특 집 : 마찰교반용접

마찰교반접합에 의한 AZ31B/A6061 이종재 접합부의 미세조직 및 기계적 특성에 관한 연구

김흥주 · 천창근 · 김숙환 · 장웅성

Microstructures and Mechanical Properties of the Friction Stir Welded Dissimilar Joint of AZ31B/A6061

Heung-Ju Kim, Chang-Keun Cheon, Sook-Hwan Kim and Woong-Seong Chang

1. 서 론

마찰교반용접은 1991년 영국 TWI에서 개발된 새로운 고상접합으로 개발되었으며, 이 접합법은 기존 용융접합에 비해 기계적 특성 향상 및 우수한 접합부를 형성한다. 이 접합법은 접합용 툴과 시편의 마찰열을 이용하여 기존의 용융 접합에 비해 낮은 입열로 접합이 행해지기 때문에 작은 잔류응력, 적은 변형 등의 장점을 더욱 부각시킨 신 접합법이다. 또한 알루미늄, 마그네슘 합금 등의 경금속과 더불어 최근에는 철계합금, Cu합금, Ti합금 등에도 상당한 발전을 이루고 있는 실정이다. 또한 산업의 발전과 더불어 구조재 등의 고품질, 고기능의 신소재가 개발 되어지고 있으나 신뢰성 측면에서 많은 문제점이 있다. 그로 인해 기 개발된 합금의 조합에 의한 이종재료 접합에 대한 연구가 여러 분야에서 연구되어 지고 있다[1]. 그리고 Mg합금 및 Al합금 등의 경량재료에 대한 연구가 활발해지면서 자동차, 항공기 등 수송·기계 산업에 있어서 연비절감이나 환경개선을 위한 경량화에 대한 사회적 요구는 경량구조재료의 적용비율을 가능한 높이도록 하고 있다[2,3]. 이러한 과정에서 최근 들어 Mg합금을 구조재로 적용하는 경우가 점차 증대되고 있으며 이 경우 Mg합금의 접합기술 확보가 중요한 과제로 대두되며 FSW 기술 적용이 다양하게 검토되고 있다. 동종 Mg금속간의 FSW공정 적용에 대해서는 만족할 만한 연구결과들이 발표되고 있지만 Mg/Al등 이종재료간의 접합기술 개발은 아직 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 경량화 및 에너지 측면에서 유리한 이종재 AZ31B/A6061 합금에 대하여 FSW 접합을 실시하여 양호한 접합부를 확보하였는데 접합부 성능 향상을 위한 FSW 접합인자의 최적화를 이루었으며 이 경우 중요한 접합인자는 tool의 회전속도와 이송속도 그리고 전진각도 등이었다. 최적 접합조건에 대한 접합부의 금속학적, 기계적 특성 평가를 실시하였으며 이를 통해 AZ31B/A6061 이종재료간의 접합기구에 대해 규명하였다.

2. 실 험

2.1 재료 및 접합 실험

본 연구에 사용한 재료는 Al-Mg-Si계 열처리 합금 A6061-T6합금과 전신재 합금으로 사용되는 Mg-Al-Zn계 AZ31(약 3wt% Al, 1wt%Zn)의 합금[4]을 이용하여 이종 FSW접합을 실시하였다. 사용재료의 화학성분은 Table 1에 나타내었다. 시편의 치수는 길이(L)=300mm, 폭(B)=150mm, 판두께(T)=4mm로 하였다. 이종재에 대한 접합 실험은 FSW기기를 이용하여

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of A6061-T6 and AZ31B-H24

Chemical compositions(Weight)(%)

	Al	Fe	Si	Cr	Mg	Cu	Mn	Zn
A6061	98	0.7	0.7	0.2	1.0	0.35	0.07	0.25
AZ31B	3.0	-	0.05	-	bal.	0.05	0.2	1.0

Mechanical properties

	Yield strength(MPa)	Elongation(%)	Shear strength(Mpa)
A6061	275	12	205
AZ31B	220	15	160

접합인자 즉, 접합용 툴의 회전속도(rotating speed), 접합속도(travel speed), 툴의 제원(shoulder, pin 등) 및 전진각등을 변화 시켜 결함이 없는 건전한 접합부를 얻고자 한다. 건전한 접합부의 결함의 유무는 육안에 의한 표면관찰 및 접합부 조직을 관찰하기 위해서 접합한 재료를 절단하여 마운팅을 한 다음 폴리싱 연마 후 광학 현미경을 사용하여 관찰하였으며, AZ31B에 사용된 부식액의 조성은 피크린산(picric acid) 4.2g, 초산(acetic acid) 10ml, 알콜 (methanal) 70ml, 증류수 10ml이고, A6061에 사용된 부식액 조성은 증류수 200ml, 수산화나트륨 25g을 사용하였다.

또한 건전한 접합부에 대하여 기계적 특성 파악은 경도시험(0.3Kgf, 13sec) 및 인장시험을 실시하였으며, 접합부 인장 실험은 서브사이즈 규격에 맞추어 시편을 제작하여 50Ton 피로 시험기를 사용하였고 5ton의 하중으로 실험을 실시하였다. 그리고 미세 조직적 특징은 광학현미경 및 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 미세조직을 관찰하였으며, 각각 상들의 조성분석은 EDX(Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) 및 EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)를 사용하였다. 그리고 접합부의 열이력을 알기 위해서 접합부에 열전대를 이용하여 접합부의 온도를 계측 하여 접합부의 특성을 기계적 특성치와 비교 검토 하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 접합부의 조직 및 접합성 평가

Fig. 1은 접합용 툴의 회전속도 450rpm, 접합속도 15mm/min에서 가장 건전한 접합부의 외관을 나타낸 사진으로서 낮은 회전속도와 이동속도에서 좋은 비드(bead) 및 결함을 발견 할 수 없으며 밑면(Rear surface)의 경우 매우 우수한 표면을 나타내고 있음을 알 수 있다. Table 2는 본 실험의 접합조건을 나타내었다.

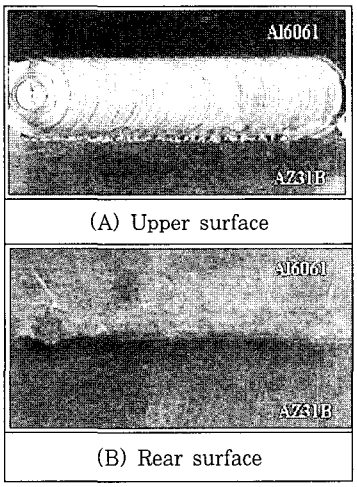

Fig. 1 Appearance of FSWelded A6061/AZ31B

Table 2 Friction stir welded conditions

Parameter	Conditions
Tool rotating speed	450rpm
Travel speed	15mm/min
Tool angle	2~3°

Fig. 2는 A6061과AZ31B의 동종 및 이종 FSW 접합에 의한 접합 단면 마크로 사진이다. Fig. 2(a)의 동종 A6061/A6061의 접합은 회전속도 1000rpm, 접합속도 200mm/min에서 결함이 없는 접합부를 보이며 SZ영역에 전형적인 툴의 마찰열과 소성유동에 의한 onion ring의 형태를 보이고 있다.

Fig. 2(b)는 또한 AZ31B/AZ31B의 접합에서는 툴의 회전속도 1000rpm, 접합속도 100mm/min에서 가장 좋은 접합을 보이며 FSW접합부에서 결함이 없음을 알 수 있다. 그리고 AZ31B/ A6061의 이종 접합부의 마크로 사진인 Fig. 2(c)의 경우 Al과 Mg합금이 혼재되어 있는 접합 중앙부 SZ영역은 onion ring의 형상이 뚜렷하게 보이며, 서로 비대칭적인 접합부를 보인다.

마찰교반접합부는 접합 중 접합 숄더면과 접합된 주위에 발생한 마찰열에 의해 접합부가 가열되어 핀에 의한 기계적인 교반에 의한 소성유동 및 그로인한 동적 재결정의 교반부(Stir Zone: SZ), 소성변형과 국부적인 재결정이 일어나는 열 및 기계적 영향부 (Thermo-Mechanically Affected Zone:TMAZ), 그리고 열적 영향만을 받는 열영향부(Heat Affected Zone:HAZ)로 크게 나눌 수 있다. 그리고, 접합부 양쪽에는 회전하는 툴의 방향과 접합방향이 일치하는 Advancing

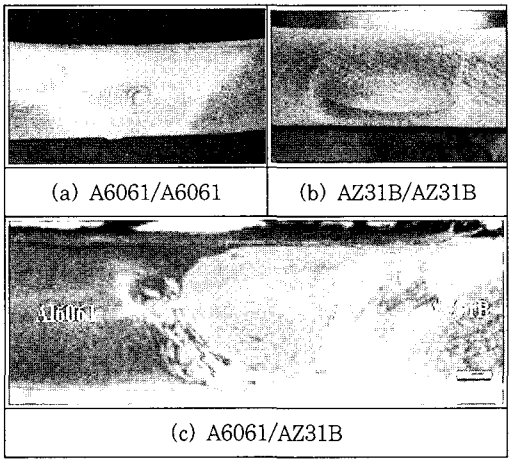

Fig. 2 Macrostructures of Friction Stir Welded A6061,AZ31B and AZ31B A6061

side(AS)와 반대 방향인 Retreating side(RS)가 존재 한다. Fig. 3은 FSW 접합 후 각 영역별 조직을 나타낸 사진이다. 마찰열원의 영향을 받지 않는 Al 모재부(a), Mg 모재부(BM) (e), Advancing side의 기계적 열향부(TMAZ-Ⅰ) (b),(c),(d)영역과 Retreating side의 기계적 열영향부(TMAZ-Ⅱ) (f),(h), 그리고 교반부(SZ) (g)로 나누어 조직을 관찰 하였으며, 열적 및 기계적 영향부(TMAZ)는 Advancing side(AS)의 기계적 영향부(TMAZ-Ⅰ)영역과 Retreating side(RS)의 기계적 열영향부(TMAZ-Ⅱ)의 각각 서로 다른 상태를 보이고 있다. Fig. 3(d)의 TMAZ는 완전하지 않은 부분적인 층상구조의 혼합상이 생성되었음을 알 수 있으며, Fig. 3(g)의 SZ부는 기계적 힘에 의해 미세한 혼합상이 생성되었음을 알 수 있다.

Fig. 4는 FSW 접합변수인 툴의 회전속도와 접합속도를 축으로 하여 동종(A6061, AZ31B)[5] 및 이재(A6061/AZ31B) 접합에 관한 용접성을 나타낸 그래프로서, 동종의 접합은 이종에 비해 상대적으로 넓은 영역

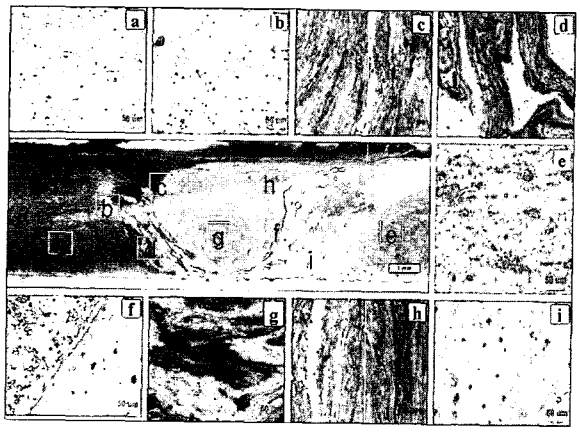

Fig. 3 Macro and microstructure feature of FSWeled (A6061/AZ31B,450rpm,15mm/min)

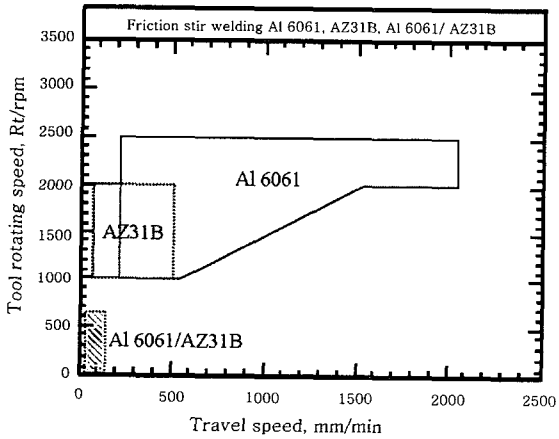

Fig. 4 Weldability of FSWelded A6061, AZ31B and A6061/AZ31B

의 분포를 보이나 이재 접합은 아주 작은 영역범위에서 접합을 보임을 실험을 통해서 알 수 있었다. 이는 이종 FSW 접합은 서로 다른 결정구조 및 물성치의 차이로 인하여 접합성이 나쁘게 나타남으로 사료된다.

3.2 접합부의 기계적 특성

Fig. 5는 이종 FSW접합부 단면의 연속경도 분포를 나타낸 것이다. 모재에서 TMAZ, SZ영역으로 갈수록 높은 경도를 보이며 최고 경도는 200Hv를 보이고, SZ영역이 BM보다 높은 경도치를 나타내고 있는데 이는 기계적 교반에 의해 결정립이 미세화 된 점과 β상 금속간 화합물[6]이 이러한 영역에서 생성되어 석출경화를 일으켰기 때문이다. 이러한 β상 금속간 화합물의 생성조건은 300℃~450℃ 에서 55%Mg-45%Al 조성 시 발생되며 결정립계를 따라 석출됨으로써 재료에 석출경화를 일으켜 강도를 상승시키지만 취약한 특성을 가짐으로 인성을 저하시키는 요인이 된다[7]. 그리고 Advancing side(AS)영역의 TMAZ에서 최고 경도를 나타내고 있는 것은 툴의 회전에 의해 접합부의 교반으로 인해 Al량이 증가하여 고용 강화가 되었고 또한 AS영역 쪽의 기계적 교반이 RS영역 보다 크기 때문에 전위 밀도의 상승으로 인해 경도가 상승한 것으로 사료된다. 이는 툴의 회전방향과 이동방향이 일치하는 AS영역이 RS영역보다 더 높은 열·기계적 영향을 받는다고 유추할 수 있다.

Al/Mg의 이종 FSW 접합[8] 시 SZ영역이 어떠한 분포로 교반되었는지 알기 위해서 SEM-EPMA를 실시하였다. Fig. 6의 결과에서 보듯이 TMAZ-Ⅱ구간은 Al과 Mg합금들이 교차되어 교반되어 있는 모습을 나타내고, SZ영역은 Al과 Mg합금들이 완전 혼합되어 새로운 결정립이 형성되었을 알수 있다. TMAZ-Ⅱ영역에서 층상

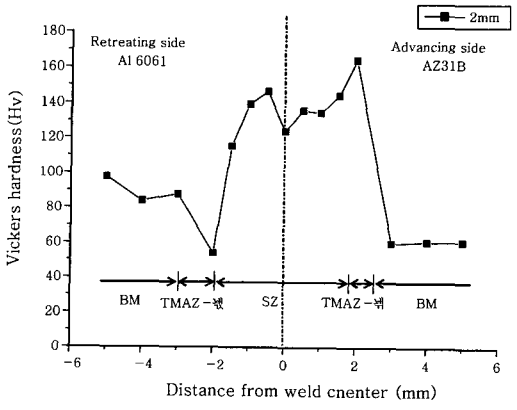

Fig. 5 Hardness profiles of FSWeled in cross section

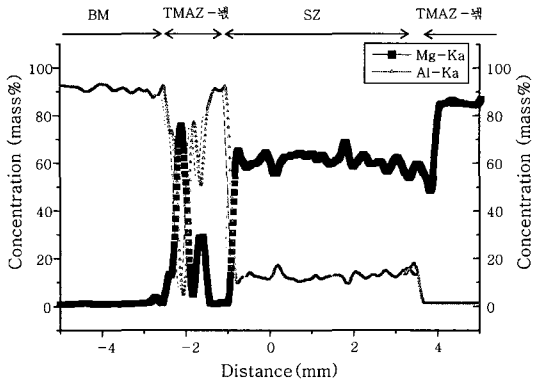

Fig. 6 Concentration profiles of Mg and Al atoms across A6061/AZ31B FSWelded

구조로 되어 있는 것은 툴의 회전 방향과 이동방향이 일치(AS영역)로 인해 Mg합금의 유동을 촉진시켜 TMAZ-Ⅱ영역에서 원활한 교반이 이루진 것이며, 이 결과는 Fig. 3의 조직의 사진과 비교해 볼 때 일치한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 TMAZ-Ⅰ영역은 TMAZ-Ⅱ영역과는 반대로 툴의 회전방향과 접합 이동 방향이 반대이기 때문에 Al유동을 충분히 일으킬 수 없으므로 TMAZ-Ⅰ영역에서는 TMAZ-Ⅱ영역과 같은 혼합영역이 생기기 어려운 것이다. Fig. 7은 이종 접합부에 대한 인장파단부의 SEM사진으로서, 단면에서 취성 및 연성파단을 일어남을 알 수 있으며, EDS분석 결과 파단면에서 금속간화합물(β-$Mg_{17}Al_{12}$)이 분포 하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이러한 취약한 특성을 가지는 금속간 화합물은 파단의 원인을 제공함을 알 수 있다.

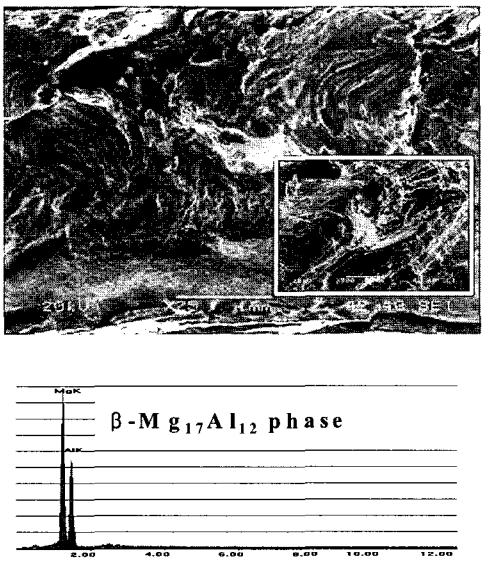

Fig. 7 Tensile fracture surface of AZ31/A6061 by SEM

다음 Fig. 8은 이종 FSW접합부 및 모재에 대한 의 인장 시험 결과 이다. 인장 결과 모재대비 약 40%의 인장강도를 보인다. 아직까지 강도에 대한 기계적 특성은 미비한 수준이지만 타 연구 결과물과 비교 시 좋은 결과가 나타남을 알 수 있었으며, 파단의 원인인 금속간 화합물을 줄임으로서 강도를 높이는 문제가 풀어야할 숙제로 남아 있다.

3.3 접합부의 온도 분포 특성

Advancing side와 Retreating Side의 다른 교반력 및 경도분포의 특성을 밝히기 위해서 각각의 영역에서 대해서 접합부의 온도 분포 특성을 파악하였다. 다음 Fig. 9와 같이 FSW접합부의 온도측정을 하기 위해 1ϕ 용 K-Type 열전대를 이용하여 접합선 중심에서 3mm와 6mm지점에 열전대를 삽입하여 온도이력을 측정 하였다.

Fig. 9는 이종 접합부의 Advancing side(AS)영역와 Retreating side(RS)영역의 측정에 의한 접합부의 온도 분포 특성을 나타낸 그래프이다. 접합부에서 3mm (SZ영역) 떨어진 부분의 AS의 Mg합금에서 최고온도 약 580K를 보이며 RS에 위치한 Al 합금은 Mg합금보다 낮은 최고온도 520K를 보인다. 이는 이종 접합시 AS영역과 RS영역의 온도 분포 이력이 다름을 알 수 있

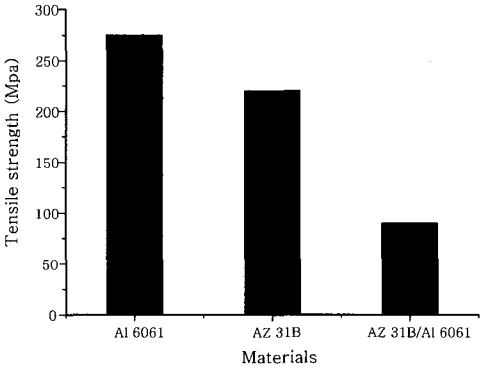

Fig. 8 Tensile property of FSW joints

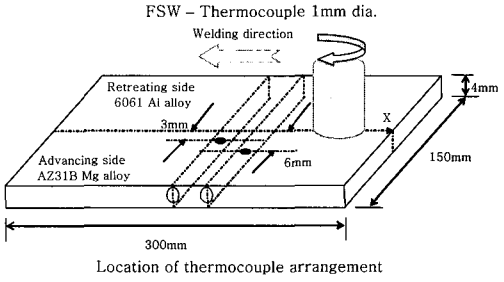

Fig. 9 Measurement of temperature FSWelded joints

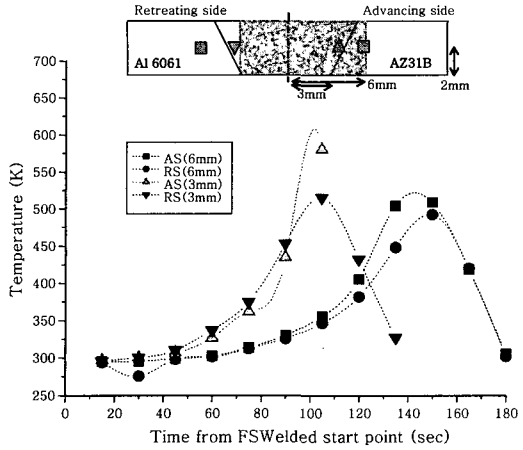

Fig. 9 Temperature distribution of FSWelded dissimilar joint of AZ31B/A6061

으며, 툴의 회전방향과 접합방향이 같은 AS영역에서 시편과 접합용 툴 사이에 마찰에 의해서 마찰열이 높게 나타남을 알 수 있으며, 이는AS영역에서 더 많은 회전에 교반력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 이는 결과는 앞의 EPMA의 실험 결과와 경도 특성 결과 와 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

이종재료에 대한 FSW 접합을 실시한 결과는 다음과 같다.

1) Mg/Al합금에 대한 이종 맞대기 FSW 접합시 접합부 중앙에서 Al합금과 Mg합금이 혼재 되어 있는 SZ(stir zone)영역에서 확연하게 onion ring의 형상이 뚜렷하게 나타났으며 결함이 없는 접합부를 형성하였다.

2) SZ영역에서는 β-$Mg_{17}Al_{12}$의 금속간 화합물 석출된다.

3) 인장 시험 결과 SZ영역에서 파단이 발생 하였으며 인장강도는 모재의 40%를 나타내는데 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 상에 의한 것으로 사료된다. 이러한 β상을 줄임으로써 더 우수한 접합강도를 얻을 수 있을 거라 생각되며 개선 연구가 필요하다.

4) Advancing side(AS)영역이 Retreating side(RS) 영역보다 높은 온도를 보이며, 높은 마찰력으로 인해 최고 경도를 나타낸다.

참 고 문 헌

1. Hwa-Soon Park, Woo-Yeol Kim, Chung - Yun Kang: Welding and Bonding of Dissmilar Metal Steel/ Nonferrous Metal, Journal of KWS, 14-6 (1996), 1-7 (in Korean)
2. Soon Chan Park, Kwang Seon Shin : Mg Alloys for Weight Reduction of Automobiles, Bulletin of the Korean Inst. of Met & Mat., 9-2 (1996), 160~171
3. Eun-Soo Park, Jae-Woo Kim, Do-Hyang Kim : Recent Development of High Strength, High Toughness Magnesium Alloys, Journal of the Korean Foundrymen's Society, 18-2 (1998), 118-123 (in Korean)
4. Michael M.Avedesian : ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, ASM international, 1999, 16-21
5. Kazuhiro Nataka, Young Gon Kim and Masao Ushio: FRICTION STIR WELDING OF MAGNESIUM ALLOYS, IWC-Korea 2002, KWS, 2002, 513
6. A. Munitz: Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates, Materials Science and Engineering : A302 (2001), P71
7. T. Kitahara, K.Katoh and H.Tokisue: PREPRINT OF THE NATIONAL MEETING OF J.WS 68(2001),132~134
8. S.H.C.Park, M.Michiuchi, Y.S.Sato and H.Kokawa: Dissimillar Frictoion stir welding of Al 1050 and Mg Alloy Az31, IWC-Korea 2002, KWS, 2002, 534~538

• 김홍주(金興柱)
• 1975년생
• RIST 용접센터
• 고상용접 응용기술, 용접부 구조해석
• e-mail : welding@rist.re.kr

• 천창근(千昌根)
• 1968년생
• RIST 용접센터
• 용접 자동화/계측기술, 신용접응용기술
• e-mail : ckchun@rist.re.kr

• 김숙환(金肅煥)
• 1959년생
• 포항산업과학연구원
• 고밀도에너지 빔 용접공정, 정밀접합, 용접야금
• e-mail : weldksh@rist.re.kr

• 장웅성(張雄成)
• 1959년생
• RIST 용접센터
• 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
• e-mail : wschang@rist.re.kr