



# 마찰교반용접된 AZ61 마그네슘 합금재의 접합강도에 미치는 용접변수의 영향

## Influence of Weld Variables on Joint Strength of AZ61 Magnesium Alloy Sheet under Friction Stir Welding

강대민\* · 박재성\*\*† · 박경도\*\*\*  
 Dae-Min Kang\*, Jae-Sung Park\*\*† and Kyoung-Do Park\*\*\*

(Received 15 May 2019, Revision received 27 November 2019, Accepted 27 November 2019)

**Abstract:** Recently friction stir welding (FSW) method has been applied to lightweight industry owing to the several merits such as low joining defect and high effectiveness. In this study two-way factorial design method was used to evaluate the effect of joint conditions on its yield strength with friction stir welded AZ61 alloy. Joint variables were rotating speed and travel speed of tool, and their levels were 1,000, 1,500 and 2,000 rpm, and 100, 150 and 200 mm/min, respectively. The uniaxial tension tests were carried out for the variance analysis of yield strength, and a hardness measurements and microstructure observations were performed at welded part as well. From the outcomes, the variance analysis resulted in contributiveness of rotation speed of 86% and that of travel speed of 13% to the yield strength. Moreover, the optimal condition of yield strength was found as the rotation speed of 1,000 rpm and welding speed of 150 mm/min, and the presumed yield strength under the conditions was estimated to be a range of  $168.93 \pm 4.59$  MPa in the 95% confidence interval. In addition, microstructure observation and hardness measurement were shown the crystal grain and hardness of the highest yield strength condition was refiner and higher than those of lowest yield strength condition.

**Key Words :** Friction stir welding, AZ61 alloy, Design of experiments, Yield strength, Weld variable

### 1. 서 론

최근 국내외적으로 각종 수송기기의 경량화 연

구가 진행되고 있으며, 이에 따라 경량소재의 용접기술개발 연구 또한 활발히 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 경량소재 중 마그네슘 합금은 비중이 구조

\*\*† 박재성(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6210-9771>) :  
 교신저자, 사원, 연풍기업  
 E-mail : [jaesung1115@naver.com](mailto:jaesung1115@naver.com), Tel : XXXXXXXXXX  
 \*강대민(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6665-5411>) :  
 교수, 부경대학교 기계공학과  
 \*\*\*박경도(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0374-4489>) :  
 교수, 한국폴리텍대학 화성캠퍼스 컴퓨터응용기계과

\*\*† Jae-Sung Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6210-9771>) : Corresponding author, Staff, Yeon Pung Co.  
 E-mail : [jaesung1115@naver.com](mailto:jaesung1115@naver.com), Tel : XXXXXXXXXX  
 \*Dae-Min Kang(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6665-5411>) : Professor, Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.  
 \*\*\*Kyoung-Do Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0374-4489>) : Professor, Department of Computer Application, Korea Polytechnics Hwaseong Campus.

용 금속소재 중에서 가장 낮은 뿐 아니라, 비강도, 비강성, 주조성 등의 특성이 우수하여 다양한 산업분야에서 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 하지만 마그네슘 합금의 용점은 약 650°C로, 타 금속의 용점에 비해 낮아 레이저, 아크 등을 이용한 용융용접을 적용할 시 모재의 증발에 따른 기공, 균열 등이 발생할 수 있다고 알려져 있다.<sup>3,4)</sup> 이러한 문제점을 개선하기 위해 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 마찰교반용접은 공구를 고속으로 회전시킨 후 접합하고자 하는 재료에 접촉시켜 발생하는 마찰열과 소성유동을 이용하는 방법으로 부가적인 용접봉, 용가제 및 별도의 열원이 필요하지 않고 용접 흠, 유해광선 등이 발생하지 않는 용접법으로 양호한 품질을 얻을 수 있다는 장점이 있다.<sup>5)</sup>

이러한 마찰교반용접에 관한 연구로는 H. S. Park 등<sup>6)</sup>에 의해서 Al6061-T6 알루미늄 압출재를 이용하여 공구의 핀 형상, 이송속도, 회전방향에 따른 맞대기 용접에서 접합부의 기계적강도와 조직특성을 분석하여 최적의 용접조건이 구해졌다. 또한 W. B. Lee 등<sup>7)</sup>에 의해서 AZ31 마그네슘 합금재의 마찰교반용접시 용접계면에서 관찰되는 결합의 분포 및 크기가 접합부의 강도에 미치는 영향을 분석하였으나 마그네슘 합금에 대한 마찰교반용접에 대한 연구는 매우 불충분한 실정이다.

본 연구에서는 상용 마그네슘 합금 중 기계적 특성이 우수한 AZ61 마그네슘 합금에 마찰교반용접을 적용하여 대표적인 공정변수인 공구의 이송속도와 회전속도가 접합부의 항복강도에 미치는 영향을 실험계획법으로 분석하여 마찰교반용접시 용접부의 최적공정을 파악하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

본 실험에서 사용한 실험재료는 두께가 2 mm 인 AZ61 마그네슘 합금 판재로 길이 150 mm 폭 100 mm로 제작하여 맞대기용접방식으로 실험하였다. Table 1에는 AZ61 마그네슘 합금의 기계적 특성을 나타내었으며, 화학적 조성은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of AZ61

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Reduction of area (%)	Elongation (%)	Hardness HV
310	210	25	13	60

Table 2 Chemical composition of AZ61 (Wtt.%)

Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Si	Cu	Mg
6.5	0.95	0.325	<0.005	<0.005	<0.1	<0.05	bal.

### 2.2 실험방법 및 조건

#### 2.2.1 용접방법 및 조건

Fig. 1은 마찰교반용접에 사용한 장비들의 모습으로 상용 머시닝 센터의 이송 베드 위에 실험을 위한 지그를 장착하였다.

사용된 지그는 마찰교반용접중 발생하는 시험편의 떨림 및 밀림현상을 방지하기 위해 클램프와 브라켓을 장착하여 시험편을 고정했으며 열전도율이 우수한 황동을 백킹 플레이트로 설치하여 용접 시 발생하는 열을 효과적으로 배출하였다. 또한 공구는 마찰교반용접 시 발생하는 마찰열을 고려하여 열간금형용강인 SKD61로 가공 후 진공 열처리를 하였고 공정제어는 주축의 수직이송제어와 베드의 수평이송제어를 사용하였다. 공구의 재질은 마찰교반용접 시 발생하는 마찰열과 전단력을 고려하여 열간금형용강인 SKD61로 선정하

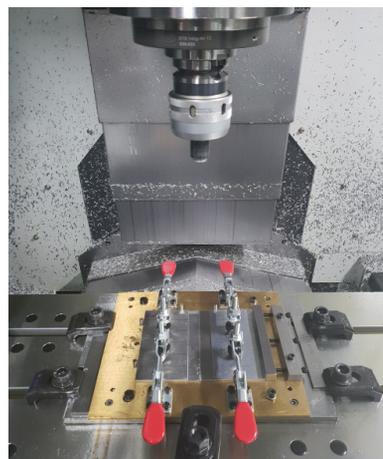


Fig. 1 Experimental equipments for FSW

Table 3 Dimensions of tool for experiment

Item	Shoulder Diameter (mm)	Pin root Diameter (mm)	Pin Length (mm)
Dimension	12	4	1.5

Table 4 Factors and each levels for experiment

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Travel speed A(mm/min)	100	150	200
Rotation speed B(rpm)	1000	1500	2000

여 가공하였으며 진공 열처리를 적용한 후 실험에 사용하였다. 사용된 공구의 주요 치수는 Table 3에 나타내었다.

접합은 판재를 맞대기 방식으로 배치하여 진행하였으며 공구의 회전방향은 시계방향이다. 그리고 수행된 용접길이는 판재의 압연방향과 동일한 방향으로 100 mm이며 공구 삼입 후 유지시간 (Dwell time)은 3초로 적용하였다.

Table 4는 실험에 사용된 용접조건으로 용접변수는 공구의 이송속도와 회전속도로 하여 수준은 3 수준, 특성치는 용접부의 항복강도로 하였다.

### 2.2.2 인장시험 및 경도측정

용접부의 인장시험을 위한 인장시험편은 워터젯 장비를 사용하여 용접부 중앙에 1개씩 제작하였다. 인장시험편의 규격은 KS B 13호로, 표점거리 50 mm, 평행부 길이 60 mm, 어깨부 반지름 R20 mm, 나비 12.5 mm, 물림부 나비 23 mm이다. 또한 인장시험시 인장하중 300 kN, 인장시험속도 1 mm/min로 수행하였다. 횡단면부의 경도 측정하기 위해 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 실험하중 2 kg<sub>f</sub>, 하중지속시간 10초로 하여 측정하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 인장시험기와 경도측정기로서 인장시험기는 인장기의 위쪽에 장착되어 있는 탑 베드가 유압에 의해 수직방향으로 위로 이동하여 시험편에 하중이 주어지는 방식이고 경도측정을 위해 사용된 마이크로 비커스 경도기는

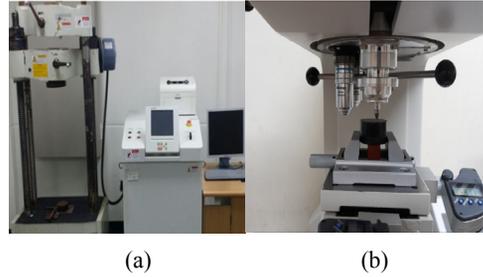


Fig. 2 Tension tester(a) and hardness measurement system(b)



Fig. 3 Welding surface with various welding conditions

시험하중과 하중지속시간 등이 조정가능하며 압입자 흔적의 크기를 부착된 현미경으로 육안 관찰하여 수동 측정하도록 되어 있다.

### 2.2.3 용접부의 미세조직관찰

마찰교반용접 후의 미세조직관찰을 위해 인장시험편의 제작면과 맞닿아있는 용접부 단면에서 시험편을 채취하여 관찰하였다. 이것을 위해 사용된 장비는 Olympus사의 금속현미경 BX60M 모델이며 50배율부터 500배율까지 배율 조정이 가능하고 관찰은 200배율로 촬영하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 접합부의 관찰

Fig. 3은 위로부터 이송속도가 100 mm/min인 상태에서 공구회전속도가 각각 1,000, 1,500, 2,000 rpm인 조건에서의 마찰교반용접된 재료의 용접부 표면을 나타낸 것으로 마찰교반된 용접부 표면은 육안으로 관찰한 결과 매우 깨끗하게 나타났다.

3.2 분산분석 결과

Table 5는 인장시험을 통하여 얻어진 항복강도를 바탕으로 분산분석 결과이다.

여기서 A는 공구의 이송속도, B는 공구의 회전속도를 나타내고 E는 오차, S는 제곱합,  $\Phi$ 는 자유도, V는 제곱평균이다. 그리고  $F_0$ 는 각 요인들의 제곱평균을 오차분산으로 나눈 값으로 F 검정에 사용되어 특성치에 미치는 영향을 나타낸다.

이 결과 95% 신뢰도의 유의수준보다 공구의 이송속도와 회전속도의  $F_0$  값이 크게 나타나 두 공정변수 모두 특성치인 용접부 항복강도에 유의한 영향을 미치는 것으로 생각된다.

Table 6은 용접변수들의 수준에 따라 모평균 및 구간추정을 한 결과를 나타낸 것이다. 모평균 추정 결과, 공구의 이송속도가 2 수준인 A<sub>2</sub>와 공구의 회전속도가 1 수준인 B<sub>1</sub>의 조합인 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>이 실험 범위 내 최적공정조건으로 분석되었으며 95%의 신뢰구간에서 168.93±4.59 MPa의 항복강도를 가질 것으로 추정되었다.

Fig. 4는 용접부의 항복강도 결과값의 공구의 이송속도 및 회전속도의 수준변화에 따른 모평균 추정 데이터를 도식화하여 나타낸 것으로 모평균 값의 변화율은 용접변수들의 수준변화가 용접부 항복강도에 미치는 영향을 나타낸다.

이 결과를 보면 공구의 이송속도는 1 수준에서 2 수준으로 수준이 증가할 때에는 용접부 항복강도가 증가하였다가 2 수준에서 3 수준으로 수준이 증가함에 따라서는 용접부 항복강도는 감소하여 2 수준인 150 mm/min에서 가장 높은 항복강도 값을 나타냈다. 반면 공구의 회전속도는 수준이 증가함에 따라 용접부의 항복강도를 감소시키는

Table 5 Results of variance analysis

ANOVA TABLE	S	$\Phi$	V	$F_0$	F(0.05)
A	231.26	2	115.63	23.52	6.94
B	1465.63	2	732.82	149.03	6.94
E	19.67	4	4.92	1.00	
T	1716.56	8	853.36		

Table 6 Estimated yield strength for each factors

Factors	Point estimation	Confidence interval	+	-
A <sub>1</sub>	147.75	3.55	151.31	144.20
A <sub>2</sub>	153.97	3.55	157.52	150.41
A <sub>3</sub>	141.56	3.55	145.10	138.00
B <sub>1</sub>	162.72	3.55	166.28	159.17
B <sub>2</sub>	149.01	3.55	152.56	145.45
B <sub>3</sub>	131.54	3.55	135.09	127.99
95%	168.93	4.59	173.52	164.35

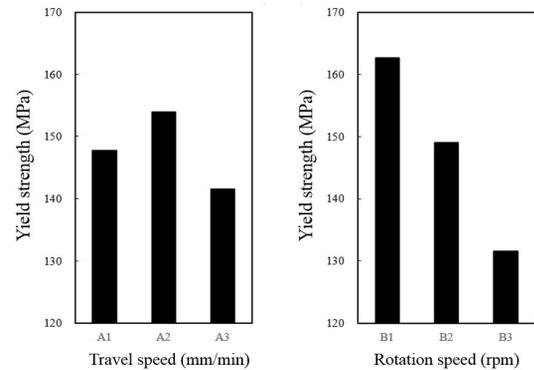


Fig. 4 Yield strength vs. welding factors

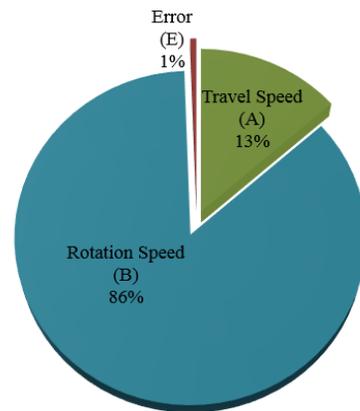


Fig. 5 Contribution of weld factors

경향을 나타내는 것으로 나타나 회전속도가 1,000 rpm 조건에서 제일 큰 값으로 나타났다.

Fig. 5는 항복강도를 바탕으로 분산분석을 한 결과를 토대로 공구의 이송속도와 회전속도가 용접부 항복강도에 미치는 기여도를 나타낸 것이다.

이 결과에서 공구의 이송속도는 약 13%, 공구의 회전속도는 약 86%의 영향을 용접부 항복강도에 미치는 것으로 나타나 용접부의 항복강도에 공구의 회전속도가 공구의 이송속도보다 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

### 3.3 미세조직관찰과 경도측정결과

Fig. 6은 용접부의 항복강도가 제일 낮은 조건인 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>조건과 제일 높은 조건인 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>조건에서 교반부의 미세조직사진을 나타낸다. 이 사진에서 항복강도가 제일 높은 조건인 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>에서의 결정립이 항복강도가 제일 낮은 조건인 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>조건에서의 결정립보다 더 미세하게 나타났다.

Fig. 7은 항복강도가 가장 높게 측정된 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub> 조건과 항복강도가 가장 낮게 측정된 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub> 조건의 마이크로 비커스 경도 측정 결과이다.

여기서 경도 측정위치는 용접 표면으로부터 1 mm 아래이며, 등간격으로 30 포인트씩 측정하였다. 이 결과, 두 조건의 경도 분포 모두 용접부의 열 영향부와 열-기계적 영향부에서는 경도가 감소하는 반면 교반부에서는 경도가 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

이것은 용접시 접합부의 열영향부와 열-기계적 영향부에서는 공구의 솔더부와 마찰로 인해 입열량이 증가함에 따라 결정립이 성장하는 것이 경도 감소의 주 원인이며<sup>8)</sup>, 교반부에서는 마찰열 및 공구 핀의 회전에 의한 동적재결정으로 결정

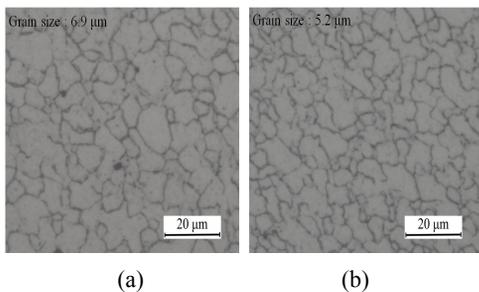


Fig. 6 Microstructure of stir zone under A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>(a) and A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>(b) conditions

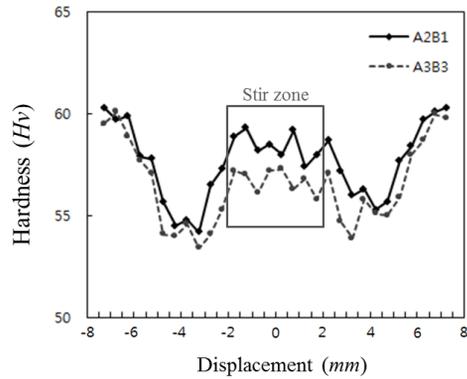


Fig. 7 Hardness of welded zone under A<sub>2</sub>B<sub>1</sub> and A<sub>3</sub>B<sub>3</sub> conditions

립 미세화로 인해 경도가 증가한다고 추측된다. 또한 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub> 조건의 교반부 경도 측정값이 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub> 조건의 교반부 경도보다 전반적으로 높게 나타난 것은 입열량이 보다 적은 조건인 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>의 교반부 결정립이 입열량이 보다 큰 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub> 조건의 교반부 결정립보다 미세하기 때문이라 생각된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 AZ61 마그네슘 합금재를 마찰 교반용접으로 접합하여 용접부의 인장시험, 경도 측정 및 미세조직사진관찰을 행한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 용접부의 항복강도를 바탕으로 한 분산분석 결과, 공구의 이송속도 및 회전속도 모두 용접부의 항복강도에의 영향은 유의하였고, 항복강도에 대한 기여도는 공구의 회전속도가 약 86%, 공구의 이송속도가 13%으로 나타나 공구의 회전속도가 이송속도보다 용접부의 항복강도에 미치는 기여도가 컸다.

2) 용접변수들의 수준에 따라 모평균 및 구간추정을 한 결과, 이송속도 150 mm/min, 회전속도 1,000 rpm인 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>이 실험 범위 내 최적공정조건으로 분석되었으며 95%의 신뢰구간에서 추정된 항복강도는 168.93±4.59 MPa이었다.

3) 용접부의 항복강도가 제일 높은 조건인 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub> 조건과 제일 낮은 조건인 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>조건에서 교반부의

미세조직사진과 경도치를 비교한 결과, A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>에서의 결정립이 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>조건에서의 결정립보다 더 미세하게 나타났고 측정된 경도치는 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>에서의 경도치는 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>조건에서의 경도보다 전반적으로 높게 나타났다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

## Author contributions

D. M. Kang; Conceptualization, Supervision, Writing-review & editing. J. S. Park; Formal analysis, Investigation, Validation, Writing-original draft. K. D. Park; Data curation, Project administration, Visualization.

## References

1. Y. Zhongqi, L. Zhongqin and Z. Yixi, 2007, "Evaluation of Fracture Limit in Automotive Aluminum Alloy Sheet Forming", *Material and Design*, Vol. 203, pp. 203-207.
2. D. M. Kang, D. Y. Lee, K. D. Park, 2017, "The Effects of Joining Factors on Strength of Al 6061 Alloy in FSW", *The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 86-91.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.5.086>)
3. C. O. Kim and S. J. Kim, 2011, "Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 61-68.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2011.15.2.061>)
4. D. M. Kang, K. D. Park and Y. S. Jung, 2013, "A Study on the Friction Stir Welding Characteristics of AZ31 Mg Alloy by the Design of Experiment", *Transactions of KSAE*, Vol. 21, No. 4, pp. 77-82.  
(<https://doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.4.077>)
5. C. O. Kim, H. J. Sohn and S. J. Kim, 2011, "Friction Stir Welding of 7075-T651 Aluminum Plates and Its Fatigue Crack Growth Property", *Journal of Mechanical Science and Technology A*, Vol. 35, No. 10, pp. 1347-1353.  
(<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.10.1347>)
6. H. S. Park, Y. H. Lee, W. D. Choi and J. B. Ko, 2008, "A Study on the Effect that Pin Shape and Welding Speed have an Influence on Mechanical Strength in Friction Stir Welding al6061-T6", *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 22-28
7. W. B. Lee, K. S. Bang, Y. M. Yoen and S. B. Jung, 2002, "The Effects of Welding Conditions on the Joint Properties of the Friction Stir Welded AZ31B-H24 Mg Alloys", *Korean welding society*, Vol. 20, No. 5, pp. 663-668
8. Y. S. Sato, M. Urata, H. Kokawa and K. Ikeda (2003) "Hall - Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys", *Materials Science and Engineering, A*, Vol. 354, No. 1, pp. 298-305