

<論 文>

## Cr-Mo 鋼 熔接熱影響部の 破壊靱性に 미치는 熔接後 熱處理의 影響(Ⅱ)<sup>†</sup>

——作用應力을 中心으로——

林 載 奎\* · 鄭 世 喜\*\*

(1984年 9月 29日 接受)

### The Effect of PWHT on Fracture Toughness in HAZ of Cr-Mo Steel(Ⅱ)

——Applied Stress——

Jae Kyoo Lim and Se Hi Chung

#### Abstract

Some problems such as toughness decrement and stress relief cracking (SRC), may occur when post weld heat treatment (PWHT) is applied to remove residual stress and hydrogen.

In this paper PWHT was carried out under the stress of 0, 98, 196 and 294 MPa (0, 10, 20 and 30kgf/mm<sup>2</sup> each) to simulate residual stress in HAZ of Cr-Mo steel. The effect of applied stress during PWHT on fracture toughness was evaluated by COD fracture toughness test, micro-hardness test and observation of SEM.

The experimental results are as follows;

- (1) Fracture toughness of weld HAZ was improved by PWHT, but it decreased as heat treated under the stress.
- (2) Hardness ratio under the stress of 294MPa (30kg/mm<sup>2</sup>) was lower and fracture toughness was decreased than that of the no stress.
- (3) Applied stress in weld HAZ during PWHT assisted precipitation of over saturated alloying elements in the structure, so fracture surface at the stress of 294MPa (30kg/mm<sup>2</sup>) appeared the grain boundary failure possibly one of the reasons for PWHT embrittlement.

**Key Words;** COD, 破壊靱性, PWHT, 熔接 HAZ, 延脆性遷移溫度, 粒界破壞

<sup>†</sup>1983年度 大韓機械學會 春季學術大會(5.15)에서 發表

\*正會員, 全北大學校 工科學 機械工學科

1. 序 論

Cr-Mo 鋼을 利用한 高溫高壓 및 重油直接脫硫 裝置 等은 大部分 熔接構造物로 이루어지고 있으며 熔接으로 인한 材質의 脆化 및 高溫에서 延性的 低下等으로 인한 豫期치 못한 事故의 大部分이 熔接熱影響部(heat affected zone: HAZ)에서 비롯되고 있음이 多數 報告되고 있다<sup>(1~4)</sup>. 이러한 熔接構造物의 事故·原因은 主로 熔接時에 發生하는 殘留應力이나 水素의 吸收 또는 熔接熱로 인한 材質의 金屬組織 變化等에 依해서 機械的인 性質의 低下에 起因된다고 알려져 있다. 위의 要因中에서도 特히 熔接時에 發生하게 되는 殘留應力의 影響은 重大한 問題로 注目되고 있으며 이들 要因으로 인한 熔接材의 機械的 性質의 低下를 輕減하기 爲한 方法으로 熔接後 熱處理(post weld heat treatment: PWHT)를 實施하게 된다. 그러나 이 熱處理는 普通 600°C 以上の 高溫에서 實施되기 때문에 때때로 熱處理 效果에 依해서 熔接部 特히 熔接 HAZ의 粗大結晶組織에 應力除去크랙의 發生 내지는 材質의 脆化를 가져오고 있음이 또한 報告되고 있다<sup>(5~7)</sup>.

따라서 本 研究에서는 第 1報<sup>(8)</sup>에 밝힌 바 있는 熔接 HAZ 組織의 破壊靱성에 影響을 주는 PWHT 維持時間과 加熱速度에 이어, 熔接 HAZ의 不安定脆性破壞에 미치는 熔接殘留應力의 影響을 상세히 밝히기 위하여 一層 熔接을 實施하고, 이 熔接材의 熔接 HAZ에 單軸狀態의 一定한 應力을 作用시켜 주면서 所定의 熱處理를 實施함으로써 熔接後 熱處理時 熔接 HAZ에 作用된 應力の 크기가 破壊靱성에 어떠한 影響을 미치는지를 COD 破壊靱性試驗, 미스硬度試驗, 破面觀察을 통하여 考察하고자 한다.

2. 試驗片 및 實驗方法

2.1. 材料 및 試驗片

實驗에 使用한 材料는 前報<sup>(8)</sup>에서와 같이 板두께 16 mm의 Cr-Mo 鋼으로써 試驗片의 加工은 150mm×300 mm 크기의 小形板으로 切斷한 後 壓延方向과 直角方向으로 길이 3mm 角 90°로 開先加工後 200°C로 예열하여 입열량 30kJ/cm의 熔接條件으로 Submerged Arc 自動熔接機에 依해 一層 熔接을 實施하였다. 시험편의 치수는 前報<sup>(8)</sup>에서와 같이 方向이 熔接方向과 直角方向으로 된 Charpy 標準試驗片과 熱處理 條件下에서 4 點 순수굽힘荷重을 加해줄 10mm×10mm×70mm의 試

片으로 機械加工하였다. 熱處理에 提供된 試驗片은 兩側面의 組織을 觀察하여 노치先端位置가 熔接 HAZ의 粗大結晶組織인 熔融線에 오도록 하였으며 노치加工은 L-S type<sup>(9)</sup>으로 하고 두께 0.3mm의 cut off wheel을 使用하여 슬릿 加工하였다. 준비된 熔接試驗片에 對한 熱處理는 노치先端位置에 作用하는 굽힘應力이 0MPa (0kgf/mm<sup>2</sup>), 98MPa(10kgf/mm<sup>2</sup>), 196MPa(20kgf/mm<sup>2</sup>), 294MPa(30kgf/mm<sup>2</sup>), 392MPa(40kgf/mm<sup>2</sup>)이 되게 4點굽힘 荷重을 加한 狀態에서 熱處理를 實施하였다. 이때 加熱速度는 220°C/hr 이었으며, 熱處理溫度 650°C에서 1/4hr 維持한후 爐冷시켰다. 이때의 冷却速度는 約 278°C/hr 였다. 熱處理가 進行되는 동안 노치先端에 作用하는 굽힘應力은 一定하게 維持시켰다. Fig. 1은 열처리할 때 사용한 爐의 개략도이다.

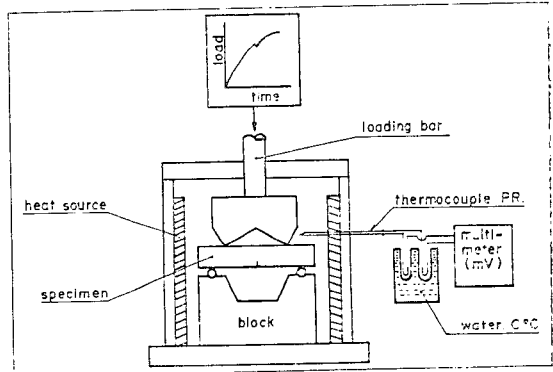


Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment furnace

2.2. 實驗方法

위의 方法에 依해서 準備된 試驗片은 Fig. 2에 圖示한 시험장치를 利用하여 3點 굽힘에 依한 COD(crack opening displacement)<sup>(10)</sup> 破壊靱性試驗을 實施하였으 며 이때의 試驗溫度는 -175°C~25°C의 분위기 溫度

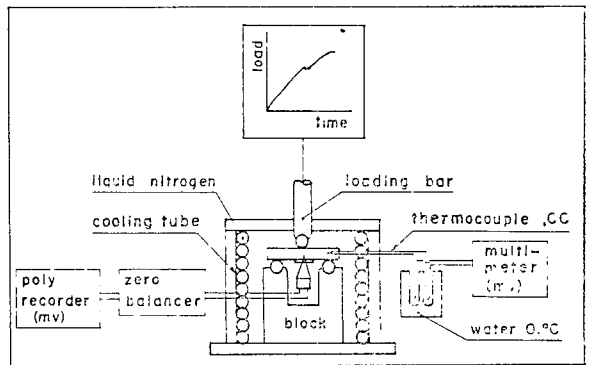


Fig. 2 Schematic diagram of COD test equipment

狀態였고 低溫분위기는 액체질소를 低溫槽에 流入시켜 얻었다. 또한 열처리와 作用應力으로 因한 材質의 變化를 알아보기 위하여 노치先端 附近的 熔接 HAZ에 注目하여 노치線上에서 板두께 方向으로 0.1mm 간격으로 硬度를 測定하였다. 이때 使用된 硬度計는 Vickers 微小硬度計로써 測定荷重은 100g 이었으며 測定面은 polishing 後 5% Nital 로 부식하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1. 低溫破壞靱性

Fig. 3은 作用應力이 變化된 各種 試驗片에 대하여 靱氣試驗溫度  $-175 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 의 範圍에서 COD 破壞靱性試驗을 實施하고 그 結果를 試驗片이 破壞될 때의 한계균열개구변위량( $\delta_c$ )과 試驗溫도의 關係로 整理해 놓은 것이다. 이를보면 各種의 作用應力下에서 熱處理된 試驗片의  $\delta_c$ -溫度依存曲線이 모두 非處理材(as-weld)의 그것보다 훨씬 低溫側에 位置하고 있어 熱處理함으로써 熔接 HAZ의 破壞靱성은 向上됨을 알 수 있다.

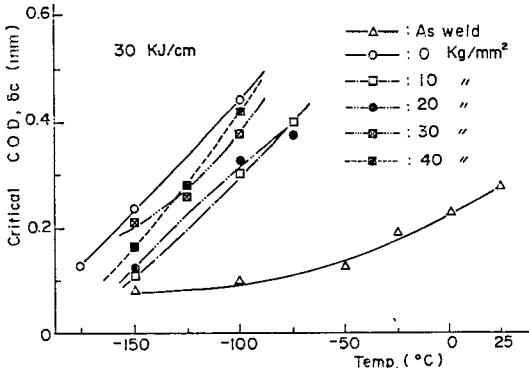


Fig. 3 Relation between critical COD and test temperature (PWHT conditions:  $650^{\circ}\text{C}$ , 1/4hr,  $220^{\circ}\text{C/hr}$ )

그러나 應力이 作用하는 경우는 應力이 作用하지 않은 境遇( $\sigma=0\text{MPa}(0\text{kgf/mm}^2)$ )에 比하면, COD溫度依存曲線이 모두 高溫側에 位置하고 있어서, 熱處理時에 作用된 應力은 組織의 脆化를 돕고 있음을 알 수 있다. 이들 COD 曲線에 對한 延脆性遷移溫度(transition temperature:  $T_{tr}$ )<sup>(8)</sup>를 Fig. 3으로 부터 求하여 應力別로 整理하면 Fig. 4와 같다. 이를 보면 as-weld 材의 遷移溫度는  $12^{\circ}\text{C}$ 이며, 無應力狀態下에 熱處理된 試驗片의 境遇  $T_{tr}$ 은  $-143^{\circ}\text{C}$ 이므로 둘 사이의 遷移溫度差( $\Delta T_{tr}$ )은  $-155^{\circ}\text{C}$ 의 溫度差異를 나타내고 있어서, 이로부터 熱處理로 因하여 as-weld 材의 熔接 HAZ의 破

壞靱성은 매우 向上되었음을 알 수 있다. 이에 對하여  $98\text{MPa}(10\text{kgf/mm}^2)$ 의 應力下에서 熱處理된 境遇는  $T_{tr}$ 이  $-113^{\circ}\text{C}$ 로서 as-weld 材에 比하여  $\Delta T_{tr}$ 이  $-125^{\circ}\text{C}$ 의 溫度差異를 나타내고 있다. 또 應力이  $196\text{MPa}(20\text{kgf/mm}^2)$ 으로 熱處理된 試驗片의 境遇  $T_{tr}$ 은  $-120^{\circ}\text{C}$ 로써  $98\text{MPa}(10\text{kgf/mm}^2)$ 의 應力이 作用된 境遇와 비슷하다. 이로부터 熔接 HAZ에 應力이 作用된 境遇도 熱處理에 依하여 HAZ의 靱성이 상당히 向上되었음을 알 수 있다. 그러나 作用應力이 增加함에 따라 遷移溫度는 低溫쪽으로 移動하고 있어서 HAZ의 靱성이 점차로 向上되고 있음을 볼 수 있다. 또한 作用應力이  $294\text{MPa}(30\text{kgf/mm}^2)$ 와  $392\text{MPa}(40\text{kgf/mm}^2)$ 에서 熱處理된 試驗片의 境遇  $T_{tr}$ 이  $-130^{\circ}\text{C}$ 와  $-132^{\circ}\text{C}$ 로서 作用된 應力이  $98\text{MPa}(10\text{kgf/mm}^2)$ 과  $196\text{MPa}(20\text{kgf/mm}^2)$ 인 境遇에 比하여 靱성이 다시 向上되고 있음을 알 수 있으며 특히 作用應力이  $392\text{MPa}(40\text{kgf/mm}^2)$ 以上이 되면 靱성의 회복은 둔화되고 있다. 以上의 關係를  $\sigma=0\text{MPa}$ 을 基準으로 하여 檢討해 보면 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 無應力狀態를 基準으로 한 遷移溫度差  $\Delta T_{tr}$ 과 作用應力과의 關係를 나타내고 있다. 위와 같은 條件으로 PWHT 할 경우  $98\text{MPa}(10\text{kgf/mm}^2)$ 의 作用應力下에서는 ( $\Delta T_{tr}$ ) $_{\sigma=0}$ 이  $+30^{\circ}\text{C}$ 로써 PWHT에 依한 脆化의 程度가 가장 크며 作用應力이  $196\text{MPa}(20\text{kgf/mm}^2)$ ,  $294\text{MPa}(30\text{kgf/mm}^2)$ ,  $392\text{MPa}(40\text{kgf/mm}^2)$ 으로 增加함에 따라 ( $\Delta T_{tr}$ ) $_{\sigma=0}$ 이 各各  $+23^{\circ}\text{C}$   $+13^{\circ}\text{C}$   $+11^{\circ}\text{C}$ 로서 線型的으로 靱성이 회복되고 있음을 알 수 있다. 그런데 熱處理作業中的 觀察에 依하면  $392\text{MPa}(40\text{kgf/mm}^2)$ 의 應力下에서 급히 中을 받은 試驗片은 이미 塑性變形을 하고 있음을 볼 수 있었다. 이것은 作用된 應力이 어느 限界以上으로 增加되면 HAZ 組織은 塑性變形되고, 이로 因한 應力の 完화와 노치先端부근에 形成된 再結晶組織으로 HAZ의 靱성이 向上되는 것으로 여겨진다<sup>(11)</sup>. 그러나 無應

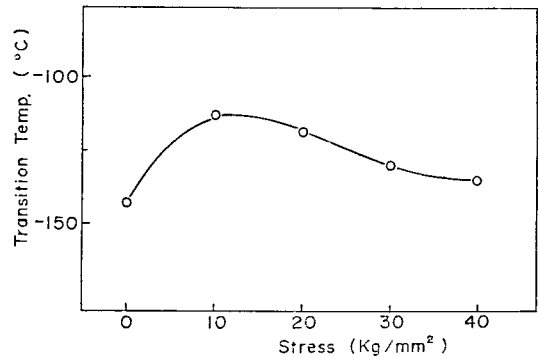


Fig. 4 Relation between  $T_{tr}$  and applied stress

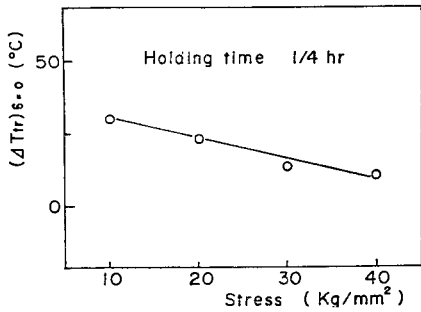


Fig. 5 Relation between  $(\Delta T_r)_{\sigma=0}$  and applied stress

力狀態下에서 熱處理된 試驗片의 境遇에 比하여서는 作用된 應力의 影響으로 HAZ의 靱性이 低下되어 材質이 脆化되었음을 알 수 있는데 이는 作用된 應力의 影響으로 熔接 HAZ에 依存하고 있던 炭化物 等の 不純物元素가 粒界偏析되는 一種의 變形時效(strain age)<sup>(12)</sup>라고 여겨지며 그 結果로 HAZ의 靱性은 低下되는 것으로 推測된다.

3.2. 微小硬度和 破壊靱性

Fig. 6은 各各의 크기의 作用應力狀態下에서 熱處理된 試驗片에 대한 微小硬度分布를 測定한 1例로써 前術한 바와같이 노치先端에 板두께 方向으로 每 0.1

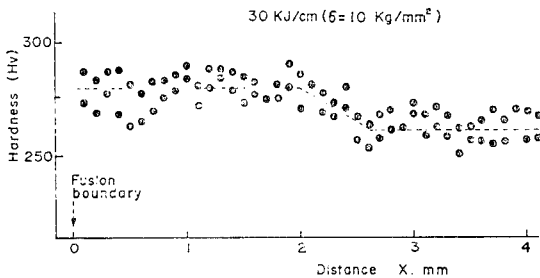


Fig. 6 Hardness distribution in HAZ (10kgf/mm<sup>2</sup>)

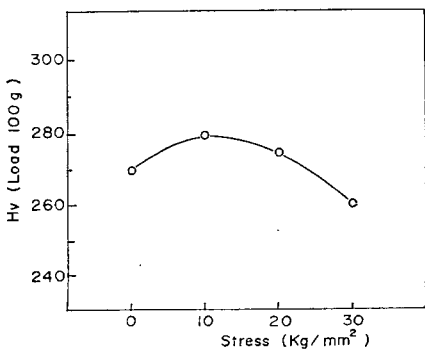


Fig. 7 Relation between  $H_v$  and applied stress

Table 1 Experimental results in weld HAZ for various applied stress during PWHT

Stress (MPa)	$T_{tr}$ (°C)	$H_v$	$(\Delta T_{tr})$ (°C)	$\frac{H_v}{(H_v)_{AS}}$
Parent	-63	270		
As weld	12	360		
0	-143	270	0	0.75
98(10)	-113	280	+30	0.78
196(20)	-120	275	+23	0.76
294(30)	-130	260	+13	0.72
392(40)	-132		+11	

mm 間隔으로 測定한 硬度值이다. 이를보면 노치先端인 熔融境界로부터 一定範圍內에 있는 組織의 硬度는 높이가 나타나다가 점차 감소하여  $A_1$ 變態點 附近에서 母材의 硬度和 같게 되고 있다. Fig. 7은 應力의 變化에 따른 硬度一定領域에서의 硬度 平均値를 作用應力에 對해서 plot 한 것이다. 이를보면 HAZ에 있어서 組織一定領域의 硬度 平均値가 應力 98MPa(10kgf/mm<sup>2</sup>)까지는 應力の 增加와 함께 向上되고 있어서 作用應力에 의해 熔接 HAZ가 硬化되고 있다. 그러나 98MPa(10kgf/mm<sup>2</sup>)를 지나서는 오히려 應力이 增加하면 硬度가 低下되고 있음을 알 수가 있다. 應力을 달리한 狀態下에서 熱處理된 試驗片에 對한 組織一定領域의 平均硬度值와 遷移溫度의 關係를 살펴보면 Table 1과 같다. Fig. 8은 各各의 狀態下에서 熱處理된 試驗片의 硬度分布值와 as-weld 材의 硬度를 1로 하고 各種 應力下에서 熱處理된 試驗片에 對한 硬度比  $H_v/(H_v)_{AS}$ 의 變化를 나타낸 것이다. 이로부터, as-weld 材에 比하여 熱處理材의 材質은 軟化되었음을 바로 알 수 있다. Fig. 9은 이들로부터 구한 熔接 HAZ의 組織一定領域의 平均硬度比  $H_v/(H_v)_{AS}$ 와 作用된 應力의 크기와 關係를 나타내고 있다. 이로부터 熔接 HAZ에 98MPa(10kgf/mm<sup>2</sup>)의 最適應力이 作用함에 따라 硬度比는 增加하여, 노치先端이 硬化되고 있음을 알 수 있다. 그러나 作用應力이 增加함으로 硬度比는 점차적으로 減少하여 294MPa(30kgf/mm<sup>2</sup>)의 應力下에서는 無應力狀態에서 PWHT 한 것보다 더욱 軟化되었음을 나타내준다. 이와같은 結果를 破壊靱性試驗結果인 Fig. 3과 比較하여 본다. 作用應力의 增加에 따른 硬度比가 無應力狀態의 그것보다 더욱 낮은 294MPa(30kgf/mm<sup>2</sup>)의 應力下에서 破壊靱性値는 無應力狀態의 그것보다 脆化되고 있음을 볼 수 있는데, 이는, 脆化의 原因이 組織의 硬化보다는 析出物의 粒界移動에 있음을 알 수 있다. 以上の 觀察로 부터 PWHT에 依한 組織의 變化

는 前報<sup>(8)</sup>의 維持時間에서와 같이 應力의 크기에 도 依存되고 있음을 알 수가 있다.

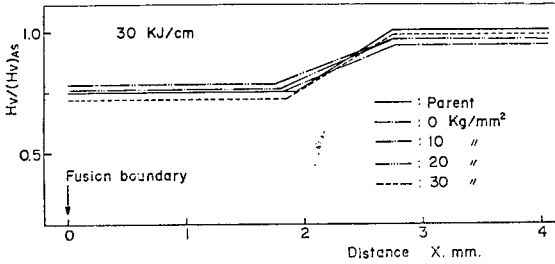


Fig. 8 Variation of hardness ratio

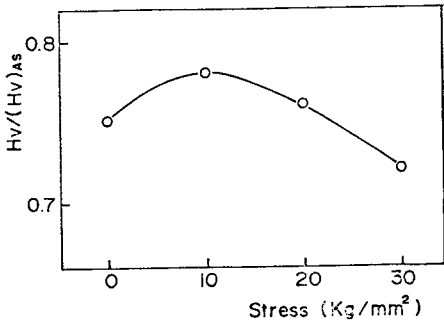
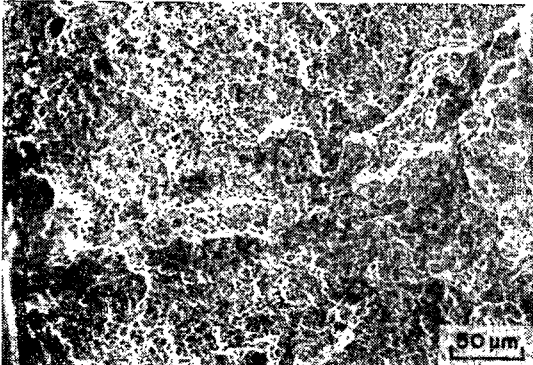


Fig. 9 Relation between  $H_v/(H_v)_{AS}$  and stress

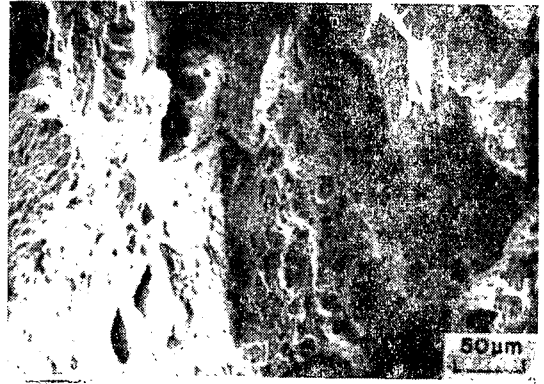
3.3. 破面觀察

HAZ 粗大組織의 노치先端에 作用한 應力의 크기가 破壞舉動에 어떠한 影響을 주는지를 알아보기 위하여 시험온도  $-100^{\circ}C$ 의 試片破面을 觀察하였다.

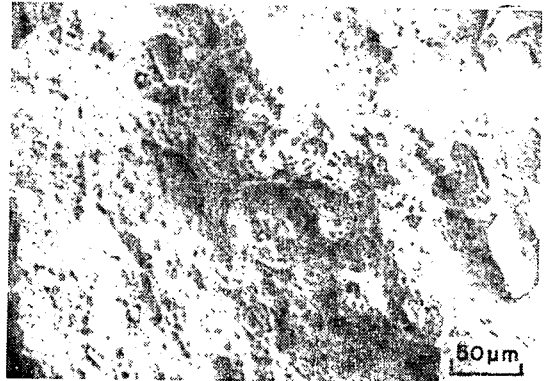
Fig.10(a)는 無應力狀態에서 PWHT 된 경우로 노치先端에는  $400\mu m$  程度의 스트레치존을 볼 수가 있으며 力無數한 凹溝를 觀察할 수가 있다. 이에 對하여 作用應力이  $98MPa(10kgf/mm^2)$ ,  $196MPa(20kgf/mm^2)$ 로 증가하면, 破面은 Fig. 10(b) (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 延性破面に 몇 군데의 劈開破面을 觀察할 수가 있어서 破斷面은 다소 脆化되고 있음을 알 수가 있다.



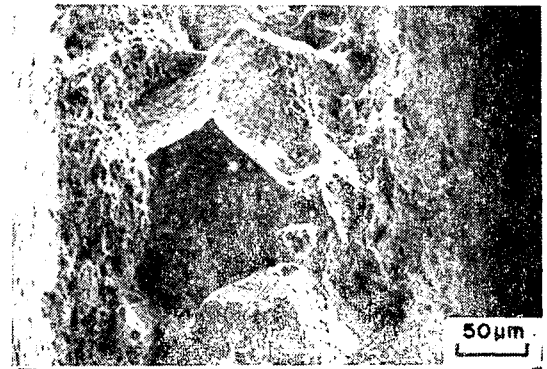
(a) Stress: 0kgf/mm<sup>2</sup>



(b) Stress: 10kgf/mm<sup>2</sup>



(c) Stress: 20kgf/mm<sup>2</sup>

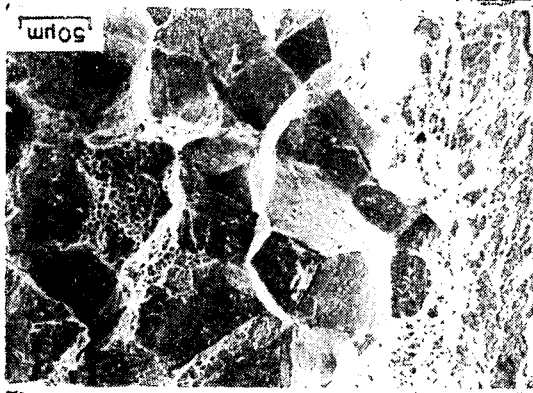


(d) Stress: 30kgf/mm<sup>2</sup>

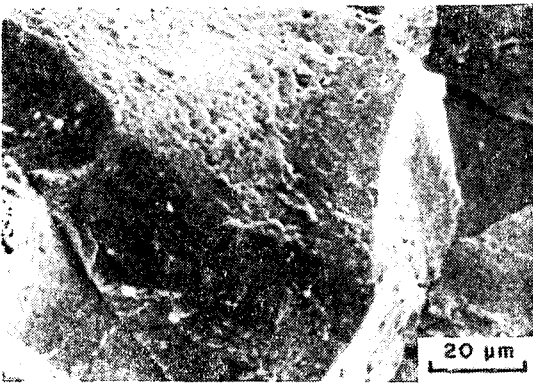
Fig. 10 Difference of fracture surfaces for applied stress during PWHT. Test temp.;  $-100^{\circ}C$ , PWHT condition;  $650^{\circ}C$ , 1/4hr,  $220^{\circ}C/hr$

다만  $294MPa(30kgf/mm^2)$ 의 경우는  $\delta$ 의 값이  $0.3mm$ 로 巨視的으로 는,  $98MPa(10kgf/mm^2)$ 나  $196MPa(20kgf/mm^2)$ 에 比하여 靱性이 回復된 것처럼 보이나 노치先端에서는 Fig. 10 (d)에서 볼 수 있는 것과 같이 部分的으로 粒界破面을 觀察할 수 있어서, 實際로는 相當히 脆化되고 있음을 알 수가 있다. 이러한 脆化는

從來의 研究結果<sup>(13)</sup>들을 미루어 보면, 不純物의 粒界析出에 依한 것으로 생각할 수가 있다. 그러한 생각은 보다 低溫인  $-125^{\circ}\text{C}$ 에서 破斷시킨 破面으로 明確하게 確認할 수가 있다. Fig. 11의 (a)(b)는 이 破面으로서 粒界破面에 無數한 析出物이 부착되어 있는 것을 볼 수 있다. 以上の 破面觀察로부터 PWHT 中 作用된 應力은 組織中에 過固溶된 合金元素의 粒內 또는 粒界析出을 帶고 있다고 볼 수 있다.



(a) Stress: 30kgf/mm<sup>2</sup>



(b) Stress: 30kgf/mm<sup>2</sup> ( $\times 1000$ )

Fig. 11 Fractographs showing on intergranular facet at applied stress (294MPa) during PWHT. (Test temp.;  $-125^{\circ}\text{C}$ , PWHT condition;  $650^{\circ}\text{C}$ , 1/4hr,  $220^{\circ}\text{C/hr}$ )

#### 4. 結 論

Cr-Mo 鋼 熔接 HAZ에서 熔接後熱處理脆化의 原因이 되는 殘留應力의 크기가 破壊靱性に 미치는 影響을 COD 破壊靱性試驗, 微小硬度試驗, 그리고 破面觀察을 通하여 考察하였으며 얻어진 結果는 다음과 같다.

(1) 熔接 HAZ 組織의 破壊靱성은 PWHT에 依해서 개선되나 應力이 作用된 상태에서 열처리되면 靱성은

劣化된다.

(2) 熔接 HAZ에 98MPa(10kgf/mm<sup>2</sup>)의 應力이 作用함에 따라 硬度比는 증가하나 作用應力이 증가함으로 硬度比는 점차적으로 감소하여 294MPa(30kgf/mm<sup>2</sup>)의 應力下에서는 無應力狀態에서 PWHT 한 것보다 더욱 軟化되었다.

(3) 作用應力의 증가에 따른 경도비가 無應力狀態의 그것보다 낮은 294MPa(30kgf/mm<sup>2</sup>)의 應力下에서 破壊靱성은 無應力狀態의 그것보다 脆化되고 있다.

(4) PWHT 中の 作用된 應力은 組織中에 過固溶된 合金元素의 粒內 또는 粒界析出을 帶고 있는 것으로 보이며 파괴인성을 저하시킨다.

(5) 殘留應力에 依한 粒界破壞는 294MPa(30kgf/mm<sup>2</sup>)의 應力이 作用할때 나타났다.

#### 참 고 문 헌

- (1) J. Kameda, H. Takahashi, M. Suzuki, "Residual Stress Relief and Local Embrittlement of Weld HAZ in Reactor Pressure Vessel Steel", IIW Doc No. X-800-76 and Doc No. IX-1002-76, 1976
- (2) E. Banks, "Toughness Properties of HAZ Structures in Structural Steel", Welding Journal, July pp. 299-s~306-s, 1974
- (3) 西茂, 鈴木, 下山; "高張力鋼溶接熱影響部のセキ化に関する研究", 三菱重工技報 Vol. 1, No. 1, pp. 72~89, 1978
- (4) R.E. Dolby, G.G. Saunders, "Sub-Critical HAZ Fracture Toughness of C: Mn Steels", Metal Construction and British Welding Journal, May, pp. 185~190, 1972
- (5) 龜田, "高張力鋼溶接熱影響部の脆化に関する研究" 日本東北大學博士學位論文(1977)
- (6) A. Joshi and D.F. Stein, "Temper Embrittlement of Low Alloy Steels", STP 499, pp. 59~89, 1972
- (7) 內木 外 3, "應力除去脆鈍割れに関する研究 (1~3報)", 日本溶接學會誌, 第33卷 第9號, p. 710, 1964
- (8) 鄭世喜, 林載奎, "Cr-Mo 鋼 熔接熱影響의 破壊靱性に 미치는 熔接後熱處理의 影響(I)", 大韓機械學會論文集 제 8권 제 2호, pp. 97~103, 1984
- (9) ASTM Standard E399-74
- (10) B.S. "Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing", BS5762 (1979)
- (11) Lim, J.K., Chung, S.H., "The Effect of PWHT

- under Prestrain on Fracture Toughness of Weld HAZ in Structural Steel”, Pro. of Asian-Pacific Colloquim on Strength Evaluation, Vol. 1, p. 124 1984
- (12) P.W. Palmberg, H.L. Marcus, “A Auger Spectroscopic Analysis of the Exuent of Grain boundary segregation”, Trans of ASME Vol. 62, p. 1016, 1969
- (13) J.C. Murza, C.J. McMahon Jr, “The Effects of Composition and Microstructure on Temper Embrittlement in  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel”, ASME Oct. Vol. 102, pp. 369~375, 1980