

Nd:YAG 레이저의 펄스 제어에 의한 마그네슘 합금 용접부의 결함 방지에 관한 연구

Study of Defect Prevention on Weld Zone of Magnesium Alloy by Pulse Control of Nd:YAG Laser

김종도^{1,✉}, 이정환², 김장수³
Jong-Do Kim^{1,✉}, Jung-Han Lee² and Jang-Soo Kim³

1 한국해양대학교 기관시스템공학부 (Division of Marine System Engineering, Korea Maritime Univ.)

2 한국해양대학교 대학원 (Graduated school, Korea Maritime Univ.)

3 ㈜ 심원 (SIMWON Inc.)

✉ Corresponding author: jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4253

Manuscript received: 2009.10.8 / Accepted: 2009.10.16

Magnesium and magnesium alloys, the lightest structural materials, have been received plenty of global attention recently. These alloys could be applied in various fields, especially the electronics industry, because of their excellent electromagnetic interference shielding. However, the welding technique of magnesium alloys has not been established. This study is related to the welding of AZ31B magnesium alloy by a short-pulsed a Nd:YAG laser. Two types of pulse waves, square pulse and variable pulse, were used to control weld defects. Results show that the crack and porosity, generated in the weld, had not been controlled by general square pulse. But through the application of variable pulse, the defects could be prevented and the good weld zone was obtained.

Key Words: Magnesium Alloy (마그네슘 합금), Pulsed Laser Welding (펄스 레이저 용접), Lap Welding (겹치기 용접), Pulse Control (펄스 제어), Weld Defects (용접결함)

1. 서론

오늘날 범세계적으로 환경문제에 대한 위기의식이 고조됨에 따라 유럽을 중심으로한 선진국들은 녹색성장으로 대표되는 환경오염물질의 저감, 고갈되고 있는 화석연료의 효율적 사용, 그리고 신 재생 에너지 개발에 박차를 가하고 있다. 더욱이 제조업이 국가의 기반산업이며 생산되는 제품의 대부분을 수출하는 우리나라는, 국제사회에서의 각종 환경규약이 무역장벽으로써 작용하기 때문에, 이에 대한 대책이 절실한 실정이다.

이러한 시대적 흐름에 따라 제조업의 기반인

재료분야에서도 근본적인 변화가 요구되고 있다. 그중 가장 가시적으로 진행되고 있는 것이 재활용이 가능한 재료를 사용하여 제품을 제조하는 것과 경량재료를 사용하여 완제품의 무게를 경감하는 것이다.

따라서 기존의 철강재들이 독점하고 있던 분야에 다양한 경량재료들의 진출이 두드러지고 있으며, 그중 최경량 소재인 마그네슘에 대한 관심이 고조되고 있다.

마그네슘은 밀도가 철의 1/5, 그리고 알루미늄의 2/3 정도로 가벼우면서도 비강도가 높고 다양한 합금 가능성을 가지고 있다. 또한 전자파 차폐

성, 방열성, 진동 및 충격 흡수능이 뛰어나고 기계 가공성과 주조성이 우수하다.¹⁴ 이러한 특성에 힘입어 마그네슘 합금은 전자제품의 케이스나 LED 방열판 등 산업계 다양한 분야에서 응용이 가능하다.

한편 기존의 마그네슘 합금 관련 연구는 새로운 합금의 개발에 치우쳐 있었으며, 상대적으로 이들 합금을 활용하기 위한 가공기술, 특히 용접에 대한 연구는 아직까지 많이 부족한 실정이다.⁵⁻¹⁰

이는 철강재와 비교하여 마그네슘 합금의 고유물성이 용접의 관점에서는 상당히 열악하기 때문으로, 마그네슘은 용점 및 비점은 낮은 반면, 증기압과 열전도율은 높고 표면장력 및 점성은 낮은 특성을 가지고 있다.

그러므로 타 공법에 비해 상대적으로 입열이 적고 고속용접이 가능한 레이저의 적용이 최적으로 판단되며, 레이저를 활용한 일부 연구결과가 보고되고 있다.¹¹⁻¹⁵ 그러나 펄스 레이저를 이용한 단펄스 용접에 관해서는 보고된 사례가 전무하다.

따라서 본 연구에서는 펄스 레이저를 이용하여 AZ31B 마그네슘 합금의 단펄스 용접을 실시하였으며, 용접시 발생하는 결함의 원인을 분석하고 그 해결책을 펄스 제어를 통해 제시하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 두께 0.6mm의 Mg-Al-Zn의 3원계 합금인 AZ31B 마그네슘 합금을 용접재료로 선정하였다. AZ31B는 알루미늄이 약 3wt% 그리고 아연이 약 1wt% 함유되어 있는 합금을 명명하며, Table 1에 주요 합금원소의 화학조성을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy

Element	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Mg
AZ31B	3.01	0.98	0.32	0.029	0.0022	bal.

2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 열원은 평균출력 600W의 펄스 Nd:YAG 레이저로, 초점거리($f_0 = 0\text{mm}$)에서 단펄스로 겹치기 용접을 실시하였다. 실험은 두께 0.6mm의 시험편 두장을 겹쳐 실시하였으며, 겹침부의 간극은 두지 않았다. Fig. 1에 용접사진을 나타낸다.

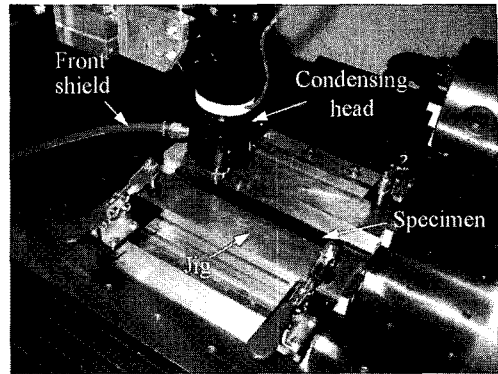


Fig. 1 Photo of laser welding

한편 펄스 레이저를 이용한 겹치기 용접에서는 겹침부의 이면이 제품의 외관이 되는 경우가 많으므로, 이를 고려하여 이면에 영향을 미치지 않으면서 안정적으로 깊은 용입이 얻어지고 용접결함이 발생하지 않는 조건을 도출하고자 하였다.

주요 공정변수로는 레이저 출력(P)과 펄스폭(τ_p)으로 한정하였으며, 또한 용접중 용융지의 산화를 막기 위해서는 동축 실드가스 노즐을 사용하여 Ar으로 용접부를 보호하였다. 이때 실드유량은 10ℓ/min으로 고정하였다.

용접이 완료된 시험편은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 비드폭과 용입깊이로 그 특성을 평가하였으며, 용접부내 결함을 펄스의 파형제어를 통해 제어하고자 하였다.

Photo Position	Bead appearance	Cross section
Measurement position		
Name	㉓ Bead width (W_b)	㉔ Penetration depth (D_p)

Fig. 2 Measurement position and definition

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접조건에 따른 용입특성

Fig. 3은 레이저 출력 변화에 따른 용입깊이 및 비드폭의 변화를 나타낸 것으로, 펄스폭을 10ms로 고정하고 실험을 실시한 결과이다. 그래프에서 확인할 수 있는 것처럼, 첨두 출력이 증가할수록 비드폭과 용입깊이가 순차적으로 증가하는 일반적인

경향을 보이고 있다. 이는 Fig. 4의 출력변화에 따른 비드의외관 및 단면조직사진에서 재차 확인할 수 있다. 또한 첩두 출력이 1.0kW일 때는 관통용입이 이루어졌으며, 특히 상부비드의 함몰이 두드러졌다.

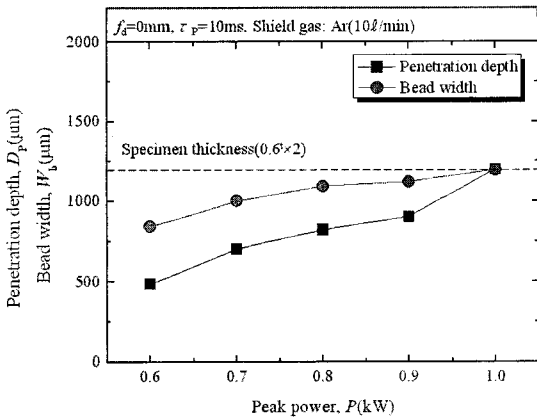


Fig. 3 Variation of penetration depth and bead width as a function of peak power

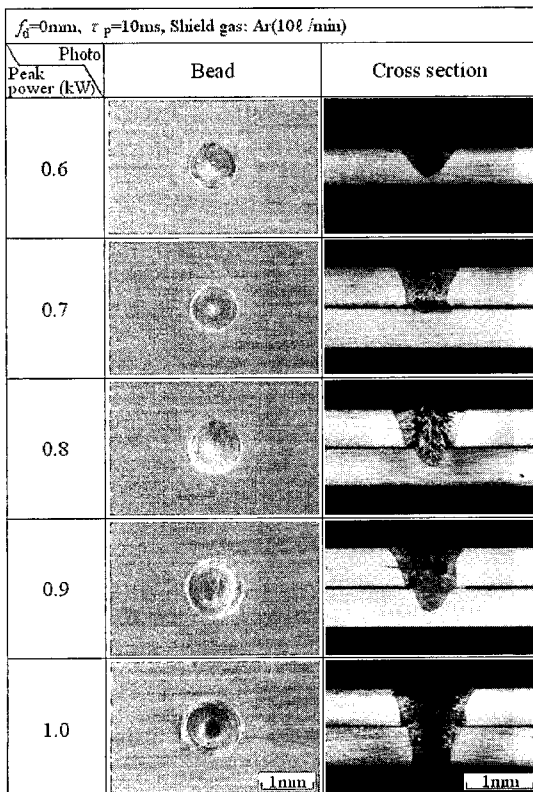


Fig. 4 Change of bead and cross section according to peak power

따라서 본 연구에서 사용한 두께 0.6mm의 겹치기 용접에서는 과도한 출력으로 판단되며, 첩두 출력 0.9kW가 적정 출력으로 사료된다.

한편 Fig. 5의 단면조직사진에서 나타난 것처럼, 용접부내에서는 균열이나 기공과 같은 용접결함이 지속적으로 관찰되었다. 이는 합금원소 첨가에 따른 균열감수성 증대와 저입열에 의한 급속응고가 주된 원인으로, 용융금속내 합금의 증발 및 응고 속도의 제어기술이 요구된다.

이를 위해 우선 첩두 출력 변화 실험에서 안정적인 용입깊이가 얻어졌던 0.9kW를 사용하여 펄스 폭에 따른 응고속도 제어를 꾀하였다. 그 결과 용입깊이 및 비드폭의 변화를 Fig. 6에, 더불어 각 조건별 비드의외관 및 단면조직사진을 Fig. 7 나타낸다.

펄스폭 증가에 따라 용입깊이 및 비드폭이 함께 증가하는 일반적인 경향을 보였으며, 펄스폭 14ms에서부터 이면비드의 용접 열영향이 관찰되어 16ms에서는 관통용입이 이루어졌다. 이면비드에 영향을 미치지 않으면서 가장 깊은 용입을 얻을 수 있었던 조건은 펄스폭 12ms였으나, 여전히 용접부내 균열은 존재하였다. 단펄스 용접에서 응고 속도를 제어할 수 있는 가장 유효한 방법은 펄스 폭을 길게 늘려 응고시간을 확보하여 주는 것이나,

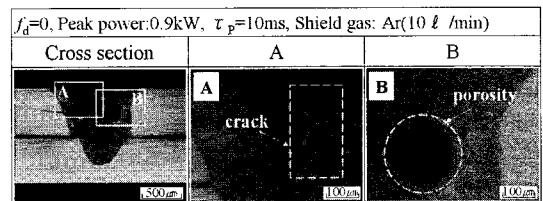


Fig. 5 Weld defects of magnesium alloy

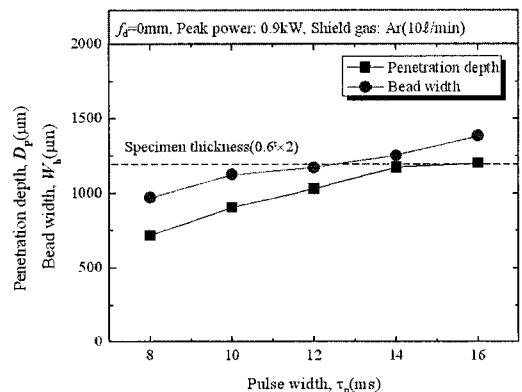


Fig. 6 Variation of penetration depth and bead width as a function of pulse width

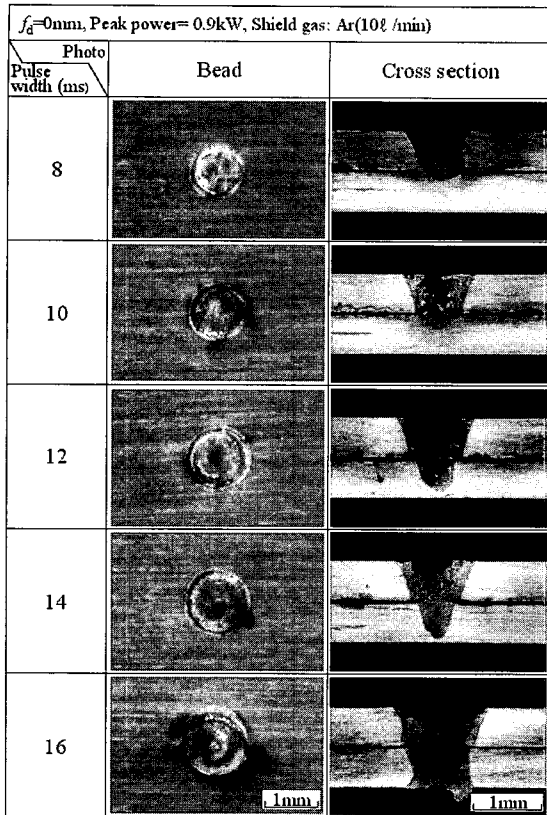


Fig. 7 Change of bead and cross section according to pulse width

본 연구에서 사용된 마그네슘합금의 경우에는 마그네슘의 낮은 용점 및 비점, 그리고 높은 열전도도에 의해 단순 구형파로는 이러한 효과를 얻을 수 없었다. 따라서 파형제어를 통한 응고속도의 조절이 요구된다.

3.2 파형제어를 통한 용접결함 제어

앞서 단순 구형파를 사용한 실험에서는 균열 및 기공과 같은 용접결함을 피할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 파형제어를 통해 용접결함을 제어하고자 하였다. 우선 단펄스 용접에서는 높은 첨두 출력의 레이저 빔이 일순간 소재로 조사되면서 발생하는 열충격과 급격한 증발에 의한 상부비드의 함몰이 발생하게 된다. 이를 제어하기 위해 첨두 출력을 서서히 상승시켜 가는 방법과, 첨두 출력을 서서히 떨어뜨려 급속응고를 방지하는 2가지 파형제어를 실현해 보았다. 그 결과, 본 실험에 사용된 파형과 그때의 비드외관 및 단면조직사진을

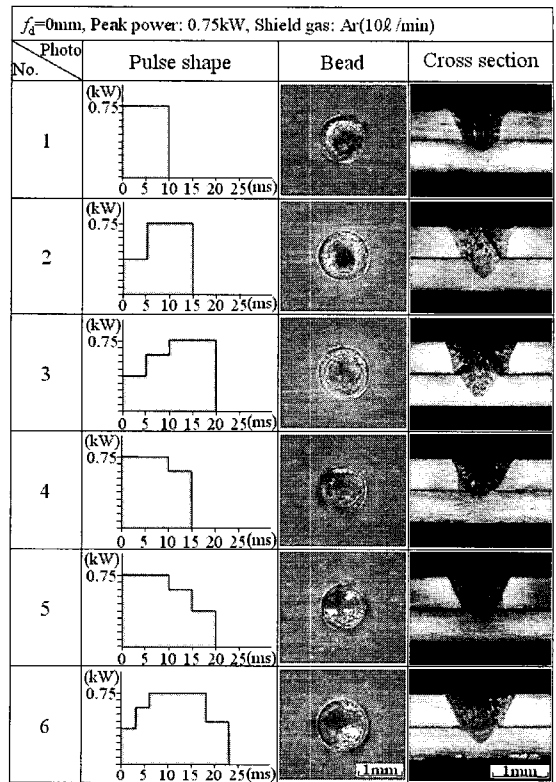


Fig. 8 Change of bead and cross section according to pulse shape

Fig. 8에 나타낸다. 파형제어에 따른 펄스폭의 제어 범위에 여유를 주기 위해서 구형파에서 최적으로 판단되는 첨두 출력 0.9kW보다 다소 낮은 값인 0.75kW의 첨두 출력을 사용하였으며, 비초점거리 및 실드조건은 동일시하였다. 또한 첨두 출력 0.75kW, 펄스폭 10ms의 구형파를 비교 파형으로 사용하여 실험결과를 비교·분석하였다. 단면조직 관찰결과 첨두 출력을 단계적으로 높였을 시, 즉 No. 1에서 No. 3까지 파형을 제어하였을 때 용입깊이가 증가하며 양호한 비드를 얻을 수 있었다. 그러나 겹침부로부터 크랙이 전파되어 상부비드로 올라오는 것은 제어할 수 없었다. 이는 마그네슘의 높은 열전도도에 기인한 응고수축으로 인해 파생되는 결함으로, 겹침부가 노치의 역할을 하여 이곳으로부터 크랙이 전파된다고 판단된다.

한편 첨두 출력을 서서히 낮추면서 실험한 No. 4와 No. 5는 구형파인 No. 1을 적용한 경우보다 재료로 조사되는 평균 에너지가 많음에도 불구하고 용입깊이가 더 얇았다. 이는 파형제어에 따른 용

입깊이 및 비드폭의 변화를 나타낸 Fig. 9에서 재차 확인할 수 있다. 또한 침투 출력의 나뭇 단계가 많은 No. 5에서는 비드의 함몰이 두드러졌다.

이상의 결과로부터 마그네슘 합금의 파형제어를 통한 접지기 용접에서는 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 우선 단계적으로 침투 출력을 상승시켰을 경우, 소재로 유입되는 평균 에너지 증가에 따른 재료의 예열에 의해 용입깊이의 증가가 두드러졌으나, 균열의 전파를 막을 수는 없었다. 반면 단계적으로 침투 출력을 하락시켰을 경우에는, 마그네슘의 높은 열전도도 때문에, 초기에 조사되는 에너지 보다 낮은 에너지가 투입되므로 용입깊이에 아무런 유효 효과가 없었으며, 오히려 최종적으로 낮은 에너지가 소재 표면에만 영향을 미쳐, 상부비드의 함몰을 유발한다고 판단된다. 그러나 응고시간을 지연시켜 줌으로서 균열의 발생은 다소 억제되었다.

따라서 두 파형의 장점을 살리고 단점을 보완하기 위해, No. 6에 나타낸 것처럼 단계적으로 침투 출력을 상승시킨 후 침투 출력을 떨어뜨리는 파형으로 실험을 실시하였다. 그 결과 적당한 용입깊이의 확보와 접침부로부터 전파되는 균열의 제어가 일부 가능하였다. 그러나 비드 표면에서의 균열

발생은 여전히 있었다. 이 문제를 해결하기 위해, 펄스 폭을 좀 더 늘려 응고시간을 확보한 파형으로 실험을 실시한 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 단면조직 사진에서 나타낸 것처럼, 기공 및 균열이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었으며 파형제어를 통한 용접결함의 제어가 가능하였다.

4. 결론

펄스 Nd:YAG 레이저를 이용한 두께 0.6mm의 AZ31B 마그네슘 합금의 단펄스 접지기 용접에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 펄스 레이저를 이용한 마그네슘 합금의 용접에서는 용접부내 기공 및 균열과 같은 용접결함이 관찰되었다. 이는 합금원소의 첨가에 따른 균열감수성 증대와 저입열에 의한 급속응고가 주된 원인으로 사료된다.

2) 펄스 용접에서 응고속도를 제어할 수 있는 가장 유효한 방법은 펄스폭을 길게 늘려 응고시간을 확보하여 주는 것이나, 마그네슘 합금의 경우에는 마그네슘의 낮은 용점 및 비점 그리고 높은 열전도도에 의해 단순 구형파로는 용접결함을 제어할 수 없었다.

3) 구형파의 한계를 극복하기 위해 가변파를 사용한 파형제어를 실시하였으며, 그 결과 기공 및 균열이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2009-C1090-0903-0007).

참고문헌

1. Avedesian, M. M. and Baker, H., "ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys," ASM, pp. 3-12, 1999.
2. The Japan Society for Technology of Plasticity, "Magnesium Processing Technology," CORONA Press, pp. 12-33, 2004.
3. Eliezer, D. and Aghion, E., "Magnesium Science, Technology and Applications," Advanced Performance Materials, Vol. 5, No. 3, pp. 201-212, 1998.
4. Zhang, B.-P., Tu, Y.-F., Chen, J.-Y., Zhang, H.-L.,

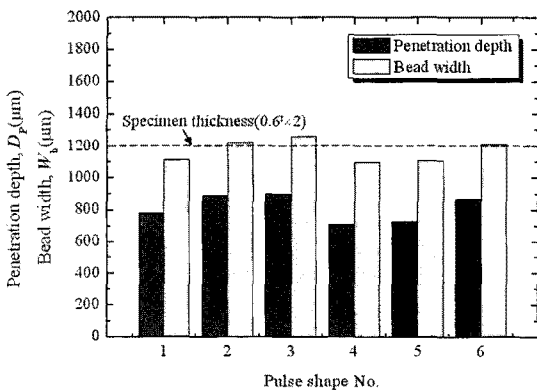


Fig. 9 Variation of penetration depth and bead width as a function of pulse shape No.

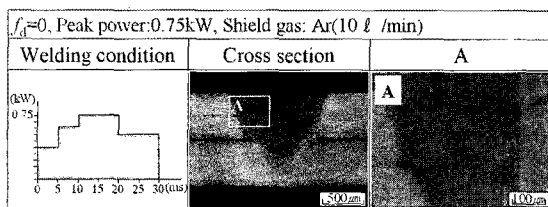


Fig. 10 Obtained good weld zone by pulse control

- Kang, Y.-L. and Suzuki, H. G., "Preparation and characterization of as-rolled AZ31 magnesium alloy sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, No. 1-3, pp. 102-107, 2007.
5. Aida, S., Tanabe, H., Sugai, H., Takano, I., Ohnuki, H. and Kobayashi, M., "Deep-drawability of cup on AZ31 magnesium alloy plate," *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 50, No. 9, pp. 456-461, 2000.
 6. Mackenzie, L. W. F. and Peguleryuz, M., "The influences of alloying additions and processing parameters on the rolling microstructures and textures of magnesium alloys," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 480, No. 1-2, pp. 189-197, 2008.
 7. Yoshida, Y., Arai, K., Itoh, S., Kamado, S., Wada, T., Matsunaga, T., Yoshimoto, T. and Kojima, Y., "Effects of Al and Zn contents and heat treatment on microstructure and tensile properties of Mg-Al-Zn alloys," *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 55, No. 10, pp. 456-462, 2005.
 8. Munitz, A., Cotler, C., Stern, A. and Kohn, G., "Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 302, No. 1, pp. 68-73, 2001.
 9. Zhu, T., Chen, Z. W. and Gao, W., "Incipient melting in partially melted zone during arc welding of AZ91D magnesium alloy," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 416, No. 1-2, pp. 246-252, 2006.
 10. Shin, H.-W., Han, B.-S., Yoo, H.-J. and Jung, H.-H., "Development of Magnesium Seat Frames using the Vacuum Die Casting Process," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 88-97, 2009.
 11. Weisheit, A., Galun, R. and Mordike, B. L., "CO₂ Laser Beam Welding of Magnesium-Based Alloys," *Welding Journal*, Vol. 77, No. 4, pp. 149-154, 1998.
 12. Asahina, T. and Tokisue, H., "Electron Beam Weldability of Pure Magnesium and AZ31 Magnesium Alloy," *Materials Transactions*, Vol. 42, No. 11, pp. 2345-2353, 2001.
 13. Cao, X., Jahazi, M., Immarigeon, J. P. and Wallace, W., "A review of laser welding techniques for magnesium alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 2, pp. 188-204, 2006.
 14. Kim, J.-D., Kil, B.-L. and Lee, J.-H., "Effect of Process Parameters on Laser Weldability of AZ31 Magnesium Alloy," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 570-577, 2008.
 15. Kim, J.-D., Lee, J.-H. and Kim, J.-S., "Characteristics of Butt Welded AZ31 Magnesium Alloy with Laser Welding Conditions," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 517-523, 2009.