[UCI]I804:24011-200000264178

2013年 2月

碩士學位論文

# TIG-FSW Hybrid 접합기술을 이용한 SS400/Al6061-T6 접합부의 수치해석 및 잔류응력 분포 특성에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

姜 棟 仁

# TIG-FSW Hybrid 접합기술을 이용한 SS400/Al6061-T6 접합부의 수치해석 및 잔류응력 분포 특성에 관한 연구

A study on the numerical analysis and Residual stress distribution characteristics of SS400/Al6061-T6 Butt joints by TIG-FSW Hybrid Welding

2013年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

姜 棟 仁

# TIG-FSW Hybrid 접합기술을 이용한 SS400/Al6061-T6 접합부의 수치해석 및 잔류응력 분포 특성에 관한 연구

指導敎授 房 漢 瑞

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함.

2013年 2月

朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

姜 棟 仁

# 姜棟仁의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授　房　熙　善 (印)

委　員 朝鮮大學校 敎授　房　漢　瑞 (印)

委　員 朝鮮大學校 敎授　權　寧　燮 (印)

2013年 11月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

List of Tables ····· iv
List of Figures ····· v
Abstract ····· vii

제 1 장 서 론

1 . 1 연구 배경 및 목적 ····· 1
1 . 2 FSW의 원리 및 특징 ····· 2
1.2.1 FSW의 원리 ····· 2
1.2.2 FSW의 특징 ····· 3
1 . 3 GTAW(TIG)의 원리 및 특징 ····· 4
1.3.1 GTAW의 원리 ····· 4
1.3.2 GTAW의 특징 ····· 5
1 . 4 수치해석 ····· 6

제 2 장 해석 이론

2 . 1 열전도 이론의 유한요소 정식화 ····· 7
2 . 2 열분포 해석용 프로그램 ····· 11
2 . 3 TIG-FSW Hybrid 입열 방정식 ····· 12

2 . 4 열탄소성 이론 ····· 14
2.4.1 3차원 열탄소성 이론의 유한요소 정식화 ····· 15
2 . 5 용접잔류응력 및 변형해석용 프로그램 ····· 20
2 . 6 온도의존성을 고려한 재료정수 ····· 21

## 제 3 장 실 험

3 . 1 실험장치 및 사용재료 ····· 23
3 . 2 공구(Tool)의 재질과 형상 ····· 26
3 . 3 TIG-FSW Hybrid 접합조건 및 비드의 형상 ····· 27
3.3.1 TIG-FSW Hybrid 접합조건 ····· 27
3.3.2 TIG-FSW Hybrid 접합부 비드 형상 ····· 30
3 . 4 인장시험 및 접합부의 인장강도 특성 ····· 31
3.4.1 인장시험 ····· 31
3.4.2 접합부 인장강도 특성 ····· 32
3 . 5 TIG-FSW Hybrid 접합부 부식 특성 ····· 34
3.5.1 부식시험 ····· 34
3.5.2 접합부의 갈바닉 특성에 의한 내부식성 평가 ····· 35
3 . 6 마크로 및 마이크로조직 분석 및 미세조직 관찰 · 39
3.6.1 마크로 및 마이크로 조직 분석 ····· 39
3.6.2 접합부 미세조직 ····· 40
3 . 7 접합부 온도 분포 측정 ····· 41
3.7.1 온도 구배 시험 ····· 41
3.7.2 접합부 온도 분포 특성 ····· 42

3 . 8 접합부 잔류응력 측정 및 특성분성 ····· 43
3.8.1 잔류응력 측정시험 ····· 43
3.8.2 잔류응력 특성 ····· 44

제 4 장 TIG-FSW Hybrid 접합부 수치해석

4 . 1 열전도 해석 ····· 45
4.1.1 해석 모델 ····· 45
4.1.2 열전도 해석 프로그램의 구성 ····· 47
4.1.3 열분포 특성 ····· 48
4 . 2 열 · 탄소성 해석 ····· 53
4.2.1 해석모델 및 해석방법 ····· 53
4.2.2 열탄소성 해석 프로그램 구성 ····· 54
4.2.3 잔류응력 분포 특성 ····· 55

제 5 장 결 론 ····· 60

참고문헌 ····· 63

# List of Tables

Table 3.1 Chemical composition and mechanical property ····· 24
Table 3.2 Tungsten carbide rod specifications ····· 25
Table 3.3 TIG welding condition ····· 27
Table 3.4 TIG-FSW Hybrid welding condition ····· 20
Table 3.5 TIG assisted FSW parameters and obtained bead shapes ····· 29
Table 3.6 Dissimilar Fractured specimen and Tensile strength ····· 31
Table 3.7 Dissimilar Tensile stress-strain curve ····· 33
Table 3.8 Schematic of specimens ····· 33
Table 3.9 Galvanic corrosion testing results of Fe and Mg galvanic couple series in deaerated 3% NaCl solution at room temperature ····· 34
Table 3.10 Temperature distribution in TIG-FSW Hybrid ····· 36

# List of Figures


Fig. 1.1 Schematic diagram of Friction Stir Welding ····· 4

Fig. 1.2 representation of microstructure regions ····· 4

Fig. 1.3 Schematic of GTAWelding ····· 6

Fig. 2.1 Isotropic Workhardening Rule ····· 9

Fig. 2.2 Physical properties of SS400 ····· 15

Fig. 2.3 Mechanical properties of SS400 ····· 15

Fig. 2.4 Physical properties of Al6061-T6 ····· 17

Fig. 2.5 Mechanical properties of Al6061-T6 ····· 18

Fig. 3.1 FSW equipment and capacity of FSW and TIG welding ·· 21

Fig. 3.2 Experimental set-up for TIG-FSW hybrid welding ····· 21

Fig. 3.3 Tool shape and drawing ····· 22

Fig. 3.4 Experiments of TIG Assisted FSW Hybrid welding ····· 23

Fig. 3.5 Welding configuration of TIG-FSW ····· 24

Fig. 3.6 Process of tensile test and specimen dimensions ····· 25

Fig. 3.7 Galvanic current density and mixed potential curves of Fe and Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature ····· 26

Fig. 3.8 Galvanic current density and mixed potential curves of welded Fe and welded Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature ····· 35

Fig. 3.9 Galvanic current density and mixed potential curves of Fe and welded Fe+Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature ····· 37

Fig. 3.10 Galvanic current density and mixed potential curves of Al and welded Fe+Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature ····· 39

Fig. 3.11 Whole galvanic current density curves of Fe and Al galvanic couple series in deaerated 3% NaCl solution at room temperature ····· 40

Fig. 3.12 Optical Microscope ····· 43

Fig. 3.13 Macro and Microstructure images ····· 45

Fig. 3.14 Temperature measurement points in welds by thermo-couple ····· 46
Fig. 3.15 Experimental set-up for Temperature measurement ····· 45
Fig. 3.16 Residual stress measurement machine(XRD) and Measurement Points of Welding Residual Stress ····· 45
Fig. 3.17 Residual stress measurement value ····· 45
Fig. 4.1 Schematic mesh division ····· 45
Fig. 4.2 Temperature distribution of specimen ····· 45
Fig. 4.3 Temperature contour along weld length and thickness obtained at 2sec for Al6061/SS400 ····· 45
Fig. 4.4 Time−temperature plot for Al6061/SS400 dissimilar joint ·· 45
Fig. 4.5 Comparison of numerically simulated and measured temperature history ····· 45
Fig. 4.6 Boundary condition ····· 45
Fig. 4.7 Distribution of welding residual stress at 0.2 below top surface of Al6061-T6/SS400 dissimilar joint ····· 45
Fig. 4.8 Distribution of welding residual stress at 1.5 below top surface of Al6061-T6/SS400 dissimilar joint ····· 45
Fig. 4.9 Distribution of welding residual stress at 3.0 below top surface of Al6061-T6/SS400 dissimilar joint ····· 45
Fig. 4.10 Comparison of experimentally measured and numerically simulated values of Transverse residual stress($\sigma_x$) at 3.0 below top surface ····· 45

# ABSTRACT

## A study on the numerical analysis and Residual stress distribution characteristics of SS400/Al6061-T6 Butt joints by TIG-FSW Hybrid Welding

Kang, Dong-In

Advisor : Prof. Bang, Han-sur, Ph.D.

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering

Graduate School of Chosun University

The increase of production efficiency by highly industrialized, fuel savings base on the light weighted and the demand of the lightweight metal which follows in the regulations of environmental pollution has rapidly increased. A environmental friendly welding process become seriously considered, whit this, joining process of lightweight alloy has played a prominent role in the industrial technique as well. More than anything else, FSW which makes a conspicuous figure is more environmental friendly then existing welding process, and its low welding deformation and excellent strength in the aspect of welded structure has already been given proof from various research. The use of FSW is becoming widespread and joining object expands its area of use from existing similar system of magnesium and aluminum to a joining area of dissimilar light weight alloys. So does in a joining area of light alloys and steel material. The case of joining a dissimilar plate using FSW has been known that is not easily obtained because of different physical properties in the way of FSW joining method of using existing similar materials.

This research found that aluminum, which has high strength to weight

and steel, which has excellent corrosion properties and high strength, can be joined by FSW and TIG Welding. In addition, research characteristic of heat distribution and residual stress over FSW and TIG Welding zone by numerical analysis in the inside and outside of the country. In this study after examining the characters of bonding zone in Al6061-T6/SS400 throughout the analysis program by Finite Element Method and find out the properties of thermal distribution and residual stress of mechanical properties over FSW and TIG Welding zone.

Consequently, the purpose of the research is to investigate the possibility of application of FSW and TIG Welding in the field of automobile, aircraft, vessels and a variety of industries.

# 제 1 장 서 론

## 1 . 1 연구 배경 및 목적

최근 환경오염문제와 국제유가 상승으로 인하여 경량소재에 대한 요구가 부각됨에 따라 수송기계(자동차, 선박, 항공기 등)분야에서 경량소재 적용을 위한 용접기술, 즉 이종재 경량합금/철계(Al, Mg, Cu ally/steel) 및 동종재 경량합금에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.[1], [2], [3]

경량 소재 중에서도 알루미늄 합금은 경량이고 비중이 강의 1/3로서 비강도가 우수하며 대기 중에서 내식성과 내마모성이 우수하여 구조 및 기능성금속으로서 다른 경량 소재에 비해 적용범위 및 활용도가 높은 비철재료이다. 하지만 알루미늄 합금을 용융 용접하는 경우 용접 열에 의한 변형 및 기공, 균열 등의 결함이 발생하기 쉬우며 접합부의 강도저하가 비교적 쉽게 발생하여 이에 대한 대책이 요구되고 있다.

이러한 문제점을 개선한 고상용접법 중 하나인 마찰교반용접(FSW: Friction stir welding)이 친환경적이며 용접결함 발생이 적고, 용접변형 및 잔류응력이 작아 동종재 및 이종재 경량합금의 접합뿐만 아니라 경량합금과 철강재료의 이종접합 분야까지 다양하게 연구가 이루어지고 있다.[4], [5] 하지만, 기존 마찰교반용접을 이용하여 이종재료 접합 시 두 재료의 상이한 물성치 및 용융점으로 인해 충분한 소성유동이 일어나지 않아 용접부의 품질이 저하 및 툴의 높은 마모성과 같은 문제점이 발생한다.[6]

따라서 본 연구에서는 이종재료 접합부의 강도 및 특성을 향상시키고자 기존 FSW 공정 중 강성이 좋은 재료부분에 TIG 예열을 추가한 TIG-FSW Hybrid 접합기술을 적용하여 SS400/Al6061-T6 맞대기 용접을 실시하고 이에 대한 수치해석을 통하여 접합부의 역학적 특성을 규명하고자 하였다.[7], [8], [9] 아울러 용접부의 신뢰성을 확보하기 위해, 접합부의 부식 특성을 파악하여 이종재료의 접합성을 평가하고 산업분야의 적용 가능성을 고찰하고자 하였다.

# 1 . 2 FSW의 원리 및 특징

## 1.2.1 FSW의 원리

FSW(마찰교반용접)은 Fig. 2.1에서 보는바와 같이 비소모식 접합용 Tool을 회전시켜 접합 모재에 삽입하여 이송하게 되면 Tool과 피 접합재 사이에 마찰열이 발생한다. 이 마찰열로 인해 피 접합재는 연화되고 Tool을 상부에서 가하는 하중과 용접방향으로 전진시키는 기계적인 힘에 의해 Tool이 이동하면서 마찰열에 의해 소성유동이 일어나 연화된 부분을 Advancing side에서 Retreating side로 압출되게 하여 강제적으로 혼합이 되게 함으로 고상접합부가 만들어지게 하는 접합 방법이다.

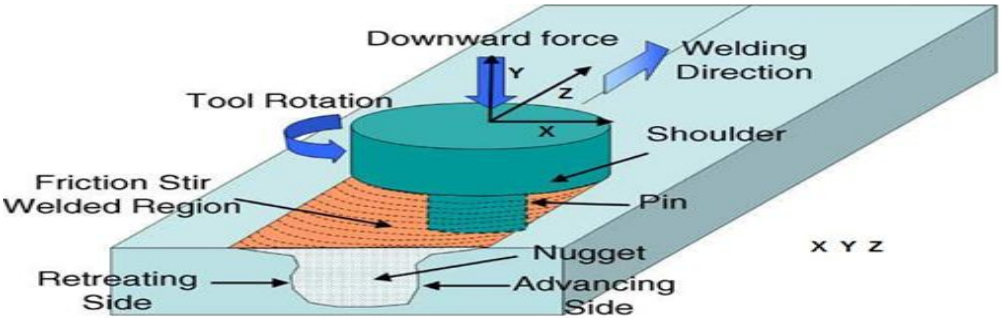
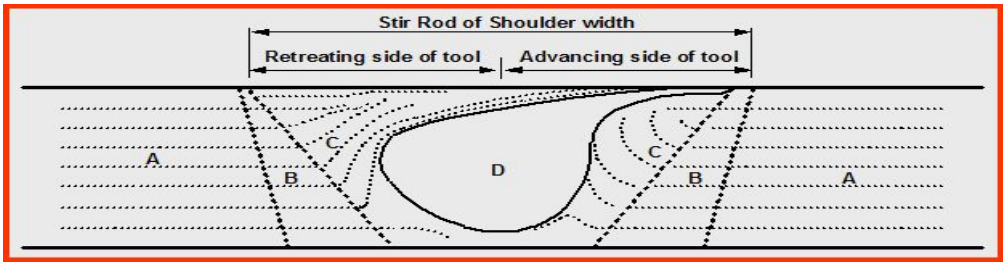



Fig. 1.1 Schematic diagram of Friction Stir Welding




A: BM (Base Metal)  B: HAZ (Heat Affected Zone)

C: TMAZ (Thermomechanically Affected Zone)  D: SZ (Stir Zone)

Fig. 1.2 representation of microstructure regions

### 1.2.2 FSW의 특징

FSW는 기존의 용융용접법과는 달리 별도의 열원, 용접봉, 용가재, 보호가스 등이 불필요하며 용접 중 적외선, 자외선등과 같은 유해광선이나 유해가스, 유해물질이 배출되지 않기 때문에 경제적이면서도 환경 친화적인 접합기술로 평가받고 있다. FSW의 장점을 정리해보면 다음과 같다.

1) 용융상태의 용접이 아닌 고상용접으로 용접에 따른 변형이 적다.

2) 경량합금(Al, Mg, Ti 합금)등으로 제조된 주조 제품, 금속기지 복합재료 등 기존 용접 기술의 적용이 거의 불가능했던 재료의 접합이 가능하여 이종재료의 용접에도 적합하다.

3) 기존 용융용접과 달리 별도의 열원 발생장치, 용접봉, 용가재, 분위기 가스 등을 사용할 필요가 없으며 접합 후 후가공이 필요치 않고 접합 시 소비전력이 매우적다.

4) 용융 용접에 비해 변형이 적기 때문에 용접부의 조직적, 기계적 특성이 매우 우수하고 잔류응력이 거의 발생하지 않는다.

5) 용융 용접에서 발생하기 쉬운 기공, 균열 등의 결함이 거의 발생하지 않는다.

6) 접합 중 유해가스나 유해 광선이 발생하지 않아 작업환경이 친환경적이다.

7) 작업자의 숙련도나 기량에 크게 의존하지 않고, 표준화와 자동화가 가능하다.

한편, FSW가 가지는 단점은 다음과 같다.

1) 마찰교반접합부 종단에 Tool 핀부분의 구멍이 남는다.

2) 접합부 뒷면에 Tool의 압력과 마찰압력을 견딜 수 있는 back-up 재료가 필요하다.

하지만 이와같은 단점을 근본적으로 해결하거나 후 공정으로써 해결할 수 있는 방법이 개발되어지고 있다. 마찰교반용접부 종단의 돌기부 구멍은 종단부에 end-tab을 부착하여 종단부를 바깥쪽으로 이동시켜 제거하는 방법과 공구의 핀이 종단부에 다다를 즈음 핀 부분만 상승하여 돌기부가 매꿔지도록 하는 방식이 사용되고 있다. 또한 FSW 용접 후 핀이 없는 평평한 공구를 회전시켜 용접부의 표면을 2차 소성변형을 시켜 연화된 금속이 종단부의 구멍을 없애주는 방법이 적용될 수 있을 것이다.

# 1 . 3 GTAW(TIG)의 원리 및 특징

## 1.3.1 GTAW의 원리

Fig. 2.2와 같이 GTAW는 TIG 용접이라고도 불리며 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재간의 아크열에 의해 모재를 용접하는 방법으로서 용접 부 주위에 불활성 가스를 공급하면서 용접하는 것이다.

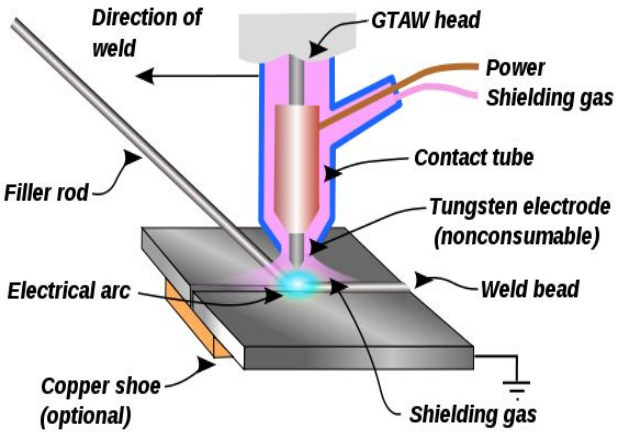



Fig. 1.3 Schematic of GTAWelding

### 1.3.2 GTAW의 특징

TIG 용접의 장점과 단점은 다음과 같다.

1) 장점

- 용접부의 기계적 성질이 우수하다.
- 내 부식성이 우수하다.
- 플럭스가 불필요하여 비철금속 용접이 용이하다.
- 보호가스가 투명하여 용접 작업자가 용접 상황을 잘 파악할 수 있다.
- 용접스패터를 최소한으로 하여 전 자세 용접이 가능하다.
- 용접 부 변형이 적다.

2) 단점

- 소모성 용접봉을 쓰는 용접보다 용접속도가 느리다.
- 용접 잘못으로 텅스텐 적극 봉이 용접부에 녹아 들어가거나 오염될 경우 용접부가 취화되기 쉽다.
- 부적당한 용접 기술로 용가재의 끝부분이 공기에 노출되면 용접금속이 오염된다.
- 불활성 가스와 텅스텐 전극봉은 다른 용접방법에 비교해 볼 때 고가 이다.
- SMAW와 같은 다른 용접 방법에 비해 용접기의 가격이 비싸다.

## 1 . 4 수치해석

용접열원의 효과를 고려하여 기존에 개발된 3차원 비정상 열전도 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 용접부에 대한 수치시뮬레이션을 수행하여 열적 특성을 규명하고자 하였다.

1) 3차원 비정상 열전도 방정식에 의거하여, 고체의 열전도 문제를 Galerkin 법을 이용하여 유한요소법으로 정식화 하였으면, 해석에 사용된 요소는 8절점 아이소-파라메트릭(Iso-parametric) 요소를 사용하였다.
2) 재료성질은 등방성으로 고려하였으며, 비열과 열전달 계수와 열전도도 및 밀도 등은 재료의 온도변화에 따라 그 값이 변화하므로 이들의 온도의존성을 고려하였다.
3) 열 해석을 위한 경계조건으로 내부의 열전도 및 대기 중으로 열전달이 있는 것으로 하였으며, 재료의 초기온도를 20℃로 가정하였다.

기 수행된 용접 열 분포 해석 데이터 중 용접 열 분포 이력을 열 하중으로 하는 용접잔류응력 해석용 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행하고 역학적 거동을 파악하고자 하였다.

1) 탄성 및 소성 전영역에 걸쳐 재료의 기계적 성질(항복강도, 탄성계수 등)의 온도 의존성을 고려하였다.
2) 탄성역에서의 전변형률(Total strain)증분은 탄성변형률 및 열변형률의 합으로 나타내었다. 소성역에서는 소성유동(Plastic-flow)이론에 입각하여 전변형률 증분을 구성하였으며, 선형 등방경화 법칙을 고려한 폰-미세스(Von-Mises) 항복조건을 항복함수로 사용하였다.

# 제 2 장 해석 이론

본 연구에서는 TIG-FSW Hybrid 접합부의 열전도[11], [12] 및 용접잔류응력 분포를 유한요소식으로 정식화한 수치해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 해석에 사용한 수치해석 프로그램은 모두 자연좌표계를 이용한 아이소-파라메트릭의 개념을 도입하여 정식화 하였다. 또한, 용접의 경우 시간에 따라 온도가 변화하므로 본 연구에 사용한 SS400/Al6061-T6의 물리정수인 비열, 밀도 및 열전도도[13], [14] 등이 변화하게 되므로 이를 고려한 열분포 해석용 프로그램을 사용하였다. 본 연구에서는 비정상 상태로 구별되는 접합부 중앙단면에 대하여 순간열원으로 고려하였으며, 본 장에서는 이들 해석에 사용한 프로그램의 해석이론에 대하여 언급하고자 한다.

## 2 . 1 열전도 이론의 유한요소 정식화

재료가 등방성(Isotropic)일 때, 연속체의 3차원 비정상 열전도문제의 지배방정식(Governing equation)은 다음과 같다.

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

식(3・1)을 3차원 비정상 열전도 방정식으로 기술하면 다음과 같다.

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

여기서, T : 온도(℃), c : 비열(cal/g・℃), $\rho$ : 밀도(g/$cm^3$), $\alpha$ : y, z 방향의 열전도율 (cal/$cm$・sec・℃), t : 시간(sec), $\dot{Q}$ : 단위 시간당 입열량

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

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

만약 경계에서 열전달이 있을 경우에는 q는 식(2・4)이 된다.

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

여기서, q : 열 유속(Heat flux) (cal/sec · ㎠), n : 물체표면의 외법선방향

$\alpha_c$ : 열전달계수 (cal/㎠ · sec · ℃), $T_c$ : 외부온도(℃) 이다.

고체의 열전도 문제를 Galerkin법을 적용하여 유한요소법으로 정식화하기위해, 해석모델을 유한개로 분할하고, 한 요소내의 온도 분포를 아래식으로 표현하였다.

$$T(y, z, t) = [N(y, z)] \quad \Phi(t) \qquad (2 \cdot 5)$$

여기서, T : 요소의 온도

[N] : 절점온도와 요소내의 온도를 연결하는 형상함수 Matrix

$\Phi$ : 시간 t에 대한 요소의 절점온도 Vector 이다.

식(2 · 2)식에 Galerkin법을 적용하면 식(3 · 6)이 된다.

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

여기서, V : 요소의 영역이다.

식(2 · 6)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 식을 전개하면 다음식이 구해진다.

$$\int_V \alpha [N]^T \ \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \ dv$$

$$= -\int_v \alpha \ \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial z}\right) dv$$

$$+ \int_s \alpha [N]^T \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}\right) ds \qquad (2 \cdot 7)$$

여기서, S : 요소의 경계이다.

식(2 · 3), (2 · 4) 및 (2 · 5)를 식(2 · 7)의 우변에 대입하면 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$-\int_v \alpha \left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x}\frac{\partial[N]}{\partial x}+\frac{\partial[N]^T}{\partial y}\frac{\partial[N]}{\partial y}+\frac{\partial[N]^T}{\partial z}\frac{\partial[N]}{\partial z}\right)dv \cdot \Phi(t)$$
$$-\int_s \alpha_c[N]^T[N]ds\ \Phi(t) + \int_v \dot{Q}[N]^T dv$$
$$+\int_s \alpha_c T_c[N]^T ds - \int_v \rho c[N]^T[N]dv \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

(2・8)

상기의 3차원 비정상 열전도식을 Matrix화 하면 다음 식이 구하여 진다.

$$[K]\ \Phi + [C]\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} = F \qquad (2・9)$$

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

그 내용은 다음과 같다.

$$[K] = \int_V \alpha \left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x}\frac{\partial[N]}{\partial x}+\frac{\partial[N]^T}{\partial y}\frac{\partial[N]}{\partial y}+\frac{\partial[N]^T}{\partial z}\frac{\partial[N]}{\partial z}\right)dv\ \Phi + \int_s \alpha[N]^T[N]ds\ \Phi$$

(2・10)

$$[C] = \int_V \rho c[N]^T[N]dv \qquad (2・11)$$

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

식(2・9)를 풀 경우에 $\Phi$ 와 $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ 의 2개의 미지량이 존재하지만, 시간 증분을 $\Delta t$라 하고 증분전의 온도를 $\Phi^B$, 증분후의 온도를 $\Phi^A$ 및 그 중간의 온도를 $\Phi^M$이라고 하면, 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

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

식(2・13)으로부터 식(2・14)가 구성된다.

$$\frac{\partial \Phi^A}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t}(\Phi^A - \Phi^B) - \frac{\partial \Phi^B}{\partial t} \qquad (2・14)$$

따라서, 식(2・9)는 아래와 같이 최종적으로 구할 수 있다.

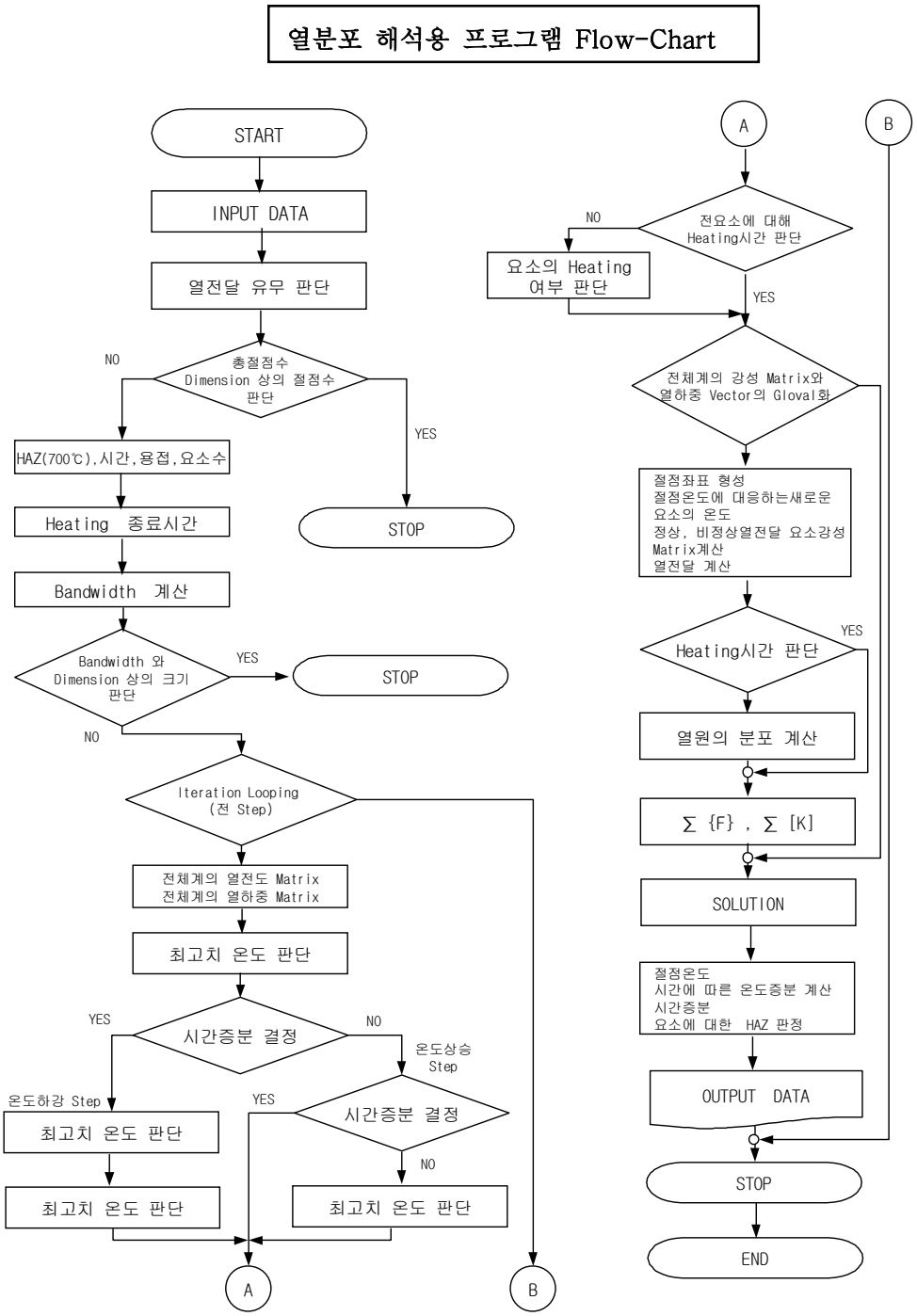
$$([K]+\frac{2}{\Delta t}[C])\ \phi^{A} = F + [C](\frac{2}{\Delta t}\ \phi^{B} + \frac{\partial \phi^{B}}{\partial t}) \qquad (2・15)$$

여기서, $\Delta t$ : 시간증분, $\phi^{A}$ : 증분후의 절점온도, $\phi^{B}$ : 증분전의 절점온도, [K] : 열전도 Matrix, [C] : 열용량 Matrix, F : 열유속 Vector 이다.

식(2・15)에서, 시간 t에 대한 $\phi^{B}$ 의 값을 알면 이 연립방정식의 해인 $\phi^{A}$ 를 구할 수 있다. 즉, 초기조건으로서 $\phi^{B}{}_{t=0}$의 값을 대입하면 된다.

본 연구에서는 식(2・9)식에 입각하여 구성된 3차원 열전도 프로그램을 이용하여 열분포 특성을 해석하였다.

## 2 . 2 열분포 해석용 프로그램



## 2. 3 TIG-FSW Hybrid 입열 방정식

본 연구에서는 접합 시 접합 모재를 고정한 후 경한 재질을 지닌 비소모성 회전 Tool과 접합모재의 상대적 운동에 의해 접촉면에서의 마찰열과 회전 Rotating Pin부근에서의 소성변형 열원 그리고 점성응력에 가해진 일에 의해 운동에너지가 열로 전환되는 점성소실을 열원으로 하여 접합이 이루어진다. 이에 대한 TIG-FSW Hybrid 접합에 의한 입열식은 다음과 같다.

1) 점성소실에 의한 열원 : 점성소실에 대한 입열량을 고려할 때 두 가지 가정을 세우는데 첫 번째는 Shear energy가 완전히 열로 전환된다고 가정을 하였고 두 번째는 Shear plane을 따라서 균일하게 열이 분포된다고 가정을 하였다. 또한, 입열량은 Advancing side와 Retreating side를 고려하여 식(2・16), 식(2・17)과 같다.

Heat source in Advancing side $q_{Sa} = \dfrac{(V_f + V_t) \times F_S}{W_a \times h_a}$ (2・16)

Heat source in Retreating side $q_{Sr} = \dfrac{(V_f - V_t) \times F_s}{W_r \times h_r}$ (2・17)

여기서, $V_f$ : Forward travel speed, $V_t$ : Pin tangential velocity

$F_s$ : Shear plan component of resultant force

$W_a$ : Width of advancing extrusion zone

$h_a$ : Depth of advancing extrusion zone

$W_r$ : Width of retreating extrusion zone

$h_r$ : Depth of retreating extrusion zone 이다.

2) 소성변형 열원 : Boothroyd의 이론에 따라 Tool의 표면부터 SZ경계까지 소성변형된 영역의 소성변형률은 선형으로 변한다고 가정을 하였다. 또한, 입열량은 Advancing side와 Retreating side를 고려하여 식(2・18), 식(2・19)과 같다.

The strain rate of Advancing side $\dot{\varepsilon}_{pa} = \dfrac{V_f + V_t}{W_a}$ (2 · 18)

The strain rate of Retreating side $\dot{\varepsilon}_{pr} = \dfrac{V_f - V_t}{W_r}$ (2 · 19)

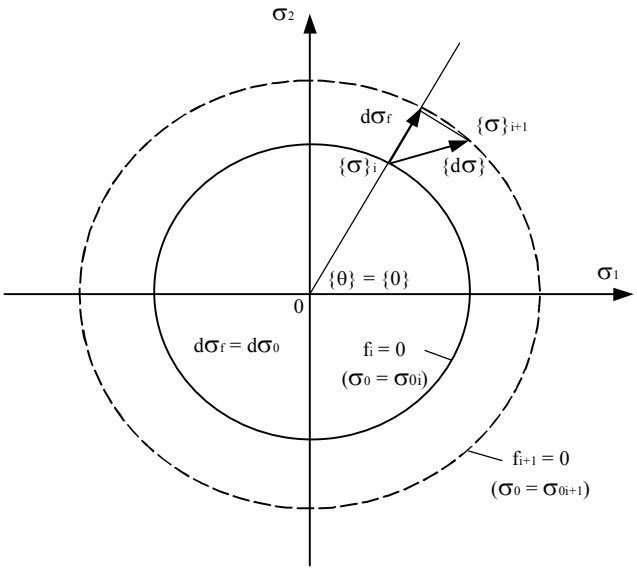
3) 마찰열 : 계면에서 발생되는 마찰열은 Tool shoulder와 Matrix interface의 마찰에 의하여 발생한다고 가정을 하였다. 또한, 입열량은 Advancing side와 Retreating side를 고려하여 식(2 · 20), 식(2 · 21)과 같다.

Advancing side $q_{fa} = \dfrac{(V_f + V_t)F}{contact\,length}$ (2 · 20)

Retreating side $q_{fr} = \dfrac{(V_f - V_t)F}{contact\,length}$ (2 · 21)

## 2 . 4 열탄소성 이론

본 연구에서는 용접잔류응력해석을 위하여 재료는 등방성으로 가정하였고, 탄성 및 소성 전 영역에서 재료의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수, 비저항)은 온도의존성을 고려하였으며, 변형률 및 응력의 관계를 소성유동(Plastic flow)이론에 입각하여 증분으로 나타내었다. 또한, 소성역에서는 선형등방경화법칙을 고려한 Von-Mises의 항복조건을 항복함수로 사용하였다. 즉, 소성유동(Plastic flow)동안에 초기 항복곡면은 일정하게 팽창한다고 가정하였다.




| |
|---|
| f=0 : yield surce(in this example, circle) |
| {Θ} : vector which indicate center of yield surface |
| $\sigma_o$ : a measure of size of yield surface |
| (radius of yield surface) |
| {σ} : stresses on yield surface |
| i, i+1 : loading step |
| (suffix f indicates normal component of each increment) |

Fig. 2.1 Isotropic Workhardening Rule

### 2.4.1 3차원 열탄소성 이론의 유한요소 정식화

용접선 방향의 길이가 폭 방향과 두께 방향의 치수에 비해 충분히 길다면, 용접선 길이 방향에 대하여 수직한 평면에 대한 열적, 역학적 거동은 용접선 길이 방향을 따라 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서 용접 시·종단부를 제외하고는 온도의 상승 및 냉각과정이 일정한 준정상역이 되고, 다음 조건으로 가정할 수 있다.

1) 응력과 변형률 분포는 용접선 길이 방향에 대해 독립이다.
2) 용접선 길이 방향에 수직인 평면이 변형 전 평면으로 존재한다면, 변형 후에도 평면으로 존재한다.

이들 가정을 정식화 하면, 식(4·1), (4·2)로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x},\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y},\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \qquad (4\cdot 1)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y},\ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \qquad (4\cdot 2)$$

그러나, 열은 등방성이므로 열에 의한 전단변형률은 발생하지 않기 때문에 이를 고려하여, 식(4·2)을 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \qquad (4\cdot 3)$$

구조물이 물체력 및 경계조건을 만족함과 동시에 평형을 이루고 있다면, 평형방정식과 역학적 경계조건이 성립되므로, 가상일의 원리(Principle of virtual work)를 정식화 할 수 있다.

$$\int_V \delta\{\varepsilon\}^T\{\sigma\}dV - \int_V \delta\{U\}^T\{\overline{F}\}dV - \int_{S^\sigma} \delta\{U\}^T\{\overline{T}\}dS = 0 \qquad (4\cdot 4)$$

여기서, $\{\sigma\}$ : 응력벡터, $\{\varepsilon\}$ : 변형률 벡터, $\{U\}$ : 변위 벡터,
$\{\overline{F}\}$ : 단위체적당의 물체력 벡터, $\{\overline{T}\}$ : 단위체적당의 표면력 벡터 이다.

따라서 열응력 문제의 변형률-변위 관계식은 다음과 같고,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x},\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y},\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \qquad (4 \cdot 5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0,\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0,\ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \qquad (4 \cdot 6)$$

응력-변형률 관계식은 다음과 같이 구성된다.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha T \qquad (4 \cdot 7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha T \qquad (4 \cdot 8)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha T \qquad (4 \cdot 9)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy} = 0 \qquad (4 \cdot 10)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz} = 0 \qquad (4 \cdot 11)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx} = 0 \qquad (4 \cdot 12)$$

여기서, $\{\alpha\}T = \varepsilon^t$ : 열 변형률(Thermal strain),

$\alpha$ : 순간 선팽창계수, T : 온도 이다.

따라서 전 변형률 $\{\varepsilon\}$는 탄성 변형률 $\{\varepsilon^e\}$와 열 변형률 $\{\varepsilon^t\}$의 합으로써 아래 식으로 표현되고,

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^t\} \qquad (4 \cdot 13)$$

응력과 변형률은 후크의 법칙(Hooke's law)으로부터 다음과 같다.

$$\{\sigma\} = [D^e]\{\varepsilon^e\}$$

$$\{\sigma\} = [D^e](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^t\}) \qquad (4 \cdot 14)$$

여기서, $[D^e]$ : 탄성 응력-변형률 메트릭스 이다.

(1) 응력-변형률 관계

재료의 물리적 성질의 온도 의존성을 고려한, 응력증분의 영향을 $[C]dT$ 라고 하면, 응력-변형률 관계는 아래식과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - [C]dT \qquad (4 \cdot 15)$$

1) 탄성역

재료가 탄성거동을 하는 경우에는 다음과 같다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^t\} \qquad (4 \cdot 16)$$

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon^e\} \qquad (4 \cdot 17)$$

여기서, 탄성변형률 $\{\varepsilon^e\}$ 는 응력 $\{\sigma\}$ 및 온도 $T$의 함수이므로, 탄성변형률의 증분은 아래와 같이 되고,

$$\{d\varepsilon^e\} = \left\{\frac{\partial\varepsilon^e}{\partial\sigma}\right\}\{d\sigma\} + \frac{\partial\{\varepsilon^e\}}{\partial T}dT$$

$$\{d\varepsilon^e\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT \qquad (4 \cdot 18)$$

전 변형률 증분은 아래식과 같다.

$$\{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \qquad (4 \cdot 19)$$

식을 정리하면, 탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 구해진다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e]\left(\frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\} + \{\alpha\}\right)dT$$

$$= [D^e]\{d\varepsilon\} - \left([D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E}\frac{E - E_1}{\Delta T}\{\sigma\}\right)dT$$
$$= [D^e]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \qquad (4 \cdot 20)$$

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

2)소성역

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

$$\begin{aligned} F = f - f_0 &= f(\sigma) - f_0(\bar{\varepsilon}^p, T) \\ &= \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\varepsilon}^p, T) \end{aligned} \qquad (4 \cdot 21)$$

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

$$dF = \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T \{d\sigma\} - \left\{\frac{\partial f_0}{\partial \bar{\varepsilon}^p}\right\}^T \{d\bar{\varepsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T}\, dT = 0 \qquad (4 \cdot 22)$$

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

소성역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜로 가정하면, 소성변형률 증분은 다음 식이 된다.

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} \qquad (4 \cdot 23)$$

여기서, $\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}$ : 편차응력, $\lambda$ : 양(+)의 스칼라양이다. 또한, 위의 식은 폰-미세스(Von-mises)항복조건을 따른다.

전변형률(Total strain)증분 $\{d\varepsilon\}$은 아래 식과 같이 탄·소성 및 열변형률의 합이 된다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^t\} \qquad (4 \cdot 24)$$

따라서, 소성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 구해진다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}\lambda - [D^e]\{\alpha\}dT + \frac{d[D^e]}{dT}[D^e]^{-1}\{\sigma\}dT \qquad (4 \cdot 25)$$

(2) 절점력-절점변위 관계

물체력을 무시하고 가상일의 원리에 따라, 요소 등가절점력 증분 $\{dF\}$는 다음 식이 된다.

$$\{dF\} = [K]\{dU\} - \{dL\} \qquad (4 \cdot 26)$$

용접에 의한 열응력 해석에서는 외력의 작용이 고려되지 않으므로, 각 요소에 관한 평형조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum [K]\{dU\} - \sum \{dL\} = \sum \{dF\} = 0$$

$$\sum [K]\{dU\} = \sum \{dL\} \qquad (4 \cdot 27)$$

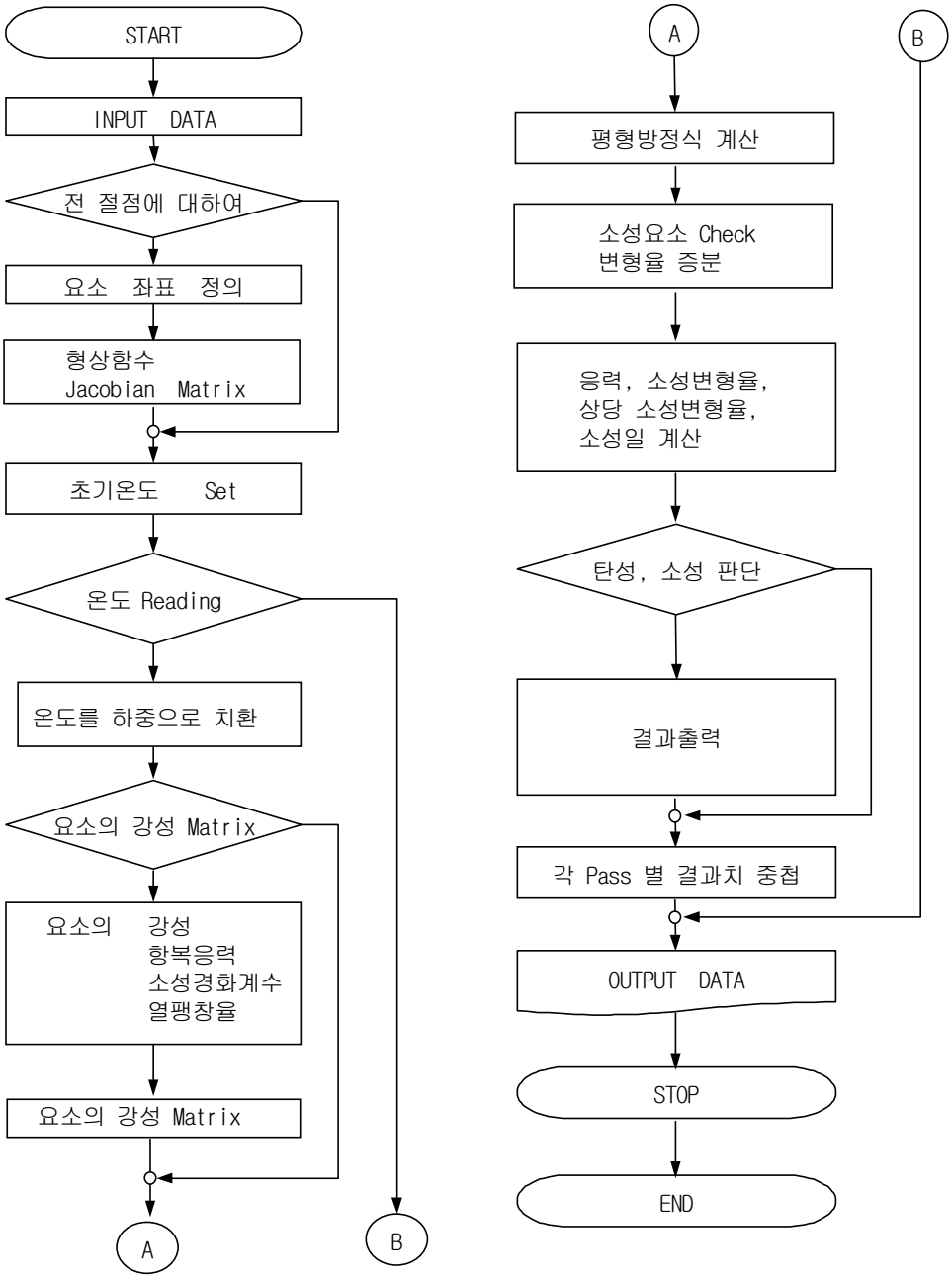
여기서, $[K] = \int_v [B]^T[D][B]dV$ : 요소의 강성 메트릭스,

$\{dL\} = \int_v [B]^T[C]dT\,dV$ : 열에 의한 등가절점력이다.

따라서 본 연구의 용접잔류응력 해석용 열탄소성 프로그램은 위의 식에 의거하여 구성 되었다.

## 2 . 5 용접잔류응력 및 변형해석용 프로그램

열탄소성 프로그램 Flow-Chart



## 2 . 6 온도의존성을 고려한 재료정수

본 연구의 열탄소성 프로그램에서 탄성 및 소성 전 영역에 걸쳐 온도 의존성을 고려한 SS400/Al6061-T6의 열전도율, 탄성계수 등의 재료정수는 Fig. 2.2, Fig. 2.3, Fig. 2.4, Fig. 2.5에 나타내었다.

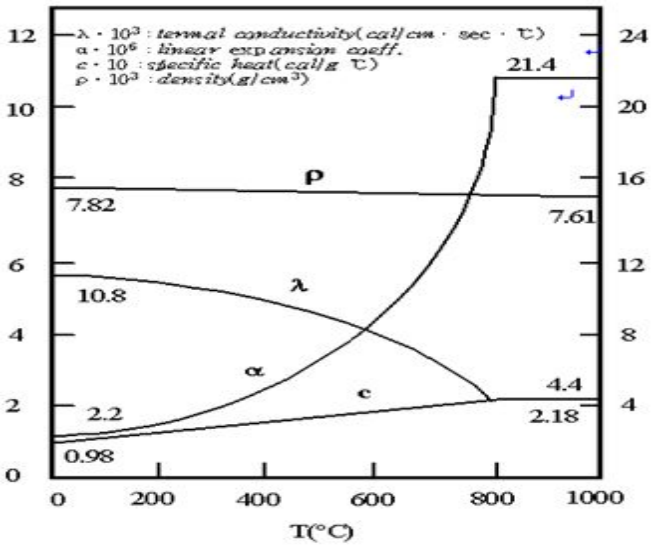



Fig. 2.2 Physical properties of SS400

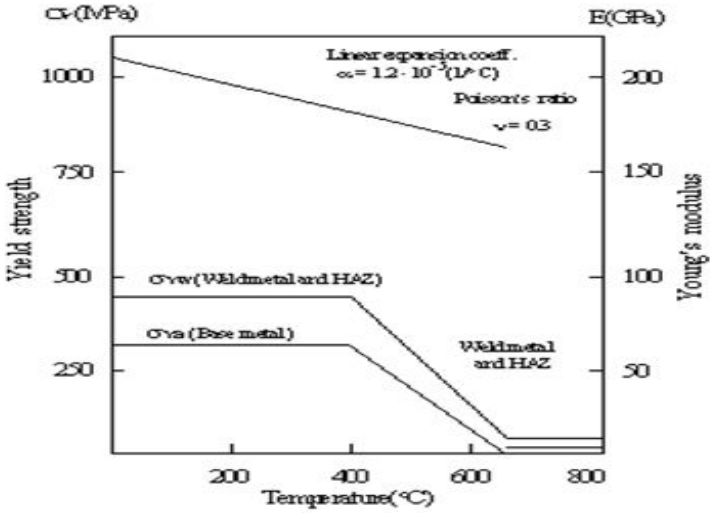



Fig. 2.3 Mechanical properties of SS400

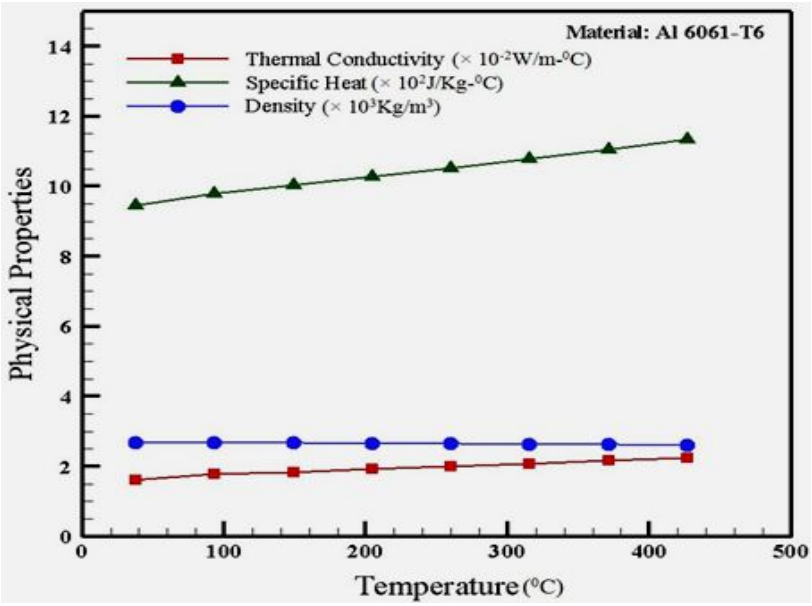



Fig. 2.4 Physical properties of Al6061-T6

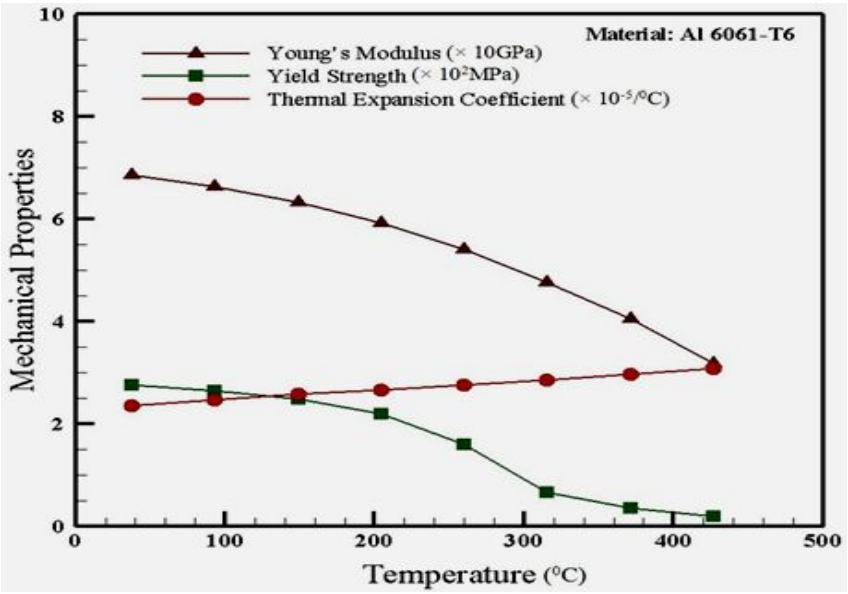



Fig. 2.5 Mechanical properties of Al6061-T6

# 제 3 장 실 험

## 3 . 1 실험장치 및 사용재료

본 실험에 사용된 FSW장비는 WINXEN사에서 제작한 마찰교반 전용용접기를 사용하였으며, 보조열원으로 사용한 TIG 용접기는 일본의 DAIHEN 사의 Inverter ELECON 500P TIG 용접기를 사용하였다. FSW Tool 시스템과 TIG Torch와의 결합은 별도의 지그를 제작하여 장착하였다.
Fig. 3.1은 FSW 장비와 제원을 나타낸 것이며, Fig. 3.2는 FSW-TIG Hybrid process를 나타낸 것이다.
본 실험에 사용된 Al-Si-Mg계 알루미늄 6061-T6 합금은 내식성, 용접성이 좋고 중간정도의 강도로 대표적인 구조재 열처리합금으로 차량, 선박 등 수송구조재, 광학기기등 다양한 분야에 사용되고 있으며, SS400은 가장 많이 사용되는 강종으로 주요 강도부를 제외하고 대부분의 기계 및 구조물의 보조부재로 사용되며, 용접성과 가공성 경제성이 좋아서 건축용 자재, 자동차, 선박, 해양구조물, 건축 교량 등에 사용되며 Table 3.1 은 재료의 화학적 성분 조성과 기계적 성질을 나타낸다.

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

(a) Equipment and specifications of FSW system

| ITEMS | RANGE |
|---|---|
| Rated Output Current | AEP-500 |
| Input Voltage Range | 단상 200V |
| Rated Input Voltage | AC20~500A/ DC5~500A |
| Welding torch | AW-12 |

(b) Equipment and specifications of TIG system

Fig. 3.1 FSW equipment and capacity of FSW and TIG welding

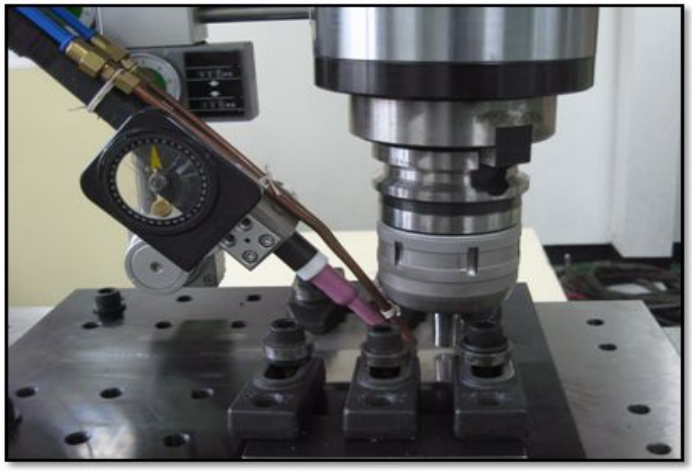


Fig. 3.2 Experimental set-up for TIG-FSW hybrid welding

Table 3.1 Chemical composition and mechanical property

| Material | Chemical composition (wt%) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Al6061-T6 | Al | Fe | Si | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti |
| | 98 | 0.42 | 0.65 | 0.21 | 0.13 | 1.01 | 0.15 | 0.02 | 0.06 |
| | Mechanical properties | | | | | | | | |
| | Yield stress (Mpa) | Elongation (%) | Tensile stress (Mpa) | Heat conduction coff. | Density (g/cc) | Melting Point | | | |
| | 276 | 13 | 310 | 0.4 | 2.7 | 650 | | | |
| Material | Chemical composition (wt%) | | | | | | | | |
| SS400 | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | 기타 |
| | 0.1423 | 0.009 | 0.535 | 0.101 | 0.0086 | 8.0~10.5 | 18.0~20.0 | - | - |
| | Mechanical properties | | | | | | | | |
| | Yield stress (Mpa) | Elongation (%) | Tensile stress (Mpa) | Heat conduction coff. | Density (g/cc) | Melting Point | | | |
| | 296 | 35 | 454 | 0.039 | 7.94 | 1450 | | | |

본 실험에 사용된 이종재 각 시편의 크기는 200mm(L) × 100mm(W) × 3mm(T)이며 두 시편이 맞닿는 부분은 밀링가공을 하였으며, 시편표면은 알코올로 깨끗하게 세척한 후 Butt type으로 접합하였다.

## 3 . 2 공구(Tool)의 재질과 형상

본 실험에 사용된 접합용 툴의 재질은 철계합금을 접합하기위해 12%Co가 함유된 텅스텐 카바이드(WF20) 재질을 다이아몬드 연삭기를 이용하여 연삭하였다.

Fig. 3.3은 접합용 툴의 제원과 제작된 툴의 형상을 나타낸 것이다. Tool pin의 형상은 Smooth frustum type으로 가공하였으며 접합 시 모재의 배출을 막고 모재 소성유동과 혼합교반을 촉진시켜주는 Shoulder의 직경은 18mm이며, 오목각(concave)은 3°, Pin 직경은 상부 6mm, 하부 4mm이다. Pin 길이는 모재보다 0.4mm 작은 2.6mm로 가공하였다.

Table 3.2 Tungsten carbide rod specifications

| Co(±0.5%) | Grade | WC(±0.5%) | Grain Size(μm) | Density (g/㎤) | Hardness (HV30) |
|---|---|---|---|---|---|
| 12% | WF20 | 88.0 | 0.6 | 14.15 | 1670 |

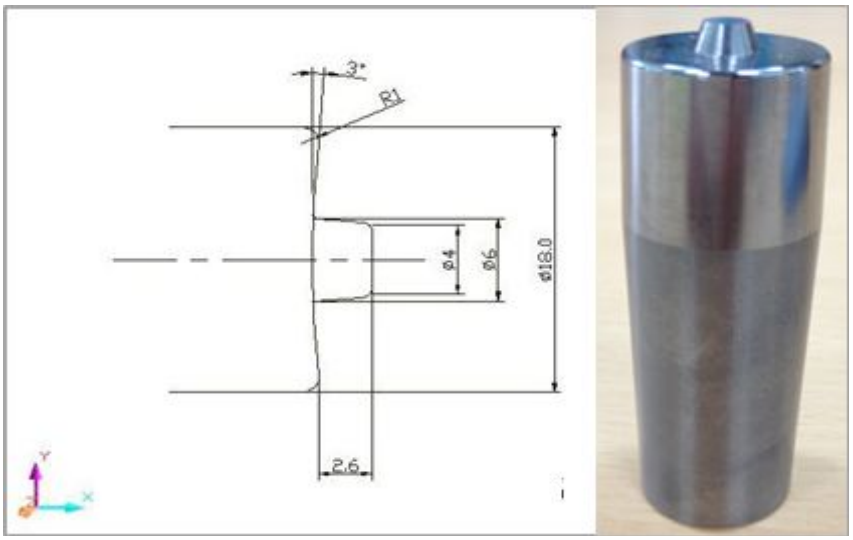



Fig. 3.3 Tool shape and drawing

## 3 . 3 TIG-FSW Hybrid 접합조건 및 비드의 형상

### 3.3.1 TIG-FSW Hybrid 접합조건

이종접합 FSW에서 주요 접합변수는 Tool의 회전속도(Rotating speed), Tool의 이송속도(Travel speed), Tool의 삽입위치(Offset from weld line), Tool의 회전방향(Rotation direction)등이 있으며, 본 실험에서는 TIG 보조열원을 사용하였으므로 TIG 전류(Current(A)), 보호가스(Shield gas), Torch angle, FSW Tool과 TIG torch 거리 등을 추가로 고려하였다.

우선 보조열원으로 사용할 TIG의 입열조건을 도출하기 위하여 단독으로 스테인리스 BOP(Bead on plate) 용접을 실시하였다. TIG 입열조건은 Table 3.3 에 나타낸 바와 같이 예비실험을 통하여 도출하였다.

이종재료의 접합은 기존의 동종재료와 같이 Tool의 삽입위치를 두 재료의 중앙에 삽입하게 되면 재료의 상이한 물성치로 인해 용접이 거의 이루어지지 않는 현상이 보고된바 있다. 또한 이종재료 중 강한 재료에 Tool을 삽입할 경우 Tool의 과열과 마찰로 인해 파손 및 마모현상을 보이므로 두 재료를 맞댄 면에서 Tool을 연질인 알루미늄합금 쪽으로 삽입하고 스테인리스강의 약 1.5mm만 교반되게 접합을 실시하였다. 그리고 Tool의 회전방향이 접합진행방향과 같은 재료쪽을 Advancing side(AS)라 하고 그 반대쪽 재료를 Retreating side(RS)라 한다. 본 실험에서는 툴의 회전 방향을 반시계방향(CCW)으로하여 접합하였으며 보조열원 TIG electrode의 위치는 시편의 맞댄 중앙에서 스틸 쪽으로 약 2mm 이동한 위치에 열원을 가하였다. 이와 같은 실험방법을 나타낸 모식도를 Fig. 3.4에 나타내었다.

Fig. 3.5는 TIG Assisted FSW Hybrid welding의 모식도를 나타낸 것이다.

본 실험의 TIG Assisted FSW 접합조건으로는 Table 3.4과 같다.

Table 3.3 TIG welding condition

| Welding Speed (mm/s) | TIG Current (A) | TIG pulse Current (A) | Shielding Gas-Ar (l/min) | Tungsten Electrode (mm) | Torch Angle ( ˚) | Surface bead appearance | Cross section (Macro) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 80 | 70 | 7 | Φ2.4 | 60 | | |

Table 3.4 TIG-FSW Hybrid welding condition

| Welding condition | | Values |
|---|---|---|
| TIG | Current(A) | 80 |
| | Shielding gas(ℓ/min) | Ar 7 |
| | CTWD(mm) | s = 2 |
| | Torch angle | 60° |
| FSW | Rotation speed(RPM) | 300 |
| | Welding speed(mm/s) | 1.0 |
| | Shoulder dia.(mm) | Ø18 |
| | Pin dia.(mm) | Ø6.0 |
| | Room temperature | 20° |
| | Tilt angle | 2 ~ 3° |
| TIG-FSW Distance = 20mm | | |
| Leading condition = TIG leading | | |
| Dia. of electrode = 2.4mm | | |

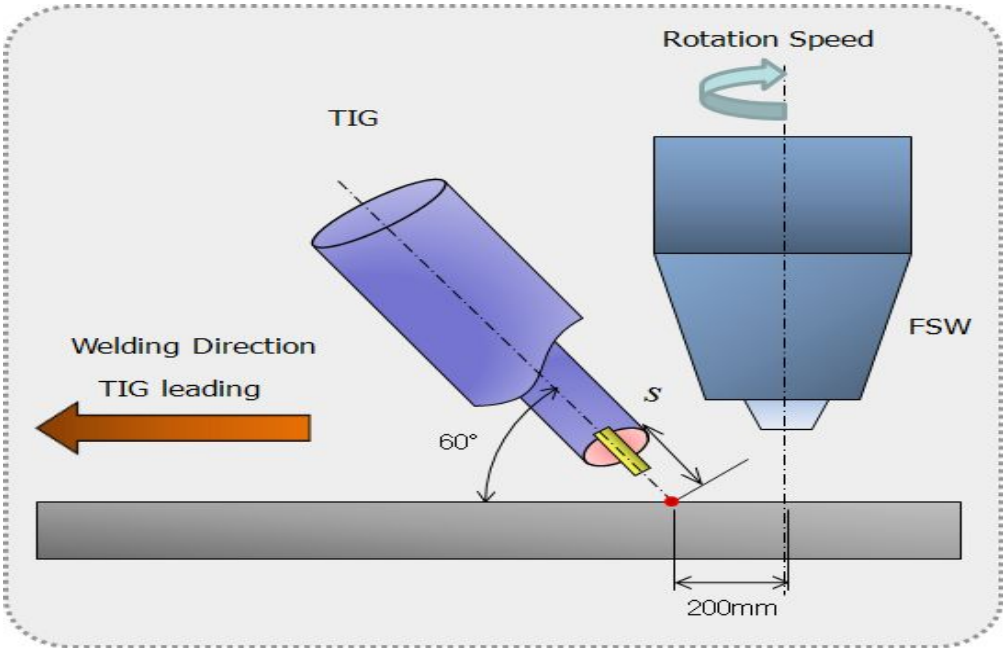



Fig. 3.4 Experiments of TIG Assisted FSW Hybrid welding

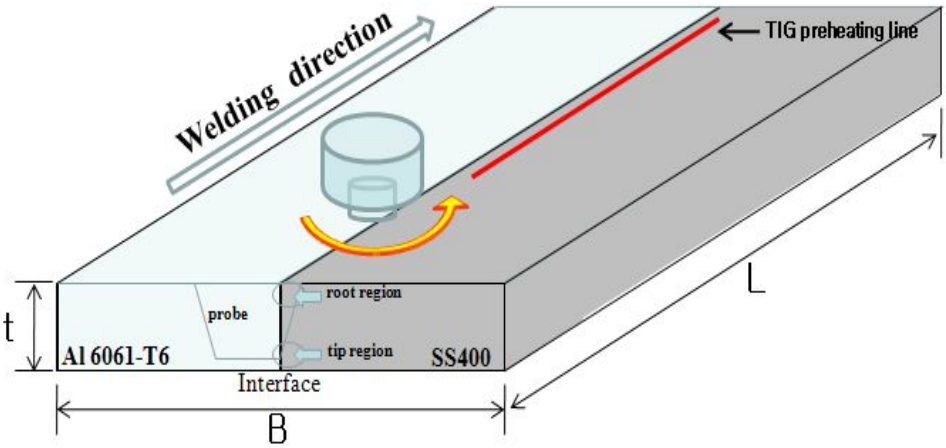



Fig. 3.5 Welding configuration of TIG-FSW

### 3.3.2 TIG-FSW Hybrid 접합부 비드 형상

Table 3.5는 TIG Assisted FSW 이종재 용접 조건과 비드형상을 나타낸 것이다. 용접조건은 예비실험을 통하여 비드 표면과 육안검사로 양호한 조건을 도출한 것이며, 본 실험에서는 Tool의 회전속도에 따른 변수를 고려하여 각 조건별 실험을 실시하였다.

접합부의 비드 표면이나 접합부 종단의 Pin hole의 형태로 인해 1차적으로 육안검사를 함으로써 접합부 특성을 파악할 수 있다. 가장 양호한 비드표면과 접합 단면을 나타낸 조건은 Tool의 회전속도 300~400rpm, TIG cerrent 80(A), Shield gas 7ℓ/min 일때 가장 양호하였다.

Table 3.5 TIG assisted FSW parameters and obtained bead shapes

(a) List of welding condition

| No | Tool plunge point | Rotating speed (RPM) | Travel speed (mm/sec) | Rotation direction | TIG current (A) | TIG pulsed current (A) | Shield gas (L/min) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9:1 | 300 | 1.0 | ccw | 80 | 70 | 7 |
| 2 | 9:1 | 400 | 0.8 | ccw | 80 | 70 | 7 |
| 3 | 9:1 | 400 | 1.0 | ccw | 80 | 70 | 7 |
| 4 | 9:1 | 500 | 1.2 | ccw | 80 | 70 | 7 |

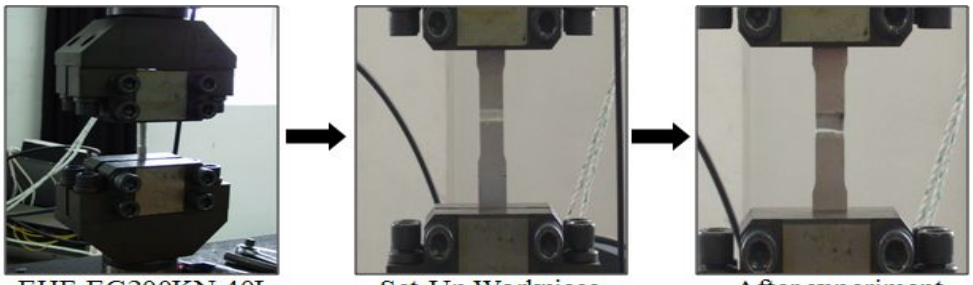
(b) Shape of bead

| RPM | Travel speed | Bead appearance | Macro image |
|---|---|---|---|
| 300 | 1.0 | | |
| 400 | 0.8 | | |
| 400 | 1.0 | | |
| 500 | 1.2 | | |

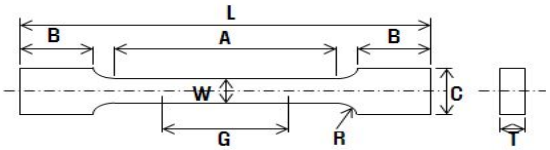
# 3 . 4 인장시험 및 접합부의 인장강도 특성

## 3.4.1 인장시험

이종접합부의 인장강도 측정은 SHIMADZU사 EHF-EG200KN-40L 유압식을 사용하였으며, WIN SERVO 프로그램을 이용하였다. 인장시험편은 와이어 컷팅 방식으로 채취하였으며 KS B 0801 13-B호 규격을 사용하였다. 인장 Load speed 는 0.033mm/sec로 시험하여 Stress-Strain 선도를 구하였다. Fig. 3.7은 실험에 사용된 장비와 시편의 규격을 나타낸 것이다.



EHF-EG200KN-40L　　Set-Up Workpiece　　After experiment




G - Gage length : 60mm
W - Width : 12.5mm
T - Thickness : 3mm
R - Radius of fillet : 20mm
L - Over-all length : 170mm
B - Length og grip section : 40mm
C - Width of grip section : 25mm

Fig. 3.6 Process of tensile test and specimen dimensions

### 3.4.2 접합부 인장강도 특성

Table 3.6은 이종재의 TIG Assisted FSW 접합부의 접합특성 및 인장파단 면과 인장 강도 값을 나타낸 것이다.
인장 파단은 Al6061-T6과 SS400의 접합계면에서 나타났으며 접합 특성이 양호하고 인장강도가 높은 조건 300RPM에서 연성파단 형상을 보이고 있다. 이는 열전도도가 더 낮은 SS400 접합부분에 TIG 보조열원을 가함으로써 거의 대등한 온도분포하에서 Tool의 소성교반으로 인해 접합계면의 강도가 상승한 것으로 사료된다. Stress-Strain curve는 Table 3.7에 나타내었다.
Tool의 회전수가 증가할수록 SS400의 탈락한 입자가 알루미늄에 교반되는 현상이 감소하는 것을 파악할 수 있었다.
실험결과 최대인장강도는 281.4Mpa로, 이는 Al6061-T6 합금의 모재 최대 인장강도(310MPa)의 약 90%에 달하는 우수한 강도 값을 나타낸다.

Table 3.6 Dissimilar Fractured specimen and Tensile strength

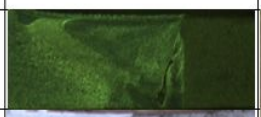
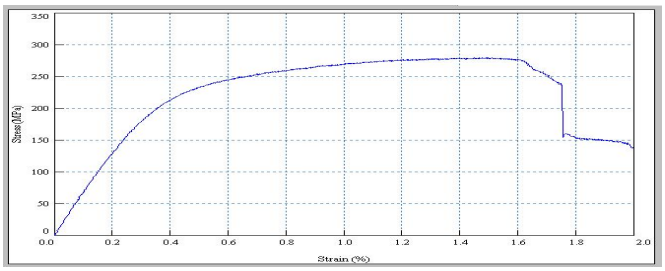
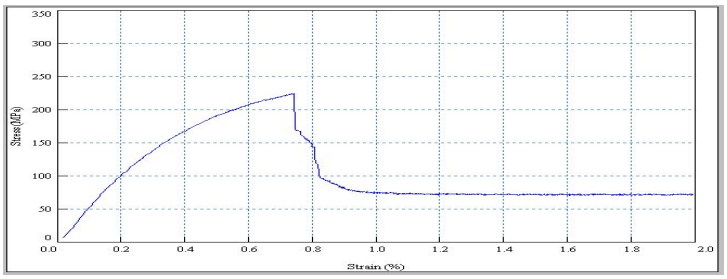
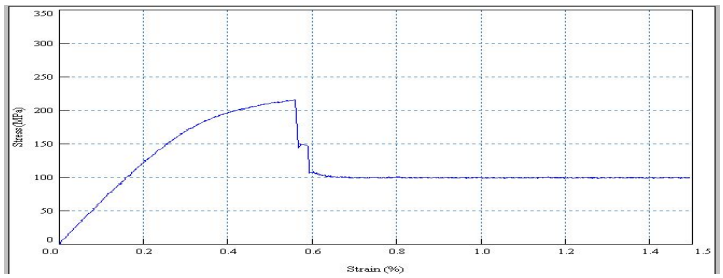
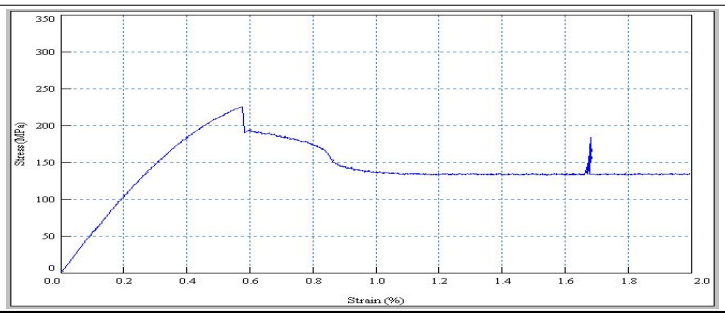
| RPM | Travel speed | Macro image | Fractured specimens | T.S(Mpa) |
|---|---|---|---|---|
| 300 | 1.0 |  | | 281.4 |
| 400 | 0.8 | | | 241.8 |
| 400 | 1.0 | | | 232.4 |
| 500 | 1.2 | | | 230.7 |

Table 3.7 Dissimilar Tensile stress-strain curve

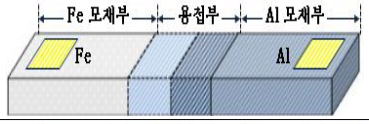
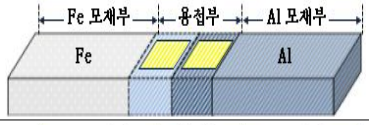
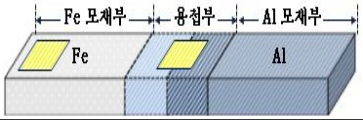
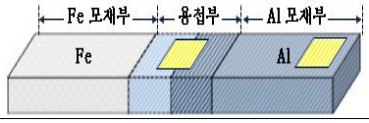
| RPM | Travel speed(mm/s) |
|---|---|
| | 1.0 |
| 300 |  |
| 400 | 0.8 |
| |  |
| 400 | 1.0 |
| |  |
| 500 | 1.0 |
| |  |

# 3 . 5 TIG-FSW Hybrid 접합부 부식 특성

## 3.5.1 부식시험

이종접합부의 갈바닉 특성에 의한 내부식성 평가를 실시하기 위해 부식 시험을 실시하였다. 갈바닉 부식측정을 위해 시험편을 1×1㎠으로 절단, 몰딩 한 후 시험편을 상온의 진공상태에서 3% NaCl 용액으로 한 시간 동안 측정 하였다. 측정위치는 SS400과 Al6061의 모재부, SS400과 Al6061의 용접부, SS400의 모재부와 접합부, Al6061의 모재부와 접합부 총 4가지 조건으로 실험을 실시하였다.

Table 3.8 Schematic of specimens

| 구분 | 갈바닉 부식 쌍 | 모식도 |
|---|---|---|
| SS400-Al | Fe 모재부 vs Al 모재부 |  |
| | Fe 용접부 vs Al 용접부 |  |
| | Fe 모재부 vs Fe+Al 용접부 |  |
| | Al 모재부 vs Fe+Al 용접부 |  |

### 3.5.2 접합부의 갈바닉 특성에 의한 내부식성 평가

Table 3.8은 이종재의 TIG Assisted FSW 접합부의 갈바닉 부식 시험 결과 값을 나타낸 것이다. 부식시험 결과 SS400모재부 + SS400/Al6061 용접부의 부식속도가 0.0020mmpy로 부식속도가 가장 높게 나타났으며 부식속도가 가장 낮은 부분은 Al6061모재부 + SS400/Al6061 용접부로 부식속도가 0.00003mmpy로 나타났다. 양극분극 결과 값이 가장 낮은 조건 역시 Al6061모재부 + SS400/Al6061 용접부 였으며, 이 값이 낮을수록 내식성이 좋다는 것을 알 수 있다.

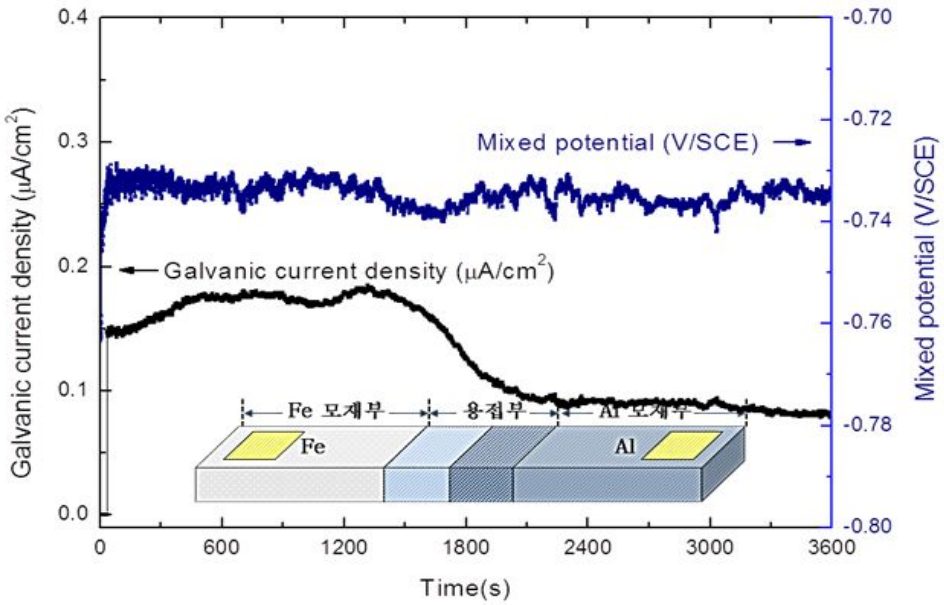



Fig. 3.7 Galvanic current density and mixed potential curves of Fe and Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature

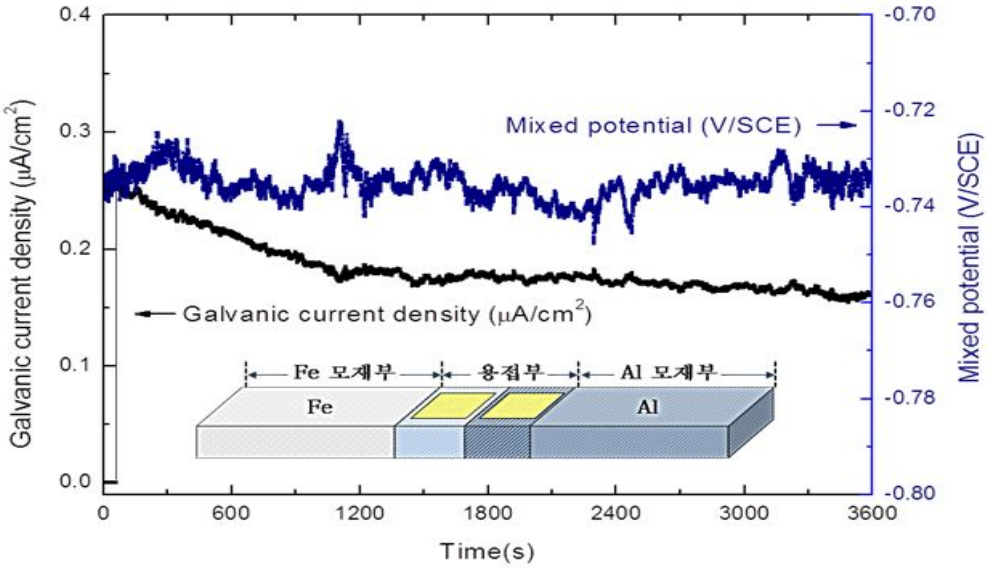



Fig. 3.8 Galvanic current density and mixed potential curves of welded Fe and welded Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature

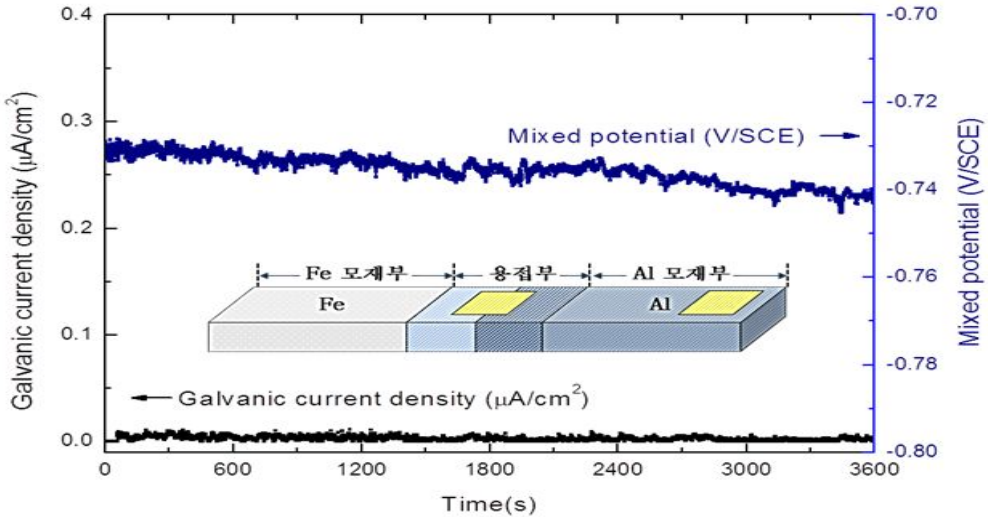



Fig. 3.9 Galvanic current density and mixed potential curves of Fe and welded Fe+Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature

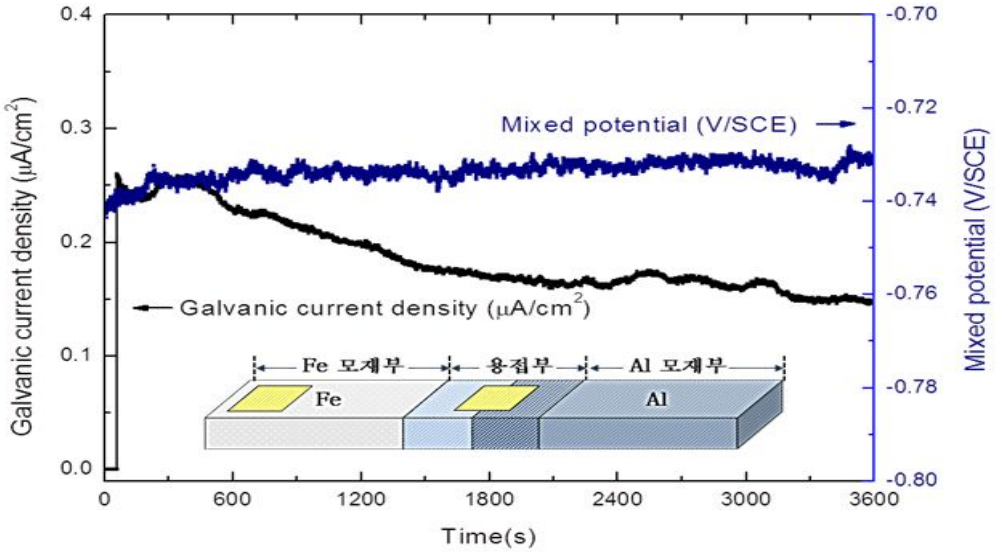



Fig. 3.10 Galvanic current density and mixed potential curves of Al and welded Fe+Al specimens in deaerated 3% NaCl solution at room temperature

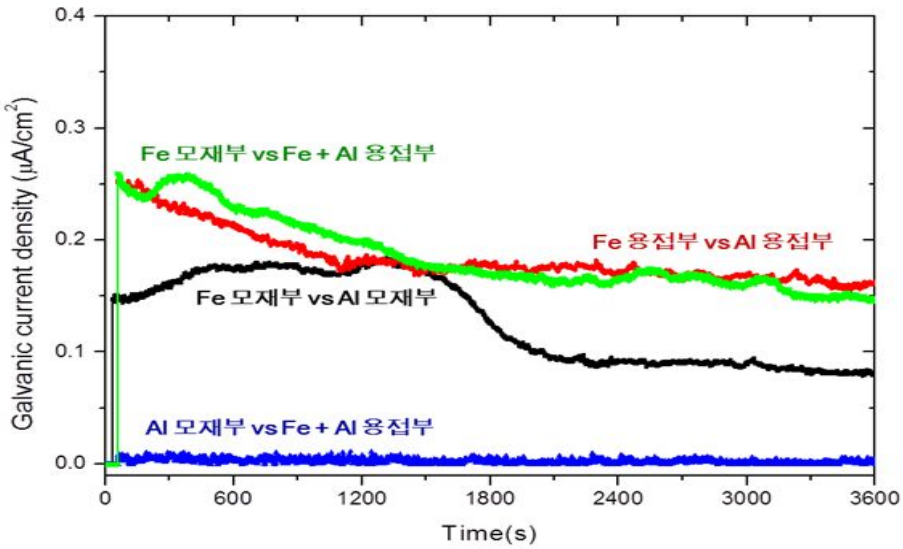



Fig. 3.11 Whole galvanic current density curves of Fe and Al galvanic couple series in deaerated 3% NaCl solution at room temperature

Table 3.9 Galvanic corrosion testing results of Fe and Mg galvanic couple series in deaerated 3% NaCl solution at room temperature

| 시험편 | 구분 | 평균 $I_{corr}$ (㎂/㎠) | mm/yr |
|---|---|---|---|
| Fe-Al couple | Fe 모재 vs Al 모재 | 0.1275 | 0.0013 (Al) |
| | Fe 용접부 vs Al 용접부 | 0.1807 | 0.0019 (Al) |
| | Fe 모재 vs Fe+Al 용접부 | 0.1835 | 0.0020 (Al) |
| | Al 모재 vs Fe+Al 용접부 | 0.0029 | 0.00003 (Al) |

## 3 . 6 마크로 및 마이크로조직 분석 및 미세조직 관찰

### 3.6.1 마크로 및 마이크로 조직 분석

TIG Assisted FSW 이종접합부의 미세조직, 상거동 및 파괴특성을 파악하기 위하여 접합한 소재의 접합부의 횡단면 및 파단면을 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 광학현미경(Optical Microscope)을 통한 접합부의 조직을 관찰하기 위해 시편을 절단하고 마운팅 하여 미세연마 후 Al6061-T6 합금은 질산(Nitric acid) 2.5㎖, 염산(Hydro chloric acid) 5㎖, 불산(Hydro fluoric acid) 5㎖, 증류수(water) 100㎖ 혼합용액을 이용하여 5min동안 에칭을 실시하였고 SS400은 질산(Nitric acid) 5㎖, 에탄올 100㎖를 혼합시킨 나이탈 용액을 이용하여 60sec동안 에칭 후 증류수 세척하여 OLYMPUS 사의 Bx51m 광학현미경을 이용하여 이종접합부의 조건별 단면 미세조직특성을 분석하였다.

Fig. 3.12 Optical Microscope

### 3.6.2 접합부 미세조직

Fig 3.13은 TIG Assisted FSW 이종접합부의 마크로 단면사진과 접합부 각각의 위치별 마이크로 조직을 나타낸 것이다.

마크로 단면을 보면 알루미늄 합금측은 일반적인 마찰교반 접합부의 형태인 HAZ, TMAZ, SZ이 관측되었고, 철강측은 핀이 삽입된 접합계면 근방에서 소성유동에 의한 소성변형이 관측되었다. 마이크로 미세조직을 관찰하면 알루미늄의 경우 B.M에서 HAZ, TMAZ방향으로 갈수록 결정립의 크기가 작아짐을 확인할 수 있었고, 특히 TMAZ는 기계적 영향에 따른 소성변형으로 인해 일정한 방향성을 가진 연신된 조직이 관찰되었다. 동적 재결정 영역인 SZ은 극심한 소성변형이 나타난 미세 재결정 조직이 관찰되었다. 이는 SS400에 조사된 TIG열원의 열영향이 소성유동을 증가 시킨 결과로 사료된다. 접합계면(Bonding interface)의 경우 소성유동으로 인한 스틸의 탈락한 입자들이 알루미늄 합금 쪽에서 관찰이 되었다. 스틸의 경우 TMAZ에서 마르텐사이트의 조직이 관찰이 되고 있으며, 이는 용접 후 급랭으로 인해 관찰되는 것으로 사료된다.

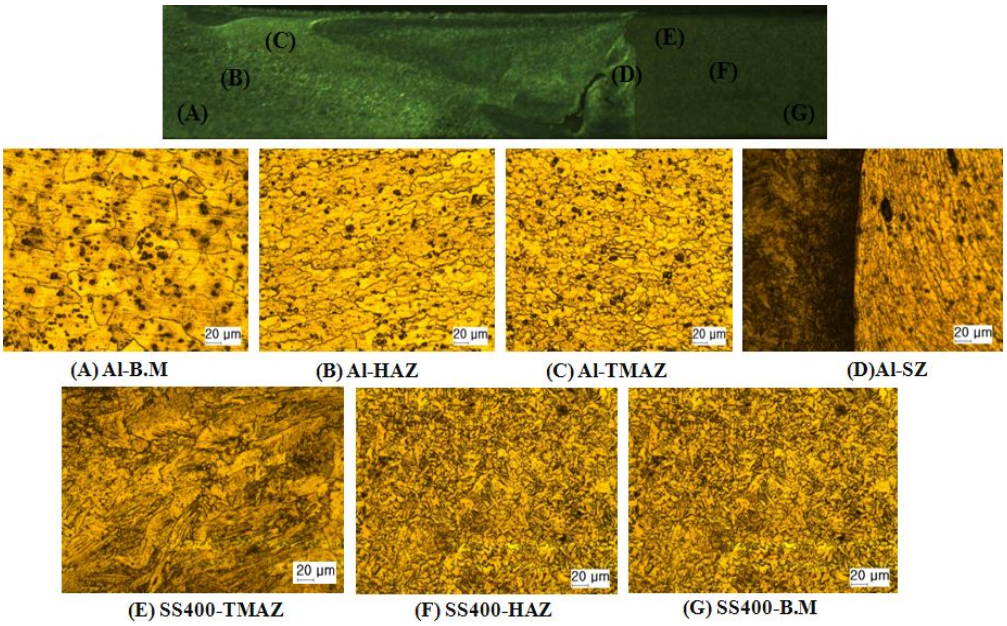



Fig. 3.13 Macro and Microstructure images

# 3 . 7 접합부 온도 분포 측정

## 3.7.1 온도 구배 시험

이종재료 접합 시 열분포 특성 고찰과 수치해석을 통한 이종재료 접합부 열 해석 값의 비교를 통하여 수치해석 프로그램의 신뢰성을 확보하기 위해 Thermo-couple을 이용하여 온도 측정을 실시하였다. 온도측정은 시편의 중앙부 횡방향에 대하여 Fig 3.14와 같이 툴의 숄더 직경을 고려하여 온도측정 포인트를 정하였고, Thermo-couple은 K타입 와이어를 사용하여 접합을 시작한 시간부터 5min까지 온도를 측정 하였다.

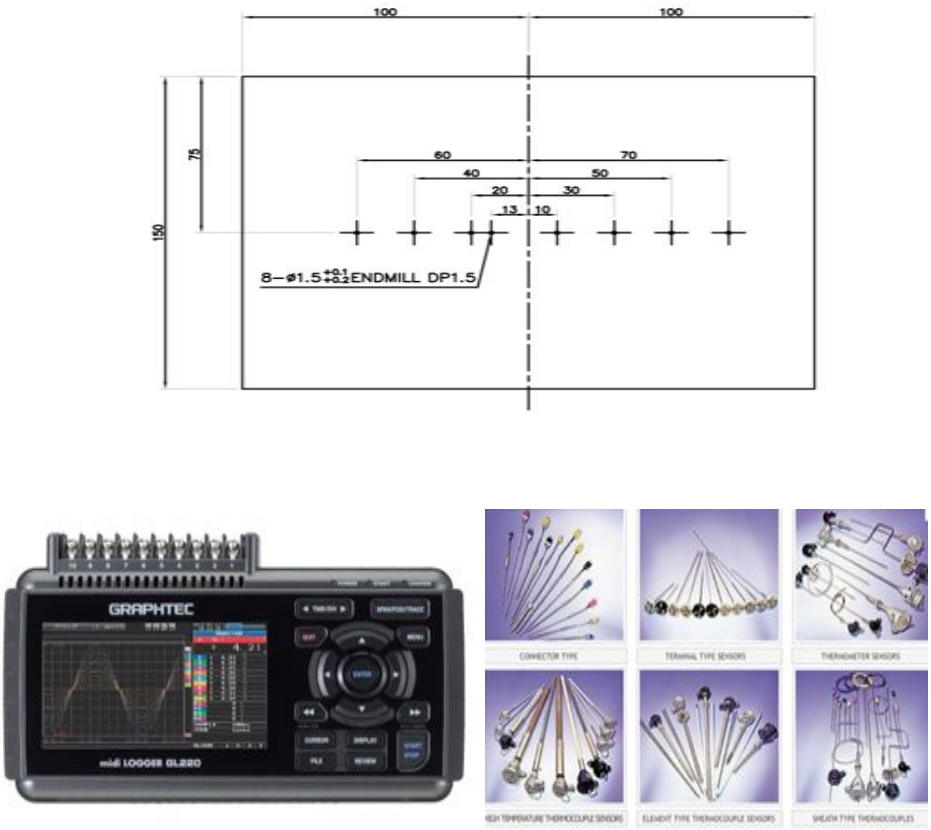


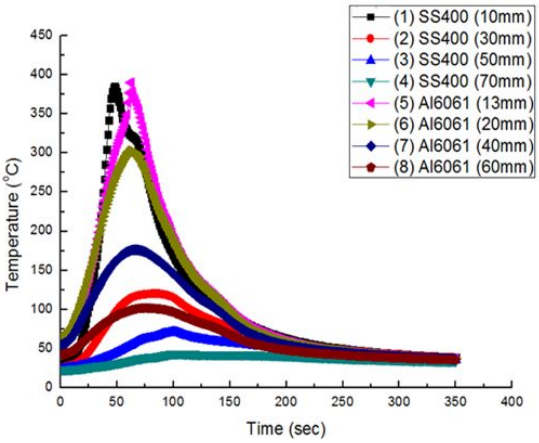

Fig. 3.14 Temperature measurement points in welds by thermo-couple

### 3.7.2 접합부 온도 분포 특성

Table 3.9는 Thermo-couple을 이용한 접합부 온도 측정값을 나타낸 것이다. 그래프에서 보이는 바와 같이 툴이 온도 측정 포인트를 지날 때 가자 높은 온도 값을 보였으며 스틸부분에서 가장 높은 온도 값은 중앙에서 10mm 떨어진 B.M부분에서 384.9℃, 알루미늄부분에서 가장 높은 온도 값은 중앙에서 13mm떨어진 HAZ부분에서 390℃가 측정되었다.

Table 3.10 Temperature distribution in TIG-FSW Hybrid

| Hole Position | | TIG-FSW Temp.(℃) | |
|---|---|---|---|
| | | Start | Max. |
| SS 400 | 1 | 30 | 384.9 |
| | 2 | 25.9 | 120.5 |
| | 3 | 24.1 | 71.5 |
| | 4 | 23 | 43.8 |
| Al 6061 | 5 | 36.8 | 390 |
| | 6 | 37.1 | 302.6 |
| | 7 | 36.7 | 176.4 |
| | 8 | 35.4 | 101.7 |



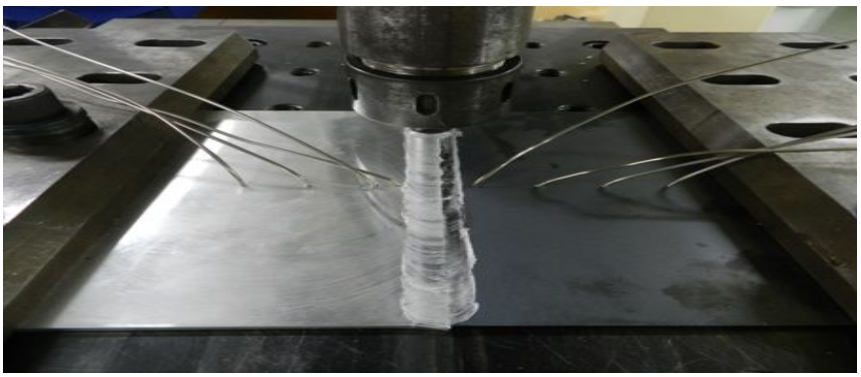



Fig. 3.15 Experimental set-up for Temperature measurement

# 3 . 8 접합부 잔류응력 측정 및 특성분석

## 3.8.1 잔류응력 측정시험

이종접합부의 잔류응력 측정에 사용된 장비는 X-Stress 3000(X-ray stress analyzer)을 사용하였으며, Al6061-T6과 SS400 용접부의 잔류응력 측정은 용접선 방향의 중심부에서부터 직각 방향으로 각각 측정하였다. Al-Mg-Si계 Al6061-T6과 Fe오스테나이트계 SS400 강의 잔류응력을 측정하기 전 각각 stress free powder로 이루어진 Sample surface로부터 collimator 끝단까지 측정하여 stress값 범위안의 거리를 구하였다. X-ray의 조사량을 조절하는 Collimator 팁은 직경 3mm 를 사용하였다. 정확한 잔류응력 데이터를 얻기 위해 7개의 y각(0°, 15 °, 30 °, 45 °, -15 °, -30 °, -45 °)으로 측정하였다. Fig. 3.16은 실험에 사용된 장비와 잔류응력측정 시편을 나타낸 것이다.

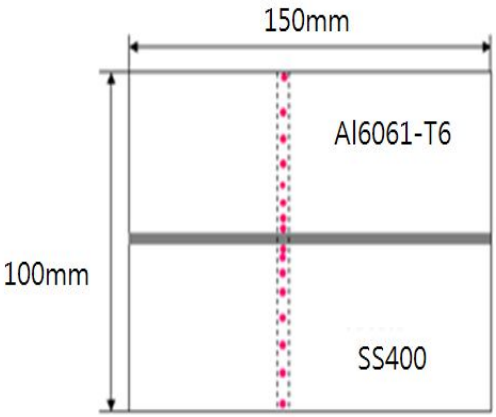



Fig. 3.16 Residual stress measurement machine(XRD) and Measurement Points of Welding Residual Stress

### 3.8.2 잔류응력 특성

Fig 3.17은 잔류응력 측정값을 나타낸 그래프이다. 잔류응력 측정위치는 시편 두께방향으로 3mm인 부분의 알루미늄과 스틸 각각 0mm, 7mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm…100mm까지 총 24개의 포인트에서 잔류응력을 측정하였다. 접합부의 잔류응력 측정결과 스틸보다 알루미늄에서 인장응력 값이 더 높게 측정되었으며, TMAZ와 HAZ부근에서 인장응력과 압축응력이 교차로 일어나고 있고 용접부 끝단 쪽으로 갈수록 잔류응력 값이 줄어드는 양상을 나타내었다.

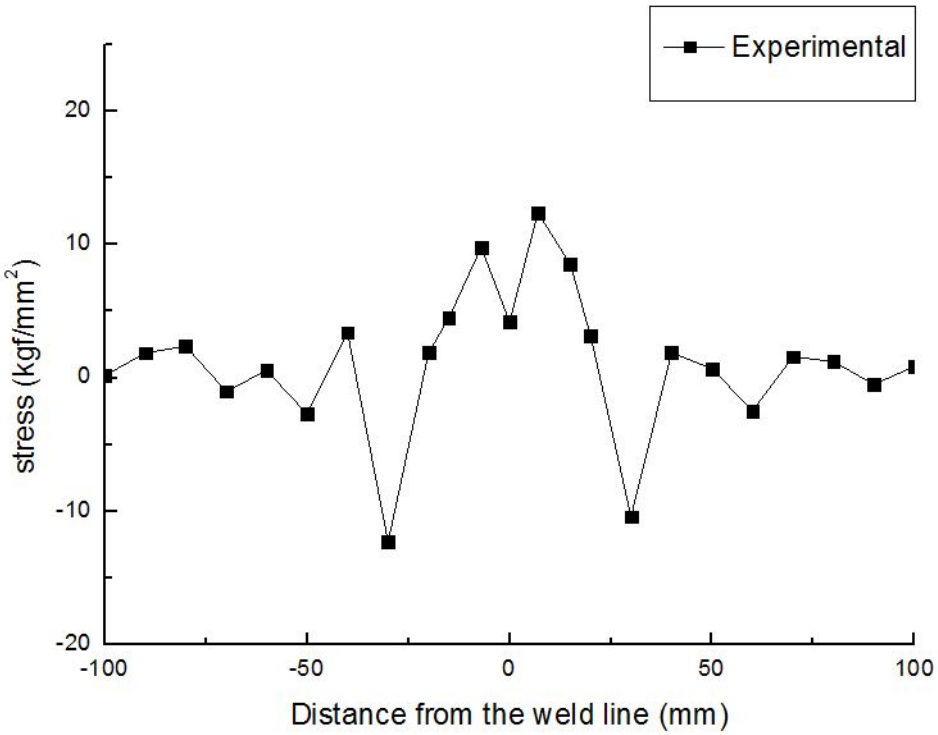



Fig. 3.17 Residual stress measurement value

# 제 4 장 TIG-FSW Hybrid 접합부 수치해석

## 4 . 1 열전도 해석

본 장에서는 TIG-FSW Hybrid 접합부의 열적 특성을 규명하기 위하여 3차원비정상 열전도 유한요소식으로 정식화한 수치해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 해석에 사용한 수치해석 프로그램은 모두 자연좌표계를 이용한 아이소-파라메트릭의 개념을 도입하여 정식화 하였다. 또한, 열분포를 정도 높게 해석하기 위해 재료의 온도 변화에 따른 온도의존성을 고려하였다.

### 4.1.1 해석 모델

열분포 수치 해석 시, 사용된 시편의 크기는 열원의 영향으로 인해 시편이 수축 및 팽창의 영향을 받지 않는 조건을 고려하여 200×40×3mm(W×L×T)로 선정하였으며, Fig 4.1에 나타낸 것과 같다. 요소분할 형상은 해석 시, 큰 영향을 줄 것으로 사료되는 부분인 접합부를 Tool shoulder와 pin의 직경을 고려하여 접합선 중심의 폭방향(x)방향으로 3mm까지는 요소의 크기를 0.1mm로 세밀하게 요소분할 하였다. 또한, 접합부에서 폭방향으로 멀어질수록 온도의 변화가 크게 나타나지 않으므로 요소분할 간격을 크게 하였으며, 요소수는 14700개이고 절점수는 18018개이다.

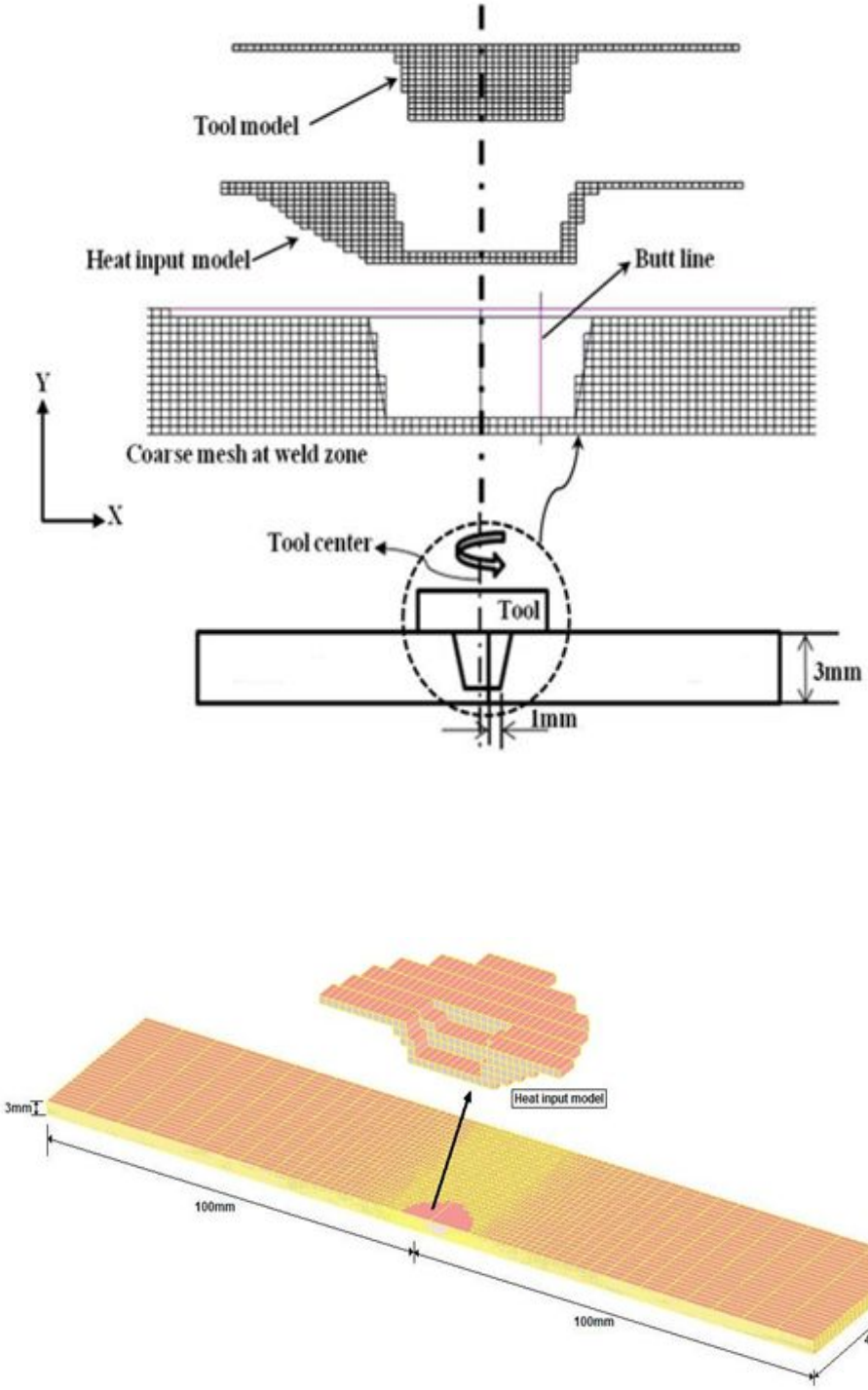



Fig. 4.1 Schematic mesh division

### 4.1.2 열전도 해석 프로그램의 구성

1) 구성 : 열분포 해석용 프로그램은 1개의 Main문 과 45개의 Sub-Routine 문 및 3개의 Function문으로 구성되어 있으며, Data를 입력함으로써 손쉽게 수치 시뮬레이션을 수행하도록 구성되어 있다.

2) 입력 Data : $x, y, z$방향의 좌표수 지정, 절점번호 코딩(Coding)순서 지정, 용착금속 요소수, 요소의 용접시간, 온도상승 및 냉각시간 선정, HAZ요소로 판별하는 온도지정, 열전달 등이 발생하는 요소 지정 등이다.

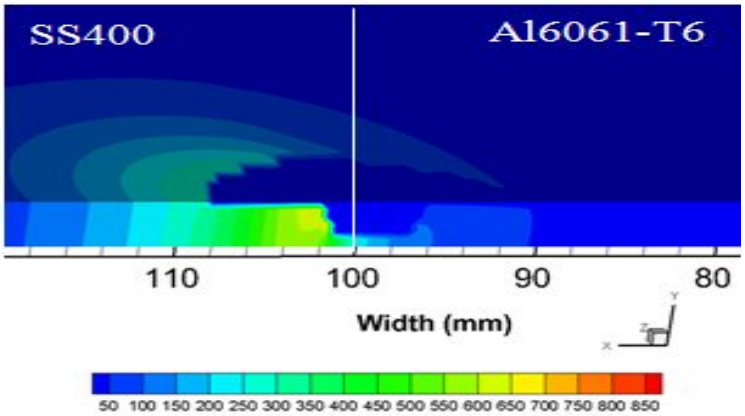
3) Main문 : 입력 Data의 형식에 맞추어 초기 Data를 입력하면, 해석모델 형상에 대한 열전달 및 열복사 유무를 판단하고, 각 좌표에 대한 절점을 자동으로 나누어 요소를 분할한다. 총 절점수 및 Dimension상의 절점수를 판단하여 열영향부 및 용접된 요소수를 초기화하여 용접이 수행된 요소의 종료시간을 판단하고, 메트릭스에 대한 Bandwidth와 Dimension상의 크기를 판단한다.

전 Step에 대하여 열전도 메트릭스, 열하중 메트릭스를 구성하며 최고치 온도를 판단하여 시간증분을 결정한다. 시간증분에 따라 용접이 끝난 요소는 온도하강 과정을, 용접이 수행되는 요소는 온도상승 과정을 겪게 된다. 온도하강 과정에서는 Room Temperature나 지정된 온도까지 하강하고, 온도상승 과정에서는 요소의 Heating 종료시간을 판단한다. 다음은 전요소의 Heating 시간을 판단하여 전체계에 있어서 강성 메트릭스와 열하중 Vector의 Gloval 화를 도모한다. 이러한 과정에 있어서 필요에 따라 Sub-Routine문과 Function문을 사용하게 된다. 이들 과정을 통하여 시간에 따른 절점의 온도, 시간에 따른 온도증분 계산, 요소에 대한 HAZ 여부의 판정을 하여 출력하게 된다.

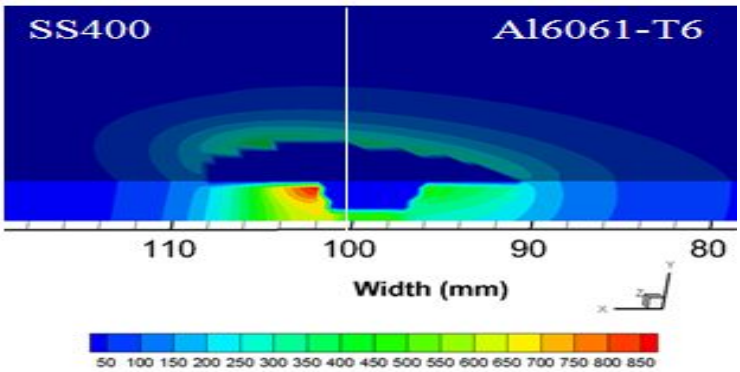
### 4.1.3 열분포 특성

3차원 비정상 열전도 프로그램을 이용하여 수치 시뮬레이션에 나타난 현상을 고찰해 본 결과 Fig 4.2 (a)는 접합 시작 후 1sec대의 온도분포를 보여주고 있으며 Tool과 모재가 맞닿는 부분에서 고온을 형성하고 있는데 이는 Tool의 회전력에 의한 마찰열이 모재에 전달되기 때문에 발생하는 현상이라 사료된다. 또한, SS400이 Al6061보다 온도가 높게 측정됨을 볼 수 있는데 이는 TIG예열에 의한 효과로 사료된다. Fig 4.2 (b)는 접합 후 2sec대 온도분포를 나타낸 것으로 접합 시작 후 최고 온도분포를 보여주고 있다. SS400과 Al6061의 온도를 보면 879.4℃, 493.2℃로 SS400과 Al606의 융점 1450℃, 650℃에 비해 낮음을 알 수 있는데 이는 융점이하에서 접합이 이루어짐을 보이고 있다. 또한, 시편의 물리적 성질에 의해 온도가 좌우됨을 고찰하였다. Fig 4.2 (c)는 접합 후 3sec대 온도분포를 나타낸 것으로 최고온도 이후로 접합부가 급랭함을 볼 수 있다. Fig 4.4는 접합부의 두께방향 0.1mm에서의 열-기계적 영향부와 열영향부 및 모재 부분에 해당하는 요소의 용접 후 80sec까지의 시간변화에 따른 온도변화를 도시한 것으로 2sec에서 최고 온도분포를 보이고 있다. SS400의 각 영역별 최고 온도는 TMAZ-879.4℃, HAZ-534.7℃, B.M-340℃이고 Al6061의 각 영역별 최고 온도는 TMAZ-493.2℃, HAZ-327.6℃, B.M-308.1℃이다.

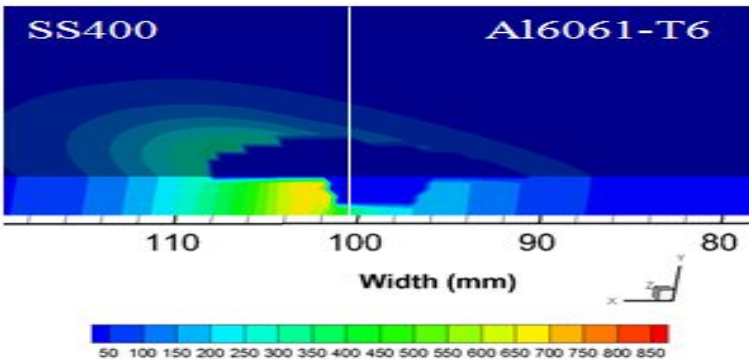
Fig 4.5는 Thermo-couple을 이용한 실제 온도 측정값과 수치해석을 통하여 얻은 온도이력을 비교하여 수치해석에 의한 열분포 해석 타당성을 입증하였다. SS400의 Butt line으로부터 10mm 떨어진 부분에서 Thermo-couple 실험을 통하여 측정된 최고 온도는 404.3℃이고 수치해석을 통하여 측정된 최고 온도 값은 384.9℃이다. 또한, Al6061의 Butt line으로부터 13mm 떨어진 부분에서 Thermo-couple 실험을 통하여 측정된 최고 온도는 390℃이고 수치해석을 통하여 측정된 최고 온도 값은 406.2℃이다. 두 그래프의 양상이 비슷함을 보아 수치해석 프로그램으로 얻은 열전도 해석 결과가 신뢰성이 있음을 알 수 있다.




(a) Temperature distribution at 1sec

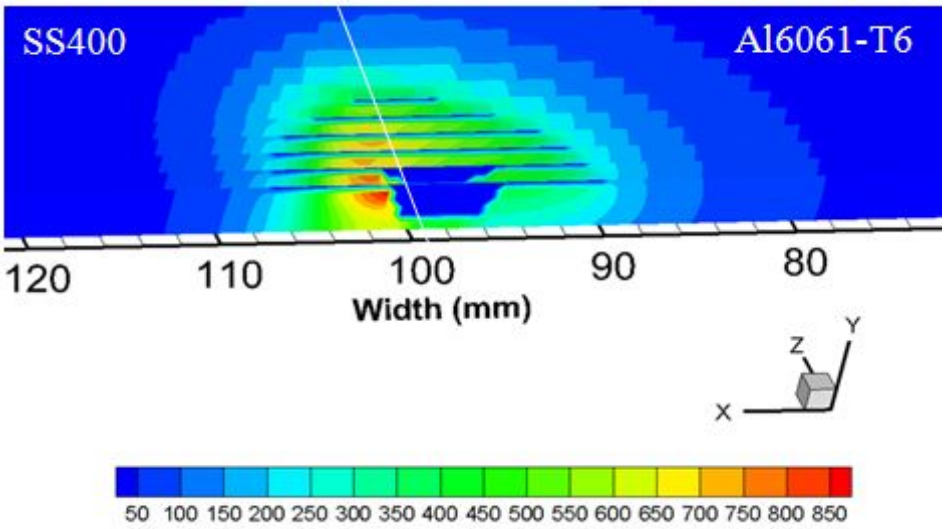



(b) Temperature distribution at 2sec

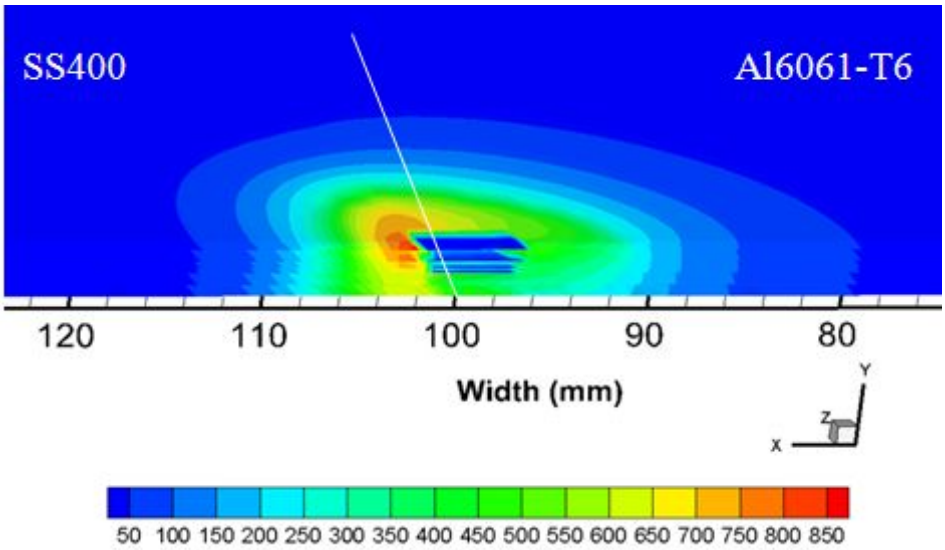



(c) Temperature distribution at 3sec

Fig. 4.2 Temperature distribution of specimen

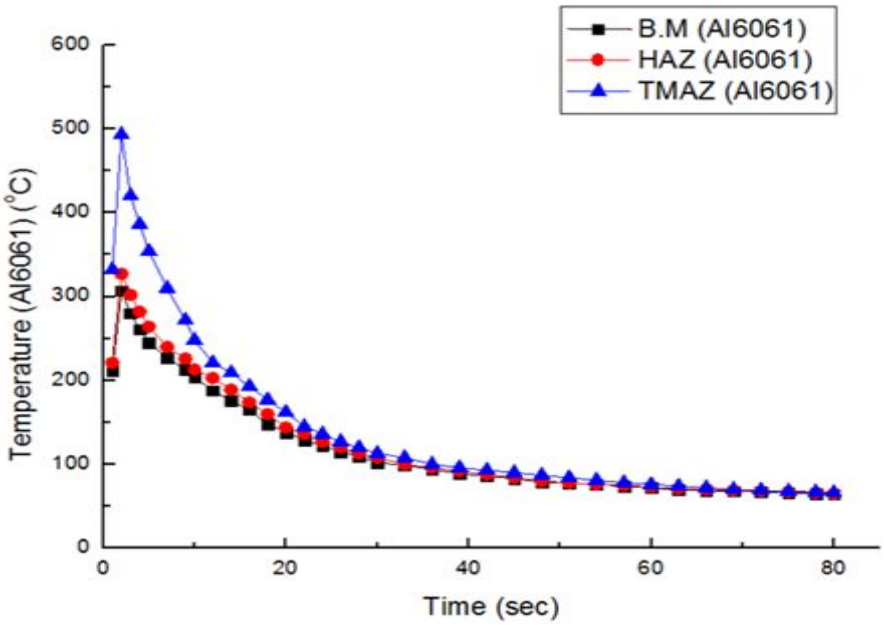



(a) Temperature distribution along thickness

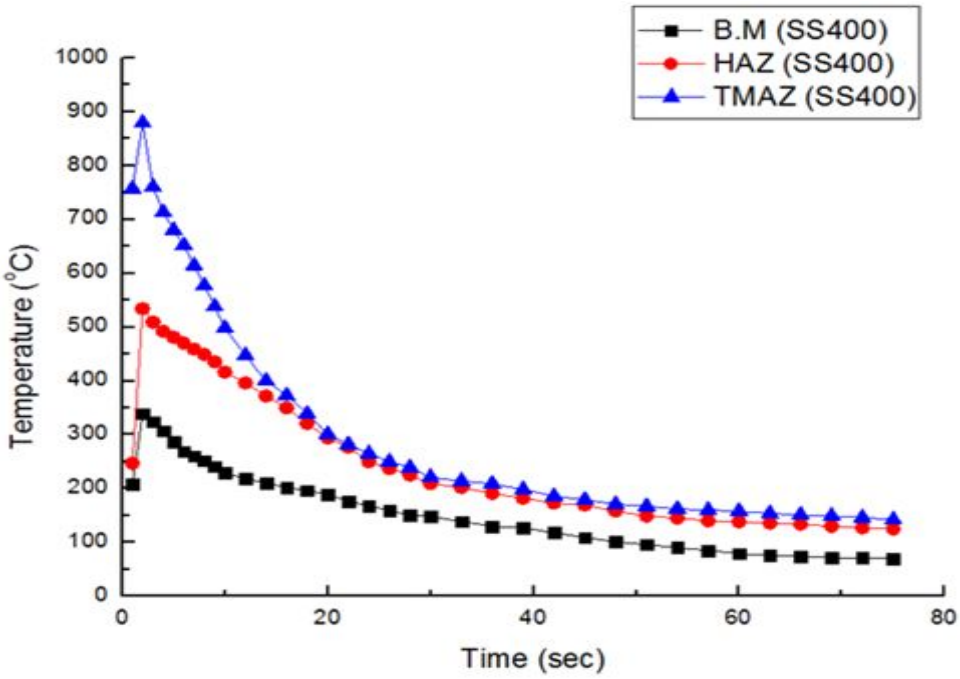



(b) Temperature distribution along weld length

Fig. 4.3 Temperature contour along weld length and thickness obtained at 2sec for Al6061/SS400

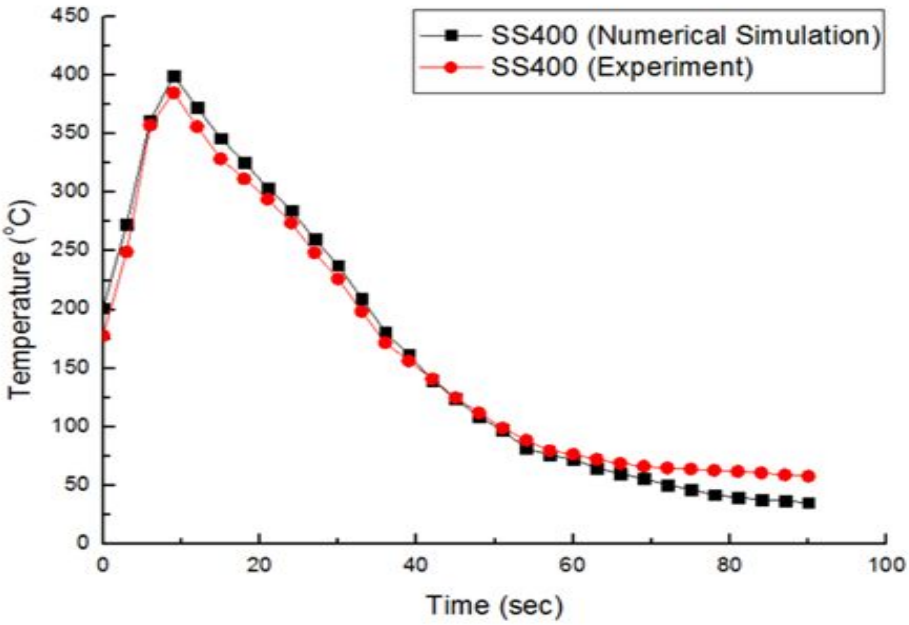



(a) Retreating side (Al6061-T6)

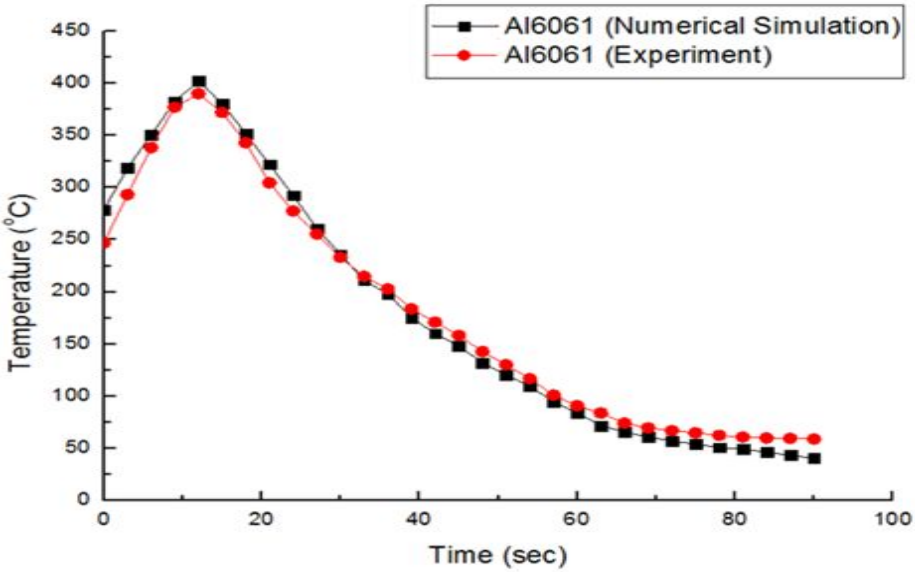



(b) advancing side (SS400)

Fig. 4.4 Time-temperature plot for Al6061/SS400 dissimilar joint




(a) 10mm away from butt line (SS400)




(b) 13mm away from butt line (Al6061-T6)

Fig. 4.5 Comparison of numerically simulated and measured temperature history

## 4 . 2 열 · 탄소성 해석

용접 응력해석을 위하여 재료는 등방성으로 가정하였고, 탄성 및 소성 전 영역에서 재료의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수)의 온도의존성을 고려하였으며, 소성역에서는 소성유동(Plastic-flow)이론에 입각하여 증분형으로 나타내어 정도 높은 해석을 수행하였다.

### 4.2.1 해석모델 및 해석방법

용접잔류응력 해석 시험편의 형상 및 크기는 Fig 4.1의 열분포 해석과 동일 하게 채택하였으며, 본 연구에 사용된 시편의 온도의존성과 응력-변형률 관계는 Fig 2.2, Fig 2.3, Fig 2.4, Fig 2.5에 나타내었다. 또한, 열분포 해석 결과를 입력 데이터로 하고 온도상승 및 냉각과정의 열분포를 열하중으로 하여 TIG-FSW Hybrid 접합부의 역학적 특성을 해석하고자 하였다. 우선, 접합부의 응력을 정도 높게 해석하기 위하여 온도분포 해석 영역과 동일한 해석 영역으로 가정을 하였으며, 3차원 열 · 탄소성 이론을 도입하여 이들을 유한 요소식으로 정식화 한 후, 8절점 아이소 파라미터 요소를 이용하여 해석하였으며, 이를 통하여 TIG-FSW Hybrid 접합부의 용접잔류응력 발생기구를 규명하고자 하였다.

열 · 탄소성 해석 시, 경계 조건은 Fig 4.6과 같이 Butt 접합부의 상하좌우 대칭이다. 모델에 대하여 중앙부는 완전 고정하였으며, 양단에 대해서는 좌우를 자유로이 두었다.

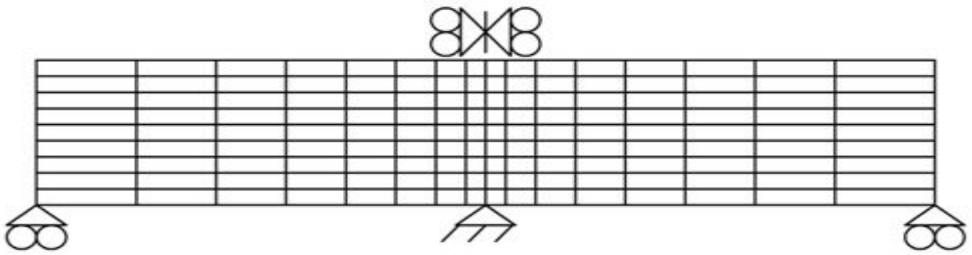


Fig. 4.6 Boundary condition

### 4.2.2 열탄소성 해석 프로그램 구성

1) 구성 : 용접잔류응력 및 변형률 해석용 프로그램은 1개의 Main문과 48개의 Sub-Routine문 및 5개의 Function문으로 구성되어 있으며, 입력 Data를 조절(입력)함으로써 손쉽게 수치 시뮬레이션을 수행하도록 구성되어 있다.

2) 입력 Data : $x, y, z$방향의 좌표수 지정, 경계조건, 절점번호 코딩(Coding) 순서 지정, 각 패스별 용착금속 및 HAZ요소, 절점의 시간대별 온도이력 등이다.

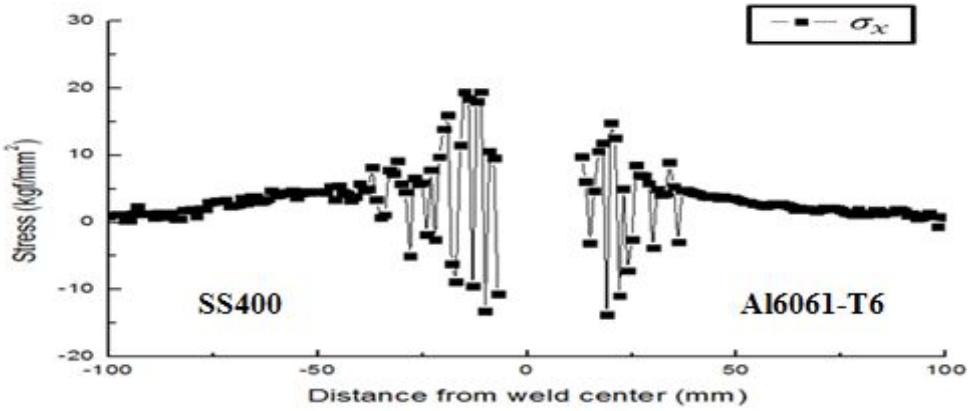
3) Main문 : 입력 Data의 형식에 맞추어 Data를 입력하면, 해석모델 형상의 전 절점에 대해 요소좌표를 자동적으로 정의하여 형상함수 및 야코비언(Jacobian)메트릭스를 구성한다.

또한, 열분포 이력을 열하중으로 하므로 용접이 수행되는 과정의 온도상승 및 냉각에서의 온도이력을 입력하여 온도를 하중으로 치환하고, 요소의 강성 메트릭스를 구성한다. 또한, 재료의 항복응력, 소성경화계수, 열팽창률 등을 온도의 변화에 따라 계산하고, 요소의 강성 메트릭스를 중첩한다. 또한, 평형방정식을 계산하여 응력, 소성변형률 등을 계산한다. 재료의 탄성, 소성여부를 폰-미세스 항복함수를 토대로 판단하여, 온도, 변위, 응력, 소성변형률 및 상당응력 등을 출력하게 된다.

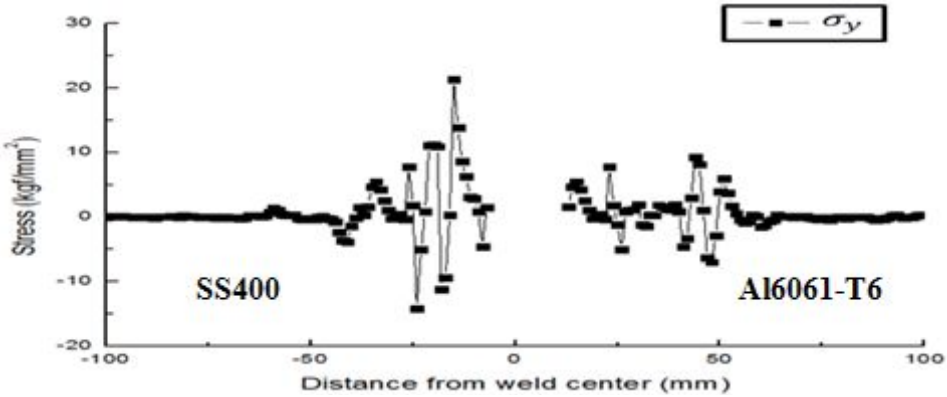
### 4.2.3 잔류응력 분포 특성

용접잔류응력 해석 시, 입력 데이터는 열전도 해석 시의 전과정의 온도분포 이력을 입력데이터로 하여 열·탄소성 프로그램을 사용하여 해석 결과에 대한 역학적 특성을 규명하였다. Fig 4.7의 (a), (b), (c)는 TIG-FSW Hybrid 접합부 상부의 0.2mm지점의 길이방향(z) 용접잔류응력($\sigma_z$), 폭방향(x) 용접잔류응력($\sigma_x$), 두께방향(y) 용접잔류응력($\sigma_y$)을 도시한 그래프로 열-기계적 영향부(TMAZ)와 열영향부(HAZ)에서 집중적인 인장·압축응력 분포를 보이고 있으며, 시편 중앙부(X=-6, 12)는 tool의 마찰에 의해 응력성분의 가장 큰 인장잔류응력값을 보이고 끝단으로 갈수록 응력이 작아짐을 보이고 있다. 용접에 의한 길이방향, 폭방향, 두께방향 용접잔류응력은 모두 유사한 경향을 보이고 있으며, 길이방향 용접잔류응력($\sigma_z$)이 폭방향($\sigma_x$) 및 두께방향($\sigma_y$)의 응력성분보다 높게 나타났다. 그 크기는 $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$순 임을 고찰하였다. Fig 4.8과 Fig 4.9는 시편의 두께별(1.5mm, 3.0mm) 잔류응력값을 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면 잔류응력 값이 두께별로 약간의 차이를 보이고 있으나, 그 각각의 두께별 그래프 형상과 그에 따른 잔류응력 값이 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

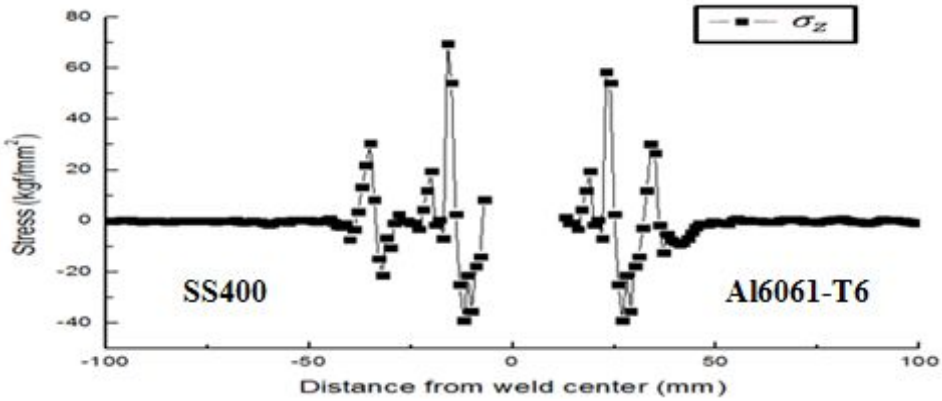
Fig 4.10은 시편의 두께 3.0mm부분에서 측정한 열탄소성 해석 값과 잔류응력실험 기기를 통하여 얻은 실측값을 비교한 그래프이다. 두 값을 비교해 보았을 때 실험값이 수치해석 값보다 작게 측정되었지만 그래프 양상은 비슷함을 보였다. 이러한 결과를 보았을 때 열탄소성 프로그램을 통한 잔류응력 측정이 신뢰성이 있음을 보여준다.




(a) Transverse stress distribution

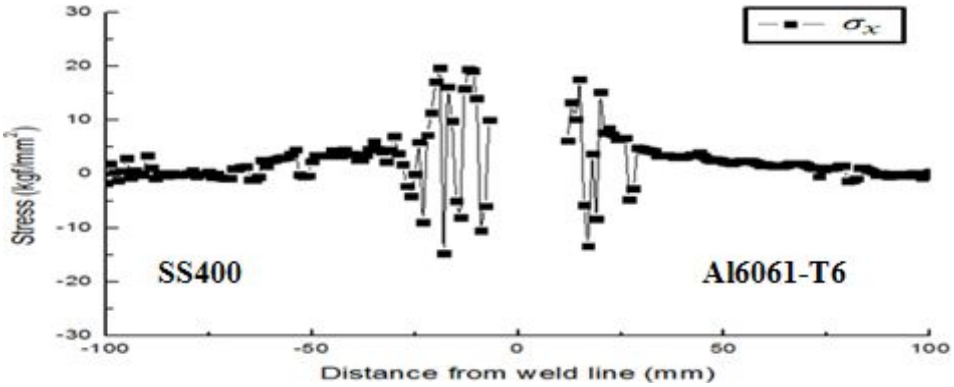



(b) Thickness stress distribution

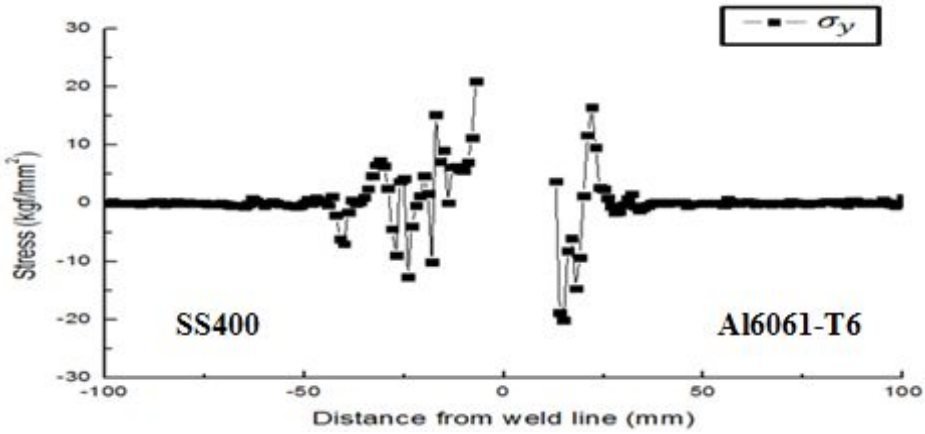



(c) Longitudinal stress distribution

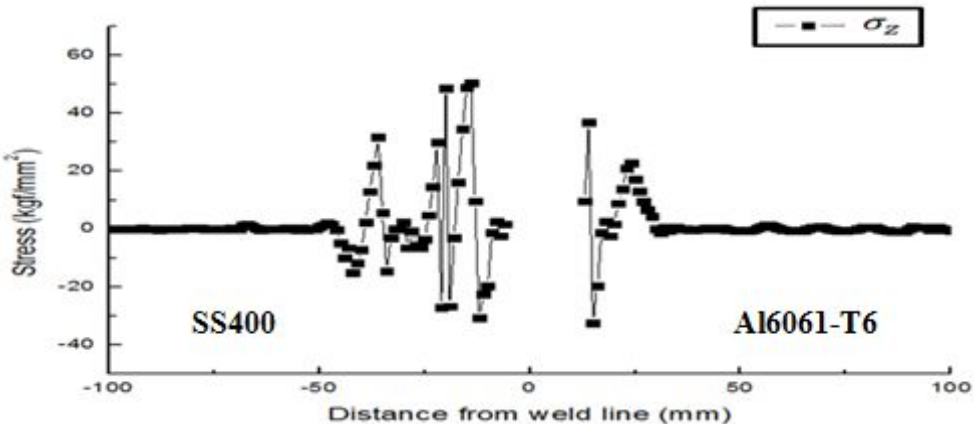
Fig. 4.7 Distribution of welding residual stress at 0.2 below top surface of Al6061-T6/SS400 dissimilar joint




(a) Transverse stress distribution

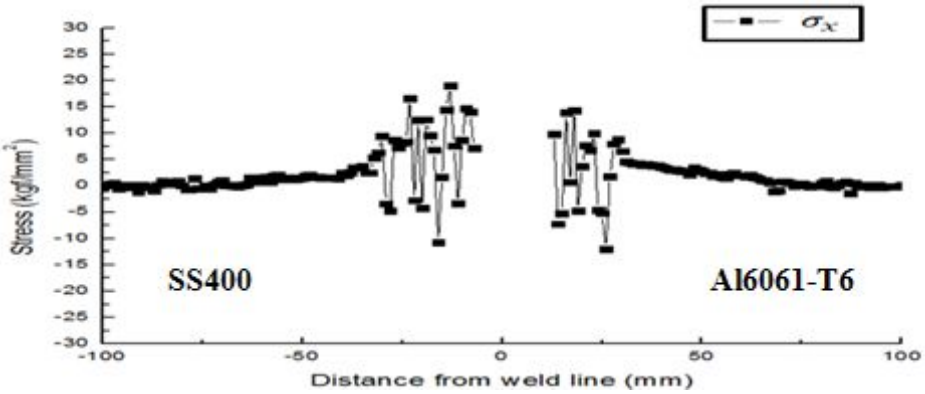



(b) Thickness stress distribution

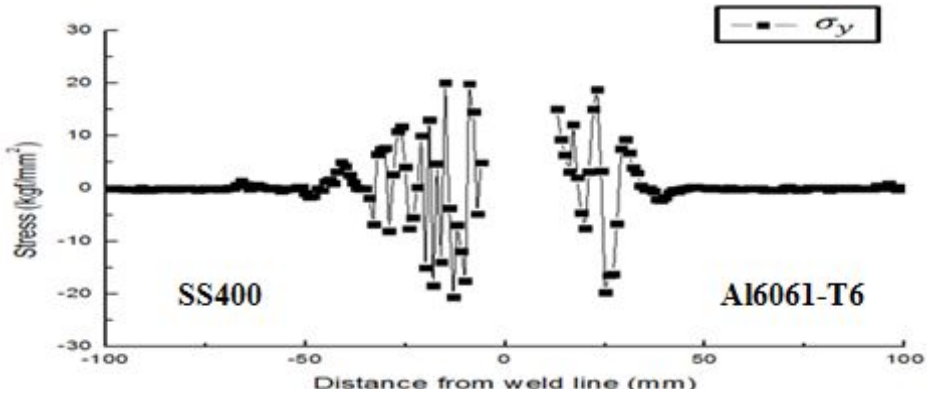



(c) Longitudinal stress distribution

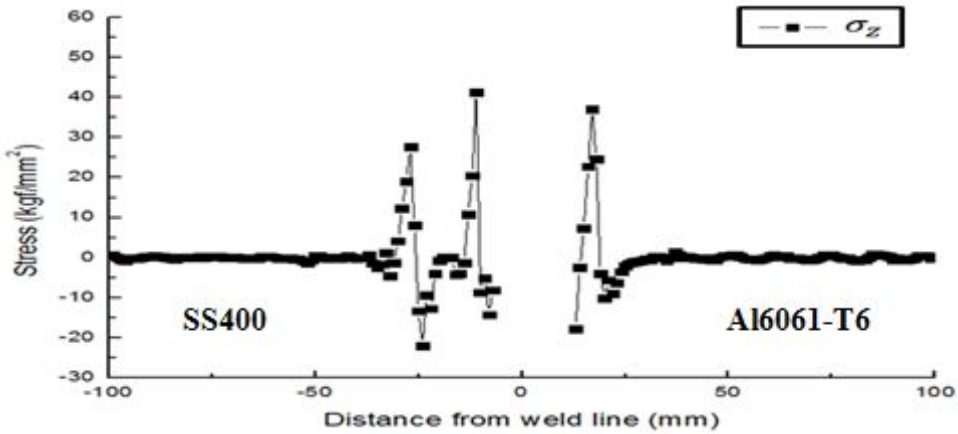
Fig. 4.8 Distribution of welding residual stress at 1.5 below top surface of Al6061-T6/SS400 dissimilar joint




(a) Transverse stress distribution




(b) Thickness stress distribution




(c) Longitudinal stress distribution

Fig. 4.9 Distribution of welding residual stress at 3.0 below top surface of Al6061-T6/SS400 dissimilar joint

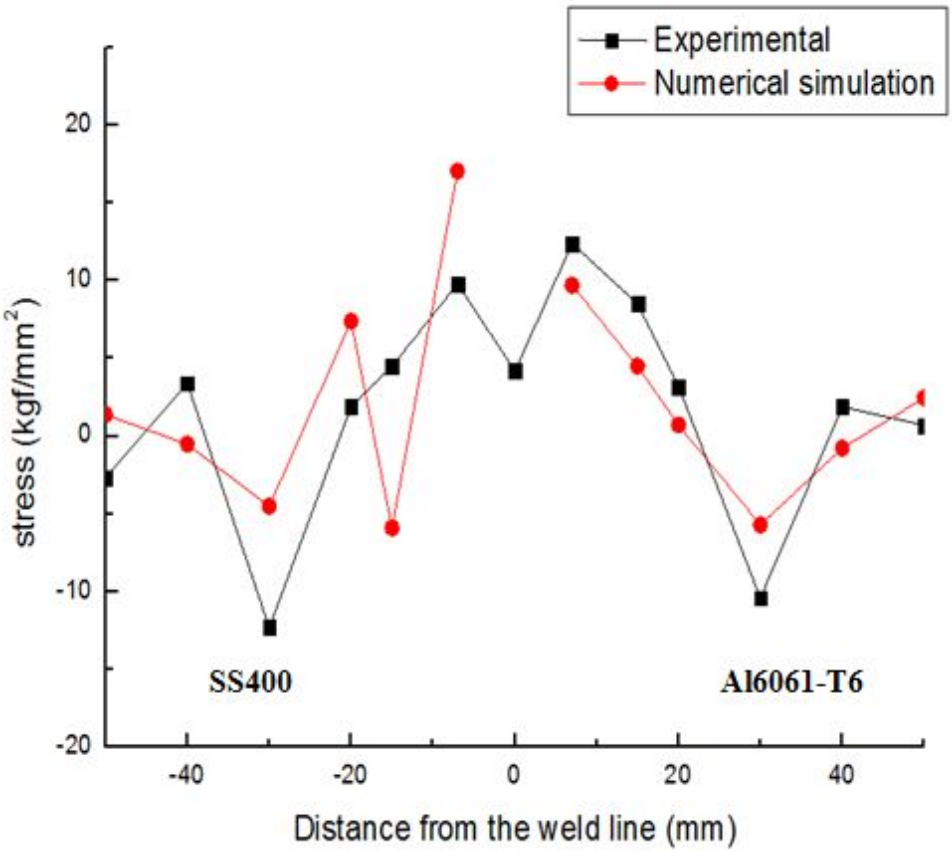



Fig. 4.10 Comparison of experimentally measured and numerically simulated values of Transverse residual stress($\sigma_x$) at 3.0 below top surface

# 제 5 장 결 론

본 논문에서는 접합부의 역적 특성 및 잔류응력을 정도 높게 해석할 수 있는 기 개발된 3차원 열전도 및 열·탄소성 수치해석용 프로그램을 이용하여 TIG-FSW Hybrid 접합부의 열적 및 역학적 특성에 대한 고찰을 하였다. 또한, 실험을 통하여 수치해석 값을 검증하고 결과값을 비교 분석 하였다.

## - 실험을 통한 접합부 특성 고찰

1) TIG-FSW Hybrid 접합 시 Tool의 회전수는 300rpm, 이송속도 1.0mm/s, TIG Current는 80A 일때 가장 양호한 접합부를 얻을 수 있었으며, 인장강도는 281.4MPa로 Al6061-T6합금 모재(최대인장강도 310MPa)대비 약 90%로 우수한 인장강도를 얻을 수 있었다, 이는 TIG의 선행 예열효과에 따른 소성유동성이 증가하였기 때문이라고 사료된다.

2) TIG-FSW Hybrid 접합부의 미세조직 관찰결과, 알루미늄의 경우 모재부분에서 접합부 방향으로 갈수록 결정립이 미세화 됨을 확인할수 있었고 스틸의 경우 모재부분에서는 나타나지 않았던 마르텐사이트조직이 TAMZ에서 관찰되었다. 이는 TIG선행 예열효과에 따른 소성유동성의 증가 및 동적재결정으로 인하여 결정립의 미세화와  마르텐사이트조직이 생성되는 것으로 사료된다.

3) TIG-FSW Hybrid 접합 시 Tool의 회전수가 증가할수록 스틸의 탈락한 입자가 알루미늄 영역에 미비하게 교반되어 인장파단 시 두 재료의 접합계면이 아닌 스틸 교반부에서 파단이 되므로 인장강도가 현저히 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

- 열분포 수치해석 결과

1) 접합 시작 후, 2sec대에서 최고온도분포(SS400 : 879.4℃, Al6061-T6 : 493.2℃)를 보이며, 알루미늄이 스틸에 배해 냉각속도가 약 10%정도 빠름을 알 수 있었다.

2) 접합 시작 후, 2sec대에서 최고온도분포(SS400 : 879.4℃, Al6061-T6 : 493.2℃)를 보이며, 시간변화에 따른 온도변화는 시간경과와 함께 점차 감소하여 온도구배가 완만히 나타남을 알 수 있었고, 알루미늄이 스틸에 비해 냉각속도가 약 10%정도 빠름을 알 수 있었다.

3) SS400의 융점은 1450℃이고 알루미늄의 융점은 650℃로 수치해석에 의한 SS400의 접합 시 최고온도(879.4℃)와 Al6061의 접합 시 최고온도(493.2℃)보다 낮음을 알 수 있는데 이는 각 재료의 융점이하에서 접합이 이루어짐을 보여주고 있다.

4) Thermo-couple을 이용하여 측정된 온도와 수치해석에 의한 온도 비교실험을 통해 관찰한 결과 두 그래프의 양상이 비슷하고 실험값과 수치해석값의 각 재료의 최고온도의 차이는 스틸의 경우 20℃정도 차이를 보였고 알루미늄의 경우 16℃정도의 차이 값을 보였다. 이는 TIG-FSW Hybrid 접합부의 열전도 해석의 타당성을 보여주고 있다.

- 열・탄소성 수치해석 결과

1) 수치해석을 통한 두께별(0.2mm, 1.5mm, 3.0mm) 접합부 잔류응력 분포를 보면 길이방향(z), 폭방향(x), 두께방향(y) 용접잔류응력 값은 TMAZ와 HAZ에서 집중적인 인장・압축응력 분포를 보이고 있으며 용접부에서 끝단으로 갈수록 응력이 작아짐을 볼 수 있었다. 이는 온도구배의 차가 시편중에 가장 많이 발생하는 부분이 TMAZ와 HAZ부근이기 때문이라고 사료된다.

2) 수치해석을 통한 접합부 잔류응력 분포를 보면 길이방향(z), 폭방향(x), 두께방향(y) 용접잔류응력은 모두 유사한 경향을 보이고 있으며, 잔류응력의 크기는 $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$순이었다. 이는 $\sigma_x$가 다른 방향성분의 잔류응력보다 길이방향으로 구속이 많이 되어있기 때문이라고 사료된다.

3) 수치해석을 통한 접합부 잔류응력 값과 실험을 통한 잔류응력 값을 비교해볼 때 실험값이 수치해석 값에 비하여 작게 나왔으나 그 값의 차이는 10kgf/㎟이하 이었으며 그래프의 양상을 보면 두 값이 서로 비슷함을 알 수 있었다.

이상의 결과를 통하여 TIG-FSW Hybrid 접합부의 열분포 특성 및 잔류응력 분포 특성을 고찰 하였다.

# 참 고 문 헌


[1] S.K. Jang, J.S. Park, “Mechanical characteristics on Friction Stir Welded joints with 6061-T6 Aluminium ally”, Journal of Mechanical Science and Technology, P693~699, Oct., 2009

[2] H.S. Park, Y.H. Lee, W.D. Choi, J.B. Ko, “A study on the effect that pin shape and welding speed have an influence on mechanical strength in Friction Stir Welding Al6061-T6”, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.17, No.4, Aug., 2008

[3] J.S. Noh, H.J. Kim, W.S. Chang, K.S. Bang, “Evaluation of FSW Weldability of Wrought and Casting Mg allys”, Journal of the Korean Welding and Joining Science, Vol. 22, No. 5, Oct., 2004

[4] H.S. Bang, H.S. Bang, S.M. Joo, “Numerical simulation of Al-SPCC weldment”, Key Engineering Materials, P1738~1744, Oct., 2006

[5] G.H. Jeon, A Study on Weldability of TIG Assisted Friction Stir Dissimilar Welding of Al6061 Alloy and STS Sheet, 2010

[6] A.William, Using Gleeble flow stress data to establish optimum FSW processing parameter in Aluminium Alloys, Advanced material processing centre, 2002

[7] Rajesh S.R, “Development of mathe matical model for Thermo-mechanical behavior of Friction Stir Welding an introduction Soldering by using FEM/BEM”, 2007

[8] H.J. Kim, “A study on the Thermal behavior and the Residual stress distribution characteristics of FSW with Al-6061 Allys”, 2002

[9] M.S. Bijoy, “Development of analytical model for Thermo-mechanical behavior of dissimilar materials butt joint by TIG Assisted Friction Stir Welding”, 2012

[10] Y.J.Chao, and X.Qi: Heat transfer and thermo-mechanical analysis of Friction Stir joining of Al6061-T6 plates, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, 1999

[11] 失川元基 外1人 :“有限要素法による熱應力・クリ-プ · 熱傳導解析”, (株) サイエソス, 1985

[12] 房漢瑞, 金裕哲 :“有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元 非定常 熱解析”, 大韓熔接 學會誌, P37~43, 9-2, 1991

[13] 房漢瑞, “有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元 非定常 熱傳導解析”, 大韓朝鮮學會誌, Vol. 27, No. 4, P44~50, 1990

[14] H.S. Bang. "Study on The Mechanical Behaviour of Welded part in thick Plate - Three-dimensional Thermal Elasto-Plastic Analysis Baseon Finite Element Method." Journal of the Korean Welding Society, Vol.10, No.4, pp.37~43, December 1992.

[15] T.J. Lienert, W.L. Steelwag, Jr., B.B Grimmett, and R.W. Warke : Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal, 82(1), 2003, pp.1S-9S

[16] AWS, WELDING HANDBOOK, Vol.1, Eighth Edition, 1987.

[17] AWS, WELDING HANDBOOK, Vol.2, Eighth Edition, 1991.

[18] W.M. Thomas, P.L.Threadgill, and E.D. Nicholas : Feasible of Friction Stir Welding Steel, Science and Technology of Welding and Joining, 4(6), 1999, pp. 365-372

[19] L.E.Murr, et al.: Solid-state flow association with the friction stir welding of dissmilar metals, Fluid flow phenomena in metals processing (1999), 31-40

[20] Z. Sun, R. Karppi, "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview", Journal of materials processing technology 59 (1996) 257-267

[21] H.S. Bang, G.Y. Han, "The plane-deformation thermal elasto -plastic analysis during welding of plate", The society of naval architects of korea p33~40, Apr.1994