

레이저 용접조건에 따른 AZ31 마그네슘합금 맞대기 용접부의 특성

김종도† · 이정한* · 김장수**

(원고접수일 : 2008년 12월 29일, 원고수정일 : 2009년 4월 17일, 심사완료일 : 2009년 5월 4일)

Characteristics of Butt Welded AZ31 Magnesium Alloy with Laser Welding Conditions

Jong-Do Kim† · Jung-Han Lee* and Jang-Soo Kim**

Abstract : Magnesium alloys have many advantages such as a low density, high strength/weight ratio and well recycle. And joining process is absolutely necessary to expand the field of application of magnesium alloy. The main problems of conventional process such as arc welding for magnesium alloy are the inflammability, a tendency toward crack formation and the appearance of porosity during solidification. Laser welding technology is a promising means for overcoming these difficulties. This study is related to the laser weldability of AZ31 magnesium alloy, an all-purpose wrought alloy with good strength and ductility. The effect of welding conditions on the weldability of butt joints was examined. Also, the mechanical properties of butt welded joints were investigated by tensile test and hardness test.

Key words : AZ31 magnesium alloy(AZ31 마그네슘합금), Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저), Butt welding(맞대기 용접), Tensile test(인장시험), Hardness test(경도시험)

1. 서 론

마그네슘합금은 구조용 금속 재료 중 가장 가벼운 소재로 알려져 있으며, 동시에 비강도, 비강성과 같은 기계적 특성이 우수하여 알루미늄합금의 뒤를 이을 차세대 재료로써 주목을 받고 있다.

더욱이 환경문제에 따른 각종 규약이 엄격해지면서 석유자원의 대부분을 소비하는 운송기기에

서는 경량화를 통한 연비향상과 배출가스 저감이 가장 큰 과제이며, 이 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 최경량 소재인 마그네슘합금의 사용은 더욱 증가할 것으로 기대된다.

한편, 순 마그네슘의 비점은 1,103°C로 마그네슘합금 또한 낮은 물성치를 나타내기 때문에 기존의 공법으로는 용접이 곤란하다. 현재까지 보고된 사례에 따르면, TIG용접(tungsten inert gas welding)을 적용한 경우 다량의 스패터가 발생하

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

* 한국해양대학교 대학원

** (주)심원

고, 타 공정에 비해 낮은 용접속도에 따른 생산성 저하 및 용접 후 변형이 문제시 되어 왔다. 이를 해결하기 위한 용접법으로 레이저 및 마찰교반용접(FSW)이 고려되고 있다. 마찰교반용접의 경우, 소모성 또는 삽입금속이 불필요하며 소성유동에 의해 접합되기 때문에 용융현상을 수반하지 않고 용접부의 응고수축에 따른 변형이 거의 없는 공법으로 주목받고 있다. 그러나 공간의 제약을 많이 받으며, 복잡한 형상이나 미세한 접합에 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 적은 입열량과 광화이버 전송방식으로 자유도가 높은 레이저 용접이 마그네슘합금 용접에 최적으로 판단된다^[1-7].

그러나 마그네슘합금의 용접에 관한 사례는 타 경량재료에 밀려 아직까지는 미진한 상태이며, 최근에 들어 경쟁적으로 연구가 진행되고 있는 실정으로, 국내에서는 몇몇 연구단체에서 행해지는 수준이다^[8-9].

따라서 본 논문에서는 마그네슘합금의 레이저 용접성을 조사하기 위한 기초연구로써 Nd:YAG 레이저를 사용하여 AZ31 마그네슘합금을 맞대기 용접하였으며, 용접조건에 따른 용접성의 변화를 관찰하고 용접부의 특성을 비교·분석하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 논문에서는 압연 판재로 상용화되어 있는 AZ31 마그네슘합금을 용접재료로 선정하였으며, 본 소재의 주요 합금원소는 알루미늄(3wt%)과 아연(1wt%)이다. 실험에서는 두께 1.25mm의 시험편을 150mm(길이)× 50mm(폭)의 크기로 재단하여 용접에 적용하였다. 또한 맞대기 용접에서는 맞댄면의 정도가 용접성에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 실험의 재현성을 높이기 위해 맞대기 면은 밀링처리하였다^[9].

2.2 실험방법

실험에 사용한 용접 열원은 최대출력 4kW의 CW Nd:YAG 레이저로 동일한 초점거리($f_d = -1$)

에서 레이저 출력과 용접속도를 변화시키면서 용접을 실시하였다. 또한 산화에 민감한 마그네슘의 특성을 고려하여 전면 뿐 만 아니라 이면실드도 같이 실시하였으며, 이 때 사용한 보호가스는 Ar이었다. Fig. 1은 본 연구의 레이저 용접 모습을 나타낸 것으로서 지그에 이면실드를 위한 홈을 제작한 것이 특징이다.

용접이 완료된 시험편은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 완전용입이 얻어지는 조건을 대상으로 전면 및 이면비드폭을 측정하여 조건별 용접성을 상호 비교·분석하였다. 또한 적정조건하에서는 용접부의 기계적 특성을 비교하기 위하여 경도시험과 인장시험을 실시하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 200g의 하중으로 모재에서 용접부를 가로지르며 측정하였다. 인장시험에는 200mm(길이)× 30mm(폭)× 1.2mm(두께) 크기의 KS B 0801 5호 시험편을 사용하였으며, Fig. 3에 나타낸 것처럼 150mm(길이)× 100mm(폭) 크기의 시험편 두 장을 맞대기 용접하여 인장시험편을 장당 2매씩 총 4매 제작하여, 그 평균을 취하였다.

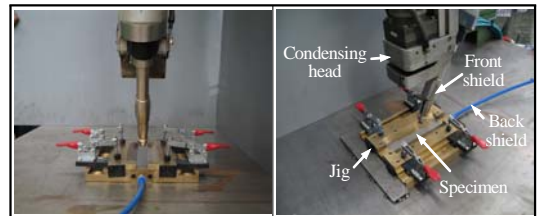


Fig. 1 Photos of laser welding

Photo Position	Bead appearance
Measurement position	
Definition	① Front bead width (W_{fa}) ② Back bead width (W_{fb})

Fig. 2 Measurement position and definition on butt welding

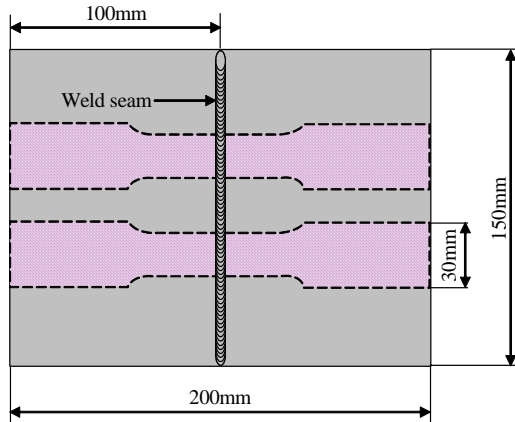


Fig. 3 Sampling of tensile specimen(KS B 0801 5)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접조건에 따른 맞대기용접 특성

맞대기용접에 적용한 레이저 출력은 1.2kW, 1.5kW 및 1.8kW였으며, 이때 사용한 실드조건은 Ar 보호가스를 사용하여 전면실드유량 25 ℓ/min, 이면실드유량 10 ℓ/min으로 동일시하였다.

Fig. 4는 용접조건에 따른 맞대기 용접 비드의

관과 단면조직사진의 대표적인 일례를 나타낸 것이다.

실험결과를 살펴보면 레이저 출력 1.2kW와 1.5kW를 적용한 경우에는 전반적으로 양호한 용접성을 보이고 있으며, 용접부내 기공의 존재도 확인되지 않았다. 그러나 레이저 출력 1.2kW, 용접속도 80mm/sec에서는 완전용입이 얻어지지 않았으며, 레이저 출력 1.5kW를 적용한 경우에는 용접속도 60mm/sec에서 용락 결함이 일부 발생하기도 하였다. 한편 레이저 출력 1.8kW를 적용한 경우에는 실험에 사용한 용접속도 전 범위에 걸쳐 용락 결함이 두드러지게 관찰되었으며, 타 출력에 비해 거친 비드와 이면비드가 처지는 경향이 뚜렷하였다. 따라서 레이저 출력 1.8kW는 본 실험에 사용된 마그네슘합금 판재를 맞대기 용접하는데 과도한 출력, 즉 임계출력으로 판단된다.

Fig. 5의 (a)에서 (b)는 맞대기 용접시 각 레이저 출력별 용접속도 변화에 따른 전면 및 이면비드 폭의 변화를 도시한 것으로, 과도한 출력으로 판단되었던 레이저 출력 1.8W는 제외하였다. 우선 레이저 출력 1.2kW를 적용한 경우에는 용접속도가 증가할수록 전면 및 이면비드가 점차적으로 감소하

$f_a=1mm$, Front shield gas: Ar(25 ℓ/min), Back shield gas: Ar(10 ℓ/min)								
Power v(mm/sec)	1.2kW		Power v(mm/sec)	1.5kW		Power v(mm/sec)	1.8kW	
	Photo Front bead Back bead	Cross section		Photo Front bead Back bead	Cross section		Photo Front bead Back bead	Cross section
50			60			70		
60			70			80		
70			80			90		
80			90			100		

Fig. 4 Bead appearance and cross section of butt welded AZ31 magnesium alloy

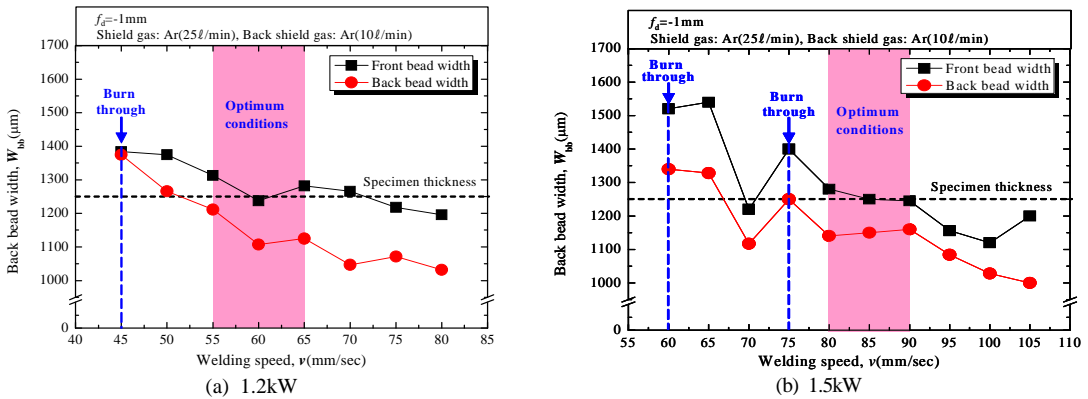


Fig. 5 Variation of front and back bead width with laser power

는 전형적인 모습을 관찰할 수 있다. 그러나 레이저 출력 1.5kW, 용접속도 70mm/sec에서는 비드 폭의 변화가 급격한 구간이 관찰되며 용락이 발생하는 개소도 증가하였다. 또한 1.8kW를 적용한 경우에 용락이 다량 발생하는 것을 고려해 볼 때, 마그네슘합금의 용접에서는 입열 제어에 세심한 주의가 요구되는 것으로 판단된다.

다시 말해 표면장력과 점성은 낮고, 증기압 및 열전도율이 높은 마그네슘의 특성 상 타 금속재료에 비해 용접조건에 민감하며, 레이저 용접시 이물고유물성에 기인한 키홀의 불안정한 거동이 용접결함의 주된 원인으로 사료된다. 따라서 용접속도가 저속일때는 과도한 입열에 기인한 용융금속량의 증가에 의해 용락이 발생하며 레이저 출력 1.5kW, 용접속도 65~75mm/sec의 조건에서처럼 비드의 변화가 급격한 구간은 키홀의 거동이 불안정한 구역으로 판단된다.

본 논문에서는 시험편 두께 1.25mm와 근사한 비드폭을 가지며 용락이 발생하지 않는 레이저 출력 1.2kW, 용접속도 55~65mm/sec와 레이저 출력 1.5kW, 용접속도 80~90mm/sec가 적정 용접 범위로 판단된다.

3.2 용접부의 기계적 특성

3.2.1 용접부의 인장특성

용접부의 기계적 특성을 평가하기 위한 지표로써 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 맞대기

용접에서 적정 용접범위로 판단되는 레이저 출력 1.2kW, 용접속도 55~65mm/sec와 레이저 출력 1.5kW, 용접속도 80~90mm/sec의 조건을 중심으로 그 주변 조건을 비교대상으로 하였다.

인장시험 결과, 각 조건별 인장강도 및 연신율의 변화를 Fig. 6에 나타낸다. 결과값들의 비교를 위해 모재의 인장강도와 연신율을 같이 제시하였으며, 모재는 247MPa의 인장강도와 28.86%의 연신율을 나타내었다. 레이저 출력 1.2kW를 적용한 경우에는 용접속도 증가에 따라 강도와 연신율이 증가하는 경향을 보였으며, 용접속도 65mm/sec와 70mm/sec의 조건에서는 모재의 인장강도보다 높은 값인 252MPa와 250MPa를 각각 기록하였

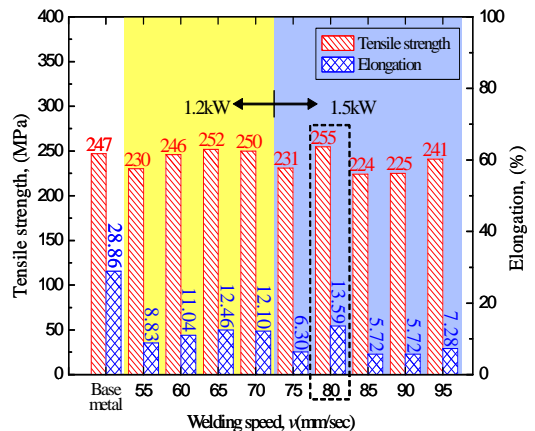


Fig. 6 Variation of tensile strength and elongation with welding conditions

다. 연신을 또한 12% 이상으로 타 조건에 비해 우수하였다. 한편 레이저 출력 1.5kW의 경우에는 용접속도 증가에 따른 강도 및 연신율의 변화가 불규칙하였으나, 용접속도 80mm/sec에서 본 연구에서 가장 우수한 255MPa의 인장강도와 13.59%의 연신율이 얻어졌다. 이는 모재 강도 대비 103%, 그리고 연신율 대비 47.1%에 달하는 결과이다.

따라서 상대적으로 안정적인 강도 및 연신율을 얻을 수 있는 1.2kW가 적정 출력으로 판단되며, 1.5kW에서 결과값들이 다소 불안정한 것은 출력이 증가함에 따라 용락 결함이 발생할 수 있는 잠재구역이 증가하였기 때문으로 사료된다. 그러나 레이저 출력 1.5kW, 용접속도 80mm/sec에서 최적의 결과가 얻어진 만큼, 속도 조절에 따른 입열량 제어와 응고속도 조절을 통해 용락 결함이나 험평비드와 같은 비드의 불안정을 피할 수 있다면 1.2kW보다 안정적인 용접부를 얻을 수 있다고 판단된다.

3.2.2 용접부의 경도특성

경도시험은 용접부 단면에 대하여 길이 방향과 깊이 방향으로 측정하였으며, 그 대표적인 예를 Fig. 7에 나타낸다. 실험결과, 용접부의 경도는 그 변화폭이 다소 관찰되기는 하나 모재와 대등한 수준으로 판단되었다. 또한 깊이 방향에서의 경도 변화도 특별한 경향을 보이지 않았다.

Fig. 8은 모재와 각 조건별 용접부의 평균 경도값을 비교한 것이다. 모재의 평균 경도는 54.3이었으며, 용접부 경도값은 용접조건에 상관없이 모재와 동등한 수준이거나 그 보다 다소 높은 값을 기록하였다.

일반적으로 압연판재의 아크용접은 용접시에 압연에 의한 가공경화의 효과가 사라지기 때문에, 용접부의 경도값은 모재보다 떨어지며 강도와 같은 기계적 특성은 열화되기 마련이다. 그러나 본 실험에 사용된 마그네슘합금의 경우에는 용접부의 경도 및 강도가 모재와 동등한 수준으로 우수한 양상을 보이고 있다. 이러한 현상의 발생 메커니즘을 이해하기 위해선, 우선적으로 마그네슘의 강화 메커니즘과 레이저 용접의 특성을 생각해 볼 필요가 있다.

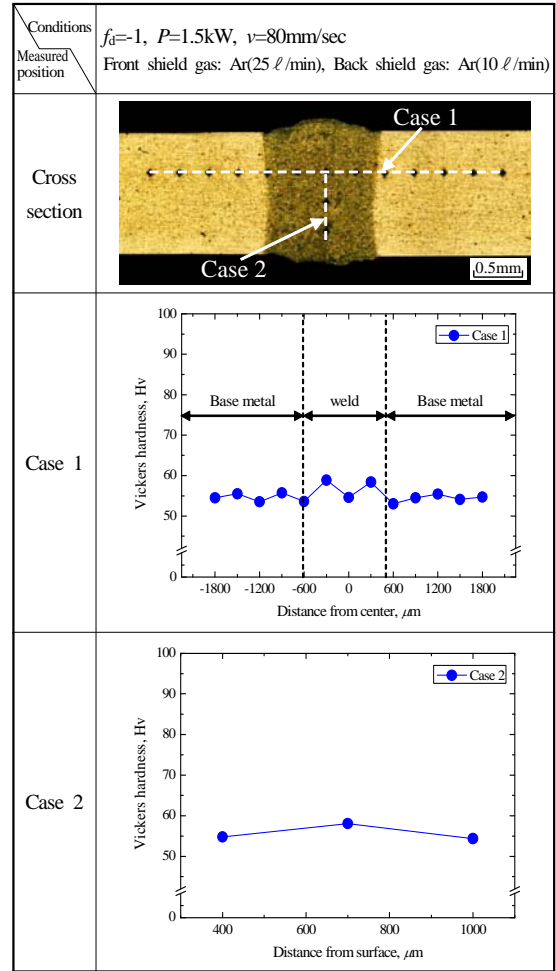


Fig. 7 Hardness characteristics

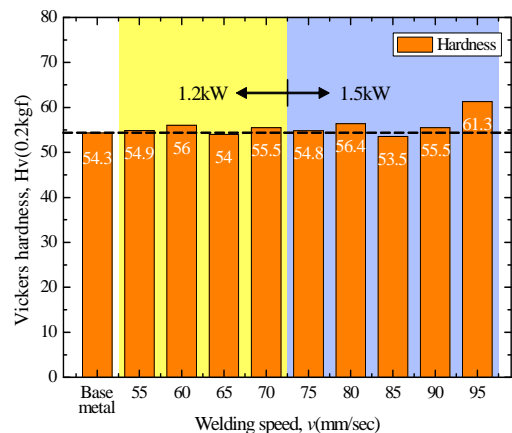


Fig. 8 Variation of welds hardness with welding conditions

마그네슘합금의 강화 메커니즘은 크게 고용강화와 가공경화를 들 수 있다^[10-11]. 대부분의 순금속은 그 자체로는 매우 연하여 상업적으로 사용할 수가 없기 때문에 기계적 특성을 향상시키기 위해 합금원소를 첨가하게 된다. 마그네슘합금, 특히 본 실험에 사용된 AZ31은 마그네슘 기지에 알루미늄이 3wt% 그리고 아연이 1wt% 첨가된 합금이다. 이들 합금원소는 마그네슘 기지에 고용되며 강도 및 경도와 같은 기계적 특성을 향상시키는 역할을 하게 된다. 또한 압연을 하는 과정에서 마그네슘합금의 소성변형을 동반하게 되고 그로 인해 전위(dislocation)가 특정 부분에 모여 금속을 강화시키는 가공경화가 마그네슘합금의 주된 강화 메커니즘이다.

한편 마그네슘합금의 용접시에는 가공경화의 효과는 사라지게 되나, 비점이 낮은 마그네슘 및 아연이 선택적으로 증발하게 되고, 상대적으로 비점이 높은 알루미늄은 용접부내 잔류하게 된다. 따라서 알루미늄에 의한 고용강화 효과와 더불어 마그네슘과 알루미늄이 만드는 금속간 화합물의 석출 빈도 또한 높아지게 된다. 더욱이 레이저 용접의 특징인 급열급랭 공정은 용접부의 결정립을 미세화시켜 용접부를 강화시키는 역할을 하게 된다. 그 결과, 본 연구에서 나타난 것처럼 마그네슘합금의 레이저 용접부는 모재와 동등한 수준의 강도 및 경도를 가지게 되는 것으로 판단된다. 또한 용접부의 경화 정도에는 큰 차이가 없으나, Fig. 6에서 나타난 것처럼 기계적 특성에 차이가 발생하는 것은 용접조건에 따른 비드의 형상이 용접부 강도에 직접적인 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

레이저 용접조건에 따른 두께 1.25mm의 AZ31 마그네슘합금 맞대기 용접부의 특성을 정리하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 사용한 AZ31 마그네슘합금의 적정 맞대기 용접조건은 비드폭의 변화가 안정적인 레이저 출력 1.2kW, 용접속도 55~65mm/sec와 레이저 출력 1.5kW, 용접속도 80~90mm/sec로

판단된다. 한편 과도한 출력으로 판단되는 레이저 출력 1.8kW를 적용한 경우에는 다량의 용락이 발생하였다.

2) 맞대기 용접 시험편의 인장시험 결과, 레이저 출력 1.2kW를 적용한 경우에 안정적인 강도를 얻을 수 있었으며 레이저 출력 1.5kW, 용접속도 80mm/sec의 조건에서 모재 인장강도 대비 103% 그리고 연신을 대비 47.1%의 최적의 결과가 얻어졌다.

3) 맞대기 용접부의 경도시험 결과, 용접조건에 상관없이 용접부의 경도는 모재와 동등한 수준이거나 그 보다 다소 높은 경도값을 기록하였다. 이는 용접시 가공경화의 효과는 사라지나, 용접부내 잔류하는 알루미늄에 의한 고용강화 효과와 금속간화합물의 석출 빈도 증가, 그리고 레이저 용접의 특징인 급열급랭 공정에 기인한 결정립 미세화의 영향 때문으로 사료된다.

참고문헌

- [1] B.H Yoon, "Welding technology of magnesium alloy for automobile industry", RIST研究論文, Vol. 18, NO. 1, pp. 7-15, 2004.
- [2] E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner, C. Walz and G. Sepold, "Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, No. 1, pp. 2-8, 2001.
- [3] T. Asahina, H. Tokisue and K. Katoh, "Solidification crack sensitivity of TIG welded AZ31 magnesium alloy", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 12, pp. 595-599, 1999.
- [4] 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: A, Vol. 302, No. 1, pp. 68-73, 2001.

- [5] T. Zhu, Z. W. Chen and W. Gao, “Incipient melting in partially melted zone during arc welding of AZ91D magnesium”, Materials Science and Engineering: A, Vol. 416, No. 1-2, pp. 246-252, 2006.
- [6] J. A. ESPARZA, W. C. DAVIS, E. A. TRILLO and L. E. MURR, “Friction-stir welding of magnesium alloy AZ31B”, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS, Vol. 21, No. 12, pp. 917-920, 2002.
- [7] A. Gerlich, P. Su and T.H. North, “Friction stir spot welding of Mg-alloys for automotive applications”, Magnesium technology, pp. 383-388, 2005.
- [8] Mook-Young Lee, Chung-Seon Ryu and Woong-Seong Chang, “Trends in application of magnesium alloy and its welding characteristics with laser”, Journal of the Korean Welding and Joining Society, vol. 25, No. 5, pp. 29-35, 2007.
- [9] Jong-Do Kim, Byung-Lea Kil and Jung-Han Lee, “Effect of process parameters on laser weldability of AZ31 magnesium alloy”, The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 570-577, 2008.
- [10] M.M. Avedesian, H. Baker, “ASM specialty handbook, magnesium and magnesium alloys”, 1999.
- [11] 日本塑性加工學會, “マグネシウム加工技術”, 2004.

저 자 소 개



김종도(金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학 코스(공학석사 및 공학박사), 2008년 10월~대한기계학회 학술이사, 2009년 1월~대한용접학회 사업이사, 한국레이저가공학회 국제협력이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템 공학부 교수, 당학회 연구이사, 관심분야: 레이저용접, 레이저 하이브리드 용접, 용접현상의 실시간 모니터링



이정한(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



김장수(金長壽)

1961년 3월생, 1985년 울산대학교 기계공학과 졸업, 2009년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 자동차 설계회사인 (주)심원의 대표이사, 현재 한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, 관심분야: 레이저용접