

原子力發電所에서의 蒸汽循環 (Steam Cycles in Nuclear Power Plants)

技術解説

16-5-2

盧 潤 來*
(E u n r a e R o h)

20世紀로 접어들면서 化石燃料의 價格이 上昇함에 따라 技術的인 難問題의 解決과 더불어 在來式 發電所의 蒸汽壓과 溫度도 上昇케 되었다. 그러나 原子力發電所에 있어서는 그 燃料價格이 低廉할뿐 아니라 앞으로 10年間에 더욱 低下될 展望이므로 높은 蒸汽壓과 溫度를 갖는 在來式 火力發電所와는 反對의 傾向을 띄게 될 것이다.

現在 大部分의 原子力發電所에서 보듯이 그 蒸汽條件은 30~40年前의 化石燃料 發電所의 蒸汽條件과 거의 같다. 이와같은 蒸汽條件으로 인한 熱效率의 低下로 原子力을 發電에 應用함에는 困難이 隨伴하는 것이 事實이지만 다음과 같은 두개의 重大한 要件을 考慮치 않으면 안된다.

現 輕水爐에 加해지는 蒸汽溫度의 制限은 技術上의 問題가 아니고 經濟上의 理由에서 取해진 事實.

原子力發電所에서의 蒸汽循環은 化石燃料 發電所와는 달리 熱을 煙道로 보내지 않으므로 어느 程度로 不良한 蒸汽條件을 補償한다는 事實.

〈표 1〉 化石燃料 및 原子力發電所의 發電原價 比較*

	化石燃料發電所 (Mills/KWh)	原子力發電所 (Mills/KWh)
固 定 費	1.57	2.04
燃 料 費	2.35	1.66
O & M	0.42	0.55
合 計	4.34	4.25

* Oyster Creek 原子力發電所(515 MWe)의 報告를 參照한 것임.

앞으로 10年間 原子力産業界의 主任務는 原子力發電所의 建設單價를 보다 低下시키는 일일 것이다. 燃料價格의 相對의 重要性이 增加되면(표 1 參照) 原子力發電所의 蒸汽壓과 溫度를 上昇시키려는 努力이 傾注될 것이다.(표 2 參照)

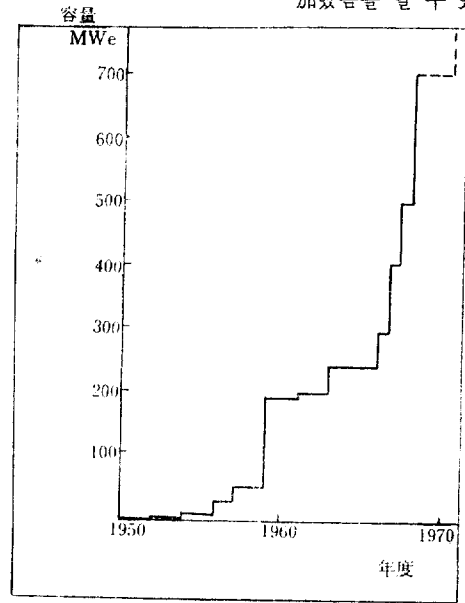
原子力發電所의 單位容量이 漸次 增大되어 오늘날 700~800 MWe 發電所가 發注되고 있으며(그림 1 參照) 1,000 MWe 級의 概念設計도 各 研究機關이나 製作會社에서 試圖된바 있다. 또한 效率도 給水加熱을 여러 段階로 하여 濕氣를 分離하고 再熱 方法等을 使用하므로써 向上

* 正會員: 韓國電力 技術部

〈표 2〉 蒸汽條件 改善으로 調整된 發電原價 比較*

調 整 內 容	化石燃料 (Mills/ KWh)	原子力 (Mills/ KWh)
固定費(1.15/1.07率로 增加)	1.69	2.20
燃料費(1.00/1.07率로 減少)	2.19	1.55
O&M(1.00/1.07率로 減少)	0.39	0.51
合 計	4.27	4.26

* 原子力 發電所가 在來式 火力發電所보다 固定費가 높고 燃料費가 낮으므로 熱效率을 改善하기 爲하여 建設費를 增加함은 經濟的 理由로 不合理하다. 例컨대 표 1의 Oyster Creek 에서 發電所 效率을 7% 增加시키려면 建設費는 15% 더 要한다. 그 結果는 표에서 보이듯이 化石燃料인 경우 0.07 Mill/KWh의 發電原價가 低下되었으나 原子力인 경우에는 오히려 약간 增加했음을 알 수 있다.



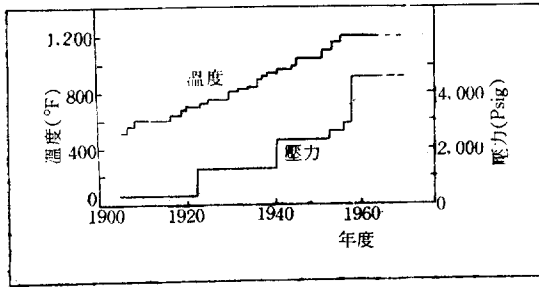
〈그림 1〉 原子力發電所의 容量增加傾向

시킬 수 있다. 다만 原子力發電所의 蒸汽條件을 改善하는데 障礙가 되는 것은 適當한 材料의 開發인데 이는 過去 在來式 發電所에서 經驗한 것과 꼭 같은 것이다.

1. 化石燃料 發電所

化石燃料을 使用한 在來式 汽力發電所에서 蒸汽壓과

溫도의 上昇에 따른 發展過程을 보면 그림 2와 같다. 이와같은 發展은 주로 良質의 材料開發, 加工技術의 改善 및 質의 向上에 其因한다. 現在의 最高 蒸汽溫度는 1,100°F로 制限되고 있는데 이는 材料와 高溫에서 稼動될 構成材料의 加工費가 비싸기 때문이다. 따라서 4~5年前만 해도 4,500 psi 까지 達한 蒸汽壓이 現今에는 3,500 psi로 減少되고 있다.

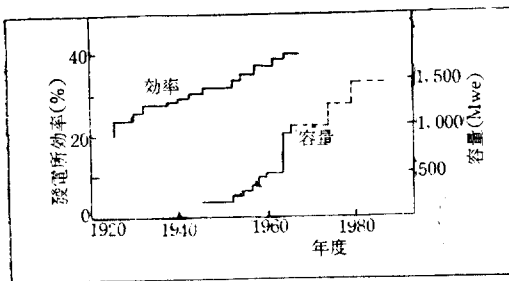


〈그림 2〉 化石燃料量 使用하는 汽力發電所에서 最大蒸汽溫도와 壓力的 變遷過程

蒸汽條件의 改善과 더불어 그림 3과 같이 터빈 發電機의 容量도 增大되어 왔는데 1980年代에 豫想되는 最大 單位 容量은 1,500 MWe가 될 것이다.

蒸汽條件의 改善과 容量의 大型化에 따라서 發電所의 效率도 增加되었는데 그 傾向은 그림 3과 같다. 燃料費가 低廉하여 餘分의 建設費 投資가 許用되는 경우에는 二重의 再熱 및 給水加熱의 多段化가 可能한 것인데 이는 오로지 效率의 增加를 爲함이다.

美國의 聯邦動力委員會(Federal Power Commission)가



〈그림 3〉 發電所의 容量과 效率의 增加傾向

〈표 3〉 各種原子力發電所의 蒸汽循環에 對한 數值

原 子 爐	一次側溫度 (°F)	蒸汽壓 (psig)	蒸汽溫度 (°F)	排汽壓 (in Hg)	給水加熱段數	再熱段數	水分分離段數	效率 (Net %)	熱出力 (MWt)	爐型	正味發氣出力 (MWe)	備 考
Peach Bottom	1,380	1,450	1,000	1	4	—	—	34.6	115	gas	40	
Bonus	540	865	900	2	4	—	—	32.6	50	BWR	16.3	內部核過熱
Oyster Creek	540	965	540	1	5	2	1	32.5	1,640	BWR	540	
San Onofre	593	650	495	1.5	5	1	1	31	1,347	PWR	429	

1964년에 發表한 美國內電力調查(National Power Survey)에 依하면 다음과 같은 內容으로 在來式 汽力發電所의 蒸汽條件에 對하여 言及하고 있다.

『오늘날 350 MW 또는 그 以上の 容量을 갖는 汽力發電所에서 經濟적으로 可能한 最大 蒸汽條件은 二重의 再熱로서 壓力 3,500psi와 溫度 1,000~1,050°F이다. 最近의 特殊한 경우에는 上記 條件이 經濟적으로 不合理한 것으로 判明되고 있긴 하다. 1980年이나 或은 그 以前에 5,000 psi의 壓力과 1,200°F의 溫度를 갖는 蒸汽가 高燃料價 地域의 特殊한 大容量 發電所에서 充分히 考慮될 수 있을것이지만 在來式 發電所에서 3,500psi와 1,050°F를 超過하는 경우 熱消費率(heat rate)의 利得은 急激히 減少된다.

『오늘날 1,100~1,200°F, 5,000psi에서 使用될 蒸汽發生設備의 特性을 滿足시킬만한 材料는 充分히 獲得될 수 있으나 그 壽命이 制限되어 있고 또한 價格이 매우 높아 現在에는 經濟의 理由로 使用될 수 없다. 그러나 現在까지 얻은 經驗과 將次의 새로운 研究로 앞으로 10年 以內에 上記 條件에 符合되는 金屬材料의 價格은 實用될 수 있도록 充分히 低下될 것이다.』

2. 原子力發電所

오늘날 原子力發電所의 蒸汽循環은 過熱과 飽和의 二重으로 區分된다.

飽和蒸汽 發電所란 現在 가장 많이 開發되고 있는 輕水爐의 大部分을 찾아하고 있는 것으로 그 代表的 例를 들면 Connecticut Yankee(PWR)와 Oyster Creek(BWR)이다.

過熱蒸汽 發電所에는 다음과 같이 三種으로 設計되고 있다. 即 (1) Pathfinder와 Bonus로 代表되는 沸騰輕水內裝過熱(boiling-water integral-superheat); (2) 冷却材의 特性上 獨立된 熱交換器內에서 過熱에 要하는 高溫을 許用할 수 있는 경우(例컨데 液體金屬冷却 Fermi爐, 有機冷却 Piqua爐, 或은 氣體冷却 Peach Bottom爐) (3) Elk River 또는 Indian Point와 같이 原子爐에서 나온 飽和蒸汽가 獨立된 化石燃料加熱 熱交換器內에서 過熱되는 경우이다.

現在 稼動中이거나 或은 豫定된 原子力發電所中에서 代表的 例를 熱效率順으로 보면 표 3과 같다.

原子力發電所에서의 蒸氣循環

Conn. Yankee	587	640	493	2	5	4	4	31	1,474	PWR	463	
Malibu	587	660	497	2	5	1	1	31	1,473	PWR	463	
Hallam	945	800	825	1.5	2	—	—	31.6	240	Na	76	
Pathfinder	489	555	825	1.5	4	—	—	31	189	BWR	62	
Dairyland	577	1,265	574	2	2	1	1	30.5	165	BWR	50	
Elk River	537	615	825	1.5	1	—	—	30.2	58.2	BWR	22	石炭過熱
Fermi	800	576	760	1	4	—	—	30	200	Na	60	高速增殖
Big Rock Pt.	551	1,015	546	1.5	3	—	—	30	157	BWR	50gr	
Dresden	547	965	540	2.5	10	—	—	29.4	626	BWR	184	
Yankee	533	453	460	1.5	3	—	—	29.1	485	PWR	140	
Hum. Bav	549	1,045	549	3.5	2	—	1	29	165	BWR	48.5	
SELNI	545	500	486	—	—	1	1	28.4	615	PWR	175	
AVR	1,562	1,029	941	1.5	3	—	—	27	49	gas	13.2	
Shippingport 2	565	600	486	1.5	3	—	1	27	505	PWR	150	
Shippingport 1	538	600	486	1.5	3	—	1	26	231	PWR	60	
Indian Pt.	519	420	1,000	1	5	—	—	25.8	585	WWR	151	重油過熱
Piqua	575	441	550	1.5	—	—	—	25.1	45.5	org.	11.4	
SM-1A	448	213	425	2.43	1	—	—	24.5	20.2	PWR	1.64	
EBWR	490	575	482	1.25	0	—	1	22.5	100	BWR	4.5	
VBWR	547	1,000	540	—	2	—	—	20	50	BWR	10.0	
SM-1	448	213	425	2.43	1	—	—	18.6	10	PWR	1.8	
CalderHall	644	245	599	—	0	—	—	18.2	225	gas	41	
PW-3A	479	300	417	9	2	—	—	16.7	9.51	PWR	1.5	
PM-1	479	300	417	9	2	—	—	14	9.37	PWR	1.0	
R-3	428	200	385	5	2	—	—	14	120	D ₂ O	9	

3. 蒸氣溫도의 限界

化石燃料을 使用하는 在來式 汽力發電所나 또는 原子力發電所에서 蒸氣溫도를 最高로 올리는 것은 技術이 用하는 限界內에서 經濟性을 極大化하기 爲함이다.

在來式 汽力發電所에서 最近에 나타나는 傾向은 몇년 전의 蒸氣溫度보다 약간 낮은 溫도의 維持인데 이는 高溫에 適合한 金屬材料를 使用함에 따라 建設費가 上昇할뿐 아니라 高溫에서 稼動되는 機器의 信賴度가 低下되기 때문이다. 技術의 見地에서 볼때의 限界點은 材料의 特性에 있는데 그 理由는 高溫에서 材料의 強度劣化와 腐蝕率의 增大를 補償기 爲하여 合金의 組成比를 올리거나 또는 汽罐의 管壁 厚께를 增加시켜야 되기 때문이다.

原子力發電所에 있어서도 어느程度 같은 條件이 材料의 選擇에 加해진다. 말할 必要없이 原子力發電所인 경우에는 材料(被覆)의 特性上 中性子の 吸收斷面積이 最少로 되어야 하며 燃料의 壽命期間에는 높은 中性子束에 對해서도 充分히 견딜 수 있어야 된다. 크게 改善된 蒸氣條件이란 技術의으로는 妥當性을 띄고 있으나, 經濟의으로 큰 負擔없이 高溫의 蒸氣를 發生시킬 수 있는

材料의 開發이나 設計 等에는 아직도 많은 難題가 남아 있다고 하겠다. 심지어 在來式 汽力發電所에 있어서도 蒸氣의 高溫이란 그 自體로서 利得이 아니라 높은 效率에 對한 經濟的 負擔임을 기억해야 될 것이다.

오늘날의 技術開發狀態下에서는 비록 原子爐에서 發生된 蒸氣溫度가 在來式 汽力發電所의 蒸氣溫度보다 낮다고 하더라도 原子爐의 蒸氣循環은 하나의 重大한 長點을 갖고 있는 것이다. 在來式 汽力發電所에서 煙道를 통한 熱損失은 節炭器와 空氣豫熱器를 使用하여 그 損失을 最少로 維持하려 하여도 全體의 入力熱의 10%에 達한다. 이 莫大한 熱을 回收하기 爲하여 煙道의 개스 溫度를 300°F 以下로 維持하면 腐蝕性 沈澱物이 熱交換器의 管壁에 凝結되기 때문에 事實上 이는 不可能하다. 그러나 原子力發電所에서는 煙道를 통한 熱損失이 없으므로 核分裂의 全 에너지는 實際로 蒸氣發生에 有用하게 된다.

4. 蒸氣循環의 效率向上

比較的 낮은 蒸氣溫度를 갖는 原子力發電所에서 그 效率을 높이기 爲해서는 可能한 限 最大蒸氣壓(即 飽和蒸氣壓)에서 稼動해야 된다. 飽和蒸氣를 使用한 發電所에

서 가장 문제가 되는 制限은 터빈後段의 水分量이다. 即 飽和線을 따라 初壓을 增加시키면 터빈 排汽의 水分이 늘어나지만 反面에 一定한 壓力에서의 初期溫度의 增加(過熱蒸汽)는 터빈排汽의 水分을 減少한다. 따라서 水分除去方法이 없는 飽和蒸汽循環系에 있어서도 初壓이 50psig 로 낮은 경우 1.5in-Hg 排汽壓에서 水分의 含有量을 許用範圍인 8~12%로 維持할 수 있다. 12%가 넘는 水分含有는 터빈 날개(翼)에 甚한 腐蝕을 준다. 이 때문에 1920年 初에는 비록 터빈 入口의 壓力이 겨우 250 psig 였으나 700°F 內외의 過熱蒸汽가 使用되었던 것이다.

터빈 調節瓣의 壓力이 600 psig 되는 飽和蒸汽發電所에서는 터빈에서 部分膨脹이 끝난 蒸汽를 抽出하여 水分分離器를 通하고 다시 乾燥된 蒸汽를 터빈에 보내어 膨脹過程을 끝내므로써 過度의 排汽水分을 防止할 수 있다. 1,000~1,250 psi의 터빈 調節瓣에 있어서도 單一段의 水分分離로서는 터빈 排汽의 過度한 水分을 充分히 除去할 수 없으므로 普通 水分을 分離하고 곧 이어 再熱을 하므로써 低壓의 過熱蒸汽를 얻고 다시 이를 터빈으로 보낸다.

再熱은 一次側 冷却材 또는 原子爐 或은 蒸汽發生器에서 抽出된 蒸汽로 하게 된다. 理論的으로는 外部의 水分分離와 再熱段階에는 數의 限界가 없지만 經濟性を 考慮하여 現在에는 在來式 發電所에서 二段의 再熱方法을 採用하고 있는데 첫 段階의 再熱에서 約 5%의 效率과 第二段階의 再熱에서 約 2%의 效率向上이 되고 있다. 原子力이나 在來式 發電所에서 再熱하는 根本의 目的은 터빈 排汽의 水分을 減少하는 것인데 이렇게 하므로써 蒸汽의 初壓을 높이고 결합하여 系統의 效率을 向上시키는 것이다. 그러나 原子力發電에 있어서는 그 燃料價格이 低廉하므로 가까운 將來에 現在의 單一段 水分分離와 二段의 給水加熱方法을 超過하지 않을 것으로 豫想된다.

給水加熱은 또한 發電所의 效率向上에 도움이 된다. 在來式 發電所에서는 汽罐에 原子力發電所에서는 原子爐에 보내지는 給水의 溫度를 높이고 復水器의 冷却水가 取出해가는 熱量을 줄이므로써 系統의 效率을 增加시킬 수 있다. 터빈으로부터 蒸汽를 抽出하므로써 附加的인 利得을 얻을 수도 있다. 터빈 前段部의 날개는 대단히 짧은데 이는 蒸汽의 密度가 높기 때문이다. 따라서 尖端에서의 漏洩과 軸車의 遊隙損失이 높아질 수 있다. 만일 蒸汽의 流量을 增加시킬 수 있다면, 터빈의 날개를 길게 하여 損失을 相對的으로 減少시킬 수 있을 것이다. 그러나 터빈의 後段에 있어서도 尖端의 速度와 그로 인한 機械的 應力을 減少시키기 위하여 날개의 높이를 制限할 必要性이 있게 된다. 때문에 給水 加熱을 爲한 蒸

汽의 抽出은 터빈 前段의 流量을 增加하고 後段의 流量을 減少하므로써 터빈 全體의 效率을 改善하게 된다. 그러나 經濟的 理由로 給水의 最高溫度에는 限界點이 있게 되며 이를 無視하고 給水加熱器를 過多하게 使用하면 經濟的 理由 以外에도 保守가 困難하고 系統의 複雜化로 因하여 信賴性을 保障할 수 없게 된다. 最近의 APC 報告에 依하면 飽和蒸汽 沸騰輕水爐에서의 最適 給水溫度는 300~375°F 이고 飽和蒸汽 加壓輕水爐에서의 最適 給水溫度는 375~450°F 로써 가장 經濟的이며, 高溫原子爐에서는 500°F를 超過하는 給水溫度가 가장 經濟的인 것으로 되어 있다. 大容量(500MWe) 原子爐에서는 3~5個의 給水加熱器를 直列로 使用하지만 高溫의 發電所에서는 效率을 增加시키기 爲하여 6~7個의 加熱器를 使用할 수도 있다.

5. 水分分離器

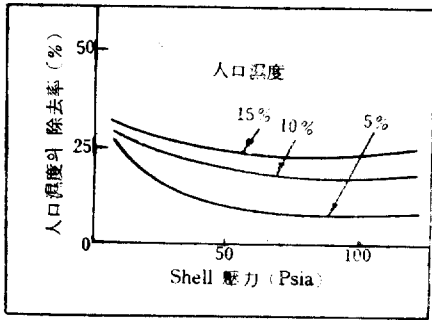
飽和蒸汽 原子力發電所에서 터빈 後段의 水分을 減少시키려면 水分分離器를 使用해야 되는데 이는 蒸汽로부터 水分粒자를 分離시킬 目的으로 流向을 急變시키거나 或은 遠心力을 使用하는 裝置이다. 代表的인 分離器에는 波狀의 鋼板製分離器와 遠心分離器가 있다.

水汽의 分離는 또한 터빈內의 水分抽出裝置를 使用하므로써 어느 程度까지 可能하다. General Electric 製의 터빈에는 이같은 目的을 爲하여 홈이 파진 廻轉翼(grooved rotating blades)이 붙어 있다. 터빈을 貫通하는 蒸汽內의 相當한 量의 水分은 nozzle 隔壁에 모인 後에 摩擦에 依하여 減速되어 比較的 낮은 速度로 nozzle 出口를 떠나게 된다. 따라서 물방울은 蒸汽와 함께 터빈의 廻轉翼을 貫通하는 代身 翼의 後面에 衝突되어 홈(grooves)內에 고이게 된다. 끝으로 물방울은 遠心力에 依하여 廻轉翼으로부터 分離되어 排出된다. 홈이 파진 廻轉翼은 蒸汽의 水分含有率이 約 4%를 超過하는 경우에 使用된다.

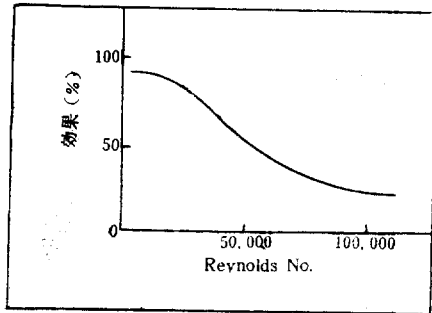
터빈 外部의 水分分離器는 普通水分의 80~90%를 抽出하여 出口의 蒸汽가 대략 98~99%의 質(即, 2~1% 水分)이 되도록 設計되어 있다. 한편 터빈內에서의 水分分離는 排汽의 水分을 약 25% 減少시킬 수 있다. 따라서 理論上 15%의 排汽水分은 內部 水分分離器가 設計된 터빈에서는 減少되어 11% 또는 그보다 적은 水分을 含有하게 된다.

홈이 파진 廻轉翼의 分離(水分)能力을 그림 4에, 波狀 鋼板製의 分離器 能力을 그림 5에 各各 圖示한다.

電氣負荷가 斷絶되는 경우의 터빈 過速을 防止하기 爲하여 一般的으로 水分分離器나 再熱器를 包含하는 터빈 系統에서는 急速히 閉鎖할 수 있는 瓣(valve)을 必要로 한다.



<그림 4> 홈 파진 迴轉翼(grooved rotating blades)을 가진 터빈의 水分分離



<그림 5> 外部 水分分離器의 效果. 대략 80%까지의 濕氣量 除去함.

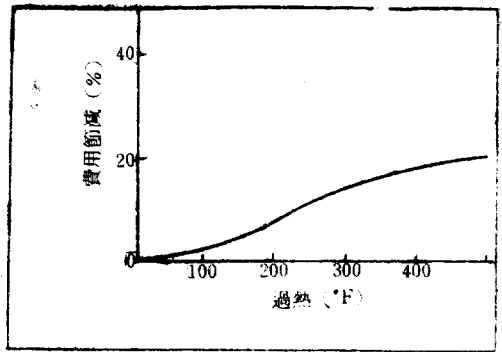
6. 經濟的 要因

發電所 設計에 있어서는 燃料價格, 發電所의 稼動率, 建設投資費 등이 聯되어 最低의 發電原價가 되도록 하지 않으면 안된다. 이같은 要因은 廣範圍에 걸쳐 變하는데 發電所의 位置, 電力會社의 系統特性, 財務計劃 등의 函數的 關係를 갖게 된다.

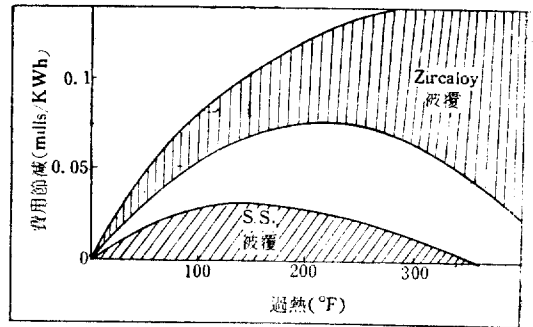
發電所의 效率向上은 반드시 要求되는 것이 아닌데 그 主要 原因은 效率를 向上시키기 爲하여 投資된 機器費以上으로 燃料費面에서 減少가 되지 않는 限에는 意義가 없기 때문이다. 따라서 燃料費가 低下하는 限 發電所의 效率向上은 있을 수 없다. 이런 點에서 볼때 原子力의 燃料費는 가장 低廉한 化石燃料보다도 싸므로 原子力發電所의 設計에 있어서는 特殊한 경우가 아니면 效率를 높게 할 必要가 거의 없다.

그러나 蒸氣의 溫度와 壓力은 터빈發電所의 資本費에 影響을 준다. 오늘날의 터빈 設計上 汽力發電所의 터빈 및 發電機가 占하는 費用은 蒸氣壓과 溫度가 增加함에 따라 減少하는 傾向에 있다. 例컨데 500MWe 터빈 및 發電機의 價格은 그림 6과 같이 變한다. 蒸氣條件이 改善됨에 따라 이를 爲해 投資된 原子力發電所의 資本費는 發電所의 向上된 效率과 터빈費用의 節減을 漸次 逆轉시키게 된다.

核過熱에 對한 經濟性이 여러 方面에서 研究 되어왔 다. 其中에서 몇개의 研究結果를 綜合하여 보면 그림 7

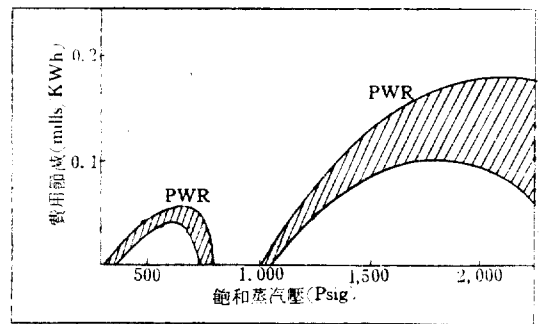


<그림 6> 蒸氣壓과 溫度의 上昇에 따른 터빈費用의 節減



<그림 7> 核過熱에 따른 費用節減 그 현상은 中性子の 吸收가 적은 Zircaloy에서 더욱 顯저함.

과 8로 要約할 수 있다. 核過熱의 效果는 그림 7과 같이 두개의 帶域으로 表示되는데 위의 帶域은 Zircaloy와 같이 中性子の 吸收가 아주 적은 材料로서 內裝式 核過熱器를 使用한 경우를 나타내며 아래의 帶域은 s. s. 과 같이 中性子の 吸收가 比較的 높은 材料로서 內裝式核過熱器를 使用하였을 경우의 經濟的 利得을 圖示한다.



<그림 8> 飽和蒸氣壓에 따른 發電原價의 節減. 그 현상은 PWR에서 더욱 顯저함.

그림 8은 沸騰輕水爐와 加壓輕水爐를 使用한 原子力發電所에서 飽和蒸氣壓을 增加시키는 경우의 效果를 圖示한다. 發電原價는 加壓輕水爐를 使用한 發電所가 沸騰輕水爐를 使用한 發電所보다 더욱 蒸氣壓의 函數的 關係를 갖게되는데 그 理由는 보다 많은 數의 高壓機器가 加壓輕水爐에서 影響을 받게 되기 때문이다.