



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 2월

석사학위 논문

알루미늄 합금(AI5052) FSW
T-joints 용접시 툴 형상이
용접성에 미치는 영향

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 병 진

알루미늄 합금(AI5052) FSW
T-joints 용접시 툴 형상이
용접성에 미치는 영향

The effect of tool pin shape on weldability of
AI5052 FSW welded T-joints

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 병 진

알루미늄 합금(AI5052) FSW
T-joints 용접시 툴 형상이
용접성에 미치는 영향

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 병 진

김병진의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	특임교수	<u>방한서</u>	
위원	조선대학교	부교수	<u>방희선</u>	
위원	조선대학교	조교수	<u>주성민</u>	

2016년 11월

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	7
1.2 국내외 기술 동향	10
1.3 마찰교반용접	12
1.3.1 마찰교반용접의 원리	12
1.3.2 마찰교반용접의 특징	14
1.4 알루미늄 소재의 특징	15

2장 . 연구 방법	17
2.1 연구 방법	17
2.2 실험방법 및 조건	19
2.2.1 사용소재 및 이음부 형상	19
2.2.2 실험장비	21
2.2.3 툴(Tool)	23
2.2.4 실험조건 및 공정	25
2.3 용접부 특성 평가	29
2.3.1 용접부 단면 특성	29
2.3.2 인장시험	30
2.3.3 미세조직 관찰	32
2.3.4 경도시험	35
3장 . 결과 및 고찰	37
3.1 Cylinder type 핀 형상인 틀의 용접특성	37
3.1.1 용접부의 단면 특성	37
3.1.2 인장시험 특성	42
3.1.3 경도 분포	44
3.1.4 미세조직 특성	47

3.2 Frustum type 핀 형상인 틀의 용접 특성	49
3.2.1 용접부의 단면 특성	49
3.2.2 인장시험 특성	54
3.2.3 경도 분포	56
3.2.4 미세조직 특성	59
3.3 두 가지 핀 type 틀의 용접 특성 비교	61
3.3.1 용접부의 단면 특성 비교	61
3.3.2 인장시험 특성 비교	63
3.3.3 경도 분포 비교	65
3.3.4 미세조직 특성 비교	66
4장 . 결론	67
참고문헌	69

List of Figures

Fig. 1.1 International energy outlook	3
Fig. 1.2 CO ₂ emissions performance and proposed passenger vehicles	4
Fig. 1.3 Regulation of fuel efficiency on vehicles	5
Fig. 1.4 After weight lightening, decreasing in emission quantity	6
Fig. 1.5 Transition on weight of vehicles	8
Fig. 1.6 Occupancy of aluminum alloy on parts of vehicles	9
Fig. 1.7 Prospect of materials applied in car in North America	11
Fig. 1.8 Histories using aluminum alloy of vehicles	11
Fig. 1.9 Schematic drawing of working process principle of FSW	13
Fig. 1.10 Process of friction stir welding	13
Fig. 2.1 Flow chart of thesis	18
Fig. 2.2 Configuration of T-joints specimen	20
Fig. 2.3 Equipment of friction stir welding system	21
Fig. 2.4 Tool details used for friction stir welding	24
Fig. 2.5 Zig system used for friction stir welded T-joints	27
Fig. 2.6 Schematic diagram of T-joints process	28
Fig. 2.7 Tensile test machine	30
Fig. 2.8 Dimension of tensile test specimen	31
Fig. 2.9 Optical microscope	34
Fig. 2.10 Scanning electron microscope	34
Fig. 2.11 The design drawing on specimens of mechanical test	35
Fig. 2.12 Vickers hardness test scheme and equipment	36
Fig. 3.1 Tensile strength of T-joints fabricated in 400rpm with cylinder typed tool	43
Fig. 3.2 Tensile strength of T-joints fabricated in 500rpm with cylinder typed tool	43
Fig. 3.3 Hardness of T-joints fabricated in 400rpm with cylinder type	46
Fig. 3.4 Hardness of T-joints fabricated in 500rpm with cylinder type	46

Fig. 3.5 EDS analysis of the kissing bond defect of T-joints with
 cylinder typed pin 47
 Fig. 3.6 Chemical compositions of the kissing bond defect of T-joints
 with cylinder type 48
 Fig. 3.7 Tensile strength of T-joints fabricated in 400rpm with frustum
 type 55
 Fig. 3.8 Tensile strength T-joints fabricated in 500rpm with frustum
 type 55
 Fig. 3.9 Hardness T-joints fabricated in 400rpm with frustum type 58
 Fig. 3.10 Hardness T-joints fabricated in 500rpm with frustum type 58
 Fig. 3.11 EDS analysis of the kissing bond defect of T-joints with
 frustum type 59
 Fig. 3.12 Chemical compositions of the kissing bonddefect of T-joints with
 frustum type 60
 Fig. 3.13 Tensile strength of cylinder type pined tool 64
 Fig. 3.14 Tensile strength of frustum type pined tool 64
 Fig. 3.12 Hardness in accordance with tool type 65

List of Table

Table. 1.1 Characteristics of comparison with aluminum and mild steel	16
Table. 1.2 Characteristics and classification of aluminum alloy	16
Table. 2.1 Chemical compositions and mechanical properties of basic materials	19
Table. 2.2 Specifications of friction stir welding system	22
Table. 2.3 Welding conditions for friction stir welding	26
Table. 2.4 Configuration of tensile test specimen	31
Table. 2.5 Keller 's etching reagent	33
Table. 2.6 Hardness testing condition	36
Table. 3.1 Cross section of T-joints fabricated with cylinder type pined tool	39
Table. 3.2 Defects of tunnel and zigzag lines with cylinder type pined tool	40
Table. 3.3 Dimension of tunnel defects of T-joints with cylinder type pined tool	41
Table. 3.4 Chemical compositions of the kissing bond with cylinder type	48
Table. 3.5 Cross section of T-joints fabricated with frustum type pined tool	51
Table. 3.6 Defects of tunnel and zigzag lines with frustum type pined tool	52
Table. 3.7 Dimension of tunnel defects of T-joints with frustum type pined tool	53
Table. 3.8 Chemical compositions of the kissing bond with frustum type pined tool	60
Table. 3.9 Cross section of T-joints in accordance with angular velocity	62
Table. 3.10 Chemical compositions of the kissing bond with tool type	66

ABSTRACT

The effect of tool profiles on friction stir welded Al5052 T-joints

Kim Byeong-Jin

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

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Currently, all countries of the world concentrate effort to conserve energy and improve environment for promoting the welfare of all mankind and the living standard. Especially, in terms of saving energy, the development of technology for welding and bonding of aluminum alloy is intensively invested for energy saving of the car and environmental protection. The use of lightweight aluminum alloy reduces the vehicle's weight. When reduces weight 10%, the vehicle's fuel efficiency is to be 8%.

This study is focused on welding of aluminum alloys T-joints which is very important in several fields of the transportation, especially in aerospace, automobile and shipbuilding, etc. T-joints are applied to be fabricated by traditional fusion welding such as MIG or Laser welding. However, fusion welding is difficult for T-joints to avoid porosities, cracks, high residual stresses and distortions.

In this case, friction stir welding(FSW), one of the solid-state welding methods was invented at TWI(The Welding Institute), Cambridge, involves the joining of metals without fusion materials or filler materials; in other flank, it joins materials by using friction heat. This welding method is energy efficient, environment friendly, and versatile. It used to weld nonferrous light materials of Aluminum alloys, Magnesium alloys because of its low heat input.

Aluminum alloy 5052 with 3mm(stringer) and 5mm(skins) thickness is used as base metal for this study. The optimum welding parameters were shape of tool, tool rotation speeds, tool traveling speeds. The detailed parameters are as follows. Shape of tool : cylinder type, frustum type, tool rotation speeds : 400~500rpm, tool traveling speeds : 60~300mm/min.

The weldability was evaluated in accordance with mechanical and metallurgical characteristic with ratio of rotation and travel speed(tool rotation speed/tool travel speed). When using the cylinder type, a maximum tensile strength of 164MPa which is approximately 85% of base metal. When using the frustum type, a maximum tensile strength of 149.6MPa which is approximately 78% of base metal. the tensile strength of cylinder type is higher than those of frustum type. The fracture occurred in the round of skins (3mm). It indicates that the main factor affecting the tensile properties along the skin directly is not tunnel defects but kissing bond defects. The Vickers hardness values in nugget zone(NZ) of 55~60 hv are lower than those in a base metal(BM), which materials in NZ undergo softening by friction heat. EDS analysis results of kissing bond defect shows chemical compositions of the kissing bond defect in the T-joints.

The results show that the percentage of oxygen and aluminum element reaches up to 54.84% and 45.16%, respectively, which is caused by the oxidation film generated by friction heat during FSW process. Also zigzag line can be found in all the T-joints in the present experiments. The zigzag line is the remnant oxide layer due to the insufficient heat input and stirring, but more effective metallurgical bond compared with kissing bond defects.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

1.1.1 연구 배경

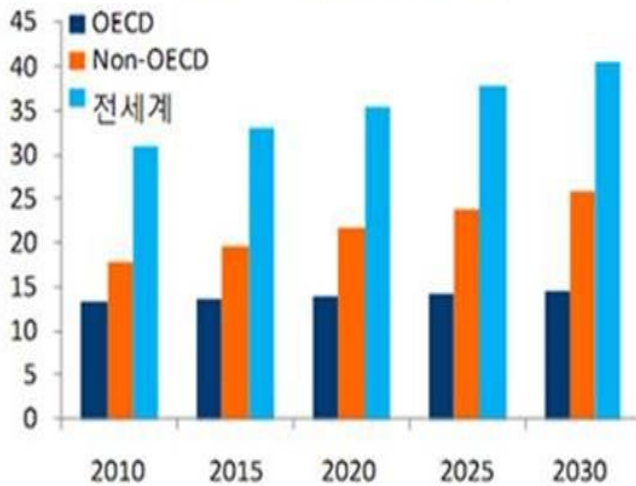
최근 세계적으로 환경 개선과 에너지 절약을 위해 많은 노력은 기울이고 있다. 또한 탄소량 배출과 유해물질 규제가 강화되고 있는 추세이다. 이와 같은 규제는 여러 가지 산업분야와 국가의 경제에 영향을 미치고 있다. 특히 에너지 절약 측면에서 보았을 때, 수송산업에서 연비의 향상과 관련된 규제가 강화되고 있다는 것은 더 이상 새로운 것이 아니다. 미국과 유럽을 중심으로 차량의 연비와 배기가스 규제는 강화되고 있으며, 자동차 산업에서는 연비개선을 위한 현실적인 대안으로 차량 경량화기술에 주목하고 있다. 이 기술은 현장에서 빠르게 적용할 수 있고, 연비 개선이 가능하다는 장점이 있기 때문에 빨라진 규제의 강화로 타 연비개선 기술의 선택이 아닌 규제 강화에 대한 부합을 위한 필수 요소가 되었다.

자동차 산업에서는 차량 경량화를 위하여 일반 강판에서 초고강도강판, 철에서 플라스틱 알루미늄으로의 대체 소재를 사용하고, 핫 스탬핑 등의 공법을 적용하고 있지만 환경규제에 대한 효과가 미비한 상황이다. 현재, 구조재를 에너지 절감과 환경보호에 필수적인 경량화 소재로 대체함으로써 강도를 강화하고 중량을 줄이는데 주목하고 있고, 이것들의 가공기술과 용접·용접기술의 개발에 집중적인 투자를 통한 차량 경량화가 구체적인 대안으로 자리 잡고 있다. 경량화 소재 중 알루미늄 합금의 경우 비강성은 철강소재와 거의 비슷하지만 비강도가 뛰어나므로 자동차에서 차체의 구조재로 사용할 경우 경량화 효과가 매우 크고 내식성, 가공성 및 재활용성이 우수하다.[1-4]

T-joints는 전 산업, 건설, 토목, 조선 및 수송기기 산업에 사용된다. 기존의 용접방식은 용융용접을 사용하지만 용융용접으로 알루미늄 합금의 T-joints 보강재를 제작할 경우, 기공이 발생하기 쉽고, 열전도도와 열팽창률이 높아 용접 변형 및 용접부 균열과 같은 결함의 발생률이 높아 건전한 용접부를 가지기 힘들다. 따라서 기존 용융용접의 한계가 있어 이를 극복하고 새로운 고상용접 중 하나인 마찰교반용접(Friction Stir Welding; FSW)을 적용하게 되었다. 마찰교반용접은 TWI(The welding institute, UK)에서 개발된 것으로 용접부의 모재보다 경도가 높은 공구의 회전력으로 마찰열과 용접부 내부의 소성유동을 이용하여 용융온도보다 낮은 온도에서 용접하는 용접법이다. 그리고 용접재료의 용융이 일어나지 않기 때문에 고상용접으로 분류되며, 비철합금 및 철계 합금까지 용접이 가능하게 한다.[5-6]

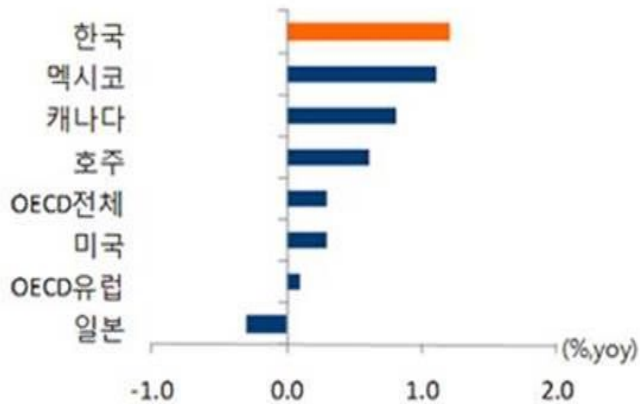
따라서 본 연구에서는 자동차 경량화를 위한 알루미늄 합금 T형 보강재를 제작 시 고상용접 중 하나인 마찰교반용접을 적용하고자 한다. 특히 용접공정 변수 중 틀 형상에 따른 용접부의 특성을 비교 평가하고자 한다.

(십억톤) <전세계 CO₂배출 전망, 2010-2030 >



(a) Prospect of CO₂ emission around the world

<OECD국가연간 CO₂ 배출량 증가율, 2010~2030 >



(b) Prospect of CO₂ emission on countries of OECD

Fig. 1.1 International energy outlook

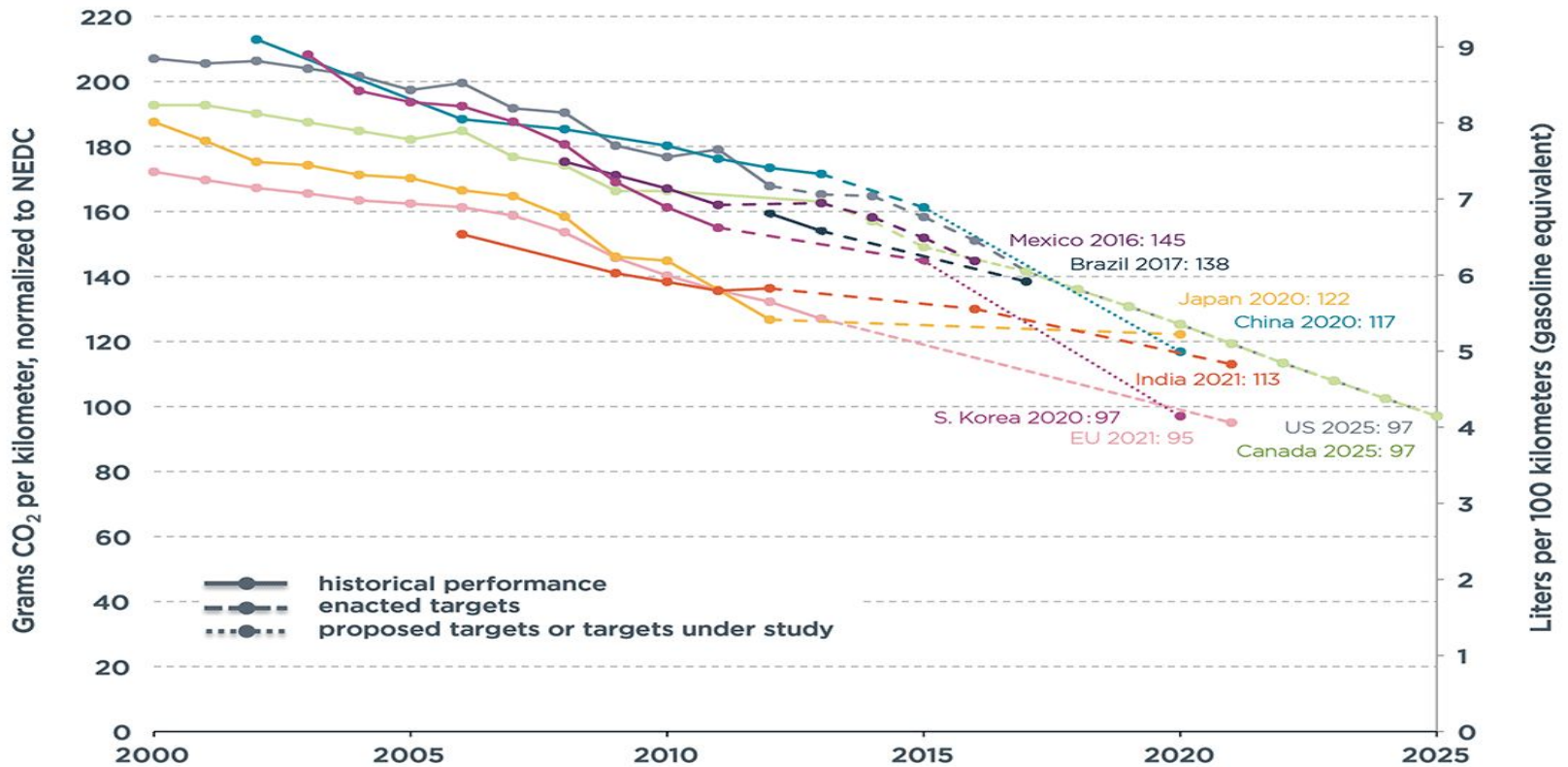


Fig. 1.2 CO₂ emissions performance and proposed passenger vehicles

미국	- 연비규제, 2025년까지 2배 강화 (CAGR 5% 개선 요구) - 평균 연비가 기준치에 미달할 경우 0.1mpg에 5.5달러의 벌금을 전체 판매 차량에 부과		
	2016	15.1 km/L	승용/상용 혼합 기준
	2017	15.6 km/L	
	2019	17.0 km/L	
	2021	19.0 km/L	
	2023	21.0 km/L	
	2025	23.2 km/L	
유럽	- 온실가스 배출 규제 (~2020년) - 초과 g당 5~95유로 누적 벌금 부과 (2015년~)		
	2005	165.0 g/km	승용 기준
	2008	140.0 g/km (자발적 협의)	
	2011	135.7 g/km	
	2015	130.0 g/km (감축 의무화)	
	2020	95.0 g/km	
일본	- 연비규제, 2015년까지 16.8km/L - 초과 시 시정권고, 벌금 부과 등 제재		
	2007	15.7 km/L	승용차 평균 기준
	2015	16.8 km/L	승용차
		15.2 km/L	소형트럭
		8.9 km/L	소형버스
7.1 km/L		대형트럭	
6.3 km/L	대형버스		
2030	30% 에너지 소비효율 개선 80% 석유 의존도 저감		
중국	- 연비규제, 단계적 강화 (3단계) - 초과 시 차량 생산 및 판매 금지 (중국 생산차량 한정)		
	2005	10.2 km/L	중소형차 평균
		13.2 km/L	소형차 평균
	2008	11.3 km/L	중소형차 평균
		15.2 km/L	소형차 평균
	2015	14.8 km/L	중소형차 평균
		19.2 km/L	소형차 평균

Fig. 1.3 Regulation of fuel efficiency on vehicles

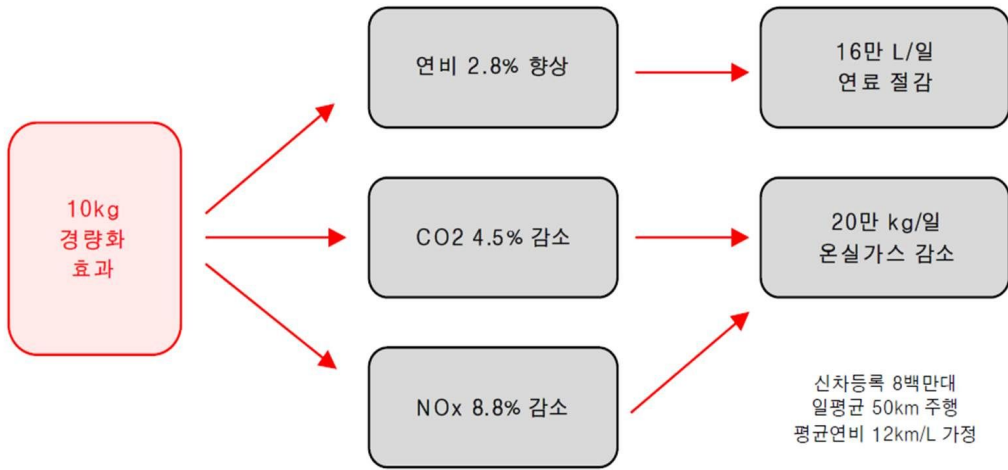


Fig. 1.4 After weight lightening, decreasing in emission quantity

1.1.2 연구목적

자동차의 연비 향상과 환경오염에 대한 규제에 따라서 경량화 논의가 지속되어 왔음에도 불구하고 고객의 안전과 편의성 요구에 부합시키기 위하여 추가되는 부품이 늘어나는 등 기대와 달리 차량의 무게가 증가해왔다. 안전 규제 강화 및 편의성에 대한 요구 증가에 따라서 자동차의 중량이 증가하고 있음을 고려할 때, 단기간 효율적인 부품 개발을 위한 방법은 차체 및 부품의 소재를 경량화 소재로 변경하는 것이다. 이런 상황에서 자동차 산업에서는 알루미늄 부품의 적용을 확대하는 중이다.

최근 철강재의 대체 재료로 주목 받고 있는 대표적인 경량 소재는 알루미늄이다. 하지만 알루미늄의 비중은 2.7이다. 이것은 철강재의 35%에 불과하며 자동차에 사용되는 철 소재를 알루미늄으로 대체할 경우, 많게는 30% 이상의 중량 감소로 의미 있는 경량화가 가능하다. 알루미늄을 용접으로 용접할 경우, 변형에 취약하고 고온 균열이 심하여 성형 또는 가공이 어렵다는 단점에 차량의 골격이나 도어 등에 적용되는 비중은 적다. 하지만 향후 국내·외 자동차 연비 향상과 이산화탄소 배출량 규제에 대한 강화로 수송기기의 경량화는 이미 피할 수 없게 되었다. 그렇기 때문에, 그 사용량은 점점 증가할 것으로 예상된다. 또한 알루미늄 합금에 대하여 기계적인 용접(리벳팅), 마찰교반용접(Friction stir welding) 등의 기술 개발로 용접에 있어서 단점을 극복하면서 점차적으로 적용 가능한 범위를 확대하고 있는 추세이다.[1,3]

알루미늄 합금의 T-형 보강재는 실재로 자동차 산업에서 뿐만 아니라 선박, 항공기 산업 등 다양한 산업에서 사용되는 중이다. 하지만 GMAW(Gas metal arc welding), GTAW(Gas tungsten arc welding)와 같은 용융용접을 이용한 용접에 대한 기술에 대한 연구가 진행 중에 있고, 마찰교반용접(FSW)에 관한 연구는 부족한 실정이다.[7]

따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금의 T-형 보강재에 마찰교반용접(FSW)을 적용 시, 틀 형상에 따른 용접부의 특성을 고찰하고자 하였다.

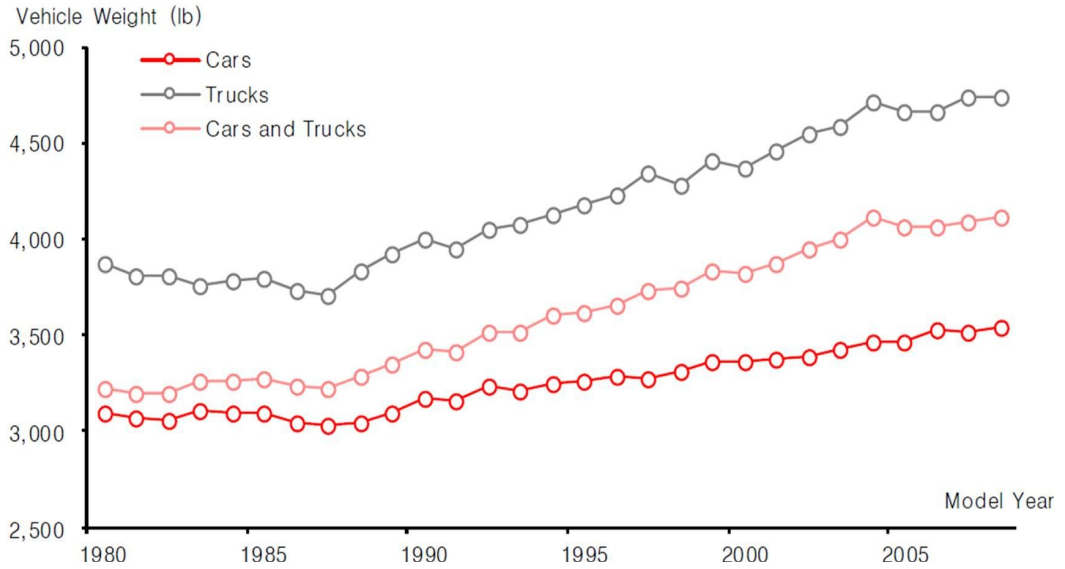


Fig. 1.5 Transition on weight of vehicles

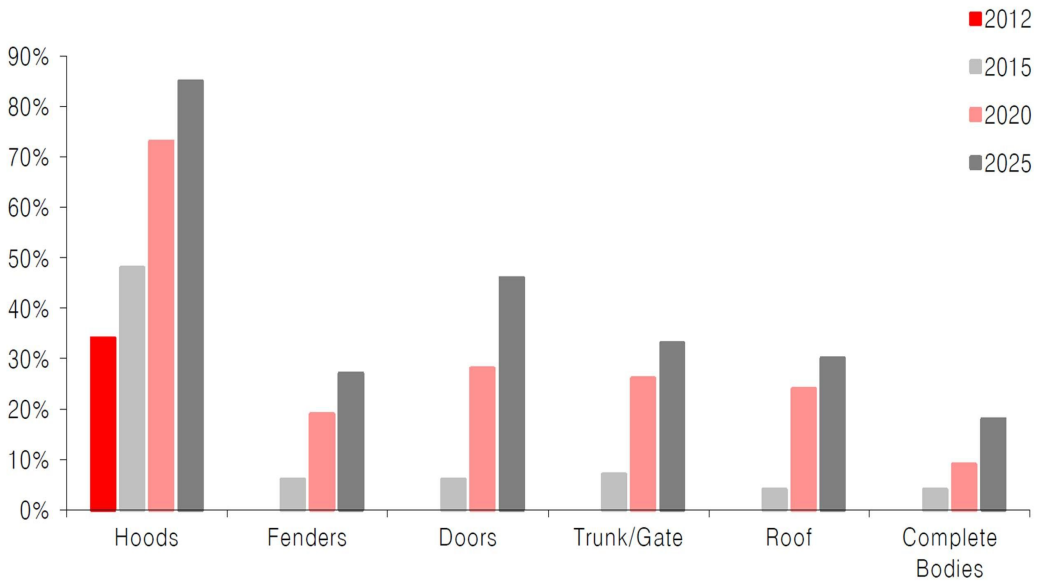


Fig. 1.6 Occupancy of aluminum alloy on parts of vehicles

1.2 국내·외 기술 동향

알루미늄은 자동차 산업에서, 경량화 개발의 초기 단계에서 부터 알루미늄 주조재로 적용되고 있으며, 최근에는 서브프레임 등에 알루미늄 합금을 적용함으로써 대체 사용하고 있다. 차체의 경우 북미 자동차 산업을 중심으로 후드 트렁크리드 등에 적용되어 왔지만, 현재 유럽의 자동차 회사에서 후드뿐만 아니라 펜더, 루프, 도어 등으로 확대하여 적용하고 있다. 현재, 세계적으로 자동차에 적용되고 있는 알루미늄 합금은 차량 무게의 대략 8%의 규모일 뿐이지만 점차적으로 적용 비중이 증가되어 2025년경에는 약 16% 이상 적용될 것으로 예측되고 있다.

최근 마찰교반용접(Friction stir welding; FSW)은 국내·외 자동차, 선박, 항공 등 많은 산업에서 적용되고 있다. 마찰교반용접은 환경규제에 맞서 가장 현실적인 경량화 기술로 알려져 있다. 마찰교반용접의 연구개발 활동이 활발하게 진행 중이며, 특히 국외의 자동차 산업에서 마찰교반용접이 적용된 차량을 생산하여 상용화하고 있다.

조선업 분야에서는 높은 수준의 완성품을 제작하고 있으며, 특히 완성된 제품은 노르웨이 선급협회(Det Norske Veritas; DNV), 영국왕립조선학회(Royal Institution Naval Architects; RINA)와 로이드(Lloyd's; 영국선급)와 같은 공인 기관에서 검사와 승인을 받아 균일한 성능과 품질을 확보하는데 노력하고 있다.

또한 항공우주 산업에서는 주로 로켓의 엔진 탱크를 제작하는데 적용되고 있다. 자동화가 어려운 리벳용접을 마찰교반용접으로 대체함으로써 리벳용접에 소용하는 비용의 약 20%이상을 절감하고 있다고 한다.[1, 7~10]

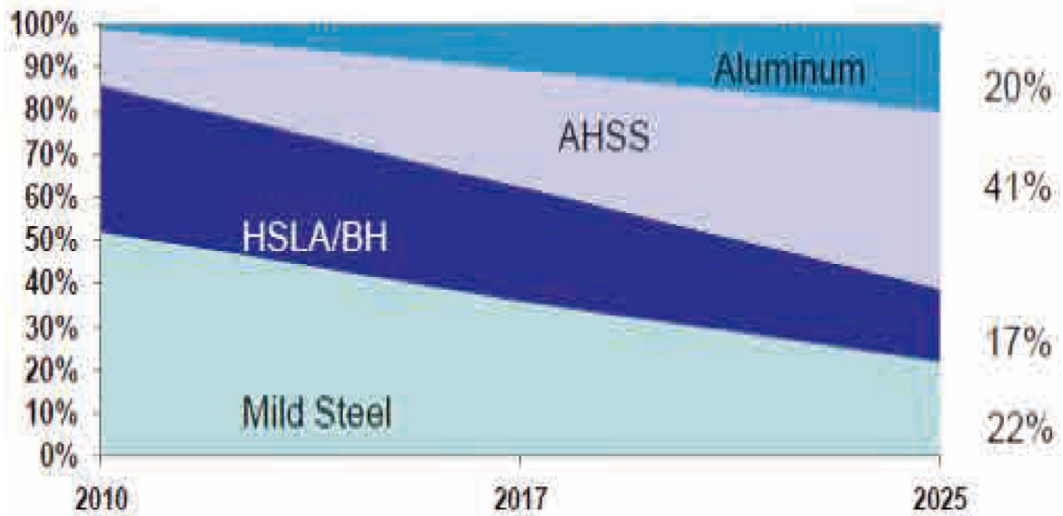


Fig. 1.7 Prospect of materials applied in car in North America

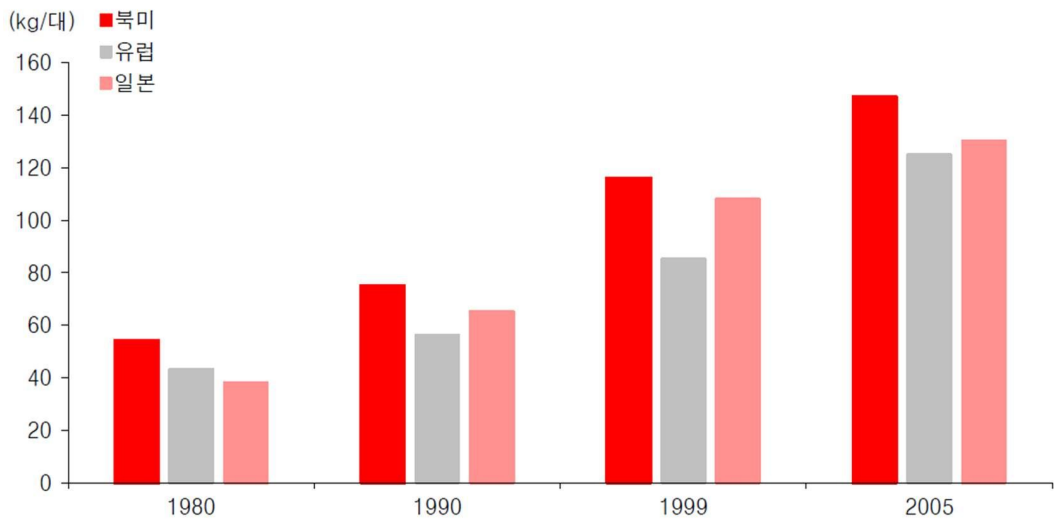


Fig. 1.8 Histories using aluminum alloy of vehicles

1.3 마찰교반용접

1.3.1 마찰교반용접의 원리

마찰교반용접은 TWI(The welding institution, UK)에서 개발된 것으로 초기에는 동종 알루미늄 용접을 시작으로 최근에 이종재의 용접이 주목받으면서 여러 가지 산업에 적용되어지고 있다. 마찰교반용접은 용융용접시 발생하는 기공, 균열, 잔류응력 등과 같은 결함을 보완할 수 있는 고상용접방식으로 친환경적이고 에너지 소비가 낮은 용접기술이다.

Fig.1.9와 같이 마찰교반용접은 일종의 연속공정으로서 용접모재에 비해 경한 재질을 지닌 툴(tool)을 회전시키면서 소재의 용접부의 삽입되어, 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.

이 용접공정의 순서는 Fig.1.10에 모식적으로 나타낸 순서에 의해 진행된다. 먼저 툴을 모재에 삽입시키기 전에 회전을 시키고 모재에 접촉시켜 열을 발생시킨다. 이어서 솔더(shoulder) 부분이 모재에 접촉하여 가열 영역을 확대시키고, 이어서 툴 또는 모재의 이동으로 툴 아래의 소재가 유동하여 마찰교반 nugget zone을 형성함으로써 용접이 이루어지게 된다. [9, 10]

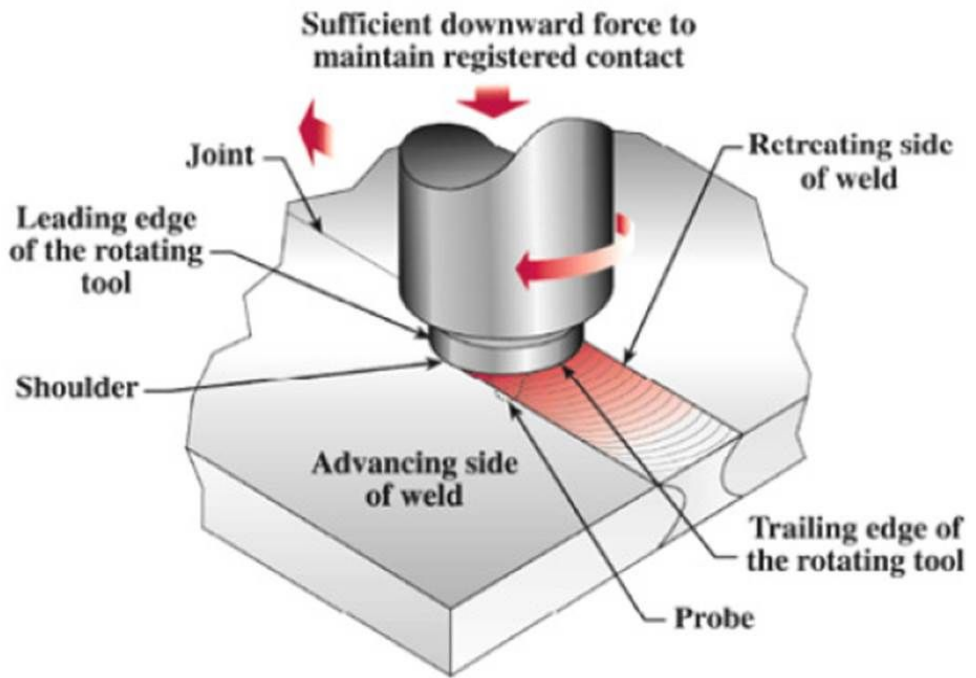


Fig. 1.9 Schematic drawing of working process principle of FSW

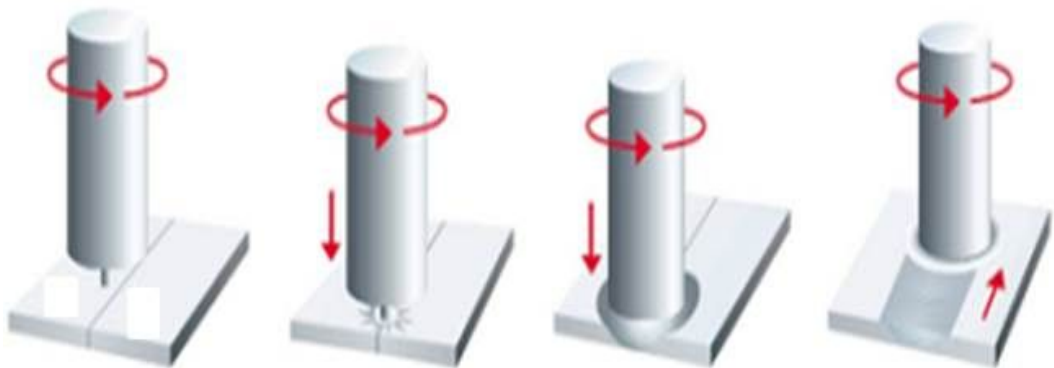


Fig. 1.10 Process of friction stir welding

1.3.2 마찰교반용접의 특징[9~11]

마찰교반용접은 다음과 같은 장점이 있다.

- 용접재료가 용융되지 않기 때문에 고상용접으로 분류된다.
- 고상용접(기계적 용접)이므로 입열량이 적어 아크용접의 비해 변형이 적다.
- 차폐가스(보호가스)를 필요로 하지 않고, 용가재도 요구되지 않는다.
- 용융용접이 아니므로 기공 또는 고온균열 등과 같은 용접 결함이 없다.
- 용접시 유해가스(흄)의 발생도 없고 적외선 또는 자외선 등의 유해 광선도 발생하지 않는 환경 친화적인 용접 방법이다.
- 용접을 할 때 사용하는 툴의 수명이 매우 길기 때문에 용접부의 품질 저하가 적게 발생한다.
- 마찰교반용접장비의 시스템이 매우 간단하기 때문에 설비비용이 적게 든다.
- 자동화가 용이하다
- 마찰교반용접기기의 에너지 효율이 높아서 소비 전력이 매우 적다.
- 용접 공정이 자동이므로 기기를 사용하는 작업자의 숙련과 경험이 요구되지 않는다.

1.4 알루미늄 소재의 특징[13]

알루미늄은 산소와 규소 다음으로 지구상에 많은 원소이지만, 알루미늄의 비교적 큰 산화성 때문에 다른 금속에 비해 늦게 분리되었다. 은백색을 띠는 가벼우면서도 가공성이 좋은 비철 금속이며, 비중으로 구분하였을 경우 마그네슘과 함께 대표적인 경금속에 속한다.

알루미늄은 무게가 철의 약 33% 정도로 경량성이 우수하고 비강도와 비강성이 매우 높으며, 내식성, 열전기전도성, 가공성이 우수하다는 여러 가지 장점을 가지고 대표적인 자동차의 경량소재로 사용되고 있다. 또한 알루미늄은 재활용성이 우수하기 때문에, 자동차에 적용하는 알루미늄 합금은 대략 85%이상이 재활용이 가능하다는 것으로 알려져 있다. 알루미늄은 자동차의 경량화를 위하여 알루미늄 주조품이 엔진, 트랜스미션과 같은 부품 등에, 전신재(판, 봉, 관 등)는 보닛과 트렁크(trunk), 도어(door), 범퍼(bumper) 등의 부위에 광범위하게 사용되고 있다.

알루미늄은 순도 99.0% 이상을 순수 알루미늄이라 부른다. 현재 많이 사용하고 있는 알루미늄 합금이라는 것은 순수 알루미늄이 강도가 상대적으로 낮으므로 각종 원소(Si, Mg, Mn, Zn, Cr, Cu 등)를 첨가한 경우를 말한다. 알루미늄은 필요한 성질에 따라 전신용, 주조용 합금으로 나눌 수 있으며, 이것들을 열처리를 통하여 높은 강도 값을 얻을 수 있는 열처리 합금과 비열처리 합금으로 구분할 수 있다.

알루미늄 합금은 자동차의 차체에 주로 알루미늄-마그네슘계열(5000계열)과 알루미늄-마그네슘-규소계열(6000계열)이 적용되고 있다. 특히 5000계열의 알루미늄 합금은 마그네슘(Mg)을 주첨가 성분으로 한 강도가 높은 비열처리 합금이다. 용접성이 우수하며 내식성이 매우 뛰어나다.

Table. 1.1 Characteristics of comparison with aluminum and mild steel

성 질	알루미늄	연강	비고
비중 (g/cm ³)	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
선팅창계수 (10 ⁻⁶ /°C)	24	12	열변형, 잔류응력, 균열
열전도율 (C.G.S 단위)	0.52~0.54	0.12	높은 전류로 빠르게 용접
고유저항 (Ω/mm ² /m)	0.028	0.120	저항열 발생이 어려움
산화막의 용융점 (°C)	2050(Al ₂ O ₃)	1400~1600	용융용접시 산화막 제거 필요

Table. 1.2 Characteristics and classification of aluminum alloy

구 분	합금명	대표조성	특 성	용 도
비열 처리용 (T60 경화)	1XXX(pure Al)	99% Al	내식성, 열의 도전성, 성형가공 우수	전기, 공조, 화학, 식품공업
	3XXX(Al-Mn)	1.8% Mn 1.0% Mg	용접성, 내식성 우수 성형가공 우수	주방용품, 판금재료
	4XXX(Al-Si)	11% Si	내마모성, 내열성	피스톤, 용접봉
	5XXX(Al-Mg)	3% Mg 0.5% Mn 0.2% Cr	용접성 양호, 내식성 우수	장갑차, 선박용 재료, 용접구조용, 압력용기
열처리용 (석출 경화)	2XXX(Al-Cu-Mg)	4% Cu 1% Mg	기계적 성질 우수, 절삭성 우수	항공기 구조재, 리벳용 소재
	6XXX(Al-Mg-Si)	0.6% Mg 0.6% Si	용접성, 내식성 양호	건축용 재료, 구조용 재료
	7XXX(Al-Zn-Mg)	5~7% Zn 1~3% Mg	용접성 우수, 고강도	항공기 구조재, 방산용 재료

제 2 장 연구 방법

2.1 연구 방법

1장에서는 연구의 배경 및 목적, 국내외 동향, 공정의 원리 그리고 소재의 특성 대해서 나타내었다.

2장에서는 본 논문의 구성과 마찰교반용접을 이용한 알루미늄 합금 5052의 T-joints에서 틀의 형상이 미치는 영향에 대한 연구 방법에 대하여 논하였다. 용접의 조건이 용접부의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 5mm의 skin 2개와 3mm의 stringer 1개로 구성하였다. 용접 변수로는 틀의 형상, 틀의 회전 속도, 틀의 이동 속도에 따른 용접성을 주안점으로 고찰하고자 하였다.

3장에서는 용접부의 기계적과 금속학적 특성을 평가하였다. 5mm의 skin 2개와 3mm의 stringer 1개를 이용한 T-joints에 대하여 실험을 수행하였다. 알루미늄 합금 5052의 T-joints의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험과 경도시험을 수행하였다. 아울러 광학현미경(Optical microscope) 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 알루미늄 합금 5052의 T-joints 미세조직 특성을 평가하였다.

4장에서는 마찰교반용접을 이용한 알루미늄 합금 5052의 T-joints에서 틀의 회전속도, 틀의 이송속도 특히 틀 형상에 따른 용접부의 기계적인 특성과 금속학적인 특성을 비교 평가하여, 이에 대한 결론을 도출하였다.

Fig. 2.1 에 본 논문의 구성을 4개의 장으로 분류한 flowchart를 나타내었다.

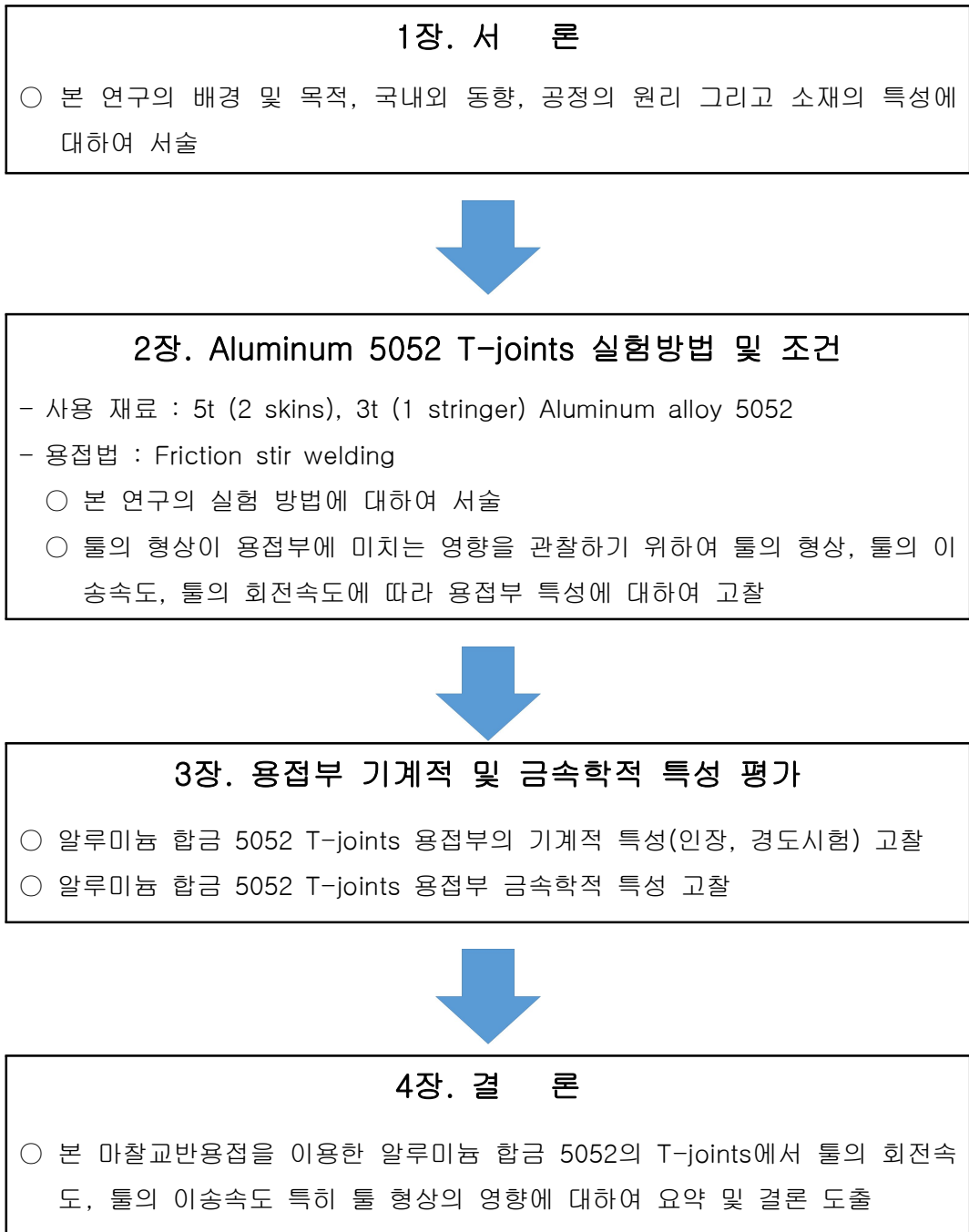


Fig. 2.1 Flow chart of thesis

2.2 실험장비 및 조건

2.2.1 사용소재 및 이음부 형상

본 연구에서는 경량화 소재인 알루미늄 합금 A15052를 사용하였다. 알루미늄 합금 A15052의 화학적 조성과 기계적인 물성은 Table. 2.1에 나타내었다. 알루미늄 5052 합금은 알루미늄-마그네슘 계열의 소재로 비열처리 합금이며, 내식성이 우수하여, 장갑차, 선박용 재료, 용접구조용, 압력 용기 등으로 사용되고 있다.

이음부의 형상은 Fig. 2.2에 나타낸 것과 같이 T-joints 용접을 수행하기 위하여 skin 2개와 stringer 1개를 사용하여 마찰교반용접을 실시하였다. Skin의 치수는 100mm(L)X50mm(B)X5mm(T)이고, stringer의 치수는 100mm(L)X 20mm(B)X3mm(T)이다.

Table. 2.1 Chemical compositions and mechanical properties of basic materials

Chemical composition (wt.%)								
Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
ratio	0.13	0.269	0.019	0.038	2.333	0.172	0.022	96.973

Mechanical properties			
Yield stress(MPa)	Tensile stress(MPa)	Elongation(%)	Hardness(Hv)
107.1	191.1	32.91	69

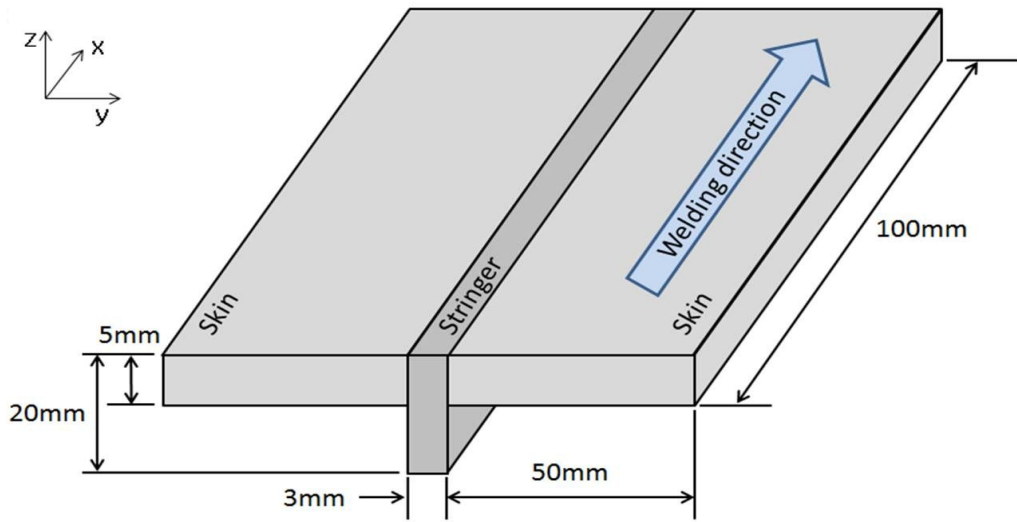


Fig. 2.2 Configuration of T-joints specimen

2.2.2 실험장비

본 연구에서는 알루미늄 합금 A15052 마찰교반용접 T-joints 용접을 위하여, 틀 형상이 용접성에 미치는 영향에 대하여 연구하기 위하여 W사의 마찰교반용접기를 사용하였다. 마찰교반용접 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 300rpm~3000rpm까지 가능하다. 마찰교반용접시 최대 하중은 3000kgf까지 적용하는 장비이다. Fig. 2.3는 사용된 실험장비시스템 사진이며, Table. 2.2는 W사 장비의 사양을 나타냈다.



Fig. 2.3 Equipment of friction stir welding system

Table. 2.2 Specifications of friction stir welding system

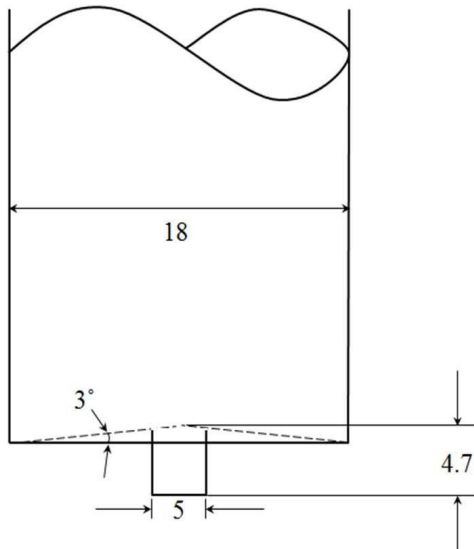
Items		Range
Type		Gantry Type
Welding Speed	X-axis	0.5~10mm/sec
	Y-axis	0.5~10mm/sec
	Z-axis	0.5~10mm/sec
	R-axis	1~20 rpm
Rotation		300~3000 rpm
LOAD Capacity		Max. 3000kgf

2.2.3 툴(Tool)

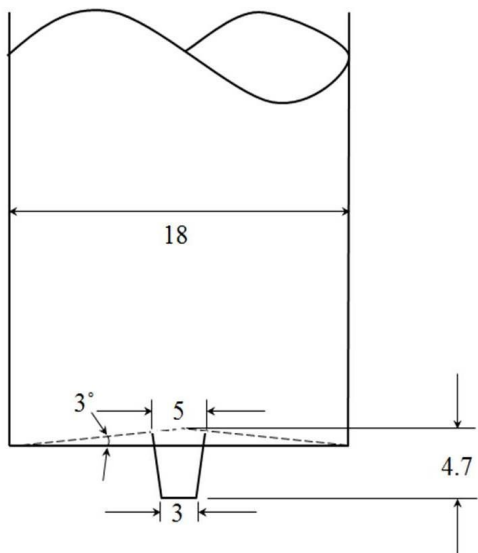
마찰교반용접에 있어서 툴의 형상과 제원은 매우 중요한 요소 중에 하나이다.[16] 본 실험에 사용된 툴은 Tungsten carbide(WC)-cobalt(co)12%의 소재이며 다이아몬드 연삭하여 제작하였다. T-joints용접시 툴의 형상이 용접부에 미치는 영향을 평가하기 위하여 두 type의 툴 즉, 핀의 형상을 절두체(frustum), 원통형(cylinder) 2가지로 툴을 제작하였다.

절두체의 경우 툴의 핀(pin) 지름은 위가 5mm, 아래가 3mm 이며, 원통형의 핀 지름은 5mm이다. 핀의 높이와 솔더(shoulder)의 지름은 각각 4.7mm, 18mm로 동일하게 제작하였으며 오목각은 3° 로 제작하였다.

본 연구에 사용된 툴의 형상과 치수를 Fig. 2.4에 나타내었다.



(a) Cylinder type



(b) Frustum type

Fig. 2.4 Tool details used for friction stir welding

2.2.4 실험조건 및 공정

마찰교반용접에서는 회전속도(rpm), 삽입속도(plunge speed), 삽입깊이(plunge depth), 삽입 유지시간(dwelI time), 툴의 형상, 틸팅각, 가압력 등이 주요 변수이다.[17~21].

본 연구에서는 알루미늄(Al5052) 마찰교반용접 T-joints 용접시 툴 형상이 용접성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 공정변수로는 툴의 회전속도(400rpm, 500rpm), 툴의 이동속도(60, 180, 300mm/min), 툴의 형상(frustum, cylinder 2가지), 툴의 각속도(angular velocity : ratio, 툴의 회전속도와 툴의 이동속도의 비율), 툴의 삽입깊이(plunge depth)를 0.3mm로 설정하고 다른 변수를 고정시켜 마찰교반용접을 실시하였다.

먼저, cylinder type의 핀 형상인 툴(tool)을 사용하여 툴의 회전속도 400rpm, 500rpm에서 툴 이송속도(60, 180, 300mm/min)에 따른 용접성을 고찰하였다. 마찬가지로 frustum type의 핀 형상인 툴을 이용하여 회전속도 400rpm, 500rpm의 조건하에 이송속도(60, 180, 300mm/min)에 따른 용접특성을 비교하였다. 알루미늄 Al5052의 FSW T-joints 용접시 두 가지 type 툴의 형상에 따른 용접성을 고찰하기 위하여 툴의 이송속도에 대한 툴의 회전속도의 비(ratio)를 측정하여 두 가지 type의 툴의 값을 각속도(angular velocity : ratio)에 따라 비교 평가하였다.

마찰교반용접 T-joint부의 용접 조건을 Table. 2.3에 간략히 정리해놓았다.

Table. 2.3 Welding conditions for friction stir welding

Tool type	Rotation speed	Traveling speed	Ratio(R/T)	Plunge depth
Cylinder	400rpm	60mm/min	6.7	0.3mm
		180mm/min	2.22	
		300mm/min	1.33	
	500rpm	60mm/min	8.33	
		180mm/min	2.77	
		300mm/min	1.66	
Frustum	400rpm	60mm/min	6.7	0.3mm
		180mm/min	2.22	
		300mm/min	1.33	
	500rpm	60mm/min	8.33	
		180mm/min	2.77	
		300mm/min	1.66	

알루미늄 마찰교반용접 T-joints 용접시 틀 형상이 용접부에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 본 실험에서 사용한 지그는 직접 설계하여 제작하였다. 앞서 말한 것과 같이 시험편을 T자 형태로 두고, 마찰교반용접을 진행하였을 경우, 시험편이 상하좌우로 움직이지 않도록 시험편 위쪽을 잡아주는 역할을 하도록 지그를 설계하였다. 또한 시험편이 마찰교반용접시 좌우로 움직이지 않도록 stringer를 clamp로 고정시킨 상태에서 실험을 진행하였다. Stringer와 skin이 맞물리는 부분에 2mm의 round(필렛)를 주어 T-joints 용접의 이음부가 필렛용접의 이음부 형상과 동일하도록 제작하였다.

Fig. 2.5에 본 실험을 실시하기 위하여 시험편을 지그에 설치하고 난 후의 모습을 나타내었다. 그리고 Fig. 2.6에 본 실험에 사용한 지그의 모식도를 그려서 나타내었다.

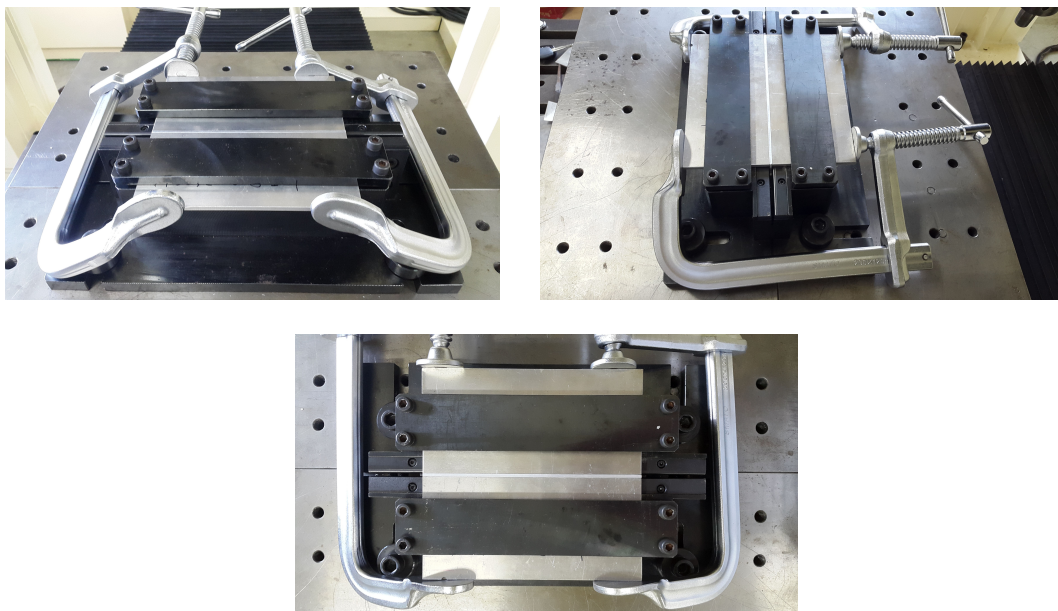


Fig. Zig system used for friction stir welded T-joints

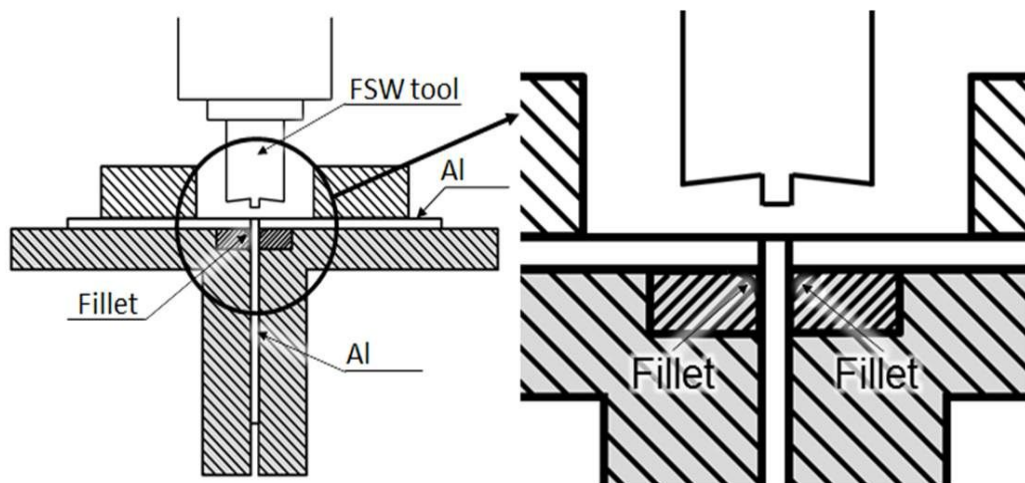


Fig. 2.6 Schematic diagram of T-joints process

2.3 용접부 특성 평가

2.3.1 용접부 단면 특성

본 연구에서는 틀 형상 즉, 핀 형상(frustum type, cylinder type)에 따라 T-joints용접시 용접부의 특성을 고찰하기 위하여 틀의 회전속도 400, 500rpm, 틀 이동속도 60, 180, 300mm/min 조건으로 마찰교반용접을 실시하였다. 아울러, 각 조건에 대하여 용접된 시험편을 접합 여부, 외관의 형태, 생성된 비드의 형상 등을 육안으로 1차적인 관찰을 실시하였다. 관찰하기에 앞서 시험편 절단과 마운팅, 미세연마를 실시하였다. 시험편은 Stringer를 중심으로 양쪽으로 약 15mm, 총 30mm의 길이로 절단하였다.

시험편의 단면(cross section) 관찰을 통하여 용접부의 건전성, 용접부 결함인 키싱본드 결함(kissing bond defect)과 지그재그 라인(zigzag line)의 형성여부와 이에 따른 크기를 측정하여 틀 형상에 따른 특성을 고찰하고자 하였다.

2.3.2 인장시험

알루미늄 합금 Al5052 마찰교반용접 T-joints의 용접시 틀의 핀 형상에 따른 용접부의 특성을 고찰하기 위하여 틀의 회전속도, 틀의 이동속도 변화에 따라서 마찰교반용접을 실시하였다. 또한 마찰교반용접이 실시된 시험편의 인장강도를 평가하기 위하여 Fig. 2.7에 나타난 엠티디아이(주)의 UT-100F 만능시험 장치를 사용하였다.

인장 시험 평가시, ASTM E8M-09 규격에 의거하여 시험편을 제작하였고, 인장시험은 Skin 방향으로 수행하였다. Fig. 2.8과 Table. 2.4에 시험편의 규격을 나타내었다. 시험편의 총길이는 100mm(L)이며 양쪽에 각 30mm(B)로 grip 부분이 있다. 규격에 따라 grip부분 옆에 round 값을 R=6으로 설정하고, 파단부(A)를 30mm로 설정하여 제작하였다.



Fig. 2.7 Tensile test machine

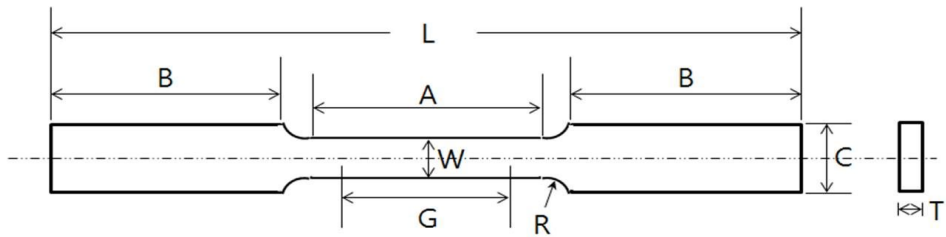


Fig. 2.8 Dimension of tensile test specimen

Table. 2.4 Configuration of tensile test specimen

Item	W	G	T	L	R	A	B	C
	6.0mm	25.0mm	-	100mm	6mm	32mm	30mm	10mm
Values	<ul style="list-style-type: none"> ○ W : Width ○ G : Gage Length ○ T : Thickness - thickness of material ○ L : Overall Length 				<ul style="list-style-type: none"> ○ R : Radius of fillet ○ A : Length of reduced section ○ B : Length of grip section ○ C : Width of grip section 			

2.3.3 미세조직 관찰

틀의 형상에 따른 알루미늄 합금(AI5052)의 FSW T-joints 용접시 용접부의 특성을 평가하기 위해 미세조직 관찰하기 전에 인장시험을 실시하였다. 특히, 인장강도의 값이 각 조건 중에서 가장 높은 값을 가지는 시험편에 대하여 미세조직을 고찰하였다. 미세조직을 고찰하기에 앞서, 시험편 절단과 마운팅, 미세연마를 먼저 실시하였다. 시험편은 Stringer를 중심으로 양쪽으로 약 15mm, 총 30mm의 길이로 절단하였다. 마운팅을 수행하고, 연마지를 사용하여 #400, #800, #1000, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000 순서로 연마를 수행하였다. 아울러 세밀한 연마를 위하여 Diamond paste $9\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ 를 이용하여 미세연마를 수행 하였다. 그리고 나서 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. 2.5에 나타내었다. 또한 키싱본드 결함(kissing bond defect)의 발생 원인 규명과 분석을 위하여 주사전자현미경(SEM-EDS; SEM, scanning electron microscope; EDS, Energy Dispersive X-ray spectroscopy)을 사용하여 키싱본드 결함(kissing bond defect)의 화학적 성분을 분석하였다.

Fig. 2.9, Fig. 2.10에 미세조직 관찰에 사용한 광학현미경, 주사전자 현미경을 나타내었다.

Table. 2.5 Keller 's etching reagent

Solutions	Values(<i>ml</i>)
Pure water	190
Nitric acid(HNO_3)	5
Hydrochloric acid(HCl)	3
Hydrofluoric acid(HF)	2



Fig. 2.9 Optical microscope



Fig. 2.10 Scanning electron microscope

2.3.4 경도시험

본 실험은 알루미늄 Al5052합금의 FSW T-joints용접시 틀의 형상이 용접부 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 따라서 FSW T-joints용접이 실시된 시험편에서 경도 측정을 위하여 일부분(Fig. 2.11에 표시)을 채취하여 경도를 측정하였다. 경도 측정은 Fig. 2.12에 나타낸 Akashi사의 HM-112 micro Vickers 경도기를 사용하였다. 현미경 배율은 $50\mu\text{m}$ 이며, 136° 다이아몬드 피라미드 입자를 이용하는 장비이다.

경도 측정을 하기 전에 용접부의 횡단면을 절단하여 미세연마 하였다. Skin 용접부의 상부 표면으로부터 2.5mm의 지점에서 측정하였고, 0점을 중심으로 양 옆의 방향으로 cylinder type 핀 형상의 틀은 1.0mm씩, frustum type 핀 형상의 틀은 0.5mm의 간격으로 모재부분까지 측정하였다. 경도 측정시 경도기 다이아몬드의 하중은 0.5kgf를 가했으며, 10초의 loading time을 주어 경도시험을 수행하였다. 측정 조건은 Table. 2.6에 간략하게 나타내었다.[22~23]

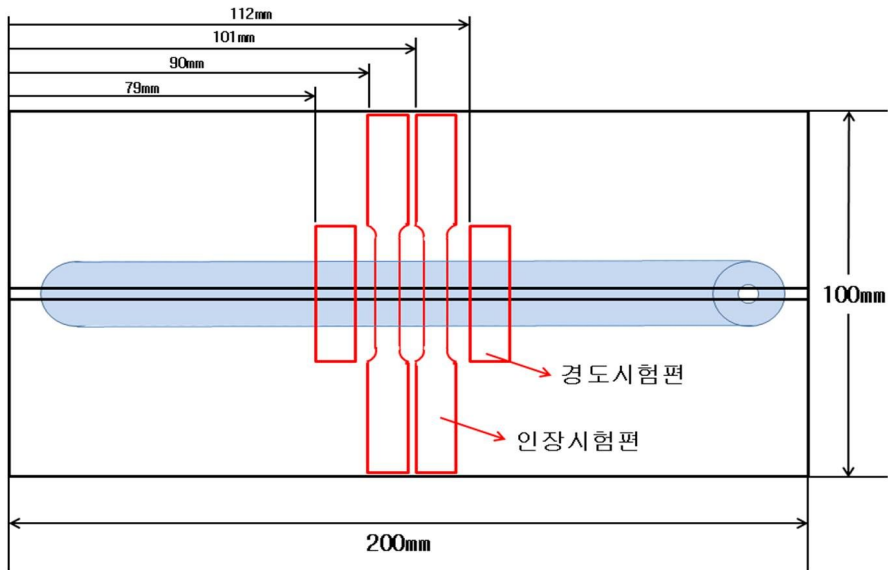


Fig. 2.11 The design drawing on specimens of mechanical test

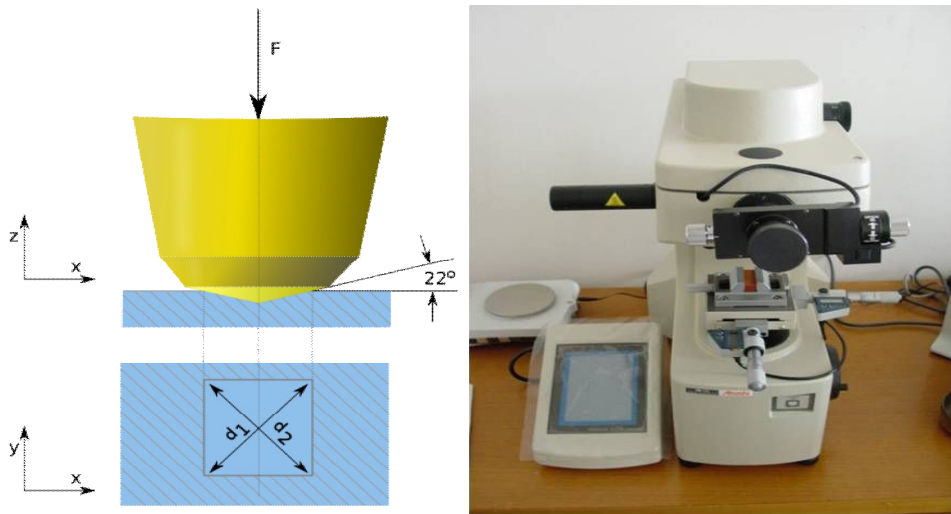


Fig. 2.12 Vickers hardness test scheme and equipment

Table. 2.6 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 Cylinder type 핀 형상인 툴의 용접 특성

3.1.1 용접부의 단면 특성

툴의 형상이 cylinder type일 때, 툴의 회전속도(400~500rpm), 이동속도(60, 180, 300mm/min)에 따른 마찰교반용접을 실시하였다. 삽입깊이(plunge depth)는 0.3mm, 삽입속도 0.5mm/s, 유지시간(dwell time)은 15초, 틸팅각(degree of tilting)은 3° 로 고정시켰다. 용접된 시험편의 단면을 Table. 3.1에 나타내었다.

마찰교반용접에서 생기는 결함들은 두 가지의 원인에 의하여 생긴다고 보고되고 있다. 첫 번째, 마찰교반 용접시 사용하는 툴에 의하여 용접하고자 하는 소재에 가해지는 입열량의 부족과 빠른 냉각 속도가 원인이 되어 결함이 발생한다. 두 번째, 과도한 용접조건(툴의 회전속도, 툴의 이송속도)에 따라서 툴 솔더가 소재에서 효과적으로 압착하지 못하여 용접부 윗면으로 재료의 배출(buur)이 과도하게 이루어졌을 때 결함이 발생한다고 보고되고 있다.[25] 본 연구에서는 첫 번째 원인 중에서 입열량의 부족에 기인하여 결함이 발생하였다고 사료된다.

본 연구에서는 모든 조건에서 툴의 회전속도에 상관없이 키싱본드(kissing bond : imperfect bonding), 지그재그라인(zigzag line), 터널결함(Tunnel defect)이 모두 발생하였다. 6가지 조건에 대한 시험편의 터널결함을 보면 advancing side에서 발생한 것을 알 수 있다.[17] Cylinder type 핀 형상의 툴에 대한 실험에서, 터널결함의 크기는 대체로 툴의 각속도 ratio(툴의 회전속도 / 툴의 이송속도)의 값이 클수록 크기가 작아진다는 것을 알 수 있었다. 이는 툴의 이송속도와 툴의 회전속도가 커짐에 따라 입열량이 많아지기 때문이라고 판단된다.

본 연구에서 수행한 알루미늄 FSW T-joints 용접부에 대하여 각 조건별 결함의 사진을 Table. 3.2에 나타내었다. 아울러 터널결함(tunnel defects)의 크기를 정리하여 Table. 3.3에 정리하였다.

Cylinder type 핀 형상인 툴을 사용하여 마찰교반용접을 수행하고, 용접부의 단면을 관찰하였을 때, 툴의 회전속도에 따라 툴의 이동속도가 빨라질수록 용접부(stir zone)에 발생하는 마찰열이 줄어들어 터널의 크기가 커졌다는 것을 알 수 있었다. 가장 큰 터널의 크기는 ratio값이 1.66(rotation speed : 500rpm, traveling speed : 300mm/min)인 시험편에서 0.204mm^2 이다. 대체로 ratio값이 줄어들수록 터널결함의 크기는 작아졌으며, ratio값이 8.33(rotation speed : 500rpm, traveling speed : 60mm/min)에서 0.009mm^2 의 가장 작은 터널의 크기를 확인할 수 있었다. 또한 용접부의 단면 특성 고찰을 통하여 키싱본드 결함(kissing bond defect)은 대부분 stringer(3mm)의 round(fillet)에서 발생하였다는 것을 확인할 수 있었다.[24]

Table. 3.1 Cross section of T-joints fabricated with Cylinder type pined tool

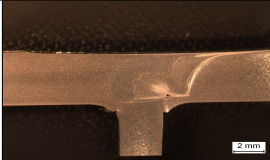


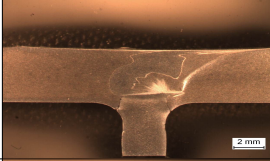

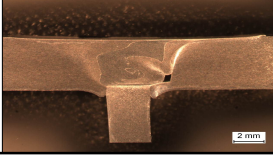
Rotation speed	Traveling speed	Ratio(R/T)	Cross section	
			RS	AS
400 rpm	60 mm/min	6.7		
	180 mm/min	2.22		
	300 mm/min	1.33		
500 rpm	60 mm/min	8.33		
	180 mm/min	2.77		
	300 mm/min	1.66		

Table. 3.2 Defects of tunnel and zigzag lines with cylinder type pined tool

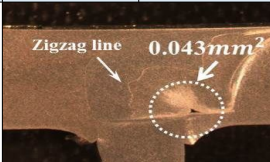
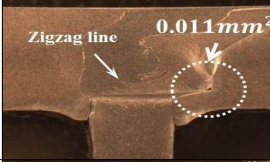

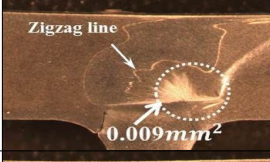
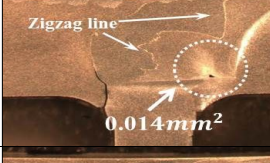
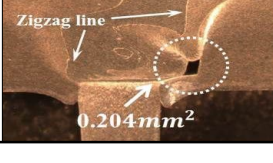
Rotation speed	Traveling speed	Ratio(R/T)	Dfects	
			RS	AS
400 rpm	60 mm/min	6.7		0.043mm ²
	180 mm/min	2.22		0.011mm ²
	300 mm/min	1.33		0.065mm ²
500 rpm	60 mm/min	8.33		0.009mm ²
	180 mm/min	2.77		0.014mm ²
	300 mm/min	1.66		0.204mm ²

Table. 3.3 Dimension of tunnel defects of T-joints with cylinder type pined tool

Rotation speed	Traveling speed	Ratio(R/T)	Dimension
400 rpm	60 mm/min	6.7	0.043mm ²
	180 mm/min	2.22	0.011mm ²
	300 mm/min	1.33	0.065mm ²
500 rpm	60 mm/min	8.33	0.009mm ²
	180 mm/min	2.77	0.014mm ²
	300 mm/min	1.66	0.204mm ²

3.1.2 인장시험 특성

본 연구는 알루미늄 합금 Al5052 FSW T-joints 용접시 튜 형상이 용접부의 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 마찰교반용접을 실시한 후, 용접부의 강도를 확인하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험용 시험편은 ASTM E8M-09의 인장시험 규격에 의거하여 제작하여 시험을 수행하였다. 인장시험은 skin 방향으로 수행하였으며, 각 조건별로 3번의 인장시험을 할 수 있도록 인장시험편을 각 조건별로 3개씩 제작하였다. Fig. 3.1과 Fig. 3.2은 cylinder type 핀 형상에 대하여 각 용접변수(튄의 이송속도, 튄의 회전속도)에 따라서 인장시험의 결과를 나타내었으며, 인장강도는 3개 시험결과 값의 평균값으로 나타내었다.

회전속도 500rpm의 튄 이동속도가 60mm/min일 때, 164MPa로 모재대비 85%의 최대 인장강도를 얻었고, 400rpm의 튄 이동속도가 60mm/min일 때 가장 낮은 인장강도 126MPa를 얻었다. 인장시험 결과, angular velocity : ratio(Rotation speed/Traveling speed)값이 상대적으로 클 때, 인장강도가 증가하는 양상을 보였으며, ratio값이 작을수록 인장강도의 값이 낮은 것을 관찰할 수 있었다.

또한 인장시험 파단시험편에 대한 파단면을 관찰하였다. 파단면을 고찰한 결과, 파단면은 터널결함에서 발생하지 않았고, 대부분 stringer의 round(fillet)에서 발생하기 시작하였다. 그 결과 마찰교반용접 T-joints에서는 터널 결함(tunnel defect)이 아닌, 키싱본드 결함(kissing bond)이 인장강도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

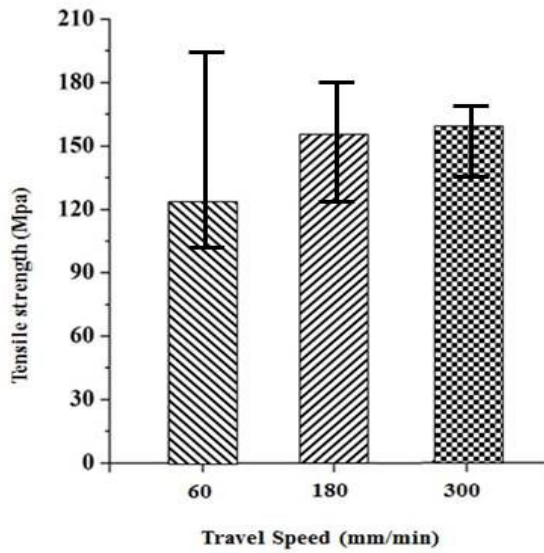


Fig. 3.1 Tensile strength of T-joints fabricated in 400rpm with cylinder typed tool

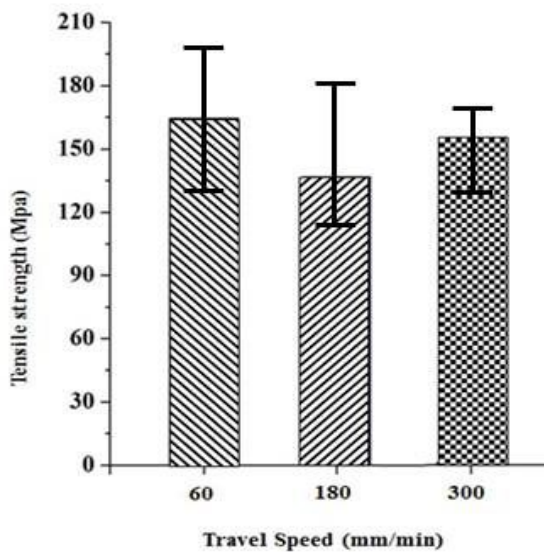


Fig. 3.2 Tensile strength of T-joints fabricated in 500rpm with cylinder typed tool

3.1.3 경도 분포

Fig. 3.3은 회전속도 400rpm, Fig. 3.4는 회전속도 500rpm으로 수행한 마찰교반 용접 용접부의 경도를 측정된 것이다. 앞서 언급한 것과 같이 용접부의 표면을 기준으로 아래 측으로 2.5mm의 위치에서, 용접부의 중심으로 좌우 각각 12mm씩 1mm의 간격으로 측정하였다.

틀의 숄더(shoulder)의 지름이 18mm이므로 각 그래프의 끝단은 모재의 강도라고 볼 수 있다. 시험편의 경도 분포를 살펴보면 모재에서 용접부로 갈수록 경도 값이 하락하는 경향을 보였다. 400rpm의 경도 분포 값에서 모재측은 69Hv, HAZ(heat affected zone)에서는 약 62Hv, TMAZ(thermal mechanical affected zone)는 58Hv, SZ(stir zone)은 약 56Hv의 값이 측정되었다.

500rpm의 경도 분포를 보면 400rpm과 마찬가지로 모재에서 SZ으로 갈수록 경도 값이 하락하는 것을 볼 수 있었다. 전체적으로 500rpm의 경도 값은 400rpm의 경도 값 보다 약간 높은 경향을 볼 수 있었다. 또한 모재는 약 77Hv, HAZ는 62Hv, TMAZ는 60Hv, SZ은 약 63Hv로 HAZ와 TMAZ보다 상승한 것을 알 수 있다.

Fig. 3.3과 Fig. 3.4를 보면 알 수 있듯이, cylinder type의 틀을 사용하였을 경우, 비커스 경도 값은 HAZ에서 최소값을 얻을 수 있었고 TMAZ와 SZ에서는 HAZ의 경도 값보다 조금 상승한 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 알루미늄 합금의 마찰교반 용접부의 경도 분포는 석출경화 합금의 경우, 모재에 비해서 현저하게 낮아진다. 또한 가공경화형 알루미늄 합금의 경우에는 SZ 근방의 경도 값은 제 2상의 소멸이 없고, 전위 밀도가 증가하며 미세결정립이 형성함에 따라 모재와 거의 비슷하거나 조금 낮은 값을 얻을 수도 있다고 보고되고 있다.[25~27]

하지만 본 연구에서 사용한 알루미늄 5052 합금의 경우 가공경화형 알루미늄 합금이지만 일반적인 가공경화형 알루미늄의 경도 값과 상이한 결과를 나타내고 있다. 이에 관하여 Yan은 전위 밀도의 감소에 따라서 동적 재결정립 생성의 발생이 줄어들며, 소재의 전위강도의 약화뿐만 아니라 경도를 낮추는 데 기인한다고 보고하였다.[27] 따라서 본 연구에서는 HAZ에서 모재보다 낮은 경도 값을 얻게 된 원인은 사용된 알루미늄 5052 합금에 존재하고 있는 전위들이 마찰교반용접에 의하여 재결정화 되는 과정에서 대부분의 전위가 소멸되었기 때문에 소재가 연화되었기 때문이라고 판단하였다.

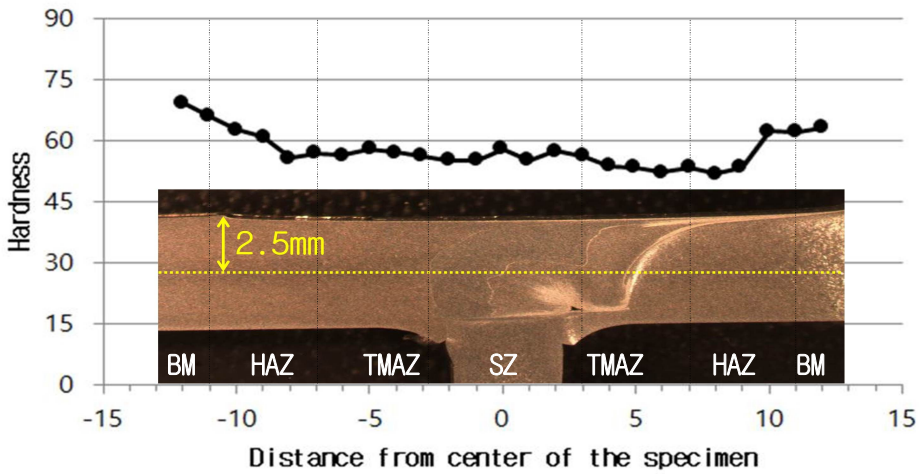


Fig. 3.3 Hardness of T-joints fabricated in 400rpm with cylinder type

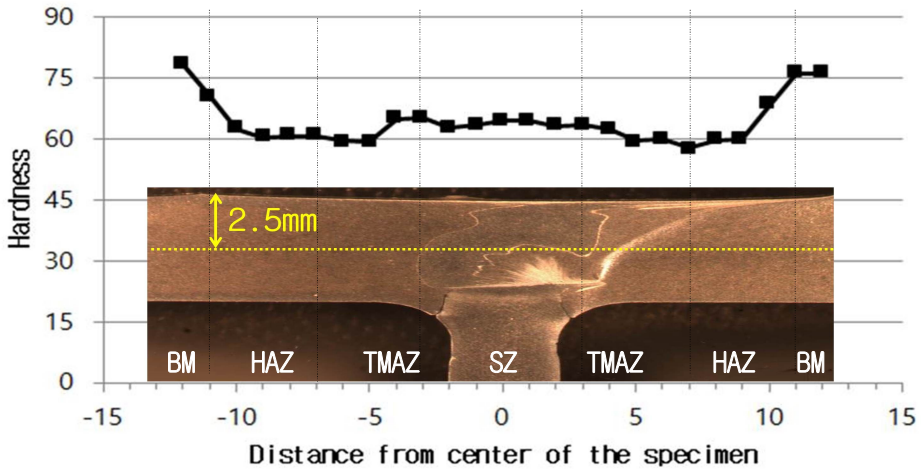


Fig. 3.4 Hardness of T-joints fabricated in 500rpm with cylinder type

3.1.4 미세조직 특성

Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 알루미늄 합금 5052 T-joints의 단면부에서 확인 가능한 키싱본드 결함(kissing bond defect)을 SEM-EDS로 성분을 분석한 것이다. Table. 3.3은 SEM-EDS로 확인한 키싱본드 결함의 화학적 성분을 나타낸 것이다. 키싱본드는 육안으로는 용접이 된 것처럼 보이지만 실제로는 용접이 되지 않은 불완전 용접으로 결함의 종류 중 하나이다. Table. 3.3을 보면 키싱본드의 성분이 산소, 알루미늄인 것으로 미루어보면 마찰교반용접 전 알루미늄 합금 5052의 표층에 있던 산화막이 교반되어 혼입됨으로써 키싱본드 결함으로 생성된 것으로 판단된다.[18]

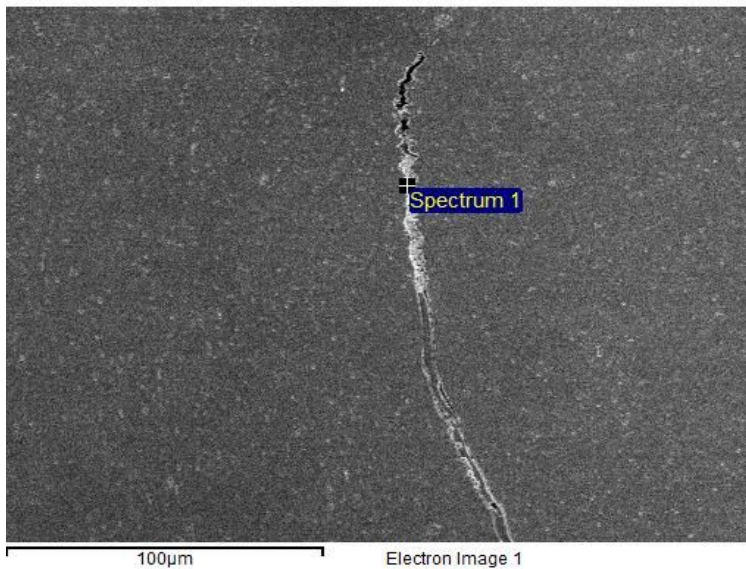


Fig. 3.5 EDS analysis of the kissing bond defect of T-joints with cylinder typed pin

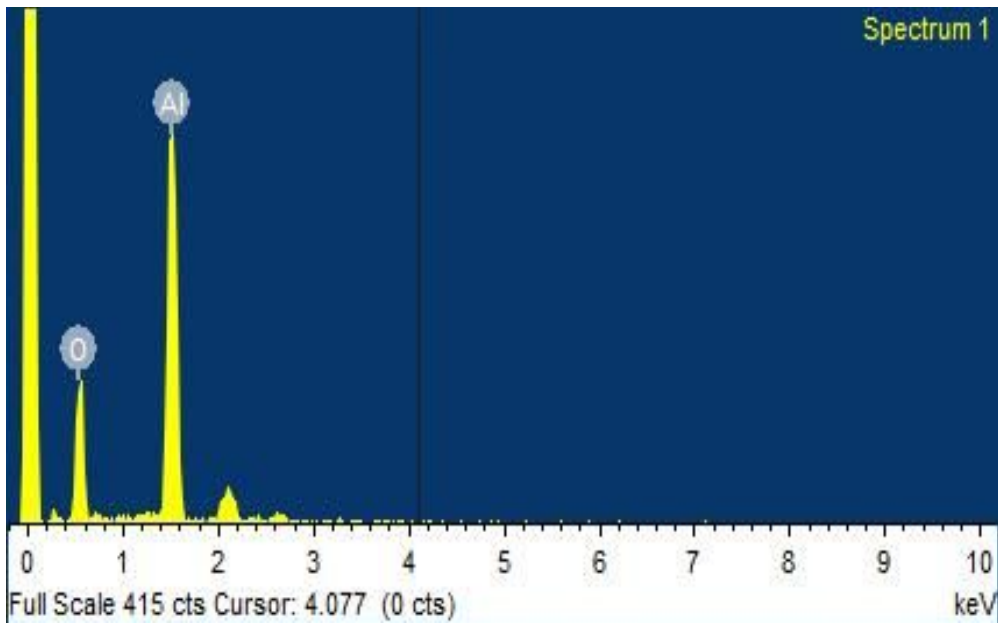


Fig. 3.6 Chemical compositions of the kissing bond defect of T-joints with cylinder type

Table. 3.4 Chemical compositions of the kissing bond with cylinder type

Element	Weight(%)	Atomic(%)
O	54.84	67.19
Al	45.16	32.81
Total	100	100

3.2 Frustum type 핀 형상인 틀의 용접 특성

3.2.1 용접부의 단면 특성

틀의 형상이 frustum type일 때, cylinder type과 마찬가지로 틀의 회전속도 (400~500rpm), 이동속도(60, 180, 300mm/min)에 따른 마찰교반용접을 동일한 조건에서 실시하였다. 또한 삽입깊이(plunge depth)는 0.3mm, 삽입속도 0.5mm/s, 유지시간(dwell time)은 15초, 틸팅각(degree of tilting)은 3° 로 고정시켰다. 용접된 시험편의 단면을 Table. 3.5에 나타내었다.

Cylinder type을 사용하여 제작한 시험편과 마찬가지로 frustum type의 시험편에서도, 틀 회전속도에 상관없이 키싱본드(kissing bond : imperfect bonding), 지그재그라인(zigzag line), 터널결함(Tunnel defect)은 모두 발생하였다. Frustum type 틀의 실험에서, frustum 핀 type의 틀은 cylinder 핀 type의 틀과 달리 angular velocity : ratio가 낮을수록 결함의 크기가 작아진 것을 확인할 수 있다. Cylinder type과 비교했을 때, cylinder type의 틀이 용접할 때 frustum type의 틀을 사용하여 용접할 때보다 소성유동이 더 활발히 이루어져 Table. 3.6은 용접부의 터널결함(tunnel defect), 지그재그라인(zigzag line)을 표시하여 나타내었다. Table. 3.7에는 터널의 크기가 용접부 강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 터널결함(tunnel defect)의 크기를 나타내었다. 틀의 이동속도가 빨라질수록 용접부(stir zone)에 가해지는 입열량이 줄어들더라도 틀이 삽입되어 교반하는 과정에서 cylinder type의 틀이 frustum type의 틀 보다 시험편 속에서 소재와 접촉한 부분이 더 많기 때문에, frustum type을 사용한 실험에서 터널 결함의 크기가 더 커졌다고 판단된다.

Cylinder 핀 type의 경우 교반부의 소성유동이 원활하게 이루어져 stringer와 skin이 접하는 부분 즉, T-joint부 미용접부가 없이 stringer의 round(fillet)가 선명하게 나타나 있다. 반면에, frustum type 핀 형상인 틀을 사용하여 실험한 시험편의 경우 stringer부의 round(fillet)가 선명하게 나타나지 않았다. 이것은 frustum 핀 type의 경우, 틀이 소재 속으로 삽입되어 교반하는 과정에서 발생하는 소성유동이 round 부분까지 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

Cylinder type을 이용한 실험과 마찬가지로, kissing bond 결함은 틀의 형상과 관계없이 대부분 stringer(3mm)의 round에서 발생하였다는 것을 알 수 있었다. 다만, cylinder type을 사용했을 때보다 kissing bond 결함의 길이가 더 길어진 것을 확인할 수 있다.

Table. 3.5 Cross section of T-joints fabricated with frustum type pined tool


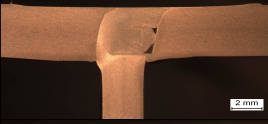
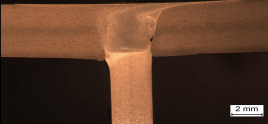
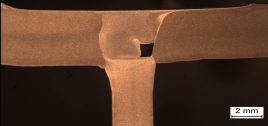
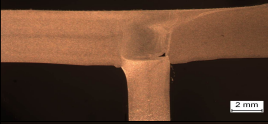
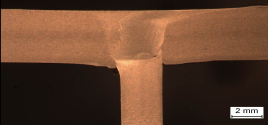
Rotation speed	Traveling speed	Ratio(R/T)	Cross section	
			RS	AS
400 rpm	60 mm/min	6.7		
	180 mm/min	2.22		
	300 mm/min	1.33		
500 rpm	60 mm/min	8.33		
	180 mm/min	2.77		
	300 mm/min	1.66		

Table. 3.6 Defects of tunnel and zigzag lines with frustum type pinned tool

Rotation speed	Traveling speed	Ratio(R/T)	Defects	
			RS	AS
400 rpm	60 mm/min	6.7	Zigzag line	0.629mm ²
	180 mm/min	2.22	Zigzag line	0.367mm ²
	300 mm/min	1.33	Zigzag line	0.046mm ²
500 rpm	60 mm/min	8.33	Zigzag line	0.933mm ²
	180 mm/min	2.77	Zigzag line	0.069mm ²
	300 mm/min	1.66	Zigzag line	0.015mm ²

Table. 3.7 Dimension of tunnel defects of T-joints with frustum type pined tool

Rotation speed	Traveling speed	Ratio(R/T)	Dimension
400 rpm	60 mm/min	6.7	0.629mm ²
	180 mm/min	2.22	0.367mm ²
	300 mm/min	1.33	0.046mm ²
500 rpm	60 mm/min	8.33	0.933mm ²
	180 mm/min	2.77	0.069mm ²
	300 mm/min	1.66	0.015mm ²

3.2.2 인장시험 특성

Cylinder type의 경우와 마찬가지로 frustum type 틀을 사용하여 마찰교반용접을 한 시험편의 용접부 건전성을 확인하기 위하여 ASTM E8M-09의 인장시험 규격에 의거하여 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편을 사용하여 인장강도 시험을 수행하였다. 인장시험은 skin 방향으로 수행하였으며, 각 조건별로 2번의 인장시험을 할 수 있도록 각 2개씩 인장시험편을 제작하였다. 인장시험을 위한 시험편은 cylinder type의 경우와 동일하다. Fig. 3.7과 Fig. 3.8에 나타난 인장시험의 결과는 2개 값의 평균값으로 나타내었다.

회전속도 500rpm의 틀 이동속도가 300mm/min일 때, 149MPa로 모재대비 78%의 최대 인장강도를 얻었고, 400rpm의 틀 이동속도가 60mm/min일 때 가장 낮은 인장강도 10MPa으로 ratio(Rotation speed/Traveling speed)값이 상대적으로 작을 때, 인장강도가 증가하는 양상을 보였다.

또한 인장시험 후 파단면을 관찰하였다. Cylinder type의 틀을 이용하여 제작한 시험편과 동일하게, 파단면은 터널결함에서 시작한 것이 아닌, stringer의 round에서 시작하였다. Frustum type에서 역시 T-joints의 인장강도에 kissing bond 결함이 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

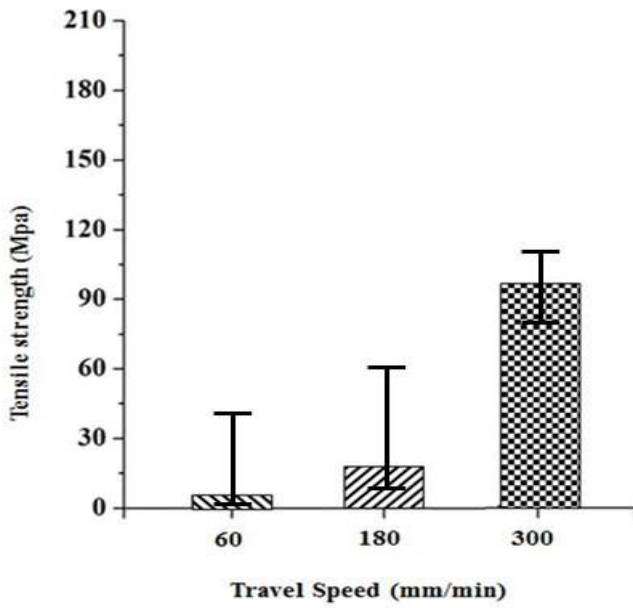


Fig. 3.7 Tensile strength of T-joints fabricated in 400rpm with frustum type

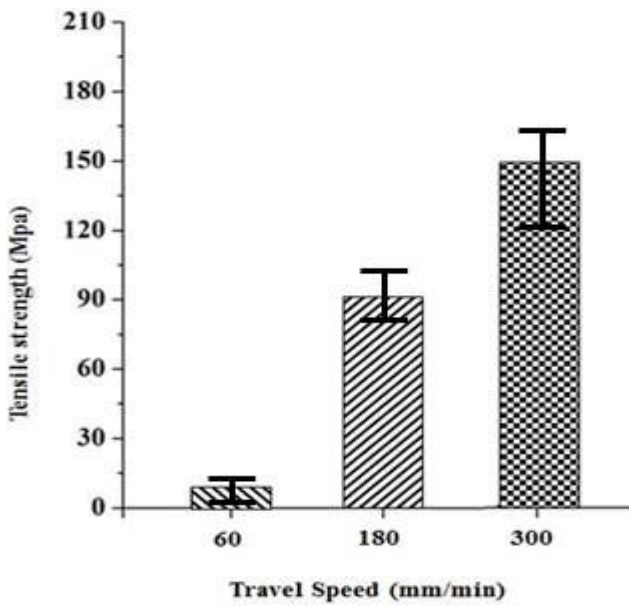


Fig. 3.8 Tensile strength of T-joints fabricated in 500rpm with frustum type

3.2.3 경도 분포

본 실험에서는 알루미늄 합금(AI5052) FSW(Friction Stir Welding) T-joints 용접시 용접부에 톨의 형상이 미치는 영향에 대하여 고찰하고 있다. 따라서 용접부의 경도 값을 측정하여 그 특성에 대하여 알아보하고자 한다. Fig. 3.9은 톨의 회전속도 400rpm, Fig. 3.10는 톨의 회전속도 500rpm으로 수행한 마찰교반용접 용접부의 경도를 측정한 것이다. 경도 측정 위치는 용접부의 표면을 기준으로 아래 측으로 2.5mm의 지점(skin의 중간)에서 측정하였고, 용접부의 중심을 0점으로 두고 좌우 각각 12mm씩 0.5mm의 간격으로 측정하였다.

시험편의 경도 분포를 살펴보면 cylinder type과 동일한 양상을 보여준다. 모재에서 용접부로 갈수록 경도 값이 하락하고 SZ(Stir zone)에서 TMAZ(Thermal mechanical affected zone)보다 상대적으로 높은 경도 값을 확인할 수 있었다. 400rpm의 경도 분포 값에서 모재측은 71Hv, HAZ(Heat affected zone)에서는 약 67Hv, TMAZ는 58Hv, SZ(Stir zone)은 약 61Hv의 값이 측정되었다. 500rpm의 경도 분포를 보면 400rpm과 마찬가지로 모재에서 SZ으로 갈수록 경도 값이 하락하며, SZ의 경도 값은 TMAZ의 경도 값보다 조금 상승한 것을 확인할 수 있었다. 전체적으로 400rpm의 경도 값 보다 약간은 낮은 경향을 볼 수 있었다. 모재는 약 77Hv, HAZ는 62Hv, TMAZ는 53Hv, SZ은 약 59Hv로 TMAZ보다 약간 상승한 것을 확인할 수 있다.

본 실험에서 사용된 소재는 알루미늄 합금 AI5052이다. AI5052를 사용한 마찰교반용접에서는 용접부의 경도 값이 모재보다 낮고 SZ의 경도 값은 TMAZ의 경도 값보다 조금 높아 W모양의 경도 그래프가 측정된다고 보고되고 있다.[25~27] 본 실험에서 측정한 경도 값도 마찬가지로 W형태의 그래프 양상을 보이고 있다.

A15052의 마찰교반용접시 알루미늄 합금 소재에 포함되어있는 전위들이 마찰교반용접에 의하여 재결정화되는 과정에서 대다수의 전위가 소멸하여 전위 밀도가 낮아지고, 소재의 전위 강도가 약화 되었을 뿐만 아니라 경도 값이 낮아진 것으로 보인다. 또한 SZ의 값이 TMAZ의 경도 값보다 상승한 이유는, 마찰교반용접에 사용된 툴의 접합부에 인접한 영역은 더 미세화된 재결정립의 형성으로 인한 것으로 판단된다.

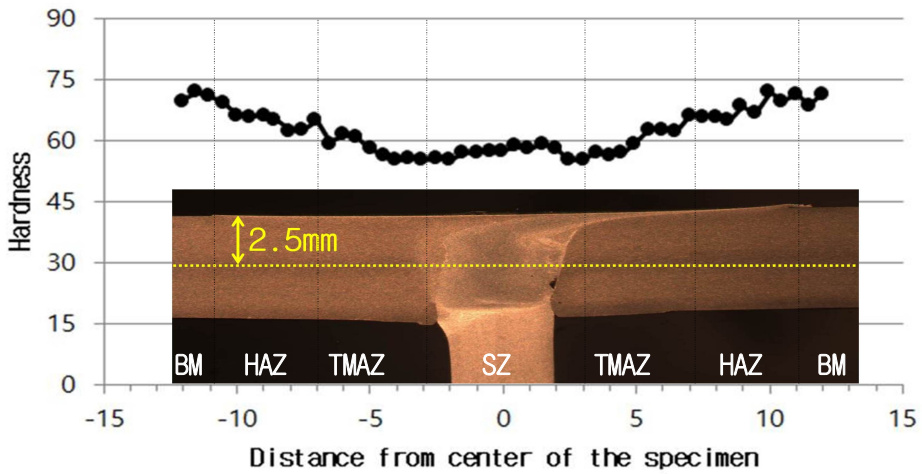


Fig. 3.9 Hardness T-joints fabricated in 400rpm with frustum type

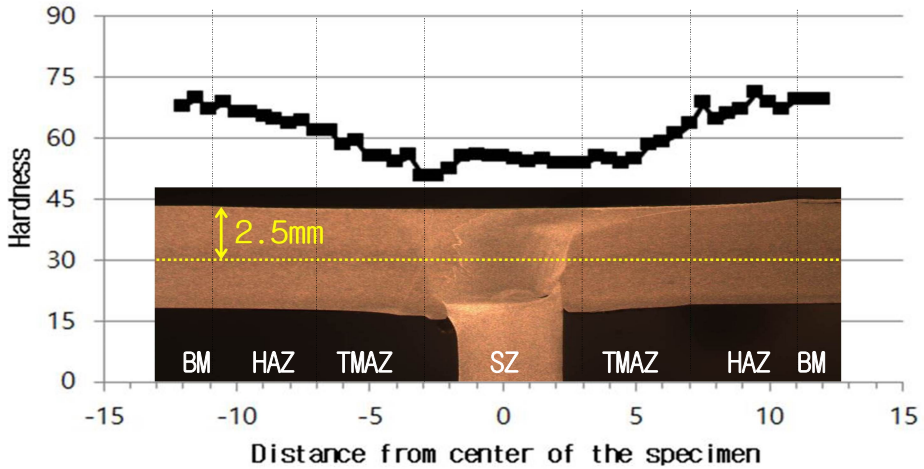


Fig. 3.10 Hardness T-joints fabricated in 500rpm with frustum type

3.2.4 미세조직 특성

Fig. 3.11과 Fig. 3.12은 frustum type 형상의 틀을 사용하여 마찰교반용접을 실시한 알루미늄 합금 5052 T-joints의 단면부에서 확인 가능한 kissing bond 결함에서 SEM-EDS로 화학적 성분을 관찰한 것이다. Table. 3.8은 SEM-EDS로 확인한 kissing bond 결함의 화학적 성분을 나타낸 것이다. Cylinder type의 경우와 다르게 frustum type에서는 kissing bond 결함에서 산소, 마그네슘, 알루미늄, 황이 검출되었다. Frustum type에서 마찬가지로 산화막이 교반되면서 안으로 밀려들어가는 과정에서 kissing bond의 결함이 생긴 것으로 판단된다. 황과 마그네슘이 검출된 것은 애칭시 사용한 황산으로 인해 황이 검출되었으며, 알루미늄 합금 5052의 마그네슘성분이 일부 검출된 것으로 사료된다.

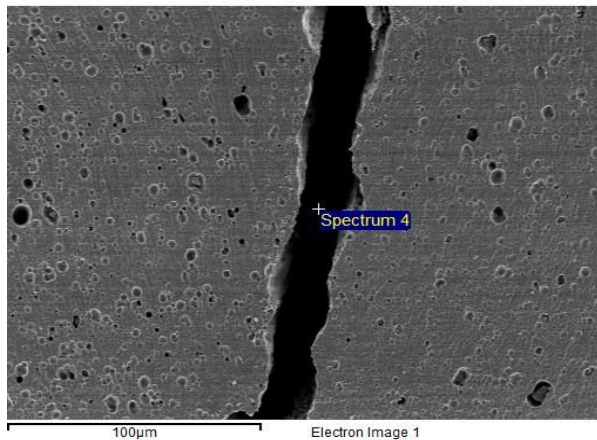


Fig. 3.11 EDS analysis of the kissing bond defect of T-joints with frustum type

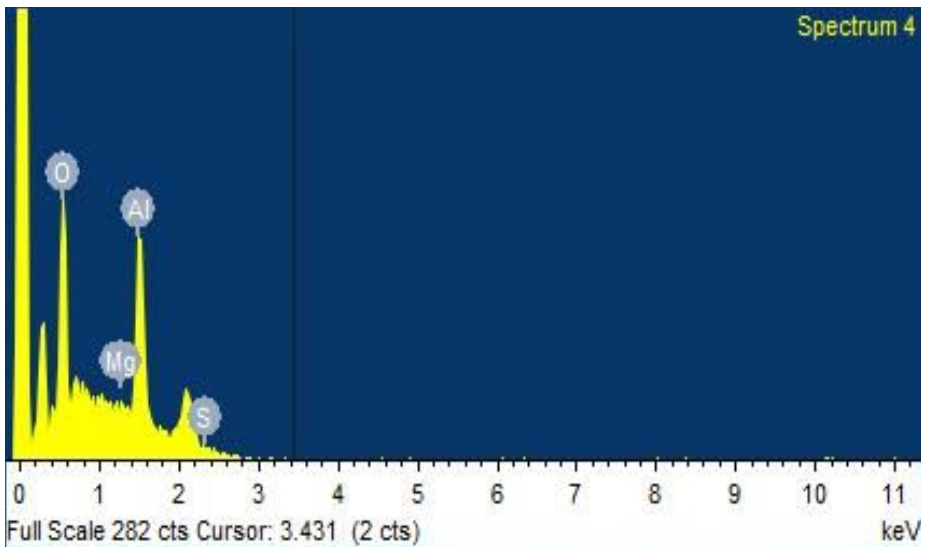


Fig. 3.12 Chemical compositions of the kissing bond defect of T-joints with frustum type

Table. 3.8 Chemical compositions of the kissing bond with frustum type pined tool

Element	Weight(%)	Atomic(%)
O	70.99	80.48
Mg	1.28	0.96
S	0.52	0.41
Al	remains	remains
Total	100	100

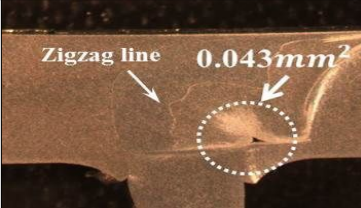

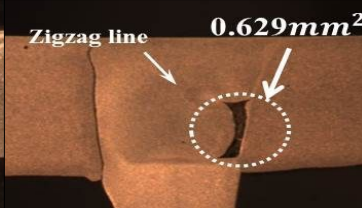
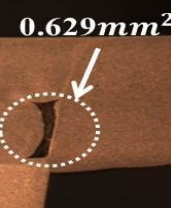
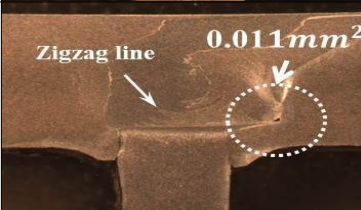
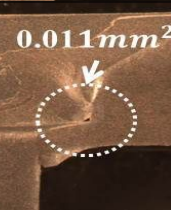
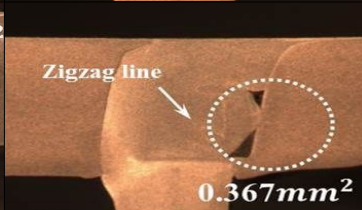

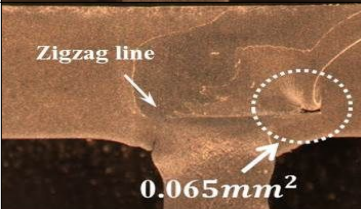

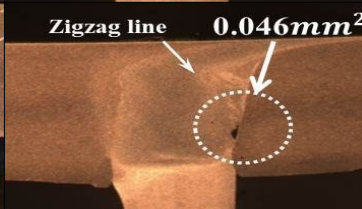
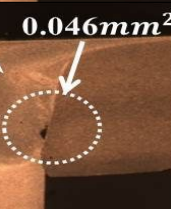
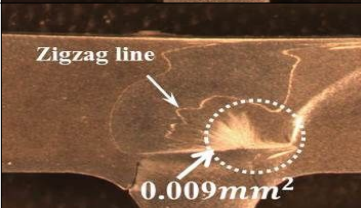

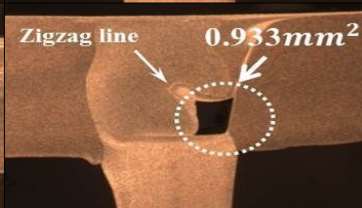
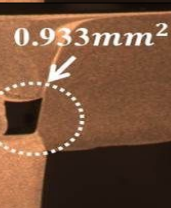

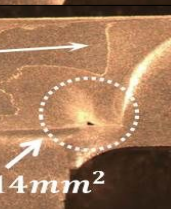
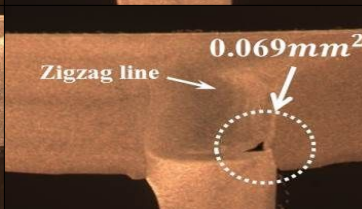
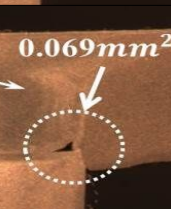
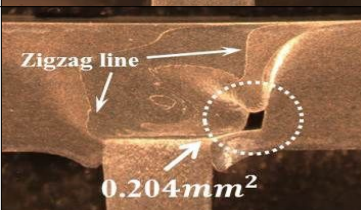
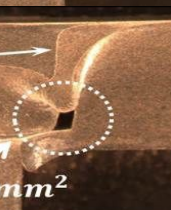
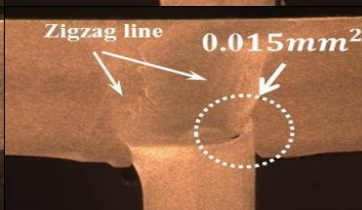
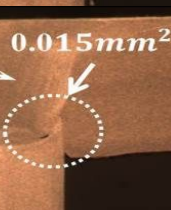
3.3 두 가지 핀 type 들의 용접 특성 비교

3.3.1 용접부의 단면 특성 비교

본 연구는 알루미늄 합금 Al5052의 FSW(friction stir welding) T-joints 용접 시 툴의 형상이 용접부 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 툴의 형상 즉, 핀의 형상이 cylinder, frustum type인 툴을 사용하여 툴의 각속도(rotation speed/traveling speed)에 따라 두 형상에 대한 특성을 비교 평가하고자 하였다. 아울러 용접결함(zigzag lines, tunnel defects, kissing bond)이 용접강도에 미치는 상관관계에 대하여 고찰하고자 한다.

툴 형상에 대하여 각속도에 해당하는 각 조건별 단면을 Table. 3.9에 나타내었다. Table. 3.9에서 볼 수 있듯이, cylinder type의 경우 대체적으로 ratio의 크기가 클수록 터널 결함(tunnel defect)의 크기가 작아지고, 지그재그 라인(zigzag line)이 더 많아진다는 것을 확인할 수 있다. 이는 마찰교반용접시 ratio의 값이 클수록 입열량이 많아지고 교반이 활발하게 이루어지기 때문에 상대적으로 ratio의 값이 작은 조건보다 소성유동이 활발했었다는 것을 알 수 있었다. 하지만 frustum type 핀 형상인 툴의 경우에는 cylinder type의 경우와는 반대로 ratio 값이 상대적으로 낮을수록 터널결함이 더 작아진다는 것을 확인 하였다. Frustum type 핀 형상인 툴의 경우, 툴의 이동속도가 빨라질수록 cylinder type 핀 형상인 툴을 사용했을 때 보다 용접부(stir zone)에 가해지는 입열량이 더 많아져 소재가 밖으로 유출되어 결함의 크기가 커졌다고 판단된다.

Table. 3.9 Cross section of specimens in accordance with angular velocity

Ratio(R/T)	Cylinder type pinned tool		Frustum type pinned tool	
	RS	AS	RS	AS
6.7		 0.043mm ²		 0.629mm ²
2.22		 0.011mm ²		 0.367mm ²
1.33		 0.065mm ²		 0.046mm ²
8.33		 0.009mm ²		 0.933mm ²
2.77		 0.014mm ²		 0.069mm ²
1.66		 0.204mm ²		 0.015mm ²

3.3.2 인장시험 특성 비교

본 연구는 알루미늄 합금 Al5052 FSW T-joints 용접시 틀 형상이 용접부의 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 마찰교반용접을 실시한 후, 용접부의 강도를 확인하기 위하여 인장시험을 진행하였다. 인장시험은 skin 방향으로 수행되었으며, 각 조건별로 2번의 인장시험을 하도록 각 조건에 대한 인장 시험편을 2개씩 제작하여 인장시험을 진행하였다.

Cylinder type 핀 형상인 틀에서는 ratio가 6.7(Rotation speed : 400rpm, Traveling speed : 60mm/min)인 조건에서 164MPa, 모재대비 85%로 가장 높은 인장강도가 나왔으며, 8.33(Rotation speed : 500rpm, Traveling speed : 60mm/min)에서 126MPa로 가장 낮은 인장강도가 확인되었다. 또한, frustum type 핀 형상인 틀에서는 ratio가 1.66(Rotation speed : 500rpm, Traveling speed : 300mm/min)인 조건에서 149MPa, 모재대비 78%로 가장 높은 인장강도가 나왔으며, 8.33(Rotation speed : 400rpm, Traveling speed : 60mm/min)에서 10MPa로 가장 낮은 인장강도를 확인하였다.

Ratio의 값에 대하여 틀 형상 즉 핀의 형상에 따른 인장강도의 값을 Fig. 3.13(cylinder type)과 Fig. 3.14(frustum type)에 나타내었다. 대체적으로 ratio 값이 작을수록 인장강도의 값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 반면, 3.3.1에서 용접부 단면 특성에 대해 고찰하였듯이, cylinder type에서는 ratio 값이 커질수록 결함의 크기가 작아졌고, frustum type에서는 ratio 값이 작아질수록 결함의 크기는 커지는 것을 확인했었다. Ratio와 관련하여 인장강도와 용접부의 특성을 비교해볼 때, 용접부의 결함은 인장강도에 영향을 미치지 않는다는 것으로 판단된다.

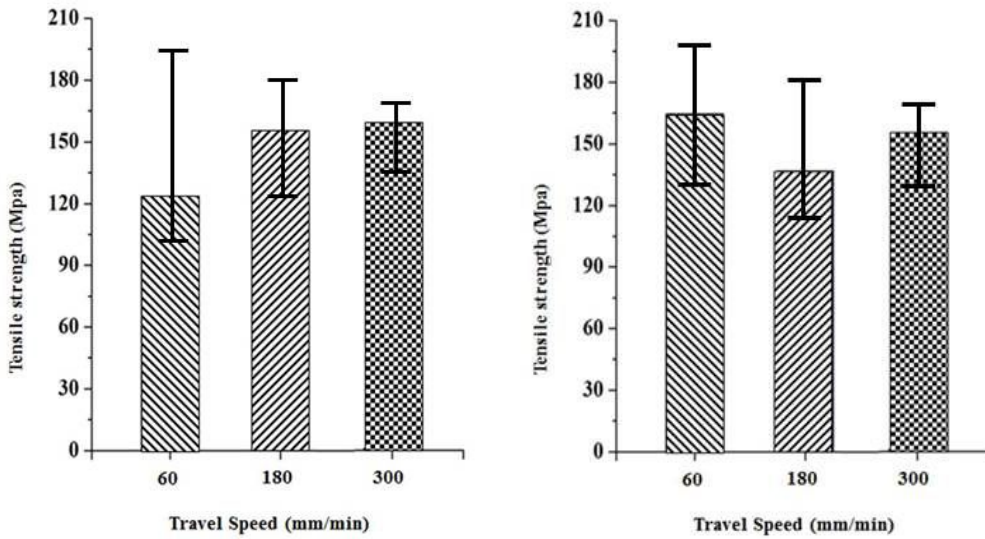


Fig. 3.13 Tensile strength of cylinder type pinned tool

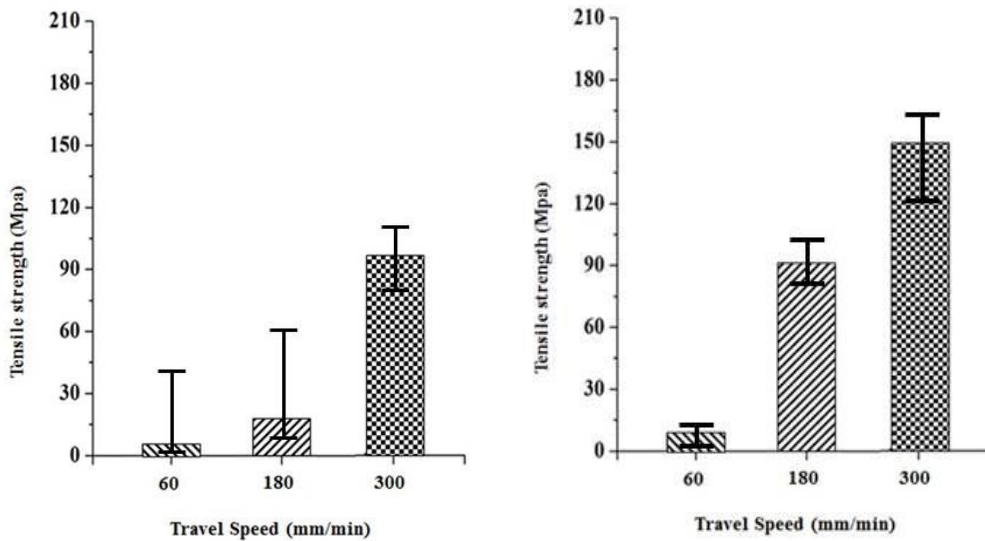


Fig. 3.14 Tensile strength of frustum type pinned tool

3.3.3 경도 분포 비교

본 실험에서는 툴의 형상이 알루미늄 합금 FSW T-joints의 용접부에 미치는 영향에 대하여 고찰하기 위하여 툴 형상 즉, 핀 형상에 따라 마찰교반용접을 실시하여 용접부의 특성을 평가하였다. Fig. 3.15는 핀 형상에 따른 경도를 측정된 값을 나타낸 그래프이다. 두 가지의 툴을 사용하여 마찰교반용접 T-joints를 실시한 시험편에 대한 경도 분포를 살펴보면, 두 type 모두 W형태의 그래프 양상을 보이고 있다. HAZ로 갈수록 경도값이 모재보다 낮아지고, SZ의 경도값이 TMAZ의 경도 값보다 높아지고 있다는 것을 알 수 있다.

Cylinder type(blue), frustum type(red) 두 가지의 경도값을 비교해보았을 때, cylinder type을 사용하여 마찰교반용접 T-joints 용접부의 경도 값이 frustum type의 경도 값보다 높은 양상을 보이고 있다. 마찰교반용접시 cylinder type이 frustum type보다 마찰열이 많이 발생하여 입열량이 커서 소성유동이 활발해지기 때문에 더 급격하게 경도 값이 하락하고, TMAZ와 SZ에서 더 높아진 것으로 판단된다.

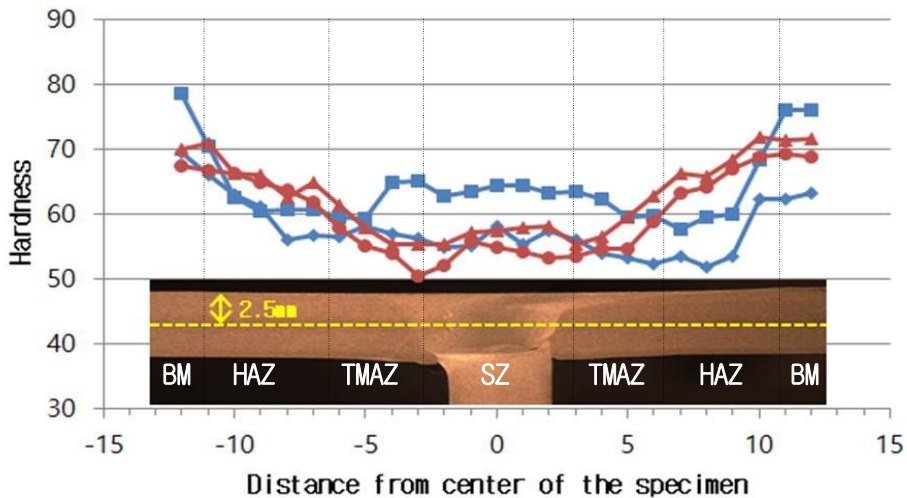


Fig. 3.15 Hardness in accordance with tool type

3.3.4 미세조직 특성 비교

본 실험은 알루미늄 합금(Al5052) FSW T-joints 용접시 툴의 형상이 용접부의 특성에 대하여 고찰하고 있다. T-joints 마찰교반용접을 실시한 시험편의 용접부에서 확인 가능한 결함 중 kissing bond는 성분 분석결과 알루미늄 합금의 표층에 있는 산화막의 성분이라는 것을 확인할 수 있었다. 마찰교반용접시 마찰열과 유입과 소성유동으로 인하여 시험편의 표층에 있는 산화막이 소재 속으로 압착하여 교반되는 과정에서 충분하지 못한 입열을 받아 생긴 것으로 사료된다. Kissing bond의 성분에서 황(S)이 검출된 것은 미세조직 관찰 전, keller 용액으로 사용한 황산으로 인하여 검출된 것으로 사료된다. 또한 마그네슘(Mg)이 검출된 것은 알루미늄 합금 5052의 마그네슘 성분이 일부 검출된 것으로 사료된다.

Table. 3.10 Chemical compositions of the kissing bond with tool type

Element	Cylinder type		Frustum type	
	Weight(%)	Atomic(%)	Weight(%)	Atomic(%)
O	54.84	67.19	70.99	80.48
Mg	-	-	1.28	0.96
S	-	-	0.52	0.41
Al	45.16	32.81	remains	remains
Total	100	100	100	100

4장 결론

본 연구에서는 차체 경량화에 적용되는 가장 현실적인 대안으로 기존 소재를 경량소재인 알루미늄 합금 5052로 대체할 때, T-joints 마찰교반용접을 실시하는 과정에서 툴의 형상이 용접부에 미치는 영향에 대해서 실험을 수행하였다. 툴의 회전속도, 이동속도에 따라 조건별로 기계적인 특성과 금속학적인 특성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 마찰교반을 사용한 T-joints에서는 터널 결함이 툴의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 터널 결함은 T-joints의 advancing side에서 발생하며, kissing bond 결함은 대부분 stringer(3mm)의 round에서 발생하였다는 것을 알 수 있었다.
- 2) Ratio(rotation speed/traveling speed)에 따라서 터널 결함의 크기에 대하여 cylinder type과 frustum type의 결과는 달라지는데, cylinder type은 ratio가 상대적으로 높을수록 결함의 크기가 작아지고, frustum의 경우 ratio가 상대적으로 낮을수록 결함의 크기가 작아지는 경향을 확인할 수 있었다.
- 3) 또한 마찰교반용접시 툴이 시험편에 삽입되어 교반하는 과정에서 cylinder type은 frustum type보다 소재와 접촉하는 면이 넓기 때문에, 소성유동을 생성하는 크기가 더 클 것으로 사료된다. 따라서 cylinder type과 frustum type에 대한 터널 결함의 크기를 비교해보았을 때, cylinder type보다 frustum type을 사용할 경우 터널 결함의 크기가 더 커진 것으로 판단된다.

- 4) 인장강도의 경우, cylinder type의 툴을 사용한 시험편은 angular velocity : ratio의 값이 상대적으로 클 때 증가하는 양상을 보이고, frustum type의 툴을 사용한 경우에는 angular velocity : ratio가 상대적으로 낮은 값일 때 인장강도 값이 증가하는 양상을 보인다. 하지만 인장시험 중 시험편이 파단될 때, 툴의 종류에 상관없이 kissing bond 결함에서 파단이 시작하는 것으로 보아, 강도 값이 낮은 이유는 터널결함이 아닌 kissing bond 결함 때문이라고 판단된다.

- 5) Kissing bond 결함이 발생하는 이유를 밝히기 위하여 SEM-EDS로 화학적 성분을 분석해 보았다. Kissing bond 결함의 화학적 성분에 산소(O), 알루미늄(Al)이 두 가지 툴을 이용한 T-joints의 시험편에 모두 채취된 것으로 보아, kissing bond 결함은 산화알루미늄을 제거하지 않고 마찰교반용접을 실시하여, 알루미늄 합금이 교반되는 과정에서 산화층이 밀려들어가서 kissing bond 결함이 생긴 것이라고 판단된다. 실험하기 전에 알루미늄의 산화층을 제거한다면 kissing bond 결함이 대폭 줄어들 것이라고 사료된다.

- 6) 툴 형상에 따른 용접부의 경도 분포에서는 용접부의 입열량에 의한 소재의 연화로 두 가지 모양의 툴에 대한 경도는 모두 HAZ(Heat affected zone)와 TMAZ(Thermal mechanical affected zone)에서 모재보다 낮은 경도 값이 측정되었고, SZ은 보다 높은 값을 관찰할 수 있었다. 모재보다 낮은 경도를 가지게 된 원인은 마찰교반용접에 의하여 대부분의 전위가 소멸되면서 전위밀도가 감소하여, 소재가 연화되었다고 판단된다.

참고문헌

- [1] M. S. Jang, M. J. Bang and J. H. Gwak : 왜 지금 현대차는 가벼워지려 하는가?, 2015.03.17
- [2] S. R. Shah and S. Tosunoglu : Friction stir welding:Current state of the art and future prospectss, WMSCI, 2012
- [3] H. T. Kim and S. C. Kil, High efficient welding technology of the car bodies, Journal of weldng and joining, 2016, 34-4, pp62-66
- [4] T. Kawasaki, T. Makino, K. Masai, H. Ohba, Y. Ina and M. Ezumi, Application of friction stir welding to construction of railway vehicles, JSME, 2004, 47-3. pp502-511
- [5] Y. B. Choi, M. J. Kang, D. C. Kim and I. S. Hwang, High current arc welding technology of Aluminum alloy, Journal of KWFS, 2013, 31-1, pp21-25
- [6] A. C.F. Silva, D. F.O. Braga, M.A.V. de Figueiredo and P.M.G.P. Moreira, Friction stir welded T-joints optimization, Materials and Design, 2014, 55, pp120-127
- [7] H. C. You and H. T. Kim, Recent technological tendency of joining for light aluminium alloy, Journal of KWJS, 2011, 29-3, pp260-269
- [8] H. W. Kim, Y.S. Lee, M. S. Kim and C. Y. Y, 자동차 차체 경량화 및 차체용 알루미늄 합금판재의 개발동향, 27-4
- [9] 마찰교반용점(Friction Stir Welding), 한국과학기술정보연구원
- [10] ESAB : Friction Stir Welding Technical Handbook, <http://www.esab.com>
- [11] S. I. Seo, Introduction of friction stir welding and its application to aluminum rolling stock, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단
- [12] S. B. Choi, S. W. Kim and S. K. Jung, 자동차 경량화 기술동향과 개발 전략, 한국과학기술정보연구원 정보분석연구소, 2013

- [13] J. H. Lee, Aluminum & Aluminum Based-Alloy, Total Information Network Services, www.technonet.co.kr
- [14] J. H. Cho, M. H. Kim and J. W. Choi, Application of friction stir welding processes for aluminum alloy boat, Journal of KWJS, 2012, 30-2, pp31-36
- [15] C. H. Kim, Y. N. An and H. S. Im, Laser welding of automotive aluminum alloys, Journal of KWJS, 2011, 29-4, pp21-26
- [16] K. Elangovan and V. Balasubramanian, Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, Materials and Design, 2008, 29, 362-373
- [17] L. Cui, X. Yang, G. Zhou, X. Xu and Z. Shen, Characteristics of defects and tensile behaviors on friction stir welded AA6061-T4 T-joints, Materials science and engineering A, 2012, 543, pp58-68
- [18] Y. Zhao, L. Zhou, Q. Wang, K. Yan and J. Zou, Defects and tensile properties of 6013 aluminum alloy T-joints by friction stir welding, Material and design, 2014, 57, pp146-155
- [19] L. Cui, X. Yang, Y. Xie, X. Hou and Y. Song, Process parameter influence on defects and tensile properties of friction stir welded T-joints on AA6061-T4 sheets, 2013, 51, pp161-174
- [20] Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee and S. B. Jung, Spot friction stir welding of 5052 al alloy, KWJS, 2005, 44, pp235-237
- [21] D. M. Kang, J. S. Jang, K. D. Park and D. Y. Lee, The joints characteristics of al 5052 aluminium alloy in friction stir welds, Journal of korean society for power system engineering, 2016, 20-3, pp51-56
- [22] Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee, S. B. Jung and K. Song, Joint characteristics of spot friction stir welded al 5052 alloy sheet, Journal of KWJS, 2006, 24, pp71-76

- [23] R&B : Etchant List, www.randb.co.kr
- [24] Y. Zhao, L. Zhou, Q. Wang, K. Yan, J. Zou, Defects and tensile properties of 6013 aluminum alloy T-joints by friction stir welding, *Materials and Design*, 2014, 57, pp146-155
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] Y. Yan, D. T. Zhang, Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum and AZ31 magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20, pp619-623