2004 춘계학술발표회 논문집
원자력학회

신형경수로1400 증기발생기 전열관의 유동유발진동해석에 대한 설계검증 연구

Study on the Design Verification of Flow-induced Vibration Analysis in APR1400 S/G

정대율[*] 이광한[**] 변성철[***]
원자력환경기술원
대전시 유성구 문지동 103-16
김무용[*] 박태정
두산중공업
경남 창원시 귀곡동 555

초록

영광3,4호기와 울진3,4호기 운전 경험상 증기발생기 중앙공동(Central Cavity) 상부의 U형 곡관부에서 프레팅 마모가 발생하고 있다. 이 영역은 유체속도가 빠르고, 증기분율(void fraction)이 높으며, 그리고 전열관 사이의 저지대가 긴 구간으로 유체유발진동의 발생 가능성이 높다.

이러한 문제점을 해결하기위해 신형경수로1400 증기발생기에서는 중앙공동영역에서 속도를 낮추고 전열관의 고유진동수를 줄이는 방향으로 설계를 개선하였다. 본 연구에서는 신형경수로1400의 증기발생기 설계특성을 소개하고, 설계사가 수행한 신형경수로1400 증기발생기의 유동유발진동해석결과에 대해 사업주가 독립적으로 설계검증을 수행하여 신고리#3,4 증기발생기의 건전성을 확인하고자 한다.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기는 원자로와 같이 30~60년의 운전수명을 유지하도록 설계하였으나 설계시에 반영하지 못한 각종 열화현상이 초기에 발생되어 전열관이 손상되고 또한 심한 경우 설계수명 이전에 증기발생기를 교체하는 사례가 다수 보고되고 있다. 증기발생기의 열화는 증기발생기의 기계설계, 재료선택, 제작기술, 2차 계통의 운전에 관련된 복합적인 문제에 기인한다. 증기발생기 전열관의 열화 원인은 응력부식균열(SCC), Wastage, IGA/SCC, PWSCC, Denting, 침식-부식, 피로균열, 피팅, 프레팅-마모, 외부물질 또는 이탈부품의 충격에 의한 파손 등으로 나타나고 있다. 이러한 열화기구 중에서 비교적 단기간에 1차 냉각재 누설을 초래할 수 있는 정도의 전열관 손상을 초래하는 프레팅 마모는 증기발생기 2차측(쉘측) 유동이 전열관군에 가하는 동적인 힘에 의하여 튜브에 여기되는 과도한 진동(유동유발진동:FIV)으로 인하여 야기되므로 증기발생기의 설계 및 운전에서 중요하게 다

루어 지고 있다. 미국의 North Anna 원전1호기와 일본 Mihama 원전2호기에서 발생한 전열관 파단의 원인은 각각 진동 저지봉들의 비효율적인 설치와 제작상의 오류 이외 공통적으로 최 상단 전열관 지지판에서 유체탄성진동에 의한 고주파 피로로 밝혀졌다. 국내에서 운전되고 있는 표준원전의 증기발생기에서 유동유발진동에 의한 마모현상이 계속 발생되고 있으며 최근 울진4호기 증기발생기에서 전열관 파단사고가 일어났다. 따라서 국내 가동중인 표준원전 증기발생기 전열관의 마모현상은 Stay Cylinder 상부의 Central Cavity 위에 위치해 있는 U곡관 전열관에서 주로 발생하고 있으며 구조적인 현상 파악이 관심사항으로 대두되고 있다. 이러한 문제를 해소하기 위해 신형경수로1400의 기술개발 과정에서 표준원전대비 상대적으로 전열관의 높이는 고정시키고 전열관 다발의 직경을 증가시켰고, Stay Cylinder 상부에 유량 분배판을 설치하여 증기발생기 중앙부위의 축 방향 유속을 줄였으며, 그리고 전열관 수직 지지대의 추가설치 등 설계개선을 수행하였다. 본 연구에서는 설계사가 수행한 증기발생기 전열관 유동유발진동해석결과에 대해 한수원㈜이 독립적으로 설계검증을 수행하고 그 결과들이 설계 목표치를 만족하는지, 설계사가 수행한 결과와도 비교 검토하고, 그리고 신고리#3,4 증기발생기 전열관의 건전성을 확보하기 위한 추가 설계개선 방안을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 APR1400 증기발생기 설계특성

증기발생기 내부는 그 형태에 따라 다소차이는 있으나 고온 고압 환경 하에서 가동되고 있다. 또한 원자력발전소에서의 증기발생기 고유의 역할수행으로 인해 내부는 매우 빠른 유체의 흐름이 일어나고 있다. 이에 따라 증기발생기 상부의 U-bend 영역과 전열관 지지판에서 유체에 의한 진동현상이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 설계변경을 통하여 증기발생기에서의 마모현상을 억제하여 왔다. 특히, 국내 표준원전의 증기발생기 경우 전열관 마모가 중앙공동(Central Cavity) 상당지역의 전열관 지지대 사이의 간격이 상대적으로 길고, 통과 유속이 높아 고 에너지가 발생되며, 전열관의 낮은 고유진동수 때문에 운전초기부터 마모현상이 발생하고 있다. 이러한 마모현상에 대하여 두산중공업과 웨스팅하우스는 그 원인을 근원적으로 제거하기위해 아래와 같이 설계개선을 수행하였다.

2.1.1 전열관 다발 직경증가

신형경수로 1400 증기발생기 전열관 다발 설계는 KSNP 증기발생기 전열관 다발과 비교하여 높이는 일정하게 유지하는 대신 직경을 증가시키는 방향으로 수행되었다.(그림 2.1 참조)

2.1.2 EFDP(Egg-crate Flow Distribution Plate) 추가설치

중앙 공동부에서 발생되는 높은 유동에너지를 감소시키기 위하여 최상단 Egg-crate Flow Distribution Plate 를(그림 2.2 참조) 설치하였다.

2.1.3 UBS(Upper Bundle Support) 설계개선

중앙 공동부 상단에 위치한 전열관의 진동 특성인 고유진동수를 증대 시킬 수 있도록 VERTICAL UBS(UPPER BUNDLE SUPPORT)중앙에 VERTICAL GRID 와 HORIZONTAL GRID 를 추가 설치하였다.(그림 2.3 참조)

2.2 유체유발진동 해석 절차

증기발생기 전열관의 유체유발진동 원인은 크게 유체탄성 불안정 진동, 랜덤난류여기 진동, 와류발산 진동에 기인하지만 유체유발 진동 실험결과 90%에 가까운 기공율을 지니는 증기발생기 전열관의 U-bend 지역에서는 거의 나타나지 않음을 보여준다[1]. 따라서 본 연구에서는 유체탄성 불안정 진동과 랜덤난류여기 진동에 대해서만 언급하기로 한다. 증기발생기 전열관의 유체유발진동 해석은 2차측 유체의 가진력에 의하여 발생하므로 전열관의 유체유발진동 해석을 위하여 우선적으로 결정하여야 할 관련 매개변수는 전열관의 단위 길이당 유효질량, 전열관에 수직한 틈새 횡 유속, 2차 측 유체에 의한 감쇠비 등이다. 이들 매개변수들은 증기발생기의 열수력 해석 결과를 이용하여 2차측 유체의 열수력 매개변수들인 유동속도, 보이드율 및 건도의 분포로부터 결정하여야 한다. ATHOS3 코드에서는 2차측 유체의 속도는 control cell의 표면 중심에서 그 표면에 수직한 평균속도이며, 보이드율과 건도는 control cell의 중심격자 점에서의 값으로 표시된다. 따라서 유체유발진동 해석을 위하여 선정된 특정 전열관이 통과하는 control cell에 대한 ATHOS3 Mod.1의 계산결과로부터 특정 전열관 전장에서 이들 관련 매개변수들에 대한 정확한 분포를 구하여야 한다. 특히 ATHOS3 Mod.1의 결과로 얻어진 속도는 전열관의 존재효과를 고려하여 유체유발진동 해석 대상 전열관을 횡단하여 유동하는 틈새 횡 유속(gap velocity)을 구하여야 한다. 본 연구에서는 그림 2.4과 같이 증기발생기 유체유발 진동 해석 절차를 확립하고 각 해석 코드간의 연계를 위해 필요한 입력 자료의 계산과 생성을 자동으로 할 수 있는 ATHOS-TAP 코드를 개발하였으며, ANSYS의 자유진동해석 결과를 유체유발진동 평가를 위한 PIPO-FE 코드의 입력 자료로 활용할 수 있도록 변환하기 위해 MODES 코드를 개발하였다.

2.3 열 수력 해석

ATHOS3 Mod.1코드를 이용한 증기발생기 열수력 해석에서 필요로 하는 유동장의 경계조건으로 APR1400 증기발생기 설계 시방서의 자료가 사용되었으며, 정상상태 하에서 2차 측 유속이 가장 큰 경우인 100% 출력의 운전조건에 해당하는 경계조건이 적용되어 열수력 해석이 수행되었다. 신형경수로1400 증기발생기에 대한 열수력 해석 결과, 이차측 주요 거시 변수의 최대값은 Table 1과 같고, 유동의 축 방향 속도 분포는 그림2.5와 같다. 그림2.5는 유량 분배판(EFDP) 설치의 영향으로 중앙 공동 영역으로 유동 집중현상이 완화되며 EFDP 설치 위치와 U-bend 영역에서 반경방향 속도는 감소하고 전열관 다발배열 특성에 의해 형성된 공동영역에서 반경방향 속도는 증가하고 있다. 이러한 반경방향 유동특성 때문에 반경방향 속도가 유체유발진동에 미치는 영향에 대해 일률적으로 말할 수 없지만, 반경방향 속도는 최대 2 ft/sec 미만으로써 축 방향 속도에 비해 매우 작은 값을 가지므로 유체유발진동 측면에서 반경방향의 속도의 영향은 미미할 것으로 판단된다. 이와는 별도로 설계검증 차원에서 국내 전문가의 자문을 통해 Egg-crate 유동 분배판을 모델링하기 위하여 athosgpp.for과 athos3.for를 개정하여 athosgpp3p1.for과 athos3p1.for를 개발하였으며, 동 프로그램을 사용하여

증기발생기의 열 수력 해석을 수행하였다. 열 수력 해석결과, 첫째 두산중의 ATHOS3 Mod.1코드로 계산한 유속과 개정된 ATHOS3 코드로 산출한 유속으로부터 도출한 수직틈새속도를 비교한 결과 전반적으로 잘 일치되었다(그림2.6 참조). 둘째, 유량 분배판 설치 여부에 대한 영향을 평가한 결과 다섯 번째 Egg-crate위에 1개의 유량 분배판을 설치할 경우에 유량 분배판이 없을 때보다 전열관의 수직틈새속도가 전반적으로 감소하나 유량 분배판을 네 번째와 다섯 번째 Egg-crate위에 설치할 경우에는 수직틈새 속도에 미치는 영향은 미미한 것으로 파악되었다(그림2.7참조).

2.4 전열관의 선정

신형경수로1400 증기발생기 전열관의 수는 13,102개로 모든 전열관에 대하여 유체유발진동 평가를 수행한다는 것은 대단히 어려운 일이다. 따라서 구조적으로 취약하다고 판단되는 몇 개의 전열관들을 적절하게 선정하고 이것들에 대하여 유체유발진동 평가를 수행한다. 그림2.1에서 Tube row 49는 첫 번째 부분 egg-crate에 의해 지지되지 않는 마지막 tube이며 tube row 91, 133은 각각 2번째와 3번째 부분 egg-crate에 의해 지지되지 않는 마지막 tube이다. 또한, tube row 175번은 모든 tube중에서 가장 긴 경간을 갖는 tube중의 하나이다. 따라서 Row 별 선정기준은 U-bend 영역에서 지지되지 않는 span의 길이가 긴 네 곳(Row 49, 91, 133, 175)을 우선적으로 선정하였다. 평면 밖(Out of plane) 방향의 진동 모드가 수평지지대(horizontal strip)에 의해 지지되지 않고 대각지지대(diagonal strip)에 의해서만 지지되는 세관들 중 가장 긴 세관인 Row 24번이 선정되었다. 그리고 Line별 선정기준은 유동압력(dynamic pressure)이 큰 곳을 기준으로 하여 선정되었으며, row 24와 29는 유체유동에너지가 큰 중앙공동구역에 인접한 tube line을 가지고 있어 2개씩 선정되었다 . 이와 같이 선정된 신형경수로1400 증기발생기의 유체유발진동 평가 대상 전열관은 Table2와 같다.

Table 1 Thermal-hydraulic analysis results

주요 거시 변수		RESULT
Max. Quality (%)		47.7
Max. Void Fraction (%)		95.0
Max. Axial Velocity	ft/sec	23.8
	m/sec	7.25
Circulation Ratio		3.86

Table 2 Tube list for FIV analysis

Row No.	Line No.	
24	129	205
49	112	202
91	192	-
133	170	
175	106	

2.5 유효질량의 계산

증기발생기 전열관의 자유진동 해석에서 대상 전열관의 밀도를 입력하기 위해서는 관의 전장을 따르는 단위 길이 당 유효질량분포를 구하여야 한다. 단위 길이 당 유효질량분포 $m_e(x)$ 는 식(1)과 같이 관 외부의 2차 냉각재의 존재로 인하여 부가되는 부가질량분포 $m_a(x)$, 전열관 내부의 1차 냉각재의 질량분포 $m_p(x)$ 및 전열관 재질 자체의 질량분포 $m_t(x)$ 의 합으로 식(1)과 같이 표시된다[2].

$$m_e(x) = m_a(x) + m_p(x) + m_t(x) \quad (1)$$

부가질량분포 $m_a(x)$ 는 증기발생기 2차 냉각재의 3차원 공간 밀도분포로부터 구해지며 관의 전 길

이에 따르는 밀도분포 $\rho_s(x)$ 로부터 식(2)와 같이 계산된다.

$$m_a(x) = C_m \frac{\pi}{4} d_o^2 \rho_s(x \quad (2)$$

여기에서 d_o 는 전열관의 외경이고 C_m 은 부가질량계수이다.
실제 운전 중인 재 순환식 증기발생기에서는 상승하는 2차 냉각재의 액체에서 증기로의 상 변화와 고온 및 저온측간의 열 적 불균형으로 인하여, 2차 냉각재에 의해 전열관에 부가되는 부가질량분포가 불 균일하므로, 전열관의 단위 길이 당 유효질량분포도 불 균일하게 된다. 그러나 전열관의 전장에 걸친 유효질량분포가 매우 불 균일한 경우에도 구간별 유효질량분포를 적용하는 경우에도 자유진동 거동을 훌륭하게 모사하는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 다 구간(multi-span)으로 구성되는 APR1400 증기발생기의 전열관 전장에 걸친 유효질량분포는 불 균일하지만, 계산의 편리성을 위해 전열관의 구간별로 유효질량분포가 균일한 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

2.6 전열관의 자유진동 해석

2.6.1 경계조건

증기발생기 세관의 주요 지지 구조는 egg-crate 지지대, 대각 지지대(Diagonal strips), 수직지지대(vertical strips) 그리고 수평지지대(horizontal strips)로 구성되어 있다. 그림2.8과 같이 Egg-crate 지지대의 경우, U-tube에 의해 구성되는 평면 내 좌우 방향과 평면 밖 방향이 구속된다. 그리고 대각 지지대(Diagonal strips)와 수직지지대(vertical strips)는 평면 밖 방향을 구속시켜주고 수평지지대(horizontal strips)는 평면 내 상하 방향과 좌우 방향을 구속시킨다. 증기발생기 전열관의 고유진동수 및 모드 형상 계산을 위한 해석 대상 전열관의 설계상 egg-crate의 개수는 총 12개이나, tube sheet로부터 3번째 egg-crate까지는 무시하고 4번째 full egg-crate에서 고온 측과 저온 측이 고정 지지된 상태에서 그 위 부분의 전열관 영역만으로 모델링하여도 전열관 전체에 대한 유체유발진동 해석결과와 차이가 크지 않으므로, 본 연구에서는 4번째 egg-crate 위치에서 관의 양단이 고정된 경우로 하여 해석을 수행하였다.

2.6.2 전열관의 자유진동 해석

유체유발진동 해석대상 전열관의 유연성은 전열관의 고유진동수와 모드 형상을 구하는 자유진동해석을 통해 결정되며, 고려 대상 모드 수는 전열관 진동 특성에 의해 결정된다. 모드 차수가 높아지면 고유진동수가 높아지기 때문에 유체탄성 불안전성 및 랜덤 난류 진동에 의한 평가 결과는 낮은 차수에 대한 결과에 비해 무시할 만하다. 따라서 최적의 모드 수는 유동유발진동 평가 결과의 모드 차수별 해석 결과의 중요도를 고려하여 결정되며 신형 경수로1400 증기발생기 유체유발진동 평가에서는 30개의 모드에 대한 평가가 수행되었다.

2.6.3 전열관의 자유진동 해석 결과

전열관의 자유진동 해석은 상업용 유한요소 코드인 ANSYS를 이용하여 수행되었으며, 유한요소는 전열관의 직관부는 PIPE18 요소를 곡관부는 PIPE18 요소를 사용하였다. 그림2.9은 선택된 전열관 중 유체유발진동 요인이 큰 세관의 주요 모드 형상을 나타내었다. a는 안정비와 RMS 변위가 가장

큰 모드형상이고 b, c, d는 각 전열관 별로 안정비의 값이 가장 크게 나타나는 모드 형상을 나타내었다. 그림2.10은 선정된 전열관의 자유진동 해석 결과로 각 모드 별 고유진동수를 보여주고 있다.

2.7 유체탄성 불안정 진동

2.7.1 유체탄성 불안정성 평가

유체탄성 불안정 진동 평가의 주요 매개변수는 임계유속(Critical velocity), 유효유속 (Effective velocity)그리고 안정비(Stability ratio)이다. 임계유속은 균일한 유동장 속의 단일 구간 세관 다발에서 유체 탄성 불안정 현상이 발생하는 유속으로 아래와 같이 정의된다[4].

임계유속 $$V_{cr} = K f_n d \sqrt{\frac{2\pi\xi m_o}{\rho_o d^2}} \quad (3)$$

여기에서 d는 전열관의 직경이고, m_o과 ρ_o는 각각 2차측 유체의 유효질량과 기준밀도이며 f_n은 전열관의 n차 고유진동수이다. ξ는 총 감쇄비로 Haslinger의 실험결과로부터 고유진동수에 따른 감쇠비를 적용하였다. 이 값은 고유진동수가 30 Hz근방에서 1.7%이며, 고유진동수가 증가하면 약 0.5%로 수렴한다. K는 유체탄성 불안정 계수로서 ABB-CE의 실험에 의하면 그림2.11에 나타낸 것과 같이 60^O 삼각배열인 경우 3.3, 30^O 삼각 배열인 경우 4.9, 45^O 회전된 사각 배열인 경우에는 7.1이다. 신형경수로1400 증기발생기의 U-자관 상부의 전열관 배열은 45^O 회전된 사각 배열을 갖는다.
진동을 유발하는 유효유속이 임계속도에 도달할 때까지는 세관의 진동변위가 천천히 증가하지만, 임계속도를 넘어서게 되면 진동변위가 급격히 증가하게 된다. 유효유속은 다중 구간(span)이거나 비균일 유동장 속의 세관에 대한 등가 유속으로 아래와 같이 정의된다.

유효유속 $$V_e^2 = \frac{\int \frac{\rho(x)}{\rho_o} v(x)^2 \phi(x)^2 dx}{\int \frac{m(x)}{m} \phi(x)^2 dx} \quad (4)$$

여기에서 x는 전열관의 길이방향 좌표이며, m(x) 는 전열관의 단위 길이 당 유효질량이며, $\rho(x)$ 는 2차 측 유체의 유효질량이다. $\phi(x)$ 는 3.3절에서 계산된 모드 형상이다. v(x)는 전열관을 횡단하는 2차측 유체의 틈새속도로 수직 직관부와 수평 직관부, U-bend부의 세 부분으로 나누어서 계산되어진다. 해석대상 전열관에 관한 틈새 횡 유속은 수직직관부인 경우에는 전열관이 통과하는 ATHOS3의 control cell과 동일한 간격으로 계산되어 지며, U-bend 영역인 경우에는 본 코드의 사용자가 선정하는 각도 간격으로 계산된다. 자세한 계산방법은 참고문헌5에 나타나 있다. APR1400 증기발생기 유체유발진동 평가대상으로 선정된 세관의 주요 틈새 속도 계산 결과는 그림2.12와 같다. 안정비(stability ratio)는 임계유속에 대한 유효유속의 비 SR = V_e/V_{cr}로 정의되는데, 이 값이 1이 될 때 유체탄성 불안정 현상이 발생하기 시작한다. 이것은 진동을 유발하는 유효유속이 임계속도에 도달할 때까지는 세관의 진동변위가 천천히 증가하지만 임계속도를 넘어서게 되면 진동 변위가 급격하게 증가함을 의미한다[2].

2.7.2 랜덤 난류 여기 진동

난류 여기에 의한 세관 다발 진동을 예측하는 방법은 랜덤 진동기법을 이용하여 개발되었다. 랜덤 난류여기 진동에 의한 세관변위를 결정하는 해석적 방법이 ASME Sec. Ⅲ Appendix N에 따른

RMS(Root Mean Squared) 변위, y(x)는 식(5)와 같이 계산될 수 있다.

$$y(x)^2 = \sum_j \sum_i \frac{L_i\ G_f^i(f_j)\ \Phi_j^2(x)}{64\ \pi^3\ M_j^2\ f_j^3\ \xi_j}\ (J_{jj}^i)^2 \quad (5)$$

여기에서 i, j는 각각 경간(span)과 고유진동 모드 번호를 의미하며 L_i, $\phi_j(x)$, f_i, ξ_i, 는 각각 i번째 경간 길이, j번째 고유진동모드와 고유진동수, 감쇠비를 각각 의미한다. J_{jj}^i는 Joint acceptance이고, M_j, $G_f^i(f_i)$는 각각 다음 식으로 표시된다.

$$M_j = \int_0^L m(x)\ \phi_j(x)^2 dx$$: Generalized mass

$$G_f^i(f_i) = \left(\frac{D}{2}\right)^2 C_R(f_i) \int_0^L [\rho_i U^2(x)]^2\ \phi_j^2(x)\ dx$$

: Mode shape weighted Power Spectral Densities

여기에서 $C_R(f)$ = Random Excitation Coefficient

유체탄성 불안정 진동이나 와류발산 진동과는 다르게, 난류여기에 의한 진동은 설계로 방지될 수 있는 성질이 아니며, 난류에 노출되어 있는 모든 세관들은 일정 부분의 진동을 경험하게 된다. 따라서 난류여기에 의한 진동을 통제하게 위한 설계목표는 계산되어진 RMS 변위가 세관의 건전성을 저해하지 않는 기준치보다 작아지도록 제한하는 것이다.

2.8 유체유발진동 해석 결과

유체탄성불안정 진동의 안정비 허용치는 1이고 랜덤 난류 여기 진동에 의한 최대 RMS 변위의 설계 목표 값은 10mils이다. 안정비가 1이 될 때 유체탄성 불안정 현상이 발생하기 시작하지만 보수적인 설계를 위하여 설계기준을 0.75로 설정하고, 랜덤난류여기 진동에 의한 최대 RMS 변위는 설계 목표 값으로 10mils가 권장되고 있다[6].

그림2.13에는 선정된 전열관에 대한 각 모드별 안정비 계산 결과를 나타내었고, Table 3는 선정된 전열관의 진동모드 중에서 안정비가 가장 큰 진동모드를 나타내었다. 그림2.14는 선정된 전열관에 대해 각 진동 모드별로 난류여기진동에 기인하는 RMS 변위 계산 결과를 나타내었고, Table 4에는 선정된 전열관에 대해 진동 모드 중에서 RMS 변위가 가장 큰 진동모드를 나타내었다.

표 3 유체탄성불안정 결과 비교

오	열	(주) 두산			설계검증		
		모드 번호.	고유 진동수	안정비	모드 번호	고유 진동수	안정비
24	129	1	22.61	0.54	1	22.41	0.60
	205	1	22.48	0.68	1	21.90	0.69
49	112	3	37.53	0.13	3	36.56	0.13
	202	9	98.50	0.18	9	90.10	0.17
91	192	9	109.10	0.18	13	106.28	0.14
133	170	1	33.47	0.17	1	32.43	0.17
175	106	1	33.46	0.16	1	33.87	0.16

표 4 랜덤난류여기진동 결과 비교.

오	열	(주) 두산			설계검증		
		모드 번호	고유 진동수	평균변위 (mils)	모드 번호.	고유 진동수	평균변위 .(mils)
24	129	1	22.61	1.40	1	22.41	2.01
	205	1	22.48	1.81	1	21.90	2.26
49	112	1	33.34	0.29	1	32.65	0.29
	202	3	37.69	0.25	3	37.07	0.27
91	192	3	39.22	0.38	3	40.21	0.31
133	170	1	33.47	0.25	1	32.43	0.30
175	106	1	33.46	0.22	1	33.87	0.26

이상의 결과를 정리하면 신형경수로1400 증기발생기 전열관의 유체유발진동 평가결과는 Table5과 같이 Row 24/Line 205번 전열관이 유체유발진동에 가장 취약한 것으로 나타났으나 설계기준을 만족함을 알 수 있다.

Table 5 Results summary of Fluid-Induced Vibration analysis

Tube		FIV results			
Row	Line	Mode No.	Natural frequency	Stability ratio	RMS disp. (mils)
24	205	1	21.90	0.69/0.68*	2.26/1.81*

2.9 증기발생기의 건전성 확보관련 권고사항

신형경수로1400 증기발생기의 유체유발진동에 대한 설계검증결과 안전성비와 평균변위가 각각 약0.7과 2.26mils로 계산되어 설계기준을 만족하지만 비교적 큰 값을 유지하며, 울진#5,6대비 전열관 상부 부분 지지대(partial egg-crate)간 간격이 넓고(27.95”->36.75”), 그리고 한원연의 울진 #5,6증기발생기 전열관의 ECT검사 결과에 의하면 상부 부분 지지대 지역의 Batwing 근처에서 근접현상이 다수 발견되었다고 주장하고 있다. 따라서, 신고리#3,4 증기발생기 전열관의 유체유발진동으로부터 기기 건전성을 확보하기 위해 민감도 분석을 통해 상부의 부분지지대를 추가 설치 또는 수평지지대의 위치 변경 등의 설계개선이 바람직한 것으로 사료된다.

3. 결론

본 연구에서는 증기발생기 전열관에 대한 유체유발진동 해석절차를 수립하고, 열수력 해석과 자유진동해석, 유체유발진동 평가 코드간의 입출력 자료를 자동으로 생성하여 신형경수로1400 증기발생기 전열관에 대하여 유체유발 진동해석을 수행하였다. 이를 위해 확립된 절차는 다음과 같다.

(1) 증기발생기 열수력 해석을 통해 얻어낸 2차측의 엔탈피와 압력을 이용하여 유체의 밀도를 계산하고, 이를 전열관의 부가질량을 계산하여 자유진동해석을 위한 유한요소 입력 자료를 자동으로 생성하도록 하였다.

(2) 증기발생기 열수력 해석결과로부터 전열관의 틈새속도와 보이드율을 계산하여 유체유발진동 평가 코드의 입력 자료를 자동으로 생성하도록 하였다.

(3) 유한요소코드를 이용하여 전열관의 자유진동해석을 수행하여 그 결과를 유체유발진동 평가코드의 입력 자료로 자동으로 변환하도록 하였다.

(4) 열 수력 해석 결과와 자유진동해석 결과를 이용하여 전열관의 유체탄성불안정 진동과 랜덤난류여기 진동을 평가하였다.

본 연구에서는 위 절차를 수행하기 위해 각 코드간의 입출력 자료를 자동으로 생성하는 프로그램을 생성하였으며 신형경수로1400 증기발생기 전열관에서 구조적으로 취약하다고 판단되는 전열관에 대한 유체유발진동 평가를 수행하여, 유량 분배판의 설치, 전열관군의 수평 및 수직 지지대의 추가 설치 등의 KSNP 증기발생기에 비해 설계 개선이 이루어진 신형경수로1400 증기발생기의 유체유발

진동 성능을 평가하였다. 평가결과 Row 24/Line 205번 전열관의 첫 번째 모드에서 안정비 0.69이고 RMS 변위는 2.26 mils로 가장 취약한 것으로 평가되지만 설계기준을 만족하고 있음을 확인하였다. 그러나, 신고리#3,4 증기발생기 전열관의 유체유발진동으로부터 기기 건전성을 확보하기 위해 설계개선에 대한 민감도를 분석한 후 필요 시 설계개선을 추진할 필요가 있는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

(1) Heilker, W. J., Vincent, R. Q., 1981, "Vibration in Nuclear Heat Exchangers Due to Liquid and Two-Phase Flow", Engineering for Power, Vol. 103, No. 2.

(2) 유기완, 박치용, 2002, CE형 증기발생기 전열관에 대한 유체탄성 불안정성 해석“, 한국소음진동공학회, 제12권, 제4호, pp.261-271.

(3) 김웅식, 조종철, 신원기, 1993, “증기발생기 U자형 관의 자유진동 해석”, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제4호, pp. 873-889.

(4) 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, pp. 93

(5) Singhal, A. K., et al., 1990, ATHOS3 Mod-01 : A Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generators, Vol. 1 : Mathematical and Physical Models and Methods of Solution, Vol.2 : Programmer's Manual ; Vol. 3 : User's Manual, EPRI Report NP-4604-CCML.

(6) Sandifer. J.B., 1992, Guidelines for Flow Induced Vibration Prevention in Heat Exchangers, Welding Research Council Bulletin No. 372

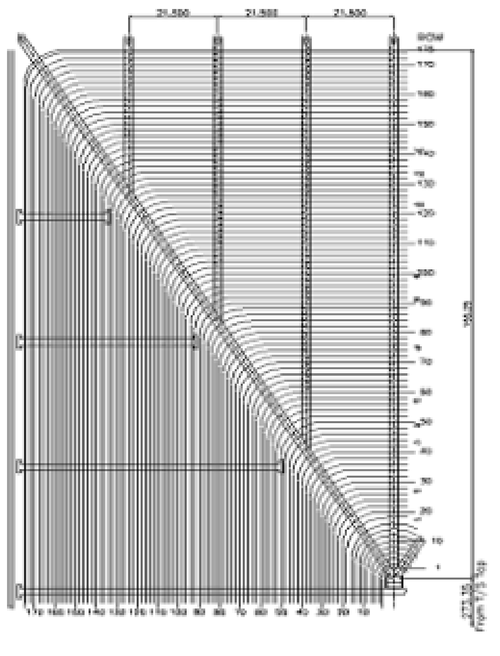

그림 2.1 Tube supports & tubes arrangement

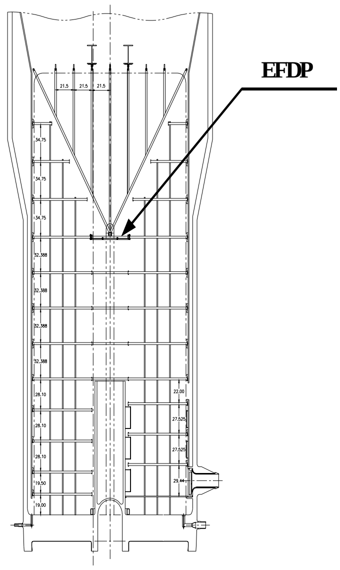

그림 2.2 Tube supports & EFDP

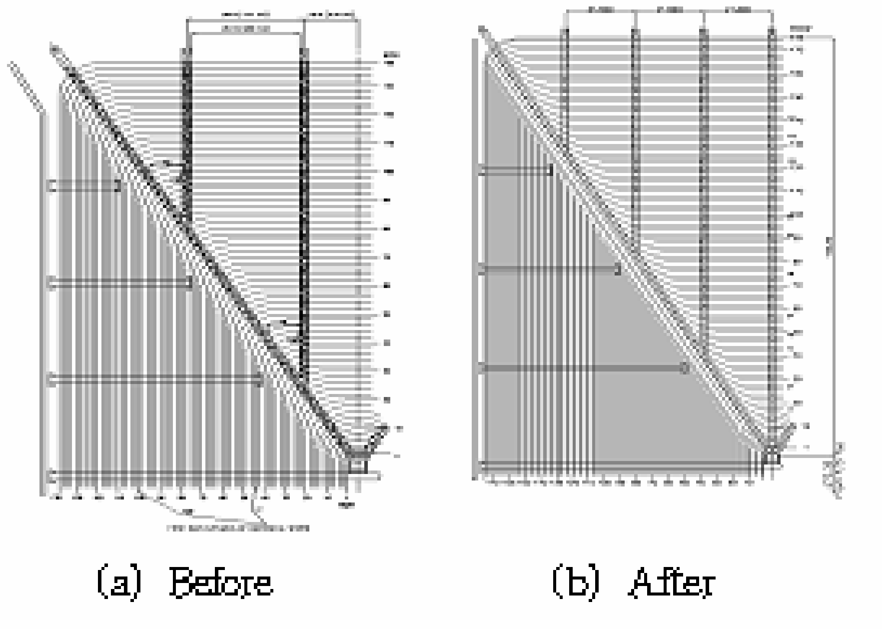

그림 2.3 Upper tube bundle supports before and after design improvement

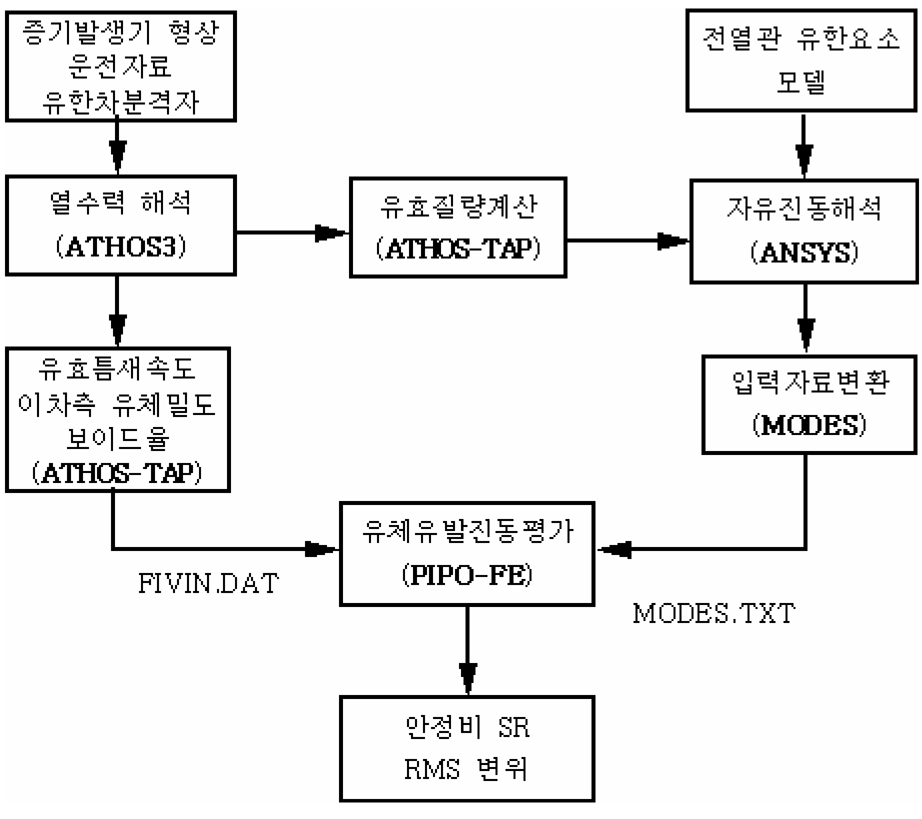

그림 2.4 Procedure of the fluid-induced vibration

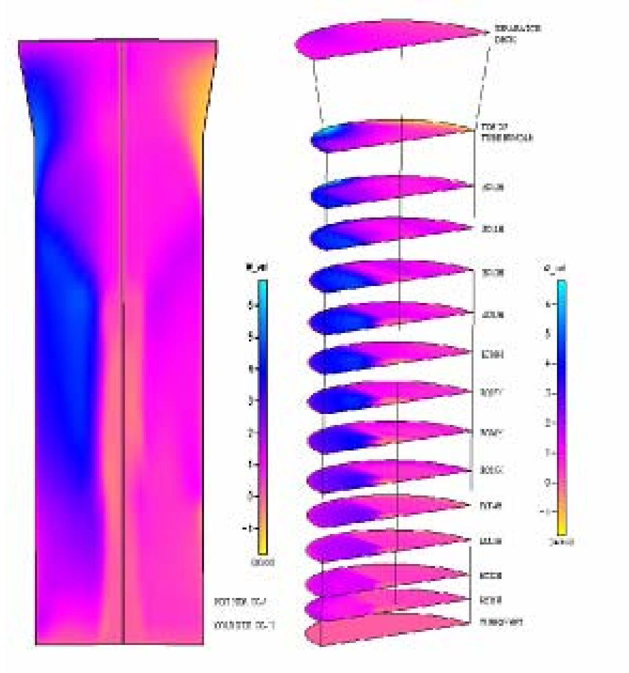

그림 2.5 Plot of axial mixture velocity for APR1400 steam generator

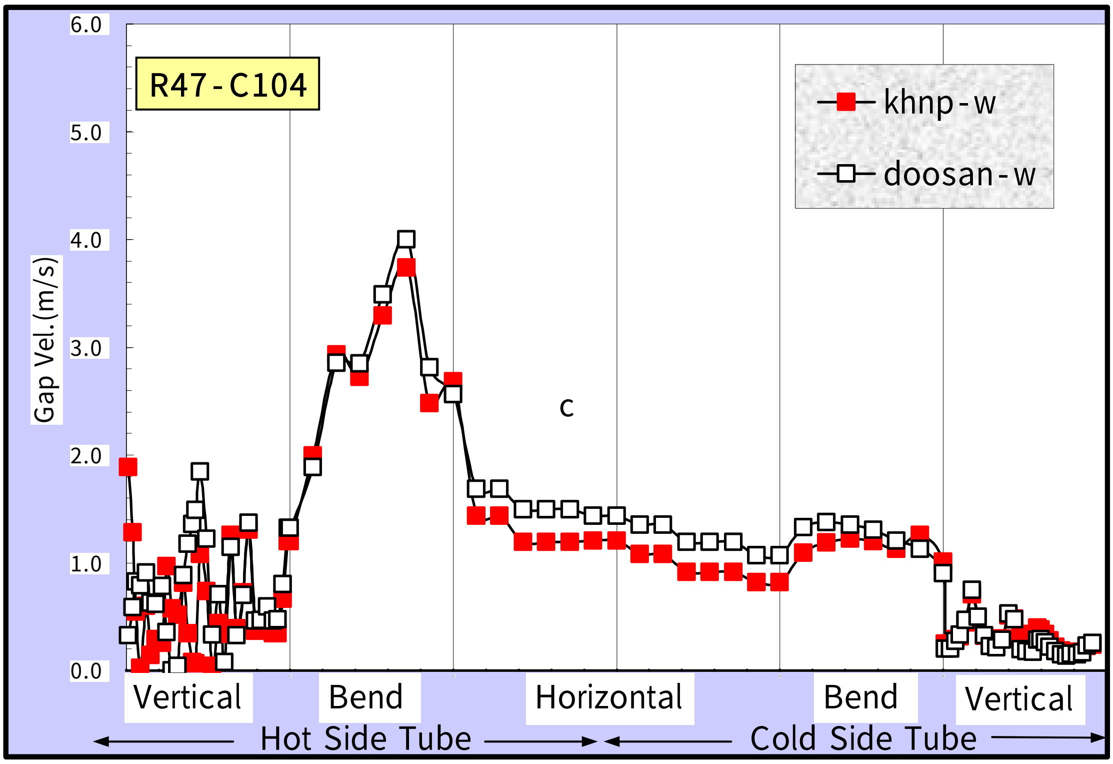

그림 2.6 Egg-crate 유동 분배판이 있는 경우 위치 별 틈새속도 비교

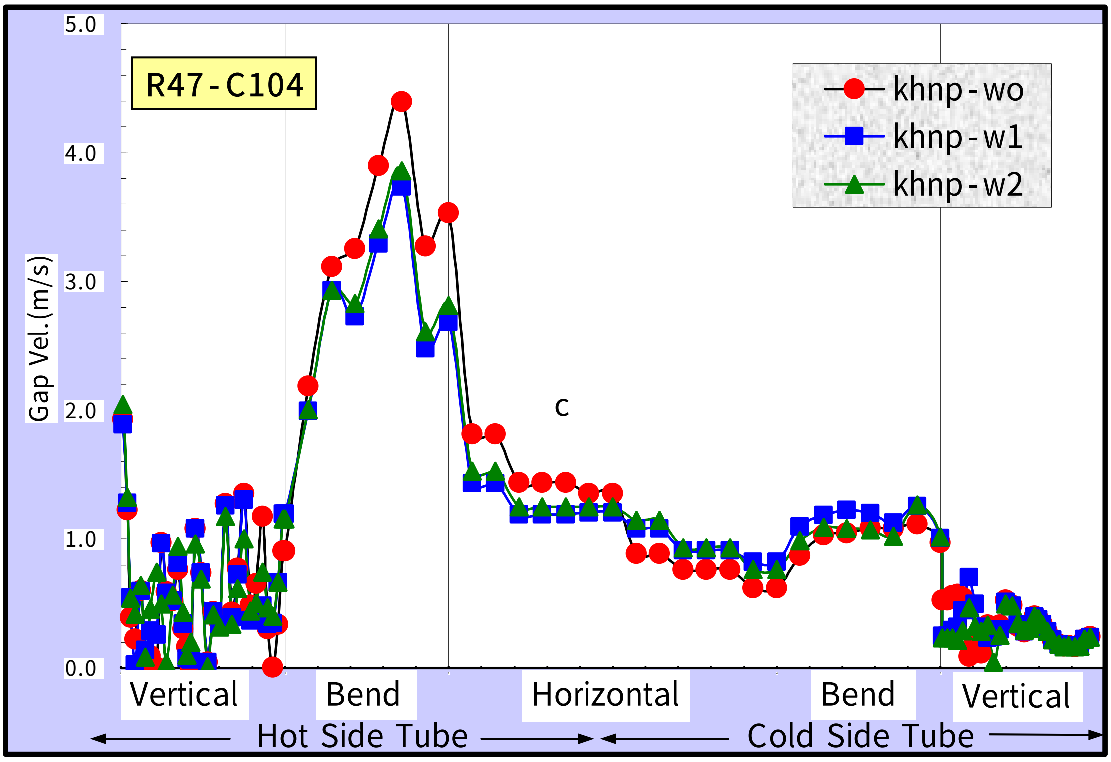

그림 2.7 Egg-crate 유동분배판의 영향

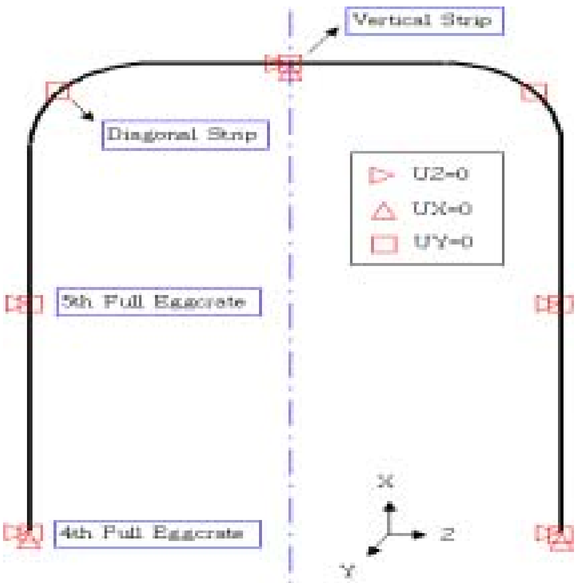

그림 2.8 Boundary condition description

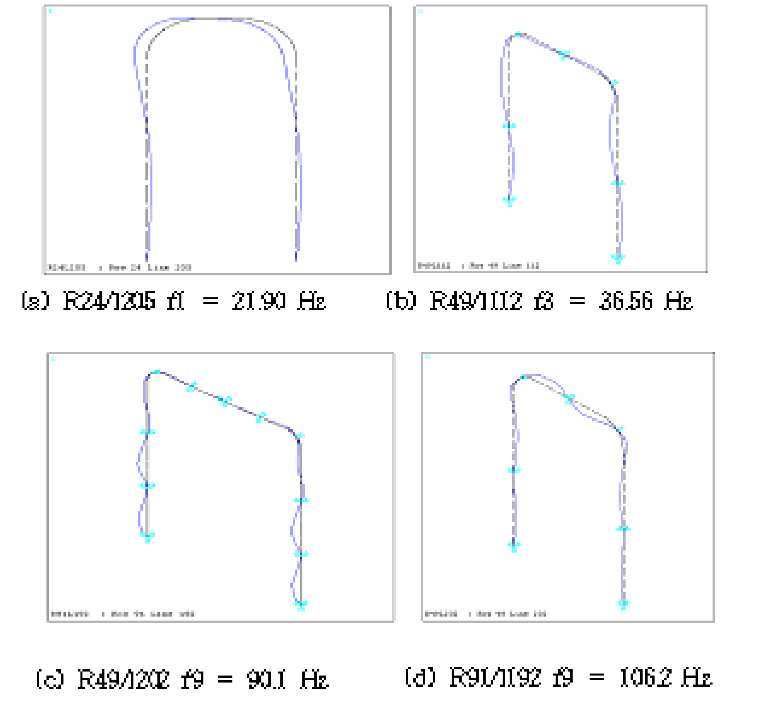

그림 2.9 Mode shape for selected tubes

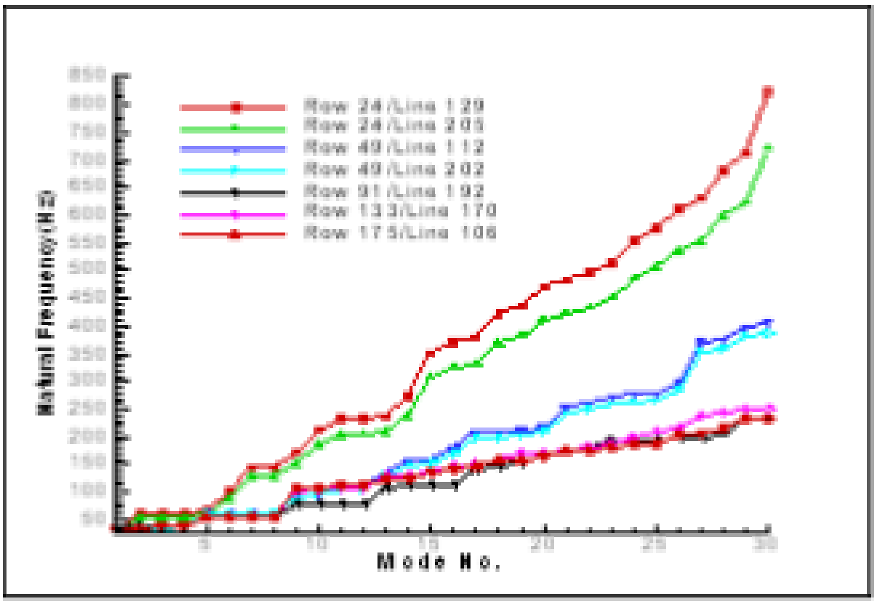

그림 2.10 Modal analysis results for selected tubes

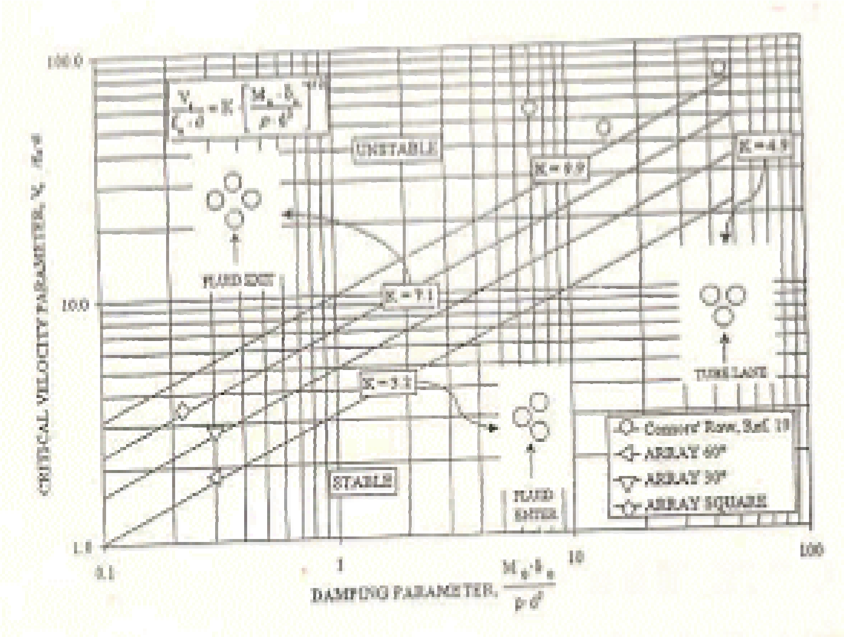

그림 2.11 The fluid-elastic instability constants K for various tube array

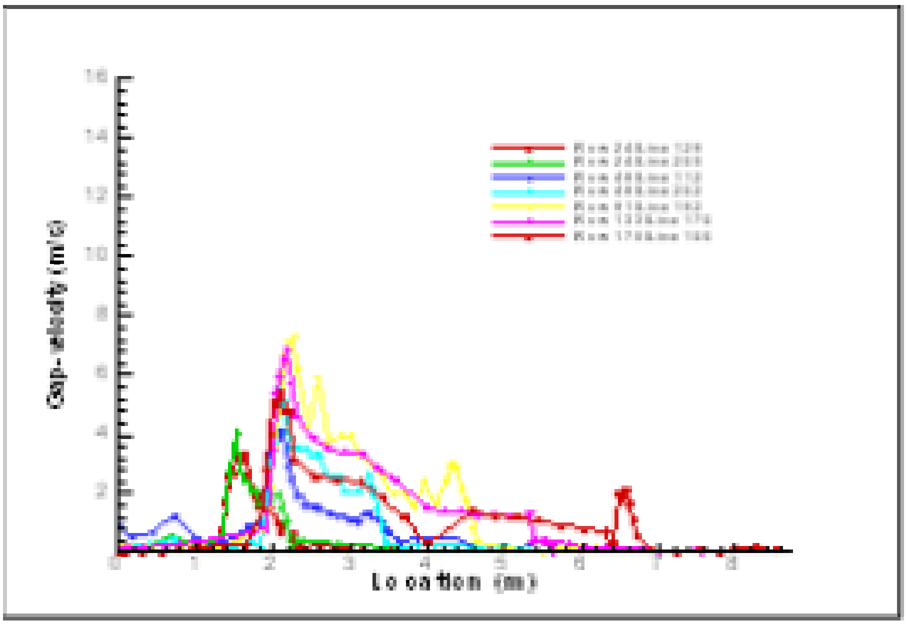

그림 2.12 Gap velocity distribution along the tubes

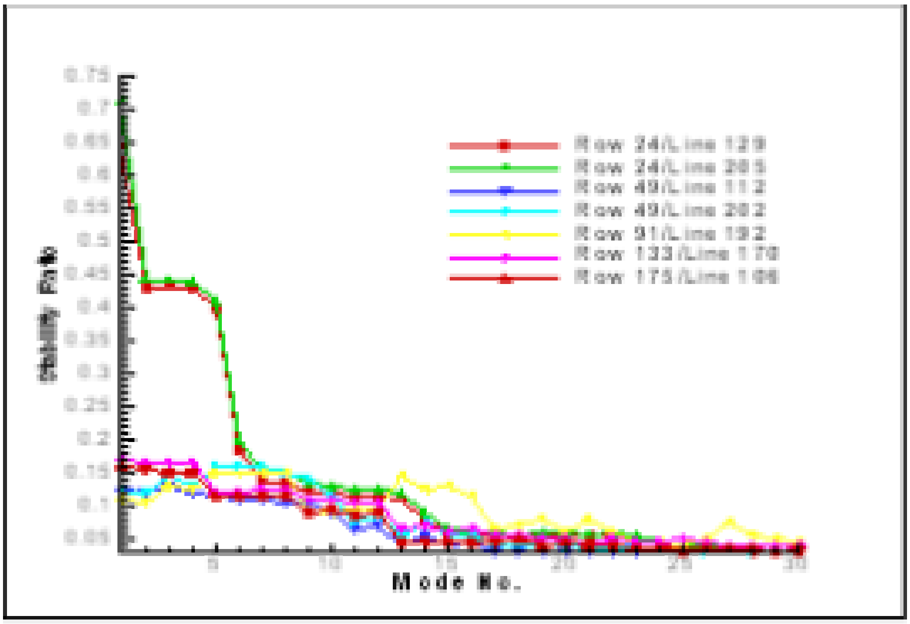

그림 2.13 Stability ratio for selected tubes

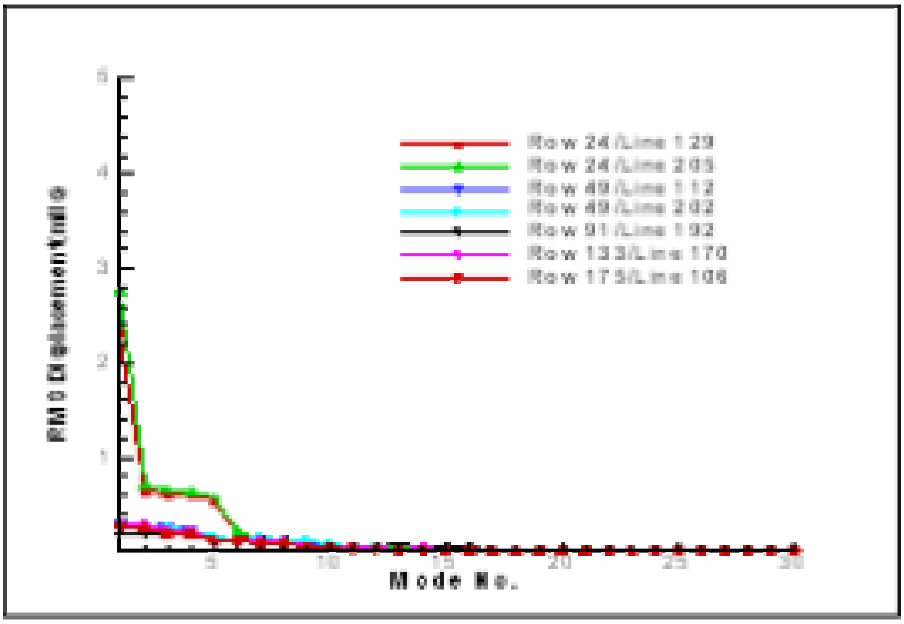

그림 2.14 RMS displacement for selected tubes