

6. 參考文獻

- 1) H. H. Uhlig: Corrosion and Corrosion Control, John-Wiley and Son Inc., 195 (1966)
- 2) 田大熙·金垣寧: 陰極防蝕時的 鋼配管의 分極電位, 所要防蝕電力 및 最適防蝕條件, 韓國海洋大學論文集(自然科學), 第16輯, 83 (1981)
- 3) 田大熙·腐蝕과 防蝕의 管理(補訂版), 316, 一中社(1985)
- 4) 重野準太: 金屬防食技術便覽(新版), 日刊工業新聞社, 578 (1972)
- 5) W. J. Schwerdtfeger · O. N. McDorman: Potential and Current Requirements for the Cathodic Protection of Steel in Solids, Corrosion (NACE), 8, Nov., 391~399 (1952)
- 6) M. H. Peterson: Principles and Criteria for Cathodic Protection of Steel in Sea Water, Corrosion (NACE), 15, Sept., 51~52 (1959)
- 7) E. Schaschl · G. A. March: The Effect of Dissolved Oxygen on Corrosion of Steel and on Current Required for Cathodic Protection, Corrosion (NACE), 13, April, 35~43 (1957)
- 8) 福谷英二: 防食基準電位 およびその電位の測定法, 防食技術, 9, 4, 157~159 (1960)
- 9) 呂秋成: 電氣化學的計測法の基礎と問題點, 防食技術, 28, 3, 129 (1979)
- 10) 水流徹·田大熙·春山志郎: 陰極防食された金屬の交流インピーダンス 特性と防食電位, 防食技術, 34, 1, 36~41 (1985)

平板의 맞대기 이음 용접時의 가로收縮에 관한 研究

李 愚 洙

A Study on the Transverse Shrinkage
in the Butt Joint Welding of plate

Woo-soo Lee

〈目 次〉

Abstract

Nomenclature

1. 序 論
2. 平板의 용접에 의한 溫度分布
3. 가로收縮
4. 角變位에 의한 가로收縮의 影響
5. 實 驗
6. 結 論

參考文獻

A Study on the Transverse Shrinkage in
the Butt Joint Welding of Plate

Woo-Soo Lee

Abstract.

The mechanism of transverse shrinkage for the butt joint welding of plates is investigated in this paper. It was certified that the compressive plastic strain due to thermal expansion of materials during heating play an important role on the transverse shrinkage. It was also pointed out that the transverse shrinkage has to be treated with the samples which shapes are as close to real shapes of welded materials as possible. Because the distribution of temperature and relative rigidity of materials during welding have great influence on the transverse shrinkage.

The formulas for the calculation of transverse shrinkage were presented and the experiments were carried out in order to verify the formulas.

The main results are as follows;

1. Because the transverse shrinkage is effected by the distribution of temperature, thermal stress and thermal str-

ain during welding, the transverse shrinkage has to be treated with the samples which shapes are as close to real shapes of welded materials as possible.

2. For the welding of bead-on-plate, the transverse shrinkage in the beginning parts of welding is the smallest, the end parts is next and the transverse shrinkage of mid section is the largest.
3. In bead-on-plate welding, the equations presented in this paper concerning transverse shrinkage coincide fairly well with the experimental values generally.
4. Transverse shrinkage increases generally as specific heat input per unit thickness increases.
5. The theory of transverse shrinkage for welding of bead-on-plate can be applicable to butt joint welding but interval of tack welding has to be more studied in this case.

Nomenclature

- a : Thermal diffusivity (cm^2/sec)
- b : Width of samples (mm)
- C : Specific heat input per unit thickness ($\text{cal}/\text{cm}/\text{cm}$)
- c : Specific heat ($\text{cal}/\text{g}/^\circ\text{C}$)
- E : Modulus of elasticity (kg/mm^2)
- e : Measured error by angular displacement (mm)
- I : Welding current (A)
- K : Degree of constraint
- Q : Intensity of heat source (cal/sec)
- Sm : Measured error of transverse shrinkage (mm)
- St' : Transverse shrinkage under the constraint condition (mm)
- St : True values of transverse shrinkage (mm)
- Stf : Transverse shrinkage under the free condition (mm)
- To : Room temperature ($^\circ\text{C}$)
- T(x,y) : Temperature at point (x,y) ($^\circ\text{C}$)
- V : Welding voltage (V)
- v : Welding speed (cm/sec)
- x,y : Moving coordinates
- α : Coefficient of thermal expansion ($1/^\circ\text{C}$)

- β : Coefficient of heat transfer ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$)
- δ : Thickness of samples (mm)
- θ : Angular displacement (degree)
- η : Thermal efficiency
- λ : Thermal conductivity ($\text{cal}/\text{cm}/^\circ\text{C}/\text{sec}$)
- γ : Specific weight (g/cm^3)
- σ_0 : Elastic limit of materials (kg/mm^2)
- $K_0(\mu r)$: Bessel function of the second kind of order zero



1. 序 論

용접이 部材의 接合手段으로서 工業적으로 널리 利用되던 初期부터 용접에 의한 變形은 큰 問題들 중의 하나로 指摘되어 왔다. 大部分의 용접方法에서 볼 수 있는 바와 같이, 빠른 冷却速度를 隨伴하는 強烈한 局部加熱에 의하여 큰 熱膨脹이 發生하고, 이로 인하여 생긴 壓縮塑性變形은 冷却後 接合된 材料를 使用할 때 용접變형을 惹起시키어 材料의 性能에 影響을 미친다.

용접變形에는 용접線 方向의 收縮인 세로收縮, 용접線과 直角方向의 收縮인 가로收縮, 發生된 殘留應力으로 인한 座屈, 回轉變形, 角變形 및 굽힘變形 등이 있으며 이 중에서 가로收縮이 가장 큰 影響을 미쳐 용접質(Welding Quality)을 決定하는 重要な 要因이 되고 있다. 지금까지의 가로收縮에 관한 研究內容은, 一次元 部材를 용접할 때의 가로收縮을 實驗적으로 求하고 Fig. 1 과 같은 Slit-Type, H-Type, Ring-Type 및 θ -Type 등의 試片에 대하여 가로收縮에 대항하는 拘束의 程度를 解析하고 拘束度를 定義하여 가로收縮과 拘束度와의 關係를 求한 結果 다음과 같은 式을 얻었다.

$$\frac{St'}{Stf} = \frac{1}{1 + 0.086 K^{0.87}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 St' 는 拘束狀態에서의 가로收縮이고 St_f 는 自由로운 狀態에서의 가로收縮이며 K 는 拘束度이다.

그런데 가로收縮을 誘發하는 熱應力과 變形率은 被熔接材의 形象에

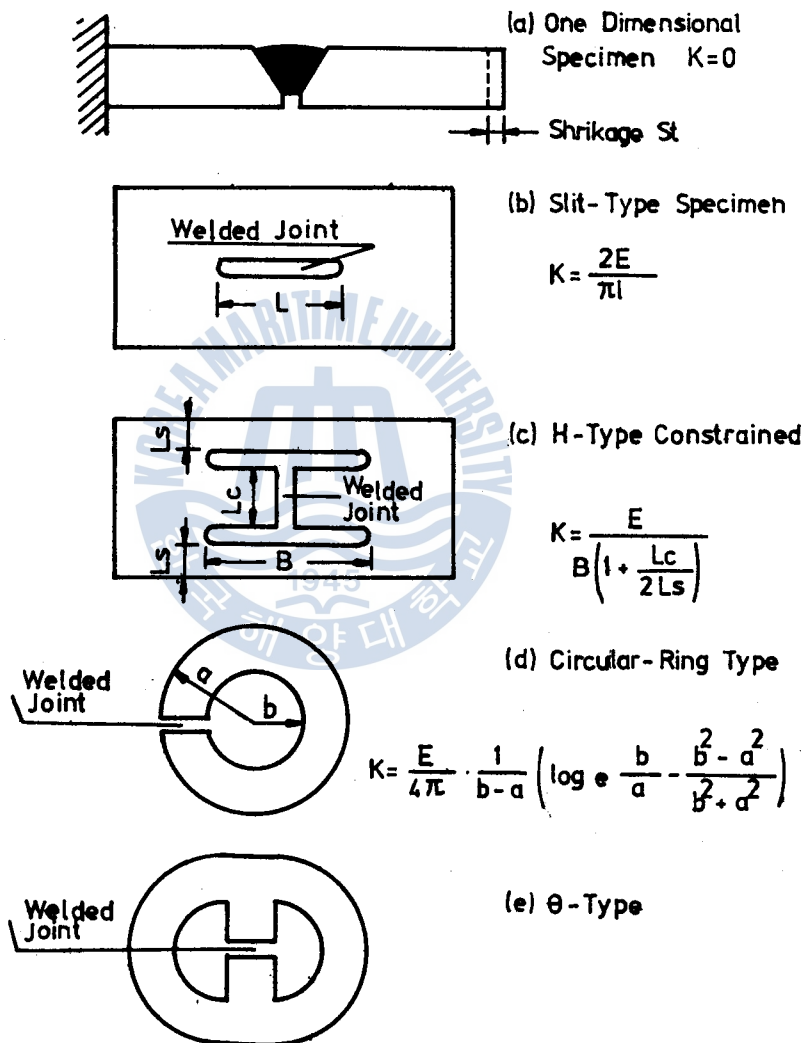


Fig. 1. Specimen Type

至大한 影響을 받고, 더구나 材料의 溫度分布와 그의 變化推移도 被熔接材의 形象에 따라 달라진다는 것은 周知의 事實이다. 그러므로 被熔接材가 위의 試片과 다른 모양을 하고 있다면 가로收縮도 달라질 것이 豫想된다. 따라서 本 研究에서는 實務에서 가장 많이 쓰이는 平板의 맞대기 이음 용접에 대하여 가로收縮의 發生機構를 糾明하고 그의 理論的인 計算法을 提示하고자, 우선 平板에 비이드 온 플레이트 時의 가로收縮을 理論的으로 計算하는 方法을 提示하였고 이를 實驗으로 立證하였다. 實驗은 平板에 서브머지도 비이드 온 플레이트를 實施하고, 實施前後의 가로方向 길이를 재어 그 差를 가로收縮으로 잡았다. 또한 平板의 비이드 온 플레이트 時의 가로收縮에 관한 理論이 平板의 맞대기 이음 용접에 適用할 수 있는가를 檢討하기 위하여 이에 관한 實驗도 實施한 結果 實際의 境遇와 같이 假接하여 놓고 용접할 때는 平板에 비이드 온 플레이트 時의 理論을 그대로 適用할 수 있음을 確認하였다.

2. 平板의 熔接에 의한 溫度分布

熔接에 의한 變形은 根源的으로 熱變形率 $\alpha \Delta T$ (여기서 α 는 熱膨脹係數이고 ΔT 는 溫度變化量이다.)로 부터 發生하므로 가로收縮을 解析하려면 熔接에 의한 溫度分布를 알아야 한다.

平板의 맞대기 이음 熔接에 의한 溫度分布에 관해서는 로젠탈 (Rosenthal)의 式이 有明하다. 一定한 速度로 熔接할 때, 熱源을 原點으로 取하고 熱源의 進行方向을 x 軸으로 잡으며 熱源을 지나고 熱源의 進行方向과 垂直한 直線을 y 軸으로 하는 移動座標系로써 熱傳導에 관한 方程式을 세우면 定常熱傳導方程式을 얻게 되는데 이의 解가 바로 로젠탈의 式이다. 그러나 이 式에서는 平板의 兩面에서 發生하는 對流과 輻射에 의한 熱傳達을 無視하고 있다. 被熔接材가 充分히 두꺼워서 材料에 傳導되는 熱量이 많을 때는 表面에서의 熱傳達은 無視할 수 있을 것이다. 리갈린¹⁾(Rykaline)은 材料가 比較的 얇은 境遇 平板의 兩面에서 發生하는 對流과 輻射에 의한 熱傳達量이 材料에 傳導되는 熱量에 比하여 無視할 수 없을 程度라 하고, 表面에서의 熱傳達量을 뉴우톤 (Newton)의 熱傳達係數 β ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$)로써 考慮하여 로젠탈의 式을 改良하여 다음 式을 얻었다.

$$T(x, y) = \frac{Q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{v}{2a}x} K_0(\mu r) + T_0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서 Q : 熱源強度 (cal / sec)

λ : 熱傳導係數 (cal / cm / °C / sec)

δ : 材料의 두께 (cm)

v : 熔接速度 (cm / sec)

a : 熱擴散係數 (cm² / sec)

$$a = \frac{\lambda}{\gamma c}, \quad \mu = \sqrt{\left(\frac{v}{2a}\right)^2 + \frac{b}{a}}, \quad b = \frac{2\beta}{\gamma c \delta}$$

γ : 材料의 比重量 (g / cm³)

c : 比熱 (cal / g / °C)

β : 熱傳達係數 (cal / cm² / sec / °C)

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

T₀: 常溫

T(x, y): 點(x, y)에서의 溫度

K₀(μr)는 0(零)次 第2種의 Bessel 函數로서 다음과 같

이 計算된다.

$$K_0(\mu r) = \int_0^\infty e^{-\mu r \cosh p} dp$$

前述한 바와 같이 이들 式은 定常狀態의 熱傳導方程式의 解이므로 熔接初期와 熔接末期와 같은 過渡期에는 適用할 수가 없다. 그러므로 리갈린은 熔接始作時와 終了時의 過渡期에 適用하는 因子(factor)를 定하였다.¹⁾

3. 가 로 收 縮

熔接에 의한 가로收縮을 正確히 解析하려면 熱應力이나 變形率 解析의 境遇와 마찬가지로 有限要素法이나 其他의 數值解析에 의한 熱彈塑性 解析에 依存하는 수 밖에 없는데 이 方法은 計算課程도 複雜하고 計算時間이 많이 所要되는 問題가 있다. 그러나 平板의 熔接에 의한 가로收縮 메카니즘을 考慮하면 이 方法이 아니라도 훨씬 간단하게 가로收縮을 計算할 수 있다.

式 (2) 로 表示한 定常狀態의 溫度分布式을 利用하여, 두께 $\delta = 1 \text{ cm}$ 의 軟鋼板을 熱源強度 $Q = 1,000 \text{ cal/sec}$, 熔接速度 $v = 0.1 \text{ cm/sec}$, 表面熱傳達係數 $\beta = 0.0014 \text{ cal/cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$ 로 熔接할 때의 溫度分布曲線을 그리면 Fig.2와 같다. 熱源近方에서 急激한 溫度變化를 볼 수 있고 특히 熱源前方에서 溫度기울기가 심하다. 또한 平板에 等溫線을 그려보면 橢圓으로 나타남을 볼 수 있다. 한편 熱應力과 變形率에 至大한 影響을 미치는 材料의 物性值인 彈性限度 σ_0 , 彈性係數 E , 熱膨脹係數 α 의 溫度依存性을 보면 Fig.3과 같다. 彈性限度 및 彈性係數가 約 300°C 로부터 減小하기 始作하여 約 700°C 정도에서 거의 零으로 되고 彈性體로써의 應力을 지탱할 수 없게 된다. 이러한 性質을 熔接하고 있는 平板에 適用시켜보면, Fig. 4 (c)

에서 보는 바와 같이 700°C를 등온선으로 하는 橢圓內에는應力이 거의 생기지 않는다. 또한 이 橢圓의 長徑 및 短徑上의 溫度分布의 彈性係數, 彈性限度의 分布를 나타내면 同圖 (a) 및 (b)와 같다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 700°C 等溫線 橢圓은 相對的으로 強한 材料에 둘러싸여 있으므로 엄청난 熱膨脹率 (αT) 에도 불구하고 膨脹과 收縮은 일어 나지 않는다. 그 理由は 熱變形

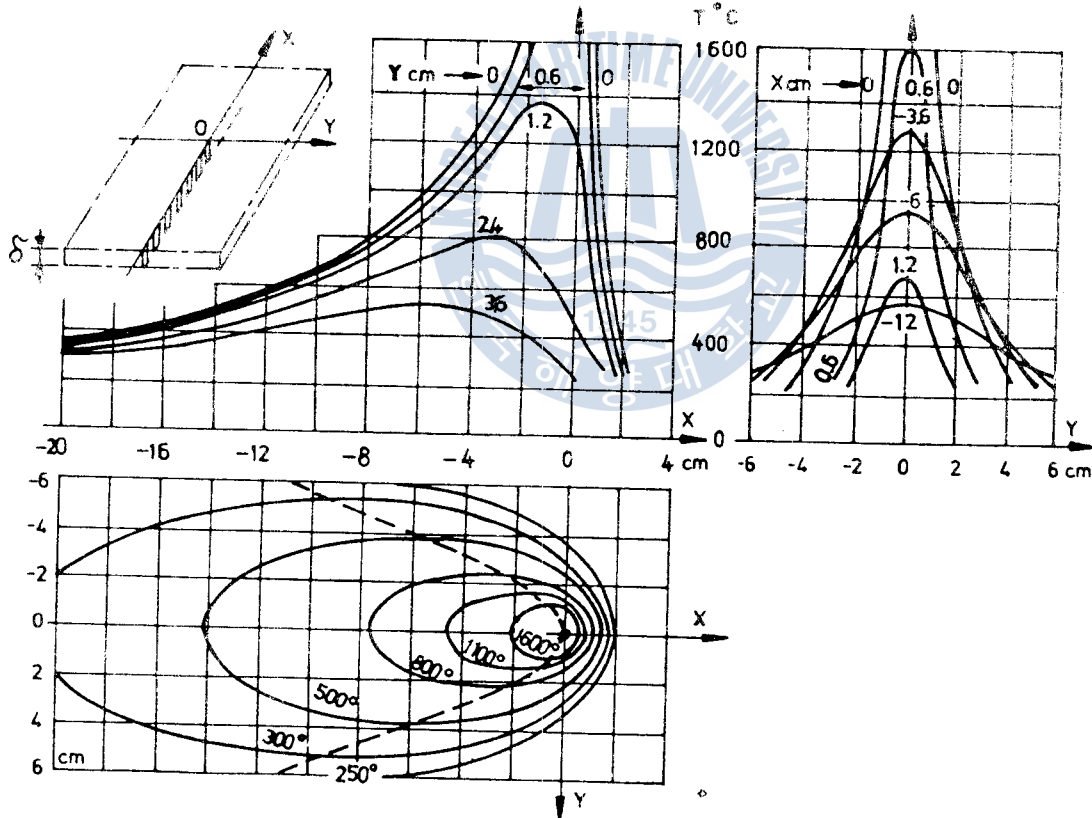


Fig. 2 Steady State Temperature Distribution for the Welding of Plate

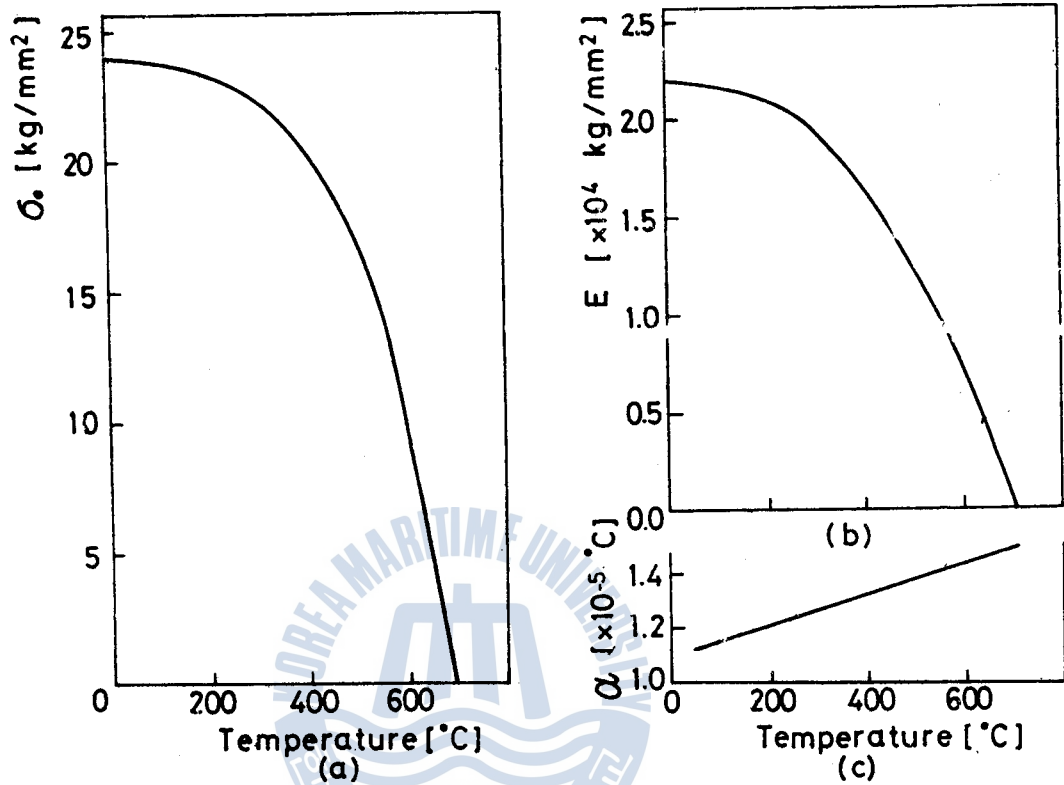


Fig. 3 Characteristics of Mild Steel

率이 變性變形率로 吸收되기 때문이다. (但 板의 垂直方向으로는 熱膨脹과 收縮이 일어나는데 이는 가로收縮과 無關하다) 그런데 熱源이 앞으로 進行함에 따라 同 橢圓도 앞으로 平行移動하게 되고 熔接線上의 任意의 어느점이 700°C에 到達하게 된다. 이때부터 이 點의 彈性係數 E 와 彈性限度 σ_0 는 커지기 始作하고 材料가 冷却하면서 收縮한다. 이때부터의 收縮이 冷却 後에 가로收縮이 된다. 따라서 이 收縮을 計算하면 가로收縮을 얻을 수 있다.

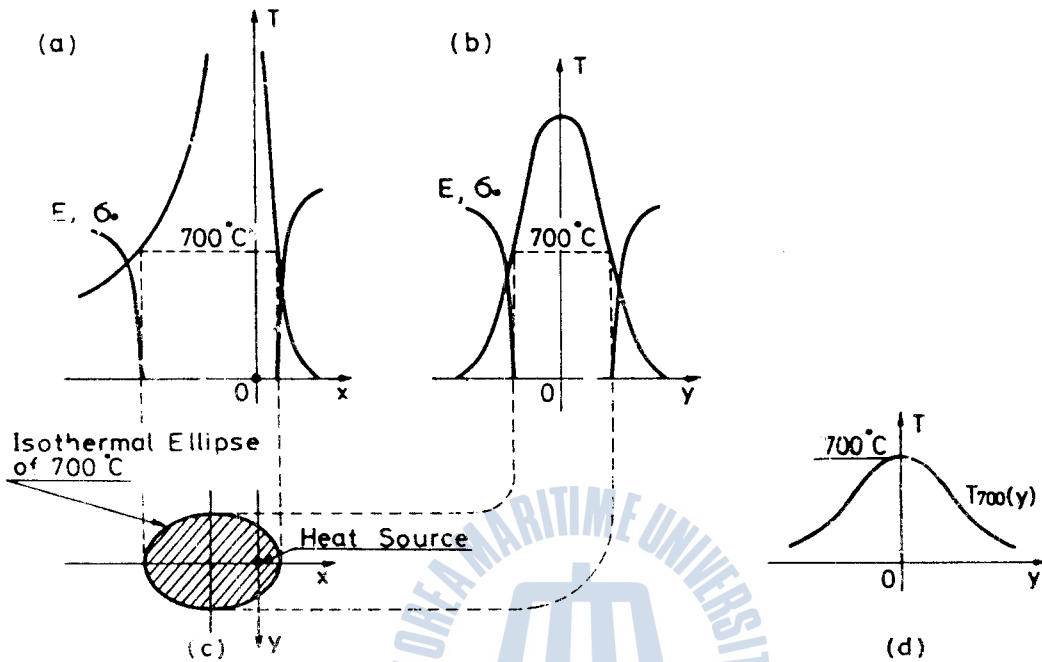


Fig. 4 The Distribution of Modulus of Elasticity (E) and Elastic Limit (σ_0) around the Heat Source

熔接線의 溫度가 700°C 에 到達했을 때의 y方向 溫度分布를 $T_{700}(y)$ 라 하고 Fig. 4 (d)에 나타내었다. 가로수축 St를 計算하면 다음과 같다.

$$St = \int \left(\int_{T_0}^{T_{700}(y)} \alpha(T) dT \right) dy \dots\dots\dots(3)$$

여기서 $\alpha(T)$ 는 熱膨脹係數로서 一般的으로 溫度 T 의 函數이다.

$\alpha(T)$ 를 常溫에서부터 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지의 平均值로 잡아 近似的으로 一定하다고 보면 式 (3)은 다음과 같이 된다.

$$St = \alpha \int (T_{700}(y) - T_0) dy \dots\dots\dots (4)$$

以上은 軟鋼에 대한 가로收縮이지만 다른 金屬材料의 平板을 熔接할 때도 똑같이 適用할 수 있다.



4. 角變位에 의한 가로수축의 影響

4板이 용접을 하면 용접線을 中心으로 角變位가 發生한다. 이 角變位에 의한 가로수축 影響을 考慮하면 角變位에 의한 測定誤差를 補正할 수 있다. 지금 試片의 幅을 b , 두께를 δ , 가로수축의 測定값을 S_m , 참값을 S_t 라고 하면 Fig.5 와 같이 된다.

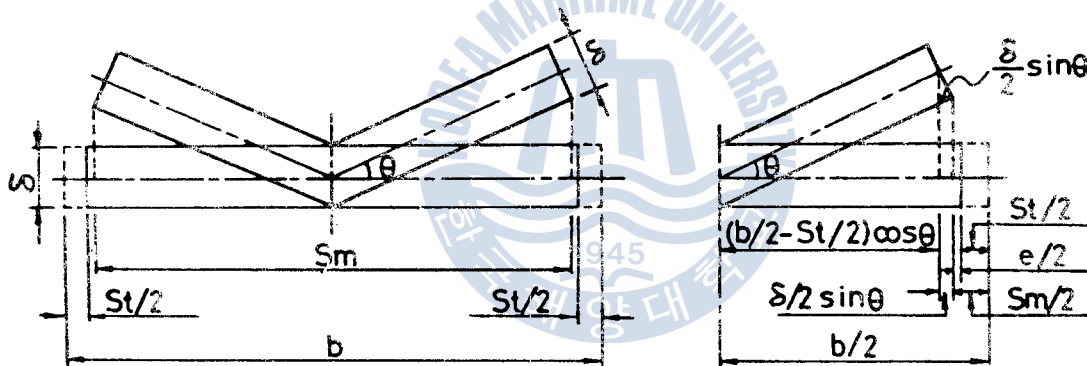


Fig. 5 Measured Error by Angular Displacement

角變位에 의한 測定誤差 $e = S_m - S_t$ 이므로

$$e = (b - S_t)(1 - \cos \theta) - \delta \sin \theta$$

가 된다. 여기서, S_t 는 b 에 比하여 極히 작은 값이므로

$$e \approx b(1 - \cos \theta) - \delta \sin \theta$$

$$\frac{e}{\delta} = \frac{b}{\delta}(1 - \cos \theta) - \sin \theta$$

로 되고 $\frac{b}{\delta}$ 를 파라미터로 하여 θ 와 $\frac{e}{\delta}$ 와의 關係를 그래프에 나타내면 Fig.6 과 같이 된다.

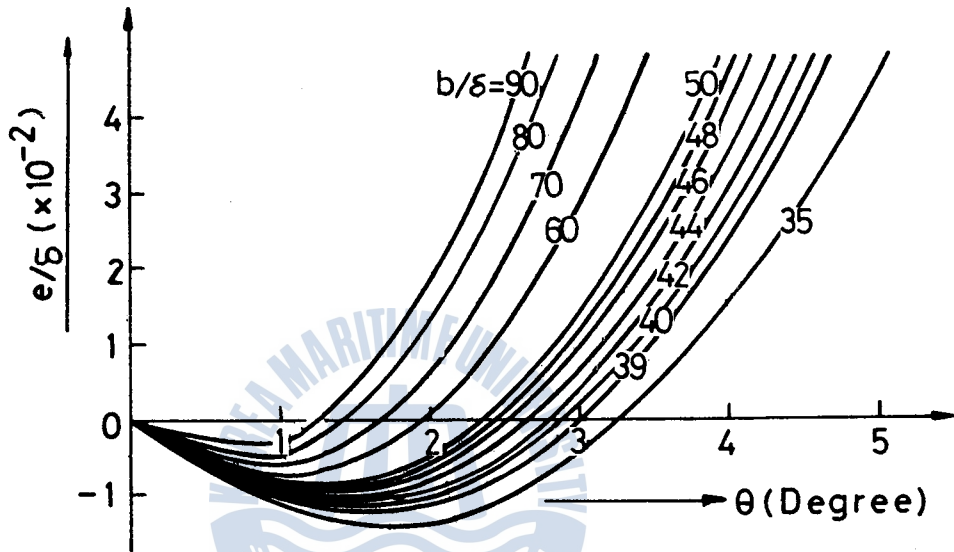


Fig. 6 Error of Transverse Shrinkage
by Angular Displacement

Fig.6 에서 陰의 $\frac{e}{\delta}$ 값은 가로收縮의 測定값이 참값보다 작음을 意味하므로 角變位 θ 에 대한 $\frac{e}{\delta}$ 값만큼 더해주면 角變位에 의한 가로收縮을 補正할 수 있다. 또한 Fig.6 에서 보는 바와 같이, 豫想 角變位 θ 를 알 수 있으면 幅 b 와 두께 δ 를 적당히 取하므로써 角變位에 의한 測定誤差를 最小로 할 수 있다.

5. 實 驗

本 研究에서 提示한 가로收縮의 計算式 (3) 및 (4)를 檢證하기 위 하여 다음 規格을 使用하여 實驗하였다.

o 試版規格

(單位 : mm)

實 驗 時 期	두 께	길 이	幅	熔 接 方 法	試 片
1 次	6.0	200	120	Bead-on-plate Submerged Arc Welding	SS - 41
2 次	6.0	210	115	Butt Joint Submerged Arc Welding	

o Wire 規格

品 種	用 途	化 學 成 分 (%)				直 徑 (mm)
		C	Si	Mn	Cr	
KD - 40	軟 鋼 熔 接 用	0.08	0.01	0.45	-	3.5

o Flux 規格

品 種	形 式	化 學 成 分 (%)			
		C	Si	Mn	S
KYF - 15	熔 融 形	0.10	0.23	0.95	0.02

一次實驗의 試片은 두께 6mm의 SS-41 軟鋼板으로 가로 200mm 세로 120mm의 크기로 側面을 精密加工하여 다듬질하였고, Fig.7(a)와 같이 位置를 수군대 表示하고 그 表示된 位置의 가로方向 길이를 測定한 뒤 비이드 온 플레이트를 實施하였다. 이때 使用된 熔接電流 (I), 熔接電壓 (V), 熔接速度 (v)를 測定하고 熱源強度 $Q = 0.24 \eta VI$ 를 計算하였다. 여기서 η 는 熱效率로서 金屬電極의 境遇 60% 內外이고 Flux 熔接인 境遇 85~95%이므로 本 研究에서는 $\eta = 0.9$ 로 取했다. 試片이 完全히 冷却한 後 表示된 位置를 마이크로미터로 재어 그 差로써 가로收縮을 取했다.

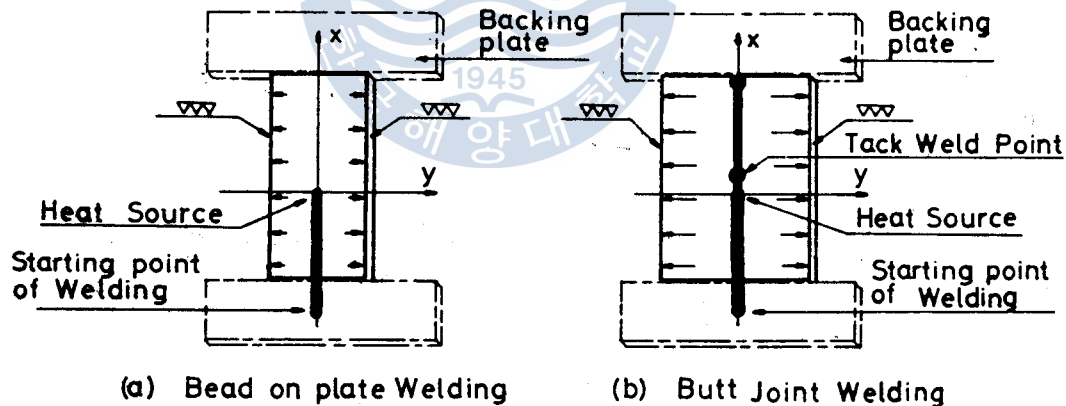


Fig. 7 Configuration of Specimen

이 실험은 1차 실험과 동일한 방법으로 두께 6 mm, 길이 210 mm, 세로 115 mm로 가공하여 수직의 시험편을 Fig. 7 (b)와 같이 假接하고 양대각 이음 용접을 實施하였다. 용접 前後에 表示된 位置를 마이크로미터를 利用하여 가로方向의 長이를 測定하고 그 差로써 가로수축을 量한다. 이 場에 熔接線(熱源의 進行方向)을 中心으로 양자의 角變位(本 實驗結果 最大 2.5 度)가 發生하므로 角變位에 의한 가로수축의 影響을 考慮하면 正確한 가로수축을 求할 수 있다. 實驗裝置의 概略圖를 나타내면 Fig. 8과 같다.

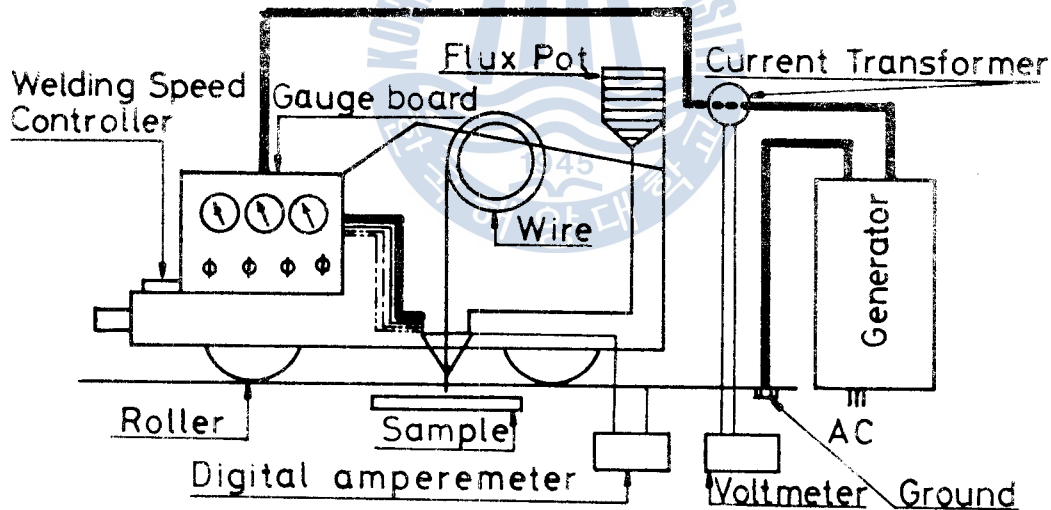


Fig. 8 Schematic Diagram of Experimental Device

비드 온 플레이트 용접 實驗에서 測定한 가로수축의 樣相을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 가로수축은 平板의 測

定位置에 따라 다르다. 一般的으로 熔接始作部の 가로收縮이 제일 작고 熔接終了部가 그 다음 작으며 中間部の 가로收縮이 가장 크다. 熔接始作時와 終了時는 過渡期에 해당하는 곳으로 定常熱傳導方程式이 適用될 수 없는 곳이다.

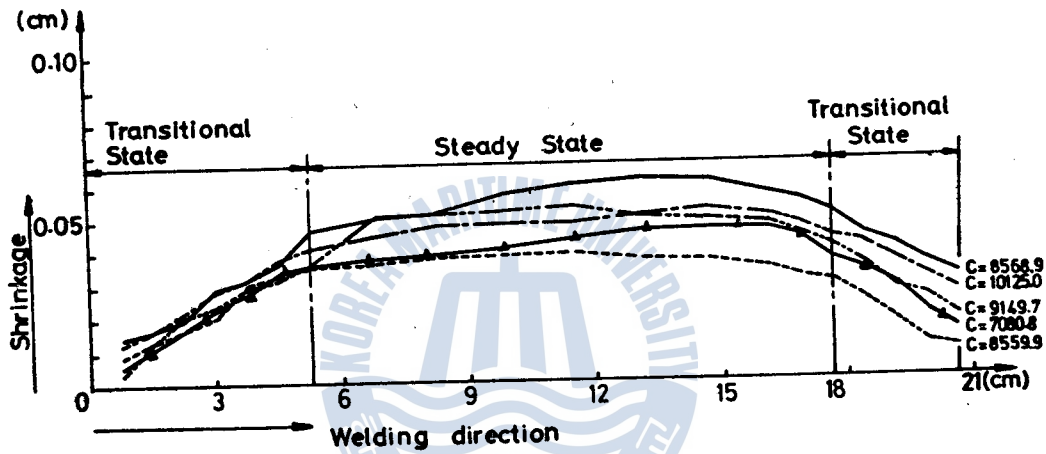


Fig. 9 Typical Transverse Shrinkage

Fig. 10은 비이드 온 플레이트 時의 가로收縮을 나타낸 것이다. 가로軸에 單位두께當의 入熱量 $C = \frac{Q}{v\delta}$ (cal/cm/cm)을 잡고 세로軸에 가로收縮을 잡아 實測値와 計算値를 나타내었다. 여기서 計算値는 式 (4)에 의하여 計算한 값이고 이때 α 는 12.3×10^{-6} (1/°C)로 잡았다. 그림에서 明白한 바와 같이 單位두께當의 入熱量이 커지면 가로收縮도 크게 되는데 比列하지는 않는다.

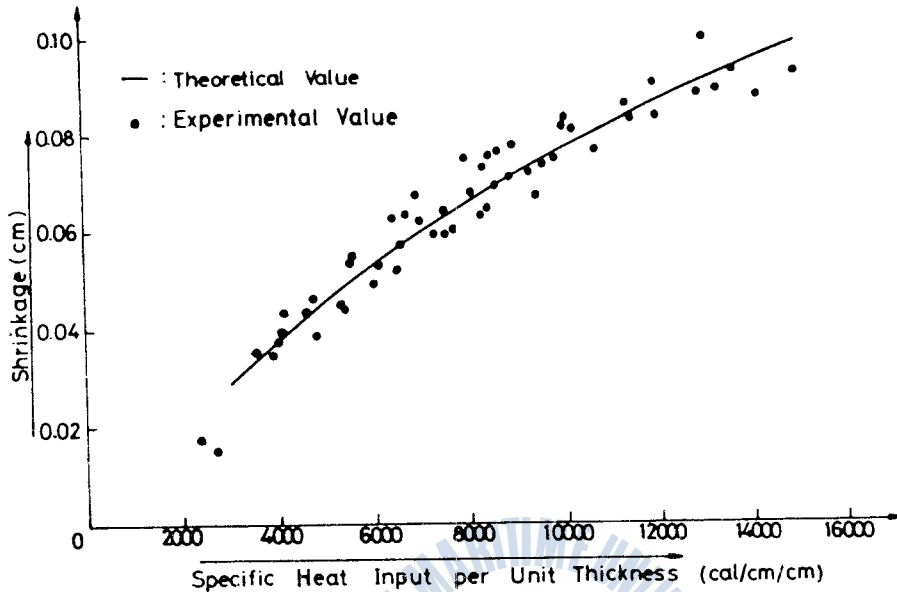


Fig. 10 Transverse Shrinkage in Bead-on-plate

맞대기 이음 熔接時 가로收縮의 樣相을 나타내면 Fig.11 과 같다. 이 實驗結果 實驗値와 計算値가 잘 一致함을 볼 수 있다. 따라서 맞대기 이음 熔接 時에도 本 研究에서 提示한 式 (3) 및 (4)를 適用할 수 있음을 알 수 있다.

위의 두가지 實驗 모두 熔接 後의 角變位를 測定하여 角變位에 의한 가로收縮의 測定誤差를 補正하여 주었다. 一般的으로 角變位에 의한 測定誤差는 매우 작아 平板의 비이드 온 플레이트 時는 4% 以內였고 平板의 맞대기 이음 熔接 時는 8% 以內였다.

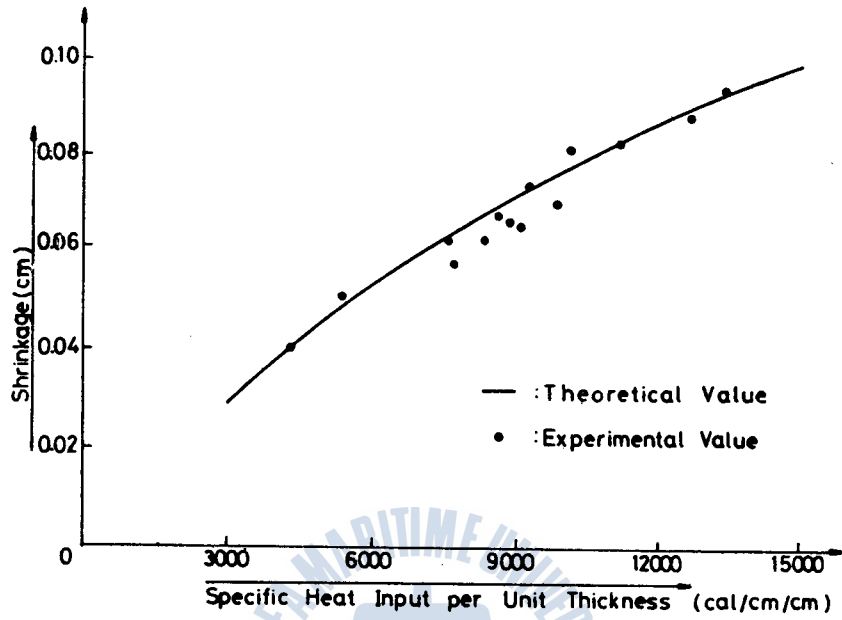
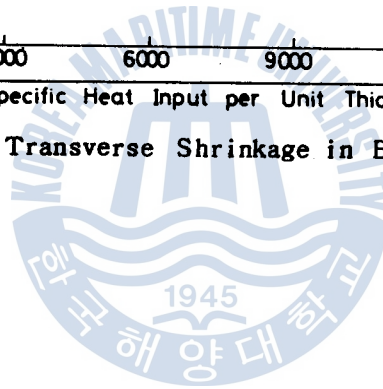


Fig. 11 Transverse Shrinkage in Butt Joint Welding



6. 結 論

平板의 비이드 온 플레이트 時 가로수축의 메카니즘을 考慮하여 가로수축의 計算式 (3) 및 (4) 를 提示하였고 이를 檢證하기 위하여 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 가로수축은 용접 中의 溫度分布와 熱應力 및 熱變形率에 따라 크게 다르게 되므로 實際와 같은 形態의 모델로써 다루어져야 한다.
2. 平板에 비이드 온 플레이트 용접을 하면 용접始作時의 가로수축이 제일 작고 終了部가 그 다음 작으며 中間部의 가로수축이 가장 크다.
3. 平板에 비이드 온 플레이트 용접 時 가로수축에 관하여 本 研究에서 提示한 式 (4) 는 一般的으로 實驗値와 잘 一致한다.
4. 一般的으로 單位두께당의 入熱量이 클수록 가로수축이 커지게 된다.
5. 平板의 비이드 온 플레이트 時의 가로수축에 관한 理論은 平板의 맞대기 이음 용접에도 그대로 適用할 수 있으며 다만 假接의 適正間隔에 관하여서는 앞으로 더 研究할 必要가 있다.

參 考 文 獻

1. N.N.Rykaline, "Calcul des prossus thermiques de Soudage" Soudage et Techniques Connexes (15), Janv. Fev., 1961, p.5-38.
2. Koichi Masubuchi, "Control of Distortion and Shrinkage in Welding" Welding Research Council-Bulletin (149), 1970, p.1-29.
3. Koichi Masubuchi, "Rapport sur l'état des connaissances de l'analyse et des autres effets du Soudage". Soudage et Techniques connexes 1976, p.301-308.
4. 王之錫, "熔接中 移動하는 熱源에 依한 溫度分布에 關한研究" 韓國船用機關學會誌 第六卷 第二號(1982), p.51-68
5. 嚴東錫, "最新 熔接工學" 文運堂, 1982, p.132-170.
6. Kenneth Easterling, "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding" Butterworths Monographs in Mat, p.17-47.