제5회 압연심포지엄 / 이준정 편
한국소성가공학회 pp.45~52

자동차용 고강도 냉연강판의 개발 및 적용현황

김성주*, 진광근*
자동차소재연구그룹, 포스코 기술연구소*

Developments and applications of high strength cold rolled steel sheets for automobiles

S. J. Kim* and K. G. Chin*
Automotive Steel Products Research Group, POSLAB*

Abstract

Continuing pressure for the weight reduction of vehicles and improvement of collision safety is driving the development of new high strength steel with excellent formability. The formable high strength steels which have excellent drawability have been developed and applied to the complicated inner panels. Although BH steel have mainly occupied the material market for outer panels, it is challenged by DP steel which have low yield strength and good bake hardenability. The advanced high strength steel, TRIP steels and DP steels which have excellent formability are new alternatives to conventional HSLA steel for structural parts such as members and pillars. HSLA steels also have been used for automotive bumper reinforcements due to their high yield ratio. Higher grade complex phase steel(CP) were developed for bumper reinforcements by addition of precipitation hardening to transformation strengthened steel. The usage of the advanced high strength steel are increasing and will become the main material in structural parts near future. This paper describes the features of newly developed high strength cold rolled steels for automobiles.

Key words :high strength steel, automotive parts, TRIP steel, DP steel, CP steel, HSLA

1. 서론

최근 환경규제와 승객의 안전에 대한 관심이 증가되면서 차체에 고강도강의 사용비율이 급격히 증가하고 있다. 현재 차체의 고강도강 적용비율이 30 ~ 40% 수준이지만 2005년 이후에는 70% 이상 증가할 것으로 예측하고 있다.[1-2] 철강재의 사용을 촉진하기 위한 초경량철강차체(ULSAB-AVC) 프로젝트의 연구결과에서도 고강도강의 채용비율이 100% 이며, 특히 인장강도 590MPa급 이상의 첨단고강도강(Advanced high strength steel)의 사용량이 85% 이상 차지하고 있다.[3]

자동차의 차체에 적용되는 강판은 각각의 부품이 요구하는 특성에 맞게 설계되어지고, 개발 및 적용되고 있다. Fig.1에서 부품별로 자동차용 강판의 현재수준과 향후 적용추이를 표시하였다. 현재자동차의 외판재는 차체의 외관의 설계에 만족하는 가공성이 요구되고, 외부의 약한 충격으로부터 손상이 일어나지 않아 자동차의 상품성을 높이는 역할을 한다. 따라서 외관을 결정짓는 가공성과 충분한 내 dent성을 갖는 고강도 강판이 주로 사용되고 있다. 기존에는 표면결함발생이 적은 IF(Interstitial Free)형 고강도강이 주로 사용되어 왔으나, 가공 후 도장, 건조 과정에서 강도가 증가하는 BH강의 개발로 현재 대부분의 외판재는 BH강으로 적용되고 있다. 최근에 경량화

에 대한 요구가 더욱 거세지면서 일부 자동차사에서는 항복강도가 낮고 BH성이 우수한 490MPa급 DP(Dual-Phase)강을 적용하기 시작하였다.[4] 내판재는 차량의 운행에 필요한 구동부품이나 다양한 내장재를 설치할 공간을 확보해야하기 때문에 상당히 복잡한 형상으로 가공될 수 있도록 가공성이 우수해야 한다. 주로 심가공성이 우수한 IF형 고강도강이 지속적으로 개발, 적용되고 있다.

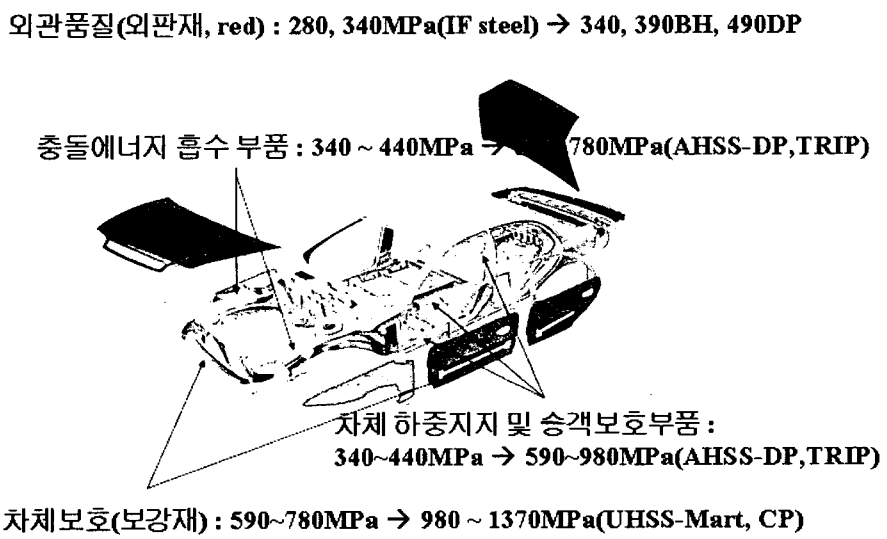

Fig. 1 The application trends of automotive steel sheets

한편 멤버, 필라 및 범퍼보강재와 같은 차체의 구조부재는 차체의 골격을 이루고 있고, 차체하중을 지지하는 역할을 한다. 특히 멤버는 차량이 정면충돌할 때 변형을 받아 충돌에너지를 흡수하고, 필라와 같은 구조부재는 측면 충돌하거나 차량이 전복되었을 때 승차공간내의 사람을 보호해야 하기 때문에 변형에 대한 큰 저항성을 갖고 있어야 한다. 그리고 범퍼보강재는 저속충돌에서 차체를 보호해야하기 때문에 역시 변형에 대한 저항성이 커야 한다.

멤버와 필라와 같은 구조부재는 중간 정도의 강도를 갖는 고강도강을 주로 적용하여 왔는데, 최근에 차체경량화의 요구와 함께 더 높은 급의 고강도강이 적용되기 시작하였으며, 특히 고속변형에서 에너지 흡수능이 우수한 TRIP(Transformation Induced Plasticity)강 및 DP(Dual Phase)강에 대한 관심이 크게 증대 되고 있다.[1,2,3] 범퍼보강재는 그 동안 석출경화능을 이용한 590MP급 저합금강(HSLA)을 이용하여 왔으나, 현재는 일부 차종에 대해서 변태조직강화에 석출강화를 더한 780MPa급 이상의 초고강도강을 주로 사용하고 있다. 대형차를 선호하는 해외에서는 980 ~ 1370MPa급 강을 적용하기도 한다.

본 논문에서는 현재 자동차의 내외판용으로 사용되는 고가공성 냉연강판 및 멤버, 필라와 같은 구재부재용으로 새롭게 개발되고 있는 590 ~ 780MPa급 TRIP 및 DP강, 자동차 범퍼보강재용으로 사용되는 780 ~ 1180MPa급의 초고강도강의 재질특성을 기존에 양산되고 있는 일반 고강도강 및 석출경화강의 가공 및 재질특성, 그리고 제조특성에 대해서 논의하고자 한다.

2. 자동차 내외판용 고강도 냉연강판

자동차의 내판부품은 차량의 운행에 필요한 구동장치와 다양한 내장재를 설치할 공간을 확보해야하기 때문에 상당히 복잡한 형상이다. 따라서 복잡한 형상의 부품을 가공하기 위해서 고가고성

을 갖는 강판을 개발하여 왔다. Fig.2는 주로 차체의 판재로 적용되는 가공용 강판의 개발추이를 r값과 연신율을 기준으로 나타낸 것이다. 제강 및 압연기술의 발달로 극저탄소 IF강에서 강중의 불순물을 최대한 낮은 수준까지 관리할 수 있는 능력을 보유하면서 일부 제철소에서는 기존의 EDDQ급 냉연강판의 r값 2.0, 연신율 50%를 훨씬 상회하는 S-EDDQ, 또는 H-EDDQ급 강판을 개발하였다.[5] 이러한 극저탄소 IF강의 가공성을 향상시키는 기술을 고강도강에도 적용하여 고강도이면서도 가공성이 우수한 고강도강을 Fig.3 에서와 같이 개발하였다.[6] 340MPa급 이상 고강도강임에도 불구하고 Deep drawing성이 연질냉연강판보다 우수한 특성을 보여준다. Table 1은 새롭게 개발된 고가공용 고강도강의 재질수준을 나타낸 것이다. 340MPa급에서 r값이 2.3, 390MPa급에서 r값이 2.1로써 Deep drawing성이 매우 우수한 특성을 보여 준다.

극저탄소 IF 고강도강에서 강도를 향상시키는 기구는 대부분 Mn, Si, P 등 고용강화원소의 첨가에 고용강화로 이루어진다. 이러한 고용강화원소의 첨가는 용접성, 도장성을 열화시키고 도금품질이 저하되기 때문에 최근에는 다량의 미세한 석출물로 결정립을 미세화시키는 기술을 이용하여 고용강화원소의 첨가량을 감소시키는 연구를 집중하고 있고, 일부 철강사에서는 제품을 생산하고 있다.[7]

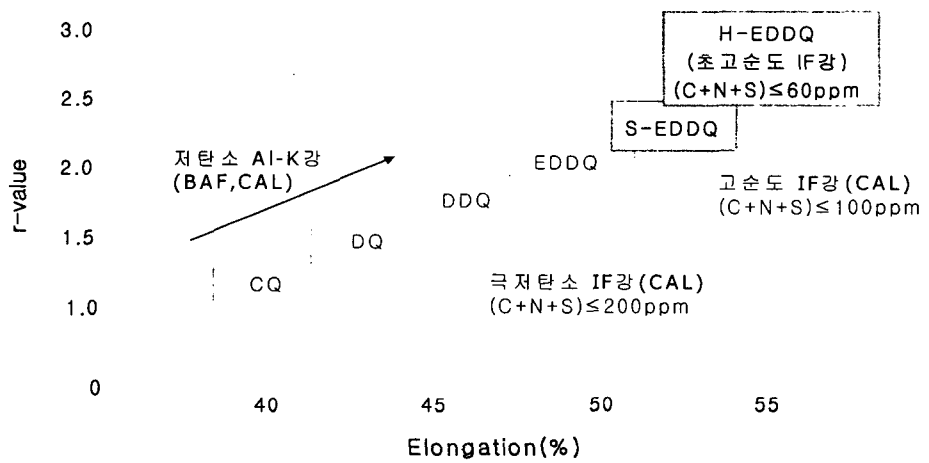

Fig.2 Development of formable cold rolled steel sheets

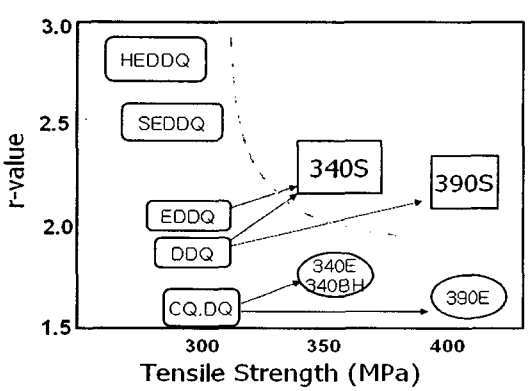

Fig. 3 Development of formable high strength steel sheets

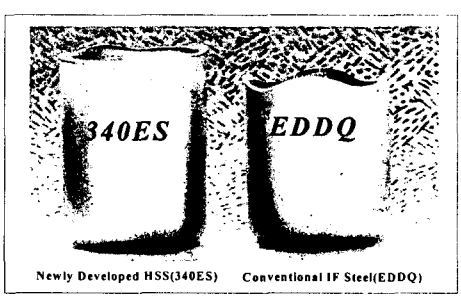

Fig.4 Comparison of drawability between 340ES and EDDQ grade steel

자동차의 외판재용 냉연강판으로는 항복강도가 낮고 stretcher strain과 같은 표면결함이 적은 극저탄소 IF강이 주로 사용되어 왔으나, 극저탄소 IF강은 항복강도가 낮고, 내 dent성에 대한 저항성이 낮기 때문에 강판의 두께가 두꺼워질 수밖에 없었다. 강판의 두께를 감소시키기 위해서

극저탄소 IF형 고강도강이 적용되었으나, 가공성과 내 dent성을 모두 갖춘 BH강의 개발로 외판재의 대부분이 BH강으로 대체되고 있다. BH강은 가공전에는 항복강도가 낮기 때문에 외판에 필요한 충분한 가공성을 확보할 수 있고, 가공 및 도장, 건조 후에는 항복강도가 크게 증가하기 때문에 제품에서 필요한 내 dent성을 확보할 수 있다. Fig.5 는 극저탄소 IF강과 BH강의 내 dent성을 비교한 것이다. BH강의 두께가 얇음에도 불구하고 dent 깊이가 크게 감소되는 것을 알 수 있다. 외판재의 경량화에 대한 요구가 더욱 증가하고, 최근에는 가공기술의 발달로 490MPa급 DP강을 외판재에 적용하기 시작하였다.[4] 일반적으로 제조되는 DP강의 경우 Table 1에서와 같이 항복비가 0.6 이하로 낮아 높은 인장강도임에도 불구하고 항복강도가 낮기 때문에 형상동결성 등 외판재에서 요구되는 가공성을 만족시키기 때문이다. 그리고 DP강의 경우 Fig.9에서와 같이 낮은 변형영역에서 가공경화지수가 높기 때문에 가공경화량이 높고, BH특성 또한 우수하여 부품의 가공 및 도장 건조 후에는 항복강도가 크게 증가하기 때문에 외판재의 내 dent성이 크게 증가하는 잇점이 있다. Fig.6은 340BH강과 490DP강의 예비변형량(pre-strain)에 따른 BH값의 변화를 나타낸 그림이다. 예비변형량에 따른 BH값의 변화는 유사하지만 490DP강의 BH값이 비교적 높다.

Table 1 General mechanical properties of formable high strength steel and BH steels

steel	기계적 성질					
	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	r	LDR	BH_0/BH_2(MPa)
340ES	205	345	43	2.36	2.45	-
390ES	230	392	40	2.10	2.40	-
340BH	227	358	41	1.60	-	25.0/37.6
490DP	301	521	33	-	-	22.7/44.5

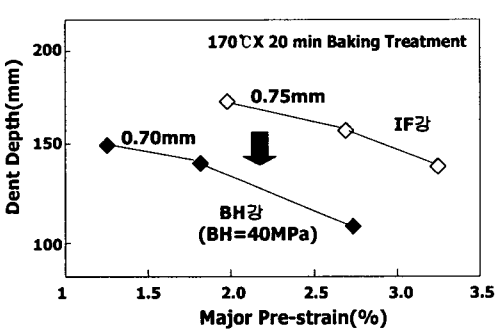

Fig.5 Comparison of dent depth between IF steel and BH steel

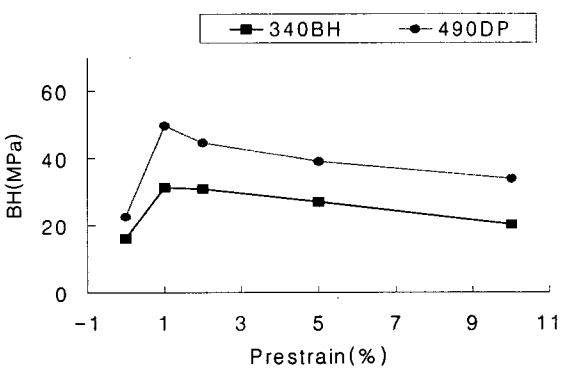

Fig.6 Variation of BH with pre-strain of 340BH steel and 490DP steel

3. 고강도 냉연강판의 자동차 구조부재 적용

자동차의 기본 골격을 구성하는 구조부재는 이제까지 주로 340 ~ 440MPa급 고강도강이 주로 적용되어 왔다. 즉 주로 저탄소강이나 극저탄소강을 기본으로하여 고용강화형 원소를 첨가한 고용강화형강 또는 저탄소강에 석출물 형성원소인 Ti, Nb, V를 첨가한 석출경화강을 사용하여 왔

다. 그러나 최근 경량화에 대한 급격한 요구로 590MPa급 고강도강이 자동차의 구조부재에 적용되기 시작하였다.[8-9] 이제까지 590MPa급 이상 고강도강은 석출경화강(HSLA강)으로 주로 제조하여 왔지만, HSLA강은 가공성이 낮기 때문에 형상이 복잡한 멤버나 필라와 같은 구조부재에는 적용하기가 어려웠다. 최근에 여러 철강사에서 가공성이 HSLA강보다 우수한 590 ~ 780MPa급 TRIP강 및 DP강을 개발하였고, 차체 구조부재에 적용 하려는 적극적인 노력이 진행되고 있다.[10,11] Fig.7은 국내 자동차사의 향후 고강도강 적용동향을 보여주는 그림으로 구조부재에는 대부분 590MPa급 TRIP강과 DP강이 주로 적용되는 것을 알 수 있다. 기존에 인장강도 440MPa이하급 강재로만 제조되었던 부품이다.

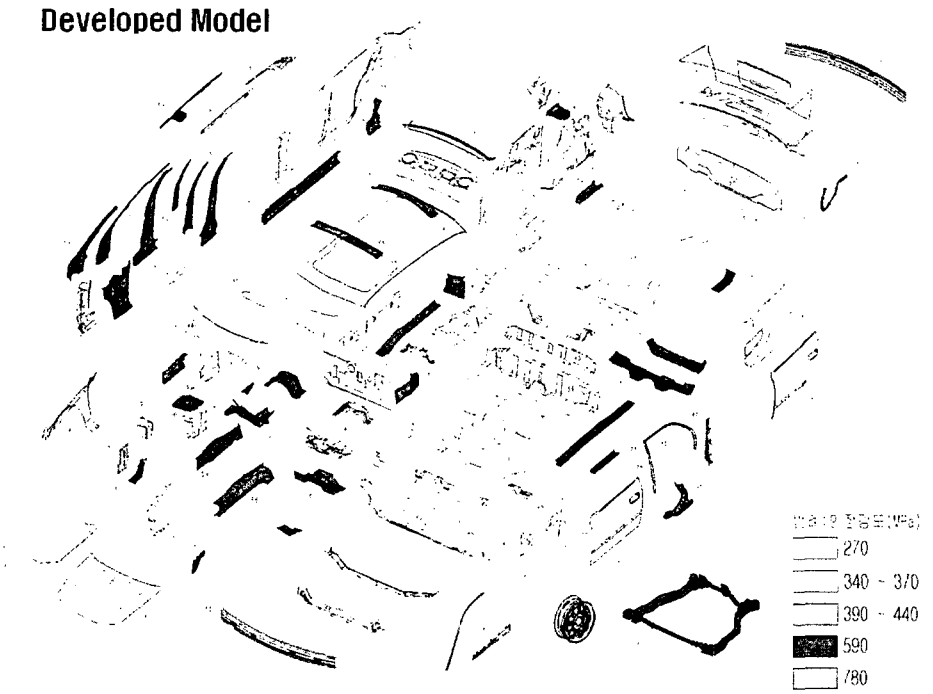

Fig.7 Application of high strength steel sheets

차체 구조부재는 그 역할에 따라 그 요구특성이 다르며, 그에 따른 적용되는 강판의 특성도 다르다.[12] 엔진을 보호하는 프론트사이드 멤버 등 motor component와 연료탱크등 연료계통을 보호하는 rear side member는 차량이 충돌할때 충돌에너지를 흡수하고, 구동계로부터 차체를 지지하는 역할을 하기 때문에 고강도와 가공성, 그리고 고속변형에너지 흡수성이 높은 재료를 요구한다. 고강도이면서 이러한 특성을 갖춘 TRIP강 및 DP강을 이 부품에 적용하려는 노력이 현재 다각적으로 진행 중이며, 향후에는 980MPa급의 고강도강이 적용될 것으로 예측하고 있다. Sill side, B-pillar등 safety cage를 구성하는 passenger compartment와 roof structure는 외부충돌 또는 차량 전복사고로부터 승객을 보호하는 역할을 하기 때문에 비교적 고가공성과 고강도를 요구한다. 비교적 복잡한 형상을 하고 있는 B-pillar나 roof structure의 경우에는 980MPa급 까지 적용되고 있으며, 제품에서 실제 강도가 1370MPa 이상인 열간가공재를 적용하여 강도를 충분히 확보하고 경량화를 이루려는 연구를 진행 중이다. 비교적 단순한 형상을 갖고 있는 Sill side의 경우에는 현재 780MPa급 까지 적용되고 있으며 조만간 980MPa급까지 적용될 것으로 예측된다.

Table 2는 구조용 고강도강의 기계적성질을 비교하여 나타낸 것이며, Ceq. = C + Si/30 + Mn/20 + P + 2S로 표시된다. 동일 인장강도 수준에서 강의 순수한 변태조직강화 특성을 이용하여 제조된 TRIP강의 연신율이 석출경화강과 복합조직강(CP강)에 비해서 훨씬 높다. 590~780TRIP강의 연신율은 30%이상이고, n값이 0.20 이다. DP강은 590MPa급에서 연신율이 27 ~ 30%로 TRIP강에 비해 약간 낮은 수준이지만, 780MPa급이 되면 연성이 급격히 감소하는 단점이 있다. 고가공성을 갖

는 590MPa급 DP강과 TRIP강은 멤버나 필라와 같은 높은 가공성과 강도를 함께 요구하는 부품에 적용되고 있다. 한편, 복합조직강(CP강)은 연성은 낮지만 항복비가 높은 특징이 있고, 1180MPa급까지 제조되고 있으며 고항복강도가 요구되는 부품에 적용된다.

이와 같이 동일 강도에서 연성이 우수한 변태조직강에서 강종별로 재질의 차이를 보여주는 것은 Fig.8에서와 같이 각각 다른 미세조직을 나타내기 때문이다. TRIP강은 비교적 결정립이 큰 페라이트상과 소량의 잔류오스테나이트상으로 구성되어 있는데, 강도가 증가할수록 잔류오스테나이트의 분율이 증가한다. 590TRIP강에서 약 6%, 780TRIP강에서 약 12% 정도의 잔류오스테나이트가 함유된다. TRIP강에서 연성의 향상은 잔류오스테나이트의 변태유기소성 효과와 고 Si첨가에 의한 페라이트상의 청정화 효과에 의한 것으로 알려져 왔다.[13)]

Table 2 General mechanical properties of advanced high strength steel

Grade(MPa)		YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	Ceq.
440	IF-HSS	308	445	35	-
490	DP	318	520	34	0.20
590	HSLA	503	636	23	0.20
	DP	378	588	29	0.23
	TRIP	394	599	35	0.28
690	DP	430	727	23	0.25
780	DP	481	843	18	0.28
	TRIP(LSi)	526	790	24	0.30
	TRIP(HSi)	470	785	30	0.34
980	CP	637	1000	14	0.32
1180	CP	1067	1182	9	-

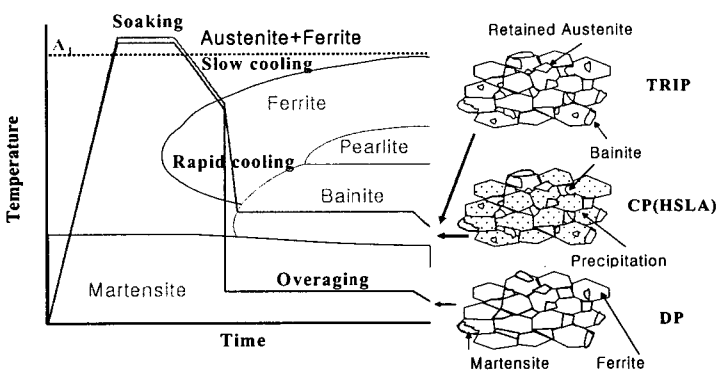

Fig.8 Schematic diagram for manufacturing of transformation strengthened steel.

현재 자동차 구조부재의 경우에는 590MPa급 DP강과 TRIP강이 경쟁적으로 적용되고 있다. Table 3은 DP강과 TRIP강의 재질수준을 나타낸 것이다. 590MPa급에서 TRIP강의 연신율이 약 5% 우수하며, n값 즉 균일연신율 또한 우수하다. DP강의 경우에는 항복비가 낮아 항복강도가 낮기 때문에 프레스 가공을 할 때 형상동결성이 유리할 것으로 추정된다. Fig.9는 TRIP강 DP강의 인장곡선과 변형량에 따른 n값의 변화를 나타낸 것이다. 균일연신율이 우수한 TRIP강에서 n값이 전체 변형영역에서 높은 값을 보여주는 반면 DP강에서는 변형초기에 n 값이 높고, 그 이후에는 변형량이 증가할수록 감소한다.

Table 3 Comparison of formability between 590TRIP and 590DP steel

Materials		YS (MPa)	TS (MPa)	U-El (%)	T-El (%)	n (10-20%)	rm	Δr	LDH (mm)	FLD_0 (%)	LDR
TRIP 590	0°	404	614	21.6	35.9	0.22	1.19	0.49	30	37	2.25
	45°	423	624	19.9	33.1	0.20					
	90°	398	610	21.6	36.4	0.21					
DP 590	0°	355	576	15.9	28.8	0.16	0.96	0.18	25	-	2.20
	45°	359	580	15.3	28.3	0.15					
	90°	356	578	15.0	29.3	0.15					

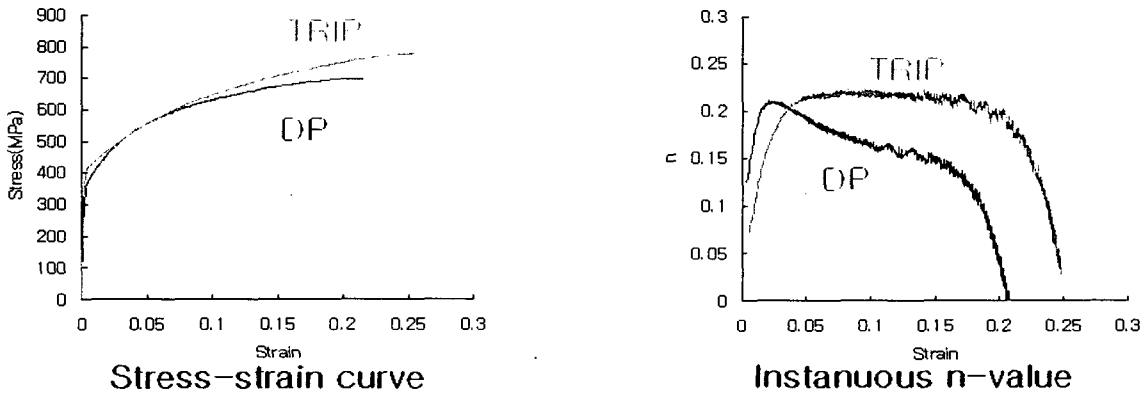

Fig.9 Comparison of stress-strain curve and n-value between TRIP and DP steel

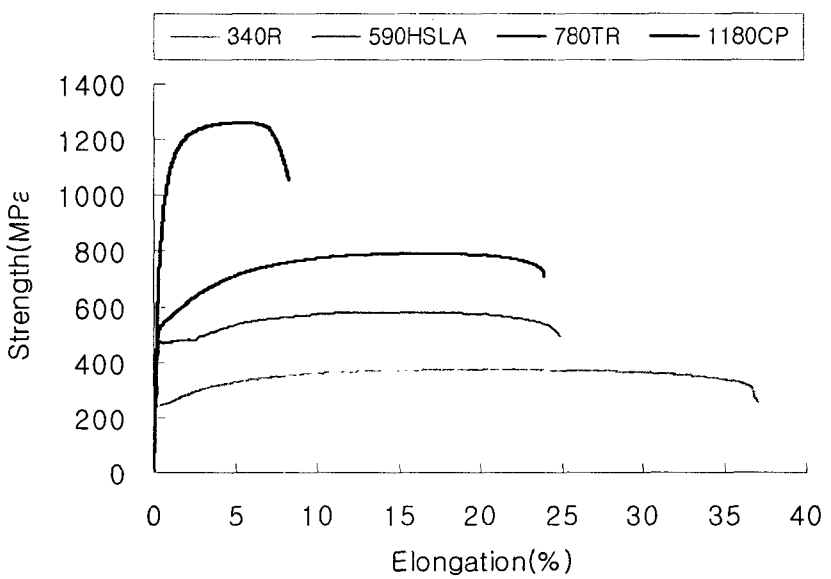

Fig.10 Stress-strain curves of high strength steels for bumper reinforcements

Fig.10은 차량이 저속으로 충돌할 때 차체를 보호하는 범퍼의 보강재용 냉연강판의 재질수준을 보여주는 그림이다. 590MPa급 냉연강판은 석출강화를 이용하여 주로 제조되었는데, 항복강도는 높으나 가공성즉 연신율이 낮은 단점이 있다. 그러나 590MPa 급에서 연신율이 20 ~ 25% 수준으로 형상이 단순한 범퍼보강재의 부품을 프레스로 가공이 가능하였다. 780MPa급 냉연강판은 저Si형 TRIP강으로 변태조직강화와 석출강화를 적용하여 590MPa급에 비해서 연성은 감소시키지 않고 강도를 증가하였다. 이 강종은 일부 부품사에서는 프레스가공으로 부품을 제작하고, 일부에서는 롤 포밍기술을 이용하여 범퍼보강재의 부품을 제작한다. 차량이 대형화 되면서 고강도강을 요구하여, 현재는 복합조직강(Complex phase, CP)라고 하는 변태조직강화에 석출강화를 더한 980MPa급 고강도강이 적용되고 있다. 그러나 980MPa급 이상의 고강도 강은 프레스 가공성이 크게 감소하기 때문에 프레스 가공시 불량률이 높아 대부분 롤 포밍기술을 이용하여 범퍼보강재의 부품을 제조한다. Fig.10에서 1180MPa급의 CP강의 연신율 수준은 약 10%를 나타내지만 굽힘가공이 대부분인 롤 포밍시 가공불량은 거의 발생하지 않는다. 한편, 일부 자동차사에서는 범퍼보강재용 소재로 마르텐사이트강이라고 하는 1370MPa급 초고강도 냉연강판을 적용하기도 한다.

4. 요약

자동차의 외관품질과 관련된 외판재용 고강도강으로는 내 dent성을 향상을 위해서 IF-HSS강과 BH강를 적용하고 있으며 점차 그 사용량이 증가하는 추세이며, 최근에는 BH특성이 우수하고 항복비가 낮아 가공에 유리한 490MPa급 DP강이 외판재에 적용되기 시작하고 있다. 한편 내판 판넬의 경우에는 대부분 형상이 복잡하기 때문에 가공성이 크게 향상된 고성형 고강도강을 적용하고 있다. 내판재 중 승객의 안전과 관련된 멤버, 필라와 같은 구조부재는 340~440MPa급 고강도강이 주로 적용되어 왔으나, 최근에는 590MPa급 이상의 TRIP강 및 DP강이 적용되기 시작하였다. 저속충돌에서 차체를 보호하는 범퍼보강재는 고강도화가 빠르게 진행되어, 현재는 석출경화와 변태조직강화를 이용한 780MPa급 이상의 초고강도강을 주로 사용하고 있으며, 일부 차종에서는 1370MPa급까지 적용하고 있다.

참고문헌

1.P.J.Belanger, M.Milititsky, The 10th steel symposium proceedings, KIMM, 2001, pp19-36
2. 山崎一正, 第 228回 塑性加工 symposium, JSTP, 2004.pp21~28
3. ULSAB-AVC Report, 2002
4. Ravir Bhatnagar, Great Design in Steel 2004 Seminar, AISI, 2004
5. K.Sakata, Materia Japan, Vol36, No.4, 1997, pp376-378
6. S.H.Han, The 7th steel symposium proceedings, KIMM, p119-126
7. Y.Ono, IF steels 2003, ISIJ, 2003, pp290-293
8. 日刊産業新聞, 1998.2.20
9. M.Takita, La Revue de Metallurgie-CIT, 2001, pp899-909
10, M.Mehrkens, Great Design in Steel 2004 Seminar, AISI, 2004
11. C.Horbath, Great Design in Steel 2004 Seminar, AISI, 2004
12. J.R. Feketa, International Conference on AHSSS for automotive applications proceeding, 2004, pp3-10
13. S.Maeda, T.Asai, S.Arai, K.Suzuki, Tetsu to Hagane, 68, 1982, p2497