

레이저 열원을 이용한 마그네슘 합금의 용접성에 관한 연구 (I) - AZ31B-H24 및 AZ31B-O의 레이저 용접성 비교 -

이 정 한* · 김 중 도** † · 이 문 용*

*성우하이텍 기술연구소

**한국해양대학교 기관공학부

A Study on the Weldability of Magnesium Alloy by Laser Heat Source (I) - Comparison on Laser Weldability of AZ31B-H24 and AZ31B-O -

Jung-Han Lee*, Jong-Do Kim** † and Mun-Yong Lee*

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

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

†Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received October 15, 2012 ; Revised October 29, 2012 ; Accepted October 31, 2012)

Abstract

This study is related to the laser weldability of AZ31B magnesium alloy, an all-purpose wrought alloy with good strength and ductility. In general, AZ31B is classified into AZ31B-H24 and AZ31B-O depending on temper designation. Thus, in this study, the laser weldability of AZ31B-H24 and AZ31B-O was investigated and compared. CW Nd:YAG laser was used to produce bead and butt joints. And the effects of welding conditions on the weldability of these joints were examined in detail. As a result of this study, AZ31B-H24 was found to have thinner oxide film and smaller grain size compared with AZ31B-O. Due to such difference, in bead welding, AZ31B-H24 had more wide welding range for full penetration compared with AZ31B-O. Furthermore, it was also confirmed that AZ31B-H24 and AZ31B-O have different welding conditions to obtain stable keyhole in butt welding.

Key Words : Magnesium alloy, AZ31B-H24, AZ31B-O, Nd:YAG laser, Bead welding, Butt welding

1. 서 론

최근 각종 환경규약 및 제한된 자원의 효율적 사용에 대한 요구가 급증함에 따라 석유자원의 대부분을 소비하는 운송기기분야에서는 연비향상의 필요성이 크게 부각되고 있다. 이러한 시대적 흐름에 따라 경량재료를 사용하여 완성품의 무게를 절감하는 방안이 주목 받고 있으며, 알루미늄 합금의 뒤를 이룰 차세대 경량소재로써 마그네슘 합금에 대한 관심이 고조되고 있다¹⁻²⁾.

그러나 마그네슘 또는 마그네슘 합금의 사용량은 아직까지 알루미늄이나 철강재에 비해 매우 부족한 실정이다. 이는 타 금속재료에 비해 생산 단가가 높을 뿐만

아니라 마그네슘의 높은 반응성 그리고 열악한 내식성과 같은 단점 때문으로, 마그네슘에 대한 사회적 관심이 증가하면서 이러한 문제점을 해결하기 위한 노력도 꾸준히 진행되고 있다.

한편 마그네슘 합금은 주조 작업시 여러 이점이 있기 때문에, 기존의 마그네슘 합금 제품은 대부분 다이캐스팅 공법으로 제조되어 왔다³⁾. 그러나 다이캐스팅재의 경우, 강도나 내열성이 엄격하지 않는 부위에 한정적으로 사용되며, 제품의 두께나 크기에 제약이 많다.

따라서 최근에는 압연 공정을 통한 마그네슘 합금 판재가 많은 연구자들의 관심을 모으고 있으며, 압연 판재의 소성가공에 관한 다양한 연구가 진행 중이다. 특히 마그네슘은 HCP의 결정구조를 가지고 있기 때문에

상온에서의 소성 변형능이 크게 떨어진다. 이것은 변형 온도를 올리는 방법으로 해결할 수 있으며, 이미 많은 연구자들에 의해 변형온도를 증가시키면 연신을 또한 향상된다는 사실이 알려져 있다. 일반적으로 마그네슘 합금의 압연, 압출 및 단조 등의 가공 공정은 300~500°C의 온도 범위에서 주로 이루어지고 있다⁴⁻⁶⁾. 이외에 마그네슘 합금의 이방성과 집합조직의 영향도 주된 연구 테마였다⁷⁻⁸⁾.

이처럼 마그네슘 합금의 개발 및 평가에 관해서는 다양한 연구 결과가 보고되고 있으나, 마그네슘 합금의 용접에 대한 사례는 상대적으로 매우 부족한 실정이다. 그러나 마그네슘 합금의 사용량이 증가하고 적용분야가 광범위해지면서 제품이 대형화 및 복잡 다양화에 부응하기 위해서는 성형 공정만으로는 완제품을 만들 수 없으므로 용접 공정이 필수적으로 수반된다. 따라서 신뢰성 있는 용접공정의 개발이 요구되며, 근래에 들어 마그네슘 합금의 용접에 대한 연구가 경쟁적으로 수행되고 있다.

한편 마그네슘 합금은 제조 공정에서의 가공 또는 열처리 조건에 따라 원하는 기계적 성질을 얻을 수 있으며, 질별 기호(temper designation)로써 이를 명시하고 있다. 이들 질별 기호는 합금 기호 뒤에 하이픈(-)을 붙여서 표시하고 있으며, 현재 압연 판재로 상용화되어 있는 것은 AZ31B-H24와 AZ31B-O제이다. 여기서 H24는 가공경화 후 부분 어닐링된 상태를, 그리고 O는 완전 어닐링된 상태를 의미한다⁹⁻¹⁰⁾.

반면 오늘날까지 마그네슘 합금 판재의 용접에 관한 대부분의 연구들은 사용한 소재의 질별 기호에 대한 특별한 언급 없이, 단순히 AZ31 또는 AZ31B 합금을 사용하였다고만 기술하고 있다¹⁰⁻¹²⁾. 그러나 AZ31B-H24 또는 AZ31B-O의 구분에 따라 기계적 특성의 차이가 엄연히 존재하고, 이러한 차이는 동일한 조건에서 서로 다른 용접성을 유발할 것이다.

따라서 본 연구에서는 AZ31B-H24 및 AZ31B-O재를 용접대상으로 선정하고 레이저 열원에 의한 기본적인 용접성 조사와, 더불어 질별에 따른 용접성 차이를 비교 및 검토하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 용접재료는 두께 1.25mm의 AZ31B-H24 및 AZ31B-O 마그네슘 합금 압연판재이다. AZ31B는 알루미늄이 3wt.%, 그리고 아연이 1wt.% 함유된 마그네슘 합금으로 그 공칭조성을 Table 1에

Table 1 Chemical compositions of AZ31B

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.

Table 2 Typical mechanical properties of AZ31B magnesium alloy sheets

Properties Material	Thickness (cm)	Tensile strength (MPa)	Tensile yield (MPa)	Elongation (%)
AZ31B-H24	0.041~0.634	290	221	15
	0.635~0.951	276	200	17
	0.952~1.270	269	186	19
	1.271~2.540	262	165	17
	2.541~5.080	255	159	14
	5.081~7.620	255	145	16
AZ31B-O	0.041~0.152	255	152	21
	0.153~0.634	255	152	21
	0.635~1.270	248	152	21
	1.271~5.080	248	152	17
	5.081~7.620	248	145	17

나타낸다¹³⁾. Table 2는 두 소재의 기계적 특성을 두께별로 정리한 것으로, AZ31B-H24는 AZ31B-O에 비해 인장강도는 높고, 연신은 낮은 특성을 가지고 있다⁹⁾.

2.2 실험방법

용접 열원으로는 최대출력 4kW의 CW Nd:YAG 레이저를 사용하였으며 집광광학계의 초점길이는 200mm, 초점에서의 빔 직경은 0.6mm이다. 실험은 비초점거리($f_d = -1\text{mm}$)에서 비드 및 맞대기 용접을 실시하였으며, 맞대기 용접의 경우 집합면의 정도를 높이기 위해 맞댄 면은 밀링처리하였다. 주된 용접공정변수로는 레이저 출력(P)과 용접속도(v)로 한정하였으며, 산화에 민감하고 표면장력 및 점성이 낮은 마그네슘의 특성을 고려하여 전면비드와 이면비드를 모두 실행하였다. 이때 사용한 보호가스는 Ar이었으며, 전면실드유량은 25 l/min, 그리고 이면실드유량은 10 l/min으로 고정하였다.

Fig. 1은 레이저 용접 상황의 사진으로, 본 연구를 위해 지그에 이면실드를 위한 7mm(폭)×12mm(높

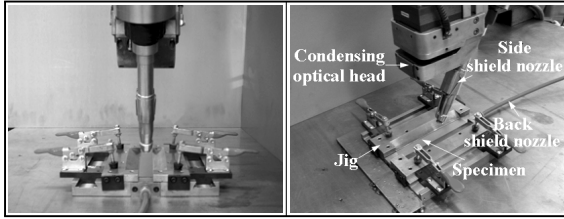


Fig. 1 Photos of laser welding

Photo Position	Bead appearance	Cross section
Measurement position		
Definition	a) Front bead width (W_{fa}) b) Back bead width (W_{fb})	c) Penetration depth (D_p)

Fig. 2 Measurement position and definition

이)의 흠을 특별히 제작하였다.

용접이 완료된 시험편은 전면 및 이면비드폭, 그리고 용입깊이로 그 특성을 평가하였으며, 각 평가항목의 정의 및 그 측정위치를 Fig. 2에 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 AZ31B-H24 및 AZ31B-O의 기초물성 비교

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 AZ31B-H24 및 AZ31B-O 소재의 현미경 조직사진으로, 단면관찰 결과 AZ31B-H24는 11.14 μ m의 평균 결정립을 가지는 반면 AZ31B-O는 AZ31B-H24에 비해 2배 정도 큰 22.46 μ m의 결정립을 가지는 것으로 확인되었다. 이러한 결정립 차이에 의해 Fig. 4에 나타난 것처럼 인장강도 및 경도와 같은 기계적 특성에 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 부분 어닐링재인 AZ31B-H24에 비해 AZ31B-O는 완전 어닐링된 재료의 성질을 가지고 있으므로, 압연과정 중에 또는 후열처리에 의해 H24재에 비해 상

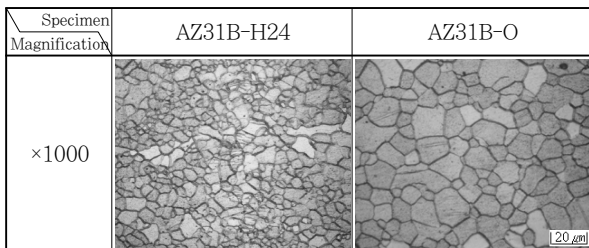


Fig. 3 Comparison of microstructure according to specimens

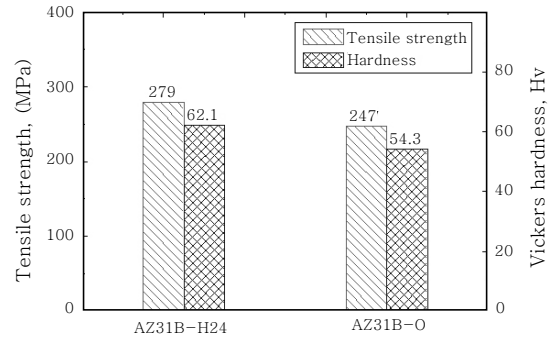


Fig. 4 Comparison of mechanical properties according to specimens

대적으로 두꺼운 산화막이 형성되어 있을 것으로 예상된다.

이를 확인하기 위해 오제이 전자분광(auger electron spectroscopy) 분석을 실시하였으며, 그 결과 AZ31B-H24는 약 47.2nm, 그리고 AZ31B-O는 H24재에 비해 약 1.6배 두꺼운 76.7nm의 산화막을 가지고 있음을 확인하였다. 더불어 산화막인 MgO는 용점이 2,800 $^{\circ}$ C로 기지인 마그네슘의 용점인 650 $^{\circ}$ C에 비해 상당히 높다¹⁴⁻¹⁵. 따라서 결정립 및 산화막과 같은 물성 차이가 레이저 용접성에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3.2 소재별 비드 용접성 비교

비드용접은 $f_d = -1$ mm에서 레이저 출력을 1.0~2.5kW까지 0.5kW 간격으로 조절하고, 각 출력별로 용접속도를 25~130mm/s까지 15 mm/s 간격으로 변화시키면서 진행하였다.

Fig. 5에 AZ31B-H24를, 그리고 Fig. 6에 AZ31B-O를 용접대상으로 한 경우의 레이저 출력 및 용접속도 변화에 따른 비드 용접성을 각각 나타낸다. 우선 AZ31B-H24 소재를 사용한 경우, 용입깊이는 Fig. 5의 (a)에서 나타내는 것처럼 모든 출력범위에서 용접속도가 증가함에 따라 감소하였다. 각 출력별 완전용입이 이루어지는 임계속도는 1.5kW의 경우에는 70mm/s, 2.0kW는 100mm/s, 그리고 2.5kW는 본 연구에서 실시한 모든 용접속도 범위에서 완전용입이 수행되었다. 그러나 레이저 출력 1.0kW를 적용한 경우에는 완전용입 영역을 벗어나면 용입이 급격하게 감소하므로 적합하지 않은 출력으로 판단된다.

비드폭의 경우는 Fig. 5(b)의 전면비드폭(W_{fb}) 및 (c)의 이면비드폭(W_{bb}) 변화에서 나타난 것과 같이, 용접속도가 증가함에 따라 모든 출력범위에서 비드폭 감소가 전반적으로 확인되었다. 그러나 레이저 출력 2.0kW 및 2.5kW의 조건에서는 전면비드폭의 변화가 1.0kW 및 1.5kW에 비해 상당히 불규칙한 양상을 보

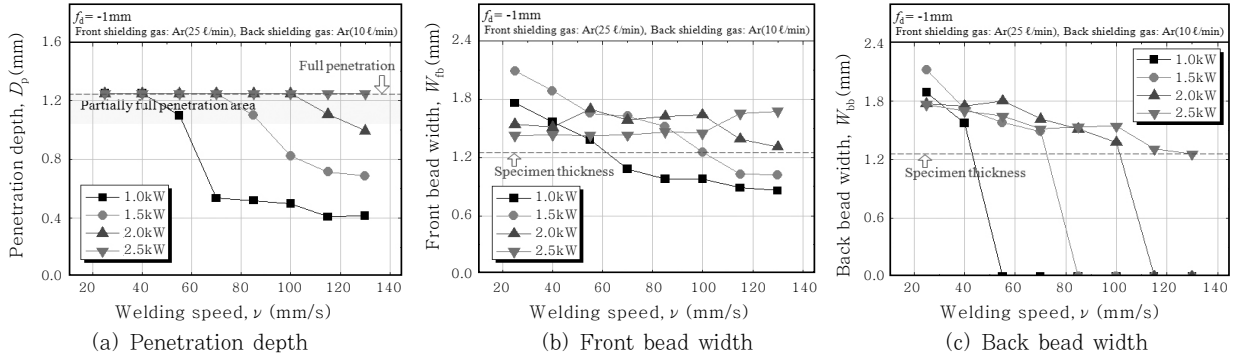


Fig. 5 Bead weldability of AZ31B-H24 with laser power and welding speed

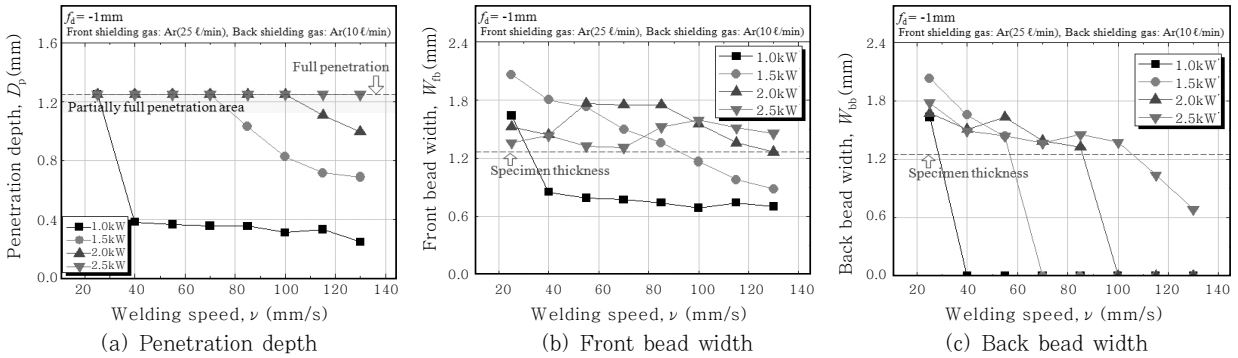


Fig. 6 Bead weldability of AZ31B-O with laser power and welding speed

이고 있는데, 이것은 상대적으로 출력이 높은 만큼 파워밀도가 증가하여 용접시 용융지의 거동이 보다 불안정해지기 때문으로 사료된다. 더불어 마그네슘의 낮은 표면장력 및 점성도 이 현상에 지대한 영향을 미칠 것이다.

다음으로 AZ31B-O의 비드용접 결과인 Fig. 6을 보면, 레이저 출력 및 용접속도에 따른 용입깊이, 전면비드폭 및 이면비드폭의 변화가 AZ31B-H24의 결과와 전반적으로 유사함을 확인할 수 있다. 그러나 H24재에 비해 레이저 출력 1.0kW 및 1.5kW의 조건에서 완전 용입이 얻어지는 구간이 다소 협소하고, 또한 2.0kW 및 2.5kW의 조건에서 전면비드폭의 변화도 보다 불규칙하였다. 따라서 두께 1.25mm의 마그네슘 합금 용접

에는 레이저 출력 1.0kW는 너무 낮은 출력으로 판단되고 2.0kW 및 2.5kW는 과도한 출력으로 사료되므로, 1.5kW가 적정 임계출력으로 판단된다.

Fig. 7은 적정 출력 조건인 1.5kW에서 두 소재의 단면을 비교하여 정리한 것이다. 우선 완전용입이 얻어지는 구간을 보면, H24재가 O재에 비해 보다 넓은 속도범위에서 완전용입이 수행되고 있다. 또한 동일한 속도에서 완전용입이 얻어진 단면형상을 비교해 보면, H24가 O재에 비해 보다 넓은 용접부를 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 소재에 따라 비드 용접성에 차이가 발생하는 것은 상대적으로 얇은 산화막 및 작은 결정립을 가지고 있는 AZ31B-H24가 O재에 비해 용접입열의 축적이 용이하기 때문으로 사료된다¹⁶⁻¹⁷⁾.

$f_a = -1\text{mm}$, $P = 1.5\text{kW}$, Front shielding gas: Ar(25 ℓ/min), Back shielding gas: Ar(10 ℓ/min)						
v (mm/s)	25	40	55	70	85	100
specimen						
AZ31B-H24						
AZ31B-O						

Fig. 7 Comparison of weld morphology with specimens

3.3 소재별 맞대기 용접성 비교

맞대기 용접 실험에 적용한 레이저 출력은 1.2kW, 1.5kW 및 1.8kW로 비드 용접에서 적정 출력으로 판단되었던 1.5kW를 중심으로 실시하였다. Fig. 8에 AZ31B-H24, 그리고 Fig. 9에 AZ31B-O재의 맞대기 용접시 각 레이저 출력별 용접속도 변화에 따른 전면 및 이면비드폭의 변화를 나타낸다.

실험결과를 살펴보면, 두 소재 모두 레이저 출력 1.2kW를 적용한 경우에는 용접속도가 증가할수록 전면 및 이면비드가 점차적으로 감소하는 전형적인 모습이 관찰되었다. 그러나 레이저 출력 1.5kW 및 1.8kW를 적용한 경우에는 비드폭의 변화가 급격한 구간이 관찰되는데, 이것은 용락(burn-through) 발생에 따른 용융 마그네슘의 불안정한 거동 때문으로 판단된다. AZ31B-H24는 레이저 출력 1.5kW에서, 그리고 O재는 1.8kW에서 다량의 용락이 발생 또는 발생 가능성이 잔존하는 구간이 관찰되었다.

이처럼 두 소재간 용락의 발생 조건이 다른 것은 소재의 물성 차이와 더불어 용락의 발생 원인으로부터 유추할 수 있는데, 과입열에 의한 영향 외에도 레이저 출력에 따른 파워밀도가 용락에 민감한 영향을 미치기 때문에 사료된다. 우선 맞대기 용접은 비드 용접과 달

리 표면상태의 영향 보다 접합면의 상태가 용접성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 고려해 볼 때, 두 소재간의 결정립 차이에 중점을 두고 생각할 필요가 있다. 즉 상대적으로 결정립이 미세한 AZ31B-H24재의 경우에는 조밀한 구조로 인해 안정적으로 키홀을 유지하기 위해서는 1.5kW보다 높은 1.8kW의 출력 조건이 요구된다. 반대로 결정립이 조대한 AZ31B-O재에서는 보다 낮은 출력에서도 키홀이 쉽게 유지가 되며, 1.8kW의 출력 조건이 되면 높은 파워밀도와 과입열로 인해 용융부를 안정적으로 유지하지 못하고 관통이 되는 것으로 판단된다. 따라서 소재에 따라 맞대기 용접조건 선정에 세심한 주의가 요구된다.

4. 결 론

CW Nd:YAG 레이저를 이용한 AZ31B-H24 및 AZ31B-O의 비드 및 맞대기 용접성을 평가한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) AZ31B-H24와 AZ31B-O의 비드 용접성을 비교한 결과, H24재가 O재에 비해 보다 넓은 속도범위에서 완전용입이 수행되고 있었다. 이것은 소재에 따른 산화막 두께 및 결정립 크기의 차이 때문으로, 상대적으로 산화막 두께가 얇고 결정립이 미세한 H24재가 용

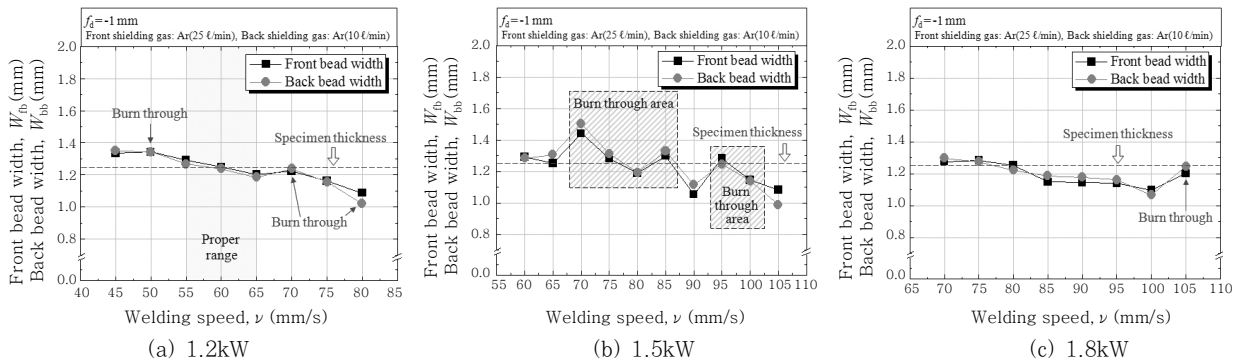


Fig. 8 Butt weldability of AZ31B-H24 with laser power and welding speed

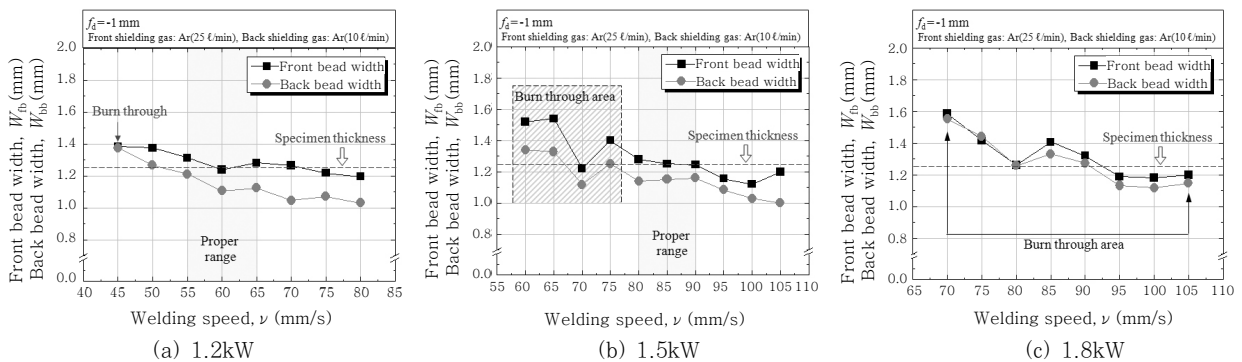


Fig. 9 Butt weldability of AZ31B-O with laser power and welding speed

접입열의 축적이 용이하기 때문이다.

2) AZ31B-H24 및 AZ31B-O의 맞대기 용접 결과, 소재에 따라 용락에 민감한 출력조건이 상이하였다. 이것은 두 소재의 결정립 크기 차이에 기인하여 키홀을 안정적으로 유지하기 위한 출력 조건이 다르기 때문이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2012-H0301-12-2009). 또한, 본 과제(결과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성 사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. I.S. Chang : Innovative Lightweight Concept in Car Bodies, *Journal of the Korean Welding Society*, **2-7** (2003), 18-20
2. Y.S. Kim and H.C Yoo : Recent Technological Tendency of Laser Welding for Magnesium Alloy, *Journal of the Korean Welding Society*, **30-1**(2012), 8-18
3. Westengen : Magnesium die casting: from ingots to automotive parts, *Light Metal Age*, **58-3~4**(2000), 44-52
4. I. Takano, H. Ohnuki and H. Kobayash : Deep-drawability of cup on AZ31 magnesium alloy plate, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **50-9** (2000), 456-461
5. E. Doege and K.Droder : Sheet Metal Forming of Magnesium Wrought Alloys-Formability and Process Technology, *Journal of Materials Processing Technology*, **115-1**(2001), 14-19
6. J. Kaneko and M. Sugamgata : Mechanical Properties and Formability of Magnesium Alloy Sheets, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **54-11**(2004), 484-492
7. Y.V.R.K. Prasad and K.P. Rao : Processing Maps for Hot Deformation of Rolled AZ31 Magnesium Alloy Plate: Anisotropy of Hot Workability, *Materials Science and Engineering A*, **487-1~2**(2008), 316-327
8. L.L. Chang, E.F. Shang, Y.N. Wang, X. Zhao and M. Qi : Texture and Microstructure Evolution in Cold Rolled AZ31 Magnesium Alloy, *Materials Characterization*, **60-6**(2009), 487-491
9. M.M. Avedesian and H. Baker : *ASM Specialty Handbook-Magnesium and Magnesium Alloys*, 1999
10. Y. Yoshida, K. Arai, S. Itoh, S. Kamado, T. Wada, T. Matsunaga, T. Yoshimoto and Y. Kojima : Effects of Al and Zn Contents and Heat Treatment on Microstructures and Tensile Properties of Mg-Al-Zn Alloys, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **55-10**(2005), 456-462
11. R.S. Coelho, A. Kostka, H. Pinto, S. Riekehr, M. Kocak and A.R. Pyzalla : Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy AZ31B Laser Beam Welds, *Materials Science and Engineering A*, **485-1~2**(2008), 20-30
12. Y.J. Quan, Z.H. Chen, X.S. Gong and Z.H. Yu : Effects of Heat Input on Microstructure and Tensile Properties of Laser Welded Magnesium Alloy AZ31, *Materials Characterization*, **59-10**(2008), 1491-1497
13. H.E. Friedrich and B.L. Mordike : *Magnesium Technology*, 2006
14. X. Cao, M. Jahazi, J.P. Immarigeon and W. Wallace : A review of laser welding techniques for magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, **171-2**(2006), 188-204
15. T. Lei, C. Ouyang, W. Tang, L.F. Li and L.S. Zhou : Enhanced Corrosion Protection of MgO Coating on Magnesium Alloy Deposited by an Anodic Electrodeposition Process, *Corrosion Science*, **52-10** (2010), 3504-3508
16. G. Soyez, J.A. Eastman, L.J. Thompson, G.R. Bai, P.M. Baldo and A.W. McCormick : Grain size-dependent thermal conductivity of nanocrystalline yttria-stabilized zirconia films grown by metal-organic chemical vapor deposition, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, **77-8**(2000), 1155-1157
17. Y.J. Lee, Y.H. Park and T. Hinoki : Influence of Grain Size on Thermal Conductivity of SiC Ceramics, *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, **18-10**(2011), Paper number 162014