

# 실험계획법에 의한 Al5052 알루미늄 합금의 마찰교반용접특성 Friction Stir Welding Characteristics of Al5052 Aluminium Alloy by Design of Experiment

강대민\* · 장진숙\*\*\*  
Dae-Min Kang\* and Jin-Suk Jang\*\*\*

(Received 16 January 2015, Revision received 21 July 2015, Accepted 21 July 2015)

**Abstract:** Welding is very popular method for joining two or more metals. In this paper, the three-way factorial design was adopted for obtaining the optimum friction stir welding conditions of Al 5052 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 was 100x100x2 mm, and the tensile specimens were worked by water-jet technique. Welding variables were shoulder diameter, rotating speed of tool and welding speed. As far as this work is concerned, optimum condition for friction stir joint of Al 5052 alloy was predicted as the shoulder diameter of 15 mm, welding speed of 500mm/min and rotating speed of 1000 rpm. In addition, the presumed range of tensile strength under the optimal conditions is estimated to be 208.3±5.7 MPa with 99% reliability.

**Key Words :** Friction stir welding, Al 5052 alloy, Three-way factorial design, Tensile strength, Weldingvariables

## 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, 강화 플라스틱 등 많은 재료가 있지만 그 중에서도 알루미늄 합금은 자동차와 조선분야 등에서 대체 재료로 주목받고 있다. 그러나 알루미늄합금은 강판에 비해 열전도 및 비열이 높고 전

기저항이 낮아 발열은 어렵고 방열은 쉬워 용접이 어려운 부분이 있어 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로는 고상용접법인 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)<sup>1-5)</sup>의 적용이 시도되고 있다.

이러한 마찰교반용접은 영국의 TWI(The Welding Institute)에 의해서 발명된 고상 접합 기술로서 회전하는 공구를 피접합체에 삽입하여 회전하는 공구와 피 용접체와의 사이에서 마찰열을 발생시키고, 여기에서 회전 및 이동과 함께 피 접합체 내에 메탈플로어가 발생하여 공구이동에 따른 공구

\*\*\* 장진숙(교신저자) : (주)홍덕기공

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

\* 강대민 : 부경대학교 기계공학과

E-mail : dmkgang@pknu.ac.kr

\*\*\* 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 : dmkgang@pknu.ac.kr

후방 유동부는 열전도에 의해 급속히 냉각되어 접합부가 형성되어 용접을 하는 방법이다.

이러한 마찰교반용접에 대한 연구로는 S. W. Kim 등<sup>6)</sup>에 의해 5052 알루미늄 합금을 톨의 회전수 및 용접속도를 변화시켜 경도값과 미세조직을 관찰하였고 또한 동일한 조건하에서 후 열처리하여 용접부 각 부분의 기계적 특성과 미세조직의 상관관계에 대해 언급하였으나 이것은 접합부의 변화를 단순하게 관찰만 했을 뿐 용접부의 특성 변화에 대한 체계적으로 제시하고 있는 연구는 많지 않다.

본 논문에서는 5052 알루미늄 합금의 마찰교반 접합시 주요한 용접변수인 공구의 솔더지름, 톨의 회전속도와 용접속도를 인자로 하여 이러한 접합 인자가 강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 실험계획법<sup>7-8)</sup>을 이용하여 수행된 통계적인 분산분석을 바탕으로 최적의 용접 공정 조건을 도출하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험재료 및 공구

본 실험에서 사용한 재료는 5052 알루미늄 합금으로 시험편은 100×100×2 (mm)로 가공하였으며 맞대기 방식으로 접합하였다.

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

Table 2 Tool measurement used in experiment

Item	Tool
Shoulder diameter (mm)	9, 12, 15
Pin root diameter (mm)	4
Pin length (mm)	1.5
Shoulder angle (°)	3
Shoulder-tool R (mm)	0.5
Pin taper angle (°)	10
Material	SKH51(tool steel)

Table 1, 2는 각각 Al 5052 알루미늄 합금제의 화학조성과 마찰교반용접에 사용된 공구의 치수 및 제원을 나타낸다. Fig. 1은 실험에 사용되었던 공구의 제작 도면 및 가공 형상을 나타낸다.

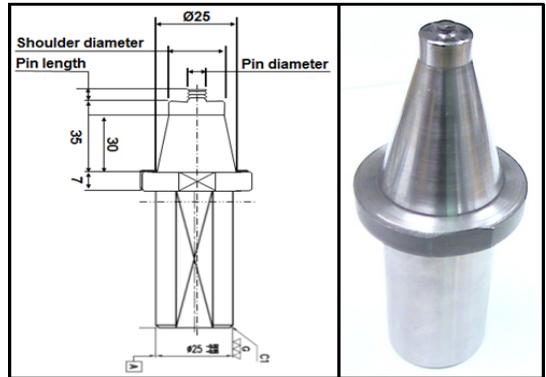


Fig. 1 Geometry of the tool

### 2.2 실험장치 및 조건

Fig. 2(a)는 마찰교반용접에 사용된 장치로서 공구의 최대 회전속도는 4,000 rpm, 이송속도는 최대 3000 mm/min 조건에서 용접할 수 있는 머시닝센터이다. 마찰교반용접 실험에 사용된 재료의 치수는 100×150×2t (mm)이고 압연 판재로부터 압연 방향을 150 mm, 폭 방향으로 100 mm의 직사각형 크기로 절단하여, 압연방향을 용접 진행 방향으로 하여 접합하였다. 실험은 먼저 공구를 적절한 회전속도로 회전시킨 다음 공구의 핀홀 이음부를 삽입하여 마찰열을 발생시켜 공구의 솔더부를 모재에 일부 삽입시킨 다음 가열영역을 확대해서 용접 이음부를 따라 공구를 이동시키면서 접합하였다. Fig. 2(b)는 실험장치중 실제 마찰교반이 행해지는 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 마찰발열로 인한 시험편과 테이블의 흠착을 막기 위해 알루미늄 판으로 제작된 보조 후판을 시험편과 테이블의 사이에 삽입 하였으며 6개의 클램프로 시험편을 고정하였다. 용접과정 중 발생할 수 있는 변형을 막기 위해 지그와 시험편 사이에 보조 박판을 삽입하여 실험하였다.

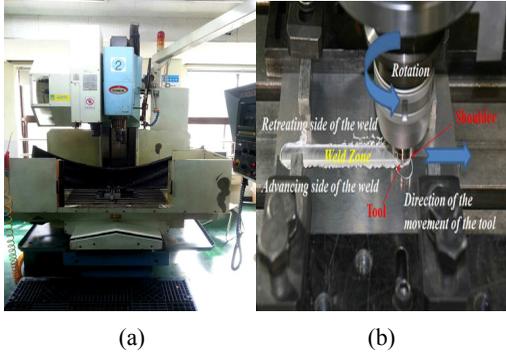


Fig. 2 Experimental equipment for FSW

Table 3은 실험에 사용된 마찰교반용접의 공정 변수와 조건 등을 나타내었다. 마찰교반용접은 비소모성 공구를 이음부에 삽입하여 회전과 이송을 통해 접합이 이뤄지는 공정이어서 이러한 공정의 가장 중요한 변수는 공구의 형상인 솔더 지름과 회전 속도, 이송 속도라고 볼 수 있다. 그러므로 본 실험에서는 실험계획법 중 삼원배치법을 이용하여 실험을 수행하였으며, 통계적 분석방법인 분산분석을 통해 용접 공정 변수들이 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 인장강도 특성에 미치는 영향에 대해 파악하고 인장강도를 최대로 하는 최적 공정 조건을 도출하고자 하였다.

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

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 마찰교반용접된 재료의 인장 강도 실험

인장시험편은 Fig. 3과 같이 ASTM E8 표준 규격을 적용하여 워터 젯 가공하여 가공시 발생하는 용접부의 열 변형, 잔류응력, 미세균열 및 화학적 변형이 발생하지 않도록 하였다. Fig. 4는 용접

부의 횡단면 방향으로 각 조건별 3개씩 인장시험편을 제작한 형상을 나타내며 마찰교반 접합된 표면은 전반적으로 깨끗하게 나타났다.

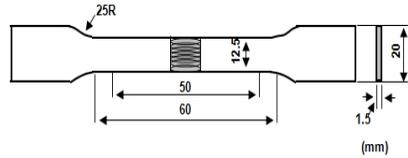


Fig. 3 Dimensions of tensile specimen

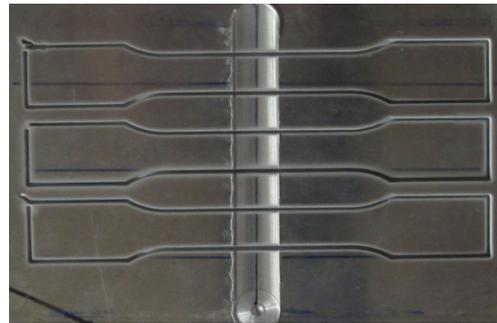


Fig. 4 Tensile specimen of FSW

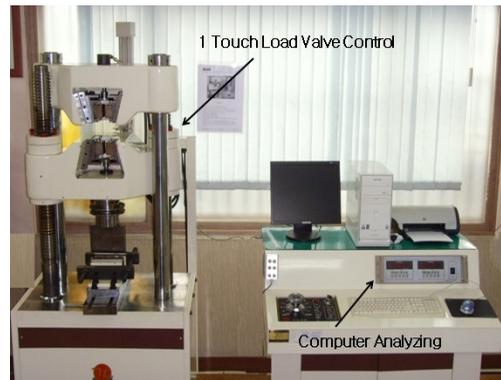


Fig. 5 Tensile testing machine(KDMT-120)

인장실험을 위해 Fig. 5와 같이 만능시험기 (MODEL: KDMT - 120)를 이용하였는데, 이것은 최대 램 행정은 150 mm로서 모든 인장속도는 2 mm/min으로 하여 하중밸브와 컴퓨터 해석 장치에 의해 데이터가 기록된다. Fig. 6a는 인장시험하기 전의 사진이고, Fig. 6b는 인장실험한 후의 사진으로 파단은 전반적으로 용접부인 중앙에서 발생하였다.

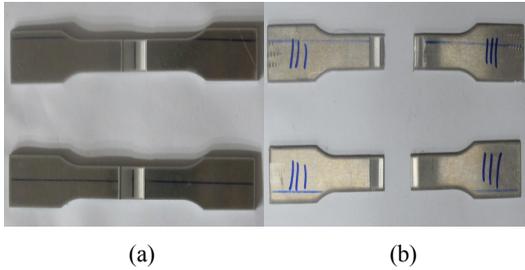


Fig. 6 Tensile specimen of FSW

Table 4 Tensile strengths of FSW at various conditions

Run	Factors			Tensile strength (MPa)
	A	B	C	
1	9	100	1000	180.82
2	9	100	1500	185.20
3	9	100	2000	186.77
4	9	300	1000	190.10
5	9	300	1500	185.10
6	9	300	2000	181.20
7	9	500	1000	200.10
8	9	500	1500	202.36
9	9	500	2000	195.20
10	12	100	1000	195.50
11	12	100	1500	205.20
12	12	100	2000	194.58
13	12	300	1000	203.14
14	12	300	1500	198.47
15	12	300	2000	185.12
16	12	500	1000	210.25
17	12	500	1500	206.25
18	12	500	2000	194.58
19	15	100	1000	195.20
20	15	100	1500	190.68
21	15	100	2000	185.10
22	15	300	1000	200.20
23	15	300	1500	198.47
24	15	300	2000	187.00
25	15	500	1000	205.20
26	15	500	1500	202.36
27	15	500	2000	195.00

Table 4에 삼원배치법을 이용하여 마찰교반용접을 수행한 후 각 조건 당 3개씩 인장시험을 실시해 얻은 인장강도 평균값을 나타내었다. 전반적인 조건에서 마찰교반된 재료의 인장강도는 대략

적으로 모재의 인장강도와 큰 차이가 없었다. 표에서 나타나 있는 A는 공구의 솔더 지름, B는 이송 속도, C는 회전 속도를 나타낸다.

### 3.2 분산분석

Table 5는 삼원배치법에 따라 마찰교반용접을 실시하여 인장시험을 통해 얻은 조건별 용접부 인장강도 평균값을 바탕으로 한 분산분석의 결과이다. 여기서 E는 오차, T는 A, B, E의 합, SS는 인자의 변동,  $\emptyset$ 는 자유도, MS는 인자의 변동을 자유도로 나눈 값, F0는 MS를 오차를 나눈 값을 나타낸다. 분산분석은 각각의 인자들의 특성치의 변동을 구하고 변동이 가장 적은 인자 항을 오차 항으로 풀링하여 오차항의 자유도와 오차의 변동으로 각 인자항의 변동을 나누어 분산비를 구하였다. 분산분석 결과에서 알 수 있듯이 공구의 솔더 지름과 이송 속도의 교호작용, 솔더 지름과 회전 속도의 교호작용, 이송 속도와 회전 속도의 교호작용은 다른 인자들에 비하여 적은 변동을 나타내는 것으로 보아 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 변수들간의 교호작용은 용접부 인장강도 특성에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.

Table 5 Results of variance analysis

Factors	SS	$\emptyset$	MS	F <sub>0</sub>	F <sub>(0.05)</sub>	F <sub>(0.01)</sub>
A	419.51	2	209.75	24.25	4.46	8.65
B	570.79	2	285.40	33.00	4.46	8.65
C	394.33	2	197.17	22.80	4.46	8.65
A×B	111.74	4	27.93	3.23	3.84	7.01
A×C	97.25	4	24.31	2.81	3.84	7.01
B×C	111.14	4	27.78	3.21	3.84	7.01
e	69.18	8	8.65			
T	1773.94	26				

또한 공구의 솔더 지름, 이송 속도, 회전 속도 모두 95% 유의수준 내에서 인장강도 특성에 유의한 것으로 나타났으며, 이송 속도가 용접부 인장강도 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 7은 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 용접 공정 변수들이 용접시 인장강도 특성에 미

치는 기여도에 대해 평가한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 공구의 이송 속도 41%, 솔더 지름 30%, 회전 속도 28%의 순서로 용접부 인장강도 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

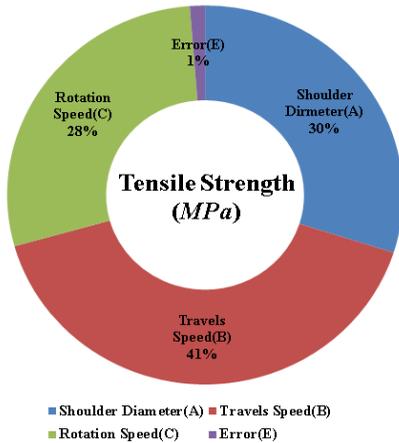


Fig. 7 Contribution of factors

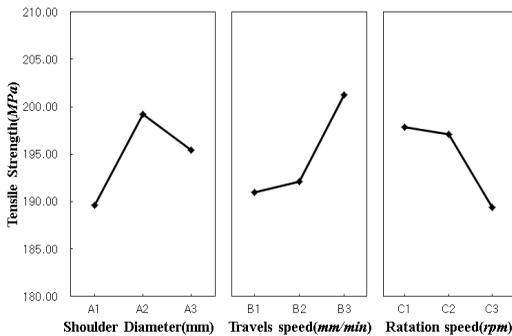


Fig. 8 Interaction plots for tensile strengths

Fig. 8에 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 용접부의 인장강도 측정 결과를 바탕으로 각각의 인자 및 수준별 모평균을 정리한 결과를 나타내었고, 각 인자 값의 변화율은 인자들이 용접부 인장강도 특성에 미치는 영향을 나타낸다. 여기서 보면 공구의 솔더 지름은 2수준까지 인장강도가 증가하다가 3수준에서 감소하는 것을 알 수 있는데, 이것은 과도한 입열이 발생할 경우 인장강도 저하의 원인이 되는 것으로 판단된다. 공구의 이송

속도의 경우 저속일 경우 충분한 입열과 소성변형이 이뤄지지 않아 인장 강도가 낮은 값을 나타내었지만, 속도가 증가할수록 충분한 입열과 소성변형으로 인해 모재와 거의 동등하거나 더 높은 인장강도 값을 나타내었다. 그러나 회전 속도는 너무 클 경우 과도한 입열로 인해 인장강도 증가의 폭이 감소하는 것을 나타내었다. 본 실험 결과가 나타내듯이 공구의 솔더 지름, 이송 속도 및 회전 속도 모두 용접부 인장강도 특성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 3개의 변수들의 수준이 증가할수록 인장강도 값은 증가하는 경향이 나타났으며, 일정한 범위를 벗어나면 인장강도 값이 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 인자의 수준별 인장강도크기를 비교해보면, 공구의 솔더 지름은 2수준, 이송 속도는 3수준, 회전 속도는 수준1에서 각각 가장 높은 값으로 나타나 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 용접부 인장강도를 최대로 하는 변수들의 최적공정조건은 A2B3C1이라고 판단된다. 즉, 공구의 솔더 지름 15 mm, 이송속도 500 mm/min, 회전속도 1,000 rpm의 조합에서 용접부가 가장 높은 인장강도 특성을 나타내며 신뢰도 95% 수준에서 구한 최적공정조건에서의 용접부 인장강도 추정구간은 208.3±5.7 MPa이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 용접 공정의 중요한 변수인 공구의 솔더 지름, 회전속도, 이송속도가 인장강도 특성에 미치는 영향을 삼원배치법과 분산분석을 이용하여 정량적으로 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 마찰교반용접시 공정 변수들이 용접부 인장강도 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 분산분석을 실시한 결과, 공구의 솔더 지름, 회전 속도 및 이송 속도 등 3개의 공정 변수 모두 인장강도 특성에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 각각의 공정 변수들 간의 교호작용은 검출되지 않았다.

2) 용접부의 인장강도의 측정 결과를 바탕으로

인자의 수준별 모평균을 정리한 결과, 공구의 슬더 지름 2수준(15 mm), 이송 속도 3수준(500 mm/min), 회전 속도 1수준(1,000 rpm)에서 용접부가 가장 높은 인장강도 값을 나타내었다.

3) 삼원배치법을 이용한 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 신뢰도 99% 수준에서 구한 최적공정조건에서의 인장강도 추정 구간이  $208.3 \pm 5.7$  MPa으로서 모재 인장강도와 거의 비슷한 값을 나타냈다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)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. W. B. Lee, C. Y. Lee, W. S. Chang, Y. Mo. Yeon and S. B. Jung, 2005, "Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium", Journal of Materials Letters 59, pp. 3315-3318.
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. W. B. Lee, H. S. Jang, U. S. Jang, Y. M. Yeon and S. B. Jeong, 2003, "The effects of FSW parameters on the joint properties of 6061 Al alloy", KWS 03S-Pusan, pp. 179-181.
6. 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.
7. 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.
8. J. H. Lee, and Y. S. Kim, 2013, "Process Optimization for Co-based Self-flux Alloy Coating by Taguchi Method", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 108-114.