

전신 및 주조된 Mg 합금의 FSW 접합성 평가

노중석** · 김흥주* · 장웅성* · 방국수**

*포항산업과학연구원(RIST) 용접센터

**부경대학교 공과대학 신소재공학부

Evaluation of FSW Weldability of Wrought and Casting Mg Alloys

Joong-Suk Noh**, Heung-Ju Kim*, Woong-Seong Chang* and Kook-Soo Bang**

*Welding center, RIST, Pohang 790-330, Korea

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

Abstract

Friction stir weldability of AZ31B-H24, AZ61A-F and AZ91C-F Mg alloys were studied using microstructural observation and mechanical tests. The microstructure of stir zone(SZ) was coarse in AZ31B-H24 alloy whereas it was very fine both in AZ61A-F and AZ91C-F alloys. The hardness of SZ was remarkably increased by very fine recrystallized grains both in AZ61A-F and AZ91C-F alloys. On the other hand, the hardness of SZ was decreased in AZ31B-H24 due to the coarse microstructure. In SZ, AZ91C-F alloy showed very high hardness values because of dispersion hardening of $Mg_{17}Al_{12}$ (β phase) and Al solid solution hardening. Because of more $Mg_{17}Al_{12}$ (β phase) intermetallic compounds, Mg alloy with high Al content showed poor mechanical properties.

* Corresponding author ; k46759@hanmail.net

(Received July 13, 2004)

Key Words : Friction stir welding, Magnesium alloys, β - $Mg_{17}Al_{12}$, Tensile test, Hardness

1. 서 론

마그네슘 합금은 밀도가 알루미늄 합금의 2/3, 철 합금의 1/5 수준으로 현재까지 개발된 합금 중 가장 낮은 밀도를 가지고 있으며 여타 경량 재료와 비교하여 손색이 없는 비강도 및 비탄성 계수를 갖고 있다. 이외에 진동, 충격, 전자 파동에 대한 흡진성이 탁월하고 전기 및 열전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격 특성이 우수하여 자동차, 항공기, 방위 산업 및 일반 기계등에 경량화 소재로서 요구되는 여러 우수한 특성을 지니고 있다¹⁾. 이러한 마그네슘 합금은 성분에 따라 크게 Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr, Mg-Th의 3종류로 구분할 수 있고, 제조방법에 따라 크게 주조재 합금과 전신재 합금으로 나뉘어진다. 대표적인 주조재 합금으로는 AZ91, AM50, AS41등이 있고 대표적인 전신재 합금으로는 AZ31, AZ61, ZK60등이 있다²⁾.

전 세계적으로 마그네슘의 사용이 증가하면서 마그네슘의 용접성에 대해서도 그 관심이 증가하고 있다. 마그네슘 합금은 낮은 용융점과 기화점, 산소와의 큰 친화력, 금속간 화합물의 생성등과 같이 용접에 제약을 주는 인자들이 많기 때문에 쉽게 용융용접을 하기 어렵다. 따라서 최근에는 이러한 문제점을 동반하지 않는 FSW (Friction Stir Welding)에 의한 용접에 관심이 증가하고 있다^{3,4)}.

따라서, 본 연구에서는 전신재 및 주조재 Mg 합금을 사용하여 FSW 접합부의 조직 및 기계적 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 마그네슘 합금은 전신재 및 주조재 합금으로, 전신재 합금으로는 가공경화와 부분 어닐링 처리된 AZ31B-H24 합금과 압출 공정으로 생산된

AZ61A-F 합금을, 그리고 주조재 합금으로는 AZ91C-F 합금을 사용하였다. 각 합금의 조성 및 기계적 특성을 Table 1과 Table2에 각각 나타내었다.

FSW의 공정은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 두 개의 부재를 그루브 가공이 없는 맞대기 형태로 두고 회전하는 핀을 두개의 부재 사이에 삽입하여 적당한 마찰열을 발생시키고 적절한 가압력과 이동속도로 틀을 이동시키는 공정이다⁵⁾. FSW 접합 시 재료는 소성 변형되고 동적 재결정(DRX)을 일으켜 접합된다.

본 실험에서는 200×50×4 크기의 두개의 부재를 맞대기 형태로 두고 접합을 실시하였다. 또한, 본 연구에서 적용한 FSW 용접 조건은 영국 용접 연구소(TWI) 문헌을 참고로 하여 Table 3과 같이 결정하였다⁶⁾.

FSW 접합부 특성 평가를 위해서 접합부에 대하여 광학 현미경을 이용하여 조직을 관찰하였고 미소 비커스 경도기를 이용해서 500g의 하중으로 경도를 측정하였다. 조직 관찰에 사용된 부식액은 피크린산(picric acid) 4.2g, 초산(acetic acid) 10ml, 알콜 (methanal) 70ml, 증류수 10ml의 혼합액을 사용하였다. 접합부에

Table 1 Chemical composition of Mg alloys.(wt%)

	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Mg
AZ31B-H24	3.0	1.0	0.20	0.05	0.05	Bal.
AZ61A-F	6.5	1.0	0.15	0.10	0.10	Bal.
AZ91C-F	9.1	0.85	0.24	0.01	0.001	Bal.

Table 2 Mechanical properties of Mg alloys

	YS (MPa)	TS (MPa)	E ℓ (%)	Hv
AZ31B-H24	220	290	15.0	66
AZ61A-F	131	302	12.2	53
AZ91C-F	114	167	4.8	63

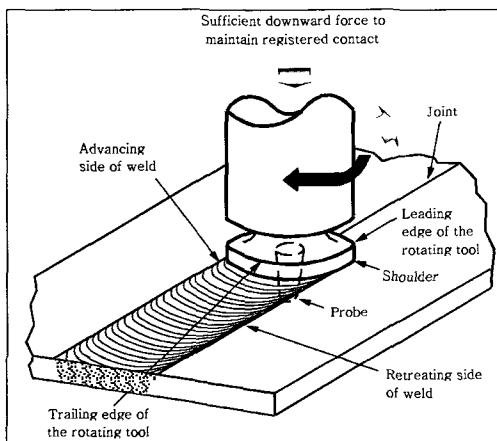


Fig. 1 Schematic diagram of friction stir welding process

Table 3 Friction stir welding parameters

	Rotation speed	Welding speed
AZ31B-H24	2000rpm	100mm/min
AZ61A-F	700rpm	160mm/min
AZ91C-F	500rpm	50mm/min

서 결정립의 크기는 ASTM에 규정된 Lineal-Intercept 법으로 측정하였다⁷⁾. 접합부에서 금속간 화합물은 EPMA (Electron Probe Micro Analyzer), XRD (X-Ray Diffractometer), TEM (Transmission Electron Microscope)등을 이용하여 관찰 및 분석을 행하였다. TEM 시편은 Fischione사의 ion milling system을 이용하여 5kV 전압으로 제조하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 조직

Fig. 2에 비드형상 및 접합부의 거시조직을 나타내었다. 세 합금 모두 비드 표면에 약간의 날림이 존재하는 것을 제외하고는 양호한 접합부를 나타내고 있다. 또한 접합부 단면에서는 FSW 접합부에서 볼 수 있는 전형적인 onion ring 형상을 확인할 수 있다.

Fig. 3에 AZ31B-H24 접합부의 미세조직을 나타내었다. A영역은 모재로서 열간 압연으로 인한 재결정 조직과 변형 밴드가 많이 생성되어 있는 것을 알 수 있다. B의 열영향부에서는 이러한 결정립이 전체적으로 조대화되고 변형 밴드는 많이 감소하였다. 열·기계적 영향부인 C에서는 FSW의 기계적 변형에 의해 조직이 연신되어졌고 D의 교반부에서는 FSW의 열·기계적 에너지에 의해 조직이 재결정되어 등축성 조직을 형성하고 있음을 알 수 있다. 모재의 재결정은 열간 압연 및 부분 어닐링 처리의 제조 공정에서 생긴 것이지만 SZ의 재결정은 FSW의 마찰열에 의해 생성된 것이다.

각 영역의 grain size를 측정하여 Table 4에 나타내었

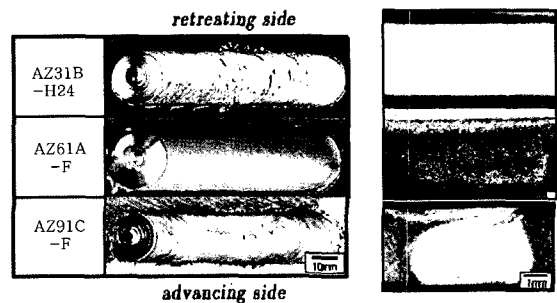


Fig. 2 Bead appearance and macrostructure of cross-section of each bead

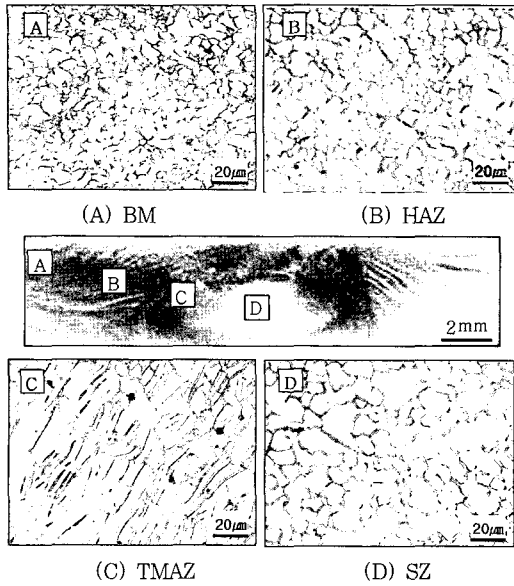


Fig. 3 Microstructure of butt joint. (AZ31B-H24, 2000rpm-100mm/min)

Table 4 Comparison of grain size of each region

	BM	HAZ	SZ
GS(µm)	5.5	8	12.5

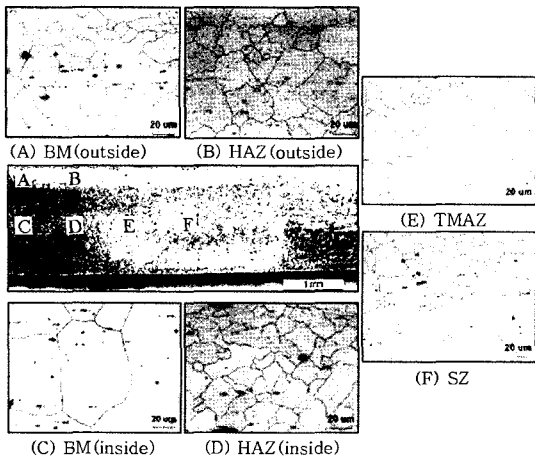


Fig. 4 Microstructure of butt joint. (AZ61A-F, 700rpm-160mm/min)

다. 모재에서 SZ로 갈수록 결정립 크기가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4에 AZ61A-F의 FSW 접합부 미세조직을 나타내었다. 먼저 A와 C는 모재이며 압출열의 영향으로 표면부와 중심부의 조직이 다르다. 압출 공정 시 발생하는 열에너지의 불균형으로 인해 표면부 조직은 재결정된 반면에 중심부는 열에너지의 부족으로 재결정되지 못하여 표면부는 미세하고 중심부는 조대한 결정립을 나타내었다. 그러나 FSW 공정 후 열영향부 중 표면부

는 모재의 결정립 크기와 비교했을 때 별 차이가 없지만, 중심부는 매우 미세해졌다. SZ에서는 등축재결정으로 인해 미세한 등축정이 생성되었다. 또한 FSW 후 두께 중심부에 미세한 결정립이 띠처럼 생겨났는데 이 띠를 고배율로 관찰해본 결과 매우 미세한 등축정 조직으로 관찰되었다. 앞서 설명한 것처럼 FSW 접합을 하기 전 모재는 표면부와 중심부의 결정립 크기가 다르다. 이러한 상태에서 FSW를 실시한 결과, Fig. 5와 같이 열영향부 표면부는 모재 표면부와 결정립 크기가 비슷하지만 열영향부 중심부는 모재 중심부에 비해 결정립 크기가 약 101µm에서 13µm로 매우 미세해졌음을 알 수 있다. 이는 제조 공정 시 재결정을 이루지 못하여 높은 에너지 상태로 존재하는 내부가 접합 시 가열에 의하여 재결정을 이루기 때문인 것으로 생각된다^{8,9)}.

Fig. 6에 AZ91C-F의 접합부 미세조직을 나타내었

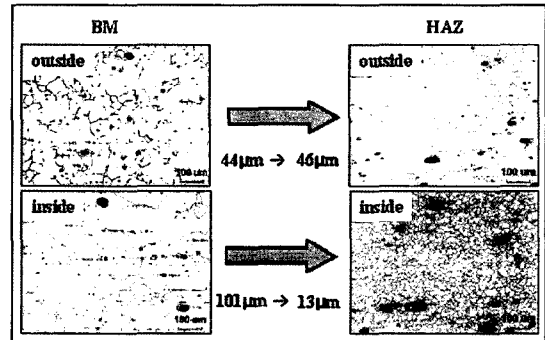


Fig. 5 Comparison of microstructure in the BM and HAZ after FSW

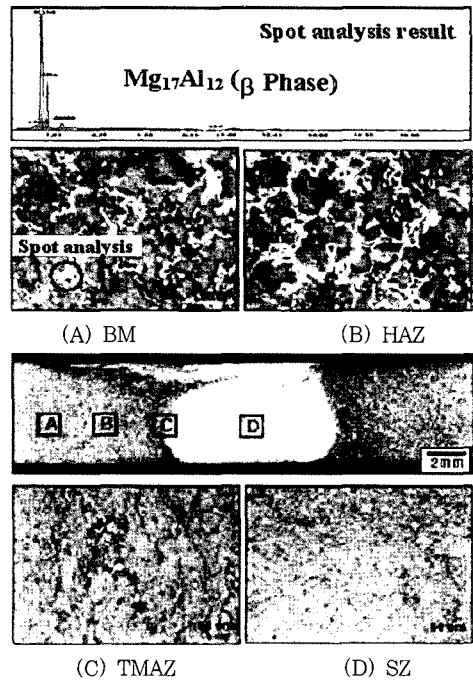


Fig. 6 Microstructure of butt joint. (AZ91C-F, 500 rpm -50mm/min)

다. 모재인 A에서는 뚜렷한 덴드라이트를 확인할 수 있으며 덴드라이트 입계를 따라 하얀색으로 표시되는 상들이 존재하고 있다. 이 상들은 EDS 분석 결과 $Mg_{17}Al_{12}$ (β 상)인 것으로 나타났다. HAZ인 B에서는 모재의 조직과 비슷하나 TMAZ인 C에서는 확연히 β 금속간 화합물이 줄어들었음을 확인할 수 있었다. SZ인 D에서는 β 금속간 화합물이 더욱 미세하게 분산되어졌고 동적 재결정으로 인해 조직이 매우 미세해졌다.

3.2 용접부 기계적 특성

FSW 접합된 세 합금의 접합부 경도를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. SZ에서의 경도치가 AZ91C-F가 가장 높고 AZ61A-F, AZ31B-H24 순으로 낮아졌다. AZ31B-H24는 모재 경도 보다 낮은 SZ 경도치를 보이고 있는데 이는 열간 압연으로 인해 미세화 된 모재가 FSW의 열·기계적 영향에 의해서 SZ의 조직이 재결정, 결정립 성장을 거치면서 조대화되었기 때문이다. AZ61A-F는 전체적으로 비슷한 경도 분포를 보이고 있으며 AZ91C-F의 SZ는 모재 경도보다 매우 높은 분포를 보이고 있다. 이는 편의 교반작용에 의해 형성된 미세한 재결정 조직 및 β 상의 미세분산 때문인 것으로 생각된다.

접합부의 경도에 영향을 미치는 이러한 β 상이 각각의 합금에 어떠한 형태로 존재하는 지에 대해서 알아보았다. AZ31B-H24에서는 β 금속간 화합물이 확인되지 않은 반면 AZ61A-F와 AZ91C-F에서는 β 금속간 화합물을 확인할 수 있었다. Fig. 8에 AZ61A-F와 AZ91C-F에서 관찰되는 β 상을 나타내었다. AZ61A-F에서는 매우 미세한 로드상인 반면, AZ91C-F에서는 매우 조대한 침상을 나타내고 있었다. AZ91C-F에서의 β 상은 그 크기가 매우 커서 SEM 뿐만 아니라 광학 현미경에서도 충분히 확인이 가능하였다.

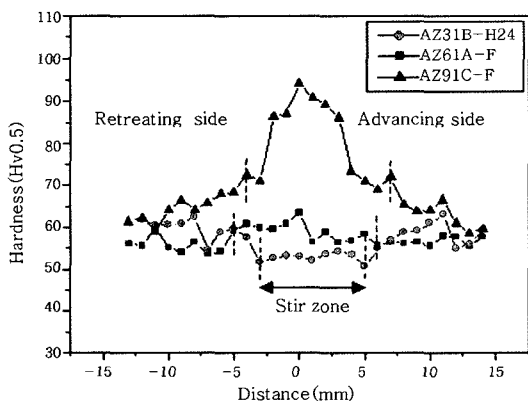


Fig. 7 Comparison of hardness of weldments of Mg alloys

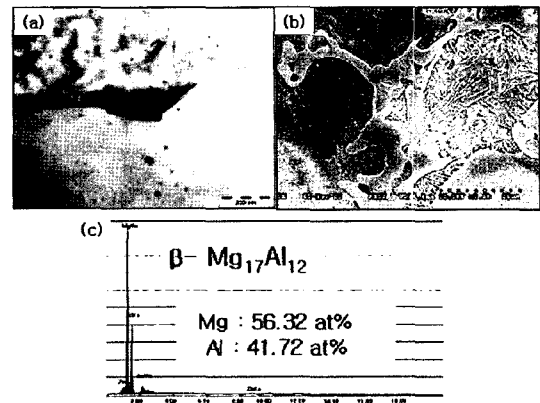


Fig. 8 β - $Mg_{17}Al_{12}$ phase in (a) AZ61A-F and (b) AZ91C-F and (c) its EDS analysis

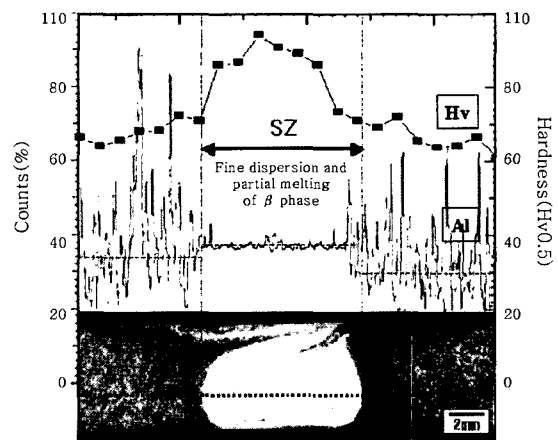


Fig. 9 EPMA profiles in cross section of AZ91C-F

Fig. 9에 AZ91C-F의 접합부 단면에서 Al함량을 분석한 EPMA 결과를 경도분포와 함께 나타내었다. β 상이 모재에 불규칙하게 분포되어 있어 Al 함량이 모재에서는 매우 불규칙한 피크를 나타내고 있다. 하지만 이러한 불규칙한 피크는 SZ에서는 매우 안정한 피크를 나타내는데 이는 β 상이 매우 미세하게 분해 되어 SZ영역에 고루 분포한다는 것을 나타낸다. 또한 모재에 비해 SZ의 평균 Al함량이 약간 증가되었다는 것을 확인할 수가 있는데 이는 일부 β 금속간 화합물이 용융되어 α -Mg에 고용되었기 때문이라고 생각된다^{10,11)}.

$Mg_{17}Al_{12}$ (β 상)이 강도 상승에 얼마나 큰 영향을 미치는 지를 확인하기 위해서 $Mg_{17}Al_{12}$ (β 상)과 α -Mg을 300g의 하중으로 측정 한 결과 α -Mg는 약 55Hv~65Hv, $Mg_{17}Al_{12}$ (β 상)은 약 65Hv~75Hv를 나타내어 β 상이 α 상보다 약 10Hv정도 높은 경도 값을 나타내었다. 따라서 이러한 β 상이 SZ에서는 미세하게 고루 분포되어 있기 때문에 높은 경도를 나타냈을 거라고 생각된다.

Fig. 10에 상온에서 실시한 각 합금의 FSW 접합부 인장 시험 후의 파단 위치를 나타내었다. AZ31B-H24

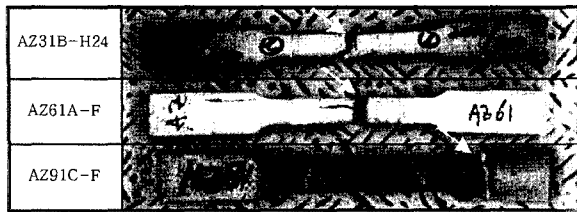


Fig. 10 Fracture location after tensile test of FSW weldments of Mg alloys

Table 5 Mechanical properties of butt joint of Mg alloys

	BM		FSW	
	TS (MPa)	E ℓ (%)	TS (MPa)	E ℓ (%)
AZ31B-H24	290	15	230	10.2
AZ61A-F	302	12.2	258	9.6

와 AZ61A-F는 접합부에서 파단이 되었으며 AZ91C-F는 모재에서 파단이 되었다. 모재에서 파단된 AZ91C-F를 제외한 두 합금의 접합부 기계적 특성을 Table 5에 나타내었다.

표에서 알 수 있듯이 AZ61A-F가 AZ31B-H24 보다 높은 인장강도를 나타내고 있다. 이는 AZ61A-F가 β 상을 형성하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 연신율은 취약한 β 상을 형성한 AZ61A-F가 상대적으로 약간 저하되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

전신재 및 주조재 Mg 합금의 FSW 접합부 미세조직과 기계적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AZ31B-H24의 SZ 조직은 모재보다 조대해졌지만 AZ61A-F, AZ91C-F의 SZ 조직은 매우 미세해졌다.

2) 모재의 Al 양이 증가할수록 $Mg_{17}Al_{12}(\beta)$ 상은 증가하고 이에 따라 접합부의 경도와 인장강도는 향상된 반면에 접합부의 연신율은 저하되었다.

3) 이러한 $Mg_{17}Al_{12}(\beta)$ 상은 SZ에서 기계적으로 미세하게 분산되고 일부는 열적으로 용융되어 Al함량이 3%인 AZ31B-H24에서는 발견되지 않았고 6%인 AZ61A-F에서는 매우 미세한 침상형태로 존재하고 있었으며 9%인 AZ91C-F에서는 매우 조대한 형태로 존재하고 있었다.

참 고 문 헌

1. 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)
2. Michael M.Avedesian : ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, ASM international, 1999, 16-21
3. 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
4. H HORI, H HINO : Application of friction Stir welding to the car body, Welding International 2003, 17(4), p 287-292
5. R Tova, C Gambaro, M Volpone : Friction Stir Welding, an innovative seam technology, Welding International 2003, **17(1)**, 36-42
6. Dr. Richard Johnson, Dr. Philip Threadgill : Friction stir welding of magnesium alloys, TWI, 2-6 March 2003
7. ASTM E112 : Standard Test Methods for Determining Average Grain Size
8. Seung Hwan C.Park, Yutaka S. Sato, Hiroyuki Kokawa : Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test, Scripta Materialia, **49** (2003), 161-166
9. Qing-yu Shi, Terry Dickerson, Hugh R Shercliff : Thermo-Mechanical FE Modelling of Friction Stir Welding of Al-2024 Including Tool Loads, 4th International Symposium on Friction stir Welding, May, 2003, 1-12
10. Kazuhiro Nakata, Young Gon Kim and Masao Ushio : FRICTION STIR WELDING OF MAGNESIUM ALLOYS, IWC-Korea 2002, KWS, 2002, 511-515
11. Jong-Woong Kim, Won-Bae-Lee, Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung : The Joint Characteristics of Friction Stir Welded AZ91D Magnesium alloys, IWC-Korea 2002, 516~521