

레이저 열처리를 이용한 핫스탬핑 부품의 국부 연화 기술 연구

김경보[#] · 정연일¹ · 김태정¹

Local Softening of Hot-stamped Parts using a Laser Heat Treatment

K. B. Kim, Y. I. Jung, T. J. Kim

(Received June 9, 2015 / Revised August 7, 2015 / Accepted August 18, 2015)

Abstract

AHSS (Advanced High Strength Steels) has been increasingly employed by global automotive OEMs in order to satisfy strengthened regulations and reduce weight for fuel efficiency. Hot stamping using boron steels in AHSS increases not only formability but also strength. The typical hot-stamped automotive part is the center pillar that is critical for vehicle side impact. However, the hot-stamped part can be risky for the passenger safety caused by brittle fracture under a vehicle collision. The high power diode laser is suitable for the heat treatment giving AHSS increased elongation that prevents brittle fracture in car crash. Therefore, local softening by laser heat treatment for energy absorption area on the hot-stamped part improves crash-worthiness.

Key Words : Hot Stamping, Laser Heat Treatment, Local Softening, Center Pillar, Vehicle Side Impact

1. 서 론

자동차의 충돌 성능을 확보하기 위해 주요 충돌 부위에 핫스탬핑(hot stamping) 부품이 확대되고 있는 추세이다. 그러나 핫스탬핑 공정은 900°C 이상으로 가열한 후 급냉을 통해 인장강도 1470MPa 이상을 확보할 수 있는 공정이지만 부품의 낮은 연신율로 인해 충돌 시 파단에 의한 급격한 충돌 성능 저하를 가져올 수 있다. 특히 측면 충돌 시 대표적인 침입 저지 부품인 센터 필라(center pillar) 부품의 경우, 주요 변형 부위인 센터 필라 하단부의 연신율 확보가 필요하다. 이에 따라 충돌 시 변위량이 큰 부위에 대해서는 국부적으로 연화시켜 충분한 연신율을 확보하는 국부 연화 핫스탬핑 공정이 일부 적용 중에 있다. 국부 연화 핫스탬핑 공정에서는 고온 성형 후 급냉 시 하단부의 냉각 속도를 늦춰 강도 하향 및 연신율을 확보하고 있으며 이를 위해 하단부의

금형은 가열 장치 및 냉각수 제어를 통해 상단부보다 높은 약 400°C의 온도를 유지하고 있다.

그러나 이러한 금형 방식 국부 연화 핫스탬핑 공법의 경우 냉각수 제어 방법 및 금형과 소재의 밀착 정도에 따라 목표 물성 제어가 어려운 단점이 있다. 또한 400°C 이상 고온으로 유지되기 때문에 핫스탬핑 소재의 산화 방지를 위한 표면의 알루미늄-실리콘(Al-Si) 도금 성분이 고온 성형 중 금형에 소착되어 성형 품질을 저하시키는 등 금형 보수와 관련한 문제점을 야기시키고 있다. 본 연구에서는 이러한 금형 방식 국부 연화 핫스탬핑 공정보다 안정적인 목표 물성 구현을 위해 레이저(laser) 열처리 공정을 이용한 국부 연화 핫스탬핑 공정을 개발한다. 이를 위해 센터 필라 부품을 대상으로 국부 연화 위치 최적화를 수행하고 목표 물성 확보를 위한 레이저 열처리 온도 및 빔(beam) 이송 속도 최적화에 대한 연구를 수행한다.

1. 현대자동차 자동차강판개발TFT

Corresponding Author : Hyundai Motor Company, Sheet Metal Development TFT, E-mail: kbk@hyundai.com

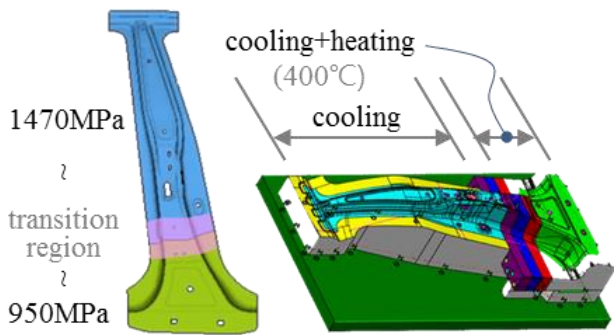


Fig. 1 Target tensile strength in center pillar and die setup for local softening hot stamping process

2. 국부 연화 핫스탬핑

2.1 금형 가열 국부 연화 핫스탬핑

센터 필라 부품의 하단부 연신율을 확보하기 위해 Fig. 1과 같이 고온의 블랭크(blank)를 성형한 후 금형 냉각 시 하단 금형 내에는 기존 냉각수 라인 외에 열선을 삽입하여 400°C 온도를 유지할 수 있게 제어하고 있다[1~2].

그러나 온도 제어 방식 및 금형 간 간격 편차에 따라 목표 물성 제어가 어렵게 된다. 실제 금형 방식 국부 연화 방식의 경우, 금형 제작 기간 및 품질 확보 기간이 일반 핫스탬핑 금형에 비해 2배 이상으로 소요된다.

2.2 레이저 열처리 국부 연화 핫스탬핑

본 연구에서는 기존 금형 가열 방식의 문제점을 개선하기 위해 전체 부위가 1470MPa 이상의 인장강도를 가지는 일반 핫스탬핑 부품에 레이저를 이용하여 선택적으로 연화시키는 공정을 개발한다. 이렇게 되면 하단부 냉각 금형을 400°C 이상으로 유지할 필요가 없으므로 금형 소착 문제 개선 및 하단부 연성을 안정적으로 확보할 수 있다. 그러나 이러한 레이저 열처리를 이용한 국부 연화 핫스탬핑 공정을 개발하기 위해서는 부품의 국부 연화 위치 최적화 및 열처리 공정 최적화가 필요하다[3].

3. 레이저 열처리 최적화

3.1 개요

센터 필라 부품의 경우 측면 충돌 시 변형량 및 파단 여부에 따라 충돌 성능에 큰 영향을 미친다.

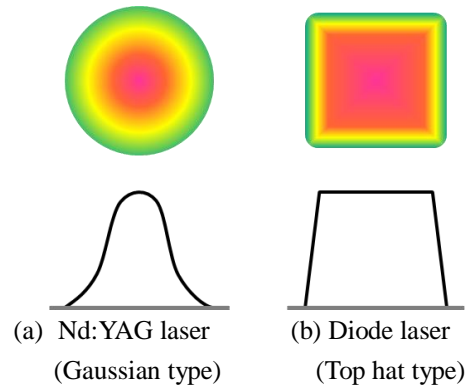


Fig. 2 Characteristics of laser beam distribution for Nd:YAG and diode laser systems

그러므로 레이저를 통한 연화 영역 및 목표 물성 선정 시 변형량 및 파단 여부를 고려하여 최적화하여야 한다. 먼저 연화 후 목표 물성에 대한 설정이 필요하다. 본 연구에서는 충돌 성능 및 경쟁사의 관련 특허[4] 등을 고려하여 연화부의 목표물성을 950 ± 50MPa로 설정하였다. 즉, 센터 필라 부품의 상단부는 1470MPa 이상의 강도를 하단부는 약 950MPa를 가지는 부품을 개발하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 일반 핫스탬핑 공법으로 가공된 1470MPa급의 강도를 가지는 부품에 레이저 열처리를 하여 하단부를 950MPa급으로 연화시키기 위한 레이저 공정 최적화를 수행한다.

본 연구에서는 다이오드 레이저를 이용한 연화 공법을 적용하였다. Nd:YAG, 파이버, 디스크 레이저 등으로 연화를 하게 될 경우 Fig. 2(a)처럼 열원이 Gaussian 분포를 가져 중앙부에서 멀어질수록 빔의 에너지 밀도가 감소하여 균일한 열처리가 어렵다. 하지만 다이오드 레이저를 이용하게 되면 Fig. 2(b)처럼 Top Hat 분포 특성으로 인해 빔의 조사 영역 전체가 균일한 에너지 밀도를 가져 부품의 균일한 열처리가 가능하다.

다이오드 레이저 열처리 공정의 변수로는 빔의 입열량을 결정하는 변수인 목표 온도(T) 및 빔의 이송 속도(v)를 선정하였다. 목표 온도 제어를 위해서 Fig. 3과 같이 실시간 온도 측정이 가능한 파이로미터(pyrometer)를 설치하여 신뢰성을 향상시켰으며 빔의 면적이 34×8mm²인 4kW급 대용량 다이오드 레이저를 이용하였다.

열처리 부위의 연화를 위한 서냉 효과(tempering)를 유도하기 위해 추가 냉각 장치 없이 공기 중에서

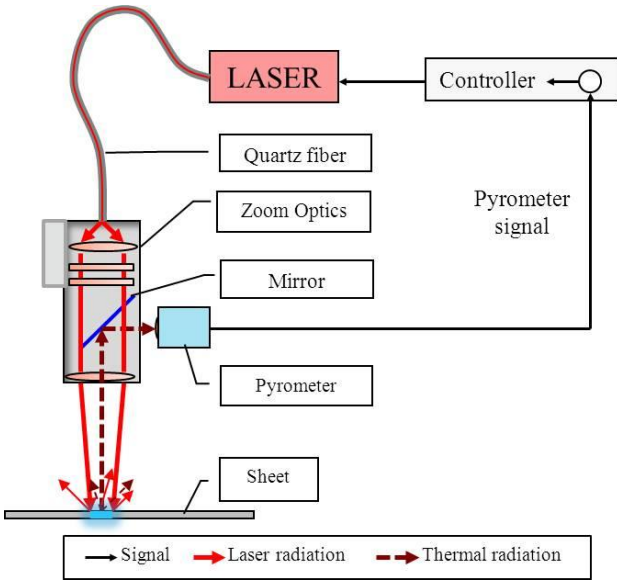


Fig. 3 Diagrams of diode laser systems

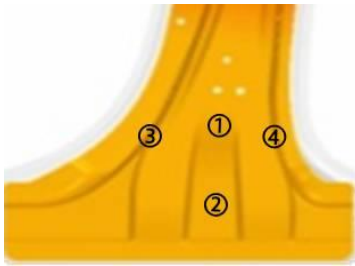


Fig. 4 Tensile test specimens from the heated zone

냉각시켰으며 6축 로봇에 연동된 빔 헤드를 이송시켜 복잡한 부품 형상에도 자유롭게 열처리가 가능하게 하였다[5~7].

3.2 레이저 열처리 조건 최적화

레이저 열처리를 위한 목표 온도(T)는 템퍼링 효과가 있는 600℃~800℃ 사이에서 50℃ 간격으로 설정하였으며 빔 이송 속도(v)는 10~30mm/s까지 5mm/s 간격으로 열처리를 실시하여 연화 효과를 평가하였다. 열처리 후 강도 평가를 위해 Fig. 4와 같이 열처리된 부위에서 4개의 시편을 채취하였으며 인장시험을 실시한 후 평균값을 취하였다.

목표 물성인 인장강도 950MPa ± 50MPa를 만족시키기 위한 조건별 인장 시험 결과를 Fig. 5에 정리하였다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 온도가 낮고 빔 이송 속도가 빠를수록 입열량이 감소해 연화 정도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 결과적으로 가열 온도 700℃에서 빔 이송 속도가 20, 25mm/s 일 때

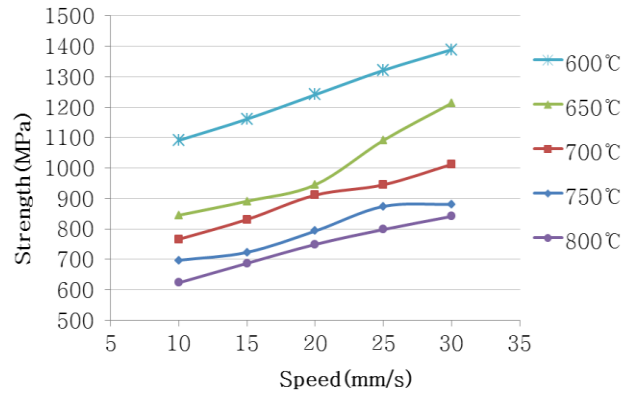


Fig. 5 Tensile strength for various heat treatment conditions

그리고 750℃에서 속도가 20mm/s 일 때 목표 물성인 950 ± 50MPa를 만족시켰다. 빔 이송 속도는 생산성과 직결되는 중요한 요소로 목표를 만족하는 3개 조건 중 가장 빠른 온도 700℃ 및 속도 25mm/s로 열처리 최적 조건을 선정하였다.

3.3 미세 조직 분석

레이저 열처리를 통한 강도 하향 효과를 분석하기 위해 선정 온도 조건인 700℃에서 빔 이송 속도에 따른 미세 조직 변화를 측정하였다.

레이저 열처리 전 원소재의 미세 조직은 마르텐사이트 단상임을 확인 하였고, 침상 형태의 조직을 나타내었다(Fig. 6a). 700℃ - 30mm/s 조건으로 열처리 시, 열처리 전의 미세조직과 유사하게 침상 마르텐사이트 조직이 관찰 되었다(Fig. 6b). 이는 30mm/s 속도 조건이 상대적으로 빠르기 때문에 미세조직 변화 및 연화 정도가 미미하고, 따라서 Fig. 5와 같이 목표 물성보다 높은 1000MPa 이상의 인장강도를 갖는 것으로 판단된다. 700℃ - 25mm/s 조건에서는 이전 조건과 같이 침상 마르텐사이트가 관찰되었지만, 30mm/s 조건에 비해 일부 조직이 구상화 되었음을 확인할 수 있었다(Fig. 6c). 일반적으로 마르텐사이트 강이 700℃ 의 온도에서 충분한 시간 템퍼링되면 연한 조직인 페라이트가 생성 및 재결정되어 구상화된 조직을 나타내는데[8], 이로 인해 강도가 낮아져 목표 물성에 도달했을 것으로 예상된다. 700℃ - 10mm/s 조건에서는 25mm/s 조건에 비해 많은 부분의 조직이 구상화 되었음을 확인하였고(Fig. 6d), 따라서, 목표 물성보다 낮은 780MPa 수준의 인장강도를 나타내는 것으로 판단된다.

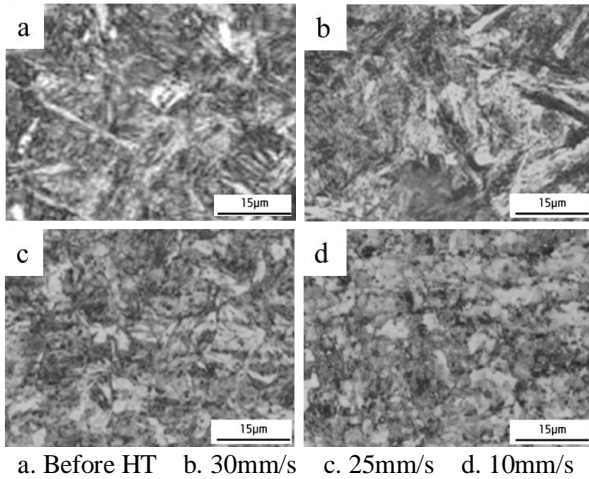


Fig. 6 Microstructures before and after laser heat treatment(700°C) in the hot stamping parts

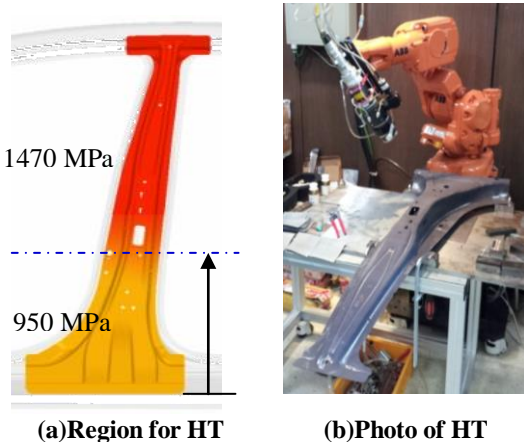


Fig. 7 Definition of height(h) for heat treatment and heat treated center pillar by 6 axis robot

3.4 연화 영역 최적화 및 부품 제작

충돌 성능 향상을 위해서는 앞의 3.2장을 통해 최적화한 레이저 열처리 공정 조건 외에도 연화 영역에 대한 최적화가 필요하다. 부품의 형상이 복잡하기 때문에 Fig. 7과 같이 하단부에서 일정한 높이(h)까지 목표 물성으로 연화하는 것을 목표로 하였다. 높이 h는 200~350mm 범위에 대해 50mm간격으로 4가지 경우에 대해서 단품을 제작하였으며 충돌 평가를 통해 최적의 연화 영역을 선정하게 된다.

4. 충돌 성능 평가

4.1 단품 충돌 해석

부품 연화 후 충돌 성능 검증을 위해서는 실차를

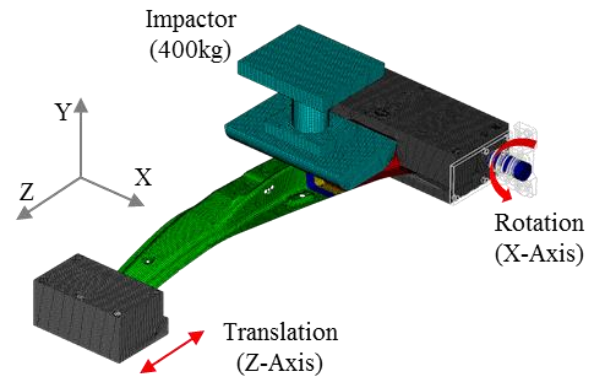


Fig. 8 Models of finite element analysis for side impact test in B pillar

이용한 충돌테스트가 가장 신뢰성이 높지만, 최적화 연구와 같이 다수의 시험이 요구되는 경우에는 적합하지 않다. 이에 본 연구에서는 낙하 충격 시험기를 이용하였으며 임팩터(impactor) 높이를 가변시켜 다양한 입력 에너지에 대한 충돌 성능 평가가 가능하다.

본 연구에서는 충돌 시험 조건을 선정하기 위해 LS-DYNA를 이용해 충돌 해석을 실시 하였으며 차량 충돌 시와 유사한 부재의 변형을 모사하기 위한 경계조건으로 Fig. 8에서 보는 바와 같이 부품 상단부엔 1축 병진 자유도를 하단부엔 회전 자유도를 부여하였다.

국부 연화된 센터 필라 부품의 변형량 및 파단 여부를 평가하기 위해서는 실차 충돌 시 입력되는 충돌 에너지와 유사한 충돌 하중 상태에서 평가가 되어야 한다. 이를 위해 실차 충돌 상태에서의 센터 필라 부품의 변형량과 유사한 변형량을 보이는 임팩터의 자유 낙하 높이를 선정하는 해석을 수행하였다. 임팩터의 질량은 400kg 이며 충돌 지점은 실제 법규 테스트에서 충돌하는 지점과 동일한 부품 하단에서 300mm 높이 지점이다. 차량의 종류에 따라 측면 충돌 시 센터 필라 부품의 변형량은 200~250mm 범위내의 수치를 보이므로 이러한 변형량을 보이는 임팩터의 높이를 해석을 통해 선정하였다. Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 임팩터의 높이가 400~500mm일때 센터 필라 부품의 최대 변형량이 212~223mm 범위를 보이므로 단품 충돌 시험시 임팩터의 높이를 각각 400, 500mm로 설정하여 실제 부품의 변형량 및 파단 여부를 검증한다.

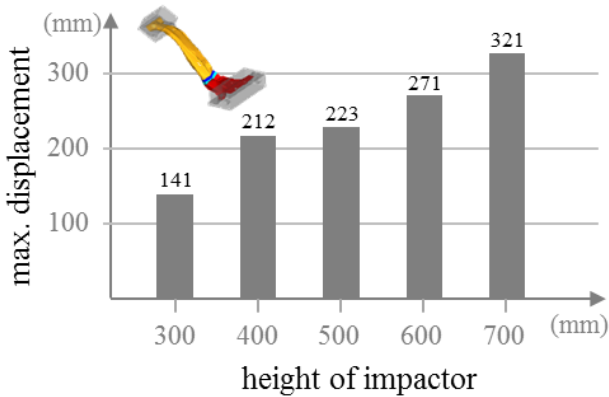


Fig. 9 Models of Finite Element Analysis for side impact test in B pillar

4.2 단품 충돌 시험

충돌 성능과 관련이 높은 취성 파단 유무를 검증하기 위해 앞에서 설명한 바와 같이 단품 대상으로 자유 낙하 시험을 이용하여 성능 평가를 실시하였다. 실제 측면 충돌은 주변 부품으로의 하중 전달 및 상대 변형을 동반하기 때문에 단품의 정확한 성능 평가를 위해 Fig. 8과 같이 센터 필러 상단부의 루프 사이드와 하단부의 실 사이드부 연결 구조를 모사한 지그를 설계하였다. 상단부 지그엔 병진 운동 구현을 위해 슬라이딩이 가능한 레일 구조를 하단부 지그엔 회전 운동을 위해 베어링과 부시를 이용해 회전축 구조를 가지는 지그를 제작하여 시험 장비를 구축하였다. 임팩터 낙하 시 장비의 마찰력 및 지그 셋팅에 의해 ±3% 수준의 미세한 변형량 오차가 발생하여, 각 조건 별로 3회 시험 실시 후 평균값을 취하였다.

4.2.1 국부 연화 영역 최적화 평가

앞의 3.4장에서 설명한 바와 같이 충돌 성능을 고려한 최적 연화 영역을 결정하기 위해서 연화 영역 높이(h)가 200, 250, 300, 350mm인 경우에 대해서 낙하 충격 시험기(임팩터 높이 400mm)를 이용한 사전 평가를 수행하였다(Fig. 7(a)). 부품의 변형량은 낙하 충돌 시 임팩터가 부품에 접촉한 최초 Y축 좌표값(Fig.8 참조)을 기준점으로 설정 후 변형 후 최저점까지의 변위를 위치 센서를 이용하여 측정하였다. Table 1에 표시한 바와 같이 연화 영역에 따라 충돌 성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 연화부 높이(h)가 200, 250, 350mm 일 때 취성 파단이 발생

Table 1 Test results of different softening zones

Softening Zone (h)	Deformation (mm)	Crack
200mm	291	Yes
250mm	268	Yes
300mm	214	No
350mm	289	Yes

Table 2 Results of side impact test for B pillar

	Height (mm)	Classification	Deformation (mm)	Crack
a	400	Hot stamping	186	Yes
b		Laser softening	220.8	No
c	500	Hot stamping	209.3	Yes
d		Laser softening	233.8	No
e	600	Hot stamping	240.8	Yes
f		Laser softening	284.6	Yes

하여 실차 충돌 시 최대 변형량인 250mm 이상 변형량이 발생하였다. 본 연구의 목적이 충돌 시 취성 파단 방지이므로 크랙이 발생하지 않은 조건인 300mm 영역의 높이(h)를 선정하여, 이후 충돌 성능 평가는 300mm까지 연화된 부품을 기준으로 수행하였다.

4.2.2 단품 충돌 평가 결과

앞의 4.2.1장에서 선정된 연화 영역에 대해서 차종별 안정된 성능을 검증하기 위해 충돌 에너지를 다양화하여 충돌 시험을 수행하였다. 4.1장의 해석 결과를 바탕으로 임팩터의 높이가 400, 500mm 인 경우에 대해서 실험을 하였으며 파단 발생 유무를 검증하기 위해 600mm에 대해서도 추가 실험을 하였다. 또한, 상대 비교를 위해 국부 연화 기술을 적용하지 않은 일반 핫스탬핑 사양과 비교 평가를 실시하였다.

Table 2 및 Fig. 10에 표시한 시험 결과와 같이 임팩터 높이가 400mm 및 500mm인 조건에서 레이저 연화 부품(b, d)은 파단이 발생하지 않았지만 일반

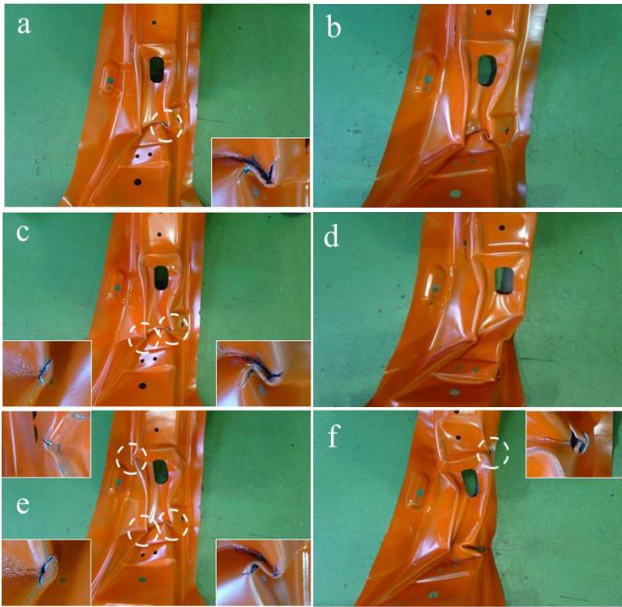


Fig.10 Pictures of side impact test for B pillar

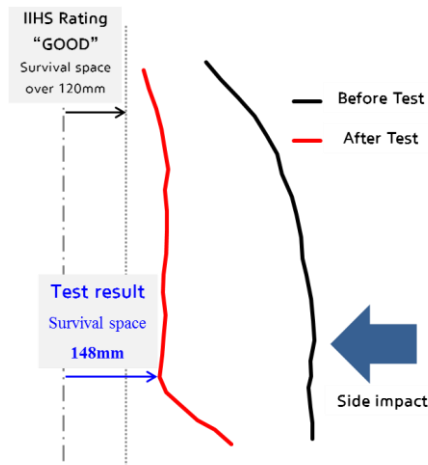


Fig.11 The test result for vehicle side impact

핫스탬핑 부품은 취성 파단이 관찰되었다. 가장 가혹한 조건인 600mm에서는 두 사양 모두 파단이 발생하였고 일반 핫스탬핑 부품의 경우 가혹한 조건일수록 파단 부위 및 정도가 심각해지는 걸 확인할 수가 있었다.

4.2.3 실차 충돌 평가 결과

본 기술의 성능 검증을 위해 레이저 열처리를 이용하여 제작한 국부 연화 센터 필라를 적용한 차량을 제작하여 전세계 측면 충돌 시험 중 가장 가혹하다고 평가 받고 있는 미국 고속 도로 안전 보험

협회(IIHS)의 시험 조건과 동일한 평가를 실시하였다. 시험 후 센터 필러 부품 분석 결과 낙하 충돌 시험기를 이용한 단품 평가 결과(Fig. 10)와 동일하게 취성 파단 문제가 발생 하지 않았다. Fig. 11은 차량의 정면에서 본 센터 필러 부의 프로파일을 나타낸 그래프로 시험 전, 후의 변형 거동을 센서를 이용하여 측정된 데이터이다. 상기 프로파일의 변형량 분석 결과 IIHS의 등급 평가 시 중요한 판단 기준인 승객 생존 공간 148mm를 확보하여, 최고 수준인 GOOD(승객 생존 공간 120mm 이상) 안전 등급을 획득 하였다.

5. 결론

대용량 다이오드 레이저를 이용하여 핫스탬핑 센터 필러 국부 연화 공법을 구현하는 기술 개발 및 충돌 성능 평가를 통한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 자동차 부품에 다중강도를 부여할 수 있는 레이저 열처리 방식의 국부 연화 공법을 개발하였다. 충격 에너지 흡수부의 성능을 향상 시킬 수 있도록 $950 \pm 50 \text{MPa}$ 의 물성을 가지는 레이저 열처리 조건은 목표 온도 700°C 에 빔 이송 속도 25mm/s 이다.

(2) 레이저 열처리 연화 메커니즘 규명을 위해 미세 조직을 분석하였다. 연화 전에는 마르텐사이트 조직의 1470MPa 급의 조직을 보이며 열처리 이후에는 뜨임처리된 마르텐사이트 조직을 보이고 있다.

(3) 실차 평가 전 단품으로 사전 성능 검증이 가능한 센터 필러 전용 시험법을 개발하였다. 또한, LS-DYNA를 이용하여 충돌 해석을 실시하여 실차 평가 조건과 유사한 임팩터의 높이를 선정하는 등 시험 조건을 결정하였다.

(4) 센터 필라 부품의 하단부 변형량을 최소화 하기 위해 연화 영역을 최적화하였다. 하단부 300mm영역을 연화할 경우 충돌 시 센터 필라 부품의 취성 파단이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다.

(5) 차급별 입력되는 충돌 에너지를 고려하여 임팩터의 높이를 400~600mm로 설정하여 단품 평가를 실시하였다. 국부 연화되지 않은 일반 핫스탬핑 부품 대비 파단 발생 없이 안정적인 충돌 에너지를 흡수함을 알 수 있었으며 실차 평가 결과에서도 취성 파단을 방지하였고 IIHS 법규 기준 GOOD 등급의 성능을 확보하였다.

REFERENCES

- [1] A. Ghiotti, D. Pellegrini, S. Bruschi, 2009, Feasibility of Producing Tailored Microstructures in Hot Stamped Sheet Components, IDDRG, pp. 941~950.
- [2] Lenze, F.J., Banik, J., Sikora, S., 2008, Applications of Hot Formed Parts for Body in White, IDDRG, pp. 511~519.
- [3] R. Neugebauer, S. Scheffler, R. Poprawe, A. Weisheit, 2009, Local Laser Heat Treatment of Ultra High Strength Steels to Improve Formability, German Academic Soc. Prod. Eng, Vol. 3, pp. 347~351.
- [4] L. Gehringhoff, H. Knaup, 2003, B-Column for Motor Vehicle, United States Patent, US6524404 B2.
- [5] O. Hedegård, M. Åslund, 2011, Tempering of Hot-Formed Steel using Induction Heating, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology.
- [6] W. J. Sim, H. J. Jeon, Y. H. Park, M. H. Song, K. B. Kim, 2015, Evaluation of Mechanical Characteristic for Softening Heat Treatment of 1500MPa Hot Stamping Steel, Trans. Mater. Process, pp. 252~255.
- [7] M. Becker, P. Kühnel, 2012, The Body of the new BMW 3Series, Euro Car Body, Germany, p. 54.
- [8] D. A. Porter, K. E. Easterling, M. Y. Sherif, 2008, Phase Transformations in Metals and Alloys, 3rd edition, CRC Press, USA, pp. 399~400.