

파이버 레이저를 이용한 이종 마그네슘 합금의 용접성에 관한 연구

김종도^{*,†} · 김영식^{**} · 송무근^{***} · 이정환^{****}

^{*}한국해양대학교 기관공학부

^{**}한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램

^{***}한국해양대학교 대학원

^{****}성우하이텍 기술연구소

The Weldability of the Dissimilar Magnesium Alloy Welded by Fiber Laser

Jong-Do Kim^{*,†}, Young-Sik Kim^{**}, Mook-Keun Song^{***} and Jung-Han Lee^{****}

^{*}Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{**}ReSEAT Program, Korea Institute of Science and Technology Information

^{***}Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{****}Technical Institute of Sungwoo Hitech Co., LTD, Busan 619-961, Korea

[†]Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received November 27, 2012 ; Revised December 14, 2012, Accepted April 19, 2013)

Abstract

Magnesium alloys have gained increased attention in recent years as the structural materials, because of their attractive properties such as good specific strength, excellent sound damping capability. However, to expand their applications, a reliable joining process is absolutely necessary. In this study, a CW fiber laser was used to investigate the lap weldability of sand casting and wrought magnesium alloys. The effect of defocused distance on lap weldability was examined, and it was found that spatters always generated at the around focused distance because of the high power density of the laser beam. Thus, defocused distance was required to obtain sound welds. In addition, the application of fillet welding was evaluated for minimizing the affect of sand casting magnesium alloy that have relatively poor weldability. As a result of this study, we could confirm good weldability without weld defects.

Key Words : Sand casting magnesium alloy, Wrought magnesium alloy, Fiber laser, Lap welding, Fillet welding

1. 서 론

구조용으로 사용가능한 금속재료 중 최경량인 마그네슘 합금은 주조 작업시 많은 이점이 있기 때문에, 오늘날까지 대부분의 마그네슘 합금 제품은 주조 공정을 통해 제작되어 왔다. 특히 다이캐스팅법을 이용할 경우, 알루미늄 합금을 같은 공정으로 처리하는 경우보다 금형의 수명이 3~5배 정도 향상되며, 단위시간당 20~50%, 단위무게당 20~30% 정도의 생산성 향상을 기대할 수 있다¹⁻³⁾. 그러나 기존 연구에 따르면 마그네슘

합금 주조재의 용접은 기공 형성, 액화 균열 및 합금원소의 손실과 같은 용접결함 때문에 건전한 용접의 수행이 어려웠다⁴⁻⁷⁾.

또한 액상 마그네슘은 고상 마그네슘에 비해 수소의 용해도가 크다^{8,9)}. 따라서 알루미늄 합금의 용접에서 문제시 되는 수소 기공이 마그네슘 합금에서도 주요한 관심사였다. 특히 고압으로 제조되는 다이캐스트재는 모재내에 상당한 양의 기공을 내포하고 있으며, 이들 초기 기공내의 가스압은 대기압 보다 매우 높다. 따라서 용접시 금속이 용융되는 과정에서 기공이 팽창하게 되고 주변 기공과의 융합으로 인해 대형 기공을 형성한

다고 보고되고 있다^{6,7)}.

한편 고압의 환경이 아닌 주조재의 용접은 다이캐스팅재에 비해서 용이하긴 하나 이 또한 주물의 품질이 용접성에 지대한 영향을 미치기 때문에 주물의 영향을 최소화 할 수 있는 용접공법의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 CW fiber 레이저를 사용하여 마그네슘 합금 사형주조재와 상대적으로 조직이 치밀한 압연재와의 겹치기 용접성을 평가하였다¹⁰⁾.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

마그네슘 합금 사형주조재에 압연재를 덧대어 용접하는데 있어, 본 연구에서 선정한 용접재료는 MRI202S (사형주조재)와 AZ31B(압연재)이다.

MRI202S는 고온 및 높은 하중에서 사용하기 위해 개발한 사형 및 금형주조 합금으로^{11,12)}, 다른 사형주조 마그네슘 합금에 비해 우수한 주조성, 치밀성, 치수 안정성 및 개선된 내부식성을 특징으로 하고 있다.

한편 AZ31B는 Mg-Al-Zn의 대표적인 3원계 합금으로 현재 압연판재로 상용화되어 있다. Table 1에 MRI202S 및 AZ31B의 화학조성을 나타낸다. 실험에 적용한 시험편의 두께는 사형주조재인 MRI202S의 경우에는 4 mm, 그리고 압연재인 AZ31B는 1.5mm였으며, 120 mm(길이)×50 mm(폭)의 크기로 재단하여 겹치기 및 필릿 용접에 적용하였다.

Fig. 1은 각 소재별 단면의 현미경사진이다. 본 실험을 위해 제작한 사형주조 시험편은 단면사진에서 보는 것처럼, 전반적으로 소재내에 기공이 없는 우수한 품질을 보이고 있다. 또한 MRI202S의 결정립 크기는 41.66 μm로, 12.5 μm의 압연재에 비해 3배 정도 큰 결정립을 가지고 있었다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 CW 파이버 레이저를 사용하여 사형주조재(하판)와 압연재(상판)의 겹치기 용접을 실시하였으며, 용접상황을 Fig. 2에 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of MRI202S and AZ31B alloys

Element Material	Zn	Zr	Ca	Nd	Y	RE	Mg
MRI202S	0.2 ~ 0.5	0.7	0.03 ~ 0.10	2.8 ~ 3.2	0.05 ~ 0.20	-	Bal.
Element Material	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Mg	
AZ31B	2.5 ~ 3.5	0.6 ~ 1.4	0.2 ~ 1.0	<0.005	<0.005	Bal.	

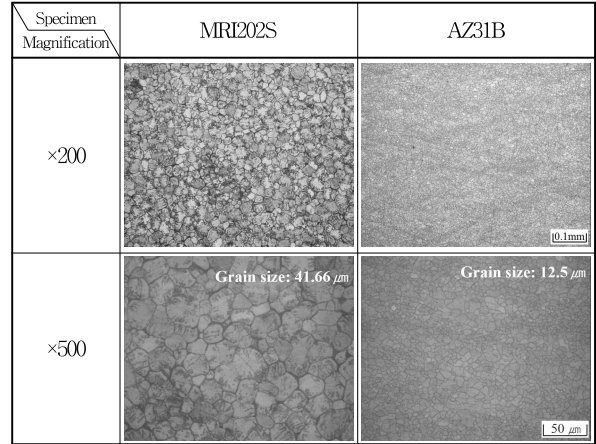


Fig. 1 Microstructure of specimens

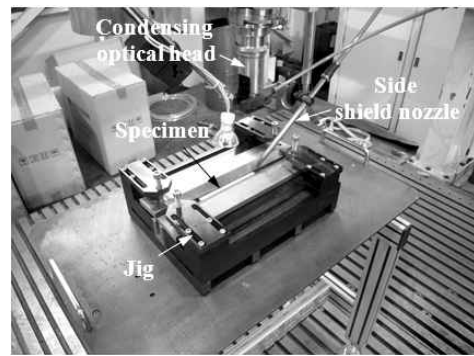


Fig. 2 Photo of laser welding

광학계의 초점거리는 300mm이며, 용접중 용융지의 산화를 방지하기 위해서는 용접진행방향 후방에 설치된 실드가스 노즐을 통해 Ar가스를 25 l/min의 유량으로 공급하였다. 노즐의 각도는 40°이며, 노즐과 용융지의 거리는 20mm로 설정하였다.

파워밀도가 높은 파이버 레이저의 특성을 고려하여 적정 비초점거리(f)를 도출하기 위한 실험을 우선적으로 수행하였으며, 적정 비초점거리에서 레이저 출력(P)과 용접속도(v)를 변화시키면서 기본적인 겹치기 용접성을 평가하였다. 평가항목은 Fig. 3에 나타낸 것처럼 비드폭(W_b)과 용입깊이(D_p), 그리고 접합부폭(W_j)이었다.

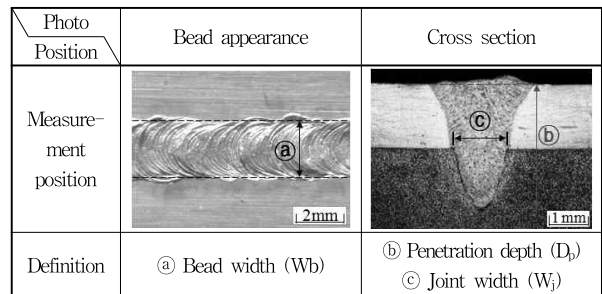


Fig. 3 Measurement position and definition

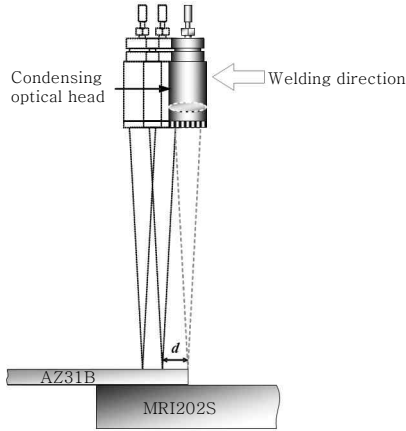


Fig. 4 Schematic illustration of fillet welding with CW fiber laser

또한 겹치기 용접에서 선정된 적정 용접조건을 기준으로, 필릿 용접으로의 적용을 검토하였다. 필릿 용접에서는 Fig. 4의 모식도에서 나타난 것처럼 주조재와 압연재의 경계부로부터 거리 d 를 변화시키면서 실험을 진행하였으며, 실드조건은 겹치기 용접과 동일시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

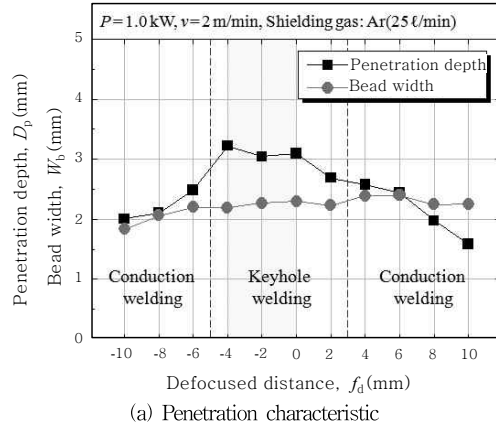
3.1 비초점거리에 따른 용입특성

Fig. 5에 비초점거리(f_d) 변화에 따른 용입특성을 나타낸다. 실험은 플러스(+)와 마이너스(-)의 비초점 방향으로 각각 10mm의 거리를 2mm 간격으로 조사하였다.

비초점거리에 따라 용입깊이는 초점을 중심으로 -4mm에서 +2mm까지 키홀용접 현상을 보였으며, -6mm 및 +4mm에서 열전도형 용접으로 이행하였다¹³⁾. 이것은 Fig. 5(b)의 단면사진에서 확연히 관찰되며, 집광광학계가 가지는 전형적인 특성으로써 비초점거리에 따른 파워밀도 변화가 주된 원인이다.

또한 단면조직사진에서 알 수 있는 것처럼, 주조재의 용접에서 문제시 되는 기공 및 균열과 같은 용접결함이 없는 건전한 용접부가 전반적으로 얻어졌다. 일부 작은 미세기공이 용접부내에서 관찰되는 경우도 있으나, 용접부 강도에 미치는 영향은 미미할 것으로 사료된다.

그러나 Fig. 6에 나타난 것처럼, 초점 근방에서는 비드외관에서 스패터의 흔적이 관찰되었다. 이것은 용접시 비점이 낮은 마그네슘 기지가 빔의 오실레이션 주기와 일치할 때 폭발적으로 증발함으로써 용융금속을 비드 외부로 밀쳐냈기 때문이다. 다시 말해 키홀용접에서는 키홀의 개폐를 반복하며 용접을 진행하게 되는데, 키홀이 열렸을 때 증기압이 높은 마그네슘의 급격한 증



(a) Penetration characteristic

P=1.0kW, v=2m/min Shielding gas: Ar(25 ℓ/min)					
f_d (mm)	Cross section	f_d (mm)	Cross section	f_d (mm)	Cross section
-10		-2		+6	
-8		0		+8	
-6		+2		+10	
-4		+4			

(b) Bead appearance and weld morphology

Fig. 5 Variation of penetration characteristics with defocused distance

P=1.0kW, v=2m/min Shielding gas: Ar(25 ℓ/min)	
Photo f_d (mm)	Bead appearance
-4	
-2	
0	
+2	
+4	

Fig. 6 Variation of bead appearance with defocused distance

발로 인해 선택적으로 용융금속을 외부로 밀쳐냄으로써 발생하는 현상으로 사료된다. 더불어 파이버 레이저의 높은 파워밀도가 이 현상에 지대한 영향을 미쳐, 키홀 용접이 수행되는 구간에서는 스패터의 발생을 피할 수 없었다.

따라서 열전도형 용접으로의 이행이 요구되며, 본 연구에서는 적절한 용입깊이가 얻어지면서 안정적인 비드 외관을 보였던 +4mm를 적정 비조점거리로 선정하였다.

3.2 레이저 출력 및 용접속도 변화에 따른 용접특성

비조점거리 실험에서 최적으로 판단된 +4mm의 비조점거리에서 레이저 출력을 0.8kW에서 1.4kW까지 0.2kW간격으로 조절하고, 각 출력별 용접속도를 1m/min에서 7m/min까지 1mm/min 간격으로 변화시키면서 겹치기 용접을 실시하였다.

Fig. 7은 레이저 출력 및 용접속도에 따른 용입특성의 변화를 정리하여 나타낸 것으로, 용입깊이는 Fig. 7의 (a)에서 나타난 것처럼 모든 출력 범위에서 용접속도가 증가함에 따라 감소하였다. 겹치기 용접은 하판인 주조재에 상판인 압연재를 덧대어 용접하는 방식으로, 관통용접이 요구되지는 않으나 충분한 강도를 확보하기 위해서는 적절한 용입깊이를 확보하여야 한다. 사용한 압연재의 두께가 1.5mm이므로, 본 연구에서는 적정 용입깊이를 2.5~3.0mm로 설정하였다. 이 이상의 용입깊이가 얻어지는 조건에서는 과입열로 인해 험핑비드나 기공과 같은 용접결함이 빈번히 발생하였다.

Fig. 7의 (b)는 각 출력별 용접속도 변화에 따른 비드폭의 변화를 나타낸 것으로 용접속도가 증가할수록 입열량 감소에 따른 비드폭의 감소가 확인되었다. 또한 레이저 출력이 높을수록, 그리고 용접속도가 느릴수록 비드폭의 변화가 크며, 용접속도가 빠른 경우(4m/min 이상)에는 상대적으로 비드폭의 변화가 완만하였다.

Fig. 7의 (c)는 레이저 출력 및 용접속도 변화에 따른 접합부폭의 변화를 도시한 것이다. 겹치기 용접에서는 접합부폭이 용접강도에 결정적인 영향을 미치므로 용입깊이와 더불어 중요한 용접성 평가지수이다. 레이저 출력이 감소할수록, 그리고 용접속도가 증가할수록 접합부폭은 순차적으로 감소하는 전형적인 모습을 보였다. 또한 상대적으로 고출력인 1.2kW 및 1.4kW를 적용한 경우에는, 동일한 용접속도에서 유사한 접합부폭이 얻어졌는데, 이것은 안정적인 접합부폭을 확보하는데 어느 수준 이상의 레이저 출력이 요구됨을 의미한다. 본 연구에서는 적정 접합부폭을 1mm 이상으로 선정하였고, 이를 안정적으로 구현할 수 있는 레이저 출력의 임계값은 1.2kW로 판단하였다. 각 출력별로 안정적인 접합부폭이 얻어지는 구간은, 과입열로 인해 비드가 불안정한 경우를 제외하면 레이저 출력 1.2kW를 적용한 경우에는 용접속도 2~3 m/min, 그리고 1.4kW를 적용한 경우에는 3~4 m/min으로 판단된다.

한편 용입깊이가 적정 범위를 넘는 조건에서는 Fig. 8에서 나타난 것처럼, 비드의 험핑이 발생하거나 용접부내 기공 잔존, 그리고 비드의 불안정과 같은 용접결함이 지속적으로 관찰되었다. 이것은 과입열이 주된 원인으로, 표면장력 및 점성은 낮고 증기압은 높은 마그네슘의 특성과 어울려 이와 같은 결함이 발생하는 것으로 사료된다.

더불어 깊은 용입깊이가 얻어진다는 것은 하판인 주조재의 용융역이 증가한다는 것을 의미한다. 주조재는

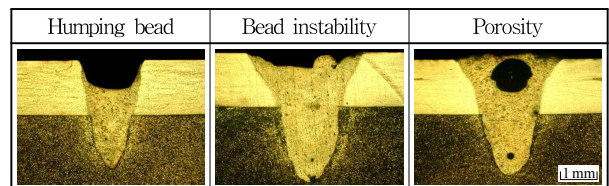


Fig. 8 Typical weld defects of magnesium alloy in laser welding

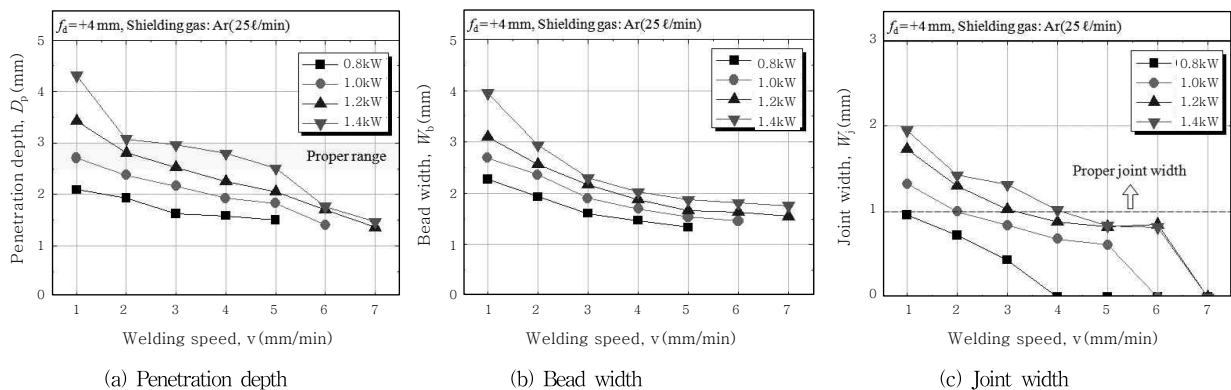


Fig. 7 Variation of penetration characteristics with laser power and welding speed

압연재에 비해 상대적으로 치밀하지 못하므로 소재내에 잔존하고 있는 각종 가스의 함량이 높다. 따라서 용접 시 하판에서 발생한 각종 가스 버블이 급속응고시 용융부내 잔존하게 되면서 기공을 만들거나, 용융금속을 폭발적으로 외부로 방출시켜 스파터를 발생시키고 그 과정 중에 비드의 불안정을 동반하게 된다고 판단된다.

3.3 필릿 용접시 레이저 조사 위치에 따른 용접특성

마그네슘 합금 실물에 레이저 적용을 고려하면, 하판이 되는 주물재의 품질 및 제품의 형상이 용접성에 크게 영향을 미치므로 적정 용접조건외 범위가 매우 협소하며, 또한 적정조건이라 하더라도 항상 우수한 용접성을 보장하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 겹치기 용접에서 얻어진 적정조건을 바탕으로 필릿 용접으로의 적용을 검토해보았다.

필릿 용접은 실험방법의 Fig. 4의 모식도에 나타난 것처럼, 주조재와 압연재의 경계부에서($d=0\text{mm}$) 겹침부쪽으로 레이저 조사위치를 0.25mm간격으로 1mm까지 변화시키면서 진행하였다. 더불어 필릿 용접은 열전도 방향이 겹치기 이음에 비해 한정적이기 때문에 겹치기 용접에서 적정 용접조건인 1.2kW, 2m/min의 조건을 적용할 시 관통용접에 가까운 용입이 얻어졌고, 이 조건은 과입열로 판단되므로 최종적으로는 레이저 출력은 1.2kW, 용접속도는 3m/min을 적용하였다. 이때 광학계의 비초점거리와 실드 분위기는 겹치기 용접과 동일시하였다.

그 결과 각 조건별 대표적인 단면조직 사진을 Fig. 9에 나타낸다. 경계부로부터의 거리가 0.75mm 이상에서는 필릿 용접에서 겹치기 용접으로 이행하는 단계로 판단되며 타 조건에 비해 깊은 용입이 얻어지고 있으

나, 용접시 상판인 압연재가 녹아 흘러내려 하판인 주조재에 충분히 용착하지 못함으로써 1.0의 조건에서처럼 겹침부에 공극이 발생한 모습을 확인할 수 있다. 이것은 기계적 하중이 작용하는 환경하에서 응력집중의 개소가 되며, 제품의 내구성을 떨어뜨리므로 안정적인 필릿 용접의 영역으로 보기에는 무리가 있는 조건이다.

경계부로부터 0.25mm이내에서는 안정적인 필릿 용접이 수행되는 것으로 판단되며, 하판인 주물재의 용융량이 한정적이고 용접시 발생 가능한 각종 가스들이 직접 외부로 방출되기 때문에 겹치기 용접에 비해 험핑비드나 스파터의 발생 같은 용접결함으로부터 보다 자유로운 건전한 용접의 수행이 가능하였다.

4. 결 론

CW 파이버 레이저를 이용한 사형주조 마그네슘 합금 MRI202S와 압연재인 AZ31B의 겹치기 및 필릿 용접성을 평가한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) CW 파이버 레이저를 사용한 주조재와 압연재의 겹치기 용접에서 스파터의 발생을 최소화하면서 깊은 용입을 얻을 수 있는 적정 비초점거리는 레이저 출력 1.0kW, 용접속도 2m/min의 조건에서 +4mm였다.
- 2) 레이저 출력 및 용접속도를 변화시키면서 겹치기 용접을 실시한 결과, 스파터가 발생하지 않으면서 용입이 깊고 안정적인 용접부를 얻을 수 있었던 적정 조건은 레이저 출력 1.2kW일 때 용접속도 2~3m/min, 그리고 레이저 출력 1.4kW일 때는 용접속도 3~4m/min이었다.
- 3) 필릿 용접으로의 적용을 검토한 결과, 겹치기 용접에 비해 하판인 주물재의 영향을 최소화하여 보다 건전한 용접의 수행이 가능하였다.

후 기

본 논문은 한국과학기술정보연구원이 교육과학기술부의 과학기술진흥기금으로 수행하는 ReSEAT프로그램 지원으로 이루어졌음. 또한, 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0301-13-2009).

참 고 문 헌

1. H. Westengen : Magnesium die casting from ingots to automotive parts, Light Metal Age, 58-3~4 (2000), 44-52
2. 김수현, 임창동, 유봉선 : 마그네슘합금 가공 및 성형 기술, 기계와 재료, 16-2(2004), 47-54 (in Korean)

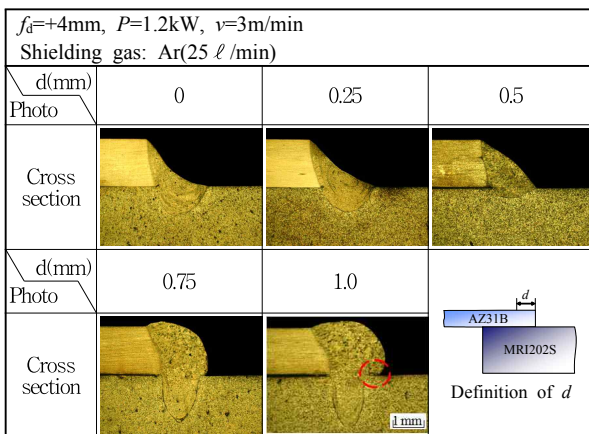


Fig. 9 Variation of bead appearance and weld morphology with d(distance from boundary)

3. 임창동, 유동선, 손근용 : 마그네슘합금의 자동차 부품 적용 현황, 기계와 재료, 16-4(2004), 66-75 (in Korean)
4. C. Lehner, G. Reinhart and L. Schaller : Welding of Die-Casted Magnesium Alloys for Production, Journal of Laser Applications, 11-5(1999), 206-210
5. P.G. Sanders, J.S. Keske, K.H. Leong and G. Kornecki : High Power Nd:YAG and CO₂ Laser Welding of Magnesium, Journal of Laser Applications, 11-2 (1999), 96-103
6. M. Pastor, H. Zhao and T. DebRoy : Continuous Wave-Nd: Yttrium-Aluminum -Garnet Laser Welding of AM60B Magnesium Alloy, Journal of Laser Applications, 12-3(2000), 91-100
7. H. Zhao and T. DebRoy : Pore Formation during Laser Beam Welding of Die-Cast Magnesium Alloy AM60B -Mechanism and Remedy, Welding Journal, 80-8(2001), 204-210
8. M.M. Avedesian and H. Baker : ASM Specialty Handbook- Magnesium and Magnesium Alloys, 1999
9. 한국철강신문 : 마그네슘합금의 기초 및 응용, 2004 (in Korean)
10. J.D. Kim, Y.S. Kim, M.K. Song and J.H. Lee : A Study on the Weldability of Dissimilar Magnesium Alloys using CW Fiber Laser, Proceedings of the KWS Conference, Vol 57(2012), 70
11. B. Brofin and N. Moscovitch : New Magnesium Alloys for Transmission Parts, Metal Science and Heat Treatment, 48-11~12(2006), 479-486
12. E.A. Nyberg, S.R. Agnew, N.R. Neelameggham and M.O. Pekguleryuz : The Effect of Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties of Sand Cast Alloy MRI 202S, Magnesium Technology 2009, 87-91
13. H. Al-Kazzaz, M. Medraj, X. Cao, M. Jahazi and M. Xiao : Effect of welding speed on Nd:YAG laser weldability of ZE41A-T5 magnesium sand castings, LIGHT METALS 2005, 137-149