

Tandem熔接으로 인한 溫度分布 및 熱應力

金 曉 哲* · 李 隼 烈**

Temperature Distribution and Thermal Stresses of Infinite Plate due to Tandem Arc Welding

Hyoehul Kim · J.Y. Lee

Abstract

In shipyard production processes, lots of steel plates are assembled by welding.

Some rectangular steel plates are butt welded to build a large block in panel production lines. There are some advantages to take the tandem arc welding in butt joints of rectangular plates with respect to welding speed.

Hence, the thermal stresses and the temperature distribution of the tandem arc welding are studied in this paper.

The solutions in the case of the infinite plate with two instantaneous point heat sources have been obtained. And then the solutions have been extended to the case of two moving heat sources corresponding to the tandem arc welding with the aid of Duhamel's superposition integral.

It was found that the temperature distribution was good agreement with the results of the experiments by Rosenthal and Park and the thermal stresses calculated were acceptable with respect to a physical phenomenon.

These solutions are able to be applied to the problem such as a line heating.

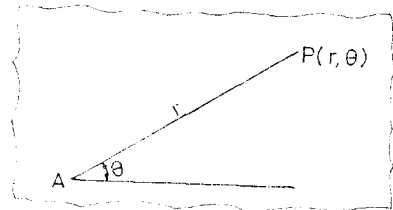
I. 結 言

造船所 現場工程의 大部分은 熔接에 依해 諸部材들을 組立하고 있다. 組立工程中에서도 panel line에서는 直線部材들을 組立하고 있는데 熔接速度를 높여 좁으므로 熔接能率의 向上을 期하고 있다. 特히 여러 境遇에 있어서 同一 直線上에 2個의 電極을 配置하여 熔接能率을 向上시키고져 하는 熔接方式인 tandem熔接을 採擇하고 있다.

그러나 現在까지 이런 境遇에 對한 溫度分布 및 熱應力問題를 다룬 바 없었다. 이에 本 論文에서는 tandem 熔接에 시와 같은 一定한 速度로 移動하는 2個의 熱源에 依한 溫度分布와 이에 對應되는 熱應力을 類推해 낼 수 있는 理論的인 바탕을 마련하고자 한다.

均質한 物理的 性質을 가진 많은 無限平板上의 任意의 點에 瞬間的으로 點熱源이 주어졌다고 하자. 또한 板의 物理的 性質은 溫度變化에 따라 不變한다고 생각 하고 平板表面상에서의 熱損失을 無視하면 板두께 方向 으로는 溫度變化가 없다고 볼 수 있다.

따라서 板에서의 溫度를 θ 라 하면 熱傳導方程式은



A: instantaneous point heat source point
 $p(r, \theta)$: arbitrary point

Fig. 1. Coordinate system

II. 理論解析

1. 溫度分布

(1) 瞬間熱源에 依한 溫度分布

* 正會員, 서울大學校 工科大學 造船工學科
 ** 正會員, 韓國 船舶海洋研究所

式(1)로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \theta_i}{\partial \theta} = \frac{1}{k} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

여기서

$$0 \leq t < \infty$$

k : 熱擴散率

式(1)의 解는 式(2)로 주어지는 條件들을 滿足해야 한다.

$$\lim_{R \rightarrow 0, t \rightarrow 0} (-2\pi R \lambda \frac{\partial \theta_i}{\partial R}) = q \quad (2-1)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \theta_i = 0 \quad (2-2)$$

여기서

q : 熱源의 單位길이와 單位時間當의 熱放出量

λ : 熱傳導率

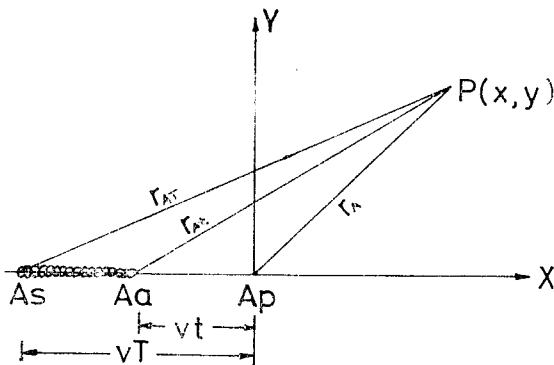
따라서 條件式(2)을 滿足하는 式(1)의 解는 式(3)으로 表示된다. [1].

$$\theta_i = \frac{q}{4\pi \lambda t} \text{EXP}(-r^2/4kt) \quad (3)$$

(2) 一定한 速度로 進行하는 熱源에 依한 溫度分布

Tandem 熔接에 있어서 電極은 持續的으로 熱을 供給하며 直線的으로 進行하는 境遇로 理想化하여 생각할 수 있다.

이 境遇의 溫度分布는 瞬間的으로 주어진 하나의 熱源을 熱源 A라 하고 그 熱의 放出量을 q_A 라 할때 이것에 依한 溫度分布를 時間 및 移動經路에 따라 積分重疊함으로써 얻을 수 있다.



- A_s : starting position of heat source A
- A_a : arbitrary position of moving heat source A
- A_p : present position of heat source A
- $P(x, y)$: arbitrary point

Fig. 2-1. Coordinate system for moving heat source A

熱의 供給時間을 T 라 하고 熱의 供給이 中止된 後의 冷却時間을 t_a 라 하면 式(3)에서 t 代身 $t+t_a$ 라 하고 積分重疊하면 式(4)로 表示된다.

$$\theta_A = \frac{q_A}{4\pi \lambda} \int_0^T \text{EXP} \left\{ -r_{Ai}^2/4k(t+t_a) \right\} \frac{dt}{t+t_a} \quad (4-1)$$

$$\theta_A = \frac{q_A}{2\pi \lambda} \text{EXP} \left(-\frac{v\xi_A}{2k} \right) \left[S_0(Z_A) \right] \frac{m_2}{m_1} \quad (4-2)$$

여기서

θ_A : 熱源 A에 依한 溫度

q_A : 熱源 A의 熱放出量

$$t_c = T + t_a$$

$$\xi_A = x - vt_a$$

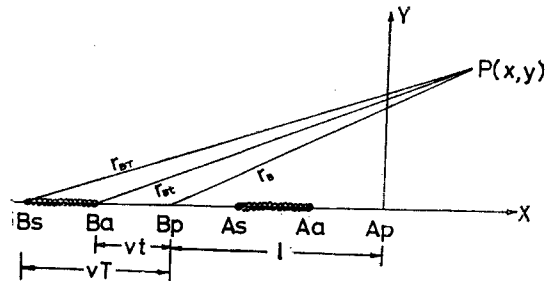
$$m_1 = \frac{v^2 t_a}{4k}$$

$$m_2 = \frac{v^2 t_c}{4k}$$

$$Z_A = \frac{v}{2k} \sqrt{\xi_A^2 + y^2}$$

$$\left[S_n(Z) \right] \frac{m_2}{m_1} = \frac{Z^n}{2^{n+1}} \int_{m_1}^{m_2} \text{EXP} \left(\frac{-x - \frac{Z^2}{4x}}{x^{n+1}} \right) dx$$

Tandem 熔接에 있어서는 x 軸上에 熱源 A로 부터 l 만큼 떨어진 곳에 주어지는 또 하나의 電極이 있으므로 그것을 熱源 B라 하면 이는 A와 같은 速度로 進行하게 되므로 tandem 熔接으로 因한 溫度는 다음과 같이 얻어진다.



- B_s : starting position of heat source B
- B_a : arbitrary position of moving heat source B
- B_p : present position of heat source B
- $P(x, y)$: arbitrary point

Fig. 2-2. Coordinate system for moving heat source B

$$\theta = \frac{1}{2\pi \lambda} \left\{ q_A \text{EXP} \left(-\frac{v\xi_A}{2k} \right) \left[S_0(Z_A) \right] \frac{m_2}{m_1} + q_B \text{EXP} \left(-\frac{v\xi_B}{2k} \right) \left[S_0(Z_B) \right] \frac{m_2}{m_1} \right\} \quad (5)$$

여기서

θ ; 熱源 A와 B에 의한 溫度

q_B ; 熱源 B의 熱放出量

$$\xi_B = \xi_A + l$$

$$Z_B = \frac{v}{2k} \sqrt{\xi_B^2 + y^2}$$

2. 熱應力

溫度分布에 의한 應力解析에 있어서는 熔接初期와 같이 溫度變化가 急激한 境遇에는 動的效果가 考慮되어야 하지만 熔接이 持續的으로 이루어지고 있는 境遇에는 熱衝激으로 인한 動的效果는 크지 않으므로 이를 無視한다.

또한 溫度分布 以外的 外力이 주어지지 않았다고 보면 體積力를 無視할 수 있고 比較的 얇은 無限板을 假定하였으므로 二次元 平面應力 問題로 取扱하였다.

따라서 熱應力 函數中 ϕ 는 式(6)을 滿足해야 한다[2].

$$\nabla^4 \phi + \alpha E P^2 \theta = 0 \quad (6)$$

여기서

α ; 線膨脹係數

E ; 彈性係數

式(3)으로 表現되는 瞬間熱源에 의한 溫度分布로 인한 熱應力은 式(6)을 滿足해야 한다.

여기서 應力函數 ϕ 를 式(7)과 같이 表現된다고 생각 하고[2]

$$\phi = U - V \quad (7)$$

熱應力의 原因이 되는 溫度分布에서와 같이 熱應力은 熱源에 關하여 對稱이 되므로 U 와 V 를 求하면 式(8)과 式(9)가 된다.

$$V = \frac{\alpha E q}{4\pi \lambda t} \int_0^r \frac{1}{R} \int_0^R R \cdot \text{EXP}(-R^2/4kt) dR \cdot dR \quad (8)$$

$$U = C_1 r^2 \log r + C_2 r^2 + C_3 \log r + C_4 \quad (9)$$

그런데 熱應力은 주어진 問題에서 式(10)의 條件들을 滿足해야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \tau_{r\theta}) = \infty \quad (10)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \tau_{r\theta}) = 0$$

여기서

$\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \tau_{r\theta}$; 瞬間點熱源에 의한 應力成分들

式(8), 式(9)로 求해진 應力函數 ϕ 로 부터 應力成分들을 求하고 條件式(10)을 適用하여 應力函數 U 와 V 를 決定하면 熱應力成分들은 다음과 같다.

$$\sigma_{rr} = \frac{\alpha E}{2\pi} \frac{q}{\rho c} \frac{1}{r^2} \left\{ \text{EXP}(-r^2/4kt) - 1 \right\}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E}{2\pi} \frac{q}{\rho c} \frac{1}{r^2} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{r^2}{2kt} \right) \text{EXP}(-r^2/4kt) \right\}$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (11)$$

여기서

ρ ; 密度

c ; 比熱

여기에서 溫度分布에서와 마찬가지로 積分重疊하여 移動熱源으로 인한 熱應力을 求하면 熱源 A에 對해서는 式(12)로 얻어진다.

$$\sigma_{rr_a} = \frac{\alpha E}{2\pi} \frac{q_A}{\rho c} \int_0^T \frac{1}{r_{A_i}^2} \left\{ \text{EXP}(-r_{A_i}^2/4k(t+t_a)) - 1 \right\} \frac{dt}{t+t_a}$$

$$\sigma_{\theta\theta_a} = \frac{\alpha E}{2\pi} \frac{q_A}{\rho c} \int_0^T \frac{1}{r_{A_i}^2} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{r_{A_i}^2}{2k(t+t_a)} \right) \text{EXP}(-r_{A_i}^2/4k(t+t_a)) \right\} \frac{dt}{t+t_a}$$

$$\tau_{r\theta_a} = 0 \quad (12)$$

여기서 $\sigma_{rr_a}, \sigma_{\theta\theta_a}, \tau_{r\theta_a}$; 移動熱源 A에 의한 應力成分들이다.

주어진 問題에서는 2個의 電極이 x 軸上을 同一한 速度로 移動하며 T 秒間 熔接이 되고 t_a 秒間 時間이 經過한 境遇의 熱應力을 求하고자 한다.

따라서 熱應力成分들은 熱源 B로 인한 熱應力까지를 마찬가지로 求하고 Fig. 3-1과 Fig. 3-2의 關係로 부터 x 軸과 y 軸方向의 熱應力으로 表記하고 溫度를 求할 때와 같이 積分을 遂行하면 式(13)이 얻어진다.

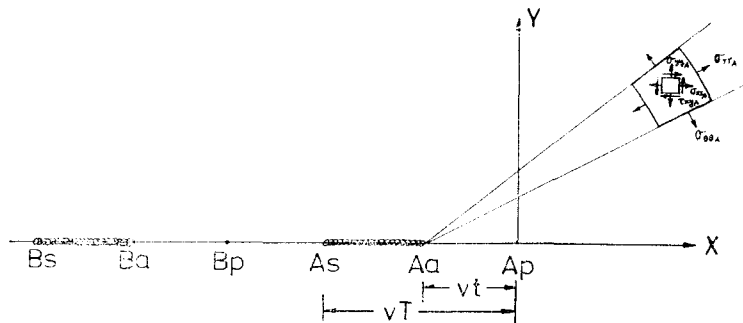


Fig. 3-1. Stress components of P in polar and rectangular form due to heat source A

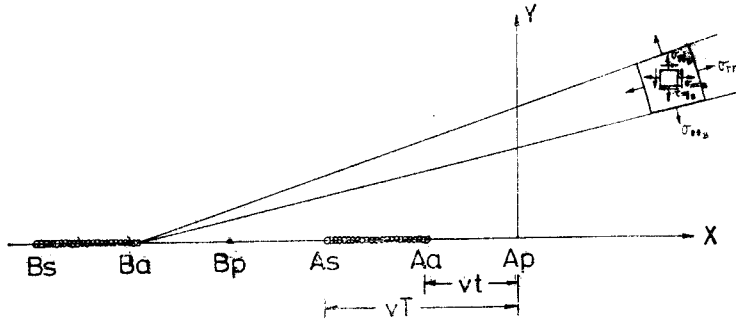


Fig. 3-2. Stress components of P in polar and rectangular form due to heat source B

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} = & \frac{\alpha E}{4\pi\lambda} \left\{ q_A \left[\frac{2k}{v} \left\{ \frac{x_{AT}}{r_{AT}^2} (1 - \text{EXP}(-r_{AT}^2/4kt_c)) - \frac{x}{r_A^2} (1 - \text{EXP}(-r_A^2/4kt_a)) \right\} \right. \right. \\
 & - \text{EXP}\left(-\frac{v\xi_A}{2k}\right) \left\{ [S_0(Z_A)] \frac{m_2}{m_1} - \frac{\xi_A}{r_{A\xi}} [S_1(Z_A)] \frac{m_2}{m_1} \right\} \\
 & - q_B \left[\frac{2k}{v} \left\{ \frac{x_{BT}}{r_{BT}^2} (1 - \text{EXP}(-r_{BT}^2/4kt_c)) - \frac{x_B}{r_B^2} (1 - \text{EXP}(-r_B^2/4kt_a)) \right\} \right. \\
 & \left. \left. - \text{EXP}\left(-\frac{v\xi_B}{2k}\right) \left\{ [S_0(Z_B)] \frac{m_2}{m_1} - \frac{\xi_B}{r_{B\xi}} [S_1(Z_B)] \frac{m_2}{m_1} \right\} \right] \right\} \\
 \sigma_{yy} = & \frac{\alpha E}{4\pi\lambda} \left\{ q_A \left[-\frac{2k}{v} \left\{ \frac{x_{AT}}{r_{AT}^2} (1 - \text{EXP}(-r_{AT}^2/4kt_c)) - \frac{x}{r_A^2} (1 - \text{EXP}(-r_A^2/4kt_a)) \right\} \right. \right. \\
 & - \text{EXP}\left(-\frac{v\xi_A}{2k}\right) \left\{ [S_0(Z_A)] \frac{m_2}{m_1} - \frac{\xi_A}{r_{A\xi}} [S_1(Z_A)] \frac{m_2}{m_1} \right\} \\
 & + q_B \left[-\frac{2k}{v} \left\{ \frac{x_{BT}}{r_{BT}^2} (1 - \text{EXP}(-r_{BT}^2/4kt_c)) - \frac{x_B}{r_B^2} (1 - \text{EXP}(-r_B^2/4kt_a)) \right\} \right. \\
 & \left. \left. - \text{EXP}\left(-\frac{v\xi_B}{2k}\right) \left\{ [S_0(Z_B)] \frac{m_2}{m_1} + \frac{\xi_B}{r_{B\xi}} [S_1(Z_B)] \frac{m_2}{m_1} \right\} \right] \right\} \\
 \tau_{xy} = & \frac{\alpha E}{4\pi\lambda} \left\{ q_A \left[\frac{2k}{v} \left\{ \frac{y}{r_{AT}^2} (1 - \text{EXP}(-r_{AT}^2/4kt_c)) - \frac{y}{r_A^2} (1 - \text{EXP}(-r_A^2/4kt_a)) \right\} \right. \right. \\
 & + \frac{y}{r_{A\xi}} \text{EXP}\left(-\frac{v\xi_A}{2k}\right) [S_1(Z_A)] \frac{m_2}{m_1} + q_B \left[\frac{2k}{v} \left\{ \frac{y}{r_{BT}^2} (1 - \text{EXP}(-r_{BT}^2/4kt_c)) \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{y}{r_B^2} (1 - \text{EXP}(-r_B^2/4kt_a)) \right\} + \frac{y}{r_{B\xi}} \text{EXP}\left(-\frac{v\xi_B}{2k}\right) [S_1(Z_B)] \frac{m_2}{m_1} \right] \right\} \quad (13)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 x_B = x + l & & x_{AT} = x + vT & & x_{BT} = x_{AT} + l \\
 \xi_A = x - vt_a & & \xi_B = \xi_A + l & & t_c = T + t_a \\
 r_A = \sqrt{x^2 + y^2} & & r_B = \sqrt{x_B^2 + y^2} & & r_{A\xi} = \sqrt{\xi_A^2 + y^2} \\
 r_{B\xi} = \sqrt{\xi_B^2 + y^2} & & & &
 \end{aligned}$$

σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} ; 移動熱源 A와 B에 의한 應力成分

3. 理論式的 無次元化

溫度分布 및 熱應力은 두 熱源의 세기, 移動速度, 物理的 性質等에 依하여 變化하게 된다. 따라서 無次元化變數들을 다음과 같이 設定할 수 있다.

$$\bar{t} = \frac{kT}{l^2} \qquad \bar{t}_a = \frac{kt_a}{l^2} \qquad \bar{v} = \frac{vl}{k} \qquad \bar{a} = \frac{x}{l}$$

$$\bar{b} = \frac{y}{l} \quad \bar{\theta} = \theta / \frac{q}{2\pi\rho cvl}$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma} \quad \bar{\sigma}_{yy} = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma} \quad \bar{\tau}_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\sigma} \quad \sigma = \frac{\alpha E q}{4\pi\lambda}$$

따라서 式(5), 式(13)은 式(14), 式(15)로 表示된다.

$$\theta = \bar{\theta} \left\{ \text{EXP}\left(-\frac{\bar{v}\bar{\xi}_A}{2}\right) \left[S_0(\bar{z}_A) \right] \frac{m_2}{m_1} + \text{EXP}\left(-\frac{\bar{z}\bar{\xi}_B}{2}\right) \left[S_0(\bar{z}_B) \right] \frac{m_2}{m_1} \right\} \quad (14)$$

여기서

$$\begin{aligned} \bar{i}_c &= \bar{i}_a + \bar{i} & \bar{\xi}_A &= \bar{a} - \bar{v}\bar{i}_a & \bar{\xi}_B &= \bar{\xi}_A + 1 & r_{A\bar{i}} &= \sqrt{\frac{r_A^2}{\bar{\xi}_A^2} + \bar{b}^2} \\ \bar{r}_{B\bar{i}} &= \sqrt{\bar{\xi}_B^2 + \bar{b}^2} & \bar{z}_A &= \frac{1}{2} \bar{v} r_{A\bar{i}} & \bar{z}_B &= \frac{1}{2} \bar{v} r_{B\bar{i}} & \bar{m}_1 &= \frac{1}{4} \bar{v}^2 \bar{i}_a \\ \bar{m}_2 &= \frac{1}{4} \bar{v}^2 \bar{i}_c \\ \bar{\sigma}_{xx} &= \frac{2\bar{a}_{AT}}{\bar{v} r_{AT}^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_{AT}^2}{4\bar{i}_c}\right)\right) - \frac{2\bar{a} r_A^2}{\bar{v} r_A^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_A^2}{4\bar{i}_a}\right)\right) - \text{EXP}\left(-\frac{\bar{v}\bar{\xi}_A}{2}\right) \left\{ \left[S_0(\bar{z}_A) \right] \frac{m_2}{m_1} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\bar{\xi}_A}{r_{A\bar{i}}} \left[S_1(\bar{z}_A) \right] \frac{m_2}{m_1} \right\} + \frac{2\bar{a}_{BT}}{\bar{v} r_{BT}^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_{BT}^2}{4\bar{i}_c}\right)\right) - \frac{2\bar{a}_B}{\bar{v} r_B^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_B^2}{4\bar{i}_a}\right)\right) \\ &\quad - \text{EXP}\left(-\frac{\bar{v}\bar{\xi}_B}{2}\right) \left\{ \left[S_0(\bar{z}_B) \right] \frac{m_2}{m_1} - \frac{\bar{\xi}_B}{r_{B\bar{i}}} \left[S_1(\bar{z}_B) \right] \frac{m_2}{m_1} \right\} \\ \bar{\sigma}_{yy} &= -\frac{2\bar{a}_{AT}}{\bar{v} r_{AT}^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_{AT}^2}{4\bar{i}_c}\right)\right) - \frac{2\bar{a}}{\bar{v} r_A^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_A^2}{4\bar{i}_a}\right)\right) - \text{EXP}\left(-\frac{\bar{v}\bar{\xi}_A}{2}\right) \left\{ \left[S_0(\bar{z}_A) \right] \frac{m_2}{m_1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\bar{\xi}_A}{r_{AT}} \left[S_1(\bar{z}_A) \right] \frac{m_2}{m_1} \right\} - \frac{2\bar{a}_{BT}}{\bar{v} r_{BT}^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_{BT}^2}{4\bar{i}_c}\right)\right) - \frac{2\bar{a}_B}{\bar{v} r_B^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_B^2}{4\bar{i}_a}\right)\right) \\ &\quad - \text{EXP}\left(-\frac{\bar{v}\bar{\xi}_B}{2}\right) \left\{ \left[S_0(\bar{z}_B) \right] \frac{m_2}{m_1} + \frac{\bar{\xi}_B}{r_{BT}} \left[S_1(\bar{z}_B) \right] \frac{m_2}{m_1} \right\} \\ \bar{\tau}_{xy} &= \frac{2\bar{b}}{\bar{v} r_{AT}^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_{AT}^2}{4\bar{i}_c}\right)\right) - \frac{2\bar{b}}{\bar{v} r_A^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_A^2}{4\bar{i}_a}\right)\right) + \frac{\bar{b}}{r_{A\bar{i}}} \text{EXP}\left(-\frac{\bar{v}\bar{\xi}_A}{2}\right) \left[S_1(\bar{z}_A) \right] \frac{m_2}{m_1} \\ &\quad + \frac{2\bar{b}}{\bar{v} r_{BT}^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_{BT}^2}{4\bar{i}_c}\right)\right) - \frac{2\bar{b}}{\bar{v} r_B^2} \left(1 - \text{EXP}\left(-\frac{r_B^2}{4\bar{i}_a}\right)\right) + \frac{\bar{b}}{r_{B\bar{i}}} \text{EXP}\left(-\frac{\bar{v}\bar{\xi}_B}{2}\right) \left[S_1(\bar{z}_B) \right] \frac{m_2}{m_1} \quad (15) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} \bar{a}_B &= \bar{a} + 1 & \bar{a}_{AT} &= \bar{a} + \bar{v}\bar{i} & \bar{a}_{BT} &= \bar{a}_{AT} + 1 & r_A &= \sqrt{\bar{a}^2 + \bar{b}^2} \\ \bar{r}_B &= \sqrt{\bar{a}_B^2 + \bar{b}^2} & \bar{r}_{AT} &= \sqrt{\bar{a}_{AT}^2 + \bar{b}^2} & \bar{r}_{BT} &= \sqrt{\bar{a}_{BT}^2 + \bar{b}^2} \end{aligned}$$

III. 檢 討

1. 理論式的 檢討

式(11)로 求해진 瞬間熱源에 依한 熱應力成分들의 素解는 變位 potential을 定義하고 Fourier-Bessel transform method에 依하여 求한 Nowacki [3]의 別解와 一致함을 보였다.

그리고 式(13)의 任意 一個의 熱源에 依한 熱應力成分들을 Watanabe의 理論解와 比較하면 Watanabe의 解法에서는 應力函數 U를 移動熱源의 熱源近處에서의 變

形의 適合條件으로부터 얻었으므로 式(13)과 差異를 나타내는 項이 있게 된다.

그러나 같은 境遇에 對한 Satoh [9]의 最近結果에서는 이를 修正하여 發表하였는데 이와는 一致되고 있다.

뿐만 아니라 式(13)中에서 하나의 熱源에 依한 應力成分들은 $T \rightarrow \infty$ 이고 $t_a = 0$ 이면 準定常狀態에 該當하고 $\lim_{B \rightarrow \infty} [S_n(Z)]_B^B = K_n(Z)$ 의 關係가 주어짐으로 Karlsson의 解와도 比較가 可能하고 一致됨을 알 수 있다.

2. 數值計算 및 結果의 檢討

理論式的 檢證을 爲하여 數值計算을 實施 하였는데 이

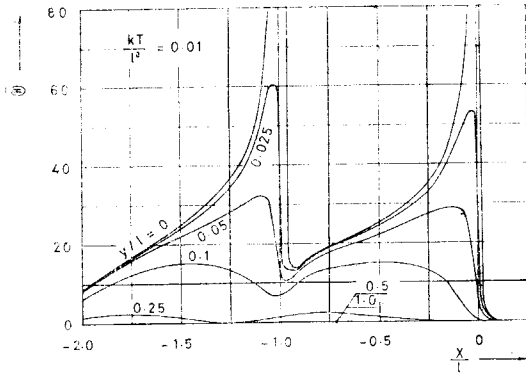


Fig. 4-1. θ in X direction

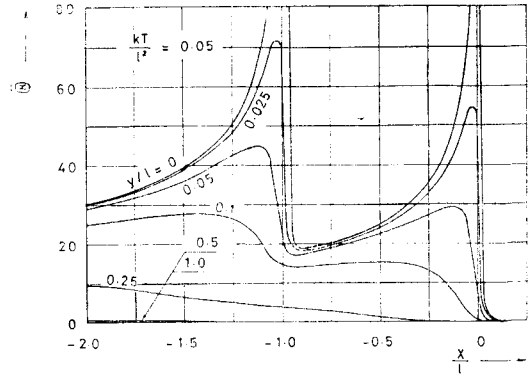


Fig. 4-2. θ in X direction

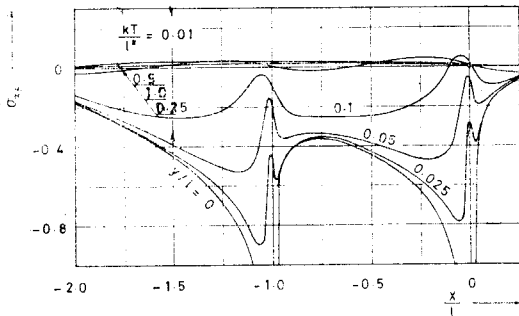


Fig. 4-3. σ_{xx} in X direction

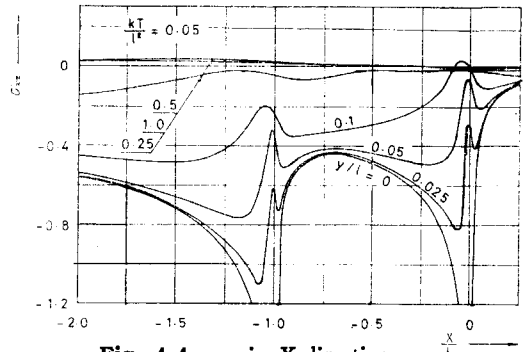


Fig. 4-4. σ_{xx} in X direction

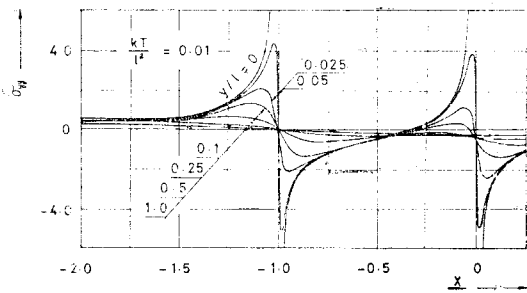


Fig. 4-5. σ_{yy} in X direction

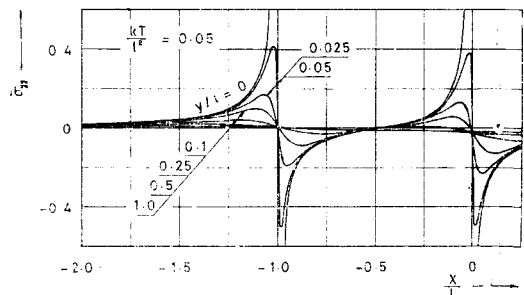


Fig. 4-6. σ_{yy} in X direction

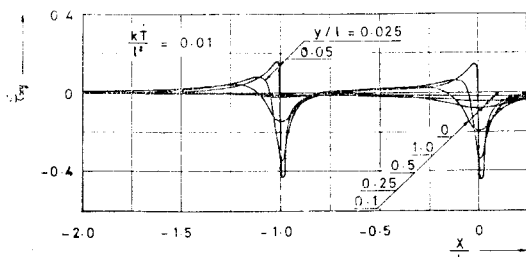


Fig. 4-7. τ_{xy} in X direction

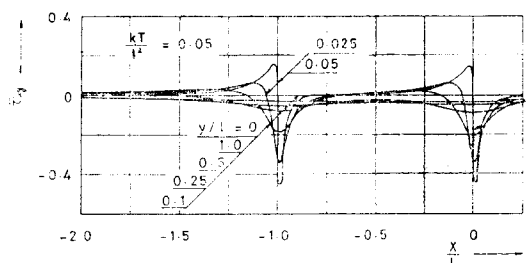


Fig. 4-8. τ_{xy} in X direction

때 變數는 實際 熔接工作를 考慮하고 熱源과 熔接길이 를 考慮하여 設定하였다.

그리고 t_0 는 그 效果가 式으로부터 確認할 수 있는 바 와 같이 溫度 및 熱應力成分들을 急速히 解消시키는 效果만을 가지고 있다.

따라서 計算例에서는 $\bar{v}=100$, $\bar{t}=0.01$, $\bar{t}_a=0$ 인 境遇 $\bar{v}=100$, $\bar{t}=0.05$, $\bar{t}_a=0$ 의 境遇를 擇하여 計算하였고 Fig. 4-1, Fig. 4-2의 溫度分布와 Fig. 4-3~Fig. 4-8의 應力成分들의 分布를 얻었다.

計算된 溫度分布 Fig. 4-1과 Fig. 4-2를 보면 Rosenthal [12] 및 Park[7]의 實驗結果와 比較해 볼 때 주어진 問題에서의 溫度分布를 定性的으로 잘 나타내고 있다.

그리고 加熱時間 $\bar{t}=0.01$ 인 境遇와 $\bar{t}=0.05$ 일 때를 比較하면 熱源 A近處에서는 溫度分布가 加熱時間 \bar{t} 에 別로 影響을 받지 않음을 알 수 있다. 反對로 熱源 近處에서는 $v_T \geq l$ 일 때 부터 앞의 影響을 받게 되어 溫度가 上昇됨을 알 수 있다.

이런 事實은 熔接에 있어서 加熱溫度를 一定하게 할 때 q_B 의 세기를 줄여 줄 수 있음을 뜻한다. 또 熔接電極間 距離 l 을 짧게 해 주면 v 를 增加시킬 수 있을 뿐만 아니라 q_B 의 세기를 더욱 줄여 줄 수 있으므로 熔接 效率를 크게 높여 줄 수 있을 것으로 보여진다.

Fig. 4-3~Fig. 4-8을 보면 前述한 研究[7], [8]로부터 미루어 볼 때 期待되는 物理的 現象과 잘 符合됨을 알 수 있다.

Fig. 4-1, Fig. 4-2의 溫度分布와 그에 對應되는 Fig. 4-2~Fig. 4-8의 熱應力을 比較해 보면 熱應力은 溫度分布가 이루어지는 區間에 比하여 훨씬 멀리 波及됨을 알 수 있다.

熱源 A 近處에서의 溫度分布와 熱應力은 加熱時間 \bar{t} 에 關係없이 거의 一定한데 反해 熱源 B 近處에서는 熱源 A 近處에서 보다 높은 溫度와 熱應力값을 나타내고 있다.

熔接等の 工學的 應用例에서는 어떤 溫度 以上 加熱해야 하는 境遇가 되므로 이 溫度를 固定시켜 놓고 생각할 때 q_B 의 세기를 줄여 주면 熱源 近處에서의 最高溫度를 떨어뜨릴 수 있을 뿐만 아니라 熱應力까지도 떨어뜨릴 수 있음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 4-3~Fig. 4-8사이의 應力成分들을 보면 熔接殘留應力 및 殘留變形의 原因이 되는 降伏現象은 Tresca의 條件式이나 Mises의 條件式과 함께 생각할 때 熱源 近處에서 나타나며 熱源이 通過된 直後에 始作될 것이라는 事實을 알 수 있다.

IV. 結 論

얻어진 解는 앞에서 檢討하여 본 바에서의 같이 주어진 問題에 關하여 加熱過程에서 부터 冷却過程에 이르는 全過程에 걸쳐서 適用될 수 있는 解가 됨을 알 수 있다.

또한 計算結果로 부터 確認된 바와 같이 이 解는 Tandem熔接에서의 熔接速度, 供給熱量과 熱源間의 距離等 熔接變數들을 理想的으로 設定하기 爲하여 有用하게 使用될 수 있음이 立證되었다.

後 記

本 論文을 爲한 資料를 주시고 助言을 하여주신 김재근, 황종홍, 임상진, 김국천, 박중은 교수님들께 감사드리며 造船工學科 大學院生, 計算結果의 整理를 도와 준 이종식군에게 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

- [1] Carslaw and Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford Univ. Press, 1973.
- [2] B.E. Gatewood, "Thermal Stresses", McGraw Hill Book Company, Inc., 1957.
- [3] W. Nowacki, "Thermo-elasticity", Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1962.
- [4] Hyochul Kim, "Transient Thermal Stresses in a Thin Circular Disk due to a Moving Point Source of Heat on a Concentric Circle", *Journal of the S.N.A.K.*, pp.13-34, 1975.
- [5] S. Timoshenko and Goodier, "Theory of Elasticity", McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951.
- [6] M. Watanabe and K. Satoh, "Theoretical Analysis of Thermal Stress due to Moving Heat Source", *Journal of J.S.N.A.* No. 96, pp.87-97, 1955.
- [7] J.E. Park, "Thermal Stresses due to a Heat Source Moving Crosswise on a Finite Breadth Plate", *Journal of the S.N.A.K.*, Vol. 12, No. 1, pp.59-75, 1975.
- [8] L. Karlsson and B.A. Akesson, "Plane Stress Field Induced by a Concentrated Heat Source Moving Perpendicularly Toward Free Edge of Semi-infinite Plate", *Journal of Applied Mechan-*

- ics*, pp.825-827, 1974.
- [9] K. Satoh et al., "Studies on Deformation and Cracking in One Sided Welding", *Journal of the J.S.N.A.*, Vol. 14, pp.93-119, 1976.
- 10] Hyochul Kim and Zae Geun Kim, "Study on the Thermal Stresses and Residual Stresses due to Welding in Hull Construction", *Journal of the S.N.A.K.*, Vol. 13, No.1, pp.25-34, 1976.
- [11] A.W.S., "*Welding Hand-book* Six Edition Section Two", American Welding Society, 1969.
- [12] D. Rosenthal and R. Schmerber, "Thermal Study of Arc Welding", *Welding Journal R.S.* Vol.17, No.4, pp.2-8, 1938.