연구논문

자동차용 35kgf/mm^{2}급 강판의 레이저 강화

서 정* · 이제훈* · 김정오* · 오상진* · 조원석** · 이두환** · 신철수** · 이문용*** · 이규현***

*한국기계연구원 레이저기술연구그룹
**현대 · 기아 연구개발본부
***(주)성우하이텍 기술연구소

Laser Strengthening of 35kgf/mm^2 Grade Steel Sheet for Automobile

Jeong Suh*, Jae-Hoon Lee*, Jeong-O Kim*, Sang-Jin Oh*, Won-Suk Cho**, Doo-Hwan Lee**, Chirl-Soo Shin**, Moon-Yong Lee*** and Gyu-Hyun Lee***

*Laser Application Group, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea
**R&D Division for Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation
***Technical Institute of Sungwoo Hitech Co., LTD.

Abstract

The laser strengthening of 35kgf/mm^2 grade steel sheet is investigated by using CO_2 laser beam irradiation. The increase of tensile strength is dominated by the number of fully penetrated melting lines. Also, the optimal laser irradiation pattern is obtained by 3-point bending test. Local laser strengthening may be effective for the weight reduction of automobile components where the tailored welded blank can not be applied.

(Received July 10, 2001)

Key Words : Laser strengthening, Pattern, Weight Reduction

1. 서 론

자동차 차체 경량화의 관점에서 자동차 제작 및 부품 업체들은 테일러드 용접 블랭크(tailored welded blank)를 차체에 적용하고 있으며[1], 점차 고강도 강판을 사용하는 추세에 있다. 강판은 고강도화가 될수록 프레스 성형성이 저하되어 복잡형상 및 정밀성형이 필요한 부품에 적용하기에는 한계가 있으므로 이를 극복하기 위해 미리 프레스 성형한 부품을 고주파 유도 경화(induction hardening)하여 부품의 강도를 향상시키는 방법이 개발되어 front pillar inner, front floor cross, center pillar reinforcement 등에 적용되고 있다[2].

고주파 유도 경화에 의한 강도 향상(strengthening)은 넓은 경화영역에 따른 강화효과가 크나, Straightening Quench 기술(또는 장치)로 열변형을 방지해야 하며, 수냉장치를 별도로 갖추어야 한다. 또한, 이 기술은 표면처리강판, 복잡한 형상에는 적용하기가 매우 불리하다. 이에 비해 레이저빔을 활용하면 적은 입열량을 사용하므로 부품변형을 최소화시킬 수 있으며 자체냉각으로 수냉장치가 필요하지 않을 뿐만 아니라 재현성이 우수하고 3차원 복잡한 형상에도 적용 가능하다. 이를 레이저 강화(laser strengthening)기술이라고 한다.

도요다 자동차에서는 CO_2 레이저 강화용 45kgf/mm^{2}급 강판을 개발하였으며[3], 레이저 강화기술을 front side member에 적용한 결과[4] 등이 보고되고 있으나, 이외의 연구는 전무한 상태이다.

따라서, 본 논문은 레이저 강화기술을 차체로의 적용 확대를 위하여 수행되었으며, 국내의 자동차용 강판으로 사용되는 35kgf/mm^{2}급 강판을 대상으로 하였다.

본 논문에서는 CO_2 레이저빔 조사선(irradiation line)의 용입(penetration) 조건에 따른 빔 조사강화 효과를 분석하였으며, 굽힘강도 실험을 통해 최적의 빔 조사 패턴(pattern)을 조사하였다.

2. 실 험

2.1 실험재료

실험에 사용된 재료는 자동차 부품업체에서 사용하는 자동차용 강판인 35kgf/mm^{2}급 냉연강판(일명: SPR-C35R)이며, P첨가 고용강화형 강판으로 두께는 1.2 mm이다. 강판의 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of material(wt%)

material	thickness	C	Si	Mn	P	S
35kgf/mm^{2}grade steel sfeet	1.2mm	0.023	-	0.15	0.08	0.009

2.2 실험 장치 및 방법

레이저 빔 조사 실험을 위하여 CO_2 레이저를 사용하였다. CO_2 레이저 발진기는 연속 출력파이며, 정격출력 4kW의 횡여기방식(transverse flow type)으로서 빔모드는 multi-mode이다. 실험에서는 레이저 출력은 2~2.5kW, 초점 위치는 강판 표면, 빔 조사 속도는 2.5~4m/min, 보호가스는 Ar을 사용하였으며 보호가스의 유량은 40 ℓ/min으로 하였다. Photo. 1은 CO_2 레이저 빔 조사에 사용된 레이저 장치의 헤드와 지그(jig)를 보여주고 있다. 강판에 레이저빔을 조사한 후 인장시험편은 Photo. 2와 같이 JIS 5호 규격으로 채취하였다. 레이저 빔 조사선의 간격은 5mm이며, 인장시험은 각 조건별 3개 이상의 시험편의 실험결과를 평균하여 구하였다. 경도측정을 위하여 마이크로 비커스 경도계를 이용하였으며 빔 조사부의 미세조직은 금속광학현미경과 SEM으로 관찰하였다.

굽힘 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 hat-type 부품

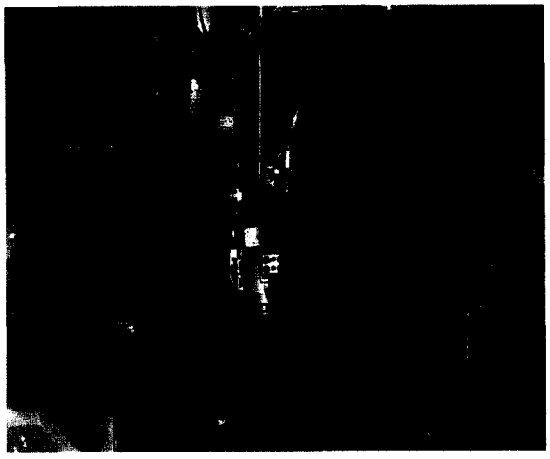

Photo. 1 CO_2 laser head and jig

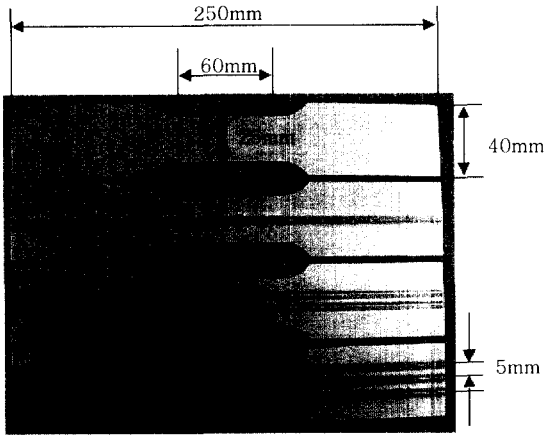

Photo. 2 Tensile specimens

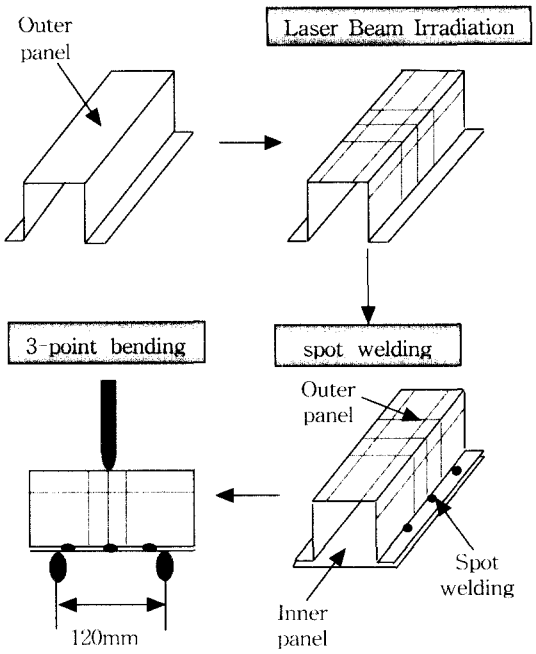

Fig. 1 3-point bending process

(bracket용)을 선정하였으며, 외부 패널에 레이저빔을 일정한 패턴으로 조사한 후 내부 패널과 저항점용접으로 조립하여 3-point 굽힘실험(span: 120mm)을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용입부의 단면 형상 (완전용입-부분용입의 비교)

Photo. 3은 레이저 출력 2.5kW에서 빔 조사속도를 4m/min에서 2.5m/min으로 감소시키면서 레이저 빔 조사된 35kgf/mm^{2}급 냉연강판의 용입단면을 나타내고 있다. (a)~(d)는 부분용입상태를 보여주고 있으며, 맨

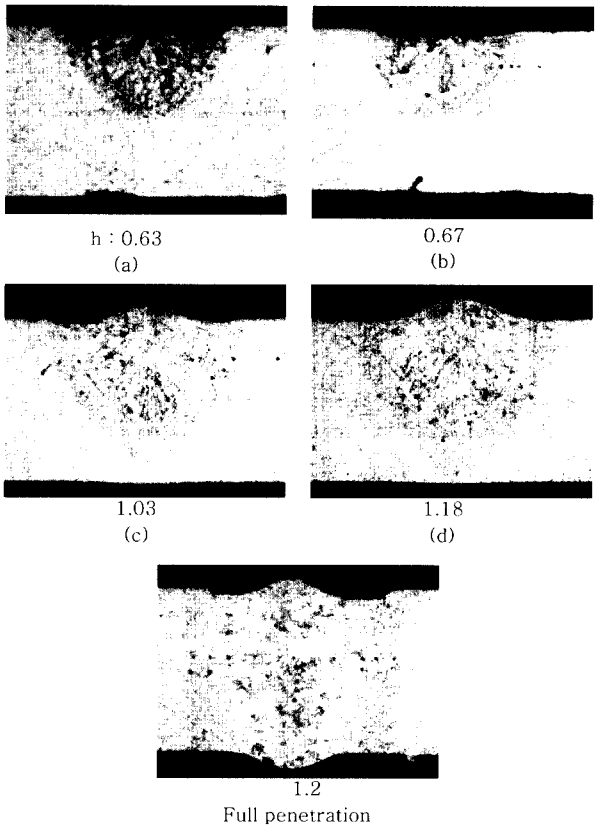

Photo. 3 Cross sections after laser beam irradiation h : penetration depth (mm), (a) ~ (d): partial penetration

아래쪽 그림은 완전용입된 상태를 보여주고 있다. 부분용입{(a)~(d)}의 경우 반달형태의 경화구역이 얻어지는데 이것은 사용된 레이저빔이 Gaussian형태로서 외부에 비하여 중심부의 레이저 출력이 높기 때문이다. 레이저 조사 후 비드(bead)부가 위로 튀어나오는 convexity와 움푹 들어가는 concavity가 약간씩 존재하나 그 정도가 모재 두께의 20%이하로 양호했으며, 또한 비드(bead) 표면 주위에 스패터(spatter)가 전혀 발생하지 않는 건전한 용입부를 얻을 수 있다

3.2 미세 조직 관찰

일반적으로 레이저 표면경화법에서는 마르텐사이트(martensite) 변태 경화 조직을 형성하여 경도를 향상시키게 되나, 본 논문에 사용된 재료의 두께는 1.2 mm로 박판이기 때문에 표면만을 경화키는 것보다는 용융이 되더라도 시편두께까지 용융면적을 크게 하여 강도의 향상에 목적을 두었다. 보통 극저탄소강에서는 마르텐사이트(martensite) 변태가 일어나기 어렵지만 레이저 용접은 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 일부에

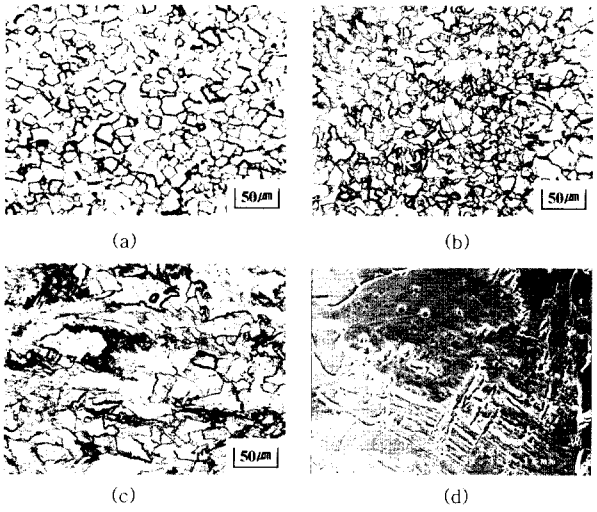

Photo. 4 Micrograph of cross-section 35kgf/mm² grade steel plate (a) base (b) HAZ (c) melting (d) SEM Microstructure of melted zone

서 마르텐사이트(martensite) 변태가 일어난다는 보고가 있다[5-7]. Photo. 4에서 보는 바와 같이 모재조직은 거의 순철에 가까운 조직을 나타내고 있고, HAZ부에서는 결정립이 미세해졌으며 용융부는 용접조직과 유사한 조직을 보여준다. Photo. 4(d)는 용융부의 SEM사진이며, 페라이트(ferrite)결정립 사이의 일부에서 베이나이트(bainite) 변태가 일어난 것을 관찰할 수 있다

3.3 경도분포

Photo. 3의 각각의 단면에서의 경도값이 Fig. 2에 나타나 있다. 경도는 비드(bead) 표면에서 0.35mm깊이에서 0.2mm간격으로 측정하였다. Fig. 2의 경도분포를 살펴보면, 용입부의 경도는 모재보다 증가되었음

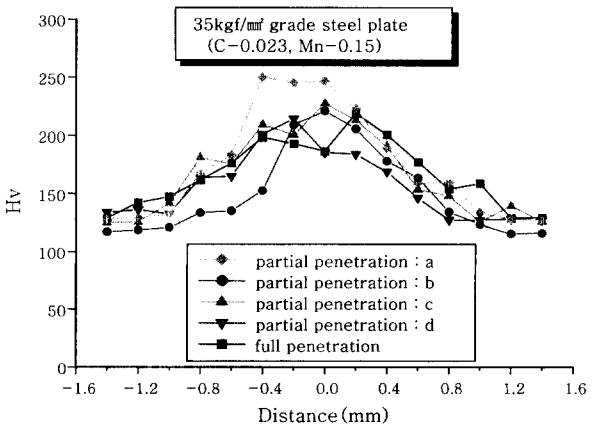

Fig. 2 Hardness distribution of partial and full penetration specimens

을 알 수 있다. 이러한 경화는 레이저빔 용입시의 급속 가열 급속냉각으로 인하여 용입부의 결정입이 미세화되고, 높은 경도를 갖는 상(phase)이 용입부에 형성되었음을 말해 준다. 그 외에 용입시 재료의 일부분만이 용융과 응고를 거치면서 수축과 팽창에 따른 잔류 응력 또한 경도상승의 원인으로 작용할 수 있다.

Fig. 2에서 완전용입된 상태로 가면 최대 경도값이 부분용입에 비해 감소함을 알 수 있다. 용입부의 최대 경도값은 부분용입의 경우 246Hv이며, 완전용입의 경우 219Hv로 나타났다. 또한, 완전용입된 강판의 모재 대비 경도 상승률은 63%(ΔHv=77)임을 보여 주고 있다. 완전용입의 경우, 강판 아래까지 열적효과를 얻기 위해 빔조사속도를 감소시켰으며, 이로 인해 입열량(레이저출력/빔조사속도) 증가에 따라 냉각효과가 떨어지게 되어 경도가 부분용입에 비해 낮아지게 됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 2에서 용융부와 HAZ부, 그리고 모재부의 경계가 확실하지 못하나, 이는 재료의 화학성분중 열처리효과에 영향을 주는 원소인 C와 Mn의 함량이 매우 적기 때문이며, 이로 인해 용융부와 모재 사이의 온도 구배가 크지 않았기 때문이라고 할 수 있다.

3.4 부분용입과 완전용입의 인장강도 비교

Fig. 3은 35kgf/mm²급 냉연 강판의 1줄 용입선의 용입정도에 따른 인장강도를 나타내고 있다. 용입면적은 부분용입a가 가장 작고, b, c, d, 완전용입 순으로 크다. Fig. 3의 결과에서 보면 용입면적이 가장 작은 부분용입a가 인장강도는 제일 낮고, b, c, d, 완전용입 순으로 높다. 레이저 출력 2.5kW, 빔 조사속도 2.5m/min으로 완전용입이 된 경우에 인장강도가 가장 높음을 알 수 있으며, 완전용입을 하여 용입면적을 증가시키면 Fig. 2에서와 같이 경도향상효과는 적으나, 인장강도의 증가(강화)에는 효과적임을 알 수 있다. 왜냐하면 인장강도는 변태된 면적의 증가에 따라 더 큰 효과를 갖기 때문이다. 실험에 사용한 재료가 자동차용 부품으로 사용되는 점을 감안하면 경도향상보다는 강도향상이 더 요구되므로, 이후의 모든 실험은 부분용입보다는 완전용입조건을 선택했다.

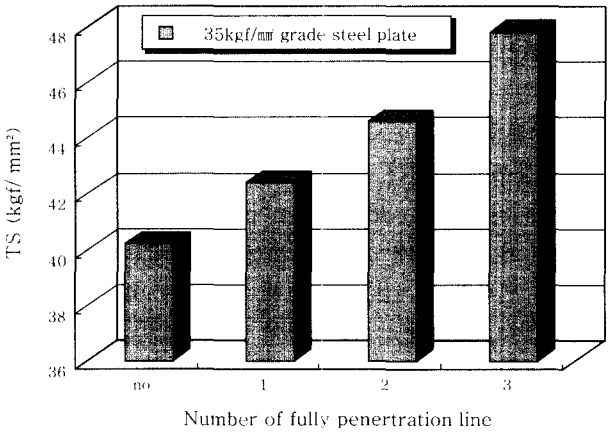

Fig. 4 Variation of tensile strength along the number of fully penetrated line

Fig. 3의 결과로부터 부분용입에 비해 완전용입의 경우가 인장강도가 크므로 완전용입상태의 용입선의 증가에 따른 인장강도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 가로축의 0, 1, 2, 3의 숫자는 용입선 수를 나타낸다. 용입선 수가 증가함에 따라 인장강도값이 증가함을 알 수 있다. 따라서, Fig. 3과 4의 결과를 이용하여 용입부 면적률에 대한 인장강도의 증가률을 Fig. 5에 나타내었다. 용입면적률(%)은 인장시험편의 표점부단면적에 대한 레이저 용입부의 면적비를 나타내고 있으며, 용입부 면적이 증가할수록 인장강도 증가율 ΔTS값이 커짐을 알 수 있다. 위의 결과와 문헌[4),8)]의 결과로 볼 때, 부분용입 보다는 완전용입이 비드 폭(bead width)도 넓

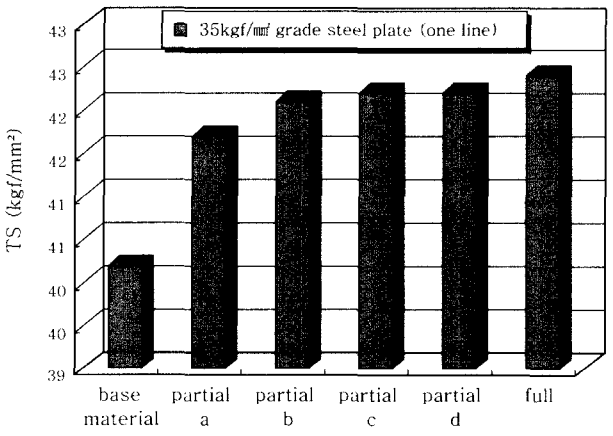

Fig. 3 Tensile strengths in partial and full penetration

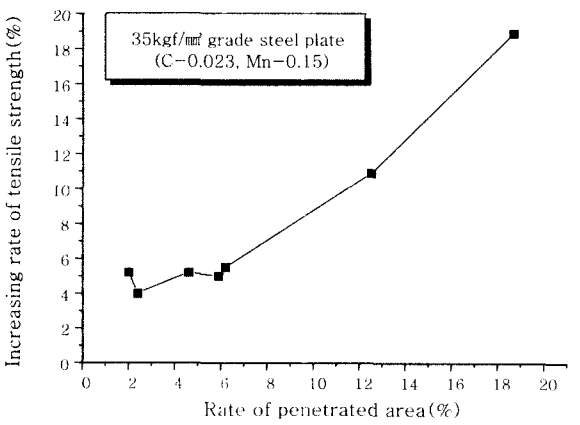

Fig. 5 Relation between increasing rate of tensile strength(%) and rate of penetrated area(%)

고, 용입깊이도 깊다. 따라서 인장강도도 높게 나타난다. 그러나 변태면적을 넓히기 위하여 변태폭을 무한정 넓힐 수는 없다. 왜냐하면 변태폭을 넓게 하기 위해서 조사속도를 너무 느리게 하면 오히려 경도와 인장강도 모두 감소하게 된다. 따라서 적당한 출력과 조사속도의 선정이 필요하다. 35kgf/mm^{2}급 냉연강판에서 용입면적률이 6.2%일 때 ΔTS는 2.2kgf/mm^2(5.5% 상승)이고, 면적률이 12.5%일 때 ΔTS는 4.4kgf/mm^2(10.7% 상승)이고, 면적률이 18.7%일 때 ΔTS는 7.6kgf/mm^2(18.9% 상승)이었다

3.5 hat-type 시편의 굽힘시험

앞의 Fig. 1의 굽힘시험용 hat-type 시편제작 공정에 따라 시편의 외부 패널에 여러 가지 패턴을 형성시킨 예가 Photo. 5에 나타나 있다. hat-type 시편은 bracket 부품으로 35kgf/mm^{2}급 냉연강판으로 되어 있다. Photo. 4의 레이저 빔 조사된 외부 패널과 내부 패널은 저항점용접으로 조립되며 그 예가 Photo. 6에 나타나 있다.

Fig. 6은 여러 패턴 형상을 갖는 hat-type 시편을 stroke 5mm/min으로 굽힘실험한 결과를 나타내고 있다. L1~L6은 Photo. 4에서의 번호를 의미하며, M은 패턴이 없는 모재(표준)시편을 나타내고 있다.

Fig. 6과 Table 2로부터 최대하중과 이후의 하중강하 현상을 비교해 보면, 먼저 폭방향으로 용입선을 형성한 L1과 L2를 비교해 보면, 최대하중은 균일하게 분포된 L1이 높게 나타나지만 최대하중 이후의 하중은 급격하게 하락하고 있다. 반면 L2는 최대하중은 다소 낮으나 하중강하는 매우 서서히 일어나서 변형이 약12 mm이상이 되면 오히려 하중이 L1보다 높게 된다. 그리고 길이방향으로 용입선을 형성한 L3과 L4를 비교하

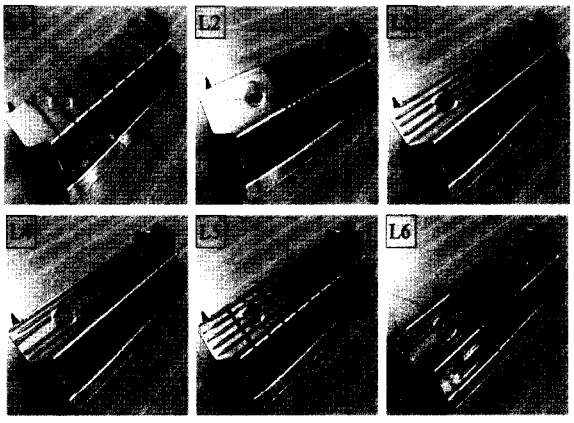

Photo. 5 Various laser irradiated patterns in out panel of hat-type specimen

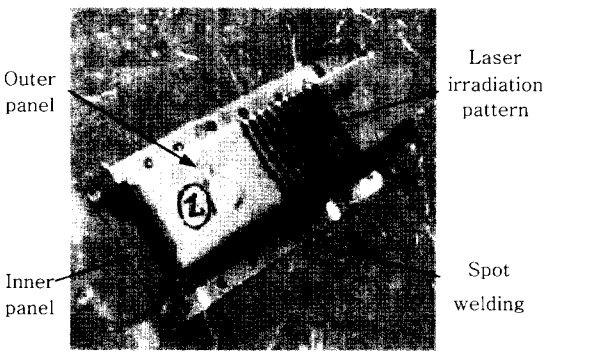

Photo. 6 Spot welded hat-type bending specimen (L2)

면 최대하중은 용입선이 hat-type시험편의 모서리부분에 밀집된 L4가 길이방향으로 균일하게 분포된 L3보다 높게 나타나지만, 하중강하는 L4가 급격하게 일어나서 변형이 약12mm이상 되면 L3보다 하중이 낮게 나타난다. 길이방향과 폭방향을 혼합한 형태의 L5(L1과 L3의 혼합)와 L6(L2와 L4의 혼합)을 비교하면 최대하중은 L6이 L5보다 훨씬 높게 나타나지만, 하중 강하가 급격히 나타나서 변형이 약15mm 이상이 되면 오히려 L5보다 낮게 된다. 따라서 최대 굽힘 하중은 길이방향(L3<L4), 폭방향(L2<L1), 혼합형태(L5<L6) 순으로 높다는 것을 알 수 있다. 즉, L4와 L2의 혼합형태인 L6 패턴의 경우에 최대 굽힘하중을 나타내며, 패턴이 없는 M에 비해 약 30% 최대하중 증가율을 보인다. 또한, 최대하중에 도달한 후 하중강하 형태는 L4와 유사하다. 길이 방향으로의 용입선은 하중이 집중되는 시편 모서리부에 조밀하게 형성하는 것이 적절함을 알 수 있다. 따라서 L3 보다는 L4가 적절함을 알 수 있다. 폭방향으로의 용입선은 시편 폭방향으로 조밀하게 형성하는 것이 바람직하게 생각되었으나, 실험결과 전체에 넓게 분포시키는 것이 더 좋은 결과를 나타내었다. 이는

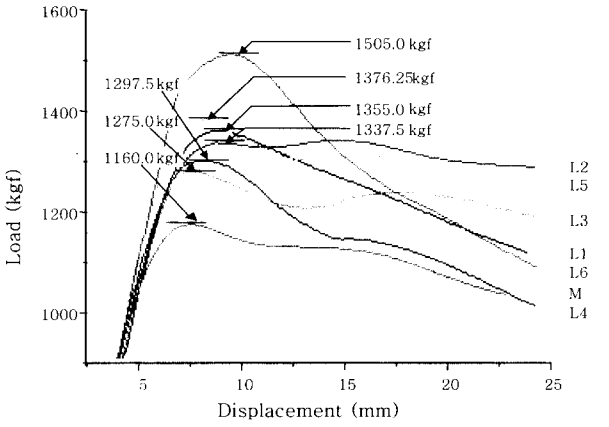

Fig. 6 Load-displacement curves of hat-type specimens with various patterns

Table 2 Experimental results obtained from Fig. 6

No. of (spexiмen)	M (no pattern)	Increasing order of max. load					
		L3	L4	L2	L1	L5	L6
Max.load(kgf)	1160	1275	1297.5	1337.5	1355	1376.25	1505
Increasing rate of load(%)	0	9.9	11.85	15.3	16.8	18.64	29.7
Decreasing of lode after max. load point	small	small	large	small	large	small	large

span이 120mm로서 L2의 경우, 상대적으로 span길이가 길어서 굽힘시험시의 하부 벤딩 지그의 지지 위치가 용입선부의 외부에 존재했기 때문에 모재쪽의 영향을 많이 받은 결과로 해석된다. 그러나, L2가 L4와 조합된 L6의 경우에는 최대하중 상승에 기인하며, 이때에는 하부 벤딩 지그의 위치가 무관하게 되며 L4와 L2의 조합인 L6가 가장 적절한 방법임을 알 수 있다.

Table 2의 결과에서 레이저빔 조사방향을 살펴보면, 용입선이 길이방향으로 형성된 경우보다는 폭방향으로 형성된 경우에 더 높은 하중값을 나타내었고, 이들을 혼합한 경우에 가장 높은 하중값을 나타내었다. 일반적으로 충격하중 $P_{max\text{-}d}$와 정적굽힘하중 $P_{max\text{-}s}$의 관계는 $P_{max\text{-}d} = 1.2 \times P_{max\text{-}s}$이므로 정적굽힘강도가 크면 충격하중에도 강하다고 볼 수 있다.

그러나 최대 굽힘 하중이 높다는 것만으로 모든 부품에 적용하기에는 무리가 있으므로 부품의 용도와 환경을 고려하여 선택하여야 할 것으로 생각된다. 또한 3 point bending 후 최종 시편의 파단은 일어나지 않았으며, 모든 시험편은 U 또는 V자모양의 변형이 outer panel에 나타났다. 그리고 inner panel은 약간의 변형이 발생했으나, spot welding부분은 파단되지 않는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 CO_2 laser를 사용하여 35kgf/mm^{2}급 자동차 강판의 강화효과를 분석하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 부분용입에 비해 완전 용입의 경우가 경도향상 효과는 적으나 변태면적의 증가로 인해 강화효과가 큼을 알 수 있었으며, 완전 용입선의 수가 증가할수록 용입면적율 및 인장강도가 증가함을 알 수 있었다.

2) 여러 종류의 조사 패턴을 갖는 hat-type 시편의 굽힘시험으로부터 가장 적절한 패턴을 얻을 수 있었다. 즉, 길이방향으로는 모서리 부분에 밀집된 형태(L4), 폭방향으로는 균일하게 분포된 형태(L1)가 높은 굽힘 하중 값을 나타내었고, 최고의 굽힘 하중 값을 나타낸 것은 길이방향으로는 모서리 부분에 밀집된 형태(L4)와 폭방향으로는 중심부에 밀집된 형태(L2)의 혼합상태(L6)가 가장 높은 굽힘 하중 값을 나타내었다.

3) 레이저 조사 강화 실험과 hat-type시편의 굽힘실험을 통해서 국부적인 레이저 조사 강화 기술이 테일러드 용접 블랭크 적용이 어려운 자동차 부품의 경량화에 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Jong-Bong Lee and Hee-Dong Pak : Current Status of Tailored Blank Technology, Journal of KWS, **18-3** (2000), 5-11 (in Korean)
2. M. Shibata et al, : Method of Improving Side Impact Protection Performance by Induction Hardening of Body Reinforcement. SAE Paper 980550, (1998)
3. K. Tamada et al, : Weight Reduction Technology by Laser Irradiation for Body Panels, 19th IDDRG Biennial Congress (Eger, 10~14, June 1996), 47-54.
4. Mitsuru Kitamura et al, : Development of 440MPa Grade Galvannealed Steel Sheet for Laser Irradiation Strengthening, Society of Automotive Engineers of Japan, Inx.(JSAE) 951, (1995-5), 97-100 (in Japenese)
5. Jong-Hyun Suh et al, : A Study of Tailored Blank Welding between Mild Steel and Zn-coated Steel Sheets by CO_2 Laser Beam, Journal of Korean Society of Laser Processing(KSLP), **1-1** (1998), 4~10 (in Korean)
6. Chang-Sun Hwang et al, : A Study on Tailored Blank Welding between dissimilar materials and different thickness sheets by CO_2 Laser Beam. Journal of Korean Society of Laser Processing(KSLP)

2-3 (1999), 42~51.(in Korean)

7. B. G. Chung et al, : Effects of Shielding Gas Type on CO_2 Laser Welding, Journal of Korean Society of Laser Processing(KSLP), **1-1**(1998), 30~38 (in Korean)
8. Jeong Suh, et al, : Strengthening of Steel Sheets for Automobile by CO_2 Laser Beam Irradiayion, Journal of Korean Society of Laser Processing(KSLP), **4-2** (2001), 21~28 (in Korean)