

관막음에 따른 증기발생기 성능 해석

A Numerical Analysis of The Effects of Tube Plugging on PWR Steam Generator Performance

박수기, 김인환, 정희권, 김양석, 김범년, 정한섭

한국전력 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

ABB-CE 형 가압경수로 U-튜브 증기발생기의 관막음에 따른 열성능 및 유동 특성에 관한 3차원 수치해석을 ATHOS3를 이용하여 수행하였다. 유동유발 진동으로 인한 중앙 공동부 주위의 전열관 마모손상이 보고되고 있는 동일한 위치의 전열관 137개를 관막음 하였다. 관막음에 따른 증기발생기 열전달 면적과 스팀돔 압력은 각각 1.49%와 0.36% 감소 하였으며, 또한 그 이외의 전체적인 열유동 변수도 크게 변하지 않았다. 그러나 국부적으로는 기공율 및 속도, 건도 등의 변화가 뚜렷하게 나타났고, 유동유발 진동과 관련된 전열관에 수직인 질량유속은 관막음한 전열관뿐만 아니라 그 주위에 있는 관막음하지 않은 전열관에서도 감소하였다.

Abstract

The effects of tube plugging on the thermal performance and flow characteristics of a ABB-CE U-tube PWR steam generator have been examined. A three-dimensional numerical analysis was carried out using the ATHOS3 thermal-hydraulics computer code. The 137 tubes were plugged in the periphery of the central cavity region. Some plants have reported tube wear due to flow induced vibration in the same region. The heat transfer area and steam dome pressure with the tube plugging were decreased 1.49% and 0.36% respectively. The change of the other overall parameters was also insignificant. However the difference of local flow characteristics including void fraction, velocities, and quality was indicated clearly and the normal mass flux related to flow induced tube vibration was decreased for the plugged tubes and the no-plugged tubes around the plugged tubes.

1. 서론

가압형 원자로에 사용되는 대표적인 증기발생기는 WestingHouse, B&W, ABB-CE 형으로 구분되며 영광 3, 4호기를 비롯하여 KSNP 원자로도 ABB-CE 형 증기발생기를 사용하고 있다. ABB-CE 형 증기발생기는 2중 급수(다운코머 급수, 이코노마이저 급수) 방식이고, 축류 예열기(axial flow economizer)를 갖고 있다. 전열관은 double 90° bend 형이고 전열관의 직관부는 egg-crate 형 지지대로 지지된다. 곡관부는 대각선 스트립(diagonal strip) 및 수평, 수직 스트립으로 지지된다.

영광 3, 4 및 KSNP 증기발생기의 모체가 되는 Palo Verde 증기발생기의 운전 경험에 의하면 관다발 중심부 공동(central cavity) 지역과 저온측 다운코머 입구창 주변의 전열관 마모가 발견되어 원인 분석과 설계 개선이 진행되어 왔다. 다운코머 입구창 주변의 전열관 마모는 국부적인 고속의 횡류에 기인한 것으로 평가되어 이코노마이저 입구창 개선 및 이코노마이저 지역의 전열관 지지대 개수 증가, 고온관측 유동 분배판 제거, 튜브레인(tube lane) 근처의 전열관 배열 조정, 이코노마이저 분리판 높이 증가 등의 설계 변경을 하였고 유동유발 진동 가능성이 감소되었다. 그러나 관다발 중심부 공동 지역 주위의 전열관 마모는 전열관 지지구조물의 설계 개선에도 불구하고 마모 가능성이 잔존하는 것으로 예측된다.

전열관 지지구조물의 설계가 유사한 San Onofre 2, 3, St. Lucie 2, Waterford 3, Palo Verde 1, 2, 3에 관한 보고에 의하면 공동(central cavity) 지역 주변의 전열관 마모는 특정 지역에 제한적으로 발생하는 것으로 밝혀졌다[1]. 영광 3, 4 및 KSNP 증기발생기의 경우, Palo Verde 발전소의 경험을 바탕으로 곡관부 전열관 지지구조물의 설계를 개선하였다. 따라서 위 발전소와 동일한 상황은 마모를 가정하여 특정 지역의 집중적인 관막음을 시행할 경우 증기발생기 열성능 감소와 국부적인 유동 특성 변화가 예측된다. 본 논문은 국내에서 운전중인 전형적인 ABB-CE 형 증기발생기를 대상으로 하고 있으며, 중앙 공동(central cavity) 주위 전열관 137개를 관막음 하였을 때의 열성능 감소 및 유동유발 진동에 영향을 주는 국소지점에서의 열유동 특성에 대한 전산 해석을 다루고 있다.

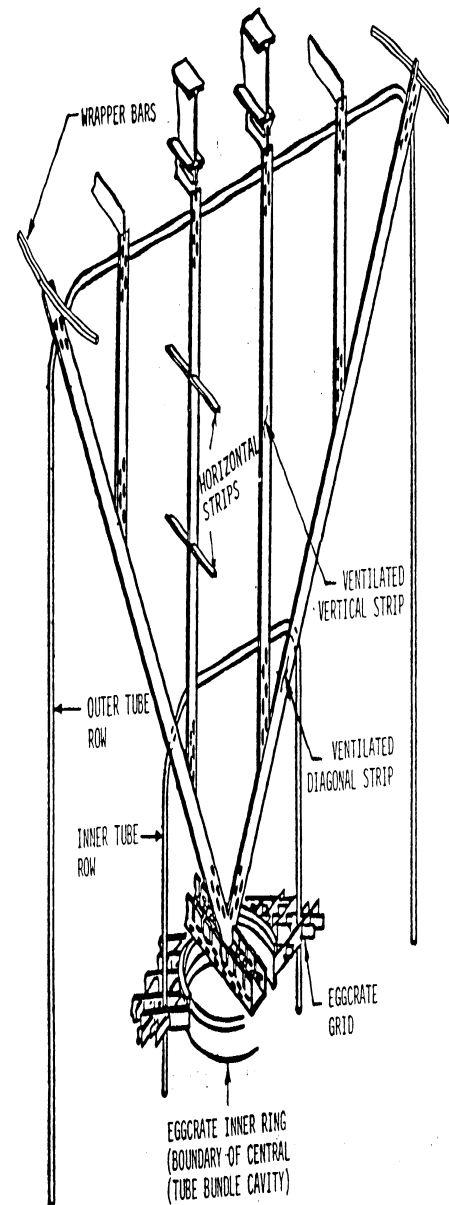


그림 1 영광 3, 4호기 증기발생기 튜브 상부지지 구조물

2. 해석 방법

해석은 SGAP 코드를 이용하였으며 SGAP는 ATHOS3를 근간으로 한다. ATHOS3는 EPRI(Electric Power Research Institute)의 주도로 개발되어 중소규모의 실험 및 원형 발전소의 검증을 거친 코드이고 증기발생기 설계 및 열수력 해석에 널리 사용되는 3차원 2상유동 해석 코드이다[2, 3]. 증기발생기 내부의 전열관 및 복잡한 구조물은 다공성 매질로 모사하고 열전달 및 운동량 전달은 적절한 실험 상관식을 이용한다.

2.1 열수력 모델

2상유동은 균질유동(homogeneous flow) 모델과 algebraic slip 모델이 적용되고 있으며 본 연구에서는 algebraic slip 모델을 이용하였다. 내부 구조물은 다공성 매질로 모사하고 열 및 운동량 전달은 실험상관식을 이용한다. 본 계산은 원통 좌표계에 대하여 수행하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

질량 보존식

$$\text{div}(\beta \rho \bar{v}) = 0 \quad \text{식1}$$

운동량 보존식

$$\begin{aligned} \text{div}[\beta \rho \bar{V}_u r - \beta \Gamma_w g \text{grad}(ur)] &= -\beta \left[\frac{\partial p}{\partial \theta} - \frac{2\Gamma_w}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] - f_\theta \cdot r \\ \text{div}[\beta \rho \bar{V}_v - \beta \Gamma_v g \text{grad}(v)] &= -\beta \left[\frac{\partial p}{\partial r} + \Gamma_v \left(\frac{2}{r^3} \frac{\partial(ur)}{\partial \theta} + \frac{v}{r^2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \rho \frac{(ur)^2}{r^3} \right] - f_r \\ \text{div}[\beta \rho_m \bar{V}_m w_m - \beta \Gamma_v g \text{grad}(w_m)] &= -\beta \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho_m g \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \frac{\rho_F g}{\rho_F 1} \rho_m w_{\text{em}}^2 \right) - f_z \end{aligned} \quad \text{식2}$$

에너지 보존식

$$\text{div}[\beta \rho_m \bar{V}_m h_m - \beta \Gamma_h g \text{grad}(h_m)] = q_s - \frac{\partial}{\partial z} (\beta \rho_F r_E w_{\text{em}} h_{1E}) \quad \text{식3}$$

여기서 β 는 단위 체적당 2차속 유체가 차지하는 비율이다. algebraic slip 모델은 기상과 액상의 상대 속도를 고려하는 것으로 식2의 z 방향에만 고려된다. 위 식의 아래 첨자 g 와 l 은 기상과 액상을 의미하며, m 은 혼합물을 의미한다. r_E 는 기공율이고 q_s 는 전열관으로부터 전달되는 열전달량이다.

운동량 보존식에서 f_r, f_θ, f_z 는 내부 구조물이 유동에 미치는 마찰력이며 실험 상관식을 이용하여 계산한다. 특히 2상유동에 의해 부가적으로 발생하는 압력 손실은 Thom의 상관식을 적용하였다. w_{em} 은 혼합물의 속도에 대한 증기의 상대속도이다. 기상과 액상의 밀도, 기공율, z 방향의 혼합속도(w_m), 증기의 drift velocity, 분배 계수의 함수이며, drift velocity와 분배 계수는 Lellouche-Zolotar 상관식으로 계산된다. 열전달은 단상대류, 포화비등, 과냉비등으로 구분하여 각 영역에 적합한 실험 상관식을 사용하여 계산한다. 본 계산은 EPRI78 옵션을 적용하였다[4].

전열관 관막음 여부에 따른 국부 유동 특성 변화를 조사하기 위하여 표 1에 정리된 전열관에서의 gap velocity 및 기공율, 밀도 등을 계산하였다. gap velocity 및 국부 유동 변수 조사는 관막음을 수행한 영역 안쪽과 그 주변의 전열관에 대하여 수행하였다.

표 2는 관막음 전후의 증기 발생기 2차 측 압력 및 순환비의 비교이다. 냉각재 유량 및 온도와 급수 유량 및 온도가 동일할 때 관막음에 따른 열교환기 면적 감소로 증기 압력은 감소하고, 순환비도 약간 감소한다. 습분분리기 입구에서의 평균 건도는 약간 증가하며 증기발생기 돔에서의 증기유량은 거의 일정하다. 일반적으로 증기 압력이 감소하면 터빈 입구에서의 압력도 감소하여 터빈 효율이 감소하게 된다. 마모 발생을 가정하여 공동 주위의 전열관 137개를 모두 관막음 할 경우 증기압 감소는 0.36%로 예측된다. 증기발생기 돔에서 증기유량의 변화는 무시할만하다. 순환비는 2.26% 감소하고 건도는 2.28% 증가하는 결과를 보여주고 있다. 순환비가 감소하고 습분분리기 입구에서의 평균 건도가 증가하므로 습분분리기의 부하는 감소하여 증기발생기 노즐에서의 건도는 약간 증가할 것으로 예측된다.

표 1 Gap velocity가 계산된 전열관의 raw 및 line 번호

raw	38	46	54	62	27	35	43	51
line	84	84	84	84	99	99	99	99

표 2 관막음 전후의 증기발생기 주요 변수 비교

	증기압(MPa)	증기온도(K)	증기유량(kg/s)	순환비	습분분리기 입구 평균 건도
관막음 전	7.6267	564.8	400.5	3.809	0.263
관막음 후	7.5996	564.6	400.6	3.723	0.269

그림 5는 그림 3, 4의 대칭면에서의 관막음 전후에 따른 기공율이고, 그림 6은 z 방향의 혼합속도(w_m , mixture velocity)이다. $z=7.505\text{m}$ (그림 5의 (a))는 5섯 번째 full egg crate 바로 위에 해당하고, $z=8.495\text{m}$ (그림 5의 (b))는 raw 번호 46 과 47 튜브의 수평관 사이에 해당하는 높이이며 $z=9.016\text{m}$ (그림 5의 (c))는 raw 번호 70 튜브의 수평 직관 높이에 해당하는 위치이다. 수평축은 계산 영역의 대칭면 길이이다. 음의 값은 고온관측을 나타내고, 양의 값은 저온관측을 나타낸다. 그림 안의 수직 실선은 전열관이 없는 중앙 공동(central cavity) 지역의 경계를 나타낸다.

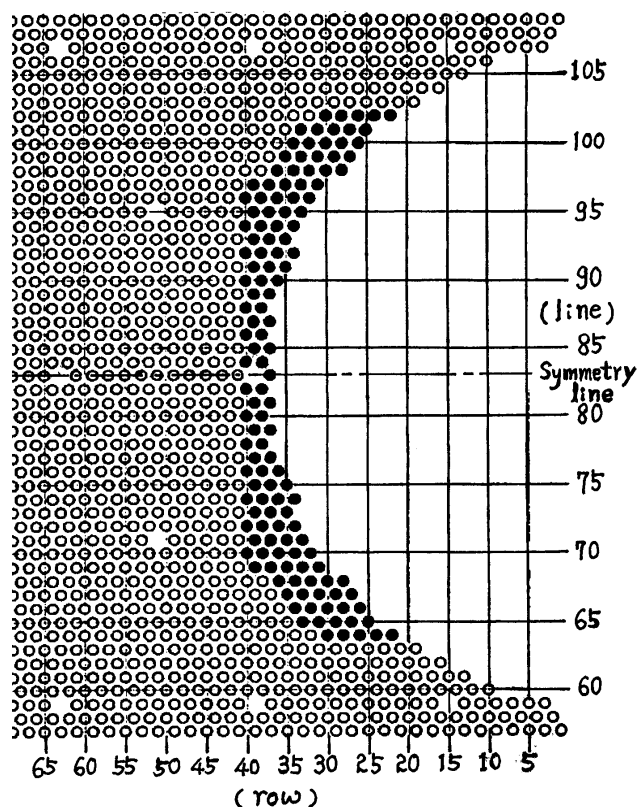


그림 4 고온관측 관막음 위치

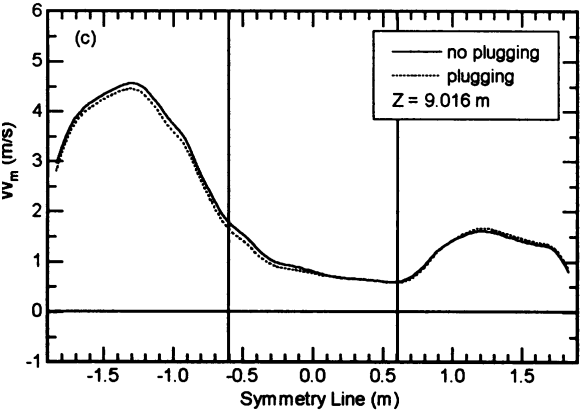
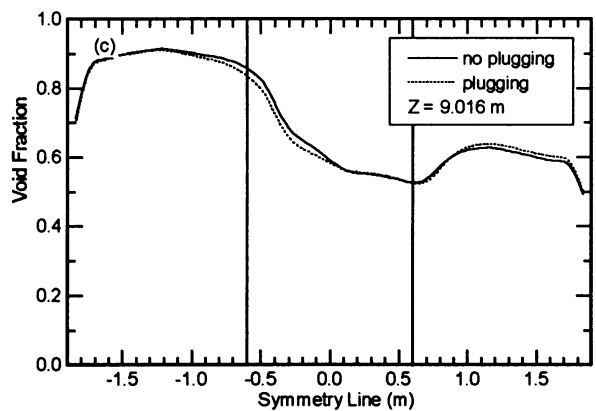
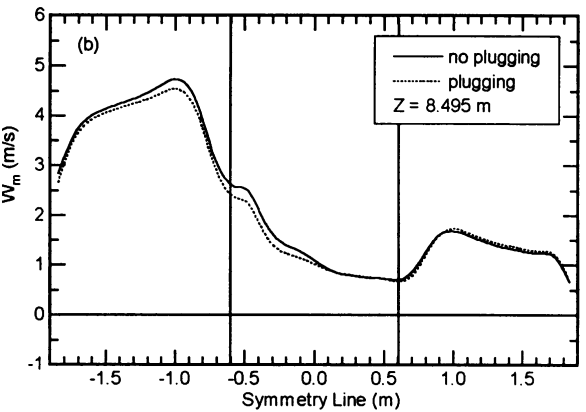
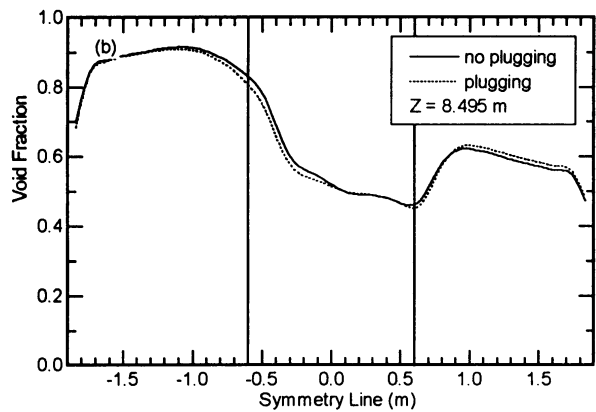
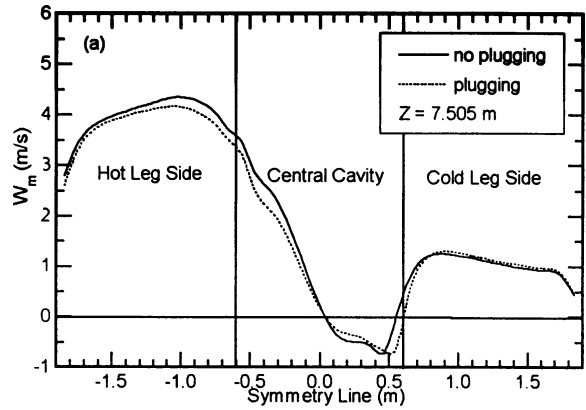
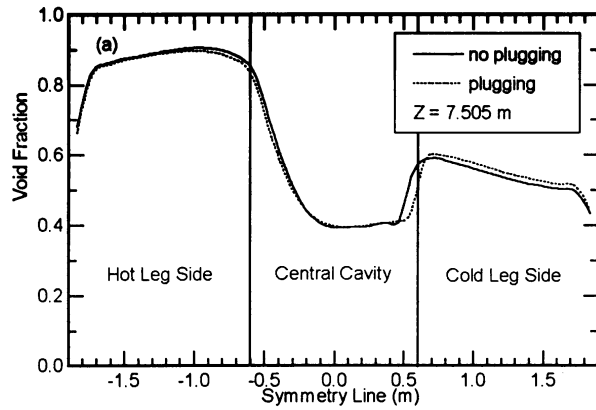


그림 5 기공률 분포

그림 6 혼합속도(W_m) 분포

그림 5의 (a)를 보면 고온관측과 중앙 공동부의 경계선 부근과 저온관측과 중앙 공동부의 경계선 부근에서 기공률의 차이가 약간 나타나고 있으며 고온관측 및 중앙 공동부는 거의 동일하다. 관막음에 따라 열원이 상실되어 비등이 발생하지 않기 때문에 기공률이 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 5의 (b)와 (c)는 중앙 공동부에서도 관막음에 따라 기공률이 감소하는 것을 알 수 있는데, 이 높이에서는 관막음한 수평 전열판에서의 열원 상실로 인한 기포 발생이 감소하기 때문이다. 관막음 전후에 따른 국부적인 기공률 감소는 고온관측에서 뚜렷이 나타나는데, 이것은 고온관측 전열판의 열유속이 크기 때문이다. 그림 6의 z 방향 혼합속도(w_m)도 관막음에 따른 기공률 감소와 유사하게 국부적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 혼합속도가 기상과 액상의 속도 모두 반영하고 있기 때문에 국부적인 기공률 감소는 혼합속도 감소 결과를 가져온다.

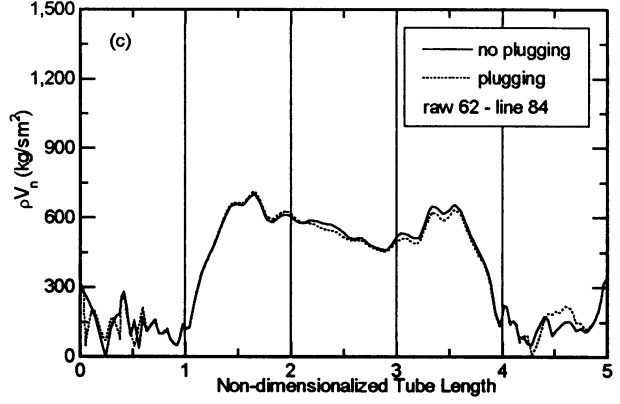
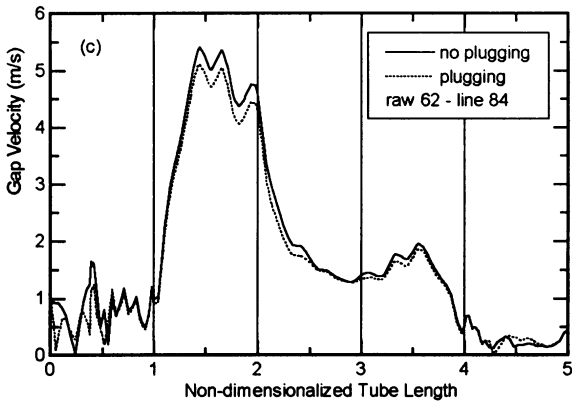
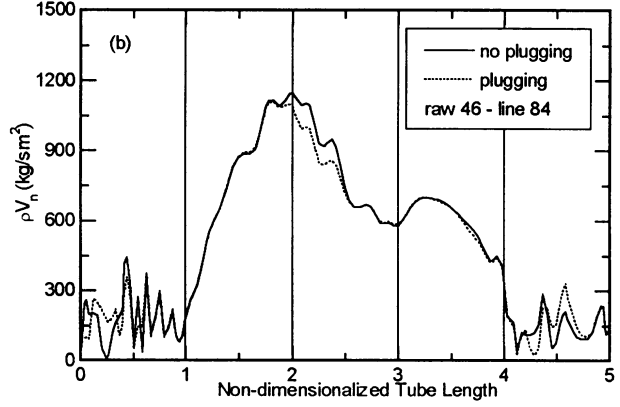
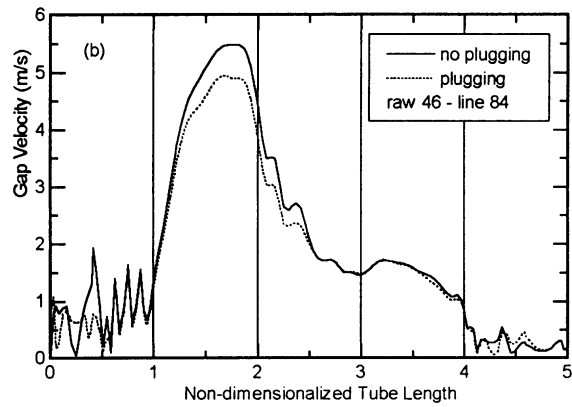
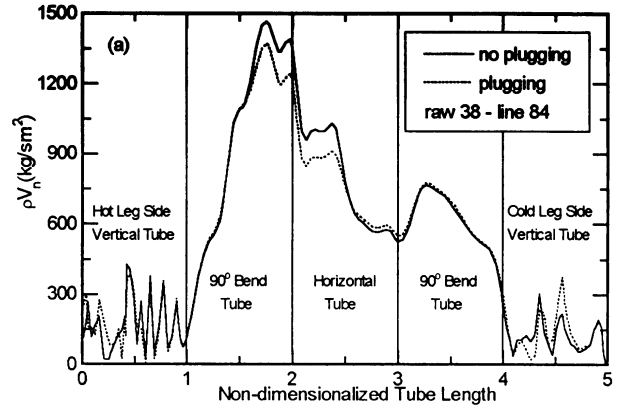
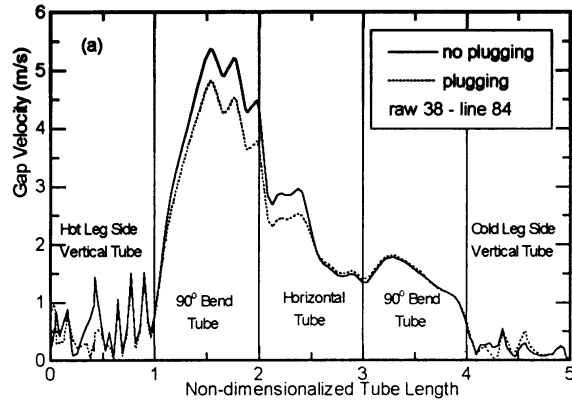


그림 7 Gap Velocity

그림 8 전열관에 수직한 질량유속

그림 5, 6이 대칭면에서의 국소 기공률 및 혼합속도 분포인 반면에, 그림 7, 8은 특정한 전열관에서의 gap velocity 및 질량유속이다. 여기서 gap velocity는 ATHOS3 코드에서 계산된 결과에 전열관의 배열에 따른 기하학적 효과가 고려된 것이다.

그림 7, 8의 (a)는 관막음을 수행한 영역에 위치한 전열관에서의 결과이고, (b)와 (c)는 관막음을 수행하지 않은 전열관에서의 결과이다. 수평축은 고온관측 전열관 입구부터 냉각재 진행 방향에 따른 각 영역의 길이를 무차원화한 값이다. 그림 7의 (a)를 보면 고온관측 곡관부와 수평 직관부에서 gap velocity가 관막음에 따라 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 특히 관막음을 수행한 영역의 raw 38 전열관뿐만 아니라 raw 46 (그림 7의 (b)), raw 62 (그림 7의 (c)) 전열관에서도 동일한 위치에서 gap velocity의 차이가 나타났다. 이것은 관막음에 의한 영향이 관막음 영역 주변에

도 영향을 끼치고 있음을 나타낸다. 특히 곡관부 및 수평 직관부에서 그 영향이 큰 것으로 나타났다. 그 이유는 이 부분의 열유속이 크기 때문에 관막음 전후에 따른 기포 발생량의 차이가 크고 높은 상승 유동이 발생하는 영역이기 때문이다. 그림 8은 전열관 길이에 따른 질량유속이다. 전열관의 유동유발 진동에 영향을 끼치는 인자는 질량유속이다. 그림 8의 (a)를 보면 관막음에 따라 수평 직관부 및 고온관측 곡관부에서의 질량유속이 뚜렷하게 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서 주의 깊게 살펴볼 결과는 그림 8의 (b)의 경우 관막음 영역 내부에 속하지 않는 전열관이다. 관막음은 raw 40 번까지 수행하였음에도 불구하고 주변에 있는 raw 46 번 전열관의 수평 직관 일부와 고온관측 곡관부 일부 구간에서도 질량유속 감소 구간이 나타났다. 즉 마모 발생 예상 영역의 전열관을 관막음하므로 인하여 주변의 전열관은 진동유발 진동 가능성이 감소하게 되는 결과를 보여주고 있다. 그러나 이와 같은 현상이 항상 나타나는 것은 아니며, 전열관의 위치와 전체적인 유동 특성에 따라 결정된다. 그림 8의 (c)의 경우는 gap velocity는 약간 감소하였지만, 밀도가 곱하여진 질량유속은 거의 변화가 없다. 이것은 관막음 영역에서 비교적 멀리 떨어져 있기 때문에 충분한 혼합이 이루어져 아래 부분에 있는 관막음 영역의 영향이 소멸된 것으로 이해된다.

4 결론

외국의 사례에 의하면 ABB-CE 형 증기발생기의 경우, 특정 지역의 전열관에 마모가 집중적으로 발생하고 있다. 국내에도 ABB-CE 형 증기발생기가 운전되고 있고, 건설중에 있으므로 외국의 경험을 기준으로 마모가 발생할 것으로 예측되는 특정 지역의 전열관을 관막음하는 경우 증기발생기 이차측 압력 및 순환비 등 전체적인 유동 특성과 관막음 영역 주변의 국소 유동 특성을 해석하였다. 중앙 공동부 주위의 전열관 137개를 관막음 하였을 경우 이차측의 압력은 0.36% 감소하였으며 전체적인 유동 특성은 큰 변화가 없었으나, 국부적으로는 뚜렷한 변화가 나타났다. 특히 관막음에 따른 gap velocity 및 전열관에 수직인 방향의 질량유속은 관막음 영역뿐만 아니라 관막음 영역 주변에서도 감소하였다.

참고문헌

- [1] Stanley J. Green, "Thermal, Hydraulic, and Corrosion Aspects of PWR Steam Generator Problems", Heat Transfer Engineering Vol. 9 No. 1, pp. 19 - 64, 1988.
- [2] A. K. Singhal and G. Srikantiah, "A Review of Thermal Hydraulic Analysis Methodology for PWR Steam Generators and ATHOS3 Code Applications", Nuclear Energy, Vol. 25, No. 1, pp. 7-70, 1991.
- [3] S. J. Green and G. Hetsroni, "PWR Steam Generators", Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 21, pp. 1-97, 1995.
- [4] ATHOS3 Mod-01: A Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generators Vol.1, EPRI NP-4604-CCML, 1990