

AZ31와 AZ61 마그네슘 합금의 이종 마찰교반용접 특성

박경도*, 이해진**, 이대열*, 강대민***, #

*대한상공회의소 부산인력개발원, **한국폴리텍대학 동부산캠퍼스, ***부경대학교 기계공학과

Dissimilar Friction Stir Welding Characteristics of Mg Alloys(AZ31 and AZ61)

Kyoung Do Park*, Hae Jin Lee**, Dai Yeol Lee*, Dae Min Kang***, #

*Human Resources Development, The Korea Chamber of Commerce & Industry,

**Dong Busan Campus of Korea Polytechnic

***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received 3 July 2017; received in revised form 31 July 2017; accepted 19 September 2017)

ABSTRACT

Friction stir welding is a solid-state joining process and is useful for joining dissimilar metal sheets. In this study, the experimental conditions of the friction stir welding were determined by the two-way factorial design to evaluate the characteristics of the dissimilar friction stir welding of AZ31 and AZ61 magnesium alloys. The levels of rotation speed and welding speed, which are welding variables, were 1000, 2000, 3000 rpm and 100, 200, 300 mm/min, respectively. From the results, the greater the rotation speed and the lower the welding speed of the tool were, the greater the tensile strength of the welded part was. The contribution of the welding speed of the tool is larger than that of the rotation speed of the tool. In addition, the optimal conditions for tensile strength in the dissimilar friction stir joint were predicted to be the rotation speed of 3000 rpm and welding speed of 100 mm/min, and the tensile strength under the optimal conditions was estimated to be 214 ± 6.57 Mpa with 99% reliability.

Key words : Dissimilar Friction Stir Joint(이종마찰교반용접), Magnesium Alloy(마그네슘 합금), Two-way Factorial Design(이원배치법), Tensile Strength(인장강도), Welding Condition(용접조건)

1. 서 론

마그네슘 합금은 실용되고 있는 구조용 금속 중 가장 가벼운 금속으로서 항공기 및 각종 수송기, 전자제품의 몸체 등 경량화가 필요한 많은 분야에서 널리 사용되고 있다. 이와 같은 마그네슘 합금의 용접법으로는 일반적으로 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding, TIG) 및 GMAW(Gas Metal Arc Welding, MIG) 등 아크를 이용한 용접법을 주로 사

용하고 있으나 이것은 용접변형 및 용접결함이 생기는 등 많은 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 고상 용접법인 마찰교반용접의 이용이 활발히 시도되고 있다.^[1-3]

마찰교반용접은 TWI(The welding of institute)에서 1991년에 개발한 용접법으로 특수하게 제작된 용접 공구를 사용하여 공구와 모재의 마찰열과 모재의 교반을 이용한 소성유동을 통해 모재를 완전히 녹이지 않는 상태에서 용접이 이뤄지므로 기존의 용융용접에 비하여 결함 및 유해기체가 발생하지 않는 등 매우 많은 장점을 지녀 적용범위가 점차 확대되어지고 있다.

Corresponding Author : dmkgang@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6134

이에 관한 연구로는 W. B. Lee^[4] 등이 마그네슘 합금의 마찰교반용접에 관한 기초연구를 하였고 H. S. Park^[5], S. K. Jang^[6] 등은 용접 공구의 형상과 이송 및 회전 속도가 용접부의 기계적 특성과 피로 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 R. Johnson^[7] 등에 의해 마그네슘합금의 용접에 대해 연구되었으나 이것은 동종재료의 용접에 대한 내용으로 적용범위를 확대하기 위해서는 이종재료의 용접에 대한 연구가 절실한 실정이다.

본 연구에서는 마그네슘 합금 중 많이 사용하는 AZ31과 AZ61의 이종 접합시 접합변수가 용접부 인장강도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 이를 위해 용접변수로는 접합시 주요한 인자인 공구의 회전속도와 이송속도로 하고 실험조건은 실험계획법 중 이원배치법을 사용하여 설정하였다.

2. 마찰교반용접 실험

2.1 실험재료 및 공구

본 실험에서 사용한 재료는 Table 1, 2에 나타난 것과 같이 화학조성과 기계적 성질을 지닌 Mg-Al-Zn계인 AZ31과 AZ61 마그네슘 합금으로 기계적 성질을 개선하는 효과가 있는 Al을 각각 3%와 6%, 내식성 및 강도를 개선하는 효과가 있는 Zn을 1% 함유한다.

Table 1 Chemical composition of magnesium alloys(Wt.%)

Alloys	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Si	Cu	Mg
AZ31	3.10	1.07	0.30	0.005	<0.001	<0.005	<0.005	bal.
AZ61	6.50	0.95	0.30	0.005	<0.005	<0.100	<0.050	bal.

Table 2 Mechanical properties of magnesium alloys

Alloy	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Reduction of area (%)	Elongation (%)	Hardness HV
AZ31	274	182	29.4	16.2	55
AZ61	314	210	25.0	13.0	60

Table 3 Tool measurement used in experiment

Item	Tool
Shoulder diameter (mm)	15
Pin root diameter (mm)	3
Pin length (mm)	1.5
Shoulder angle (°)	3
Pin taper angle (°)	10
Material	SKD61 (tool steel)

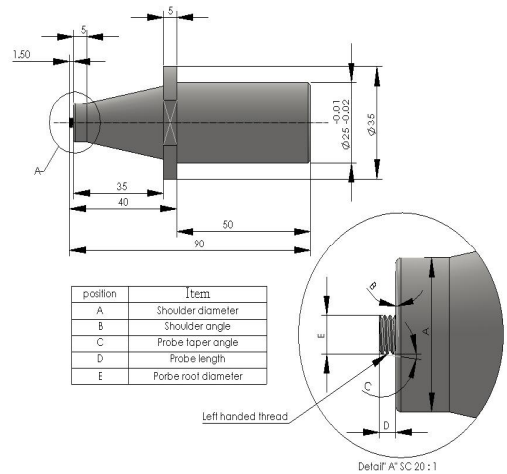


Fig. 1 Geometry of the tool

마찰교반용접을 위한 실험 재료는 두께가 2mm의 판재를 100×150 mm로 절단한 후 맞대기 방식으로 용접하였다.

Table 3에 실험에 사용된 마찰교반용접 공구의 치수 및 제원을 표시하였으며 Fig. 1에 마찰교반용접 공구의 제작 도면 및 가공 형상을 나타내었다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 2에 나타난 것과 같이 MCT(Machining Center Tooling System, 모델: MYNX400)를 이용하여 마찰교반용접 실험을 수행하였다. 특수하게 제작된 지그로 시험편을 클램핑을 하였으며 예비실험을 통해 공구의 회전방향과 테이블의 이송방향이 반대인 AS(Advancing Side) 부에서 파단이 발생하는 것을 확인하여 AS부에 모재의 인장강도 값이 높은

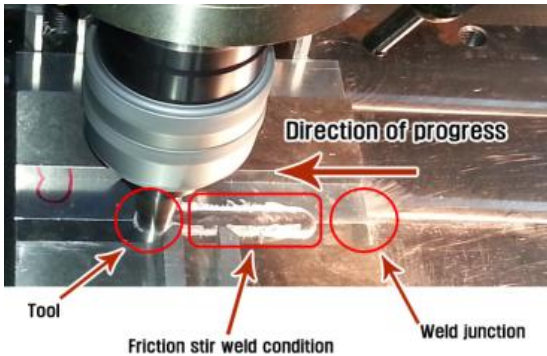


Fig. 2 Experimental equipment for FSW

Table 4 Factors and each levels for experiments

Factor \ Level	Level 1	Level 2	Level 3
Rotation speed (rpm), (A)	1000	2000	3000
Welding speed (mm/min), (B)	100	200	300

AZ61 시험편을 배치하고 회전방향과 테이블의 이송방향이 같은 RS(Retreating Side)부에 AZ31 시험편을 배치하였다. 또한 핀 부가 용접부에 완전히 삽입되고 솔더 부도 0.2mm 이상 시험편에 삽입되어 마찰열을 충분히 발생시킬 수 있도록 하였다.

2.3 실험조건

Table 4에 본 실험에서 사용된 변수와 수준을 나타내었다. 대표적인 마찰교반용접 변수인 공구의 회전속도와 테이블의 이송속도가 용접부 인장강도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 반복이 있는 이원배치법의 원리를 적용하여 실험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마찰교반 용접부 표면 및 단면

Fig. 3은 공구 회전속도를 3000 rpm으로 유지하고 테이블의 이송속도를 100, 200, 300 m/min으로

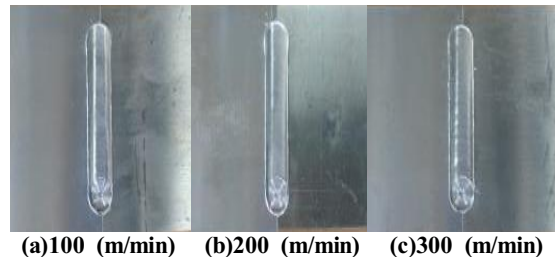


Fig. 3 The welding parts for various welding speed at 3000 (rpm)

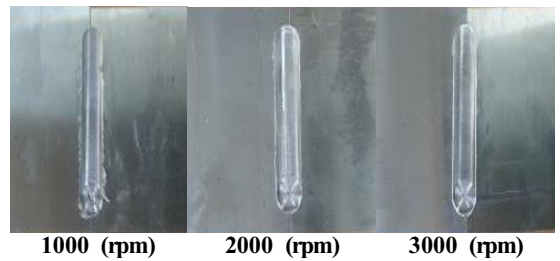


Fig. 4 The welding parts for various rotation speed at 100 (m/min)



Fig. 5 Cross-sectional shape of welding parts

증가시켜 100mm 길이로 마찰교반용접을 실시한 결과를 좌에서 우로 나타내었다.

용접부 표면을 육안으로 확인한 결과 용접 결함은 나타나지 않았으며 테이블의 이송속도가 증가할수록 용접부 표면이 전반적으로 약간 거칠게 나타났다.

Fig. 4는 테이블의 이송속도를 100 mm/min으로 유지하고 공구의 회전속도를 1000, 2000, 3000 rpm으로 증가시켜 100mm 길이로 마찰교반용접을 실시한 결과를 좌에서 우로 나타내었다. 용접부 표면을 육안으로 확인한 결과 용접 결함은 나타나지 않았으며 공구의 회전속도가 증가할수록 용접부 표면이 약간 매끄러운 형태를 나타냈다.

Fig. 5는 용접부 단면을 현미경으로 50배 확대하여 나타낸 사진이다.

No.1은 용접부 인장강도가 가장 낮은 조건으로서 핀 부가 삽입된 중앙을 기준으로 원활하게 소성유동이 이뤄지지 않았으며 No. 2는 용접부 인장강도가 가장 높은 조건으로 중앙 핀 부를 기준으로 충분한 입열량으로 인해 두 개의 소재가 원활하게 교환되어 있는 것으로 나타났다.

3.2 마찰교반용접된 재료의 인장실험

Fig. 6은 인장시험을 위한 시험편으로 ASTM E8 standard 표준 규격을 적용하였고 인장시험편 절단시 발생할 수 있는 열영향을 최소화하기 위하여 T300-3015 워터젯 장비를 사용하여 제작하였다.

Table 5는 적용된 공구의 회전속도와 접합속도에 따른 인장실험한 결과로서 전반적으로 공구의 이송속도가 증가할수록 접합부 인장강도는 감소하

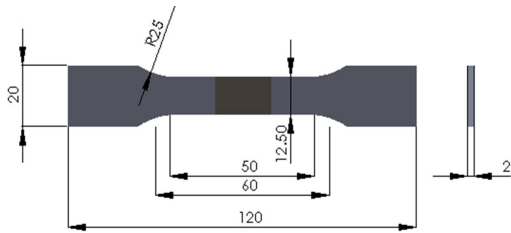


Fig. 6 Specimen for tensile test

Table 5 Tensile strengths of FSW at various condition

No.	Factors		Tensile strength(MPa)	
	Rotation speed (rpm), (A)	Welding speed (mm/min), (B)	case1	case2
1	1000	100	203.54	200.15
2	1000	200	191.24	185.12
3	1000	300	176.15	180.45
4	2000	100	210.16	203.15
5	2000	200	195.74	198.36
6	2000	300	180.32	182.44
7	3000	100	218.11	215.65
8	3000	200	207.56	193.15
9	3000	300	187.12	190.61

Table 6 ANOVA for tensile strength before pooling

	S	∅	V	F ₀	F _(0.05)	F _(0.01)
A	477.66	2	238.83	12.15	4.26	8.02
B	1968.72	2	984.36	50.08	4.26	8.02
A×B	34.80	4	8.71	0.44	3.63	6.42
E	176.91	9	19.66			
T	2658.09	17				

였으나 회전속도는 증가할수록 접합부 인장강도는 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 회전속도의 변화에 따른 접합부 인장강도 결과 값보다 이송속도 변화에 따른 접합부 인장강도 결과 값이 다소 큰 차이를 나타내는 것으로 보아 이송속도가 접합부 인장강도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

3.3 분산분석

Table 6에 마찰교반용접시 용접 변수들이 용접부 인장강도 특성에 미치는 영향에 대해 분산분석을 실시한 결과이다.

여기서 A는 공구의 회전속도, B는 테이블의 이송속도, A×B는 교호작용, E는 오차, T는 총변동으로서 A, B, A×B, E의 합을 나타낸다. S는 변수의 변동, ∅는 자유도, V는 변수의 변동을 자유도로 나눈 평균제곱, F₀는 V를 오차로 나눈 평균제곱의 비를 나타낸다. 총 변동, 각 변수들의 변동, 교호작용, 오차의 변동은 각각 식 (1) ~ 식(4)에 의하여 계산되었고 식 (1)과 식 (2)에 포함되어있는 CT 값은 총변동 T의 제곱을 A, B 변수의 수준수 l, m와 반복횟수 r의 곱으로 나눈 값으로 식 (5)에 나타내었다.

$$S_T = \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk}^2 - CT \quad (1)$$

$$S_{A,B} = \sum_{i,j} \frac{T_{i,j}^2}{lmr} - CT \quad (2)$$

$$S_{A \times B} = S_{AB} - S_A - S_B \quad (3)$$

$$S_E = S_T - S_{AB} \quad (4)$$

Table 7 ANOVA for tensile strength after pooling

	SS	∅	V	F ₀	F _(0.05)	F _(0.01)
A	477.66	2	238.83	14.67	3.81	6.70
B	19687.72	2	984.36	60.44	3.81	6.70
E	211.71	13	16.29			
T	2658.09	17				

Table 8 Estimate of population for each factors

Factors	Point estimation	Confidence interval	+	-
A1	189.44	3.42	192.86	186.02
A2	195.03	3.42	198.45	191.61
A3	202.03	3.42	205.45	198.62
B1	208.46	3.42	211.88	205.04
B2	195.20	3.42	198.61	191.78
B3	182.85	3.42	186.27	179.43
95%	214.99	4.59	219.59	210.40
99%	214.99	6.41	221.40	208.59

$$CT = \frac{T^2}{lmr} \quad (5)$$

한편 용접부 인장강도를 특성치로 선정하여 분산 분석한 결과 공구의 회전속도와 테이블의 이송속도 간의 교호작용은 검출되지 않아 Table 7에서 회전속도와 이송속도의 교호작용을 오차항에 풀링하여 다시 분산분석한 결과를 나타내었다.

이중 마그네슘합금의 마찰교반용접시 공구의 회전속도와 테이블의 이송속도 변화 모두 신뢰구간 99% 유의수준까지 용접부 인장강도 특성치에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 8은 분산분석 후의 추정을 위해 A, B 각 변수들에 대하여 모평균 및 구간추정을 실시하여 나타내었다. 공구의 회전속도는 3수준에서 가장 높은 값을 나타냈으며 테이블의 이송속도는 1수준에서 가장 높은 값을 나타내었다. 따라서 이중 마그네슘합금의 마찰교반용접시 용접부 인장강도를 최대로 갖는 최적 공정 조건은 A₃B₁으로 99% 신뢰구간에서 214.99±6.41Mpa로 추정되고 본 실험에서 실

시한 실험 조건 중 A₃B₁ 조건에서의 용접부 인장강도는 99% 신뢰구간의 추정 결과 범위 내에 포함되었다. Fig. 7, 8 등은 용접부 인장강도 결과를 바탕으로 각 변수들의 수준별 모평균을 정리한 결과로서 모평균 값의 변화율인 기울기는 변수들의 수준별 변화가 용접부 인장강도 특성에 미치는 영향을 나타낸다. 공구의 회전속도가 증가할수록 용접부 인장강도는 증가하는 경향을 나타냈으며 테이블의 이송속도가 증가할수록 용접부 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 공구의 회전속도 증가로 발생하는 마찰열보다 테이블의 이송속도가 증가하면서 재료 내부의 충분한 교반을 통한 소성유동이 이뤄지지 않는 것이 용접부 인장강도 특성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

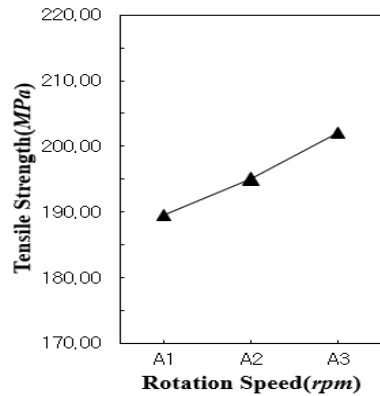


Fig. 7 Tensile strength vs. rotation speed of tool

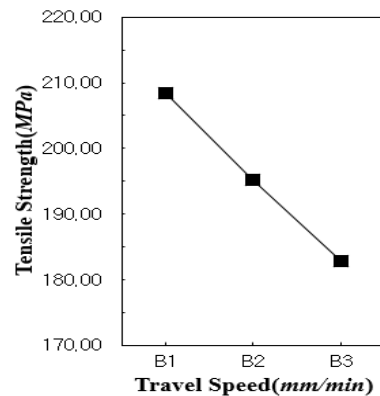


Fig. 8 Tensile strength vs. welding speed of tool

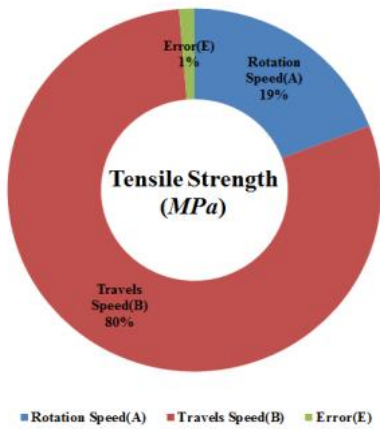


Fig. 9 The contribution of welding factors on tensile strength

Fig. 9는 마찰교반용접시 용접 변수들이 용접부 인장강도에 미치는 기여도를 평가한 결과이다.

여기서 보면 80%의 기여도를 가지는 테이블의 이송속도가 19%를 지니는 공구의 회전속도보다 용접부 인장강도 특성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 AZ31 마그네슘 합금과 AZ61 마그네슘합금의 이중 마찰교반용접시 공구의 회전속도와 테이블의 이송속도를 변수로 하여 이원배치법으로 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 용접부 인장강도에 대해 분산분석을 실시한 결과, 공구의 회전속도 변화와 테이블의 이송속도 변화 모두 용접부 인장강도 특성에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며 두 변수들간의 교호작용은 검출되지 않았다.
- 2) 공구의 회전속도가 증가할수록 용접부 인장강도는 증가하는 경향을 보였으며 테이블의 이송속도가 증가할수록 용접부 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 용접부 인장강도에 대한 최적조건은 공구의 회전속도 3000 rpm, 테이블의 이송속도 100 mm/min 으로 분석되었고 이 조건에서 용접부

인장강도의 추정치는 99% 신뢰구간에서는 214.99 ± 6.41 Mpa으로 나타났다.

REFERENCES

1. Kim, J. D., Kim, K. H. and Yoon, M. C., "Decision-Making Method of Priority Welding Process", Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 5, pp. 39-47, 2016.
2. James, M. N., Hattingh, D. G. and Bradley, G. R., "Weld Tool Travel Speed Effects on Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083 Aluminum", International Journal of Fatigues, No. 25, pp. 1389-1398, 2003
3. Kang, D. M., Park, K. D., Kang, J. Y., "Friction Stir Welding Characteristics of AZ31 Mg Alloy by Orthogonal Array", Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 16-21, 2012.
4. Lee, W. B., Yeon, Y. M., Shur, C. C., Jung, S. B., "Bonding of Magnesium Alloys by Friction Stir Welding", Journal of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 19, No. 6, pp. 23-28, 2001.
5. Park, H. S., Lee, Y. H., Choi, W. D., Ko, J. B., "A Study on the Effect that Pin Shape and Welding Speed have an Influence on Mechanical Strength in Friction Stir Welding Al6061-T6", Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 17, No. 4. pp. 22-28, 8. 2008.
6. Jang, S. K., Han, M. S., Jeon, J. I., "Effects of Tool Rotation and Transition Speed during Friction Stir Welding of Al 7075-T651 Alloy", Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 11, No. 4, pp. 532-539, 2007.
7. Richard Johnson, "Friction Stir Welding of Magnesium Alloys", 4th International Friction Stir Welding Symposium - Utah, USA, 14-16, May 2003.