



## 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](#) 

August 2016

Master's Thesis

The Effect of Welding Residual  
Stress on Numerical Analysis of  
Automotive Cowl Structure

Graduate School of Chosun University

Department of Producing and Processing

Hyung-Hoon Lee

# The Effect of Welding Residual Stress on Numerical Analysis of Automotive Cowl Structure

용접잔류응력이 자동차 카울 구조에 미치는 영향

August 25, 2016

Graduate School of Chosun University

Department of Producing and Processing

Hyung-Hoon Lee

# The Effect of Welding Residual Stress on Numerical Analysis of Automotive Cowl Structure

Advisor : Professor Han-Sur Bang

A Thesis submitted for the degree of  
Master of Engineering

April 2016

Graduate School of Chosun University

Department of Producing and Processing

Hyung-Hoon Lee

# Hyung-Hoon Lee's master thesis is certified.

Commitee Chair Chosun Univ. Prof. Han-Sur Bang

Member Chosun Univ. Prof. Hee-Seon Bang

Member Chosun Univ. Prof. Sung-Min Joo

May 2016

Graduate School of Chosun University

# CONTENTS

List of Figures .....	III
Abstract .....	IV

## 1장. 서 론

1 . 1 연구배경 .....	1
1 . 2 연구목적 .....	4
1 . 3 연구방법 .....	5

## 2장. 이론의 정식화

2 . 1 열전도 해석 .....	6
2.1.1 열전도 이론의 유한요소 정식화 .....	7
2.1.2 열전도 해석용 프로그램 .....	11
2 . 2 용접잔류응력 해석 .....	13
2.2.1 열탄소성 이론의 유한요소 정식화 .....	14
2.2.2 열탄소성 해석용 프로그램 .....	19

## 3장. 유한요소해석의 결과 및 고찰

3 . 1 용접 방법에 따른 열분포 특성 .....	21
3 . 2 용접 방법에 따른 역학적 특성 .....	27
3 . 3 외력을 적용한 역학적 특성 .....	31

4장. 결 론 .....34

참고문헌 .....36

## List of Figures

Fig 1.1	Application of Laser Beam Welding for Lightweight	3
Fig 1.2	Concept of Laser Stitch Welding for Lightweight	4
Fig 1.3	FE Analysis Model for Numerical Simulation	5
Fig 2.1	Iso-Parametric Element (4 Nodal Point)	6
Fig 2.2	Flow Chart of Program for Heat Conduction Analysis	12
Fig 2.3	Isotropic Workhardening Rule	13
Fig 2.4	Flow Chart of Program for Thermal Elastic-Plastic Analysis	20
Fig 3.1	Temperature of Distribution in the Spot Welding Model in Cooling Stage	23
Fig 3.2	Temperature of Distribution in the Laser Stitch Welding Model in Cooling Stage	25
Fig 3.3	Temperature History of Spot and Laser Stitch Welding with Time	26
Fig 3.4	Comparison of Welding Residual Stress Distribution in the Single Pass Welding	28
Fig 3.5	Comparison of Welding Residual Stress Distribution in the Multi Pass Welding	29
Fig 3.6	Comparison of Welding Residual Stress Distribution in the Single and Multi Pass Welding	30
Fig 3.7	External Force for Model	32
Fig 3.8	Stress Distribution of Spot Welding by Tensile Load Change	32
Fig 3.9	Stress Distribution of Laser Stitch Welding by Tensile Load Change	33



## ABSTRACT

### 용접잔류응력이 자동차 카울 구조에 미치는 영향

Hyung-Hoon Lee

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

Department of Producing and Processing,

Graduate School of Chosun University

The lightweight in automotive industry is important due to the demand of CO<sub>2</sub> emission reduction and fuel efficiency. Many automotive parts are mostly made by Resistance Spot Welding. Laser Beam Welding has potential to substitute the Resistance Spot Welding in terms of automotive lightweight.

This study aim is to evaluate the structural stability of automotive cowl by numerical analysis. In this study, three steps analysis for heat conduction, thermal elastic-plastic and structural analysis considering welding residual stress were conducted.

In short, the analysis result shows that in comparison with residual stress of single pass and multi pass welding, the welding residual stress in Resistance Spot Welding become higher than that of Laser Stitch Welding about 10 percent.

On applying the external force to Resistance Spot and Laser Stitch weld joints, stress distribution show that tensile residual stress increased in the Base Metal and compressive residual stress increased in the Heat Affected Zone.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

국제적인 환경 규제 강화 및 에너지 자원의 가격상승 그리고 연비규제 강화에 따라 경량화(Lightweight)는 선택이 아닌 필수로 자동차산업의 영원한 숙제가 되고 있다. 특히 경량화 기술은 연비향상은 물론 자동차의 성능을 향상시킬 수 있는데, 차량중량을 10% 경량화하면 연비 3%, 가속성능 8%, 조향성능 6%, 샤시의 내구성이 1.7배가 향상되고 브레이크 정지거리가 5% 감소하는 것으로 보고되고 있다<sup>1)</sup>.

이에 따라 자동차 경량화 및 고성능화를 위한 개발이 가속화되고 있는 실정으로 경량화와 함께 차체의 고강도화 및 생산성이 향상될 수 있는 방안들이 지속적으로 연구되고 있다. 일반적으로 차체의 경량화 연구개발은 1) 차체 구조자체의 합리화, 2) 경량소재의 채택, 3) 신 공법(용접) 적용 등 크게 3가지 분야에서 진행되고 있다. 특히 신 공법의 적용을 통한 경량화 연구개발은 레이저용접(Laser Beam Welding), TWB(Tailor Welded blanks), 하이드로포밍(Hydro Forming) 등의 기술개발이 이루어지고 있다<sup>2)</sup>.

자동차산업에서의 레이저용접 적용은 국내보다도 국외 글로벌 완성차업체에서 주로 적용되고 있다. 폭스바겐사는 5세대 골프에 아연도금 및 고장력강판을 사용하여 레이저용접을 적용하였으며, 기존대비 정적 비틀림 강성 80%, 동적 비틀림 강성 15%, 동적 휨강성 35%를 향상시켰다. 그리고 기존공정인 저항 점용접(Resistance Spot Welding)을 레이저용접으로 대체하여 50%의 가용면적을 감소시켜 차체 경량화를 실현하였다<sup>3)</sup>.

그러나 국내 자동차산업의 경우 아직까지는 자동차 차체 및 부품 생산에 있어 고비용의 설비투자로 인하여 레이저용접보다는 점용접이 주를 이루고 있으나, 향후

경량화 실현을 위한 경제적·기술적 한계를 극복하고자 점용접을 대체하여 경량 차체 설계 및 생산성 향상 측면에서 레이저용접의 적용이 확대될 것으로 예상된다.

레이저용접은 기존공정인 점용접대비 가용면적을 최소화할 수 있어 경량화 측면에서 효율적인 이유로 다양한 연구가 보고되고 있으나, 주로 용접부에 대한 기계적 특성 및 아연에 의한 용접현상을 주로 다루고 있었다. H. I. Kim 등은 아연도금강판에 대한 점용접부와 레이저 스티치 용접부의 기계적 특성 비교에서 레이저 출력 2kW, 용접속도 4m/min, 비드길이 20mm일 때, 피치간격 70, 90mm에서 전단-인장강도가 각각 38%, 26% 향상됨에 따라 용접부 면적이 동일하면 비드길이와 피치간격을 조정하여 용접할 수 있다고 보고하였다<sup>4)</sup>. 한편, 아연도금강판의 레이저 겹치기 이음부에서는 간극이 없을 경우 용접부 품질 및 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다<sup>5-7)</sup>. 이러한 근본적인 원인은 아연도금강판의 용접보다 도금된 아연의 비등점이 약 600°C 이상 낮기 때문으로 레이저 열원이 겹쳐진 면에서의 아연도금층의 기화하면서 부피가 팽창, 압력으로 인한 상대적으로 약한 용융풀(Molten pool)을 통해 아연증기가 외부로 분출하게 된다. 이때 발생하는 스패터(Spatter)는 표면 블로우홀(Blow-hole)이 생성되거나, 용융풀 내에 아연 증기가 잔류하거나 대기가 유입되어 기공(Porosity)을 형성하게 된다. 이를 방지하기 위해서는 겹침 부분의 간극을 0.1~0.3mm의 조절을 통한 Zinc-vapor 방출 통로 및 시간 확보가 필요하다. T. H. Kim 등은 자동차 차체 부품 사이드멤버 제작시 많이 사용되는 소재인 SGARC440 아연도금강판의 레이저 겹치기 용접에서의 간극 및 보호가스 유무에 따른 용접성을 평가하였다<sup>5)</sup>. H. U. Seol 등은 440MPa급 아연도금강판에 대한 아연증기 배출을 위한 적정 갭(0.15~0.2mm)을 유지할 수 있는 Laser dimple 조건을 도출하였으며, 0.4mm 이상의 갭에서는 용락 및 언더컷이 발생하여 전단-인장강도가 감소하는 결과를 보고하였다<sup>8)</sup>. J. S. Chu 등은 자동차 차체용 340MPa급 고강도 강판(SPRC340)에 대하여 점용접부 전단-인장강도를 기준으로 레이저 스티치 용접부의 적정 용접조건을 제시하고 용접성을 평가하였는데, 동일한 60mm의 피치간격에서 점용접부 대비 레이저 스티치 용접부의 강도가 약 6% 향상됨을 보고하였다<sup>9)</sup>.

하지만, 실제 차체 및 자동차 부품에 레이저용접을 적용하기 위해서는 용접부에 대한 역학적 특성을 명확히 파악하고 열적거동 및 용접잔류응력을 예측할 필요가 있다. 그리고 용접잔류응력(Welding residual stress)이 용접구조물의 강도에 미치는 영향 및 외력을 적용한 용접잔류응력의 분포 등의 연구가 필요한 실정이다.

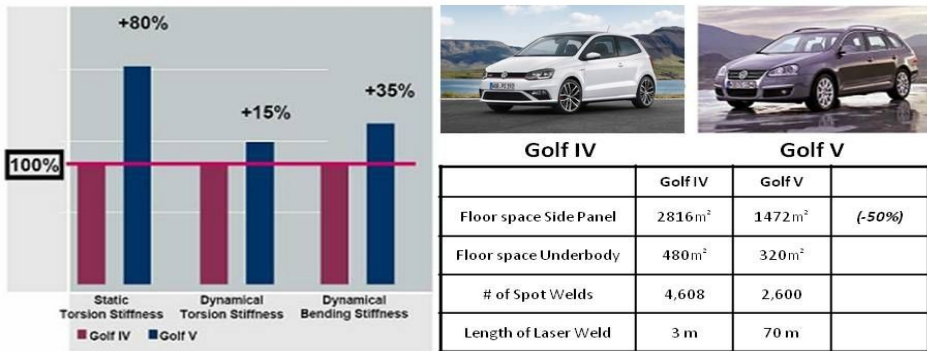


Fig. 1.1 Application of Laser Beam Welding for Lightweight<sup>3)</sup>

## 1.2 연구목적

일반적으로 점용접은 차체 및 자동차 부품의 박판 조립공정에서 가장 많이 적용되고 있다. 그러나 점용접시, 용접을 위하여 일정이상의 플랜지(Flange)가 요구되므로 이에 따른 차체 중량 증가 및 자유로운 차체 설계에 한계를 갖게 된다(Fig. 1.2). 또한 아연도금강판의 점용접에서는 타점 진행과 함께 아연 부착량의 증가로 용접강도가 저하하는 문제점이 있다. 레이저 스티치 용접(Laser Stitch Welding)의 경우, 점용접과 달리 비접촉식이므로 플랜지를 일부러 늘릴 필요가 없으므로 점용접에 필요한 가용면적을 50%이상 줄일 수 있어 경량화에 효과적이다.

따라서 본 연구에서는 자동차 부품 카울(Cowl)의 소재로 사용되는 아연도금강판에 대한 수치해석을 통하여 점용접 및 레이저 스티치 용접의 열적 그리고 역학적 특성을 파악하고자 하였다. 또한 용접잔류응력의 해석 결과를 이용하여 용접잔류응력이 카울의 강도에 미치는 영향을 고찰하고자 외력을 적용하여 그 영향을 검토하고자 하였다.

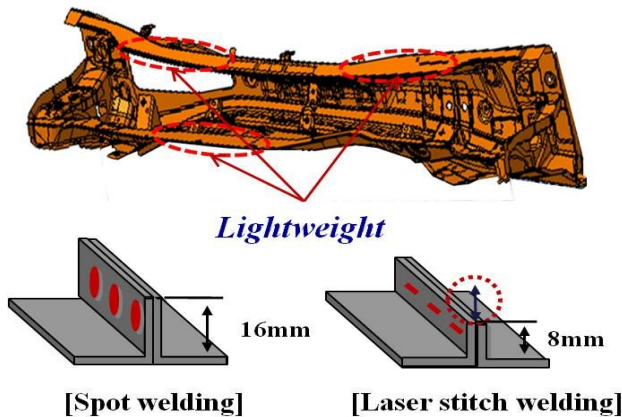


Fig. 1.2 Concept of Laser Stitch Welding for Lightweight

### 1.3 연구방법

본 연구에서는 자동차 부품 카울에 대한 점용접과 레이저 스티치 용접을 적용하여 열적 및 역학적 특성을 규명하기 위해 수치해석을 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 1.3에 도시한 바와 같이 카울의 전 모델(Full Model)에 적용하였으며, 점용접부와 레이저 스티치 용접부에 대한 모델을 도시한 것이다. 그리고 용접열원의 크기 및 분포를 열하중으로 하여 용접부에 발생하는 역학적 메커니즘을 해석하고자 하였다. 또한 해석한 용접잔류응력을 범용 프로그램에 적용하여 외력에 따른 안정성을 정량 및 정성적으로 평가하고자 하였다. 즉, 열탄소성 수치해석 결과를 상용 프로그램에 초기값으로 적용하였으며, 외력이 작용하였을 때 용접구조물의 잔류응력 재분포를 파악하였다. 해석에 있어 실제 점용접 및 레이저 스티치 용접에서 열적 및 역학적 특성이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위해 Sing Pass와 Multi Pass로 나누어 해석을 수행하였다.

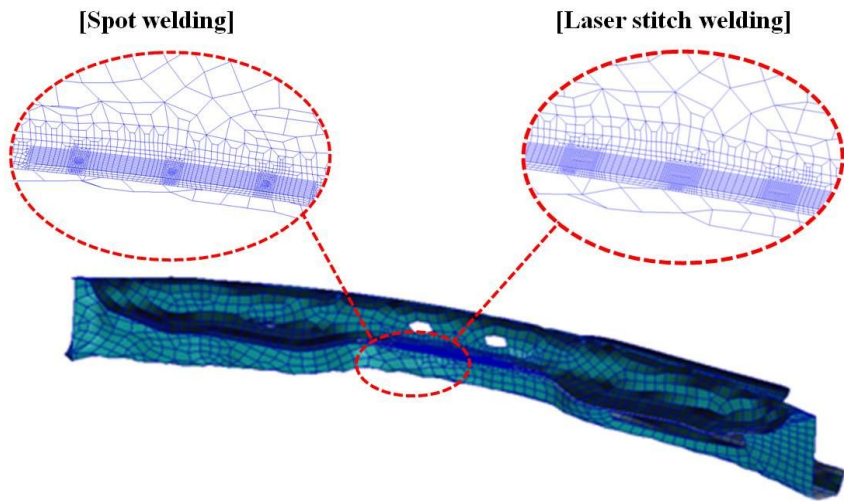


Fig. 1.3 FE Analysis Model for Numerical Simulation

## 제 2 장 이론의 정식화

### 2.1 열전도 해석

본 연구에서는 용접열원 분포의 명확한 해석을 위하여 열원의 효과를 고려하였으며, 해석의 정도를 높이기 위한 자연좌표계를 이용하여 요소좌표와 변위를 동일한 보간함수로 하여 절점 및 요소에서 뿐만 아니라 임의의 적분점에서도 필요한 값을 알 수 있는 아이소-파라메트릭 4절점을 도입하였다. 또한 용접의 경우 시간에 따라 온도가 변화하므로 아연도금강판의 물리정수(비열, 비저항, 밀도 및 열전도도 등)가 변화되기 때문에 이를 고려하여 열전도 해석을 수행하였다<sup>10-13)</sup>.

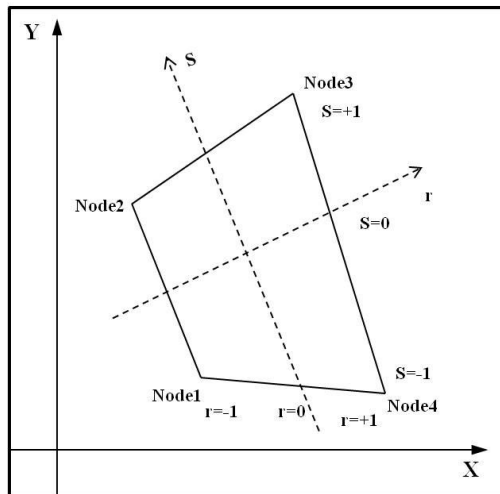


Fig. 2.1 Iso-Parametric Element (4 Nodal Point)

## 2.1.1 열전도 이론의 유한요소 정식화<sup>10-13)</sup>

- 재료가 등방성(Isotropic)일 때를 고려하면, 연속체의 비정상 열전도 해석의 지배 방정식(Governing equation)은 아래식과 같이 기술된다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (2.1)$$

### (1) 2차원 열전도 이론의 유한요소 정식화(定式化)

- 식(2.1)을 2차원 비정상 열전도 방정식으로 기술하면 다음과 식과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} \quad (2.2)$$

여기서,  $T$  : 온도(°C),  $c$  : 비열(cal/g · °C),  $\rho$  : 밀도(g/cm<sup>3</sup>)

$\lambda$  : 열전도율(cal/cm · sec · °C),  $t$  : 시간(sec),

$\dot{Q}$  : 단위시간당 입열량(cal/sec)이다

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

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -\frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.3)$$

- 만약 경계에서 열전달이 있을 경우에는  $q$ 는 식(2.4)가 된다.

$$q = \alpha_c (T - T_c) \quad (2.4)$$



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

- 고체의 열전달 문제를 갈라킨법(Galerkin method)을 적용하여 유한요소법으로 정식화하기 위해, 해석모델을 유한개로 분할하고, 한 요소내의 온도 분포를 아래 식으로 표현하였다.

$$T(x, y, t) = [N(x, y)]\{\varnothing(t)\} \quad (2.5)$$

여기서,  $T$  : 요소의 온도

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

$\{\varnothing\}$  : 시간  $t$ 에 대한 요소의 절점온도 Vector이다.

- 식(2.2)에 형상함수 $[N]$ 을 가중(Weighting)함수로 하여 갈라킨법을 적용하면 식(2.6)이 구성된다.

$$\int_v [N]^T \left\{ \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dv = 0 \quad (2.6)$$

여기서,  $v$  : 요소의 영역이다.

- 식(2.6)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 식을 전개하면 다음의 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} & \int_v [N]^T \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) dv \\ &= - \int_v \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) dv + \int_s \lambda [N]^T \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) ds \end{aligned} \quad (2.7)$$

여기서,  $s$  : 요소의 경계이다.

- 식(2·3), (2·4) 및 (2·5)을 식(2·7)의 우변에 대입하면 다음의 식(2·8)과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & - \int_v \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dv \cdot \{ \varnothing(t) \} \\
 & - \int_s \alpha_c [N]^T [N] ds \{ \varnothing(t) \} + \int_v \dot{Q} [N]^T dv \\
 & + \int_s \alpha_c T_c [N]^T ds - \int_v \rho c [N]^T [N] dv \cdot \frac{\partial \{ \varnothing \}}{\partial t} = 0 \quad (2\cdot8)
 \end{aligned}$$

- 상기의 2차원 비정상 열전도식을 Matrix화 하면 다음 식이 구하여진다.

$$[K] \{ \varnothing \} + [C] \left\{ \frac{\partial \varnothing}{\partial t} \right\} = \{ F \} \quad (2\cdot9)$$

여기서,  $[K]$  : 열전도 Matrix이고,  $[C]$  : 열용량 Matrix이며,  
 $\{ F \}$  : 열유속 Vector이다.

그 내용은 다음과 같다.

$$[K] = \int_v \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dv \{ \varnothing \} + \int_s \lambda [N]^T [N] ds \{ \varnothing \} \quad (2\cdot10)$$

$$[C] = \int_v \rho c [N]^T [N] dv \quad (2\cdot11)$$

$$\{ F \} = \int_s \alpha_c T_c [N]^T ds + \int_v \dot{Q} [N]^T dv \quad (2\cdot12)$$

- 따라서, 본 연구는 식(2·9)에 입각하여 구성된 열전도 프로그램을 이용하여 열분포 특성을 해석하였다.

## (2) 비정상문제의 이산화(離散化)

- 2차원 비정상 열전도식을 Matrix화 한 식(2·9)을 풀 경우에  $\{\varnothing\}$  및  $\left\{\frac{\partial\varnothing}{\partial t}\right\}$ 의 2개의 미지량이 존재하지만, 시간 증분을  $\Delta t$ 라하고 증분전의 온도를  $\varnothing^B$ , 증분후의 온도를  $\varnothing^A$  및 그 증간의 온도를  $\varnothing^M$ 이라고 하면, 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial\varnothing^A}{\partial t} = \frac{\varnothing^A - \varnothing^M}{(\Delta t/2)}, \quad \frac{\partial\varnothing^B}{\partial t} = \frac{\varnothing^M - \varnothing^B}{(\Delta t/2)} \quad (2\cdot13)$$

- 식(2·13)으로부터 식(2·14)가 구성된다.

$$\frac{\partial\varnothing^A}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t}(\varnothing^A - \varnothing^B) - \frac{\partial\varnothing^B}{\partial t} \quad (2\cdot14)$$

- 따라서, 식(2·9)은 아래와 같이 최종적으로 구할 수 있다.

$$([K] + \frac{2}{\Delta t}[C])\varnothing^A = \{F\} + [C](\frac{2}{\Delta t}\varnothing^B + \frac{\partial\varnothing^B}{\partial t}) \quad (2\cdot15)$$

여기서,  $\Delta t$  : 시간증분,  $\varnothing^A$  : 증분후의 절점온도,

$\varnothing^B$  : 증분전의 절점온도,  $[K]$  : 열점도 Matrix,

$[C]$  : 열용량 Matrix,  $\{F\}$  : 열유속 Vector 이다.

- 식(2·15)에서, 시간  $t$ 에 대한  $\{\varnothing^B\}$ 의 값을 알면 이 연립방정식의 해인  $\{\varnothing^A\}$ 를 구할 수 있다. 즉, 초기조건으로써  $\{\varnothing^B\}_{t=0}$ 의 값을 대입하면 된다.

## 2.1.2 열전도 해석용 프로그램

### (1) 프로그램 구성

- 1) 구성 : 열분포 해석용 프로그램은 1개의 Main문과 45개의 서브루틴 및 3개의 Function문으로 구성되어 있으며, 데이터를 입력함으로써 손쉽게 수치 시뮬레이션을 수행하도록 구성되어 있다.
- 2) 입력 데이터 : 각 방향의 좌표수 지정, 절점번호 코딩(Coding)순서 지정, 용착 금속 요소수, 요소의 용접시간, 온도상승 및 냉각시간 선정, 열영향부(HAZ) 요소로 판별하는 온도지정, 열전달 등이 발생하는 요소 지정 등이다.
- 3) Main문 : 입력 데이터(Data)의 형식에 맞추어 초기 데이터를 입력하면, 해석 모델형상에 대한 열전달 및 열복사 유무를 판단, 각 좌표에 대한 절점을 자동으로 나누어 요소를 분할한다. 총 절점수 및 Dimension상의 절점수를 판단하여 열영향부 및 용접된 요소수를 초기화, 용접이 수행된 요소의 종료시간을 판단하여 매트릭스에 대한 Bandwidth와 Dimension상의 크기를 판단한다.

전 단계(Step)에 대하여 열전도 매트릭스, 열하중 매트릭스를 구성하며 최고치 온도를 판단하여 시간증분을 결정한다. 시간증분에 따라 용접이 끝난 요소는 온도하강 과정을, 용접이 수행되는 요소는 온도상승 과정을 겪게 된다. 온도하강 과정에서는 상온 또는 지정된 온도 까지 하강하고, 온도상승 과정에서는 요소의 용접 종료시간을 판단한다.

다음은 전요소의 용접 시간을 판단하여 전체계에 있어서 강성매트릭스와 열하중(Vector)의 Global화를 도모. 이러한 과정에 있어서 필요에 따라 서브루틴과 Function문을 사용하게 된다.

이들 과정을 통하여 시간에 따른 절점의 온도, 시간에 따른 온도증분 계산, 요소에 대한 열영향부(HAZ) 여부의 판정을 하여 출력하게 된다.

(2) 열분포 해석용 프로그램의 Flow-Chart

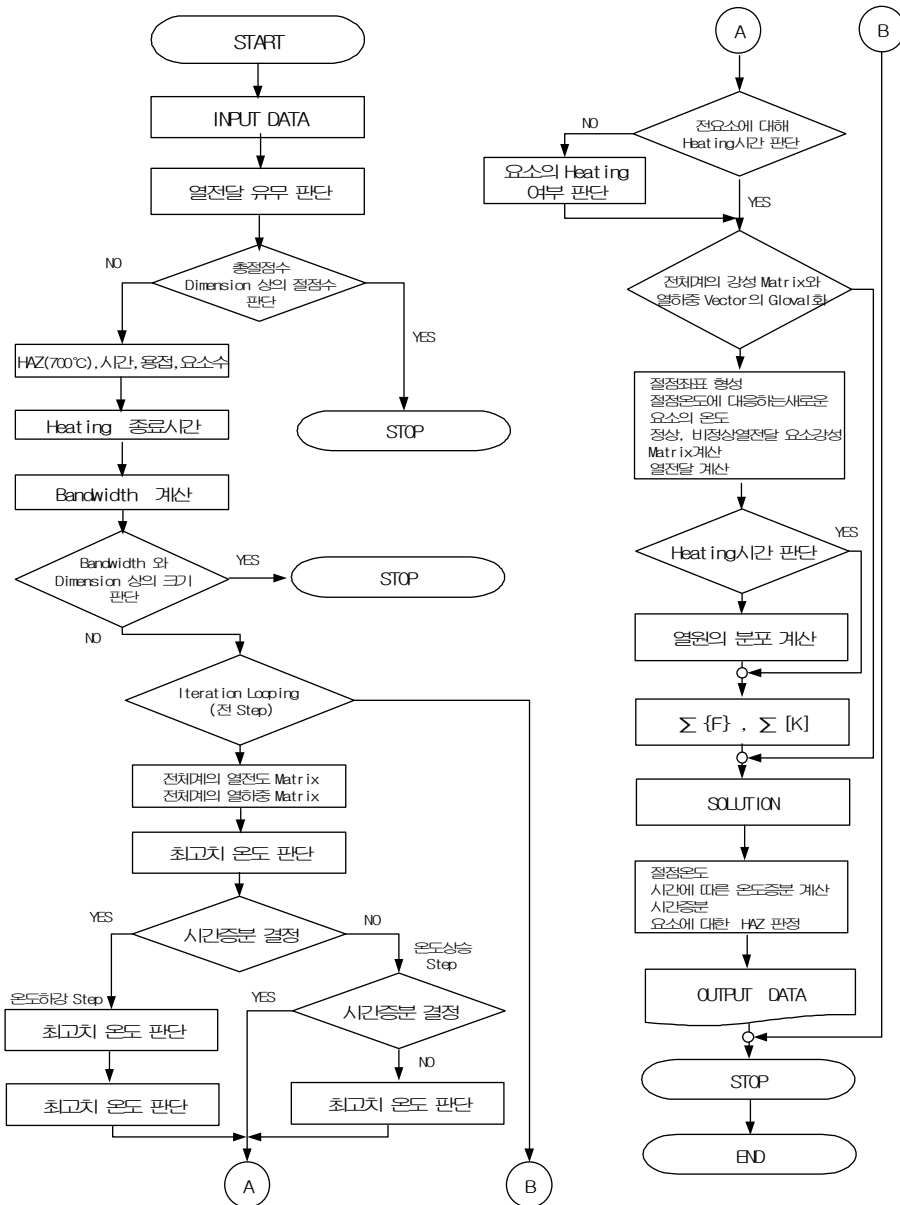


Fig. 2.2 Flow Chart of Program for Heat Conduction Analysis

## 2.2 용접잔류응력 해석

열응력 문제에서는 맨 처음 연속체의 비정상 열전도문제, 즉 시간과 함께 시시각각 변화하는 온도분포를 구하여야만 한다. 이러한 온도 변화에 따라 열 변형률 (Thermal strain)이 변화하기 때문이다. 더욱이, 각 요소를 구성하는 재료의 물리적 성질이 온도에 따라 변화하므로 이들의 영향을 고려한 절점력과 절점 변위의 관계식을 결정하여야 한다.

이에 따라, 본 연구에서는 용접잔류응력의 가장 일반적인 해석을 위하여 재료의 등방성(Isotropic)을 고려하여 탄성 및 소성 전 영역에 걸쳐 재료정수의 온도 의존성을 고려하였으며, 변형률 및 응력의 관계를 소성유동(Plastic flow)이론에 입각하여 증분으로 나타내었다<sup>10-13)</sup>.

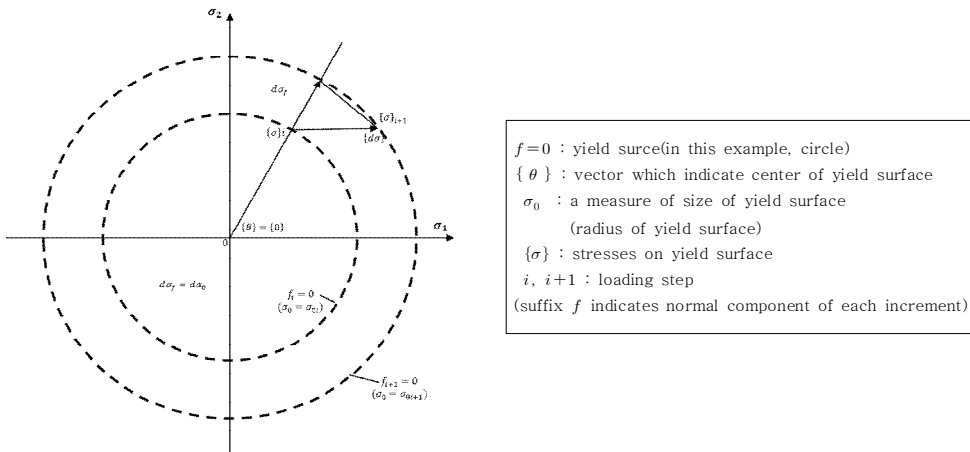


Fig. 2.3 Isotropic Workhardening Rule

또한 소성영역에서는 선형 등방경화 법칙을 고려한 Von-mises의 항복조건을 항복함수로 사용하였다. 즉, 소성유동 동안에 초기 항복곡면은 일정하게 팽창한다고 가정하였다.

## 2.2.1 열탄소성 이론의 유한요소 정식화<sup>10-13)</sup>

### (1) 2차원 열탄소성 이론의 유한요소 정식화(定式化)

- 열은 등방성(Isotropic)이므로 열에 의한 전단변형율은 발생하지 않기 때문에 이를 고려하여, 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\gamma_{xy} = 0 \quad (2\cdot16)$$

- 따라서, 열응력 문제에서의 변형율-변위 관계식은 다음과 같고,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2\cdot17)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2\cdot18)$$

- 응력-변형율 관계식은 다음과 같이 구성된다.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha T \quad (2\cdot19)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha T \quad (2\cdot20)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} = 0 \quad (2\cdot21)$$

여기서,  $\{\alpha\}T = \varepsilon^t$  : 열 변형율 (Thermal strain),  
 $\alpha$  : 순간 선팽창계수,  $T$  : 온도 이다.

- 따라서, 전 변형율 $\{\varepsilon\}$ 는 탄성변형율  $\{\varepsilon^e\}$ 와 열 변형율  $\{\varepsilon^t\}$ 의 합으로서,

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^t\} \quad (2\cdot22)$$

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

$$\{\sigma\} = [D^e] \{\epsilon^e\} \quad (2.23)$$

$$\{\sigma\} = [D^e] (\{\epsilon\} - \{\epsilon^t\}) \quad (2.24)$$

여기서,  $[D^e]$ : 탄성 응력-변형율 Matrix이다.

## (2) 응력-변형율 관계

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

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\epsilon\} - [C]dT \quad (2.25)$$

### 1) 탄성역

- 재료가 탄성거동을 하는 경우에는 다음과 같다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^t\} \quad (2.26)$$

$$\{d\sigma\} = [D^e] \{d\epsilon^e\}$$

여기서, 탄성변형율  $\{\epsilon^e\}$  : 응력  $\{\sigma\}$  및 온도  $T$ 의 함수이다.

- 탄성변형율의 증분은 아래와 같이 구성되고,

$$\{d\epsilon^e\} = \left\{ \frac{\partial \epsilon^e}{\partial \sigma} \right\} \{d\sigma\} + \frac{\partial \{\epsilon^e\}}{\partial T} dT \quad (2.27)$$

$$\{d\epsilon^e\} = [D^e]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT \quad (2.28)$$



- 전 변형을 증분은 아래식과 같다.

$$\{d\epsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \quad (2.29)$$

- 식을 정리하면, 탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e]\{d\epsilon\} - [D^e]\left(\frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\} + \{\alpha\}\right)dT \\ &= [D^e]\{d\epsilon\} - \left([D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E}\frac{E-E_1}{\Delta T}\{\sigma\}\right)dT \\ &= [D^e]\{d\epsilon\} - \{C\}dT \end{aligned} \quad (2.30)$$

여기서,  $E_1$  : 온도변화  $\Delta T$  후의 탄성계수,

$$\{C\} : [D^e]\alpha\frac{1}{E} - \frac{E-E_1}{\Delta T}\{\sigma\} \text{ 이다.}$$

## 2) 소성역

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

$$\begin{aligned} F &= f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\bar{\epsilon}^P, T) \\ &= \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\epsilon}^P, T) \end{aligned} \quad (2.31)$$

즉,  $dF = df - df_0 = 0$ 을 만족할 때 재료는 항복한다.

- 재료가 소성역에서 부하상태에 있을 경우에는  $dF=0$ 의 조건을 만족해야 한다.

$$dF = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} - \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\epsilon}^p} \right\}^T \{d\bar{\epsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT = 0 \quad (2.32)$$

여기서,  $\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T$  : 상당응력의 변화,  $\left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\epsilon}^p} \right\}$  : 가공경화,  $\left\{ \frac{\partial f_0}{\partial T} \right\}$  : 온도 증분이다.

- 소성역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜로 가정하면, 소성변형을 증분은 다음의 식이 된다.

$$\{d\bar{\epsilon}^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (2.33)$$

여기서,  $\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$  : 편차응력,  $\lambda$  : 양(+)의 스칼라양이다.

또한, 위의 식은 폰-미세스(Von-mises) 항복조건을 따른다.

- 전 변형율(Total strain) 증분  $\{d\epsilon\}$ 은 아래 식과 같이 탄·소성 및 열변형율의 합이 된다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\} \quad (2.34)$$

- 따라서, 소성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e] \{d\epsilon\} - [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \lambda - [D^e] \{\alpha\} dT \\ &\quad + \frac{d[D^e]}{dT} [D^e]^{-1} \{\sigma\} dT \end{aligned} \quad (2.35)$$

### (3) 절점력-절점변위 관계

- 물체력을 무시하고 가상일의 원리에 따라, 요소 등가절점력 증분  $\{dF\}$ 은 다음의 식이 된다.

$$\{dF\} = [K] \{dU\} - [dL] \quad (2-36)$$

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

$$\begin{aligned} \sum [K] \{dU\} - \sum \{dL\} &= \sum \{dF\} = 0 \\ \sum [K] \{dU\} &= \sum \{dL\} \end{aligned} \quad (2-37)$$

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

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

- 따라서, 본 연구의 용접잔류응력 해석용 열탄소성 프로그램은 위의 식에 의거하여 구성되었다.

## 2.2.2 열탄소성 해석용 프로그램

### (1) 프로그램 구성

- 1) 구성 : 용접잔류응력 및 변형을 해석용 프로그램은 1개의 Main문과 48개의 서브루틴 및 5개의 Function문으로 구성되어 있으며, 입력 데이터를 입력함으로써 손쉽게 수치 시뮬레이션을 수행하도록 구성되어 있다.
- 2) 입력 데이터 : 각 방향의 좌표수 지정, 경계조건, 절점번호 코딩(Coding)순서 지정, 용착금속 및 열영향부(HAZ) 요소, 절점의 시간대별 온도이력 등이다.
- 3) Main문 : 입력 데이터(Data)의 형식에 맞추어 데이터를 입력하면, 해석모델의 전 절점에 대해 요소좌표를 자동적으로 정의하여 형상함수 및 야코비언 (Jacobian) 매트릭스를 구성한다.

열분포 이력을 열하중으로 하므로 용접이 수행되는 과정의 온도상승 및 냉각에서의 온도이력을 입력하여 온도를 하중으로 치환하고, 요소의 강성 매트릭스를 구성한다.

재료의 항복응력, 소성경화계수, 열팽창을 등을 온도의 변화에 따라 계산하고, 요소의 강성 매트릭스를 중첩한다. 또한 평형방정식을 계산하여 응력, 소성변형을 등을 계산한다.

재료의 탄성, 소성 여부를 폰-미세스 항복함수를 토대로 판단하여 온도, 변위, 응력, 소성변형을 등을 출력하게 되고, 이러한 결과치가 중첩과정으로 반복하게 된다.

(2) 열탄소성 해석용 프로그램의 Flow-Chart

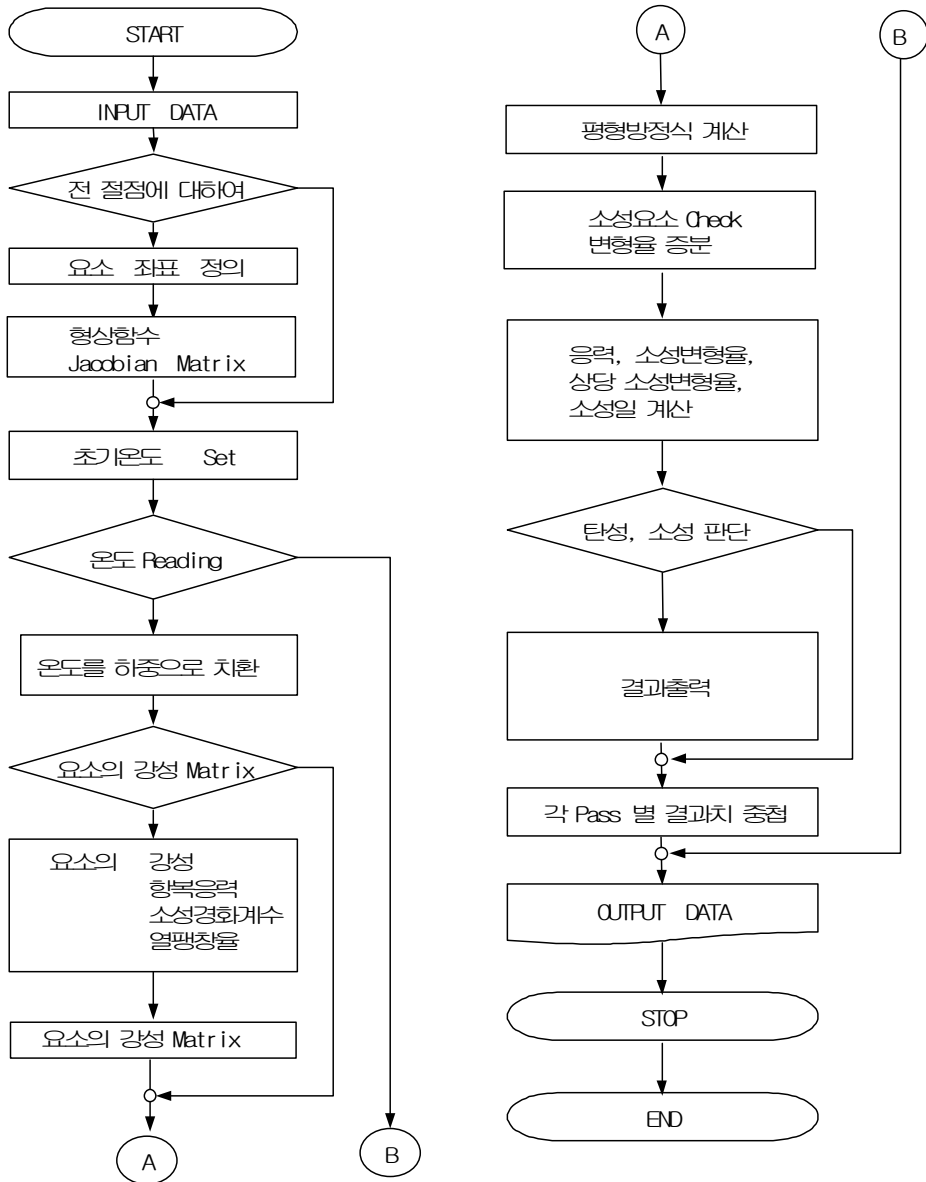


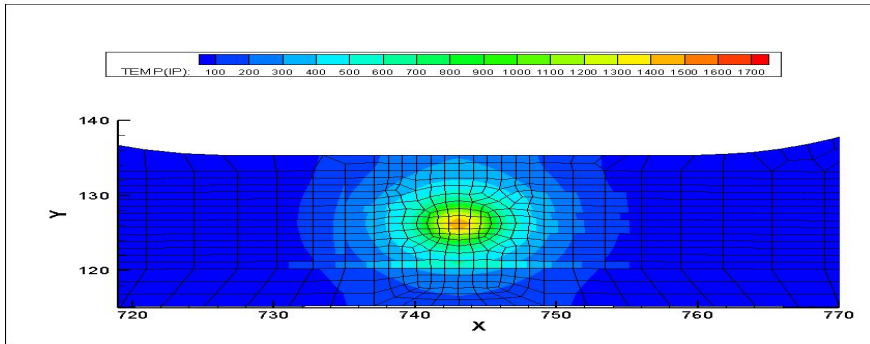
Fig. 2.4 Flow Chart of Program for Thermal Elastic-Plastic Analysis

## 제 3 장 유한요소해석의 결과 및 고찰

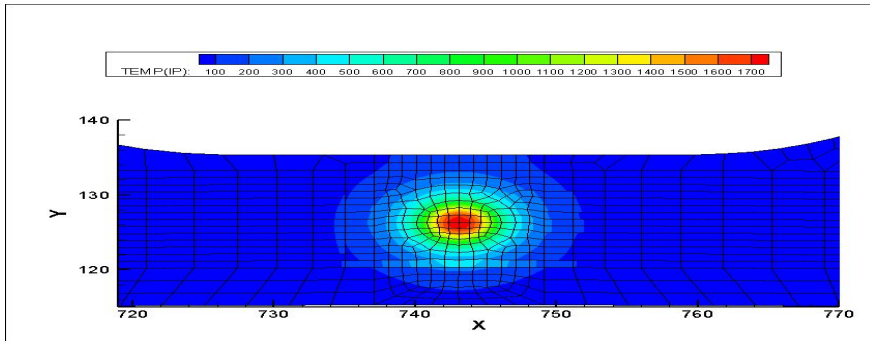
### 3.1 용접 방법에 따른 열분포 특성

자체 개발된 비정상 열전도 프로그램을 사용하여 점용접과 레이저 스티치 용접 시험편에 대한 각 용접부의 열적 특성을 해석한 결과를 비교하였다. 시험편의 온도 분포는 용접잔류응력에 기인하는 주요한 인자로 작용하기 때문에 온도 분포 특성을 고찰하였다. 해석결과에 따른 각 용접부의 온도 분포는 Fig. 3.1과 3.2에 나타내었다. Fig. 3.1은 점용접의 Single Pass 및 Multi Pass에 대해 나타내었고, Fig. 3.2는 레이저 스티치 용접의 Single Pass 및 Multi Pass에 대한 전 영역에 걸쳐 입열 후 냉각 시간별 온도 분포도를 보여주고 있다. 점용접부와 레이저 스티치 용접부의 Single Pass와 Multi Pass의 온도 분포를 비교해 보면 최고온도는 점용접보다 레이저 스티치 용접에서 더 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

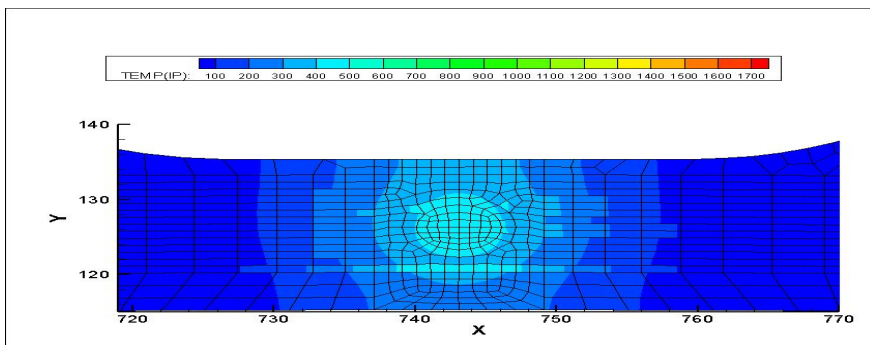
Fig. 3.3의 (a) 및 (b)는 점용접부 및 레이저 스티치 용접부의 Single Pass와 Multi Pass에 대한 용접부(Weld metal)의 시간에 따른 온도이력을 나타낸 것이다. Fig. 3.3 (a)의 시간에 따른 온도를 살펴보면, Single Pass의 경우 점용접이 레이저 스티치 용접보다 시간이 지나면서 온도 분포의 차가 더 커짐을 보이고 있고, 온도 분포 영역은 레이저 스티치 용접부에서 더 완만함을 보이고 있다. 그러나 온도 구배는 시간의 경과와 함께 점차 감소하여 온도 구배가 완만하게 나타남을 보이고 있다. 그리고 Fig. 3.3 (b)의 Multi Pass의 경우, 시간에 따른 온도를 살펴보면 Single Pass와 비슷한 온도 이력을 나타내었다.



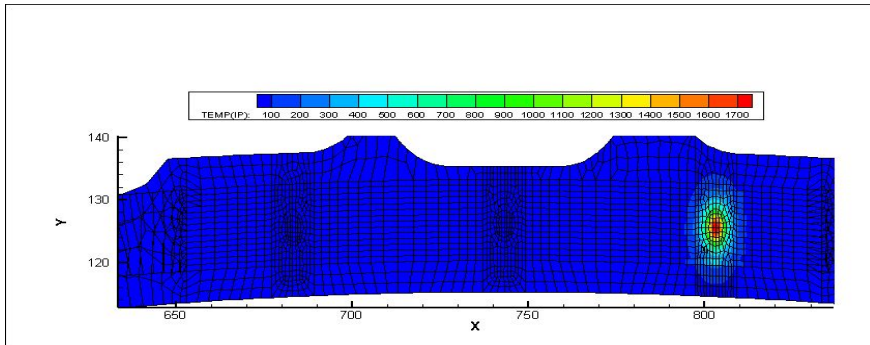
(a-1) Temperature Distribution after 1 sec - Single Pass



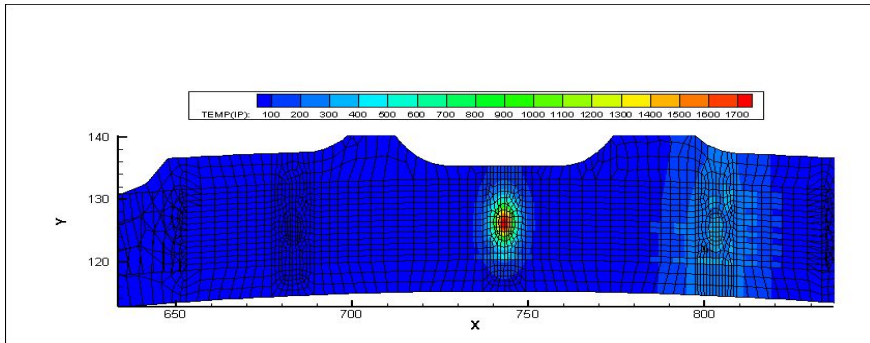
(a-2) Temperature Distribution after 1.5 sec - Single Pass



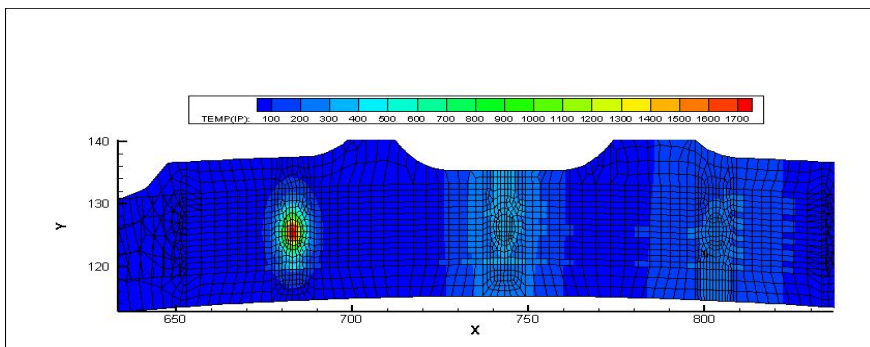
(a-3) Temperature Distribution after 4 sec - Single Pass



(b-1) Temperature Distribution after 1.5 sec - Multi Pass



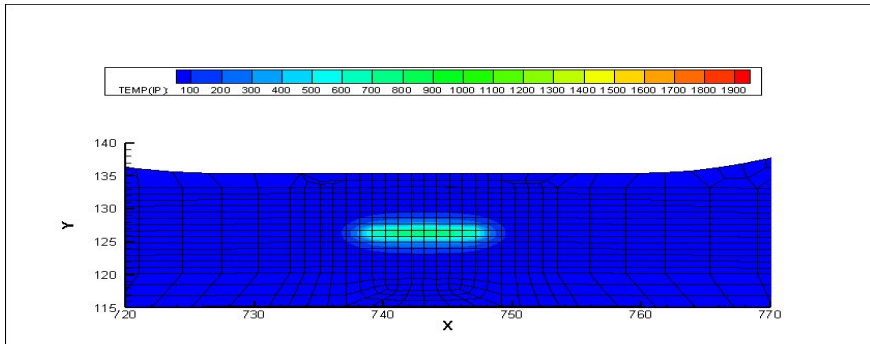
(b-2) Temperature Distribution after 7 sec - Multi Pass



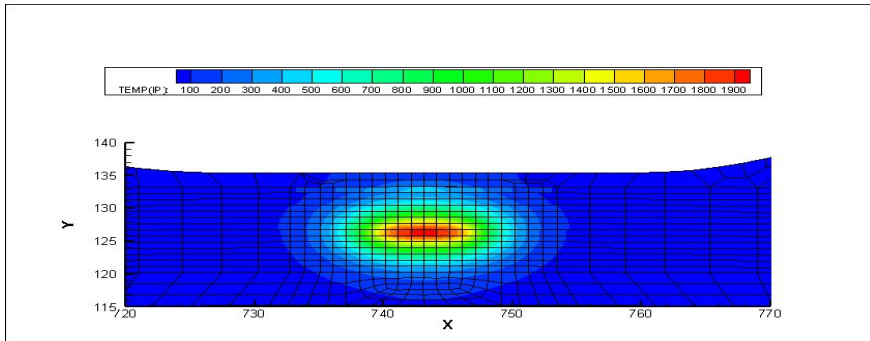
(b-3) Temperature Distribution after 10.5 sec - Multi Pass

**Fig. 3.1 Temperature of Distribution in the Spot Welding Model in Cooling Stage**

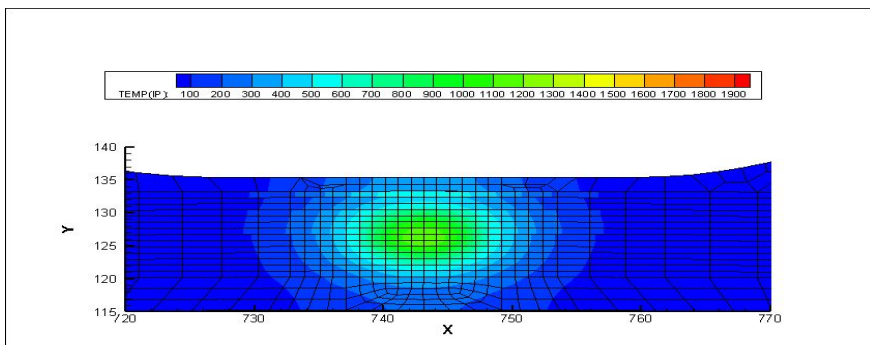




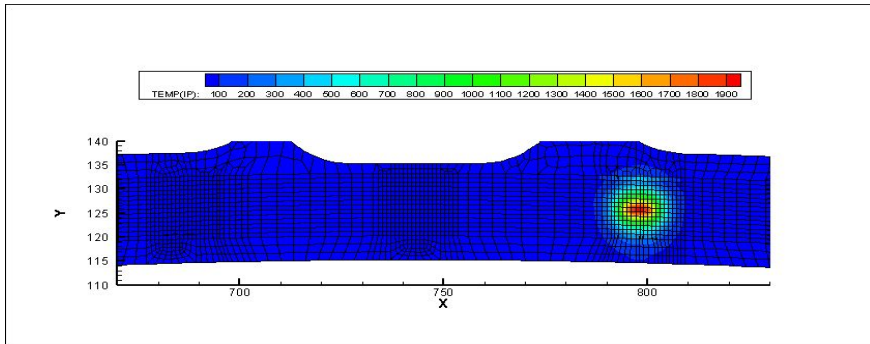
(a-1) Temperature Distribution after 0.2 sec - Single Pass



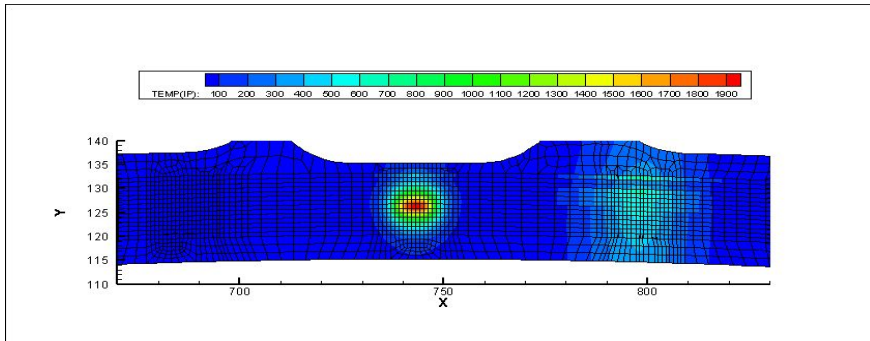
(a-2) Temperature Distribution after 1.2 sec - Single Pass



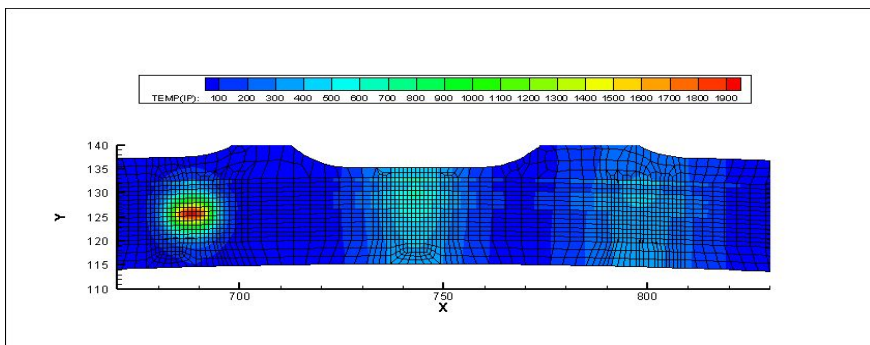
(a-3) Temperature Distribution after 2 sec - Single Pass



(b-1) Temperature Distribution after 1.2 sec - Multi Pass

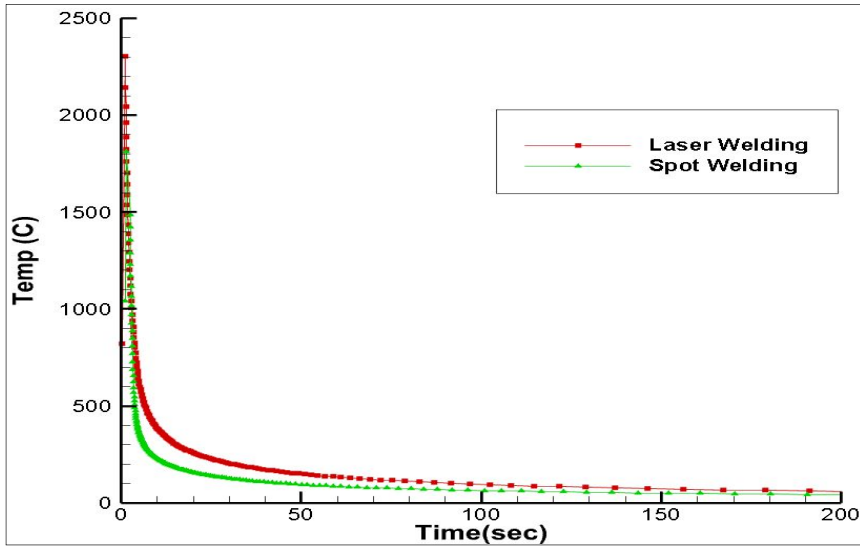


(b-2) Temperature Distribution after 4.4 sec - Multi Pass

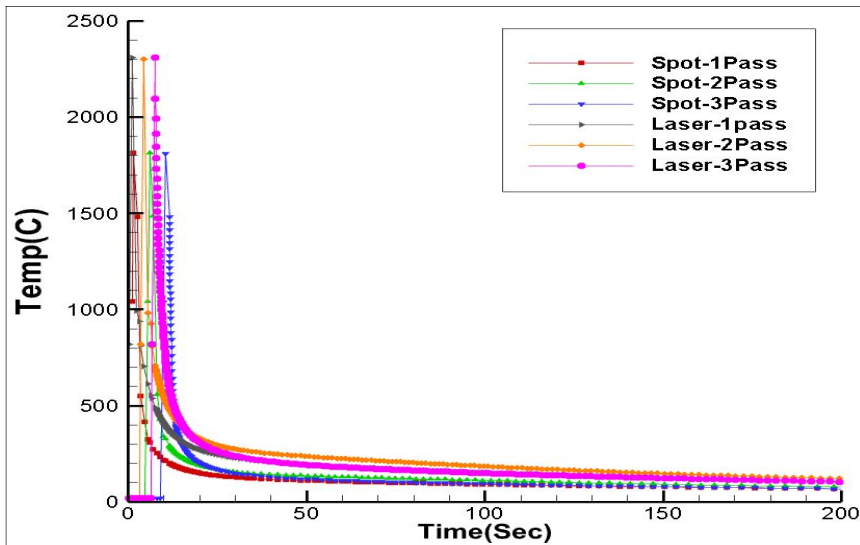


(b-3) Temperature Distribution after 7.6 sec - Multi Pass

**Fig. 3.2 Temperature of Distribution in the Laser Stitch Welding Model in Cooling Stage**



(a) Temperature History of Single Pass Welding with Time



(b) Temperature History of Multi Pass Welding with Time

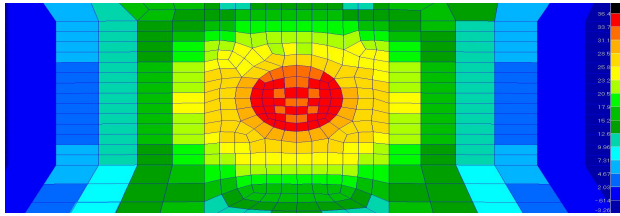
**Fig. 3.3 Temperature History of Spot and Laser Stitch Welding with Time**

### 3.2 용접 방법에 따른 역학적 특성

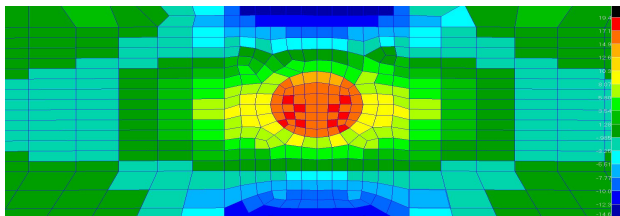
해석 시험편의 형상 및 크기는 용접부의 열분포 해석과 동일하게 채택하였고, 수치해석은 열분포 해석에서 수행한 온도상승 및 냉각과정의 열분포를 열하중으로 하여 용접구조물에 발생하는 역학적 메커니즘을 점용접과 레이저 스티치 용접에 대하여 유한요소법에 의한 용접잔류응력 해석용 프로그램을 사용해서 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 점용접과 레이저 스티치 용접에 대한 용접잔류응력의 크기, 분포 및 발생 기구를 해석하여 비교 분석하였으며 역학적 근거를 제시하였다.

또한 용접잔류응력 해석에서 사용한 경계조건은 시험편이 자유롭게 수축 및 팽창할 수 있도록 고려하여 수치해석을 수행하였다. 요소분할은 아이소-파라메트릭 요소를 도입하여 열분포 해석 모델과 동일하게 사용하였다. 이들 용접잔류응력 해석 결과에 대한 역학적 현상을 점용접과 레이저 스티치 용접의 시험편별로 분석하여 각각의 역학적 특성을 아래와 같이 규명하였다.

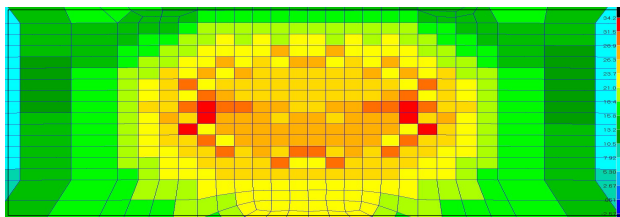
Fig. 3.4 및 Fig. 3.5의 용접잔류응력 해석 결과 값을 비교하면, Single Pass 점용접부에서  $\sigma_x$ 는 36.4kgf/mm<sup>2</sup>이며  $\sigma_y$ 는 19.4kgf/mm<sup>2</sup>가 발생하였다. Multi Pass에서는  $\sigma_x$ 는 41.3kgf/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_y$ 는 29.4kgf/mm<sup>2</sup>가 발생하였다. 레이저 스티치 용접부를 비교하였을 때, Single Pass에서  $\sigma_x$ 는 34.2kgf/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_y$ 는 14.1kgf/mm<sup>2</sup>가 발생하였으며, Multi Pass에서는  $\sigma_x$ 는 36.4kgf/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_y$ 는 24.3kgf/mm<sup>2</sup>가 발생하였다. Single Pass 및 Multi Pass 용접부를 비교했을 때, Single Pass 용접부보다 Multi Pass 용접부의 마지막 Pass에서 다소 높은 응력 값을 나타내었다.



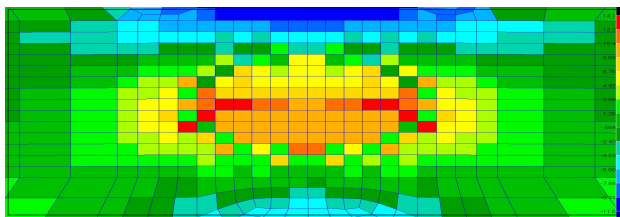
(a-1) Welding Residual Stress Distribution in the Single Spot Welding ( $\sigma_x$ )



(a-2) Welding Residual Stress Distribution in the Single Spot Welding ( $\sigma_y$ )

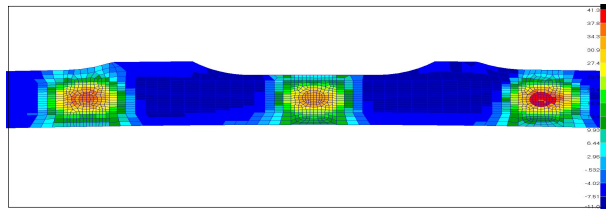


(b-1) Welding Residual Stress Distribution in the Single Laser Stitch Welding ( $\sigma_x$ )

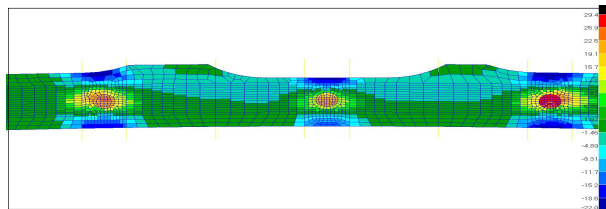


(b-2) Welding Residual Stress Distribution in the Single Laser Stitch Welding ( $\sigma_y$ )

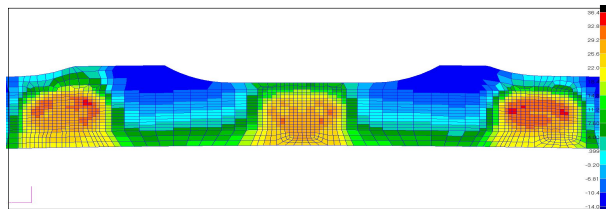
**Fig. 3.4 Comparison of Welding Residual Stress Distribution in the Single Pass Welding**



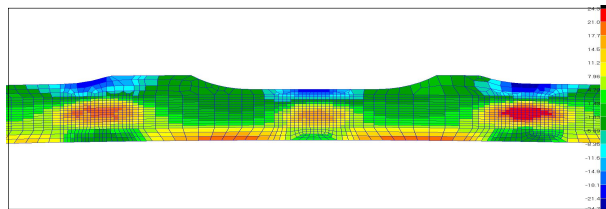
(a-1) Welding Residual Stress Distribution in the Multi Spot Welding ( $\sigma_x$ )



(a-2) Welding Residual Stress Distribution in the Multi Spot Welding ( $\sigma_y$ )



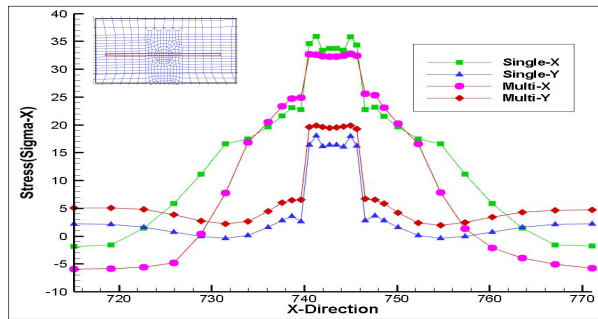
(b-1) Welding Residual Stress Distribution in the Multi Laser Stitch Welding ( $\sigma_x$ )



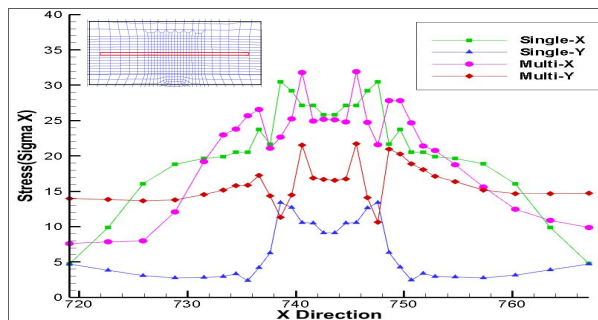
(b-2) Welding Residual Stress Distribution in the Multi Laser Stitch Welding ( $\sigma_y$ )

**Fig. 3.5 Comparison of Welding Residual Stress Distribution in the Multi Pass Welding**

Fig. 3.6은 Multi Pass와 Single Pass의 값을 비교하기 위해 같은 위치 즉, Multi Pass의 중간 위치가 Single Pass와 위치가 같으므로 중간 위치에서 값을 비교하였다. 먼저 점용접부를 비교하였을 때,  $\sigma_x$ 에서는 Single Pass가 높게 나온 반면  $\sigma_y$ 에서는 Multi Pass에서 높게 나왔다. 그리고 레이저 스티치 용접부를 비교해보면  $\sigma_x$ 는 비슷하게 나왔으나  $\sigma_y$ 는 Multi Pass에서 높게 나왔다. 이는 역학적 구속의 크기가 점용접부와 레이저 스티치 용접부간에 서로 달라 발생하는 현상인 것으로 보인다. 그리고 Multi Pass에서 높게 나온 이유는 후행용접부가 선행용접부의 영향을 받았기 때문이라 사료된다. 이러한 결과로부터 점용접부와 레이저 스티치 용접부의 잔류응력 값을 비교해 보면 전반적으로 점용접법이 레이저 스티치 용접법보다 높게 나온 것을 확인할 수 있다.



(a) Residual Stress of Spot Welding



(b) Residual Stress of Laser Stitch Welding

**Fig. 3.6 Comparison of Welding Residual Stress Distribution in the Single and Multi Pass Welding**

### 3.3 외력을 적용한 역학적 특성

자동차용 부품 카울(Cowl) 용접부에 외력이 작용할 경우 앞 절에서 해석한 용접 잔류응력이 어떻게 변화 하는지를 검토하기 위하여 용접 구조물에 외력을 주어 해석을 수행하였다. 그리고 용접 구조물의 안정성을 정량 및 정성적으로 평가하고자 하였다. 용접 구조물의 안정성을 평가하기 위해 앞 절에서 해석한 용접잔류응력 해석 결과를 초기값으로 적용하였으며, 외력을 적용하여 용접 구조물의 잔류응력 재분포를 고찰하였다. 외력은 Fig. 3.7과 같이 Y방향으로 200kg과 400kg을 적용하는 것으로 가정하여 구조해석을 수행하였다.

Fig. 3.8은 점용접부의 외력을 주었을 때 외력의 변화를  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 로 나타내었고, Fig. 3.9는 레이저 스티치 용접부의 외력의 변화를  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 로 나타내었다. 그래프의 위치는 Fig. 3.6의 위치와 비교를 위해 동일한 위치를 선정하였다. Fig. 3.8의 점용접부에서  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 의 그래프를 보면 외력이 증가하면서 모재부는 인장응력이 증가하며, 열영향부는 압축응력으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 용접부에서  $\sigma_x$ 는 인장응력이 약간 줄어든 반면  $\sigma_y$ 는 인장응력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3.9의 레이저 스티치 용접부의  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 의 그래프를 보면 점용접부와 같이 외력이 증가하면서 모재부는 인장응력이 증가하고 있으며 열영향부는 압축응력으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 용접부를 보면  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$  모두 인장응력이 증가 하는 것을 볼 수 있다.

따라서 점용접부와 레이저 스티치 용접부를 비교해 보면, 점용접부는 외력의 변화에 따라 응력이 열영향부에서 급격하게 변하는 반면 레이저 스티치 용접부는 응력이 점용접부보다 외력에 의한 변화가 완만함을 보이고 있다.



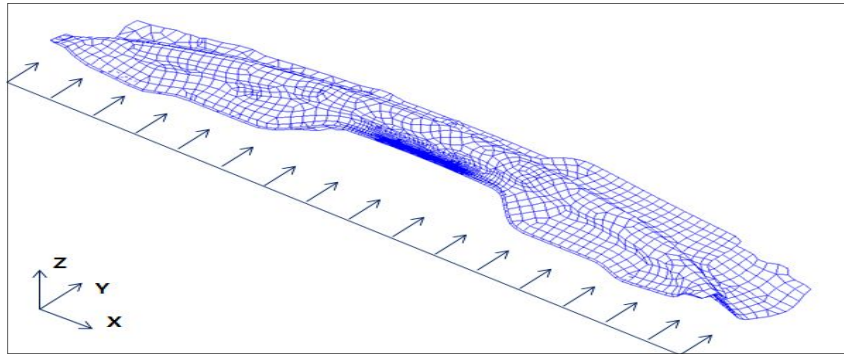
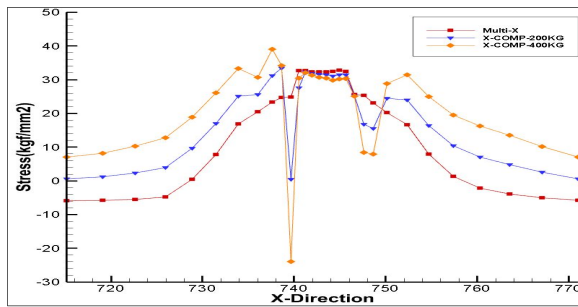
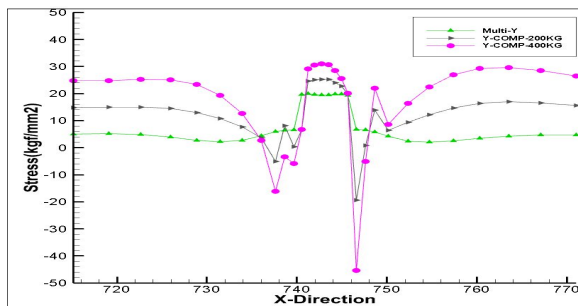


Fig. 3.7 External Force for Model

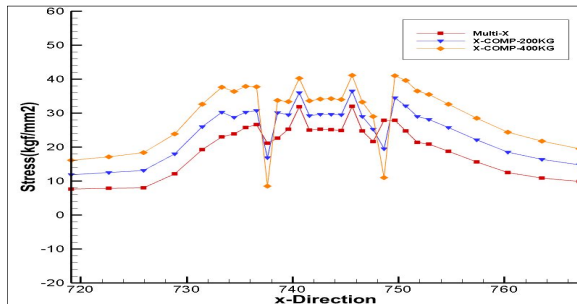


(a)  $\sigma_x$

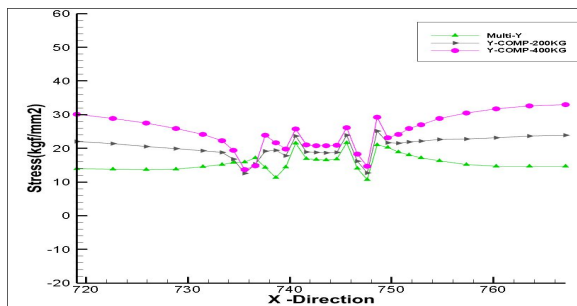


(b)  $\sigma_y$

Fig. 3.8 Stress Distribution of Spot Welding by Tensile Load Change



(a)  $\sigma_x$



(b)  $\sigma_y$

Fig. 3.9 Stress Distribution of Laser Stitch Welding by Tensile Load Change

## 제 4 장 결론

본 연구에서는 자동차용 부품 카울에 적용되는 아연도금강판에 대하여 각 공정별 점용접과 레이저 스티치 용접의 유한요소해석에 의한 용접 시 발생하는 열 이동현상과 이에 따른 응력 발생의 특성을 명확하게 고찰할 수 있었다. 또한 열분포 특성, 잔류응력 등을 고찰함으로써 입열에 의한 재료의 역학적 열화정도를 평가할 수 있었다. 또한 용접잔류응력을 적용한 외력의 변화에 따른 용접구조물의 안정성을 평가할 수 있었다.

- 점용접부와 레이저 스티치 용접부의 시간에 따른 온도를 살펴보면, 점용접이 레이저 스티치 용접보다 시간이 지나면서 급격한 온도를 보였으며, 온도 분포 영역은 레이저 스티치 용접부에서 더 완만함을 보이고 있다. 그러나 온도 구배는 시간의 경과와 함께 점차 감소하여 온도구배가 완만하게 나타남을 보였다.
- 용접부의 잔류응력 값의 크기를 각 성분별로 살펴보면, 점용접부에서  $\sigma_x$ 는 Single Pass,  $\sigma_y$ 는 Multi Pass에서 높게 나왔다. 그리고 Laser Stitch 용접부는  $\sigma_x$ 는 비슷하게 나온 반면  $\sigma_y$ 는 Multi Pass에서 높게 나왔다. 이는 역학적구속의 크기가 점용접부와 레이저 스티치 용접부간에 서로 달라서 발생하는 현상인 것으로 보이며, 후행용접부가 선행용접부의 영향을 받아 Multi Pass에서 잔류응력이 높게 나온 것으로 보인다.
- 점용접부 및 레이저 스티치 용접부의 Single Pass와 Multi Pass의 잔류응력 값을 비교하였을 때, 전반적으로 점용접법이 레이저 스티치 용접법보다 약 10% 정도 높게 나온 것을 확인 할 수 있었다.
- 외력을 적용한 잔류응력의 변화에서는 두 용접부 모두 외력이 증가하면서 모재부는 인장응력이 증가하였고, 열영향부는 압축응력이 증가하였다.

- 외력에 변화에 따른 응력의 변화를 보면 점용접부는 열영향부에서 응력이 급격하게 변하는 반면 레이저 스티치 용접부는 응력이 점용접부보다 외력에 의한 변화가 완만한 양상을 나타내었다.
- 각 공정별 해석 결과를 종합해 보면 점용접법보다 레이저 스티치 용접법이 카울의 제작에 적용하였을 때 구조적으로 안정됨을 확인할 수 있었다.

## Reference

- [1] 김익수 : 탄소섬유강화 복합재(CFRP)산업의 동향과 기술개발 방향, KEIT PD Issue Report, 15-6, 101-121, 2015
- [2] 정현상 : 자동차 경량화 용·복합소재 트렌드 분석-트렌드 1. 자동차 산업, 경량화기술이 중요, 2013정보분석보고서, 35, 5-19, 2013
- [3] VW Golf V Laser Processing Concept and Production Implementation Report
- [4] Hyeong-Il Kim, Han-Sur Bang, Hee-Seon Bang, Byung-Ho An : Mechanical Characteristics on Cowl by Nd:YAG Laser Stitch Welding, Abstracts of the 2012 Autumn Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, 57, 58-58, 2012
- [5] T.H. Kim, J. Suh, H.S. Kang, M.Y. Lee, Y.S. Lee : A Study on Effect of Shielding Gas in Fiber Laser Welding of Zinc Coated Steel for Automobile, Abstracts of the 2009 Spring Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering, 397-398, 2009
- [6] M.M.S. Gualini, F. Grassi : Experimental Result of Laser Welding of Zinc Coated Steel Sheets with a New Method, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics, 2003
- [7] Cheol-Hee Kim, Woong-Yong Choi, Hyun-Byung Chae, Jeong-Han Kim, Se-Hun Rhee : A Study on CO<sub>2</sub> Laser-TIG Hybrid Welding of Zinc-Coated Steel Sheet-Part 1: Analysis of Welding Phenomena, Journal of Korean Welding and Joining Society, 24-4, 22-26, 2006

- [8] Hyun-Uk Seol, Mun-Jong Song, Kyu-Hyun Lee, Mun-Yong Lee, Sok Won Kim : Research on Laser Welding Properties of Zinc-Coated Automobile Steel Sheets using Laser Dimple, Abstracts of the 2011 Autumn Annual Meeting of Korean Society of Automotive Engineers, 2332-2332, 2011
- [9] Jae-Seon Chu, Hee-Seon Bang, Rajesh.S.R, Han-Sur Bang : A Study on the Nd:YAG Laser Stitch Welding of Automotive High Strength Steel Sheet, Abstracts of the 2006 Autumn Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, 213-215, 2006
- [10] H. S. Bang : A Study on the Two Dimensional Unstationary Heat Conduction during the Welding on Thin Plate by F.E.M., Jouranl of the Society of Naval Architects of Korea, 27-4, 44-50, 1990
- [11] Han-Sur Bang, Chong-In Oh, Hee-Seon Bang, Chan-Seung Ro, Yoon-Ki Lee, Hyun-Soo Bong, Jeong-Soo Lee : The Comparison of the Themal and Mechanical Characteristic in Butt Joint for Ship Structure Thick Plate AH32 Steel by SAW & Hybrid (CO<sub>2</sub> Laser+MIG) Welding, Korean Welding and Joining Society, 29-35, 2008
- [12] Hee-Seon Bang : A Study on the Thermal and Mechanical Characteristics of Resistance Multi-Spot Welded Joints, Graduate School of Chosun University, 2001
- [13] Min-Sung Gho : A Study on the Mechanical Behavior of Weld Part of Ultra Thickness Plate by using EGW (Electro Gas Welding) and FCAW (Flux Cored Arc Welding), Graduate School of Chosun University, 2010