

## 머시닝센터를 활용한 알루미늄합금의 마찰교반용접 특성 분석

승영춘<sup>1</sup> · 박경도<sup>2</sup> · 이춘규<sup>†</sup>

공주대학교 금형설계공학과<sup>1,†</sup> · 한국폴리텍대학 화성캠퍼스<sup>2</sup>

### Analysis of friction stir welding characteristics of aluminum alloy using machining center

Young-Chun Seung<sup>1</sup> · Kyoung-Do Park<sup>2</sup> · Chun-Kyu Lee<sup>†</sup>

Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University<sup>1,†</sup>

Department of Computer Applied Mechanical Design, Hwaseong Campus of Korea Polytechnic colleges<sup>2</sup>

(Received December 14, 2020 / Revised December 26, 2020 / Accepted December 31, 2020)

**Abstract:** The purpose of this study was to analyze the change in tensile strength characteristics of the weld when the welding speed and rotational speed of the tool, which are representative variables of the friction stir welding process. The equipment used in the experiment was Machining Center No. 5. The material used in the experiment is an AA6061-T6 alloy, and a rolled plate with a thickness of 2mm was used. Two experimental variables were selected, the welding speed of the tool and the rotational speed of the tool. The experimental conditions were selected in the range in which a healthy weld could be obtained through a preliminary experiment. The welding speed of the tool was increased to 100mm/min, 200mm/min, and 300mm/min, and the rotational speed of the tool was increased to 1000rpm, 2000rpm, and 3000rpm. As a result of the experiment, the tensile strength increased as the rotational speed of the tool changed at each tool welding speed. In addition, as the welding speed of the tool increased, the tensile strength of the weld was increased. The condition with the highest tensile strength of the weld was found to be a tool feed speed of 300 mm/min and a tool rotation speed of 3000rpm.

**Key Words:** Friction stir welding, Aluminum alloy, Machining center, Tensile test

## 1. 서 론

마찰교반용접은 재료를 용융점 이하에 접합시키는 일종의 고상용접 기술로서 미국과 유럽, 일본 등을 중심으로 꾸준히 발전하고 있으며 최근 장비사용에 대한 특허 로열티(Patent Royalty) 문제가 해결되면서 국내에서도 활발하게 연구가 진행되고 있는 추세이다<sup>1-3)</sup>.

마찰교반용접은 비소모성 재료로 특수하게 제작된 공구를 회전시켜 용접하고자 하는 모체에 일부 삽입시켜 마찰열을 발생시키고 강제 이송을 통해

소성유동을 발생시켜 접합이 이뤄지는 공정이다. 특히 용접 공정 중 발생하는 열이 재료의 용융점을 넘지 않아 용융용접이 가지는 기공, 불활성가스 발생 등의 단점이 없으며 모체의 80% 이상의 강성을 가지는 장점을 가지고 있으며, 전 세계적으로 산업분야에서의 적용 범위가 점차 확대되어지고 있다. 특히 마찰교반용접은 알루미늄 합금과 같은 저융점 경량합금의 용접에 특화되어 있다고 해도 과언이 아니다<sup>4)</sup>.

알루미늄 합금은 실용되고 있는 구조용 금속 중에서도 우수한 특성을 가지고 있으며 항공기, 철도 차량, 자동차, 조선 등 각종 수송기기 부품에 널리 사용되어지고 있다. 또한 최근 전 세계적으로 대기 오염에 따른 환경 문제와 이에 따른 환경규제의 강

1. 공주대학교 금형설계공학과

† 교신저자: 공주대학교 금형설계공학과

E-mail: ckt1230@kongju.ac.kr

화와 함께 화석연료의 고갈에 따른 에너지 절약 문제가 대두되면서 이를 해결하기 위한 대체 소재로서 각광받고 있다. 그러나 알루미늄합금은 많은 장점과 함께 해결해야할 몇 가지 단점을 가지고 있다<sup>5)</sup>. 특히 용점이 낮고 활동도가 높아 용융용접에서 산소와 접촉할 경우 발화하거나 쉽게 산화되는 단점을 가지고 있어 일반적인 용융용접으로는 작업이 쉽지 않은 실정이다<sup>6,7)</sup>.

따라서 본 연구에서는 상용 머시닝센터를 활용하여 알루미늄 합금 중 가장 널리 사용되고 있는 6000 계열의 AA6061-T6 합금을 이용하여 마찰교반용접을 실시하였으며 공정변수 중 대표적인 공구의 이송속도와 회전속도의 변화가 용접부분의 인장강도 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험 조건

예비실험을 통해 건전한 용접부분을 갖는 용접 범위를 선정하였으며, 본 실험의 조건을 Table 1에 나타내었다.

마찰교반용접 공정 변수 중에서도 가장 대표적인 변수인 공구의 이송속도와 공구의 회전속도로 선정하였으며, 각각의 변수들을 3가지 수준으로 변화시켜 일정한 공구 이송 속도하에서 공구의 회전속도가 변화할 때 용접부분의 인장강도 특성과 공구의 이송속도가 증가할 때 용접부분의 인장강도 특성을 분석할 수 있도록 설정하였다.

Table 1 Factors and each levels for experiment

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

### 2.2. 실험장치

Fig. 1에 본 실험에서 사용한 장치인 머시닝센터를 나타내었다. AA6061-T6 합금의 마찰교반용접을 적용을 위해 상용 MCT(Machining Center Tooling System, 모델: VX500)를 사용하여 실험을 수행하였으며, 실험재료를 안전하게 고정하기 위해 특수 제작된 지그로 클램핑하였다.

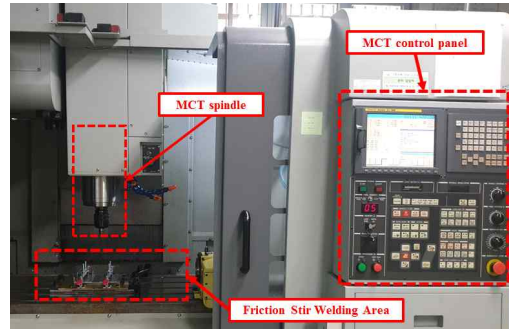


Fig. 1 Friction stir welding experiment device

### 2.3. 실험공구

Fig. 2에 본 논문에서 사용한 마찰교반용접 공구의 사진과 각 부분에 대한 치수를 나타내었다. 실험을 위해 공구는 열간가공용 합금 공구강인 STD61 재료를 CNC선반을 이용하여 가공 후 진공열처리 작업을 통해 제작하였다.

Table 2에 실험에 사용된 마찰교반용접 공구의 치수 및 제원을 표시하였으며, 공구의 크기는 예비실험을 통해 선정하였고, 숄더부분의 지름은 16.0 mm, 핀 부분의 지름은 4.0 mm, 핀 부분의 길이는 1.5 mm 로 제작하였다.

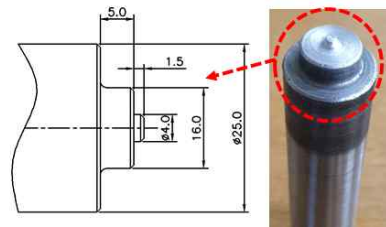


Fig. 2 Friction stir welding tool

Table 2 Tool dimensions and specifications

Item	Tool
Shoulder diameter (mm)	16.0
Pin root diameter (mm)	4.0
Pin length (mm)	1.5
Material	STD61 (tool steel)

### 2.3. 실험재료

본 논문에서 사용한 재료는 AA6061-T6 합금으로서 기계적 강도가 우수하여 고강도를 요구하는 수송기계 부품에 주로 사용되고 있으며, Mg와 Si의 함량이 많고, 인성과 피로강도 개선을 위해 Mn, Cr,

Cu가 다량 함유된 6000계열 Al-Mg-Si 합금으로 분류된다.

Table 3에 AA6061-T6 합금의 화학적조성을 나타내었으며, Table 4에 기계적 성질을 나타내었다.

실험에 사용된 재료는 두께 2.0 mm의 박판을 가로 100 mm, 세로 150 mm로 절단하여, 세로방향으로 맞대기 방식으로 용접을 실시하였다.

Table 3 Chemical composition of AA6061-T6(wt%)

Al	Cr	Ti	Mn	Fe	Si	Cu	Mg
bal.	0.35	0.15	0.15	0.70	0.4	0.15	1.2

Table 4 Mechanical properties of AA6061-T6

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness (Hv)	Elongation (%)
310	276	107	17

### 2.4. 실험공정

Fig. 3에 마찰교반용접공정의 기본 개념을 나타내었다. 공구는 시계방향으로 회전하고 핀 부를 모체에 완전히 삽입한다. 또한 용접부분 표면 및 내부에 충분한 마찰열을 발생시키기 위해 솔더 부분을 0.3 mm 추가 삽입한 후 정해진 이송속도로 이송하였다.

마찰교반용접부분은 공구의 회전방향과 이송방향이 같은 전진부분(Advancing Side)과 공구의 회전방향과 이송방향이 반대인 후퇴부분(Retreating Side)으로 구분할 수 있으며, 후퇴부분에 소량의 버(Burr)가 생성된다.

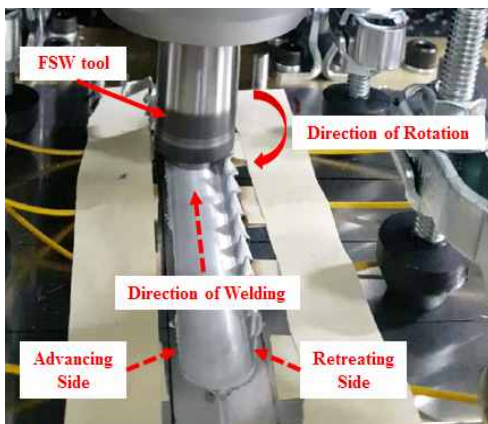


Fig. 3 Friction stir welding process concept

Fig. 4에 대표적인 용접부분의 형상을 나타내었다. 본 논문에서는 충분한 입열 발생을 고려하여 모든 조건에서 동일하게 솔더 부분을 0.3 mm 추가 삽입하였으며, 4초간 대기 후, Table 1과 같은 조건을 적용하여 100mm 길이로 전진하면서 용접 실험을 수행하였다.

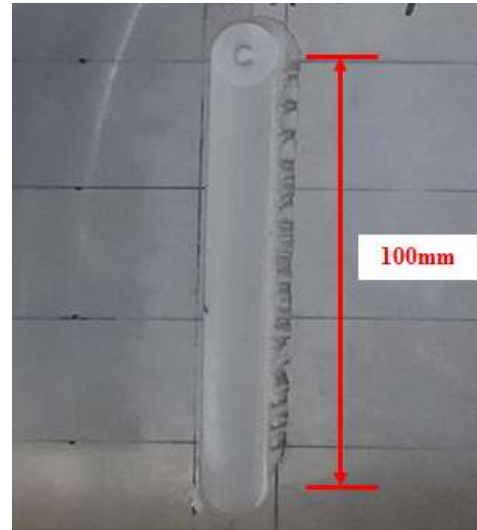


Fig. 4 Friction stir welding shape

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1. 마찰교반 용접부 표면

본 연구에서는 모든 공정변수의 조합인 9개 조건에서 실험을 실시하였으며, 실험의 신뢰성을 높이기 위해 모든 조건에서 3회 반복실험을 실시하였다.

실험을 실시한 후 그중에서 용접부 인장강도가 가장 높게 나온 Case 3의 용접부 표면형상을 Fig. 5에 나타내었다.

총 27회의 모든 실험 조건에서 용접부는 육안검사를 시행한 결과 결함이 발생하지 않은 것으로 관찰되었다.

### 3.2. 마찰교반 용접부 인장실험

Fig. 6은 마찰교반용접부의 인장시험을 위한 시험편으로서 ASTM E8 standard 표준 규격을 적용하였으며, 인장시험편 절단시 발생할 수 있는 열 영향을 최소화하기 위하여 와이어컷팅 가공을 통해 시험편을 제작하였다.

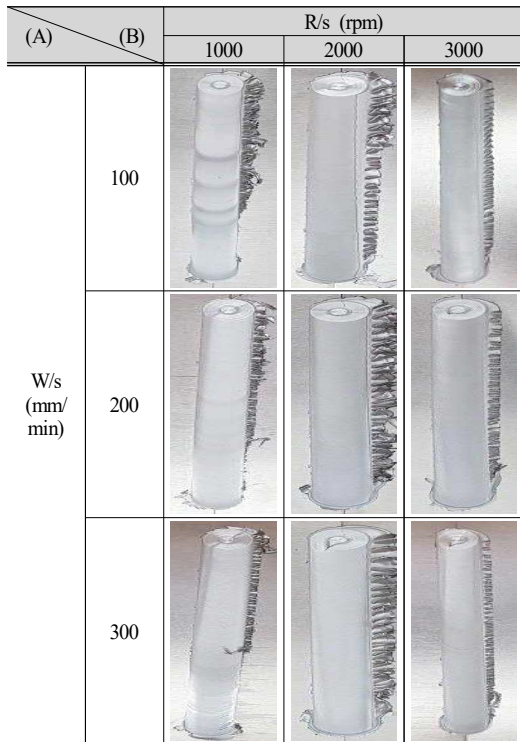


Fig. 5 friction stir welding surface shape of case 3

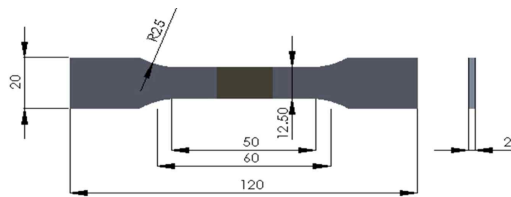


Fig. 6 Specimen for tensile test

Fig. 7에는 인장실험 후 파단된 인장시험편을 나타내었다. 마찰교반용접부분은 공구의 진행 방향과 이송방향이 같은 Advancing Side(AS)부와 서로 반대 방향인 Retreating Side(RS)부로 구분되며, 인장실험 결과 모든 조건에서 AS부에서 파단이 발생하였다. 이는 용접 중 AS부가 RS부보다 더 큰 내부응력이 발생하는 것으로 사료된다.



Fig. 7 Fractured tensile test piece

Table 5와 Fig. 8은 본 실험에서 실시한 총 27회 마찰교반용접부의 인장강도 결과를 나타낸다.

마찰교반용접부분의 인장강도는 공구의 이송속도와 회전속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 모재 인장강도의 70 ~ 90% 범위로 양호한 값을 나타내었다.

Table 5 Tensile strengths of all experimental conditions

No.	Factors		Tensile strength(MPa)		
	W/S (mm/min), (A)	R/S (rpm), (B)	Case1	Case2	Case3
1	100	1000	242.62	233.43	248.55
2	100	2000	246.17	227.05	240.90
3	100	3000	254.53	249.85	255.67
4	200	1000	267.14	261.88	269.22
5	200	2000	276.65	269.83	281.61
6	200	3000	280.23	279.71	282.77
7	300	1000	281.55	276.49	270.27
8	300	2000	287.85	281.65	291.15
9	300	3000	280.37	291.04	291.19

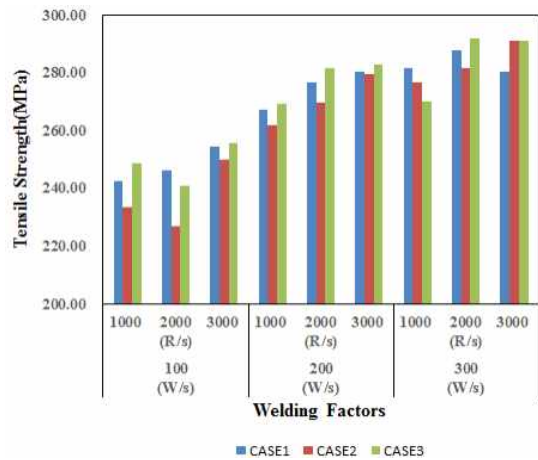


Fig. 8 Tensile strengths of all experimental conditions

### 3.3. 마찰교반 용접부 단면

Fig. 9에 마찰교반용접부분의 단면 형상을 나타내었다. 용접 진행방향과 직각방향으로 단면을 절단하여 마운팅 작업 후 폴리싱 작업을 하였으며, 에칭 후 단면 형상을 촬영하였다.

모든 조건에서 내부 단면에서 기공이나 결함을 발견되지 않았으며, 교반을 통한 소성유동의 흔적이 뚜렷하게 나타나는 것으로 고찰되었다.

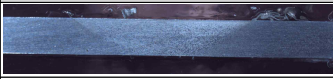
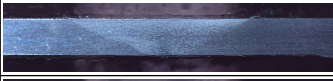




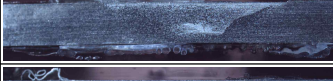
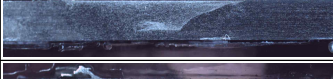

No.	Factors		Weld section
	(A)	(B)	
1	100	1000	
2	100	2000	
3	100	3000	
4	200	1000	
5	200	2000	
6	200	3000	
7	300	1000	
8	300	2000	
9	300	3000	

Fig. 9 Weld section shape of all conditions

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 상용 머시닝센터를 활용하여 알루미늄 합금 중 대표적인 AA6061-T6의 마찰교반용접d에서 공구의 이송속도와 공구의 회전속도의 변화가 용접부분의 인장강도 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 용접부분의 표면 및 단면형상을 통해 결함 유무를 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공구의 이송속도 100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min 범위와 공구의 회전속도 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm 조건의 모든 조합에서 육안검사에 의한 용접부분의 표면에는 결함이 발생하지 않은 것으로 고찰되었다.

2) 공구의 이송속도 100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min 각각의 조건에서 공구의 회전속도가 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm 으로 증가할수록 용접부분의 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었다.

3) 공구의 이송속도 300 mm/min 공구의 회전속도

3000 rpm 조합의 조건에서 용접부분의 인장강도가 291.19 MPa로서 가장 높게 나타났으며, 모재 인장강도의 약 94 %의 값을 나타내었다.

4) 본 연구에서 실시한 모든 조건에서 인장실험 결과 전진부분(Advancing Side)에서 파단이 시작되는 것으로 고찰되었으며, 이는 용접 중 AS부분이 RS부분보다 더 큰 내부응력이 발생하는 것으로 사료된다.

5) 용접부분 단면 촬영 결과 실험의 모든 조건에서 교반을 통한 소성유동의 흔적이 뚜렷하게 관찰되었으며, 내부 기공이나 결함 등은 고찰되지 않았다.

향후 용접 공정변수 변화에 따른 용접부분의 인장강도 특성 변화를 통계적 분석을 통한 정량적인 추가 검증이 필요하다고 판단된다.

#### 참고문헌

- 1) H. T. Kim, S. C. Kil, "Recent Research Trend of Friction Stir Welding Process", Spring Conference of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 49, p. 77, 2008.
- 2) James, M. N, Hattingh, D. G. and Bradley, G. R., "Weld Tool Travel Speed Effects on Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083Aluminum", International Journal of Fatigues, No. 25, pp. 1389-1398, 2003.
- 3) H. S. Park, Y. H. Lee, W. D. Choi, J. B. Ko, "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.
- 4) S. K. Jang, M. S. Han, J. I. Jeon, "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.
- 5) S. K. Jang and S. H. Shin, "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.,

“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, “The Joints Properties of Friction Stir Welded 5052Al Alloy”, KWS 2003-Autumn, pp. 69-71, 2003.

## 저자 소개

**승 영 춘(Young-Chun Seung)**

[학생회원]



- 2019년 3월~현재: 공주대학교 테크노융합대학원 산업디자인.금형융합전공 (석사과정)

< 관심분야 >  
사출 금형 제작

**박 경 도(Kyoung-Do Park)**



- 2012년 2월: 부경대학교 (공학석사)
- 2019년 3월~현재: 한국폴리텍대학교 화성캠퍼스 컴퓨터응용기계과 조교수

< 관심분야 >  
사출 금형 및 유동 해석

**이 춘 규(Chun-Kyu Lee)**

[정회원]



- 2014년 8월 : 공주대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 3월~2016년 12월 : 유한대학교 금형설계공학과 교수
- 2016년 12월~2018년 3월 : 한국폴리텍 대학 창원캠퍼스 금형디자인과 교수
- 2018년 4월~현재: 공주대학교 금형설계공학과 교수

< 관심분야 >  
프레스 성형 및 금형