

論 文

瞬間아아크 熔接熱에 의한 母材內의 一次元的 溫度分布

朴 鍾 殷*

One Dimensional Temperature Distribution in the Base Metal due to Transient Arc Welding Heat

by
Jong Eun Park*

Abstract

The temperature distribution and cooling rate play an important role in the investigation of heat affected zone of weldment. All the problems such as metallurgical changes, welding thermal stress, welding residual stress and welding deformation in the heat affected zone of welded joint are due to the temperature distribution and cooling rate.

In this paper, one dimensional temperature distribution and cooling rate due to transient arc welding heat in the heat affected zone of the base metal are studied.

Heat transfer equation for one dimensional heat flow is formed, and solution is obtained. Weld heat input formula is also formed and used. Computed numerical results show a good agreement with the experimented temper color.

記號 및 單位

- T: 溫度 °C
- t: 時間 sec
- $x(\xi)$: 任意點의 座標 cm
- δ : 熱傳導率 cal/cm²·sec·°C
- c: 比熱 cal/g·°C
- ρ : 密度 g/cm³
- $k = \frac{\delta}{c\rho}$: 溫度擴散率 cm²/sec
- q: 平面狀熱量 cal/cm²
- α : 熱傳達率 cal/cm²·sec·°C

1. 緒 言

熔接構造物에 있어서 熔接이음 附近에, 熔接後에 發生하는 여러가지問題, 즉 熔接殘留應力, 變形, 材質變化等을 研究하는 일은, 熔接工學에 있어서 接合하는 일 에 못지않게 大端히 重要한 問題다.

이러한 問題들은, 熔接熱에 의한 熔接이음 部分에 있어서의 急激한 溫度變化에 그 原因을 두고있다. 따라서 熔接部附近의 溫度變化를 안다는것은, 이들問題研究를 爲한 基本的인 事項이라고 할수있다.

일찌기 D. Rosenthal 이 처음으로 熔接熱傳導問題를 理論的으로 取扱하기 始作한 以來[1, 2, 3] R. J. Grosh 및 E.A. Trabant 는 radiation 과 convection 을 無視하고, 熱傳導率을 溫度의 函數라보고 아아크熔接으로서, stainless 鋼에 對해서 研究하여 理論値와 實驗値가 보다 잘 一致함을 보이고 있으며[4], C.M. Adams Jr. 는 移動熱源에 의한 熔接線中心線의 冷却速度와 最高溫度分布에 對해서 研究하여, 設定된 數式과 實驗値가 잘 一致함을 나타내고 있고 [2], P. Jhaveri, W.G. Maffatt 및 C.M. Adams Jr. 는 板두께와 radiation 을 고려하여 一般的인 境遇에 利用할 수 있도록 無次元化된 圖表와 數式으로 發表하고[3] 있는등 많은 研究가 遂行되고 있다.

이들 여러研究中에서도 熔接熱에 의한 一次元的熱傳達問題에 屬하는 境遇는 flash butt 熔接, up-set butt

* 正會員, 서울大工大

熔接, friction 熔接, rod 의 아아크 熔接이나 가스 熔接에 의한 接合등 여러가지 境遇가 있겠는데, E.F. Nippes 等은 flash 熔接에 對해서, 熱源이 移動하는 것에 對하여 radiation 을 無視하고 研究하여, 주어진 材料에 對한 適切한 溫度擴散率의 平均值를 選擇하는 方法등을 發表하였으며 [5], C.J. Cheng 은 tube 의 摩擦熔接에 있어서 固定材內의 溫度分布에 對해서, 同種材料의 境遇와 異種材料의 境遇에 對해서 研究하였다 [6], [7].

本研究에서는 瞬間아아크 熔接熱을, 一次元熱流로 보고 母材內의 溫度分布과 冷却速度에 對해서 研究하였다. 이것으로서, 母材內의 各點에서의 到達할수있는 最高溫度, 또 그 最高溫度에 머무는時間, 加熱및 冷却速度等을 求할 수 있고, 그리므로서 熱影響部의 材質變化, 熔接熱應力, 熔接殘留應力, 熔接變形等の 研究에 基本이 되는 熔接部의 溫度分布과 冷却速度를 求하는 要領을 提示하였다.

2. 理論的計算

本研究에서는 Fig.1 에 表示된바와 같은 가는 正四角柱의 一端에 瞬間의인 아아크 熔接熱을 加했을 境遇를 考察하였다. 理論的인 考察을 할에있어서는 先, 많은 論文에서 無視한 表面에서의 熱傳達을 包含시켜 보았다.

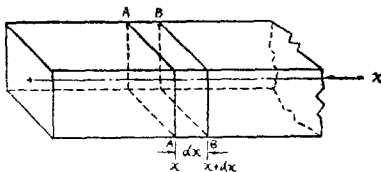


Fig. 1 Coordinate System

緒言에서 말한 여러 研究들과 같이 어떤 物理的性質의 溫度變化에 따르는 變化는 工學的計算의 目的으로 別影響을 미치지 않으므로 다음과 같은 假定을 設定하였다.

- 1) 比熱, 密度, 熱傳導率, 熱傳達率은 溫度에 關係없이 一定한 값을 갖는다.
- 2) 四角柱의 斷面은 充分히 작아서 座標原點에서 같은 距離에 있는 垂直斷面은 恒常等溫이다.
- 3) 四角柱의 材質은 考慮하는 範圍에서는 均質이다.

Fig.1 에서 四角柱斷面의 一邊의 長이를 b cm 라하면 斷面積 $a = a = b^2$, 四角柱의 둘레는 $4b$ 이고 $4b = l$, AA, BB, 兩面에 亙 六面體를 AABB 라한다.

熱量에 對하여서는, 六面體 AABB 밖에서 AA 面을

지나서 六面體에 들어가는 熱量을 Q_i , AABB에서 BB 面을 지나서 밖으로 傳導되어 나가는 熱量을 Q_o , AA BB의 表面에서 空間으로 傳達放出되는 熱量을 Q_r , AABB 自體의 溫度上昇에 消費되는 熱量을 Q_s 라고 定義하면 다음 (1)式이 成立된다.

$$Q_i = Q_o + Q_r + Q_s \tag{1}$$

또 $Q_i = -\delta adt \frac{\partial T}{\partial x}$

$$Q_o = -\delta adt \frac{\partial}{\partial x} \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) \tag{2}$$

$$Q_r = c\rho adx \frac{\partial T}{\partial t} dt$$

$$Q_s = \alpha l dx dt T$$

로 表示되므로 이(2)式을 (1)式에 代入하고, $\alpha l/c\rho a = \mu^2$ 이라 하면 다음 (3)式과 같은 溫度方程式이 얻어진다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \mu^2 T \tag{3}$$

(3)의 解를 다음 (4)式과 같은 形式으로 假定하고

$$T = e^{-\mu^2 t} \theta(t, x) \tag{4}$$

$\frac{\partial T}{\partial t}$, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ 을 求하여 (3)의 兩邊에 넣어 (5)式을 얻는다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \tag{5}$$

(5)의 特殊解를 求하면 다음 (6)式과 같다.

$$\theta = e^{-k\lambda^2 t} (A \sin \lambda x + B \cos \lambda x) \tag{6}$$

지금 여기서 一旦 生覺하는 固體는 無限固體이며, 따라서 境界條件이 없고, λ 는 連續的으로 變하는 任意의 값을 取할수있고, A와 B는 λ 에 依存하고 있으므로

$$\theta = \int_0^\infty e^{-k\lambda^2 t} \{A_{(\lambda)} \sin \lambda x + B_{(\lambda)} \cos \lambda x\} d\lambda \tag{7}$$

(7)도 (5)의 解가 된다.

여기서 지금 初期溫度分布을

$$\theta_{t=0} = f(x) \tag{8}$$

라 하면 다음 (9)式이 얻어진다.

$$f(x) = \int_0^\infty \{A_{(\lambda)} \sin \lambda x + B_{(\lambda)} \cos \lambda x\} d\lambda \tag{9}$$

여기서 Fourier 積分公式으로 係數 $A_{(\lambda)}$, $B_{(\lambda)}$ 을 決定하고 (10)式을 利用하면 (11)式이 된다.

$$\int_0^\infty e^{-k\lambda^2 t} \cos \lambda (\xi - x) d\lambda = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{kt}} e^{-\frac{(\xi-x)^2}{4kt}} \tag{10}$$

$$\theta = \frac{1}{2\sqrt{\pi kt}} \int_{-\infty}^\infty f(\xi) e^{-\frac{(\xi-x)^2}{4kt}} d\xi \tag{11}$$

(11)式은 最初의 溫度分布가 $\theta_{t=0} = f(x)$ 로서 주어졌을 때 任意瞬間의 溫度分布이다.

지금 여기서 微小한 區間 $-\frac{h}{2} \leq x \leq \frac{h}{2}$ 에

$q \text{ cal/cm}^2$ 의 熱이 瞬間的으로 加해졌다고 生覺하면 初期 條件은 다음 (12)와 같다.

$$-\frac{h}{2} \leq x \leq \frac{h}{2} \text{ 에서 } \theta_{t=0} = f(x) = f(\xi) = \theta$$

$$|x| > \frac{h}{2} \text{ 에서 } \theta_{t=0} = f(x) = 0 \quad (12)$$

이것을 (11)에 代入하면 (13)이 된다.

$$\theta = \frac{\theta}{2\sqrt{\pi kt}} \int_{-h/2}^{h/2} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4kt}} d\xi \quad (13)$$

被積分函數를 ξ 에 關해서 展開해서 積分하고 微小項을 省略하여 (14)式을 얻는다.

$$\theta = \frac{\theta h}{2\sqrt{\pi kt}} e^{-\frac{x^2}{4kt}} \quad (14)$$

$$\text{또 } \theta h = \frac{q}{c\rho} \quad (15)$$

이므로 (14)에 넣으면 다음 (16)과 같고,

$$\theta = \frac{q}{c\rho} \cdot \frac{e^{-\frac{x^2}{4kt}}}{2\sqrt{\pi kt}} \quad (16)$$

(16)을 (4)에 代入하면 (17)이 된다.

$$T = \frac{q}{c\rho} \cdot \frac{e^{-\mu^2 t - \frac{x^2}{4kt}}}{2\sqrt{\pi kt}} \quad (17)$$

實際計算에 있어서 μ^2 을 他常數에 比較해 보니 計算에 影響을 미치지 못할 정도로 작아서 [8] 無視하면 (18)式이 된다.

$$T = \frac{q}{c\rho} \cdot \frac{e^{-\frac{x^2}{4kt}}}{2\sqrt{\pi kt}} \quad (18)$$

다음에 冷却速度를 計算하기 위하여 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 를 求하였다. 即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q}{c\rho} \cdot \frac{e^{-\frac{x^2}{4kt}}}{2\sqrt{\pi kt^3}} \left(-\frac{x^2}{4kt} - \frac{1}{2} \right) \quad (19)$$

여기서 熔接入熱 q 는 다음 (20)式을 設定하여 使用하였다. 即

$$q = \eta_1 V I t \quad (20)$$

$$\text{但 } \eta_1 = 0.239 \frac{1}{A} \eta_2 \eta_3 \eta_4$$

이다. 0.239는 電力의 熱當量이고, A 는 熱量이 주는 面積을 表示하며 其他 文字는 다음과 같은 意味를 갖는 常數들이다. η_2 는 이음의 熱擴散方向數를 考慮한 係數로서 butt joint의 境遇는 熱流의 方向이 2이므로 $\frac{1}{2}$ 이다. η_3 는 發熱量이 母材에 吸收되는 比率을 뜻하는데 理論値는 0.65, 實驗値는 0.632, 0.64 등이

發表되어 있으므로 本研究에서는 0.65를 擇하였고, η_4 는 아아크電源의 差異를 表示하는 係數인데, 渡邊, 佐藤에 의하면 [8] A.C.는 0.9, D.C.는 1을 取하고 있어서, 本實驗에 使用한 熔接機가 A.C.이므로 0.9를 取하였다.

3. 數值計算

數值計算에 있어서는 우리가 實際로 많이 利用하는 低炭素鋼, stainless 鋼 및 알루미늄의 3가지 材料를 擇하여 이들의 常數와 熔接條件을 代入하여 計算하였다. 材料에 있어서 低炭素鋼은 $c=0.1 \sim 0.2\%$, stainless 鋼은 $Cr=18 \sim 20\%$, $Ni=8 \sim 11\%$ 인 AISI 304 를, 알루미늄은 純粹한것을 對象으로 하였다. 이들의 常數는 다음 Table 1과 같고 [9, 10], 熔接條件은 實際로 熔接作業에 使用되는 數值를 選擇 하였으며 Table 2와 같다.

Table 1. Constants of Materials

Material	low carbon steel	stainless steel	aluminum
Physical Property			
Specific Heat (cal/g.°C)	0.136	0.120	0.214
Density (g/cm ³)	7,850	8,000	2,700
Heat Conductivity (cal/cm.sec.°C)	0.135	0.050	0.500

Table 2. Welding Conditions

Conditions	plate thickness (cm)	arc voltage (volt)	arc current (amp.)	welding speed (cm/min)	welding process
low-carbon steel and stainless steel	0.55	27	94	18	A.C. stick arc welding
aluminum	0.635	26	185	68.6	MIG welding [11]

이들 數值들을 代入하여 計算하고 computer 에 들어가기 直前의 計算式을, 低炭素鋼의 境遇를 例를 들어 表示하면, (18)式 및 (19)式은 各各 다음 (21), (22)式이 된다.

$$T = \frac{0.750 \times q}{\sqrt{t} \times e^{\frac{1.984x^2}{t}}} \quad (21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{0.750 \times q}{\sqrt{t^3} \times e^{\frac{1.984x^2}{t}}} \left(\frac{1.984x^2}{t} - \frac{1}{2} \right) \quad (22)$$

但. $q=1076.11$

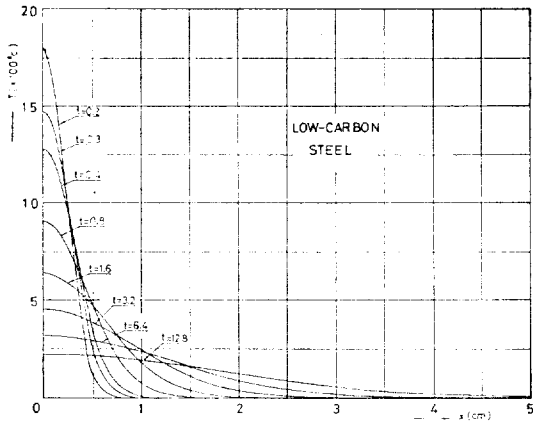


Fig. 2 Transient temperature distributions in a low-carbon steel rod

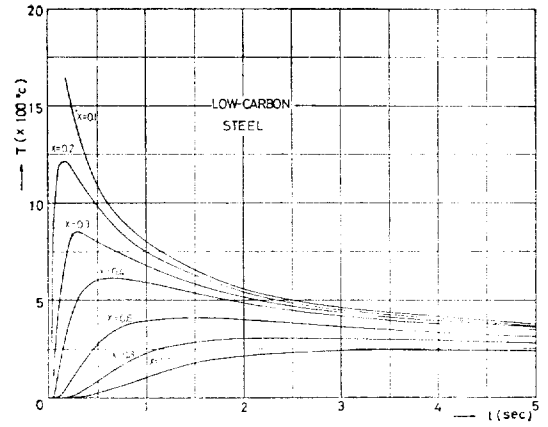


Fig. 5 Temperature histories in a low-carbon steel rod

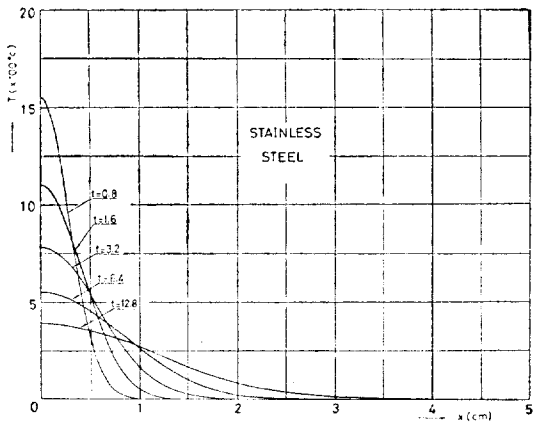


Fig. 3 Transient temperature distributions in a stainless steel rod

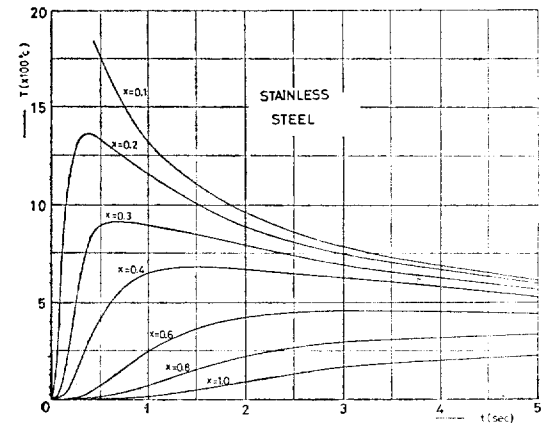


Fig. 6 Temperature histories in a stainless steel rod

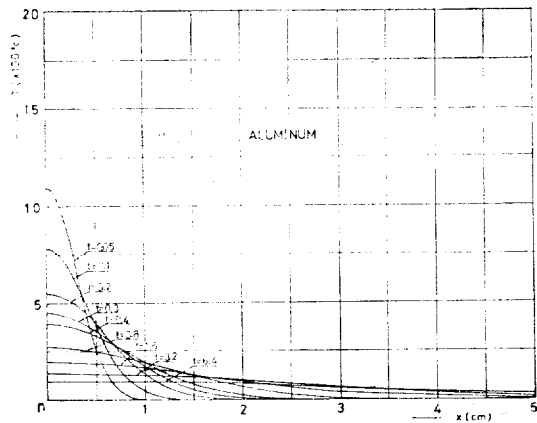


Fig. 4 Transient temperature distributions in an aluminum rod

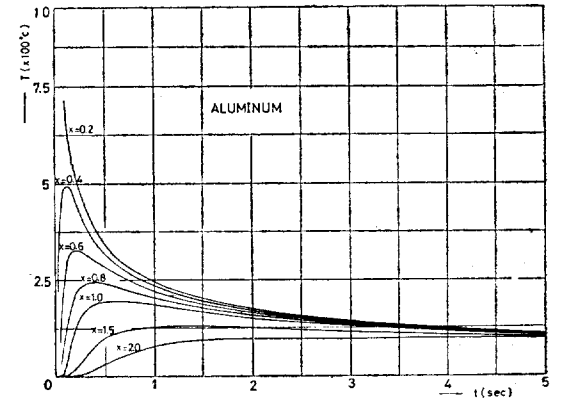


Fig. 7 Temperature histories in an aluminum rod

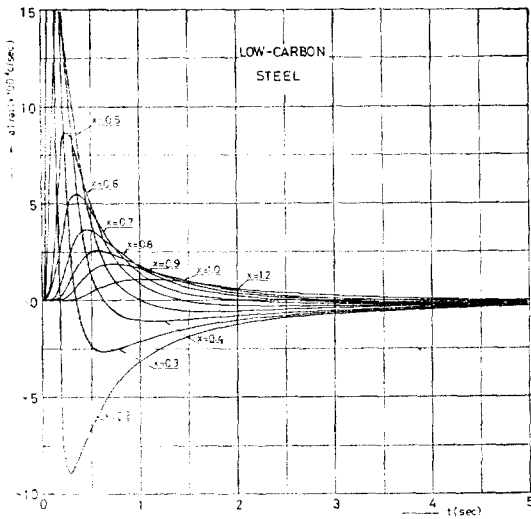


Fig. 8 Cooling rate in a low-carbon steel rod

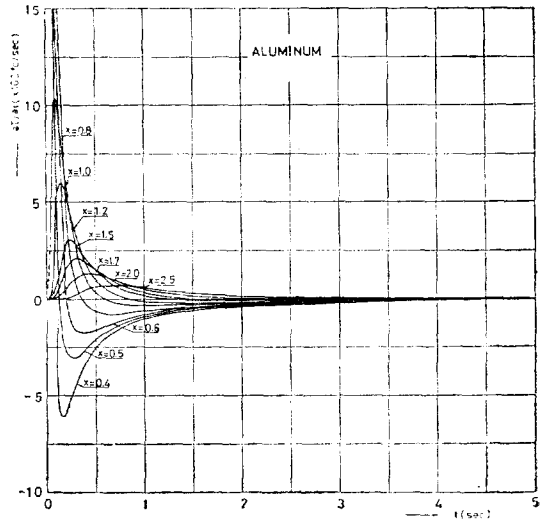


Fig. 10 Cooling rate in an aluminum rod

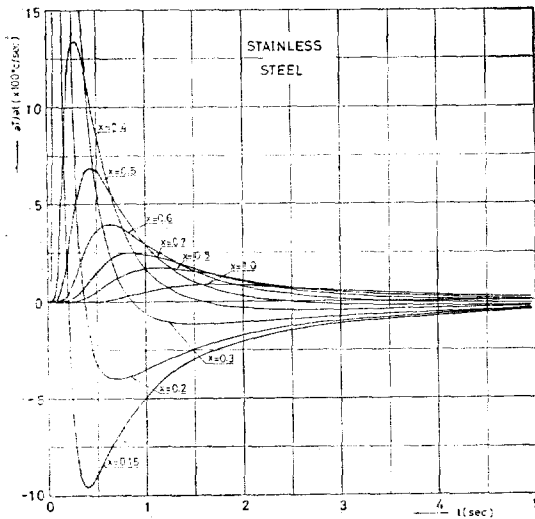


Fig. 9 Cooling rate in a stainless steel rod

本計算에는 서울대학교 工科大学이 保有하는 IBM 1130을 利用하였다. 이 計算結果를 圖表로 表示해보면 다음 Fig. 2~10이 된다.

4. 實 驗

많은 研究에서 thermo-couple을 利用하여 溫度를 測定하고 있으나 本研究에서는 比較的 簡單하면서도, Table 3 [13]과 比較하므로써 實用的으로 充分히 正確한

값을 얻을수있는 temper colour計測으로 實驗하고 理論計算值의 一部와 比較하였다. 實驗에 使用된 試片은 Fig. 11과 같다.

母材는 그 常數들이 數值計算에 使用한것과 같은 低炭素鋼으로, 6 mm 두께의 鋼板이다. 熔接棒은 E 6013 3/32''φ의 아아크熔接棒을 使用하였으며, 熔接機는 Marquette社의 Model 95C, A.C 熔接機를 使用하였다. 熔接電壓, 電流值는 精密性을 考慮하여 熔接機의 panel plate에서 읽어지는 값을 使用하지 않고, National Clamp Meter 600 S (max. current 600 amp. max. voltage 600 volt A.C.)로서 測定하였다.

Table 3. Temper colors on carbon steel

Color in Surface	Approx. temp. at which colour forms	
	°F	°C
light straw	400	204
tan	450	232
brown	525	274
purple	575	302
dark blue	600	316
black	800 and higher	427

時間의 測定에는 田中製作所의 KT5型 自動切斷機를 利用한 定速運棒補助裝置를 考案使用하였다. 이렇게 하여 얻어진 實驗熔接條件을 數值計算에 使用하였다. 完成된 試片의 한例를 提示하면 Fig. 12와 같다.

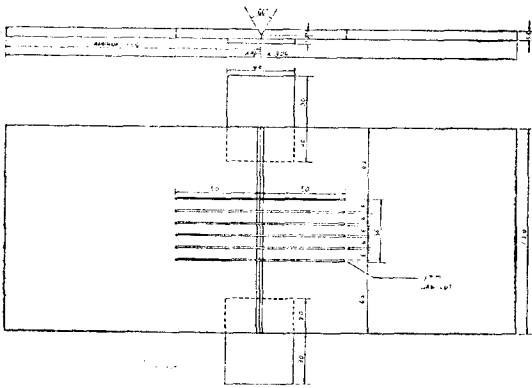


Fig. 11 Specimen used

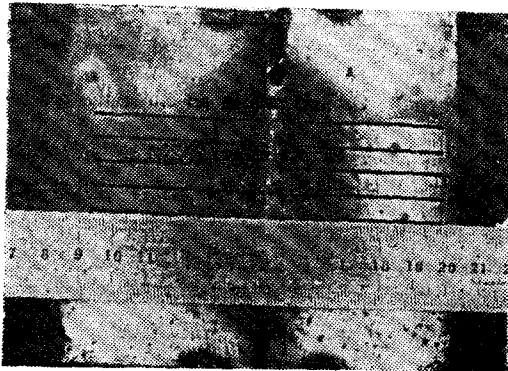


Fig. 12 Specimen welded

5. 結果考察

熔接部附近的 母材의 組織變化에 影響을 주는 主된 要件은

- (1) 母材의 化學成分
- (2) 加熱速度
- (3) 到達하는 最高溫度와 그 最高溫度에서 維持되는 時間
- (4) 冷却速度

等이다. [12] 이 要件들을 生覺해볼때 (1)에 對해서는 熔接手段이 큰影響을 미치지 않으나 (2)~(4)에 對해서는, 熔接熱이 全的으로 그 原因이 된다고 볼수있다. 本研究에서 取扱한 溫度分布와 冷却速度計算에 依하면 母材內各部的 (2)~(4)까지의 要件을 알수있고 따라서 組織變化와 其他性質의 變化를 알수가 있다. 뿐만아니라 熔接力學의인面, 即 熔接熱應力, 熔接殘留應力, 熔接으로 因한 變形等을 研究하는데도 根本的資料가 됨을 알수 있다.

本研究에서는 理論的인 計算結果와 temper color 計測에 依한 實驗結果를 低炭素鋼의 境遇에 對해서 比較해보니 $x=1.12\text{ cm}$ 에서는 理論值와 實驗值의 差는 52°C 로서, 實驗值에 對해서는 16.46%, 理論值에 對해서는 19.70%에 該當된과. 其他部分에 對해서는 實驗으로 確認된 이點近處와, R.J. Grosh 等の 實驗結果를 引用하면 實驗值와 理論值가 잘 一致됨을 알수있다[4].

實驗值가 理論值보다 높은 理由는 實驗에 있어서 groove를 溶融金屬으로서 채웠기 때문에 그만큼 熔接入熱이 追加되었으므로 必然的으로 나타나는 現象이다.

Fig. 2~7을 考察하던 熔接에 必要한 程度의 熔接入熱을 加했을때 熔接部附近의 母材內의 溫度는 急激히 降下하고 降下率은 溫度擴散率이 클수록 더욱 甚하게 나타나고 있다. 熱影響部의 範圍도 溫度擴散率이 클수록 같은 時間에 멀리 傳導됨을 容易하게 認知할수 있다.

本研究에서 低炭素鋼의 境遇 熱影響部는 toe에서 3~4cm 以內($t=12.8\text{ sec}$ 에서 2.25 cm)로서 그 範圍가 그다지 넓지 않음을 알수있다. Fig. 8~10에서 보는 冷却速度圖表에 依하면 各點의 各瞬間에 있어서의 冷却速度를 알수있고, 따라서 그 部分의 母材의 材質變化를 豫測할수가 있다. 이 冷却速度에 있어서도, 低炭素鋼, stainless 鋼, 및 알루미늄을 比較해 볼때, 溫度擴散率이 클수록 冷却速度가 크다는것을 쉽게 알수 있다.

以上과 같이하여 아아크熔接熱에 依한 一次元熱傳導를 考察할때 設定한 (20)式에 依해서 熔接入熱을 決定하고, 導出된 (18), (19)式에 依해 溫度分布 및 冷却速度를 求하면 充分히 工學的의 目的에 使用될수 있는 數值가 얻어진다.

6. 結 言

上述한바를 綜合하여 다음과 같은 結論을 얻을수 있었다.

- (1) 母材內의 一次元의 熱傳導로 因한 溫度分布와 冷却速度는 (18)式과 (19)式으로 얻을수 있다.
- (2) 工學的의 目的에 使用하기 위한 熔接入熱은 (20)式으로 얻을수 있다.
- (3) 表面에서의 熱傳達을 無視해도 工學的의 目的에는 別支障이 없다.

7. 後 記

本研究에 많은 助言을 해주신 金曉哲先生님께 깊은 謝意를 表하는 바이다.

参 考 文 献

- [1] D. Resenthal, "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting" *Welding Journal R.S.* p.220-234, 1941.
- [2] C.M. Adams, Jr., "Cooling Rate and Peak Temperatures in Fusion Welding" *Welding Journal R.S.* p.210-215, 1958.
- [3] P. Jharveri, W.G. Maffatt and C.M. Adams, Jr., "The Effect of Plate Thicknss and Radiation on Heat Flow in Welding and Cutting" *Welding Journal R.S.* p.12-16, 1962.
- [4] R.J. Grosh and E.A. Travant, "Arc Welding Temperatures" *Welding Journal R.S.* p.396-399, 1956.
- [5] E.F. Nippes, W.F. Savage, H. Suzuki and W.H. Chang, "A Mathematical Analysis of the Temperature Distribution During Flash Welding" *Welding Journal R.S.* p.271-285, 1955.
- [6] C.J. Cheng, "Transient Temperature Distribution During Friction Welding of Two Similar Materials in Tubular Form" *Welding Journal R.S.* p.542-550, 1962.
- [7] C.J. Cheng, "Transient Temperature Distribution During Friction Welding of Two Dissimilar Materials in Tubular Form" *Welding Journal R.S.* p.233-240, 1963.
- [8] 渡邊正規, 佐藤邦彦, 「熔接力学とその應用」 p. 167 184, 189 朝倉書店, 1965.
- [9] 日本金属學會, 日本鐵鋼協會編, 「鐵鋼材料便覽」 p. 535, 丸善株式會社, 1967.
- [10] 橋口隆吉, 「金属ハンドブック」 p. 18, 朝倉書店, 1970.
- [11] American Welding Society, "*Welding Handbook Section Four*," p. 69, 36, 1966.
- [12] E.M. Mahla, M.C. Rowland, C.A. Shook and G. E. Doan, "Heat Flow in Arc Welding" *Welding Journal R.S.* p. 459-468, 1941
- [13] G.E. Linnert, "*Welding Metallurgy*" Third Edition Vol. I, p. 187, American Welding Society., 1965.