레이저 열원을 이용한 마그네슘 합금의 용접성에 관한 연구 (Ⅲ) - Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 사형주조 마그네슘 합금의 맞대기 용접성 -

김 종 도^{*,†} · 이 정 한^{**} · 이 문 용^{**}

*한국해양대학교 기관공학부 **성우하이텍 기술연구소

A Study on the Weldability of Magnesium Alloy by Laser Heat Source (Ⅲ) - Butt Weldability of Sand Casting Magnesium Alloy using Pulsed Nd:YAG Laser -

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

*Division of Marine Engineering, 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 January 4, 2013)

Abstract

Magnesium has good castability and limited workability, so its products have been manufactured by almost casting processes. In this study, a pulsed Nd:YAG laser was used to butt-weld the sand casting magnesium alloys. And the effect of welding conditions such as peak power, pulse width, welding speed was evaluated in detail. As a result of this study, large underfill and plenty of spatter taken place under the conditions with high peak power. Thus, it is recommended to use low peak power and long pulse width to obtain good welds with deep penetration. It is also confirmed that the welding speed and pps(pulse per second) are directly connected at weld defects such as underfill, porosity.

Key Words : Sand casting magnesium alloy, Pulsed Nd:YAG laser, Butt welding, Welding parameters, Underfill

1. 서 론

마그네슘 합금은 알루미늄 합금에 이어 차세대 재료 로써 부각되고 있으며, 현재 자동차 부품에 일부 또는 추후 적용이 검토되고 있다. 오늘날까지 자동차용으로 사용되고 있는 마그네슘 합금 제품은 대부분 다이캐스 팅 공법으로 제작하여 왔으나, 다이캐스팅의 경우 복잡 한 형상이나 대형 제품에는 그 적용에 한계가 있었다. 이들 제품은 사형주조를 통해 제작할 수 있는데, 사형 주조의 특성상 중공이 있는 제품의 제작시 코어를 지탱 하기 위한 코어 프린트를 두게 되고, 그 결과 주조가 완료된 후의 제품에는 원치 않는 홀이 만들어진다. 이

에작할 수 있는데, 사형 금과 연결되면, 부식환경 ·의 제작시 코어를 지탱 corrosion)을 일으킬 수 ?

것은 Fig. 1에 나타낸 흡기 매니폴드처럼 기밀성이 요 구되는 부품에서 문제가 되며, 추후 이 부분에 대한 밀 봉이 요구된다.

현장에서는 이 홀을 밀봉하기 위해 스틸과 같은 금속 재료를 강제적으로 압입하는 방식을 사용해왔으나, 제 품의 사용 환경이 고온 또는 장시간 운행시에는 연결 부위의 열화 및 변형을 동반하게 되므로 충분한 기밀성 을 보장하기 어렵다. 더불어 마그네슘과 같이 표면전극 전위가 낮은 재료가 상대적으로 전위가 높은 철계의 합 금과 연결되면, 부식환경에서 갈바닉 부식(galvanic corrosion)을 일으킬 수 있다. 따라서 동종 재료의 접 합이 요구되며, 이 홀을 밀봉하기 위해서는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 외측에 마그네슘 합금 주조재 또는 압연



Fig. 1 Hole on product surface after sand casting



Fig. 2 Schematic illustration of laser welding

재를 덧붙여 용접할 필요가 있다.

그러나 마그네슘 합금 사형주조품의 용접은 국내·외 를 통틀어 그 사례가 극히 제한적이며, 이것은 주조공 법을 떠나 마그네슘 합금 주조품들의 적용에 큰 제약을 준다^{1,2)}.

따라서 본 연구에서는 레이저 열원을 사용하여 사형 주조 마그네슘 합금의 맞대기 용접성을 조사하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 용접재료로 선정한 사형주조 마그네슘 합금은 MRI202S다. MRI202S는 이스라엘의 DSM (Dead Sea Magnesium)사에서 고온 및 높은 하중에 서 사용하기 위해 개발한 사형 및 금형주조 합금으로, T6조건에서 250℃까지 우수한 기계적 특성 및 내크리 프성을 나타낸다³⁻⁵⁾.

실험에 적용한 시험편의 두께는 4mm로, 맞댄면의 정도를 높이기 위해서 시험편의 맞대기면은 밀링처리하 였다. Table 1에 MRI202S의 화학조성을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of MRI202S alloys

∖ Element Material∖	Zn	Zr	Са	Nd	Υ	RE	Mg
MRI202S	0.2~ 0.5	0.7	0.03~ 0.10	2.8~ 3.2	0.05~ 0.20	I	Bal.



Fig. 3 Photo of laser welding

Photo Position	Bead appearance	Cross section
Measure- ment position		
Definition	(a) Bead width (Wb)	(b) Penetration depth (Dp) (c) Underfill (Fu)

Fig. 4 Measurement position and definition

2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 용접열원은 평균출력 500W의 pulsed Nd:YAG 레이저로, 초점거리에서 사형주조 마 그네슘 합금의 맞대기 용접을 실시하였다. 단 펄스에 의한 스폿의 중첩으로 연속된 비드를 형성하는 방식이 며, 용접시에는 Ar 실드가스를 사용하여 동축노즐을 통 해 25ℓ/min의 유량으로 용접부를 차폐하였다. Fig. 3에 맞대기 용접 상황을 나타낸다.

한편 중공이 있는 사형주조 제품의 기밀유지가 본 연 구의 주목적이므로, 중공 내부의 실드는 어려운 점이 많다. 또한 산화에 민감한 마그네슘의 특성을 고려하면 완전용입조건에서는 이면비드에도 실드가 요구되기 때 문에, 본 연구에서의 용입조건은 완전용입이 아닌 부분 용입이었다.

실험에 적용된 주된 매개변수는 첨두출력(*P*_p), 펄스 폭(_石), 용접속도(*v*) 및 중첩률(*R*_o)이었으며, 각 변수 에 따른 용접성은 Fig. 4에 나타낸 것처럼 비드폭(*W*_o), 용입깊이(*D*_p) 및 언더필(*F*_u)로 그 특성을 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 첨두 출력 및 펄스폭 변화에 따른 용접성 변화

실험은 초점거리(*f*=0 mm)에서 레이저 첨두 출력 (*P*_p)을 1.0~2.5 kW까지 0.5 kW 단위로 변화시키고, 각 출력별로 펄스폭(石)을 2~12 ms까지 변화시키면서 진행하였다. 이때 초당 펄스 반복률은 20pps, 그리고 용접속도(*v*)는 200mm/min으로 고정하였다. 그 결과 펄스폭 변화에 따른 각 레이저 출력별 비드폭(*W*), 용 입깊이(*D*₀) 및 언더필(*F*_u)의 변화를 Fig. 5에 나타낸다.

용입깊이 및 비드폭은 출력조건에 상관없이 펄스폭이 증가할수록 순차적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특 히 레이저 출력이 높을수록 펄스폭 증가에 따른 용입깊 이의 증가율이 높았다.

한편 순간적으로 높은 첨두 출력의 레이저 빔이 재료 에 조사되며 에너지의 공급이 단속적인 펄스 레이저 용 접의 특성상, 그리고 비중은 낮고 표면장력 및 점성이 떨어지는 마그네슘 소재의 특성상, 마그네슘 합금의 펄 스 레이저 용접에서는 항시 비드의 함몰, 즉 언더필 (underfill)을 동반하였다.

Fig. 5의 (c)에 나타낸 것처럼 언더필은 레이저 첨두 출력 및 펄스폭이 증가할수록 커지는 경향이 있으며, 고출력일수록 그 경향이 뚜렷하였다.

Fig. 6은 레이저 출력 1.0kW 및 2.5kW를 적용한 경우 펄스폭 변화에 따른 대표적인 단면사진을 나타낸 것이다. 출력이 높을수록 펄스폭 증가에 따른 용입깊이 의 변화가 현저하며, 고출력에서 언더필이 크다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 펄스 레이저를 사용한 마그네슘 합금의 용접 에서는 첨두 출력을 최대한 낮추어야하며, 낮은 출력에 서 용입깊이를 충분히 확보하기 위해서는 펄스폭을 길 게 가져갈 필요가 있다고 사료된다.

3.2 PPS 변화에 따른 용접성 변화

본 연구에서는 미려한 외관을 나타내면서 용접부의 안정적인 강도를 확보하기 위한 적정 용입깊이를 1.3mm 이상, 1.5mm미만으로 선정하였다. 1.5mm 이상의 용 입깊이가 얻어지는 조건에서는 0.2mm이상의 언더필이 항시 발생하였다. 따라서 언더필이 일부 존재하긴 하나



Fig. 5 Variation of penetration characteristics with peak power and pulse width



Fig. 6 Variation of weld morphology with peak power and pulse width

충분한 용입을 확보할 수 있는 첨두 출력 1.0kW, 펄 스폭 12ms가 적정 조건으로 판단된다.

한편 펄스 용접에서는 pps, 즉 초당 펄스 반복률이 또한 중요한 변수가 되므로, 적정 조건을 기준으로 pps 를 5~25까지 5pps 간격으로 조사하였다. 그 결과 pps 변화에 따른 용입깊이, 비드폭 및 언더필의 변화를 Fig. 7에 나타낸다.

실험결과를 살펴보면, pps 변화에 따른 용입깊이 및 비드폭의 변화가 다소 불규칙한 것을 확인할 수 있다. 또한 pps에 따른 언더필의 변화를 보면 pps가 증가할 수록 언더필도 증가하는 경향이 있으나, 5pps의 조건 에서는 언더필이 발생하지 않았다.

우선 5pps의 경우 언더필이 발생하지 않은 원인은 너무 낮은 pps로 인해 소재로의 입열이 매우 단속적인 형태가 되고, 동시에 pps가 낮은 만큼 급속응고되기 때 문으로 사료된다. 그 결과 단면사진에서 보는 것처럼 용융부가 외부로 크게 들어 올려져 있고, 그 안에 금속 증기가 외부로 배출되지 못한 체 기공을 형성한 것도 일부 확인 되었다.



Fig. 7 Variation of penetration characteristics with pps

10~15pps의 구간은 용입깊이가 다소 감소하는 모 습을 보이고 있는데, pps가 증가하면 소재로의 입열이 증가하기 때문에 용입은 깊어지는 것이 일반적이다. 이 와 같은 현상이 발생하는 원인으로는 10~15pps 구간 에서는 용접시 발생하는 각종 금속증기 및 플라즈마와 레이저 빔과의 상호관계가 불안한 경계조건이기 때문으 로 사료된다. 따라서 이 경계를 넘어선 20pps의 조건 에서 용입깊이가 급격히 깊어지는 것으로 판단된다.

한편 25pps의 조건에서는 가장 많은 입열이 소재로 유입됨에도 불구하고 용입깊이가 감소하는 모습을 보이 고 있는데, 이것은 pps가 증가한 만큼 다량의 금속 플 라즈마 또는 퓸(fume)이 발생하여 레이저 빔의 조사를 산란시킴으로써, 소재로의 직접적인 입열은 감소하였기 때문으로 사료된다.

또한 pps 증가에 따른 언더필의 증가는 용접시 초기 펄스에 의해 용융된 부위를 재차 조사되는 펄스들이 증 발시킴으로써 발생하는 현상으로, 용융금속의 증발과 동시에 새로운 기지가 드러나면, 이 부위에 다시 펄스 가 조사됨으로써 용융 및 증발 현상이 반복되기 때문이 다. 따라서 적정 pps 범위를 넘어서면, 용입깊이는 깊 은 반면 언더필도 같이 증가하여 실질적인 접합부는 크 지 않게 되므로 pps 선정에 주의가 요구된다.

3.3 용접속도 및 중첩률 변화에 따른 용접성 변화

Fig. 8은 용접속도에 따른 용입깊이, 비드폭 및 언더 필의 변화를 정리하여 도시한 것이다. 실험은 앞선 실 험에서 우수한 용접성을 보였던 레이저 첨두 출력 1.0kW, 펄스폭 12ms, 그리고 20 pps의 조건에서 용 접속도만의 영향만을 검토하였다. 더불어 용접속도에 따른 비드의 중첩률(overlapping rate)도 같이 고려하 여, 그래프내에 기입하였다.

펄스 레이저 용접에서는 단일 펄스의 스폿 하나하나 가 이어져서 연속된 비드를 형성하기 때문에 pps와 용 접속도는 비드의 중첩률을 결정하는 매우 중요한 인자 이다. 중첩률의 계산식은 Eq. 1과 같다⁶⁾.

$$R_{o} = \left(1 - \frac{v}{d \times R_{p} \times 60}\right) \times 100\,(\%) \tag{1}$$

 R_o : 이론 중첩률 (%), v : 용접속도 (mm/min) d : 스폿사이즈 (mm), R_n : 펄스반복율 (Hz)

스폿 사이즈는 상기 실험조건에서 사용한 용접조건에 서 단 펄스로 5회 조사하여 얻어진 평균값 1mm를 적 용하였다. 예로 20pps에서 용접속도 200mm/min을



Fig. 8 Variation of penetration characteristics with welding speed

대입하면 83%의 이론 중첩률이 구해진다.

실험결과를 살펴보면, 용접속도가 증가할수록 용입깊 이는 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있으나, 용접 속도 100mm/min의 조건에서는 용접속도 200~ 300mm/min의 조건보다 낮은 용입깊이를 나타내었다. 이것은 단면사진에서 나타낸 것처럼 상부비드의 급격한 함몰과 연관하여 생각해 볼 수 있다. 즉 용접속도가 느 린 만큼 입열량이 크고 또한 중첩률이 증가하게 되는데 타 재료에 비해 비중, 융점 및 비점은 낮은 마그네슘의 특성상 급격한 증발을 일으키게 되며, 이때 동반되는 금속증기 및 플라즈마가 레이저 빔의 광로를 차단하여 실질적으로 소재내로 유입되는 입열은 감소하였기 때문 으로 사료된다. 더불어 마그네슘의 표면은 MgO의 산 화막으로 덥혀있는데^{7,8)}, MgO의 융점이 약 2,800℃인 데 반해 마그네슘의 융점은 650℃, 비점은 1,107℃로 용접시 표면의 용융은 마그네슘의 급격한 증발을 의미 한다. 이로 인해 비드표면에서의 융액 거동이 불안정해 지므로 비드폭의 변화에도 특별한 경향은 보이지 않는 것으로 사료된다.

따라서 너무 높은 중첩률은, 앞서 설명한 pps의 영향 과 마찬가지로 용융 마그네슘의 거동을 보다 불안하게 만들고 다량의 금속증발을 동반하여, 결과적으로 언더 필도 커지게 되는 것으로 판단된다. 이 현상은 용접속 도가 200mm/min을 초과하면 현저하게 감소하나, 용 접속도가 너무 빨라지면 500mm/min의 단면사진에서 처럼 급속응고로 인해 용접부내 기공이 잔존하기도 하 였다.

Fig. 9는 중첩률을 고정한 상태에서 pps 및 용접속 도 변화에 따른 용접성 변화를 도시한 것이다. 그래프 의 x축은 기본적으로 pps의 변화를 나타내나, 각 pps 의 조건에서 사용한 용접속도도 같이 기입하였다. 중첩 률을 고정하기 위해 pps가 증가에 따라 용접속도도 같 이 증가하고 있다.





Fig. 9 Variation of penetration characteristics with pps and welding speed (Ro=83%)

실험결과, pps 및 용접속도가 증가함에 따라 용입깊 이와 비드폭은 순차적으로 증가하였다. 동일한 중첩률 임에도 불구하고 용접성에 큰 차이가 나타나는 것을 볼 때, 중첩률을 결정하는 pps 및 용접속도가 마그네슘 합 금의 용접에서 주요 변수임을 확인할 수 있다.

5~10pps의 조건처럼 pps가 낮은 조건에서는 느린 용접속도로 인해 다량의 용융금속 증발을 동반하게 되 고, 이로 인해 소재로 유입되는 레이저 조사 에너지가 감소하여, 결과적으로 용입깊이가 감소하는 모습을 보 인다. 더불어 낮은 pps로 인해 에너지의 공급이 단속적 이므로 언더필도 타 조건에 비해 큰 것을 확인할 수 있 다. 이와 같은 현상은 10pps, 즉 용접속도 100mm/min 의 조건까지 발생하였으며, 이것은 앞선 용접속도 변화 에 따른 경향과 유사하였다.

15~20 pps의 조건에서 가장 우수한 용접결과가 얻 어졌으며, 깊은 용입과 낮은 언더필을 가지는 건전한 용접부를 확보할 수 있었다. 한편 25pps의 조건에서는 용입깊이는 증가하나, pps 증가로 인해 언더필이 다소 증가하였다. 더불어 너무 빠른 용접속도에 기인한 급속 응고로 용접부내 기공이 잔존하기도 하였다.

따라서 마그네슘 합금의 펄스 용접에서 건전한 용접 부를 확보하기 위해서는 첨두 출력 외에도 용접속도가 용입깊이와 용접부내 기공과 같은 용접결함을 결정하는 주 변수였으며, pps의 경우 비드형상이나 언더필과 같 은 외적인 결함과 연관되어 있다고 판단된다.

4. 결 론

Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용하여 사형주조 마그 네슘 합금 MRI202S의 맞대기 용접성을 평가한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

 Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 주조재의 맞
 대기 용접 결과, 첨두 출력을 최대한 낮추면서 펄스폭
 길게 가져가는 것이 건전한 용접부를 확보하는데 유 효하였다.

2) 첨두 출력 외에도 용접속도가 용입깊이와 용접부
 내 기공과 같은 용접결함을 결정하는 주 변수였으며,
 pps의 경우 비드형상이나 언더필과 같은 외적인 결함
 과 연관되어 있었다.

3) 본 연구결과, 적정한 용입깊이를 확보하면서 언더 필이 낮은 최적조건은 초점거리(*f*=0)에서 레이저 출 력 1.0kW, 필스폭 12ms, 용접속도 200mm/min, 그 리고 20pps의 조건이었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었 음(NIPA-2013-H0301-13-2009). 또한, 본 과제(결 과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- 1. X. Cao, M. Xiao, M. Jahazi and J.P. Immarigeon : Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Sand-Cast ZE41A-T5 Magnesium Alloys, Materials and Manufacturing Processes, 20-6(2005), 987-1004
- H. Al-Kazzaz, M. Medraj, X. Cao, M. Jahazi and M. Xiao : Effect of Welding Speed on Nd:YAG Laser Weldabilirt of ZE41A-T5 Magnesium Sand Casting, Light Metals 2005, 137–149
- B. Brofin, E. Aghion, N. Fantetti, F. Von Buch, S. Schumann and H. Friedirch : High Temperature Mg Alloys for Sand and Permanent Mold Casting Applications, SAE Technical Papers, No. 2004–01– 0656, 2004
- B. Brofin and N. Moscovitch : New Magnesium Alloys for Transmission Parts, Metal Science and Heat Treatment, 48–11~12(2006), 479–486
- 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
- T. Asahina, H. Tokisue, H. Itoh and S. Taguchi: Some Characteristics of Pulsed YAG Laser Welds of Magnesium Alloys, 日本大學生產工學部研究報告 A, 38-2 (2005), 1-9
- 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
- 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