

핫스탬핑에 의한 고강도 차체 부품 개발

이두환[#] · 김태정¹ · 임종대¹ · 임희중²

Development of High Strength Steel Body by Hot Stamping

D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim

(Received March 9, 2009)

Abstract

Quenchable boron steel is a new type of high strength steel to reduce the weight of automobiles and maintain the safety conditions. Quenchable blanks can be hot-stamped and hardened in a water-cooled tool to achieve high strength. In this paper, new alloy for hot stamping is designed based on requirement of mechanical properties and two types of surface coating are investigated in viewpoints of oxidization and exfoliation. An automotive part of center pillar is manufactured by hot-stamping using Al-Si coated sheet. The performance of developed part is compared by static compression test and side impact crash test.

Key Words : Hot Stamping, High Strength Steel, Surface Coating, Center Pillar, Compression Test, Crashworthiness Test

1. 서 론

자동차의 충돌안전기술은 시트벨트(seat belt), 에어백(air-bag) 등으로 대표되는 안전장치 위주로 발전을 거듭 해왔다. 이러한 안전장치들은 충돌 시 승객의 상해를 줄여주는데 크게 기여를 하고 있다. 그러나 충돌로 인한 차체의 변형에 의해 상해를 입는 경우가 대부분으로 근본적으로는 변형이 적은 강한 차체에 대한 요구가 있어 왔다.

이러한 요구에 부응하기 위해 고장력강판(high strength steel)의 자동차 적용연구가 활발하게 진행되고 있으며 실제 많은 양의 고장력강판이 자동차에 적용되고 있다. 소재기술 측면에서 자동차용 강판은 현재 인장강도 기준으로 1180MPa 급까지 상용생산이 가능하지만 이러한 소재들을 부품화하는 데는 여러 기술적인 한계가 있다. 일반적인 프레스 성형기술로는 440MPa 급 정도가 성형한계로 평가되고 있고 최근 590MPa 급까지 시도가 되고는 있으나 스프링백(springback)과 같은 변형문

제를 해결하는 것이 여전히 과제로 남아 있다. 최근 들어 이러한 소재와 가공기술의 한계를 뛰어넘을 수 있는 고온성형, 즉 핫스탬핑(hot-stamping) 기술에 대한 연구가 활발하고 선진 자동차사를 중심으로 적용이 이루어지고 있다.

핫스탬핑 기술은 기존의 프레스(press) 성형이 냉간 상태에서 이루어지는 것과 달리 고온에서 이뤄진다. 고온에서는 소재의 연신율이 대폭 증가하기 때문에 성형성에 특별한 제약을 받지 않으며 또한 열처리효과에 의해 초고강도를 달성할 수 있는 장점이 있다. 이러한 핫스탬핑을 성공적으로 개발하기 위해서는 우선 열처리성이 우수한 소재, 특히 고온가열 시 표면산화가 적고 안정적인 피막을 유지할 수 있는 도금재의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 소재개발을 중심으로 도금재의 표면구조 및 특성을 분석하였으며 차체의 센터필라(center pillar) 시제품 제작, 단품 및 실차 충돌 시험에 대한 결과를 바탕으로 향후 고 안전 차체 개발의 가능성을 알아본다.

1. 현대자동차 금속재료연구팀

2. 하이스코 연구개발팀

교신저자: 현대자동차 금속재료연구팀, dhlee21@hyundai.com

2. 본 론

2.1 소재 개발

핫스탬핑용 소재는 기존의 자동차용 강판과는 다른 물성이 요구된다. 즉, 가열 및 냉각을 통해 초고강도화를 달성할 수 있는 열처리 특성이 요구되는데 일반적으로 적정량의 탄소와 열처리성을 확보하기 위해 보론(B)성분이 첨가된다.

또한 핫스탬핑은 900℃이상의 고온에서 이루어지는 기술이기 때문에 소재의 고온안정성이 매우 중요한데 이를 위해 도금강판을 사용하는 것이 일반적이다. 도금층은 핫스탬핑 후에도 균일하고 안정된 막을 형성해야 하고 산화피막 발생이 없어야 한다. 일부 비도금재를 사용하는 경우도 있으나 완성차 상태에서 방청품질에 대한 문제가 전혀 없을 경우에만 사용이 가능하다. 하지만 핫스탬핑 후 용접, 도장 등의 후속 공정을 위해서는 산화피막을 기계적으로 제거하는 공정이 반드시 추가되므로 비용 면에서도 효율적이지 못하다. 현재 대부분의 핫스탬핑용 소재로는 Al-Si 계 도금강판을 사용하고 있으며 최근 들어 이보다 다소 저렴한 GA(Galvanealed)도금강판을 사용하기 위한 연구가 시도되고는 있으나 고온에서의 도금층 증발, 산화피막 발생 등의 기술적인 한계로 인해 제한적으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 현재 핫스탬핑용 소재로 사용되고 있는 해외소재의 벤치마킹 결과를 기본으로 합금설계를 하였으며 도금강판 개발을 위해 Al-Si 계, GA 도금재에 대한 비교평가를 통해 관련 부품에 적합한 도금재를 개발하고자 하였다.

2.1.1 합금설계

핫스탬핑용 소재는 국내에서 개발, 생산된 적이 없는 소재로 해외소재 벤치마킹을 통해 합금설계를 하였으며 기계적 특성을 평가한 결과, 목표한 물성을 얻을 수 있었다. 사용된 소재의 화학성분은 Table 1 과 같다.

탄소강에서 열처리성을 향상시키는데 가장 중요한 성분은 탄소(C)이다[1]. 그러나 일정량 이상의 탄소함유는 취성을 동반하기 때문에 제한된다. 박강판의 경우에는 대체적으로 0.2% 이하의 탄소함량이 적절하며 인성(toughness)을 잃지 않는 것으로 보고되고 있다[2~3].

탄소 외에도 미량의 보론 첨가가 열처리성에 큰 영향을 미친다[4]. Fig. 1 은 개발재 및 비교재

Table 1 Chemical Composition (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	B
Developed	0.21	0.088	1.44	0.016	0.002	0.002
Ref. #1	0.18	0.345	1.06	0.016	0.003	0.002
Ref. #2	0.20	0.255	1.27	0.015	0.001	0.004

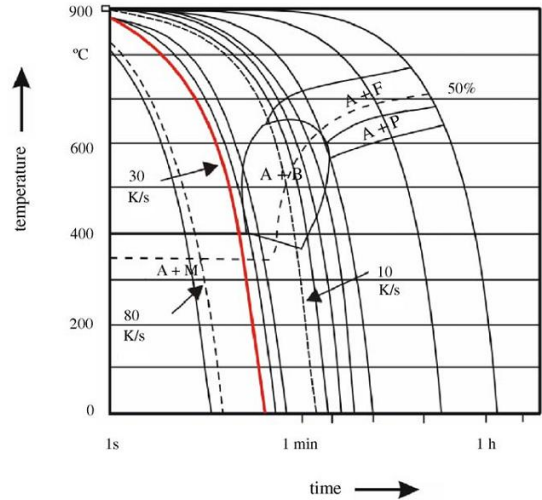


Fig. 1 CCT curve for developed alloy[7]

Table 2 Mechanical Properties

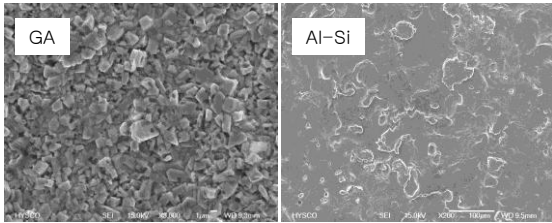
	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Hardening Exponent (n)
Developed	338	538	27.9	0.153
Ref. #1	367	502	29.7	0.167
Ref. #2	409	596	23.8	0.136

#1, #2 의 조성에 해당하는 소재의 연속냉각변태 (CCT; Continuous Cooling Transformation) 곡선이다. 보론 성분은 페라이트(ferrite) 상(phase)의 출현을 억제하는 효과가 있어 결과적으로 임계 냉각속도를 저하시킴으로써 원하는 마르텐사이트(martensite) 상을 용이하게 얻게 해준다[5~6].

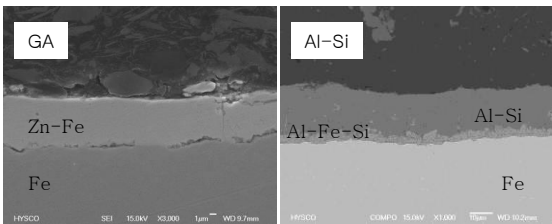
CCT 곡선에서 개발재의 임계 냉각속도는 27~30℃/s 이다. 핫스탬핑 시 냉각속도가 이 보다 느릴 때는 마르텐사이트(M)상 중에 베이나이트(B)상이나 페라이트(F), 펄라이트(P)상이 출현하게 되어 목표로 하는 강도나 경도를 얻을 수 없으므로 적절한 냉각방법을 통해 임계 냉각속도 이하로 급냉을 해야 한다.

Table 3 Coating Properties

	Coating weight(g/m ²)		Fe composition(%)		Powdering (%)
	Front side	Back side	Front side	Back side	
GA	48.0	68.2	13.6	11.6	17.1
Al-Si	63.3	71.7	-	-	-



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Surface of GA and Al-Si coated layer(SEM), (b) Section of GA and Al-Si coated layer(SEM)

핫스탬핑 소재에 있어서는 원소재의 물성은 크게 중요하지 않다고 할 수 있다. 다만 합금설계를 통해 비교재와 유사한 특성을 용이하게 판단할 수 있는 지표로써 활용하였으며 인장시험 결과는 Table 2 와 같다.

2.1.2 도금재 개발

핫스탬핑용 도금소재는 Al-Si계의 사용이 대부분이며 GA도금재의 경우에는 제한적으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 Al-Si계와 저가의 GA재를 동시에 개발하기 위해 소재를 제작하였고 도금부착량, 합금화도, 파우더링성(powdering) 등의 도금 특성을 평가하였다(Table 3).

GA 재의 도금부착량은 전면(front side) 대비 이면(back side)에서 부착량이 다소 높게 나타나고, 합금화도는 부착량이 낮은 전면에서 높게 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 Fe 합금화도는 7~14%

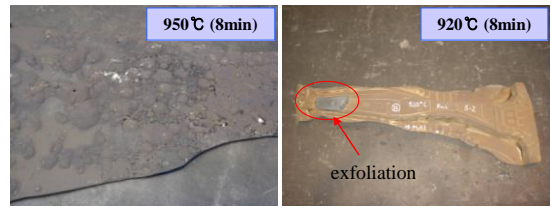


Fig. 3 GA-coated steel after heating test

범위내에 있으므로 제작된 소재는 양호하다고 할 수 있으며 또한 파우더링은 20%미만으로 우수하게 나타나고 있다. Al-Si 재의 도금 부착량은 전면, 이면 모두에서 GA 재에 비해 다소 많은 양으로 분석되었다.

Fig. 2 는 도금층 표면과 단면층을 전자주사현미경(SEM)으로 관찰한 결과이며 GA 재의 경우, 표면에서 균일한 δ상이 잘 발달되어 있고 약 8~10 μm두께의 균일한 도금층이 형성되어 있음을 알 수 있다. Al-Si 재의 경우는 Fe 층과 Al-Si 층 사이에 화합물층이 존재함을 알 수 있는데 Al-Fe-Si의 화합물로 분석됐다.

2.2 소재 가열 시험

핫스탬핑 공법으로 센터필라 부품을 제작키로 하고 GA재와 Al-Si도금재의 고온 안정성에 대한 평가를 실시하였다. 핫스탬핑을 하기 위해서는 약 0.2% 탄소를 함유하는 강의 오스테나이트(austenite) 온도역인 950°C까지 소재 블랭크(blank)를 가열하게 되는데 이 온도구간에서 일정시간 유지 후에 도금층의 표면에서 박리(exfoliation)가 일어나거나 도금층이 증발한다면 핫스탬핑용 소재로 적합치 않다.

2.2.1 GA 도금재

GA재의 경우, 900~950°C 가열실험에서 도금층이 부분 박리되거나 증발되는 현상이 나타났다(Fig. 3). 특히 950°C, 8분 가열실험에서는 표면에 극심한 박리현상으로 시제품 핫스탬핑을 진행할 수 없어 중단을 했다.

2.2.2 Al-Si 도금재

Al-Si 도금재를 950°C까지 가열하였으며 GA도금재와는 달리 가열 및 핫스탬핑 후에도 도금층의 표면박리는 관찰되지 않았다(Fig. 4).

본 실험을 통해 GA도금재의 경우 고온에서 도



Fig. 4 Al-Si coated steel after heating test

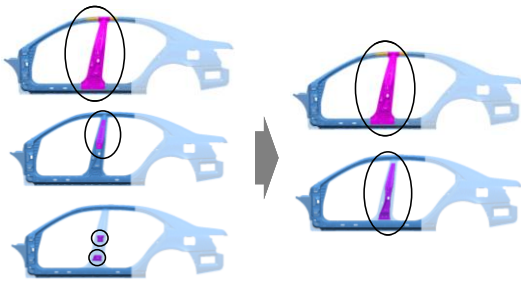


Fig. 5 New design concept of hot-stamping center-pillar Assembly

금표면이 비교적 불안정하여 핫스탬핑 소재로는 부적합하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 Al-Si도금재에 비해 저가소재임을 고려할 때 향후에 이를 개선하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

2.3 부품 제작

2.3.1 부품설계 및 제작

센터필라 부품은 차량의 측면충돌 시에 승객을 보호하는 가장 중요한 구조부품이기 때문에 충돌 시 변형을 최대한 억제할 수 있는 구조 및 재료 선정이 중요하다. 본 연구에서는 설계단계에서부터 핫스탬핑의 장점을 살리고 부품 수를 줄이기 위하여 기존 보강재(reinforcement)를 통합하고자 하였으며 Fig. 5 와 같이 기존의 센터필라 어셈블리(assembly)가 4 개 부품인데 비해 핫스탬핑에서는 보강재를 통합함으로써 2 개 부품으로 줄일 수 있었다.

소재 가열실험을 통해 핫스탬핑 소재로는 Al-Si 도금재를 선정하였다. 블랭크의 가열온도는 실험을 통해 표면 상태가 양호하고 오스테나이트 조직으로 존재하는 930°C를 목표로 하였다.



Fig. 6 Appearance of hot-stamping center-pillar

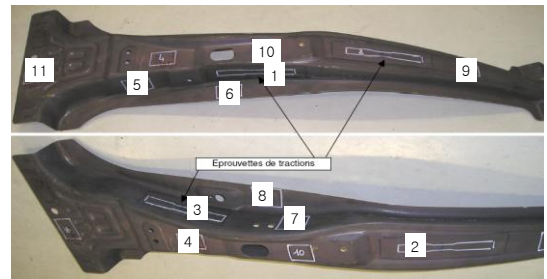


Fig. 7 Positions for hardness test of center-pillar

핫스탬핑은 블랭크 제작, 가열로 내에서 블랭크 가열, 금형내 투입, 성형후 유지(냉각) 등의 일련의 연속 공정으로 이루어진다. 사용된 프레스는 800 톤으로 일반적인 냉간성형용에 비해 매우 작은 용량의 프레스로도 핫스탬핑이 가능하다. 또한 부품의 형상에 따라 간접, 직접 핫스탬핑으로 나누기도 하는데 본 연구에서는 예비성형 없는 직접 핫스탬핑을 하여 센터필라 부품을 제작하였다 (Fig. 6). 일반적으로 핫스탬핑 공정으로 제작된 부품은 스프링백(springback) 량이 작다. 이는 고온에서 성형되어 잔류응력이 크지 않기 때문인데 실제 측정 결과 95.7%의 치수 정밀도를 얻었다.

2.3.2 경도 실험

인장시편 채취가 곤란하므로 경도시험을 통해 핫스탬핑 부품의 성능을 간접적으로 확인하였다. 경험적으로 HRC 45~50 수준의 로크웰 경도값이면 인장강도 환산시 1480MPa 이상의 강도를 가진다 [8]. 시제품의 각 부위별 경도시험 결과 목표물성을 상회함을 알 수 있다(Table 4, Fig. 7).

2.3.3 미세 조직 실험

핫스탬핑은 기본적으로 열처리에 의해 고강도를 얻는 과정이며 급냉조직인 마르텐사이트 조직으로 변태가 이뤄짐에 의한 것이다. 따라서 미세

Table 4 Hardness test results (HRC)

Position	Sample 1	Sample 2	Sample 3
1	46.2	47.2	47.7
2	42.3	41.5	42.2
3	46.9	47.0	48.0
4	46.0	45.5	45.1
5	47.1	46.6	46.8
6	41.6	42.3	43.9
7	48.1	47.8	46.9
8	46.2	46.1	44.8
9	44.8	45.4	47.1
10	47.5	44.5	45.4
11	47.6	46.8	46.5

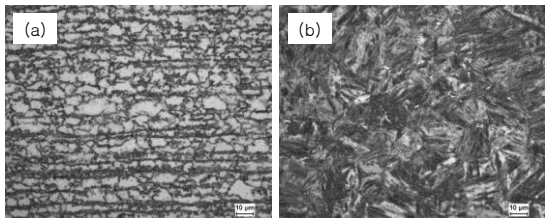


Fig. 8 Microstructures of (a) before hot-stamping, (b) after hot-stamping

조직을 관찰함으로써 핫스탬핑이 제대로 됐는지를 확인할 수 있다. Fig. 8 은 핫스탬핑 전후의 미세조직을 보여주고 있으며 페라이트, 펄라이트 혼합조직에서 마르텐사이트로 조직변태가 일어난 것을 알 수 있다.

2.3.4 도금층 표면분석

본 연구에서는 고온에서 안정적인 Al-Si 도금재를 사용했는데 핫스탬핑 후 표면 도금층의 구조 및 성분 등을 분석하고 비교하였다. Fig. 9 는 개발재와 비교재 2 종의 핫스탬핑 후 도금층의 단면 전자현미경 사진이다. 도금층 내 존재하는 Si-rich phase 와 Al-Si-Fe 의 합금층은 개발재와 비교재가 유사한 경향을 보이고 있다. 비교재 #2 에서 도금층이 다소 두껍게 나타나는 것은 핫스탬핑 전 원소재의 도금층 두께에 기인한 것이다.

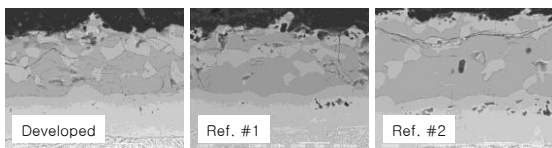


Fig. 9 SEM observations of coated layer

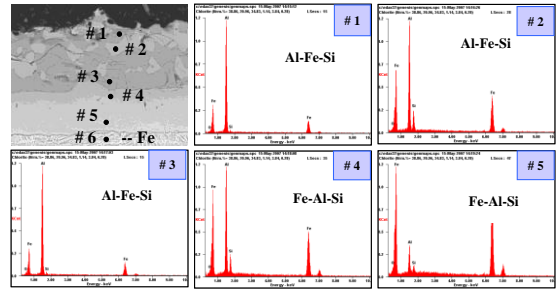


Fig.10 EDS Analysis of coated layer

위에서 보듯이 도금층은 단일 구조가 아닌 다층 구조를 가지는 것을 알 수 있고 미소성분분석기(EDS)를 이용하여 각 층의 구성 성분을 분석하였다. 모재(#6)로부터 멀수록(#1,#2,#3) Al-Fe-Si 계, 가까울수록 (#4,#5) Fe-Al-Si 계의 화합물로 분석되어 Fe의 확산이 있었음을 알 수 있다(Fig. 10).

2.4 성능 평가

2.4.1 단품 정압축 시험

핫스탬핑 센터필라 부품의 단품성능을 평가하기 위해 30 톤(ton) UTM 에 전용 지그를 장착하여 3 점 압축방식의 정압축 시험을 실시하였고, 현재 양산중인 센터필라 부품을 보강재 유무에 따라 비교시험을 하였다.

시험장비는 Fig. 11 과 같고 시험결과는 Fig. 12 에 표시하였다. 기존 프레스 부품(③)과 핫스탬핑 부품(④)을 비교하면 최대하중 기준으로 567kgf 에서 2255kgf 로 398% 향상되었다. 보강재가 삽입된 경우에는 기존 프레스 부품(①)과 핫스탬핑 부품(②)을 비교하면 최대하중 기준으로 690kgf 에서 3924kgf 로 569% 강화되었다. 실험 결과, 핫스탬핑재는 기존 프레스품에 비해 약 4~6 배의 정압축 강도를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 보강재를 제거한 경우(④)에도 기존 보강재 포함된 프레스품(①) 대비 327%의 성능을 보여 향후 최적 설계를 통해 대폭적인 경량화까지 가능함을 예상할 수 있다.

2.4.2 실차 충돌시험

상기 정압축시험 결과를 바탕으로 실차 충돌시험에 필요한 차량을 제작하여 북미 IIHS 측면 충돌 시험을 실시하였고, 생존공간이 50mm 이상 개선되는 것을 확인하였다. 이로 인해 앞좌석 승객의 골반 상해치가 Poor 에서 Acceptable 로 개선되고 차체 성능이 Marginal 에서 Acceptable 로 향상되었



Fig.11 Test jig for compression test (30ton UTM)

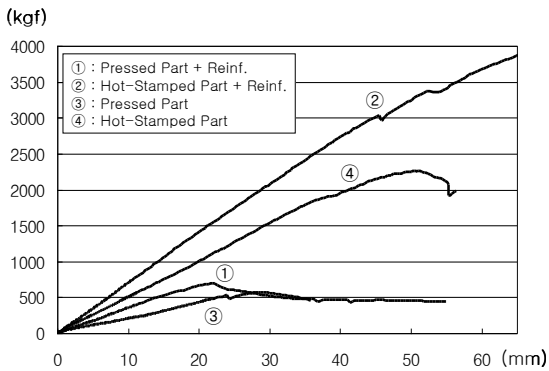


Fig.12 Static compression test of hot stamped part

다. 이 같은 결과는 충돌 성능을 한 단계 상향시키는 결과로서 측면 충돌 성능이 4★에서 5★로 개선되었다.

3. 결론

핫스탬핑 기술은 상기의 결과에서도 알 수 있듯이 더욱 강화된 충돌법규와 상품성 시험에 대응할 수 있는 매우 효과적인 차체 보강 기술이다.

(1) 개발된 Al-Si 계 도금강판은 950℃에서도 표면산화나 도금층의 증발없이 안정된 표면품질이

유지되어 국산개발 핫스탬핑용 소재의 가능성을 인할 수 있었다. 반면, GA 강판은 도금층의 증발 또는 박리발생으로 부적합하다.

(2) 핫스탬핑 후 시제품의 부위별 경도시험 결과 HRC45 수준으로 환산 시 1480MPa 급의 인장강도를 달성하였다.

(3) 정적 압축강도시험을 통해 핫스탬핑은 기존 프레스폼 대비 4~6 배의 성능을 확인하였고 최적설계를 할 경우 추가적인 경량화도 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] G. Krauss, 1990, Steels, Heat treatment and processing principles, ASM international.
- [2] A. R. Marder, G. Krauss, 1967, Trans. ASM, Vol. 60 (651).
- [3] A. R. Marder, G. Krauss, 1978, Hardenability Concepts with Applications to Steel, AIME, Vol. 238.
- [4] A. K. Sinka, 2003, Physical Metallurgy Handbook, McGraw Hill Handbooks, pp. 1.23,13.123.
- [5] L. Vaissiere, 2002, Development of Pre-Coated Boron Steel for Applications on PSA Peugeot Citroen and RENAULT Bodies in White, SAE Technical paper 2002-01-2048.
- [6] X. Bano, J. P. Laurent, Heat treated boron steels in the automotive industry, 39th Mechanical working and Steel Processing Conference Proceedings, Vol. XXXV.
- [7] M. Merklein, J. Lechler, 2006, Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels, J. of Mat. Proc. Tech. Vol. 177(1-3), pp 452~455.
- [8] G. Krauss, 1998, Understanding the Heat Treatment, Microstructure and Performance of High-Strength Hardened Steels, 1stfd International Automotive Heat Treating Conference, pp. 125~131.