

# 火力發電設備中 復水器管 適正運用 에 對한 考察

The Consideration for Proper  
Application of Condenser  
Tubes on the Thermal  
Power Plant

蔡 千 錫

韓電技術研究所 第 2 研究室長

## 1. 序言

火力發電設備中 復水器는 Turbine 設備의 附屬機器로 發電所 熱交換器中 重要な 位置에 있으므로 最近 石油燃料 確保의 困難 및 價格 上昇은 高効率 運轉 및 事故 없는 安全運轉等 補修, 管理, 運用, 問題는 發電原價에 重要的 影響을 미치고 있다

最近 單位 容量의 增加로 우리나라에서도 建設中인 三千浦 火力發電所(560MW)는 復水器 Tube 數가 43,574個(外徑 25.4mm 두께 1.24mm 길이 9,360mm 1個當)이나 되며 原子力 發電所의 大容量化에 따라 單位容量當 復水器 Tube 數는 漸次 增加趨勢에 있다.

이와같이 많은 量의 Tube 中 1個만 어떠한 理由로 漏泄되는 곳이 있으면 發電所 出力을 減發 또는 停止를 하며 補修를 하여야 하며 二次的 影響으로 Boiler Tube 事故의 原因과 다른 熱交換器의 運轉에 미치는 影響도 크다.

復水器는 거의 海水를 冷却水로 使用함으로써 海水로 因한 復水機管의 腐蝕問題가 重要的 問題로 대두되고 있어 이의 材質改善 및 運用方法에 對하여 世界 各國에서 계속 研究되고 있는 實情 이므로 그간 研究結果 및 實際 E. C. T(Eddy Current Tester)를 利用하여 設備診斷 結果等を 參考로 腐蝕原因 및 對策에 對하여 主로 記述하고 材質選擇, 運用管理 問題에 對하여 附記하고자 한다.

## 2. 復水器管 損傷原因 및 對策

火力發電所의 復水器는 冷却水로 거의 海水를 使用하기 때문에 復水器 Tube의 腐蝕에 依한 漏泄事故는 계속 문제점으로 대두되고 있으며 漸次 發電設備의 大容量化에 따른 그 使用 Tube數가 많아지고 우리나라도 急進的인 工業化에 따라 冷却水의 汚染度가 심해져 腐蝕 양상도 점차 여러가지로 나타내고 있다.

表 1은 1980年 全發電所 復水器를 E. C. T를 利用하여 設備를 診斷한 結果로 總 Tube 207,725個 中 81,062個를 點檢하며 7,357個가 腐蝕되음을 볼수 있어 腐蝕率은 9.1% 程度이다.

### 가. 局部的인 腐蝕形態

#### 1) Impingement Attack (漬蝕)

〈表 - 1〉 80年度 復水器點檢結果 腐蝕形態 (E. C. T)

발전소	Unit		총 Tube 수 량	점검량	腐蝕 形 態					기타
	Box				均一腐蝕	Deposit Attack	Ammonia Attack	Inlet Attack	Erosion	
부산T/P	3	1.2	14,000	6,320	341	49				2
군 산	1	A, B	9,100	4,550	77			138	105	
인 천	1	C, D	17,200	4,353	97	169		90	146	2
호 남	1	2	11,835	4,325	29	138		29	7	
서 울	4	A, B	8,340	4,620		10	119	48		
인 천	2	A,B,C	17,412	5,220	147	146		191	198	
여 수	2	1,2	22,300	6,850	20	168		46		
평 택	1	A, B	14,940	1,855		8		2		
제 주	1	A, B	1,960	1,960	66	18		19		
인 천	3	1,2	12,466	7,113		15	321	24	56	
울 산	3	1,2	20,900	6,382	5	101	81	39		1
부 산	1	A, B	6,240	6,008	70	156	178	198		
인 천	4	1,2	14,466	6,950		37	289	25	32	
부 산	4	1,2	14,000	4,822	936	113	131			
남 제 주	1	1,2	1,724	1,724	44	7		130		
울 산	1	1,2	20,900	6,286	256	210	390	422		
남 제 주	2	1,2	1,724	1,724	12	12		443		
계	17	33	207,725	81,062	2,098	1,357	1,509	1,844	544	5

Impingement Attack은 流体의 衝擊에 依하여 保護皮膜이 機械的으로 벗겨지는 部分에 金屬이은 濃淡電池에 依하여 腐蝕이 일어난는 現象이다.

一般的으로 亂流가 일어나기 쉬운 部分 即 水室內나 管 入口部 또는 管의 屈曲部와 冷却水의 흐름이 過大한 경우 空氣泡의 混入이 있을 경우 등에 많이 發生한다.

특히 入口部位에 생기는 Impingement Attack를 Inlet Attack이라 한다.

海水에 對한 各種 銅合金管의 限界 流速은 學者들間에 多少 異見이 있으나 이는 皮膜의 狀態 또는 水質 變動(물의 ion조성, 공기량, 水中의 固形物質, 水温) 冷却水의 흐르는 形態等에 依하여 變動되나 海水를 使用하는 경우 보편적인 流速은 2 m/s前後이다.

表2는 各種 銅合金管의 限界 流速을 表示한다.

Impingement Attack은 保護皮膜의 安定성과 化學的인 因子等에 영향을 받는다.

銅合金은 海水나에서 表面에 얇은 腐蝕 生成物이 생겨 그것이 保護皮膜의 作用을 한다.

따라서 人工的으로 黃酸第一鐵을 少量 여전에 따라 주입하여 皮膜形成에 많은 效果를 보고 있다.

Inlet Attack이 發生되는 때는 電氣防蝕 또는 黃酸第一鐵을 注入하거나 Insert Tube를 挿入 하거나 하며 腐蝕을 억제하는 例도 있다.

Insert Tube 材料로는 Titanium, 합성수지 등이 있으며 先端에 급격한 段이 생기지 않도록 얇게 하며 密着시키는데 注意가 필요하다.

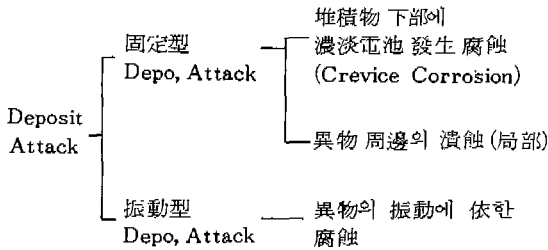
嶺東火力 第1號機는 Inlet Attack이 發生하였으나 Insert Tube를 挿入하여 큰 效果를 보았다.

〈表-2〉銅合金管의 限界流速(耐蝕性考慮) m/sec

管 材 料	濃蝕發生臨界流速	設計上의 限界流速		
		Mclaughlin	Bulow	Tracy
銅	1.8	0.9	0.9	-
Silcon - Brass	2.1	0.9	0.9	0.9 ~ 1.2
Admiralty - Brass	3.0	1.4	1.8	1.5 ~ 1.8
Al - Brass	4.5	1.8	2.7	2.1 ~ 2.4
10% Cupronickel	4.5	1.8	2.4	2.4 ~ 3.0
30% "	4.5	1.8	4.5	3.0 ~ 3.6

2) Deposit Attack

Deposit Attack는 冷却管에 流入한 異物에 依하여 發生하는 腐蝕으로 發生 形態는 아래와 같다.



固定型 Deposit Attack은 管壁에 固定된 異物로 因하여 腐蝕되는 濃蝕과 堆積物의 下部에 濃淡電池 作用에 依하여 腐蝕되는 隙間腐蝕의 두 種類가 있으며 異物이 水流의 振動에 依하여 管表面의 保護皮膜을 반복 충격 또는 磨擦等에 依한 振動型 Deposit Attack이 있다.

海水를 冷却水로 使用하는 管에서는 Self Healing Protective Film이 形成되나 異物流入 即 조개류, 나무조각, 미역, 비닐 등에 依하여 局部 濃蝕을 일으키니 取水部의 異物流入 防止施設 및 염소注入이라든지 防汚塗料 등에 依하여 水路內의 生物번식을 억제하고 逆洗等으로 管內에 異物이 남아 있지 않도록 하여야 한다.

3) Sand Erosion

復水器管에 使用되는 冷却水에 浮遊物 即 浮遊되어 있는 모래가 機械的인 作用에 依하여 皮膜을 破壞하여 損傷을 일으키는 것을 Sand Erosion 이라 하며 海水中 最大 限界値는 約 30ppm으로 30 ~ 25,000ppm의 경우 即 모래의 含有量이 많을수록

Erosion 現象은 심하며 淡水中에서 더욱 크며 모래의 직경이 클수록 심하게 일어나고 250 $\mu$ 인 것이 50 $\mu$ 보다 5~8배 더 管內面 保護皮膜을 侵蝕시킨다.

群山火力 및 영동火力等은 Sand Erosion의 代表的인 例이며 入口管에 保護管 取附 및 모래 流入 防止 施設과 陰極防蝕施設 管理를 철저히 하여 Erosion을 防止함이 바람직하다.

4) Ammonia Attack 및 其他 腐蝕

Ammonia 腐蝕은 復水器의 Air Cooling Zone에 集中的으로 發生하는 것으로 Boiler의 高壓化가 됨에 따라 Hydrazine이나 Ammonia 性分等 PH조절 등 의 目的으로 使用한 藥品에 依하여 發生하므로 防止策으로는 耐 Ammonia性 材質을 使用함이 바람직하며 嶺東火力2號機나 平澤火力에는 Air Cooling Zone에 Titanium Tube을 使用하고 있으며 다른 復水器도 腐蝕狀態를 考慮, 耐 Ammonia性 材質 使用를 檢討하는 것이 바람직하고 Titanium Tube에는 管板의 防蝕이나 Titanium Tube의 水素吸水를 考慮, 管板의 防蝕電位를 適正值(-500mV ~ -750mV S. C. E)의 範圍를 保持하는 것이 필요하다.

사진1은 전형적인 Ammonia Attack 現象을 나타낸다.

其他 腐蝕으로는 Turbine 排氣가 直接 衝突하는 部位 即 蒸氣의 高速衝擊作用에 依한 腐蝕으로 이 排氣는 蒸氣中에 微粒水飮이 含有되어 있다고 볼 수 있으며 管이 外部 振動源이나 共振現象에 依하여 振動 接觸의 反復으로 保護皮膜이 點狀으로 破壞되어 局部電池 腐蝕을 招來하여 點蝕이 發生하



〈사진- 1〉復水器 Air Cooling Zone의 Ammonia Attack

는 경우도 있고 熱交換器의 冷却水側에 깊은 孔蝕現象이 發生하는 것을 熱點腐蝕(Hot Spot Corrosion)이라 하며 이는 高溫部와 周邊部間에 電氣化學的反應에 의한 것으로 發生原因은 管壁 溫度가 局部的으로 上昇하는 경우와 冷却水에 氣泡가 管壁에 附着하여 Hot Spot의 原因에 의한 경우 流速이 대단히 느린 경우 등으로 防止策으로는 管内流速을 增大시키고 被冷却體 入口에 Baffle Plate 을 設置하여 局部的인 溫度上昇을 막아야 하며 그림 1은 銅合金의 熱點腐蝕과 流速의 影響을 나타낸다.

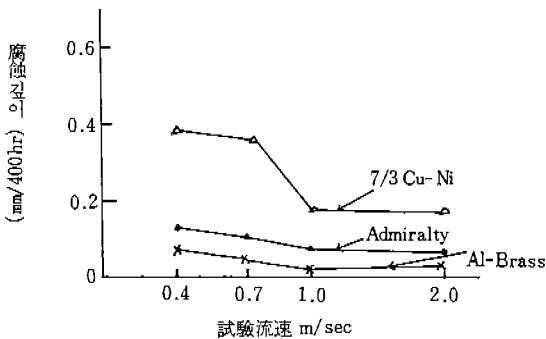
나. 全面腐蝕

一般腐蝕 또는 均一腐蝕으로 保護皮膜 形成에 缺陷이 있거나 冷却水가 汚染되면 冷却水 全管에 걸쳐 腐蝕이 發生하는 現象으로 孔蝕깊이가 대개 新材管 두께의 10% 以下일 때를 말한다.

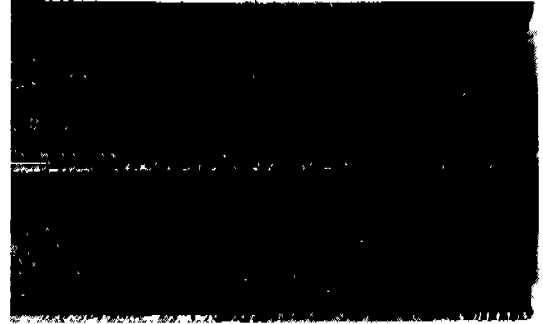
사진 2는 全面腐蝕型態를 나타낸다.

1) 汚染 海水에 의한 腐蝕

一般的으로 銅合金은 淸淨海水에는 강한 耐蝕性 皮膜을 形成하는 性質을 가지나 大都市 近海의 汚



〈그림- 1〉銅合金의 熱點腐蝕과 流速의 影響



〈사진- 2〉復水器 Tube 全面腐蝕型態

染海水에는 甚한 腐蝕이 發生한다.

汚染海水의 腐蝕의 主要因子는 硫化物로서 硫化物은 汚染源에 의한 海水중에 흘러 들어오는 有機物이 海水의 용존산소를 消費하여 發生한다.

汚染海水와 淸淨海水를 比較하면 다음과 같은 特徵이 있다.

- ① PH는 淸淨海水의 8.0~8.3에 比하여 낮다.
- ② 溶存酸素는 淸淨海水의 5~7倍 以上이나 汚染海水는 낮다.
- ③ 淸淨海水中에는 硫化物은 存在하지 않으나 汚染海水中에는 檢出되는 경우가 있다.
- ④ Ammonia ion은 淸淨海水中에는 0.01ppm 程度이거나 그 以下이나 海水가 汚染되면 增加한다.
- ⑤ 化學的 酸素 消費量(C. O. D)이 淸淨海水에서는 2~4 ppm이나 汚染海水에서는 增加한다.

汚染海水에 依하여 甚한 腐蝕이 發生되는 곳은 嶺南地域의 嶺南火力 1號機, 釜山, 馬山火力 等이다.

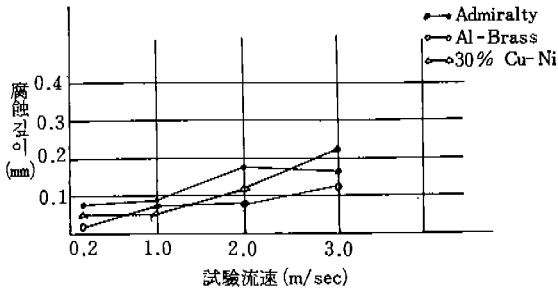
防止對策으로는 耐蝕性 材料를 選擇, 使用하고 初期 皮膜成에 유의 防蝕效果를 얻으며 Sponge Ball Cheaning을 實施, 부식촉진 媒体를 除去함이 重要하다. 汚染海水에 依한 耐蝕性 比較를 그림 2에 表示한다.

다. 應力腐蝕 및 腐蝕疲勞

應力腐蝕 Crack은 純金屬에서는 거의 發生되지 않고 合金에서 發生한다.

應力과 腐蝕이 週期的으로 同時에 作用하면 腐蝕疲勞가 일어난다.

振動이 있는 部位는 皮膜이 破壞되면 皮膜의 再生이 늦어져 腐蝕이 進行되며 孔蝕이 發生되기 쉽고 따라서 管製作時 熱處理가 不充分 하여 内部應力이 存在한다든가 外部에서 引張力 또는 週期的인



〈그림-2〉微量의 硫化物을 含有한 海水中の 銅合金 耐蝕性 (27~33°C에서 644時間)

應力이 걸리는 管은 破斷되는 일이 있다.

특히 Ammonia나 이들 化合物이 作用하면 應力 Crack이 發生되고 管의 擴管部에서 橫方向의 Crack이 간혹 나타나기도 하며 汚染海水에서 腐蝕은 더 甚하다.

防止對策으로 組立中에 發生하기 쉬운 外部應力과 運轉中 發生하기 쉬운 振動 및 管材의 製作時 殘留應力 제거 등에 注意가 必要하다.

### 3. 立地 環境에 따른 復水器管 適正 材質選擇

復水器管은 初期에는 銅合金만이 쓰여져 왔다. 即 淡水에는 Admiralty, 海水에는 Al-Brass 나 10% Cupro Nickel 管이 使用된다.

1960年頃부터 담수용으로 美國에서는 18-8 Stainless 鋼管이 使用되고 1970年頃 부터는 銅合金管이 汚染海水 腐蝕對策 및 空氣冷却部의 Ammonia Attack 對策으로 Titanium 管이 使用되고 있다.

銅合金 復水器管은 그간 꾸준히 材質의 改良과 防蝕法의 改善等을 施行하여 왔고 Al-Brass 管에 皮膜形成을 目的으로 鐵이온 注入에 의한 防蝕法을 實施하였다.

그러나 鐵 이온 주입은 環境保存面에서 제약을 받아 시행상 어려움이 뒤따르고 있다.

復水器管의 最適材料 選擇은 海水에 對한 耐蝕性을 主眼點으로 水質, 물처리, 土砂含有關係, 環境 구제 및 防蝕과 오염방지 부대설비 등의 適用事項等을 考慮하여 選定하여야 한다.

다음 表3은 復水器管의 化學的 性分을 表示하고 表4는 立地環境에 따른 適正材質을 表示한다.

〈表-3〉復水器管 材質別 化學的 性分

性分 材質	Symbol	Cu	Al	Pb	Fe	Zn	As	Sn	Si	Ni	Mn	Remark
Admiralty	Bs PF <sub>1</sub>	70.0 ~73.0		Max 0.07	Max 0.06	R	0.02 ~0.10	0.8 ~1.2				
	Bs PF <sub>2</sub>	76.0 ~79.0	1.8 ~2.5	Max 0.07	Max 0.06	R	0.02 ~0.08		0.2 ~0.5			
Al-Brass	Bs PF <sub>3</sub>	76.0 ~80.0	1.8 ~2.5	Max 0.07	Max 0.06	R	0.03 ~0.10			0.2 ~1.0		
	Bs PF <sub>4</sub>	76.0 ~79.0	1.8 ~2.5	Max 0.07	Max 0.06	R	0.02 ~0.10					
Ap-Bronze	A P <sub>2</sub>	R	0.7 ~1.3	Max 0.1				7.0 ~9.0	0.1 ~0.3			
Cu-Ni	CNT F <sub>1</sub>	R		Max 0.05	1.0 ~1.8	Max 1.0				9.0 ~11.0	Max 1.0	
	CNT F <sub>2</sub>	R		Max 0.05	0.5 ~1.0	Max 1.0				19.0 ~23.0	Max 1.0	
	CNT F <sub>3</sub>	R		Max 0.05	0.4 ~0.7	Max 1.0				29.0 ~33.0	Max 1.0	
Modified Cu-Ni	X-78	R			2.5					10.0	Max 1.0	
	X-79	R			3.0					15.0	Max 1.0	
	X-80	R			3.5					20.0	Max 1.0	

〈表-4〉 立地環境에 따른 適正材質

材質名	使用條件	備考
Admiralty	淡水에 使用	漬蝕發生等 耐蝕性 부족
Al-Brass	淸淨한 冷却水, 輕微한 砂含有	傳熱性이 좋다. 一般的으로 많이 채택
10% Cu-Ni	Sand Erosion 및 耐 Ammonia 性이 경미하게 要求되는 곳	Al-Brass에 비해 高價로 耐蝕에 比하여 高價
30% Cu-Ni	淸淨한 冷却水, 砂 多小 含有, 耐 Ammonia 이 要求되는 곳	汚染海水에는 Al-Brass 보다 腐蝕速度가 빠르다
Modified Cu-Ni	30%-Cu-Ni 使用條件과 비슷하며 特히 入口 Inlet Attack 發生 및 Sand Erosion 억제 必要한 곳	熱處理法 改善으로 임계 剪斷應力이 높음
Ap-Bronze	汚染海水에 對한, 耐蝕性이 있어 汚染海水 地域에 使用	Al-Brass 보다 高價
Titanium	淸淨海水, Ammonia 腐蝕이 發生 가능한 곳	耐蝕性이 극히 優秀하고 汚染海水에도 耐蝕이 있다. Galronic Attack 發生 우려가 있다.

#### 4. 復水設備의 初期運轉 및 維持

復水器管의 冷却海水에 對한 耐蝕性은 金屬表面의 保護皮膜에 좌우되므로 使用初期 不注意로 早速 漏泄 事故가 發生하는 例가 있으므로 다음 事項을 考慮 試運轉에 들어감이 바람직하다.

- 1) 通水前에 水路淸掃: 工事中の 異物, 콘크리트 小石, 土砂 木片等을 完全淸掃
- 2) Screen, Strainer 等の 設備을 完備하여 復水路에 異物流入 防止
- 3) 第1鐵 이온 注入(銅合金 鋼管): 早期 良好한 保護皮膜을 形成하여 防蝕할 수 있도록 初期 第1鐵 이온 注入 實施
- 4) 冷却管의 管端部 및 管板의 腐蝕防止를 위하여 電氣防蝕 實施
- 5) 水路中 長期間 汚染된 停滯水를 排除하여 保護皮膜 形成의 阻害要因 除去
- 6) 海產物 繁殖防止를 爲하여 塩素處理 實施
- 7) 管内의 點檢 및 淸掃을 定期的으로 實施하여 防蝕 處理有效 確認 및 管内 停滯物 有無 確認
- 8) 通水 初期는 各種 試驗等으로 低流速 運轉의 例가 있으나 海產物의 管内 附着이 용이하여 管에 惡影響을 미치므로 正常流速·運轉이 必要하다.

#### 5. 結言

復水器 Tube의 漏泄로 인한 事故 防止는 損傷 原因을 把握하며 適切한 對策 樹立과 維持 管理가 必要하다.

建設時 周圍 環境에 따른 材質 選擇 및 補助 設備을 設置하고 試運轉 初期 부터 保護皮膜 育成 및 腐蝕 防止에 努力하여야 하며 運轉中 定期的으로 E. C. T. C (渦電流 探傷器) 測定을 實施, Tube 의 經年變化 狀態를 調査, 補修 計劃을 樹立하고 特히 효율히 할 수 있는 防蝕 設備의 點檢 및 維持 管理에 留意하여 復水器管의 壽命延長 및 運轉中 負荷 減發 또는 發電停止 하는 例가 없도록 하여 熱效率 向上 및 系統運轉에 信賴性을 부여함이 바람직하다.

#### 參 考 文 獻

1. 韓電 技術研究所: 研究所報 第13號 14號 15號
2. 任友輕金屬工業會社: 火力 原子力發電誌 投稿 論文 別刷
3. 神戶製鋼: 熱 交換用 銅合金管材料의 腐蝕 事例と 防止對策
4. A. W. PEABODY: Control of Pipeline Corrosion 1978
5. 防蝕技術: 復水器의 分極特性 25. 611-617 (1976)
6. 田部善一 流水中의 砂による 復水器管用 銅合金의 埃蝕 SUMITOMO. 1978.