〈기술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.6.533

고주파유도가열에 의한 고강도 센터필라 개발

손진혁* · 염영진† · 김원혁** · 황정복** · 김선웅** · 유승조** · 이현우**

(2008년 2월 28일 접수, 2008년 4월 15일 심사완료)

Development of High Strength Center-pillar by High Frequency Induction Heating

Jin-Hyug Son, Young-Jin Yum, Won-Hyuck Kim, Jung-Bok Hwang, Sun-Ung Kim, Seung-Jo Yoo and Hyun-Woo Lee

Key Words: High Frequency Induction Heating(고주파유도가열), Induction Hardening(유도경화), Heat Treatment(열처리), Hat-shaped Specimen(모자형상시편), Center-pillar(센터필라)

Abstract

An high frequency induction hardening technology of vehicle body press-formed of thin sheet steel has been developed to increase the strength of vehicle body parts locally by high frequency induction heating, thereby eliminating the need for reinforcements. And this technique for increasing the tensile strength of sheet steel was practically applied to the front floor cross member and center pillar reinforcement of a passenger car. The side impact behavior has been investigated when induction hardening technology is applied to the conventional low-carbon steel and weight reduction of an automotive body is expected. In this paper, basic experiments were performed for the hat-shaped specimen under high frequency induction heating process. Martensitic transformation was found in the heating zone through microscopic observation which showed higher hardness. In addition, the hardness and strength of the center-pillar specimen made of boron steel increased remarkably by high frequency induction heating.

1. 서 론

기본적으로 자동차의 측면충돌은 정면충돌에 비해서 충돌에너지를 대폭적으로 흡수할 수 있는 구조물이 없고, 승객과 차체 사이에 제한된 공간으로 인해 승객에게 치명적인 상해를 줄 수 있다. 정면충돌이 전체 교통사고의 높은 비중을 차지하고 있지만, 도시지역을 중심으로 교차로 등에서의 측면충돌에 의한 사고의 빈도가 증가하고 있고, 낮은 사고율에 비해 사상자 발생률이 매우 높아 측면충돌 거동이 자동차의 안전도 평가에 중요한 요소가 되고 있다. 즉 충돌안전 측면에서 볼 때, 전후방충돌에 비해 측면충돌에 대비하기란 간단한 일이 아니다. 측면충돌에 관련한 상품성을 높이기 위해서는 센터필라(Center-pillar)와 같은 측면 부재의 최적 변형 형상을 유도하여 운전자의 안전 공간을 확보함과 동시에 경량화의 요구를 만족하여야 한다. 이를 위한 일반적인 대책으로는 측면으로부터의 하중을 최대한 분산시킬 수 있는 구조설계를 하고, 다음으로는 측면을 구성하는 각 부품의 정적강도를 확보하기 위해 고강도재료를 사용하거나 더욱 용이하게는 보강

† 책임저자, 회원, 울산대학교 기계자동차공학부
E-mail : yjyum@ulsan.ac.kr
TEL : (052)259-2132 FAX : (052)259-1680
* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과
** (주)엠에스오토텍 기술연구소

재를 추가하는 것이 일반적이다. 그러나 충돌성능을 만족하기 위하여 재료의 강도와 두께에 의존하는 설계자유도는 한계가 존재한다. 현재 고강도강을 많이 사용하고 있는 추세이지만, 프레스 성형성에 한계가 있기 때문에 고강도를 필요로 하는 부분에는 일반적으로 두께를 증가시키거나 보강재를 추가하는 방식을 많이 사용하고 있다. 하지만 이러한 방법은 중량 및 비용을 증가시키는 문제점이 상존한다.[1~3]

그래서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 일본과 미국을 중심으로 판재를 프레스 성형 후 고주파유도가열을 이용하여 국부적으로 제품을 강화시키는 고주파열처리 기술이 고강도를 요구하는 차체 부품에 부분적으로 적용되고 있다.[4]

최적 고주파열처리 조건은 계속적인 반복 실험에 의해서 확보되어야 하기 때문에 시간과 비용이 많이 소요되게 된다. 따라서 본 연구에서는 Hat 모양의 시편을 대상으로 고주파열처리 기초시험을 수행한 후, 그 결과를 기초로 하여 실제 양산차종의 센터필라 패널에 국부적으로 고주파유도가열을 적용하여 시작품을 제작하였다. 이를 통하여 모델링 데이터 대비 시작품의 품질을 비교분석하고자 하였다. 아울러 고주파유도가열 후의 강도, 경도, 조직 등 시작품의 물성을 검사하여, 자동차산업 분야에 고주파열처리 적용 부품의 신뢰성을 분석함을 연구 목적으로 하였다.

2. 고주파열처리 기초시험

2.1 시편 제작

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 고주파열처리 시험의 편의성, 시편과 가열코일간의 간섭 등의 파악이 매우 용이하다고 알려진 Hat 형상으로 시편을 제작하였다.[5]

Fig. 1 Hat-shaped specimen for induction heating

Table 1 Mechanical Property of 20MnB5

Condition	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HR_C)
Annealed	350	500	28	-
Quenched in water	-	1,480	-	46
Quenched in oil	-	1,360	-	43

Table 2 Numerical result by induction heating process of hat-shaped specimen

No.	Heating process			Cooling process	
	Total heating time (sec)	Time to 750℃ (sec)	Max. Temp. after 14sec. (℃)	Time to 200℃ (sec)	Total cooling time (sec)
1	18	10	1020	3	5
2	17	10	1040	3	5
:	:	:	:	:	:
9	14	9	830	3	5
10	14	10	795	3	5
Avg.	14.6	9.4	933.3	3	5

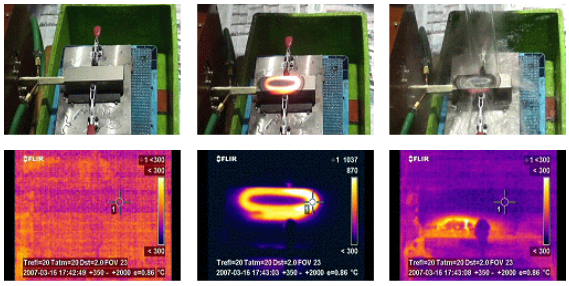


Fig. 2 Step by step induction heating process of hat-shaped specimen (Top; real images, Bottom; thermal images)

고주파열처리 시험에 사용된 소재는 스웨덴 SSAB(Swedish Steel AB)의 20MnB5(이하 보론강이라 칭함)라는 보론강으로서, 이는 저탄소강에 50ppm 정도의 붕소(Boron)를 첨가하여 소재의 열처리성을 개선한 소재이다. 두께는 1.2mm이고, 사용된 소재의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

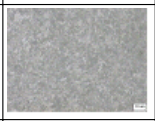
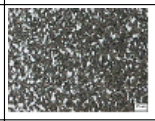
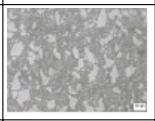
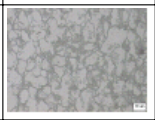
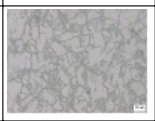
2.2 고주파열처리 시험

본 연구에서는 100kW/20kHz의 고주파 발진장치를 사용하여 Fig. 2와 같이 Hat 형상 시편에 고주파열처리 시험을 실시하였으며, 이 때 시편의 열처리 면적은 60cm^{2}이고, Fig. 2에서 하단 그림은 적외선 열화상 카메라로 촬영한 것이다. 고주파열처리 시험 결과 Table 2와 같이 평균적으로 14.6초 후 933.3℃까지 승온되었고, 냉각 개시 후 3초 만에 200℃ 미만으로 온도가 하강하였다.

2.3 경도 및 조직 분석

본 연구에서는 고주파열처리를 통하여 시편에 충분한 경화가 이루어졌는지 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 일직선상으로 연속적인 경도를 측정하였다. 또한 고주파열처리 후의 경도는 급속냉각에 의한 상변태의 결과로 생긴 마르텐사이트(Martensite)에 의해 결정되기 때문에, 측정한 경도에 부합하는 조직으로 변태했는지 분석할 필요가 있었다.

Table 3 Hardness and microscopy by each part after induction heating

No.	Hardness (Hv)	Microscopy		Remark
		×50	×250	
1-1	494			Martensite
1-2	345			Martensite + Ferrite
1-3	245			Martensite + Ferrite
1-4	169			Ferrite + Pearlite
1-5	170			Ferrite + Pearlite
1-6	435			Martensite
1-7	480			Martensite

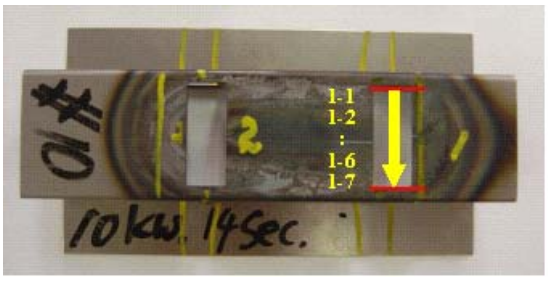


Fig. 3 Cut hat-shaped specimen partly for hardness and microscopy

고주파열처리 시험 결과 Table 3과 같이 직접적으로 고주파열처리가 된 부위는 100% 마르텐사이트 조직으로 변태하였고, 경도 또한 435Hv (1,437MPa) 이상, 즉 모재 경도(170Hv)보다 255% 향상된 결과를 보였다. 그리고 열영향부는 페라이트(Ferrite) 외에 마르텐사이트 혹은 베이나이트(Bainite) 조직이 발견되었으며, 비가열부(모재)는 대부분 페라이트와 펄라이트(Pearlite) 조직으로 구성되어 있었다.

2.4 정하중 시험

고주파열처리 기술의 적용 가능성 여부를 알아보기 위해서는 제품의 구조강도 특성이 필요하다. Fig. 4와 같이 Hat 형상의 시작품 하단부에 판재를 맞대고, 플랜지부를 용접하여 폐단면 형상으로 시편을 제작하였다. 시편은 고주파열처리 미적용, 고주파열처리 적용, 그리고 고주파열처리 후 템퍼링 실시한 시편으로 3종류를 준비하였다. 템퍼링은 고주파열처리 후의 취성 및 잔류 응력을 제거하기 위하여 200℃에서 30분간 저온 템퍼링을 실시하였다.

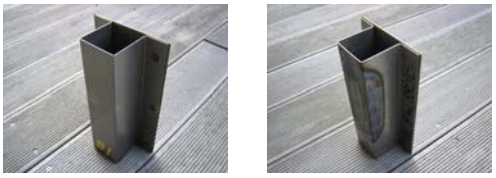


Fig. 4 Welded hat-shaped specimen with plate for static load test (Left; before induction heating, Right; after induction heating)

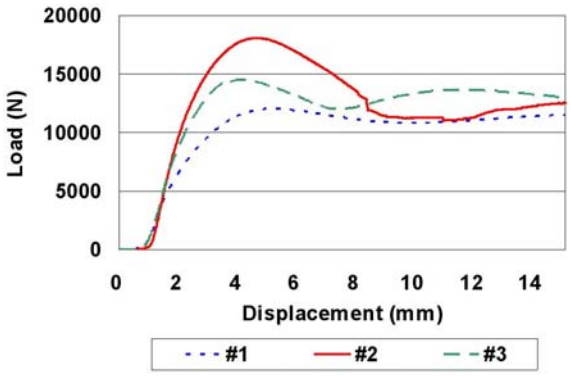


Fig. 5 Displacement-load curve of each specimen (#1; before induction heating, #2; after induction heating, #3; tempering after induction heating)

정하중 시험의 목표는 고주파열처리 전/후의 구조강도에 대한 단순 비교이다. 정하중 시험 결과 Fig. 5와 같이 고주파열처리 미적용 시편(#1)에는 11,940N의 하중이 작용했으며, 고주파열처리 적용 시편(#2)에는 17,850N의 하중, 즉 구조강도가 150% 향상된 결과를 보여주었다. 그리고 템퍼링을 실시한 고주파열처리 적용 시편(#3)에는 14,470N의 하중이 작용하였으며, 이 또한 120% 이상의 구조강도가 향상된 결과를 보였다.

3. 고주파열처리 적용 센터필라 제작

3.1 센터필라 패널 성형

센터필라에 고주파열처리를 적용하기 위하여 보론강을 사용하여 프레스 성형으로 센터필라 패널을 Fig. 6과 같이 제작하였다. 사용된 소재는 기초 시험과 동일한 스웨덴 SSAB의 보론강이며, 두께는 1.4mm이다. 참고로 센터필라 패널은 Table 4와 같이 일반적으로 TWB(Tailor Welded Blank)가 적용되며, 소재는 SPRC440을 사용한다.

3.2 고주파열처리 센터필라 시편 제작

고주파열처리 범위는 통상적으로 부품 전체에서 어느 부분을 강화할 것인지에 따라서 결정되지만, 충돌안전에 관한 차체부품의 경우에는 충돌 시에 어느 부위가 변형을 받게 될 것인가에 따라서 결정된다. 센터필라의 경우 축압축이 주요한 변형모드이기 때문에, 전면 열처리 보다는 능선(Ridge) 부분만을 열처리 하는 것이 유리하다.[3] 이에 Fig. 7과 같이 자체 제작한 고주파유도가열 시스템을 이용하여 센터필라를 수초에 1,000℃ 이상으로 가열한 후 냉각수를 분사, 즉 200℃/sec 정도로 급냉하여 고주파열처리 센터필라 시편을 제작하였으며, 이 때 열처리 면적은 750cm^{2}이다. Fig. 7에서 하단 그림은 고주파열처리 시험을 열화상 카메라로 촬영한 것이다.

Fig. 8은 보론강의 연속냉각변태곡선(C.C.T. Diagram)을 도시한 것으로서, 오스테나이트 영역에서 10,000℃/min, 즉 167℃/sec의 속도로 냉각이 되면 마르텐사이트 조직으로 변태함을 알 수 있다.[6] 이를 토대로 고주파유도가열 온도 및 냉각시간을 설정하고, 고주파열처리 시험을 하였다.

Table 4 Comparison of the relation between existing and prototype center-pillar

Center-pillar	Existing	Prototype
Material	SPRC440 1.2t/0.8t	20MnB5 1.4t

Fig. 6 Center-pillar panel made of boron steel for induction heating test

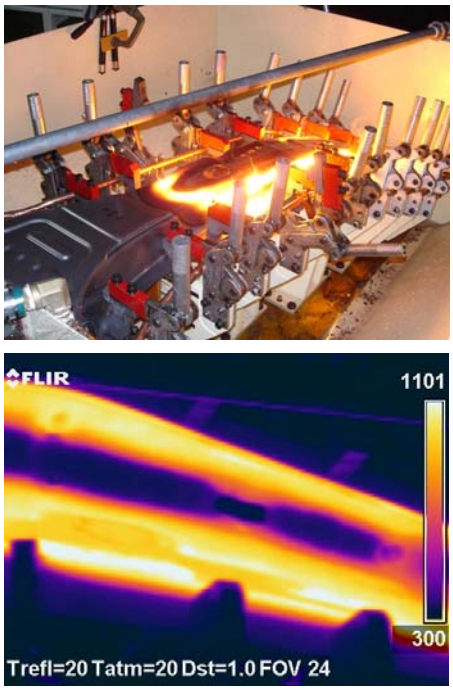


Fig. 7 Induction heating process of center-pillar panel (Top; real image, Bottom; thermal image)

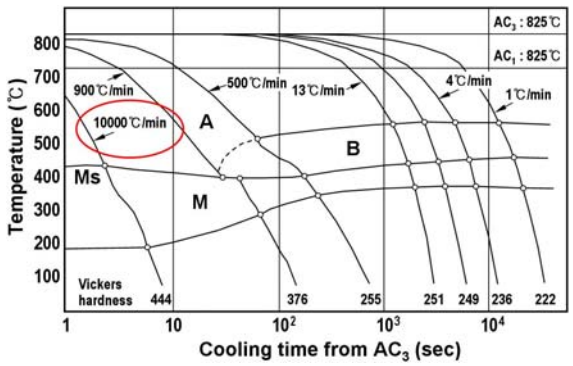


Fig. 8 Used cooling rate of 10,000℃/min for martensitic transformation based on C.C.T. diagram for boron steel

3.3 경도 및 조직 분석

본 연구에서는 고주파유도가열을 통하여 센터필라 패널에 충분한 경화가 이루어졌는지 평가하기 위하여 기초 시험과 동일하게 경도를 측정하였다. Fig. 9는 고주파열처리 시험 후의 센터필라 시편이다.

고주파열처리 시험 결과 Table 5와 같이 직접적으로 고주파열처리가 된 부위의 경도는 411Hv (1,338MPa)에서 488Hv(1,649MPa)의 범위 사이에 분포하였다. 모재의 경도가 평균 151Hv(493MPa)임을 감안하면, 고주파유도가열 후의 경도는 열처리 전에 비해 270% 이상 향상된 결과를 보였다.

또한 Fig. 10과 같이 고주파유도가열 전, 즉 모재 부위의 미세조직은 대부분 페라이트와 다수의 탄화물(Carbide)로 구성되어 있다. 하지만 고주파유도가열 후, 즉 열처리 부위는 거의 100% 마르텐사이트 조직으로 변태하였고, 일부 베이나이트 조직도 발견되었다.

Table 5 Hardness by each part of center-pillar panel after induction heating

No.	Hardness (Hv)	Unit conversion (MPa)	Induction heating
①	416.6 ~ 469.9	1,360 ~ 1,569	Yes
②	412.9 ~ 488.4	1,345 ~ 1,651	Yes
③	411.1 ~ 481.3	1,338 ~ 1,623	Yes
④	436.0 ~ 479.1	1,442 ~ 1,614	Yes
⑤	144.0 ~ 157.1	467 ~ 511	No

Fig. 9 Center-pillar panel after induction heating

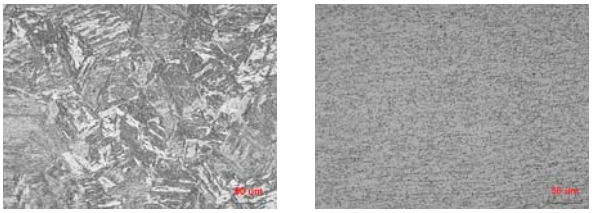


Fig. 10 Optical micrographs as a function of induction heating process (Left; before induction heating, Right; after induction heating)

3.4 품질 정도 검사

일반적으로 차체 부품의 품질 정도 검사는 제품의 형상을 본떠서 만든 검구(Checking Fixture)를 사용하여 측정하지만, 본 연구에서는 비접촉식 3D 스캐닝(Scanning)을 이용하여 Fig. 11과 같이 고주파열처리 센터필라 시작품의 3D 데이터와 모델링 데이터를 비교하였다.

Fig. 12는 Fig. 11에 도시한 총 6개의 단면을 품질 정도 검사에서 가장 중요한 부분인 플랜지면(Left 및 Right)과 모델링 데이터를 비교한 것이다. 모든 측정 부위에서 ±5mm 이내의 변형량을 보였고, 전체적으로 왼쪽 하단부와 오른쪽 상단부가 열처리에 따른 스프링백(Spring back)이 심하게 발생하였다. 향후 고주파유도가열 제품을 실적용하기 위해서는 ±1mm 이내의 품질 정도를 확보해야 하는데, 이를 위해서는 열변형을 최소화시키는 것이 매우 중요하며, 역변형 또는 지그 구조의 개선이 필요함을 알 수 있었다.

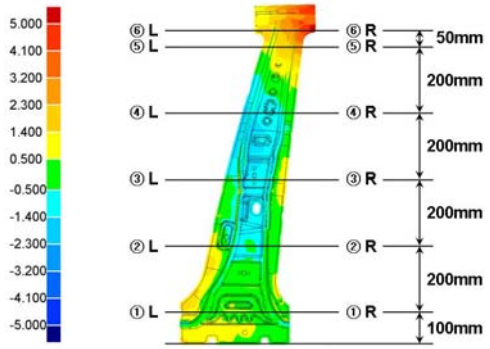


Fig. 11 Inspection of center-pillar panel after induction heating by 3D scanning

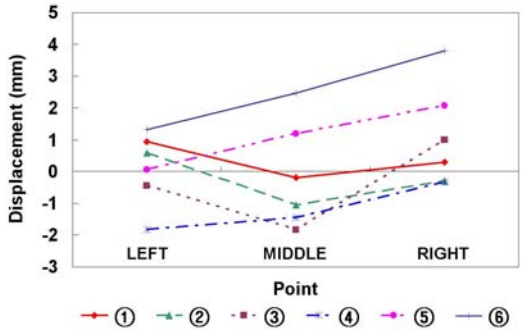


Fig. 12 Comparison of the relation between each point and displacement according to sections of center-pillar panel after induction heating

3.5 센터필라 정하중 시험 시편 제작

고주파열처리 적용 센터필라의 강도성능 평가를 위하여, Table 6과 같이 4가지 종류의 시편을 제작하였다. Fig. 13은 각 시편을 구성하는 부품을 도시한 것이다.

Table 6에서 시편1(#1)과 시편3(#3)은 대조군으로 각 현재 양산중인 센터필라 패널과 보강재 및 기능성 부품들을 센터필라 패널과 조립하였고, 시편2(#2)와 시편4(#4)는 시험군으로 본 연구의 개발품인 국부 열처리 유도경화 센터필라 패널과 보강재를 제거하여 기능성 부품들만 조립하였다.

3.6 정하중 시험

본 논문에서는 고주파열처리 부품의 구조강도, 즉 상품성을 평가하였다. 상품성을 평가하는 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째, 법규와 동일한 조건으로 개발 실험을 수행하는 FST(Full Scale Test) 방법, 둘째로 Sub-System Test라 불리는 차체의 단품으로 실험과 해석을 이용하는 방법, 그리고 유한요소법(Finite Element Method) 등을 이용한 순수 충돌 해석법이 있다.[7] 본 연구에서는 이 중 Sub-System Test를 이용한 단품 정하중 시험을 통하여 고주파유도가열을 적용한 국부강화 센터필라의 구조강도를 평가하였다.

시험방법은 센터필라 중간 지점에 만능재료시험기(UTM)에 장착된 램(Ram)이 위치하도록 고정지그를 설치한 후, 램이 50mm/min의 이동속도를 갖도록 설정하고 센터필라에 수직으로 정하중을 가하였다. 정하중 시험은 대조군 및 시험군 시편 총 4개로 수행하였으며, Fig. 14와 같이 센터필라가 변형되었다. Fig. 15 및 Table 7의 결과에서 보듯이 고주파열처리 적용 센터필라의 강도가 기존 대비 10% 이상 향상된 것을 알 수 있다.

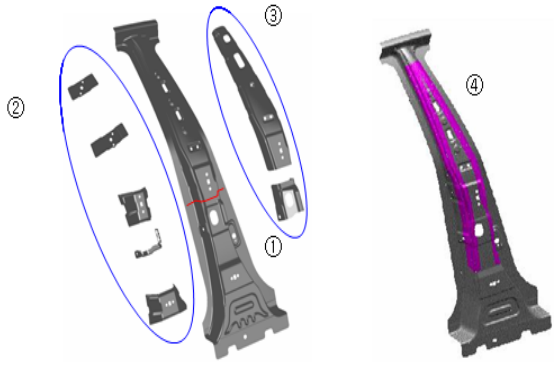


Fig. 13 Component parts of center-pillar

Table 6 Composition of each center-pillar specimen for static load test

No.	Composition	Weight (g)	Rate of reduction (compared with #3)	Remark
#1	①	2,480	-	-
#2	④	3,602	-	-
#3	①+②+③	5,013	-	Existing
#4	②+④	4,449	11.3%	Prototype

Fig. 14 Deformation result of each center-pillar specimen after static load test (From top; #1, #2, #3, #4)

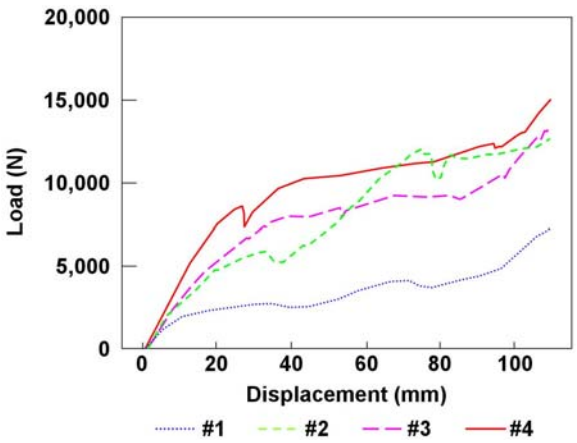


Fig. 15 Displacement-load curve of each center-pillar specimen by static load test

Table 7 Strength of each center-pillar specimen after static load test

No.	Composition	Load (N)	Rate of rising (compared with #3)	Remark
#1	①	7,532	-	-
#2	④	13,896	-	-
#3	①+②+③	13,210	-	Existing
#4	②+④	14,602	10.5%	Prototype

4. 결 론

Hat 모양의 시편을 대상으로 고주파열처리 기초시험을 수행한 후, 그 결과를 기초로 하여 실제 양산차종의 센터필라 패널에 국부적으로 고주파유도가열을 적용하여 시작품을 제작하였다. 고주파열처리 전/후의 경도와 조직을 분석하였으며, 고주파유도가열 적용 센터필라 시작품에 정하중 시험을 수행하여 현재 양산품과 강도를 비교분석하였다. 이를 통하여 자동차산업 분야에 고주파열처리 적용 부품의 신뢰성 및 실적용 가능성을 분석하고자 하였다.

(1) 고주파유도가열을 실험한 결과 고주파열처리 수행 전에 비해 경도가 270% 이상 향상된 결과를 보였으며, 이는 고강도를 요구하는 차체 부품에의 적용 가능성을 보여 주었다.

(2) 직접적으로 고주파열처리가 된 부위는 100% 경한 마르텐사이트 조직으로 변태하였음을 확인할 수 있었다.

(3) 고주파열처리 적용 센터필라 조립품의 정하중 시험을 수행한 결과 보강재를 제거하고도 기존 양산품 보다 10% 이상 강도가 향상되었음을 확인 할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년에서 2007년까지 지역혁신특성화(RIS)과제 및 자동차기반기술개발사업과제의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

(1) Shibata M., Oonishi M., Makino K. and Kurach S., 1998, “Method of Improving Side Impact Protection Performance by Induction Hardening of Body Reinforcement,” *American Society of Automotive Engineers - International Congress and Exposition*, SAE Technical Paper Series 980550, pp. 105~117.

(2) Bae G.H., Song J.H., Huh H. and Kim S.H., 2005, “Optimum Design of a Center-Pillar Model with a Simplified Side Impact Analysis,” *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 84~92.

(3) Park J.C. and Bae D.H., 2003, “The Development of Automotive Parts Technologies with high Strength Steel,” *Final Report of Manufacturing Technologies for High Strength Automotive Steels.*

(4) Hong S.O., Kim H.B. and Cho G.J., 2003, “A Study on Improvement of Workpiece Deformation in High Frequency Heat Treatment,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 2, No. 2, pp. 31~36.

(5) Yum Y.J, Son J.H, Kim W.H., Hwang J.B. and Kim S.U., 2007, “Development of High Strength Automotive Part by High Frequency Induction Heating”, *Proceedings of the KSME 2007 Fall Annual Meeting*, pp. 7~12.

(6) Yamanaka K. and Ohmori Y., 1977, “Effect of Boron on Transformation of Low-carbon Low-alloy Steels,” *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 17, pp. 92~101.

(7) Youn Y.H., 1994, “Estimation of Vehicle Structure and Occupant Protections on Side Impact by a Simultaneous Method CC-CTP,” *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 943846, pp. 378~383.