2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 증기발생기 전열관의 유동유발진동 해석 : 유체탄성 불안정, 난류에 의한 불규칙 진동, 관 내류에 의한 진동

Flow Induced Vibration Analysis of SMART Steam Generator Tubes : Fluid Elastic Instability, Random Turbulence Induced Vibration, Tube Inside Vibration

김용완, 김지호, 박진석, 김종인
한국원자력연구소

심우건
한남대학교

요 약

일체형원자로 SMART에는 관류식 나선형 증기발생기가 원자로에 내장되도록 설계되었는데 일차측 냉각재가 증기발생기 전열관의 외부로 흐르고 이차측이 전열관의 내부로 흐르는 개념으로서 기존의 상용발전소 증기발생기와 크게 다르다. 선행연구에서 발표된 SMART 증기발생기의 칼만와류에 의한 진동평가[1]에 이어 본 연구에서는 기존의 실험식 및 실험결과, 그리고 유동유발진동해석 프로그램을 활용하여 유체탄성 불안정, 난류에 의한 불규칙 진동, 관 내류에 의한 진동 등이 발생할 가능성을 평가하였다. 유속, 피치 등에 대한 민감도 해석을 수행 한 후 현재의 SMART 설계 데이터와 비교한 결과를 제시하였다. 유체탄성 불안정과 난류에 의한 불규칙 진동해석을 수행한 결과 현재의 SMART 증기발생기에서는 전열관의 유동유발진동이 발생할 가능성은 낮은 것으로 판명되었으나 관 내류에 의한 진동은 여유도가 10%로서 진동이 발생할 가능성을 완전히 배제할 수 없다. 본 해석은 평균유속에 대한 결과이므로 향후 증기발생기의 유속분포를 구하여 국부적인 평가가 필요하다.

Abstract

Once-through helical steam generator, with design concepts quite different from the steam generator of the conventional loop type pressurized water reactor, is to be installed in the integral reactor, SMART. The life time and structural integrity of the steam generator is strongly influenced by the flow induced vibration of tubes. The possibility of Karman vortex shedding of the SMART steam generator tube was presented in the previous paper. In this paper, tube vibrations induced by fluid elastic instability, random turbulence, and tube inside flow were evaluated using empirical formula, experimental results available in literature, and fluid induced vibration analysis program. The sensitivity analysis has been performed for a wide range of design variables such as the velocity of primary coolant and the tube pitch. The results of the analysis show that the levels of the flow induced vibration of the SMART steam generator tubes are within the acceptable ranges.

1. 서론

원자력발전소의 증기발생기는 일차냉각재가 가지는 열에너지를 이차냉각재로 전달하여 이차측에서 적절한 압력하의 증기를 발생시키는 일종의 열교환기이다. 증기발생기 전열관들은 일차냉각재와 이차냉각재의 분리벽으로서 열전도매체의 기능을 함과 동시에 원자로 냉각재 압력경계의 기능을 담당하고 있다. 전열관의 불안정한 진동에 의해 전열관이 파열되면 냉각재가 유출되어 방사능 오염 등의 중대한 원전사고를 야기할 수 있다. 예를 들면 1987년 미국 North Anna 원전 1호기와 1991년 일본 미하마 원전 2호기에서 증기발생기 내의 전열관이 지지격자의 부적당한 설치로 전열관이 파손되어 방사능에 오염된 일차측 유체가 이차측으로 방출되는 사고가 있었다. 원자력발전소가 건설되기 시작한 60년대부터 냉각재에 의한 핵연료집합체의 진동과 증기발생기나 열교환기의 유체유동에 의한 진동에 대하여 많은 연구가 수행되었다. 미국에서 1974년 3월부터 1975년 12월까지 원자력발전소의 출력감소 또는 사고로 인한 운전정지 261건 중에서 23건이 유동관련 진동에 그 원인이 있다고 보고되었으며 최근에 62건의 가압경수로(Pressurized Water Reactor) 증기발생기에서 발생한 문제 가운데 5건이 유동관련 진동에 대한 문제였고 10건이 수격(water hammer)에 관련된 문제였다고 한다. 또한, 유동관련 진동은 마모와 피로의 주요한 원인으로 작용하기 때문에 원자력발전소에서는 매우 중요한 문제의 하나다. 그러나 유동관련진동의 발생 기구(mechanism)가 복잡하여 이에 대한 이해가 부족하고 열전달이나 자중 등과 같은 설계변수에 비하여 유동관련 진동은 이차적인 설계변수로 생각하기 때문에 유동관련 진동에 의한 파손이 계속되어 왔다.

이상에서 확인된 것과 같이 유동유발진동은 증기발생기의 수명 및 구조적 신뢰성과 관련된 중요한 문제로 인식되어 관련 연구가 여러 가지 유동유발진동에 대한 해석과 실험이 지속적으로 수행되어 오고 있다[1-4]. 유동유발진동은 관을 지지하고 있는 지지격자의 간격을 줄이거나 관의 두께를 증가시킴으로써 강성을 증대시켜 이 문제를 해결할 수 있으나 전열관의 두께를 증가시키면 무게가 증가하게되고 전열효율이 나빠지고 지지간격도 무작정 줄일 수가 없으므로 문제해결이 단순하지 않다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 원자로 개발 선진국인 미국, 캐나다에서 실험과 병행하여 자체 프로그램 개발과 보완작업을 하고 있는데, 특히, 캐나다 Chalkriver연구소에서는 직관 및 U자관에 대해 유동유발해석을 수행할 수 있는 프로그램인 PIPO를 개발하여 상용으로 공급하고 있다.

구조물이 운동을 할 때, 외부에서 구조물 안으로 유입되는 에너지나 원래 구조물이 지니고 있던 에너지를 분산시키는 능력을 일반적으로 감쇠라 부르는데 이는 유동유발진동에서 매우 중요한 인자이다. 유동유체 내에서 진동하는 구조물에 대한 감쇠력은 다음과 같이 세 가지로 크게 나눌 수 있다. 유체의 동적 항력(drag)과 Coriolis힘 및 점성에 의한 감쇠 (유체감쇠 : fluid damping), 구조물 재료의 내부에서 에너지 분산에 의한 감쇠 (재료감쇠 : material damping), 구조물간의 충돌이나 마찰로 인한 감쇠(구조감쇠, structural damping) 감쇠력에 대한 정확한 평가가 필요하므로 실험에 의지하는 경우가 많고 이미 여러 가지 경우에 대한 결과가 많이 발표되어 있다. 전체적으로는 이론적인 규명보다는 실험결과와 경험식이 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

일체형원자로 SMART에 내장되는 관류식 나선형 증기발생기는 기존의 상용원자로와 여러 가지 측면에서 많이 다르므로 설계 초기단계에서 유동유발진동에 대한 평가를 수행하여 설계인자의 타당성을 검토하는 것이 필요하다[5-6]. 관 외류, 즉 일차 냉각재에 의한 면 외 진동이 중요한 인자로 파악되며, 이 때 칼만 와류에 의한 진동, 난류에 의한 진동, 기존의 상용원자로에서 중요한 양상이었던 유체력에 의한 탄성진동, 음향진동이 주요 양상이다. 이 중에서 SMART 전열관의 칼만

와류에 의한 진동평가 결과는 저자에 의해 이미 발표되었다[1]. 다음으로 관 내류에 의한 진동이 있는데 SMART에 사용되는 증기발생기와 같이 나선형으로 되어 있으며 관내에서 과열증기가 발생할 때는 냉각재의 속도가 매우 빨라지므로 중요하게 고려된다.

본 연구에서는 먼저, 경험식과 문헌에서 제시한 여러 가지 실험 데이타를 활용하여 SMART에 사용될 증기발생기에 대해 계산하였다. 이 방법으로는 난류에 의한 진동, 관 내류에 의한 진동에 대한 평가가 가능했다. 이어서 유동유발진동해석 전용프로그램을 활용하여 유체력에 의한 탄성진동, 난류에 의한 진동에 대해 독립적인 평가를 하였다. 증기발생기 전열관의 피치, 지지점의 간격, 일차측 유체의 속도 등의 설계변수를 변화시키면서 해석을 수행하여 현재 설계 값의 타당성을 조사하였다.

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 전열관 밖에는 일차냉각수가 cross-flow형태로 흐르고 있으며 전열관 안쪽에는 이차측 냉각수가 유입되어 과열증기가 생성되어 나가는 형태다. 외경이 12mm이고 내경이 9mm인 티타늄합금 전열관이 약 10°의 나선각으로 나선을 이루면서 여러줄 나사형태로 감긴다. 전열관과 전열관 사이의 반경방향피치는 17mm이며 축방향피치는 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/m^3이다. 유로단면적과 증기발생기 일차측 냉각수 유량으로부터 일차측 평균유속을 구할 수 있다. SMART 증기발생기에서 전열관이 사각배열인 경우에 유속은 1.72 m/s가 되며 삼각배열인 경우의 유속은 0.81 m/s가 된다.

3. 유체탄성진동 및 난류에 의한 불규칙진동

유동유발진동해석 프로그램은 U-튜브 및 직관에 대한 해석을 위해서 개발된 프로그램이므로 나선형 관에 대해서 바로 적용할 수가 없다. 따라서 나선형 전열관을 직관 및 곡관으로 모델링하여 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. SMART 증기발생기의 나선형 전열관은 나선각이 작기 때문에(10 ° 내외) 링으로 가정하여도 큰 오차가 발생하지 않는다[7]. 앞서 연구한 칼만 와류에 의한 진동평가[1]에서도 링으로 모델링하여 해석을 수행하였다. 그러나 본 해석코드에 사용한 프로그램은 완전히 링으로 모델을 할 수가 없다. 따라서 직관으로 가정한 모델, 이는 곡률반경이 무한대인 경우에 해당된다. 그리고 U자형 모델에서 직관부는 가상적으로 조금만 두고 곡관부 해석결과만 사용하는 모델로 나누어 해석을 수행하였다.

유속을 불안정 유속으로 나눈 불안정속도비(instability ratio)로써 유체탄성에 의한 유동유발진동 해석을 평가하였는데 이 값이 1 이상이 되면 유동유발진동이 발생하게 된다. 유체의 속도가 임계값이상이 될 때 유체탄성 불안성성의 효과가 고려된다. Connors에 의하여 최초로 소개된 관계식에 근거하여 Pettigrew 등은 유체탄성 불안정성에 의한 임계유속을 예측할 수 있는 다음 식을 제안하였다.

$$V_{crit} = K \frac{cf_i}{\left[2m\,\rho \int_o^L \psi(x)\ \phi_i^2(x)\ dx\right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서

K **유체탄성 불안정계수**

c **감쇠계수**

f_i **자유진동 i번째 모드의 고유진동수**

ϕ **정규모드함수**

ρ **횡류의 쉘측 유체밀도**

x **튜브의 축방향 좌표**

L **튜브의 참조 길이**

ψ **유속 구배 함수**

불규칙 난류에 의하여 생성되는 유동유발력의 평균제곱응답은 다음과 같다.

$$y^2(x) = \sum_{r=1}^{k}\sum_{s=1}^{k} \frac{\phi_r(x)\ \phi_s(x)}{16\ \pi^4 f_r^2 f_s^2} \int_0^{\infty} H_r(f)\ H_s(f)\ \ W(f)\ df \quad (2)$$

여기서

r, s **모드수**

k **계산에 사용된 총 모드수**

H_r **주기응답함수**

$W(f)$**는 가중함수로서**

$$W(f) = \int_0^L \int_0^L R\,(x, x', f)\ \phi_s(x')\ \ dx\,dx' \quad (3)$$

R**은 통계학적 측면에서 불규칙 외력을 나타내는 공간상관밀도함수**(Spatial Correlation Density Function)**이다. 만약 불규칙 외력이 균질**(Homogeneous)**이고 공간적으로 상관관계가 있다면 공간상관밀도함수는 파워스펙트럴밀도**(Power Spectral Density)**함수이다. 주기응답함수는 다음과 같이 표현된다.**

$$H_r(f) = \frac{1}{\left(1 - \frac{f^2}{f_r^2}\right) + \frac{j\,cf}{2\,\pi m f_r^2}} \quad (4)$$

난류에 의한 불규칙진동은 전열관 바깥쪽 일차측 냉각재의 극단적인 난류에 의해 전열관에 작용하는 변동하중에 의해 발생한다. 이 때 불규칙 진동수는 다음과 같은 경험식을 사용하였다[7].

$$f_{tb} = \frac{V_c d_o}{Lt}[3.05(1 - \frac{d_o}{t})^2 + 0.28] \quad (5)$$

여기서

f_{tb} : 유력한 불규칙진동의 진동수 (Hz)
V_c : 전열관을 통과하는 직행유속 1.72m/s(사각피치)
0.81m/s(삼각피치)
L : 길이방향 전열관의 피치(m)
t : 횡방향전열관의 피치(m)
d_o : 전열관 외경 0.012 m

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.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R^2} F(\alpha, \frac{EI}{GJ}) \sqrt{\frac{EIg}{\rho}} \qquad (6)$$

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

$$f_2 = K \frac{\lambda}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EIg}{\rho}} \qquad (7)$$

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.

직관으로 모델링하여 해석한 결과는 그림 1과 같은데 SMART의 증기발생기 설계점에서 불안정속도비는 0.22로서 불안정성이 발생할 가능성은 희박하다. 그러나 국부적으로 유속이 높은 곳에서는 발생할 가능성을 배제할 수 없다. 그림 2에서는 최내열에 대한 해석결과를 보여주며 그림 3에서는 최외열에 대한 결과를 보여주는데 불안정성이 발생할 가능성은 낮음을 보여준다. 그리고 1차 모우드에 대한 결과를 3가지 모델에 대해 상호 비교하면 그림 4와 같은데 불안정속도비 절대값은 상호 차이가 있지만 일관된 경향을 보여주며, 이 결과에서 직관모델이 보수적인 결과를 보여줌을 알 수 있다.

그림 5에서는 피치의 변화에 따른 불규칙진동수를 보여주며 표 1은 현재 SMART 증기발생기 설계치수로 계산했을 때 값인데 전열관의 고유진동수 1093Hz보다 훨씬 작은 값이므로 난류에 의한 불규칙진동이 발생할 가능성은 희박하다. 실제로 불규칙 진동에 의한 공진 가능성은 작고 단지 진폭만이 중요한 문제가 된다. 진폭에 대한 평가는 유동유발진동해석 프로그램을 활용하여 평가하였다.

4. 관 내류에 의한 진동

SMART에 사용되는 나선형 증기발생기 전열관과 같은 곡관에서는 관내흐름에 의해 자체 진동이 생기는 경우가 있다. 이것은 관이 관내흐름의 압력, 유속의 영향을 받아 겉보기 강성저하에 의해 고유진동수가 낮아져 발생하는 불안정 진동으로 설명되고 있다. 이와 같은 진동현상에 대해서 굽은 관의 설계조건에 기초해 아래와 같은 무차원 속도를 구해 이것과 면외 불안정진동을 생성시

키는 한계유속과의 비교로부터 설계평가를 하였다. 굽은 관의 면외 진동에 대한 무차원 유속 V는 다음 식으로 나타내진다.

$$V = \left(\frac{m_f}{EI}\right)^{\frac{1}{2}} vR \tag{8}$$

여기서

V : 무차원 유속

m_f : 관내유체의 단위길이 당 질량 (kg/mm)

$$m_f = \frac{1}{4}\pi d_i^2 \times \rho \times 1 \tag{9}$$

d_i : 관의 내경

d_o : 관의 외경

v : 관내유체의 유속

R : 관의 곡률 반경 (mm)

이 무차원유속 V가 한계유속 V_c이상이 되는 경우에 불안정진동이 발생하는 것으로 간주한다.

$$V \geq V_c \tag{10}$$

V_c는 곡관의 강성비 k, 관심있는 곡관부(지지점 사이)의 좁은 각 α, 양단의 지지조건, 관-유체의 질량비 β, 관심있는 진동모드 등에 의해 정해진다.

여기서

V_c : 한계유속

k : 관의 강성비 = 0.77

$$k = \frac{1}{1+\nu}$$

여기서

ν : 관의 포아송비

α : 좁은 각

β : 관-유체의 질량 비

$$\beta = \frac{M_p}{(m_f + M_p)}$$

M_p : 관의 단위길이당 질량

관내 흐름에 의한 자체진동을 평가하기 위해서 중요한 것은 진동모드와 지지조건이므로 다음과

같이 고려되어야 한다. 중요한 진동모드는 외면의 일차모드이다. 관내 유체의 흐름에 의한 겉보기 강성저하에 의한 곡관의 불안정진동이 생긴다고 하면, 설계유속이 최저차모드에 대한 한계속도보다 낮음을 보여주면 진동발생에 대한 위험성은 없다고 할 수 있다. 지지조건은 양단고정으로서 평가한다. 해석절차와 방법론에 관한 내용은 참고문헌[9]에 기술되어있다. 관내유속 v의 한계속도를 앞서 언급한 식으로 구한 결과를 표 2에 나타냈다. 여기서 이차측 설계속도는 152.7kg/s의 유량으로부터 구한다. 물 및 증기의 조건은 아래와 같다.

급수 온도 : 180 °C
급수 압력 : 3 MPa
급수비용적 : 0.001125 m^3/kg
증기 온도 : 274 °C
증기 압력 : 3 MPa
증기비용적 : 0.083125 m^3/kg

최내층은 문제가 없는 것으로 판단되며 최외층에서도 유동유발진동이 발생하지는 않는 것으로 계산되었지만 여유도가 매우 작다. 또한, 고정지지된 경우에 대한 평가를 수행하였으나 SMART의 증기발생기는 엄밀한 의미에서 고정지지도 아니고 핀지지도 아니므로 양단이 핀지지된 경우에 대한 검토도 필요하다. 따라서 유속분포 등 관련 해석결과가 정확히 나온 후에 다시 한번 재평가를 할 필요성이 있다.

5. 결론

일체형원자로 SMART 증기발생기 전열관에 대해 경험식을 바탕으로 유체탄성불안정성, 난류에 의한 불규칙 진동, 관내류에 의한 유동유발진동해석을 수행하였다. 유체탄성력에 의한 불안정성이 발생할 가능성과 난류에 의한 유동유발진동가능성은 매우 희박하였다. 직관 및 곡관모델을 사용하여 계산한 결과 유동유발진동 가능성은 낮은 것으로 판명되었지만, 관 내류에 의한 진동이 발생할 가능성은 완전히 배제할 수 없다. 본 해석은 평균유속을 바탕으로 수행되었으므로 향후 SMART의 설계가 진행되면 전제적인 유속해석결과를 바탕으로 평가를 수행하여 국부적인 유동유발진동이 발생할 가능성을 평가해야 한다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김용완, 김종인, 김지호, 허형, 심우건, “SMART 증기발생기 전열관의 와류에 의한 유동유발진동해석,” 한국원자력학회, ‘98 추계학술발표회 논문집, 서울, 1998.10.29-30.
2. Robert D. Blevins, *Flow-Induced Vibration*, Van Nostrand Reinhold, NY, 1990.
3. 정경훈, 손갑헌, *봉집합체의 유동관련진동 기술현황분석보고서*, KAERI/AR-277/87, 1987.
4. 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.
5. 김종인 외, *일체형원자로 기기개발 및 검증시험*, KAERI/RR-1889/98-1, 1999.
6. 김용완 외, *일체형원자로 관류식 나선형 증기발생기 개념설계*, KAERI/TR-1446/99, 1999.
7. 김용완, 이두정, *나선형 증기발생기와 일체형원자로 설계 및 개발기술 토의시험시설조사*,

KAERI/OT-127-95.

8. R. King, "Vortex Excited Oscillations of Yawed Circular Cylinders," *Journal of Fluid Engineering*, Vol.99, pp.495-502, 1977.

9. **김용완 외**, ***SMART 증기발생기 전열관의 유동유발진동 평가***, KAERI/TR-1134/98, 1998.

표 1. 불규칙 난류에 의한 유동유발진동 비교

	사각배열	**삼각배열**
V_c(m/s)	1.72	0.81
L (m)	0.0135	0.0135
t (m)	0.017	0.034
난류에 의한 진동수 (Hz)	48.9	32.9
전열관 고유진동수 (Hz)	1093	1093

표 2 관 내류에 의한 유동유발진동 검토

	R (mm)	**유체**	ρ (kg/mm^3)	m (kg/mm)	Vc	v (mm/s)	**설계속도** (mm/s)
최외층	363	**물**	$8.88x10^{-7}$	$5.6x10^{-5}$	7	6586	701
		증기	$1.23x10^{-8}$	$7.82x10^{-7}$	7	55737	50223
최내층	91	**물**	$8.88x10^{-7}$	$5.6x10^{-5}$	3	11259	701
		증기	$1.23x10^{-8}$	$7.82x10^{-7}$	3	95286	50223

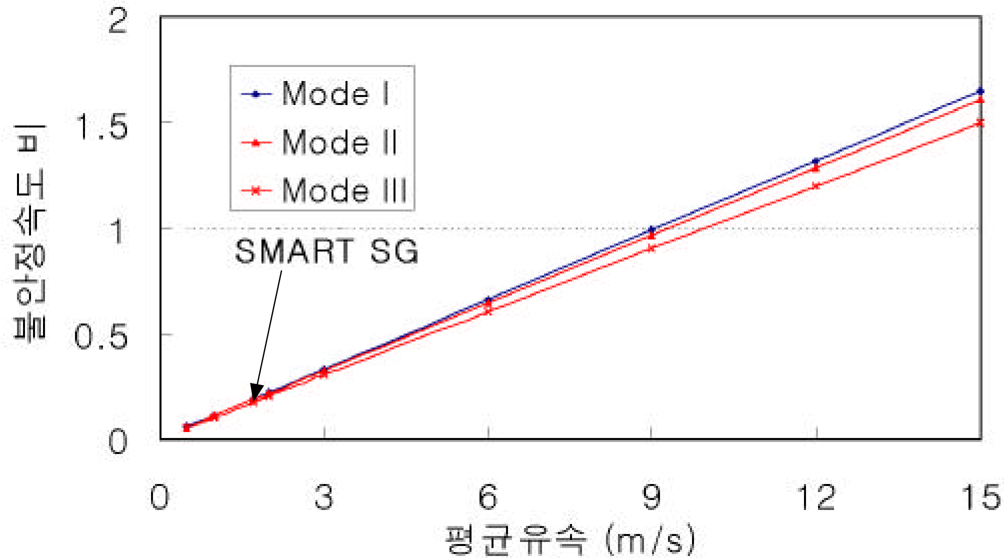


그림 1. **직관모델에서 일차냉각재 유속이 불안정속도 비에 미치는 영향**

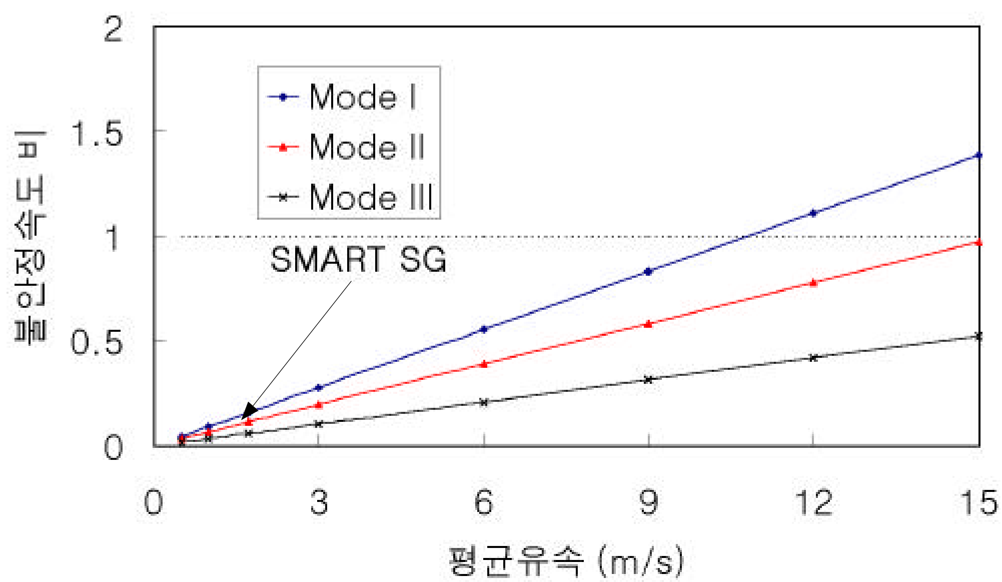
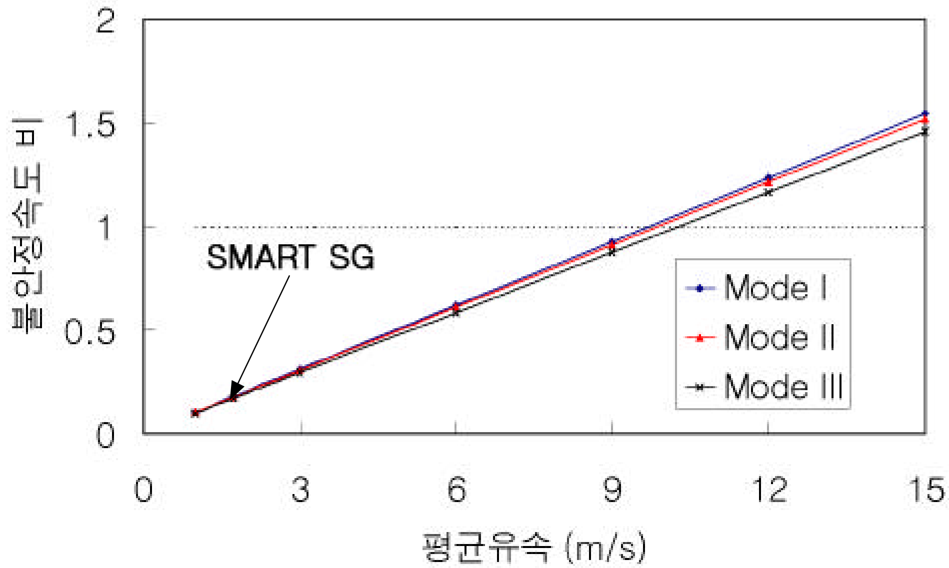
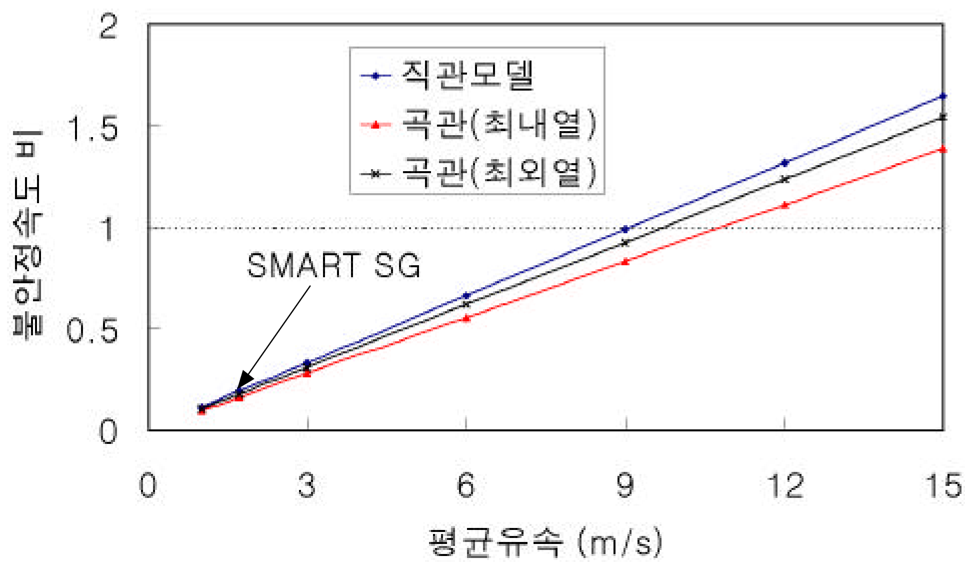


그림 2. **최내열 모델에서 일차냉각재 유속이 불안정 속도 비에 미치는 영향**



불안정속도 비
평균유속 (m/s)
SMART SG
Mode I
Mode II
Mode III



불안정속도 비
평균유속 (m/s)
SMART SG
직관모델
곡관(최내열)
곡관(최외열)

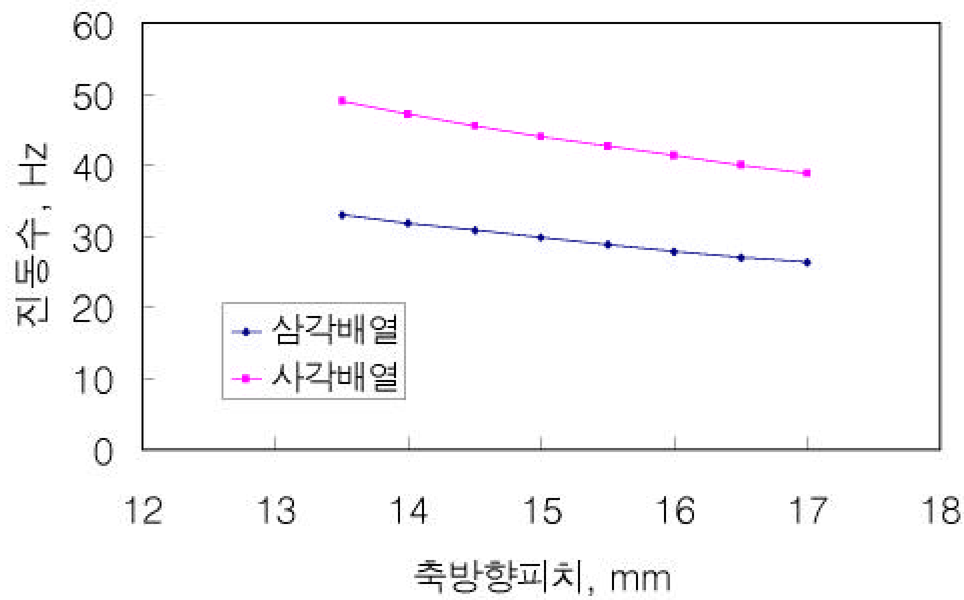


그림 5. 축방향 피치가 불규칙 난류에 의한 진동 수에 미치는 영향