

AZ61 필러 와이어를 첨가한 AZ31B-H24 마그네슘 합금의 레이저 용접

류충선* · 방국수* · 이목영** · 장웅성**

*부경대학교

**포항산업과학연구원

Laser Welding of AZ31B-H24 Mg Alloy with AZ61 Filler Wire.

Chung-Sun Ryu*, Kook-Soo Bang*, Mok-Young Lee** and Woong-Sung Chang**

*Welding Research Center, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330, Korea

**Division of Advanced Materials Science and Engineering, PKNU, Busan 608-739, Korea

*Corresponding author : ksbang@pknu.ac.kr

(Received July 4, 2008 : Revised October 14, 2008 ; Accepted November 24, 2008)

Abstract

Laser welding with AZ61 filler wire was carried out to improve formability though reduction of porosity and formation of under fill bead. Optimum welding condition and mechanical properties of butt joint for 400×500×1.3mm magnesium sheets were studied. Optimal welding conditions of laser power, welding speed, and defocusing length are 1000W, 3m/min, and 2mm, respectively.

Results of tensile test indicated that both tensile strength and elongation of specimens welded with filler wire were improved at room temperature because of reduction of porosity and under-filled bead formation in addition to the precipitation hardening and microstructure refinement by Al-Mn and Mg-Al-Zn precipitates. At elevated temperature of 200~350°C, fracture location of tensile specimen was shifted from weld metal to base metal, indicating less softening of weld metal than base metal.

Key Words : Nd:YAG Laser welding, AZ31B-H24 mg alloy, AZ61 filler wire, Tensile properties.

1. 서 론

세계적으로 차량에 대한 환경규제가 대폭 강화됨에 따라 차량 제조 업계에서는 차량의 연비 향상 및 배기가스의 축소를 위해 경량화 소재인 마그네슘에 대한 관심을 집중시키고 있다. 최근에는 마그네슘 합금의 개발과 제조 공정의 발전으로 고강도, 고연성을 가지는 마그네슘 합금 판재가 제조됨에 따라 기존 주조재로 제한되었던 마그네슘 합금의 차체 적용이 프레스 성형영역까지 그 적용범위가 확대되고 있다. 하지만, 마그네슘의 열악한 압연성으로 인해 제조 가능한 폭이 제한되므로 보통 용접하여, 엔진 후드, 트렁크 리드 등의 차체 부품을 제조하고 있다¹⁻⁴⁾.

Haferkamp 등은 마그네슘 합금에 대한 전자빔 및 레이저 용접을 행한 결과, 용접부 내부의 기공과 비드 표면의 노치, 즉 용착부족(under fill) 비드가 형성하여 기계적 특성이 저하한다고 하였다. 하지만 용접 과정 중 적절한 필러 와이어를 첨가하면 기공 및 용착부족 비드를 억제하여 우수한 기계적 특성을 확보 할 수 있다고 보고하고 있다⁶⁻⁸⁾.

본 연구에서는 Nd:YAG 레이저 용접한 마그네슘 합금의 프레스 가공 시 균열의 주원인이 되는 용착부족 비드를 억제하기 위하여 AZ61 필러 와이어를 첨가하는 용접을 실시하여 용접조건을 최적화하고, 레이저 용접부의 기계적 특성에 미치는 필러 와이어 첨가의 영향에 대해 조사하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

Table 1에 실험에 사용한 AZ31B-H24 마그네슘 합금 판재와 약 6wt%Al, 1wt%Zn를 함유한 AZ61 필러 와이어의 조성 및 기계적 특성을 나타내었다. 1.3mm 두께의 마그네슘 합금 판재를 400×500mm로 기계 가공한 후, CW Nd:YAG 레이저로 맞대기 용접하였다.

용착부족 비드가 형성되지 않는 건전한 용접부를 형성하기 위한 최적 용접조건을 찾기 위하여 200mm의 초점거리를 가지는 렌즈를 사용하여 레이저출력, 용접속도와 비초점거리(defocused distance)를 변화시켰다. 비초점거리는 초점거리와 렌즈와 피용접재 사이의 거리의 차이로 양의 값인 경우 초점거리가 렌즈와 피용접재 사이의 거리보다 크고, 음의 값인 경우 그 반대이다. 각 변화조건을 Table 2에 나타내었다. 이 때, 와이어 송급 속도는 최대 속도인 2.5m/min, Ar 가스유량은 15ℓ/min으로 일정하게 유지하였다. 용접 후 레이저 용접부의 기계적 특성에 미치는 필러 와이어 첨가의 영향을 조사하기 위하여 ISO 377 규격에 따라 인장시험편을 제작하여 상온 및 고온에서 인장 시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접조건 최적화

Fig. 1의 (a)에 용접속도와 비초점거리를 각각 3m/min, 2mm로 일정하게 한 후 출력을 750~1500W로 변경한 경우, 상하 비드 모습과 용접부 단면 형상을 나타내었다. 출력이 750W인 경우에는 전도모드에 의한 부분 용입이 형성되나, 출력의 증가와 함께 완전 용입을 나타낸다. 하지만, 1250W에서는 과도한 용착량을 보이며, 1500W의 경우에는 필러 와이어의 첨가에도 불구하고, 여전히 용착부족 비드가 형성된다. 이것은 출력의 증가로 인하여 필러와이어의 첨가량보다 용접금속의

증발량이 훨씬 더 많아지기 때문이라고 생각된다. 따라서 완전 용입을 나타내며 균일한 상하부 비드와 용착부족이 없는 비드를 나타내는 조건은 1000W임을 알 수 있다.

Fig. 1의 (b)에는 출력을 1000W, 비초점거리를 2mm로 각각 일정하게 하고, 용접속도를 2~5m/min로 변경한 경우 비드 상하 모습과 용접부 단면 형상을 나타내었다. 용접속도가 2에서 5m/min으로 증가할수록 용착량은 감소하고 상하부 비드의 폭 또한 감소하는 경향을 보인다. 속도가 2m/min인 경우에는 과도한 용착량을 보이고 4m/min의 경우에는 균일한 상하부 비드를 형성하였으나 용접부 내에 기공이 관찰되었다. 5m/min의 경우에는 불균일한 이면비드를 보이며, 용접부 내에 기공 또한 관찰되었다. 따라서 적정 용접속도는 3m/min임을 나타낸다.

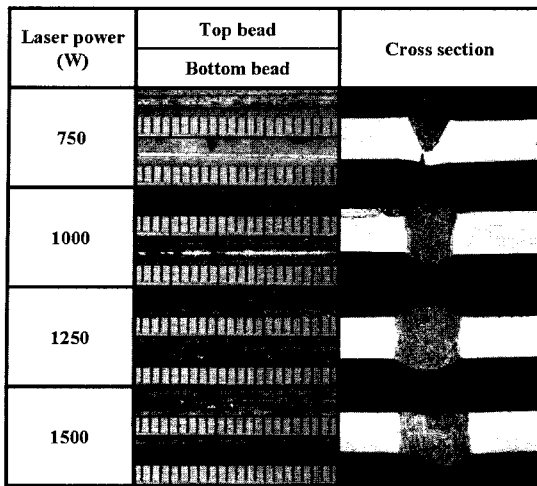
Fig. 1의 (c)는 출력을 1000W, 용접속도를 3m/min으로 일정하게 하고, 비초점거리를 -4mm에서 2mm로 변경한 경우 상하부 비드 모습과 단면형상을 나타낸 것이다. 비초점거리가 -4mm 경우에는 필러 와이어와 레이저 빔의 상호 간섭으로 용적이 용융 풀로 연속적으로

Table 2 Laser welding conditions

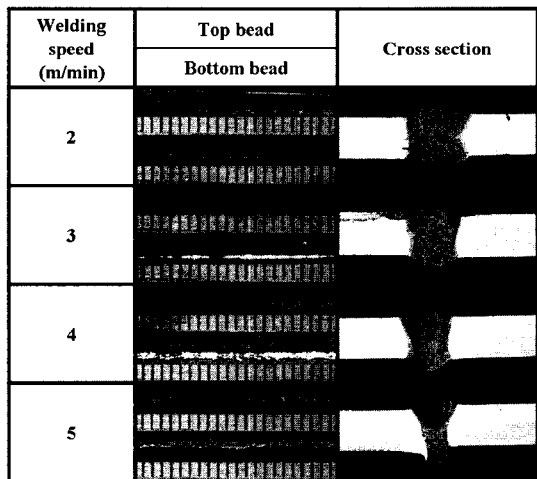
| Laser power (W) | Welding speed (m/min) | Defocused distance (mm) | Gas flow (ℓ/min) | Wire feeding speed (m/min) |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|------------------|----------------------------|
| 750 | 3 | 2 | 15 | 2.5 |
| 1000 | | | | |
| 1250 | | | | |
| 1500 | | | | |
| 1000 | 2 | 2 | 15 | 2.5 |
| | 3 | | | |
| | 4 | | | |
| | 5 | | | |
| 1000 | 3 | 2 | 15 | 2.5 |
| | | 0 | | |
| | | -2 | | |
| | | -4 | | |

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of AZ31B-H24 Mg alloy and AZ61 filler wire

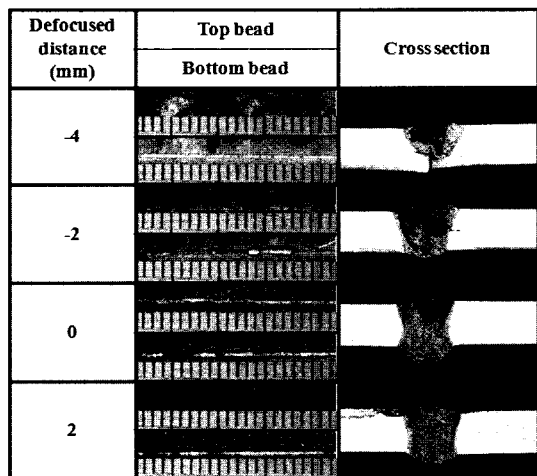
| Chemical composition (wt%) | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|------|-----------------------|------|----------------|------|
| Material | Al | Zn | Mn | Cu | Si | Mg |
| AZ31B-H24 | 3.18 | 1.02 | 0.30 | 0.03 | 0.02 | Bal. |
| AZ61 | 5.93 | 0.73 | 0.36 | - | 0.009 | >92 |
| Mechanical properties | | | | | | |
| Material | Yield Strength(MPa) | | Tensile Strength(MPa) | | Elongation (%) | |
| AZ31B-H24 | 220 | | 290 | | 15 | |



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Top and bottom bead appearances and cross-section of weld with various welding conditions. (a) laser power, (b) welding speed, (c) defocusing length

이행되지 못하고 일정한 간격을 두고 이행하여 불균일한 비드와 부분 용입을 형성하였다. 비초점거리를 -2mm로 증가한 경우에는 불균일한 이면비드뿐만 아니라 기공 또한 관찰되었다. 0mm와 2mm의 비초점거리에서는 건전한 용접부가 형성되었지만, 0mm의 경우에는 피용접재 표면에서 레이저 빔의 직경이 다른 비초점거리에서의 직경보다 훨씬 작기 때문에 레이저 빔-와이어-용접선의 정렬에 곤란한 점이 나타났다. 따라서 적정 비초점거리를 2mm로 하였다.

이상의 실험결과 필러 와이어를 첨가한 Nd:YAG 레이저 용접 시 용착부족이 없고 균일한 상하부 비드를 형성하며, 기공 등 결함을 포함하지 않는 건전한 용접부를 얻기 위한 최적 용접조건은 출력 1000W, 용접속도 3m/min, 비초점거리 2mm이다.

3.2 용접부의 기계적 특성

필러 와이어 첨가가 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 최적용접 조건으로 용접한 시험편에 대하여 상온 인장시험을 실시하였다. Table 3에 실험결과를 나타내었다. 비교를 위하여 와이어를 첨가하지 않고 레이저 단독으로 용접한 경우 용접부의 인장 시험결과도 함께 나타내었다.

레이저 단독 용접부와 필러 와이어 첨가 용접부 모두 용접금속에서 파단하였다. 하지만, 필러 와이어 첨가의 경우 레이저 단독의 경우보다 인장강도는 약 85MPa, 연신율은 약 8% 향상되었다. 즉, 필러 와이어를 첨가하면 용접금속의 강도 및 연성이 레이저 단독 용접금속보다 향상되는 것을 알 수 있다.

필러 와이어가 첨가된 용접금속이 레이저 단독 용접금속보다 높은 강도와 연성을 나타내는 결과는 Haferkamp 등에 의한 연구에서도 보고되고 있다. 그는 1.36mm 두께의 AZ31 마그네슘 합금을 AZ61A 필러 와이어를 사용하여 Nd:YAG 레이저 용접한 결과, 레이저 단독의 경우보다 용접금속의 인장강도는 약 20MPa, 연신율은 약 10% 향상되었으며, 그 원인은 필러 와이어 첨가에 의한 기공 감소와 용착부족 비드형성 억제 때문이라고 하였다^{7,8)}. 한편, Yoshida 등은

Table 3 Results of tensile test of welded joint

| Welding | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Fracture location |
|---------------------|----------------------|------------------------|----------------|-------------------|
| With filler wire | 200 | 290 | 9.6 | WM |
| Without filler wire | 170 | 205 | 1.7 | WM |

2~4.5%의 알루미늄을 포함하는 Mg-Al-Zn 합금을 사용하여 기계적 성질에 미치는 알루미늄의 영향을 조사한 결과, 알루미늄의 증가에 따라 상온 인장강도와 항복강도 및 연신을 모두가 증가한다고 보고하였다. 이 원인으로는 마그네슘 기지에 고용되는 알루미늄의 고용 강화 효과와 결정입내에서 Al-Mn 석출물과 결정입계에서 Mg₁₇Al₁₂ 석출물 형성에 따른 석출강화 및 결정립 미세화 효과로 강도와 연신율이 증가된다고 하였다⁹⁾.

Fig. 2에 본 실험에서 필러 와이어를 첨가한 경우와 레이저 단독 용접한 경우 각 용접금속의 광학현미경 및 주사식 전자 현미경(SEM) 조직사진을 나타내었다. 필러 와이어 첨가 용접금속이 레이저 단독 용접금속보다 작고 비교적 균일한 결정립을 가짐을 알 수 있다. 또한 투과식 전자 현미경 (TEM) 을 사용하여 용접금속 내의 석출물을 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 결정입내에는 Al-Mn 화합물 (b), 결정입계에는 Mg-Al-Zn 석출물 (a)가 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 결과들은 Yoshida의 실험 결과에서 언급한 강도와 연성 증가의 원인과 일치한다. 따라서 본 실험에서 AZ61 필러 와이어 첨가에 의한 용접금속 강도 및 연성 향상은

기공 및 용착부족 비드 형성 억제와 더불어 석출물 석출에 의한 석출강화 및 결정립 미세화효과에 기인한다고 판단된다.

3.3 용접부의 고온 특성

HCP 결정구조의 마그네슘 합금은 열악한 연신율로 인해 상온에서 프레스 가공이 불가능하여 일반적으로 특정 온도 범위에서 온간성형을 행하여 가공한다.²⁻⁵⁾ 따라서 온간성형 가공 시 용접부의 고온 특성을 조사하기 위하여 필러 와이어를 첨가하여 레이저 용접한 마그네슘 판재의 고온인장 실험을 실시하였다. Table 4에 200와 250℃에서 인장 시험한 결과를 나타내었다. 비교를 위하여 상온에서의 인장시험 결과도 함께 나타내었다. Fig. 4에는 파단 후 시험편 모습을 나타내었다. 상온에서 인장한 경우에는 용접금속에서 파단 하였으나 200℃이상으로 온도가 증가하면 파단위치가 용접금속에서 모재로 바뀌어 온간가공에 의한 용접금속만의 강도와 연성 변화는 알 수가 없다. 하지만 파단위치가 용접금속에서 모재로 바뀔에 따라 200℃이상으로 가열하는 경우 강도저하의 정도는 용접금속이 모재보다 작음을 알 수 있다. 이러한 이유는 고온에서 용접금속과 모재의 알루미늄 양에 따른 재결정과 결정립 성장의 차이가 원인이라고 생각된다. Kim 등의 연구에 따르면 AZ31 마그네슘 합금의 경우에는 227℃에서 결정립 성장이 급격히 일어나는 반면, AZ61 마그네슘 합금의 경우에는 377℃에서 결정립 성장이 나타난다고 보고하고

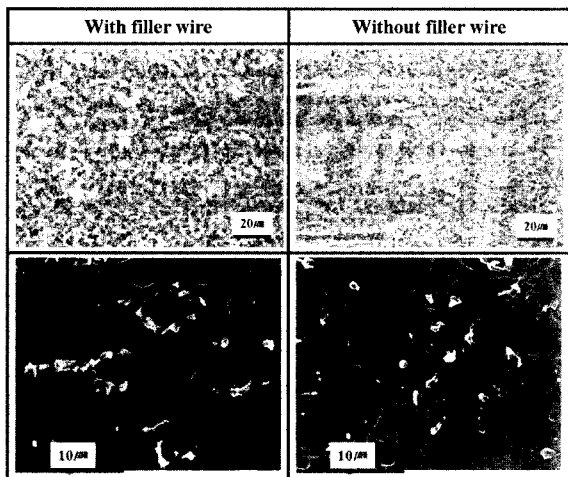


Fig. 2 Microstructure of weld metal welded with and without filler wire

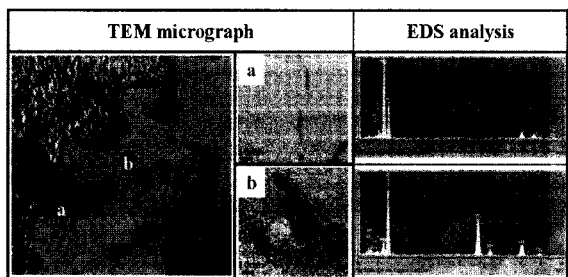


Fig. 3 TEM micrograph and EDS analysis of precipitates observed in weld metal.

Table 4 Results of tensile test of welded joint at elevated temperatures

| Temperature (°C) | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Fracture location |
|------------------|----------------------|------------------------|----------------|-------------------|
| 25 | 200 | 290 | 9.6 | WM |
| 200 | 91.2 | 102.3 | 53.1 | BM |
| 250 | 66.8 | 69.9 | 63 | BM |

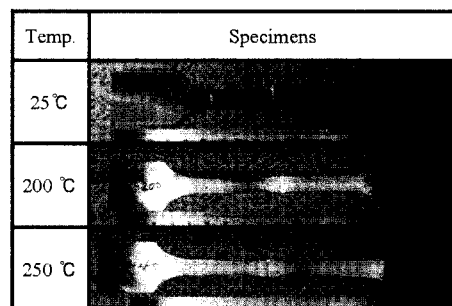


Fig. 4 Specimen appearance after fracture in tensile test

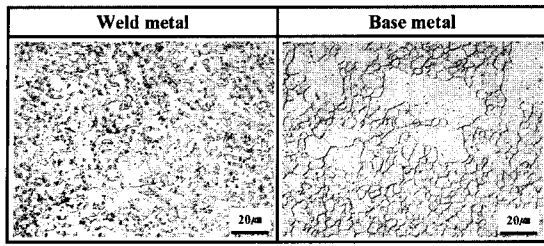


Fig. 5 Microstructure of weld and base metals at 250°C

있다¹¹⁾. 또한 Watanabe 등은 AZ61 마그네슘 합금의 소성변형에 미치는 결정립 크기와 온도의 영향에 대하여 연구한 결과, Kim의 결과와 유사한 375°C에서 급격한 결정립 성장을 보인다고 보고하고 있다. 즉 마그네슘 합금에서 알루미늄의 증가에 따라 결정립 성장 온도가 증가함을 알 수 있다¹⁰⁾.

Fig. 5에 250°C로 가열한 경우 용접금속과 모재의 조직을 비교하였다. 필러 와이어가 첨가된 용접금속의 경우(알루미늄 6%) 250°C에서 결정립 성장을 나타내지 않는 반면에 모재에서는(알루미늄 3%) 결정립의 성장이 현저히 관찰된다. 따라서 온간가공 시 용접금속보다 모재의 결정립 성장이 현저하여 모재의 강도 저하가 더욱 크게 된다고 생각된다.

4. 결 론

레이저 용접 시 형성되는 기공 및 용착부족 비드를 억제하기 위한 목적으로 AZ61 필러 와이어를 첨가하는 용접을 실시하여 용접조건을 최적화하고, 용접부의 기계적 특성에 미치는 필러 와이어 첨가의 영향에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Ar 가스유량을 15ℓ/min, 와이어 송급속도를 2.5m/min로 일정하게 하여 필러 와이어 첨가 시 최적의 용접조건은 레이저 출력 1000W, 용접속도 3m/min, 비초점거리 2mm이다.

2) 필러 와이어를 첨가한 용접금속은 기공 및 용착부족 비드 형성을 억제하고, Al-Mn 및 Mg-Al-Zn 석출물에 의한 석출강화 및 결정립 미세화 효과로 레이저 단독 용접금속에 비해 강도와 연성이 향상된다.

3) 200~250°C로 온간가공 하는 경우 필러 와이어가 첨가된 용접금속은 모재보다 결정립 성장이 억제되어 상대적으로 강도저하의 정도가 작다.

참 고 문 헌

1. Michael M. Avedesian, Hugh Baker : ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium alloys (1999)
2. K. Iwanaga, et. al, "Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ31 magnesium alloy", J. of Materials Processing Technology **155-156** (2004), 1313-1316
3. H. Somekawa, et. al, "The press formability in magnesium alloy AZ31", Materials Science Forum **350-351** (2000), 177-182
4. M.Y. Lee, C.S. Ryu W.S. Chang, : Trends in application of magnesium alloy and its welding characteristics with Laser. Journal of KWJS **25-5** (2007), 29-35
5. A. Jäger, P. Lukáč, V. Gärtnerová, J. Bohlen, K.U. Kainer : Tensile properties of hot rolled AZ31 Mg alloy sheets at elevated temperatures. Journal of Alloys and Compounds **378** (2004), 184-187
6. X. Cao, M. Jahazi, J.P. : A review of laser welding techniques for Mg alloys Journal of Materials Processing Technology **171** (2006), 188-204
7. H.Haferkamp, Fr.-W.Bach, Burmester : Nd:YAG Laser Beam Welding of Magnesium Constructions. Proceedings of the third international Magnesium Conference 1996 April, 89-98
8. H.Haferkamp, F.von Alvensleben, I.Burmester : The Characteristics of Laser Beam Welded Magnesium Alloys ICALEO 1997, 140-149
9. Yu Yoshida, Keita Arai, Shota Itoh : 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
10. H.Watanabe, T.Mukai, M.Kohzu : Effects of temperature and grain size on the dominant diffusion process for superplastic flow in an AZ61 magnesium alloy. Acta mater **47-14** (1999), 3553-3758
11. W.J. KIM, S.W. Chung, C.S. Chung : Superplasticity in thin magnesium alloy sheets and deformation mechanism maps for magnesium alloys at elevated temperatures. Acta mater **49** (2001), 3337-3345