

# 유한요소법을 이용한 용접부의 열전달 및 잔류응력 해석에 관한 연구

김일수\*, 김인권\*\*, 문채주\*\*\*, 정영재\*\*\*\*, 안영호\*\*\*\*\*

## A Study on Analysis of Heat Transfer and Residual Stress on the Weld Zone using FEM

Ill-Soo Kim\*, In-Kweon Kim\*\*, Chac-Joo Moon\*\*\*, Young-Jae Jeong\*\*\*\*, Young-Ho An\*\*\*\*\*

### Abstract

This paper represents to develop a computer software system which is capable to analyze the phase transformation of high strength steel(BV-AH32) and to predict heat transfer and welding residual stress due to phase transformation during Gas Metal Arc(GMA) welding. The developed model was considered temperature dependent properties such as young's modules, coefficient of thermal expansion and yield stress as well as the double ellipsoidal heat distribution by the moving arc. From the results, it was found that the longitudinal and transverse residual stresses calculated by the coupled analysis of heat transfer, residual stress and phase transformation showed good agreement with the experimental data. In addition, the temperature distribution as well as longitudinal and transverse residual stresses of weldment by the 1-pass and 2-pass of welding were also determined.

**Key Words** : Phase transformation, Heat transfer, Residual stress, GMA welding, Latent heat

### 1. 서론

일반적으로 용접공정은 재료를 부분적으로 가열하여 접합시키고 냉각하는 공정으로, 재료내부에 불 균일한 온도 분포가 형성된다. 재료내부의 불 균일한 온도분포는 각 위치에서 열팽창량이 다르게 됨으로 내부에 열팽창 및 수축에 의한 열변형 및 열응력이 발생하여, 변형과정에서 소성영역이 생기면서 냉각 후에 응력 등이 잔류하게 된다. 용

접 중 발생하는 잔류응력의 원인 및 방지대책에 관해서는 과거부터 많은 연구가 진행되어 왔고, 현재 연구가 활발히 행해지고 있다.<sup>(1-3)</sup> 하지만 실제 용접구조의 기하학적 형상은 복잡하고, 용접공정은 재료특성의 온도의존이나 소성변형 등을 포함한 비선형 문제이기 때문에 이론적으로 정확한 해를 얻는 것은 거의 불가능하다.<sup>(4-5)</sup>

최근 모든 산업분야에서 국내외적으로 기술경쟁이 심화되고 있는 바 용접분야에서도 컴퓨터 시뮬레이션을 응용

\* 목포대학교 공과대학 기계공학과  
\*\* 조선대학교 항공우주공학과  
\*\*\* 목포대학교 공과대학 전기공학과  
\*\*\*\* 목포대학교 공과대학 대학원  
\*\*\*\*\* 목포기능대 전산응용기계과

한 공정 및 재료개발의 실용화가 적극 추진되고 있다. Rosenthal<sup>6)</sup>, Hibbitt and Marcal<sup>7)</sup> 등은 해석적인 방법으로, Ueda, Kamtekar<sup>8-10)</sup>은 수치해석 방법으로 용접열원 및 용접강도를 분리하여 해석하였으며, Penso<sup>11)</sup>은 용접 잔류응력에 국한하여 용접부의 강도를 평가하였다. 또한 Bloom<sup>12)</sup>은 용접부의 파괴강도에 한정된 연구를 수행하였다. 하지만 용접부에 발생하는 복잡한 역학적 현상으로 인하여 국내외에서는 관련연구는 그다지 활발하지 못하였으며, 단지 부분적으로 용접열, 잔류응력 및 피로 파괴강도에 대한 이론에 기초한 해석해와 수치해석법에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 하지만 상변태를 고려한 용접부의 잔류응력 및 변형에 관한 연구는 전무한 실정이며 이에 대한 연구가 시급히 대두되고 있다.

금속 상변태를 수반하는 용접공정에 대한 컴퓨터 시뮬레이션에는 열전달, 금속 상변태 및 기계적인 현상간의 상호관계에 대한 정밀한 이론적 접근이 요구된다. 상변태는 용접공정에서 응력 발생의 주요요인으로 작용하게 되는데 이는 고전적인 열변형 뿐 아니라 변태시 체적변화를 수반하고, 재료거동이 변태소성(transformation plasticity)을 유발하면서 조직을 구성하는 상(phase)에 크게 의존하기 때문이다. 열해석은 상변태 현상이 온도 및 온도 변화율에 크게 영향을 미치며, 잠열효과 및 상에 의존적인 열물성치(property)에 의해 온도분포, 역학적 해석은 잔류응력 및 변형량을 예측하게 된다.

한편, 금속 상변태에는 고전적인 개념의 열변형 외에 체적 변화가 수반되는데 강의 경우 입열시 펄라이트-페라이트(pearlite-ferrite) 조직에서 오스테나이트(austenite)로의 변태가 일어나면서 체적 감소가 일어나고, 냉각시에는 오스테나이트(austenite)로부터 펄라이트-페라이트(pearlite-ferrite), 베이나이트(bainite) 또는 마르텐사이트(martensite)로의 변태가 냉각속도에 의존하면서 발생하여, 이로 인해 체적 팽창이 일어나게 된다. 또한, 그 동안의 연구 결과로부터 냉각시 변태가 일어나게 될 때 매우 작은 응력에 의해 잔류변형 즉 변태 소성변형률(transformation plastic strain)이 유발된다는 것을 알 수 있다. 하지만 국내외를 막론하고 용접 중 발생하는 잔류응력 및 변형을 계산하는 컴퓨터 프로그램에 위의 두 가지 현상을 체계적이고 일관적인 프로그램이 아직까지 개발되지 못하고 있는 실정이다. 또한 잔류응력을 제거하기 위하여 용접 후열처리(post-heating treatment)를 하고 있는데, 이 후열처리재의 통계적 성질 또한 밝혀지지 않고 있는 실정이다.

본 연구는 용접공정에서 상변태를 고려한 용접부의 열전달 및 잔류응력 해석과 관련하여 열전도 및 잠열 탄소성이론에 의한 용접강도(열분포, 용접잔류응력 및 용접변형)를 평가할 수 있는 열-기계적 해석용 컴퓨터 시스템을 개발하고, 이 시스템을 이용하여 용접부의 가열 및 냉각 열이력(thermal history)에 따른 상변태의 수치적 모사 및 구조물의 취약부인 용접부에 발생하는 잔류응력과 변형 및 미세조직 변화의 정량적 해석을 수행하고자 한다. 또한, 개발된 컴퓨터 시스템을 이용하여 두께가 12mm인 모재에 맞대기 용접(butt welding)을 모델로 하여 용접시 다층용접부위 온도 분포 및 온도 분포 변화에 따른 잔류응력 및 용접부의 취약부를 예측하고 실험결과값과 비교·분석하였다.

## 2. Simulation 모델 개발 및 수치해석

### 2.1 모델 개발

열전달 방정식은 다음과 같이 표현된다.<sup>13-14)</sup>

$$\frac{dH}{dt} - \text{div}(\lambda \Delta T) - q = 0 \quad (1)$$

여기서, H : Enthalpy at temperature T

$\lambda$  : Heat conductivity

q : Volumetric heat source

열전달 해석에서 상변태(phase transformation)를 고려하기 위하여 H와  $\lambda$ 는 다음과 같은 간단한 혼합법칙(mixture law)에 따라 구할 수 있다.

$$H = \sum_{\text{phase}} p_i H_i \quad (2)$$

$$\lambda = \sum_{\text{phase}} p_i \lambda_i \quad (3)$$

$$\sum_{\text{phase}} p_i = 1 \quad (4)$$

여기서,

$H_i$  : Enthalpy of phase i at temperature T

$\lambda_i$  : Heat conductivity of phase i at temperature T

$p_i$  : Separation ratio of phase I

식 (2)~(4)를 식 (1)에 대입하면 열전도 방정식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.<sup>15)</sup>

$$\left( \sum_{phase} p_i (\rho C)_i \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \text{div} \left( \left( \sum_{phase} \dot{p}_i \lambda_i \right) \text{grad} T \right) - q + \sum_{phase} \dot{p}_i H_i = 0 \quad (5)$$

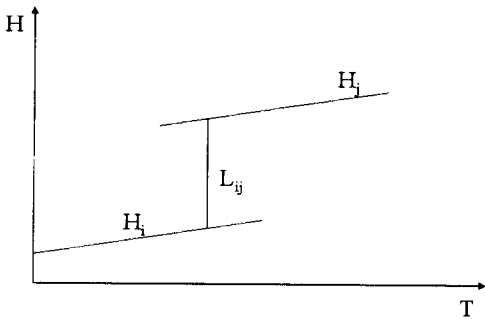
여기서,

$$(\rho C)_i = \frac{\partial H_i}{\partial T} : \text{Specific heat at phase } i$$

$$(\rho)_i : \text{Density at phase } i$$

$$\sum_{phase} \dot{p}_i H_i : \text{Volumetric heat source (Latent heat)}$$

추가로 잠열(latent heat)은 체적 열원으로 다음 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 각 상(phase)의 정의를 온도의 변화에 엔탈피 변화로 정의하였다. 변태시 가열 및 냉각의 두 과정이 모두 적용되며, 변태가 동시에 일어나게 된다. 2개 이상의 상(phase)에 대하여 컴퓨터 모델링은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.



- $H_i(T)$  : enthalpy of phase  $i$  at temperature  $T$
- $L_{ij}(T)$  : latent heat of transformation  $i \Delta j$

Fig. 1 Variation of enthalpy with temperature for a definition of each phase

$$\dot{p}_i = \sum_{phase \ i \neq j} A_{ij} \quad (6)$$

여기서,

$$A_{ij} = K_{ij} p_i - K K_{ij} p_j \quad \text{if } (K_j p_i - K K_{ij} p_j) > 0 \quad (i \rightarrow j) \text{ Transformation}$$

$$\begin{aligned} & -K_{ji} p_j - K K_{ij} p_i && \text{if } (K_j p_i - K K_{ij} p_j) > 0 \\ & && (j \rightarrow i) \text{ Transformation} \\ & 0 && \text{if } (K_{ij} p_i - K K_{ij} p_j) \leq 0 \\ & && \text{and} \\ & && \text{if } (K_{ji} p_j - K K_{ij} p_i) \leq 0 \\ & && \text{No. transformation between phase } i \text{ and } j \end{aligned}$$

또한,  $K_{ij}$ ,  $L_{ij}$  계수는 연속 냉각 변태도(continuous cooling transformation, CCT) 곡선으로부터 얻으며 행렬  $A_{ij}$ 는 컴퓨터에서 계산하도록 하였고, 금속 상변태시 결정구조의 변화로 인해 체적 변화가 수반되는데 이를 포함한 변형량을 포함한 총 열변형량은 다음과 같다.<sup>(16)</sup>

$$\epsilon^{th}(T) = \sum_{phases} p_i \epsilon_i^{th}(T) \quad (7)$$

여기서  $\epsilon^{th}(T)$ 는 금속 상(phase)  $i$ 의 열변형을 나타낸다. 위에서 주어진 식 (7)의  $\epsilon^{th}(T)$ 은 거시적으로 등방성(isotropy)이라고 가정하였다.

이상적인 소성거동에 대하여 방정식은  $\sigma_u$ 은 두상의 혼합체를 포함한 극한응력(ultimate stress)을 Von Mises stress의 최대치로 가정하면 다음과 같다.

$$\sigma_u = (1 - f(p_2)) \sigma_1^y + f(p_2) \sigma_2^y \quad (8)$$

여기서,  $\sigma_i^y$ 는  $i$ 상의 강도이다.

소성 변형률은 응력 변화율, 온도 변화율 및 상변태 속도 3가지에 모두 비례하므로 그 합으로 표현하여야 한다.  $\sigma_{eq}$ 를 Von Mises Stress로 나타내고,  $\sigma_{eq} < \sigma_u$ 일 때 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\epsilon^p = (\dot{\epsilon}^{cp}) + (\dot{\epsilon}^{lp}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (\dot{\epsilon}^{cp}) &= \frac{3(1 - p_2)g(p_2)}{2\sigma_1^y} \frac{g(p_2)}{E} S \dot{\sigma}_{eq} \\ &+ \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sigma_1^y} p_2 \text{Log} P_2 S \dot{T} \end{aligned}$$

$$(\dot{\epsilon}^{lp}) = -\frac{3\Delta\epsilon_{1 \rightarrow 2}^{th}}{\sigma_1^y} Sh \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \right) \text{Log} P_2 - P_1$$

여기서,

$E$  : Young's modules

$\alpha_1$  :  $i$ 상의 열팽창계수

$\Delta \epsilon_{1 \rightarrow 2}^{th}$ : Volumetric expansion from phase 1 to 2  
 S : Deviatoric stress tensor  
 $g(p_2)$ : Solved from theoretical and numerical function

$$h \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \right) = 1 \quad \text{if} \quad \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \right) \leq \frac{1}{2}$$

$$h \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \right) = 1 + 3.5 \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} - \frac{1}{2} \right) \quad \text{if} \quad \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \right) \geq \frac{1}{2}$$

또한  $\sigma_{eq} = \sigma_u$  인 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}^{cp} + \dot{\epsilon}^{lp} = \dot{\lambda} S \quad (10)$$

여기서  $\lambda$  는 전형적인 소성이론(plastic theory)으로 구한다.<sup>(17)</sup>

### 2.2 재료 물성치 및 경계조건

용접시 재료는 상온에서부터 용접이상의 고온까지 변화하므로 정확한 이론적인 용접공정 해석을 위하여 온도에 따른 물성치의 변화를 고려하였으며, 용접구조물의 온도 상승 및 냉각과정에서 열분포를 하중으로 하는 잔류응력 등의 해석을 위하여 탄성 및 소성의 전 영역에 걸쳐 온도의존성에 따른 재료의 항복강도, 탄성계수 및 열팽창계수 등은 Fig. 2를 이용하여 구했다. 또한 용체에 응력이 걸리는 것을 방지하기 위하여 액상에서는 열팽창계수의 값을 0으로 하고, 용가재(filler metal)는 같은 물성치와 동일한 것으로 가정하였으며, 잠열의 영향은 엔탈피법을 이용하여 해석하였다. 실험에 사용된 재료는 두께가 12mm의 고장력강인 BV-AH32를 선정하였으며, 재료의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다.

컴퓨터 시뮬레이션에 의해 모재의 연결부는 90°의 개섩각을 가진 V홈(groove)이며, 두 번의 패스에 의하여 채워지게 된다. 실제 용접작업에서 이동하는 아크에 의한 열분포(heat flow)는 일반적으로 3차원적이기 때문에 용접작업을 완전하게 모사하기 위해서는 3차원 해석이 필요하지

Table 1 Chemical compositions of BV-AH32 steel(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
0.16	0.42	1.5	0.018	0.005	0.03	0.03	0.02	0.03

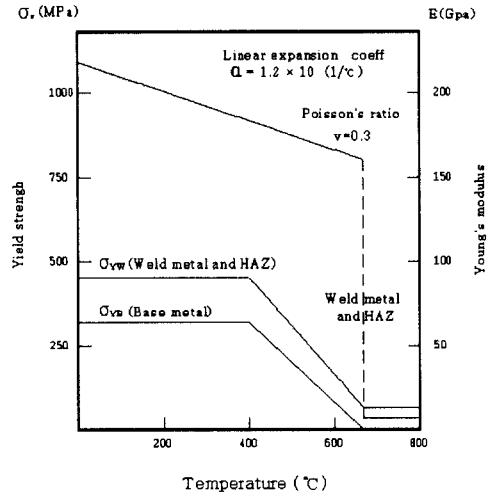


Fig. 2 Material properties<sup>(10)</sup>

만, 3차원 해석은 2차원 해석에 비해 각 요소 절점의 자유도가 증가하고 전체요소의 개수 또한 급격하게 증가하므로 수렴성이 매우 나쁘며 수렴시간이 매우 길어지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 2차원(2-dimension)으로 모델링하여 용접방향에 수직한 단면을 해석대상으로 하였다.

용접부의 중심면과 배관의 끝면은 z방향으로 구속이 되어있다. 용접부의 내부와 외부 표면에서는 대류와 복사에 의해 열이 빠져나가는데, 이는 대류와 복사를 함께 고려한 열전달 계수 H를 이용하였다.

$$H = h + \epsilon \sigma (T - T_{\infty})(T^2 + T_{\infty}^2) \quad (11)$$

h는 자연 대류에 의한 열전달계수로서 20W/m<sup>2</sup>-K이며, 방사계수(emissivity coefficient)  $\epsilon$ 는 0.8이다. 스테판-볼츠만 상수(Stefan-Boltzmann constant)  $\sigma$ 는 5.67 × 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>-K<sup>4</sup>이며, 대기온도는 T<sub>∞</sub>는 293.15K(20℃)이다. 해석에 사용된 유한요소 분할을 Fig. 3에 나타내었다. 용접선을

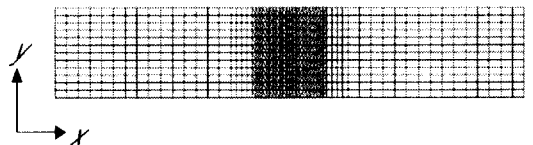


Fig. 3 Mesh generation for simulation employed

중심으로 전체 요소망의 요소의 개수는 788개, 절점의 개수는 982개로 구성하였고, 용접 부위는 온도구배가 매우 크므로 정확한 온도 해석을 위하여 미세하게 요소망을 구성하였다.

### 2.3 열입력 모델링

용접공정의 정확한 해석을 위해서는 이동하는 열원에 의한 열입력을 적절하게 모델링하는 것이 매우 중요하다. 이동 열원의 모델링은 Rosental<sup>(6)</sup>이 최초로 시도하였으나, 열원에 의한 열입력의 분포를 고려하지 않았다. 이동 열원에 의한 열분포를 고려한 모델로서는 가우시안 표면 분포 모델(Gaussian surface flux distribution model)과 이중타원체 분포 모델(double ellipsoidal power density distribution model)이 있지만, 맞대기 용접과 같이 용입 깊이가 커서 두께방향으로의 열전달이 중요한 경우는 이중타원체 분포 모델을 사용하는 것이 실제 이동 열원에 의한 입열을 더 정확하게 나타낸다고 주장하였다.<sup>(18-19)</sup> 용접봉을 따라 이동하는 이동 좌표계(moving coordinate) 및 고정 좌표계(fixed coordinate)와 이중타원체 분포 모델을 Fig. 4에 나타내었으며, 이중타원체 분포 모델의 수학적 표현은 다음과 같다.

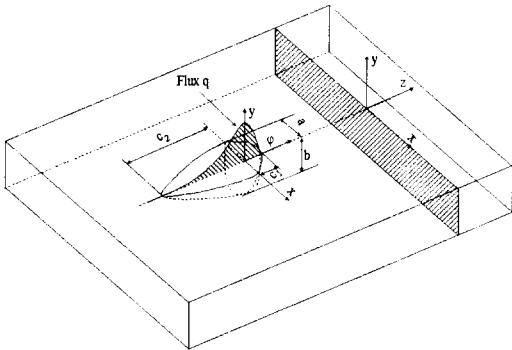


Fig. 4 Coordinate system and double ellipsoidal power density distribution model

$$q_f(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/c_1^2}, \quad \xi > 0 \quad (12)$$

$$q_r(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/c_2^2}, \quad \xi < 0 \quad (13)$$

이동 좌표계와 고정 좌표계 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\xi = z + v(\tau - t) \quad (14)$$

식 (14)를 이용하여 식 (12)와 (13)을 고정 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$q_f(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_1^2} \quad (15)$$

$$q_r(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_2^2} \quad (16)$$

여기서, Q : Heat source

$$Q = \eta \cdot V \cdot I \quad (17)$$

여기서,  $\eta$  : Arc efficiency

V : Welding voltage

I : Arc current

아크 효율은 아크에서 모재로 전달되는 일률과 아크에서 발생한 전체 일률의 비로 정의되는데, 아크에서 모재 사이의 복잡한 열손실을 간단하게 나타내는 상수이다. 아크 효율은 용접 조건, 용융 깊이, 보호 가스 등 많은 변수에 영향을 받기 때문에 이론적으로 예측하기가 매우 어렵고 실험적으로 측정을 하여 구한다. 본 연구에서는 아크 효율  $\eta$  값을 0.85로 하였다.<sup>(16-18)</sup>  $f_f$ 와  $f_r$ 는 열원의 앞쪽과 뒤쪽에서 투입되는 입열 비이며  $f_f + f_r = 2$ 이다. 변수 a, b, c는 타원체의 세 방향의 크기를 정의하는 상수이며, x, y, z는 중심이 열원 아래의 용접부 표면에 위치하는 직교 좌표계의 세 직교 축으로부터의 거리이다. 용접봉의 속도는 v이며,  $\tau$ 는 t에서 열원의 위치를 나타내기 위한 지연 상수(lag factor)이다.

## 3. 실험

### 3.1 실험

컴퓨터 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 선정된 재료는 고장력강이며 BV-AH32이며, GMA 방법을 용접방법으로 선정하였다. 시편의 크기는 Fig. 5와 같이 표준 용접시편을 정하여 시편을 절단 및 홈의 면을 가공하였다. 용접면에 녹이나 기타 부착물이 붙어 있으면 계속 오차의 요인이 됨으로 회전형 와이어 브러시를 이용하여 이물질

을 제거하였다. 또한 보호가스는 Ar 80% + CO<sub>2</sub> 20%를 사용하였으며 contact tube의 선단으로부터 모재(base metal) 까지의 거리 CTWD(contact tube work distance)는 20mm, 가스 속도는 25 cm/min, 팁 높이는 15mm, 토치 각도는 90°로 선정하였다. 용접을 하기 전 시험편의 밑면에 가접인 Sealing bead를 140(A)×20(V)×22 cm/min 용접조건으로 수행하였다. 여기서 와이어(wire) 직경은 1.2 mm를 선정한다.

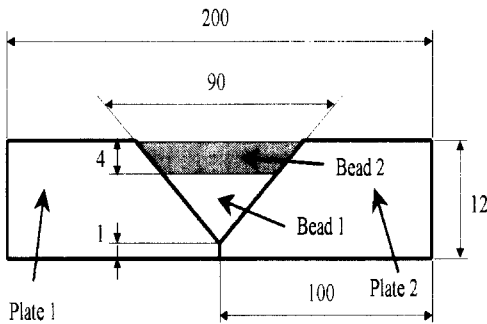


Fig. 5 Dimensions of weldment

용접기는 서보모터 구동식인 GMA/CO<sub>2</sub>겸용 산업용 로봇 용접기이며, 피드백 방식, 순전자식 절대위치 검출시스템을 사용하였다. 용접변형을 최소화하기 위하여 지그로 구속한 상태에서 용접을 실시하였다. Table 2의 용접조건을 이용하여 잔류응력을 측정하기 위한 실험은 포크대학교 용접자동화실에 있는 용접장비를 이용하였다. 준비된 용접 지그를 이용하여 300×200×12mm의 시편을 고정시키고, 용접 변수의 값을 프로그램 유니트(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시켰다. 새로운 용접 변수 프로그램 유니트를 이용하여 재 입력하고 용접을 계속하여 수행

Table 2 Welding condition for experiment

No.	Condition (Amp. × Volt)	Velocity	Weaving		No. of pass	Layer
			폭 (mm)	횟수 (n/min)		
1	270 × 28	30			1	2
		30	7	100	2	
2	170 × 23	17			1	
		19	13	45	2	



(a) No. 1 of welding condition



(b) No. 2 of welding condition

Fig. 6 Photograph of weld bead

하였다. Fig. 6은 용접후 용접조건에 따른 비드형을 나타낸다.

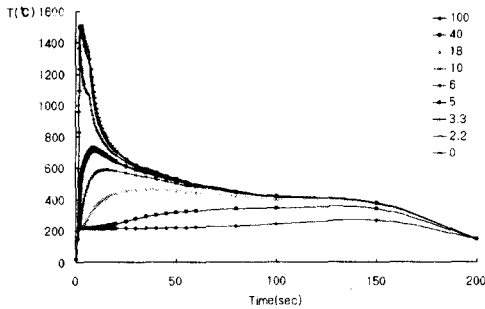
용접잔류응력 값을 측정하기 위하여 단면절단법을 사용하였으며, 측정에 사용된 시험기는 휴대형 MT-16A Strain Meter로서 측정된 데이터 분석은 위해 SAS 97 Strain Analysis system을 이용하여  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ 의 2축 방향을 측정하였다. 스트레인 게이지는 KFG-2-120-D16-11 Type을 이용하였으며, 크기는 1mm, 게이지 상수 2.10, 저항값 120.2±0.3Ω을 사용하였다. 절단간격은 스트레인 게이지로부터 약 2mm로 쇄톱을 사용하여 느린 속도로 절단응력과 열응력이 최소화 되도록 단면을 절단하였다.

## 4. 결과 및 고찰

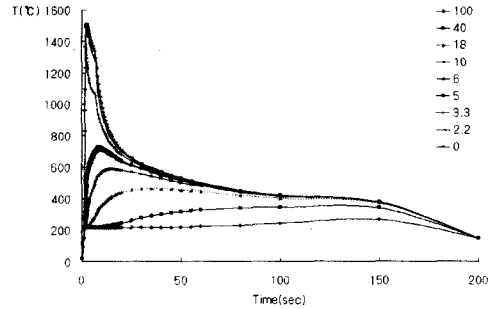
### 4.1 열전달 해석

재료의 온도 분포(temperature distribution)는 재료의 미세조직 변화와 용접부의 강도를 결정하는데 있어 매우 중요한 요소(factor)이다. 재료의 가열과 냉각시에 고립된 열점(hot spot)과 같은 열취약부에서 응력생성으로 균열이 발생할 수 있으므로, 열분포를 제어하는 문제는 용접구조물의 안전성에 있어서 가장 중요한 부분이다.

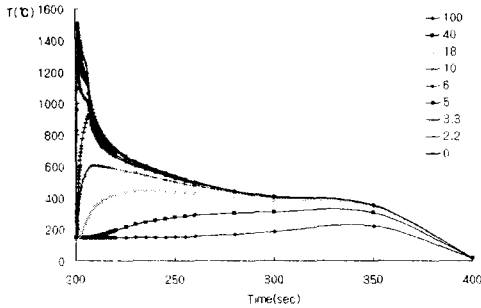
Figs. 7~8은 입열량을 변화시켰을 때 각 패스에 대하여 용접부의 중앙부 표면에서 각 위치에 따른 온도 분포도를 나타낸다. t=2초일 때 용접부 중앙부에서 용융시 표면에 용입량이 도입되어 200초가 지나면 첫번째 패스가 완료되고, 200초를 기점으로 400초까지를 두번째 패스의 용



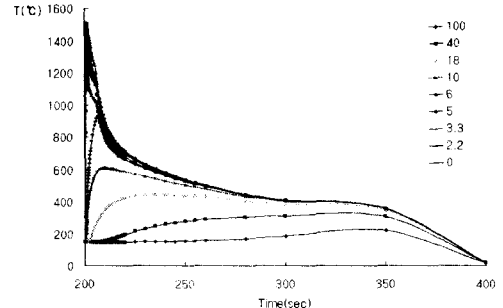
(a) one pass



(a) one pass



(b) two pass



(b) two pass

Fig. 7 Temperature history on the top surface by source(5.67kJ)

Fig. 8 Temperature history on the top surface by heat source(2.93kJ)

접 진행시 온도분포를 계산하였다. 용접방향에서 중앙인 부분,  $x=0\text{mm}$ 인 면을 축으로 하여 시편 표면 부위에서의 거리에 대한 온도분포를 관찰하였으며, 두께에 대한 온도차는 미소하므로 무시하였다. 입열량이 변하면 최고온도에만 차이가 있을 뿐, 용접부 중앙에서 멀어질수록 냉각속도가 감소되는 양상을 보이고 있음을 Figs. 7~8으로부터 알 수 있다. 용접 입열에 의한 최대 온도는 중심점에서 약  $1520^{\circ}\text{C}$ 이며, 용접 열영향부와 경계에 해당하는 구간에서의 최대온도는 약  $720^{\circ}\text{C}$  정도를 나타내고 있다.

#### 4.2 잔류응력 해석

용접시의 불균일한 온도분포로 인하여 용접 후에 재료에는 변형과 잔류응력이 발생하여 시편의 길이 및 횡방향의 응력 분포변화가 발생하므로 용접부의 시간에 따른 응력의 변화와 용접이 완료된 후 존재하는 잔류응력에 대하여 해석하였다. 단면법에 의한 용접 잔류응력 측정값을 얻기 위하여 되도록 수치해석과 동일한 조건으로 하여 측

정하였다. 각 패스에서의 응력변화는 유사한 경향을 보이며 최종 잔류응력의 분포는 두번째 패스에 의해 결정되므로, 두번째 패스를 고찰 대상으로 하였다. 용접선 길이방향으로 용접 잔류응력의 분포양상을 보면, 용접 시단부와 종단부의 미소영역에서 용접 잔류응력 성분( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) 모두 응력이 크게 측정되었으며, 그 외의 영역에서는 일정하게 나타남을 보이고 있다. 이러한 측정결과를 보이고 있는 제일 큰 이유는 용접이 시작되는 지점과 끝나는 지점의 일정영역을 제외하고는 동일한 열적 특성을 받기 때문이라고 사료된다.

Figs. 9~10은 입열량이 5.67kJ에서 2.93kJ로 변화할 때 길이방향과 횡방향의 잔류응력을 실험치와 시뮬레이션 값을 비교·분석한 결과를 나타낸다. 각각의 잔류응력 변화는 매우 유사한 경향을 보이며, 두번째 패스의 입열에 의해 모재 내부 표면이 가열되고 온도상승에 의한 용접부의 팽창이 모재에 의해 억제되면서 모재내의 인장응력이 압축응력으로 변화됨을 Figs. 9~10로 알 수 있었다.

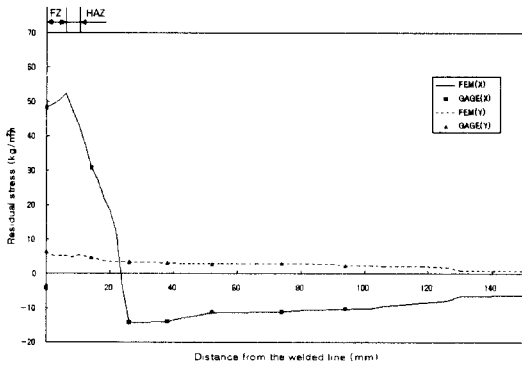


Fig. 9 Comparison of experiment and simulation stresses for heat source(5.67kJ)

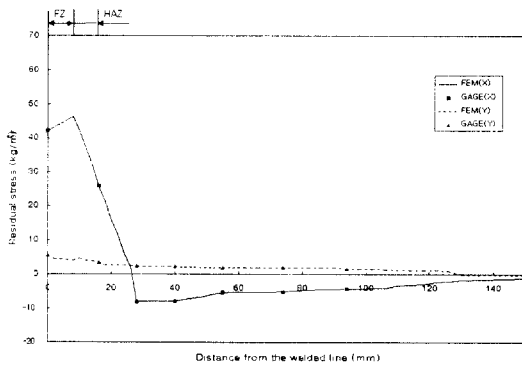


Fig. 10 Comparison of experiment and simulation stresses for heat source (2.93kJ)

또한, 최대 인장응력은 용접부의 바닥부분에서 볼 수 있었으며, 용접부 외의 지역에서는 보다 낮은 잔류응력을 Figs. 9~10에서 알 수 있었다. 특히 이 지역의 경우는 용융지가 형성될 때 가장 높은 압축 항복응력이 작용함으로, 용접선 길이방향 잔류응력은 용접부 근처에서 매우 높은 응력상태를 보여준다. 용접부에서는 항복응력에 가까운 인장응력이 집중되어 있고 용접선에서 멀리 떨어질수록 압축응력이 작용하다가 점점 그 크기가 줄어드는 잔류응력 분포 경향을 나타낸다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전기용접공정에서 상변태를 고려한 용접

부의 열전달 및 잔류응력 해석과 관련하여 열전도 및 잠열 탄소성이론에 기초한 용접강도를 평가할 수 있는 열-기계적 연결 해석용 컴퓨터 시스템 개발을 수행하였다. 개발된 시스템을 이용하여 두께 12mm의 고장력강(BV-AH32) 모재에 맞대기 용접(butt welding)을 모델로 하여 열-기계적 해석을 수행하여 용접시의 온도분포, 용융부와 열 영향부의 크기, 온도분포 변화에 따른 잔류응력 분포 및 용접부의 취약부를 예측하였다. 또한 다층 용접부에 있어서 열응력 및 잔류응력 분포를 예측 및 분석하였다. 실험으로부터 측정된 측정값을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 계산한 가로 및 세로방향의 잔류응력 및 변질부(heat affected zone)의 크기 값과 비교·분석하였으며 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 추가로 다양한 입열조건을 갖고 실험한 실험치와 시뮬레이션 결과치를 비교하였으며 상당히 정확함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 기초전력공학공동연구소 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, New York, 1980.
- (2) R. Matthew, "Combining quadrilateral and triangular meshing Using the advancing Front approach Proceedings", 6th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, pp. 337~348, October, 1997.
- (3) T. Zacharia, S. A. David, J. M. Vitek, H. G. Kraus, "Surface Temperature distribution of GTA weld pools on thin plate 304 stainless steel", Welding Journal, pp. 353~362, 1995.
- (4) R. Roper, J. Vossle and D. Osborn, "Thermal stress and strain analysis in travel autogenous welds", MARC User's conference, pp. 313~333, 1992.
- (5) G. W. Krutz and L. J. Segerlind, "Finite Element Analysis of Welding Structures", Welding Journal, Vol. 57, pp. 211~217, 1987.
- (6) D. Rosenthal, "Mathematical theory of heat distrib-



- ution during welding and cutting”, *Welding Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 220-s~224-s, 1941.
- (7) H. D. Hibbitt and P. V. Marcal, “A numerical thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure”, *Computer & Structures*, Vol. 3, pp. 1145~1174, 1973.
- (8) Y. Ueda and T. Yamakawa, “Analysis of thermal elastic-plastic behavior of metals during welding by finite element method”, *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 42, No. 6, pp. 61~71, 1973.
- (9) Y. Ueda and T. Yamakawa, “Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method”, *Transactions of Japan Welding Society*, Vol. 2, No. 2, pp. 90~98, 1971.
- (10) K. Satoh, M. Toyoda, Y. Suita, M Tanaka and T. Hirano, “Controlling parameters of residual stresses and deformations in welded thin cylindrical shells”, *Transactions of the Japan Welding Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 3~9, 1986.
- (11) J. A. Penso, “Development of a PC-based FEM model to predict weld distortion”, M.S. Thesis, The Ohio State University, 1992.
- (12) J. M. Bloom, “An analytical assessment of the effects of residual stresses and fracture properties on service performance of various weld repair processes”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, No. 11, pp. 373~379, 1982.
- (13) O. C. Zienkiewicz, “The Finite Element Method”, McGraw-Hill, 3rd edition, 1977.
- (14) G. Dhatt and G. Touzot, “The finite element method display”, Verlag John Wiley and sons, 1984.
- (15) D. Pont, J. Bergheau, M. Rochette and R. Fortunier, “Identification of a kinetic model for an isothermal metallurgical transformations in steels”, *Inverse Problems in Engineering Mechanics*, Edited by H.D. Bui, M. Tanaka et al, Balkema, Rotterdam, pp. 151~156, 1994.
- (16) T. Inoue and K. Tanaka, “An elastic-plastic stress analysis of quenching when considering a transformation”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 17, pp. 361~367, 1975.
- (17) G. J. Hutchings and A. I. Soler, “Approximate elasticity solution for moderately thick shell of revolution”, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 40, pp. 955~960, 1973.
- (18) J. Goldak, M. bibby, J. Moore, R. House and B. Patel, “Computer modeling of heat flow in weld”, *Metallurgical Transaction*, Vol. 17b, pp. 587~600, 1987.
- (19) E. Friedman, “Thermo-mechanical analysis of the welding process using the finite element method”, *Transaction of the ASME*, pp. 206~213, 1975.