



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](#)

2018년 8월

석사학위 논문

마찰교반용접을 이용한 알루미늄
합금 Al5052의 TWB 용접 특성에
관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 은 결

마찰교반용접을 이용한
알루미늄 합금 Al5052의 TWB
용접 특성에 관한 연구

A study on the characteristics of different
thickness aluminum alloys Al5052 friction stir
welded joints for TWB

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 은 결

마찰교반용접을 이용한
알루미늄 합금 A15052의 TWB
용접 특성에 관한 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 은 결

최은결의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 특임교수 방한서 (인)
위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)
위 원 조선대학교 조교수 송국현 (인)

2018년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	IV
List of Tables	VI
Abstract	VII
1장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.1.1 연구 배경	1
1.1.2 연구 목적	4
1.2 국내외 기술 동향	7
1.3 마찰교반용접	8
1.3.1 마찰교반용접의 원리	8
1.3.2 마찰교반용접의 특징	10
1.4 알루미늄 합금 소재의 특징	12

2장 . 연구 방법	15
2.1 연구 방법	15
2.2 실험장비 및 조건	16
2.2.1 소재 및 이음부 형상	16
2.2.2 실험장비 및 툴(Tool)	18
2.2.3 실험조건 및 공정	20
2.3 용접부 특성 평가	24
2.3.1 용접부 외관 및 단면 관찰	24
2.3.2 인장시험 특성	24
2.3.3 경도시험 특성	27
2.3.4 미세조직 관찰	28
3장 . 결과 및 고찰	29
3.1 두께가 다른 AI5052 TWB의 FSW 용접변수에 따른 용접특성	29
3.1.1 용접부 외관 및 단면 특성	29
3.1.2 인장시험 특성	34
3.1.3 경도분포 특성	36
3.1.4 미세조직 특성	38

3.2	틸팅각 변화에 따른 용접특성 비교	40
3.2.1	용접부 외관 및 단면 특성	40
3.2.2	인장시험 특성	46
3.2.3	경도분포 특성	48
3.2.4	미세조직 특성	50
4장	결론	52
	참고문헌	54

List of Figures

Fig. 1.1 CO ₂ emission standard, fuel efficiency regulation forecast	3
Fig. 1.2 Automobile fuel efficiency and emission gas regulation by country	3
Fig. 1.3 Average aluminum content of vehicles	5
Fig. 1.4 Application of aluminum usage for automotive parts	5
Fig. 1.5 Tailor welded blank of automobile	6
Fig. 1.6 Tailor welded blank of pillars	6
Fig. 1.7 Process of friction stir welding	9
Fig. 1.8 Macrostructure of friction stir welded joints	9
Fig. 1.9 Classification of Aluminum alloy	13
Fig. 2.1 Configuration of different thickness Al5052 specimen	17
Fig. 2.2 Equipment of friction stir welding system	18
Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding	19
Fig. 2.4 Jig used for TWB of FSW	22
Fig. 2.5 Schematic diagram of FSW for TWB	23
Fig. 2.6 Tensile test machine	25
Fig. 2.7 Dimension of tensile test specimen	25
Fig. 2.8 Vickers hardness test equipment	27
Fig. 3.1 Tensile strength of welded joints for various rotation speeds in travel speed 40 mm/min	35
Fig. 3.2 Tensile strength of welded joints for various rotation speeds in travel speed 60 mm/min	35
Fig. 3.3 Hardness distributions of welded joints	37
Fig. 3.4 Microstructure of welded joints in Y-axis tilting angle 0°	39
Fig. 3.5 Tensile strength of welded joints welded joints with Y-axis tilting angel at rotation speed 400 rpm	47
Fig. 3.6 Tensile strength of welded joints welded joints with Y-axis tilting angel at rotation speed 600 rpm	47
Fig. 3.7 Hardness distributions of rotation speed 400 rpm	49

Fig. 3.8 Hardness distributions of rotation speed 600 rpm 49
Fig. 3.9 Microstructure of welded joints in Y-axis tilting angle 1° 51

List of Table

Table. 1.1 Main coupling variables of the FSW process	11
Table. 1.2 Characteristics of aluminum alloy	14
Table. 2.1 Chemical compositions of material	16
Table. 2.2 Mechanical properties of material	16
Table. 2.3 FSW welding conditions for TWB	21
Table. 2.4 Configuration of tensile test specimen	26
Table. 2.5 Hardness testing condition	27
Table. 2.6 Keller 's etching reagent and Optical microscope	28
Table. 3.1 Bead appearance and cross section of welded joints with angular velocity ratio at 48 mm/min	30
Table. 3.2 Bead appearance and cross section of welded joints with angular velocity ratio at 60 mm/min	31
Table. 3.3 Variation of thickness in welded joint with angular velocity ratio	33
Table. 3.4 Bead appearance and cross section of welded joints with Y-axis tilting angle at rotation speed 400 rpm	41
Table. 3.5 Bead appearance and cross section of welded joints with Y-axis tilting angle at rotation speed 500 rpm	42
Table. 3.6 Bead appearance and cross section of welded joints with Y-axis tilting angle at rotation speed 600 rpm	43
Table. 3.7 Variation of thickness of welded joint with Y-axis tilting angle	45

ABSTRACT

A study on the characteristics of different thickness aluminum alloys Al5052 friction stir welded joints for TWB

Choi Eun-Gyeol

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

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, fuel-efficiency regulations, light-weight and environmental regulations have been strengthening all over the world. Vehicle weight is one of the most realistic alternatives in the automotive industry because it can be expected to give effects on fuel consumption and exhaust emission reduction as well as performance improvement through weight reduction as a key factor that determines fuel efficiency. Currently, focusing on the development of lightweight automobiles and welding and bonding process technology to cope with this trend. In order to realize automobile weight reduction, materials of body and parts considering economical efficiency are replaced by lightweight materials such as high strength steel, aluminum alloy, magnesium alloy. However, welding process technology applying lightweight materials to automobiles has not yet achieved the optimum method. It is a trend to apply friction stir welding, in order to minimize the deformation of aluminum alloy weld defect, to ensure weldability

This study has the purpose to investigate the effect of friction stir

welding with different thickness aluminum alloys for TWB. 2.5mm(retreating side) and 1.5mm(advancing side) thickness is used as Al5052 for this study. The welding parameters were Y-axis tilting angle 1° , 2° , 3° , tool rotation speed 400, 500, 600 rpm, travel speed 48, 60 mm/min.

The cross section showed that the pin was not reached to the bottom surface as the tilting degree increased. As the rotation speed increases, the heat input increased therefore thinning effect is occurred, and that the different thickness of workpiece led insufficient plastic flow. When Y-axis tilting angle 0° , 1° , 2° , 3° were compared, the best welding condition is Y-axis tilting angle 1° , rotation speed 400 rpm, travel speed 60 mm/min.

As a result of the tensile test, the minimum tensile strength value of 194 MPa, which is 86 % of the aluminum base sheet at Y-axis tilting angle 0° . The maximum tensile strength was 212.3 MPa, which is 95 % of the aluminum base sheet at Y-axis tilting angle 1° . The tensile strength was decreased as the rotation speed was increased and Y-axis tilting angle increases, the tensile strength decreased.

Hardness test was distributed in a uniform shape at every conditions, hardness value of the welded joint was low than the base material. The highest hardness was confirmed 60 Hv, which is 88 % of the aluminum base sheet at Y-axis tilting angle 1° . The lowest hardness was 52 Hv at 3° , the average hardness tended to decrease with increasing Y-axis tilting angle.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

1.1.1 연구배경

최근 전 세계적으로 고유가, 연비규제, 환경규제가 강화되고 있는 추세로 여러 산업분야에 영향을 미치고 있다. 특히나 자동차 산업분야에서는 세계적인 산업 환경 규제의 변화로 에너지효율 제고, 온실가스 저감 및 친환경 자동차 시장이 급속히 성장하고 있다. 친환경 자동차의 경우 안전장치 및 편의성 향상을 위한 부가적인 부품 수가 증가함에 따라 차체 무게도 증가하고 있는 실정이다. 자동차 중량은 연비 효율을 결정짓는 핵심 요소로써 차체 경량화를 통하여 연료소비 및 배기가스 배출 감소에 효과를 바랄 수 있을 뿐만 아니라 성능의 향상 효과도 바랄 수 있기 때문에 자동차 산업에서 가장 현실적인 대안 중 하나로 손꼽히고 있다. 현재 자동차 산업이 뛰어난 국가에서는 이러한 추세에 대응하기 위하여 경량 자동차 개발 및 이에 대한 용접·접합 공정 기술 개발에 주목하고 있다.[1]

자동차 경량화를 실현하기 위하여 자동차 기술 선진국들은 경제성을 고려하여 자동차 차체 및 부품의 소재를 고강도강판, 철강 소재에서 알루미늄 합금, CFRP, 마그네슘 합금, 엔지니어링 플라스틱 등 비철금속, 경량 소재로 대체하고 있다. 하지만 이러한 경량소재, 비철금속을 자동차에 적용하기 위한 용접 공정 기술, 가공 및 성형 기술은 아직 최적의 방법이 실현되지 않은 실정이다. 따라서 차체에 적용하기 위한 경량 소재나 부품 별 최적화된 강도를 위한 용접·접합 기술의 다양한 시도가 이루어지고 있으며, 여러 연구들을 통하여 환경규제 및 산업분야를 만족시킬 수 있는 방안이 대두되고 있다.[2]

알루미늄 합금의 경우 철이나 구리와 비교하였을 때 비중이 3분의 1 수준으로 경량화 효율이 높을 뿐만 아니라 비강도가 크고 내식성도 우수하여 자동차 분야에서 보편적으로 사용된다. 하지만 알루미늄 합금에 일반적인 용융용접을 적용했을 때 기존의 용융용접은 잔류응력, 균열, 변형 등 용접 결함이 생기기 쉬워 건전한 용접부를 가지기 어렵다. 따라서 용융용접을 적용했을 시 알루미늄 합금의 변형, 용접 결함 등을 최소화하고 용접부의 건전성 확보를 위해 고상용접 중 하나인 마찰교반용접(Friction Stir Welding)을 적용하는 추세이다. 마찰교반용접은 TWI(The Welding Institute, UK)에서 개발된 것으로 Tool의 회전력으로 마찰열과 소성유동을 이용하여 용융온도보다 낮은 온도에서 용접하는 용접법이다. 모재의 용융이 발생하지 않는 상태에서 용접이 진행되기 때문에 고상용접으로 분류되며, 용접이 곤란했던 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 등의 경량 소재를 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차 경량화를 위해 두께가 서로 상이한 알루미늄 합금의 TWB에 대한 마찰교반 용접 적용 가능성을 고찰하고자 하였다.



Fig. 1.1 CO2 emission standard, fuel efficiency regulation forecast

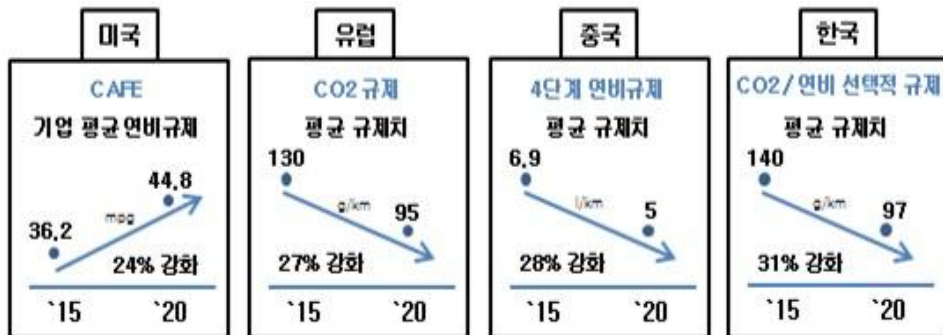


Fig. 1.2 Automobile fuel efficiency and emission gas regulation by country

1.1.2 연구목적

에너지 자원의 고갈 및 환경오염으로 인해 여러 산업분야에서의 연비규제, 환경규제가 강화되고 있어 자동차 산업분야에서도 그에 따른 차체 경량화와 새로운 기술 개발은 필수이다. 하이브리드, 전기차 등 친환경 자동차에 추가적인 부품들이 발생하므로 자동차 중량은 상대적으로 증가 할 수밖에 없기 때문에 알루미늄 합금 등 경량소재의 적용을 점차 확대하는 중이다. 이처럼 비철금속이나 경량 소재가 적용되기 위해서는 재료의 성형기술, 가공기술, 용접 및 접합 기술의 발전이 불가피 하다.

알루미늄 합금 소재가 성형성, 용접성이 취약하다는 단점이 있음에도 불구하고 경량화 효과가 크기 때문에 자동차 차체 및 부품에서 알루미늄 합금의 적용은 꾸준히 증가하고 있다. 현재 자동차에 적용되고 있는 알루미늄 합금 부품으로는 Engines, Bumper System, Seat Frames, Wheels, Suspension Components 등 다양하며, 이미 차체 Hood, Center pillar 등에도 사용되어 경량화율을 높이고 있는 추세이다. [3,4]

차체 경량화를 위해 기존에 쓰이던 철강소재를 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, CFRP 등으로 대체하면서 이를 자동차 차체에 적용하기 위해서 부품에 필요한 강도가 요구되는 부분은 두께가 두꺼워지거나, 이종 소재 끼리 용접 및 접합을 할 수밖에 없는 실정이다. 이를 위해 개발된 공법이 맞춤형단용접이라 불리는 TWB 공법이다. TWB(Tailor Welded Blank) 공법은 서로 다른 강도를 가지고 있거나, 서로 다른 두께, 서로 다른 소재의 강판을 각기 목적에 맞는 곳에 배치하고 용접 후 프레스 성형을 실시하는 방법으로 각 부위에 맞게 필요한 두께, 소재를 고르게 배치시켜 무게는 감소되고 부분적인 고강도화를 만족시킬 수 있어 차체 경량화 및 원가절감의 특징을 실현할 수 있는 공법이다. 현재 TWB 공법은 주로 자동차용 강판에만 적용되고 있으나 알루미늄 합금 등 경량 소재 적용 및 이종 소재 용접·접합의 증가에 따라 점차 확대될 것이며, 많은 연구가 진행되리라 예상된다. [5~7]

마찰교반용접을 적용한 두께가 상이한 알루미늄 소재에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이므로, 본 연구에서는 마찰교반 용접을 이용하여 알루미늄 합금의 TWB에 대한 용접 특성을 고찰하고자 하였다.

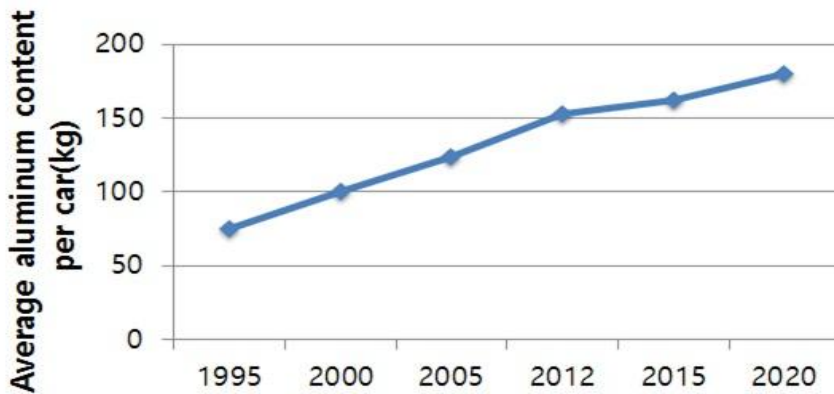


Fig. 1.3 Average aluminum content of vehicles

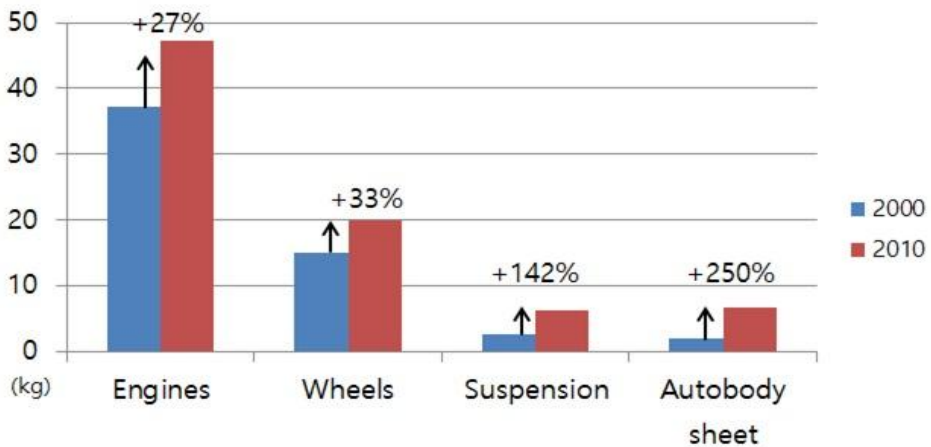


Fig. 1.4 Application of aluminum usage for automotive parts

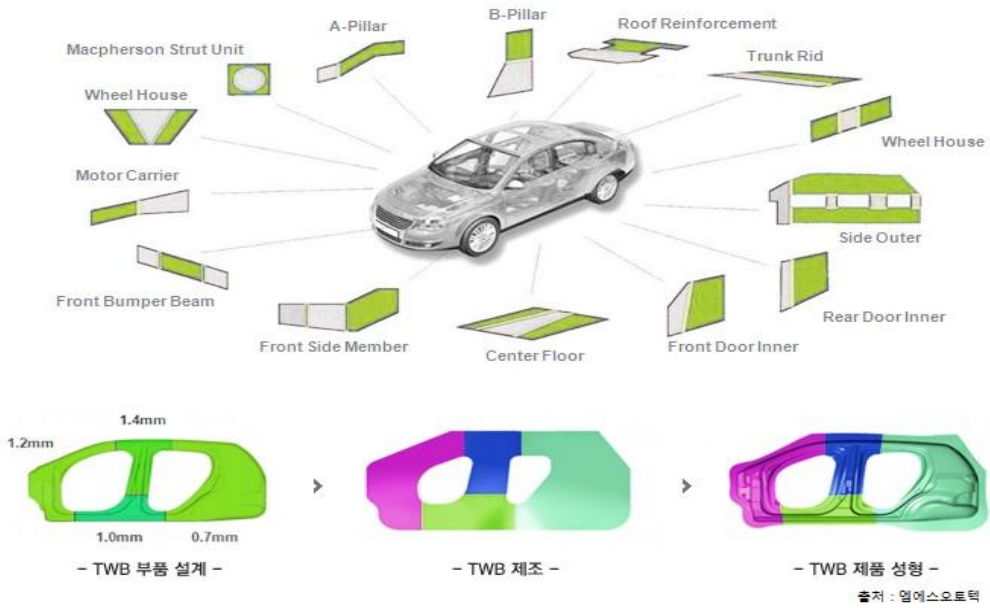


Fig. 1.5 Tailor welded blank of automobile

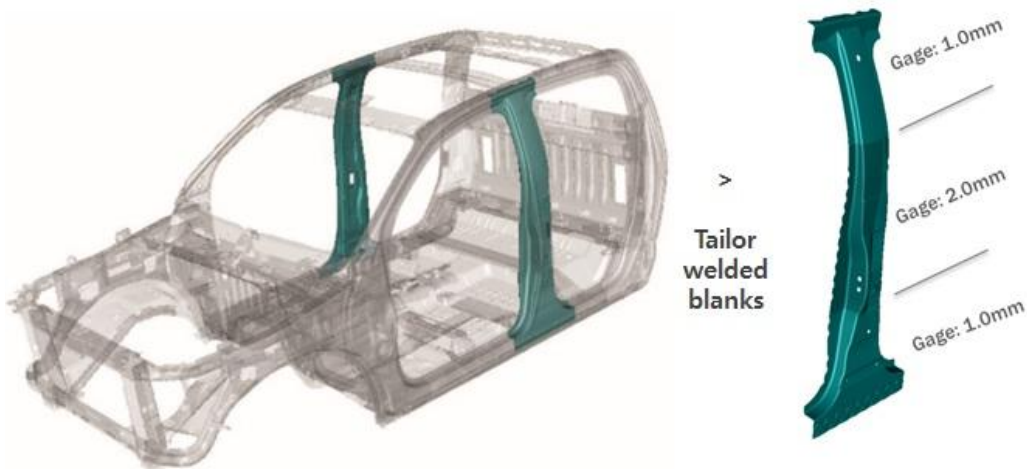


Fig. 1.6 Tailor welded blank of pillars

1.2 국내·외 기술 동향

최근 들어 마찰교반용접(Friction stir welding; FSW) 기술의 발전으로 전 세계적으로 우주항공, 철도차량, 자동차 등 많은 산업분야에서 적용이 확대되고 있다. 또한 수송기기 경량화 추세로 인하여 알루미늄 합금과 같이 열전도도가 비교적 큰 경량 소재의 우수한 접합부를 나타내기 위해 마찰교반용접 기술을 이용한 많은 연구개발이 계속 될 것이라고 예상된다.[8]

수송분야를 축으로 하여 친환경화, 제품 경량화에 맞춰 경량 소재의 사용은 항공기, 자동차, 철도차량으로 사용 비중이 넓어지고 있으며, 소형 선박에도 그 이용이 증가하는 실정이다. 알루미늄 합금 동종 용접, 경량 소재 이종재 용접, 철강과 경량 소재의 접합 영역까지 확대 되고 있으며, 실 제품에 적용하여 상업화 단계에 있다. 알루미늄 선박에 마찰교반용접을 적용함으로써 경량화 효과로 속력의 상승과 더불어 구조적 안정성을 확보할 수 있고 재활용이 가능한 친환경 선박을 건조하고 있다. [9, 10]

국외 철도차량 산업분야에서는 일본이 최초로 마찰교반용접을 철도 차체 제조에 적용하여 특허기술을 획득하는 등 기술 개발이 꾸준히 진행 중에 있으며, 국내에서도 용접부 결함 등 기초연구를 기반으로 한 연구가 진행되고 있다. 우주항공 분야에서 경량화는 경제적인 측면에서 중요한 요인으로 작용하므로 발사체, 연료탱크에 마찰교반용접 기술을 점차 상용화 시키는 추세이다.[11~13]

자동차 산업분야에서 알루미늄 합금의 사용빈도가 증가하면서 현재 국내에서도 마찰교반용접을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있으며 TWB(Tailor Welded Blank) 공법을 중심으로 기대치가 상승하고 있다. 앞으로 개발될 새로운 소재, 물성의 차이가 큰 소재끼리의 용접·접합에 대한 연구가 요구되며 이에 대한 용접 기술로 향후 마찰교반용접 기술이 활발하게 활용 될 것이라고 예상된다.[14, 15]

1.3 마찰교반용접

1.3.1 마찰교반용접의 원리

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW) 기술은 영국의 용접기술연구소 TWI(The welding institution, UK)에서 개발된 새로운 공정이다. 접합시킬 모재를 맞대어 FSW 지그(Jig)에 고정시킨 후 용접선을 따라 접합용 툴(Tool)을 고속으로 회전시키며 모재에 삽입한다. 이때 모재와 툴이 직접적으로 마찰되어 소성 가공변형과 마찰열이 발생하게 되면서 마찰열에 의해 고상상태인 모재가 충분히 연화되어 용융점의 약 80% 이하에서 접합이 이루어지는 고상용접법이다. 모재의 용융점 이하 온도에서 진행되는 고상용접공정이므로 알루미늄 합금과 같이 용융점이 낮고 고온균열 등 용융용접이 힘들었던 재료에 대한 용접이 가능하며, 경량 합금간의 용접, 이종금속 간의 용접을 가능하게 하여 다양한 분야에 응용되고 있다.

Fig.1.7과 같이 마찰교반용접은 연속공정으로서 먼저 툴이 고속으로 회전하면서 모재와 근접하여 핀(Pin)이 모재에 접촉하고 삽입되어 툴의 솔더(Shoulder) 부분까지 맞닿으면 솔더에 의한 추가적인 열이 용접부에 가해져 용접이 이루어진다. 이 과정에서 고속으로 회전하고 있는 핀에 의해 모재에서 기계적 교반이 발생되고, 용접선을 따라 접합진행 방향과 툴의 회전방향이 일치하는 부위(Advancing side)인 핀의 앞부분에서 툴의 회전방향과 접합진행 방향이 서로 반대되는 뒷부분(Retreating side)으로 압출되어 고상용접부가 형성된다.

Fig1.8에는 마찰교반용접된 단면적을 예시로 나타내었다. 마찰교반용접부의 미세조직은 모재(Base Metal) 부분 A, 열영향부(Heat Affected Zone)인 B, 교반부에 인접한 곳으로 툴에 의해 극심한 소성변형이 일어나 재결정이 발생하는 열-기계적영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone) C, D는 마찰열과 소성유동에 의한 교반부(Stir Zone)으로 나뉜다.

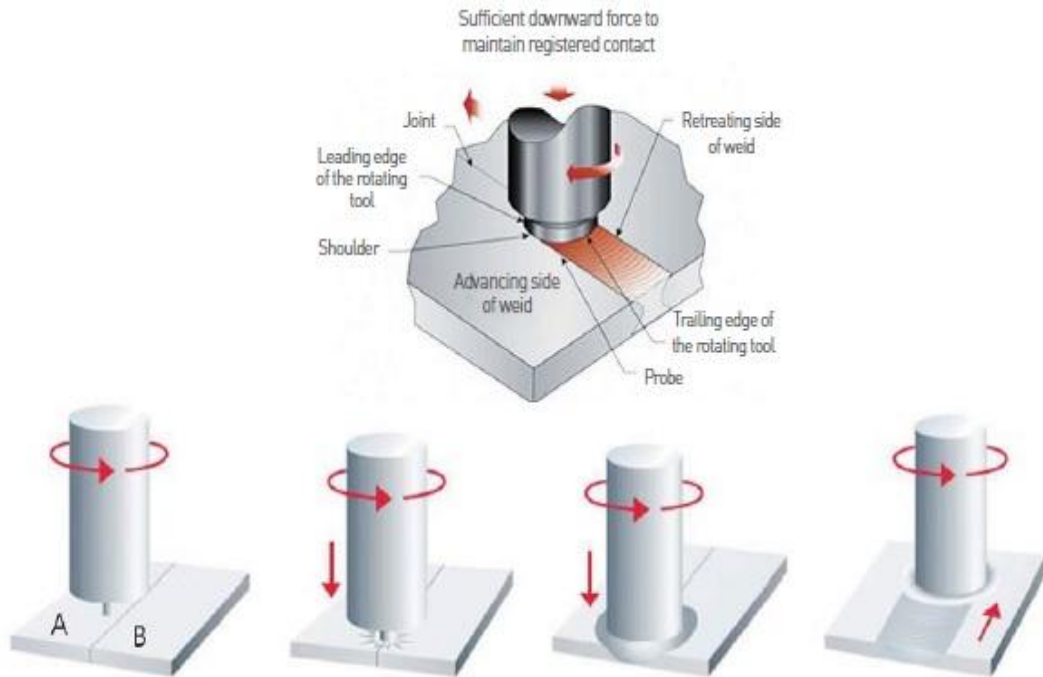


Fig. 1.7 Process of friction stir welding

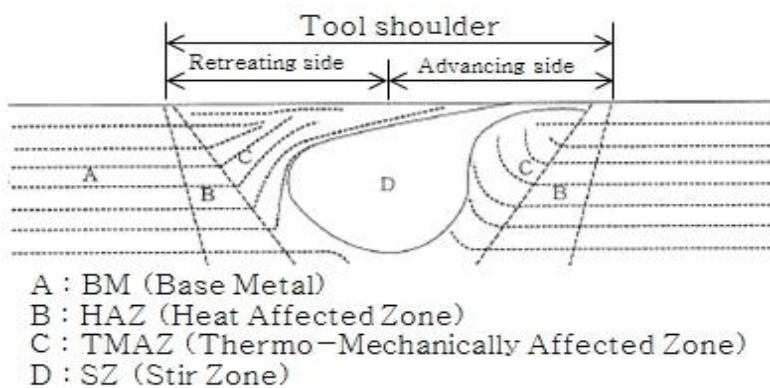


Fig. 1.8 Macrostructure of friction stir welded joints

1.3.2 마찰교반용접의 특징

마찰교반용접은 모재가 용융되지 않기 때문에 고상용접으로 분류된다. 장점으로 는 첫째, 유해가스(Fume)나 적외선, 자외선 등 유해광선이 발생하지 않는 친환경 적 용접법이다. 둘째, 고상상태의 접합이므로 부가적인 용가재나 보호가스가 필요 하지 않으며, 셋째로 자동화가 용이하며 기기를 다루는 작업자의 숙련도에 거의 의존하지 않는다. 넷째, 미려한 용접부를 형성하며 용융용접에 비해 무시할 정도로 적은 변형이 발생한다. 다섯째로 용접 툴(Tool)의 수명이 매우 길어 용접부 품질 저하가 적게 발생한다. 하지만 툴을 사용한 용접이어서 용접부 끝단에 툴의 핀 구멍이 남아 이를 보수하기 위한 후처리 과정이 필요하다.

마찰교반용접은 육안으로는 교반부 형상에 대한 예측이 불가능하며 다양한 인자 에 의해 영향을 받는다. 주된 접합 변수로는 툴의 형상, 툴의 삽입깊이, 회전속 도, 이송속도 등이 있다. 이를 Table. 1.1에 나타내었다. 이러한 변수들은 용접하 려는 모재의 재질, 형상, 두께 등에 의해 적절히 선택되어야 한다.[16,17]

Table. 1.1 Main coupling variables of the FSW process

Welding Factors		Contents
Tool shape		Quality, Shapes, Thickness
Tool size	Pin	Base metal thickness
	Shoulder	Connection of base metal surface
Tilting angle		2° ~ 5°
Tool rotation speed		Quality, Pin shapes, Thickness
Travel speed		According to rotation speed
Fixing		Jig connecting

1.4 알루미늄 합금 소재의 특징

알루미늄 합금은 철의 약 33% 무게로 경량화 효과를 기대할 수 있으며 열전도도, 재활용성이 우수하고 부식이 거의 없는 특성을 가지고 있어 자동차 경량화 소재로 적합하며, 기술, 가격, 소재의 공급과 수요를 고려하였을 때 현재 철강 소재의 대체 재료로 주목 받고 있는 경량 소재 중 알루미늄 합금이 가장 현실적인 대안으로 자리 잡고 있어 그 사용량은 점점 증가할 것으로 예상된다. 또한 알루미늄 합금에 대하여 기계적인 용접(리벳팅), 마찰교반용접 등의 기술 개발로 기존 용융 용접에 있는 단점들을 극복하면서 점차적으로 적용 가능한 범위를 확대하고 있는 추세이다.

알루미늄은 철과 비교했을 때 기계적 성질은 떨어지나 합금 첨가 원소로 마그네슘, 구리, 크롬, 망간 등을 첨가하거나 열처리해 순도 99.0% 이상인 순수 알루미늄 보다 강한 알루미늄 합금을 얻을 수 있으며, 보통 강과 견줄만한 강도도 얻어진다. 전연성이 커서 가공이 쉬우며, 전기 및 열의 양도체이고, 알루미늄 합금은 표면에 자연적으로 생기는 치밀한 피막이 있어 쉽게 반응하지 않아 재활용 효율이 높다는 장점이 있다. 하지만 AI 합금의 선팽창계수는 강의 약 2배여서 용접 변형이 발생하기 쉽고, 용점이 낮아 고온에서의 제약이 따른다. 각종 기기의 요구와 용도에 필요한 성질에 의해 가공용 합금과 주조용 합금으로 크게 구분할 수 있고, 이를 열처리 합금과 비열처리 합금으로 다시 구분 지을 수 있다. 마그네슘 다음으로 가벼운 금속이기 때문에 자동차 산업 패러다임에 걸맞은 경량화에 적합한 소재이다. 이러한 경량화 소재의 특징을 살려 우주항공 산업분야, 가정용기기, 일반공업용 자동차, 건축, 식품 등 광범위한 분야에 널리 사용된다.

본 연구에 사용되는 알루미늄 합금은 5000계열의 5052-H32로 5000계열은 주 첨가성분이 마그네슘인 강도 높은 비열처리형 합금이다. 내식성, 성형성, 용접성 등이 우수하고, 인장강도에 비해 피로강도가 높아 다방면에 사용되고 있어 국내에서 유통되는 알루미늄 합금 중 이용률이 가장 높다. 마그네슘의 첨가로 가공경화 효

과를 증대해 고강도 및 고성형성을 얻을 수 있다. 5052는 주로 자동차, 선박 구조 부품, 연료 탱크, 가정용 기구, 용접 구조용 재료로 많이 사용된다. 자동차용 알루미늄 합금 판재에는 주로 강도가 높은 Al-Mg인 5000계열, Al-Mg-Si인 6000계열 합금이 사용되며 비강도가 우수하고 경제적인 측면에서도 이점이 있어 자동차 차체용 소재로서 외장 구조재 뿐만 아니라 내열성이 요구되는 엔진 주변 등 다양한 부품에서 그 사용량이 증가하는 추세이다.[18]

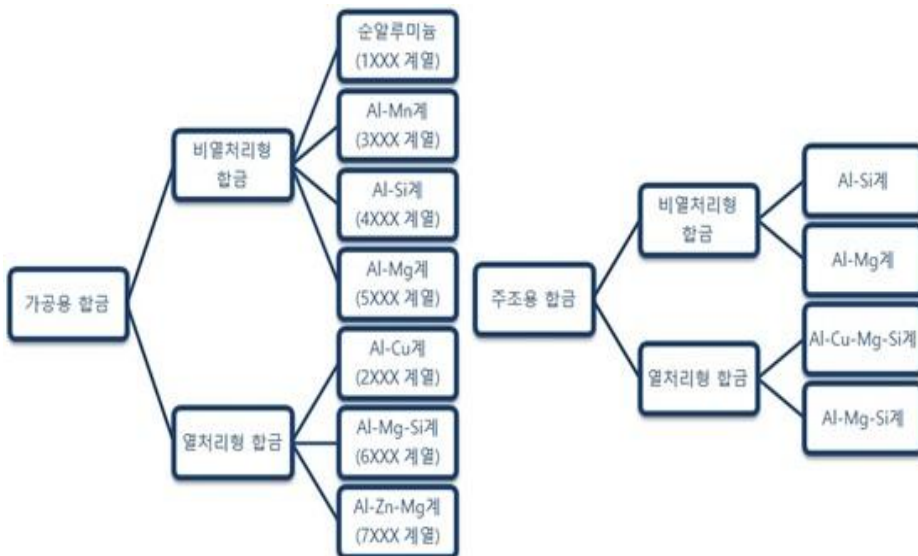


Fig. 1.9 Classification of Aluminum alloy

Table. 1.2 Characteristics of aluminum alloy

합금명 / 제조상태	항복강도 Yield Strength (Kgf/mm ²)	인장강도 Tensile Strength (Kgf/mm ²)	연신율 Elongation thickness (1.6 mm%)	전단강도 (Kgf/mm ²)	피로강도 (Kgf/mm ²)
5005-0	4.00	12.50	25	7.50	-
-H12	13.50	14.00	10	10.00	-
-H14	15.50	16.00	6	10.00	-
-H16	17.50	18.50	5	10.50	-
-H18	19.50	20.50	4	10.00	-
-H32	12.00	14.00	11	11.00	-
-H34	14.00	16.00	8	10.00	-
-H36	17.00	18.50	6	10.50	-
-H38	19.00	20.50	5	11.00	-
5052-0	9.00	19.50	25	12.50	11.00
-H32	19.50	23.00	12	14.00	12.00
-H34	22.00	26.50	10	15.00	12.50
-H36	24.50	28.00	8	16.00	13.50
-H38	26.00	29.50	7	17.00	14.00
5056-0	15.50	29.50	-	18.50	14.00
-H18	41.50	44.50	-	24.00	15.50
-H38	35.00	42.00	-	22.50	15.50
5086-0	12.00	26.50	22	16.00	-
-H32	21.00	29.50	12	-	-
-H34	26.00	33.00	10	19.00	-
-H38	13.50	27.50	14	-	6.50
-T4, T451	5.50	12.50	25	8.5	10.00
-T6, T651	15.00	24.50	22	17.00	10.00
	28.00	31.50	12	21.00	

제 2 장 연구 방법

2.1 연구 방법

본 연구에서는 두께 및 재질을 달리하는 TWB 공법에 마찰교반용접을 적용하기 위하여 알루미늄 합금 소재의 이두께 맞대기 용접을 실시하여 용접 특성을 고찰하고자 하였다.

1장에서는 연구의 배경 및 목적, 국내·외 동향, 마찰교반용접 공정의 원리, 알루미늄 합금 소재의 특성을 나타내었다.

2장에서는 마찰교반용접을 이용한 알루미늄 합금 A15052의 TWB 용접 특성에 관한 연구 방법에 대하여 논하였다. 주된 용접 변수로는 Tool의 회전 속도, Travel speed, Y-axis tilting angle 이며 용접 조건에 따라 서로 두께가 상이한 TWB 알루미늄 합금 용접부의 특성을 주안점으로 고찰하고자 하였다.

3장에서는 1.5 mm와 2.5 mm의 판재를 사용하여 이두께 맞대기 마찰교반용접을 실시하였다. 용접 조건에 따른 A15052 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험과 경도시험을 진행하였고, 광학현미경(Optical microscope)을 이용하여 알루미늄 합금 용접부의 미세조직 특성을 고찰하였다.

4장에서는 마찰교반용접을 이용한 알루미늄 합금 A15052의 TWB 용접 특성에 관하여 톨의 이송속도, 회전속도, Y-axis tilting angle에 따른 용접부의 기계적인 특성과 금속학적인 특성을 비교 평가하여, 이에 대한 결론을 도출하였다.

2.2 실험장비 및 조건

2.2.1 소재 및 이음부 형상

본 연구에서는 자동차 경량화 소재인 알루미늄 합금 A15052를 사용하였다. 길이 150 mm(L), 폭 50 mm(W), 두께 2.5 mm(T), 1.5 mm(T)의 시편을 실험에 사용하였다. 이에 대한 화학적 조성과 기계적인 물성은 Table. 2.1, Tabel. 2.2에 나타내었다.

Fig. 2.1에 이음부의 형상을 나타내었으며 알루미늄 합금 동종의 두께가 서로 상이한 판재를 사용해 맞대기 마찰교반용접을 실시하였다. 용접 시 틀의 회전방향은 반시계 방향(CCW)으로 고정하여 두 판재 중 상대적으로 박판인 1.5 mm를 Advancing side에 위치시키고, 2.5 mm의 판재를 Retreating side가 되도록 배치하였다.

Table. 2.1 Chemical compositions of material

Chemical composition (wt.%)								
Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
ratio	0.13	0.28	0.012	0.036	2.35	0.18	0.006	Bal.

Table. 2.2 Mechanical properties of material

Mechanical properties			
Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
168	228	11	70

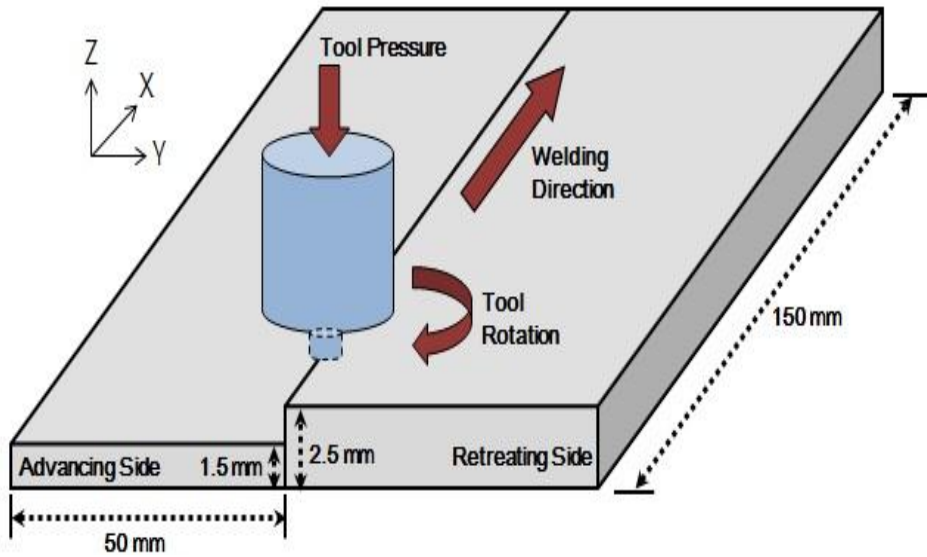



Fig. 2.1 Configuration of different thickness Al5052 specimen

2.2.2 실험장비 및 틀

본 연구에서 알루미늄 합금 A15052 마찰교반용접을 위하여 Fig. 2.2에 나타낸바와 같이 FSW 장비를 사용하였다. 실험장비의 사양은 Table. 2.2에 나타내었다. 마찰교반용접 실험 장비는 Z축의 회전은 최소 300 RPM 부터 3000 RPM까지 제어 가능하며, 최대 하중은 3000 kgf 까지 적용 할 수 있다. GANTRY TYPE으로 X축과 Y축은 장비 테이블에 의해 0.5~10 mm/sec의 속도로 이동이 가능하다.



Items		Range
Type		Gantry Type
Welding Speed	X-axis	0.5~10 mm/sec
	Y-axis	0.5~10 mm/sec
	Z-axis	0.5~10 mm/sec
	R-axis	1~20 rpm
Rotation		300~3000 rpm
LOAD Capacity		Max. 3000 kgf

Fig. 2.2 Equipment of friction stir welding system

접합용 툴(Tool)을 이용하는 공정인 마찰교반용접은 툴 솔더의 형상, 핀의 형상 등에 따라 용접부의 기계적 특성 결과가 달라진다. 본 마찰교반용접 실험에서는 WC(Tungsten carbide)-CO(Cobalt) 12% 소재를 다이아몬드 연삭하여 제작한 툴을 사용하였다. 핀(Pin)의 형상은 원통형(Cylinder)으로 선택하였고, 핀의 길이는 1.6 mm, 핀 지름은 5 mm, 솔더(Shoulder)의 직경은 16 mm, 핀과 솔더의 오목각을 3° 로 고정하여 제작하였다. 본 연구에 사용된 툴의 형상과 치수를 각각 Fig. 2.3 에 나타내었다.

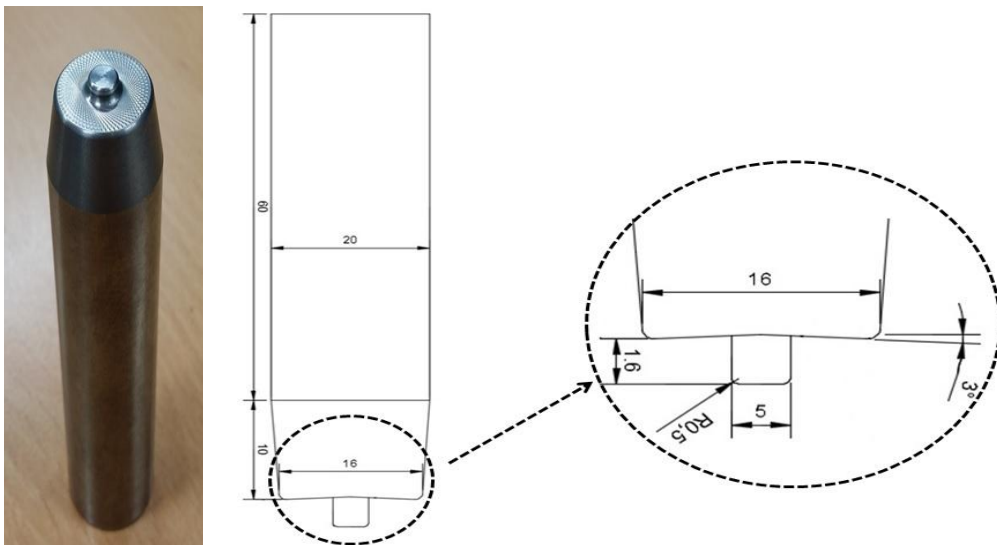


Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding

2.2.3 실험조건 및 공정

Table. 2.3에 나타낸 것과 같이 마찰교반용접에서 톨의 형상, 회전속도(rpm), 이송속도(Traveling speed)는 매우 중요한 변수이고, 그 외에도 삽입 깊이(Plunge depth), 삽입 유지시간(Dwell time), 틸팅 각도(Tilting angle), 가압력 등의 변수에 의해 용접성이 좌우된다.[19~22]

본 연구에서는 Table. 2.3에 나타낸 용접 공정 조건으로 알루미늄 합금 (Al5052-H32)의 이두께 맞대기 마찰교반용접 실험을 진행하였다. 먼저, Y-axis tilting angle을 설정하지 않은 상태(Y-axis tilting angle 0°)에서 두께가 서로 상이한 용접부의 용접 특성을 고찰하기 위하여 이송속도에 대한 톨의 회전속도의 비인 각속도비(Angular velocity ratio, RS/TS)에 따른 용접부 거동을 비교 평가하였다. 톨의 회전속도는 400 rpm ~ 600 rpm, 톨의 이송속도는 48 mm/min, 60 mm/min, 톨의 회전방향은 반시계 방향(CCW)으로 실험을 실시하였다. 그 후 최적의 조건을 도출하여 Y-axis tilting angle 1° , 2° , 3° 를 변수로 설정하여 Y-axis tilting angle이 알루미늄 합금 동종의 두께가 다른 TWB 용접부에 미치는 영향을 고찰하였다.

Table. 2.3 FSW welding conditions for TWB

Y-axis Tilting Angle	Rotation Speed (rpm)	Traveling Speed (mm/min)	Angular Velocity Ratio (RS/TS)
0° ~ 3°	400	48	8.33
		60	6.67
	500	48	10.42
		60	8.33
	600	48	12.50
		60	10.00

일반적으로 두께가 균일한 판재의 마찰교반용접을 실시할 때에는 틀의 틸팅각도 (Tilting angle)만 설정해도 건전한 용접부를 얻을 수 있지만, 서로 두께가 상이한 TWB 소재를 마찰교반용접 할 때에는 Tilting angle 이외의 각도가 주어지지 않으면 틀이 고속으로 회전하면서 삼입 될 시, 핀이 동시에 두 판재에 닿지 않고 상대적으로 두꺼운 판재에 먼저 접촉이 시작되어 소성유동을 유발하는 마찰열이 불충분하여 원활한 교반이 이루어지지 않는다.[23] 그렇기 때문에 두께 차를 보완하기 위한 각도가 설정되어야 하는데 Fig. 2.4에 나타낸 것처럼 Y-axis tilting angle을 위해 1°, 2°, 3°의 각도가 주어진 지그(Jig)를 특수 제작하여 마찰교반용접을 진행하였다. Fig.2.5에 본 실험의 모식도를 그려서 나타내었다.

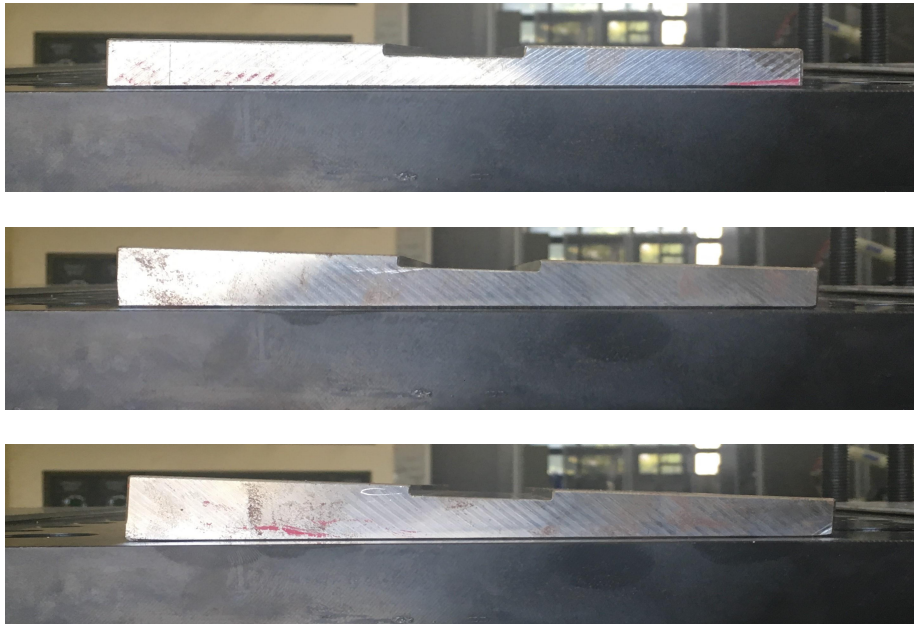
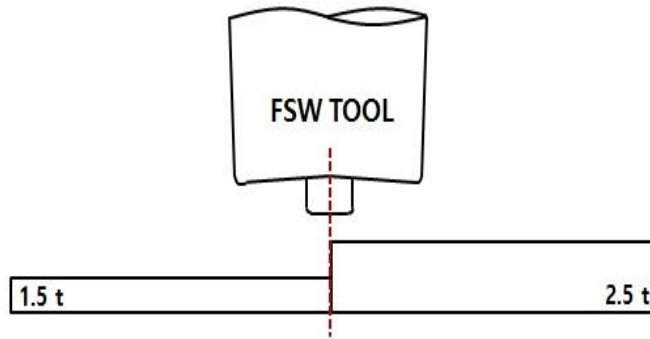
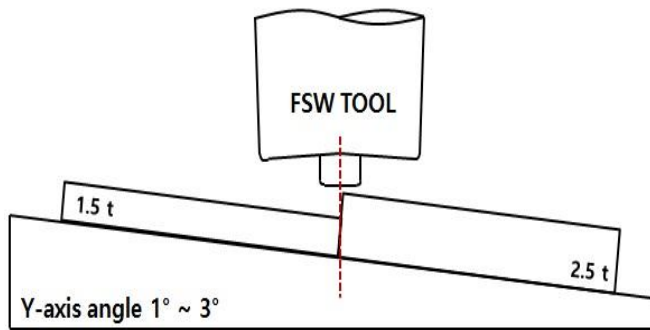


Fig. 2.4 jig used for TWB of FSW



(a) Y-axis angle 0°



(b) Y-axis angle $1^\circ \sim 3^\circ$

Fig. 2.5 Schematic diagram of FSW for TWB

2.3 용접부 특성 평가

2.3.1 용접부 외관 및 단면 관찰

본 연구에서는 마찰교반용접을 이용하여 알루미늄 합금의 이두께 맞대기용접의 특성을 고찰하기 위하여 톨의 회전속도 및 이동속도, Y-axis tilting angle의 변화에 따른 용접부의 용접 여부, 비드 표면 형상, 접합부 균열 및 결함 형성 유무 등을 관찰하였다. 1차적으로 육안으로 관찰하였고, 시험편을 용접 진행방향에 수직으로 절단하여 마운팅, 자동연마기계로 연마를 진행한 후 Diamond paste를 이용하여 미세연마를 실시하였다. 특히 시험편의 단면(Cross section)으로 용접부의 건전성 확인과 더불어 마찰교반용접부의 결함 형성 여부를 확인하고 관찰하였다.

2.3.2 인장시험 특성

본 연구에서는 동종 알루미늄 합금의 이두께 맞대기 마찰교반용접의 특성을 고찰하기 위하여 톨의 이송속도, 회전속도, Y-axis tilting angle 의 조건에 따라 마찰교반용접을 실시하였다. Fig. 2.6에 나타낸 Shimadzu사의 EGF-EG 600EGKN-40L 만능 시험 장치를 사용하여 마찰교반용접한 시험편의 인장강도를 평가하였다.

인장시험 평가를 진행할 때 총 길이 100 mm(L), Length of reduced section(A), 30 mm(B)의 Grip, Round(R) 값은 6으로 Fig. 2.7, Table. 2.4에 나타낸 ASTM E8/E8M-09 규격의 Subsize Specimen에 따라 시험편을 제작하였다.



Fig. 2.6 Tensile test machine

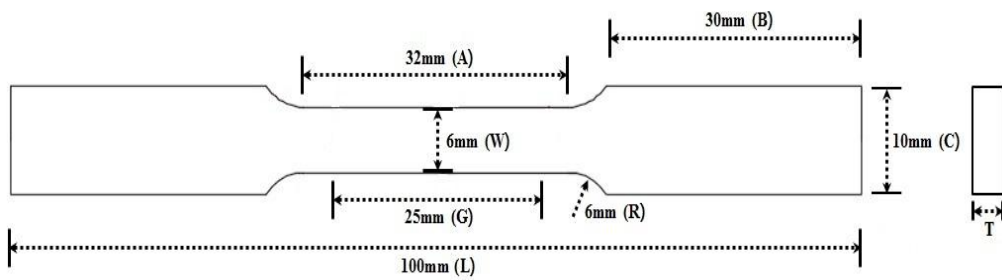


Fig. 2.7 Dimension of tensile test specimen

Table. 2.4 Configuration of tensile test specimen

Item	Range
Width (W)	6 mm
Gage Length (G)	25 mm
Thickness of material (T)	-
Overall length (L)	100 mm
Radius of fillet (R)	6 mm
Length of reduced section (A)	32 mm
Length of grip section (B)	30 mm
Width of grip section (C)	10 mm

2.3.3 경도시험 특성

본 실험은 FSW를 이용한 알루미늄 Al5052 합금의 이두께 맞대기 용접 시 조건에 따른 용접 특성을 고찰하였다. 마찰교반용접을 실시한 시험편에서 용접 진행방향의 수직으로 용접부를 절단하여 경도 측정 전에 미세연마를 진행한 후 경도를 측정하였다. Fig. 2.8에 나타낸 Akashi사의 HM-112 micro Vickers 경도 시험기를 사용하였다. 현미경의 배율은 $50\mu\text{m}$, 136° 다이아몬드 피라미드 입자를 사용하였다.

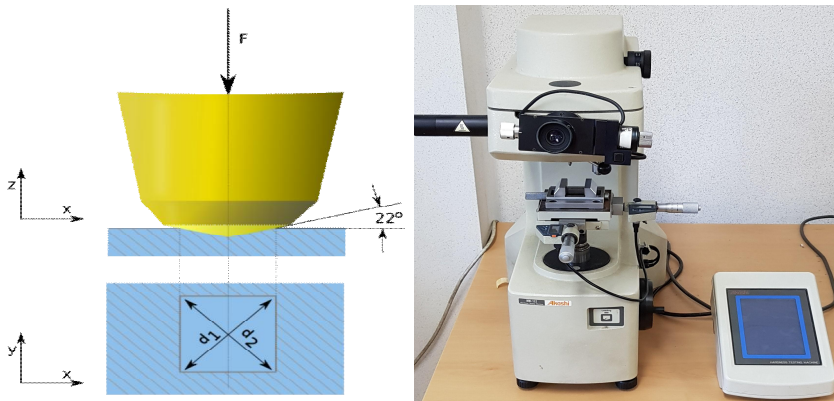


Fig. 2.8 Vickers hardness test equipment


Table. 2.5 Hardness testing condition

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

2.3.4 미세조직 관찰

알루미늄 합금 Al5052의 이두께 1.5 mm와 2.5 mm 간의 마찰교반용접 시 용접 특성을 평가하기 위해 미세조직을 관찰하기 전에 인장시험을 실시하였다. 각 용접 조건별 인장강도의 값이 가장 높은 값을 가지는 시험편에 대하여 미세조직을 관찰하였다. 미세조직을 관찰하기 위해서 시험편을 용접 진행방향에서 수직으로 절단하여 마운팅, 미세연마를 먼저 실시하였다. 연마지를 사용하여 #400, #800, #1000, #1500, #2000, #2400, #4000 순서로 연마를 수행하였고, 더욱 세밀한 연마를 위해서 Diamond paste $3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ 로 미세연마를 수행하였다. 그 후 연마된 시험편을 Keller's 용액으로 10~30초간 에칭(Micro etching)을 실시하였다. Table. 2.6에 Keller's 에칭액의 비율과 미세조직 관찰에 사용한 광학현미경을 나타내었다.

Table. 2.6 Keller 's etching reagent and Optical microscope

Solutions	Values(ml)	Optical microscope
Pure water	190	
Hydrofluoric acid(HF)	2	
Hydrochloric acid(HCl)	3	
Nitric acid(HNO ₃)	5	

3장. 결과 및 고찰

3.1 두께가 다른 Al5052 TWB의 FSW 용접변수에 따른 용접특성

3.1.1 용접부 외관 및 단면 특성

툴의 회전속도 400~600 rpm, 이동속도 48, 60 mm/min에 따른 마찰교반용접을 실시하였다. 삽입속도 0.5 mm/s, 유지시간(dwelling time)은 15초, 전진각(tilting angle)은 3° 로 고정시켰다. 각속도비(RS/TS)에 따른 비드 및 단면 특성을 고찰하였다.

마찰교반용접부의 비드의 형태, 접합 여부를 1차적으로 육안으로 확인하고 재료의 소성유동성, 결함의 발생 등을 관찰하였다. 적정 용접조건을 벗어날 경우 용접부에서는 툴의 교반부족이나 교반 과잉에 의해 결함이 발생하게 된다. 불충분한 입열량(Insufficient heat input)일 경우 터널 결함(Tunnel defect), 키싱본드(Kissing bond)의 결함이 존재한다. 또한 과도한 입열량(Excessive heat input)일 경우 툴 솔더가 소재에 효과적으로 압착하지 못해 용접부 표면으로 재료의 배출(burr)이 생성되어 용접부의 두께가 모재의 두께에 비해 상대적으로 얇아지게 되어 기계적 특성 저하의 요인이 된다.[24] 마찰교반용접된 시험편을 육안으로 확인했을 시에 회전속도 400~600 rpm, 이송속도 48, 60 mm/min 모든 조건에서 용접부 비드 표면이 미려한 것으로 보아 툴 솔더의 접합이 원활히 이루어 졌다고 판단하였다.

용접부 외관 및 단면은 Table. 3.1, 3.2에 나타내었다.

Table. 3.1 Bead appearance and cross section of welded joints with angular velocity ratio at 48 mm/min


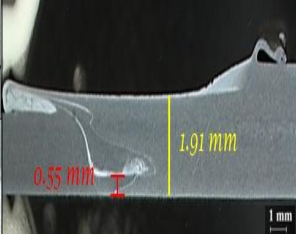

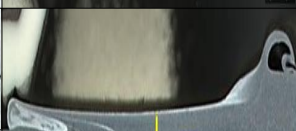

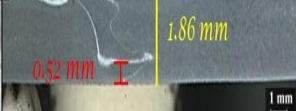



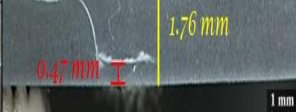

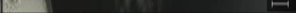

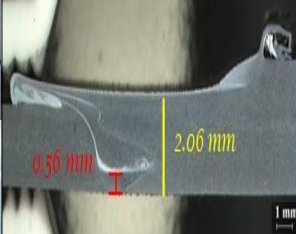


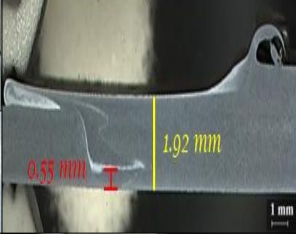


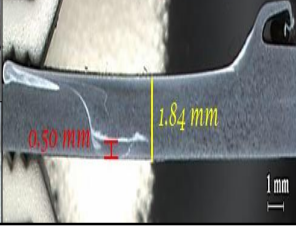

Rotation Speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Angular Velocity Ratio (RS/TS)	Bead appearance	Cross section	
				AS	RS
400	48	8.33			1.91 mm
					0.55 mm
500		10.42			1.86 mm
				0.52 mm	
600	12.5			1.76 mm	
				0.47 mm	

Table. 3.2 Bead appearance and cross section of welded joints with angular velocity ratio at 60 mm/min

Rotation Speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Angular Velocity Ratio (RS/TS)	Bead appearance	Cross section	
				AS	RS
400	60	6.67			2.06 mm
					
500		8.33	8.33		
				0.55 mm	
600	10.00	10.00			1.84 mm
					0.50 mm

용접부의 단면을 관찰하였을 때, 모든 회전속도 400~600 rpm, 이송속도 48, 60 mm/min의 조건에서 결함이 발생한 것으로 발견되었다. 일반적으로 마찰교반용접일 경우에 불충분한 입열량에서 키싱본드(Kissing bond) 결함이 발생한다. 본 실험에서는 두께 단차에 의해 두꺼운 쪽인 Retreating side에서 얇은 쪽인 advancing side로 소재로 유동되어 이동하게 되는데, 이때 툴의 솔더가 소재 표면에 정확하게 접촉되지 않기 때문에 마찰열 발생 및 소성 유동이 불충분하여 키싱본드가 발생한 것으로 사료된다.

또한, 모든 조건에서 용접부 끝단까지 접합되지 않아 지그재그라인(zigzag line)이 발생하였으며 이는 툴이 판재의 직각으로 삽입되어 그에 따른 단차의 영향으로 판단되어진다. 이송속도 48, 60 mm/min의 조건을 비교하였을 때 회전속도가 증가하여 각속도비(ratio : rotation speed / travel speed)가 증가 할 때 thinning effect로 인해 두께가 두꺼운 판재의 측이 큰 폭으로 용접부의 두께가 감소하는 것을 확인하였다. 각속도비(angular velocity ratio) 값이 같은 회전속도 400 rpm, 이송속도 48 mm/min, 500 rpm의 60 mm/min (ratio:8.33)의 조건에서 용접부의 두께가 1.91, 1.92t로 비슷하였고, 각속도비 값이 가장 높은 회전속도 600 rpm, 이송속도 48 mm/min (angular velocity ratio : 12.5)의 조건에서 용접부의 두께는 1.76t 로 판재의 얇은 두께 1.5t와 크게 차이나지 않고 retreating side에 위치한 2.5t가 burr로 배출된다는 것을 확인하였으며 각속도비의 값이 클수록 용접부의 소성유동이 활발하기 때문이라고 사료된다. 용접 조건 및 각속도별 Advancing side (1.5t)와 Retreating side(2.5)의 용접부의 두께 증감을 Table. 3.3에 나타내었다.

Table. 3.3 Variation of thickness in welded joint with angular velocity ratio

Rotation Speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Angular Velocity Ratio (RS/TS)	Thickness	
			AS	RS
400	48	8.33	0.41 ↑	0.59 ↓
	60	6.67	0.56 ↑	0.44 ↓
500	48	10.48	0.36 ↑	0.64 ↓
	60	8.33	0.42 ↑	0.58 ↓
600	48	12.5	0.26 ↑	0.74 ↓
	60	10.00	0.34 ↑	0.66 ↓

3.1.2 인장시험 특성

본 연구는 두께가 다른 알루미늄 합금 A15052의 이두께 맞대기 마찰교반용접에 대하여 고찰하였다. 실험으로 얻어진 용접부의 강도를 확인하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험편은 ASTM E8M-09의 인장시험 규격에 의거해 제작 후 시험을 수행하였다. 인장시험은 용접 진행방향에 수직인 방향으로 수행하였으며, 각 조건별로 3개씩 제작하였다. Fig. 3.1과 Fig. 3.2은 용접 변수인 톨의 회전속도, 이송속도에 따라 인장시험의 결과를 나타내었으며, 인장강도는 3개 시험결과 값의 평균값으로 나타내었다.

인장시험 결과, 회전속도 600 rpm, 이송속도가 48 mm/min일 때(각속도비 angular velocity ratio:12.5), 204 MPa로 본 연구에 사용된 알루미늄 합금 5052 재료 모재대비 91%의 최대 인장강도를 얻었다. 이는 각속도비가 증가할수록 입열량이 증가하여 용접부 두께가 감소하기는 하지만, 소성유동이 증가하여 미용접부가 감소하기 때문이라 생각된다. 회전속도 600 rpm, 이송속도 60 mm/min의 조건에서(각속도비 angular velocity ratio:10) 가장 낮은 인장강도 값 194 MPa(모재 대비 86 %) 보이는데, 이는 상대적으로 각속도 증가로 인한 과입열에 의한 thinning effect로 용접부의 두께가 큰 폭으로 감소하였기 때문이라고 사료된다.

인장 시험 결과 회전속도 400, 500, 600 rpm, 이송속도 48, 60 mm/min의 조건에서 상대적으로 두께가 얇은 1.5t의 판재측의 HAZ와 TMAZ에서 파단이 일어났음을 확인하였다.

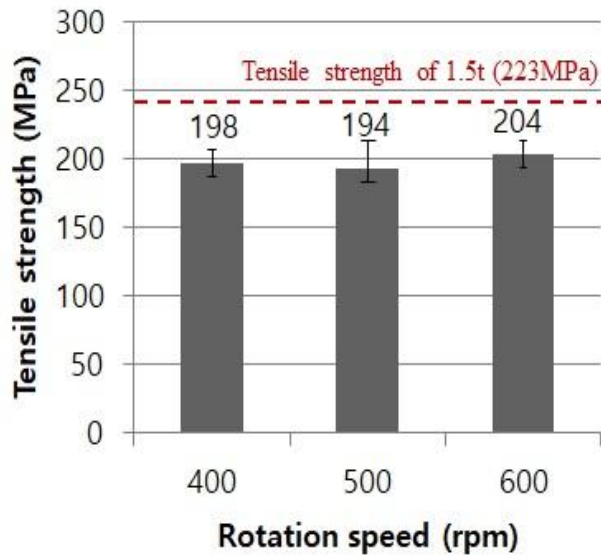


Fig. 3.1 Tensile strength of welded joints for various rotation speeds in travel speed 48 mm/min

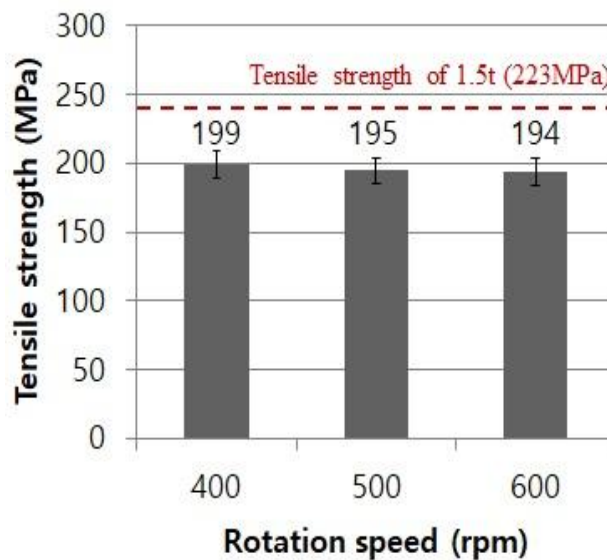


Fig. 3.2 Tensile strength of welded joints for various rotation speeds in travel speed 60 mm/min

3.1.3 경도분포 특성

Fig. 3.3는 인장강도 값이 가장 높은 시험편의 회전속도 600 rpm, 이송속도 48 mm/min의 조건에서 용접시험편의 경도를 측정하는 것이다. 상대적으로 얇은 판재 1.5t 기준으로 시험편의 중앙부 위치 0.75 mm의 위치에서 용접부의 중심으로 좌우 각각 15 mm 씩 0.25 mm의 간격으로 경도를 측정하였다.

시험편의 경도 분포를 관찰하였을 때 모재에서 용접부로 갈수록 경도 값이 감소하는 경향을 보였다. 본 연구에 사용된 알루미늄 합금 A15052 판재의 모재 평균 경도 값은 상대적으로 두꺼운 시편 2.5t는 69.4 Hv, 1.5t는 68.4 Hv가 측정되었다. 얇은 두께의 판재 1.5t에서 HAZ(heat affected zone)에서의 경도 분포 값은 약 54 Hv, TMAZ(thermal mechanical affected zone)는 약 50 Hv이 측정되었다. 두꺼운 판재 2.5 t에서도 마찬가지로 HAZ에서의 경도 분포 값은 61 Hv, TMAZ에서는 56 Hv가 측정되었다. 교반부 SZ(stir zone)의 최대 경도 값은 63 Hv가 측정되었으며 모재에 준하는 경도 값을 확보할 수 있었다.

일반적으로 가공경화형 알루미늄 합금의 경우 마찰교반 부근의 경도 값은 전위 밀도가 증가하고 미세결정립이 형성되어 모재와 비슷하거나 모재 보다 조금 낮은 값을 얻을 수 있다. 따라서 알루미늄 합금 A15052를 이용한 마찰교반용접에서 W형태의 경도 그래프가 나타난다.[25] 판재 두께와는 상관없이 본 연구에서는 모재에 비해 HAZ에서 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 교반부(SZ)가 모재보다 낮은 경도가 측정되었다.

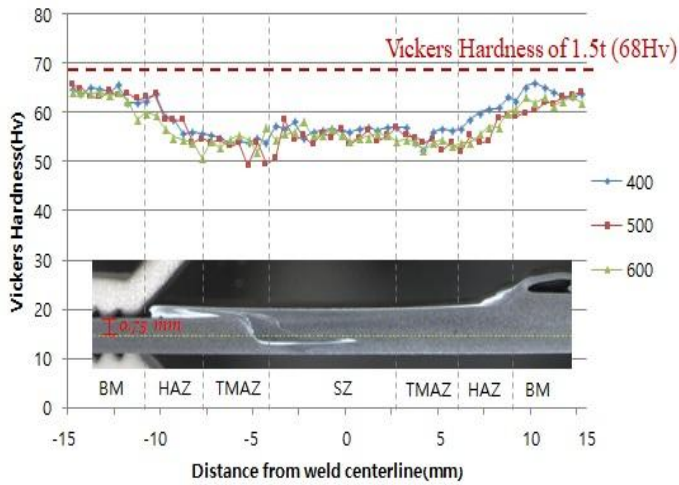


Fig. 3.3 Hardness distributions in ultimate tensile strength

3.1.4 미세조직 특성

Fig. 3.4는 최대 인장강도 값이 도출된 용접조건인 600 rpm, 48 mm/min, 각속도 비 12.5의 시편에서 용접부에 대한 각각의 영역별로 미세조직의 변화를 나타내었다. (A),(E) BM 모재, (B),(F) HAZ 열영향부, (C),(G) TMAZ 열-기계적영향부, (D)SZ 교반부의 순서로 나타내었다.

미세조직을 관찰한 결과, (D) 교반부(SZ)에서 교반이 진행되면서 마찰열과 소성 유동에 의한 동적재결정으로 인해 결정립이 미세화 되고 응집 돼있는 현상을 관찰하였다. 단차가 존재하다보니 이러한 응집현상이 나온 것이라고 사료되어진다. (C),(G) 열-기계적영향부(TMAZ)는 톨 핀의 회전으로 소성변형에 의한 재결정 발생으로 결정립이 미세화 되었으며, (B),(F) 열영향부(HAZ)는 마찰교반용접 시 발생하는 열영향으로 인해 모재 보다 결정립이 조대화 된 것을 확인할 수 있었다.[26]

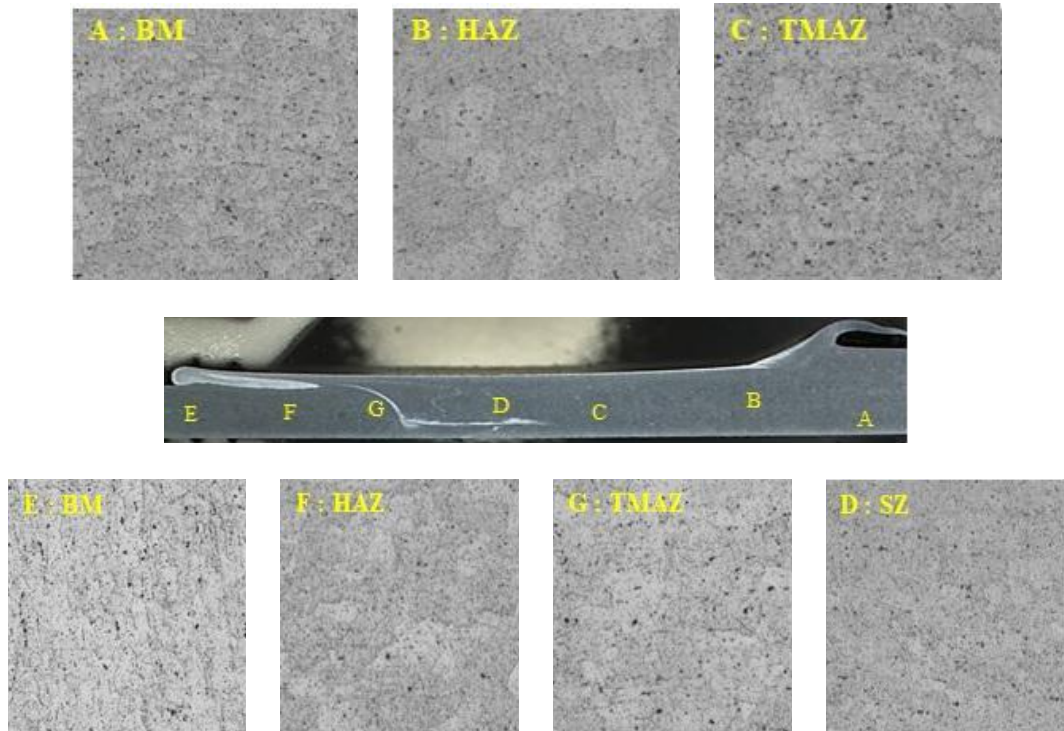


Fig. 3.4 Microstructure of welded joints in Y-axis tilting angle 0°

3.2 틸팅각 변화에 따른 용접특성 비교

3.2.1 용접부 외관 및 단면 특성

두께 단차를 보완하여 용접성을 향상시키기 위해 Y-axis tilting angle 1° , 2° , 3° 을 설정하여 용접부의 특성을 평가하였다. 기존 실험에서 이송속도 60 mm/min의 조건에서 일정한 향상이 관찰되었으므로 Y-axis tilting angle을 설정한 실험의 조건으로 톨의 회전속도 400~600 rpm, 이동속도 60 mm/min에 따른 마찰교반용접을 실시하였다. 삽입속도 0.5 mm/s, 유지시간(dwelI time)은 15초로 고정시켰다. 기본 실험인 Y-axis tilting angle 0° 의 조건을 실시했을 때와 마찬가지로 마찰교반용접부의 비드의 형태, 접합 여부를 1차적으로 육안으로 확인하고 재료의 소성유동성, 결함의 발생 등을 관찰하였다.

본 실험을 육안으로 확인했을 시에 Y-axis tilting angle 1° , 2° , 3° , 회전속도 400~600 rpm, 용접 이송속도 60 mm/min의 모든 조건에서 용접부 비드 표면이 미려한 것으로 보아 원활한 용접이 진행되었다고 판단되어진다.

육안으로 확인했을 시에 Y-axis tilting angle 3° 의 회전속도 600 rpm의 조건에서 높은 회전속도로 인해 용접이 진행 될수록 비드가 일정치 않은 것을 확인할 수 있었지만 400 rpm, 500 rpm의 조건에서는 균일한 비드가 형성되었음을 관찰하였다. 이는 톨의 솔더가 1.5t와 2.5t 간의 두께 단차에도 불구하고 두 시편에 균일하게 맞닿은 후 삽입되어 Burr가 발생하지 않은 것으로 사료되어진다.[27]

회전속도별 Y-axis tilting angle에 따른 용접부 외관 및 단면을 Table. 3.4 ~ Table. 3.6 에 나타내었다.

Table. 3.4 Bead appearance and cross section of welded joints with Y-axis tilting angle at rotation speed 400 rpm


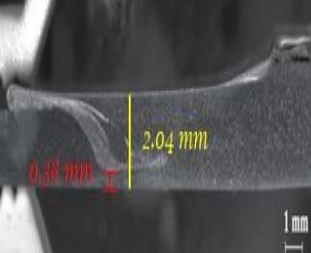

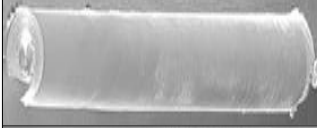
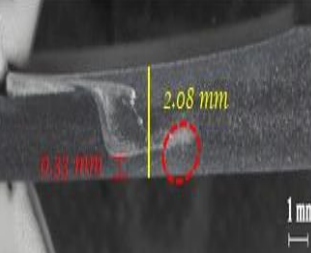

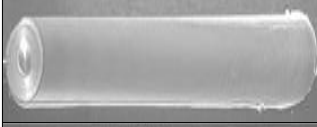
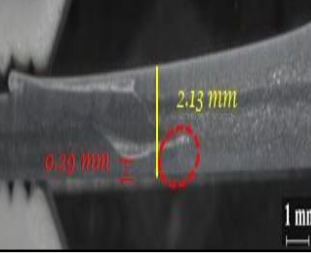
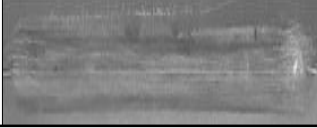
Rotation Speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Y-axis tilting angle	Bead appearance	Cross section	
				AS	RS
400	60	1°			2.04 mm
					
		2°			2.08 mm
					
		3°			2.13 mm
					

Table. 3.5 Bead appearance and cross section of welded joints with Y-axis tilting angle at rotation speed 500 rpm

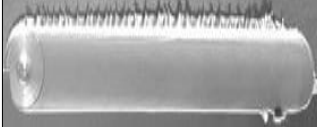
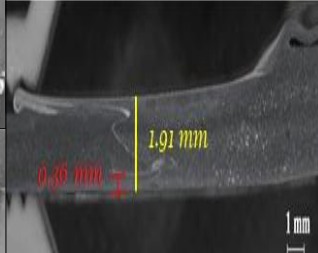

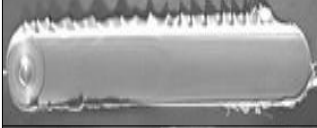
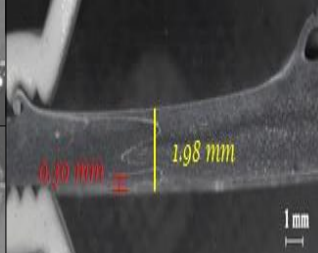


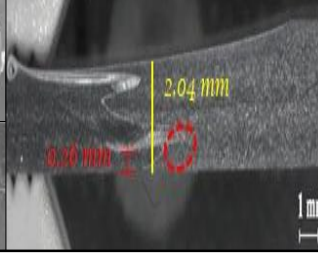
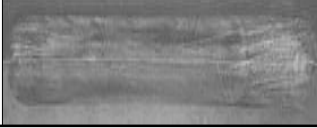
Rotation Speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Y-axis tilting angle	Bead appearance	Cross section	
				AS	RS
500	60	1°			1.91 mm
					
		2°			1.98 mm
					
		3°			2.04 mm
					

Table. 3.6 Bead appearance and cross section of welded joints with Y-axis tilting angle at rotation speed 600 rpm


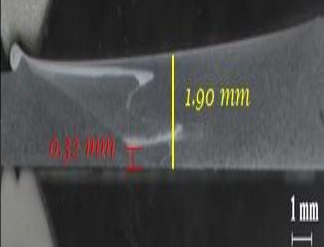

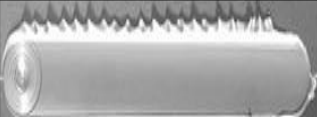
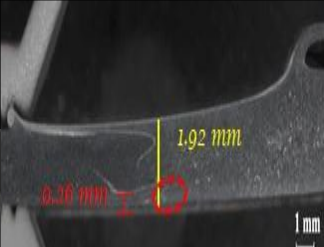
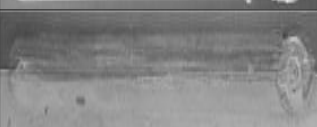

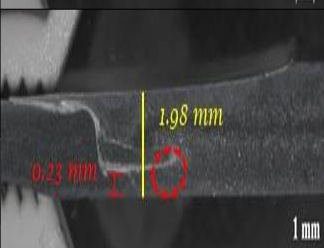

Rotation Speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Y-axis tilting angle	Bead appearance	Cross section	
				AS	RS
600	60	1°			1.90 mm
					
		2°			1.92 mm
					
		3°			1.98 mm
					

Table. 3.7 은 회전속도 400~600 rpm, 이송속도 60 mm/min의 조건에 따른 용접부 두께의 증감을 나타내었다.

마찰교반용접을 실시한 용접부의 단면을 관찰하였을 때 틀의 회전속도 600 rpm의 모든 조건에서 Y-axis tilting angle 이 증가 할수록 소성유동이 원활하게 진행되지 않았으며, 3° 에서 용접부 끝단까지 미접합 된 것을 확인하였다. 회전속도 400 rpm, Y-axis tilting angle 2° 와 3° 의 조건에서 Y-axis tilting angle가 증가할수록 용접부의 끝단 부분도 똑같이 증가하여 retreating side에 위치한 상대적으로 더 두꺼운 시편인 2.5t 용접부의 끝단 미접합 부분이 증가하였고 회전속도 500, 600 rpm과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 회전속도에 의해 충분한 소성유동이 이루어지지 않아 용접이 원활히 진행되지 않았음을 확인 할 수 있었다. Y-axis tilting angle 1° , 회전속도 400 rpm, 이송속도 60 mm/min 의 조건에서 2° 와 3° 에 비해 retreating side에 위치한 2.5t 와 advancing side에 위치한 1.5t의 용접부 끝단까지 비교적 균일하게 원활한 소성유동이 일어나 건전성 있는 용접이 이루어짐을 확인하였다.

Table. 3.7 Variation of thickness of welded joint with Y-axis tilting angle

Rotation Speed (rpm)	Y-axis tilting angle	Thickness	
		AS	RS
400	1°	0.53 ↑	0.46 ↓
	2°	0.51 ↑	0.39 ↓
	3°	0.42 ↑	0.35 ↓
500	1°	0.41 ↑	0.58 ↓
	2°	0.31 ↑	0.49 ↓
	3°	0.24 ↑	0.32 ↓
600	1°	0.25 ↑	0.57 ↓
	2°	0.22 ↑	0.41 ↓
	3°	0.16 ↑	0.31 ↓

3.2.2 인장시험 특성

본 연구는 알루미늄 합금 A15052의 이두께 맞대기 마찰교반용접에 대하여 고찰하였다. 실험으로 얻어진 용접부의 강도를 확인하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험편은 ASTM E8M-09의 인장시험 규격에 의거해 제작 후 시험을 수행하였다. 인장시험은 용접 진행방향에 수직인 방향으로 수행하였으며, 각 조건별로 2개씩 제작하였다. Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 용접 변수인 톨의 회전속도, Y-axis tilting angle에 따라 인장시험의 결과를 나타내었으며, 인장강도는 2개 시험결과값의 평균값으로 나타내었다.

본 실험의 인장시험 결과, 회전속도 400 rpm의 조건에서 Y-axis tilting angle 1° 일 때 최대 인장강도 값인 212.3 MPa로 A15052 1.5t의 모재대비 95 %를 확보하였으며 얇은 판재 1.5t에서 모재(BM)에서 파단이 발생하였다. 회전속도 600 rpm의 조건에서는 회전속도 400 rpm에 비해 모든 조건에서 인장강도가 낮은 경향을 확인할 수 있었는데 이는 과도한 입열로 인한 thinning effect로 용접부의 두께가 감소하며, 인장강도 저하의 원인이 되기 때문이라고 사료된다.[28]

회전속도 600 rpm에 비하여 400 rpm의 조건에서 상대적으로 균일한 경향을 보이므로 회전속도 400 rpm이 신뢰성 있는 조건이라고 판단되며 인장시험 결과, Y-axis tilting angle이 증가할수록 인장강도가 감소하는 것을 확인하였다.

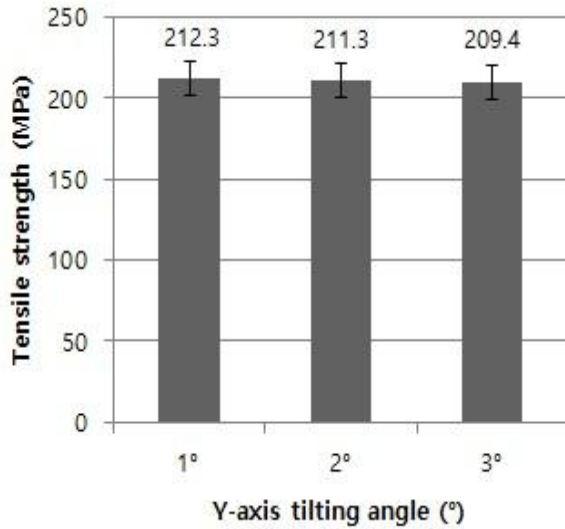


Fig. 3.5 Tensile strength of welded joints with Y-axis tilting angle at rotation speed 400 rpm

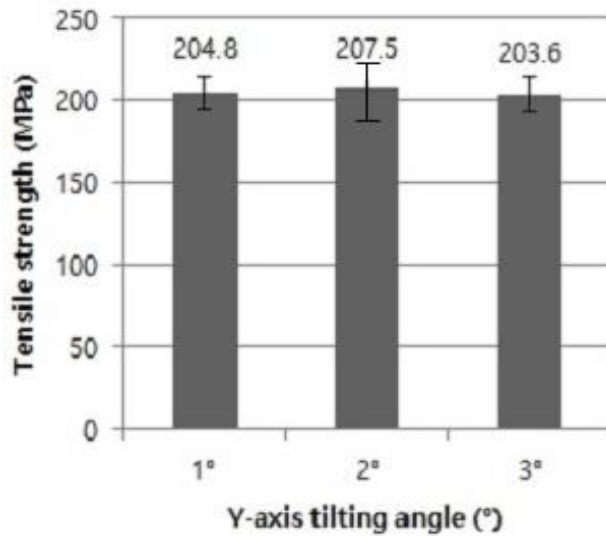


Fig. 3.6 Tensile strength of welded joints welded joints with Y-axis tilting angel at rotation speed 600 rpm

3.2.3 경도 분포 특성

Fig. 3.7과 Fig. 3.8은 회전속도 400, 600 rpm, Y-axis tilting angle 1° , 2° , 3° 의 조건에서 용접시험편의 경도를 측정하였다. 상대적으로 얇은 판재 1.5t 기준으로 시험편의 중앙부 위치 0.75 mm의 위치에서 용접부의 중심으로 좌우 각각 15 mm 씩 0.25 mm의 간격으로 경도를 측정하였다.

시험편의 경도 분포를 관찰하였을 때 모든 조건에서 모재보다 용접부의 경도 값이 감소하는 경향을 보였다. 회전속도 400 rpm, Y-axis tilting angle 1° 의 조건에서 접합부 최대 경도 값 60 Hv가 측정되었다. SZ(Stir Zone)에서 평균 59Hv가 측정되었으며 Y-axis tilting angle 2° 의 조건에서는 55 Hv, Y-axis tilting angle 3° 의 조건은 최소 경도 값인 52 Hv가 측정되었으며, 회전속도 600 rpm, Y-axis tilting angle 3° 에서 SZ에서 가장 낮은 경도 값 52 Hv가 측정되었다. 따라서 Y-axis tilting angle이 증가함에 따라 미세하지만 용접부 경도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서 HAZ(Heat Affected Zone)과 TMAZ(Thermo-Mechanically Affected Zone) 부분에서 미세하지만 모재보다 낮은 경도가 측정되었는데, 일반적으로 가공경화형 알루미늄 합금에서는 SZ 부분의 경도 값은 전위 밀도가 증가하며 미세결정립 형성에 의해 모재와 비슷하거나 조금 낮은 값을 얻을 수 있으며, 전위 밀도가 감소함에 따라 동적재결정립 생성이 감소하여 소재의 전위강도 약화 및 경도를 낮추는데 기인하기 때문이라고 사료된다.[29]

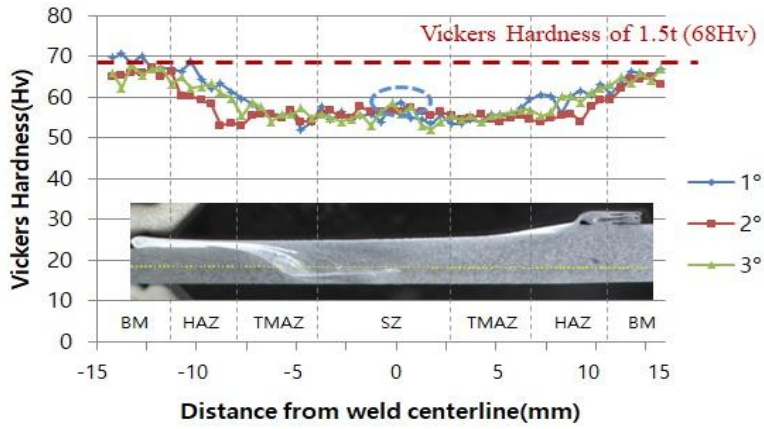


Fig. 3.7 Hardness distributions of rotation speed 400 rpm

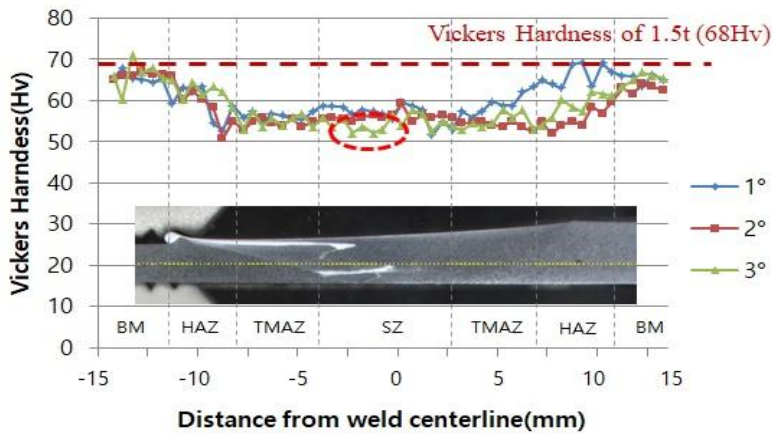


Fig. 3.8 Hardness distributions of rotation speed 600 rpm

3.2.4 미세조직 특성

Fig.3.9는 최대 인장강도 값이 도출된 조건인 회전속도 400 rpm, 이송속도 60 mm/min, Y-axis tilting angle 1° 의 시편에서 용접부에 대한 각각의 영역별로 미세조직의 변화를 나타내었다. Advancing side의 1.5t와 Retreating side 측 2.5t에 대하여 (A),(E) BM 모재, (B),(F) HAZ 열영향부, (C),(G) TMAZ 열-기계적영향부, (D)SZ 교반부의 순서로 각각 나타내었다.

미세조직을 관찰한 결과, (D) 교반부에서는 모재와 비교하여 결정립의 미세화 및 응집 현상을 관찰 할 수 있었는데 이는 교반이 진행되면서 마찰열에 의한 소성 유동으로 동적재결정이 발생하여 미세화 된 것으로 사료된다. (C),(G) TMAZ부에서는 마찰교반용접 시 사용되는 톨 핀의 회전으로 소성변형에 의해 결정립이 미세화 되었으며 특히, (B),(F) HAZ 열영향부분은 마찰교반용접 시 발생하는 열 영향으로 인해 모재 및 열-기계적영향부 보다 결정립이 조대화 된 것을 확인 할 수 있었다.[30]

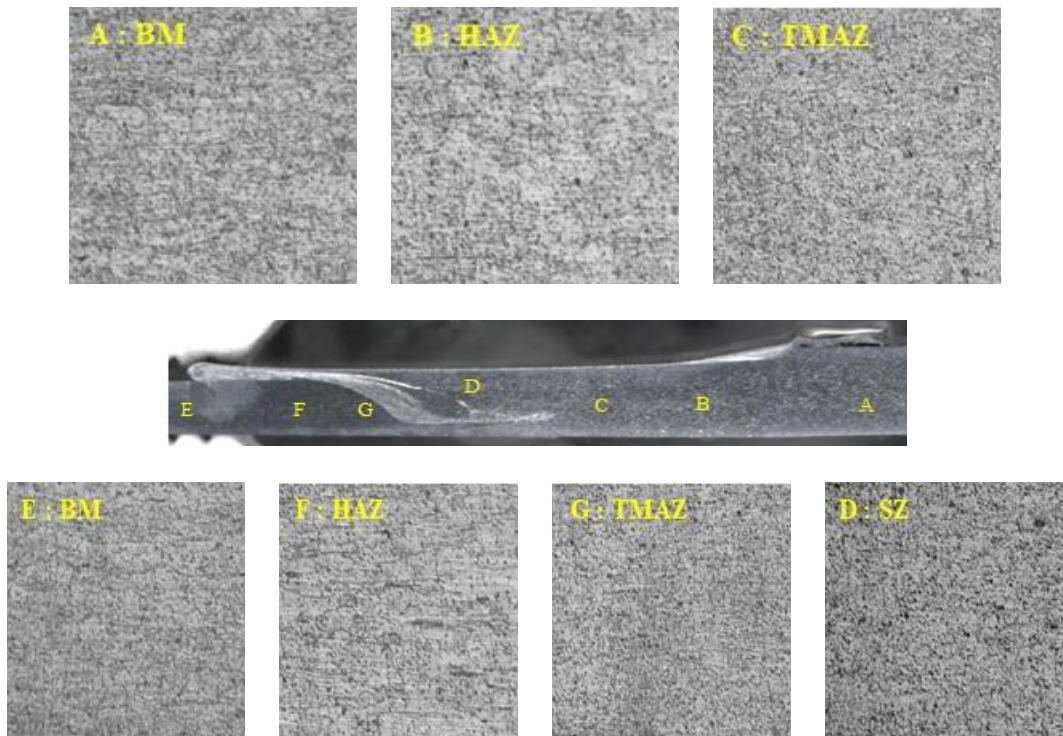


Fig. 3.9 Microstructure of welded joints in Y-axis tilting angle 1°

4장 결론

본 연구에서는 차체 경량화를 위하여 두께가 다른 알루미늄 합금(AI5052)에 마찰교반용접을 적용한 TWB 용접부에 대한 특성을 고찰하였다. 특히 톨의 Y-axis tilting angle, 회전속도, 이송속도에 따른 기계적·금속학적 특성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.[31]

- 1) 이두께에 대한 틸팅각(Y축)을 설정하지 않은 상태(0°)에서 판재에 대해 직각으로 톨을 삽입하여 마찰교반용접시, 이두께의 단차 영향을 줄이기 위한 과도한 톨의 삽입으로 많은 양의 Burr가 모든 조건에서 발생하였으며 용접부 끝단까지 용접이 이루어지지 않음이 관찰되었다. 이는 톨 솔더가 소재 표면에 접촉하는 면적이 적어 마찰열이 적게 발생하고 가압력이 부족하여 소재 표면에 제대로 적용되지 않아 입열량 부족에 의한 불충분한 소성유동으로 인해 발생하는 것으로 판단된다.
- 2) 용접성을 향상시키기 위하여 이두께에 대한 틸팅각(Y축)을 1° , 2° , 3° 로 설정하여 고찰한 결과, 3° 에서 이두께의 단차의 영향이 최소화 되어 가장 매끄러운(smooth) 비드를 얻을 수 있었으나, 틸팅각이 증가할수록 그 만큼 경사지게 핀이 삽입되어 용접부 계면과 멀어지므로 소성유동 영역이 용접부 끝단에 형성되지 않으므로 미접합 부분이 증가하는 것이 관찰되었다. 틸팅각 1° 에서는 용접부 계면의 위치에 핀이 삽입되어 소성유동이 이루어지므로, 원활한 소성유동이 발생하여 끝단까지 용접이 이루어짐을 확인하였다.

- 3) 이두께에 대한 틸팅각(Y축) 0° 의 조건과 비교한 결과, 틸팅각을 주었을 때 인장강도가 더 향상됨을 확인하였다. 특히, 틸팅각 1° , 회전속도 400 rpm, 이송속도 60 mm/min의 조건에서 최대인장강도 212.3 MPa로 모재 대비 95 %를 확보할 수 있었으며, 틸팅각이 2° , 3° 의 경우 인장강도 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 경도 시험의 결과 Y-axis tilting angle 1° , 회전속도 400 rpm, 이송속도 60 mm/min의 조건에서 60 Hv, 모재 대비 88 %가 측정되다. 영역별 미세조직은 열영향부는 미세조직의 조대화되고, 교반부는 동적재결정이 일어남에 따라 용접부의 전위밀도가 감소하여 소재의 연화가 경도에 영향을 주는 것으로 판단된다. Y-axis tilting angle이 증가 할수록 평균 경도 값은 감소하는 경향을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 방한서, 방희선, 전근홍. (2011). 마찰교반접합기술을 이용한 이종재료 접합에 관한 최근 연구동향. 대한용접접합학회지, 29(5), 37-40.
- [2] 장인성, 조용준, 박현성, 소득영. (2016). 자동차 산업에서 뿌리기술의 중요성 및 최신 용접/접합 기술. 대한용접접합학회지, 34(1), 21-25.
- [3] 이강문, 김윤규, 문만빈. (2013). 차체 경량화 최신 기술 동향. 소성가공, 22(5), 286-290.
- [4] 문민석. (2017). 경량 자동차 개발을 위한 소재 및 성형공정. 한국자동차공학회 Workshop, 50-81.
- [5] KINSEY, Brad; LIU, Zhihong; CAO, Jian. A novel forming technology for tailor-welded blanks. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99.1: 145-153.
- [6] 천창환, 한창석. TWB 판넬의 기계적특성 평가에 관한 연구. 열처리공학회지, 2010, 23.4: 183-190.
- [7] 임성곤. (2017). 차량 경량화를 위한 알루미늄 적용 동향 및 단조 소재기술. 단조 심포지엄, 107-115.
- [8] THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D. Friction stir welding for the transportation industries. Materials & design, 1997, 18.4: 269-273.
- [9] CAM, Gürel; MISTIKOGLU, Selcuk. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23.6: 1936-1953.
- [10] FEISTAUER, E. E., et al. Mechanical behaviour of dissimilar friction stir welded tailor welded blanks in Al-Mg alloys for Marine applications. Materials & Design, 2014, 59: 323-332.
- [11] OHBA, Hideshi; UEDA, Chiaki; AGATSUMA, Kouji. Innovative Vehicle—the “A-train” . Hitachi Review, 2001, 50.4: 131.

- [12] 최은결, 김경학, 김종희, 방한서, 방희선. (2017). 이(異)두께 TWB 마찰교반 용접시 공정변수에 따른 용접 특성. 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 439-439.
- [13] 정현호, 이에림, 유준태, 윤종훈, 민경주, 이호성. (2014). 마찰교반용접 기술의 항공우주분야 응용 동향. 항공우주산업기술동향, 12(2), 158-165.
- [14] KWON, Y. J.; SHIGEMATSU, Ichinori; SAITO, Naobumi. Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys. *Materials Letters*, 2008, 62.23: 3827-3829.
- [15] SHIGEMATSU, I., et al. Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding. *Journal of Materials Science Letters*, 2003, 22.5: 353-356.
- [16] SHEN, Z., et al. Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015, 18.2: 270-277.
- [17] ZHANG, Zhaohua, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials & Design*, 2011, 32.8: 4461-4470.
- [18] J. H. Lee, Aluminum & Aluminum Based-Alloy, Total Information Network Services, www.technonet.co.kr
- [19] 강대민, 장진숙, 박경도, 이대열. (2016). 마찰교반 용접조건에 따른 Al 5052 알루미늄 합금의 접합특성. 한국동력기계공학회지, 20(3), 51-56.
- [20] FUJII, Hidetoshi, et al. Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 419.1: 25-31.
- [21] SABARI, S. Sree; MALARVIZHI, S.; BALASUBRAMANIAN, V. Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 22: 278-289.
- [22] KRASNOWSKI, K.; HAMILTON, C.; DYMEK, S. Influence of the tool shape and

- weld configuration on microstructure and mechanical properties of the Al 6082 alloy FSW joints. Archives of civil and mechanical engineering, 2015, 15.1: 133-141.
- [23] FRATINI, L.; BUFFA, G.; SHIVPURI, R. Improving friction stir welding of blanks of different thicknesses. Materials Science and Engineering: A, 2007, 459.1: 209-215.
- [24] 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
- [25] Y. M. Yeon, W. B. Lee, C. Y. Lee, S. B. Jung and K. Song, Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A 5052 Alloy Sheet, Journal of KWJS, 2006, 24, pp71-76
- [26] MOSHWAN, Raza, et al. Effect of tool rotational speed on force generation, microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg-Cr-Mn (AA 5052-0) alloy. Materials & Design (1980-2015), 2015, 66: 118-128.
- [27] KOLAHGAR, Sina, et al. Formability of Friction Stir-Welded Blanks with Different Thickness Ratios. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47.5: 2177-2187.
- [28] KANG, Dae-Min; JANG, Jin-Suk. Friction Stir Welding Characteristics of Al5052 Aluminium Alloy by Design of Experiment. Journal of the Korea Society For Power System Engineering, 2015, 19.4: 11-16.
- [29] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu and B. Zou, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, Materials and Design, 2011, 32, pp4461-4470
- [30] SAHU, Prakash Kumar; PAL, Sukhomay. Mechanical properties of dissimilar thickness aluminium alloy weld by single/double pass FSW. Journal of

Materials Processing Technology, 2017, 243: 442-455.

- [31] ZADPOOR, Amir Abbas, et al. Mechanical properties and microstructure of friction stir welded tailor-made blanks. Materials Science and Engineering: A, 2008, 494.1-2: 281-290.