

마찰교반 용접조건에 따른 AI 5052 알루미늄 합금의 접합특성 The Joints Characteristics of AI 5052 Aluminium Alloy in Friction Stir Welds

강대민* · 장진숙**† · 박경도*** · 이대열***

Dae-Min Kang*, Jin-Suk Jang**†, Kyong-Do Park*** and
Dai-Yeal Lee***

(Received 31 March 2016, Revision received 8 June 2016, Accepted 9 June 2016)

Abstract: In this study, the tensile tests and hardness tests were carried out for the joints characteristics in friction stir welds of AI 5052 alloy. Three way factorial design was applied to optimal welding conditions, whose control factors were shoulder diameter, rotation speed and welding speed of tool. From the results of this study, the optimum condition for maximum yield strength was predicted as the shoulder diameter of 15 mm, welding speed of 500mm/min and rotating speed of 1000 rpm. And the presumed optimal yield strength was estimated to be 167.36±7.82 MPa with 99% reliability. In addition the increaser rotation speed of tool and the decreaser welding speed, the decreaser the hardness at welding part.

Key Words : Friction stir welding, Three-way factorial design, Yield strength, Welding variables, Hardness

1. 서 론

최근 지구 환경 보호와 에너지 절감으로 각종 수송기기의 경량화와 더불어 건축과 토목 분야조차도 경량합금의 적용이 증가하여, 이를 위해 경량 소재 중 알루미늄 합금이 자동차와 조선분야 등에서 많이 주목받고 있다. 보통 각종 기기 및 구조물 등은 용접에 의해 조립되나 알루미늄 합금의 용접은 기술과 경제적인 측면에서 해결해야 할 많은 문제점을 지니고 있다. 그러나 최근 이러한 알루미늄 합금의 용접시 발생하는 여러 문제점을 해결하는 방법으로 용접부의 모재보다 경도

가 높은 공구의 회전력을 사용하여 모재에 마찰열을 발생시키어 용접부 내부에 발생하는 교반작용으로 두 재료를 접합시키는 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)¹⁻³⁾이 적용되고 있다. 이러한 마찰교반용접은 기존 아크 용접법에 비해 많은 장점이 지니고 있는 기술로서 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에 의해 특허가 출원된 이래 90년대 중반부터 AI 합금을 비롯하여 각종 합금의 용접공정에 실용화가 이루어지고 있다.⁴⁻⁶⁾

한편 알루미늄 합금을 이용한 마찰교반용접의 연구로서 Lim등⁷⁾은 다양한 종류의 알루미늄 합금을 이용하여 마찰교반용접을 실시한 후 접합부의

**† 장진숙(교신저자) : ㈜홍덕기공

E-mail : hd8546@hanmail.net, Tel : 051-312-8546

*강대민 : 부경대학교 기계공학과, E-mail : dmkang@pknu.ac.kr

***박경도 : 부산인력개발원, E-mail : 5151644@naver.com

***이대열 : 부산인력개발원, E-mail : xiaolee@korcham.net

**† Jin-Suk Jang(corresponding author) : HD

E-mail : hd8546@hanmail.net, Tel : 051-312-8546

*Dae-Min Kang : Department of Mechanical Engineering,

Pukyong National University, E-mail : dmkang@pknu.ac.kr

***Kyong-Do Park : KCCI, E-mail : 5151644@naver.com

***Dai-Yeal Lee : KCCI, E-mail : xiaolee@korcham.net

미세조직과 인장특성을 비교하였다. 또한 S. T. Won⁸⁾ 등은 마찰교반용접된 철도 차량용 A6005 압출재의 기계적 성능 향상을 위한 최적 공법 설계에 관한 연구를 하였으나 아직도 알루미늄 합금의 마찰교반용접에 대한 연구가 많이 불충분하다.

Table 1 Chemical composition of Al 5052 alloy (Wt.%)

Al	Cr	Ti	Mn	Fe	Zn	Si	Cu	Mg
bal.	0.17	0.01	0.04	0.31	0.00	0.17	0.02	2.43



Fig. 1 Experimental equipment for FSW

본 연구에서는 5052 알루미늄 합금의 마찰교반 용접 시 주요한 변수인 공구의 솔더지름과 회전 속도, 그리고 이송속도 등의 용접조건이 접합특성에 미치는 영향을 인장시험과 경도측정을 통해 분석하고자한다.

2. 실험

2.1 마찰교반시험

Table 1은 실험에 사용된 Al 5052 알루미늄 합금재의 화학조성을 나타낸 것으로, 알루미늄 베이스에 Mg를 주 첨가한 합금으로 강도가 높은 비열처리 합금이며 용접성이 양호하고 내식성 좋다.

Fig. 1은 마찰교반접합에 사용된 장치로서 공구의 최대 회전속도는 4000 rpm, 이송속도는 최대 3000 mm/min 조건에서 용접할 수 있는 머시닝센터이다. 사용된 공구는 SKH51 재질을 사용하여 솔더 직경 9 mm, 프로브 직경 3.5 mm으로 비의 값이 2.7이 되게 하였다. 이것은 솔더 직경과 프로

브 직경의 비의 값이 대략 3에 가까울 때 가장 좋은 용접성능을 지닌다는 특성과 피 용접재가 평탄면이 아닌 곡면인 점을 감안한 것이다. 그리고 프로브 형상은 나사형으로 길이가 1.5 mm로서 모재의 두께 2 mm보다 작게 제작하였다. 또한 공구의 솔더 직경을 9, 12 및 15 mm로 하였고 용접시틀의 회전 방향은 반시계 방향으로 설정하였다. 실험에 사용된 재료는 두께가 2 mm인 압연 판재로부터 압연 방향을 150 mm, 폭 방향으로 100 mm의 직사각형 크기로 절단하여, 압연방향을 용접 진행 방향으로 하였다. 접합시 마찰발열로 인한 시험편과 테이블의 흡착을 막기 위해 알루미늄 판으로 제작된 보조 후판을 시험편과 테이블의 사이에 삽입 하였으며 6개의 클램프로 시험편을 고정하였다. 용접 과정 중 발생할 수 있는 변형을 막기 위해 지그와 시험편 사이에 보조 박판을 삽입하여 실험하였다.

Table 2 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

Table 2는 실험에 사용된 마찰교반용접의 공정 변수와 조건 등을 나타내었다. 용접조건은 공구 삽입속도를 5 mm/min, 예열시간을 8 sec, 핀 지름을 3 mm로 고정하고 공구의 솔더지름, 회전속도 및 용접속도를 Table 2와 같이 설정하여 실험하였다.

2.2 인장시험

Fig. 2는 인장시험에 사용된 만능시험기(MODEL: KDMT-120)로서 최대 램 행정은 150 mm이고, 모든 인장속도는 2 mm/min으로 하여 하중 밸브와 컴퓨터 해석 장치에 의해 데이터가 기록된다. 인장시험편은 Fig. 3과 같이 KS규격(KSB0801 14A)에 따라 형상과 치수에 맞게 와이어 가공하였다.

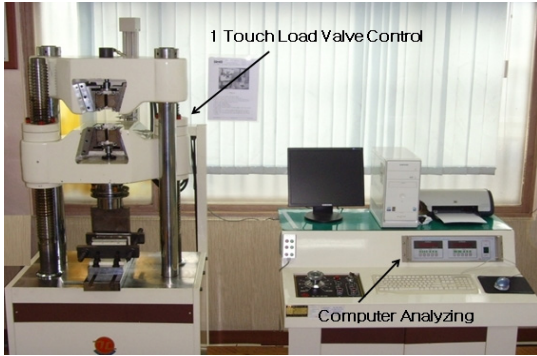


Fig. 2 Tensile testing machine(KDMT-120)

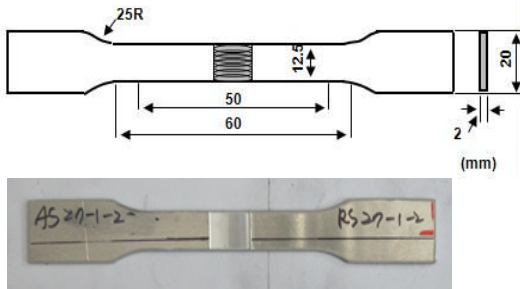


Fig. 3 Dimensions of tensile specimen

사용된 와이어 커팅기는 소디사에서 제작된 A500W(850×500×500) 와이어 커팅기를 사용하였고 그 아래 사진은 실제 가공된 인장시편을 나타낸다.

2.3 경도측정

Fig. 4는 측정에 사용된 마이크로 경도 시험기와 측정된 용접부 3점을 나타낸 것이다. 경도시험에 사용된 마이크로 비커스 경도시험기는 미국 INSTRON사의 Series 600 Rockwell 측정기로서 하중제어를 자동으로 수행할 수 있으며, 시험하중은 0.5부터 2,000 g까지 가능하고, 가압시간은 5초에서 99초까지 조절 가능하도록 되어 있다. 비커스 경도시험을 위한 시편은 ASTM E384-10 규격에 준하였고, 용접부 중심으로 양쪽으로 1.5 mm 간격으로 총 3군데의 경도 1~5포인트를 순서대로 Hv로 측정하였다. 시험하중의 조건은 하중 300 g 가압시간 10초로 두고 실험을 시행하였고, 동일한 표면 거칠기를 갖도록 사포 800-2000으로 표면연

마하여 경도 측정하였다.

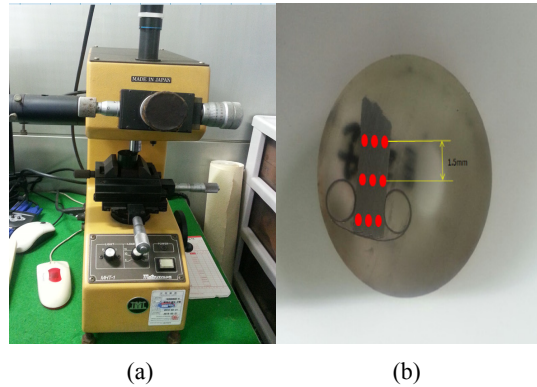


Fig. 4 Micro hardness tester(a) and 3 point for hardness tests.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마찰교반용접 표면부

Fig. 6은 용접속도가 100 mm/min인 상태에서 톨의 회전속도가 위로부터 1000, 1500, 2000 rpm 인 경우에 대해 용접표면을 나타낸 것이다. 이 결과에서 톨의 회전속도의 증가에 따라 전반적으로 용접부 형상은 양호하게 나타났으며, 회전속도가 증가할수록 용접부 비드의 표면이 매끄러운 형태를 나타내었다.

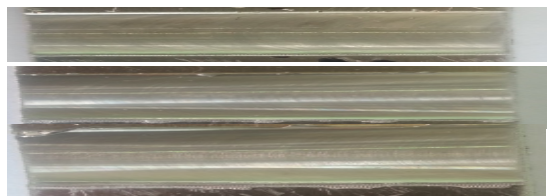


Fig. 6 The welding parts for various rotation speed



Fig. 7 The welding parts for various welding speed

Fig. 7은 공구 회전속도를 1000 rpm으로 유지하고, 용접속도를 위에서 아래로 100, 300, 500 mm/min으로 증가시켜 용접표면의 변화를 비교해 놓은 결과이다. 이 결과에서 용접속도의 증가에 따라 용접면이 거칠어지는 것으로 관찰되었다.

3.2 인장실험결과

Table 3은 용접인자를 공구의 솔더 지름, 이송 속도 그리고 회전속도를 하여 삼원배치법으로 설정된 조건에 따라 인장실험 후 측정된 항복강도를 나타낸 것으로 A는 공구의 솔더 지름, B는 이송 속도 그리고 C는 회전 속도를 나타낸다.

Table 3 Yield strengths of FSW at various conditions

Run	Factors			Yield strength (MPa)
	A(mm)	B(mm/min)	C(rpm)	
1	9	100	1000	156.1
2	9	100	1500	158.1
3	9	100	2000	155.2
4	9	300	1000	163.1
5	9	300	1500	151.2
6	9	300	2000	148.2
7	9	500	1000	165.2
8	9	500	1500	172.2
9	9	500	2000	163.2
10	12	100	1000	154.2
11	12	100	1500	168.5
12	12	100	2000	155.1
13	12	300	1000	168.2
14	12	300	1500	165.2
15	12	300	2000	159.7
16	12	500	1000	170.2
17	12	500	1500	168.9
18	12	500	2000	162.3
19	15	100	1000	160.3
20	15	100	1500	157.1
21	15	100	2000	152.1
22	15	300	1000	155.9
23	15	300	1500	154.8
24	15	300	2000	150.6
25	15	500	1000	162.2
26	15	500	1500	158.7
27	15	500	2000	155.2

Table 4는 삼원배치법에 따라 마찰교반용접을 실시하여 인장실험을 통해 얻은 조건별 용접부 항복강도 평균 값을 바탕으로 한 분산분석의 결과이다. 여기서 E는 오차, T는 A, B, E의 합, SS는 인자의 변동, σ 는 자유도, V는 인자의 변동을 자유도로 나눈 값, F^0 는 V를 오차를 나눈 값 등을 나타낸다. 분산분석은 각각의 인자들의 특성치의 변동을 구하고 변동이 가장 적은 인자 항을 오차항으로 풀링하여 오차항의 자유도와 오차의 변동으로 각 인자항의 변동을 나누어 분산비를 구하였다. 분산분석 결과에서 공구의 솔더 지름과 이송 속도의 교호작용, 솔더 지름과 회전 속도의 교호작용, 이송 속도와 회전 속도의 교호작용은 다른 인자들에 비하여 적은 변동을 나타내는 것으로 보아 변수들 간의 교호작용은 용접부 항복강도 특성에 미치는 영향이 적은 것으로 생각된다. Table 5는 교호작용을 오차항에 풀링하여 다시 분산분석을 실시한 결과를 나타냈다.

이 결과에서 공구의 솔더 지름, 이송 속도, 회전 속도 모두 95% 유의수준 내에서 항복강도 특성에 유의한 것으로 나타났으며, 이송 속도가 용접부 항복강도 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 용접 공정 변수들이 용접시항복강도 특성에 미치는 기여도에 대해 평가한 결과는 공구의 이송 속도 36%, 솔더 지름 31%, 회전 속도 28%의 순서로 용접부 항복강도 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 8은 항복강도 측정 결과를 바탕으로 각각의 인자 및 수준별 모평균을 정리한 결과이다.

이 결과에서 인자의 수준별 항복강도 크기를 비교해보면 공구의 솔더 지름은 2수준, 이송 속도는 3수준, 회전 속도는 수준1에서 각각 가장 높은 값으로 나타나 용접부 항복강도를 최대로 하는 변수들의 최적공정조건은 $A_2B_3C_1$ 이라고 판단된다. 즉, 공구의 솔더 지름 15 mm, 이송속도 500 mm/min, 회전속도 1000 rpm의 조합에서 용접부가 가장 높은 항복강도 특성을 나타내며, 신뢰도 99% 수준에서 구한 최적공정조건에서의 용접부 항복강도 추정구간은 167.36 ± 7.82 (MPa)이다.

Table 4 Results of variance analysis(before pooling)

Factors	SS	∅	MS	F ₀	F _(0.05)	F _(0.01)
A	241.35	2	120.68	7.39	4.46	8.65
B	278.35	2	139.17	8.52	4.46	8.65
C	211.62	2	105.82	6.48	4.46	8.65
A×B	128.59	4	32.15	1.97	3.84	7.01
A×C	30.59	4	7.65	0.47	3.84	7.01
B×C	75.99	4	19.00	1.16	3.84	7.01
e	130.70	8	16.34			
T	1097.22	26				

Table 5 Results of variance analysis(after pooling)

Factors	SS	∅	MS	F ₀	F _(0.05)	F _(0.01)
A	241.35	2	120.68	6.60	4.46	8.65
B	278.35	2	139.17	7.61	4.46	8.65
C	211.65	2	105.82	5.78	4.46	8.65
e	365.87	20	18.29			
T	1097.22	26				

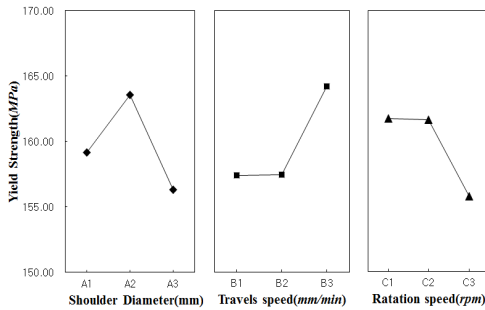


Fig. 8 Interaction plots for yield strengths

3.3 경도측정 결과

Table 6은 용접속도를 300 mm/min으로 유지하고 톨의 회전속도를 1,000, 1500, 2000 rpm으로 증가시켜 마찰교반용접을 실시하였을 때의 용접부 3점을 마이크로 경도계로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 톨의 회전속도의 증가에 따라 용접부의 경도치는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 공구가 회전함에 따라 발생하는 마찰열로 인한 재료의 연화가 용접부에 열입량을 증가하게 하여 결과적으로 용접부의 경도가 감소되었다고 생각된다.

Table 6 Hardness for welding speed of 300 mm/min

Welding speed (mm/min)	Rotating speed (rpm)	Hardness(HV)		
		1	2	3
300	1000	75.88	72.88	69.2
	1500	65.2	64.23	61.63
	2000	57.23	58.1	58.96

Table 7 Hardness for welding speed of 500 mm/min

Welding speed (mm/min)	Rotating speed (rpm)	Hardness(HV)		
		1	2	3
500	1000	72.88	75.88	71.65
	1500	91.15	90.25	88.40

Table 7은 톨의 회전속도를 1000, 1500 rpm으로 유지하고 용접속도를 500 mm/min으로 증가시켜 마찰교반용접을 실시하였을 때의 용접부 3점을 마이크로 경도계로 측정된 결과를 나타낸 것이다.

이 결과에서 회전속도가 1000 rpm일 때는 비슷한 값으로 측정되었으나, 1500 rpm일 때는 용접속도에 증가에 따라 경도가 증가하는 결과가 나타났다. 이는 용접속도가 증가할수록 용접부의 마찰이 충분히 이루어지지 않아 그만큼 마찰열이 감소하여 알루미늄 합금의 열연화 현상이 적게 나타난 결과라 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 마찰교반 시 적용되는 용접조건이 5052 알루미늄 합금의 접합특성에 어떤 영향을 미치는 지를 인장시험 및 경도시험 등을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 톨의 회전속도의 증가에 따라 용접부의 경도치는 감소하고 용접속도에 증가에 따라 경도가 증가하는 결과가 나타났다.

(2) 용접부의 항복강도의 측정 결과를 바탕으로 인자의 수준별 모평균을 정리한 결과, 공구의 슬더 지름 2수준(15 mm), 이송 속도 3수준(500 mm/min), 회전 속도 1수준(1000 rpm)에서 용접부가 가장 높은 항복강도 값을 나타내었다.

(3) 삼원배치법을 이용한 알루미늄 합금의 마찰교반용접 시 신뢰도 99% 수준에서 구한 최적공정 조건에서의 항복강도 추정 구간 167.36 ± 7.82 (MPa)로서 모재 항복강도와 거의 비슷한 값을 나타냈다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)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", Journal of The Korean Society of Marine Engineers, Vol. 25, No. 4, pp. 791-796
2. 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", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 64-71
3. D. M. Kang and J. S. Jang, 2015, "Friction Stir Welding Characteristics of Al5052 Aluminium Alloy by Design of Experiment", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 11-16
4. M. W. Mahoney and C. G. Rhodes, 1998, "Properties of friction-welded 7075 T651 aluminum", Metall Mater Trans A, 29A, 1955-64
5. P. David and T. W. Field, 2001, "Heterogeneity of crystallographic texture in friction stir welds of aluminium", Metall Mater Trans A, 32A, 2869-77
6. T. U. Seidel, A. P. Reynolds, 2001, "Visualization of the material flow in AA2195 friction stir welds using a marker insert technique", Metall Mater Trans A, 32A, 2879-84
7. S. G. Lim, S. S. Kim, C. G. Lee and S. J. Kim, 2003, "Microstructural Evolution and Tensile Behavior of Stir Friction Welded Al Alloys", Met. Mater., Vol. 41, No. 11, pp. 743-749
8. S. T. Won, W. K. Kim, and B. C. Goo, 2010, "Mechanical Properties of Joints according to Welding Methods and Sensitivity Analysis of FSW's Welding Variables for A6005 Extruded Alloy of Rolling Stock", The Korean Society for Railway, Vol. 13, No. 2, pp. 131-138