



차세대 자동차용 철강재료 기술

김성준, 이창길, 오창석, 서동우, 이태호 | 한국기계연구원

한흥남 | 서울대학교

1. 서론

자동차 분야는 철강재료의 수요가 가장 클 뿐만 아니라 기술적인 파급효과도 크기 때문에 주요 철강회사들은 자동차용 철강재료에 연구개발 역량을 집중하고 있다. 자동차에 사용되는 철강재료는 연간 8000만톤 정도로 전체 철강재료 수요량의 약 12%를 차지한다. 그리고, 알루미늄, 마그네슘, 경량 복합재료, 고분자 재료 등과 같은 경량 재료와의 점유율 경쟁이 대단히 치열하고 부가가치 또한 크기 때문에 철강재료 기술 중 가장 고급 기술에 속한다. 현재 주요 철강회사들이 추진하고 있는 자동차용 철강재료 기술개발의 공통적인 목표는 고강도·고인성화, 내열·내식성 향상, 성형성 향상 등이다. 본 논문에서는 자동차에 사용되는 여러 가지 철강재료를 중심으로 최근의 자동차용 철강재료 기술개발의 동향을 살펴보고자 한다.

2. 자동차용 철강재료

2.1 기술의 개요와 산업적 환경

자동차용 철강재료는 대부분 구조용으로 사용되고 있으며, 자원의 고갈, 지구 온난화의 진행, 유가의 지속적인 상승 등으로 인하여 경량·고강도화, 내식성 향상을 위한 장수명화, 고강도화에 따른 성형성의 향상 등을 가장 중요한 기술 항목으로 설정하고 있다. 자동차용 철강재료와 관련된 연구 방향은 크게 특성 향상을 위한 신합금 개발과 친환경적인 신공정 개발로 나눌 수 있다. 구체적으로, 자동차의 차체 경량화를 위한 고강도 냉연강판, 내식성 향상을 위한 표면처리강판, 연료 효율 향상과 배기가스 절감을 위해 사용되는 스테인레스강판, 그리고 차체 경량화와 고강도화를 위한 설계 및 가공기술 등을 중심으로 기술개발이 이루어지고 있다. 1973년 오일쇼크 이후 에너지 절약을 위한 자동차의 소형화 및 경량화가 촉진됨에 따라 자동차용 소재로서 철강재료의 위상은 약화되기 시작하여 점진적으로 점유율이 줄어들고 있기는 하나 여전히 자동차 소재로서의 지배적 위상을 유지하여 왔다. 미국의 승용차 한 대당 철강재료 평균 사용량은 1976년 1,290kg에서 1999년에는 979kg으로 감소한 반면 알루미늄 사용량은 39kg에서 107kg로 구성비가 2.3%에서 7.2%로 증가하고 있으나, 성능 향상과 안전성 및 안락성의 개선 등에 대한 요구가 많아져 자동차의 전체 중량이 오히려 증가하고 있어 철강재료의 절대 사용량에는 큰 변화가 없

는 것으로 파악되었다. 이러한 추세는 향후 상당기간 지속될 것으로 전망되고 있다. 다만 자동차용 철강재료의 구성비 측면에서 고강도강 또는 고장력강의 사용비율이 큰 폭으로 증가할 것으로 전망된다. 그림 1은 일본 Kobe 제철에서 2005년까지의 자동차용 철강재료 수요를 예측한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 자동차용 철강재료 수요량은 거의 변화가 없는 대신 2005년에는 고강도강(HSS, high strength steel)이 55%를 차지할 것으로 예측하고 있으며, 구체적인 수치에서는 다소 차이가 있으나 세계 주요 자동차사와 철강회사들이 대동소이한 결과들을 발표하고 있다.

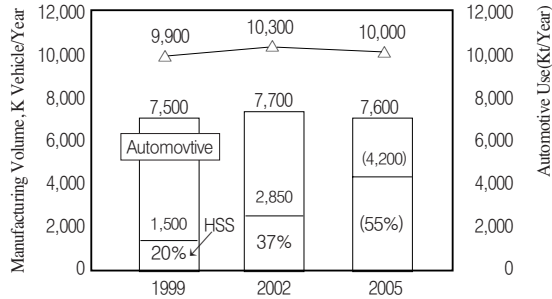


그림 1. 2005년까지의 일본 내 자동차용 철강재료 수요 예측

이러한 환경변화에 대응하여 세계 철강업계는 고강도 철강재료의 개발을 적극적으로 추진하고 있으며, 고강도화에 따라 두께가 얇아지면서 내식성에 대한 요구가 한층 높아져 표면처리강판 개발에 주력하고 있다. 한편, 1994년 이후 철강재료를 이용한 차체, 클로저, 서스펜션 및 차량 경량화 기술개발을 위한 ULSAB(Ultra Light Steel Auto Body), ULSAC(Ultra Light Steel Auto Closure), ULSAS(Ultra Light Steel Auto Suspension) 프로젝트와 이의 후속 프로젝트인 ULSAB-AVC(Advanced Vehicle Concept)를 추진하는 등 자동차업계와 연계하여 차세대 자동차 강재기술 개발에 주력하고 있다.^[1-7]

2.2 자동차용 고강도 냉연강판

자동차용 냉연강판은 용도상 차체 내/외판 판넬용(door, hood), 구조재용(member, pillar) 및 보강재용(bumper, door impact beam) 등으로 나눌 수 있으며, 자동차 총 중량에서 열연·냉연·표면처리강판의 사용량은 평균 51.9%를 접하며 각각 15.4%, 16.2%, 20.3%를 차지한다. 그림 2에는 차체에 사용되는 대표적인 강판의 종류들을 강도와 연신율과 함께 정리하였다. ULSAB 프로젝트에서는 210~550 MPa 범위의 강도를 가진 강을 고강도강이라 정의하고 550 MPa 이상의 강도를 지닌 강은 초고강도강으로 정의하고 있다.

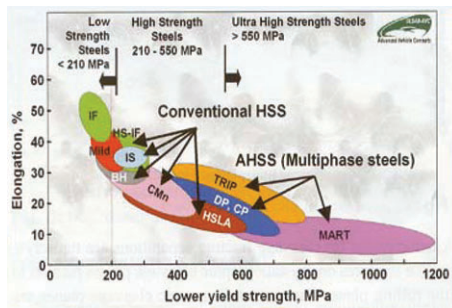


그림 2. 강종별 강도 및 연신율 범위

그러나, 일반적으로 자동차용 고강도 강판은 내외판, 보강재 등의 용도에 따라 기준이 다르기는 하나 350 MPa 이상의 인장강도를 가진 경우를 일컫는다. 합금원소가 다량 첨가되는 고강도 고장력 강판은 프레스 성형성, 용접성, 피로특성 및 내식성 등의 품질 특성이 동시에 확보되어야 하며, 차체 용도별 주요 요구특성은 표 1과 같다.

표 1. 고장력강 차체용도별 요구특성

용도	요구특성
외판	프레스 성형성, 판넬 강성, dent 저항성, 표면 변형
내판	프레스 성형성, drawing성, 판넬 강성
구조부재	굽힘성, spring back, 저항복비, 에너지 흡수능, 피로 강도, 용접부 강도
충돌부재	roll forming, 충돌 강도

이러한 요구특성에 따라 고장력 냉연강판은 고가공성이 요구되는 내판보다는 외판, 구조재, 보강재에 적용되고 있으며, 1000 MPa급 이상의 초고강도강은 범퍼류에 사용되고 있다. 고장력강의 적용 현황을 표 2에 나타내었다.^[8]

표 2. 고장력강판의 용도별 적용 현황 (최대인장강도)

용도		국내	일본	유럽	ULSAB	
판넬	외판	door(소부경화강)	350 MPa급	350 MPa급	500 MPa급	600 MPa급
		hood(소부경화강)	350 MPa급	400 MPa급	350 MPa급	600 MPa급
		quarter	일반재	350 MPa급	일반재	350 MPa급
	내판	dash 판넬	일반재	450 MPa급	일반재	350 MPa급
		rear floor	일반재	일반재	일반재	350 MPa급
구조재	front side member	450 MPa급	600 MPa급	700 MPa급	600 MPa급	
	center pillar	400 MPa급	600 MPa급	600 MPa급	600 MPa급	
	cross member	450 MPa급	450 MPa급	700 MPa급	800 MPa급	
보강재	범퍼 보강재	800 MPa급	1200 MPa급	1400 MPa급	-	

고장력강판을 제조하는데 있어 활용되는 강화기구로는 고용강화, 석출강화, 소부강화, 복합조직 강화 등 다양한 방법^[9]들이 있으나, 최근에는 소부강화와 복합조직을 이용한 강화방법이 가장 많이 연구되고 있다. 소부강화는 자동차 외판을 성형 및 도장처리한 후 약 170°C 정도에서 baking 처리를 할 때 강재 내의 탄소와 질소 등 고용원소의 확산을 통한 전위고착에 의해 약 20~40 MPa 정도 강도가 증가되는 현상을 이용하는 것이다. 강판의 가공 전에는 높은 성형성을 확보할 수 있고 가공 후에는 고강도가 확보되므로 내 dent성이 요구되는 외부 판넬에 주로 적용되고 있다.

복합조직을 이용한 고강도강판의 개발 방향은 마르텐사이트와 페라이트의 2상 조직강(DP, dual phase), 페라이트+베이나이트+잔류 오스테나이트의 TRIP강(Transformation Induced Plasticity), 그리고 더 복잡한 4상 조직강(CP, complex phase) 등으로 나눌 수 있다. 2상 조직강은 오스테나이트와 페라이트 2상 영역에서 급냉하여 마르텐사이트를 약 20~30%(부피분율) 정도 생성시킨다. 석출강화강에 비하여 연성 및 장출 가공성이 우수하며, 충돌에너지 흡수능이 크기 때문에 멤버, 범퍼 등에 적용된다. 2상 조직강은 1980년대에 개발되어 최근 적극적으로 적용되기 시작하였으며, 특히 유럽에서는 그 적용비율이 전체 판재의 50%를 상회할 만큼 많이 적용되고 있다.

그러나 국내에서는 아직 적용률이 낮은 편이어서 앞으로 2상 조직강의 개발 및 부품 적용 연구가 시급하다고 할 수 있다.

3상 조직을 기본으로 하는 TRIP강은 현재 개발이 활발히 진행되고 있으며 일부 적용이 시도되고 있다. 대체로 1.5%(중량%) 정도의 Si, Mn을 첨가하는 TRIP강은 미세조직 내에 약 5~20% 정도 생성된 잔류 오스테나이트가 가공 중에 마르텐사이트로 변태하면서 동반되는 응력 집중 완화에 의해 연성이 향상되는 현상을 이용한다. 600~1000 MPa의 높은 강도를 지니면서도 약 25~35% 정도의 우수한 연성을 확보할 수 있으므로 성형성이 우수하며, 충돌 에너지 흡수능이 크기 때문에 멤버, 범퍼, 휠 등에 적용되며 향후 더욱 적용 범위를 넓어질 것이다. 한편, 마르텐사이트나 베이나이트를 기지로 하고 미세조직 구성이 복잡한 CP강도 개발되고 있는데, 이들은 대개 강도가 1000 MPa를 넘는 초고강도강으로 상업적 생산 및 적용까지에는 상당한 시간이 걸릴 것이다.

표 3은 강화기구별 고장력강의 제조특성과 주요 용도를 정리한 것으로, 기존에 보강재로 사용되던 석출강화형 또는 고용강화형은 복합조직강들로 대체되는 경향이 강하며 내외판재로 사용되는 강재는 아직도 고용강화형이 가장 많이 사용된다.^[10]

표 3. 강화기구별 고장력강의 특성 및 주요 용도

강판의 종류		강화기구 및 특성	용도
석출강화강		저탄소강에 Ti, Nb 등을 첨가, 미세 탄질화물의 석출로 입계성장을 억제하여 결정립 미세화	보강재 -bumper, rail -member, door
고용강화강	경가공	중·저탄소강에 치환형 고용체인 P를 다량 첨가	가공용 내판재 -member, dash 등
	심가공	극저탄소강에 Ti 및 치환형 고용체 P, Mn, Si를 첨가하여 강도 확보	내외판재, 심가공용 -door, hood 등
소부경화강		탄질화물 형성원소인 Ti를 소량 첨가, 고용 탄소를 잔류시켜 도장 소부처리시 전위에 고용탄소가 확산, 고착	외판재 -door, hood -trunk lid 등
이상조직강		저탄소강의 급냉을 통해 페라이트와 마르텐사이트 형성, 페라이트의 연성과 마르텐사이트의 고강도가 합쳐져 고연성, 고강도 확보	보강재 -bumper -member
TRIP강		탄소, Si, Mn 등의 첨가와 2상역 소둔+베이나이트 항온변태처리로 생성된 잔류 오스테나이트가 가공중 마르텐사이트로 변태	보강재 -bumper -member -wheel

2.3 표면처리용 강판

자동차 차체의 경량화 요구에 부응하여 강도 증가와 함께 판재의 두께가 점차 감소하여 내식성 향상이 과거보다 더욱 중요한 요구특성으로 인식되고 있고, 방청보증 기간 증가에 따라 표면처리용 강판기술에 대한 연구개발이 활발하게 추진되고 있다. 아울러 자동차 업계의 원가절감 경쟁에 따라 표면처리 강판의 구매와 사용패턴에도 큰 변화가 오고 있다.

표면처리 기술은 크게 용융도금과 전기도금으로 대별할 수 있으나, 용융도금 제품이 전기도금 제품에 비해 내식성이 우수하며 원가측면에서도 우위를 점하고 있어 연구개발이 집중되고 있는 분야이다. 그동안 CG(연속 용융도금) 및 EG(전기도금) 계가 병행 사용되어 왔으나, 자동차 외판용으로 EG계 표면처리 강판을 선호하던 미국과

일본의 자동차사가 최근 CG계로 적극 전환함에 따라 향후 CG계로 일원화될 전망이다. 또한 순수아연도금 제품(GI, EG)에 비해 합금화 용융도금 제품(GA, Zn-Ni, Zn-Fe)이 용접성이 우수한 것은 물론 도장 전처리성 향상으로 도장 후 내식성도 뛰어나 GA 강판 기술 개발에 보다 더 많은 역량을 집중하고 있는 추세이다. 하지만 유럽지역에서는 용접기술 및 도장기술의 향상으로 GA 대신 GI제품이 자동차용 강판으로 주로 채용되고 있다. 영국의 Corus 기술연구소에서 자동차용 강판에 대한 여러 가지 품질특성을 비교 시험한 결과에 의하면 각종 표면처리 판재의 특성을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- CR(표면처리 하지 않은 냉연강판)은 부식성능을 제외하고 모든 점에서 우수함
- GI는 성형성과 가격에서 우위를 나타내지만 spot welding 특성은 열악함
- GA는 spot welding 특성과 부식특성에서 양호하나 powdering성과 cratering성이 열악함
- EG는 중간수준의 특성을 보유하지만 성형성, spot welding 특성, 가격 측면에서 떨어짐
- Zn-Ni는 spot welding 특성이 우수하나 성형성, 내식성, 도장성, 가격 측면에서 열악함

상기에서 보듯이 모든 면에서 절대적으로 우수한 제품은 없다. 따라서 자동차용 강판으로 무엇을 선정하느냐 하는 문제는 자동차사의 프로세스와 자동차 제조철학에 의존한다고 할 수 있다. 표 4에는 자동차용 표면처리강판의 요구변화 및 적용현황을 요약하였다.

표 4. 표면처리강판의 특성에 대한 요구변화 및 적용추이

구 분	1980년	1985년	1990년	현재	
방청목표 (표면/구멍 부식)	1.5 / 5년 [Canadian]	3 / 6년 [Nordic]	5 / 10년 [GM 기준]	6 / 12년 [OPEL기준]	
강판특성요구변화	내식성	내식성, 용접성, 가공성	고내식성	고내식성	
적용추이 (제품 / 도금량)	국내 일본	GA 45/45 EG 40/40	Zn-Fe 45/45 Zn-Ni 20/20, 30/30	이층도금 45/45 유기피복 30/30	GA 45/45, 60/60 유기피복
	미주	GA 45/45 EG 60/60			GA 50/50 EG 50/50
	유럽	EG 20/20	EG 50/50		EG 50/50 GI 50/50

자동차용 강판 소비의 특징은 최근 들어 냉연강판의 비중이 낮아지고 표면처리 강판의 구성비는 높아졌다는 점이다. 냉연강판의 비중은 1995년 51.5%에서 1998년 43.8%로 낮아진 반면, CG와 EG를 포함하는 표면처리 강판의 비중은 1995년 24.2%에서 1998년 32.8%로 불과 3년 사이에 8.6%나 점유비가 증가하였다. 이중 CG의 비중은 1996년의 6.9% 대비 1998년 13.7%로 두 배 가까이 상승하였다.

한편, 유해물질의 사용 및 배출에 대한 규제에 따라 유해물질의 함유를 최소화하거나 재활용을 용이하게 하는 등 자동차용 철강재료의 가공 및 최종제품의 사용·폐기·재활용 단계에서 환경부하를 최소화할 수 있는 환경친화적인 철강재료, 즉 그린스틸(green steel)의 개발과 사용이 확대될 전망이다. 일례로 최근 일본의 주요 6개 제철사들은 모두 독자적으로 크롬 무함유 아연도금 강판을 개발하였는데, 현재까지는 주로 가전 및 사무기기용 중심으

로 개발되고 있으며 향후 자동차용으로도 개발이 확대될 전망이다.

POSCO에서도 자동차용 Cr-free 수지피복 강판을 개발하여 시험생산 중에 있다. 또한 자동차 연료탱크용 소재로서 과거 Pb와 Sn을 함유도금한 강판이 주로 사용되어 왔는데, 도요타와 닛산은 일찍부터 연료탱크용 소재로 납을 사용하지 않는 새로운 강판으로 교체했으며, 미쓰비시, 혼다, 후지, 마쯔다 등 다른 자동차업체들도 순차적으로 무연(無鉛)강판을 채용할 방침이다. POSCO에서는 자동차 연료탱크용 신도금강판(Zn-Ni+Cr+Phenoxy계 수지)을 개발하여 현재는 양산단계에 있다.

2.4 배기계용 스테인레스강판

자동차용 스테인레스강판은 크게 외장용과 배기계용으로 구분된다. 외장용 스테인레스강판은 주로 차량의 외관을 좋게 하기 위해서 사용되며 trim, wiper, wheel cap, antenna 등의 부품에 적용된다. 자동차 배기계는 엔진에서 나오는 배기가스를 모아서 공해물질을 정화시켜 배출하는 역할을 하며, 자동차 하부에 장착되어 있기 때문에 외장성 보다는 기능에 맞는 소재를 적용하고 있다. 배기계는 부품 보증기간의 연장 및 배기가스 규제의 강화 경향에 의해서 고기능 소재의 사용을 필요로 하고 있어 스테인레스강판의 사용량이 지속적으로 증가하고 있고, 적용 강종도 고급화, 고기능화 하는 추세에 있다. ^[11,12]

배기계는 사용온도에 따라서 크게 두 가지로 구분된다. Center pipe 이후 tail pipe까지는 비교적 온도가 낮아서 cold end 라고 하고 그 앞의 부품들은 hot end 라고 한다. 표 5에 배기계 각 부품의 사용온도와 요구특성 및 현재 적용되고 있는 대표적인 강재들을 정리하였다. 자동차 배기계에서 부식이 가장 잘 일어나는 부위는 muffler를 포함한 후단부이다. 스테인레스강판은 이 후단부부터 적용되기 시작하여 차례로 적용 부위를 늘려왔다.

1990년대에 들어서 미국의 Clean Air Act의 발효와 유럽의 배기가스 규제 강화 이후, 엔진시동 초기의 차가운 exhaust-manifold 부품을 통과하는 배기가스의 오염물질에 관한 문제점이 부각되었다. 그에 따라 이전까지 사용되던 두꺼운 주철제 주물 대신에 스테인레스 냉연강판이 적용되기 시작하였고, 이로써 배기계 전 부위에 스테인레스강판이 적용되게 되었다. 국내에서는 부품보증기간의 연장이 다소 느리게 이루어져 왔기 때문에 수출차종을 위주로 스테인레스강판이 적용되어 전체 사용량도 비교적 완만하게 증가하였지만, 최근에는 내수용 자동차 배기계에 도 스테인레스강판이 점차 많이 적용되고 있다. ^[13]

표 5. 배기계 각 부품의 사용온도, 요구특성 및 적용 강판

부 품	온도(℃)	요 구 특 성	적 용 강 판
exhaust manifold	950 ~ 800	내산화성, 내열피로성	429ENM 430J1
front pipe	800 ~ 600	내산화성, 내열피로성	409L, 429EM, 430J1
flexible pipe	650 이하	내고온염부식, 내산화성, 가공성, 용접성	304, 302B, XM15J1
catalytic converter	shell:800~600 inner:1100	가공성, 내산화성	shell:409L, 430J1, 429EM Inner:ceramic, 20Cr-5A1
center pipe	600 ~ 400	내응축수 부식성, 내염성	409L, 436L
muffler	400 ~ 200		
tail pipe			

2.4.1 Muffler

자동차 배기계 부품 중 가장 후단에 위치한 muffler는 작동온도가 400°C 이하이며, 배기가스 중의 수분 응축으로 염소와 황화합물을 함유하는 부식성 응축수(condensed water)가 발생된다. 종전에는 Al 도금 강판이 주로 사용되었지만 부품보증기간의 연장에 따라서 11wt%-Cr base의 409L이 가장 많이 적용되어 왔다. 최근 구미 지역에서 보증기간이 5년 이상으로 연장되고 일부 차종에서는 10년으로 늘어나고 있기 때문에 보다 내식성이 우수한 18Cr-base의 436L의 사용이 늘고 있고, Al-coated 409L도 사용되고 있는 추세이다. 국내에서는 수년 전부터 수출차종을 중심으로 Al 도금강판을 409L이나 436L 강종으로 바꾸어 왔는데, 현재 수출용 차량들에는 모두 스테인레스강판을 적용하고 있고, 내수용 차량에는 중형급 이상에서만 스테인레스강판을 적용하고 있다.

2.4.2 배기가스 정화장치(catalytic converter)

배기가스 정화장치는 외부의 shell과 내부의 촉매로 이루어져 있으며, 배기가스 규제가 계속 강화되기 때문에 정화효율 향상을 위해 작동온도도 계속적으로 올라가고 있다.

Converter shell에는 종전에 적용되던 Al 도금강판에서 요즘은 더 높은 내산화성을 가진 스테인레스강판으로 대체되고 있다. 초기에는 409L 강종이 주로 사용되었지만 사용온도가 약 800°C까지 상승하여 최근에는 더 우수한 내산화성을 가진 430J1L이나 429-Modified 소재가 사용되고 있다.

내부의 촉매 substrate로는 기존에 ceramic이 주로 사용되어 왔다. Ceramic substrate의 경우 균열을 방지하기 위해서는 주로 316 wire net를 사용하는데, 배기가스의 온도가 상승함에 따라서 내열성이 부족한 ceramic substrate에 대한 대안으로서 metal substrate를 개발하여 적용을 시작하고 있다. Metal substrate는 ceramic substrate에 비해서 두께가 1/3 이하로 얇기 때문에 개구율(開口率) 증가로 배기압력 손실이 30% 정도 저감되어 엔진성능의 향상에도 기여한다. Metal substrate용 재료로는 20Cr-5Al의 기본조성에 내산화성의 향상을 위해 희토류 금속을 미량 첨가한 소재를 사용하고 있다.

2.4.3 Exhaust manifold

Exhaust manifold는 엔진하부에 위치하며 엔진의 배기가스를 한 곳으로 모아 뒤로 전달하는 부품이다. 지금까지는 주로 가격이 저렴한 주철제 주물품이 사용되어 왔다. 그러나, 주철제 주물품은 두껍기 때문에 시동 초기에 온도가 빨리 상승하지 못하여 배기가스 정화장치(catalytic converter)에서 공해물질의 정화효율이 떨어지는 단점이 있다. 최근에는 세계적으로 자동차 배기가스에 대한 규제가 강화되고 있기 때문에 소재가 스테인레스 냉연강판으로 빠르게 전환되고 있다.

전세계 대부분의 자동차사들은 페라이트계 스테인레스강을 사용하고 있으며, 일본에서는 14Cr-base에 Si, Ti, Nb 등을 첨가한 429-modified 소재를 개발해서 적용하고 있다.^[14-16]

표 6에 현재 사용 중인 exhaust manifold용 소재들의 성분과 특성을 정리하였다. 기본적으로 수명의 보증을 위해 내열피로성과 내산화성을 보유해야 하며, 복잡한 성형 및 용접공정을 거치기 때문에 성형성과 가공성도 양호해야 한다.

표 6. Exhaust manifold용 소재들의 성분과 특성

강재	주요성분	온도(°C)	특성
409L	11Cr-Ti	<750	가공성 양호, 내열성 미흡
429EM	14Cr-Si-Ti-Nb	<950	열피로특성, 내산화성 양호, 저가 고기능
430J1L	18Cr-Cu-Nb	<950	열피로특성, 내산화성 양호, 가공성 약간 미흡
444	19Cr-2Mo-Nb	<1000	열피로특성, 내산화성우수, 고가, 가공과 용접이 어려움
309S	23Cr-13Ni	<1000	고성능 엔진에만 적용(독일)

3. 국내외 기술개발의 동향

3.1 국내 기술개발 동향

3.1.1 열연강판

최근의 열연강판 제조기술 개발의 방향은 고강도화, 고기능화로 요약된다. 이를 위해서는 압연 및 열처리 기술을 결합한 제어압연 및 제어냉각 기술의 확보가 중요한 요소이다. 특히 초고강도강판의 제조에 있어서는 런아웃(run-out) 테이블에서의 냉각제어 기술이 중요하다. 일반적으로 종래의 one step 냉각에 의해 제조되었던 페라이트+펄라이트 고용강화강 및 석출경화강에 비해 three step 냉각에 의해 제조된 고장력강의 경우 향상된 재질을 얻을 수 있다. Three step 냉각제어 방식을 통해 600 MPa급 이상의 열연 DP, TRIP 및 복합조직강의 제조가 가능하며 현재 800 MPa급 TRIP강의 개발이 완료된 단계이다. 열연강판이 적용되는 부품들은 보강부품으로 stabilizer, 측면 충돌보호를 위한 impact bar가 있으며, 구동부품으로는 lower arm, wheel disk, 동력전달장치인 drive shaft 등이 있다. 그리고 구조용 부품으로는 frame 및 member류에 열연강판이 많이 사용되고 있다.

3.1.2 냉연강판

1990년대 이후 TRIP 및 복합조직형 고장력강판의 개발이 급속하게 진행되고 있다. 국내 자동차용 철강재료 중 인장강도 350 MPa급 이상의 소재 채용은 연간 1%씩 지속적으로 증가하여 1991년 14.4%이던 것이 1995년 17.7%가 되었으며, 2005년에는 35%이상으로 증가될 전망이다. 고장력 냉연강판은 주로 요구특성에 따라 내판 보다는 외판, 구조재, 보강재에 적용되고 있다. 석출강화형 고장력강판의 경우 Nb, Ti 등을 첨가한 450 또는 600 MPa급의 강판이 member 및 bumper용 소재로 공급되고 있다. 고용경화형 고장력강의 경우는 P, Si, Mn 등의 치환형 원소와 C와 N을 첨가하여 격자변형을 통한 페라이트의 내부응력의 발생을 이용하여 강화효과를 얻으며, 차체 내/외판 판넬에 적용되고 있다. P를 첨가한 350~450 MPa급 강판 및 fender, door, quater용으로 P, Ti를 첨가하여 성형성을 향상시킨 350~450 MPa급 강판이 개발 중에 있다.

소부경화형 고장력강판은 성형 및 도장 후 약 170°C 정도에서 baking 처리를 할 때 C, N 등 고용원소의 확산을 통한 전위고착에 의해 약 20~40 MPa 정도의 강도가 증가되는 현상을 이용하는 것이다. 가공 전에는 높은 성형성을 확보할 수 있고 가공 후에는 고강도가 확보되므로 내 dent성이 요구되는 외판 판넬에 주로 적용되고 있다. 280, 350, 400 MPa급 소부경화강판이 개발되어 활용 중에 있으며, 450 MPa급 강판이 연구개발 중에 있다.

충돌 흡수성이 뛰어나 차량의 member나 bumper에 활용하는 고장력강판으로 DP 및 TRIP강이 있다. DP강은 소둔로에서 빠른 냉각에 의해 연성이 우수한 페라이트와 강도가 우수한 마르텐사이트의 2상을 생성시킨 강으로

석출강화강에 비해 연성 및 장출 가공성이 우수하여, 충돌 흡수성이 큰 것이 그 특징이라 할 수 있다. 현재 600 MPa급 DP가 개발되어 활용 중에 있으며, 800 MPa급은 연구개발 중에 있다. TRIP강은 600 MPa급과 800 MPa급이 개발되어 양산 공급 중에 있으며, 1000 MPa급 이상에 대해서는 각각 TRIP형과 복합조직형의 형태로 연구 개발 단계에 있다.

3.2 국외 기술개발 동향

3.2.1 고장력강판

현재 진행 중인 고장력강판의 개발현황을 POSCO 및 일본 제철사를 비교하여 표 7에 요약하여 나타내었다. DP와 TRIP강의 경우 현재 가장 앞선 기술력을 가지는 일본 제철사보다 POSCO의 연구개발 속도가 다소 뒤진다.

표 7. 고장력강판 개발현황

강재	POSCO	일본 제철사	적용 부품
고용강화강	일반용(저탄소):350~400 MPa급 가공용(극저IF):350~400 MPa급	일반용(저탄소):350~450 MPa급 가공용(극저IF):350~450 MPa급	내/외판 멤버류
석출강화강	400, 450, 600 MPa급	400, 450, 500, 550, 600 MPa급	멤버류, 범퍼 보강재
소부경화강	280, 350, 400 MPa급	280, 300, 350, 400 MPa급	외판판넬(도어, 후드)
DP강	600 MPa급	600~1500 MPa급	멤버류, 범퍼 보강재
TRIP강	600, 800 MPa급	600, 700, 800 MPa급	멤버류, 범퍼 보강재

3.2.2 Si 저감형 TRIP강판

현재까지 개발된 C-Mn-Si계 자동차용 TRIP형 냉연강판은 탄화물 석출을 억제하여 고용탄소 함량이 높은 retained austenite를 생성시키기 위해 Si를 1wt.% 이상 첨가하는데, 이로 인해 용접성이 저하되고 용융아연도금이 어려워지는 문제점이 발생하여 자동차용 철강재료로서의 적용이 크게 제약받는다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 선진국의 자동차사와 철강업계에서는 용융아연도금이 가능한 Si 저감형 TRIP형 냉연강판 개발을 추진하고 있으며, 이미 유럽을 중심으로 일부 결과가 발표되고 있다.^[17-22]

TRIP강의 고유특성인 변태유기소성 현상이 나타나기 위해서는 다량의 잔류 오스테나이트가 형성되어야 하므로, 일반적으로 bainite 변태시 탄화물 석출을 억제하는 원소로 알려진 Si를 첨가하여 사용한다. 그러나, Si를 1wt.% 이상 첨가하면 용융 Zn과의 젖음성이 매우 낮은 Mn_2SiO_4 산화물이 표면에 생성되어 용융도금이 잘 되지 않는 문제점이 발생한다.^[20,21] 또 용융아연도금에서는 용융 Zn 내에 소량의 Al을 첨가하여, inhibition layer라는 얇은 Fe_2Al_5 층을 형성시켜 변형에 취약한 Fe-Zn 금속간화합물의 형성을 억제한다. 그러나 Mn_2SiO_4 산화물은 inhibition layer의 생성을 방해한다.^[20,21] 이러한 이유로 인해 Si 대체원소를 이용하여 새로운 합금조성을 가지는 TRIP형 냉연강판 제조에 관한 연구가 활발하게 시도되고 있다.

Si 대체원소로서 대표적으로 활용되는 것이 Al인데, 현재까지의 연구방향은 약 1.0에서 2.0wt.%까지 첨가하여 기계적 특성과 용융아연도금성을 조사하는 것이다. Si를 0.5wt.% 이하로 낮추고 Al을 대체원소로 첨가한 TRIP형 냉연강판의 경우, 대개 강도는 떨어지지만 연신율은 다소 증가하며^[22], 용융아연도금성 측면에서는 표면에 생성된 $FeAl_2O_4$ 산화물이 용융 Zn와의 젖음성을 좋게 하고 inhibition layer의 생성도 방해하지 않아 대체로 좋은 도금성을 가진다고 알려져 있다.^[19-21] Al 외에 P, Mo 등도 좋은 대체원소로 사용이 가능하다고 알려져 있으나, 현재까지

용융아연도금성이나 기계적 특성을 체계적으로 조사한 연구는 미미하다.

대개의 냉연 TRIP강판은 연속어닐링라인(CAL)에서 제조되나, 용융아연도금시에는 연속용융도금라인(CGL)을 통해 생산된다. CGL에서는 TRIP형 냉연강판의 마지막 열처리 단계인 항온변태구간의 시간이 CAL에 비해 짧은 약점이 있으며, GA 판재의 경우는 용융아연도금 후 약 550°C에서 몇 초간 어닐링을 해야만 하는 제약이 있다. 이로 인해 용융도금성이 우수한 TRIP형 냉연강판을 제조하기 위해서는 새로운 합금조성의 결정과 더불어 최적의 열처리 패턴을 새롭게 구해야만 하는 노력이 필요하다. 이러한 연구개발은 현재 유럽, 미국, 일본 등 선진국에서 매우 활발히 이루어지고 있으며, 현재 국내에서도 연구개발이 시작된 단계에 있다.

4. 결론 및 전망

현재 자동차 산업은 자동차 연비 향상 및 배출가스 규제에 따라 차체 경량화를 위한 기술 개발에 주력하고 있다. 또한 안정성 확보를 위한 충돌 안전성에 대한 요구가 높아지고 있다. 이에 따라 철강업계는 자동차 차체 경량화 및 충돌 안전성 향상을 위해 강판의 고강도화 방향으로 연구개발을 진행시켜왔으며, 자동차업계 또한 고장력강 채용이 꾸준히 증가하고 있다. 현재의 전망으로는 향후 수년 내에 90%이상 고장력강판을 적용한 자동차가 실현될 전망이다. 차세대 자동차용 철강재료 및 부품개발과 관련된 합금설계 기술, 공정 기술, 생산 기술, 활용 기술, 부품화 기술 등은 비단 철강회사에만 국한된 연구개발 과제가 아니며 국가적으로 적극 추진되어야 한다는 점은 선진국의 예를 보더라도 주지의 사실이다. 따라서 보다 효율적인 연구개발과 적용을 위해서는 자동차사, 철강사, 연구소, 대학교 등의 상호 연계 하에 지속적인 노력이 요구된다.

✿ 참고문헌

- [1] PES, ULSAB Phase 2 Final Report, Mar. (1998)
- [2] PES, ULSAC meeting report, Jun. (1999)
- [3] Lotus Engineering, ULSAS Phase 1, Step 2 Final Report, Jun. (1999)
- [4] PES, ULSAC Engineering Report, Apr. (2000)
- [5] Lotus Engineering, ULSAS Engineering Report, Feb. (2000)
- [6] PES, Technical Transfer Dispatch #5, Sept. (2000)
- [7] PES, Technical Transfer Dispatch #6, May (2000)
- [8] 최병조, 전현철, 진광근, 제 10회 철강기술 심포지엄 논문집, 대한금속재료학회 (2001) 111
- [9] K. Kishida, High Strength Steel Sheets For Light Weight Vehicle, Nippon Steel Technical Report, 81 (2000) 12
- [10] 고문찬, 김연근, 김종상, 제 7회 철강기술 심포지엄 논문집, 대한금속재료학회 (2000) 15
- [11] N. Matsuura, 2nd Annual Conference of the International Stainless Steel Forum Market Development Committee (1998) 1
- [12] 石川秀雄, “스테인레스강의 제조,이용기술의 진보”, 西山記念講座 (1994) 253

- [13] 권중원, 김영호, 이용득, 제 7회 철강기술 심포지엄 논문집, 대한금속재료학회 (2000) 285
- [14] M. Barteri, M.G. Mecozzi and S.Fortunati, International Congress Stainless Steel 1999, 3 (1999) 75
- [15] N. Fujita, K. Ohmura, E. Sato and A. Yamamoto, Nippon Steel Technical Report, 71 (1996) 25
- [16] A. Miyazaki, M. Gunzi and K. Yoshioka, Kawasaki Steel Technical Report, 31 (1994) 21
- [17] J. Mahieu, J. Maki, S. Claessens and B. C. De Cooman, 43th Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceedings, Volume XXXIX, ISS (2001) 397
- [18] I. Hertveldt, B. C. De Cooman, S. Claessens, Metal. Mater. Trans. A, A32 (2000) 1225
- [19] J. Mahieu, J. Maki, B. C. De Cooman and S. Claessens, Metal. Mater. Trans. A, 33A (2002) 2573
- [20] J. Mahieu, S. Claessens, B. C. De Cooman, Proc. Galvatech '2000, Brussels (2001) 644
- [21] J. Maki, J. Mahieu, S. Claessens, B. C. De Cooman, Proceedings Galvatech '2000, Brussels (2001) 623
- [22] S. Traint, A. Pichler, P. Stiaszny, K. Spiradek-Hahn and E. Werner, 43rd MWSP Conference Proceedings, ISS, XL (2001) 449



김 성 준

- 한국기계연구원 공정연구부 책임연구원
- 관심분야 : 금속상변태, 철강재료 신합금개발, 재료의 가공열처리
- E-mail : sjkim@kmail.kimm.re.kr



이 창 길

- 한국기계연구원 공정연구부 책임연구원
- 관심분야 : 상변태, 재료의 기계적 성질 고상점함, 미세조직 분석
- E-mail : cglee@kmail.kimm.re.kr



오 창 석

- 한국기계연구원 공정연구부 선임연구원
- 관심분야 : 열역학계산, 상변태 수치해석 자동차용 철강재료
- E-mail : csoh@kmail.kimm.re.kr



서 동 우

- 한국기계연구원 공정연구부 선임연구원
- 관심분야 : 상변태, 재료의 기계적 성질, 가공열처리 공정과 미세조직의 상관관계
- E-mail : dongwoo@kmail.kimm.re.kr



이 태 호

- 한국기계연구원 공정연구부 선임연구원
- 관심분야 : 상변태, 결정학, 전자현미경
- E-mail : lth@kmail.kimm.re.kr



한 흥 남

- 서울대학교 재료공학부 조교수
- 관심분야 : 금속소성가공, 상변태 해석 재료의 기계적 성질
- E-mail : hnhan@snu.ac.kr