

6061 알루미늄 합금 Nd:YAG 레이저 용접부의 기계적 성질에 관한 연구

윤 종 원 · 이 윤 상* · 이 문 용** · 정 병 훈**

동의대학교 공과대학 재료금속공학과

*동의대학교 대학원 신소재공학과

** (주) 성우하이텍 기술연구소

Study on the mechanical properties of Nd:YAG laser welded 6061 aluminum alloy

J.W. Yoon, Y.S. Lee*, M.Y. Lee** and B.H. Jeong**

Dept. of Materials Science and Engineering, Dongeui University

*Dept. of Advanced Materials Engineering, Graduate School, Dongeui University

**Technical Institute, Sungwoo Hitech Co., Ltd.

Abstract

6061 aluminum alloy sheets were I-square butt welded using a continuous wave Nd:YAG laser. Heat inputs were varied from 54.6 to 80 J/mm for butt welding using different sets of the laser power and the weld speed. I-square butt welds were also made with and without Ar shielding gas. The effect of Ar shielding gas and heat input on the mechanical properties and formability was investigated using Vickers hardness, transverse-weld tensile and bulge test. Porosity on the weld beads and sections and hot crack on the fracture surfaces of transverse-weld tensile test specimens were investigated using optical and scanning electron microscopy. The experimental results showed that mechanical properties and formability of 6061 aluminum alloy laser welds were degraded compared to those of base metal. Mechanical properties and formability of 6061 aluminum alloy laser welds were not substantially changed when Ar shielding gas was supplied or heat inputs were varied.

Key words : Laser welding, 6061 aluminum alloy, Ar shielding gas, Mechanical properties, Formability

1. 서 론

최근 자동차 업계의 주요 관심 분야인 연료전지차량 및 하이브리드 차량의 실현을 위해 차체 경량화 역시 반드시 해결해야 할 과제로 떠오르고 있다. 이러한 경향에 맞춰 기존 철강재에 비해 비중이 낮은 알루미늄 합금의 적용과 생산효율을 높이기 위한 방법으로써 레이저의 사용이 고려되고 있다¹⁾.

알루미늄 합금 레이저 용접시 직면하는 가장 큰 문제점은 고온균열과 기공의 발생이며 용접부의 인장성질 및 성형성에 직접적인 영향을 주는 요소로 작용한다.²⁻⁴⁾ 고온균열(Hot crack)은 용융금속의 응고단계에서 고상과 액상 공존온도 영역에서 응고마지막 단계에 발생하는 응고균열(Solidification crack)과 용접 열사이클에 의해 가열된 열영향부에서 결정립계에 존재하는 저융점 성분이 용융되고 여기에 국부적인 응력이 작용하여 발생하는 열영향부 결정립계 액화균열(Heat affected zone grain boundary liquation crack)이 있다. 응고균열의 경우 용가재 및 결정립 미세화 원소 첨가 등으로 용접금속의 조성을 변화시키거나 용접부에 작용하는 국부응력의 작용을 최소화시켜 균열발생을 저감시킬 수 있다. 기공의 발생원인은 액상의 용융금속에 용해된 수소가 용융금속의 응고중 알루미늄 고체와 액체상태에서의 수소용해도 차에 의해 기체상태로 된 수소가 용접금속 바깥으로 배출되지 못하고 내부에 갇힌 경우, Zn, Mg와 같은 저비등점 합금원소가 용접중 증기화하여 용융금속의 응고도중 내부에 갇힌 경우, 그리고 keyhole(키홀)의 불완전한 붕괴들로 인한 경우를 들 수 있다.³⁻⁵⁾

본 연구는 열처리형 합금인 6061 알루미늄 합금 압연 판재의 연속과 Nd:YAG 레이저 용접시 Ar 보호가스 사용유무 및

입열량 변화에 따른 용접성을 조사하였다. 경도시험, 인장시험, 액압성형성시험을 통하여 기계적 성질을 평가하였으며 이러한 성질에 영향을 끼치는 용접결함을 금속광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 재료는 두께 2mm인 열처리형 알루미늄 합금인 6061-T6로 이 합금의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 The chemical composition of 6061 aluminum alloy(wt. %).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0.68	0.5	0.28	0.01	1.0	-	0.19	0.02	Bal.

2.2 실험방법

2.2.1 시편준비 및 레이저 용접

Fig. 1과 같이 판재를 압연방향이 접합면에 수직하도록 판재를 100mm×200mm의 크기로 절단하고 접합면은 밀링가공을 하여 I-square butt 이음부를 준비하였다. 밀링가공한 면을 아세톤으로 세척한 뒤, 용접시편 구속치구에 시편을 고정시킨 상태에서 최대출력 4kW의 연속과 Nd:YAG 레이저를 사용하여 맞대기 레이저 용접 하였다.

용접조건은 레이저 빔의 초점위치를 0 mm로 한 뒤 Table 2와 같이 하였고, 레이저 빔 조사축과 50°각도를 이루며 설치된 직경 12.6mm인 구리튜브를 이용하여 Ar 보호가스를 공급하였다. 용접쿠폰 아래 위치한 고정지그에서 용접선을 따라 파인 홈을 통하여 하부비드에도 보호가스를 공급함으로

써 용접이음부 상하부 모두에 10 l/min의 유량으로 Ar보호가스를 공급하였다.

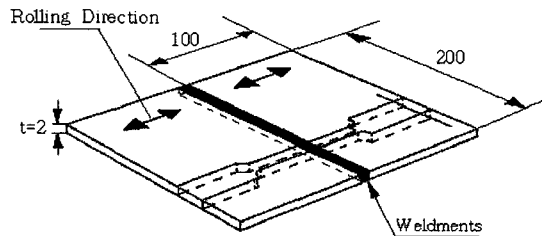


Fig. 1 The weld coupon and the extraction of the transverse-weld tensile specimens.

Table 2 Laser welding condition.

Laser power (kW)	Welding speed (m/min)	Shielding gas	Flow rate (l/min)		Heat input (J/mm)
			Upper	Back	
2.8	2.1	-	-	-	80
3.0	3.3	-	-	-	54.6
3.8	4.1	-	-	-	56.6
3.2	3.3	Ar	10	10	58.2

2.2.2 인장시험 및 경도시험

각 조건별로 레이저 용접된 용접쿠폰으로부터 Fig. 1과 같이 용접금속이 인장시험의 게이지부 중심에 위치하도록 하여 게이지 길이가 50mm인 Transverse-weld 인장시험편을 채취하였다. 인장시험시 Cross-head 이동속도는 2.5mm/min로 설정하여 각 용접조건별로 3개 이상의 인장시험편을 시험하였다.

경도시험은 Vickers 경도계를 이용하여 200g의 하중으로 용접금속 횡단면 1/2두께 위치에서 용접금속, 열영향부 및 모재에 걸쳐 0.25mm 간격으로 14초 동안 압입자를 가압하여 경도값을 측정하였다.

2.2.3 액압 성형성 시험(Bulge Test)

레이저 용접된 200mm×200mm의 용접쿠폰을 Bulge 시험용 금형에 장착하고 시험편이 파단 될 때까지 유압을 가하였다. 파단된 시험편을 꺼낸 뒤 Height gauge를 사용하여 파단된 돔(Dome)의 높이를 측정하여 성형성의 지수로 사용하였다.

2.2.4 Metallography and Fractography

용접금속 내부에 생성된 결함 관찰을 위하여 용접쿠폰의 용접시작점으로부터 각각 100mm, 70mm, 60mm지점에서 횡단면, 종단면 및 상부비드를 채취하여 마운팅한 후 각각 연마하여, Keller 용액을 사용하여 에칭한 후 금속광학현미경으로 관찰하였다. Transverse-weld 인장시험편 파단면의 용접결함을 관찰하기 위하여 저배율 금속광학현미경과 주사전자현미경을 이용하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 용접성

보호가스를 사용하지 않은 용접쿠폰의 상부 비드 표면은 매우 거칠었으며 하부비드는 비드처짐 현상이 발생하였다(Fig. 2 (a), (b), (c)).

입열량 변화에 따른 하부비드의 비드처짐 및 비드폭의 변화는 상부비드에 비해 더욱더 명확히 차이가 발생하였다. 특히 80J/mm의 입열량이 투입된 조건의 경우 하부비드 표면은 다른 조건에 비해 거칠지 않고 매끄러우나 비드처짐 정도가 심하고 비드폭도 가장 넓었다.

Ar 보호가스를 사용하여 레이저 용접한 경우 상부 및 하부비드 표면에 물결무늬가 발생하였으며, 보호가스를 사용하지 않은 경우에 비해 비드표면이 매끄러웠으며 하부비드의 비드처짐 현상이 사라졌다.

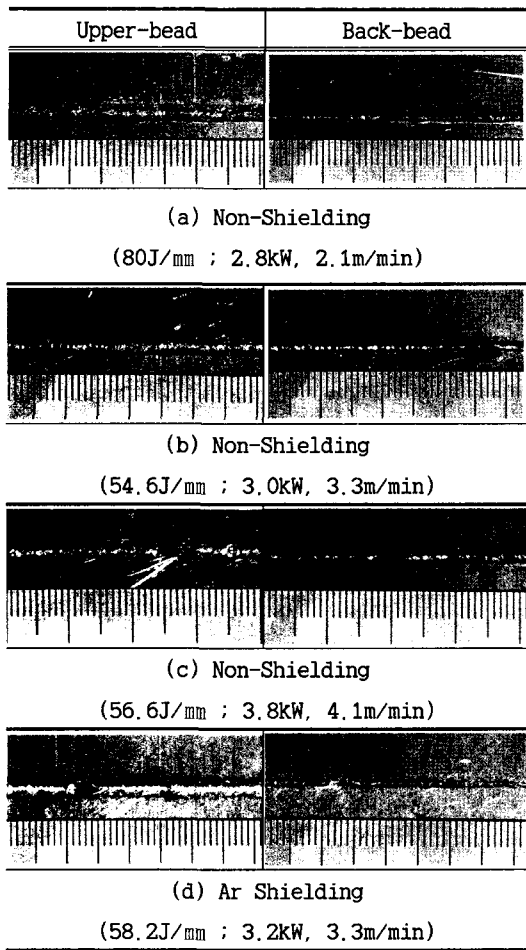


Fig. 2 The shape of upper and back-bead on 6061 aluminum alloy laser weld coupons.

그러나 상부비드를 따라 간혹 비드폭이 불균일한 용접부가 관찰되었다(Fig. 2 (d)).

Ar 보호가스를 사용하지 않은 경우(입열량 56.6J/mm) 및 Ar 보호가스를 사용한 경우(입열량 58.2J/mm) 용접비드 두께를 관통하는 hole이 발생하였으며 특히 보호가스를 사용하지 않은 조건(입열량 56.6J/mm)에서 더욱더 현저하였다(Fig. 2 (c), (d)). 이러한 현상에 대해 여러 연구자들의 연구결과에 의하면 과입열에 의해 생성된 용융금속의 질량이 증가하며 중력이 작용하여 액체금속의 점성도 및 표면장력을 이기고

아래로 떨어져서 발생한 형태이거나 키홀 내의 금속증기가 연속적으로 조사되는 레이저 빔 에너지에 의해 폭발하여 나타난 결과로 설명하고 있다⁶⁻⁸⁾. 그리고 용접후 입열량 변화에 관계없이 용접쿠폰이 변형되어 휘어지는 현상이 관찰되었다.

3.2 인장성질 및 성형성

6061 알루미늄 합금 레이저 용접부의 모든 Transverse-weld 인장시험편과 액압성형성 시험편에서 파단은 Fig. 3 및 Fig. 4에 보여진 바와 같이 용접금속에서 일어났으며 Ar 보호가스 사용여부에 관계없이 인장시험편의 파단면인 용접금속에서 기공이 관찰되었으나 앞선 보고와 같이 5052 알루미늄 합금 레이저 용접금속에서 관찰되는 기공에 비해 그 수와 크기가 작았다⁹⁾.

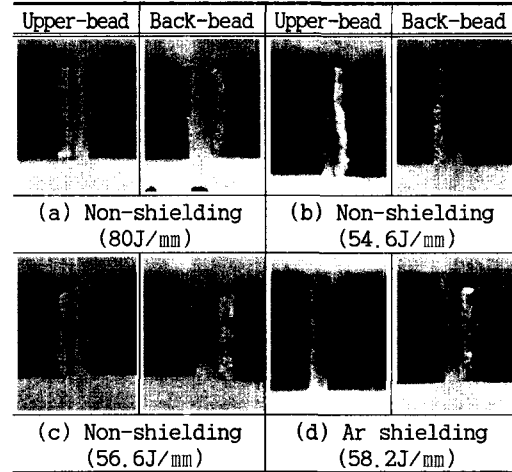


Fig. 3 Fracture area in the transverse-weld tensile test specimens of 6061 aluminum alloy laser welds.

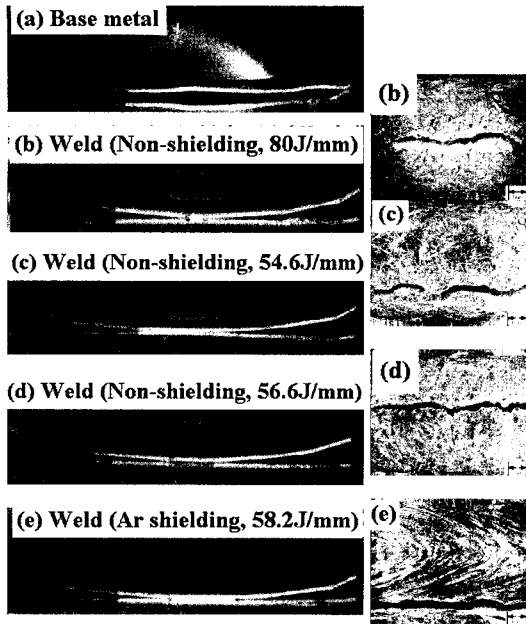


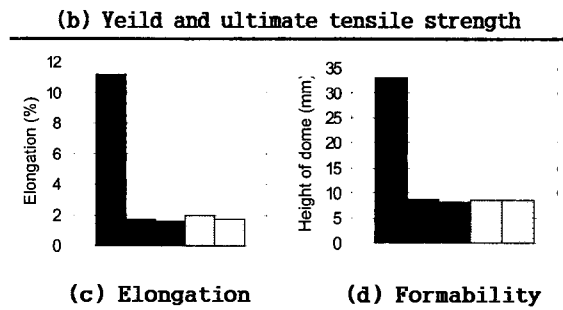
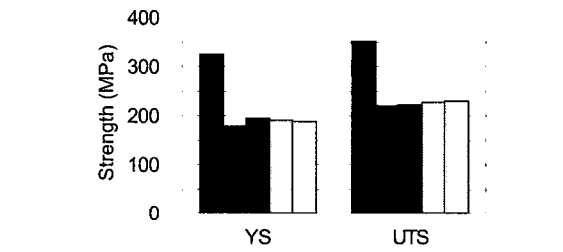
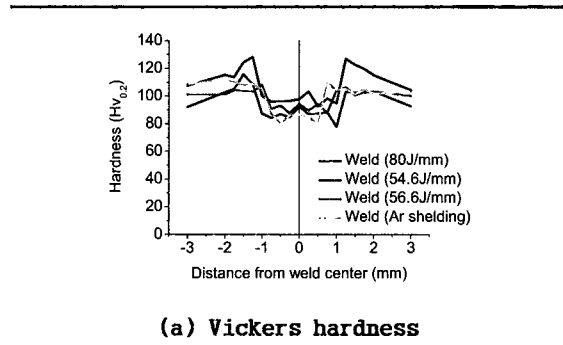
Fig. 4 Bulge test coupons and fracture area for 6061 base alloy and Nd:YAG laser welds in 2mm thick 6061 aluminum alloy.

Fig. 5에서 보듯이 6061 알루미늄 합금 레이저 용접부의 경도, 인장강도, 항복강도, 연신률 및 성형성은 모재보다 열화되었으며 이 값들은 Ar 보호가스의 사용유무 및 입열량 변화에 관계없이 유사하였다. 용접 금속 경도값은 모재대비 약 80%이며, 항복강도 및 최대인장 강도는 모재 대비 각각 54~59% 및 62~65%이다. 연신률 및 성형성의 경우 각각 모재대비 14~17% 및 약 25%를 나타내었다.

인장시편 파단면에서는 Ar 보호가스 사용여부 및 입열량 변화와 관계없이 Fig 6과 같은 고온균열들이 관찰되었다.

Fig. 6(a)는 입계파괴 흔적을 나타내고 있으며, 국부적인 영역을 확대하여 관찰한 결과 Fig 6(b), (c)와 같이 Dendrite 조직을 이루고 있었다. 또한 대부분의 인장시편 파단면에서는 Fig. 6(d)와 같은 액상 막(film)들이 관찰되었다. 이것은 응고 마지막 단계에 존재했던 공정(Eutectic)조성의 액상이

그대로 응고된 형태로 추정되며 이러한 결과들로 미뤄보아 여기서 관찰된 균열은 응고균열일 것으로 사료된다¹⁰⁾.



	80J/mm	54.6J/mm	56.6J/mm	58.2J/mm
Base metal	Non-shielding			Ar shielding
	Weld			

Fig. 5 Mechanical properties and formability of Nd:YAG laser welds in 6061 aluminum alloy.

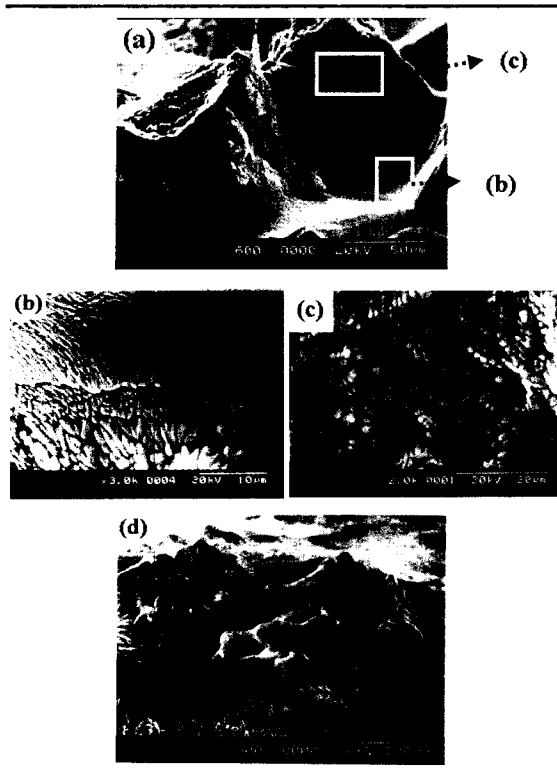


Fig.6 Solidification cracking observed on the fracture surface in the transverse-weld tensile specimens of 6061 aluminum alloy laser welds.

Fig. 7 (b), (c)과 같이 보호가스를 사용하지 않은 조건에서는 Ar 보호가스를 사용할 때와 달리 입열량 변화에 관계없이 많은 기공이 관찰되었다. 그리고 입열량이 증가할수록 기공의 크기가 증가하였고 입열량이 작을수록 크기는 작으나 많은 수의 기공이 관찰되었다.

모재대비 용접금속의 항복강도 및 최대인장강도의 저하 정도는 경도값 저하 정도에 비해 더욱 현저하였다. 용접부의 기계적 성질 열화정도가 이렇게 큰 이유는 모재가 T6(용체화열처리 + 인공시효)처리되어 최대강도를 가지게 하는 준안정상들이 용접 후 용접금속내에서 재용해된 상태로 시효경화효과가 소멸된 것과 아울러 Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 용접금속에서 관찰되는 기공

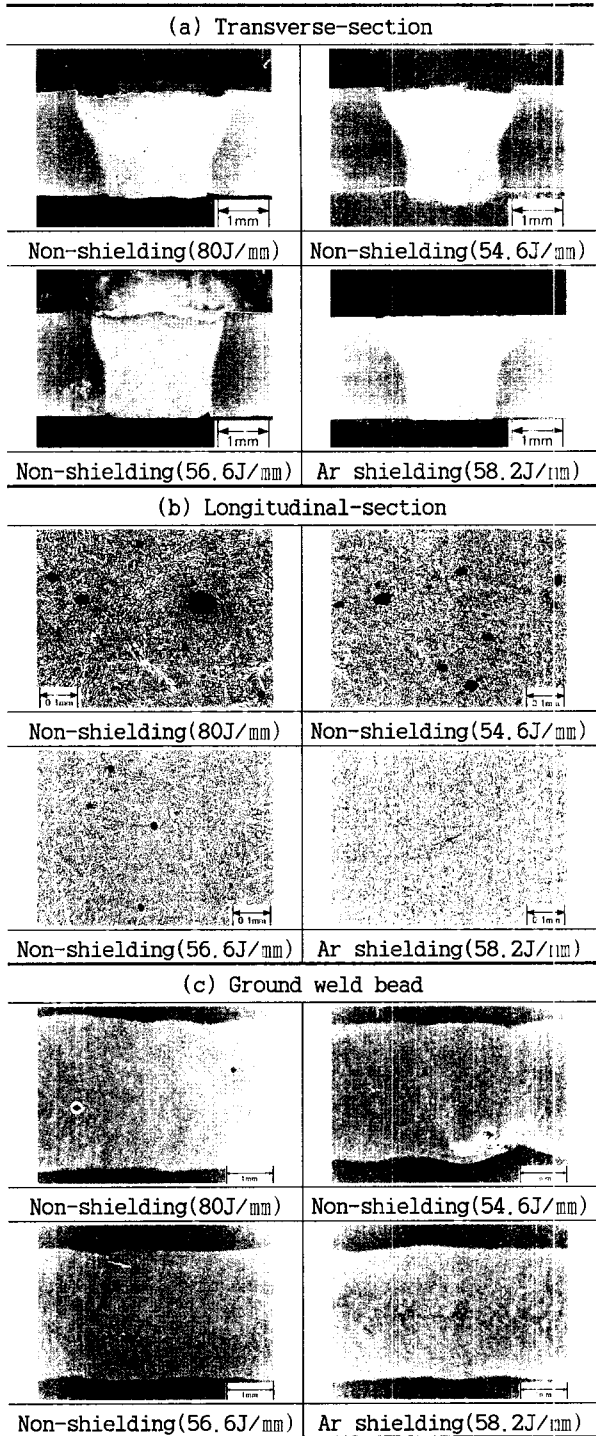


Fig.7 Polished, etched weld section and beads of 6061 aluminum alloy laser welds.

및 고온균열에 의한 것으로 추정된다^{3,4, 10-12)}.

그러나 Fig. 7과 같이 Ar 보호가스를 사용할 경우 기공의 수와 크기가 감소함에도 불구하고 Fig. 5와 같이 인장성질 및 성형성은 큰 변화가 없는 반면, Fig. 6과 같은 고온균열조직은 모든 용접조건에서 유사하게 관찰되었으며 이러한 결과는 인장성질 및 성형성의 결과와도 잘 일치한다.

즉 고온균열이 6061 알루미늄 합금 레이저 용접부의 기계적 성질 열화에 지배적인 영향을 끼쳐 Ar 보호가스 사용여부, 입열량 변화에 관계없이 유사한 인장성질과 성형성을 나타낼 것으로 추정된다.

4. 결 론

Ar 보호가스 사용 및 입열량 변화에 관계없이 6061 알루미늄 합금 레이저 용접부의 경도, 항복강도, 최대인장강도, 연신률 및 성형성은 모재에 비해 저하되었다.

Ar 보호가스를 사용하여 레이저 용접한 경우 보호가스를 사용하지 않은 경우에 비해 6061 알루미늄 합금 레이저 용접부의 항복강도, 최대인장강도, 연신률 및 성형성은 개선되지 않았으며, 또한 입열량 변화에 상관없이 유사한 경향을 나타낸다. 이것은 6061 알루미늄 합금의 조성이 고온균열에 민감하여 레이저 용접시 Ar 보호가스 사용 및 입열량 변화에 상관없이 용접금속내 발생하는 고온균열에 의해 지배적인 영향을 받았기 때문이다.

후 기

본 연구는 2003년도 부산테크노파크의 연구지원을 받아 수행되었으며, 연구수행을 위해 협조해 주신 고등기술연구원 관계자

여러분께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

1. B. Irving, The auto industry gears up for aluminum, *Welding Journal*, Vol.79 No.11, Nov. 2000, pp63~68.
2. J. W. Yoon et al., Laser Welding of Aluminium alloys, *TWI Report* 517, Jan. 1995, pp26~27.
3. J. W. Yoon, Laser Welding of Aluminum Alloys, *Journal of KWS*, Vol.18 No.2, Apr. 2000, 147~153 (in Korean).
4. H. Zhao et. al., Current issues and problems in laser welding of automotive aluminum alloys, *International Materials Reviews*, Vol.44, No.6, 1999, pp238~266.
5. S. Kou, Welding metallurgy and weldability of high strength aluminum alloy, *WRC Bulletin* 320, Dec. 1986.
6. S. Venkat et. al., CO₂ and Nd:YAG laser beam welding of 6111-T4 aluminum alloy for automotive applications, *Journal of laser applications*, Vol.12 No.3, Jun. 2000, pp101~115.
7. S. Ramasamy et. al., CO₂ laser beam welding of aluminum 5754-O and 6111-T4 alloys, *Welding Journal*, Vol.76 No.7, Jul. 1997, pp275s~282s.
8. L. Cretteur et. al., Flux development to improve CO₂ laser welding of aluminum application to alloy 6061, *Welding in the World*, Vol.44 No.1, January/February 2000. pp4~11.
9. J. W. Yoon et. al, Study on the mechanical properties of 5052

- aluminum alloy laser welds, Journal of KSLP, Vol.6 No.1, April. 2003, pp25~31 (in Korean).
10. D. Fabregue et. al., Microstructural study of laser welds Al6056-AS12 in relation with hot tearing, Materials Science Forum, Vol.396-402(2002), pp1567~1572.
 11. A. Hirose et. al., CO₂ laser beam welding of 6061-T6 aluminum alloy thin plate, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.28A, Dec. 1997, pp2657~2662.
 12. N.F Gittos et. al., Heat-Affected Zone cracking of Al-Mg-Si alloys, Welding Journal, Vol.60 No.6, June 1981, pp95s~103s.