

마찰교반 점용접(FSJ)을 이용한 Mg 합금의 접합성 평가

조현진 · 김홍주 · 천창근 · 장웅성

Evaluation of Friction Spot Joining Weldability of Al Alloys for Automotive

Hyeon-Jin Cho, Heung-Ju Kim, Chang-Keun Cheon and Woong-Seong Chang

1. 서 론

최근 한정된 에너지 자원의 효율적인 이용과 환경오염 저감에 대한 관심이 고조되어 선진국을 중심으로 각종 환경규제를 강화하여 환경오염을 억제하려는 노력과 이를 해결하기 위한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다.

자동차 메이커들은 자동차의 경량화를 통해 에너지 저감에 노력을 기울이고 있는 실정이다. 이를 위한 소재로는 현재 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 강화 플라스틱 등 많은 재료가 있지만 그 중에서도 최근 마그네슘 합금의 사용이 급증하고 있는 실정이다¹⁾.

마그네슘 합금은 밀도가 알루미늄 합금의 2/3, 철 합금의 1/5 수준으로 현재까지 개발된 합금 중 가장 낮은 밀도를 가지고 있으며 여타 경량재료와 비교하여 손색이 없는 비강도 및 비탄성 계수를 지니고 있다.^{2),3)}

이러한 마그네슘 합금은 아크용접 및 RSW (Resistance Spot Welding) 등 용융 용접법으로 많은 접합을 하고 있다. 이러한 용접법은 우수한 용접속도를 얻을 수 있지만 높은 용접 잔류응력, 용융 및 재응고 과정에 동반한 용접부의 조직 변화 등의 문제점을 야기할 수 있다. 이러한 용접법은 상대적으로 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 있다.⁴⁾

FSW 공정을 응용한 새로운 기술인 마찰교반 점용접 (Friction Spot Joining)는 이러한 점에서 최근 주목 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 일반적으로 상용되고 있는 대표적인 마그네슘 합금인 AZ계 합금 (Mg-Zn-Al 합금)인 AZ31B -H24에 대하여 최적의 FSJ 접합조건을 설정하고 접합 특성을 평가하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에서 사용된 마그네슘 합금은 우수한 강도와 연성을 가지는 전신재 합금으로 가공경화와 일부 어닐링 되어진 것으로 두께 1.5mm의 AZ31B-H24 합금을 사용하였으며, 이는 현재 가장 널리 사용되고 있는 Mg 합금 중 하나이다. 이 합금에 대한 중요 원소에 대한 화학 조성과 기계적 특성을 Table 1에 나타내었다. 본 실험에서는 100×30×1.5 크기의 두 부재를 겹치기 형태로 접합을 실시하였다.

2.2 실험방법

AZ31B-H24 소재에 대한 접합 실험은 마찰교반 점용접 장치에 솔더 직경 11mm, 핀 직경 3mm, 핀 길이 1.8mm인 툴을 이용하여 마찰교반 점접합을 실시하였다. 접합실험은 Table 2와 같이 접합용 툴의 회전속도(rotating speed), 삽입된 툴이 접합부 내에서 머무르는 시간(Dwelling time), 툴의 삽입깊이(plunging depth)를 변화시켜 결함이 없는 건전한 접합부를 얻고자 한다. 건전한 접합부의 결함 유무는 육안에 의한 접

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of AZ31B

Chemical composition (weight)(%)					
Al	Zn	Mn	Si	Cu	Mg
3.28	0.84	0.34	0.06	0.01	Bal.
Tensile Strength(MPa)			Elongation(%)		Yield Strength(MPa)
290			15		220

Table 2 Friction spot joining condition for AZ31B-H24

Rotational speed (rpm)	1000	1500	2000	2500	3000
Dwell times (sec)	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
Plunge depths (mm)	2	3	4	5	6
Tool Geometry	Shoulder	$\Phi 12$			
	Pin	diameter : $\Phi 3$, length : 1.9mm			

합부 외관관찰 및 접합한 재료를 절단하여 마운팅을 한 다음 폴리싱 연마 후 광학 현미경을 사용하여 접합부 조직을 관찰하였으며 접합부와 모재, 열영향부의 결정립 크기를 측정하기 위해 ASTM E112에 규정된 Heyn Lineal Intercept Procedure법을 이용하여 결정립 크기를 측정하였다⁵⁾. Fig 3.2.1과 같이 결정립 크기를 측정하기 위한 시료로써 모재의 압연방향과 평행한 방향 (longitudinal, l(0°))와 수직한 방향 (transverse, t(90°))방향과 표면방향과 평면의 방향 (planar, p(90°))에서 각각 채취한 시료로부터 각 영역별로 200 배율 사진을 준비한 후 한 선의 길이를 100mm로 하여 4개의 선을 교차시켜 측정하였다.

또한 건전한 접합부에 대하여 기계적 특성 파악을 하기 위하여 경도시험(0.3kgf, 12sec) 및 인장전단시험을 실시하였으며, 접합부 인장전단시험은 JIS Z 3140 규격에 맞추어 시편을 제작하여 실시하였으며, 미세 조직적 특징은 광학현미경(Optical Microscope)을 이용하여 미세조직을 관찰하였으며, SEM (Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 접합부 단면 및 파 단면을 관찰하고 EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)를 사용하여 각 상들의 조성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 조직관찰

Fig. 1는 두 판을 접친 AZ31B에 마찰교반 점용접을 이용하여 회전속도 1000rpm, 삽입깊이 2.2mm, 유지 시간 3sec의 조건에서 접합한 접합부 단면을 나타낸 것이다. 접합부 단면은 일반적인 FSW 접합부와 유사하게 교반부(Stir Zone ; SZ) A, 기계적 열영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone ; TMAZ) B, 열영향부(Heat Affected Zone ; HAZ) C, 모재부(Base Metal ; BM) D로 구분할 수 있다⁶⁾.

일반적으로 FSW 공정에서 알려진 것과 같이 회전하

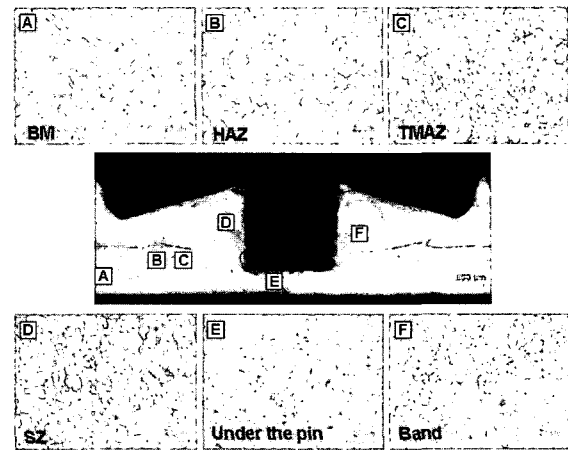


Fig. 1 Microstructures of FSJ joints in AZ31B-H24

는 tool의 shoulder면과 모재의 접촉으로 발생한 마찰 열에 의해 접합부가 가열되어지고 tool의 pin에 의한 직접적인 기계적인 교반으로 발생하는 극심한 소성변형으로 인한 재결정이 일어나는 교반부(SZ, D영역)는 모재에 비해 약간 조대한 조직을 지니고 있다. 이러한 재결정 조직은 재료가 소성변형을 받는 동안 형성되기 때문에 동적 재결정(dynamic recrystallization)조직이며 접합 tool이 빠져나오고 난 후 냉각하는 동안에는 접합열에 의해 정적 결정립 성장(static grain growth)를 거치게 된다⁷⁾. 전체적으로 미세하고 균일한 결정립을 나타내고 있지만 부분적으로는 조대한 조직이 형성되는데 이는 접합 후 냉각 시 교반부에 부분적으로 비정상적인 결정립 성장(abnormal grain growth, secondary recrystallization)이 일어났음을 예상할 수 있다. 열·기계적 영향부인(TMAZ, C영역)는 회전하는 tool에 의해 마찰열과 간접적인 기계적인 변형에 영향을 받아 일부 동적회복(dynamic recovery)이 일어나는 곳과 회전하는 방향을 따라 일부 조직의 연신이 일어나는 것이 특징이며 입내에는 많은 저 경각 입계의 아 결정립 셀(subgrain cell)이 형성된다고 보고되고 있다.⁸⁾ 이 부분에서 틀 회전은 재료의 소성 유동을 일으키지만 주입된 에너지는 동적 재결정을 형성하기에는 충분하지 않은 것이 이러한 현상의 원인인 것으로 판단된다. 열영향부(HAZ, B영역)는 흔히 용융용접에서도 발견되는 부분으로 마찰열의 영향을 받아 모재에 비해 결정립이 일부 조대해지는 것이 특징이다.

적정조건에서 실시한 접합실험에서 접합부의 결정립 크기 변화는 모재의 결정립 크기 약 $8\mu\text{m}$ 에 비해 약 $10\mu\text{m}$ 로 약간 조대해졌고, 열영향부의 경우 약 $22\mu\text{m}$ 로 크게 조대해진 결정립을 지녔다.

Fig 2는 AZ31B-H24의 FSJ 공정 시 나타나는 각

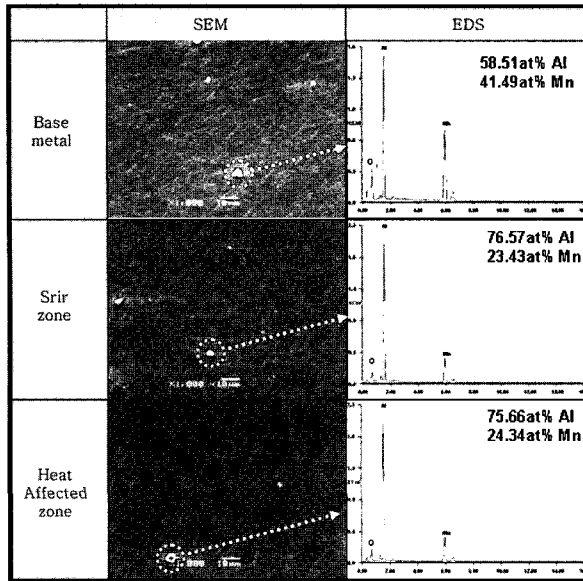


Fig. 2 SEM/EDS analysis of FSJ joints in AZ31B-H24

영역별 SEM 사진과 석출물들의 EDS 결과를 나타낸 것이다. 대부분의 석출물들이 산화물 형태로 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 FSJ 접합 시 기존 산화막의 파괴와 대기 중 산소 혼입 등에 기인하는 것으로 생각된다⁹⁾. 또한 Al-Mn 석출물은 접합부 모든 영역 및 모재에서도 확인되었으나 SZ와 TMAZ 부분에서는 석출이 모재에 비해 상대적으로 크기가 작고 고르게 분포하고 있음을 알 수 있었으며 이는 기계적인 교반으로 인하여 석출물이 분쇄되는 것에 의한 것으로 생각된다.

3.2 접합부 기계적 특성

Fig. 3은 톨 회전속도에 따라 접합을 시행한 시험편 단면의 경도분포를 나타낸 것이다. 핀에 인접한 부분과

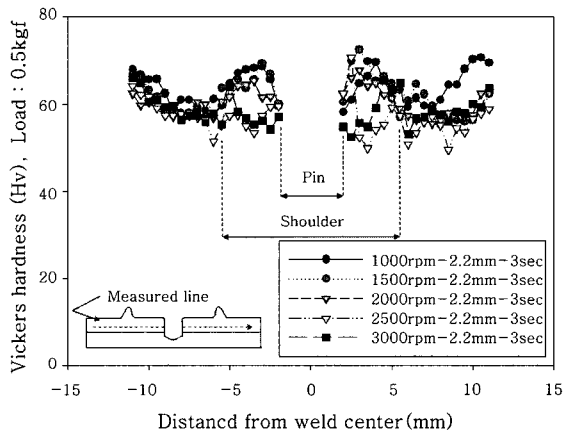


Fig. 3 Hardness distribution as a function of distance from weld center in AZ31B-H24 (vs. rotating speed)

열영향을 받은 부분인 중심부에서 약 6mm 떨어진 부분에서 일부 연화가 일어남을 알 수 있다.

일반적인 금속 재료에서 항복 응력(σ_y)과 결정립 크기(d)의 관계를 나타내는 다음과 같은 Hall-Petch 식을 만족한다¹⁰⁾.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

여기서 σ_0 는 마찰 응력이고 k_y 는 인접한 항복되지 않은 결정립 속으로 전위가 확장되기 위해 필요한 응력과 관련된 항복된 양의 상수이다. 이 관계식에 의하면 항복 응력은 결정립의 크기가 감소할수록 증가한다고 알려져 있다. 또한 모재는 결정립 성장을 억제한 어닐링 처리가 되어 있기 때문에 조직이 매우 미세한 반면 SZ에서는 회복, 재결정, 결정립 성장 단계를 거치며 조직이 일부 조대해졌기 때문에 이러한 경도분포를 보이는 것으로 생각된다. 하지만 TMAZ의 경우는 일부 조직이 조대해졌으나 재결정이 일어나지 않아 쌍정 변형 등 많은 가공경화된 형태를 나타내므로 경도가 높게 나오는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 위에서 설정한 다양한 접합변수들에 대한 인장전단하중을 측정한 그래프이다. 최적 인장전단하중은 1000rpm-2.2mm-2sec의 조건에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 설정한 조건 중 유지시간과 삼입깊이의 경우는 최초 상승하다 정점을 지나 다시 하강하는 분포를 나타내었으나 회전속도의 경우는 최소조건 1000rpm보다 낮은 조건에서는 불충분한 마찰열로 인해 접합이 되지 않는 현상이 관찰되었다.

FSJ의 기계적 특성은 실제로 접합이 이루어져지는 접합부 단면적에 가장 크게 영향을 받는 것으로 추정된다. 하지만 tool의 회전속도의 증가와 tool 삼입 후 유지시간의 증가로 인한 초과되는 마찰열이 발생할 때는

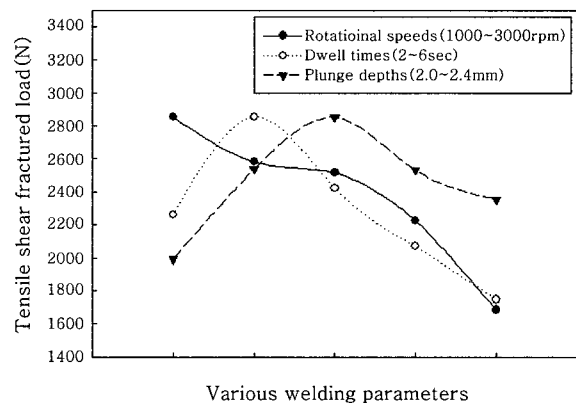


Fig. 4 Tensile shear fractured load as function of various welding parameters in AZ31B-H2

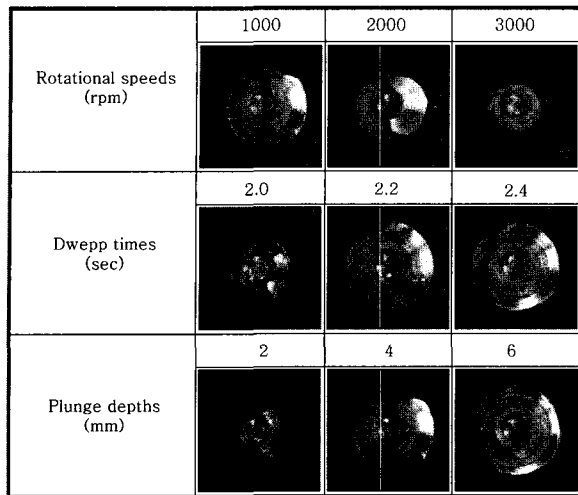


Fig. 5 Fractured shape of FSJ joints in AZ31B-H24

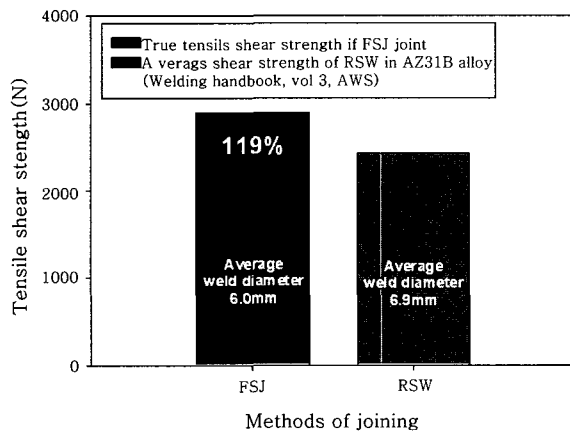


Fig. 6 Comparison of tensile shear fractured load between RSW joints and FSJ joints

상판에서 발생하는 변형 및 과도한 삽입깊이로 인한 상판의 두께로 감소로 인해 실제 인장전단하중은 오히려 감소하는 것으로 사료된다. 이러한 현상은 Fig 5에 나타난 인장전단시험 후 파면형상을 통해서도 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 본 실험에서의 적정조건에서 접합한 접합부의 인장전단강도와 동일두께 동일합금(AZ31B)에 대한 동일 접합부 직경을 지닌 전기저항 점용접(RSW)부의 평균 인장전단강도(Welding handbook, vol 3, AWS)¹¹⁾를 비교한 것이다. 적정조건에서 마찰교반 점용접(FSJ)한 접합부의 인장전단강도는 전기저항 점용접부에 비해 116%의 인장전단강도를 지녔다.

4. 결 론

마찰교반 점용접(FSJ)를 이용하여 전신재 마그네슘

합금 AZ31B-H24에 대해 접합실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

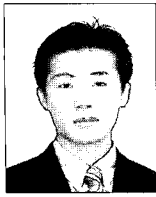
1) AZ31B-H24 합금은 회전속도 1000rpm, 틀 삽입깊이 2.2mm, 틀 삽입 후 유지시간 3sec일 경우 가장 양호한 접합부를 형성하였다.

2) 접합부의 결정립 크기는 약 10 μ m로 모재 약8 μ m에 비해 크게 변하지 않았고 열영향부는 약 20 μ m로 열영향에 의해 조대한 결정립을 지니는 것으로 나타났다.

3) 마찰교반 점 접합부의 인장강도는 허용 전기저항 점용접부의 인장강도(Welding handbook, vol 3, AWS)에 비해 119% 증가한 우수한 접합부가 생성되었다.

참 고 문 헌

1. 박우진, 박익민, 김남준 : 자동차용 경량금속재료의 개발 동향, 자동차공학회지, 016(004), 23-31, 1994 (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, Jea-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. ASTM E 112 : Standard Test Methods for Determining Average Grain Size
6. M. Fujimoto, M. Inuzuka, M. Nishio and Y. Nakashima : Development of Friction Spot Joining, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 74-4 (2004), 4-7 (in Japanese)
7. K.V. Jata, S.L. Semiatin : Continuous Dynamic Recrystallization During Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys, Scripta Mater., 43, 743-749, 2000
8. J.-Q.Su, T.W.Nelson, R. Mishra, M. Mahoney : Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 Aluminum, Acta Materialia, 51, 713-729, 2003
9. 岡村 久宣, 青田 炊也, 板本 征彦, 江角 昌, 他内 建二 : 溶接學會論文, 19-3(2001), 446-456
10. Yutaka .S. Sato, Mitsunori Urata, Hiroyuki Kokawa : Hall-Petch Relationship in Friction Stir Welds of equal channel angular- pressed aluminum alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, 33(3), 625-635, 2002
11. AWS : Welding Handook, Materials and Applications - Part 1, Vol 3, 8th edition, 1996, 121-162



- 조현진(趙顯珍)
- 1978년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철용접성, 고상용접응용기술
- e-mail : balliant@rist.re.kr



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



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



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