(별책부록)

선진 한국의 길

소재 강국

素材强國

소재강국연구회 | 편저

대한금속 · 재료학회, 한국세라믹학회

발행일 : 2016년 3월 31일
발간 : 대한금속·재료학회, 한국세라믹학회 공동
편저 : 소재강국연구회
편집, 디자인 : 이준정
표지 디자인 : 송민기

대한금속·재료학회
(06630) 서울시 서초구 서초대로 56길 38 대한금속재료학회회관(서초1동 1666-12)
Tel: 070-4266-1646 E-mail : kim@kim.or.kr

한국세라믹학회
(06704) 서울시 서초구 방배로 76, 머리재 빌딩 403호
Tel : 02-584-0185 E-mail : ceramic@kcers.or.kr

* 이 책의 내용에 대한 재사용은 발간자의 서면동의를 받아야만 합니다.

차례

제3부 핵심소재 개발사례 (증보판)

정보·전자산업 소재 _002

○ 전해동박 _003 ○ 나노소재 제조용 세라믹 비드 _009

에너지·환경산업 소재 _018

○ 내열강 _019 ○ 송전선용 초내열 알루미늄 합금 _040 ○ 연료전지용 소재 _052

○ 타이타늄 _061 ○ 스테인리스 강판 _078 ○ 티타니아 나노분말 _87 ○ 내화물 소재 _101

수송·기계산업 소재 _114

○ 알루미늄 압출재 _115 ○ 선재 _126 ○ 자동차용 특수강 _140

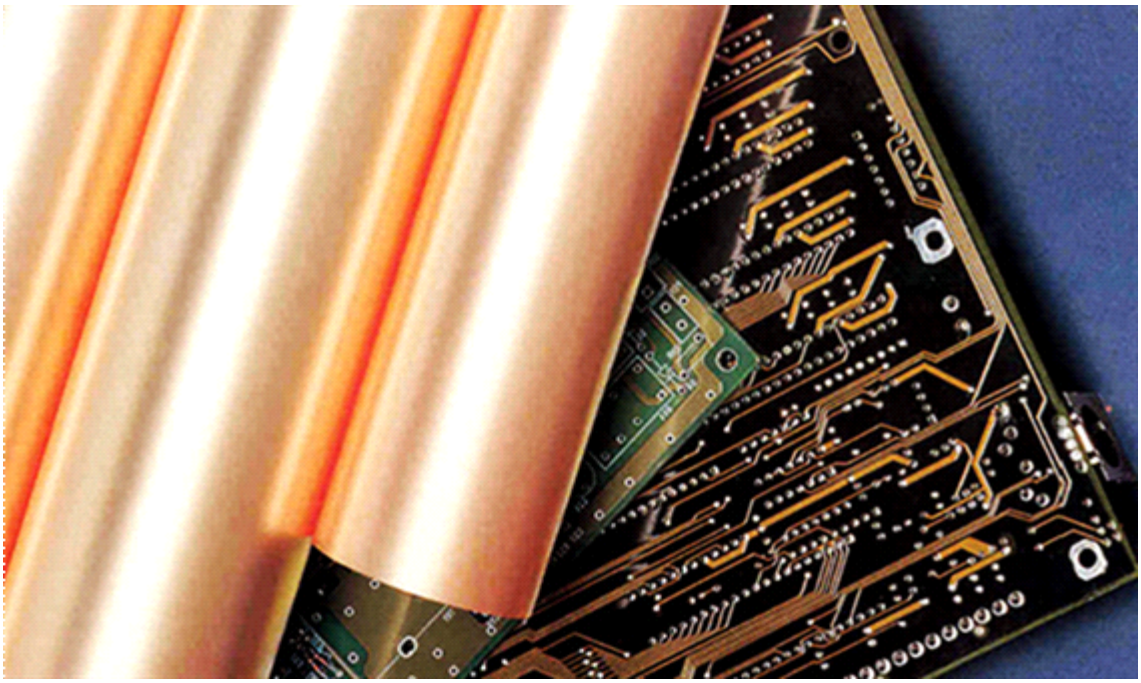
기초산업 소재 _151

○ 열연강판 _152 ○ 냉연강판 _165 ○ 생활도자기 _177

정보·전자산업 소재

전해동박

(Electrodeposited Copper Foil)



디지털 시대의 기반 소재

전해동박(Electrodeposited Copper Foil)은 전기도금 공정으로 제조되는 얇은 구리 포일로서, 주로 TV, PC, 스마트폰 등 전자제품의 인쇄회로기판에서 전기신호를 전달하는 회로소재로 사용이 된다. 최근에는 모바일 IT, 전기자동차, 지능형 로봇, 그린 에너지 산업 등에서 필수적으로 적용되는 리튬이온전지의 음극집전체 소재로도 수요가 급증하고 있는 핵심소재이다. 휴대폰, PC와 더불어 전 세계적으로 열풍이 불고 있는 스마트폰, 태블릿 등의 최신 전자 모바일 기기의 보급이 가속화됨에 따라 해당 제품들의 다기능화, 고집적화가 진행되고 있으며, 이에 따라 Package용, Flexible용, 전지용 동박의 중요성이 크게 부각되고 있다.

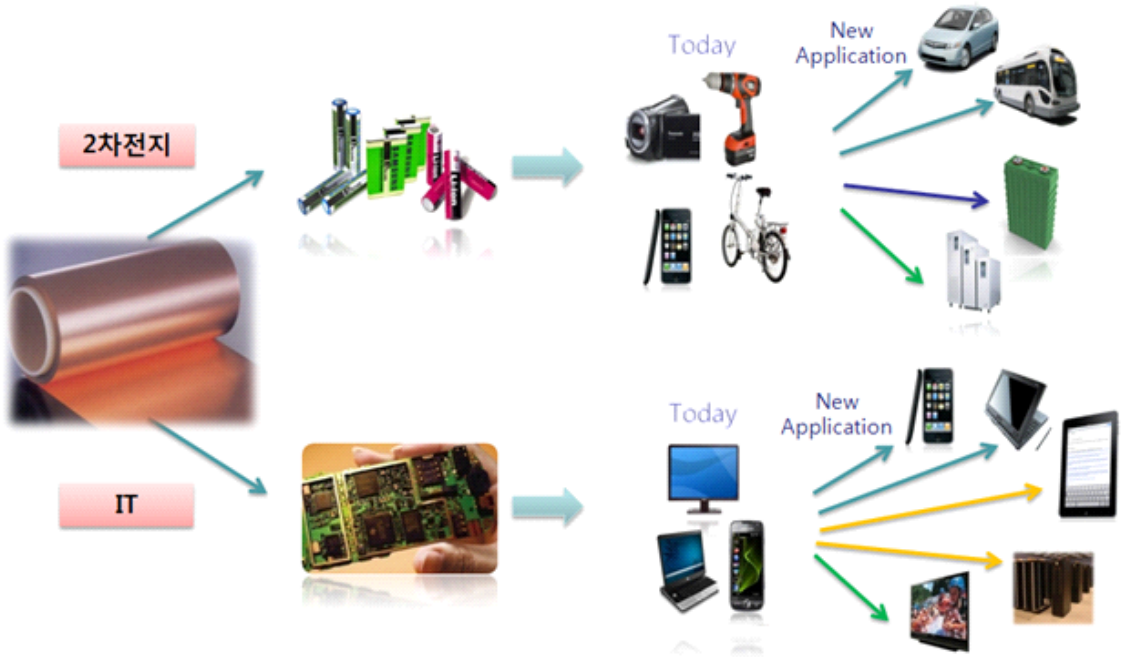


그림 1. 전해동박의 활용

최근 전기자동차 및 신재생에너지 관련 산업 확대에 따른 에너지 저장기술에 대한 관심이 증대되고 있으며, 특히 리튬이차전지는 높은 에너지 밀도로 인하여 소형 가전제품에서 전기자동차 및 전력저장 등 중대형 에너지원까지 적용분야가 확대면서 연구 개발이 집중되고 있다. 향후 리튬이온전지의 주요시장이 소형가전기기 중심에서 전기자동차나 대용량 에너지저장 시스템으로 이동할 경우, 이차전지의 핵심소재 중 하나인 전해동박의 수요는 폭발적으로 성장할 것으로 전망된다.

전방 산업의 동향에 따라 급변하는 환경

연성회로기판(FPCB)/IC Package용 전해동박

회로기판은 모든 전자제품에 들어가는 핵심부품으로서 전방산업인 전자, 정보통신, 통신장비 등 관련 산업의 성장과 그 흐름을 같이 하고 있다. 특히 연성회로기판(Flexible Printed Circuits Board)은 주로 휴대폰에 사용되고 있기 때문에, 국내외 경기동향과 밀접한 매출동향을 보인다. 연성회로기판은 전자산업의 주요부품으로 전반적인 시장동향에 민감할 수밖에 없지만, 전자산업에도 가전, 정보기기, 통신기기, 전장품, 정밀계측기기 등 수많은 분야가 있기 때문에 연성회로기판의 최종 수요처가 어느 부문이냐에 따라서 경기변동에 대한 민감도는 달라질 수 있다. 가전이나 정보기기에 사용되는 연성회로기판의 경우는 경기 동향에 매우 민감하지만 통신 등 시스템 기기에 사용되는 연성회로기판의 경우는 상대적으로 안정적인 편이다.

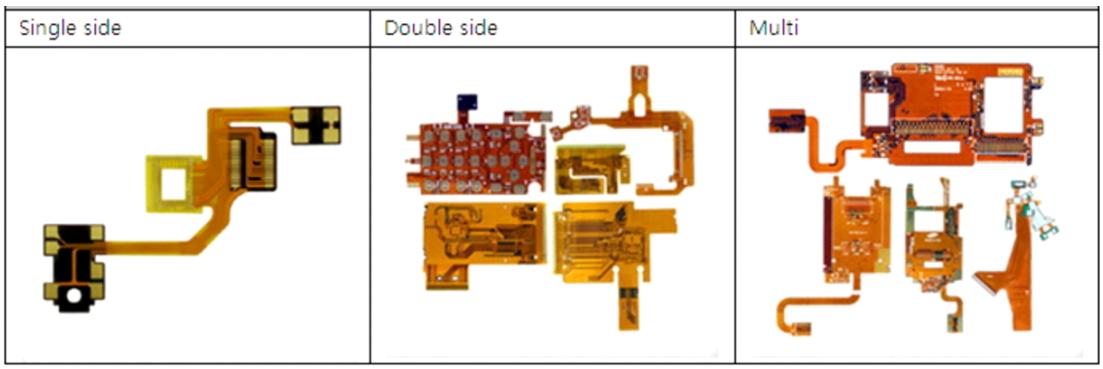


그림 2. 연성회로기판(FPCB)

연성회로기판의 주요 수요처는 휴대폰, LCD 등 전자, 전기제품의 세트업체로서 수출 비중이 높은 관계로 환율, 원자재 가격, 수출 시장 환경 등 해외의 경기변동에 따라 매우 민감하게 반응하며 시장의 경기에 변동되는 특성을 가지고 있다. 기술성 외에 동종업종의 대표적인 경쟁요소로 작용할 수 있는 사항으로는 설비보유 능력, 생산 노하우, 가격 경쟁력, 고객지향 영업 등을 꼽을 수 있다. 연성회로기판 사업은 설립 초기부터 투자자본이 많이 소요되며, 꾸준하게 제품을 공급할 수 있는 수요처 또한 확보해야 하므로 신규업체의 시장진입이 용이하지 않다.

최근 연성회로기판은 일본 및 미국이 선진기술로서 시장을 선점하고 있고, 중국 및 동남아 국가들이 저가 제품을 무기로 새롭게 시장에 진출하고 있어 시장 내에서의 경쟁이 더욱 가속화되고 있다. 또한 세계의 주요 연성회로기판 시장의 세트메이커들이 중국을 중심으로 한 아시아 지역 생산기지로 옮겨가고 있어 생산기지의 현지화 전략이 주요해졌다.

연성회로기판의 주요 원재료인 동박은 과거에는 주로 일본에서 조달하였으나, 최근 국내의 부품소재 개발에 힘입어 국내 조달 비중이 증가하고 있고 중국의 저가 제품이 급속히 시장에 참투하고 있는 실정이다. 연성회로용 동박 시장은 디스플레이 분야의 성장을 인하여 2002년부터 2004년까지 급격한 성장하였고, 세계 연성회로기판용 동박 시장의 경우 2011년 5,430억원에서 2015년 5,298억원의 시장 규모를 보이며 지속적인 성장이 예측된다.

연성회로기판용 동박은 질량을 기준으로 단가가 형성되므로 동박의 두께가 얇아질수록 면적에

비해 질량이 가벼워지므로 가격이 떨어진다. 그러므로 세계 시장에서 2011년부터 2015년까지 연성회로기판용 동박의 면적은 202,500㎢에서 277,500㎢으로 37% 증가하여도, 시장 규모는 2.4%가 감소한다고 본다. 그러나, 얇고 높은 품질의 동박은 질량의 감소로 가격은 감소하나 부가가치는 점차 증가할 것으로 예상된다.

구 분		2011	2012	2013	2014	2015
국내	면적기준(㎢)	26,000	28,500	30,500	32,000	33,000
	금액기준(억원)	697	709	700	673	630
국외	면적기준(㎢)	202,500	230,000	250,000	265,000	277,500
	금액기준(억원)	5,430	5,723	5,738	5,571	5,298

표1 FPCB용 동박 시장 규모 (출처 : JMAR report, 2012년)

IC package용 동박 시장의 경우 연성회로기판용 동박 시장에 비해 규모는 작으나, 지속적인 시장 성장이 예측되는 분야이다. IC package용 세계 시장의 경우 모바일 기기 등의 성장이 지속할 것으로 예상됨에 따라 2011년 29,000㎢ 수준에서 2015년 50,000㎢으로 15%의 높은 연평균 성장을 예상한다. 연성회로기판 시장과 마찬가지로 박막화 진행에 따라 면적당 단가는 하락하므로 금액 기준의 시장 규모보다 면적 기준의 시장 규모가 시장의 성장을 판단해야 한다.

구 분		2011	2012	2013	2014	2015
국내	면적기준(㎢)	5,700	6,900	8,000	9,300	10,000
	금액 기준 (억원)	274	344	415	500	557
국외	면적기준(㎢)	29,000	35,000	40,000	45,500	50,000
	금액기준(억원)	1,392	1,747	2,074	2,446	2,784

표 2 IC 패키지용 동박 시장 규모 (출처 : JMAR report, 2012년)

이차전지용 전해동박

리튬이온 2차전지 시장은 노트북, 스마트폰 등 각종 소형 전자기기 시장의 성장과 하이브리드 자동차와 전기자동차 시장의 개막, 각국의 활발한 신재생에너지 지원 정책 추진에 따라 시장 규모의 확대가 급속히 이루어지고 있다. 리튬이온 2차전지용 동박 시장의 규모는 2011년 국외 시장이 1,773억원에서 2015년 4,196억원 규모로 약 20%의 연평균 성장이 기대된다. 국내 시장의 경우 삼성, LG 등 각종 IT기기 및 배터리를 주도하는 업체를 보유하여 2011년 954억원에서 2015년 2,260억원 규모로 연평균 24%의 높은 성장이 기대된다.

구 분	2011	2012	2013	2014	2015
국내시장 (억원)	954	1.187	1.498	1.878	2.260
국외시장 (억원)	1,773	2,205	2,783	3,489	4,196

표 3 리튬이온 이차전지용 동박 시장 규모 (출처 : JMAR report, 2012년)

이차전지 음극집전체의 원재료인 동박 등은 과거에는 일본에서 조달하였으나, 최근 국내의 부품소재 개발에 힘입어 국내 조달 비중이 급격히 증가하였다. 하지만 최근 중국의 저가품이 시장을 급속히 잠식하는 중이다.

저조도, 극박화 기술 개발

제품-기술 개발의 특징

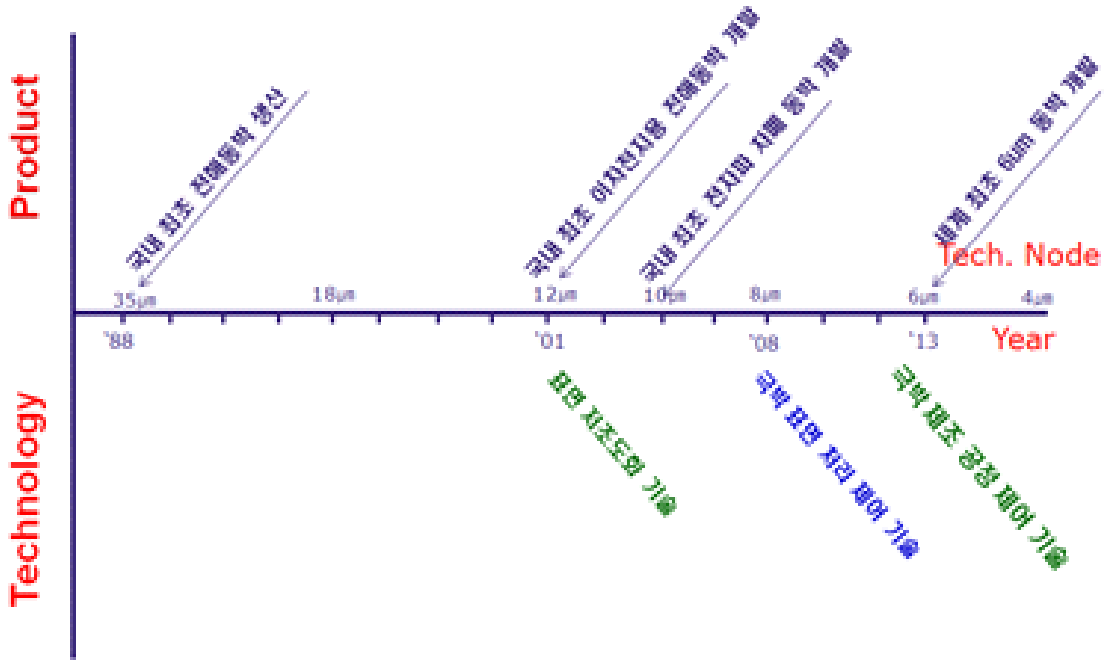


그림 2 동박의 저조도 및 극박화 기술개발

회로기판용(PCB/FPCB) 전해동박

○ 필요 요소 : 회로 밀도 증대, Etching Factor 향상, 회로 폭 감소 설계, Etching 속도 향상, 신뢰도 향상
○ 개발 기술 : 표면 저조도화, Prepreg와의 고밀착력, 극박화 설계

이차전지용 전해동박

○ 필요 요소 : 이차전지 에너지 밀도 향상, 이차전지 생산성 및 신뢰성 향상, 이차전지 활물질 밀착력 향상
○ 개발 기술 : 표면 저조도화, 극박화 설계, 기본 물성 향상 설계

주요 소재기술

○ 도금 공정 제어 기술 : 도금조성(첨가제), 도금조건(전류밀도)

○ 표면 저조도 기술 : 첨가제 제어, 조화처리, 표면처리
○ 드럼 도금 기술 : 드럼재질, 드럼도금 제어, 롤러배치
○ 정밀제어 Web-handling 기술 : 박편형상 제어, 롤러구조 제어, 권취 제어

전해동박 개발의 시사점

전해동박의 성공요인은 크게 세 가지를 들 수 있다. 첫째, 국내 회로기판(PCB/FPCB)이나 이차전지 등 전방산업의 성장에 따른 수요증가, 둘째 국내 소재 기업들의 자체 기술 확보 노력, 그리고 셋째 정부의 개발지금 지원에 의한 산학연 협동기술개발이 기반이 되었다.

동박은 국내 전자산업을 이끄는 핵심부품인 PCB, FPCB를 만드는데 도선재료로 쓰이는 주요한 재료로서 일본, 대한민국, 중국 등 아시아권에 서 제조 및 소비가 90%이상 이뤄지고 있는 필수 불가결한 소재이지만 2000년대 들어 중국, 대만 동박 업체들이 대규모 투자와 함께 저비용 동박 제품을 생산하기 시작하여 일본, 중국, 대만 사이에서 “Nutcracker” 상황에 처해 있다. 특히 고집적 및 유연성, 굴곡성이 필요한 저조도 협피치용 PCB의 경우 일본의 미쯔이사로부터 전량 수입에 의존하는 2~3㎛ 두께의 동박에 Carrier가 부착된 제품을 이용하거나 Semi-additive 방식을 통해서만 50 ㎛ Pitch(Line/Space 20 ㎛/ 20 ㎛의 회로가 제조가 가능하기 때문에 제조단가 증가로 인해 PCB 협피치화의 기술개발이 지연되고 있다. 또한 최근 FCCL용 동박 9 ㎛ 및 Carrier 동박 등은 전적으로 일본의 동박 maker의 제품에 의존하던 상황에서 최근 동일본 대지진으로 인하여 동박소재의 수급불량 현상이 발생함으로서 전 세계적인 특수동박(9 ㎛ 이하 두께)의 Shortage 현상을 초래하게 되었으며 국내 전자산업도 심각한 원자재 수급 문제를 겪기도 하였다.

결론적으로 상기에서 언급한 국내 연성회로기판 업계의 요구 사항을 해결하고, 향후 세계 일류 수준의 전자제품 제조 기술을 유지하고 , 저조도의 9㎛ 동박제품의 대일본 종속 현상을 해결하기 위해서는 1-7㎛ 저조도 동박제품이 필요하고 이를 가능하게 하기 위해서는 업계 및 정부의 지속적인 개발 의지가 필요하다. 또한 현재 업계의 R&D 개발 인력이 감소하고 있으며 이에 대한 대책 또한 필요하다.

현재 정부가 추진 중인 그린카 및 신재생에너지 개발사업도 핵심소재인 전해동박의 기술개발과 밀접한 관계가 있다. 전해동박 소재는 전기자동차 및 PCB 등의 완제품의 성능과 부가가치를 좌우하는 핵심요소로서, 전해동박 기술의 개발은 미래시장을 독과점할 수 있는 핵심소재임에 틀림이 없다. 하지만 전해동박 기술개발은 기술 패러다임의 급속한 변화에 따라 기업차원에서의 독립적 기술개발은 위험성이 높기 때문에 정부차원의 기술개발 지원과 R&D 개발 인력 지원이 필요하다.

나노소재 제조용 세라믹 비드

(Ceramic Beads for Nanoparticles)

소재/부품의 특징

현대는 마이크론 시대를 지나 나노 시대로 진보하고 있다. 나노는 정보 분야, 재료(소재)분야, 에너지 분야, 환경 분야, 의학 분야, 국방 분야 등 사회 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있다. 재료분야에서 나노 소재의 개발 및 응용을 위해서는 소재의 분쇄 및 분산이 필수적 공정으로 행하여지고 있으며, 이 때 소형 세라믹 비드가 이용되고 있다.

분쇄는 주로 기계적인 방법으로 고체원료를 분쇄하여 미세한 분체를 얻는 조작을 말하며, 이는 재료의 평균 입자 크기를 감소 및 모양 변화, 입도 변화, 불순물들을 유리, 입자의 기공률을 감소, 응집체와 응결체를 분산, 콜로이드 함량 증가 등의 특성을 변화시킴으로써 제품의 레올로지, 제조거동, 소결거동, 최종 미세구조의 변화를 유도하기 위함이다. 합성 또는 분쇄 등의 공정에 의해 입자가 미세하게 됨에 따라 비표면적의 증가와 함께 표면에너지의 비중이 상대적으로 증가하게 된다. 이는 열역학적으로 매우 불안정한 상태로 높은 자유에너지를 낮추기 위해 다량의 응집을 발생시키게 되는데 이를 분리시키는 작업을 분산이라고 한다. 특히 분쇄 공정을 효율적으로 수행하기 위해서는 입자간의 분산 안정성을 확보하는 것이 가장 중요한 요소 중 하나이다.

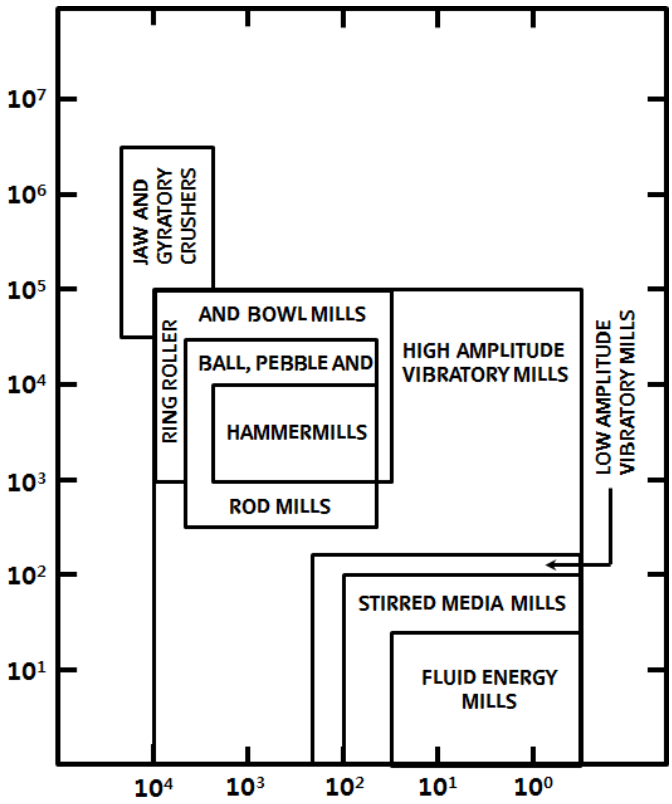


그림 1. 입자크기별 사용장비

자료원: W. Summers, Am. Ceram. Soc. Bull., 62(2), 213 (1983).

분쇄 공정은 압축, 전단, 충격과 마모에 의해 이루어지며, 그림 1과 같이 입자의 크기에 따른 다양한 분쇄 방법이 존재한다. 일반적으로 미분쇄를 위해서는 분쇄매체를 이용하게 되는데, 비드를 이용한 분쇄는 대용량 분쇄에 주로 이용되며, 넓은 크기분포 혹은 입자 또는 첨가제 상들

에 대해 최소의 손상을 갖는 응집체의 혼합과 분산이 선호될 때 사용되어진다.

분쇄 매체는 밀도에 따라 구분이 가능하며, 이때 비드의 밀도는 분쇄 효율을 결정하는 가장 큰 요소로써 세라믹 비드의 조성, 특성, 가격을 결정하는 가장 큰 인자이기도 하다. 현재 쎄노텍에서는 밀도별로 Al_2O_3계와 ZrO_2계의 비드를 개발 및 제조하고 있으며, CZM, CZS, CZ-5, CZY, CZC의 제품군을 갖고 있다.

그림 2. 국내에서 생산되는 지르코니아 계열 세라믹 비드

분쇄 매체의 크기는 피분쇄물의 입도에 가장 큰 영향을 미치는 요소로써 비드의 크기가 작아질수록 피분쇄물의 크기는 그림 2와 같이 작은 입도를 가지게 된다. 현재 쎄노텍은 0.1mm 크기까지의 비드를 생산하고 있다.

Product	Media size	Estimated size After milling
30㎛ below	1.0mm below (1/30)	0.5 ㎛ below (1/2000)
300㎛ below	3.0mm below (1/10)	3.0 ㎛ below (1/1000)

mm / ㎛	0.1	0.3	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	5.0
1	0.05	0.15	0.3	0.4	0.5	1.0	1.0	1.0
2	0.05	0.15	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.5
10	△	△	0.3	0.4	0.5	1.0	3.0	5.0
30	X	X	△	0.4	0.5	1.0	3.0	5.0
50	X	X	X	X	△	1.0	3.0	5.0
100	X	X	X	X	X	△	3.0	5.0
300	X	X	X	X	X	X	3.0	5.0

그림 3. 분쇄비드 크기에 따른 분말 생산크기

재료	밀도 (mg/m^3)
Flint pebbles	2.4
Porcelain	2.3
Steatite porcelain	2.7
High-density alumina	3.6
Zircon	3.7
Zirconia	5.5
Steel (hardened or carburized)	7.8
Tungsten carbide	15.6

표 1. 산업용 분쇄비드의 밀도

※ 자료출처 : Principles of Ceramic Processing, 2/e, James S. Reed, p.270

산업의 특징 및 국내외 현황

국내에서 사용되고 있는 비드는 재료, 크기에 관계없이 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이며 특히, 0.3㎜ 이하의 초소형 비드는 전량 수입에 의존하고 있다. 특히 고품위 비드는 일본이 전 세계를 대부분 장악하고 있다. 국내의 쎄노텍은 80% 이상을 수출에 비중을 두고 있으며, 국내 시장을 대부분 점유하고 있는 고품위 일본 제품(전자 세라믹스 산업)의 일부를 대체하고 있다.

세라믹 비드는 크게 용융법과 소결법으로 제조되어진다. 소결법은 다시 세 가지로 분류되는데 몰드를 이용하는 방법 (10 ㎜ 이상), tumbling을 이용하는 방법 (2 ㎜ 이상), 슬러리를 이용한 방법이 있다. 초소형 비드의 경우, 몰드를 이용하는 방법이나 tumbling을 이용하는 방법으로는 제조가 곤란하여 슬러리를 이용한 방법 또는 용융법을 이용하여 제조한다고 알려져 있다. 특히 소형비드의 경우 그 제조방법이 각 업체의 기술적 노하우가 집약된 상태이기 때문에 정보유출이 극히 적다. 산업 전반에서 나노분체의 활용 및 분산이 급격히 증가함에 따라 초소형 비드의 시장이 크게 증가하고 있으며, 특히 0.1㎜ 이하의 극소형 비드의 사용량이 증가하고 있는 추세이다. 쎄노텍의 경우 0.1, 0.2, 0.3㎜ 크기의 초소형 비드 생산이 이루어지고 있으며, 국내외 판매량이 점차적으로 증가하고 있다. 또한 0.1㎜ 이하의 극소형 비드의 개발이 완료된 상태이다.

비드의 조성 또는 밀도에 따라 품질 및 적용되는 산업군이 결정되어지는 이는 표 1에 나타냈다. 일반적으로 지르코니아 계열의 고밀도 조성군이 가장 높은 품질 상태를 갖고 있으며, 다음으로 지르콘, 알루미나, 실리카 순으로 나누어져 있다. 쎄노텍의 경우 지르코니아, 지르콘, 알루미나 계열의 비드를 모두 생산하고 있으며, 지속적인 연구개발을 통한 신규 조성의 비드군도 개발되고 있다. 표 2와 3에 분쇄, 분산, 혼합용으로 사용되는 국내외 비드 현황을 나타내었다. 단, 기능성, 충진용 세라믹 비드는 제외한 것으로 소형은 0.5mm 이하, 중형은 0.8mm에서 6.0mm의 크기이며, 대형은 8.0mm 이상을 말한다.

지르콘계 중형 비드는 탄산칼슘 분쇄 또는 광물분쇄용으로 주로 사용되고 있는 비드군으로써

2012년 이전까지는 유럽, 일본, 중국산 알루미나 비드가 주로 사용되어졌으나 분쇄능을 향상시키고, 비드의 내마모성이 우수하여 알루미나를 대체하여 사용되고 있다. 지르코니아 계열의 비드는 나노 크기의 분체 제어 기술이 발전함에 따라 특히 0.5mm 이하의 소형 비드 수요가 점진적으로 증가하고 있는 추세이다.

국내 비드 시장의 경우 중대형 비드보다는 전자산업의 활성화에 따라 지르코니아 계열의 소형비드 시장이 점진적으로 증가하고 있으며, 해외 비드 시장의 경우 거의 모든 재료 및 크기의 비드가 점진적으로 증가하고 있다..

Year		2011			2012			2013			2014		
Major material		ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3	ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3	ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3	ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3
Size	S	10 (20)	-	-	10 (20)	-	-	20 (40)	-	-	50 (100)	-	-
	M	70 (35)	200 (30)	-	70 (35)	200 (30)	-	80 (40)	200 (30)	-	90 (45)	200 (30)	-
	L	<10 (<5)	-	3,000 (75)	<10 (<5)	-	2,500 (62)	<10 (<5)	-	2,000 (50)	<10 (<5)	-	2,000 (50)

표2. 분쇄용 비드의 국내시장(ton(억원))

※ 자료출처 : 쎄노텍

Year		2011			2012			2013			2014		
Major material		ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3	ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3	ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3	ZrO_2	$ZrSiO_4$ -ZTA	Al_2O_3
Size	S	1 (200)	-	-	1 (200)	-	-	2 (400)	-	-	5 (1,000)	-	-
	M	7 (350)	40 (600)	120 (300)	7 (350)	50	150	9 (450)	50 (750)	120 (300)	10 (500)	50 (750)	100 (2,500)
	L	1 (50)	-	10,000 (15,000)	1 (50)	-	12,000	1 (50)	-	12,000 (18,000)	1 (50)	-	12,000 (18,000)

표 3. 분쇄용 비드의 전체시장 (100ton(억원))

※ 자료출처 : 쎄노텍

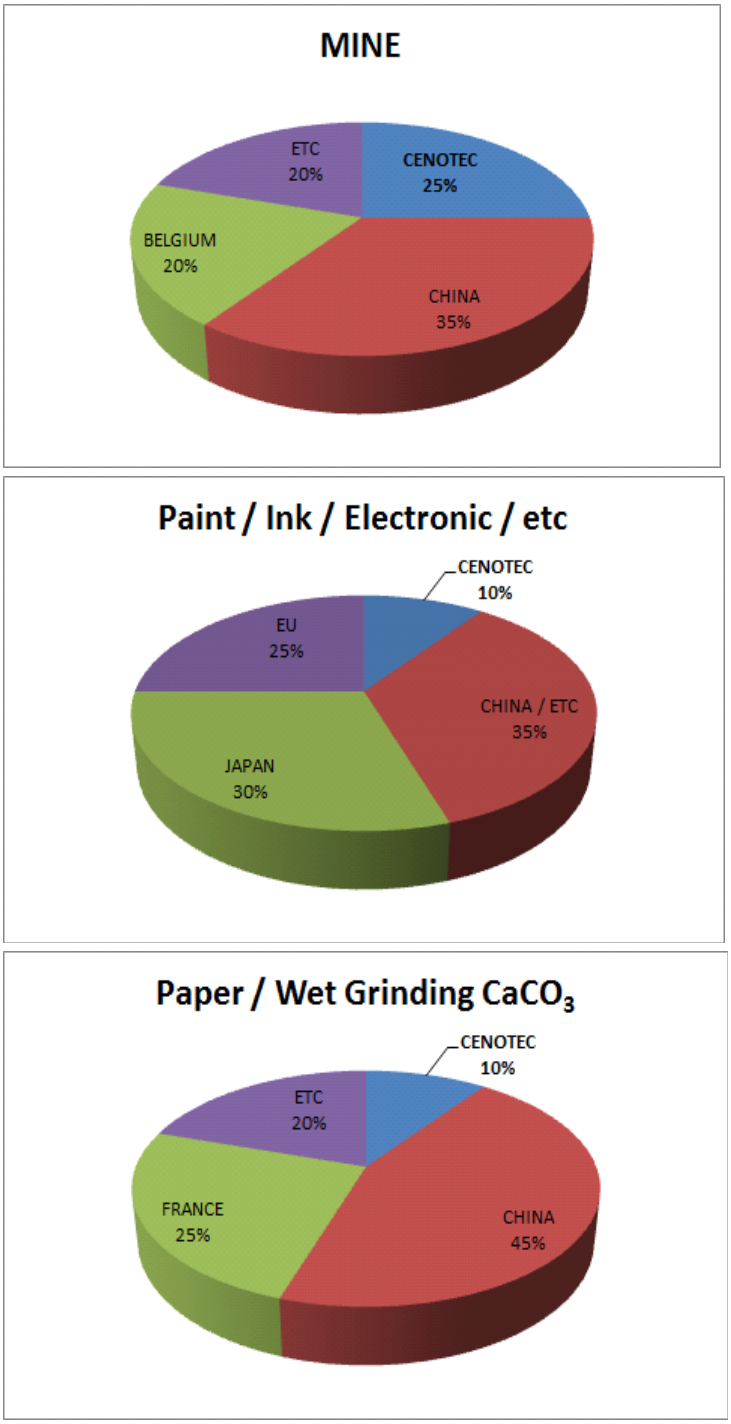


표 4. 세노텍의 세계시장 점유율(자료출처 : 쎄노텍)

주요제품-기술

대부분의 분쇄비드 제조사의 경우 단일 방식으로 제품을 생산하지만 쎄노텍의 경우 두 가지 이상의 방식을 병행하여 생산하며 이는 비드의 크기 및 제품 목적에 따라 제조방법이 구분된다. 그림 4와 같은 공정도를 통해 제품이 생산되어 진다.

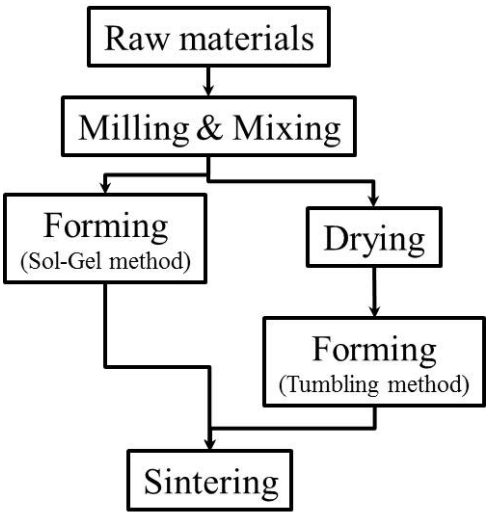


그림 4. 세라믹 비드 제조공정

쎄노텍에서 생산되고 있는 비드의 주요 제조방법은 크게 Sol-Gel method와 Tumbling method 두 가지 형태로 제조되고 있다.

첫째로 Sol-Gel method의 경우 그림 4와 같이 Sol 상태의 slurry를 일정한 크기의 needle에서 표면장력에 의해 구형으로 성형시킨 다음 치환반응이 가능한 용매에 투입하는 방식으로 비드를 제조한다. Sol-process의 경우 내부 미세구조가 우수하여 마모율 및 제품의 품질이 좋지만, 구형도가 다소 낮으며 대량생산 및 대형크기의 성형이 힘든 단점을 갖고 있다.

둘째로 tumbling method를 이용한 비드의 제조공정은 일반 제립기와 유사한 방법으로 그림 4 오른쪽같은 형태의 장비에서 성형이 이루어진다. Tumbling 방법으로 비드의 제조 시 구형도가 우수하며, 대량생산에 적합하지만 제품의 품질이 Sol-Gel method에 비해 다소 낮은 단점을 갖고 있다. 최근 기술개발을 통한 그 격차가 매우 좁아진 상태이다.

쎄노텍의 비드에는 크게 3가지 조성군으로 구분되어지며 첫 번째 지르코니아 계열의 CZY (Yittria stabilized Zirconia) 및 CZC (Ceria stabilized Zirconia)는 Grinding media로 제조되어진 비드 중 가장 높은 물성을 갖고, 단가는 기타 비드에 비해 상대적으로 높지만 안정적이고 높은 생산 효율을 갖고 있으며, 장시간의 사용함으로써 유지보수 비용의 절감이 가능하고 분쇄 장비의 수명까지도 연장할 수 있는 장점을 갖고 있다. CZY 및 CZC는 고효율의 horizontal Mill 및 basket mill에 적합하며 높은 마모 저항성으로 인한 비드로 인한 오염을 최소화할 필요가 있는 electronic

ceramic, food, cosmetic 산업에 적합하다. 또한 높은 압축강도와 좁은 입도분포를 가지기 때문에 fine particle size 생산에 주로 응용되며 특히 0.3mm 이하 사이즈는 Nano particle size을 요구하는 산업에 적합하다.

대부분의 세라믹스의 특성은 결정립으로부터 기인함으로 최종 제품의 결정립 제어를 위해서는 원료, 분쇄 및 분산, 건조, 성형 등 모든 공정에서 입자의 크기, 분포, 결정상등의 물성을 고려한 공정 제어가 필요하다. 특히 fine ceramic 계열에서는 피분쇄물의 정밀한 입도 제어 및 오염물의 최소화를 위해 CZY 및 CZC의 적용이 많은 편이다.

두 번째로 CZS는 Zirconium Silicate를 주원료인 비드로써 중·대용량의 $CaCO_3$, Kaolin, $ZrSiO_4$ 등 Mineral 생산에 주로 응용되어지는 Sand mill등 Vertical type의 Mill에 적합하다. Zirconium silicate는 열적저항성이 우수하기 때문에 분쇄과정에서 발생하는 열에 민감한 제품의 적합하여 Paint, Inks, Pigments, Dyes, Magnetic Coating에 사용되는 Vertical type의 mill에서 제조되는 Lead, Copper, Zinc Surfide등metal mining에 적합한 비드이다.

CZS는 1000℃ 이상에서 열적해리 특성을 갖고 있어 치밀한 소결체를 제조하기 힘든 단점을 갖고 있지만 이를 억제하는 기술력을 바탕으로 우수한 품질의 비드를 제조하고 있다.

마지막으로 CZM은 알루미나가 주요 원료인 비드로써 대용량의 $CaCO_3$, Kaolin, $ZrSiO_4$등 Mineral 생산에 적합하며 Paint, Inks, Pigments, Dyes, Magnetic Coating에도 활용되고 있다. CZM의 경우 저비용 대용량 제조 기술을 확보를 통한 품질과 가격적 경쟁력을 동시에 확보하는 것이 매우 중요한 비드군이다.

쎄노텍은 1996년 Ceramic R&D로 연구개발 시작하여 1999년 5월 경남대학교 벤처 1호 기업으로 회사 설립 및 CZY 생산하기 시작하였다. 2001년 사명을 CENOTEC (CEramic naNO TEChnology, CENO(=NEW) TEChnology)으로 변경하였으며 2002년 electronic drop 방식을 통한 0.5mm 크기의 소형 비드 생산 기술의 개발 및 제품의 생산이 이루어졌다. 2003년 CZS의 생산과 함께 2005년 체계적인 기술개발을 위하여 2005년 R&D center 설립하게 되었다. 같은 해 기존의 비드 생산 방식인 Sol-Gel process와 함께 대량 생산에 보다 적합한 Tumbling process를 구축함으로써 양적 성장을 위한 발판을 마련하게 되었다. 2005년부터 비드 사업군 외에 분체 사업으로 영역을 확장하여 Ceno Flux의 개발 및 생산이 이루어졌다. 2011년 광산용 CZM이 개발되어 생산량의 급격한 증가를 가져왔으며 0.5㎜ 이하의 소형 비드 개발을 진행하였으며, 2013년 제2공장에 R&D center 신축하였다. 2014년에는 0.2mm 이하의 소형비드 개발 완료 및 0.3mm 크기의 비드가 양산되어 판매되기 시작하였다.

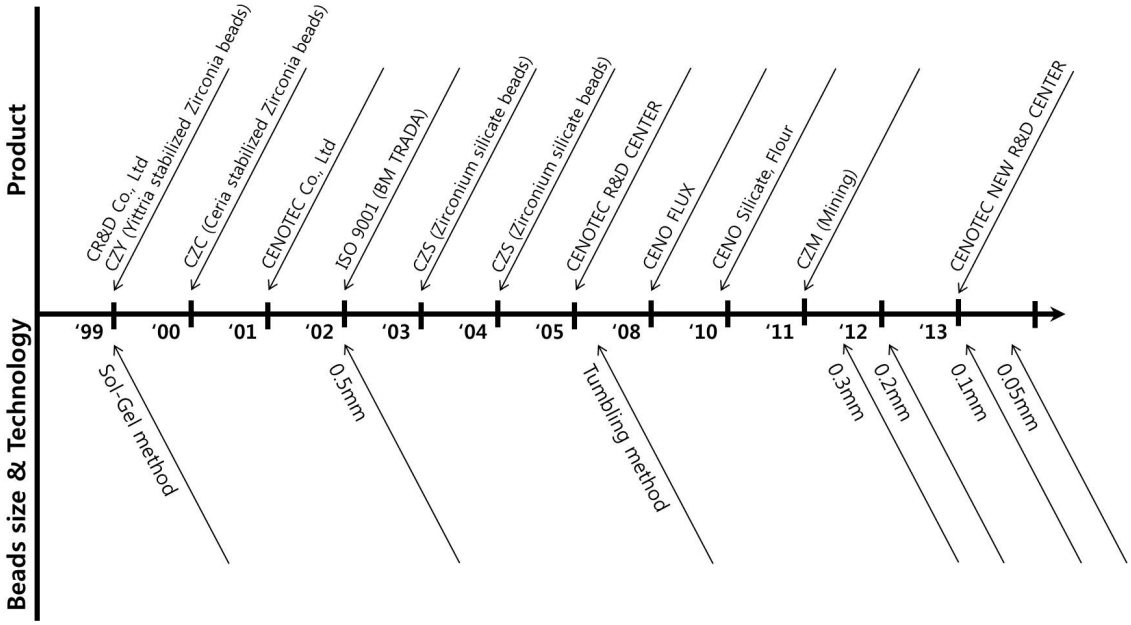


그림 5. 쎄노텍의 기술과 제품 개발 상관도

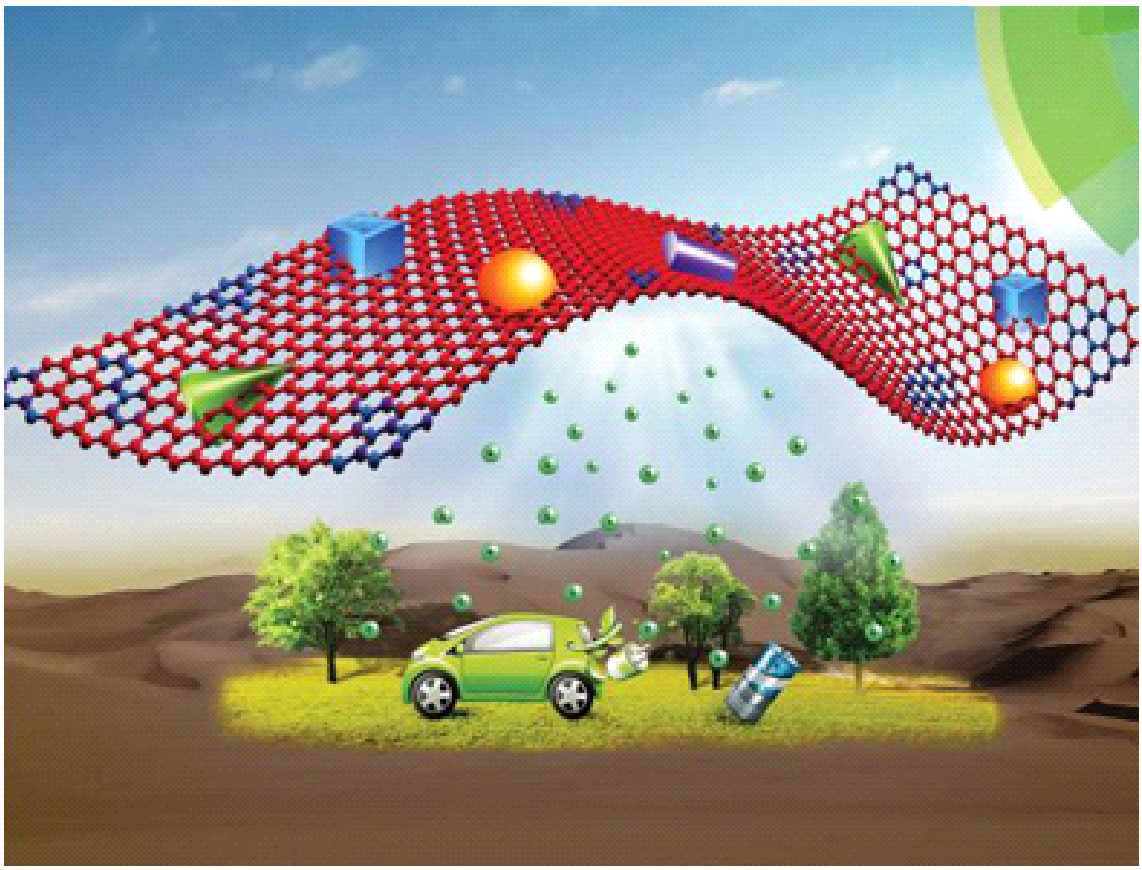
	Competitor	Levelof technology(%)	
		2004	2014
Japan	2	100	100
Germany	1	90	90
India	1	80	80
China	5	80	80
France	1	90	90
Korea (CENOTEC)	1	70	95

표 4. 국내외 세라믹 비드 제조기업들의 기술수준. ※ 자료출처 : 쎄노텍 자체 조사

성공적 소재기술개발의 시사점

쎄노텍은 15여년을 분쇄 분산용 세라믹비드를 개발하였고, 이를 발전시키며 생산하고 있다. 15년 전에도 지르코니아 계열의 비드를 생산했으며, 현재도 생산하고 있지만 아직도 기술수준이 경쟁사에 비해 완성되지 않았다. 앞으로 더욱 연구하여 제품 및 공정개선에 힘을 쏟을 예정이다. 기술개발 기간 중에는 수많은 시행착오와 노력이 밑바탕되어도 실패하는 일이 빈번하다. 이와 같은 실패 행위의 반복 속에서 한순간에 step up 되는 경우가 많다. 한 단계의 발전을 위해서는 이전의 것을 과감히 버리고 새로운 것에서 시작할 때 비로소 한 단계의 진보 할 수 있다. 쎄노텍은 미래성장을 위하여 언제나 새로운 지르코니아를 잘 활용하고자 한다.

에너지·환경산업 소재



내열강

(Heat Resistant Steel)

친환경, 고효율 화력발전소의 핵심 소재/부품

화력발전소는 크게 터빈과 보일러로 이루어진 주기기와 발전소 운전에 필요한 주변설비(석탄 하역 설비, 배관, 등) 및 탈황, 탈질등의 환경 설비로 구성되어 있다. 이러한 설비 중 내열강이 사용되는 설비는 터빈과 보일러의 주기기에 대부분 사용되고 있으므로, 주기기인 터빈과 보일러의 핵심 설비에 사용되는 내열강에 대해 기술하고자 한다. 먼저, 증기 터빈용 핵심 부품 소재는 고압(high pressure: HP) / 중압(intermediate pressure: IP) 로터, 회전 블레이드, Bolt/Nut, Casing 및 제어 밸브용 단조 및 주조 소재이다. 보일러의 경우 석탄을 연소시켜 발생된 연소가스를 가두고, 낮은 온도에서의 열흡수를 담당하는 수냉벽관, 연소에 의해 발생하는 복사열과 고온 가스를 활용해 고압/고압의 스팀을 생산하는 과열기, 재열기 Tube 및 Head Pipe 그리고 생산된 고온/고압의 증기를 터빈으로 이송하는 주증기 배관 등으로 크게 나눌 수 있다. 이들 부품들은 가장 높은 온도에서 가동되기 때문에 가장 엄격한 요구조건을 충족시켜야 한다. 각 부품의 소재가 지녀야 할 특성은 표 1에 나타내었다.

터빈 부품	기능	용도/비고
Rotor	블레이드를 원심 운동시키는 대형 단조강	- HP Rotor - IP Rotor - LP Rotor
Blade	터빈으로 유입된 증기의 열에너지를 이용하여 운동에너지 즉 회전력으로 변환하는 장치이며, 전기를 생산하는 원동력임	Control Stage Bucket, Load Factor Stage Bucket, Margin Stage Bucket
Casing	터빈으로 유입된 증기가 빠져나가지 않도록 증기를 보관하는 대형 주조품	- Inner Casing - Outer Casing
보일러 부품	기능	용도/비고
Superheater	연소가스와 접촉을 통해 Tube 내부에서 물이 증기로 변화되는 고온/고압 Tube	고온 고압의 Tube
Reheater	터빈 HP를 회전 시킨 후 온도가 떨어진 스팀을 개가열 시키도록 설계된 Tube로 IP에 Steam 전송	상대적으로 압력은 Superheater보다 낮으나 온도는 보일러에서 가장 높은
Waterwall	화로로부터 열을 1차적으로 흡수하는 보일러의 외벽	보일러 외벽을 구성
Main steam Pipe	보일러에서 생산된 고온/고압의 증기를 터빈으로 이송하는 관	가장 두꺼운 배관

표1. 화력발전소용 터빈 및 보일러 부품 구분 및 용도

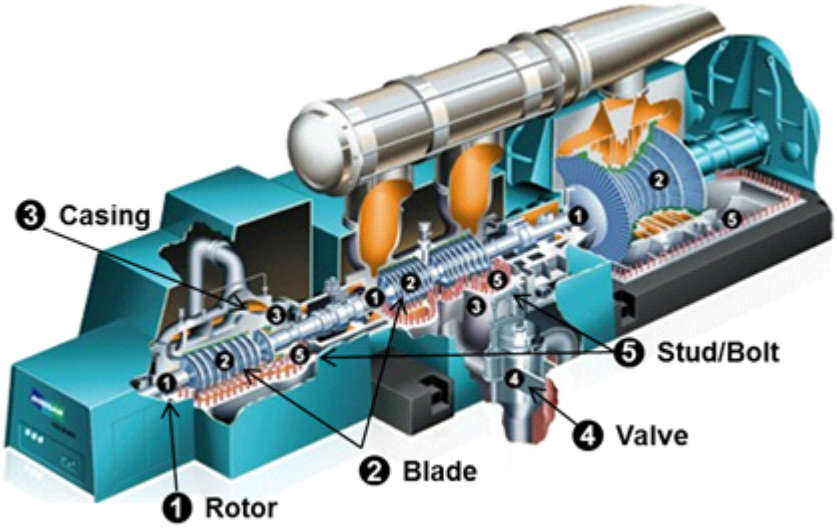


그림 1. 증기터빈 핵심 부품들

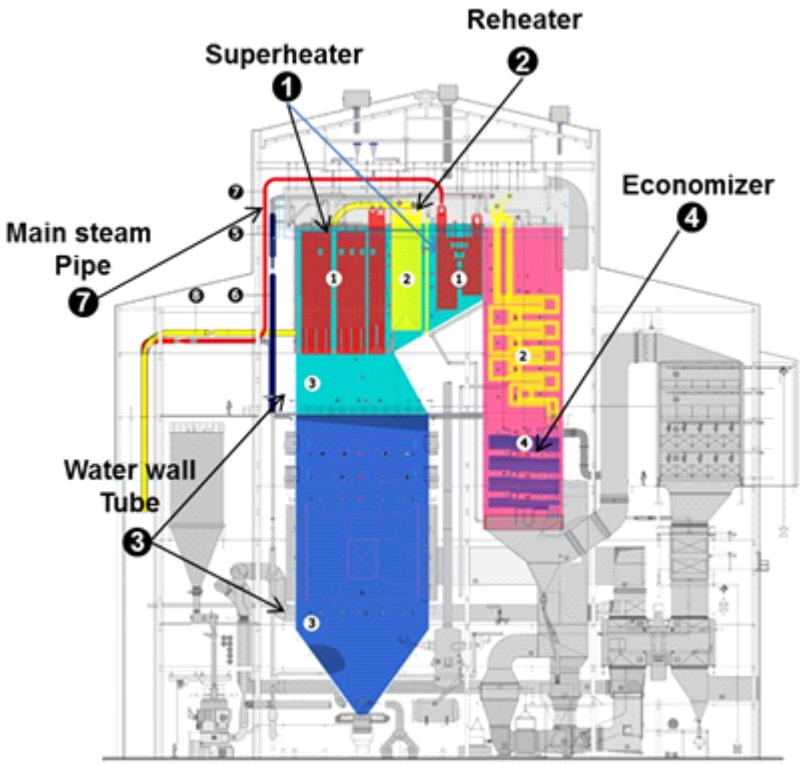


그림 2. 보일러의 핵심 부품들

화력발전 소재/부품 개발의 국내·외 현황

전기에너지는 각 국가의 삶의 질과 복지 개선의 자원이기는 하나 에너지 생산 자체를 지구환경 보호를 위해 엄격한 배출 규제에 직면하고 있는 실정이다. 특히, 지구상에 고루 분포되고 매장량이 풍부한 석탄 의존도가 높아질 것으로 예상되나 공해 배출량을 감축하기 위해서 발전소의 효율을 개선시킬 필요성이 보다 높아질 것이다. 석탄화력 발전소의 열효율 개선은 아래 그림 3과 같이 연료비 절감뿐만 아니라 SOx,NOx와 CO_2배출량을 감소시키는 부가적인 효과가 있다.

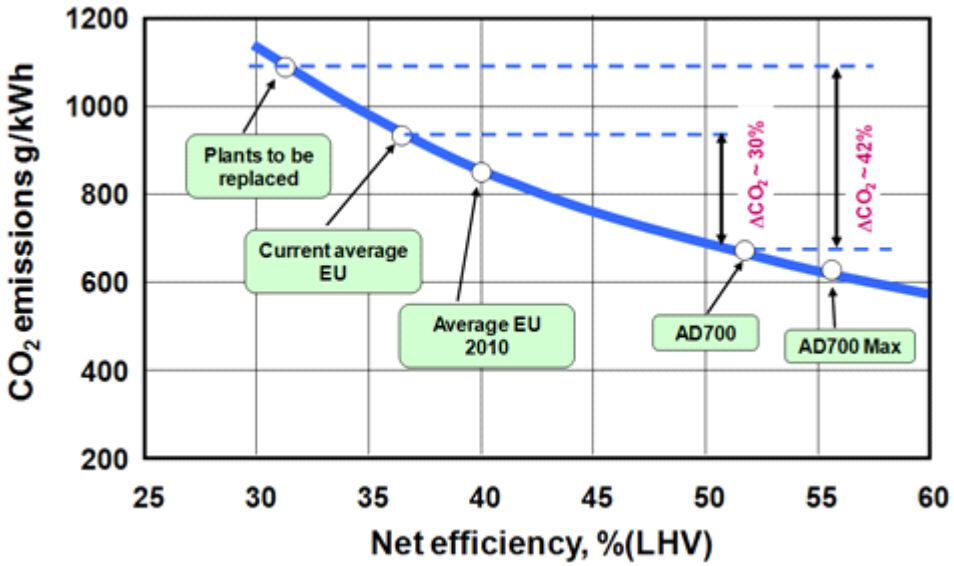


그림 3. 발전소 효율과 이산화탄소 배출 저감의 관계

이산화탄소 배출량 감소는 국가정책으로 2020년 BAU 기준 30%감축 목표(2005년 기준 4% 감축)를 가지고 정책을 추진하고 있다. 가장 배출량이 많은 화력발전소의 경우 800MW 발전소 효율 1% 개선은 발전소 수명동안 약 1,000천톤의 CO_2배출량을 줄이는 효과가 있는 것으로 평가되므로 이러한 환경적 요인 등의 부가적인 이점으로 USC 발전소 건설에 대한 관심이 높아지고 있다. 이들 첨단 운전 조건은 고온에서 견디고, 발전비용 상승에 영향을 미치는 발전소 건설 투자 비용을 최소화하기 위해서는 보일러와 터빈용 주요 부품 소재로 사용 가능성이 가장 높은 것이 Martensitic 강이다. 특히 9-12%Cr 계의 강은 대형 단조품, 주조품과 후육 파이프의 제조 용이성과 함께 고온고압의 증기조건에서 산화 저항성과 장기간 높은 크리프 강도를 요구한다. 이러한 요인 때문에 대용량의 경제적인 USC 발전소 건설에 주요한 challenge가 재료기술 분야에 집중되어 오고 있다

선진국은 에너지 효율 제고를 목표로, 개발도상국은 전력수요 충족을 위해 고효율, 대용량 USC 화력발전의 수요 증대로 시장은 지속적인 증가하는 추세이다. OECD국가는 R&D를 통해 상용화에 성공한 600℃급 USC 기술을 확대 적용해 CO_2배출을 줄이는 고효율화 기술과 친환경 기술에 국가기술역량을 집중하고 있으며, 현재 증기온도 700℃ 이상의 A-USC(Advanced Ultra Super Critical)기술을 개발하는 중임

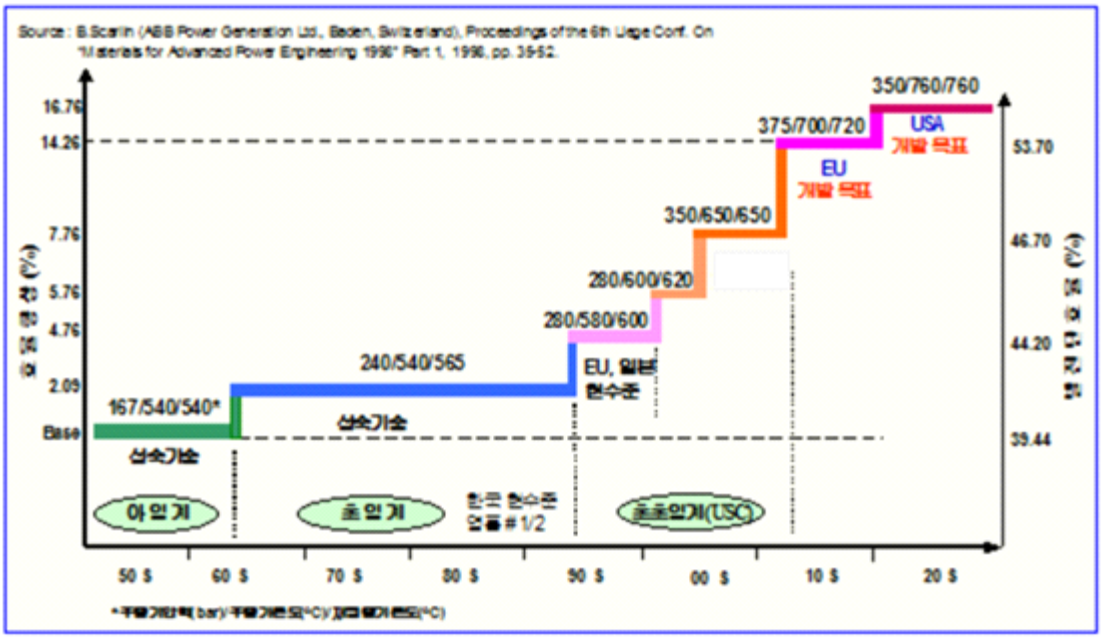


그림 4. 화력발전소 증기 조건 변화와 효율 향상

그림 4와 같이 향후 기존 방식의 석탄화력 발전 시장은 낮은 효율의 발전소 건설에서 벗어나 대용량의 USC 조건으로 건설이 진행되지만, HSC 조건 발전소 상용화가 성공적으로 이루어 질 경우 급격히 초고효율 발전소 건설로 전환될 것으로 판단된다. 석탄화력 발전소 전체 시장 규모는 현재의 Scenario를 기반으로 검토한 결과 표 2와 같다.

년도	항목	2011	2020	2030	2035
시장 규모	총발전량(GW)	1,837	2,265	2,747	3,005
	신규규모(GW)	-	428	242	482
점유율	(%)		1% (4GW)	30% (72GW)	40% (193GW)
금액	(조원)		5.6조	100조	270조

표 2. 연도별 화력발전 시장 규모

2020년경부터 세계적으로 신규석탄발전소의 HSC로 건설할 것으로 전망(30년 약 30%, 35년 약 40%)되며, 국내는 2023년 1기 정도가 건설될 전망이며, 2023년 이후엔 매년 1-2기 건설될 것으로 예상된다.

* '30년경 HSC 시장전망 : 72대(1000MW 기준)× 1조4,000억원(2기 기준 건설비용을 1기 기준으로 환산) = 100조원(현재 정책 기준)

우리나라는 세계 HSC 신규발전소의 5% 수주 목표 시에 해외 발전소 건설로 약 5조원 소득을 창출할 수 있다.

내 Creep 저항성을 갖는 증기 터빈용 핵심 부품 소재

고압(high pressure: HP) / 중압(intermediate pressure: IP) 로터, 회전 블레이드, Bolt/Nut, Casing 및 제어 밸브용 단조 및 주조 소재이다. 이들 부품들은 터빈에서 가장 높은 온도에서 가동되기 때문에 가장 엄격한 요구조건을 충족시켜야 한다. 각 부품의 소재가 지녀야 할 특성은 표3에 나타내었다. 이들 부품은 크리프가 발생되는 고온에서 사용되기 때문에 크리프 강도를 개선하는 합금원소들의 영향을 고려해 합금설계가 진행되었고, 현재까지 개발한 9-12%Cr 터빈 소재의 진척상황을 그림 5에 나타내었다.

Requirements	HP&IP IP-Rotor	LP-Rotors, LP-Discs	HP, IP Casings	HP,IP Blades	LP-Blades	HP,IP Bolts
Tensile Properties	⭘	⭘	⭘	⭘	⭘	⭘
Creep Properties	⭘		⭘	⭘		⭘
Toughness :						
Low cycle fatigue(LCF)	⭘	⭘	⭘	⭘	⭘	⭘
High cycle fatigue(HCF)	⭘	⭘		⭘	⭘	
Crack growth :						
Static - Creep CG	⭘		⭘			⭘
Fatigue CG	⭘	⭘	⭘			⭘
Corrosion :						
Local corrosion		⭘		⭘	⭘	⭘
SCC		⭘			⭘	⭘
Corrosion fatigue		⭘			⭘	
Erosion behaviour	⭘	⭘	⭘	⭘	⭘	
Oxidation behaviour	⭘		⭘	⭘		⭘
HP=High pressure turbine, IP=Intermediate pressure turbine, LP= Low pressure turbine						

표 3 주요 터빈부품에 요구되는 특성

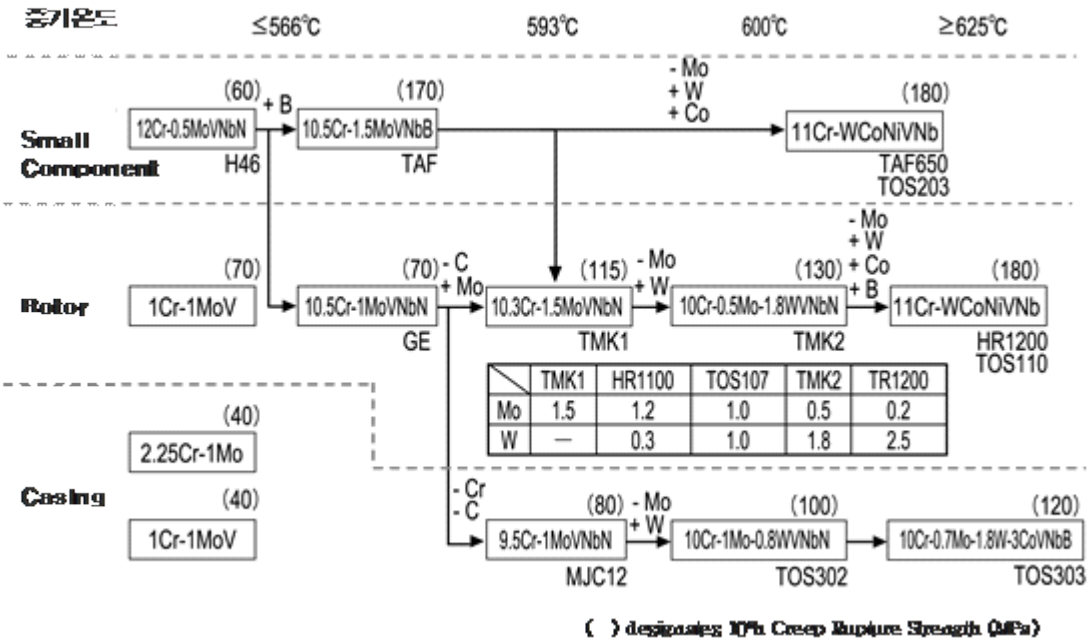


그림 5. 터빈소재의 개발 동향

이들 첨단 증기 조건의 터빈들에 사용 가능한 재료들은 표 4에 나타내었다. 각 부품의 사용조건에 부합되는 규정에 기초한 각 소재의 개발 현황과 실적을 아래 절에서 각각 설명한다.

	31MPa(4500psi) 565/565/565℃	31MPa(4500psi) 593/593/593℃	31MPa(4500psi) 620/620/620℃	31MPa(4500psi) 650/650/650℃
HP/IP rotor	CrMoV AISI 422 SS TOS 101 11Cr1MoVNbN (GE original)	TR1100 X12CrMoVWNbN101-1 TOS 10 GE-modified steel7	X18CrMoVNbB91 TOS 110 EPDC alloy B TR1200 HR1200	HR1200
Blade	AISI 422 SS 12Cr1Mo1WV (Westinghouse)	TOS 202 GE-modified steel	TOS 203 EPDC candidate	M252 Nimonic 90 Refractalloy 26
Bolting	CrMoV AISI 422 SS Refractalloy 26	M252 Refractalloy 26	EPDC candidate Nimonic 80 Inco X750 Refractalloy 26	Inco 718 Nimonic 80 Refractalloy 26
Nozzle box	CrMo steel(cast)	9%Cr steel cast	Advanced 9-12%Cr steel, Cast Similar to 92, P122 GX12CrMoWNiV NbN10-1-1	316 austenitic stainless steel

표 4. 발전소 운전조건에 따라 주요터빈 부품에 사용되는 합금

HP/IP 로터 소재 개발

HP/IP로터는 블레이드를 원심 운동시키는 대형 단조강이며, 고압 혹은 중압 재열 증기 조건에서 고속회전(3,600 rpm)에 의한 원심력을 받고, 기동/정지 천이 동안 열응력을 받는다. 이러한 운전조건에 따라 요구되는 소재의 특성은 높은 크리프강도, 크리프파단 연신율 및 노치 민감성이 없을 것, 높은 저주기 피로강도 및 파괴인성 과 강도와 인성의 균형이다. 또한, 제조성을 고려한 요구 특성으로는 직경 1200mm 중심부까지 단상 tempered 마르텐사이트를 유냉 냉각조건에서도 얻을 수 있는 경화능 확보, 용접성, 제조 용이성 및 경제성이 있어야 한다.

크리프강도는 블레이드 부착부 혹은 중심공에서 변형과 균열 생성에 견딜 정도로 높아야 하며, 이를 위해서 증기온도에서 10만시간 요구 크리프 파단강도는 최저 100MPa로 알려지고 있다. 저주기 피로강도는 발전소 운전 사이클에 기인한 열응력으로부터 야기될 수 있는 파손(cracking)을 방지하는데 필요하며, 파괴 인성은 기동 정지 천이 조건에서 취성 파괴의 가능성을 억제하는데 요구되는 성질이다. 그리고 열피로에 대한 위험을 최소화하기 위해서는 오스테나이트 강보다 열팽창계수가 작은 페라이트 강이 선호되고 있다.

크리프 파단 강도를 개선하여 개발한 사용 가능한 증기 온도별 HP/IP 로터강의 대표화학조성은 표5에 나타내었다. 증기 터빈 운전 온도 조건에 적합한 강들의 크리프 시험 조건에 따라 얻은 대표적인 크리프 파단 데이터를 Larson-Miller 인자로 환산하여 그림 6에 나타내었다.

일반적으로 560℃ 이상의 고온에서는 12%Cr강이 크리프강도와 내식성을 위해서 적용되고 있으나 초기 개발된 12%Cr강은 560℃까지 사용 가능한 X21CrMoV121이였다. 12%Cr강의 3가지 대체용으로 개발한 Nb+N 첨가강은 GE가, W첨가 version은 Westinghouse가 그리고 Ta+N을 첨가한 TOS101강은 일본에서 사용하고 있다.

Steam Temperature	Alloy designation	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ta	N	W	B	Co
≤ 566℃	X21CrMoV121	0.23	0.55	-	0.55	11.7	1	0.3	-	-	-	-	-	-
≤575℃	11CrMoTaV(1)	0.17	0.6	-	0.35	10.6	1	0.22	-	0.07	0.05	-	-	-
	GE-Original	0.19	0.5	0.3	0.5	10.5	1	0.2	0.08	-	0.06	-	-	-
	11CrMoVNbN	0.16	0.62	-	0.38	11.1	1	0.22	0.07	-	0.05	-	-	-
	Wiestinghouse	0.23	0.8	0.4	0.75	13	1	0.25	-	-		1	-	-
≤583℃	10CrMoVNbN(2)	0.14	0.5	0.05	0.6	10.2	1.5	0.17	0.06	-	0.04	-	-	-
	TOS 107	0.14	-	-	0.7	10	1	0.2	0.05	-	0.05	1	-	-
	X12CrMoWVNbN1011 (COST E)	0.12	0.4	0.01	0.75	10.5	1	0.19	0.05	-	0.06	1	-	-
≤621℃	TMK2(TR1150)	0.13	0.5	0.05	0.7	10.2	0.4	0.17	0.06	-	0.05	1.8	-	-
	X18CrMoVNbB91	0.18	0.07	0.06	0.12	9	1.5	0.25	0.05	-	0.02	-	0.01	-
	TR1200	0.12	0.5	0.05	0.8	11.2	0.3	0.2	0.08	-	0.06	1.8	-	-
≤630℃	TOS110	0.11	0.08	0.1	0.2	10	0.7	0.2	0.05	-	0.02	1.8	0.01	3
≤650℃	HR1200	0.1	0.55	0.06	0.5	11	0.23	0.22	0.07	-	0.02	2.7	0.02	2.7

표 5. 증기온도별 HP/IP 로터강에 사용되는 합금의 조성

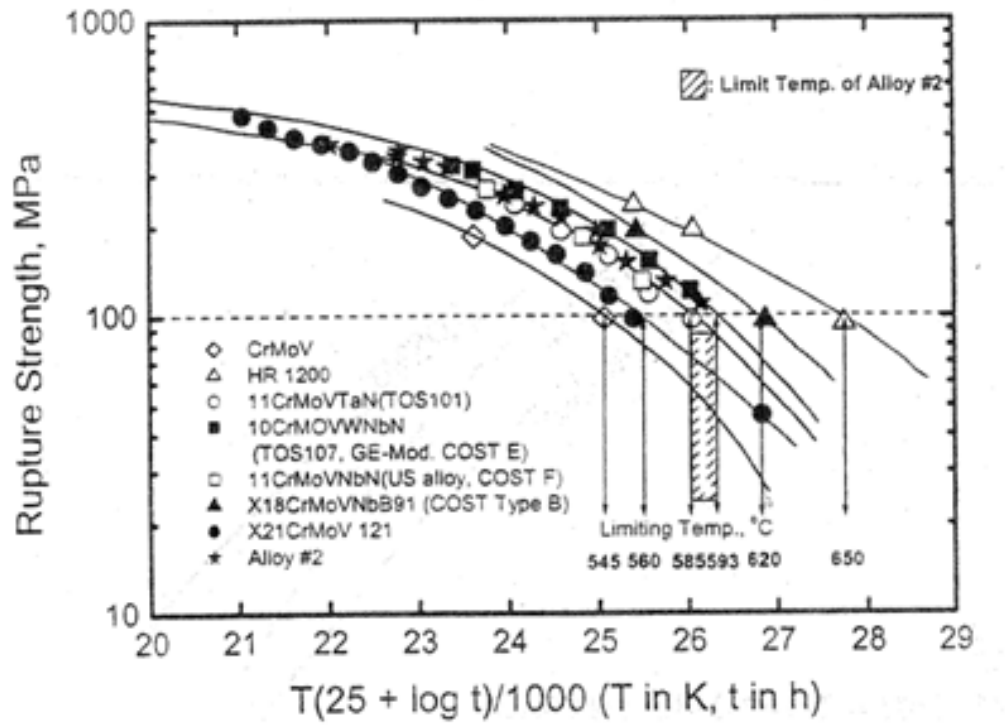


그림 6. 로터에 사용되는 터빈소재의 크리프강도

이런 강들은 Nb과 Ta은 탄질화물(carbon nitrides)의 생성에 의한 석출강화로 X21CrMoV121 강에 비하여 증기온도를 15℃ 높일 수 있는 것으로 평가되고 있으며 565℃까지 성공적으로 적용되고 있다.

그 이후에는 고용 강화 효과를 얻기 위해서 Nb+N 혹은 Ti+N 첨가 개량강에 W을 첨가하여 일본에서는 GE-origin을 개량한 TOS 107과 유럽에서의 COST 501프로젝트 사업으로 COST E(X12CrMoVWNbN10-1-(1))를 개발하여 80,000시간 실제 크리프시험을 수행하였고, 이들

강을 이용하여 허용 운전온도를 593℃까지 높여 현재 발전소가 가동되고 있다. 593℃까지 적용 가능한 또 다른 강은 C 함량을 낮추고 M6C와 M23C6탄화물을 안정화시키는 Mo 함량을 1%에서 1.5%로 증가시켜 고용강화 효과를 높인 TMK1 혹은 TR1100을 일본에서, 유럽의 COST 501 과제에서 COST F(X12CrMoVNbN) 강을 개발하였다.

유럽에서는 COST 501과제에서 W이 포함되지 않은 100ppm의 B첨가 X18CrMoVNbB91강(COST FB2)을 55,000시간 이상 크리프 시험하여 625℃에서 요구하는 크리프 강도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이 연구과정에서 1.0% W첨가에 의한 크리프강도 개선 효과가 없음을 보고한 것은 크리프 파단강도 개선을 위한 연구에 중요한 시사점을 던져 주는 것으로 확인되어 현재는 EU지역을 중심으로 개발(COST 522 program)된 COST F, E소재가 상용화되어 최근 대부분의 USC운전 조건의 발전소에 사용되고 있다.

버켓 소재 개발

고온 고압의 스팀에 직접 노출되는 버켓의 1,2단에 사용되는 소재는 내산화성, 내부식성 및 강도를 고려하여 충분한 건전성을 확보하여야 한다. 증기 조건의 고온 고압화에 따라 버켓 소재 또한 그 환경에 맞게 변천되어 왔다. 종래의 증기 조건의 터빈 버켓에는 12% Cr을 함유하는 소재로 내산화성을 고려하여 Cr과 Si 함량이 비교적 높은 편이며, Nb과 N을 첨가한 12Cr1MoVNb강과 Mo와 W을 첨가한 12Cr1Mo1WV강을 사용하여 왔다. 593℃급 이상의 초초임계압발전소에 사용되는 1,2단 버켓소재로서는 기존 12Cr강을 기본으로 하여 강도와 충격인성을 크게 저하시키지 않고 100% 마르텐사이트강이 되게 합금을 조절하며, 또한 델타 페라이트가 생성되지 않도록 되어야 한다.

오랜 연구 끝에 유럽공동연구 조직인 COST 501/522(Eupean Co-operation in Scientific and Technical Research) 프로그램을 통하여 보론을 첨가하여 크리프 강도를 향상시킨 COST B2강종이 593℃급 이상 증기온도 조건에서 사용가능함이 입증됨에 되었다. 국내에서는 COST B2소재 제작 기술의 확보를 위한 연구가 진행되어 왔다. 주요 극복하여야 할 기술로서는 보론 함량의 제어 기술로서 편석 없이 원하는 함량의 보론이 강괴내에 포함되게 제작하여야 한다. ESR공정에서의 Slag 조성 등 공정변수를 최적화를 통해 성공적인 COST B2소재를 제작할 수 있었다. 일본에서는 독자적으로 버켓 신소재 개발을 하여 왔으며, 주요 소재 개발 방향은 1956년 TAF강을 개발한 이래 터빈 로터용으로 개발한 TOS101강을 기초로 하여 C과 Nb를 약간 증가시켜 고온 아전성이 우수한 NbC 석출상의 양을 증가시켜 고온 크리프 강도를 개선한 TOS202강을 개발하였다. 이 후, C함량을 낮추고 W, Co, B 및 히토류 원소인 Re를 첨가한 새로운 TOS203강을 개발하였고 초초임계압 발전소 터빈 버켓 소재로 사용하고 있다.

한편, 621℃ 이상의 운전 온도에 적용될 수 있는 블레이드 소재는 현재까지 12Cr계 합금강은 개발된 것이 없는 실정이며, 주로 Nimonic 80 또는 Inconel 625 초합금 소재가 사용될 것으로 사료된다.

케이싱/밸브 소재 개발

화력 발전소에 사용되는 케이싱은 터빈 내부의 작동 기계류를 보호하고 기밀을 유지하여 스팀의 유출을 방지하는 제품으로, 제품의 특성상 노즐, 플랜지 등의 돌출부가 많아 형상이 대단히 복잡하다. 또한 제품의 최종 중량이 수십톤에 달하는 대형 제품으로 기계가공이나 자유단조에 의해 제작하는 것이 거의 불가능하며, 저압터빈 Casing을 제외하면 매우 높은 온도와 압력에서 사용되므로 용접조립에 의한 제작도 제한된다. 최근 USC 발전용 밸브 Chest 중 일부분이

단조 후 Gauging에 의한 형상가공으로 제작되고 있으나 현재 대부분 주조에 의해 제작되고 있는 실정이다. 터빈 케이싱의 경우 기계 가공후의 최종 제품중량이 최대 50 ton 이상으로 제작에 만 10개월 이상이 소요되는 전형적인 중후 장대형 제품이다. 뿐만 아니라 최대두께가 600mm 이상인 것에 비해 최소 두께는 200mm 전후로 두께의 변화가 심해 주조 공정에도 높은 기술력이 요구되는 제품이다.

화력 발전용 대형 주강품의 합금설계는 로터용 소재와 마찬가지로 발전소 효율증대를 위한 증기온도의 상승에 대응해 크리프 파단강도의 개선을 중심으로 진행되어져 왔다. 로터와 같이 동적인 환경에서 사용되지는 않으나 높은 온도와 압력하에서 사용되므로 크리프 파단강도, 고온 내산화성 등이 요구되며 기동 정지 시 내외부 온도 편차에 의한 저주기 피로특성 등이 주요 요구 특성이 된다. 뿐만 아니라 주조 시 발생된 결함의 보수를 위한 보수용접과 주증기 배관 등과의 조립을 위한 구조용접이 이루어지므로 양호한 용접성이 요구 되어지며, 이러한 제품으로는 MSV, CV, CRV 등 대형 밸브류의 케이싱, 중, 고압터빈의 내외부 케이싱 등이 있다.

이들 부재에 사용되는 소재의 신뢰성을 확보하기 위해서는 인장강도와 충격인성은 물론, 기동/정지시의 반복되는 열응력에 의해 유발되는 피로강도, 고온 고압의 증기에 견디는 Creep 파단강도 등이 설비의 수명 및 운전 신뢰성을 좌우하는 중요한 요소가 된다.

보일러 소재 개발

화력 발전 보일러는 석탄을 연소하여 발생된 연소열을 이용하여 고온 고압의 증기를 만들어 내는 설비이며 터빈을 돌리는 증기의 온도 및 압력에 따라 아임계압(Subcritical), 초임계압(Supercritical), 초초임계압(Ultra Supercritical)으로 구분된다. 보일러를 이루는 각 기기는 절탄기(Economizer), 화로(Furnace), 기수분리기(Steam separator), 과열기(Superheater), 및 재열기(Reheater)등이 있으며 유체 및 수증기 온도에 따라 다양한 재질의 탄소강 및 합금 소재가 사용되며, 형태적으로는 튜브 및 파이프로 구분되어지며, 가공, 밴딩, 용접 및 열처리 등의 공정으로 제작되어진다.

따라서 보일러 소재는 고온, 고압 하에서 사용되기 때문에 재료물성 측면에서 크리프강도, 피로강도, 산화저항성 및 고온 부식 저항성이 우수하여야 하며, 제작성 측면에서 제관, 밴딩 및 용접성이 우수하여야 한다.

헤더 및 파이프는 대구경, 후육 소재로서 우수한 크리프강도뿐만 아니라 Thermal stress에 의한 피로강도를 확보하기 위하여 오스테나이트계 재료보다는 페라이트-마르텐사이트계 재료가 사용되어진다. 재열기 및 과열기는 화로에 직접 노출되어지며, 튜브 내부에는 고온의 증기가 흐르기 때문에 고온부식 및 증기산화 저항성이 우수한 재료가 사용되어진다. 수냉벽관은 우수한 전열효과, 용접성 및 부식 저항성이 우수한 재료가 사용되어진다.

[헤더 및 파이프]

헤더 및 파이프에 요구되어지는 특성은 거의 비슷하지만, 주증기가 흐르는 파이프는 헤더에 비해서 증기온도가 위치 별로 거의 일정하기 때문에 헤더의 경우 파이프 보다 열피로 특성이 더 요구된다.

주증기 온도 538℃급에서는 1Cr-1Mo계열의 SA335-P11/P22 재료가 사용되어져 왔으며, 발전소 효율 향상을 위해 주증기 온도가 높아짐에 따라 고온 크리프 강도 및 부식 저항성이 우수한 9~12Cr계열의 소재, HT9, HT91, HCM9M, HCM12M 및 P91 소재가 개발되어 졌으며, 주증기 온도 593℃까지 사용을 목표로 하였다.

HT9 및 HT91 소재는 독일, 벨기에, 네덜란드 등에서 주증기 온도 500~600℃의 상업 발전소

에서 20년 이상 사용되어졌지만, 탄소 함량이 0.2%로 비교적 높아 제관 및 용접성이 나빠 미국, 일본 등에서는 거의 사용한 실적이 없다. HCM9M(9Cr-2Mo) 소재는 대구경, 후육 파이프의 제작성 및 용접성이 우수하여 1985년에 처음으로 상용 발전소에 사용되어 거의 30년 정도의 가동 실적을 보유하고 있으며 허용응력은 HT9 소재와 유사하다. P91 소재는 HT9, HT-91 및 HCM9M 소재보다 크리프 강도들 향상 시킨 강종으로 1986년에 ASME 코드로 등재되어 USC 발전소용 헤더 및 파이프 재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 P91 소재는 주증기 온도 593℃ 이상에서는 크리프 강도가 낮아지는 한계가 있어 이를 극복하기 위하여 일본 Nippon steel에서 브랜드명 NF616(P92), Sumitomo metal에서 HCM12A 소재를 개발하였다. 유럽에서는 Tungsten을 첨가한 E 911 소재를 개발하였으며, P91 소재보다 허용응력이 약 25% 정도 높여 주증기 온도 620℃까지 사용을 목표로 하였다. 일본에서는 주증기 온도 650℃까지 사용을 목표를 12Cr 계열의 NF12 및 SAVE12 소재를 개발 중에 있다.

[과열기 및 재열기]

주증기 온도 538℃급에서는 2.25Cr-1Mo계열의 T22 소재가 사용되어져 왔으며 헤더 및 파이프 소재와 마찬가지로 주증기 온도 593℃까지는 9Cr계열의 T91/T92 소재가 사용되며, 고온 부식이 요구되어지는 영역에는 12Cr 계열의 소재가 사용되기도 한다. 미국에서는 페라이트-마르텐사이트계 소재의 용접 문제를 억제하기 위하여 오스테나이트계 소재를 사용하고 있다. Cr 함량 20% 이하의 소재로는 TP304H, 316H, 347H, Tempaloy A-1 등이 있으며, Cr 함량 20% 이상의 소재로는 일본에서 개발한 NF707, NF709 및 HR3C 소재가 있다.

[수냉벽관]

주증기 온도 538℃급에서는 1Cr-1Mo계열의 T11/T12 소재가 사용되어지며, 주증기온도의 상승에 따라 T91 소재가 사용되기도 하지만, 제관 및 용접시공의 어려움으로 인하여 사용이 제한적이다. T91에 필적할 정도의 크리프 강도를 가지면서 용접성을 개선한 2.25Cr계열의 T23 소재가 일본에서 개발되어졌지만 제한적인 용접성을 가지고 있기 때문에 상업 발전소에 사용하기는 어려움이 있어 종래의 T11/T12 소재가 수냉벽관 재료로 사용되고 있다.

제품-기술 개발의 특징

터빈소재/부품

터빈 부품의 경우 고온 고압화가 되는 발전소 증기조건에 따라 사용 가능한 소재가 결정되고, 또한 노출 환경이 열악하게 되므로 고청정화 및 손상방지 기술이 추가로 적용하게 된다. 아래 그림 8은 발전소 운전조건과 주요 소재 생산 기술을 나타내었다.

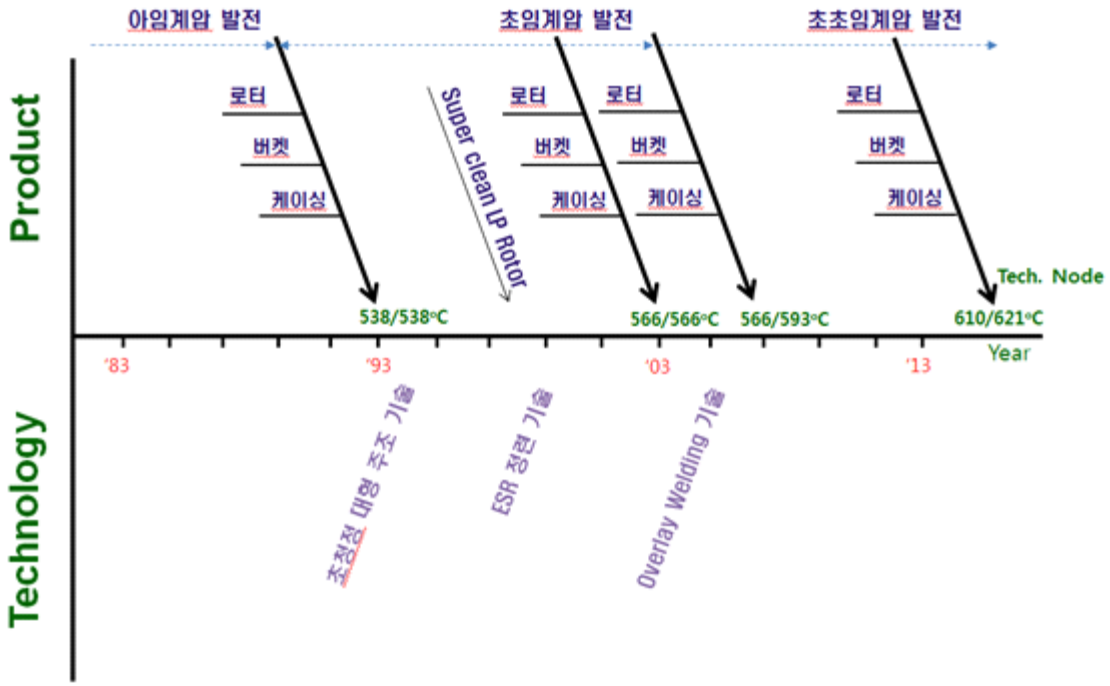


그림 7. 발전소 운전조건 변화와 소재 생산에 적용된 주요 기술

로터 제조 기술

그림 8은 HP 및 IP 로터 제조 공정도를 개략적으로 도시한 그림이다. 대형 단조품인 로터는 70톤 이상을 제강한 후, 소재의 균질성을 확보하기 위하여 ESR(Electro Slag Remelting)이라는 특수정련 과정을 거치게 된다. 제강과정에서는 미량원소 제어기술과 Gas 제어기술이 확보되어야 하며, ESR 과정에서는 slag성분, 용해속도 등의 핵심기술이 확보되어야 한다. 그리고 단조기술 및 최적의 물성을 나타낼 수 있는 열처리 기술이 확보되어야 한다. 그 외 로터제조에 따른 비파괴검사 기술 및 오버레이 용접기술 또한 확보하였다.

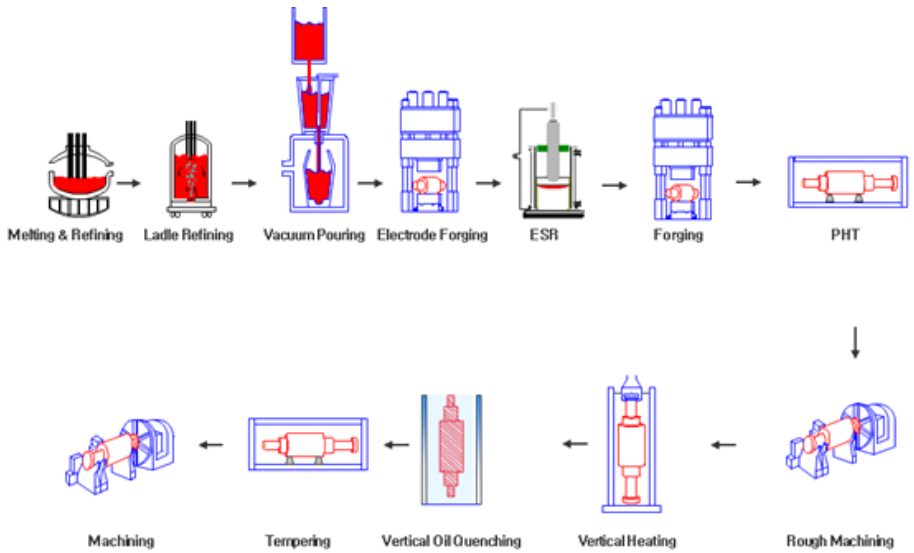


그림 8. HP 및 IP 로터 제조 공정도

그림 9는 LP 로터 차등열처리 개략도를 나타내었다. 발전용량이 증가함에 따라 LP 로터에 부착되는 LSB(Last Stage Blade)의 크기가 커짐에 따라 높은 응력이 요구되고, SCC저항성을 높이기 위해서는 낮은 항복강도가 요구된다. 이런 상반된 물성이 한 제품에 필요하게 됨으로써 부위별 차등열처리 기술이 개발되었다.

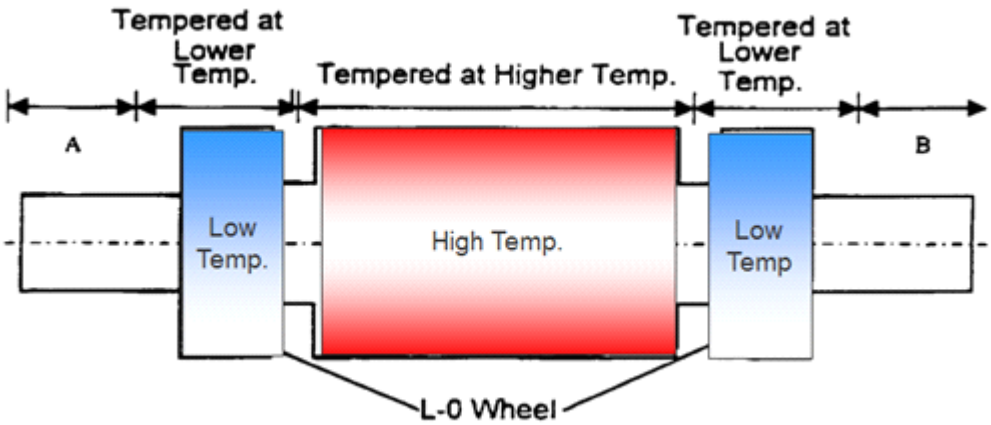


그림 9. 로터의 차등열처리 개략도

케이싱/밸브 소재 개발-기술 개발의 특징

그림 10및 표6은 주증기 온도 별로 사용 가능한 주강소재를 나열한 것으로, 566℃까지 사용된 종래의 1%CrMoV강 또는 2.25%Cr-Mo강의 경우 593℃ 이상의 증기온도에서는 온도상승에 따른 허용응력의 저하로 주강품의 두께가 대폭 증가하므로 편석, 응고 등의 주조문제, 용접, 운반, 제조비 상승 등 제조상의 문제 외에도 운전 중 발생되는 열응력 증대 등 많은 문제점이 발생할 위험성이 높다. 593℃ 급의 경우 그림과 같이 10CrMoVNbN계의 합금이 주로 사용되며, 600℃ 이상에서는 W첨가 개량 12%Cr강, W+Co+B첨가 개량 12%Cr강 등이 개발되어있다.

50,000시간이 넘는 장시간 크리프 파단 실험 결과에 의하면 W 첨가에 의한 크리프 파단강도의 개선은 고응력 단시간 측에서는 상당한 개선 효과가 있으나, 저응력 장시간 측에서 Laves Phase의 형성에 의해 그 효과가 소실되어 W 첨가에 의한 크리프 강화효과에 의문이 제기되고 있다. 따라서 600℃ 이상의 증기조건에서 설계수명동안 안전하게 사용 가능한 소재의 개발을 위해 W의 고용강화를 대체할 수 있는 B첨가 새로운 합금설계의 접근과 시도가 요구된다. 700℃급 이상의 A-USC 발전용 케이싱 소재는 Ni기 초내열 합금이 사용될 것으로 예상되며, 유럽, 미국 및 일본 등에서 활발한 연구가 진행 중에 있다.

Steam Temperature	Materials	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Nb	B	N
≤566℃	2¼Cr1Mo	0.15	Max. 0.5	0.3~0.8	-	2.0~2.5	0.9~1.1	-	-	-	-	-	-
	1Cr1MoV	0.12~0.2	-	-	Max. 0.5	1.0~1.5	0.9~1.2	0.2~0.35	-	-	-	-	-
≤593℃	HUC121)	0.12	0.49	0.88	0.51	9.7	0.78	0.15	-	-	0.05	-	0.039
	ESDA3652)	0.11	0.35	0.8	0.5	9	0.94	0.22	-	-	0.05	-	0.055
	TOS 101	0.14	-	-	0.5	10	1	0.2	-	-	0.1	-	0.05
	Mod.9Cr-1Mo	0.1	0.4	0.5	0.3	8.9	0.95	0.23	-	-	0.08	-	0.01
600~620℃	GX10CrMoVNbN9-1	0.09	-	0.51	0.12	9.38	0.94	0.22	-	-	0.073	-	0.044
	GX12CrMo (W)VNbN10-1	0.12	-	0.62	0.93	10.5	0.59	0.22	0.99	-	0.08	-	0.048
	TOS 102	0.12	-	-	1	10	1	0.2	0.8	-	0.1	-	0.05
625℃	COST CB2	0.12	-	0.88	0.17	9.2	1.49	0.21	-	0.98	0.06	0.011	0.02

표6 케이싱용 소재 화학성분(wt.%)

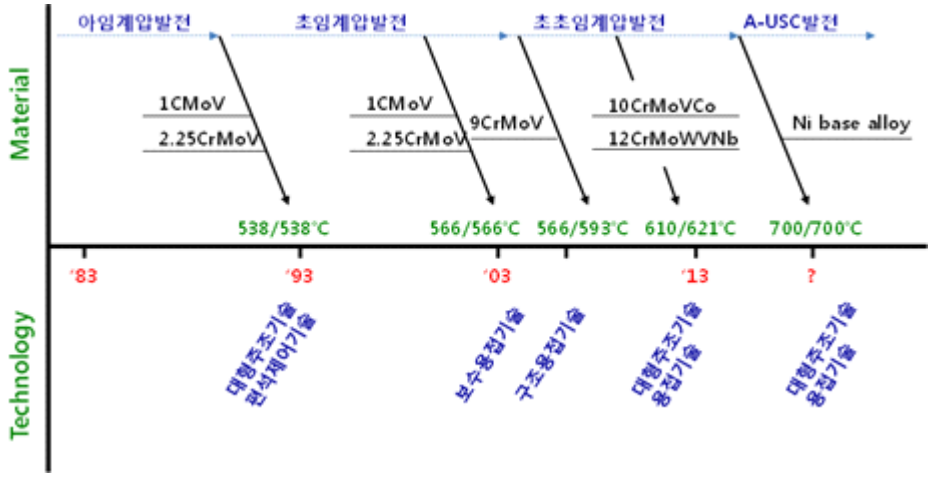


그림 10. 케이싱용 소재 개발 현황

케이싱/밸브 소재 기술

주조용 합금은 단조용 합금과 달리 주조 후 열처리, 부분적 절삭가공 등 간단한 후속공정 만에 의해 바로 제품으로 사용된다는 점과, 용접에 의한 보수 또는 조립이 가능하다는 차이점으로부터 단조재에 비해 주조성과 용접성을 고려한 합금 설계가 요구된다. 즉, 주조성의 측면에서는 S, B, P, C, As, Nb, Mn 등과 같이 합금의 응고 시 고액공존구간 (Mushy Zone)을 확대하거나 저융점 공정화합물을 만드는 원소의 첨가범위의 설정에 특히 주의가 필요하다. 이러한 원소의 농도가 높을 경우 Hot Tearing, Shrinkage Defect 등의 주조 결함이 발생할 우려가 높아지기 때문이다. 용접성의 측면에서는 C, Cr, Mo, V, Mn, Si 등 탄소당량에 영향을 미치는 원소의 첨가량에 각별한 주의가 필요하다. 그러나 이러한 원소는 모재의 강도, 인성 등 기계적 성질과 d-ferrite 생성경향 등에도 동시에 영향을 미치므로 최적 첨가량의 설정에는 다각적인 검토와 더불어 많은 경험을 필요로 한다.

따라서 케이싱 소재는 화학성분 최적화, 열처리 공정개발 및 기계적 물성평가가 필요하며, 또한 주조품은 주조결함의 발생이 수반되기 때문에 결함 발생 시 보수를 할 수 있는 보수용접 공정의 개발이 필요하며, 뿐만 아니라 주증기 배관과 연결이 필요하기 때문에 구조용접 공정 개발이 필수적이다(그림 11).

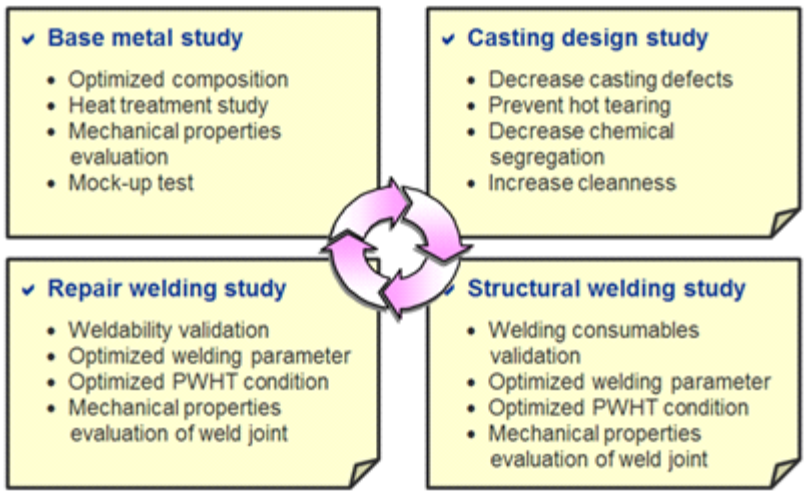


그림 11. 케이싱 소재 개발내용

그림12는 케이싱 및 밸브 소재로 유럽 COST 프로그램에서 개발되어진 COST CB2 소재의 20톤 Control valve 제품을 나타내었다. 9Cr-1.5Mo-3Co-B-VNbN계 CB2 소재는 COST 522 프로그램에서 개발한 621℃급 USC 발전소용 주강소재로서, 화학조성에 있어서 593℃급 발전소용 10Cr-1Mo-VNbN 소재에 사용되지 않는 B(Boron), Co(Cobalt) 등이 첨가되는 점에서 큰 차이를 나타낸다. Boron은 모재 및 열영향부의 장시간 크리프 파단강도의 개선을 목적으로 첨가되나, 편석 및 저융점 공정형(共晶型, Eutectic) 화합물의 형성 경향이 매우 큰 원소로서 일반적으로 대형 사형주조 시 Hot Tearing 감수성을 증가시킬 뿐 아니라 용접성의 저하에도 매우 큰 영향을 미치기 때문에 제조시 세심한 주의가 필요하다. 주조성 및 제조성을 평가하기 위해 제품 위치 별 총 13 포인트에서 샘플링을 채취하여 화학성분을 분석한 결과 기준 값을 모두 만족하여 편석이 없는 양호한 결과를 보여주고 있다.

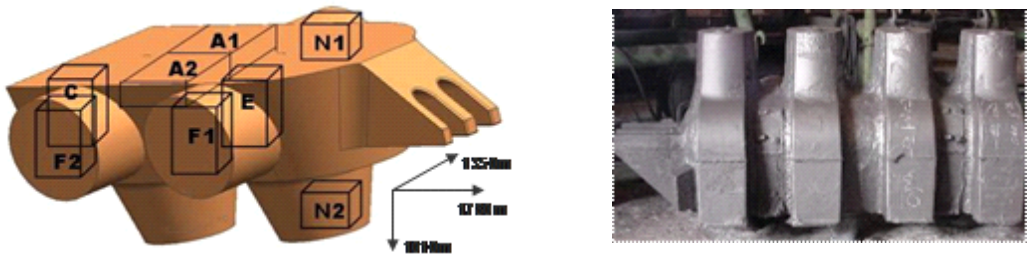


그림12는 케이싱 및 밸브 소재

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu	Co	Nb	Ti	B
Ave.	0.12	0.32	0.88	0.009	0.005	0.16	9.43	1.50	0.19	0.006	0.05	1.0	0.05	0.005	0.0088
Std. Dev.	0.02	0.004	0.01	0.001	0.001	0.003	0.06	0.02	0.01	0.004	0.0	0.01	0.003	0.001	0.0022

표.7 CB2 소재의 화학성분(wt.%) _ 13 포인트 샘플링 평균

그림13은 CB2 소재 및 종래의 10Cr-1Mo-VNbN 소재와의 크리프 및 용접특성을 나타낸 것으로 621℃에서 크리프 강도가 85.2MPa로서 10Cr-1Mo-VNbN 소재 대비 약 30% 정도 높은 우수한 크리프 특성을 보인다. 뿐만 아니라 CB2 소재 및 종래의 10Cr-1Mo-VNbN 소재와의 용접성을 비교해 보면 CB2 소재의 경우 강도가 Conv.10Cr-1Mo-VNbN 대비 높아졌지만, 용접성은 거의 동등한 수준인 것을 알 수 있다.

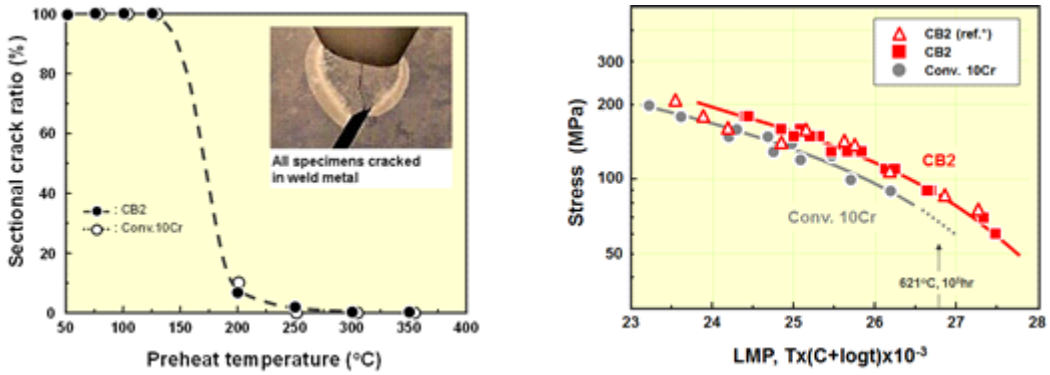


그림13. CB2 &Conv.10Cr-1Mo-VNbN 소재의 크리프 강도 및 용접성

제품-기술 개발의 특징: 보일러 소재/부품

주증기 온도 538℃급에서 USC 발전소 가동 조건인 주증기 온도 약 600℃까지 도달하는데 약 30년이 소요되었으며, 향후 주증기 온도를 50~100℃ 상승시키는데 약 30년이 더 걸릴 것으로 예상된다. 이와 같은 배경에는 보일러 소재가 요구하는 용접/제관성, 증기산화 저항성 및 고온 부식저항성 등을 모두 만족하는 재료 개발이 선행되어져야 하기 때문이다.

보일러용 재료로 사용 가능한 튜브 및 파이프소재를 분류해보면 저합금강(≤3%Cr), 고합금강(9~12%Cr), 스테인리스강(18~25%Cr), 초합금(Ni base)으로 크게 대별되며, 세부적인 재료를 그림14에 나타내었다. 사용환경 즉 주증기 온도가 증가됨에 따라 저합금 소재에서 고합금 및 초합금재료로 전환되고 있음을 알 수 있다.

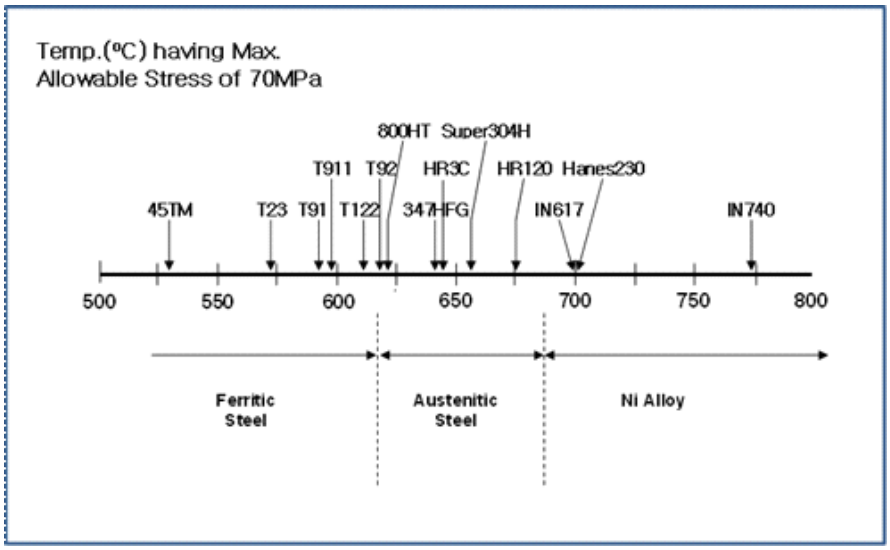


그림14. 보일러용 소재 개발 현황

주요 소재기술

HP/IP 로터 소재 개발

그림 15는 전 세계 화력발전소용 HP 및 IP 로터의 온도별 사용재질을 비교한 것이다. 주증기 온도가 566℃이하인 초임계압(SC, Super Critical) 조건에서는 전 세계가 모두 1CrMoV강을 사용을 하였다. 그러나 초초임계압(USC, Ultra Super Critical) 조건이 되면서 일본은 엔지니어링 사 별로 자체 로터소재를 개발하여 사용하고, 다른 지역은 유럽의 COST 프로그램에서 개발된 COST F, E, FB2 로터소재를 사용하고 있다. 국내 두산중공업(주)에서도 전 세계적으로 사용되고 있는 COST 로터소재 3종에 대한 개발을 완료하여 현재 상용화 단계에 접어들었다.

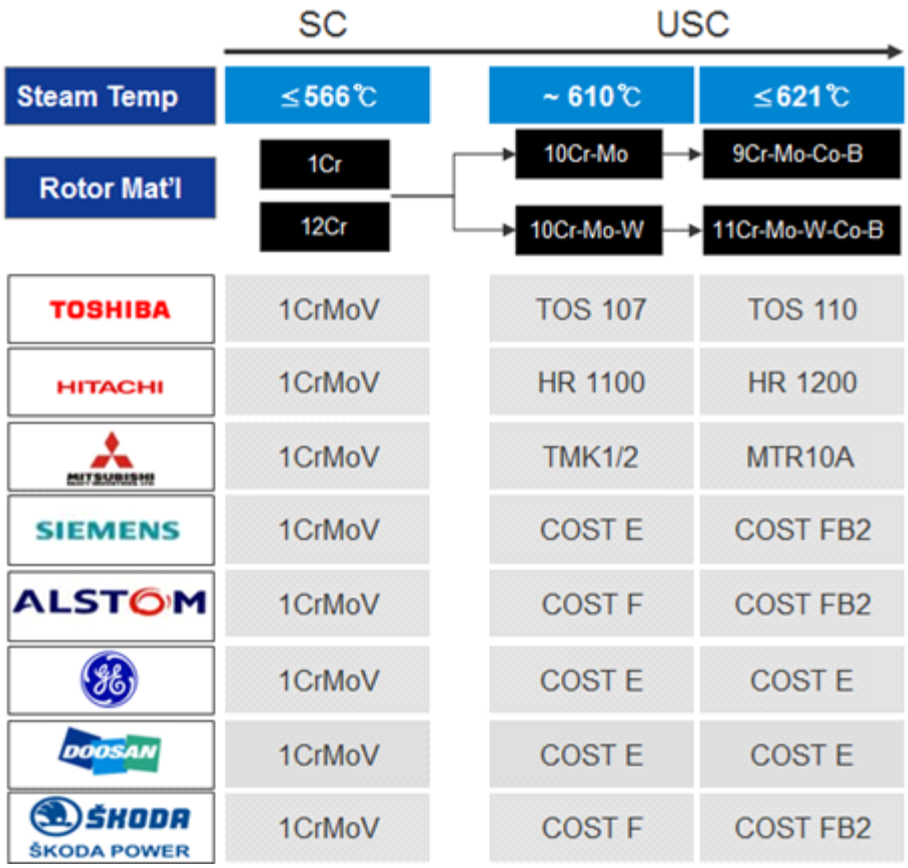


그림 15. 전세계 화력발전소 HP/IP 로터 소재 사용 현황

표 8은 주요 로터소재의 화학성분을 비교한 것이다. 주요 화학성분의 차이는 W, Co, B, N의 함량차이이다. 이는 HP/IP 로터에서 가장 중요한 물성특성인 Creep 강도를 향상하기 위한 합금 설계이다.

		C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	W	B	Co
610 C	COST F/TMK1	0.14	0.50	0.05	0.60	10.2	1.5	0.17	0.06	0.04			
	TOS107(Japan)	0.14	-	-	0.70	10.0	1.0	0.20	0.05	0.05	1.0		
	COST E	0.12	0.40	0.10	0.75	10.5	1.0	0.19	0.05	0.06	1.0		
>621 C	COST FB2	0.13	0.07	0.10	0.12	9.2	1.5	0.25	0.05	0.02		0.01	1.2
	TR1200(Japan)	0.12	0.50	0.05	0.8	11.2	0.3	0.20	0.08	0.06	1.8		
	TOS110(Japan)	0.11	0.08	0.1	0.20	10.0	0.7	0.20	0.05	0.02	1.8	0.01	3.0
	HR1200(Japan)	0.10	0.55	0.06	0.50	11.0	0.23	0.22	0.07	0.02	2.7	0.02	2.7

표8. USC HP 및 IP용 주요 로터소재 화학성분

그림 16은 두산중공업(주)에서 개발한 COST F, COST E, COST FB2 로터소재의 Creep특성을 비교한 것이다. 그림에서 보듯, COST FB2 로터소재의 Creep강도가 가장 우수한 것을 알 수 있다. 본 Creep 실험 결과는 두산중공업(주)에서 직접 제조한 20톤 및 70톤 Ingot으로부터 제조된 로터로부터 채취한 시험편의 시험결과이다. 그림 17은 두산중공업(주)과 해외 선진업체에서 제조된 COST FB2 로터소재의 Creep시험결과를 상호 비교한 것이다. 그림에서 보듯, 두산중공업(주)에서 제조된 로터소재의 Creep특성은 해외 선진업체에서 제조된 로터소재와 Creep특성이 동등하다는 것을 알 수 있다.

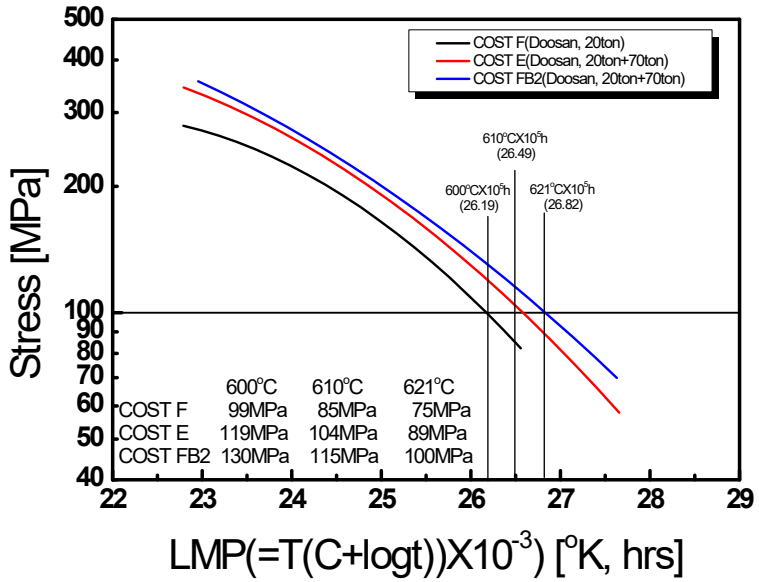


그림 16. 두산중공업(주) 개발 HP/IP용 로터 소재의 Creep특성

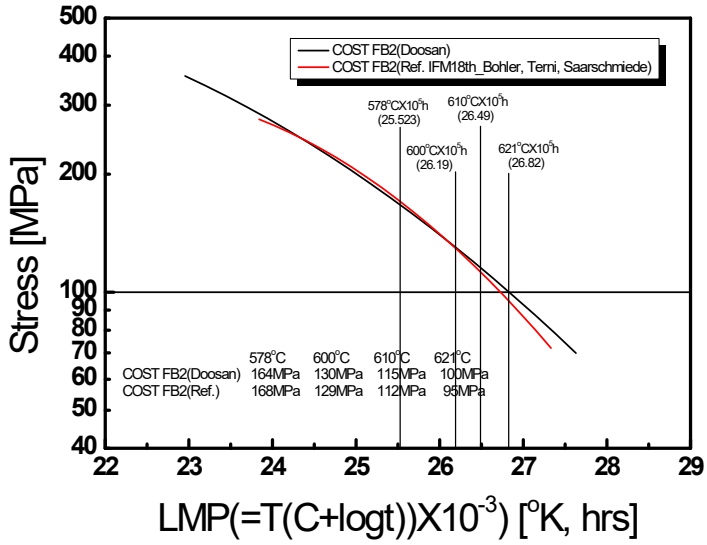


그림 17. 두산중공업(주) 개발 로터소재와 해외사 제조 로터소재의 Creep특성 비교

보일러 소재 기술

소재물성

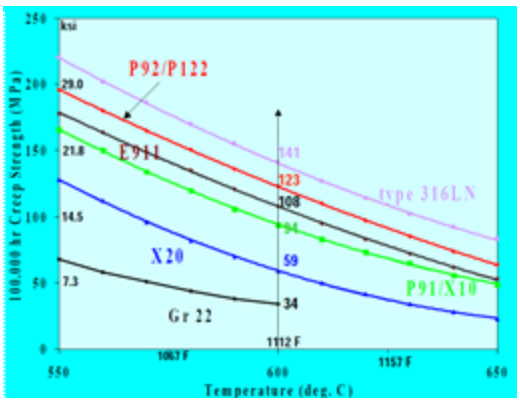
보일러 주요 부품에 요구되어지는 물성을 표9에 나타내었다. 보일러에 사용되는 소재는 소재 특성으로는 크리프 강도, 내부식성 및 내산화성 향상, 제작성 측면에서는 용접성 및 성형제관성 향상을 통해 발전소 사용수명의 연장, 발전소 경량화에 따른 용량 격상 및 Compact한 발전소 건설 및 운용이 가능할 것으로 판단되며 소재 물성, 용접성, 가공성 및 재료 Cost를 고려하여 설계 시 설계자가 사용 환경을 면밀하게 검토하여 환경에 가장 적합한 재료를 선택하는 것이 중요하다.

	헤더, 파이프	과열기,재열기	수냉벽관
운전 요구특성	● 크리프 특성 ● 열피로특성 ● 파괴인성 ● 내산화성/내부식성 ● 장시간 내취화성 ● 장시간 조직 안정성	● 크리프 특성 ● 내산화성/부식성	● 인장강도 ● 열피로특성 ● 파괴인성
제작 요구특성	● 용접성 ● 성형성/제관성	● 용접성 ● 성형성/제관성	● 용접성/열처리특성 ● 성형성/제관서

표9 보일러 주요부품의 요구특성

그림18은 동일한 설계 조건에서 소재별 적용 가능한 두께를 나타내고 있다. 허용응력 혹은 내산화/부식성이 높은 신소재를 사용하면 튜브와 배관의 두께 감소로 전체 중량이 감소하고 열응력 발생이 낮아지기 때문에 경제성과 부하추종 운전성이 높아질 것으로 기대된다. 또한 발전소

가동조건의 가혹해 지기 때문에 기존 소재로는 사용의 한계가 있어 USC 발전소의 고온, 고압부에는 신재료 사용이 불가피 하다.



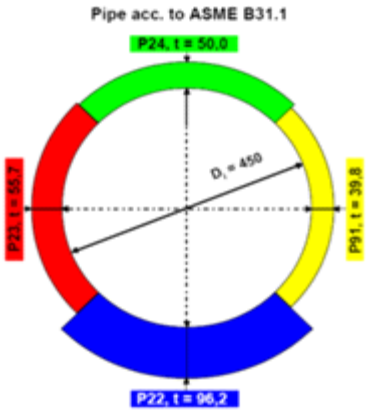
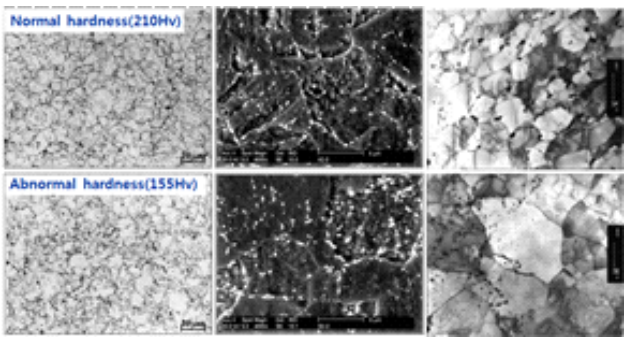


그림18. 크리프 강도와 소재 제작성

그림 19는 P91 소재의 소재 경도에 따른 크리프 강도를 나타내었는데, 소재 경도가 낮아질수록 크리프 강도가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이는 소재 제작 시 부적절한 열처리에 의해 건전한 미세조직이 형성되어지지 않았기 때문이다. P91소재의 경도별 미세조직을 살펴보면 P91 소재의 정상적인 미세조직은 템퍼드 마르텐사이트 조직이지만, 부적절한 열처리에 의한 저경도 소재는 lath의 회복 및 결정립 성장에 의한 비정상적인 미세조직을 보인다. 따라서 보일러 제작 시 수반되는 밴딩 및 용접공정에서 부적절한 열이력에 노출되지 않도록 제작 시 주의가 필요하다.



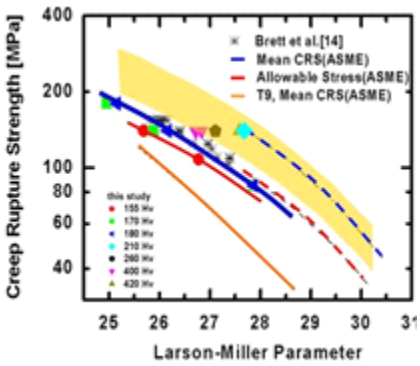


그림 19. P91 소재의 경도, 크리프강도 및 미세조직

용접성

보일러용 소재는 탄소강에서부터 고합금강에 이르기 까지 다양한 재료가 사용되며, 용접이 가능한 조건이 탄소강에서는 큰 반면에 저합금강 및 고합금강 소재에선 좁다. 따라서 소재의 용접성 확보를 위해서는 최적 용접조건의 선정이 중요하며, 특히 예열 및 용접후 열처리 등의 열관리가 중요하다. 또한 보일러용 고합금강인 9Cr 소재의 모재 및 용접부 크리프 특성을 보면 용접부 크리프 강도가 모재보다 다소 낮은 경향을 보기 때문에 용접부 물성 향상을 위해 새로운 소재 및 제작 공정의 개발이 필요하다.

그림20 보일러용 소재의 용접성 및 크리프 특성을 모식적으로 나타낸 것으로 용접이 가능한

영역이 탄소강에서는 큰 반면에 저합금강 및 고합금강 소재의 용접 가능 영역이 좁은 것을 알 수 있다. 따라서 소재의 용접성 확보를 위해서는 최적 용접조건의 선정이 중요하며, 특히 예열 및 용접후열처리 등의 열관리가 중요하다. 또한 보일러용 소재 특히 고합금강인 9Cr 소재의 모재 및 용접부 크리프 특성을 보면 용접부 크리프 강도가 모재보다 다소 낮은 경향을 보기 때문에 용접부 물성 향상을 위해 새로운 소재 및 제작 공정의 개발이 필요한 것으로 보인다.

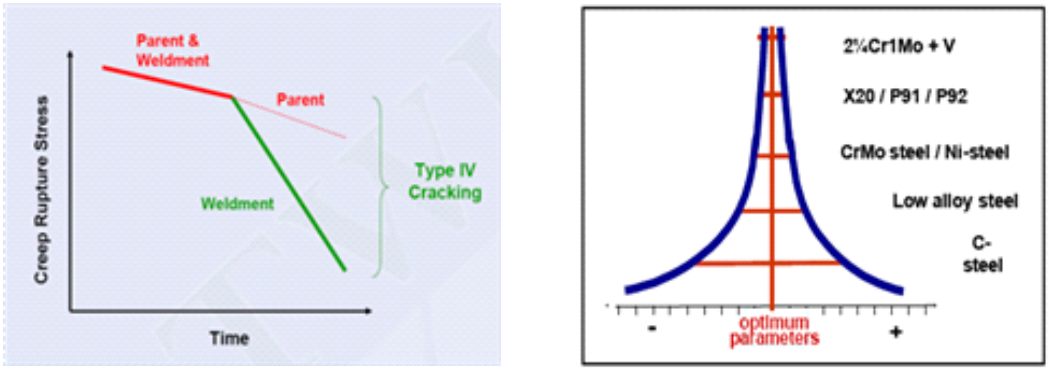


그림 20. 보일러용 소재 용접성 및 크리프 특성

성공적 소재기술개발의 시사점

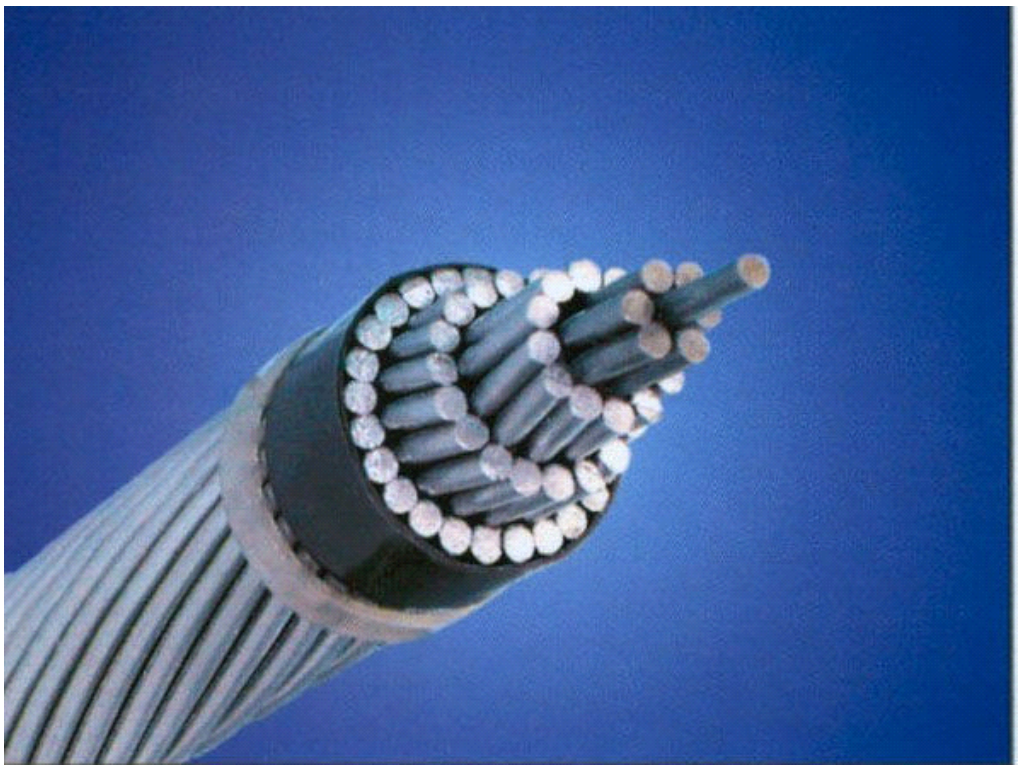
두산중공업(주)의 상기 터빈 주요부품 소재 국산화 성공 전에는 Saarschimede(독일), JSW(일본), JCFC(일본) 업체만 초초임계압(USC)발전소용 소재를 전 세계 시장에 거의 독점하여 공급하였다. 그러나 두산중공업(주)의 상기 3대 Major기업만의 세계독점시장에 참여하여 국내시장을 보호함은 물론 최초로 중국시장에 수출을 완료하였으며, 추가적으로 중동, 인도 등 해외시장을 발굴하고 있으며 진출 가능성 또한 높은 상태이다. 대형 9~12Cr로터강의 핵심기술은 제품품질을 결정하는 10여종의 화학조성을 제어 할 수 있는 ESR정련 Parameter를 도출하고 특허등록을 완료하였으며, 아울러 로터 저널부 Overaly 용접기술을 추가로 개발하여 터빈•발전기부품의 전체 제작공정 확립으로 부품공급 경쟁력을 강화하고 있다. 또한 대형 9~12Cr강용 독자적 위상배열 초음파 검사기술을 개발하여 고분해 결함검출능을 향상시켰다.

이러한 기술개발을 바탕으로 국내외 USC발전소 터빈•발전기 부품 공급능력 확대 및 국내외 발전플랜트 수주경쟁력을 강화하는데 기여하고 있으며, 향후 HSC 발전 및 Gas Turbine 발전 등 고부가가치 제품 제조에 추가로 응용이 가능할 것으로 기대하고 있다.

보일러용 소재는 대부분 미국, 유럽 및 일본에서 개발되어 발전소에 상용화되고 있으며, 두산중공업(주)은 해외에서 개발된 소재를 발전소에 적용 가능토록 소재 물성평가, 용접 및 제관성 평가에 집중되어져 있었다. 그러나 최근 우수한 소재 물성을 가진다고 알려져 있는 Grade 23 소재의 제작성 문제 및 Grade 91/92 소재의 고온 물성 이슈로 인하여 해외 유수의 기관에서는 새로운 소재 개발에 매진하고 있는 실정이며 대부분 산,학,연의 공동 연구로 진행되는 경우가 많다. 특히 HSC 발전소용 Ni기 초합금 소재 개발은 유럽, 미국 및 일본에서 활발히 진행되고 있으며, 대부분 정부주도 혹은 정부 지원 하에 전방위적으로 기술개발이 이루어지고 있다. 따라서 보일러용 신소재 이슈 대응 및 신소재 개발을 위해 정부지원이 반드시 필요하며, 뿐만 아니라 보일러용 소재 개발에도 역량을 집중해야 할 것으로 보인다.

송전선용 초내열 알루미늄 합금

(High Temperature Low-Sag Aluminium Conductor)



소재/부품의 특징

가공 송전선은 해안의 화력발전소, 원자력발전소, 산과 산 사이의 수력발전소 등에서 도시와 공업지대 등의 전력 수요지의 가까운 변전소까지, 높은 철탑에 전선을 연결하여 전력을 보내는 전선이다. 현재 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 강심 알루미늄 전선(Aluminum Conductor Steel Reinforced, ACSR)은 90℃의 연속 사용온도를 가지며 오랫동안 사용되어 왔으나, 산업의 발전에 따라 증가되는 전력 수요에 부응하여 새로운 송전선로를 확보하거나 송전전압의 격상이 필요하게 되었다.

그러나 새로운 송전선로를 위한 부지 확보의 어려움에 직면하게 되어 전력수급이 곤란해짐에 따라 기존의 송전선로와 철탑을 그대로 사용하여 도체만을 바꿈으로써, 단기간에 전력을 두 배 가까이 보낼 수 있는 방법을 찾게 되었다. 이와 같이 기존 ACSR의 외경 및 중량이 동일 수준이면서도, 증가된 송전용량의 운전온도인 200℃ 이상에서도 이도(Sag)를 현재의 ACSR 수준으로 유지시키는 가공 송전선을 증용량/저이도 가공 송전선(High Temperature Low-Sag Conductor, HTLSC)이라고 한다.

HTLSC 제품에는 증용량/저이도 특성을 달성하기 위해, 전선을 이루는 도체와 전선을 지지하는 인장선의 재료기술, 전류용량 증대에 따른 손실 증가를 만회하기 위한 저 손실 기술, 그리고 고온 운전을 하기 위한 접속 기술이 요구된다. 이러한 증용량/저이도 가공 송전선 개발을 위한 요소 기술 중 전선을 이루는 도체에 대한 재료기술은 고온에서도 강도가 저하되지 않는 내열특성을 가진 알루미늄 합금에 대한 기술이 가장 핵심 기술이다.

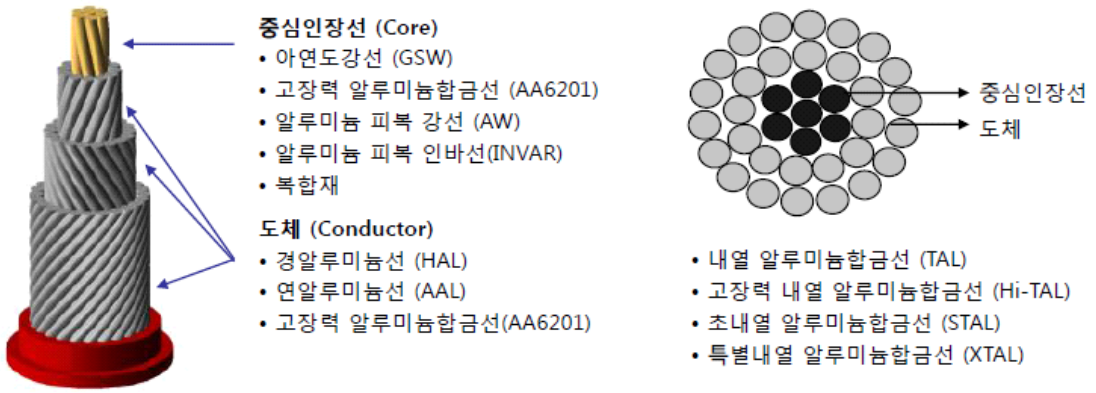


그림 1. 가공 송전선의 구조

산업의 특징 및 국내 현황

가공 송전선 산업 국내 현황

2011년 9월 15일 서울 지역에서 발생한 대규모 정전 사태는 하절기 이상기후로 인한 전력수요 급증으로 발생한 사고로써 전력공급 안정성 확보가 점점 더 중요해짐을 보여주고 있다. 또한

다른 에너지에 비해 낮은 가격으로 인해 전력수요 사용량이 급증하고 있으나, 민원 및 부지 확보의 어려움으로 인해 신규 송전선로 구축이 제한되고 있어 기설 선로를 활용한 송전용량 증대가 요구된다. 국내 선종의 약 90%를 차지하고 있는 ACSR 일반 전선의 경우 사용연수 40년 이상 교체 시기가 도래하고 있으며, 신기술을 접목하여 성능이 향상된 전선으로 대체하는 방안 마련이 대두되고 있다. 특히 하중 분담을 위해 도체로 경알루미늄을 사용하고 있는 ACSR은 전력손실이 큰 단점이 있으며 그 해결 방안 마련이 적극 검토되고 반영되어야 한다.

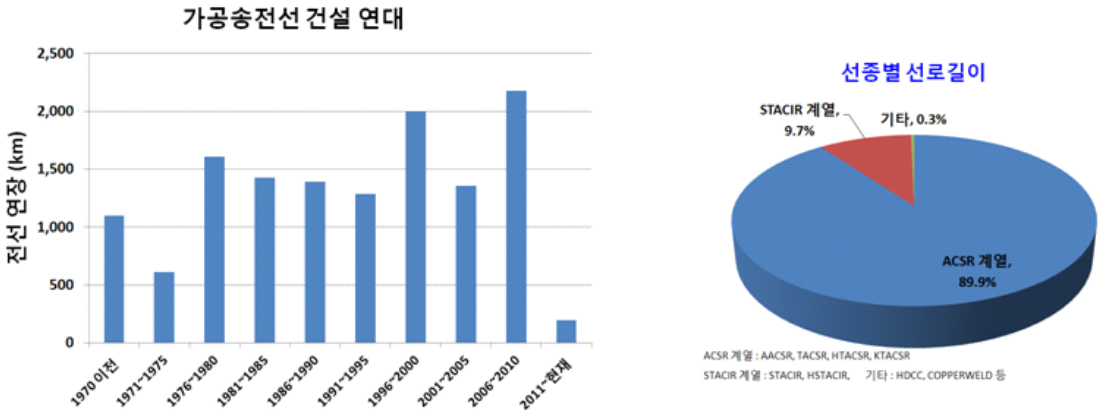


그림 2. 가공 송전선 건설연대 및 구성비율

해외 증용량 가공 송전선 기술 동향

현재 국내에서 적용하고 있는 주요 증용량 전선인 STACIR 전선(Super Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced)은 일본 스미토모 전기공업과 간사이 전력과 공동으로 1978년 최초 개발하였으며, 우리나라는 1995년부터 적용하기 시작하였다. STACIR 전선은 Invar 합금을 지지선으로 사용하고 있으며 Invar 합금의 선팽창계수가 기존 강선의 1/3에 불과해 고온에서 운전 시 이도 변화가 거의 없어 증용량 전선으로 사용되어 왔으나, 최근 Invar 합금의 주성분인 Ni 가격의 급등으로 가격 경쟁력이 약화되었다.

복합재료를 지지선으로 하는 증용량 전선은 비교적 최근에 개발되어 실용화 추진되고 있으며, 레진이나 금속 알루미늄을 기지로 하고 보강재로 탄소섬유, 알루미나 세라믹 섬유, SiC 세라믹 섬유 등을 사용하고 있다. 이러한 전선은 경량, 고강도, 내부식 특성으로 이도가 매우 적은 장점이 있으나 아직까지 가격이 비싼 단점이 있다.

강선을 지지선으로 하는 증용량 전선은 가격이 저렴하고 설치 실적이 많은 상황이지만 고온에서의 이도 특성이 미흡한 단점이 있다.

국내/외 가공 송전선 시장 규모

2012년 3월 기준 우리나라 송전선 연장은 194,379 km로써 이 중 95%가 가공 송전선, 5%가 지중 송전선, 0.1%가 수중 송전선이다. 가공 송전선은 ACSR계가 94.2%, 증용량의 STACIR계가 5.8%를 각각 차지하며, 전압별로는 154 kV (66.6%), 345 kV (27.5%), 765 kV (2.3%)로

구성되어 있다(2005년 기준). 국내 전력계통은 타 국가와 전력유통이 곤란한 단독 계통이며, 전력 수요의 43%가 수도권에 집중되는 반면, 발전소는 중남부 지역에 편재해 있는 특징이 있다. 특히 40년 이상 노후한 가공 송전선이 전체의 22%를 점하고 있어 전선 대체 수요는 지속적으로 발생할 것으로 예상된다.

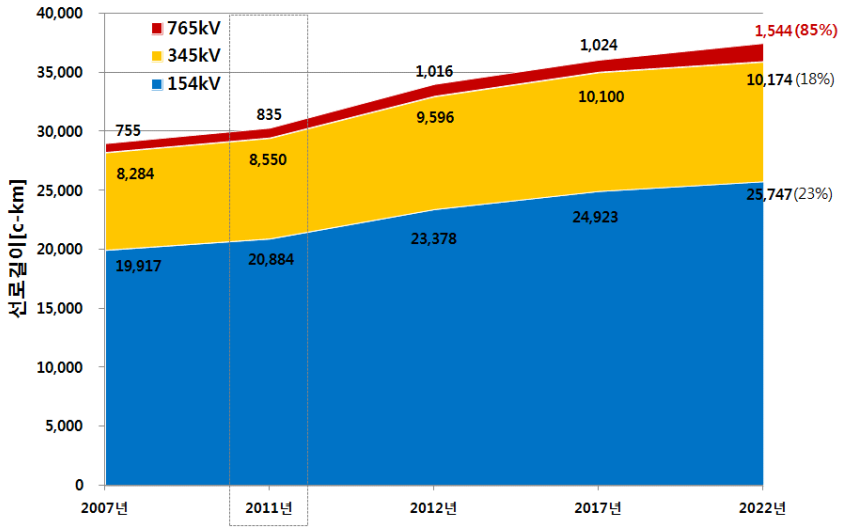


그림 3. 국내 송전선로 건설 계획

국내 가공 송전선 신규 수요는 전력 소비량 증가와 유사하리라 예상되며, 2010 ~ 2024년 동안 연평균 3.1% 전력 소비량 증가가 전망된다. 증용량 전선은 STACIR계 전선 사용 실적이 유일하며, 1995년 61억원 규모 154 c-km(circuit-km)를 시작으로 2011년 까지 총 1,365억원 규모 2,284 c-km가 설치되었고, 최근 5년간 연평균 71.6억원 규모로 설치되고 있다. 우리나라의 송배전손실률은 2010년 기준 3.99%로 다른 나라에 비해 월등히 우수한 편이지만, 손실 절감에 대한 필요성은 지속적으로 강조되고 있다.

2011년도 IAEA(International Atomic Energy Agency) 보고서에 의하면, 전세계 평균 전력 소비량 증가는 우리나라의 3.1%와 유사하게 2010 ~ 2030년 동안 2.7 ~ 3.9%로 전망되고 있으며, 세계의 전력 생산은 2011년 기준 21,000 TWh에 달하며 우리나라는 전 세계의 2.2%를 차지하고 있다.

2005 ~ 2030년 동안 중장기 전력계통 신규 투자는 11조$에 달할 것으로 예상되며 2012년 단기시장을 보더라도 1조 548억$로 예상된다.

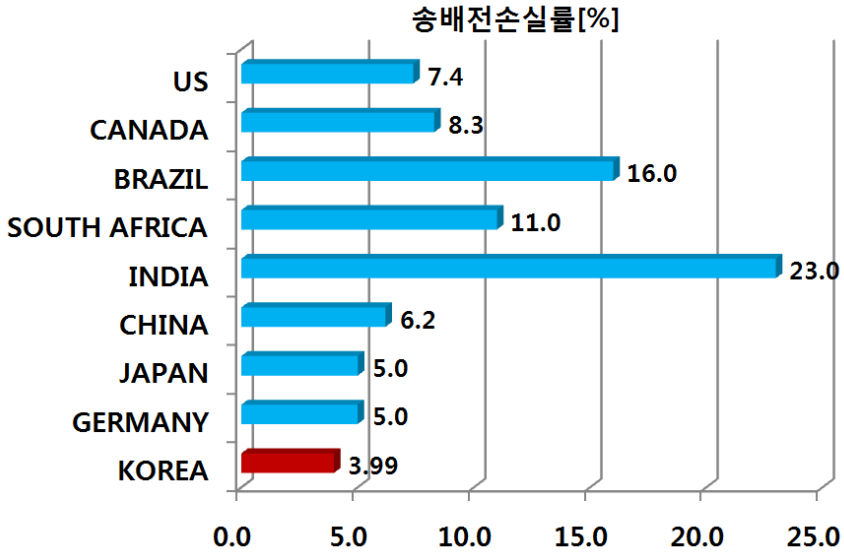


그림 4. 각국의 송배전 손실률 비교

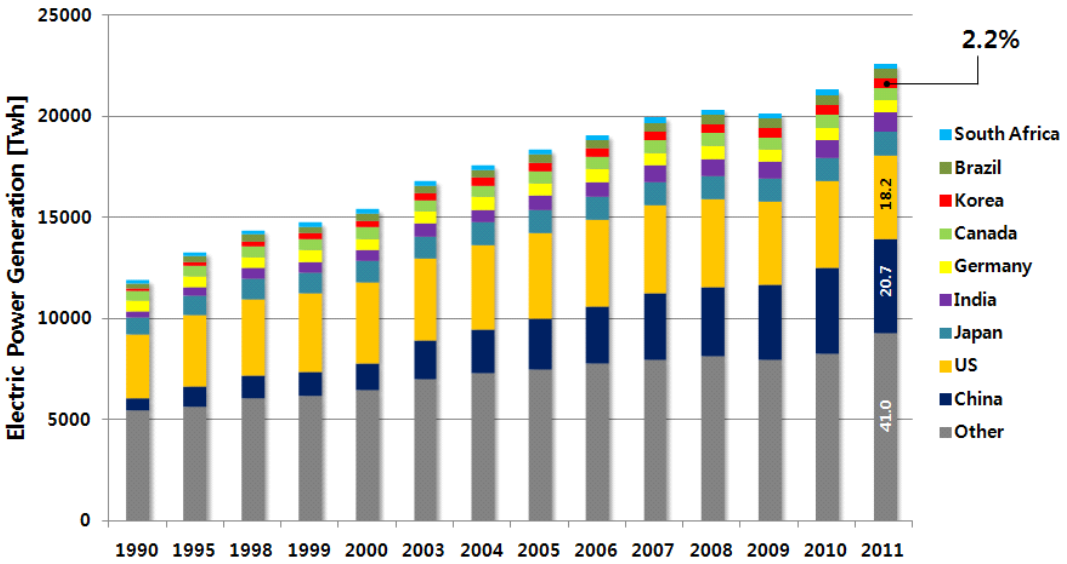


그림 5. 세계 전력생산 현황

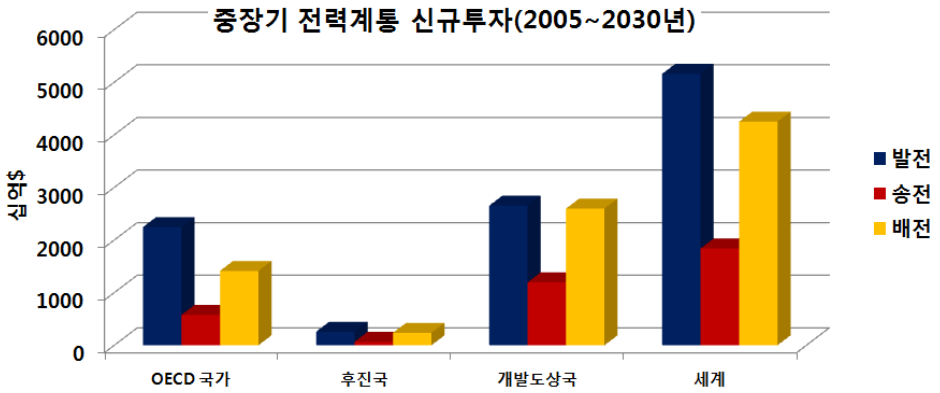


그림 6. 전력설비 신규투자 전망

2011년 가공 송전선 세계 시장은 10조원 정도로 추정되며, 시장 성장은 전력 소비량 증가와 유사하게 2015년까지 연간 3%대의 성장이 예상된다.

연도	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
시장(백만$)	7,855	8,016	8,248	8,633	8,984	9,313	9,648	10,007	10,383

표 1. 가공 송전선 세계 시장 추이 및 전망

초고압 가공 송전선용 내열 합금 기술

제품/기술 개발의 특징

송배전선로의 증용량화를 위해서는 도체의 성능 개선이 필요하며 이를 위해서 송배전선을 구성하는 소재들의 특성을 향상시키거나, 새로운 첨단 소재의 개발, 적용이 필요하다.

송배전 용량 증대화 방안으로는 송전선의 도체 크기를 대형화하거나 다도체화 하는 방법 등이 있으나, 이 경우 기존의 철탑이나 전신주만으로는 증가된 송배전선의 하중을 지탱할 수 없는 단점이 있다. 하지만 송배전선용 알루미늄 도체의 도전율 및 내열성을 향상시키게 되면 상기의 문제점을 극복할 수 있어, 高전기전도도, 高내열 알루미늄 합금 도체의 개발이 가공 송전선용 핵심 기술이다.

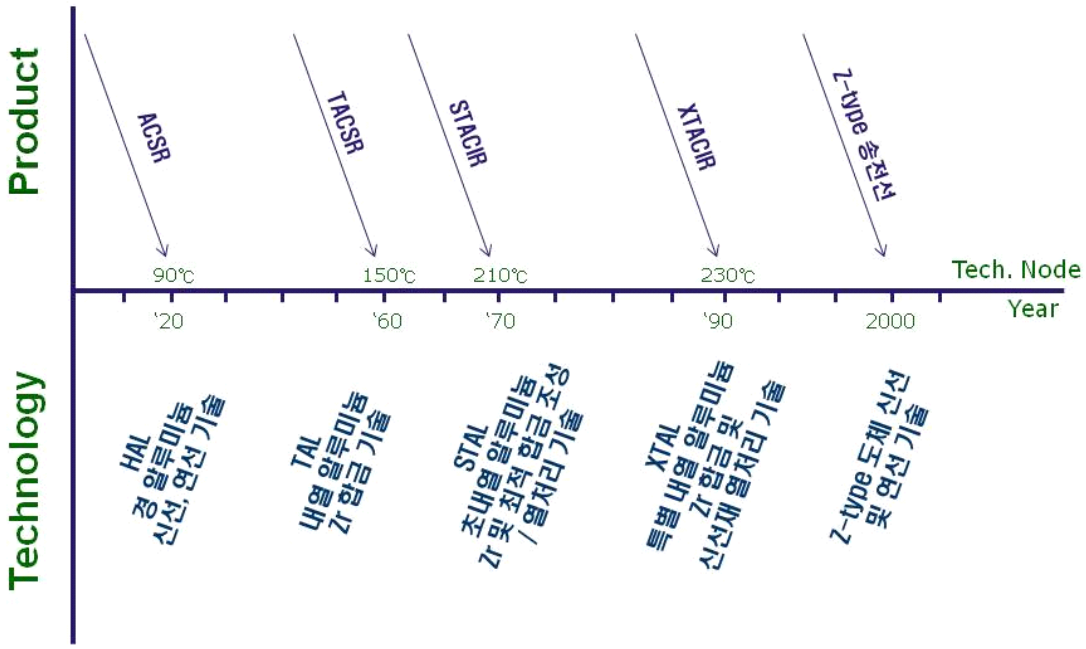


그림 7. 가공 송전선 – 내열 합금 소재 분석표

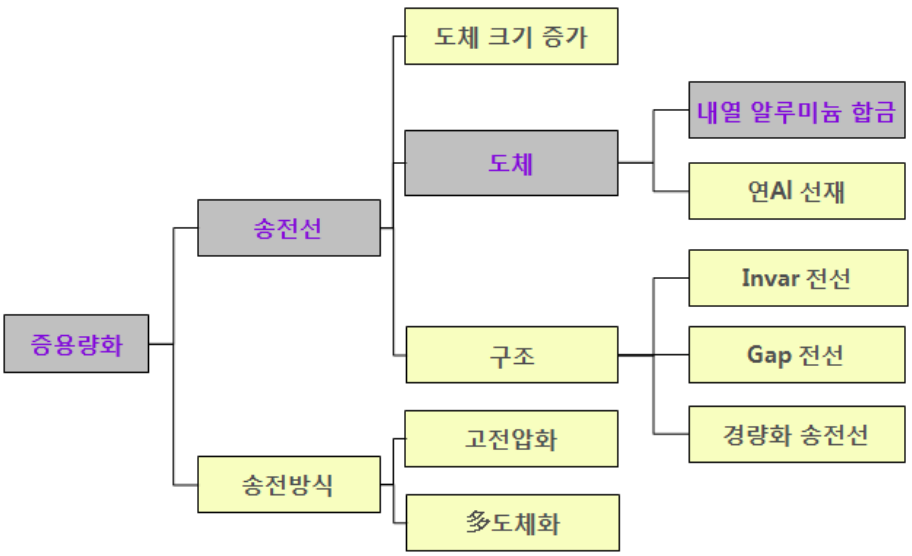


그림 8. 가공 송전선의 증용량화 방식

주요 소재 기술

Al-Zr 계 합금의 특징

전선용 내열 알루미늄 합금으로서는 오직 Al-Zr계 합금만이 사용되어 왔으며, Zr이 적용되는 이유는 알루미늄 내에서의 확산이 현저히 늦어 내열성 향상에 효과가 있고, 알루미늄의 내식성을 해치지 않기 때문이다.

Al-Zr 합금에서의 내열성 향상 기구는 Zr 원소가 주조 중 알루미늄 내에 과포화 상태로 고용되고 이후의 열처리를 통해 Al_3Zr의 미세 석출상으로 석출되며, 이 석출상은 전위나 결정입계에 석출하여 이들의 이동을 방해한다. 결과적으로는 금속의 열처리에 따른 상변화 단계(연화단계)인 회복 → 재결정을 지연시키게 되어 상대적으로 고온에서도 강도가 크게 변화하지 않게 된다.

Al-Zr계 알루미늄 합금에서는 아래와 같이 알루미늄 중의 Zr원소의 존재형태에 따라 도전율과 내열성에 미치는 영향성이 달라진다. Zr이 고용되어 있는 경우 Zr 양에 따라 도전율은 직선적으로 저하하고 내열성은 높아지나, 내열성은 Zr 양이 증가해도 일정 수준 이상 높아지지 않는다. Zr이 석출하는 경우 이 석출상은 미세하게 분산됨에 따라 도전율의 저하가 작아지고 고용 Zr에 의한 효과 이상으로 내열성을 확보하는 것이 가능하다.

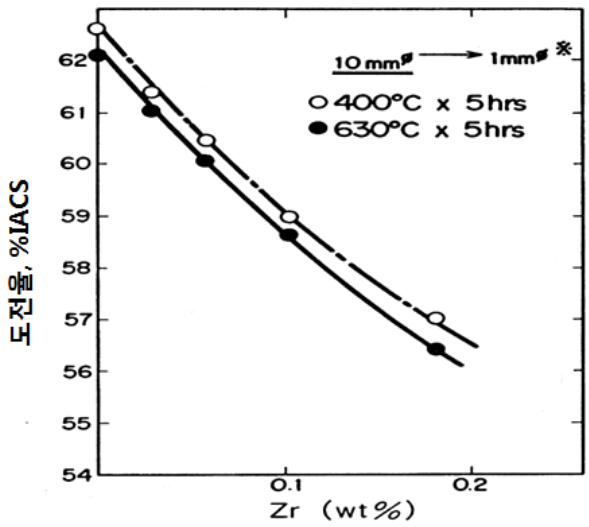


그림 9. Zr 함량과 도전율의 관계

그림 10에 Al-0.28%Zr 합금의 열처리 시간에 따른 도전율 변화를 나타내었으며, 알루미늄 내에서 Zr의 확산속도는 매우 느리기 때문에 고온에서 장시간의 시효 처리가 필요하다.

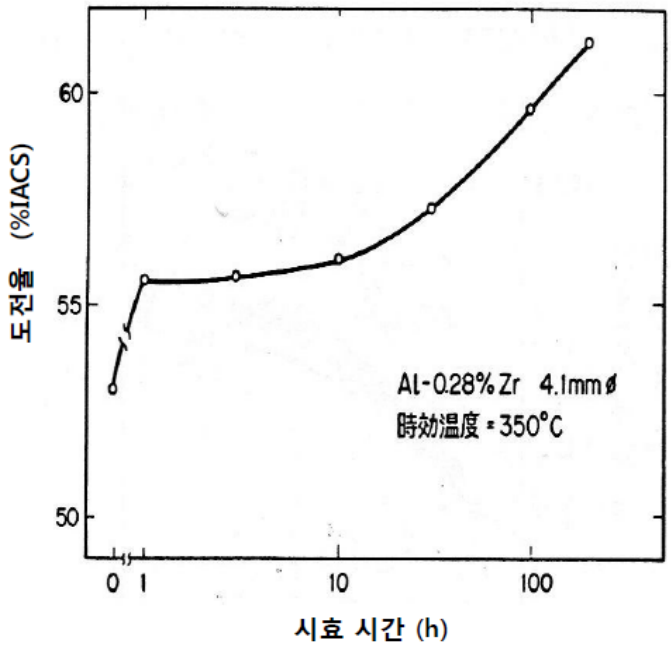


그림 10. Al-0.28%Zr 합금의 시효 특성

도체용 알루미늄 합금 개발 이력

앞서 기술한 바와 같이 송전선의 송전용량을 높이기 위한 주요한 방법은 전류 밀도의 증대, 즉 도체의 내열성 향상이다.

가공 송전선 용도로 내열 알루미늄 합금 전선이 실제 사용되기 시작한 것은 1960년으로 이때의 내열 알루미늄 합금선은 "58TAL"로 연속 및 단시간 허용온도가 각각 150℃, 180℃이며 도전율이 58%IACS이다. 그러나 도전율이 경(硬) 알루미늄선(HAL, Hard drawn ALuminum)에 비해 약간 낮고, 고온에서 전기저항이 크게 되어 송전손실이 커지는 문제가 있다. 따라서 도전율을 60%IACS 이상의 도전율을 가지는 내열 알루미늄 합금선(TAL)가 개발되어 적용되었다.

한편 알루미늄 합금에서 내열성과 도전율은 서로 상반되는 특성이 있기 때문에 도전율을 높이는 경우 내열성을 확보하기가 쉽지 않다. 송전선의 적용 범위 내에서 도전율의 저하를 크지 않게 하고 내열특성을 향상시킨 것이 초내열 알루미늄 합금선(UTAL)으로 연속사용온도와 단시간 허용온도가 각각 200℃, 230℃인 합금이다.

이후 연속사용온도와 단기간 사용온도가 각각 230℃, 310℃인 특별 내열 알루미늄 합금선(XTAL)이 개발되어 전류용량의 향상을 가졌으며, 비슷한 시기에 일본에서 도전율 60%IACS, 연속사용온도 210℃, 단시간 허용온도 240℃급의 STAL이 개발되어 상용화되었다. 또한 장경간 송전(Long Span), 송전 용량의 증가, 시설비 절감을 위하여 高 인장강도, 高 내열성의 Hi-TAL이 개발되어 상용화 되었다. 표 2에 주요 가공 송전선용 도체의 약자를 표기하였다.

LS전선에서는 1986년 TAL, 1994년 STAL, 1996년 Hi-TAL, 2005년 XTAL을 개발하였으며, 현재는 TAL, STAL, Hi-TAL 소재 및 송전선 완제품을 양산하여 판매 중이다.

약자	원문 표기	국문 표기
HAL	Hard-drawn Al	경 알루미늄
TAL	Thermal-resistant Al-alloy wire	내열 알루미늄 합금
UTAL	Ultra thermal-resistant Al-alloy wire	초내열 알루미늄 합금
STAL	Super thermal-resistant Al-alloy wire	
XTAL	Extra thermal-resistant Al-alloy wire	특별 내열 알루미늄 합금
Hi-TAL	Hi-strength thermal-resist Al-alloy wire	고강도-내열 알루미늄 합금

표 2. 가공 송전선용 주요 도체 소재의 표기

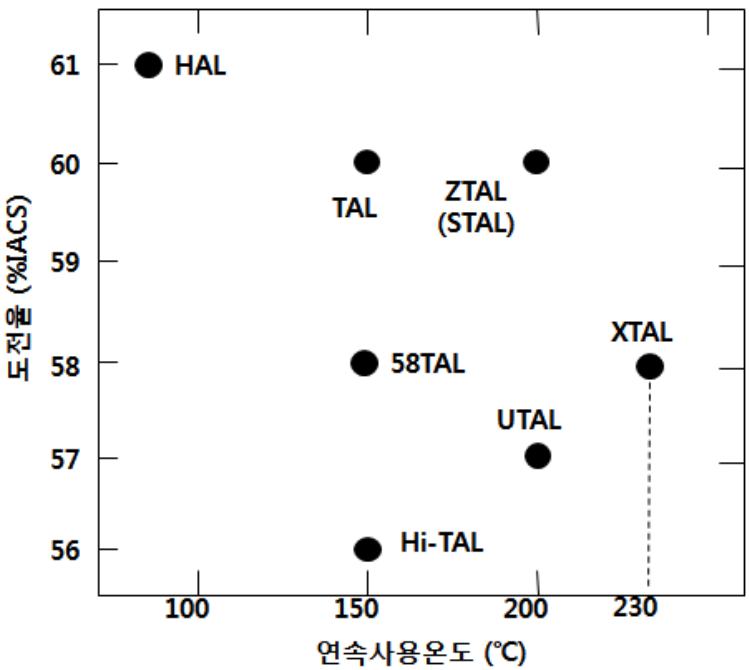


그림 11. 도전율과 내열온도에 따른 내열 Al 합금 분류

내열 알루미늄의 종류와 특징

그림 12에 전선용 도체로 사용되는 알루미늄 합금에 따른 도전율, 내열 온도 및 1시간 연화 특성을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 허용온도가 높은 알루미늄 합금도체일 수록 고온에서의 내열 특성이 우수하다.

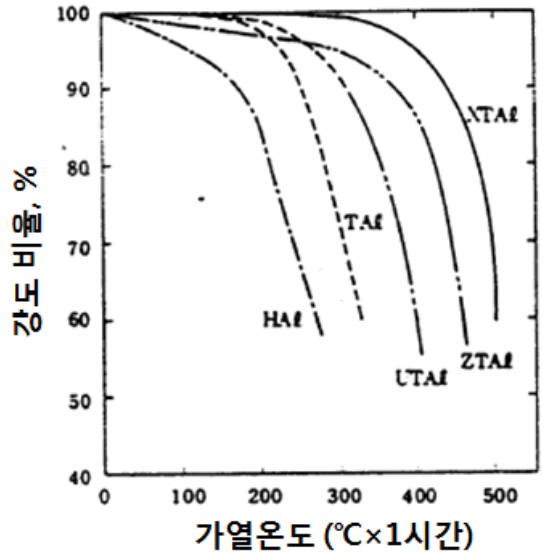


그림 12. 내열 알루미늄 합금 도체의 1시간 연화 특성 비교

상술한 내열 알루미늄 합금 도체를 적용한 가공 송전선의 허용 전류를 비교하여 표 3에 나타내었다. 표에 나타낸 바와 같이 내열 알루미늄 합금을 적용한 전선의 단시간 허용 전류는 경 알루미늄 선의 약 1.6 ~ 1.8배로 증용량이 가능함을 알 수 있다.

종류	적용 합금	약호	연속			단시간		
			허용온도 (℃)	허용전류 (A) [60Hz]	비율	허용 온도 (℃)	허용전류 (A) [60Hz]	비율
강심 알루미늄 연선	HAL	ACSR	90	829	1.0	120	1,115	1.0
강심 내열 알루미늄 합금연선	TAL	TACSR	150	1,323	1.6	160	1,508	1.4
강심초내열 알루미늄 합금 연선	UTAL	UTACSR	200	1,598	1.9	230	1,757	1.6
	ZTAL	XTACSR	210	1,675	2.0	240	1,831	1.6
강심특별내열 알루미늄 연선	XTAL	XTACIR	230	1,715	2.1	290	2,004	1.8
강심고강도 내열 알루미늄 합금 연선	Hi-TAL	Hi-TACSR	150	1,306	1.6	-	-	-

표 3. 각종 알루미늄 합금 연선계 전선의 허용 전류 비교 (ACSR 단면적 410㎟ 기준)

성공적 소재 기술 개발의 시사점

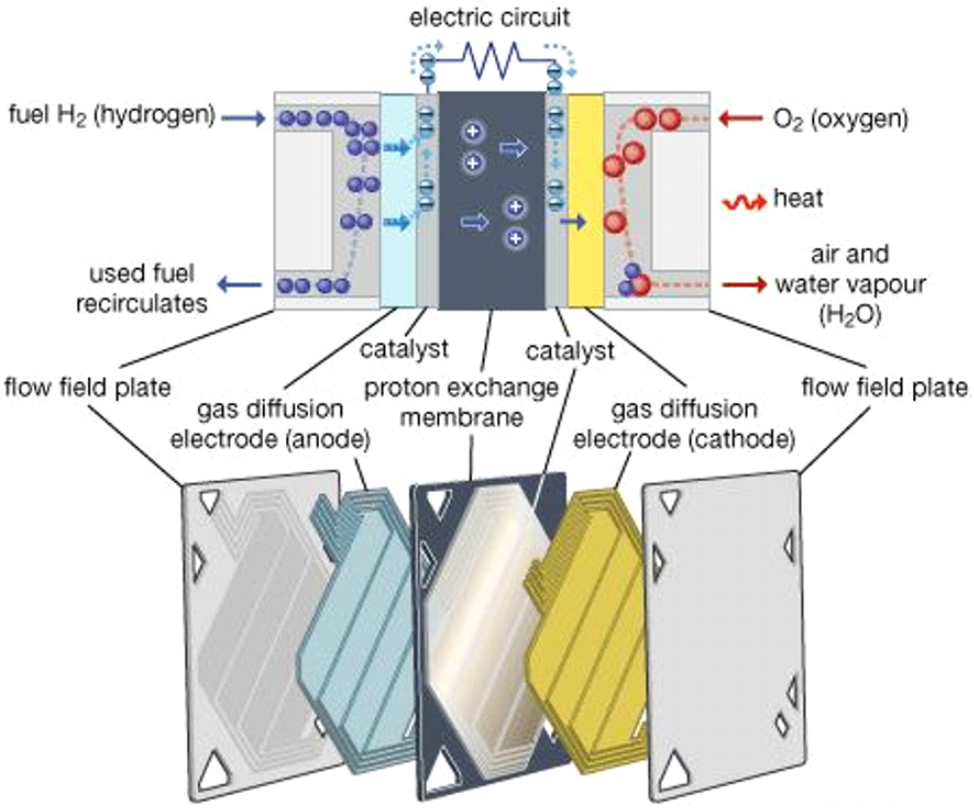
LS전선의 사례와 같이 세계적인 기술 선진 업체를 따라 잡고 추월하기 위해서는 소재에 대한 개발 및 소재를 완제품인 전선에 적용할 수 있는 공법 및 설비 개발이 동반되어야 한다. 또한 입찰 위주의 사업 특성 상 완제품의 기술적인 성능뿐 만 아니라 제조를 위한 가격 경쟁력이 확보되어야 하는데 이를 위해서는 소재의 국산화 실현이 무엇보다 중요하다.

소재 국산화는 개발에 많은 시간이 소요되며, 인적, 물적 자원의 중장기적인 투자가 필요하며, 국산화에 대한 진척이 늦을수록 기술 선진국인 일본에 대한 무역 적자가 심화될 것으로 사료된다.

향후 증용량 가공 송전선 시장의 경우 국내외적으로 지속적인 시장의 확대가 예상된다. 기술 성능 및 장기적인 소재의 신뢰성을 확보하기 위해서는 각 소재 업체별 연구 개발 투자뿐 만 아니라 학계와의 지속적인 연계, 더 나아가 정부의 정책적인 지원이 필요하다.

연료전지용 소재

(Fuel Cell Materials)



연료전지용 소재/부품의 특징

연료전지기술은 1839년 영국의 윌리엄 그로브(William Grove, 1811~1896)에 의해 발명된 기술로, 그림 1과 같이 연료의 화학에너지를 열과 기계적인 에너지 변환과정을 거치지 않고 전기화학반응에 의해 직접 전기에너지로 변환시키는 발전기술이다. 연료전지는 그림 2와 같이 연료전지 스택, 연료변환장치, 운전장치(BOP) 및 제어기로 종합 시스템이 구성되는데 기존 발전기술들 보다 발전효율이 높고 광범위한 적용성과 다양한 연료를 사용할 수 있으며, 친환경성으로 소음과 유해 배기가스 배출이 거의 없어, 화석연료 고갈과 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 녹색 신성장동력 기술이다.

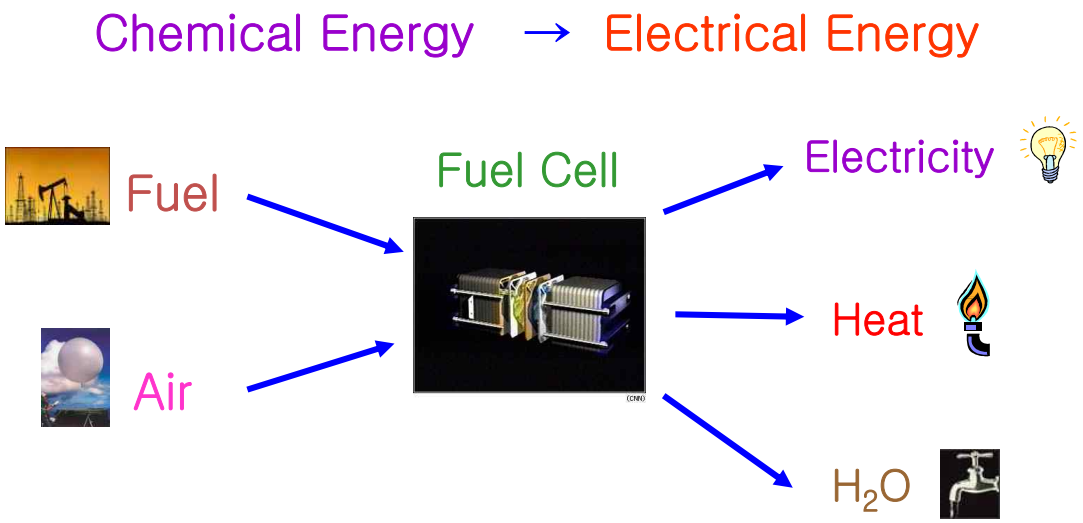


그림 1. 연료전지기술의 개념

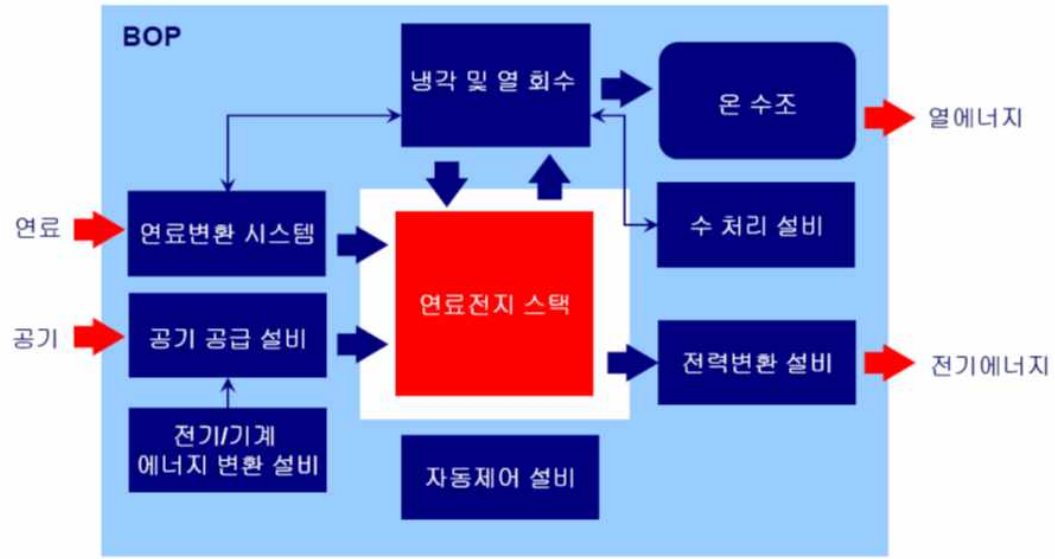


그림 2. 연료전지 시스템 구성요소

연료전지는 전해질 소재의 종류에 따라서도 분류가 가능하지만 보다 일반적으로는 그림 3과 같이 작동온도에 따라 고온형과 저온형으로 구분된다. PAFC, PEMFC 그리고, AFC는 상온에서부터 200℃이하에서 작동되어 저온형으로 분류되며, 시동시간이 짧고 부하변동이 뛰어나지만, 효율이 상대적으로 낮고 고가의 백금을 전극으로 사용하는 단점을 가지고 있는 반면 MCFC, SOFC 등 고온형은 600℃이상에서 작동되며 전극촉매로 니켈과 같은 일반 금속촉매를 사용하며, 발전효율이 높고, 고출력이지만 시동 시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다.

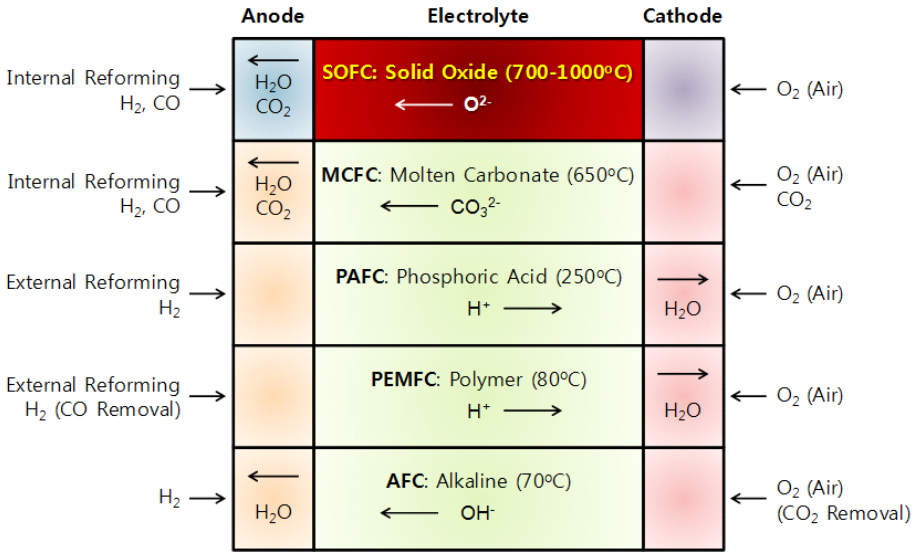


그림 3. 연료전지의 종류 (전해질 소재에 따른 분류)

연료전지를 구성하는 구성요소로는 전기화학 촉매, 전해질막, 전극 및 접합체, 분리판 등이 있는데 이러한 구성요소들의 대부분은 미국, 일본, 유럽 등의 기술선진국들이 일찍이 원천기술을 확보하고 산업화 단계에 들어가 자체 개발한 제품을 독자생산 및 판매하고 있다. 그러나 국내에서는 이러한 구성요소에 대한 산업기반이 취약한 상태로 대부분의 소재 및 부품을 수입에 의존하고 있는 실정이며, 최근 몇몇 기업들에서 관심을 갖고 개발에 참여하고 있는 수준이다. 따라서 취약한 국내 산업기반을 통해 연료전지 시스템을 상용화하기 위해서는 무엇 보다 구성요소 및 소재에 대한 원천기술 확보를 통해 핵심 기술의 해외 의존도를 감소시키고 국내 기술의 국제적 경쟁력을 제고시켜야 한다. 한편 연료전지는 다양한 구성 재료와 복잡한 시스템으로 구성되어 있어 종합기술적인 측면이 강하므로 다학제적인 연구인력 확보와 장기적인 연구개발 투자가 요구되는 분야별 특성을 가진다. 또한 연료전지기술은 다른 다양한 산업분야와의 연계성도 우수해 연료전지를 활용한 새로운 제품개발을 촉진할 수 있으며, 연료전지용 구성요소 자체로 또는 구성요소에 대한 제조기술은 다른 용도로도 확대적용이 용이해 산업적 잠재력이 매우 큰 기술적 특성을 가진다.

연료전지용 소재/부품 산업의 특징 및 국내 현황

연료전지 산업은 기술 집적도와 자본 집약도가 매우 높아 소수 기술 선진국의 글로벌 기업을 중심으로 기술개발 경쟁이 치열하고, 글로벌 시장 주도권 확보를 위하여 기술개발 정책에서 보급 정책에 이르는 각국의 정책 경쟁도 치열해 지는 추세이다. 연료전지 기술은 온실가스 저감을 위한 친환경 수소연료전지 자동차는 물론 화석연료로부터도 발전효율 35~60%, 종합효율 60~90%를 얻어 낼 수 있는 고효율 발전장치에도 적용 가능해 천연가스 시대는 물론 수소 시대까지 대응할 수 있는 현재와 미래 에너지 믹스의 핵심 산업이다. 또한 연료전지는 에너지 믹스 전체의 효율 향상은 물론 에너지 수요(스플리트) 대응성을 기반으로 재생 에너지 하이브리드 시스템과 고효율 건물에너지 시스템 시장에서 핵심 역할을 담당할 수 있을 뿐만 아니라 초자연적인 자연재해에서도 백업전원으로 신뢰성을 인정받음으로써 그리드 독립성을 가진 가장 신뢰성이 높고 장기적인 운전이 가능한 백업전원으로 시장에 진입하고 있다.

현재 연료전지는 핵심기술 개발과 규모의 경제 구현을 위한 지속적인 가격 저감 노력이 경주되고 있지만, 2020년경에 경쟁기술에 대한 가격 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상되며, 연료전지 시장은 다른 신재생 에너지 시장과 마찬가지로 각국의 보급 정책에 의한 보조금 지원 시장 또는 규제 시장을 통해 서플라이 체인과 산업 생태계를 구축하는 단계로 가격 경쟁력을 확보할 때까지는 각국의 보급 정책에 의하여 성장률과 산업 지속성이 좌우되는 산업적 특성을 가지고 있어 현재도 국제적인 인수와 합병을 통한 산업 재편이 활발한 산업이다. 연료전지산업 value chain은 크게 원재료, 소재, 부품, 완제품으로 구분될 수 있으며 가치사슬 상단은 고도의 원천기술이 요구되어 주로 글로벌 메이저 기업들이 포진하고 있고 부품시장의 경우는 기술진입 장벽이 높지 않고 큰 자본이 필요하지 않아 중소기업이 주로 진출하고 있다. 해외 선진기술국들의 경우 소재, 부품, 시스템, 유통 등의 Supply chain이 잘 형성되어 있으나, 국내는 관련 Supply chain 형성이 미숙하여 최근 기술종속에 대한 우려속에 부품 국산화, 시스템 설계·제작·운전기술 개발을 중심으로 투자 확대 중이다.

국내 연료전지 산업의 경우, 현재는 성장 초기 단계로 각 가치사슬마다 별도의 시장이 구성되어 있다고 판단하기 어렵지만 향후 기술력 및 정책적 지원에 힘입어 수요가 확대됨에 따라 전반적인 연료전지 시장이 성장할 뿐만 아니라 가치사슬 각각의 고유 시장이 형성될 것으로 전망된다. 현재 연료전지 산업은 건물용/분산발전용 그리고 자동차용 시스템 업체들을 중심으로 투자가 확대되고 있으며, 부품 및 소재를 위한 연구개발이 증가하고 있다. 구성요소/스택/모듈의 경우 국내 소수업체에서 제작이 가능하지만, 양산 경험 및 설비가 매우 부족한 실정이며 시스템/BOP 분야의 경우 시스템 통합 기술력은 보유하고 있지만 BOP 등 대부분 시스템부품은 외국제품 수입에 의존하고 있는 실정이다. 하지만 BOP 관련해 잠재력을 가진 다수의 국내업체가 존재하며, 이들의 관련 기술 및 생산능력은 높은 수준이다.

연료전지는 현재 초기시장 진입단계이지만, 그림 4에서 보듯이 2015년 전후로 본격적인 시장 활성화가 예상되며 세계시장은 2020년 22조원, 2025년 66조원 규모로 추정되고, 2010년까지 누적 75,000대 이상의 연료전지가 보급되었으며, 2010년 발전용(주택·건물용 포함), 휴대용 및 수송용 연료전지시스템 등 약 30,000대 보급(2011년 연료전지 기술·시장 전망, 후지경제) 완료되었다.

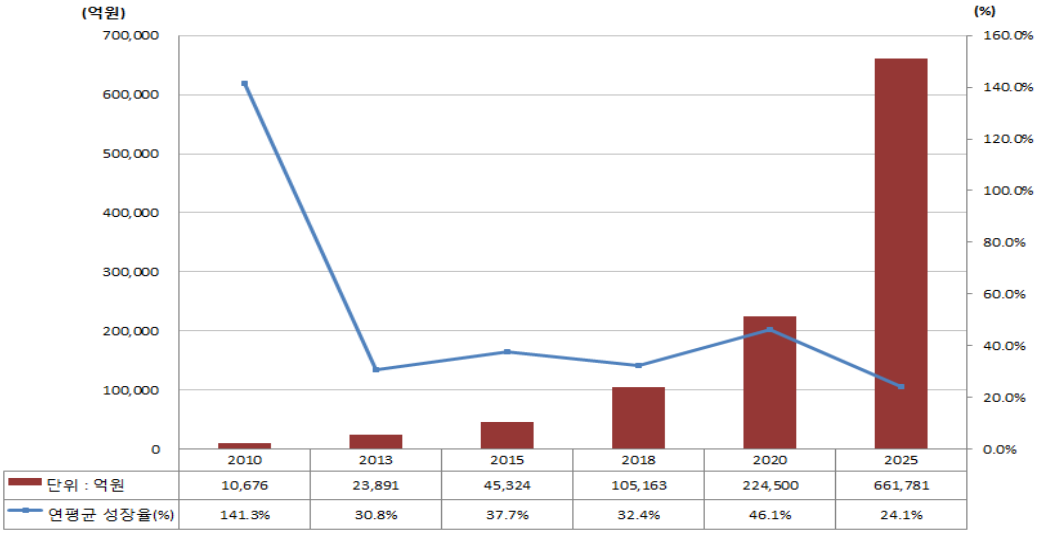


그림 4. 세계 연료전지 시장 규모 전망

국내 주택·건물용 연료전지 시장은 초기 형성 단계로 규모가 미미한 수준이지만, 정부 정책 및 기술개발에 따라 2015년 이후 시장규모가 확대될 것으로 예측되는데 현재 주택·건물용 연료전지 지원 사업 및 신재생에너지 시범보급 사업을 통해 일반 건물 및 시설물 등에 보급되어 설치·운전 중이다. 주택·건물용 연료전지의 경우 가정용 연료전지 모니터링 사업을 초석으로 주택·건물용 연료전지 지원 사업이 2010년부터 시작되었다. 현재 GS퓨얼셀, 퓨얼셀파워, 효성, 현대하이스코의 제품이 판매되어 운영 중이며 2012년 퓨얼셀파워, 삼천리, 해양도시가스 등 3개사가 참여전문기업으로 선정돼 퓨얼셀파워는 자사의 제품을, 삼천리와 해양도시가스는 GS퓨얼셀과 보급사업 협약을 맺고 설치하고 있으며 퓨얼셀파워는 2013년 기준 국내 최대 규모인 700여대의 1kW급 주택용 연료전지를 보급 완료하였다. 최근 공공건물 이용의무 확대, 신재생 건축물 인증제도 및 1만 m^2 이상 신축 건축물에 대한 RHO (신재생열에너지 공급 의무화 제도) 도입에 따라 신재생에너지 중 효율 및 이용률이 가장 높고, 양질의 열에너지를 공급할 수 있으며, 설치면적이 작은 연료전지시스템의 확대가 전망된다 (시장규모 60 MW/년). 현재 연료전지 설치 시 산업체 및 건물의 비상발전기를 대체하는 관련 규정 개정이 검토 중이다 (시장규모 75 MW/년).

국내 발전용 연료전지 시장은 발전차액지원제도를 통하여 확대되었으며 포스코에너지의 MCFC를 중심으로 2006년부터 2011년까지 전국적으로 52.2 MW의 설비가 설치·보급되었고 2012년부터 시행된 RPS 제도의 도입 이후 발전용 연료전지 시장은 더욱 빠르게 성장하여 누적 113 MW의 설비가의 설치·보급 및 운영 중이다. 특히 2012년 RPS 제도 도입으로 경기도 화성에 58MW 세계 최대의 연료전지 (MCFC) 발전단지 완공 및 가동 예정이며 이러한 RPS 제도로 연간 100 MW 규모 이상의 발전시장 창출이 예상된다. 특히 연료전지는 태양광, 풍력에 비해 소요부지 면적이 작고(연료전지 179, 태양광 19,800, 풍력 39,600m^2/MW), 이용률이 높으며 (연료전지 90, 태양광 15, 풍력 25%) 전력과 함께 열 생산도 가능하고, 단기간 내 설치가 가능하여 RPS 제도의 최적 대안으로 부상하고 있다. 정부는 2010년 12월 제5차 전력수급기본계획에서 2024년까지 연료전지 발전설비를 660 MW 도입을 반영하여 공고하였고 서울시는 2009년 「저탄소.녹색성장 마스터플랜」을 수립·발표하여 2030년까지 서울시 신·재생에너지의 47.6%

(700 MW규모)를 수소연료전지로 보급하고, 이중 600 MW를 도심형 및 분산발전용 연료전지로 설치할 계획이다.

연료전지 자동차 시장의 경우 2013년 현대자동차가 독자기술로 개발한 투싼ix 수소연료전지차를 세계 최초로 양산, 2013년 4월 덴마크 코펜하겐에 15대, 스웨덴 스코네 2대 등 유럽의 정부기관과 관공서 등을 중심으로 판매를 시작해 2015년까지 국내외에서 모두 1천대 규모의 수소연료전지차를 생산, 판매할 계획이다. 수소연료전지 자동차의 2015년 국내시장규모는 약 1천억원으로 세계시장(78,000억 원)의 약 1.2%에 해당할 것으로 예측되며 2020년에는 세계시장의 5.2%인 1.7조원으로 전망되는데 현재 수소연료전지 자동차의 보급을 가로막는 가장 큰 장애물은 수소 충전 인프라의 부족으로 현재 국내 수소 충전소는 전국에 총 13기뿐으로 미국, 독일, 일본에 비하면 매우 부족한 상태이다. 현재 세계 각국은 2015년 수소연료전지 자동차 상용화 개시를 목표로 시범사업용이 아닌 실차 적용을 위한 설계와 제작에 집중하고 있다. 독일과 일본은 관련업체와 정부간의 MOU 체결과 실행계획 수립을 통해 초기시장에 대응할 수소 인프라 구축을 위해 노력 중이다. 미국의 캘리포니아 주는 2012년 주내의 모든 수송용 유류업체는 수소연료전지 자동차의 상용화 시점에서 수소를 충전할 수 있도록 하는 조치를 입법화 하였다.

연료전지용 소재/부품 기술

연료전지용 제품-기술 개발의 특징

PEMFC 의 경우 소재 분야에서 탄소 복합체 분리판, 개스킷, 기체확산층(GDL) 생산 인프라가 구축되기 시작하였으나 촉매, 전극, MEA, 고분자 전해질막 산업은 아직 초기단계이다. 한편 스택 제조 및 시스템의 경우 관련 국내 업체에서 자체생산하고 있으며 기술 수준은 선진국 수준에 도달한 상태다.

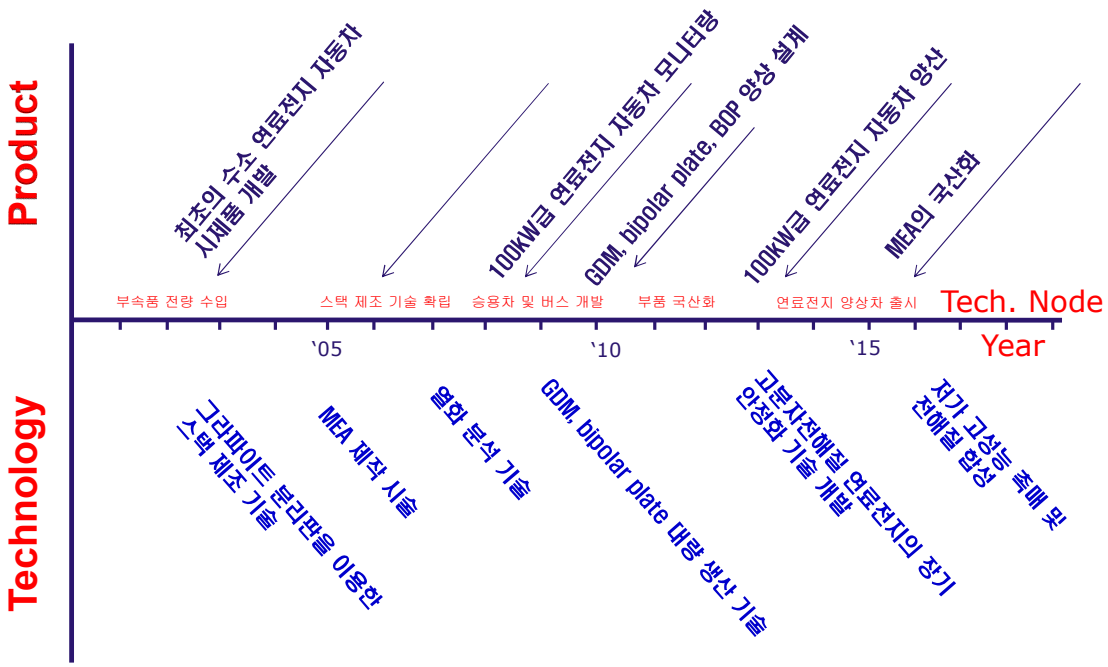


그림 5. PEMFC 제품-기술 분석표

MCFC 의 경우 소재 분야에서 스테인리스 분리판을 제외하고 대부분의 전극, 매트릭스 분말, 촉매를 수입하고 있으며 소재 분야의 R&D 강화 및 산업육성이 필요하며 타 발전기술과의 우위확보를 위한 고효율화, 다용도 활용기술, 고부가가치 시스템의 기술개발 및 인프라 확충이 필요한 상태이다.

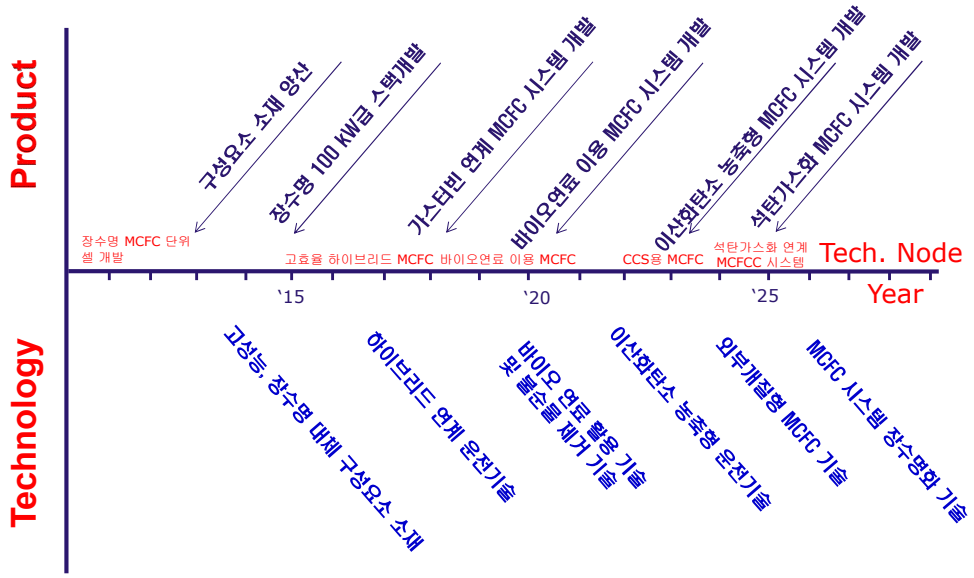


그림 6. MCFC 제품-기술 분석표

SOFC 는 연료전지 중 소재 분야에서 산업구조는 제일 취약한 편으로 소재, 스택, BOP, 시스템 업체의 R&D 및 설비투자가 보다 적극적으로 이루어 질 필요가 있다. 또한 셀 및 스택 생산규모가 지속적인 설비투자를 통해 시스템 개발을 지원할 수 있는 규모로 확보될 필요가 있다.

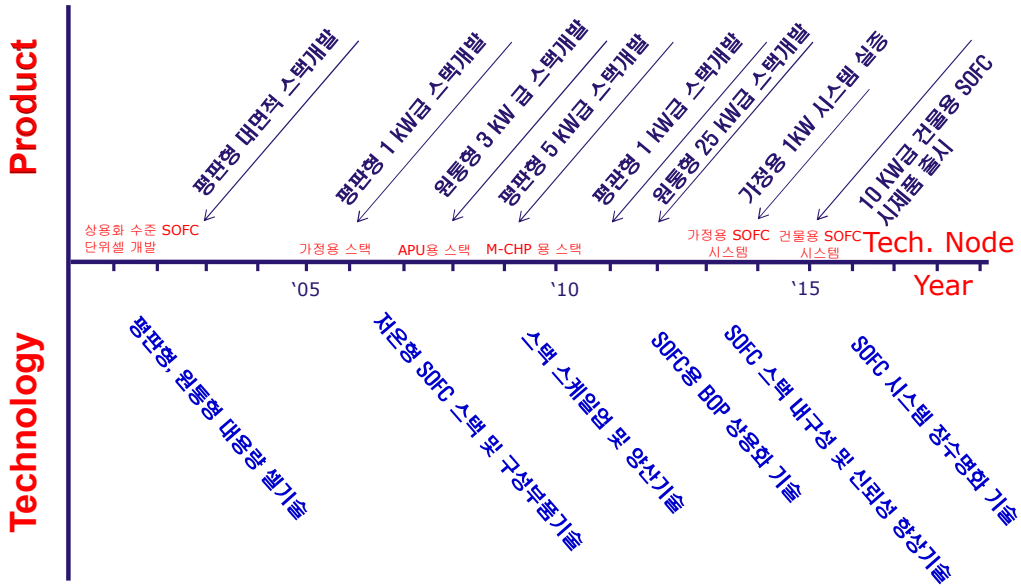


그림 7. SOFC 제품-기술 분석표

연료전지용 주요 소재/부품기술

PEMFC 용 소재/부품 기술

PEMFC 용 MEA는 그림 8과 같이 고분자전해질 막, 연료극과 공기극으로 이루어진 막-전극 접합체로 구성되며 고분자전해질연료전지의 성능을 결정짓는 가장 핵심적인 구성요소로 Gore, DuPont, 3M, Johnson-Matthey 등의 회사에서 제조하여 판매하고 있다. MEA 는 고분자전해질 막, 연료극과 공기극으로만 이루어진 3-layer 형태, 여기에 GDM 두 장이 더해진 상태인 형태를 가지며 이러한 5-layer에 gasket까지 덧붙여진 7-layer 형태로 제작된다.

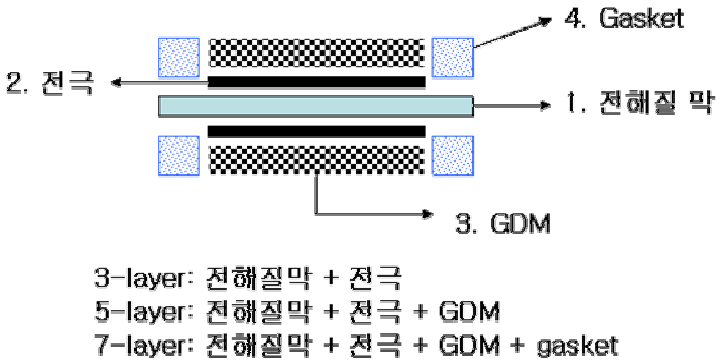


그림 8. PEMFC MEA의 구조

고성능 저가의 MEA를 제작하기 위해서는 전도성이 높은 전해질막과 성능이 우수한 촉매를 합성하는 연구가 주를 이루고 있지만, 이를 바탕으로 MEA의 전극 구성을 적절하게 이루어야 장기성능이 우수한 MEA를 제조할 수 있다. 특히 전극 내의 바인더의 조성 및 삼상 계면의 증대와 유지를 위한 새로운 연구가 필요로 하고 있다. 현재 국내에서 생산되는 GDM 및 bipolar plate의 경우는 순수 국산화에 거의 다다르고 있으며 BOP의 경우도 상당한 진척이 이루어져 앞으로 MEA의 국산화만 이루어진다면 연료전지 차량 분야에서 매우 독보적인 위치를 차지하리라고 예상된다.

MCFC 용 소재/부품 기술

MCFC 용 구성요소는 그림 9와 같이 용융탄산염 전해질을 포함하는 매트릭스와 그 양쪽에 합금형태의 anode, 산화물 형태의 cathode 로 구성되는데 현재 FCE 사(미국)를 필두로 국내의 포스코에너지가 주도적으로 시장개척을 진행 중이다.

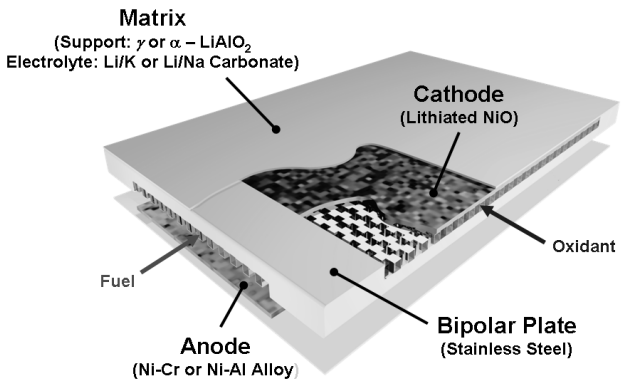


그림 9. MCFC 단위셀의 구조

최근 분산발전, 대형발전 뿐만 아니라 Back-up 파워, 선박용 보조전원 등 다양한 분야에서 많은 관심을 받고 있는 MCFC의 조기 상용화를 위한 많은 개발 투자가 이루어지고 있다. 소재 개발 관점에서 MCFC 기술은 산업적으로 접근이 용이한 핵심기술 범주로 구분하여 비금속계 소재 개발, 금속계 소재 개발, 그리고 내식처리 소재 개발로 세분할 수 있다. MCFC용 비금속계 분말 소재기술로는 전해질 매트릭스 구성을 위한 알파-리튬알루미네이트 분말 및 Li/K 공융 탄산염 분말 제조기술, 매트릭스 강화소재 및 전해질 피독 저항성이 강한 촉매 소재기술이 필요하다. MCFC용 금속계 분말 소재기술로는 anode 용 Ni 및 Ni-Al 합금분말 제조 기술, 그리고 기존소재를 대체할 새로운 전극소재 기술개발이 필요하다. MCFC 용 분리판 소재기술로는 분리판의 내식성 향상을 위한 처리기술로 분리판 wet-seal 부의 신뢰성 및 내식성 향상을 위한 코팅기술 개발이 필요하다.

SOFC 용 소재/부품 기술

여타 다른 연료전지 기술과 달리 SOFC 기술의 경우 design flexibility가 우수하여 그림 10과 같이 다양한 형태의 셀이 개발되고 있다. SOFC의 구성은 세라믹전해질, 연료극, 공기극, 밀봉재, 접속자, 코팅용소재, 단위셀에서의 기능층 및 완충층 소재로 이루어지는데, 최근 여러 나라들이 SOFC 기술개발에 뛰어들면서 기존 기술선진국들을 위주로 배타적인 기술개발 및 기술보안에 더욱 신경 쓰며 타국으로의 기술 이전을 기피하고 있어 자체 핵심소재 기술개발이 시급하다.

SOFC 용 소재/원재료 기술의 경우 국내 기술 및 기업이 거의 없어 대부분 수입에 의존하고 있는 상태이며 구성요소/부품 기술 또한 국내 소수업체에 의해 개발이 이루어지고는 있지만 양산 경험 및 설비가 매우 부족한 실정이다. 그러나 SOFC는 연료전지 발전기술 중 최고효율, 최장수명 및 기존 발전기술과 가격 경쟁 가능한 차세대 기술로서 지속적인 R&D 투자가 예상된다. 특히 다른 연료전지 기술들에 비해 선진국과의 기술격차가 크지 않아 체계적인 지원 및 개발 시 국제경쟁력을 확보 할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만, 세라믹 소재의 취약성과 제조공정의 비균일성으로 막대한 연구개발비가 소요되는 부담이 있어 정부주도하에 중장기 기술개발을 목표로 제조공정 최적화와 기반산업의 안정화 노력이 병행되어야 한다.

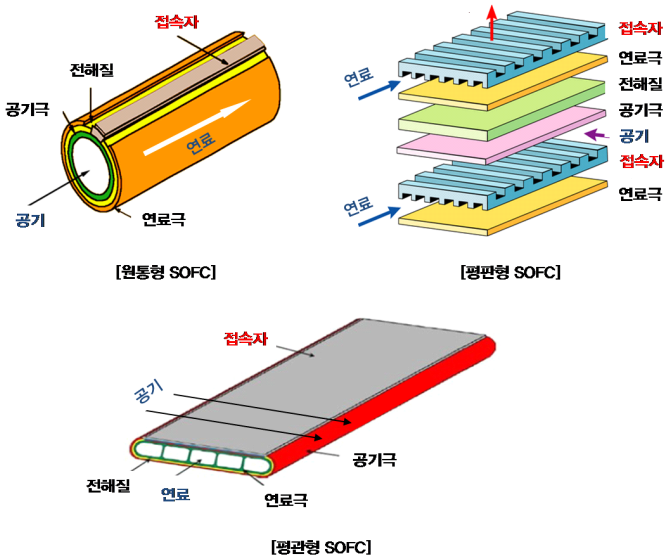


그림 10. SOFC 의 구조 및 구성성분

SOFC 용 전해질 소재기술의 경우 기존 지르코니아계 전해질 소재보다 우수한 이온전도 특성을 가지는 소재를 개발하고자 주로 불순물을 첨가함으로서 세리아계 전해질의 전자전도도를 억제하거나, 새로운 페롭스카이트계 이온전도성 소재를 발굴하는 시도, 서로 다른 전해질을 이중층으로 구성하여 각 전해질 소재가 가지는 단점을 보완하기 위한 연구개발이 진행되고 있다. SOFC 용 전극소재의 경우 전극성능향상을 위한 다공성 전극의 미세구조 제어 및 신물질 개발에 초점을 맞추어 진행되어 왔으나 전극반응의 명확한 메커니즘이 아직 규명되지 않았으며 제조공정에 있어서 기술적인 어려움 및 경제적인 제약으로 인하여 아직 완성된 기술은 존재하지 않는 상태이다. SOFC 용 분리판 소재의 경우 기존 400계열 스테인리스강에 표면코팅을 적용해 내산화 특성을 향상시켜 사용하는 경우가 주였으며 최근 보다 저가의 새로운 합금 개발을 목표로 한 연구가 진행 중이다.

연료전지용 소재/부품기술개발의 시사점

국내의 경우 미국 DOE 수소연료전지 프로그램과 달리 가시적 성과를 위해 시스템 위주로 기술개발이 추진되어 부품·소재 개발이 상대적으로 미흡한 상태였으나 최근에 Supply chain 확립을 위한 정부시책으로 부품·소재 기술 개발 비중이 높아지는 추세이다. 또한 시스템 위주의 기술개발이 진행되다 보니 지금까지는 주로 대기업 위주로 연구개발이 진행되었으며, 부품·소재의 경우도 시스템 제조업체를 중심으로 개발이 진행되어 현재 국내 기술 수준은 시스템 기술의 경우 60~90% 수준이나 부품소재 분야는 60% 이하인 수준에 머물고 있다.

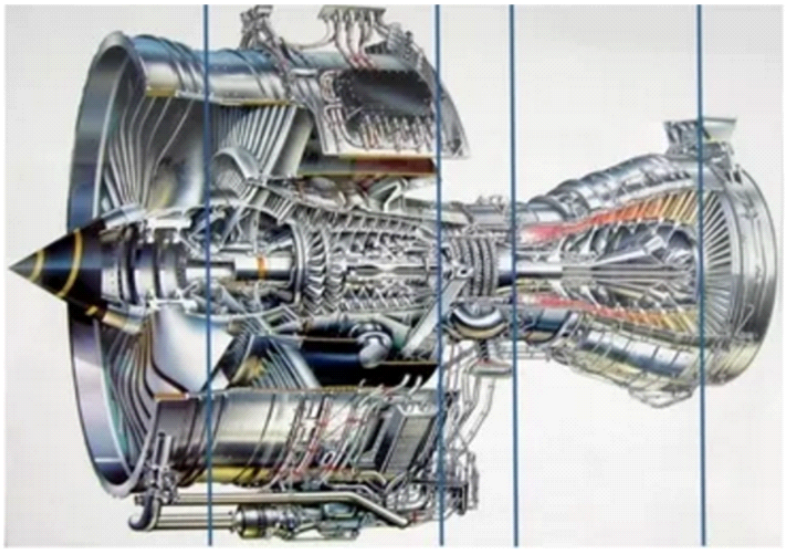
그러나 부품·소재 산업의 경쟁력 향상과 Supply Chain의 완성을 위해 단순한 부품의 시제품 개발 외에 생산기술개발에 대한 지원, 개별 부품개발에 대한 지원 대신 부품·소재 기업과 수요기업과의 협력사업 지원 등을 통한 부품개발 컨소시엄 구성유도, 국산화율이 높은 국내 시스템에 대한 의무설치 등의 정책으로 시장을 열어줌으로써 전문 중소기업의 컨소시엄 참여를 유도해야 한다. 또한 미래선도형 원천기술개발 강화 및 세계적인 경쟁력을 갖춘 핵심부품·소재 전문기업 육성을 위해서는 R&D 예산의 편중 방지 및 효율화를 위해 전문중소기업 위주의 상용화 기술개발 지원확대가 필요하다. 특히 부품 소재 국산화를 통한 가격저감과 내구성 향상을 위해 연료전지 핵심요소인 MEA, 촉매 등에 대한 투자 비중을 높일 필요가 있다.

현재까지 파악된 연료전지 분야별 상용화의 공통 이슈인 가격 저감 및 수명 문제해결을 위해선 열화분석 및 해석과 같은 기초 기반 기술개발은 물론 핵심 부품·소재의 양산화 및 내구성 향상 등을 위한 상용화 원천기술개발에 보다 적극적인 정부지원이 필요하다. 아울러 원천 핵심기술 확보를 통한 부품·소재 기술의 수출 산업화 추진을 위해 정부의 세제 지원, 육성 자금 지원, 기술이전, 설비 도입 시 혜택, 국제 공동 개발을 통한 경쟁력 조기 확보 지원 등의 적극적 지원이 필요하다. 또한 지속적인 신기술 개발투자를 통해 신규 시장을 창출 할 수 있도록 개발기술들에 대한 실증과 시범보급 등의 체계적인 전주기적 기술개발 및 보급 프로그램이 필요하다.

타이타늄

(Titanium)

	Ti-64	Ti-6246	Ti-834	Ni-based Superalloys	Titanium Aluminides
Operating Temperature [℃]	up to 230	up to 430	up to 730	1,2301~730	up to 730



타이타늄 소재/부품의 특징

타이타늄은 경량 (비중 4.5g/cm3), 고강도, 고내식성, 인체 친화성, 등의 우수한 성질을 가지며, 융점이 높고 (1,668℃), 저온에서부터 중고온 (600℃)에 이르기 까지 상대 구조재료에 비하여 비강도가 월등히 우수하여 다양한 산업용 소재로 활용되고 있다. 타이타늄은 전 온도구간에서 산소와의 친화력이 높고, 따라서 견고한 산화피막을 형성하여 내산화성이 우수하고, 염소 분위기 (해수, 등)에서 내식성이 백금과 유사한 정도로 극히 우수하여 부품의 수명이 길다. 또 타이타늄은 생체 친화적 금속으로 인체에 무해할 뿐만 아니라 비강도가 우수하고 골유착 성질이 우수하여 엘러지가 생기지 않고 신체 거부반응이 없어서 악세사리, 정형외과용 뼈 대체 생체소재, 임프란트 등의 생체의료용 소재로 사용량이 급증하고 있다.

타이타늄은 다른 금속에 비해 부가가치가 높고, 우리 산업 전반에 필수적으로 활용되는 핵심소재로 등장하였다. 공정 단계별(원료 → 제련 → 잉곳 → 판재) 부가가치 증가율이 철강의 42배, 알루미늄의 11배의 부가가치를 창출하고 있다. 조선·플랜트 등 주력산업 뿐 아니라 항공·의료 등 첨단산업의 필수소재로 사용되면서 산업발전을 견인할 차세대 소재로 부각되고 있다.

타이타니아 (TiO2)는 자외선 차단 성질이 우수하고, 빛과의 반응으로 향균성이 우수하고, 심미적이며, 인체에 무해하여 자외선 차단용 화장품, 백색안료, 항균 및 항취용 도포제, 식품, 등에 수요가 많다.

타이타늄이 산업적으로 중요함에도 불구하고, 우리나라는 관련기술이 미흡하여 대부분 해외수입에 의존하고 있다. 타이타늄은 기술이 개발된 지 60여년이 지났으나 소수 국가(Ti: 미국, 러시아, 일본, 중국, TiO2: 미국, 일본, 독일, 중국, 등 소수국가 독점체제)가 원천기술을 보유한 상태라 타 국가의 신규진출은 없는 상황이다. 국내는 주력산업 성장으로 타이타늄 수입이 크게 증가하고 있지만, 선도국의 타이타늄 무기화에 따른 국내산업의 해외종속이 보다 더 심화되고 있다. 각국은 핵심기술 개발, 주력산업과의 융·복합 등 타이타늄 산업육성에 국가적 역량을 집중하는 반면 우리는 관련노력이 전무한 상황이다. 국내 산업의 다변화로 타이타늄 수요가 증가함에 따라 원료에서 리사이크링에 이르는 전주기 생태계 구축과 자립화 필요성 증대되고 있다.

타이타늄 소재를 가공하여 다양한 산업분야에 활용이 높아짐에 따라 수요가 급증하고 있으나, 경기의 부침에 따라 가격과 소요량의 변동폭이 높은 소재/부품으로, 특히 미국의 항공산업이 수요량을 결정하는 선진국형 소재/부품 구조이다. 항공, 조선, 건축, 의료, 스포츠 등을 비롯한 다양한 산업용 중요 구조재로 사용량이 증가하면서, 소재가공기술이 더불어 발전하여 다양한 부가가치를 창출하는 소재/부품으로서 기초소재로서의 중요성이 더욱 강화되고 있다. 구조재료로서의 활용뿐만 아니라, 전자, 화학용 신소재 등으로 활용도가 높아짐에 따라 기존의 차세대 구조재료로서 뿐만 아니라 기능재료로서의 활용도 높아짐에 따라 신 산업분야에 수요을 창출하는 “꿈의 신소재”로 등장하였다.

타이타늄 산업의 특징 및 국내/국외 현황

원료

원광을 채굴·선광하는 단계로서 타이타늄의 순도에 따라 저순도광(함량 45~65%)과 고순도광(92~98%)으로 구분한다. 남아공, 호주 등이 세계적인 산지이며, 저순도광은 고순도광 대비 매장량은 20배, 가격은 1/4 수준으로 저렴하다. 2010년도 기준으로 보면 고순도광 매장량은 0.42억톤 정도로 가격은 1,600$/톤이고 저순도광은 6.5억톤으로 가격은 300$/톤이다.

저급광 대비 고급광은 전 세계 매장량이 적고 자원 고갈이 가속화되어 저급 저원가 일메나이트 광석을 활용하는 기술개발이 세계 자원의 효율적인 활용 차원에서도 필요하다. 국내에도 3백만톤(TiO2함량 기준)이 매장되어 있는 것으로 추정되며, 연천 ·하동에서 저순도광이 생산되어 국내 철강업체에 노벽보호제로 공급 중이다 참고로 국내 광석 생산량은 ('06) 180천톤 → ('08) 221천톤 → ('10) 132천톤 → ('12) 202천톤이다.

원료 → 원천소재

타이타늄 광석을 제련하여 고순도의 금속소재 또는 세라믹소재로 제조하는 단계를 구분해 본다. 미국, 러시아, 카자흐스탄, 우크라이나, 일본, 중국 등 5개국만이 금속소재 제조기술을 보유하고 있으며, 우리나라는 주로 카자흐스탄, 일본, 미국, 중국 등으로부터 타이타늄 소재를 수입하고 있다. 수입된 잉고트는 POSCO에서 압연하여 약 3,000톤/년 정도의 압연 판재를 가공하고 있다. 금속 타이타늄은 원료 Rutile(천연, 인조)을 염소화하여 $TiCl_4$를 제조하고, 이를 Mg로 환원하여 Ti 스폰지를 제조, 부산물인 $MgCl_2$를 전기분해하여 Mg와 Cl_2를 얻어 Mg는 환원공정, Cl_2는 염소화공정에서 사용한다. 금속 스펀지는 미국의 Timet, 러시아의 VSMPO-Avisma, 일본의 Osaka Titanium, Toho Titanium, 카자흐스탄의 UKTMP, 중국의 Zunyi Titanium, 우크라이나의 ZTMC 등이 생산을 독점하고 있다.

세라믹/화학소재는 Rutile과 Anatase로 구분하여 사용, Rutile은 자동차, 항공기 등 외장용 백색안료로, Anatase는 플라스틱, 제지 등 내장용 백색안료 및 촉매담체로 사용된다. Rutile은 염소법과 황산법으로 제조하는데 염소법은 순도가 높은 고급 안료를 만들 수 있어 미국(Dupont, Tronox, Huntsman), 독일(Kronos), 일본(Ishihara), 사우디(Cristal) 등 4개국만이 제조 기술을 보유하고 있으며 황산법은 중국에서 대부분 생산하는 방법이다. Anatase는 황산법으로 제조하며 전체 TiO2 시장의 10% 정도이고, 국내에서는 코스모화학이 생산(생산능력은 54,000톤/년으로 생산량의 75%를 해외에 수출, '13년에 황산법으로 rutile을 생산하기 위해 231억원 투자)하고 있다.

원천소재 → 가공부품

판, 봉 등의 금속 소재를 주조, 단조, 용접 등 뿌리기술을 통해 부품으로 가공하는 단계로 구분한다. Ti 스폰지를 용해 (VAR 등) 하여 잉고트를 제조하고 다양한 가공공정과 열-기계적 처리를 통해 제조되는 판재, 봉재 등의 중간재 제조한다. 국내 철강업체인 포스코는 '10년부터 카자흐스탄으로부터 잉곳을 수입, 압연을 거쳐 두산중공업에 해수담수화 설비용 판재를 공급하고 있다. 금속 잉곳 및 중간재는 미국의 ATI, Timet, RTI, 러시아의 VSMPO-Avisma, 일본의 Kobe, JFE, NSC, 중국의 Baoji, Fusun, 등이 생산한다.

완제품

고가의 타이타늄 합금을 전량 수입하여 타이타늄 부품을 조립·가공하여 항공, 플랜트, 자동차, 의료 등 최종 제품으로 완성하는 단계로 구분한다. 판재, 봉재 등의 중간재를 성형하여 열교환기, 화학용기, 항공우주용 부품 등에 사용되는 제품을 주조, 단조, 가공, 열처리, 표면처리 등 뿌리산업과 연결되어 생산·제조 (중간재 세계시장 153kt, 국내시장 12.9kt) 하고 있다. 풍산발리녹스, 신한금속, 이스트벨리, KE&P 등에서 국내 생산된 용접튜브는 주로 두산중공업에 납품하여 원자력 발전소요 관형 열교환기, 해외수출용 해수담수화 설비의 기초소재로 활용하고 있다. TSM Tech은 타이타늄 판재를 가공하여 화학용 대형 반응용기 등을 제조하며, KPCM은 석유화학 플랜트용 타이타늄 밸브 등을 생산하고 있다. 오스템임플란트, 메가젠 등은 치과용 Ti 임플란트 가공 생산하고 있으며, U&I, 코렌텍 등은 정형외과용 임플란트 등을 제조한다. 국외 완제품기업은 Timet, Airbus(유럽), Boeing(미), Rolls-Royce(영)은 항공, 국방, 발전산업 적용부품, Nobel Biocare(미), Straumann(유럽)은 의료산업 적용부품을 생산 중이다.

국내 완제품기업으로 TSM Tech(화학/압력용기), KPC(밸브) 등은 석유화학 플랜트 산업 적용부품, S&T중공업, 두원중공업, 삼성테크윈 등은 국방 적용부품, 현대중공업은 선박 및 해양산업 적용부품, 두산중공업은 발전, 담수화설비 등 적용부품, Kang&Park은 생체의료 적용부품을 생산·제조 중이다. 세계 최종제품 시장은 항공우주 59.2천톤, 일반산업 86.7천톤, 의료 및 기타산업 19.1천톤이며, 국내 국방산업 시장은 12천톤으로 추정한다.

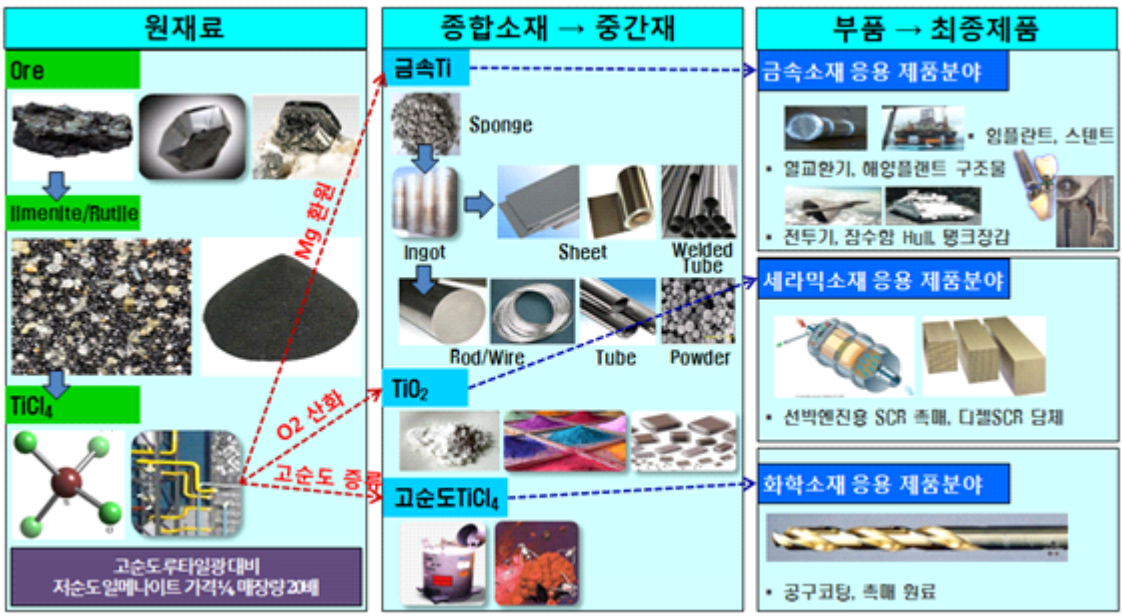


그림 1 타이타늄 소재/부품 산업 (원료→소재→부품·가공→완제품) 개괄

	원천소재	종합소재	중간재 (판재,봉재,튜브재 등)	부품 및 모듈	최종제품
세계시장		Ti 스폰지: 240kt('12) Ti 잉곳/슬래브:222kt('12)	중간재: 153kt('12)		항공우주 59.2kt 일반산업 86.7kt 의료 및 기타 19.1kt
국내시장	국내생산 無 수입사용량 5kt 이내	Ti 스펀지 수입량 >1kt 탈산제 3.5~4kt 잉곳 0.7kt Al발포제, 분말 0.13kt 주조기타 0.1~0.2kt	시장규모 12.9kt('12) - 수출 3.9kt('12) - 수입 8.6kt('12) - 생산 8.2kt('12)		국방 12kt (추정)
국외 주요 생산기업	(러)VSMPO-Avisma (일)Osaka Ti, Toho Ti (카자흐스탄) UKTMP (중)Zunvi, Pangang (미국)ATI, Timet (우크라이나) ZTMC	(러)VSMPO Avisma (미)ATI, RTI, Timet (일)Osaka Ti,Toho Ti, Kobe (중)Baoji (독)Outokumpu VDM (프)Aubert& Duval	(일)SMI,NSC (미)ATI, Timet,Alcoa Howmet (중)Baoji, Zunni (러)VSMPO-AVIMA (프)Aubert&Duval	주조품 : Topcast 단조품 : Wyman-Gordan, McwilliamsForge, Hacknet Ladish 파스너 : SPS Tech, Airdrome Prescision, AF Aerospace	항공,국방,발전 등 - Timet, Airbus, Boeing, Rolls Royce 의료 등 - Nobel Biocare, Straumann
국내 주요 생산기업		Cosmo Chemical (TiO2) 동부메탈(스폰지 계획중) 세종소재, MTJG, 고려용접봉(Ti분말) KPCM(잉곳) 한국진공야금(예정), 한스코(예정)	KPCM(빌렛) 태웅(단조) 용현BM(빌렛) 포스코(판재) 고려용접봉(선재) 풍산빌리녹스,외(파이프, 튜브, 봉재 등)	주조 : NIB, 천지산업, KPCM(밸브) 단조품 : KSP,삼미금속, 한일단조 (판재성형) 파스너 : 신도 하이텍, 태양금속, 신진	TSM Tech (화학/압력용기) S&T중공업(국방) 두원중공업(국방) 삼성테크윈(국방) 현대중공업 (선박/해양) 두산중공업(발전) Kang&Park (생체의료)

표 1. 타이타늄 소재/부품 산업동향 (원료→소재→부품·가공→완제품)

타이타늄 소재/부품 산업화를 위한 재료기술

제품-기술 개발의 특징

타이타늄은 알루미늄, 철, 마그네슘에 이어 4번째로 풍부한 금속으로 다른 금속에 비해 우수한 물성을 보유하고 있다. 우선 비강도가 철강 대비 2.5배에 달해 항공, 국방, 자동차 등 고강도와 경량성 등을 요구하는 첨단산업의 핵심소재로 사용된다. 금(Au) 수준의 초내식성을 갖지만 가격은 훨씬 저렴해서 발전, 해수담수화설비, 친환경선박 등에 없어서는 안 될 필수소재이다.

인체에 이식하더라도 알레르기나 거부반응이 없어 인공관절, 임플란트 등 의료분야에 사용할 수 있는 유일한 금속소재이다. 고기능성으로 자동차, ·가전 백색안료, 화장품·토너 첨가제, 배기가스 분해 촉매제 등 산업 전반에 광범위하게 사용되는 기반소재이다.

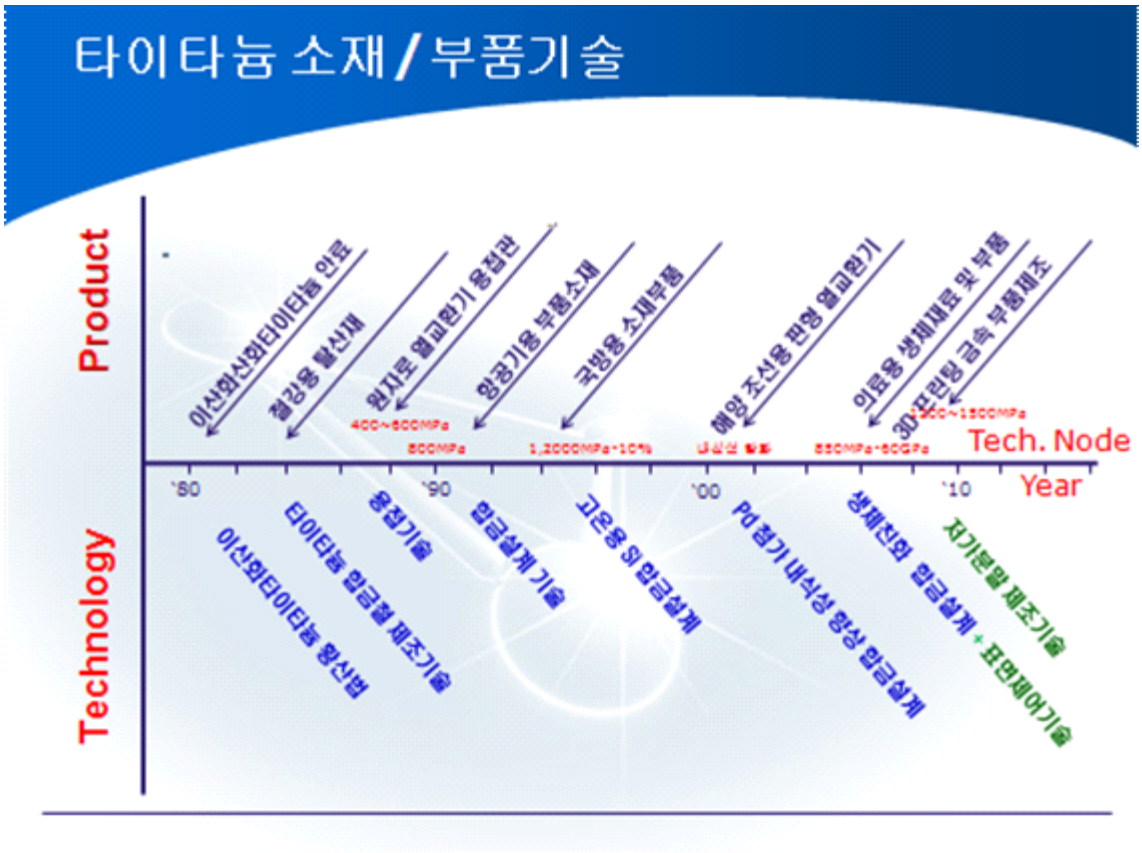


그림 2. 타이타늄 소재/부품 기술 발전경과

타이타늄 소재 및 부품 기술은 그림 2에 도시한 것과 같이 시대별로 발전되어 왔다.

1980년대 이전에는 국내의 철강산업에 약 4,000톤/년 정도가 탈산제로 소요되었는데 전량 수입에 의존하였다. 이산화타이타늄 분말을 제조하기 위한 원료는 호주, 인도, 말레이시아 등에서 약 10,000톤/년 정도를 수입하여 황산법으로 정제하고 미분화 하여 국내 및 해외시장에 공급하였다. 1990년대에는 하부공정에 사용되는 타이타늄 판재, 봉재, 각재, 등의 다양한 소재가 약 5,000톤/년 정도 수요가 있었는데 주로 열교환기, 반응용기, 원자력 발전소용 열교환기 용접관

등을 제조하는데 사용되었다. 2000년대에는 타이타늄의 국산화 시도가 이루어져서 POSCO, 풍산, 두산 등의 대기업을 중심으로 기초소재를 국산화하기 위한 설비투자와 생산기술에 대한 연구개발이 진행되었다. 2010년대에는 POSCO에서 판재를 생산하여 국내시장에 약 3,000톤/년 정도 공급하여 일부 소재의 국산화가 된셈이다. 그러나, 의료기기 시장의 소재의 ELI 급의 의료용 소재는 부가가치가 높음에도 불구하고 국내생산이 어려워서 아직까지도 해외에서 전량 수입하고 있는 실정이다.

그림 2에 도시한 것과 같이 시대별로 국내 산업의 발전과 함께 다양한 타이타늄 부품에 대한 요구가 변하였고 철강, 조선, 원자력, 국방, 의료, 3D 프린팅 등의 신산업에 소요되는 타이타늄 부품 제조기술이 개발되어 왔다. 이와 같은 시대적 배경 하에서 국산화가 이루어진 중요한 타이타늄 소재기술 4종(스폰지 제조기술, 판재 제조기술, 생체재료기술, 분말성형기술)에 대하여 기술적 중요성을 기술하고자 한다.

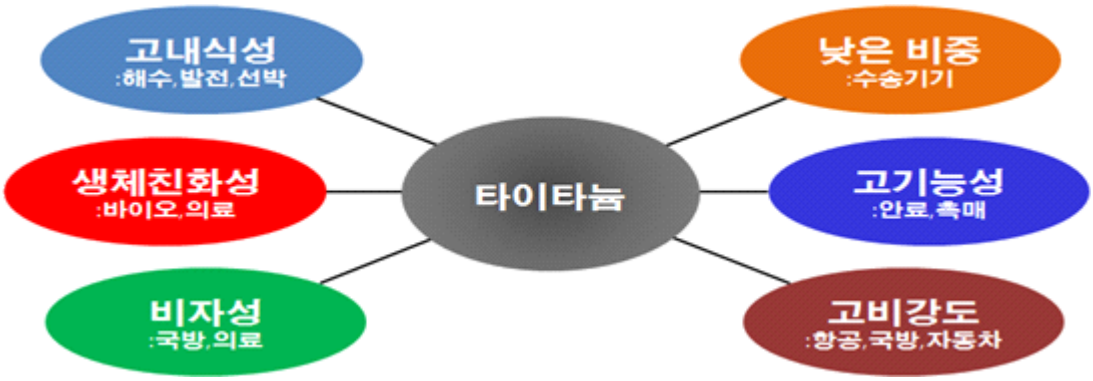


그림 3 타이타늄의 특성 및 용도

주요 소재기술

타이타늄 스폰지 원소재 제조기술

타이타늄 소재를 제조하기 위해서는 먼저 세라믹 원료 (TiO2 -> TiCl4)를 타이타늄 금속으로 환원시켜 스폰지를 제조하여야 한다. 금속 타이타늄으로 환원하는 방법에 따라 크게 Kroll 법, Hunter 법, 그리고 용융염전해법으로 나눌 수 있는데, 최근에는 거의 Kroll 법으로 (약 95%) 제조된다.

(1) Kroll 법: Kroll 법은 $TiCl_4$ 와 Mg를 반응시켜,

$TiCl_4(g) + 2Mg(\ell) = 2MgCl_2(\ell) + Ti(s)$ $\triangle H = -423kJ/mole$ (at 900℃)

스폰지 타이타늄을 제조한다. 이 반응은 불활성가스를 채운 스테인레스 반응용기 (리토르트)에 마그네슘 (융점 650℃)을 충진 한 후 상부에서부터 $TiCl_4$을 뿌려가면서 반응을 진행시킨다. 이 반응은 격렬한 발열과 함께 용융된 마그네슘 표면에서 반응하여 타이타늄 스폰지를 생성한다. 반응온도는 반응에 참가하는 마그네슘이나 염화마그네슘의 융점보다 높고 마그네슘의 비등점보다는 낮은 900℃ 정도로 적정량의 $TiCl_4$을 넣어가면서, 그리고 바람을 불어가면서 온도를 제어한다.

일반 금속의 정련과 달리 알곤(Ar) 불활성 분위기로 치환하여 밀폐된 스테인리스 용기 내에서

단계로 한 배치에 3톤의 스폰지를 생산하고 있다. 대부분의 $TiCl_4$은 반응용기 내에서 마그네슘 표면과 접촉으로 대부분 타이타늄으로 환원된다. 그러나 주입된 $TiCl_4$ 내에 존재하는 불순물은 환원반응 과정에서 저급의 염화물을 생성시켜 비중 차이에 의해 마그네슘 용탕 아래로 침전된다. 부차적으로 생성되는 염화마그네슘은 용융된 마그네슘보다 비중이 크기 때문에 반응용기의 아래쪽에 침적하게 되어 주기적으로 외부로 배출시켜 제거할 수 있다. 반응용기 상부에서 생성된 스폰지의 내부에는 반응이 완료되지 않은 마그네슘이 함유되어 있기 때문에 반응이 완료될 때까지 지속적으로 환원반응이 진행된다. 전체적인 환원반응은 투입되는 원료의 양에 따라 달라질 수도 있지만 대략 수일간 (10-15일)에 걸쳐서 일어난다.

이 환원반응에 의해 생성된 스폰지 타이타늄은 융점이 1,668℃로 반응용기의 작업온도보다 높기 때문에 반응용기 내부 측면으로부터 수지상의 다공질 형태로 (스폰지 타이타늄) 부착된다. 이 과정은 발열반응이 일어나므로 $TiCl_4$이 과잉 공급되면 과열되어 스폰지 타이타늄의 겉보기 밀도에 영향을 주고 반응용기와의 반응에 의하여 오염이 될 수 있으므로 주의해야 한다. 생성된 스폰지의 중앙부는 반응시간이 길어서 완전한 환원반응이 일어나게 됨으로 고순도 (99.6% 이상)의 제품이 생산된다. 이 부위의 스폰지는 향후에 가공공정을 거쳐 항공기부품을 제조하는 항공소재로 이용된다. 반면에 반응용기의 벽과 괴의 표면에서는 융점이 낮은 저급의 염화물이 부착되어 불순물이 다량 포함된 스폰지가 생산된다. 표면에 생성되는 순도가 낮은 이들 스폰지는 후에 적절한 크기의 덩어리로 파쇄한 다음 선별 분리하여 철강 조업에 필요한 저가의 탈산제로 이용된다.

염화마그네슘 ($MgCl_2$)은 전해방식에 의해 Mg으로 환원시켜 타이타늄 환원에 재사용된다. 반응에 참여하지 않은 여분의 마그네슘과 부산물로 생성된 $MgCl_2$은 진공분리법, 불활성 가스 ·스위핑법 (Sweeping법), 산세법에 의해 금속 마그네슘으로 재생되어 다음 반응에 재활용된다. 반응이 종료되면 반응용기를 빈 용기와 연결시킨 다음 반응물이 있는 용기를 약 1,000℃ 로 가열·가압하면서 수냉한다. 이때 스폰지에 포함되어 있는 미 반응된 Mg과 반응생성물인 $MgCl_2$은 기화되어 빈 용기의 내벽에 고체화되면서 석출된다. 이때 회수된 Mg은 절단하여 다음 반응에 다시 사용한다. 이 방법은 Mg을 재회수하여 사용할 수 있다는 점과 스폰지에서 이들 생성물을 분리하여 순도를 높일 수 있다는 장점이 있다.

이상과 같은 환원반응에서 부가적으로 생성되는 $MgCl_2$ (융점 714℃)은 용융염 전해법으로 전기분해하여 Mg와 Cl_2로 재생하여 다음 공정에 리사이클링 해 준다. 일반적으로 Mg은 용융상태로 스폰지 제조의 환원반응에, 그리고 Cl_2는 가스 상으로 $TiCl_4$의 제조에 사용된다. 스폰지 타이타늄을 생산하는데 필요로 하는 전력의 50% 정도가 $MgCl_2$을 분해하여 재사용하는 공정에 소요된다.

진공증류는 고온에서 Mg 및 $MgCl_2$의 증기압이 높은 것을 이용하여 잔류 반응물을 제거하기 위한 작업으로, 진공증류 온도는 1000℃, 압력은 10^{-5}~10^{-6}atm 정도에서 수행된다. 증발된 Mg 및 $MgCl_2$는 저온의 응축 용기 내에 모이게 되는데, 이러한 진공증류 및 응축 방식은 크게 2가지가 존재한다. 응축이 상부에서 이루어지는 I type은 구소련에서 개발되어 중국 및 CIS 국가에서 사용되고 있으며, 응축 용기가 환원 용기와 수평으로 연결되는 Inverted U type은 일본에서 개발되어 미국 및 일본에서 사용되고 있다.

이와 같은 방법으로 타이타늄 스폰지를 제조하는 방법이 국내 기업과 재료연구소의 연구과제로 진행되어, 국산화에 성공하여 국내 최초로 3톤 규모의 타이타늄 스폰지가 제조되었다. 이로서 년 5,000톤 정도 해외로부터 수입해 오던 타이타늄 스폰지를 국내생산하여 공급할 수 있게 되었다. 주로 철강 제조용 탈산재, 첨가재 등으로 사용되고 있다.

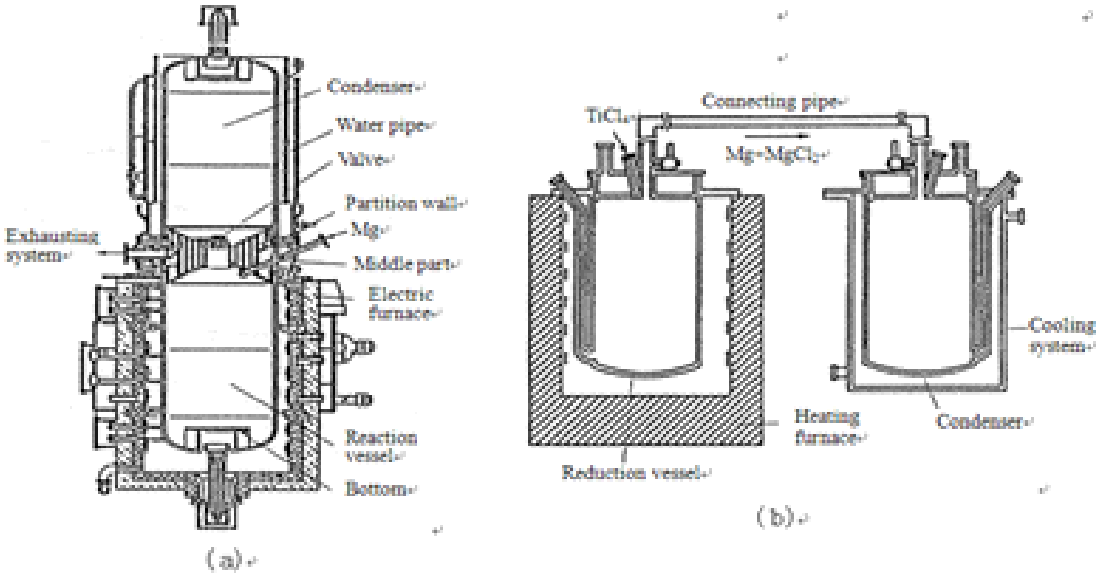


그림 4 환원/증류 방식의 종류, (a) I type, (b) Inverted U type

타이타늄 판재 제조기술

타이타늄 판재를 성형하기 위해서는 열간압연과 냉간압연을 거쳐서 각종 두께의 판재로 생산한다. 열간 압연에는 분괴 압연, 코일 압연, 후판 압연, 환봉 압연, 형재 압연, 그리고 리그 압연 등이 있다. 후판제조에 사용되는 슬래브는 타이타늄 잉고트의 단조, 분괴 압연, 또는 이들 공정 모두가 사용된다. 잉고트의 압연은 제철소의 분괴 압연 설비를 이용해서 철강 제품이 생산되지 않는 기간을 이용하여 실시한다. 열간 압연을 위하여 타이타늄 주괴 (잉고트)는 균열로에서 900~1,000℃로 가열해 준다. 타이타늄의 압연을 위한 가열 온도는 철강의 경우보다도 약 300℃ 낮으며, 이에 더하여 로 내의 온도를 보다 엄격히 관리해야 하므로 저연소 용량 버너를 따로 설치하여 운용한다. 가열 시간은 주괴의 직경에 따라 다르지만 대략 12~36시간 정도로 장시간이 소요된다.

순수 타이타늄 및 β 타이타늄 합금 박판을 제조하기 위해서는 열간 코일 압연을 이용한다. 타이타늄의 코일을 생산하는 데는 전통적으로 풀 오버식의 핸드 시트 밀 및 스케터 밀이 이용된다. 연속 워킹로에서 가열된 슬래브는 조 (粗) 압연기와 마무리 압연기로 압연한다. 조 (粗) 압연기는 일반적으로 가역식이 이용되며, 슬래브 두께부터 마무리 압연기에 공급되는 조 (粗) 바(bar)의 두께 (25~40mm)까지 두께를 낮추는 데는 반복적으로 5~7패스 압연을 수행한다. 마무리 압연기는 6~7대의 탠덤 압연기로 구성되며 조 (粗) 압연기에서 공급되는 소재를 두께 3~6mm의 스트립으로 한 번에 압연한다. 타이타늄의 압연 작업이 철강과 다른 점은 소재가 활성 금속이기 때문에 표면 산화가 일어날 수도 있고, 쉽게 흠이 생기기도 하고, 압연 중의 미끄러짐이 일어날 수 있기 때문에 주의가 필요하다.

마무리 압연을 통해 얻어지는 스트립은 권취기로 감아서 외경 1,000~2,000mm의 코일로 만든다. 권취 코일의 형상이 불량하면 표면이 흠집이 생길 수도 있기 때문에 주의해야 한다. 후판 압연기로 제조된 판 제품의 두께 하한치는 4~5mm이며, 후판 제조를 위한 압연은 4단 가역식 압연기에 의해 실시되는데 설비에 따라 조 (粗) 압연기와 마무리 압연기로 나누어 수행되기도

한다.

압연 후에는 핫 레벨러에 의해 판형상이 교정되며 열처리, 절단, 쇼트 블래스트 및 산세 등을 거쳐서 후판 제품이 된다. 용도에 따라서는 산세 후, 그라인더 연마 또는 기계 가공에 의해 마무리되기도 한다.

타이타늄 합금의 특수한 박판 제조 방법으로 후판 압연기를 이용한 팩 압연법이 있다. (일본의 KOBELCO 법). 이 방법은 주로 α형, $\alpha+\beta$형의 고강도 타이타늄 합금에 적용되며 타이타늄 합금 후판을 탄소강 등의 재료 사이에 봉입하여 열간 압연하는 가공법이다. 팩 압연법으로 가공함으로써 타이타늄의 표면산화를 방지하고, 아울러 가열로에서 잉고트가 압연되기 전까지의 시간 동안에 표면의 온도저하를 억제함으로써 균열을 방지할 수 있다. 팩 압연에서는 형상 및 후판 제어에 고도의 기술을 필요하다. 이는 압연 온도에서 표면의 팩 강재와 내부의 타이타늄의 가공 정도가 유사하여야 하고, 압연 후에 팩 재료를 박리하여야 하기 때문이다.

타이타늄의 냉간 압연 판재는 열간에서 압연된 소재 (Hot coil)를 이용하여 박판 판재 제조용 연속 압연기를 이용하여 제조된다. 연속 열간 압연기 (핫 스트립 밀)로 압연하여 코일 상태로 열연할 수 있는 소재는 순수 타이타늄, 내식성 α합금, β합금, 일부 $\alpha+\beta$합금 (Ti-3Al-2.5V) 등만이 가능하다. 열간 압연에서 제조된 코일은 일반적으로 소둔 열처리와 표면의 산화피막을 제거하는 작업 (Descaling)이 우선된다. 소둔 열처리는 열간에서 가공에 의해 변형된 조직으로부터 재결정시켜 강도를 최소한으로 낮추기 위하여 시행된다. 아울러 Descaling은 열연 공정에서 판재의 표면에 생성되는 스케일을 제거하는 동시에 산소가 침투되어 경화된 표면층을 제거하기 위하여 수행됨.

타이타늄의 냉간 압연은 강성이 큰 스테인레스 강이나 경질 강재을 박판 제조하는데 사용되는 20단 젠지미어 압연기를 이용한다. 그 외에도 극박판 또는 하이카본 강의 박판 제조에 이용되는 6단 가역식 콤비네이션 밀이 사용된다. 젠지미어 압연기는 워크롤 직경이 50~80mm로 작으며 변형 저항이 큰 재료에 강력한 압하를 가할 수 있는 구조로 되어 있다. 냉간 압연의 목적은 판재 두께의 치수 정밀도를 향상시키고, 균일하고 양호한 표면 정도를 가지면서 가공방향에 관계없이 균질한 기계적 성질을 얻기 위한 미세조직을 만들기 위함이다. 타이타늄을 냉간 압연시에 타이타늄의 높은 변형 저항과 롤에 달라 붙는 물성을 적절히 극복하는 기술이 핵심이다. 냉간 압연 중에 소재가 롤에 달라붙지 않게 하려면 압연 발열을 최소화 할 수 있는 방법을 택해야 하고, 이를 위해서는 회당 압하량을 줄이고, 적절한 압연유를 사용하여 최적의 윤활조건을 찾아야 한다.

냉간 압연된 재료는 가공 경화되어 단단해지면서 연신률이 저하되는데, 소둔 열처리를 함으로써 가공에 의해 변형된 결정에서 재결정을 일으켜 재료를 다시 연화시키고자 한다. 압연된 코일을 다시 냉간 압연하기 위해서 중간소둔 열처리를 하게 되는데, 코일 전체를 진공 또는 불활성 가스로 채워진 로에 넣어 적정 온도 (Annealing temperature)에서 가열하는 배치식과 말려져 있는 코일을 다시 풀면서 연속적으로 로 내에 장입하여 소둔 처리하는 연속식, 두 가지 방법이 사용된다. 연속소둔하는 경우에는 일반적으로 대기 중에서 열처리를 수행하기 때문에 소둔 후에 염욕에서 산세하거나 숏트로 때려서 표면의 산화피막을 제거하는 후처리를 병행한다. 소둔 열처리된 냉연코일은 최종적으로 스킨 패스 밀이라고 불리는 조질 압연기로 1~2%의 변형을 주어 판형상과 판 조도를 확보하게 된다.

브라이트(bright) 마무리는 스킨 패스 밀로 조질 압연된 그대로의 표면 마무리 상태로 금속 광택을 가지는 반면에 덜(dull) 마무리는 염욕 산세 및 쇼트 산세로 마무리한 표면으로 금속 광택이 적은 상태를 말하며 알루미나 블라스트 마무리 처리를 하거나 대기 중에서의 연속 소둔을

함으로써 결정립과 정밀도를 조정해 광택이 제어된 상태로 출시하게 된다,

타이타늄 박 (箔)은 부드러운 순수 타이타늄을 냉간 압연하는데 사용된 젠즈미어 압연기를 사용하여 제조한다. 시판되고 있는 타이타늄 박의 두께는 50㎛까지 생산이 가능하다.

POSCO에서는 해외에서 잉고트를 전량 수입하여 분괴압연을 한 다음, 위에 열거한 열간 및 냉간 가공을 거쳐 다양한 두께의 후판과 박판을 생산하는 기술을 국산화했다. POSCO의 판재 생산 능력은 년간 약 4,000톤이다. 그럼에도 한국의 판재 수요량이 많아서, 일본, 미국 등에서 수입하여 최종제품을 제조하는데 사용하고 있다.

생체의료용 타이타늄 소재기술

생체의료용 재료로 타이타늄이 다른 금속재료보다 우수한 이유는 내식성과 저탄성계수를 가지는 특성 때문이다. 타이타늄은 공기 중에 노출되는 순간 치밀한 산화피막이 형성되어 부동태를 형성하므로 내식성이 우수하다. 생체 내에 이물질이 삽입되면 생체섬유조직이 이물질을 덮어 싸서 생체조직을 유해물로부터 격리하는데, 타이타늄은 다른 금속소재에 비해 1/10 이하의 두께로 생성되므로 접합성이 좋으며, 또한 인체 내에서 전연 독성이 보고되지 않기 때문에 생체재료로 각광을 받고 있다.

타이타늄이 생체용 재료로 사용되었던 초기에는 순 타이타늄과 Ti-6Al-4V ELI (Extra Low Impurity)가 사용되었지만, Al이 인간에게 치매를 유발할 수 있다는 가능성과 V의 세포독성이 알려짐에 따라 새로운 합금이 개발되어 왔다. 이러한 생체용 신합금의 1세대로 Ti-6Al-7Nb와 Ti-5Al-2.5Fe가 대표적인 합금으로 등장하였다.

뼈 (10-20 GPa)와 인공관절 (100-110 GPa)의 큰 탄성계수 차이에 의하여 외부에서 가해진 힘이 뼈에까지 응력전달이 잘 이루어지지 못해서 발생하는 응력차폐 (stress shielding) 효과는 뼈사 스스로 하중지탱 능력을 낮추는 쪽으로 변화되어 골 세포의 치밀도가 떨어지고 골섬유의 밀도를 저하시켜 골다공증이나 골절로 이어진다. 결국엔 임플란트와 뼈의 결합을 느슨하게 만들어 인공관절의 수명을 단축시키는 결과를 초래한다. 따라서 무해한 합금을 사용하면서도 뼈에 근접하는 탄성계수를 가지는 저탄성 타이타늄 생체합금을 개발하였는데 이를 생체합금이라고 정의한다.

타이타늄 합금이 생체의료용으로 이용되는 분야로는 골절 등에 고정구로 사용하는 Fixture, Screw 등과 마모된 뼈를 대체하는 인공고관절, 인공슬관절과 같은 분야와 치아를 대체하는 임플란트, 악골을 교정하는데 사용되는 교정구, 협심증 등에 사용되는 심장 페이스 메이커, 의료용 수술기구, 휠체어와 같은 보조기구에 이르기까지, 그 사용 용도가 다양하고 사용량도 증가하고 있다. 생체의료용으로 사용되는 의료용 타이타늄 및 그 합금의 양은 대략 년간 1,000톤을 상회한다. 저탄성계수의 생체용 합금을 위해 사용되는 주요 원소로는 인체에 무해하다고 알려진 Nb, Ta, Zr, Mo, Sn 등을 적정량 합금화하여 개발하고 있다. 또한 이들 합금이 가져야 하는 물성으로 탄성계수, 피로특성, 내마모특성이 고려되어야 한다. 생체재료로 개발된 β-저탄성계수 합금의 적용이 높아질 전망이다.

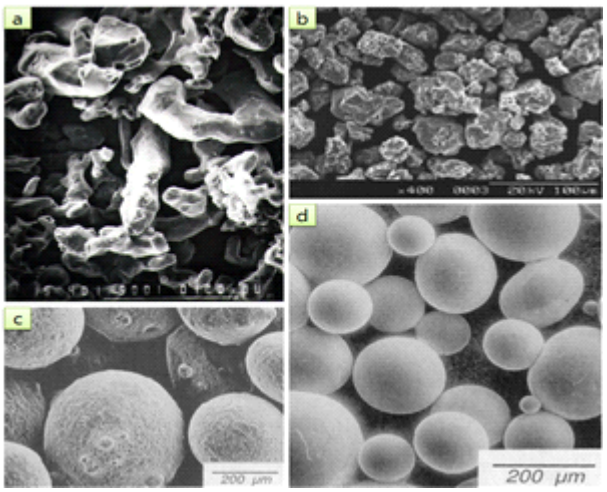
생체재료로 가장 각광을 받고 있는 타이타늄은 다양한 우수성에도 불구하고 생체활성이 낮기 때문에 골 생성반응이 느려 치유기간이 길고, 골세포와 임플란트와의 접착력이 약한 단점이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위한 방법으로 임플란트의 표면적을 넓이거나, 표면형상을 변화시키거나, 물리적 또는 화학적 표면처리를 시도한다. 개발된 생체재료를 치과용 또는 정형외과용 제품으로 사용하기 위해서는 엄격한 시험평가와 인증의 절차를 거쳐야 상품으로 사용 가능하다. 상품화를 위한 임플란트의 인증은 먼저 원소재 제조처 및 물성, 가공, 표면처리, 포장, 멸균

소독, 출고 등에 걸친 전 과정에 대한 평가와 인증에 관한 성적서가 첨부되고 관련기관의 공인 성적서가 발급되어야 한다. 이에 더하여 물리적 특성평가 (임플란트 제품의 형상 및 정밀도, 긁힘, 파손, 변형, 균열, 이물질 부착, 오염, 제품의 칫수, 등), 기계적 특성평가 (인장시험, 압축시험, 비틀림 강도시험, 풀림 토크시험, 피로시험, 등), 생물학적 특성평가 (급성 전신독성시험, 세포독성시험, 혈액내 반응시험, 엘러지 반응시험, 발열성시험, 골융합 이식시험, 등)의 인증시험을 관련기관의 시험방법에 의거 통과되어야 시판이 가능하다. 재료연구소에서 정부과제 (WPM 사업, 국책과제, 등)를 기업과 같이 수행하여 상품화를 달성하였고 현재는 대량 생산을 위한 생산기술이 진행되고 있다.

타이타늄 분말제조 신기술

타이타늄의 분말제조 및 성형기술은 오래 전부터 연구개발 되었으나, 최근 들어 3D 프린팅 소재로 각광을 받으면서 분말제조 신기술이 개발되었다. 저가의 분말 생산과 저가의 소결공정 기술에 더하여 타이타늄 분말 내에 유입되는 산소나 다른 원소들을 최소화하여 정적 물성은 물론 항공기 부품 등에 이용하기 위한 동적 물성의 향상을 위한 연구가 저가의 고품질 분말을 생산하는 기술과 병행하여 진행되었다.

전통적으로 타이타늄 분말을 제조하는 방법으로는 BE, HDH, GA, PREP 4가지 방법이 사용된다. (그림 5 참조)



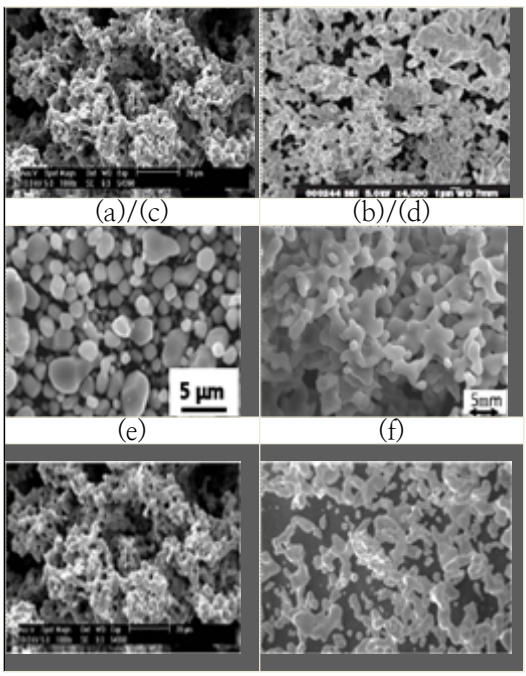


그림 5. (a) BE, (b) HDH, (c) GA, (d) PREP 방법으로 제조된 분말 형상
(a) Sponge Fine, (b) FFC, (c) OS, (d) EMR/MSE, (e) Armstrong, (f) TiRO법

-BE (Blended Elemental) 분말: Kroll법에 의해 제조된 대형 (3톤 이상)의 스폰지를 파쇄하는 과정에서 생성되는 200 μm 이하의 분말을 크기별로 분류하여 분말야금 공정을 위한 원료로 사용되는 저가의 분말이다. 가격이 저렴한 대신, 스폰지에 유입된 Mg이나 Cl_2, 또는 $MgCl_2$와 같은 불순물이 많이 남아 있고 (1,200 -1,500ppm), 유입된 산소 농도도 최대 4,000ppm까지 달하게 되어, 일반적인 소결 공정에 의해 100% TD (Theoretical Density)에 도달하지 못하고 많은 기공을 가지게 되며, 또한 불순물의 유입으로 동적물성이 낮아지는 단점이 있다.

-**수소화 탈수소법 (Hydride-Dehydride Processed) 분말**: 타이타늄에 수소를 흡입 (Hydride) 시켜 취화시킨 다음, 파쇄한 후, 탈수소 (Dehydride) 과정을 거쳐서, 다시 한번 파쇄한 다음, 체로 쳐서 크기별 분말을 제조한다. 조업 상 불순물 함량이 많은 단점이 있으나, 분말의 형상이 구형에 가깝기 때문에 소결에 의해 이론적 밀도에 근접할 수 있고, 비교적 저가이다.
-**GA (Gas Atomizing) 분말**: 진공용해하여, 하부로 자유낙하 시키면서 동시에 불활성 가스 (Ar 또는 He)를 강하게 불어주면 용융 분말이 비산하면서 냉각되어 고형화되는 Atomization 공정으로 분말을 제조하는 방법이다. 이 방법으로 제조된 분말은 거의 완전한 구형의 형상을 가지며, 입도가 낮은 구형분말 (40μm 이하)의 생산이 가능하기 때문에 MIM (Metal Injection Molding) 공정에 이용되고 용해과정에서 다양한 합금화가 가능하다. 분말 내의 산소 농도가 낮고 (800ppm 이내), 염화물의 잔류가 거의 없는 청정 분말을 얻을 수 있으나, 가격이 비싼 단점이 있다.
-**PREP (Plasma Rotated Electrode Process, 프라즈마 회전전극) 분말**: 일정한 크기의 봉재를 IM (Ingot Metallurgy) 방법으로 제조하여 전극으로 장착한 다음 일정한 속도로 회전시키면서, 이 전극과 다른 쪽의 전극 (W 전극)사이에 통전하여 프라즈마를 발생시켜 발생된 열로 인하여 타이타늄 전극 표면에서 용융된 금속이 비산하면서 진공 용기 중에서 냉각되어 구형의 분말을 제조하는 방법이다. MIM, Thermal spray 용 분말 등, 다양한 용도의 분말야금 소재로 사용된다.
-**FFC 분말**: 경제성이 높은 타이타늄 분말을 제조할 수 있는 가능성을 보여준 획기적인 공정방법으로, TIMET, Cabride University, QinetQ, Boeing, UC Berkeley 등이 미국의 DARPA 연구 프로젝트로 성공시킨 방법이다.
-**OS 법**: 일본 Kyoto대의 Suzuki와 Ono 교수가 개발한 칼슘 열환원법을 이용하여 TiO_2분말을 환원하여 타이타늄 금속을 얻는 방법으로 염화칼슘을 전기분해하여 금속 칼슘을 만들고, 염화칼슘욕 중에 TiO_2 분말을 상부로부터 공급하면 칼슘과 반응하여 열환원에 의해 연속적으로 인성 (ductile)이 있는 타이타늄 금속을 얻는 방법이다.
-**EMR/MSE법**: 일본 Tokyo대의 Okabe 교수가 개발한 금속 열환원 반응으로 환원제와 TiO_2가 반드시 물리적으로 접촉하지 않아도 환원반응이 일어나는 것을 이용하여 TiO_2 분말을 환원하여 타이타늄 금속을 얻는 방법이다.
-**Armstrong법**: 미국의 ITP (International Titanium Powder)사에서 개발한 방법으로 사염화타이타늄을 액체 나트륨으로 환원하여 타이타늄을 얻는 공정인 헌터 (Hunter)법을 개량하여 연속적인 공정으로 타이타늄 분말을 얻는 방법이다,
-**TiRO법**: 호주의 CSIRO에서 사염화타이타늄을 유동배소로에서 마그네슘으로 연속 환원시키는 공정으로, 유동환원로를 사용하여 염화마그네슘과 타이타늄이 분말 형태로 연속적으로 얻는 방법이다.
-**금속분말 사출성형 (Metal Injection Molding)**: 타이타늄 분말과 화학 바인더를 기계적으로 혼합하여 원료 (Slurry)를 만든 다음, 금속사출 성형기를 이용하여 금형에 충진하여 형상을 제조한 다음, 바인더가 녹을 수 있는 정도의 고온에서 바인더를 녹여 제거한 후, 고온에서 바인더를 완전히 태워서 제거한 후에 일반적인 소결온도와 진공 조건에서 소결하여 제품을 제조하는 성형방법이다.
-**적층 조형법 (Selective Laser Sintering)**: 소결 공정의 열원으로 레이저를 사용하여 제품을 성형하는 방법으로, 3차원 CAD를 이용하여 설계된 제품을 분말를 적층하면서 레이저로 소결을 하는 제조방법이다.

-**자기연소합성법** (Self-propagating High Temperature Synthesis): 분말들의 자발적인 발열반응에 의하여 발생된 열을 이용하여 소결하는 방법으로, 고온에서 착화시키면 두 금속원소의 자발적인 발열 반응에 의하여 반응이 지속적으로 일어나면서 발생되는 열로 소결한다.
-**방전 프라즈마 소결법** (Spark Plasma Sintering): 금형 내에 분말을 충진한 다음 가압하여 성형하고, 이후에 프라즈마를 발생할 정도의 큰 용량의 전류를 흘려서 소결하는 방법이다.

위와 같은 다양한 방법으로 국내에서 분말을 제조하여 각종 분말야금 방법을 거쳐 악세사리, 항공기 부품, 3D 프린팅 금속원료로 사용하는 시장이 형성되었다.

성공적 소재기술개발의 시사점

타이타늄 소재/부품의 성공사례를 타이타늄 스폰지 개발, 타이타늄 판재개발, 생체의료용 타이타늄 소재개발, 타이타늄 분말소재개발 등의 4개 분야로 구분하여 기술개발로부터 성공의 요인을 도출해 보면 장기간의 연구개발의 결과로 분석된다. 또한 기업가 정신 (Enterplanership)을 가지고, 국내에서 전연 개발되지 않은 새로운 소재 (타이타늄 스폰지, 생체재료, 판재)의 기술개발에 연구개발비를 투자하여 소재를 국산화함으로써 연관 산업분야에서 기업화가 이루어지게 되었다. 3D 프린팅 기술과 같은 시대 상황에 부합하는 새로운 산업이 부각됨에 따라, 금속부품의 성형이 필요해지고, 이에 소요되는 타이타늄 구형 분말소재가 필요해졌다. 그간의 연구개발로 생산이 가능한 다양한 분말소재가 국산화됨으로써, 신산업에 필요한 매출이 발생되고 있다.

최근 타이타늄 소재에 대한 수요가 증가하고 있으나, 기존의 공정으로는 에너지 다소비, 어려운 성형성 등으로 인하여 경제성을 확보하기가 어려운 상황이다. 저비용 고성능 합금 제조기술 및 스크랩 재활용 기술 확보를 통한 최종제품의 가격 경쟁력 확보 및 국부유출을 방지할 수 있도록 주력 산업 고부가 가치화를 위한 중간재 제조기술의 국산화가 필수적으로 요구된다. 국가적인 연구개발과제를 도출하여, 고도의 성형성을 바탕으로 타이타늄 중간재, 제품 제조 공정기술을 지원하여 제조비용을 40% 이상 낮추어 세계적인 경쟁력을 가지게 하는 국가적 연구개발 지원이 필요한 실정이다.

소재를 부품으로 가공하는 뿌리 산업 중 압출, 단조, 용접, 주조, 열처리 등의 기술개발을 국가적 차원에서 지원함으로써 가격이 낮고, 부가가치가 높은 타이타늄 제품화 기술 지원이 필요하다. 타이타늄 제품 제조 과정에서 부산물 발생을 최소화 하고, 고품질의 최종제품으로 제조 가공하는 타이타늄 관련 뿌리산업을 국가차원에서 육성하여야 한다. 최근 들어 컴퓨터 등을 이용한 ITC 산업을 적용하여 급속응고 제어기술, 가변 단면형상 튜브 정밀 제조기술, 접합부 형상 설계 기술, 고정밀 압축단조 시스템 설계 기술 등에 접목하여 원가절감과 정밀성형이 가능한 기술개발에 국가적 지원이 필요하다.

자원보유국의 자원무기화 대비 및 안정적 수급을 도모하기 위해 6개월분 정도를 비축할 필요가 있다. 또한 전략소재인 타이타늄 합금이 스크랩이 저가로 대외 유출되는 것을 방지하기 위해 체계적인 회수·재활용 시스템을 도입하는 등 국내 자원의 체계적인 관리 체계가 필요하다.

타이타늄 산업의 능력강화를 위해 산·학·연 간 타이타늄산업 동향, 기술개발 추세 등 최신정보를 공유하는 「타이타늄산업포럼」 구성이 필요하고 자원 정보, 소재·제품 가격 등에 대한 통계기반을 구축해야 한다. 업계 자율적으로 타이타늄 산업 발전을 도모하기 위해 소재기업, 수요기업 등으로 구성된 「타이타늄산업협회」 설립하고, 기술개발 및 성과확산, 산업동향정보 수집·제공, 정책 개발 등을 담당하는 「타이타늄산업연구협의체」를 운영할 필요가 있다. 다만 설립에 필요한

재원은 국내 소재·완제품 대기업 주도로 조달하는 방안을 제안한다.

세계 주요 생산국이 타이타늄을 무기화함에 따라 우리나라는 구매력을 가지고 있음에도 협상력이 약화되어 산업적 종속이 심화되고 있다. 따라서 국내에서 안정적으로 원료에서부터 최종제품에 이르는 전주기 산업의 연계 기술 확보가 필수적이다. 현재 하부공정 (가공, 응용, 재활용)은 타이타늄 산업이 잘 발달하고 있으나, 상부공정 (스폰지, 잉고트, 소재성형)은 연계가 되어 있지 않아서 산업의 종속이 심하다. 신공법을 연구 개발하여 국산화함으로써 타이타늄 원천소재 제조기술을 우선적으로 확보하고, Pilot 시범 운영을 거쳐 양산체제를 본격 가동하여야 한다. 선도국의 기술보호로 기술 이전이 불가능한 타이타늄 소재 제조기술을 우선 국산화할 필요가 있다. 상대적으로 기술 습득이 용이한 저순도광, 전/후처리 기술은 국제협력으로 추진하여 국산화 시기 단축 전략을 수립할 필요가 있다.

스테인리스 강판

(Stainless Steel)

스테인리스 강의 특징

스테인리스(STS)강이란 최소한 10.5~30%의 크롬을 함유하여 표면에 부동태를 갖는 연속적이고 안정한 크롬산화물 필름(30~50A두께)이 형성된 강을 말한다. 그림 1은 STS강과 일반강의 표면 Scale 구조를 나타내고 있다.

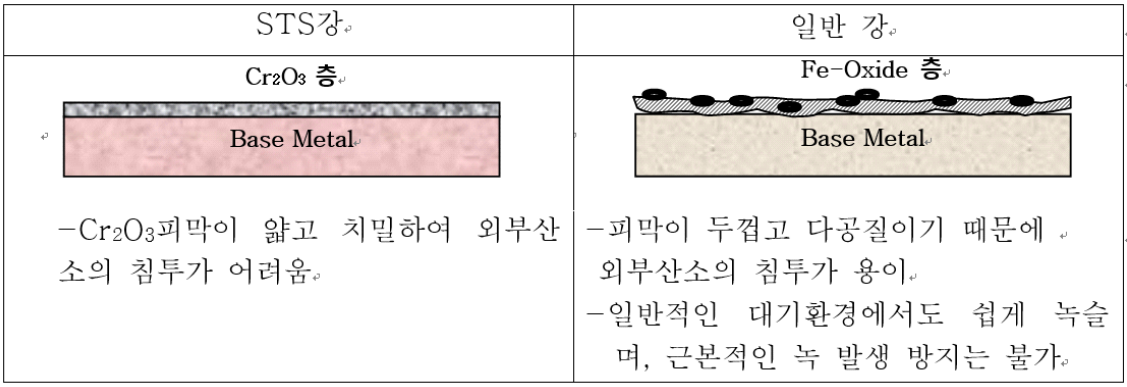


그림 1. STS강과 일반강의 표면 Scale 구조(모식도)

STS강의 용도는 강종에 따라 다르다. 오스테나이트계 강은 범용으로 다양한 산업용도로 쓰이는데 대표강종인 304강은 주로 주방용기, 건축용 등에 사용된다. 페라이트계 강 중 430강은 가전제품용으로 쓰이며 409L, 436L 강은 자동차 배기계 부품용으로 주로 사용된다. 마르테사이트계 대표강종인 420 STS강은 칼, 가위와 같은 절단 부품용으로 사용되며 탄소 함유량이 높아서 소입으로 강도가 향상된다. 이를 정리하면 표 1과 같다.

분 류	Fe-Cr-Ni(300)계	Fe-Cr(400)계	
조 직	Austenite	Ferrite	Martensite
대표강종	304 (18Cr-8Ni)	430 (17Cr-Low C)	420 (13Cr-High C)
내 식 성 성 형 성	우 수	양 호	열 위
제조난이도	보 통	높 음	보 통
주 용 도	범 용	가전제품, 배기계	칼, 가위

표 1. STS강의 분류와 특성

STS강은 최근에 산업의 고도화로 인하여 다양한 용도로 사용이 증가되어 년 수요 증가율이 일반강 1.2%, 알루미늄 1.2~2.3%에 비해 STS강은 5~6%로, 수요 증가율이 매우 높고 생산설비의 대형화 및 저원가 제조기술의 개발로 낮은 제조가격으로 수요 증가율을 유지하고 있다. STS 강의 제조단가는 원료비 비중이 탄소강에 비해 매우 높다. 특히 오스테나이트계 강종은 약 80% 이상으로 Ni 또는 스테인리스 스크랩 확보가 매우 중요하다. 물류비 비중이

낮아서 글로벌 대기업이 생산구조를 선점하고 대형화, 통합화하는 추세다.

다량의 크롬 첨가로 크롬 산화물(Cr-Oxide)을 표면에 형성시켜 매우 미려한 표면을 얻게 되어 의장성이 우수하고, 내식성이 탁월하며 사용 환경의 제약이 적고 위생적이며, 내산화성 등 내열특성도 매우 뛰어나다.

STS강은 에너지절감, 환경친화, 삶의 질 향상의 측면에서 적은 에너지 소모, 재활용성(Recyclability), 환경보호 및 청결성, 유지관리의 편의성, 의장성 등 사회적 요구를 수용하는 소재다. 소재개발의 방향은 고기능성, 저 Life cycle cost, 위생성, 경량화, 장수명화에 있다.

산업의 특징 및 관련 STS 제품군

자동차용 STS강

오스테나이트계 STS강은 Exhaust-manifold 부품으로 사용하기에는 고가이며, 열팽창 계수가 높아 불리하여 저가의 고성능 페라이트계 STS강을 채용한다. 엔진 배기가스 온도인 1000℃ 부근에서 사용 가능한 페라이트계 STS강을 개발하게 되었다.

배기가스 규제와 자동차 보증 년한 강화로 특히 Muffler, Front-Center-Tail Pipe, Exhaust Manifold 등 자동차 배기계용 STS강 채용이 증가했다. 그리고, 대기환경오염 저감을 위한 기존에 자동차 배기가스 정화촉매 담체용으로 쓰이는 ceramic보다 기공율이 높고 내열성과 강도가 우수한 금속형 배기 가스 정화촉매 담체용으로 20% Cr-5% Al 페라이트계 STS강이 개발되었다.

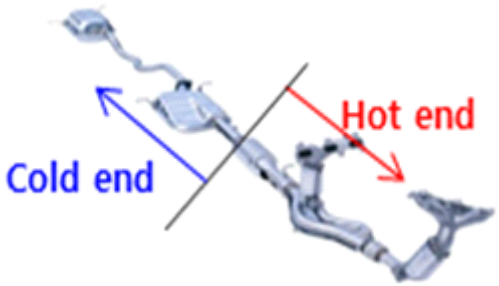


그림 2 자동차 배기계

그림 3 Exhaust manifold

한편, 자동차 연비 절감을 목적으로 차량 경량화를 위한 자동차의 구조용 재료를 경제적이고 고강도의 STS강재로 대체 개발하기 위하여 고가(高價)의 니켈(Ni) 대신 망간(Mn)과 질소(N)를 첨가한 Ni 절약형의 200계 STS강도 개발되고 있다.

건축용 초고강도 STS강

건축용에는 내식성이 우수한 STS강을 모재로 내구성을 강화하고, 외관미를 향상시키기 위해 표면에 도금, 도장처리한 STS강이 있다. 또, 건축물 중량을 감소하고 고가의 니켈(Ni)대신에 저가의 망간(Mn)과 질소(N)로 대체한 저가의 고강도 건축 구조용 STS강을 채용하는데 대표적인 사례로 그림 4의 인천공항 지붕이 있다.

주택용 온수기의 사용온도가 상승되고 대형화 됨에 따라 온수기의 응력 부식균열(Stress corrosion cracking)에 의한 파손사고가 증가하는 추세로서 이에 대응한 내공식성, 틈새부식저항성 및 내 SCC성이 우수한 온수기용 고 Si- STS강이 있다. 기타 엘리베이터에 많은 STS강이 사용 중이다.

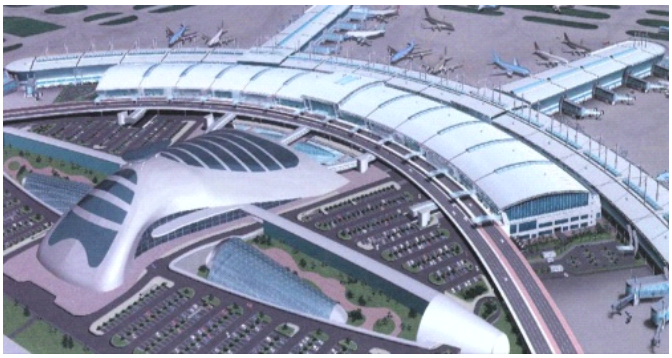


그림 4. 인천공항

그림 5. 엘리베이터

화학설비용 STS강

해수 열교환기와 탈황설비용 소재는 316 L STS강을 사용 할 경우 3년 이내 관통 발생되는 문제가 있어 내해수 부식 저항성이 우수한 고가의 수입 Super-Austenitic STS 소재를 적용하고 있어, 소재 국산화를 위한 고 내식Super Austenitic STS 소재 개발 필요이 필요하다. 산업 고도화에 따른 다양한 사용 환경과 고강도 구조재로서 적합한 고강도 Martensitic STS강재 개발과 수질 환경규제 대비한 해수 및 오폐수 처리 설비용 초내식 Austenitic 및 Duplex고합금 STS강 개발되고 있다.

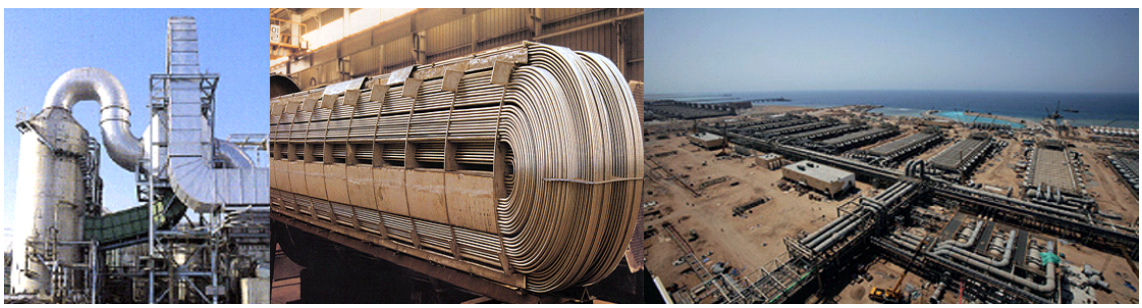


그림 6. 화학설비용 STS강재 사용사례 (탈황설비, 원전 복수기, 담수설비)

양식기, 가전기용 STS강

양식기 칼, 방직기 바늘, 가위 등으로 쓰이는 마르텐사이트계 STS강의 제품 가공성, 내식성, 강도를 개선하기 위한 N첨가 고강도 STS강이 개발되었다. 그리고, 페라이트계 STS강에 대하여 고순도강(극저 C,N) 제조기술 및 집합조직제어 열간 압연기술을 이용하여 성형성을 개선하고 고가의 오스테나이트계 STS를 대체하기 위한 양식기, 자동차, 건자재 등 용도의 페라이트계 강이 적용되고 있다.

그림 7. 마르텐사이트계 STS강 채용 사례.

한편, 정밀 스프링등에 사용되는 극박 STS강판, 위생, 주방용품에 사용되는 항균 STS강 등 고기능 STS강 등도 개발되고 있다.

주요제품과 개발기술

STS 제품군 포트 폴리오

STS 제품군은 자동차 산업에 소요되는 STS소재의 개발과 화학설비용 Super STS강의 소재의 개발로 크게 구별되며, 시장 규모나, 기술개발의 중요도로 보아, 자동차 구조용 고질소, 고망간강과 초고성형 Ferrite STS 강을 우선적으로 개발할 필요가 있다.

이 중에서 자동차 구조용 고질소, 고망간 STS강은 자동차의 경량화, 저원가화에 따른 수요의 증가가 예상되고, Ni자원의 부족에 대응하고 Ni정련시 발생하는 환경 유해물질을 줄일 수 있어, 향후 자동차 업계와 공동으로 구조부품 설계기술, Hydroforming 등 가공기술이 완성될 경우 시장의 확대가 용이할 것으로 전망되어, 경쟁국들의 적용에 앞서 기술의 확보가 요구된다. 자동차 연료탱크용 소재는 환경규제 강화로 표면처리강판 및 Plastic 소재에서 STS강으로 대체하려고 시도하고 있으며, 또한 고가인 Ni 원소를 함유하지 않고 가장 경제적으로 대체하기 위해서는 성형성과 내식성을 개선한 초고성형 Ferrite계 STS강의 기술 개발이 필요하다.

Super STS는 석유화학설비, 발전설비, 유정설비, 환경설비 등 각종 Plant산업에 필수 불가결한 핵심 전략 소재로 산업 Plant의 완전 국산화를 위하여 이의 제조기술 확보가 필요하다. 한편, 자동차의 배기가스 규제에 대응하기 위하여, 효율적인 배기 가스의 정화가 필요하며, 기존의 세라믹 재질에서 열충격성이 우수하고, 또한 열용량이 적은 페라이트 STS강 박막을 이용한 정화 촉매 converter의 소재 개발이 필요하다.

자동차 구조용 고질소 고망간 STS강

자동차 경량화 및 안전도 제고를 위한 철강소재로서 탁월한 내충돌 특성을 갖는 가공경화형 오스테나이트계 STS강을 개발하고, 현재 미국과 유럽 각국은 International Stainless Steel Forum (ISSF), Euro Inox 등 기관을 통한 스테인리스 업계 공동의 시장개발 활동이 진행 중이다.

300계(Cr-Ni계)에 비해 저가의 망간을 함유한 STS강으로 기존 201, 202 강에 비해 고N 함량으로 자동차 구조용의 고강도, 고연성을 구현하고, 인장강도 1000 MPa, 연신율 40% 이상의 고강도, 고성형 특성의 제품을 개발하고 동시에 이들에 대한 저원가 제조기술 개발을 위한 기술경쟁 심화 예상된다.

자동차 구조용 고질소 고망간강의 핵심기술은 Ni를 Mn과 N으로 대체하는합금성분 설계기술, 표면결함 방지기술, 구조부품설계, 제조 및 평가기술, 용접 및 가공기술로 분류됨. 이 중에서 Ni대체 합금성분 설계기술과 표면결함 방지기술의 소재 개발은 상당히 진행되어 실현 가능성이 높으며, 소재를 사용하는 자동차 업계에서 필요로 하는 구조부품설계, 제조 및 평가기술은 상업화하기 위한 핵심요소기술로서 중요성과 실현가능성이 매우 높아 자동차 업계 공동개발이 요구된다. 또한, 자동차 및 부품 Maker와 Hydro-forming과 이종 금속간의 가공 및 최적 Design 개발 기술이 요구되고 있다.

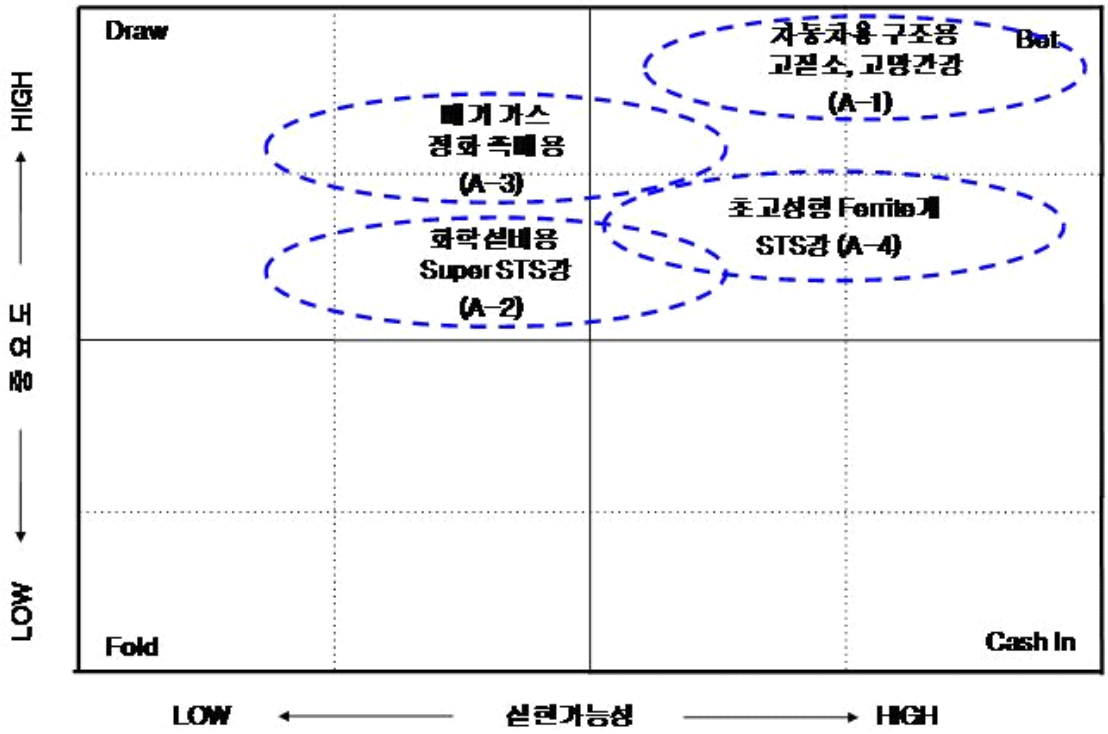


그림 8. 자동차 구조용 STS제품의 포트 폴리오

화학설비용 Super STS

Super STS강은 국내 발전소, 환경설비 등 plant 건설 및 보수용 자재로 사용되어 왔으나, 국내 생산 기술 미확보로 전량 수입으로 충당되고 있다. 그러나 Super STS강은 국내 생산량이 많지 않아 고가로 거래되고 있으며, 수요량은 소량이나, 생산할 수 있는 제철소가 제한적이며 기술 확보시 높은 부가가치를 가지며, 유사 강종 개발에 파급효과가 매우 클 것으로 예상된다.

Super 스테인리스 강은 금속 조직상의 분류로 Super-austenitic STS강, Super-duplex STS강 및 Super-martensitic STS강으로 구분 되며, Cr, Ni, Mo 합금성분의 합이 45% 이상으로 고합금 강인 Super-austenitic STS강은 응고 시 초정 오스테나이트 생성으로 편석이 심할 뿐 아니라 주편 표면 및 내부 크렉 발생 및 열간 압연 시 표면 크랙의 쉽게 발생하며, 이러한 강의 개발을 위해서는 탈황 및 질소 취련기술, 고청정강 제강기술, Near fully-austenitic 강의 연주화기술, 고부하강 열간압연기술 등 고도의 기술이 요구된다.

한편, 두 상이 혼재 되어 있는 Duplex 강은 제강 시에는 고 Cr 함유강의 탈탄기술, 열간

압연성 향상을 위한 탈황기술 그리고 연주, 압연 및 소둔 시 강의 특성을 저해하거나 표면의 크렉을 유발할 수 있는 시그마 상등 금속간 화합물 석출을 억제할 수 있는 냉각기술 또한 적정 상분율 및 내식성 확보를 위한 열처리 기술 등 각 공정별 특수한 요소기술의 확보가 필요하다.

Super-martensitic STS강은 저온인성을 확보하기 위하여 ferrite가 없고, C, N이 낮아 용접성 및 stress corrsion cracking 저항성을 개선하는 기술의 확보가 필요하고 유정환경에서의 소재의 거동을 밝혀 이에 대처가 가능토록 이에 대한 기초연구가 필요하다.

화학설비용 Super 스테인리스강의 핵심기술은 고합금강의 제조기술, 환경별 소재 합금 설계기술, Duplex 냉연재 폭수축 제어 소둔기술, Super martensite STS강 제조 기술 등으로 분류된다.

이와 같이 Super STS강의 국내수요는 매우 작지만 향후 증가될 전망이며 이들 핵심기술 중에서 국내에서 수요가 많고 실현 가능성이 높은 제조 핵심기술은 Duplex 냉연재의 폭수축 제어 고온소둔기술이다. 또한, 소재의 제조측면에서 고합금강의 제조기술, Super martensite STS강 제조기술은 필수적이며, 현재 수요는 적지만 향후 석유유정용 고내식 고강도 강관으로 다량 사용을 대비 유정 환경별 요구특성 조사연구와 이에 대한 환경별 소재 합금설계기술 등은 상대적으로 중요도는 낮으나, 소재의 개발과 적용을 위해서는 필수적인 기술이다.

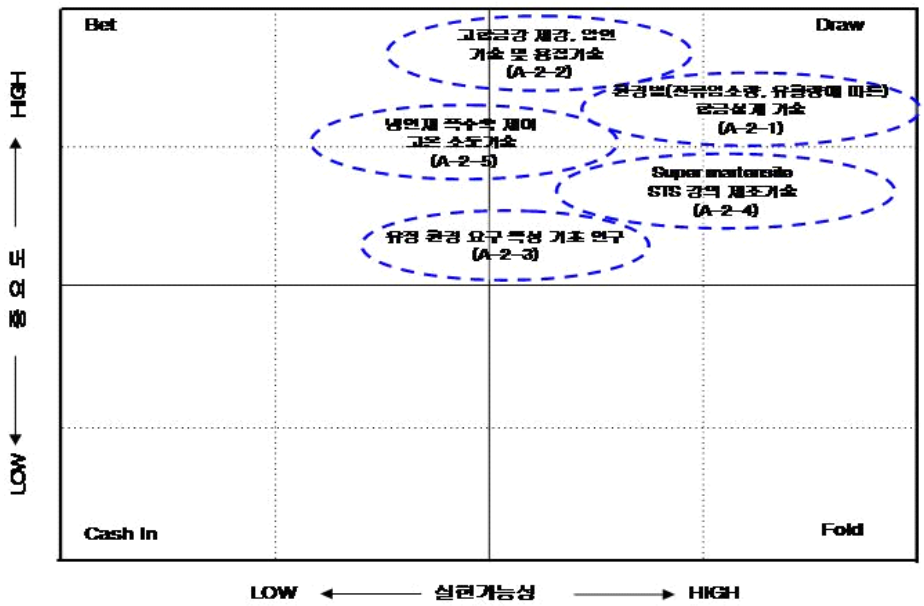


그림 9. 화학설비용 Super STS제품의 포트 폴리오

배기가스 정화촉매용 고 Al 첨가 STS강

배기가스 정화촉매용 고 Al 첨가 STS강은 세계에서 선진국 4~5개국에서만 생산이 가능한 소재이며, 우리나라에는 자동차 배기계 부품중 정화촉매용 converter를 metal subtrate 소재로 전환하는 경우 전량 수입이 불가피하여, 고 Al 첨가 STS강의 개발이 시급하다.

배기가스 정화촉매용 고 Al STS강의 핵심기술은 극저 C,N정련기술, 정련 연주공정의Al 및 La,Ce투입기술, 극박압연기술, 정화촉매 Converter 가공기술 등으로 분류된다.

국내 자동차 배기계 부품은 현재 ceramic으로 사용되고 있으나 환경 규제에 대한 자동차 업계의 채용 필요성이 높기 때문에 소재 국산화 가능성이 높으며 이를 위한 핵심기술은

소재개발과 가공기술 개발이 매우 중요하며 실현 가능성이 높다고 판단된다. 핵심기술 중에서 정련 연주공정에서의 Al, La 투입기술이 가장 중요하고 실현성이 높으며 소재 압연기술로서는 30μm의 극박 압연기술이 요구되고 있다. 한편, 소재가공 관점에서는 정화촉매 Converter가공 요소기술인 corrugate가공과 Soldering 접합기술 개발이 필요하다.

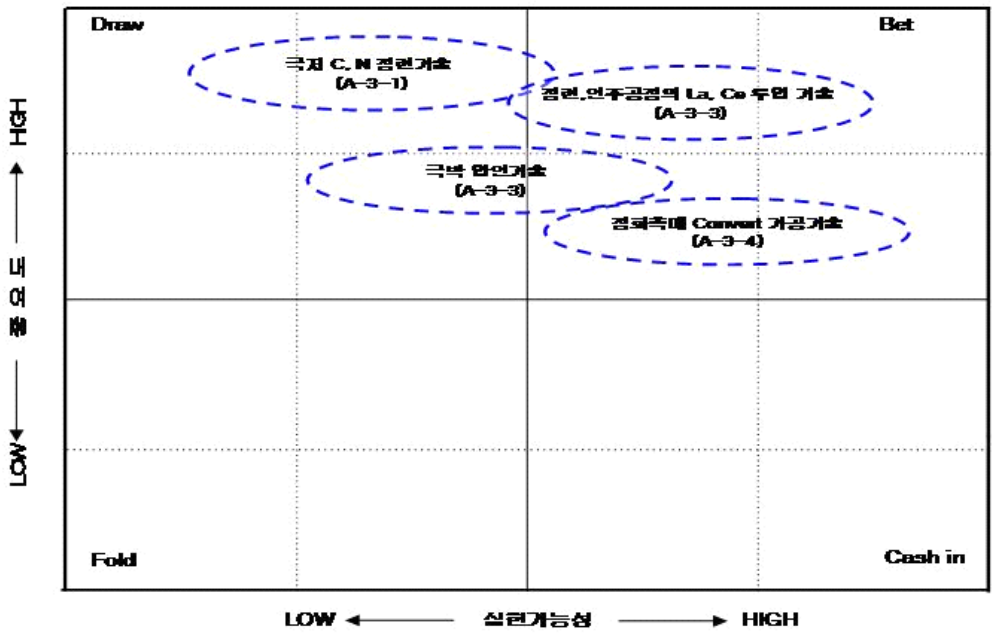


그림 10. 배기가스 정화용 STS제품의 포트 폴리오

초고성형 페라이트계 STS강

페라이트계의 저가 특성을 활용하고 C, N 등의 침입형 불순물원소의 저감과 Cr과 Mo 함량을 증가시켜 성형성과 내식성을 향상하여 고가인 300계 STS강을 대체하여 가전 제품 또는 자동차 배기계 등의 신규 수요 창출이 예상되고 있다.

자동차, 양식기용 초고성형 Ferrite계 STS강의 핵심기술은 고순도강 제조기술, 재결정 집합조직 제어기술, 고윤활 압연기술으로 분류된다. 이들 핵심기술 중에서 고순도 (C,N,O<100ppm)강 제조기술이 실현 가능성은 다소 어렵지만 매우 중요하고 개발이 필요하다. 또한 고성형성 (r값: 2.3이상)을 얻기 위해서는 재결정 집합조직 제어기술과 열간압연시 적용되는 고윤활 압연기술은 필수적인 핵심 요소기술이다.

고성형성 개선은 고윤활 압연과 재결정제어 소둔 및 압연기술과 밀접한 관계가 있으므로 이를 위해서는 열연 연연속압연을 통한 생산기술 개발이 필수적이다.

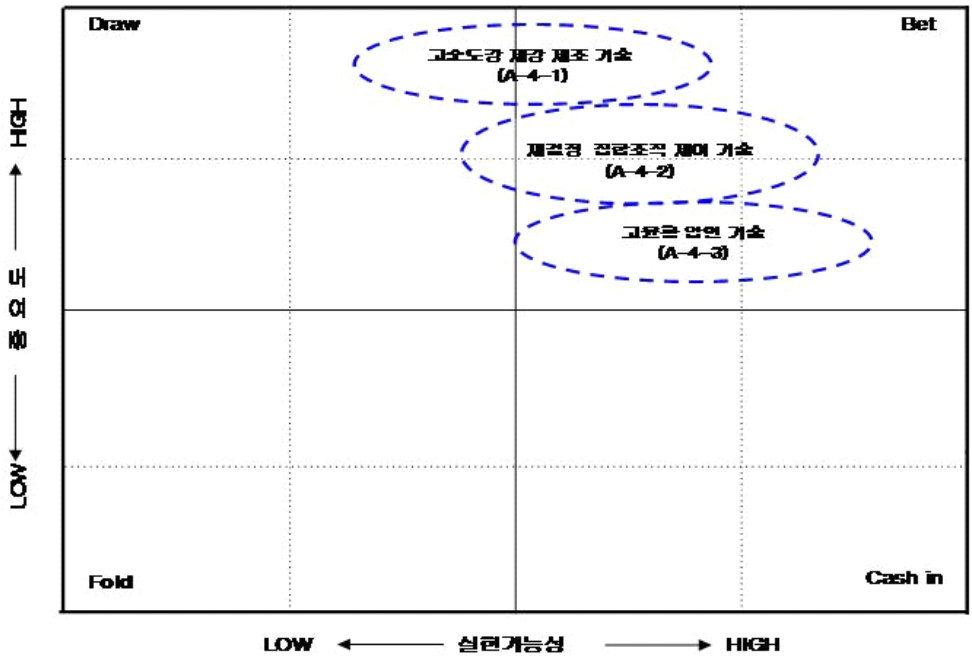


그림 11. 초고성형 페라이트 STS제품의 포트 폴리오

성공적 소재기술개발의 시사점

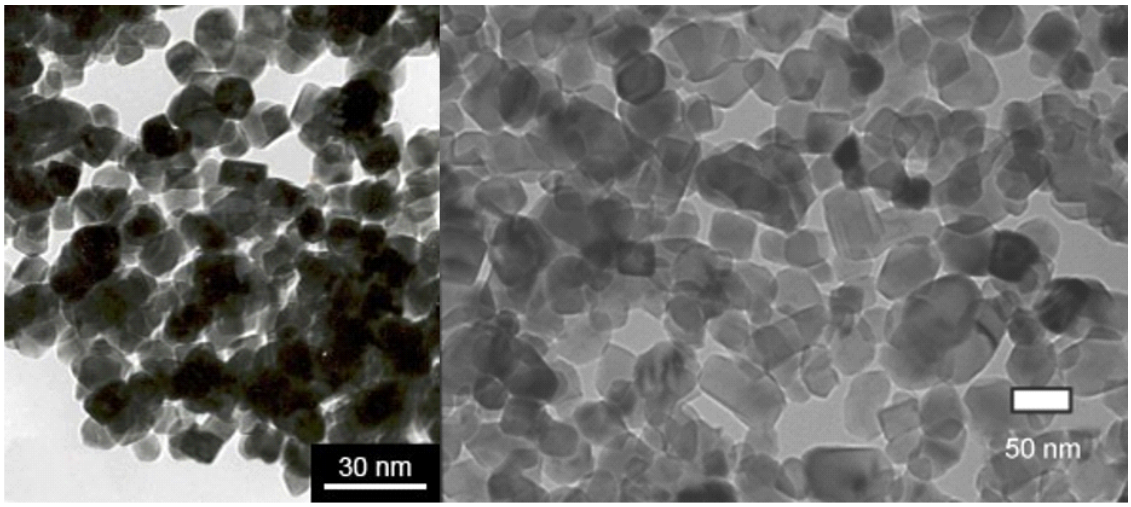
21세기가 되면서 지구 환경보호 측면에서 에너지와 자원 절약을 목적으로 한 제조기술과 재료개발이 철강회사에 상당한 관심이 되고 있다. 이러한 친환경 측면의 관점에서 자원을 절약할 수 있는 강종개발이 활발히 진행되고 있다.

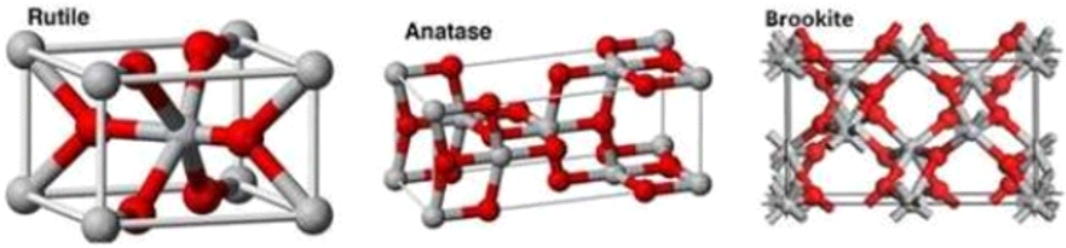
대표적인 자원 절약형 강종개발은 두 가지 형태가 있으며, 첫째가 고질소 오스테나이트 또는 Duplex STS강 개발이며 고가의 Ni를 절약하기 위한 소재개발로, 특히 Ni절약 STS강은 Ni제련 시 발생되는 Sox 가스와 Slag부산물을 줄일 수 있는 환경 친화형 재료이다. 여기에 속하는 대표적인 강종의 예로는 1)자동차 구조용 고질소 고망간 STS강과 2) 초고성형 페라이트계 STS강 등을 들 수 있다.

둘째는 가혹한 사용조건에 견딜 수 있도록 재료의 성능을 향상시키고 용도에 적합하도록 하는 고기능 STS강의 개발이다. 이러한 강종개발은 화학설비, 자동차 배기계, 조선 등 산업 용도별로 기능성을 특화 시킨 고기능 자원절약형의 초내식, 초내열강의 개발이다. 이에 대한 대표적인 강종의 예로는 화학설비용 Super STS강, 배기가스 정화촉매용 고Al-STS강 등이 있다. 한편, 자동차의 경량화, 장수명화 요구로 배기계, 차체 구조용, Fuel Tank용 등으로 자동차용 STS 강 사용이 확대되고 있고, 산업고도화로 환경 및 산업설비용으로 고내식 STS강재의 사용이 증대되고 있으며 STS 원료중에서 고가인 Ni 원소를 절약하기 위하여 자원절약형 STS 강재와 고기능 강재의 개발이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

철강 제조사에서는 제조 Cost 저감을 위하여 용선사용기술, 냉연연연속, Strip Casting등 공정생략 및 연연속화 설비투자와 관련 기술 개발이 추진되고 있다. 한편, 원활한 부품 기술개발 및 용도 확대를 위한 소재 제조업체와 소재 사용업체와의 공동 연구개발의 시스템 구축이 필요하다고 판단된다.

티타니아 나노분말
(Titania Nanopowder)





천의 얼굴을 가진 소재

신기술의 발달로 생활은 급격하게 개선되고 있지만 여전히 여러 가지 문제들이 해결을 기다리고 있다. 급격한 산업발전에 수반되는 환경오염의 문제, 에너지 자원의 부족 문제가 우리가 해결하여야할 대표적인 문제들이다. 이러한 문제들의 내용을 들여다보면 여러 요인들이 복잡하게 얽혀있어서 한 가지 대책으로 해결하기 대단히 어렵지만 다양한 대안들(주로 부분적인 해결책)이 제시될 수 있다. 특히 문제 해결의 열쇠를 쥐고 있는 소재의 경우 한 종류의 소재로는 다양한 문제 해결에 어려워서 다양한 새로운 소재의 개발을 필요로 한다. 예외적인 경우도 많은데 사회 인프라를 구성하는 철(강철), 구리 같은 전형적인 기반소재가 이에 속한다. 전통적인 기반소재는 아니지만 환경 · 에너지 · 식품 · 일상생활 등 여러 분야에 다양한 활용도를 갖는 이산화티타늄(TiO_2) 소재 역시 기반소재 혹은 원천소재에 속한다.

금속 티타늄의 산화물인 이산화티타늄(이하 티타니아)은 분말형태의 소재로 전형적인 전통소재에 해당한다. 티타니아는 1918년 4,000 톤이 생산된 이래 1996년 4,200,000 톤으로 생산량을 빠르게 늘려온 전통소재이다. 티타니아 소재 시장이 이렇게 빠르게 성장해 온 이유는 티타니아가 가진 화학적인 안정성, 생체 · 환경적인 무독성, 심미성(순백색)이 일상생활과 밀접한 부분이 많음에 기인한다. 티타니아 생산량의 추이가 개인소득(GDP)의 변동추이와 같은 경향을 보인다(그림1). 전통적인 티타니아의 약 60%는 흰색 페인트의 안료로 사용되고 20%는 플라스틱의 첨가제, 12%는 종이 제조를 위한 첨가제로 사용된다. 이는 티타니아가 갖는 순백색과 높은 빛 반사율을 외장재나 장식 등에 활용할 수 있기 때문이다. 공업적으로는 자동차용 엔진 배기가스 정화장치의 촉매 담체 등에 대량으로 사용되고 있으며 (적층) 세라믹 커패시터 소재인 티탄산바륨($BaTiO_3$)의 제조를 위한 원료로 대량 쓰이고 있다.

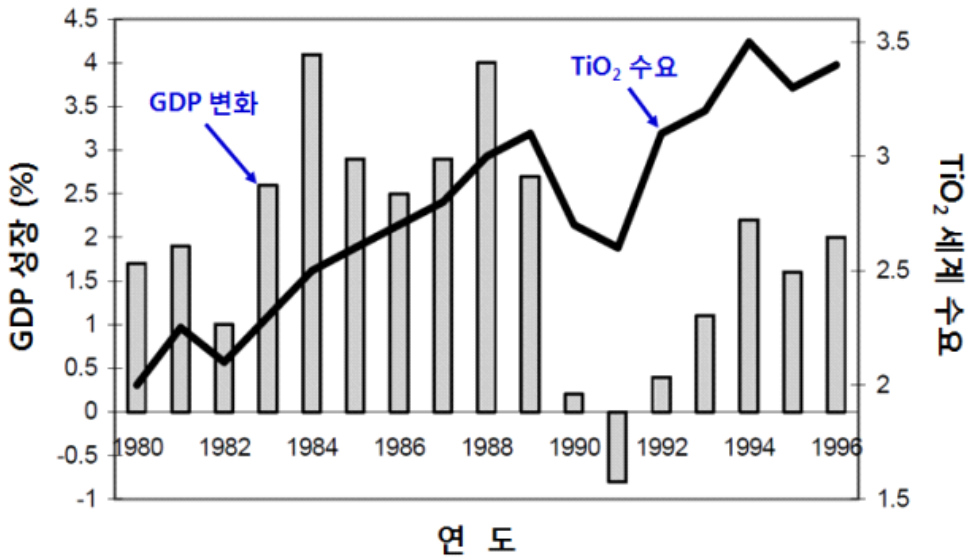


그림1. GDP 성장과 티타니아 수요와의 상관관계.

티타니아의 다양한 활용도가 더욱 확대된 것은 티타니아 분말의 크기가 나노크기 영역으로 작아지면서 새롭게 나타난 특이한 물성들 덕분이다. 티타니아는 자연계에서 주로 루틸(rutile) 또는 아나타제(anatase) 상으로 존재한다(간혹 브루카이트(Brookite) 상으로 존재). 전통적인 티타니아는 루틸 상이 많으며 아나타제 상을 가진 경우도 많다. 티타니아 분말의 크기가 수 십 나노미터 이하로 작아지면 아나타제 상이 지배적으로 나타난다. 이 아나타제 상은 굴절률이 루틸 상보다 작으며 루틸 상에서는 나타나지 않던 자외선을 흡수하는 성질, 광촉매성, 친수성 등 새로운 성질을 나타낸다. 티타니아 나노분말 소재의 이러한 특성은 자외선으로부터 보호를 필요로 하는 화장품, 의류, 포장재, 코팅제 등에 다양하게 쓰이며, 오염물의 분해 및 제거는 물론 염료감응 태양전지, 유기 태양전지 등의 핵심소재로 쓰인다. 따라서 티타니아 나노분말 소재는 환경 및 에너지 분야에의 다양한 응용에 필요한 핵심소재라고 할 수 있다. 향후 티타니아 분말소재의 시장은 나노분말의 사용 확대로 더욱 성장이 빨라지고 일부는 나노분말로 대체될 전망이다.

나노크기가 가져다 준 선물

티타니아 소재는 공업적인 생산을 시작한 지 거의 100 년이 지난 전형적인 범용 소재라고 할 수 있다. 산업적으로 기술이 매우 성숙되어 있을 뿐만 아니라 시장(용도) 또한 안정적으로 성장하고 있다. 고품위 원광석(ilmenite)을 생산하는 국가들로부터 세계적인 티타니아 소재의 생산업체, 활용업체에 이르기까지 가치 사슬이 잘 정립되어 있는 상태이다. 그럼에도 불구하고 1980년대 이후 티타니아 소재가 다시 큰 각광을 받고 있는 이유는 티타니아 소재의 다른 가능성 때문이다. 미크론 크기의 기존 티타니아 분말과는 달리 아나타제 형을 갖는 티타니아 나노분말이 이제까지와는 다른 유익한 기능들을 나타내고 있다. 산화환원을 원활하게 하는 촉매담체기능이나 광촉매 기능, 자외선 흡수/차단 기능, 자기정화 기능, 결로방지(초친수성) 기능 등이 아나타제형 티타니아 나노분말에서 나타나는 새로운 기능이다. 따라서 새롭게 주목받고 있는 티타니아 나노분말을 중심으로 형성되고 있는 새로운 가치 사슬에 주목할 필요가 있다.

그림2는 가치 사슬을 지원 활동과 함께 나타낸 그림이다. 티타니아 나노분말의 가치 사슬은 원재료(분말)의 합성(제조)→중간재(분말입자의 분산)→최종제품(코팅, 성형체(담체), 멤브레인, 박막 등)→산업적 활용으로 이어진다. 이 가치 사슬이 원활히 이어지기 위해서는 경제성을 갖춘 티타니아 나노분말의 합성 기술, 티타니아 나노분말을 용도에 맞게 적용할 수 있도록 중간재를 제조하는 공정(분산, 성형, 코팅, 소결) 기술이 필요하다. 티타니아 나노분말의 특성이나 기능성을 분석하고 표준화된 자료를 제공할 수 있는 기반이 필요하다. 광촉매 기능에 대하여 논란이 있었던 것도 이러한 기반이 미흡하여 제품 성능에 대한 객관적인 자료를 제공할 수 없었기 때문이라고 할 수 있다. 또한 최근 나노소재가 인체 및 환경에 미칠 수 있는 유해성에 대한 우려가 증가하고 있기 때문에 티타니아 나노분말의 위해성에 관한 과학적인 자료와 관리를 위한 기준이 필요하며 국제적으로 논의가 활발하다. 티타니아 나노분말은 인체나 환경에 안전한 것으로 알려져 있다. 노출 정도나 노출 환경에 따라 달라질 수 있기 때문에 안전 확보에 필요한 기준의 확립이 필요하다. 그림 1에서 알 수 있는 것처럼 생활수준이 높아질수록 티타니아의 사용량이

늘어나기 때문에 티타니아 소재, 특히 티타니아 나노분말 소재의 사용량이 많아지면 안전성에 대한 경각심이 높아질 것이라는 것을 인식하고 대응방안을 찾을 필요가 있다.

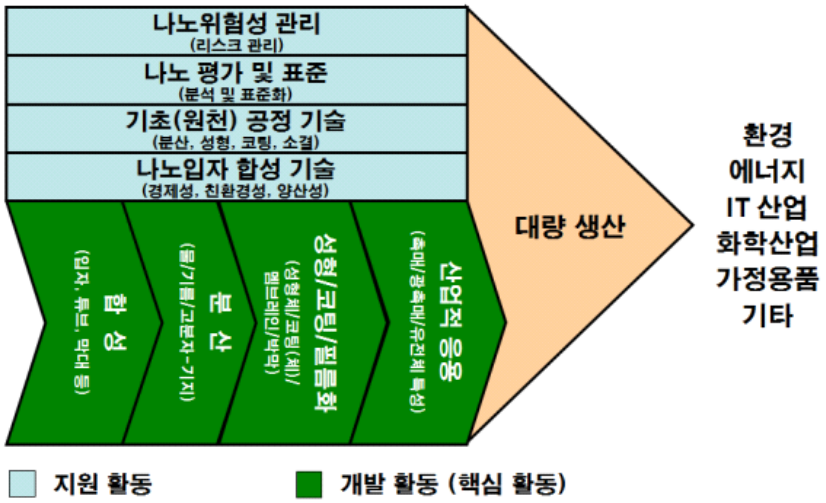


그림2. 티타니아 나노분말의 가치 사슬 및 관련 활동.

우리나라에는 황산법으로 티타니아 일반분말을 생산하는 코스모화학을 제외하면 대규모 생산 시설을 갖춘 업체는 없다. 광촉매 도료용이나 염료감응 태양전지 광전극용 티타니아 나노분말을 제조하는 몇몇 중소기업이 있다.

- 코스모화학 : 황산법으로 미크론 크기의 분말 생산 (연간 6만 톤)
- ㈜나노신소재 : 졸-겔법으로 광촉매용 나노분말 제조
- ㈜켐웰텍 : 수열법으로 광촉매 혹은 염료감응 태양전지 광전극용 나노분말 제조
- 석경AT : 급속가열법으로 나노분말 제조

연구개발 부문에서는 세종대가 분무열분해법(spray pyrolysis)으로 티타니아 나노분말을 대량으로 제조할 수 있는 기술을 개발한 바 있으며 KIST가 기상반응법인 화염법(flame method)으로 염료감응 태양전지 광전극용 티타니아 나노분말과 화장품이나 컬러토너 외첨재에 적합한 구형 단결정 티타니아 나노분말을 대량으로 제조할 수 있는 기술을 개발하였다. KIST는 티타니아에 천이금속 원소와 질소, 탄소를 도핑할 수 있는 기술, 자외선 하에서는 물론 가시광 영역에서도 광촉매 특성이 탁월한 티타니아 나노분말을 제조할 수 있는 기술을 개발하였으며 최근에는 구형 단결정 티타니아 나노분말을 대량으로 제조할 수 있는 기술을 석경AT에 이전하여 2015년 초 본격 생산에 들어갈 예정이다.

세계적으로 티타니아 나노분말 생산량은 2010년 이후로 급격히 증가하여 연간 50,400 톤(티타니아 전체 수요의 0.7% 차지)에 달하던 티타니아 나노분말 생산량이 2015년에는 연간 201,500 톤으로 증가할 것으로 전망된다. 티타니아 나노분말 시장 또한 급격한 성장을 보이며 2008년에 3,779.5만 달러 규모의 시장이 2010년에는 6,860만 달러로 80%의 성장을 보였다. 그 이후 시장 규모가 매년 약 100% 성장을 보이며 티타니아 나노분말이 본격적으로 시장에 나올 2015년에는 3억 2,240만 달러에 달할 것으로 예상된다(그림3).

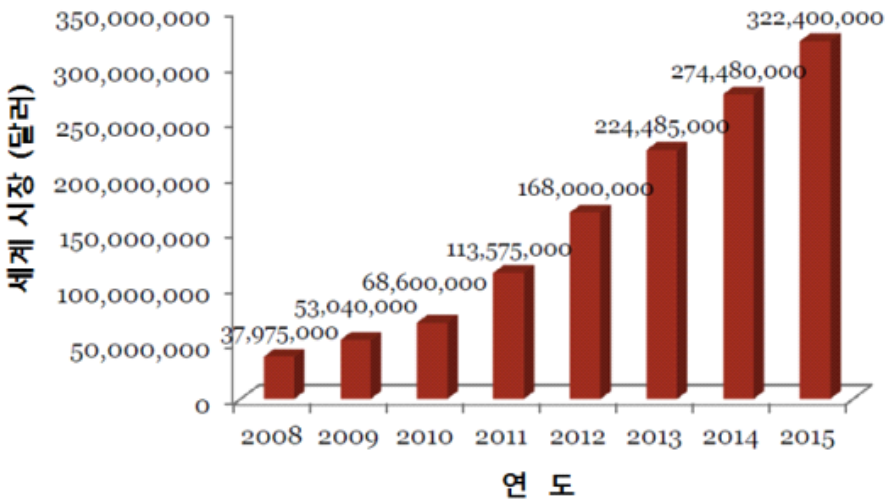


그림3. 티타니아 나노분말의 세계 시장 규모 및 전망.

티타니아 나노분말의 생산업체로는 Evonik Degussa, Cristal, Ishihara Sangyo Kaisya, Ltd., Kemira, Rhodia, Sachtleben, Showa Denka, Tayca Corporation, Titan Kogyo STT, Croda 등이 있다. 그 중 독일 기업인 Evonik Degussa는 기상반응법(fumed process)을 이용하여 광촉매 특성이 우수한 티타니아 나노분말을 제조하여 세계에 공급하고 있다. 특히 P25 티타니아 나노분말은 신뢰도가 매우 높아 광촉매 표준물질로 인정받고 있다. P25는 광촉매뿐만 아니라 디젤 엔진의 배기가스 정화를 위한 촉매 변환 장치의 담체 소재로도 각광 받고 있다. 최근 비표면적이 100 ㎡/g에 달하는 아나타제형 티타니아 나노분말 P90를 생산하여 염료감응 태양전지 광전극용으로 공급하고 있다. 반면, 일본의 Ishihara Sangyo Kaisya(이하 Ishihara)는 습식 화학공정인 황산법(sulfate process)을 써서 티타니아 벌크분말을 생산하고 페인트, 잉크, 플라스틱, 제지용으로 공급하고 있으며 나노분말로는 루틸 형의 TTO 시리즈와 아나타제 형의 ST 시리즈를 생산하고 있다. TTO는 페인트의 안료용으로 ST는 광촉매 및 초친수 코팅용으로 사용된다.

2010년 티타니아 나노분말의 국가별 생산량을 살펴보면 유럽이 11,760 톤, 미국이 11,368 톤, 중국이 7,840 톤으로 세계 전체 생산량의 70%를 차지하였다. 중국 시장이 급격히 성장하고, 일본과 한국 등 아시아 지역에서 자기 정화, 공기 정화 등의 광촉매용 티타니아 나노분말의 수요가 늘어남에 따라 아시아 지역의 생산량이 급격히 상승할 것으로 예상된다. 또한 아시아 지역에서 나노소재 개발에 대한 정부 차원의 강력한 지원으로 티타니아 나노분말 제품에 있어서도 다양한 신제품과 사업이 창출될 것으로 전망된다.

환경 • 에너지 문제 해결을 위한 핵심소재

그림4는 범용 탈질촉매 광촉매 제품 혹은 화장품 등 기존의 산업 영역 외 티타니아 나노소재가 활용될 것으로 전망되는 새로운 산업 영역들의 예를 보여 준다. 티타니아 나노소재의 대표적

인 형태인 나노분말이 활용될 분야로는 유기 및 염료감응 태양전지, 병원 등 다중 이용 시설 및 지하철 등 지하 생활공간 내 감염 방지 위생처리, 자동차 배기가스로 의한 오염 공기의 정화, 화력발전소의 배기가스 정화, 수질 정화 등을 꼽을 수 있다. 나노분말(혹은 티타니아 전구체를 직접 사용)을 이용하여 섬유 형태로 만든 티타니아 나노섬유는 가스센서(섬유 제작 시 매질로 이용한 고분자를 제거)나 자외선 차단용 직물 혹은 위생처리용 제품(필터 소재)로 사용할 수 있다. 금속 티타늄 표면을 양극산화 처리하여 제조한 다공성 막은 그 자체로 생체친화성을 높인 생체 삽입 소재(임플란트)로 사용하거나 멤브레인으로 활용할 수 있다.

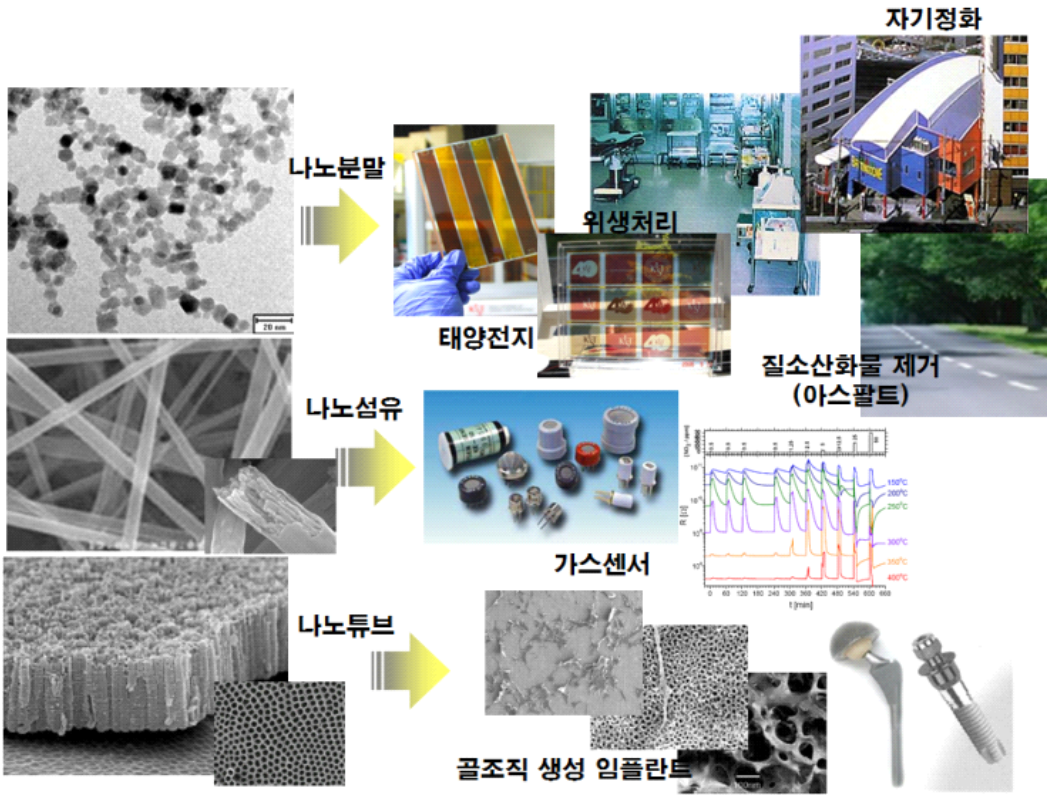


그림4. 티타니아 나노소재의 형태별 활용 분야

다음은 티타니아 나노분말을 활용하는 산업과 관련이 있는 주요 분야들에 대한 설명이다.

오염방지 코팅제

옥외 혹은 실내 건축물, 혹은 자동차 내, 외장 제품 등에서 먼지 등에 의해 발생하는 얼룩이 생기지 않도록 하고, 햇빛에 의한 빛바램 현상이 없으며, 혹은 세정이 용이하도록 하기 위해 티타니아 나노분말이 사용된다(그림5). 광촉매 및 초친수성을 이용한 오염방지 코팅재 세계 시장은 유리 표면 코팅과 플라스틱 표면 코팅 시장으로 크게 나눌 수 있는데, 유리 시장의 경우 약 1,000억 원 정도로 추산되고 있으며, 플라스틱 표면 코팅의 경우 약 6,000억 원 정도로 추산된다. 플라스틱의 경우 티타니아 입자의 광촉매 현상에 따른 기재 분해 문제로 인해 전체 시장에서 실리카가 대부분을 차지하고 있으며, 티타니아가 실제로 차지하는 비중은 약 10%(600억 원)

정도로 예측된다.

일본의 위생도기 업체인 Toto 사의 경우 티타니아 나노분말을 Ishihara 사로부터 공급받아 다양한 제품을 제조하고 있다. 우리나라의 경우 (주)켐웰텍이 자체 생산한 티타니아 광촉매용 분말과 결합제를 사용하여 코팅액을 생산하고 있으며, 직접 시공까지 담당하고 있다. 또한 나노케미칼(주)은 살균력과 유해물질 분해능을 가진 가시광 광촉매의 시공에 필요한 광촉매 용액을 제조하고 있다.

그림5. 광촉매 및 초친수성을 이용한 오염 방지막 적용의 예.

에너지 소재

티타니아 나노분말은 신재생 에너지 분야 핵심 소재로서, 염료감응 태양전지의 광전극 혹은 연료전지의 고체전해질로 사용되며 해당 제품의 고성능화 및 가격 경쟁력 제고에 관건(전지 효율 향상 및 원가 절감)이 될 것이다. 또한 태양전지 패널에 자기정화용 코팅막으로 사용되어 수분 및 먼지로부터 태양전지를 보호하여 효율 향상 및 수명 연장을 위한 용도로 사용된다.

염료감응 태양전지에 있어서 광전극용으로 아나타제 형 나노분말이 사용되고 산란층으로는 굴절율이 큰 루틸 형의 서브미크론 티타니아 분말이 사용된다(그림6). 특히 광전극용 티타니아의 경우 염료의 흡착을 위해 50 ㎡/g 이상의 높은 비표면적을 갖는 나노크기의 분말이 요구된다. 염료감응 태양전지를 구성하는 요소별 원가구조를 보면 표1과 같이, 광전극이 차지하는 비중이 76.6% 달한다.

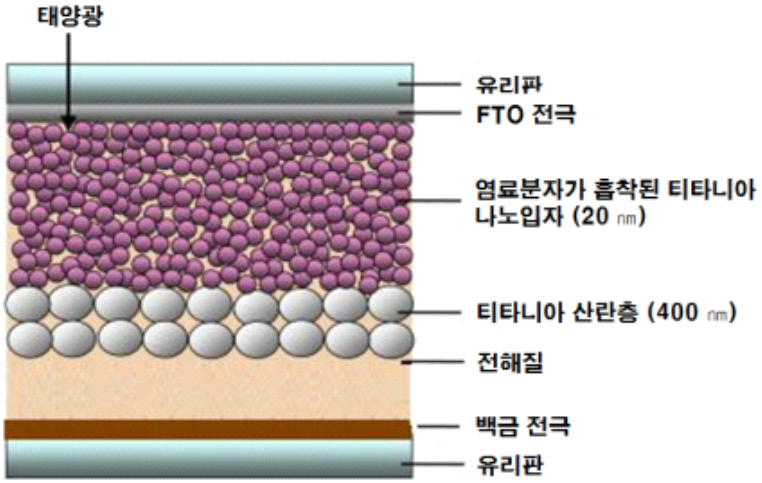


그림6. 염료감응 태양전지의 구성(출처: Organic Electronics, 13, 1865 (2012)).

구성요소	양극 (ITO)	광전극 (TiO_2)	염 료	전해질	음극(백금)	봉지재
원가비중(%)	0.3	76.6	1.0	0.1	0.5	21.6

표1. 태양전지 중 각 구성요소가 차지하는 원가 비중

국내에서 염료감응 태양전지 제조에 관심을 갖고 있는 업체로는 삼성을 비롯하여 동진세미켐, 이건창호, 티모테크놀로지 등 여러 기업들이 있으며, 이들은 태양전지 셀 내지는 모듈(궁극적으로는 모듈)을 제조하기 위해 공정 기술을 개발하고 있으며 핵심 소재인 티타니아 분말소재의 경우 거의 전량 외국 제조업체에 의존하고 있다. Degussa, DuPont 등이 분말 상태로 태양전지용 티타니아 소재를 공급하고 있다. 다수의 업체가 고가의 슬러리 상태로 공급하고 있으며 대표적인 업체로는 Dyesol과 Solaronix가 있다. Dyesol은 5 종의 슬러리를 공급하고 있으며 가격대는 10 g 당 117~144 달러, Solaronix는 8 종의 슬러리를 공급하고 있으며 가격대는 1 ㎏ 당 6,113~8,434 달러이다.

태양전지 패널의 자기정화용 코팅막은 영국의 Pinkington 사에서 개발하여 2010년부터 시장에 소개하였다. 연료전지의 고체전해질용 티타니아는 아직 연구 단계이며 2014년 시장에 선보일 전망이다.

화장품 소재

티타니아 나노분말은 산화아연(ZnO) 나노분말과 함께 자외선 차단제로 널리 사용된다. 우수한 자외선 흡수 기능 뿐 아니라 투명도가 높고, 질감이 부드러워 화장품 소재로 선호한다. 국내에서는 기능성화장품 소재로 승인 받은 품목 중에서 자외선 차단용 화장품은 미백 화장품과 더불어 최다 승인 품목이며, 최근 오존층의 파괴에 따른 피부 손상이 크게 대두되면서 자외선 차단용 화장품의 인기가 더욱 높아지고 있다. 특히, 티타니아 나노분말은 UV-B 영역(280~320

㎚)에서 우수한 자외선 차단능력을 보여 자외선 차단용 화장품에 대표적인 물질로 사용되는 실정이다. 이러한 화장품 용도로 사용되는 티타니아 나노분말은 Tayca 사에 의해 양산되며, 화장품용 티타니아 나노분말의 세계 시장을 일본기업들이 선점하여 85% 이상의 시장을 차지하고 있다. Tayca 사는 10~50 ㎚급 루틸형의 티타니아 나노분말을 스테아린산(stearic acid)으로 표면 코팅한 티타니아 MT 시리즈를 판매하고 있다(그림7).

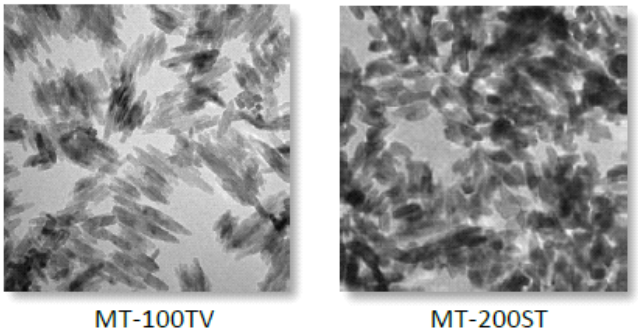


그림7. Tayca 사의 MT 시리즈 티타니아 나노분말(출처: http://www.tayca.co.jp).

페인트, 인쇄 잉크, 종이 소재

티타니아 나노분말은 실리카(SiO_2), 산화아연 나노분말과 함께 페인트 혹은 인쇄 잉크로 중간 소재로 가공되어 흠집 방지 효과, 산란에 의한 반짝임 효과, 견고성 강화 효과 등을 위한 코팅(페인팅) 소재로 사용된다. 광촉매 활성이 높은 나노분말은 항균 종이 및 티슈 등에 적용할 수 있으며, 페인트로 사용 시 자기정화, 자외선 차단 등의 기능을 기대할 수 있다. 티타니아 나노분말의 초친수성 특성은 고품질 인쇄용 종이를 생산하는 데 사용되며 Domtar paper, Nippon Paper Crecia Co., Ein and Coatte Industries 등의 회사들이 고품질 인쇄용 종이 생산에 티타니아 나노분말을 쓰고 있다.

티타니아 나노분말을 포함하고 있는 자외선 차단 페인트는 이미 2000년대 초 시장에 출시되어 널리 사용되고 있으며, 자기정화 페인트, 항균 코팅제는 2010년 시장이 성숙되었다. 티타니아 나노분말은 2000년 후반 인쇄용 잉크 시장에 진입하여 2014년 경 성숙시장이 될 것으로 전망된다.

플라스틱 소재

티타니아 나노분말은 플라스틱에 첨가되어 UV 차단으로 인한 플라스틱의 수명 연장, 견고성 강화, 부서짐 방지 등의 효과를 보인다. UV 차단 효과 외 산소 차단의 기능도 보이므로 음식물 포장재의 투명 코팅제로 사용되기도 한다. 또한 광촉매 기능이 부가되어 항균 작용이 필요한 플라스틱 응용에도 사용된다.

세라믹 소재

티타니아 나노분말은 핸드폰, 컴퓨터 등 전자기기에 많이 쓰이는 적층 세라믹 커패시터(MLCC, multilayer ceramic capacitor)의 원료인 티탄산바륨($BaTiO_3$) 분말을 제조하는 원료로 사용된다. 티타니아 나노분말은 티탄산바륨의 제조 온도를 낮출 수 있고 제조되는 분말의 크기를 줄여서 소결온도를 낮출 수 있어서 에너지 절감은 물론 은(Ag), 니켈(Ni), 구리(Cu) 등 금속 전극 등 낮은 소결온도를 필요로 하는 공정의 선택 폭을 넓힐 수 있다.

위생 및 클리닝 소재

티타니아 나노분말의 광촉매 혹은 초친수 성질은 위생 및 세정제로 사용된다. 세계적 생활용품 대기업인 Clorox, Unilever 등의 회사는 이미 세정제 및 항균 클리너에 티타니아 나노분말을 섞어서 시중에 판매하고 있다.

제품-기술 개발의 특징

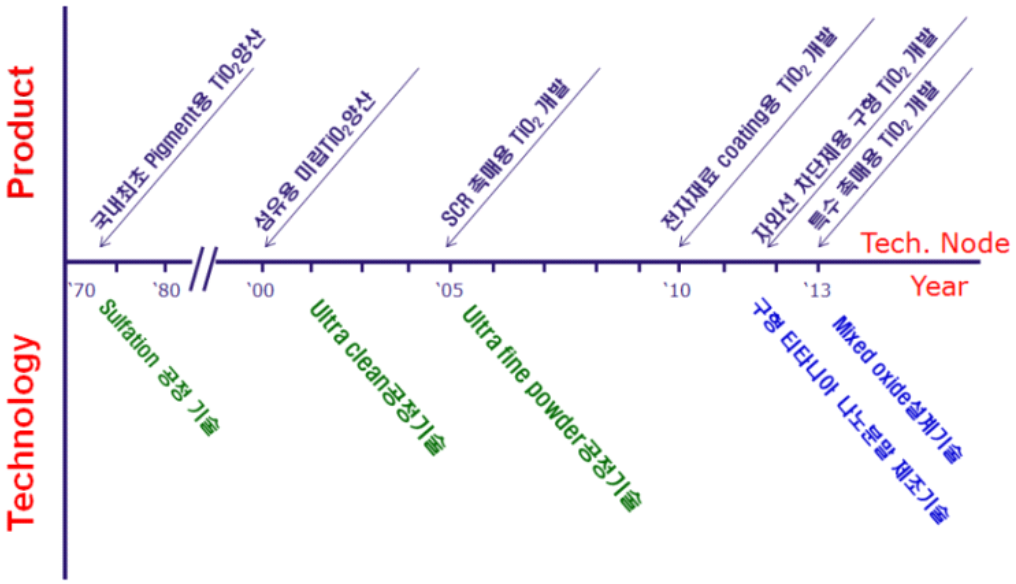


그림8. 시기별 개발 제품-기술.

주요 소재기술

섬유용 미립 TiO_2 제조 기술

섬유용 미립 TiO_2는 n-TiO_2의(티타니아 나노분말) 입도를 제어하여 미려한 백색을 띄게 할 뿐만 아니라 n-TiO_2가 가지는 자외선 차단 능력 또는 친수 소수성 특성을 부여하여 기능성 섬

유로 만드는 기술이다. 섬유 가닥 내부 혹은 표면에 n-TiO_2 나노입자를 배치하기 위하여 입자의 크기, 형상, 성상 및 표면 성질을 제어하는 것이 매우 중요하다. 황산법으로 n-TiO_2를 제조할 경우 아래와 같은 반응과정을 거치게 된다.

$$FeTiO_3+2H_2SO_4 \rightarrow TiSO_4+FeSO_4+2H_2O$$
$$TiSO_4 \rightarrow TiO_2 \cdot n(H_2O) + H_2SO_4$$
$$TiO_2 \cdot n(H_2O) \rightarrow TiO_2 + nH_2O$$

n-TiO_2의 입자특성을 제어하는 과정은 $TiSO_4$를 MTA(meta titanic acid)로 가수분해한 후 n-TiO_2 입자로 만들 때 각종 변수들을 최적화하는 과정이다. 가수분해 시의 $FeTiO_3$ 및 H_2SO_4의 농도 및 각종 변수들은 티타니아 나노분말의 형상 및 크기, 입도 등에 결정적 영향을 미치므로 이들의 상관관계를 고려한 최적 공정조건이 필요하다. 섬유용 n-TiO_2의 일차적 기능은 미려한 백색을 부여하는 것이지만 기능성 면에서는 나노입자의 표면특성을 제어하여 소수성 특성을 부여할 수도 있다.

SCR 촉매용 TiO_2 제조 기술

전통적으로 자동차 등에 쓰이는 삼원촉매의 담체로는 알루미나 분말이 사용되고 cordierite monolith에 코팅하여 사용한다. 대표적인 공기오염 물질인 질소산화물을 처리할 경우에는 아나타제 상의 n-TiO_2의 입자를 사용하게 된다. 그 이유는 질소산화물을 암모니아 등의 환원제로 사용하는 촉매반응에서 아나타제 상의 n-TiO_2는 단순하게 넓은 표면적에 다량의 산점을 제공하는 등의 전통적인 담체 특성 외에 산화환원 반응의 율속 단계와 연관된 격자산소를 제공하는 등의 역할들을 담당하게 된다. 이에 따라 고성능의 SCR 촉매용 TiO_2 제조 기술은 일본, 독일, 프랑스 등의 일부 회사에 국한되어 왔다. 최근에는 국내의 ㈜코스모화학 등에서 고성능 SCR 촉매를 제조할 수 있는 아나타제 상의 n-TiO_2 생산에 성공하여 국내외에 제품을 공급하고 있다. 한편, 질소산화물 촉매의 사용환경에 따라서 담체의 특성을 최적화시켜 주어야 하는데 자동차용 탈질촉매의 경우 사용온도가 높거나 바나듐(V)과 같은 특정원소의 휘발을 억제하여야 하므로 혼합 산화물 등의 설계에 의하여 n-TiO_2의 구조를 안정화시켜 열적 안정성을 높이거나 활성물질을 고착화시키는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 또한 2016년에는 IMO(국제해사기구)의 규정에 따라 그림9와 같이 ECA(emission controlled area)에서는 선박에서 배출되는 질소산화물이 Tier III 환경규제 조건을 만족시켜야 하므로 이에 대응하는 촉매 및 담체 개발이 요구된다. 그런데 선박의 엔진 기술이 발달함에 따라 엔진 배출가스의 온도가 떨어져서 저온에서 작동하는 탈질촉매의 개발이 요구된다. 이 경우 아나타제 상의 nano TiO_2와 희토류 금속 산화물 등의 혼합 산화물을 담체로 사용하여 저온 탈질반응 속도를 극대화시키는 것이 필수적이다. 혼합 산화물 제조는 습식,건식 방법을 모두 적용할 수 있으나 내부구조 및 표면 개질 등의 요구 조건에 따라 선택을 달리하게 된다.

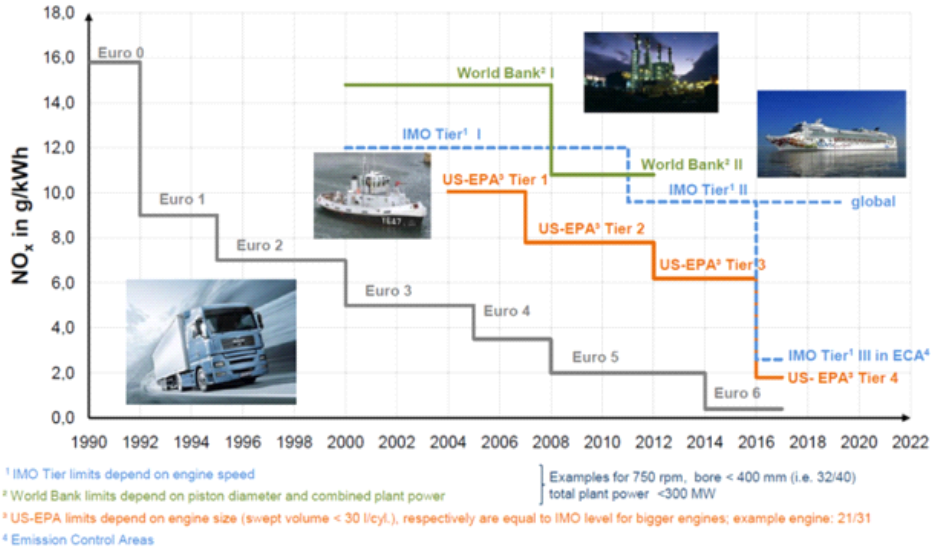


그림9. 선박용 엔진의 질소산화물 배출 기준.

전자재료 코팅용 TiO_2 제조 기술

n-TiO_2는 고유의 redox couple의 높은 작동능을 이유로 $Li_4Ti_5O_{12}$(LTO) 등의 재료로 사용되거나 Li 이온이 침투하기 위한 표면적, 입도 및 ppb 수준의 순도 등을 정밀하게 제어할 필요가 있다. 이 경우에는 $TiSO_4$를 MTA(meta titanic acid)로 가수분해한 후 TiO_2 입자로 만들 때 각종 변수를 최적화시킬 뿐만 아니라 세척 및 분리공정을 정밀하게 해줘야 한다. 한편, $BaTiO_3$와 같은 티타늄화합물은 바륨산화물과 티타니아의 액상소결에 의하여 제조되며 커패시터나 압전재료, 트랜스듀서 등으로 응용이 가능하다. 이 때 티타니아는 액상소결이 용이하도록 입도를 제어할 뿐만 아니라 화합물을 제작하였을 때 전기적 특성도 만족시켜야 하므로 티타니아 나노입자 제조 시 정밀한 공정제어가 필요하다.

자외선 차단제용 구형 TiO_2 제조 기술

다양한 종류의 옥외 혹은 실내 건축물, 혹은 자동차 등에 사용되는 자외선 차단코팅 시장은 유리 표면 코팅과 플라스틱 표면 코팅 시장으로 크게 나눌 수 있는데, 국내 유리 시장의 경우 약 1,000억 원 정도이며, 플라스틱 표면 코팅의 경우 약 6,000억 원 정도로 추산된다. 자외선 차단 보호필름의 국내 생산업체로는 금정산업 및 KCC 등을 들 수 있으며, 세계시장을 선도하는 생산업체로는 엡손, 코니카, 히가시라, Avery digital 등을 들 수 있다. 코팅용 자외선 차단제로는 실리카, 타이타니아, 산화아연 입자들이 사용되는데 제품화를 위해 코팅액을 제조하는 데에는 이러한 입자의 분산성과 필름 형성 시 기재와의 부착성, 그리고 각 응용 분야마다 필요한 표면개질제 사용이 필수적이다.

고품질 코팅제 생산을 위하여 투과도, 내구성, 경도 등의 특성이 향상되어야 하는데 코팅제의

무기 소재가 되는 입자의 크기, 형상, 성상 및 표면 성질을 제어하는 것이 매우 중요함. 특히 입자의 분산성과 관련된 특성을 제어하는 기술이 요구된다.

또한, 피부를 자외선으로부터 보호하기 위하여 자외선 차단제가 기능성 화장품 소재로 각광받고 있으며, 최근 오존층의 파괴에 따른 자외선에 의한 피부 손상이 크게 대두되면서 자외선 차단용 화장품의 인기는 더욱 커지고 있다. 세계 화장품 시장규모는 2010년 기준 2,422억 달러이며 매년 연평균성장율 3% 이상의 꾸준한 증가세를 보이고 있다.

화장품용 자외선 차단제로 사용되는 무기소재로는 타이타니아와 산화아연이 있으며, 자외선 차단지수(Sun Protecting Factor, SPF)에 따라 화장품 중량의 약 8~12% 가량 사용된다. 자외선 차단제의 고품질화를 위하여 화장품 조성의 formulation도 중요하지만, 근본적인 무기물의 형상 및 표면상태를 제어함으로써 품질을 업그레이드할 수 있다. 특히, 구형의 형상을 가지는 무기입자를 사용하였을 경우, 최종 화장품의 유동성 및 분산성을 향상시켜, 피부에 고르게 도포 가능하며 사용 질감이 향상된 제품을 생산할 수 있다.

차별화된 제품(응용)을 목표로 도전

우리나라는 티타니아 나노분말 소재의 소비량은 많지만 티타니아 나노분말 소재 산업의 기반은 거의 없다. 산업 측면에서 우리나라는 기술 개발 초기에 있다고 할 수 있다. 이미 연간 700만 톤 이상의 생산 능력을 가진 선진국의 여러 업체들이 있는 상황에서 우리나라는 그들과는 다른 접근이 필요하다. 즉, 큰 파급효과를 갖는 핵심제품(혹은 기술)을 목표로 선택적, 전략적 개발이 필요하다. 전략적 목표들을 달성한 이후 수평으로 기술을 확대하는 것이 시장 진입(혹은 창출) 측면이나 기술기반을 단시간에 확보할 수 있는 전략이 될 수 있다.

첫 번째로 연구하여야할 분야는 원료 물질 개발 분야이다. 현재 개발 중이거나 산업적으로 활용하고 있는 제조 공정에서는 전량 수입한 원료를 사용하고 있다. 티타니아 나노분말 수요가 증가하면서 세계적으로 원료 가격이 상승하고 있다. 따라서 원료를 전량 수입에 의존할 경우 (새로운 원료(전구체)가 없으므로) 새로운 티타니아 나노소재의 제조가 어렵고 원가를 일정 수준 이하로 낮출 수 없는 문제점이 있다. 따라서 원료물질($TiCl_4$)의 제조를 더욱 경제적으로, 적어도 기존 업체와 경쟁이 가능한 수준으로 할 수 있는 기술을 개발할 필요가 있다. 또 다른 선택으로 새로운 특성을 가진 티타니아 나노소재를 겨냥한 원료 물질의 제조 기술을 전략적으로 개발하는 것을 고려할 수 있다. 새로운 용도를 가진 티타니아 나노소재는 기존의 대형 업체들과 경쟁할 필요가 없으므로 산업화에 성공할 가능성이 있다.

두 번째로 연구하여야할 분야는 선진업체들과 차별화된 특성을 가진 티타니아 나노소재를 제조할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 선진업체들은 오랜 기간에 걸쳐 제조 공정을 최적화하였을 뿐만 아니라 설비비용을 상당 부분 회수하였기 때문에 충분한 가격 경쟁력을 갖고 있다. 따라서 우리나라는 선진업체들이 제조하지 못하는 특수한 티타니아 나노소재를 개발하여 새로운 시장을 창출하거나 틈새시장을 뚫고 들어갈 수밖에 없다. 예를 들어 가시광 영역에서 반응성이 뛰어난 티타니아 광촉매나 수소 제조 능력이 뛰어난 티타니아 나노소재 등이 개발목표가 될 수

있을 것이다.

세 번째로 산업 측면에서 연구하여야할 분야는 티타니아 나노소재를 활용하는 새로운 영역을 찾아내는 것이다. 기존 광촉매 시장보다 10 배 이상의 규모가 된 건축(광촉매 시멘트)에의 응용과 같은 시장을 창출할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 새로운 응용 분야는 아마도 다른 영역과의 융합에서 나올 것이다. 티타니아 나노소재는 원천소재이자 기반소재이므로 여러 분야에 응용(융합)되어 큰 성과를 낼 가능성이 충분하다.

한 예로 KIST는 티타니아 나노분말 개발을 시작할 때 두 가지 목표를 갖고 출발하였다. 첫째는 광촉매 특성에서는 잘 알려진 P25를 능가하는 자외선 하에서의 광촉매 특성을 달성하는 것, 둘째는 태양빛의 대부분을 차지하는 가시광 하에서 높은 광촉매 특성을 갖는 나노분말을 만드는 것이 목표였다. 실제로 자외선 하에서는 P25 대비 115% 이상의 성능을 달성하였으며 가시광 하에서의 특성은 견줄만한 비교대상이 없어서 정량적인 비교를 할 수 없지만 태양광으로 수처리가 가능한 수준의 높은 효율을 갖는 나노분말을 제조하였다. 이러한 물성 달성과 함께 경제성을 갖추는 기술을 개발하여 시간 당 10 ㎏ 수준의 제조기술을 개발하여 기업이 활용할 수 있게 하였다. 티타니아 나노분말의 용도에 따라 다양한 성상이 요구되는 수요에 대응하여 태양전지용 초미립 나노분말(20 ㎚ 내외), 고정밀 인쇄토너용 외첨제에 요구되는 구형 나노분말(120 ㎚ 내외)을 제조할 수 있는 기술을 개발하였다.

내화물 소재

(Refractories)

고온에 견디는 비금속 소재

내화물(refractories)은 고온에서도 용융되지 않는 비금속재료의 총칭이며 고온의 열작용에도 견디기 위한 충분한 기계적 강도를 가지며, 급격한 열변화나 반복가열에도 안정하고, 접촉하는 가스나 용융물 등에 의한 침식, 마모 등에도 저항성이 높다. 사용 환경에서 가열에 의한 용적안정성(volume stability)이 뛰어나고 조직 열화가 느린 특성이 필요하다.

국 가	규 격
한국(KSL 0011)	SK 26(1,580℃)이상 내화도를 가진 비금속 물질 또는 그 제품(일부금속 또한 포함)
일본(JIS-R 2001)	1,500℃이상의 정형 내화물 및 최고 사용온도 800℃이상의 부정형 내화물
미국(ASTM)	PCE No.15이상 (1,430℃)
독일(DIN)	SK26 (1,580℃) 이상

표 23 국가 규격 별 내화물의 정의

내화물은 고열조업를 하는 산업전반에 널리 사용되고 기초소재이다. 구조재료로써 제철제강, 시멘트, 유리, 각종 비철금속 용해로 등 산업 전반에 사용되고 있다. 고온조업 설비들의 수명은 1년에서 길게는 15년 이상까지 다양하다. 이밖에도 각종 사업에서 열원을 다루는데 필요한 소모성 조업 자재로 ladle용, tundish용, runner용, 주물용 내화물, 각종 gate류, nozzle류, 열간 & 냉간 보수재, 머드재 등 산업 전반에 사용되며, 사용수명은 수분에서 수십일 까지 다양하게 나타난다. 따라서 내화물의 선정 시에는 열설비의 종류, 사용조건, 사용연료, 조업조건 등을 충분히 조사하고 조건에 맞는 품질 특성을 보유하는 내화물의 선정이 필요하다. 또한 구조면에서도 충분히 검토하여 내화물의 형상이나 구조를 결정하여야 한다. 산업체 별로 사용되는 열원, 사용수명, 역할에 맞는 구축 재료와 소모성 조업자재로 선정해야 한다. 따라서 내화물은 건설재료이며 동시에 engineering 세라믹의 특징을 가지는 소재로 화학성분과 형상으로 분류해 본다.

분 류	주성분	특 성
산성 내화물	SiO_2, ZrO_2	RO_2의 결합물질을 주성분으로 하는 것으로 산성물질에 대한 내침식성이 우수하다
중성 내화물	Al_2O_3, Cr_2O_3	R_2O_3의 결합물질을 주성분으로 하는 것으로 높은 내화도와 산성, 염기성물질에 대하여 유사한 내침식성을 갖는다
염기성 내화물	MgO, CaO	RO의 결합물질을 주성분으로 하는 것으로 염기성물질에 대한 내침식성이 우수하다

표 24 내화물의 화학적성분에 의한 분류 및 특성

분 류	종 류	특 성
Shaped Refractories	Firing	원료를 분쇄, 조합하여 일정한 형상으로 고압성형 후 고온에서 소성하여 소결시킨 것
	Non-firing	원료를 분쇄, 조합하여 일정한 형상으로 고압성형 후 건조시킨 것
	Electro-cast	원료를 분쇄, 조합하여 고온에서 용융시킨 후 일정한 형상으로 주입하여 성형시킨 것
내화 mortar	Thermo setting	시공 후 가열에 의하여 소결되어 강도를 유지하는 것
	Air setting	첨가된 화학결합재에 의해 시공 후 상온에서 강도를 유지하는 것 (소결강도는 고온이 되어야 발현)
	Hydraulic	첨가된 수경성 시멘트에 의해 수화반응으로 강도가 유지되는 것
Unshaped Refractories	Castable	내화골재와 알루미나시멘트 등의 결합재를 혼합하여 분말 상으로 제조된 것
	Plastic	내화골재, 점토, 결합재 및 수분을 첨가하여 연토 상으로 제조되어 방습포장지에 보관된 것

표 25 내화물의 형상에 의한 분류 및 특성

내화물의 국내·외 동향

국내 동향

국내 내화물 산업은 1990년대 중반까지 중화학공업의 발전과 함께 성장하여 양적, 질적인 규모를 갖췄다. 최근에는 내화물 생산량의 70% 이상을 소비하는 철강업체들의 설비증설이 활발하여 최대의 조강 생산을 달성하고 있음에도 불구하고 내화물 사용량은 감소 추세에 놓여있다. 좀 더 명확히 설명하면, 철강생산 기술과 공정의 발전에 의해 내화물의 사용량이 지속적으로 감소해 1960년대 50kg/t-steel에서 현재에는 8~10kg/t-steel 수준으로 내화물 사용량이 뚜렷한 감소세를 나타나고 있다. 이러한 내화재의 사용량 감소는 내화물의 고품위화에 의한 것뿐만 아니라 철강 제조기술의 변화 때문이다. 철강 제조기술 변화는 주로 Open Hearth Furnace가 Basic Oxygen Furnace로 대체되고 Continuous Casting의 도입 및 2차 정련기술의 성장에 의한 것이다. 이런 철강 제조기술 변화 및 내화물의 고품위화로 인해 전 세계적으로 연간 약 1.2~1.7% 정도 내화물 사용량이 감소되는 추세이다. 이로 인해 국내 내화물 업체들은 철저한 원가절감을 통해 global 경쟁력 확보 및 수익성 악화에 대비하는 전략을 추진하고 있으며 이외에도 원재료 공급이 원활하고 인건비가 싼 중국으로 설비이전이나 합자회사 설립을 통해 중국으로 진출하여 제품의 가격 경쟁력을 확보하고 있다. 향후에도 국내 내화물 시장은 원가경쟁이 지속될 전망이다.

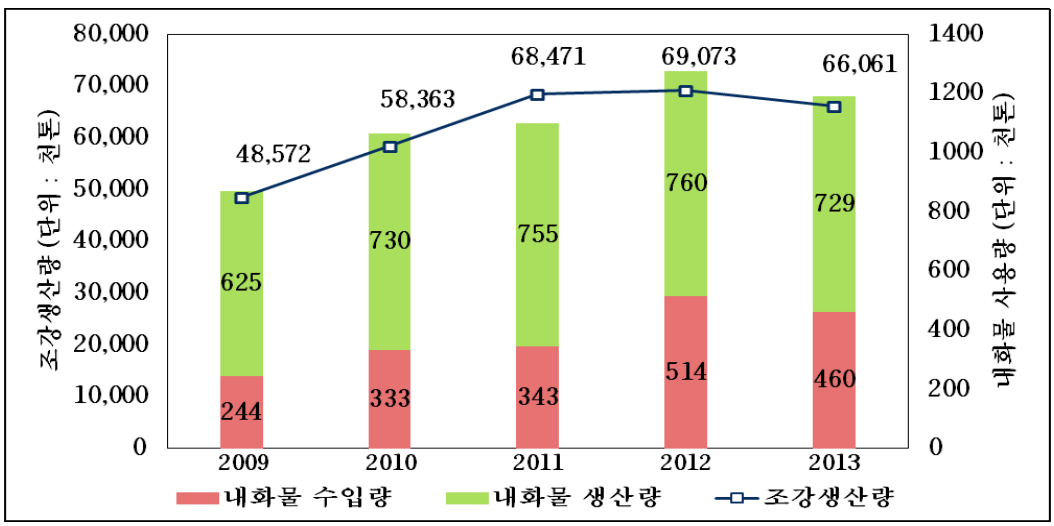


그림 1. 국내 조강생산량 대비 내화물 사용량

		2009	2010	2011	2012	2013
조강 생산량		48,572	58,363	68,471	69,073	66,061
내화물 사용량	생산	625	730	755	760	729
	수입	244	333	343	514	460
	계	869	1,063	1,098	1,274	1,189

표 4. 국내 조강생산량 및 내화물 사용량 추이 (단위: 천톤)

내화물 가격은 중국의 시장상황에 따라서 민감하게 변할 가능성이 높다. 또한 global 다국적 기업에 대응하기 위한 국내 내화물 업체 간의 기술적 대응은 필연적이다. 국내시장에서의 경쟁력 확보는 세계 시장으로의 확대로 이어질 수 있다. 먼저 국내 철강업체들의 요구 품질을 저가격에 제공할 수 있는 힘이 필요하다. 제조공정의 혁신이나 생산성 향상을 통한 경쟁 우위 확보를 위한 연구개발이 중요하며 신제품 개발 및 신기술 확보만이 미래의 생존을 보장하는 길이다.

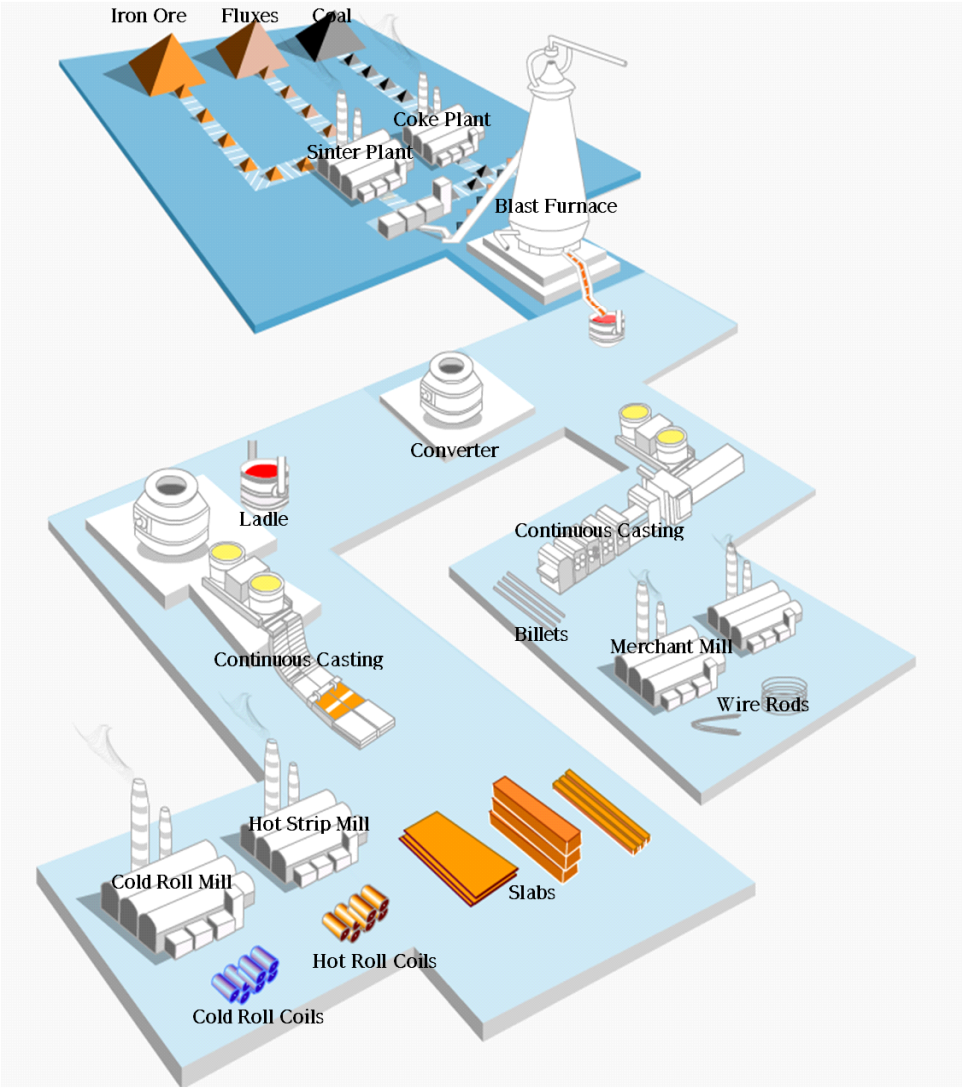


그림 2. 제철·제강 공정 및 주요 노체설비

해외 동향

세계적인 경기침체는 중국 내 건설, 조선 산업을 중심으로 극심한 불황을 가지고 왔으며, 이로 인해 철강가격도 지속적으로 약세의 흐름이다. 내화물 사용 원단위를 일본의 경우를 예를 들어보면 1980년대 15.3.kg/t-steel에서 2002년 8.0kg/t-steel의 사용량을 나타내어 약 50% 정도의 감소를 보여준다. 내화물 사용량의 현저한 감소는 내화물의 심각한 과잉생산 능력으로 이어진다. 현재 내화물 설비가동률이 약 65% 정도이며 이에 따른 경쟁압력이 큰 상태다. 중국의 경우 2013년 조강생산능력은 11.4억 톤이나 실제 생산량은 8.3억 톤으로 평균 가동률은 73%에 그쳤다. 이러한 중국의 제한적 생산에도 가격 회복은 느리게 진행될 것으로 본다. 특히 전 세계적으로 철강 공급과잉에 따른 수익률 저하와 맞물려 국내시장은 가격경쟁력을 지닌 중국산 철강 제품과 품질경쟁력으로 무장한 일본산 철강 제품의 틈바구니에서 국내시장 수성에도 어려움을 겪고 있어 내화물 시장은 정체되거나 감소될 위험에 있다. 향후에도 세계 철강 수요가 연 1~2% 정도의 저성장이 예상되고 있고 국내 철강수요도 연 2.0~2.5% 정도의 수요 둔화가 예상되고 있어 국내 내화물 업체의 어려움도 지속될 것으로 예측된다. 해외 내화물 시장에서는 가격경쟁력을 앞세운 중국의 독주가 계속될 것으로 예상된다. 전 세계적으로 대학에서 내화물을 전공한 대학졸업자는 중국이 거의 유일무이 하다고 할 수 있는 상황에서 세계 조강 생산량의 50% 이상을 생산하며 자국 내 내화물 생산 및 조업경험을 앞세워 고급내화물 생산에서도 우위를 점하게 되면 전 세계시장은 물론이고 국내 내화물 시장까지도 잠식하게 될 전망이다. 메이저 업체인 RHI, VESUVIUS, KROSAKI, SHINAGAWA 등이 인수합병을 활발히 하여 거대 내화물 회사로 탄생되었듯이 중국도 정부의 규제로 중소업체의 인수합병을 포함한 구조조정이 활발히 진행되고 있어 향후 중국 내 내화물 시장의 재편과 대형 내화물 업체의 등장으로 국내 내화물 업체의 위기는 한층 심화될 것으로 보인다.

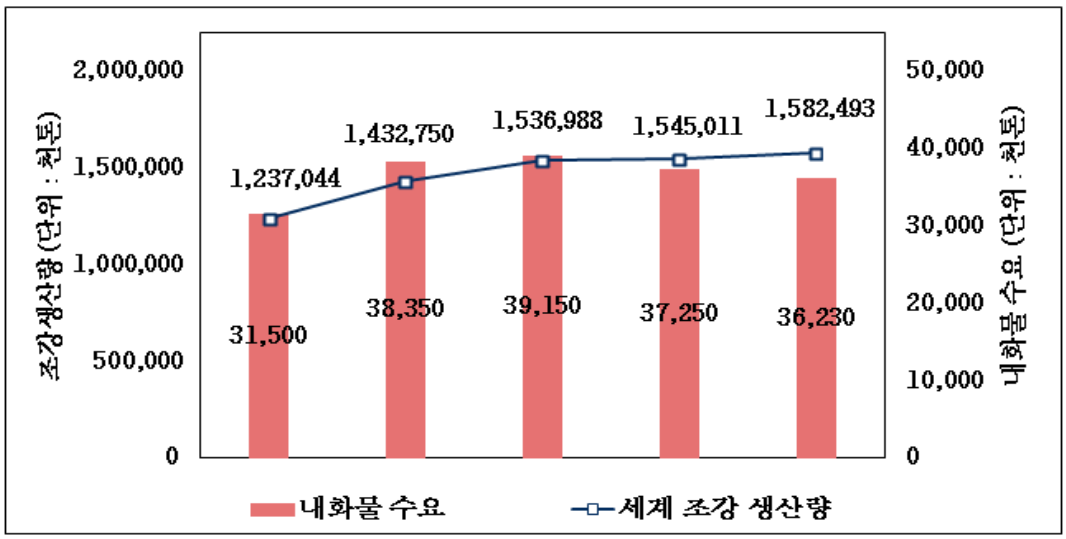


그림3. 세계 조강생산량 대비 내화물 수요

(단위 : 천톤)

	2009	2010	2011	2012	2013
세계 조강 생산량	1,237,044	1,432,750	1,536,988	1,545,011	1,582,493
세계 내화물 수요	31,500	38,350	39,150	37,250	36,230

표5. 세계 조강생산량 및 내화물 수요

다양화 / 다각화되는 내화물

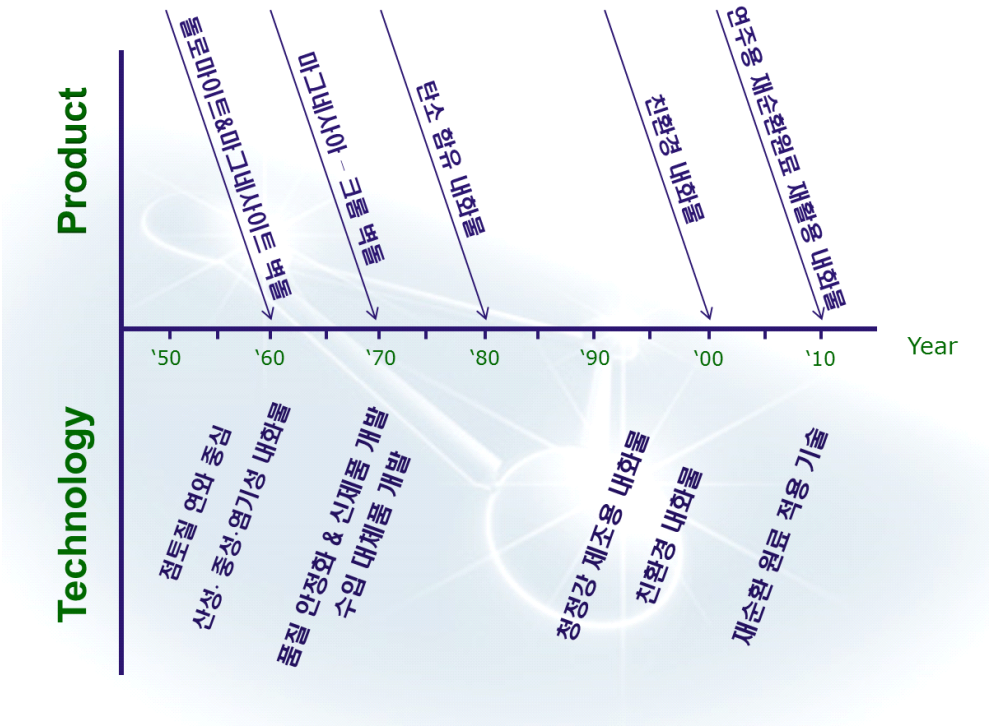


그림 4. 내화물 기술과 제품 개발동향

Dolomite-Magnesite brick

MgO와 CaO를 주요 구성성분으로 하는 brick을 일반적으로 dolomite brick이라고 한다. 이것은 천연 dolomite광물 ($MgCO_3$-$CaCO_3$)에서 유래된 명칭이지만, 실제는 magnesia clinker와 병용한 것이 많기 때문에 brick 조성은 본래의 dolomite 조성보다도 MgO 성분이 많다. 크게 구분하면 5~10% tar를 혼련, 성형한 후 300~400℃에서 baking한 tar 결합 brick과 유기질 결합체로 성형한 후 고온 소성한 fire brick이 있다. dolomite brick은 1975년대 후반까지는 제강용 전로의 내장재로서 대량으로 사용하였지만, 그 이후 MgO-C brick로 전환됨에 따라 사용량은 대폭 감소하였다. 현재는 주로 fire brick이 2차 정련로(AOD, LF 등) 및 시멘트 소성로 등에 사용되고 있다. 또 최근에는 내목지 용손성 및 내 slag 침투성에 대하여 우수한 non-fire brick dolomite-magnesia-carbon brick을 개발하여, 2차 정련로에 사용하고 있다. dolomite 광물은 탄산염으로 가열하면 열분해하기 때문에 자체는 내화물 원료로서 사용할 수 없고 고온 소성하여 MgO·CaO를 주성분으로 하는 dolomite clinker로 만들어 사용한다. Dolomite clinker 중에 함유된 CaO는 대기 중의 수분과 반응하여 수산화칼륨을 생성한다. 이 반응은 체적 팽창을 수반하기 때문에 clinker는 분화 붕괴(소화)한다. 따라서 dolomite 광물의 소성 시, 철분이나 SiO_2 성분을 첨가하여, CaO를 calcium ferrite나 calcium silicate로 전환시킴으로써 소화를 억제시키는(안정화)방법을 적용하고 있다. 초기에는 CaO의 전량을 안정화시켜 CaO를 함유하지 않는 안정화 dolomite clinker로서 사용하였지만 염기성 slag에 대한 내식성이 양호하지 못하고, dolomite clinker로서의 특징을 충분히 발휘하지 못하였기 때문에 CaO의 일부가 존재하는, 준안정화 dolomite clinker가 널리 사용되고 있다. 준안정화 clinker는 표층부가 비교적 다량의 calcium ferrite 또는 calcium silicate로 피복되어 있고, 내부는 일부 CaO를 갖는 구조로 되어 있다.

Magnesia-Chrome Brick

MgO-Cr_2O_3 brick은, magnesite brick의 결점을 보완하고, 각각의 특성을 살려 연구, 개선한 것이다. 그 명칭은 MgO 함유량 50%를 기준으로 하여, MgO 함유량이 적은 것을 Cr-MgO, 많은 것을 MgO-Cr brick이라고 한다. 이러한 brick은 과거에 염기성 평로 및 제강용 전기로를 중심으로 대량 사용되어 왔지만, 평로의 소멸, 전기로의 수냉화와 MgO-C brick으로의 전환으로 인하여 사용량이 현저하게 감소하고 있다. Non-fire brick과 fire brick로 구분되는데 non-fire brick은 magnesia clinker와 chrome ore를 원료로 하여, 입도 조정된 배합물에 결합제로 고즙액을 첨가, 혼련, 성형 건조하여, 화학적으로 결합시킨 brick이다. Brick의 성형 시 표면을 강판으로 피복시킨 소위 metal case로 하는 것이 특징이다. Metal case는 중간 온도에서 강도를 유지함과 동시에 내 spalling을 보강하고, 특히 사용 시 열로 용해되어 brick을 접착시키는 효과가 있다. Non-fire brick인 MgO-Cr_2O_3 brick은 일부 정련소에서만 사용될 뿐, 생산량은 매우 적다. Fire brick은 입도 조정된 magnesia clinker와 chrome ore의 배합물을 혼련, 성형, 건조 후 소성하여 얻어진 brick으로서 non-fire brick에서 볼 수 있는 중간 온도에서 강도 열화는 없고, 고온에서 용적 안정성에도 우수하다. 주로 chrome ore에 함유되어 있는 규산염과

magnesia clinker 등과 반응하여 silicate 결합을 형성하는 것이 특징이며, 용도로는 과거에는 제강용 내장, 시멘트 소성로, 유리 용해로 checker brick 등에 널리 사용되어 왔지만, 현재, 거의 대부분이 MgO-C brick으로 전환되었다.

탄소 함유 내화물

탄소 함유 내화물은 산화물 이외의 재료가 내화물에 도입되어 비산화물 복합 재료화하는 계기를 만들었다. 탄소가 내화물의 중요한 성분의 하나로 도입되면서 열전도율의 증가, 기계적 인성의 증가에 따라 열충격에 대한 저항성이 높아지고, 용융액와 젖지 않는 성질과 slag나 금속용액에 대한 내침식성의 증가가 이루어져 내화물의 사용수명이 획기적으로 증가되었다. Al_2O_3-C, Al_2O_3-SiO_2-C, Al_2O_3-SiC-C, MgO-C, Al_2O_3-MgO-C, Spinel-C, Dolomite-C, ZrO_2-C 등 탄소함유 내화물은 현대의 철강용 내화물의 가장 중요한 부분을 이루고 있다. 내화물에 탄소가 도입되면서 사용 중 내화물 내부에서의 산화물과 탄소의 반응, 외부로부터 침입한 공기에 의한 탄소의 산화반응, 용융금속이나 slag 내부의 산소성분과의 반응, 용융 금속 속으로 용해 등에 의하여 탄소가 소실되어 내화물의 수명이 짧아지는 문제점이 생겼다. 흑연순도와 내식성의 관계를 그림4에 나타내었다. 사용 중 가능한 오랫동안 성능을 유지하기 위해서는 사용 중 탄소의 소실을 억제할 필요가 있으므로 탄소의 산화를 억제하기 위한 여러 가지 형태의 산화방지제가 내화물에 적용되었다. 이 때, 내화물에 탄소의 산화방지로 사용되는 원료의 성분으로 탄화물, 질화물, 금속분말, 저융점 산화물 등이 사용되고 binder로서 유기물인 수지재료를 포함되어 있으므로 내화물은 산화물-탄소-비산화물-금속분말-유기 수지재료로 이루어진 복잡한 시스템을 가지게 되었고 내화물이 사용될 때, 이들로 이루어진 고상-유리상과 금속액상이 복잡한 반응을 일으킨다. 이런 복잡한 시스템의 내화물 재료들과 철과 강의 용융액과의 반응에 대하여 많은 연구가 행해지고 있다.

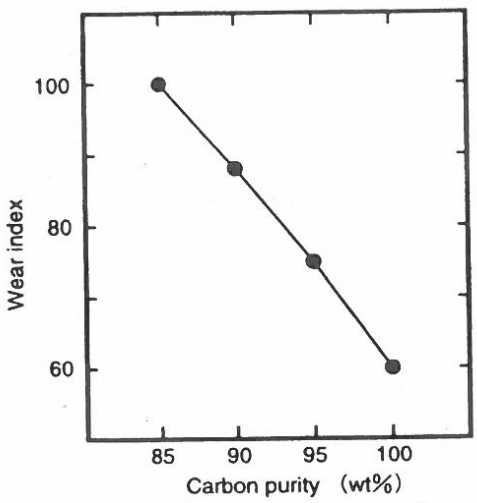


그림4. 흑연순도와 내식성과의 관계

친환경 내화물 기술

Chromium-free alkaline내화물, bio-soluble refractory ceramic fiber, green and eco-friendly 등의 친환경 내화물의 중요성은 점점 증가되고 있다. 전 세계적으로 인체에 유해한 Cr^{6+}의 사용상의 규제는 magnesia-chrome 계열의 내화물에서 새로운 방향으로의 기술 발전 방향을 이끌고 있다. Cr-Spinel은 알루미나 대비 우수한 내화도, slag에 의한 침식, 침투, 팽창의 저항성과 Cr함유 내화물의 대체가능성 등의 장점으로 인해 UNITECR에서 Spinel에 대한 연구가 1989년 4건에서 2011년 22건으로 증가한 것을 매개로 친환경 내화물 기술의 대표주자로 자리매김하고 있다. 또한 인체 유해성을 최소화하기 위해 Cr^{6+} 생성메커니즘을 재연구하거나 스피넬 재질로 대체하는 연구도 진행하고 있으며, 일부는 적용 중에 있다. 특히 Spinel계 내화물은 정·부정형을 가리지 않고 사용할 수 있으며, Spinel의 단독사용 혹은 첨가제와의 복합 반응에 의해 특정 설비에 교유한 특성을 부여할 수 있다는 점에서 더욱 그 사용 범위가 확장될 것이다.

연주용 재순환원료 재활용

Tundish는 일반적으로 ladle에 비해 수강온도가 낮고 예열되기 때문에 열충격 등의 사용조건은 완만하지만 tundish 내화물의 손상은 작업성의 저하 뿐 아니라 주변의 개재물로 작용하여 강품질에 직접적인 영향을 미친다. Tundish 내화물은 내장재로 high-Al_2O_3재질의 brick이나 castable이 사용되고 가동면에는 MgO질의 gunning재가 시공된다. 용강의 청정도 향상과 개재물 유입을 막기 위한 댐에는 high-Al_2O_3재질의 pre-cast block이 적용되고 있다. Tundish 폐내화물은 대수리 시에 발생되는 유입재나 내화 brick을 회수하여 재활용이 가능하지만 대수리를 제외한 수리작업 시에는 폐 MgO gunning재와 slag, 보온재 등이 혼합되어 재활용이 곤란하다. 용강의 유량조절에 사용되는 각종 nozzle 내화물은 stopper나 S/N(sliding nozzle) 등이 있는데 공정 간의 원활한 연결과 생산성 및 설비 안정성 등의 측면에서 그 중요성이 더욱 강조되고 있으며, 특히 강품질 면에서 내화물의 품질 및 사용방법에 대한 요구는 엄격해지고 있다. ladle로부터 tundish로 용강이 주입되는 shroud nozzle이나 tundish로부터 주조몰드로 용강이 주입되는 침적 nozzle은 지금 개재물의 부착 등으로 재활용되지 않고 있다. sliding nozzle plate는 회수되어 tundish 용강 낙하부에 침식방지용으로 사용되기도 하며 일본에서는 침식부위만을 재생하여 사용하기도 한다.

21세기에는 환경과 조화하고 지구환경을 보전하는 것에 대해 인류의 관심과 노력은 더욱 증대될 것으로 전망되며, 지속적인 발전과 순환형 사회구축을 위하여 기업은 환경보전과 자원보호에 대응한 기술개발을 조기 추진하여 생산기술과 일체화 시키는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 폐기물의 자원화 활용기술은 기업생산 process에 요구되는 가장 중요한 기술의 하나이다.

기능성내화물 개발

최근 철강 산업이 위축됨에 따라, 철강회사들은 고청정강 제조 기술 확보를 통해 수요 증대를 꾀하고 있다. 이러한 주사용자 측의 요구에 따라 내화물 산업에서는 단순한 내화용기로써의 기능에서 벗어나 다양한 형상 및 기능성을 부여한 내화물을 개발하고 있다.

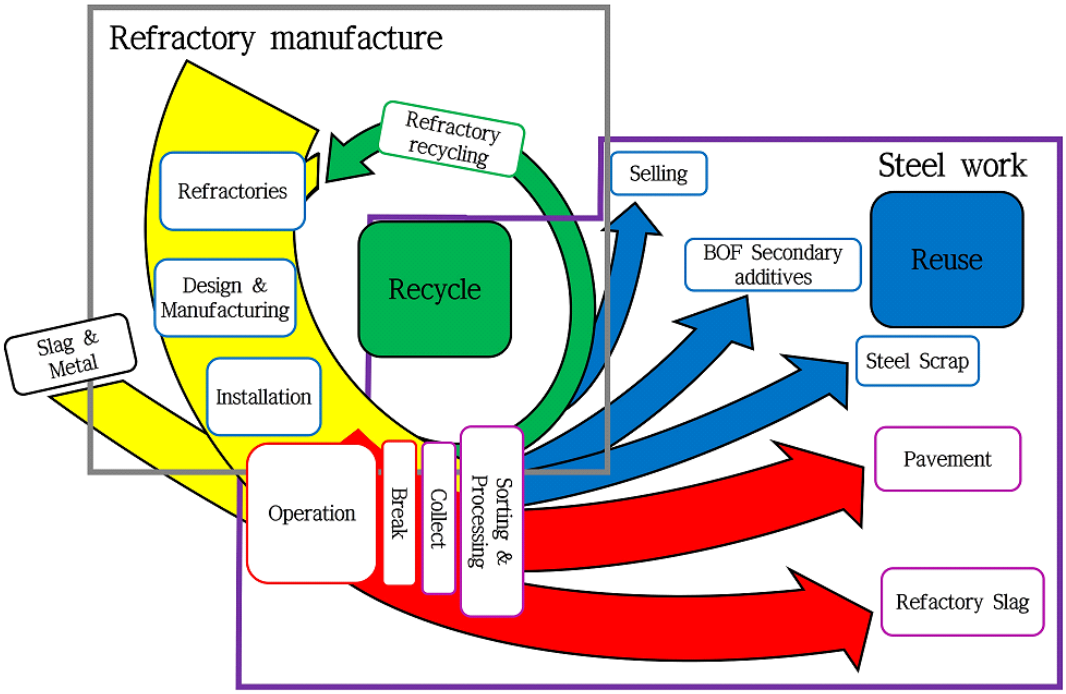


그림5. 내화물 재생 Cycle

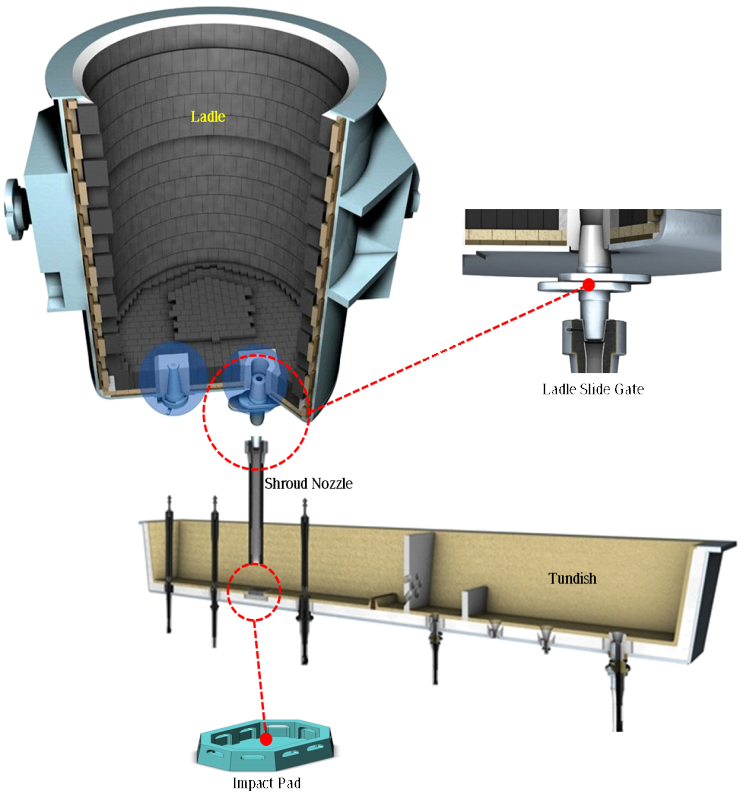
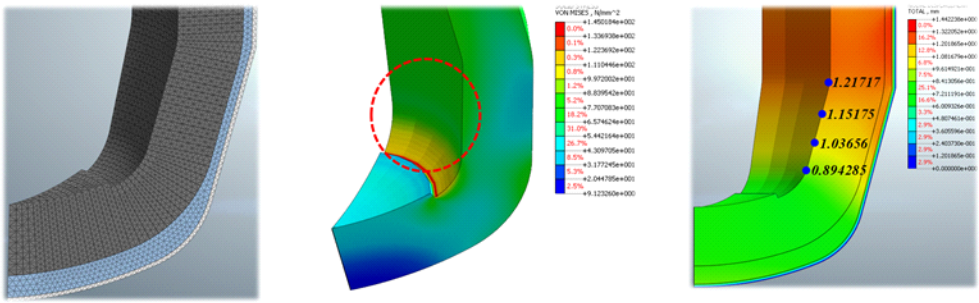


그림6. 기능성내화물의 종류

열응력 시뮬레이션 및 첨단 기술개발

열응력 시뮬레이션 장치를 활용하여 응력분포를 분석함으로써 재질적 또는 구조적 개발을 진행하고 있다. 또한 수모델 시험을 연계한 유체 역학시뮬레이션 프로그램을 활용하여 내화물의 형상에 따른 수명 예측 기술을 확보하고, 내화물의 프로필 변경을 통해 장수명화를 꾀하고 있다. 내화물 재질의 한계점을 극복하기 위해 희토류 원소나 나노 입자의 첨가 및 산화물, 탄화물, 질화물을 복합화한 첨단 기술도 개발 중이다.

※ MgO-C 벽돌 형상 개선



※ Impeller 형상 개선

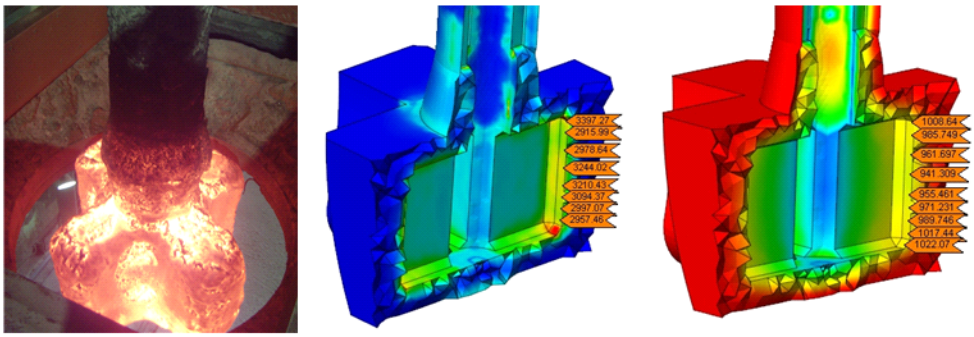


그림7. 구조해석 활용의 예

M	M-C	M-N	M-N-O	M-B
Si	SiC	Si_3N_4	Si_2ON_2	-
Al-Si	-	-	SiAlON	-
Al	Al_4C_3	AlN	AlON	-
Mg-Al	-	-	MgAlON	-
Mg	MgC_2	-	-	-
Zr	ZrC	ZrN	-	ZrB_2
Ca	CaC_2	-	-	-
Cr	Cr_3C_2	Cr_2N	-	-
Ti	TiC	TiN	-	TiB_2
B	B_4C	BN	-	-

표 6. 비산화물계 내화물 재료

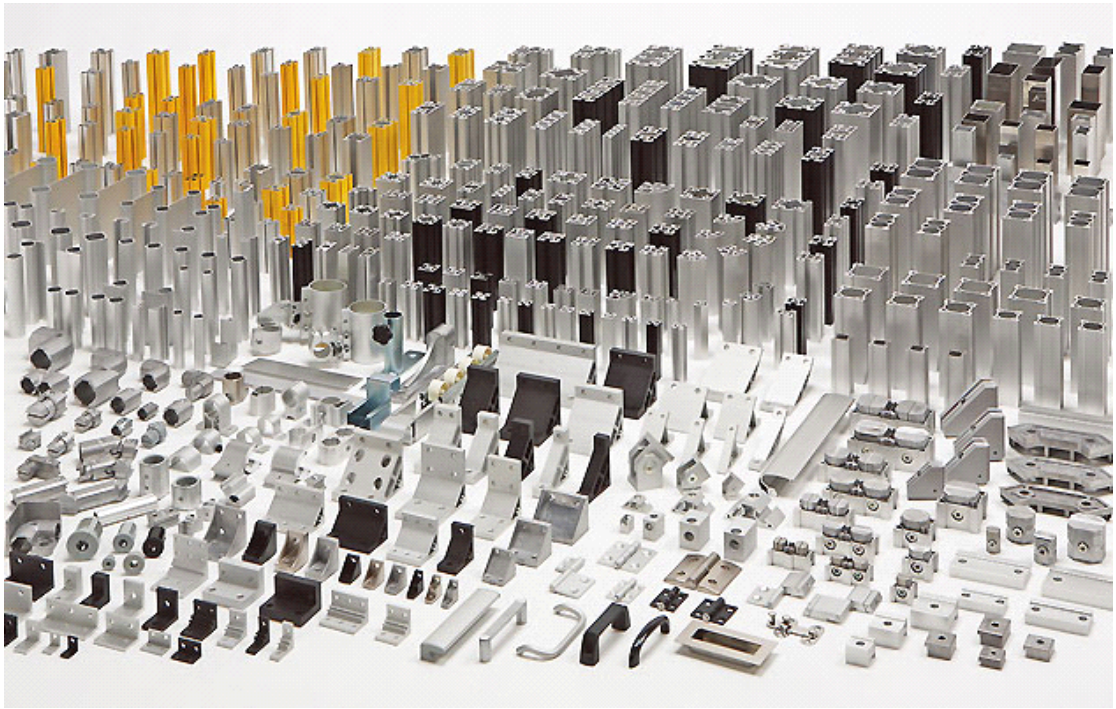
내화물 발전과 앞으로의 과제

국내 내화물 산업은 철강 산업의 증설과 함께 1990년대 중반이전까지 상당한 규모로 성장해 왔다. 국내 내화물 산업은 1970년대 시작된 '경제개발 5개년 계획'부터 급격한 발전양상을 보였고, 철강·건설의 산업 발전에 밑바탕이 되었다. 이후 1990년대 들어와서 국내 대규모 업체의 수출 증대로 해외시장을 개척하고 해외경쟁력을 높였던 시기라고 할 수 있으며, 현재 국내 내화물 산업은 경제 산업 발전에 중요한 밑거름이 되었다. 국내 내화물 생산량의 절반 이상이 철강 산업에 쓰이고 있기 때문에 철강 산업의 경기 흐름에 따라 내화물 산업이 좌지우지 된다고 볼 수 있다. 내화물 산업은 철강 산업 이외에도 시멘트, 화학 등 중공업의 공업용로 및 폐기물 소각로에 사용되고 있어 산업 전반적으로 다양하다. 하지만 최근 닥쳐온 세계적 금융위기 및 경기 침체는 내화물 산업에도 영향을 미쳐 큰 어려움을 겪고 있다. 국내 내화물 업체 간의 과다경쟁으로 인한 가격덤핑, 원부자재의 확보, 인력 수급, 중국을 비롯한 저가 수입제품의 공세, 동종업체 간의 과잉경쟁 등 국내 내화물 산업 내부의 문제도 심각하다. 향후 이런 내외문제를 극복하지 못하면 국내 내화물 산업은 경쟁력을 잃고 말 것이다. 국내 내화물 산업이 예전처럼 호황을 이루기 위해서는 경기 회복이 우선시 돼야 하겠지만 이와 더불어 취약점을 해결할 수 있는 근본적인 대처 방안이 절실한 것으로 보인다. 현재 정부 관련 조합이나 단체들은 국내 경기를 파악하고 해결책을 모색하기 위해 업체 간 교류와 융합이 이뤄지고 있으며 산업발전과 개선방안을 위해 도모하고 있는 단계에 있는 것으로 보인다. 이처럼 국내 내화물 산업은 업체가 독자적으로 해결할 수 없는 부분이 많다. 산·학·연 협력관계 속에 국내 내화물 산업의 고질적인 문제점을 타개하고 향후 선진기술을 위한 기술 증진에 매진해야 할 것이다. 한편, 앞으로 국내 내화물 산업은 전문 세미나와 전시회를 통해 '환경'문제에 부딪히지 않는 기술과 생산 환경에 초점이 맞춰지고 있다. 이는 곧 과거에 비해 내화물 산업이 환경 문제를 줄여 나가는데 주안점을 두고 기술개발을 해야 할 것이며, 주요 선진국들은 이미 이행되고 있음을 직시해야 한다. 예로 실리콘 웨이퍼를 생산하는 과정에서 발생하는 대량의 실리콘 슬러지를 재활용 기술을 통해 SiC 원료로 대체하여 사용할 수 있다. SiC 원료는 고 열전도율, 내스폴링성, 내마모성 및 슬래그에 대한 내식성이 우수하여 제철, 제강 내화물에 많이 사용되는 원료이며, 일반적인 제조 방법은 Acheson 법으로 2,000~2,200℃의 고온에서 48시간 이상 소성해야 한다. 실리콘 슬러지를 재활용하여 얻어지는 SiC를 재활용할 경우, 연간 34,900t/y의 CO_2 저감과 20,000t/y의 산업폐기물 저감효과가 있다. 내화물 산업의 미래를 위해서 내화물 업계는 이러한 재활용 원료를 사용하여도 품질에 문제가 없는 기술을 확보하여야 할 것이며, 소비자는 향후 원가절감 등의 이유로 재활용 원료 사용에 적극 협조하여야 할 것이다.

수송·기계산업 소재

알루미늄 압출재

(Aluminium Extruded Parts)



알루미늄 압출기술

수송기기 산업 및 산업용품 산업에 대해 지속적으로 경량화가 요구되고 있는 현 시점에서 경량소재를 이용한 제품의 개발은 선택이 아닌 필수조건이 되었다. 제품의 경량화는 특히 수송기기 산업에서 연비 향상으로 이어지며, 이는 제한적인 석유자원의 이용 및 환경문제와 직결되어 있는 것으로 세계적인 추세도 소재부품의 경량화를 추구하고 있다. 대표적인 경량화 소재로는 알루미늄, 마그네슘, 타이타늄 등으로 대표되는 비철금속, 탄소섬유, 플라스틱 등이 있다. 이러한 경량소재는 소재 자체의 개발뿐만 아니라, 압연, 압출, 주조, 단조 등 다양한 가공방법이 있으며, 이에 대한 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 본 원고에서는 상기의 다양한 생산 방법 중 하나인 알루미늄 합금과 알루미늄 합금을 이용한 압출기술에 대해 소개하고자 한다.

압출에 의해 생산되는 제품으로는 알루미늄 새시와 같은 건축용 제품, 알루미늄 범퍼 등과 같은 자동차 부품, 방열판으로 대표되는 산업용 부품, 배터리케이스와 프레임과 같은 전자용 부품 등이 대표적인 제품군이다.

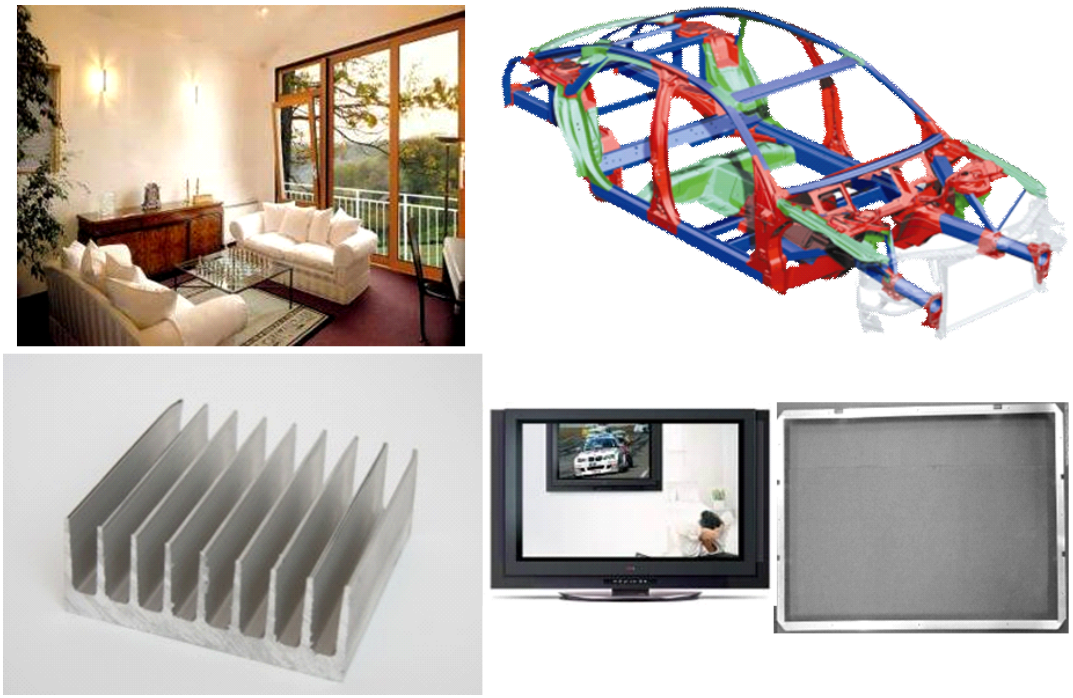


그림 1. 알루미늄 압출 제품

알루미늄 압출기술의 국내외 현황

원소재의 생산은 세계적으로 국가의 보호를 받는 산업 중 하나이며, 세계적으로 알루미늄 원자재 확보를 위한 노력은 꾸준히 진행되고 있다. 한국은 세계 7위의 알루미늄 소비국이며, 그 사용량은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 그러나, 한국에는 보크사이트의 매장량이 전무함에 따라 1차 산업인 알루미늄의 정련 및 제련 산업 또한 전무하며, 알루미늄 제품을 생산하기 위

한 알루미늄 원자재는 전량 수입에 의존하고 있다.

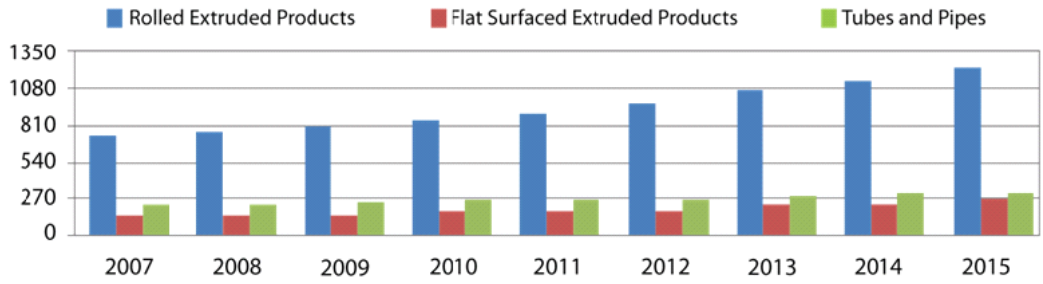


그림 2. 국내 알루미늄 판재, 압출재, 튜브 및 파이프재 생산(단위 : 천톤)

국내 알루미늄 압출재의 경우 압연에 의한 판재의 지속적인 성장세에 힘입어 2012년부터 2015년까지 약 12% 정도의 안정적인 성장세를 유지하고 있으며, 특히 국내의 소비는 전통적인 건축자재 부분에서는 큰 성장이 없지만 자동차, 가전, IT 및 스포츠레저산업에서 지속적인 성장이 전망되고 있다.

자동차부품에 대한 알루미늄 압출 시장의 현황은 아래 표2에 나타낸 바와 같으며, 국내시장 규모는 2012년 약2,715억원의 규모였으며, 2016년에는 약3,656억원 규모로 평균 약 6% 이상의 성장세를 나타낼 것으로 예상되고 있으며, 향후 배출가스 및 연비규제 강화에 따라 그 증가폭은 더욱 클 것으로 예상되고 있다.

구분	년도	시장규모					성장률
		2012	2013	2014	2015	2016	CAGR(%)
국 내 시장	원소재(억원)	1,000	1,120	1,254	1,404	1,573	12%
	샤시부품(억원)	872	915	961	1,009	1,059	5%
	엔진부품(억원)	843	885	929	975	1,024	5%
	합계(억원)	2,715	2,920	3,144	3,388	3,656	
세 계 시장	원소재(억달러)	200	217	230	257	280	8.8%
	자동차부품(억달러)	11.8	12.3	13	13.6	14.3	5%
	IT부품(억달러)	11.4	11.9	12.5	13.1	13.8	5%
	합계(억달러)	223.2	241.2	255.5	283.7	308.1	

표 1 알루미늄 압출 시장현황 및 전망

세계시장에서의 알루미늄 압출 시장현황은 2012년에 223억 달러의 규모로 파악되고 있으며, 2016년에는 약 308억달러 규모에 이를 것으로 전망되고 있다.

알루미늄 압출과 관련하여 주요한 해외업체는 Aleris, Alcoa, Novelis, Kobe, Sapa등의 대기업 중심으로 압출이 진행되고 있으며, 대부분 국내와 동일하게 중소기업형 산업으로 대기업보다는 기술력을 갖는 중소기업형으로 변화되고 있다. 국내의 경우 알루미늄 압출용 빌렛을 생산하는 기업은 성훈, 알루텍, 알루원, 알코 등 대부분 중소기업으로 연속주조 방식으로 주조를 하고 있으며, 중견압출업체의 경우 자체적으로 빌렛을 제조하고 재활용하는 방식을 적용하고 있다. 국내 압출업체는 동양강철 및 신양금속과 같은 중견기업도 있지만 대부분 보원경금속, 코레스, 알

맥스 등 중소기업이 제품의 생산과 기술개발을 담당하고 있으며, 압출산업은 최종제품이 아니라 중간재의 방식으로 전방산업에 공급되는 구조를 가지고 있다. 알루미늄 압출에 대한 공급망 분석 자료를 아래 표 2에 나타내었다.

공급망 단계	원소재	압출	자동차부품
주요내용	알루미늄 원소재 연속주조 및 빌렛제조	고강도 알루미늄 Seam 제어 압출	자동차 샤시 및 엔진부품
주요제품/기술	5XXX계, 6XXX계 및 7XXX계 빌렛	5XXX계, 6XXX계 및 7XXX계 압출	로어 암, 서스펜션 링크, 스테빌라이져 링크, 커넥팅로드, 캠샤프트
해외기업	Alcoa, Hindalco	Alcoa, Norsk	ZF, Magna
국내기업		동양강철 신양금속	센트랄, 서진산업
	성훈ENG, 알루텍, 청송중앙알미늄, 성신산업	보원경금속, 코레스	명화공업, 씬터온
중소기업 참여	●	●	◕
중소기업 시장점유	●	●	◑

표 2. 공급망 분석 종합

알루미늄 압출기술 및 부품에 대한 기술개발 내용을 그림 3에 나타내었다. 알루미늄 압출은 100년 이상 진행되었기에 알루미늄 압출을 이용한 새로운 제품의 개발은 거의 이루어지지 않고 있으며, 경량화와 고강도를 위한 단면형상의 변경을 주로 하고 있다.

기술적인 측면에서 최근들어 마찰교반 용접을 응용한 마찰교반압출이 간접압출법에 의해 시도되고 있으며, 이는 용해 및 빌렛주조와 같은 공정을 배제할 수 있는 방법으로 향후 선재의 압출에 이용될 가능성이 많은 공정기술이다.

그리고, 한국생산기술연구원에서 개발한 에코알루미늄은 최근 상용화 단계에 접어들어 그 활용범위를 점점 넓혀가고 있다.

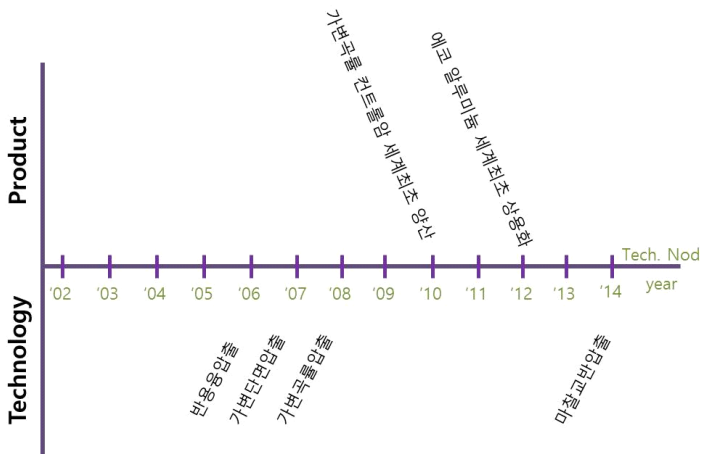


그림 3. 알루미늄 압출의 기술 및 제품

알루미늄 압출

압출은 판재의 성형 및 가공, 주조나 다이캐스팅 제품의 성형과는 차별되는 기술이며, 동일한 단면을 갖는 제품에 대한 연속적인 작업이 가능한 생산기술이다. 일반적인 알루미늄 압출은 온간에서 실시하고 있으며 원자재인 알루미늄 합금 빌렛을 일정온도 이상 가열하고, 압출기의 램을 전진시켜 빌렛을 압축시키고, 구현하고자 하는 단면 형상을 갖는 금형의 내부로 알루미늄을 통과시켜 제품이 만들어 지도록 하는 제조기술이다.

제품을 제작하는 다른 방식과의 차이점으로 압출은 일정한 단면을 갖는 제품이 연속적으로 나오게 되며, 제품을 원하는 길이로 절단하여 사용할 수 있으므로, 생산성이 높으며 대량생산이 가능한 장점이 있다. 따라서, 봉재, 각재 등의 동일한 단면형상을 가진 제품의 대량생산에 유리한 가공방법이다.

알루미늄 압출에 필요한 것들은 알루미늄 빌렛이라고 하는 알루미늄 원자재, 압출금형, 후면설비를 포함한 압출기, 열처리장비 등이 있으며, 표면 경화와 다양한 색상 구현을 할 수 있는 표면처리 장비 등이 있다.

알루미늄 빌렛

알루미늄 빌렛은 제품에서 요구되어지는 용도, 물성등에 따라 다양한 합금이 있으며, 가장 널리 사용되는 압출용 알루미늄 합금은 A6061과 A6063이다. A6061은 건축용 및 산업용에 적합한 고강도의 합금으로 널리 사용되고 있으며, A6063은 알루미늄 창호용 섀시, 알루미늄 방열판 등의 제품생산에 많이 사용되고 있는 합금이다. 합금계의 올바른 선택이 제품의 특성을 만족시키는 첫 걸음이므로 올바른 합금의 선택이 매우 중요하며, 최근에는 압출업체별로 제품의 특성을 고려하여 자체적으로 개량화 시킨 합금을 사용하는 경우도 많이 있다.

압출금형

압출금형은 제품의 단면형상을 결정하는 중요한 도구이며, 금형의 형상과 구성을 어떻게 하느냐에 따라 제품의 단면 구현, 생산성, 품질 등이 결정될 수 있다. 그러므로 금형의 설계, 제작 그리고 시압출 이후의 수정등이 매우 중요한 요소기술이며, 금형의 설계 및 제작은 각 회사의 know-how로 취급되고 있다.

압출금형은 Solid 금형과 hollow 금형으로 구분되며, Solid 금형은 금형 홀더, Flow guide, female, backer, bolster등으로 구성되며, 방열판이나 폐구멍이 없는 압출재를 제작하는 용도로 사용하고, 용착선(Seam)이 형성되지 않는다. Hollow 금형은 male 금형이 추가되어 있으며 폐구멍이 있는 단면을 갖는 제품의 압출에 사용되며, male 금형에 존재하는 port hole의 수에 따라 제품의 단면에 용착선이 형성된다. 이러한 용착선의 형성 및 접합은 다음 그림4와 같이 설명될 수 있다.

Male 금형의 bridge 부분을 통과해서 나누어진 알루미늄이 weld chamber를 통과하면서 다시 뭉치게 되고, 압출 female 금형을 통과하면서 받는 압력에 의해 물리적인 용착선이 발생하며 최종적인 제품형상을 나타내게 된다. 또한 빌렛의 연결부에 의해 압출재의 전, 후방결함 및 용접부 및 결함의 발생은 위의 그림 5와 같은 charging model로 설명할 수 있다.

금형의 Port hole 내부에 충진되어 있는 기존의 빌렛 내부로 유동속도의 차이에 따른 후속 빌렛의 중심부가 이동하게 되며 2상 압출과 유사한 형태의 압출단면을 확인할 수 있으며, 후속 빌렛이 완전히 충진된 이후부터 정상적인 용접부를 가진 압출재의 생산이 가능하다. 따라서, 금형의 Port hole의 크기를 어떻게 하느냐에 따라 전, 후방부 결함의 길이를 결정할 수 있으며, 제품의 생산수율에도 크게 영향을 미치게 된다.

그리고, 압출재의 치수 정밀도, 기계적 특성 및 표면품질을 결정하는 압출금형에서의 주요 요소는 금형의 베어링 형상 및 길이이다. 금형 베어링의 길이가 길어질수록 금속의 유동 및 마찰에 의한 열 및 압력의 발생이 많으므로 미세조직 관리와 표면 품질 등이 저하될 수 있으며, 베어링의 길이가 짧아질수록 치수 정밀도의 관리가 어려워지는 단점이 있다. 그러므로, 적절한 베어링 길이를 갖도록 하는 것이 압출성, 표면품질, 미세조직관리 등을 하는 것에 매우 중요한 역할을 한다.

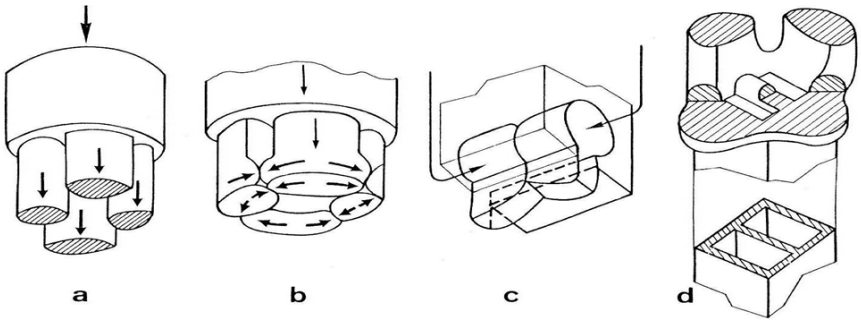


그림 4 압출 시 용착 개념도

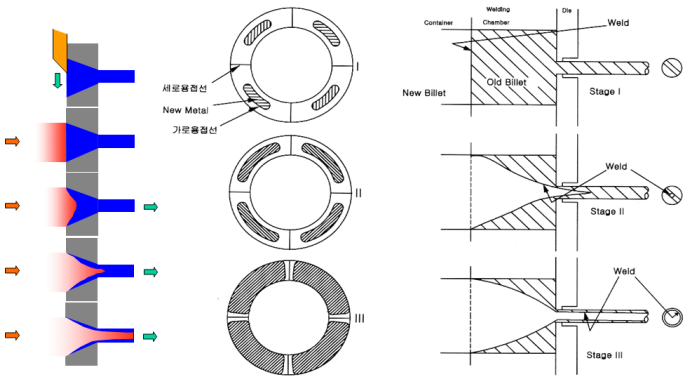


그림 5 압출의 결함

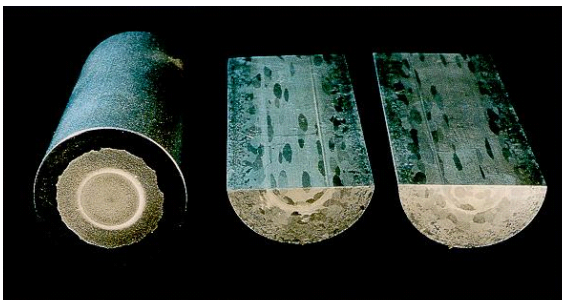


그림 6(a) 후방결함

그림 6(b) Butt부의 후방결함

압출기 및 압출공정

압출기는 빌렛예열로, 빌렛투입장치, 유압압출장치, 컨테이너, 램(멘드렐), 금형투입구, 후면설비 등으로 이루어져 있으며, 대부분의 압출은 유압프레스 방식에 의해 행하여진다.

그림 7 압출기

또한 압출기는 1,000ton 압출기 또는 9.8MN 압출기 등과 같이 압출기의 용량에 따라 구분될 수 있으며, 알루미늄 빌렛의 직경에 따라 구분되기도 한다.
압출기의 구동방식에 따라 크게 직접압출 및 간접압출로 구분된다.

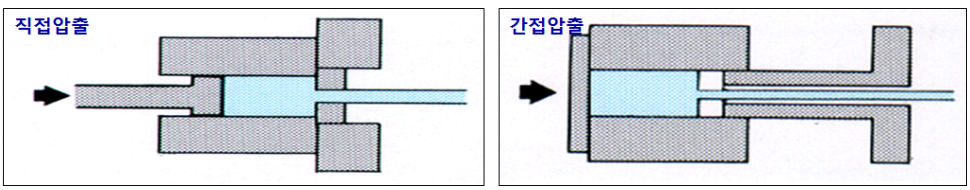


그림 8 압출의 종류

직접압출은 메인 램의 이동방향과 알루미늄 제품이 동일한 방향으로 압출되는 방식이며, 압출속도가 빨라 생산성이 높은 장점이 있으며 연속적인 생산이 가능하나, 컨테이너벽과 소재 사이에서의 마찰로 인해 압력이 증가하여 고력소재의 압출에 적용하는 것은 한계가 있으며, 압출 시 온도의 조절이 간접압출에 의한 것보다 어려운 단점이 있다. 또한 Hollow 압출재의 제작 시 용착선이 있는 Seam pipe의 생산이 가능하다.

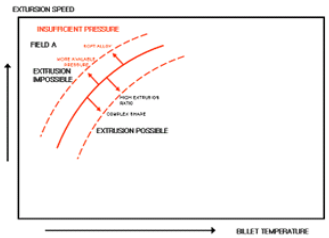
간접압출은 메인 램의 이동방향과 제품이 생산되는 방향이 반대방향인 압출방법이며, 빌렛과 컨테이너 사이에 마찰이 없으므로 직접압출 대비 압출 압력이 높지 않아 고력제품의 압출에 적당하며 제품 생산 중 압출온도의 변화가 거의 없는 장점이 있는 반면 연속적인 작업이 어려운 단점이 있다. 또한, 간접압출 방식에 의해 hollow 제품 생산 시 용착선이 없는 seamless pipe의 생산이 가능한 장점도 있다.

압출을 포함한 알루미늄 제품의 생산은 다음과 같은 공정에 의해 진행된다.

알루미늄 원자재 및 합금원소의 용해 주조, 균질화처리, 빌렛 및 금형예열, 압출, 스트레칭, 절단, 시효처리, 가공, 표면처리, 조립의 순으로 공정이 진행되며, 그 중 알루미늄 압출압출공정에 대해 언급하고자 한다.

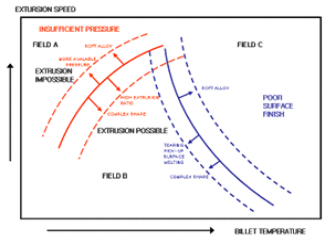
알루미늄 압출의 주요 변수는 온도, 압력, 속도이다. 온도는 빌렛예열온도, 컨테이너 온도, 금형온도를 나타내며, 최종적으로 온도와 압력, 속도가 복합적으로 작용함으로써 제품의 출구온도와 냉각속도에 따른 제품의 온도관리가 중요하다.

압출을 통하여 생산성, 기계적 특성, 품질등을 제어할 수 있는 최적 조건을 한계선도로 표시한 것을 operating window라고 부르고 있으며, 이에 대한 내용은 아래 그림9와 같다.



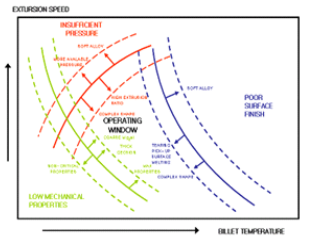
압출압력 vs 공정변수

그림 9(a) 압력한계도



압출압력 vs 공정변수 vs 표면품질

그림 9(b) 품질한계도



압출압력 vs 공정변수 vs 기계적특성

그림 9(c) 물성 한계도

압출 압력에 대한 한계선도에서 생산성을 고려할 경우 일반적으로 빌렛예열온도를 높일 경우 한계선도는 오른쪽으로 이동하게 되며, 이때 압출속도도 증가하게 된다. 그러나, 무한정 빌렛예열온도를 높이거나 압출속도를 증가시킬 수 없으며, 생산성을 고려할 경우 한계선도의 좌측으로 이동시켜야 함을 알 수 있으나, 일정범위를 벗어나게 되면 불충분한 압출압력으로 인해 정상적인 제품을 얻을 수 없다. 또한, 압출비가 클수록, 그리고 복잡한 형상일수록 한계선도의 우측에서 압출을 실시하여야 함을 알 수 있다.

A6XXX계 합금의 경우 빌렛은 400~500℃ 범위 이내에서 예열하여 압출을 하며, 압출 시 제품의 온도는 약 500~570℃를 유지하는 것이 일반적인 경우이다. 이러한 빌렛예열 및 압출온도는 생산성과 표면품질, 기계적 특성 등을 고려하여 합금 재질별로 특성화하여 관리하여야 한다.

일반적인 압출 시 압출초기와 말기의 출구온도차가 발생하며, 이는 압출 시 마찰에 의한 온도상승 구간의 발생 및 온도의 전달과 압출 속도의 차이에 의한 것으로 압출 온도의 차이발생은

제품의 물성에 영향을 미치게 된다. 따라서, 압출온도의 편차 발생을 줄이기 위하여 빌렛의 앞과 뒷부분의 예열온도를 다르게 함으로써 압출 시 출구에서의 온도편차를 균일하게 할 수 있는 taper heating을 사용하기도 한다. 균일한 압출재를 확보하기 위해 상기와 같이 Taper heating을 함으로써 등온압출에 의한 물성을 확보하는 방법이 있으며, 최근에는 등온 및 등속압출을 함으로써 제품의 물성 및 표면품질을 확보하는 방법도 사용되고 있다.

다음으로 표면 품질을 고려한 한계선도에서 soft alloy의 경우는 한계선도의 우측범위에서 압출을 실시하여야 하며, 고강도 합금에서는 한계선도의 좌측범위에서 실시하여야 표면의 품질을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, soft alloy에서도 무한정 우측의 범위로 이동할 수는 없으며, 표면품질이 양호한 범위내에서만 이동할 수 있다. 압출재의 표면품질 개선 및 금형의 과열방지를 위한 방법으로 질소 냉각법이 있으며, 이는 금형에 질소를 투입할 수 있는 유로를 형성시키고 그 유로를 통해 기화된 질소를 통과시킴으로써 베어링 주위의 온도 상승을 억제하는 방법도 널리 사용되고 있다.

마지막으로 기계적 특성 및 표면재결정 층 생성억제를 위한 출구온도의 제어를 고려한 한계선도에서 조대석출물이 있는 경우 한계선도의 우측범위내에서 압출이 이루어져야 하며, 미세석출물이 있는 경우는 한계선도의 좌측에서 압출을 하는 것이 바람직하다. 그리고, 재결정 및 결정립조대화가 발생할 경우 피로특성 저하를 유발하게 됨에 따라 제품의 내구성이 감소할 수 있다. 따라서, 빌렛, 컨테이너 및 금형의 예열온도와 압출속도를 적절하게 조합하고 기계적특성 및 표면품질 등을 고려하여 각 재질에 적합한 압출조건을 찾는 것이 중요하다.

최신 압출기술

일반적인 압출은 동일한 단면을 갖는 직선형태의 압출재의 생산방법이 일반적이나, 최근들어 기존 생산 방법에서 구현되지 않았던 단면의 변화나 곡선형태의 압출 등 새로운 압출기술을 접목한 시도가 다양하게 이루어지고 있다. 대표적인 방법이 가변곡률압출, 가변단면압출, 융합공정 등이 있다.

가변곡률압출은 기존 압출기의 출구에 압출과 동시에 곡률을 형성시킬 수 있는 가이드금형을 설치하여 고온에서 곡률을 형성하고 냉각장치를 통과함으로써 압출재의 기계적 특성 감소가 없으며, 냉각 후 곡률을 부여하는 일반적인 압출과는 달리 스프링백 현상이 없고, 잔류응력이 최소화되어 고 내구성 부품의 제조가 가능하며, 합금 및 재료의 종류에 무관하게 소성변형이 가능함에 따라 난성형성 소재에도 적용이 가능하다. 또한, 공정시간단축, 공정수 절감으로 생산성이 향상되어 제조 공정비용의 절감이 가능하다.

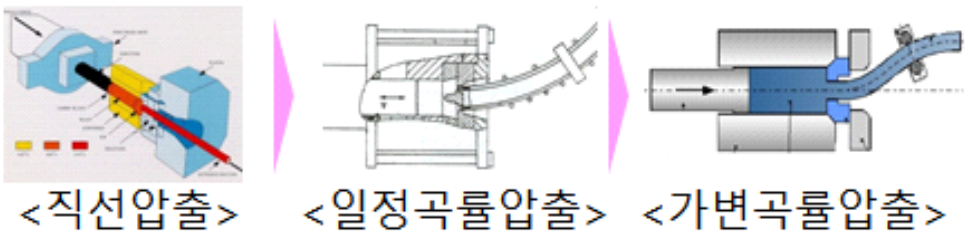


그림 10 직선압출 및 곡률압출

가변곡률 압출을 실시하기 위해서는 금형제작기술 및 압출기술이 동시에 수반되어야 하며, 특

히 금형설계 시 금형 및 제품의 치수정밀도를 확보할 수 있는 금형제작기술이 필수적이며, 2차 가이드 금형에 의해 단면형상을 유지할 수 있는 방안의 확보도 필요한 기술이다. 압출공정에서는 고온의 온도를 유지할 수 있는 고온압출장비의 확보가 필요하며, Ram 및 2차 가이드 금형의 이동속도를 조합하여 속도조절하는 것이 필수이고, 압출재의 강도확보를 위한 수냉설비도 반드시 필요한 부속설비이다. 가변곡률 압출에 있어서도 품질확보 및 생산성 향상을 위해 등온 및 등속압출을 이용하여 압출하는 것도 반드시 수반되어야 한다.

일반적인 압출은 압출재의 단면이 일정하며 연속적인 생산이 가능한 기술이다. 이에 비해 가변단면압출은 압출 시 압출금형의 조작을 통해 압출재의 단면을 변화시킬 수 있는 압출방법으로 후가공에 의해 단면형상을 변형시켜야 하는 제품의 생산에 적용될 수 있으며 공정수 절감 및 공정시간 단축 등의 장점이 있다.

가변단면압출은 메인램과 가변램에 의해 압출소재를 가변 압출하고, 제어수단에 의해 메인램과 가변램의 이송변위를 연산 및 제어하는 방법으로 압출한다.

이는 금형을 이송시키지 않고 펀치의 이송을 통해 압출홀을 가변시키고 제품을 압출성형 함으로써 금형의 구조를 단순화시키고 제품의 품질을 향상시키는 한편, 구동기구의 구동을 통해 압출홀을 가변함에 다라 제품 외형에 일정 피치의 형상을 연속적이고 반복적으로 형성할 수 있도록 하는 방법이다.

융합공정은 압출과 인발, 압출과 스웨이징 또는 압출과 하이드로포밍 등의 방식 등이 있으며, 가변곡률 및 가변단면을 동시에 응용할 경우 장비가 복잡해 지는 단점이 있으나 형상구현의 자유도가 증가할 수 있으므로 기술개발을 통한 제품 생산에 응용할 필요성도 부각되고 있다.

소재부품의 특징

알루미늄 압출공정이 적용되는 대표적인 자동차부품은 범퍼이다. 알루미늄 범퍼는 일부 차종에 A6XXX계 합금을 사용하며, 대부분 A7XXX계 합금을 이용하여 제작하고 있다. 일반적으로 사용되는 알루미늄 범퍼용 알루미늄 합금의 물성은 인장강도 약 400MPa 의 특성을 나타내는 A7XXX계 합금이나, 최근 부품의 강도향상 및 차량 중량절감을 위해 기존 소재보다 고강도를 갖는 합금 및 압출기술의 개발이 진행되고 있다.

범퍼는 차량의 전 후방 충돌 시 1차로 충격을 흡수하여 운전자 및 승객의 안전을 확보하는 매우 중요한 역할을 하는 차체 부속품이다. 차량의 제일 앞쪽과 뒤쪽에 위치하며, 철재범퍼 및 알루미늄 범퍼가 사용되고 있으며, 차량 경량화 및 고급화를 위해 알루미늄 범퍼의 사용을 늘리고 있는 추세다.

범퍼는 범퍼레일, 스테이, 스테이 플레이트로 구성되며, 동일한 재질을 사용하여 압출하여야 한다. 범퍼레일은 임의 각도에서 충돌할 경우를 대비하여 압출재에 곡률을 부여하여 제작하며, 스테이는 범퍼레일과 스테이 플레이트를 연결시켜주는 부속품으로 충돌 시 충격의 흡수가 용이하도록 형상을 설계하는 것이 중요하다. 그리고, 스테이 플레이트는 스테이와 차체간에 견고하게 고정될 수 있도록 제작되어야 한다.

범퍼용 소재의 압출 시 주요하게 고려해야 할 사항은 빌렛 예열온도 및 압출속도, 그리고 출구온도의 관리이다. 고력 소재의 특성 상 압출 생산성이 저하됨과 동시에 높은 압력을 받아 압출이 중단되는 현상이 종종 발생할 수 있다. 일반적인 A7XXX계 빌렛의 예열은 450~550℃의 범위 내에서 제품의 특성에 맞게 예열하고, 압출 속도는 0.5~5mm/sec의 범위에서 이루어진다. 이때 출구온도는 500~550℃를 유지하여야 한다.

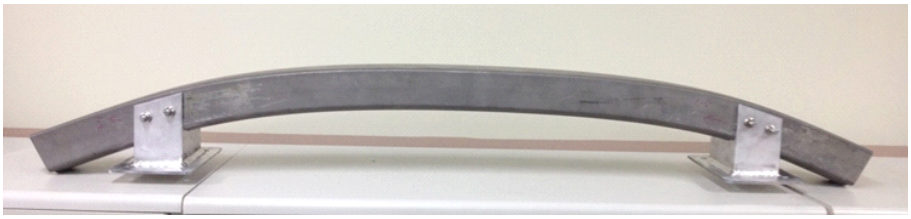


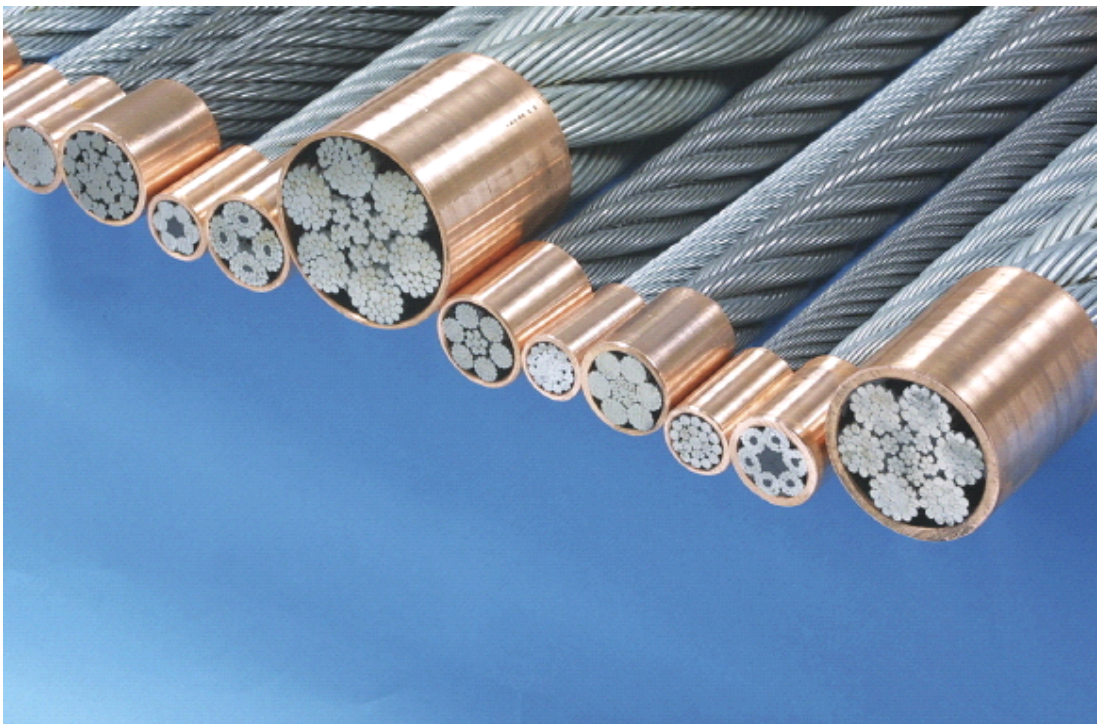
그림 11 알루미늄 범퍼

압출재의 강도확보를 위해 압출 이후 열처리를 실시하며, 요구되는 물성을 만족시키는 범위 내에서 T5, T6, T651, T7 등의 열처리를 실시하는 것이 일반적이며, 압출 및 가공이 완료된 알루미늄 범퍼를 그림 11에 나타내었다.

성공적 소재기술개발의 시사점

알루미늄 압출기술은 다양한 제품을 양산하는데 적합한 생산기술 중 하나이며, 기술의 성숙도는 완료된 것이 아니라 현재 진행형으로 보아야 할 것이다. 현재까지 개발되어 있는 공정기술에 한정하지 않고 기술의 융합공정을 통해 공정단축 및 생산성을 향상시킬 수 있는 알루미늄 생산기술이 될 수 있기를 바란다.

선재
(Wire Rods)



선재의 특징

선재(Wire rod)는 볼트, 못, 와이어와 같이 일상생활과 밀접한 제품부터 타이어코드, 밸브 스프링, 베어링 등 자동차 부품과 정밀 너트 등 기계부품까지 산업전반에 널리 사용되는 철강소재이다. 선재는 일반적으로「선의 재료」의 의미로써 철강재 중 봉형강류에 속하는 제품으로 열간압연된 강재를 형상별로 분류한 명칭의 하나이며, Billet (중량: 2톤)을 공형 Roll로 열간압연하여, 단면이 둥글고 코일(Coil) 형상으로 감겨져 있으며 길이가 최대 10,462m정도이다. 또, 2차 가공 공정 중 인발기를 거친 봉 형태의 제품을 일정 길이로 절단한 것을 선재와 구분해 바인코일(Bar in Coil)이라고 부른다.

선재의 단면 형상은 대부분 원형이지만 그 용도에 따라 육각형, 정방형, 장방형 및 이형 단면이 생산되고 있다. 치수 범위는 직경 5.5~42.0mmØ가 주로 생산되고 있으나 용도에 따라 5.0mmØ의 소경이나 50.0mmØ 전후의 극대경 선재도 출현하고 있다. 중량은 1000~2000kg의 코일이 일반적이나 2차 가공메이커의 생산성, 실수율 향상을 목적으로 3000~4000kg 전후의 선재도 생산되고 있다. 포스코는 5.5~42.0mmØ의 2000kg 원형선재를 일반적으로 생산하고 있다. 선재는 탄소 함량에 따라 보통 선재와 특수 선재로 구분되는 데, 선재업계 내에서는 용도에 따라 경강선재, 연강선재, 냉간압조용 선재(CHQ wire), 스테인리스선재, 용접봉 등으로 나눈다.

보통선재는 탄소함유량이 0.09~0.25%로 전성과 연성이 뛰어나며 특수선재는 탄소함유량이 0.25~0.6%인 반연강, 경강, 최경강과 탄소함유량이 0.09% 미만인 최연강 등이 있다. 이와 함께, 자동차 등 각종 기계부품에 활용되는 냉간압조용 선재(CHQ Wire), 용접봉에 쓰이는 아크용접봉심선용 선재 등이 있다. 선재는 보통 2차 가공 이상을 거치기 때문에 그대로 사용되는 경우는 없으며 60% 이상이 조립 금속제품 제조용에 소비되고 그 외 전기전자 제품 제조용, 자동차 산업용, 일반기계 및 건설용 등으로 활용된다.

그림 1. 선재제품 용도 및 제조공정 예

선재 산업의 특징 및 국내 현황

우리나라 선재산업은 1959년 동국제강이 최초로 영등포 당산동에 연산 2천t 규모의 철선 아연도금 공장을 신설한 후 1973년 12월 영창철강이 연산 1만t 규모의 압연공장을 가동, 1978년 포스코가 포항에 연산 60~70만t 규모의 선재1공장을 짓게 되면서 본격화되기 시작했다. 1970년대 후반 국내 선재 수요 구조는 보통선재였지만 특수선재의 수요 증가에 따라 1980년대에는 수입의존도가 높은 자동차부품 소재용 특수강 선재를 공급하기 시작했다.

이어 고급강 대량 생산을 위한 초고속 압연 생산체제를 갖추기 시작하면서 자동차 타이어용 스틸코드, 스테인리스선재 등이 생산되었다. 1990년대에는 연소제어시스템을 구축하고 고장 발생 방지를 위한 가이드 모니터링 시스템 등을 도입했으며, 2000년대에는 제어압연, 제어냉각 설비 운영기술을 통해 선재 가공업계의 열처리를 생략할 수 있는 제조 프로세스를 확보해 원가절감 등을 이루게 되었다.

선재는 고로와 전기로에서 생산되는 Billet을 선재압연기로 압연, 냉각해 제조된다. 고로나 전기로로부터 제조된 Billet은 가열로, 선재압연, 냉각 공정 등을 거쳐 선재로 완성되며 검사, 포장 공정 등을 거쳐 2차가공 공정으로 이동한다. 한국신용평가정보에 따르면 선재는 만성적인 공급부족 품목으로 2009년 기준 총 출하량 가운데 내수 출하 비중이 81%를 기록하는 등 내수 의존적인 산업이며 보통 볼트, 너트, 스프링, 와이어로프 등 2차 가공품 형태로 자동차나 기계 산업에 투입되기 때문에 산업 전반의 경기변동에 영향을 받는다.

국내 선재 시장은 일반강과 고급강을 모두 생산하는 포스코와 연강선재 전문업체인 코스틸, 특수강선재를 생산하는 포스코특수강, 동부제철, 세아특수강, 동방금속공업 등이 참여하고 있다. 특히, 동부제철은 2011년 1월부터 선재사업부문을 동부특수강으로 분사했다. 동부특수강은 결국 현대제철에 흡수되었지만 생산규모가 50만t 수준으로 CHQ 와이어, CD Bar, 스테인리스 봉강 등 고부가가치 특화제품 개발에 주력하고 있다.

특수강업계는 쇳물을 봉강과 선재로 만드는 상공정(1차공정)과 이를, 가공 판매하는 하공정(2차공정)으로 나뉘는데, 세아그룹에 흡수된 포스코특수강과 세아그룹의 세아베스틸이 1차업체, 현대제철에 흡수된 동부특수강, 세아특수강 등이 2차업체에 해당한다. 일반 탄소강 시장(약 40조원)의 10분의 1에 해당하는 '틈새 시장'으로 세아그룹이 국내 시장 점유율 절반을 차지하며 1위를 지키고 있다. 특히 2016년 2월부터 현대제철은 특수강공장을 통해 연산 100만톤의 특수강 제품을 생산할 예정이며 이중 60만톤은 특수강 봉강제품이며, 40만톤은 자동차 스프링 및 볼트, 너트의 원자재인 특수강 선재 제품을 생산, 시장에 진입하여 단숨에 업계 2위에 오를 예정이다. 한편, 선재 제품 생산업체들은 최근 지속되고 있는 저가 중국산 제품의 국내 시장 유입 확대와 이로 인한 국산 제품의 판매 감소와 시장 점유율 하락 등과 관련해 상당한 위기감을 느끼고 있다. 2014년 1~2월 선재 생산 및 판매량은 각각 8.6%와 8.2%가 감소한 것으로 나타난 반면 수입량은 2013년 대비 13%가 증가하였는데, 국내산에 비해 가격이 다소 저렴한 중국산 선재의 수입 확대의 영향이 컸다.

특히 연강선재 및 관련 제품은 저가 수입 제품의 증가가 국내 중소형 업체들의 생산 및 판매 활동을 크게 위축시키고 있으며 결국 국내 제품 생산업체들의 존립 기반을 위태롭게 하고 있다. 연강선재의 국내 수요량 가운데 50% 이상, 50만톤을 넘어서는 양이 중국산에 의존하고 있다는 것 자체도 부담이다. 현재는 다른 국가들에 비해 낮은 가격에 수입이 되고 있지만 만약 국내 연강선재 생산 기반이 지금보다 열악해져 결국 중국산 선재 의존도가 절대적으로 높아진다면 지금처럼 낮은 가격에 수입할 수 있을지 의문이 제기되고 있다.

경강선재 제품의 경우 중국에 생산설비를 갖춘 업체들은 내부적 구조조정을 통해 국내 생산으로는 수익을 내기 어려운 제품을 위주로 중국에서 생산하는 체제를 중장기적으로 고려하고 있다. 실제 고려제강은 중국 청도에 공장을 마련하였고, 영흥철강도 중국공장 제품을 활용하고 있다. DSR제강도 중국내 공장 활용방안에 대해 적극적으로 검토가 이뤄지고 있는 것으로 알려지고 있다. 그러나 이외 업체들의 사정은 그다지 좋은 편이 아니다. 특히 범용 제품 생산 중심의 업체들은 가격 경쟁에서 밀리면서 시장 축소가 불가피한 실정이다.

중국산 선재를 사용해 제품을 생산한다해도 이보다 저렴한 가격에 완제품 수입이 이뤄질 경우

사실상 경쟁이 불가능하기 때문이다. CHQ용 선재 제품의 경우에도 고품질을 요하는 자동차 부품용을 제외하고 일부이지만 중국산 수입재의 사용이 가능해졌다는 점은 장기적으로 제품 생산 및 판매 활동에 위기를 초래할 수 있다고 볼 수 있다. 또한 비열처리 제품을 중심으로 국산 소재 구매 가격 수준에 제품 수입이 이뤄지고 있는 실정이어서 자동차용을 제외하고 수요 확대에 제한적인 상황인 것으로 추정된다.

범용 철물 제품의 경우에도 중국산 소재 및 가공 완제품의 시장 비중 확대가 지속되고 있다. 소규모 업체들의 경우 생산 자체를 포기하는 사례가 늘어나고 있고 중견업체를 중심으로 자동차용과 고품질 제품 위주로 체질을 개선하거나 중국 내 생산시설을 마련하는 등의 노력을 기울이고 있다. 그러나 원자재 가격 차이에서부터 초래된 완제품의 가격 경쟁력 저하로 인해 범용 제품은 수입 원자재 사용 비중 확대가 불가피하고 국산 원자재를 사용해야 하는 고품질 제품에서는 수출 증가와 같은 수요 확대가 저해될 우려가 높다.

선재 주요제품

선재제품은 제품의 외형에 사용되는 판재와 달리 강재와 강재 사이의 연결 부위, 운동을 전달하는 축 부위 및 콘크리트나 타이어의 보강재 등에 사용되고 있다. 이러한 사용 부위 특성에 따라 선재제품은 제품의 건전성을 크게 강조함과 더불어 두가지 개발 흐름이 진행되고 있다. 첫 번째는 선재제품의 고강도화이다. 강재와 강재의 연결부위에 사용되는 소재가 고강도화가 되면 그 접합부의 면적을 축소할 수 있으며 이것은 전체 디자인을 축소할 수 있어 자동차 엔진의 경우 현재 주요 흐름이라 할 수 있는 엔진 다운사이징 등에 큰 영향을 줄 수 있게 된다.

또 하나의 흐름은 복잡한 가공공정을 거치는 선재제품을 공정 단순화를 통해 Total Cost 관점에서 저원가를 실현하는 방법이다. 철강 제품의 경쟁이 치열하게 진행되면서 더 높은 가격경쟁력이 요구됨에 따라, 제품의 가공 공정을 생략 또는 단순화하므로서 전체 제조원가 및 에너지를 저감하는 방향으로 개발이 진행되고 있다.

와이어로프

와이어로프(wire rope)는 선재 중에서도 탄소 함유량이 높은 선재(소선)를 열처리하여 여러 층으로 꼬아 만든 밧줄이다. 심재(心材, 코어(core)) 둘레로 스트랜드(strand)를 꼬아 만든 구조로 되어 있고, 스트랜드는 수많은 소선을 꼬아 만든다. 와이어로프는 각종 교량, 토목, 건설, 및 운송운반 장비 등에 폭넓게 활용되고 있다.

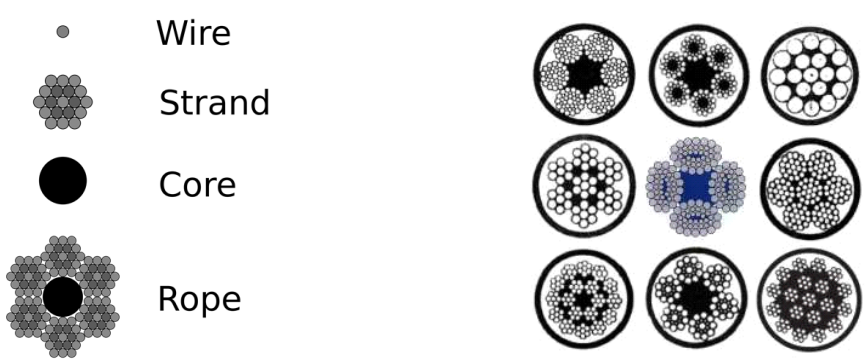


그림 1. 철선으로 구성된 와이어로프 단면

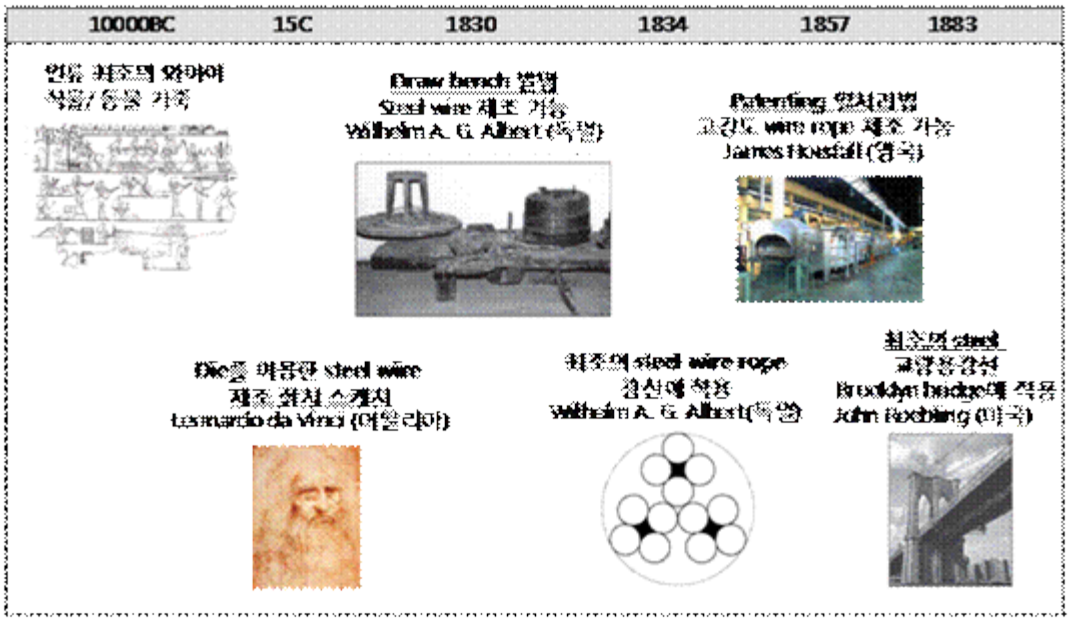


그림 2. 와이어로프의 역사

교량용 강선은 케이블 교량에 사용되는 와이어로프이며 케이블 교량은 교량에 작용하는 하중을 고강도 강선을 이용하여 지지하는 교량으로 현수교와 사장교로 분류된다. 우리나라에서 볼 수 있는 광안대교, 남해대교, 영종대교, 이순신 대교는 모두 현수교이며 현수교는 교상이 하중을 견디는 케이블에 매달려 있는 다리이며, 케이블은 다리 양끝 땅속에 고정되어 있는 주탑에 의해 지지된다. 한편, 인천대교, 서해대교, 거가대교, 진도대교는 사장교이며, 사장교는 일반 교량의 교각에 해당하는 주탑에 케이블을 경사지게 설치하여 이 케이블이 주탑과 상판을 연결하여 지지하는 형식을 갖는다. 그림3은 연도별 와이어로프의 강도 변화와 적용된 교량을 나타낸다.

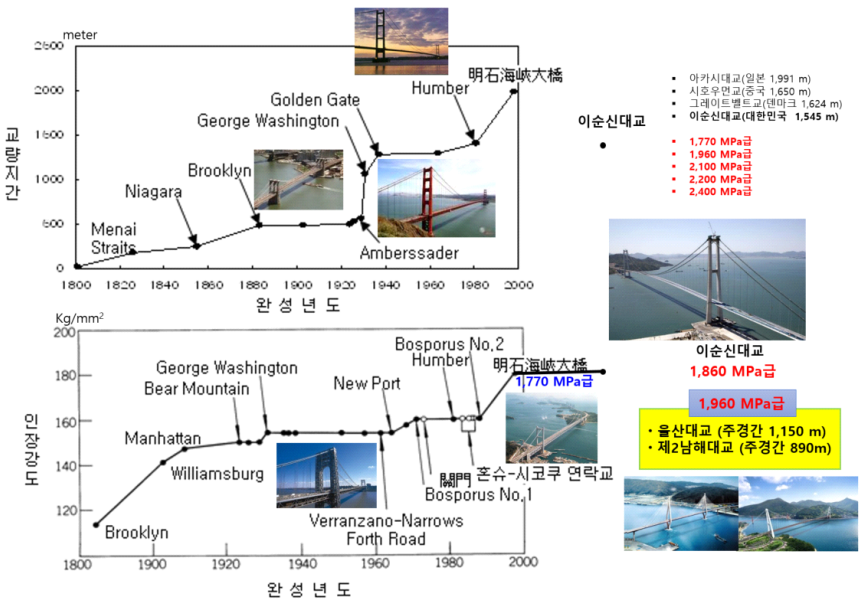


그림 3. 연도별 와이어로프의 강도변화와 적용된 교량

교량용 강선은 Brooklyn Bridge에 최초 적용되어 1800년대부터 1998년 일본의 명석해협대교가 개통되기 이전까지 오랜 기간 동안 1600MPa급 강선이 주로 사용되어 왔다. 명석해협대교는 현존하는 세계 최장의 현수교로서 완공 당시 소재측면에서 주목할 만한 부분은 현수교의 생명이라 할 만한 메인 케이블에 세계 최초로 1800MPa급 강선이 사용된 사실이다.

이러한 개발 동향에 발맞추어 우리나라에서도 고강도화를 위한 다각적인 노력이 기울여지고 있으며, 차세대 거대 구조물(Mega-structure)용 강재개발사업의 결과로 이미 이순신 대교에 1,860MPa급을 적용했고 울산대교에 1,960MPa급을 적용했다. 이 사업의 일환으로 2200MPa급 PC(Prestressed Concrete) 강선 및 2000MPa급 특수 장대교량용(사장교 및 현수교) 강선도 개발 완료했으며, 2400MPa급 PC 강선 및 2200MPa급 특수 장대교량용 강선도 개발했다.

타이어코드강

타이어코드용 강선은 자동차 타이어 내부에 위치하여 외부로부터의 압력 및 충격완화로 타이어 수명을 연장시켜 주는 보강재로서, 타이어 보강재를 강선으로 사용시 내충격성, 고속주행성, 운전 조정성이 우수하다는 특징이 있다. 특히 강선을 고강도화하면 강선의 무게 감소뿐만 아니라 , 타이어에 사용되는 고무무게를 감소시켜 타이어 무게를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 타이어코드강은 타이어 보강재 이외 자동차 Window 개폐용 wire, Side Break용 wire, 각종 Belt 보강용 wire 및 반도체 Wafer 절단용 Saw Wire, 고압 호스용 Wire 등의 용도로도 사용되고 있다.

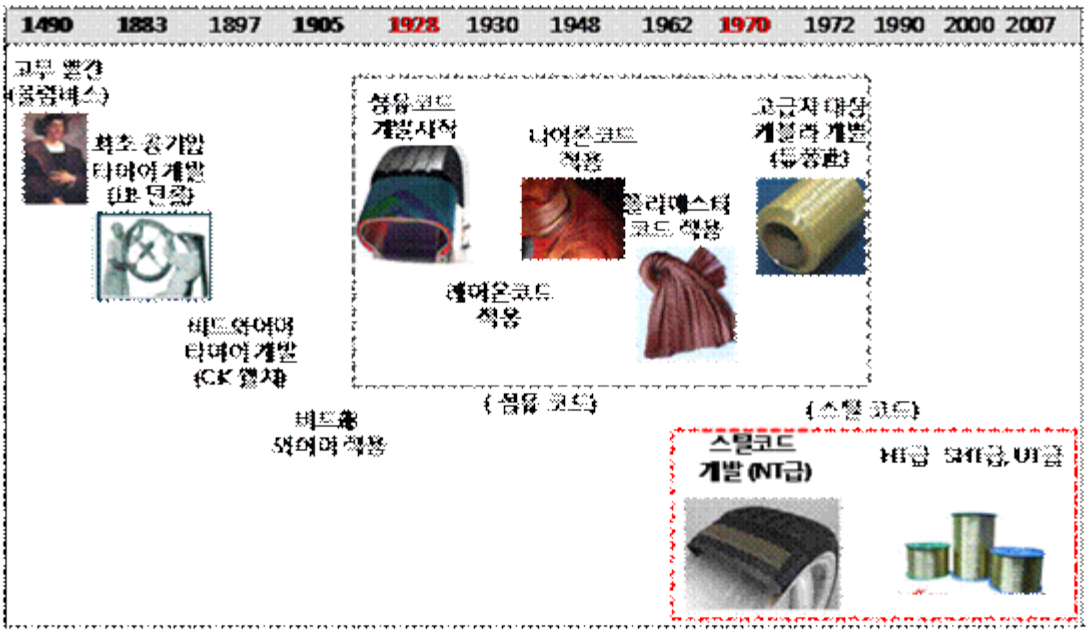


그림 4. 타이어코드강의 역사

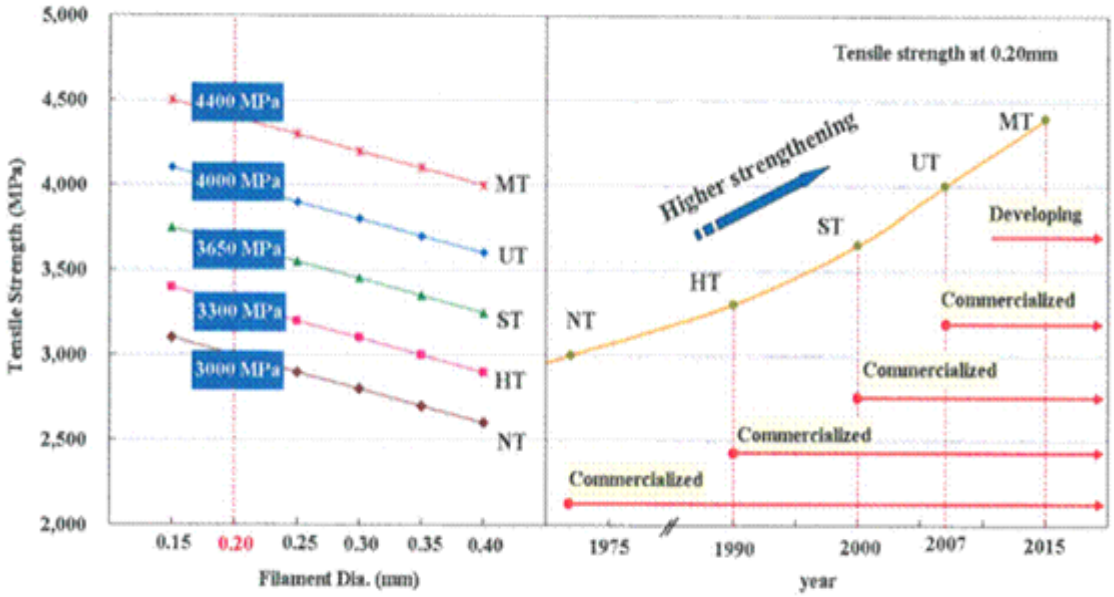


그림 5. 타이어코드 강선 직경별 인장강도 개발 현황

그림 5는 타이어코드 강선 직경별 인장강도와의 관계 및 0.2mm타이어코드용 강선에 대해 연도별 인장강도 개발 현황을 나타낸다. 현재 3,200MPa급의 타이어코드가 주력으로 생산되고 있으며, 3,600MPa급의 수요가 늘어나고 있다. 또한, 초고강도 타이어코드인 4,400MPa급의 개발 및 상용화도 완료한 상태이다.

타이어코드강의 경우 고강도화와 더불어 0.18mm이하의 극세선 타이어코드를 제조하는 것이 주요 이슈로 극세선 타이어코드 제조는 가혹한 신선가공 조건에서 가공이 이루어지므로, 엄격한 개재물 제어를 포함한 고급 선재 제조기술과 타이어코드 가공기술의 향상을 필요로 한다. 또한 최근 타이어코드강은 태양광 전지, 고가의 반도체 소재인 Silicon Wafer 절단시 손실을 줄이기 위해 사용하는 0.12mm 이하 초극세선용 고탄소강 선재인 Saw Wire용 소재로도 사용될 목적으로 고강도, 고청정성 특징을 갖는 제품이 개발되었다.

쾌삭강

쾌삭강은 제1차 세계 대전 중에 미국에서 처음으로 제조된 이래 공작 기계의 발달(특히 자동선반)과 함께 보급되어 왔다. 쾌삭강은 일반강에 비금속개재물(MnS) 및 저융점 원소인 Pb(융점 327℃), Bi(융점 271℃)를 다량 분산시켜 피삭성을 크게 향상시킨 강재로서 Shaft, Pin, Nut 및 정밀 가공품 용도로 널리 사용되고 있으며, 공구 수명 향상 및 절삭면 표면조도 향상기술이 중요하다. 저융점 원소인 Pn, Bi는 MnS 및 기타 개재물과 기지조직간에 Film상으로 존재하며, 절삭가공중 가공열에 의해 용해되어 윤활제로 작용하는데, 공구와 Chip 사이에서 마찰에 의한 공구 마모를 억제시키고, 절삭성을 높이는 역할을 한다.

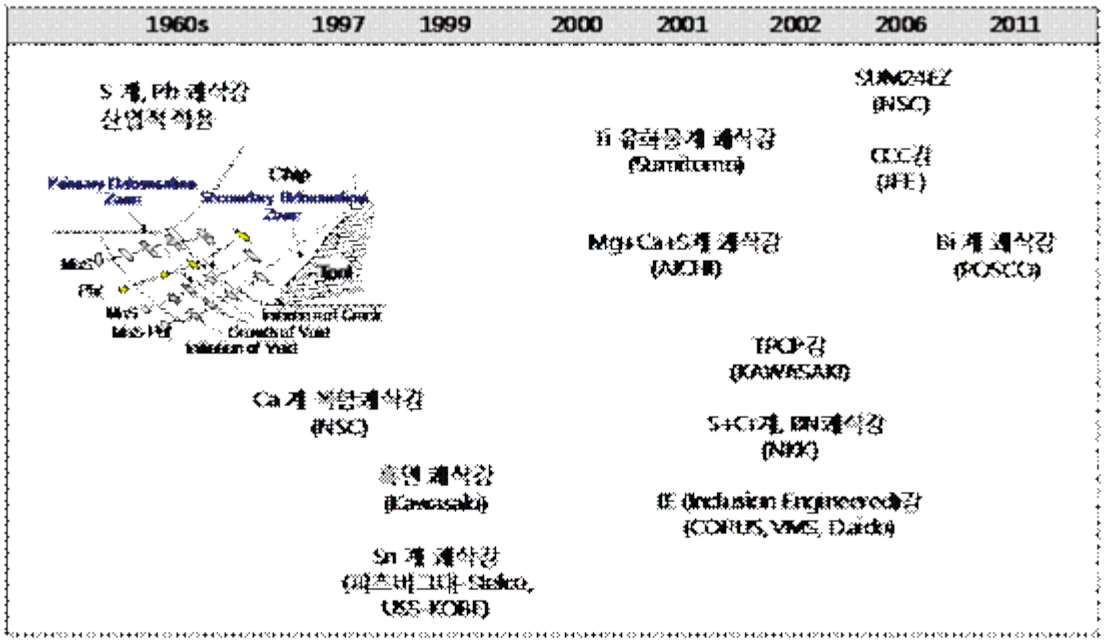


그림 6. 쾌삭강의 역사

2015년말 파리기후협약으로 앞으로 환경에 대한 자율규제가 심화되면서 대표적인 유해 물질인 Pb 사용에 대한 규제도 강화되므로 각종 산업 재료에서 Pb를 제거해야만 한다. Pb 쾌삭강은 피삭성이 매우 우수한 편이나 강재의 제조공정과 사용 과정에서 심각한 환경공해를 유발할 수 있으므로, 국내외에서 Pb 쾌삭강을 대체하기 위한 새로운 개념의 Pb-free 쾌삭강 개발이 활발하게 진행되고 있다. Pb 대체용 쾌삭강으로는 Bi 쾌삭강, Sn- 쾌삭강, Bi-Sn 쾌삭강, 흑연 쾌삭강 등이 이미 개발되었거나, 개발이 진행중이다. 한편 Pb 쾌삭강의 퇴조 및 수급에 대비하여 부품 가공회사들은 절삭가공 조건을 크게 개선함으로써 Pb쾌삭강을 SUM재 쾌삭강으로 대체하려는 시도가 있다. 저탄소 Pb-free 쾌삭강에 있어서 요구 품질 특성은 강재의 피삭성과 chip 분절성이 뛰어나야 하는데, 이들 강재의 주요 용도는 OA기기용 shaft류, 자동차 유압부품 등이다.

스프링강

스프링강은 고Si첨가강으로 반복피로 하중을 요구하는 곳에 사용되며, 내피로특성 및 변형저항성이 요구되는 제품이다. 피로수명에 영향을 주는 비금속개재물, 표면탈탄 및 표면크랙 등을 엄격히 제어하는 기술확보가 필수적이다.

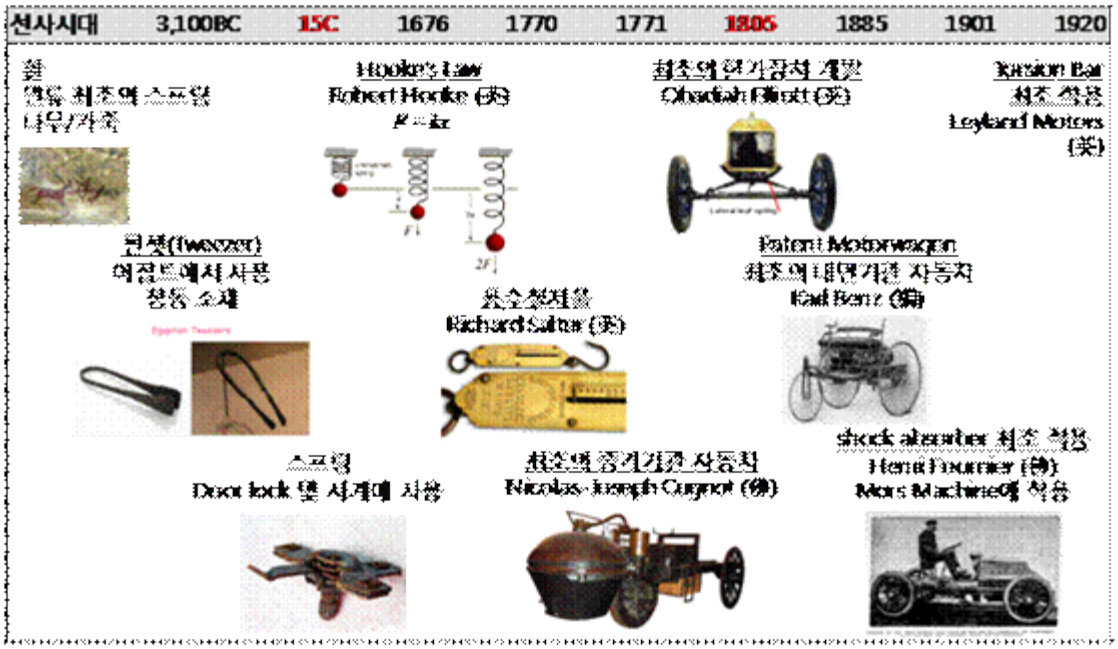


그림 7. 스프링의 역사

최근의 자동차 경량화 추세에 힘입어 자동차에 사용되는 스프링강 역시 고강도화, 고기능화 하기 위한 노력이 진행되고 있다. 그림6-9는 현가용 스프링강의 고강도화에 따른 스프링 경량화의 관계를 나타낸다.

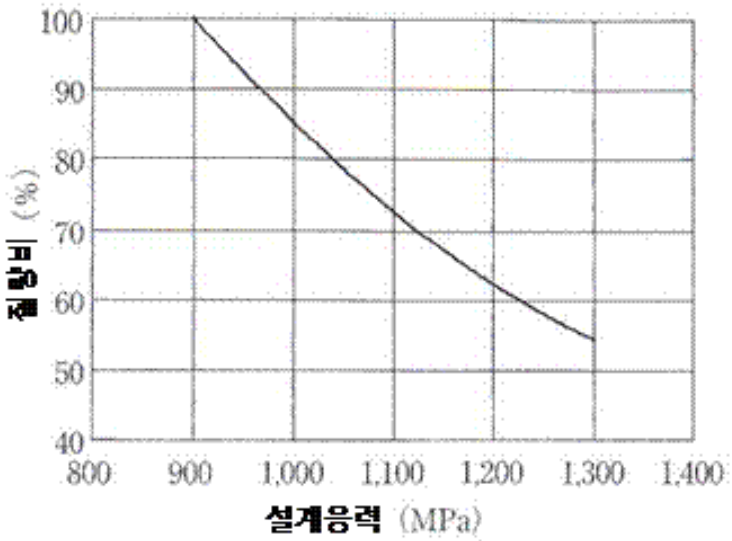


그림 8. 현가용 스프링강의 강도와 스프링 질량간 관계

자동차 현가용 스프링의 형상은 고강도화, 경량화에 따라 그림 9와 같이 변화되어 왔다.

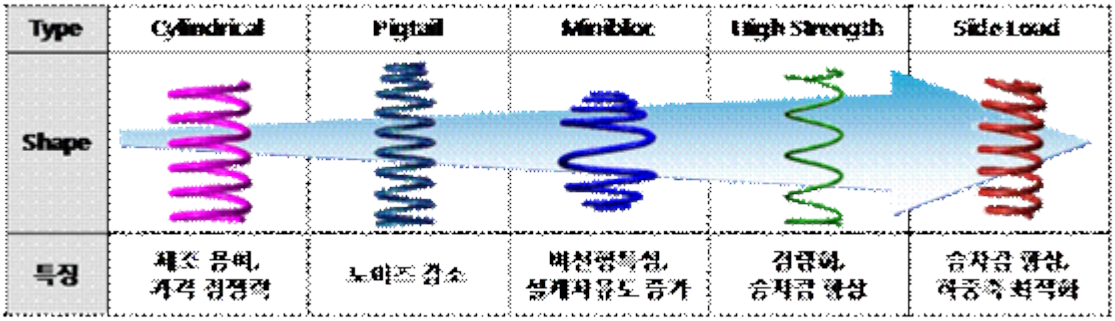


그림 9. 자동차 현가용 스프링 형상변화 및 특징

현재 일반 현가용 스프링강은 1,100MPa급이며 고강도 현가용 스프링 소재의 경우 현 설계 응력을 1200MPa급을 사용하고 있는데, 최근 자동차 회사의 경우 가혹해진 사용환경과 자동차 품질요구 수준 증가를 고려하여 고강도화와 더불어 고내식성, 고피로수명 보증형 스프링강 개발을 요구하고 있는 실정이다. 이에 대응하기 위해 1300MPa급 스프링이 개발되어 상용화가 완료되었으며, 기능성을 더 향상시킨 1250MPa급 스프링강도 개발되는 등 고강도화와 함께 내식성이나 피로물성을 더 향상시킨 고기능성 스프링강 개발이 진행되고 있다.

또 다른 관점의 개발방향은 스프링강의 생산원가를 저감시키기 위해 여러 연구가 진행중에 있는데, 대표적으로 고객사 peeling 공정이 생략 가능한 강재를 개발하는 것으로 일부제품에 대해서는 상용화가 완료되었다. 이러한 기술의 핵심은 표면에서의 탈탄 및 표면흠 발생 등을 억제하여 고객사에서 직접 신선을 통해 스프링 가공 열처리가 가능하도록 한 것이다.

한편, 엔진밸브용 스프링강은 고온, 고속의 반복 하중을 받는 자동차 엔진에 사용됨으로 인해 내,외부 품질이 엄격히 요구되고 있다. 포스코의 경우 생산 제품중 최고의 청정강으로 관리되고 있으며, 현재 2100MPa급과2300MPa급이 개발 상용화 되었다. 특히 2300MPa급 밸브용 스프링강은 세계 최고강도로서 양산 중이다.

구분	성 분	Wire강도 (MPa)	화학성분(%)			
			C	Si	Cr	V
SAE9254V	Si-Cr계	1,900	0.55	1.4	0.7	–
SAE9254HV	Si-Cr-V계	2,100	0.65	1.4	0.7	0.11
POSHV2300	Si-Cr-Ni-Mo	2,300	0.65	2.2	0.9	0.11

표 1. 엔진밸브용 스프링강 종류

CHQ(Cold Heading Quality)강

열간, 냉간 상태에서 단조 및 압조가공을 통해 각종 기계부품의 Bolt, Nut, Screw 등을 제조하는 소재로서 특히 양호한 표면품질과 균일한 내부품질이 요구되는 제품이다. 신선가공중 필요시 연화열처리 등이 이루어짐으로 재질특성보다는 성분 및 표면품질의 영향이 큰 제품이다.

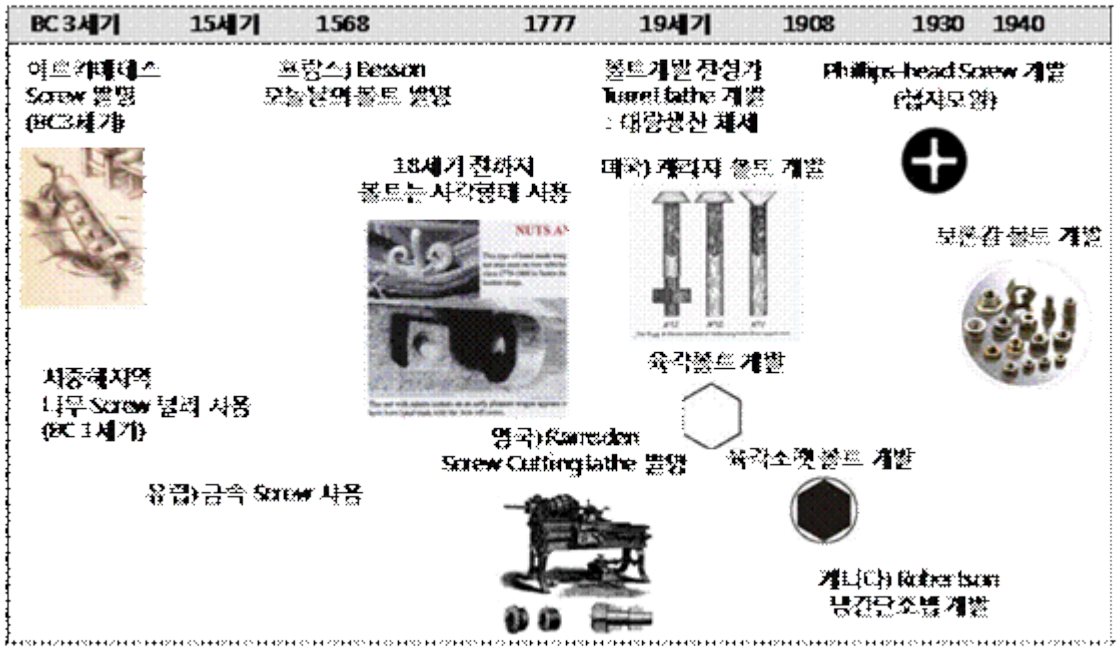


그림 10. CHQ강 Bolt의 역사

CHQ강의 종류로는 일반탄소강, 합금강, 열처리 생략 보론강, 열처리 생략 비조질강이 있다. 일반탄소강은 C, Si, Mn 성분을 기본으로 하는 가장 대표적인 강종이며, 합금강은 일반탄소강에 Cr, Mn, Ni, Cu 등을 넣어 소입성 및 내식성을 강화한 것이다. 한편 열처리 생략 보론강은 일반탄소강(0.2~0.3%C)에 소입성 향상을 목적으로 소량의 보론(B)을 첨가하여 저원가 소재로 개발된 것으로 합금강 대비 저탄소 성분계로 인해 가공성이 좋고 고객사 가공공정인 중간 열처리 없이 기존의 고탄소강 및 합금강과 동등한 볼트 완제품 재질(강도, 경도 등)을 확보한 강이다. 열처리 생략 비조질강은 Mn, V, Cr 성분을 추가하여 일반적으로 CHQ용 제품의 최종 가공공정에서 적용하는 열처리 공정(Quenching &Tempering)을 생략하고도 최종 제품에서 요구하는 제반 물성치 확보가 가능한 강이다.

Making Process		W/Rod	LA	1차신선	SA	2차신선	Q.T	제품
TS (kg/㎟)	합금강	100	70	85	60	65	105	
	Bobon	65				68	104	

표 2. 합금강과 보론강의 가공공정 및 제품 특성

LA : Low Temp. Annealing, SA : Spheroidized Annealing, Q.T: Quenching &Tempering

고강도 자동차형 볼트도 개발이 진행 중이며, 일본 및 우리나라에서도 1,600MPa급 자동차용 볼트가 개발되어 차량에 적용되거나 적용 중이다. 최근 대형 건축물 구조는 철근-콘크리트 구조에서 경제성 및 안정성이 우수한 강구조물로 변화되어 가고 있으며, 강구조물의 접합 방식에도 효율적 건설이 가능한 볼트 체결 접합 방식을 선호하고 있다.

건축용 판재의 고강도화와 함께 같이 사용되는 볼트의 이러한 건축용 볼트를 고강도화 하는 것은 볼트의 체결 개수를 줄여 공기를 단축하여 비용을 단축할 수 있는 장점이 있으나, 기존 소재를 이용하여 볼트의 인장강도를 높일 경우 일정 강도(약 1,100MPa) 이상에서는 대기 중 수소 침입으로 인하여 재료가 취화되는 것(수소지연파괴)으로 알려져 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 포스코에서는 기존의 수소지연파괴 저항성을 향상시킨 F13T급 (인장강도 1,300MPa 이상)을 개발하였으며, 수소지연파괴에 관한 시험기기 및 노하우 등에 대한 지속적인 인프라 구축을 통하여 인장강도 1,800 MPa 이상의 건축용 강재도 개발 중에 있다.

베어링강

베어링은 자동차나 조선, 산업기계에서 회전부분을 지탱하는 기능부품으로서 전동체(Rolling Element), 내륜(Inner Ring), 외륜(Outer Ring), 그리고 전동체를 서로 분리시켜 회전을 원활하게 해주는 리테이너(Retainer)로 구성된다. 그림6-12는 가장 널리 사용되고 있는 볼 베어링의 구조를 나타낸 것이다.

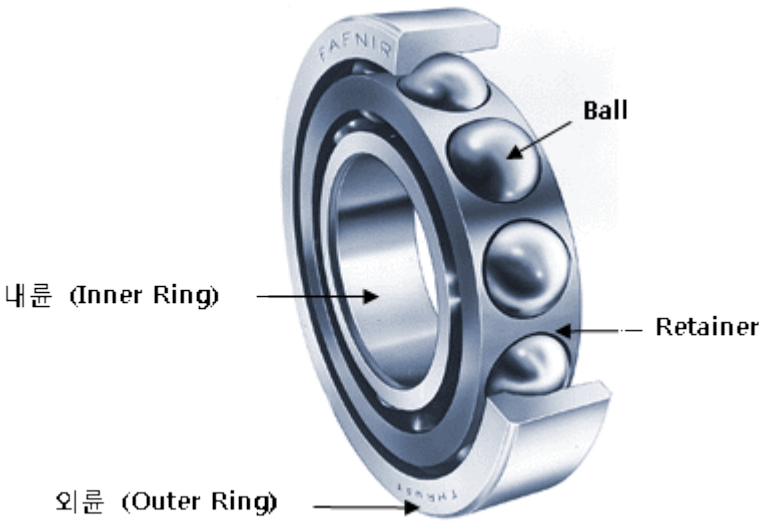


그림 11. 볼 베어링 구조

베어링의 종류는 크게 3가지 기준으로 구분할 수 있다. 첫째, 마찰의 형식에 따라서 베어링의 종류를 구분하면 미끄럼 베어링과 구름 베어링으로 구분할 수 있다. 미끄럼 베어링의 종류에는 오일이 필요 없는 윤활성 재료를 사용한 자기윤활 베어링과 다공질 재료에 오일을 침투시킨 함유 베어링이 있으며, 베어링 사이의 공간에 축의 회전에 의해 유막을 자동적으로 형성하는 동력학적 유체윤활 베어링과, 외부에서 압력유를 공급하여 회전축을 부상시키는 정력학적 유체윤활 베어링이 있다. 최근에는 자석의 흡인력과 반발력을 이용하여 회전축을 부상시키는 자기 베어링과 오일 대신에 공기 등을 사용한 기체 베어링이 있다. 이에 비해 구름 베어링은 내륜과 외륜 사이에 볼(Ball)이나 롤러(Roller)를 넣은 베어링으로서, 이 볼과 롤러는 미끄럼 베어링에서의 윤

활제와 같은 역할을 한다. 그렇다고 윤활제가 필요 없는 것은 아니다. 실제로 구름 베어링은 구름 운동 이외에 미끄럼 운동을 하는 부분도 있으므로 윤활제를 사용하여야만 마찰을 적게 하고 고속에도 견딜 수 있다. 일반적으로 베어링이라 함은 구름 베어링을 일컬으며, 그림 12는 베어링 종류 및 구조를 나타내고 있다.

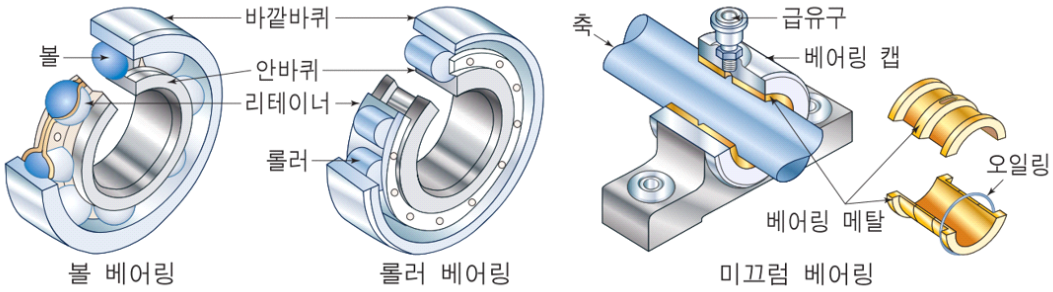


그림 12. 베어링 종류 및 구조

베어링이 주로 지지할 수 있는 하중의 방향에 따라 구분하면 레이디얼 베어링(Radial Bearing)과 스러스트 베어링(Thrust Bearing)으로 구분한다. 그림 13은 레이디얼 베어링과 스러스트 베어링을 보여주고 있다.

그림 13. 레이디얼 베어링과 스러스트 베어링

베어링강은 축수강 또는 축받이강이라고도 불리며, 보통 1.0%C－1.5%Cr의 고탄소 고크롬 베어링강(High Carbon Chromium Bearing Steel)인 SUJ2와 0.5%C 전후의 침탄 베어링강 두 종류로 나뉜다. 일반적으로 베어링강이라 함은 고탄소 고크롬강인 SUJ2를 말하는데, 전 세계 베어링강 사용량의 약 90 % 정도를 차지하고 있다. SUJ2는 일본의 JIS G 4805 규격으로서 다른 나라의 규격에 의한 유사 강종으로는 SAE52100, 100Cr6, GCr15 등이 있으며, 이들 강종은 모두 성분계가 유사하다. SUJ2는 자동차용 또는 기계구조용 베어링의 전동체(Ball 또는 Roller)와 내외륜용 소재로 사용된다. 이에 비해 침탄 베어링강은 주로 허브 베어링의 외륜과 허브용으로 사용되고 있다.

베어링강은 고하중과 고속회전에 사용되기 때문에 내마모성 및 내피로특성치에 대한 소재품질 보증이 요구되는 특수강이다. 베어링강은 강중 Total 산소량에 따라 피로 수명이 영향을 받는다는 것이 잘 알려져 있어 생산 공정에서 Total 산소량을 줄이기 위한 기술개발 노력이 지속적으로 진행되었으며, 산소 함량을 6~7ppm 미만으로 낮춤으로서 피로수명의 향상이 가능하게 되었다. 또한 피로수명에 영향을 주는 크롬탄화물 제어를 위해 중심편석 제어기술 및 확산 기술 확보가 필수적이다.

전 세계적으로 베어링강 생산은 전로 또는 전기로 LF(Ladle Furnace), RH(Rheinstahl and Heraeus), 연속주조(CC, Continuous Casting) 공정에 의한 프로세스가 일반적인 추세이나, 중국에서는 아직도 많은 업체들이 잉곳주조(Ingot Casting)에 의해 베어링강을 생산하고 있으며, 유럽에서는 자동차용 허브 베어링강 생산은 연속주조가 아닌 반드시 잉곳주조에 의해 생산하도록 규정하고 있다.

포스코의 경우 일본이나 유럽 Mill들과는 달리 봉강압연 설비가 없기 때문에 전량 선재 상태로 생산되고 있으며, 이런 측면에서 수요 확대 및 수출 창출에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 베어링강 선재는 1차 가공업체인 신선업체에서 연화소둔과 신선을 거친 뒤 구상화 열처리를 실시한다. 구상화 열처리는 베어링강 제조공정 중에서 가장 중요하면서도 가장 오랜 시간을 요구하는 공정으로서, 뒤이은 공정인 볼 압조공정을 원활히 하기 위하여 소재의 강도를 560 ~ 580 MPa (20 HRC) 정도로 내리는 공정이다.

구상화 열처리와 볼 압조공정 후에는 베어링강이 실제 적용되어 사용될 수 있도록 다시 강도를 높이기 위해 담금질 뜨임 처리(QT, Quenching and Tempering)를 실시하고, 이 후 베어링 제조업체에서 베어링으로 조립된다.

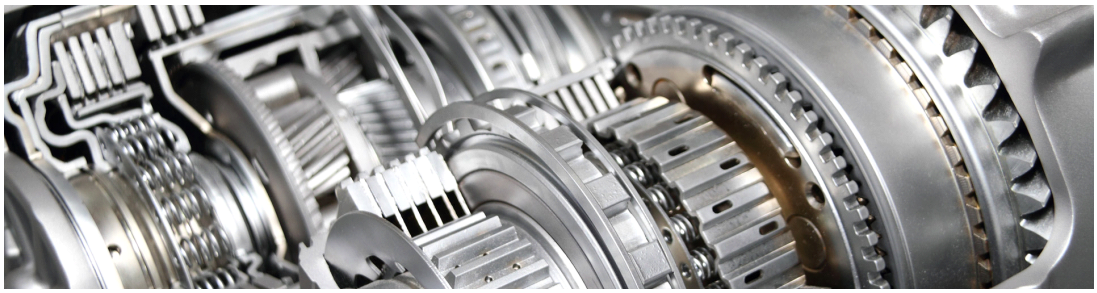
선재 기술개발의 시사점

선재는 만성적인 공급부족 소재로 전형적인 내수 의존적인 산업이며, 보통 볼트, 너트, 스프링, 와이어로프 등 2차 가공품 형태로 자동차나 기계 산업에 투입되기 때문에 산업 전반의 경기변동에 큰 영향을 받게 된다. 이러한 선재에 대해 최근 국내 업체간 경쟁은 심화되는 반면, 저가의 중국산 제품의 대량 유입으로 인한 국내업체의 경쟁력이 크게 약화되고 있는 실정이다. 국내 업체의 경우, 현대제철이 2016년 2월부터 연산 100만톤 규모로 이중 60만톤은 특수강 봉강제품을, 40만톤은 자동차 스프링 및 볼트, 너트의 원자재인 특수강 선재 제품을 생산, 시장에 진입할 예정으로 특수강 봉강분야에서는 최근 합병한 세아베스틸과 경쟁이 될 것이며, 자동차용 고급 선재 분야에서는 포스코와 치열한 경쟁을 할 것으로 판단된다.

이러한 상황에서 중국산 선재 및 제품의 품질 발전 속도 등을 감안할 경우 선재 전 강종에서 중국으로부터의 저가 공세로 인한 국내시장 위기가 생각보다 빠르게 도래할 가능성이 높아 각 제품별로 대책 마련이 절실히 요구되고 있다. 즉, 향후에는 중국보다 앞선 기술 경쟁력을 확보하여 중국이 생산하지 못하는 고급품질의 신강종 개발과 함께 기 생산되는 강종에 대한 획기적인 품질 개선만이 경쟁시대에서 생존할 수 있는 유일한 방안이 될 것이다.

이에 대해 선재 업계 관계자들은 각종 와이어에서부터 철못은 물론 자동차 부품용 등 우리나라 수출의 일등 공신 품목에서 중요한 역할을 하고 있는 등 기초 소재 산업의 핵심 분야라 할 수 있는 선재 및 관련 제품 산업의 특성을 고려한 범국가적인 차원의 대응방안이 절실히 필요한 시점이라는 의견도 제기하고 있다.

자동차용 특수강
(Special Steel for Vehicles)



자동차용 특수강 재료의 특징

특수강은 보통강에 대응되는 말로, 성질에 따라 보통강에 탄소함유량을 높인 고탄소강과, 니켈, 크롬, 몰리브덴 등 1종 이상의 합금원소를 첨가하여 특수한 성질을 갖게 한 합금강으로 나눌 수 있다. 용도에 따라서는 일반 구조용탄소강, 기계구조용합금강, 소입성보증강, 공구강, 내식강 및 내열강등으로 구분된다.

특수강은 오래전부터 자동차 부품 및 산업기계, 선박부품, 석유시추용의 강재로 다양하게 사용되고 있다. 특히 자동차용 특수강은 일반 기계구조용 합금강에 비해 제조공정이 엄격하여 대부분 고부하, 고하중의 구동장치, 현가장치 및 조향장치 등의 고기능의 자동차 부품 소재로 사용되고 있어서 자동차 재료 중 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 자동차는 현대사회에 없어서는 안 될 필수품이며, 사회가 자동차에 요구하는 것도 점점 다양화되고, 승차자, 보행자 보호 차원에서 안정성 확보요구가 대단히 엄격해지고 있다.매년 자동차 생산량이 꾸준하게 증가됨에 따른 자동차용 특수강의 소요량이 증가되는 바, 고품질·저원가 및 고성능을 발휘하는 특수강의 개발이 필요하다.

표 1은 (주)세아베스틸이 현대·기아자동차와 공동개발을 통해 적용 확대되고 있는 자동차 부품별 특수강 재료의 적용현황이다. 차량의 고성능화에 대응해서 재료의 고강도·고인성의 합금설계 및 고청정강의 제조 기술개발이 이루어지고 있다. 또한 제조원가 절감, 열처리 특성향상을 통한 품질 개선을 통해 비조질강, 성자원강 및 소입성 협폭제어강의 개발 및 실용화가 가속화되고 있다.

구 분	부품명	사용강재	비 고
Engine	Crank Shaft	SCM440H 44MNSIVS6 38MNVS5	조질강 비조질강 비조질강
	Connecting Rod	C70S6 S36CVS2	비조질강
Transmission	Input/Output Shaft	SCR420HB, SCM920HVSI SCR420H, SCM820PRH	침탄용강 (H-Steel)
	Drive Pinnion	SCM822HD, SCMH2	침탄용강 (H-Steel)
Chassis	Axle Shaft Drive Shaft	S45C,S50C SAE15B38M	조질강 보론강
	Steering Rack	S45C-D,SM45CS1-QD POSMA45R, SAE1141M	조질강 비조질강
	Suspension	SUP7,SUP9,SAE9254	스프링강
	Bearing	SUJ2	베어링강

표 1. 자동차 부품별 특수강 재료 적용현황

자동차용 특수강 재료의 현황과 개발동향

자동차용 특수강은 기본적으로 고강도, 고인성 및 고내피로성이 요구되고 있으며 자원, 에너지, 환경문제에 대응하여 요구조건이 더욱 다양화되고 있어서 기존의 규격화된 강종 외에도 부품의 특성을 고려한 고성능을 갖는 강재가 개발 및 실용화되고 있다.

구동되는 부품별 특수강의 개발현황과 동향을 정리하면 먼저 크랭크샤프트, 커넥팅로드의 엔진 부품용 특수강은 1980년대에서 현재까지 QT열처리를 생략하고자 바나듐(V)에 의한 탄질화물 석출로 강도를 확보한 비조질강이 적용되고 있다. 1990년대 후반부터는 열간단조 후 냉각공정을 활용한 석출강화형 고강도재가 사용되고 있다. 열간단조 후 공냉에 의한 페라이트+펄라이트 조직은 강도가 낮기 때문에 규소(Si) 함유량을 늘려서 페라이트 기지조직을 강화하고 바나듐(V) 첨가량을 늘려서 탄질화물의 석출강화를 이용하는 고강도설계가 적용되었다. 이와 더불어 비조질강의 단점인 인성을 향상시키기 위해서 고온에서의 결정입계 Pinning 효과를 이용해서 결정립을 미세화시켜 고인성을 확보한 고인성 비조질강이 개발되면서 중탄소강의 QT 열처리재를 대체하였다. 종래의 페라이트+펄라이트 조직의 비조질강에서 열간단조 후 직접퀜칭(DQ, Direct Quenching)하여 베이나이트 또는 마르텐사이트 조직을 갖는 저탄소 고강도·고인성 비조질강 및 열간단조 후 공냉조건에서 베이나이트 조직을 갖는 고강도 베이나이트 비조질강의 개발이 진행되었다. 그림 1은 엔진부품의 고강도화 Needs에 따른 비조질강의 개발현황을 정리한 것이다.

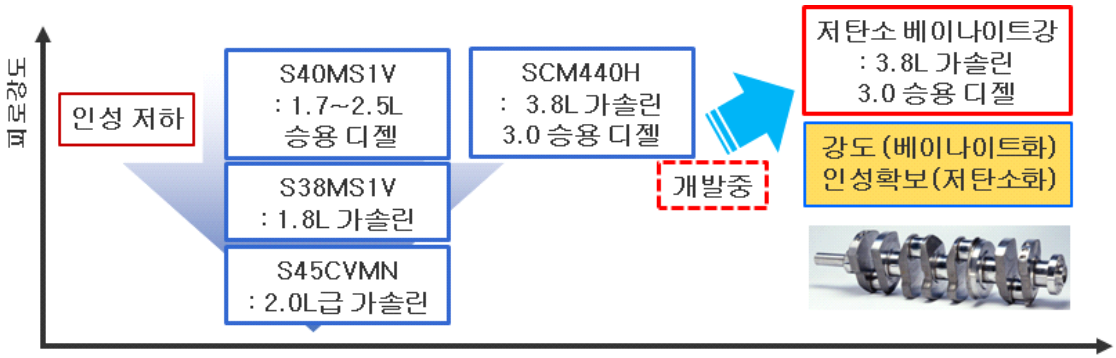


그림 1. 고강도화 대응에 따른 비조질강 개발현황

비조질강의 고강화에 따른 절삭가공성 개선의 필요성이 높다. 이를 위해 황(S)을 첨가해준다. 또한 열간변형 시 결정립이 연신됨에 따라 기계적 성질의 이방성도 문제가 된다. 이를 줄이는 방안으로 마그네슘(Mg), 칼슘(Ca) 등을 첨가하여 황화물의 형상제어 및 균일미세분포를 유도한다.

변속기는 연비향상을 위해 자동변속기(AT)의 다단화 및 무단변속기(CVT)로 발전하고 있다. 변속기용 강재는 주로 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo)이 첨가된 저탄소 합금강의 침탄소입을 통하여 피로강도 및 면압강도를 확보하였으나 침탄 시 입계산화에 의해 굽힘피로강도가 저하되므로 규소(Si), 크롬(Cr) 함유량을 최적화하고, 가스침탄에서 진공침탄으로의 열처리기술 개발에 의해 입계산화문제를 해결하여 고강도화에 의한 고내구성을 확보한다.

무단변속기(CVT)는 기어에 의한 토크전달 방식이 아닌 Pulley와 벨트의 마찰력으로 토크를 전달하는 것으로서 큰 면압강도(Pitting Strength)가 요구되므로 종래의 침탄소입보다 깊은 소입깊

이가 필요하다. 이에 따라 장시간의 침탄이 필요한데 이는 생산성의 저하를 초래한다. 이에 대하여 침탄온도를 높여 침탄시간을 줄일 수 있는 특수강 개발에 대한 Needs를 충족시키고자 니오븀(Nb)의 함유량을 최적화하여 1,050℃ 침탄온도에서 결정립 조대화가 발생되지 않는 고온침탄용 강을 개발하였다.

변속기의 다단화와 무단변속에 따른 면압강도를 높이고자 침탄소입에 의한 마르텐사이트 기지에 미세 구상화 탄화물을 석출시키는 고탄소침탄열처리 및 이에 대한 전용강의 개발이 진행되고 있으며, 열처리 변형을 최소화하기 위한 질화열처리기술 및 전용강, 고주파소입 초세립화에 의한 윤곽 고주파 전용강 등 변속기의 고성능을 확보하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 그림 2는 변속기용 강재의 고성능화에 대한 개발방향을 나타낸 것이다.

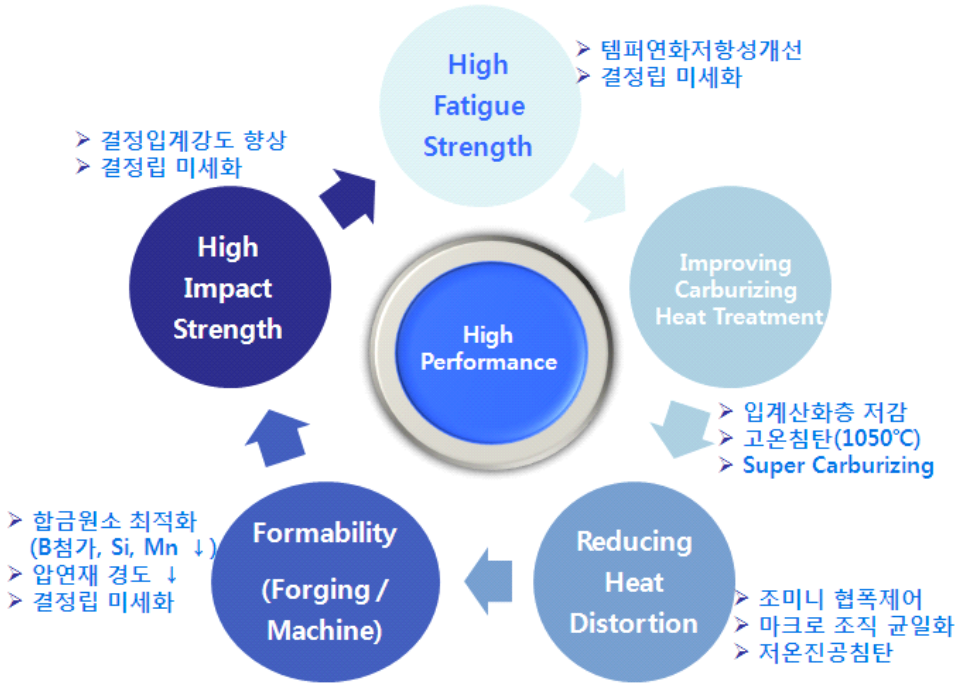


그림 2. 변속기용 강재의 고성능화 개발방향

1970년대 자원위기 및 오일파동을 계기로 합금강의 합금량을 줄이거나 탄소강으로 전환하는 추세였다. 크롬(Cr)-몰리브덴(Mo) 합금강에서 고가의 몰리브덴(Mo)을 보론(B)으로 대체한 보론강이 최근엔 적용되고 있다. 보론은 주로 탄소강, 망간(Mn)강 및 망간(Mn)-크롬(Cr)강에 첨가되어 사용되고 있다. 쾌삭강은 자동선반의 보급에 따른 가공성 향상 목적으로 적용되고 있다. 황(S) 첨가 쾌삭강이 사용되고 있으며 가공성 향상, MnS계 비금속개재물의 형상제어 및 기계적 성질 향상을 위한 연구가 진행되고 있다.

중소형 승용차를 기준으로 자동차 한 대당 철강재 소요량은 통상 1.35톤이다. 판재류가 0.95톤이며 봉강, 선재 및 주물 등 기타 철강재는 0.4톤이 필요하다. 구체적인 내용은 표2와 같다.

품 목	소요량
열연강판 (HR)	0.20
냉연강판 (CR)	0.40
아연도금강판 (GI)	0.35
봉 강	**0.20**
기 타	0.20
합 계	1.35

자동차 구동 부품도(봉강적용 주요부품)

표2. 자동차 1대당 철강재 소요량 (단위:톤)

자료 : 업계자료, 동부 리서치

이러한 가정을 바탕으로 연도별 국내 완성자동차 생산대수를 기준(그림 3)으로 자동차 생산에 필요한 철강재를 역산해보면, 표3과 같이 2013년도 특수강 봉강류는 82만톤 이상 소요되었으며 해외생산 및 (C)KD재의 적용과 향후 안정적인 성장 전망을 고려했을 경우 국내 자동차 완성업체 기준으로 특수강 봉강 소요량은 200만톤 이상이 될 것으로 추정된다. 그림 4는 국내 특수강 현황을 나타낸 것이다.

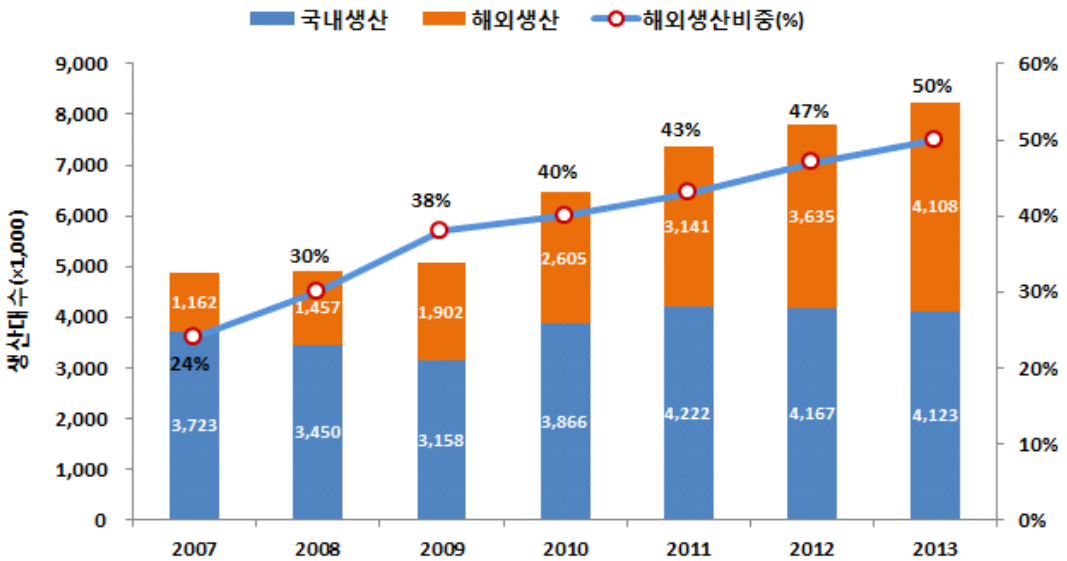


그림 3. 국내 완성차 국내.외 생산실적현황 (자료 : 한국자동차산업협회)

	자동차생산 (천대)		이론적 소요량(톤)					
	국내	해외	열연강판	냉연강판	아연도금	**봉강류**	기타	합계
2007	3,723	1,162	745	1,489	1,303	**745**	745	5,027
2008	3,450	1,457	690	1,380	1,208	**690**	690	4,658
2009	3,158	1,902	632	1,263	1,105	**632**	632	4,264
2010	3,866	2,605	773	1,546	1,353	**773**	773	5,219
2011	4,222	3,141	844	1,689	1,478	**844**	844	5,699
2012	4,167	3,635	833	1,667	1,458	**833**	833	5,626
2013	4,123	4,108	825	1,649	1,443	**825**	825	5,566

표 3. 자동차용 철강재 이론적 소요량

*.자료 : KAMA, KISA, 업계자료, 동부리서치

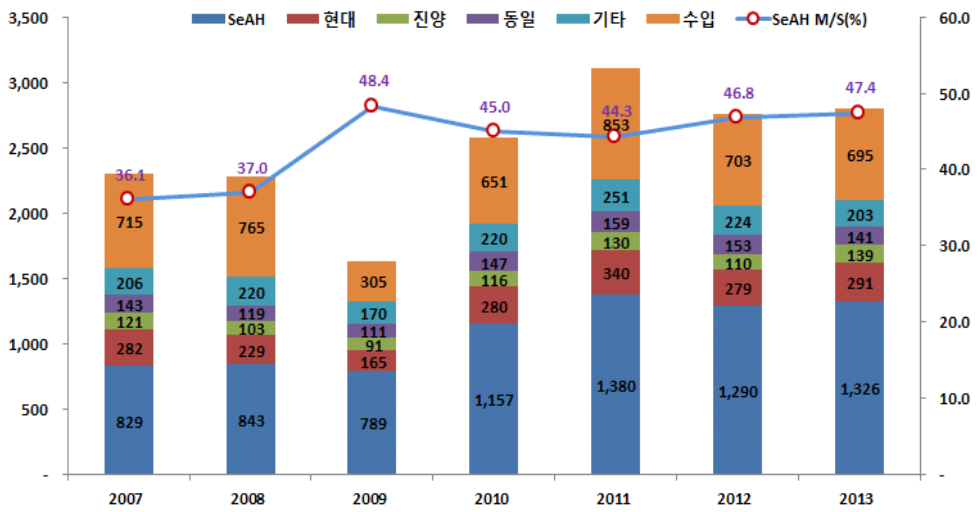
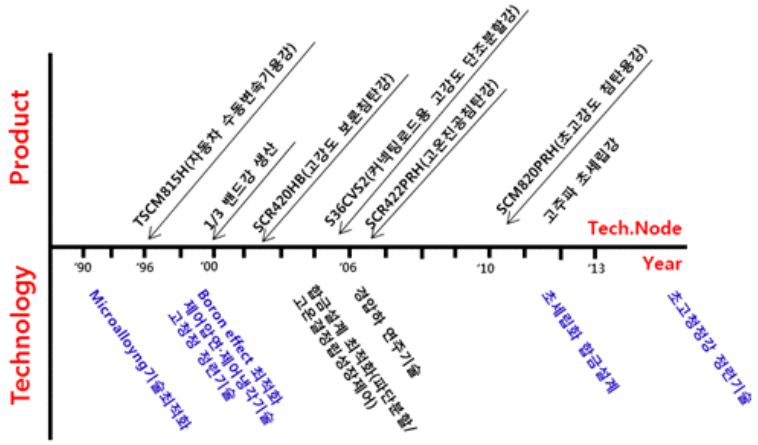


그림 4. 국내 특수강 수요현황 (자료:한국철강협회)

자동차 파워트레인 샤시용 고성능강재 개발현황



고강도 파단분할형 커넥팅 로드용 비조질강

자동차용 커넥팅 로드는 그림 5와 같이 엔진의 핵심 5대 부품중 하나로 크랭크샤프트와 함께 특수강이 사용되는 대표적인 부품으로써 그 기능은 크랭크샤프트와 피스톤을 연결하여 피스톤의 왕복운동을 크랭크샤프트에 전달하는 중요한 부품이다. 요구특성은 연소에 의한 폭발하중을 직접적으로 받기에 고하중을 버티는 고강도화가 필요하다. 이를 위해 피로강도, 항복강도 및 강성이 중요한 지표이다.

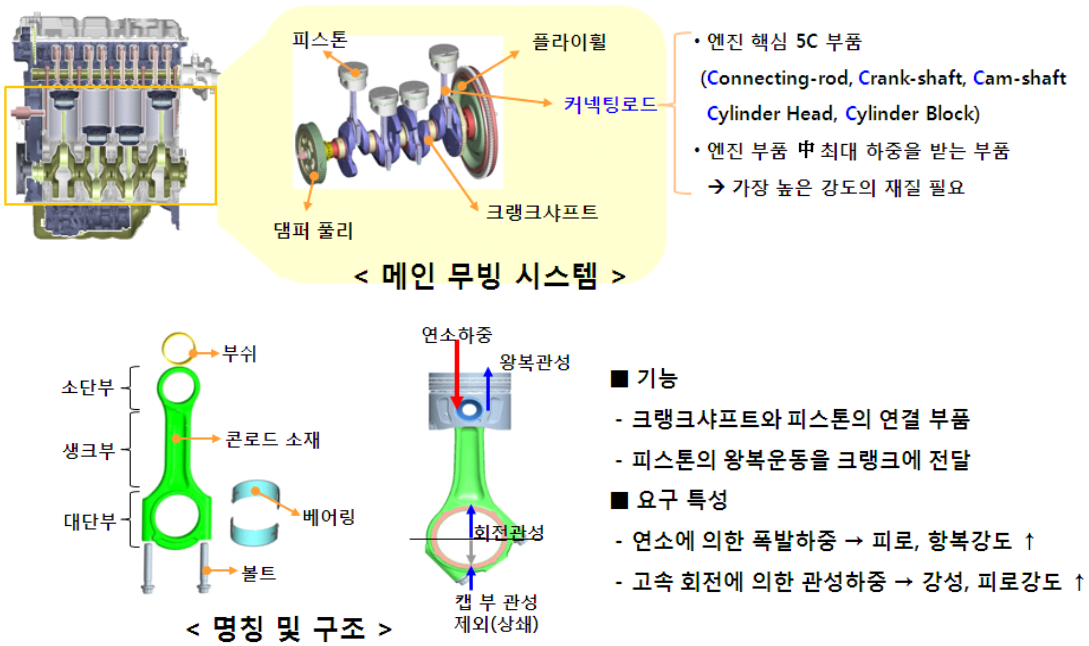


그림 5. 메인 무빙시스템 및 커넥팅로드 부위별 기능

개발강은 기존 강재인 C70S6 보다 더 우수한 피로강도는 물론 파단분할에 적합한 영구 변형률

을 가져야 한다. 그림 6은 고강도 커넥팅로드용 비조질강의 개발 컨셉을 나타낸 것으로써 고강도화에 의한 피로강도를 향상시키기 위해서 바나듐(V), 규소(Si), 망간(Mn) 함량을 높이고 고경도의 원인이 되는 탄소(C)를 낮췄다. 또한 대단부의 분할성능을 향상시키기 위해 페라이트 강화 원소인 바나듐(V), 규소(Si) 함량을 증가시킴으로서 우수한 파단면을 확보하여 양산성을 확보하였다.

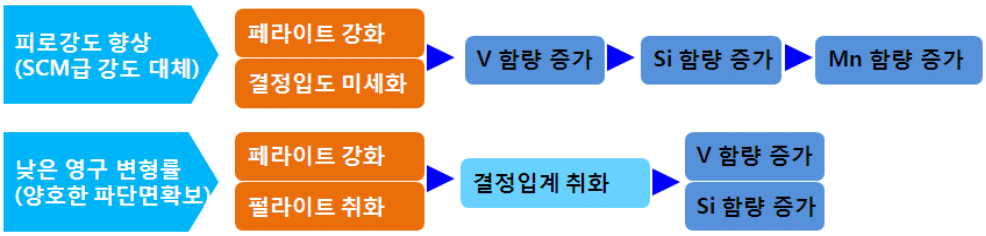


그림 6. 고강도 커넥팅로드용 비조질강의 개발컨셉

기존 고강도 비조질강인 C70S6와 개발강의 인장압축피로시험을 실시하여 그림 7에 나타내었다. 개발강의 인장압축피로강도는 35K급인 기존강 대비 10K 향상되어 커넥팅 로드의 요구특성인 우수한 피로강도가 확보되었다.

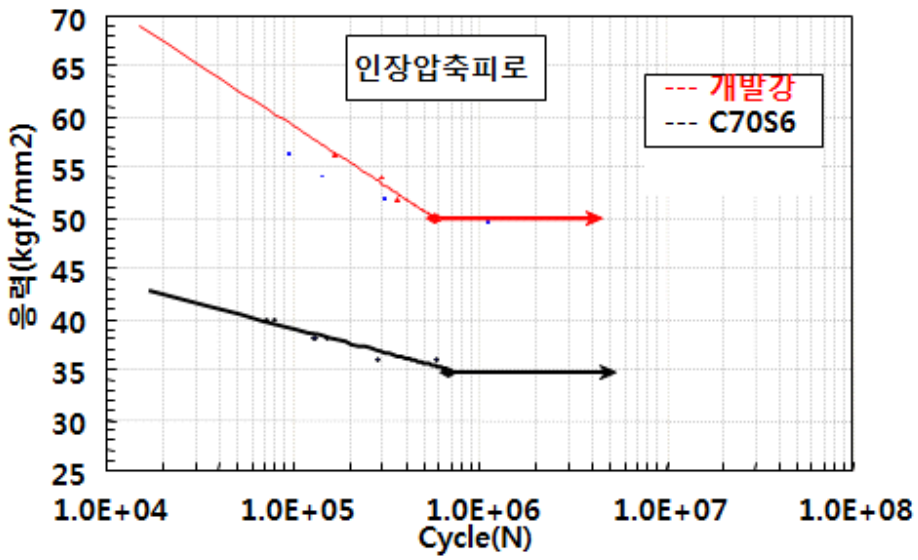


그림 7. 인장압축 피로시험결과

고온 진공침탄 변속기용강

자동차의 고성능화 및 경량화 추세에 대응하여 완성차의 제조원가 또한 중요하게 대두되고 있다. 이러한 추세에 힘입어 부품의 원재료를 제조하는 제강메이커 및 부품 가공업체들의 제조원가 절감이 절실하게 요구된다. 따라서 기존의 부품을 제조하고 가공하는 과정에서의 특성은 향상되고 제조원가는 절감되는 공정개발이 요구된다. 이에 따라 기존의 가스침탄부품을 진공침

탄 처리함으로써 원재료 및 부품의 물성을 향상시키고 열처리 시간단축이 가능한 강재가 고온 진공침탄 변속기용강이다.

합금설계는 부품의 고성능화를 위해 크롬(Cr)-몰리브덴(Mo)계 저탄소 침탄합금강을 기본으로 하여 템퍼링 연화저항성에 유효한 원소인 규소(Si)함유량의 최적화, 고온에서의 결정립 성장을 제어하고자 안정한 탄화물을 형성하는 원소인 니오븀(Nb) 함유량의 최적화 및 내 접촉 피로성능을 향상시키고자 탄화물 형성원소인 크롬(Cr) 함유량을 최적화하였다. 또한 고강도 치차용 강재로 양산되고 있는 강재와 유사한 소입성을 확보하고 기존 침탄재 대비 진공 침탄 후 가스 소입 시 나타나는 소입성 저하를 감안하여 소입성을 확보할 수 있도록 주요합금원소의 목표성분을 협폭으로 설정하였다.

기존 가스침탄 열처리 시간은 통상 12시간이며 개발강의 고온 진공침탄시간은 4.5 ~ 5.5시간으로 기존 가스침탄 대비 크게 단축할 수 있다.

그림 8은 개발강을 적용한 부품인 CVT Pully의 제조공정을 나타낸 것이며, 그림 9는 개발강의 내피팅강도를 비교한 것으로써 기존재 대비 우수한 특성을 나타냈다.

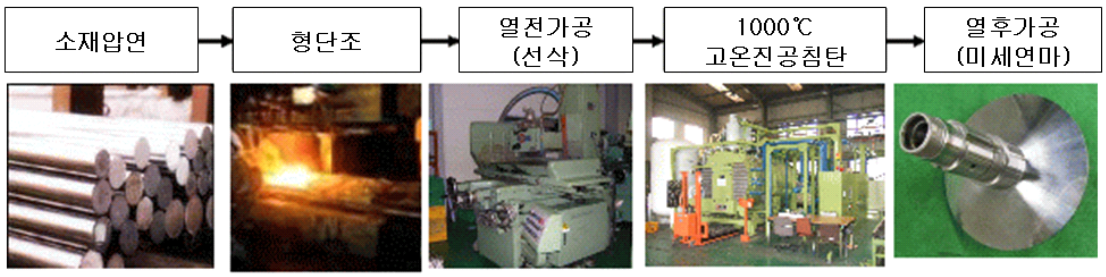


그림 8. 고온진공침탄재의 적용부품인 CVT Pully의 제조공정

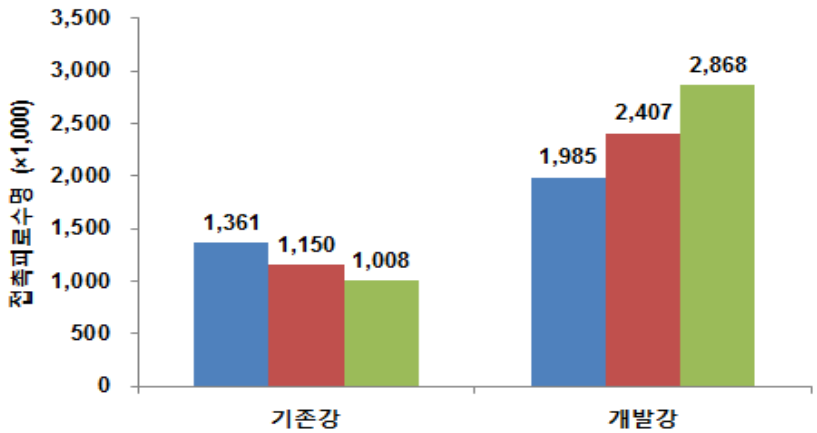


그림 9. 접촉피로수명 평가결과

보론침탄용강

1930년대 보론(B)이 강의 경화능을 대폭적으로 향상시킨다는 것을 발견한 후 많은 연구가 이

루어져 왔으며 그 결과 보론(B)은 ①오스테나이트 입계에 편석되어 입계 에너지를 저하시켜 페라이트 핵생성 억제를 통해 강의 경화능을 향상시키고, ②보론(B)의 최대 효과는 고용 보론(B)량으로 5ppm 이상이면 얻어지며 ③보론(B)의 경화능배수, f_B값이 탄소(C)량의 증가와 함께 감소하는 이유는 f_B값이 강의 기본성능의 경화능(D_I값)과 관계가 있기 때문에 그 영향을 배제한 보론(B)의 효과는 탄소(C)량에 의존하지 않고 망간(Mn)을 1%정도 첨가한 것과 동일한 효과를 갖는다는 것 등을 확인하였다.

또한 보론(B)은 열처리를 위한 가열 시, 인(P)보다 빠른 시간 내에 입계에 편석 하여 인(P)이 입계에 편석 하는 량을 상당히 줄이며, 또한 보론(B)의 입계강화작용이 중첩적으로 작용하여 강재의 파괴강도를 대폭적으로 개선시킨다고 알려져 있다. 개발강은 보론(B)의 효과에 주목하여 피로강도가 높고 품질대비 저원가의 침탄용강재로 개발되었다.

고주파소입 초세립강

고주파 소입은 금속표면을 가열 후 균열화에 의해 짧은 시간에 오스테나이트화하는 것을 기본으로 하고 있다. 급속가열 후 소입함에 따라 일반 QT 열처리재 대비 5~20㎛ 크기의 미세한 결정립을 갖게 되어 고강도·고인성을 나타낸다. 이와 같은 효과는 결정립 미세화 및 탄화물의 입계 내에서의 미세분산과 석출량이 감소되기 때문이다. 5㎛이하의 초세립화는 보다 더 강인화에 유요한 것으로 판단되어 고주파소입 초세립강을 개발하고자 하였다.

몰리브덴(Mo)을 첨가하여 고주파열처리 시 몰리브덴(Mo) 탄화물에 의한 입계 피닝효과를 극대화하여 최종 고주파열처리 제품에서 5㎛ 이하의 오스테나이트 결정립을 구현할 수 있다. 이는 원가절감 및 내구성이 향상된 소재로써, 자동차용 3세대 허브베어링, 외륜 등의 부품개발을 통해 내구성을 기존강 대비 2.5배 향상시킴으로서 내구력 강화 및 경량화가 실현되었다.

개발 컨셉은 중탄소강에 규소(Si), 망간(Mn), 크롬(Cr), 알루미늄(Al), 바나듐(V), 보론(B)을 첨가하였고 오스테나이트 핵생성 사이트 증가를 위해 전 조직을 베이나이트 조직으로 형성시키고 탄화물 형성에 의한 결정립 성장을 억제하였다. 그림 10은 허브베어링 단품내구 평가결과를 나타낸 것으로 내구수명이 2.5배 향상되었다.[7)]

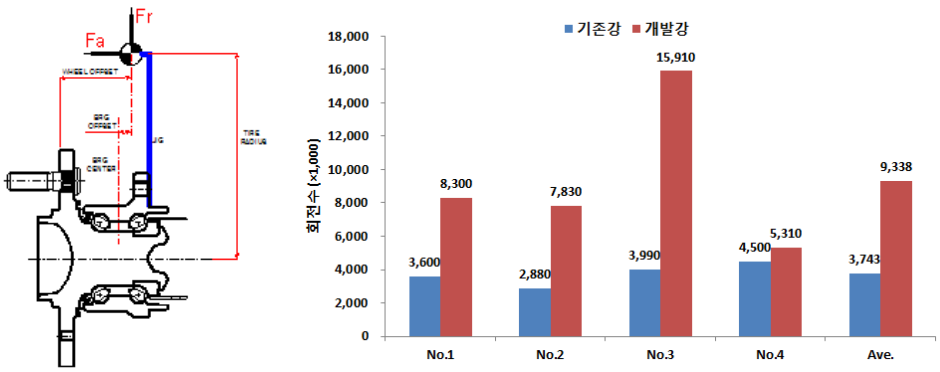


그림 10. 허브베어링 내구평가

성공적 소재기술개발의 시사점

국내 특수강 산업의 안정적 사업영위와 자동차 산업의 경쟁력을 확보하기 위해서는 품질은 물론 가격 경쟁력을 높일 수 있는 저가의 고품질 고강도 자동차용 특수강을 개발되어야 한다. 개발된 자동차용 특수강은 국내 현대·기아자동차의 Needs를 충족시켰으며 자동차사의 경쟁력확보에 공헌하였다.

고성능화 강재의 개발과 더불어 내 피팅성을 크게 향상시킬 수 있고 열처리 변형을 최소화 할 수 있는 전용강 개발 및 새로운 열처리 기술의 개발도 중요하다. 또한 환경오염을 최소화 할 수 있도록 기존의 열간단조에서 냉간단조의 제조공정 변경, 냉간단조성 확보를 목적으로 실시되는 구상화 소둔 열처리를 균일 미세한 페라이트+펄라이트 조직을 갖게 하는 등온소둔(Isothermal annealing) 열처리나 제어압연을 이용한 열처리 시간단축 기술 등 고강도화 소재기술에 더해 고객사의 제조공정을 개선할 수 있는 기술개발이 요구된다.

기초산업 소재

\

열연강판

(Hot-rolled Strip Steel)

열연 제품의 특징

열연 강재는 가장 생산량이 많은 철강 제품군으로서, 자동차 프레임, 휠, 선박 컨테이너, 구조용 재료, 파이프, 가정용품 등으로 주로 사용되지만 후공정인 냉간압연 및 표면처리용 소재로 대부분 사용된다. 열연 강재는 용도별로 분류하면 일반 구조용강, 내후성/내해수/내황산 등 비 STS내식강, 강관용강, API 등 에너지용 강재, 그리고 자동차용 열연 강재로 구분할 수 있다. 구조용 열연재는 일반 구조용강, 용접 구조용 및 고기능 구조용강으로 구분할 수 있으며 철구조물, 교량, 선박, 차량제작 등에 사용된다.

구분	환경변화	강재요구특성
조선용	• 컨테이너선의 초대형화 (~13,000TEU)	고강도, 후물화
해양구조용	• Platform의 대형화 • 개발지역의 심해역화, 극지화	고강도, 고인성, 후물화
라인파이프용	• 한냉지, 내sour, 심해저, 내지진	고강도, 고인성, 내sour, 좌굴
건설용	• 건물의 초고층화 및 교량의 장스팬화	고강도, 후물화
압력용기용	• 저장 용기의 대형화	고강도, 고인성

표 1. 열연강판의 용도

분류		용 도	대표규격
구조용강	일반구조용강	일반구조물,건축물,교량	KS-SS400,KS-SM490
	조선용강	선체구조물(선박)	KR-EH32/36/40/47
	해양구조용강	해양구조물(시추선등)	API 2W-50/60
	건설용강	빌딩,교량 등	HSB600, SM570
Line pipe 용강		석유, 천연가스 수송용 Pipe	API X42~X80
압력용기용강		저온과 고온의 저장용기, 보일러	A516-60/65/70,A387, SPV490
산업기계용강		크레인, 내마모 구조물, 금형 등 각종 기계부품	AR360,S45C,POSTEN60/80
특수용도강		방산용 및 LNG 저장용기 등 특수용도용	HY80/100, A533-1(9%Ni강)

표 2. 열연강판의 분류

열연 강관은 일반강관, 구조용 강관, 특수강관, 기계 구조용 탄소 강관 등으로 구분되며, 배관, 기계구조용, 압력용기, 보일러 및 열교환기 등에 사용된다. 내후성강은 열연/냉연 내후성강으로 구분되며, 특수원소 (P, Cu, Cr등)을 첨가하여 내식성과 내후성이 우수하며, 주로 컨테이너, 건축 외장재 등으로 사용된다. 내해수강은 첨가된 합금원소(Cu, Cr 등)의 영향으로 해양 환경에서의 부식률이 일반 탄소강의 절반 이하인 부식저항성이 높은 강종으로 교량, 건축물, 지지대 등에 사용된다. 열연 API 강재는 송유관과 유정관으로 구분되며, 일반적으로 고장력, 극저온 인성, 고용접성을 갖는다. 특히, 송유관은 내수소 유기 균열 특성을 가지며, 유정관은 내파괴 특성을 갖는다. 고탄소강은 자동차 부품, 톱날, 제침, 체인, 농기구 등에 다양하게 사용되며, 제조 공정

에 따라 열연고탄소강, PA 고탄소강, 냉연 고탄소강으로 구분된다. 자동차용 열연 강재는 일반 외판재로 사용되는 냉연 강재 대비 Front suspension, Steering system, Brake system, Rear suspension, Wheels &tire 등의 자동차 구조용 part로 사용되는 강재를 말하며, 우수한 기계적 성질 이외에도 HER(%)특성 등 자동차 용도에 특화되는 용도를 갖는 강종을 이른다.

열연 제품 산업의 특징 및 국내/외 현황

열연강판의 개요 및 현황

열연강판이란 철강재의 하나로 열로 강판을 가열한 상태에서 강판을 롤러 사이를 지나게 해서 강판의 두께를 조절한 것이다. 열연강판의 특징은 압연이 쉽다는 점이고 대신에 고온에서의 표면이 산화되어 거칠다는 것과 고온 압연시의 두께가 냉각되었을 때에는 수축되어 두께가 일정하기가 어렵다는 것이다. 2014년 기준으로 국내 열연강판 총수요는 4,206만톤이며, 이중 명목소비는 3,582만톤, 수출은 624만톤이었으며, 생산규모는 3,704만톤, 수입은 503만톤이었다.

열연강판 시장동향 및 전망

열연판 생산능력은 계속확충되면서 2014년 기준으로보면 국내 열연강판 생산능력은 4,411만톤에 이르렀다. 현대제철의 설비 증설과 포스코의 설비 신설 때문에 사상 최대의 생산능력을 기록했지만 국내 전방산업의 수요는 늘어나지 않아서 해외시장 개척만이 돌파구라 할 수 있다. 중국이 철강재 생산을 늘리며 수출 비중을 확대하고 있고 일본도 저가 수출로 시장쟁탈전을 벌이고 있어서 국내 철강업체들의 경영환경이 극도로 위축되어 있다.

현재 포스코는 포항제철소에 2개, 광양 제철소에 4개의 열연 공장을 보유하고 있으며 총 2,959만톤의 열연강판 생산능력을 보유하고 있다. 특히 광양제철소에서만 2천만톤을 넘는 생산능력을 보유하고 있다. 동부제철은 지난 2009년 전기로 열연공장 가동 이후 추가 증설내용은 없다. 제강 (300만톤)-연주 (250만톤)-압연 (300만톤) 공정간 설비 능력이 상이해 앞으로 연주라인 합리화 가능성은 남아있지만, 당분간 투자 가능성은 크지 않다. 지난 2000년대 후반 현대제철의 일관제철소 투자와 동부제철의 전기로 열연공장 투자 등 열연강판 중심의 상공정 투자는 공급부족이던 열연 시장을 공급과잉으로 변화시켰으며, 순수입 품목에서 순수출 품목으로 전환하는 계기가 됐다. 이 때문에 포스코의 국내 독점시장 구조는 현대제철, 동부제철과의 3자 경쟁시장 구조로 전환됐으며, 그 동안의 생산능력 향상이 열연강판 수요 증가를 웃돌면서 2011년을 정점으로 가동률은 점진적인 하락 추세에 있다.

열연강판은 냉연강판과 강관의 원소재인 반제품 성격도 짙다. 한국 철강협회의 출하구조 분석 자료(2011년 기준)에 따르면, 열연강판 출하구조는 실수요 23.5%, 유통 11.3%, 후속공정용 30.2%, 수출 35.1%로 구성된다. 후속 공정용 중 50%가 냉연강판 생산용이며, 냉연 (냉연을 후처리한 표면처리강판 포함) 실수요의 약 60%가 자동차용으로 사용되고 있어 자동차산업이 열

천톤		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013E	2014E	'14/'13(%)
	생산	20,973	22,632	23,544	24,649	24,928	26,858	27,927	24,786	31,092	35,473	36,325	35,104	37,035	5.5%
	수입	5,550	4,907	5,433	5,812	7,072	7,845	7,974	6,258	7,756	5,947	5,649	5,467	5,030	-8.0%
열연	수출	2,755	3,308	3,508	3,600	4,006	3,822	4,153	4,742	5,377	7,118	7,080	5,946	6,244	5.0%
	명목소비	23,768	24,231	25,470	26,861	27,994	30,881	31,747	26,303	33,471	34,302	34,894	34,625	35,821	3.5%
	총수요	26,523	27,539	28,978	30,460	31,999	34,703	35,900	31,045	38,848	41,420	41,974	40,572	42,065	3.7%

표 3. 국내 열연강판 수급동향 (자료원: POSRI)
연강판의 주 수요분야로 꼽힌다.

열연설비 증설의 중심에 서 있는 현대제철과 포스코는 그룹사 계열 내 소비량 증가와 해외 하공정 생산기지 공급용이 중심이어서 국내 수급 불균형을 심화하는 부작용 가능성은 적다고 생각한다. 하지만 양사의 설비 증설에 따른 본격적인 공급량 확대로 인해 2015년부터 수요부족 문제가 심각한 실정이다. 특히, 현대제철의 현대 하이스코 냉연 사업부문 인수합병으로 현대하이스코에 공급되던 비현대제철 공급이 현격히 줄어들어서 포스코와 중국, 일본 고로사들의 공급 경쟁이 더욱 치열해졌다.

원자재 가격하락으로 인해 원가압력은 줄었지만 철강제품가격의 동반하락은 피할 수 없는 현실이 되었다. 특히 국내 유통가격에 비해 해외 수입품의 가격이 월등히 낮게 형성되면서 국내 철강사들의 경쟁력이 풍전등화 처지가 되었다. 국내산 열연판의 유통가격이 톤당 50만원대이나 수입재는 40만원대에 수입되고 있는 실정이다. 수급적인 요인도 앞서 살펴본 바와 같이 개선될 상황이 아니므로 전체적으로 열연강판 가격은 당분간 상승할 여력이 적다고 볼 수 있다.

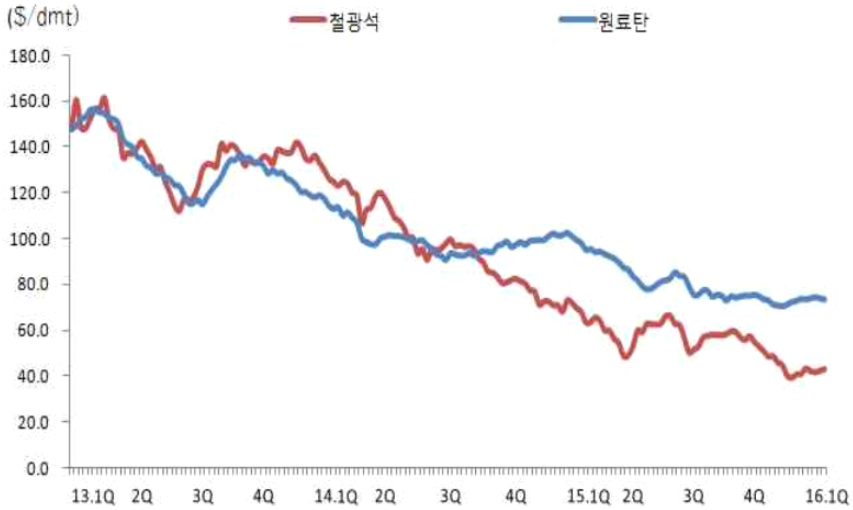


그림 1. 철광석과 원료탄 가격 동향 (자료원 : 한국철강협회)

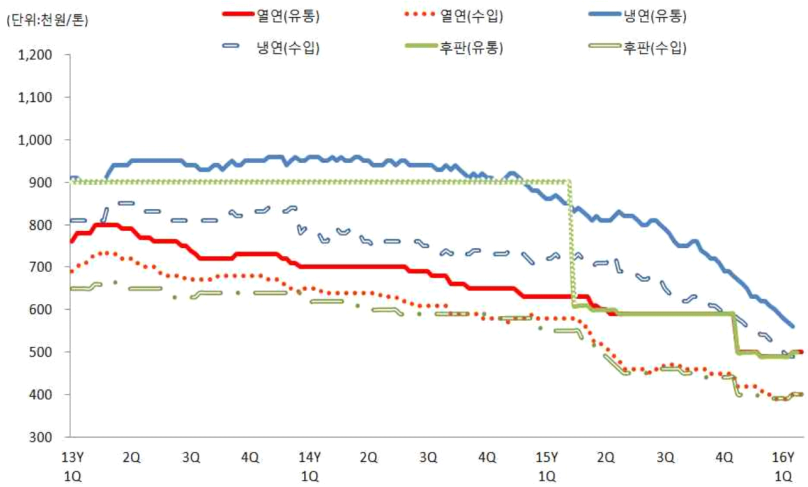


그림 2. 국내 철강제품 가격동향 (자료원 : 한국철강협회)

제품-기술 개발의 특징 및 주요 소재 기술

일반 열연강재 부문에서는 저원가, 고효율화, 그리고 후물화 및 박물화를 목표로 하는 새로운 생산기술들이 개발되고 있다. 대표적인 기술로서 열연 급속냉각 설비를 활용하여 넓은 범위의 소재 두께를 하나 혹은 몇 개의 성분만으로 제조하는 강종통합 기술, 그리고 냉연 대체가 가능한 0.8~1.2mm 두께의 초극박 열연제품을 제조하는 연연속 압연기술이 개발되었다.

고기능 열연 강재는 특수한 기능을 바탕으로 마케팅 경쟁력을 보유한 시장 선도형 열연제품이라 할 수 있는데, 고탄소강, 고강도강, 내식/내후성/내해수성강 등 환경적응형 기능소재, 고가공강, 그리고 라인파이프용 API 강재 등으로 다시 세분할 수 있다.

고탄소강은 0.3wt.% 이상의 탄소를 함유하거나 탄소 함량이 0.15wt.% 이상이면서 Mn, Ni, Cr, Mo, B 등의 합금이 첨가된 강으로 규정할 수 있는데, 이는 열처리를 통해 마르텐사이트 경화를 얻을 수 있는 합금계임을 의미한다. 고탄소강은 열연 후 통상 퍼얼라이트 및 페라이트의 복합 조직을 갖게 되며, 이후 소둔과 냉연을 반복하는 과정에서 원하는 두께 및 형상을 얻게 된다. 목표 형상까지의 대부분의 가공을 마친 후 경화 열처리를 실시하여 원하는 경도를 얻게 되는데, 이 때 경화능이 중요한 인자가 된다.

이러한 경화능을 확보하기 위해 Mn, Cr, Mo 등 합금을 첨가하여 왔으며 가장 효과가 큰 Mo의 경우 특히 고가이다. 최근에는 B의 경화능 향상 효과를 활용하여 이러한 고가 합금원소의 첨가량을 줄여 저원가를 구현한 B첨가 고탄소강의 사용량이 계속적으로 증대되고 있다. 또한 열연 조직을 미세하게 하여 가공성을 증대시킨 고버링성 고탄소강, 제침 등 용도로 사용되는 정밀한 두께 공차의 공구용 고탄소강 등이 개발되었으며, 중탄소강까지의 조관이 보편화됨에 따라 콘크리트 이송관 등에 사용되는 내마모성 고탄소 강관, 자동차에 폭넓게 적용되는 중공형 고탄소 강관 등의 강관류 고탄소강 제품도 계속적으로 개발되고 있다.

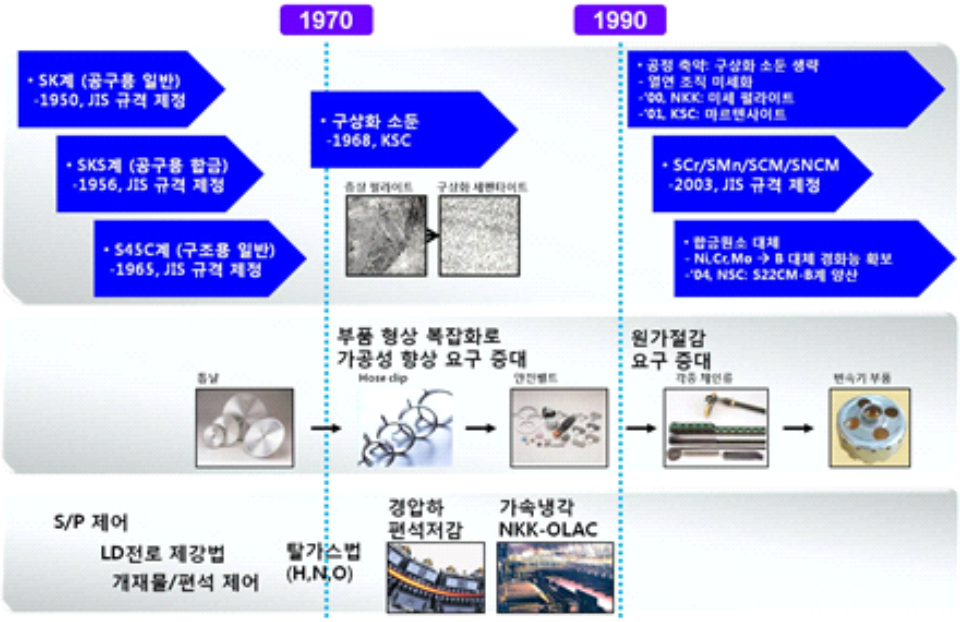


그림 3. 고탄소강 Product-technology 분석표

고내식강은 황산, 황산/염산 복합부식, 암모니아, 해수 등 가혹한 환경에서 뛰어난 내부식성을 갖는 소재로서 기존 소재보다 뛰어난 내부식성과 물리적 특성을 갖는 소재가 개발되고 있다. Cu와 Co 첨가를 통해 내황산부식 특성을 확보한 내황산 부식강은 화력발전소의 예열기, 집진기, GGH(gas-gas heater), Duct 등에 사용되는데, 최근 환경규제 정책에 따라 화력발전소의 탈황설비 시장이 부각되고 있다. 최근에는 강도와 내식성을 동시에 가지는 고강도(인장강도 550MPa급) 내황산 부식강이 개발 완료되어 실용화가 진행되고 있다.

한편 컨테이너 혹은 모듈러 건축소재 및 건축 외장용으로 사용되는 내후성강의 극박 고강도화가 진행되어 기존 인장강도 550MPa급 소재의 강도를 인장강도 800MPa급까지 향상시킨 고강도 내후성강의 개발이 이루어졌다. 강널말뚝, 강관파일, 해양 풍력타워 및 부유식 구조물에는 현재 일반강 혹은 A690 소재가 사용되고 있는데, 내해수성을 부여하고 고강도화를 이룬 소재로 대체함으로써 기능과 수명을 향상시키려는 목적으로 최근 인장강도 최대 590MPa급까지의 내해수성강 개발이 추진되고 있는 상황이다.

고가공강은 보일러튜브, 고인발튜브, 압력용기 등에 사용되는 소재로서 Deep drawing이나 인발 가공성이 우수해야 하며, 고온 강도 및 취성파괴에 대한 저항성을 확보하기 위해 높은 청정성이 요구된다. 이밖에도 철침목, 스틸전주, 내지진 각관, 철탑구조물 등에 사용되는 고기능 구조용 소재의 개발과 선박 혹은 교량용 후판 대체 열연 코일의 개발도 이루어지고 있다.

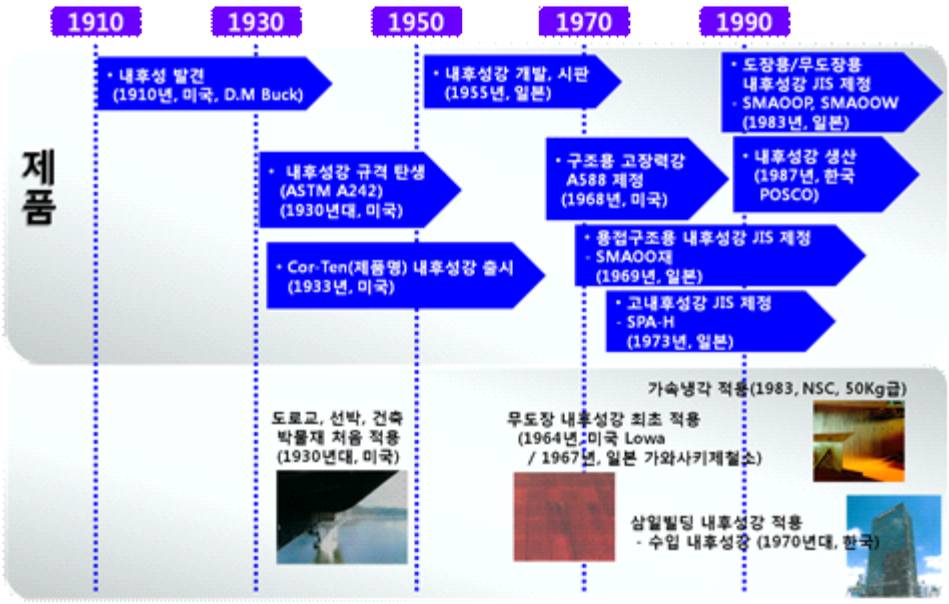


그림 4. 내후성강 Product-technology 분석표

열연 고강도강은 유류비 절감을 위해 경량화가 요구되는 운송 및 건설중장비 부문에 많이 사용되고 있다. 항복강도 450~700MPa급까지의 강도를 석출 경화를 통해 얻는 TMCP형 냉간성형 고강도강 Line-Up이 주요 철강사마다 구축되어 있으며, 항복강도 최고 900MPa 급까지의 석출경화형 고강도강도 개발되고 있다.

한편 인장강도가 1GPa을 초과하는 고강도강의 개발 전략으로는 석출경화형보다는 저온변태형 강종이 보다 빈번히 선택되고 있다. 열연 ROT 상에서의 급냉과 저온 권취를 통해 베이나이트 혹은 마르텐사이트 조직을 얻음으로써 비교적 용이하게 높은 강도를 얻을 수 있지만, 판형상과 연신율 측면에서 높은 기술적 장벽이 존재한다.

그림 5. 열연 고강도강의 개발 방향

이러한 저온변태형 고강도강은 항복강도 1200MPa급 제품까지 개발되고 있으며, 전통적으로 열처리를 통해 제조되던 내마모강은 실제로 이보다 더 높은 강도 수준을 갖는다 (HB450급이라면 인장강도가 1.5GPa에 달할 수 있다.) 이처럼 열연 급속냉각 (DQ, Direct quenching) 공정으

로 제조되는 저온변태형 초고강도강은 구조용 고강도강과 내마모강의 두 가지 큰 용도에 맞추어 개발되어 오고 있다.

그림 5는 고강도 강의 개발 방향을 간단한 표로 나타낸 것이다. 기존 고용 강화를 통해 확보하던 강도를 석출 강화, 조직 강화 등을 통해 높은 연신율, 높은 기능성, Stretch-Flangeability 등을 확보하기 위해 다양한 성분/ 공정 조건을 활용하여 강을 제조하고 있는 실정이다.

라인파이프용 API 강재는 최근 에너지 수요 증가가 지속됨에 따라 수요가 증대되고 있다. 에너지 수요 증가에 따라 유정개발이 가속화 되고 있으며, 극한지 또는 심해저 유정개발도 증가되고 있다. 이와 같은 에너지 환경 변화에 따라 고강도를 유지하면서도 부식성이 강한 환경에 사용 가능한 고강도, 고 내식성 유정용 강관 요구가 증대되고 있다. 현재, 낮은 부식성 환경에서는 N80, L80, P110, Q125 등 탄소강이 적용되고 있으며, 고부식성 환경에서는 13Cr, 이상 스테인리스강, Ni 합금강 등 고합금강이 사용되고 있다. 탄소강의 경우 열처리된 seamless 파이프 혹은 ERW 용접강관이 사용되고 있으나, 최근 비용절감을 위해 비열처리 ERW 강관의 개발 및 대체시도가 이루어지고 있다. 채굴된 석유 및 천연가스를 수송하는 열연코일을 이용한 강관은 조관방법에 따라 ERW 및 Spiral 강관으로 구분된다. 비용절감을 위해 후판이 사용되던 UOE 대구경 강관을 열연 Spiral 강관으로 대체하려는 기술변화가 이루어지고 있으며, 이에 따라 두께 17mm 이상의 극후물 열연소재가 많이 요구되고 있으며 향후 두께 23mm 이상의 열연소재도 상용화 될 전망이다. 한편 H2S 가스 함유량이 높은 Sour 원유 혹은 가스를 수송하는 라인파이프용 강재는 부식에 의해 강재로 침입되는 수소에 의해 수소유기균열 (HIC, Hydrogen Induced Cracking) 혹은 황화물 응력부식 (SSC, Sulfide Stress Cracking) 등 수소 취성 현상에 의한 손상문제가 크다. 또한 시베리아, 알라스카 등 한랭지 라인파이프용 강재는 높은 저온충격특성이 요구되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 열연코일 제조 공정 중 엄격한 성분제어, 편석 억제, 개재물 제어 및 균일 미세조직제어 등의 기술을 활용하여 높은 품질의 라인파이프용 강재 개발에 노력하고 있다. 현재 저온인성 보증용 강재는 X70 급이 주로 사용되고 있으며, 최근 수송효율 향상을 위한 고압수송을 위해 X80 급 적용이 증대되고 있다. H2S 부식부식성 환경의 경우에는, X60/X65 급의 ERW 강관이 주로 적용되고 있으며, X70 급 적용이 시도되고 있다. 또한 최근에 후판 대체용 열연 API 강재로서 Spiral로 조관된 X65 급도 사용되고 있다.

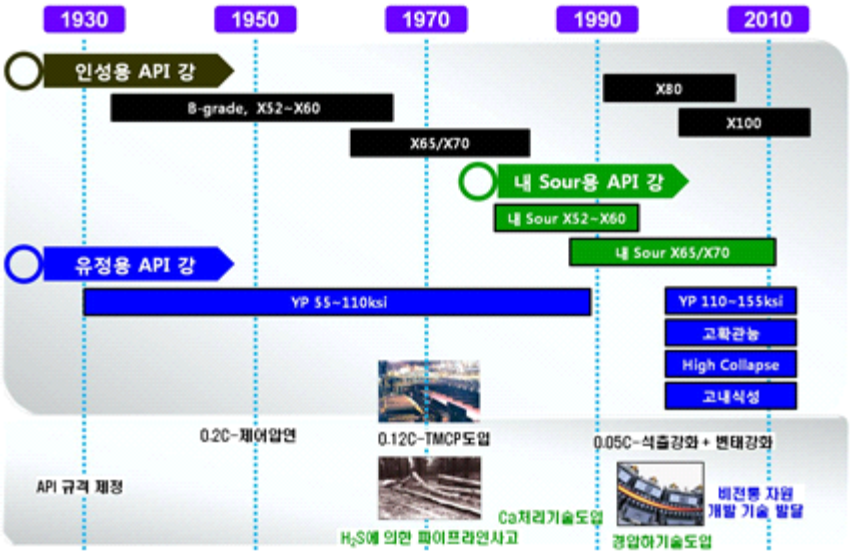


그림 6. 에너지용 강재 Product-technology 분석표

자동차용 열연 강재 부문에서는 환경문제를 고려한 자동차 연비향상의 추구로 인하여 자동차 경량화를 이룰 수 있는 고강도-고성형성 강재의 제조와 개발된 제품들의 상용 부품화 기술이 매우 중요한 과제이다. 고연신율과 낮은 항복강도를 요구하는 부품에서는 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 Dual Phase강이 많이 활용되며, 구멍을 뚫은 후 확장하거나 stretch flangeability가 요구되는 부품에서는 페라이트와 베이나이트 그리고 석출물로 구성된 고버링강이 널리 사용되고 있다.

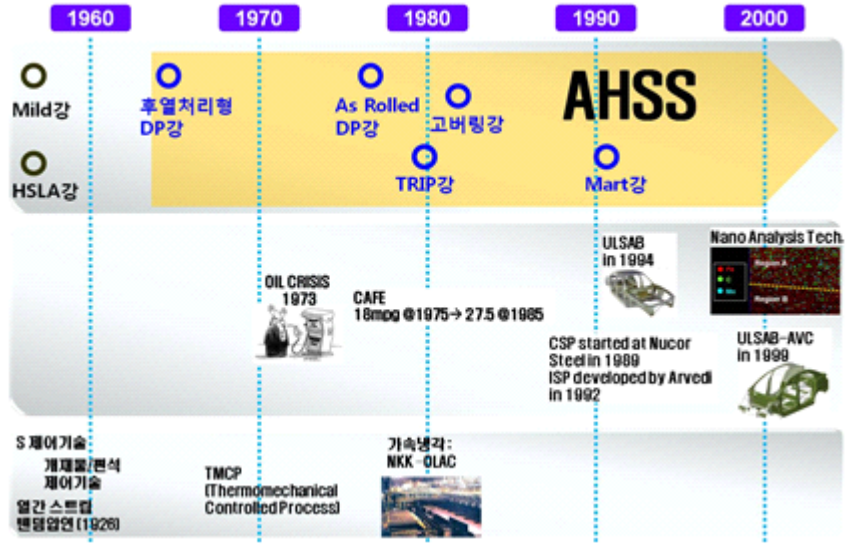


그림 7. 자동차용 열연 강재 Product-technology 분석표

이런 변태조직을 활용한 강들은 열연 ROT에서의 냉각제어가 매우 중요하며, 적절한 상분율의 확보를 통해 원하는 강도와 연신율 또는 구멍확장성을 얻게 된다. 그리고 이러한 강재들의 적용을 위해서는 적당한 피로강도와 용접성이 동시에 만족시켜져야 한다. Dual phase강은 590~980MPa까지 개발되어 있으면 현재 590MPa급이 주로 사용되고 있다. 고버링강 또한

590~980MPa까지 개발되어 있고 현재 590MPa급이 주력이지만 차츰 780MPa급으로 변경되는 경향을 보이고 있다.

주요 소재기술

자동차용 고강도 열연강재 제조기술

자동차용 고강도 강재의 경우, 일반적으로 고용 강화 만으로 원하는 강도 범위를 확보할 수 없기 때문에 고용 강화 이외의 강화법을 이용하여 강도를 증가시키는데 대표적인 것이 석출 강화 및 미세조직 강화이다. 이 중 미세조직을 변화하여 강도를 증가시키는 것은 열처리등을 통해 용이하게 고강도를 얻기 위해서 고가의 합금 원소를 첨가하게 되어 비용이 증가하는 문제와 복합적인 상의 도입으로 인한 상간 경도차 등으로 인해 최근 새롭게 부상하고 있는 HER(%)특성을 낮게 만들 수 있다는 여러가지 단점이 있다.

이러한 단점을 해소하기 위하여 Carbide 석출물을 활용한 석출 강화형 강종이 개발되었으며 개발 기술에 대해 자세히 소개하고자 한다.

석출 강화형 강종의 강화 메커니즘에서 가장 중요한 것은 inter-phase carbide 석출물이다. 이러한 석출물을 형성하는 원소로는 Ti, Mo, Nb, V 등이며 10nm이하의 구형 석출물이 FCC구조를 가지며 입계에 석출한다. 이러한 탄화물의 입계 석출 시기는 austenite에서 ferrite로 변태되는 시점 또는 그 후이다.

그림 8은 최근 논문에서 소개된 interphase carbide의 석출 형태를 나타낸 것이다.

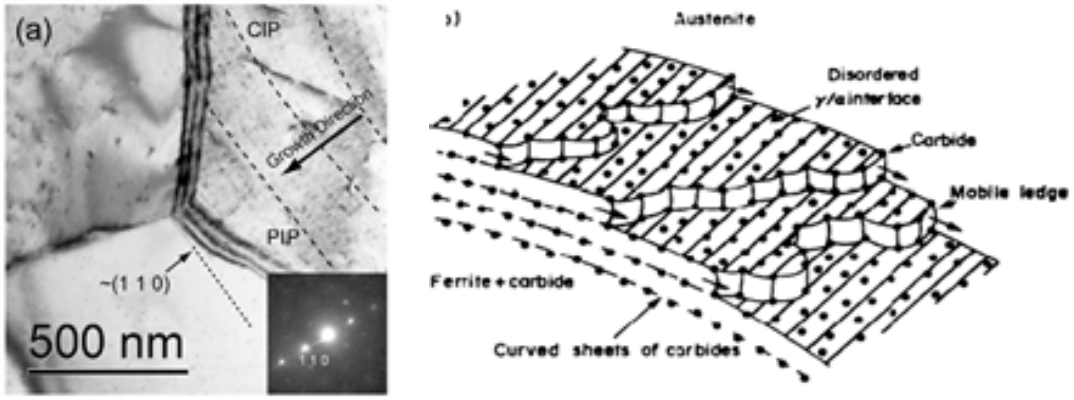


그림 8. Inter-phase carbide의 석출 형태

이때 interphase carbide들은 Ferrite내에서 선형으로 층을 갖고 석출되며 고르게 분산된 형태의 carvide들이 고강도/ 고연신의 조합을 가능하게 한다고 알려져 있다. 하기 그림은 이렇게 형성된 탄화물들을 TEM으로 관찰한 것이다.

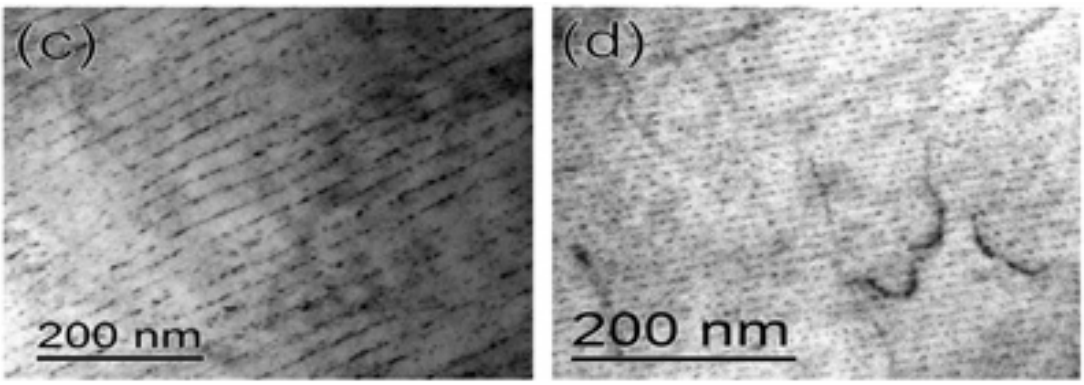


그림 9. Inter-phase carbide 석출 형태

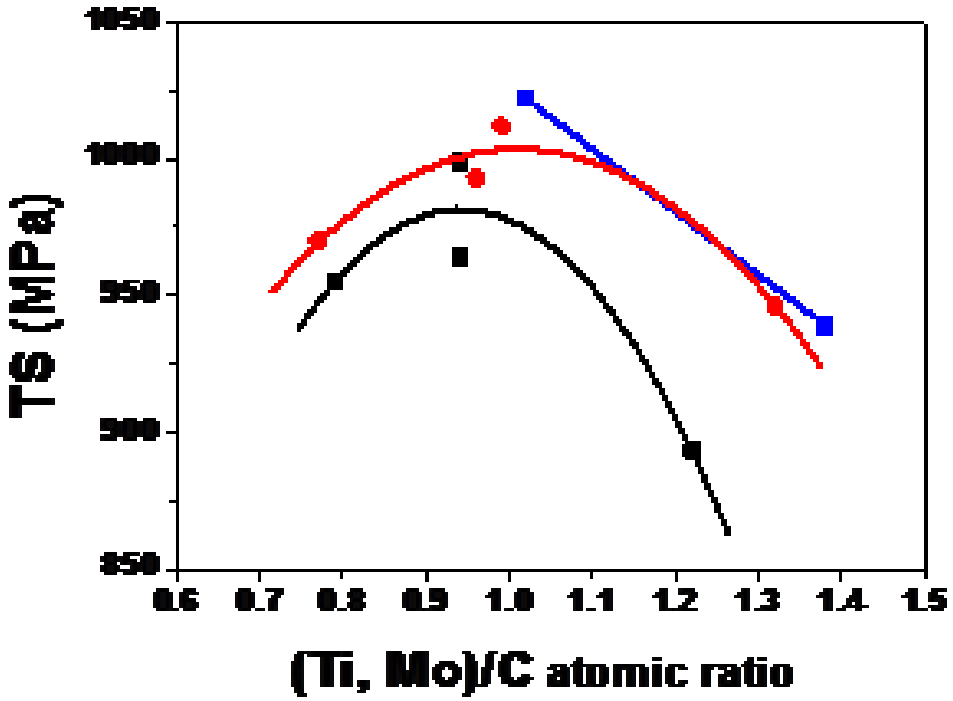


그림 10. (Ti, Mo)와 C의 원자비에 대한 TS의 변화

보통 이런 나노 석출물들은 탄화물의 형태로, 탄화물을 형성하는 원소와 C의 비가 강도를 결정하는 중요한 요소이다. 이때 강도에 미치는 Ti, Mo등의 탄화물 형성 원소와 C의 비를 나타낸 것이 그림 10이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 탄화물 형성 원소와 C의 원자비가 0.9~1.1일 때 동일 조건에서 가장 높은 강도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이를 기반으로 800MPa이상급의 고강도 강재를 석출 강화를 통해 제조하기 위해서는 적절한 탄화물 형성 원소의 선택 (Ti, Mo, Cr, Nb, V …)과 C과의 비율의 조합을 활용하고 또한 이를 통해 얻어진 inter-phase의 나노 탄화물을 상변태 과정에서 석출하기 위해 적절한 공정 조건을 도출해야 하는 것이 주요한 기술이다.

열연 이상조직강 (Dual phase, DP) 제조기술

열연재 중 가장 널리 활용되는 강종이 이상조직강 (DP)이다. 이상 조직강은 페라이트와 마르텐사이트의 복합 조직을 갖는 강으로서 저항복비와 높은 연신율을 특징으로 한다. 이때 강종의 연성은 페라이트에서, 강종의 강도는 마르텐사이트에서 지지하여 연성과 강도가 우수한 강을 만드는 컨셉이다.

DP강은 1962년 B.I. Edelson이 처음으로 개발하였다. 이후 1975년에 일본의 Hayami와 Furukawa가 Dual phase라는 용어를 처음으로 사용하여 DP강이라고 명명되었다. DP강의 개발 현황을 살펴 보면, 1960년대 중반 BRISA사와 Inland steel에서 후열처리형 DP강을 개발하였으며, 1977년 Climax Molybdenum사에서 as rolled type의 강판을 개발하여 상용화 하였다. 이후 1982년 NSC, KSC, NKK, SMI에서 열연 DP강을 개발하고 양산 적용 하였으며, 1985년 TKS, V. Alpine등에서 저 Si형 Cr-P계 열연 DP강을 개발한 바 있다.

그림 11의 개발 흐름을 보면 후열처리 DP강에서 As-rolled DP가 개발된 이후 합금 원소의 저감과 고온/저온 권취형의 DP로 다양한 형태의 DP강이 개발되었으며, 한국에서는 POSCO에서 고온 권취형의 980DP, 저온 권취형의 590, 780DP등이 개발되어 양산되고 있다.

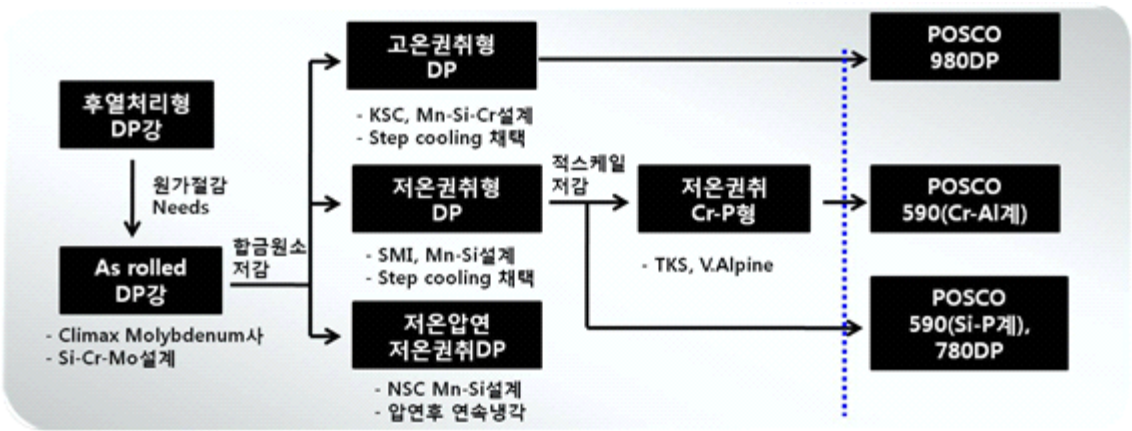


그림 11. 열연 DP강재 개발 흐름

성공적 소재기술개발의 시사점

열연 제품의 경우 성공적인 소재기술 개발을 위해서는 제품의 생산 측면과 연구 측면, 그리고 학계의 적극적인 관심과 협조가 필요하다. 결국 성공적인 기술 개발을 위해서는 산/학/연의 네트워크 구축, 적극적인 협력 연구 및 연구된 제품의 현장 적용등이 바탕이 되어야 성공적 열연 제품을 개발할 수 있을 것이다. 특히 열연 제품의 경우, 치수 정밀도가 중요한 고탄소강, 특수한 물성을 갖는 내후성강, 자동차 내부 부품으로 쓰여 신뢰도가 가장 중요한 자동차용 강종 등 다양한 분야에 널리 활용 되므로, 열연 제품의 개발 이외에도 제품을 직접적으로 사용하는 자동차 업계, 프레스 업계, 자동차 부품 업계 등과도 적극적인 협업이 필요하다.

또한 열연 제품의 경우, 냉간압연이 최종인 제품의 원소재로도 사용되는 제품으로서, 최종 냉연 제품의 물성에 미칠 수 있는 여러가지 인자를 정밀하게 제어하는 공정 제어 또한 매우 중요

한 부분이라 할 수 있겠다.
열간 압연재의 경우, 현재 국내 인프라가 부족하고 제품을 생산할 수 있는 업체가 한정되어 있는 한계가 있으며, 학계에서도 물리야금을 전공하여 배출되는 인원이 부족해지는 현실에서 고급 인력 양성을 위한 정부의 노력이 필요한 측면이 있다.

냉연 강판

(Cold Rolled Strip)

냉연 강판의 특징

냉연 강판은 표면이 미려하고 가공성이 우수한 소재로, 자동차, 냉장고, 세탁기 등 가정용품에서부터 산업기기, 각종 건자재에 이르기까지 다양한 용도로 사용되며 산업구조의 고도화에 따라 현대 사회의 필수 소재로 인식된다.

많은 부분이 자동차용 강판으로 사용되지만 그 외에도 그 제품과 기술의 범위가 넓어 여기서는 자동차 강판을 제외한 제품만을 다룬다. 냉연 제품은 크게 일반 냉연강판, 구조용 냉연강판, 법랑용 냉연 강판, 고장력강 냉연 강판으로 구분할 수 있다.

일반용 냉연강판은 일반적인 용도에 사용되는 강재로서 가전용인 냉장고 도어, 산업용 드럼, 가구 제작 등에 쓰이는 소재를 말한다. 구조용 강판의 경우 가공은 하지 않으나 강도가 요구되는 강구조물에 사용되는 강판을 말한다. 법랑용 강판의 경우 내충격성, 고인성, 성형성을 보유하고 있는 철강재와 내열성, 내마모성, 표면 광택 등의 특성을 갖고 있는 법랑의 특징을 함께 가진 제품으로, 가전용, 건축용, 주방용품, 욕조 등에 널리 사용되는 소재이다. 고장력강의 경우 제조방법과 최종 용도에 따라 또 일반용, 가공용, 심가공용, TRIP형 고장력강으로 구분되며, 최근의 고강도 박물화 소재 개발의 경향에 발맞추어 각광받고 있는 소재이다.

냉연 제품 산업의 특징 및 국내/외 현황

냉연 용기용 제품 시장 동향

냉연 용기용 제품의 시장 동향은 알루미늄캔, PET캔 등이 급속도의 성장세를 보여 시장 전망이 밝지 않다. 특히 알루미늄 캔의 경우 성장세가 크게 이어지고 있으며, '13년 국내 음료캔 시장에서는 내수와 수출을 포함하여 철강 캔이 제자리 걸음을 하는 사이에 알루미늄 캔 생산량은 8.4%가 늘어난 것으로 조사되었다. 제관 업계는 그동안 음료관 생산설비 교체 시 알루미늄 캔 설비 위주의 신규 설비 도입을 진행해와서 앞으로도 이런 추세는 변함이 없을 것으로 전망된다.

국내 음료 캔 생산량 통계에서는 지난 '08년을 기점으로 알루미늄 캔과 철강재 캔 생산량의 급격한 역전 현상이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 실제 한국 제관공업협동조합 자료에 따르면 지난해에도 알루미늄 캔 생산량은 주스, 스포츠, 전통음료, 기타 부문에서 전년대비 16.3%의 생산량 증가를 기록하면서 맥주관과 탄산관, 커피관을 합해 총 57억 6,800만권을 생산하여 '12년 대비 8.4%의 증가세를 나타내었다.

반면 음료 시장에서 철강재 캔은 2peice 캔에서는 주스, 스포츠, 전통음료, 기타 부문에서 3piece는 커피관 부문에서 각각 13.6%와 39.5%의 증가세를 기록한 것으로 보일 뿐 나머지 음료 부문에서는 마이너스의 성장세를 보였다. 이로써 지난해 음료관 시장에서 철강재 캔 생산량은 총 7억 4,200만관으로 '12년 대비 2.9%의 증가세에 머물렀다.

철강재 캔의 부진에도 알루미늄 캔의 가파른 성장세에 힘입어 지난해 국내 제관 업계의 음료

캔 생산량은 총 65억 1,000만관을 기록하면서 '12년 대비 7.5%의 성장률을 기록했다. 제관 업계에서는 이 같은 음료 캔 시장에서의 알루미늄 캔의 철강재 캔 역전 현상에 대해 다음과 같은 몇 가지 변동 요소들이 복합적으로 작용한 것으로 분석하고 있다.

첫째, 제관 업계의 Al설비로의 생산라인 교체, 둘째, 알루미늄 캔 음료 선호도 급증 그리고 알루미늄 캔재 소재 공급 안정화와 석도 강판 대비 가격 경쟁력 확보 등이 그것이다.

알루미늄 업계의 관계자는 알루미늄 캔의 성장세가 놀라울 만큼 가파르다면서 제관 업계의 신규 설비나 설비 교체에서 할루미늄 캔 설비가 대세를 이루고 있는 만큼 음료 캔 시장에서 알루미늄 캔의 성장세는 견고하게 이어질 것으로 본다고 했다.

구분				2008	2009	2010	2011	2012	2013
음료관	알루미늄	2피스	맥주관	913	1,068	1,221	1,385	1,585	1,714
			탄산관	777	1,163	1,290	1,306	1,389	1,521
			커피관	47	419	584	798	869	817
			주스, 스포츠, 전통음료, 기타	633	1,257	1,523	1,457	1,476	1,716
		계		2,370	3,907	4,618	4,946	5,319	5,768
	철강재	2피스	탄산관	172	40	-	-	-	8
			커피관	766	456	383	301	365	325
			주스, 스포츠, 전통음료, 기타	1,203	456	197	197	236	268
		소계		2,141	952	498	498	601	601
		3피스	커피관	37	39	97	97	38	53
			주스, 스포츠, 전통음료, 기타	196	179	122	122	99	88
		소계		233	218	219	219	137	141
		계		2,374	1,170	717	717	738	742
합계				4,744	5,077	5,663	5,663	6,057	6,510

표 1. 2013년 금속캔 판매 실적 (내수, 수출 포함) (단위: 백만관)

제품-기술 개발의 특징 및 주요 소재 기술

용기용강판

냉연강판 제품 및 제조 기술은 크게 제품군으로 석도원판 제조기술, 일반 가전용 강판 제조기술, 법랑용 강판 제조기술, 특수 제품군으로 내식강 제조 기술 등으로 분류할 수 있다. 냉연 강판은 지난 10년간 환경문제 및 원가절감에 대응하기 위한 극박 고강도화와 복합적인 기능성 강화를 통해 부가가치 향상 방안이 모색되었다.

캔/ 용기용으로 소재인 석도강판 (Tin plate) 원판 즉, 석도 원판의 제조 기술을 살펴본다. 석도 원판은 제조 방법에 따라 SR-BP및 DR-BP로 구분할 수 있다. 여러 가지 종류의 식음료 용

기 및 뚜껑 등의 금속 용기용 원소재로 사용된다. 경도에 따라 다양한 규격의 석도 원판으로 구분되는데, 규격에 따라 요구되는 경도와 강도 조합을 맞춰준다. 이때 SR type의 규격이 T1, T2, T3, T4, T5, T6 등으로 [JIS G3303, KS D3516, DIN 1616] 표준이 존재한다. 또한 금속캔용 소재로서 기본적으로 갖추어야 할 가공성, 용접성 등 제반 특성을 갖춰야 한다. 그림은 용기용 소재 및 제관 기술의 발달을 연도별로 표현한 자료이다.

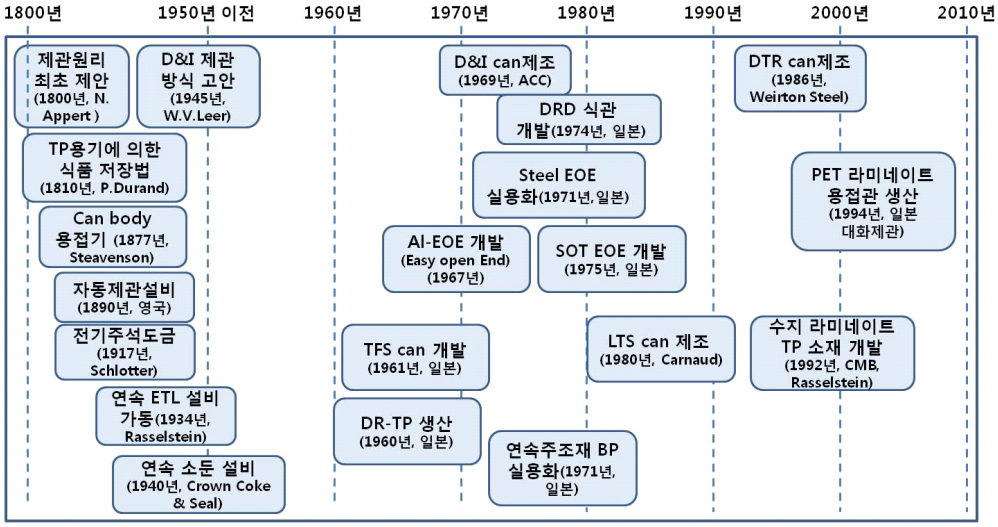


그림 1. 용기용 제품 및 제관 기술의 발달 (연도별)

용기용 강판은 용기용 제품의 개발과, 표면처리 기술의 발달, 용기 제작 기술의 발달 등과 함께 같이 개발되어 왔다. 그림 160은 용기용 강판의 입장에서 개발추세를 나타낸 그림이다.

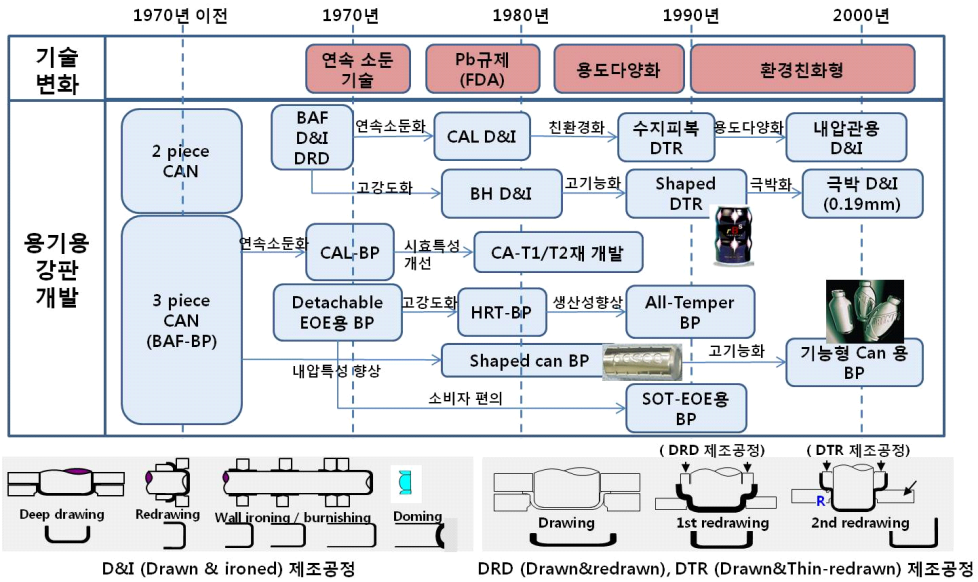


그림 2. 용기용 강판의 개발 trend

용기용 강은 크게 두 가지로 구분하는데 deep drawing으로 용기를 제작한 후 두껑을 덮어 최종 제품을 만드는 2 piece can과 용접으로 관을 말은 후 위/아래 부분을 두껑으로 덮어 만드는

3 piece can으로 나눌 수 있다. 캔 제조 기술은 1970년대 이전에 만들어 졌으나, 연속소둔 기술의 발달, FDA의 식음료용 관의 성분 원소 규제, 음료 can 이외 다양한 용기용으로의 용도 다양화, 환경 친화형 용기 소재의 개발 등으로 인해서 다양한 수준의 제품군이 만들어져 왔다.

가전용 소재는 LCD, LED panel 등 영상기기의 플레임으로 사용되는데 극박의 고강도 냉연소재를 요구한다. 기존에 스테인레스강이 적용되던 노트북 샤시 등을 대체하여 내식성 및 내충격성을 확보하고 원가도 저렴하다. 항복강도 650MPa급 이상의 극박 냉연재가 개발되었다. 이와 같은 용도에 대응하기 위해 극박재 전용 프로세스를 도입하여 저가에 고강도재를 공급하는 방안도 검토할 수 있다.

법랑용강판

철판 위에 유약을 도포하고 열처리를 하여 세라믹을 입히는 법랑강판이 있다. 법랑처리는 원하는 모양으로 가공된 소지 강판에 유리질의 유약을 코팅하여 고온에서 소성 처리하는 것으로, 소재인 강판과 코팅제인 유약의 물리적, 화학적 성질이 전혀 다르므로 일반 강판으로 법랑처리할 경우 처리 과정에서 여러 가지의 결함이 발생할 수 있다. 이러한 결함의 발생을 방지하고 요구특성을 만족할 수 있는 특성을 갖도록 제조한 것이 법랑용 강판이다. 그림은 법랑강판의 일반적인 용도를 나타낸 것이다.

그림 3. 법랑 강판 활용 제품

가스오븐렌지 상판, 식기류, 건축외장, 난방기기 부품 등 다양한 용도로 사용되는 법랑용 강판은 초기에 탈탄 소둔강이 사용되었으나, 제강 및 소둔기술의 발달로 기존 제품인 탈탄소둔강과 거의 동등한 수준의 법랑특성을 갖는 연속주조-연속소둔 방식의 제조 방법이 보편화되어 제조원가가 크게 절감되었다. 최근에 법랑업체들은 정전기를 이용하여 건식방식으로 유약을 강판에 직접 분사하는 정전분체 법랑처리 공정을 많이 채용하고 있는 등 법랑공정의 다양화되어서 이에 부응하는 강판을 개발하였다. 시장의 요구에 효율적으로 대응하기 위하여 저원가 법랑강판 제조기술 및 안정적인 새로운 수소흡장원의 개발로 법랑특성을 개선하는 노력을 다 하고 있다.

그동안 다양한 강종이 적용되었던 후물 열연재를 대체하는 용도로 법랑강판을 개발 중이며

다양한 용도의 법랑강 특성을 만들기 위해 강종 및 프로세스의 변수를 검토하고 있다. 근년에 이르러 철강사는 법랑강의 전체적인 조업성 개선을 위한 연연주성 확보 및 표면 결함 저감

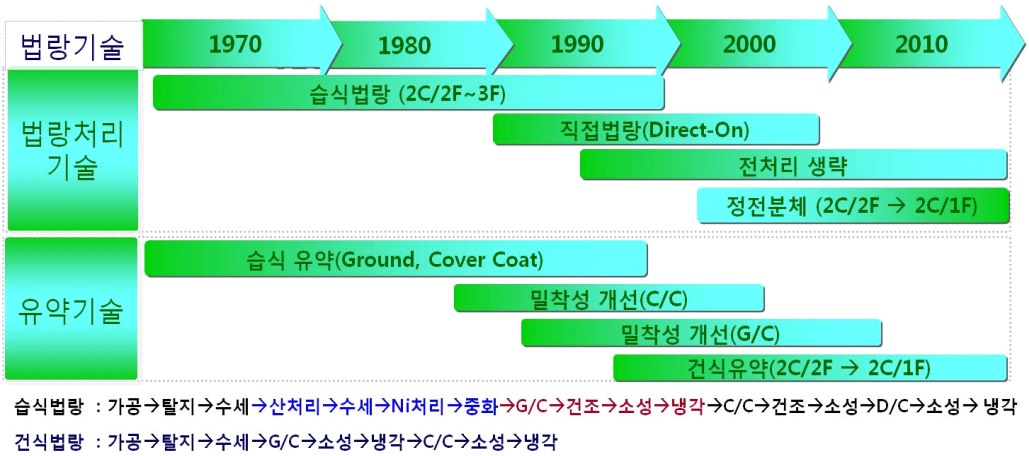


그림 4. 법랑 공정 기술의 발전

활동에서도 큰 진전이 이루어지고 있다.

그림 5는 강판위에 세라믹 처리를 하고 열처리를 통해 강판과 유약층을 접합 시키는 법랑처리 기술의 발전도를 나타낸 것이다.

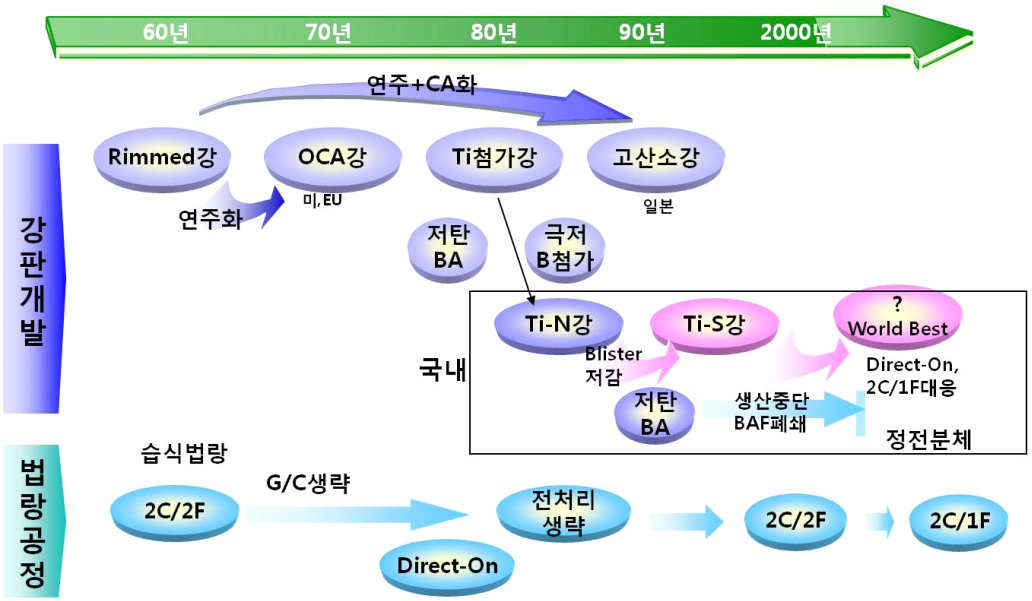


그림 5. 법랑강판 Product-Technology 분석표

법랑 처리 기술은 습식 법랑 기술과 분체 법랑 기술로 나뉜다. 습식 법랑 기술은 유약을 곱게 갈아 물에 섞어 법랑 강판 위에 올리고 건조로에서 건조 시킨 후 법랑 소성 처리를 하는 방법이다. 건식법은 법랑을 물에 섞지 않고 건조시킨 형태로 직접 혹은 정전기를 활용하여 강판에 도포한 후 소성하는 방식이다.

법랑처리 기술과 함께 유약 기술도 발달해 왔다. 기본적으로 저가의 유약으로도 결함이

발생하지 않고 밀착성이 높아지도록 소성 횟수와 Coating 횟수를 조절하여 원가를 낮추는 것이 핵심기술이다.

내후성 냉연강판

냉연 강판의 부가가치를 높이기 위한 기능형 냉연강판에 대한 관심도 높아지고 있다. 특히, 다양한 환경에서의 적용성을 개선한 내식용 냉연강판에 대한 기대가 높다. 특수 컨테이너용 등으로 사용되는 냉연 내후성강의 경우에도 소재 극박화로 수송비를 절감하면서도 인장강도 800MPa급 이상의 고강도 소재를 적용하여 효과를 보았으며, 가공성과 내후성을 더욱 개선한 소재를 개발하는 방안도 고객사와 함께 검토 중이다. 이런 강판을 냉연 내후성강판이라 부른다. 용도는 주로 컨테이너나 건축 외장재 등으로 사용된다.

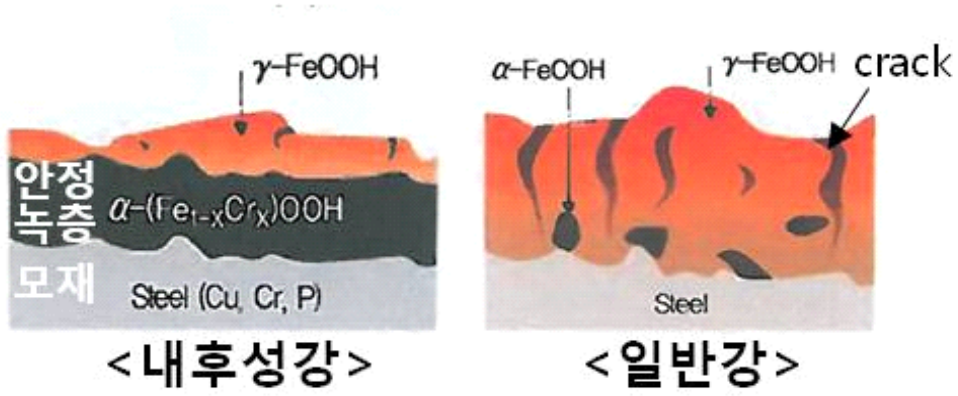


그림 6. 내후성강 내식 메커니즘 분석

내후성강은 강도에 따라 다양한 규격의 제품이 있지만 기본적으로 갖추어야 할 특성으로 강도, 연신율, 가공성, 용접성 등이 요구된다. 그림 164는 내후성 냉연강판이 갖는 내식성이 메커니즘을 나타내는 모식도이다. 내후성강의 경우, 일반강과 달리 내후성 원소인 Cu, P 등을 첨가하여 표면에 비정질의 안정한 산화물 층을 형성하고 이것이 소재의 지속적인 감육을 방지하고, 부식 속도를 현저히 감소하는 내식성을 갖게 하는 원리다. 내후성강은 크게 내식 특성을 향상시키기 위한 성분 원소 첨가 기술과, 강도/ 성형성을 향상 시키기 위한 조직 제어 기술이 중요하다.

내황산 냉연강판

냉연강판은 화력발전소의 예열기 등의 소재로 사용되는 내황산강 및 황산-염산 복합부식강으로도 사용된다. 황을 포함한 화석 연료가 연소하면서 발생하는 아황산가스 등이 수분과 반응하여 생성되는 황산에 의해 강판의 부식이 급격히 진행되는데, 황산노점내식강은 부식을 크게 지연시켜 이러한 부식환경에서 사용되는 설비의 수명을 크게 연장할 수 있는 강판이다. 황산 내식강은 용도에 따라 다양한 강도를 가지며, 고강도 소재로서 기본적으로 갖추어야 할 가공성 및 용접성 등 제반 특성을 갖고 있다. 내황산 부식강 혹은 내황산/염산

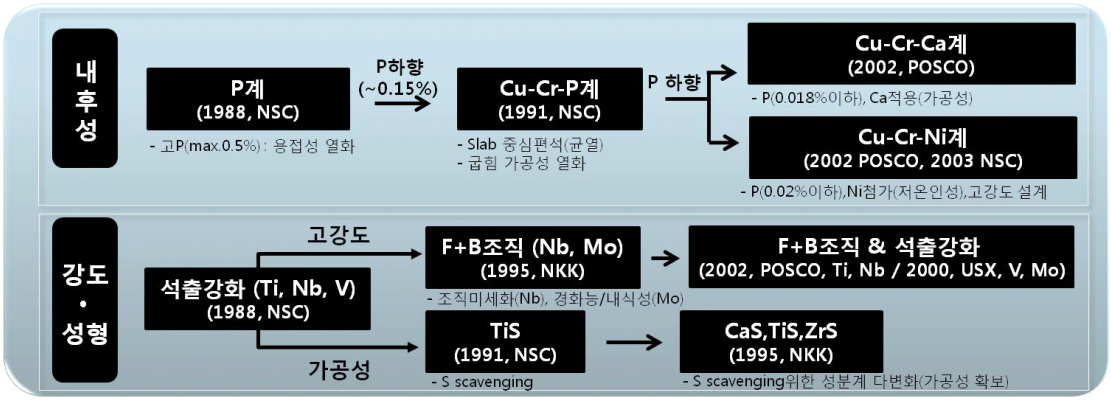


그림 7. 내후성강 강종 개발 현황

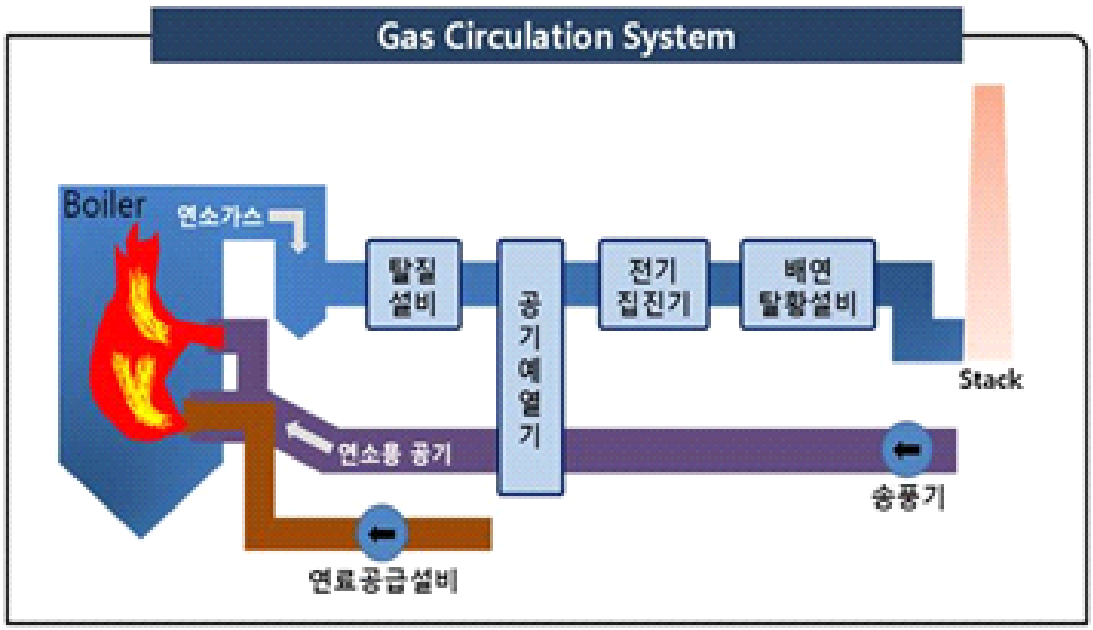


그림 8. 화력발전소 내 내황산강 적용개소

부식강은 국내생산이 불가하여 수입 소재를 비싼 가격으로 사용하여 왔으나, 국내철강사도 기존 수입 소재와 동등한 수준의 내부식 특성을 확보한 소재를 개발하여 시장에 공급함으로써 수입 대체 및 원가 절감 나아가서는 예열기의 내구성 향상에도 크게 기여할 수 있게 되었다. 이와 같이 강화된 내식 특성은 타 용도로도 활용하는 방안이 적극적으로 검토되고 있다. 그림 8은 내황산강이 사용되는 화력발전소의 개소를 나타낸 것으로, 일반적으로 연료가 연소하기 위한 공기가 연소 후 굴뚝을 통해 바깥으로 나가는 전반적인 프로세스 중 건조와 응축이 반복되는 개소에 내황산강이 사용된다.

내황산강이 사용되는 개소에는 응축 부식에 대한 기술적 대처가 필요하다. 그림 167은 응축부식의 개념을 표시한 그림으로 응축 부식은 황산과 염산의 이슬점부식이 발생하는 온도구역을 회피하기 위한 강의 성분 및 제조 공정의 정밀한 제어 등이 필요하다.

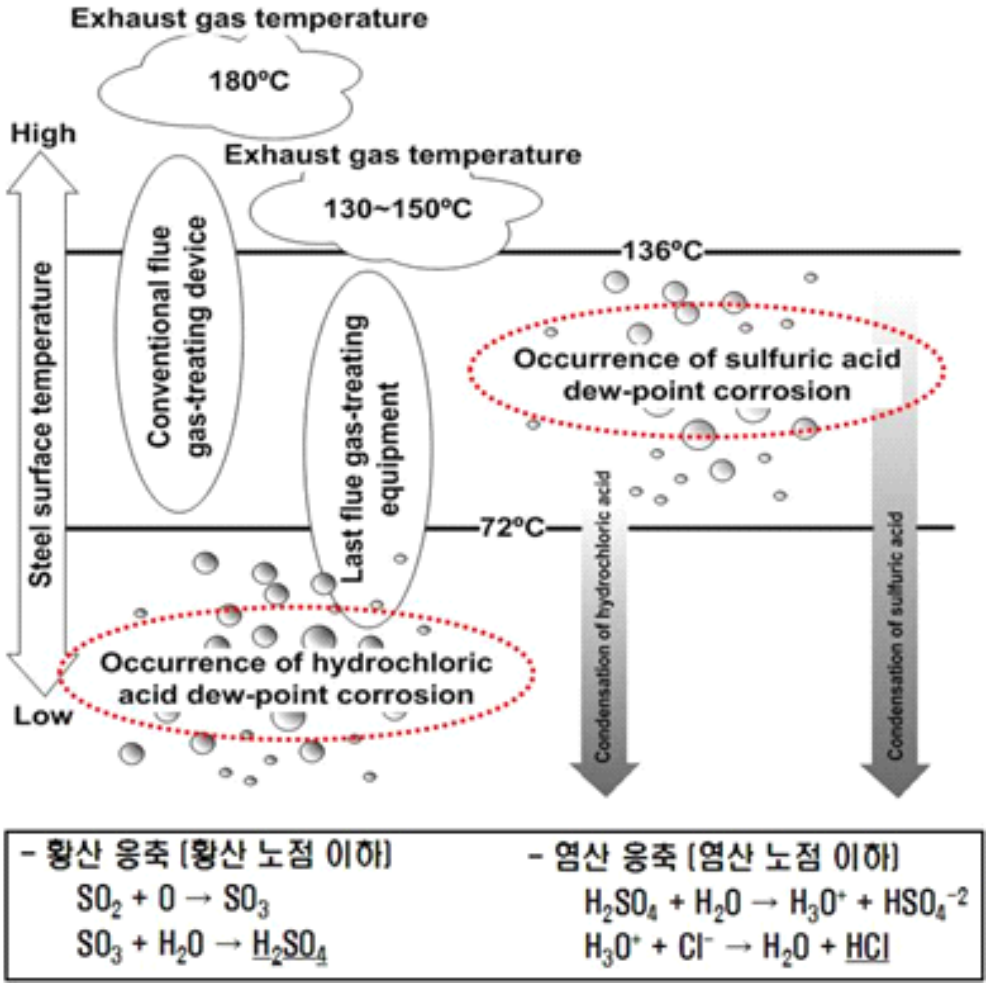


그림 9. 응축 부식의 개념도 (황산 이슬점 및 염산 이슬점)

주요 소재기술

법랑용 강판 수소 흡장능 향상 기술

법랑강판에서 가장 중요한 결함인 Fish Scale 결함을 그림 10에 나타냈다. 법랑 강판에서 Fish scale 결함을 일으키는 주요한 원소는 수소 원자인데, 수소는 여러 공정에서 강 내로 침투할 수 있다. 예를 들어 철강 제조 공정에서 수소 침투가 가능하며, 법랑 소성 과정에서도 수소 침투가 가능하다. 수소가 강내에 침투하는 메커니즘은 xFe+ yH_2O à FexOy + yH_2 의 반응식에 의해서인 것으로 알려져 있는데, 고온에서 철강 표면이 산화되면서 주변 수증기와의 반응으로 생성된 H_2 gas가 강 내부로 침투하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 수소는 강 내로 침투하면서 부피가 큰 수소 분자의 형태로 침투하는 것이 아닌 H+ 이온의 형태로 침투하게 되는데, 강 내에 풍부히 존재하는 자유전자를 만나 H 단원자의 형태를 띤다고 알려져 있다.

이때 강 표면에 수소 원자가 쉽게 확산하여 나갈 수 없는 처리가 되어 있지 않은 경우에는 수

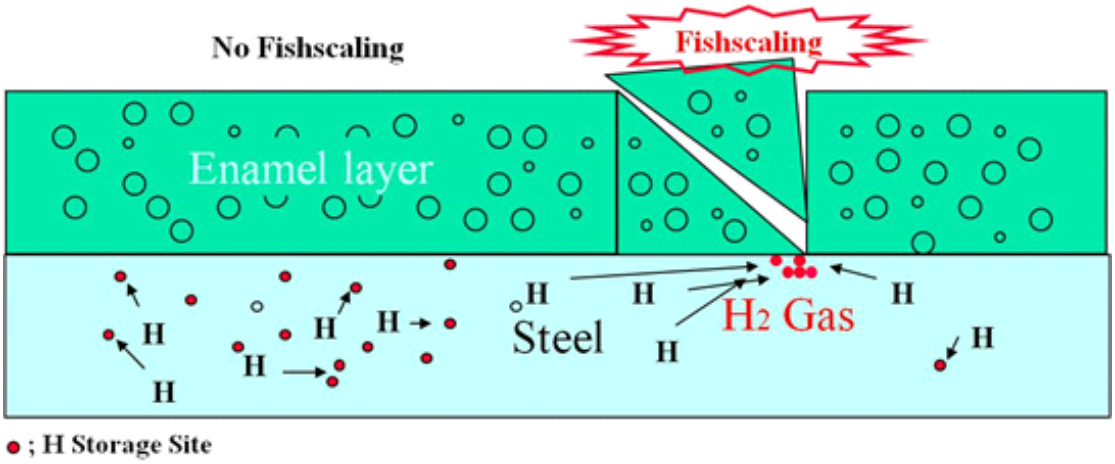


그림 10. Fish Scale 결함 발생 모식도

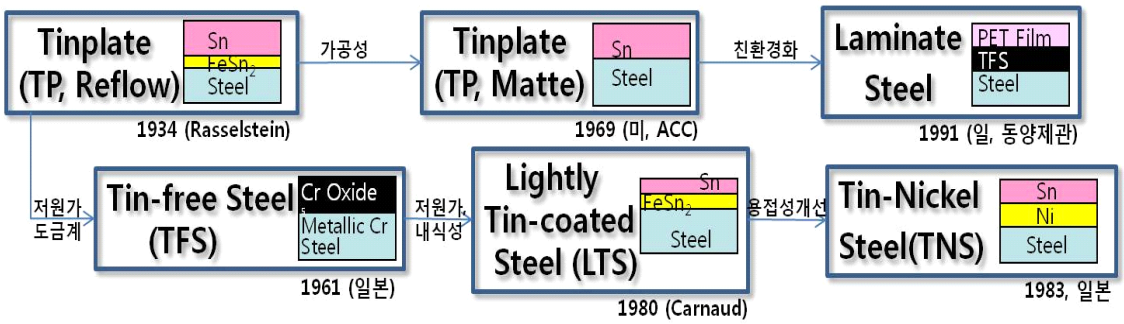
소 원자는 자유롭게 강 밖으로 확산하여 나가게 되며 실제 강 내에는 sub ppm 단위의 H원자가 존재한다. 하지만, 수소 원자가 쉽게 확산되어 나가지 못하는 일부 FCC결정의 도금층 (Zn 도금 등)이 존재하거나, 위와 같이 세라믹 형태의 법랑층이 존재하는 경우에는 내부에 장입되어 있는 수소가 밖으로 빠져나가지 못하고 내부에 갇히게 된다. 이런 경우, 자유운동을 하던 수소 원자들이 모여 수소 분자로 되면서 부피 증가로 인한 내압이 형성된다. 이러한 내압으로 인해 법랑층과 강재의 계면에서 파단분리가 일어나는 현상을 Fish Scale 현상이라고 부른다.

이런 F/S 현상을 방지하기 위해 일반적으로 법랑용 강판은 그 내부에 수소를 가둘 수 있는 수소 흡장원이 존재하며, 수소 흡장원의 종류에 따라 강판의 종류가 나뉜다. 수소 흠장원으로 탈탄 후 생성되는 공극을 활용하는 탈탄 소둔강판과, 냉간 압연 시 압하 후 개재물/ 석출물 주변에 생성되는 Micro Void를 활용하여 수소를 흡장하는 마이크로 보이드 활용 강판이 있다. 또한 BN의 수소 흡장능을 활용한 B계 법랑강판도 있다. Micro Void 활용 강판은 M/V를 생성하기 위한 기준 석출물/개재물의 종류에 따라 TiN형 법랑강판, TiS형 법랑강판, 고산소 법랑강판 (MnO등 개재물의 파쇄로 인해 M/V의 생성) 등으로 또한 나뉠 수 있다.

용기용 강판의 도금재 개발 및 고강도 극박재 제조기술

그림 11은 도금 측면에서 용기용 강재의 개발 현황을 나타낸 것이다. 이때 주요 개발 개념 및 특징을 기술하면, TP (Tinplate, 주석 도금 강판) Reflow의 경우 도금용 원판 (BP)에 주석 도금 후 내식성 및 광택도를 확보하기 위해 고온처리 함으로써 Steel과 도금층 사이에 합금층을 형성한 용기용 강판을 일컫는다. TP, Matte의 경우 도금용 원판(BP, Blackpate)에 주석을 도금한 상태로 유지한 강으로 가공시 주석층이 윤활작용하여 가공성 확보하는 형태이다. TFS (Tin Free Steel)의 경우 강판에 고가의 주석 대신 Cr을 도금한 강판으로 용접성에 문제가 있어 주로 접착관 등으로 활용되는 강판이다.

LTS (Lightly Tin-coated steel)은 도금계의 원가 절감을 위하여 고가의 주석 도금량을 현저히 낮추어 도금한 강판을 일컫으며, TNS는 최근 문제가 되는 주석의 도금량을 낮추고 용접 특성을 개선하기 위해 극박의 Ni층을 원판위에 도포한 용기용 강판을 말한다. 최근에는 미려한 표



림 11. 용기용 강판의 도금재 개발 현황

면과 기능성을 위하여 강판 위에 수지층을 도포한 용기용 소재로 제관 공정에서 락카와 같은 유기물 처리를 없앨 수 있는 장점을 가진 Laminated Steel 또한 개발되고 있다.

석도 원판과 석도 강판에서는 고강도화를 통한 소재의 박물화로 고객사의 원가 절감을 도모하고 있다. 이런 노력의 결과 2-피스캔의 대표적인 가공법인 D&I용 소재로 0.225mm 극박재까지 상용화가 되었고, Pilot급에서 0.20mm 이하의 소재를 적용하기 위한 개발이 진행되고 있다.

기존 3-piece can용 소재로는 1차 압연법에 의해 두께 0.15mm재가 상용 생산 중이지만, 국내외적으로 2차 압연설비(DCR mill)를 이용한 초극박의 초고강도 소재 개발 노력도 진행 중이다. 용기용 소재의 환경친화성을 높이기 위해선 도금량의 하향 관리기술, 새로운 도금계의 개발, 석도원판 제조 설비의 연속화 및 고속화 기술도 중요한 과제들이다.

용기의 Fashion화 및 기능성 요구에 부응해서 Shaped Can, 재밀봉 Can 등 다양한 기능 및 형태를 가지는 Steel Can이 제조되고 있으며, 신 용도 및 가공 특성에 적합한 적절한 소재 및 도금 기술에 대한 기술협력 활동도 활발하다. 향후에도 새로운 내용물에 대한 용기의 보존성 및 안정성을 확인하는 활동을 통해 Steel can의 적용성 확대노력이 지속될 전망이다.

성공적 소재기술개발의 시사점

다양한 시장환경 속에서 활용할 수 있는 고기능 냉연재의 용도가 확산되고 있다. 스테인리스강과 같은 특수강에서부터 종이, 나무, 비철금속에 이르기 까지 다양한 경합소재들과 특성을 비교하여 채택될 수 있는 냉연강판의 특성을 다양한 관점에서 개발하는 적극적인 노력이 필요하다.

예를 들면 법랑강판의 경우 소재의 개발과 별도로 고객사 공정의 변경으로 인해 기존 소재를 사용할 수 없는 경우가 비일비재하게 발생하고 있다. 즉, 고객사의 소재, 공정 변경에 대해 소재를 공급하는 철강사도 고객이 원하는 수준의 적합한 소재를 제시할 수 있는 기술적 가변능력이 매우 중요해 졌다.

화력 발전소의 적용 사례를 보면, 실제 현장에 적용되기 위해서는 수년간의 현장실험을 거치고 실제 적용 후에도 몇 년간의 추적이 필요하다는 관점에서 제품개발자의 지속적인 노력도 매우

중요하다.

고기능 냉연 강판의 경우, 철강 본연의 기계적 성질 이외에도 화학적 특성, 열적 특성, 도금 특성, 내식성, 타 화확 물질과의 반응성 등 주변 환경에 적합한 특성들을 종합적으로 고려해야 하며 복합 소재화하여 하이브리드 기능을 활용하는 전략도 필요하다. 철강 물성의 고정틀에서 벗어나 철강도 카멜레온같이 다양한 적용환경에 잘 들어맞는다는 기술적 설득력이 필요하다는 생각이 든다. 물론 산·학·연 간의 다양한 전문성을 활용할 수 있는 네트워크 구성 및 인력 교류도 중요해 보인다.

생활도자기

(Ceramic Tiles & Pottery)

생활도자기

생활도자기는 전통세라믹스(Classic ceramics) 중 도자산업에 해당하며, 생활식기, 건축용도자기, 산업자기, 전승자기를 포함한다. 한국표준산업분류(KSIC)에 따르면 도자산업은 5단위(digit)에서 「23211. 가정용 및 장식용 도자기 제조업」, 「23212. 위생용 도자기 제조업」, 「23213. 산업용 도자기 제조업」, 「23219. 기타 일반 도자기 제조업」, 「23231. 점토벽돌, 블록, 유사 비내화 요업제품 제조업」, 「23232. 타일 및 유사 비내화 요업제품 제조업」에 해당된다.

최근, 생활도자기의 범위를 파인세라믹스와 같은 산업재가 아닌 소비재, 최종재로서의 성격이 강한 생활세라믹스 분야로 구분하기도 하며, 여기에 해당하는 것은 생활식기, 전승도자기, 타일, 위생도기, 점토벽돌로 정의한다.

생활식기 전승도자기 타일, 위생도기 점토벽돌

그림1. 생활도자기의 종류

국내 도자산업 특징 및 현황

국내 도자산업 특징

도자산업은 문화 및 여가 등과 관련된 서비스산업임과 동시에 기술개발을 요구하는 제조업의 성격을 지니고 있어 산업간 · 기술간 융합을 통한 발전 가능성이 큰 산업이다. 한류문화 성장에 부응한 문화산업과의 융합 (문화+도자산업), 웰빙트렌드에 부응한 음식산업과의 융합 (식생활+도자산업), 친환경 · 기능성 요구에 부응한 건축산업과의 융합 (주거+도자산업), 지역별 도자클러스터와 연계한 관광산업과의 융합 (관광+도자산업) 등을 그 예로 들 수 있다. 소득증대에 따른 감성소비의 증가로 디자인 중심의 고품위 제품에 대한 수요가 증가하고 있으며, 첨단기술(IT,NT,BT)과의 융합을 통한 신규시장 창출이 가능하다.

<내열식기 + IH기술> <박판도자기술+LED기술> <생활도자+3D프린팅> <도자공예+스마트폰>

그림2. 도자산업과 타산업의 융합 예

표1에 나타낸 바와 같이 도자산업은 경제성장과 고용창출을 견인하는 국가 선도 산업이다. 산업규모는 작으나 전후방 산업 연계효과를 통하여 타 주력산업 대비 경제적 파급효과가 크다.

	도자산업	조선	자동차	IT	건설
생산 유발계수	**2.158**	2.028	2.599	1.781	2.055
부가가치 유발계수	**0.785**	0.621	0.687	0.528	0.789
수입 유발계수	**0.215**	0.379	0.313	0.472	0.211

표1. 국내 도자산업 연관분석

자료 :『전통세라믹산업 실태조사 및 발전전략 수립』(현대경제연구원, 2011)

타산업과의 융합을 통한 신규시장 창출 및 취업유발 효과가 높은 산업으로 표2에 잘 나타나 있다.

	도자산업	조선	자동차	IT	건설
취업 유발인원(명)	12,766	10,802	10,391	10,554	16,836

표2. 1조원 신규시장 창출에 따른 취업유발인원

자료 :『전통세라믹산업 실태조사 및 발전전략 수립』(현대경제연구원, 2011)

도자산업은 정책적 육성을 통한 국내외 시장 확대 시 경제성장 및 일자리 창출에 미치는 영향이 타 주력산업보다 크다. 또한, 세계적으로 인정받은 전통계승산업이며, 국가브랜드 가치향상 산업이다. 국가브랜드 맵(2007.12)에 따르면 도자산업은 부가가치를 극대화하여 시너지 효과를 일으킬 가능성이 높은 산업으로 선정되었고, 고려청자, 조선백자 등 전 세계적으로 뛰어난 도자기를 전승해오고 있어 전승도자에 대한 기술력과 노하우를 축적한 상황이다.

세계 도자산업 시장은 '13년 2,500억불 규모에서 '20년 3,500억불로 연평균 5% 성장이 예상된다. 도자산업은 대표적인 생활밀착형 산업으로 각국의 내수시장 변화에 큰 영향을 받는다. 따라서 최근 높은 경제성장률을 보이는 아시아 시장에서는 건축용 도자기 시장이 연평균 15% 이상 성장하고 있는 반면에, 유럽 및 북미 시장에서는 친환경 및 홈인테리어 생활도자기 시장이 지속적으로 성장하고 있다.

전 세계 도자시장은 선진국(유럽, 일본) 주도의 고가 제품시장과 중국 및 동남아시아 중심의 저가 제품시장으로 양분화 되어 있다. 세계 도자시장에서 유럽은 '12년 생산량 점유율은 10% 미만에 머물고 있지만 수출액 점유율에서는 30%를 차지하고 있다. 반면에 중국의 도자산업 생산량 점유율은 '12년 45%에 이르지만 수출액 점유율에서는 38%를 보이고 있다.

세계 도자산업의 추세는 지역클러스터(조합) 중심의 공동브랜드화 전략과 더불어 가격 및 제품경쟁력 강화를 위한 방향으로 진행되고 있다. 중국은 경덕진, 불산, 당산 등의 도자클러스터를 중심으로 원료생산 및 제품개발을 진행하여 생활식기 및 타일, 위생도기 분야에서 높은 경쟁력을 유지하고 있다. 유럽은 이탈리아의 볼로냐타일, 스페인의 카스텔론 타일과 같은 지역클러스터 중심의 명품브랜드화 추진으로 전 세계 고급타일 수출액의 20%를 점유하고 있다.

국내 도자산업의 경우 가격 및 기술경쟁력 약화로 인하여 시장의 수요를 맞추지 못하고 수입산 제품에 시장을 내어주고 있는 실정이다. 국내 도자산업 시장은 2013년 1조 9천억원으로 1999년 8783억원 대비 2배 이상의 시장규모 성장을 보이고 있으나, 수입산 점유율은 1999년 12%에서 2013년 58%로 약5배 급증한 상황이다.

	1999	2003	2009	2013
국내시장규모	8783 억원	16,813 억원	17,847 억원	19,304 억원
수입산점유율	12 %	28 %	50%	58%
주요수입국가	'13년 기준 1.중국, 2.EU, 3.일본			

표3. 국내 도자산업 시장현황

자료 :『도자산업현황조사』(대한도자기타일협동조합, 2013)

경제의 전반적인 탈공업화, 도자산업의 규모 축소 등의 영향으로 도자업체 수는 2002년 2,286개에서 2012년 1,956개로 감소하였으며, 종업원 수도 2002년 1만2천여명에서 2013년 9천8백여명으로 감소하였다.

국내 도자산업의 경우 스튜디오형의 소규모 업체의 비중이 높으며, 2012년 기준 5인 이하 업체의 비중은 76.7%에 이르며, 이는 제조업 평균(63.7%)에도 미치지 못하는 실정이다.

	2002	2012	비고
업체 수	2,286	1,956	'12년 기준 5인이하 생활세라믹업체는 76.7% *제조업 평균: 63.7%
종업원 수	12,200	9,800	

표4. 국내 도자산업 업체 및 종업원수 변화

자료 :『도자산업현황조사』(대한도자기타일협동조합, 2013)

수입산 점유율로 인한 국내 도자산업의 침체는 기반시설 노후화 및 고도화된 인력구조 양성 실패로 인하여 노동생산성 악화를 초래하고 있다.

		생활세라믹스	제조업
1인당 노동생산성 (만원)	1995	3,337	3,098
	2008	5,851	7,787

표5. 국내 도자산업 업체 및 종업원수 변화

자료 :『전통세라믹산업 실태조사 및 발전전략 수립』(현대경제연구원, 2011)

도자산업에서 생산되는 제품의 판매시장을 국내시장과 해외시장으로 구분할 경우 도자산업은 과도하게 높은 내수시장 의존성(내수비중 98%)을 보이고 있다. 이러한 내수중심의 산업구조는 수출경쟁력 약화 및 수입대체 현상의 심화를 가져왔다.

	총산출액(A)	수출액	내수액(B)	내수의존도(B/A)
도자산업	10,181	704	9,477	93.1%
가정용도자기	5,596	635	4,961	88.7%
건설용점토제품	4,585	69	4,516	98.5%
제조업	11,154,664	3,467,018	7,687,645	68.9%

표6. 국내 도자산업 내수의존도 (단위: 억 원)

자료 :『전통세라믹산업 실태조사 및 발전전략 수립』(현대경제연구원, 2011)

유럽의 도자업체가 디자인 경쟁력을 바탕으로 브랜드 가치를 제고시킨 것과 달리 국내 도자업체의 절반 이상이 고유의 상표, 포장디자인이 없으며, 도자선진국과 비교할 경우 브랜드 인지도와 품질경쟁력이 낮은 상황이다. 국가 브랜드맵(2007.12)에 따르면 '도자제품 하면 떠오르는 국가'에 대한 응답으로 중국(45.3%), 일본(8.5%), 독일(3.5%), 한국(3.4%), 이탈리아(3.0%) 순을 기록하고 있지만, '도자제품 하면 떠오르는 한국기업이 있는가'에 대한 응답으로 '없다'가 98%로 조사되었다.

	중국	일본	유럽	베트남	한국
생산비용(가격)	★★★★★	★★★	★★★	★★★★★	★★★★
기술수준(소재, 공정)	★★★★	★★★★★	★★★★★	★	★★★
디자인(차별화)	★★★	★★★★★	★★★★★	★	★★★
유통(마케팅)	★★★★★	★★★	★★★★★	★	★★★

표7. 생활세라믹산업 국가별 경쟁력 비교

자료:『'13-'14 생활세라믹산업체 대상 설문조사』(한국세라믹기술원, 2013-2014)

생활도자기 주요제품

제품 · 기술개발의 특징

고강도·경량화 생활도자기 제품

식기, 위생도기, 타일, 점토벽돌 등은 의식주 생활에서 필수적인 요소이며, 전통생활도자산업의 대표적인 제품이다. 그러나, 이러한 생활도자기 제품은 높은 비중(>2.7)과 작은 충격에도 쉽게 깨지는 특성으로 인하여 그 수요가 지속적으로 감소하고 있는 추세이다. 유치원과 학교에 보급되어 있는 에나멜 제품 식기는 저보온성으로 재가열이 필요하고, 재가열 시 인체유해 성분이 발생하는 문제점을 보인다.

최근 소득증대에 따라 well-being에 대한 소비자의 수요가 증가하고 친환경 생활도자기 제품에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 국내외에서 생활도자 제품의 수요확산을 위해 소비자들의 가장 큰 요구인 강하고 가벼운 제품의 개발이 요구되고 있다. 고강도.경량화 도자기는 현재의 도자기와는 다른 특성의 새로운 도자 소재를 사용하고 있으며, 이러한 특성을 이용하여 기존 도자기에는 없던 기능을 보강하고 있다.

도자기의 핵심기술은 크게 소재기술, 표면기술, 공정기술의 3가지로 구분할 수 있으며, 이중 소재기술은 원료의 정제, 개질, 나노화를 이용한 기능성 소지 개발을 포함한다. 일본의 경우 세계적인 고강도, 경량화 관련 특허기술을 보유하고 있으며, 항공기용 식기를 경량화하여 유류비용을 절감할 수 있는 고강도.경량화 도자식기 제품을 생산하고 있다. 높은

강도를 유지하면서 수십%의 경량화를 달성하는 것은 기업내의 특허나 노하우에 해당되어 기술이 공개되지 않고 있다.

국내의 경우 생활도자식기 메이저 업체인 한국도자기와 행남자기에서 본차이나의 비중을 줄이기 위한 기술개발을 검토 중이며, 한국세라믹기술원에서 고강도.경량 소재 개발을 진행하고 있다.

디지털융합 생활도자기 제품

도자산업의 경쟁력 향상을 위해서는 중요한 요소로 작용하고 있는 디자인 분야에대한 기술개발이 매우 중요하며, 최근 도자선진국에서는 도자산업에 디지털기술을 융합하는 시도가 활발하게 진행되고 있다. 디지털기술의 접목은 충분히 강력해진 컴퓨터 기술을 도자산업에 도입함으로서 생산성 증대, 품질개선, 가격경쟁력 확보 등을 기대할 수 있는 새로운 패러다임이다. 도자산업에서는 이전부터 3차원가공기(CNC)를 이용한 도자원형몰드 제작 및 3차원스캐너를 이용한 도자제품 원형 복원 등의 기술개발이 이루어져 관련 업계에서 이용되고 있다. 최근 유럽과 일본 등 도자선진국에서는 '잉크젯프린팅 기술을 활용한 디지털 도자타일 제작' 및 '3차원프린터를 이용한 생활도자 제품 제작'에 관한 기술개발을 진행하고 있다.

-잉크젯프린팅 기술을 활용한 도자타일

도자타일 시장에 대한 소비자의 구매패턴이 짧은 제품주기, 디자인의 다양성, 기능과 감성을 중요시하는 형태로 변화하면서 잉크젯프린팅을 활용한 도자타일 기술개발이 진행되어, 유럽을 중심으로 제품이 출시되고 있다. 잉크젯프린팅 도자타일 기술의 장점은 디지털 공정(digital process)으로 짧은 시간과 적은 자원으로 다양한 제품군 제작이 가능하며, 친환경 공정으로 원료이용효율을 95%까지 향상시킬 수 있으며, 네트워크 기반의 제조현장 구축으로 공정효율 향상 및 설비공간의 최소화를 가져올 수 있다.

-3차원프린터를 활용한 생활도자기 제품

적층방식으로 복잡하고 다양한 디자인의 제품을 제작할 수 있는 3차원프린팅 기술은 3차 산업혁명을 가져올 수 있는 미래기술로 각광받고 있으며, 바이오, 금속 등 다양한 분야에서 활용을 위한 기술개발이 진행되고 있다. 특히 생활밀착형 제품으로 구매자의 취향에 따라 다양한 디자인의 제품개발이 중요한 생활도자기 분야에 3차원프린팅 기술과의 융합은 신규시장을 창출할 수 있는 기술로 인식되면서 유럽과 일본을 중심으로 활발하게 연구가 진행되고 있다. 영국의 Denby사는 옥스퍼드 대학과 기술협력을 통하여 분말공급 방식의 3차원프린터에 도자기 소재를 직접 이용한 생활도자 제품을 개발하였다. 3차원프린팅 생활도자제품 개발에서 설비는 기존에 특허권 말소로 대중화되어 있는 3차원프린터 활용이 가능하기 때문에 소재개발에 대한 집중이 필요하다. 3차원프린터를 활용한 생활도자 제품은 성형 후 유약을 표면에 시유하고 1% 이하의 흡수율을 갖기 위한 1000oC 이상의 열처리를 수반하기 때문에 전통생활도자기에 사용되는 소재를 활용하면서 프린팅 기능의 복합화가 필요하다. 3차원프린팅 생활도자 제품용 소재는 유럽의 1-2 개 업체에서만 원천기술을 보유하고 판매하고 있다.

환경친화형 생활도자기 제품

-초절수형 위생도기 개발

도시화, 산업화, 지구온난화로 인한 수질오염으로 전 세계적으로 물부족 현상이 심화되고 있으며, 물은 희소가치가 높은 경제재로 부상하고 있다. 우리나라는 UN이 지정한 물부족 국가이며, 2015년에는 물기근 국가로 지정될 것으로 예상된다. 이 중 양변기로 사용하는 물은 45L로 조사되어 양변기로 인한 물사용량을 30% 줄일 경우, 연간 물소비는 4억4천8백만톤 감소 및 4천억원의 수도요금 절감효과가 기대된다.

세계 각국은 절수형 제품표준법 제정, 절수등급제 도입, 건축법 개정 등을 통하여 4.5L급 초절수형 위생도기 개발을 서두르고 있다. 욕실기능에 대한 인식전환(생리해결기능 → 개성표현, 고급화)으로 욕실 리모델링 시장이 급성장하고 있다. 국내 위생도기 시장은 연평균 10% 성장률을 보이며, 1999년 2,200억원에서 2011년 3,950억원 시장으로 확대되었다.

세계 각국은 정책, 규제 시행을 통하여 절수형 위생도기 개발을 장려하고 있다.

표8. 절수형 위생도기 관련 해외규제 동향>

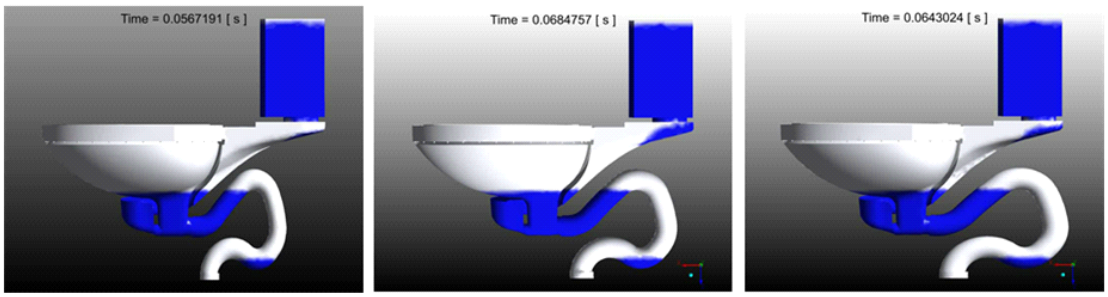


그림4. 초절수형 위생도기 수치해석 모델 개발

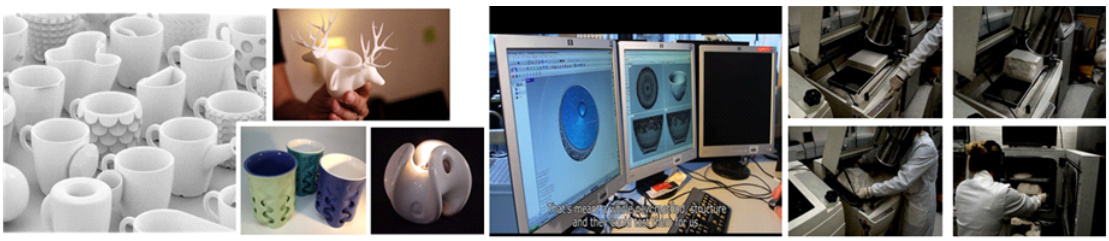


그림3. 3차원프린팅 생활도자기 제작

중국	2007년부터 중국 내 절수형 변기제품의 생산표준을 6L 이하로 강제화
호주	2006년부터 건축 시설물에 대한 절수등급제도 시행 및 제품 유통 규제
EU	2007년 건축물 관련, 2012년 농업분야 수자원절약 관련 정책 시행
미국, 일본	위생기구 제작업체에 대한 규제를 통한 절수정책 진행
대만	2010년부터 수자원 절약제품 보조금 지급정책 시행

일본의 TOTO사, 미국의 American Standard 는 CFD 해석을 통한 자체 제품에 대한

수치해석모델 개발 및 5L 이하 초절수형 위생도기 제품 발표하였다.

중국은 4.5L 초절수형 위생도기 제품개발을 지원하고 있으며, 중국내 절수형 생산표준은 모두 6L(소변 3L)를 강제성 표준으로 실시하고 있다.

〈항균, 탈취 점토벽돌〉

〈이산화탄소제거 점토벽돌〉

〈태양광 조경 점토벽돌〉

그림5. 다양한 기능성 점토벽돌

국내에서는 2012년부터 양변기 1회 물사용량 6L 이하 사용에 대한 개정안 공포됨에 따라 주요 양변기 제조업체인 IS동서, 대림바이스, 계림, 로얄&컴퍼니 등은 5L 절수형 위생도기를 개발 중이나 4.5L급 초절수형 위생도기 기술개발은 진행되지 못하고 있다.

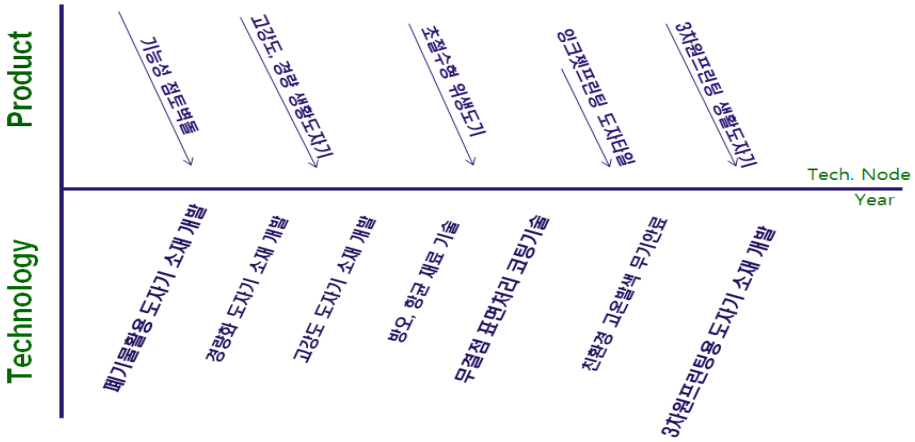
-기능성 점토벽돌 개발

점토벽돌은 점토, 고령토 등을 원료로 하여 혼련, 성형, 건조, 소성 공정을 거쳐서 만든 벽돌로 정의한다. 점토벽돌의 종류는 건축물의 내외장용으로 사용되는 미장벽돌과 보도, 차도, 공원, 조경용으로 사용되는 바닥벽돌로 구분된다.

국내 점토벽돌 시장은 80-90년대 건설경기 붐으로 호황을 맞이하고, 정부 및 금융기관의 전폭적인 자금지원으로 설비의 현대화를 갖추게 되었다. 그러나 2002년 이후 경기불황과 중국산 석재제품으로 인한 수요 잠식 등으로 수요가 감소하여 13억장의 연간 수요가 5억장으로 감소하였다.

점토벽돌은 흙으로 만든 친환경 자재라는 강점을 갖고 있음에도 불구하고 수요가 감소하고 있으며, 따라서 기능성 점토벽돌 기술개발을 통한 제품경쟁력 확보가 매우 중요하다. 점토벽돌은 포름알데히드, 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 유해성 물질이 전혀 검출되지 않으며, 광촉매 작용으로 공기 중에 있는 유해성 물질을 흡착.분해하는 작용을 한다. 흙과 태양열에 의해 점토벽돌에서 방사되는 강력한 원적외선은 온열효과, 신진대사촉진, 스트레스 방지에 탁월한 효과를 보인다. 기공율이 20% 이상으로 다공성과 다양한 기공층 구조로 형성되어 있어 단열, 흡음, 탈취, 항균효과가 탁월하다.

주요 소재기술



<생활도자기 분야 Product-Technology 분석표>

고강도·경량 소재개발

도자기를 경량화하기 위해서는 비중이 낮은 원료를 사용하면 가능하지만 원료의 대부분이 2.5 이상이기 때문에 이들을 활용한 저비중의 도자기 개발은 불가능하다. 따라서 경량도자기 개발을 위하여 기공형성을 통한 비중감소가 제시되고 있다. 도자기에 기공을 형성시키는 방법은 1)성형단계에서 기공을 형성하여 소성단계까지 유지시키는 방법과 2)소성단계에서 고온가스 생성에 의한 기공형성법이 있다.

-기공형성제 첨가에 의한 경량화

도자기 경량화를 위한 기공형성제로서 대표적인 유기물 기공형성제는 PMMA (poly-methylmethacrylate), PAHM (poly-acryonitrile hollow microsphere), 종이 및 플라스틱 등이 활용된다. 무기물 기공형성제로는 FAHM (fly-ash hollow micrisphere), GHM (glass hollow micrisphere), HAp 등이 있다.

기공형성제를 첨가한 도자원료를 슬러리 혹은 소지로 제조하기 위해서는 슬러리 내 기공형성제의 균일성 확보와 소지에서의 기공형성제 생존율, 균일분포가 중요하다.

-고온발포법에 의한 경량화

고온발포법에 의한 경량화는 성형단계가 아닌 소성단계에서 기공을 형성하는 과정으로 도자기의 소성과정 중 1100oC ~ 1300oC 범위에서 가스를 방출하여 기공을 형성시킨다. 대표적인 발포물질은 CeO2이며, 입자크기에 의한 가스방출량과 첨가량에 의한 변화를 열분석기를 통하여 확인한다. 분석결과 CeO2 평균입도를 제어함에 따라 발포되는 양을 제어할 수 있었고, 표면개질 CeO2가 고온에서 가스방출량이 증가한다.

기공형성을 통한 도자기 경량화는 도자기 내부에 기공이 다량 잔존하여 결국 도자기 강도의 저하를 가져온다. 도자기 강도의 저하는 일상생활에서 도자기 제품의 사용을 저해하기 때문에 소성체의 강도를 향상시킬 수 있는 방안이 필요하다.

도자기 강도를 높이기 위해서는 기공(결함)을 감소시키는 방법, 출발원료의 비표면적 향상으로 고체간 접촉면을 증가시켜 치밀화를 향상시키는 방법, 고강도 결정상을 형성시키는 방법 등이 있다.

-뮬라이트 (Mullite) 생성에 의한 강도증진

도자기 원료조성에 알루미나를 첨가하여 1300oC 미만 소성영역에서 침상의 뮬라이트 결정을 생성시켜 강도를 증가시킨다. 저온에서 뮬라이트 형성을 촉진하기 위하여 저융점 물질 (MnO2, CuO)를 첨가하여 소성 후 상용화 도자기에 비하여 강도가 37% 향상된다.

-표면강화에 의한 강도증진

기공형성제를 이용한 경량화 도자기의 강도를 향상시키는 방법으로 표면의 결함제거와 표면강화에 의한 강도향상이 제안되고 있다. 이러한 방법은 표면에 생성된 기공을 치밀화시켜 제거하거나 표면부터 내부에 연결된 기공에 강화물질을 투입시켜 강도를 증가시킨다.

수용성 알루미나 (Al(NO3)39H2O를 침투시켜 표면을 치밀화하고 또한 기공 내부로 흡수시킴으로서 표면 및 내부기공을 치밀화함으로서 16% 강도증가를 가져온다.

디지털융합 도자기 소재 개발

-잉크젯프린팅용 고온발색 세라믹잉크 개발

1000oC 이상의 고온에서 발색하는 나노세라믹잉크는 잉크젯프린팅 도자타일 제작공정에서 가장 중요한 핵심기술이다. 특히, 잉크젯프린팅 기술의 도자산업으로의 공정도입은μm급 무기안료에서 나노세라믹잉크로 발색제 분야의 패러다임 이동을 가져왔다. 나노세라믹잉크의 가장 중요한 요소는 고화도 발색 나노무기안료 개발이다. 특히 나노무기안료는 1000oC 이상에서 고온안정성과 유약안정성 및 분산안정성 확보가 중요하다.

표7. 고화도 세라믹 발색잉크 주요물성

분산후입도	< 300nm	분산안정성	> 6개월
고온안정성	> 1000℃	점도	10-20 cps
유약안정성	프릿트,광택유,매트유	색도	C M Y K +기타

디지털프린팅 잉크는 디지털 4원색(Cyan, Magenta, Yellow, blacK)으로 구성되며, 4가지 컬러잉크의 프린팅을 통해 수많은 컬러 구현이 가능하다. 그러나 현재 고온발색 나노세라믹잉크는 높은 가격과 일부 색상이 고온에서 변색되는 문제점이 보고되었다.

도자타일 잉크젯프린팅용 나노세라믹잉크에 적용되는 나노무기안료는 저가격화와 친환경 특성을 만족해야 하며, 이를 위하여 고가의 원소적용을 최소화하고, 규제물질인 납(Pb), 카드뮴(Cd), 6가크롬(Cr6+)이 제거된 발색무기안료 개발이 진행되고 있다. 액상법을 이용하여 고기능성 나노세라믹잉크에 관한 연구가 보고되고 있지만, 도자타일 산업에서의 가격경쟁력 확보를 위해서는 고상반응법으로 제조한 발색무기안료를 나노크기로 제어하는, 즉 Top-Down 방식의 개발 방식에 관한 연구가 더욱 활발하게 진행되고 있다. 용매내 입자형태인 나노세라믹잉크는 분산안정성 확보가 매우 중요함. 따라서 첨가제 및 용매 선택이 매우 중요하며, 현재는 상대적으로 분산안정성 확보가 유리한 유기계 용매를 활용한 연구가 대부분이지만, 향후 수용액 기반의 고화도 발색 나노세라믹잉크 개발의 중요성이 대두되고 있다.

-3차원프린팅 생활도자기 소재개발

3차원프린팅 기술을 이용한 세라믹제품의 개발은 일반적으로 알루미나(Al2O3), 실리카(SiO2) 분말이 주로 사용되고 있으며, 실리콘나이틀라이드(Si3N4)를 이용한 정밀부품 제작에 대한 보고가 있다. 최근 생활도자기 제품 제작에 3차원프린터 기술을 도입하는 연구가 진행 중이며, 도자기 고유의 특성(고온소성, 유리화)과 식품안전성이 확보된 소재이어야 하기 때문에 전통도자기분말을 활용해야 한다.

3차원프린터에 적용되는 세라믹분말은 균일한 입도분포가 매우 중요하며, 또한 견고한 성형체 제작을 위한 결합재 및 결합재와 반응하는 첨가물의 개발이 필수적이다. 현재 결합재는 수용액 기반의 용매가 사용되고 있으며, 결합재와 반응하는 첨가물은 황산칼슘(CaSO4) 화합물이 사용되고 있다.

전통도자기소재는 백자, 청자, 발색안료 등 다양한 종류의 분말이 존재하며, 감성디자인 개발이 중요한 생활도자기 제품에서 매우 중요한 요소로 작용된다.

환경친화형 도자기 소재개발

-방오.항균 위생도기 소재개발

욕실의 위생도기 사용에 있어서 배설물의 제거가 완벽하게 이루어지지 않는 경우 변색 및 미생물 증식에 의한 질병의 원인이 된다. 특히 적은 수세량으로도 배설물의 제거가 원활한 소재 개발은 초절수형 위생도기 개발이 핵심기술이다.

위생도기 표면은 육안으로 평평한 상태이지만 미시적으로는 수μm급의 요철로 구성되고, 이러한 요철의 존재가 배설물의 제거를 방해하고 오염물질이 축척되는 주요 원인이다. 위생도기 표면에 존재하는 요철은 유약 내에 국부적으로 뭉쳐져 있는 지르콘 입자에 의한 것으로 알려져 있다. 따라서 위생도기의 방오특성을 향상시키기 위해서는 표면의 요철을 줄여야하며, 또한 오염물질이 표면에 강하게 결착하는 것을 억제하기 위한 표면화학처리가 필수적이다.

일본의 TOTO사는 위생도기 표면에 Ceramic Fine Ion Technology를 적용하여 표면의 거칠기를 submicron 이하로 제어하는 방오기술을 도입하여 오염물질 제거를 향상시켰다.

국내 C사는 항균제품에 사용하는 은이온(Ag+)을 유약표면에 고르게 도포후 소성공정을 통하여 유약층 내로 은이온을 분포시키는 연구를 통하여 항균효과 뿐만 아니라 방오효과도 뛰어난 기술을 개발하였다. 위생도기 표면에 도포되는 유약 성분에서 고온 열처리시 가스 방출을 유도하는 성분을 제어함으로서 표면거칠기를 극도로 제어하여 방오효과를 향상시킬 수 있다. 이와 같은 방법은 표면코팅과 같은 추가적인 공정을 필요로 하지 않기 때문에 더욱 효과적인 방법으로 인식된다.

-폐자원활용 점토벽돌 개발

국내외 유일한 연료자원인 무연탄은 과거 1950년대 이후 우리나라 국민연료로서 크게 공헌하여 왔으나 갑작스런 탄광지역 산업의 붕괴현상과 아울러 탄광을 개발해 오는 과정에서 폐기되어 온 탄광폐석으로 인한 환경문제가 날로 심각해지고 있다.석탄폐석의 활용에 대한 연구사례는 국외의 경우 성숙된 활용 연구가 있으며 토목분야, 공업원료, 세라믹골재, 요업분야, 시멘트원료 등의 기타분야에 다각적으로 활용되고 있으나 국내에서는 요업 및 공업

용 원료로서의 활용에 대한 연구가 일부 있었으나 실용화는 극히 부진한 실정이다. 석탄폐석을 활용한 점토벽돌 개발은 날로 심각해지는 골재난을 해소하고, 폐석의 자원화와 함께 환경개선 효과가 있을 것으로 기대된다. 국내 석탄폐석을 활용한 점토벽돌 개발에 대한 연구가 진행되었으며, 석탄폐석 함유 점토벽돌의 소결기구를 분석 및 소결체의 특성을 평가가 이루어진다. 폐석을 활용한 점토벽돌의 개발은 석탄폐석의 미연탄소 연소에 의한 에너지절감 소성온도 저하(~50oC)에 의한 20% 에너지절감, 함수량(20% → 17%) 감소에 따른 건조용 에너지 절감효과 등으로 연간 55억원의 연료비 절감효과가 기대된다.

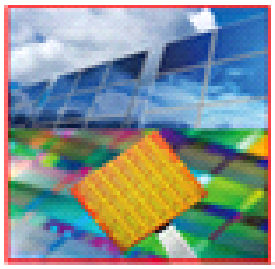
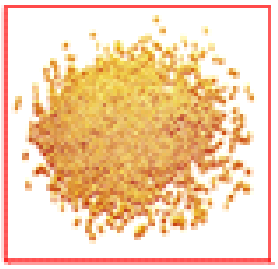
성공적 소재개발의 시사점

도자산업에 있어서의 소재는 디자인과 기술의 융합적인 산업의 특성상 디자인과 기능에 주안점을 두고 개발되어야 한다. 아울러 이러한 신기술과 신소재가 적용되는 공정기술이 뒷받침되어져야 한다. 최근의 디지털 기술은 디자인 개발에 혁신적인 방법론을 제공하고 있다. 이 분야는 디지털기술의 활용과 이 기술의 접목을 위한 신소재 개발이 그 중심에 있다. 즉, 세련되고 감성적인 디자인을 신속하고 생산성 있게 표현할 수 있는 디지털 디자인 기술의 개발과 신기술에 적용될 새로운 소재개발이 핵심적인 개발 분야이다. 도자산업에서의 최근의 변화는 산업 자체의 파라다임을 변화시키고 있으며, 연구개발을 통한 신속한 변화의 대응이 산업을 리드할 수 있는 구심적인 역할을 할 것으로 판단된다. 즉, 향후 수년간의 노력이 도자산업지배력 확보에 중요하다 할 수 있다. 유럽은 이러한 변화를 수년 전부터 빠르게 인지하여 새로운 소재개발에 박차를 가하고 있으며, 중국은 막강한 자본력으로 변화의 기술을 신속하게 흡수하고 있다. 도자산업의 국내업체들은 현재 인력과 재원의 극심한 인프라 부족에 시달리고 있으며, 첨단 중심의 정부 지원에서도 소외받고 있다. 실제 도자업체들은 연구인력의 부족과 인력구조 고도화를 위한 인프라 부족으로 연구개발의 기능이 소실된 상태까지 와 있어 정부지원에 의한 학·연의 역할이 소재개발의 중심이 되어야 한다.

앞에서 언급한 것처럼 도자제품의 개발에는 인적으로 재원적으로 인프라 지원이 필요하며 다방면의 연구개발이 동시에 진행되어져야 한다. 도자산업에 종사하는 업체들은 생산성향상에 주력하고 있으며 지속적인 신기술의 개발 및 소재의 개발에는 경쟁력확보가 거의 불가능한 상태이다. 국내 수요의 무역적자 폭은 이러한 산업의 실상이 그대로 반영되고 있으며, 대학 및 국가 연구기관의 많은 노력과 지원이 뒤따라야만 할 것이다.

향후 도자산업은 소득증대에 따라 well-being에 대한 소비자의 수요가 증가하고 친환경 생활도자기 제품에 대한 관심이 증가하고 있으며, 문화 및 여가 등과 관련된 서비스산업임과 동시에 기술개발을 요구하는 제조업의 성격을 지니고 있어 산업간 · 기술간 융합을 통한 발전 가능성이 큰 산업이다. 그러나 이러한 수요를 충족시킬 수 있는 소재기술의 진보없이는 경쟁력을 얻을 수 없고 점점 커지는 시장에 참여하는데 어려움을 겪게 될 것이다. 향후 점점 커지고 있는 시장의 다양한 수요에서 각 기업의 노력과 함께 정부의 정책적인 지원, 산·학·연 연계 등을 통한 기술개발로 도자산업의 선두주자가 되어야 할 것이다. 〈끝〉

"시장지배 형 첨단소재를 우리가 만들자."

소재강국의 길

미래시장 지향형 소재기술혁신

중장기 소재개발 생태계 활성화

재료개발 전문인력의 핵심역량 고도화

세계가 찾는 첨단소재 공급기지화

KIM 대한금속·재료학회

한국세라믹학회