

## 平板의 맞대기 이음 용접時의 가로收縮에 관한 研究

李愚洙\* · 王之錫\*\*

### A Study on the Transverse Shrinkage for the Butt Joint Welding of Plate

W. S. Lee, J. S. Wang

**Keywords:** Transverse Shrinkage(가로수축), Compressive Plastic Strain(압축소성변형)  
 Thermal Expansion(열팽창), Bead-on-plate(비이드 온 플레이트)

#### 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 of which the 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. For the bead-on-plate welding, 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.
2. In bead-on-plate welding, the equations presented in this paper concerning transverse shrinkage coincide fairly well with the experimental values generally.
3. Transverse shrinkage increases generally as specific heat input per unit thickness increases.

#### 1. 序 論

熔接이 部材의 接合手段으로서 工業의 으로 널리 利用되던 初期부터 熔接에 의한 變形은 큰 問題들 中의 하나로 指摘되어 왔다. 大部分의 熔接方法에서 不 可 缺인 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 因하여 생긴 壓縮塑性變形은 冷却後 接合된 材料를 使用할 때 熔接變形을 惹起시키어 材料의 性能에 影響을 미친다.

熔接變形에는 熔接線 方向의 收縮인 세로收縮, 熔接線과 直角方向의 收縮인 가로收縮, 發生된 殘留應

\* 韓國海洋大學 大學院

\*\* 韓國海洋大學 船舶機械工學科, 正會員

力으로 인한 座屈, 回轉變形, 角變形 및 굽힘變形 등이 있으며 이 중에서 가로수축이 가장 큰 影響을 미쳐 용접質(Welding Quality)을 決定하는 重要한 要因이 되고 있다. 지금까지의 가로수축에 관한 研究內容은, 一次元 部材를 용접할 때의 가로수축을 實驗的으로 求하고, Fig.1과 같은 Slit-Type, H-Type, Ring-Type 및  $\theta$ -Type 등의 試片에 대하여 가로수축에 對항하는 拘束의 程度를 解析하고 拘束度를 定義하여 가로수축과 拘束度와의 關係를 求한 結果 다음과 같은 式을 얻었다.<sup>2)3)</sup>

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

여기서  $St'$ 는 拘束狀態에서의 가로수축이고  $Stf$ 는 自由로운 狀態에서의 가로수축이며  $K$ 는 拘束度이다.

그런데 가로수축을 誘發하는 熱應力과 變形率은 被熔接材의 形象에 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 가로수축도 달라질 것이 豫想된다. 따라서 本 研究에서는 實務에서 가장 많이 쓰이는 平板의 맞대기 이음용접에 대하여 가로수축의 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時的 가로수축을 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 서브버저드 비이드 온 플레이트를 實施하고, 實施前後의 가로方向 길이를 재어 그 差를 가로수축으로 잡았다. 또한 平板의 비이드 온 플레이트時的 가로수축에 관한 理論이 平板의 맞대기 이음용접에 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時的 理論을 그대로 適用할 수 있음을 確認하였다.

## 2. 平板의 용접에 의한 溫度分布

용접에 의한 變形은 根源的으로 熱變形率  $\alpha \Delta T$ (여기서  $\alpha$ 는 熱膨脹係數이고  $\Delta T$ 는 溫度變化量이다.)로부터 發生하므로 가로수축을 解析하려면 용접에 의한 溫度分布를 알아야 한다.

平板의 맞대기 이음용접에 의한 溫度分布에 관해서는 로젠탈(Rosenthal)의 式이 有明하다. 一定한 速度로 용접할 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.<sup>1)4)</sup>

그러나 이 式에서는 平板의 兩面에서 發生하는 對流과 輻射에 의한 熱傳導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 熱傳導은 無視할 수 있을 것이다. 리칼린<sup>1)</sup>(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 熱傳導量이 材料에 傳導되는 熱量에 比하여 無視할 수 없을 程度라 하고, 表面에서의 熱傳導量을 뉴우튼(Newton)의 熱傳導係數  $\beta$ (cal/cm<sup>2</sup>/sec/°C)로써 考證하여 로젠탈의 式을 改良하여 다음 式을 얻었다.

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

여기서

$Q$ : 熱源強度(cal/sec)

$\lambda$ : 熱傳導係數(cal/cm/°C/sec)

$\delta$ : 材料의 두께(cm)

$v$ : 용접速度(cm/sec)

$a$ : 熱擴散係數(cm<sup>2</sup>/sec)

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

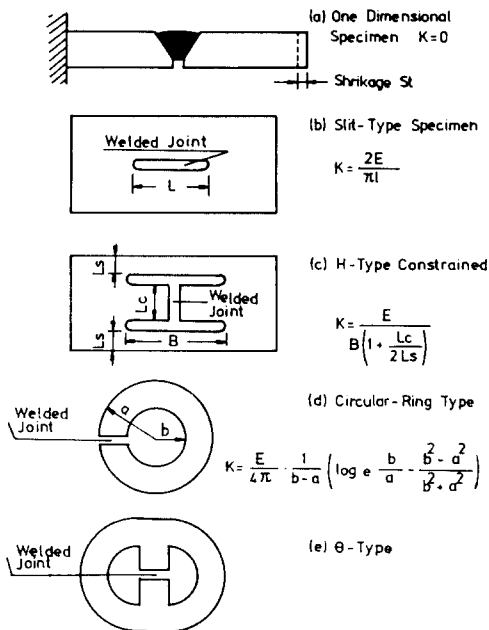


Fig. 1. Specimen type

$\gamma$ : 材料의 比重量( $g/cm^3$ )  
 $c$ : 比熱( $cal/g/^\circ C$ )  
 $\beta$ : 熱傳達係數( $cal/cm^2/sec/^\circ C$ )  
 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

$T_0$ : 常溫

$T(x, y)$ : 點( $x, y$ )에서의 溫度

$K_0(\mu r)$ 는 0(零)次 第2種의 Bessel 函數로서 다음과 같이 計算된다.

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

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.<sup>1)</sup>

### 3. 가로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 수밖에 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  $\delta=1cm$ 의 軟鋼板을 熱源強度  $Q=1,000cal/sec$ , 熔接速度  $v=0.1cm/sec$ , 表面熱傳達係數  $\beta=0.0014cal/cm^2/sec/^\circ C$ 로 熔接할 때의 溫度分布曲線을 그리면 Fig.2와 같다.<sup>1)</sup> 熱源近方에서 急激한 溫度變化를 볼 수 있고 特히 熱源前方에서 溫度 기울기가 심하다. 또한 平板에 等溫線을 그려보면 橢圓으로

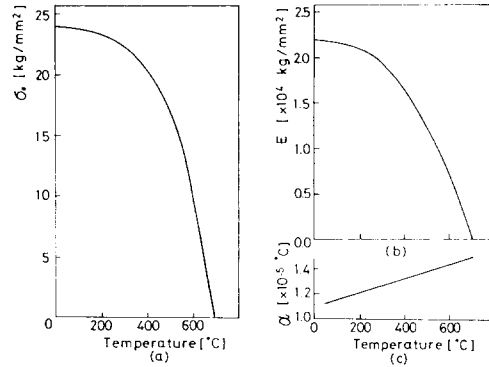


Fig. 3. Characteristics of mild steel.

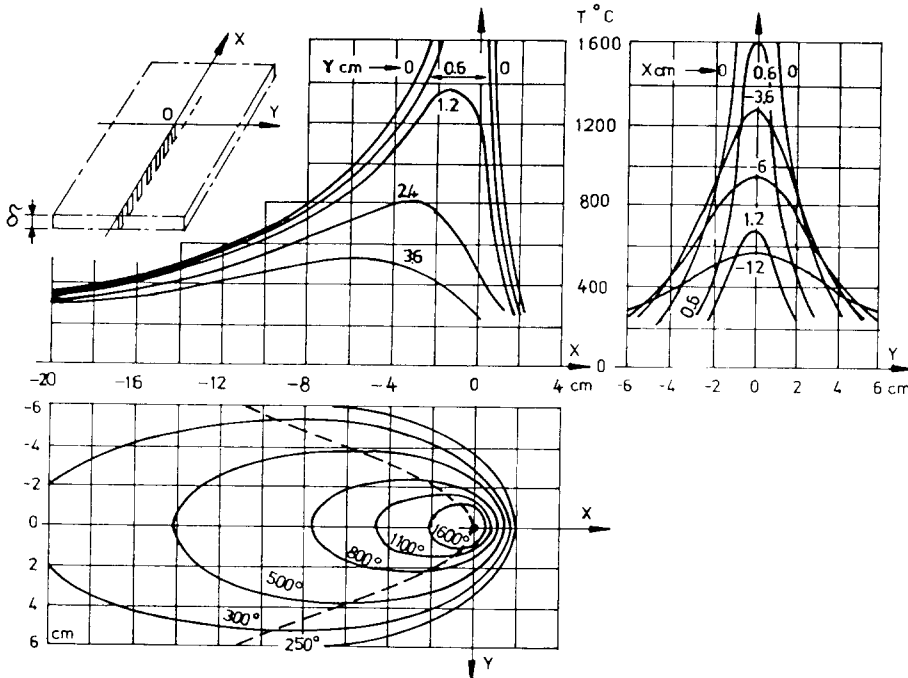


Fig. 2. Steady state temperature distribution for the welding of plate.

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  $\sigma_0$ , 彈性係數  $E$ , 熱膨脹係數  $\alpha$ 의 溫度依存性을 보면 Fig. 3과 같다.<sup>5)</sup> 彈性限度 및 彈性係數가 約 300°C로부터 減小하기 始作하여 約 700°C 程度에서 거의 零으로 되고 彈性體로서의 應力을 지탱할 수 없게 된다. 이러한 性質을 熔接하고 있는 平板에 適用시켜 보면, Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이 700°C를 等溫線으로 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과 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 엄청나게 큰 熱膨脹率( $\alpha T$ )에도 불구하고 膨脹과 收縮은 일어나지 않는다. 그 理由는 熱膨脹率이 塑性變形率로 吸收되기 때문이다. (但 板의 垂直方向으로는 熱膨脹과 收縮이 일어나는데 이는 가로수축과 無關하다). 그런데 熱源이 앞으로 進行함에 따라 同橢圓도 앞으로 平行移動하게 되고 이 橢圓을 벗어난 지점은 이때부터 彈性係數  $E$ 와 彈性限度  $\sigma_0$ 는 커지기 始作하고 材料가 冷却하면서 收縮한다. 이때부터의 가로方向 收縮이 冷却後에 가로수축이 된다. 따라서 이 收縮을 計算하면 가로수축을 얻을 수 있다. 熔接線의 溫度가 700°C에 到達했을 때의  $y$ 方向 溫度分布를  $T_{700}(y)$ 라 하고 Fig. 4(d)에 나타내었다. 가로 收縮  $S_t$ 를 計算하면 다음과 같다.

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

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에서 700°C까지의 平均値로 잡아 近似的으로 一定하다고 보면 式(3)은 다음과 같이 된다.

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

以上은 軟鋼에 대한 가로수축이지만 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

平板에 熔接을 하면 熔接線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  $\delta$ , 가로수축의 測定값을  $S_m$ , 참값을  $S_t$ 라고 하면 Fig. 5와 같이 된다.

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  $\theta$ 와  $\frac{e}{\delta}$ 와의 關係를 그래프에 나타내면 Fig. 6과 같이 된다.

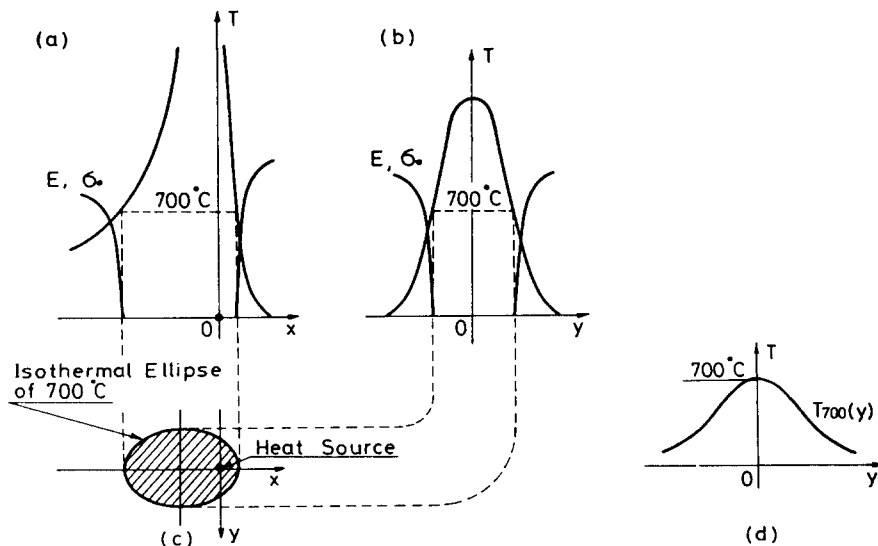


Fig. 4. The distribution of modulus of elasticity( $E$ ) and elastic limit ( $\sigma_0$ ) around the heat source.

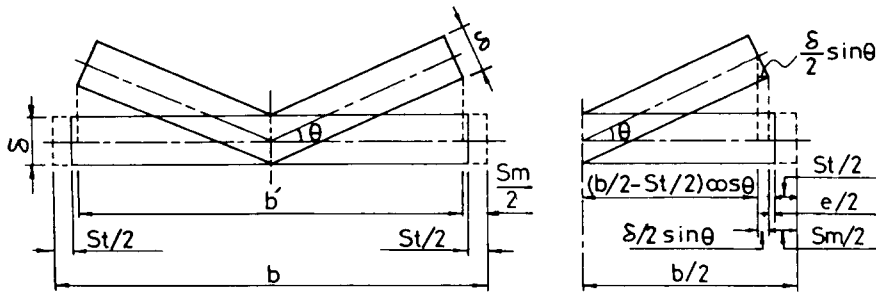


Fig. 5. Measured error by angular displacement.

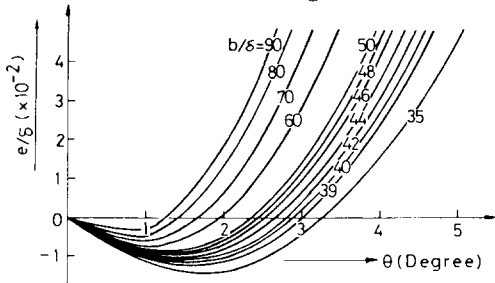


Fig. 6. Error of transverse shrinkage by angular displacement.

Fig. 6에서陰의  $\frac{e}{s}$  값은 가로收縮의測定값이 참값보다 작음을意味하므로角變位  $\theta$ 에 대한  $\frac{e}{s}$  값만큼더해 주면角變位에 의한 가로收縮을補正할 수 있다. 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이,豫想角變位  $\theta$ 를 알 수 있으면幅  $b$ 와 두께  $\delta$ 를 적당히取하므로서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)

◦ 試 片 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	

◦ 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

◦ 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

를 檢證하기 위하여 다음 規格을 使用하여 實驗하였다.

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 수근데 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,  $\eta$ 는 熱效率로서 金屬電極의 境遇 60%内外이고 Flux 熔接인 境遇 85~95%이므로 本 研究에서는  $\eta=0.9$ 로 取했다. 4) 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.

二次實驗은 一次實驗과 同一한 方法으로 두께 6mm 試片을 가로 210mm, 세로 115mm로 加工하여 두장의 試片을 Fig. 7(b)와 같이 假接하고 맞대기 이음熔接을 實施하였다. 熔接 前後에 表示된 位置를 마이크로미터를 利用하여 가로方向의 길이를測定하고 그 差로써 가로收縮을 量했다. 이 境遇에 熔接線(熱

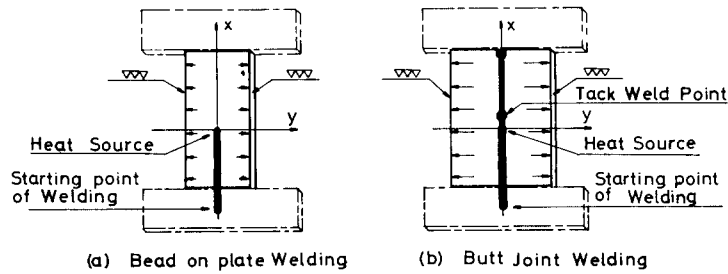


Fig. 7. Configuration of specimen.

源의 進行方向)을 中心으로 약간의 角變位(本 實驗 結果 最大 2.5度)가 發生하므로 角變位에 의한 가로 수축의 影響을 考慮하면 正確한 가로수축을 구할 수 있다.

實驗裝置의 概略圖를 나타내면 Fig. 8과 같다.

비이드 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적으로 용접始作部의 가로수축이 제일 작고 용접終了部가 그 다음 작으며 中間部の 가로수축이 가

장 크다. 용접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. 따라서 가로수축은 中間部の 값을 取했다.

Fig. 10은 비이드 온 플레이트時的의 가로수축을 나타낸 것이다. 가로軸에 單位 두께당의 入熱量  $C = \frac{Q}{\delta}$  (cal/cm/cm)을 잡고 세로軸에 가로수축을 잡아 實測値와 計算値를 나타내었다. 여기서 計算値는 式 (4)에 의하여 計算한 값이고 이때  $\alpha$ 는  $12.3 \times 10^{-6}$  (1/°C)로 잡았다. 그림에서 明白한 바와 같이 單位 두께당의 入熱量이 커지면 가로수축도 크게 되는데 비

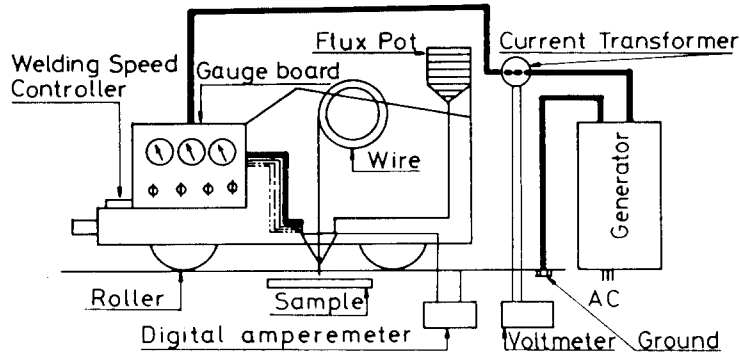


Fig. 8. Schematic diagram of experimental device.

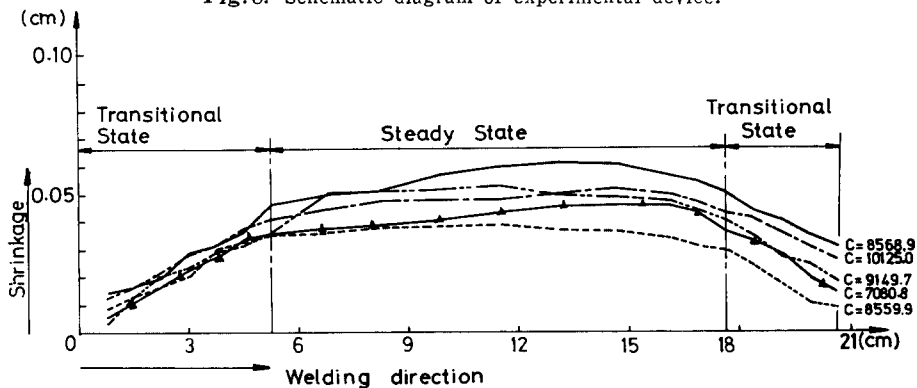


Fig. 9. Typical transverse shrinkage of bead-on-plate welding.

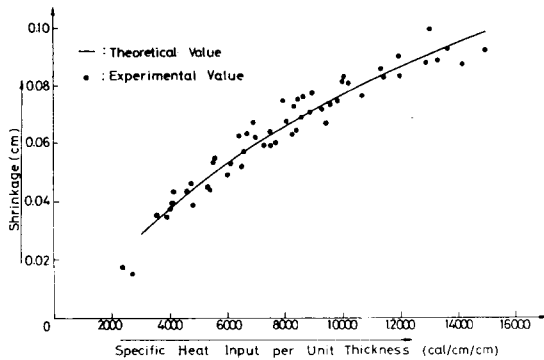


Fig. 10. Transverse shrinkage in bead on plate welding.

例하지는 않는다.

맞대기 이음 용접시 가로수축의 양상을 나타내면 Fig. 11과 같다. 이 실험결과 실험값과 계산값이 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 맞대기 이음 용접시에도 본 연구에서提示한 식(3) 및 (4)를適用할 수 있음을 알 수 있다.

위의 두가지 실험 모두 용접後의 角變位를測定하여 角變位에 의한 가로수축의測定誤差를補正하여 주었다. 一般적으로 角變位에 의한測定誤差는 매우 작아 平板의 비이드 온 플레이트時는 4% 以內이었고 平板의 맞대기 이음용접時는 8% 以內였다.

## 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 실험한 결과 다음과 같은結論을 얻었다.

1. 가로수축은 용접 중의 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 플레이트용접을 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 본 연구에서提示한 식(4)는 一般적으로 실험값과 잘 일치한다.

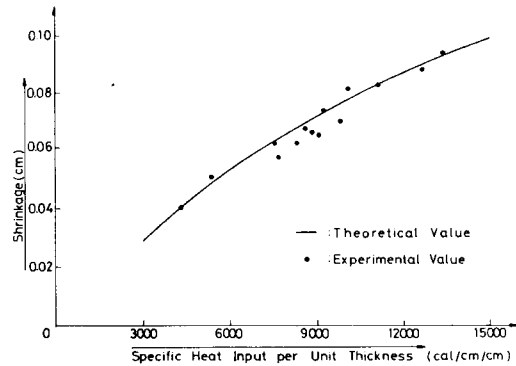


Fig. 11. Transverse shrinkage in butt joint welding.

4. 一般적으로 單位 두께當의 入熱量이 클수록 가로수축이 커지게 된다.

5. 平板의 비이드 온 플레이트 용접時의 가로수축에 관한 理論은 平板의 맞대기 이음 1 PASS 용접에도 그대로適用할 수 있으며 다만 假接의 適正間隔과 多層용접에의 適用에 관하여서는 앞으로 더 研究할 必要가 있다.

## 參 考 文 獻

1. N. N. Rykalin, "Calcul des processus thermiques de Soudage" Soudage et Techniques Connexes(15), Janv. Fev., 1961, p. 5-p. 38.
2. Koichi Masubuchi, "Control of Distortion and Shrinkage in Welding" Welding Research Council-Bulletin(149), 1970, p. 1-p. 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-p. 308.
4. 王之錫, "용접中 移動하는 熱源에 依한 溫度分布에 관한 研究", 韓國船舶機關學會誌 第六卷 第二號(1987), p. 51-p. 68.
5. 嚴東錫, "最新용접工學", 文運堂, 1982, p. 132-p. 170.
6. Kenneth Easterling "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding" Butterworths Monographs in Mat p. 17-p. 47.