

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

증기발생기 내부 유체유발진동 및 마모 특성지도 작성을 위한
모드해석 프로그램 개발 및 적용성

Development and Application of Mode Analysis Program for
Contouring the FIV Characteristics and Wear Map in the Steam
Generator

부명환, 박치용, 정한섭
한전전력연구원 대전광역시 유성구 문지동 103-16

이희남
순천대학교 기계자동차공학부 전남 순천시 매곡동 315

요 약

증기발생기 세관의 자유진동해석을 수행하기 위하여 전용 프로그램을 개발하였으며 세관의 건전성평가를 손쉽게 수행할 수 있는 절차를 수립하였다. 본 전산 프로그램의 적용의 일례로서 KSPN형 증기발생기 세관의 모드해석을 수행하여 ANSYS결과와 비교하였다. 또한 유동유발진동에 의한 안정비와 일률을 평가하여 세관의 마모손상에 미치는 영향에 어떠한 변화가 있는지 검토하였다.

Abstract

In order to perform the analysis of natural frequency for steam generator tube, the exclusive program and its analysis procedure have been developed to evaluate easily the integration of the tube. As one example of the applications of the program, the mode analysis of the KSNP type steam generator tube has been accomplished and the results have been compared with the ANSYS's. And by Assessing the stability ratio and work rate by flow induced vibration, the variation of the effects on tube wear have checked.

1. 서론

발전소의 유체계통 주요기기의 손상원인 중에 많은 부분이 유체유발진동으로 알려져 있다. 증기발생기 세관의 마모손상을 평가하기 위해서는 증기발생기 내부의 열수력 특성 평가와 함께 유동 및 유동유발 진동, 일률 해석 기술의 개발과 함께 통합 구성되어야 하지만 증기발생기 세관의 건전성을 평가 할 수 있는 통합 프로그램이 없기 때문에 수천 개에 특성을 평가하기 위해서는 개개의 세관에 대한 평가를 수행한 후 이를 조합하는 것이 현실이다. 이에 본 연구에서는 기존의 증기발생기 세관의 유동유발진동(flow induced vibration, FIV) 평가 프로그램인 PIAT-FEI/TE와 더불어 증기발생기 세관의 자유진동해석을 할 수 있는 전산프로그램인 PIAT-MODE를 개발하여 세관의 진동 모드 해석과 마모평가를 수행할 수 있도록 하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 프로그램은 임의의 세관에 대한 진동 해석을 할 수 있도록 하였고 현재 보다 정확한 해석을 하기 프로그램의 성능을 높이고 있다. 상용코드의 일부분에서 수행하는 세관의 진동해석이 아닌 증기발생기 세관의 진동해석 코드가므로 증기발생기 내부구조에 따른 구속조건과 물성치를 적용하였다. 따라서 비전문가에 대해서도 손쉽게 세관의 진동해석을 수행할 수 있기 때문에 시간과 경비를 절약할 수 있으며, 현장에서 발생하는 세관의 손상원인분석은 물론 운전시간에 따른 세관의 마모량예측에 도움이 되도록 하였다.

2. 모드해석 프로그램

2.1 이론배경

KSNP의 증기발생기는 그림 1에서 보이는 바와 같이 8214개의 세관으로 구성되어 있으며 각 세관들은 기하학적 형상, 구속조건이 다르거나 또는 증기발생기 내부 각 세관위치에서의 온도분포와 유동장의 차이에 기인한 물성치들의 변화로 인해 각각의 고유진동수와 모드형상 등 동특성이 다르다. 따라서 유체유발진동 특성 지도를 작성하기 위해서는 8214개의 세관 각각에 대한 모드해석을 별도로 수행하고 그 결과를 유체유발진동 특성 해석을 위한 전산코드인 PIAT-FEI/TE 와 주고 받는 연계 작업이 필요하다. 하지만 이러한 일련의 작업들은 매우 시간이 많이 소요되고 복잡하여 일반적인 상용 진동해석 프로그램을 이용하는 것은 현실

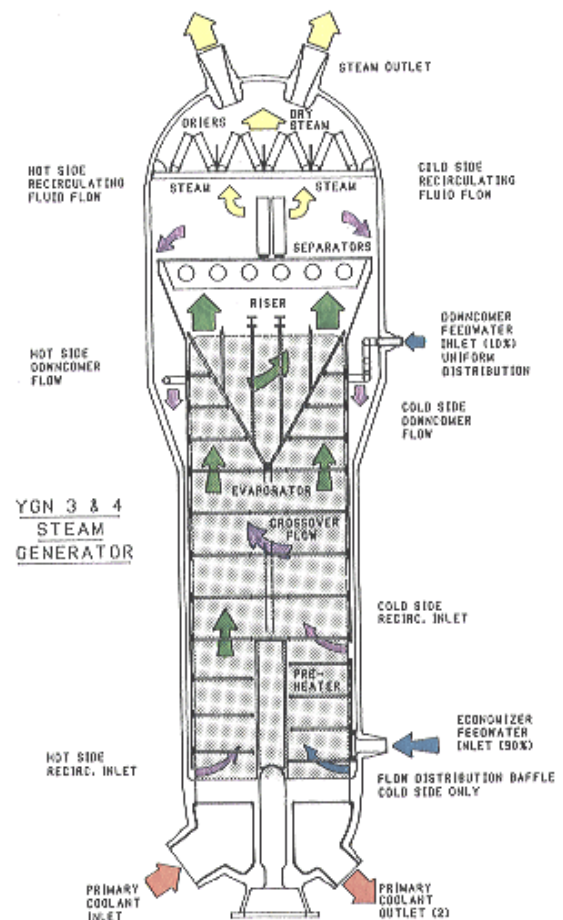


그림 1 표준원전 증기발생기

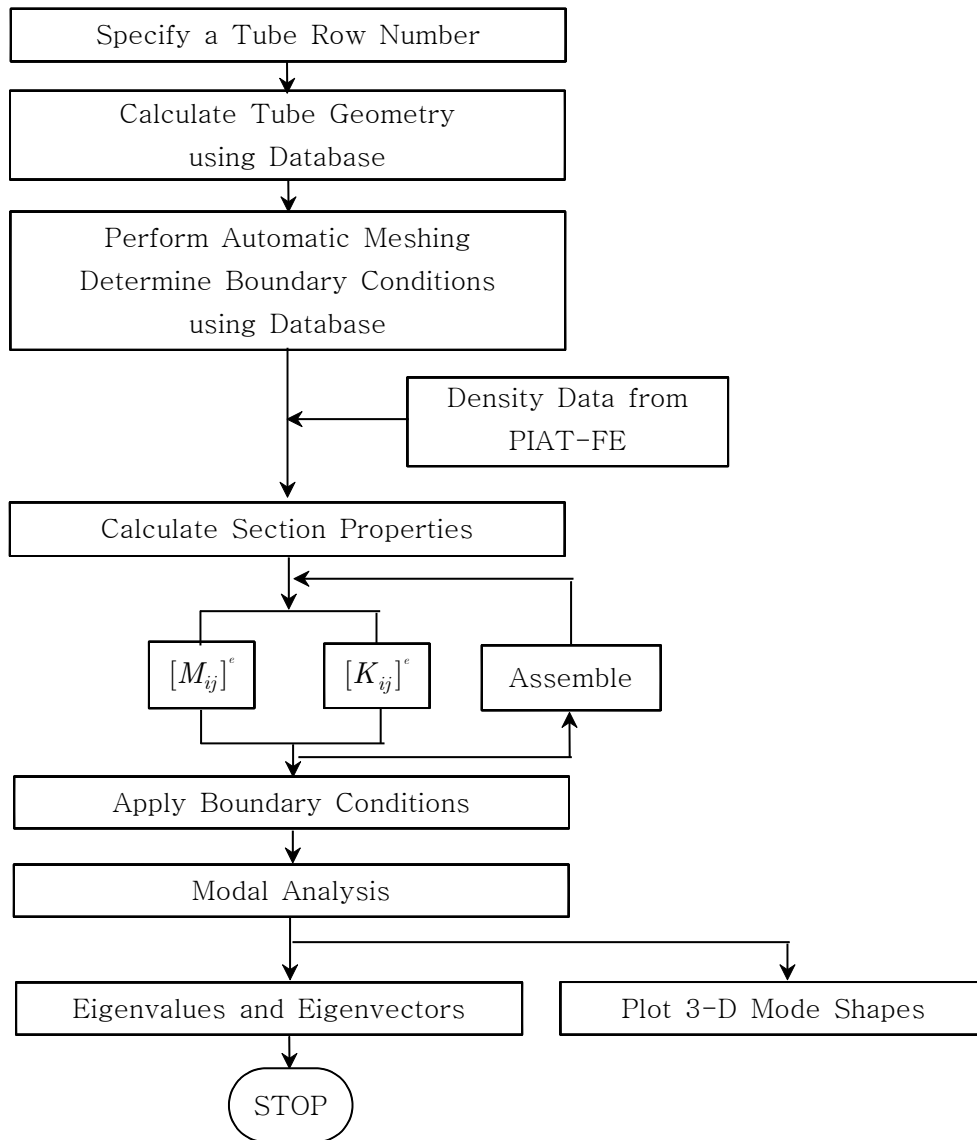


그림 2 PIAT-MODE 프로그램의 순서도

적으로 가능하지 않다. 모드해석 전용 프로그램인 PIAT-MODE 은 이와 같은 작업을 짧은 시간 내에 간단하게 수행할 수 있도록 하기위해 작성되었으며, 그림 2와 같은 구조로 설계되어있다.

8214개의 KSNP 증기발생기 세관의 형상 및 경계조건들을 모두 수식 또는 데이터로 프로그램화 하여, 작업자가 row, column 번호만 지정하여 주면 유한요소 생성, 경계조건 설정과 그 이후의 모드해석 작업들은 자동적으로 수행되도록 작성되었다.

3. 모드해석의 적용성 검토

모드해석프로그램을 검증하기 위하여 증기발생기 세관의 마모량평가에 적용하였다. 적용절차는 그림 3에서 나타낸 것 같이 4단계로 나누어진다. 1단계에서는 증기발생기에 대한 열수력 해석을 수행한다. 열수력 해석은 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 3차원 2상유동 해석코드인 ATHOS3코드[1]를 이용하였다. 2단계에서는 ATHOS3에서 계산된 결과를 이용하여 ANSYS 및 PIAT-MODE에서 고유진동해석을 수행하며, 모드해석을 위한 기계적 특성, 요소형태, Node의 수 등은 동일하게 적용하였다. 또한 U-tube의 하부는 고정조건이 적용되며, 세관 지지대(tube support plate, TSP)는 x, z방향에 대해서 세관 상부의 중앙은 x방향에 대해 구속을 적용하였다. 3단계의 PIAT-FEI/TE[2]를 사용하여 유체탄성불안정성의 정도를 나타내는 안정비(stability ratio, SR)는 세관의 고유진동에 의한 진동 형상함수를 고려하여 얻어지는 세관의 횡유동 유효 틱새속도를 정의한 후 이 값과 임계속도로부터 다음과 같이 정의한다.

$$SR = \frac{V_{ge}}{V_c} \quad (1)$$

여기서 V_c 는 임계속도이며, V_{ge} 는 횡유동 유효 틱새속도이다.

난류여기응답 해석은 ASME Code Section III Division 1[3]에 제시되어 있는 절차를 적용하였다. 세관의 난류가진에 의한 RMS(Root Mean Square) 진폭 변위는 다음과 같이 정의된다.

$$y_{rms}^2(x) = \sum_j \sum_i \frac{L_i G_i(f_j) \phi_i^2(x)}{64\pi^3 M_j^2 \beta_j^2 \xi_j} f_{ij}^2 \quad (2)$$

4단계 난류가진에 의한 세관의 마모량의 평가에는 Yetisir와 Pettigrew가 제안한 일률식[4]을 이용하여 평가하였다. 이 식은 선형해석 결과를 이용한 마모 평가법으로 직관부 및 반경이 다른 곡관부에 사용가능한 것으로 지지대 사이의 전체질량, 진동수 및 변위에 의해 일률의 계산이 가능하며, 다음과 같이 식 (3)로 나타난다.

$$\dot{W}_N = 8\pi^3 M f^3 Y_{RMS}^2 \xi / \mu \quad (3)$$

여기서, M 은 지지대 사이의 전체 질량, f 는 진동 주파수, Y_{RMS} 는 변위, ξ 는 댐핑계수, μ 는 마찰계수이다.

증기발생기 세관의 마모손상을 평가하는 마모율(wear rate)은 마모계수와 일률에 비례하며, 다음과 같이 식(4)로 나타낼 수 있으며 운전시간에 따른 세관의 마모량(체적)은 식(5)와 같이 정의 된다.

$$\dot{V} = K \cdot \dot{W} \quad (4)$$

$$V = K \cdot 8\pi^3 M f^3 Y_{RMS}^2 \xi / \mu \cdot t \quad (5)$$

여기서, K 는 마모계수이다.

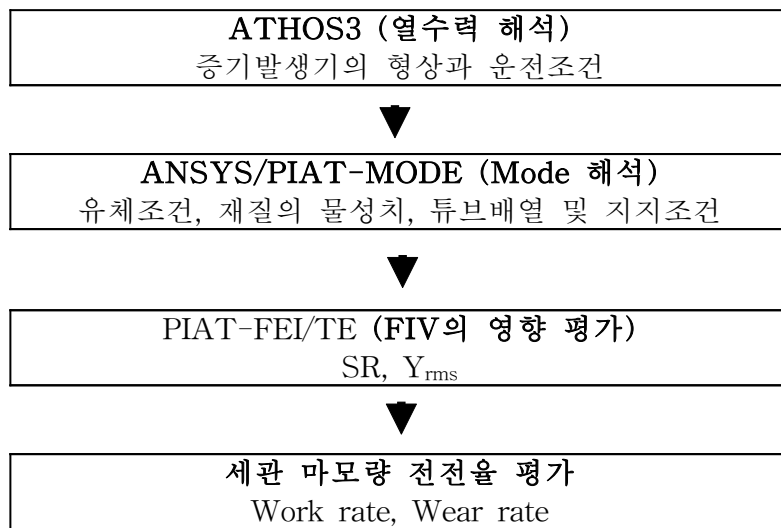


그림 3 마모량변화를 예측 절차

비교검증을 위해 사용된 재료의 물성치는 실제 한국표준형의 증기발생기 세관의 대표적인 물성치와 동일한 데이터를 사용하였다. 표 1에 검증을 하기 위한 세관과 노드, 요소 수 및 요소형태를 나타내었다.

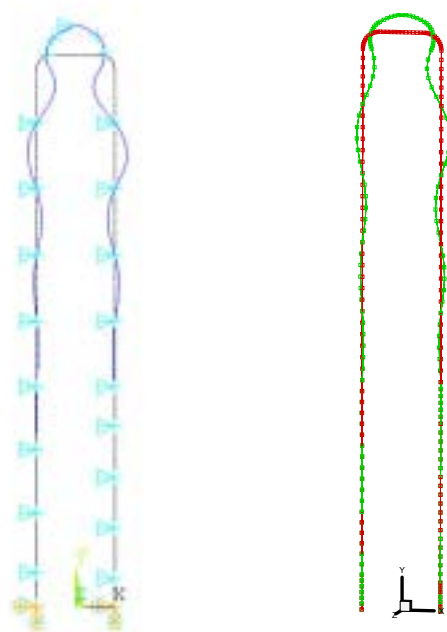
표 1 해석에 사용한 노드, 요소의 수 및 요소형태

Tube	Node #	Element #	Element Type
R41	151	150	Elastic Straight Pipe 16
R75	175	174	
R138	211	210	

4. 결과 및 고찰

그림 4는 KSNP형 증기발생기 R41C83 세관의 1차 진동모드형상을 나타낸 것이다. ANSYS와 PIAT-MODE를 이용한 결과의 진동모드의 형상을 비교하면 In-plane모드로 거의 유사하게 나타나고 있으며 세관의 상부에서 국부 고유진동 모드가 집중되어 있다. 그림으로 나타내지는 않았지만 R75와 R138 세관의 진동모드는 세관의 측면 직관부분에서 국부 진동모드가 발생하는 Out-of-plane 모드로 그림 4의 진동 모드와는 다르지만 ANSYS와 PIAT-MODE의 해석결과는 거의 동일하게 나타났다. 그림 5는 ANSYS를 이용해 구한 각 진동모드에서의 진동수 변화를 나타낸 것이다. 고유진동수는 거의 유사하게 나타났으며 진동차수가 증가할수록 증가하고 있다. 그림 6은 PIAT-MODE를 이용해서 구한 각 진동모드에서의 진동수 변화를 나타낸 것이다. 진동모드에 따른 진동수의 변화는 그림 5의 ANSYS의 결과와 거의 동일하게 나타나고 있다. 그림 7은 ANSYS와 PIAT-MODE의 각 진동모드에 대한 진동수 차이의 비율을 나타낸 것이다. R75와 R138 세관의 경우 오차는 2%이하로 거의 동일하게 나타나고 있지만, R41 세관의 경우 R75와 R138 세관에 비하여 상대적으로 오차가 비교적 크게 나타나고 있다.

또한 R41 세관은 그림 3과 같이 상부 중앙에 1차 국부 진동모드가 발생하기 때문에 증



(a) ANSYS

(b) PIAT-MODE

그림 4 R41C83 세관의 1차 진동모드형상

기발생기 내부의 세파 지지구조물과의 진동에 의한 충격과 마찰 등에 의해 세관의 마모가 상대적으로 빨리 진행할 것으로 예상된다. R75와 R138 세관은 튜브시트 상부의 직관 부분에서 국부진동이 발생하며 세관이 유체의 유동방향과 동일하기 때문에 세관의 마모량은 상대적으로 적게 발생할 것이다.

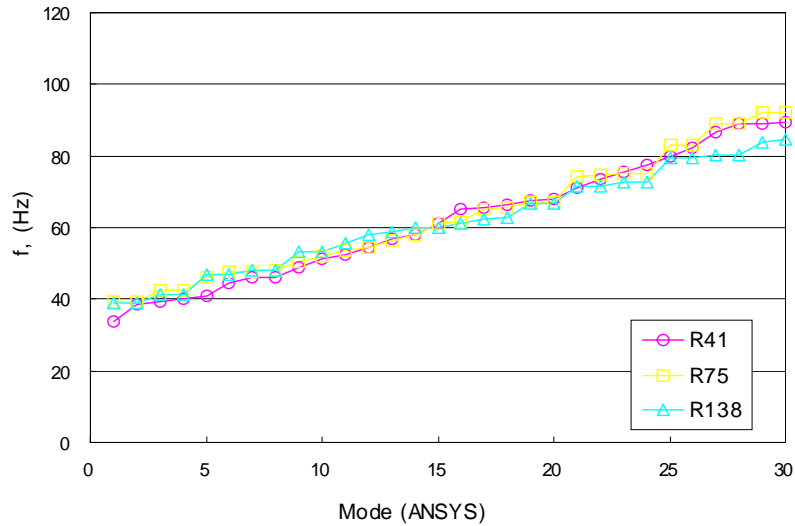


그림 5 ANSYS 해석에 의한 진동 주파수 변화

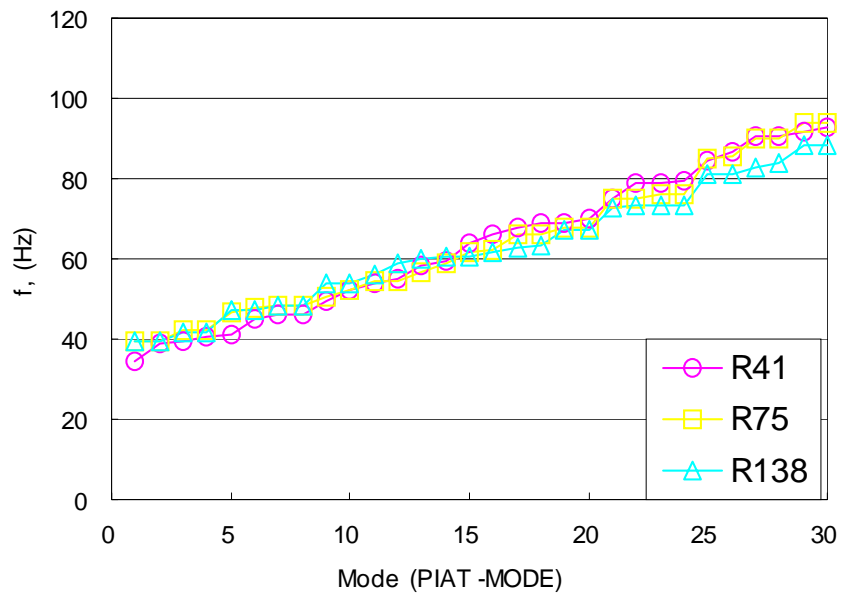


그림 6 PIAT-MODE 해석에 의한 진동 주파수 변화

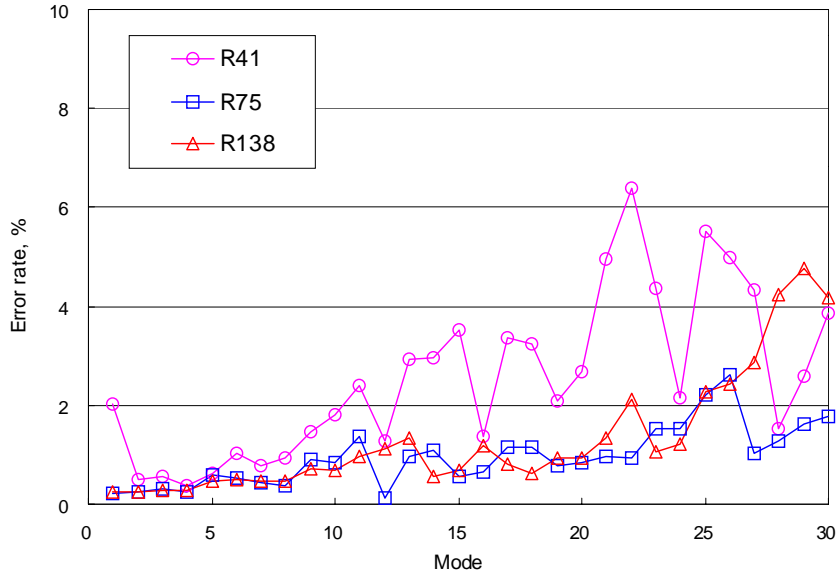


그림 7 자유진동 해석의 오차율

진동모드에 따른 안정비의 변화를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 그림 8은 ANSYS에 의한 결과이며, 그림 9는 PIAT-MODE에 의해 구한 결과이다. R41세관의 경우 모드 차수에 따라 크기의 차이는 있지만 점진적으로 작아지는 경향을 나타내고 있으며 R75와 R138 세관의 경우는 모드의 차수에 따라 일정한 폭을 가지고 증감하고 있다. 안정성비는 크기에는 다소 차이가 있지만 ANSYS와 PIAT-MODE의 결과는 유사한 거동을 나타내

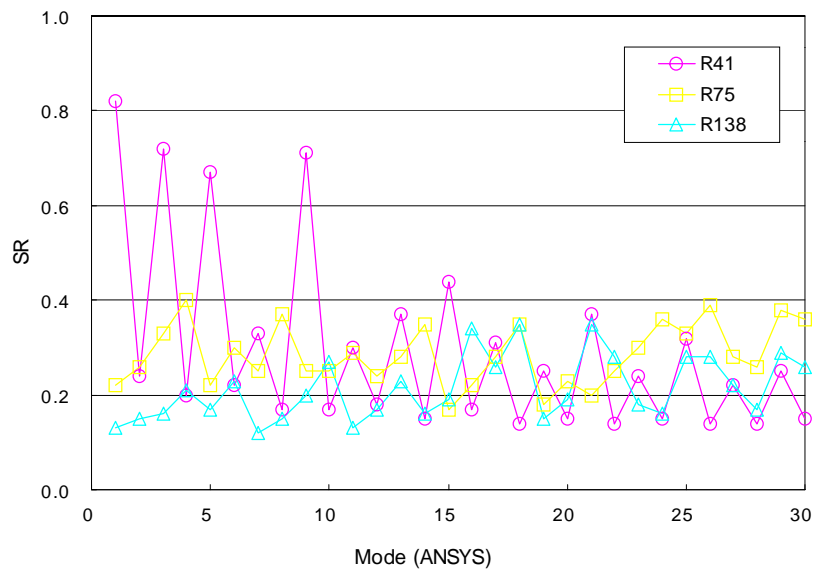


그림 8 진동모드별 안정비(ANSYS)

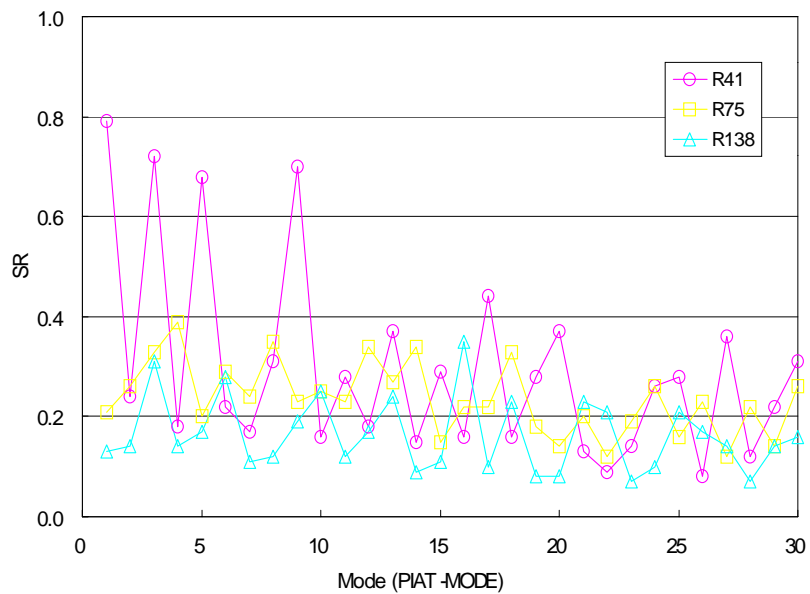


그림 9 진동모드별 안정비(PIAT-MODE)

고 있다.

세관의 최대 진폭변위, 일률 및 마모량(체적)을 식(2)~(6)을 이용하여 구했으며 이에 대한 1차 진동모드에 대한 각각의 오차율을 표 3에 나타내었다. R41 세관의 1차 진동모드에 대한 주파수에 대한 오차는 그림 5에서와 같이 2%이내로 나타나고 있지만 세관의 최대 변위는 식(2)에서와 같이 진동 주파수 3승에 반비례하므로 이에 대한 오차는 더욱 커지게 된다. 또한 일률의 경우 식(3)에서와 같이 진동 주파수의 3승과 더불어 최대변위의 2승에 비례하게 때문에 이에 대한 오차는 더욱 증가하게 되며 마모율은 일률에 단순 비례하기 때문에 오차율은 일률의 오차율과 같게 나타나고 있다.

표 3 ANSYS와 PIAT-MODE의 오차율

세관번호	주파수 오차율	Yrms 오차율	work rate 오차율	마모량 오차율
R041	2.03	14.94	24.22	24.22
R075	0.23	4.83	9.15	9.15
R138	0.25	1.04	1.31	1.31

5. 결론

본 연구에서는 증기발생기 세관의 진동모드 해석을 위한 전산 프로그램을 완성하고 세관의 마모손상 평가 절차를 수립하여 그 적용의 일례로서 KSNP형 증기발생기 세관의 마모손상 평가를 수행할 수 있는 체계를 구축하였다. 증기발생기 세관 중 R41 세관은 1차 진동모드가 상부 중앙부분에서 국부 진동모드를 나타내고 있으며 유체의 유동방향과 일치하기 때문에 특히 취약한 것으로 파악된다. 세관의 진동 주파수는 최대변위와 일률의 계산에 직접적으로 큰 영향을 미치고 있다. 국부진동모드가 U-bend영역이 아닌 직관부분에서 일어나는 R75와 R138 세관의 경우 진동 주파수에 따른 오차율은 극히 낮게 평가되고 있다.

증기발생기 세관의 자유진동해석과 유동유발진동 평가 등에 의한 증기발생기 세관의 손상평가가 본 전산 프로그램에 의해 일련의 작업으로 가능하게 되었으며 기존의 상용코드가 아닌 증기발생기 세관의 손상평가를 위한 전용 코드로서 세관의 건전성평가에 도움이 되었으면 한다. 또한 보다 정확한 해석을 수행하기 위하여 본 전산 프로그램의 업데이트를 수행하고 있다.

6. 참고문헌

- [1] 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.
- [2] PIAT-FEI/TE Program Manual, 2002.
- [3] ASME code section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1 - Appendices, ASME, 1995.
- [4] M. Yetisir and M. J. Pettigrew, A Simple Approach to Estimate Fretting-Wear Damage in Heat Exchanger Tubes: Verification and Validation, PVP-Vol.420-1 Flow-Induced Vibration ASME, pp.27~33, 2001.