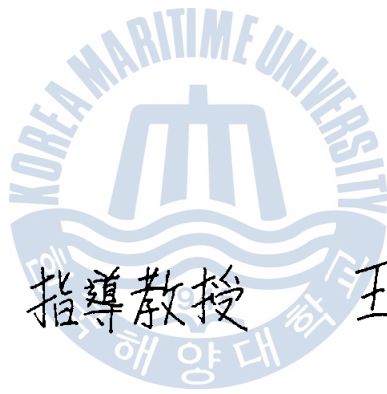


點熔接에 있어서 溫度分布의 變化推移에
關한 研究

A study on the Transient Temperature
Distribution for Spot Welds



指導教授 王之錫

韓國海洋大學 船舶機械工學科

朴鐘復 吳昌植

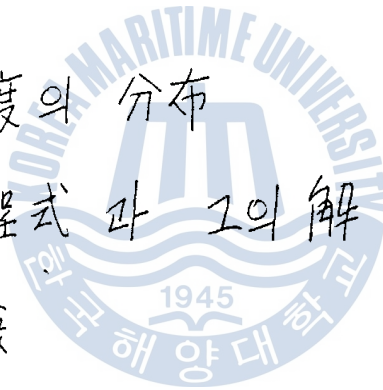
張秀憲 韓暎官

目次

Abstract

記號說明

1. 序論
2. 熱源密度的分布
3. 支配方程式과 그의解
4. 實驗
5. 結論



Abstract

A calculating method of transient temperature distribution due to spot welding of thin plates is studied in this paper.

Considering the contact stress between plates and temperature-dependence of specific resistance and elastic limit of base metal, the model of calorific density of heat source was decided.

Using 2 dimensional polar coordinates system, the governing equation was developed and the solution was obtained as following;

$$T = \frac{hH}{\pi r c \delta} \frac{e^{-bt}}{4hat+1} e^{-\frac{hr^2}{4hat}}$$

The thermal cycles of various points were traced through the spot welding experiments for mild steel plates of 1 mm, and were compared with the results of calculations.

記號說明

Q : 熱源強度	[cal/sec]
I : 電流	[A]
V : 電壓	[V]
q : 熱源密度	[cal/sec/cm ²]
k : 常數	
r, θ : 極座標系	
r_0 : 板間接觸半徑	[cm]
d_e : 電極의 直徑	[cm]
δ : 母材의 두께	[cm]
q_{im} : 熱源密度分布 모델	[cal/cm ² /sec]
q_{max} : 最大熱源密度	[cal/cm ² /sec]
f_1 : 熱源集中係數	[1/cm ²]
T : 溫度	[°C]
γ : 比重量	[gr/cm ³]
C : 比熱	[cal/gr/°C]
λ : 熱傳導係數	[cal/cm/°C/sec]
t : 時間	[sec]
H : 全熱量	[cal]
a : 熱擴散係數	[cm ² /sec]

1. 序論.

많은 板材의 接合에 주로 使用되던 點熔接의 특징은 加壓하고 短히 짧은 時間에 大電流을 通電시켜 熔接이 이루어 진다는 것이다. 따라서 母材가 常溫으로부터 融點까지 極甚한 溫度變化가 일어나고 이 溫度變化中에 熔湯이나 熱影響部에 熔接質을 決定하는 여러가지 物理的, 化學的 現象이 發生하는데 相變化, 材料의 收縮膨脹, 熱應力의 發生, 熱彈塑性變形, 母材의 熔融, 再結晶, 各種 電氣化學 反應 등이 그것이다. 이러한 現象들을 研究하는데 材料의 各點의 溫度와 그의 變化率을 正確히 把握하는 것이 尙한 重要하다. 最近 自動車나 航空機 産業이 急速度로 發達하면서 熔接材料의 信賴性을 增進시키기 위하여 點熔接質을 向上시키려는 研究가 多數 行하여 來고 있다. 이들 研究에서 주로 熔接質을 決定하는 여러가지 因子들을 變경시키면서 實驗하여 가장 適切한 熔接條件을 찾아내고 있다. 그러나 因子의 數가 甚히 많은 因子는 다른 因子에 影響을 미치므로 適正條件을 찾는 것이 매우 어렵다.

예를 들면 加壓力은 熔接電流에 커다란 영향을 미친다. 만약
熔接中 또는 熔接後에 母材의 溫度分布과 그의 變化推移를
把握할 수만 있다면 母材의 溫度變化에 따라 일어나는 여러가지
前述한 物理的, 化學的 現象들을 推定할수 있을 것이고 眞熔接質을
向示시키는데 도움이 클 것이다. 本研究에서는 이러한 點에 着眼하여
眞熔接中 및 眞熔接後의 溫度分布과 그의 變化推移를 다루었다
板間接觸應力, 母材의 比抵抗과 彈性限度가 溫度에 따라
變化하는 變動等を 考慮하여 熱源密度分布의 模型을 定하였다.

또한 板材가 얇다고 간주하여 電極의 中心線이 母材와
반하는 點을 原點으로 잡은 極座標系를 세우고 熔接時間이 대단히
짧다事實을 利用하여 이의 解를 구하므로써, 溫度分布計算式을
提示하였다. 本研究에서 提示한 計算式을 檢證하기 위하여 두께 1mm의
軟鋼板을 實際로 眞熔接하면서 熱履歷 (Thermal cycle)을 測定하여
計算結果와 比較하였다. 熱履歷의 測定은 C-A熱電對 溫度計를
利用하였다.

2. 熱源密度의 分布

某熔接時 單位時間當의 發熱量, 즉 熱源強度 Q 는
다음式으로 表示할 수 있다.

$$Q = 0.24\eta I^2 R = 0.24\eta IV \quad (1)$$

여기서 η 는 熱效率이고 I 는 熔接電流, V 는 熔接電壓,
 R 은 電氣抵抗이다. 이 熱量의 大部分이 熔接初期에는
板間接觸部分의 接觸電氣抵抗에 의하여 發生한다¹⁾.

電極의 加壓力과 被熔接材의 溫度上昇에 의하여 板間接觸
電氣抵抗은 곧 소멸되나 被熔接材의 比抵抗이 溫度에 따라
增加하므로 이런 것들을 考慮하여 單位時間當, 單位面積當,
被熔接材가 받아들이는 熱量, 즉, 熱源密度의 分布 形을
計算하고자 한다. 固體의 두面이 接觸할때, 該接觸面積은
接觸應力에 比例하고 接觸電氣抵抗은 該接觸面積에 反比例하므로²⁾
被熔接材의 板間接觸電氣抵抗은 接觸應力에 反比例한다고 볼 수 있다.

한편 電氣抵抗에 一定 電壓을 인가하였을때 單位時間當의 發熱量은 抵抗에 反比例함을 勘案할때 結局 熱源密度分布는 板間接觸 應力에 比例한다는 것을 알수있다. 點熔接의 中心點을 原點으로 한 極座標系 r, θ 를 利用하여 板間接觸應力을 計算하면 第1種 0次 Bessel 函數²⁾가 되므로 熱源密度的 分布도 第1種 0次 Bessel 函數가 된다.

$$q = CJ_0(kr) \quad (2)$$

여기서 C 와 k 는 다음에 求할 常數이고 J_0 는 第1種 0次 Bessel 函數를 나타낸다.

電極의 直徑을 d_e , 板의 두께를 δ 라 하면 板隔離 (sheet separation)가 일어나는 伴徑, 즉 板間接觸伴徑 r_0 는

$$r_0 = 0.5 (d_e + 1.1\delta) \quad (3)$$

이다. 板間接觸伴徑 r_0 을 式(2)에 代入하면 이 값이 0이 된다.

$$J_0(kr_0) = 0 \quad (4)$$

이 식을 풀어 합리적인 解를 取하면 $k r_0 = 2.405$ 이므로

$$k = \frac{2.405}{r_0} = \frac{4.81}{de + 1.18} \quad (5)$$

이 된다

熱源密度分布를 重積分하면 熱源強度가 되므로 다음식이 성립한다.

$$\int_0^r q 2\pi r dr = Q \quad (6)$$

式(5)의 k 를 式(2)에 代入하여 q 를 구하고 이를 式(6)에

代入하여 常数 C 를 구하면

$$C = 1.1487 \frac{Q}{r_0^2} = \frac{4.595 Q}{(de + 1.18)^2} \quad (7)$$

이 된다. 따라서 熱源密度의 分布 q 는 다음과 같이 된다.

$$q = 1.1487 \frac{Q}{r_0^2} J_0\left(\frac{2.405}{r_0} r\right), \quad r \leq r_0$$

$$q = 0, \quad r > r_0 \quad (8)$$

式(8)은 熔接初期에 板間接觸電氣 콘덕턴스(接觸電氣抵抗의 逆數)가 板間接觸應力에 比例할때 成立하는 式이나, 熔接이

始作되면 被熔接材의 溫度가 原點($r=0$)으로부터 急上昇하므로 이각 材料가

溶融되지 않더라도 弾性体로서 더이상 応力을 지탱할 수 없게 된다.
 따라서 熱源密度의 分布는 材料物性値가 溫度에 따라 어떻게
 變化하는가에 따라 다를 뿐만 아니라 熔接中 時々刻刻 달라진다.
 그러나 Fig.1 에서 보는바와 같이 熱源密度의 分布가 大略
 다음과 같은 形을 이루므로써 나타내어도 별 무리가 없고 다음 節의
 支配方程式을 푸는데 容易하다.

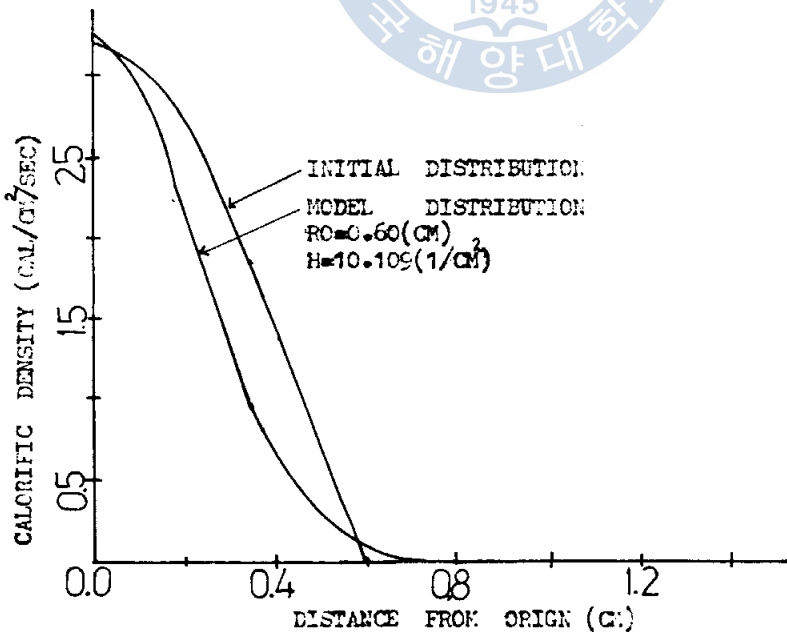


FIG.1 DISTRIBUTION OF CALORIFIC DENSITY

$$q_m = q_{\max} e^{-kr^2} \quad (9)$$

여기서 q_{\max} 는 熱源密度分布의 最大值를 나타내고 k 는 常數로서 熱源의 集中係數이다.

式(9)의 q_m 을 重積分하면 熱源強度 Q 가 된다.

$$Q = \int_0^{\infty} q_m 2\pi r dr = \int_0^{\infty} q_{\max} e^{-kr^2} 2\pi r dr \quad (10)$$

이 式으로부터 q_{\max} 를 구하면

$$q_{\max} = \frac{kQ}{\pi} \quad (11)$$

가 된다. 그러므로 熱源密度分布의 모델은 다음과 같다

$$q_m = \frac{kQ}{\pi} e^{-kr^2} \quad (12)$$

式(9)로 표시된 熱源密度分布의 모델은 다음節에서 나오는 熱傳導에 관한 偏微分方程式(支配方程式)의 解를 구하는데 쉽도록 정한 것이지만 Fig. 1에서 보는 바와 같이 실제로 어느 정도 符合되므로 實用的 價値가 있다고 생각된다.

그러나 어디까지나 모델이기 때문에 식(8)의 正確한 分布와 되도록 誤差가 적어야 할 것이다. 따라서 最小自乘法에 의하여 다음 값이 最小가 되도록 h 를 정하면 合理的인 것이다.

$$\phi = \int_0^{\infty} (g - g_m)^2 2\pi r dr \quad (13)$$

식(8)과 식(12)를 식(13)에 代入하고 $\frac{d\phi}{dh} = 0$ 이 되도록 하면

다음과 같은 超越方程式을 얻게 된다.

$$\int_0^{r_0} \left\{ \frac{1.487}{r_0^2} J_0\left(\frac{2.405}{r_0} r\right) - \frac{h}{\pi} e^{-hr^2} \right\} (hr^2 - 1) e^{-hr^2} r dr + \frac{1-2hr_0^2}{8\pi} e^{-2hr_0^2} = 0 \quad (14)$$

이것을 試行誤差法 (Trial and error method) 에 의하여 풀면

Table 1 과 같고, 式으로 表示하면 다음과 같은 近似式이 된다.

$$h = \frac{3.638}{r_0^2} \quad (15)$$

Table 1 에 式(15)의 絶對誤差와 相對誤差를 같이 나타내었다.

그리고 Fig. 1은 板間接觸半徑 $r_0 = 0.6\text{cm}$ 熱源의 集中係數

$h = 10.109 \text{ } 1/\text{cm}^2$ 에 대하여 熱源密度分布를 나타낸다.

Ro (Cm)	H (1/Cm ³)	Approx. Value H	Absolute Error	Relative Error
0.1	363.821	363.8	0.021	5.772E-5
0.2	90.955	90.95	0.005	5.497E-5
0.3	40.425	40.422	0.003	7.421E-5
0.4	22.739	22.738	0.001	4.398E-5
0.5	14.553	14.552	0.001	6.871E-5
0.6	10.106	10.106	0	0
0.7	7.425	7.424	0.001	1.347E-4
0.8	5.685	5.684	0.001	1.759E-4
0.9	4.492	4.491	0.001	2.226E-4
1.0	3.638	3.638	0	0
1.1	3.007	3.007	0	0
1.2	2.527	2.526	0.0001	3.957E-4
1.3	2.153	2.153	0	0
1.4	1.856	1.856	0	0
1.5	1.617	1.617	0	0
1.6	1.421	1.421	0	0
1.7	1.259	1.259	0	0
1.8	1.123	1.123	0	0
1.9	1.008	1.008	0	0
2.0	0.910	0.910	0	0

Table 1. Contact Radius and Concentration Coefficient of Heat Source

3. 支配方程式과 그의 解

熔接部에 큰 電流가 通電하므로써 接觸部에 생기는 ジュール熱 (Joule heat)은 接觸部를 熔着시키고 板에 傳導되어 퍼져 나간다. 여기서는 傳熱에 관한 基本方程式을 세우고 그의 解를 하므로써 熔接中 및 熔接後에 있어서 板의 溫度分布가 어떻게 변화하여 가는지 알고자 한다. 點熔接에 의하여 接合할수 있는 板은 一般的으로 얇은 板이다. 따라서 被熔接材自体에 傳導되는 熱量에 比하여 板의 兩側에서 對流와 輻射에 의하여 損失되는 熱量이 無視할수 없을 程度이다. 그러므로 이 熱量을 Newton의 熱傳導 係數 α 로써 考慮한다. 板이 얇으므로 板의 全 두께에 걸쳐서 溫度가 같다고 볼수 있고 點熔接點의 中心을 原點으로 하는 極座標系 r, θ 를 利用하여 二次元 非定常 熱傳導方程式을 다음과 같다

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} - \frac{b}{a} T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

여기서 T 는 熔接始作後 t 抄가 지난 時點에서 點(r, θ)의 溫度이고

材의 比重量을 γ , 比熱을 C , 두께를 δ , 熱傳導係數를 λ 라 할때 $b = 2\alpha / (c\gamma\delta)$, $a = \lambda / (c\gamma)$ 이다.

式(16)의 解를 구하기 위하여 다음과 같이 變數變換한다.

$$T = \phi e^{-bt} \quad (17)$$

이 式을 式(16)에 代入하여 定理하면

$$\frac{\partial \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (18)$$

와 같이 된다. 一般적으로 熔接板의 너트面積 (Nugget area) 에 비하여 매우 얇으므로 熔接板을 무한히 넓다고 간주하면

式(18)의 境界條件은 없고 初期條件을 滿足하는 解를 구할수 있다.

一般적으로 通電時間 t_0 가 $\frac{1}{400}$ 초 내지 1 초로 대략히 짧기

때문에 熔接終了時를 時間原點 ($t=0$)으로 취하고 全入熱量

의 瞬間적으로 주어졌다고 보고 初期條件을 구하면

$$T_0 = \frac{q_{\max} t_0}{\gamma c \delta} e^{-kr^2} = \frac{h Q t_0}{\pi \gamma c \delta} e^{-kr^2} = \frac{h H}{\pi \gamma c \delta} e^{-kr^2} \quad (19)$$

와 같이 된다.

이 初期條件을 만족하는 式(18)의 解를 구하면 다음과 같다.

$$\phi = \frac{hH}{\pi r c s} \cdot \frac{1}{4hat+1} e^{-\frac{hr^2}{4hat+1}} \quad (20)$$

式(20)을 式(17)에 代入하면 溫度分布式은

$$T = \frac{hH}{\pi r c s} \cdot \frac{e^{-bt}}{4hat+1} e^{-\frac{hr^2}{4hat+1}} \quad (21)$$

과 같이 된다. 여기서 $H=Q$ 으로서 全入熱量 (Total heat input) 이다. 式(19) (20) (21)의 全入熱量 H 는 被熔接板 1장에 주어지는 熱量이다. 그러므로 2장을 겹쳐서 點熔接할 때는 點熔接機의 計器에서 檢出한 電流와 電壓으로 부터 換算한 熱량을 2로 나누어야 한다. 만약 3장을 겹쳐서 點熔接할 때는 이 熱량을 3으로 나누어야 한다. Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4는 두께 2mm 짜리 軟鋼板을 入熱量 200 cal로 點熔接할 때 原點에서 부터 各各 2mm, 6mm, 10mm 떨어진 點의 熱履歷曲線은 計算에 의하여 그린 것이다. 熔接時間을 各各 1秒, 1/2秒, 1/4秒로 하여, 計算結果들을 나타내었다.

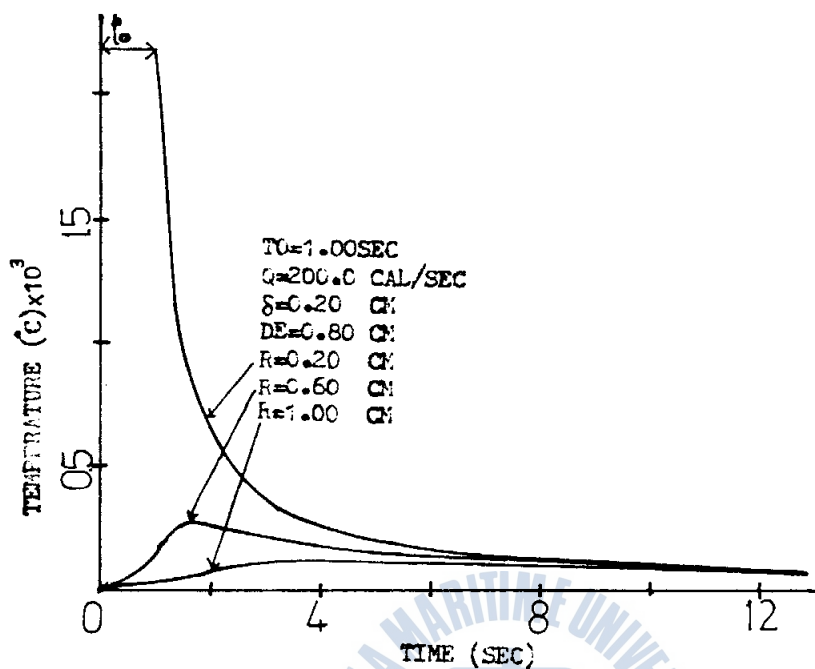


FIG.2 COMPARISON OF THERMAL CYCLES FOR 1.00 SEC OF WELDING TIME

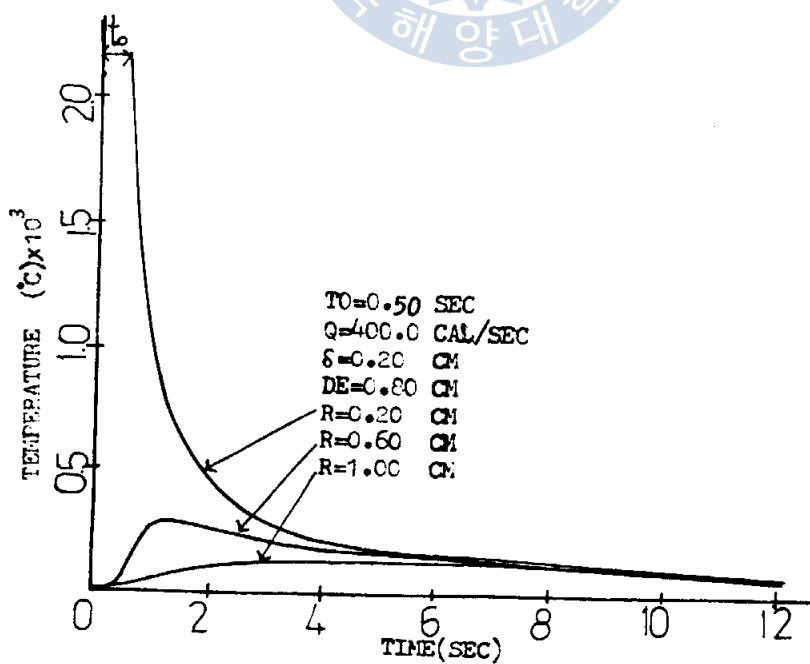


FIG.3 COMPARISON OF THERMAL CYCLES FOR 1/2 SEC OF WELDING TIME

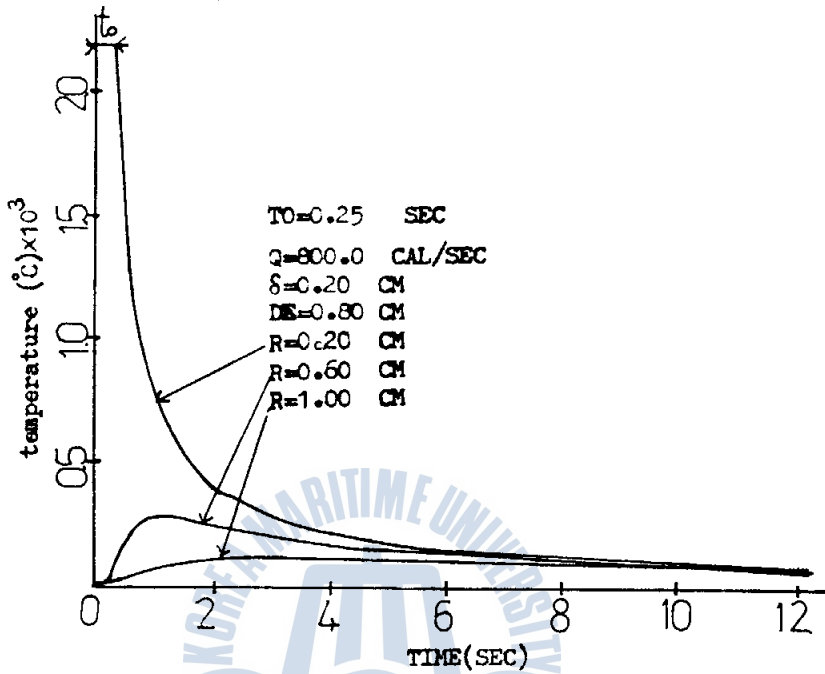


FIG.4 COMPARISON OF THERMAL CYCLES FOR 1/4 SEC OF WELDING TIME

4. 實 驗

本 研究에서 提示한 溫度分布計算式을 檢證하기 위하여 軟鋼板을 實際로 點熔接하고 溫度記錄裝置로 熱履歷曲線 (Thermal cycle curve)을 記錄하여 計算에 의한 熱履歷曲線과 比較하여 보았다. 本 實驗에서 使用한 點熔接機는 Matsushita Industrial Co. LTD 에서 生産된 모델 YR-120 SPO, 定格容量 35.1 kVA, 油壓式, 돔(Dome)形 軀를 가진 點熔接機 이다. 試片은 두께 1mm SS-41의 軟鋼板을 30cm x 30cm로 切斷하여 깨끗이 닦아 Fig. 5와 같이 各試片마다 點熔接部의 中心이 되는 點을 原點으로 하고 原點으로부터 0.5cm, 1.0cm, 1.5cm, 2.0cm의 거리에 直徑 2mm의 드릴로 鑄었고, C-A 熱電對를 Percussion Welding 해서 서로의 끝을 短絡시킨후 鑄어 놓은 구멍을 通하여 Fig. 6에 보인바와 같이 亦是 Percussion Welding으로 아래 試片에 附着시켰다. Table 2는 試片의 化學的成分과 物性值들을 나타낸다.

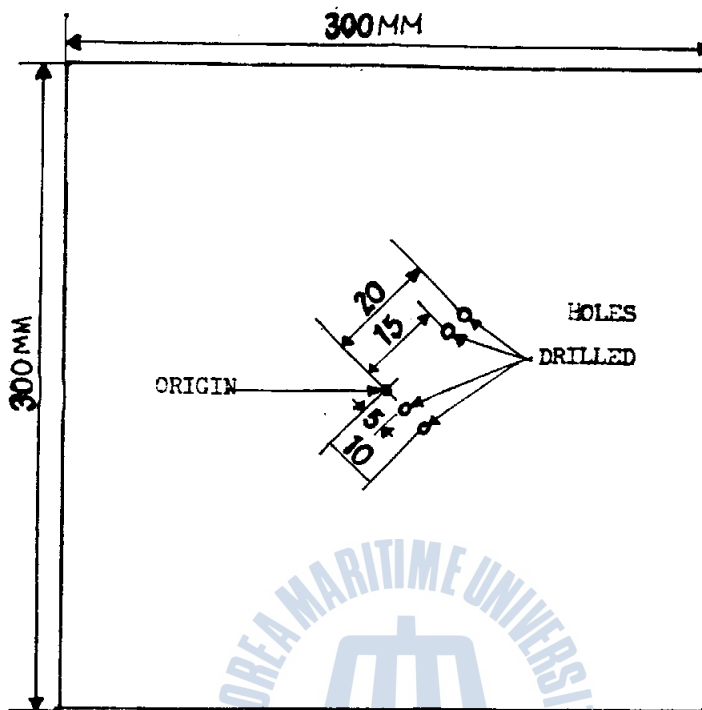


FIG. 5 ARRANGEMENT OF HOLES

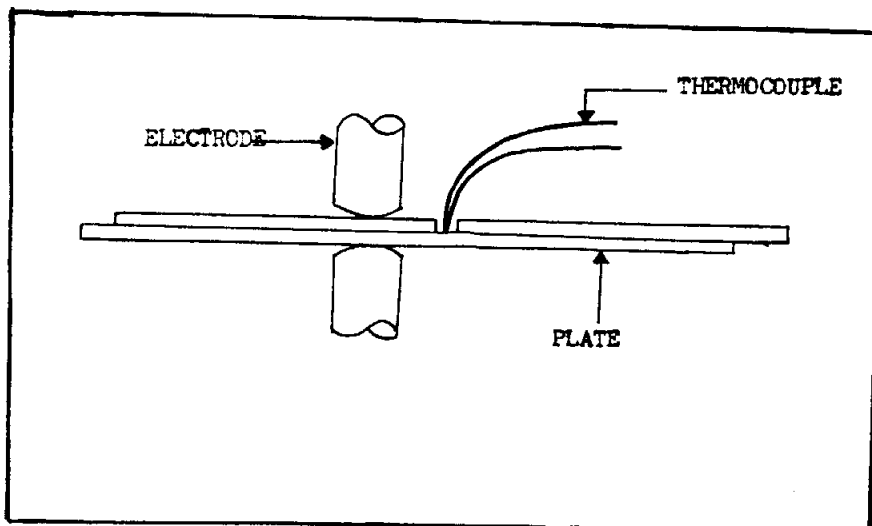


FIG. 6 ATTACHMENT OF THERMOCOUPLE

Chemical Composition (wt %)						Material Properties			
Mn	Si	C	P	S	Fe	Thermal Conductivity Cal/Cm ² /C/Sec	Density gr/Cm ³	Spec. Calorie Cal/gr/C	Coefficient of Heattransfer Cal/Cm ² /C/SEC
0.54	0.22	0.19	0.02	0.015	Res.	0.1	7.8	0.15	0.0014

Table2 Chemical Composition and Material Properties

熔接條件으로는 熔接前維持時間 (squeeze time) 을 60 cycle,
 加壓力은 400 kg, 그리고 通電時間 25 cycle 로 두었다. 熔着部內에서
 생기는 void 를 제거해 주기 위하여서는 熔接後維持時間 (Hold time) 을
 길게 할 수 있 종래 것을 考慮하여⁵⁾ 熔接後維持時間은 約 30 cycle 로
 하고 冷却流速은 3l/min 로 하였다. 熔接電流는 9600 A 로 하였고
 熱履歷曲線을 記錄裝置 (GRAPHTEC MULTICORDER MC6715) 로
 記錄하였다. 本實驗에서 使用한 記錄裝置는 增幅機에서
 C-A 熱電帶에 의한 유기전압을 바로 溫度로 換算한 後

Galvuna meter로 記錄하도록 되어 있는 溫度記錄專用記錄
裝置이다. 實驗을 3번 실시하였고 3번 다 비슷한 結果를 얻었다.

Fig. 7은 實驗裝置를 나타낸다. 冷却水 펌프를 가동시켜 熔接中 및
熔接後 계속 電極을 冷却시켰다.

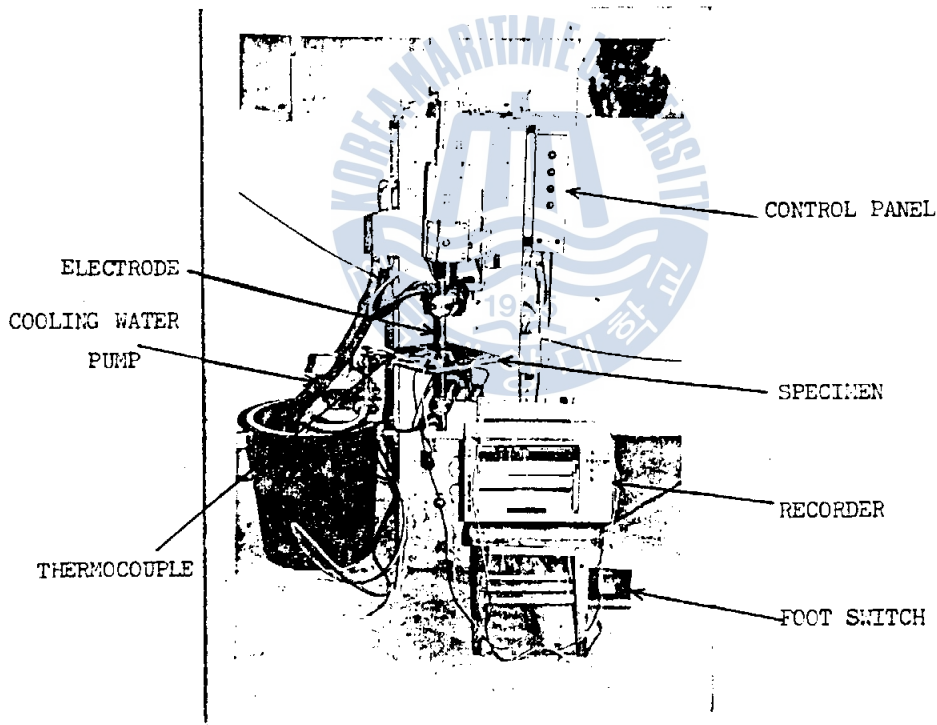


FIG.7 VIEW OF EXPERIMENTAL APPARATUS

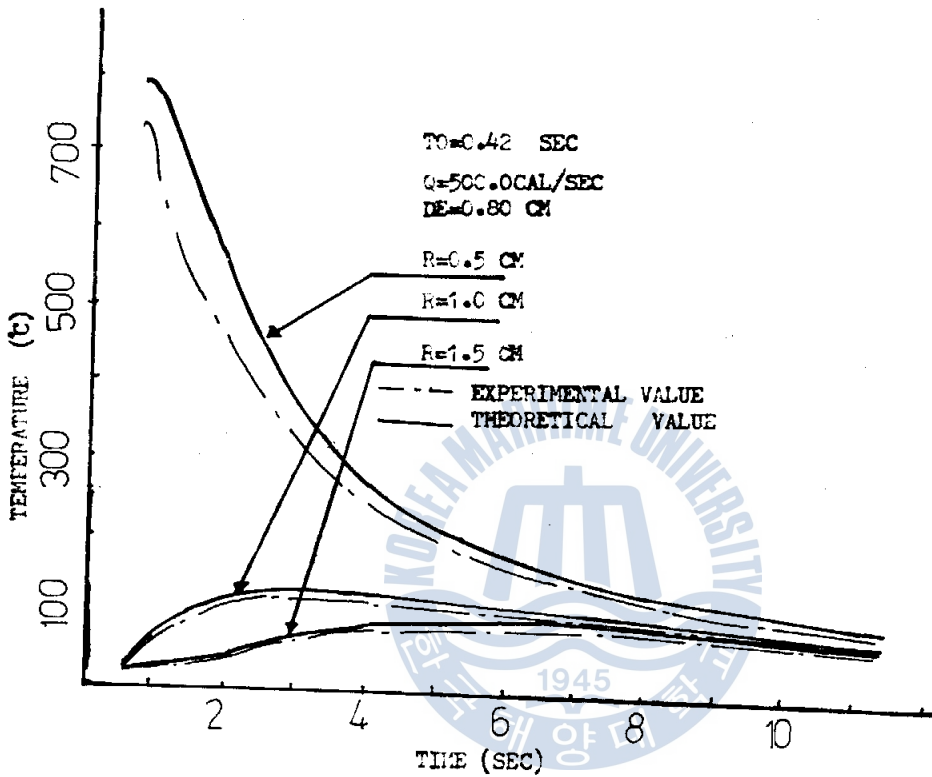


FIG. 8 THERMAL CYCLE

Fig. 8 은 實驗結果와 計算結果를 나타낸다. 一般적으로 計算에 의한 熱履歷曲線이 實驗에 의한 그것보다 약간 늦게 나타나고 있으나 全般的으로 잘 맞아감을 알수있다.

原點에 가까울수록 溫度變化가 크고 最高溫度가 높다는 것은
예상한바와 같고 Nugget의 가장자리에서 약 700°C 정도 된다는
Greenwood 등의 연구結果⁶⁾에 상당히 가깝게 나타났다. 0.5cm
되는 곳의 溫度에 있어서 實驗에 의한 曲線이 計算에 의한
曲線보다 약간 빨리 增加함을 볼수있는데 이는 熔接中の
熱源密度分布 모델이 實際와 약간 差異가 나는 것에 基因
한다고 생각된다. 이로서 初期熱源密度分布가 Bessel 函數의
形態를 하고 熔接中の 熱源密度分布 모델이 무리없이
정하여 졌다는 것을 짐작할 수 있다.

또한 極座標를 이용한 二次元 熱傳導方程式과 그의
解가 어느 程度 實際를 잘 나타낸다고 보아진다.

5. 結論

點熔接에 의한 母材의 溫度分布計算式을 구하기 위하여 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 熔接初期 熱源密度分布는 다음과 같이 Bessel 函數의 形態로 나타내진다.

$$q = 1.1487 \frac{Q}{r_0^2} J_0\left(\frac{2.405}{r_0} r\right), \quad \text{단 } r < r_0.$$

2) 熔接中의 熱源密度分布는 材料物性值의 溫度依存性에 左右되나 大略 다음과 같은 模型로 나타낼 수 있다.

$$q_m = \frac{hQ}{\pi} e^{-hr^2}$$

3) 熔接中의 熱源密度分布 模型에 있어서 熱源의 集中係數는 板間接觸半徑에 反比例하여 다음과 같이 된다.

$$h = \frac{3.638}{r_0^2}$$

4) 點熔接에 의한 溫度分布計算式은 다음과 같이 된다.

$$T = \frac{hH}{\pi r c \delta} \cdot \frac{e^{-bt}}{4h\alpha t + 1} e^{-\frac{hr^2}{4h\alpha t + 1}}$$

參考文獻

- 1). 鈴木春義, "改訂最新溶接工學" (1978) 工口社 pp.341~343,
- 2) 宋森弘·金富東, "點熔接의 너트지름과 板間接觸 狀態의 關聯性",
大韓機械學會論文集 第7卷第3號 (1983) pp.314~315.
- 3) 中村孝·小林徳夫·森本一, "溶接全書 vol.8 抵抗溶接"
産報出版 (1979), pp.41
- 4) 安藤弘平·西口公之·中村孝·浜崎正信, "溶誌" 35 (1966) No.11,
pp.1103~1120.
- 5) 柳炳吉·姜春植, "Galvannealed Steel 의 靛용靛성에 對하
전압의 영향" 大韓熔接學會誌 第5卷第3號 (1987) p.16
- 6) J.A. Greenwood·K.P. Bently, et. al., Brit. weld. J., vol.10-12, (1963)
p. 613
- 7) F.P. Bowden·D. Tabor, "The friction and lubrication of solids",
Oxford (1950) p. 20