



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 8월

석사학위 논문

이종 알루미늄 합금 TWB  
마찰교반용접부의 기계적 특성에  
관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

선 민 수

이종 알루미늄 합금 TWB  
마찰교반용접부의 기계적  
특성에 관한 연구

Study on the mechanical properties of dissimilar  
aluminum alloys friction stir welded joints for  
TWB

2017년 8월 21일

조선대학교 대학원  
용접·접합과학공학과  
선 민 수

이종 알루미늄 합금 TWB  
마찰교반용접부의 기계적  
특성에 관한 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 4월

조선대학교 대학원  
용접·접합과학공학과  
선 민 수

## 선민수의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>방한서</u> (인)
위 원	조선대학교	교수	<u>방희선</u> (인)
위 원	조선대학교	교수	<u>송국현</u> (인)

2017년 05월

조선대학교 대학원

## CONTENTS

List of Figures .....	IV
List of Tables .....	V
Abstract .....	VI
1장. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.1.1 연구 배경 .....	1
1.1.2 연구 목적 .....	3
1.2 국내외 기술 동향 .....	5
1.3 마찰교반용접 .....	8
1.3.1 마찰교반용접의 원리 .....	8
1.3.2 마찰교반용접의 특징 .....	10
1.4 알루미늄 소재의 특징 .....	12

2장 . 연구 방법 .....	16
2.1 연구 방법 및 연구내용 .....	16
2.2 실험조건 .....	18
2.2.1 사용소재 및 용접 장비 .....	19
2.2.2 용접조건 .....	22
2.3 용접부 특성 평가 .....	26
2.3.1 용접부 표면 및 단면 특성 .....	26
2.3.2 인장시험 .....	27
2.3.3 미세조직 관찰 .....	29
2.3.4 경도시험 .....	31
3장 . 결과 및 고찰 .....	33
3.1 이종 알루미늄 합금 용접부 표면 및 단면 특성 .....	33
3.1.1 용접부의 표면 및 단면 특성 .....	33
3.1 이종 알루미늄 합금 용접부 기계적, 금속학적 특성	40
3.2.1 인장강도 및 경도 분포 특성 .....	40
3.2.2 미세조직 특성 .....	45
4장 . 결론 .....	48
참고문헌 .....	49

## List of Figures

Fig. 1.1 Examples of joining and forming of different materials using TWB method .....	3
Fig. 1.2 Strong substitution trend for aluminium in automotive .....	6
Fig. 1.3 China' s consumption pattern changing, with transport emerging as a key engine of growth .....	7
Fig. 1.4 Aluminum consumption .....	7
Fig. 1.5 Schematic drawing of working process principle of FSW .....	8
Fig. 1.6 Process of friction stir welding .....	9
Fig. 1.7 Shape of FSW welded part .....	9
Fig. 1.8 Characteristic of FSW .....	10
Fig. 1.9 Comparison of deformation by welding method .....	11
Fig. 2.1 Dimension of FSW welded specimen .....	19
Fig. 2.2 Friction stir welding equipment .....	20
Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding .....	23
Fig. 2.4 Zig system used for FSW butt weld joint .....	24
Fig. 2.5 Schematic diagram of FSW process .....	25
Fig. 2.6 Tensile test machine .....	27
Fig. 2.7 Dimension of tensile test specimen .....	28
Fig. 2.8 Optical microscope .....	30
Fig. 2.9 Design drawing on specimens of mechanical test .....	31
Fig. 2.10 Vickers hardness test scheme and equipment .....	32
Fig. 3.1 Tensile strength of FSW welded joints in various ratio .....	41
Fig. 3.2 Fractured welded specimens after tensile test .....	42
Fig. 3.3 Hardness distribution of FSW welded joints .....	44



## List of Table

Table. 1.1 Mechanical properties of Aluminum alloys .....	12
Table. 1.2 Components and uses of non-heating treatment .....	13
Table. 1.3 Mechanical properties of non-heating treatment 5000 aluminum alloys .....	13
Table. 1.4 Components and uses of heat-treated aluminum alloys .....	14
Table. 1.5 Mechanical properties of 6000 aluminum alloys .....	15
Table. 1.6 Comparative characteristics of aluminum and mild steel .....	15
Table. 2.1 Chemical composition of Al5052-0/Al6061-T6 .....	18
Table. 2.2 Mechanical properties of Al5052-0/Al6061-T6 .....	18
Table. 2.3 FSW equipment specification .....	21
Table. 2.4 Welding conditions for friction stir welding .....	22
Table. 2.5 Configuration of tensile test specimen .....	28
Table. 2.6 Keller 's etching reagent .....	29
Table. 2.7 Hardness testing condition .....	32
Table. 3.1 Top and bottom surface of FSW welded joints fabricated at traveling speed 48mm/min .....	34
Table. 3.2 Top and bottom surface of FSW welded joints fabricated at traveling speed 60mm/min .....	35
Table. 3.3 Cross section of FSW welded joints fabricated at traveling speed 48mm/min .....	36
Table. 3.4 CCross section of FSW welded joints fabricated at traveling speed 60mm/min .....	37
Table. 3.5 Tensile test results of FSW welded joints in various angular velocity ratios .....	41
Table. 3.6 Cross-section of FSW welded joints .....	46

## ABSTRACT

### Study on the mechanical properties of heterogeneous aluminum Friction Stir Welding for TWB

Sun Min-Soo

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science  
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Automotive industry is strongly required to preserve the environment, such as global warming, smog, CO<sup>2</sup> emission regulations and PM, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>x</sub> reduction, which are important issues along with reduction of fuel consumption. The development of technology that can achieve both environmental regulation and economic efficiency is an important topic. As a method to solve such a demand, there is the way to improve the performance of the engine and realize it by lightening the weight of the vehicle body. It's very costly and little effective even though long period to make a research. It's sure that the lightness of the body is an important factor in the economic feasibility of the material and the construction method, but it is more effective in improving the environmental regulation and fuel efficiency than improving the engine.

Lightweighting technology was the main subject on this study. Lightweighting technology can suggest alternate redevelopment and conversion of production method. Herewith, it's used that the aluminum alloy has already sufficient supply and marketability among non-ferrous metals. And

the application of the improved welding technique has been studied as a main subject. The study was made to reduce the weight of the body by using Friction Stir Welding (FSW), which is a solid joining process of low heat input type in order to solve the thermal deformation that is the main problem on the welding deformation in aluminum alloy.

This study has the purpose to investigate the welding quality of friction stir welding, using aluminum alloys Al5052-0 and Al6061-T6, which are different materials and thicknesses. Especially, the welding quality analysis of aluminum alloys Al5052-0 and Al6061-T6 is valuable as a basic study to replace heterogeneous bonding of SS41(SS40) steel with aluminum alloy. Since Al6061-T6, a heat-treated material among aluminum alloys, has mechanical characteristics comparable to SS41 steel.

Two types of friction stir welding were proceeded, using aluminum alloy 5052-0(3mm) and 6061-T6(2.5mm) as a research method. The tool shape and load pressure were fixed and the parameters were varied from 300 to 500 rpm and movement rate from 0.8 to 1.0 mm/sec. which can be considered with welding quality in this experiment.

As for the surface and cross section, the surface is rough at the starting point on a rotation speed of 300 rpm, while it's little smooth of 500 rpm. However, considering the cross section, it was confirmed that the joining is completed to the end of the joint due to the smooth plastic flow at 300 rpm, which is relatively low rotational speed. Namely, it was confirmed that a relatively reliable bonding is achieved at the condition of the angular velocity ratio, 6.25(300rpm, 48mm/min), comparing with 10.4 (500rpm, 48 mm/min). The property of tensile strength is the maximum(183.1MPa) at the movement speed of 300 rpm and the minimum value at 500 rpm (162.9MPa). It can be seen that the plastic flow becomes stronger at higher speed of rotation because of the frictional heat while the transfer speed does not allow sufficient agitation to the ends of the joints.

That's to say, it's confirmed that the less angular velocity can make it sufficient plastic flow and smooth stirring while the larger angular velocity

not available to the end of the joints in this experimental condition. The minimum hardness value occurred in the Stir Zone(SZ) and, especially, precipitation hardening type Al6061, which is a heat treatment material, showed significant decrease in hardness value by precipitation melting due to heat effect (minimum 47Hv at maximum 83Hv).

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 연구목적

### 1.1.1 연구배경

자동차산업에 있어서 지구온난화와 미세먼지 등의 환경보존의 의무가 산업계에 강하게 요구되고 있는 상황에서 CO<sup>2</sup> 배출량규제와 PM, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 저감이 연비의 절감과 더불어 중요한 이슈이다. 이런 환경적 규제와 경제성을 모두 확보할 수 있는 기술의 발전이 중요한 화두인데 이러한 요구를 해결하기 위한 방법으로 엔진의 성능을 높이는 방법과 차체의 경량화를 통해 실현하는 방법이 있다. 하지만 엔진의 효율을 높이는 방법은 그 비용과 연구기간이 많이 들고 노력에 따른 효과가 크지 않다. 차체의 경량화는 엔진의 효율을 높이는 방법보다 좀 더 다양한 해법이 있기는 하지만 소재 및 공법에 따른 경제성의 논리가 중요한 요소이다.

본 연구에서는 경량화기술을 주요 연구과제로 삼았다. 경량화기술은 대체재개발과 생산공법의 전환을 제시 할 수 있는데, 여기서는 비철금속(非鐵金屬)중에서 이미 충분한 공급량과 시장성을 갖고 있는 알루미늄합금을 이용하고 이에 맞는 개선된 용접공법의 적용을 주요과제로 연구하고자 한다. 알루미늄합금에 용접변형의 주요원인인 열변형을 해결할 수 있는 저입열 고상용접방식의 마찰교반용접(Friction Stir Welding)을 이용하여 차체의 경량화를 위한 연구를 하고자한다.

차체의 경량화효과를 살펴보면, 1,500kg 세단형 자동차의 경우 10%의 경량화를 통해 연료사용의 6~8%를 절감할 수 있다는 보고가 있고 정지거리를 5%줄이며 일산화탄소(CO)를 4.5%, 탄화수소(HC) 2.5%, 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 8.8%를 줄일 수 있다. 또한 자동차의 조향성능을 6%향상하고 내구성을 1.7배정도 높일 수 있다고 보고되었다. 2020년까지 세계 각 국가별 연비 및 배출가스 규제 현황을 보면, 미국은 202년까지 연비를 23% 강화하여 19.81km/l 이상으로 규제한다는 정책을 발표했으며, 유럽은 CO<sup>2</sup> 배출량을 현행 130g/km보다 27% 강화된 95g/km로 규제할 방침이다. 우리나라도 2020년까지 연비를 43%강화하여 24.3km/l, CO<sub>2</sub>배출을 30% 강화하

여 97g/km로 규제하려고 발표한 바 있다.[5]

경량화를 위한 용접공법을 살펴보면 용접에 있어 용접성과 용접변형의 기술적 연구가 필요하다. 자동차 및 조선 산업에 있어서 구조의 용접변형은 조립을 위한 용접 단계별로 필연적으로 발생하게 된다. 각 용접 단계에서 발생하는 이러한 변형은 로봇 등 용접자동화와 기계의 도입을 방해하고 있으며 후행 조립단계의 취부 시 부가적인 교정작업을 초래하여 조립과 가공의 공수를 증가시키는 요인이 된다. 자동차산업과 맥락은 같지만 조금은 다른 분야인 소형선박의 경우 비중에 비해 강도가 좋고 경제적인 소재로 복합재(FRP, Fibre-reinforced plastic)가 많이 사용되고 있으나 대부분의 접착경화제(Epoxy Resin)가 열경화성으로 환경오염 및 리사이클 문제 등으로 사용이 제한되고 있으며 그 대체재로서 알루미늄합금이 부각되고 있다. 아직 소재의 가격과 용접기술의 문제로 FRP를 완전 대체하기는 좀 더 시일이 필요하지만 경량화를 위하여 알루미늄합금과 같은 비철금속의 합금에 대한 접합공정이 필요하다. 현재 알루미늄합금으로 자동차 차체나 선박을 건조하기 위해서는 용융용접 및 레이저 용접을 활용한 연구와 이를 복합한 하이브리드 용접이 연구되고 있다.[8]

알루미늄합금 용접 시 산화막으로 감싸져 있는 표면의 용융온도가 2,000℃로 강재보다도 높고 재료의 용융점은 660℃정도로서 용접 시 열영향부(HAZ)에 열 변형이 생기기 쉬우며 시효(時效)성 취화가 생길 수 있다. 강재(Steel)와 달라서 알루미늄합금은 합금소재의 함량에 따라 용접성 및 가공성이 쉽지 않으며 편차가 크다. 알루미늄합금은 용접시에 기포가 발생하고 화합물 등의 생성으로 인한 강도가 감소하는 현상, 즉, 열 변형 및 진행 중 비드가 빠지는 용접불량이 발생하고 있다. 아크용접의 경우 용접장치 가격이 저렴하고 용가재가 다양하나 용접부의 열영향부의 열화되는 영역이 넓고 기계적 성질의 변화량이 크기 때문에 용접 하는 사람의 숙련도에 따라 차체나 용접부 품질이 좌우된다는 문제점이 있다.[6]

이러한 문제를 해결하거나 개선하기 위하여 알루미늄합금 간 이종, 이두께 용접 연구 뿐만 아니라 알루미늄합금과 스테인리스의 접합연구, 알루미늄과 티타늄(Ti) 합금 접합 등에 고상용접 FSW(Friction Stir Welding: 마찰교반용접)에 의한 연구가 다양한 분야에서 시도되고 있다. 본 연구는 기존 연구를 참고하고 좀 더 세분

화하여 서로 다른 두께의 이종알루미늄합금 A15052-0와 A16061-T6의 용접을 위해 마찰교반 용접기술을 채용하여 이종 알루미늄 합금 마찰 교반 용접부에 대한 신뢰성을 확보하고자 한다.

### 1.1.2 연구목적

자동차경량화를 위한 중요한 요소인 경량소재를 이용하고 생산공정을 최적화하는 과정에서 이종재료의 접합과 성형가공 공법의 적용이 필연적으로 요구되는데, 본 연구에서는 이종, 이두께의 소재를 접합하고 이를 재단하여 성형하는 TWB(Tailor Welded Blanks)제작을 위한 기초연구로써 이종재의 맞대기 용접의 접합부 강도 고찰을 통한 경량화 연구를 하고자 한다.

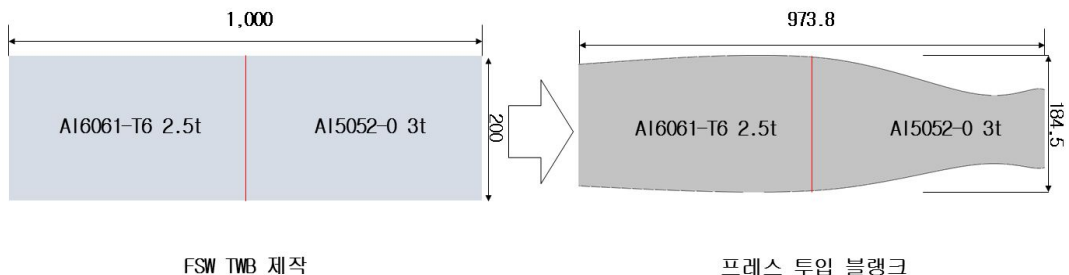


Fig. 1.1 Examples of joining and forming of different materials using TWB method

알루미늄합금의 용접은 주로 GMAW, GTAW 방법이 이용되는데 이러한 아크용접의 경우 높은 입열량에 의한 고온균열과 큰 변형의 문제로 강재(Fe)의 용접에 비해 난이도가 높다. 알루미늄의 강점을 활용한 자동차와 선박 산업의 발전을 위해서는 자동화를 포함한 용접과 접합기술이 요구되고 있으며 본 연구는 이러한 용접기술의 문제를 개선하고자 한다.

알루미늄합금 중 5000계 알루미늄합금은 비열처리합금 중 우수한 기계적특성을 지니고 있으며 다른 비열처리 합금에 비해 인장강도 등의 강도의 특성이 좋고 내부식성, 성형가공, 용접성을 향상시킨 합금이다. 비열처리 합금인 A15052는 A15083에 비해 강도는 떨어지나 내식성, 특히 자동차용 구조부재 뿐만 아니라 내해수성에 강

하고 용접성과 성형성이 우수해 선박용 구조부재나 연료탱크 등의 용재로 많이 쓰인다. Al6061은 마그네슘(Mg) 및 규소(Si)와 약간의 크롬(Cr)을 함유하고 있으며 515~550℃에서 용체화(溶體化, 담금질) 처리한 후 수냉하고, 다시 170~810℃에서 8시간 정도 유지하여 시효경화(Age Hardening) 처리를 하여 6061-T6합금은 신율 12% 이상, 인장강도 340MPa, 항복강도 250MPa등 SS41 강종에 견줄만한 우수한 기계적 특성을 가진다. 또한 내식성, 용접성이 좋고 압출성형 등의 냉각 가공성이 양호하여 자동차 구조부재와 해수용 기자재와 구조부품용으로 많이 쓰인다.[1]

따라서, 본 연구에서는 알루미늄합금 Al5052-0와 Al6061-T6, 이종재이면서 서로 다른 두께의 소재에 대하여 마찰교반용접시 용접 특성을 고찰하고자 하였다.

이를 위해 먼저 용접 파라미터 변화에 따른 용접부의 표면 및 단면의 특성을 분석하고, 아울러 용접부의 기계적 성질 및 금속학적 특성을 비교, 평가하였다.



## 1.2 국내·외 기술 동향

고상 용접 공정중 하나인 FSW는 제한적으로 적용되고 있는 실정이며 일부 대학과 연구기관을 중심으로 Al합금 등 비철금속합금의 공정개발에 대하여 한정되어 있다. FSW를 보다 넓은 제조업 분야에 확대하기 위해서는 접합소재와 FSW Tool과의 상호작용에 대한 이해와 열적 기계적 성질에 대한 메커니즘의 연구가 필요하다. 특히, 생산성향상을 위한 접합속도 향상과 Tool의 재질과 설계기술이 뒷받침 되어야 하며 복잡한 형상의 구조물과 부품제작에 적용하기 위한 비선형 접합체계의 개발이 필요하다.

최근에는 알루미늄합금에 이어 티타늄(Ti), 마그네슘(Mg), 구리(Cu)합금 등이 마찰교반용접 기술개발의 축이 되고 있고 더 나아가서 철강, Ni 합금 그리고 금속간화합물 역시 적용이 고려될 것이다. FSW 기술은 기본적으로 사용전력과 가스, 용가재의 절약 및 흠과 유해광선으로부터의 작업환경의 개선이라는 이점도 있어 향후 자원의 절감 및 지구온난화 문제 등으로 환경규제가 더욱 강화되어 간다고 본다면 그 사용이 증대될 것이다.[19]

2013년 이후 Al과 Mg합금의 경량금속이 주류를 이루었던 과거와 달리 구조용 연강, 고강도강, 초내열 Cr합금강 및 Ti합금 등의 고용점 금속재료에 대한 연구발표가 증가하고 있으며, 공정조건에 따른 접합부의 기계적 특성 및 미세조직에 대한 보고가 많아지고 있다. 하지만 경량의 연성금속의 경우와 달리 고강도강이나 초내열합금 등 특수강의 FSW 적용은 여전히 툴(Tool)의 마모에 따른 문제를 해결하지 못하고 있어 내마모성 및 인성이 뛰어난 툴소재의 개발이 시급하다. 따라서 이러한 툴의 소재개발과 형상설계는 FSW의 상업적응에 있어서 반드시 향상되어야 할 핵심 기술이다.[19]

FSW 적용확대를 위한 연구를 살펴보면, 접합이음부정도의 영향, 툴 전진각도의 영향, 툴 형상의 영향, 응력부식 균열성, 저온에서의 기계적 성질, 결함 생성시의 강도 특성, 시계 이중접합이음부의 특성 등에 대한 연구결과가 보고된바 있다.

FSW 접합부의 미세조직 형성기구가 1000계, 5000계, 6000계 합금을 중심으로 조직형태와 접합계면의 산화막 거동에 대한 미세관찰이 연구되어 지고 있다. 또한, 재료의 FSW 접합성이란 관점에서 이중 Al합금, 다이캐스트 Al재에 대한 FSW 접합

성이 평가가 이루어지고 있다.

최근의 추세를 보면 FSW는 국내·외 수송 기계, 자동차, 선박, 항공 등 많은 산업에서 적용되고 있으며 특히 국외의 자동차 산업에서 마찰교반용접이 적용된 차량을 생산하여 상용화하고 있다. 조선업 분야에서는 높은 수준의 완성품을 제작하고 있으며, 완성된 제품은 선급협회(DNV, RINA, LR)와 같은 공인 기관에서 승인을 받았다. 또한 항공우주 산업에서는 주로 로켓의 엔진 탱크를 제작하는데 적용되고 있으며, 자동화가 어려운 리벳용접을 마찰교반용접으로 대체함으로써 리벳용접에 소용하는 비용의 약 20%이상을 절감하고 있다고 한다.[6]

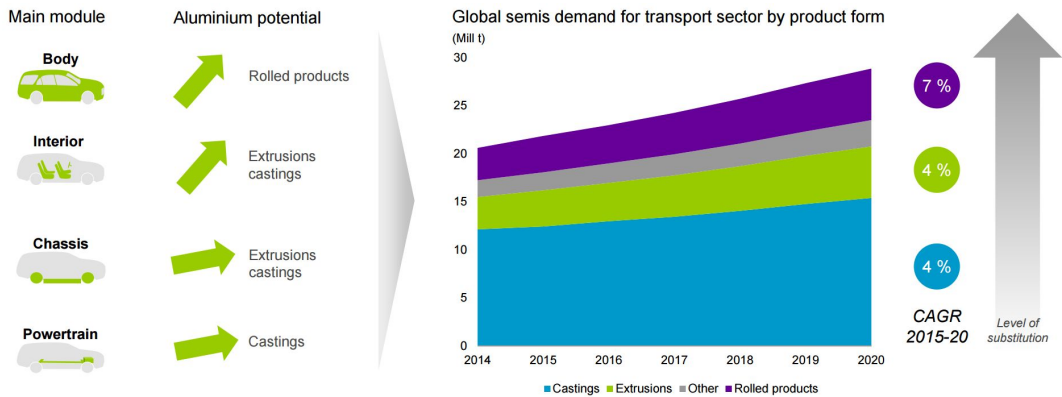


Fig. 1.2 Strong substitution trend for aluminium in automotive (Source: CRU, Hydro analysis)

Chinese semis demand per key segments  
Mill tonnes

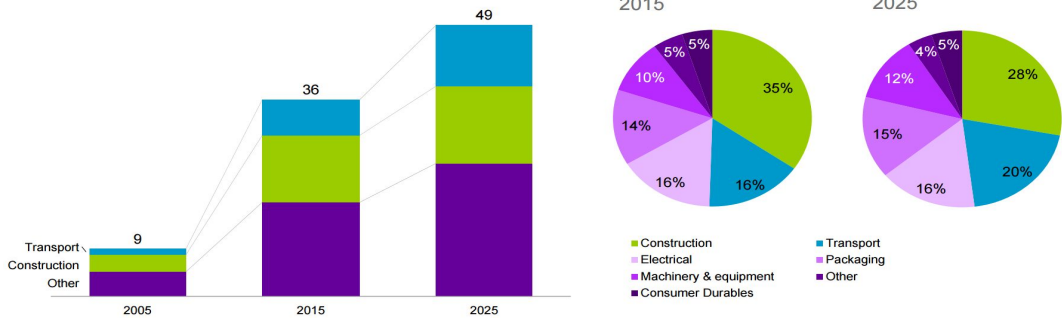


Fig. 1.3 China's consumption pattern changing, with transport emerging as a key engine of growth(Source: CRU, Hydro analysis)

2006 ~ 2015년 사이 총 알루미늄 소비는 2,300만톤 증가하여 68%가 증가했다. 이 성장의 대부분은 현재 세계 소비의 절반이상을 차지하는 중국에 기인 할 수 있으며, 같은 기간 동안 중국의 소비량은 두배 이상 증가하여 2,200만톤 증가했다.

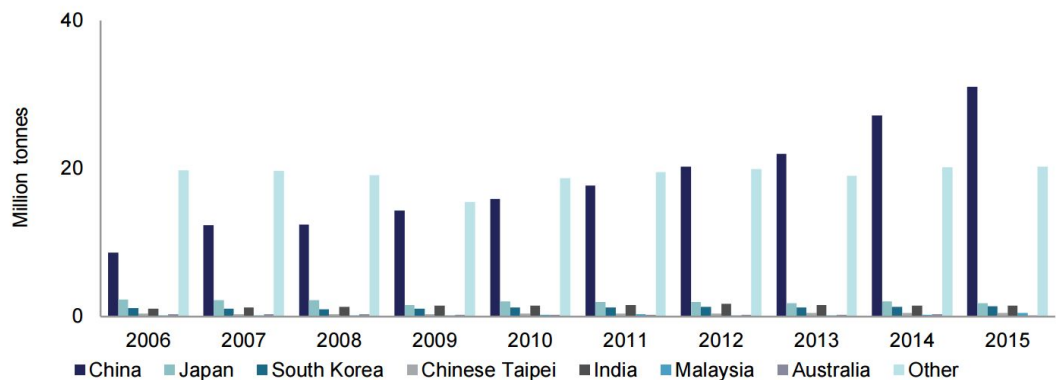


Fig. 1.4 Aluminum consumption (Source: WBMS; Department of Industry, Innovation and Science)

### 1.3 마찰교반용접

#### 1.3.1 마찰교반용접의 원리

마찰교반용접(FSW)은 TWI(The welding institution, UK)에서 개발된 것으로 초기에는 동종 알루미늄 용접을 시작으로 최근에 이종재의 용접이 주목받으면서 여러 가지 산업에 적용되어지고 있다. FSW는 용융 용접시 발생하는 기공, 균열, 잔류응력 등과 같은 결함을 보완할 수 있는 고상용접방식으로 친환경적이고 에너지 소비가 낮은 용접기술이다.[7]

Fig.1.5와 같이 FSW는 일종의 연속공정으로서 용접모재에 비해 경한 재질을 지닌 툴(tool)을 회전시키면서 소재의 용접부에 회전하는 공구가 삽입되면서 소재와 툴 사이에서 가압력과 마찰열이 발생하게 된다. 그리고 기계적인 힘을 가하여 핀(pin)이 용접선을 따라서 이동하고, 가열된 부분이 핀의 앞부분(advancing side)에서 뒤쪽(retreating side)으로 압출하며, 마찰열과 기계적 가공의 조합에 의해서 고상용접부가 만들어진다.[19]

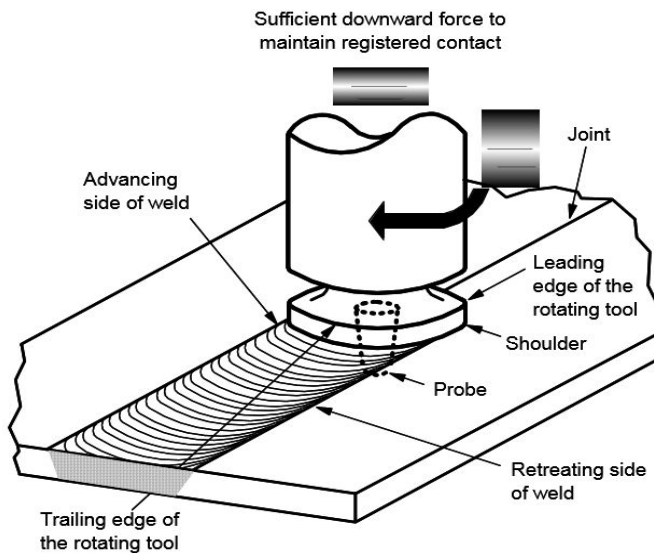


Fig. 1.5 Schematic drawing of working process principle of FSW

접합공정의 순서는 툴을 모재에 삽입하기 전에 회전시키고 난후 모재와 접촉하여 열을 발생시킨다. 그리고 툴의 Shoulder 부분이 접촉하여 가열영역을 점차 넓힌 후 툴의 이송으로 툴 하부의 접촉부분의 소재가 소성 유동하여 마찰교반용접 너겟(nugget)을 형성함으로써 접합이 이루어진다.

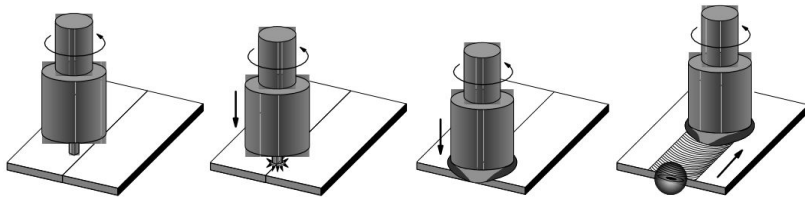


Fig. 1.6 Process of friction stir welding

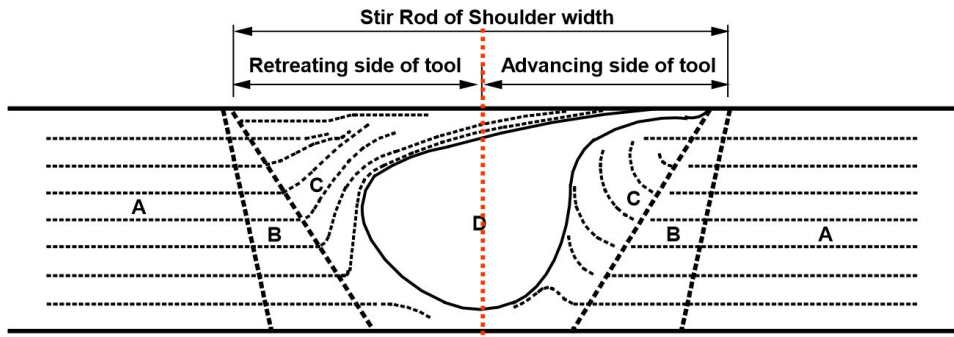


Fig. 1.7 Shape of FSW welded part

- A : BM (Base Metal)
- B : HAZ (Heat Affected Zone)
- C : TMAZ (Thermo-mechanically Affected Zone)
- D : SZ (Stir Zone)

### 1.3.2 마찰교반용접의 특징

FSW 공정에서는 보호가스가 필요 없으며 용가재가 필요 없고 접합에 따른 변형이 없거나 있어도 아크용접이나 레이저용접에 비해 무시할 정도로 적다. 접합 중 흠의 발생이 없고 자외선 등의 유해광선이 발생하지 않는 환경친화적 접합공정이다. 또한, 기계적 에너지 효율이 높아서 12mm의 6000계열 알루미늄합금에 대해 3kW의 에너지이면 충분하다고 한다.[19]

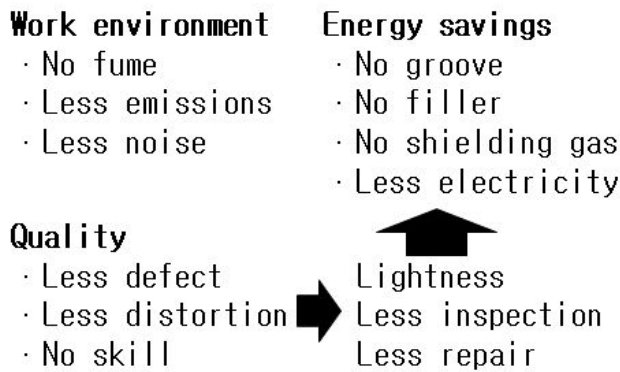
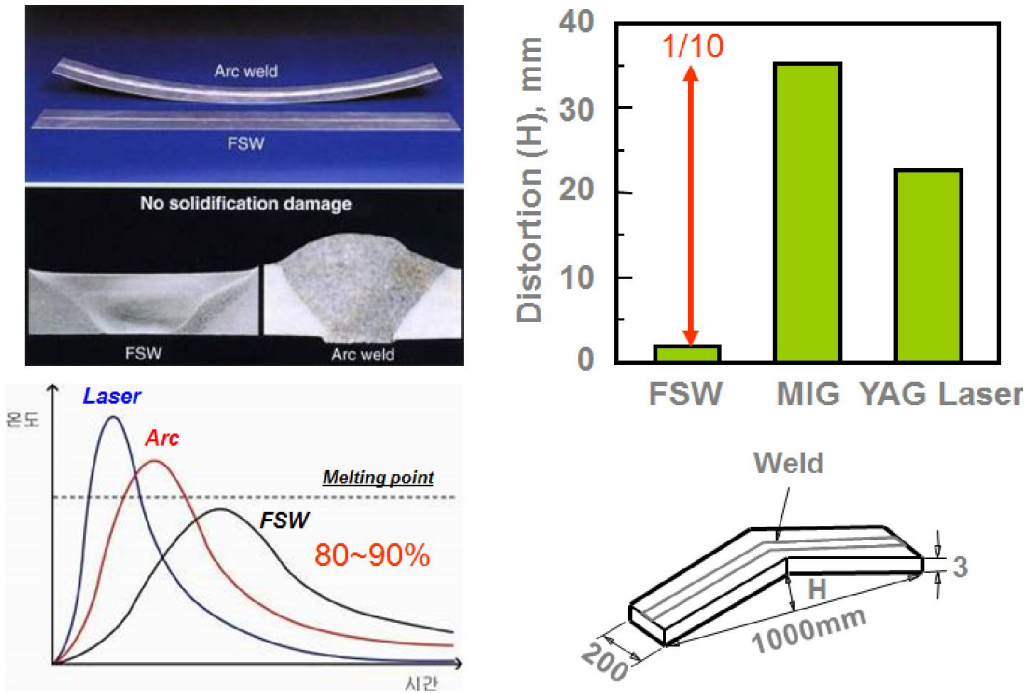


Fig. 1.8 FSW 접합의 특징

FSW의 단점은 접합부 종단에 틀 돌기부의 구멍이 남아서 용접 후 제품의 보수를 하거나 end-tab을 부착하여 용접 종단부를 제품의 바깥영역에 위치하도록 선 가공할 필요가 있다. 또한 환봉인 틀을 이용하므로 용접부위가 모재보다 깊으며, 이로 인해 용접 설계기준을 만족하기 어렵고 필렛용접은 원리적으로 불가능하다. 하지만 접합부 이음형상에 대한 다양한 틀의 형상이 개발되어 맞대기용접은 물론 필렛 이음부, lap 이음부 등도 용접이 가능하다.

FSW공정과 동일한 구속조건으로 용접한 경우 GMAW, Nd-YAG Laser 용접의 각변형량을 비교해보면, 재질, 두께에 및 접합재료에 따라 달라지겠지만 FSW의 각변형은 GMAW의 1/20~1/30 수준으로 적다.[19]



(출처: KISTI FSW보고서, 조선대학교 강의자료)

Fig. 1.9 Comparison of deformation by welding method (Al6061, 1m, 3t)

## 1.4 알루미늄 소재의 특징

알루미늄(Aluminium, Al)은 1827년 발견된 원소로서 규소(Si) 다음가는 지구상에 다량으로 존재하는 원소이다. 비중은 2.7이며, 공업용 금속 중 Mg 다음가는 가벼운 금속이다. 또한 주조가 용이하며 다른 금속과 잘 접합 되고, 상온 및 고온에서 가공이 용이하다. 알루미늄은 상온(pH4.5~8.5 환경)에서 산화피막이 모재를 보호하기 때문에 내식성은 우수하나 이온화 경향이 커서 부식이 진행되는 환경에서 철(Fe), 구리(Cu), 납(Pb) 등과 접촉하면 심하게 부식되고 수은(Hg)은 ppm 단위만 있어도 심하게 부식된다.[20]

Table 1.1 Mechanical properties of aluminum alloys

종류	상태	인장실험			브리넬 경도 (Hb)
		인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	항복점 (kg/mm <sup>2</sup> )	연신율(%)	
99.996(%)	어닐링 재	4.8	1.25	48.8	17
	75(%) 상온가공	11.5	11.0	5.5	27

### 1) 비열처리 알루미늄합금

비열처리 알루미늄합금의 강도는 실리콘(Si), 철(Fe), 망간(Mn), 마그네슘(Mg) 등의 원소에 의한 고용 강화 혹은 분산 강화에 의해 결정된다. 이 분류에 속하는 합금은 1000, 3000, 4000, 5000계에 속하는 금속들이다. 근본적으로 석출물에 의해서 경화하는 조직상의 특성을 가지고 있기에 열처리에 의해 경화하지 않는다. 이들 합금을 경화하기 위해서는 가공 경화의 방법이 적용된다. 비열처리 알루미늄 합금을 용융 용접하게 되면 열영향부의 강도가 저하된다.[12]



Table 1.2 Components and uses of non-heating treatment

합금명	Nominal Composition (%)			대표적인 용도
	Mn	Mg	Cr	
5052, 5652	0.1	2.2-2.8	0.15-0.35	내식성 특히 내해수성이 우수하고 성형성, 용접성 양호 선박용 구조 부품재, 연료 Tank, 가정용기 구 등
5082	0.15	4.0-5.0	0.15	5083 에 가까운 강도를 가지며 성형가공성, 내식성이 좋음 Can End 등
5083	0.4-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	비열처리용 합금중 최고의 강도를 가지나, 성형성은 약간 떨어짐. 내식성, 용접성 양호 선박용재, 차량용재, 압력용기, 용접구조용 재 등
5086	0.2-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	해양 구조물, 저장조
5154, 5254	0.1 0.01	3.1-3.9	0.15-0.35	5052 와 5083 의 중간 정도의 강도를 가지며 성형성, 내식성, 용접성 양호 선박용재, 차량용재, 압력용기, 용접구조용 재 등
5454	0.5-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20	해양 구조물, 압력용기

- 비열처리 알루미늄합금의 제조 상태와 용도

F(As fabricated) : 제품 그로(압연, 압출, 주조한 그로)

O(Annealed, recrystallized) : 어닐링한 재질(압연한 것에만 사용)

H : 가공경화한 재질(가공 경화의 정도에 따라 H1, H2, H3)

W : 담질 처리 후 시효경화가 진행 인 재질

T : F, O, H 이외의 열처리를 받은 재질

Table 1.3 Mechanical properties of non-heating treatment 5000 aluminum alloys

합금명 / 제조상태	Yield Strength (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation thickness (1.6mm %)	Brinell Hardness	전단강도 (Kgf/mm <sup>2</sup> )	피로강도 (Kgf/mm <sup>2</sup> )
<b>5052-0</b>	<b>9.00</b>	<b>19.50</b>	<b>25</b>	<b>47</b>	12.50	11.00
-H32 -H34	19.50 22.00	23.00 26.50	12 10	60 68	14.00 15.00	12.00 12.50
-H36 -H38	24.50 26.00	28.00 29.50	8 7	73 77	16.00 17.00	13.50 14.00
5056-0 -H18	15.50 41.50	29.50 44.50	-	65	18.50 24.00	14.00
-H38	35.00	42.00	-	105	22.50	15.50
			-	100		15.50
5083-0	15.00 23.00	29.50 32.50	-	-	17.50	-
-H321			-	-	-	16.00
5086-0 -H32	12.00 21.00	26.50 29.50	22 12	-	16.00 -	-
-H34 -H38	26.00 13.50	33.00 27.50	10 14	-	19.00 -	-
				-		-
5086-0	5.50	12.50	25	30	8.5	6.50
-T4, T451	15.00 28.00	24.50 31.50	22 12	25 17	17.00 21.00	10.00 10.00
-T6, T651						

## 2) 열처리 알루미늄합금

알루미늄 합금의 강도는 합금 원소에 의해서 결정된다. 구리(Cu) 망간(Mn) 아연(Zn) 규소(Si) 등의 원소는 알루미늄합금의 온도가 높아질수록 두 성분이 혼합되어 단일 상을 이룰 수 있는 고용도가 높아진다. 따라서 열처리를 이용하여 석출과 고용화에 의한 경화를 얻을 수 있으며 이런 의미에서 이들 원소가 첨가된 합금을 열처리 알루미늄 합금이라고 구분하다. 여기에 속하는 합금은 2000, 6000계과 7000 그리고 합금 원소 조합에 따라 일부 4000계가 있다. 본 연구에서는 차량용과 조선용으로 주로 사용되는 6000계열 열처리 알루미늄 합금의 합금 조성과 용도를 비교한다. [13]

Table 1.4 Components and uses of heat-treated aluminum alloys

합금명	Nominal Composition (%)						대표적인 용도
	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	
6009	0.4	0.8	0.5	0.6	0.25	0.1	자동차용 철판
6010	0.4	1	0.5	0.8	0.25	0.1	자동차용 철판
6013	0.9	0.25	0.35	0.95	-	-	6061 보다 우수한 강도, 구조용강재
<b>6061</b>	0.15 ~0.4	0.4 ~0.8	0.15	0.8 ~1.2	0.25	0.04~0.35	내식성, 용접성이 좋고 중간정도의 강도로 냉각 가공성은 열처리합금으로서 양호. 우수한 내식성, 강도, 용접성 우수, 해수용 기자재, 건축용
6063	0.1	0.4	0.1	0.45-0.9	0.1	0.1	양극산화 대막은 현저하게 양호. 압축 가공성 우수. 건축용 재료, 배관 재
7005	-	-	0.45	1.4	4.5	0.13	인발 가공재, 차량용 부재
7039	-	-	0.3	2.8	5.6	0.23	군사용 교량, 무기 재료
7075	1.6	0.4	0.3	2.1-2.9	5.1-6.1	0.23	2024 보다 매우 높은 강도를 가지며, 현재 시합금중 최고의 강도 유지. 고강도 항공기용 재료, 내식용 재료
7079	0.4-0.8	0.3	0.1-0.3	2.9-3.7	3.8-4.8	0.1-0.25	두께가 76.2mm 이상의 후판에 적용되는 고강도 합금, 항공기 재료
7178	1.6-2.4	0.4	0.3	2.4-3.1	6.3-7.3	0.15-0.25	항공기재료, 7075보다 우수한 강도

Table 1.5 Mechanical properties of 6000 aluminum alloys

합금명 / 제조상태	Yield Strength (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation thickness (1.6mm %)	Brinell Hardness	전단강도 (Kgf/mm <sup>2</sup> )	피로강도 (Kgf/mm <sup>2</sup> )
6061-0	5.61	12.65	27	30	8.47	6.34
-T4	14.80	24.59	22	65	16.94	9.85
<b>-T6</b>	<b>28.06</b>	<b>31.63</b>	<b>15</b>	<b>95</b>	21.12	9.85
6063-0	5.00	9.00	-	25	7.00	5.50
-T1	9.00	15.50	20	42	10.00	6.50
-T4	9.00	17.50	22	-	-	-
-T5	15.00	19.00	12	60	12.00	7.00
-T6	22.00	24.50	12	73	15.50	7.00
-T83	24.50	26.00	9	82	15.50	-
-T831	19.00	21.00	10	70	12.50	-
-T832	27.50	29.50	12	95	19.00	-

Table 1.6 Comparative characteristics of aluminum and mild steel

성 질	알루미늄	연강	비고
비중(g/cm <sup>3</sup> )	2.70	7.86	경량화 가능
용융점(°C)	660	1500~1527	브레이징/이종용접 어려움
비열(cal/g)	0.22	0.11	높은 전류로 빠르게 용접
선팽창계수(10 <sup>-6</sup> /°C)	24	12	열변형, 잔류응력, 균열
열전도율(C.G.S 단위)	0.52~0.54	0.12	높은 전류로 빠르게 용접
고유저항(Ω/mm <sup>2</sup> /m)	0.028	0.120	저항열 발생이 어려움
산화막의 용융점(°C)	2050(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1400~1600	용융용접시 산화막 제거 필요

## 제 2 장 연구 방법

### 2.1 연구방법 및 연구내용

본 연구에서는 다양한 두께의 재료를 필요한 모양대로 절단하여 용접한 후 가공하는 TWB(Tailor Welded Blanks) 제조기술을 위한 이종 알루미늄 합금 마찰교반용접부의 용접성(Weldability)을 평가하고, 용접부의 기계적 특성을 고찰하고자 하였다.

1장에서는 연구의 배경 및 목적, 국내외 기술동향, 마찰교반공정의 원리 그리고 알루미늄합금 소재의 특성 대해서 나타내었다.

2장에서는 본 논문의 구성과 마찰교반용접을 이용하여 서로 다른 두께의 이종알루미늄합금 5052-0와 6061-T6의 용접을 위한, 즉 이종 알루미늄 합금 TWB 마찰교반 용접부 특성 고찰을 위한 세부적인 연구 방법에 대하여 논하였다. 사용 소재 알루미늄 합금 6061-T6 2.5(t)와 5052-0 3(t)에 대하여 용접공정 파라미터에 따른 용접성을 주안점으로 고찰하고자 하였다.

3장에서는 용접공정 파라미터에 따른 용접부 표면 및 단면특성, 기계적 및 금속학적 특성을 평가하였다. 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험과 경도 시험을 수행하였으며 아울러 용접부의 금속학적 특성 고찰을 위해 미세조직 특성을 고찰하였다.

4장에서는 이종 알루미늄 합금(5052-0/6061-T6) TWB 마찰 교반 용접시 용접공정 파라미터에 따른 용접부의 용접성 및 건전성에 대한 결론을 도출하였다.

시험방법에 따른 용접조건 도출시

3°의 전진 각(Tilting angle), 시계방향, 프로브의 삽입깊이 2mm, 공구 회전 속도는 300~500rpm 용접 이송속도는 0.8mm/sec, 1.0mm/sec의 용접조건에서 6061 재가 후진 측(RS) 5052재가 전진 측(AS)이 되도록 용접을 실시하였다.

## 2.2 실험조건

### 2.2.1 사용소재 및 용접장비

재료는 알루미늄합금 3(t)의 5052-0, 2.5(t)의 6061-T6를 사용하여 이종, 이두께 마찰교반용접을 수행하였으며, 시험편의 크기는 각 100mm x 50mm x 2.5mm, 3mm(L×W×T)로 맞대기 접합을 수행하였다. 시험편 재료의 화학조성과 기계적 물성치를 다음 표에 나타내었다.

Table 2.1 Chemical composition of Al5052-0/Al6061-T6

합금명	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5052-0	0.25	0.11	0.075	0.65	4.07	0.047	0.014	0.011
6061-T6	0.5	0.6	0.3	0.15	1.0	0.2	0.15	0.15

Table 2.2 Mechanical properties of Al5052-0/Al6061-T6

합금명 / 제조상태	Yield Strength (MPa) (Max)	Tensile Strength (MPa) (Max)	Elongation thickness (1.6mm %)	Brinell Hardness
5052-0	88.2	191	25	47
6061-T6	244(295)	295(310)	15	95

소재는 알루미늄 합금 Al5052-0은 전진측(AS), Al6061-T6는 후진측(RS)이 되도록 배치하여 용접시 틀의 회전방향은 반시계 방향(CCW)로 적용하였다.

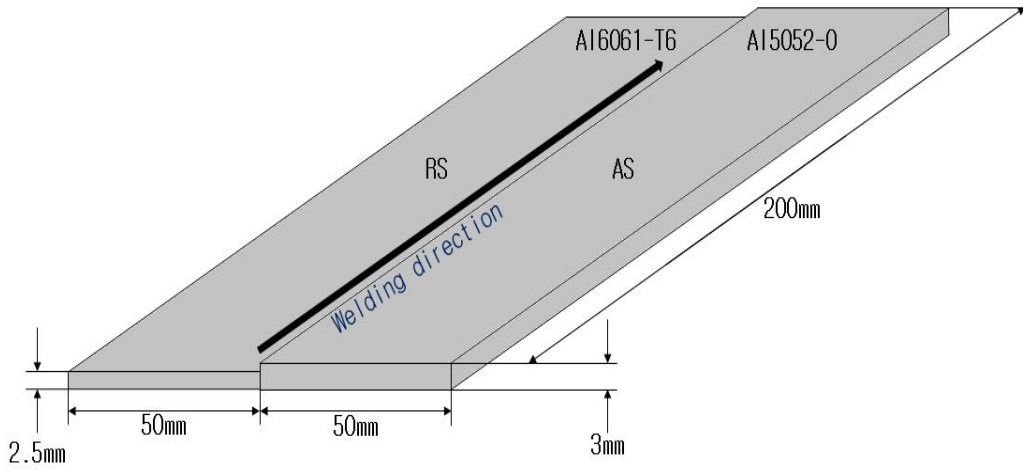


Fig. 2.1 Dimension of FSW welded specimen

본 연구에서 사용된 용접장비는 W사의 마찰교반용접기를 사용하였다. 마찰교반 용접 실험 장비는 Gantry Type으로 X, Y, Z, 총 3개의 축 이동이 가능하다. X축과 Y축은 실험장비의 테이블에 의해 0.5~10mm/sec의 속도로 이동이 가능하며, Z축의 회전은 300~3,000rpm까지 가능하다. 마찰교반용접시 최대 하중은 3,000kgf까지 적용하는 장비이다. Fig. 2.2는 사용된 실험장비시스템 사진이며, Table. 2.3는 W사 장비의 사양을 나타냈다.





Fig. 2.2 Friction stir welding equipment

Table 2.3 FSW equipment specification

Items		Range
Type		Gantry
Welding Speed	X-axis	0.5~10mm/sec
	Y-axis	0.5~10mm/sec
	Z-axis	0.5~10mm/sec
	R-axis	1~20 rpm
Rotation		300~3,000 rpm
LOAD Capacity		Max. 3,000kgf

### 2.2.2 용접조건

마찰교반용접에서는 회전속도(rpm), 삽입속도(plunge speed), 삽입깊이(plunge depth), 삽입 유지시간(dwell time), 툴의 형상, 틸팅각, 가압력 등이 주요 변수이다.

본 연구에서는 공정변수로는 툴의 회전속도는 300 ~ 500rpm, 툴의 이동속도 48mm/min ~ 60mm/min, 툴의 형상은 cylinder 타입, 툴의 회전 방향은 반시계 방향, 툴의 각속도비(angular velocity ratio(R/T), 툴의 회전속도와 툴의 이동속도의 비율), 툴의 삽입깊이(plunge depth)를 0.2mm로 적용하고 3°의 틸팅각, 다른 변수를 고정시켜 마찰교반용접을 실시하였다.

특히 용접부의 용접 특성을 고찰하기 위하여 툴의 이송속도에 대한 툴의 회전속도의 비(ratio), 즉 각속도비(angular velocity ratio)에 따른 용접부 거동을 주요안점으로 고찰하였다.

Table 2.4 Welding conditions for friction stir welding

Tool	Traveling speed(mm/min)	Rotation speed(rpm)	Angular velocity Ratio(R/T)	Plunge depth
Cylinder Type	48	300	6.25	0.2mm
		400	8.3	
		500	10.4	
	60	300	5.0	
		400	6.7	
		500	8.3	

마찰교반용접에 있어서 툴의 형상과 제원은 매우 중요한 요소 중에 하나이다. 본 실험에 사용된 툴은 Tungsten carbide(WC)-cobalt(co)12%의 소재이며 다이아몬드 연삭하여 제작하였다. 툴의 형상은 원통형(cylinder)형태의 핀을 가진 툴을 제작하였다.

원통형 툴은 핀(pin) 지름은 위가 5mm 이며, 핀의 높이와 솔더(shoulder)의 지름은 각각 2.07mm, 16mm로 제작하였으며 오목각은 3° 로 제작하였다.

본 연구에 사용된 툴의 형상과 치수를 Fig. 2.3에 나타내었다.

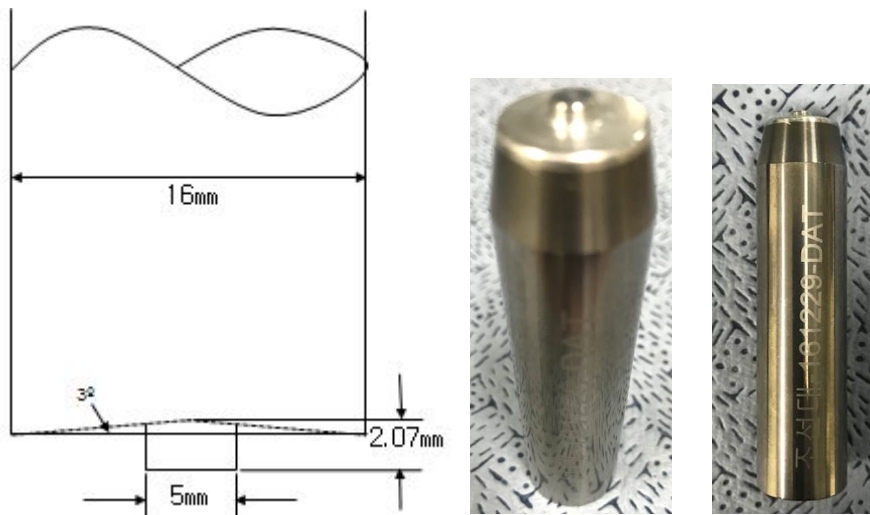


Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding

두께가 상이한 이종 합금 알루미늄 마찰교반용접을 위해 시험편이 상하좌우로 움직이지 않도록 볼트로 고정시킨 상태에서 실험을 진행하였다.

Fig. 2.46에 본 실험을 위한 시험편 지그 시스템의 모습을 나타내었다. 그리고 Fig. 2.5에서는 FSW 용접 접합공정의 과정을 단계별로 나타내었다.

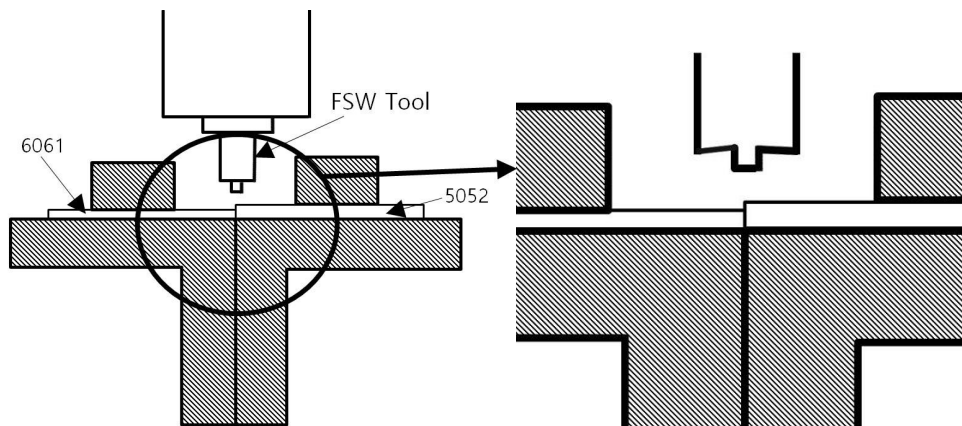


Fig. 2.4 Zig system used for FSW butt welded joint

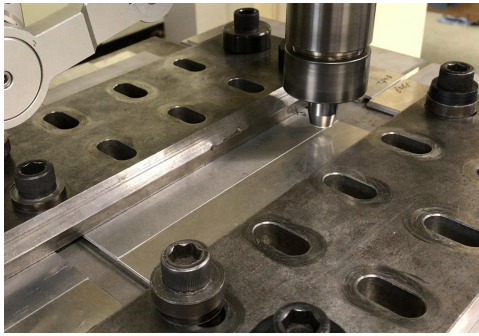


Fig. 2.5 Schematic diagram of FSW process

## 2.3 용접부 특성 평가

### 2.3.1 용접부 표면 및 단면 특성

본 연구에서는 용접공정 변수(회전속도(rpm), 삽입속도(plunge speed), 삽입깊이(plunge depth), 삽입 유지시간(dwell time), 틀의 형상, 틸팅각, 가압력)에 따른 용접부의 특성을 고찰하기 위하여 먼저, 용접된 시험편 접합 여부, 외관의 형태, 등을 육안으로 1차적인 관찰을 실시하였다.

시험편의 단면 관찰을 통하여 용접부의 소성 유동성, 용접부 결함인 보이드(Void)와 크랙(Crack)의 형성여부와 이에 따른 크기를 측정하여 용접부의 건전성을 평가하고자 하였다.

### 2.3.2 인장시험

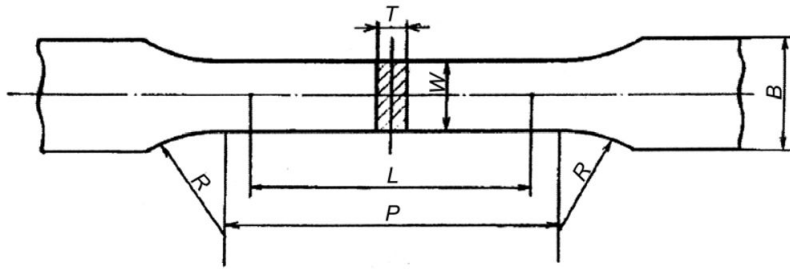
용접부 인장강도를 평가하기 위하여 Fig. 2.6에 나타난 엠티디아이(주)의 UT-100F 만능시험 장치를 사용하였다.

인장 시험 평가시, KS B 0801 규격에 의거하여 시험편을 제작하였고, 인장시험은 Fig. 2.7와 Table 2.5에 시험편의 규격에 대해 실시하였다. 시험편의 총길이는 100mm(L)이며 양쪽에 각 20mm로 grip 부분이 있다. 규격에 따라 grip부분 옆에 round 값을 R=25으로 설정하고, 파단부(P)를 60mm로 설정하였으며 시편의 폭(B)는 30mm로 하여 제작하였다. 인장 속도는 0.2mm/min으로 실시하였다.



Fig. 2.6 Tensile test machine





단위 : mm

시험편의 구별	나비 $W$	표점 거리 $L$	평행부의 길이 $P$	어깨부의 반지름 $R$	두께 $T$	물림부의 나비 $B$
13A	20	80	약 120	20~30	원래 두께대로	-
13B	12.5	50	약 60	20~30	원래 두께대로	20 이상

Fig. 2.7 Dimension of tensile test specimen (규격: KS B 0801)

Table 2.5 Configuration of tensile test specimen

Item	W	L	P	R	T	B
Values	12.5mm	50mm	60mm	25mm	-	30mm

### 2.3.3 미세조직 관찰

용접부의 미세조직은 인장강도의 값이 가장 높은 값을 가지는 조건의 시험편에 대하여 미세조직을 관찰하였다. 미세조직을 관찰하기 위해, 마운팅, 미세연마를 먼저 실시하였으며, 마운팅을 수행하고, #400 ~ #4000 순서로 연마를 수행하였다. 아울러 세밀한 연마를 위하여 Diamond paste  $9\mu m$ ,  $3\mu m$ ,  $1\mu m$ 를 이용하여 미세연마를 수행 하였다. 연마된 시험편을 Keller 용액으로 10~30초간 애칭을 실시하였다. Keller 애칭액은 증류수, 질산, 염산, 황산을 각각 95%, 2.5%, 1.5%, 0.5%의 비율이다. Keller 애칭액의 비율을 Table. 2.6에 나타내었다.

용접부의 미세조직을 고찰하기 위해 광학현미경을 사용하여 영역 SZ(교반부), TMAZ(열·기계적 영향부), HAZ(열 영향부), BM(모재) 별 조직 특성 변화를 고찰하였다.

Table 2.6 Keller 's etching reagent

Solutions	Values(ml)
Pure water	190
Nitric acid( $HNO_3$ )	5
Hydrochloric acid(HCl)	3
Hydrofluoric acid(HF)	2



Fig. 2.8 Optical microscope

### 2.3.4 경도시험

용접부의 경도 측정을 위하여 일부분(Fig. 2.9)을 채취하여 경도를 측정하였다. 경도 측정은 Fig. 2.10에 나타난 Akashi사의 HM-112 micro Vickers 경도기를 사용하였다. 현미경 배율은  $50\mu\text{m}$ 이며,  $136^\circ$  다이아몬드 피라미드 입자를 이용하는 장비이다.

경도 측정을 하기 전에 용접부의 횡단면을 절단하여 미세연마 하였다. 용접부의 얇은 시편의 중앙부 즉 하부 기준 1.25mm 지점에서 0점을 중심으로 양 옆의 방향으로 0.25mm의 간격으로 모재부분까지 측정하였다. 경도 측정시 경도기 다이아몬드의 하중은 0.5kgf를 가했으며, 10초의 loading time을 주어 경도시험을 수행하였다. 측정 조건은 [Table 2.7]에 간략하게 나타내었다.

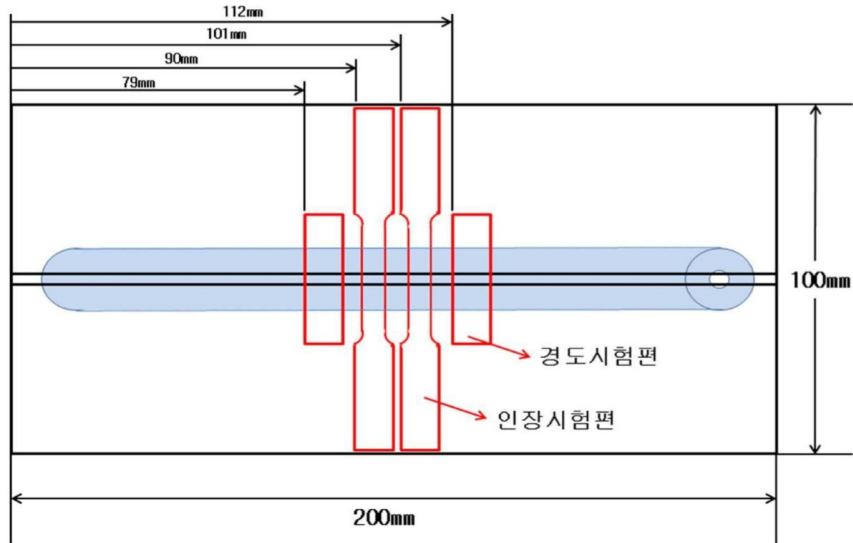


Fig. 2.9 Design drawing on specimens of mechanical test

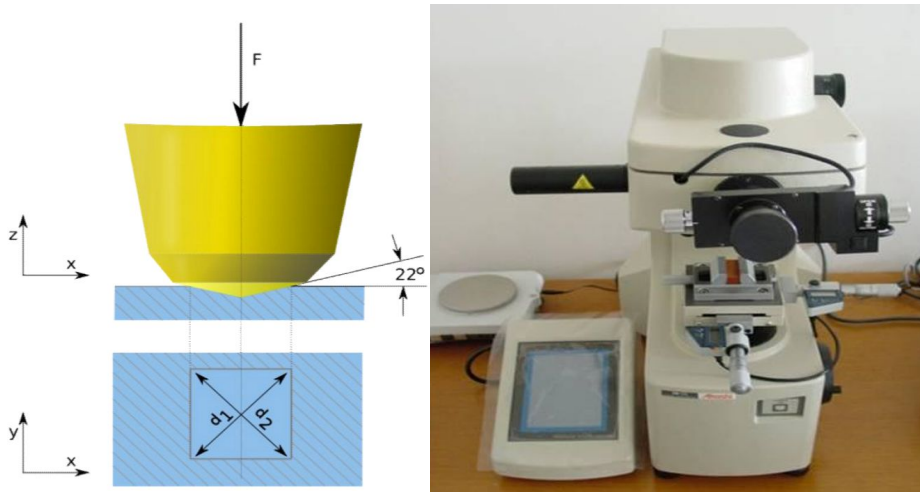


Fig. 2.10 Vickers hardness test scheme and equipment

Table 2.7 Hardness testing condition

Parameters	Values
Type	Micro vickers hardness tester
Load	0.5kgf
Loading time	10sec
Test position	Below 2.5mm from surface

## 3장. 결과 및 고찰

### 3.1 이종 알루미늄 합금 용접부 표면 및 단면 특성

#### 3.1.1 용접부 표면 및 단면 특성

툴의 회전속도(300~500rpm), 이동속도(48, 60mm/min)에 따른 마찰교반용접, 즉 각속도비(R/T)에 대한 표면 및 단면 특성을 고찰하였다.







용접부의 표면 특성과 용접부(burr 발생 등) 외관형태, 접합 여부, 측면에서 평가하고 단면특성은 재료의 소성 유동성에 따른 접합 정도, 결함(Void, Crack 등) 발생 측면에서 평가하였다.

마찰교반용접에서 생기는 결함들은 크게 두 가지의 원인에 의하여 생긴다고 볼 수 있다. 첫 번째, 마찰교반 용접시 사용하는 툴에 의하여 용접하고자 하는 소재에 가해지는 입열량의 부족과 빠른 냉각 속도가 원인이 되어 결함이 발생한다. 두 번째, 과도한 용접조건에 따라서 툴 솔더가 소재에서 효과적으로 압착하지 못하여 용접부 윗면으로 재료의 배출(buur)이 과도하게 이루어졌을 때 결함이 발생한다고 보고되고 있다.[21]

용접부의 표면은 Table 3.1 ~ 3.2, 단면은 Table 3.3 ~ 3.4에 나타내었다. Table 3.1는 이송속도 48mm/min시 툴의 회전속도에 따른 용접부 표면 특성을 나타낸 것이다.

용접 이송속도 48mm/min에서 용접표면의 특성으로는 회전속도 300rpm에서 용접부 시작점 표면이 거친 반면 500rpm에서는 표면부가 미려함을 알 수 있다.

Table 3.1 Top and bottom surface of FSW welded joints fabricated at traveling speed 48mm/min

Traveling speed	Rotation speed (angular velocity ratio(R/T))	Location	Surface
48mm/min	300rpm (6.25)	Top	
		Bottom	
	400rpm (8.3)	Top	
		Bottom	
	500rpm (10.4)	Top	
		Bottom	

이는 틀의 회전속도 300 ~ 400rpm에서는 시단부에서 상대적으로 입열량이 부족해 교반에 의한 소성유동을 원활하게 할 수 있는 온도에 도달하지 못하여 용접부 상표면이 거칠게 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 용접이 진행됨에 따라 충분한 온도에 도달하여 표면이 미려해짐을 확인 할 수 있었다. 용접부 이면부 표면 부분도 시단부에서 용접 방향으로 진행되면서 점차 미려해지는 양상을 보여주었다.[22, 23]

Table 3.2 Top and bottom surface of FSW welded joints fabricated at traveling speed 60mm/min







Traveling speed	Rotation speed (angular velocity ratio(R/T))	Location	Surface
60mm/min	300rpm (5.0)	Top	
		Bottom	
	400rpm (6.7)	Top	
		Bottom	
	500rpm (8.3)	Top	
		Bottom	

Table 3.2는 이송속도 60mm/min시 틀의 회전속도 300 ~ 500rpm에 따른 용접부 표면 특성을 나타낸 것이다.

이송속도 60mm/min에서도 40mm/min인 경우보다 300rpm, 400rpm에서 용접부 상표면의 거친 면 구간이 짧아지긴 했으나 거의 유사한 양상을 보임을 확인할 수 있다.



Table 3.3 Cross section of FSW welded joints fabricated at traveling speed 48mm/min

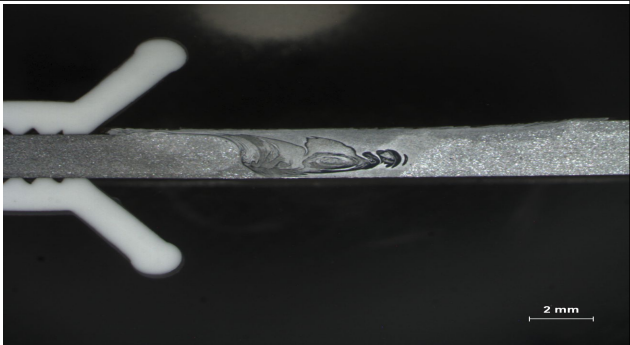
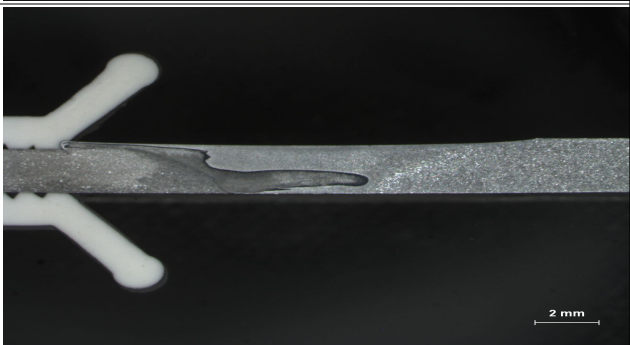

Traveling speed	Rotation speed	Angular velocity ratio	Cross section
48mm/min	300rpm	6.25	
	400rpm	8.3	
	500rpm	10.4	

Table 3.4 Cross section of FSW welded joints fabricated at traveling speed 60mm/min

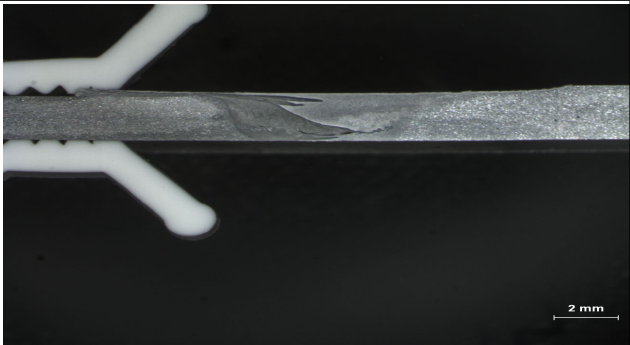
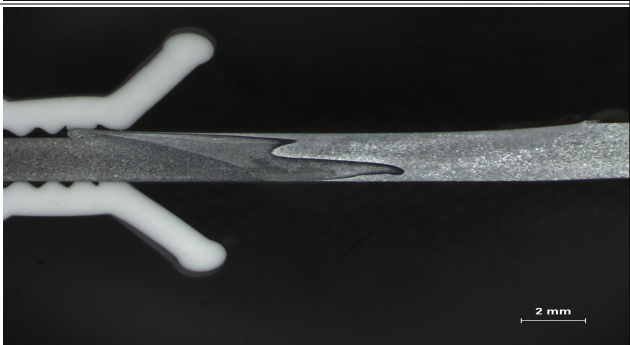
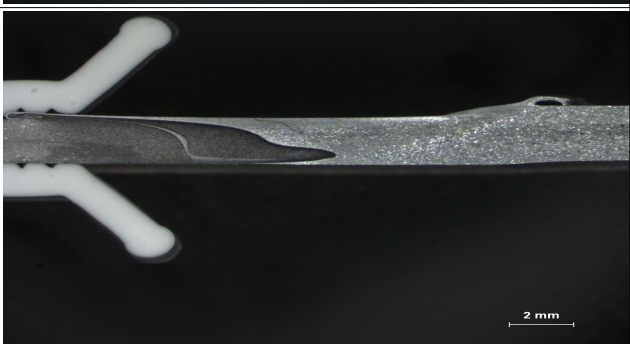
Traveling speed	Rotation speed	Angular velocity ratio	Cross section
60mm/min	300rpm	5.0	
	400rpm	6.7	
	500rpm	8.3	

Table 3.3은 이송속도 48mm/min시 툴의 회전속도 300 ~ 500rpm에 따른 용접부 단면을 나타낸 것이다.

툴의 이송속도 48mm/min일 경우 단면특성을 고찰한 결과 회전속도 300rpm에서 용접부(SZ)의 끝단까지 원활한 소성유동이 이루어져 미접합부 없이 접합이 됨을 확인 할 수 있었다. 즉, 각속도비가 6.25(300rpm, 48mm/min) 일 때 8.3(400rpm, 48mm/min), 10.4(500rpm, 48mm/min)에 비해 상대적으로 건전성 있는 접합이 이루어짐을 확인하였다. 400rpm시에는 용접부 용접부(SZ)의 단면을 확인해본 결과 300rpm에서보다 용접부의 끝단까지 충분한 소성유동이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 500rpm에서도 충분한 소성유동이 이루어지지 않아 용접부의 끝단까지 접합이 되지 않았음을 알 수 있다. 이송속도 48mm/min에서의 용접부 단면 확인결과 회전속도가 상대적으로 낮은 300rpm에서 원활한 소성유동으로 인하여 접합부의 끝단까지 접합이 됨을 확인하였고, 툴의 회전속도를 높일수록 접합이 끝단까지 이루어지지 않음을 확인하였다. 이는 상대적으로 이송속도 대비 빠른 회전속도로 인해 용접 진행 방향으로 재료의 소성유동이 많이 이루어짐을 의미 하는 것으로 사료된다.[24]

용접속도 60mm/min에서도 마찬가지로 각속도가 높을수록 용접진행방향으로 소성유동이 증가하는 반면 빠른 회전속도로 인해 용접부의 끝단까지 충분한 소성유동이 이뤄지지 않았음을 알 수 있었다.

## 3.2 이종 알루미늄 합금 용접부 기계적, 금속학적 특성

### 3.2.1 인장강도 및 경도 분포 특성

Fig. 3.1은 용의 회전속도(300 ~ 500rpm), 이송속도(48, 60mm/min)에 따른 용접부의 인장시험의 결과를 나타내었으며, 인장강도는 3개 시험결과 값의 평균값으로 나타내었다.

회전속도 300rpm이고 톨 이동속도가 48mm/min일 때, 177.7MPa로 모재 5052-0 대비 95.6%의 최대 인장강도를 얻었다. 반면 회전속도 500rpm의 이동속도가 48mm/sec인 경우, 즉 각속도비(R/T) 10.4 일때 최대 인장강도 164.5MPa로 모재 5052-0 대비 86%로 최소값을 보였다.

또한 500rpm이고 톨 이동속도가 60mm/min 조건에서도 유사한 양상을 보이는데, 인장강도 165.0MPa로 모재 A15052-0대비 86.5%의 최소값을 보였다.

인장시험 결과, 각속도비가 6.25(300rpm, 48mm/min) 일 때 8.3(400rpm, 48mm/min)과 10.4(500rpm, 48mm/min)일때에 비해 상대적으로 신뢰성있는 접합이 이루어짐을 확인하였다. 이는 보다 더 빠른 회전속도에서는 용접진행방향으로 소성유동이 다소 많이 이루어지는 반면 접합부의 끝단까지는 소성유동이 충분하게 이루어 지지 않았음을 알 수 있었다. 즉, 본 연구의 실험조건 내에서 각속도비가 클수록 접합부의 끝단까지 충분한 소성유동이 이루어 지지 않아 미접합부가 발생하고 각속도가 작은 경우 용접 진행 방향보다는 용접부 끝단 방향으로 충분한 소성유동이 이루어져 건전한 접합부가 형성이 됨을 알 수 있었다.

Table 3.5 Tensile test results of FSW welded joints in various angular velocity ratios

Traveling speed(mm/min)	Rotation speed(rpm)	Angular velocity ratio(R/T)	Tensile strength(MPa)
48	300	6.25	177.7
	400	8.3	167.3
	500	10.4	164.5
60	300	5.0	169.1
	400	6.7	167.1
	500	8.3	165.0

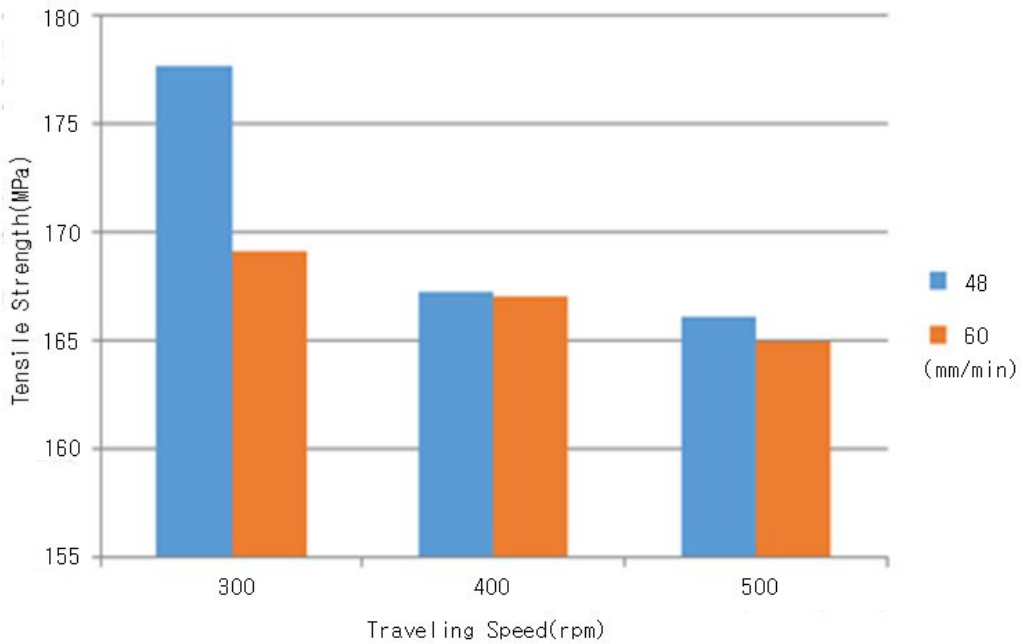


Fig. 3.1 Tensile strength of FSW welded joints in various ratio



Fig. 3.2 Fractured welded specimens after tensile test

Fig 3.2는 용접 시험편 인장 시험후 파단시편을 나타낸 것이다.

인장시험 결과 용접부 SZ 이면부의 미접합부를 시점으로 판재 두께가 얇은 Al6061-T6의 TMAZ와 SZ경계부근으로 파단이 일어났음을 알 수 있다.

서로 다른 두께 중 얇은쪽 알루미늄 합금(Al6061-T6)에서 발생하는데, 이는 열처리 소재인 석출경화형 Al6061-T6에서 석출 용해로 인해 강도가 저하되었기 때문이라고 판단된다.

Fig. 3.3은 최대 인장강도값을 보이는 용접조건인 회전속도 300rpm, 이송속도 48mm/min, 즉 각속도비 6.25에서 제작된 용접시험편에 대하여 경도를 측정하였다. 앞서 언급한 것과 같이 얇은 판재 Al6061-T6 기준으로 시험편 중앙부 위치에서 1.25mm의 위치에서, 용접부의 중심으로 좌우 각각 12mm씩 0.25mm의 간격으로 측정하였다.

경도 분포를 살펴보면 모재에서 용접부로 갈수록 경도 값이 감소하는 경향을 보였다. 최소 경도값은 47Hv로 교반부(SZ)에서 발생하였으며, 특히 열처리 소재인 석출경화형 Al6061-T6 측의 경우 용접시 발생한 마찰열의 영향으로 인한 석출용해로 경도 값이 크게 감소함을 알 수 있으며, 최대 83Hv 에서 최소 47Hv로 감소하였다. 반면 알루미늄 합금 Al5052-0 측은 대체적으로 15Hv미만으로 경도 값이 감소하였는데 이는 비열처리소재 특성상 경도의 변화가 크지 않음을 알 수 있었다.

경도분포에 대한 결과를 종합해보면, 후진측(RS) 알루미늄 합금 Al6061-T6의 경우 열처리를 통하여 다량의 Mg<sub>2</sub>Si 상을 석출시킴으로써 기계적 강도를 대폭 향상시킨 소재로, 용접시 마찰열에 의해 그 경도가 급격히 떨어져 Al6061-T6 모재의 경도 83Hv가 TMAZ와 SZ사이에서 급격히 감소한다. 용접부의 인장강도 실험에서 시험편의 파단 위치가 이 부위와 일치함을 알 수 있다. 이는 석출경화 열처리소재 특성을 그대로 나타내고 있음을 알 수 있으며 비열처리소재인 전진측(AS) Al5052-0 측의 TMAZ와 SZ 경계면보다 Al6061 SZ측의 인장강도 그리고 경도 등의 기계적 특성이 다소 약함을 확인할 수 있었다.[25]

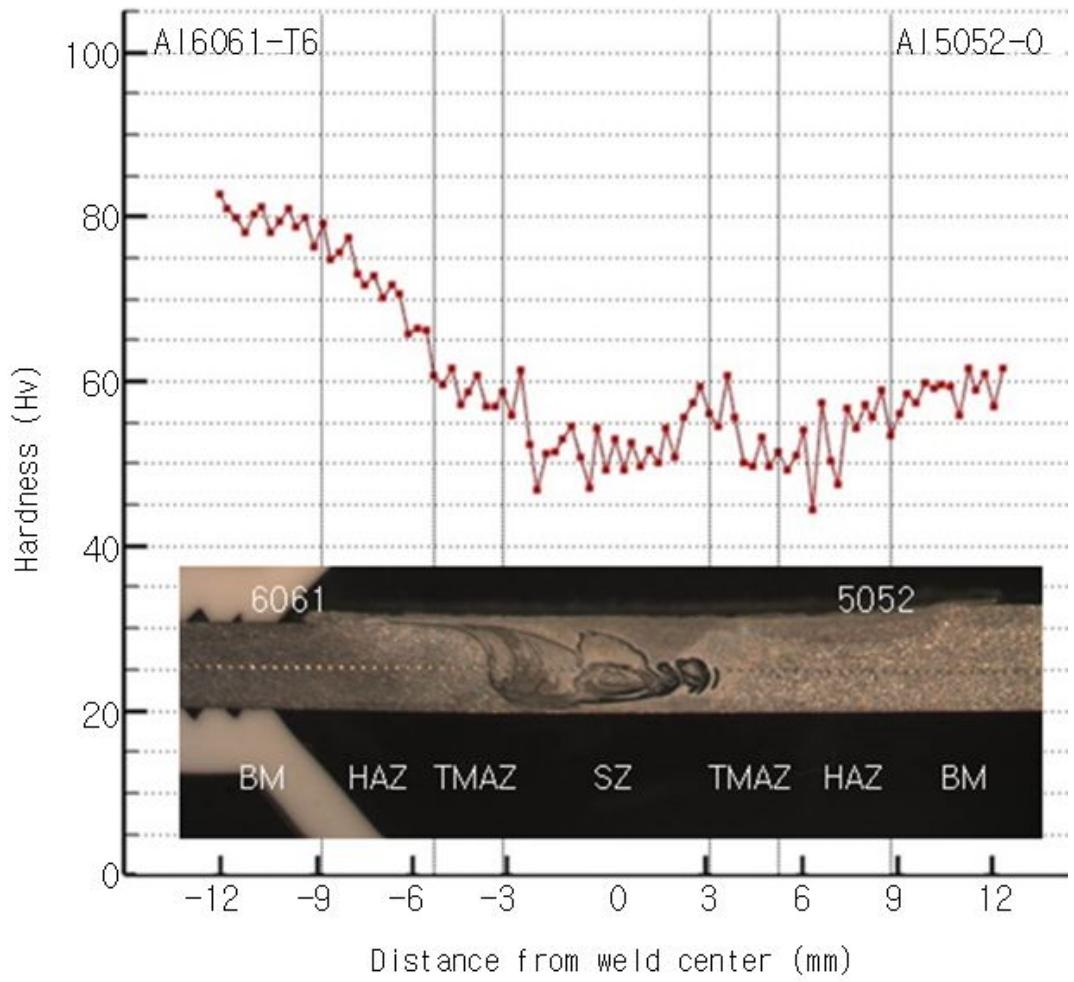


Fig. 3.3 Hardness distribution of FSW welded joints



### 3.2.2 미세조직 특성

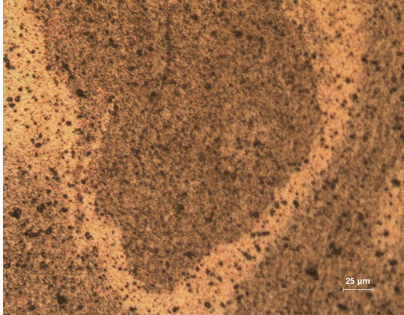
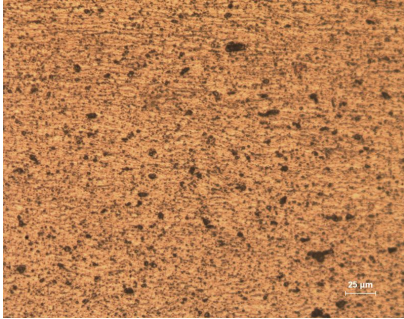
Table 3.6은 최대인장강도값을 보이는 용접조건인 회전속도 300rpm, 이송속도 48mm/min, 즉 각속도비 6.25에서 제작된 용접부에 대하여 각 영역별로 미세조직의 변화를 나타내었다.

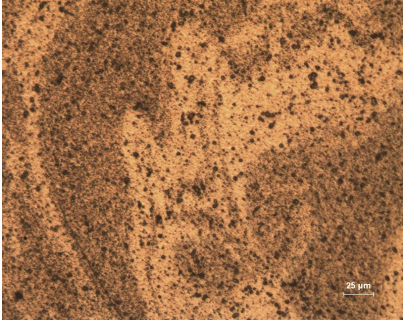
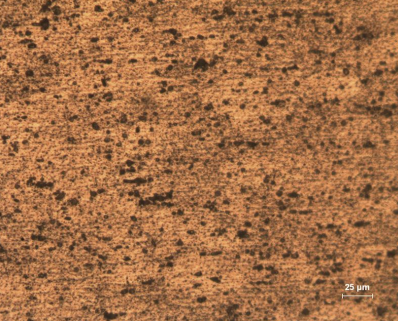
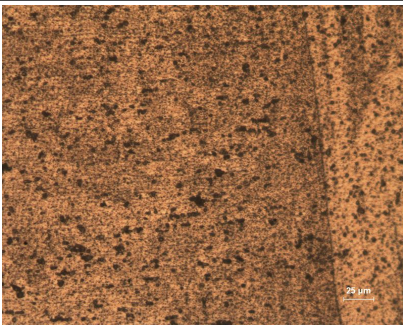

(a)는 AS 전진측 알루미늄 합금 AI5052-0측 (b)는 RS 후진측 알루미늄 합금 AI6061-T6측의 SZ(교반부), TMAZ(열·기계적 영향부), HAZ(열 영향부), BM(모재)에 대해 각각 나타내었다.

미세조직을 관찰해보면, SZ(교반부)는 동적재결정으로 인해 결정립이 미세화 되고 회전방향으로 다소 연신됨을 확인할 수 있었다. TMAZ(열·기계적 영향부)는 마찰열 발생과 소성가공으로 인한 열·기계적 영향으로 인한 소성변형이 발생하여 결정립이 미세화 되었으며, HAZ(열 영향부)의 경우는 열 영향으로 다소 결정립이 조대화 됨을 확인할 수 있었다.

교반존(SZ)에서는 동적재결정으로 인한 결정립이 미세화 되었으며, 열영향부(HAZ)에서는 상대적으로 열에 의해 교반존이나 열-기계적영향부(TMAZ) 보다 결정립이 크다.

Table 3.6 Cross section of FSW welded joints

Region	(a) Al5052-0	
SZ		HAZ
TMAZ		BM

Region	(b) Al6061-T6			
SZ		HAZ		
TMAZ		BM		

## 4장 결론

본 연구에서는 두께가 상이한 이중 알루미늄 합금(AI5052-0, AI6061-T6)에 대한 TWB 마찰교반용접시 용접공정 파라미터에 따른 용접 특성을 고찰하고자 하였다.

특히 주안점으로 용접 공정 파라미터 중 각속도비(R/T)에 따른 용접 표면 및 단면 특성과 기계적 및 금속학적 특성을 명확하게 규명하여 용접부의 건전성을 확보하고자 하였다.

- 1) 표면 및 단면특성으로는 톨 회전속도 300, 400rpm 시단부 상표면이 거친 반면 500rpm 에서는 상표면부가 미려한 특성을 보였다. 하지만 단면특성을 고찰한 결과 톨 회전속도가 상대적으로 낮은 300rpm에서 원활한 소성유동으로 인하여 접합부의 끝단까지 접합이 됨을 확인 할 수 있었다. 즉, 각속도비가 8.3(400rpm, 48mm/min), 10.4(500rpm, 48mm/min)인 경우에 비해 각속도비가 6.25(300rpm, 48mm/min) 일때 상대적으로 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.
- 2) 인장강도 특성은 톨 이송속도 300rpm에서 최대인장강도(177.7MPa, 모재 대비 95.6%) 이고 500rpm(161.5MPa, 모재 대비 86%) 일때 최소값을 나타내는데, 이는 보다 더 빠른 회전속도에서는 용접진행방향으로 소성유동이 증가함에 따라 접합부의 끝단까지 충분한 접합이 이뤄지지 않았음을 알 수 있었다. 즉, 본 연구의 실험조건 내에서 각속도비가 클수록 접합부의 끝단까지 충분한 소성유동이 이루어 지지 않아 접합부 하부 끝단이 미접합 됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 경도 특성으로는 최소 경도값은 SZ(교반부)에서 발생하였으며, 특히 열처리 소재인 석출경화형 AI6061-T6측의 경우 마찰열의 영향으로 인한 석출용해로 경도값이 큰폭으로 감소(모재 대비 약 36Hv 감소)함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 이호인, 한요섭, 김도향, 김원태, “비철금속(II) 알루미늄 응용기술의 이해와 활용”, 한국철강신문, 2006.11.05, pp.28-40, pp.309-329
- [2] 배동호, 홍정균, “재료접합기술(Joining & Welding)”, 2012, pp.89-94, pp. 159-199
- [3] 정의한, 김선진, “마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 합금 용접부의 피로균열전파율의 공간적 변동성에 미치는 균열 방향의 영향”, 한국동력기계공학회지, 2014.02
- [4] Rajiv Sharan Mishra, Parthra Sarathi De, Nilesh Kumar, “Friction Stir Welding and Processing”, Book of Science and Engineering, pp.109-146, 2014.04
- [5] 김경학, 방희선, 방한서, 최인철, 홍성민, 김철희, “CTR FLR COMPL의 이종재료(Al/Steel) TWB 적용을 위한 하이브리드 마찰교반접합부의 접합성 평가 및 용접장비 개발” 한국자동차공학회지, 2017.05
- [6] Kim Byeong-Jin, “The effect of tool profiles on friction stir welded Al5052 T-joints” Chosun University Master 's Thesis, 2016.12
- [7] 공유식, 김선진, “마찰교반용접된 7075-T651 알루미늄 판재의 피로균열전파의 거시적 미시적 관찰” 한국동력기계공학회지, 2014.04
- [8] 한민수, 장석기, “FSW된 이종알루미늄합의 합금의 접합 특성 미세 조직”, 한국마린엔지니어링학회지, 2011.01
- [9] 조제형, 김명원, 최준용, “소형선박용 5000계/6000계 알루미늄합금제의 마찰교반접합 특성 연구”, 대한용접접합학회지, 2014.02
- [10] 조규선, “알루미늄 재의 전해연마(電解研磨) 가공특성에 관한 연구”, 인하대학교 석사논문, 2002
- [11] 김진우, “알루미늄 판의 용접변형 해석에 관한 연구”, 울산대학교 석사논문

문, 2005

[12] 이진희, “알루미늄 합금 (Aluminum & Aluminum Based-Alloy)”, LG건설 테크노트 교육자료, 2012, pp.4-12

[13] 이진희, 이병학, “알루미늄의 이해와 적용”, 도서출판 명진, 2016.4.20., pp.102-107, pp.121-149

[14] 윤종원, “알루미늄합금의 레이저용접”, 대한용접접합학회지, 2000

[15] 기술연구소, “알루미늄 합금의 특성 및 생산기술의 이해”, ALUKO 그룹 기술연구소, 2005

[16] 임동용, 김남인, 이정수, 최우현, “알루미늄합금 선체 구조의 용접기술”, 현대중공업 기술연구소, 대한용접접합학회 학술발표논문, 2005

[17] 이원식, “자동차용 알루미늄합금의 소성가공 재료와 성형가공 기술”, 한국과학기술정보연구원(KISTI) ReSEAT 프로그램 자료, 2015

[18] 이익호, 이학렬, 황운석, 김광근, “부식과 방식의 원리”, 신광문화서, pp.187-190, 2004

[19] S&T Information Analysis, “기술산업정보분석-마찰교반용접”, 한국과학기술정보연구원(KISTI), 2002

[20] MCT Net, “알루미늄 합금”, 한국과학기술정보연구원(KISTI), 2006

[21] W. B. Lee, S. W. Kim, C. Y. Lee, Y. M. Yeon, W. S. Chang, C. C. Shur and S. B. Jung, Effects of Welding Parameters on the Friction Stir Weldability of 5052 Al alloy, Journal of KWJS, 2004, 22, pp69-76

[22] 방한서, 방희선, 정민우 ‘마찰교반용접을 이용한 이종재(A6061-T6/SAPH440) Tailored Blank의 용접성 및 기계적 특성’, 대한용접접합학회, 2015.11

[23] 방한서, 방희선, 전근홍 ‘마찰교반접합기술을 이용한 이종재료 접합에 관한 최근 연구동향’, 大韓熔接·接合學會誌 第29卷 第5號, 2011.10, 37-40 (4 pages)

[24] 방한서, 방희선, 정민우 ‘용접파라미터가 이종재(AI5052/DP590)Tailored

Blank의 마찰 교반접합 용접성에 미치는 역할' , 대한용접접합학회 2016년도  
춘계학술발표대회, 2016.4, 77-77

- [25] HanSur Bang, Heeseon Bang, 'Gas tungsten arc welding assisted hybrid  
friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy  
and STS304 stainless steel' 17 December 2011