'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국형 표준원전 냉각재온도 감소운전에 대한 증기발생기 전열관의 유체탄성 불안정성 영향 검토

A Study on the fluidelastic instability effects of KSNP steam generator tube for operation at reduced temperature (ORT)

최석남*, 윤기석, 김범식, 박성호

한국전력기술㈜
대전시 유성구 덕진동 150번지

박수기, 이선기, 최광희

한국전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16번지

요 약

운전중인 증기발생기 전열관 재질의 건전성을 향상시킬 수 있는 냉각재온도 감소운전(operation at reduced temperature; ORT)은 증기발생기 전열관의 일차응력부식에 의한 결함 발생 가능성과 성장율을 크게 감소시켜 전열관 재질에 대한 건전성을 향상시킬 수 있지만, 2차측 냉각재의 유량변화에 따라 유체유발진동에 의한 유체탄성 불안정성(fluidelastic instability)이 증가하기 때문에 증기발생기 전열관 다발의 구조적인 건전성에 대한 충분한 검토가 함께 요구된다. 본 논문에서는 한국형 표준원전 냉각재 고온관의 온도가 621°F인 경우와 10°F만큼 감소를 하였을 경우에 증기발생기 전열관의 유체탄성불안정성이 4.7%정도 증가되는 것으로 평가되었다.

Abstract

To increase the integrity of operating steam generator tubes, the operation at reduced temperature (ORT) can be applied, which reduce possibility of the crack initiation and crack growth rate by stress corrosion of tubes. But it may increases the fluidelastic instability of flow-induced vibration by mass flow rate change of the secondary coolant.

Therefore, the structural integrity of the tube bundle must be considered to apply the operation at reduced temperature (ORT) to the operating plants. In this study on KSNP steam generator tube, the fluidelastic instability is increased about 4.7% for a reduced primary fluid inlet temperature by 10°F.

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기 전열관은 직경에 비하여 길이가 길고 가느다란 전열관 다발으로 구성되어 있으며, 냉각재가 전열관의 내부 및 외부로 흐르고 있어서 진동에 매우 취약한 구조물이다. 유동하는 냉각재와 구조물은 냉각재에 의해 연동(coupling)되어 발생한 유체력(fluid force)이 구조물을 변형시키며, 구조물의 변형은 유동의 흐름을 변경하여 유체력을 변하게 한다. 냉각재가 구조물에 유체력을 작용하면 구조물은 동일한 크기의 힘을 냉각재에 전달하는데, 이때 두 힘이 일치하면 진폭이 큰 진동을 발생할 수 있다. 이와같이 유동하는 냉각재의 동역학적인 힘과 구조물의 관성, 감쇠 및 탄성력 간의 상호 연동작용에 의한 구조물의 동적거동과 관련된 현상들을 유체유발진동(flow-induced vibration)이라 한다.

증기발생기의 열전달 성능을 향상시키기는 방안으로 2차측 냉각재의 유속을 증가시키거나, 구조물 내부의 전열관 지지대의 개수를 줄여서 압력강하를 감소시키면 가능할 수 있다. 그러나, 유속의 증가나 전열관 지지대의 감소는 과도한 유체유발진동을 유발하여 구조물의 건전성을 저하시킬 수 있기 때문에 이러한 사항을 함께 고려하여 설계하여야 한다.

그리고, 운전중인 발전소에서 증기발생기의 건전성을 향상시키는 방안중의 하나로서, 냉각재온도 감소운전(operation at reduced temperature ; ORT)이 있다. 냉각재온도 감소운전은 증기발생기 전열관 손상의 가장 큰 주요원인이 되는 전열관 재질의 일차냉각수 응력부식균열(primary water stress corrosion cracking : PWSCC)에 대한 가능성과 성장률을 크게 감소시켜 전열관 재질에 대한 건전성을 향상시킬 수 있으나, 2차측 냉각재의 유량변화에 따라 유체유발진동에 의한 증기발생기 전열관의 구조적 건전성이 저하될 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 냉각재온도 감소운전(ORT)에 따른 한국형 표준원전 증기발생기 전열관 유체유발진동 주요 가진기구의 하나인 유체탄성 불안정성(fluidelastic instability) 영향을 평가하기 위하여 각각 운전온도 621°F 경우와 10°F가 저감된 운전온도 611°F인 경우를 고찰하였다. 운전온도에 따른 유동장해석(thermal-hydraulic analysis)은 미국 전력연구소(EPRI) 상용코드인 ATHOS3 Code를 이용하였다.

2. 유체유발진동의 주요 원인

현재 증기발생기 전열관 다발의 손상은 대부분 그림 1과 같이 횡유동이 존재하는 부위

(저온측 및 고온측 재순환 입구, 주급수 입구, U자관 수평부위인 2상냉각재 출구등)에서 발생하였다. 특히 증기-물 혼합물(steam-water mixture)의 2상(two phase) 횡유동이 존재하는 부위인 U자관 수평부위는 유체유발진동에 가장 취약한 부위이다. 횡유동을 받고 있는 구조물에서 발생가능한 유체유발진동 가진기구는 난류여기진동 가진(turbulence-induced vibration excitation), 주기적 와류 방출(periodic wake shedding) 및 유체탄성 불안정(fluidelastic instability)등이 있다[1]. 증기발생기처럼 좁은 공간에 조밀하게 밀집되어 있는 전열관 다발이 횡유동을 받는 경우에 전열관 다발의 거동은 그림 2와 같이 3종류의 유체유발진동 가진기구의 합성진폭으로 나타난다.

지금까지 밝혀진 바에 의하면 횡유동을 받는 전열관 다발에서 유체탄성 불안정은 손상을 야기시키는 가장 주요한 유체유발진동 가진기구의 하나로 밝혀졌다. 유체탄성 불안정은 유체동역학적인 힘과 전열관의 거동 사이에 상호 연동작용이 전열관의 변위 및 동위상에 비례하는 유체동역학적인 힘성분을 유발할 때 가능하며, 단일 주기운동 동안에 전열관이 냉각재로부터 흡수한 에너지가 전열관의 감쇠에 의해 소모된 에너지보다 더 커질 때 일어난다. 이 현상의 특징은 단기간내에 과도한 진폭을 야기하여 전열관을 손상시킨다.

유체탄성 불안정에 대한 연구는 대부분 실험적으로 고찰되었다. Connors[2,3]는 1970년에 처음으로 단일 전열관열을 갖고 풍동실험을 실시하여 유체탄성 불안정 가진기구를 확인하여 수식화하였다. 이후에 M.J.Pettigrew, R.D.Bleveins, M.K.Au-Yang등 많은 연구자들은 Connors의 수식을 이용하여 여러 가지 유동상태와 전열관 다발의 배열형상 및 지지조건에서 현실적인 유체탄성 불안정 상수값을 얻기 위한 연구가 실시하였고, 그 결과들을 제시하고 있다.

3. 유체유발진동 해석방법

일반적인 증기발생기 전열관의 유체유발진동 해석절차는 증기발생기 열수력 해석코드를 이용하여 2차측 냉각재의 유동 및 유속을 계산한 후 여기에서 얻은 결과를 이용하여 전열관의 동특성해석 (modal analysis) 단계에서 전열관의 모드형상 및 고유진동수를 구한다. 다음은 열수력 해석 결과와 전열관의 동특성해석 결과를 사용하여 유체유발진동 가진기구인 난류여기진동 가진, 주기적 와류 방출 및 유체탄성 불안정 등에 따라 발생될 전열관거동에 대한 설계허용치(acceptance criteria)와 비교평가 한다.

본 논문에서는 횡유동을 받는 전열관 다발에서 주요한 유체유발진동 가진기구의 하나로 밝혀진 유체탄성 불안정에 대한 영향만을 한국형 표준원전 증기발생기 전열관에 대해 평가하였다. 증기발생기 전열관의 유체탄성 불안정성 해석절차는 그림 3과 같다.

(1) 유동장 해석(thermal-hydraulic analysis)

증기발생기에서 전열관다발의 진동해석을 수행하기 위해 필수적인 선행 요건 중의 하나가 증기발생기 열수력 해석을 통하여 증기발생기 내부 전장에 걸친 2차측 냉각재의 속도 및 밀도의 분포를 구하는 것이며, 증기발생기 2차측의 실제 기하학적 형상에 대한 열수력 해석은 증기발생기 내부 유동장의 해석모형을 단순화시킴으로써 2차측 유동을 계산 가능하도록 고안된 ATHOS3 전산코드[4]를 이용하였다.

열유동장 해석에 사용한 ATHOS3 해석모델은 그림 7과 같다. 계산 영역으로 한정되는 증기발생기의 유동장 영역은 전열관 고정판(tubeshhet) 상부면으로부터 1차 습분 분리기 하부 입구면까지 전열관 다발을 포함하고 있는 원통(shroud)의 내부공간이며, 유한차분법에 의한 열수력 해석을 위해서 유한차분격자로 원통의 전열관 다발과 내부공간을 잘 모사하기 위하여 극좌표계를 활용하여 분할 구성하였다. 격자구성은 그림 7에서 보는 바와 같이 원주방향 IX=16개, 반경방향 IY=18개, 높이방향 IZ=43개로 구분하였다. 또한, 재순환유로 전영역을 고온측과 저온측의 두 영역으로 분할하였다.

한국형 표준원전 증기발생기의 운전온도에 따른 유동장해석은 한국전력연구원(KEPRI)에서 운전온도가 621°F인 경우와 611°F인 경우를 각각 수행하였다.

본 논문에서 사용한 ATHOS3 유동장 해석이 적절히 수행되었는지 비교하기 위하여 운전온도 621°F인 경우에서 한국형 표준원전 증기발생기와 동일한 영광 3,4호기 해석결과[5]와 비교한 결과 대체적으로 큰 차이가 없었다.

(2) 동특성 해석 (modal analysis)

한국형 표준원전 증기발생기의 구조적 건전성을 평가하기 위해 선정한 전열관은 상부 수평부위에서 지지대가 없이 가장 긴 지관(span)을 갖는 전열관을 선택하였다.

유동장 해석시 전열관의 수력학적 부가질량(hydrodynamic added mass)을 포함한 단위 길이당 유효질량(m_0)는 다음과 같다 [1].

$$m_o = r_t A_t + r_i A_i + C_m r_o A_o \qquad \text{-------------------------------- (1-1)}$$

여기서, r_t는 전열관 밀도, r_i와 r_o는 각각 1차 및 2차 냉각수 밀도, C_m 은 부가질량 상수, A_t, A_i, A_o는 각각 전열관의 단면적, 전열관의 내부 및 외부의 표면적이다.

한국형 표준원전 증기발생기 전열관의 형상과 재질은 다음과 같다.

- 전열관의 치수 ; 직경 0.75 in., 두께 0.042 in.
- 전열관의 재질 ; Inconel 600 (E = 28.5 * 10^6 psi @ 650°F)

(3) 유체탄성 불안정성 평가

증기발생기처럼 좁은 공간에 많은 전열관들이 조밀하게 밀집되어 있는 경우에 전열관 다발내 단일 전열관의 유체동력학적 힘은 그 전열관을 에워싸고 있는 인접해 있는 전열관들의 거동에 의해 영향을 받는다. 전열관의 진폭은 유량이 증가함에 따라서 점진적으로 증가하다가 임의의 유량에 도달하면 갑자기 커져서 전열관의 거동을 불안정하게 한다. 이때의 유량을 임계유량이라 한다. 이같은 현상은 전열관의 한 주기운동 동안에 전열관이 유동으로부터 흡수한 에너지가 전열관의 감쇠에 의해 소모된 에너지 보다 더 커질 때 일어난다.

본 논문에서는 유체탄성 불안정(fluidelastic Instability) 현상으로 인한 전열관의 건전성평가를 아래와 같이 Connors[2,3]가 제안한 방법을 적용하였다. 즉, 전열관외부에 흐르는 냉각재의 유속이 임계유속(critical velocity)에 도달하면 진폭이 급격히 증가하여 파단에 이른다고 정의하였으며, 증기발생기의 설계는 냉각재의 유효유속(effective velocity; V_{EFF})이 임계유속이하가 되도록 설계한다.

$$\frac{V_r}{fd} = K_n\sqrt{\frac{m_0 V_0}{r_o d^2}} \qquad \text{(1-2)}$$

여기서, V_r은 기준 갭 유속, f는 유동속에서 전열관의 고유진동수, d는 전열관의 직경, r_o는 냉각재의 밀도, m_o는 전열관의 수력학적 부가질량(hydrodynamic added mass)을 포함한 단위 길이당의 유효질량, V_0는 유동속에서 전열관의 전체 감쇠비다. n은 질량-감쇠 매개변수의 지수이다.

(가) 유체탄성 불안정 상수(K)

한국형 표준원전 증기발생기 전열관의 유체탄성 불안정 상수 K는 그림 4와 같이 영광 3,4호기 실험자료[5]를 이용하였는데, 정삼각형 배열인 수직직관부는 보수적으로 가장 낮은 K=3.2를 적용하였다. 이는 참고문헌 [1]에서 권고한 값(K=3.3)과 큰 차이가 없다. 회전사각형 배열인 상부 U-Bend 수평부위는 K=7.1을 적용하였다.

(나) 수력학적 부가질량 상수 (C_m)

증기발생기 전열관 동특성해석에 필요한 수력학적 부가질량 상수는 Blevins가 제시

한 식[1]으로 계산된 상수보다 보수적인 큰 값을 적용하였다.

- 부가질량 상수 ; C_m = 3.1 (전열관 수직부위), C_m = 1.7 (전열관 수평부위)

(다) 감쇠비 (damping ratio, z)

한국형 표준원전 증기발생기 전열관의 고유진동수에 대한 감쇠비는 그림 5와 같은 System80 증기발생기 실험자료[5,7]를 이용하였다. 특히, 선정한 전열관의 U-Bend부위인 냉각재출구에서 자유진동수의 함수로 정의한 감쇠비와 참고문서[1]에서 Pettigrew가 2상(two-phase) 냉각재의 void fraction(%)의 함수로 제안한 값은 거의 일치하고 있다.

(라) 모드 해석(modal analysis)

한국형 표준원전 증기발생기에서 유체탄성 불안정성 평가를 위하여 선정한 전열관의 모드해석은 ANSYS Code[6]를 이용하여, 전열관의 횡유동이 존재하는 4개 부위에서 각각의 critical mode shape을 구하였다. 선정한 전열관 상부에 대한 모드형상은 그림 6과 같다.

(마) 임계유속 (critical velocity, V_{cr})

유체탄성 불안정 현상이 발생하기 시작하는 전열관의 임계유속은 유체탄성 불안정 상수 K 와 동특성해석에서 얻은 결과를 이용하여 Connors가 제안한 식(1-2)에서 계산하였다.

(바) 유효 유속(effective velocity; V_{EFF})

냉각재의 흐름이 전열관에 대하여 횡유동(cross flow)이고 전열관의 단일 간격(single span)의 일부분이나 다간격 (multi span)관의 단일간격에만 흐른다면, 이러한 냉각재의 임계유속은 전열관간격 전체에 걸쳐서 흐르는 냉각재의 유속보다 더 크기 때문에 전열관 전장에 걸친 유효속도(effective velocity; V_{EFF})를 불균일한 실제 횡유동 유속 $V(x)$로부터 전열관 전 길이에 걸친 횡유동을 균일하도록 산정할 수 있도록 다음과 같이 계산하였다.

$$V_{EFF} = \sqrt{\frac{\int (r(x)/r_o)V^2(x)f_n^{\,2}(x)dx}{\int (m(x)/m_o)f_n^{\,2}(x)dx}} \qquad \text{------------------------------ (1-3)}$$

여기서, m_o는 수력학적 부가질량을 포함한 단위 길이당 유효질량, r_o는 2차측 냉각재의 기준밀도, $V(x)$는 2차측 냉각재의 횡방향 속도, $r(x)$ 는 냉각재밀도, f_n는 전열관의 n번째 모드형태이다. 식(1-3)의 분자항은 유동부위, 분모항은 전열관간격 전장에 걸쳐서 평가한다.

(사) 유체탄성 불안정성 해석결과

한국형 표준원전 증기발생기의 운전온도에 따라 유체탄성 불안정성 평가를 위하여 선정한 전열관의 해석결과는 표 1과 같다.

유체탄성 불안정성의 영향이 가장 큰 부위인 U자관 수평부위에서는 냉각재온도 감소운전에 따라 냉각재의 유속(mass flow rate)은 8%정도 증가한다. 이에 따라 냉각재의 유효유속은 증가되기 때문에 유체탄성 불안정성이 증가된다. U자관 수평부위인 2상 냉각재 출구의 유동장해석 결과 밀도와 유속의 상태는 그림 8과 같다. 저온측 재순환 입구와 주급수 입구, 고온측 주급수 입수에서는 냉각재의 변화가 크지 않으며, 임계속도에 비하여 유효유속이 적기 때문에 유체탄성 불안정성은 문제가 되지 않는다.

한편, 전열관의 지지구조물의 형상은 변하지 않고, 냉각재온도와 밀도변화에 따른 전열관 부가질량의 변화는 아주 작기 때문에 전열관의 동특성해석 결과는 표 1에서 보는 바와 같이 전열관의 자유진동수와 냉각재의 임계유속의 변화량도 매우 작음을 알 수 있다.

따라서, 유동장 해석과 전열관의 동특성해석결과를 적용하여 저감된 운전온도(611°F)에서 평가한 한국형 표준원전 전열관의 유체탄성 불안정성은 U자관 수평부위인 2상 냉각재 출구부위에서 증가될 수 있는 것으로 평가되었다.

4. 결 론

운전중인 한국형 표준원전 증기발생기 전열관 재질의 건전성을 향상시킬 수 있는 냉각재온도 감소운전(ORT)은 전열관에 대한 일차응력부식균열의 발생가능성과 성장율을 크게 감소시켜 전열관 재질에 대한 건전성을 향상시킬 수 있으나, 2차측 냉각재의 유속이 증가하는 전열관 U자관 수평부위에서 유체탄성 불안정성(fluidelastic instability)이 운전온도가 621°F인 경우보다 4.7% 정도 증가할 수 있기 때문에 증기발생기 전열관 다발의 구조적인 건전성이 저하될 수 있다. 따라서, 냉각재온도 감소운전(operation at reduced temperature; ORT)은 유체유발진동에 의한 유체탄성 불안정성과 구조적인 건전성에 대한 충분한 검토가 함께 요구된다.

5. 참고문헌

[1] Welding Council Bulletin No. 372 "Guidelines for Flow-Induced Vibration Prevention in Heat Exchangers", Sandifer, J. B., May, 1992.

[2] Connors, H. J., Jr., "Fluidelastic Vibration of Tube Arrays Excited by Nonuniform Cross Flow", Flow-Induced Vibration of Power Plant Components, ASME, PVP-41, 1980.

[3] Connors, H. J., Jr., "Fluidelastic Vibration of heat Exchanger Tube Arrays"' ASME Paper No. 77-DET-90, 1977.

[4] Keeton, L. W., et al., "ATHOS3 : A Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of Steam Generators", EPRI Report NP-4604-CCM, Vol.1-3, 1986.

[5] Beard, N.L., Fanselau, R.W., Heilker, W.J. and Thakkar, J.G., "Flow Induced Vibration Analysis YGN 3 and 4 Steam Generator Economizer and Lower Tube Bundle", CENC-1838, ABB-CE, 1988.

[6] ANSYS Computer Code, Release 5.3, ANSYS Inc.

[7] Heilker, W. J., Beard, N. L., Park, J. Y., "Flow Induced Vibration Analysis in Support of Design of the Yonggwang Unit 3&4 Steam Generators", Proceedings of the International Symposium of Pressure Vessel Technology and Nuclear Code and Standards, April 19-21, 1989.

표 1. 운전온도에 따른 한국형 표준원전 증기발생기 전열관의 유체탄성 불안정성 평가결과

	운전온도	621 °F	611 °F	증감율
저온측 재순환 입구 (cold side recirculating entrance region)	자유진동수 [Hz]	130.01	129.43	-0.45%
	유효속도 [ft/sec]	1.1174	1.1311	1.23%
	임계속도 [ft/sec]	11.5813	11.4939	-0.75%
	안전성비	0.0964	0.0984	2.07%
주급수 입구 (feedwater entrance region)	자유진동수 [Hz]	288.59	287.18	-0.49%
	유효속도 [ft/sec]	0.9323	0.9014	-3.31%
	임계속도 [ft/sec]	22.7915	22.5725	-0.96%
	안전성비	0.0409	0.0399	-2.44%
고온측 재순환 입구 (hot side recirculating entrance region)	자유진동수 [Hz]	228.10	228.84	0.32%
	유효속도 [ft/sec]	3.2871	3.4361	4.53%
	임계속도 [ft/sec]	21.8052	21.9827	0.81%
	안전성비	0.1507	0.1563	3.72%
2상 냉각재 출구 (two phase flow at fluid exit region)	자유진동수 [Hz]	32.868	33.004	0.41%
	유효속도 [ft/sec]	10.8632	11.8567	9.15%
	임계속도 [ft/sec]	16.5738	17.2747	4.23%
	안전성비	0.6554	0.6863	4.71%

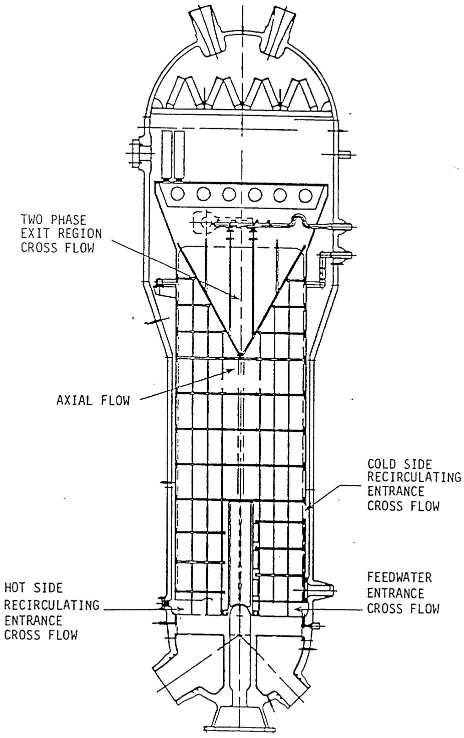


그림 1. 한국형 표준원전 증기발생기의
횡유동 부위

증기발생기 유동장 해석
(ATHOS3 전산코드)
↓
Critical Tube 선정
↓
Modal Analysis(ANSYS 전산코드)
↓
건전성 평가 (Connors 제안식)
↓
Stability Ratio 결과 비교

그림 3. 유체탄성불안정 해석 절차

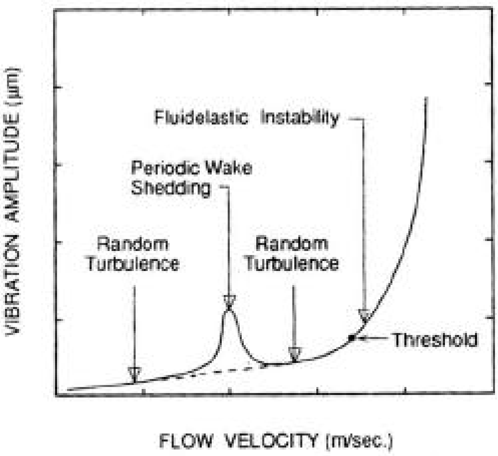


그림 2. 유체유발진동 가진기구

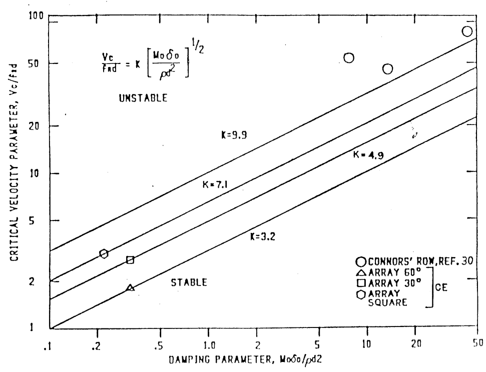


그림 4. 한국형 표준원전 증기발생기
전열관에 대한 유체탄성 불안정
상수 [5,7]

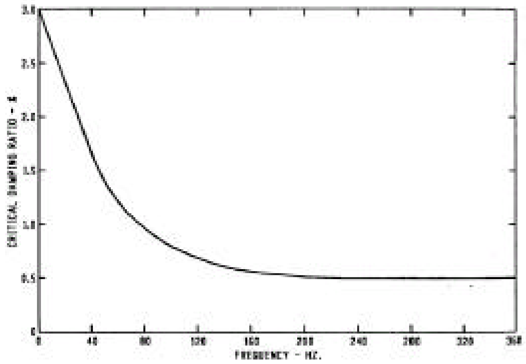
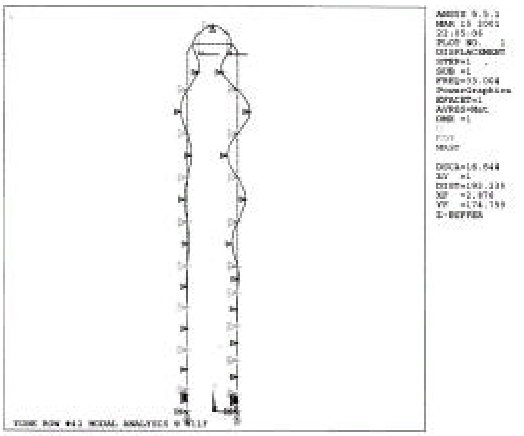


그림 5. 한국형 표준원전 증기발생기 전열관의 고유진동수 vs. 임계 감쇠비 최저값 [5,7]



(Mode Shape No.1 at 33.004 Hz)

그림 6. **한국형 표준원전 증기발생기의 유체탄성 불안정성 평가용 전열관 상부의 모드형상** (운전온도; 611°F).

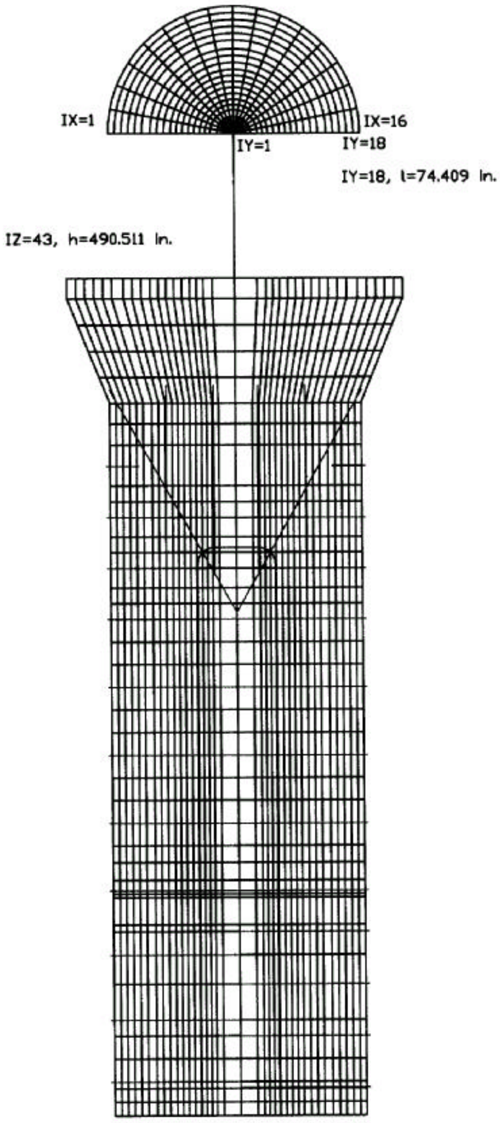


그림 7. 한국형 표준원전 증기발생기의 ATHOS3 Code **열유동장 해석 모델 (IX=16, IY=18, IZ =43)**

그림 8. 운전온도에 따른 한국형 표준원전 증기발생기 전열관 상부중앙부위 냉각재 출구의 횡유속(cross flow)과 밀도변화량 비교 (유체탄성 불안정성 평가용 전열관 상부)