솔더 지름과 회전 속도에 따른 AZ31 마그네슘합금의 마찰교반접합 특성

전상혁^a, 고영봉^b, 박경채^{a*}

^a경북대학교 금속신소재공학과, ^b한국화학융합시험연구원

Characteristics of Friction Stir Welded AZ31 Mg Alloys with Shoulder Diameter and Rotating Speed

Sang-Hyuk Jun^a, Young-Bong Ko^b, Kyeong-Chae Park^{a*}

^aDept. of Materials Science and Metallurgy, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

^bKorea Testing & Research Institute (KTR), Seoul 150-038, Korea

(Received February 18, 2013 ; revised February 27, 2013 ; accepted February 28, 2013)

Abstract

Friction stir welding (FSW) is a relatively new joining technique particularly for magnesium and aluminum alloys that are difficult to fusion weld. In this study, AZ31 Mg alloys were joined by FSW with shoulder diameter 11, 19 mm and rotating speed 900, 1200, 1500, 1800 rpm. The shoulder diameter and welding speed depended on the heat input during FSW process. As a result, the microstructures of stir zone were a fine grain by dynamic recrystallization. According to the larger shoulder diameter and the higher rotating speed, refined grain sizes of stir zone were grown by higher heat input, and the microhardness of stir zone was lower. The tensile strength at the shoulder diameter 19 mm, rotating speed 900 rpm was obtained maximum value. This value compared with the base metal was over 93%.

Keywords: Friction Stir Welding (FSW), Shoulder diameter, Rotating speed, Heat input

1. 서 론

최근 증가하는 환경오염 문제와 이에 따른 국제적인 환경규제의 강화와 함께 화석연료의 고갈에 따른 에너지 절약문제가 대두되면서 선진국을 중심으로 이를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 대응하고자 최근에 자동차 산업국가에서는 차체 경량화를 통한 연비 향상 개발에 힘쓰고 있으며, 이에 적합한 마그네슘합금의 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾.

마그네슘은 비중이 1.74 g/cm³으로서 알루미늄의 2/3, 티타늄의 1/3, 철강의 1/5에 해당하고, 현재 사용되고 있는 상용 금속 중에 가장 가벼우며, 지구상의 약 2.7%를 차지하여 나트륨, 칼륨에 이어 8번째로 풍부하게 존재하는 원소 중 하나이다. 하지만

마그네슘은 활성금속으로 고온에서 쉽게 산화되기 때문에 용접 시에 불활성 가스를 사용하여 표면 산화를 방지해야 하고, 철강재료와 비교하여 열전도율과 열팽창계수가 크기 때문에 접합변형이 크다²⁾. 이러한 특성으로 인해 새롭게 개발된 접합법으로 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW)³⁾이 전세계적으로 각광받고 있다.

마찰교반접합은 1991년 영국 TWI(The Welding Institute)에서 개발한 고상용접법으로 마그네슘, 알루미늄 등 경량재료에 적용하여 우수한 용접부 특성을 얻을 수 있었다. 마찰교반접합 공정은 피가공재를 고정시켜 놓고 고속으로 회전하는 툴(tool)을 피가공재에 삽입시킨 후 툴을 피가공재의 표면에 이동시킨다. 이 때 툴과 모재 표면부의 마찰현상을 이용하여 마찰열의 발생시킴과 동시에 소성유동을 일으켜서 조직 재배열 및 파괴 작용 등으로 결정립을 미세화 함으로써 기계적 성질을 향상시킨다.

*Corresponding author. E-mail : kcpark@knu.ac.kr

이에 본 연구에서는 마그네슘합금 중 우수한 기계적 성질과 구조용 재료에 널리 쓰이는 AZ31 마그네슘합금을 회전속도와 솔더(shoulder) 지름에 따라 마찰교반접합을 실시하여 미세조직 및 기계적 성질을 통한 접합 특성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

본 실험에서 사용된 마그네슘 합금은 열간 압연으로 생산된 AZ31 마그네슘 합금 판재를 사용하였고, AZ31 마그네슘 합금의 조성 및 기계적 특성을 표 1과 2에 나타내었다. 시편의 크기는 길이 100 mm × 폭 53 mm × 두께 3.3 mm이며, 접합 전 이물질 제거를 위해 아세톤으로 초음파세척을 실시하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 맞대기 마찰교반접합을 실시하였다. 표 3은 마찰교반접합 조건을 나타내었으며, 접합속도는 100 mm/min으로, 하중은 1 ton으로 일정하게 유지시키고, 회전속도를 변수로 하여 900, 1200, 1500, 1800 rpm으로 수행하였다. 표 4는 마찰교반접합 툴의 크기를 나타내었고, 그림 1은 툴의 모식도를 나타내었다. 툴의 재질은 SKD61종을 사용하였으며, 솔더 지름(D)은 11, 19 mm이고 핀은 윗지름(d1) 6.0 mm, 아랫지름(d2) 4.0 mm, 길이(L)

Fig. 1. Schematic of friction stir welding tool.

3.0 mm의 원뿔형으로 제작하였다. 접합 변수를 간략하게 솔더 지름-회전속도 순으로 표시하였다. 예를 들어 솔더 지름 11 mm-회전속도 900 rpm을 11 mm-900 rpm으로 나타내었다.

접합부의 조직관찰을 위해 시편을 SiC 페이퍼 2000번까지 연마와 0.1 μm 알루미나 파우더를 이용하여 미세연마를 실시한 후 부식용액(피크릭산 4.2 g + 초산 10 ml + 에탄올 70 ml + 증류수 10 ml)으로 에칭하였다. 마크로 조직은 실측현미경을 이용하였고, 미세조직은 광학현미경으로 교반부, 열기계적 영향부, 열영향부, 모재부를 관찰하였다.

접합변수에 따른 접합특성 평가를 위해 인장시험과 경도시험을 행하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 하중 500 gf, 압입시간 10초로 시험하였다. 경도 측정 위치는 접합 시작부에서 50 mm인 곳을 수직 절단한 횡단면을 상판으로부터 1.5 mm 아래지점에 1.0 mm 간격으로 측정하였다. 인장시험은 Zwick/Z030 인장시험기를 사용하였고 시험 속도 1.6×10^{-1} mm/sec로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 접합부 단면 및 미세조직

3.1.1 접합부 단면 조직

입열량은 $Q = \frac{4}{3}\pi^2 \mu PNR^3$ 으로 주어진다. μ 는 저항계수, P 는 압력분포, N 는 회전속도, R 는 솔더 반지름이다⁴⁾. 접합변수인 N 과 R 이 크면 입열량이 커짐을 알 수 있다.

그림 2는 회전속도 및 솔더 지름에 따른 접합부의 횡단면 사진이다. 입열량이 가장 작은 접합조건인 11 mm-900 rpm에서 표면결함이 후진측(retreating side, RS)에 관찰되었다. 이것은 솔더와 모재간의 마찰열이 부족하여 낮은 입열량에 의해 모재의 연화가 전체적으로 충분하게 일어나지 않았기 때문이며 이로 인한 교반부족으로 발생한 결함이라 판단된

Table 1. Chemical compositions of AZ31 Mg alloys

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ca	Mg
3.0	1.0	0.2	0.05	0.05	0.005	0.04	Bal.

Table 2. Mechanical properties of AZ31 Mg alloys.

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness (Hv)
260	171	59

Table 3. Friction stir welding conditions

Tool rotating speed (rpm)	900, 1200, 1500, 1800
Welding speed (mm/min)	100
Load (ton)	1

Table 4. Size of friction stir welding tool(mm)

Shoulder diameter (D)	11, 19
Pin upper diameter (d2)	6.0
Pin lower diameter (d1)	4.0
Pin length (L)	3.0

Fig. 2. A typical macrographs of FSWed cross section on FSW conditions; (a) 11 mm-900 rpm, (b) 11 mm-1800 rpm (c) 19 mm-900 rpm (d) 19 mm-1800 rpm (e) detailed micrograph at round region of (b).

다⁵⁾. 일반적으로 마찰교반접합 공정에서 물질의 이동은 후진측에서 전진측(advancing side, AS)으로 이동하는데 후진측이 입열량 부족으로 인해 연화가 되지 않고 심한 교반에 의해 후진측의 표면부가 떨어져 나간 것으로 사료된다⁶⁾. 11 mm-1800 rpm일 때 내부결함은 전진측의 교반부와 열기계적영향부가 만나는 핀 하단부에서 발생하였고, 이 내부결함의 사진을 그림 2의 (e)에 나타내었다. 결함의 원인은 입열량 부족에 의한 소성유동 부족에 의한 것으로 판단되며, 이런 결함은 slightly higher plastic flows에 의해 없어진다고 보고되었다⁷⁾. 19 mm-900 rpm에서는 결함이 없는 건전한 단면이 관찰되었다. 또한 입열량이 가장 큰 19 mm-1800 rpm일 때 전진측의 표면부에서 핀 하단부까지 결함이 발생하였다. 이는 솔더와 모재간의 높은 마찰열에 의해 교반부가 과연질화와 과교반되어서 plunge depth가 증가함에 따라 회전하는 핀 주변의 전진측에 공공(void)과 날림(flash)이 발생한 것으로 사료된다⁸⁾.

이와 같이 결함의 생성은 회전속도가 증가함에 따라 후진측에서 전진측으로, 상부에서 하부로, 솔더 지름이 증가함에 따라 후진측에서 전진측으로 이동하는 경향을 알 수 있다.

3.1.2 접합부 미세조직

일반적으로 마찰교반 접합부는 교반부(Stir Zone, SZ), 열기계적영향부(Thermo Mechanical Affected Zone, TMAZ), 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ), 모재부(Base Metal, BM)로 분류된다.

그림 3은 19 mm-900 rpm에서 마찰교반접합부의 미세조직 사진이다. (a)는 모재부이며 쌍정조직과

Fig. 3. A typical macrograph of FSWed cross section on 19 mm-900 rpm and detailed micrographs at b, c, d and e regions of (a) : (a) macrograph, (b) BM, (c) HAZ, (d) TMAZ, (e) SZ.

열간압연 및 어닐링 처리에 의한 부분 성장된 결정립으로 이루어져 있다. (b)는 열영향부로 결정립 성장으로 인해 모재보다 조대화되었다. (c)는 열기계적 영향부로 재결정화된 조직과 방향성을 갖는 연신된 결정립들이 관찰되었다. (d)는 교반부로 미세

Fig. 4. Microstructures of central SZ on FSW conditions; (a) 11 mm-900 rpm, (b) 19 mm-900 rpm, (c) 11 mm-1200 rpm, (d) 19 mm-1200 rpm, (e) 11 mm-1500 rpm, (f) 19 mm-1500 rpm, (g) 11 mm-1800 rpm, (h) 19 mm-1800 rpm.

한 재결정립이 생성되었으며, 솔더와 모재의 마찰 열과 핀의 교반력에 의해 동적재결정이 일어난 것으로 판단된다.

회전속도 및 솔더 지름에 따른 교반부의 영향을 알아보기 위해 그림 4에 교반부 중앙의 조직사진을 나타내었다. 회전속도가 증가할수록 솔더 지름이 커질수록 교반부에서 결정립이 조대화되었는데, 이는 입열량의 증가가 원인인 것으로 사료된다⁹⁾.

그림 5는 회전속도 1500 rpm에서 솔더 지름에 따른 열기계적 영향부의 조직사진을 나타내었다. 솔더 지름이 커질수록 열기계적 영향부에서 연신된 조직들의 결정립이 성장되었으며, 이는 솔더에 의한 마찰 면적이 넓어짐에 따른 입열량 증가가 원인이라 판단된다. 또한 전진측의 연신된 조직 방향과 후진측의 연신된 조직방향은 반대 방향이며, 전진

Fig. 5. Microstructures of TMAZ with shoulder diameter at fixed rotating speed 1500 rpm; (a), (c) 11 mm and (b), (d) 19 mm.

Fig. 6. Microstructures of TMAZ with rotating speed at fixed shoulder diameter 19 mm; (a), (c) 900 rpm and (b), (d) 1200 rpm.

측의 경계면이 후진측의 경계면보다 확연히 구분되는데 이는 물질의 이동이 후진측에서 전진측으로 핀 바깥면에서 발생되고, 물질이 후진측에서 전진측으로 채워 넣는 형태가 된다. 이러한 물질이동으로 인해 전진측의 경계면이 확연히 구분되어진다.

그림 6은 솔더 지름 19 mm에서 회전속도 900, 1200 rpm에서의 열기계적 영향부 조직사진이다. 솔더 지름의 크기와 마찬가지로 회전속도가 증가함에 따라서 전진측에서 연신된 조직들의 결정립이 성장되었다.

3.2 경도 및 인장강도

그림 7(a)는 회전속도 1500 rpm에서 솔더 지름에 따른 경도 변화를 나타내었고, (b)는 솔더 지름 19 mm에서 회전속도에 따른 경도 변화를 나타내었다.

Fig. 7. Micro hardness profiles of FSW zone; (a) on shoulder diameter at fixed 1500 rpm (b) on rotating speed at fixed shoulder diameter 19 mm.

경도분포는 좌우 비대칭 형태를 나타내며, 교반부에서 전진측보다 후진측의 경도값이 더 높게 되었는데 이는 물질의 이동이 후진측에서 전진측으로 덜 채워졌기 때문이라고 생각된다¹⁰⁾.

그림 7(a)에서 보듯이 솔더 지름 11 mm에서 교반부의 경도가 모재보다 높은 것을 알 수 있다. 이것은 동적재결정에 의해 생성된 미세결정립의 영향이라 예상된다. 솔더 지름이 19 mm로 증가함에 따라 교반부에서의 경도가 감소하여 열기계적 영향부의 경도보다 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 솔더와 모재간의 마찰 면적이 넓어짐에 따른 입열량 증가로 교반부 중심에서 결정립 성장이 크게 일어나 열기계적 영향부의 연신된 조직보다 큰 결정립의 존재가 원인이라 판단된다. 또한 솔더 지름의 증가에 따른 전진측의 열기계적 영향부에서 경도가 감소하였고, 이것은 그림 5에서 보는 것과 같이 입열량 증가에 따른 열기계적 영향부에서 연신된 조직의 결정립성장이 경도에 영향을 미쳤기 때문이다.

그림 7(b)에서 보듯이 회전속도가 증가함에 따라 전진측의 열기계적 영향부에서 경도가 감소하였고, 이는 그림 6에서 회전속도가 증가함에 따라 연신된 조직의 조대화가 원인이라 판단된다.

그림 8은 회전 속도와 솔더 지름에 따른 인장강도를 나타내었다. 입열량이 가장 작은 조건인 11 mm-900 rpm과 입열량이 가장 조건 19 mm-1800 rpm에서 모재의 인장강도보다 20% 이하의 낮은 인장강도가 나타났다. 이것은 앞에서 언급한 것과 같이 접합 비드면에서 발생한 표면결함이 원인인 것으로 판단된다. 솔더 지름 11 mm, 회전속도 1200, 1500, 1800 rpm에서 모재 인장강도보다 70% 이하의 비교적 낮은 인장강도를 보였다. 이것은 접합부 내부에

Fig. 8. Tensile strength on FSW conditions.

서 발생한 전진측 내부결함의 발생에 따른 영향으로 볼 수 있다.

솔더 지름 19 mm일 때는 표면결함이 발생한 회전속도 1800 rpm을 제외하고 900, 1200, 1500 rpm에서 모재 인장강도보다 90% 이상의 인장강도가 나타났으며, 회전속도 900 rpm에서는 모재 인장강도 93%에 해당하는 242 MPa 값이 나타났으며, 이는 가장 건전한 접합조건이었다.

4. 결 론

회전속도 및 솔더 지름에 따른 AZ31 마그네슘합금 판재의 맞대기 마찰교반접합 후 미세조직 및 기계적 성질을 통하여 접합특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 11 mm-900 rpm일 때 후진측에서 표면결함이 발생하였고, 회전속도가 증가함에 따라 전진측 핀하단에서 내부결함이 나타났다. 19 mm-1800 rpm일 때는 전진측 표면결함이 발생하였다. 솔더 지름이 커지고 회전속도가 증가함에 따라 결함발생이 후진측에서 전진측으로 이동하는 경향을 보였다.

2. 모든 접합조건에서 마찰교반 접합조직인 교반부, 열기계적 영향부, 열영향부가 나타났으며, 회전속도가 증가함에 따라 솔더 지름이 커짐에 따라 입열량 증가에 의해 교반부와 열기계적 영향부의 결정립이 조대화 되었다.

3. 솔더 지름 11 mm 조건에서 교반부의 경도가 모재보다 높게 나타났으며, 이는 동적재결정에 의한 미세한 재결정립이 경도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 솔더 지름이 19 mm 조건에서는 교반

부 중앙에서 열기계적 영향부보다 낮은 경도를 보였다. 이는 입열량 증가에 따라 교반부 중심에서 결정립 성장이 크게 일어나 열기계적 영향부의 연신된 조직보다 큰 결정립의 존재가 원인이라 판단된다.

4. 본 실험조건에서 솔더 지름 11 mm인 경우는 19 mm인 경우에 비해 비교적 낮은 인장강도가 나타났고, 톨의 회전속도가 증가할수록 인장강도가 증가되는 경향을 나타내었다. 그러나, 솔더 지름 19 mm인 경우는 표면결함이 발생한 회전속도 1800 rpm을 제외한 조건에서 모재 인장강도의 90~93%로 나타났고, 톨의 회전속도가 증가할수록 인장강도가 감소되는 경향을 나타내었다.

후 기

이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Richard Johnson, 4th FSW Symposium (2003).
2. Michael M. Avedesian, ASM Specialty Handbook (1999) 12.
3. W. M. Thomas, International Patent Application No. PCT/GB92 Patent Application No. 9125978.8 (1991).
4. Ø. Frigaard, 1st FSW Symposium (1999).
5. Y.-B. Ko, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 42 (2009) 294.
6. Y.-B. Ko, Journal of KWJS, 27 (2009) 595.
7. Z. W. Chen, Materials Science and Engineering A, 474 (2008) 312.
8. Y.-B. Ko, Journal of KWJS, 28 (2010) 34.
9. Y.-B. Ko, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 45 (2012) 181.
10. L. Cederqvist, The Welding Journal Research Supplement, 80 (2001) 281.