

## 원통 용접부의 온도분포 해석

남궁재관\*

(논문접수일 2009. 2. 16, 심사완료일 2009. 3. 23)

### An Analysis on the Temperature Distribution at the Circumferential Weld Zone

Chai-Kwan Namkoong\*

#### Abstract

The study of the solidification process of welded metal is carried out using the finite element method, which is the basic study for optimal design. In the analysis of temperature, the welded zone is cooled as the result of heat conduction to the base metal and heat transfer to the circumference. In the early phase of the temperature in base metal zone is little changed. But after the rise in temperature the whole area is cooled gradually and uniformly with the lapse of 10 seconds, and a temperature change is hardly occurred in the radial direction but in the axial direction.

**Key Words** : Temperature Distribution(온도분포), Weld Zone(용접부), Base Metal Zone(모재부), Finite Element Method(유한요소법), Heat Conduction(열전도)

## 1. 서론

플랜트 배관설비, 해양구조물 및 원자로 배관 등에 있어서 원둘레방향 용접을 하는데, 용접부에 발생하는 열응력 및 열변형<sup>(1)</sup>이 잔류응력을 유발시켜 용접균열을 초래한다<sup>(2)</sup>. 따라서 잔류응력을 감소시키기 위해서는 용접부의 온도 분포 예측을 할 필요가 있다<sup>(3)</sup>.

온도분포 예측을 위한 방법으로는 Rosenthal<sup>(4)</sup>이 제시한 방법과 유한차분법이나 유한요소법과 같은 수치해<sup>(5)</sup>를 이용하는 방법이 온도에 따른 재료상수의 변화를 고려할 수 있어서 Galerkin 법에 의한 비선형, 비정상 2차원 열전도 해석을

일반적으로 널리 사용하고 있다.

본연구에서는 이러한 pipe 원주 방향 용접시의 온도분포를 Rosenthal의 해석해 및 유한요소법을 사용하여 계산하였으며, 예측결과를 비교, 검토하였다.

## 2. 실험 및 모델설정

### 2.1 실험

실험재료는 강파이프를 대상으로 하였으며 파이프의 화학적 및 기계적 성질은 Table 1과 같다.

먼저 이 파이프는 용접을 실시하기 전에 200mm로 절단

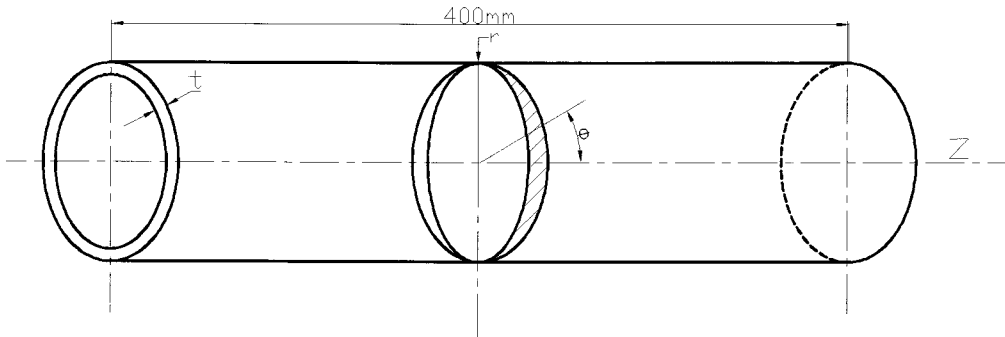
\* 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (namkoong@snut.ac.kr)  
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

**Table 1 Chemical composition and mechanical properties of pipes.**

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Inner dia( $\Phi$ ) (mm)	Thick-ness( $t$ ) (mm)	Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength( $\sigma$ ) (kg/mm <sup>2</sup> )	Elong-ation( $\epsilon$ ) (%)
0.12	0.12	0.72	0.015	0.008	142	4	37.4	47.2	30

**Table 2 Welding conditions of each pipe**

Current(A)	Voltage(V)	Welding velocity( $v$ ) (cm/min)	Diameter of electrode( $d$ ) (mm)	No. of pass( $n$ )	Specific heat input( $E$ ) (J/cm)
100	25	15	2.6	2	10000



**Fig. 1 Schematic illustration of pipes used in this study**

하여 650℃로 가열하고 1시간 유지한 후 노냉을 실시하여 파이프의 초기 내부잔류응력을 제거하였다.

사용 용접부의 조건은 Table 2와 같다. 용접부의 치수는 Fig. 1과 같으며, 이음부형상은 V 형으로 하였고 각도는 45°로 하였다.

용접작업은 2가지 종류 모두 불구속 자동회전식 아크용접(Shield metal arc welding)으로 실시하였는데, 실용접을 실시하기 전에 0°, 90°, 180°, 270° 방향에 가용접을 행한후 용접을 실시하였다.

그리고 이때 용접을 Arc 길이 2.6mm로 개선부가 모재표면보다 낮지 않은 상태로 Slag를 제거하는 조건에서 용접을 완료하였다.

## 2.2 모델설정

본 연구에서 이용된 모델은 탄소 0.12% 탄소강을 모재로 하는 축대칭 원통관에 탄소 0.1% 이하인 탄소강재 용접봉으로 용접하는 경우로 하여 응고 및 냉각과정이 진행됨에 따라

변화하는 비정상 온도분포를 해석하였다<sup>(6)</sup>.

용접봉 및 모재의 물리적, 기계적, 성질들은 같은 것으로 취급하였다.

$$k_L : grad T_L = k_S grad T_S \quad (1)$$

$k_L$  : 용접부의 열전도계수

$k_S$  : 모재의 열전도계수

$T_L$  : 용접부의 온도

$T_S$  : 모재의 온도

로 나타낼 수 있다.

모델 축방향의 양끝단은 Pipe의 두께에 비하여 매우 길어 반무한 경계조건(semi-infinite boundary condition)으로 생각하여 온도해석을 행하였다.

초기조건으로 용접부의 초기온도를 1350℃, 모재의 초기 온도를 20℃로 하였으며 이때 주위 온도는 20℃로 일정하다고 가정하였다.

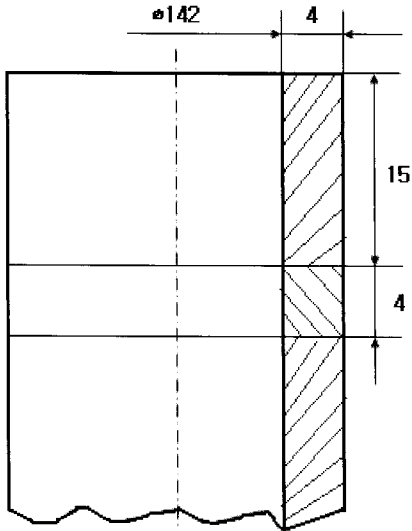


Fig. 2 Dimension of model

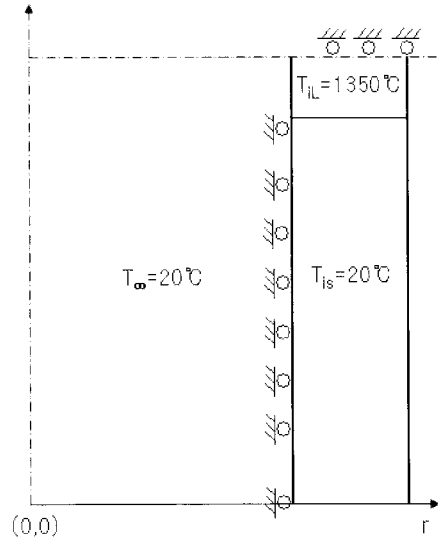


Fig. 3 The Boundary condition of model

Fig. 1은 모델의 형상 및 치수를 도시한 것이며, Fig. 2는 해석에 이용된 초기조건 및 경계조건을 도시한 것이다.

### 3. 해석방법

용접부가 냉각하는 동안의 용접부 및 모재의 온도분석은 지배방정식, 구성방정식, 경계조건 및 초기조건 등을 이용하여 해를 구하여야 한다. 그러나 실제의 상태는 온도와 열 변형 및 응력간의 연성효과(coupled effect)로 인하여 대단히 복잡한 거동을 하기 때문에 수학적인 엄밀해를 구하기가 어렵다<sup>(7)</sup>. 따라서 본 분석에서는 온도분포의 계산을 위하여 weighted residual법 중의 Galerkin method를 이용하였다.

#### 3.1 온도해석

환상용접에 있어서 용접부의 냉각에 따른 용접재료의 온도분포 계산은 2차원 비정상 열전도해석을 통하여 얻을 수 있다.

상기한 가정하에서 열전도방정식을 2차원 원통좌표계(cylindrical coordinate)에 적용하고 유한요소법을 이용하여 온도분석을 행한다.

용접재의 온도분포를 구하기 위한 계의 지배방정식과 경계조건, 초기조건은 다음과 같이 설정한다.

#### 1) 지배방정식(governing equation)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( kz \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho c \dot{T} = 0, \quad t > 0 \quad (2)$$

#### 2) 초기조건

$$\begin{aligned} T &= T_{iL} \quad \text{in weld zone, } t = 0 \\ T &= T_{sL} \quad \text{in column, } t = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

#### 3) 경계조건

$$k_r \frac{\partial T}{\partial r} L + k_z \frac{\partial T}{\partial z} L_z + h(T - T_{\infty}) = 0 \quad (4)$$

여기서

- $h$  : 열전달계수
- $T_{\infty}$  : 주위온도
- $r, z$  : 원통좌표계
- $k_r, k_z$  : 재료의 열전도계수
- $L_r, L_z$  : 각 방향에 대한 방향여현(direction cosine)

을 나타낸다.

식 (4)에서 사용된 열전도계수  $h$ 는 용접재의 크기, 재질, 형상 및 냉각조건 등 여러 가지 복잡한 인자들의 영향을 받기

때문에 실험적으로 결정하여야 하나, 본 해석에서는 해석방법에 중점을 두었으므로 문헌에서 주어진 값을 이용하였다.

식 (2)에 Galerkin 법을 적용하면

$$\int_V \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho c \dot{T} \right] N_i dV = 0 \quad (5)$$

이 되며 여기서  $\dot{T}$ 는 비정상항이다.

식 (5)를 Gauss 적분법을 이용하여 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_S N_i \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \hat{e}_r + k \frac{\partial T}{\partial z} \hat{e}_z \right) \cdot (L_r \hat{e}_r + L_z \hat{e}_z) \right] dS \\ & - \int_V \left[ \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \hat{e}_r + k \frac{\partial T}{\partial z} \hat{e}_z \right) \cdot \left( \frac{\partial N_i}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{\partial N_i}{\partial z} \hat{e}_z \right) \right] dV \\ & - \int_V N_i \rho c \dot{T} dV = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 전개하면

$$\begin{aligned} & \int_V k \left[ \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial N_i}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] dV + \int_V \rho c r \dot{T} N_i dV \\ & - \int_S \left[ \frac{\partial T}{\partial r} L_r + \frac{\partial T}{\partial z} L_z \right] N_i dS = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

가 된다.

경계조건 식 (4)를 식 (7)에 적용시켜 풀면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \int_V k \left[ \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial N_i}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] dV + \int_V \rho c r \dot{T} N_i dV \\ & + \int_S h r (T - T_\infty) N_i dS = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 온도함수  $T$ 는 각 요소에서 온도로 정의 한다. 따라서

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^N N_i(r, z) T_i(t) \\ &= N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 + \dots + N_n T_n \end{aligned} \quad (9)$$

로 표시된다. 본 해석에서는 삼각형 요소분할을 이용하였으므로  $n=3$ 이 된다. 그러므로 식 (9)는

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^N N_i(r, z) T_i(t) \\ &= N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다.

식 (10)에 의하여 식 (8)의 온도미분항 및 비정상항  $\dot{T}$ 는

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial N_i}{\partial r} T_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial N_i}{\partial z} T_i$$

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 N_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 N_i \dot{T}_i \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (10), 식 (11) 및 식 (12)를 식 (8)에 대입하고 그 결과식을 행렬항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_V \left( k \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} \{T\} + k \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \{T\} \right) dV \\ & + \int_V \rho c r [N_i]^T N_j \dot{T} dV + \int_S h r [N_i]^T N_j T dS \\ & - \int_S h r N_i T_\infty dS = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$[N_i] = [N_1 \ N_2 \ N_3] \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (14)$$

$$\left[ \frac{\partial N_i}{\partial r} \right] = \left[ \frac{\partial N_1}{\partial r} \ \frac{\partial N_2}{\partial r} \ \frac{\partial N_3}{\partial r} \right] \quad (15)$$

$$\left[ \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] = \left[ \frac{\partial N_1}{\partial z} \ \frac{\partial N_2}{\partial z} \ \frac{\partial N_3}{\partial z} \right] \quad (16)$$

$$\{T\} = [T_1 \ T_2 \ T_3]^T \quad (17)$$

이다.

식 (13)을 미지변수  $\dot{T}$ 에 대하여 이산화(discretization)하여 정리하면 강성방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$[K] T + [K_3] \dot{T} = P \quad (18)$$

여기서

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV + h \int_S r [M]^T [M] dS \quad (19)$$

$$[K_3] = \rho c \int_V r [M]^T [M] dV \quad (20)$$

$$P = h T_\infty \int_S r [M] dS \quad (21)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{\partial N_2}{\partial r} & \frac{\partial N_3}{\partial r} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (22)$$

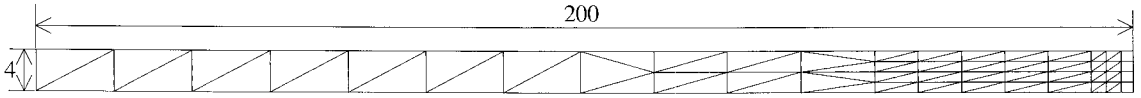


Fig. 4 Mesh screen used for temperature calculation in model(elements=135 node points=224)

$$[D] = \begin{bmatrix} rk & 0 \\ 0 & rk \end{bmatrix} \quad (23)$$

한편 비정상항  $\{\dot{T}\}$ 은 유한차분법 중의 전진차분공식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\dot{T}\} = (T_{i+\Delta t} - T_{i}) / \Delta t \quad (24)$$

가 되며, 여기서  $t$ 는 시간증분이다. 따라서 최종결과식은

$$[\bar{K}]\{T\}_{t+\Delta t} = \{\bar{P}\}_{t+\Delta t} \quad (25)$$

가 되며, 여기서

$$[\bar{K}] = [K] + [K_3] / \Delta t \quad (26)$$

$$\{\bar{P}\} = \{P\} + [K_3]\{T\}_i / \Delta t \quad (27)$$

이다.

이상에서 얻어진 강성방정식 (25)에 초기조건 (3)을 이용하여 미소시간증분  $\Delta t$ 에 따른 모델 전영역의 응고과정을 해석하였다.

### 3.2 해석과정

온도분포의 예측을 위한 수치해석의 방법으로는 유한차분법과 유한요소법이 가장 널리 쓰여지고 있다. 본 연구에서는 용접시 준정상상태에 최고온도분포를 유한요소법을 사용하여 계산하며 보았다.

Fig. 3은 계산에 사용된 mesh를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 용접이 중앙선을 중심으로 대칭으로 이루어진다는 가정하에 반쪽부분만 계산에 사용되었다. 계산에서는 1층 용접과 2층용접을 구분하여 1층용접시에는 중앙부분의 element가 없는 것으로 생각하여 계산을 수행하였으며 2층용접시에는 final bead까지를 포함하여 element mesh를 설정하였으므로 1층 용접시에는 63절점, 85 element가 2층 용접시에는 65절점, 87 element가 계산에 사용되었다. Mesh는 용접부에서 온도분포가 급격하므로 정밀한 계산이 요구된다는 점을 고려하여 용접 중앙부에서 작게 세분하였으며 용접부에서 멀어질수록 element의 크기가 커지도록 구성하

였다. 한편 계산에는 3각형 element와 4각형 element가 복합되어 사용되어졌으며, 유한요소해석 program은 Huebner의 program을 본 연구의 목적에 맞추어 수정하여 사용하였다.

유한요소법에 의한 용접부 온도분포 해석시에 용접에 의한 입열을 고려하는 방법으로는 용접부의 element에 heat flux를 경계조건으로 주는 방법과 용접에 의해 용융되어지는 element의 온도를 그재료의 melting temperature로 가정하는 두가지 방법이 있을 수 있다. 본 연구에서는 두가지 방법의 계산 정밀도를 비교 검토하기 위하여 heat flux를 경계조건으로 주는 방법과 melting temperature를 경계조건으로 주는 두가지 방법 모두를 사용하여 계산을 수행하였다.

Heat flux를 경계조건으로 주는 방법에서는 실제 용접에 있어서의 arc 특성에 따라 heat flux의 분포가 많이 달라지게된다<sup>(8)</sup>. 일반적으로 arc 용접에 있어서의 heat flux의 분포는 계산의 편의를 위해 gaussian분포를 가진다고 가정하는 경우가 대부분이다. 한편 이러한 gaussian분포를 가정한다 하더라도, 유한요소법에 의한 경계조건으로의 변환을 위해서는 이분포를 다시 각 element에 있어서의 equivalent한 평균 heat flux로 고쳐서 사용하여야만 한다. 본 연구에서는 gaussian분포의 중앙집중도에 의한 열향을 관찰하기 위하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 중앙 element에 0.8, side element에 0.2의 비율로 분포하는 경우(Case I)과 중앙 element에 0.7, side element에 0.3의 비율로 분포하는 경우(Case II)를

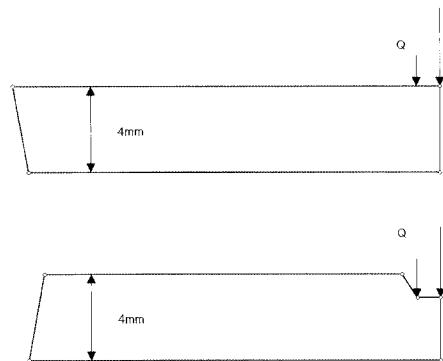


Fig. 5 Boundary condition(Heat flux)

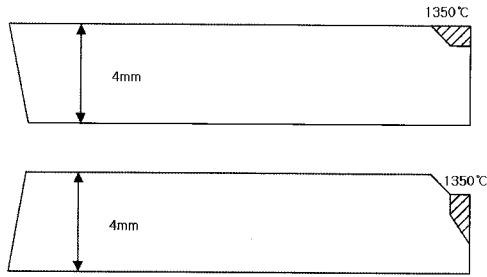


Fig. 6 Boundary condition(Temperature)

가정하여 계산을 수행하였다. 한편 melting temperature를 경계조건으로 주는 방법에서는 경계와 내부의 element의 온도를 1,350°C로 가정하고 계산을 수행하였다(Fig. 5).

Fig. 6은 해석과정의 개요를 나타내는 흐름도(flow chart)이다.

### 3.3 고찰

본 연구에서는 온도해석을 위하여 용접부의 초기온도를 1350°C, 모재의 초기온도를 20°C로 하여 축방향의 경계면에 있는 각 절점의 시간경과에 따른 온도변화 과정에 대하여 고찰하였으며, 또한 용접부의 모재에서의 등온선을 도시하고, 그 변화에 대하여 고찰하였다. 그 결과를 고찰하면 다음과 같다.

Fig. 7은 용접재의 축방향 경계면상의 시간의 변화에 따른 온도의 변화를 도시한 것이다. 냉각 초기에 있어서 용접부 끝단에서의 온도와 모재와 접하는 부분에서의 온도는 매우 완만하게 냉각이 이루어지고 있으며 모재부에서는 초기온도를 유지하며 온도의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 용접부 끝단의 경우 초기에 전달되는 열량이 작기 때문으로 사료되며, 모재와 접하는 부분에서는 초기에 낮은 온도의 모재부와 열전도에 의하여 급격한 냉각이 이루어지지만, 시간이 경과함에 따라 전달되는 열량과 주위로 전달되는 열량이 거의 비슷하기 때문이라고 생각된다. 그러나 시간의 흐름에 따라 용접부에서의 온도는 급격히 냉각이 이루어지며, 반면에 모재의 온도는 상승하여 냉각개시 후 10초 후에는 전영역의 온도가 거의 비슷해지며 주위와의 열전달에 의하여 완전히 냉각되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 모델은 축방향 중앙부에서의 시간에 따른 온도분포를 도시한 것이다. 그림에서 나타내고 있는 바와 같이 축방향 경계면상에서의 변화와 매우 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 모델의 길이에 비하여 두께가 매우

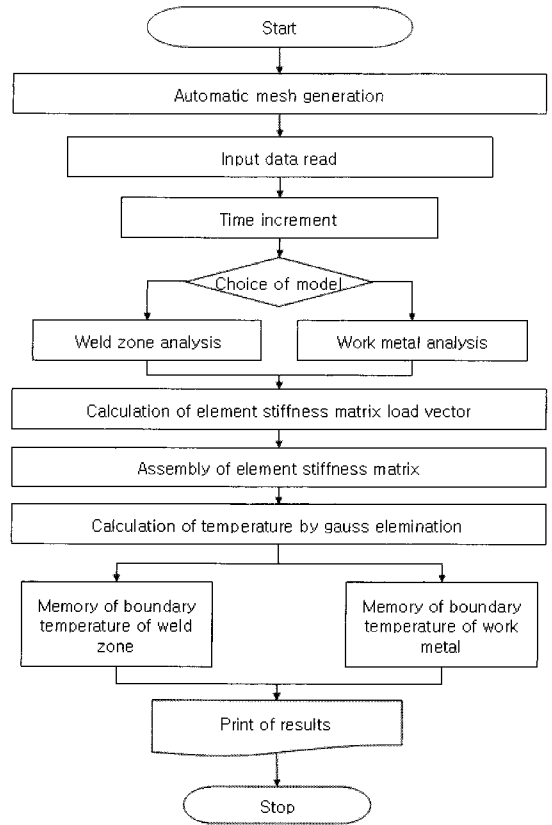


Fig. 7 Flow chart for temperature calculation of weld zone and work metal

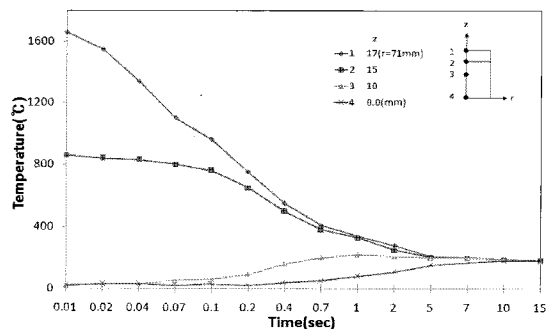


Fig. 8 Temperature variation of model according to cooling time at boundary face of z-direction

얇기 때문에 주위와의 열전달에 의한 것보다는 모재와의 열전도에 의한 영향이 더 크기 때문인 것으로 생각된다.

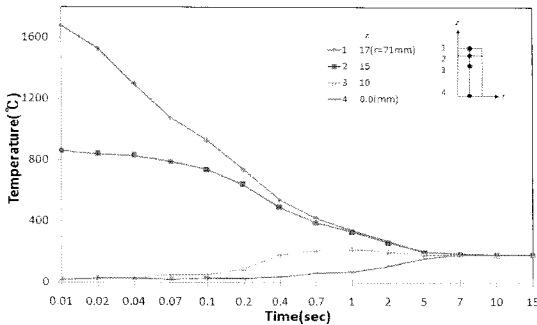


Fig. 9 Temperature variation of model according to cooling time at center face of z-directiong

#### 4. 결론

원통둘레, 용접부의 온도분포 해석을 위한 기초적 연구로써 용접금속의 응고과정을 유한요소법을 사용하여 용접부와 모재부의 온도해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 온도해석에 있어서 용접부의 경우 냉각초기단계에서 모재와의 열전도 및 주위와의 열전달로 인하여 냉각됨을 알 수 있었다
- (2) 모재부는 초기단계에서는 거의 온도변화가 없었으나 시간의 경과와 함께 온도가 상승한 후 냉각개시 후 10 초를 지나면서 전영역의 온도는 균일하게 된 후 서서히 냉각되고 있음을 알 수 있었다.
- (3) 위치에 따른 온도변화에 있어서는 축방향을 따라 냉각이 이루어지고 있음을 알 수 있다.
- (4) 이러한 결과를 기초로하여 상변화시의 잠열, 물리적 성질의 온도 의존성 등을 고려한 해석이 실험과 병행하여 비교, 연구되어야 하며, 열응력 및 열변형이 평가되어서 최적의 용접설계를 위한 자료가 제시되어야 할 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- (1) Ueda, Y, and Yamakawa, T, 1971, "Analysis of Thermal Elastic-Plastic-Stress and Strain during Welding by Finite Element Method," *Trans., Japan Welding Society*, Vol. 2, No. 2, pp. 50~55.
- (2) Ueda, Y, Fukuda, K, and Nakacho, K, 1977, "Basic

Procedures in Analysis and Measurement of Welding Residual Stresses by The Finite Element Method," *Proc. of Int. Conf. on Residual Stresses in Welded Construction and Their Effects*, Welding Institute, England, pp. 27~37.

- (3) Grosh, J. R. and Trabandt, E. A., 1956, "Arc welding temperature," *Welding Journal*, Vol. 36 No.2, pp. 396~400.
- (4) Rosenthal, D, 1941, "The mathematical theory of heat distribution during welding and cutting," *Welding Journal*, No. 5, Vol. 21, pp. 220~234.
- (5) Masubuchi, K., 1980, *Analysis of welded structures*, Pergamon Press, Tokyo, pp. 147~234.
- (6) Brandes, E. A, 1983, "Smithells Metals Reference Hand Book," 6th Butterworths, London, pp. 86~120.
- (7) Zienkiewicz, O. J, 1979, "The Finite Element Method," 3rd, McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 59~69.
- (8) Debarri, A, 1986, "Control of distortion and residual stresses in girth welded pipes M. I. T. Ph.D. Dissertation".
- (9) Hinton, E, and Owen, O.R.J, 1980, "Finite Element in Plasticity," Pineridge Press LTD., New York, pp. 36~48.
- (10) Holman, J. P, 1981, "Heat Transfer," McGraw-Hill, Inc., New York, pp. 67~85.
- (11) Vaidyanathan, S., and Todaro, A.F, I. Finnie, 1973, "Residual Stresses in Circumferential Welds," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 95, pp. 233~242.
- (12) Lee, K. M., Lee, C. K, 2008, "An Effect of Harmful Materials During Welding Work," *Trans. of the KSMTE*, Vol. 17, No. 1, pp. 43~49.
- (13) NamKoong, C. K., 2003, "An Experimental Study on Detection of Defects in Weldzone," *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 6, pp. 56~63.
- (14) NamKoong, C. K., 2008, "A study on the Residual Stresses by the Hole Drilling Measuring in the Weld Zone," *Trans. of KSMTE*, Vol. 17, No. 3, pp. 115~121.