

AZ31 마그네슘합금의 레이저 용접성에 미치는 공정변수의 영향

김종도† · 길병래* · 이정한**

(원고접수일 : 2007년 12월 31일, 심사완료일 : 2008년 3월 11일)

Effect of Process Parameters on Laser Weldability of AZ31 Magnesium Alloy

Jong-Do Kim† · Byung-Lea Kil* · Jung-Han Lee**

Abstract : Magnesium alloys are potentially useful as structural materials due to higher strength/weight ratio, heat conductivity and recyclability compared to other alloys. These alloys have attracted the interest of modern manufacturing such as the automobile, computer, communication and consumer electronic appliances industries. Hence welding techniques are required to be developed for these applications. Laser are known to be an excellent tool for them. This paper presents the laser weldability of AZ31 magnesium alloy with CW Nd:YAG laser. The low viscosity and surface tension of the melt pool make magnesium more difficult to weld than steel. As a result of this study, optimal process parameters could be obtained without weld defects. Also it was certain that cutting methods had influence on butt weldability.

Key words : Magnesium alloy(마그네슘합금), Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저), Laser weldability(레이저 용접성), Process parameter(공정변수), Butt welding(맞대기 용접)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경오염 및 지구 온난화 문제가 심각해짐에 따라 이에 대한 대책과 함께 한정된 에너지를 효과적으로 이용하는 방안이 급세기 가장 큰 이슈로 떠오르고 있다. 더욱이 석유자원의 대부분은 자동차, 선박 및 항공기와 같은 운송기기에서 소비되고 있고 자동차의 배기가스는 지구 온난화의 주 원인으로 알려져 있다. 따라서 이러한 시대적 요구와 석유자원의 효율적 사용을 위해 연

비향상에 대한 필요성이 크게 증대되고 있으며, 이를 위해 가장 가시적인 방법인 경량화가 강력하게 추진되고 있는 실정이다.

대표적인 경량화 재료로는 알루미늄, 마그네슘 및 강화플라스틱 등을 들 수 있다. 이 중 마그네슘에 대한 관심이 최근 급증하고 있으며, 마그네슘합금의 밀도는 철합금의 1/5, 알루미늄합금의 2/3의 수준으로써 현재까지 개발된 합금 중에서 가장 가벼운 재료로 알려져 있다. 더욱이 알루미늄합금 등 다른 경량재료와 비교하여 손색이 없는 비강도 및 탄성계

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253)

* 한국해양대학교 기관시스템공학부

** 한국해양대학교 대학원

수를 가지고 있으며 진동 및 충격 흡수능과 전자파 차폐성이 탁월하다. 이러한 특성에 힘입어 마그네슘 합금은 자동차 및 전자기기 부품에 적용되고 있으며 그 사용량도 해마다 증가하는 추세이다^[1)-(5)].

한편 이러한 마그네슘합금의 적용분야를 더욱 확대하기 위해서는 접합공정이 필수적이고, 이에 따라 마그네슘합금의 용접에 대한 연구가 최근 전 세계적으로 주목을 받고 있다.

마그네슘합금의 용접은 거의 모든 방법으로 가능한 것으로 알려져 있으나 마그네슘합금은 철강재와 비교해서 용점이 낮고 용융 잠열 및 비열이 작다. 더욱이 열전도율 및 열팽창계수가 크기 때문에 양호한 용접 이음부를 얻기 위해서는 용접 입열을 억제할 필요가 있다. 따라서 타 용접공법에 비교해 상대적으로 입열이 적고 고속용접이 가능한 레이저용접이 마그네슘합금에 최적으로 판단된다.

더욱이 기존의 연구는 새로운 마그네슘합금의 개발 및 다이캐스트재에 대한 용접이 대부분이었으며^[6)-(10)], 가공용 마그네슘합금의 용접에 대해서는 최근에 몇몇 사례가 보고되고 있는 수준이다^[11)-(13)]. 따라서 본 연구에서는 AZ31 마그네슘합금 판재를 사용하여 레이저 용접시 공정변수에 따른 영향을 조사하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 알루미늄이 3wt.%, 아연이 1wt.% 첨가된 AZ31 마그네슘합금으로 두께는 1.25mm이다. 시험편은 150mm(길이)×50mm(폭)의 크기로 재단하여 비드용접 및 맞대기 용접에 적용하였다. Table 1에 본 실험에 사용된 마그네슘합금의 화학조성을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of AZ31

Element Material	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Mg
AZ31	3.01	0.98	0.32	0.029	0.0022	0.0012	0.0019	bal.

2.2 실험방법

실험에 사용한 열원은 최대출력 4kW의 CW Nd:YAG 레이저로 동일한 초점거리($f_d = -1$) 및 실드분위기에서 출력($P = 1 \sim 3kW$)과 속도($v = 25 \sim 130mm/sec$)를 변화시키며 용접을 실시하였다. 용접 중 용융지의 산화를 막기 위해서는 측면에서 실드가스 노즐을 사용하여 Ar으로 용접부를 보호하였으며 활성도가 높은 마그네슘합금의 특성을 고려하여 Fig. 1에서 나타낸 것처럼 이면실드도 같이 실시하였다. 최적 맞대기 용접조건을 도출하기 위해 우선적으로 형상인자를 배제한 비드용접을 실시하였으며, Fig. 2에 나타낸 것처럼 전면 비드폭(W_{fd}) 및 이면 비드폭(W_{bb})과 용입깊이(D_p)로 그 특성을 평가하였다. 맞대기 용접은 비드용접에서 선정된 적정조건으로 실시하였으며 Fig. 3에 나타낸 전면 및 이면 비드폭과 접합길이(L_b)로 용접성을 평가하였다. 맞대기 용접의 경우, 접합면의 정도에 따라 용접성에 차이가 발생할 수 있으므로, 절단면의 품질에 대한 평가를 같이 실시하였다. 접합면은 시어링(shearing), 밀링(milling) 및 와이어 커팅(wire cutting)에 의해 제작하였으며, 각 가공조건 별 접합면의 사진을 Fig. 4에 나타낸다.

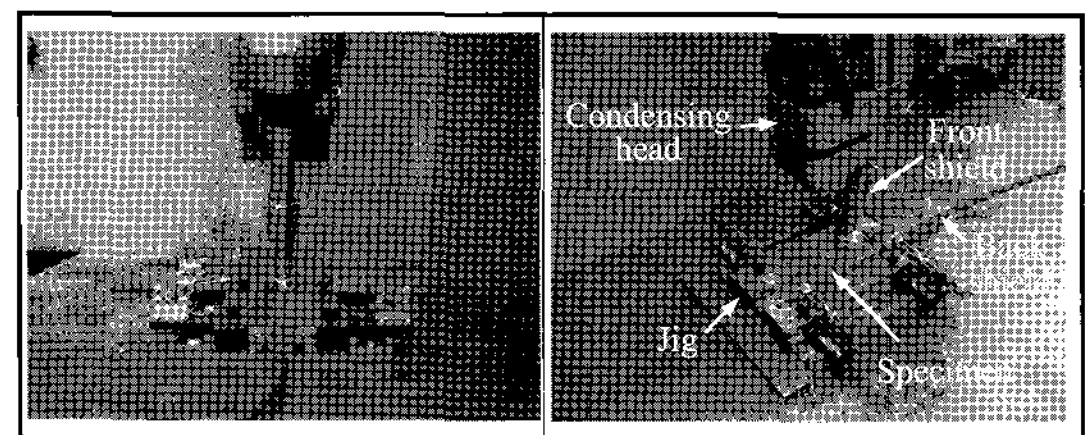


Fig. 1 Photos of laser welding

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)

Fig. 2 Measurement position and definition on bead welding

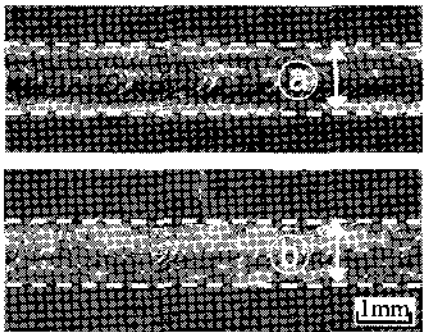
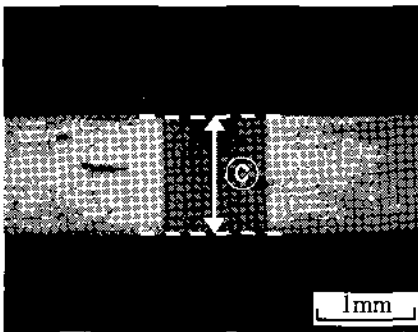
Photo Position	Bead appearance	Cross section
Measurement position		
Definition	(a) Front bead width (W_{fd}) (b) Back bead width (W_{bb})	(c) Bonding length (L_b)

Fig. 3 Measurement position and definition on butt welding

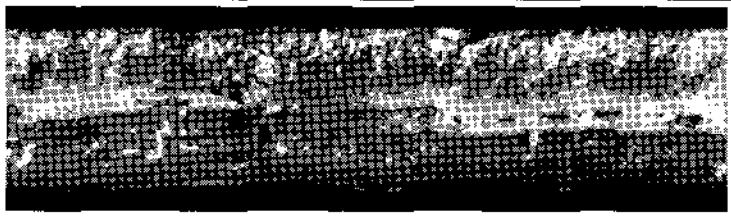
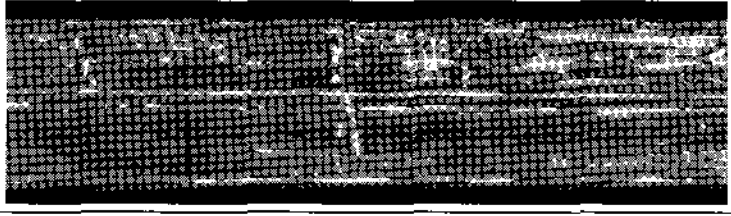
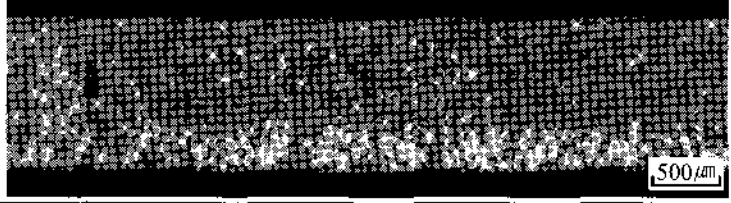
Photo Method	Bead appearance
Shearing	
Milling	
Wire cutting	

Fig. 4 Appearance of cutting surface

3. 실험결과 및 고찰

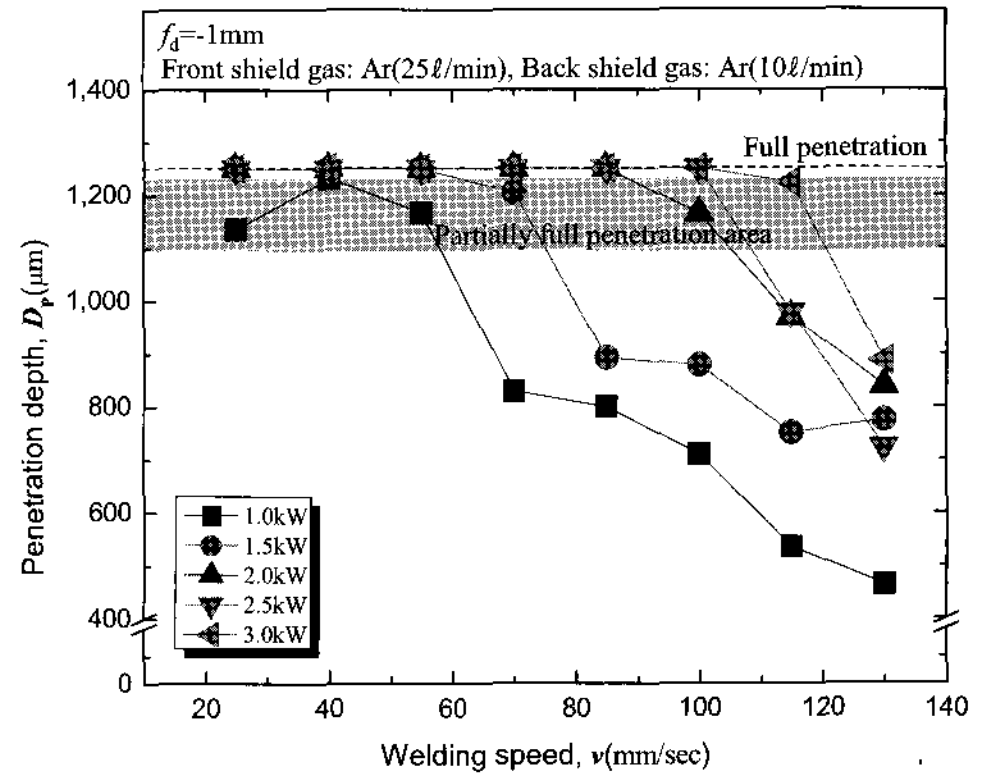
3.1 비드용접 특성

3.1.1 출력 및 속도변화에 따른 용접특성

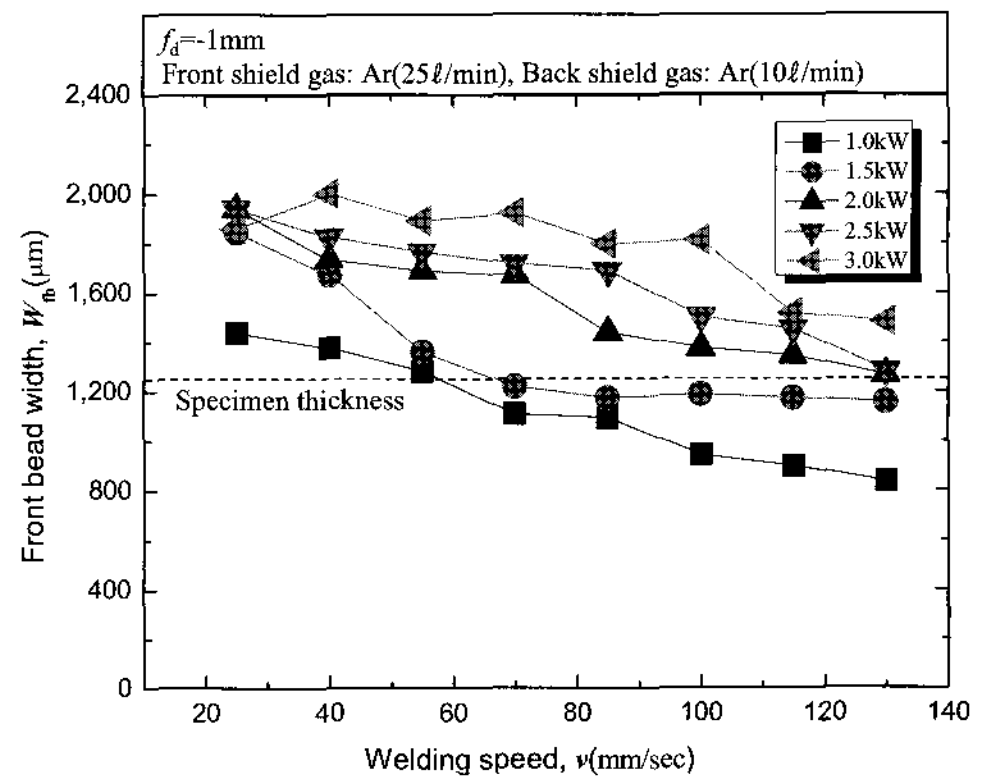
Fig. 5는 레이저를 적용한 마그네슘합금의 비드 용접 시 출력 및 속도변화에 따른 용접특성을 나타낸 것으로서 용입깊이(D_p), 전면비드(W_{fd}) 및 이면비드(W_{bb})의 변화를 각각 도시하였다.

용입깊이의 변화는 Fig. 5(a)에서 나타낸 것처럼, 모든 출력범위에서 용접속도가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 레이저 출력 1.0kW의 경우, 용접속도 25~55mm/sec의 범위에서 부분관통용입만 확인되며 본 실험에 사용된 조건하에서는 완전용입을 얻을 수 없었다. 따라서 본 실험에 사용된 두께 1.25mm 마그네슘합금 박판을 용접하는데는 부적합한 출력으로 판단된다. 그 외 출력에서는 완전용입이 안정적으로 이루어지는 속도구간이 존재하였다. 각 출력별 완전용입이 이루어지는 임

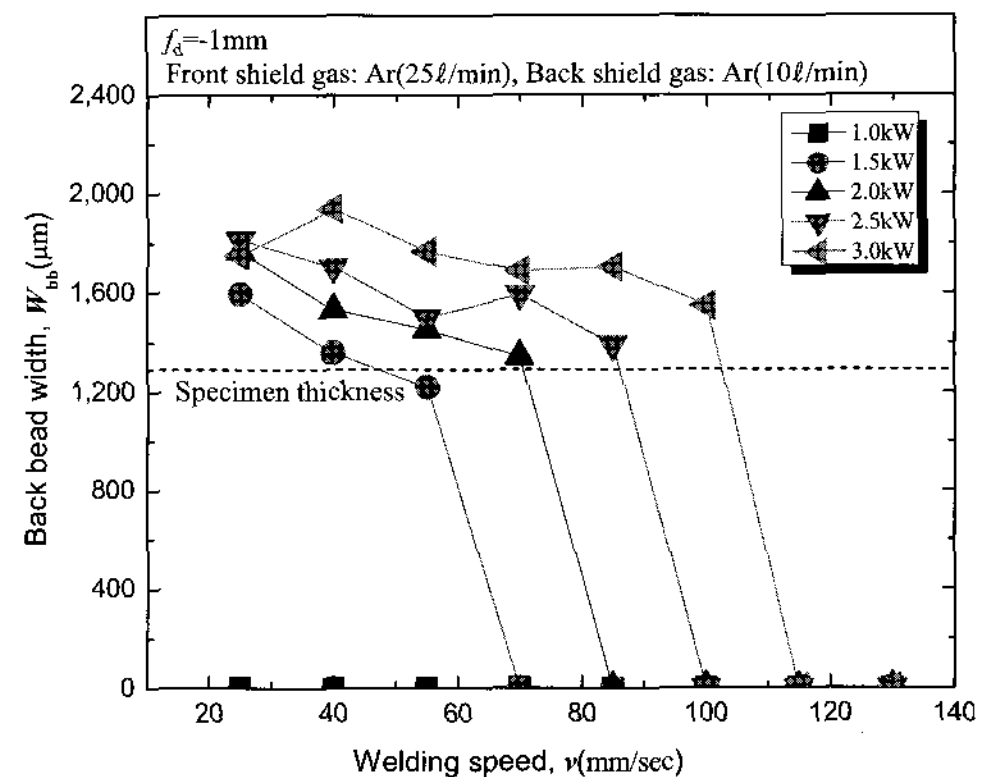
계값은 1.5kW의 경우에는 70mm/sec, 2.0kW는 85~100mm/sec, 2.5kW는 100~115mm/sec에서 그리고 3.0kW에서는 115mm/sec의 용접속도에서 각각 확인되었다.



(a) Penetration depth



(b) Front bead width



(c) Back bead width

Fig. 5 Variation of bead weldability according to laser power and welding speed

비드폭의 경우는 Fig. 5(b)의 전면비드(W_{fd})와 Fig. 5(c)의 이면비드(W_{bb})에서 나타낸 것과 같이, 용접속도가 증가함에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보였으며 본 실험에 사용된 모든 출력범위에서 동일하게 확인되었다. 그러나 레이저 출력 3.0kW의 경우에는 타 출력에 비해 다소 비드폭의 변화가 불안하였으며, 본 실험에 사용된 마그네슘합금의 용접에는 과도한 출력으로 판단된다. 따라서 차후 맞대기 용접에서는 레이저 출력 1.5kW, 2.0kW, 2.5kW를 적용하였다.

3.1.2 비드용입형상의 주기적 특성

마그네슘합금의 비드용접에서는 용접속도(v)와 출력(P)변화에 따라 일정한 주기성을 가지는 용입불량(irregular penetration)현상이 발생하였으며 비드의 특정부분에서는 용락(burn through)

현상이 관찰되었다. 그 일례를 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 보듯이 전면비드에서는 잘 나타나지 않았던 용입형상의 주기적인 변화가 이면비드에서 관찰되었다. 따라서 이를 기준으로 비드형상의 변화를 간격별로 표시해보면 일정한 주기성을 가지고 있으며, 이러한 주기성은 비드의 관통부가 형성되는 위치와 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 7에서 나타낸 것처럼 용접속도가 증가함에 따라 결함이 발생하는 간격이 큰 폭으로 감소하다가 완전용입에서 부분관통용접으로 전환되는 임계속도구간에서 급격하게 증가한 후, 다시 감소하는 경향을 보였다. 이는 타 금속재료에 비해 열전도율과 증기압이 높고, 표면장력 및 점성이 낮은 마그네슘의 특성 때문으로 사료된다. 따라서 용접속도가 저속일때는 이러한 물성의 영향이 미미하나, 용접속도가 증가함에 따라 입열량이 감소하게 되면

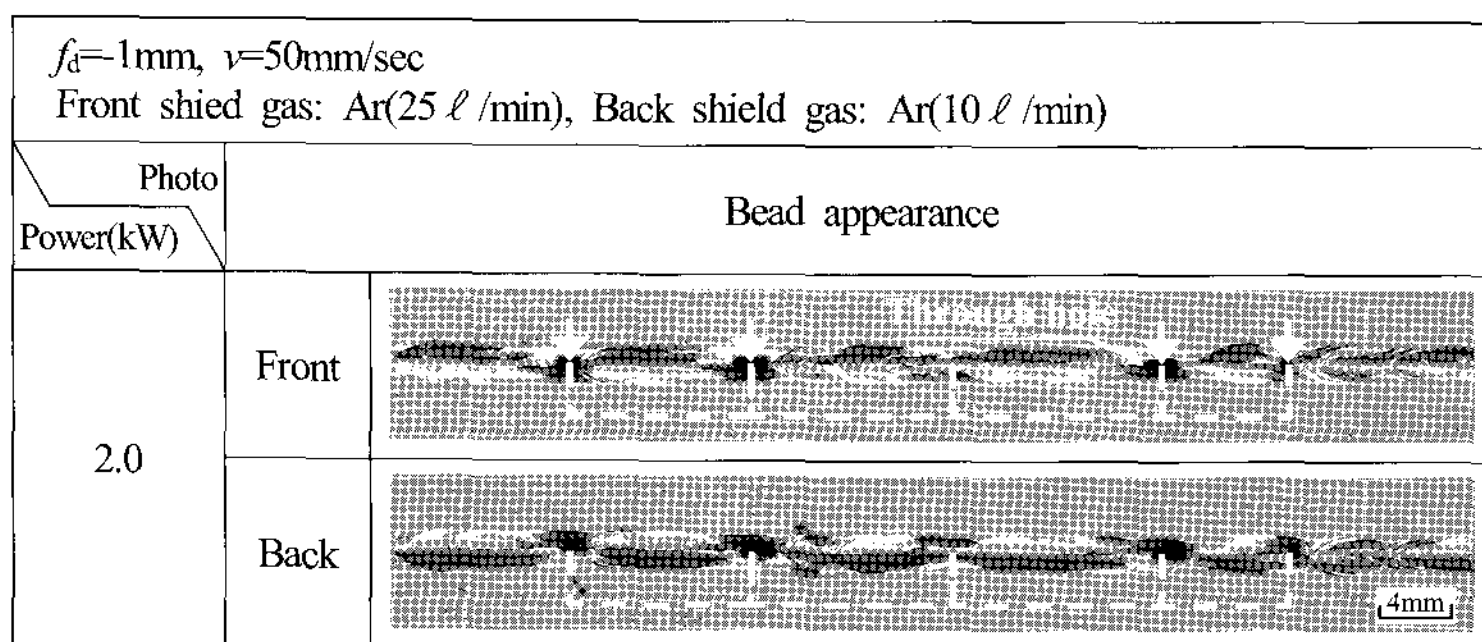


Fig. 6 Periodic variation of bead penetration shape

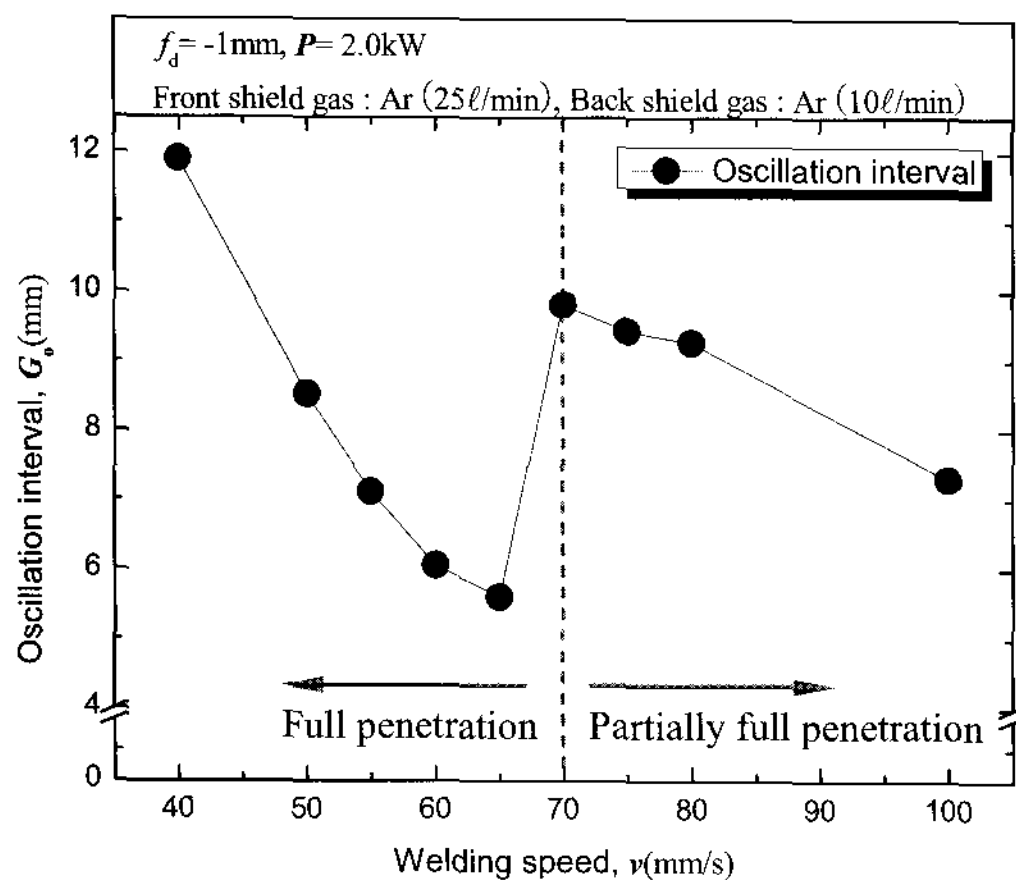


Fig. 7 Variation of oscillation interval according to welding speed

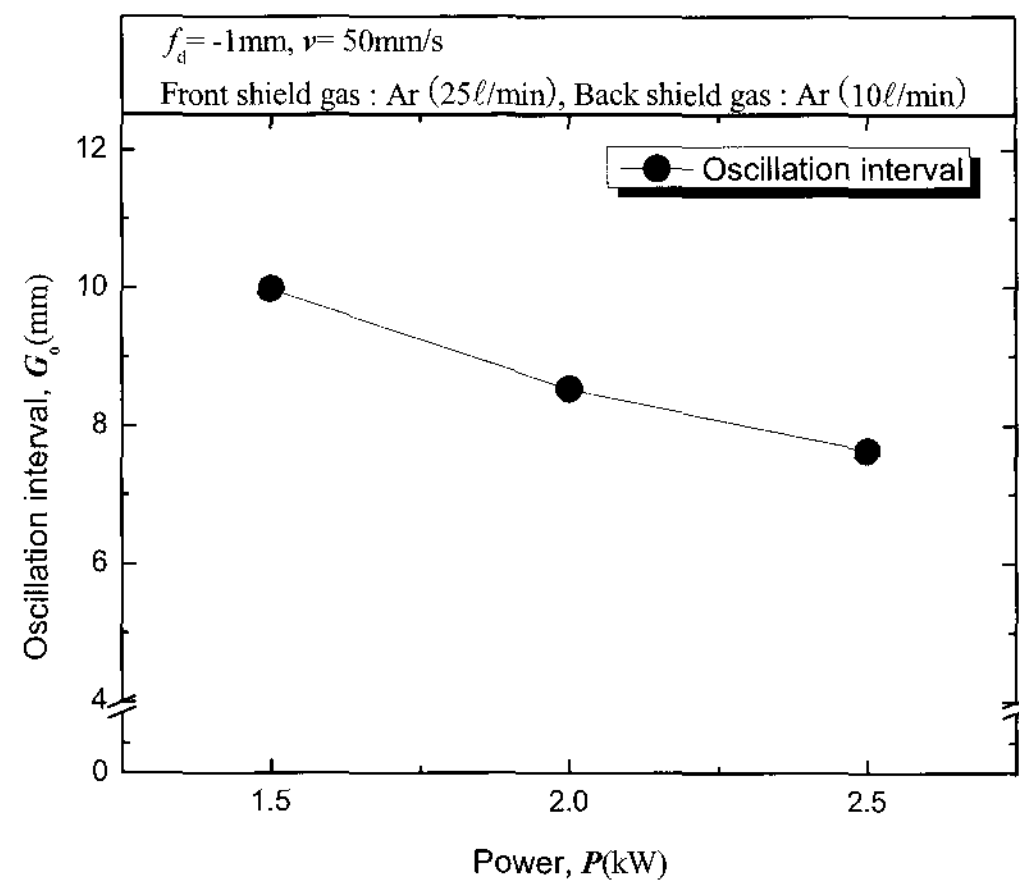


Fig. 8 Variation of oscillation interval according to laser power

키홀이 불안정하게 되어, 재료와 열원간의 상호작용에 의해 용입불량현상이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 높은 증기압에 의해 키홀 외부로 밀쳐진 용융금속이 다시 키홀을 메우기 전에 급속응고하여 언더필(underfill)이나 용락 현상이 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 8은 출력변화에 따른 용입불량현상의 주기성을 나타낸 것이다. Fig. 7의 용접속도 변화와 동일한 경향을 보이고 있으나, 변화폭이 다소 완만하였다. 따라서 마그네슘합금의 비드용접시 발생하는 용입불량이나 용락과 같은 결함은 출력보다는 용접속도에 의한 영향이 크다고 판단된다.

3.2 맞대기용접 특성

3.2.1 가공조건에 따른 맞대기용접 특성

맞대기용접은, 비드용접에서 완전용입이 얻어지고 전면 및 이면 비드폭의 변화가 안정하며, 용입불량현상이 일어나지 않거나 또는 그 발생빈도가 적은 조건으로 실시하였다. 또한 상온에서 연신이 떨어지는 마그네슘의 특성상 시험편의 가공공법에 따라 접합면의 상태가 달라지므로, 이에 대한 평가를 우선 실시하였다. Fig. 9는 시어링, 밀링 및 와이어 커팅에 의해 제작된 용접시험편의 비드 외관 및 단면조직사진이다. 용접은 비드용접에서 용입불량 없이 건전한 비드 및 단면조직을 보였던 레이저 출력(P) 1.5kW, 용접속도(v) 55mm/sec로 실시하였다.

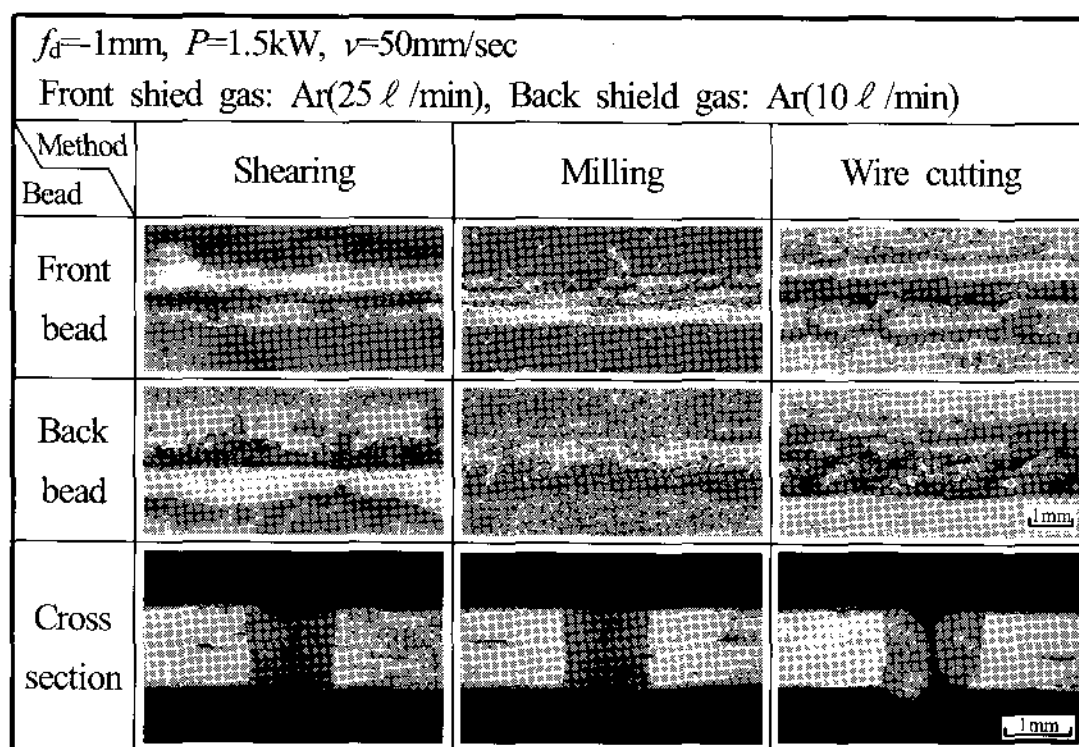


Fig. 9 Butt weldability of magnesium alloy depending on cutting method of specimen

시어링으로 시험편을 절단한 경우, 절단면이 매끄럽지 못하고 맞댄면의 정도가 떨어지기 때문에 용접이 이루어지지 않았다. 밀링을 적용한 경우(절삭유를 사용하지 않음)에는 전반적으로 양호한 면상태를 얻을 수 있었으며, 맞대기용접에 적용한 결과 건전한 용접비드 및 단면을 보였다. 한편 와이어 커팅으로 제작한 시험편의 면의 정도는 밀링 처리한 시험편과 동등 또는 그 이상의 면 정도를 보이나 비드외관 및 단면조직에서 알 수 있듯이 용접은 이루어지지 않았다. 이러한 현상은 와이어 커팅시 사용되는 절삭유가 커팅부에서 마그네슘과 반응을 하여 절단면이 산화되거나 오염되기 때문이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 밀링처리한 마그네슘 판재를 사용하여 맞대기 용접에 적용하였다.

3.2.2 용접조건에 따른 맞대기용접 특성

Fig. 10은 비드용접에서 얻어진 적정조건을 맞대기 용접에 적용한 결과이다. 레이저 출력은 비드용접에서 완전용입이 얻어지지 않는 1.0kW와 비드폭의 변화가 심한 3.0kW를 제외한 1.5kW, 2.0kW 및 2.5kW로 선정하였다. 용접속도는 비드용접시 나타나는 용입불량을 최소화하고 현장 적용시의 생산성을 고려하여, 완전용입시 입열이 가장 적은 조건을 선정하였으며, 출력별로 5mm/sec씩 변화시키면서 용접을 실시하였다.

그 결과 모든 조건에서 건전한 비드외관을 얻을 수 있었다. 그러나 단면조직관찰 결과, 레이저 출력이 증가할수록 언더필과 같은 비드의 함몰이 관찰되었다. 이는 레이저 출력 2.0kW 및 2.5kW의 용접조건은 비드 용접시 용입불량이 다소나마 발생한 영역으로써 맞대기 용접시 이음부 갭의 영향으로 용입불량은 발생하지 않았으나, 접합면의 정도나 갭 간극에 따라 이와 같은 결함이 발생할 수 있는 잠재구역이라고 판단된다. 한편 1.5kW의 경우, 비드용접시 안정한 용접이 이루어졌으며, 맞대기 용접시에도 가장 최적의 단면형상을 보였다.

Fig. 11(a)와 (b)는 맞대기 용접시 레이저 출력 및 용접속도 변화에 따른 전면 및 이면비드의 변화를 도시한 것이다. 레이저 출력이 증가할수록 그리

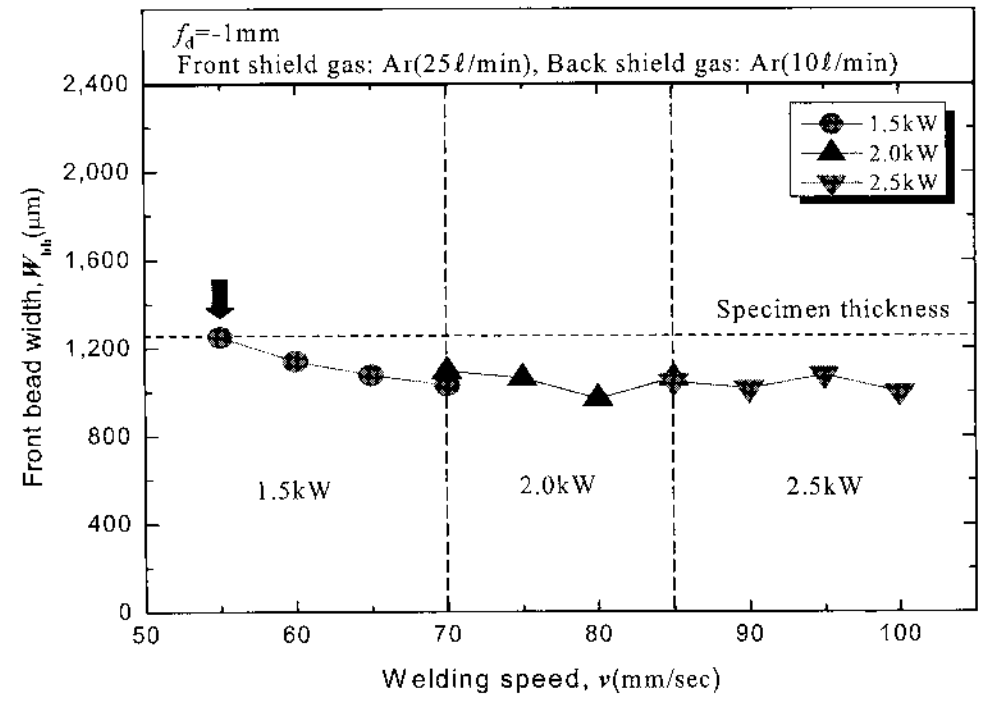
$f_d=1\text{mm}$, Front shield gas: Ar(25 l/min), Back shield gas: Ar(10 l/min)

Power	1.5kW		Power	2.0kW		Power	2.5kW	
Photo $v(\text{mm/sec})$	Front bead	Cross section	Photo $v(\text{mm/sec})$	Front bead	Cross section	Photo $v(\text{mm/sec})$	Front bead	Cross section
	Back bead			Back bead			Back bead	
55			70			85		
60			75			90		
65			80			95		
70			85			100		

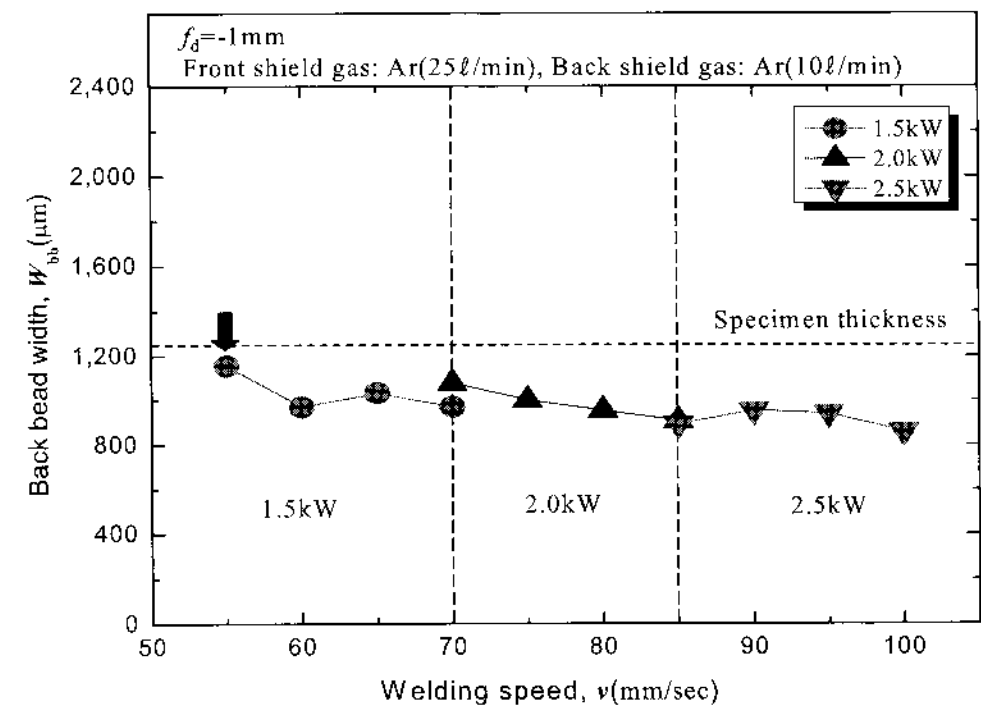
Fig. 10 Bead appearance and cross section of butt welded magnesium alloy

고 용접속도가 증가할수록 전면 및 이면 비드폭은 다소 감소하는 경향이 있으나, 그 차이는 크지 않았다. 출력 및 용접속도 변화에 따른 비드폭의 차이가 이처럼 크지 않은 것은 맞대기용접에 적용된 용접조건의 입열량 차이가 크지 않은 것에 기인한다고 판단된다.

Fig. 11(c)는 맞대기 용접부의 접합강도에 영향을 미치는 접합길이의 변화를 나타낸 것이다. 1.5kW의 경우, 55mm/sec 및 60mm/sec에서 시험편 두께와 동등한 접합길이를 가지는 이상적인 용접이음을 나타내다가, 용접속도 증가에 따라 접합길이가 감소하였다. 한편 2.0kW 및 2.5kW의 경우에는 용접속도 증가에 따른 접합길이 변화가 불규칙하였다. 이는 상술한 것과 같이 2.0kW 및 2.5kW의 출력에서 용접이 그만큼 불안하다는 것을 단편적으로 나타낸다. 따라서 시험편 두께 1.25mm와 가장 가까운 비드폭을 나타내면서 용접이음의 변화 또한 안정적인 출력 1.5kW 및 용접속도 55~60mm/sec가 최적의 조건임을 확인할 수 있었다.

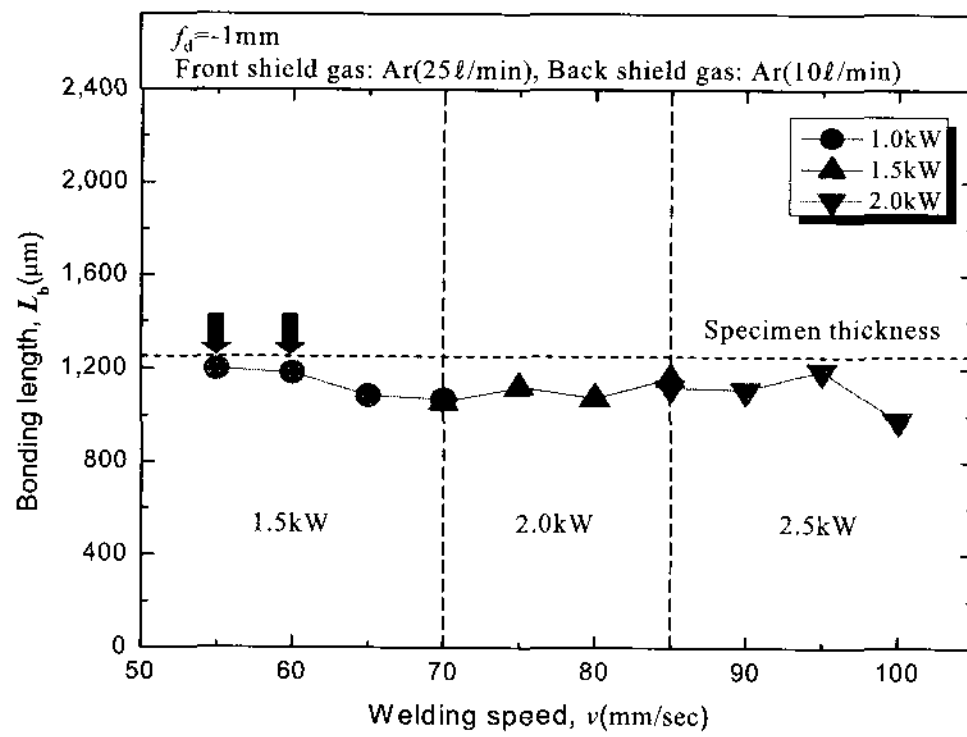


(a) Front bead width



(b) Back bead width

Fig. 11 Variation of butt weldability according to laser power and welding speed



(c) Bonding length

Fig. 11 To be continued

4. 결 론

AZ31 마그네슘합금판재의 Nd:YAG 레이저 용접시 공정변수의 영향을 정리하면 다음과 같다.

1) 비드용접시 레이저 출력 1.5kW~3.0kW의 범위내에서 완전용입을 안정적으로 얻을 수 있었다. 레이저 출력 1.0kW에서는 완전용입을 얻을 수 없었으며, 3.0kW에서는 비드폭의 변화가 타 출력에 비해 불안하였다.

2) 마그네슘합금의 비드용접시 일정한 주기성을 가진 용입불량현상이 발생하였다. 이러한 현상은 마그네슘만의 고유물성과 키홀의 불안정한 거동이 주된 원인으로 판단된다.

3) 절단방법에 따른 맞대기 용접성을 조사한 결과, 시어링 및 와이어 커팅으로 제작한 시험편은 용접이 이루어지지 않았으며, 밀링처리한 시험편에서 양호한 용접성을 보였다.

4) 맞대기용접은 비드용접에서 얻어진 적정조건으로 실시하였으며, 레이저 출력이 증가할수록 언더필과 같은 비드의 함몰이 관찰되었다.

5) 맞대기 용접시 레이저 출력 2.0kW 및 2.5kW의 경우에는 용접속도 증가에 따른 접합길이의 변화가 불규칙하였으나, 레이저 출력(P) 1.5kW, 용접속도(v) 55mm/sec 및 60mm/sec에서는 시험편 두께와 동등한 접합길이를 갖은 이상적인 용접이음이 얻어졌다.

참고문헌

- [1] A. Munitz, C. Cotler, A. Stern and G. Kohn, "Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates", *Materials Science and Engineering A302*, pp. 68-73, 2001.
- [2] Shuhei AIDA, Hiroshi TANABE, Hiroyuki SUGAI and Itaru TAKANO, "Deep-drawability of cup on AZ31 magnesium alloy plate", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 50, No. 9, pp. 456-461, 2000.
- [3] Tianping Zhu, Zhan W. Chen and Wei Gao, "Incipient melting in partially melted zone during arc welding of AZ91D magnesium alloy", *Materials Science and Engineering A416*, pp. 246-252, 2006.
- [4] G. Ben-Hamu, D. Eliezer and C.E. Cross, "The relation between microstructure and corrosion behavior of GTA welded AZ31B magnesium sheet", *Materials Science and Engineering A452-453*, pp. 210-218, 2007.
- [5] 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, pp. 188-204, 2006.
- [6] Shigeru KURAMOTO, Ichiro ARAKI and Motohiro KANNO "Hydrogen behavior during stress-corrosion cracking of an AZ31 magnesium alloy", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 51, No. 8, pp. 397-402, 2001.
- [7] A. Weisheit, R. Galun and B.L. Mordike, "CO₂ Laser Beam Welding of

Magnesium -Based Alloys”, Welding journal, Vol. 77, No. 4, pp. 149-154, 1998.

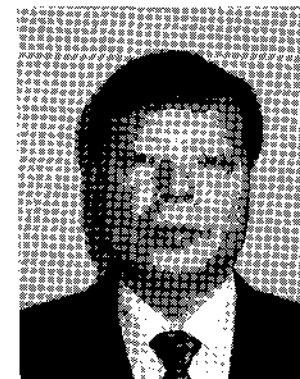
- [8] C. Lehner and G. Reinhart, “Welding of die-casted magnesium alloys for production”, Journal of Laser Applications, Vol. 11, No. 5, pp. 206-210, 1999.
- [9] M. Pastor, H. Zhao and T. DebRoy, “Continuous wave-Nd: yttrium-aluminum-garnet laser welding of AM60B magnesium alloy”, Journal of Laser Applications, Vol. 12, No. 3, pp. 91-100, 2000.
- [10] M. Marya and G.R. Edwards, “The Laser Welding of Magnesium Alloy AZ91”, Welding in the World, Vol.44, No. 2, pp. 31-37, 2000.
- [11] Toshikatsu Asahina and Hiroshi Tokisue, “Electron Beam Weldability of Pure Magnesium and AZ31 Magnesium Alloy”, Materials Transactions, Vol. 42, No. 11, pp. 2345-2353, 2001.
- [12] Jinhong Zhu, Lin Li and Zhu Liu, “CO₂ and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy”, Applied Surface Science 247, pp. 300-306, 2005.
- [13] T ASAHINA, “Pulsed YAG laser weldability of magnesium alloys”, Welding International, No. 19, pp. 23-28, 2005.

저 자 소 개



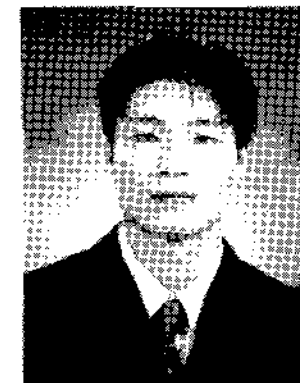
김종도(金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 사업이사겸 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집이사, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



길병래(吉炳來)

1957년 11월생, 1981년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2000년 부경대학교 음향진동공학과(공학석사), 1996년~현재, 한국 해양대학교 기관시스템공학부 교수, 관심분야 : 음향진동



이정환(李貞翰)

1979년 12월생, 2005년 한국해양대학교 기계·시스템공학과 졸업, 2005년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 2007년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, 관심분야 : 레이저용접, 비철금속 및 표면처리 강판 용접