

# 마찰교반용접에서 툴의 형상이 접합부 강도에 미치는 영향에 관한 연구 The Effect of Strength by Changing Tool Shape in the Friction Stir Welding

천창근\*, 김홍주\*, 박인규\*\*, 전시현\*\*, 장웅성\*

Chang-Keun Chun\*, Hyeng-Ju Kim\*, In-Gyu Park\*\*, Kyung-Su Umm\*\*, Woong-Seong Chang\*

---

## ABSTRACT

As demand regarding a recent energy-saving rises, the using ratio of the aluminum plate in manufacturing of a railroad vehicle has been increasing. The aluminum structure to be applied to a railroad vehicle is divided to single skin and double skin, and the main aluminum product is mainly Al 6005 extrude and Al 5083 rolled in domestic market. The Al 6005 alloy is applied heat treatment in order to improve the strength of material. Therefore there is the disadvantage that the strength of welding zone decreases compare with base material's if you apply to fusion welding like MIG(metal inert gas) welding. In this paper we tried to apply friction stir welding to solve these problems. In this study we investigated how tensile strength and fatigue strength were changed in case of changing the shoulder diameter of thread tool.

---

## 1. 서 론

최근 국내외 산업전반에서 에너지 절감에 대한 요구가 높아짐에 따라 철도차량의 차체 제조에 종래에 주로 사용하던 철계 합금 대신에 경량금속인 알루미늄이나 마그네슘 합금의 사용 비율이 높아지고 있다. 철도차량에 적용되는 알루미늄 차체 구조는 single skin과 double skin으로 나누어지며 구조에 상관없이 국내에서 사용되는 알루미늄 소재는 주로 압출성이 좋은 Al 6005 압출재와 Al 5083 압연재가 대체를 이룬다. Al 6005 합금 압출재는 강도를 향상시키기 위하여 제조하는 과정에서 T6 열처리를 주로 실시한다. 따라서 MIG(metal inert gas) 용접과 같은 용융 용접을 실시하면 어닐링 효과 때문에 접합부 강도가 모재 강도에 비하여 약 60% 정도로 떨어지는 단점이 있다. 따라서 일본을 중심으로 해외 선진 알루미늄 철도차량 회사에서는 가장 최근 개발된 고상용접기술 중 하나인 마찰교반용접을 차체 제조에 적용하고 있거나 적용하려고 추진하고 있다.

따라서 향후 국내 철도차량 회사에서 알루미늄 차체 제작에 마찰교반용접을 적용할 수 있도록 사전 기초연구를 수행할 필요가 있다고 판단된다. 본 논문에서는 Al 6005-T6 압출재에 일반적인 마찰교반용접에 주로 사용되는 thread 툴을 사용하여 마찰교반용접한 후 접합부 단면의 마이크로조직을 분석하고자 한다. 또한 동일한 접합 공정인자에서 툴의 사양만 변경하여 접합부의 대표적인 기계적 특성인 인장강도, 연신율, 항복강도, 피로강도를 측정하여 툴 변경에 따라 어떻게 변화되는 지 관찰하였다.

---

† 책임저자 : 포항산업과학연구원 용접센터 책임연구원

E-mail : ckchun@rist.re.kr

TEL : (054)279-5236 FAX : (054)279-6879

\* (재)포항산업과학연구원

\*\* (주)현대로템

## 2. 사용재료 및 실험 방법

실험에 사용된 알루미늄 소재는 A6005 압출재에 T6의 열처리를 실시하였으며 재료 두께는 3.1mm, 길이 200mm, 너비 95mm로 가공하여 마찰교반접합을 실시하였다. 표 1은 소재의 화학적 조성과 기계적 특성을 나타낸다.

표 1. A6005 압출재의 화학적 조성과 기계적 특성

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
%	0.78	0.13	0.01	0.16	0.5	0.1	0.03	0.02	Remainder
A6005A T6	Tensile Strength (MPa)			Yield Strength(MPa)			Elongation(%)		
	260			215			8		

마찰교반접합을 적용할 때 접합부 강도와 같은 기계적 특성에 영향을 미치는 접합 공정인자는 툴의 크기와 형상, 툴의 회전속도, 접합속도, 전진각 등이 있다. 본 연구에서는 툴의 사양이 접합부의 인장강도 및 피로강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 1과 같이 두 가지 사양의 툴을 설계하였다. 두 가지 툴 모두 숄더 각도는 3°, 핀 길이는 소재 두께를 고려하여 2.8mm로 고정하였다. Tool #1의 직경이 Tool #2보다 조금 작게 설계되었다. 툴의 삽입깊이는 완전 용입이 되도록 모재 두께의 90%이상을 삽입하였으며 전진각은 3°로 고정하였다. 툴 회전속도는 1800rpm, 접합속도는 700mm/min으로 고정하여 실험하였다. 접합 후 접합부의 미세조직은 광학현미경을 사용하여 관찰하였으며 기계적 성질은 인장시험과 피로시험을 실시하여 접합부를 평가하였다. 인장시험편은 그림 2에서와 같이 JIS Z 2201에 따라 가공하였으며 피로시험편은 그림 3에서와 같이 ASTM E466 규격에 따라 가공하였다. 모든 시험편은 접합부의 표면비드 연마 없이 특성 시험하였다.

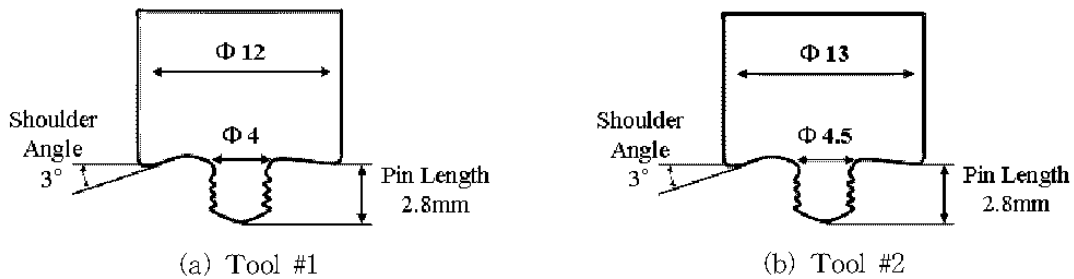


그림 1. 마찰교반용접 툴 사양

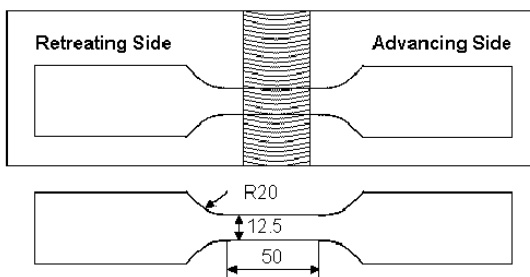


그림 2. 인장시험시편(JIS Z 2201)

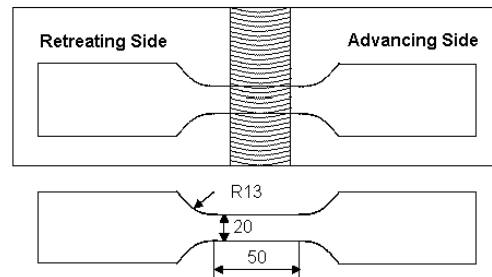


그림 3. 피로시험시편(ASTM E466)

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 접합부 조직

일반적으로 알루미늄과 마그네슘과 같은 비철금속을 마찰교반용접하면 용접부의 미세조직은 마찰열과 소성유동에 의하여 완전한 동적 재결정이 형성되는 교반부(Stir Zone)와 마찰열과 부분적인 소성유동 영향을 받아 국부적인 재결정영역이 관찰되는 TMAZ(Thermo-mechanical Affected Zone), 접합부 주변에는 열영향만을 받은 열영향부(HAZ)로 나누어진다. 그림 4의 (a)와 (b)는 틀의 회전속도를 1,800rpm, 접합속도를 700mm/min로 일정하게 고정하고 각각 다른 사양을 가진 마찰교반용접 틀을 사용하여 접합한 후 용접부의 마이크로 사진을 나타내고 있다. 두 단면 사진 모두 교반부와 TMAZ, 열영향부가 뚜렷이 관찰되었으며 알루미늄 6xxx 계열에서 접합속도에 비하여 회전속도가 낮은 경우 흔히 나타나는 Kissing Bond가 일부 관측되었다. 이러한 Kissing Bond는 접합면에 존재하는 산화피막이 완전히 파괴되지 않고 일부 잔존하여 관측되는 것으로 미세한 Kissing Bond는 접합부 인장강도에는 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. Tool #1을 가지고 접합한 단면의 Advancing Side에는 미소한 홀이 관측되었다. 이러한 홀은 일반적으로 Retreating Side에서는 관측되지 않고 주로 Advancing Side에서 가끔 관측되는 데 그 이유는 접합 시 완전한 교반이 이루어지지 못하여 발생하는 것으로 틀의 삽입깊이를 조금 깊이 하거나 틀의 회전속도를 증가하면 없어지기도 한다.

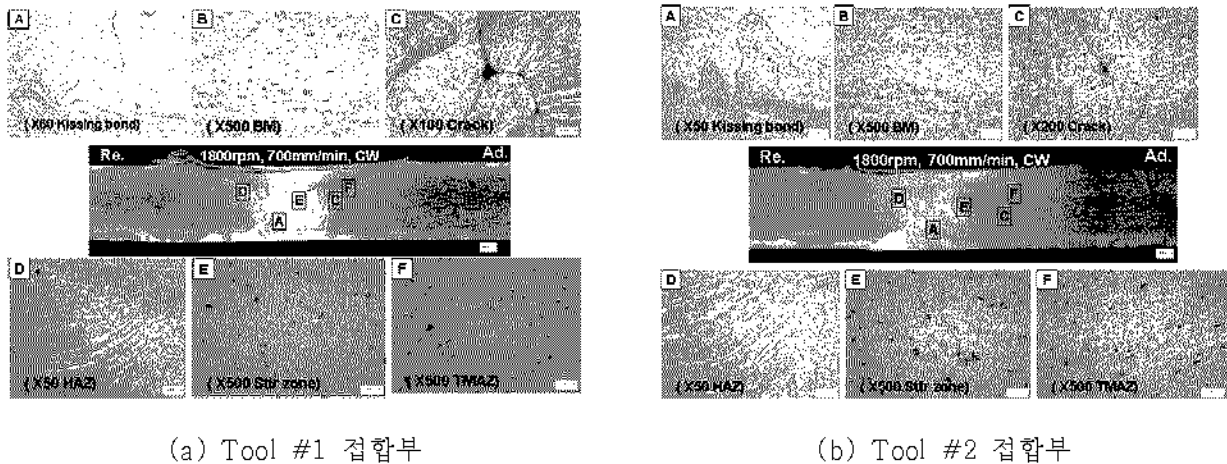
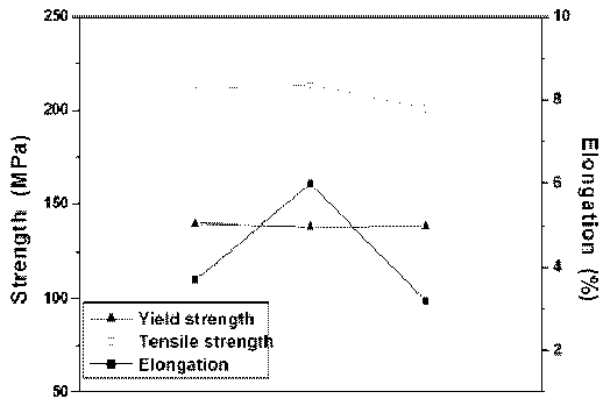


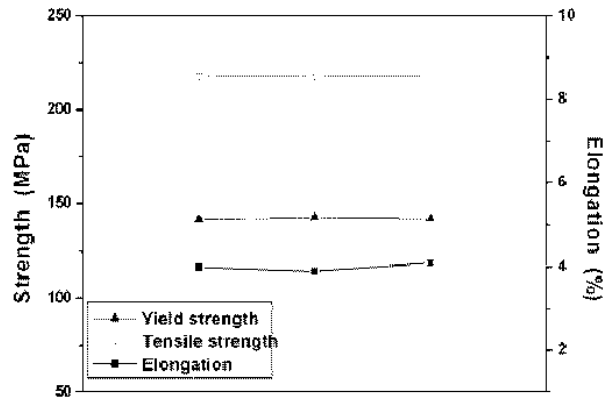
그림 4. 접합부 단면의 마이크로 사진

#### 3.2 인장시험

인장시험도 틀의 회전속도를 1,800rpm으로 고정하고 접합속도를 700mm/min으로 고정하여 실험을 하였으며 Tool #1과 Tool #2를 각각 사용하여 동일한 접합조건으로 3번씩 실험을 수행하여 그림 5에 도시하였다. 인장강도 측정결과 Tool #1의 평균 인장강도는 208Mpa, Tool #2의 평균 인장강도는 218Mpa로 모재강도의 80~84% 수준으로 아크용접의 경우보다 매우 높게 측정되었다. 항복강도는 Tool #1의 경우 139Mpa, Tool #2는 142Mpa로 모재 항복강도의 약 65% 수준이었다. 연신을 측정결과 Tool #1의 경우 4.3%, Tool #2는 5.1%로 모재 연신율 8%와 비교하여 비교적 양호한 수준이었다. 인장시험결과를 요약하면 인장강도 및 항복강도, 연신율 모두 Tool #2의 경우가 우수한 것으로 나타났다.



(a) Tool #1 접합부



(b) Tool #2 접합부

그림 5. 접합부 인장강도

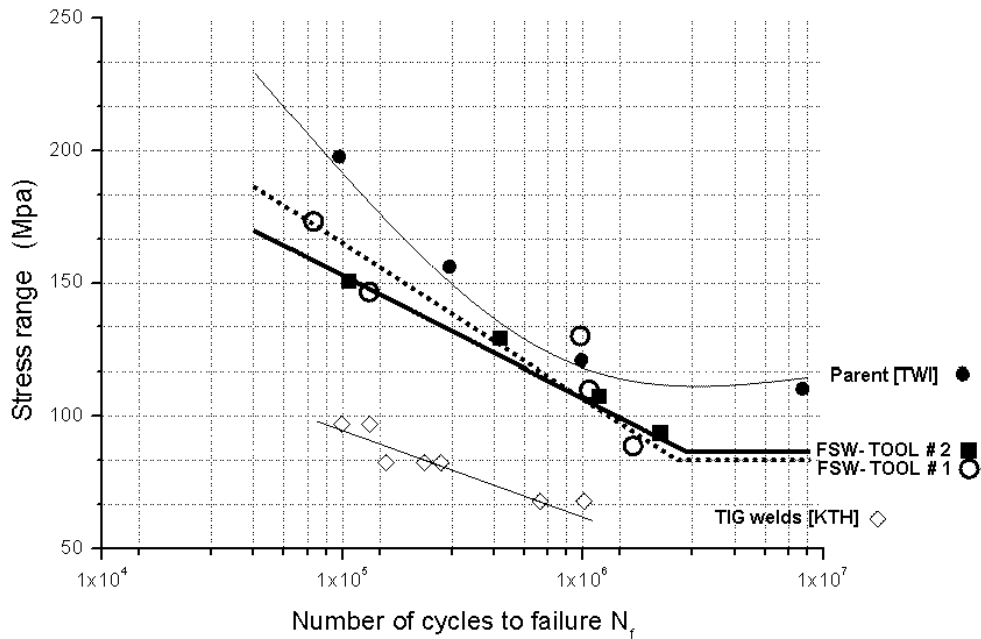


그림 6. 피로강도 시험결과

### 3.3 피로시험

피로시험은 Instron 50ton 시험기를 사용하여 7Hz의 정현 주파수로 하중제어를 실시하였으며 Tool #1 과 Tool #2 각각 5가지 경우의 하중을 인가하여 진동 시험하였다. 그림 6은 피로시험결과를 도시한 것으로 모재에 대한 피로강도 곡선은 TWI에서 시험한 결과를 그대로 사용하였으며 TIG 용접에 대한 피로강도 곡선은 KTH에서 시험한 결과를 그대로 사용하였다. 본 연구에서 수행한 피로강도의 S-N 선도는 피로수명 값을 단순선형회귀법(simple linear regression)을 사용하여 계수를 구한 후 그 값을 단축 양진(fully reversed) Basquin의 식에 대입하여 S-N선도를 작성하였다. 피로시험결과 모재보다는 떨어지지만 TIG 용접부에 비하여 현저히 높은 강도를 유지하는 것을 알 수 있다. Tool #2가 Tool #1보다 약간 우수한 피로강도를 가지는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 차체 제작에 주로 사용하는 Al 6005-T6 압출재에 마찰교반용접을 적용하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 사양이 다른 두 가지 툴 즉, Tool #1과 Tool #2를 사용하여 마찰교반용접한 마이크로 단면을 관찰한 결과 모두 교반부와 TMAZ, 영영향부가 뚜렷하였다. 그리고 교반부에 Kissing Bond가 희미하게 남아있었으며 Tool #1을 가지고 접합한 단면의 Advancing Side에 미소한 홀도 관측되었다.

2) 인장시험 결과 평균 인장강도는 모재강도의 80~84% 수준이었으며 항복강도는 Tool #1의 경우 139Mpa, Tool #2는 142Mpa로 모재 항복강도의 약 65% 수준이었다. 용접부 연신율은 Tool #1의 경우 4.3%, Tool #2는 5.1%로 모재 연신율 8%와 비교하여 비교적 양호한 수준이었다.

3) 피로강도의 S-N 선도는 피로수명 값을 단순선형회귀법(simple linear regression)을 사용하여 계수를 구한 후 그 값을 단축 양진(fully reversed) Basquin의 식에 대입하여 작성하였다. 피로시험결과 모재보다는 떨어지지만 TIG 용접부에 비하여 현저히 높은 강도를 나타내었다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 서승일 (2004년), "알루미늄 철도차량의 용접 기술", 대한용접학회지, 제22권 제3호, pp.228-234
2. 서승일 (2005년), "알루미늄 철도차량 차체 용접부의 강도 특성에 관한 연구", 대한용접학회지, 제23권 제1호, pp.35-40
3. 장용성 외 5명 (2008년), "차세대 분산형 고속전철용 압출재 알루미늄 합금의 마찰교반접합", 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, pp.980-985
4. Yasutomo ODA 외 3명(2007), "Fatigue Design Diagram for Weld Joints on Aluminum Alloy Railcar Body Shells, "The 10th International Conference on Joints in Aluminum, proceedings, pp.292-297
5. 이원배 외 6명(2004년), "5052 알루미늄 합금 마찰교반접합부 특성에 미치는 접합인자의 영향", 대한용접접합학회지, 제22권 제3호, pp.69-76