

FSW를 이용한 AZ31B Mg 합금의 접합성 평가

노중석** · 김홍주* · 장웅성* · 방국수**

*포항산업과학연구원(RIST) 용접센터

**부경대학교 공과대학 신소재공학부

Evaluation of Joint Properties of Friction Stir Welded AZ31B Mg Alloy

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 Mg alloy was studied using microstructural observation and mechanical tests. Defect free joints was obtained under the condition of 2000rpm-100mm/min. In TMAZ, a lot of twin deformation were observed due to the mechanical effect of the FSW tool and thus relatively high hardness was obtained. In SZ, the twin deformation was disappeared by recovery and the hardness decreased because the grain structure was coarsened by dynamic recrystallization and grain growth. The Al-Mn precipitates were observed throughout the joint regions. On the other hand, β -Mg₁₇Al₁₂ intermetallic compounds were not observed in either of the zone. The joint efficiency was about 80% and the impact value of the joint was almost equal to that of base metal.

* Corresponding author : k46759@hanmail.net

(Received January 28, 2004)

Key Words : Friction stir welding, Magnesium alloys, AZ31B-H24, Tensile test, Hardness

1. 서 론

최근 들어 한정된 에너지 자원의 효율적인 이용과 환경오염 저감에 대한 관심이 고조되어 선진국을 중심으로 각종 환경규제를 강화하여 환경오염을 억제하려는 노력과 이를 해결하기 위한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 시대적 상황에 효과적으로 대처하기 위하여 주요 자동차 생산국들은 자동차의 연비를 향상시킬 수 있는 방안을 다각적으로 모색하고 있으며, 미국, 유럽, 일본 등 자동차 산업분야를 선도하는 국가에서는 차체 경량화를 통한 연비 향상 방안 개발에 적극적인 투자를 하고 있다¹⁾.

자동차의 경량화를 위한 소재로는 현재 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 강화 플라스틱 등 많은 재료가 있지만 그 중에서도 최근에 마그네슘 합금의 사용이 급증하고 있는 상태이다.

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, 열전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격 특성이 우수하여 자동차, 항공기, 방위 산업 및 일반 기계 등에 경량화 소재로서 요구되는 여러 우수한 특성을 지니고 있다²⁻³⁾.

이러한 마그네슘 합금은 GMAW(Gas Metal Arc Welding)와 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 등 아크를 이용한 용융 용접법으로 많은 접합을 하고 있다. 이러한 용접법은 우수한 용접속도를 얻을 수 있지만 높은 용접 잔류 응력, 용융 및 재응고 과정에 동반한 용접부의 조직 변화 등의 문제점을 야기할 수 있다. 그리고 레이저 용접(Laser Welding)이나 전자 빔 용접(Electron Beam Welding)을 이용한 고밀도 용

접합은 용접 비용이 너무 고가이고 용접부내의 취약한 조직, 기공의 존재 등이 문제가 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 고상 용접법인 FSW (Friction Stir Welding)의 이용이 활발히 시도되고 있다⁴⁻⁵⁾.

FSW는 이미 알루미늄 합금에 많은 적용이 되어져 왔다. 이러한 적용으로 틀의 형상, 재료, 전진각, 가압력 등의 접합 변수들이 어느 정도 밝혀지면서, 여기에서 얻어진 많은 결과들을 마그네슘 합금의 용접에 적용할 수 있게 되었다.

본 실험에서는 지금까지의 보고 된 용접 조건 및 용접 변수를 고려하여 열간압연 처리한 AZ31B-H24를 사용하여 FSW 접합 시 나타나는 조직의 변화 및 기계적 성질에 미치는 영향 등을 검토하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 마그네슘 합금은 우수한 강도와 연성을 가지는 전신재 합금으로 가공경화와 부분 어닐링 처리된 두께 4mm의 AZ31B-H24 합금으로서 현재 가장 많이 사용되고 있는 Mg 합금 중 하나이다. 합금의 조성 및 기계적 특성을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

본 실험에서는 FSW 접합 공정 중 주요 변수인 틀 회전속도, 접합 속도를 Table 3에 나타낸 조건으로 접합하였다.

FSW 접합 후 접합부 조직을 관찰하기 위해서 접합부 단면을 광학 현미경을 사용하여 관찰하였다. 조직

Table 1 Chemical composition of AZ31B-H24 Mg alloy (wt%)

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
3.00	1.0	0.20	0.05	0.05	0.005	0.005	bal.

Table 2 Mechanical properties of AZ31B-H24 Mg alloy

Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation in 50mm(%)	Hardness (HRC)
45	290	220	15	73

Table 3 Friction stir welding parameters

Parameters	Conditions
Tool rotation speed	1000rpm, 2000rpm
Travel speed	100mm/min

관찰에 사용된 부식액은 피크린산(picric acid) 4.2g, 초산 (acetic acid) 10ml, 알콜 (methanol) 70ml, 증류수 10ml를 사용하였다. 접합부 변형 거동을 알기 위한 부식에는 100ml 증류수, 초산 10ml의 부식액을 사용하였다. 각 영역의 결정립 크기를 조사하기 위하여 ASTM에 규정된 Lineal intercept법을 이용하여 결정립 크기를 측정하였다⁶⁾. 한 선의 길이는 8cm로 하여 4개의 선을 교차시켜 측정하였고 사진의 크기는 500배로 하였다. 또한 접합부 내의 결함부분과 석출물, 파단면의 성분을 분석하기 위해서 SEM (Scanning Electron Microscope), EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) 그리고 XRD (X-Ray Diffractometer)를 사용하였다. 접합부의 경도는 마이크로 비커스를 사용하여 하중 500g, 시간 10sec를 주어 측정하였으며 접합부의 인장강도는 시편을 서브사이즈 규격에 맞추어 제작하여 5ton의 하중으로 시험하여 항복강도, 인장강도, 연신율을 측정하였다. 충격 시험편 역시 서브 사이즈 규격에 맞추어 제작하여 Charpy 충격 시험으로 상온에서 시험하여 충격치와 흡수에너지를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

용접 속도를 100mm/min으로 유지시키고 틀 회전속도를 1000rpm과 2000rpm으로 접합한 접합부의 표면과 이면의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 두 조건 모두 약간의 burr가 존재하는 것을 제외하고는 비교적 양호한 접합 형상을 보였으며 표면에는 어떠한 결함도 관찰되지 않았다. Fig. 2는 각각 1000rpm과 2000rpm으로 접합한 접합부 단면 마크로 사진이다. 두 경우 모두 교반상태가 매우 양호한 것을 알 수 있다. Fig. 2-(a)의 마크로 조직을 접합부 변형 거동을 관찰할 수 있는 부식액을 사용하여 다시 부식한 결과를 Fig. 3에

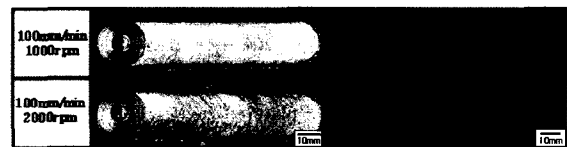


Fig. 1 Front and back surface of FSW butt joint

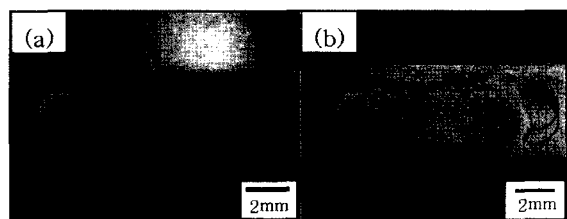


Fig. 2 Macrostructures of cross-section of butt joint (a) 1000rpm, (b) 2000rpm under 100mm/min

나타내었다. 접합부가 모재(Base Metal, BM), 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ), 열·기계적 영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ), 교반부(Stir Zone, SZ)로 구성되어 있음을 확인할 수 있으며 이러한 관찰을 통하여 FSW에 의한 소성변형 시 metal flow를 파악할 수가 있다.

Fig. 4는 본 실험에서 metal flow가 응집하는 곳에 나타난 균열 사진이다. 일반적으로 metal flow가 최종적으로 응집하는 곳에는 결함이 발생할 확률이 높다고 알려져 있는데⁷⁾ 본 실험에서도 회전속도 1000rpm, 이동속도 100mm/min으로 접합한 경우 metal flow의 최종점에서 접합 불량에 의한 균열을 확인할 수 있으며 틀이 삽입되는 중심의 좌우 쪽에 각각 위치하고 있다. 이러한 결함의 생성은 용접 틀의 느린 회전 속도로 인해 틀과 마그네슘 합금사이에서 생기는 입열이 충분하지 못하고 이로 인해 재료의 소성변형이 불충분해졌기 때문이라고 생각된다. 재료에 따라 접합을 하기 위한 접합조건에 차이는 있겠지만 기본적으로 FSW에 있어서 접합부 온도는 재료가 충분한 소성변형을 일으킬 수 있는 온도까지 충분히 가열되어야 하기 때문으로 사료된다⁸⁾. 회전속도 2000rpm, 이동속도 100mm/min으로 접합한 시편에서는 재료 내에 어떠한 결함도 생성되어 있지 않은 아주 양호한 접합부임을 실험에서 확인할 수 있었다. Fig. 4에서 RS로 표기한 영역은 틀의 회전방향과 이동방향이 불일치하는 retreating side이고, AS로 표기한 영역은 두 방향이 일치하는 advancing

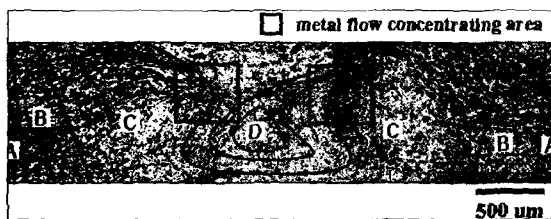


Fig. 3 Behavior of metal flow. (1000rpm-100 mm/min) (A) BM (B) HAZ (C) TMAZ (D) SZ

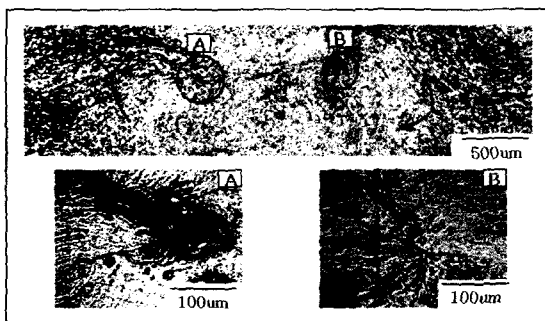


Fig. 4 Weld defects of FSW butt joint. (1000rpm, 100mm/min)

side이다. 틀의 회전방향과 이동방향이 서로 반대인 RS에서 더 큰 전단응력이 발생하기 때문에 Fig. 4에서 보는 것처럼 RS에서 나타난 결함이 AS에 나타난 결함보다 큰 것으로 사료된다.

Fig. 5는 1000rpm, 200mm/min의 조건으로 용접한 접합부 조직을 나타낸 것이다. A는 BM, B는 HAZ, C는 TMAZ, D는 SZ이다. AZ31B-H24 합금은 열간 압연 공정 후에 가공경화와 부분 어닐링 처리를 하여 결정립 성장이 억제된 재결정 상태의 합금이다. 따라서 A에서 보듯이 모재 조직은 매우 미세한 상태를 나타내고 있음을 알 수 있다. B는 HAZ로서 FSW 접합으로 인한 기계적 영향은 받지 않고 열 영향만 받은 영역이다. 압연으로 인해 형성된 연신 흔적이나 쌍정 변형의 존재를 찾을 수 없고 결정립 크기가 모재보다 커졌음을 알 수 있다. TMAZ인 C에서는 조직의 가운데에 많은 쌍정 변형이 생긴 것을 알 수가 있고 이러한 변형은 기계적인 힘에 의해 일정한 방향성을 가진다. 이러한 기계적 쌍정변형이 TMAZ에서 주로 관찰되는 이유는 틀의 회전에 의해 직접적으로 소성변형되어지기 때문이다. 마찬가지로 더욱 높은 SZ에서는 재결정이 일어나 소멸되었지만 TMAZ는 재결정 온도에

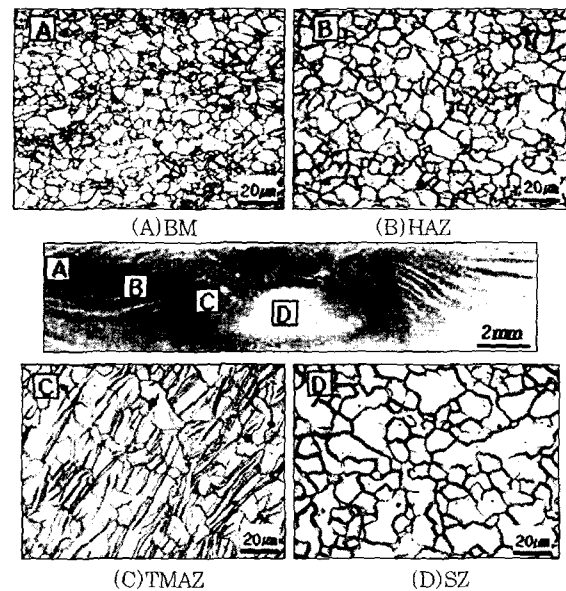


Fig. 5 Microstructure of butt joint. (2000rpm-100mm/min) (A) BM (B) HAZ (C) TMAZ (D) SZ

Table 4 Comparison of grain size of each region

	BM	HAZ	SZ
1000rpm, 100mm/min	5.6	7.6	11.7
2000rpm, 100mm/min	5.6	7.7	12.5

미치지 못하므로 쌍정이 그대로 존재한다. SZ인 D는 회복, 재결정, 결정립 성장의 단계를 거친 영역으로 이 영역에서는 동적 재결정에 의해서 TMAZ에서 볼 수 있었던 많은 쌍정 변형들이 회복 및 재결정되어 등축정 조직으로 나타났다.

이러한 각 영역에서 결정립 크기를 측정한 결과를 Table 4에 나타내었다. 틀의 회전속도가 1000rpm인 경우, HAZ는 모재와 비교하여 약 1.3배의 결정립 성장을 보였으며 SZ는 약 2.1배의 성장을 보였다. 2000rpm인 경우는 HAZ는 약 1.4배, SZ는 약 2.2배의 성장을 보였다. 틀의 회전속도에 따라 각 영역에서 큰 차이는 없으나 2000rpm의 경우가 결정립 크기가 조금 크다. 일반적으로 이동 속도가 느리고 틀 회전속도가 빠르면 마찰열이 높아지게 되고 이로 인해 냉각속도가 느려져서 결정립 성장이 크게 된다. 즉, 같은 용접 속도라 하더라도 틀 회전속도가 빠르면 재결정 성장이 촉진됨으로 조대해지게 되는 것이다.

Fig. 6은 1000rpm, 100mm/min과 2000rpm, 100mm/min으로 접합한 접합부의 경도 분포를 나타낸 것이다. 두 조건 모두 비슷한 경도분포를 나타내고 있으나 주목할만한 특징은 연화된 SZ가 존재한다는 것이다. SZ의 연화 정도는 모재의 약 80%정도이다. 이는 위에서 언급했듯이 모재는 결정립 성장을 억제한 어닐링 처리가 되어 있기 때문에 조직이 매우 미세한 반면 SZ에서는 회복, 재결정, 결정립 성장 단계를 거치며 조직이 조대해졌기 때문이다. TMAZ에서는 비록 조직은 조대해졌지만 재결정이 일어나지 않아 쌍정 변형 등 많은 가공 경화된 형태를 나타내고 있기 때문에 경도치가 상대적으로 높게 나오는 것이다. 그리고 전체적으로 회전속도가 2000rpm인 조건이 1000rpm인 조건보다 TMAZ와 SZ에서 약간 높은 경도 분포를 보이고 있다. 이는 2000rpm일 때가 1000rpm일 때보다 비록

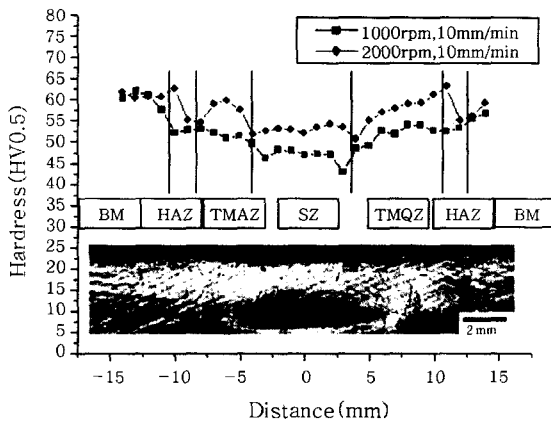


Fig. 6 Hardness profiles in cross section of butt joints

TMAZ와 SZ 모두 결정립 크기는 조금 크지만 동반되는 기계적 변형을 비교해볼 때 생성된 쌍정변형이나 전위가 집적되는 전위 밀집 영역이 상대적으로 2000rpm에서 더 많이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 FSW 접합부 경도에 미치는 인자는 결정립 크기보다는 기계적 변형에 더 많이 의존한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 AZ31B-H24의 FSW 공정 시 나타나는 각 영역별 SEM 사진과 석출물들의 EDS 결과를 나타낸 것이다. 대부분의 석출물들이 산화물 형태로 존재하고 있음을 확인할 수가 있다. 이는 FSW 접합 시 기존 산화막의 파괴와 대기 중 산소 혼입등에 기인하는 것으로 생각된다⁹⁾. Al-Mn 석출물은 접합부 모든 영역에서 확인되었으며 TMAZ와 SZ에서는 Mg-Si 석출물도 확인되었다. TMAZ에서의 대표적인 Al-Mn 석출물과 SZ에서의 대표적인 Mg-Si 석출물의 EDS 결과를 그림 중에 같이 나타내었다. SZ에서는 비교적 적은 수의 석출물들이 확인되었는데 이는 FSW시 기계적인 교반으로 인하여 석출물이 분해 및 고용되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 SZ 영역에서 확인된 Al-Mn 석출물의 TEM 사진이다. 앞서 설명한 것처럼 Al-Mn 석출물은

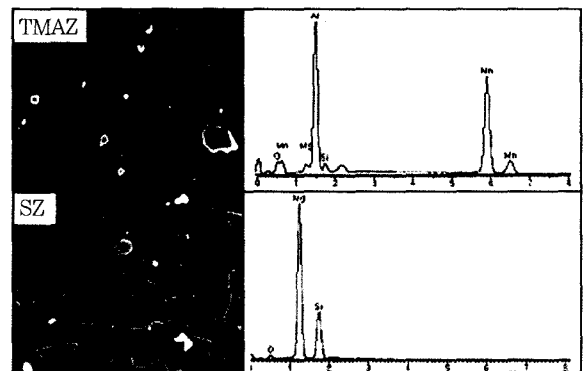


Fig. 7 SEM micrograph and EDS analysis of precipitates

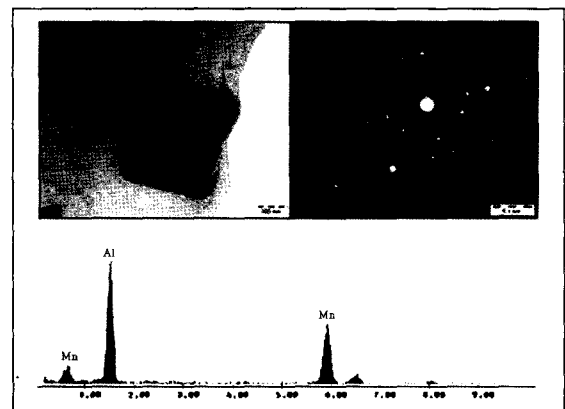


Fig. 8 TEM micrograph and EDS analysis of Al-Mn precipitates

전체적으로 고루 분포되어 있으며 약 1~5 μ m의 크기를 가지고 있다. Al-Mn 석출물은 대개 MnAl, MnAl₄, MnAl₆의 조성으로 화합물을 이루고 있으며 덩어리나 바늘같은 형태를 가지고 있다.

Fig. 9는 Mg₂Si를 촬영한 SEM사진과 EDS분석 결과이다. SEM 사진에서 Mg₂Si 금속간 화합물을 제외하고 나머진 모두 Al-Mn 석출물이다. Al-Mn 석출물과 달리 Mg₂Si 금속간 화합물은 각이 많이 쳐 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 Mg₂Si는 Mg합금의 기계적 특성을 향상시키는 우수한 금속간 화합물로 알려져 있다¹⁰⁾. 본 합금에는 Si양이 0.05%로 매우 미미한 양이 첨가되어 있어서 Mg₂Si 금속간 화합물이 많이 생성되지는 않았지만 AZ, AM계열의 마그네슘 합금에 Si 원소를 첨가시킨 고인성 고강도 마그네슘 합금에서는 본 석출물이 많이 생길 것으로 판단된다.

한편 AZ계열의 Mg 합금에서 가장 문제시되고 있는 취약한 Mg₁₇Al₁₂(β 상) 금속간 화합물은 본 실험에서는 거의 생성되지 않았다. 그 이유는 첫째 금속간 화합물을 형성할 만큼의 Al 양이 충분히 많지 않기 때문이고, 둘째 Si가 첨가되면서 Al이 Mg과 반응하여 금속간 화합물을 형성하기 전에 Si가 먼저 Mg와 결합하여 Mg₂Si를 형성하기 때문으로 생각된다.

Table 5는 상온에서 실시한 FSW 접합부의 인장시험과 충격 시험 결과이다. 표에서 알 수 있듯이 접합부의 인장강도는 모재 인장강도의 약 80%정도로 우수한 접합부를 나타내고 있다. 충격치는 오차 범위의 차이로

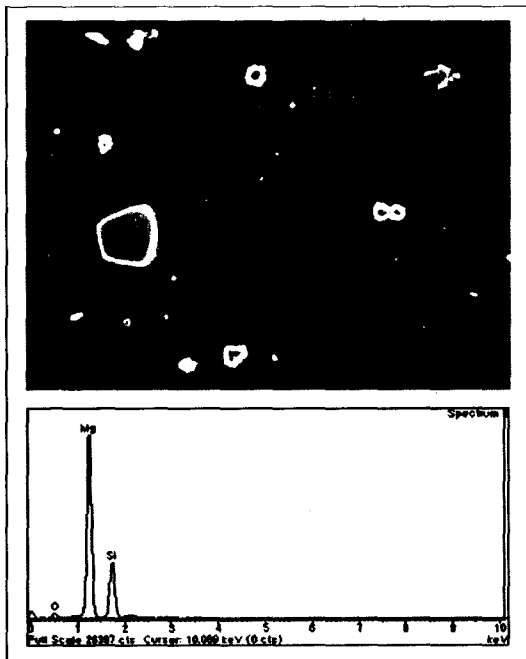


Fig. 9 SEM micrograph and EDS analysis of Mg₂Si precipitates

Table 5 Mechanical properties of butt joint

	Tensile Test			Impact Test	
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	absorbed energy(J)	impact value (J/cm ²)
Base metal	220	290	15	4.2	17.1
Butt joint (1000/100)	78	220	10.2	4.3	17.4
Butt joint (2000/100)	93	230	-	4.2	16.9

서 FSW 접합부 충격치는 모재 충격치와 거의 비슷하다고 할 수 있다.

4. 결 론

AZ31B Mg 합금을 두 가지 FSW 조건으로 접합하여 미세조직 및 기계적 특성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AZ31B 합금은 1000rpm, 100mm/min의 조건보다 2000rpm, 100mm/min의 조건이 더 양호하고 결함 없는 접합부를 형성하였다.

2) TMAZ에서는 접합 틀의 기계적인 영향으로 쌍정 변형이 많이 관찰되었으며 이로 인해 경도 값이 모재보다는 낮지만 SZ보다는 높게 나왔다. SZ 영역은 회복으로 인해 쌍정 변형은 찾아볼 수 없었고 재결정 및 결정립 성장 단계를 거치면서 조직이 조대해져 경도 값이 낮게 나왔다.

3) 본 합금에 나타나는 석출물은 Al-Mn 석출물이 전 영역에 매우 넓게 생성되어 있고 β -Mg₁₇Al₁₂ 금속간 화합물은 어느 영역에서도 발견되지 않았다.

4) 본 합금의 접합부는 인장강도가 모재의 약 80% 이상을 나타내는 우수한 접합부를 형성하였으며 충격치는 모재와 비슷한 값을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. K.S.Shin, H.C.Jung, Y.G.Na : Application Status and Manufacturing Technologies of Magnesium Alloys in the Automotive Industry, Bulletin of the Korean Institute of Metals and Materials, 2003, 63-79 (in Korean)
2. H.Friedrich, S.Schumann : Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry, Journal of Materials Processing Technology, 117 (2001), 276-281
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. H Hori, H Hino : Application of friction stir welding to the car body, *Welding International* 2003, **17(4)**, 287-292
 5. R Tova, C Gambaro, M Volpone : Friction Stir Welding, an innovative seam technology, *Welding International* 2003, **17(1)**, 36-42
 6. ASTM E112 : Standard Test Methods for Determining Average Grain Size
 7. Won-Bae Lee, Yun-Mo Yeon, Chang-Chae Shur, Seung-Boo Jung : Bonding of Magnesium Alloys by Friction Stir Welding, *Journal of KWS*, **19-6**, December, 2001, 23-29 (in Korean)
 8. Kazuhiro Nakata, Young Gon Kim and Masao Ushio : FRICTION STIR WELDING OF MAGNESIUM ALLOYS, *IWC-Korea 2002, KWS, 2002*, 516-521
 9. 岡村 久宣, 青田 炊也, 坂本 征彦, 江角 昌, 他内 建二 : *Journal of the Japan welding society*, **19-3** (2001), 446-456 (in Japanese)
 10. Chang Dong Yim, Min Yong Jang, Kwang Seon Shin, Hyung Gyu Lee, Sung Chul Choi : Development of processing Technology for Magnesium Alloys and Components, *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, **10-6** (1997), 795-806 (in Korean)