

## Nd:YAG 레이저를 이용한 마그네슘 합금의 겹치기 용접

김종도<sup>\*,☒</sup>, 이정환<sup>\*\*</sup>, 서정<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>한국해양대학교 기관공학부

<sup>\*\*</sup>한국해양대학교 대학원

<sup>†</sup>한국기계연구원 광응용생산기계연구실

## Lap Welding of Magnesium Alloy using Nd:YAG Laser

J. D. Kim<sup>\*,☒</sup>, J. H. Lee<sup>\*\*</sup>, J. Suh<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>Division of Marine Engineering, Korea Maritime Univ.

<sup>\*\*</sup>Graduate School, Korea Maritime Univ.

<sup>†</sup>Korea Institute of Machinery & Materials, Laser Application Team

### Abstract

In automotive industry, because of the consideration of fuel economy, lightweight alloys have been adopted and are expected to be extensively used in the future. Magnesium alloys are among the promising materials, due to their lightweight and good mechanical properties. This study is related to the laser weldability of AZ31B magnesium alloy, an all-purpose wrought alloy with good strength and ductility. A 4kW Nd:YAG laser was used to join AZ31B sheet, and the effects of welding parameter on the quality of lap-welded joints were investigated. As a result of this study, the optimal condition was obtained, and the effect of gap distance was also revealed on the porosity control.

**Keywords:** Magnesium alloy(마그네슘 합금), Nd:YAG laser(엔디야그 레이저), Lap welding(겹치기 저항 용접), Welding parameter(용접 변수), Gap distance(사이 거리)

### 1. 서론

마그네슘은 알루미늄의 2/3, 철의 1/5 수준으로 가벼우면서도 비강도가 높고 다양한 합금 가능성을 가지고 있다. 더욱이 진동 및 충격 흡수능, 전자파 차폐성 등이 뛰어나고 기계가공성과 주조성이 우수하다.<sup>1-3</sup> 이러한 특성에 힘입어 마그네슘 합금은 산업계 다양한 분야에서 응용 가능하다. 특히 환경문제 및 자원고갈에 따라 연비향상이 강력하게 요구되고 있는 자동차 분야에서는 경량화가 가장 현실적인 대안으로 부각되면서, 마그네슘 합금을 이용한 부품개발에 관심이 집중되고 있다.<sup>4,5</sup>

한편 기존의 자동차용 마그네슘 합금 제품은 대부분 주조공정, 특히 다이캐스팅 공법을 적용하여

제작되어 왔다. 이는 마그네슘이 알루미늄에 비해 비열 및 용해 잠열이 2/3 수준으로 낮고, 동시에 응고 잠열도 작아 빨리 응고되므로, 주조 작업에 많은 이점을 가지고 있기 때문이다. 따라서 기존의 연구 사례도 주조재로 한정되어 있었으며, 마그네슘 합금의 용접관련 연구도 주조재가 대부분이었다.<sup>6-8</sup>

그러나 차체 적용을 위해선 보다 고강도와 고인성을 가진 재료가 요구되고, 더불어 제품의 대형화 및 다양화에 생산성을 맞추기 위해서 근래에는 압연, 압출, 단조 등의 가공공정을 통한 마그네슘 합금 제품의 개발이 활발히 수행되고 있다. 지금까지 개발된 가공용 마그네슘 합금 중 상용화되어 있는 것은 Mg-Al-Zn의 3원계 합금인 AZ31B가 대표적이다. 이들 가공용 합금은 주조용 합금 제품에 비해 제조원가를 낮출 수 있고, 열처리를 통해 기계적 성질의 다양성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 반면 이들 압연판재를 활용하기 위한 가공기술, 특히 용접에 대한 연구는 아직까지 많이 미진

투고일 : 2011년 7월 19일 심사완료일 : 2011년 9월 20일

계재승인일 : 2011년 9월 23일

교신저자 : 김종도 ☒ jdkim@hhu.ac.kr

한 실정이다.<sup>9,10</sup>

따라서 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저를 사용하여 압연판재로 상용화되어 있는 AZ31B 마그네슘 합금의 용접성을 조사하였다. 용접이음은 차체에 보편적으로 사용되고 있는 겹치기 이음이었으며, 레이저 용접조건에 따른 용접성 변화를 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서 사용한 용접재료는 알루미늄이 3wt%, 아연이 1wt% 첨가된 AZ31B 마그네슘합금이다. 시험편의 두께는 1.25mm로 150mm(길이) × 50mm(폭)의 크기로 재단하여 겹치기 용접에 적용하였다. Table 1에 본 연구에서 사용한 실험재료의 화학적 조성을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of AZ31B

Element Material	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Mg
AZ31B	3.01	0.98	0.32	0.029	0.0022	0.0012	0.0019	bal.

### 2.2 실험방법

본 연구에 사용된 열원은 최대출력 4kW의 CW Nd:YAG 레이저로 동일한 초점거리( $f_d = -1$ )에서 레이저 출력( $P$ )과 용접속도( $v$ )를 변화시키며 용접을 실시하였다. 용접 중 용융지의 산화를 막기 위해서는 측면에서 실드가스 노즐을 사용하여 Ar으로 용접부를 보호하였으며 활성도가 높은 마그네슘의 특성을 고려하여 이면실드도 같이 실시하였다. 이를 위해 지그표면에 이면실드를 위한 7mm(폭) × 12mm(높이) 크기의 홈을 지그 길이 방향으로 특별히 제작하였으며, 이때 실드유량은 전면 25 l/min, 이면은 10l/min이었다.

용접이 완료된 겹치기 시험편은 Fig. 1에 나타난 것처럼 전면비드폭( $W_b$ )과 이면비드폭( $W_{bb}$ ), 그리고 용입깊이( $D_p$ )로 그 용접성을 평가하였으며, 겹치기 용접의 경우에는 접합부의 폭( $W_j$ )이 용접부 강도에 미치는 영향이 크기 때문에 이를 같이 조사하였다.

한편 마그네슘은 용점 및 비점이 낮고, 상대적으로 증기압은 높기 때문에 용접시 용접부 내 다수의 기공(porosity)이 발생한다는 문제점이 지적되고 있다. 아연도금강판의 용접에서도 이와 유사한 문제점이 보고되어 있으며, 기공을 제거하기 위해

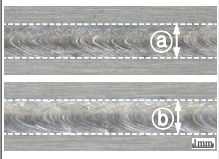
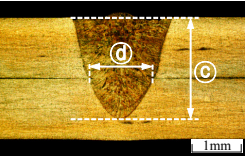
Photo Position	Bead appearance	Cross section
Measurement position		
Definition	(a) Front bead width ( $W_{fd}$ ) (b) Back bead width ( $W_{bb}$ )	(c) Penetration depth ( $D_p$ ) (d) Joint width ( $W_j$ )

Fig. 1 Definition of measurement factor and position in experiment of lap welding.

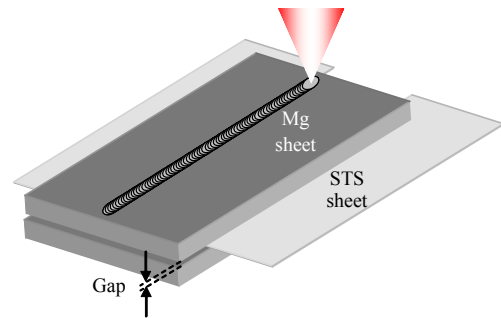


Fig. 2 Schematic illustration of gap control.

다양한 연구가 진행되어왔었다. 그 중 가장 유효한 방법이 겹침부의 간극을 두어 아연증기가 빠져나갈 수 있는 틈을 제공하는 것이며, 마그네슘 합금의 용접에서도 이와 유사한 효과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 이를 위해 Fig. 2에 나타난 것처럼 스테인리스 박판을 이용하여, 겹침부의 간극을 0.05에서 0.3mm까지 조절하여 용접성의 변화를 조사하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 용접조건에 따른 용접성 변화

겹치기 용접은 레이저 출력( $P$ )을 1.5kW에서 3.0kW까지 0.5kW 간격으로 변화시키고, 동시에 용접속도( $v$ )를 25mm/sec에서 130mm/sec까지 15mm/sec 간격으로 조절하면서 레이저 출력 및 용접속도 변화에 따른 용접성을 조사하였다. 겹침부의 간극은 두지 않았으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타낸다.

우선 용입깊이의 변화는 Fig. 3(a)에서 확인되는 것처럼, 모든 출력범위에서 용접속도가 증가함에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보였다. 한편 접합부폭의 변화는 Fig. 3(b)에 나타난 것처럼, 레이저 출력 1.5kW의 경우를 제외하고는 용접속도 증가에 따라 접합부 폭이 감소하다가 한번의 상승

을 거친 후, 다시 하락하는 경향을 보이고 있다. 이러한 변화가 발생하는 경계점은, 레이저 출력 2.0kW에서는 용접속도 55mm/sec에서, 2.5kW는 70mm/sec에서, 그리고 3.0kW는 85mm/sec에서 각각 확인되었다. 이들 경계점들을 살펴보면 각 출력별로 부분완전용입 영역에 해당하며, 이면비드에 불연속적인 비드의 관통이 발생하는 구간이다. 따라서 이들 부분관통역에서는 이면비드로 완전히 배출되지 못하고 축적된 에너지가 재료 내부로 전달되어 접합부폭을 넓히는 것으로 추정된다.

이러한 현상은 Fig. 3(c)의 전면비드폭 변화에서도 동일하게 관찰이 되며, 용접시 높은 증기압을 가진 기화 마그네슘이 이면비드로 빠져나가지 못하고, 상부 비드쪽으로 다량 증발하면서 전면 비드폭을 넓힌다고 판단된다.

한편 이면비드는 Fig. 3(d)에서 나타난 것처럼 용접속도가 증가함에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보이고 있으나, 레이저 출력 3.0kW, 용접속도 25mm/sec에서는 과도한 입열로 인해 이면비드가 전면비드보다 넓은, 비드의 역전 현상이 관

찰되기도 하였다.

본 연구에서는 완전용입이 얻어지면서 비드폭이 안정적이고 접합부폭이 가장 넓은, 레이저 출력 2.5kW, 용접속도 55mm/sec가 적정조건으로 판단된다.

### 3.2 겹침부 간극에 따른 용접특성

마그네슘 합금의 용접에서는 용접부내 기공의 존재가 자주 관찰된다. 이들 기공은 레이저 용접 시 키홀의 불안정한 거동에 의해 키홀 내에 갇힌 증발가스가 용융금속의 응고완료 후에도 잔존하는 것이 주된 원인이며, 액상과 고상 마그네슘의 수소 용해도 차이에 의해 응고시 방출된 수소가스가 기공으로 잔존하는 경우가 대부분이다.

본 겹치기 용접 연구에서도 용접부내 기공의 존재가 관찰되었으며, 이들 기공은 겹침부 주변에서 발생빈도가 높았다. 이는 낮은 용점 및 비점, 높은 증기압 및 열전도도를 가지는 마그네슘의 고유물성과, 더불어 급열·급랭의 레이저 공정에 기인한 것으로 사료된다. 즉 용접시 빠른 응고속도로 인해 대기 중으로 방출되지 못한 마그네슘

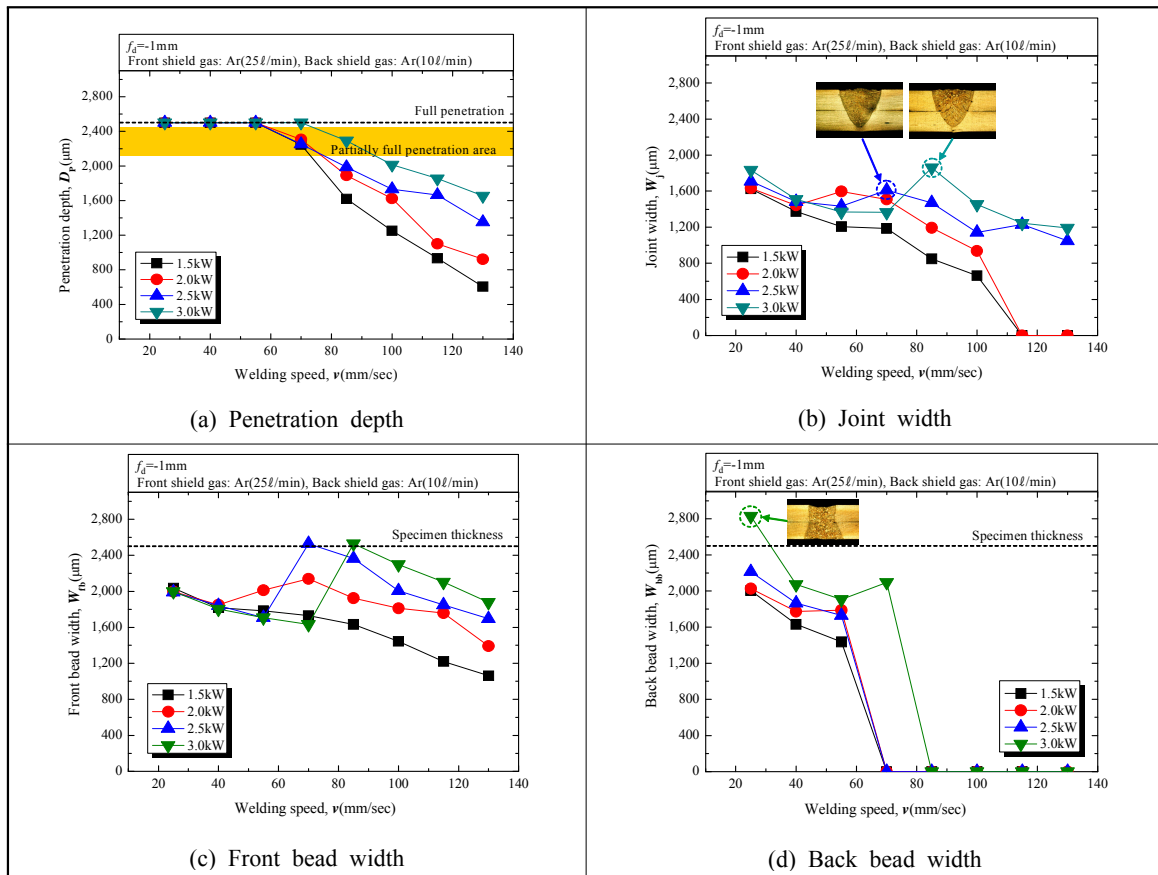
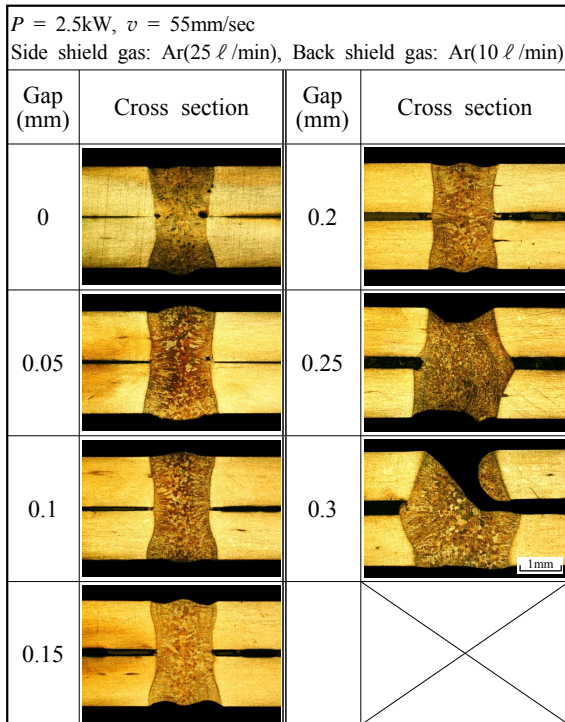
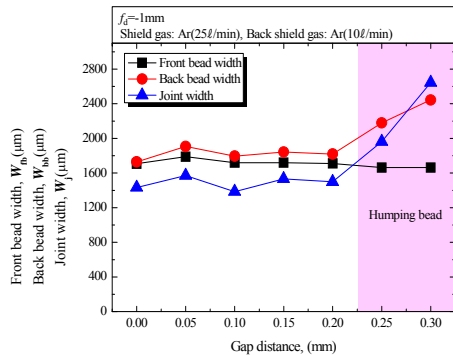


Fig. 3 Variation of lap weldability by laser power and welding speed.



(a) Cross section



(b) Variation of weldability

**Fig. 4** Lap weldability according to gap distance.

증기가 겹침부의 미세한 틈으로도 빠져나가지 못하면서 응고가 완료되었기 때문이다. 이들 기공은 완전용입 보다 부분용입조건에서 더 자주 관찰되며, 기공의 크기도 큰 경향이 있었다. 이는 완전용입시에는 이면비드로 금속증기가 빠져나가면서 상대적으로 용융부내 트랩되는 양은 줄어들었기 때문으로 판단된다.

한편 이러한 현상은 아연도금강판의 레이저 용접에서 자주 관찰되는 것으로, 이 문제를 해결하기 위해 겹침부의 간극을 두어 아연증기가 빠져나갈 수 있는 틈을 제공하고 있다.

마그네슘 합금의 용접에서도 이와 같은 효과가

기대되며, 이를 위해 본 연구에서는 두께 0.05mm의 스테인리스 박판을 사용하여 겹침부의 간극을 0.05-0.3mm까지 조절하면서 겹침부 간극에 따른 용접성의 변화를 조사해보았다. 그 결과를 Fig. 4에 나타낸다.

우선 Fig. 4(a)의 단면변화를 관찰하여 보면, 겹침부의 간극이 없는 경우에 겹침부 주위에 존재 하였던 기공이, 0.05mm 간극에서 현저하게 줄어들고 0.1mm 간극 이후로는 소실되는 것을 알 수 있다. 한편 겹침부 간극이 과해지면, 0.25mm 및 0.3mm의 단면사진에서 관찰되는 것처럼 험핑비드를 동반하면서 용융지가 함몰되었다. 또한 겹침부가 크랙의 시발점이 될 가능성이 있기 때문에 실질적인 겹침부 간극은 0.05mm에서 0.15mm 정도로 판단된다.

Fig. 4(b)는 겹침부 간극에 따른 전면 및 이면비드폭, 그리고 접합부폭의 변화를 도시한 것이다. 겹침부의 간극이 0mm에서 0.2mm까지는 전면 및 이면비드폭의 변화가 크지 않으나, 접합부폭은 다소 변동이 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 겹침부의 간극 사이로 마그네슘 증기와 더불어 용융금속의 일부가 빠져나가면서 응고가 완료되었기 때문이라고 사료된다. 한편 0.25mm 및 0.3mm의 겹침부 간극에서는 험핑비드가 발생하면서 이면비드 및 접합부폭이 급격하게 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

Nd:YAG 레이저를 이용한 마그네슘 합금의 겹치기 용접시 용접조건 및 겹침부 간극의 영향을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 마그네슘 합금의 겹치기 용접에서는 완전용입에서 부분완전용입으로 전환되는 임계속도구간에서 접합부폭 전면비드폭의 변화가 불안하였다.
- 2) 본 연구에서는 완전용입이 얻어지면서 비드폭이 안정적이고 접합부폭이 가장 넓은, 레이저 출력 2.5kW, 용접속도 55mm/sec가 적정조건으로 판단된다.
- 3) 마그네슘 합금의 용접부내 잔존하는 기공은 겹침부 주변에서 발생하는 경향이 있었으며, 이는 빠른 응고속도로 인해 대기중으로 방출되지 못한 마그네슘 증기가 겹침부의 미세한 틈

으로도 빠져나가지 못하면서 응고가 완료되었기  
때문으로 사료된다.

- 4) 마그네슘 합금의 용접에서 문제시 되는 기공은  
접침부의 간극을 제공함으로써 해결할 수 있었  
으며, 최적 접침부 간극은 0.05-0.15mm였다.

- 10) C.T. Chi, C.G. Chao, T.F. Liu and C.C Wang,  
“A study of weldability and fracture modes  
in electron beam weldments of AZ series  
magnesium alloys,” *Materials Science and  
Engineering A*, Vol. 435-436, pp. 672-680,  
2006.

### References

- 1) M.M. Avedesian and H. Baker, “ASM Specialty  
Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys,”  
ASM, pp. 3-12, 1999.
- 2) B.L. Mordike and T. Ebert, “Magnesium Pro-  
perties - applications - potential,” *Materials  
Science and Engineering A*, Vol. 302, No.  
1, pp. 37-45, 2001.
- 3) X. Cao, M. Jahazi, J.P. Immariageon and W.  
Wallace, “A review of laser welding techniques  
for magnesium alloys,” *Journal of Materials  
Processing Technology*, Vol. 171, No. 2, pp.  
188-204, 2006.
- 4) C. S. Gerald, “Issues that influence magnesium’s  
use in the automotive industry,” *Materials Science  
Forum*, Vol. 419-422, pp. 43-50, 2003.
- 5) C. Blawert, N. Hort and K.U. Kainer, “Automotive  
Applications of Magnesium and Its Alloys,”  
*Transactions of the Indian Institute of Metals*,  
Vol. 57, No. 4, pp. 397-408, 2004.
- 6) C. Lehner, G. Reinhart and L. Schaller, “Welding  
of Die-Casted Magnesium Alloys on Production  
Machines,” *Section F-ICALEO*, pp. 18-27,  
1998.
- 7) C. Lehner, G. Reinhart and L. Schaller, “Welding  
of die-casted magnesium alloys for production,”  
*Journal of Laser Applications*, Vol. 11, No. 5,  
pp. 206-210, 1999.
- 8) M. Pastir, H. Zhao and T. DebRoy, “Continuous  
wave-Nd:yttrium-aluminum-garnet laser welding  
of AM60B magnesium alloy,” *Journal of Laser  
Applications*, Vol. 12, No. 3, pp. 91-100, 2000.
- 9) M. Aochi, N. Fujii and K. Yasuda, “Study of  
the basic welding characteristics of Mg alloy,”  
*Welding international*, Vol. 18, No. 12, pp.  
944-949, 2004.