

抵抗點熔接에 따른 過渡的 冷却 溫度履歷

金 曉 哲\*

Transient Temperature Distributions in a Adiabatic Plate  
Due to Resistance Spot Welding

by

Hyochul Kim

Abstract

As the technique of resistance spot welding became more and more advanced the factors hitherto considered secondary became more and more important. Among these factors the distribution of heat and temperature during resistance spot welding is particularly important in conjunction with thermal stress, strain and residual stress, strain problems.

The analytical investigations upon the transient temperature due to resistance spot welding were made for the carbon steel plate and aluminum alloy plate. The numerical values obtained by the analytical investigation are nearly identical with the temperature distribution which obtained by D. J. Sullivan and some other experimental data.

It was thought therefore useful to estimate the heat effect upon the material such as a residual stress and strain, metalurgical change, change in physical properties and etc.

記 號

- $r_e$  : 電極의 先端에서 的 半徑
- $r_o$  : 溫度變化가 일어나는 領域의 最大半徑
- $r$  : 座標原點에서 任意의 點까지의 距離
- $t$  : 任意의 點에서 的 溫度
- $t_w$  : 板의 熔接溫度(板의 熔解點 溫度)
- $t_{p0}$  : 板의 初期溫度
- $T$  :  $t - t_{p0}$
- $T_o$  :  $t_w - t_{p0}$
- $\alpha$  : 熱擴散率
- $\theta$  : 熔接電流가 끊어진 後부터 的 時間

1. 緒 言

우리 生活週邊에서 흔히 使用되고 있는 鐵鋼材 또는 알루미늄合金材 等的 金屬材料는 그 成分 및 製造過程에 따라 各기 다른 物理的 特性을 갖고 있다.

이러한 材料의 特性은 熔接過程中에 받게 되는 熱

에 依하여 그 材料의 熔解點 溫度까지 局部的으로 急激히 加熱되었다가 冷却됨으로 因하여 局部的으로 是母材와 다른 性質로 變化되게 된다. 이러한 材料의 溫度履歷에 따른 局部的인 性質變化가 熱應力 및 熱變形 그리고 殘留應力 및 殘留變形의 主要한 原因이 된다.

이와 같은 熔接部品 特有的 局部的인 應力 및 變形은 그 自體가 構造物에 構造上 缺陷을 가져오거나 다른 주어진 荷重에 依한 應力 및 變形과 重疊되어 缺陷을 나타내는 例를 쉽게 찾아 볼 수 있다. 따라서 위 的 問題들을 解析하는데 있어, 그 各기 段階로 볼 수 있는 熔接 過程中에 母材가 받게 되는 溫度履歷을 究明하기 爲한 理論的 및 實驗的 研究가 活潑히 이루어 지고 있다.

D. Rosenthal은 電弧熔接 過程을 熱源의 移動으로 取扱하여 理論的 解析을 하고 다시 이를 實驗的으로 檢證하고 있다[2], [1]. R.J. Grosh와 E.A. Trabant는 D. Rosenthal이나 Nippe等이 理論的 解析에서

材料的 物理的 性質이 溫度變化에 關係없이 一定하다고 보고 解析한데 對하여 이들을 溫도의 函數로 取扱한 數值解를 求하고 이를 實驗值 및 前述한 Nippe의 理論解[16]와 比較하고 있다. 또한 D. J. Sullivan 은 溫度變化에 따른 材料의 物理的 性質의 變化가 크게 問題視되지 않는 比較的 낮은 溫度까지 加熱되는 soldering의 경우에 對한 溫度履歷을 理論解析하고 있으며[4], Warren Rice와 E.J. Funk는 抵抗點熔接으로 異種材料들을 熔接할 때의 加熱過程을 一次元 energy flow로 보고 理論解析하고 있다.

本論文에 있어서는 比較的 簡單한 形態이면서도 理論解析이 잘 알려지지 않은 抵抗點熔接時의 冷却過程에 對한 溫度履歷을 理論解析하고 溫度變化가 일어나는 領域을 本論文 2節의 理論展開에서 詳述한 바와 같이 電極直徑의 5倍로 看做하여 數值計算함으로써 抵抗點熔接에서 問題될 수 있는 熱應力 및 熱變形 그리고 殘留應力 및 殘留變形을 求하는 基礎資料를 提示하였다.

2. 理論解

緒言에서 言及한 研究들 [1] [2] [3] [4] [5]들에 根據하여 理論解析에 있어서 다음과 같은 假定들을 設定한다.

1) 密度, 比熱, 熱傳達係數 등의 物理的 性質은 工學的 近似計算의 目的으로서는 溫度에 關係없이 一定한 값을 갖는다고 볼 수 있다.

2) 抵抗熱에 加熱되는 領域은 使用한 熔接電極의 直徑과 같은 直徑을 갖는 領域이 되며, 이 領域內의 모든 點은 材料의 熔解點溫度까지 均一하게 加熱된다.

3) 對流 및 輻射에 依한 熱傳達은 그 크기가 傳導에 依한 熱傳達에 比하여 훨씬 작기 때문에 이를 無視할 수 있다.

4) 抵抗熱에 依하여 加熱되었던 板要素가 冷却될 때 母材는 傳導되어온 熱에 依하여 理論上으로는 無限遠方까지 溫度變化가 일어날 것이나, 實際面에서는 抵抗入熱이 크지 않음을 考慮하여 溫度變化는 熔接電極 直徑의 5倍의 直徑을 갖는 圓板內에서만 일어난다고 看做한다.

以上の 假定下에서는 생각하는 問題는 二次元 問題로 歸着된다.

따라서 Fig. 1에서와 같이 座標系로서 加熱된 板要素 即 熔接部의 中央에 原點을 둔 極座標系를 擇하면 溫度分布는 原點에 對하여 回轉對稱이 됨으로

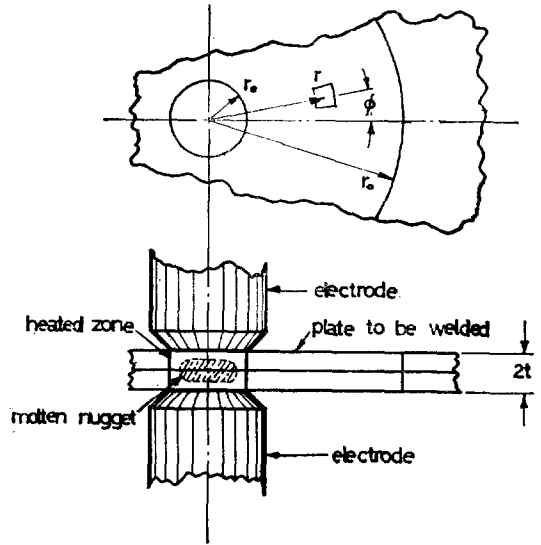


Fig. 1 Coordinate System

Fourier의 熱傳導 方程式은 다음과 같은 꼴로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} \dots\dots\dots(1)$$

이 方程式의 前述한 假定에 依한 條件式

$$\left. \begin{aligned} \theta=0, 0 \leq r \leq r_0 \text{ 일때 } T=T(r) \\ \theta \geq 0, r=r_0 \text{ 일때 } T=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

을 滿足하는 解는

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-(\lambda_n)^2 \theta} J_0 \left( M_n \frac{r}{r_0} \right) \dots\dots\dots(3)$$

와 같이 쓸 수 있다.

但 여기서  $M_n$ 은 0次의 第1種 Bessel 函數를 0으로 하는 固有值들이다.

$$\text{即 } J_0 \left( \frac{\lambda_n}{\sqrt{\alpha}} r_0 \right) = J_0(M_n) = 0$$

따라서 Fourier-Bessel 展開로서 (3)式의  $C_n$ 을 決定하면

$$C_n = \frac{2}{r_0^2} \frac{1}{[J_0(M_n)]^2 + [J_1(M_n)]^2} \int_0^{r_0} r T(r) J_0 \left( M_n \frac{r}{r_0} \right) dr \dots\dots\dots(4)$$

이 된다.

따라서 (4)式을 (3)式에 代入하면 (5)式

$$T = \frac{2}{r_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(M_n/r_0)^2 \alpha \theta} \frac{J_0 \left( M_n \frac{r}{r_0} \right)}{[J_1(M_n)]^2} \int_0^{r_0} r T(r) J_0 \left( M_n \frac{r}{r_0} \right) dr \dots\dots\dots(5)$$

을 얻는다.

이제 初期溫度分布에 關한 假定

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq r \leq r_e \text{ 일 때 } T(r) &= t_w - t_{p0} \\ r_e \leq r \leq r_0 \text{ 일 때 } T(r) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

를 사용하여 (5) 式의 積分項을 計算하면 다음과 같다.

$$\int_0^{r_e} r T(r) J_0\left(M_n \frac{r}{r_0}\right) dr = \frac{(t_w - t_{p0}) r_0 r_e}{M_n} J_1\left(M_n \frac{r_e}{r_0}\right) \dots\dots\dots(7)$$

(7) 式을 (5) 式에 代入하면 求하고자 하는 解를 얻을 수 있다. 即

$$t = t_{p0} + \frac{2 r_e}{r_0} (t_w - t_{p0}) \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(M_n/r_0)^2 \alpha \theta} \frac{J_1\left(M_n \frac{r_e}{r_0}\right) \left(M_n \frac{r}{r_0}\right)}{[J_1(M_n)]^2 M_n} \dots\dots\dots(8)$$

따라서 板의 任意의 點에서 半徑方向의 溫度變化率과 冷却速度는 다음 式으로 表示된다.

$$\frac{dt}{dr} = \frac{-2 r_e (t_w - t_{p0})}{r_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(M_n/r_0)^2 \alpha \theta} \frac{M_n J_1\left(M_n \frac{r_e}{r_0}\right) J_1\left(M_n \frac{r}{r_0}\right)}{[J_1(M_n)]^2} \dots\dots\dots(9)$$

$$\frac{dt}{d\theta} = \frac{-2 r_e (t_w - t_{p0}) \alpha}{r_0^3} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(M_n/r_0)^2 \alpha \theta} \frac{M_n J_1\left(M_n \frac{r_e}{r_0}\right) J_0\left(M_n \frac{r}{r_0}\right)}{[J_1(M_n)]^2} \dots\dots\dots(10)$$

3. 數值計算

Table 1 에서 보는 바와 같이 比較的 많이 쓰이면서도 그 性質이 對照的이라 할 수 있는 低炭素鋼과 알루미늄을 擇하여 서울大學校 工科大學에서 保有하고

Table 1. Comparison of the physical properties for the low carbon steel and aluminum alloy

Physical property	low carbon steel	aluminum alloy
Young's modulus (psi)	30,000,000	10,000,000
density (lbs/ft <sup>3</sup> )	487	171
specific heat (Btu/lbs-F)	0.113	0.22
thermal conductivity (Btu/hr-ft-F)	25	95-110
thermal diffusivity (in <sup>2</sup> /sec)	0.01808	0.1466
melting point (°F)	2700	1220
annealing temperature (°F)	1500-1695	527

있는 電子計算組織 IBM 1130 을 使用하여 溫度, 半徑方向의 溫度變化率 그리고 冷却速度를 計算하였다.

이때 式 (8), (9), (10)으로 부터 알 수 있듯이 時間  $\theta$  가 작을 경우에는 그 收斂速度가 느리므로,  $\theta$  의 작은 값에 對하여서도 精度 높은 값을 얻기 爲하여 級數의 項數  $n$  을 20 까지 取하였다.

또한 計算位置는 熔接熱에 依한 溫度變化가 일어나지 않는다고 생각한 半徑  $r_0$  를 單位길이로 하는 無次元數로 取하고 過度는 母材의 熔接溫度 即 熔解點 溫度를 單位 溫度로 하는 無次元數로 取하여 計算하였다. 따라서  $r_0$ 는 假定한 바와 같이 0.2가 된다.

4. 計算結果 및 考察

計算된 값들로 부터 低炭素鋼에 對한 溫度分布, 溫度履歷, 溫度變化率 및 冷却速度를 Fig. 2-1, Fig. 2-2, Fig. 2-3 및 Fig. 2-4 에 表示하였으며 알루미늄 合金에 對한 것은 Fig. 3-1, Fig. 3-2, Fig. 3-3 및 Fig. 3-4 에 表示하였다.

Fig. 2-1에 依하면 加熱되었던 熔接部分은 熔接作業中 加熱되지 않았던 部分으로 熱傳導가 急激히 일어나므로 그 境界面으로 부터 急激히 冷却되게 된다.

反對로 加熱되지 않았던 板은 熔接部에 가까울수록 傳導되어온 熱에 依하여 急激히 加熱되나 加熱溫度는 낮고 比較的 짧은 時間後에는 다시 冷却되기 始作하여 約 100 秒後에는 板의 初期溫度로 되돌아 오게 된다. 이는 Fig. 2-3 및 Fig. 2-4 에서도 確認할 수 있다.

이러한 事實은 比較的 낮은 溫度까지 加熱되는 soldering 경우에 對하여 溫度變化 領域을 無限遠方까지 取한 D.J. Sullivan의 計算結果[4]와 잘 一致하고 있다. 그러나 點熔接에서 加熱되는 溫度는 높기 때문에 溫度變化에 따른 物理的 性質의 變化로 因하여 實驗值와는 多少差異가 있을 것이 豫測된다. 그러나 그 差異는 前述한 R.J. Grosh와 E.A. Trabant의 研究結果로 미루어 判斷할 때 5~10%의 範圍內에 있을 것이 分明하다.

Fig. 2-2의 位置에 따른 溫度履歷 線圖에서 任意 時間後의 溫度를 알 수 있다. 따라서 熔接後 얻어지는 熔接部의 組織狀態는 該當 材料의 S曲線과 比較함으로써 미리 豫測할 수 있다. 그런데 S曲線과 比較하기에 앞서서 考慮하여 할 點은 加熱되어 熔解된 部分과 熔解되지 않은 部分이 熔接部內에 共存하게 된다는 事實이다. 即 實際熔接作業에 있어서 60 Hz의 電源을 使用하였을 때 加熱過程은 板두께에 따라

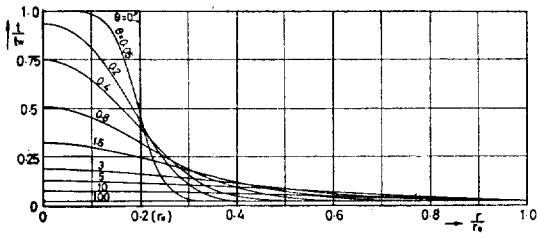


Fig. 2-1 Transient temperature distributions in a low carbon steel plate

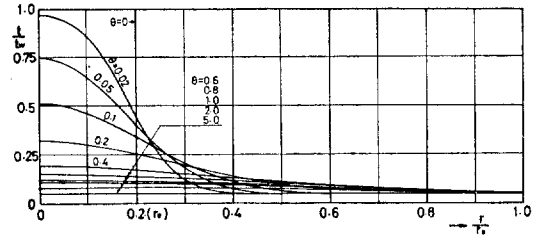


Fig. 3-1 Transient temperature distributions in an aluminum alloy plate

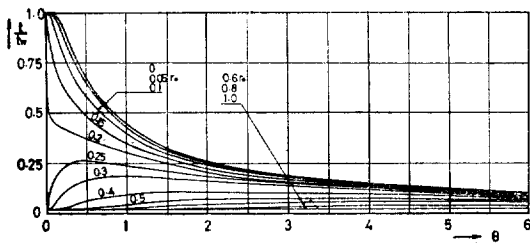


Fig. 2-2 Temperature histories in a low carbon steel plate

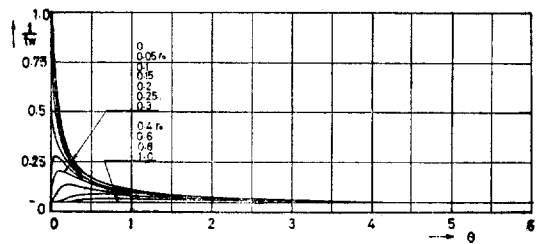


Fig. 3-2 Temperature histories in an aluminum alloy plate

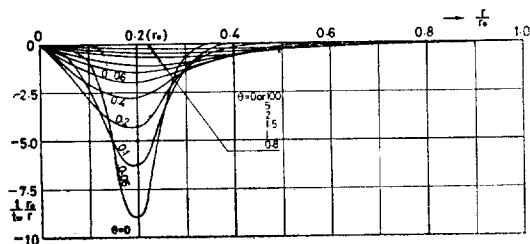


Fig. 2-3 Transient temperature gradient in a low carbon steel plate

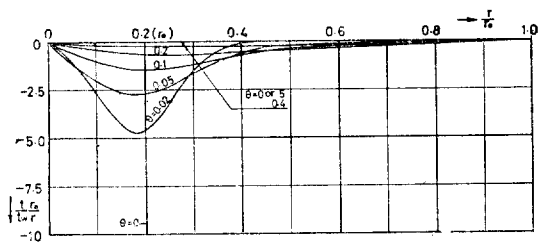


Fig. 3-3 Transient temperature gradient in an aluminum alloy plate

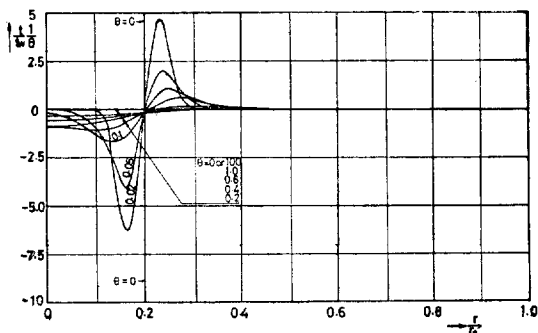


Fig. 2-4 Transient cooling rate in a low carbon steel plate

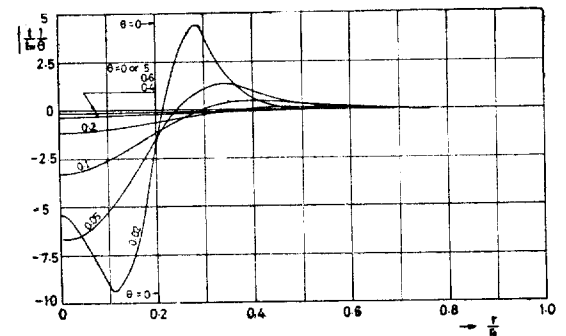


Fig. 3-4 Transient cooling rate in an aluminum alloy plate

差異는 있으나 最大 20 Hz 程度의 區間이 使用됨으로 入熱時間이 大端히 짧을 뿐 아니라 急速히 冷却되기 때문에 熔接入熱이 充分히 큰 경우에도 部分的으로 是 熔解되지 않는 部分이 있게 된다는 點이다. 美國 熔接學會의 作業標準에 依한 作業을 施行하였을 때, 주어진 電極으로서 熔接할 수 있는 板두께 들의 平均 值에 對하여 調查하여 보면 實際로 熔解되는 區間은 熔接電極 直徑의 75 % 程度의 直徑을 갖는 區間이 됨을 알 수 있다. 따라서 實際로 S 曲線과 比較할 수 있는 區間은 熔解되어 鑄造組織으로 나타나는 中央의 75 %를 除外한 殘餘區間이 된다[9][10]. 그러나 이 25 %의 外廓部分에 對하여 計算된 溫度履歷과 S 曲線을 比較하여 봄으로써 할 수 있는 것은 바로 이 區間이 急速히 冷却되기 때문에 甚하게 硬化되는 熱影響部가 된다는 點이다. 뿐만 아니라 이 區間은 몇몇의 組織寫眞[9][10]들에서도 確認할 수 있드시 組織變化를 顯微鏡으로 觀察할 수 있는 區間이라는 點이다. 熔接部의 冷却過程에서 加熱되는 週邊의 板要素는 加熱溫度가 低炭素鋼의 再結晶溫度보다 낮기 때문에 顯微鏡檢査로서는 組織變化를 識別하기 어려우나 強度低下는 確認되고 있는데[14]이 區間이 加熱되는 溫度範圍가 鋼의 變態溫度보다 낮다는 事實을 考慮한다면 이 強度低下의 原因은 組織變化에 依한다기 보다는 熱應力이나 殘留應力에 原因이 있는 것으로 생각되며, 이는 計算된 溫度分布를 利用하여 計算함으로써 確認할 수 있을 것이 기대된다.

Fig. 3-1, Fig. 3-2, Fig. 3-3 및 Fig. 3-4의 알루미늄에 對한 線圖들로부터 溫度分布의 傾向이 低炭素鋼의 경우와 거의 같은 것을 알 수 있다. 그러나 알루미늄의 物理的 性質이 Table 1에 보인 바와 같이 低炭素鋼과 對照의이기 때문에 冷却이 더욱 急速히 일어나서 熔接作業이 完了된 後約 5 秒後면 板의 初期溫度를 되 찾게 된다. 또한 熔接入熱로 直接加熱되지 않았던 熔接部 週邊의 板要素에 對한 加熱溫度의 熔接溫度에 對한 比  $t/t_w$ 는 알루미늄合金과 低炭素鋼에서 同等한 값을 갖는다.

그러나 알루미늄은 annealing 溫度가 527°F로서 鐵鋼材에 比하여 훨씬 낮을 뿐 아니라 짧은 時間 加熱되는 條件에서는 450°F 程度에서도 強度 低下가 일어 남으로 加工硬化된 母材일 경우에는 強度低下가 더욱 두드러지게 나타난다. 따라서 熔接時 熱影響으로 組織 및 強度에 變化가 일어나는 範圍가 低炭素鋼에 比하여 훨씬 크게 된다는 것을 알 수 있다.

위의 두 경우에 있어서 材料의 接觸抵抗으로 因한

內部 加熱溫度의 差異, 材料의 物理的 性質의 溫度에 따른 變化 外에도 加熱에 所要된 時間, 그리고 熔解된 部分의 潛熱로 因한 效果 等에 依해서도 溫度分布가 달라질 것이 豫想된다. 이들 중 接觸抵抗과 潛熱로 因한 效果는 本論文中에서 보인 理論解法에서 條件式(6)을 바꾸어 준다면 좀더 實際와 接近된 값을 얻을 수 있을 것이다.

### 5. 結 論

上述한 바 들로부터, 本論文中에서 使用한 假定下에서도 理論解析된 溫度分布는 工學的 目的으로 그 有用성이 認定되며, 이 理論解의 結果를 利用함으로써 抵抗 點熔接이 母材에 미치는 熱影響을 어느 程度 推理할 수 있다고 믿어진다.

### 後 記

本 理論展開에 있어서 많은 助言을 주신 學內의 여러 教授님들께 謝意를 表하는 바이다.

### 參 考 文 獻

- [1] D. Rosenthal and R. Schmerber, "Thermal Study of Arc Welding-Experimental Verification of Theoretical-Formulars-" *Welding Journal R.S.* p.2-8, 1938.
- [2] D. Rosenthal, "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting" *Welding Journal R.S.* p.220-234, 1941.
- [3] R.J. Grosh and E.A. Trabant, "Arc Welding Temperatures" *Welding Journal R.S.* p.396-400, 1956.
- [4] D.J. Sullivan, "Heat Transfer During Resistance Welding and Dip Soldering" *Welding Journal R.S.* p.79-81, 1965.
- [5] Warren Rice and E.J. Funk, "An Analytical Investigation of the Temperature Distributions During Resistance Welding" *Welding Journal R.S.* p. 175-186, 1967.
- [6] L.R. Ingersoll, O.J. Zobel, A.C. Ingersoll, "Heat Conduction with Engineering, Geological, and Other Applications" The University of Wisconsin Press, 1954.
- [7] P.J. Schneider, "Conduction Heat Transfer" Addison Wesley Company, Inc. 1957.

- [8] A.W.S., "*Welding Handbook*" Third Edition  
American Welding Society, 1956.
- [9] A.W.S., "*Welding Handbook*" Sixth Edition,  
American Welding Society, 1969.
- [10] A.W.S., "*Resistance Welding Theory and Use*"  
American Welding Society, 1966.
- [11] E. Fray and Jeffries, "*The Aluminum Industry*"  
McGraw-Hill Book Company, Inc. 1930.
- [12] Milton Abramwitz and Irene A. Stegun, "*Hand-  
book of Mathematical Functions with Formulas,  
Graphs, and Mathematical Tables*" Dover  
Publication, Inc., New York
- [13] 渡邊正紀, 住藤邦彦 "船體熔接法" 海文堂, 1961
- [14] 矢野雄三, 山根巖 "熔接作業" 産業圖書, 1964
- [15] 李澤植譯 "熱傳達" 東明社, 1969
- [16] Nippes, E.F., Wawrousek. H., Fleish mann.  
W.F., "Some Properties of Heat Affected Zone  
in Arc Welded Type 347 Stainless Steel."  
*Welding Journal R.S.* p.169. 1955.