

자동차용 강판의 레이저 빔 조사 강화

Laser Beam Irradiation Strengthening of Steel Sheets for Automobile

한국기계연구원 레이저 기술연구 그룹 서 정, 이 제 훈,
김 정 오, 오 상 진
현대·기아 연구 개발본부 조 원 석, 이 두 환,
신 철 수

1. 서 론

자동차의 안전성, 주행편의성, 안락성 등 소비자의 욕구가 다양화됨에 따라 전장부품, 안전 및 편의장비의 장착으로 인해 자동차 중량이 증가하는 추세에 있다. 반면에 전세계적인 환경규제와 각국 정부의 연비규제로 차량 경량화에 의한 연비개선이 중요한 과제로 부각되고 있다¹⁾.

자동차를 구성하는 부품의 약 70% 이상은 철강재료가 차지하고 있으며, 이는 다른 경량소재와 비교하여 가격 경쟁력의 우수성(생산성, 가공성, 조립성, 도장성, 재활용성 등의 관점)때문이라고 할 수 있다. 또한, 철강소재의 경량화의 관점에서 테일러드 용접 블랭크(TWB, tailored welded blank)적용이 증가하는 추세에 있으며²⁾, 고강도강판 테일러드 블랭크 적용 기술이 연구되어짐에 따라 강판의 고강도화가 진행되고 있다. 그러나 강판이 고강도화될수록 프레스 성형성이 저하되어 복잡형상 및 정밀성형이 필요한 부품에 적용하기에는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 도요다 자동차에서는 프레스 성형한 부품을 고주파 유도경화(induction hardening)하여 부품의 강도를 향상시키는 front pillar inner, front floor cross, center pillar reinforcement 등에 적용하였다³⁾.

레이저빔에 의한 표면경화 깊이는 금속재료의 합금함량과 합금원소 종류에 따라 2mm정도 가능하나, 일반적으로 0.5mm 내외이다. 자동차 강판은 2mm이내의 박판이기 때문에 레이저 경화법으로 표면의 경도만을 향상시키는 것보다는 용융비드(molten bead)를 형성하여 용융면적을 크게 하는 것이 경도의 향상 효과는 적으나, 강도향상에는 매우 효과적임이 보고되고 있으며, 이를 레이저빔 조사강화(laser irradiation hardening or strengthening)기술이라고 한다. 도요다 자동차에서는 CO₂ 레이저 강화용 인장강도 45kgf/mm²급 강판을 개발하였으며⁴⁾, 레이저 강화기술을 front side member에 적용한 결과가 보고되고 있으나⁵⁾, 이외의 연구는 전무한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 자동차용 강판으로 사용 및 개발 중인 인장강도 40~90kg/mm²급의 강판들을 사용하여 Nd:YAG 레이저빔 조사강화 효과를 분석하고, hat-type 부품의 실물 적용 실험을 통하여 레이저빔 조사강화 기술의 자동차 차체 부품으로의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

Nd:YAG 레이저빔 조사 강화 실험에 사용된 재료는 자동차용으로 사용 및 사용 예정인 S60(냉연강판), S80(냉연강판), S38(열연강판), S35(석출강화형강판), T60(Trip강), T80(Trip강)의 인장강도 40kgf/mm²~90kgf/mm²급의 강판들이다. 사용한 재료의 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 실험방법

레이저 빔 조사 실험은 한국기계연구원과 (주)성우하이텍이 공동 개발한 테일러드 블랭크 레이저 용접 시스템(Photo. 1 참조)을 활용하였다. 사용된 Nd:YAG 레이저 발전기는 Hass사 HL 4006D로 4kW급이다. 레이저 출력은 4kW, 빔 조사 속도는 5m/min로 하였으며, 보호가스는 사용하지 않았으며, 레이저빔은 강판 표면에 집속하였다.

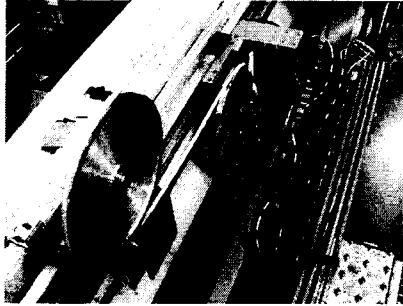


Photo. 1 Nd:YAG laser beam irradiation system (TB welder)

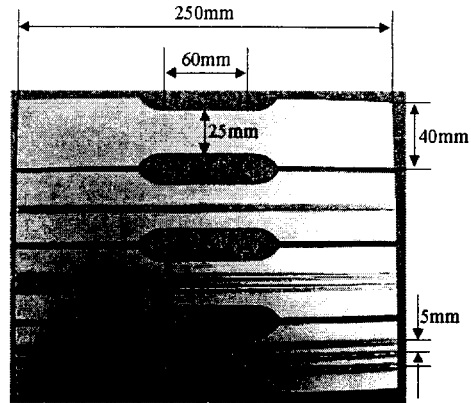


Photo. 2 Tensile specimens

강판에 레이저빔 조사를 한 후 인장강도를 측정하기 위해 레이저빔이 조사된 강판으로부터 인장시험편을 Photo. 2와 같이 KS 5호 규격으로 채취하였으며, 인장방향의 수평방향으로 3줄(간격 5mm)의 레이저빔 용입선을 가지도록 하였다. 인장시험에 사용된 장비는 Shimadzu사 인장시험기(최대하중 25ton)를 사용하였으며, 인장변위속도를 2mm/min로 하였다. 인장강도는 각 조건별 3개 이상의 시험편의 실험결과를 평균하여 구하였다. 빔 조사부의 경도를 측정하기 위하여 마이크로 비커스 경도계(HM -122, Akashi)를 이용하였으며 이때 하중은 100g으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도분포

실험에 사용된 강판의 화학조성 및 실험결과를 Table 1에 정리하였다.

Fig. 2는 탄소(C) 함량에 따른 강판들의 Nd:YAG 레이저 조사 강화후의 경도 및 경도상승을 나타내고 있다. 선행된 연구결과⁶⁾에서 보면, CO₂ 레이저 조사강화 실험에서 S60 강판의 경우 Hv=300~394로 동등한 효과를 보이고 있으나, S35 강판의 경우 Hv=218이므로 Nd:YAG 레이저 조사시 경도가 높게 나타났다. 이는 S35의 경우 Nd:YAG 레이저빔 조사속도가 CO₂ 레이저빔 조사속도에 비해 매우 크므로 냉각 효과가 S60에 비해 현저히 크게 나타난 경우라고 볼 수 있다.

Table 1 Chemical composition and experimental results

material	t (mm)	chemical composition(wt%)				before laser irradiation			after laser irradiation (3 lines)			ΔTS	
		C	Si	Mn	P	tensile strength	hard-ness	elonga-tion	tensile strength	hard-ness	elonga-tion		
						kgf/mm ²	Hv	%	kgf/mm ²	Hv	%	kgf/mm ²	%
S60	1.4	0.09	0.52	1.75	0.02	63.7	215.6	29.4	73.8	365.8	22.5	10.1	16
S80	1.8	0.14	0.5	2.4	0.02	89.8	340.3	23.7	101.4	446	19.1	11.6	13
S38	1.6	0.08	-	0.6	0.014	41.4	214.4	41.7	47.5	280.8	29.2	6.1	15
S35	1.2	0.023	-	0.15	0.08	43.2	256.7	40.8	49.8	363.1	28.0	6.6	15
T60	1.2	0.084	0.97	1.52	0.078	64.3	266.8	40.2	72.9	432.2	19.3	8.6	13
T80	1.4	0.19	1.6	1.6	-	85.3	332.8	38.4	101.2	528.5	18.2	15.9	19

3.2 인장강도 비교

Fig. 3은 Table 1의 재료의 화학성분중 탄소(C) 및 망간(Mn) 함량에 따른 강판들의 Nd:YAG 레이저빔 3줄 완전용입 조사 후의 인장강도 상승을 나타내고 있다. 선행된 연구 결과⁶⁾로부터 CO₂ 레이저빔 조사강화 실험에서 S60 강판의 경우 ΔTS=9.9~11.2kgf/mm², S35 강판의 경우 ΔTS=7.6kgf/mm²이므로 거의 동등한 강화효과가 있음을 알 수 있다.

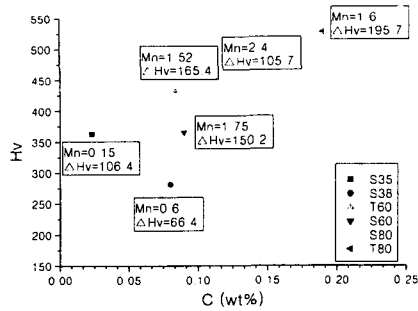


Fig. 1 Relation between hardness and carbon content

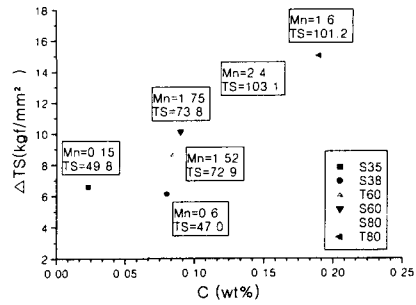


Fig. 2 Relation between increase of tensile strength and carbon content

Nd:YAG 레이저 조사강화시 입열량(Q)은 48kJ/m로 CO₂ 레이저 조사 강화시의 입열량보다 적으나 동등한 강화효과가 나타남은 Nd:YAG 레이저빔의 파장(1.06 μm)이 CO₂ 레이저빔의 파장(10.6 μm)보다 짧아 강판 내부로의 빔 흡수율이 높음에 기인될 수 있다. Fig. 2에서 비슷한 탄소 함유량을 가진 S60, T60, S38의 3개의 강판을 비교해 보면 Mn 함유량이 높을수록 인장강도 증가(강화)가 큼을 알 수 있다. Fig. 3에 탄소당량(C_{eq}=C+Mn/6+Si/24)에 따른 레이저빔 조사 후의 인장강도와 인장강도 증가를 나타내었다.

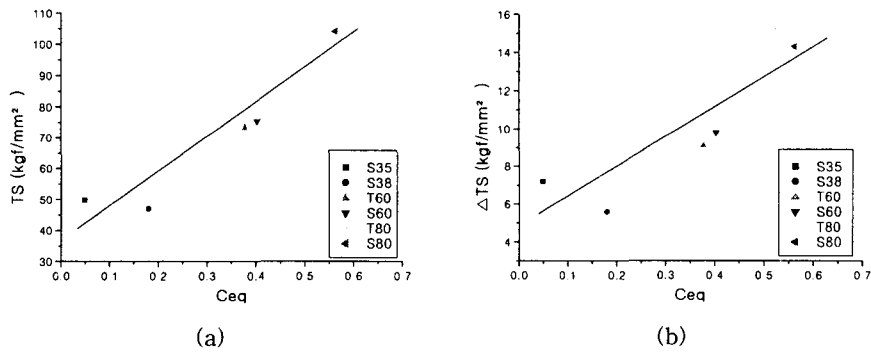


Fig. 3 Relation between increase of tensile strength and carbon equivalent

C_{eq}와 TS 및 ΔTS의 관계는 선형적이라고 할 수 있으나, 데이터 분산오차가 매우 넓다고 할 수 있다. Fig. 4는 C×Mn 함유량에 따른 레이저빔 조사후의 인장강도와 인장강도 증가를 나타내고 있다. C×Mn과 TS 및 ΔTS의 관계는 매우 선형적이라고 할 수 있으며, 데이터 분산오차도 Fig. 3에 비해 매우 적음을 알 수 있다.

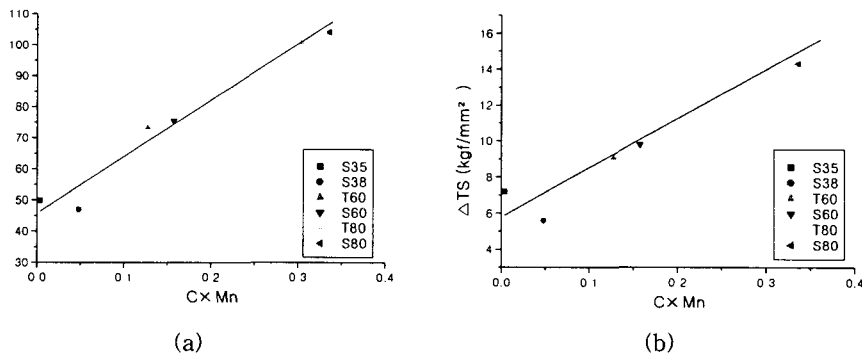


Fig. 4 Relation between increase of tensile strength and C×Mn

Fig. 5는 T80과 S60의 경도분포를 나타내고 있다. C가 많은 경우 경도가 상승하고 Mn이 많은 경우 경화 변태조직(최대경도치 범위)이 넓음을 알 수 있다⁵⁾. Mn은 최고경도의 상승에도 기여하지만 강의 γ/α 변태점을 크게 저하시키게 한다. 따라서, 동일한 온도분포를 주는 경우에도 Mn양이 많아지면 γ 상이 되는 영역이 변화하여 강판의 경화폭이 증대한 것으로 판단된다.

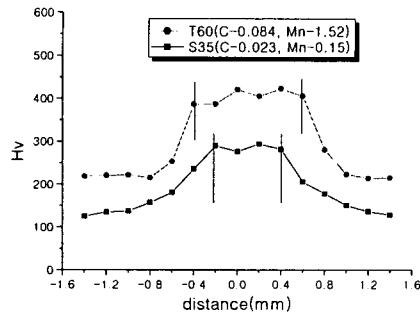


Fig. 5 Comparison of hardness distribution after laser strengthening

3.3 타 실험결과와의 비교

Table 2는 Nd:YAG 레이저 조사강화 결과와 선행된 CO₂ 레이저 조사강화 및 보고된 실험결과⁵⁾와의 비교를 나타내고 있다. 본 연구의 Nd:YAG 레이저 조사강화 효과와 CO₂ 레이저 조사강화 효과는 거의 같음을 알 수 있다. 그러나, 보고된 실험결과⁵⁾와는 다소 차이를 보이고 있으나, 이는 레이저 출력 등의 실험조건의 차이로 나타나며, 이로 인해 변태영역, 경도 등의 차이에 기인하고 있다.

본 연구의 Nd:YAG 레이저 조사강화 및 CO₂ 레이저 조사강화 결과는 레이저 조사강화의 실제 적용성을 평가하기 위한 hat-type 시편에 적용하였다.

Table 2 Comparison with other results

material	chemical composition(wt%)				after laser strengthening			remark
	C	Si	Mn	P	tensile strength (base mat.)	increase of tensile strength(Δ TS)		
					kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	
S60	0.09	0.52	1.75	0.02	63.7	10.1	16	Nd:YAG laser, 3 lines
					62.3	9.9	16	CO ₂ laser, 3 lines
					64.3	16	25	CO ₂ laser, 5 lines
S80	0.14	0.5	2.4	0.02	89.8	11.6	13	Nd:YAG laser, 3 lines
					107.4	11.9	18	CO ₂ laser, 3 lines
S38	0.08	-	0.6	0.014	41.4	6.1	15	Nd:YAG laser, 3 lines
					47.2	6.13	15	CO ₂ laser, 3 lines
S35	0.023	-	0.15	0.08	43.2	6.6	15	Nd:YAG laser, 3 lines
					40.2	7.6	19	CO ₂ laser, 3 lines
T60	0.084	0.97	1.52	0.078	64.3	8.6	13	Nd:YAG laser, 3 lines
					76.1	11.9	19	CO ₂ laser, 3 lines
T80	0.19	1.6	1.6	-	85.3	15.9	19	Nd:YAG laser, 3 lines
					113.1	27.5	32	CO ₂ laser, 3 lines
Conventional	0.13	0.04	0.89	0.01	51.5	9.2	19	CO ₂ laser, 3 lines ⁵⁾
Developed	0.12	0.02	1.98	0.01	48.0	14.8	31	

4. 단순화 모델로의 적용

4.1 시편의 제작 및 굽힘 실험

굽힘 실험을 위하여 Fig. 6과 같이 hat-type 부품(bracket용)을 제작하였으며, 외부 패널에 레이저 빔을 일정한 패턴으로 조사한후 내부 패널과 저항 점용접으로 조립하여 3-point 굽힘실험(span: 120mm)을 행하였다. Fig. 6의 굽힘시험용 hat-type 시편제작 공정에 따라 시편의 외부 패널에 여러 가지 패턴을 형성시킨 예가 Photo. 3에 나타나 있다. Hat-type 시편은 Bracket 부품으로 35kgf/mm²급 냉연강판(S35)으로 되어 있으며, CO₂ 레이저빔 조사를 하였다. 레이저 빔 조사조건은 CO₂ 레이저빔 조사강화 실험의 최적조건을 선정하여 사용하였다. L2시편의 레이저빔 조사된 외부 패널과 내부 패널은 저항 점용접으로 조립된 예가 Photo. 4에 나타나 있다.

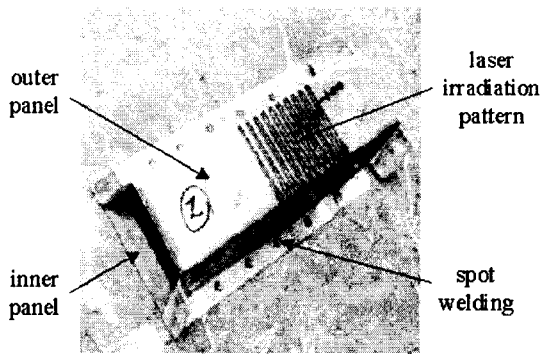


Photo. 4 Spot welded hat-type bending specimen (L2)

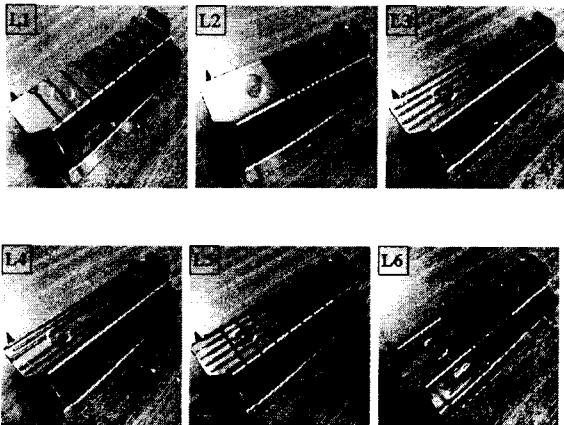


Photo. 3 Various laser irradiated patterns in out panel of hat-type specimen

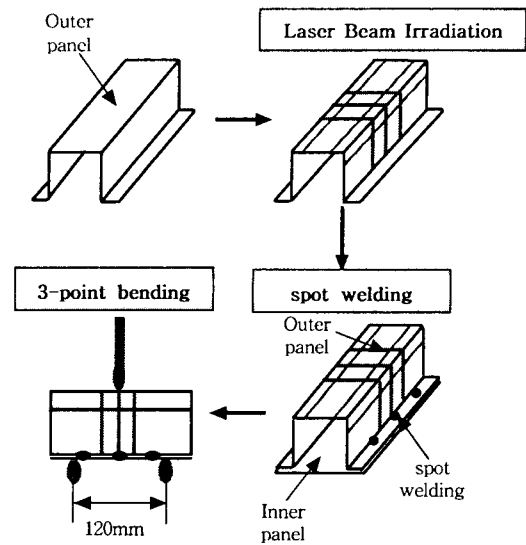


Fig. 6 3-point bending process

Photo. 6은 hat-type 시편을 stroke 5m/min으로 굽힘실험하는 장면을 나타내고 있다. 3-point 굽힘 시험조건으로 span은 120mm이다. 굽힘시험 장치는 Shimadzu사 Autograoh를 사용하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 여러 형태의 레이저 빔 조사 패턴이 형성되어 제작된 단순화 모델의 굽힘시험 결과를 나타내고 있다. L1~L6은 Photo. 4에서의 번호를 의미하며, M은 패턴이 없는 모재(표준)시편을 나타내고 있다. Fig.7의 결과는 Table 3에 정리되어 있다.

Table 3 Experimental results obtained from Fig. 17

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

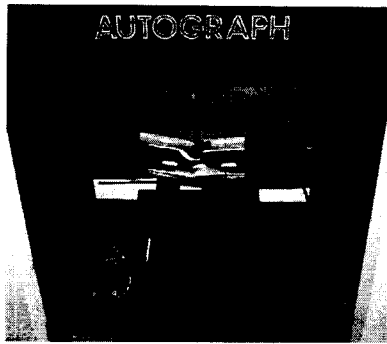


Photo. 5 3-point bending testing machine

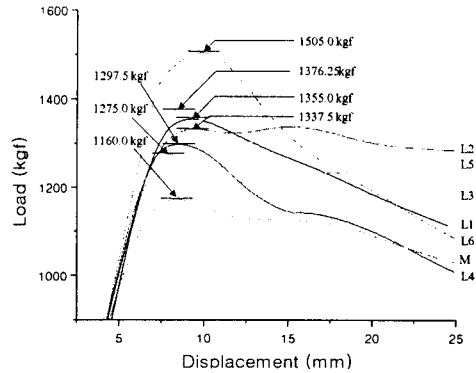


Fig. 7 Load-displacement curves of hat-type specimens with various patterns

Fig. 7과 Table 3으로부터 L4와 L2의 혼합형태인 L6패턴의 경우에 최대 굽힘하중을 나타내며, 패턴이 없는 M에 비해 약 30% 최대하중 증가율을 보인다. 또한, 최대하중에 도달한 후 하중강하 형태는 L4와 유사하다. 길이 방향으로의 용입선은 시편 모서리부에 형성하는 것이 적절함을 알 수 있으며, 폭 방향으로의 용입선은 시편 전체에 넓게 분포시키는 것이 적절하게 보인다. 그러나, L2의 경우 굽힘시험시의 하부 벤딩 지그의 지지 위치가 용입선부의 외부에 존재했기 때문에 L1보다 낮은 하중값을 보이나, L2가 L4와 조합된 경우에는 최대하중 상승에 기인하며, 이때에는 하부 벤딩 지그의 위치가 무관하게 되며 L4와 L2의 조합인 L6가 가장 적절한 방법임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저를 사용하여 자동차용 강판의 레이저 조사 강화 적용성 평가를 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) S60, S80, S38, S35, T60, T80 강판을 사용하여 출력 4kW, 빔 조사속도 5m/min, 빔 조사 라인수 3(pitch 5mm)의 조건에서 Nd:YAG 레이저빔 조사 강화효과 분석하였다. 그 결과, S60, S35의 경우 CO₂ 레이저 빔 조사강화 결과와 유사하였으며, 재료의 화학적 성분에서 C×Mn 에 비례하여 강화효과가 나타났으며, 특히 Mn이 많은 경우, 강화효과가 큼을 알 수 있었다.

(2) 단순화 모델로의 적용 및 실부품으로의 적용성 평가를 위해 hat type 시편을 제작하여 굽힘 강도를 분석하였다. 최적 빔 조사 패턴을 도출하였으며, 표준시편 대비 굽힘강도가 30% 증가하여 30%정도의 경량화가 가능함을 알 수 있었다.

(3) 국부적인 레이저 조사 강화기술은 테일러드 용접 블랭크의 적용이 어려운 자동차 부품의 경량화에 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 1) 광규섭, "자동차 경량화의 현황과 전망", 자동차경제, pp. 24~29, 1997. 10. 18.
- 2) 이종봉, 박희동, "Tailored Blank의 적용 현황 및 전망", 대한용접학회지, 18-3, 2000, pp.5-11.
- 3) M. Shibata, M. Oonishi, K. Makino and S. Kurach, "Method of Improving Side Impact Protection Performance by Induction Hardening of Body Reinforcement," SAE Paper 980550, 1998.
- 4) K. Tamada, A. Sato and N. Nakagawa, "Weight Reduction Technology by Laser Irradiation for Body Panels," 19th IDDRG Biennial Congress (Eger, 10~14, June 1996) p.47-54.
- 5) 北村 充ら, "レーザー照射強化用 440MPa級 GA鋼板 開發," 自動車技術會學術講演前 刷集 951 pp.97-100 (1995-5).
- 6) 서정, 이제훈 등 "자동차용 강판의 CO₂ 레이저빔 조사 강화", 한국레이저가공학회지, 4-2, 2001, pp. 21~28,