

平板의 팽대기 이후 용접時 가로收縮의
近似的 計算式에 관한 研究

指導教授 王之錫



韓國海洋大學 船舶機械工學科4學年

南鳳熙 朴龍泰 柳基善

Table.3 예열 온도의 변화에 따른 확산성 수소량 과 Δt 150
의 변화

		확산성 수소량	Δt 150
예열 하지 양 음	20°C	응고시 수소량의 43%	1분 20초
	100°C	응고시 수소량의 5%	—
예열 온도	150°C	응고시 수소량의 2%	9분 30초
	200°C	응고시 수소량의 0%	—

目 次

1. 序 論
2. 平板의 熔接에 의한 溫度分布
3. 가로 收縮
4. 가로 收縮의 近似式
5. 實 驗
6. 結 論
7. 參 考 文 獻
8. 부 록

A Study on the Approximate Formulas for Transverse Shrinkage for the Butt Joint Welding

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 shape 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 have 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.

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 : Elastic limit of materials (kg/mm^2)
- $K_0(\mu r)$: Bessel function of the second kind of order zero

1. 序 論

熔接이 部材의 接合手段 으로서 工業的으로 널리 利用되던 初期부터 熔接에 의한 變形은 큰 問題들 중의 하나로 指摘되어 왔다.

大部分의 熔接方法에서 불수 있는 바나 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 蒸起시키어 材料의 性能에 影響을 미친다.

熔接變形은 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 殘留應力으로 因한 座屈, 回轉變形, 角變形 및 屈曲變形 등이 있으며 이 중에서 가로收縮이 가장 큰 影響을 미쳐 熔接質을 決定하는 重要한 要因이 되고 있다.

지금까지의 가로收縮에 관한 研究內容은, 一次元 部材를 熔接할 때의 가로收縮을 實驗的으로 求하고, Fig 1과 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

$$\frac{S_t'}{S_{tf}} = \frac{1}{1 + 0.086k^{0.87}} \quad (1)$$

여기서 S_t' 는 拘束狀態에서의 가로收縮이고 S_{tf} 는 自由로운 狀態에서의 가로收縮이며 K 는 拘束度이다.

그러나 가로收縮을 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, 材料의 溫度分布와 變化推移도 形象에 따라

달라지기 때문에 피용접재가 위의 시험편과 다른 모양을 하고 있다면 차수 수축도 달라질 것이 예상된다.

따라서 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 쓰이는平板의 맞대기 이음 용접에 대하여, 차수 수축의 발생機構를 설명하고 그에近似的理論의 計算法을提示하고자, 平板에 비어드온 플레이트 時의 차수 수축을 近似的理論値로 計算하는 方法을提示하였고, 이를 實驗으로 立證하였다.

實驗은 平板에 서번지드 비어드온 플레이트를 實施하고, 實施前後의 차수 方向 길이를 재어 그 差를 차수 수축으로 量했다. 또한 平板의 맞대기 이음 용접에 適用할수 있는 否를 檢討하기 위하여 이에 關한 實驗도 實施한 結果, 實際의 境遇나 尺寸이 假接하여 놓고 용접할 때는 平板에 비어드온 플레이트 時의 理論을 그대로 適用할수 있음을 確認하였다.

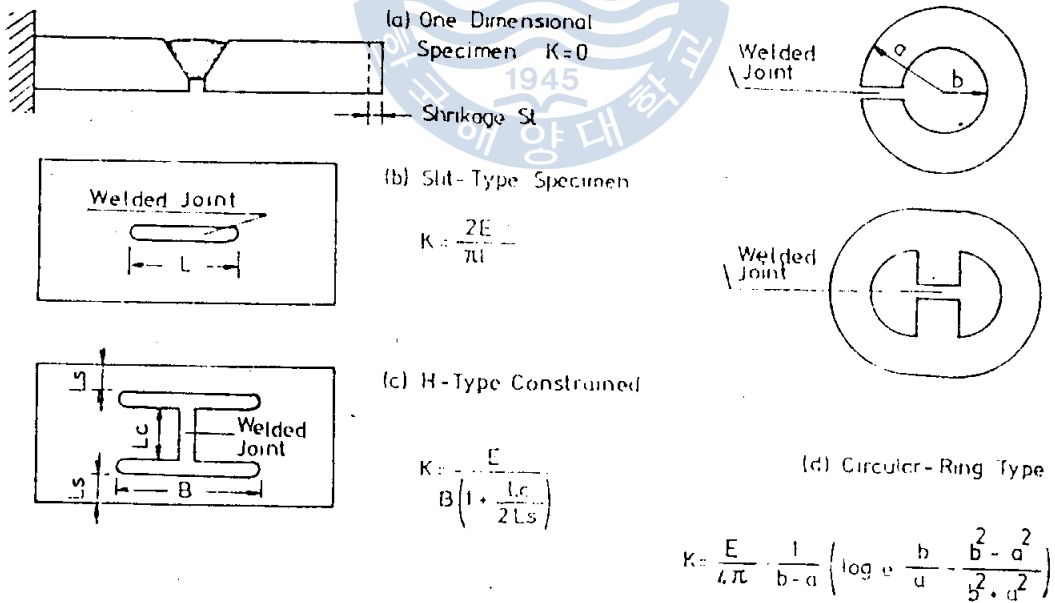


Fig.1 Specimen Type

(e) θ-Type

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 $\alpha \Delta T$ (α 는 熱膨脹係數이고 ΔT 는 溫度變化量이다)로부터 發生하므로 가로 收縮을 解析 하려면 熔接에 의한 溫度分布를 알아야 한다.

熔接中の 溫度分布에 關한 研究은 많이 發表된 것이 있으며 그中에서 Rosenthal과 Rykhaline의 研究가 重要한 地位를 占하고 있다. 이들의 研究에 是 熱源을 點이라고 보았고 또한 材料의 厚를 無限大라 看做하여, 熱源을 原點으로 取하고 熱源의 進行方向을 x 軸으로 잡고, 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로서 熱傳導에 關한 定常熱傳導方程式을 만든다.

그러나 Rosenthal의 式에 是 平板의 兩面에서 發生하는 對流과 輻射에 의한 熱傳達을 無視하고 있기 때문에 Rykhaline은 熔接始作時과 終了時의 過渡期에 適用할 爲한 表面에서의 熱傳達量을 Newton의 熱傳達係數 β ($\text{cal/cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$)로써 考慮하여 Rosenthal의 式을 改良하여 다음 式을 만들었다.

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

여기서 Q = 熱源強度 (cal/sec)
 λ = 熱傳導係數 ($\text{cal}/\text{cm}/^\circ\text{C}/\text{sec}$)
 δ = 材料의 厚 (cm)
 v = 熔接速度 (cm/sec)
 a = 熱擴散係數 (cm^2/sec)

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

γ = 材料의 比重量 (g/cm^3)
 c = 比熱 ($\text{cal}/\text{g}/^\circ\text{C}$)
 β = 熱傳達係數 ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$)
 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, T_0 : 常溫

달라지기 때문에 피용접재가 위의 시험편과 다른 모양을 하고 있다면 가로 수축도 달라질 것이 예상된다.

따라서 본 연구에서는實務에서 가장 많이 쓰이는平板의 맞대기 이음 용접에 대하여, 가로 수축의 발생機構를 설명하고 그의近似的理論의計算法를提示하고자, 平板에 비어드은 플레이트 時의 가로 수축을 近似的理論値로 計算하는方法을提示하였고, 이를實驗으로 示證하였다.

實驗은 平板에 서브머지드 비어드은 플레이트를 實施하고, 實施前後의 가로 方向 길이를 재어 그 差를 가로 수축으로 量했다. 또한 平板의 맞대기 이음 용접에 適用할수 있는 否를 檢討하기 위하여 이에 관한 實驗도 實施한 結果, 實際의 境遇나 같이 假接하여 놓고 용접할 때는 平板에 비어드은 플레이트 時의 理論을 그대로 適用할수 있음을 確認하였다.

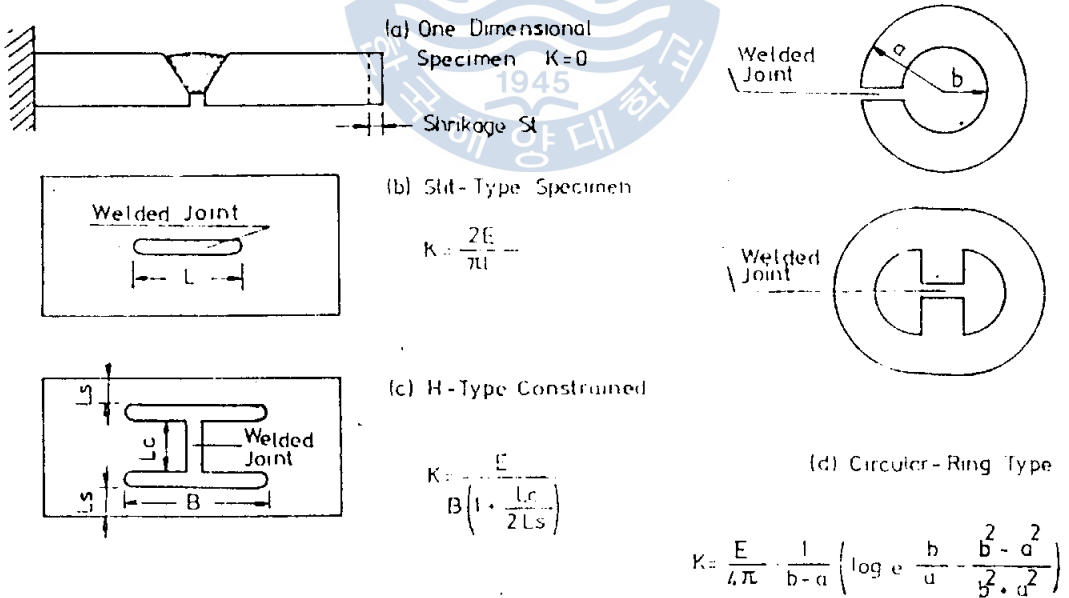


Fig.1 Specimen Type

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 $\times \Delta T$ (α 는 熱膨脹係數이고 ΔT 는 溫度變化量이다)로부터 發生하므로 가로 收縮을 解析하려면 熔接에 의한 溫度分布를 알아야 한다.

熔接中の 溫度分布에 對한 研究은 盛이 發表되어 있으며 그中에서 Rosenthal과 Rykhaline의 研究가 重要를 얻어져 있다. 이들의 研究에서는 熱源을 點이라고 보았고 또한 材料의 厚를 無限大라 看做하여, 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로서 熱傳導에 對한 定常熱傳導方程式을 만든다.

그러나 Rosenthal의 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 있기 때문에 Rykhaline은 熔接始作時과 終了時의 過渡期에 適用할 수 있도록 表面에서의 熱傳達量을 Newton의 熱傳達係數 β ($\text{cal/cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$)로써 考慮하여 Rosenthal의 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)
 λ = 熱傳導係數 ($\text{cal}/\text{cm}/^\circ\text{C}/\text{sec}$)
 δ = 材料의 厚 (cm)
 v = 熔接速度 (cm/sec)
 a = 熱擴散係數 (cm^2/sec)

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

- γ = 材料의 比重量 (g/cm^3)
 c = 比熱 ($\text{cal}/\text{g}/^\circ\text{C}$)
 β = 熱傳達係數 ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$)
 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 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라 다음나 같이 計算된다

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

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나 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 수법이 있는데 이 방법은 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 變形을 考慮하면 이 방법이 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장치의 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 格차가 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 , 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 減少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°C 를 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상의 溫度分布와 彈性係數, 彈性 限度의 分布를 나타내면 同圖 (a) 및 (b)와 같다.

이 그림에서 알수있는 바바늘이 700°C 等溫線 橢圓은 相對的으로 強靱한 材料에 둘러싸여 있으므로 엄청나게 큰 熱膨脹率(αT)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 가로 收縮과 無關하다)

그런데 熱源이 앞으로 進行함에 따라 이 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 σ_0 는 커지기 시작하고 材料가 冷却하면서 收縮한다.

이때부터의 가로 方向 收縮이 冷却後에 가로 收縮이 된다. 따라서 가로 方向 收縮을 計算하면 가로 收縮을 얻을수 있다.

熔接線의 溫度가 700°C 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°C 까지의 平均値로 잡아 近似的으로 一定하다고 보면 식(3)은 다음과 같이 된다.

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

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

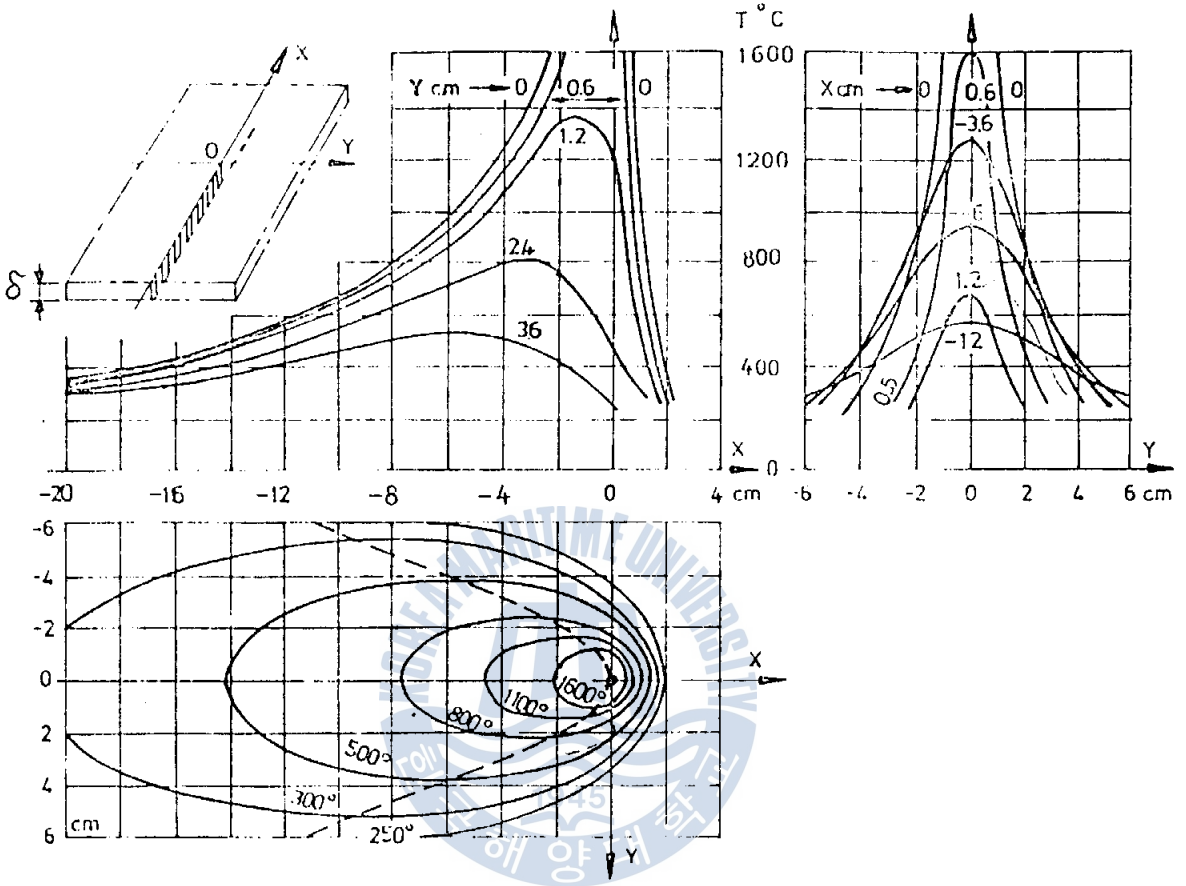


Fig.2 Steady State Temperature Distribution for the Welding of Plate

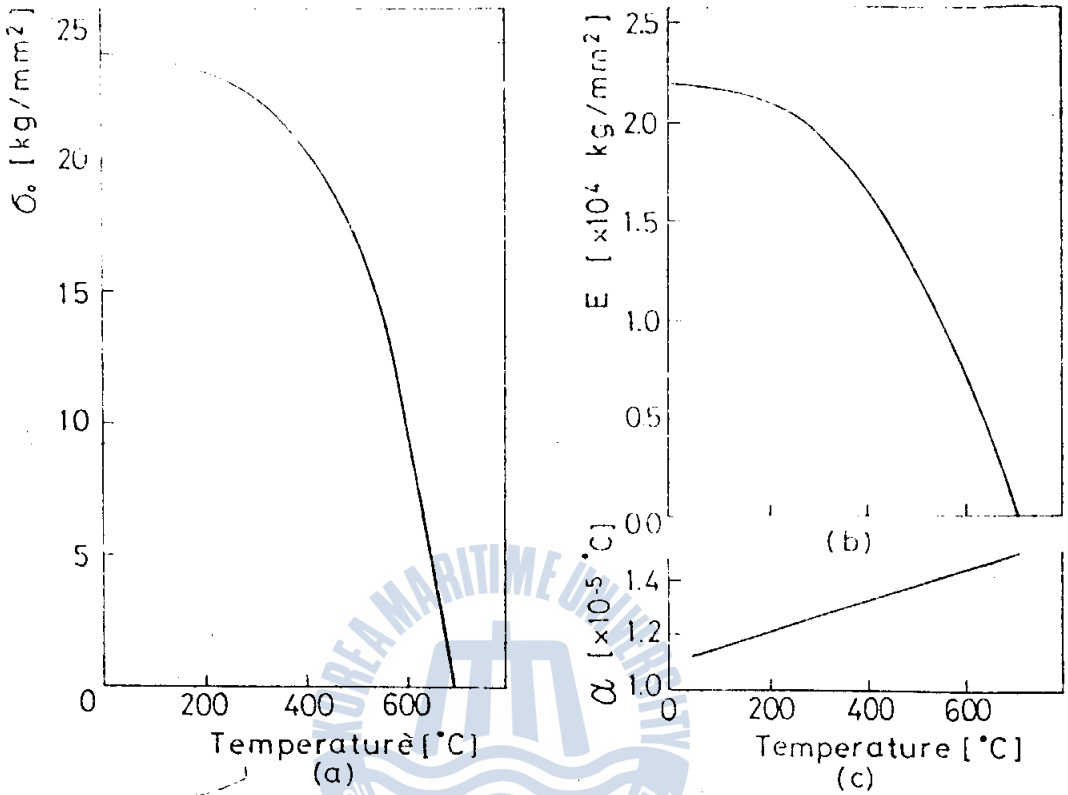


Fig.3 Characteristics of Mild Steel

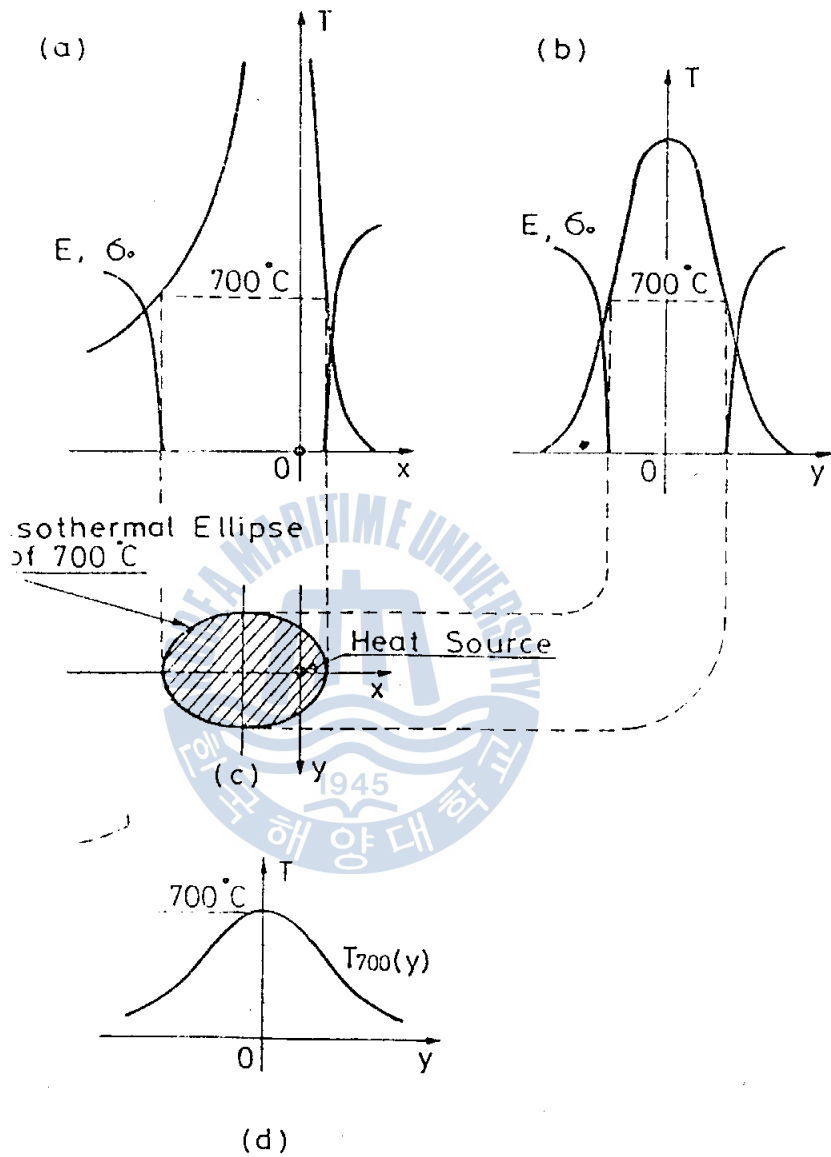


Fig.4 The Distribution of Modulus of Elasticity(E) and Elastic Limit(σ_0) around the Heat Source

4. 가로 收縮의 近似式

前節에서 보는 바와 같이 가로 收縮은 積分形態로 되어 있다. 이 積分은 컴퓨터를 利用하는 數值 積分을 하여야만 한다. 따라서 單位 두께 당의 入熱量만 알면 바로 計算할 수 있는 近似式을 여기서 提示 하고자 한다.

單位 두께 당 入熱量을 x , 가로 收縮을 y 라 두고 이를 2次式으로 表示한다. $x=0$ 일때 y 가 0 인 점을 감안하여 가로 수축을 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$y = ax^2 + bx$$

(5)

$$x = 6564 \text{ 일때 } y = 0.0577$$

$$x = 13589 \text{ 일때 } y = 0.0935 \text{ 이므로}$$

이들을 (5) 식에 代입하여 a, b 를 구하면

$$a = -2.71810 \times 10^{-10}$$

$$b = 1.0574 \times 10^{-5}$$

따라서)

$$y = -2.71810 \times 10^{-10} x^2 + 1.0574 \times 10^{-5} x \quad (6)$$

◦ 試片規格

(單位: mm)

層數	厚	寬	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

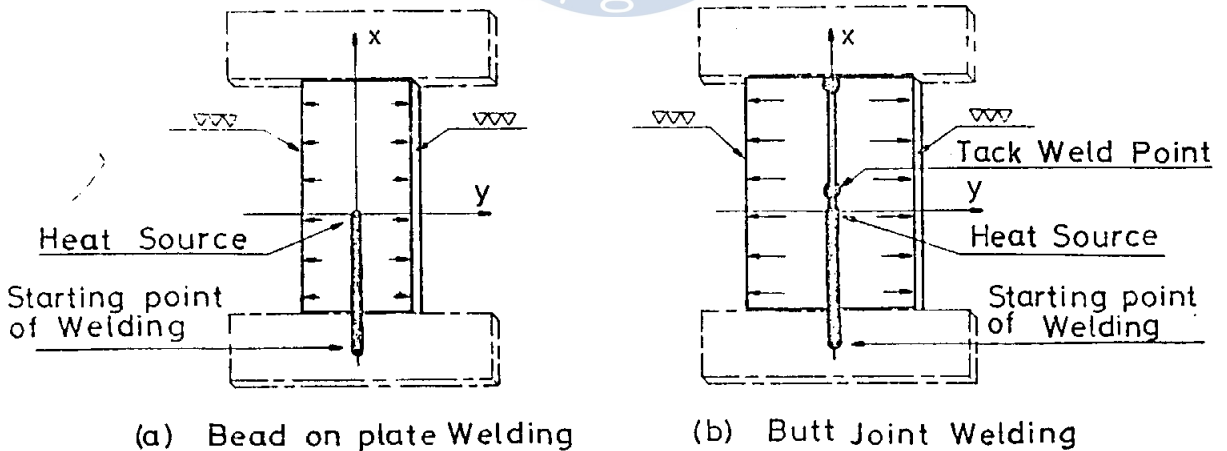


Fig.7 Configuration of Specimen

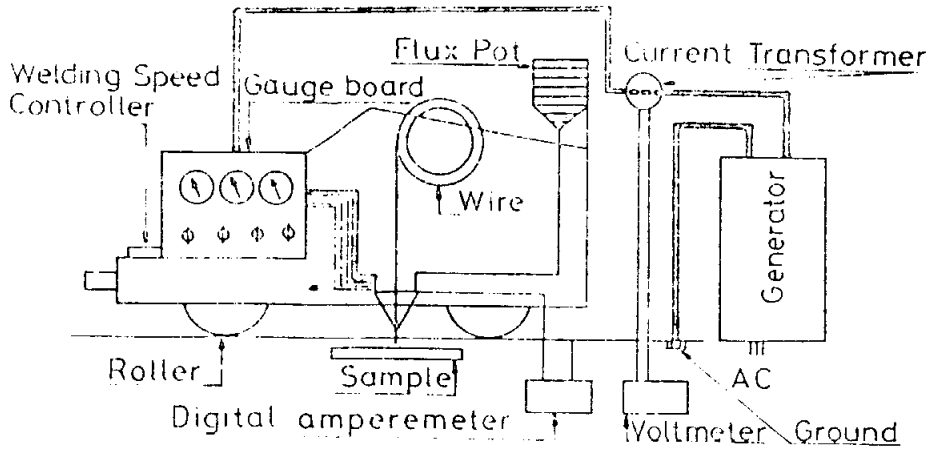


Fig.8 Schematic Diagram of Experimental Device



Experimental Device

1. Digital Amperemeter
2. Voltmeter
3. Current Transformer
4. Flux pot
5. wire
6. Welding Speed Controller
7. Gauge Board
8. Roller
9. Sample

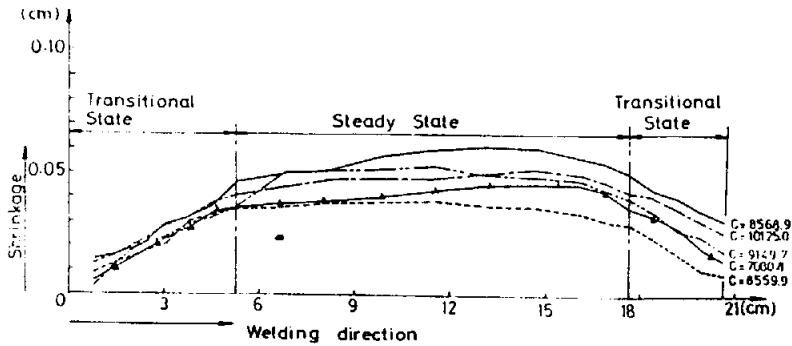


Fig. 9. Typical transverse shrinkage of head-on-plate welding.

Fig 10은 비이드온 플레이트 時의 가로 收縮을 나타낸것이다. 가로軸에 單位 두께당의 入熱量 $C = \frac{Q}{\delta}$ (cal/cm/cm)를 잡고 세로軸에 가로 收縮을 잡아 實測值과 計算值를 나타내었다. 여기서 計算值는 式 (4)에 의하여 計算한 값이고 이때 α 는 12.3×10^{-6} (1/°C)로 잡았다.

그림에서 明白한 바와같이 單位 두께당 入熱量이 커지면 가로 收縮도 크게 되는데 比例 하지는 않는다.

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

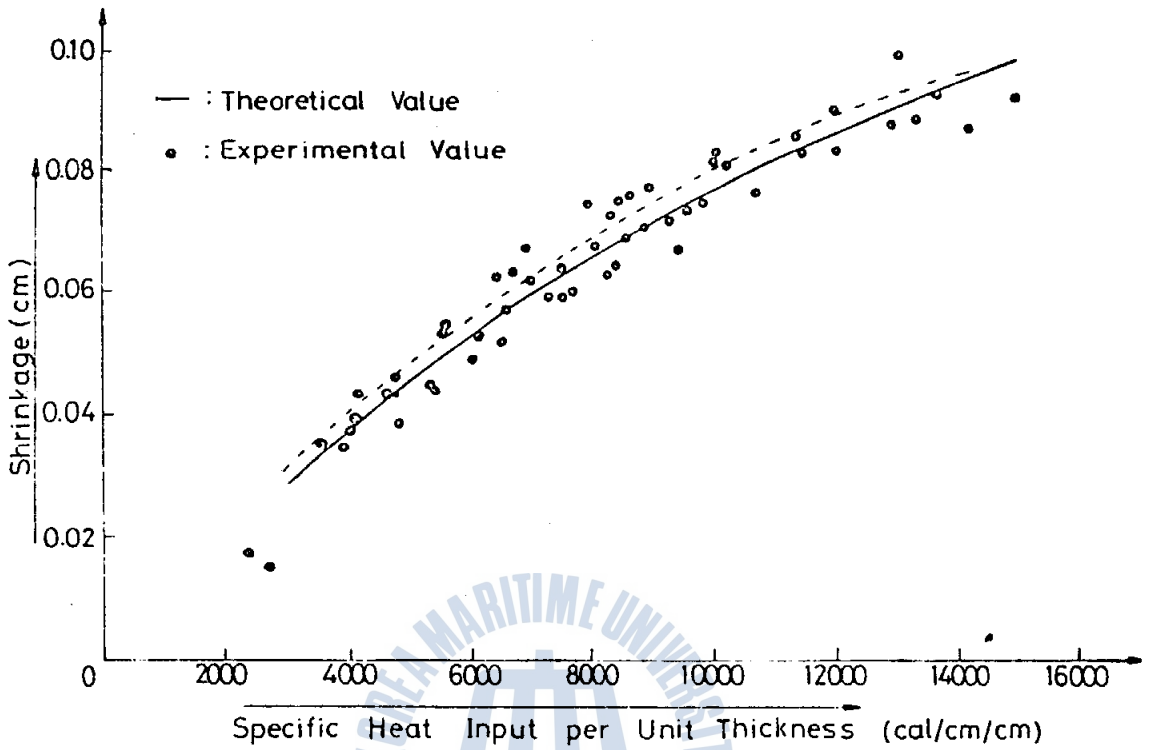


Fig.10 Transverse Shrinkage in Bead-on-plate

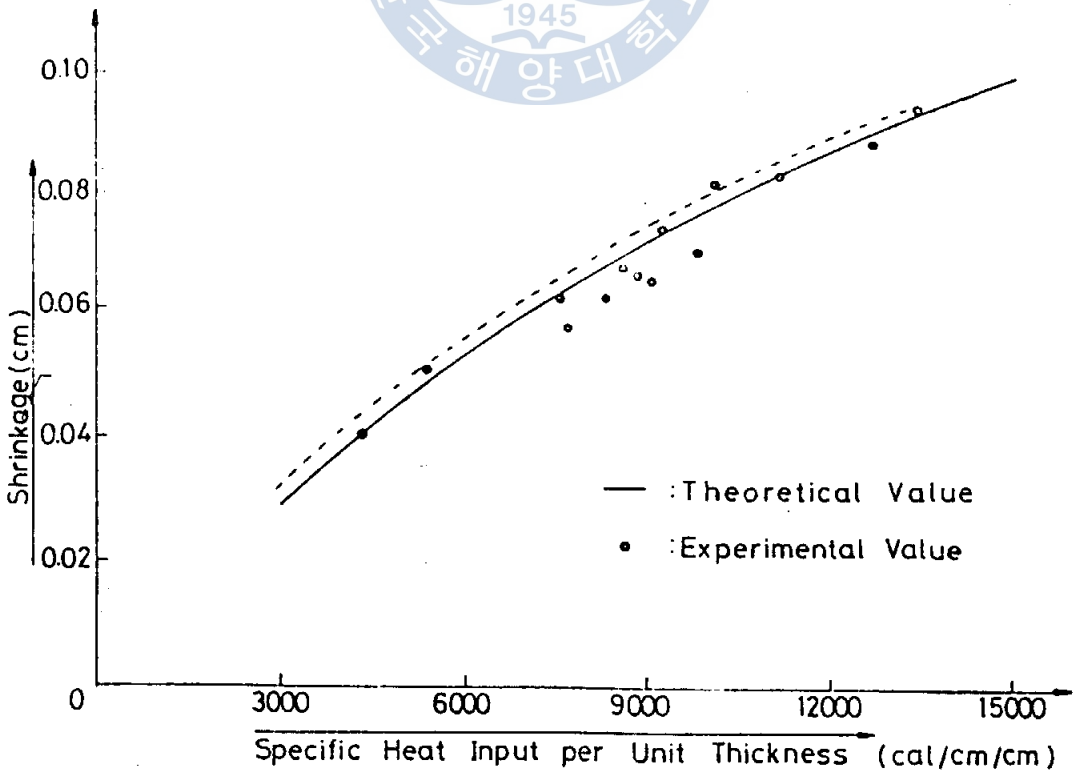


Fig.11 Transverse Shrinkage in Butt Joint Welding

6. 結 論

平板의 비이온플레이트時 가로收縮의 메커니즘을 考慮하여 가로收縮의 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. 가로收縮은 熔接 중의 溫度分布과 熱応力 및 熱變形率에 따라 크게 다르게 되므로 實際과 같은 形態의 모델로서 다루어져야 한다.
2. 平板에 비이온플레이트 熔接을 하면 熔接始作時의 가로收縮이 제일 작고 終了部가 그 다음 작으며 中間部의 가로收縮이 가장 크다.
3. 平板에 비이온플레이트 熔接時 가로收縮에 관하여 本研究에서 提示한 式(4)는 一般的으로 實驗値과 잘 一致한다.
4. 一般的으로 單位 두께당의 入熱量이 큰수록 가로收縮이 커지게 된다.
5. 가로收縮에 대한 近似的 計算式은 다음과 같다

$$y = -2.71810x^2 + 1.0574 \times 10^5 x$$

6. 平板의 비이온플레이트 熔接時의 가로收縮에 관한 理論은 平板의 寬대기 이후 1 PASS 熔接에도 그대로 適用할 수 있으며 다른 假接의 適正間隔과 多層熔接의 適用에 관하여는 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. Fiev., 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 Soudage et Techniques connexes 1976. p.301-P.308
4. 王文錫, "熔接中移動熱源之溫度分布之研究", 韓國船用機園學會誌 第六卷 第二號 (1982), p.51-P.68.
5. 嚴東錫, "最新熔接工學", 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.

