



[요약문]

온실가스 배출 규제로 대표되는 환경문제가 시급한 경제·사회적 현안이 됨에 따라 자동차 차체경량화에 의한 연료소모 및 배기가스 감소를 통하여 각종 환경규제에 대응하고 환경친화형 산업으로 형성되는 새로운 시장을 선점하려는 노력이 전세계적으로 치열하게 경주되고 있다. 자동차 중량의 대부분을 점유하고 있는 철강소재의 경량화는 차체 경량화의 척도로 평가되어 왔으며, 미래형 자동차의 출현에 대응하기 위한 철강산업계의 노력도 치열하게 경주되고 있다. 고부가가치 강판의 최대 수요처인 자동차 산업의 동향과 이에 관련한 최근의 자동차용 강판의 연구개발 현황 및 차세대 고강도 강판의 연구개발 동향에 대해 소개한다.

1. 서 론

2008년 전 세계 자동차 생산대수는 약 7,053만대이며 그중 승용 및 소형 상용차가 5,264만대로 전체의 약 75%를 점하고 있으며, 특히 아시아 지역의 두드러진 경제성장에 따라 아시아 지역의 점유율이 급격히 증가하고 있는 추세로 2015년에는 31~36% 수준에 도달할 전망이다. 철강소재는 중량비로 환산할 경우 자동차 부재용 소재의 70% 이상을 점유하고 있는 핵심소재로, 자동차용 철강재에 대한 수요는 전세계적으로 약 6,000만톤에 달하고 있으며 이는 세계 전체 철강재 소비의 약 13%에 해당한다.

근래 자동차업계가 직면하고 있는 현안으로 유가 급변동에 따른 연비향상 요구, 온실가스 배출량 저감으로 대표되는 환경규제에 대한 대응, 승객 및 보행자 안전성 확보 및 최근 세계적으로 불확실성이 심화되어가는 경제적 상황에서의 경쟁력 강화 등을 들 수 있다. 소재적용의 측면에서 유가변동 및 자동차 연비규제(CAFE, Corporate Average Fuel Economy)기준 강화에 따라 종래의 연질강판의 적용감소는 불가피하며 연질강판이 사용되던 부분에서 경량고속, 플라스틱, 탄소 복합재료, 신공법이 적용된 고강도강판이 경합할 것으로 전망되고 있다. 한편, 1995년 이후 신차에 대한 자동차 충돌안전성 규제 강화(1995 NCAP, 1997 SINCAP, 1999 JNCAP, 2003 EURONCAP)로 고강도강판의 채용증가에도 불구하고, 안정성 보강을 위한 지속적인 차체중량 증가로 고강도강판의 경량화에 대한 요구는 날로 증가하고 있다. 또한 미래형 자동차로 주목받고 있는 하이브리드 자동차의 경우 100kg의 중량 증가, 연료전지 자동차의 경우 내연기관 엔진의 삭제에도 불구하고 연료전지 및 주변시스템(BOP)의 부가적인 탑재로 인해 250kg의 차량중량 증가가 예상되어, 미래형자동차 차체경량화 달성을 위한 초고장력강판 소재 개발 및 부품 가공기술 개발이 필요하다.

이러한 수요산업의 환경변화에 대하여 철강업계에서는 강판의 박육화 및 고강도화를 통한 경량화와 새로운 성형기술의 개발과 도입으로 대응하고 있으며, 향후 전기자동차 및 연료전지 자동차와 같은 미래형 자동차 개발의 가시화에 맞추어 일부 부품에 선별적으로 사용되고 있는 인장강도 1GPa급 이상의 초고강도강판의 적용도 확대될 것으로 예상된다.

본고에서는 고부가가치 강판의 최대 수요처인 자동차 산업의 동향과 이에 관련한 최근의 자동차용 강판의 연구개발 현황 및 차세대 고강도 강판의 연구개발 동향에 대해 기술한다.



2. 본 론

2.1 자동차산업 동향 및 환경분석

자동차 산업은 국가경제의 중추적인 역할을 하는 기간산업으로 협력업체 및 관련산업과 연계되어 고용창출, 세수입, 무역수지 개선 등 국가경제에 많은 기여를 하고 있다. 우리나라의 경우 타 경쟁국가에 비해 출발이 늦었지만 지난 수십 년간 눈부신 발전을 통하여 세계 5위의 자동차 생산국이 되었다. 최근 날로 심각해지는 배기가스 등의 환경문제와 석유자원 고갈 및 가격상승 등의 문제로 인하여 대체연료개발과 자동차 배기가스 저감에 대한 관심이 집중되고 있으며 이와 관련하여 많은 도전에 직면하고 있다.

총 CO₂ 배출량의 20%를 점하고 있는 운송부분에서의 배출량 중 50%가 자동차 배기가스로 추정되고 있다. 근래 유럽, 미국 등에서 제정되고 있는 연비향상 및 배기가스 감소에 관련된 각종 규제 및 법규는 물론 ZEV(Zero Emission Vehicle)의 의무판매 규정 등으로 인하여 차량의 연비향상과 연료전지 자동차 등과 같은 무공해 자동차의 개발이 요구되고 있다(표 1 참조).

표 1. CO₂ 배출량과 연비규제 목표⁽¹⁾

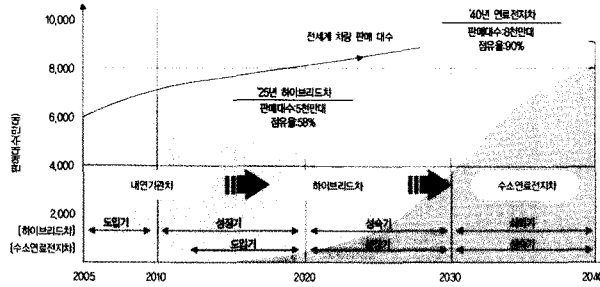
CO ₂ 배출량 (g/km)	가솔린		디젤		연도별 목표
	연료소비(MPG)	연료소비(km/l)	연료소비(MPG)	연료소비(km/l)	
200	27.46	11.67	31.51	13.39	미국(2008)
160	34.33	14.59	39.39	16.74	유럽(2008)
153	35.70	15.17	41.19	17.51	미국(2015)
130	45.25	17.96	48.48	20.60	유럽(2012)
120	45.77	19.45	52.52	22.32	미국(2016)
95	57.82	24.57	66.34	28.20	유럽(2020)

CO₂ 배출량 삭감을 위해서는 자동차 엔진성능의 향상과 더불어 차체경량화가 불가결한 요소이며, 연료소비의 절감 방향은 경량화, 주행저항감소에 의한 연비제고, 연소엔진 개발, 청정에너지 등 대체연료개발, 전기자동차와 같은 무공해자동차개발 등을 열거할 수 있다.

자동차의 경량화에 의한 연비제고와 배출가스 억제에는 그동안 자동차메이커들이 착실하게 추진해온 정책의 하나이며 기술상의 큰 혁신 없이 비교적 쉽게 적용해온 방법이다. 즉, 기존 내연기관 자동차의 경량화추진은 연비향상을 가져와 간접적으로 배기가스 억제 등 환경문제를 해결하는 유일한 수단이라고 할 수 있다.

차량의 연비향상 및 배기가스 감소를 위하여 여러 가지 방안들이 제안되고 있으며 구동계의 효율향상, 디젤엔진기술 향상, 바이오 디젤 등의 친환경 연료개발과 함께 차량의 경량화 등이 지속적으로 추진되고 있다. 또한 획기적인 연비향상을 얻을 수 있는 하이브리드자동차 기술이 개발되어 이미 양산시판 되고 있는 상황이며, 궁극적으로 완전 무공해 자동차인 연료전지 및 전기자동차의 양산화를 위한 각 부문의 연구가 활발히 진행중이다(그림 1). 하이브리드자동차나 연료전지자동차는 기본적으로 전기자동차의 원리를 활용하는 것으로 전기에너지를 사용하는 모터를 주동력원이나 보조동력원으로 사용한다. 하이브리드자동차는 기존 내연기관에서 발생하는 동력을 전기에너지로 전환시켜 재 활용하는 개념으로 에너지 사용을 저감시켜준다. 연료전지자동차는 수소를 공기중의 산소와 결합시켜 전기를 발생시키고, 이 전기를 이용하여 모터를 회전시켜 차량을 구동한다. 수소를 연료로 하기 때문에 발전 후 순수한 물만 배출되므로 환경오염물질을 전혀 배출하지 않는 100% 무공해 자동차로 미래형 자동차로 가장 주목 받고 있다.

하이브리드 자동차는 이미 도요타, 혼다 등 일본자동차업체들이 개발 및 생산하여 미국과 일본시장에서 약 40만 대 가량을 판매하고 있지만 아직 세계적인 자동차 수요에 비하면 미미한 수준이다. 연료전지자동차는 아직 본격적인 시장판매가 이루어지지 않고 있지만 세계적인 자동차업체 대부분이 개발 진행중이고, 미국, 일본, 유럽 등 주요국들



자료 : Automotive World Car Industry Forecast Report, Global Insight, 2004
The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, The National Academies, 2004

그림 1. 미래형 자동차 시장 예상

이 시범사업 등을 통해 상용화를 서두르고 있는 실정이다. 현재 도요타, 닛산, 혼다, GM, 다임러 크라이슬러 등 세계 유수의 자동차 회사에서 사활을 걸고 연구를 진행중이며, 그림 1과 같이 2015년경 양산이 시작되어, 2040년에는 90% 정도의 비중을 차지할 것으로 예측되고 있다.

2.2 철강소재 차체경량화 프로젝트

2007년 Ducker Worldwide에서 북미 소형차량에 적용된 자동차용 소재 중량 분석 결과, 1975년에는 연질강판이 55.9%, 석출강화 및 고용강화강으로 대표되는 기존의 고강도강이 3.6%, 알루미늄 등 비철금속이나 플라스틱이 9.8%를 점유하였다. 2007년에는 연질강판이 43.1%로 12.8%나 감소한 반면, 고강도강이 11.9%로 8.3% 증가하였고 비철금속이나 플라스틱이 20.4%로 10.6% 증가하였다. 강재만을 고려하면 2007년까지 기존의 고장력강(HSS, High Strength Steel)이 1975년에 비하여 2.5배 증가하여 첨단고장력강판(AHSS, Advanced High Strength Steel) 보다 많이 사용되었으나, 경량화와 충돌안전성에 대한 요구가 더욱 강화되고 있는 측면에서 향후 첨단고장력강판의 증가가 더욱 두드러질 것으로 전망되고 있다.

자동차 중량의 상당부분을 점유하고 있는 철강소재의 경량화는 차체 경량화의 척도로 평가되어 왔으며, 국제철강 협회(ISS) 주도로 18개국 35개 철강업체가 참여하여 90년대 중반부터 4단계에 걸쳐서 고강도 철강소재 적용에 의한 차체경량화 프로젝트(ULSAB, ULSAC, ULSAS, ULSAB-AVC)가 수행되었다. 상기 프로젝트의 수행 결과, 고강도

표 2. 자동차용 소재 사용량 변화

소재 (lbs)	1975	2005	2007	2015	증감
Mild Steel	2,180	1,751	1,748	1,314	866 ↓
HSS	140	324	334	315	175 ↑
AHSS	-	111	149	403	403 ↑
Other Steels	65	76	76	77	12 ↑
Iron	585	290	284	244	341 ↓
Aluminum	84	307	327	374	290 ↑
Magnesium	-	9	9	22	22 ↑
Other Metals	120	150	149	145	25 ↑
Plastic/Composites	180	335	340	364	184 ↑
Other Materials	546	629	634	650	104 ↑
Total Pounds	3,900	3,982	4,050	3,908	8 ↑

자료원 : Ducker Worldwide, 2007



강의 적용에 의한 가시적인 차체 경량화 효과뿐만 아니라 리사이클성, 승객 및 보행자 안정성 향상, 신성형기술 개발, 부품일체화 기술 등 주변 기술의 개발이 동시에 이루어지는 부가적인 경제적 효과가 얻어졌다. 또한 새로운 고강도-고성형성 철강재료 개발과 신성형기술에 대한 니즈에 따라 자동차용 철강재료 관련 연구가 활성화되는 환경이 조성되었다.

1994~1998년에 추진된 ULSAB(Ultra-Light Steel Auto Body) 프로젝트에서는 차체성능과 충돌안정성을 확보하는 동시에 경제성을 구비한 경량 철강재 차체개발에 관한 연구가 수행되었다. 또한 도아 등 외판재를 대상으로 한 ULSAC(Ultra-Light Steel Auto Closure)와 서스펜션을 대상으로 한 ULSAS(Ultra-Light Steel Auto Suspension) 프로젝트도 동시에 수행되었다. 이 3가지 프로젝트의 성과를 바탕으로 1998~2002년에 차체, 외판, 샤시, 구동계를 포함한 자동차 전체를 종합적으로 검토한 ULSAB-AVC(ULSAB-Advanced Vehicle Concept) 프로젝트는 저연비, CO₂ 배출량 저감, 리사이클 등의 환경적합성, 충돌안정성, 보행자보호 등의 안정성, 양산가능성 및 유지비용 절감 등의 경제적 효과를 철강재료의 활용에 의해 달성하는 것을 목표로 수행되었다. 강재이용 측면에서 ULSAB-AVC에서 개발한 차체의 특징은 ULSAB에 비해 표 3에 나타난 것과 같이 고장력강판의 적극적인 활용으로 그 적용비율이 대폭 증가한 것에 있다. 성형성과 강도를 구비한 2상조직(DP, Dual Phase)강, 변태유기소성(TRIP, Transformation Induced Plasticity)강 등 다상(복합)조직강의 적용이 대표적인 예로, 특히 인장강도 590MPa급 이상의 고강도 DP 및 TRIP강의 사용비율이 차체중량비의 80% 이상을 차지하고 있다.

표 3. ULSAB-AVC 차체에 적용된 강판²⁾

Product	YS (MPa)*	UTS (MPa)*	Total EL (%)*	n-value (5-15%), If applicable	r-bar*	Application Code
Mild 140/270	140	270	38-44	0.23	1.8	A,C,F
BH 210/340	210	340	34-39	0.18	1.8	B
BH 260/370	260	370	29-34	0.13	1.6	B
IF 260/410	260	410	34-38	0.20	1.7	C
DP 280/600	280	600	30-34	0.21	1.0	B
IF 300/420	300	420	29-36	0.20	1.6	B
DP 300/500	300	500	30-34	0.16	1.0	B
HSLA 350/450	350	450	23-27	0.22	1.0	A,B,S
DP 350/600	350	600	24-30	0.14	1.1	A,B,C,W,S
DP 400/700	400	700	19-25	0.14	1.0	A,B
TRIP 450/800	450	800	26-32	0.24	0.9	A,B
HSLA 490/600	490	600	21-26	0.13	1.0	W
DP 500/800	500	800	14-20	0.14	1.0	A,B,C,W
SF 570/640	570	640	20-24	0.08	1.0	S
CP 700/800	700	800	10-15	0.13	1.0	B
DP 700/1000	700	1000	12-17	0.09	0.9	B
Mart 950/1200	950	1200	5-7	0.07	0.9	A,B
MnB**	1200	1600	4-5	na	na	S
Mart 1250/1520	1250	1520	4-6	0.07	0.9	A

Application Code: A = Ancillary Parts, B = Body Structure, C = Closures, F = Fuel Tank, S = Suspension/Chassis, W = Wheels

2상(페라이트+오스테나이트) 영역에서 어닐링 후 급냉에 의해 연질상인 페라이트와 경질상인 마르텐사이트로 구성된 미세조직을 갖는 고강도 DP강은 석출강화강 대비 연성 및 장출가공성이 우수하고 충돌흡수능이 크지만 성형성의 지표가 되는 균일연신율이 떨어지는 단점이 있다. 이에 비해 2상영역 어닐링, 급냉, 오스템퍼링 처리로 형성되는 다상조직(페라이트+베이나이트+잔류오스테나이트) 내에 존재하는 잔류오스테나이트가 소성변형 중 마르텐사이트로 변태하는 현상(변태유기소성)을 이용한 TRIP강은 균일변형에 따른 연성향상과 강도증가가 동반되므로 자동차용 강재로서 구비해야할 고강도, 고성형성을 동시에 만족시킬 수 있다는 장점이 있다. 국내에서도 90년대 후반부터 고강도, 고연성을 갖는 자동차용 열연 및 냉연 TRIP강을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

WorldAutoSteel 그룹 회원사들은 4회에 걸쳐 성공적으로 수행되었던 차체경량화 프로젝트(ULSAB, ULSAC, ULSAS, ULSAB-AVC)의 연장선상에서 5번째 프로젝트를 수행하고 있다. 이번 프로젝트는 “Future Steel Vehicle

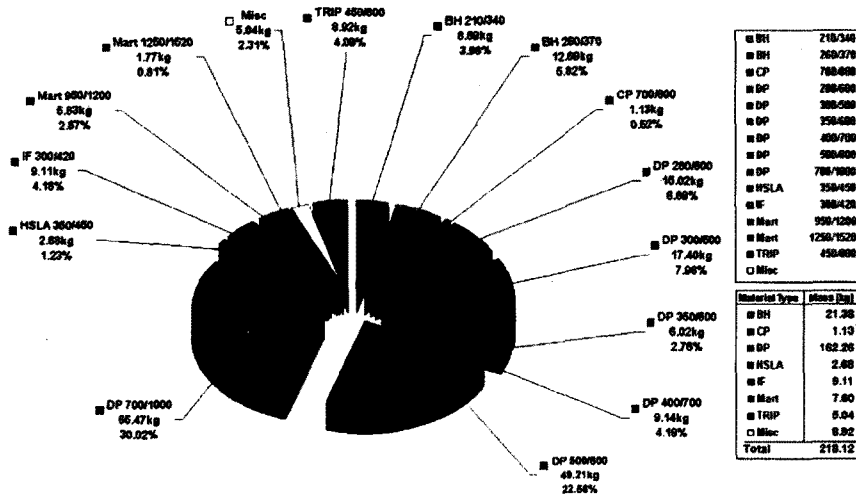


그림 2. ULSAB-AVC PNV Class 자동차의 강재사용 분포^[3]

Research Program”의 이름으로 온실가스(GHG) 배출 삭감을 이슈로 3단계에 걸쳐(1단계 : Engineering Study, 2단계 : Concept Designs, 3단계 : Demonstration Hardware) 철강재료를 적용한 차세대 경량 프로토타입 차체(Future Steel Vehicle)를 설계하고 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

특히 그림 3에 나타난 것과 같이 자동차용 소재의 생산, 부품제조, 이용, 폐기 및 재활용에 이르는 전과정(Cradle-to-grave Life Cycle)에서의 온실가스배출량을 평가함으로써 자동차에 적용되는 소재에 대한 환경부담 예비평가를 수행하였다.

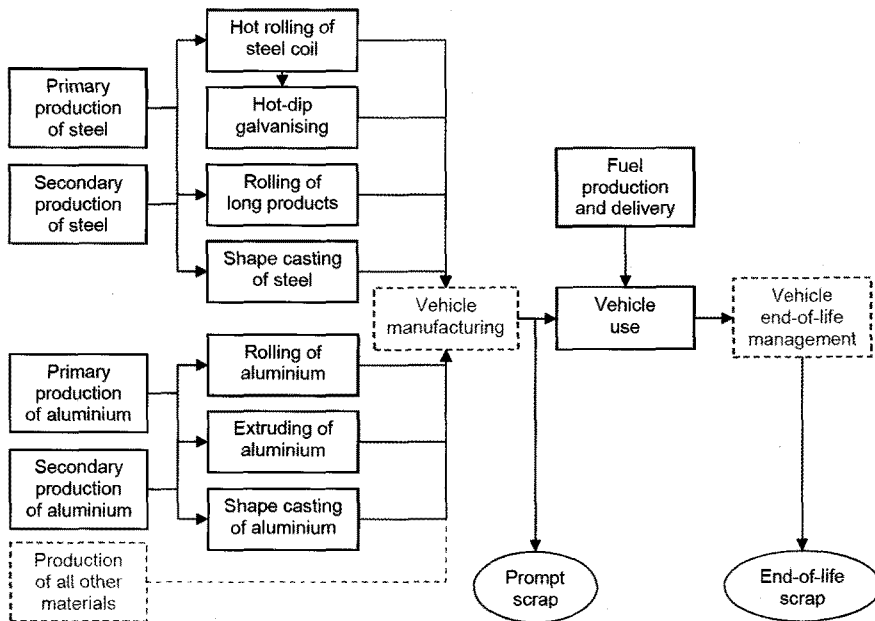


그림 3. 자동차용 철강과 알루미늄 소재의 전주기 평가 흐름도^[4]

캘리포니아대학의 LCA 비교평가 모델을 적용하여 경량재료(알루미늄)와 철강재료(AHSS)를 적용한 자동차의 온실가스배출량을 평가한 결과, 고강도 철강재료를 적용하였을 경우 사용 중 온실가스 배출량이 다소 증가하지만 재료 생산 단계에서의 배출량 차이가 역전되지 않는 결과를 나타내고 있다. 이는 향후 미래형자동차 개발시 경제적, 환경적인 관점에서 철강재료가 경쟁소재 대비 경쟁력을 유지할 수 있는 근거를 제시하고 있다.

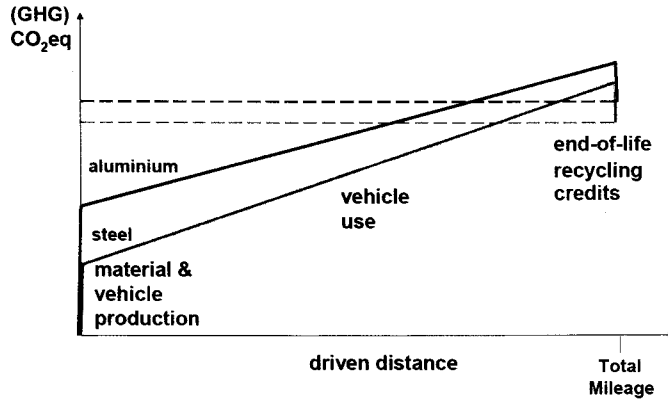


그림 4. 경량재료와 철강재료를 적용한 자동차의 온실가스배출량 비교^[5]

또한 경량소재와 철강재료를 적용한 자동차의 온실가스배출량은 내연기관엔진을 하이브리드 엔진으로 교체할 경우 또는 연료를 가솔린에서 바이오연료로 교체할 경우 크게 감소하지만 알루미늄 및 철강재료 적용에 따른 전과정 온실가스배출량 차이는 일정하게 유지되고 있다.

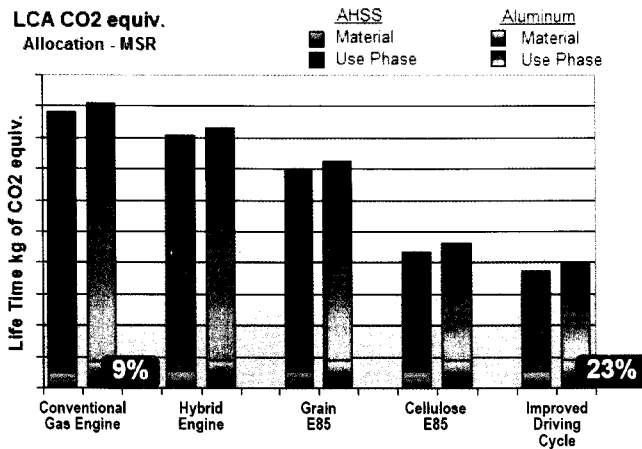


그림 5. 자동차 엔진 및 사용연료에 따른 온실가스배출량 비교^[5]

이러한 국내외의 상황을 고려하여 2007년 4월 5차 철강산업기술 로드맵에서 제시한 Moving Metal 소재개발의 기술개발 목표는 다음과 같으며, 목표 달성을 위한 소재 개발 로드맵을 그림 6에 나타내었다.

- 미래 자동차산업인 하이브리드 및 연료전지 자동차 연비 향상을 극대화 하기 위한 고강도/고성형 철강 구조 소재를 2015년 까지 개발하고, 자동차 구조 효율화 기술을 입체적으로 개발 연계함으로써 100kg 이상 경량화, 고강도강 적용률 50% 증대를 통한 차체 경량화 20% 달성.
- 2015년 까지 3세대 자동차 제조기술 분야 특허 5개 이상 확보를 통한 고강도, 고성형성 등의 원천기술을 개발하여 자동차의 충돌 안전성 20% 향상, 내구성 10년 보증 달성.

프로그램	년 도									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
기술개발	1.5 GPa 고강도 강판 개발					2GPa 고강도 강판 개발				
	친환경 표면처리 도금강판 개발					고강력 무방향성 전기강판 개발				
	고강도 박막 주철 개발					복합형성 열처리 주철 개발				
	Hot Stamping / Press / hydroforming									
	고속 고기온 용융도금 강판					친환경 용성도료 제조/적용 기술 개발				
	초고강도강 Tailoring 기술 개발					3세대 차체 비선형 용접 기술				
기반구축	고주조성 고내열 Mg/Al 합금									
	고성형성 Mg/Al 합연판재					초고강도 Mg/Al 합용재				
표준화	3G 철강기술지원 기구 구축 (철강과력연구원, 철강솔루션센터)									
	3세대 철강재료 신뢰성					인증, 표준화 기반 구축				
표준화	3G 철강재료 정밀분석 기술 개발									
	국제 표준화 확산활동 추진									

그림 6. 철강산업의 발전전략과 기술로드맵—moving metal 소재 로드맵⁽⁸⁾

Moving Metal 기술로드맵에서는 기가급 고강도 강판, 친환경 표면처리강판, 초고강도강 tailoring 기술 및 경량강판의 개발 등이 최우선적으로 개발되어야 할 소재로, 핫 프레스 포밍, 하이드로포밍 기술 등 경량차체구조에 적용되는 신성형공법은 지속적으로 개발해야할 대상인 것으로 제시하고 있다.

2.3 자동차용 고강도강판 개발 현황

자동차 차체는 충돌 시 충돌에너지를 흡수하고 그 에너지를 적절하게 분산시키는 충돌특성과 충돌 및 전복(roll-over)시 승객을 보호하기 위한 천정강도 특성이 우수하여야 한다. 전자의 경우 적절한 구조설계와 충격흡수능이 우수한 강재를 채용하여야 하며, 후자의 경우에는 가공 후 항복강도가 높은 특성을 갖는 강재가 요구되고 있다.

차체용 강판에는 주로 냉연강판과 전기도금 또는 용융아연도금강판 등 표면처리 강판이 주로 사용되며 내식성, 피로강도 등 내구성과 용접성이 우수해야한다. 차체 부품별로는 펜더 등 심가공이 필요한 외판에는 IF강 등 연질강판이

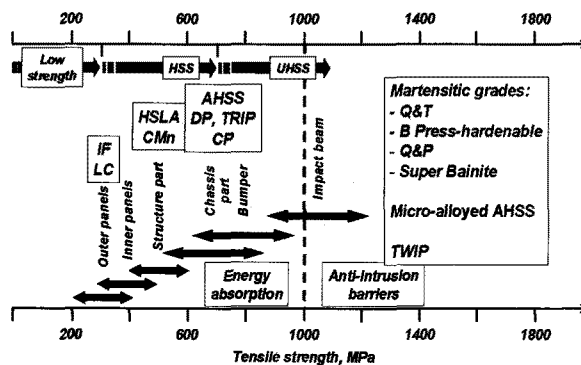


그림 7. 강도수준별 적용 강종 및 주요 적용 부품⁽⁸⁾



적용되고 있으며, 내탄트성이 요구되는 도아, 후드 및 루프 등은 소부경화(BH, Bake hardening)강이 적용되고 있으나 향후에는 540~590MPa급 DP강이 채용될 전망이다. 어느 정도의 강도와 가공성이 요구되는 구조부재는 기존의 고강도강이 아직 적용되고 있으나, 최근 DP, FB(페라이트-베이나이트)강으로 전환되고 있다. 필라 등의 부품 역시 기존 고강도강에서 내충돌특성이 우수한 HPF 또는 1GPa급 TWIP 또는 TRIP강이 사용될 것이며, 충격에너지 흡수가 필요한 멤버류는 고강도강 및 일부의 경우 TRIP강이 사용되고 있으나, 향후 1GPa급 TRIP강이 채용될 것으로 예상된다. 현재 주로 사용되고 있는 강종과 강도 수준 및 부품을 나타내면 그림 7과 같다.

최근 자동차용 열연강판의 품질이 우수해지면서 기존에 냉연강판을 적용하던 부품에도 원가절감을 위해서 사용량 중 일부를 열연강판으로 대체하고 있다. 냉연 초고강도강판은 합금원소의 첨가량이 높기 때문에 제조원가가 상승하고, 공정 중 작업성이 좋지 않기 때문에 냉연공정에서의 난공정을 생략한 열연강판으로 냉연강판을 대체할 경우 냉연 조업부담이 크게 경감할 것으로 기대되고 있다.

표 4. 국내외 철강사의 고강도 열연강판 개발 현황

철강사	구분	인장강도 (MPa)								
		440	490	540	590	690	780	980	1180	1470
POSCO (한국)	일반재	●	●	●	●	●	●			
	고버링	●	●	●	●		●			
	저 YR			●	●		●			
	고연신						●			
	MS/HPF									●
NSC (일본)	일반재	●	●	●	●	●	●			
	고버링	●	●	●	●		●	●		
	저 YR			●	●		●			
	고연신				●	●	●			
	MS/HPF									●
JFE (일본)	일반재	●	●	●	●	●	●			
	고버링	●	●	●	●		●			
	저 YR			●	●		●			
	고연신				●					
	MS/HPF									●
TKS (독일)	일반재	●	●	●	●					
	고버링				●					
	저 YR				●					
	고연신					●				
	MS/HPF						●	●	●	●
Arcelor Mittal (다국적)	일반재	●	●	●	●					
	고버링			●	●					
	저 YR				●		●			
	고연신						●			
	MS/HPF						●	●	●	●

대부분 냉연강판군으로 분류되는 첨단고장력강판(AHSS)의 강종별 사용전망을 본다면 ULSAB 프로젝트의 영향으로 DP강이 많이 사용되고 있지만, AHSS 적용에 걸림돌이 되고 있는 성형성 문제를 해결한 강재, 즉 강판의 강도와 연신율을 동시에 확보한 TRIP, TWIP강의 사용증가가 두드러질 것으로 예상되고 있다. 표5에서 보는 바와 같이 인장강도 590MPa급 이상의 냉연 고강도강판은 FB(ferrite-bainite)강을 제외하고는 국내의 기술수준에 큰 차이는 없다.

표 5. 자동차용 고강도 냉연강판 국내의 상용화 현황

● 상용화, ○ 개발중

인장강도 (MPa)	DP/CP		TRIP		FB		HPF		TWIP		경량강판	
	국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외
1180~	●	●	○	○			●	●				
980	●	●	●	●		●			●	○		
780	●	●	●	●	●	●						
~590	●	●	●	●	●	●						○

2.4 제3세대 자동차용 고강도 강판

2005년 IISI에서는 강의 조직과 강도수준에 따라 인장강도를 기준으로 270MPa미만을 저강도 강판, 270~700MPa 사이를 고강도강판(HSS) 그리고 700MPa 이상을 첨단고강도강판(AHSS)으로 분류하였다. 미세조직으로 구분하였을 때 페라이트 단상을 기본 미세조직으로 한 저강도강을 제1세대, DP강, TRIP강, CP강 등 복합상 미세조직에 기반한 강재 및 오스테나이트 단상을 기본으로 한 TWIP강을 제2세대 고강도강으로 분류한다. 인장강도 수준이 1GPa급 이상인 강재는 UHSS(Ultra-High Strength Steel)로 분류하지만 베이나이트와 마르텐사이트와 같은 저온변태조직을 활용하여 종래의 UHSS가 나타내는 강도×연성 밸런스보다 월등히 높은 값을 나타내는 강재의 경우 U-AHSS라고 부른다. 1GPa급 AHSS 중 마르텐사이트나 CP강은 상당부분 개발되었고, 강도×연성 발란스도 10,000~20,000MPa·% 수준의 기존 AHSS선상에 존재한다. 따라서 이를 뛰어 넘는 25,000수준의 1GPa급 AHSS 강재를 개발하기 위해서는 새로운 개념의 강화 기구를 고려해야 하며 이를 제3세대 고강도 강판으로 분류한다.

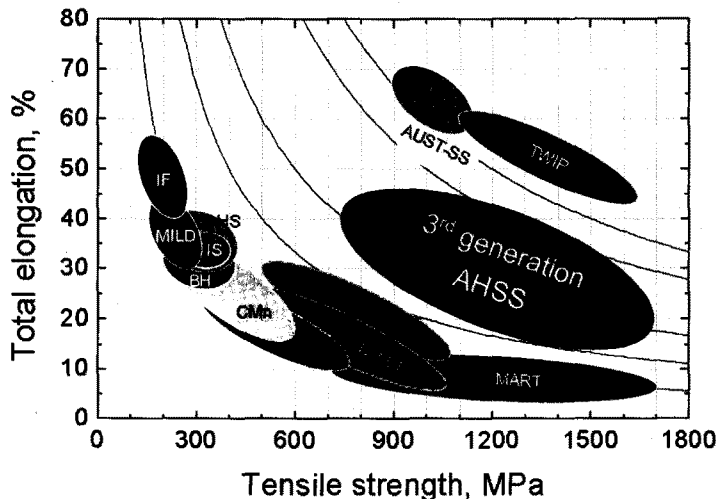


그림 8. 인장강도-총연신율에 의한 자동차용 강판의 분류

2.4.1 경질상 기지 다상·복합조직강

2세대 고강도강인 저합금 TRIP강은 미세조직이 연질상인 페라이트, 경질상인 베이나이트와 잔류오스테나이트로 구성되어 있으며, 강도수준에 따라 차이가 있지만 기본적으로 페라이트를 기지조직으로 하고 있으며 잔류오스테나이트의 분율은 대략 5~15% 정도이다. 기지조직을 연질상인 페라이트에서 경질상인 베이나이트 또는 마르텐사이트로 대체할 경우 기지조직에 의한 높은 인장강도를 우선적으로 확보할 수 있고 적절한 분율의 잔류오스테나이트가 존재할 경우 추가적인 강도와 연성의 향상을 기대할 수 있다. 이러한 개념을 이용하여 연구개발이 진행되어 온 강종으로 Q&P(Quenching and Partitioning) 강^[8], TRIP-Dual강^[9], TAM(TRIP-aided Annealed Martensite) 강^[10] 및 TBF(TRIP-aided Bainitic Ferrite) 강^[11]을 들 수 있으며, 이들은 탄소함량을 비롯하여 화학성분이 기존의 저합금 TRIP형 강판과 매우 유사하지만 경질기지조직의 제어와 잔류오스테나이트의 안정성을 조절하기 위해 Mn, Si 이외에 다른 합금원소를 적극적으로 활용하고 있다.

Q&P강, TRIP-Dual강 및 TAM강은 미세조직을 형성하기 위한 열처리패턴에 다소 차이는 있으나 기본적으로 마르텐사이트를 기지조직으로 하고 있으며 연성을 확보하기 위해서 잔류오스테나이트를 2차상으로 활용한다는 점에서 동일한 강종으로 분류할 수 있다. 기본적인 열처리공정은 오스테나이트 단상영역 또는 (페라이트+오스테나이트) 2상영역에서 일정시간을 유지하고 마르텐사이트변태 개시온도(Ms)와 종료온도(MF) 사이의 온도까지 급랭(quenching)한 후, Ms 온도 이상 또는 이하에서 유지하여 마르텐사이트 내에 다량 함유된 탄소를 오스테나이트로 분배(partitioning)시키는 2가지 단계로 구성된다(그림 9). 이러한 열처리패턴의 적용에 의해 (마르텐사이트+잔류오스테나이트)와 (마르텐사이트+잔류오스테나이트+페라이트)로 구성되는 다상·복합 미세조직을 얻을 수 있다.

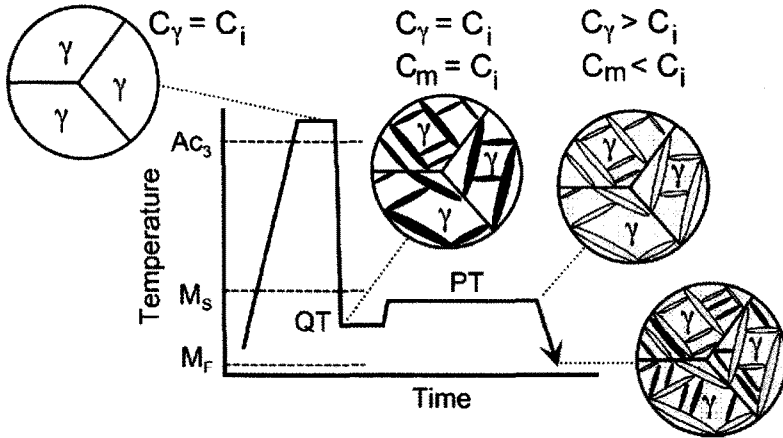


그림 9. Q&P강 제조 열처리패턴^[12]
(QT: quenching temperature, PT: partitioning temperature)

Q&P강의 전형적인 기계적 특성은 그림 10에 나타난 것과 같이 CP강의 높은 인장강도와 TRIP강의 연성을 조합한 특성을 나타내고 있으며, 잔류오스테나이트의 변태유기소성에 의한 연성의 증가는 현저하지 않으나 열처리공정 조건의 변화에 따라 다양한 강도/연성의 조합을 얻을 수 있다. Q&P강의 기계적 특성은 급냉온도(QT)와 분배온도(PT) 및 분배온도에서의 유지시간에 따라 크게 달라지며 이는 결국 각 열처리 단계에서의 상변태 과정에 의해 결정된다. 최근에는 마르텐사이트와 잔류오스테나이트 사이의 탄소분배, 베이나이트 형성과 천이탄화물 석출에 미치는 합금원소의 영향 등 Q&P공정에서의 상변태 해석에 대한 연구가 미국과 유럽을 중심으로 활발히 진행되고 있다^[14-17].

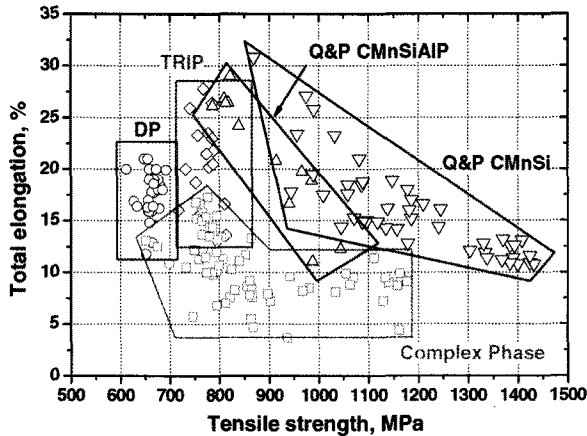


그림 10. Q&P 열처리한 CMnSi강과 CMnSiAlP강의 인장특성^[18]

2.4.2 고 Mn 첨가 변태유기소성강

오스테나이트 안정화 원소인 Mn을 기존의 TRIP형 냉연강판에 첨가되는 함량(2.5wt.% 이하) 이상으로 첨가하여 실온에서 잔류하는 오스테나이트의 분율을 증가시키고 변태유기소성기구를 적극적으로 활용함으로써 열연 TRIP강판의 강도-연성 밸런스를 향상시키고자 하는 연구는 80년대 후반에 일본에서 시도되었다^[18]. 90년대 중반에 국내에서도 5~7wt.%Mn 냉연 TRIP강에 대한 연구개발이 진행된 바 있고, 최근 3세대 고강도강 개발에 대한 니스에 따라 새로운 개념의 TRIP강에 대한 연구개발이 필요한 시점에서 Mn 첨가 TRIP강이 다시 주목 받고 있다^[19-21].

Mn 첨가 TRIP강 연구개발의 시초는 70년대초 US Steel 연구자들이 발표한 냉간가공재의 역변태를 통하여 제조된 0.11C-5.7Mn강으로, 냉간가공재(페라이트+오스테나이트) 2상영역에서 장시간 열처리 후 실온까지 냉각하였을 때 초세립 2상조직을 얻을 수 있음을 보고하였다^[22]. 미세조직의 특징으로는 페라이트와 오스테나이트의 결정립이 모두 1 μ m 이하인 초세립 2상조직으로 마르텐사이트가 2차상인 DP강과 구별하여 micro-duplex강으로 명명하였다. 일축인장실험에 의한 기계적 특성은 인장강도 1GPa 이상, 총연신율 30% 이상으로 30,000MPa·% 이상의 강도-연성 밸런스 값을 나타내었다. 이는 오스테나이트 안정화 원소인 Mn의 첨가로 실온에서 잔류하는 오스테나이트 분율을 30% 이상까지 획기적으로 증가시킨 TRIP형 냉연강판의 제조가능성을 제시한 최초의 연구결과이다.

Mn 함량의 증가는 2상영역에서 형성되는 오스테나이트의 경화능을 크게 증가시켜 후속 냉각과정에서의 상변태를 억제시키는 효과가 있지만 열간압연 후의 후가공 시 부하가 크게 증가하고 페라이트의 재결정안정성이 확보된 적정 분율의 오스테나이트를 형성시키기 위해서 상소둔 열처리공정을 채택해야 하는 단점이 있다. 최근에는 이러한 문제점 이외에도 지연파괴특성을 향상시키고 연속어닐링공정에서 제조가능한 Mn 첨가 TRIP강을 개발하기 위한 시도가 다방면으로 이루어지고 있으며^[23-25], 석출강화기구와 변태유기소성기구를 동시에 활용한 연구결과도 보고되고 있다^[26].

2.4.3 자동차용 저비중 강판

저비중 철강소재는 철(Fe)에 비해 비중이 작은 Al과 같은 경량원소를 주요 합금원소로 활용하여 철강재료의 비중을 낮춘 철강재료로 비중감소의 목표 또는 경량 합금원소의 함량에 따라 대상재료의 성분계 및 특성이 크게 구분된다. 저비중 철강재료를 하이브리드, 전기 및 연료전지 자동차 등 차세대 자동차에 적용하는 것을 목표로 할 경우, 알루미늄, 마그네슘 등의 경량금속소재와 경쟁하기 위해서는 기존의 고강도 철강재료 적용에 의한 자동차 중량감소 결과에 비해 보다 가시적인 중량감소효과가 요구되고 있다. 이를 위해서는 현재의 고강도 철강재료에 비해 비중(밀도)을 10% 이상 낮춘 경량철강재료의 개발이 필요하며, 현재까지 Al을 합금원소로 적극적으로 활용한 경량철강재료 연구 개발은 크게 3가지로 진행되고 있다.



표 6. Al 함량과 미세조직에 따른 경량철강재료의 분류

비중감소(%)	합금	미세조직	강도수준(MPa)
10	Fe-Al-(C), 8 ~ 10%Al	페라이트	500 ~ 800
10	Fe-Mn-Al-C	다상조직	800 ~ 1200
10 ~ 25	Fe-Al, Al > 10%	금속간화합물	

자동차용 저비중 철강재료 연구는 독일 막스플랑크 철강연구소(MPIE)와 ThyssenKrupp Steel(TKS)사, Arcelor사 등 유럽에서 가장 적극적으로 이루어지고 있다. 특히 MPIE의 경우 저비중 페라이트강 및 다상조직강에 대한 원천 기술을 보유하고 있으며 TKS와 공동으로 자동차 차체에 적용하기 위한 연구개발 및 상업화를 진행하고 있다. MPIE에서 개발한 페라이트계 저비중 강판(Fe 대비 중량감소 4.5~12%)의 경우 Al을 10% 이하로 첨가하고 연성의 저하를 일으키는 탄화물의 석출을 방지하기 위해 C의 함량을 수백 ppm 이하로 제한하며 미량합금원소를 소량 첨가한 성분계로 어닐링재에서 인장강도 550MPa, 총연신율이 35%에 근접한 우수한 기계적 특성을 나타내고 있다.

Fe-Al 2원 합금계에서 6wt.%의 Al을 첨가할 경우 밀도 7.25g/cm³, 8.5wt.% (약 16at.%)의 Al을 첨가할 경우 밀도 7g/cm³을 나타내므로, 순수한 철에 비해 10% 이상의 밀도감소를 얻기 위해서는 최소한 8.5wt.% 이상의 Al을 첨가해야 한다고 보고하고 있다. 또한 MPIE는 고 Mn 계열의 Fe-Mn-Al-C 고강도-고연성 강판개발에서도 선도적인 위치를 점하고 있어 오스테나이트, 페라이트, 나노크기의 탄화물로 구성된 다상조직강 TRIPLEX를 개발하여 상업화를 추진하고 있다. TRIPLEX강은 Fe-(26~28)Mn-(10~12)Al-(1.0~1.2)C을 기본조성으로 하고 있으며, Fe-Al 2원 계에서 초격자구조를 갖는 금속간화합물이 형성되는 함량 이상의 Al이 첨가되어 있고, Fe에 비해 다소 밀도가 작은 Mn이 다량첨가되어 있으므로 Fe-Al계에 비해 경량화 효과가 다소 크게 나타나고 있다.

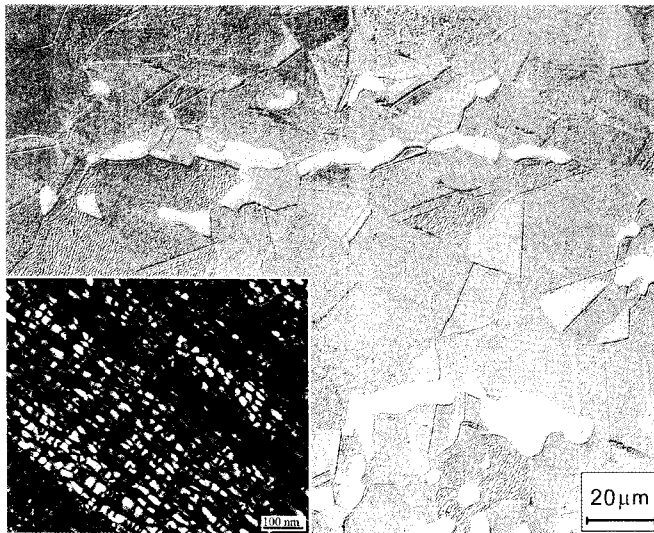


그림 11. Fe-26Mn-11Al-1.15C TRIPLEX강의 미세조직^[27]

일본 철강업체들은 통상 자동차용 강판의 생산에 적용되는 열간압연, 냉간압연 및 어닐링 공정설비로 제조가 가능한 경량 강판 개발에 있어서 가장 선도적인 위치를 차지하고 있다. NKK(현 JFE)에서는 90년대 중반 5% Al을 첨가한 자동차 차체용 경량 고강도 강판을 개발하였으며, 최근 신일본제철(NSC)에서는 Al의 함량을 크게 증가시킨 5~30%의 Al을 함유한 고강도-고연성 저비중 열연 및 냉연강판을 개발하여 2003년 이후 다수의 특허를 출원하였

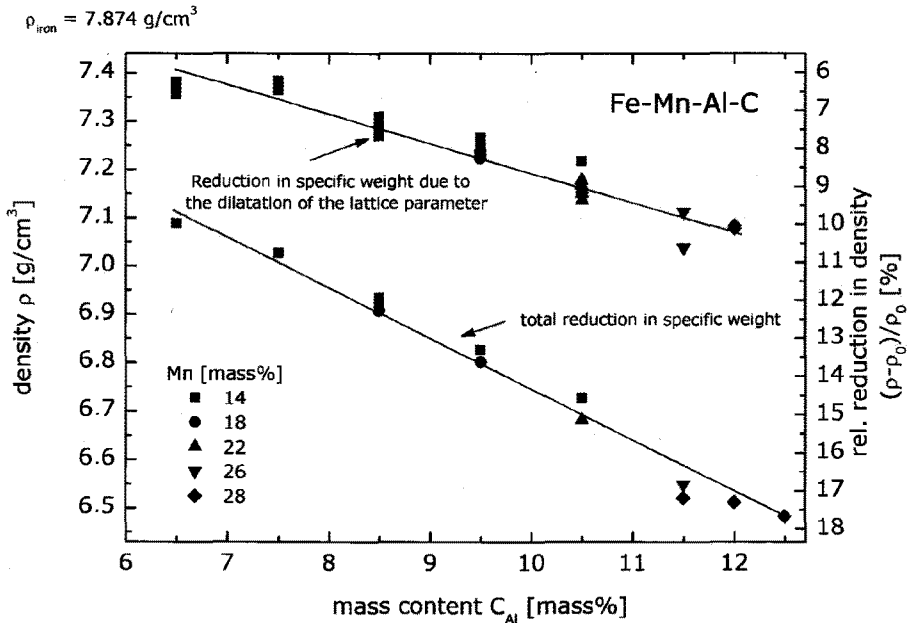


그림 12. Al 함량에 따른 Fe-(14~28)Mn-Al-C 합금의 밀도변화^[27]

다. NSC가 출원한 특허는 대부분 페라이트계 단상조직 강판을 대상으로 하고 있고, MPIE에서 개발한 합금에 비해 Al의 함량이 통상의 주조-냉각상태에서는 금속간화합물이 형성되는 Al 조성영역까지 포함하고 있다. 또한 열간압연 시 재결정 제어, 결정립 성장제어, 냉간압연 등 연속생산라인에서의 제조공정조건을 적극적으로 고려하고 있다는 면에서 기존에 수행되었던 연구개발과는 차별화될 수 있으며, 상용화를 염두에 둔 자동차용 경량강판 개발이 시작되었음을 시사하고 있다.

표 7. 해외 주요국의 자동차용 저비중 강판 기술개발 현황^[28~36]

기술명	개발단계	개발 내용	개발주체
저비중 다상조직 강판 제조 기술	상용화	Light-Weight TRIPLEX강 인장강도 최대 1,000MPa급 비중감소 최대 17%	MPIE TKS
저비중 페라이트계 강판 제조 기술	파일럿 규모	인장강도 400~580MPa 5~8% Al	MPIE TKS
		인장강도 440MPa 열연소둔강판 5~10% Al	일본 NSC Toyota
		인장강도 590MPa 열연소둔강판 10~15% Al	일본 NSC Toyota
		인장강도 750MPa 냉연소둔강판 8.5~10% Al	일본 NSC
	기술검토	인장강도 550MPa, 5% Al	일본 JFE
		인장강도 1050MPa 7.2% Al 고탄소 강판	미국 ORNL

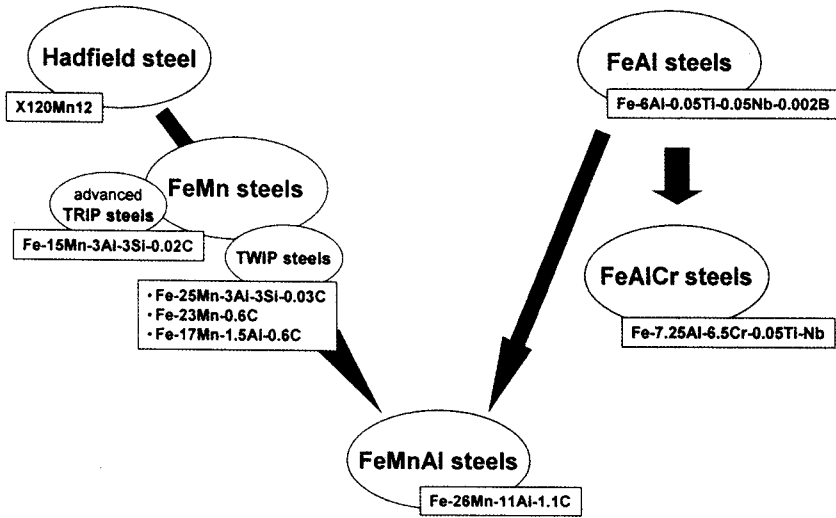


그림 13. Fe-Al계 및 고 Mn Fe-Mn-Al-C계 저비중 강판 개발 흐름도

2.4.4 자동차용 고강도 강판의 미래상³⁷⁾

앞서 기술한 바와 같이 환경·에너지 문제에의 대응, 안정성 보장의 관점에서 여러 가지 미래형 자동차의 출현이 기대되고 차체경량화에 기여할 수 있는 철강재료 개발에 대한 기대 또한 높아지고 있다. 그러나 이러한 기대에 대한 요구조건 또한 매우 가혹하여 높은 강도-연성 밸런스를 필두로 용접성, 표면처리특성, 내지연파괴특성 등 현상태와는 비교할 수 없는 높은 수준의 특성을 갖는 강재개발이 요구되고 있다. 이러한 상황에서 철강재료가 차체구조의 기본 재료로 생존하기 위해서는 무엇보다 고강도의 실현이 필요하며, 이에 요구되는 특성을 정리하면 다음과 같다.

① 강도목표 : 인장강도 1180MPa 이상

인장강도 수준 1180MPa는 최소 요구수치로 가능한 한 1470MPa급 이상이 바람직하다. 1470MPa급 인장강도는 핫프레스성형에 의해 오스테나이트 영역에서 가공 후 급랭 시 얻어지는 마르텐사이트 조직이 나타내는 인장강도로 자동차 부품 생산에 이미 적용되고 있으므로 상온에서 성형이 가능한 1470MPa급 강판의 개발이 향후 연구개발의 목표로 고려할 수 있다. 페라이트조직을 기지로 이러한 수준의 인장강도를 얻기 위한 야금학적인 수단으로는 결정립 미세화가 가장 유력하나, 1 μ m의 결정립 크기로는 1180MPa급 이상을 얻기 어렵다. 따라서 기지조직을 베이나이트, 마르텐사이트로 하는 것이 필연적으로 보이며 이를 위해서는 일정수준이상의 탄소가 첨가되어야 한다.

② 연성목표(성형성) : 총연신율 15% 이상

프레스부품의 경우 변형율이 1에 근접하는 부위도 있기 때문에 일축인장시험에서 얻어지는 총연신율을 지표로 하는 것은 현실적이지는 않지만, 총연신율 15% 이상 가능하면 20%에 도달하는 것이 요구된다.

③ 점용접특성 : 980MPa급 강재에 해당하는 용접부 특성 유지

고강도강판 개발에 있어서 가장 어려운 난제로 용접부 특성을 들 수 있다. 잘 알려진 탄소당량식 ($C_{eq}=C+Si/30+Mn/20+2P+4S$)을 사용할 경우, 모재의 고강도화에 필연적으로 수반되는 탄소함량의 증가와 모순되는 목표를 추구하게 된다. 따라서 용접부 파괴강도를 980MPa급 이상으로 유지하는 것이 최우선의 목표가 될 수 있다.

④ 내지연파괴특성

인장강도 1GPa급 이상의 강재에서 나타나는 지연파괴(또는 수소취성)는 1180MPa급 이상의 초고강도 강판 개발에 걸림돌이 되고 있다. 이를 해결하기 위한 성분계 선택 및 미세조직제어 등 야금학적 기초연구개발이 필요하다.

3. 맺음말

21세기에 들어선 이후 환경 및 에너지에 대한 생산자 및 소비자의 관심 고조로 친환경 제품에 대한 요구는 시간이 갈수록 더욱 거세어 지고 있으며 자동차 중량의 70%를 차지하고 있는 철강재료의 저비중화 및 신공법이 적용된 경량화 부품 적용은 피할 수 없는 경향이 되고 있다. 또한 하이브리드자동차 및 전기자동차와 같은 차세대 차량은 엔진 중량은 감소되나 동력 및 새로운 부품의 추가로 차체무게가 대폭 증가하게 되므로 후드, 도아 및 각종 차체 보강재의 고강도화, 경량화는 필수적으로 이루어져야 한다. 이러한 요구에 따라 새로운 차체설계개념에 적용이 가능한 자동차용 경량재료가 개발될 경우 부품 생산설비와 제조공정 재편이 불가피하게 되므로 경량차체용 부품산업에는 현재 예상할 수 없을 정도의 새로운 규모의 시장이 형성될 것으로 예상된다. 이와 같은 수요산업 환경의 변화에 대응하기 위해서는 자동차 경량화에 기여할 수 있는 성형성을 구비한 초고강도급의 소재 개발이 절실하다 할 수 있겠다. 따라서 가격경쟁력, 성형성, 용접성, 충돌특성 등이 우수한 1~2GPa급의 초고장력 강판 소재개발, 표면처리 공정 개발 및 이의 가공기술에 대한 광범위한 연구가 필요한 상황이다.

* 참고 문헌

- [1] 조열래, WAS Future Steel Vehicle Project 추진현황, 제50회 철강기술 심포지엄, 미래형 자동차의 강재 및 이용기술, 대한금속·재료학회, p5, 2009.
- [2] ULSAB-AVS-PES Engineering Report, Porsche engineering service, p5. 2001
- [3] ULSAB-AVS-PES Engineering Report, Porsche engineering service, p9. 2001
- [4] R. Geyer, Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessments of Automotive Materials, University of California at Santa Barbara, 2007.
- [5] Reinventing steel - What steel is doing to mitigate automotive GHG, www.worldautosteel.org
- [6] 제5차 철강산업기술 로드맵, 지식경제부, p 347, 2007.
- [7] 차세대 U-AHSS급 자동차용 강판소재 및 이용기술 개발, 산업원천기술개발사업 기획보고서, 지식경제부, 2008.
- [8] J.G. Speer, D.K. Matlock, B.C. De Cooman and J.G. Schroth, Acta Mater. 51 (2003) 2611.
- [9] H-J Jun and N. Fonstein, Int'l Conference on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels, J.G. Speer et al. (eds.), AIST, Warrendale, PA (2008) 155.
- [10] K. Sugimoto, M. Kobayashi, R. Kikuchi, S. Hashimoto, T. Kashima and S. Ikeda, ISIJ Int., 42 (2002) 910.
- [11] K. Sugimoto, M. Murata and Y. Mukai, Int'l Conference on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels, J.G. Speer et al. (eds.), AIST, Warrendale, PA (2008) 51.
- [12] D.V. Edmonds, K. He, F.C. Rizzo, B.C. De Cooman, D.K. Matlock and J.G. Speer, Mater. Sci. Eng. A, 438-440 (2006) 25.
- [13] E. De Moor, S. Lacroix, A.J. Clarke, J. Penning and J.G. Speer, Metall. Mater. Trans. A, 39A (2008) 2586.



- [14] D.V. Edmonds, K. He, F.C. Rizzo, J.G. Speer and D.K. Matlock, New Developments on Applications of High Strength Steels, TMS, Warrendale, PA (2008) 829.
- [15] M.J. Santofimia, L. Zhao and J. Sietsma, Scr. Mater., 59 (2008) 159.
- [16] A.J. Clarke, J.G. Speer, D.K. Matlock, F.C. Rizzo, D.V. Edmonds and M.J. Sanfomia, Scr. Mater., 61 (2009) 149.
- [17] M.J. Santofimia, J.G. Speer, A.J. Clarke, L. Zhao and J. Sietsma, Acta Mater., 57 (2009) 4548.
- [18] T. Furukawa, Mater. Sci. Technol., 5 (1989) 465
- [19] 김동은, 박영구, 이오연, 진광근, 김성주, 한국재료학회지, 15 (2005) 115.
- [20] M.J. Merwin, Materials Science and Technology (MS&T '07) (2007) 515.
- [21] H. Takechi, JOM, 60 (2008) 22.
- [22] R.L. Miller, Metall. Trans., 3 (1972) 905.
- [23] Y. Okitsu et al., CAMP-ISIJ 21 (2008) 1650.
- [24] Y. Okitsu et al., CAMP-ISIJ 22 (2009) 1473.
- [25] Y-H Jin and K-G. Chin, Proc. Asia Steel Int'l Conf. 2009, KIM.
- [26] D. Raabe, D. Ponge, O. Dmitrieva and B. Sander, Scr. Mater., 60 (2009) 1141.
- [27] G. Frommeyer and U. Brux, Steel Research Intl., 77 (2006) 627.
- [28] US Patent 6,383,662 B1.
- [29] 일본 특허공보 2517492.
- [30] 일본 공개특허공보 2005-15909.
- [31] 일본 공개특허공보 2005-29889.
- [32] 일본 공개특허공보 2005-60728.
- [33] 일본 공개특허공보 2005-68549.
- [34] 일본 공개특허공보 2005-273004.
- [35] 일본 공개특허공보 2006-176843.
- [36] 일본 공개특허공보 2006-176844.
- [37] K. Nagai, Bulletin of the Iron and Steel Institute of Japan, 14 (2009) 803.



오 창 석

- 재료연구소 철강재료연구그룹 책임연구원
- 관심분야 : 미세조직 제어
- E-mail : csoh@kims.re.kr



김 성 준

- 재료연구소 선임연구본부장
- 관심분야 : 신합금 개발
- E-mail : sjkim@kims.re.kr