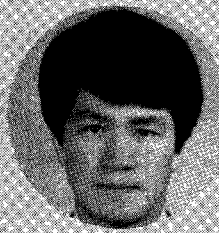


# 核蒸氣發生器 問題點의 總括的考察

*Comprehensive Overview of Problems  
Related to Steam Generators*



魯 熙 天

(韓國科學技術院 核工學科 助教授)

## 1. 序 論

증기발생기는 輕水爐에서 NSSS중 중요한 위치를 차지하고 있는 部品으로, 터빈을 작동시키는 증기를 발생시키기 위해 1次冷却水에서 부터 2次系統까지 熱을 전달하는 역할을 한다. 또한, 증기발생기는 정상상태에서 運轉負荷의 변화에 따른 발전소의 반응을 결정하는데 중요한 역할을 할 뿐아니라 冷却과 反應度와 壓力制御 그리고 터빈날개의 구조적 건전성에 결정적인 역할을 한다.

안전성에 있어서 증기발생기 튜우브는 1次系統 총압력경계의 50% 이상을 차지하며, 환경에 대하여 放射性物質의 방출을 막아주는 주요한 장벽 역할을 하기도 한다.

그러나 운전경험이 쌓이면서 발전소의 수명까지 증기발생기의 수명을 보장하기 위해 충분히 튜우브의 손상을 조절할 수 있다는 데에 심각한 회의가 일어나고 있다. 經濟的, 技術的, 安全성의 관점에 있어 증기발생기의 問題點은 다음과 같다.

● 튜우브 損傷 : 腐蝕에 의한 증기 발생기의 튜우브 損傷은 발전소 稼動率 低下와 補修者의 放射線量 문제를 야기한다.

● 蒸氣發生器 水位制御 : 증기발생기 水位制御의 어려움과 실패는 稼動率 低下의 큰 요소가 된다.

● 蒸氣分離器 設計 : 증기분리기의 설계 미숙에 의해 파생된 과잉 水分은 터빈날개의 浸蝕을 일으켜 막중한 補修를 요구한다.

● 蒸氣發生器 Water Hammer : 給水링에 생성된 蒸氣空의 찬물에 의한 붕괴는 강력한 壓力波를 발생시켜 給水系統에 심각한 구조적 영향을 줄 수 있다.

● Small Break 分析 : 給水過渡와 증기발생기의 熱排泄의 손실은 Small Break分析에 있어 결정적인 역할을 한다.

위의 문제들은 독립적인 문제라기 보다 서로

밀접한 관계를 갖고 있다. 위의 문제점들을 해결하기 위해서는 증기발생기 전반에 관한 지식이 필요하다.

예를들면 化學的, 材料的, 熱·力學的, 構造的 綜合的인 考察이 증기발생기의 設計와 運轉에 고려가 되어야 한다. 다섯번째 문제는 상당한 논의를 요구하기 때문에 여기서는 우선 네개의 문제점을 논의해 보기로 하자.

## 2. 本 論

### (1) 蒸氣發生器 튜우브 損傷

지금까지 核증기발생기에서 다양한 튜우브 신뢰성 문제가 발생했다(表 1).

腐蝕과 力學的으로 유도된 손상은 化學處理熱·力學的 設計, 材料選擇, 加工方法, 2次系材料選擇 등의 복잡한 상호 관계에 의해 영향을 받았다.

1980년도에는 97개의 발전소중 약 38%에서 튜우브 결함이 발견되었다(참고문헌 1). 튜우브 결함의 원인중 SCC에 의한 결함이 30.7%를 차지해 가장 많이 일어났으며, 그 다음으로 Denting에 의한 부식이 29.3%를 차지해 이 두가지에 의한 손상이 전체의 60%나 차지했다.

튜우브 결함이 일어난 곳중, 튜우브 받침판

〈表 1〉 蒸氣發生器의 信賴性 問題

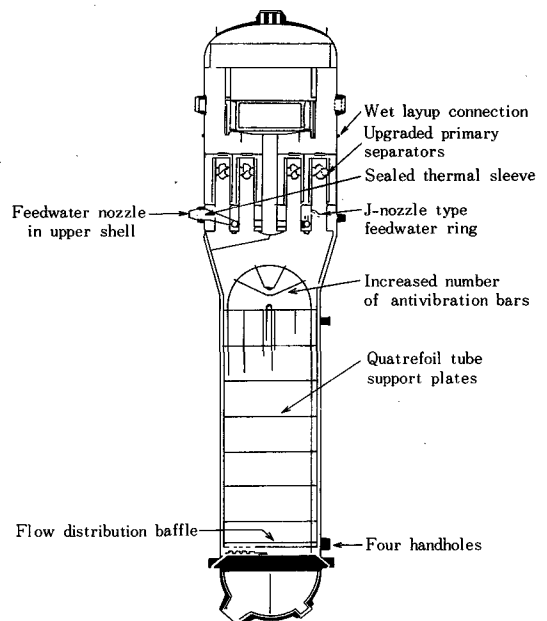
<p><b>1. Tube Material Corrosion</b> (Nickel Alloys 600 and 800)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Wastage or thinning</li> <li>● Primary water initiated cracking</li> <li>● Secondary water initiated cracking</li> <li>● Pitting</li> </ul>
<p><b>2. Tube Support and Tubesheet Corrosion</b> (Carbon Steel and Stainless Steel)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Denting</li> </ul>
<p><b>3. Mechanical Damage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Tube fretting</li> <li>● Fatigue cracking</li> </ul>

과 管板 근처에서 68%의 결함이 일어났다. 이곳의 공통점은 流體가 정지되어 있거나 거의 흐르지 않는 지역으로서, 그곳에서 불순물과 화합물의 농축이 일어나 부식이 가속될 수 있다. 그러므로 진보된 核증기발생기의 설계는 가능한한 流體가 정지되어 있는 지역이 極小化 되도록 설계를 해야 한다.

化學的 處理에 있어서는 AVT와 함께 Condensate Polishing 플랜트를 가진 원자로가 가장 좋은 기록을 지니고 있으며, 古里 1號機와 같이 AVT와 함께 硼酸을 첨가하는 원자로도 상당히 좋은 기록을 지녀, 硼酸이 Denting에 있어 防止劑 역할을 하는 것이 증명되었다. K-AIST에서 한 實驗的 研究(참고문헌 2)에서 硼酸은 튜우브 받침판에서 발생된 산화물을 溶解시켜 Denting率을 줄이는 역할을 한다는 것이 관찰되었다.

튜우브 재질로는 Inconel 800이 Inconel 600보다 좋은 기록을 가지고 있으며, 특히 Inconel 800에는 SCC결함이 지금까지 발견되지 않았다.

〈그림 1〉 웨스팅하우스 Model F 蒸氣發生器 設計更變



부식을 일으키는 화합물의 주요 근원은 손상된 復水器 튜우브로 스며든 바닷물이기 때문에 復水器 튜우브의 健全性 문제도 상당히 중요하다. KAIST에서 행한 연구에 의하면 復水器로 침투한 바닷물의 증가는 튜우브 받침판과 튜우브 사이에서 Denting의 원인인 염소의 농도를 급격히 증가시킨다. 그래서 바닷물을 이용하는 플랜트에서는 점점 부식에 강한 Titanium이나 AL-6X같은 재질을 復水器 튜우브로 사용한다.

化學的 處理와 補修에 좀더 큰 마아진을 주기 위해 核증기발생기의 設計目標가 세워졌고, 이에 따라 증기발생기의 設計變更이 행해졌다. 그 목표로는 순환비(Recirculation Ratio)를 증가시키고, 化學的 物質의 농축 가능성을 줄이고, 부식에 강한 물질을 사용하며 2次系統에 容易한 補修를 위한 出入口를 제공하는 것들이었다.

이 設計目標에 따라 만들어진 증기발생기로는 고리 2호기에서 사용되고 있는 웨스팅하우스 Model F 증기발생기가 있다(그림1). 여기서는 순환비를 증가시키기 위해 드릴된 튜우브 받침판 대신에 네잎 클로마보양의 튜우브 받침판이 사용되었고, 중앙에 流體정지지역을 막기 위해 중앙에 큰 구멍을 가진 流體分配배플(Flow Distribution Baffle)이 사용되었으며, 부식에 대한 마아진을 증가시키기 위해 부식에 약한 카본鋼 대신에 스테인레스鋼이 튜우브 받침판 재질로서 사용되었다.

또한, 증기발생기로 통하는 出入口를 크게 해서 補修를 쉽게 했으며 발전소 정지상태에서 증기발생기내의 流體정지에 의한 화합물의 불균형 分配를 막기 위해 Wet Layup 再循環回路가 첨가되었다. 이외에도 효과적으로 水分 제거를 위해 蒸氣分離器가 再設計되었고, 증기발생기 Water Hammer의 가능성을 줄이기 위해 給水링에 J자 노즐이 사용되었으며 봉인된 熱슬리브가 사용되었다.

## (2) 蒸氣發生器 水位制御

증기발생기 水位制御는 稼動率에 상당한 영향을 준다. 왜냐하면 Hi-Hi水位트립과 Lo-Lo水位트립이 일어나게 되어 있어, 만약 水位制御에 실패하면 運轉停止가 발생하기 때문이다. Lo-Lo水位트립은 원자로의 충분한 冷却性유지에 관계되며, Hi-Hi水位트립은 主蒸氣線 絶斷事故에 있어 冷却率의 低下와 格納容器의 높은 壓力형성과 과잉된 水分발생을 막기 위해서이다.

그러므로 증기발생기 水位制御는 經濟的인 면뿐만 아니라 安全性에 있어서도 매우 중요하다. 그런데 現在 사용되고 있는 증기발생기 水位制御器는 다음과 같은 문제점을 갖고 있다.

●收縮·膨脹현상 : 만약 負荷가 증가되면 증기발생기內의 壓力강화로 기포의 膨脹에 의해 水位가 증가된다.

負荷증가는 給水流量의 증가를 유발해야 하는데, 일시적인 膨脹현상으로 給水流量을 감소시키는 方向으로 制御信號가 들어와 바람직한 方向의 逆方向으로 制御가 행해진다. 負荷가 감소되면 반대로 收縮현상이 일어나 逆方向의 制御信號가 들어온다. 이 문제점의 해결책으로는 水位에러信號를 필터를 통해서 지연시켜 일시적인 收縮·膨脹현상이 지나가고 난 뒤 水位에러信號를 받아들일도록 하는 것이다.

負荷에 따라 또한 負荷 증가·감소율에 따라 收縮·膨脹되는 정도가 다르기 때문에 적절한 지연시간 결정이 힘들다.

●測定에러 : 낮은 負荷로 갈수록 蒸氣流量과 給水流量이 감소하므로 벤추리원리를 이용하는 流量計는 상당한 測定에러를 발생시킨다. 현재 水位制御器는 이 에러를 전혀 반영하고 있지 않고 전적으로 流量計에서 測定된 값에 의존하기 때문에 水位制御에 상당한 어려움을 겪고 있다.

또한 年數가 지남에 따라 流量計의 低下가 일

어나 補正커브에 의한 값이 실제의 값보다 상당히 다를 수 있어 이 에러는 水位制御 문제뿐만 아니라 熱效率도 상당히 감소시킨다.

● 低負荷에서 低利得 : 現 制御器에 있어서 安定된 水位制御를 위해 PID 制御利得이 負荷의 제곱에 반비례해야 한다. 그래서 低負荷에서 制御安定을 위해 制御利得이 매우 낮아야 하며, 이는 制御器의 效能을 감소시킨다.

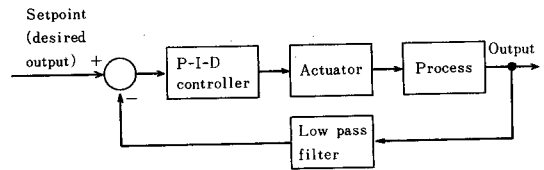
現 발전소에서는 15% 이하의 負荷에서는 自動制御 대신 調整자가 직접 制御하도록 되어 있다. 調整자가 負荷변화에 따른 증기발생기의 반응에 익숙해져 있지 않을 때, 즉 운전초기에 水位制御의 실패에 따른 여러번의 발전소 정지운전이 예상된다.

이와같은 문제점을 해결하기 위해서 測定에러까지 고려하면서 전 負荷영역에서 증기발생기 水位를 最適으로 自動制御할 수 있는 방법이 연구되어야 한다.

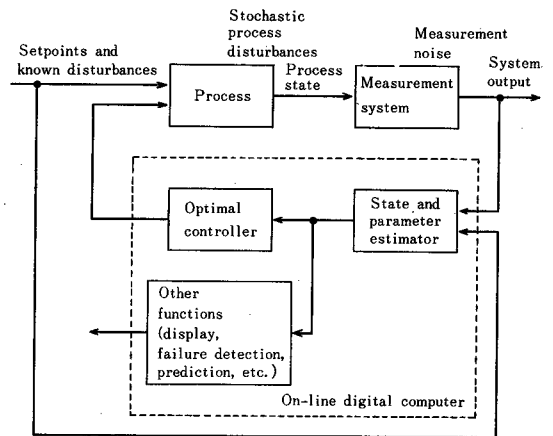
전형적인 증기발생기 水位制御는 PID 아날로그 制御器(그림2a)를 이용하며, 制御利得은 웨스팅하우스 발전소같이 고정되어 있거나 프라마툼 발전소같이 利得이 負荷에 따라 미리 프로그램되어 있다. 이와같은 방법은 광범위한 문제에서 성공적으로 사용되어 왔으나 核발전소에서는 水位制御에 많은 문제점을 안고 있다. 최근에 들어와서 이런 문제를 해결하기 위해서 빠른 速度와 큰 容量을 가진 디지털컴퓨터를 이용한 'Digital Estimator와 Control System'(그림2b)을 이용한 방법이 연구되고 있다.

Estimator는 測定에러까지 고려하여 증기발생기내의 상태를 추정하여 이것에 기초하여 最適의 制御利得이 결정된다. 변수추정방법으로 Karman Filter를 이용한 Update - Propagate 방법을 이용하거나, 변수의 Identification과정을 통한 Adaptive 制御를 하는 방법이 있다. 이 진보된 制御器는 調整자의 운전부담을 줄일 뿐 아니라 발전소 稼動率을 증가시키는 데 기여할

<그림2a> 典型的인 蒸氣發生器 制御方法



<그림2b> 最新의 蒸氣發生器 制御方法



것이다.

### (3) 進歩된 蒸氣分離器 設計

月城발전소의 증기분리기 設計 잘못에 의한 과잉 水分발생은 증기분리기에 대한 우리의 관심을 높였는데 月城발전소 이전에도 8건 이상 이와같은 문제가 대부분의 供給者가 제공한 증기발생기에서 일어났다. 또한, 부식문제 해결의 일환으로 증기발생기내의 순환율을 증가시키기 위해 現場에서 증기분리기를 교체하는 일이 일어났다.

그래서 EPRI를 중심으로 증기분리기에 대한 연구기금이 조성되어 진보된 증기분리기 설계와 이 증기분리기 性能을 예측할 수 있도록 分析技術 開發에 대한 연구가 시작되었다. 다음과 같은 設計변경의 目標가 設定되었다.

● 全 負荷영역과 넓은 영역의 水位에 걸쳐 물과 증기가 완전히 分離되도록 設計하며 수증기에 실려가는 水分量, 즉 Carry Over와 재순환하는 물에 실려가는 수증기량, 즉 Carry U-

nder를 줄인다.

●순환율을 증가시키기 위해 증기분리기내에서 일어나는 壓力강하를 줄이도록 設計한다.

●補修를 용이하게 하기 위해 通路로 出入이 가능할 정도로 작은 크기의 증기분리기를 設計한다.

비교를 위한 基本設計로 CE의 증기분리기와 웨스팅하우스 증기분리기를 들 수 있다(그림3). 그림3에서 보는 바와 같이 CE 증기분리기内的 날개(Vane)는 웨스팅하우스 날개보다 강력한 速心力을 발생시켜 물과 증기의 分離效率를 증가시키며 또한 分離된 물이 구멍을 많이 가진 内部 원통을 통해 降水管으로 빠져나가도록 되어있어 물의 수증기와 再結合을 막아 水分제

거에 상당히 효과적이다. 결점으로는 入口노즐과 날개를 통과할 때 상당한 壓力강하가 일어나 순환율을 줄일 염려가 있다는 점이다.

最適의 進歩된 蒸氣分離器의 設計를 위해 다음의 변수들을 고려해야 한다.

●外部蒸氣分離 直徑 : 증기분리기의 크기는 증기발생기의 通路를 충분히 지나갈 수 있을 정도로 작아야 한다.

●날개 直徑 : 외부 증기분리기 외경에 대해 날개 직경은 分離過程에서 물의 유연한 천이가 일어나도록 크기가 결정되어야 한다.

●날개 數 : 너무 많은 날개는 壓力강하를 증가시키며 너무 적은 날개는 불충분한 分離를 일으킨다. 6개의 날개가 最適의 數다.

●入口 날개 角度 : 90°의 入口角度가 流體의 유연한 천이를 위해, 그래서 入口에서의 壓力강하를 줄이기 위해 필요하다.

●出口 날개 角度 : 角度가 너무 적으면 과잉의 壓力강하가 일어나며, 너무 크면 불충분한 遠心力을 일으킨다. 35°근방에서 最適의 角度가 구해질 수 있다.

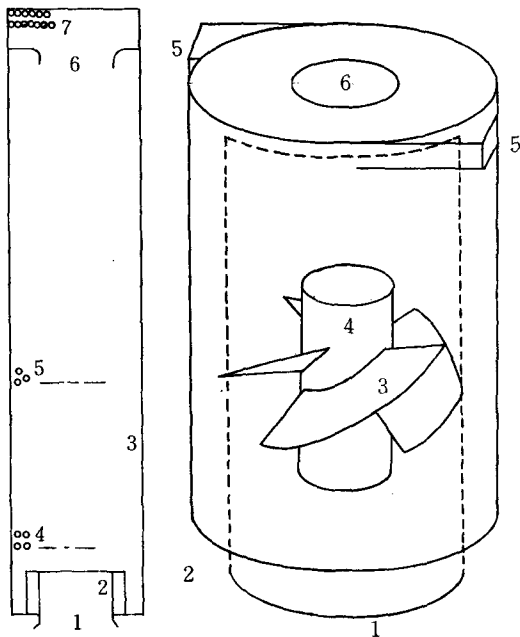
●날개 높이 : 더 초과되어도 分離에 아무런 영향을 주지 않는 날개 높이를 구한다.

●날개부터 制限板(Restrictor)까지 높이 : 이 높이는 물이 쉽게 증기분리기의 降水管으로 빠져 나갈 수 있을 정도의 물두께를 허용하는 높이를 구한다.

●制限板 餘裕面積 : 이 面積이 너무 크면 증기분리기 出口에서 증기제트를 유발시켜 壓力강하를 증가시킬 뿐아니라 蒸氣乾燥器에 가기 前에 마려된 공간에서 일어나는 重力에 의한 증기分離를 감소시킨다.

만약 너무 작으면 分離된 물이 증기분리기의 降水管으로 흘러가지 못하고 증기와 함께 증기분리기 밖으로 흘러나가기 때문에 상당히 Carry Over를 증가시킨다. 内部 원통에서 最大의 물두께보다 큰 制限板 餘裕面積이 요구된다.

〈그림 3〉 CE와 웨스팅하우스 蒸氣分離器



(a) Combustion Engineering

(b) Westinghouse

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1. Inlet Nozzle       | 1. Riser               |
| 2. Centrifugal Vanes  | 2. Separator Downcomer |
| 3. Barrel             | 3. Turbovane           |
| 4. Lower Perforations | 4. Hub                 |
| 5. Upper Perforations | 5. Tangential Port     |
| 6. Discharge Nozzle   | 6. Orifice             |
| 7. Screen Assembly    |                        |

이와같은 변수들을 고려해 最適의 증기분리가 設計된다면 水分의 감소로 터빈날개의 수명을 증가시킬 뿐아니라 蒸氣乾燥器의 크기도 줄일 수 있어 증기발생기의 크기가 상당히 감소될 수 있을 것이다.

#### (4) 蒸氣發生器 Water Hammer

고리 1호기가 최초로 10%까지 전력을 올리던 1977년에 給水펌프케이스에 균열이 일어나 5개월간 공기가 연기된 적이 있는데, 이 사건은 증기발생기 Water Hammer에 의해 일어났다.

NRC가 'PWR S/G Water Hammer Evaluation'(참고문헌 3)을 발표했던 1976년 이전까지 24건의 Water Hammer 사건이 NRC에 보고되었고, 이중 4개의 발전소에서 영구적인 給水배관의 변형과 배관지지물의 파괴가 일어났다. 또한, Calbert Cliffs 1호기에서는 給水制御밸브가 이 사건으로 인해 고장나서 증기발생기에 급격한 Flooding을 일으켰다.

이 증기발생기 Water Hammer는 蒸氣線과 給水線 絶斷事故, 停電, 給水流 断絶, 始動과 運轉停止같은 系統過渡에 의해 증기분리기水位가 떨어져 給水링이 노출되었을 때 일어난다. 補助給水器로부터 매우 찬물이 給水링으로 공급되면 이 찬물에 의해 증기의 응축현상이 일어나고, 이 응축에 의한 압력강하는 蒸氣流를 일으키며, 이는 給水링内の 물 表面에 波面을 일으킨다.

이 波面이 給水링을 막을 때 蒸氣空이 형성되고, 트랩된 蒸氣空의 급격한 응축에 의해 물 Slug의 가속이 일어나고, 완전히 蒸氣空이 사라질 때 가속되어 달려온 Slug와 정지되어 있던 물과의 충돌이 일어나며, 이때 강한 壓力波가 생성되어 給水파이프內에서 전파되고 반사되면서 일정한 週期를 가지며 진동을 계속한다.

이 Water Hammer를 막기 위해 다음과 같은 設計변화와 運轉節次변경이 제안되었다.

● 증기발생기로부터 연결되는 主給水器 파이프의 水平연결 길이를 가능한 한 짧게하라: 水平으로 된 파이프 길이가 짧게 되면 물 Slug가 충분히 가속될 수 없어 Slug 충돌 순간에 압력증가를 줄인다.

● 給水링으로부터 물의 방출을 막기 위해 給水링 윗부분에 J자 노즐을 첨가하라: 고리 1호기에서는 처음에 給水링 밑부분에 구멍이 뚫어져 있어 급격한 물의 방출이 일어나 Water Hammer가 일어났지만 사건발생후 이 구멍을 막고 J자 노즐을 첨가함으로써 Water Hammer가 일어나는 것을 막을 수 있었다.

그러나 主給水器 파이프와 증기발생기 연결부분에 있는 熱술리브에 있는 틈새는 물의 누출을 일으키며, 누출률은 발전소마다 다르고, 누출이 많이 일어나는 발전소가 Water Hammer가 일어나는 확률이 높다 하겠다.

이것의 보완책으로 웨스팅하우스 Model F 증기발생기는 밀봉된 熱술리브를 사용해 물의 누출을 막고 있다.

● Water Hammer 확률을 줄이기 위해 補助給水器의 流量을 制限하라: 給水링內에서 응축에 의해 일어나는 蒸氣流量은 補助給水器의 流量에 비례하므로 이 量을 制限함으로써 물 Slug가 발생되는 것을 막을 수 있다.

실제로 Indian Point 2호기에서 補助給水流量이 240gpm에서 행한 네번의 試驗중 두번의 Water Hammer가 일어났지만 200gpm에서 행한 아홉번의 試驗중 한번도 Water Hammer가 일어나지 않았다. 그래서 NRC는 50gpm의 安全마아진을 가진 最大 150gpm의 補助給水流量을 制限할 것을 제안했다. 그러나 이 流量이 충분히 潛熱을 제거할 수 있을지 확인해 볼 필요가 있다.

現在 웨스팅하우스 발전소는 초기 1분 동안에 補助給水流量을 100gpm까지 줄이도록 設計되어 있다.

●補助給水器의 노즐과 主給水器의 노즐을 分離하라 : 이 조치를 따른 것으로 웨스팅하우스 Model E 증기발생기가 있다. 이 증기발생기에는 補助給水器 노즐은 熱衝擊 문제때문에 上部胴에 연결되어 있고 主給水器 노즐은 下部胴에 연결되어 있어 Water Hammer의 가능성을 배제한다.

그러나 이 모델은 豫熱器設計를 전제조건으로 하고 있기 때문에 豫熱器 問題點, 즉 순환률의 감소와 구조적 복잡성과 漏出이 크다는 문제점을 갖고 있다.

증기발생기의 Water Hammer는 發電所 稼動率과 安全性에 심각한 위험을 줄 수 있기 때문에 증기발생기의 設計나 運轉과 파이프配置圖 결정에 상당한 주의를 요구한다.

### 3. 結 論

本論에서 蒸氣發生器에서 발생하는 여러 問題點들을 살펴보았다. 이 問題點들 외에도 증기발생기의 安全檢査가 稼動率에 미치는 영향을 무시할 수 없으며, 많은 數의 튜브 플러깅은 1次系 流量을 감소시켜 MDNBR 마아진

을 줄일뿐 아니라 熱傳達面積을 감소시킨다.

또한, 튜브 絶斷事故로 인해 123일의 發電所 停止時間을 가진 Ginna와 같은 事故도 일어날 수 있다.

아직 시원하게 해결된 問題點은 없지만 문제점의 원인파악과 그 대책이 계속 연구되고 있다. 한국에서도 韓電이 주축이 되어 研究所와 학교에서 이러한 問題解決을 위해 衆智를 모으고 研究한다면 많은 問題點들의 解決이 可能하며, 이로 인해 發電所 稼動率 增加뿐만 아니라 安全性이 더욱 높아진 原子爐 運轉이 可能해질 것이다.

#### <참 고 문 헌>

1. O. S. Tatone and R. S. Pathania, "Steam Generator Tube Performance : Experience with WaterCooled Nuclear Power Reactors During 1980," Nuclear Safety, Vol. 24, No.1(1983)
2. 신상운, "원자력 발전소의 증기발생기에서 일어나는 Denting 현상의 실험적인 고찰," 한국과학기술원, 석사논문, (1984)
3. G. B. Wallis. et.al., "An Evaluation of P-WR Steam Generator Water Hammer," NUREG-0291, (1977)

## 原子力産業視察 參加者 募集

當 會議에서는 일반국민에게 原子力平和利用에 관한 지식을 널리 보급하고 國家經濟發展相을 인식시켜, 國家에 대한 信賴感과 아울러 국가관을 정립할 수 있는 계기를 마련키 위하여 다음과 같이 原子力産業視察을 실시하오니 많은 參加를 바랍니다.

1. 시찰일정  
1984. 8. 29(수)~8. 30(목) (1박 2일)
2. 모집마감  
1984. 8. 10(금)까지 선착순 마감
3. 모집인원  
80명

4. 시찰지  
古里원자력발전소 및 건설현장  
경주일원관광
5. 참가비  
會員社 : 1人當 7,000원  
非會員社 : 1人當 9,000원
6. 신청 및 문의처  
한국원자력산업회의 사무국  
주소 : 서울 중앙사서함 6583호  
전 화 : 755-0163~4

社團 韓國原子力産業會議  
法人