



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  
Al6061-T6 코너용접시 툴 핀  
길이에 따른 용접 특성

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

손 영 빈

마찰교반용접을 이용한  
Al6061-T6 코너용접시 툴 핀  
길이에 따른 용접 특성

Effect of Tool Pin Length on Weldability of  
Al6061-T6 Friction Stir Corner Welded Joints

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

손 영 빈

마찰교반용접을 이용한  
Al6061-T6 코너용접시 톨 핀  
길이에 따른 용접 특성

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

손 영 빈

## 손영빈의 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 .....	V
Abstract .....	VI
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 .....	6
1.3 마찰교반용접 .....	8
1.3.1 마찰교반용접의 원리 .....	8
1.3.2 마찰교반용접의 특징 .....	10
1.4 알루미늄 소재의 특징 .....	11

2장. 연구 방법 .....	13
2.1 연구 방법 .....	13
2.2 실험방법 및 조건 .....	14
2.2.1 사용소재 및 실험장비 .....	14
2.2.2 용접조건 .....	18
2.2.3 툴(Tool) .....	19
2.3 용접부 기계적 및 금속학적 특성 평가 .....	20
2.3.1 용접부 외관 및 단면 특성 .....	20
2.3.2 미세조직 관찰 .....	20
2.3.3 인장시험 .....	22
2.3.4 경도시험 .....	23
2.3.5 온도측정 .....	24
2.4 용접부 열전도 및 열탄소성 수치해석 .....	26
2.4.1 열전도 및 열탄소성 이론 .....	26
2.4.2 FSW 입열식 .....	35
2.4.3 해석 모델 및 조건 .....	36

3장 . 연구 결과 .....	37
3.1 톨 핀 길이(4.7mm, 5.4mm)에 따른 Al6061-T6 코너용접 부의 용접 특성 .....	37
3.1.1 용접부의 외관 및 단면 특성 .....	37
3.1.2 인장시험 특성 .....	45
3.1.3 경도 분포 특성 .....	47
3.1.4 미세조직 특성 .....	48
3.1.5 열전대를 이용한 용접부 온도특성 .....	49
3.2 Al6061-T6 코너용접부의 열적 및 잔류응력 수치해석	50
3.2.1 온도분포 특성 .....	50
3.2.2 잔류응력 및 변형률 분포 특성 .....	52
4장 . 결론 .....	56
참고문헌 .....	58



## List of Figures

Fig. 1.1 Anticipation of International regulations about CO <sub>2</sub> gas emission	3
Fig. 1.2 Restriction on National fuel consumption	3
Fig. 1.3 Prospect of materials applied in car	5
Fig. 1.4 Average aluminum use per light vehicle in lbs	5
Fig. 1.5 The trend of aluminum alloy application in North American automotive industry	7
Fig. 1.6 Demand and changing rate of aluminum in Korea	7
Fig. 1.7 Schematic drawing of working process principle of FSW	9
Fig. 1.8 Process of friction stir welding	9
Fig. 2.1 Dimension of corner joints specimen	15
Fig. 2.2 Friction stir welding system	16
Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding	19
Fig. 2.4 Optical microscope	21
Fig. 2.5 Tensile test machine	22
Fig. 2.6 Vickers hardness test scheme and equipment	23
Fig. 2.7 Set up for temperature measurement	24
Fig. 2.8 Thermocouple positions on workpiece	25
Fig. 2.9 Finite element mesh division for numerical analysis	36
Fig. 3.1 Tensile strength of FSW corner welded joints	46
Fig. 3.2 Hardness distribution of FSW corner welded joints	47
Fig. 3.3 Cross section of FSW corner welded joints	48
Fig. 3.4 Temperature history of FSW corner welded joints	49
Fig. 3.5 Temperature fields of FSW corner welded joints	50
Fig. 3.6 Thermal history of FSW corner welded joints	51
Fig. 3.7 Residual stress fields of FSW corner welded joints	52
Fig. 3.8 Residual stress distribution of FSW corner welded joints	53
Fig. 3.9 Strain fields of FSW corner welded joints	54
Fig. 3.10 Strain distribution of FSW corner welded joints	55

## List of Table

Table. 1.1 Characteristics and classification of aluminum alloy .....	12
Table. 2.1 Chemical composition of Al6061-T6 .....	14
Table. 2.2 Mechanical properties of Al6061-T6 .....	14
Table. 2.3 Friction stir welding specification of system .....	17
Table. 2.4 Welding conditions for friction stir welding .....	18
Table. 2.5 Hardness testing condition .....	23
Table. 3.1 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 4.7 mm of pin length with varified rotation speed (travel speed 0.8mm/s, plunge depth 0.7mm) .....	38
Table. 3.2 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 4.7 mm of pin length with varified plunge depth (travel speed 0.8mm/s, rotation speed 600rpm) .....	39
Table. 3.3 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 4.7m m of pin length with varified travel speed (plunge depth 1.0mm, rotation speed 600rpm) .....	40
Table. 3.4 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 5.4m m of pin length with varified rotation speed (travel speed 0.8mm/s, plunge depth 0.3mm) .....	42
Table. 3.5 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 5.4m m of pin length with varified plunge depth (travel speed 0.8mm/s, rotation speed 600rpm) .....	43
Table. 3.6 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 5.4 mm of pin length with varified travel speed (plunge depth 0.3mm, rotation speed 600rpm) .....	44
Table. 3.7 Fractured specimen after tensile test .....	46

## ABSTRACT

### Effect of Tool Pin Length on Weldability of Al6061-T6 Friction Stir Corner Welded Joints

Son Yeong-Bin

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

Department of Welding and Joining Science  
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, the development of technologies to reduce energy and protect the global environment of automobiles, aircraft, rail vehicles and ships has been actively underway. Lightweight technologies include efficient engine development, application of lightweight materials and structural rationalization. As part of reduce lightweight, it is used for ultra-high strength steel plates and steel materials is replaced by Al and Mg alloys.

Compared to steel materials, Al alloys have about four times the thermal conductivity, two times the specific heat and 1.5 times the melting latent heat. And the low melting point and difficult to concentrate energy in heat source. Also, The surface is easily oxidized and the formed aluminum oxide film has a high hardness and high melting point, so that it is difficult to remove. Therefore, application of friction stir welding rather than melting welding is more advantageous to reduce defects.

Friction stir welding (FSW), one of the solid-state welding methods was invented at TWI. 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 Magnesium alloys, Aluminum alloys because of its low heat input.

In this study, we applied the friction stir welding (FSW) process as a method for Al6061-T6. For this purpose, the reliability of the joints is secured by evaluating the weldability and the metallic and mechanical characteristics according to the parameters of each process.

Aluminum alloy 6061-T6 with 6 mm (skin) and 15 mm (stringer) thickness are adopted as base metal in this study. Tool rotation speed, travel speed, plunge depth and different pin length were adopted as welding parameter. In terms of pin length, 4.7 mm (about 80% of the material) and 5.4 mm (about 90% of the material) were used in this study. The tool rotation speed was from 400 to 600 rpm, the traveling speed was 0.6 to 0.8 mm/s. Moreover, when the pin length was 4.7 mm, the pin was plunged 0.7 to 1.0 mm, and 0.2 to 0.4 mm when the pin length was 5.4 mm. Tensile strength and hardness characteristics of the joint were investigated to figure the mechanical characteristics of the corner joint. Plus, thermal distribution characteristics of the Al6061-T6 corner joints were investigated by numerical analysis. To validate the numerical simulation result, the experimental result, carried out with thermocouple, was compared.

As a result of Vickers Hardness test, the hardness value of BM, TMAZ, HAZ, and SZ were 99 Hv, 71 Hv, 53 Hv, 69 Hv respectively. The hardness value of SZ and TMAZ decreased to 70% of the base material's value, because the welding process gave annealing effect to the base material, which was already heat treated to increase its mechanical strength.

When using the pin length 4.7 mm tool (about 80 % of the material), a maximum tensile strength of 186 MPa which is approximately 63 %. And When using the pin length 5.4 mm tool (about 80 % of the material), a maximum tensile strength of 196 MPa which is approximately 67 %. When the 5.4 mm tool was used, the effect of improving the tensile strength value of about 4 % compared to the conventional 4.7 mm was obtained.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

### 1.1.1 연구 배경

최근 세계적으로 자동차 산업에 있어서 화석연료고갈 및 기후변화협약 등의 환경규제 심화에 따라 친환경 자동차의 필요성이 증가하고 있다. 특히 하이브리드자동차, 전기자동차, 연료전지자동차와 같은 전기 기반의 자동차가 기존의 내연기관 자동차를 대체할 것으로 예상되고 있다. 이러한 전기구동기반 자동차의 경우 배터리효율이 낮아 주행속도 및 주행거리 등의 성능개선에 대한 요구가 증가하고 있다. 또한 친환경 자동차의 경우 연비규제, 환경규제 뿐만 아니라 안전장치와 주행 편의성 향상을 위해 장착되는 부품이 증가함에 따라 차량의 무게가 증가하고 있다. 따라서 중량감소를 위한 경량화 기술이 필요한 상황이다.

자동차 산업에서는 차량 경량화를 위하여 기존의 철강소재에서 Al합금, Mg합금, 고분자 복합소재, 고강도 철강소재 등으로 대체하고 있다. 최근 철강재의 대체 재료로 주목 받고 있는 대표적인 경량소재 중 알루미늄합금의 비중은 2.7이다. 철강재의 비중 7.8에 비해 35%에 불과하며, 자동차에 사용되는 소재를 알루미늄으로 대체할 경우 30%이상의 경량화가 가능하다. 알루미늄합금은 비강도가 우수하고 내식성, 가공성 및 재활용성이 우수하다. 또한, 비교적 저렴한 가격으로 자동차 경량화 소재로 각광받고 있으며, 고급대형차 위주로 적용 되어 왔지만 최근에는 중소형 차종까지 적용될 정도로 사용되고 있는 소재이다.[1,3,4]

알루미늄합금은 자동차산업 뿐만 아니라 건설, 조선 및 수송기기 산업 등 다양한 산업에 사용되고 있다. 기존의 아크용접, 레이저용접과 같은 용융용접을 적용하였을 경우 기공발생이 쉽고, 열전도도와 열팽창률이 높아 용접부의 변형 및 고온 균열과 같은 결함의 발생하기 쉬워 건전한 용접부를 가지기 힘들뿐만 아니라 성형 또는 가공이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 기존의 용융용접의 애로사항을 해소하기 위하여 고상접합법인 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)을 적용하였다.[2,5]

마찰교반용접은 1991년 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 것으로 툴(tool)의 회전력과 모재의 마찰열, 소성유동에 따른 입열로 연화된 재료가 교반(소성유동화)되어 용융온도보다 낮은 온도에서 접합되는 용접법이다. 마찰교반용접은 알루미늄합금과 철강재료, 알루미늄합금과 구리합금과 같이 용융용접이 곤란한 이종재에 대한 접합이 가능하다.[6]

따라서 본 연구에서는 Al6061-T6 corner 용접 시 고상접합법인 마찰교반용접을 적용하여 용접부의 특성을 비교 평가하고자 한다.

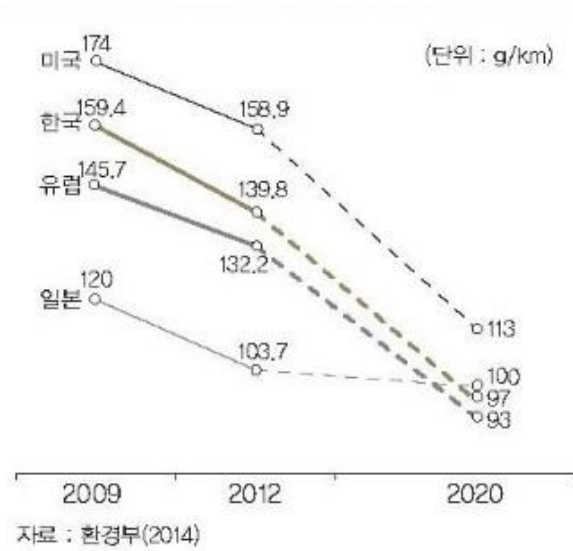


Fig. 1.1 Anticipation of International regulations about CO<sub>2</sub> gas emission

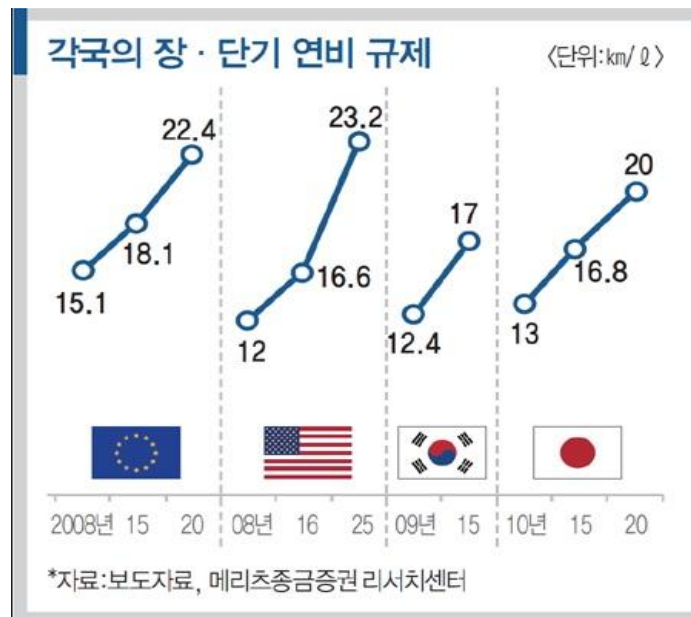


Fig. 1.2 Restriction on National fuel consumption



## 1.1.2 연구목적

자동차 관련 연비 및 이산화탄소 규제가 심화됨에 따라 기존 엔진기반 차량에서 하이브리드 또는 전기자동차의 수요가 증가할 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 자동차 효율을 고려한 경량화요구 증가로 알루미늄 차체의 적용이 크게 확대될 것으로 예상되고 있다. 산업적으로 알루미늄 합금은 경량금속 중에서 가장 널리 사용되고 있는 소재로서, 알루미늄 판재, 압출, 주조품 등 다양한 제품으로 사용되고 있다. 자동차산업에서 알루미늄 합금의 사용비중은 자동차 1대당 평균 1970년대 2%, 1990년대 5.1%에 불과하였으나 2012년 9%, 2015년 11%에 이르렀으며, 2025년에는 16%까지 증가할 전망이다.

자동차용 알루미늄 합금은 주로 5XXX계(Al-Mg계)와 6XXX계(Al-Mg-Si계)가 사용된다. 6XXX계 알루미늄합금은 Mg와 Si를 주 첨가 성분으로 한 열처리 합금으로 성형가공성, 강도, 내식성이 우수하다. 6061 합금은 차량용 재료 및 건축용 재료, 6063 합금은 건축용 샷시재, 6N01은 대형 용접용으로써 철도차량, 선박용의 소재로 사용되고 있다. 6061은 515~550℃에서 용체화(담금질) 처리 후 수냉하고, 170~180℃에서 8시간 정도 시효경화 처리를 한다. 6061-T6 합금은 인장강도 340MPa, 항복강도 250MPa, 연신율 12% 이상 등 우수한 기계적 특성을 가진다.[3,7]

알루미늄합금은 가스 메탈 아크용접(GMAW)과 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW)을 주로 적용하고 있지만 높은 입열량으로 인해 용접부에 고온균열과 함께 압출재 조직의 미세한 변화에 따라 용접된 압출재의 기계적 특성이 저하되는 원인이 되고 있다. 따라서 선진국을 중심으로 고상접합법인 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)이 널리 연구 적용되고 있다.[8]

따라서 본 연구에서는 마찰교반용접(FSW)을 적용하여 Al6061-T6 corner 용접부에 대한 신뢰성을 확보하고자 한다.

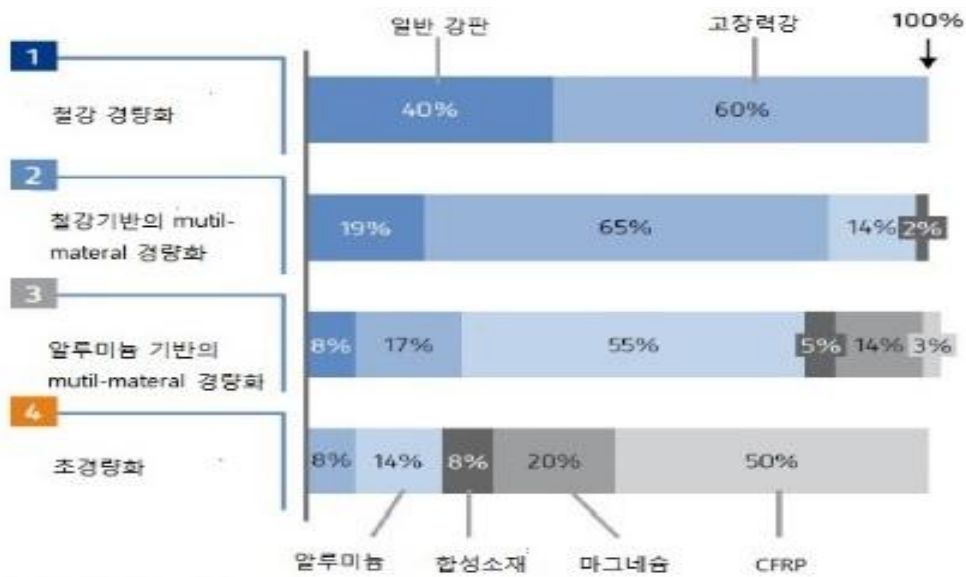


Fig. 1.3 Prospect of materials applied in car

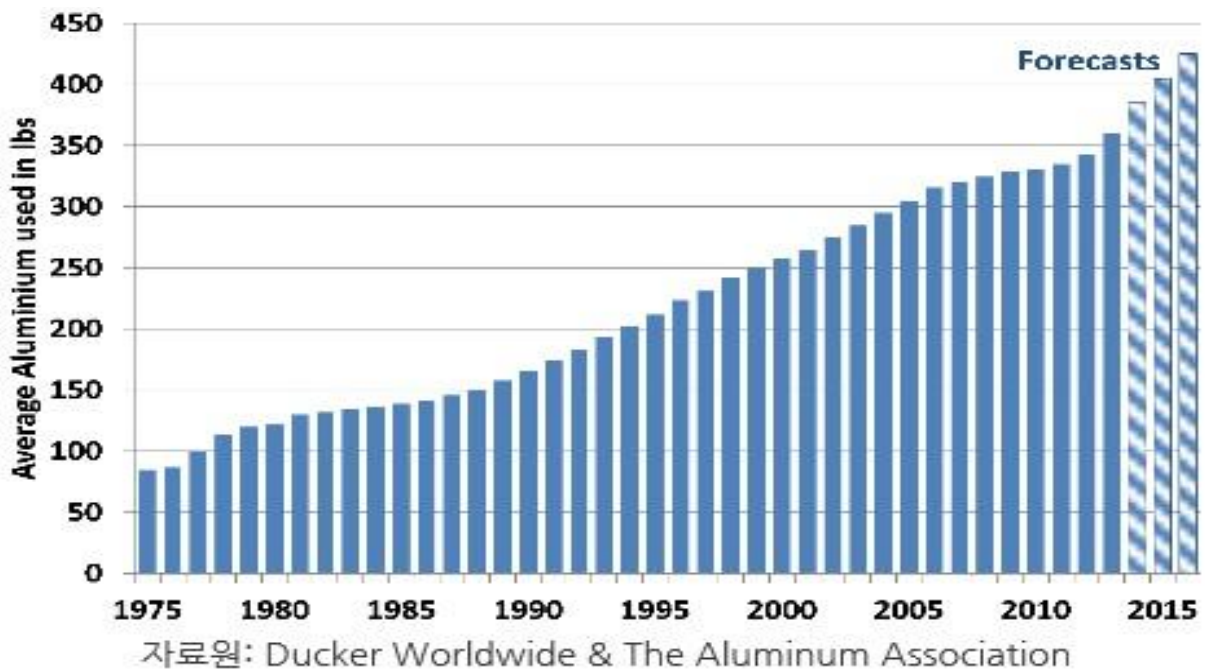


Fig. 1.4 Average aluminum use per light vehicle in lbs

## 1.2 국내·외 기술 동향

국내의 경우 마찰교반용접이 가장 적용이 많이 된 분야는 전자, 반도체 및 디스플레이 제조 설비에 들어가는 열 교환 플레이트 제작 분야이다. 최근에는 자동차 산업에서는 환경규제 만족에 대한 현실적인 기술인 마찰교반용접을 적용하여 차체 경량화를 위한 경량소재의 활용, 이종소재 간 접합기술에 주목하고 있다.

항공우주분야에서는 연구기관들이 마찰교반용접 프로젝트를 통한 항공기 적용에 연구가 진행되고 있으며, 지금까지 항공분야에서는 일부 군용기를 제외하고 용융용접이 적용되지 않고 리벳구조가 이용되고 있다. 특히 알루미늄합금에서 기체 주 구조에의 용융용접의 적용은 용접변형 및 결함 등이 불가피하게 발생하는데 이 상황을 극복하기 위한 접합법이 마찰교반용접 기술이다. 미국 항공우주산업에서도 두랄루민은 용융용접이 불가능하다고 간주 되어 왔다. 따라서 마찰교반용접을 적용하여 리벳 방식을 대체하는 접합기술로 상업적 생산에 적용하고 있다.

또한 토목산업에서는 알루미늄합금은 원가가 높기 때문에 지금까지 토목구조물의 강도부재로서 이용된 예는 거의 없지만 일본에서는 압출형재를 마찰교반용접으로 접합하여 판넬을 제작하고, 판넬과 판넬은 TIG 용접과 MIG 용접으로 연결하여 상행(箱桁)을 제작 하였는데, 마찰교반용접으로 제작된 판넬은 변형이 매우 적다는 것을 확인하였다고 한다.

선박분야에서는 알루미늄 합금을 선박제조에 적용함으로써 안정적 보장, 높은 완성도가 있는 친환경적인 선박을 제작하고 있다. 철도차량분야에서 동체는 알루미늄 합금제와 스테인리스 강제로 나누어져 있는데 일본은 알루미늄 합금에 마찰교반용접이 본격적으로 적용되고 있다.[1,9-11]

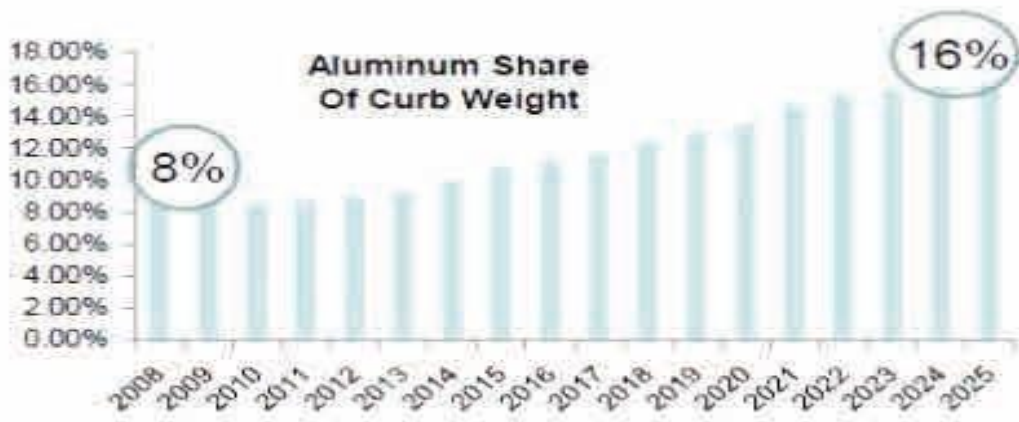


Fig. 1.5 The trend of aluminum alloy application in North American automotive industry



Fig. 1.6 Demand and changing rate of aluminum in Korea

## 1.3 마찰교반용접

### 1.3.1 마찰교반용접의 원리

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 TWI(영국용접연구소)에서 알루미늄 합금의 용접상의 문제점을 획기적으로 개선할 수 있는 새로운 용접법인 마찰에 의한 가열 및 소성유동을 응용한 접합법을 개발하였다. 마찰교반용접은 아크용접, 레이저용접 등의 용융용접에 비해 기공, 균열 발생이 없고 용가재와 보호가스를 사용하지 않는 비소모성 접합일 뿐만 아니라 용접결함, 소음 및 유해광선의 발생이 없어 고품질의 접합부를 얻을 수 있는 친환경적이고 에너지 소비가 낮은 특징을 갖고 있다. 때문에 최근 자동차, 철도차량, 선박, 우주항공 산업에 널리 적용되고 있다.

마찰교반용접의 원리는 우선 회전하는 툴(tool)이 소재의 접합면에 압입하고 솔더(shoulder)를 압착시키면서 툴과 소재 사이에서 마찰열과 가압력이 발생한다. 기계적인 힘을 가하여 툴이 이동하고 가열된 부분이 핀의 앞부분(advancing side)에서 뒤쪽(retreating side)로 압출하며, 툴의 후방 유동부는 열전도에 의해 급속히 냉각되어 고상용접부가 형성이 된다.

툴은 솔더(shoulder) 및 핀(pin)으로 구성되어 있으며, 솔더는 절삭상태의 연화된 소재가 외부로 배출되는 것을 방지하는 동시에 소재가 외부로 배출되는 것을 방지하는 동시에 소재의 표면과의 마찰열을 발생시키는 역할을 한다. 핀의 개략적인 형상은 나사 모양이며, 소성변형된 소재가 접합된 곳으로부터 완전히 빠질 수 있도록 해주며 빈 공간이 없는 접합부를 형성하게 하는 역할을 한다. 툴의 재질로는 일반적으로 AISI H13, SKD11, SKD61, STS440C 등이 사용되고 있다.[12, 13]

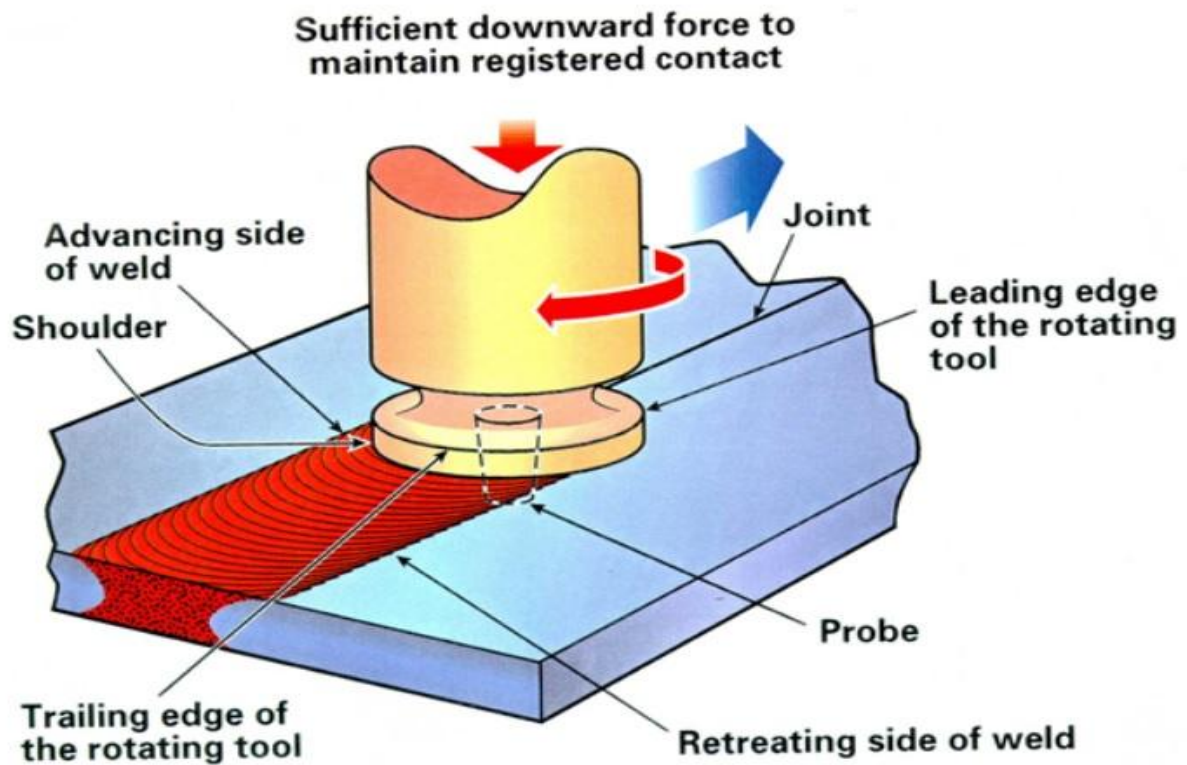


Fig. 1.7 Schematic drawing of working process principle of FSW

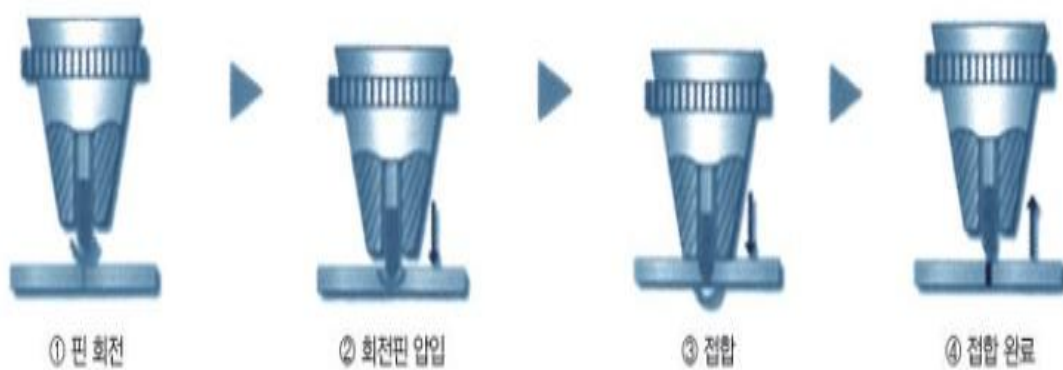


Fig. 1.8 Process of friction stir welding

### 1.3.2 마찰교반용접의 특징 [12, 13]

마찰교반용접은 다음과 같은 장점이 있다.

- 용접소재가 용융되지 않기 때문에 고상용접으로 분류된다.
- 모든 알루미늄 합금을 용점 이하의 온도에서 접합이 가능하다.
- 접합기구가 단순하며, 접합인자가 적어 관리가 용이하다.
- 접합부에 덧살이 형성되지 않으므로 표면 및 이면이 평활하다.
- 용접입열이 작아 접합 후의 변형이 아크용접에 비해 매우 적다.
- 그루브 표면에 산화피막의 영향을 받지 않아 전처리가 필요 없다.
- 기공, 균열 등의 용접 결함이 발생하지 않는다.
- 접합부의 강도 및 접합속도가 MIG 용접의 경우와 동등하거나 그 이상이다.
- 용접 시 스파터, 유해가스가 발생하지 않고 적외선 또는 자외선 등의 유해 광선이 발생하지 않는 친환경적인 용접이다.
- 용가재, 보호가스가 요구되지 않는다.
- 튈의 수명이 길기 때문에 용접부의 품질 저하가 적다.
- 마찰교반용접기구의 에너지 효율이 매우 높아서 소비 전력이 적다.
- 마찰교반용접장비의 시스템이 매우 간단하기 때문에 설비비용이 적게 든다.



## 1.4 알루미늄 소재의 특징 [14, 15]

알루미늄은 산소와 규소 다음으로 지구상에 많은 원소이다. 하지만 알루미늄은 비교적 큰 산화성 때문에 다른 금속에 비해 늦게 분리 되었다. 금속의 반응성 나열표를 보면, 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al), 아연(Zn) 순서이다. 이러한 비교적 큰 반응성 때문에 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 등의 산화물 형태로 존재했지만 18세기에 전기 분해로 인한 정제 기술이 개발되면서 처음으로 순수하게 분리 되었다. 알루미늄의 비중은 2.7으로 마그네슘 다음으로 가벼운 금속이다.

알루미늄 합금은 항공 우주 산업이나 일반 공업용 차량, 조선, 건축, 토목, 화학 및 식품 등 여러 공업 분야에 널리 사용되고 있다. 알루미늄은 pH 4.5 ~ 8.5의 환경에서 산화 피막이 모재를 보호하기 때문에 내식성은 우수하지만 이온화 경향이 커서 부식 환경에서 철, 구리, 납 등과 접촉하면 부식이 심하게 발생되고 수은은 ppm 단위만으로도 심하게 부식된다.

순수 알루미늄은 강도가 낮으므로 Mn, Si, Mg, Cu, Zn, Cr 등을 첨가하여 주로 석출 경화에 의한 강도 향상을 위해 사용한다. 일반 탄소강에 비해 열전도도와 전기 전도도는 약 4배 정도로 크고, 자성이 없으며, 선팽창계수는 약 2배 정도로 커서 용접성은 많이 떨어지는 재료이다.

알루미늄 합금은 전신재와 주물, 다이캐스팅 합금으로 분류하거나 열처리하여 사용하는 열처리 합금과 열처리하지 않고 사용하는 비열처리 합금으로 분류하기도 한다. 6000계(Al-Mg-Si계) 합금은 내식성, 강도, 성형가공성, 용접성이 우수하지만 용접부가 용접 열에 의해 연화되는 단점이 있다. 6061 합금은 차량용 재료 및 건축용 재료, 6063 합금은 건축용 샷시재, 6N01 합금은 대형 용접용 형재로서 철도차량 또는 선박용으로 사용되고 있다.



**Table. 1.1 Characteristics and classification of aluminum alloy**

구분	합금명	특성	용도
비열처리용 (건열경화)	1XXX(pure Al)	내식성, 광의 반사성, 열의 도전성, 성형가공 우수	도전재, 화학공업용, 식품용기, 반사판
	3XXX(Al-Mn계)	용접성, 내식성 우수 성형가공성 우수	주방용품, 판금재료
	4XXX(Al-Si계)	내마모성, 내열성	피스톤, 용접봉
	5XXX(Al-Mg계)	용접성 양호, 내식성 우수	건축, 차량, 가드레일, 선박, 액화가스설비
열처리용 (선열경화)	2XXX(Al-Cu-Mg계)	기계적 성질 우수, 절삭성 우수, 고강도	기계부품, 항공기기, 광학부품
	6XXX(Al-Mg-Si계)	용접성, 내식성 양호	건축용, 구조용 재료
	7XXX(Al-Zn-Mg계)	용접성 우수, 고강도	방산용 재료, 용접 구조재, 상온시효성 우수

## 제 2 장 연구 방법

### 2.1 연구 방법

1장에서는 연구 배경, 연구 목적, 국내외 기술 동향, 마찰교반용접의 원리 및 특징 그리고 알루미늄 소재의 특징에 대해서 나타내었다.

2장에서는 본 논문의 구성과 마찰교반용접을 이용하여 Al6061-T6 corner 용접시 틀 핀 길이에 따른 용접부 특성 고찰을 위한 연구 방법에 대하여 논하였다. 틀 핀 길이에 따라 용접조건이 용접부에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 16mm의 stringer와 6mm의 skin으로 구성하였다. 용접 변수로는 틀의 핀 길이, 틀의 삽입 깊이, 틀의 회전 속도, 틀의 이동 속도에 따른 용접부 특성을 고찰하고자 하였다.

3장에서는 서로 다른 틀 핀 길이에 따라 틀의 삽입깊이, 틀의 회전속도, 틀의 이송속도에 따른 용접 특성분석, 기계적 및 금속학적 특성을 평가하였다. corner 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험, 경도시험을 하였으며, 금속학적 특성 분석을 위해 미세조직 특성을 평가하였다. 또한, 유한요소해석을 이용하여 Al6061-T6 corner 용접부에 대한 온도 특성을 규명하였으며, 수치해석 결과의 타당성 검증을 위해 열전대를 이용하여 실측 값과 비교하였다. 또한, 열탄소성 해석에 의한 잔류응력 및 변형률 특성 분석을 실시하였다.

4장에서는 마찰교반용접을 이용한 Al6061-T6 corner 용접 시 틀 핀 길이에 따른 corner 용접부의 접합성 및 건정성에 대한 결론을 도출하였다.

## 2.2 실험장비 및 조건

### 2.2.1 사용소재 및 실험장비

본 연구에서 사용한 소재는 Al6061-T6를 사용하여 마찰교반용접을 수행하였으며, 시험편의 크기는 skin 200mm(L) X 70mm(B) X 6mm(T)이고, stringer 200(L) X 35mm(B) X 15mm(T)로 corner 마찰교반용접을 실시하였다. 시험편의 치수는 Fig. 2.1에 나타내었으며, 실험에 사용된 Al6061-T6의 화학적 조성과 기계적 특성은 Table. 2.1과 Table. 2.2에 나타내었다.

**Table. 2.1 Chemical composition of Al6061-T6**

Chemical composition (wt.%)								
Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
ratio	0.5	0.6	0.3	0.15	1.0	0.2	0.15	0.15

**Table. 2.2 Mechanical properties of Al6061-T6**

Mechanical properties			
Yield stress (MPa)(Max)	Tensile stress (MPa)(Max)	Elongation(%)	Vickers Hardness(Hv)
244(295)	295(310)	12	107

전진 측(advancing side)은 skin(6mm), 후진 측(retreating side)은 stringer (15mm)를 배치하였으며, 용접 시 틀의 회전방향은 반시계 방향으로 적용하였다.

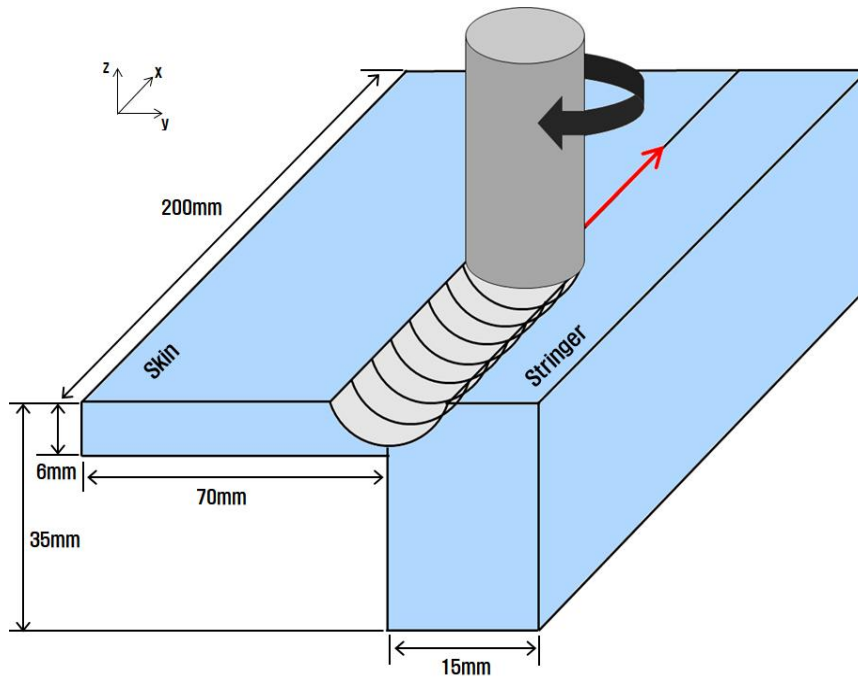


Fig. 2.1 Dimension of corner joints specimen

본 연구의 마찰교반용접을 수행하기 위해 사용된 용접장비는 WINXEN사의 마찰교반용접기를 사용하였다. 마찰교반용접 실험 장비는 Gantry Type으로 X, Y, Z축으로 이동이 가능하며, X, Y축은 실험장비의 테이블에 의해 이동이 된다. Z축의 회전은 300~3000rpm까지 가능하며, 최대하중은 3000kgf인 장비이다. Fig. 2.2는 실험에 사용된 마찰교반용접기이며, Table. 2.3는 장비의 사양을 나타냈다.

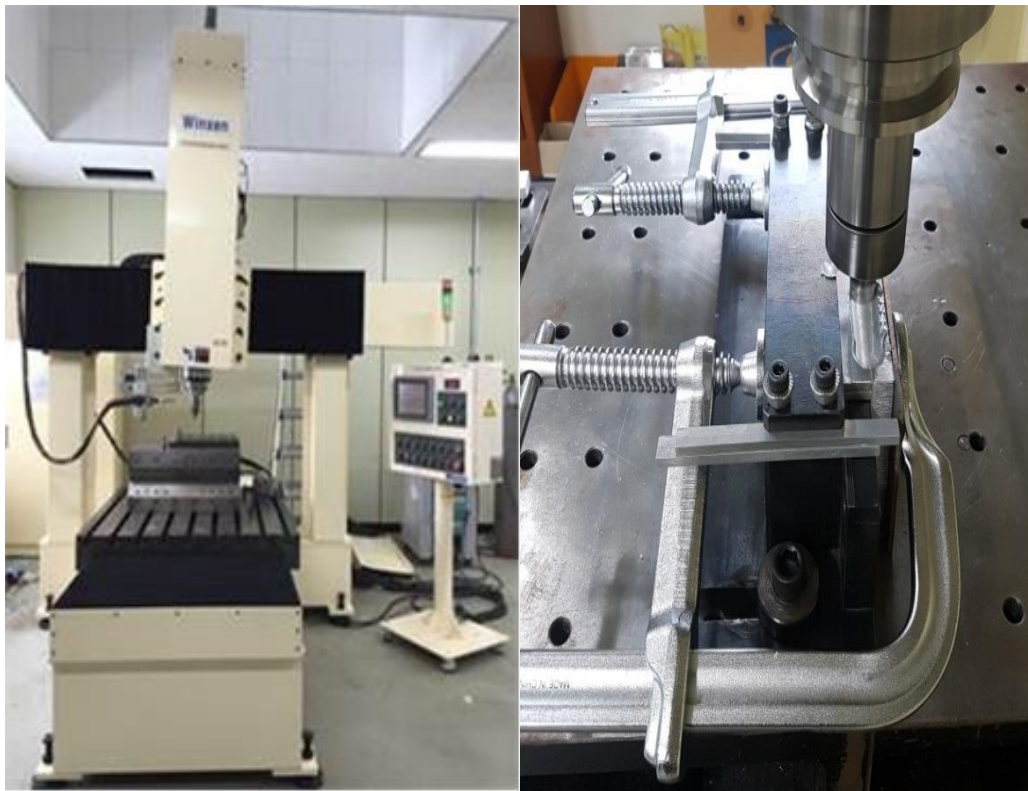


Fig. 2.2 Friction stir welding system

Table. 2.3 Friction stir welding specification of system

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

## 2.2.2 용접조건

마찰교반용접에서 주요 변수로는 삽입깊이(plunge depth), 회전속도(rotation speed), 이송속도(travel speed), 삽입속도(plunge speed), 삽입유지시간(dwell time), 튄의 형상, 가압력, 틸팅각 등이 있다.[16,17] 본 연구에서는 Al6061-T6 마찰교반용접 corner 용접시 튄 핀 길이에 따른 용접부의 특성을 고찰하기 위하여, 핀 길이 4.7mm(소재대비 약 80%) 튄의 공정변수로는 삽입깊이(0.7, 0.8, 0.9, 1.0mm), 튄의 회전속도(400, 500, 600rpm), 튄의 이송속도(0.8, 0.7, 0.6mm/s)이며, 핀 길이 5.4mm(소재대비 약 90%) 튄의 공정변수로는 삽입깊이(0.2, 0.3, 0.4mm), 튄의 회전속도(400, 500, 600rpm), 튄의 이송속도(0.8, 0.7, 0.6mm/s)으로 하였다. 튄의 형상은 Frustum 타입, 튄의 회전 방향은 반시계 방향, 틸팅각은 3° 로 설정하고 다른 공정변수를 고정시켜 마찰교반용접을 실시하였다. 본 연구의 마찰교반용접 Al6061-T6 corner 용접부의 용접 조건을 Table. 2.4에 나타내었다.

Table. 2.4 Welding conditions for friction stir welding

핀 길이	4.7 mm			5.4 mm		
조건	회전속도 (rpm)	삽입깊이 (mm)	이송속도 (mm/s)	회전속도 (rpm)	삽입깊이 (mm)	이송속도 (mm/s)
회전속도에 따른 조건	400	0.7	0.8	400	0.3	0.8
	500			500		
	600			600		
삽입깊이에 따른 조건	600	0.7	0.8	600	0.2	0.8
		0.8			0.3	
		0.9			0.4	
		1.0				
이송속도에 따른 조건	600	1.0	0.8	600	0.3	0.8
			0.7			0.7
			0.6			0.6

### 2.2.3 툴(Tool)

마찰교반용접에서 툴의 형상과 제원은 매우 중요한 요소 중에 하나이다.[18] 본 연구에 사용된 툴은 Tungsten carbide-cobalt 12%의 소재이며, 다이아몬드 연삭을 하여 제작하였다. Corner 용접 시 재료의 원활한 소성유동을 위해 Frustum(절두체) 형상으로 제작 하였다. 솔더(shoulder)의 직경은 18mm, 핀(pin)의 직경은 위, 아래 각각 5mm, 3mm이며, 핀의 길이는 각각 4.7mm, 5.4mm, 오목각은 3° 로 제작하였다. 본 연구에 사용된 툴의 형상과 치수를 Fig. 2.3에 나타내었다.

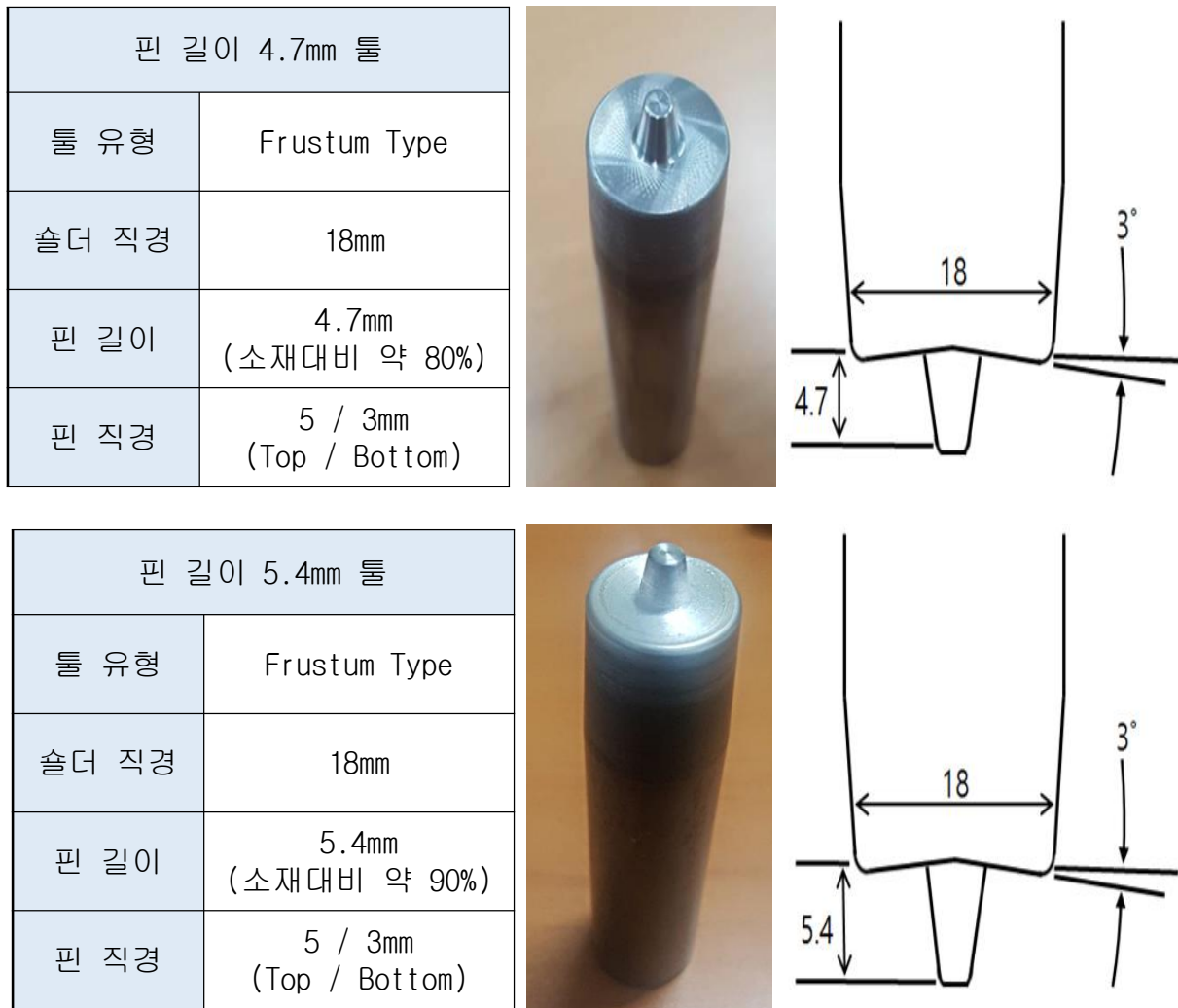


Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding



## 2.3 용접부 기계적 및 금속학적 특성 평가

### 2.3.1 용접부 외관 및 단면 특성

핀 길이 4.7mm(소재대비 약 80%) 톨은 삽입깊이(0.7, 0.8, 0.9, 1.0mm), 톨의 회전속도(400, 500, 600rpm), 톨의 이송속도(0.8, 0.7, 0.6mm/s), 핀 길이 5.4mm(소재대비 약 90%) 톨은 삽입깊이(0.7, 0.8, 0.9mm), 톨의 회전속도(400, 500, 600 rpm), 톨의 이송속도(0.8, 0.7, 0.6mm/s)에 따른 마찰교반용접 후, corner 용접부의 특성을 고찰하기 위하여 시편의 접합 여부, 외관의 형태, 생성된 burr의 형상 등을 1차적으로 관찰하였다.

### 2.3.2 미세조직 관찰

마찰교반용접 Al6061-T6 corner 용접부의 특성을 평가하기 위해 미세조직 관찰하기 전에 인장시험을 실시하였으며, 가장 높은 값을 갖는 조건의 시험편에 대해 미세조직을 관찰하였다. 미세조직을 관찰하기 위해 마운팅, 미세연마, 에칭 하였다. 미세연마는 #400, #800, #1200, #1500, #2000, #2400 순서로 연마하였으며, 세밀한 연마를 위해 Diamond paste  $9\mu m$ ,  $3\mu m$ ,  $1\mu m$  순서로 연마를 수행하였다. 연마된 시험편을 Macro 시험편은 Poulton 용액으로 3초간 에칭 하였으며, Micro 시험편은 Keller 용액으로 1분 30초~2분간 에칭 하였다. Poulton 에칭액은 염산, 질산, 불산, 증류수 각각 5%, 30%, 5%, 60%이며, Keller 에칭액은 염산, 질산, 불산, 증류수 각각 1.5%, 2.5%, 0.5%, 95%의 비율이다. Fig. 2.4에 미세조직 관찰에 사용한 광학현미경을 나타내었다.[19,20] 용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 광학현미경을 사용하여 교반부(SZ), 열·기계적 영향부(TMAZ), 열 영향부(HAZ), 모재(BM)로 조직 특성을 고찰하였다.



Fig. 2.4 Optical microscope

### 2.3.3 인장시험

AI6061-T6 FSW corner 용접시 틀 핀 길이에 따른 용접부 특성을 고찰하기 위하여 틀의 핀 길이, 틀의 회전속도, 틀의 삽입깊이, 틀의 이송속도 변화에 따라서 마찰교반용접을 실시하였다. 마찰교반용접 된 시험편의 인장강도를 평가하기 위해 인장시험편은 85mm(L) X 35mm(B)로 가공하였고, 인장시험은 skin 방향으로 수행하였다. 인장시험은 Shimadzu의 UTM(Universal Testing Machine) 장비를 사용하여 1mm/min속도로 인장시험을 실시하였으며, Fig. 2.5에 실험에 사용된 만능재료시험기를 나타내었다.

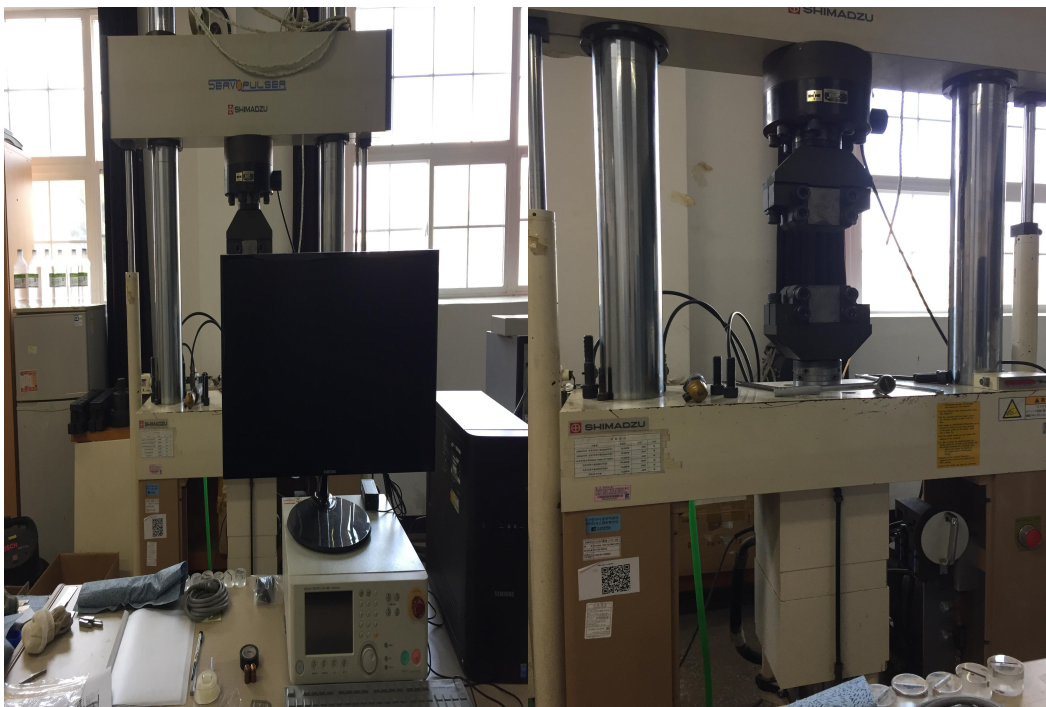


Fig. 2.5 Tensile test machine

### 2.3.4 경도시험

마찰교반용접 Al6061-T6 corner 용접부 특성을 고찰하기 위하여 경도를 측정하였다. 경도 측정은 Fig. 2.6에 나타난 Akashi사의 HM-112 Micro Vickers 경도기를 사용하였다. 현미경의 배율은  $50\mu\text{m}$ 이며,  $136^\circ$  다이아몬드 피라미드 입자를 이용하는 장비이다. 용접부의 경도 측정을 위해서 시험편 용접부의 횡단면에서 절단 후 미세연마를 하였다. Skin용접부의 상부로부터 3mm의 지점인 중간지점에서 측정하였으며, 0점을 중심으로 양 옆의 방향으로 0.5mm의 간격으로 모재부분까지 측정하였다. 경도 측정기의 다이아몬드 하중은 0.5kgf를 가하였으며, 10초의 loading time을 주어 경도시험을 하였다. 측정 조건은 Table. 2.5에 나타내었다.

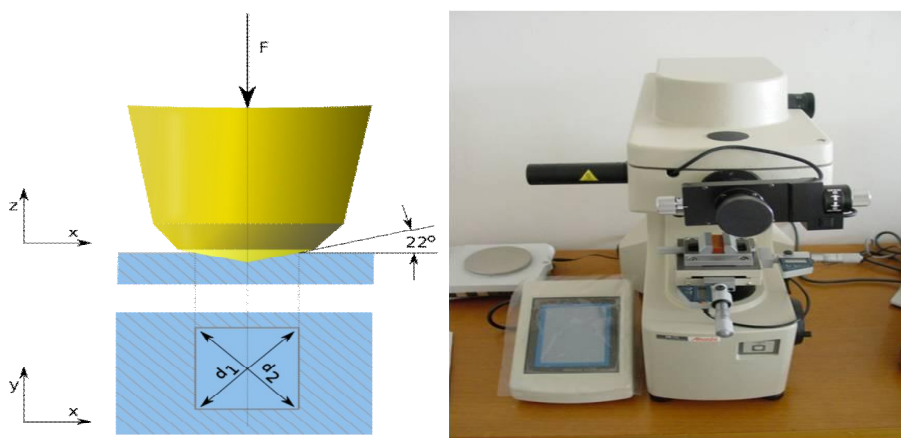


Fig. 2.6 Vickers hardness test scheme and equipment

Table. 2.5 Hardness testing condition

Parameters	Values
Type	Micro vickers hardness tester
Load	0.5kgf
Loading time	10sec
Test position	Below 3mm from surface

### 2.3.5 온도 측정

수치해석 결과에 대한 타당성을 검토하기 위해 MIDI LOGGER GL220-UM-851(K 타입)의 Thermo Couple 장비를 사용하여 열전도해석 값과, 실측값의 온도비교를 하였다. 온도 측정 위치는 툴과 열전대간의 간섭을 방지하기 위해 접합부에서 12mm 떨어진 지점에 0.3mm의 직경의 구멍을 만들어 설치하였다. 또한 Advancing Side와 Retreating Side의 온도차와 시간에 따른 온도변화를 관찰하기 위하여 AS, RS 각각 시작, 중간, 끝 3부분의 동일한 위치에서 온도를 측정하였다. 본 연구에 사용된 장비와 구성을 Fig. 2.7 과 Fig. 2.8에 나타내었다.[21]



Fig. 2.7 Set up for temperature measurement

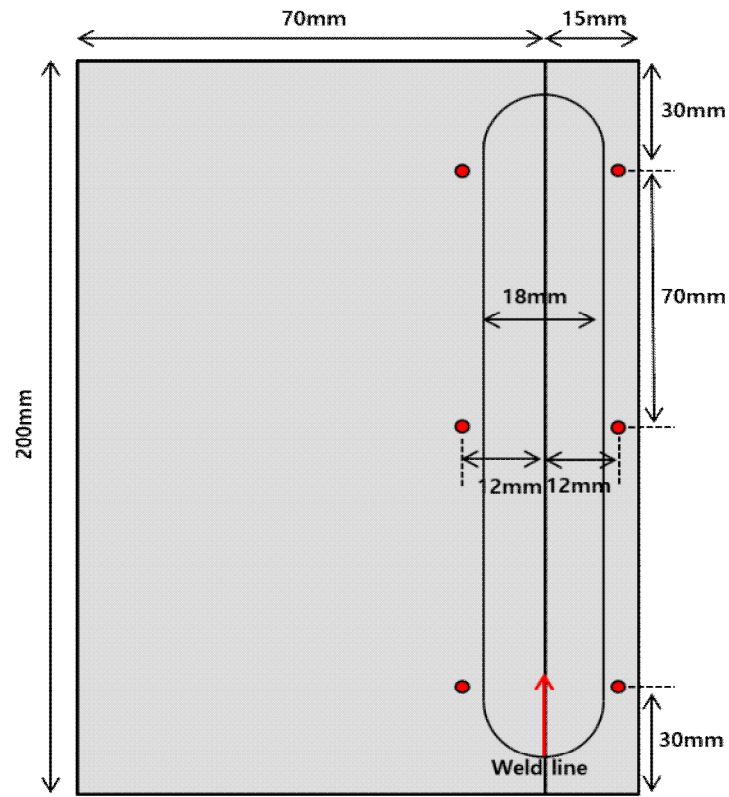


Fig. 2.8 Thermocouple positions on workpiece



## 2.4 용접부 열전도 및 열탄소성 수치해석

본 연구에서는 Al6061-T6 corner 용접부의 열분포 확인을 위해 수치해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 수치해석 프로그램은 자연좌표계를 이용한 Iso-Parametric Element의 개념을 도입하여 정식화 하였다. 또한 시간에 따라 온도가 변화하므로 본 연구에 사용한 Al6061-T6의 비열, 열전도도, 밀도 등이 변화하므로 이를 고려하여 수치해석 프로그램을 사용하였다.[22]

### 2.4.1 열전도 및 열탄소성 이론

#### 가. 열전도 이론

재료가 등방성 일 때, 연속체의 3차원 비정상 열전도 지배방정식은 다음의 식과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

(2-1)을 3차원 비정상 열전도 방정식으로 기술하면 아래와 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

$T = T(x, y, t)$  : 온도(°C),  $c$  : 비열(cal/g·°C),

$T$  : 온도(°C),  $\dot{Q}$  : 단위시간당 입열량 (cal/sec)  
 $c$  : 비열(cal/g·°C),  $\lambda$  : 열전도율(cal/cm·sec·°C)  
 $\rho$  : 밀도 (g/cm<sup>3</sup>),  $t$  : 시간 (sec) 이다.

물체 표면의 열적 경계조건은 Fourier법칙을 사용하여 다음과 같이 구성 된다.

$$q = -a \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \frac{\partial T}{\partial n} \dots\dots\dots (2-3)$$

경계에서 열전달이 있을 경우에  $q$ 는 (2-4)이 된다.

$$q = \alpha_c (T - T_c) \dots\dots\dots (2-4)$$

$q$  : 열 유속 (cal/sec · cm<sup>2</sup>),     $\alpha_c$  : 열전달계수 (cal/cm<sup>2</sup> · sec · °C)

$n$  : 물체표면의 외법선방향,     $T_c$  : 외부온도 (°C)

고체의 열전도 문제를 Galerkin법을 적용하여 해석모델을 유한개로 분할하고, 한 요소의 온도 분포를 다음과 같이 표현하였다.

$$T(y, z, t) = [N(y, z)] \{ \phi(t) \} \dots\dots\dots (2-5)$$

$T$  : 요소의 온도

$[N]$  : 절점온도와 요소내의 온도를 연결하는 형상함수 Matrix

$[\phi]$  : 시간  $t$ 일 때 요소의 절감온도 Vector

형상함수를 가중함수로하여 식(2-5)에 Galerkin법을 적용하면 식(2-6)이 된다.

$$\int_v [N]^T \left\{ a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dv = 0 \dots\dots\dots (2-6)$$



여기서  $v$ 는 요소의 영역,  $\hat{n}$  첨자  $T$ 는 전치행렬을 나타내며, 식(2-6)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 식을 전개하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \int_v [N]^T a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dv \\
 &= - \int_v a \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dv \\
 & \quad + \int_s a [N]^T \left( \frac{\partial T}{\partial x} \hat{n}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{n}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{n}_z \right) ds \dots\dots\dots (2-7)
 \end{aligned}$$

$S$ 는 요소의 경계이며, 식(2-3), (2-4), (2-5)를 식(2-7)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & - \int_v a \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dv \cdot \phi(t) \\
 & - \int_s a_c [N]^T [N] ds \phi(t) + \int_v \dot{Q} [N]^T dv \\
 & + \int_s \alpha_c T [N]^T dS - \int_v \rho_c [N]^T [N] dv \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2-8)
 \end{aligned}$$

위 식을 간단히 하면 3차원 비정상 열전도문제에 대한 유한요소식은 다음과 같다.

$$[K] \phi + [C] \frac{\partial \phi}{\partial t} = F \dots\dots\dots (2-9)$$

$K$  : 열전도 Matrix,  $C$  : 열용량 Matrix,  $F$  : 열유속 Vector 이다.

그 내용은 다음과 같다.

$$[K] = \int_v a \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dv + \int_s \alpha [N]^T [N] ds \dots\dots\dots (2-10)$$

$$[C] = \int_v \rho c [N]^T [N] dv \dots\dots\dots (2-11)$$

$$F = \int_s \alpha_c T_c [N]^T ds + \int_v \dot{Q} [N]^T dv \dots\dots\dots (2-12)$$

위 식(2-9) 3차원 비정상 열전도문제서  $\phi$ 와  $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 의 2개의 미지수가 존재하지만 시간증분을  $\Delta t$ , 증분 전 온도  $\phi^B$ , 증분 후 온도  $\phi^A$ , 중간 온도  $\phi^M$  라고 하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial \phi^A}{\partial t} = \frac{\phi^A - \phi^M}{(\Delta t/2)}, \quad \frac{\partial \phi^B}{\partial t} = \frac{\phi^M - \phi^B}{(\Delta t/2)} \dots\dots\dots (2-13)$$

식(2-13)으로부터 다음과 같은 식이 구성이 된다.

$$\frac{\partial \phi^A}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} (\phi^A - \phi^B) - \frac{\partial \phi^B}{(\Delta t)} \dots\dots\dots (2-14)$$

식(2-9)는 최종적으로 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\left( [K] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{ \phi^A \} = [C] \left( \frac{2}{\Delta t} \{ \phi^B \} + \left\{ \frac{\partial \phi^B}{\partial t} \right\} \right) + F \dots\dots\dots (2-15)$$

$K$  : 열전도 Matrix,       $C$  : 열용량 Matrix,       $F$  : 열유속 Vector  
 $\Delta t$  : 시간증분,       $\phi^A$  : 증분후의 절점온도,       $\phi^B$  : 증분전의 절점온도

식(2-15)에서 미지수는  $\phi^A$  하나만 존재하므로, 시간  $t$ 에 대한  $\phi^B$ 의 값을 알면  
 연립방정식의 해인  $\phi^A$ 를 구할 수 있다. (초기조건  $\phi^B_{t=0}$ 을 대입)

## 나. 열탄소성 이론

본 연구에서 잔류응력해석을 위해 탄성과 소성 전 영역에서 재료의 항복응력, 비저항, 열팽창계수, 탄성계수는 온도 의존성을 고려하였으며, 변형률과 응력의 관계를 소성유동 이론의 근거로 증분형으로 나타냈다. 또한, 소성역에서는 Von-Mises응력을 항복함수로 사용하였다.

### (1) 응력-변형률 관계

응력 변형률의 관계식

$$\{\epsilon\} = [D^e]^{-1} \{\sigma\} - \{\epsilon^t\} \dots\dots\dots (2-16)$$

$[D^e]^{-1}$  : 탄성 응력-변형률 매트릭스,  $\{\epsilon^t\}$  : 열 변형률

식(2-16) 응력증분의 영향을  $[C]dT$ 라고 하면 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D]d\epsilon - [C]dT \dots\dots\dots (2-17)$$

### (2) 탄성역

재료가 탄성거동을 하는 경우의 식은 다음과 같다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^t\} \dots\dots\dots (2-18)$$

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon^e\} \dots\dots\dots (2-19)$$

응력  $\{\sigma\}$ , 탄성변형률  $\{\epsilon^e\}$ , 온도  $T$  의 함수이므로 탄성변형률의 증분은 아래의 식과 같고,

$$\{d\epsilon^e\} = \left\{ \frac{\partial \epsilon^e}{\partial \sigma} \right\} \{d\sigma\} + \frac{\partial \{\epsilon^e\}}{dT} dT \dots\dots\dots (2-20)$$

$$\{d\epsilon^e\} = [D^e]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{dT} \{\sigma\} dT \dots\dots\dots (2-21)$$

전 변형률 증분은 아래의 식과 같다.

$$\{d\epsilon\} = [D^e]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{dT} \{\sigma\} dT + \{\alpha\} dT \dots\dots\dots (2-22)$$

탄성역에서 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e] \{d\epsilon\} - [D^e] \left( \frac{\partial [D^e]^{-1}}{dT} \{\sigma\} + \{\alpha\} \right) dT \\ &= [D^e] \{d\epsilon\} - \left( [D^e] \{\alpha\} - \frac{1}{E} \frac{E - E_1}{\Delta T} \{\sigma\} \right) dT \\ &= [D^e] \{d\epsilon\} - \{C\} dT \dots\dots\dots (2-23) \end{aligned}$$

$$E_1 : \text{온도변화}(\Delta T) \text{ 후의 탄성계수}, \quad \{C\} : [D^e] \alpha \frac{1}{E} - \frac{E - E_1}{\Delta T} \{\sigma\}$$

### (3) 소성역

재료의 항복응력  $\sigma_y$ 은 온도  $T$ 와 소성일  $W^P(\bar{\sigma}, \epsilon^P)$  함수로  $\sigma_y(T, W^P)$ 로 하고, 항복함수  $F$ 는 응력  $\{\sigma\}$ , 항복응력  $\sigma_y$ 으로부터 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\bar{\epsilon}^p, T) = \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\epsilon}^p, T) \dots\dots\dots (2-24)$$

$dF = df - df_0 = 0$  을 만족할 때 재료는 항복이 되고, 이에 따라 재료가 소성영역에서 부하상태일 경우  $dF = 0$ 의 조건을 만족해야 하므로 아래와 같은 식이 될 수 있다.

$$dF = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} - \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\epsilon}^p} \right\}^T \{d\bar{\epsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT = 0 \dots\dots\dots (2-25)$$

$$\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T : \text{상당응력의 변화}, \quad \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\epsilon}^p} : \text{가공경화}, \quad \frac{\partial f_0}{\partial T} : \text{온도증분}$$

소성영역에 도달한 재료는 비합축성이며, 항복함수를 소성포텐셜로 가정한다면 소성변형률 증분은 다음과 같은 식과 같다.

$$\{d\epsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \dots\dots\dots (2-26)$$

$$\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} : \text{편차응력}, \quad \lambda : + \text{스칼라양}$$

전 변형률증분  $\{d\epsilon\}$ 은 탄성, 소성, 열변형률의 합이므로 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\} \dots\dots\dots (2-27)$$

따라서 소성영역에서 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon\} - [D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}\lambda - [D^e]\{\alpha\}dT + \frac{d[D^e]}{dT}[D^e]^{-1}\{\sigma\}dT \dots\dots\dots (2-28)$$

**(4) 절점력과 절점변위의 관계**

재료의 물체력을 무시하고 가상일의 원리에 따라 요소 등가절점력 증분  $\{dF\}$ 은 다음과 같은 식이 된다.

$$\{dF\} = [K]\{dU\} - \{dL\} \dots\dots\dots (2-29)$$

용접에 의한 열응력 해석에서 외력의 작용이 고려되지 않으므로 각 요소에 관한 평형조건식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\sum [K]\{dU\} - \sum \{dL\} = \sum \{dF\} = 0 \rightarrow \sum [K]\{dU\} = \sum \{dL\} \dots\dots\dots (2-30)$$

$$[K] = \int_v [B]^T [D] [B] dV : \text{요소에 강성 매트릭스}$$

$$\{dL\} = \int_v [B]^T [C] dT dV : \text{열에 의한 등가절점력}$$

## 2.4.2 FSW 입열식

FSW 접합 시 비소모성 회전 툴과 접합 재료의 상대적 운동에 의해 접촉면에서의 마찰열과 회전하는 Pin 주위에서 발생하는 소성변형에 의해 접합이 이루어진다. 이에 대한 FSW 접합에 의한 입열식은 다음과 같다.

### (1) 점성소실에 의한 열원

점성소실에 대한 입열량을 고려할 때 1) Shear energy가 완전히 열로 전환 된다  
 2) Shear plane을 따라서 균일하게 열이 분포 된다 라고 가정을 했다.

$$\text{Advancing side 열원} \rightarrow q_{sa} = \frac{(V_f + V_t) \times F_S}{W_a \times h_a} \dots\dots\dots (2-31)$$

$$\text{Retreating side 열원} \rightarrow q_{sr} = \frac{(V_f - V_t) \times F_S}{W_r \times h_r} \dots\dots\dots (2-32)$$

### (2) 소성변형 열원

Boothroyd 이론에 따라 Tool 표면부터 Stir Zone 경계까지 소성영역의 소성변형률은 선형으로 변한다고 가정을 했다.

$$\text{The strain rate of Advancing side} \rightarrow \dot{\epsilon}_{pa} = \frac{V_f + V_t}{W_a} \dots\dots\dots (2-33)$$

$$\text{The strain rate of Retreating side} \rightarrow \dot{\epsilon}_{pr} = \frac{V_f - V_t}{W_r} \dots\dots\dots (2-34)$$

### (3) 마찰열

계면에서 발생하는 마찰열은 툴의 솔더와 접합재료의 마찰에 의해 발생한다고 가정을 했다.

$$\text{Advancing side} \rightarrow q_{fa} = \frac{(V_f + V_t) \times F}{\text{contact length}} \dots\dots\dots (2-35)$$

$$\text{Retreating side} \rightarrow q_{fr} = \frac{(V_f - V_t) \times F}{\text{contact length}} \dots\dots\dots (2-36)$$



### 2.4.3 해석 모델 및 조건

Al6061-T6 corner 용접부의 열전도 및 열탄소성 수치해석에 사용된 모델의 크기는 실제 시험편과 동일한 skin 200mm(L) X 70mm(B) X 6mm(T), stringer 200(L) X 35mm(B) X 15mm(T)이며, 3차원으로 모델링하였다. Fig. 2.9와 같이 용접부의 Mesh size는 x, y, z축 각각 1mm 단위로 Fine mesh를 주었으며, 용접부 이외의 부분은 Spacing ratio를 이용하여 러프한 Mesh로 설정하였으며, 요소의 개수는 119400개, 절점의 개수는 139896개 이다. 실험 시 사용된 틀의 제원, 공정변수(회전속도, 이송속도, 삽입깊이)를 입력하였으며, 열전도 수치해석시 열적 경계조건은 재료 표면에 Conduction, Convection을 고려하였다. 열전도 수치해석의 온도 결과치를 이용하여 열탄소성 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 용접부의 잔류응력 및 변형 특성을 고찰하였다.

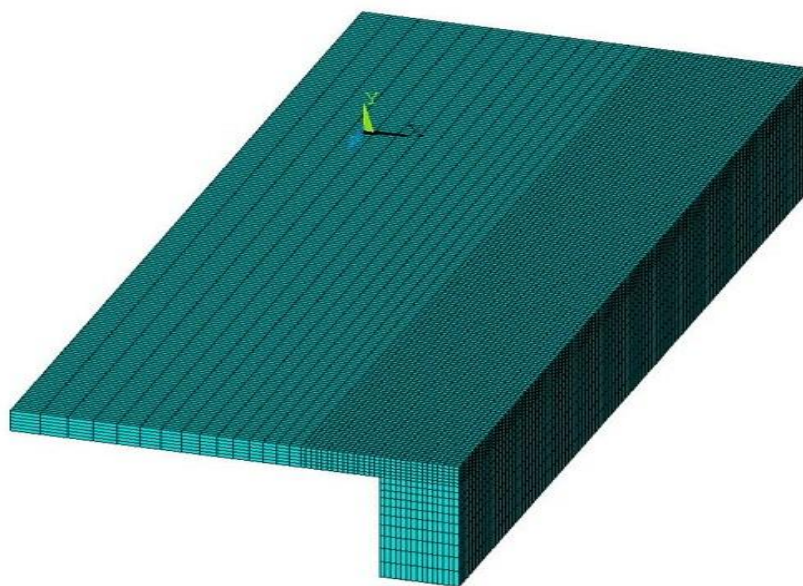


Fig. 2.9 Finite element mesh division for numerical analysis

## 3장. 연구 결과

### 3.1 툴 핀 길이(4.7mm, 5.4mm)에 따른 Al6061-T6 코너용접부의 용접 특성

#### 3.1.1 용접부의 외관 및 단면 특성

##### 가. 핀 길이 4.7mm 툴의 외관 및 단면 특성

핀 길이 4.7mm 툴 일 때, 툴의 회전속도(400~600rpm), 이송속도(0.8~0.6mm/s), 삽입깊이(0.7~1.0mm)에 따른 마찰교반용접을 실시하였다. 삽입속도 0.5mm/s, 삽입 유지시간(dwell time)은 15초, 틸팅각(tilting degree)은 3° 로 고정시켰다.

마찰교반용접에서 생기는 결함들은 크게 세 가지의 원인에 의해 생긴다고 보고 있다. 첫째, 마찰 교반용접시 사용하는 툴에 의해 입열량의 부족과 빠른 냉각 속도가 원인이 되어 결함이 발생하고, 둘째, 과도한 용접조건에 따라 툴의 솔더가 소재에 효과적으로 압착하지 못하여 용접부 윗면으로 재료의 배출(Burr)이 과도하게 이루어졌을 때 결함이 발생하며, 셋째, 최적의 툴의 핀 길이 선정이 되지 않을 경우 용접부 끝단부에 미용접부가 발생한다. [23,24] 본 연구에서는 세 번째 원인 중에서 짧은 핀 길이인 4.7mm(소재대비 약80%)에 의해 용접부 끝단부에 미용접부가 발생되어 진다고 사료된다.

Table. 3.1 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 4.7m m of pin length with varified rotation speed (travel speed 0.8mm/s, plunge depth 0.7mm)


Travel speed	Plunge depth	Rotation speed	Bead / Cross section
0.8mm/s	0.7mm	400rpm	
			
		500rpm	
			
		600rpm	
			

Table. 3.1은 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.7mm일 때, 회전속도 변화에 따른 용접부 외관 및 단면 특성을 나타낸 것이다. 모든 조건에서 용접부 하단에 미접합 Zone이 발생하였으며, 회전속도가 증가할수록 마찰열이 증가하고 소성유동이 원활함에 따라 미접합 Zone의 길이는 감소하는 것을 알 수 있었다.

Table. 3.2 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 4.7mm of pin length with varified plunge depth (travel speed 0.8mm/s, rotation speed 600rpm)


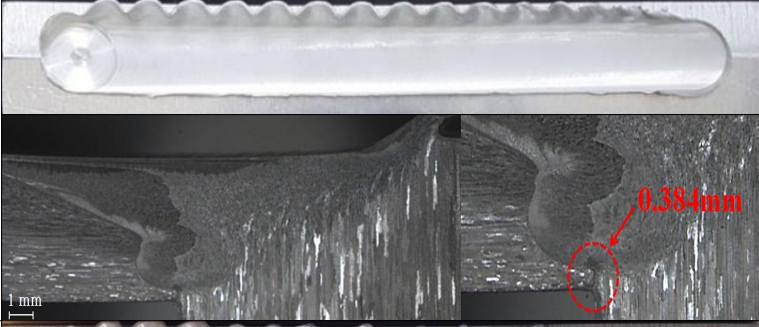
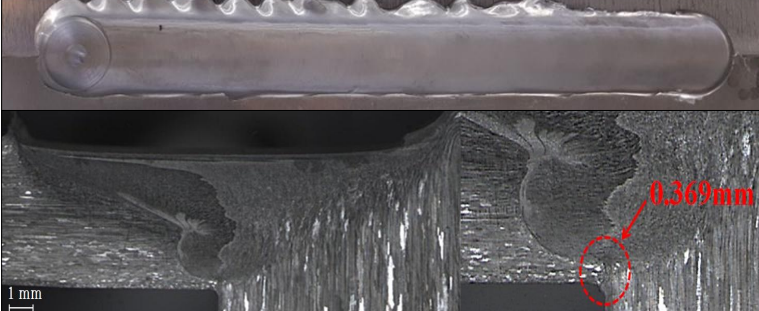
Travel speed	Rotation speed	Plunge depth	Bead / Cross section
0.8mm/s	600rpm	0.8mm	
		0.9mm	
		1.0mm	

Table. 3.2는 이송속도 0.8mm/s, 회전속도 600rpm일 때, 삽입깊이 변화에 따른 용접부 외관 및 단면 특성을 나타낸 것이다. 회전속도에 따른 조건과 동일하게 모든 조건에서 용접부 하단에 미접합 Zone이 발생하였으며, 삽입깊이가 증가할수록 가압력과 입열량이 증가함에 따라 미접합 Zone의 길이는 감소하는 것을 알 수 있었다.



Table. 3.3 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 4.7mm of pin length with varified travel speed (plunge depth 1.0mm, rotation speed 600rpm)

Plunge depth	Rotation speed	Travel speed	Bead / Cross section
1.0mm	600rpm	0.7mm/s	
		0.6mm/s	

Table. 3.3은 삽입깊이 1.0mm, 회전속도 600rpm일 때, 이송속도 변화에 따른 용접부 외관 및 단면 특성을 나타낸 것이다. 모든 조건에서 용접부 하단에 미접합 Zone이 발생하였으며, 이송속도가 감소할수록 입열량이 증가함에 따라 미접합 Zone의 길이는 감소하는 것을 알 수 있었다.

핀 길이 4.7mm 틀의 용접 특성을 고찰한 결과 전체적인 조건에서 과도한 용접조건에 따라 다량의 Burr가 생성되었으며, 소성유동이 원활이 된 것 같아 보이지만 용접부 하단에 미접합 Zone이 발생하였다. 회전속도 증가, 삽입깊이 증가, 이송속도 감소할수록 즉, 입열량이 증가할수록 미접합 Zone의 길이는 감소하는 것을 알 수 있었다.

## 나. 핀 길이 5.4mm 툴의 외관 및 단면 특성

핀 길이 5.4mm 툴 일 때, 툴의 회전속도(400~600rpm), 이송속도(0.8~0.6mm/s), 삽입깊이(0.2~0.4mm)에 따른 마찰교반용접을 실시하였다. 삽입속도 0.5mm/s, 유지시간(dwell time)은 15초, 틸팅각(tilting degree)은 3° 로 고정시켰다. 조건별로 실험을 진행한 후 접합부의 표면, 단면을 관찰하였으며, 인장시험을 실시하였다.

단면특성을 고찰한 결과 핀 길이 5.4mm(소재대비 약 90%) 툴을 사용 했을 때, 삽입깊이 0.3mm, 이송속도 0.8mm/s, 회전속도 600rpm의 조건에서 접합부(Stir Zone)의 끝단이 0.124mm 만큼 접합이 되지 않은 것을 볼 수 있었지만, 나머지의 조건에서는 핀 길이 4.7mm(소재대비 약 80%) 툴을 사용 했을 때와 달리 접합부(Stir Zone)의 끝단까지 접합이 되지 않았던 현상은 나타나지 않았다.

삽입깊이 0.4mm, 이송속도 0.8mm/s, 회전속도 600rpm의 조건에서는 과도한 삽입깊이로 인하여, 삽입깊이 0.3mm, 이송속도 0.6mm/s, 회전속도 600rpm 조건에서는 과입열로 인하여 시험편 하부에 놓인 백플레이트가 함께 붙는 현상이 발생하였으며, 비드형상은 전체적으로 건전한 형상을 보였다.

Table. 3.4 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 5.4mm of pin length with varified rotation speed (travel speed 0.8mm/s, plunge depth 0.3mm)

Travel speed	Plunge depth	Rotation speed	Bead / Cross section
0.8mm/s	0.3mm	400rpm	
		500rpm	
		600rpm	

Table. 3.4는 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm 일 때, 회전속도 변화에 따른 용접부 외관 및 단면 특성을 나타낸 것이다. 400rpm 조건에서 원활한 소성유동이 이루어지지 않아 미접합 Zone이 발생하였으며, 500rpm, 600rpm 조건에서 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

Table. 3.5 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 5.4mm of pin length with varified plunge depth (travel speed 0.8mm/s, rotation speed 600rpm)

Travel speed	Rotation speed	Plunge depth	Bead / Cross section
0.8mm/s	600rpm	0.2mm	 <p>1 mm</p> <p>Fully welded</p>
		0.4mm	 <p>1 mm</p> <p>백플레이트 표면에 영향</p>

Table. 3.5는 이송속도 0.8mm/s, 회전속도 600rpm 일 때, 삼입깊이 변화에 따른 용접부 외관 및 단면 특성을 나타낸 것이다. 두 조건 모두 미접합 Zone이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었지만, 0.4mm 조건에서 과입열로 인하여 시험편 하부에 놓인 백플레이트가 함께 붙는 현상이 발생하였다.



Table. 3.6 Bead and Cross section profile of FSW corner welded joints by 5.4mm of pin length with varified travel speed (plunge depth 0.3mm, rotation speed 600rpm)

Plunge depth	Rotation speed	Travel speed	Bead / Cross section
0.3mm	600rpm	0.7mm/s	
		0.6mm/s	

Table. 3.6은 삼입깊이 0.3mm, 회전속도 600rpm 일 때, 이송속도 변화에 따른 용접부 외관 및 단면 특성을 나타낸 것이다. 두 조건 모두 원활한 소성유동으로 인해 미접합 Zone이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었지만, 0.6mm/s 조건에서 과입열로 인하여 시험편 하부에 놓인 백플레이트가 함께 붙는 현상이 발생하였다.

### 3.1.2 인장시험 특성

본 연구는 튄의 핀 길이가 Al6061-T6 FSW corner 용접부에 미치는 영향에 대하여 고찰하기 위해 튄 핀 길이에 따른 마찰교반용접부의 인장시험을 실시하였다.

핀 길이 4.7mm(소재대비 약 80%)튄을 사용했을 때 용접부 끝단이 미접합 되었으며, 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 1.0mm에서 186MPa로 가장 높은 인장강도를 보였다. 또한, 회전속도 400rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.7mm에서 165MPa로 가장 낮은 인장강도 값을 확인하였다. 핀 길이 5.4mm(소재대비 약 90%)튄을 사용했을 때 용접부 끝단까지 접합이 되었으며, 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm에서 196MPa로 가장 높은 인장강도를 보였다. 또한, 회전속도 400rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm에서 178MPa로 가장 낮은 인장강도 값을 확인하였다.

핀 길이가 다른 튄에 따른 용접부의 인장강도 값을 Fig. 3.1에 나타내었다. 핀 길이 5.4mm의 튄을 사용했을 때, 핀 길이 4.7mm의 튄에 비해 인장강도의 값이 큰 것을 확인할 수 있었다. 핀 길이 4.7mm의 튄을 사용하였을 때, 접합부 단면 특성에서 고찰했듯이 미접합 Zone의 영향에 의해 용접부에서 파단이 되었으며, 핀 길이 5.4mm의 튄을 사용한 시험편은 열영향부에서 파단이 된 것을 확인하였으며, Table. 3.7에 나타내었다.

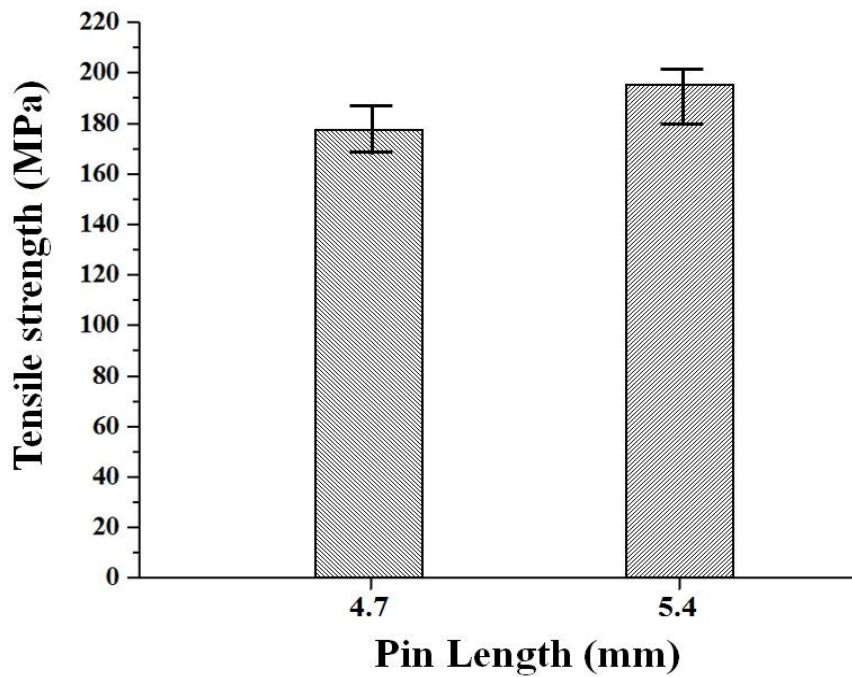


Fig. 3.1 Tensile strength of FSW corner welded joints

Table. 3.7 Fractured specimen after tensile test

Pin Length	4.7mm	5.4mm
Cross section		
Sur face		

### 3.1.3 경도 분포 특성

Fig. 3.2는 핀 길이 5.4mm 툴을 사용했을 때, 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm의 조건으로 수행한 시험편의 마찰교반용접부 경도를 측정한 것이다. 교반부(SZ)에서 약 64~69Hv, 열·기계적 영향부(TMAZ)는 약 68~71Hv, 열 영향부(HAZ)에서는 약 49~53Hv, 모재(BM)는 약 94~99Hv의 값이 측정되었다.

핀 길이 5.4mm 툴을 사용하여 마찰교반 corner 용접을 실시한 시험편에 대한 경도 분포를 살펴보면, HAZ는 마찰열에 의한 조대한 석출물에 의해 가장 낮은 경도 분포를 보이고, SZ과 TMAZ는 소성유동에 의한 교반부에서 동적 재결정에 기인한 미세한 입자가 생성되기 때문에 HAZ보다 높은 값을 확인하였다. 또한, SZ과 TMAZ는 모재대비 약 70%, HAZ는 약 50%로 경도 값이 큰 폭으로 감소하였는데, 이는 열처리소재의 열 풀림 효과가 생겨 감소되는 것으로 사료된다.[25,26]

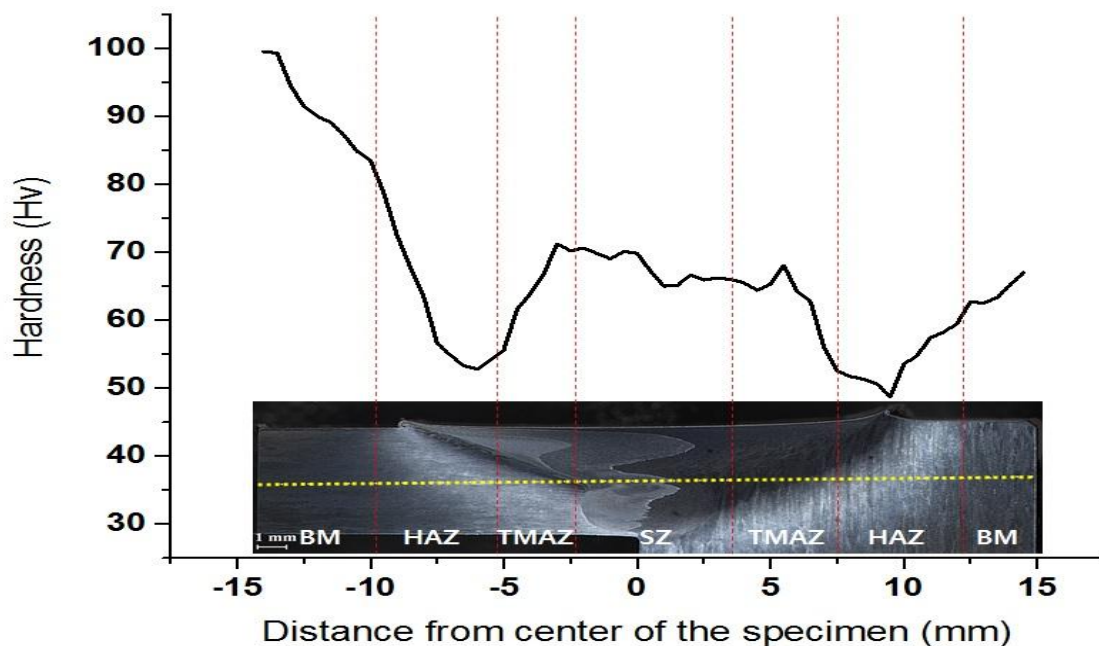


Fig. 3.2 Hardness distribution of FSW corner welded joints

### 3.1.4 미세조직 특성

Fig. 3.3은 회전속도 600rpm, 이송속도0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm의 조건으로 수행한 마찰교반용접부의 미세조직을 분석한 것이다. 교반부(SZ)에서는 동적재결정으로 인한 결정립이 미세화 되었으며, 열·기계적영향부(TMAZ)는 마찰열 발생과 소성유동으로 인한 열, 기계적 영향으로 미세화가 이루어졌으며, 열영향부(HAZ)는 상대적으로 열에 의해 SZ이나 TMAZ 보다 결정립이 조대화 된 것을 볼 수 있었다.[26]

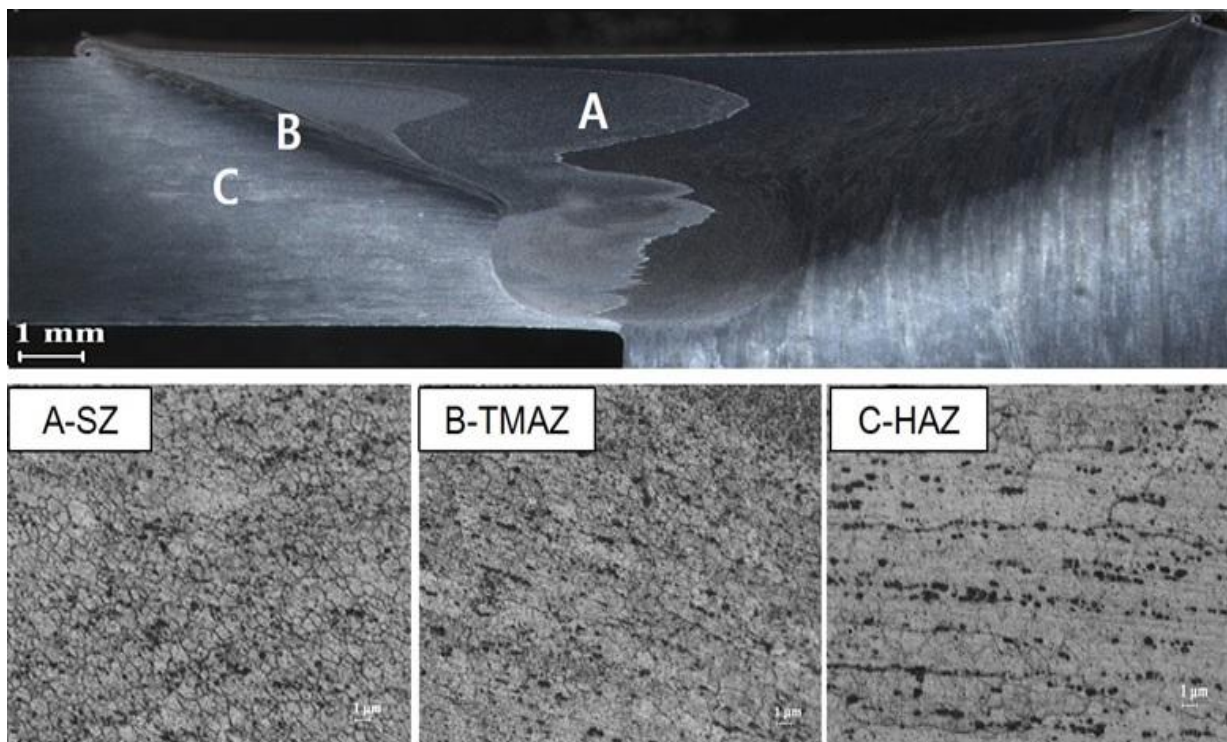


Fig. 3.3 Cross section of FSW corner welded joints



### 3.1.5 열전대를 이용한 용접부 온도특성

열전도 수치해석 결과에 대한 타당성을 검토하기 위하여 Thermo couple을 이용하여 수치해석 값과 실측값을 비교 하였다. Fig. 3.4는 인장강도가 가장 높은 값 (196MPa)이 나온 회전속도 600rpm, 이송속도0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm 조건의 용접 시험편에 대한 온도 측정을 진행한 온도이력이다. 용접 진행 시작지점(TC4)에서 275.6℃로 가장 낮은 온도를 확인 할 수 있었으며, 용접 진행 끝 지점(TC3)에서 418.4℃의 최대 온도를 확인 할 수 있었다.

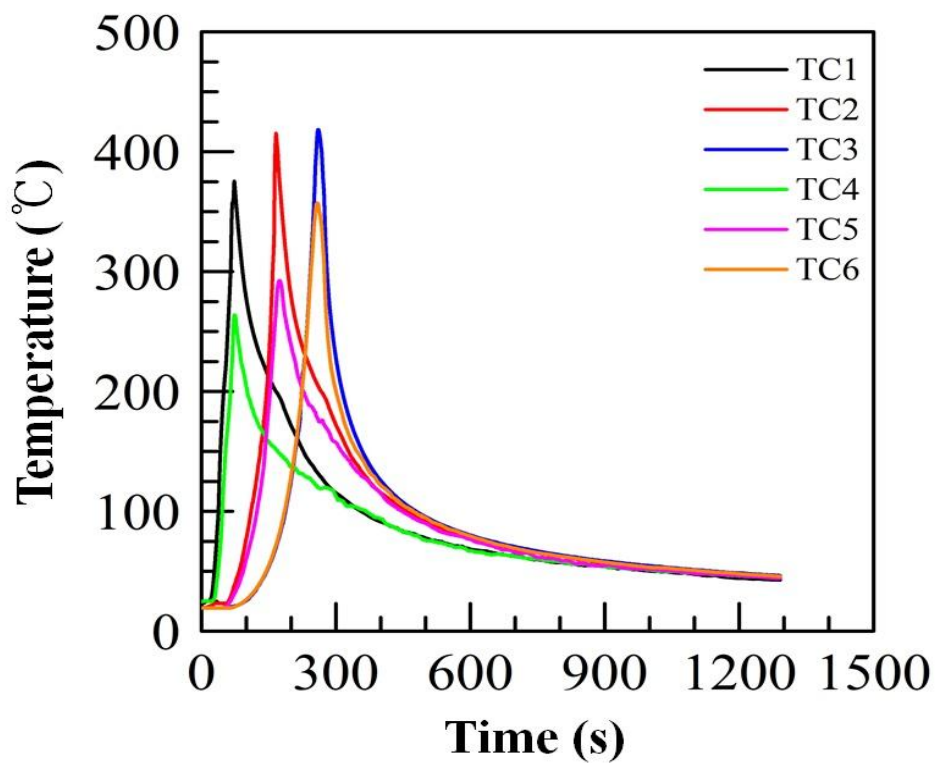


Fig. 3.4 Temperature history of FSW corner welded joints

## 3.2 Al6061-T6 코너용접부의 열적 및 잔류응력 수치해석

### 3.2.1 온도분포 특성

Al6061-T6 FSW corner 용접부의 3차원 비정상 열전도 수치해석 결과로 용접부의 온도분포를 나타내었다. 용접조건은 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm에 대해서 해석을 실시하였다. 최고온도는 약 763K으로 확인되었으며, Fig. 3.5에 용접부에 대한 온도분포를 나타내었다. 또한, Fig. 3.6에 시간에 따른 온도이력을 나타내었으며, 열전대를 사용하여 측정한 실측 온도 값과 수치해석 결과 온도 값을 HAZ 지점에서 비교한 결과 열전도 수치해석 값은 699.7K, 실측 온도 값은 691.4K로 온도 특성이 정성적 및 정량적으로 일치함을 확인 할 수 있었다.

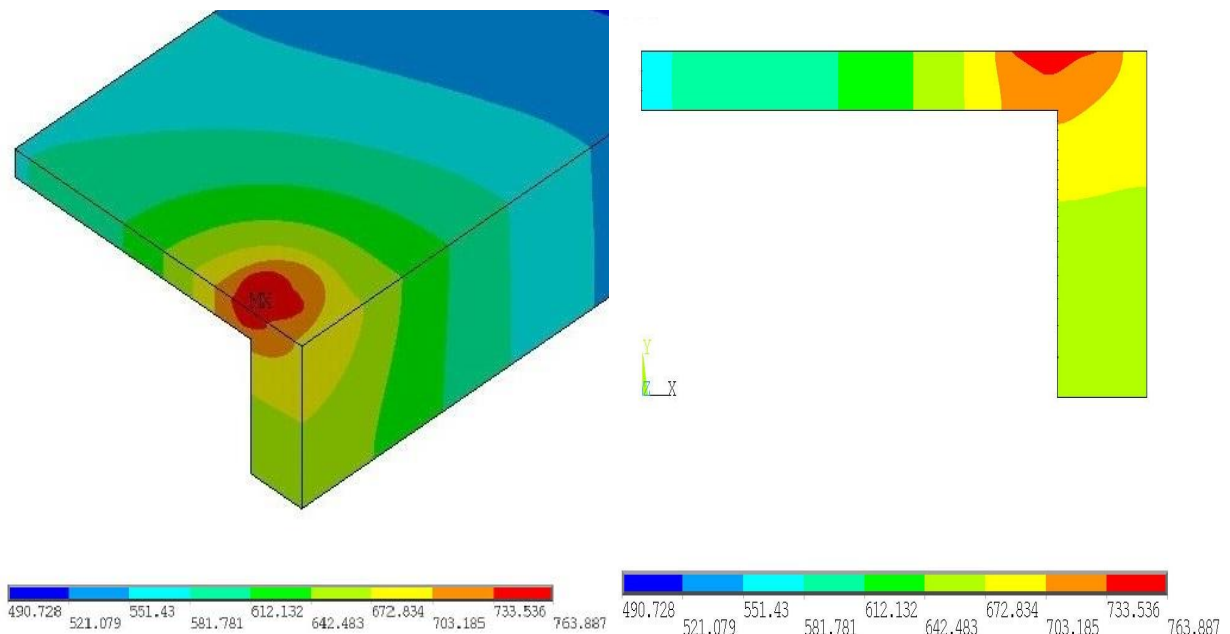


Fig. 3.5 Temperature fields of FSW corner welded joints

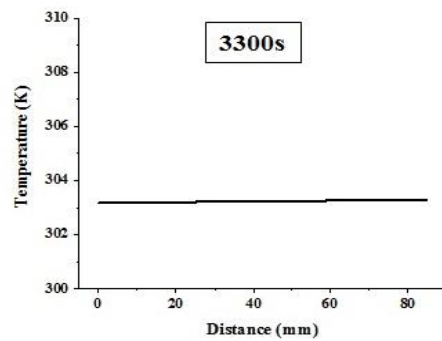
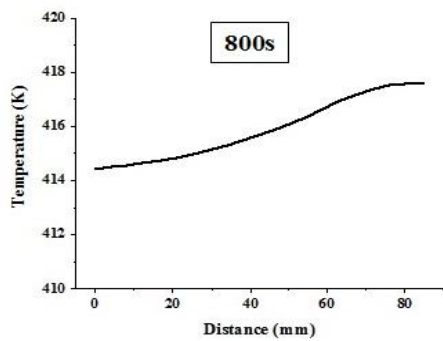
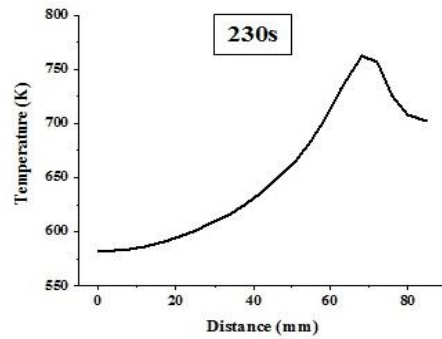
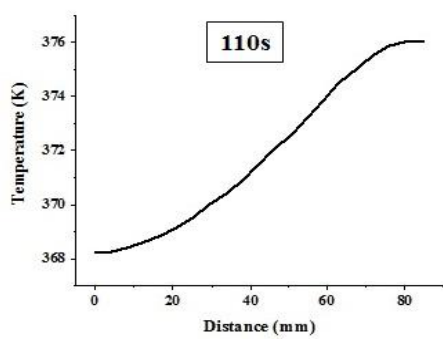
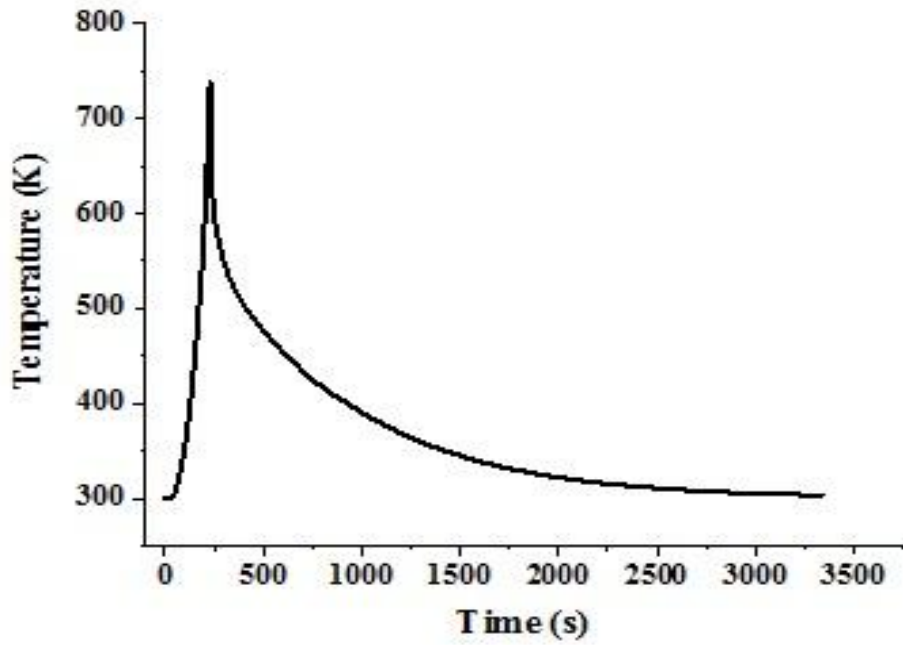


Fig. 3.6 Thermal history of FSW corner welded joints



### 3.2.2 잔류응력 및 변형을 분포 특성

#### 가. Al6061-T6 FSW 코너용접부의 잔류응력 특성

Fig. 3.7은 Al6061-T6 FSW corner 용접부의 잔류응력의 상당응력성분 분포도이다. 잔류응력은 스칼라량만을 취하는 Von-mises를 사용하여 그 특성을 고찰하였다. 용접조건은 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm에 대해서 잔류응력해석을 실시하였으며, 최대 잔류응력은 231MPa로 항복강도의 92%가 발생하였다. 최대 잔류응력은 TMAZ 및 HAZ에서 발생하였으며, 인장성분을 나타내었고, HAZ에서 모재로 갈수록 점차감소 하다가 압축성분을 나타냄을 확인할 수 있었다. 용접부의 종방향, 횡방향 잔류응력 분포도를 Fig. 3.8에 나타내었다.

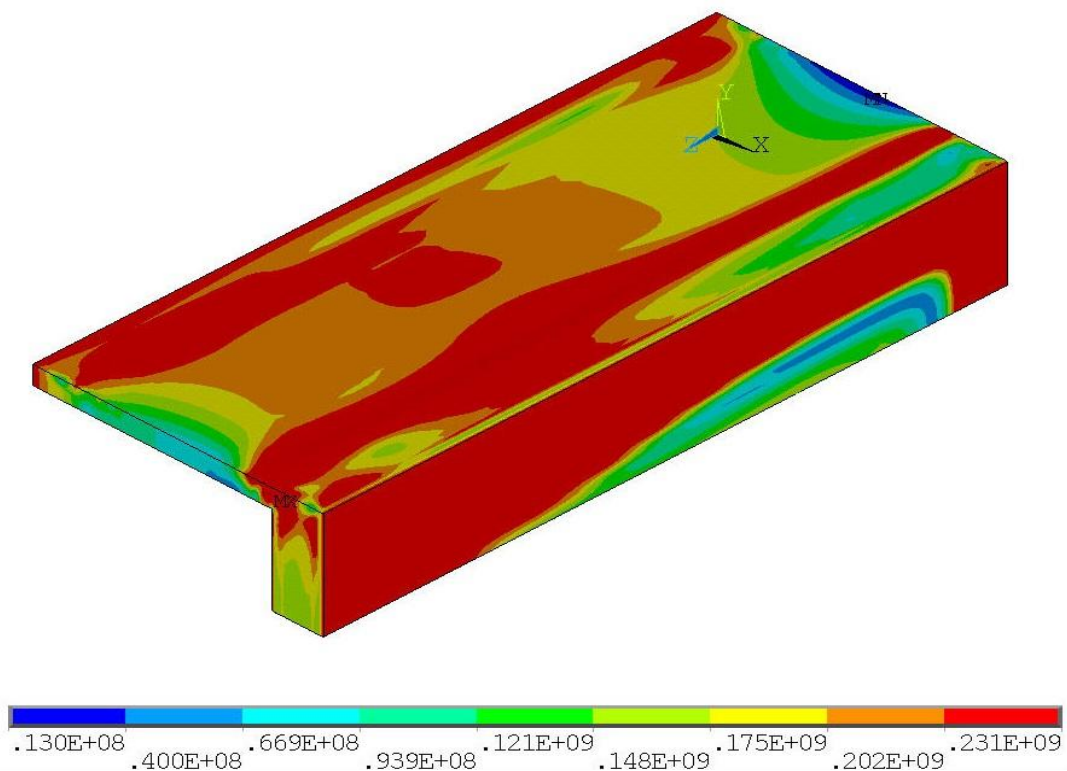
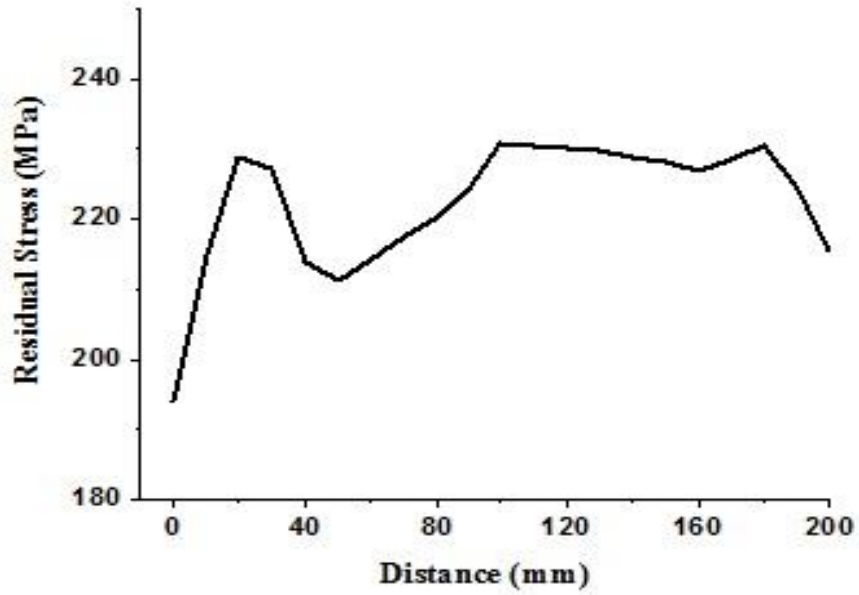
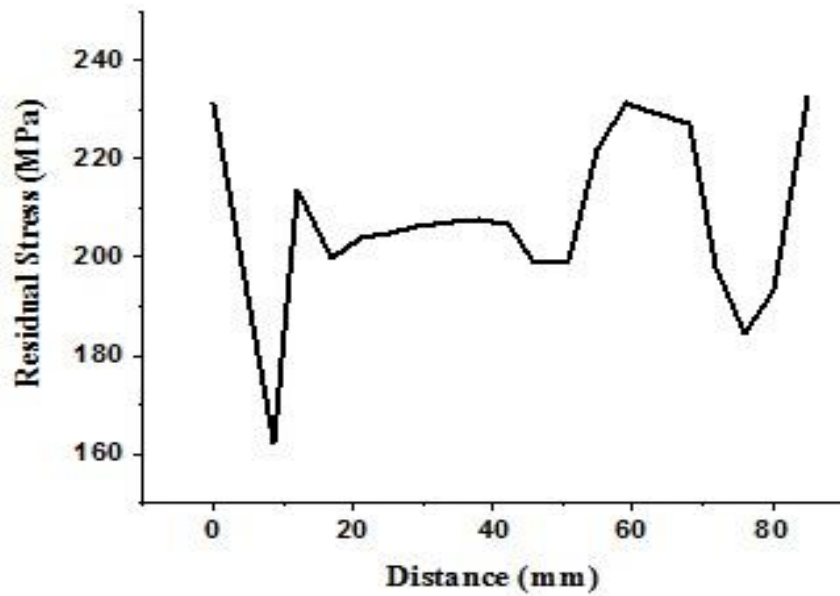


Fig. 3.7 Residual stress fields of FSW corner welded joints



(a) 종방향



(b) 횡방향

Fig. 3.8 Residual stress distribution of FSW corner welded joints

## 나. Al6061-T6 코너용접부 변형률 특성

Al6061-T6 FSW corner 용접부의 상당소성변형률의 분포를 Fig. 3.9에 나타내었으며, 용접부의 종방향, 횡방향 변형률 분포도를 Fig. 3.10에 나타냈다. 용접조건은 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm에 대해서 변형률 분포 해석을 실시하였으며, 최대 변형률은 0.0558이고, 최대 변형률의 발생 위치는 틀의 삽입 위치에서 약 2mm 떨어진 위치에서 발생하였다.

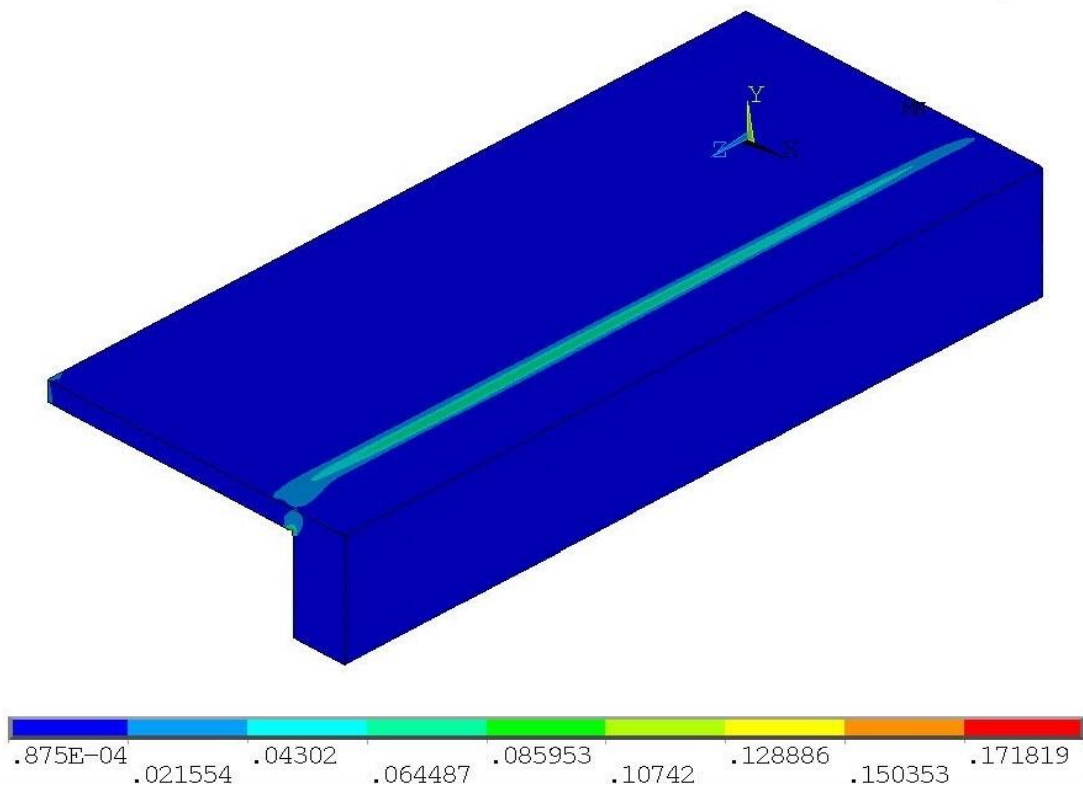
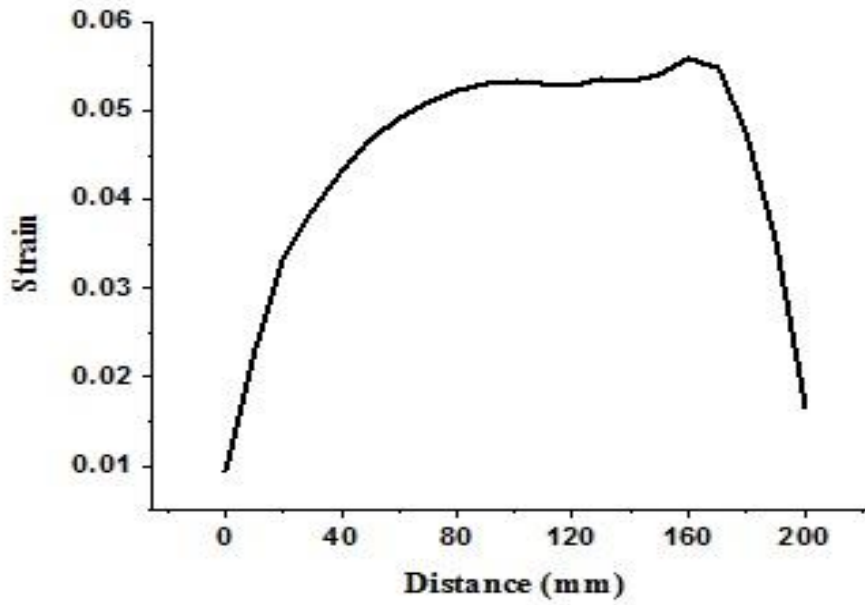
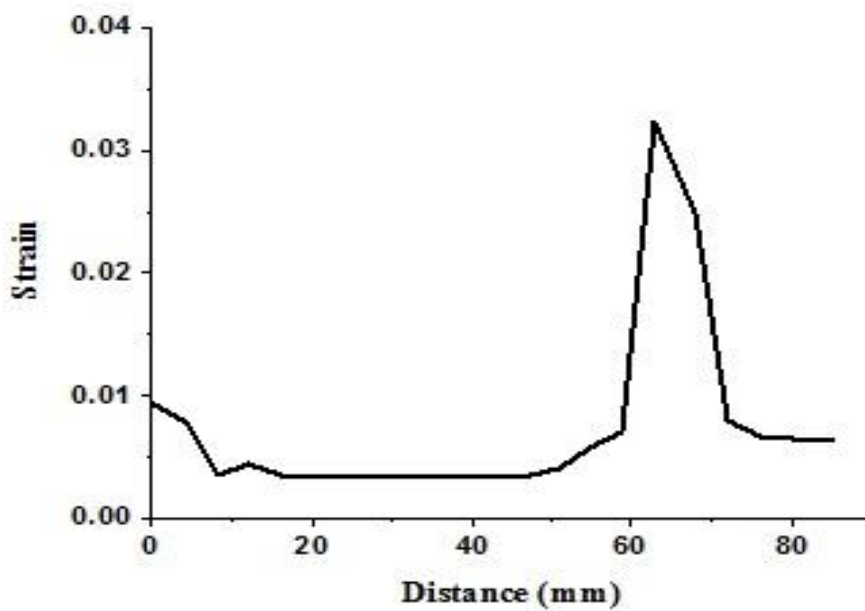


Fig. 3.9 Strain fields of FSW corner welded joints



(a) 종방향



(b) 횡방향

Fig. 3.10 Strain distribution of FSW corner welded joints

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 마찰교반용접을 이용하여 Al6061-T6 합금의 corner 용접시 툴 핀 길이에 따른 용접성을 고찰하였다. 용접조건(툴 핀 길이, 툴의 회전속도, 이송속도, 삽입깊이)에 따른 기계적, 금속학적 특성을 평가하였으며, 수치해석을 통해 Al6061-T6 corner 용접부의 열적, 역학적 특성을 고찰하였다.

- 1) 핀 길이 4.7mm (소재대비 약 80%) 툴을 사용하여 용접공정변수 (Tool 회전속도, 이송속도, 삽입깊이)를 변화시켜 실험한 결과 용접부 끝단이 접합되지 않았으며, 입열량이 증가할수록 미접합 Zone의 길이는 감소하였다.
- 2) 핀 길이 5.4mm (소재대비 약 90%) 툴은 회전속도 500rpm 이상, 이송속도 0.7~0.8mm/s, 삽입깊이 0.2~0.3mm조건에서 용접부의 미접합Zone 없이 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.
- 3) 인장강도의 경우, 핀 길이 4.7mm(소재대비 약 80%)툴을 사용했을 때, 186MPa로 가장 높은 인장강도가 나왔으며, 미접합 Zone의 영향에 의해 계면에서 파단이 되었으며 미접합 Zone의 길이가 짧아질수록 인장강도가 증가하였다. 핀 길이 5.4mm(소재대비 약 90%)툴을 사용했을 때, 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm에서 196MPa로 가장 높은 인장강도가 나왔으며 열영향부에서 파단이 된 것을 확인하였다.
- 4) 경도분포특성 결과 회전속도 600rpm, 이송속도 0.8mm/s, 삽입깊이 0.3mm 조건의 시험편에서 BM 99Hv, TMAZ 71Hv, HAZ 53Hv, SZ 69Hv의 결과로 접합부는 모재대비 70%정도로 경도 값이 큰 폭으로 감소하였는데, 이는 열처리소재의 열풀림 효과가 생겨 감소되는 것으로 사료된다.

- 5) 용접부의 열전도 수치해석결과 최대온도 763K이며, 수치해석 결과에 대한 타당성을 검토하기 위해 열전대를 사용하여 측정한 실측값과 수치해석 결과 온도 값을 HAZ 지점에서 비교한 결과 각각 최대온도 691K, 699K의 결과로 열전도 수치해석의 타당성을 검토 할 수 있었다.
  
- 6) Al6061-T6 FSW corner 용접부의 열탄소성 수치해석 결과로 얻어진 용접 잔류응력과 변형률은 최대 잔류응력은 231MPa, 최대 변형률은 0.05586로 잔류응력은 항복강도의 92%에 해당된다.

## 참고문헌

- [1] H. S. Bang, H. S. Bang, H. S. Kim, J. H. Kim, I. H. Oh and C. S. Ro, A Study on the Weldability and Mechanical Characteristics of Dissimilar Materials Butt Joints by Laser Assisted Friction Stir Welding, Journal of KWJS, 2010, 28-6
- [2] H. S. Bang, H. S. Bang and G. H. Jeon, Recent Studies on Friction Stir Welding Techniques for Dissimilar Materials, Journal of KWJS, 2011, 29-5
- [3] H. W. Kim, Y. S. Lee, M. S. Kim, C. Y. Lim, 자동차 차체 경량화 및 차체용 알루미늄 합금판재의 개발동향, 2017, 27-4
- [4] W.S.Miller, L.Zhuang, J.Bottema, A.J.Wittebrood, P.De Smet, A.Haszler and A. Vieregge, “Recent development in aluminum alloys for the automotive industry” , Mater.Sci.Eng., A208 (2000), pp.37-49
- [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] R.S. Mishra, P.S.D.N. Kumar, Friction Stir Welding and Processing, Springer(ISBN 978-3-319-07042-1), 2014, 1-11
- [7] J.Hirsch and H.I.Laukli, “Aluminum in innovative light-weight car design” (Paper presented at the 12th international conference on aluminum alloys, Yokohama, Japan, 5 September 2010), pp.46-53
- [8] H. C. You and H. T. Kim, Recent technological tendency of joining for light aluminium alloy, Journal of KWJS, 2011, 29-3, pp260-269
- [9] S. B. Choi, S. W. Kim and S. G. Jung, 자동차 경량화 기술동향과 개발 전략, 한국과학기술정보연구원, 2013
- [10] Y. P. Kim, C. H. Kim, Y. G. Kim and S. M. Joo, Trends of Technology Development of Friction Stir Welding Machine, Journal of Welding and Joining, 2016, 1-5

- [11] 중소기업 기술로드맵 2017-2019(Technology Roadmap for SME), 중소기업청
- [12] Friction Stir Welding Technical Handbook
- [13] 마찰교반용접(Friction Stir Welding), 한국과학기술정보연구원
- [14] H. C. Yoo, 구조용 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술, 한국과학기술정보연구원
- [15] J. H. Lee, Aluminum & Aluminum Based-Alloy, Total Information Network Services
- [16] SHIGEMATSU, Y.-J. KWON, K. SUZUKI, T. IMAI, N. SAITO, Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS 22, 2003, 353- 356
- [17] Prakash Kumar Sahu<sup>1</sup>, Sukhomay Pal, EFFECT OF SHOULDER DIAMETER AND PLUNGING DEPTH ON MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL HISTORY OF FRICTION STIR WELDED MAGNESIUM ALLOY, 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, 2014
- [18] 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, 362-373
- [19] R&B : ASTM E407~99 Standard Practice for Micro etching Metals and Alloys, [www.randb.co.kr](http://www.randb.co.kr)
- [20] H Liu, H Fujii, M Maeda, K Nogi, Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloy, Journal of materials science letters, 2003
- [21] K. H. Kim, G. C. Zheng, H. S. Bang and H. S. Bang, Weldability of Thin Ferritic Stainless Steel by FSW Using Tool without Pin, Journal of KWJS, 2013
- [22] 房漢瑞, 金裕哲: “有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元非定常熱解析”, 大韓熔接學會誌, 1990, 9-2, 37~43



- [23] 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
- [24] Jinwen Qian, Jinglong Li, Fu Sun, Jiangtao Xiong, Fusheng Zhang and Xin Lin, An analytical model to optimize rotation speed and travel speed of friction stir welding for defect-free joints, Scripta Materialia, 2013, 175-178
- [25] H.J. Liu, J.C. Hou and H. Guo, Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, Materials and Design, 2013, 872-878
- [26] S. RAJAKUMAR, C. MURALIDHARAN and V. BALASUBRAMANIAN, Establishing empirical relationships to predict grain size and tensile strength of friction stir welded AA 6061-T6 aluminium alloy joints, Trans. Nonferrous Met. Soc, 2010, 1863-1872