



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](#)

2019년 2월

석사학위 논문

이(異)두께 알루미늄 합금  
A15052 마찰교반용접 시 튜의  
두께 방향 틸팅각에 따른  
용접성 및 성형성 평가

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

유 승 지

이(異)두께 알루미늄 합금  
A15052 마찰교반용접 시 튜의  
두께 방향 틸팅각에 따른  
용접성 및 성형성 평가

Evaluation of Weldability and Formability of  
A15052 FSW Welded Joints with Different Thick  
sheets

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

유 승 지

이(異)두께 알루미늄 합금  
A15052 마찰교반용접 시 튜의  
두께 방향 틸팅각에 따른  
용접성 및 성형성 평가

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

유 승 지

## 유승지의 석사학위논문을 인준함

|     |       |      |                |
|-----|-------|------|----------------|
| 위원장 | 조선대학교 | 특임교수 | <u>방한서 (인)</u> |
| 위 원 | 조선대학교 | 교수   | <u>방희선 (인)</u> |
| 위 원 | 조선대학교 | 조교수  | <u>송국현 (인)</u> |

2018년 11월

조선대학교 대학원

## CONTENTS

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| List of Figures .....                 | IV  |
| List of Tables .....                  | VI  |
| Abstract .....                        | VII |
| <br>                                  |     |
| 1장. 서론 .....                          | 1   |
| 1.1 연구배경 및 목적 .....                   | 1   |
| 1.1.1 연구배경 및 필요성 .....                | 1   |
| 1.1.2 연구목적 .....                      | 4   |
| <br>                                  |     |
| 1.2 국내 외 기술 동향 .....                  | 6   |
| <br>                                  |     |
| 1.3 마찰교반용접(FSW) 및 알루미늄 합금 소재 특성 ..... | 7   |
| 1.3.1 마찰교반용접의 원리 및 특징 .....           | 7   |
| 1.3.2 알루미늄 합금 소재의 특징 .....            | 9   |

|   |    |
|---|----|
| 2장 . 연구 방법 .....                              | 12 |
| 2.1 연구 방법 .....                               | 12 |
| 2.2 실험 방법 및 조건 .....                          | 13 |
| 2.2.1 사용 소재 및 시험편 형상 .....                    | 13 |
| 2.2.2 용접 조건 및 사용 툴(Tool) .....                | 15 |
| 2.3 마찰교반용접부의 용접성 및 성형성 평가 .....               | 19 |
| 2.3.1 마크로 및 미세조직 .....                        | 19 |
| 2.3.2 인장 및 경도시험 .....                         | 19 |
| 2.3.3 성형성 시험 .....                            | 22 |
| 2.3.4 온도 측정 시험 .....                          | 23 |
| 2.4 수치해석에 의한 마찰교반용접부의 열적 및 역학적<br>특성 평가 ..... | 24 |
| 2.4.1 유한요소법에 의한 열전도 이론 .....                  | 24 |
| 2.4.2 유한요소법에 의한 열탄소성 이론 .....                 | 27 |
| 2.4.3 마찰교반용접 입열 방정식 .....                     | 30 |
| 2.4.4 해석모델 및 조건 .....                         | 31 |

|  |    |
|--|----|
| 3장 . 연구 결과 .....                           | 33 |
| 3.1 마찰교반용접부의 용접성 및 성형성 평가 .....            | 33 |
| 3.1.1 마크로 및 미세조직 .....                     | 33 |
| 3.1.2 인장강도 및 경도 분포 .....                   | 39 |
| 3.1.3 성형성 .....                            | 43 |
| 3.2 수치해석에 의한 마찰교반용접부의 열적 및 역학적 특성<br>..... | 45 |
| 3.2.1 온도 분포 .....                          | 45 |
| 3.2.2 잔류응력 및 소성변형을 .....                   | 53 |
| <br>                                       |    |
| 4장 . 결론 .....                              | 58 |
| 참고문헌 .....                                 | 60 |



## List of Figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1.1 CO <sub>2</sub> emissions performance and proposed passenger vehicle standards .....             | 3  |
| Fig. 1.2 Effect of vehicle weight reduction .....   | 3  |
| Fig. 1.3 Shift from steel to aluminium in automobile industry .....                                       | 5  |
| Fig. 1.4 Application of tailor welded blank in a car body .....   | 5  |
| Fig. 1.5 Schematic diagram of friction stir welding .....   | 9  |
| Fig. 1.6 Cross-section of friction stir welding .....   | 9  |
| Fig. 2.1 Configuration of Al5052 specimen for FSW .....   | 14 |
| Fig. 2.2 Equipment of friction stir welding .....   | 16 |
| Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding .....  | 16 |
| Fig. 2.4 Jig used for friction stir welding of Al5052 with different thick sheets .....                   | 18 |
| Fig. 2.5 Universal testing machine .....  | 20 |
| Fig. 2.6 Dimension of tensile test specimen .....   | 20 |
| Fig. 2.7 Vickers hardness test equipment .....  | 21 |
| Fig. 2.8 Erichsen cupping test equipment .....  | 22 |
| Fig. 2.9 Thermo-couple positions on workpiece .....   | 23 |
| Fig. 2.10 FE model of Al5052 FSW welded joints with different thick sheets for numerical analysis .....   | 32 |
| Fig. 2.11 Mesh division for numerical analysis .....  | 32 |
| Fig. 3.1 Effective sheet thickness with y-axis tilting angle .....  | 37 |
| Fig. 3.2 Microstructure of FSW welded joints at y-axis tilting angle 1° (a:SZ, b:TMAZ, c:HAZ, d:BM) ..... | 38 |
| Fig. 3.3 Tensile strength of FSW welded joints with y-axis tilting angle .....                            | 41 |
| Fig. 3.4 Fractured specimen at y-axis tilting angle 1° .....  | 41 |
| Fig. 3.5 Hardness distribution of FSW welded joints .....   | 42 |

Fig. 3.6 Erichsen cupping test of FSW welded joints with y-axis tilting angle ..... 44  
 Fig. 3.7 Fractured specimen of y-axis tilting angle 1° after Erichsen cupping test ..... 44  
 Fig. 3.8 Temperature fields of FSW welded joints with y-axis tilting angle at welding time 2sec ..... 47  
 Fig. 3.9 Temperature distribution of FSW welded joints in y-axis tilting angle 0° with time ..... 48  
 Fig. 3.10 Temperature distribution of FSW welded joints in y-axis tilting angle 1° with time ..... 48  
 Fig. 3.11 Temperature histories (SZ, TMAZ, HAZ, BM) of FSW welded joints at y-axis tilting angle 0° ..... 49  
 Fig. 3.12 Temperature histories (SZ, TMAZ, HAZ, BM) of FSW welded joints at y-axis tilting angle 1° ..... 50  
 Fig. 3.13 Temperature histories in middle position of FSW welded joints at y-axis tilting angle 0° ..... 51  
 Fig. 3.14 Temperature histories in middle position of FSW welded joints at y-axis tilting angle 1° ..... 52  
 Fig. 3.15 Residual stress fields of FSW welded joints with y-axis tilting angle ..... 54  
 Fig. 3.16 Residual stress distribution in middle position of FSW welded joints with y-axis tilting angle ..... 55  
 Fig. 3.17 Plastic strain fields of FSW welded joints with y-axis tilting angle ..... 56  
 Fig. 3.18 Strain distribution in middle position of FSW welded joints with y-axis tilting angle ..... 57

## List of Tables

|   |    |
|---|----|
| Table. 1.1 Characteristics of aluminum alloy .....                                  | 11 |
| Table. 2.1 Chemical compositions of Al5052 .....                                    | 13 |
| Table. 2.2 Mechanical properties of Al5052 .....                                    | 13 |
| Table. 2.3 Specification of Friction stir welding equipment .....                   | 17 |
| Table. 2.4 Welding conditions for friction stir welding .....                       | 17 |
| Table. 2.5 Configuration of tensile test specimen .....                             | 21 |
| Table. 2.6 Material properties of Al5052 .....                                      | 31 |
| Table. 3.1 Bead appearances of FSW welded joints with y-axis tilting angle<br>..... | 35 |
| Table. 3.2 Cross sections of FSW welded joints with y-axis tilting angle<br>.....   | 36 |

## ABSTRACT

### Evaluation of Weldability and Formability of Al5052 FSW Welded Joints with Different Thick sheets

Yoo Seung-Ji

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

Department of Welding and Joining Science  
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, the need for eco-friendly vehicle is revealed due to environmental and fuel-efficiency regulations. However, eco-friendly vehicle is 200~300kg more heavier than existing vehicle, so light-weight is essential. Currently, in order to realizw vehicle weight reduction, lightweight materials such as aluminium alloys, magnesum alloys and CFRP are applied to the vehicle body. In addition, the Tailor Welded Blanks(TWB) process of aluminium alloys is increasingly applied in the automotive industries because of its high strength to weight ratio, excellent corrosion resistance and crash worthiness. The welds produced by FSW have high strength and formability because they can obtain a sound joint at a relatively low temperature as compared with conventional fusion welding.

This study has the purpose to investigate the applicability of different thickness aluminium alloys by friction stir welding to vehicle body and to secure reliability. 2.5t(Retreating side) and 1.5t(Advancing side) aluminium

alloy workpiece is used in this study. The mechanical and metallurgical characteristics of the welds by workpiece tilting angle are studied.

As a result of experimental, the highest tensile strength around 225 MPa (fractured of base metal) is achieved at a Y-axis tilting angle  $1^\circ$ . But, workpiece is non welded up to bottom surface at Y-axis tilting angle  $0^\circ$ .

As a result of Numerical analysis, a wider thermal distribution was shown at Y-axis tilting angle  $1^\circ$ , because the heat input was more given that the thickness difference was reduced.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

### 1.1.1 연구배경

최근 자동차 산업에서 화석 연료의 고갈 및 기후변화협약과 같은 환경규제의 영향으로 친환경 자동차의 필요성이 대두되고 있다. 친환경 자동차의 경우 전기차, 수소연료전지차, 하이브리드와 같은 차량이 기존에 사용되고 있는 내연기관 차량을 대체할 것으로 예상되고 있다. 그러나 전기차, 수소연료전지차, 하이브리드 등의 친환경 자동차는 기존의 엔진을 베이스로 한 자동차보다 200~300kg의 무게가 증가하여 배터리 효율이 낮아짐에 따라 주행거리나 주행속도 등의 개선사항이 요구되고 있다. 또한 친환경 자동차는 안전장치, 주행의 편의성을 향상시키기 위해 장착되는 부품의 수가 증가하여 차량의 무게가 증가함에 따라 경량화 기술이 더욱 필요한 실정이다.[1]

유럽, 일본, 미국 등 자동차 기술 선진국에서는 차량 경량화를 실현하기 위해 차체나 부품의 알루미늄 합금 적용 비율을 점차 확대시키고 있으며 알루미늄 합금에 대해 효율적이고 신뢰성이 높은 접합 기술 개발에 집중하고 있다. 자동차 제품 개발 및 생산기술의 발달에 따른 차량 경량화를 위한 기술 개발이 다양하게 이루어지고 있으며, 용접·접합 기술에서 가장 괄목할만한 부분은 경량 소재에 의한 차량 경량화이다. TRB (Tailor Rolled Blank)나 TWB (Tailor Welded Blank)처럼 판재의 두께를 최적화 시켜 적용하는 방법도 재질 자체를 바꾸는 것이 아니기 때문에 상대적으로 저비용으로 차량의 차체 경량화를 가능케 할 수 있다. 비용에 상관없이 차체 경량화 효과를 극대화시키기 위해 알루미늄 합금이나 마그네슘 합금, CFRP(Carbon Fiber Reinforce Plastic)와 같은 새로운 경량소재를 차체에 적용시

켜 제작하고 있다.[2]

알루미늄 합금은 비강도가 우수하고 내식성이 높으며 경량금속소재 중 비교적 저렴하여 철강 다음으로 가장 많이 사용되고 있다. 특히 자동차 차체 경량화 소재로서 많이 사용되고 있으며, 과거에는 고급대형차 위주로 적용되었으나, 현재는 중소형 차량에도 사용되고 있는 보편적인 소재이다. 그러나 자동차 차체에 사용되는 알루미늄 합금의 경우에는 높은 열전도도로 인해 일반 용융용접으로는 입열량을 정확히 제어하기 어려워 용락이나 용입불량 등의 결함이 생기기 쉬운 특성이 있다. 따라서 알루미늄 합금의 결함이나 변형을 최소화하고 건전한 용접부 확보를 위하여 고상용접 중 하나인 마찰교반용접(Friction Stir Welding)을 적용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 두께가 서로 상이한 알루미늄 합금 A15052 마찰교반용접 시 틀의 두께 방향 틸팅각 변화에 따른 용접성 및 성형 특성에 대한 연구를 하고자 하였다.

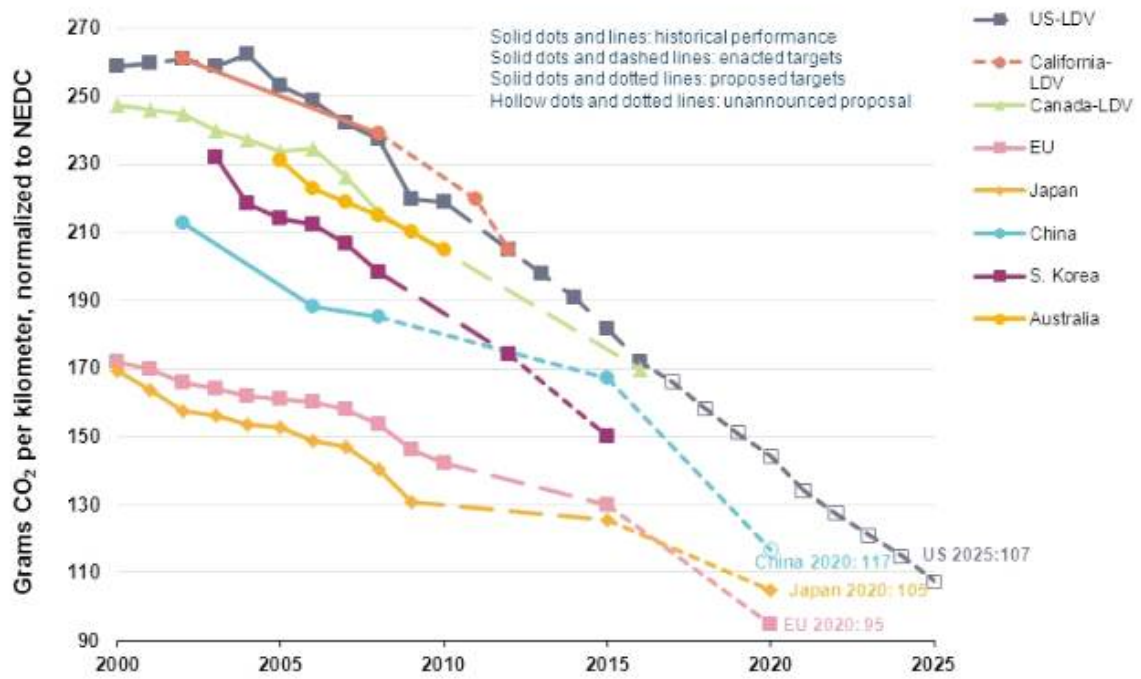


Fig. 1.1 CO<sub>2</sub> emissions performance and proposed passenger vehicle standards

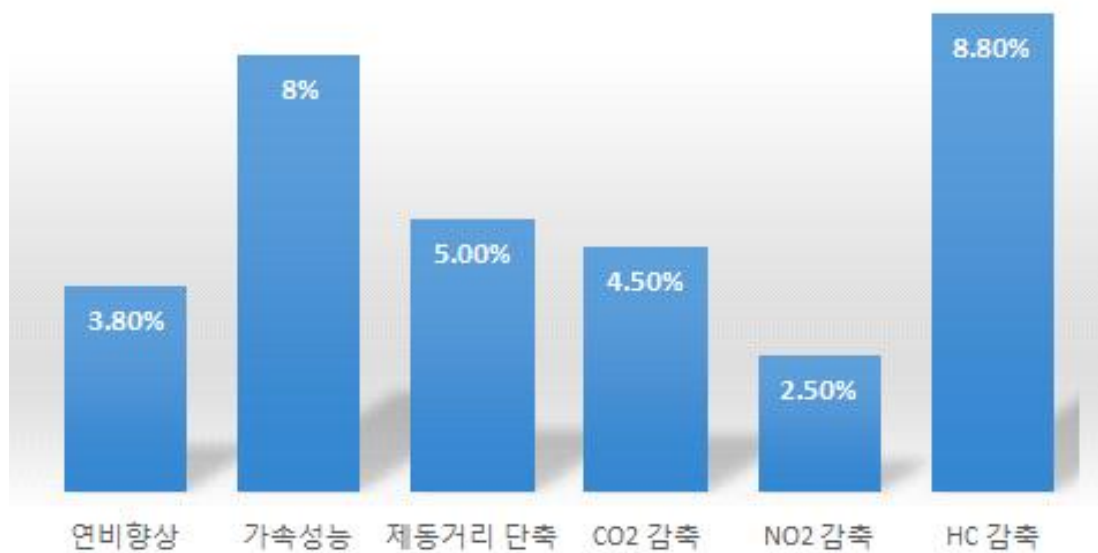


Fig. 1.2 Effect of vehicle weight reduction



## 1.1.2 연구목적

화석 연료의 고갈 및 기후변화협약과 같은 환경규제가 강화되고 있어 자동차 산업분야에서도 그에 대한 기술 개발이 필수적으로 이루어지고 있다. 전기차, 수소 연료전지차, 하이브리드 등의 친환경 자동차에는 안전장치나 주행의 편의성을 위한 부가적인 부품들이 장착되므로 자동차 중량은 기존 자동차들에 비해 증가할 수밖에 없으므로 알루미늄 합금 등의 경량 소재의 적용은 필수적이다. 더불어 경량 소재가 적용되기 위해서는 재료의 성형 및 가공 기술과 용접 및 접합 기술의 발전이 필요한 실정이다. 알루미늄 합금은 철강 소재에 비해 다소 가격이 높고 용접과 성형이 어렵다는 단점에도 불구하고 경량 효과가 높기 때문에 자동차 차체와 부품에서의 적용 비율이 점차 상승하고 있다. 현재 자동차에서 알루미늄 합금은 엔진 블록, 서브프레임, 트렁크 리드, 후드, 휠 등에 적용하여 자동차 경량화를 진행하고 있다.[3]

차체 경량화를 위해 기존에 사용되고 있던 철강 소재 대신 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, CFRP(Carbon Fiber Reinforce Plastic) 등을 적용하기 위해서는 그 부분에 필요한 강도만큼 판재의 두께를 두껍게 하거나, 이종 소재의 용접이나 접합이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 TWB(Tailor Welded Blank)라 불리는 맞춤형재단용접이 개발되었다. 두께, 강도, 재질이 다른 두 개 혹은 그 이상의 판재를 필요한 부분에 배치하여 용접한 후 프레스 성형하여 제작하는 기술로써 무게 감소 및 부분적인 고강도화가 가능함으로 자동차 경량화에 적합한 공법이다. 현재 주로 차량용 강판에만 TWB 공법이 적용되고 있으나 경량 소재 적용 및 이종 소재 접합의 증가에 따라 점차적으로 확대될 전망이다.[4~6]

현재 이(異)두께 알루미늄 합금의 마찰교반용접에 대한 연구가 많이 이루어지지 않고 있으므로 본 연구에서는 마찰교반용접을 이용한 이(異)두께 알루미늄 합금의 기계적 특성 고찰 및 성형성을 평가하고 아울러 수치해석을 통해 열적 및 역학적 특성 평가를 통해 용접 특성을 고찰하고자 하였다.

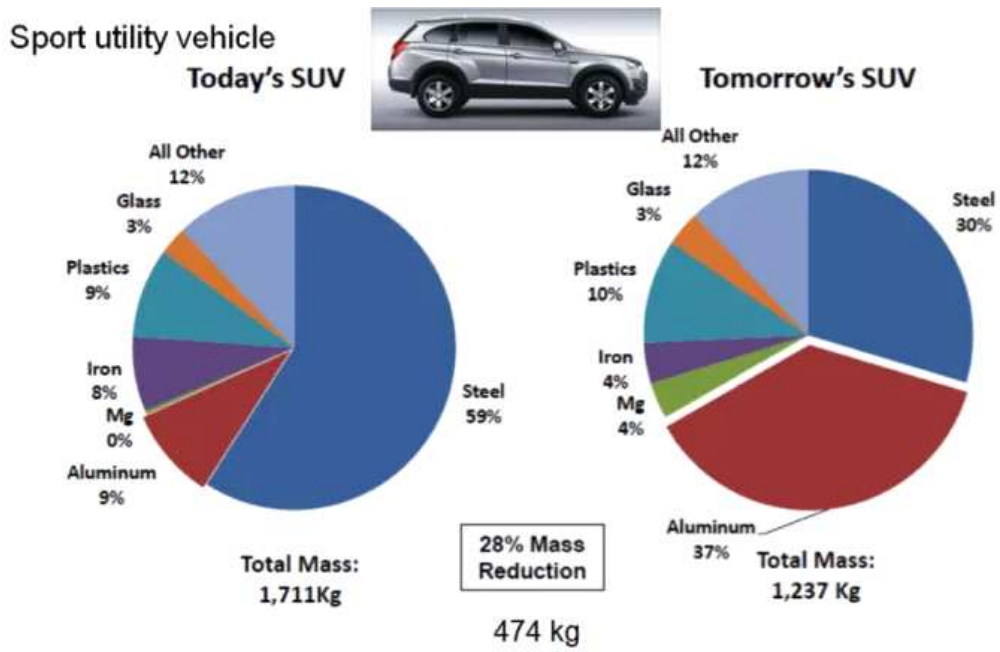


Fig. 1.3 Shift from steel to aluminium in automobile industry

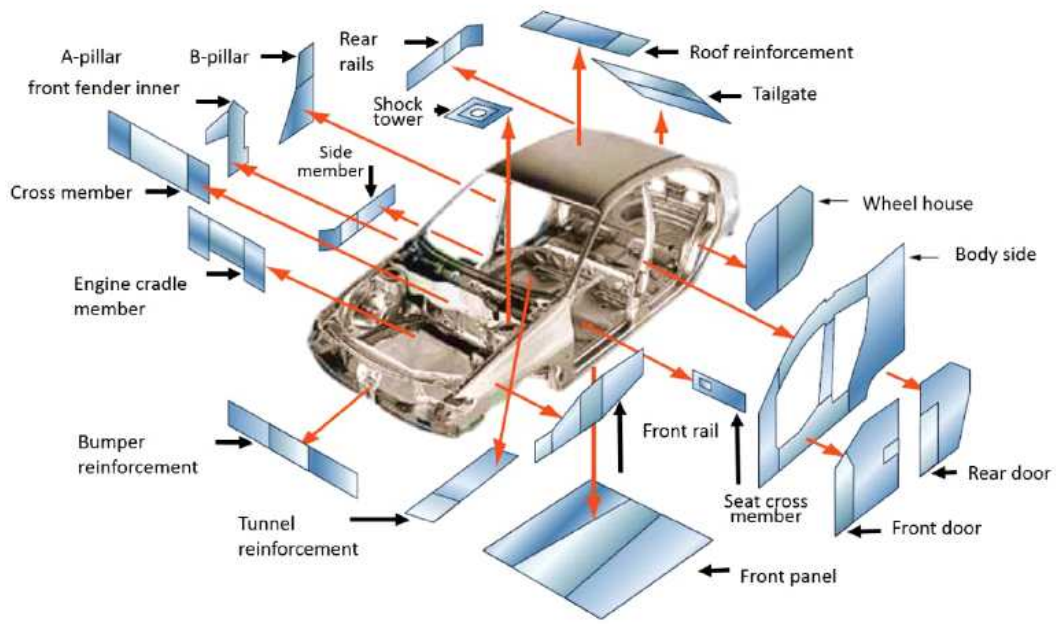


Fig. 1.4 Application of tailor welded blank in a car body

## 1.2 국내·외 기술 동향

최근 마찰교반용접(Friction stir welding) 기술의 발전에 따라 자동차뿐 아니라 철도차량, 우주항공 등 다양한 산업분야에서 적용이 되고 있다. 게다가 수송기기의 경량화가 추세인 만큼 알루미늄 합금과 같은 비교적 열전도도가 높은 경량소재의 접합부를 우수하게 나타내기 위해서 마찰교반용접 기술의 연구 및 개발이 계속 이루어질 것이다.[7]

수송분야를 중심으로 제품의 친환경화, 경량화의 추세에 따라 경량 소재는 자동차, 항공기, 철도차량, 소형선박으로 사용 범위가 확대되고 있는 실정이다. 경량소재의 접합 범위도 철강과 경량 소재 접합뿐 아니라 경량 소재 이종재 용접 및 알루미늄 합금 동종 용접까지 확대 되고 있으며, 실제 제품에 적용하고 있다.[8]

국외에서는 일본이 최초로 철도차량 산업분야에서 마찰교반용접을 이용하여 철도 차체 제조에 적용하는 등 특허 기술 획득을 위한 기술 개발이 계속 진행되고 있으며, 국내에서도 용접부 결함 등 기초연구를 바탕으로 한 연구가 진행되고 있다. 우주항공분야에서 경량화는 경제적인 측면에서 아주 중요한 요인으로 작용하기 때문에 발사체나 연료탱크에 마찰교반용접 기술적용을 점차 상용화 시키는 추세이다.[9~10]

현재 국내 자동차 산업분야에서 알루미늄 합금의 사용이 증가함에 따라 마찰교반용접에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, TWB공법을 기반으로 한 연구에 대한 기대치가 상승하고 있다. 향후 개발될 신소재, 물성의 차이가 큰 소재끼리에 대한 용접·접합 기술연구가 요구될 것이라 생각되며, 이에 대한 용접·접합 기술로써 마찰교반용접 기술이 중점적으로 활용 될 것이라고 예상된다.[11, 12]

## 1.3 마찰교반용접(FSW)

### 1.3.1 마찰교반용접의 원리 및 특징

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국의 용접기술연구소 TWI(The welding institution, UK)에서 개발된 용접법이다. 접합시킬 소재를 지그(Jig) 위에 고정시킨 후 툴(Tool)을 고속으로 회전시키면서 툴의 핀(Tool pin)을 소재에 압입한다. 이때 툴의 숄더(Tool shoulder)를 압착시키면서 회전에 의한 마찰발열에 의해 고상상태인 소재가 연화되는 동시에 접촉부를 소성 가공변형을 일으켜 접촉부를 이동시켜 접합하는 고상용접법이다. 고상용접법이므로 용융점이 낮아 용융용접이 어려웠던 알루미늄 합금 같은 소재에 대한 용접이 가능하며, 경량 소재간의 용접, 이종소재간의 용접을 가능케 하여 다양한 분야에 적용되고 있다.

Fig.1.5와 같이 마찰교반용접은 툴이 고속으로 회전하면서 핀(Pin)이 모재에 삽입되고 숄더(Shoulder)부분까지 모재에 접촉되면 숄더에 의한 마찰열이 용접부에 가해여 용접이 이루어지는 방법이다. 이 과정에서 모재에서 회전하고 있는 핀에 의해 기계적 교반이 발생되고, 툴이 회전하는 방향과 용접 진행방향이 일치하는 Advancing side와 툴의 회전방향과 용접 진행방향이 반대인 Retreating side로 용접부가 형성된다.

Fig1.6는 마찰교반용접부의 단면을 나타낸 것이다. 마찰교반용접부의 미세조직은 모재(Base Metal) 부분 a, 열영향부(Heat Affected Zone)인 b, 교반부에 인접한 곳으로 툴에 의해 극심한 소성변형이 일어나 재결정이 발생하는 열-기계적영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone) c, 마찰열과 소성유동에 의한 교반부(Stir Zone)인 d로 나뉜다.

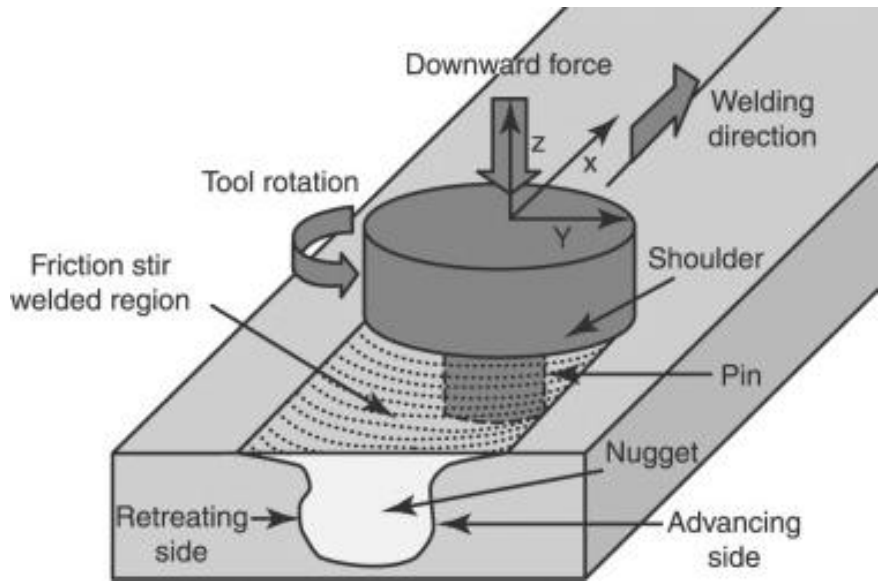


Fig. 1.5 Schematic diagram of friction stir welding

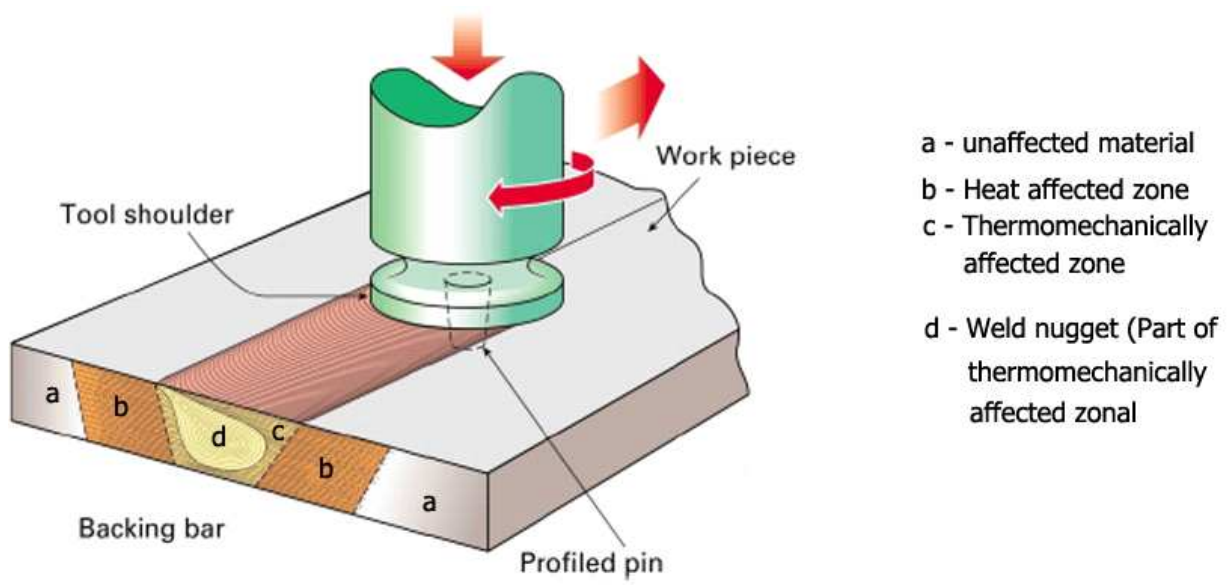


Fig. 1.6 Cross-section of friction stir welding

마찰교반용접은 기존의 용융용접과는 다르게 별도의 열원, 용접봉, 용가제 등이 불필요하고 접합 중에 유해한 광선이나 물질이 발생하지 않기 때문에 경제적이면서 친환경적인 접합기술로 평가 받고 있다. 마찰교반용접의 장점으로서는 첫째, 용융상태의 용접이 아닌 고상용접으로 용접에 따른 변형이 적다. 둘째, 용융용접에 비해 변형이 적기 때문에 용접부의 기계적 성능이 우수하다. 셋째, 용융용접에서 발생하기 쉬운 기공, 균열 등의 결함이 거의 발생하지 않는다. 넷째, 경량합금(Al, Ti, Mg합금)등으로 제조된 구조제품이나 금속을 기지로한 복합재료 등 기존 용접법의 적용이 어려웠던 재료의 접합이 가능하여 이종재료의 용접에도 적합하다.

### 1.3.2 알루미늄 합금 소재의 특징

자동차 차체는 전체 무게의 20~30%를 차지하는데 기존의 차체 부분 소재를 철강 대신 알루미늄 합금으로 대체했을 경우 알루미늄 합금은 철강의 약 33%의 무게이기 때문에 큰 경량화 효과를 기대할 수 있다. 또한 기존 철강을 대체하려면 강도, 내식성, 용접성, 성형성, 표면처리성 등이 우수하여야 하는데 알루미늄 합금은 전기전도도, 내식성, 가공성 등이 우수하고 부식에 강하여 차량 경량화 소재로 적합하다.

알루미늄은 철강에 비해 기계적 성질이 떨어지지만 합금 첨가 원소인 마그네슘, 크롬, 망간, 구리, 아연 등을 첨가하거나 열처리를 하여 순수 알루미늄(순도99% 이상)보다 강한 알루미늄 합금을 얻을 수 있고, 일반 철강과 비슷한 강도도 확보할 수 있다. 알루미늄은 가공성이 좋아 다른 금속에 비해 소성가공이 쉽고, 다양한 형상의 모양을 성형할 수 있고 대기중의 산소와 반응하여 표면에 얇고 치밀한 산화피막을 형성하여 부식을 방지한다. 또한 용융점이 낮기 때문에 이미 사용된 알루미늄 제품을 녹여 쉽게 재생할 수 있으므로 재활용성이 높다는 장점이 있다. 그러나 알루미늄 합금은 용접 변형이 발생하기 쉽고, 고온 용접의 제약이 따른다.

알루미늄 합금 5000계열 Al-Mg 합금은 성형성이 우수하기 때문에 차량의 내·외부 패널에 사용되며, 6000계열 Al-Mg-Si 합금은 가열 시에 강도가 높아지는 열경화성을 가지므로 차체 패널에 최근에 많이 사용되고 있다. 국내에서는 내식성, 용접성, 성형성 등이 우수한 알루미늄 합금 5000계열이 인장강도 대비 피로강도가 높아 다양한 분야에 사용되고 있어서 사용률이 가장 높다. 주로 자동차, 선박용 구조 부품재, 가정용 기구, 연료 탱크 등에 사용되고 있으며 최근 유럽에서는 알루미늄 합금 판재 사이에 발포알루미늄이나 수지를 끼워 넣은 샌드위치판을 차량에 적용하고 있다.



**Table. 1.1 Characteristics of aluminum alloy**

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



## 제 2 장 연구 방법

### 2.1 연구 방법

본 연구에서는 두께가 서로 상이한 알루미늄 합금(A15052)에 마찰교반용접을 적용하기 위하여 이두께 알루미늄 합금(A15052)에 대해 맞대기 용접을 실시하여 용접 특성을 고찰하고자 하였다.

1장에서는 연구배경 및 연구목적, 국내외 기술동향, 마찰교반용접의 원리, 마찰교반용접의 특징, 알루미늄 합금 소재의 특징에 대해서 나타내었다.

2장에서는 본 논문의 구성 및 마찰교반용접을 이용하여 이두께 알루미늄 합금(A15052) 용접 시 Y축 틸팅각 변화에 따른 이두께 알루미늄 합금(A15052) 용접부 특성을 고찰하기 위한 실험적 및 수치해석적 연구 방법을 논하였다.

3장에서는 이두께 알루미늄 합금(A15052) 마찰교반용접부의 기계적 및 성형 특성을 평가하기 위해 인장시험, 경도시험, Ericshen cupping test를 실시한 후 특성을 고찰하였고, 마크로 및 미세조직 관찰 후에 금속학적 특성을 고찰하였다. 아울러 수치해석을 통해 이두께 알루미늄 합금(A15052) 마찰교반용접부의 온도 및 잔류응력, 변형률 특성을 고찰하였고, 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 실측 온도 값과 해석 온도 값을 비교하였다.

4장에서는 마찰교반 용접을 이용한 이두께 A15052 용접 시 알루미늄 합금(A15052)특히 Y축 틸팅각 변화에 따른 용접부의 건전성 및 신뢰성 향상을 위한 결론을 도출하였다.

## 2.2 실험장비 및 조건

### 2.2.1 사용 소재 및 시험편 형상

본 연구에서 사용한 소재는 경량소재인 알루미늄 합금(AI5052)을 사용하였다. 실험에 사용된 시험편 제원은 길이방향으로 150 mm(L), 폭방향으로 50 mm(W), 두께는 1.5 mm(T)와 2.5 mm(T)의 시편을 사용하였다. 사용소재의 화학적, 기계적 특성은 Table. 2.1, Tabel. 2.2에 나타내었다.

Fig. 2.1에 두께가 서로 다른 알루미늄 합금(AI5052)을 사용한 이음부의 형상을 나타내었으며 마찰교반용접을 이용해 용접을 실시하였다. 용접 시 톨의 회전방향은 반시계 방향(CCW)으로 고정하여 두 판재 중 상대적으로 얇은 판재인 1.5 mm를 용접 진행방향과 동일한 전진측(Advancing side)에 위치시키고, 2.5 mm의 판재를 후퇴측(Retreating side)에 위치하도록 배치하였다.

**Table. 2.1 Chemical compositions of AI5052**

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

**Table. 2.2 Mechanical properties of AI5052**

| Mechanical properties |                      |                |               |
|-----------------------|----------------------|----------------|---------------|
| Yield stress (MPa)    | Tensile stress (MPa) | Elongation (%) | Hardness (Hv) |
| 188                   | 228                  | 12             | 70            |

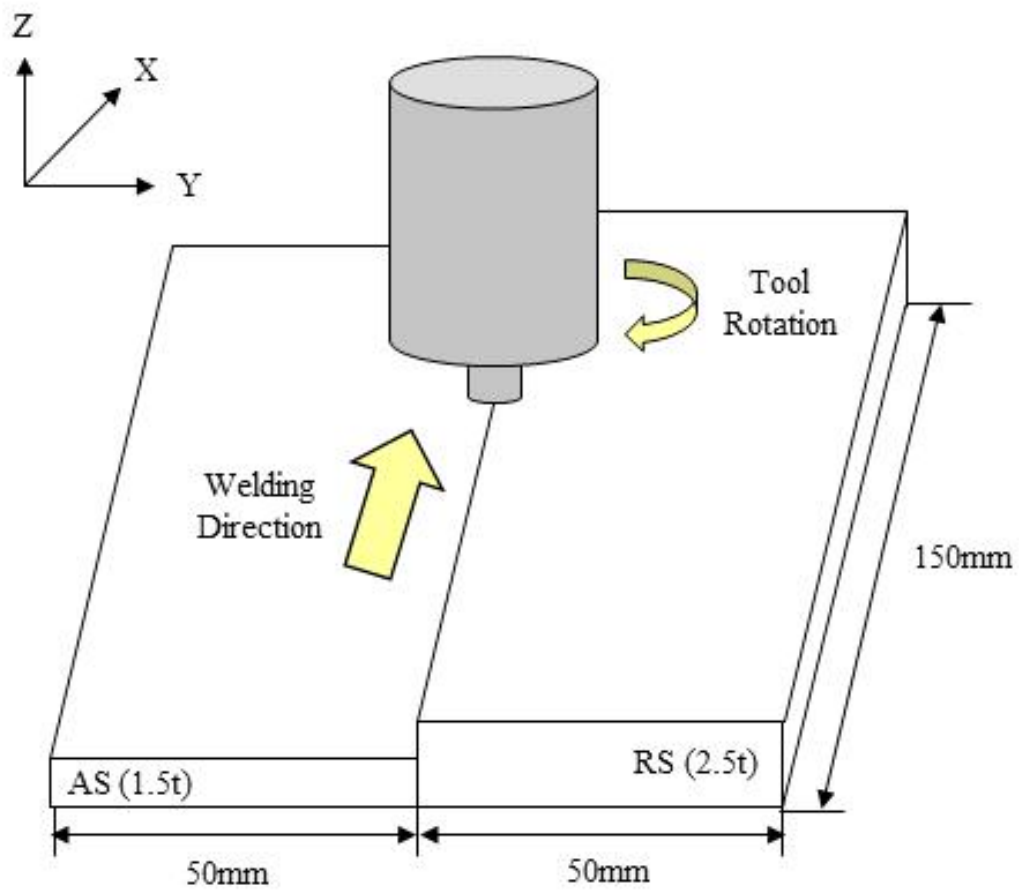


Fig. 2.1 Configuration of Al5052 specimen for FSW

## 2.2.2 용접 조건 및 사용 툴(Tool)

본 연구에서 사용된 Friction Stir Welding 장비는 X, Y, Z 방향으로 3축 이동이 가능하고 X, Y 축은 테이블에 의해 0.5 ~ 1/0 mm/sec의 속도로 이동이 가능하며, Z축은 300 ~ 3000 rpm까지 제어 가능하고, 최대 가압 하중은 3000 kgf 까지 적용 가능하다. Fig. 2.2는 연구에 사용된 실험장비 사진이며, Table 2.3에 장비의 사양을 나타내었다.

마찰교반용접 시 툴의 소재 및 형상에 따라 용접 특성이 달라지므로 툴의 소재 및 형상은 매우 중요한 요소이다. 본 마찰교반용접 실험에 사용된 툴의 소재는 WC(Tungsten carbide)-CO(Cobalt) 12%이며, 다이아몬드 연삭을 통해 제작되었다. 또한 툴의 형상은 핀(Pin)이 원통형(Cylinder)이고, 핀의 길이 및 지름은 1.6 mm, 5 mm, 숄더(Shoulder)의 직경은 16 mm, 핀과 숄더의 오목각은 3° 로 제작하였으며, 형상과 치수를 Fig. 2.3에 나타내었다. 마찰교반용접(FSW)에서는 툴의 회전속도(rpm), 삽입깊이(Plunge depth), 삽입유지시간(Dwell time), 이송속도(Travel speed), 기울기(Tilting angle) 등이 주요한 공정변수이고 이에 따라 용접성이 결정된다.[13]

본 연구에서는 알루미늄 합금(AI5052)의 이두께 마찰교반용접 시 공정변수별 용접특성을 고찰하기 위해 먼저 공정변수별 예비실험을 실시하여 회전속도, 용접속도 및 삽입깊이 등의 변수를 도출한 후, 이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 부족한 용접성을 향상시키기 위해 소성유동을 원활히 이루어지게 하고자 판재 두께 단차 방향인 Y축 틸팅각의 변화에 따른 실험을 실시하였다. Table. 2.4에서 나타낸 것처럼 Y축 틸팅각 0°, 1°, 2°, 3° 를 공정변수로 하여 실험을 실시하였다. 그리고 Y축 틸팅각을 위해 1°, 2°, 3° 의 각도가 주어진 특수 지그를 사용했는데, 이는 두께가 상이한 소재의 마찰교반용접 시 상대적으로 두꺼운 판재에 우선적으로 접촉이 되면서 마찰열의 불충분으로 인해 소성유동이 원활히 일어나지 않기 때문에 두께 차를 보완하여 원활한 소성유동을 유발하기 위함이다.



Fig. 2.2 Equipment of friction stir welding

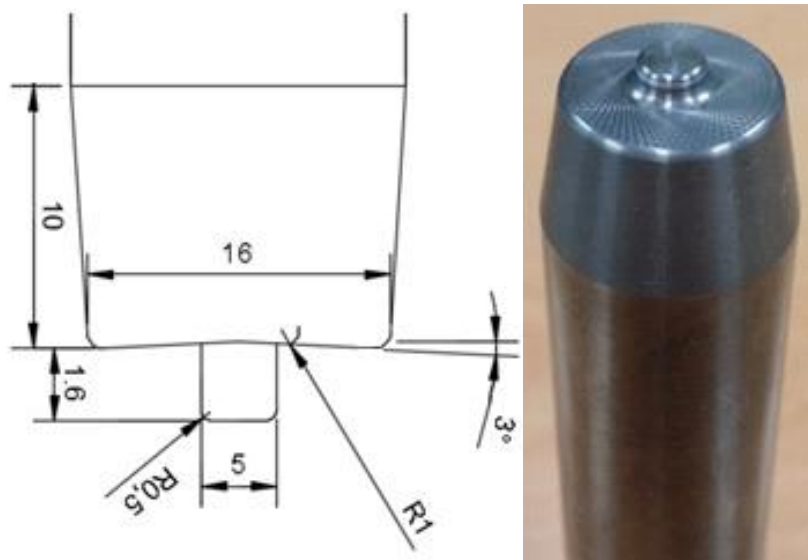


Fig. 2.3 Tool details used for friction stir welding

Table. 2.3 Specification of Friction stir welding equipment

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

Table. 2.4 Welding conditions for friction stir welding

| Experiment set no. | Y-axis tilting angle (°) | Welding speed (mm/s) | Rotational speed (rpm) | Plung depth (mm) |
|--------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------------|
| Case 1             | 0                        | 1                    | 400                    | 0.9              |
| Case 2             | 1                        |                      |                        |                  |
| Case 3             | 2                        |                      |                        |                  |
| Case 4             | 3                        |                      |                        |                  |

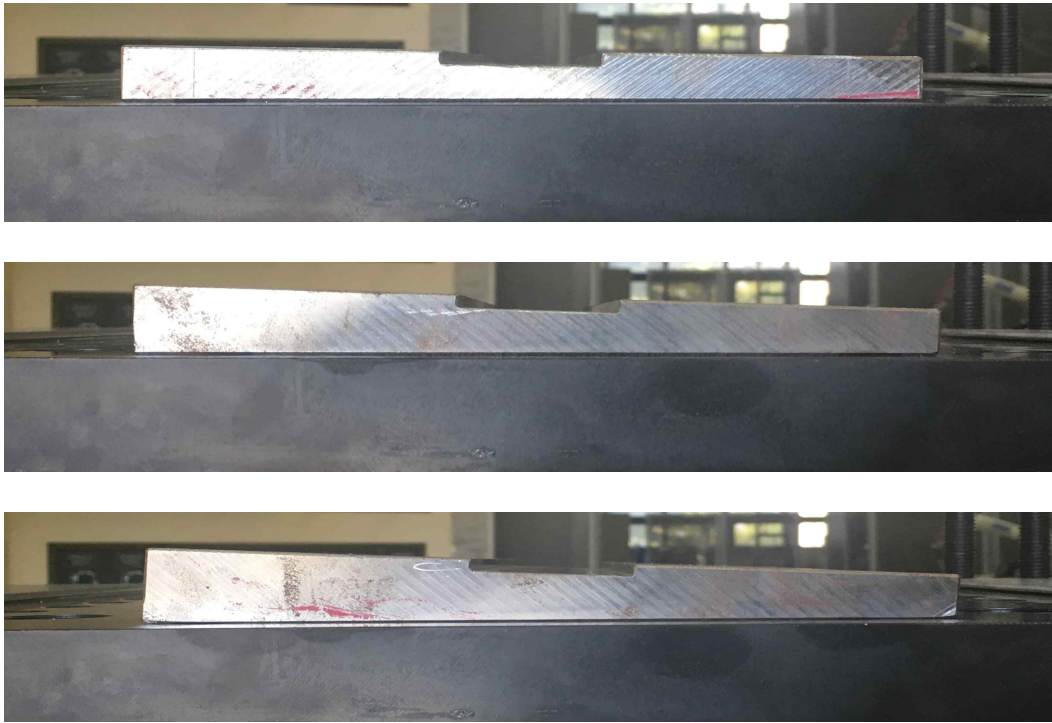


Fig. 2.4 Jig used for friction stir welding of Al5052 with different thick sheets

## 2.3 마찰교반용접부의 용접성 및 성형성 평가

### 2.3.1 마크로 및 미세조직

본 연구에서는 Y축 틸팅각( $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ )에 따른 마찰교반용접을 진행한 후 특성을 고찰하기 위해 접합 여부, 용접부 외관 형태 등을 1차적으로 관찰하였다. 그 후 마크로 및 미세조직 관찰을 위해 시험편을 용접 진행방향의 수직방향으로 절단한 후 마운팅, 미세연마, 에칭을 실시하였다. 미세연마는 #400, #800, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000 순서로 연마하였고, 세밀한 연마를 하기 위해 Diamond paste  $3\mu m$ ,  $1\mu m$  순서로 미세연마를 실시하였다. 연마된 시험편을 Macro 시험편과 Micro 시험편으로 나누어 Keller`s 용액으로 10~30초간 에칭을 실시하였으며, Macro 시험편의 Keller`s 용액은 질산, 염산, 불산, 증류수 각각 25%, 15%, 10%, 50%이며, Micro 시험편의 Keller`s 용액은 질산, 염산, 불산, 증류수 각각 2.5%, 1.5%, 0.5%, 95%의 비율이다.

### 2.3.2 인장 및 경도시험

이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접부의 인장강도를 평가하기 위해 Table. 2.5에 나타낸 ASTM E8/E8M-09 규격의 Subsize Specimen에 따라 시험편 제작 후 Shimadzu사의 20Ton의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 인장강도를 평가하였다. Fig. 2.5 는 실험에 사용된 만능 시험 장치를 나타낸 것이다. 마찰교반용접을 이용한 이두께 알루미늄 합금(AI5052) 용접부의 횡단면으로 절단하여 미세연마를 진행한 후 용접부 경도 측정을 실시하였다. 경도 측정은 Akashi사의 HM-112 Micro Vickers 경도기를 사용하였으며, Fig. 2.7에 사용된 Vickers 경도기를 나타내었다.





Fig. 2.5 Universal testing machine

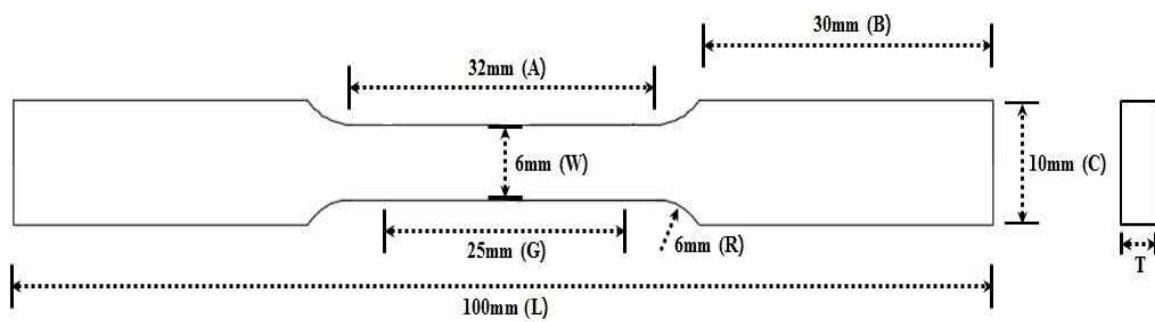


Fig. 2.6 Dimension of tensile test specimen

Table. 2.5 Configuration of tensile test specimen

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

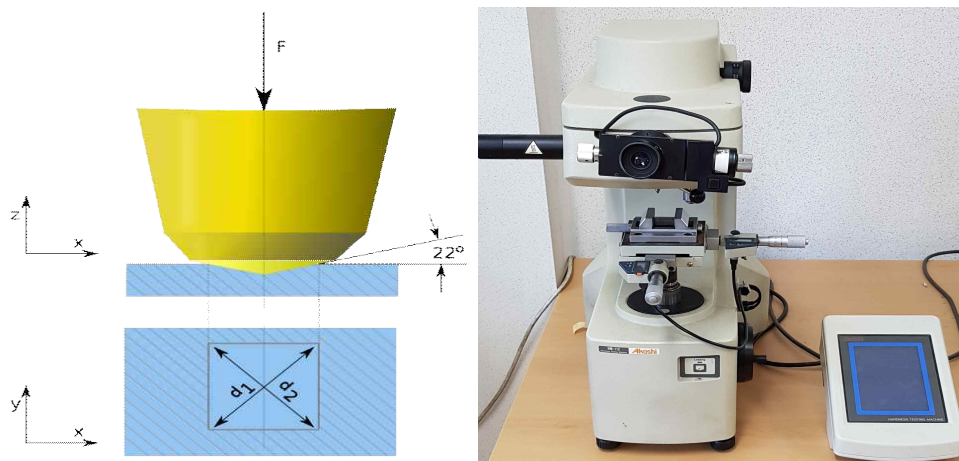


Fig. 2.7 Vickers hardness test equipment

### 2.3.3 성형성 시험

이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접부의 성형성을 평가하기 위해 ASTM 643-09에 기초하여 Erichsen cupping test를 실시하였다. 이 때 길이 100mm, 폭 100mm 의 Erichsen 시험편 제작 후 펀치의 팁을 10mm를 20mm/min의 속도로 용접부의 성형성을 평가하였다. 평가 시 주안점으로 파단이 일어났을 때의 팁의 높이와 파단된 부분을 관찰하고 조건별로 비교평가 하였다. Fig. 2.8은 성형성 평가에 사용된 유압식 에릭슨 시험기이다.

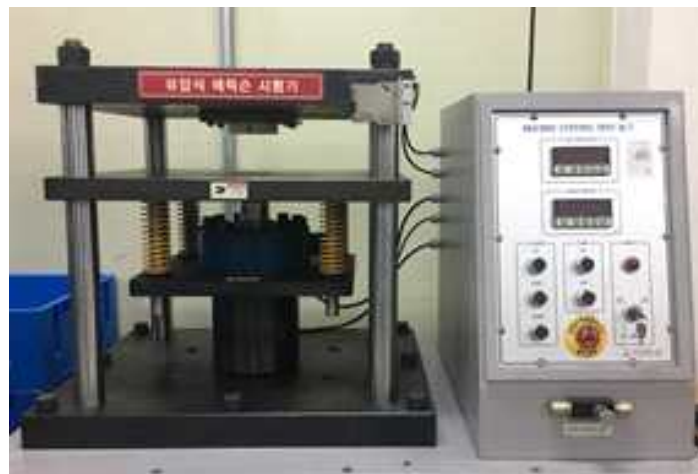


Fig. 2.8 Erichsen cupping test equipment

### 2.3.4 온도 측정 시험

수치해석 결과와 실제 용접 시 용접부의 온도를 비교하기 위해 MIDI LOGGER GL220-UM-851의 Thermocouple 장비를 사용해 온도비교를 하였다. 톨과 열전대 사이에 간섭을 지지하기 위해서 접합부에서 20mm 떨어진 부분에 직경 0.3mm의 구멍을 뚫어 Advancing side와 Retreating side의 각 시작, 중간, 끝 부분의 위치에서 온도 측정을 실시하였고, Fig. 2.9에 온도 측정 위치를 나타내었다.

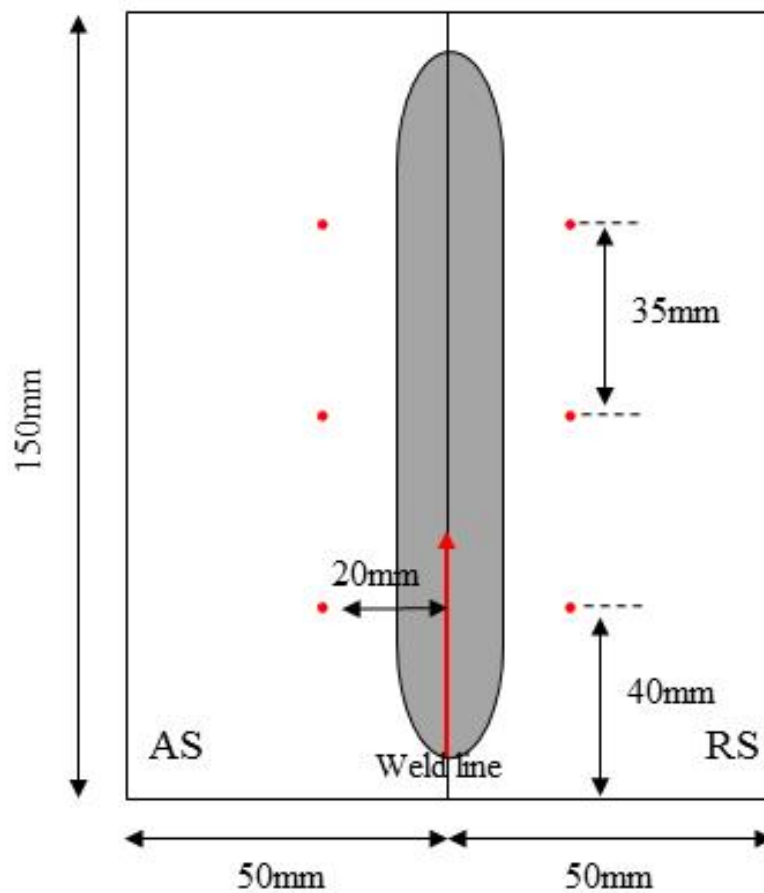


Fig. 2.9 Thermo-couple positions on workpeice

## 2.4 수치해석에 의한 마찰교반용접부의 열적 및 역학적 특성 평가

본 연구에서는 이두께 알루미늄 합금(AI5052) 마찰교반용접부의 온도분포 특성을 고찰하기 위해 열전도 수치해석을 실시하였다. 그리고 AI5052-H32 재료의 비열, 밀도, 열전도도 등의 온도 변화를 고려하여 해석을 실시하였다.

### 2.4.1 유한요소법에 의한 열전도 이론

재료가 등방성(Isotropic)일 때, 연속체의 3차원 비정상 열전도 지배방정식은 아래와 같이 기술할 수 있다

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \dots\dots\dots 2.1$$

여기서,  $T = T(x,y,t)$  : 온도(°C),  $c$  : 비열(cal/g·°C),  
 $\rho$  : 밀도(g/cm<sup>2</sup>),  $\dot{Q}$  : 단위시간당 입열량(cal/sec)  
 $t$  : 시간(sec),  $\lambda$  : 열전도율(cal/cm·sec·°C) 이다.

또한, 물체 표면의 열적 경계조건은 Fourier 법칙을 사용하여 다음과 같이 구성된다.

$$q = -a \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \frac{\partial T}{\partial n} \dots\dots\dots 2.2$$

만약 경계에서 열전달이 있을 경우에는 q는 (2.4)이 된다.

$$q = a_c(T - T_c) \dots\dots\dots 2.3$$

여기서,  $q$  : 열유속(Heat flux) ( $\text{cal}/\text{sec}\cdot\text{cm}^2$ ),  $n$  : 물체표면의 외법선방향  
 $a_c$  : 열전달계수( $\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$ ),  $T_c$  : 외부온도( $^\circ\text{C}$ ) 이다.

고체의 열전도 문제를 Galerkin법을 적용하여 유한요소법으로 정식화하기 위해,  
 해석모델을 유한개로 분할하고, 한 요소내의 온도 분포를 아래 식으로 표현하였  
 다.

$$T(y,z,t) = [N(y,z)]\phi(t) \dots\dots\dots 2.4$$

여기서,  $T$  : 요소의 온도,  $[N]$  : 절점온도와 요소내의 온도를 연결하는 형상함수  
 Matrix,  $\phi$  : 시간  $t$ 에 대한 요소의 절감온도 Vector 이다.

형상함수를 가중함수로 하여 Glaerkin법을 적용하면 식(2.6)이 구성된다.

$$\int_v [N]^T \left\{ a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial x} \right\} dv = 0 \dots\dots\dots 2.5$$

여기서,  $v$  : 요소의 영역 이다.

식(2.6)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 식을 전개하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \int_v a[N]^T a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dv \quad \dots\dots\dots 2.6 \\
 & = - \int_v a \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dv \\
 & \quad + \int_s a [N]^T \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) ds
 \end{aligned}$$

여기서  $s$  : 요소의 경계 이다.

식(2.3), (2.4), (2.5)를 식(2.7)에 대입하면 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & - \int_V \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \phi(t) \quad \dots\dots\dots 2.7 \\
 & - \int_s \lambda_c [N]^T [N] ds \phi(t) + \int_V \dot{Q} [N]^T dV + \int_s \lambda_c T_c [N]^T ds \\
 & - \int_V \rho c [N]^T [N] dV \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0
 \end{aligned}$$

위 식의 3차원 비정상 열전도식을 Matrix화하면 다음 식이 구해진다.

$$[K] \phi + [C] \frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad \dots\dots\dots 2.8$$

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

$$[K] = \int_V \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \phi \dots\dots\dots 2.9$$

$$+ \int_s \lambda_c [N]^T [N] ds \phi$$

$$[C] = \int_V \rho c [N]^T [N] dV \dots\dots\dots 2.10$$

$$F = \int_V \dot{Q} [N]^T dV + \int_s \lambda_c T_c [N]^T ds \dots\dots\dots 2.11$$

### 2.4.2 유한요소법에 의한 열탄소성 이론

#### (1) 응력 - 변형률 관계

재료의 물리적 성질의 온도 의존성을 고려한, 응력증분의 영향을  $[C]dT$ 라고 하면, 응력 - 변형률 관계는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\sigma = [D]d\varepsilon - [C]dT \dots\dots\dots 2.12$$

#### (2) 탄성역

재료가 탄성거동을 하는 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^t \dots\dots\dots 2.13$$

$$d\sigma = [D^e]d\varepsilon^e \dots\dots\dots 2.14$$

여기서, 탄성변형률( $\varepsilon^e$ ) : 응력( $\sigma$ ) 및 온도  $T$ 의 함수이다. 탄성변형률의 증분은 아래 식과 같이 표현된다.



$$d\varepsilon^e = \frac{\partial \varepsilon^e}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial \varepsilon^e}{\partial T} dT \rightarrow d\varepsilon^e = [D^e]^{-1} d\sigma + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \sigma dT \dots\dots\dots 2.15$$

탄성역에서 응력증분에 의한 구성방정식이 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 d\sigma &= [D^e]d\varepsilon - [D^e]\left(\frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\sigma + \alpha\right)dT = [D^e]d\varepsilon - \left([D^e]\alpha - \frac{1}{E} \frac{E - E_1}{\Delta T}\sigma\right)dT \\
 &= [D^e]d\varepsilon - C dT \dots\dots\dots 2.16
 \end{aligned}$$

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

### (3) 소성역

재료의 항복응력( $\sigma_y$ )은 온도  $T$ 와 소성일(Plastic work)  $W^P(\bar{\sigma}, \varepsilon^P)$ 의 함수로서  $\sigma_y(T, W^P)$ 로 하고, 항복함수  $F$ 는 응력( $\sigma$ )와 항복응력( $\sigma_y$ )으로부터 아래 식과 같이 정의된다.

$$F = f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\bar{\varepsilon}^p, T) = \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\varepsilon}^p, T) \dots\dots\dots 2.17$$

즉,  $dF = df - df_0 = 0$ 을 만족할 때 재료는 항복한다. 따라서 재료가 소성역에서 부하상태에 있을 경우에는  $dF = df - df_0 = 0$ 의 조건을 만족해야 한다.

$$dF = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} - \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\varepsilon}^p} \right\}^T \{d\bar{\varepsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT = 0 \dots\dots\dots 2.18$$

여기서,  $\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T$  : 상당응력의 변화,  $\left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon^p} \right\}^T$  : 가공경화,  $\frac{\partial f_0}{\partial T}$  : 온도증분 이  
 다.

소성역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜로 가정하  
 면, 소성변형률 증분은 아래 식이 된다.

$$d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dots\dots\dots 2.19$$

여기서,  $\frac{\partial f}{\partial \sigma}$  : 편차응력,  $\lambda$  : 양(+)의 스칼라량 이다. 또한, 위의 식은 폰-미세  
 스(Von-mises) 항복조건을 따른다.

전 변형률 증분( $d\varepsilon$ )은 아래 식과 같이 탄·소성 및 열변형률의 합으로 표현된다.

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p + d\varepsilon^t \dots\dots\dots 2.20$$

따라서, 소성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 아래와 같이 구해진다.

$$d\sigma = [D^e] d\varepsilon - [D^e] \frac{\partial f}{\partial \sigma} \lambda - [D^e] \alpha dT + \frac{d[D^e]}{dT} [D^e]^{-1} \sigma dT \dots\dots\dots 2.21$$

### 2.4.3 마찰교반용접 입열 방정식

마찰교반용접 시 회전 틀과 모재 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열과 핀 주변에 발생하는 소성변형에 의해 접합이 이루어지고, 이에 대한 틀 슬더에 의한 마찰열 방정식(2.26)과 핀에 의해 발생하는 마찰열 식(2.27)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s = \eta_h \times [\eta_m (1 - \delta) \tau_y + \delta \mu_f p] \omega r \dots\dots\dots 2.22$$

$$\dot{Q} = \eta_h \times [\eta_m (1 - \delta) \tau_y + \delta \mu_f \sigma_y] \omega R_p \times \frac{A}{V} \dots\dots\dots 2.23$$

여기서,  $\eta_h$  : 열 분할효율,  $\eta_m$  : 기계적 효율,  $\delta$  : slip의 정도,  $\tau_y$  : 전단항복 응력,  $\mu_f$  : 마찰계수,  $\omega$  : 각속도,  $R_p/r$  : 핀 반지름,  $A$  : 핀 옆면의 넓이,  $V$  : 핀의 경계면과 전단층의 부피,  $p$  : 용접 하중 이다.

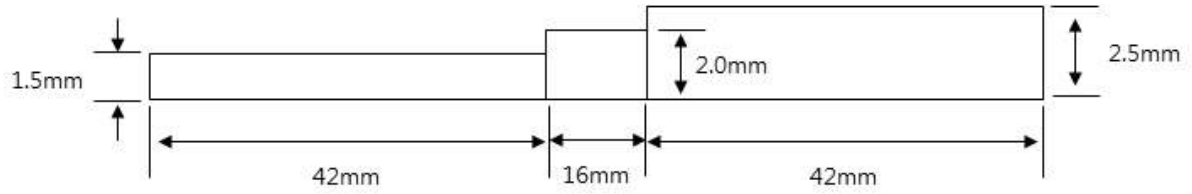
### 2.4.4 해석모델 및 조건

이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접 시 틀의 두께 방향 틸팅각에 따른 열적 및 역학적 특성을 고찰하기 위해 3차원 열전도 및 열탄소성 수치해석을 ANSYS 프로그램을 사용하여 실시하였다. 온도 특성 수치해석에 사용된 모델의 크기는 시험편 크기와 동일한 길이방향으로 150mm(L), 폭방향으로 50mm(W), 두께는 1.5mm(t)와 2.5mm(t)로 맞대기 용접한 용접부의 형상을 고려하였다.

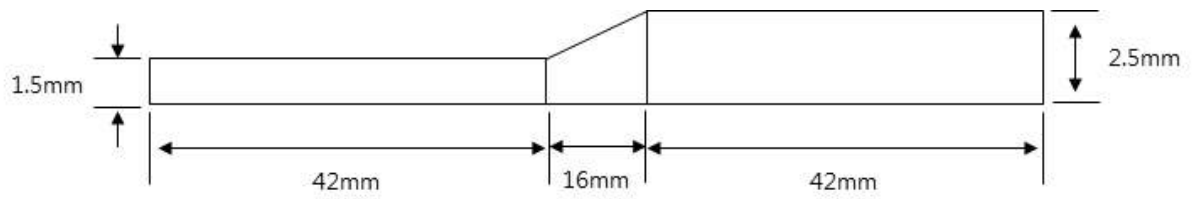
모델링의 형상은 Fig. 2.10에 Mesh 형상은 Fig. 2.11에 나타내었다. 요소(element)와 절점(node)의 개수를 줄이기 위해 용접부는 Fine mesh로 모델링 하였으며, 절점의 수는 각각 37,448개, 56,776개로 모델링하였다. 열적 경계 조건으로는 Convection을 고려하였으며, 해석 시 재료 온도의 조성을 고려하였다. Table. 2.6에 수치해석에 사용된 재료의 물성치를 나타내었다.

**Table. 2.6 Material properties of AI5052**

|      |                   |   |       |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------|-------------------|---|-------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Dens | kg/m <sup>3</sup> | 2696  |       |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| TS   | K                 | 880   |       |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| TL   | K                 | 925   |       |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| C    | K                 | 4   | 104   | 204     | 304    | 404     | 504     | 604     | 704     | 804     | 811     | 904     | 1004    |
|      | J/(kg K)          | 0.22  | 0.22  | 1315.95 | 961.15 | 1114.91 | 1164.95 | 1206.94 | 1255.44 | 1310.07 | 1313.82 | 1313.82 | 1313.82 |
| KXX  | K                 | 4   | 104   | 204     | 304    | 404     | 504     | 604     | 704     | 804     | 811     | 904     | 1004    |
|      | W/(mK)            | 5.15  | 99.91 | 137.49  | 156.50 | 170.93  | 179.94  | 183.56  | 181.77  | 174.58  | 173.88  | 173.88  | 173.88  |
| YST  | MPa               | 13.52 + 263.25 × [1 + { exp (T-5) 29 } ] -1 |       |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         |



(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$



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

Fig. 2.10 FE model of Al5052 FSW welded joints with different thick sheets for numerical analysis



(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$



(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$

Fig. 2.11 Mesh division for numerical analysis

## 제 3 장 연구 결과

### 3.1 마찰교반용접부의 용접성 및 성형성 평가

#### 3.1.1 마크로 및 미세조직

Y축 틸팅각  $0\sim 3^\circ$  에 따른 마찰교반 용접을 실시하였다. 먼저 선행 실험을 통해 얻은 조건인 툴의 회전속도 400rpm, 이송속도 1mm/s, 삽입속도 0.5mm/s, 삽입유지 시간(dwell time)은 15초로 고정시키고, 툴의 두께 방향인 Y축 틸팅각 변화에 따른 비드 및 단면을 Table. 3.1, 3.2에 나타내었다.

1차적으로 용접 후 용접부 비드 형상을 육안으로 확인하여 재료의 소성 유동 및 결함 등을 관찰하였다. 용접 조건이 적절하지 못할 경우에는 용접부에서 툴의 교반 부족 또는 교반 과잉에 의한 결함이 발생한다. 교반 부족으로 불충분한 입열량 일 때는 터널 결함(Tunnel defect), 키싱본드(kissing bond)의 결함이 발생하고, 교반 과잉으로 과도한 입열량일 때는 용접부의 두께가 얇아지게 되어 기계적 특성이 저하하게 된다.[14] Y축 틸팅각  $0^\circ$  일 때, 용접 초반에 비드가 미려하지 못한 것을 확인할 수 있었으나, 두께 단차를 보완한 Y축 틸팅각  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  에서는 미려한 비드가 얻어진 것으로 보아 솔더의 압착이 원활하게 이루어졌다고 판단된다.

단면을 관찰한 결과 Y축 틸팅각  $0^\circ$  일 때, 용접부 끝단이 0.38mm만큼 미접합 된 것을 확인할 수 있었다. 본 실험에서는 상대적으로 두꺼운 2.5t에서 1.5t로 유동이 일어나게 되는데, 이 때 두께 단차로 인한 툴의 핀 삽입이 완벽히 이루어지지 않아 원활한 소성유동이 이루어지지 않았기 때문에 키싱본드가 발생하였다고 사료된다. 그러나 Y축 틸팅각  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  에서는 용접부 끝단까지 완전한 접합이 이루어졌으나 Y축 틸팅각이 증가할수록 과도한 입열로 인한 Thinning Effect로 인해 용접부 두께가 감소하는 경향을 보였다. 이에 따른 유효 두께를 Fig 3.1에 나타내

었다.

Fig 3.2는 최대 인장강도값을 나타내었던 Y축 틸팅각  $1^\circ$  조건의 마찰교반용접부에 대한 각각의 영역별 미세조직을 관찰한 결과이다. (a) 교반부(SZ), (b) 열-기계적영향부(TMAZ), (c) 열영향부(HAZ), (d) 모재(BM)의 순서로 미세조직을 나타내었다.

미세조직을 관찰한 결과, (a) 교반부(SZ)에서는 핀의 회전, 재료의 상호작용으로 인한 마찰열 및 소성유동으로 인해 재결정 조직이 형성된다. 재료가 소성변형을 받는 동안 형성되기 때문에 동적재결정이 발생하여 결정립이 미세화되었다. (b)열-기계적영향부(TMAZ)에서는 톨의 회전에 기인한 연신된 조직 및 미시적으로 동적회복(dynamic recovery)이 형성되어 입내에 많은 저경각 입계의 아결정립 셀(subgrain cell)이 형성된다. 따라서 모재와 유사한 조직의 천이 영역(transient zone)의 형태가 관찰되었다. 이는 5000계열 가공경화 알루미늄 합금이 타 합금계에 비해 소성유동에 대한 저항성이 높기 때문이다. 그리고 (c)열영향부(HAZ)에서는 용접 시 발생하는 열영향으로 인해 (d)모재(BM)보다 결정립이 조대화되는 것을 관찰할 수 있었다.[15, 16]

Table. 3.1 Bead appearances of FSW welded joints with y-axis tilting angle




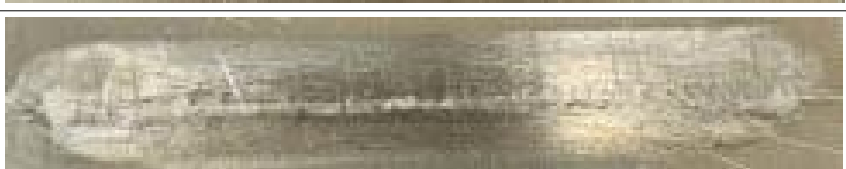




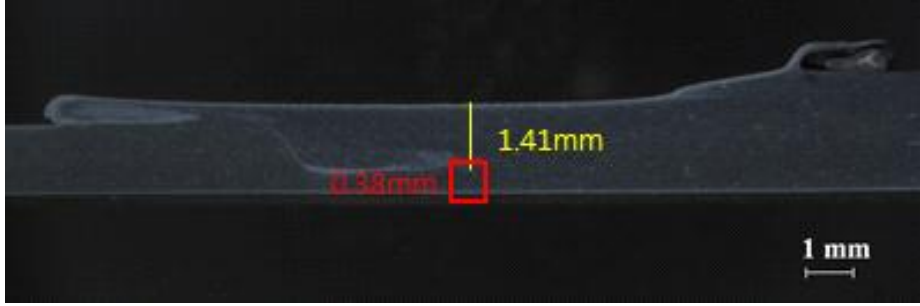
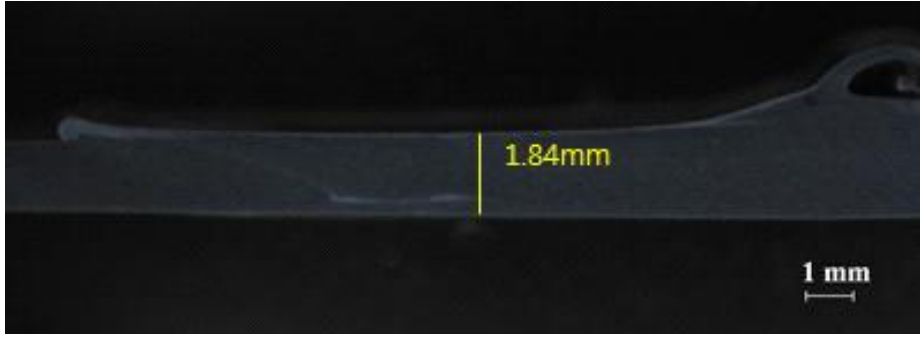
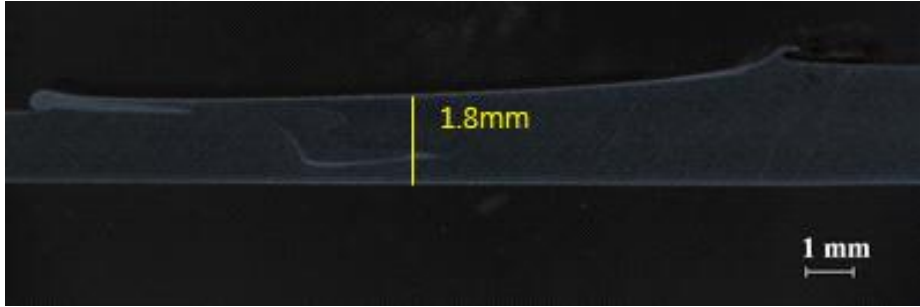
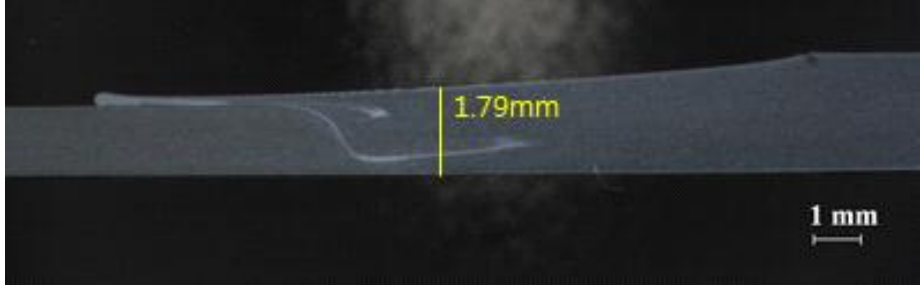
| Welding Parameter       | location | Bead appearance  |
|-------------------------|----------|--|
| Y-axis Tilting angle 0° | Top      |    |
|                         | Back     |    |
| Y-axis Tilting angle 1° | Top      |    |
|                         | Back     |  |
| Y-axis Tilting angle 2° | Top      |  |
|                         | Back     |  |
| Y-axis Tilting angle 3° | Top      |  |
|                         | Back     |  |



Table. 3.2 Cross sections of FSW welded joints with y-axis tilting angle

| Welding Parameter       | Cross section  |
|-------------------------|--|
| Y-axis Tilting angle 0° |    |
| Y-axis Tilting angle 1° |   |
| Y-axis Tilting angle 2° |  |
| Y-axis Tilting angle 3° |  |

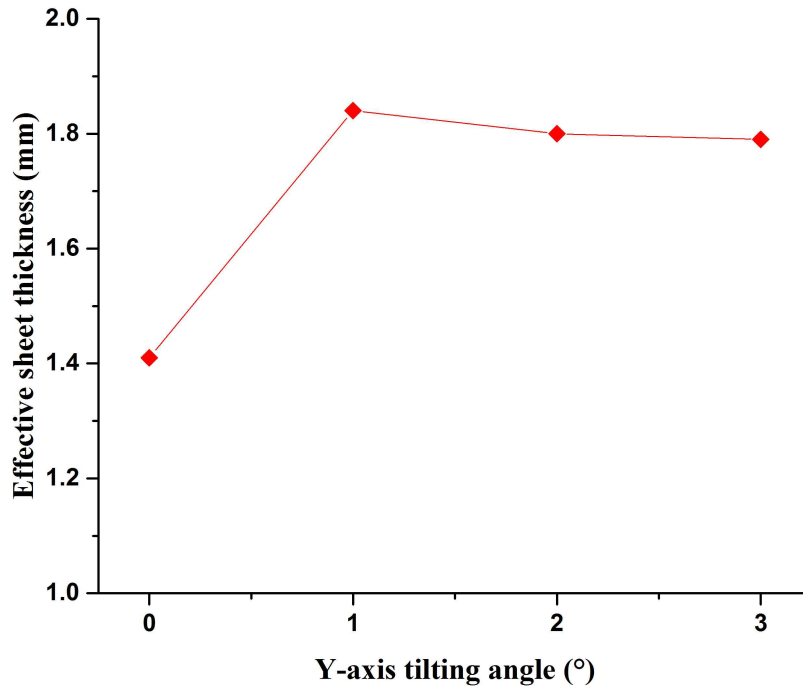


Fig. 3.1 Effective sheet thickness of y-axis tilting angle

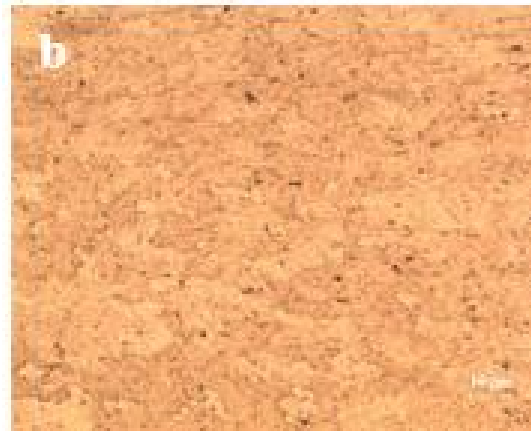


Fig. 3.2 Microstructure of FSW welded joints at y-axis tilting angle  $1^\circ$   
(a:SZ, b:TMAZ, c:HAZ, d:BM)

### 3.1.2 인장 강도 및 경도 분포

본 연구는 틀의 두께 방향인 Y축 틸팅각이 이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접부에 미치는 영향에 대해 고찰하기 위하여, Y축 틸팅각에 따른 마찰교반용접부의 인장시험을 실시하였다. 인장시험편은 ASTM E8M-09의 규격에 의거해 시험을 실시하였다. 각 조건별로 인장시험편을 3개씩 제작한 후 용접 진행방향의 수직방향으로 시험을 진행하였다. 인장강도는 3개 시험결과의 평균값으로 나타내었다. 마크로를 관찰한 결과 Y축 틸팅각을 고려하지 않은 0°에서는 접합이 끝단부까지 이루어지지 않았으므로 기계적 및 성형성을 평가하지 않았다.

Y축 틸팅각에 따른 이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접부의 인장값을 Fig. 3.3에 나타내었다. 인장시험 결과, Y축 틸팅각 1°의 조건에서 225MPa(모재 대비 98%, 연신율 13%)로 가장 높은 인장강도를 보였으며, 상대적으로 얇은 판재인 1.5t에서 모재(BM)파단이 일어났다. Y축 틸팅각이 증가할수록 점점 낮은 인장강도 값을 확인 하였는데 이는 기울기 증가로 인해 입열량이 증가하여 용접부 두께가 감소하는 Thinning effect가 일어났기 때문이라고 사료된다. Fig. 3.4에 각 조건별 파단된 인장시험편을 나타내었다.

Fig 3.5는 모든 Y축 틸팅각 1~3°를 조건으로 한 시험편의 마찰교반용접부 경도를 측정하여 분포도로 나타낸 것이다. 상대적으로 얇은 판재인 1.5t의 중앙부인 0.75mm 위치에서 0.5mm 등간격으로 경도를 측정하였다.

시험편 경도 분포를 관찰한 결과, 모든 조건에서 평균 경도값이 비슷하게 나타났는데 이는 모재의 전위들이 소성유동에 의해 재결정립이 생성되는 과정에서 대부분 소멸되어 연화되었기 때문이라고 사료된다.[17] 교반부(SZ)에서는 약 59Hv로 다른 접합부에 비해 약간 높은 값을 보였으며, 열·기계적 영향부(TMAZ)에서는 약 51~52Hv, 열영향부(HAZ)에서는 56Hv, 모재(BM)에서는 약 66Hv의 값이 측정되었다.

Y축 틸팅각을 실시한 시험편의 경도 분포를 살펴보면, 가공경화형 알루미늄인 Al5052의 교반부 경도 값은 전위 밀도 증가로 인해 미세결정립이 형성되어 모재와 비슷한 경도 값을 얻을 수 있다. 열-기계적 영향부에서는 경도 값이 조금 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 재료의 연화에 따른 영향이라고 사료된다.[18]

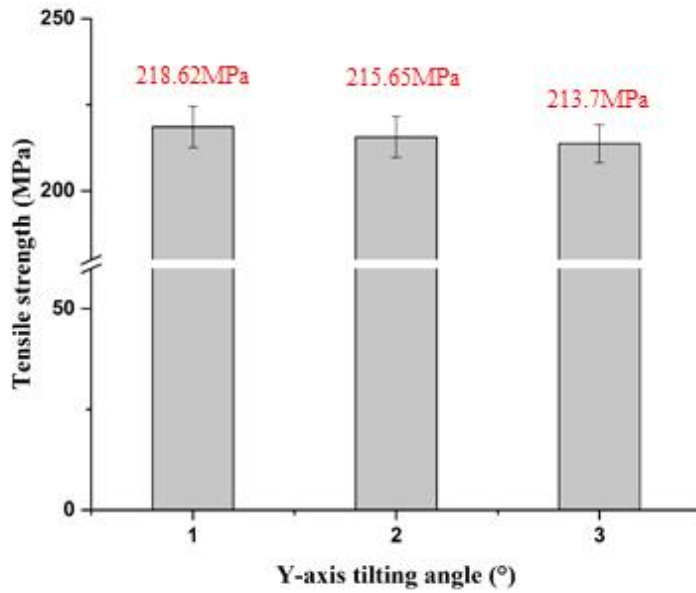
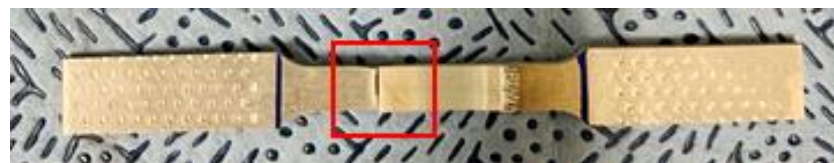


Fig. 3.3 Tensile strength of FSW welded joints with y-axis tilting angle



(a) Tilting angle 1°



(b) Tilting angle 2°



(c) Tilting angle 3°

Fig. 3.4 Fractured specimen of the highest tensile strength at y-axis tilting angle

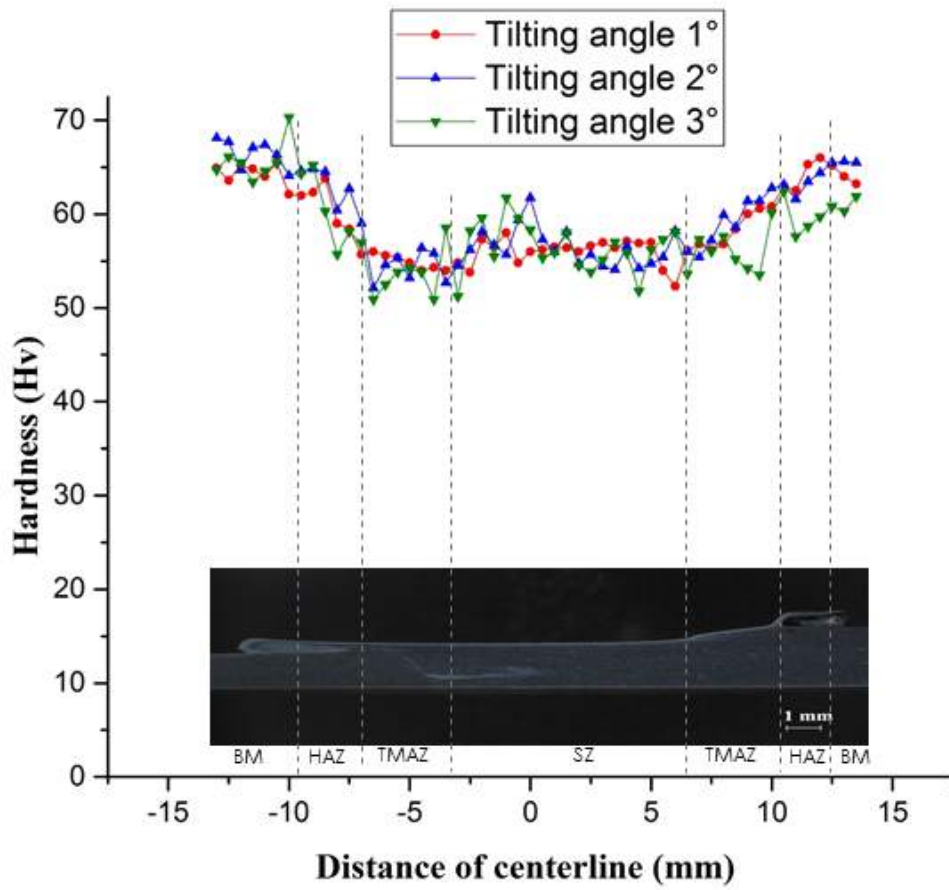


Fig. 3.5 Hardness distribution of FSW welded joints

### 3.1.3 성형성

틀의 두께 방향인 Y축 틸팅각에 따른 이두께 알루미늄 합금(AI5052) 마찰교반용 접부에 대한 성형성을 평가하기 위해 Erichsen cupping test를 실시하였다. ASTM 643-09의 규격에 의거해 10mm의 펀치 팁을 사용하여 20mm/min의 속도로 용접부의 성형성을 평가하였다. Y축 틸팅각 1°에서는 12.6mm, Y축 틸팅각 2°에서는 11.8mm, Y축 틸팅각 3°에서는 11.1mm에서 파단이 발생하였다. Y축 틸팅각 1°에서 가장 높은 성형성을 보였는데, 이는 앞선 실험에서 유효두께 및 인장강도가 Y축 틸팅각 1°에서 가장 높았기 때문이라고 판단된다. Fig 3.6에 각 조건별 Erichsen cupping test 결과 값을 나타내었다. Fig.3.7은 Erichsen cupping test 후 가장 높은 성형성을 보였던 Y축 틸팅각 1°의 모재와 용접부를 나타낸 시험편이다.



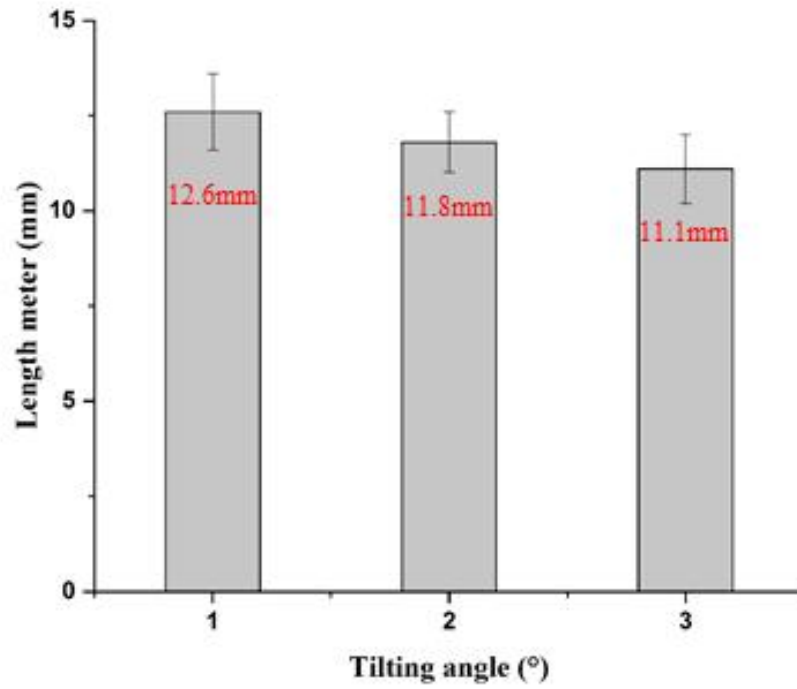


Fig. 3.6 Erichsen cupping test of FSW welded joints by y-axis tilting angle

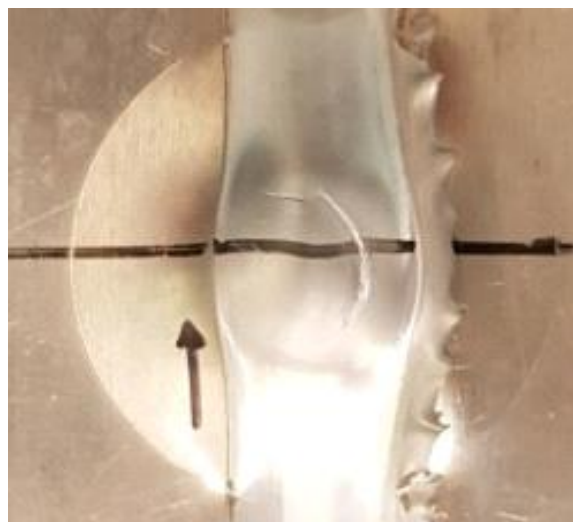


Fig. 3.7 Fractured specimen of y-axis tilting angle 1° after erichsen cupping test

## 3.2 수치해석에 의한 마찰교반용접부의 열적 및 역학적 특성

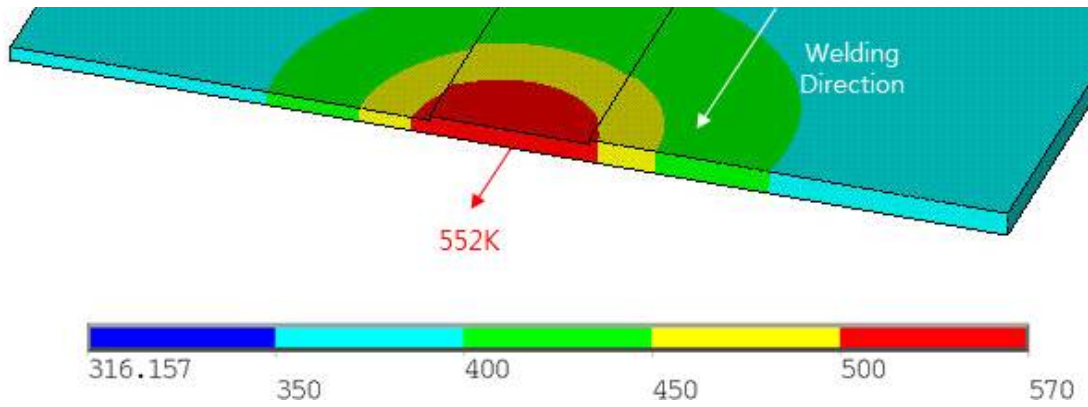
### 3.2.1 온도 분포

이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 틀의 두께방향 틸팅각  $0^{\circ} \sim 1^{\circ}$ 의 변화에 따른 온도 분포 특성을 고찰하기 위해 열전도 수치해석을 실시하였다. Fig. 3.8은 용접 시작 후 최고 온도를 나타낸 2초 시간대의 용접부의 온도를 나타낸 것이다. 최고 온도는 Y축 틸팅각  $0^{\circ}$ 에서 약 552K, Y축 틸팅각  $1^{\circ}$ 에서 약 556K인 것을 알 수 있었다. 최고온도는 약 4K 정도 차이로 거의 비슷하였다. Fig. 3.9는 용접 개시 후 가열 및 냉각이 일어난 시간대별 Y축 틸팅각  $0^{\circ}$ 의 용접부 단면의 온도 분포를 나타낸 것이며, Fig. 3.10은 용접 개시 후 가열 및 냉각이 일어난 시간대별 Y축 틸팅각  $1^{\circ}$ 에서 용접부 단면의 온도 분포를 나타낸 것이다. 각 조건 용접부 단면의 온도 분포를 비교한 결과, Y축 틸팅각  $1^{\circ}$ 의 조건에서 열전도가 더 빠르게 일어난 것을 확인할 수 있었는데, 이는 두께 단차가 줄어들어서 상대적으로 얇은 시편인 1.5t에 달는 솔더의 면적이 늘어나 입열량이 많아졌기 때문이라고 사료된다.

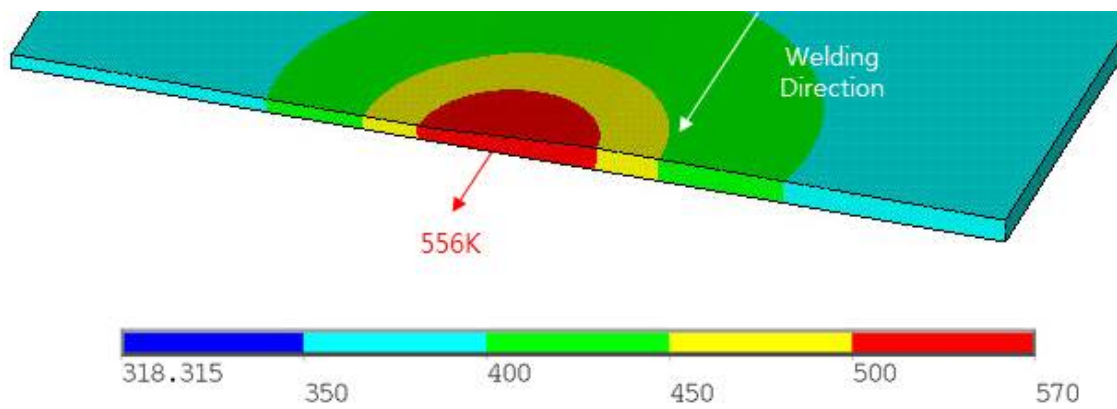
Fig. 3.11과 Fig. 3.12는 틀의 두께방향인 Y축 틸팅각 변화에 따른 이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접부의 교반부, 열-기계적영향부, 열영향부, 모재에 대한 온도 이력을 나타낸 것이다. 각각의 측정위치는 용접 중심인 SZ(50mm)로부터 Advancing side(1.5t)측에서는 열-기계적영향부는 6mm, 열영향부는 9mm, 모재는 14mm 떨어진 지점에서 측정을 실시하였다. Retreating side(2.5t)측에서는 열-기계적영향부는 8mm, 열영향부는 11mm, 모재는 16mm 떨어진 지점에서 측정을 실시하였다. 틸팅각  $0^{\circ}$ 의 교반부 온도는 552K, 열-기계적영향부 온도는 Advancing side 518K, Retreating side 528K, 열영향부 온도는 Advancing side 490K, Retreating side 493K, 모재의 온도는 Advancing side 440K, Retreating side 438K 이었고, 틸팅각  $1^{\circ}$ 의 교반부 온도는 556K, 열-기계적영향부 온도는 Advancing side 523K, Retreating side 535K, 열영향부 온도는 Advancing side 487K,

Retreating side 501K, 모재의 온도는 Advancing side 446K, Retreating side 446K 이었다. 틸팅각 0° 일 때 보다 틸팅각 1° 일 때, 온도가 4~8K 정도 높게 측정되었는데, 이는 두께 단차가 보완됨으로써 입열량이 증가하여 열전도가 더 빠르게 일어나기 때문이라고 판단된다.

Fig. 3.13과 Fig .3.14에서 Y축 틸팅각 0° , 1° 이두께 알루미늄 합금(AI5052) 마찰교반용접부에 대한 열전도 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 Thermocouple을 이용하여 측정한 실제 온도 값과 수치해석 결과 값을 비교하였다. 측정 위치는 Advancing side(1.5t)와 Retreating side(2.5t) 각각 계면에서 20mm 떨어지고 용접진행 방향의 75mm 지점에서 측정을 실시하였다. Y축 틸팅각 0° 일 때, Advancing side의 온도는 수치해석 결과와 실제 실험 결과 각각 446K, 440K이었고 Retreating side의 온도는 수치해석 결과와 실제 실험 결과 각각 458K, 465K으로 측정할 수 있었다. Y축 틸팅각 1° 일 때, Advancing side의 온도는 수치해석 결과와 실제 실험 결과 각각 443K, 444K이었고 Retreating side의 온도는 수치해석 결과와 실제 실험 결과 각각 463K, 468K으로 측정할 수 있었다. 수치해석 결과와 실제 측정 결과 값이 정성적으로나 정량적으로 거의 일치하였으므로 결과 값을 신뢰할 수 있다고 판단된다.



(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$



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

Fig. 3.8 Temperature fields of FSW welded joints with y-axis tilting angle at welding time 2sec

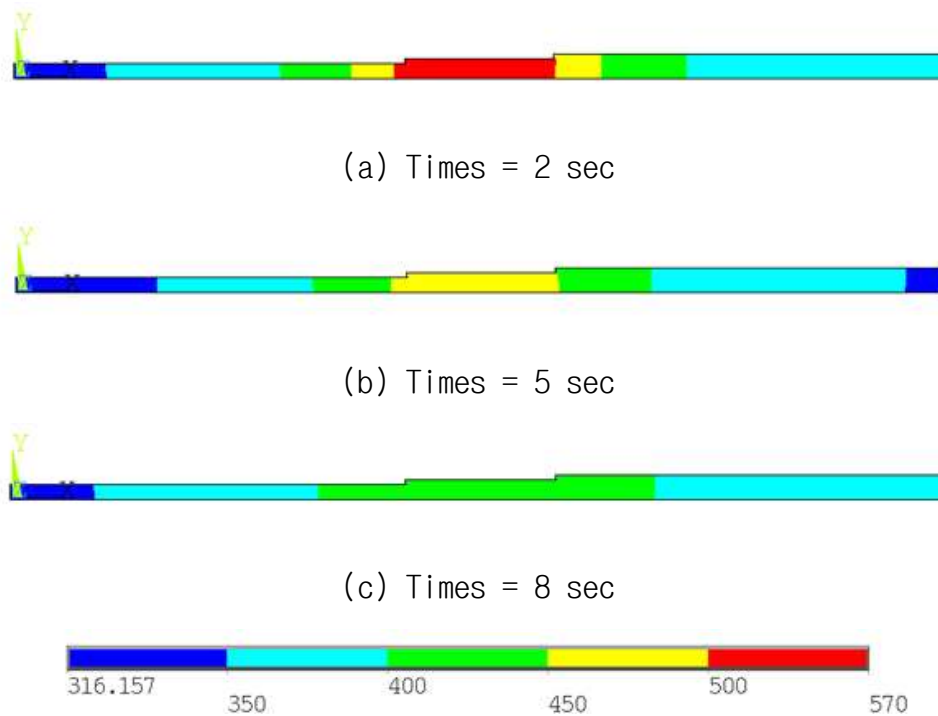


Fig. 3.9 Temperature distribution of FSW welded joints in y-axis Tilting angle  $0^\circ$  with time

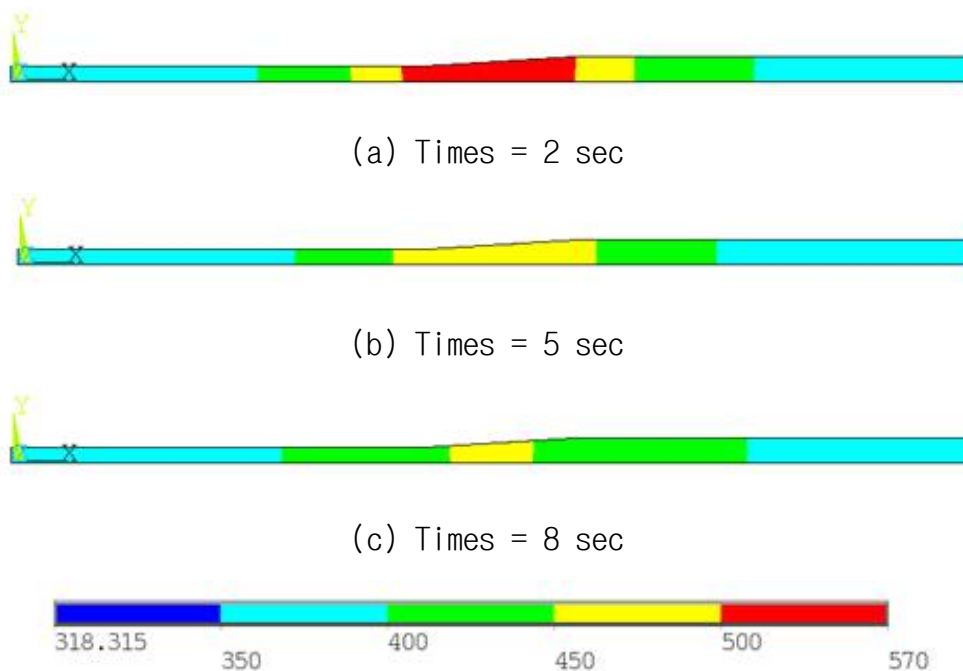
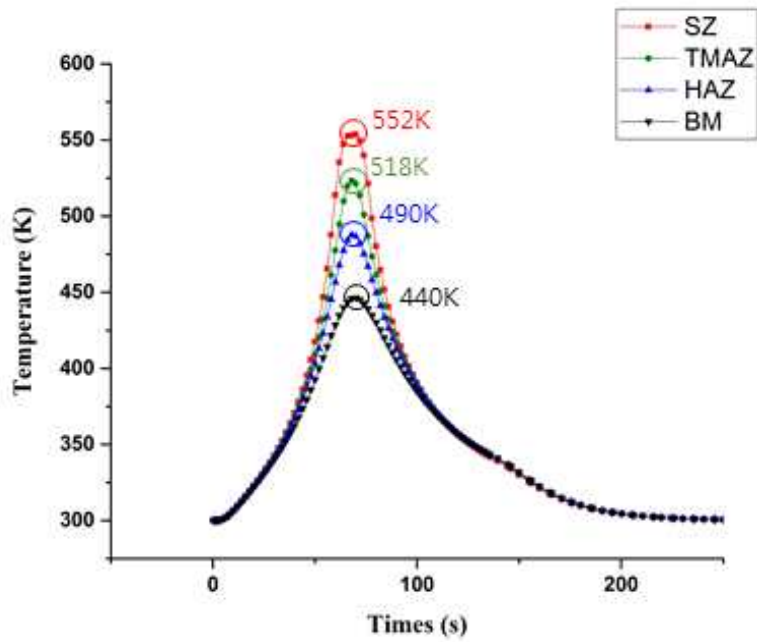
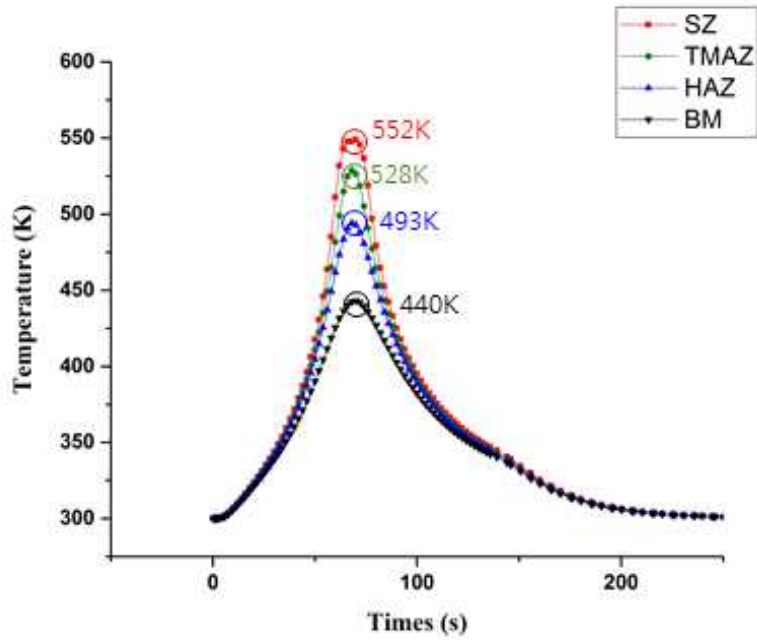


Fig. 3.10 Temperature distribution of FSW welded joints in y-axis tilting angle  $1^\circ$  with time

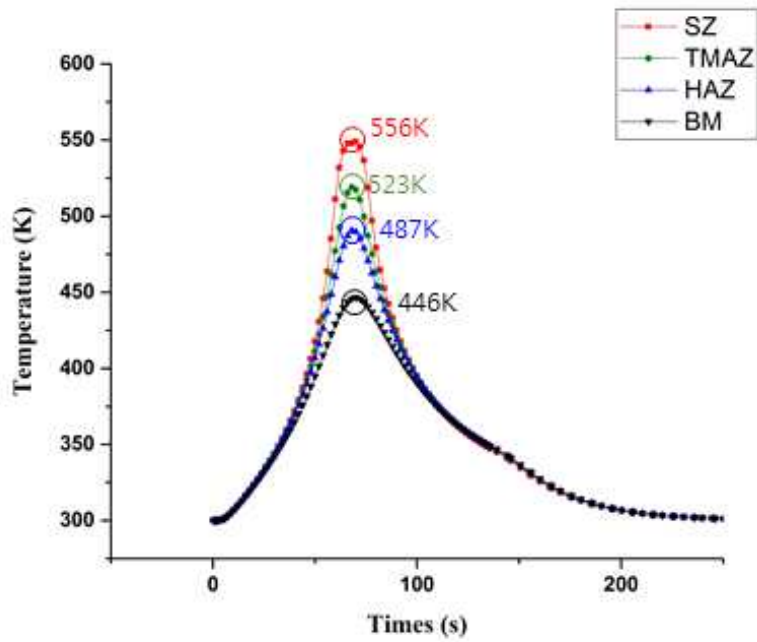


(a) Advancing side

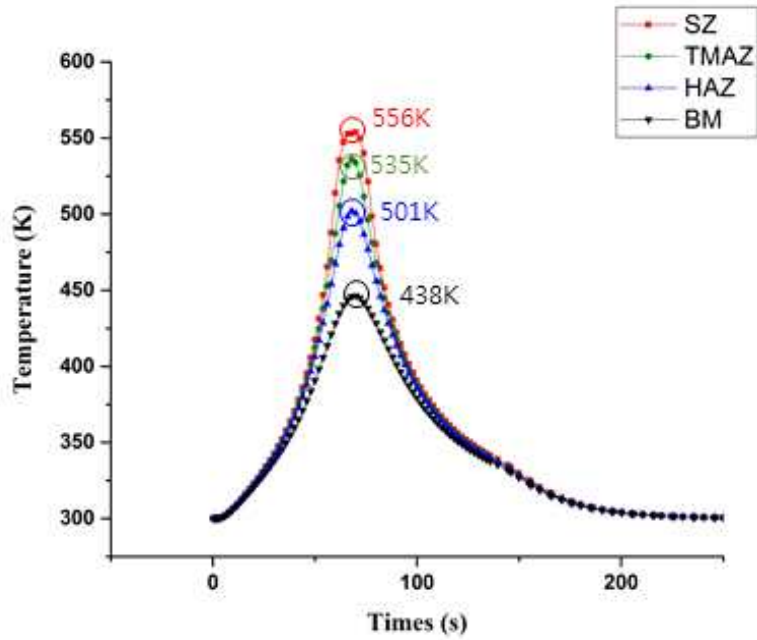


(b) Retreating side

Fig. 3.11 Temperature histories (SZ, TMAZ, HAZ, BM) of FSW welded joints at y-axis tilting angle  $0^\circ$

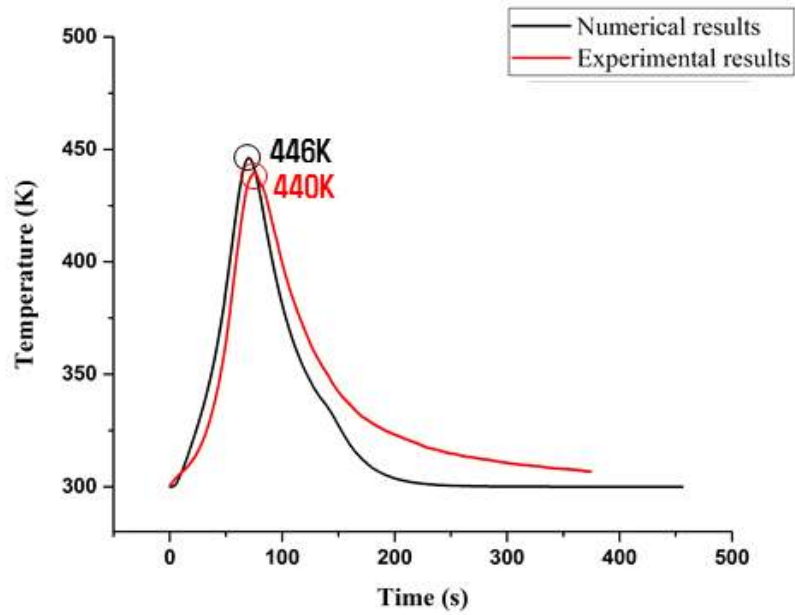


(a) Advancing side

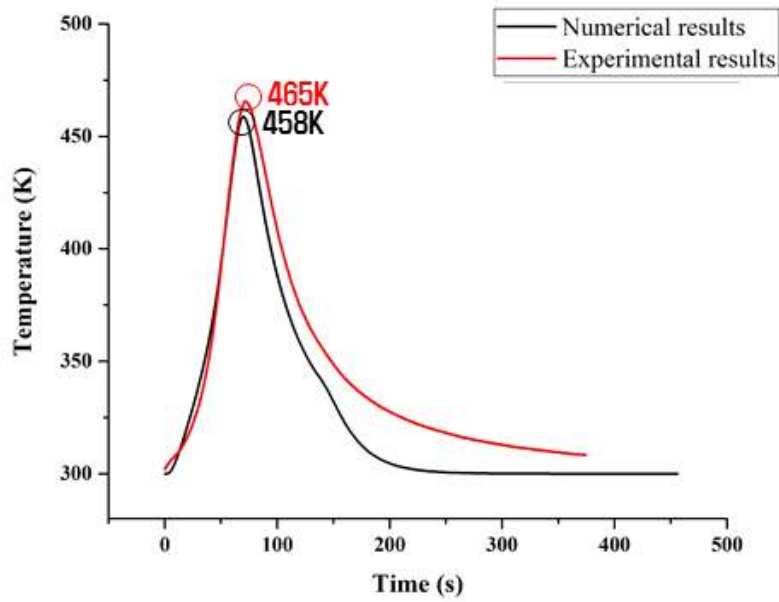


(b) Retreating side

Fig. 3.12 Temperature histories (SZ, TMAZ, HAZ, BM) of FSW welded joints at y-axis tilting angle 1°



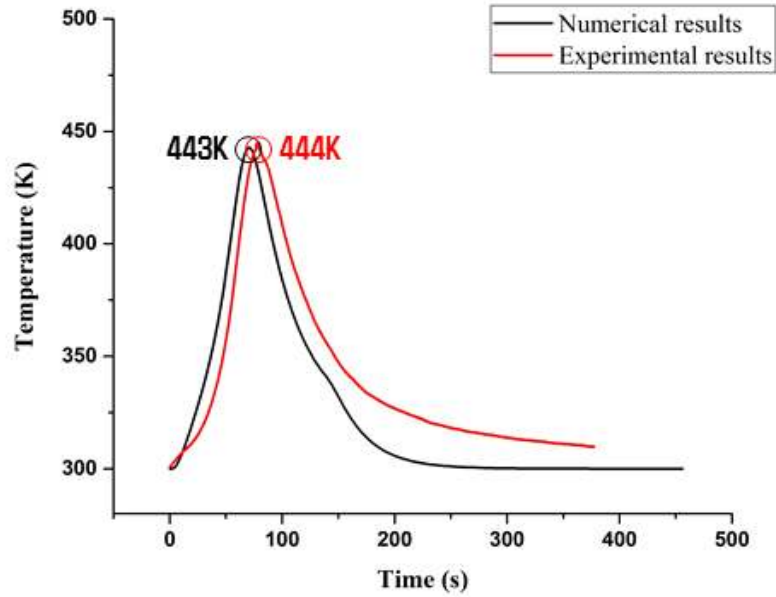
(a) Advancing side



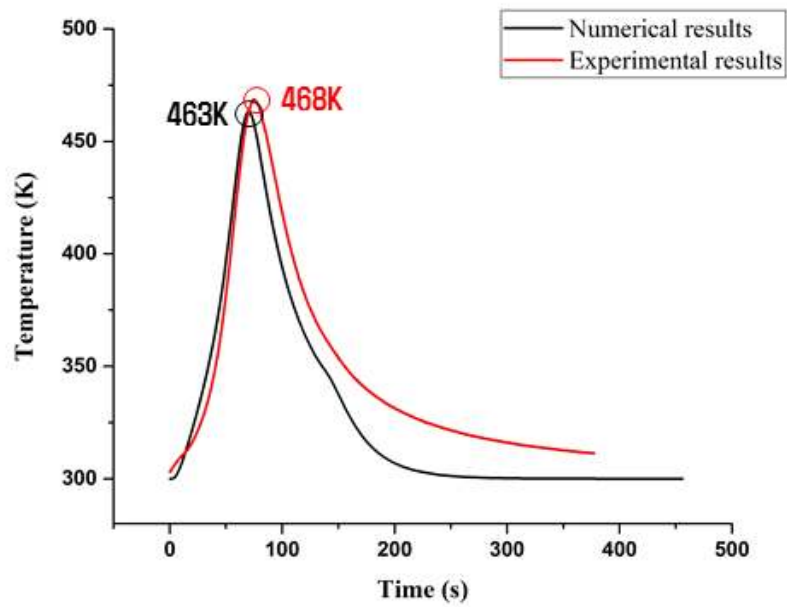
(b) Retreating side

Fig. 3.13 Temperature histories in middle position of FSW welded joints at y-axis tilting angle 0°





(a) Advancing side



(b) Retreating side

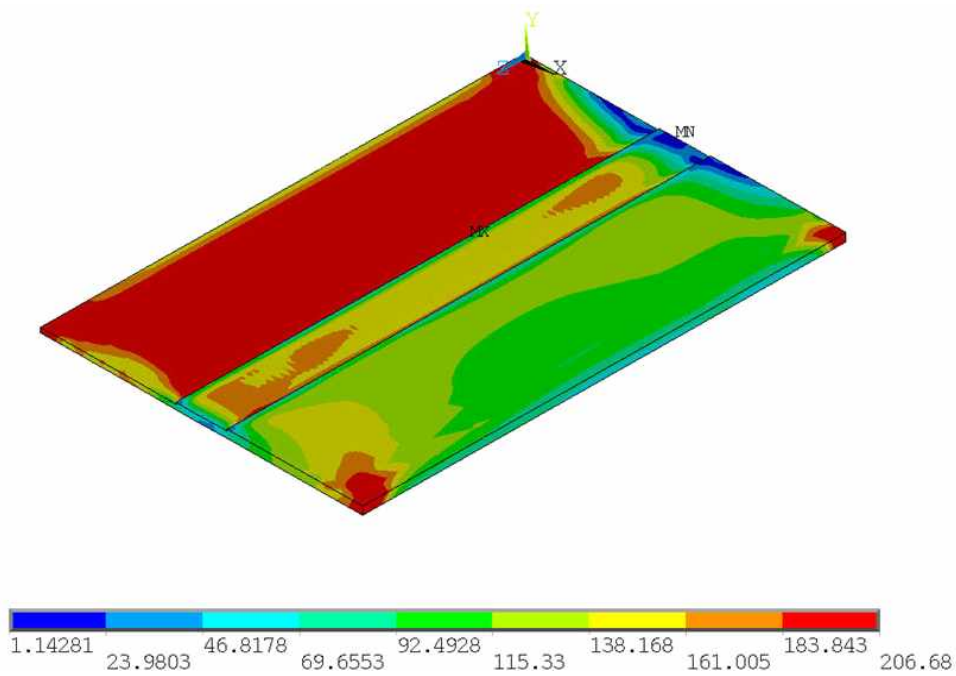
Fig. 3.14 Temperature histories in middle position of FSW welded joints at y-axis tilting angle 1°

### 3.2.2 잔류응력 및 소성변형률

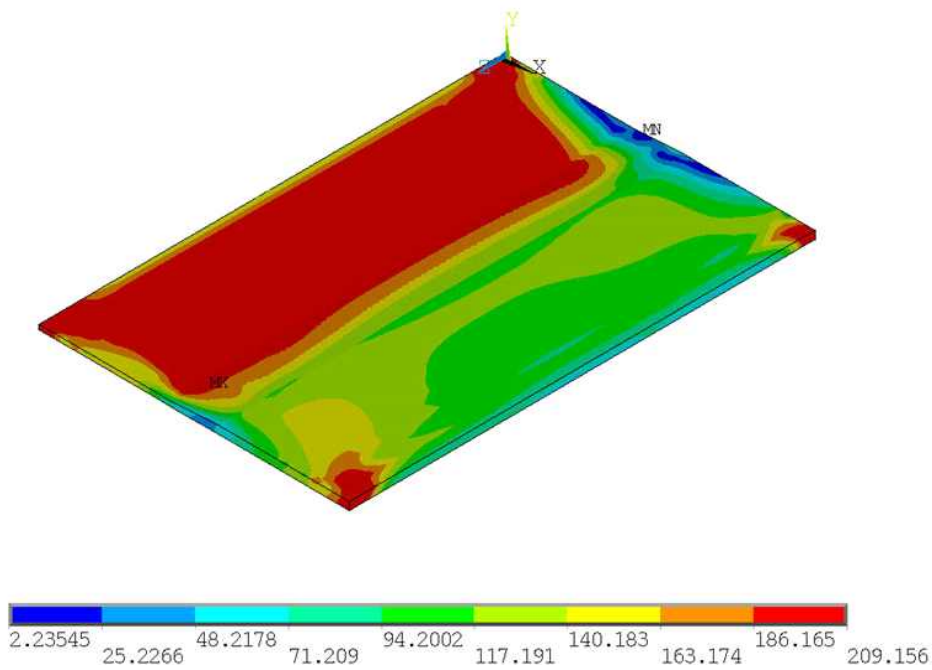
Fig. 3.15는 수치해석을 이용하여 이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접부의 잔류응력 분포를 수치해석한 것이다. 틸팅각 변화에 따른 잔류응력 분포는 정성적으로 동일한 특성을 보였고, 정량적인 최대 잔류응력 값으로는 Y축 틸팅각 0° 에서 200MPa, Y축 틸팅각 1° 에서 201MPa로 측정되었고 모두 상대적으로 얇은 시편인 Advancing side(1.5t)의 TMAZ 부분에서 발생하였다.

Fig. 3.16에 방향별 잔류응력을 나타내었으며, 잔류응력의 측정위치는 길이방향으로 75mm, 바닥에서 1mm 떨어진 부분에서 측정을 실시하였다. Y축 틸팅각 0° , 1° 모두 비슷한 경향성을 보였다. Fig. 3.15에서 확인한 것과 같이 Retreating side(2.5t)보다 Advancing side(1.5t)에서 더 높은 잔류응력을 확인할 수 있었는데, 이는 상대적으로 두꺼운 2.5t 판재 쪽에서 1.5t 판재 쪽을 강하게 구속을 하기 때문이라고 사료된다. 또한 시험편의 잔류응력 분포를 확인한 결과 중앙에서 5mm 정도 떨어진 부분에서 최대 잔류응력이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3. 17은 틀의 두께 방향인 Y축 틸팅각 변화에 따른 이두께 알루미늄 합금(AI5052)의 마찰교반용접 후 시험편의 상당변형률의 분포를 나타낸 것이다. Fig 3.18에서 방향별 상당변형률을 나타내었고, 최대 상당변형률은 Y축 틸팅각 0° 에서 0.030729이며, Y축 틸팅각 1° 에서 0.046809로 0.01608 정도 보다 더 많이 발생함을 확인할 수 있었다. 최대 상당변형률의 발생 위치는 Y축 틸팅각 0° 는 용접 계면부근이었고, 1° 는 용접부에서 Advancing side(1.5t) 측으로 약 5mm 떨어진 위치였다. Y축 틸팅각 0° 일 때 보다 Y축 틸팅각 1° 일 때 상당변형률이 큰 것을 알 수 있었으며, 틸팅각이 증가함에 따라 상당변형률이 증가함과 동시에 최대 상당변형률 발생 위치가 계면에서 Advancing side(1.5t) 측으로 바뀌었음을 확인할 수 있었다. 또한 Y축 틸팅각 1° 에서 두께 단차가 줄어들어 Y축 틸팅각 0° 일 때 보다 틀이 용접부 끝단까지 삽입되기 때문에 입열량이 향상되고 소성유동이 활발해짐에 따라 상당변형률이 증가함을 확인할 수 있었다.

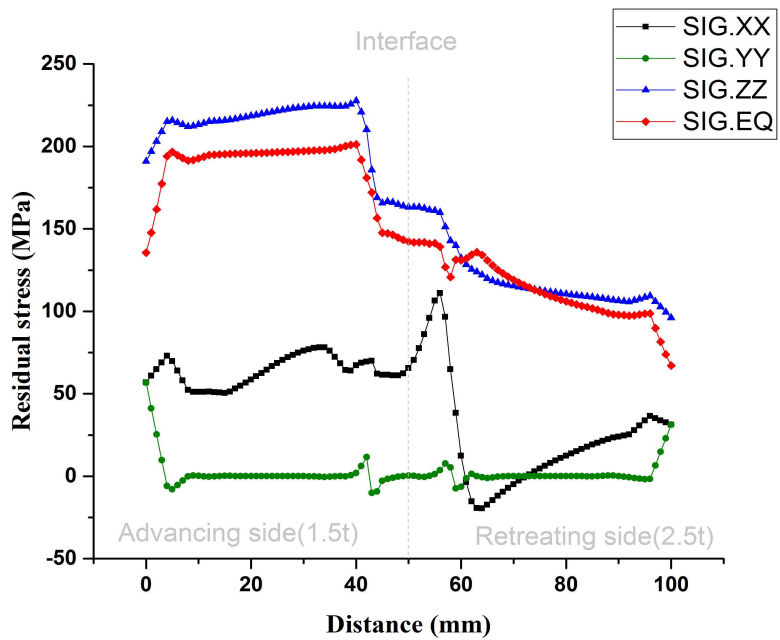


(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$

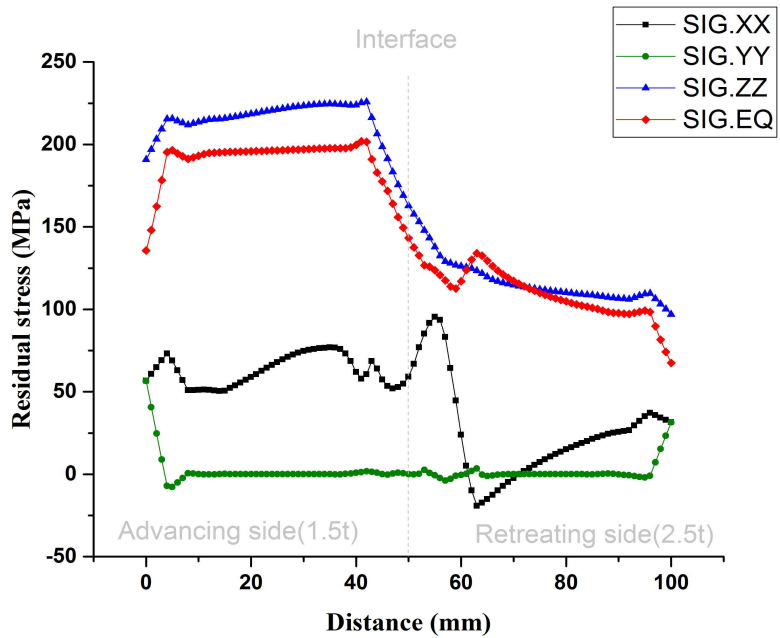


(b) Y-axis tilting angle  $1^\circ$

Fig. 3.15 Residual stress fields of FSW welded joints with Y-axis tilting angle

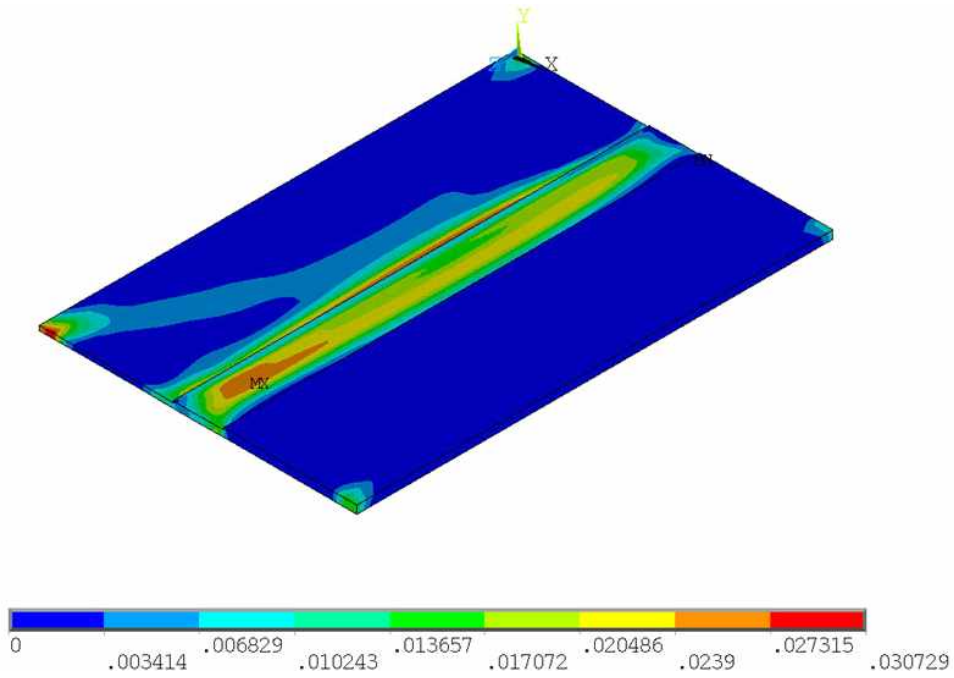


(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$

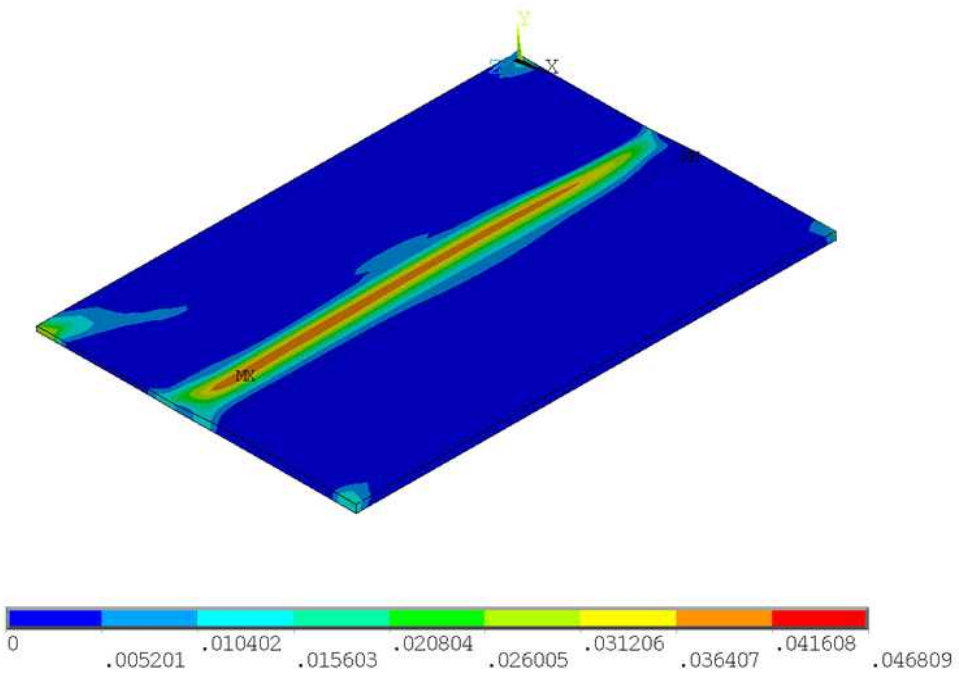


(b) Y-axis tilting angle  $1^\circ$

Fig. 3.16 Residual stress distribution in middle position of FSW welded joints with y-axis tilting angle

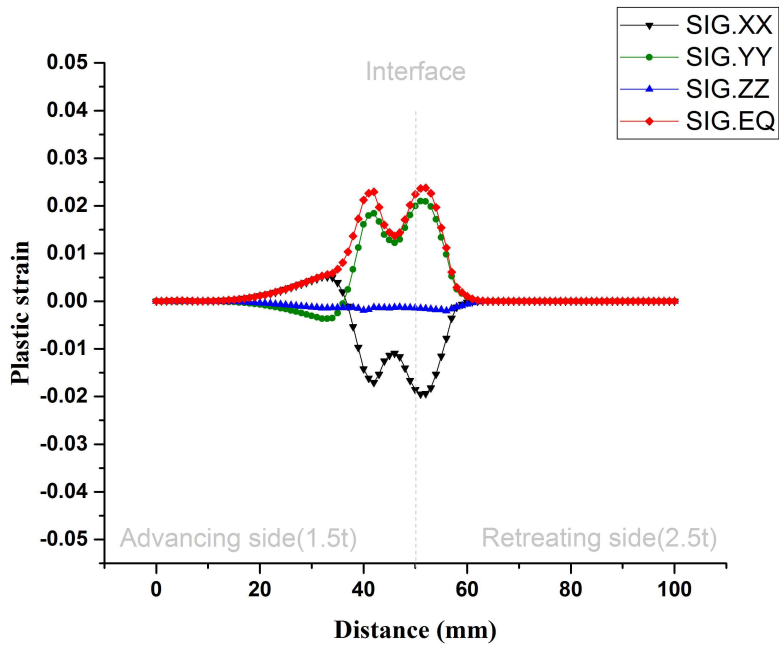


(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$

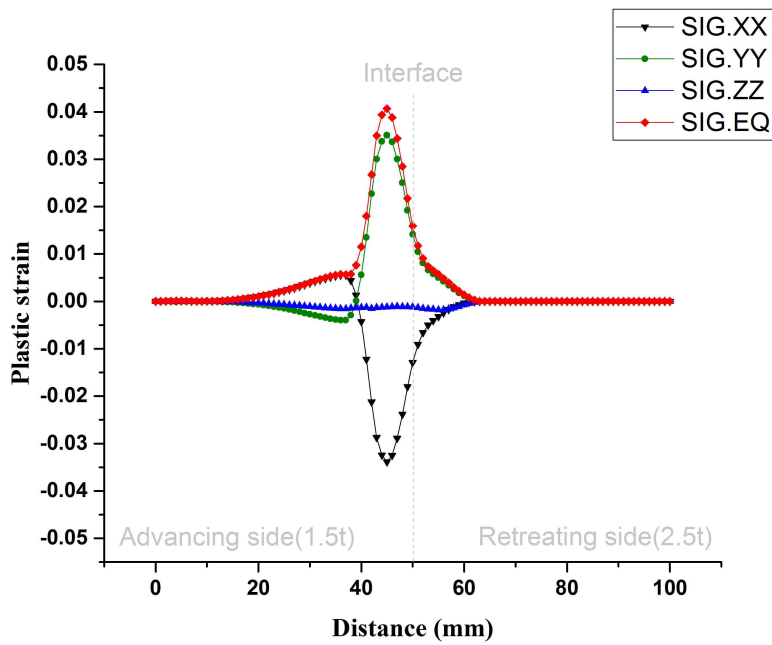


(b) Y-axis tilting angle  $1^\circ$

Fig. 3.17 Plastic strain fields of FSW welded joints with y-axis tilting angle



(a) Y-axis tilting angle  $0^\circ$



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

Fig. 3.18 Plastic strain distribution in middle position of FSW welded joints with y-axis tilting angle

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 이(異)두께 알루미늄 합금(AI5052) 마찰교반용접 시 틀의 두께 방향 틸팅각에 따른 용접성 및 성형성을 평가하고자 하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Y축 틸팅각 0~3° 변화에 따른 용접 특성을 고찰한 결과, 0°에서는 용접부 끝단까지 접합이 이루어지지 않았고, Y축 틸팅각을 기울인 결과 용접부 끝단부까지 접합이 되는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 두께 단차가 줄어듦으로 인해 틀의 완벽한 삽입이 이루어져 입열량 증가 및 원활한 소성유동이 일어났기 때문이라고 사료된다.

2) Y축 틸팅각 1°에서 가장 높은 인장강도 값인 225MPa(모재대비 98%)을 확보하였고, 모재파단이 발생하였다. 그러나 Y축 틸팅각이 증가할수록 과입열로 인한 Thinning Effect가 일어나 유효두께가 감소하는 경향을 보였고 이는 인장시험에서 인장강도가 감소하는 결과를 나타내었다.

3) Y축 틸팅각 1~3°의 성형성을 평가하기 위해 Erichsen Cupping Test를 실시한 결과 1°의 조건에서 가장 높은 값인 12.6mm가 관찰되었는데, 이는 Y축 틸팅각이 1°일 때 가장 높은 유효두께와 인장강도 값을 가지기 때문이라고 판단된다. 또한 2.5t 용접부에서 파단이 일어남을 확인할 수 있었다.

4) Y축 틸팅각 0°와 1°에 대한 열전도 수치해석을 실시한 결과 마찰교반용접부 계면에서 각각 552K, 556K의 최대온도를 나타내었고, 온도 분포는 Y축 틸팅각 1°에서 더 빠르게 열전도 됨을 확인할 수 있었다. 이는 두께 단차가 보완됨으로 인해 솔더와 시편의 접촉 면적이 증가하였기 때문이라고 판단된다.

5) 이(異)두께 알루미늄 합금 마찰교반용접부의 열탄소성 수치해석으로 얻어진 잔

류응력 최대 값은 약 201MPa로 Y축 틸팅각  $1^\circ$  의 용접부 중심에서 약 8mm 떨어진 Advancing side(1.5t)의 TMAZ 부분에서 확인되었으며, 2.5t보다 1.5t에서 더 큰 잔류응력을 확인할 수 있었다. 이는 2.5t가 상대적으로 얇은 1.5t를 더 강하게 구속하기 때문이라고 사료된다. 또한 Y축 틸팅각  $1^\circ$  에서 0.01608 더 높은 상당변형률이 발생하였다.



## 참고문헌

- [1] 방한서, 방희선, 전근홍. (2011). 마찰교반접합기술을 이용한 이종재료 접합에 관한 최근 연구동향. 대한용접접합학회지, 29(5), 37-40.
- [2] 장인성, 조용준, 박현성, 소득영. (2016). 자동차 산업에서 뿌리기술의 중요성 및 최신 용접/접합 기술. 대한용접접합학회지, 34(1), 21-25.
- [3] 이강문, 김윤규, 문만빈. (2013). 차체 경량화 최신 기술 동향. 소성가공, 22(5), 286-290.
- [4] KINSEY, Brad; LIU, Zhihong; CAO, Jian. (2000). A novel forming technology for tailor-welded blanks. Journal of Materials Processing Technology, 99.1: 145-153.
- [5] 천창환, 한창석. (2010). TWB 판넬의 기계적특성 평가에 관한 연구. 열처리공학회지, 23.4: 183-190.
- [6] M. Mehta, A. Arora, A. De, T. Debroy. (2011). Tool Geometry for Friction Stir Welding-Optimum Shoulder Diameter.
- [7] THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D. (1997). Friction stir welding for the transportation industries. Materials & design, 18.4: 269-273.
- [8] CAM, Gürel; MISTIKOGLU, Selcuk. (2014). Recent developments in friction stir welding of Al-alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 23.6: 1936-1953.
- [9] OHBA, Hideshi; UEDA, Chiaki; AGATSUMA, Kouji. (2001). Innovative Vehicle -the "A-train" . Hitachi Review, 50.4: 131.
- [10] 정현호, 이예림, 유준태, 윤종훈, 민경주, 이호성. (2014). 마찰교반용접 기술의 항공우주분야 응용 동향. 항공우주산업기술동향, 12(2), 158-165.
- [11] KWON, Y. J.; SHIGEMATSU, Ichinori; SAITO, Naobumi. (2008). Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys. Materials Letters, 62.23: 3827-3829.
- [12] SHIGEMATSU, I., et al. (2003). Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys

- by friction stir welding. *Journal of Materials Science Letters*, 22.5: 353-356.
- [13] FUJII, Hidetoshi, et al. (2006). Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 419.1: 25-31.
- [14] W. B. Lee, S. W. Kim, C. Y. Lee, Y. M. Yeon, W. S. Chang, C. C. Shur and S. B. Jung. (2004). Effects of Welding Parameters on the Friction Stir Weldability of 5052 Al alloy, *Journal of KWJS*, 22, pp69-76
- [15] MOSHWAN, Raza, et al. (2015). Effect of tool rotational speed on force generation, microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg-Cr-Mn (AA 5052-0) alloy. *Materials & Design (1980-2015)*, 66: 118-128.
- [16] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu and B. Zou. (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, *Materials and Design*, 32, pp4461-4470
- [17] 연윤모, 이원배, 이창용, 정승부, 송건. (2006). 마찰교반 점용접한 A 5052 알루미늄 합금판재의 접합부 특성. *대한용접접합학회지*, 24(1), pp71-76.
- [18] Y. M. Yeon, W. B. Lee, C. Y. Lee, S. B. Jung and K. Song. (2006). Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A 5052 Alloy Sheet, *Journal of KWJS*, 24, pp71-76