

비집속빔을 이용한 CO₂ 레이저 빔 조사강화

서 정 · 이재훈 · 강희신 · 김정오 · 이문용* · 오상진* · 이규현*

한국기계연구원 레이저응용시스템그룹

* (주)성우하이텍 기술연구소

CO₂ Laser Irradiation Strengthening by Defocused Beam

Jeong Suh, Jae-Hoon Lee, Hie-Sin Kang, Jeong-O Kim,
Moon-Yong Lee*, Sang-Jin Oh* and Gyu-Hyun Lee*

Laser Application Group, Korea Institute of Machinery & Materials

*Technical Institute, Sungwoo Hitech Co., Ltd.

Abstract

Defocused CO₂ laser beam irradiation strengthening of 60kgf/mm² grade steel sheet was investigated to obtain the tensile strength similar to that of fully penetrated one by the focused beam. The melted line width by the defocused beam was 3~4 times larger compared to that of the focused beam. However, the increase of tensile strength with 1 line irradiation by the defocused beam was similar to that of 2~3 lines by the focused beam. The increase(37.6%) of bending strength with 1 line by the defocused beam was higher than the increase(12.9%) of tensile strength. Also, the effect of cooling gas to strengthening was observed.

Key Words : CO₂ laser beam irradiation, strengthening, defocusing beam, cooling gas

1. 서 론

자동차 차체 경량화를 위해 고강도 강

판의 테일러드 용접 블랭크(TWB, tailored

welded blank) 적용이 증가하고 있으나, 강판이 고강도화가 될수록 성형성이 저하되어 복잡형상 및 정밀성형의 부품으로 적용하기에는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 성형한 부품을 고주파 유도 경화(induction hardening)하여 부품 강도를 향상시키는 방법이 개발되어 front pillar Inner, front floor cross, center pillar reinforcement 등에 적용되고 있다.¹⁾ 고주파 유도 경화에 의한 강도향상(strengthening)은 넓은 경화영역에 기인하지만, straightening quench 장치로 열변형을 방지해야 하며, 수냉장치도 갖추어야 할 뿐만 아니라 표면처리강판, 복잡한 형상에는 적용하기가 매우 불리하다. 이에 비해, 레이저 경화(laser hardening)기술은 적은 입열량을 사용하므로 부품변형을 최소화시킬 수 있으며, 자체냉각으로 수냉장치가 필요하지 않을 뿐만 아니라 재현성이 우수하고 3차원 복잡형상에 적용가능하다.

일반적으로 레이저 경화법에서는 금속 표면 온도를 변태점과 용융점 사이의 온도로 가열하여 자체냉각(self-quenching)작용으로 표면층만을 경화시키며, 레이저 빔에 의한 표면경화 깊이는 합금합량과 합금원소 종류에 따라 2mm정도 가능하나 일반적으로 0.5mm 내외이다. 주로 사용되는 자동차 강판은 두께 2mm이내의 박판이기 때문에 레이저 경화법으로 표면의 경도만을 향상시키는 것보다는 용융비드(molten bead)를 형성하여 용융면적을 크게 하는 것이 경도 향상효과는 적으나 강도향상에는 매우 효과적이다. 이를 레이저 조사 강화(laser irradiation hardening or strengthening)기술이라고 하며 도요다 자동차에서는 인장강도 45kgf/mm²급 강판을 front side member 적용한 결과가 보고되고 있다.^{2,3)}

최근에 자동차 범퍼빔(bumper beam)에 보강재를 사용하지 않고 강도와 강성이 요구되는

부위에 레이저 빔 조사강화를 함으로써 경량화와 강성증가를 동시에 시도한 연구가 발표되었다.⁵⁻⁷⁾ 이들 연구에서는 범퍼빔의 강도를 국부적으로 상승시키기 위한 방법으로 레이저 빔을 재료표면에 집속시켜 강판 두께 전체를 용융하는 방법을 선택하고 있다. 그러나, 강판 표면에 초점위치를 갖는 집속된 레이저 빔을 이용하기 때문에 용융폭이 좁으므로 현저한 강도 향상을 위해서는 레이저 용입선을 3줄이상 형성시키는 것이 효과적이었다. 따라서, 본 논문에서는 레이저 용입선을 여러줄 형성해야 하는 단점을 극복하기 위해 빔의 크기가 확대된 비집속 레이저 빔(defocused laser beam)을 강판 표면에 조사하는 레이저 강화방법을 연구하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 재료는 자동차용 강판인 인장강도 60kgf/mm²급 냉연 고장력 강판으로 두께는 1.4mm이며, 강판의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of material(wtx)

material	60kgf/mm ² grade steel
thickness	1.4 mm
C	0.0827
Si	0.0144
Mn	1.8423
P	0.0130
S	0.0037

레이저 빔 조사 실험을 위하여 CO₂ 레이저를 사용하였다. CO₂ 레이저 발전기는 연속출력파(CW)이며, 정격출력 4kW의 횡여기방식(transverse flow type)으로서 빔모드는

multi-mode이다. 또한, 레이저 빔 집속렌즈의 초점거리는 200mm이다. Photo. 1은 레이저 조사후 JIS 5호 규격으로 채취한 인장시험편의 형상이다. 레이저 빔을 강판 표면에 집속한 빔 (focused beam: 이후 “집속빔”이라고 함)을 사용하는 경우에는 Photo. 1(a)와 같이 여러줄의 용입선을 형성하였으며, 초점 위치에 벗어난 빔 (defocused beam, size $\approx 10 \times 10\text{mm}$, 이후 “비 집속빔”이라고 함)의 경우 (b)와 같이 1줄의 용입선을 형성하였다.

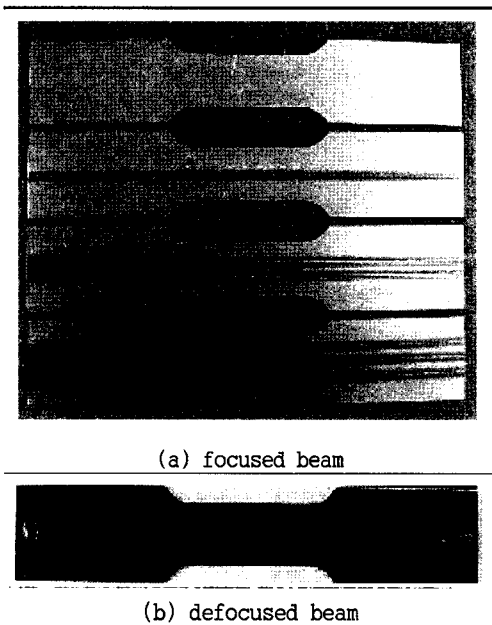


Photo. 1 Appearance of tensile specimens

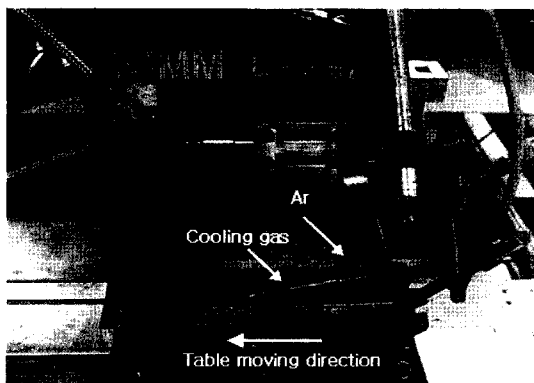


Photo. 2 Experimental set-up for CO₂ laser beam irradiation

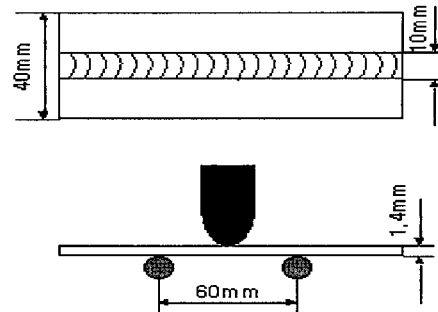


Fig. 1 Schematic diagram for 3-point bending test

Photo. 2는 레이저 조사강화를 위한 실험장치이다. 집속빔을 사용하는 경우에는 레이저 출력은 2.5kW, 빔 조사속도는 2.5m/min, 보호가스로는 Ar을 사용하였으며, 보호가스의 유량은 40 l/min으로 하였다. 조사면적을 넓히기 위하여 재료 표면으로부터 빔의 초점위치를 강판 표면으로부터 50mm로 이동시켜 빔 크기를 확대하였다. 이때 레이저 출력은 3.1kW로 증가시켰으며, 빔조사속도는 1~1.6m/min으로 감소시켰다. 또한, 빔 크기가 확대되어 레이저 집속밀도가 낮으므로 레이저 빔흡수율을 높이기 위해 시편표면에 에어졸 블랙 페인트로 도포한 후 건조하였다. 또한, 빔 조사후에 시편의 냉각효과를 높이기 위하여 -78℃의 액화 CO₂가스(압력: 1.5kgf/cm²~2.8kgf/cm²)를 사용하였으며 지름이 10mm인 동파이프를 통해 용접후면에서 투입되도록 하였다.

레이저 빔 조사 실험후 인장시험과 경도시험을 하였으며, 모재 및 용입부의 현미경조직을 관찰하였다. 또한, Fig. 1과 같은 굽힘장치에서 최대굽힘하중이 나타날때까지 굽힘실험을 하여 굽힘강도를 측정하였다. 시험은 각 조건별 3개 이상의 시험편의 실험결과를 평균하여 구하였다. 경도측정은 마이크로 비커스 경도계(하중:100g)를 이용하였으며 비드 표면에서 0.35mm 깊이에서 0.2mm 간격으로 측정하였으며, 미세조직은 금속광학현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Photo. 3은 레이저 출력이 3.1kW인 경우에 비집속빔 조사속도를 1.0~1.6m/min으로 변화시킨 강판 표면 비드 형상을 나타내며 조사속도가 빠를수록 비드폭이 감소함을 알 수 있다. 강판 두께 방향으로 절단된 내부 용융부(또는 변태부)의 폭은 Photo. 4에서 보는 바와 같이 초점에서 집속빔을 사용한 경우에 비해 초점에서 벗어난 비집속빔의 경우 더욱 넓음을 알 수 있으며, 집속빔에 의한 용융폭은 약 2.5mm이고 비집속빔의 경우 약 8.1~10.4mm으로 약 3~4배 증가한 것을 알 수 있다.

Photo. 5은 비집속빔을 사용하여 조사한 시편 단면의 미세조직을 보여주고 있다. 모재조직은 페라이트(ferrite) base에 약간의 퍼얼라이트(pearlite)가 형성되어 있으며 냉간압연된 조직을 보여준다. HAZ(Heat Affected Zone)부는 결정립이 미세해졌고 용융부는 전형적인 용접조직을 보여준다. 레이저 표면경화법에서는 마르텐사이트(martensite) 변태 경화조직을 형성하여 경도를 향상시키게 되나, 완전용입부에서는 용융도 수반하게 되어 대부분의 페라이트와 약간의 마르텐사이트, 베이나이트(beinite) 조직을 갖게 됨을 알 수 있다. 일반적으로 극저탄소강에서는 마르텐사이트 변태가 일어나기 어렵지만 레이저 빔 조사에서는 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 일부에서 마르텐사이트 변태가 일어난다고 보고되고 있다. 한편, CO₂ 레이저 빔의 흡수율을 높이기 위해 시편 표면에 칠한 블랙 페인트의 영향으로 비드 상부 일부에 침탄조직이 나타났으나 침탄 깊이가 280 μ m이하로 매우 얇으며, 침탄부의 경도값은 500Hv 정도였다.

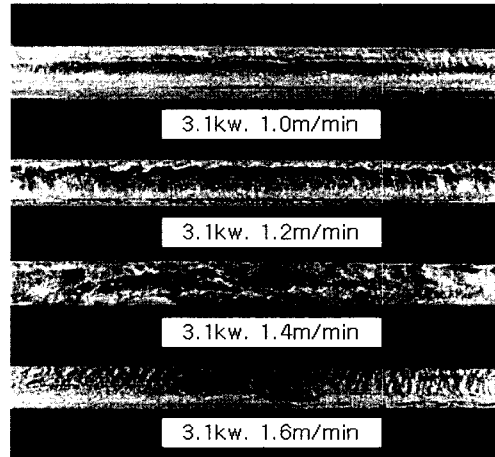
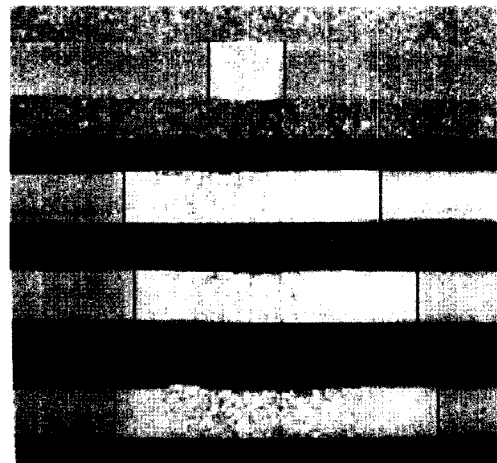


Photo. 3 Bead width of surface



Focused beam : P=2.5kW, V=2.5m/min

Defocused beam : P=3.1kW, V=1.4m/min

Defocused beam : P=3.1kW, V=1.2m/min

Defocused beam : P=3.1kW, V=1.0m/min

Photo. 4 Comparison of melted (or transformed) width

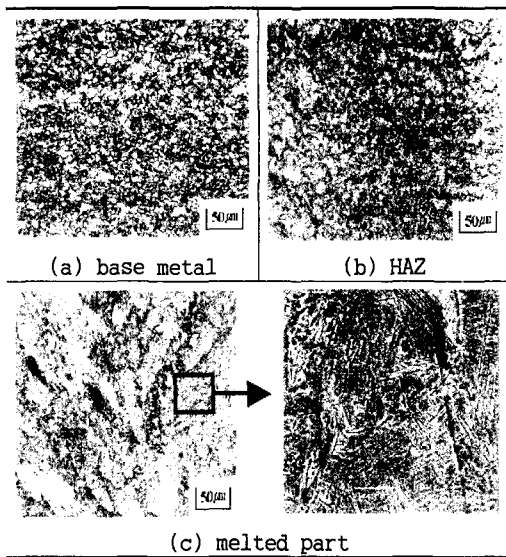
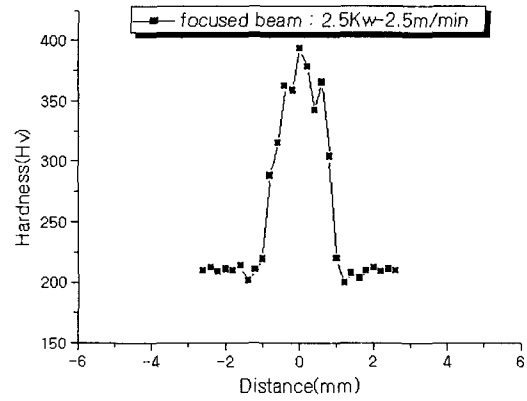


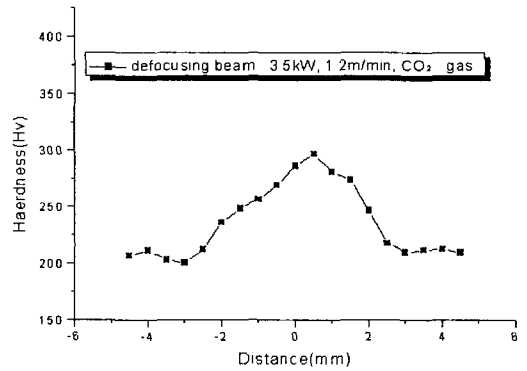
Photo. 5 Microstructures of cross-section

Fig. 2는 집속빔과 비집속빔을 사용한 경우의 비드 표면에서 0.35mm 깊이에서 0.2mm 간격으로 측정된 경도분포를 나타낸다. 집속빔을 사용한 (a)에서 최고 경도값은 397Hv이며 용융부 경도가 모재(200Hv)에 비해 크게 증가하였음을 알 수 있다. 비집속빔을 사용한 (b)에서는 냉각효율을 높이기 위해 CO₂ 가스를 사용함에도 불구하고 최고 경도값은 297Hv이며 집속빔에 비해 경도 상승효과가 떨어졌으나, 경도가 200Hv 이상인 용융부(HAZ포함)의 폭은 넓음을 알 수 있다. 비집속빔의 경우 넓은 면적에서 열적효과를 얻기 위해 레이저 출력은 증가시키면서 빔 조사속도를 감소시켰으며, 이로 인해 입열량(레이저출력/빔조사속도) 증가에 따라 냉각효과가 떨어지게 되어 집속빔의 경우에 비해 경도가 낮음을 예측할 수 있다.

Fig. 3은 초점에서 50mm 벗어난 비집속빔을 사용하여 레이저 출력 3.1kW에서 레이저 빔 조사속도와 CO₂ 가스의 압력의 영향에 따른 인장강도를 보여주고 있다. 레이저 빔 조사속도 1.2~1.6m/min에서는 빔 조사속도가 빠를수록 인장강도는 감소한다.



(a) focused beam



(b) defocused beam

Fig. 2 Hardness distributions with focusing beam and defocusing beam.

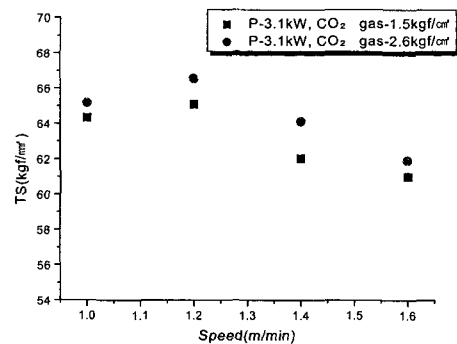


Fig. 3 Variation of tensile strengths under various laser beam irradiation speed

이는 속도가 빨라지므로 인해 입열량이 재료에 충분히 전달되지 못하여 용입면적이 적음에 기인한다. 그러나 용입면적이 넓히기 위한 레이저 빔 조사속도를 1m/min으로 감소시키면 입열량이 과하여 경도하락으로 인한 영향이 크게 되어 인장강도가 오히려 감소하는 현상을 보인다.⁴⁾ 한편, CO₂ 가스의 압력이 1.5kgf/cm²일 때 보다 2.6kgf/cm²일 때가 인장강도가 높으며, CO₂ 가스의 압력이 높을수록 냉각효과가 우수하다고 할 수 있다.

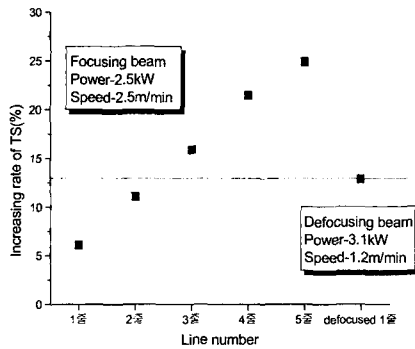


Fig. 4 Increasing of tensile strengths under various melting lines.

Fig. 4는 모재의 인장강도를 기준으로 할 때 집속빔과 비집속빔에 의한 용입선을 형성한 경우의 인장강도 증가율을 보여주고 있다. 집속빔의 경우에 용입선 증가는 용융면적의 증가를 의미하며 이로부터 인장강도가 높게 나타난다.^{4,5)} 용입선 1줄의 경우 인장강도 상승률이 6.1%, 2줄인 경우 11.1%, 3줄인 경우 15.9%인데 비집속빔 1줄의 경우 12.9%(60kgf/mm² → 67.72kgf/mm²)로 약 2~3줄의 효과가 있으며, 용융면적 3~4배의 증가효과보다는 조금 못미치는 값이나, 레이저 출력이 큰 발전기를 사용한다면 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 1줄 비집속빔의 경우 정적 최대굽힘강도

Pmax-s를 측정된 결과 굽힘하중의 효과는 37.6% (94.5kgf → 130kgf)로 충격에도 강하므로 자동차 부품으로의 적용이 가능함을 보이고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 비집속빔을 사용한 60kgf/mm²급 냉연 고장력 강판의 CO₂ 레이저 빔 조사강화에 대하여 조사하였으며, 집속빔을 사용한 경우와 비교하여 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 강판의 용융(변태)면적을 넓히기 위해 비집속빔(defocusing beam)을 사용한 경우에는 집속빔(focused beam)의 경우에 비해 약 3~4배 넓은 용융선폭을 확보할 수 있었다. 이에 비해 비집속빔 1줄 경우의 인장강도는 집속빔 용입선 2~3줄 중간 수준의 인장강도를 보였으며, 비집속빔 1줄에 의한 인장강도 증가효과 12.9%(60kgf/mm² → 67.72kgf/mm²)에 비해 굽힘하중의 증가효과는 37.6% (94.5kgf → 130kgf)로 충격에 강한 효과를 보였다.
- 2) 레이저빔의 흡수율을 증가시키기 위한 블랙 페인트의 영향으로 비드 상부 일부에 경화된 칩탄조직이 나타났으나, 칩탄 깊이가 약 280 μ m이하로 매우 얇아서 인장강도에 미치는 영향은 없었다. 또한, 레이저 빔 조사속도가 늦을 수록 인장강도는 증가하나, 속도가 너무 느린 경우에는 입열량이 과하여 경도하락의 영향이 크게 되어 인장강도가 오히려 감소하게 되며, CO₂ 가스의 압력이 높을수록 냉각효과가 우수하다고 할 수 있다.

참고문헌

1. M. Shibata et al, "Method of Improving Side Impact Protection Performance by Induction Hardening of Body Reinforcement," SAE Paper 980550, 1998.
2. K. Tamada et al, "Weight Reduction Technology by Laser Irradiation for Body Panels," 19th IDDRG Biennial Congress (Eger, 10~14, June 1996) pp.47-54.
3. M. 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), pp.97-100 (in Japanese).
4. 서정, 이제훈, 김정오, 오상진, 조원석, 이두환, 신철수 "자동차용 강판의 CO₂ 레이저 빔 조사 강화" 한국레이저가공학회지 Vol.4, No.2, pp. 21-28, 2001.
5. 서정, 이제훈, 김정오, 오상진, 조원석, 이두환, 신철수, 이문용, 이규현, "자동차용 35kgf/mm²급 강판의 레이저 강화" 대한용접학회지, Vol.20, No.1, pp. 34-40, 2002.
6. 서정, 이제훈, 오상진, 이문용, 이규현, "자동차 범퍼빔 경량화를 위한 레이저빔 조사 강화(1)" 한국자동차공학회논문집 Vol.10, No.5, pp. 228-234, 2002.