

<論 文>

Cr-Mo 鋼 熔接熱影響部의 熔接後熱處理 脆化에 관한 研究

林 載 奎* · 鄭 世 喜**

(1986年 12月 26日 接受)

Study on PWHT Embrittlement of Weld HAZ in Cr-Mo Steel

Jae Kyoo Lim and Se Hi Chung

Key Words : PWHT Embrittlement(PWHT 취화), Fracture Toughness(파괴인성), PWHT Heating Rate(PWHT 가열속도), Residual Stress(잔류응력), Grain Boundary Failure(입계파괴)

Abstract

Post weld heat treatment (PWHT) of weldment of the low alloy Cr-Mo steel, in general, is carried out not only to remove residual stress and hydrogen existing in weldment but to improve fracture toughness of weld heat affected zone (HAZ). There occur some problems such as toughness decrement and stress relief cracking (SRC) in the coarse grained region of weld HAZ when PWHT is practiced.

Especially, embrittlement of structure directly relates to the mode of fracture and is appeared as the difference of fracture surface such as grain boundary failure.

Therefore, in this paper, the effect of heating rate on PWHT embrittlement under the various kinds of stresses simulated residual stress in weld HAZ was evaluated by COD fracture toughness test and observation of fracture surface.

Fracture toughness of weld HAZ decreased with increment of heating rate under no stress, but it was improved to increment of heating rate under the stress. Grain boundary failure didn't almost appear at the heating rate of 600°C/hr but it appeared from being the applied stress of 294 MPa at 220°C/hr and 196 MPa at 60°C/hr.

1. 序 論

高張力鋼을 使用한 熔接構造物의 不安定 脆性破壞로

인한 사고는 종종 경험하고 있으며 또 이가 미치는 영향이 지대하여 이들 파괴의 방지는 현재 시급을 요하는 과제로 되고 있다. 불안정취성파괴 방지를 위해서 무엇보다도 필요로 하는 것은 破壞靱性の 精確한 평가라 할 수 있다.

熔接熱影響部(heat affected zone: HAZ)의 靱性에 영향을 미치는 因子中에서 殘留應力의 영향은 重大한

* 正會員, 全北大學校 工科學 機械工學科

** 正會員, 全北大學校 工科學 精密機械工學科

문제로 注目되고 있으며⁽¹⁾, 이로 因한 熔接材의 기계적 성질의 低下를 경감하기 위한 方法으로 熔接後熱處理 (post weld heat treatment: PWHT)에 依한 除去方法을 이용하고 있다. 그러나 이 熱處理는 보통 600°C 以上の 고온에서 實施되기 때문에 熱處理過程에서 템퍼링 (tempering) 效果로 因한 HAZ의 劣化가 때때로 發生하고 있어서 熔接 시공상 問題로 되고 있다⁽²⁻⁴⁾. 또한 PWHT 時에는 加熱中이나 冷却中에도 熱處理效果가 進行되고 있다고 볼 수 있으므로, PWHT 加熱速度는 機械的 性質의 改善이라는 理由外에 경제적 側面에서도 重要時 된다. 특히 熔接組織의 脆化는 破壞의 양식에 직접 반영되어, 破面形態의 差로 나타나므로, 본 연구에서는 熔接後熱處理에 因한 破壞靱性值의 劣化를 組織의 脆化와 關連시켜 검토하기 위하여 熱處理된 HAZ를 대상으로 作用된 '應力'의 크기와 加熱速度가 HAZ의 破壞靱성에 어떠한 영향을 미치는지를 COD 破壞靱性試驗과 微小硬度測定, 그리고 주사전자현미경 관찰을 통하여 考察하였다.

2. 試驗片 및 實驗方法

本 實驗에 使用된 試驗材는 板두께 16mm의 Cr-Mo 鋼板(SCM440 級)으로 그 化學成分 및 機械的 性質은 Table 1과 같다. 鋼板은 Fig. 1과 같이 150mm×300mm 크기의 小板으로 切斷한 後 그 表面에 壓延方向과 直角方向으로 길이 3mm의 90°V 홈을 機械加工하고 그 위에 서브머저드아아크(submerged arc) 自動熔接으로 一層熔接을 實施하였다. 이때 使用한 熔接條件은 Table 2와 같다.

熱處理試驗片은 길이方向이 鋼板의 壓延方向과 一致하게 하였으며 마크로(marco)부식에 의해 兩端面의 組織을 觀察하여 노치 設定位置를 確認한 後 10×10×70

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 (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)						
1020	655	19.2						

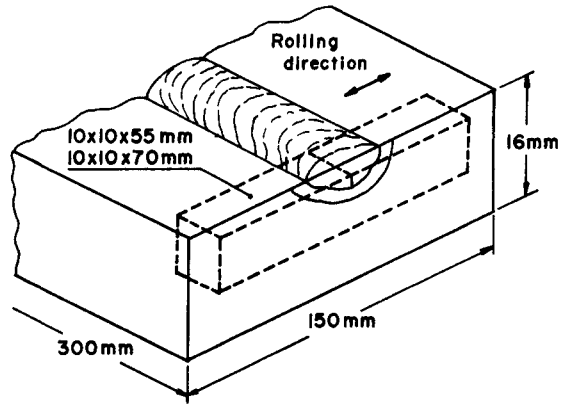


Fig. 1 Welding plate configuration and extraction of specimen

Table 2 Welding conditions(submerged arc welding)

Heat input (kJ/cm)	Pre-heating temperature (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Wire (mm)
30	200	500	30	30	3.2

mm 크기로 加工하였다. 또 熱處理된 시험편은 小型굽힘 COD 破壞靱性試驗⁽⁵⁾을 위하여 10×10×55mm의 標準 Charpy 試驗片으로 修正加工하였다. 노치加工은 ASTM 規格 L-S형⁽⁶⁾으로 하였으며, 工學的 破壞條件으로써 COD 破壞靱性試驗을 만족시키는 노치 acuity 범 위인⁽⁷⁾ 두께 0.3mm의 圓판 cut off wheel을 使用하여 板두께 方向으로 2mm 깊이의 슬릿加工을 하였다. 노치先端의 位置는 熔接비이드의 中央部인 熔融線, 즉 熔接 HAZ의 마르텐사이트 粗大結晶組織에 位置하도록 하였다. 준비된 시험편은 熱處理에 提供되었으며 熱處理條件은 이 材料의 適正後熱處理溫度로 알려진 650°C에서 노치先端에 잔류應력을 모의하여 98MPa(10kgf/mm²), 196MPa(20kgf/mm²), 294MPa(30kgf/mm²)의 一軸應力을 加한 狀態로 加熱速度를 600°C/hr, 220°C/hr, 60°C/hr의 세가지 條件으로 變化시켰다. Fig. 2는 이때의 熱處理條件을 개략적으로 圖示한 것이다. 熱處理된 試驗片은 Charpy型 標準試片으로 再加工되어 小型굽힘 COD 破壞靱性試驗에 提供되었으며 이때 使用된 시험기는 10톤 용량의 탄성시험기였다. 試驗溫度는 -175°C~25°C의 분위기 溫度狀態였으며 크로스 헤드 速度는 0.2mm/min였다. 熱處理와 應力集中으로 因한 材質의 變化를 관찰하기 위하여 노치先端附近의 熔接 HAZ에 注目하여 板두께 方向으로 每 100

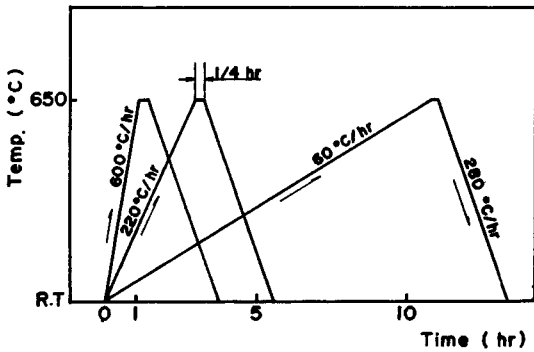


Fig. 2 Heat treatment conditions (heating rate)

μm 간격으로 硬度를 測定하였다. 이때 使用한 硬度計는 빅커스微小硬度計로 測定荷重은 100g 이었다. 破斷試驗이 끝난 試驗片은 破斷面에서 粒界破壞여부를 알아보기 위하여 주사전자현미경으로 破面觀察을 하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 低溫破壞靱性

Fig. 3은 各種 熱處理 시험편에 대한 低溫破壞靱性試驗을 實施한 結果를 試驗溫도와 限界개구변위량 δ_c 의 관계로 整理한 것이다. 各種 條件으로 熱處理된 시

험편의 δ_c -溫度依存曲線이 모두 as-weld 材의 그것보다 低溫側에 位置하고 있어서 熔接 HAZ의 破壞靱性は PWHT에 依해서 改善되고 있음을 알 수 있다. 그러나 이 線圖에서 COD 遷移曲線은 加熱速度뿐만 아니라 作用應力의 大小에 따라서 改善의 程度를 달리하고 있음을 엿볼 수가 있다. 따라서 이들 線圖로부터 各試驗片에 대한 延脆性遷移溫度 [$(T_{ir})_{\sigma=0.25}$]⁽⁸⁾를 求하고 作用應力下에서 加熱速度가 HAZ의 靱性を 어떻게 變化시키기를 살펴보기 위하여 $\sigma=0$ MPa 즉 無應力 狀態를 基準으로 하여 各處理條件에 對應하는 T_{ir} 값과 無應力 時의 T_{ir} 값과의 差 (ΔT_{ir}) _{$\sigma=0$} 을 求하여 各 加熱速度別로 整理해 보면 Fig. 4와 같다. 이를 보면 加熱速度가 가장 빠른 600°C/hr의 경우 T_{ir} 값이 無應力 일 時의 T_{ir} 에 比하여 $\sigma=98$ MPa일 時 약 20°C $\sigma=196$ MPa와 $\sigma=294$ MPa에서 各各 46°, 52°C만큼 低溫 쪽으로 내려가고 있다. 그러나 이보다 加熱速度가 느린 220°C/hr의 경우를 보면 이와는 반대로 應力이 作用될 時의 T_{ir} 값은 모두 無應力일 時에 比하여 高溫 쪽으로 移動하고 있어서 이 加熱速度에서의 PWHT는 HAZ 組織을 脆化시키고 있음을 엿볼 수 있다. 한편 60°C/hr의 대단히 느린 加熱速度에서의 T_{ir} 값은 應力이 98 MPa일 時는 無應力일 時 보다 低下되어 熔接 HAZ 組織을 改善시키고 있음을 볼 수 있다. 이런 현상은 60°C/hr의 아주 느린 加熱速度 때문에 殘留應力에 依한

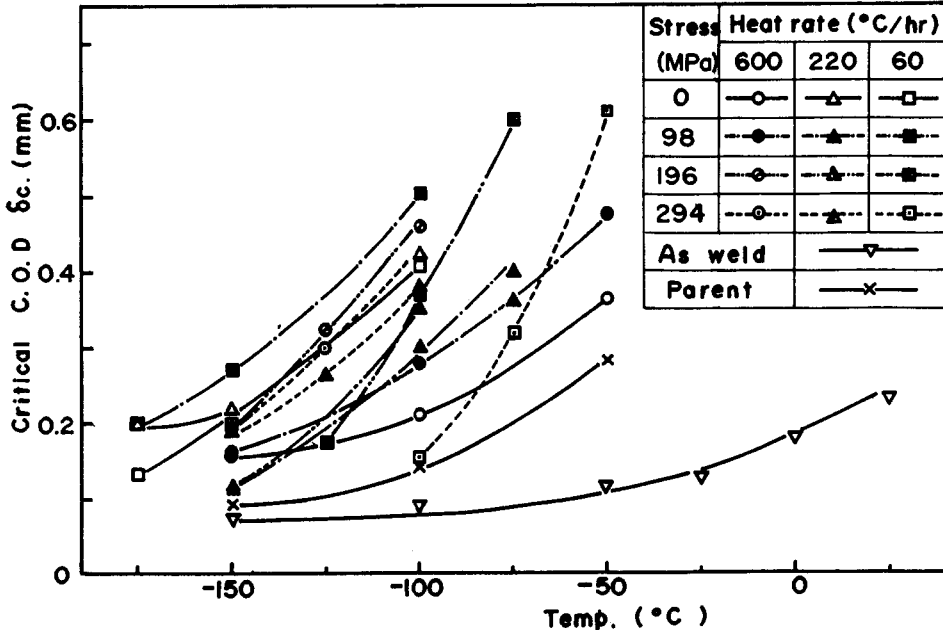
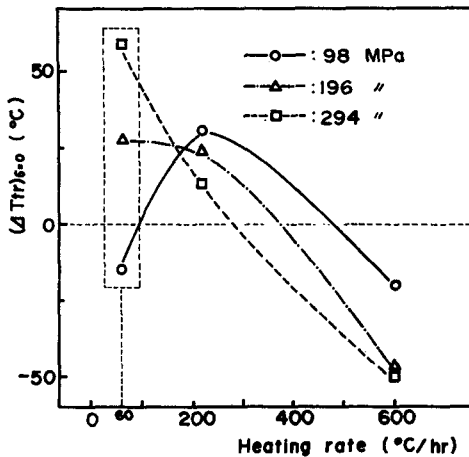
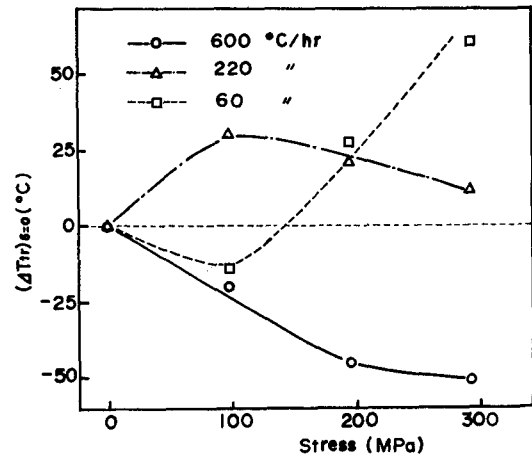


Fig. 3 Relation between critical COD and test temperature for heating rate (PWHT conditions : 650°C, 1/4hr)

Fig. 4 Relation between $(\Delta T_{ir})_{\sigma=0}$ and heating rate

脆化現象이 熱處理에 依해 改善되고 있는 것으로 생각할 수 있으며 점차 作用應力이 196MPa, 294MPa 로 增加하면 組織을 脆化시킬뿐만 아니라 應力의 크기에 따라 脆化의 程度가 커지고 있음을 볼 수 있다. 이를 다시 정리하면 600°C/hr 의 빠른 加熱速度에서는 作用應力의 增加에 따라 靱性이 向上되고 있으며 220°C/hr 까지는 同一한 脆化勾配를 갖고 脆化되나 220°C/hr 를 境界로 98MPa 에서는 다시 向上되고 196MPa, 294MPa 의 경우는 포화되거나 더욱 脆化되고 있음을 볼 수가 있다. 여기서 60°C/hr 는 作用하는 殘留應力에 의해 組織이 일단 脆化되고는 있으나 아주 느린 加熱速度이므로 전체적인 PWHT 時間이 進어 事實상 PWHT 도중에 이 應力의 效果보다는 再結晶等의 熱處理效果가 더욱 크게 나타나서 靱性은 向上되고 있는 것으로 볼 수 있다. 以上の 관찰에서 알 수 있는 것은 PWHT 된 HAZ 組織의 破壞靱性値는 組織固有의 破壞靱性과 加熱速度 및 殘留應力에 依해서 左右된 破壞靱性値의 複合的인 값이라고 생각할 수가 있다. 이러한 뜻에서 加熱速度와 殘留應力만의 影響을 살펴보면 Fig. 5 와 같다. 이 그림은 無應力下에 있을 때의 T_{ir} 을 基準으로 하여 各點에서의 各加熱速度에 대한 T_{ir} 의 差 $(\Delta T_{ir})_{\sigma=0}$ 를 求하여 作用된 應力에 關하여 정리한 것이다. 이를 보면 600°C/hr 의 경우는 應力의 作用에 依存하기는 하나 $(\Delta T_{ir})_{\sigma=0}$ 의 값이 전부 (-) 쪽에 位置하고 있어서 이 加熱速度로의 熱處理는 HAZ 組織에 作用되고 있는 應力이 組織의 破壞靱性을 向上시키고 있음을 알 수 있다. 그러나 加熱速度가 220°C/hr 로 느려진 경우는 組織固有의 破壞靱性은 크게 向上하는 례도 불구하고

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

應力이 作用된 狀態에서는 $(\Delta T_{ir})_{\sigma=0}$ 이 전부 高溫쪽으로 位置하고 있어서 이 加熱速度는 HAZ 組織을 脆化시키는 速度임을 알 수가 있다. 특히 $\sigma=98$ MPa 인 경우가 그 影響이 가장 크며 應力이 增大됨에 따라 약간씩 靱性이 改善되고 있다. 또한 加熱速度가 60°C/hr 일 때는 破壞靱性의 改善 및 熔接 HAZ 組織의 脆化度가 作用應力에 따라 크게 左右되고 있음을 볼 수 있다. $\sigma=98$ MPa 일 때는 $(\Delta T_{ir})_{\sigma=0}$ 이 -15°C 로써 靱性이 改善되었다. 이는 느린 加熱過程中에 完全풀림현상이 강하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 作用應力이 196MPa, 294MPa 로 增加함에 따라 ΔT_{ir} 이 各各 +28°C, +60°C 로 上昇한 것은 熔接 HAZ 의 殘留應力에 依한 脆化現象이 强하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 단순한 組織의 熱處理 現象보다는 殘留應力の 影響이 더욱 크게 나타나는 加熱速度임을 나타내 준다. 이러한 現象을 PWHT 脆化現象이라고 볼 때 이는 冷却速度뿐만이 아니고 加熱速度 및 作用된 殘留應力の 크기에도 影響을 받는 것이라 할 수 있다.

3.2 微小硬度和 破壞靱性

加熱速度와 作用應力을 변화시키면서 PWHT 했을 때 노치先端에서 組織의 變化를 알아보기 위하여 微小硬도를 測定하였다. Fig. 6 은 그 測定値의 一例을 例示한 것으로 그 값에 차이는 있으나 모든 조건하에서 硬도値는 溶融線에 隣接한 粗大結晶粒에서 가장 높으며 어느거리까지는 그 값이 一定値를 이루나 漸次 低下되어 母材의 硬도値와 같아지고 있다. 또한 無應力下에서 硬도變化와 靱性의 舉動變化를 갖는 HAZ 組織에 應

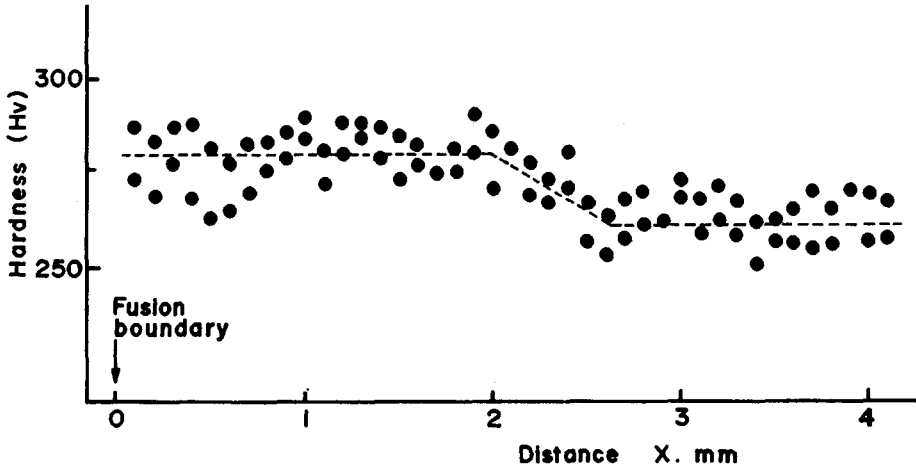


Fig. 6 Hardness distribution in HAZ after PWHT (heat input : 30 KJ/cm, applied stress : 98MPa, PWHT conditions : 650°C, 220°C/hr, 1/4hr)

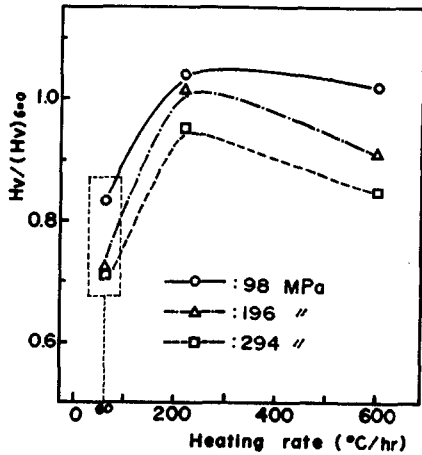


Fig. 7 Relation between $H_v/(H_v)_{\sigma=0}$ and heating rate for applied stress

력이 작용되면 PWHT에 의해서 어떠한 硬度變化를 갖는지를 살펴보면 Fig. 7과 같다. 이 線圖는 無應力 때의 硬度를 기준으로 한 硬度比 $H_v/(H_v)_{\sigma=0}$ 을 구하여 각 作用應力別로 加熱速度에 關해서 整理한 것이다. 이를 보면 加熱速度 600°C/hr일 때 作用應力이 98MPa가 되면 無應力일 때 보다 약간 硬化되는데 反하여 196 MPa, 294MPa의 作用應力下에서는 오히려 軟化되고 있으며 應力이 커짐에 따라 軟化의 程度는 더 커지고 있다. 이와 같은 舉動을 갖는 硬度比는 加熱速度의 低下와 더불어, 220°C/hr의 加熱速度까지는 약간씩 증가함을 보이다가 速度가 아주 느린 60°C/hr에서는 급격한 軟化를 보이고 있다. 지금까지의 加熱速度와 作

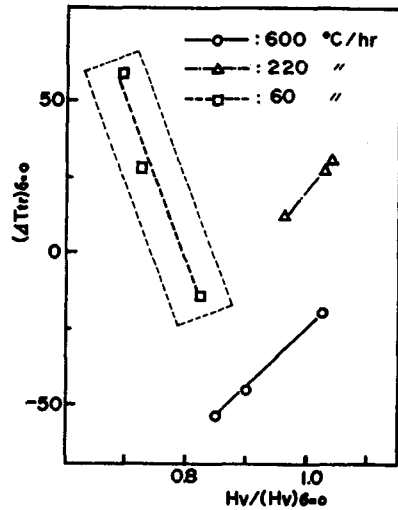


Fig. 8 Relation between $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ and $H_v/(H_v)_{\sigma=1}$ for heating rate

用應力에 依한 T_{tr} 과 硬度의 變化경향을 알아보기 위하여 無應力狀態를 기준으로 한 遷移溫度의 差 $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ 과 HAZ組織의 變化를 나타내주는 硬度比와의 關係를 Fig. 8에 나타낸다. 여기에서 加熱速度 600°C/hr에서는 硬度比가 증가할수록 $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ 은 高溫測으로 移動하고 있어 韌性劣化를 알 수 있다. 220°C/hr의 加熱速度 역시 硬度比의 증가와 함께 韌性劣化의 程度가 커지고 있다. 그러나 加熱速度가 아주 늦은 60°C/hr의 경우는 600°C/hr와 220°C/hr의 韌性變化度와는 달리 硬度比가 低下하는데도 韌性的 劣化가 급진적으로

增加하고 있음을 알 수 있다. 즉 가열속도가 늦어짐에 따라 硬度比와 $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ 의 線型的인 관계가 그 정도를 달리하고 있으며 기울기가 점점 증대되어 60°C/hr에서는 負의 기울기를 나타내고 있다. 이것은 Cr, Mo 따위의 2次硬化元素가 첨가되었기 때문에 PWHT 과정에 이런 2次元素의 時効析出⁽⁹⁾ 粒界가 脆化되어 韌性の 低下를 가져온 것으로 생각된다. 따라서 60°C/hr의 加熱速度로 PWHT 한 것은 硬度比가 低下하는 데도 遷移溫度의 差 $(\Delta T_{tr})_{\sigma=0}$ 이 고온측으로 移動하고 있어 韌性が 低下하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 이와 같이 아주 느린 加熱速度에서 PWHT 하는 것은 後述하는 바와 같이 긴 熱處理時間으로 因하여 加熱中에 不純物이나 炭化物들의 粒界析出을 誘發하여 熔接 HAZ가 脆化되기 때문에 PWHT 조건으로 적합하지 않다.

3.3 破面觀察

熔接後熱處理條件이 破壞舉動에 어떠한 영향을 주는지를 알아보기 위하여 시험온도 -100°C의 試片破面을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. Fig. 9는 作用應力 0 MPa의 條件下에서 加熱速度를 變化시킨 노치先端의 破面사진이다. (a)는 600°C/hr의 加熱速度로서 전체적으로 벽개파면만이 존재한다. (b), (c)는 220°C/hr, 와 60°C/hr로서 노치先端에 스트레치존이 있으며 미세한 덩플로 이루어진 延性破面을 나타내고 있다. 특히 (c)에서는 가열속도가 늦어서 열처리시간

이 많아지므로 덩플바닥에 미세한 析出物들을 관찰할 수가 있으며, COD 韌性試驗結果와도 一致하고 있다. Fig. 10은 作用應力 98MPa의 破面사진으로 600°C/hr와 220°C/hr에서는 약간의 延性破面이 존재하는 壁開破面으로 되어 있다. 그러나 가열속도가 가장 느린 60°C/hr에서는 노치先端에 스트레치존이 100 μ m 정도 존재하고 나머지는 擬壁開破面을 포함한 壁開破面으로 되어 있다. 특히 가열속도가 늦어짐에 따라 空洞(void)의 성장을 확인할 수 있다. Fig. 11는 作用應力이 196 MPa인 경우로 가열속도가 600°C/hr에서는 노치先端에 延性破面和 약간의 壁開破面을 관찰할 수 있다. 특히 이 破面은 98MPa, 220°C/hr의 破面和 비슷하여 作用應力과 加熱速度는 노치先端의 破壞韌性に 크게 관련이 있음을 알 수 있다. 220°C/hr에서는 대부분의 破面이 延性破面이며 析出物들의 移動을 관찰할 수 있어서 이러한 析出物들이 粒內에 存在하므로 韌性を 低下시키고 있음을 알 수 있다. 또 60°C/hr의 加熱速度에서는 노치先端에서 일부의 粒界破面을 볼 수 있으며 粒界의 밑바닥에 微細한 덩플이 있어 韌性を 조금은 회복시켜 주고 있다. Fig. 12는 作用應力이 294MPa인 경우로 加熱速度 600°C/hr에서는 延性破面이 대부분이며 미세한 덩플이 結晶境界에 存在하고 있어 破壞韌性を 增加시키고 있다. 加熱速度가 너무 빠르므로 作用應力의 效果가 크게 나타나지 않으나 粒界에 空洞의 형성이 進行되고 있음은 관찰할 수 있다. 220°C/hr에서는 노치先端에 粒界破面을 뚜렷이 관찰할 수 있는데

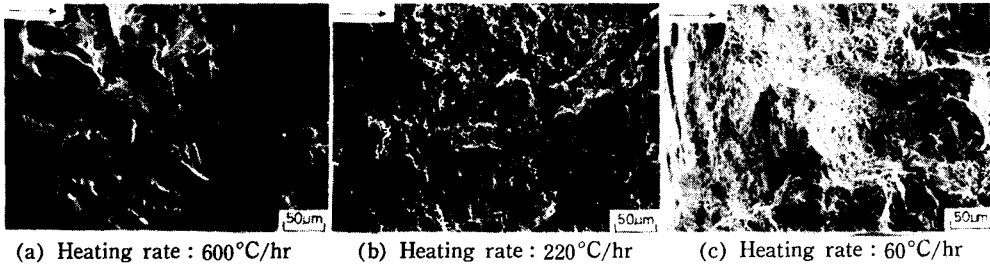


Fig. 9 Difference of fracture surfaces for heating rate during PWHT (stress : 0 MPa)

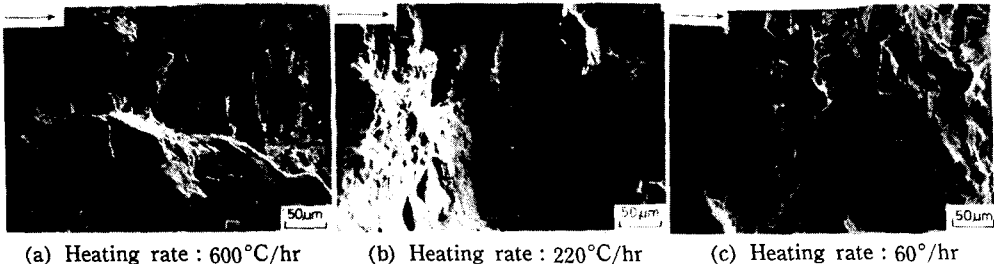
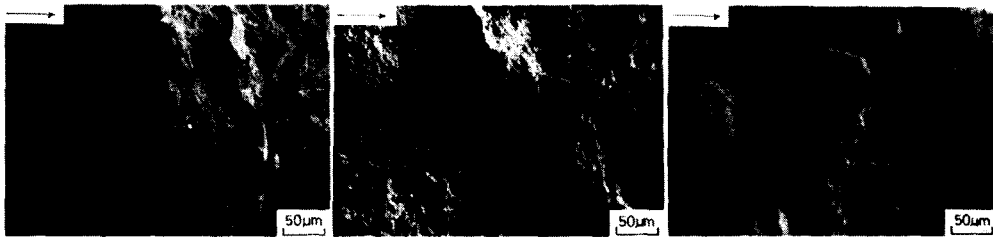
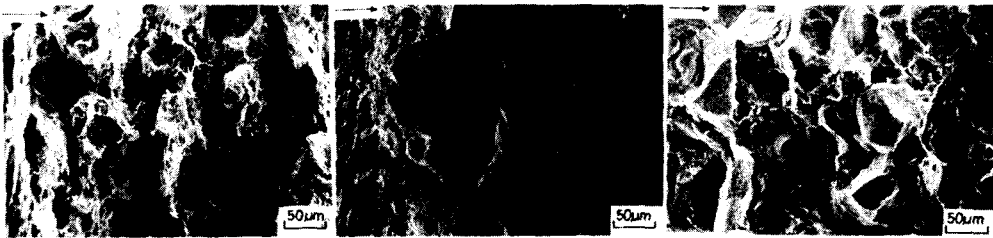


Fig. 10 Difference of fracture surfaces for heating rate during PWHT (stress : 98 MPa)



(a) Heating rate : 600°C/hr (b) Heating rate : 220°C/hr (c) Heating rate : 60°C/hr

Fig. 11 Difference of fracture surfaces for heating rate during PWHT (stress : 196MPa)



(a) Heating rate : 60°C/hr (b) Heating rate : 220°C/hr (c) Heating rate : 60°C/hr

Fig. 12 Difference of fracture surfaces for heating rate during PWHT (stress : 294MPa)

이는 作用應力에 의한 析出物들의 粒界移動을 나타내 주고 있다. 그리고 60°C/hr의 加熱速度에서는 作用應力 294MPa에 의하여 析出物들이 粒界로 移動하여서 全般的으로 粒界破壞를 일으키고 있다. 또한 作用應力에 의한 析出物들의 移動으로 粒界析出物들의 層은 應力과 PWHT時間의 경과에 따라 層두께가 增加되며 이에 따라 本드의 結合力이 減少되고 있음을 靱性시험에서 確認할 수 있었다. 위와 같은 結果로부터 加熱速度에 의한 靱性의 變化가 크게 나타나며 殘留應力이 析

出物들의 驅動力이 되고 析出量은 얼저러 加熱時間에 依해 影響을 받고 있다. 그러므로 加熱速度와 應力의 變化에 따른 破斷面의 舉動을 종합적으로 평가하면 Table 3와 같이 600°C/hr에서는 加熱速度가 너무 빠르므로 作用應力에 依한 組織變化가 그렇게 크지 않을 뿐만 아니라 格子 缺陷들의 分散과 組織의 軟化만을 增大시키므로, 粒界破壞는 거의 나타나지 않는다. 그러나 220°C/hr에서는 294MPa의 殘留應力이 存在할 때 나타나며, 60°C/hr에서는 196MPa의 殘留應力이 存在할 때부터 粒界破壞를 일으킨다.

Table 3 Evaluation of fracture surface due to the change of heating rate

Heating rate	600°C/hr	220°C/hr	60°C/hr
Stress			
0 MPa	X	X	X
98 MPa	X	X	M
196 MPa	X	M	O
294 MPa	M	O	O

X : Nothing grain boundary failure
 M : Mixed grain boundary failure and dimple
 O : Grain boundary failure

4. 結 論

PWHT 된 Cr-Mo 鋼 熔接 HAZ를 대상으로 小型굽힘 COD 破壞靱性試驗과 전자현미경 관찰을 통하여 PWHT 時에 作用된 應力과 加熱速度가 HAZ 粗大組織의 破壞靱性에 어떠한 影響을 미치는가를 檢討하였으 며 얻어진 結果는 다음과 같다.

(1) 熔接 HAZ 組織의 破壞靱性은 PWHT에 依해서 改善되나 應力이 作用된 狀態에서 熱處理되면 靱性은 劣化된다.

(2) HAZ의 破壞靱性은 加熱速度에 依存되고 있으며

無應力下에서는 加熱速度가 빨라짐에 따라 靱성은 低下하고 있으나 應力이 作用된 경우는 加熱速度가 빨라지면 靱성은 向上되고 있다.

(3) 加熱速度에 依한 粒界破壞는 600°C/hr 에서는 거의 나타나지 않으며, 220°C/hr 에서는 294MPa 의 殘留應力이 存在할 때, 60°C/hr 에서는 196MPa 의 殘留應力이 存在할 때부터 나타난다.

(4) 熔接 HAZ 에 各種 應力을 作用시켜주면서 PWHT 를 實施하는 경우에 HAZ 의 破壞靱성을 低下시키는데 이는 作用된 應力이 組織中에 過固溶된 合金元素의 粒內 또는 粒界析出을 돕기 때문이다.

참 고 문 헌

- (1) 田中, 小幡, “應力除去焼鈍に關する研究(1~8報)”, 日本溶接學會誌, Vol. 36, No. 2, 1967, ~Vol. 39, No. 11, 1970
- (2) R.M. Horn and R.O. Ritchie, “Mechanism of Tempered Martensite Embrittlement in Low Alloy Steel”, Met Trans. A., Vol. 9A, p. 1039, 1978
- (3) J.C. Murza and C.J. McMahon Jr, “The Effect of Composition and Microstructure on Temper Embrittlement in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel”, ASME, Vol. 102, pp. 369~375, 1980
- (4) A. Joshi and D.F. Stein, “Temper Embrittlement of Low Alloy Steels”, STP, 499, pp. 59~89, 1972
- (5) B.S. “Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing”, BS5762, 1979
- (6) ASTM Standard E399
- (7) 豊貞, “曲げCOD試験片におけるNotch Acuity 効果の定量化に關する提案”, 日本造船學會論文集, 第143號, p. 427, 1978
- (8) 정세희, 임재규, “Cr-Mo 鋼 熔接熱影響部の 破壞靱성에 미치는 熔接後熱處理의 影響(I)”, 大韓機械學會論文集, 第8卷, 第2號, pp. 97~103, 1984
- (9) 伊藤, 中西, “低合金鋼熔接熱影響部の應力除去焼鈍割れの研究(第1報)”, 日本溶接學會誌, Vol. 40, p. 1261, 1971