

點熔接에 있어서 溫度分布의 變化에 關한 研究

A Study on the Transient Temperature
Distribution for Spot Welds



〈 目 次 〉

Abstract	3. 支配方程式과 그의 解
記號說明	4. 熱 効 率
1. 序 論	5. 實 驗
2. 熱源密度的 分布	6. 結 論

A Study on the Transient Temperature
Distribution for Spot Welds

Yong Bea, Cho

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 upper and lower plate 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;

$$T = \frac{h}{\pi \gamma c \delta} \int_0^{t_i} \frac{Q e^{-b(t-\tau)}}{4ha(t-\tau) + 1} e^{-\frac{hr^2}{4ha(t-\tau) + 1}} d\tau + T_a$$

The obtained solution has an integral form, so the approximate formula was also developed as following;

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

The thermal cycles of various points were recorded using C-A thermocouples during spot welding procedure for mild steel.

plates of 1 mm thickness, and those results were compared with the results of calculations presented in this paper.



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]
k	: 常數	
r, θ	: 極座標系	
r_0	: 板間接觸半徑	[cm]
de	: 電極의 直徑	[cm]
δ	: 母材의 두께	[cm]
q_m	: 熱源密度分布 모델	[cal/cm/sec]
q_{max}	: 最大熱源密度	[cal/cm/sec]
h	: 熱源集中係數	[1/cm]
T	: 溫度	[°C]
γ	: 比重量	[gr/cm]
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/sec]
T_0	: 室內溫度	[°C]
τ	: 積分 파라미터	

1. 序 論

얇은 板材의 接合에 주로 使用되는 點熔接의 특징은 加壓하고 극히 짧은 時間에 大電流를 通電시켜 熔接이 이루어 진다는 것이다. 따라서 母材에 常溫으로부터 融點까지 極其한 溫度變化가 일어나고 이 溫度變化中에 熔湯이나 熱影響部의 熔接質을 決定하는 여러 가지 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 溶融, 再結晶, 各種電氣化學反應 등이 그것이다. 이러한 現象들을 研究하는 데는 材料內 各點의 溫도와 그의 變化率을 正確히 把握하는 것이 대단히 重要하다.

最近 自動車나 航空機 産業이 急速度로 發達하면서 點熔接材의 信賴性을 增進시키기 위하여 點熔接質을 向上시키려는 研究가 多數 行하여지고 있다. 이들 研究에서는 주로 熔接質을 決定하는 여러 가지 因子들을 변경시키면서 實驗하여 가장 適切한 熔接條件을 찾아 내고 있다. 그러나 因子의 數가 많고 한 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 影響을 미친다. 만약 熔接中 또는 熔接後에 母材의 溫度分布와 그의 變化推移를 把握할 수만 있다면 母材의 溫度變化에 따라 일어나는 여러 가지 前述한 物理的 化學的 現象들을 推定할 수

있을 것이고 點熔接質을 向上시키는데 도움이 클 것이다.

本研究에서는 이러한 점에 着眼하여 點熔接中 및 點熔接後의 溫度分布와 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 舉動 등을 考慮하여 熱源密度分布의 모델을 定하였다. 또한 板材가 얇다고 看做하여 電極의 中心線이 母材와 만나는 點을 原點으로 잡은 極座標系를 세워, 이의 解를 구하므로써 溫度分布計算式을 提示하였다.

本計算式이 積分形態로 되어 있기 때문에 電子計算機를 利用한 數值積分을 하여야 한다. 그러므로 이를 計算하는 프로그램을 FOR-TRAN의 FUNCTION으로 作成하여 부록에 첨부하였다. 또한 熔接時間이 一般的으로 대단히 짧다는 事實을 利用하여 近似計算式도 만들어 提示하였으므로 電子計算機를 備置하고 있지 않아도 卓上用計算器만으로도 計算할 수 있도록 하였다.

本研究에서 提示한 計算式을 檢證하기 위하여 두께 1 mm의 軟鋼板을 實際로 點熔接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. 熱源密度的 分布

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

$$Q = 0.21 \gamma I^2 R = 0.21 \gamma IV \dots\dots\dots (1)$$

여기서 γ 는 다음 節에서 論하게 될 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한다.¹⁾ 電極의 加壓力와 被熔接材의 溫度上昇에 의하여 板間接觸電氣抵抗은 零 消滅되나 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, 熱源密度的 分布 q 를 計算하고자 한다.

固體의 二 面이 接觸할 때, 接觸面積은 接觸應力에 比例⁶⁾하고 接觸電氣抵抗은 接觸面積에 反比例하므로 被熔接材의 板間接觸電氣抵抗은 接觸應력에 反比例한다고 볼 수 있다. 한편, 電氣抵抗에 一定 電壓을 인가하였을 때 單位時間當 發熱量은 抵抗에 反比例함을 勘定할 때 結局, 熱源強度的 分布는 板間接觸應력에 比例한다는 것을 알 수 있다. 點熔接의 中心點을 原點으로 한 極座標系 r, θ 를 採用하여 板間接觸應力을 計算하면 第1種 0次 Bessel 函數가

되므로 熱源密度的 分布도 第1種 0次 Bessel 函數²⁾가 된다.

$$q = C J_0(kr) \dots\dots\dots (2)$$

여기에 C와 k는 다음에 求할 常數이고 J₀는 第1種 0次 Bessel 函數를 나타낸다.

電極의 直徑을 de, 板의 두께를 δ라 하면 板隔離 (Sheet Separation)가 일어나는 半徑, 즉 板間接觸半徑 r₀는

$$r_0 = 0.5 (de + 1.1 \delta)^{2/3} \dots\dots\dots (3)$$

이다. 板間接觸半徑 r₀를 式(2)에 代入하면 이 값이 0이 된다.

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

이 式을 풀어 合理的인 解를 取하면 kr₀ = 2.405 이므로

$$k = \frac{2.405}{r_0} = \frac{4.81}{de + 1.1 \delta} \dots\dots\dots (5)$$

이 된다.

熱源密度分布를 重積分하면 熱源強度가 되므로 다음 式이 成立한다.

$$\int_0^{r_0} q 2\pi r dr = Q \dots\dots\dots (6)$$

式(5)의 k를 式(2)에 代入하여 q를 구하고 이를 다시 式(6)에 代入하여 常數 C를 구하면

$$C = 1.1487 \frac{Q}{r_0^2} = \frac{4.595 Q}{(de + 1.1 \delta)^2} \dots\dots\dots (7)$$

이 된다. 따라서 熱源密度의 分布 q 는 다음과 같이 된다.

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

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

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할 때 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 아직 材料가 溶融되지 않더라도 彈性體로서 더 이상 應力을 支撐할 수 없게 된다. 例를 들면 軟鋼의 境遇, 700°C 에 到達하면 彈性限度와 彈性係數가 0이 되어 彈性體에서 點性體로 變化한다.⁸⁾ 이렇게 되면 接觸電氣抵抗이 消滅되어 電流密度가 커지게 된다. 勿論, 材料의 溫度上昇으로 比抵抗이 커져서 電流密度의 增加가 약간 鈍化된다.

材料의 溫度上昇은 熔接中心點(즉, 原點)에서 가장 먼저 일어나므로 板間接觸應力도 이제 더 이상 Bessel 函數의 形態를 하지 않는다. 다시 말하자면 接觸應力の 最大點이 中心部에서 바깥 쪽으로 移動하게 된다. 이러한 때에 熱源密度의 分布를 正確히 計算한다는 것은 너무 많은 因子때문에 매우 어렵다. 그러나, 材料의 比抵抗과 彈性限度가 溫度에 따라 變化하는 모양을 알면 어느 정도 推定할 수 있다. 例를 들면 軟鋼의 比抵抗과 彈性限度가 溫度에 따라 變化하는 모양을 나타내면 Fig.1과 같고^{7,8)} 이를 參照하여 熔接中 熔着部의 여러 가지 物性值의 分布를 定性的으로 그리면 Fig.2와 같

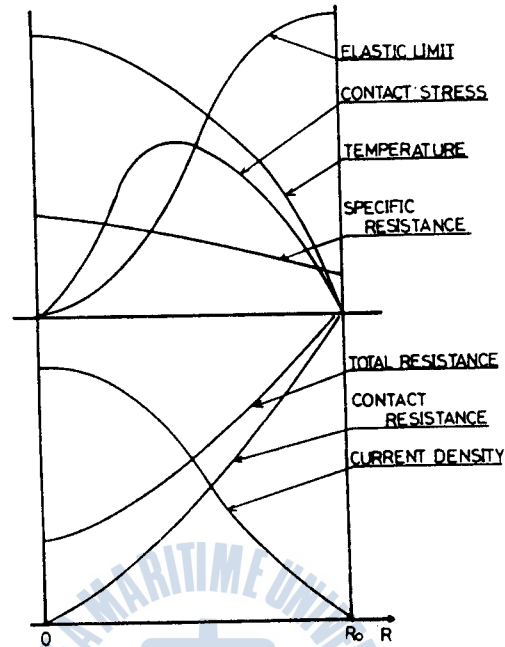


Fig.1 Properties of Mild Steel

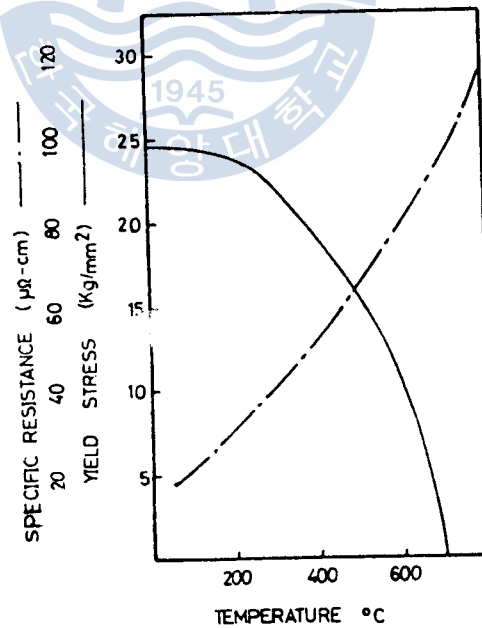


Fig.2 Qualitative Distribution of Material Constant During Welding in Bonded Zone

다. 熔接時間이 대단히 짧기 때문에 熔接始作後 任意的 짧은 時點에서 接觸面의 溫度分布는 初期熱源密度分布인 式(8)과 같은 모양을 하고 있을 것이다. 이것을 原點에서부터 板間接觸半徑 r_0 까지 그래프로 나타내면 Fig.2의 溫度曲線이다. Fig.1을 參照하여 比抵抗과 彈性限度의 分布도 그릴 수 있다. 一般적으로 金屬材料가 高溫이 되면 完全塑性體 (Perfectly Plastic Materials)에 가까우므로 接觸應力의 計算은 약간의 假定만 포함하면 별 어려움이 없다. 두 문제가 接觸할 때 接觸面積은 接觸應力에 比例하고 彈性限度에 反比例하므로 接觸電氣抵抗은 그의 反對가 된다. 따라서 接觸電氣抵抗의 分布를 그릴 수 있다. 材料의 比抵抗의 分布를 알므로서 電氣抵抗의 分布를 알 수 있고 電流密度의 分布를 구할 수 있다. 이 電流密度의 分布는 熱源密度의 分布와 같은 形態를 하고 있다.

이와 같이 熱源密度의 分布는 材料의 物性值가 溫度에 따라 어떻게 變化하는가에 따라 다를 뿐만 아니라 熔接中 時時刻刻에 달라진다. 그러나, 위의 過程으로 熱源密度의 分布가 大略 다음과 같은 모델 q_m 으로서 나타내어도 별 무리가 없음을 알았다.

$$q_m = q_{max} e^{-hr^2} \dots \dots \dots (9)$$

여기서 q_{max} 는 熱源密度分布의 最大値를 나타내고 h 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.

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

이 式으로부터 q_{max} 를 구하면

$$q_{max} = \frac{hQ}{\pi} \dots\dots\dots (11)$$

가 된다. 그러므로 熱源密度分布의 모델은 다음과 같다.

$$q_m = \frac{hQ}{\pi} e^{-hr^2} \dots\dots\dots (12)$$

式(9)로 표시된 熱源密度分布의 모델은 다음 節에서 나오는 熱傳導에 關한 偏微分方程式(支配方程式)의 解를 구하는데 쉽도록 정한 것이지만 Fig.2에서 보는 바와 같이 실제에 어느 정도 符合되므로 實用的 價値가 있다고 생각된다. 그러나, 어디까지나 모델이기 때문에 式(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일 것이다.

$$\phi = \int_0^{\infty} (q - q_m)^2 2\pi r dr \dots\dots\dots (13)$$

式(8)과 式(12)를 式(13)에 代入하고 $\frac{d\phi}{dh} = 0$ 이 되도록 하면 다음과 같은 超越方程式을 얻게 된다.

이것을 試行誤差法(Trial and Error Method)에 의하여 풀면 Table 1과 같고, 式으로 表示하면 다음과 같은 近似式이 된다.

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

Table 1에 式(15)의 絶對誤差와 相對誤差를 같이 나타내었다. 그리고 Fig.3은 板間接觸半徑 $r_0 = 0.6 \text{ cm}$, 熱源의 集中係數 $h = 10.109 \text{ 1/cm}$ 에 대하여 熱源密度分布를 나타낸다.

Re (Q ₁)	H (1/cm ²)	APPROX. VALUE H	ABSOLUTE ERROR	RELATIVE ERROR
0.1	363.821	363.8	0.021	5.77E-5
0.2	90.955	90.95	0.005	5.49E-5
0.3	40.425	40.422	0.003	7.42E-5
0.4	22.739	22.738	0.001	4.38E-5
0.5	14.583	14.582	0.001	6.87E-5
0.6	10.106	10.106	0	
0.7	7.275	7.274	0.001	1.37E-5
0.8	5.665	5.664	0.001	1.76E-5
0.9	4.492	4.491	0.001	2.23E-5
1.0	3.638	3.638	0	0
1.1	3.007	3.007	0	0
1.2	2.527	2.526	0.001	3.95E-5
1.3	2.153	2.153	0	0
1.4	1.856	1.856	0	0
1.5	1.611	1.611	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	1.006	1.006	0	0
2.0	0.910	0.910	0	0

Table 1. Contact Radius and Concentration Coefficient of Heat Source

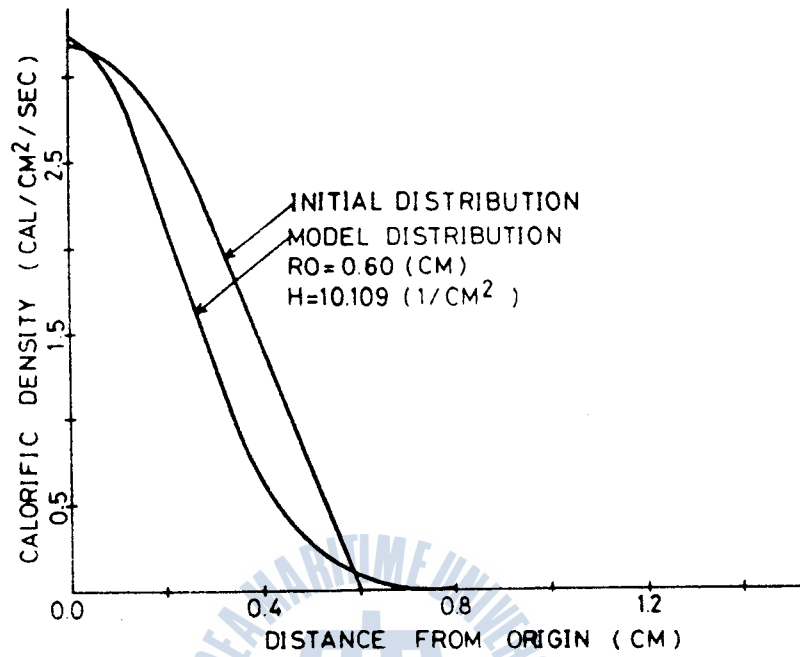
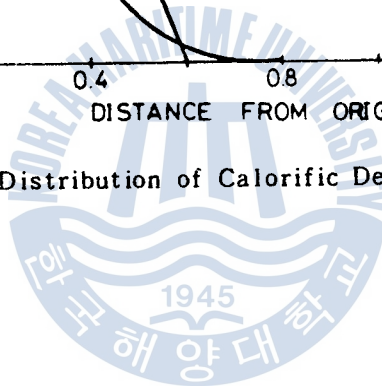


Fig.3 Distribution of Calorific Density



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 구하므로써 熔接中 및 熔接後에 있어서 板의 溫度分布가 어떻게 변화하여 가는 지 알고자 한다.

點熔接에 의하여 接合할 수 있는 板은 一般的으로 얇은 板이다. 따라서, 被熔接材自體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할 수 없을 程度이다. 그리므로 이 熱量을 Newton의 熱傳達係數 α 로써 考慮한다. 板이 얇으므로 板의 兩두께에 걸쳐서 溫度가 같다고 볼 수 있고 點熔接點의 中心을 原點으로 하는 極座標系 r, θ 를 利用하여 2次元 非定常 熱傳導方程式을 세우면 다음과 같다.

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

여기서 T 는 熔接始作後 t 秒가 지난 時點에서 點(r, θ)의 溫度이고 材料의 比重量을 γ , 比熱을 c , 두께를 δ , 熱傳導係數를 λ 라 할 때 $h = 2\alpha/(rc\delta)$, $a = \lambda/(rc)$ 이다.

式(16)의 解를 구하기 위하여 다음과 같이 變數變換한다.

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

이 式을 式(16)에 代入하여 定理하면

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

와 같이 된다.

一般的으로 熔接板이 너깃面積(Nugget Area)에 比하여 매우 넓으므로 熔接板을 무한히 넓다고 看做하면 式(18)의 境界條件은 없고 다음의 初期條件을 滿足하는 解를 구하여 보자.

$$\phi_0 = \Psi e^{-hr^2} \dots\dots\dots (19)$$

復雜한 數學的 過程을 거쳐 式(19)의 初期條件을 滿足하는 式(18)의 解는 다음과 같음을 알았다.

$$\phi = \frac{\Psi}{4hat + 1} e^{-\frac{hr^2}{4hat+1}} \dots\dots\dots (20)$$

式(20)을 式(17)에 代入하므로서 初期條件

$$T_0 = \Psi e^{-hr^2} \dots\dots\dots (21)$$

를 滿足하는 式(16)의 解는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$T = \frac{\Psi}{4hat + 1} e^{-bt} e^{-\frac{hr^2}{4hat+1}} \dots\dots\dots (22)$$

以上の 事實을 基礎로 하여 式(9)로 表示된 熱源密度分布 모델에 의한 熔接中の 溫度分布를 구하여 보자. Δt 秒 동안 材料에 주어지는 單位面積當 熱量은 $q_m \Delta t$ 가 된다. 이 熱量이 $t=0$ 일 때,

點熔接에 있어서 溫度分布의 變化에 關한 研究

瞬間的으로 材料에 주어졌다고 보고서, 이에 의한 初期溫度를 T_0 라 하면 다음 式이 成立한다.

$$q_m \Delta t r d\theta dr = T_0 \gamma c \delta r dr d\theta \dots\dots\dots (23)$$

여기에 式(9)를 代入하고 T_0 에 관하여 整理하면

$$T_0 = \frac{q_{max} \Delta t}{\gamma c \delta} e^{-hr^2} \dots\dots\dots (24)$$

가 된다. 이 式으로 表示된 初期條件에 의한 溫度分布 T_1 은 式(22)에서 Ψ 代身 $q_{max} \Delta t / (\gamma c \delta)$ 를 代入하면 된다.

$$T_1 = \frac{q_{max} \Delta t}{\gamma c \delta (4hat + 1)} e^{-bt} e^{-\frac{hr^2}{4hat + 1}} \dots\dots\dots (25)$$

그 다음 瞬間의 Δt 秒 사이에 單位面積當 주어진 熱量 $q_m \Delta t$ 에 의한 溫度分布 T_2 는 같은 方法으로 다음처럼 구하여진다.

$$T_2 = \frac{q_{max} \Delta t}{\gamma c \delta \{4ha(t-\Delta t) + 1\}} e^{-b(t-\Delta t)} e^{-\frac{hr^2}{4ha(t-\Delta t)}} \dots\dots\dots (26)$$

一般的으로 i 번째 瞬間의 Δt 秒 사이에 單位面積當 주어진 熱量 $q_m \Delta t$ 에 의한 溫度分布 T_i 는

$$T_i = \frac{q_{max} \Delta t}{\gamma c \delta \{4ha\{t-(i-1)\Delta t\} + 1\}} e^{-b\{t-(i-1)\Delta t\}} e^{-\frac{hr^2}{4ha\{t-(i-1)\Delta t\}}} \dots\dots\dots (27)$$

이 된다.

熔接中の 溫度分布는 이들을 全部 合하면 되고 더우기 $\Delta t \rightarrow 0$ 이면 다음과 같이 定積分形態로 表示된다.

$$T = \frac{1}{r\gamma\delta} \int_0^t \frac{q_{max} e^{-b(t-\tau)}}{4ha(t-\tau)+1} e^{-\frac{hr^2}{4ha(t-\tau)+1}} d\tau + T_a$$

..... (28)

여기서 τ 는 積分파라미터이고 T_a 는 室內溫度이다.

式(28)은 熔接中の 溫度分布이나 $t = t_0$ 에서 熔接이 終了되었다면 즉 通電時間이 t_0 이라면 熔接終了後의 溫度分布는 式(28)에서 積分上限值를 t 代身 t_0 로 바꾸기만 하면 된다. 따라서 式(11)를 式(28)에 代入하여 整理하면 熔接中 및 熔接後의 溫度分布計算式은 熔接始作時를 時間原點($t=0$)으로 취하여 다음과 같이 表示된다.

$$T = \frac{h}{\pi\gamma\delta} \int_0^{t_i} \frac{Qe^{-b(t-\tau)}}{4ha(t-\tau)+1} e^{-\frac{hr^2}{4ha(t-\tau)+1}} d\tau + T_a$$

단 $t_i = \inf(t, t_0)$

..... (29)

熱源強度 Q 가 通電時間동안 一定할 때 式(29)의 計算프로그램을 FORTAN의 FUNCTION으로 作成하여 附錄에 提示하였다. 여기서 FUNCTION의 名稱을 SPOTEM으로 하였고 積分은 Simpson公式을 使用하였으며 室內溫度 T_a 는 20°C 로 취하였다.

式(29)는 熔接中 및 熔接後의 溫度分布를 正確하게 計算할 수 있는 式이기는 하지만 電子計算機에 의한 數值積分을 하여야만 하

點熔接에 있어서 溫度分布의 變化에 關한 研.

기 때문에 만약 이것을 備值하고 있지 않으면 計算하기에 대단히 不便하다. 그러므로 熔接後의 溫度分布만을 近似的으로 計算하고자 할 때에는 다음과 같은 近似式을 利用하면 卓上用計算器만으로도 計算할 수 있다.

一般的으로 通電時間 t_0 가 $\frac{1}{400}$ 秒로 대단히 짧기 때문에 熔接終了時를 時間原點 ($t=0$) 으로 취하고 熔接後의 溫度分布式은 式 (25) 에서 Δt 를 t_0 로 代置하고 室內溫度를 舍하면 된다. 따라서 式 (11) 을 式 (25) 에 代入하면

$$T = \frac{hH}{\pi\gamma c\delta} \frac{e^{-bt}}{4hat+1} e^{-\frac{hr^2}{4hat+1}} + T_a \dots\dots\dots (30)$$

과 같이 된다. 여기서 $H = Q t_0$ 로서 全入熱量 (Total Heat Input) 이다.

式 (29) 의 熱源強度 Q 와 式 (30) 의 全入熱量 H 는 被熔接板 1 장에 주어지는 熱量이다. 그러므로 2 장을 겹쳐서 點熔接할 때는, 點熔接機의 計器에서 檢出한 電流와 電壓으로부터 換算한 熱량을 2로 나누어야 한다. 만약 3 장을 겹쳐서 點熔接할 때는 이 熱량을 3으로 나누어야 한다.

Fig.4, Fig.5, Fig.6 은 두께 2 mm 짜리 軟鋼板을 入熱量 200cal 로 點熔接할 때 原點에서부터 各各 2 mm, 6 mm, 10 mm 떨어진 點의 熱覆歷曲線을 計算에 의하여 그린 것이다. 熔接時間을 各各 1 秒, $\frac{1}{2}$ 秒, $\frac{1}{4}$ 秒로 하여 正確한 計算式과 近似式에 의한 計算結果들

을 나타내었다. 예상하였던 대로 熔接時間이 짧을 수록 誤差가 적고, 一般的으로 近似式에 의하여 計算한 溫度가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

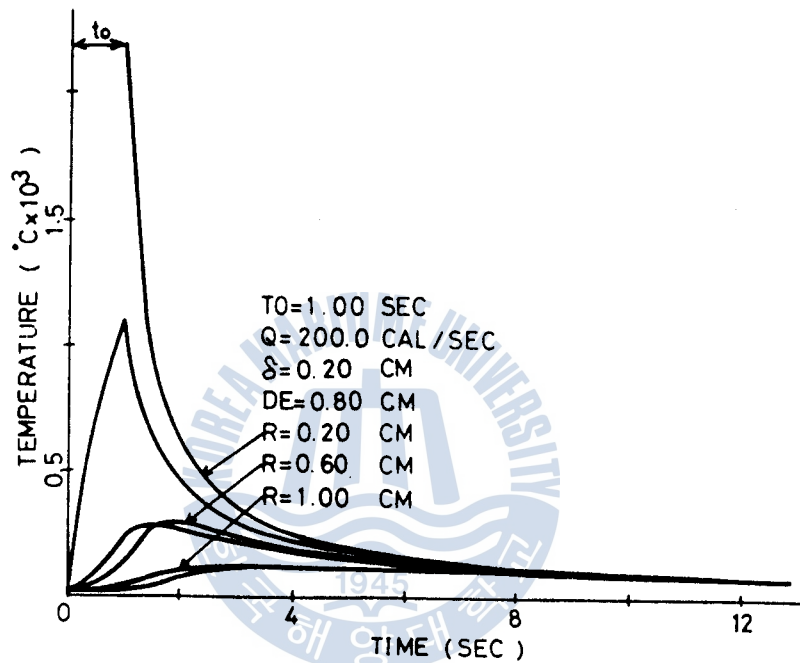


Fig.4 Comparison of Thermal Cycles for 1 sec. of Welding time

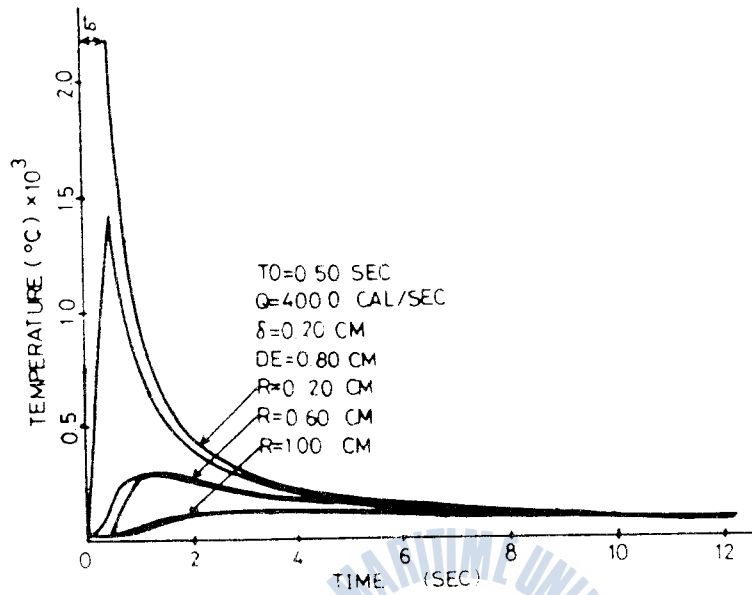


Fig.5 Comparison of Thermal Cycles for $\frac{1}{2}$ sec. of Welding Time

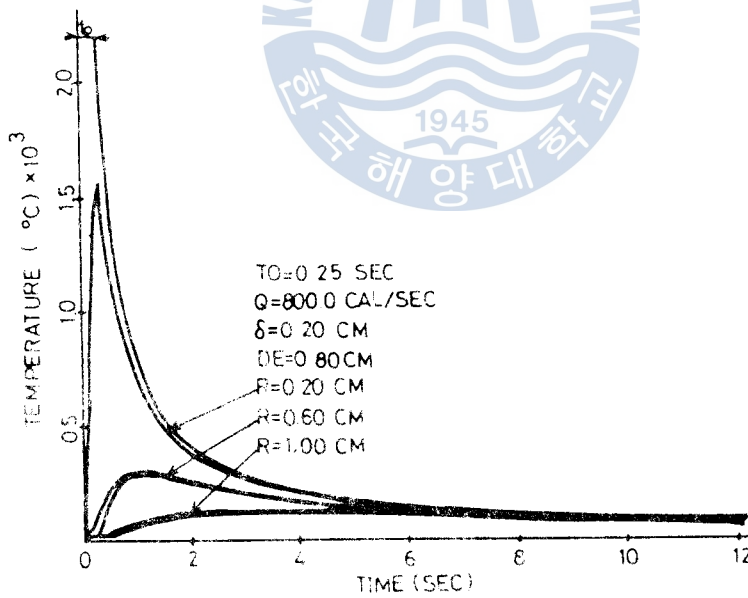


Fig.6 Comparison of Thermal Cycles for $\frac{1}{4}$ sec. of Welding Time

4. 熱 効 率

電極과 母材를 通하여 흐르는 大電流에 의한 熱量은 板間接觸部를 위시한 母材에서 大部分 發生하는데 이 發生熱量の 50 ~ 80 %가 電極을 통하여 冷却水로 損失된다.³⁾ 이 損失熱量を 뺀 나머지 熱量이 母材로 傳達되어 퍼져 나가는데 이 熱量を 全熱量으로 나눈 값이 熱効率이다.

熱効率は 여러 가지 因子의 影響을 받는다. 維持時間(Hold Time)이 짧으면 熱効率が 增加하고, 電極의 直徑과 熱傳導係數가 커면 熱効率が 減少한다. 또한 母材의 두께와 熱傳導係數가 크면 熱効率が 增加하고 加壓力이 크면 熱効率が 減少한다. 이와 같이 熱効率は 여러 가지 因子의 影響을 받는데 이의 體系的인 研究가 있어야 할 것이다. 文獻에 의하면 두께 1 mm의 軟鋼板을 實務에서 보통의 方法대로 點熔接할 때의 熱効率は 25 %程度이다.³⁾

5. 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해 보았다.

本實驗에서 使用한 點熔接機는 Matsushita Industrial Co., LTD 에
서 生産된 모델 YR-120SPC, 定格容量 35.1 KVA, 油壓式의 點熔
接機이다. 試片은 두께 1mm SS-41의 軟鋼板을 30cm × 30cm로 切
斷하여 깨끗이 닦아 Fig.7의 같이 各試片마다 點熔接部의 中心이

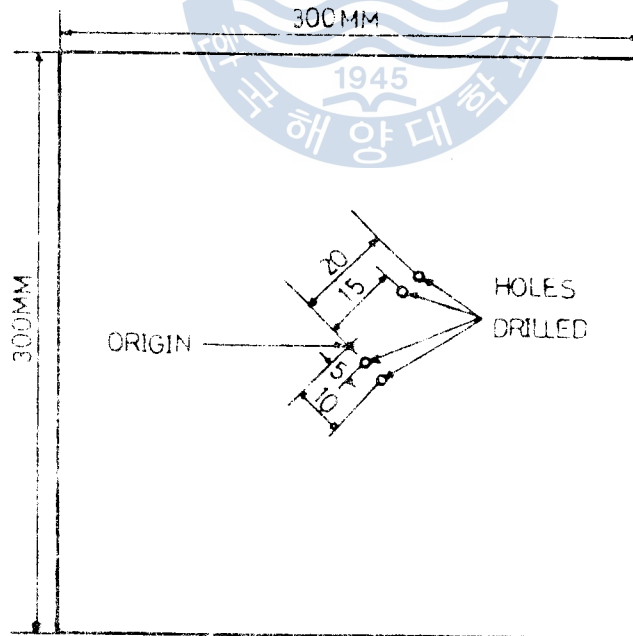


Fig.7 Arrangement of Holes

되는 곳을 原點으로 하고 原點으로부터 0.5cm, 1.0cm, 1.5cm, 2.0 cm의 거리에 直徑 2mm의 드릴로 뚫었고 그리고 C-A 熱電對를 Percussion Welding 해서 서로의 끝을 短絡시킨 후 뚫어 놓은 구멍을 통하여 Fig.8에 보인 바와 같이 亦是 Percussion Welding 으로 아래 試片에 附着시켰다. Table 2는 試片의 化學的 成分과 物性值들을 나타낸다.

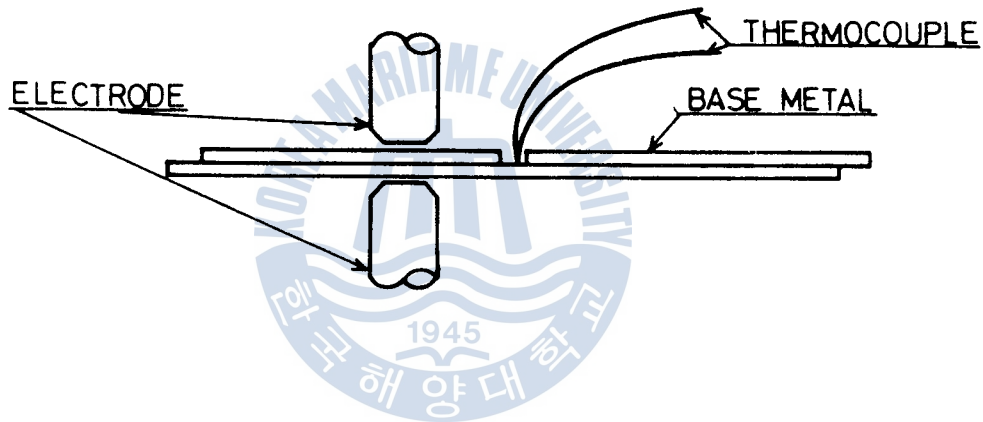


Fig.8 Attachment of Thermocouple

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 Heat Transfer cal/cm ² /°C/sec
0.54	0.22	0.19	0.02	0.015	Res.	0.1	7.8	0.15	0.0014

Table 2. 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은 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 수록 좋다는 것을 考慮하여⁴⁾ 熔接後維持時間은 約 30 Cycle 로 하고 冷却流速을 3ℓ/min 로 하였다. 熔接電流는 9600 A 로 하였고 熱履歴曲線을 記錄裝置 (Graphtec Multicorder Mc 6715) 로 記錄하였다. 本實驗에서 使用한 記錄裝置는 增幅機에서 C-A 熱電對에 의한 유기전압을 바로 溫度로 換算한 後 Galvanometer로 記錄하도록 되어 있는 溫度記錄專用 記錄裝置이다. 實驗은 3번 실시하였고 3번 더 비슷한 結果를 얻었다. Fig.9는 實驗裝置를 나타낸다. 冷却水 펌프를 가동시켰을 熔接中 및 熔接後 계속 電極을 冷却시켰다.

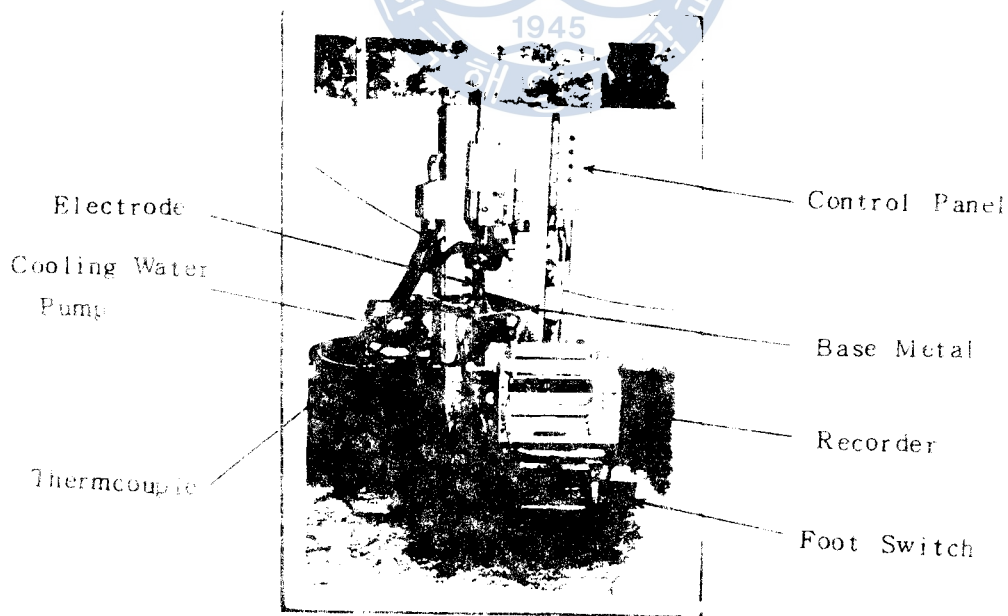


Fig.9 View of Experimental Apparatus

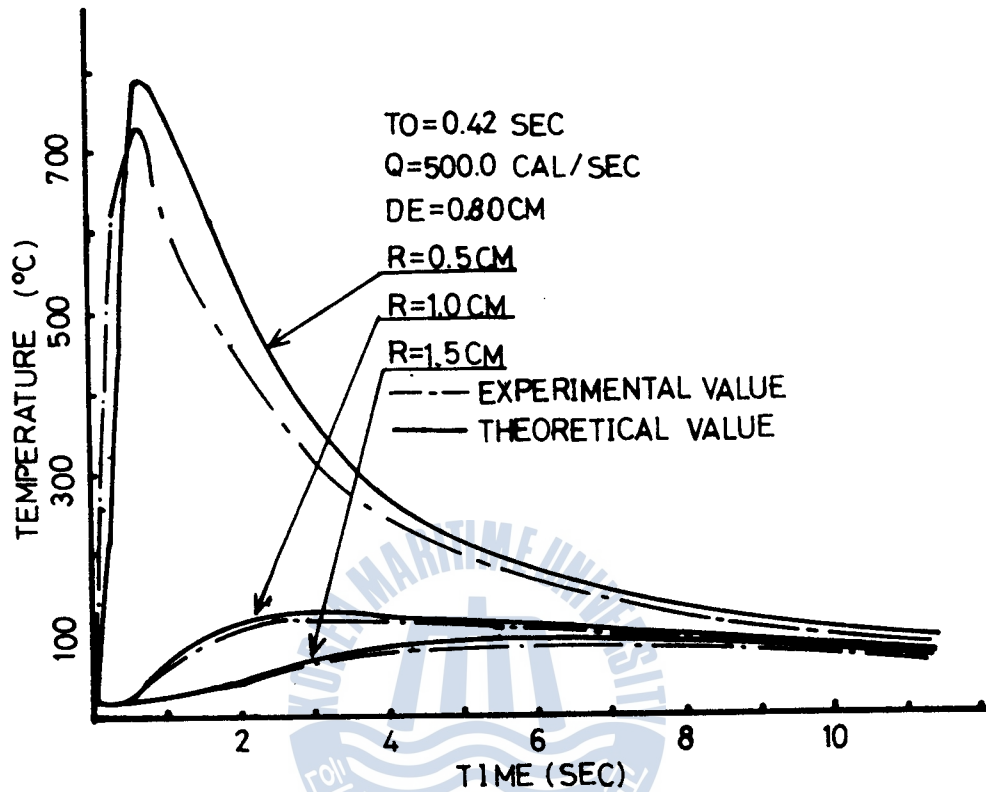


Fig.10 Thermal Cycle

Fig.10은 實驗結果와 計算結果를 나타낸다. 一般的으로 計算에 의한 熱履歷曲線이 實驗에 의한 그것보다 약간 높게 나타나고 있으나 全般的으로 잘 맞아감을 알 수 있다. 原點에 가까울 수록 溫度變化가 크고 最高溫度가 높다는 것은 예상한 바와 같고 Nugget의 가장자리에서 약 700°C程度된다는 Greenwood 등의 研究結果⁵⁾에 상당히 가깝게 나타났다. 0.5 cm되는 點의 溫度에 있어서 實驗에 의한 曲線이 計算에 의한 曲線보다 약간 빨리 增加함을 볼 수 있

는데 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. 이로써 初期熱源密度의 分布가 Bessel 函數의 形態를 하고 熔接中の 熱源密度分布모델이 무리없이 定하여 졌다는 것을 짐작할 수 있다. 또한 極座標를 利用한 2次元 熱傳導方程式과 그의 解가 어느 程度 實際를 잘 나타낸다고 보여진다.



6. 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.

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

- (2) 熔接中の 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 모델로써 나타낼 수 있다.

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

- (3) 熔接中の 熱源密度分布모델에 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) 極座標系를 利用하여 點熔接에 의한 溫度分布計算式을 나타내면 다음과 같이 積分形態로 된다.

$$T = \frac{h}{\pi r c \delta} \int_0^{t_i} \frac{Q e^{-b(t-\tau)}}{4ha(t-\tau)+1} e^{-\frac{hr^2}{4ha(t-\tau)+1}} d\tau + T_a$$

$$\text{단 } t_i = \inf(t, t_0)$$

- (5) 點熔接時間이 짧으면 點熔接에 의한 溫度分布計算式으로 다음과 같은 近似式을 利用할 수도 있다.

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

- (6) 點熔接에 의한 溫度分布計算式의 近似式은 熔接時間이 짧을 수록 誤差가 적다.



參 考 文 獻

1. 鈴木春義, “改訂最新溶接工學”(1978) コロナ社, pp.341 ~ 343.
2. 宋森弘·金富東, “點熔接의 너깃지름과 板間接觸지름의 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), p.41.
4. 柳炳吉·姜春植, “Galvannealed Steel 의 점용접성에 미치는 전
극팁의 영향” 大韓熔接學會誌 第5卷 第3號(1987),
p.16.
5. J.A. Greenwood·K.P.Bently, et. al., Brit. Weld. J., Vol.10-12,
(1963), p.613.
6. F.P.Bowden·D.Tabor, “The Friction and Lubrication of Solids”,
Oxford (1950), p.20.
7. 禹亨疇·趙哲, “電氣材料學”, 文運堂(1982), pp.144 ~ 146.
8. 嚴東錫, “最新熔接工學”, 文運堂(1982), p.176.

(부 록)

```

FUNCTION SPOTEM(ALP,ALAM,GAM,C,DEL,DE,D,TO,T,R)
C
C THIS FUNCTION IS FOR CALCULATING THE TEMPERATURE OF A GIVEN POINT
C IN THE SPOT-WELDED PLATE.
C
C PARAMETER DISCRPTION,
C ALP=COEFFICIENT OF HEAT TRANSFER (CAL/CM**2/SEC/ C)
C ALAM=COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY (CAL/CM/SEC/ C)
C GAM=SPECIFIC WEIGHT (GRAM/CM**3)
C C=SPECIFIC HEAT (CAL/GRAM/ C)
C DEL=THICKNESS OF PLATE (CM)
C DE=DIAMETER OF ELECTRODE (CM)
C D=CALORIFIC INTENSITY (CAL/SEC)
C TO=WELDING TIME (SEC)
C T=TIME (SEC)
C R=DISTANCE FROM THE ORIGIN (CM)
C
GAMC=GAM*C
A=ALAM/GAMC
R=2.*ALP/GAMC/DEL
R0=0.5*(DE+1.1*DEL)
H=3.638/R0/R0
T1=TO
IF(T .LT. TO) T1=T
DT=T1/30
TT=0.
T1=B*(1+H*R*R)/(4.*H*A*T+1.)
IF(T1 .GT. 80.) GOTO 4
T1=EXP(-T1)/(4.*H*A*T+1.)
4 T2=B*(T-T1)+H*R*R/(4.*H*A*(T-T1)+1.)
IF(T2 .GT. 80.) GOTO 6
TT=TT+EXP(-T2)/(4.*H*A*(T-T1)+1.)
6 TAU=DT
DO 10 J=1,29
T1=4.*H*A*(T-TAU)+1.
T2=B*(T-TAU)+H*R*R/T1
IF(T2 .GT. 80.) GOTO 10
T3=EXP(-T2)/T1
J=J/2
J=J*2
IF(I .GT. J) TT=TT+4.*T3
IF(I .EQ. J) TT=TT+2.*T3
10 TAU=TAU+DT
TT=TT*DT/3
SPOTEM=H*D*TT/GAMC/DEL/3.14159+20.
RETURN
END

```

