

## 溶接部の熱處理에 따른 殘留應力の 破壞舉動에 미치는 影響

### On the Effect of Residual Stress on Fracture Behavior at the Welded Zone According to Annealing Temperature

鄭 錫 柱

京畿工業開放大學 機械設計學科

Suk Choo Chung

Dept. of Mechanical Design National Kyonggi Open University

#### ABSTRACT

In this study, a mild steel (SS41) of the carbon steel, a spring steel (SUP-9), and stainless steel (SUS 304) of the special steel, etc. are adopted as the experimental materials and are welded by CO<sub>2</sub> (SS41, SUP-9), TIG (SUS 304), respectively. And the residual stress distribution and fracture behavior at the welded zone are examined according to annealing temperatures of four section involving as welded.

As a consequence, the best annealing temperatures that the residual stress is removed enough and mechanical properties are very suitable are at 900°C (SS41), 750°C (SUP-9), 1100°C (SUS 304), respectively.

#### 1. 序 論

熔接으로 인한 變形과 殘留應力은 熔接構造物의 製作에 있어서 重要な 問題로 臺頭되고 있다. 熔接構造物에 있어서의 殘留應力과 變形은 材料의 破壞에 影響을 준다. 卽, 낮은 外力에 의한 應力에서도 균열을 發生시키고 進行시켜 破壞를 誘發시킨다고 Weck<sup>1)</sup> 과 Barton 및 Hall<sup>2)</sup> 은 밝히고 있다.

그러나, 殘留應力이 同一한 條件에서 압축력 이면 Crack 進展을 沮止시켜 有利할 수도 있으므로 殘留應力에 對하여는 그 크기와 分布狀態 등을 正確히 把握할 必要가 있다.

本 研究에서는 炭素鋼中 軟鋼(SS41) 特殊鋼中 스프링鋼(SUP-9)과 스테인레스鋼(SUS 304)를 選擇하여 軟鋼 및 스프링鋼은 CO<sub>2</sub> Arc welding, 스테인레스鋼은 TIG로 熔接한 後, 各 材料마다 熱處理 條件에 따른 熔接部の

殘留應力 分布와 強度舉動 및 應力擴大 係數를 求하여 가장 좋은 熱處理의 條件을 比較하여 보았다.

## 2. 試驗片 및 實驗方法

### 2-1 試驗片의 準備

本 實驗에 使用한 材料로서는 板두께 12 mm 의 軟鋼, 스프링鋼, 스테인레스鋼等 3 가지를 選擇하였고, 우선 試驗片을 製作하기 위하여 軟鋼과 스프링鋼은 CO<sub>2</sub>, 스테인레스鋼은 TIG

熔接했다. 熔接棒 각각의 機械的 性質 및 化學的 成分은 Table 1 ~ Table 2 와 같다. 그리고 熔接條件은 Table 3 과 같이 하였다. 또한, 熱處理溫度에 따르는 殘留應力分布와 機械的 性質을 比較하기 위하여 試驗片을 熱處理溫度에 到達시킨 후 12分以上 維持시킨 다음 爐冷하였다. 熱處理溫度는 再結晶溫度에 가까울수록 應力除去 效果가 크기 때문에 Table 4 와 같이 區分하였다. 熔接部의 殘留應力分布를 測定하기 布를 測定하는 것이 容易하나 本 實驗에서는 Fig.1 과 같이 製作하였다.

Table 1. Mechanical Properties of the Welding Wire

재료	성질	Tensile Strength	Yielding Point	Elongation	Impact Value
SS41 SUP-9		56 kg/mm <sup>2</sup>	44 kg/mm <sup>2</sup>	32 (%)	12.5 kg m/cm <sup>2</sup>
SUS 304		53 kg/mm <sup>2</sup>	21 kg/mm <sup>2</sup>	40 (%)	17 kg m/cm <sup>2</sup>

Table 2. Chemical Composition of the Welding Wire (%)

재료	성분	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
SS 41 SUP-9		0.08	1.10	0.42	0.013	0.014		
SUS 304		0.06	0.86	0.58	0.02	0.01	18.33	9.18

Table 3. Welding Condition

재료	조건	φ (mm)	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Root (mm, θ)	Speed (mm/min)	Remark
SS41 SUP-9		1.2	4	200	23	2-4 60	600	CO <sub>2</sub> -W
SUS 304		3	3	300	25	2-4 60	650	TIG-W

Table 4. Annealing Temperature (°C)

Materials	Annealing Temperature (°C)			
	As Weld	700	800	900
SS 41	As Weld	700	800	900
SUP 9	As Weld	750	850	950
SUS 405	As Weld	900	1,000	1,100

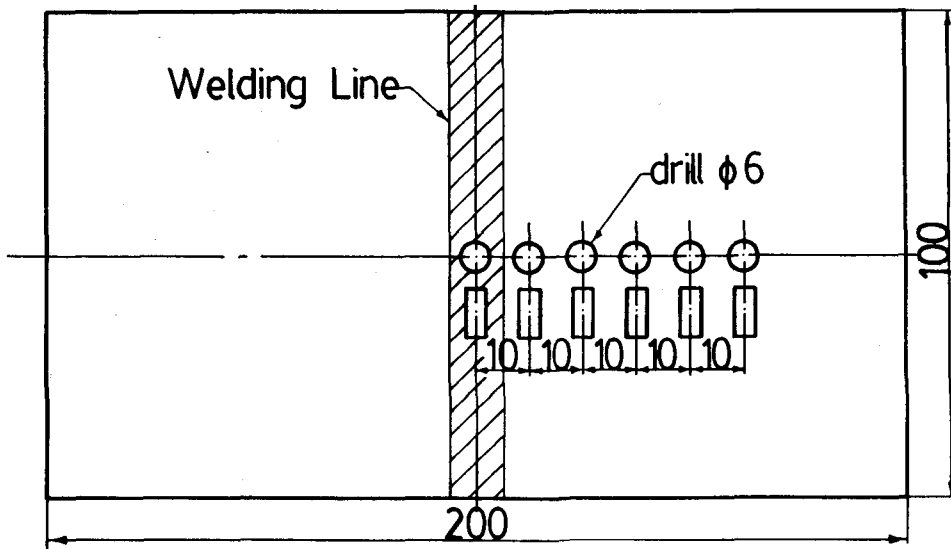


FIG.1. Residual stress test specimen.

2-2. 實驗方法

殘留應力 測定은 여러가지 方法이 있으나 本 實驗에서는 材料에 drilling을 하고 hole 周邊에 있어서의 strain 變化의 結果를 測定함으로써 殘留應力이 決定되는 應力 弛緩法의 하나인 Mather의 部分破壞的 Hole Drilling Method<sup>3,4)</sup>를 擇하여 決定했다. 熔接殘留應力試驗片의 規格은 100 mm × 200 mm로 採取하여 各 annealing 溫度에 따라 熱處理을 하였고 그 다음, 熔接部 中心線을 基準으로 10 mm의 間격으로 Strain gage를 附着함으로써 drilling 후의 Strain 變化를 測定, Kirsch<sup>5)</sup>에 의한 다음 式에 代入함으로써 殘留應力을 算定하였다.

$$\sigma_y^r(x) = \frac{E \epsilon R_r}{K_r}$$

여기서,  $\epsilon R_r = \epsilon_r - \epsilon_r^0$  ( $\epsilon_r$ : drilling 후의 strain量,  $\epsilon_r^0$ : drilling 전의 strain量)

$$K_r = -\frac{\nu+1}{8} \lambda^2 - \left( \frac{1}{2} \lambda^2 - \frac{3(\nu+1)}{3^2} \lambda^4 \right)$$

E : 彈性係數

$\nu$  : 프와송의 비

d : hole의 直徑

r : hole의 中心에서 Strain yage 中心까지의 거리

$$\lambda = \frac{d}{r} \approx 1.15$$

이다.

한편, 각 熱處理 條件에 따른 殘留應力分布를 測定하고 Green's function에 의한 다음式에 代入함으로써, 殘留應力에 의한 應力擴大係數는 決定될 수 있다.<sup>6)</sup>

$$K_I^r(a) = \frac{2\sqrt{\pi a}}{\pi} \int_0^a \frac{\sigma_y^r(x) dx}{\sqrt{a^2 - x^2}}$$

(a : 크랙 반 길이) (2)

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3-1. 熱處理에 따른 衝擊值

實驗結果, 衝擊值는 軟鋼의 경우 Fig. 2에 나타내 보인 것과 같이 熱影響部가 熔着金屬部 母材部에 비해 全 熱處理區間에서 대단히 컸고, 특히 900 °C의 熱處理溫度에서 熔着金屬部, 熱影響部, 母材部 등 모든 部位의 衝擊值는 가장 높았다. 스프링鋼의 경우는 Fig.3에서와 같이 熔着金屬部가 熱影響部 및 母材部の 衝擊值에 비해 매우 컸으며, 熔着金屬部는 특히 850 °C의 熱處理溫度에서 衝擊值는 컸고 熱影響部와 母材部는 大體的으로 熱處理溫度에 따라 衝擊值의 變化는 거의 없었으나, 비교적 750 °C의 熱處理溫度에서 衝擊值가 多少 높았다.

스테인레스鋼은 Fig.4에 나타내 보인 것처럼 大體的으로 熱影響部가 全 熱處理區間에서 높은 값을 나타내었으며, 특히 1,100 °C의 熱處理溫度에서 熱影響部の 衝擊值는 가장 큰 값을 나타내었다. 한편, 各 材料의 衝擊實驗結果, 破斷面을 보면 全 熱處理 區間에서 軟鋼의 경우, 大體的으로 ductile fracture 한 것을 알 수 있고, 스프링강의 경우는 熔着金屬部에서 ductile fracture, 熱影響部와 母材部는 brittle fracture 한 것을 알 수 있으며, 또한 스테인레스鋼도 軟鋼의 경우와 마찬가지로 모

든 部位에서 ductile fracture 한 것을 알 수 있었다.

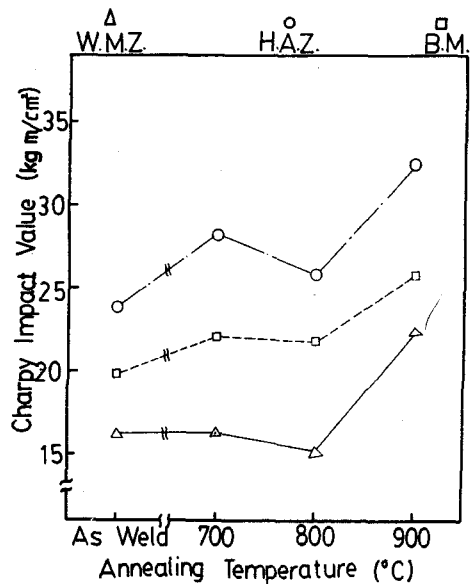


FIG.2. Charpy Impact VS. Annealing Temperature (SS41)

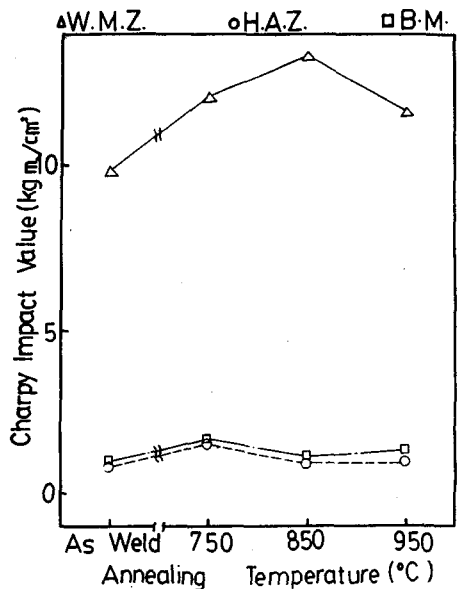


FIG.3. Charpy Impact Value VS. Annealing Temperature (SUP9)

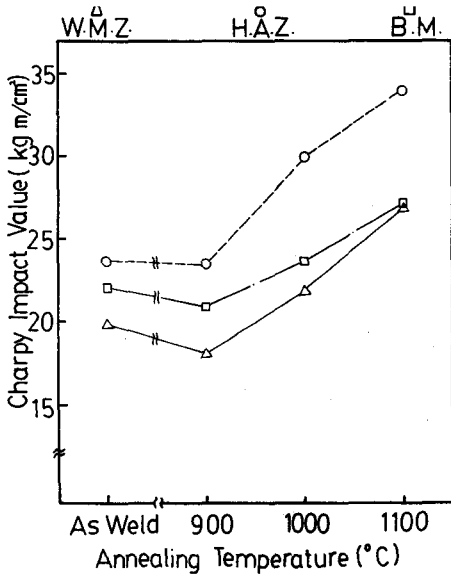


FIG. 4. Charpy Impact Value VS. Annealing Temperature(SUS304)

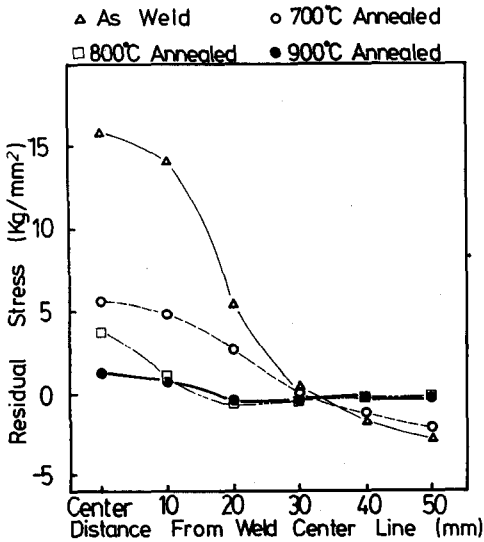


FIG. 5. Residual Stress Vs. Distance From Weld Center Line (SS41)

### 3-2. 熱處理에 따른 殘留應力 및 應力擴大係數

Mather의 hole-drilling 方法에 의하여 各 各의 材料를 熱處理溫度에 따라 殘留應力을 測定한 結果, 熔接한 狀態 그대로에서 測定한 殘留應力分布는 軟鋼의 경우 Fig.5와 같이 熱處理溫度 900 °C, 800 °C, 700 °C 順으로 除去程度가 컸으며, 스프링鋼은 750 °C와 850 °C의 熱處理溫度에서는 거의 비슷하게 殘留應力이 除去되었고, 950 °C의 熱處理溫度에서는 殘留應力의 引張領域이 커졌다.(Fig.6) 스테인레스鋼은 Fig.7에 나타내 보인 것과 같이 900 °C의 熱處理溫度에서, 熔接한 狀態 그대로의 殘留應力 分布에 比하여 比較的 殘留引張應력과 殘留壓縮應力은 比例의으로 減少되었으며, 1,000 °C와 1,100 °C의 熱處理溫度에서는 比較的 殘留應力은 減少되었으나 殘留應力의 引張領域은 相當히 커졌다. 한편, 熔接線의 中央에 크랙이 있는 경우를 假定한 각 熱處理條件에 따른 殘留應力만의 應力擴大係數는 크랙 길이에 따라 식(2)에 대입함으로써 산정할 수 있다. 그 결과는 SS41, SUP-9, SUS304 등에 대하여 각각 Fig.8, Fig.9, Fig.10에 나타낸 바와 같다.

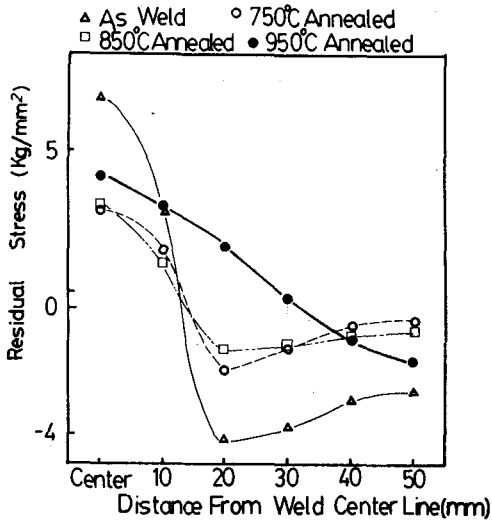


FIG. 6. Residual Stress VS. Distance From Weld Center Line(SUS9)

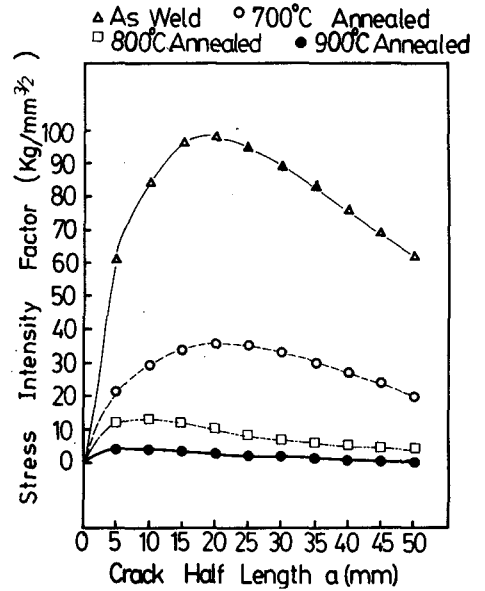


FIG. 8. Stress Intensity Factor Due To Residual Stress VS. Crack Half Length(SS41)

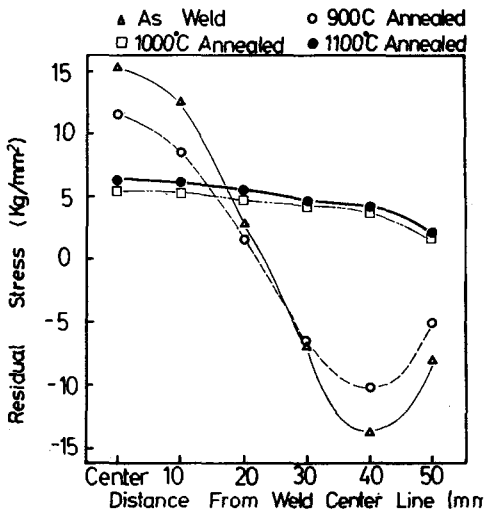


FIG. 7. Residual Stress VS. Distance From Weld Center Line (SUS304)

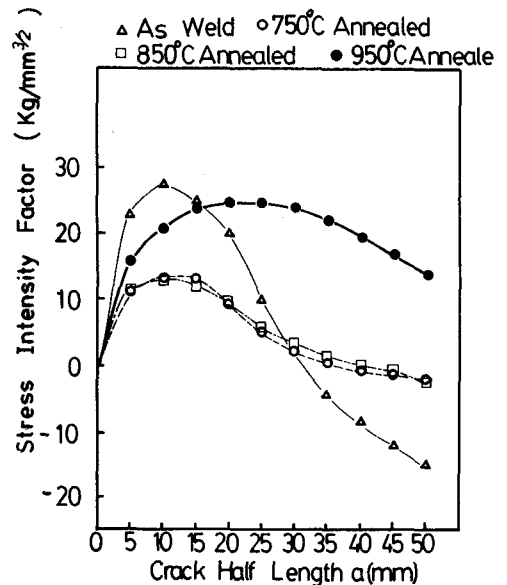


FIG. 9. Stress Intensity Factor Due To Residual Stress VS. Crack Half Length(SUP9)

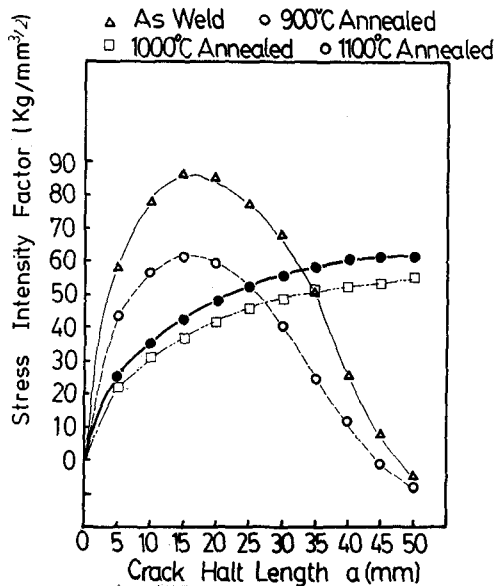


FIG.10. Stress Intensity Factor Due To Residual Stress VS. Crack Half Length (SUS304)

#### 4. 結 論

軟鋼, 스프링鋼, 그리고 스테인레스鋼에 對한 實驗結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 熔接部에서의 衝擊値는 軟鋼과 스테인레스鋼의 경우 같은 熱處理溫度에서 熱影響部, 母材部, 熔着金屬部 順으로 크게 나타나는데 反하여, 스프링鋼은 熱影響部, 母材部가 別로 差異가 없고, 熔着金屬部가 훨씬 크게 나타나고 있다. 그리고, 熱處理 條件에 따라, 軟鋼은 900 °C, 스테인레스鋼은 1,100 °C에서 가장 크게 나타나고, 스프링鋼은 別로 差異가 없으나 비교적 熔着金屬部에서 850 °C의 경우 가장 크게 나타난다.

2. 殘留應力 除去效果는 軟鋼의 경우 900 °C 스프링鋼의 경우는 750 °C와 800 °C가 거의 비슷하게, 그리고 스테인레스鋼의 경우는 1,000 °C의 熱處理溫度에서 가장 좋게 나타나고 있다.

3. 熔接部の 殘留應力을 充分히 除去하면서 要求하는 材質을 誘導하도록 하는 熱處理溫度는 各各 軟鋼의 경우 900 °C, 스프링鋼의 경우 850 °C, 스테인레스鋼의 경우 1,100 °C라 할 수 있겠다.

#### References

1. R. Weck, "Residual stress due to welding", Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys, Institute of Metals Monograph, London (1948).
2. F.W. Barton and W.J. Hall, "Brittle-Failure Tests of six-foot wide Prestressed Steel Plates", Welding Journal 39 (9) Research Suppl 379-5. (1960)
3. J. Mathar, "Determination of initial stresses by measuring the deformations around drilled holes," Trans. ASME, 56, 249. (1969)
4. A.M. Nawwar, K. Mclachlan and J. Shevchuk, "A modified holl-drilling technique or determining residual stresses in thin plates." Experimental Mechanics, June. (1976).
5. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, "Theory of Elasticity", 3rd Ed., Mcgraw-Hill, pp. 91. (1970).
6. 岡村弘之, "線形破壞力學入門", 破壞力學と材料強度講座 - 1, pp.41-42, (1976).