

# 집단 관막음된 한국표준원전 증기발생기 전열관의 유체탄성불안정성 특성 평가

## Estimation of Fluid-elastic Instability Characteristics on Group Plugged KSNP Steam Generator Tube

조봉호\* · 유기원\*\* · 박치용\*\*\* · 박수기\*\*\*\*

Bong-Ho Cho, Ki-Wahn Ryu, Chi-Yong Park and Su-Ki Park

**Key Words** : Fluid-elastic instability(FEI, 유체탄성불안정성), Group Plugging(집단관막음), KSNP(한국표준원전), Steam Generator(증기발생기), Stability Ratio(안정비), Gap Velocity(틈새속도)

### ABSTRACT

To investigate the group plugging effect, the fluid-elastic instability analysis has been performed on various column and row number of the KSNP steam generator tubes. This study compares the stability ratio of the plugged tube with that of the intact one. The information on the thermal-hydraulic data of the steam generator have been obtained by using the ATHOS3-MOD1 code with and without the thermal energy transfer at the plugged region. Both of the boundary conditions of hot-leg temperature and feedwater mass flow rate are fixed for this investigation. From the results of this study the stability ratios inside the group plugging zone are decreased slightly. At the outside of group plugging zone, however, most of the stability ratios tend to be increased.

### 1. 서 론

원자력발전소 계통도를 살펴보면 원자로, 가압기, 증기발생기, 냉각재 펌프, 주급수 펌프, 터빈, 발전기, 복수기 등으로 구성되어있다. 그 중에서 증기발생기는 원자로 내에서 고온·고압으로 된 물이 밀폐된 상태의 2차 계통의 차가운 물과 열교환을 통해 증기로 만들어진다. 이처럼 증기발생기는 원자로에서 가열된 물이 이곳에서 2차 계통의 물과 세관을 사이에 두고 만나 증기를 발생시키는 장치로서 열교환기의 성격을 띤다. 증기발생기 전열관은 대략 0.04" ~ 0.05" 의 두께로 1차 계통의 냉각수와 2차 계통을 구분짓게 된다. 전열관은 그 내부에 8,214개가 배열되어있어, 전열관의 두께 감육 및 파열사고(SGTR: Steam Generator Tube Rupture)에 유의해야하며, 원전 설계 시에 가장 많이 고려

되고 있다. 원전의 안정적인 운전을 위해서 주기적 안전점검기간에 와전류탐상 검사(ECT)를 통해 감육량 기준인 40% 이상일 경우 해당 전열관에 대해서는 관막음(plugging) 조치를 취하게 된다.<sup>(1,2)</sup> 관막음 시행은 전열관의 두께 감육 및 마모로 인한 1차 냉각수의 누설을 막기 위함이다. 본 연구에 적용되는 모델인 한국 표준 원전(KSNP, Korea Standard Nuclear Powerplant)의 경우, 100% 출력 8%의 관막음을 고려하여 설계한다. 증기발생기 전열관의 두께 감육 및 마모의 원인은 여러 가지가 있겠으나, 유체의 유동에 따른 불규칙적인 진동이 주원인이며, 유동에 따른 내부 구조물과의 마찰과 이물질과 화학조건에 따른 생성물 등으로 감육이 발생한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 전열관 감육의 여러 원인 중 유동에 따른 불규칙적 진동인 유체탄성불안정성을 고려하여 한국표준원전 증기발생기 전열관의 진전성을 평가하려한다.<sup>(3)</sup> 유동에 의한 불규칙적인 진동은 증기발생기 내부구조물에 영향을 주어, 증기발생기 상부에서 전열관과 진동방지 내부구조물간의 마찰과 충격으로 마모(wear)와 피로파괴(fatigue fracture)에 영향을 미치게 된다. 마모의 발생은 두께 감육과 심할 경우 전열관의 rupture에 따른 냉각수의 누수현상을 초래한다. 이러한 손상은 증기발생기 전열관의 역학적 설계, 재질, 치수공차, 제조법 및 운전방법 등이 연관되어

\* 전북대학교 대학원 항공우주공학과

E-mail : exivguy@korea.com

Tel : (063) 270-4286, Fax : (063) 270-2472

\*\* 전북대학교 기계항공시스템공학부

\*\*\* 한전 전력연구원 원자력연구실

\*\*\*\* 한국원자력연구소 하나로이용기술개발부

복합적인 원인에 의해 발생하고 있다. 열출력 조절 및 관막 음률, 냉각재 온도 감소등의 원전 운전조건 변화는 증기발생기 전열관 건전성에 영향을 미치므로 내부 유동특성해석 및 안전사고 대비 등에 유리할 것이다. 이를 위해서는 원전 운전조건 변화에 따라 유체탄성불안정성해석에 따른 전열관의 건전성 평가가 필수적이라 볼 수 있다. 증기발생기 전열관 마모를 예방하기 위한 시정조치로 관막음을 시행하는데, KSNP형 증기발생기에서 stay cylinder 상부의 공동부위 주변의 전열관들을 집단 관막음을 실시하여,<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 집단 관막음이 이루어졌을 때 공동부위 영역에서의 전열관과 그 주변 영역의 전열관의 유체탄성불안정성 평가를 통해 어떠한 변화가 있는지 비교 분석해보며, 집단 관막음에 따른 전열관의 유체탄성불안정성을 평가하고자 한다.

## 2. 증기발생기

### 2.1 개요

본 연구에서 적용한 증기발생기 모델은 한국표준원전에 채택되고 있는 증기발생기로서 Fig. 1에서처럼 diagonal strip, vertical strip, horizontal strip, U-Bend tube support (Batwing)과 전열관 지지판(tube support plate, TSP)등의 진동방지 구조물들이 상부에 구성되어있다.

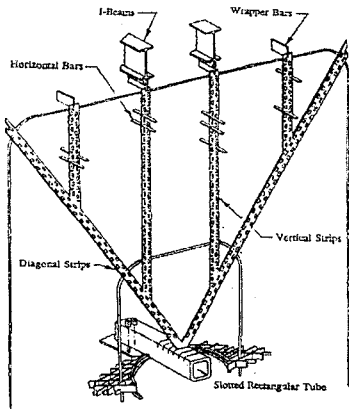


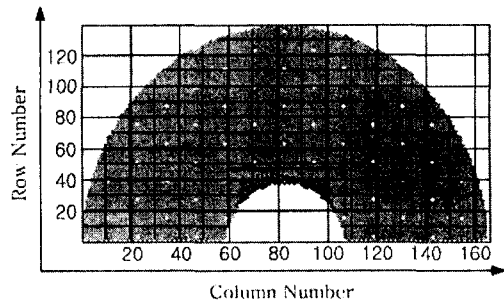
Fig. 1 Configuration of diagonal, vertical, and horizontal strips of the KSNP SG

한국표준원전은 ABB-CE사의 설계로 미국 팔로버디(Palo Verde) 원자력 발전소인 System-80의 원자로설계 기술을 도입하여, 그 동안 축적된 선진 기술과 운전 경험 그리고 자체 개발한 최신 기술을 반영하여 우리 실정과 여건에 맞게 설계를 개량시킨 1000MWe급 경수로형 발전소이다. 17번 열까지의 전열관은 역 U자형이고, 그 외에는 웨스팅하우스형 증기발생기와 같이 원형을 이루지 않고 U자관 상부

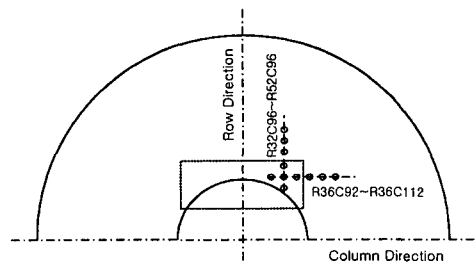
에 수평부분이 존재하게 된다. KSNP형 증기발생기 전열관의 상부 유동출구영역에서의 수평 전열관은 다이아몬드 배열형태이며, 이 부분에서의 피치는 1.231" 이다. 전열관의 수직부분에서의 배열은 삼각형 배열이며, 전열관의 외경은 0.75", 피치는 1" 이다.

### 2.2 집단 관막음 영역

증기발생기 내부에 들어있는 전열관의 수는 KSNP형의 경우 총 8,214개에 이른다. 본 연구에서는 증기발생기에서 stay cylinder 상부의 공동부위에 전열관의 마모가 발생하는 영역인 Fig. 2(a)에서처럼 row 25~40, column 64~102 부분에 해당하는 167개 전열관과,<sup>(4)</sup> 그 주변 부위까지 몇 개 포함시켜 row 22~42, column 64~102 부분의 총 206개의 전열관이 집단 관막음을 되었을 때, 그 영역에서의 전열관과 영역주변의 전열관의 유체탄성불안정성 특성을 비교 분석하려한다. 총 전열관 수가 8,214개임을 감안하였을 때, 206개의 관막음을 시행은 2.5%의 관막음을 시행한 결과이다. Fig. 2 (a)는 증기발생기 전열관의 hotside에서의 튜브배열 형상을 나타내었고, 고온관측에서의 집단 관막음 영역을 도 시해보았다. 본 연구에서는 집중 마모 발생 영역의 전열관을 기준으로 Fig 2 (b)와 같이 영역내외의 전열관의 행과 열을 변화시켜보면서 유체탄성불안정성 특성을 비교 분석하려한다.



(a) Tube array on the tube sheet



(b) Selected tube locations

Fig. 2 Sectional view of the KSNP SG plane

### 3. 수치 해석

#### 3.1 열수력 해석

본 연구에서는 EPRI 주도로 개발한 열수력 해석코드인 ATHOS3-MOD1을 이용하여 증기발생기의 내부 열유동 해석을 하였다. 이 코드는 증기발생기 2차측의 열유동 특성을 3차원으로 계산하고 정상상태 뿐만 아니라 과도상태도 해석이 가능하다. 본 연구에서 사용한 내부 좌표계는 원통좌표계를 사용하며, 격자계 수는  $20(\theta) \times 18(r) \times 45(z)$ 이다.<sup>(5)</sup> 여기서,  $\theta$ 는 증기발생기 원주방향이고,  $r$ 은 반경방향,  $z$ 는 수직 축 방향이다.

Table 1 Operating condition of the KSNP SG

Condition	Intact	Group Plugged
고온관 온도 (F)	611.0	611.0
저온관 온도 (F)	554.7	554.7
관막음률 (%) ( $m^2$ )	0% (4762.6)	2.5%(4655.0)
급수온도 (F)	450	450
냉각재 유량 (lb/hr)	6.320E+07	6.320E+07
증기압력 (psia)	1014	1006
증기유량 (lb/hr)	6.340E+06	6.337E+06

본 연구에서 적용된 증기발생기의 운전조건은 Table 1과 같으며, 고온관온도를 10F 감소시킨 운전 조건으로 설정하였다. 집단관막음 효과를 알기 위해 관막음률을 제외하고 경계조건은 동일한 조건으로 적용하였다. 이 값들은 ATHOS3-MOD1의 입력값으로 사용되며 열수력 해석의 주요변수가 된다.

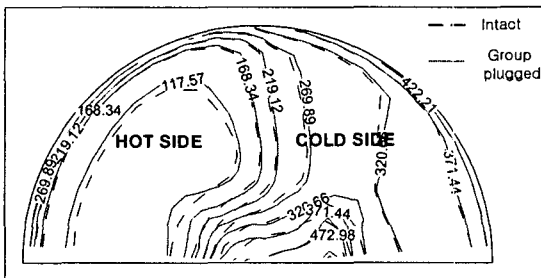


Fig. 3 Secondary side flow density distribution ( $kg/m^3$ ) of R40C96 at  $z=8.472m$

Fig. 3은 R40C96의 튜브 상부 수평관 부근에서 2차측 유체 밀도분포를 집단 관막음 전후로 비교한 것이다. 집단 관막음 실시에 따라 2차측 유체밀도는 전반적으로 약간 상승하

였고, 증기발생기 중앙부위에서 밀도분포가 집중되었으며 그 값이 커짐을 확인할 수 있다. 이는 열전달 감소로 인한 체적팽창률의 감소에 의해서 기인하는 것이며 이는 곧 중앙 공동부위에서 유속의 감소를 일으키게 됨을 확인할 수 있었다.

#### 3.2 유체탄성불안정성(FEI) 해석

유체탄성불안정성의 해석 기준으로 Connors<sup>(6)</sup>가 제안한 임계 유속식을 적용한다. Connors의 임계 유속식에는 전열관 직경, 금속 재질의 질량, 전열관 주위의 유체 질량, 부가 유체 질량, 감쇠비, 전열관의 고유진동수 등이 포함되어 있다. Fig. 4는 유체탄성불안정성 해석절차를 flow chart로 나타내었다. 먼저 설계자료를 통해서 전열관 형상을 파악하며, 운전조건과 경계조건 자료로부터 ATHOS3-MOD1<sup>(5)</sup> 열수력 해석을 수행한다. 열수력 해석은 진동모드 해석을 위해서 전열관 내부와 외부의 1,2차측 냉각수의 밀도분포를 계산하고, 부가질량 분포를 얻어내어 ANSYS를 이용한 모드해석을 수행하기 위함이다.

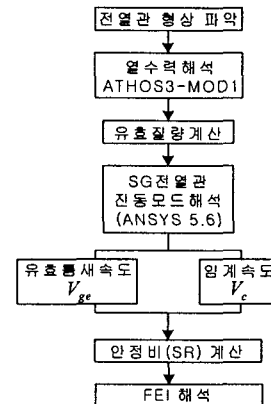


Fig. 4 Flow chart of FEI analysis

그 다음으로 전열관의 단위길이당 유효질량분포를 각 위치에서 1차측 밀도, 전열관 금속 밀도, 부가 질량을 고려하여 계산한다. 전열관 재질의 단위 길이당 질량, 1차 냉각수의 단위 길이당 질량, 전열관 주변의 2차측 유체 질량을 모두 더해서 유효질량을 구한다. 부가 질량은 부가질량 계수<sup>(7)</sup>을 수직 전열관에 대해서  $c=3.1$ , 수평전열관에 대해서  $c=1.7$ 를 적용하여 계산한다. 여기서  $c$ 는  $\rho(s)$ 는 전열관을 따르는 2차측 혼합밀도이다. Fig 5와 6은 단위 길이당 부가 질량(added mass)으로 R36C96과 R40C96의 관 주변을 흐르는 2차측 유체질량 분포를 비교해보았다. 집단 관막음 시행 후 hotside측의 수직 전열관 부위에서 부가질량이 가장 많이 증가했으며 이것은 hotside측 전열관의 유속분포가 고온관측에 편심되어 그 영향을 미쳤음을 알 수 있었고,

U-bend region을 기준으로 cold side측 주변의 부가질량의 증가는 다소 완화되었다. 전반적으로 집단 관막을 시행 후 부가질량이 증가했음을 알 수 있었다.

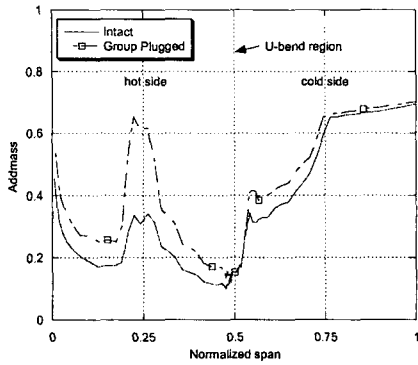


Fig. 5 Added mass distribution of R36C96

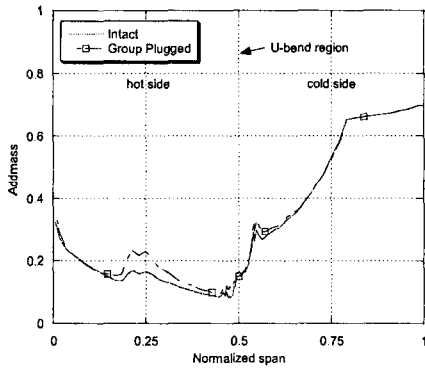


Fig. 6 Added mass distribution of R48C96

그 다음으로 전열관 형상과 재질의 물성치(Young's modulus), 그리고 유효 질량분포를 이용하여 전열관의 고유진동 모드 해석을 수행한다. 모드해석은 ANSYS ver. 5.6을 사용하였다. 전열관의 하부는 고정으로 가정하고, 전열관 지지판(tube support plate)은  $r, \theta$  방향에 대해서 구속하는 핀 지지조건을 적용하며, 진동지지봉은  $x$ -방향에 대한 구속을 적용한다. 전열관의 유효틈새속도는 전열관에 수직 횡단하는 흐름 성분으로부터 구한 틈새속도  $V_g(s)$ 를  $j$ -차의 모드 형상함수로 가중시킨 유효틈새속도  $V_{ge,j}$ 를 안정성 해석 시 사용한다.

$$V_{ge,j}^2 = \frac{m_o}{\rho_o} \frac{\int_0^L \rho(s) V_g^2(s) \phi_j^2(s) ds}{\int_0^L m(s) \phi_j^2(s) ds}$$

(1)

여기서  $m_o, \rho_o$ 는 전열관의 기준 유효질량과 2차측 유체의 기준밀도이며,  $L$ 은 전열관 길이,  $\phi_j(s)$ 는  $j$ -차의 수직 모드 형상함수이다. Fig 7과 8은 R36C96과 R48C96의 집단 관막을 전후의 전열관 주변의 틈새속도를 계산하여 그 분포를 나타내었다. 집단 관막을 시행 후 틈새속도는 감소되었으며, 집중 관막을 영역의 바깥쪽 전열관에 비해 틈새속도가 감소됨을 알 수 있다. 이것은 row 44번 이후에 수평방향의 스트립이 놓여있어 유속이 억제되는 특성이 있다.

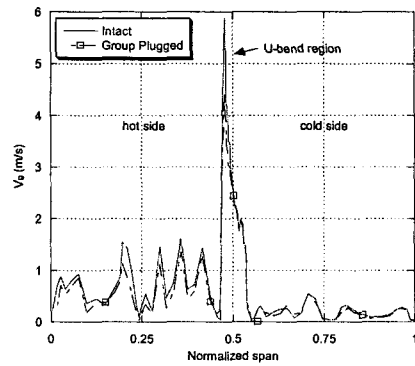


Fig. 7 Gap velocity distribution of R36C96

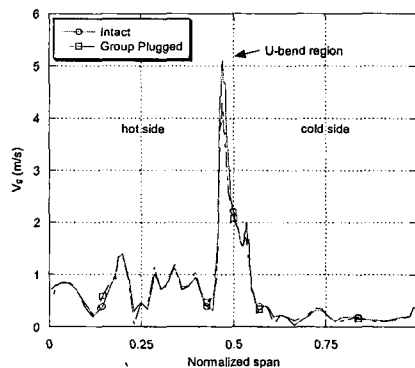


Fig. 8 Gap velocity distribution of R48C96

임계속도는 Connors의 실험을 통해서 다음처럼 얻어냈다.

$$V_{c,j} = K f_j d \sqrt{\frac{2\pi\zeta m_o}{\rho_o d^2}} \quad (2)$$

여기서  $f_j$ 은 전열관의  $j$ -차 고유진동수,  $\zeta$ 는 감쇠비,  $K$ 는 유체탄성불안정성 상수,  $d$ 는 전열관 외경을 나타낸다. 본 연구에서는 유체탄성불안정성 상수  $K=3.3$ 과 감쇠비

$\zeta=1.5\%$ 를 적용하였다. 최종적으로 열수력 해석 결과로부터 전열관에 수직한 틈새속도를  $j$ -차의 모드 형상함수로 가장시킨 유효틈새속도  $V_{ge,j}$ 와 Cornors의 실험으로부터 각 고유진동수에 대한 임계속도  $V_{c,j}$ 를 얻어 안정비를 판정한다.

$$SR_j = \frac{V_{ge,j}}{V_{c,j}} \quad (3)$$

안정비(Stability Ratio,  $SR$ ) 값이 1을 넘으면 유체탄성불안정성 영역에 들어가게 되어 전열관의 과다진동이 발생하여 마모의 원인이 되므로, 이 값이 1을 넘지 않도록 구조물 등에 알맞은 기준을 정하여 설계하여야 한다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 집단 관막음에 따른 안정비(Stability Ratio) 비교

###### (1) 열 번호 변화에 따른 안정비 비교

Fig. 9 ~ Fig. 11은 전열관의 열(row) 번호 변화에 따른 집단 관막음 전후의 안정비를 비교하고 있다. 정상상태에서와 집단 관막음 상태 모두 1차 모드와 2차 모드에서 R40C96 전열관에서 안정비가 크게 증가하고 그 이후로 열 번호의 증가에 따라 안정비의 변화가 미비함을 알 수 있다. 집단 관막음 실시 후 전열관의 안정비는 감소되었음을 확인하며, 마모 집중 부위에 집단 관막음 시행이 어느 정도의 효과가 있음을 대략적으로 확인할 수 있다. KSNP 증기발생기의 전열관 상부 진동방지 구조물들의 특징은 전열관 밴드 부분에 diagonal strip과 상부 수평 전열관 부위에 수직으로 장착된 vertical strip, 그리고 row 번호 44번 이상에서는 수평방향의 horizontal strip이 놓여있어서 전열관의 높이방향의 진동을 억제하는 효과가 있다. 이러한 내부 구조물들의 지지조건이 진동모드형상에 영향을 주어 Row44 이상에서는 안정비가 완화된 것으로 판단된다.<sup>(8)</sup>

###### (2) 행 번호 변화에 따른 안정비 비교

Fig. 12 ~ Fig. 14는 전열관의 행(column) 번호 변화에 따른 집단 관막음 전후의 안정비 변화 비교를 나타낸다. 행 번호의 변화는 지지조건이 동일하게 적용되었고, 동일한 전열관 형상에서 수행되었다. 집단 관막음 시행후 모드에 따라 약간의 차이가 있지만, 각 전열관의 안정비는 미비하나 감소됨을 알 수 있다. 3차 모드에서 C104이후의 값이 그 안쪽 값보다 작게 나오는 원인은 증기발생기 전열관 단면에서 hot side측이 cold side 측보다 유속의 크기가 상대적으로 약간 크게 갖는 중앙부의 유속분포가 한 원인으로 작용하였으리라 생각된다. 이는 전열관 상부 구조물과 전열관 사이의 배열 특성 및 지지 조건의 변화가 안정비에 영

향을 미치는 인자로 작용하리라 본다. 이처럼, 증기발생기

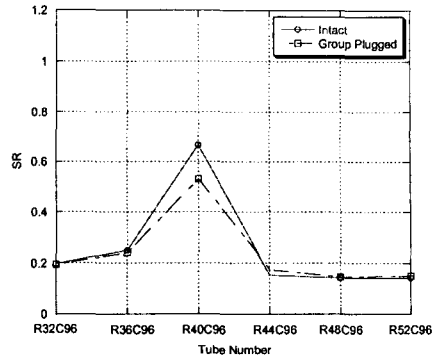


Fig. 9 Change of the stability ratio with the variation of row number. ( $f_1$ )

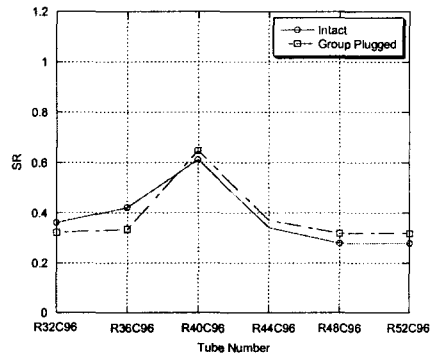


Fig. 10 Change of the stability ratio with the variation of row number. ( $f_2$ )

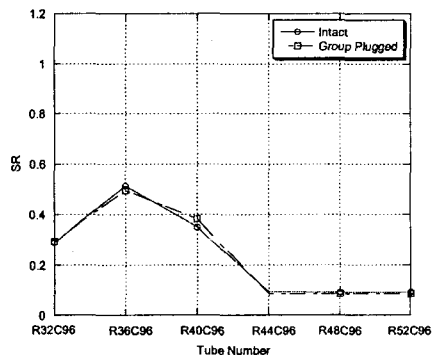


Fig. 11 Change of the stability ratio with the variation of row number. ( $f_3$ )

중앙부위의 전열관을 집단 관막음 시행 전후의 결과를 살펴본 결과 안정비는 완화되었고, 전열관 상부의 진동방지 구조물과 2차측 유체 유동에 따른 영향으로 row 40번에서와 column 104번을 전후로 어느 정도의 규칙적인 변화를 볼 수 있었다.

(3) 속도 인자에 따른 안정비 비교

Table 2 Critical velocity

Tube Mode	R36C96			R36C108			R48C96		
	Intact	Group Plugged	Ratio	Intact	Group Plugged	Ratio	Intact	Group Plugged	Ratio
1	1.73	1.59	0.919	1.84	1.82	0.989	1.83	1.79	0.978
2	1.90	1.65	0.868	2.08	2.10	1.010	2.11	2.07	0.981
3	2.01	1.86	0.925	2.17	2.18	1.005	2.28	2.23	0.978
4	2.21	2.01	0.910	2.37	2.39	1.008	2.43	2.42	0.996
5	2.36	2.17	0.919	2.53	2.55	1.008	2.78	2.76	0.993

Table 3 Effective gap velocity

Tube Mode	R36C96			R36C108			R48C96		
	Intact	Group Plugged	Ratio	Intact	Group Plugged	Ratio	Intact	Group Plugged	Ratio
1	0.43	0.38	0.884	0.35	0.31	0.886	0.26	0.26	1.000
2	0.80	0.55	0.688	0.80	0.80	1.000	0.59	0.66	1.119
3	1.03	0.92	0.893	0.71	0.59	0.831	0.21	0.19	0.905
4	0.73	0.55	0.753	0.65	0.76	1.169	0.54	0.60	1.111
5	0.98	0.92	0.939	0.80	0.77	0.963	0.56	0.58	1.160

안정비를 결정하는 요소는 식(3)과 같이 임계속도 인자와 유효틈새속도 인자이다. 두 속도 인자 값의 변화는 안정비에 영향을 주기 때문에 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서 집단 관막음 영역 내의 전열관과 영역 밖의 전열관을 선정하여 Table 2 와 Table 3과 같이 속도 인자에 따라 임계속도와 유효틈새속도를 나타내었다. 속도 인자의 변화는 일관적이지는 않지만 대체적으로 살펴보았을 때, 집단 관막음

영역 내의 전열관의 임계속도와 유효틈새속도는 모두 감소하는 경향이 있다. 특히 유효틈새속도의 감소량이 임계속도의 감소량보다 크게 나타나는 경향이 있어, 안정비는 관막음 후 대부분 감소되었다. 그러나 집단 관막음 영역 밖의 전열관은 일관적이지 않지만, 유효틈새속도가 약간 증가하는 경향이 있고, 임계속도는 큰 변화가 없어 결과적으로 안정비가 다소 증가하는 추세를 보여주고 있다.

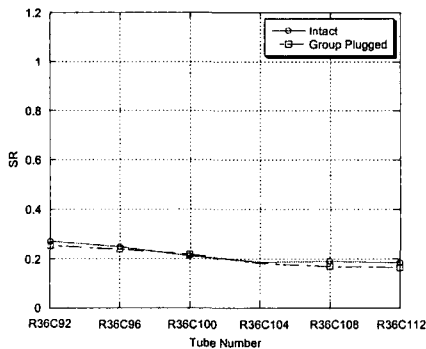


Fig. 12 Change of the stability ratio with the variation of column number. ( $f_1$ )

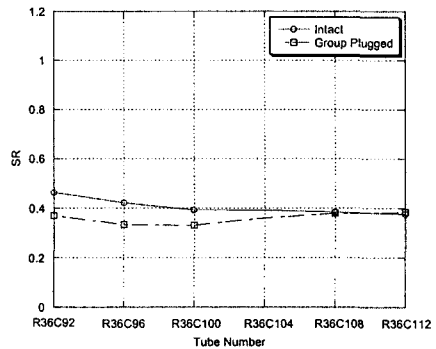


Fig. 13 Change of the stability ratio with the variation of column number. ( $f_2$ )

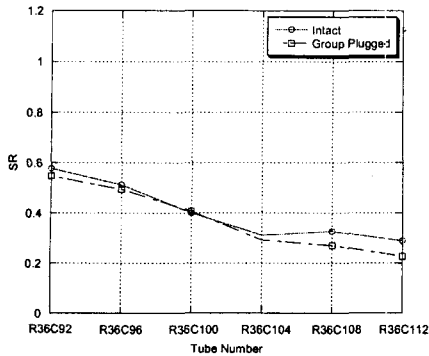


Fig. 14 Change of the stability ratio with the variation of column number. ( $f_3$ )

#### 4.2 집단 관막음에 따른 전열관 모드형상

R36C96의 집단 관막음 시행 후 진동 모드 형상의 변화는 거의 없으며, 냉각수의 부재로 인해 frequency는 약간 상승하였음을 알 수 있었다. 전열관의 행열 변화에 따른 진동 모드 특성을 비교해본 결과 row 40의 전열관은 전열관의 수평부위에서 국부 모드가 발생하고, 그 외의 row 전열관에서는 수직부위에서 발생됨을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 한국표준원전 증기발생기의 안정적인 운영을 위하여 상대적으로 유속이 높은 곳으로 예상되는 중앙공동부위에 집단 관막음을 시행한 결과와 시행하지 않은 결과를 가지고 유체탄성불안정성 관점에서 비교 해석하였다. 집단 관막음 시행에 의해서 중앙 공동 부위에서의 2차측 유속의 감소와 밀도의 증가가 일반적인 경향을 가지고 일어남이 관찰되었으며, 중앙공동부위에서 떨어질수록 값의 변화는 미미해짐을 확인하였다.

일관적이지는 않지만 대부분의 결과를 놓고 볼 때 집단 관막음 영역 내부에서의 임계속도와 유효틈새속도는 둘 다 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 유효틈새속도의 감소량이 임계속도의 감소량보다 더 크게 나타나는 경향을 나타내었다. 이로 인하여 관막음에 의해서 중앙공동부위의 안정비가 대부분의 경우에 감소되는 결과를 얻어내었다. 그러나 집단관막음 영역 바깥에서는 유효틈새속도가 증가하는

경향을 나타내고 임계속도도 커다란 변화가 없게 나타남으로써 안정비에 다소 증가가 일어나는 경향을 보여주었다.

위의 결과를 종합해보면 한국표준원전 증기발생기의 중앙공동부위에서의 집단관막음은 중앙공동부위의 안정비를 감소시키는 경향을 보이나 중앙공동부위 바깥에서는 오히려 안정비를 약간씩 증가시키는 결과를 보이는 것으로 확인되었다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) 조봉호, 유기완, 박치용, 박수기, 2002, "관막음된 증기발생기 전열관의 유체유발진동 특성 평가", 한국소음진동공학회 논문집 추계학술대회 논문집.
- (2) 김형남 외, 2001, "증기발생기 2차측 잔류물질 영향 평가 프로그램 개발", TM.00NJ17.M2001.214, KEPRI
- (3) 유기완, 박치용, "CE형 증기발생기 전열관에 대한 유체탄성불안정성 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제4호, pp.261-271, 2002.
- (4) 정한섭, 김기태, 김홍덕, 2000, "증기발생기 전열관 진전성 평가기준 개발", TR.96NJ14.S2000.63, KEPRI.
- (5) ATHOS3 Mod-01: "A Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generators," Vol. 1, EPRI NP-4604-CCML, 1990.
- (6) Connors, H.J. 1980, "Fluid-elastic Vibration of Tube Arrays excited by Nonuniform Cross Flow," Flow-Induced Vibration of Power Plant Components, ASME PVP-41, p.93
- (7) Chen, S.S. and Chung, Ho, 1976, "Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass Part I: Circular Cylindrical Structures," ANL-CT-75-45.
- (8) 유기완, 조봉호, 박치용, 박수기, 2002, "CE 형 증기발생기 전열관의 행열 변화에 따른 유체유발진동 특성", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집.