'98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 증기발생기 전열관의 와류에 의한 유동유발진동 해석
Vortex Shedding Induced Vibration Analysis of SMART Steam Generator Tubes

김용완, 김종인, 김지호, 허형
한국원자력연구소

심우건
한남대학교

요 약

일체형원자로 SMART에 내장되는 관류식 나선형 증기발생기 전열관의 와류에 의한 진동해석을 수행할 수 있는 모델을 개발하고 설계변수에 대한 민감도 해석을 수행하였다. SMART에 내장된 관류식 나선형 증기발생기는 개념 및 형상적인 측면에서 상용원자로의 증기발생기와 상이하므로 기존의 평가방법을 사용할 수 없다. 따라서 실험식을 바탕으로 관류식 나선형 증기발생기 전열관의 와류에 의한 진동을 평가할수 있는 계산절차를 개발하고 이와 병행하여 유동유발해석 전용코드를 사용하여 해석할 수 있는 모델을 개발하였다. 두가지 독립적인 방법으로 해석한 결과가 서로 잘 일치함을 보여 방법적인 타당성이 간접적으로 입증되었다. 개발된 절차 및 해석모델로 개념 설계된 SMART 증기발생기 전열관에 대해 해석한 결과 전열관의 고유진동수가 와류에 의한 유동유발진동수 보다 매우 높아서 유동유발진동가능성이 낮음이 입증되었다.

Abstract

Vibration induced by vortex shedding was analyzed for the tubes in the once-through helical steam generator of integral reactor, SMART. Based upon experimental result and empirical formula, a simple calculation procedure was developed to analyze the flow induced vibration of tubes. As an independent approach an analysis model was presented by the computer code developed for the analysis of flow induced vibration. The results of these two independent approaches have shown good agreement and this indirectly confirms the validity of the method. It has been proven from these analysis that the possibility of vibration due to vortex shedding in SMART steam generator tubes is very low because the natural freqency of the tubes is much higher than the vortex shedding frequency.

1. 서론

원자력발전소의 증기발생기는 일차냉각재가 가지는 열에너지를 이차측 급수로 전달하여 이차측에서 적절한 압력하의 증기를 발생시키는 열교환기로서 증기발생기 전열관들은 일차냉각재와 이차냉각재의 열전도매체의 기능을 함과 동시에 원자로 냉각재 압력경계의 기능을 담당하고 있다. 전열관의 불안정한 진동에 의해 전열관이 파열되면 냉각재가 유출되어 방사능 오염 등의 원전사고를 야기할 수 있고 발전소의 출력이 감소될 수도 있기 때문에 전열관의 유동유발진동은 증기발생기의 수명 및 구조적 신뢰성과 관련된 중요한 문제로 인식된다. 유동유발진동은 관을 지지하고 있는 지지격자의 간격을 줄이거나 관의 두께를 증가시킴으로써 강성을 증대시키고 전열관의 고유진동수를 높여서 이 문제를 해결할 수 있으나 전열관의 두께를 증가시키면 무게가 증가하고 전열효율이 나빠지고 지지간격도 무작정 줄일 수가 없으므로 문제해결이 단순하지 않다. 이러한 이유로 열교환기 및 증기발생기에 대한 유동유발진동해석과 실험은 광범위하게 수행되어 왔다[1,2,3].

한국원자력연구소에서 개발 중인 일체형원자로 SMART에는 관류식 나선형 증기발생기가 사용되고 있다[4,5]. SMART 증기발생기는 기존의 상용발전소에서 사용되는 재순환형 U-전열관 증기발생기와는 달리 일차 냉각재가 전열관의 바깥쪽을 흐르고 이차측이 전열관의 안쪽을 흐르면서 관내에서 완전히 증발하는 형태이다. 설계개념이 다르고 형상이 다르므로 기존의 상용원자로의 증기발생기 전열관에 대한 해석에 사용한 유동유발진동해석방법과 모델을 그대로 사용할 수 없다. SMART의 증기발생기는 나선형으로 감겨있기 때문에

전열관이 일차냉각재의 횡류를 받는 형태이므로 기존의 재순환식 U-자형 증기발생기에서는 큰 문제가 되지 않는 와류진동이 중요한 문제가 될 수 있다.

본 연구에서는 SMART 증기발생기 전열관의 와류에 의한 진동에 대한 평가를 수행하였다. 관류식 나선형 증기발생기의 와류에 의한 진동해석에 적합한 계산 절차나 해석모델이 없으므로 실험 및 경험식을 바탕으로 관류식 나선형 증기발생기에 적용할 수 있는 계산방법을 제시하고 기존의 유동유발진동해석용 프로그램을 사용하여 독립적인 해석을 수행하여 비교 평가하고 주요 설계변수에 대한 민감도 해석을 수행하였다.

2. 전열관 형상

SMART 증기발생기는 12개의 카세트로 구성되며 각각의 카세트에는 324개의 전열관이 6개의 모듈에 연결되어 있다. 따라서 전체 증기발생기는 72개의 모듈로 구성되며, 서로 인접하는 카세트에서 6개의 모듈이 합쳐져서 1개의 노즐헤더를 통해 원자로를 관통한다. 증기발생기의 단위 카세트의 형상은 Fig.1에서 보는 것과 같이 전열관 밖으로 일차냉각수가 cross-flow형태로 흐르고 있으며 전열관 안쪽에는 이차측 냉각수가 유입되어 과열증기가 생성되어 나가는 형태다. 외경이 12mm이고 내경이 9mm인 티타늄합금 전열관이 약 10^{o}의 나선각으로 나선을 이루면서 여러줄 나사형태로 감긴다. 전열관과 전열관 사이의 반경방향피치는 17mm이며 축방향 피치는 13.5mm이다. 단위카세트의 전열관은 17열로 구성되며 각 열은 전열관 수를 달리하여 전열관의 길이 차이가 일정한 범위 이내에 포함되도록 설계되었다. 전열관을 지지하는 5mm 두께의 지지대가 원주방향으로 150mm 간격으로 설치되어 일차측 유로를 확보함과 동시에 유동유발진동과 외력으로부터 전열관을 보호하는 역할을 한다. 해석에 사용한 티타늄합금 전열관의 탄성계수는 106.9 GPa이며, 밀도는 4517 kg/㎥이다.

3. 실험식을 이용한 평가

흐름에 수직으로 하나의 원통이 있는 경우에는 그 후방에 와류가 교대로 방출되어 칼만 와류를 형성한다. 이 와류의 토출에 의해 원통은 주기적으로 변동하는 유체 힘을 받게되는데, 원통의 고유진동수와 와류 토출 진동수가 일치하면 원통은 공진을 일으키게 되어 크게 진동하게 된다. 따라서, 전열관을 설계할 때 이 두 가지의 진동수가 서로 충분히 떨어져 있도록 하는 것이 필요하다.

먼저 와류 토출진동수는 다음과 같은 순서로 계산하였다. 증기발생기 전열관은 사각배열과 삼각배열이 될 수가 있으므로 두 가지 배열방식에 대해서 모두 계산하였다. 전열관이 Fig.2와 같이 사각격자형태 혹은 삼각격자형태로 배열되어 있는 경우에 유로 단면적은 다음과 같다.

$$A=\{\frac{p}{4}(D_o^2-D_i^2)-pd_o\sum_{k=1}^{17}d_k\}\Upsilon(1-A_{spt}) \quad \text{(사각배열)} \quad (1)$$

$$A=\{\frac{p}{4}(D_o^2-D_i^2)-pd_o\sum_{k=0}^{8}d_{2k+1}\}\Upsilon(1-A_{spt}) \quad \text{(삼각배열)} \quad (2)$$

여기서 A는 유로단면적, D_i와 D_o는 증기발생기 카세트 안의 환형 공간에 대한 내경과 외경이다. d_o는 전열관의 외경이며 d_k는 안쪽에서 k번째 전열관 열의 나선지름이다. 그리고 A_{spt}는 전열관지지대로 인해 감소된 유로의 면적 비를 나타내는데 SMART의 증기발생기는 12%로 설계되었다.

유로단면적과 증기발생기 일차측 냉각수 유량으로부터 일차측 평균유속을 구할 수 있다. SMART 증기발생기에서 전열관이 사각배열인 경우에 유속은 1.72 m/s가 되며 삼각배열인 경우의 유속은 V=0.81 m/s가 된다. 와류토출 진동수는 일차측 유속, 전열관 외경, 그리고 Strouhal 수로 다음과 같이 표현된다.

$$f_k=S_t\frac{V}{d_o} \quad (3)$$

여기서 f_k는 칼만 와류생성 진동수이고 S_t는 Strouhal 수 이다. 열교환기의 관과 같이 일정간격으로 배치되어 있는 전열관에 대해서 칼만 와류는 Chen에 의해 실험되어 도표의 형태나 경험식 형태의 Strouhal수의 관계를 얻었다[1,6,7]. 실험결과나 도표에 따라 약간씩 다른 결과를 보여주며 그 중에서 사각배열은 다음식으로 계산하였다.

$$S_t=0.1\ln[A(XT-1.0)+1.0] \quad (4)$$

여기서

$$A = 7.596X^3 - 25.26X^2 + 45.61X - 14.387$$

$$X = \frac{1}{|XL - 1.0|}$$

$$XL = \frac{L}{d_o}$$

$$XT = \frac{T}{d_o}$$

위의 수식에 SMART 증기발생기의 수치를 대입하여 계산하면 와류토출진동수는 약 100HZ가 된다. 실제 SMART의 나선형 증기발생기에서는 일차냉각재가 전열관에 80^o 전후의 각도로 흐르지만 여기서는 수직으로 흐르는 것으로 가정하였다. Ramberg[8]와 King[9]에 의하면 원통에 유체가 수직에서 θ의 각도만큼 경사져서 흐르는 경우에 와류토출진동수가 다음과 같이 표현된다고 하였다.

$$f_k(q) = f_k \cos q \tag{5}$$

위의 수식은 각도가 약 30^o까지 타당하고 했다. SMART의 경우 나선각이 약 10^o이어서 $\cos 10^o$는 0.98이 되므로 경사에 의한 영향은 무시할 수 있다.

다음으로 전열관의 고유진동수는 다음과 같은 개념으로 구하였다. 전열관의 고유진동수는 지지구조물의 간격 혹은 지지점수 n을 변수로하여 구한다. 반경 R인 링 형상의 전열관이 원주방향에 사이각 α로 2점으로 지지되어 있는 경우의 전열관의 직각방향 고유진동수는 다음 식으로 계산된다.

$$f_1 = \frac{1}{2pR^2} F(a, \frac{EI}{GJ}) \sqrt{\frac{EIg}{r}} \tag{6}$$

여기서 g는 중력가속도이며 ρ는 전열관의 밀도를 나타낸다. F값은 기계공학편람 등에서 도표로 제공된다. 링 형상의 전열관의 원주방향지지가 2점을 넘는 경우, 면외방향의 고유진동수를 단순한 경험식으로 구하기가 힘들다.

$$f_2 = K \frac{l}{2pL^2} \sqrt{\frac{EIg}{r}} \tag{7}$$

여기서 L은 지지점사이의 거리를 나타내며, λ는 지지조건에 의해 결정되는 상수이다. 따라서 수식(6)와 (7)을 사용하여 2점 지지인 경우에 대한 K를 구한 후 지지점수가 2점을 넘는 경우에는 수식(7)에 계수 K를 곱해서 계산하였다.증기발생기 전열관 나선 코일부의 관외의 흐름에 의해 발생할 것으로 예상되는 와류에 의한 진동관련변수를 변화시키면서 계산해서 전열관의 지지점수, 전열관의 피치의 타당성과 전열관의 건전성을 검토하였다. 지지점의 간격이 150mm인 경우에는 전열관의 고유진동수는 1093 Hz가 되며, 간격이 증가할수록 진동수는 감소하는 것을 Fig.3에서 보여주며, 전용코드로 해석한 결과와 비교하였는데 대체로 잘 일치함을 보여준다. 지지점의 간격이 500mm가 넘게되면 전열관의 진동수와 SMART증기발생기 설계치로 계산한 칼만와류의 진동수가 일치하는 점이 생긴다. 전열관의 지지점수를 매개변수로 변화시키면서 전열관의 고유진동수와 칼만와류의 관계를 확인했다. 그 다음에 전열관의 피치를 변화시킨 경우에 대해서 고유진동수와 칼만 와류의 진동수의 관계를 검토한 것이 Fig.4이다. 증기발생기 제작적인 측면에서 150mm정도의 간격이 적절한 값으로 사용되는데 이 값에서 전열관의 고유진동수는 매우 높으므로 칼만와류에 의한 진동이 발생할 가능성은 낮다. 그리고 사각배열에서는 축방향피치가 증가할수록 칼만와류의 진동수가 감소하며 삼각배열에서는 그다지 차이를 보이지 않았다.

4. 유동유발해석 프로그램을 이용한 해석

직관 및 U자관 증기발생기의 유동유발진동해석을 위해 개발된 프로그램을 사용하여 적절한 모델링을 도입함으로써 관류식 나선형 증기발생기를 해석하였다. 프로그램에서 주기적으로 방출되는 와류에 의하여 튜브에 외력이 작용하면 i번째 모드의 응답에 의한 변위는 다음과 같이 계산된다.

$$y(x) = \frac{m \phi_i(x)}{2\pi f_i c} \int_o^L F_L(x') \, \phi_i(x') \, dx \tag{8}$$

$$F_L(x') = C_L \rho d V_r^2 \phi^2(x') / 2 \quad (9)$$

$$V_r = V_\infty \frac{p}{p-d} \quad (10)$$

여기서 c 감쇠계수

f_i 자유진동 i번째 모드의 고유진동수

ϕ 정규모드함수

ρ 횡류의 쉘측 유체밀도

x 튜브의 축방향 좌표

ψ 유속 구배 함수

그리고 F_L은 주기적인 유체유발력의 진폭이며 C_L은 양력계수이고 V_r는 참조간격유속이다. 참조간격유속은 튜브군의 형상에 무관하며 튜브군의 유공성과 관련되어 최대 유속의 지표로서 사용된다.

관류식 나선형 증기발생기의 경우 기하학적 형상을 직관 및 링의 두 가지 극단적인 경우로 모델링하여 비교하였다. SMART 증기발생기의 나선형 전열관은 나선각이 작기 때문에(10^o 내외) 링으로 가정하여도 큰 오차가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 직관모델은 전열관 지지점을 10곳으로 하였으며 Fig.5에서 보는 것과 같은 형태로 일차측 유체가 흐르는 것을 가정하였는데 이 경우 면내 진동과 면외 진동은 동일하게 된다. Fig.6에서는 직관으로 모델링했을 때 전열관의 고유진동수를 와류토출진동수로 나눈 값인 공진비가 일차측 유속이 증가함에 따라 달라지는 것을 3개의 저차모드에 대해 살펴보았다. 공진비가 1에 가까워지면 와류에 진동과 전열관이 공진할 가능성이 높아지는데 일차측 평균유속이 12m/s이상이 되어야 공진비가 1에 접근되었다.

이 프로그램에서는 링부위만 모델링하는 것이 불가능하고 직관부위가 최소한 3곳 이상 포함되어야 하므로 직관부와 곡관부가 연결되는 곳에는 매우 작은 길이의 가상 스팬을 정의하는 모델링을 하였다. 실제 링모델에서 절반만 모델링하는 것과 유사하게 하기 위해서 직관부위를 짧게 하여 곡관부위의 결과를 구하였다. SMART의 관류식 나선형 증기발생기의 가장 안쪽열은 직경이 182mm밖에 되지 않는다. 따라서 150mm 정도의 간격으로 지지대를 설치하면 4곳을 지지하게 된다. 먼저 직관부위의 길이를 변화시키면서 민감도 해석을 수행한 후에 수행한 직관부 해석과 마찬가지로 일차냉각재의 속도를 변화시키면서 안정성을 평가하였다.

최내열 곡관부는 Fig.5에 있는 것과 같이 3개의 곡관부가 3개의 지지점으로 지지된다. 최내열 곡관모델에 대해 일차측 유속을 증가시키면서 3개의 저차모드에 대해 공진비를 계산한 결과는 Fig.7과 같다. 마찬가지 방법으로 최외열에 대해 공진비를 계산한 결과는 Fig.8에 나와 있으며 세가지 모델링에 대해 Fig.9에서 일차모드에 대해 비교하였다. 최내열 링모델의 공진비가 가장 높고 직관모델의 공진비가 가장 낮았으며 최외열 링모델은 그 사이에 위치하였다. 어떤 모델링을 취하던 현재의 SMART 증기발생기 설계치에서 유동유발진동이 발생할 가능성은 매우 낮으며 직관모델을 사용하는 것이 설계적인 측면에서 보수적인 접근 방법이다.

5. 결론

SMART의 관류식 나선형 증기발생기에서 와류에 의한 전열관 유동유발 진동 가능성을 평가하였다. 단순식을 활용하여 계산 절차를 정립하고 피치를 변화시키면서 계산을 수행하여 SMART의 설계 피치에서는 와류에 의한 진동이 발생할 가능성이 낮음을 보였다. 이어서 유동유발진동해석코드를 활용하여 나선형 전열관을 직관으로 모델링하고, 최외열과 최내열에 대해 링모델링을 하여 비교하였다. 방법과 모델링에 따라 다소의 차이는 있지만 SMART의 증기발생기 전열관에 대해서는 와류에 의한 진동이 발생할 가능성이 매우 희박함을 보였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Robert D. Blevins, *Flow-Induced Vibration*, Van Nostrand Reinhold, NY, 1990.
2. 정경훈, 손갑헌, *봉집합체의 유동관련진동 기술현황분석보고서*, KAERI/AR-277/87, 1987.
3. Y.S. Shin and M.W. Wambsganss, "Flow-Induced Vibration in LMFBR Steam Generators : A State-of-the-Art Review," *Nuclear Engineering and Design* Vol.40, pp.235-284, 1977.
4. 김용완, 김지호, 윤주현, 김주평, 김종인, "일체형 신형원자로 증기발생기 예비 개념설계," 한국원자력학회 추계학술발표회, 1995.
5. 김종인, 김긍구, 김용완, 이두정, 장문희 "모듈식 증기발생기를 사용한 일체형원자로의 예비 개념설계," 한국원자력학회 춘계학술대회, 1996.
6. 김용완, 이두정, *나선형 증기발생기와 일체형원자로 설계 및 개발기술 토의시험시설조사*, KAERI/OT-127-95.
7. Y.N. Chen, "Flow Induced Vibration and Noise in Tube-bank Heat Exchanger due to Karman Streets," *J of Engineering Industry 90*, pp.134-146, 1968.
8. S.E. Ramberg, "The Effect of Yaw and Finite Length upon the Vortex Wakes of Stationary and Vibrating Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, vol.128, pp.871-107, 1983.
9. R. King, "Vortex Excited Oscillations of Yawed Circular Cylinders," *Journal of Fluid Engineering*, Vol.99, pp.495-502, 1977.

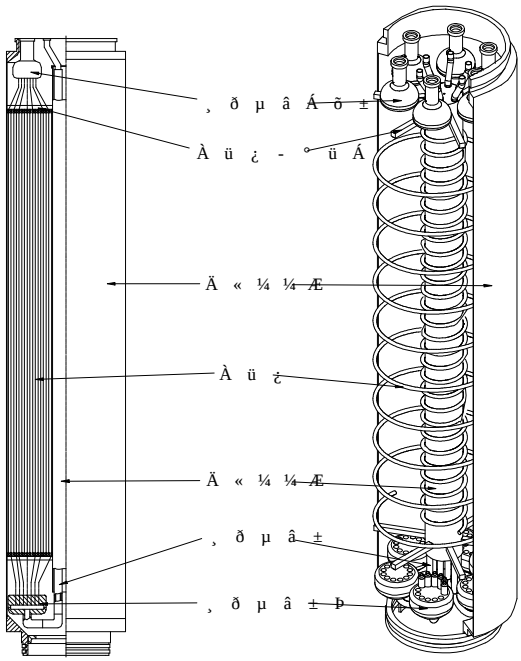

Fig. 1 증기발생기 카세트

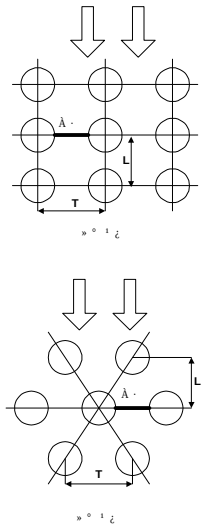

Fig. 2 전열관 배치 및 피치

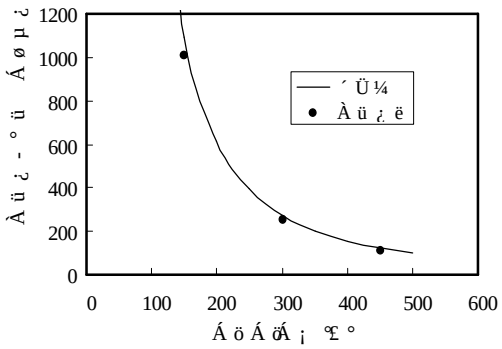

Fig. 3 지지구조물 간격에 따른 고유진동수변화

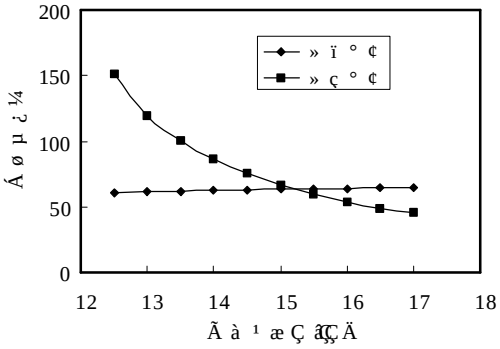

Fig. 4 축방향피치의 변화에 따른 와류 진동수

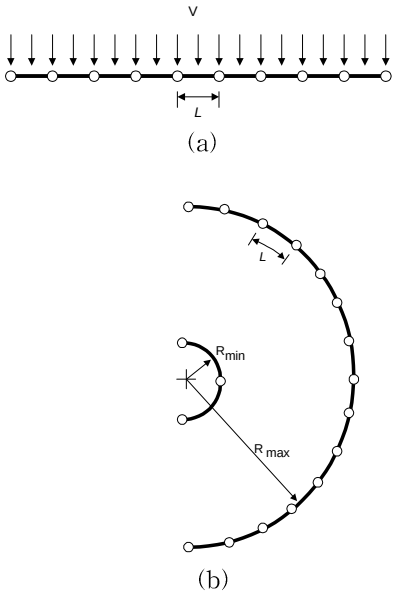

Fig. 5 나선형 전열관의 해석모델
: a)직관모델, b)곡관모델.

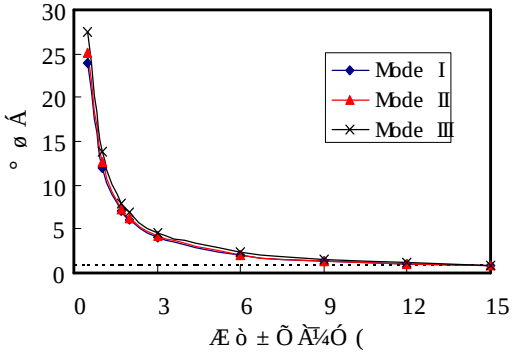

Fig. 6 직관모델에서 유속의 증가에 따른 공진비

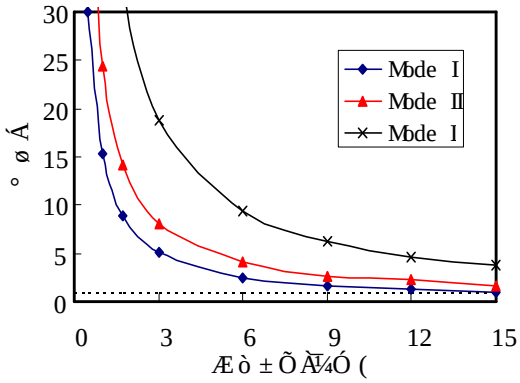

Fig. 7 최내열 곡관모델에서 유속의 증가에 따른 공진비

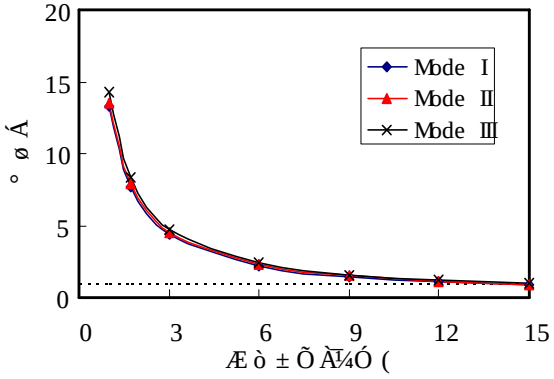

Fig. 8 최외열 곡관모델에서 유속의 증가에 따른 공진비

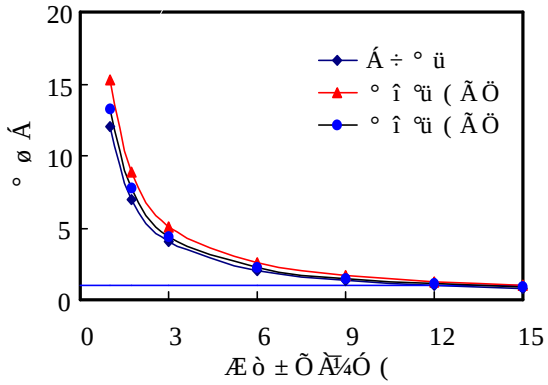

Fig. 9 모델링 방법에 따른 결과 비교