

Al 6061 합금의 마찰교반용접 시 접합변수가 강도에 미치는 영향

The Effects of Joining Factors on Strength of Al 6061 Alloy in FSW

강대민* · 이대열** · 박경도****

Dae-Min Kang*, Dai-Yeal Lee** and Kyoung-Do Park****

(Received 04 September 2017, Revision received 27 September 2017, Accepted 28 September 2017)

Abstract: Friction Stir Welding (FSW) is useful technique to join aluminum alloy with energy efficient and environment friendly. In this paper, the design of experiment with three-way factorial design was adopted for optimum conditions of welding variables in the FSW of Al 6061 alloy. Tools of shoulder diameter of 9, 12, 15 mm and pin length of 1.5 mm were used. Also the material's dimension for welding were 2×100×150 mm, and the tensile specimens were worked by water-jet technique. Welding variables were shoulder diameter, rotating speed and travel speed of tool. From the results of this work, the welding factor influenced on yield strength most was travel speed and the optimum condition for FSW was predicted as the shoulder diameter of 15 mm, welding speed of 500 mm/min and rotating speed of 2,000 rpm. Also the presumption range of yield strength at optimal condition of reliability 99% was estimated to 207.19±9.91 MPa.

Key Words : Friction Stir Welding, Al 6061 Alloy, Three-way Factorial Design, Yield Strength, Welding Variables

1. 서 론

최근 들어 지구 환경 보호와 에너지 절감에 대한 요구가 높아짐에 따라 자동차, 항공기, 철도차량, 선박 등 각종 수송기기의 경량화를 위한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 수송기기의 경량화를 위한 소재로는 현재 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 및 티타늄 합금 등의 비철합금 소재의 수요가 크게 증가하고 있고, 그 중에서도 알루미늄 합금은 많은 분야에서 경량 재료로 주목받고 있다.

그러나 알루미늄 합금은 강판에 비해 열전도 및 비열이 높고 전기저항이 낮아 발열은 어려운 반면 방열은 쉬워 일반 용접으로는 접합이 어려운 점이 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 기존 아크 용접법에 비해 용접 변형이 적고 흠(fume)과 스패트(splatter)가 발생하지 않아 기계적 성질이 우수한 장점을 지닌 고상용접법인 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)의 적용이 시도되고 있다¹⁻⁴⁾. 이러한 마찰교반용접법은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발된

**** 박경도(교신저자) : 대한상공회의소 부산인력개발원
E-mail : 5151644@naver.com, Tel : 051-629-6134

*강대민 : 부경대학교 기계공학과

**이대열 : 대한상공회의소 부산인력개발원

**** Kyoung Do Park(corresponding author) : KCCI.
E-mail : 5151644@naver.com, Tel : 051-629-6134

*Dae-Min Kang : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

**Dai Yeal Lee : KCCI.

기술로서 미국과 유럽 그리고 일본을 중심으로 꾸준히 발전하고 있으며, 적용 재료는 알루미늄 합금으로 출발하여 비철금속뿐만 아니라 탄소강, 스테인리스강에까지 사용 범위가 확대되는 추세에 있다. 이 중 알루미늄 합금에 적용한 연구로는 Jang과 Shin⁵⁾ 등이 용접 공구의 치수를 변화시켜 Al합금에 대한 용접부의 인장 강도를 최대로 만드는 용접 조건을 평가하는 연구를 하였고, Won과 Kim⁶⁾ 등은 마찰교반 용접된 철도 차량용 A6005 압출재의 기계적 성능 향상을 위한 최적 공법 설계에 관한 연구를 하였다. 또한 Kim과 Lee⁷⁾ 등에 의해 공구의 회전수 및 용접속도를 변화시켜 열처리에 따른 알루미늄합금의 기계적 물성치와 미세조직 특징에 대해 언급하였으나 마찰교반용접시 용접부의 강도에 대해 체계적으로 제시하고 있는 연구는 많지 않다.

본 논문에서는 6061 알루미늄 합금의 마찰교반 용접시 중요한 용접 변수인 공구의 솔더지름, 공구의 회전속도와 이송속도를 변수로 선정하여 실험계획법^{8,9)}을 이용하여 용접 변수가 용접부의 강도에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료 및 공구

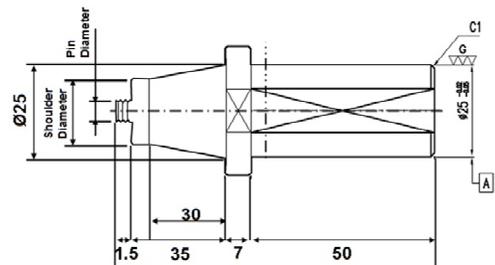
본 실험에서 사용되는 6061 알루미늄 합금은 기계적 강도가 높아 경량, 고 강도를 요구하는 자동차용 범퍼 등에 사용되며, Mg과 Si의 함량이 많고 인성과 피로강도를 개선하기 위해 Mn, Cr, Cu 량도 증가된 6000계열 Al-Mg-Si 합금이다. 이러한 시판용 6061 알루미늄 합금의 마찰교반용접 실험을 위해 두께 2 mm의 판재를 가로길이 100 mm, 세로길이 150 mm의 판재로 정밀하게 가공하여 맞대기 용접에 사용하였다. Table 1은 6061 알루미늄 합금의 화학성분을 나타낸다. Table 2는 마찰교반용접에 사용된 공구의 치수 및 제원을 나타내고 Fig. 1은 실험에 사용되었던 공구의 제작도면과 실제 가공된 공구로서 핀의 형상은 널리 사용되고 있는 나사형 핀으로 제작하였다.

Table 1 Chemical composition of Al 6061 alloy(Wt.%)

Al	Cr	Ti	Mn	Fe	Si	Cu	Mg
bal.	0.04-0.35	0.25	0.15	0.70	0.4-0.8	0.15-0.40	0.8-1.2

Table 2 Tool measurement used in experiment

Item	Tool
Shoulder diameter (mm)	9, 12, 15
Pin root diameter (mm)	3
Pin length (mm)	1.5
Material	SKD61(tool steel)



(a)



(b)

Fig. 1 The drawing of tool (a) and geometry of the tool(b)

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 2a는 마찰교반용접에 사용된 장치로서 공구의 최대 회전속도는 4,000 rpm, 이송속도는 최대 3,000 mm/min 조건에서 용접할 수 있는 머시닝 센터로서 베드 위에 별도로 제작한 시편을 고정할 수 있는 지그 장치를 장착하여 용접하였다.

Fig. 2b는 머시닝센터의 컨트롤하는 조작기이며, Fig. 2c는 실제 마찰교반용접을 위해 지그에 재료를 장착한 것이다. 시편의 크기에 따라 클램프의 위치를 조절할 수 있게 하였고, 시편을 고정하는 방식은 나사 조임 방식으로 용접을 수행할 때 시편이 상/하, 좌/우로 움직이지 못하게 하였다.

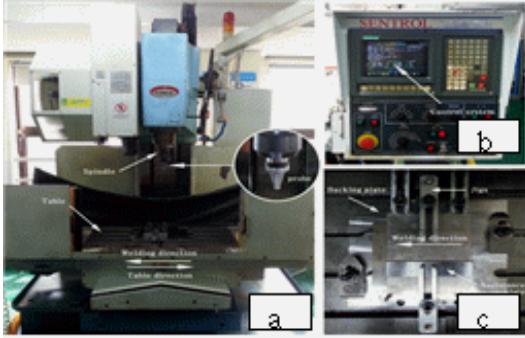


Fig. 2 Experimental equipment for FSW

또한 클램프는 마찰발열로 인한 시험편과 테이블의 흡착을 막기 위해 알루미늄 판으로 제작된 보조 후판을 시험편과 테이블의 사이에 삽입하여 총 6개로 이루어졌고, 용접 과정 중 발생할 수 있는 변형을 막기 위해 지그와 시험편 사이에 보조 박판을 삽입하였다. 마찰교반용접 실험에 사용된 재료의 치수는 2×100×150 mm이고 압연 판재로부터 압연 방향을 150 mm, 폭 방향으로 100 mm의 직사각형 크기로 절단하여 압연방향을 용접 진행 방향으로 배치하였다. 실험은 공구를 적절한 회전속도로 회전시킨 다음 공구의 핀을 용접 이음부에 삽입하여 마찰열을 발생시키고 공구의 솔더부를 모재에 일부 삽입시켜 가열영역을 확대해서 용접 이음부를 따라 공구를 이동시키면서 용접을 수행하였다.

2.3 실험조건

Table 3은 실험에 사용된 마찰교반용접의 용접 변수와 변수들의 수준 등을 나타내었다. 마찰교반용접은 비소모성 공구를 용접 이음부에 일부 삽입하여 공구의 회전과 이송을 통해 접합이 이뤄지는 공정이다. 따라서 대표적인 용접 변수로는 공구의 형상인 솔더지름과 회전속도, 이송속도 등이라고 볼 수 있어 본 실험에서는 대표적인 용접 변수들 간의 상관관계를 정량적으로 분석하기 위하여 통계적 기법인 실험계획법 중 삼원배치법을 이용하였으며, 총 27회 마찰교반용접 실험을 수행하였다.

Table 3 Factors and each levels for experiment

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Shoulder diameter (mm), (A)	9	12	15
Travels speed (mm/min), (B)	100	300	500
Rotation speed (rpm), (C)	1000	1500	2000

Fig. 3은 이송속도가 100 mm/min, 회전속도가 1,000 rpm인 상태에서 위로부터 솔더지름을 9, 12 및 15 mm로 변화시켜 솔더지름의 변화에 따른 용접부의 표면 형상을 나타낸 것으로, 전반적으로 용접부 표면 형상은 양호하게 나타났으며 솔더지름이 커질수록 용접부 폭이 넓어졌다. Fig. 4는 이송속도가 100 mm/min, 솔더지름이 9 mm인 상태에서 회전속도가 위로부터 1,000, 1,500 및 2,000 rpm인 경우에 대해 용접부의 형상을 나타낸 것으로 전반적으로 용접부 형상은 양호하게 나타났으며 회전속도가 증가할수록 용접부의 표면이 매끄러운 형태를 나타내었다.

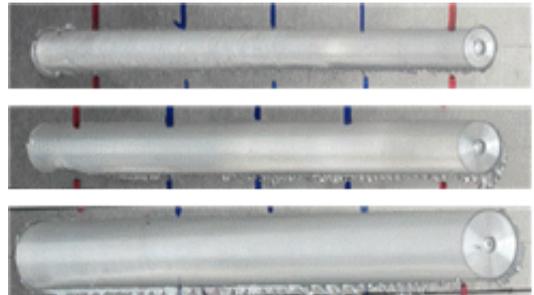


Fig. 3 The welding parts under various shoulder diameter

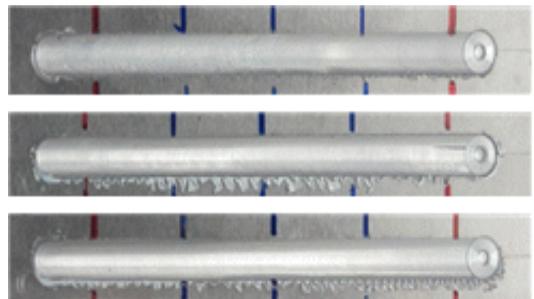


Fig. 4 The welding parts under various rotation speed

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰교반용접된 재료의 인장 강도실험

인장시험편은 마찰교반 용접된 재료를 Fig. 5와 같이 ASTM E8 표준 규격을 적용하였으며 시험편 절단시 발생할 수 있는 열영향을 최소화하기 위하여 T300-3015 model의 워터젯 장비를 이용하여 모든 조건에서 100 mm 용접 길이 당 3개의 인장 시험편을 제작하였다.

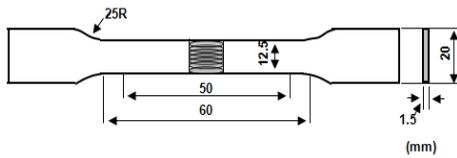


Fig. 5 Dimensions of tensile specimen

Fig. 6은 이송속도 500 mm/min, 회전속도 2,000 rpm, 솔더지름 15 mm 조건에서 가공한 인장시험편의 인장실험 후 파단 형상을 나타내었다. 대부분의 조건에서 파단은 공구의 핀 삼입부에서 시작하여 공구의 회전방향과 이송방향이 반대인 AS(Advancing Side)부로 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 공구의 회전방향과 이송방향이 반대인 AS부에서 공구의 회전방향과 이송방향이 같은 RS(Retreating Side)부보다 더 큰 내부 응력이 발생하여 파단이 일어나는 것으로 생각된다.



Fig. 6 Specimen after tensile test

3.2 분산분석

본 실험에서는 삼원배치법¹⁰⁾에 따라 설정된 조건을 이용하여 마찰교반용접을 수행한 후 각 조건 당 3개씩 인장실험을 실시해 얻은 용접부 항복강도 평균값을 구하였다. Table 4는 삼원배치법에

따라 마찰교반용접을 실시하여 인장실험을 통해 얻은 조건별 용접부 항복강도 평균값을 바탕으로 한 분산분석의 결과이다. A는 공구의 솔더지름, B는 이송속도, C는 회전속도를 뜻한다. 또한 E는 오차, T는 A, B, E의 합, SS는 인자의 변동, Φ 는 자유도, MS는 인자의 변동을 자유도로 나눈 값, F_0 는 MS를 오차로 나눈 값 등을 나타낸다.

Table 4 Results of variance analysis(Before pooling)

Fac.	SS	Φ	MS	F_0	$F_{(0.05)}$	$F_{(0.01)}$
A	1684.27	2	842.13	21.82	4.46	8.65
B	2615.34	2	1307.67	33.88	4.46	8.65
C	1243.20	2	621.60	16.11	4.46	8.65
A×B	284.17	4	71.04	1.84	3.84	7.01
A×C	93.78	4	23.45	0.61	3.84	7.01
B×C	248.44	4	62.11	1.61	3.84	7.01
E	308.74	8	38.59			
T	6477.94	26	2966.59			

분산분석 결과, 각 변수들 간의 교호작용은 5% 유의수준보다 낮게 나타나 오차항에 풀링하여 Table 5에 나타내었다. 그 결과 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 모두 99% 신뢰구간에서 항복강도 특성치에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 공구의 이송속도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 솔더지름과 회전속도는 비슷한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 5 Results of variance analysis(After pooling)

Fac.	SS	Φ	MS	F_0	$F_{(0.05)}$	$F_{(0.01)}$
A	1684.27	2	842.13	18.01	3.49	5.85
B	2615.34	2	1307.67	27.97	3.49	5.85
C	1243.20	2	621.60	13.29	3.49	5.85
E	935.14	20	46.76			
T	6477.94	26				

Fig. 7은 마찰교반용접시 용접 변수들이 용접부 항복강도 특성치에 영향을 끼치는 기여도를 나타내었다. 여기서 보면 공구의 이송속도가 약 44%로 용접부 항복강도에 가장 큰 영향을 끼치는 것

으로 나타났으며, 솔더지름이 28%, 회전속도가 21%의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

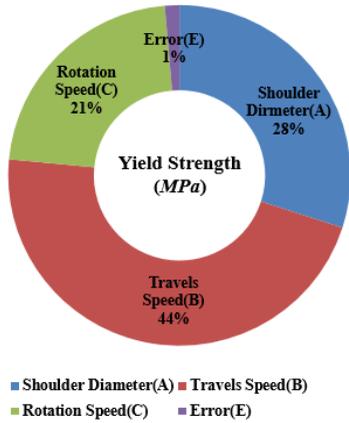


Fig. 7 The contribution of welding factors on yield strength

Table 6은 각 용접 변수들의 모평균 및 구간추정을 실시한 결과이다. 3가지 용접 변수들의 조합에서 가장 높은 항복강도 값을 나타내는 조합은 A₃B₃C₃ 조건으로 99% 신뢰구간에서 207.19±9.91 Mpa로 추정된다. 본 논문에서 실시한 총 27회 조건 중 A₃B₃C₃ 조건에서의 항복강도 평균값은 약 205.45 Mpa로 99% 신뢰구간의 모평균 및 구간추정 결과 범위 내에 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 추가 검증 실험 없이 본 논문에서 선정된 변수들과 변수들의 수준은 적절하다고 판단된다.

Table 6 Estimated yield strength of each factors

Factors	Point estimation	Confidence interval	+	-
A1	173.52	4.75	178.28	168.77
A2	188.19	4.75	192.95	183.44
A3	191.78	4.75	196.54	187.03
B1	170.73	4.75	175.49	165.98
B2	189.60	4.75	194.36	184.85
B3	193.16	4.75	197.92	188.41
C1	175.22	4.75	179.97	170.46
C2	187.03	4.75	191.79	182.28
C3	191.25	4.75	196.00	186.49
95%	207.19	7.26	214.46	199.93
99%	207.19	9.91	217.10	197.29

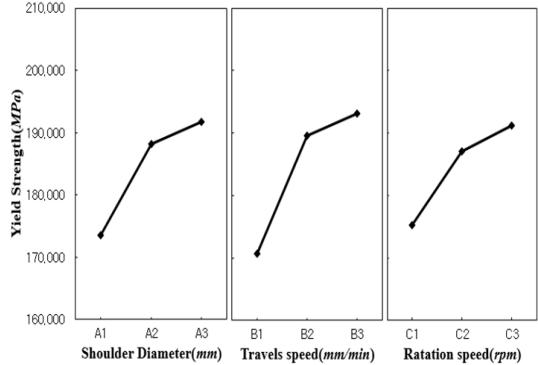


Fig. 8 Yield strength vs. welding factors

Fig. 8은 마찰교반용접시 용접부 항복강도 측정 결과를 바탕으로 변수들의 수준별 모평균을 정리한 결과로서 모평균 값의 변화율은 변수들의 수준별 변화가 용접부 항복강도 특성에 미치는 영향을 나타낸다.

이 결과에서 공구의 솔더 지름이 증가할수록 용접부 항복강도가 증가하였고 3수준인 15 mm에서 가장 큰 항복강도 값을 나타내었다. 공구의 이송속도 역시 증가할수록 용접부 항복강도가 증가하였고 3수준인 500 mm/min에서 가장 큰 항복강도 값을 나타내었다. 그리고 공구의 회전속도 또한 증가할수록 용접부 항복강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 2,000 rpm에서 가장 큰 항복강도 값을 나타내었다. 그리고 3가지 변수 중에서 항복강도 특성에 가장 큰 영향을 미치는 용접 변수는 이송속도로서 가장 큰 기울기를 나타내었다. 이것은 마찰교반용접시 이송속도의 변화에 따라 재료 내부의 교반을 통한 소성유동이 다르게 나타나는 것을 의미하며 마찰열을 발생시키는 공구의 솔더지름과 회전속도 변화보다 재료 내부의 교반을 통한 소성유동이 용접부 항복강도 특성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 6061 알루미늄 합금의 마찰교반용접에 공구의 솔더지름, 회전속도와 이송속도를 변수로 하여 용접 변수의 변화가 용접부 항복강

도에 미치는 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 용접부 항복강도 특성치를 토대로 분산분석을 실시한 결과, 공구의 이송속도 변화가 용접부 항복강도에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 각 변수들 간의 교호작용은 유의하지 않는 것으로 나타났다.

2) 마찰교반용접시 공구의 솔더지름, 이송속도 및 회전속도 등이 증가할수록 항복강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 가장 높은 항복강도 값을 나타내는 조건은 솔더지름 15 mm, 이송속도 500 mm/min, 그리고 회전속도가 2,000 rpm에서 가장 큰 항복강도 값을 나타내었다.

3) 삼원배치법을 이용하여 분석된 최적공정조건(A₃B₃C₃)에서의 용접부 항복강도는 99% 신뢰구간에서 207.19±9.91 Mpa로 추정되었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

References

1. S. K. Jang and S. H. Shin, 2001, "A Development of Optimizing Tools for Friction Stir Welding with 2mm Thick Aluminum Alloy using a Milling Machine", J. Kor. Soc. Mar. Eng, Vol. 25, No. 4, pp. 791-796.
2. D. M. Kang, K. D. Park and D. Y. Lee, 2014, "Optimization Friction Stir Welding of Al 6061 Alloy using Statistical Analysis", J. Adv. Comput. Intell. Intell, Vol. 18, No. 5, pp. 752-754.
3. J. S. Noh, H. J. Kim, W. S. Chang and K. S. Bang, 2004, "Evaluation of Joint Properties of Friction Stir Welded AZ31B Mg Alloy", The Journal of KWS, Vol. 22, No. 3, pp. 56-61.
4. H. J. Kim, C. K. Cheon, S. H. Kim and W. S. Chang, 2006, "Microstructures and Mechanical Properties of the Friction Stir Welded Dissimilar Joint of AZ31B/A6061", Journal of KWS, Vol. 24, No. 4, pp. 6-10.
5. S. K. Jang and S. H. Shin, 2001, "A Development of Optimizing Tools for Friction Stir Welding with 2mm Thick Aluminum using a Milling Machine", Journal of The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 91-96.
6. Won, S. T., Kim, W. K. and Goo, B. C., 2010, "Mechanical Properties of Joints according to Welding Methods and Sensitivity Analysis of FSW's Welding Variables for A6005 Extruded Alloy of Rolling Stock", Journal of The Korean Society for Railway, Vol. 13, No. 2, pp. 131-138.
7. S. W. Kim, W. B. Lee, D. W. Kim, Y. M. Yeon and S. B. Jeong, 2003, "The Joints Properties of Friction Stir Welded 5052Al Alloy", KWS 2003-Autumn, pp. 69-71.
8. D. M. Kang, K. D. Park, and Y. S. Jung, 2013, "Thermal and Mechanical Analysis on Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy by the Finite Element Method", J. Kor. Soc. Power. Syst. Eng, Vol. 17, No. 4, pp. 64-71.
9. D. M. Kang, J. S. Jang, K. D. Park and D. Y. Lee, 2016, "The Joints Characteristics of Al 5052 Aluminium Alloy in Friction Stir Welds", J. Kor. Soc. Power. Syst. Eng, Vol. 20, No. 3, pp. 51-56.
10. S. H. Park, 2003, "Design of Experiments", Min Yeong Sa, pp. 181-183.