

研 究 論 文

大 韓 熔 接 學 會 誌  
第 5 卷, 第 2 號, 1987 年 6 月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 5, No. 2, Jun., 1987.

**Cr-Mo鋼 熔接熱影響部의 破壞韌性과 熔接入熱量에  
관한 研究(Ⅱ)**

—作用應力を 中心으로—

林 載 奎\* · 鄭 世 喜\*\*

**Study on Fracture Toughness and Heat Input in Weld  
HAZ of Cr-Mo Steel(Ⅱ)**

—applied stress—

J. K. Lim\*, S. H. Chung\*\*

**Key Words :** PWHT : (용접후열처리), COD Fracture Toughness(COD 파괴인성), Residual Stress(잔류응력), Grain Boundary Failure(입자파괴), PWHT Embrittlement (PWHT 취화), Heat Input(용접입열량)

**Abstract**

Post weld heat treatment (PWHT) is carried out to increase the fracture toughness in heat affected zone(HAZ) and remove the residual stress. There occur some problems such as toughness decrement and stress relief cracking(SRC) in the coarse grained HAZ subjected to the effect of tempering treatment. Especially, embrittlement of structure directly relates to the mode of fracture and is appeared as the difference of fracture surface, that is, grain boundary failure.

Therefore, in this paper, PWHT was carried out under the stress of 0, 10, 20 and 30kg/mm<sup>2</sup> to simulate residual stress in HAZ welded by heat input of 10, 30 and 40KJ/cm.

Applied stress in weld HAZ during PWHT assisted precipitation of over saturated alloying element in the structure, and grain boundary failure according to welding heat input didn't almost appear at the heat input of 10 KJ/cm, but it appeared from being the applied stress of 30kg/cm<sup>2</sup> at 30KJ/cm and 20kg/mm<sup>2</sup> at 40KJ/cm.

\* 1985년도 춘계학술대회에서 발표

\* 전북대학교 기계공학과

\*\* 전북대학교 정밀 기계공학과

## 1. 序論

熔接部 특히 熔接熱影響部(heat affected zone: HAZ)는 熔接熱 cycle의 相異와 熔接時의 주위환경등 여건에 의해서 매우 복잡하고 다양한 熔接組織이<sup>1)</sup>生成되어 硬度와 韌性등 기계적 성질이 복잡하게 변화되고 있다. 뿐만 아니라 熔接部에는 熔接時에 發生하는 三軸性의 不均一한 殘留應力과 熔接變形이 복합적으로 作用하고 있어 熔接 HAZ의 破壞韌性을 저하시키는 原因이 되고 있음이 보고 되고 있다.<sup>2~3)</sup> 그러므로 低合金鋼과 特殊鋼의 熔接構造物의 製作에 있어서 殘留應力を 제거시키기 위하여 實施하는 熔接後熱處理(post weld heat treatment; PWHT)나 Repair를 위한 재열에 依해 熔接組織이 变化하게 된다. 그런데 이를 热處理는 보통 600°C以上的 고온에서 실시되기 때문에 용접부가 tempering的 효과를 받게 되어 熔接 HAZ의 용융선에 가까운 粗粒域은 脆化될 뿐만 아니라 때로는 應力除去풀립크랙(stress relief crack:SRC)이 발생된다.<sup>4~5)</sup>

특히 組織의 脆化는 破壞의 양식에 직접 반영되어 破面形態의 差로 나타나므로 本研究에서는 各組織固有的 熔接後熱處理에 依한 破壞韌性值의 變化를 組織의 脆化와 관련시켜 검토하기 위하여 熔接 HAZ의 PWHT 脆化에 미치는 殘留應力과 서로 다른 熔接入熱量에 의한 복잡한 熔接組織에 대하여 COD(Crack Opening Displacement) 破壞韌性試驗과 微小硬度測定, 그리고 破面觀察을 通하여 考察하고자 한다.

**Table 1. Chemical compositions and mechanical properties**

(a) chemical compositions (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.39	0.26	0.72	0.025	0.008	0.002	0.02	0.98	0.193

(b) mechanical properties

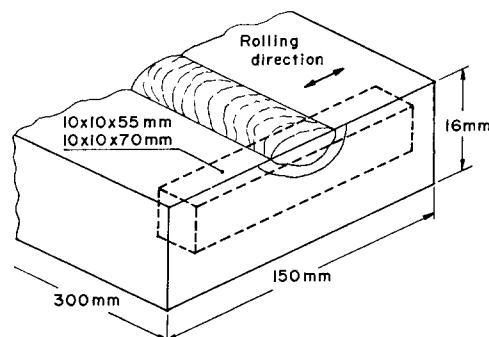
tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	yield strength(kg/mm <sup>2</sup> )	elongation(%)
104.1	66.8	19.2

**Table 2. Welding conditions (submerged arc welding)**

heat input (KJ/cm)	pre-heating temperature (°C)	current (A)	voltage (V)	welding speed (cm/min)	wire dia. (mm)
10	200	300	20	36	3.2
30	200	500	30	30	3.2
40	200	500	40	30	3.2

## 2. 試驗片 및 實驗方法

본 實驗에 使用된 시험재는 板두께 16mm의 Cr-Mo鋼板으로 그 化學成分 및 機械的 性質은 Table. 1과 같다. 鋼板은 Fig. 1과 같이 150×300mm 크기의



**Fig. 1** Welding plate configuration and extraction of specimens.

小板으로 切斷한 後, 그 表面에 壓延方向과 直角方向으로 깊이 3mm의 90°V槽을 機械加工하고 그 위에 Submerged arc 自動熔接으로 一層熔接을 實施하였다. 熔接條件은 Table 2와 같다. 試驗片은 길이 方向이 강판의 壓延方向과 一致하게 하였으며 놋치설정 위치를 確認한 後 10×10×70mm 크기로 加工하였다. 놋치加工은<sup>6)</sup> 두께 0.3mm의 원판카터를

使用하여 板두께 方向으로 2mm 깊이의 Slit 加工을 하였다. ニチ先端의 위치는 熔接 bead의 中央部에서 bond에 接한 粗大結晶組織에 位置하도록 하였다. 준비된 시험편은 ニチ先端의 作用應力이  $0, 10, 20, 30\text{kg/mm}^2$  되게 4點 금속모우멘트를 作用시켜면서 加熱速度  $220^\circ\text{C}/\text{hr}$  热處理溫度  $650^\circ\text{C}$  그리고 維持時間은 1/4時間으로 熔接後热處理하였다. 热處理된 시험편은 Charpy型 標準試片으로 再加工되어 小型金屬 COD破壞韌性試驗에<sup>7)</sup> 提供되었다. Fig. 2는 이 試驗裝置의 개략도로서 사용한 試驗機는 10ton 容量의

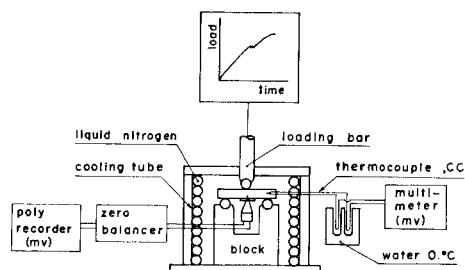


Fig. 2 Schematic diagram of COD test equipment.

만능시험기로 試驗溫度範圍는  $-175^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$  였으며 低溫분위기는 액체질소를 저온조에 유입시켜 얻었다. 한편 热處理에 의한 材質의 变化를 알아보기 위한 방법으로 ニチ先端近傍에의 微小硬度分布를 조사하였으며 破斷試驗이 끝난 試驗片은 走査전자현미경으로 破面觀察을 하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 低溫破壞韌性

Fig 3~5는 實驗에 提供된 各種試驗片에 대한 低溫破壞韌性試驗의 結果로 限界開口變位( $\delta_c$ )와 試驗溫度의 關係를 나타낸 그림이다. 먼저 Fig. 3은 熔接入熱量이  $10\text{KJ/cm}$ 인 경우로 어느 條件으로 PWHT를 하더라도 熔接 HAZ韌性은 용접한 상태(as-weld材)에 比하여 改善됨을 알수 있으며 PWHT中 作用된 應力의 영향은 크게 나타나고 있지 않다. 热量  $30\text{KJ/cm}$ 의 경우는 Fig 4와 같이 應力이 作用된 曲線이 無應力의 曲線에 比해 전부 高溫쪽으로 移動하고 있어서 PWHT된 HAZ組織의 韌性은 热處理中에 作用된 應力에 영향을 받고 있음을 볼 수 있다. 다시 热量을 증가 시켜  $40\text{KJ/cm}$ 로 한 경우의  $\delta_c$ -溫度

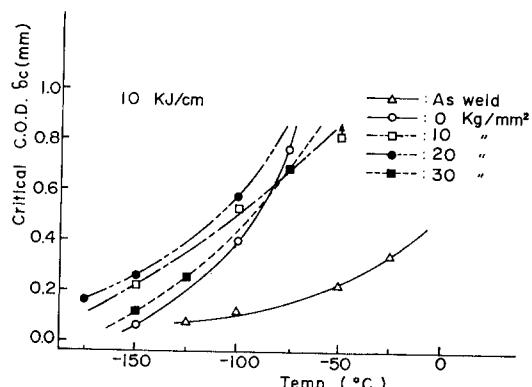


Fig. 3 Relation between critical COD and test temperature. (Heat input;  $10\text{KJ/cm}$ , PWHT conditions;  $650^\circ\text{C}$ ,  $1/4\text{hr}$ ,  $220^\circ\text{C}/\text{hr}$ )

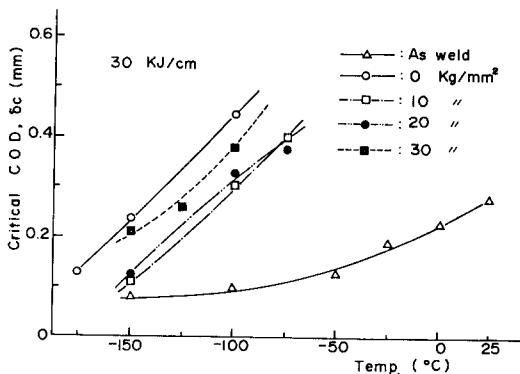


Fig. 4 Relation between critical COD and test temperature. (Heat input;  $30\text{KJ/cm}$ , PWHT conditions;  $650^\circ\text{C}$ ,  $1/4\text{hr}$ ,  $220^\circ\text{C}/\text{hr}$ )

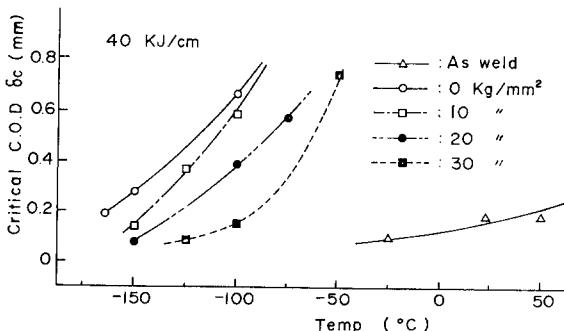


Fig. 5 Relation between critical COD and test temperature (Heat input;  $40\text{KJ/cm}$ , PWHT conditions;  $650^\circ\text{C}$ ,  $1/4\text{hr}$ ,  $220^\circ\text{C}/\text{hr}$ )

依存曲線은 Fig 5와 같다. 이를 보면 PWHT 時에 作用된 應力의 영향은 현저하여  $10, 30, 40\text{KJ/cm}$ 인 3種類의 組織中 그 變化幅이 가장 크다. 이를 線圖

로 부터 延脆性遷移溫度(Transition temperature;  $(T_{tr})_{\delta_c=0.25}$ )<sup>8)</sup>를 求해보면 Table 3과 같다. 이를 세 가지 入熱量에 對한  $T_{tr}$ 값을 作用應力別로 정리하면 Fig. 6과 같다. 이 線圖를 보면 應力이 없는 狀態에서 热處理된 경우는 入熱量이 증가함에 따라 HAZ粗大組織의 韌性은 直線上으로 向上되고 있다. 이에

Table 3. Results of fracture toughness and microhardness test for heat input

Heat input (KJ/cm)	Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	$T_{tr}$ (°C)	$(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ (°C)	Hv	$\frac{Hv}{(Hv)_{\sigma=0}}$
10	As weld	-44		330	
	0	-120	0	230	1
	10	-145	-25	250	1.09
	20	-153	-33	250	1.09
30	As weld	12		360	
	0	-143	0	270	1
	10	-113	30	280	1.04
	20	-120	23	275	1.02
40	As weld	64		320	
	0	-155	0	190	1
	10	-138	17	220	1.16
	20	-120	35	215	1.13
	30	-90	65	200	1.05

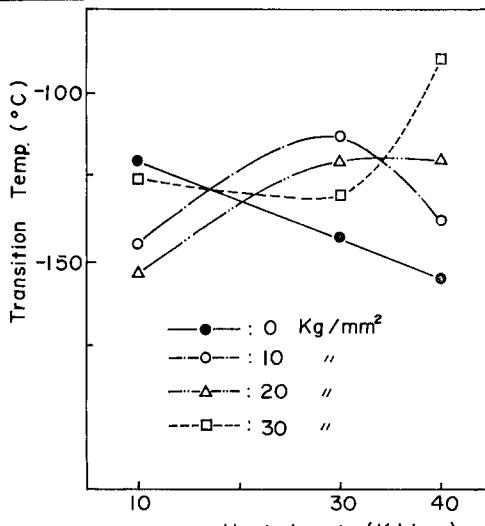


Fig. 6 Relation between transition temperature and heat input for applied stress.

대하여 應力이 作用된 狀態에서 PWHT된 경우는 組織의 PWHT에 應力依存性이 크게 作用되고 있음을 볼 수가 있다.

이를 좀 더 詳細하게 관찰하기 위하여  $\sigma=0\text{kg/mm}^2$  을 기준으로  $T_{tr}$ 의 差를 求하여 作用應力別로 入熱

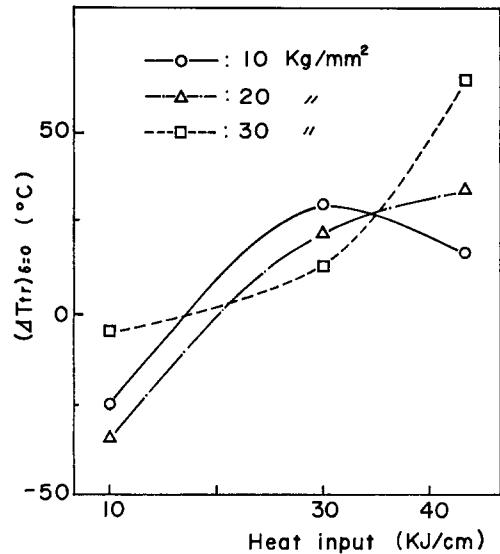


Fig. 7 Relation between  $((\Delta T_{tr})_{\sigma=0})$  and heat input for applied stress.

量에 관해서 정리하면 Fig 7과 같다. 입열량 10KJ/cm의 경우 應力이 作用되면 無應力의 경우에 比하여 韌性은 改善되고 있으며 改善의 程度는 30, 10, 20kg/mm<sup>2</sup> 順으로 커지고 있다. 이에 대하여 入熱量이 증대된 30, 40KJ/cm의 경우는 應力이 作用되면 組織은  $\sigma=0\text{kg/mm}^2$ 에 比하여 모두 脆化되고 있으며 脆化的 程度는 作用應力에 따라 달라지고 있다. 즉 30KJ/cm로 熔接된 경우는  $\sigma=30\text{kg/mm}^2$ 의 것이 脆化的 程度가 가장 낮으며 다음에 20, 10kg/mm<sup>2</sup>의 順으로 되고 있다. 다시 入熱量 40KJ/cm를 보면 지금까지 와는 달리 作用應力이 커지면 脆化的 幅이 현저하게 증가하고 있음을 보이고 있다.

이상의 관찰에서 용접한 상태(as-weld)에서 韌性值를 달리하는 組織은 각각 다른 PWHT 應力依存性을 갖고 있음을 알았기 때문에 各種試片의  $T_{tr}$ 值를 入熱量別로 作用應力에 관해서 정리하면 Fig 8과 같다. PWHT 할 때 熔接 HAZ에 存在하는 應力의 크기가 PWHT 脆化에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 無應力 热處理材를 기준으로 하는 遷移溫度差  $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ 과 作用應力과의 關係를 나타내는 그림이다. 入熱量 10KJ/cm일 때 作用應力 20kg/mm<sup>2</sup>까지는 残留應力에 依한 PWHT 脆化現象은 나타나지 않고  $\sigma=30\text{kg/mm}^2$ 以上일 때 나타나고 있다. 이것은 小入熱量으로 結晶粒子가 적은 組織은 残留應力에 依한 脆化보다는 單純한 热處理效果가 더 크게 作用하고 있음을 알 수 있다. 즉 熔接 HAZ가 적으므로 残留應力에 依한 脆化的 敏感度가 저연되고 있음을 나타

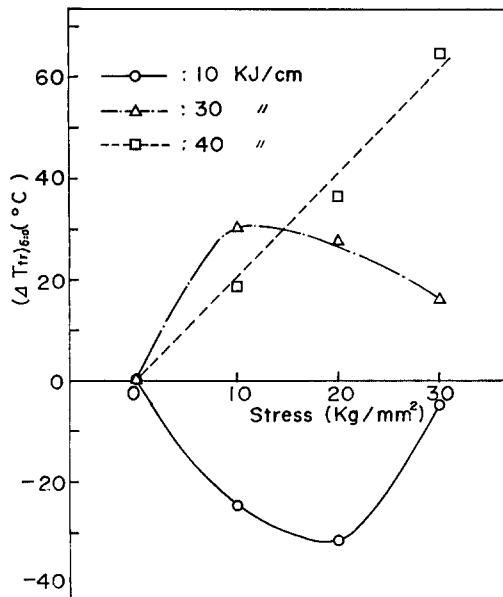


Fig. 8 Relation between  $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$  and applied stress for heat input.

내 주고 있다. 그러나 入熱量이 30KJ/cm의 熔接條件에서는 作用應力에 依해 바로 脆化되고 있음을 알 수 있으며 應力이 증가하여 20kg/mm<sup>2</sup> 以上이 되면 다시 韌性이 增加하고 있다. 이것은 譚性變形에너지가 증대하여 韌性이 조금씩 회복되고 있음을 알 수 있다. 또한 入熱量이 40KJ/cm의 高入熱量인 경우에는 殘留應力에 依한 PWHT 脆化現象이 크게 나타나고 있다.

### 3.2 微小硬度와 破壞非性

熔接入熱量을 달리함으로써 각기 韌性을 달리하는 HAZ組織을 대상으로 각종 조건으로 PWHT된組織의 놋치先端에서 硬度分布의 變化와 破壞非性과의 관계를 알아보기 위하여 微小硬度를 測定하였으며 測定値는 Table 3에 併記하였다.

作用應力에 依한 變化된 組織의 破壞非性에는 어떠한 영향을 주는지를 알아보기 위해  $\sigma = 0 \text{ kg/mm}^2$ 의 無應力狀態에서 PWHT된 試片을 基準으로 한 遷移溫度差  $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ 과 硬度比  $Hv/(Hv)_{\sigma=0}$ 과의 관계를 入熱量에 대해서 정리하면 Fig. 9와 같다. 이것은 作用應力에 依한 PWHT 영향이 어떻게 作用하는지를 나타내 주고 있다. 10KJ/cm과 30KJ/cm의 入熱量에서는 作用된 應力에 依해 變化된 組織의 硬度比가 增加하던 高溫側으로 移動해 韌性이 減少하고 있다. 그러나 40KJ/cm의 入熱量에서는 無應力狀態에서 PWHT된 것보다는 脆化되고 있지만, 硬度比가 增加

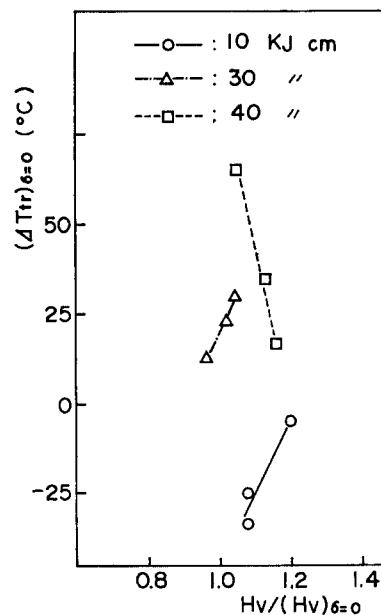


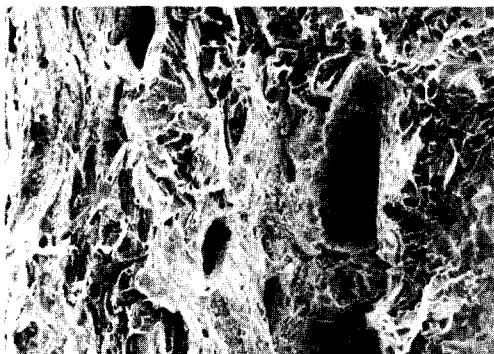
Fig. 9 Relation between  $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$  and  $Hv/(Hv)_{\sigma=0}$  for heat input.

할수록 韌性이 向上되고 있어 前者의 10KJ, 30KJ과는 반대의 효과가 나타난다. 즉 作用應力의 增加함에 따라 그것에 依한 組織의 變化度를 나타내주는 硬度는 減少함에도 韌性은 劣化함을 볼 수 있다. 이것은 破壞를 일으키는 다른 機構가 있음을 나타내 준다. 즉 높은 入熱量에서의 위와같은 사실은 Verhoeven이 報告한<sup>9)</sup> 析出物이나 不純物들의 粒界移動理論과 府合되는 結果이다. 위와같은 원인을 보다 자세하게 알아보기 위해 다음절에서 式面觀察을 통해 고찰하였다.

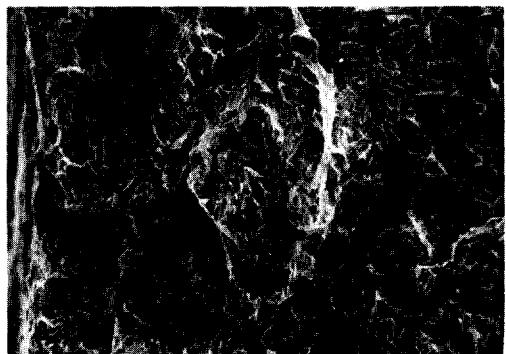
### 3.3 式面觀察로 본 脆化機構

各種 入熱量에 따른 熔接 HAZ組織의 PWHT 條件이 破壞舉動에 어떠한 영향을 주는지를 알아 보기 위하여 시험온도 -100°C의 試片破面을 觀察하였다. 限界 COD值  $\sigma_c = 0.14 \text{ mm}$ 인 母材의 破面은 大부분 脫開와 약간의 擬脫開가 混在된 破面으로 거의 完全한 脆性破壞를 하고 있었으며 熔接時 入熱量의 증가는 그 만큼 더 HAZ粗大組織을 脆化시키고 있음을 破面觀察을 통해 前報<sup>10)</sup>에서 고찰하였다.

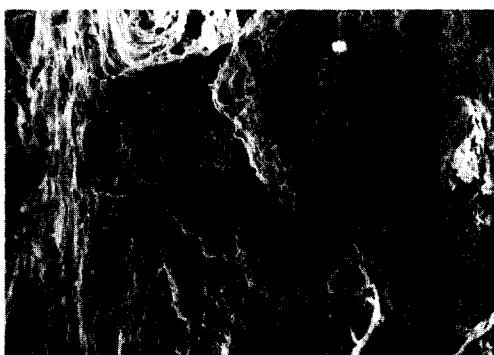
이와같은 破壞舉動을 보이는 용접한상태(as-weld材)의 HAZ組織을 PWHT하면 破面은 作用應力에 따라 變化한다. Fig 10(a)는 入熱量 10KJ/cm의 破面으로 無應力狀態에서는 void와 미세한 dimple들을



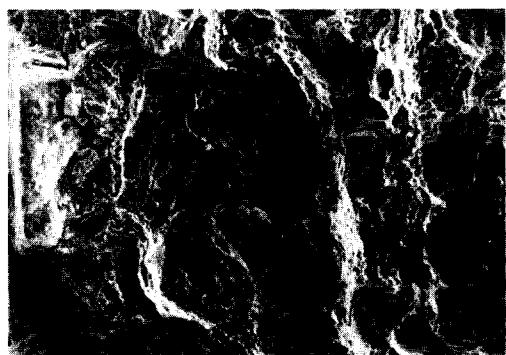
(a-1) Stress: 0 kg/mm<sup>2</sup> × 300



(a-2) Stress: 10kg/mm<sup>2</sup> × 300



(a-3) Stress : 20kg/mm<sup>2</sup> × 300

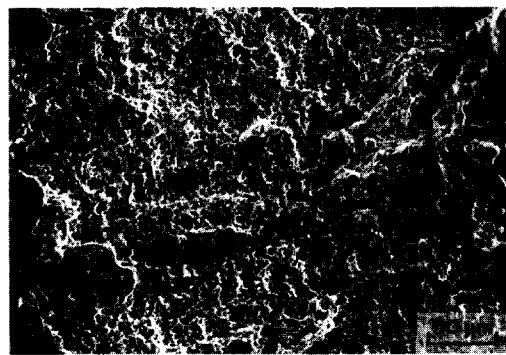


(a-4) Stress : 30kg/mm<sup>2</sup> × 300

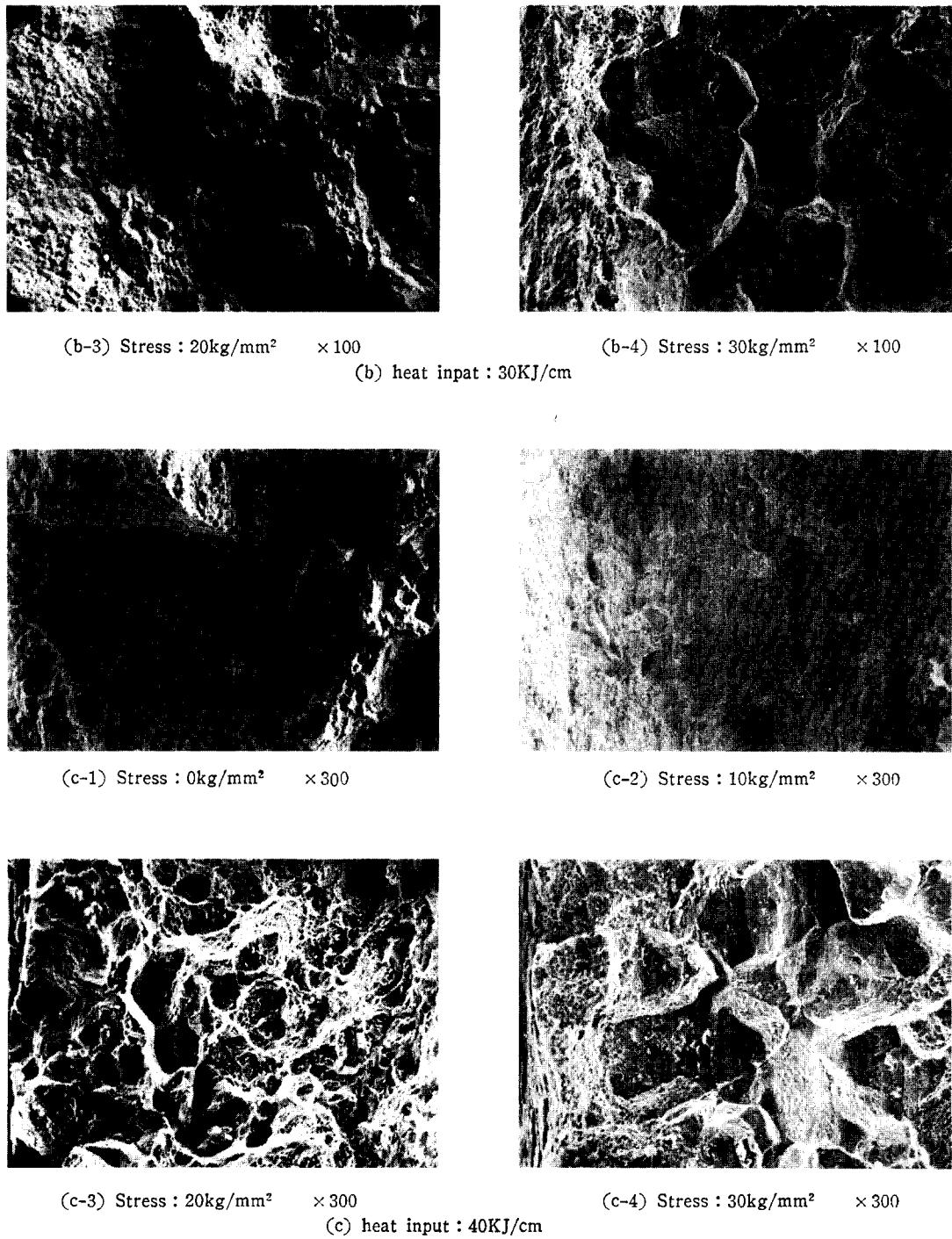
(a) heat input : 10KJ/cm



(b-1) Stess : 0kg/mm<sup>2</sup> × 300



(b-2) Stress : 10kg/mm<sup>2</sup> × 300



**Fig. 10** Fractographs showing on intergranular facet in variety of applied stress during PWHT.  
 (Test temperature ; -100°C, PWHT conditions ; 650°C, 1/4hr, 220°C/hr)  
 (a) heat input ; 10KJ/cm (b) heat input ; 30KJ/cm (c) heat input ; 40KJ/cm

볼 수 있다. 作用應力이 증가함에 따라 破面의 오첨이 심하여  $30\text{kg/mm}^2$ 에서는析出物의 粒界移動을 볼 수 있다. Fig 10(b)는  $30\text{KJ/cm}$ 의 入熱量인 것으로 無應力狀態에서는 미세한 dimple를 볼 수 있으며  $10\text{kg/mm}^2$ 의 作用應力에서는 應力에 依한 韌性破面을 볼 수 있다. 또한 作用應力이 증가하여  $20\text{kg/mm}^2$ 에서부터는析出物들의 출현과 특히  $30\text{kg/mm}^2$ 에서는析出物들의 粒界移動으로 因한 粒界破壞(grain boundary failure)를 하고 있음을 확인 할수 있다. 특히 熔接入熱量이 가장 큰  $40\text{KJ/cm}$ 인 PWHT材中 作用應力이  $0\text{kg/mm}^2$ 인 것은 미세한 dimple이 대부분이며, 가장 큰 結晶粒子가 热處理軟化現象으로 韌性을 증가시켜 주고 있다. 그러나 作用應力이  $10\text{kg/mm}^2$ 에서는析出物들을 粒界로 移動시키는 구동력이 되어 粒界 dimple들을 볼 수 있다. 또  $20\text{kg/mm}^2$ 의 作用應力下에서는 粒界破面을 볼 수 있으며 粒界 밑바닥에는 미세한 dimple이 있어 韌性을 유지시켜 주고 있다.  $30\text{kg/mm}^2$ 의 作用應力下에서는 완전한 粒界破壞를 하고 있으며 粒界에서析出物들을 관찰 할 수 있다. 입열량과 작용응력의 변화에 따른 破斷面의 거동을 종합적으로 살펴보면 Table 4와 같다.  $10\text{KJ/cm}$ 과 같이 입열량이 적으면 PWHT시作

Table 4. Evaluation of fracture surface due to the change of heat input

heat input stress	$10\text{ kJ/cm}$	$30\text{ kJ/cm}$	$40\text{ kJ/cm}$
$0\text{ kg/mm}^2$	X	X	X
$10\text{ kg/mm}^2$	X	X	M
$20\text{ kg/mm}^2$	X	M	O
$30\text{ kg/mm}^2$	M	O	O

X : nothig grain boundary failure

M : mixed grain boundary failure and dimple

O : grain boundary failure

用應力에 의한 영향이 적게 나타나며 粒界破面도 볼 수 없다. 그러나 入熱量이  $30\text{KJ/cm}$ 로 증가하면 作用應力이  $20\text{kg/mm}^2$ 에서 나타나기 시작하여  $30\text{kg/mm}^2$ 에서 완전한 粒界破壞를 일으키고 있다. 또한 入熱量이  $40\text{KJ/cm}$ 에서는 作用應力에 依한 脆化 정도가 아주 커서  $20\text{kg/mm}^2$ 에서부터 粒界破壞를 하고 있다. 이것으로 PWHT脆化는 入熱量과 더불어 PWHT中の 잔류된 應力에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 結論

熔接後熱處理된 熔接 HAZ를 대상으로 小型굽힘 COD 破壞韌性試驗과 微小硬度測定, 그리고 전자현미경관찰을 통하여 PWHT時에 使用된 應力과 熔接入熱量이 HAZ粗大組織의 破壞韌性에 어떠한 영향을 미치는가를 檢討하였으며 얻어진 結果는 다음과 같다.

1.  $10\text{KJ/cm}$ 과  $30\text{KJ/cm}$ 의 入熱量에서는 作用된 應力에 依해 變化된 組織의 硬度比가 增加하면 高溫側으로 移動해 韌性이 減少하고 있으나  $40\text{KJ/cm}$ 의 入熱量에서는 無應力狀態에서 PWHT된 것보다는 脆化되고 있지만 硬度比가 감소함에도 불구하고 석출물의 입체이동으로 인하여 파괴인성을 감소하고 있다.

2. 熔接入熱量에 의한 粒界破壞는  $10\text{KJ/cm}$ 에서는 거의 나타나지 않으며  $30\text{KJ/cm}$ 에서는  $30\text{kg/mm}^2$ 의 殘留應力이 존재할 때,  $40\text{KJ/cm}$ 에서는  $20\text{kg/mm}^2$ 의 殘留應力이 존재할 때부터 나타난다.

3. 熔接 HAZ에 各種 應力を 作用시켜 주면서 PWHT를 실시하는 경우에 作用된 應力은 HAZ의 破壞韌性을 저하시키며 組織中에 과고용된 合金元素의 粒内 또는 粒界析出를 돋고 있다.

#### 參考文獻

1. 松田：熔接冶金學，日刊工業社(1975)p. 196.
2. 龜田純：高張力鋼熔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)
3. J. Kameda, H. Takahashi and 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-1002-2-76(1976)
4. A. Joshi and D. F. Stein：“Temper embrittlement of low alloy steels” STP 499(1972) pp. 59~89.
5. 内木・山崎 外2：“應力除去焼鈍割れに関する研究” 日本溶接學會誌，33卷 9號(1964)p. 716.
6. ASTM, Standard E 399-74.
7. B. S “Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing. B. S 5762(1979)
8. 정세희, 임재규：“Cr-Mo강 용접열영향부의 파괴인성에 미치는 용접후열처리의 영향(I)”, 대한기계학회논문집 vol. 8 No. 2(1984)pp. 97~103.
9. J. D. Verhoeven：“Fundamentals of physical Metallurgy”(1975)p. 202.
10. 임재규·정세희：“Cr-Mo강 용접열영향부의 파괴인성과 용접입열량에 관한 연구(I)”, 대한용접학회지 제2권 2호 (1984) pp. 54~61