

<論 文>

제트유동에 의한 튜우브 집합체의 진동 연구

이 해* · 장 영 배*

(1985년 4월 24일 접수)

Jet-Flow-Induced Vibration of Tube Arrays

Hae Lee and Young Bae Chang

Key Words: Jet Flow(제트유동), Tube(튜우브), Vibration(진동), Instability(불안정현상)

Abstract

This paper presents a study on jet-flow-induced vibration, which has been one of the main causes of fuel damage in many pressurized water reactors. A systematic investigation was carried out experimentally to identify the mechanism of jet-flow-induced vibration and to provide a design guide. Fluidelastic instability occurs when the jet velocity exceeds a critical value. The threshold of instability is given by $V/f_n D = K \sqrt{(D/h)(m_0 \delta_0 / \rho D^2)}$, where K is a stability constant. The effect of axial flow velocity and stand-off distance of a tube array on the stability of the array were investigated. A design guide is proposed.

기 호 설 명

- D : 튜우브의 직경, (m)
- f_n : 진동수, (cycles/sec)
- H : 제트분출틈에서 튜우브 집합체까지의 거리, (m)
- h : 제트분출틈의 폭, (m)
- J : 제트분출틈의 길이, (m)
- K : 안정경계상수, (dimensionless)
- L : 튜우브집합체의 종방향피치, (m)
- l : 보의 스패, (m)
- M : 튜우브의 가상질량, (kg)
- m_0 : 튜우브의 단위길이당 가상질량, (kg/m)
- T : 튜우브집합체의 횡방향 피치, (m)
- U : 축류유속, (m/sec)
- V : 제트유속, (m/sec)
- δ_0 : 대수감쇠율, (dimensionless)

ρ : 유체밀도, (kg/m³)

ϕ_n : 튜우브의 진동모우드모양, (dimensionless)

1. 서 론

열교환기, 보일러, 증기발생기, 원자로 등에서는 유체유동으로 인하여 튜우브 집합체에 진동이 발생하며 이로 인한 튜우브의 충격, 마멸, 피로 등은 튜우브의 파손을 일으키는 주요 원인이 되고 있다^(1,2). 이같은 진동현상은 주로 튜우브집합체에 대한 적각방향 유동에 의한 것으로서, 종류는 vortex shedding에 의한 진동, 난류유동에 의한 진동, 유탄성불안정현상(fluidelastic instability)등으로 나뉜다. 이중 유탄성불안정 현상은 적교류의 속도가 어느 한계치(임계유속)를 넘어설 때 진폭이 급격히 증가하기 시작하여 임계치 이상의 유속 영역에서 대단히 진폭이 큰 진동이 발생하는 현상을 가리키는 것으로서 단시간내에 튜우브의 파손을 초래

*정회원, 한국기계연구소

하는 원인이 되고 있다.

근래에는 십여개의 가압경수형 원자로(PWR)에서, 핵연료 집합체의 길이 방향으로 길게 위치하는 좁은 틈으로부터 Fig. 1에 보인 바와 같이 핵연료 집합체를 향하여 분사되는 제트유동 때문에 핵연료 집합체가 손상되는 사고가 수 차례 있었다⁽³⁾. 핵연료집합체의

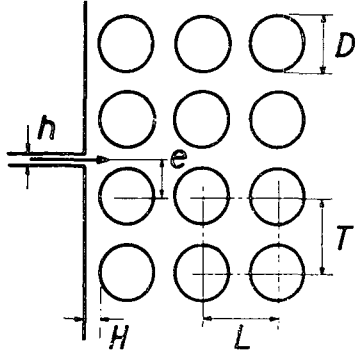


Fig. 1 Tube array in a two-dimensional submerged jet flow

손상은 제트분출구 근방에 있는 핵연료봉들에만 국한된 것이었으나, 손상정도는 핵연료봉이 절단될 정도로 심한 것이었다. 핵연료봉의 손상형태를 고려해 볼 때 핵연료봉에서는 대단히 진폭이 큰 진동이 발생했던 것임을 알 수 있으며, 이전의 연구결과^(4,5)에 의하면 제트유동에 의한 튜우브집합체의 진동현상은 직교류에 의한 유탄성불안정현상과 매우 유사한 특성을 갖는 것으로 나타났다. 즉, 다른 조건들이 일정한 상태에서 제트유속을 증가시킬 때 특정한 유속(임계유속)을 기점으로 진동이 시작되며 유속이 더욱 증가할 때 진폭은 급격히 증가하여 봉들 사이에 충돌이 발생한다. Fujita 등⁽⁶⁾은 실물크기의 핵연료 집합체 모델을 사용한 실험을 통하여 이같은 불안정성 진동현상을 관찰하고 제트분출틈과 튜우브집합체 사이의 상대 위치에 따른 안정성 변화를 연구하였다. 본 논문에서는 제트유동에 놓인 튜우브 집합체의 진동 발생구조를 깊이 파악하고 일반성 있게 사용할 수 있는 설계 지침을 마련하기 위하여 보다 광범위하게 수행된 파라미터 연구 내용을 다루었다.

2. 안정경계식

튜우브집합체에서 불안정성 진동이 발생하는 것은 한 주기의 운동중 진동체가 유체로부터 흡수하는 에너지(ΔW)가 감쇠에 의해 잃는 에너지(ΔE) 보다 클 때이다. 따라서 ΔW 와 ΔE 가 같아지는 조건이 곧 안정경계

가 된다. 튜우브집합체 전체가 일정한 상대운동모드로 진동하는 동안 한 튜우브에 작용하는 유체력이 그 튜우브 자체의 운동만으로 기술되고 튜우브가 일자유도 계로서 $y=y_0 \sin(2\pi f_n t)$ 로 진동한다면 유체력을 다음과 같은 형태로 가정할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 C(h) y_0 \sin(2\pi f_n t + \phi) \quad (1)$$

여기에서 $C(h)$ 는 제트분출틈의 크기와 관련된 유체력상수, ϕ 는 유체력과 튜우브 운동 사이의 위상차이다. 또한 Fig. 2에 나타난 바와 같이 폭이 h 인 좁고 긴 틈으로부터 균일속도 V 의 제트가 무한유체속으로 분출될 때에는 다음식과 같이 표시되는 모우멘텀플럭스가 일정하게 유지된다⁽⁷⁾.

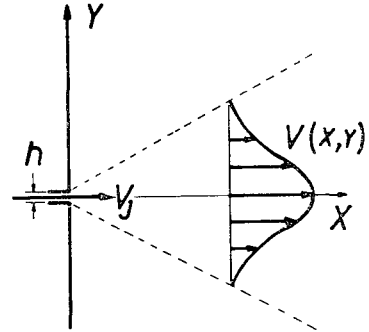


Fig. 2 Two-dimensional free jet

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho V^2(x, y) dy = \text{const.} = \rho V^2 h \quad (2)$$

따라서 제트유동에 놓인 물체에 작용하는 힘은 $\rho V^2 h$ 와 밀접한 관계를 갖게 되며 식(1)은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$F = C_0 \frac{1}{2} \rho V^2 h y_0 \sin(2\pi f_n t + \phi) \quad (3)$$

식(3)과 같은 형태의 유체력이 작용할 때 진동체가 한 주기 운동 중에 흡수하는 에너지는 다음과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} \Delta W &= \oint F dy \\ &= C_0 \frac{\pi}{2} \cdot \sin \phi \cdot \rho V^2 h y_0^2 \end{aligned} \quad (4)$$

또한 감쇠에 의해 한 주기 운동 중 진동체가 잃는 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{\text{total}} \cdot 2\delta_0 \\ &= 4 \pi^2 f_n^2 M y_0^2 \delta_0 \end{aligned} \quad (5)$$

진동체의 질량 M 을 단위길이의 질량 m_0 로 바꾸어 표시하면, 안정경계는 $\Delta W = \Delta E$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\rho V^2 h = K^2 f_n^2 L m_0 \delta_0 \quad (6)$$

여기에서 K 는 안정경계상수로서, K^2 은 모우멘텀플럭스의 임계값과 튜브의 특성을 나타내는 값의 비값을 나타낸다. 안정경계식 (6)을 모우멘텀플럭스의 형태로 나타내지 않고 유체유인진동과 관련된 주요 무차원 변수들로 바꾸어 표시하면 다음과 같이 나타낸다.

$$V/f_n D = K \sqrt{(D/h)(m_0 \delta_0 / \rho D^2)} \quad (7)$$

식 (6), (7)은 일자유도 진동체의 운동을 고려하여 유도된 것으로서 제트유동이 튜브의 스펀 전체에 균일하게 작용하는 경우에 사용할 수 있다. 그러나 실제로는 튜브의 축방향을 따라 제트의 속도, 제트분출률의 크기, 튜브의 단위 길이 질량, 유체의 밀도 등이 불균일할 수 있다. 따라서 이들의 값이 임의의 분포를 갖는 경우에 적용할 수 있는 식이 필요하다. 튜브의 n 차 진동모우드 모양을 $\psi_n(z)$ 라 하면 진동변위는

$$y(z,t) = y_0 \psi_n(z) \sin(2\pi f_n t) \quad (8)$$

의 형태로 나타낼 수 있으며 식 (4), (5)에 대응하는 에너지량은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\Delta W = K_1^2 y_0^2 \int \rho(z) V^2(z) h(z) \psi_n^2(z) dz \quad (9)$$

$$\Delta E = K_2^2 y_0^2 f_n^2 D \delta_0 \int m(z) \psi_n^2(z) dz \quad (10)$$

안정경계조건은 $\Delta W = \Delta E$ 로부터

$$\int \rho(z) V^2(z) h(z) \psi_n^2(z) dz = K^2 f_n^2 D \delta_0 \int m(z) \psi_n^2(z) dz \quad (11)$$

과 같이 구해지며, 여기에서의 K 값은 식 (6), (7)의 것과 동일한 것이다.

또한 $\rho(z)$, $h(z)$, $m(z)$ 의 기준값을 ρ , h , m_0 라 할 때 다음과 같이 유효유속을 정의함으로써 식 (11)은 식 (7)과 같은 형태로 표시될 수 있다.

$$V = \left[\frac{\int \frac{\rho(z)}{\rho} V^2(z) \frac{h(z)}{h} \psi_n^2(z) dz}{\int \frac{m(z)}{m_0} \psi_n^2(z) dz} \right]^{1/2} \quad (12)$$

또한 제트유속만이 불균일한 경우에는 유효유속이 다음과 같이 표시된다.

$$V = \left[\frac{\int V^2(z) \psi_n^2(z) dz}{\int \psi_n^2(z) dz} \right]^{1/2} \quad (13)$$

이상과 같이 하여 안정경계식의 형태가 결정될 수 있으나 이의 사용을 위해서는 안정경계상수의 값이 결정되어야 하며 안정경계식의 형태 및 유효유속 계산식에 대한 타당성 입증을 위한 연구가 요구된다. 안정경계식에 나타난 주요 파라미터들의 영향을 파악하고 안정경계상수 값을 구하기 위해 실험을 수행하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

실험에는 두 대의 water loop가 동시에 사용되었다. 하나의 튜브는 최대유량이 1.0 m³/min.로서 튜브 집합체에 축류를 보내기 위한 것이며 다른 하나는 0.15 m³/min.로서 제트류를 분출시키기 위한 것이다.

튜브 집합체는 피치비가 1.32인 사각형배열로서 배열 크기는 4×4 및 5×4로 하였다. 4×4 배열은 제트가 튜브들 사이로 분출되는 경우의 실험에 사용되었으며 5×4 배열은 제트가 한 튜브의 중심선을 향하여 정면으로 분출되는 경우의 실험에 사용되었다.

실험에 사용된 모델은 봉(solid bar)을 가공하여 만들었으며 그 중 대표적인 형태가 Fig. 3에 나타나 있다. 길이 l 로 표시된 중앙부스팬의 양끝을 대단히 유연해지도록 가공하여 그 바깥부분을 완전고정함으로써 중앙부의 스펀은 단순지지보에 가까운 특성을 갖게 된다. 이같은 형태의 모델에서는 Fig. 3에 표시된 바와 같은 위치에 스트레인게이지를 접착함으로써 진동을 측정할 수 있다. 즉, 단순지지보가 자유진동할 때 양단에 작용하는 전단력이 진폭에 비례한다는 원리를 이용한 것이다. 진폭측정을 위한 보정은, 일차모우드 자유진동 상태에서의 진폭에 대한 스트레인 계산치를 기준으로 하고 중앙점의 정적변위에 대한 스트레인의 측정치와 계산치를 비교하여 보정하는 방법으로 수행했다.

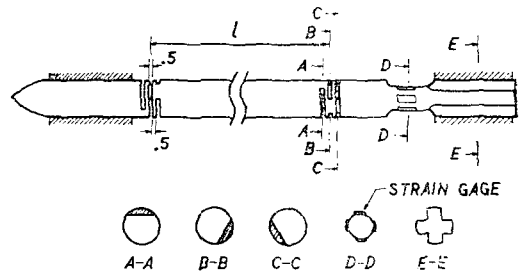


Fig. 3 Model configuration

유량은 로우터미터를 사용 측정하였으며 측정된 제트류 및 축류의 유량을 제트분출률의 단면적 또는 축류의 유로 단면적으로 나누어 각각 유속을 계산하였다.

주요 실험변수로는 (1) 제트유속, (2) 축류유속, (3) 제트분출률과 튜브 집합체 사이의 상대위치, (4) 질량비, (5) 감쇠값, (6) 제트분출률의 폭 등을 택하였다.

모델의 질량비와 감쇠값을 바꾸어 주기 위해 알루미늄, 황동, 스테인레스강의 세가지 재질이 사용되었으

며, 직경은 6.0 mm 및 8.0 mm의 두 종류로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

제트유속을 변화시키면서 튜브의 진동을 관찰할 때 진동이 발생하는 유속영역과 진동하지 않는 유속영역은 뚜렷이 구분이 된다. 제트유속이 임계치를 넘어선 후에는 유속의 변화에 따라 진폭(zero-to-peak amplitude)이 민감하게 변하여 튜브들끼리 또는 제트분출관과 튜브들이 충돌할 정도로 진폭이 증가한다. 대부분의 경우 불안정영역에서 유속이 일정할 때 시간 따른 진폭의 변화는 거의 없으며 진동파형은 안정된 정현파를 나타낸다.

불안정영역에서 4×4 배열중 12개의 튜브들이 울

직이는 궤적을 구한 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 대부분의 튜브들은 타원운동을 하며 직선운동을 하는 것들도 있는 것으로 나타났으나 진폭이 특히 크게 나타내는 방향은 따로 없었다. 단 5×4 배열의 경우에는 제트류에 직접 맞는 하나의 튜브가 가장 심하게 진동하며 언제나 양력 방향(제트류에 수직 한 방향)의 진폭이 지배적이다. 유속이 변할때 진폭의 변화와 아울러 튜브들의 운동형태가 달라지며 타원운동하는 튜브의 회전방향(Fig. 4에 표시되지 않았음)도 바뀌는 경우가 많다. 제트유동의 영향을 직접 받지 않는 튜브들도 튜브들 사이의 유체간섭효과, 지지부를 통한 구조간섭효과 및 제트유동에 의한 주위 유체의 요동 등에 의해 함께 진동한다.

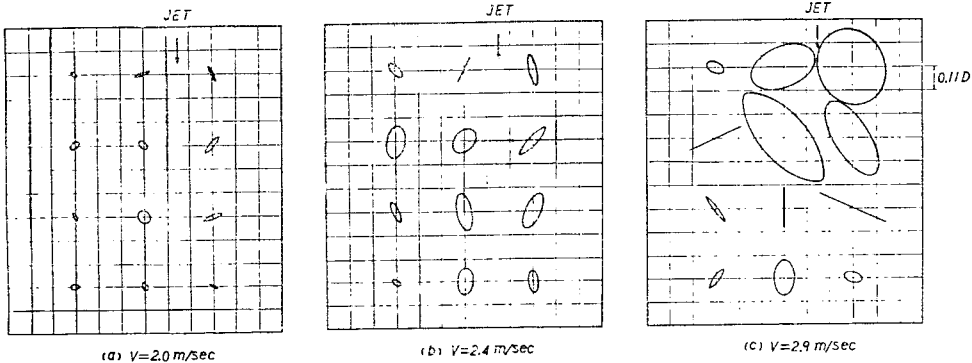


Fig. 4 Typical whirling trajectories of a tube array in a jet flow

불안정영역에서 진동파형이 안정된 후에는 튜브들의 진동수가 서로 완전히 일치하는 현상이 관찰된다. 유속이 바뀔 때에는 진폭과, 튜브들의 상대운동 모우드(Fig. 4)가 바뀌면서 진동수도 바뀐다. 대체로 제트유속이 커짐(진폭 증가)에 따라 진동수가 커지는 경향이 나타난다. 이같은 진동수의 일치 및 유속에 따른 변화의 주요 원인 중 하나는 유체에 의한 튜브들 사이의 간섭 효과인 것으로 판단된다. 정지된 유체에서 이론⁽⁸⁾ 및 실험⁽⁹⁾으로 연구된 바에 의하면 튜브 집합체에서는 튜브들 사이의 상대운동형태에 특정한 고유모우드가 있으며 각 모우드에 따라 고유한 부가질량계수값이 존재한다. 따라서 제트의 유속변화에 따라 튜브들 사이의 상대운동모우드의 변화와 아울러 진동수가 바뀔 수 있으며, 직교류[실험⁽¹⁰⁾에서도 유속에 따른 진동수 변화 현상이 관찰된 바 있다.

제트분출관의 크기(h/D)와 질량-감쇠 파라미터($m_0 \delta_0 / \rho D^2$)를 주요 변수로하여 안정경계를 구한 실험결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 이 실험은 제트분출관과 튜

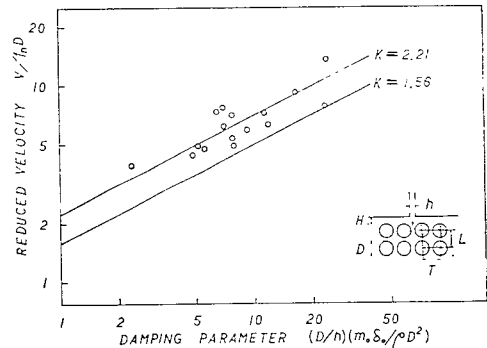


Fig. 5 Stability plot for tube arrays in a jet flow
L/D=T/D=1.32, H/D=0.80

우브집합체 사이의 거리가 H/D=0.80 되고, 속류가 없는 상태에 대한 것이다. 이 실험값들을 안정경계상관식 $V/f_n D = K \sqrt{(D/h)(m_0 \delta_0 / \rho D^2)}$ 에 대입하여 안정경계상수값을 계산한 결과 평균값은 K=2.21, 통계적으로 처리된 95% 확신 하한치는 K=1.56이 되었다. 여

기에서 진동수 f_n , 단위길이의 가상질량(자체질량+부가질량) m_0 , 대수감쇠율 δ_0 등은 임계유속 때의 값이며 m_0, δ_0 의 값은 다음과 같이 계산되었다.

$$m_0 = (f_a/f_n)^2 m_a$$

$$\delta_0 = (m_w f_w / m_0 f_n) \delta_w \quad (14)$$

단, 첨자 a, w 는 각각 공기속에서의 값, 정지유체속에서의 값을 의미한다. 주요변수값들의 범위는 $0.018 \leq h/D \leq 0.067$, $2.13 \leq m_a/\rho D^2 \leq 6.61$, $0.017 \leq \delta_w \leq 0.134$ 이었다.

실험중 제트분출구의 길이 J 는 튜브의 span(l)보다 짧았으며 $D=6.0$ mm 인 튜브집합체의 경우 $J/l = 0.70$ 이고 $D=8.0$ mm 인 튜브집합체의 경우 $J/l = 0.96$ 이었다. 따라서 식(13)을 사용하여 유효유속 V 와 실제유속 V_{act} 사이의 관계가 다음과 같이 구해졌다.

$$V = \begin{cases} 0.96 V_{act} : D=6.0 \text{ mm} \\ 1.00 V_{act} : D=8.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

본 논문에 사용된 제트유속은 모두 위의 같이 계산된 유효유속이다.

축류의 속도에 따른 안정경계상수의 변화를 조사한 결과 Fig. 6에 보인 바와 같이 축류의 속도에 따라 안정경계상수가 커졌다. Fujita 등⁽⁶⁾은 형상과 크기가 원형 핵연료집합체와 같은 튜브 집합체를 사용하고 축류조건을 모의한 모델실험을 통해 Fig. 6에 비교 표시된 바와 같은 결과를 얻었으며 Fujita 등의 안정경계상수값은 본 실험의 것보다 높은 편이다.

축류없는 상태에서, 튜브 집합체와 제트출구 사이의 거리(H/D)의 영향을 다룬 결과 Fig. 7과 같이 나타났으며 이 결과는 튜브집합체가 제트분출구에 가

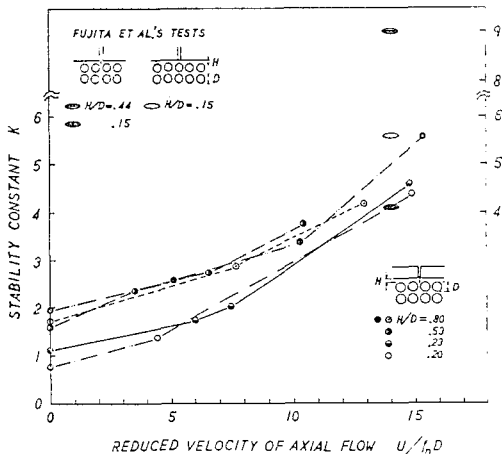


Fig. 6 Effect of axial flow on the stability constant K of a tube array in a jet flow. Pitch-to-diameter ratio is 1.32

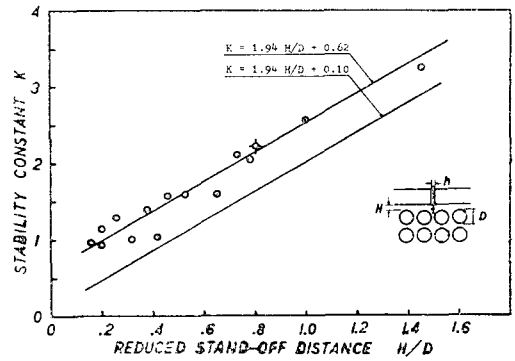


Fig. 7 Effect of stand-off distance on the stability constant K . (Tentative design criteria for a tube array in a jet flow)

까와 질수록 안전경계상수가 작아져, 진동위험성이 커짐을 의미한다. 최소자승법에 의해 구해진 안정경계상수값은

$$K = 1.94 H/D + 0.62 \quad (16)$$

로 나타났다.

원형 핵연료집합체에 대한 안정경계조건은 Fig. 6에서 구할 수 있다. 전형적인 가압경수형 원자로에서는 무차원 축류유속이 $U/f_n D \approx 14$ 이므로 $0.2 \leq H/D \leq 0.8$ 에서 $4 \leq K \leq 5$ 가 된다. 그러나 안전한 설계기준을 마련하는 데에는 축류없는 실험결과의 평균값을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 따라서 식(16)의 안정경계상수값을 사용하여, 안정경계조건은 다음과 같이 구해졌다.

$$V/f_n D = (1.94 H/D + 0.62) \sqrt{(D/h)(m_0 \delta_0 / \rho D^2)} \quad (17)$$

더욱 안전한 설계기준으로는 Fig. 7에 나타난 데이터들의 95%확신 하한치로부터 구해진 다음 식을 사용할 수 있다.

$$V/f_n D = (1.94 H/D + 0.10) \sqrt{(D/h)(m_0 \delta_0 / \rho D^2)} \quad (18)$$

5. 결 론

튜브 집합체의 길이 방향으로 길게 존재하는 좁은 틈으로부터 튜브 집합체를 향하여 제트류가 분출될 때 튜브 집합체에서는 대단히 진폭이 큰 진동이 발생할 수 있다. 진동이 발생하는 조건은 $\rho V^2 h \geq K^2 f_n^2 D m_0 \delta_0$ 또는 $V/f_n D \geq K \sqrt{(D/h)(m_0 \delta_0 / \rho D^2)}$ 이며 모우멘텀 플럭스 $\rho V^2 h$ 를 임계값 미만으로 유지함으로써 진동

을 방지할 수 있다. 제트 유동이 불균일하게 존재하는 경우에도 마찬가지로 튜우브의 진동 모우드를 고려한 유효치 계산법을 사용하여 튜우브 집합체의 불안정 현상발생 여부를 판단할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 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
- (2) M.P. Paidoussis, *Flow-Induced Vibrations in Nuclear Reactors*, Proc. of the IUTAM-IAHR Symposium on Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, Karlsruhe, Germany, pp. 1~80, 1979
- (3) Nuclear Power Experiences, Vol. PWR-2, 1. Fuel.
- (4) 장영배, 이 해, 조형석, 제트흐름을 맞는 봉집합체의 안정경계, 대한기계학회논문집, 제 6권 제 1호, pp. 34~39, 1982
- (5) Hae Lee, Stability Criteria of PWR Fuel Assemblies in a Baffle Jet Flow, Presented at the Ninth Water Reactor Safety Research Information Meeting, Gaithersburg, Maryland, Oct. 26~30, 1981
- (6) K. Fujita, et al., Flow-Induced Vibration of PWR Fuel Assembly by Leakage Cross Flow, 6th SMIRT Conference, Paris, Paper B6/8, 1981
- (7) H. Schlichting, *Boundary-layer Theory*, McGraw-Hill, 1968
- (8) S.S. Chen, Dynamics of Heat Exchanger Tube Banks, J. of Fluid Engineering, Trans. of ASME, pp. 462~469, 1977
- (9) S.S. Chen and J.A. Jendrzejczyk, Experiments on Fluidelastic Vibration of Cantilevered Tube Bundles, J. of Mechanical Design, Trans. of ASME, Vol. 100, pp. 540~548, 1978
- (10) D.S. Weaver and Koroyannakis, The Cross-Flow Response of a Tube Array in Water-A Comparison with the Same Array in Air, J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, Vol. 104, pp. 139~146, 1982