

〈論 文〉

粒界腐蝕法에 의한 플랜트用 高溫器機의 經年材質劣化 評價에 관한 研究

金正基* · 尹在永** · 宋基旭*** · 李柱鎭**** · 鄭世喜*****

(1990年 10月 26日 接受)

A Study on the Evaluation for In-Service Material Degradation of High Temperature Structural Components by Grain Boundary Etching Method

J.K. Kim, J.Y. Yoon, K.W. Song, J.J. Lee and S.H. Chung

Key Words : Material Degradation(材質劣化), Grain Boundary Etching Method(粒界腐蝕法), Segregation(偏析)

Abstract

Mechanical properties of structural materials for high temperatures, such as Cr-Mo steel, degrade during long-time service operation. The non-destructive evaluation of in-service material degradation of Cr-Mo steel by the grain boundary etching method(GEM) has been investigated. Newly developed non-destructive grain boundary etching method for detection and evaluation of material degradations of Cr-Mo steels caused by carbide coarsening and temper embrittlement are described. The obtained results are summarized as follows :

(1) There is a good correlation between the degree of grain boundary etching and of material degradation($\Delta FATT$), and obtained at 30 minutes etching.

$$\Delta FATT[^\circ C] = 34.96 - 125.48A + 151.57A^2 \text{ (etching time : 30min.)}$$

[A : width of grain boundary]

(2) There is a good correlation between the degree of material degradation and relative depth of grain boundary by roughness test, which is as follow.

$$\Delta FATT[^\circ C] = -62.27 + 315.42B - 153.55B^2 \text{ (etching time : 30min.)}$$

[B : maximum roughness of replica (μm)]

(3) Corrosive susceptibility of grain boundary also have a good relationship to the degree of material degradation.

$$\Delta FATT[^\circ C] = 153.7C - 62.43 \text{ (etching time : 5min.)}$$

[C : cutting ratio of grid, N_i/N_o]

* 정희원, 전주공업전문대학 기계과

** 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

*** 한국전력공사 여수화력발전소 발전부

**** 정희원, 한국항공우주연구소 우주실험실

***** 정희원, 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

1. 서 론

火力發電 設備나 石油化學 設備는 高溫材料의 殘餘壽命 豫測이 問題로 되어있는 代表的인 設備이

다. 이는 이들 高溫器機의 豫期치 않은 破損事故가 人命과 社會에 큰 損失을 주게되므로, 殘餘壽命을 可能하면 正確하게 把握하여 器機가 安全하고 확실한 運轉을 行하게 하는 일이 時急한 課題로 되고 있다⁽¹⁾.

이들 殘餘壽命 測定技術은 첫째, 構造部材의 劣化現象을 把握하는 損傷評價技術의 開發과 둘째, 將來의 運轉履歷을 包含하는 壽命計算 시스템의 開發로 나눌 수 있다⁽²⁻⁴⁾. 前者에는 破壞的 技法과 非破壞的인 技法이 있다. 이들 高溫材料의 材質劣化에 미치는 強度支配要因은 실로 多樣하고, 이들이 相互 影響을 미쳐서 加速的으로 損傷이 進行되는 境遇도 많아, 實際 使用狀態에서의 經年的인 材質劣化를 充分히 把握해 두지 않으면 안된다.

一般的으로, 플랜트 部材 및 配管은 Cr-Mo鋼이 많이 使用되고 있으나 이들 部材는 375~575℃의 溫度域에서 長時間 使用된 結果, 韌性이 顯著하게 低下하는 現象을 보이고 있다. 이러한 現象은 結晶粒界에 特定 不純物의 偏析 및 炭化物의 析出等에 起因하는 材料劣化의 典型的 形態 즉, 뜨임脆化^(5,6)로 알려져 있으며, 이러한 現象의 觀察을 통하여 材質劣化를 評價하려는 注意 깊은 努力이 行하여지고 있다. 그 結果 피크르酸水溶液系 腐蝕液를 使用하였을때, 粒界의 선택적인 腐蝕도와 磷등의 粒界偏析量 사이에 一定한 關係가 있음이 報告⁽⁷⁻¹¹⁾되고 있다.

한편, 이를 應用한 새로운 粒界腐蝕法(Grain boundary Etching Method : GEM)⁽¹²⁾은 Cr-Mo, Cr-Mo-V鋼에 대하여 粒界의 腐蝕도와 材質劣化度 사이에 一定한 相關關係를 찾을 수가 있어서, 高溫

使用材의 經年材質劣化를 測定할 수 있는 새로운 非破壞技術이 될 수 있음을 提示하고 있다.

그러나 이 方法이 완전한 非破壞的 經年劣化測定法으로 定立되기 위해서는 標準腐蝕液의 決定, 腐蝕方法 및 測定 데이터의 定量化 等 試驗方法의 標準化가 반드시 先行되어야 할 것이다.

따라서, 本 研究에서는 粒界腐蝕법에 의한 材質劣化 評價法의 標準化에 研究目的을 두고, 高溫部材의 劣化에 따른 組織의 特性變化를 觀察하였다.

2. 實驗材와 實驗方法

2.1 試驗片

本 研究에 使用된 材料는 石油化學 設備의 高溫 高壓用 反應容器 및 火力發電 設備의 過熱器等에서 長時間 使用된 Cr-Mo鋼으로 各各의 化學的 成分과 機械的 性質 및 使用 條件은 Table 1과 2 및 3과 같다.

從來의 破壞韌性 評價法에 따른 CVN衝擊試驗片과 粒界腐蝕試驗에 使用할 腐蝕 試驗片은 試驗材料로부터 Fig. 1과 같은 方法으로 採取하였다. CVN 試驗片은 10×10×55mm를 標準으로 하였으나 파이프치수의 制限으로 5×5×55mm로도 加工하였고, 노치는 開先角 45°, 半徑 0.2mm, 깊이는 10×10×55mm의 境遇 2mm로, 5×5×55mm의 境遇는 1mm로 加工하였다.

한편, 新材가 保存되어 있지 않은 材料는 650℃에서 3.5時間동안 維持시킨 後 空冷시키는 脫脆化熱處理⁽¹²⁾를 實施하여 新材로 代置하였다.

Table 1 Chemical composition (Wt, %)

	Symbol	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
1 $\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo	1P1	0.19	0.24	0.66	0.014	0.012	0.11	1.26	0.48	0.10	0.011
	1P2	0.16	0.74	0.59	0.010	0.017	-	1.43	0.49	-	-
	1S1	0.18	0.55	0.54	0.005	0.005	-	1.32	0.47	0.06	0.011
	1PK1	0.15	0.70	0.55	0.030	0.030	-	1.25	0.45	-	-
2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo	2P1	0.12	0.035	0.047	0.034	0.005	-	2.11	0.94	-	-
	2P2	0.10	0.30	0.40	0.032	0.005	-	2.18	0.95	-	-
	2S1	0.16	0.38	0.59	0.009	0.015	0.17	2.14	1.04	0.16	0.006
	2PK1	0.15	0.55	0.45	0.028	0.030	-	2.30	1.07	-	-
	2PK2	0.15	0.50	0.55	0.032	0.032	-	2.10	0.98	-	-

Table 2 Mechanical properties

Symbol	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in Area (%)
1P1	564	388	21.0	44.0
1P2	597	352	20.5	68.0
1S1	565	405	22.5	61.0
1PK1	588	294	-	-
2P1	620	448	-	-
2P2	610	445	-	-
2S1	823	686	20.3	76.0
2PK1	420	205	-	-
2PK2	430	220	-	-

Table 3 Service condition

Symbol	Service year	Temperature (°C)	Location of specimen
1P1	14	540	Inlet pipe of turbine
1P2	8	500	Reactor of oil refinery
1S1	1.5	500	Surveillance specimen
1PK1	14	510	2ry S/H of power plant
2P1	14	330	Outlet pipe of turbine
2P2	8	300	Outlet pipe of turbine
2S1	5	500	Surveillance specimen
2PK1	5	566	Platen S/H of power plant
2PK2	6.6	566	2ry S/H of power plant

2.2 實驗方法

(1) 衝擊實驗

使用材의 經年劣化 程度를 測定하기 위하여 살피 衝擊試驗을 行하였으며 試驗機는 容量 30kgf-m의 自動記錄型 衝擊試驗機 (instrumental impact test-

ing machine)를 使用하였다.

試驗溫度 範圍는 $-100^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ 이었고, 試驗은 ASTM E 23-72의 規程에 의하여 實施하였다.

(2) 粒界腐蝕法

粒界 腐蝕試驗에 使用된 試驗片은 實驗材의 外表面을 對象으로 하여 $10 \times 10\text{mm}$ 의 크기로 採取하여 에폭시樹脂로 固定하였다. 腐蝕할 表面은 研磨紙 (#1500까지)로 研磨한 後 粒徑 $0.05\mu\text{m}$ 의 alumina 研磨材를 使用하여 buff 研磨하여 鏡面 狀態를 維持시켰고, 腐蝕前에 超音波 洗滌器를 使用하여 充分한 脫脂 및 洗滌을 行하였다.

腐蝕液은 Cr-Mo鋼에 있어서 粒界에 析出된 不純物(주로 P)를 선택적으로 腐蝕시키는데 有用한 것으로 알려진⁽⁷⁻¹²⁾ 피크린酸 飽和水溶液을 使用하였다. 腐蝕液은 먼저 蒸溜水를 100°C 에서 充分히 加熱하여 脫氣시킨 後, 冷却하여 25°C 에서 피크린酸 飽和水溶液을 準備하고, 여기에 界面活性化劑인 sodium tridecylbenzene sulfonate를 1 gf 添加하여

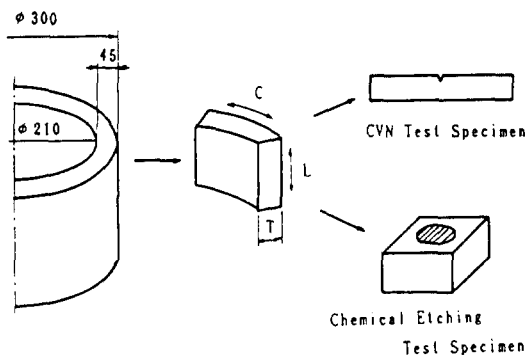


Fig. 1 Extraction procedure of specimen

만들었다.

腐蝕溫度는 $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 이었고, 腐蝕時間은 1分에서 300分까지의 範圍에서 여러段階로 하였다. 腐蝕表面은 生成된 腐蝕生成物을 깨끗이 水洗한 後 乾燥시켜 顯微鏡 觀察로 부터 粒界腐蝕度를 測定하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 破壞的인 試驗方法에 의한 材質劣化 評價

本 研究에서는 高溫에서 長時間 使用에 起因하는 經年材質劣化度를 從來의 破壞靱性評價法 中에서 CVN衝擊試驗 結果 破面의 50%가 延性破面을 보이는 延性-脆性遷移溫度(Ductile-Brittle Transition Temperature : DBTT) 즉 破面遷移溫度(Fracture Appearance Transition Temperature : FATT)의 高溫側으로의 移動量($\Delta FATT$)으로 定義하였다.

Fig. 2는 各各의 試驗材에 대한 脫脆化材와 劣化材의 CVN衝擊試驗에서 求한 吸收에너지의 溫度依存曲線이다. 여기에서 劣化材의 溫度依存曲線은 脫脆化材의 溫度依存曲線에 比하여 高溫側에 位置하고 있어 高溫에서 長時間 使用하게 되면 劣化함을 알 수 있다. 또, 高溫側으로의 移動量은 使用時間의 增加와 함께 增加하고 있음을 알 수 있다.

이는 高溫部材의 經年材質劣化가 使用時間, 使用溫度에 강한 依存性을 갖고 있으며, 磷等의 不純物元素의 粒界偏析量 및 炭化物의 粒內 또는 粒界析出量에 따라 微視的인 組織變化가 일어나는 程度가 다름을 나타내는 것을 알 수 있다. 各各의 試驗材에 대한 $\Delta FATT$ 를 Table 4에 整理하였다.

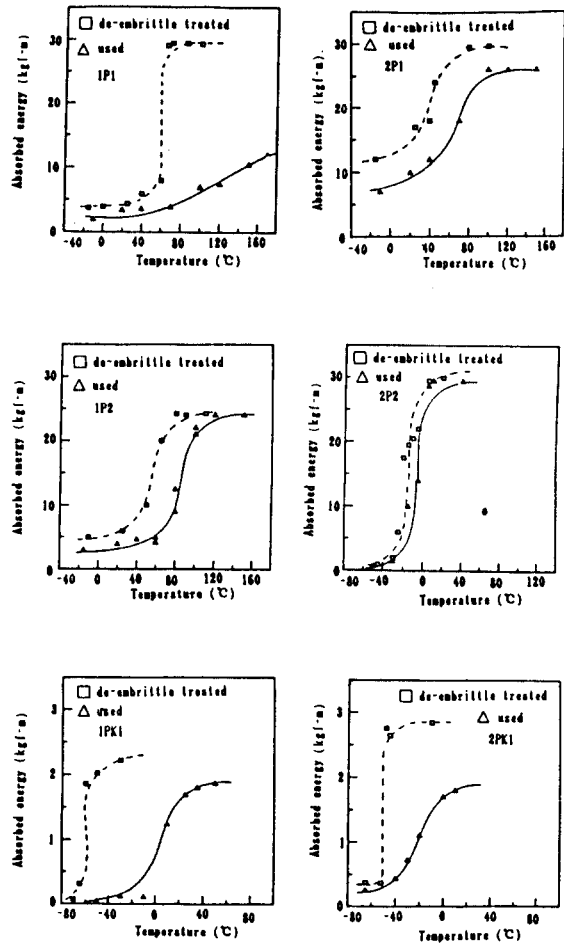


Fig. 2 CVN impact energy at various temperature for used and de-embrittle treated materials

Table 4 Results of CVN test and GEM

Symbol	$\Delta FATT$ ($^\circ\text{C}$)	Width of grainboundary (μm)	Ni/No	R_{max} (μm)
1P1	70	1.03	0.87	0.6
1P2	35	0.81	0.68	0.38
1S1	15	0.57	0.46	0.3
1PK1	68	1.04	0.85	0.62
2P1	20	0.71	0.55	0.35
2P2	7	0.37	0.49	0.25
2S1	60	1	0.74	0.5
2PK1	30	0.79	0.59	0.4
2PK2	40	0.93	0.67	0.4

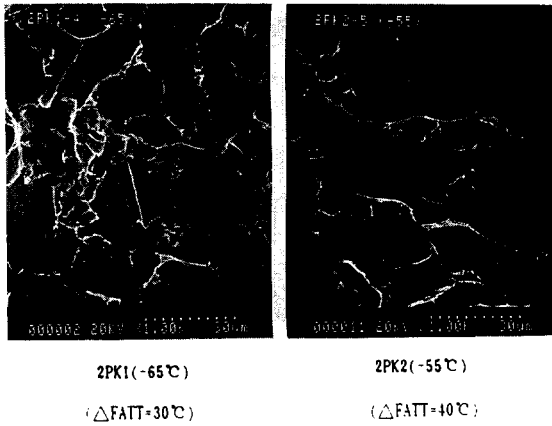


Fig. 3 Appearance of fracture surface by SEM

한편, Fig. 3은 CVN 충격시험片的 破面을 走査電子顯微鏡(HITACH, X-650)으로 觀察한 例이다. 破面形態를 觀察하여 보면 주로 粒內破面을 보이고 있으며 極少의 粒界破面을 볼 수 있다. 이를 보면 脆化程度가 큰 2PK2쪽이 2PK1에 比하여 試驗溫度가 높은데도 더 많은 脆性破面을 보이고 있어서 CVN 충격시험의 結果가 正當함을 確認해 주고 있다.

또한 粒內 및 粒界에 介在物 및 析出物이 많이 存在하고 이곳에서 破壞가 始作하고 있음을 確認해 주고 있다.

이러한 結果는 Cr-Mo鋼의 經年材質劣化는 不純物 元素와 炭素量, 微視組織等の 相互作用의 影響을 받고 있다는 報告⁽¹³⁾와 粒界에 단단한 第2相의 存在에 의해 粒內 스텝先端에 應力을 集中시킴으로 인하여 粒內破壞가 發生하기 容易하다고 主張⁽¹⁴⁾하는 것을 立證하는 結果라 생각된다.

3.2 非破壞的인 試驗方法에 의한 材質劣化 評價

Fig. 4는 劣化材와 脫脆化材의 腐蝕表面을 觀察한 寫眞으로 金屬顯微鏡과 走査電子顯微鏡 寫眞 모두 劣化材와 脫脆化材의 粒界腐蝕狀態에 顯著한 差異가 있음을 알 수 있다. 즉 劣化材의 境遇는 脫脆化材의 組織에 比하여 넓은 粒界를 보이고 있어서 不純物 元素의 粒界偏析量과 粒界腐蝕度 사이에는 相關關係가 있음을 알 수 있다. 또한 粒內析出物의 크기나 分布는 劣化材側에 크고 많이 存在하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 材質劣化도와 粒界腐蝕

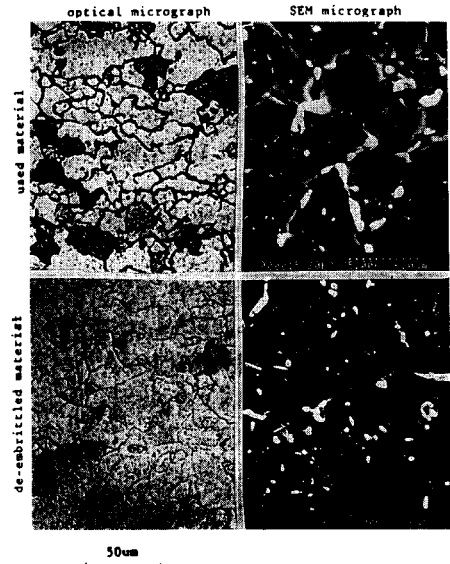


Fig. 4 Typical surface attack morphology revealed by the picric acid etch for used and de-embrittled material

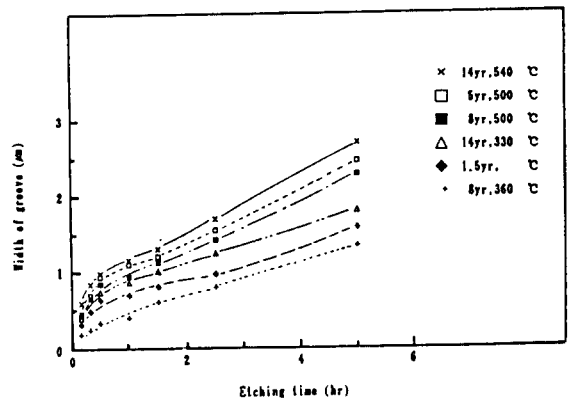


Fig. 5 Correlation between etching time and average width of grainboundary

度 사이에는 一定한 相關關係가 있을 것임을 豫測할 수 있다. 以後 腐蝕表面에서 얻어지는 여러 測定量과 材質劣化도의 關係를 살펴본다.

(1) 粒界腐蝕幅과 材質劣化

Fig. 5는 各 試驗材에서 測定된 粒界의 腐蝕幅을 腐蝕時間別로 定量的으로 整理하여 본 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 腐蝕程度는 腐蝕時間에 의하

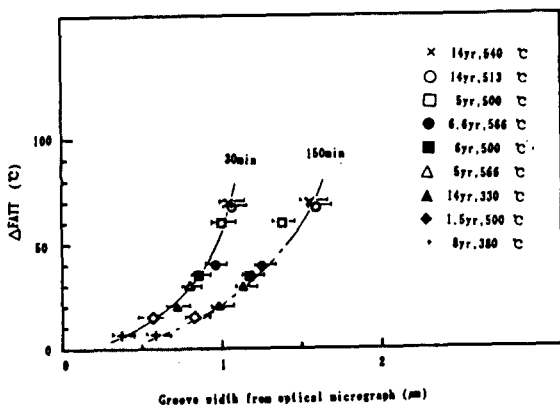


Fig. 6 Correlation between the $\Delta FATT$ and average width of grainboundary

여 증가하고 있으며, 30분까지는 腐蝕速度가 빠르고 30分以後에는 腐蝕이 緩慢하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 腐蝕時間 30分과 150分에서 檢出된 粒界腐蝕幅(μ)과 材質劣化度($\Delta FATT$)사이의 關係를 나타낸 것이다. 이 그림에서 粒界腐蝕幅과 材質劣化度 사이에는 좋은 相關關係가 있음을 確認할 수 있어서, 30分과 150分에서 각기 檢出된 粒界腐蝕幅을 比較하여보면 正確한 測定을 얻기 위해서는 150分쪽이 더 有利하지만 腐蝕表面이 全面腐蝕되며, 또 測定幅의 퍼짐이 커지고 있을 뿐만 아니라, 本方法을 現場 實機에 積極的으로 活用하기 위해서는 되도록 짧은 腐蝕時間이 要求된다. 이런 理由로 腐蝕時間은 30分이 最適時間임을 알 수 있었다. 한편 이 그림에서 粒界腐蝕幅과 材質劣化度 사이의 상관關係를 最小자승법으로 구하면 다음 식으로 표현된다.

腐蝕時間: 30分

$$\Delta FATT(^{\circ}C) = 34.98 - 125.48A + 151.57A^2$$

腐蝕時間: 150分

$$\Delta FATT(^{\circ}C) = 48.3 - 102.9A + 66.94A^2$$

[A: 粒界腐蝕幅(μm)]

이 식으로부터 粒界腐蝕幅의 測定에 의하여 材質劣化度を 推定할 수 있다.

따라서, 本 粒界腐蝕法이 高温器機의 經年材質劣化를 評價하는 일에 有效한 方法임을 알 수 있다.

(2) 粒界腐蝕 깊이와 材質劣化

粒界의 腐蝕도를 測定하는 方法에는 앞에서의 幅

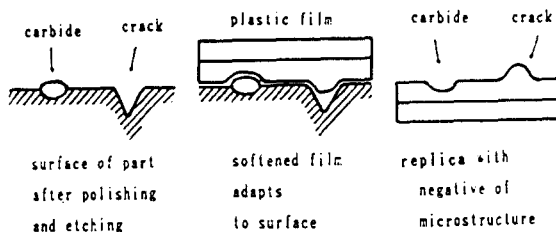


Fig. 7 Schematic diagram of replication

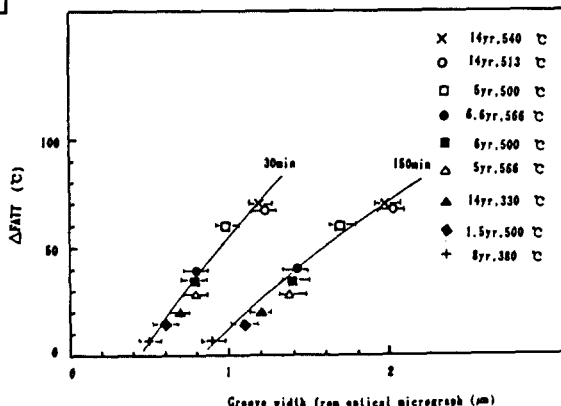


Fig. 8 Correlation between the $\Delta FATT$ and average width of grainboundary

과 더불어 腐蝕깊이를 測定하는 方法이 있다.

現在 粒界腐蝕 깊이를 直接 測定하는 方法은 없으나, 間接的으로 비이커스 壓痕을 基準으로 한 反復 研磨方法⁽⁵⁾과 레프리카(replica)의 表面거칠기 R_{max} 값으로 測定하는 方法⁽⁶⁾이 있다.

本 研究에서는 後者の 방법을 이용하여 Fig. 7과 같이 腐蝕 表面을 複製한 레프리카를 使用한 表面거칠기를 測定(SURFCOM 300, stylus tip $5 \mu m$, stylus force $4mV$)한 結果 劣化도가 클수록 最大表面거칠기 R_{max} 값이 크게 됨을 確認하였다.

Fig. 8에 腐蝕時間 30分과 150分の 境遇 다같이, 檢出된 레프리카의 最大表面거칠기 R_{max} 와 材質劣化度($\Delta FATT$) 사이에는 一定한 關係가 있음을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 앞의 粒界腐蝕幅과 마찬가지로 腐蝕時間 150分の 境遇가 30分の 境遇보다 R_{max} 값이 커지고 있어 測定이 便利할 것이나 짧은 腐蝕時間이 要求되는게 本方法임을 考慮할 때, 이 境遇도 腐蝕時間 30分에서 充分한 劣化度 評價가 可能함을 알 수 있었다.

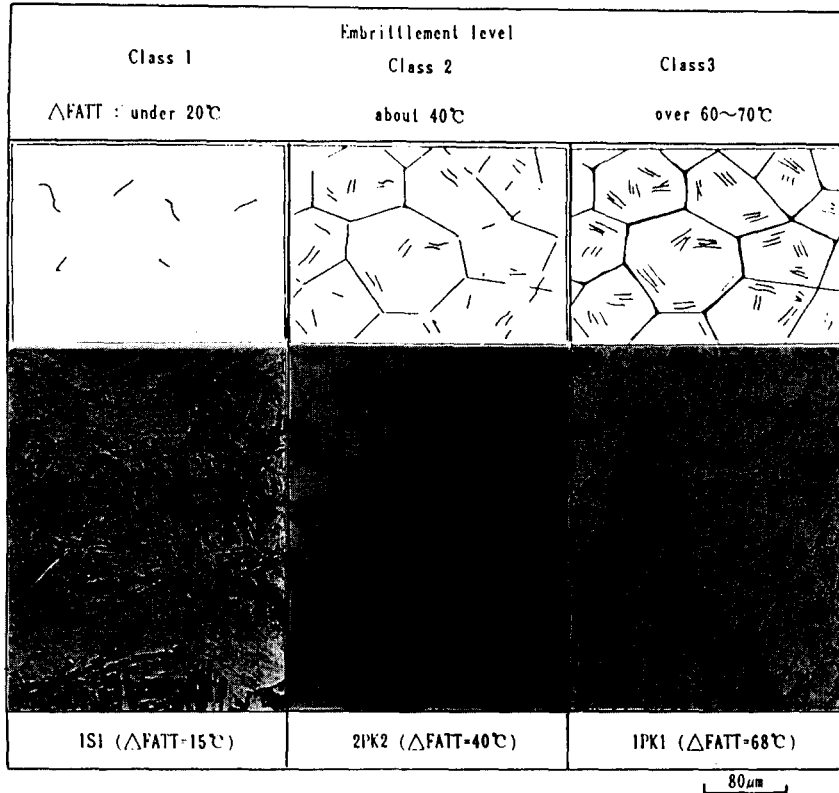


Fig. 9 Illustrative surface attack morphology changes with the ΔFATT (picric acid, 25°C, 30min)

이 그림에서 最大表面거칠기 R_{max} 와 劣化度 (ΔFATT)의 相關關係는 最小自乘法으로 구하면 다음식과 같다.

腐蝕時間 : 30分

$$\Delta FATT (^{\circ}C) = -62.27 + 315.42B - 153.55B^2$$

腐蝕時間 : 150分

$$\Delta FATT (^{\circ}C) = -65.36 + 171.4B - 38.59B^2$$

[B : 最大表面거칠기 (μm)]

따라서 레프리카를 利用한 粒界腐蝕 깊이의 간접 측정에 의해서도 材質劣化度の 推定이 가능함을 알 수 있다.

(3) 格子切斷比와 材質劣化

以上の 觀察에서 알 수 있는 바와 같이 粒界腐蝕 幅(μ)이나 粒界의 腐蝕 깊이(R_{max})는 材質의 劣化도와 一定한 相關關係를 가지고 있으므로, 腐蝕된 粒界의 幅과 깊이를 測定하는 것으로 劣化度の 評價가 可能하나, 이들 값을 測定한다는 것은 相當히 熟練된 技術을 要하는 作業이다.

그러나, Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 同一한 腐蝕條件下에서도 劣化度の 差異에 따라 粒界의 形成에 差異가 있음을 알 수 있다. 이에 着眼하여, 一定 腐蝕時間에 나타난 粒界를 定量化 하기 위하여 촬영된 顯微鏡寫眞의 一定한 面積위에 미리 定한 一定한 間隔의 格子와 交叉되는 粒界의 數, 즉 格子切斷比(Ni/No)를 셈하여 (Fig. 10) 劣化度 (ΔFATT)와의 相關關係를 살펴 보았다.

여기서 No 는 粒界가 完全히 나타날 때의 格子交叉數로 Nital腐蝕에 의해서 粒界를 나타내었다. Ni 는 標準腐蝕液으로 一定時間(possible 한 짧은 腐蝕時間이 效果的이다.) 腐蝕시켰을 때에 나타난 粒界가 格子와 交叉된 數이다.

Fig. 11은 Cr-Mo鋼을 피크린酸 標準腐蝕液으로 5分間으로 腐蝕시킨 다음, Ni/No 을 셈하여 이에 對應하는 材質劣化度 ΔFATT와의 相關關係를 살펴본 것이다. 測定值에 다소의 퍼짐은 있으나 하나의 直線으로 表示됨을 알 수 있다. 여기에서 格子

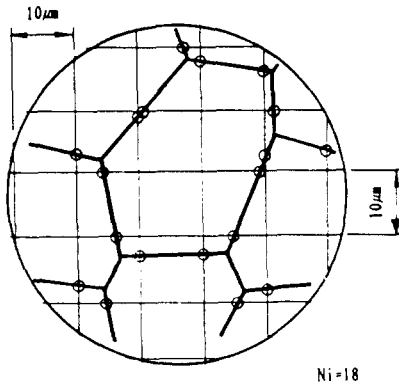


Fig. 10 Measurement method of Ni/No

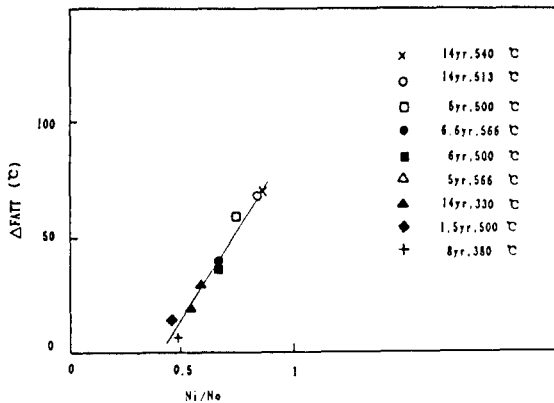


Fig. 11 Correlation between the $\Delta FATT$ and Ni/No

切斷比(Ni/No)와 材質劣化度($\Delta FATT$)사이의 相關關係는 다음식으로 表示된다.

$$\Delta FATT(^{\circ}C) = 153.7C - 62.43 \text{ (腐蝕時間: 5分)}$$

[C: 格子切斷比(Ni/No)]

따라서 이 方法은 짧은 時間에 比較的 簡便하게 劣化度를 測定하는 方法이 될 수 있어서 現場의 適用 可能性이 클 것으로 본다.

以上の 觀察을 통하여 現場實機에서 長時間 使用

된 Cr-Mo鋼을 對象으로 殘餘壽命과 關連된 材質劣化 評價技法中 非破壞的인 評價法의 開發을 目標로 粒界腐蝕法을 檢討하였다.

그 結果 材質劣化도와 粒界腐蝕度사이에 좋은 相關關係가 成立하고 있어서 粒界腐蝕法은 앞으로 多樣한 鋼種과 더 많은 데이터가 蓄積되면 經驗的인 經年材質劣化 評價技術로 確立되어 特殊한 裝置나 技術없이 現場實機에 適用할 수 있다고 생각한다.

4. 結 論

構造物의 殘餘壽命을 非破壞的으로 評價하는 技術確立을 目的으로 經年材質劣化의 主要 原因이 되고 있는 構의 粒界 偏析 檢出에 效果的인 特殊 피크린酸을 使用한 粒界腐蝕法과 從來의 材質劣化度 評價에 많이 使用되어온 CVN 衝擊試驗을 통하여 다음과 같은 材質劣化度 評價方法과 各 方法에 대한 實驗式을 提案하여 보았다.

(1) 材質劣化도와 粒界腐蝕幅 사이에 좋은 對應關係가 成立한다.

腐蝕時間: 30分

$$\Delta FATT(^{\circ}C) = 34.96 - 125.48A + 151.57A^2$$

[A: 粒界腐蝕幅(µm)]

(2) 表面거칠기를 使用한 粒界腐蝕 깊이의 間接的인 測定으로도 材質劣化도와 좋은 對應關係를 求할 수 있었다.

腐蝕時間: 30分

$$\Delta FATT(^{\circ}C) = -62.27 + 315.42B - 153.55B^2$$

[B: 最大表面거칠기(µm)]

(3) 粒界의 腐蝕 感受성을 利用한 一定 腐蝕時間에서의 粒界出現量 Ni/No와 材質劣化度 사이에도 一定한 相關關係가 있다.

腐蝕時間: 5分

$$\Delta FATT(^{\circ}C) = 153.7C - 62.43$$

[C: 格子切斷比(Ni/No)]

後 記

本 論文은 韓國科學財團의 研究費(891-0907-032-1) 支援과 韓國標準研究所의 協調에 의해서 이루어진 研究結果의 一部로 研究를 隨行할 수 있도록 支援하여 주신 財團과 研究所의 諸位에 感謝를 드리며, 또 物心兩面으로 助言과 協調를 아끼지 않으신 日本의 東北大學工學部 高橋秀明 教授 그리고

姫路工業大學의 野方文雄 教授에게 또한 感謝를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

- (1) 大南正瑛, 遠藤忠良, 吉川州彦, 北川正樹, 新田明人, 1987, “火力發電プラント의 餘壽命推定技術의 世界的動向”, 日本機械學會誌, 第90卷, 第833號, pp. 38~43.
- (2) 新谷紀雄, 1987, “高溫構造材料의 餘壽命豫測技術開發”, 鐵と鋼, 第73卷, 第9號, pp.13~19.
- (3) 大南正瑛, 1983, “高溫機器의 餘壽命豫測システムの開發”, 鐵と鋼, 第69卷, 第14號, pp. 19~25.
- (4) 新田明人, 1987, “高溫機器의 損傷檢出·評價”, 日本機械學會, 第544回 講習會教材, pp. 87~94.
- (5) Watanabe, J., et al., 1974, “Presented at the 29th Petroleum Mech. Eng. Conference”, Dalls, Sept.
- (6) McMahon, C.J., et al., 1980. “Elimination of Impurity-Induced Embrittlement in Steel”, Part. I. EPRI Report. NP-1501, Project RP 559. Sept.
- (7) 小倉次夫, 牧野彰宏, 増本健, 1981, “リン의 粒界偏析量分析法としての 粒界腐蝕法の檢討”, 日本金屬學會誌, 第45卷, 第10號, pp. 1093~1101.
- (8) 小倉次夫, 牧野彰宏, 増本健, 1981, “低合金CrMo鋼および二, 三의 鐵合金への 粒界腐蝕法の適用”, 日本金屬學會誌, 第45卷, 第11號, pp.1180~1186.
- (9) Brummer, S.M., Viswanathan, R., 1985, “In-Service Degradation of Toughness steam Turbine Rotors”, Trans of the ASTM. Vol. 107, pp. 316~324.
- (10) Brummer, S.M., Viswanathan, R., Richman, R.H., 1988, “Etching Technique for Assessing Toughness Degradation of In-Service Components”, International Conference Life Assessment and Extension. June. pp. 92~98.
- (11) Gould. G.C., 1972, “Temper Embrittlement of Alloy Steels” ASTM STP 499. pp.3~36.
- (12) 鄭世喜 外, 1987, “粒界腐蝕法による石油化學プラント用高溫器機의 經年劣化評價法”, 日本材料強度學會誌, 第22卷, 第3號, pp. 106~114.
- (13) McMahon, C.J., Cohon, Jr. M., 1965, Acta Metallurgical. Vol. 13, pp. 591~604.
- (14) Smith, E., Proc, 1966, Conference Physical Basis of Yield and Fracture 36. Inst. Phys. Soc. Oxford.
- (15) Brummer, S.M., et al, 1985, “Grain Boundary Composition and Intergranular Fracture of Steels”, Vol. 1, “Detection of Grain Boundary Segregation in Steels”, RD-3859, Project 2257-1, Final Report, EPRI, pp. 4-1~4-10.
- (16) 野方文雄 外, 1987, “粒界腐蝕法にあるプラント用高溫部材의 經年劣化評價法にフソて”, 非破壞檢査, 第36卷, 第8號, pp. 535~539.