



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

통계적 분석에 의한 마찰교반용접시  
A1 6061 합금의 특성 및 강도 평가



2015년 2월

부경대학교 산업대학원

기계공학과

이 대 열

공 학 석 사 학 위 논 문

# 통계적 분석에 의한 마찰교반용접시 A1 6061 합금의 특성 및 강도 평가

지도교수 강 대 민

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.

2015년 2월

부경대학교 산업대학원

기계공학과

이 대 열

# 이대열의 공학석사 학위 논문을 인준함

2014년 12월 19일



주 심 공학박사 곽 재 섭 (인)

위 원 공학박사 김 태 완 (인)

위 원 공학박사 강 대 민 (인)

# 목 차

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| List of figures ..... | iii    |
| List of tables .....  | iv     |
| Abstract .....        | v      |
| <br>1. 서 론 .....      | <br>1  |
| 1.1 연구배경 .....        | 1      |
| 1.2 연구동향 및 연구목적 ..... | 3      |
| <br>2. 이론적 배경 .....   | <br>7  |
| 2.1 알루미늄 합금의 특성 ..... | 7      |
| 2.2 마찰교반용접의 원리 .....  | 9      |
| 2.3 유한요소법 .....       | 12     |
| 2.4 실험계획법 .....       | 14     |
| <br>3. 실험 .....       | <br>19 |
| 3.1 실험재료 및 실험장치 ..... | 19     |
| 3.2 실험방법 및 조건 .....   | 23     |
| <br>4. 유한요소해석 .....   | <br>25 |
| 4.1 모델링 .....         | 25     |
| 4.2 해석조건 및 해석방법 ..... | 27     |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 5. 결과 및 고찰 .....         | 29 |
| 5.1 실험결과 .....           | 29 |
| 5.2 해석결과 .....           | 41 |
| 5.3 실험결과 및 해석결과 비교 ..... | 65 |
| 6. 결론 .....              | 67 |
| 참고문헌 .....               | 69 |



## **List of figures**

- Fig. 2.2.1 Schematic diagram of basic principle of FWS
- Fig. 2.2.2 Process of FSW
- Fig. 2.3.1 The basic building block of SYSWELD
- Fig. 3.1.1 Al 6061 alloy proof piece
- Fig. 3.1.2 Equipment of FWS
- Fig. 3.1.3 Dimension of the jig & fixture
- Fig. 3.1.4 Geometry of the tool
- Fig. 3.1.5 Fig. 3.1.5 Tensile specimen (a) and wire cutting machine (b)
- Fig. 4.1.1 3D modeling of FSW
- Fig. 4.1.2 3D geometry for analysis
- Fig. 4.1.3 Modeling and mesh geometry
- Fig. 5.1.1 Response plots for tensile strengths
- Fig. 5.1.2 Graphical illustration of the contribution on all factors (Tensile strength)
- Fig. 5.2.1 Response plots for temperature result
- Fig. 5.2.2 Graphical illustration of the contribution on all factors (Temperature)
- Fig. 5.2.3 Response plots for von Mises stress
- Fig. 5.2.4 Graphical illustration of the contribution on all factors (Von Mises stress)

## **List of tables**

|             |                                                                     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| Table 2.1.1 | Composition of the properties between aluminum alloy and steel      |
| Table 2.1.2 | Chemical composition of AL6061 (Wt.%)                               |
| Table 2.1.3 | Mecanical chracteristic of AL6061                                   |
| Table 2.4.1 | The data array of three-way factorial design                        |
| Table 2.4.2 | AB two way list                                                     |
| Table 2.4.3 | AC two way list                                                     |
| Table 2.4.4 | BC two way list                                                     |
| Table 2.4.5 | ANOVA for three-way factorial design                                |
| Table 3.1.1 | Tool measuring used in experiment                                   |
| Table 3.2.1 | Factors and levels for experiment                                   |
| Table 3.2.2 | Experiment conditions for FWS                                       |
| Table 4.1.1 | Tool measurement for analysis                                       |
| Table 4.2.1 | Factors and each levels for analysis                                |
| Table 4.2.2 | The analysis plan of three-way factorial design                     |
| Table 5.1.1 | Tensile strength (Lever 1)                                          |
| Table 5.1.2 | Tensile strength (Lever 2)                                          |
| Table 5.1.3 | Tensile strength (Lever 3)                                          |
| Table 5.1.4 | ANOVA for tensile strength                                          |
| Table 5.1.5 | Estimated tensile strength for each factors                         |
| Table 5.1.6 | Quality view results of FWS (shoulder diameter 9mm)                 |
| Table 5.1.7 | Quality view results of FWS (shoulder diameter 12mm)                |
| Table 5.1.8 | Quality view results of FWS (shoulder diameter 15mm)                |
| Table 5.1.9 | Tensile specimens of FWS after tensile test (shoulder diameter 9mm) |



|              |                                                                      |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| Table 5.1.10 | Tensile specimens of FWS after tensile test (shoulder diameter 12mm) |
| Table 5.1.11 | Tensile specimens of FWS after tensile test (shoulder diameter 15mm) |
| Table 5.2.1  | Temperature (Lever 1)                                                |
| Table 5.2.2  | Temperature (Lever 2)                                                |
| Table 5.2.3  | Temperature (Lever 3)                                                |
| Table 5.2.4  | ANOVA for FWS maximum temperature                                    |
| Table 5.2.5  | Estimated temperature for each factors                               |
| Table 5.2.6  | Temperature by analysis (section view : shoulder diameter 9mm)       |
| Table 5.2.7  | Temperature by analysis (section view : shoulder diameter 12mm)      |
| Table 5.2.8  | Temperature by analysis (section view : shoulder diameter 15mm)      |
| Table 5.2.9  | Temperature by analysis (top view : shoulder diameter 9mm)           |
| Table 5.2.10 | Temperature by analysis (top view : shoulder diameter 12mm)          |
| Table 5.2.11 | Temperature by analysis (top view : shoulder diameter 15mm)          |
| Table 5.2.12 | Von Mises stress (Level 1)                                           |
| Table 5.2.13 | Von Mises stress (Level 2)                                           |
| Table 5.2.14 | Von Mises stress (Level 3)                                           |
| Table 5.2.15 | ANOVA for von Mises stress                                           |
| Table 5.2.16 | Estimated von Mises stress for each factors                          |
| Table 5.2.17 | Results of analysis (section view : shoulder diameter 9mm)           |
| Table 5.2.18 | Results of analysis (section view : shoulder diameter 12mm)          |
| Table 5.2.19 | Results of analysis (section view : shoulder diameter 15mm)          |
| Table 5.2.20 | Results of analysis (top view : shoulder diameter 9mm)               |
| Table 5.2.21 | Results of analysis (top view : shoulder diameter 12mm)              |
| Table 5.2.22 | Results of analysis (top view : shoulder diameter 15mm)              |
| Table 5.3.1  | Analysis and experiment result of FWS                                |

# Characteristics and Strength of Aluminium 6061 Alloy in Friction Stir Welding by Statistical Analysis

**Lee, Dai Yeal**

*Department of Mechanical Engineering,  
Graduate School of Pukyong National University*

## ABSTRACT

Recently, the energy-saving was growing up to interest of transporting machine field because of globally environmental pollution problem. In this paper, welding of AL6061 alloy based on a representative sample of FWS(Friction Stir Welding) are proposed to characterize welding parameter's relation by DOE(Design of Experiment) of statistical estimation techniques. It makes also high reliability data analysis and cost reduction up by applying for FEM(Finite Element Method). In this case, the control factors of welding of AL6061 alloy based on a representative sample of FWS are shoulder diameter, travel speed, and rotation speed of tool. And the impact of tensile strength on welding parameter analyzed using the each factor proceed with experiment by changing 3 stage level. Also, The effects that each variable has on the characteristic values were analyzed using the analysis of variance (ANOVA). And temperature field and von mises stress were obtained and valid of numerical analysis was verified by applying for SYSWELD.

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

20세기 용접기술이 발전함에 따라 금속 접합의 혁신의 시대를 맞게 되어 급속도로 발전하는 현대 산업사회에서 제품의 생산성과 품질향상에 지대한 공헌을 하고 있다. 100년이라는 짧은 역사를 가지고 있지만 두 번의 세계전쟁을 거치며 군수물자를 생산하는 기술로 사용되면서 급속도로 발전하였다. 또한 현대에 들어 생산품의 가격경쟁력에 직접적인 영향을 미치므로 생산성 증대를 위해 새로운 용접기술의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 국내에서는 조선, 자동차, 철도차량, 항공기, 반도체, 전기전자제품, 원자력발전설비, 방산기계, 산업기계, 화학설비 산업에서 정부의 중화학 산업육성책과 1990년대 반도체 산업의 부흥으로 비약적인 발전을 이루었으며 용접기술은 상기 대부분의 산업분야 전반에 핵심적으로 사용되며 국가 경제에 중요한 영향을 미치고 있다.<sup>1)</sup> 현재 세계적으로 환경오염에 대한 우려와 고유가에 따른 에너지 절감의 문제로, 경량화 및 고강도의 비철합금 소재의 수요가 크게 증가 하고 있는 추세이다.<sup>2)</sup> 이러한 요구에 알루미늄 합금은 강도와 내식성, 인성 및 저온 특성을 가지기 때문에 여러 산업 분야에 많이 사용되고 있으며 그 사용범위가 날로 증가하고 있다.<sup>3-5)</sup> 알루미늄합금을 주재료로 하는 많은 기계부품은 주로 용접에 의하여 제작되며 용접재에 대한 피로거동의 지식이 매우 중요하다. 알루미늄 피로거동에 대한 수많은 데이터가 있지만 상대적으로 마찰교반용접(Friction stir welding, FSW)에 관한 연구는 아직 많이 부진한 상태이다. 이러한 마찰교반용접은 1991년 영국용접연구소(The Welding Institute, TWI)에서 개발되었고 고상상태의 접합 기술로서 비소모성 공구를 이용하여 재료를 교반 일체화하는 새로운 원리의 용접기술이다.<sup>6)</sup> 알루미늄 합

금은 선팅창계수는 철강재에 비해 약 두 배 정도 크기 때문에 용접 후 변형이 용접부에 잔류하기 쉬워 접합부의 기계적 특성이 매우 떨어진다. 알루미늄 용접 시 다량의 열이 유입되고 회복 재결에 의해 가공경화성에 손실 및 미세석출물의 용해 등이 일어나 강도가 현저히 저하되고 고용강화 원소가 증발하기 때문에 용접부는 모재에 비해 기계적 특성이 현저히 떨어진다. 그 외에도 열전도율이 높기 때문에 용융이 어렵고 알루미늄 합금의 표면에서 특히 고용점의 산화피막이 발생하는 등 많은 문제점이 존재한다. 마찰교반용접은 기존의 용융용접에 비해 접합부 결함이 없으며 기계적 특성이 우수한 특징을 가짐은 물론 친환경적이며 용접변형이 적으며 용접구조물의 강도적 측면에서 그 뛰어남은 여러 논문에서 이미 입증된바 있다.<sup>7)</sup> 마찰교반용접의 적용범위는 급속도로 확대 되어가고 있으며, 알루미늄 동종계의 접합은 물론이며 이종재의 접합도 가능하며 알루미늄 합금의 용접 철강재료 접합의 영역까지 확대되고 있으며 산업현장에 마찰교반용접의 적용범위는 무궁무진하며 제조 공정에서 핵심적인 기술로 자리 잡을 것이다.<sup>8-10)</sup>

## 1.2 연구 동향 및 연구 목적

마찰교반용접기술은 알루미늄을 주로 이용한 용접기술로써 용접 결함 발생 문제를 해결하고 유해 물질을 배출하지 않기 때문에 경제적이고 친환경적인 접합 기술로 각광받고 있다.<sup>11-13)</sup> 선박 또는 철도차량 제작 시 과거 아크용접 후 꼭 필요했던 용접 변형 교정 작업을 생략할 수 있어 제작 공정을 간소화시킬 수 있게 되었다. 더불어 항공기 제작 시 발생하는 용접결함을 제거하기 위해 사용되던 리벳이음방식은 FSW기술로 대체함으로써 자동화가 가능하게 되어 획기적으로 용접결함을 방지하고 비용이 절감된다. 경량합금의 용접을 가능케 만든 마찰교반용접은 자동차 산업에 있어서 파란을 일으켰다. 대표적으로 일본 자동차 업체인 혼다는 '신형 어코드(2.4 model)' 서브 프레임에 알루미늄과 강철을 용접하는 마찰교반용접 기술을 세계 최초로 적용하여 연비 향상까지 이룰 수 있었다. 결과적으로 미국에서 리터당 12.75km(30mpg)의 복합 연비를 기록하여 현대 소나타와 도요타 신형 캠리보다 연료의 효율성이 나은 것으로 평가되었고, 뿐만 아니라 이전의 강철제 프레임보다 강도는 20% 향상시키고, 무게는 25% 줄일 수 있었다. 지금까지 차량 경량화 소재로 알루미늄이 각광받아 왔지만, 철강 재료에 비하면 용접에 한계성이 있고, 가격이 비싸서 실제 적용에는 제한적일 수밖에 없었다. 그래서 알루미늄과 강판 용접 시 접촉 부분에 있어서 전해부식(electrolytic etching)으로 인해 제품에 문제가 있어서, 알루미늄은 도어, 보닛, 아우터패널 등 용접이 불필요한 부분에 일부 사용되거나 주요 부품에 도금 형식으로 사용되었다. 경우에 따라서, 일부차량에 있어서 알루미늄 샷시가 통째로 적용되거나 아연 도금 층과 스폿 접합하는 비교적 복잡한 방식으로 사용되었으나 가격에 부담이 되는 게 사실이었다. 혼다는 마찰교반용접을 이용하여 기존의 아크



용접과 같은 방식의 가공 속도로, 전해부식을 더 쉽게 막을 수 있었고, 비용과 생산 공정에 맞춰 알루미늄 강판 조합을 조정해서 자동차에 적용시켰다. 자동차, 조선해양, 우주항공 등 기존의 제조업에서 전자 산업까지 다양한 분야에 있어서 마찰교반용접의 응용 범위가 점차 확대되고 있는 추세이다. 최근 애플이 개발한 아이맥(iMAC)의 경우 세계에서 가장 얇은 올인원 PC이다. 특히 이 제품에서 눈에 띄는 것은 PC 본체를 그대로 찍어낸 것 같은 간단한 일체형 디자인과 가전제품에 처음으로 마찰교반용접 기술을 적용시켜 기존 제품보다 두께를 최대 40% 이상 줄였다는 점이다. 마찰교반용접을 적용함으로 인해서 레이저 용접과 접착제를 적용하던 기존 방식의 두 장의 패널을 원래 한 장이었던 것처럼 깔끔하게 붙여 매끈한 외관을 만들 수 있게 되었고, 더불어 두께 감소에 의한 경량화 효과도 볼 수 있었다. 세계 용접 공정 시장 규모는 연평균 5% 수준의 성장률을 기록할 것으로 전망되어, 2011년 약 123억 달러 규모에서 2014년 약 143억 달러 규모까지 성장할 것으로 예상되고 있다. 특히 마찰용접 공정은 점진적으로 2014년까지 연평균 3.6% 성장률을 기록하여 약 6.5억 달러의 규모를 가진 시장을 형성할 것으로 보고 있다. 우리나라에 출원된 특허출원은 59건으로 이는 조사대상국 특허출원의 12.6%로, 이중 특허 내국인의 특허출원건수는 단 5건으로 매우 저조한 실정으로써 우리가 시급히 연구개발에 나서야 할 때라고 할 수 있다. FSW기술의 특허출원을 살펴보면 1996년 세계 주요국의 특허 출원이 22건에서 2002년에는 138건으로 점점 증가하고 있으며, 2004년까지의 469건의 특허출원을 국가별로 살펴보면 일본 33.3% 미국 30.7% 유럽 23.5% 로서 선진국들이 대부분을 차지하고 있다. 기존 용접 공정의 개념을 획기적으로 넘어선 것으로 평가되는 마찰교반용접은 이중 판재의 마찰 압접을 가능하게 만들었고, 더불어 친환경과 경제성 등에 있어서 큰 장점을 가지고 있어서 앞으로 더

많은 응용이 기대되고 있다. 또한 마찰교반용접의 설비 기술이 발전함에 따라서 자동차, 항공기 부품, 액체수소용기 등에 본격적으로 응용이 시도되고 있고, 현재까지 용접이 어려웠던 분야에 있어서도 적용시키기 위한 연구 개발이 지속될 것으로 예상된다. 국내외 연구동향을 살펴보면, Moreira등<sup>14)</sup>은 A6061-T6와 A6082-T6에 대해 GMAW 및 마찰교반용접을 수행하여 용접부의 인장강도, 경도 및 미세구조를 모재와 비교하였으며, Mahoney등<sup>15)</sup>은 A7075-T654 합금에 대해, Liu등<sup>16)</sup>은 A2017-T351 합금에 대해 마찰교반용접을 수행한 후 기계적 특성을 모재와 비교함으로써 마찰교반용접된 용접부의 성능을 평가하였다. 또한 모재의 재질에 따른 접합부의 기계적 성질을 분석, 용접 조건과 접합부의 기계적 특성과의 관계를 규명하여 최적 공정 설계에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 임성곤 등<sup>17)</sup>은 여러 가지 알루미늄 합금에 대해 마찰교반용접을 실시한 후 접합부의 미세조직과 인장특성을 비교하였고, 방항서<sup>18)</sup> 등은 Al6061 합금에 대한 마찰교반용접 접합부의 열적 거동을 분석하였고, 김상식 등<sup>19)</sup>도 같은 합금에 대하여 마찰교반용접 접합부의 응력부식 균열 거동에 대해 살펴보았다. 또한 용접 공정 변수의 변화에 따른 접합부의 기계적 성능 변화에 대한 연구도 많이 수행되었다. 박희상<sup>20)</sup> 등은 용접 공구의 형상과 이송 및 회전속도가 접합부의 기계적 특성과 피로 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 장석기 등<sup>21)</sup>은 용접 공구의 지름 및 길이, 솔더부의 지름을 변화시켜가며 Al합금에 대한 마찰교반용접을 실시하였고, 용접부의 인장 강도를 측정하여 인장 강도를 최대로 만드는 마찰교반용접의 용접 조건을 찾았으며, 박재철 등<sup>22)</sup>은 해수환경에서의 마찰교반용접된 알루미늄합금에 대한 부식특성 비교에 관한 연구를 하였다. 한편으로 마찰교반용접의 유한요소법 적용을 위한 연구도 활발히 진행되었다. 구병춘 등<sup>23)</sup>은 마찰교반용접 열원의 유한요소 모델링에 관한 연구와

Al 6061-T6 판재의 마찰교반용접 3D 유한요소해석에 관한 연구를 하는 등 최근 수년에 걸쳐 마찰교반용접 기술의 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 대표적인 경량합금인 Al 6061-T6 합금을 사용하여 마찰교반용접의 주요 용접 변수인 공구의 솔더 지름, 회전속도, 이송속도 3가지의 상관관계를 규명하고 최적 공정 조건을 도출하기 위하여 실험계획법을 적용하여 실험을 수행하였으며 통계적 분석 방법인 분산분석을 통해 마찰교반용접시 용접 변수들이 인장강도 특성에 미치는 영향에 대하여 정량적인 분석을 하였다. 또한 용접해석 전용프로그램인 SYSWELD를 이용하여 마찰교반용접시 공구의 솔더지름 회전속도, 이송속도 변화에 따른 유동해석 및 구조해석을 실시하여 온도분포와 응력분포를 파악하였다. 실험과 동일하게 실험계획법을 적용하여 온도와 응력에 용접 변수들이 미치는 영향에 대해 정량적으로 파악하고자 하였으며 실험의 결과와 해석의 결과를 비교 검토하여 마찰교반용접 실험과 해석의 결과에 대한 경향성을 파악하고자 하였다.



## 2. 이론적 배경

### 2.1 알루미늄 합금의 특성

알루미늄 합금의 비중은 2.73정도로 강재에 비해 1/3의 밀도를 가지며 경량화에 의한 성능향상이 요구되는 자동차, 철도, 항공기, 선박, 등의 분야에 많은 알루미늄 합금이 사용되고 있으며 열전도도가 좋으며 기계가공이 용이하며, 내식성이 강하고 저온강도 또한 우수하다. 또 용융점이 660°C로 낮아 재성과 합금이 용이하여 구조재로 적합하며 양극산화를 비롯한 각종 표면처리가 가능한 우수한 성질을 가지고 있다. Table 2.1.1은 알루미늄 합금과 강재의 물성치를 비교하였다.

Table 2.1.1 Composition of the properties between aluminum alloy and steel

| Property Material | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Electrical conductivity (%) | Thermal conductivity (W/m°C) | Thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /°C) | Melting point (°C) | Elastic modulus (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| aluminum          | 2,700                        | 62                          | 222                          | 23.6                                     | 660                | 70,000                               |
| steel             | 7,850                        | 10                          | 46                           | 12.6                                     | 1,350              | 207,000                              |

시편으로 사용한 판재 재료는 Al 6061-T6로 용접성이 양호하고, 내식성 및 가공성이 우수하다. 재료의 화학적 성분은 Table 2.1.2에 나타내었고, Table 2.1.3에 기계적 특성을 나타내었다.

시편은 본 실험을 위해 2mm×150mm×100mm로 전단가공으로 절단 후 접합부를 밀링머신으로 가공하여 접합성을 좋게 하였다.

Table 2.1.2 Chemical composition of AL6061(Wt.%)

| Al   | Si      | Fe   | Cu        | Mn   | Mg      | Cr        | Ti   |
|------|---------|------|-----------|------|---------|-----------|------|
| Rest | 0.4~0.8 | 0.70 | 0.15~0.40 | 0.15 | 0.8~1.2 | 0.04~0.35 | 0.25 |

Table 2.1.3 Mechanical characteristic of AL6061

|            | Yield Strength<br>kgf/mm <sup>2</sup> | Tensile Strength<br>kgf/mm <sup>2</sup> | Elongation<br>thickness<br>1/16" thick | Brinell Hardness<br>(HB) | Shear Strength<br>kgf/mm <sup>2</sup> | Fatigue Strength<br>kgf/mm <sup>2</sup> |
|------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| Al 6061-O  | 5.6                                   | 12.7                                    | 25                                     | 30                       | 8.4                                   | 6.3                                     |
| Al 6061-T4 | 14.8                                  | 24.6                                    | 22                                     | 62                       | 16.9                                  | 9.8                                     |
| Al 6061-T6 | 28.1                                  | 31.6                                    | 12                                     | 95                       | 21.1                                  | 9.8                                     |

## 2.2 마찰교반용접의 원리 및 특성

마찰교반용접은 용접부에 삽입된 비소모성 회전공구를 고속으로 회전시키면서 두 개의 재료 사이를 마찰시키며 용접라인을 따라 이송시킴으로써 재료와의 마찰열을 이용하여 접합부를 가열, 연화, 소성, 유동화 시켜 고상으로 용접하는 독특한 연속 공정이다. 마찰교반용접 원리의 개념도를 Fig. 2.1과 같이 간단하게 도시하였다. 접합할 모재를 고정시킨 후 이음부의 용접라인을 따라 접합모재에 비해 경한 재질의 비소모식 회전 툴의 일부분이 삽입되어 툴과 접합모재의 상대적 운동에 발생하는 마찰열을 이용하여 모재의 변형 저항을 낮추고 연화시켜 모재에 삽입된 프로브(probe) 부위로 연화된 제3의 영역이 생기게 된다. 이때 교반을 일으키는 툴이 접합부를 따라 이송함으로 가열된 부위가 프로브의 전방에서 후방으로 압출되고 마찰열과 기계적 운동의 조합에 의해 마찰교반용접 너깃(nugget)이 형성되며 고상 용접부가 만들어진다.<sup>24-28)</sup>

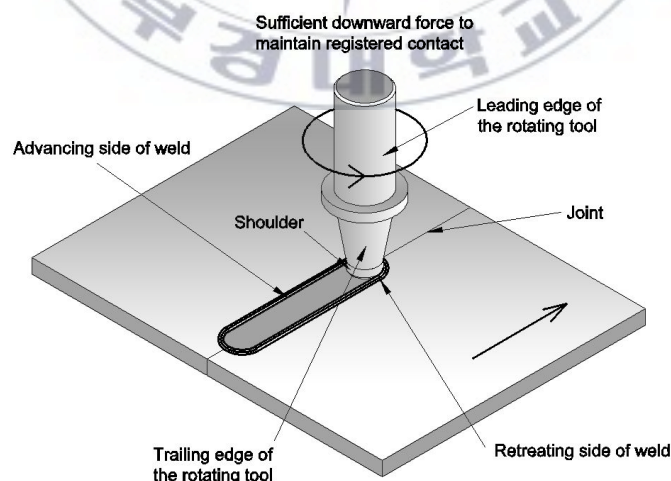


Fig 2.2.1 Schematic diagram of basic principle of FWS

마찰교반용접의 4가지 공정을 Fig 2.2.2에 간략하게 도시하였다.

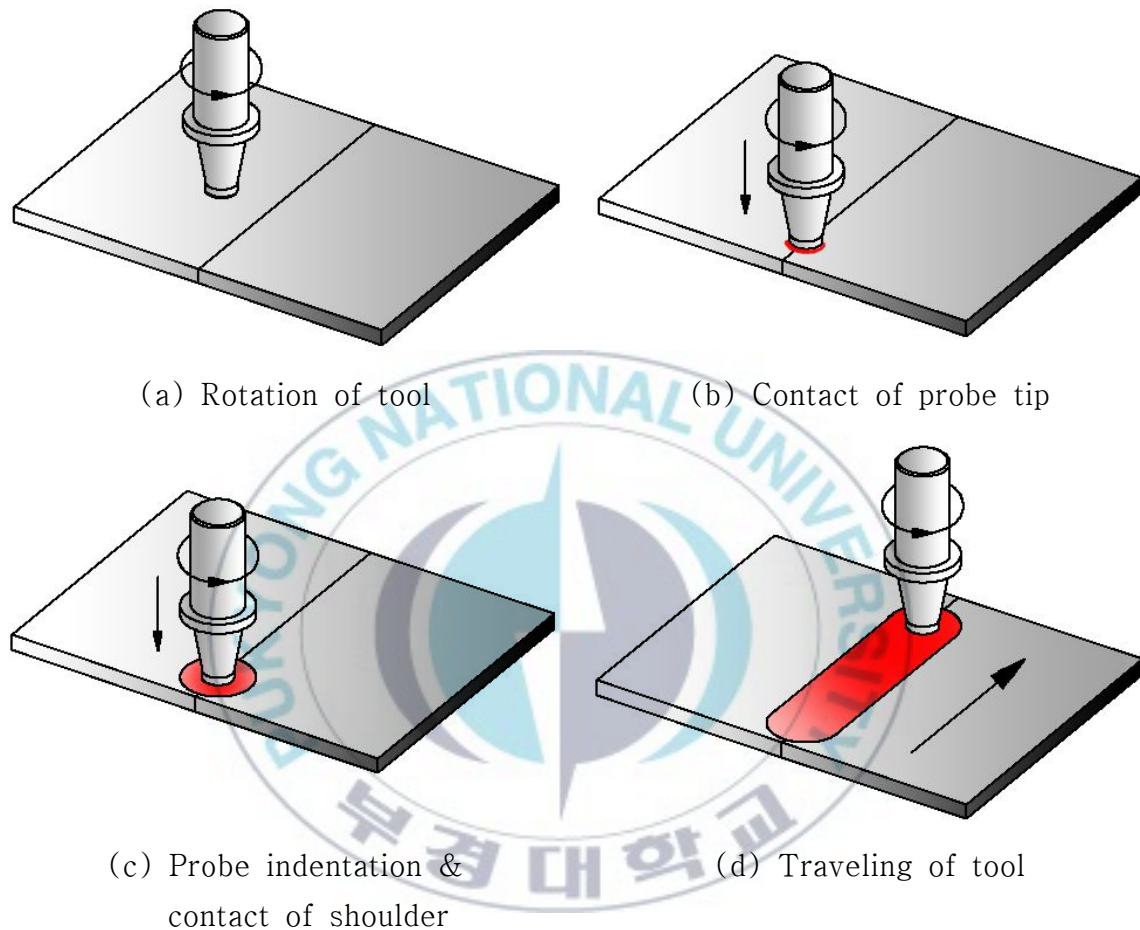


Fig. 2.2.2 Process of FSW

(a) 공구를 모재에 삽입 전 적절한 회전 속도로 회전을 시킨다. (b) 회전하는 공구의 핀을 접합하고자 하는 부위에 삽입시켜 마찰열을 발생시킨다. (c) 용접모재를 연화시키기 위해 공구의 숄더를 용접모재에 접촉시켜 가열영역을 확대시킨다. (d) 용접선을 따라 모재를 이동시켜 가열된 모재가 유동하여 너깃부를 형성함으로 용접이 이루어진다.

용접부의 품질에 가장 영향을 많이 끼치는 변수로는 크게 공구형상과 용접조건으로 분류된다. 공구형상은 핀 지름, 핀의 길이, 솔더 지름 등이 있으며 용접 조건은 공구의 이송속도, 회전속도, 예열시간, 삽입 깊이 등이 있다. 이러한 조건들 중 용접부 품질에 가장 큰 영향을 끼치는 요인은 공구의 이송속도와 회전 속도이다.<sup>29,30)</sup> 공구의 회전은 핀 주변의 연화된 조직을 혼합시키고, 공구의 이송은 혼합된 조직을 핀의 앞쪽으로 운반하는 역할을 한다. 공구의 회전 속도가 빨라지면 고온의 마찰열이 발생하고, 이에 따라 재질의 연화 또한 빨리 진행되므로 접합부가 보다 치밀한 조직을 얻게 된다. 공구의 이송속도는 생산성과 직결된다. 이송이 빨라지면 높은 생산성이 보장되지만, 조직의 혼합이 제대로 이루어지지 않아 용접부의 품질이 떨어지게 된다. 마찰교반용접의 가장 큰 특징은 고상용접이라 할 수 있으며, 타 용접법에 비하여 용접변형이 적다는 것이다. 또한 알루미늄 합금이나 마그네슘 합금, 복합 재료와 같은 난 접합 재료의 접합도 가능하다. 용접할 때 차폐가스나 용가재 같은 재료가 필요치 않으며 흠이나 적외선, 자외선 등의 유해 가스나 광선이 발생하지 않는 친환경적 용접기술이다.



## 2-3 유한요소법

용접 현상은 열전달, 탄소성 변형, 야금학적 특성 등이 복합적으로 존재하는 비선형 문제로 정의 될 수 있다. 이론적인 해를 구하기 어렵기 때문에 수치적인 접근 방법이 유용하게 적용되며 유한요소해석법에 기초한 수치적인 시뮬레이션 연구가 많이 수행되어져 왔다. 기본적으로 용접부내의 열전도현상은 다음 식(2-1)과 같은 지배방정식으로 표현된다.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q = 0 \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

여기서  $T$ : 온도,  $t$ : 시간,  $k$ : 열전도계수,  $\rho$ : 밀도,  $c$ : 비열,  $Q$ : 내부발열량이다. 이러한 지배방정식은 시스템 내의 임의의 위치 및 시간에 대해서 적용이 가능하기 때문에 만약 이 방정식을 풀어 해를 얻을 수 있다면 용접부 내의 어느 위치 또는 시간에서의 온도를 구할 수 있다. 그러나 복잡한 형상이나 경계조건에 대해 일반적으로는 해를 구할 수 없기 때문에 유한요소법과 같은 수치해석을 이용하여 해를 구한다.

유한요소해석용 상용 프로그램 중 SYSWELD는 프랑스 ESI그룹에서 만든 용접해석전용 프로그램으로서 기본적으로 각 공정 조건에 대한 입력 데이터로부터 열-야금학 모듈로서 온도와 상변태에 대한 연성 해석을 수행하여 온도와 상분포를 구하고, 이로부터 역학 모듈로서 휨 및 잔류응력을 계산한다. 또한 열전달과 야금학의 연성 해석을 수행하고 상변태 현상이 온도 및 온도 변화율에 크게 의존하기 때문에 매우 중요하며 상변태시 발생하는 잠열효과는 온도분포에 영향을 미친다. 그리고 역학 모듈은 열-야금학 해석으로부터 얻은 온도분포와 상분포로부터 변형 및 잔류응력 등의 역학해석을 수행하고 상변태는 이러한 해석에 중요한 영향을 미치는데



그 이유는 금속 상 변태가 고전적인 개념의 열변형 외에 체적 변화가 수반되며, 재료 거동 또한 상에 크게 의존하고 변태시 특별한 거동 즉, 변태 소성 현상이 유발되어 SYSWELD는 각 재료에 따라 탄소성 거동과 점 소성 거동을 선택할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 SYSWELD를 이용하여 마찰교반용접의 유한요소법 적용에 관해 실험 결과와 비교 검토하였다.



## 2-4 실험계획법

본 논문에서는 실험계획법 중 하나인 다원배치법을 이용하여 마찰교반 접합의 중요 변수인 공구의 솔더 지름, 회전속도, 이송속도간의 상관관계에 대해 파악하고자 한다. 변수가 3개이므로 삼원배치법으로 실험을 계획하였으며 실험계획법에서 가장 많이 사용되는 분산분석을 통해 결과를 분석하였다. 분산분석이란 특성치의 산포를 제곱 합으로 나타내고 이 제곱 합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱 합으로 분해하여 오차에 비해 특이 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다.

기본적인 삼원배치법 데이터의 구조식은 A, B, C인자의 수준이 각각 1, m, n 이라고 할 때 아래와 같이 표현된다.

$$x_{ijk} = \mu + a_i + b_j + c_k + (ab)_{ij} + (ac)_{jk} + (bc)_{jk} + e_{ijk} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, l$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

위 식(2.2)에 근거하여 각 변동의 이상의 결과를 종합하여 분산분석표를 작성하면 Table 2.4.1와 같다.

Table 2.4.1 The data array of three-way factorial design

|          |          | $A_1$                | $A_2$                | ... | $A_l$                | Sum       | Average                   |
|----------|----------|----------------------|----------------------|-----|----------------------|-----------|---------------------------|
| $B_1$    | $C_1$    | $x_{111}$            | $x_{211}$            |     | $x_{l11}$            | $T_{.1.}$ | $\overline{x_{.1.}}$      |
|          | $C_2$    | $x_{112}$            | $x_{212}$            | ... | $x_{l12}$            |           |                           |
|          | $\vdots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |     | $\vdots$             |           |                           |
|          | $C_n$    | $x_{11r}$            | $x_{21r}$            |     | $x_{l1r}$            |           |                           |
| $B_2$    | $C_1$    | $x_{121}$            | $x_{221}$            |     | $x_{l21}$            | $T_{.2.}$ | $\overline{x_{.2.}}$      |
|          | $C_2$    | $x_{122}$            | $x_{222}$            | ... | $x_{l22}$            |           |                           |
|          | $\vdots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |     | $\vdots$             |           |                           |
|          | $C_n$    | $x_{12r}$            | $x_{22r}$            |     | $x_{l2r}$            |           |                           |
| $\vdots$ |          | $\vdots$             |                      |     | $\vdots$             | $\vdots$  | $\vdots$                  |
| $B_m$    | $C_1$    | $x_{1m1}$            | $x_{2m1}$            |     | $x_{lm1}$            | $T_{.m.}$ | $\overline{x_{.m.}}$      |
|          | $C_2$    | $x_{1m2}$            | $x_{2m2}$            | ... | $x_{lm2}$            |           |                           |
|          | $\vdots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |     | $\vdots$             |           |                           |
|          | $C_n$    | $x_{1mr}$            | $x_{2mr}$            |     | $x_{lmr}$            |           |                           |
| Sum      |          | $T_{1..}$            | $T_{2..}$            | ... | $T_{l..}$            | $T$       | $\overline{\overline{x}}$ |
| Average  |          | $\overline{x_{1..}}$ | $\overline{x_{2..}}$ | ... | $\overline{x_{l..}}$ |           |                           |

또한 변동을 계산하기 위해서 Table 2.4.1의 데이터를 집계하여 아래와 같이 AB, AC, BC 이원표를 만들어야 한다.

Table 2.4.2 AB two way list

|          | $A_1$     | $A_2$     | ... | $A_l$     | Sum       |
|----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|
| $B_1$    | $T_{11.}$ | $T_{21.}$ | ... | $T_{i1.}$ | $T_{.1.}$ |
| $B_2$    | $T_{12.}$ | $T_{22.}$ | ... | $T_{i2.}$ | $T_{.2.}$ |
| $\vdots$ | $\vdots$  | $\vdots$  |     | $T_{1..}$ | $\vdots$  |
| $B_m$    | $T_{1m.}$ | $T_{2m.}$ | ... | $T_{lm.}$ | $T_{.m.}$ |
| Sum      | $T_{1..}$ | $T_{2..}$ | ... | $T_{l..}$ | $T$       |

Table 2.4.3 AC two way list

|          | $A_1$     | $A_2$     | ... | $A_l$     | Sum       |
|----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|
| $C_1$    | $T_{1.1}$ | $T_{2.1}$ | ... | $T_{i.1}$ | $T_{..1}$ |
| $C_2$    | $T_{1.2}$ | $T_{2.2}$ | ... | $T_{i.2}$ | $T_{..2}$ |
| $\vdots$ | $\vdots$  | $\vdots$  |     | $\vdots$  | $\vdots$  |
| $C_n$    | $T_{1.n}$ | $T_{2.n}$ | ... | $T_{l.n}$ | $T_{..n}$ |
| Sum      | $T_{1..}$ | $T_{2..}$ | ... | $T_{l..}$ | $T$       |

Table 2.4.4 BC two way list

|          | $B_1$     | $B_2$     | ... | $B_l$     | Sum       |
|----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|
| $C_1$    | $T_{.11}$ | $T_{.21}$ | ... | $T_{.i1}$ | $T_{..1}$ |
| $C_2$    | $T_{.12}$ | $T_{.22}$ | ... | $T_{.i2}$ | $T_{..2}$ |
| $\vdots$ | $\vdots$  | $\vdots$  |     | $\vdots$  | $\vdots$  |
| $C_n$    | $T_{.1n}$ | $T_{.2n}$ | ... | $T_{.ln}$ | $T_{..n}$ |
| Sum      | $T_{.1.}$ | $T_{.2.}$ | ... | $T_{.l.}$ | $T$       |

삼원배치법에서 변동의 분해는 총변동  $S_T$  를, 각 인자에 의한 변동  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$  와 교호작용에 의한 변동  $S_{A \times B}$ ,  $S_{A \times C}$ ,  $S_{B \times C}$  와 오차변동  $S_E$

로 나눈다.

각 변동계산의 정의식을 유도하여 주는 데이터의 분해는 식(2.3)과 같다.

$$\begin{aligned}(x_{ijk} - \bar{x}) &= (\bar{x}_{i..} - \bar{x}) + (\bar{x}_{.j.} - \bar{x}) + (\bar{x}_{..k} - \bar{x}) \\ &\quad + (\bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{i..} - \bar{x}_{.j.} + \bar{x}) + (\bar{x}_{i.k} - \bar{x}_{i..} - \bar{x}_{..k} + \bar{x}) \\ &\quad + (\bar{x}_{.jk} - \bar{x}_{.j.} - \bar{x}_{..k} + \bar{x}) \\ &\quad + (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{i.k} - \bar{x}_{.jk} + \bar{x}_{i..} + \bar{x}_{.j.} + \bar{x}_{..k} - \bar{x})\end{aligned} \quad (2.3)$$

식(2.3)을 이용하여 구한 각 변동의 계산공식은 식(2-4)와 같다.

$$CT = \frac{T^2}{lmn} \quad (2-4)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x})^2 = \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk}^2 - CT$$

$$S_A = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{x}_{i..} - \bar{x})^2 = \sum_i \frac{T_{i..}^2}{mn} - CT$$

$$S_B = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{x}_{.j.} - \bar{x})^2 = \sum_j \frac{T_{.j.}^2}{ln} - CT$$

$$S_C = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{x}_{..k} - \bar{x})^2 = \sum_k \frac{T_{..k}^2}{lm} - CT$$

$$S_{AB} = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{x}_{ij.} - \bar{x})^2 = \sum_i \sum_j \frac{T_{ij.}^2}{n} - CT$$

$$S_{A \times B} = S_{AB} - S_A - S_B$$

$$S_{AC} = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{x}_{i.k} - \bar{x})^2 = \sum_i \sum_k \frac{T_{i.k}^2}{m} - CT$$

$$S_{A \times C} = S_{AC} - S_A - S_C \quad S_{BC} = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{x}_{.jk} - \bar{x})^2 = \sum_j \sum_k \frac{T_{.jk}^2}{l} - CT$$

$$S_{B \times C} = S_{BC} - S_B - S_C$$

$$S_E = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_{A \times B} + S_{A \times C} + S_{B \times C})$$

자유도의 계산은  $\Phi_T$  는  $N-1=lmn-1$  이 되고  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$ ,  $\Phi_C$  는 각각  $l-1$ ,  $m-1$ ,  $n-1$  이며, 교호작용은 식 (2-5)와 같이 계산한다.

$$\begin{aligned}\Phi_{A \times B} &= \Phi_A \times \Phi_B = (l-1)(m-1) \\ \Phi_{A \times C} &= \Phi_A \times \Phi_C = (l-1)(n-1) \quad \dots\dots\dots (2-5) \\ \Phi_{B \times C} &= \Phi_B \times \Phi_C = (m-1)(n-1)\end{aligned}$$

그리고  $\Phi_E$  는 식 (2-6)와 같이 계산한다.

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \Phi_T - (\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C + \Phi_{A \times B} + \Phi_{A \times C} + \Phi_{B \times C}) \dots\dots\dots (2-6) \\ &= (l-1)(m-1)(n-1)\end{aligned}$$

또한 분산분석은 아래 표와 Table 2.4.4와 같이 계산하여 작성하였다.

Table 2.4.5 ANOVA for three-way factorial design

| Factor       | SS               | $\Phi$                           | V                | $F_0$                  |
|--------------|------------------|----------------------------------|------------------|------------------------|
| A            | $S_A$            | $\Phi_A = l-1$                   | $V_A$            | $V_A / V_E$            |
| B            | $S_B$            | $\Phi_B = m-1$                   | $V_B$            | $V_B / V_E$            |
| C            | $S_C$            | $\Phi_C = n-1$                   | $V_C$            | $V_C / V_E$            |
| $A \times B$ | $S_{A \times B}$ | $\Phi_{A \times B} = (l-1)(m-1)$ | $V_{A \times B}$ | $V_{A \times B} / V_E$ |
| $A \times C$ | $S_{A \times C}$ | $\Phi_{A \times C} = (l-1)(n-1)$ | $V_{A \times C}$ | $V_{A \times C} / V_E$ |
| $B \times C$ | $S_{B \times C}$ | $\Phi_{B \times C} = (m-1)(n-1)$ | $V_{B \times C}$ | $V_{B \times C} / V_E$ |
| E            | $S_E$            | $\Phi_E = (l-1)(m-1)(n-1)$       | $V_E$            |                        |
| T            | $S_T$            | $lmn-1$                          |                  |                        |



### 3. 실험

#### 3.1 실험 재료 및 실험장치

본 논문에 사용된 실험 재료는 경량 합금 중 가장 각광받고 있는 알루미늄 합금 6061계열을 사용하였으며 두께 2mm의 판재를 Fig. 3.1.1과 같이 100mm × 150mm으로 절단하여 맞대기 용접을 실시하였다.

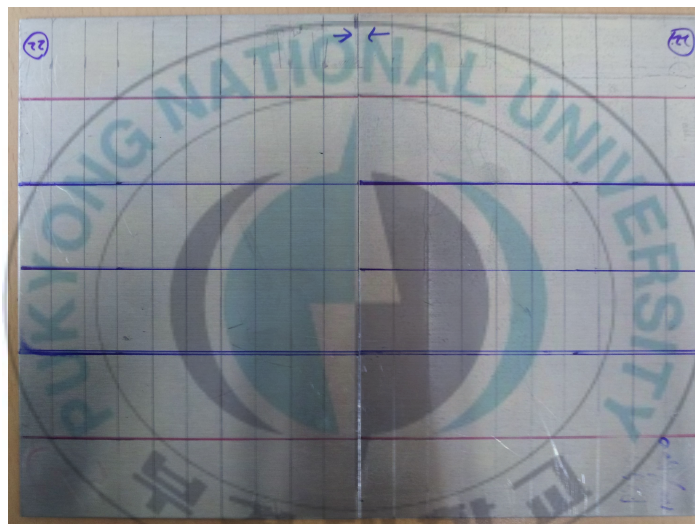


Fig. 3.1.1 Al-6061 alloy plate

본 실험에서는 Fig. 3.1.2와 같이 MCT(Machining Center Tooling System)를 이용하여 마찰교반용접을 수행하였으며, Fig. 3.1.3과 같이 MCT에 마찰교반용접을 적용하기 위하여 별도의 지그를 제작하여 두께 2mm 판재를 고정하였다. 또한 Fig. 3.1.4와 같이 마찰교반용접 공구를 솔더 지름을 변화시켜 3개의 공구를 제작하였으며 Table 3.1.1에 공구의 제원을 나타내었다.

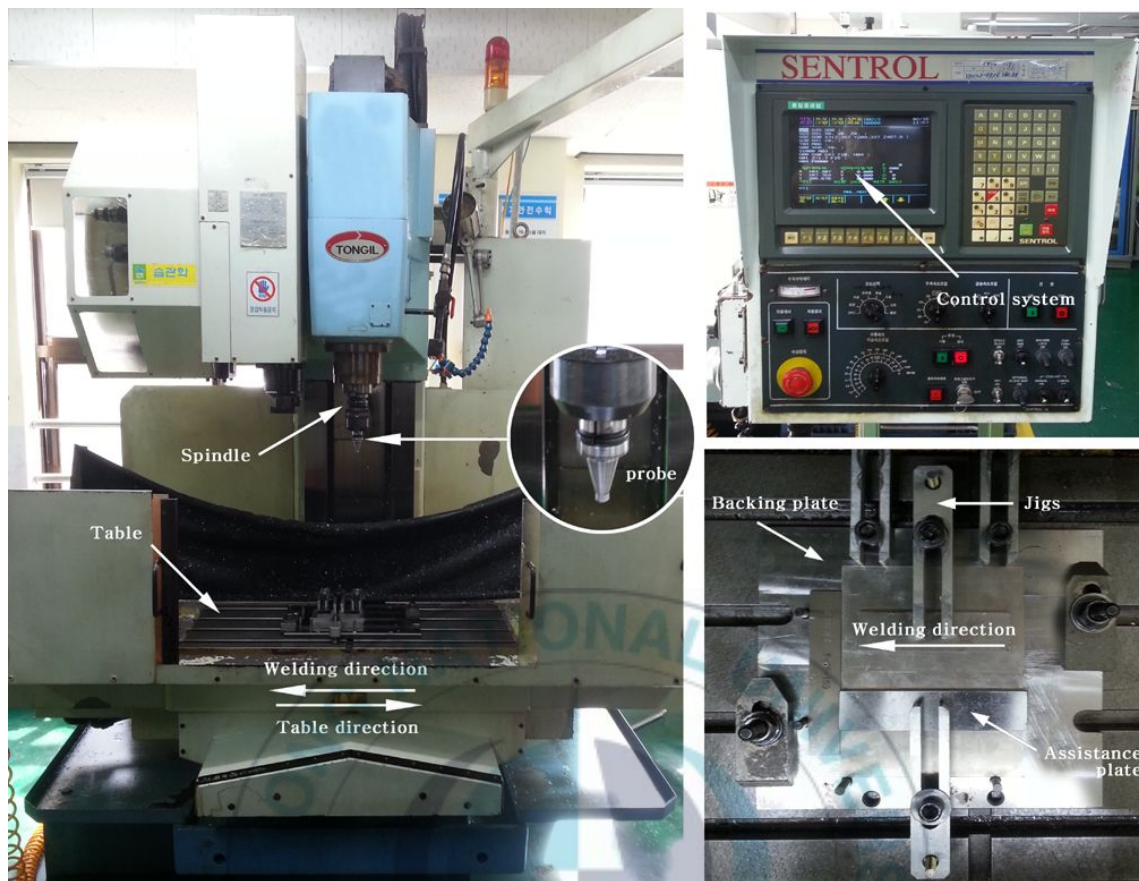


Fig. 3.1.2 Equipment of FWS

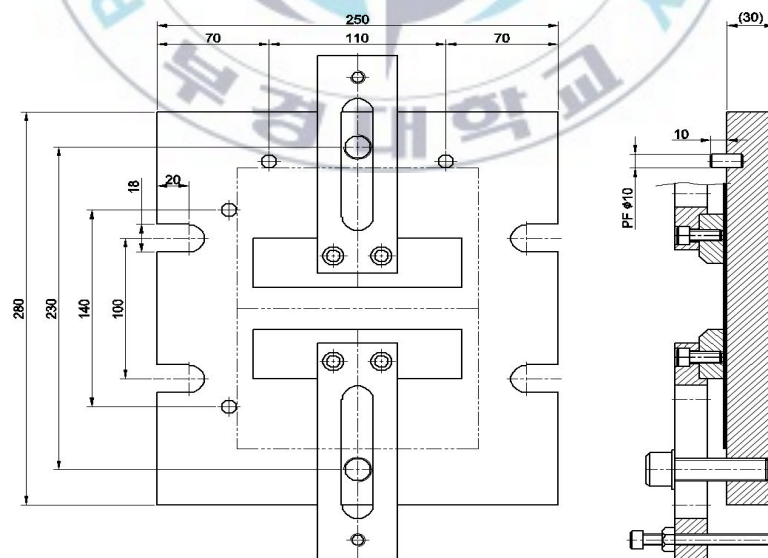


Fig. 3.1.3 Dimension of the jig & fixture

Table 3.1.1 Tool measurement used in experiment

| Item                                 | Dimension          |
|--------------------------------------|--------------------|
| Shoulder diameter ( <i>mm</i> )      | 9, 12, 15          |
| Pin root diameter ( <i>mm</i> )      | 3                  |
| Pin length ( <i>mm</i> )             | 1.5                |
| Shoulder angle (°)                   | 3                  |
| Shoulder corner radius ( <i>mm</i> ) | 0.5                |
| Pin taper angle (°)                  | 10                 |
| Material                             | SKD61 (tool steel) |

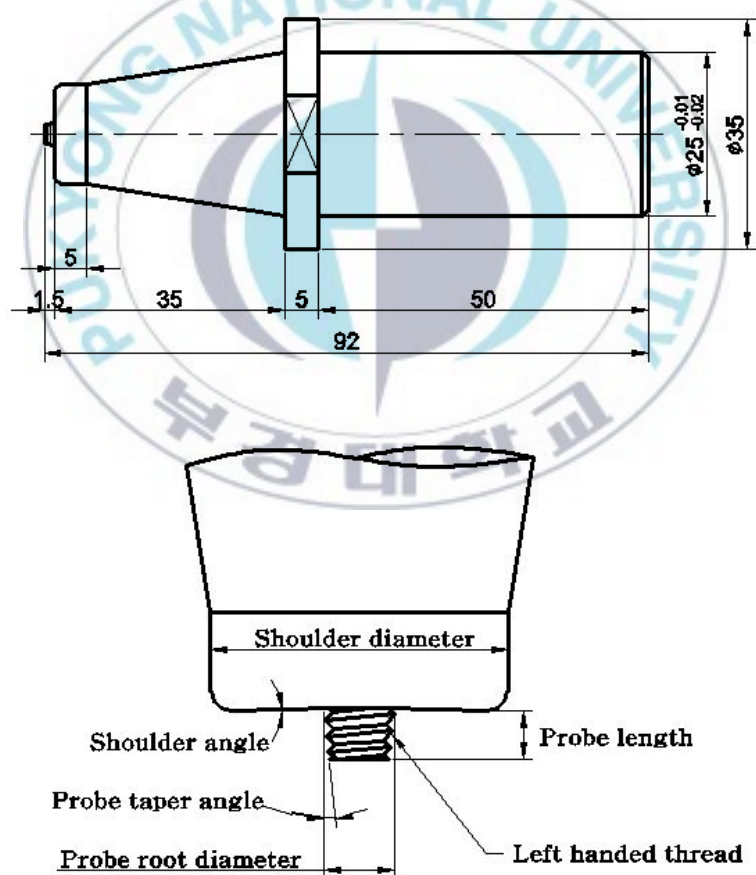
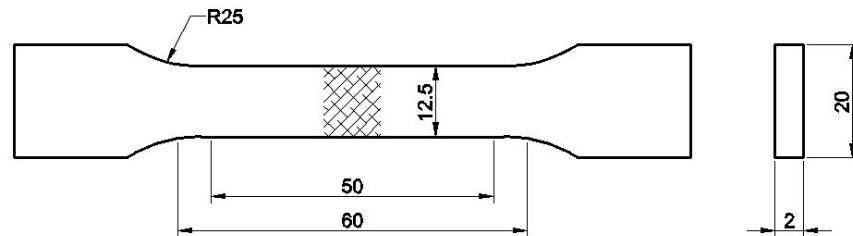
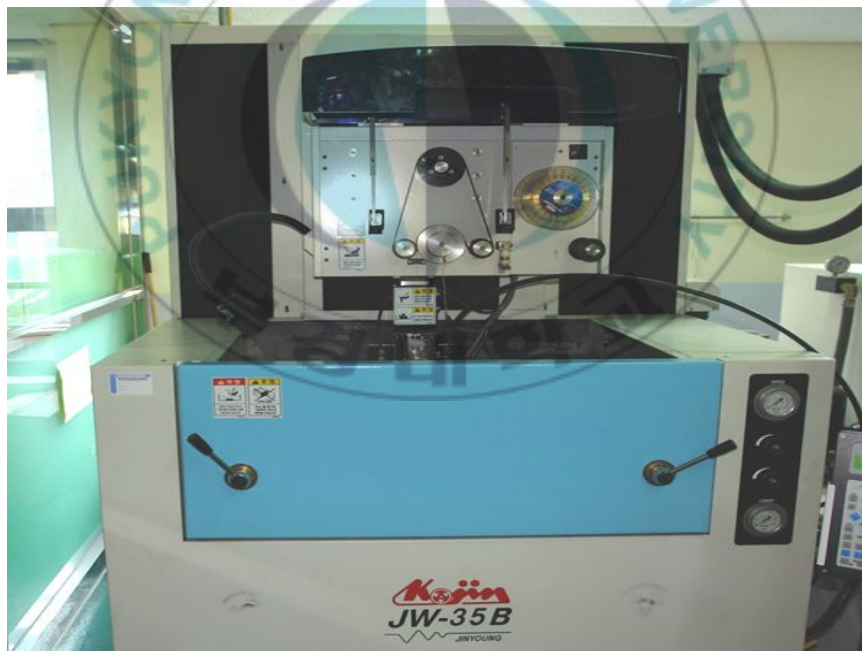


Fig. 3.1.4 Geometry of the tool

인장시험편은 ASTM E8 standard 규격을 적용하였으며, 인장시험편 가공은 Jinyoung사에서 제작된 JW-35B (250×250×170) 와이어컷팅기를 이용하였다. Fig.3.1.5에 인장시험편의 형상 치수와 와이어 컷팅기를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 3.1.5 Tensile specimen (a) and wire cutting machine (b)

### 3.2 실험 조건

마찰교반용접의 기계적 특성에 영향을 끼치는 용접 변수에 대한 연구는 현재까지도 다양하게 이뤄지고 있으며, 주로 공구의 형상과 실험 장치의 파라미터로 분류할 수 있다. 일반적으로 공구의 형상은 숄더 지름, 핀 지름, 핀 길이, 핀 각도, 나사 형상 등이며, 실험 장치는 회전속도, 이송속도, 축 각도, 누름압력 등이 주요 변수로 연구되고 있다.

본 논문에서는 예비실험과 참고문헌을 통해 마찰교반용접의 기계적 특성에 가장 영향을 끼치는 용접 변수 3가지를 선정하여 Table 3.2.1과 같이 실험 조건을 정하였다. 또한 마찰교반용접 전용 장치가 아닌 범용 공작기계를 이용하여 접합 가능여부를 파악하고자 하였으며 Table 3.2.2와 같이 실험계획법을 적용하여 공구의 숄더 지름, 이송속도 및 회전속도를 각각 3수준으로 변화시켜 통계적 분석 방법인 분산분석을 통해 마찰교반용접의 강도 특성에 가장 유의한 영향을 끼치는 변수를 파악하고자 하였다.

Table 3.2.1 Factors and each levels for experiment

| Factors                      | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 9       | 12      | 15      |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     | 300     | 500     |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 1500    | 2000    |



Table 3.2.2 Experiment conditions for FWS

| Run | Factors |     |      |
|-----|---------|-----|------|
|     | A       | B   | C    |
| 1   | 9       | 100 | 1000 |
| 2   | 9       | 100 | 1500 |
| 3   | 9       | 100 | 2000 |
| 4   | 9       | 300 | 1000 |
| 5   | 9       | 300 | 1500 |
| 6   | 9       | 300 | 2000 |
| 7   | 9       | 500 | 1000 |
| 8   | 9       | 500 | 1500 |
| 9   | 9       | 500 | 2000 |
| 10  | 12      | 100 | 1000 |
| 11  | 12      | 100 | 1500 |
| 12  | 12      | 100 | 2000 |
| 13  | 12      | 300 | 1000 |
| 14  | 12      | 300 | 1500 |
| 15  | 12      | 300 | 2000 |
| 16  | 12      | 500 | 1000 |
| 17  | 12      | 500 | 1500 |
| 18  | 12      | 500 | 2000 |
| 19  | 15      | 100 | 1000 |
| 20  | 15      | 100 | 1500 |
| 21  | 15      | 100 | 2000 |
| 22  | 15      | 300 | 1000 |
| 23  | 15      | 300 | 1500 |
| 24  | 15      | 300 | 2000 |
| 25  | 15      | 500 | 1000 |
| 26  | 15      | 500 | 1500 |
| 27  | 15      | 500 | 2000 |



## 4. 유한요소해석

### 4.1 모델링

본 논문에서는 마찰교반용접의 유한요소법 적용을 위하여 용접해석 전용프로그램인 SYSWELD를 이용하여 실험과 동일한 조건에서 해석을 수행하였다. Fig. 4.1.1와 같이 Unigraphics NX6를 이용하여 두께 2mm의 판재와 공구를 모델링하였으며, 공구의 형상 및 크기는 Table 4.1.1와 같이 실험과 동일하게 적용하였다.

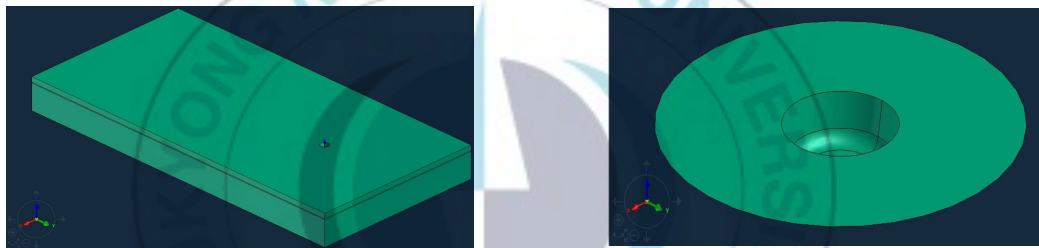


Fig. 4.1.1 3D modeling of FSW

Table 4.1.1 Tool measurement for analysis

| Item                       | Dimension |
|----------------------------|-----------|
| Shoulder diameter (mm)     | 9, 12, 15 |
| Pin root diameter (mm)     | 3         |
| Pin length (mm)            | 1.5       |
| Shoulder coner radius (mm) | 0.5       |
| Pin taper angle (°)        | 10        |

Fig. 4.1.2와 같이 VISUAL MESH 프로그램을 이용하여 MESH 작업을 수행하였으며 마찰교반용접 공구의 진행 방향은 y 축이며 진행방향의 70% 지점에 공구의 최종 위치를 설정하였다. 또한 z 축을 따라 회전이 이루어지므로 요소는 중심 부위에서는 조밀하게 나누고 가장자리로 갈수록 커지도록 분할하였다.

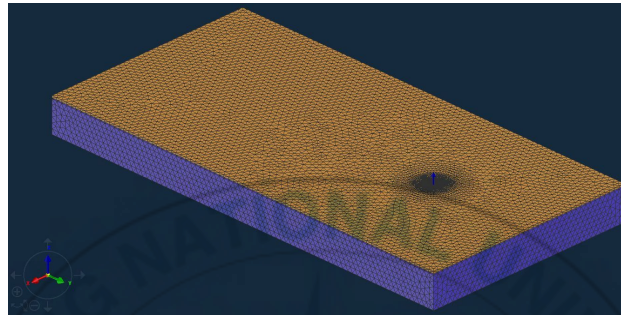


Fig. 4.1.2 3D geometry for analysis

Fig. 4.1.3 와 같이 두께 방향으로 3개의 요소로 분할하여 두께 방향으로 온도와 응력의 분포를 관찰할 수 있도록 2D MESH 생성 후 8개의 절점을 갖는 육면체 요소를 사용하여 3D MESH 를 생성하였다.

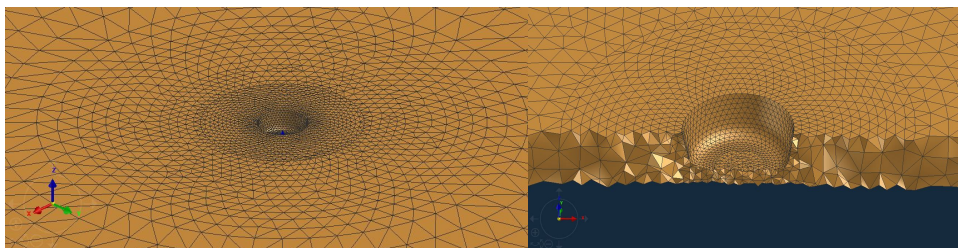


Fig. 4.1.3 Modeling and mesh geometry

## 4.2 해석 조건 및 해석 방법

본 논문에서는 마찰교반용접의 유한요소법 적용을 위하여 용접해석 전용프로그램인 SYSWELD를 이용하여 유동해석과 구조해석을 수행하였다. Table 4.2.1에 표시한 것처럼 해석은 실험과 동일한 조건에서 수행되었으며, Table 4.2.2와 같이 통계적 기법인 실험계획법을 적용하여 유동해석을 통해 온도 분포를 파악하였으며 구조해석을 통해 응력 분포를 파악하였다. 또한 용접 조건에 따른 온도 및 응력 변화와 기계적 특성과의 상관관계에 대해 파악하고자 하였다.

Table 4.2.1 Factors and each levels for analysis

| Factors                      | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 9       | 12      | 15      |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     | 300     | 500     |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 1500    | 2000    |

Table 4.2.2 The analysis plan of three-way factorial design

| Run | Factors |     |      |
|-----|---------|-----|------|
|     | A       | B   | C    |
| 1   | 9       | 100 | 1000 |
| 2   | 9       | 100 | 1500 |
| 3   | 9       | 100 | 2000 |
| 4   | 9       | 300 | 1000 |
| 5   | 9       | 300 | 1500 |
| 6   | 9       | 300 | 2000 |
| 7   | 9       | 500 | 1000 |
| 8   | 9       | 500 | 1500 |
| 9   | 9       | 500 | 2000 |
| 10  | 12      | 100 | 1000 |
| 11  | 12      | 100 | 1500 |
| 12  | 12      | 100 | 2000 |
| 13  | 12      | 300 | 1000 |
| 14  | 12      | 300 | 1500 |
| 15  | 12      | 300 | 2000 |
| 16  | 12      | 500 | 1000 |
| 17  | 12      | 500 | 1500 |
| 18  | 12      | 500 | 2000 |
| 19  | 15      | 100 | 1000 |
| 20  | 15      | 100 | 1500 |
| 21  | 15      | 100 | 2000 |
| 22  | 15      | 300 | 1000 |
| 23  | 15      | 300 | 1500 |
| 24  | 15      | 300 | 2000 |
| 25  | 15      | 500 | 1000 |
| 26  | 15      | 500 | 1500 |
| 27  | 15      | 500 | 2000 |

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 실험결과

본 논문에서는 Table 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3과 같이 마찰교반용접의 중요 변수인 공구의 솔더 지름, 회전속도, 이송속도 3가지 변수들 간의 상관관계에 대해 정량적으로 파악하고자 통계적 기법인 실험계획법 중 삼원배치법을 이용하여 인장강도를 특성치로 선정하여 총 27회 실험을 수행하였다. 여기서 A는 공구의 솔더지름, B는 이송속도, C는 회전속도이다.

Table 5.1.1 Tensile strength ( Lever 1)

| Run | Factors |     |      | Tensile strength<br>(MPa) |
|-----|---------|-----|------|---------------------------|
|     | A       | B   | C    |                           |
| 1   | 9       | 100 | 1000 | 189.18                    |
| 2   | 9       | 100 | 1500 | 198.65                    |
| 3   | 9       | 100 | 2000 | 193.49                    |
| 4   | 9       | 300 | 1000 | 191.44                    |
| 5   | 9       | 300 | 1500 | 233.49                    |
| 6   | 9       | 300 | 2000 | 247.87                    |
| 7   | 9       | 500 | 1000 | 192.63                    |
| 8   | 9       | 500 | 1500 | 253.87                    |
| 9   | 9       | 500 | 2000 | 268.39                    |

Table 5.1.2 Tensile strength ( Lever 2)

| Run | Factors |     |      | Tensile strength<br>(MPa) |
|-----|---------|-----|------|---------------------------|
|     | A       | B   | C    |                           |
| 10  | 12      | 100 | 1000 | 205.02                    |
| 11  | 12      | 100 | 1500 | 217.26                    |
| 12  | 12      | 100 | 2000 | 213.83                    |
| 13  | 12      | 300 | 1000 | 238.21                    |
| 14  | 12      | 300 | 1500 | 250.17                    |
| 15  | 12      | 300 | 2000 | 268.23                    |
| 16  | 12      | 500 | 1000 | 260.73                    |
| 17  | 12      | 500 | 1500 | 266.31                    |
| 18  | 12      | 500 | 2000 | 235.78                    |

Table 5.1.3 Tensile strength ( Lever 3)

| Run | Factors |     |      | Tensile strength<br>(MPa) |
|-----|---------|-----|------|---------------------------|
|     | A       | B   | C    |                           |
| 19  | 15      | 100 | 1000 | 213.39                    |
| 20  | 15      | 100 | 1500 | 238.57                    |
| 21  | 15      | 100 | 2000 | 219.55                    |
| 22  | 15      | 300 | 1000 | 239.78                    |
| 23  | 15      | 300 | 1500 | 247.64                    |
| 24  | 15      | 300 | 2000 | 260.42                    |
| 25  | 15      | 500 | 1000 | 239.19                    |
| 26  | 15      | 500 | 1500 | 249.06                    |
| 27  | 15      | 500 | 2000 | 263.43                    |



Table 5.1.4 와 같이 실험을 통해 얻은 인장강도를 특성치로 선정하여 통계적 분석방법인 분산분석을 실시하였다.

분산분석 결과, 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 공구의 이송속도가 인장강도에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 회전속도와 이송속도는 비슷한 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 각 변수들 간의 교호작용은 유의하지 않는 것으로 나타났다.

Table 5.1.4 ANOVA for tensile strength

|     | SS       | $\Phi$ | MS      | $F_0$   | $F_{(0.10)}$ | $F_{(0.05)}$ | $F_{(0.01)}$ |
|-----|----------|--------|---------|---------|--------------|--------------|--------------|
| A   | 2809.09  | 2      | 1404.55 | 5.80*   | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| B   | 7472.13  | 2      | 3736.06 | 15.44** | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| C   | 2785.81  | 2      | 1392.90 | 5.75*   | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| A×B | 401.60   | 4      | 100.40  | 0.41    | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| A×C | 1409.24  | 4      | 352.31  | 1.46    | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| B×C | 790.89   | 4      | 197.72  | 0.82    | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| E   | 1936.27  | 8      | 242.03  |         |              |              |              |
| T   | 17605.03 | 26     | 7425.98 |         |              |              |              |

Table 5.1.5와 같이 각 변수들의 모평균 및 구간추정을 실시하였다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 모두 인장강도와 비례하는 경향을 나타냈으며, 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 가장 높은 인장강도 값을 나타내는 조합은 A3B3C3\* 조건으로 90% 신뢰구간에서 287.89±14.73, 95% 신뢰구간에서 287.89±18.27, 99% 신뢰구간에서 287.89±26.58로 나타났다.

마찰교반용접의 실험계획법 적용을 위하여 본 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 최적 공정 조건인 A3B3C3\* 조건에서 검증실험을 실시한 결과, 275.85로 신뢰구간 90% 조건에서도 만족하는 것으로 나타났다.

Table 5.1.5 Estimated tensile strength for each factors

| Factors | Point estimation | Confidence interval | +      | -      |
|---------|------------------|---------------------|--------|--------|
| A1      | 218.78           | 14.73               | 233.51 | 204.04 |
| A2      | 239.50           | 14.73               | 254.24 | 224.77 |
| A3      | 241.23           | 14.73               | 255.96 | 226.49 |
| B1      | 209.88           | 14.73               | 224.62 | 195.15 |
| B2      | 241.92           | 14.73               | 256.65 | 227.18 |
| B3      | 247.71           | 14.73               | 262.44 | 232.98 |
| C1      | 218.84           | 14.73               | 233.58 | 204.11 |
| C2      | 239.45           | 14.73               | 254.18 | 224.71 |
| C3      | 241.22           | 14.73               | 255.96 | 226.49 |
| 90%     | 287.89           | 14.73               | 302.62 | 273.15 |
| 95%     | 287.89           | 18.27               | 306.15 | 269.62 |
| 99%     | 287.89           | 26.58               | 314.46 | 261.31 |

※ : 공구의 솔더지름 15mm, 이송속도 500mm/min, 회전속도 2000rpm

각 변수들의 모평균을 구하여 Fig. 5.1.1과 같이 나타내었다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 공구의 숄더 지름이 증가할수록 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 15(mm)에서 가장 큰 인장강도 값을 나타내었다. 공구의 이송속도 역시 증가할수록 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 500(mm/min)에서 가장 큰 인장강도 값을 나타내었다. 공구의 회전속도 또한 증가할수록 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 2000(rpm)에서 가장 큰 인장강도 값을 나타내었다.

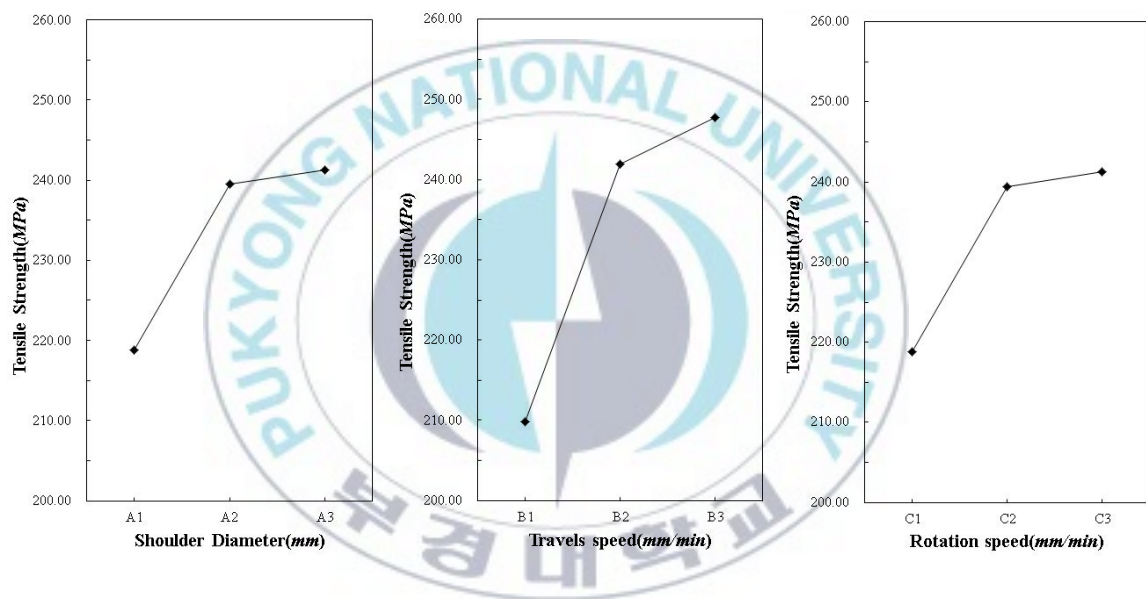


Fig. 5.1.1 Response plots for tensile strengths

Fig. 5.1.2에 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 용접 변수들인 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도가 인장강도 특성에 영향을 끼치는 기여도를 나타내었다. 공구의 이송속도가 약 50%로 인장강도에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며 솔더 지름과 회전속도가 각각 약 19%의 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

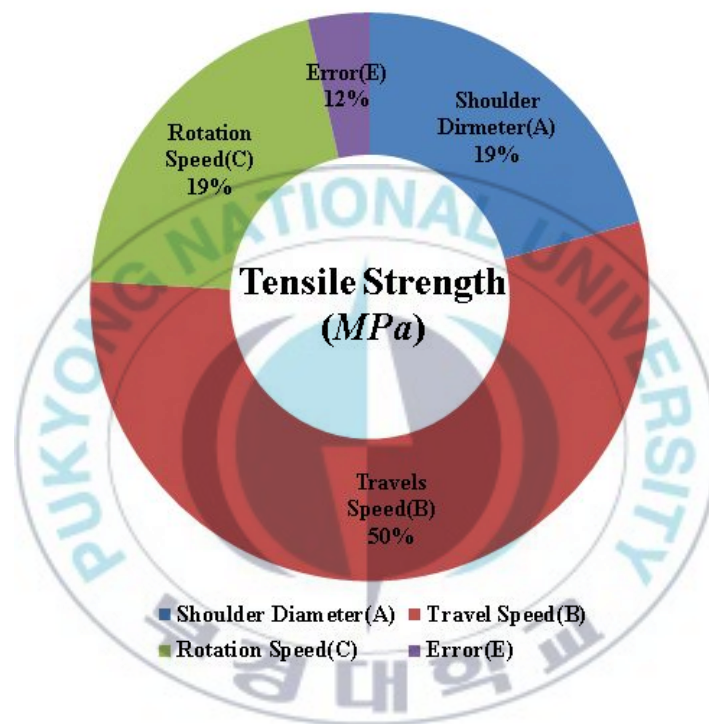


Fig. 5.1.2 Graphical illustration of the contribution on all factors (Tensile strength)

Table 5.1.6, 5.1.7, 5.1.8에 실험계획법을 이용하여 27회 수행한 알루미늄 합금의 마찰교반용접 결과를 나타내었다. 전반적으로 모든 조건에서 용접부 형상은 양호하게 나타났으며, 솔더 지름이 커질수록 용접 비드가 넓어지며 인장강도와 회전속도가 증가할수록 용접부 비드의 표면이 매끄러운 형태를 나타내었다.

Table 5.1.6 Quality view results of FWS (shoulder diameter 9mm)

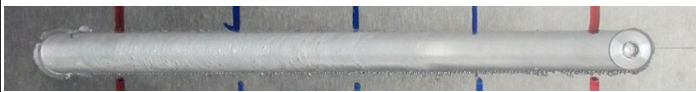
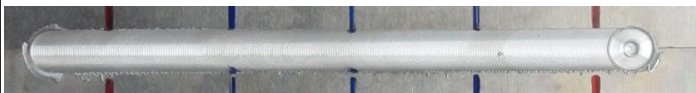
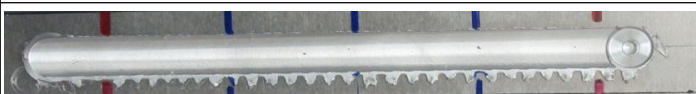
| Factors                      | Level 1 |   |                                                                                      |
|------------------------------|---------|---|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 9       |   |                                                                                      |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |   |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 1 |    |
|                              | 1500    | 2 |    |
|                              | 2000    | 3 |    |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |   |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 4 |  |
|                              | 1500    | 5 |  |
|                              | 2000    | 6 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |   |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 7 |  |
|                              | 1500    | 8 |  |
|                              | 2000    | 9 |  |



Table 5.1.7 Quality view results of FWS (shoulder diameter 12mm)

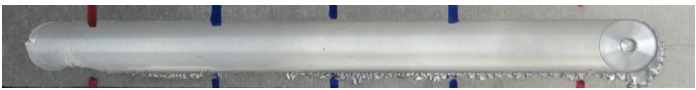
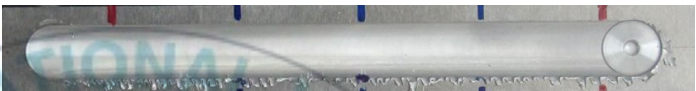
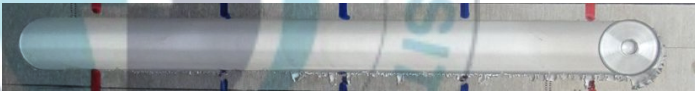
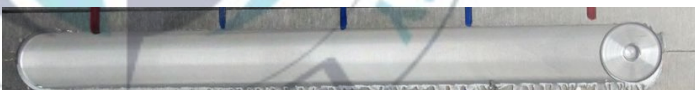
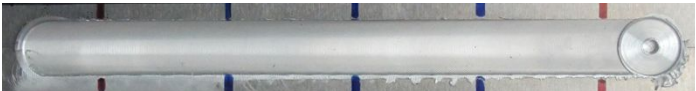
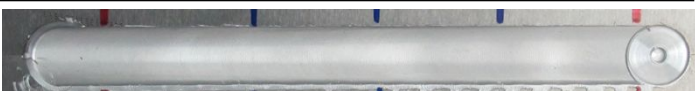
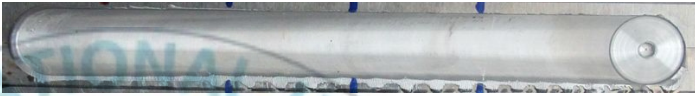
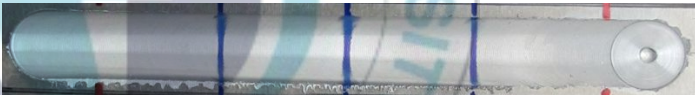
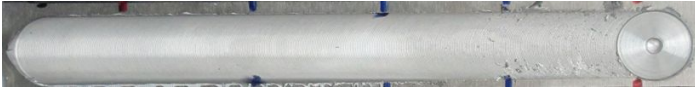
| Factors                      | Level 2 |    |                                                                                      |
|------------------------------|---------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 12      |    |                                                                                      |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 10 |    |
|                              | 1500    | 11 |    |
|                              | 2000    | 12 |   |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 13 |  |
|                              | 1500    | 14 |  |
|                              | 2000    | 15 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 16 |  |
|                              | 1500    | 17 |  |
|                              | 2000    | 18 |  |



Table 5.1.8 Quality view results of FWS (shoulder diameter 15mm)

| Factors                      | Level 3 |    |                                                                                      |
|------------------------------|---------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 15      |    |                                                                                      |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 19 |    |
|                              | 1500    | 20 |    |
|                              | 2000    | 21 |   |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 22 |  |
|                              | 1500    | 23 |  |
|                              | 2000    | 24 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 25 |  |
|                              | 1500    | 26 |  |
|                              | 2000    | 27 |  |

또한 Table 5.1.9, 5.1.10, 5.1.11에 인장시험 후 시험편의 파단 형상을 나타내었다. 전반적으로 모든 조건에서 열영향부에서 파단이 발생하였으며, 핀 삽입 부위가 아닌 솔더 접착 부에서 발생하는 것으로 나타났다.

Table 5.1.9 Tensile specimens of FWS after tensile test (shoulder diameter 9mm)

| Factors                      | Level 1 |   |  |
|------------------------------|---------|---|--|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 9       |   |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |   |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 1 |  |
|                              | 1500    | 2 |  |
|                              | 2000    | 3 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |   |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 4 |  |
|                              | 1500    | 5 |  |
|                              | 2000    | 6 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |   |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 7 |  |
|                              | 1500    | 8 |  |
|                              | 2000    | 9 |  |

Table 5.1.10 Tensile specimens of FWS after tensile test (shoulder diameter 12mm)

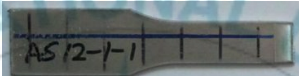
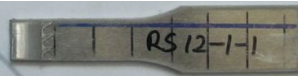
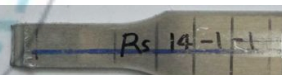
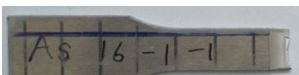
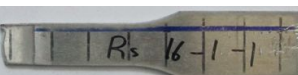
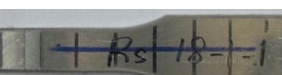
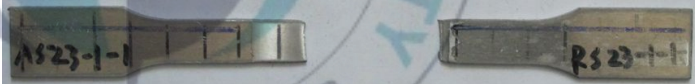
| Factors                      | Level 2 |    |                                                                                                                                                                           |
|------------------------------|---------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 12      |    |                                                                                                                                                                           |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |    |                                                                                                                                                                           |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 10 |       |
|                              | 1500    | 11 |       |
|                              | 2000    | 12 |       |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |    |                                                                                                                                                                           |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 13 |   |
|                              | 1500    | 14 |   |
|                              | 2000    | 15 |   |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |    |                                                                                                                                                                           |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 16 |   |
|                              | 1500    | 17 |   |
|                              | 2000    | 18 |   |

Table 5.1.11 Tensile specimens of FWS after tensile test (shoulder diameter 15mm)

| Factors                        | Level 3 |    |                                                                                      |
|--------------------------------|---------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter<br>(mm), (A) | 15      |    |                                                                                      |
| Travels speed<br>(mm/min), (B) | 100     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), (C)   | 1000    | 19 |    |
|                                | 1500    | 20 |    |
|                                | 2000    | 21 |    |
| Travels speed<br>(mm/min), (B) | 300     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), (C)   | 1000    | 22 |  |
|                                | 1500    | 23 |  |
|                                | 2000    | 24 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), (B) | 500     |    |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), (C)   | 1000    | 25 |  |
|                                | 1500    | 26 |  |
|                                | 2000    | 27 |  |



## 5.2 해석결과

본 논문에서는 Table 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3과 같이 마찰교반용접의 중요 변수인 공구의 솔더지름, 회전속도, 이송속도 3가지 변수들 간의 상관관계에 대해 정량적으로 파악하고자 통계적 기법인 실험계획법 중 삼원배치법을 이용하여 유동해석은 평균 온도를 특성치로 선정하여 총 27회 해석을 수행하였다. 여기서 A는 공구의 솔더지름, B는 이송속도, C는 회전속도이다.

Table 5.2.1 Temperature ( Lever 1)

| Run | Factors |     |      | Temperature<br>( °C) |
|-----|---------|-----|------|----------------------|
|     | A       | B   | C    |                      |
| 1   | 9       | 100 | 1000 | 148.14               |
| 2   | 9       | 100 | 1500 | 215.08               |
| 3   | 9       | 100 | 2000 | 302.74               |
| 4   | 9       | 300 | 1000 | 175.25               |
| 5   | 9       | 300 | 1500 | 237.07               |
| 6   | 9       | 300 | 2000 | 314.15               |
| 7   | 9       | 500 | 1000 | 199.65               |
| 8   | 9       | 500 | 1500 | 257.07               |
| 9   | 9       | 500 | 2000 | 324.49               |

Table 5.2.2 Temperature ( Lever 2)

| Run | Factors |     |      | Temperature<br>( °C) |
|-----|---------|-----|------|----------------------|
|     | A       | B   | C    |                      |
| 10  | 12      | 100 | 1000 | 200.75               |
| 11  | 12      | 100 | 1500 | 317.89               |
| 12  | 12      | 100 | 2000 | 476.91               |
| 13  | 12      | 300 | 1000 | 220.49               |
| 14  | 12      | 300 | 1500 | 319.46               |
| 15  | 12      | 300 | 2000 | 465.86               |
| 16  | 12      | 500 | 1000 | 238.47               |
| 17  | 12      | 500 | 1500 | 323.36               |
| 18  | 12      | 500 | 2000 | 456.06               |

Table 5.2.3 Temperature ( Lever 3)

| Run | Factors |     |      | Temperature<br>( °C) |
|-----|---------|-----|------|----------------------|
|     | A       | B   | C    |                      |
| 19  | 15      | 100 | 1000 | 279.09               |
| 20  | 15      | 100 | 1500 | 491.87               |
| 21  | 15      | 100 | 2000 | 607.30               |
| 22  | 15      | 300 | 1000 | 278.84               |
| 23  | 15      | 300 | 1500 | 485.75               |
| 24  | 15      | 300 | 2000 | 590.92               |
| 25  | 15      | 500 | 1000 | 283.62               |
| 26  | 15      | 500 | 1500 | 477.73               |
| 27  | 15      | 500 | 2000 | 582.20               |



Table 5.2.4와 같이 유동해석을 통해 얻은 온도 값을 특성치로 선정하여 통계적 분석방법인 분산분석을 실시하였다. 분산분석 결과, 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동 해석시 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 공구의 회전속도가 온도 특성치에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 솔더 지름, 이송속도 순으로 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 각 변수들 간의 교호작용 모두 온도 특성치에 유의한 것으로 나타났다.

Table 5.2.4 ANOVA for FWS maximum temperature

|     | SS        | $\Phi$ | MS        | $F_0$     | $F_{(0.10)}$ | $F_{(0.05)}$ | $F_{(0.01)}$ |
|-----|-----------|--------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| A   | 202165.64 | 2      | 101082.82 | 4948.53** | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| B   | 588.98    | 2      | 294.49    | 14.42**   | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| C   | 244352.25 | 2      | 122176.13 | 5981.15** | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| A×B | 1917.66   | 4      | 479.41    | 23.47**   | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| A×C | 28573.78  | 4      | 7143.45   | 349.71**  | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| B×C | 1162.53   | 4      | 290.63    | 14.23**   | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| E   | 163.41    | 8      | 20.43     |           |              |              |              |
| T   | 478924.26 | 26     | 231487.36 |           |              |              |              |

Table 5.2.5와 같이 각 변수들의 모평균 및 구간추정을 실시하였다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동 해석시 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 모두 온도와 비례하는 경향을 나타냈으며, 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 가장 높은 온도 값을 나타내는 조합은 A3B3C3\* 조건으로 90% 신뢰구간에서  $578.84 \pm 7.05$ , 95% 신뢰구간에서  $578.84 \pm 8.74$ , 99% 신뢰구간에서  $578.84 \pm 12.72$ 로 알루미늄 합금의 재결정 온도와 용융점 사이인 것으로 나타났다.

Table 5.2.5 Estimated temperature for each factors

| Factors | Point estimation | Confidence interval | +      | -      |
|---------|------------------|---------------------|--------|--------|
| A1      | 241.52           | 7.05                | 248.57 | 234.46 |
| A2      | 335.47           | 7.05                | 342.53 | 328.42 |
| A3      | 453.03           | 7.05                | 460.09 | 445.98 |
| B1      | 337.75           | 7.05                | 344.80 | 330.70 |
| B2      | 343.09           | 7.05                | 350.14 | 336.06 |
| B3      | 349.18           | 7.05                | 356.24 | 342.13 |
| C1      | 224.92           | 7.05                | 231.97 | 217.87 |
| C2      | 347.25           | 7.05                | 354.31 | 340.20 |
| C3      | 457.85           | 7.05                | 464.90 | 450.80 |
| 90%     | 578.84           | 7.05                | 585.90 | 571.79 |
| 95%     | 578.84           | 8.74                | 587.59 | 570.10 |
| 99%     | 578.84           | 12.72               | 591.56 | 566.12 |

※ : 공구의 솔더지름 15mm, 이송속도 500mm/min, 회전속도 2000rpm

각 변수들의 모평균을 구하여 Fig. 5.2.1과 같이 나타내었다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동해석시 공구의 솔더 지름이 증가할수록 온도 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 15mm에서 가장 큰 온도 값을 나타내었다. 공구의 이송속도 역시 증가할수록 온도 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 500mm/min에서 가장 큰 온도 값을 나타내었다. 공구의 회전속도 또한 증가할수록 온도 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 2000rpm에서 가장 큰 온도 값을 나타내었다.

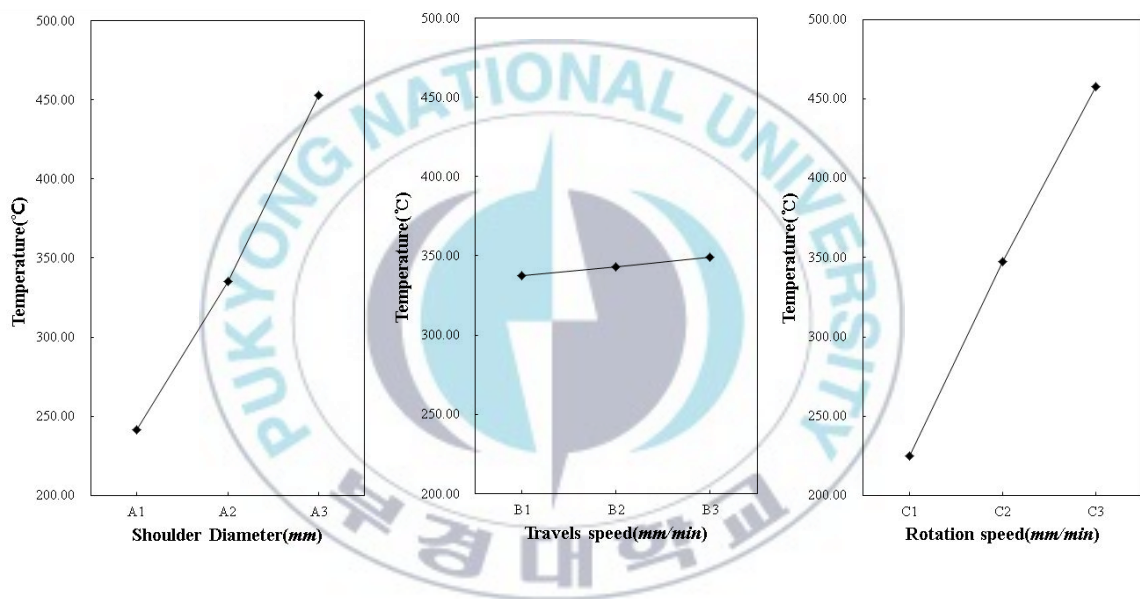


Fig. 5.2.1 Response plots for temperature result

Fig 5.2.2 에 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동 해석시 용접 변수들인 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도가 온도 특성치에 영향을 끼치는 기여도를 나타내었다. 공구의 회전속도가 약 53%로 온도 특성치에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며 솔더 지름이 44%, 이송속도가 각각 약 0.1%로 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

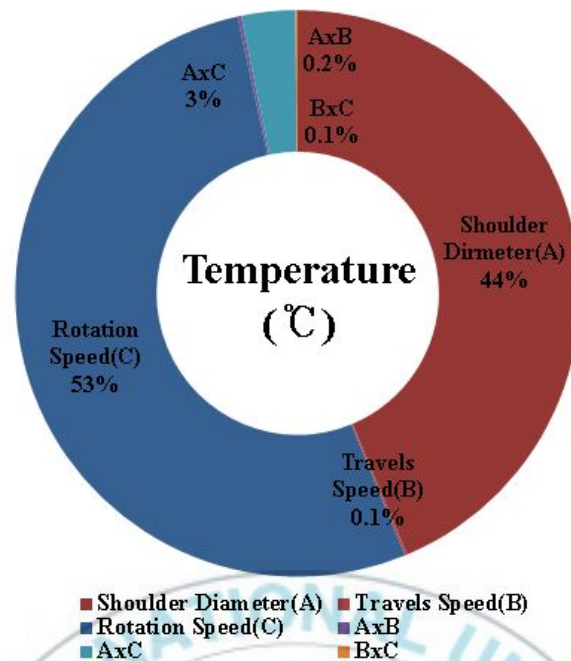


Fig. 5.2.2 Graphical illustration of the contribution on all factors (Temperature)

Table 5.2.6, 5.2.7, 5.2.8에 실험계획법을 이용하여 27회 수행한 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동해석 결과를 나타내었다. 전반적으로 모든 조건에서 용접부 온도분포는 양호하게 나타났으며, 회전속도가 커질수록 단면부 온도 분포는 좁아지며 솔더 지름이 커질수록 용접부 온도 분포가 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 5.2.6 Temperature by analysis (section view : shoulder diameter 9mm)

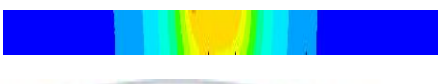
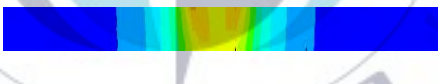
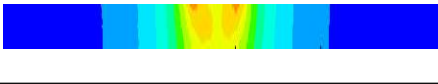
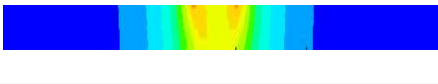
| Factors                                 | Level 3 |   |                                                                                      |  |  |                                                                                                            |                                                                                                            |                                                                                                            |  |  |
|-----------------------------------------|---------|---|--------------------------------------------------------------------------------------|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| Shoulder diameter<br>( <i>mm</i> ), (A) | 9       |   |                                                                                      |  |  |                                                                                                            |                                                                                                            |                                                                                                            |  |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 100     |   |                                                                                      |  |  | 1                                                                                                          | 2                                                                                                          | 3                                                                                                          |  |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 1 |    |  |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.1361<br>Max = 148.142                          | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.112<br>Max = 215.076                           | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0654<br>Max = 302.738                          |  |  |
|                                         | 1500    | 2 |    |  |  | 31.773<br>43.4099<br>55.0469<br>66.6838<br>78.3207<br>89.9577<br>101.595<br>113.232<br>124.868<br>136.505  | 37.836<br>55.56<br>73.284<br>91.0079<br>108.732<br>126.456<br>144.18<br>161.904<br>179.628<br>197.352      | 45.7629<br>71.4605<br>97.158<br>122.856<br>148.553<br>174.251<br>199.948<br>225.646<br>251.343<br>277.041  |  |  |
|                                         | 2000    | 3 |    |  |  |                                                                                                            |                                                                                                            |                                                                                                            |  |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 300     |   |                                                                                      |  |  | 4                                                                                                          | 5                                                                                                          | 6                                                                                                          |  |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 4 |  |  |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.084<br>Max = 175.240                           | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0499<br>Max = 237.072                          | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.9936<br>Max = 314.152                          |  |  |
|                                         | 1500    | 5 |  |  |  | 34.1898<br>48.2956<br>62.4015<br>76.5073<br>90.6132<br>104.719<br>118.825<br>132.931<br>147.037<br>161.142 | 39.7792<br>59.5084<br>79.2377<br>98.9669<br>118.696<br>138.425<br>158.155<br>177.884<br>197.613<br>217.342 | 46.7353<br>73.477<br>100.219<br>126.96<br>153.702<br>180.444<br>207.186<br>233.927<br>260.669<br>287.411   |  |  |
|                                         | 2000    | 6 |  |  |  |                                                                                                            |                                                                                                            |                                                                                                            |  |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 500     |   |                                                                                      |  |  | 7                                                                                                          | 8                                                                                                          | 9                                                                                                          |  |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 7 |  |  |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.6086<br>Max = 199.652                          | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.4706<br>Max = 257.067                          | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.2964<br>Max = 324.493                          |  |  |
|                                         | 1500    | 8 |  |  |  | 35.9762<br>52.3438<br>68.7114<br>85.079<br>101.447<br>117.814<br>134.182<br>150.549<br>166.917<br>183.285  | 41.0703<br>62.67<br>84.2697<br>105.869<br>127.469<br>149.069<br>170.668<br>192.268<br>213.868<br>235.467   | 47.0415<br>74.7866<br>102.532<br>130.277<br>158.022<br>185.767<br>213.512<br>241.257<br>269.002<br>296.747 |  |  |
|                                         | 2000    | 9 |  |  |  |                                                                                                            |                                                                                                            |                                                                                                            |  |  |



Table 5.2.7 Temperature by analysis (section view : shoulder diameter 12mm)

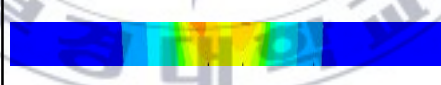
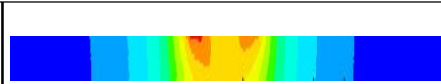
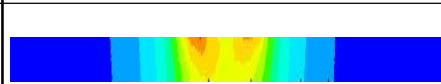
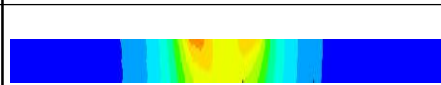
| Factors                                 | Level 3 |    |                                                                                      |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |  |
|-----------------------------------------|---------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--|
| Shoulder diameter<br>( <i>mm</i> ), (A) | 12      |    |                                                                                      |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 100     |    |                                                                                      | 10                                                                                | 11                                                                                | 12                                                                                |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 10 |    | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.1134<br>Max = 200.749 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0359<br>Max = 317.889 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0017<br>Max = 476.912 |  |
|                                         | 1500    | 11 |    | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.1134<br>Max = 200.749 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0359<br>Max = 317.889 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0017<br>Max = 476.912 |  |
|                                         | 2000    | 12 |    | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.1134<br>Max = 200.749 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0359<br>Max = 317.889 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0017<br>Max = 476.912 |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 300     |    |                                                                                      | 13                                                                                | 14                                                                                | 15                                                                                |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 13 |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.079<br>Max = 220.489  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0286<br>Max = 319.462 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.9901<br>Max = 465.861 |  |
|                                         | 1500    | 14 |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.079<br>Max = 220.489  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0286<br>Max = 319.462 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.9901<br>Max = 465.861 |  |
|                                         | 2000    | 15 |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.079<br>Max = 220.489  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 20.0286<br>Max = 319.462 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.9901<br>Max = 465.861 |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 500     |    |                                                                                      | 16                                                                                | 17                                                                                | 18                                                                                |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 16 |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.4301<br>Max = 238.474 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.1122<br>Max = 323.364 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 18.7442<br>Max = 456.061 |  |
|                                         | 1500    | 17 |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.4301<br>Max = 238.474 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.1122<br>Max = 323.364 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 18.7442<br>Max = 456.061 |  |
|                                         | 2000    | 18 |  | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.4301<br>Max = 238.474 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 19.1122<br>Max = 323.364 | CONTOURS<br>Temp<br>Time 1<br>Comput.Ref Global<br>Min = 18.7442<br>Max = 456.061 |  |

Table 5.2.8 Temperature by analysis (section view : shoulder diameter 15mm)

| Factors                                 | Level 3 |    |                                                                                      |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                |    |    |    |  |
|-----------------------------------------|---------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|--|
| Shoulder diameter<br>( <i>mm</i> ), (A) | 15      |    |                                                                                      |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                |    |    |    |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 100     |    |                                                                                      |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                | 19 | 20 | 21 |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 19 |    | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 20.0628<br/>Max = 279.087</div>                              | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 20.0029<br/>Max = 491.874</div>                             | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 20.0027<br/>Max = 607.299</div>                              |    |    |    |  |
|                                         | 1500    | 20 |    | <div>43.6104<br/>67.1581<br/>90.7057<br/>114.253<br/>137.801<br/>161.349<br/>184.896<br/>208.444<br/>231.992<br/>255.539</div> | <div>62.9003<br/>105.798<br/>148.695<br/>191.592<br/>234.49<br/>277.387<br/>320.285<br/>363.182<br/>406.079<br/>448.977</div> | <div>73.3933<br/>126.784<br/>180.175<br/>233.565<br/>286.956<br/>340.346<br/>393.737<br/>447.128<br/>500.518<br/>553.909</div> |    |    |    |  |
|                                         | 2000    | 21 |    |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                |    |    |    |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 300     |    |                                                                                      |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                | 22 | 23 | 24 |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 22 |  | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 20.0499<br/>Max = 278.896</div>                              | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 19.9863<br/>Max = 485.751</div>                             | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 19.9765<br/>Max = 590.915</div>                              |    |    |    |  |
|                                         | 1500    | 23 |  | <div>43.5759<br/>67.102<br/>90.628<br/>114.154<br/>137.68<br/>161.206<br/>184.732<br/>208.258<br/>231.784<br/>255.31</div>     | <div>62.3285<br/>104.671<br/>147.013<br/>189.355<br/>231.698<br/>274.04<br/>316.382<br/>358.724<br/>401.067<br/>443.409</div> | <div>71.88<br/>123.784<br/>175.687<br/>227.59<br/>279.494<br/>331.397<br/>383.301<br/>435.204<br/>487.108<br/>539.011</div>    |    |    |    |  |
|                                         | 2000    | 24 |  |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                |    |    |    |  |
| Travels speed<br>( <i>mm/min</i> ), (B) | 500     |    |                                                                                      |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                | 25 | 26 | 27 |  |
| Rotation speed<br>( <i>rpm</i> ), (C)   | 1000    | 25 |  | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 19.1376<br/>Max = 283.617</div>                              | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 18.5728<br/>Max = 477.728</div>                             | <div>CONTOURS<br/>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global<br/>Min = 18.0468<br/>Max = 582.198</div>                              |    |    |    |  |
|                                         | 1500    | 26 |  | <div>43.1912<br/>67.2248<br/>91.2684<br/>115.312<br/>139.355<br/>163.399<br/>187.443<br/>211.486<br/>235.53<br/>259.573</div>  | <div>60.3142<br/>102.056<br/>143.797<br/>185.538<br/>227.28<br/>269.021<br/>310.763<br/>352.504<br/>394.245<br/>435.987</div> | <div>69.3333<br/>120.62<br/>171.906<br/>223.193<br/>274.479<br/>325.766<br/>377.052<br/>428.339<br/>479.625<br/>530.911</div>  |    |    |    |  |
|                                         | 2000    | 27 |  |                                                                                                                                |                                                                                                                               |                                                                                                                                |    |    |    |  |

또한 Table 5.2.9, 5.2.10, 5.2.11에 평면부 온도 분포 형상을 나타내었다. 전반적으로 모든 조건에서 온도 분포는 양호하게 나타났으며, 회전속도가 증가할수록 온도 분포는 좁아지며 솔더 지름이 증가할수록 길어지는 것으로 나타났다.

Table 5.2.9 Temperature by analysis (top view : shoulder diameter 9mm)

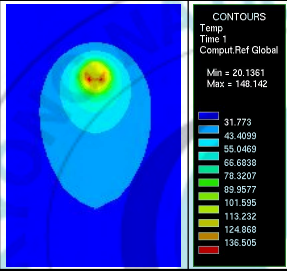
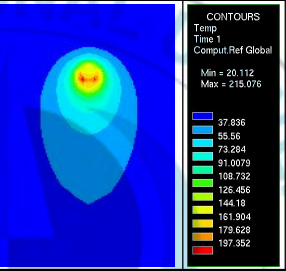
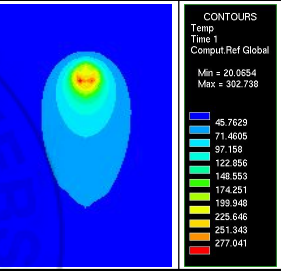
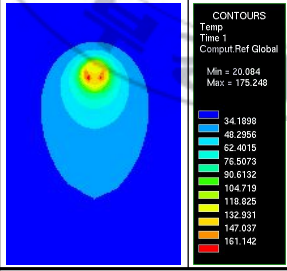
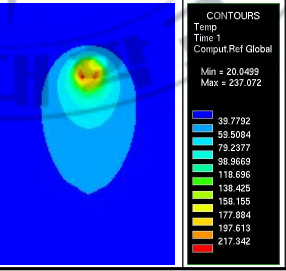
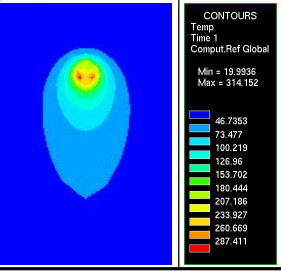
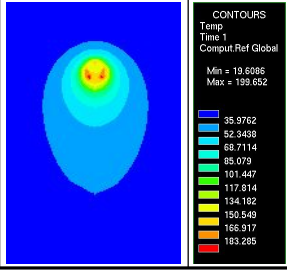
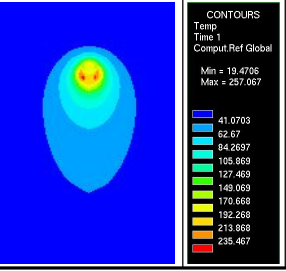
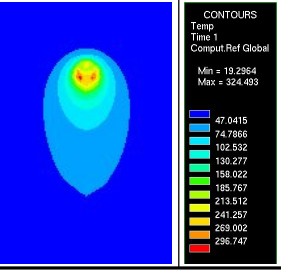
| Factors                    | Level 1                                                                             |                                                                                      |                                                                                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter(mm), (A) | 9                                                                                   |                                                                                      |                                                                                       |
| Travels speed(mm/min), (B) | 100                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                            |   |   |   |
| Travels speed(mm/min), (B) | 300                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                            |  |  |  |
| Travels speed(mm/min), (B) | 500                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                            |  |  |  |

Table 5.2.10 Temperature by analysis (top view : shoulder diameter 12mm)

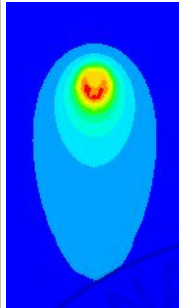
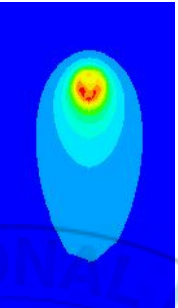
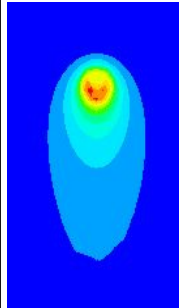
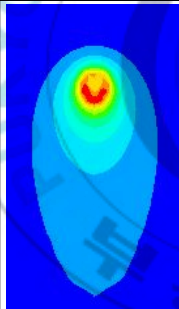
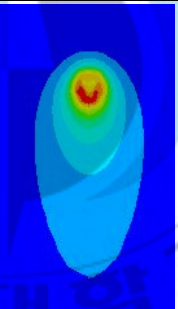
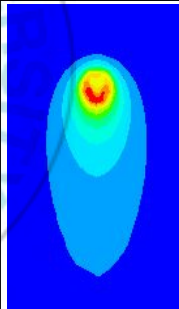
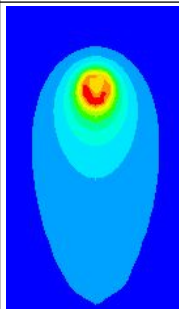
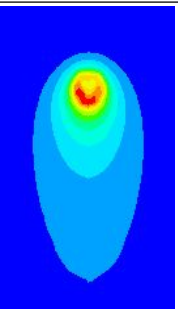
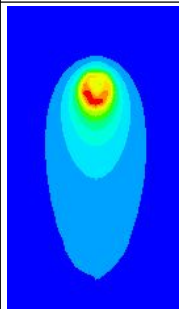
| Factors                    | Level 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter(mm), (A) | 12                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Travels speed(mm/min), (B) | 100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1500                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                            |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 20.1134<br/>Max = 200.749</p> <p>36.5348<br/>52.9562<br/>63.3776<br/>65.739<br/>102.22<br/>118.642<br/>135.063<br/>151.485<br/>167.306<br/>184.527</p> </div>     |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 20.0359<br/>Max = 317.889</p> <p>47.1134<br/>74.191<br/>101.269<br/>128.346<br/>158.424<br/>189.501<br/>208.579<br/>236.657<br/>263.734<br/>290.812</p> </div>   |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 20.0017<br/>Max = 476.912</p> <p>61.539<br/>103.076<br/>144.614<br/>186.151<br/>227.688<br/>269.225<br/>310.763<br/>352.3<br/>393.837<br/>435.375</p> </div>      |
| Travels speed(mm/min), (B) | 300                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1500                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                            |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 20.079<br/>Max = 220.489</p> <p>38.2391<br/>56.5172<br/>74.7363<br/>92.9554<br/>111.174<br/>129.394<br/>147.613<br/>165.832<br/>184.051<br/>202.27</p> </div>   |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 20.0286<br/>Max = 313.462</p> <p>47.2499<br/>74.4711<br/>101.692<br/>128.914<br/>156.135<br/>183.356<br/>210.577<br/>237.799<br/>265.02<br/>292.241</p> </div> |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 19.8901<br/>Max = 465.861</p> <p>60.5238<br/>101.058<br/>141.591<br/>182.125<br/>222.659<br/>263.193<br/>303.726<br/>344.26<br/>384.794<br/>425.327</p> </div>  |
| Travels speed(mm/min), (B) | 500                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1500                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                            |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 19.4301<br/>Max = 238.474</p> <p>39.3431<br/>59.2562<br/>79.1692<br/>99.0823<br/>118.995<br/>138.908<br/>158.821<br/>178.734<br/>198.647<br/>218.561</p> </div> |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 19.1122<br/>Max = 323.364</p> <p>46.7714<br/>74.4306<br/>102.09<br/>129.749<br/>157.408<br/>185.068<br/>212.727<br/>240.386<br/>268.045<br/>295.704</p> </div> |  <div> <p>CONTOURS</p> <p>Temp<br/>Time 1<br/>Comput.Ref Global</p> <p>Min = 18.7442<br/>Max = 456.061</p> <p>58.5003<br/>89.2563<br/>139.012<br/>177.768<br/>217.525<br/>257.281<br/>297.037<br/>336.793<br/>376.549<br/>416.305</p> </div> |

Table 5.2.11 Temperature by analysis (top view : shoulder diameter 15mm)

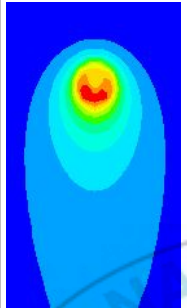
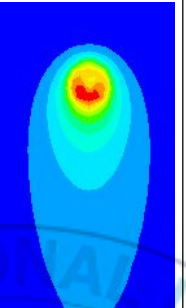
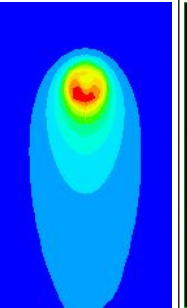
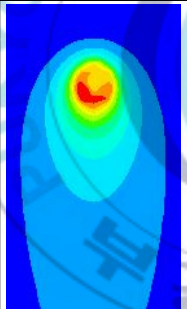
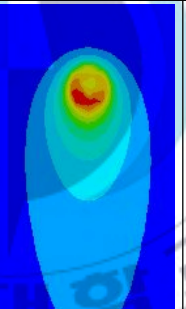
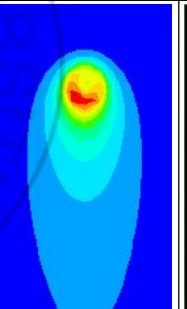
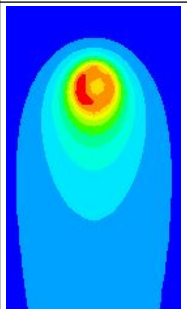
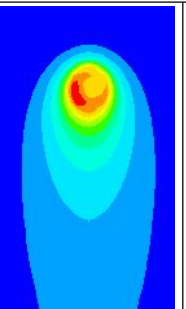
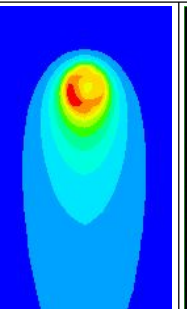
| Factors                    | Level 3                                                                             |                                                                                     |                                                                                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter(mm), (A) | 15                                                                                  |                                                                                     |                                                                                       |
| Travels speed(mm/min), (B) | 100                                                                                 |                                                                                     |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                | 1500                                                                                | 2000                                                                                  |
|                            |    |    |    |
| Travels speed(mm/min), (B) | 300                                                                                 |                                                                                     |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                | 1500                                                                                | 2000                                                                                  |
|                            |  |  |  |
| Travels speed(mm/min), (B) | 500                                                                                 |                                                                                     |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), (C)   | 1000                                                                                | 1500                                                                                | 2000                                                                                  |
|                            |  |  |  |



표 Table 5.2.12, 5.2.13, 5.2.14와 같이 마찰교반용접의 중요 변수인 공구의 솔더 지름, 회전속도, 이송속도 3가지 변수들 간의 상관관계에 대해 정량적으로 파악하고자 통계적 기법인 실험계획법 중 삼원배치법을 이용하여 구조해석은 응력을 특성치로 선정하여 총 27회 해석을 수행하였다. 여기서 A는 공구의 솔더지름, B는 이송속도, C는 회전속도이다.

Table 5.2.12 Von Mises stress (Level 1)

| Run | Factors |     |      | Von mises Stress<br>(MPa) |
|-----|---------|-----|------|---------------------------|
|     | A       | B   | C    |                           |
| 1   | 9       | 100 | 1000 | 76.24                     |
| 2   | 9       | 100 | 1500 | 115.79                    |
| 3   | 9       | 100 | 2000 | 132.88                    |
| 4   | 9       | 300 | 1000 | 89.69                     |
| 5   | 9       | 300 | 1500 | 121.00                    |
| 6   | 9       | 300 | 2000 | 141.86                    |
| 7   | 9       | 500 | 1000 | 101.15                    |
| 8   | 9       | 500 | 1500 | 122.13                    |
| 9   | 9       | 500 | 2000 | 151.75                    |

Table 5.2.13 Von Mises stress (Level 2)

| Run | Factors |     |      | Von mises Stress<br>(MPa) |
|-----|---------|-----|------|---------------------------|
|     | A       | B   | C    |                           |
| 10  | 12      | 100 | 1000 | 120.59                    |
| 11  | 12      | 100 | 1500 | 175.33                    |
| 12  | 12      | 100 | 2000 | 174.53                    |
| 13  | 12      | 300 | 1000 | 122.71                    |
| 14  | 12      | 300 | 1500 | 181.36                    |
| 15  | 12      | 300 | 2000 | 173.31                    |
| 16  | 12      | 500 | 1000 | 123.66                    |
| 17  | 12      | 500 | 1500 | 189.85                    |
| 18  | 12      | 500 | 2000 | 174.97                    |

Table 5.2.14 Von Mises stress (Level 3)

| Run | Factors |     |      | Von mises Stress<br>(MPa) |
|-----|---------|-----|------|---------------------------|
|     | A       | B   | C    |                           |
| 19  | 15      | 100 | 1000 | 145.24                    |
| 20  | 15      | 100 | 1500 | 172.93                    |
| 21  | 15      | 100 | 2000 | 169.84                    |
| 22  | 15      | 300 | 1000 | 147.71                    |
| 23  | 15      | 300 | 1500 | 173.51                    |
| 24  | 15      | 300 | 2000 | 171.67                    |
| 25  | 15      | 500 | 1000 | 154.03                    |
| 26  | 15      | 500 | 1500 | 172.52                    |
| 27  | 15      | 500 | 2000 | 194.10                    |

Table 5.2.15와 같이 구조해석을 통해 얻은 응력 값을 특성치로 선정하여 통계적 분석방법인 분산분석을 실시하였다. 분산분석 결과, 알루미늄 합금의 마찰교반용접 구조해석시 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 공구의 솔더 지름이 응력 특성치에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 회전속도, 이송속도 순으로 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 각 변수들간의 교호작용 중 솔더지름과 회전속도간의 교호작용이 응력 특성치에 유의한 것으로 나타났다.

Table 5.2.15 ANOVA for von Mises stress

|     | SS       | $\Phi$ | MS       | $F_0$    | $F_{(0.10)}$ | $F_{(0.05)}$ | $F_{(0.01)}$ |
|-----|----------|--------|----------|----------|--------------|--------------|--------------|
| A   | 13083.31 | 2      | 6541.66  | 188.36** | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| B   | 573.14   | 2      | 286.57   | 8.25*    | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| C   | 10545.56 | 2      | 5272.78  | 151.82** | 3.11         | 4.46         | 8.65         |
| A×B | 108.70   | 4      | 27.17    | 0.78     | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| A×C | 1546.74  | 4      | 386.68   | 11.13**  | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| B×C | 71.85    | 4      | 17.96    | 0.52     | 2.81         | 3.84         | 7.01         |
| E   | 277.84   | 8      | 34.73    |          |              |              |              |
| T   | 26207.14 | 26     | 12567.56 |          |              |              |              |

Table 5.2.16와 같이 각 변수들의 모평균 및 구간추정을 실시하였다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접 구조 해석시 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 모두 온도와 비례하는 경향을 나타냈으며, 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 가장 높은 온도 값을 나타내는 조합은 A3B3C3\* 조건으로 90% 신뢰구간에서  $184.54 \pm 7.00$ , 95% 신뢰구간에서  $187.54 \pm 8.67$ , 99% 신뢰구간에서  $184.54 \pm 12.62$ 로 나타났다.

Table 5.2.16 Estimated von Mises stress for each factors

| Factors | Point estimation | Confidence interval | +      | -      |
|---------|------------------|---------------------|--------|--------|
| A1      | 116.94           | 7.00                | 123.94 | 109.95 |
| A2      | 159.59           | 7.00                | 166.59 | 152.59 |
| A3      | 166.84           | 7.00                | 173.84 | 159.84 |
| B1      | 142.60           | 7.00                | 149.59 | 135.60 |
| B2      | 146.98           | 7.00                | 153.98 | 139.98 |
| B3      | 153.79           | 7.00                | 160.79 | 146.80 |
| C1      | 120.11           | 7.00                | 127.11 | 113.12 |
| C2      | 158.27           | 7.00                | 165.27 | 151.27 |
| C3      | 164.99           | 7.00                | 171.99 | 157.99 |
| 90%     | 184.54           | 7.00                | 191.54 | 177.54 |
| 95%     | 184.54           | 8.67                | 193.22 | 175.87 |
| 99%     | 184.54           | 12.62               | 197.16 | 171.92 |

※ : 공구의 솔더지름 15mm, 이송속도 500mm/min, 회전속도 2000rpm

각 변수들의 모평균을 구하여 Fig. 5.2.3와 같이 나타내었다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접 구조해석시 공구의 솔더 지름이 증가할수록 응력 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 15mm에서 가장 큰 응력 값을 나타내었다. 공구의 이송속도 역시 증가할수록 응력 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 500mm/min에서 가장 큰 응력 값을 나타내었다. 공구의 회전속도 또한 증가할수록 응력 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 2000rpm에서 가장 큰 응력 값을 나타내었다.

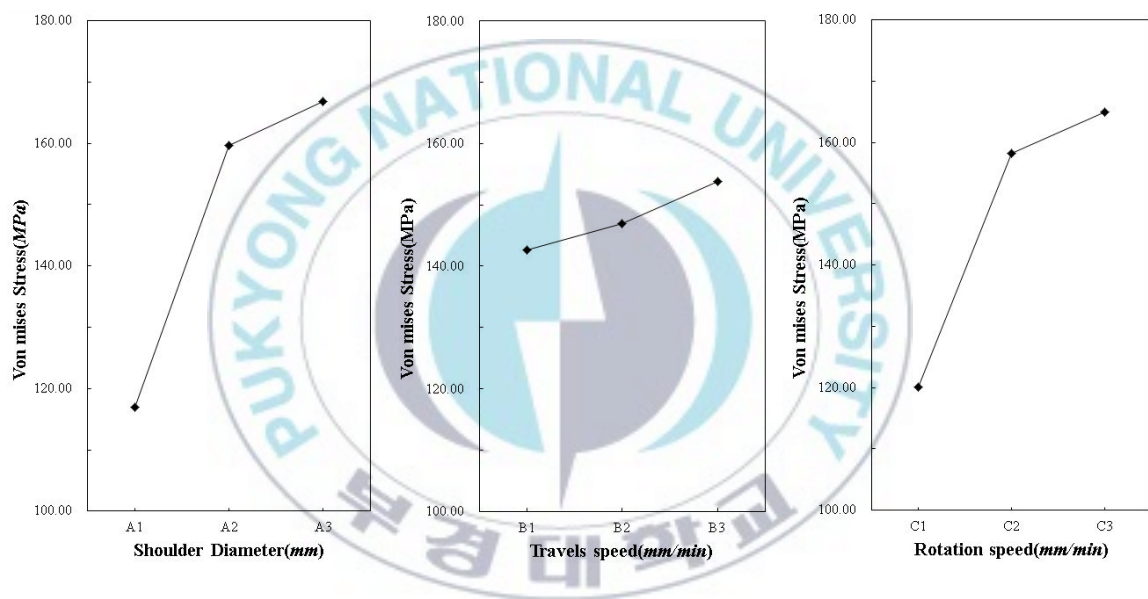


Fig. 5.2.3 Response plots for von Mises stress

Fig 5.2.3 에 알루미늄 합금의 마찰교반용접 구조 해석시 용접 변수들인 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도가 응력 특성치에 영향을 끼치는 기여도를 나타내었다. 공구의 솔더 지름이 약 52%로 응력 특성치에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며 회전속도가 42%, 이송속도가 각각 약 2.0%로 영향을 끼치는 것으로 나타났다.



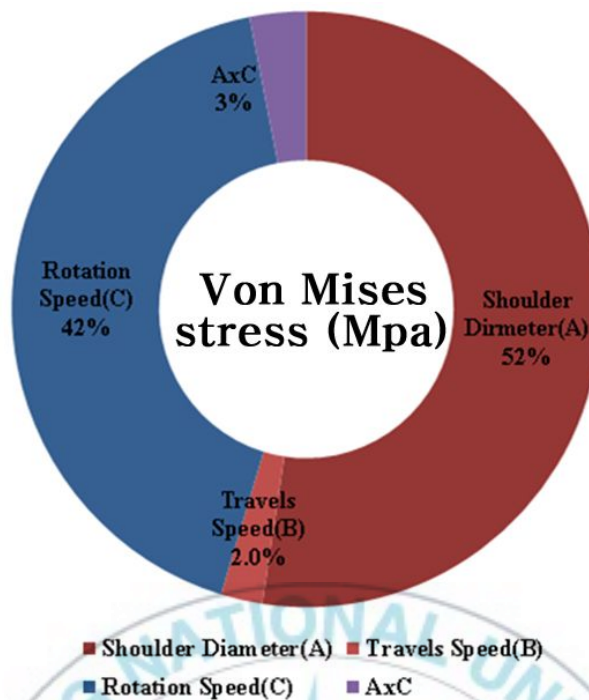


Fig. 5.2.4 Graphical illustration of the contribution on all factors (Von Mises stress)

Table 5.2.17, 5.2.18, 5.2.19에 실험계획법을 이용하여 27회 수행한 알루미늄 합금의 마찰교반용접 구조해석 결과를 나타내었다. 전반적으로 모든 조건에서 용접부 응력 분포는 양호하게 나타났으며, 회전속도가 증가할수록 단면부 응력 분포는 좁아지며 솔더 지름이 커질수록 용접부 응력 분포가 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 5.2.17 Results of analysis (section view : shoulder diameter 9mm)

| Factors                      | Level 1 |   |                                                                                      |
|------------------------------|---------|---|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 9       |   |                                                                                      |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |   |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 1 |    |
|                              | 1500    | 2 |    |
|                              | 2000    | 3 |    |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |   |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 4 |  |
|                              | 1500    | 5 |  |
|                              | 2000    | 6 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |   |                                                                                      |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 7 |  |
|                              | 1500    | 8 |  |
|                              | 2000    | 9 |  |

Table 5.2.18 Results of analysis (section view : shoulder diameter 12mm)

| Factors                      | Level 2 |    |  |
|------------------------------|---------|----|--|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 12      |    |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |    |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 10 |  |
|                              | 1500    | 11 |  |
|                              | 2000    | 12 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |    |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 13 |  |
|                              | 1500    | 14 |  |
|                              | 2000    | 15 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |    |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 16 |  |
|                              | 1500    | 17 |  |
|                              | 2000    | 18 |  |

Table 5.2.19 Results of analysis (section view : shoulder diameter 15mm)

| Factors                      | Level 3 |    |  |
|------------------------------|---------|----|--|
| Shoulder diameter<br>(mm), A | 15      |    |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 100     |    |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 19 |  |
|                              | 1500    | 20 |  |
|                              | 2000    | 21 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 300     |    |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 22 |  |
|                              | 1500    | 23 |  |
|                              | 2000    | 24 |  |
| Travels speed<br>(mm/min), B | 500     |    |  |
| Rotation speed<br>(rpm), C   | 1000    | 25 |  |
|                              | 1500    | 26 |  |
|                              | 2000    | 27 |  |

또한 Table 5.2.20, 5.2.21, 5.2.22에 평면부 응력 분포 형상을 나타내었다. 전반적으로 모든 조건에서 응력 분포는 양호하게 나타났으며, 회전속도가 증가할수록 응력 분포는 좁아지며 이송속도가 증가할수록 길어지는 것으로 나타났다.

Table 5.2.20 Results of analysis (top view : shoulder diameter 9mm)

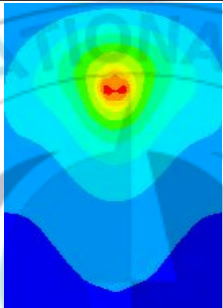
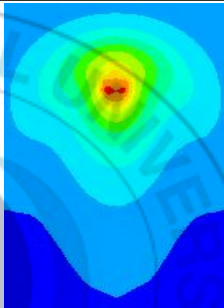
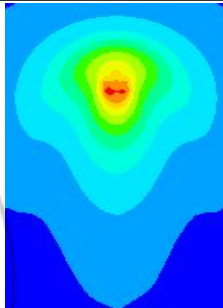
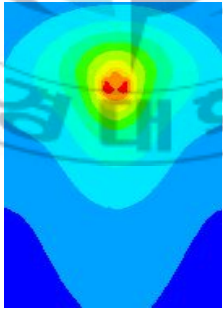
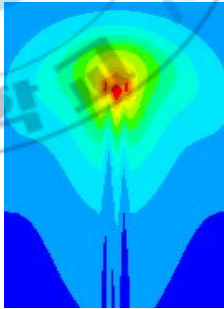
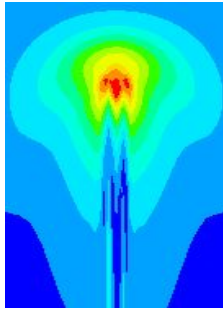
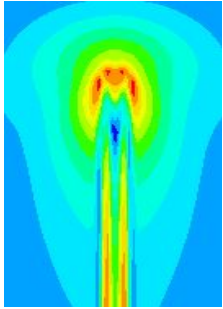
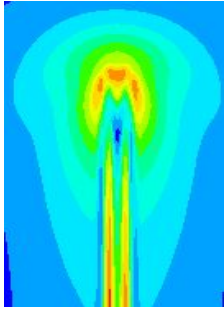
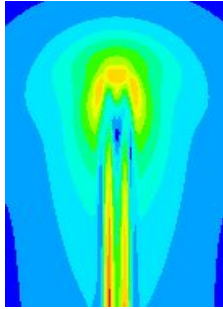
| Factors                  | Level                                                                               |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter(mm), A | 9                                                                                   |                                                                                      |                                                                                       |
| Travels speed(mm/min), B | 100                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |   |   |   |
| Travels speed(mm/min), B | 300                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |
| Travels speed(mm/min), B | 500                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |



Table 5.2.21 Results of analysis (top view : shoulder diameter 12mm)

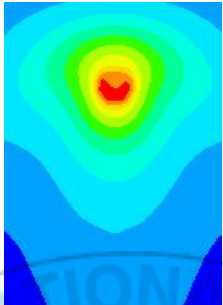
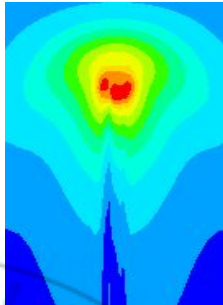
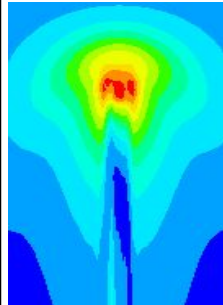
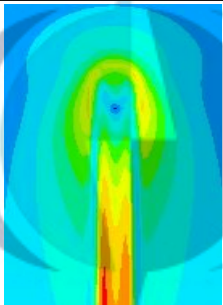
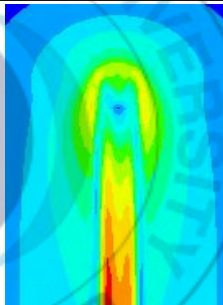
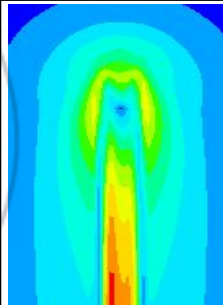
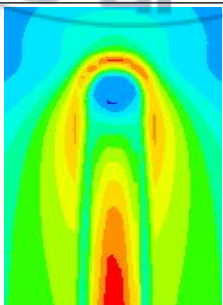
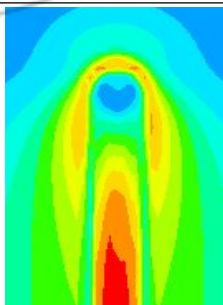
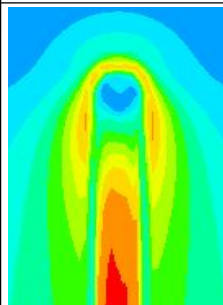
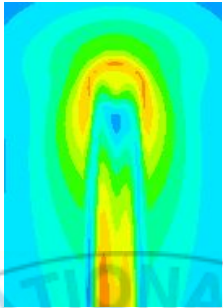
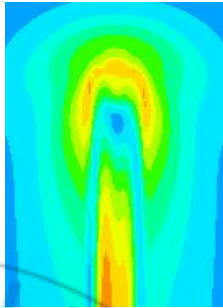
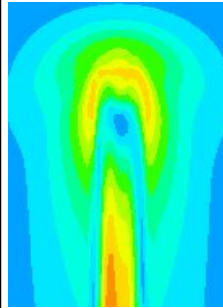
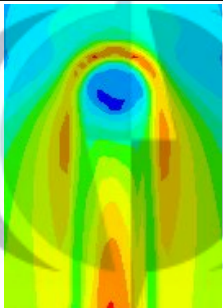
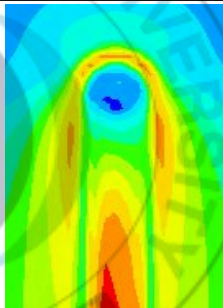
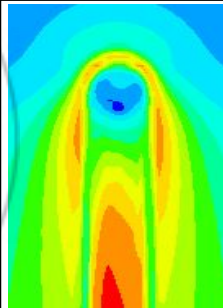
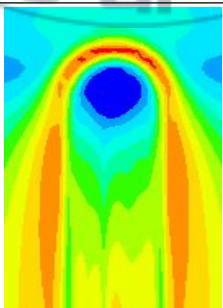
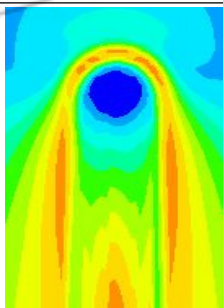
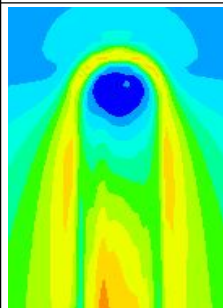
| Factors                  | Level 2                                                                             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter(mm), A | 12                                                                                  |                                                                                      |                                                                                       |
| Travels speed(mm/min), B | 100                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |    |    |    |
| Travels speed(mm/min), B | 300                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |   |   |   |
| Travels speed(mm/min), B | 500                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |



Table 5.2.22 Results of analysis (top view : shoulder diameter 15mm)

| Factors                  | Level 3                                                                             |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoulder diameter(mm), A | 15                                                                                  |                                                                                      |                                                                                       |
| Travels speed(mm/min), B | 100                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |    |    |    |
|                          | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |   |   |   |
| Travels speed(mm/min), B | 300                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |
|                          | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |
|                          | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |
| Travels speed(mm/min), B | 500                                                                                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Rotation speed(rpm), C   | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |
|                          | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |
|                          | 1000                                                                                | 1500                                                                                 | 2000                                                                                  |
|                          |  |  |  |

### 5.3 실험결과 및 해석결과 비교

본 논문에서는 알루미늄 합금의 마찰교반용접시 실험계획법 적용과 유한요소법 적용에 대해 검토 하고자 하였다. Table 5.3.1에 실험을 통해 얻은 인장강도, 온도, 용접전용해석 프로그램을 이용한 해석을 실시해 얻은 최대 응력의 모평균 값을 비교하였고, 그림 Fig 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3에 실험계획법을 통해 얻은 각 용접 변수들의 인장강도, 온도, 응력의 모평균을 추정하여 나타내었다. 인장강도는 용접변수들과 비례하는 경향을 나타냈으며, 온도 값 역시 용접변수들과 비례하는 경향을 나타내었다. 또한 응력 값 역시 용접 변수들과 비례하는 경향을 나타내었다. 실험과 해석 결과를 비교해보면 인장강도, 온도, 응력 값은 모두 비례하는 경향을 나타내었다.



Table 5.3.1 Analysis and experiment result of FWS

| Run | Factors                   |                           |                         | Tensile strength<br>(MPa) | Temperature<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Von Mises stress<br>(MPa) |
|-----|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
|     | Shoulder diameter<br>(mm) | Welding speed<br>(mm/min) | Rotation speed<br>(rpm) |                           |                                       |                           |
| 1   | 9                         | 100                       | 1000                    | 189.18                    | 148.14                                | 76.24                     |
| 2   | 9                         | 100                       | 1500                    | 198.65                    | 215.08                                | 115.79                    |
| 3   | 9                         | 100                       | 2000                    | 193.49                    | 302.74                                | 132.88                    |
| 4   | 9                         | 300                       | 1000                    | 191.44                    | 175.25                                | 89.69                     |
| 5   | 9                         | 300                       | 1500                    | 233.49                    | 237.07                                | 121.00                    |
| 6   | 9                         | 300                       | 2000                    | 247.87                    | 314.15                                | 141.86                    |
| 7   | 9                         | 500                       | 1000                    | 192.63                    | 199.65                                | 101.15                    |
| 8   | 9                         | 500                       | 1500                    | 253.87                    | 257.07                                | 122.13                    |
| 9   | 9                         | 500                       | 2000                    | 268.39                    | 324.49                                | 151.75                    |
| 10  | 12                        | 100                       | 1000                    | 205.02                    | 200.75                                | 120.59                    |
| 11  | 12                        | 100                       | 1500                    | 217.26                    | 317.89                                | 175.33                    |
| 12  | 12                        | 100                       | 2000                    | 213.83                    | 476.91                                | 174.53                    |
| 13  | 12                        | 300                       | 1000                    | 238.21                    | 220.49                                | 122.71                    |
| 14  | 12                        | 300                       | 1500                    | 250.17                    | 319.46                                | 181.36                    |
| 15  | 12                        | 300                       | 2000                    | 268.23                    | 465.86                                | 173.31                    |
| 16  | 12                        | 500                       | 1000                    | 260.73                    | 238.47                                | 123.66                    |
| 17  | 12                        | 500                       | 1500                    | 266.31                    | 323.36                                | 189.85                    |
| 18  | 12                        | 500                       | 2000                    | 235.78                    | 456.06                                | 174.97                    |
| 19  | 15                        | 100                       | 1000                    | 213.39                    | 279.09                                | 145.24                    |
| 20  | 15                        | 100                       | 1500                    | 238.57                    | 491.87                                | 172.93                    |
| 21  | 15                        | 100                       | 2000                    | 219.55                    | 607.30                                | 169.84                    |
| 22  | 15                        | 300                       | 1000                    | 239.78                    | 278.84                                | 147.71                    |
| 23  | 15                        | 300                       | 1500                    | 247.64                    | 485.75                                | 173.51                    |
| 24  | 15                        | 300                       | 2000                    | 260.42                    | 590.92                                | 171.67                    |
| 25  | 15                        | 500                       | 1000                    | 239.19                    | 283.62                                | 154.03                    |
| 26  | 15                        | 500                       | 1500                    | 249.06                    | 477.73                                | 172.52                    |
| 27  | 15                        | 500                       | 2000                    | 263.43                    | 582.20                                | 194.10                    |

## 6. 결 론

본 논문은 Al 6061 합금의 마찰교반용접 특성과 강도평가를 위해서 실험과 유한요소해석결과를 실험계획법을 적용하여 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 용접변수를 파악하고 용접강도에 가장 크게 하는 최적 공정 조건을 도출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마찰교반용접된 재료를 인장실험을 실시한 결과, 인장강도는 전반적으로 모든 조건에서 모재의 80%로 양호한 값으로 본 실험에 적용한 용접변수들의 수준은 적절하다고 판단되며, 범용 공작 기계의 마찰교반용접 적용이 가능하다고 판단된다. 또한 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수 모두 인장강도와 비례하는 경향을 나타냈다.

2. 인장강도를 특성치로 선정하여 분산분석을 수행한 결과, 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 모두 특성치에 유의한 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 이송속도가 인장강도 특성치에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 인장강도를 가장 크게 하는 용접 변수들의 조합은 A3B3C3<sup>\*</sup> 으로 나타났다.

3. 마찰교반용접의 실험계획법 적용을 위하여 본 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 최적 공정 조건인 A3B3C3<sup>\*</sup> 조건에서 검증실험을 실시한 결과, 275.85(MPa)로 신뢰구간 90% 조건에서도 만족하는 것으로 나타났다.

4. Al 6061 합금의 마찰교반용접의 유한요소해석을 실시한 결과, 온도 분포는 전반적으로 모든 조건에서 양호하게 나타났다. 또한 온도 값을 특성치로 선정하여 분산분석을 수행한 결과, 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 및 교호작용 모두 온도 특성치에 유의한 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 회전속도가 가장

큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 온도 값을 가장 크게 하는 용접 변수들의 조합은 A3B3C3\* 으로 나타났다.

5. 유한요소법을 이용하여 계산된 응력 값을 특성치로 선정하여 분산분석을 수행한 결과, 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 모두 응력 특성치에 유의한 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 이송속도가 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 응력 값을 가장 크게 하는 용접 변수들의 조합은 A3B3C3\*으로 나타났다.

6. 마찰교반용접의 실험과 해석에 대한 비교 검토 결과, 공구의 솔더 지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수는 인장강도, 온도, 응력에 대해 모두 비례하는 경향을 나타내었다.

이와 같이 대표적인 경량 합금 소재인 Al 6061 합금의 마찰교반용접에 대해 실험계획법과 유한요소법 적용 가능성을 검토한 결과, 실험계획법의 적용을 통해 정량적인 파악이 가능한 것으로 판단되며, 유한요소법 적용에 대해서는 전반적으로 실험과 해석의 결과가 일정한 경향을 보이는 것을 파악할 수 있었다. 그러나 인장강도, 온도, 응력 3가지 특성치에 대한 상관관계에 대해서는 추가 실험이 필요하다고 판단된다. 또한 현재까지도 공구 형상 및 공구 재료에 대한 연구 결과들이 학회나 연구기관을 통해 다양하게 보고되고 있다. 따라서 보다 심도 있는 마찰교반용접의 실험계획법과 유한요소법의 적용을 위해서는 공구 형상 및 공구 재료 등 추가적인 변수들을 고려할 필요가 있다고 사료된다.

※ : 공구의 솔더지름 15mm, 이송속도 500mm/min, 회전속도 2000rpm



## 참고문헌

1. 21세기 용접기술, 한국과학기술정보연구원, 2007.
2. 2030년 자동차 기술전망, 한국자동차공학회, 2010,
3. D. Lohwasser, Seoul International Symposium on FSW, 2000.
4. G. Liu, L. E. Murr, C. niou, J. C. Mc Clure and F. R. Vega, Scripta Mater 37, 1997, pp. 355.
5. O. Y. Midling, J. S. kvale and O. Dahl, First International Symposium on FSW, 1999, Thousand Oaks. USA.
6. Thomas, W. M, Nicholas, E. D, Needham, J. C, Murch, M. G, Templesmith, P. and Dawes, C. J, 1991, G. B. Patent Application No. 9125978.8.
7. 김환태, 길상철, “마찰교반용접기술의 최근 연구 동향”, 대한용접학회 춘계 학술대회, 2008, 제49권, pp. 77-77.
8. 岡材摩久宣青田欣也 : 日本溶接学会誌 Vol.72-5, 2003, pp. 134-142
9. M. Stangwood, J. E. Berry, D. P. Cleugh, A. J. Leonard, P. L. Threadgill, 1<sup>st</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, 1999, Thousan Oak, Calif.
10. C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel : Scripta Materialia 36, 1997, pp. 69-75.
11. 방한서, 김홍주, 오정인, 대한용접·접합학회, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집 2001년 제2권, 2001. 1, pp.206-208.
12. 이원배, 장형선, 장웅성, 연운모, 정승부, 대한용접·접합학회, 대한용접학



회 특별강연 및 학술발표대회 개요집 2003년 제1권, 2003. 5, pp. 179-181.

13. 서승일, 2007, “마찰교반용접의 현황 및 알루미늄 철도 차량에의 적용”, 한국철도학회 춘계학술대회.

14. Moreira, P. M. G. P. M. A. V. de figueiredo and P. M. S. T de Castro. 2007, “Fatigue behavior of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, No. 48, pp. 169-177.

15. Mahoney, M. W, Rhodes, C. G, Flintoff, J. G, Spurling, R. A. and Bingel, W. H. 1998, "Properties of Friction Stir Welded 7075 T651 Aluminum, Metallurgical and Materials", A, No. 29, pp. 1955-1964.

16. Liu, H. J, Fujii, H, Maeda, M. and Nogi, K. 2003, "Tensile Properties and Fracture Locations of Friction Stir Welded Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy", Journal of Materials Processing Technology, No. 142, pp. 692-696.

17. 임성곤, 김상식, 이창길, 김성준, “마찰교반용접된 각종 알루미늄 합금의 미세조직과 인장특성”, 대한금속·재료학회지, 제41권, 제11호, 2003, pp. 743-749.

18. 방한서, 김홍주, 고민성, 김규훈, “Al6061 합금의 마찰교반접합시 접합부의 열거동에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제20권, 제4호, pp. 128-131.

19. 김상식, 임성곤, 이창길, 김성준, “마찰교반용접된 Al6061-T651 합금의 응력부식균열 거동”, 대한금속·재료학회지, Vol. 43, No.3, pp.217-222.

20. 박희상, 이영호, 최원두, 고준빈, “Al6061-T6 마찰교반용접시 핀 형상과 이송속도가 기계적 강도에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국공장기계학회논문집, Vol. 17, No.4, pp. 22-28.

21. 장석기, 신상현, “밀링을 이용한 Al합금의 마찰교반용접용 최적 공구 형상 및 치수 개발에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제25권, 제4호, pp. 91-96.

22. 박재철, 한민수, 김성중, “해수환경에서의 마찰교반용접된 알루미늄합금에 대한 부식특성 비교”, 한국마린엔지니어링학회, 한국마린엔지니어링학회, 2010년도 공동학술대회 논문집, 2010, pp. 459-459.
23. 구병춘, 정현승, “마찰교반용접 열원의 유한요소 모델링”, 대한용접·접합학회, 대한용접접합학회 2011년도 춘계 학술발표대회 초록집, 제55권, 2011, pp. 154-154.
24. Mishra, R. S. and Ma, Z. Y. 2005, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering, R, No.50, pp. 1-78.
25. Kallee, S. W, Nicholas E. D. and Thomas, W. M 2001, "Friction Stir Welding - Invention, Innovations and Applications", INAL CO 2001, 8<sup>th</sup> International Conference on Joints in Aluminium, pp. 28-31.
26. "Friction Stir Welding - A General Introduction", High Tech Welding Website, <http://www.frictionstirwelding.com>
27. Thomas, W. M. 1998, "Friction Stir Welding and Related Friction Process", Proceedings of INALO98, pp. 157-167.
28. 송상우, 김남규, 강정윤, “마그네슘 및 알루미늄 합금의 마찰교반접합시 액화균열의 발생”, 대한용접·접합학회, 대한용접·접합학회지, 제28권, 제5호, 2010, pp. 28-34.
29. Ericsson, M. and Sandstrom, R. 2003, "Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds, and Comparison with MIG and TIG", International Journal of Fatigue, No. 25, pp. 1379-1387.
30. James, M N, Hattingh, D. G and Bradley, G R 2003, "Weld Tool Travel Speed Effectson Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083Aluminum", International Journal of Fatigues, No. 25, pp. 1389-1398.