

## 炭素鋼材 熔接部の 溫度分布에 關한 研究

A Study on the Temperature Distribution of Welding Zone in Carbon Steel

남 궁 재 관 \* 홍 재 학\*\*  
C. K. NAMKOONG J. H. HONG

### ABSTRACT

In this study, the transient temperature distribution of welded zone was analyzed by Finite Element Method for the optimal design of weldment. This study was carried out for the steel plate 8mm thick, 100mm wide, 100mm long that butt weld. The weld was made with a heat input of 2,250 joule/cm(arc current : 180 amperes ; arc voltage : 25 volts ; and arc travel speed : 0.28 cm/sec). In the analysis of temperature, cooling in the welded zone by the conduction between material was almost completed at 600 sec when a unique temperature field was formed. after this, the material was gradually cooled by the heat transfer to the circumference. In the early phase the temperature in base metal zone is little changed. but after the rise in temperature the whole area is cooled gradually.

### 第 1 章 序 論

일반적으로 熔接部에서 일어나는 제현상들은 熱이 집중적으로 傳達되는 순간부터 시작된다. 그리고 이때 熱源이 되는 金屬은 熔接되어 있다.

시간의 경과에 따라 熔接部는 낮은 溫度의 熔接部 및 주위와의 熱傳導 및 熱傳達에 의하여 冷却되며 동시에 모재의 溫度는 일정 시간동안 상승하게 된다. 이와같은 熔接 各部의 溫度上昇 및 冷却의 차이에 따라 母材는 熱膨脹, 收縮의 相互作用에 의하여 서로

拘束되며, 또한 주변의 다른 材料들에 의하여 外的 拘束이 存在하게 되어 熔接 材料는 필연적으로 熱應力 및 熱變形이 발생한다.<sup>1, 2)</sup>

그리고 이때의 熱變形은 부분적으로 塑性領域에 까지 달하여 冷却이 완료된 후에도 남게된다. 熔接 중에 발생하는 이러한 熱應力과 熱變形率에 의한 殘留應力 및 熔接變形은 熔接龜裂의 발생 원인으로 알려져 있다.<sup>3)</sup>

熔接의 熱應力 計算을 위하여는 熔接部の 凝固過程 및 母材와의 熱傳導解析이 선행되어야 한다. 熔接部の 凝固過程은 液固相變化를 동반하게 되며 2相 境界가 이동하는 熱傳達 問題로 알려져 있다.<sup>4, 5)</sup> 여기에 대하여 1次元 半無限 領域에서의 凝固에

\*正會員 : 서울 産業大 機械設計學科

\*\*正會員 : 檀國大 機械工學科

대한 解析의 解는 알려져 있지만 2, 3次元에서 相境界의 移動을 고려한 解析은 복잡하여 대개 有限差分法, 有限要素法 등에 의한 數值計算이 시도되고 있다.

本 研究에서는 熔接部の 熱應力 및 殘留應力の 解析을 위한 基礎的 研究로서 數值解析法의 하나인 有限要素法을<sup>6~8)</sup> 이용하여 非定常 熱傳導 解析을 행하였다.

### 第 2 章 모델 設定

本 解析에서 이용된 모델은 炭素 0.20% 機械構造用 炭素鋼(SM20C)을 母材로 하는 平板을 0.1% 이하인 炭素鋼材 熔接棒으로 熔接하는 경우로 하여 凝固 및 冷却過程이 進行됨에 따라 變化하는 非定常 溫度分布를 解析하였다.<sup>9)</sup> 解析을 위하여 두께방향의 溫度變化가 거의 없다고 假定하여 熔接方向과 길이 방향의 2次元 問題로 하였으며, 모델 길이방향의 양끝단은 平板의 두께에 비하여 매우 길어 熱傳達이 일어나는 경우이나, 半無限 境界條件(semi-infinite boundary condition)으로 생각하여 溫度解析을 행하였다.

初期條件으로 素材의 初期溫度를 27°C로 하였으며, 이때 주위의 溫度는 27°C로 일정하다고 假定하였다. 熔接電流 및 電壓은 180amp, 25volt로 하였고, 용접 속도는 0.28cm/sec로 하였다.

Fig. 2-1은 모델의 形狀 및 치수를 圖示한 것이다.

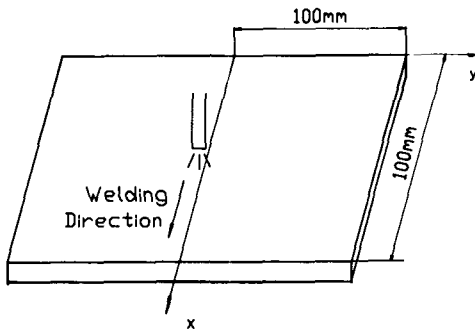


Fig. 2-1 Dimension of model.

Table 2-1은 解析에 이용된 材料의 物理的性質을 나타낸 것이다.

Table 2-2은 熔接 條件을 나타낸 것이다.

Table 2-1. Physical properties of materials.

Thermal Conductivity K(w/m°C)	34.76
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7933.33
Specific heat (J/kg°C)	614.064

Table 2-2. Welding parameter for Analysis.

arc current (amp.)	arc Voltage (Volt.)	arc efficiency	speed (cm/sec)
180	25	0.4	0.28

### 第 3 章 解析 方法

熔接部가 冷却하는 동안의 溫度解析은 支配方程式을 境界條件 및 初期條件들을 이용하여 解를 구하여야 한다. 그러나, 실제의 狀態는 溫度와 熱變形 및 應力間의 連性效果(coupled effect)로 인하여 대단히 복잡한 舉動을 하기 때문에 數學的인 엄밀해를 구하기가 어렵다.<sup>12)</sup> 따라서 本 解析에서는 溫度分布의 計算을 위하여 weighted residual 法중의 Galerkin method를 이용하였다.

本 研究에서는 熔接토치의 移送速度를 考慮하여 初期熔接部の 境界條件을 구하고 그 DATA를 熱傳導 有限要素 解析에 應用하는데 초점을 맞추었기 때문에 熱傳導의인 側面에서 볼때에 假定이 많이 包含되어 있다. 即 固相과 液相間의 移動境界條件 및 相境界에서의 jump condition, 物理定數의 溫度依存性, 相變化, 相變態時的 잠열발생 등은 그 엄청난 複雜性에 비해 研究의 意味가 작다고 보아 없는 것으로 假定하여 無視하였다.

3.1 溫度 解析

熔接에 있어서 熔接部の 冷却에 따른 熔接材料의 溫度分布 計算은 2次元 非定常傳導解析을 통하여 얻을 수 있다.

上記의 假定下에서 熱傳導方程式을 2次元 直交座標系에서 有限要素法을 이용하여 溫度解析을 행한다.

熔接材의 溫度分布를 구하기 위한 系의 支配方程式과 境界條件, 初期條件은 다음과 같이 設定된다.

1) 支配方程式(governing equation)

$$\frac{\partial}{\partial x} [K_x \frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_y \frac{\partial T}{\partial y}] - \rho c \dot{T} = 0, t > 0 \dots\dots\dots(3-1)$$

2) 初期條件

$$T = T_i \text{ in weld zone, } t = 0 \dots\dots\dots(3-2)$$

3) 境界條件

$$K_x \frac{\partial T}{\partial x} e_x + K_y \frac{\partial T}{\partial y} e_y + h(T - T_\infty) = 0 \dots\dots\dots(3-3)$$

여기서

- $K_x, K_y$  : 材料의 熱傳導係數
  - $e_x, e_y$  : 각 方向에 대한 方向餘弦
  - $h$  : 熱傳達係數
  - $T_\infty, T_i$  : 周邊溫度 및 初期溫度
- 를 나타낸다.

식(3-3)에서 사용된 熱傳達係數  $h$ 는 熔接材의 크기, 材質, 形狀 및 冷却條件 등 여러가지 복잡한 因子들의 影響을 받기 때문에 實驗的으로 決定하여야 하나, 本解析에서는 解析 方法에 重點을 두었으므로 文獻에서<sup>(3)</sup>  $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 이용하였다.

윗 式을 未知變數  $T$ 에 대하여 山化하여 정리하면 剛性方程式은 다음과 같이 표시된다.

$$[K] \{T\} + [K_3] \{\dot{T}\} = \{P\} \dots\dots\dots(3-4)$$

여기서

$$[K] = \int_v [B]^T [D] [B] dV + h \int_s [N]^T [N] dS \dots\dots\dots(3-5)$$

$$[K_3] = \rho c \int_v [N]^T [N] dV \dots\dots\dots(3-6)$$

$$\{P\} = h T_\infty \int_s [N] dS \dots\dots\dots(3-7)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3-8)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3-9)$$

한편 非定常項  $\{\dot{T}\}$ 는 有限差分法중 前進差分方式을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\dot{T}\} = (\{T\}_{t+\Delta t} - \{T\}_t) / \Delta t \dots\dots\dots(3-10)$$

가 되며, 여기서  $\Delta t$ 는 時間增分이다. 따라서 最終結果式은

$$[K] \{T\}_{t+\Delta t} = \{P\}_{t+\Delta t} \dots\dots\dots(3-11)$$

가 되며, 여기서

$$[K] = [K] + [K_3] / \Delta t \dots\dots\dots(3-12)$$

$$\{P\}_{t+\Delta t} = \{P\}_{t+\Delta t} + [K_3] \{T\}_t / \Delta t \dots\dots\dots(3-13)$$

이다.

이상에서 얻어진 剛性方程式(3-11)에 初期條件(3-2)를 이용하여 微小時間 增分  $\Delta t$ 에 따른 모델 全領域의 非定常 溫度分布를 解析하였다.

3.2 解析 過程

모델의 溫度解析에 있어서 熔接部와 모재 사이의 熱交換은 熔接初期의 溫度差異에 의한 이중 金屬間의 熱傳導로 취급하여 時間의 變化에 따른 非定常 溫度解析을 행하였다.

한편 냉각초기 단계에서는 온도구배가 심하기 때문에 냉각 개시후 0.1 이하에서는  $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ 의 간격으로 1초까지는 0.1초 간격으로, 1초부터 10초까지 1초간격으로, 10초부터는 10초간격으로 時間

증분을 달리하면서 해석하였다.

要素分割은 平板의 熔接線에 대하여 모델의 형상 및 경계 조건이 좌우대칭이므로 모델의 1/2 부분을 解析하였다. 溫度解析에 사용된 要素 및 節點數는 각각 165개, 280개로 하였으며, 熔接部와 모재가 접하는 부분에서는 溫度의 變化가 심하므로 要素의 크기를 작게 분할하였다.

Fig. 3-1은 溫度解析에 이용된 모델의 要素分割을 도시한 것이다.

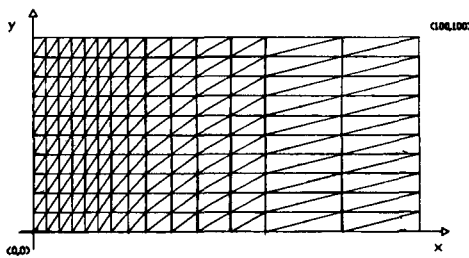


Fig. 3-1 Mesh screen Used for temperature Calculation in model (element = 280, node point = 165)

#### 第 4 章 解析結果 및 考察

本 研究에서는 溫度解析을 위하여 길이 방향과 용접방향의 境界面上에 있는 각 節點의 時間經過에 따른 溫度變化 過程에 대하여 解析하였고, 그 結果에 대하여 考察하였다. 다음으로 일정시간 경과 후의 model의 溫度分布에 대한 것을 圖示하고, 그 變化에 대하여 考察하였다.

Fig. 4-1은 용접토치의 이동 열원에 의한 시간에 따른 온도변화를 모재부 중심선을 따라서 용접선과 용접선으로부터 각각 30mm, 60mm 떨어진 위치에서의 온도를 계산한 결과이다.

arc의 위치가 중심선에서 10초에서 20초 사이에 일정 最高溫度를 유지하는 것은 실제의 계산상에서 溫度의 최대값을 시편의 熔接溫度로 제한했기 때문이다.

중심에서 3cm 떨어진 곳에서는 arc가 지난 수초

후에 最高溫度에 도달하였다가 점차 낮아지고 있다. 특히 중심에서 6cm 떨어진 곳에서는 100초를 넘어서 最高溫度에 도달한다. 용접중심선에서 가까운 곳일 수록 먼저 最高溫度에 도달하는 것을 보여주고 있다.

모델의 전체 단면에 있어서 일정시간이 경과한 후의 溫度分布의 변화에 대하여 살펴보면, 먼저 Fig. 4-2는 용접시작 후 10초경과 후의 온도분포를 圖示한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 용접 torch가 위치한 2cm 정도에서는 最高溫度에 도달하였고, 용접선과 인접한 母材部를 제외한 지역에서는 거의 溫度의 변화가 일어나지 않고 있다.

Fig. 4-3은 용접이 끝난 시점의 溫度分布를 圖示한 것이다. 용접을 시작한 곳에서는 冷却이 일어나 900℃ 정도의 溫度分布를 나타내고 있으며, 길이방향으로도 상당히 熱傳達이 일어나고 있음을 알 수

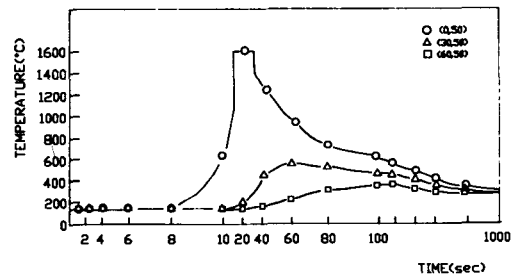


Fig. 4-1 Temperature Variation of model according to cooling time

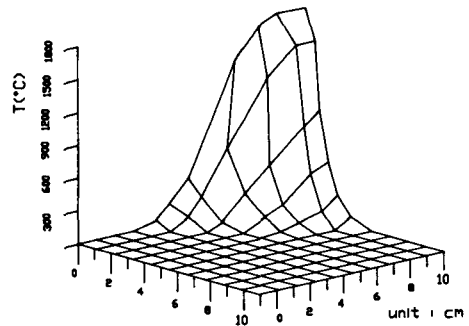


Fig. 4-2 Temperature Contour at 10 Sec after Welding.

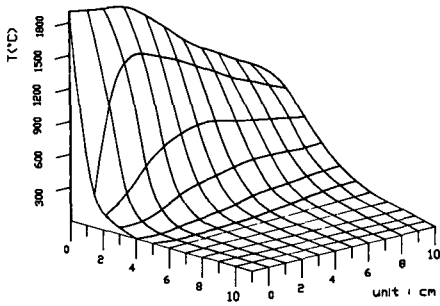


Fig. 4-3 Temperature Contour at 34 Sec after Welding.

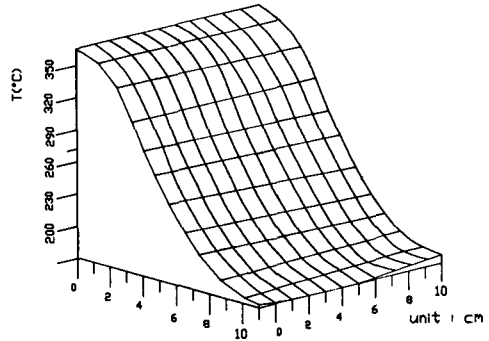


Fig. 4-6 Temperature Contour at 300 Sec after Welding.

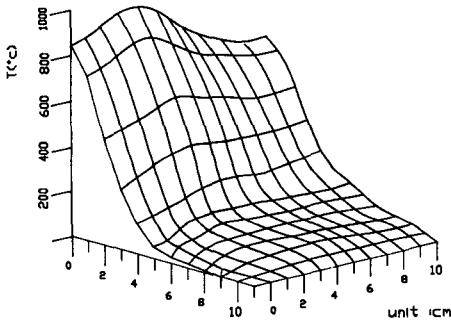


Fig. 4-4 Temperature Contour at 50 Sec after Welding.

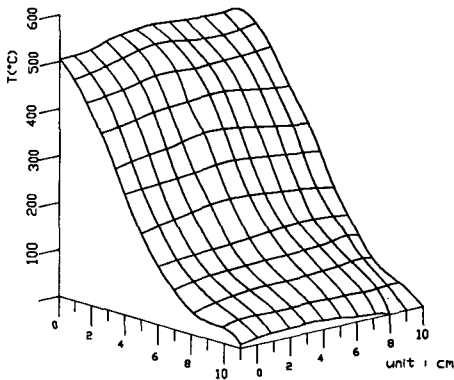


Fig. 4-5 Temperature Contour at 100 Sec after Welding.

있다. 용접이 끝난 곳 부근에서는 最高의 溫度를 나타내지만, 길이방향으로는 溫度變化가 거의 일어나지 않고 있다.

Fig. 4-4는 용접이 시작된 후 50초 경과 후의 溫度分布를 나타내고 있다. 용접선 부근에서 양쪽 끝보다 가운데에서 높은 溫度分布를 보이는 것은 양쪽 끝에서는 材質間의 熱傳導 뿐만아니라, 주변과의 熱傳達이 잘 일어나기 때문이다.

Fig. 4-5는 용접 시작 후 100초 경과 후의 溫度分布이다. 용접방향으로는 거의 균일한 溫度分布를 보이나, 길이방향으로는 溫度의 차가 심하여 약 500°C의 溫度差를 나타내고 있다.

Fig. 4-6은 용접 시작 후 300초 경과 후의 溫度分布를 圖示한 것으로서, Fig. 4-5와 유사한 양상을 보이고 있으나, 길이방향으로도 熱傳導가 상당히 이루어져 길이방향으로의 溫度句配는 덜 심하게 나타나고 있으며, 溫度差 200°C 정도임을 알 수 있다.

## 第5章 結 論

本 研究에서는 熔接部의 最適 設計를 위한 基礎的 研究로서 熔接部의 冷却過程을 有限要素法에 의하여 試圖하였다.

解析을 통하여 얻어진 주요 結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 溫度解析에 있어서 熔接線 근처의 경우 冷却 初期段階에서 熱傳導 및 주위와의 熱傳達로 인하여 약 60초 이내에 용접선 방향으로의 冷却이 거의 완료되고, 그 이후에는 熔接線방향으로 균일한 溫度句配를 보이며, 용접선으로 부터 먼 母材部는 初期段階에서는 거의 溫度變化가 없었으나 시간의 경과와 함께 溫度가 상승한 후 冷却開始후 600초를 지나면서 全領域의 溫度가 균일하게 된 후 서서히 冷却되고 있음을 알 수 있다.

2) 위치에 따른 溫度變化에 있어서, 용접선 방향으로 용접 torch의 이동에 의한 영향으로 溫度變化가 심하나 60초를 경과한 후에는 溫度差는 거의 나타나지 않으며, 그 이후에는 균일한 冷却이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 研究結果를 실험과 병행하여 비교, 研究하고 아울러 熱應力 및 熱變形도 評價됨으로써 最適한 熔接設計를 위한 資料가 提示되어야 할 것으로 思料된다.

### 참고문헌

- (1) Y. Ueda, and T. Yamakawa, "Analysis of Thermal Elastic-Plastic-Stress and Strain during Welding by finite Element Method" Trans. Japan Welding Society, Vol. 2, No. 2(1971)
- (2) Y. Ueda, and T. Yamakawa, "Thermal Stress Analysis of Metals with Temperature dependent Mechanical Properties", Proc. 1971 Int. conf. on Mechanical Behavior of Metals Vol. 3(1972)
- (3) Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho, "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 Intitute, England (1977) 27-37
- (4) J. T. Oden, "Finite Elements of Nonlinear Continua"(1972), Mc Gaw-Hill
- (5) Rebenstein, L. I., "The Stefan Problem", American Mathematical Society,(1971).
- (6) H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford Press,(1959)
- (7) E. Hinton, D. R. J. Owen, "An Introduction to Finite Element Computation Pineridge Press LTD.(1979)
- (8) E. Hinton, D. R. J. Owen, "Finite Element Programming", Academic Press,(1977)
- (9) E. A. Brandes, "Smithells Metals Referenece Hand Book", 6th Butterworths,(1983)
- (10) J. P. Holman, "Heat Transfer", Mc Graw-Hill, Inc.,(1981)
- (11) E. Hinton, D. R. J. Owen, "Finite Element in Plasticity", Pine-ridge Press LTD.(1980)
- (12) O. C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method", 3rd, Mc Graw-Hill Book Co.(1977)
- (13) J. R. Welty, "Engineering Heat Transfer, SI Version, John Wiley and Sons,(1978)