

## 2상 횡유동에서 열교환기 관군 배치에 따른 진동특성 고찰

김범식

### The effects of tube bundle geometry on vibration in two-phase cross-flow

Beom-Shig Kim

#### Abstract

Two-phase cross-flow exists in many shell-tube heat exchangers such as steam generators, condensers and reboilers. An understanding of flow-induced vibration excitation mechanism is necessary to avoid problems due to excessive tube vibration. This paper presents the results of a series of experiments done on tube bundles of different geometries subjected to two-phase cross-flow simulated by air-water mixtures. Normal( $30^\circ$ ) and rotated( $60^\circ$ ) triangular, and normal( $90^\circ$ ) and rotated( $45^\circ$ ) square tube bundle configurations of pitch-to-diameter ratio of 1.2 to 1.5 were tested over a range of mass fluxes from 0 to 1,000  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  and void fraction from 0 to 100%. The effects of tube bundle geometry on vibration excitation mechanism such as fluidelastic instability and random turbulence, and on dynamic parameters such as damping and hydrodynamic mass are discussed. A lower pitch-to-diameter results in a higher hydrodynamic mass. The effect of tube bundle configurations on damping and random turbulence excitation is minor. The effect of pitch-to-diameter on the fluidelastic instability, however, is significant.

#### 1. 서론

대부분의 셸-관형 열교환기(예 : 증기발생기, 콘덴서, 재생보일러 등)에 존재하는 2상 횡유동(two-phase cross-flow)은 관손상을 야기하는 주된 원인이며, 또한 2상유동의 가진력은 단상유동(single-phase)의 가진력보다 큰 것으로 밝혀졌다<sup>(1)</sup>. 열교환기의 성능은 관 주위를 흐르는 유속을 증가시킴으로써 높일 수 있지만, 유속의 증가는 관에 과도한 유동유발진동을 야기하여 관 손상을 초래한다. 그러므로 열교환기의 설계단계에서 철저한 진동해석이 수행되어야 하는데, 이때 2상 횡유동

에서의 정확한 진동가진기구의 파악과 충분한 자료가 요구된다.

대부분의 열교환기의  $P/D$ (pitch-to-diameter ratios)는 1.2 ~ 1.5 사이에서 제작되고 있다. 2상 횡유동을 받는 열교환기 관군에 대한 진동연구는 1980년대 이후부터 시작되었다. 본 논문에서는 공기-물 혼합물의 2상 유동을 받고 있는  $P/D$ 가 1.22, 1.32 및 1.47 인 관군에 대한 실험결과를 제시한다. 실험에서 고찰된 관군의 배열형상은 4종류로 normal( $30^\circ$ ) 및 rotated( $60^\circ$ ) 삼각형, 그리고 normal( $90^\circ$ ) 및 rotated( $45^\circ$ ) 사각형등이다. 2상 횡유동 실험으로부터 관군의 배열형상 및  $P/D$ 가 관의 동적 특성(감쇠, 부가질량)과 진동가진기구(유체탄성 불안정, 난류여기진동)에 미치는 영향을 고찰하였다.

---

정희원, 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

## 2. 실험시설 및 유동조건

### 2-1 실험장치 및 관군 모형

2상 유체를 모의하기 위해 증기-물 혼합물 대신에 공기-물 혼합물을 사용하였다. 실험은 0.3 m<sup>3</sup>/s의 물과 0.5 m<sup>3</sup>/s의 공기를 수용할 수 있는 실험시설에서 수행하였다. 실험시설은 원심펌프, 열교환기, 유량조절 밸브, 유량측정기, 실험대, 공기공급계통 및 배관 등으로 구성되어 있으며 상온, 상압에서 운전된다. 실험대는 그림 1에서 볼 수 있듯이, 관군, 공기-물 혼합기 및 관련 배관으로 구성되어 있다. 실험대 하단에는 유입되는 공기가 물속에 균질하게 섞이고 기포를 미세하게 만들 수 있도록 공기-물 혼합기를 부착하였다.

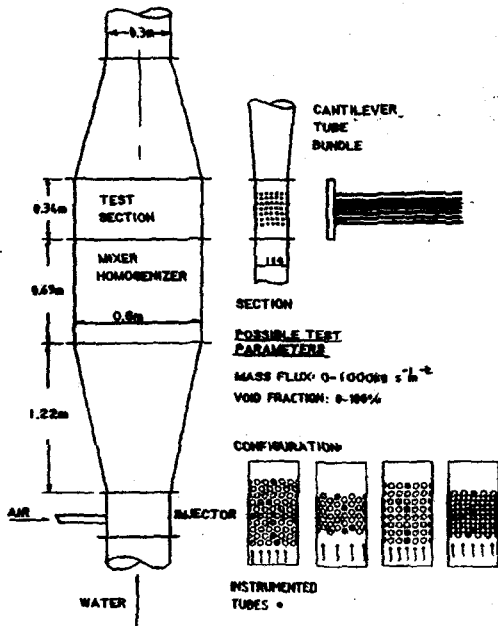


그림 1 Sketch of test section and tube bundle configurations

관군의 모형은 실제 열교환기 관의 주된 고유진동수와 동일하게 모의하고 작은 유동면적에서 관을 충분히 가진할 수 있으며, 지지조건을 명확히 판명할 수 있도록 고정-자유지지 형태의 단일 경간으로 된 외팔보로 하였다. 관군은 길이 600 mm, 직경 13 mm, 두께 1.07 mm인 스테인레스강관 25 ~ 30개로 구성되며 두께 20 mm인 탄소강 지지

판에 고정되었다. 단일 관의 1차 고유진동수는 공기중에서 약 30 Hz로서 실제 열교환기의 대표적인 고유진동수에 해당한다. 관의 거동은 2축 스트레인 게이지를 사용하여 측정하였다.

### 2-2 유동 조건

2상유동의 성질(properties)들은 실험대 내부 공간에서 시간과 위치에 따라 변하지만, 본 논문에서는 유체밀도, 질량유동율(mass flux), 보이드율 등이 균질(homogeneous)하다고 가정하였다. 균질한 보이드율,  $\epsilon_g$  은 공기와 물의 체적유량 ( $\dot{V}_g, \dot{V}_l$ ) 으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_g = \dot{V}_g / (\dot{V}_g + \dot{V}_l) \quad (1)$$

자유흐름 상태에서의 유체성질들은 관의 배열형상과  $P/D$ 에 따라서 관군 내부에서 변할 수 있다. 따라서 관의 배열형상에 관계없이 모든 관군에 사용 가능한 피치 유속(pitch velocity),  $U_p$ , 및 피치 질량유동율(pitch mass flux)로 정의할 필요가 있다. 이들은 자유흐름에서의 유체성질로부터 다음과 같이 된다.

$$U_p = U_o P / (P - D) \quad (2)$$

$$\dot{m}_p = \dot{m}_o P / (P - D) = \rho U_p \quad (3)$$

여기서,  $U_o$ 은 균질의 자유흐름 유속이다.

## 3. 진동 측정

실험은 두가지 지지조건을 갖는 관군, 즉 관군의 한쪽 끝단이 자유로운 외팔보 관군과 관군 중앙에 위치한 관군 한 개를 제외한 모든 관군을 구속하여 고정-단순 지지조건으로 바뀐 고정 관군에 대하여 수행하였다. 먼저, 외팔보 관군을 사용하여 관에 유체탄성 불안정을 야기시키는 유속을 측정하였고, 다음에 고정 관군을 이용하여 관의 감쇠값을 측정하였다. 참고문헌(2)에서 자세히 언급하였듯이, 2상 유동에서 외팔보 관군의 감쇠값은 인접한 관들간의 유체동력학적 커플링 현상 때문에 중

간 보이드율(  $\epsilon_g = 50 \sim 75\%$  )에서 최대 7.0%에 달하는 현실성이 없는 큰 값을 나타냈다. 그러므로 현실적으로 타당한 관의 감쇠값을 얻기 위하여 고정관군을 사용하였다.

실험은 각 보이드율에서 질량유동율을 변화시키면서 수행하였다. 질량유동율은 일정 보이드율에서 인접한 관 사이에 충돌이 발생할 때까지 증가시켰다. 진동응답치는 RMS 미터를 사용하여 유동방향(drag direction)과 유동의 수직방향(lift direction)에서 측정하였다. 그림 2는 임의의 보이드율에서 질량유동율의 증가에 따른 관의 응답스펙트럼인데, 관의 진폭은 저유량에서 점진적으로 증가하다가 임의의 유량에 도달하면 갑자기 커지는 현상을 보였다. 유동방향의 스펙트럼에서 약 4 Hz 이하의 저주파수에 해당하는 모드가 상당히 크게 나왔다.

외팔보 관군과 고정 관군의 진동응답치를 비교하였다<sup>(6)</sup>. 대체로 저유량에서 관의 진폭은 지지조건에 관계없이 거의 일정하였는데, 이것은 관에 작용하는 랜덤 가진력이 인접한 관의 거동으로부터 거의 영향을 받지 않음을 의미한다. 반면에, 유체탄성 불안정 현상은 고정관군의 관이 외팔보 관군의 관보다 훨씬 높은 유량에서 발생하였다. 이것은

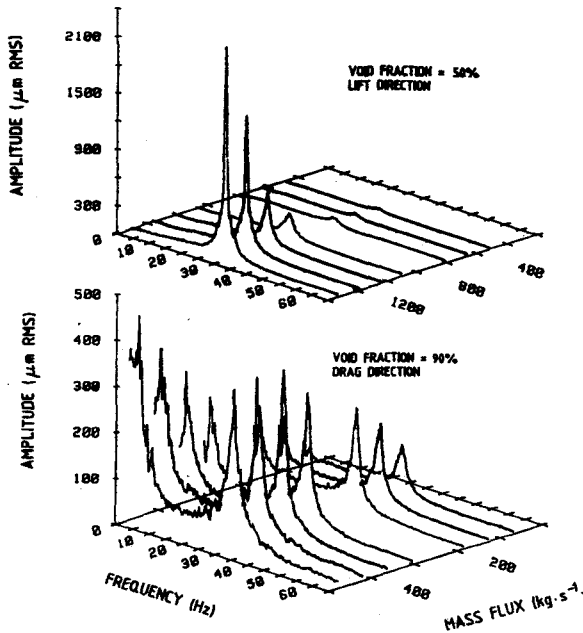


그림 2 Typical vibration response spectra for normal-square tube bundle,  $P/D = 1.47$

유체탄성 불안정 현상하에서 인접한 관 사이의 수력학적 커플링 현상이 현저함을 의미한다.

#### 4. 부가질량

부가질량이란 유체속에서 진동하는 관의 등가외부질량을 말한다. 2상 유동에서 부가질량은 잘 밝혀지지 않았다. Carlucci 와 Brown<sup>(3)</sup>은 2상 유동속에 있는 실린더집합체의 부가질량,  $m_h$ , 을 계산할 수 있는 수식을 제시하였다.

$$m_h = m_t \left[ \left( f_g / f \right)^2 - 1 \right] \quad (4)$$

여기서,  $m_t$  는 관의 자체 질량이고,  $f_g$  는 공기중 고유진동수이다. 관의 진동수는 유체탄성 불안정 현상이 발생하는 유량의 1/2 유량에서 측정하였다. 유체탄성 불안정 현상이 발생하면 관의 진동수는 상당히 변한다. 그림 3은 보이드율 변화에 따른 관군의 부가질량비,  $m_h/m_t$ , 를 나타내고 있다.

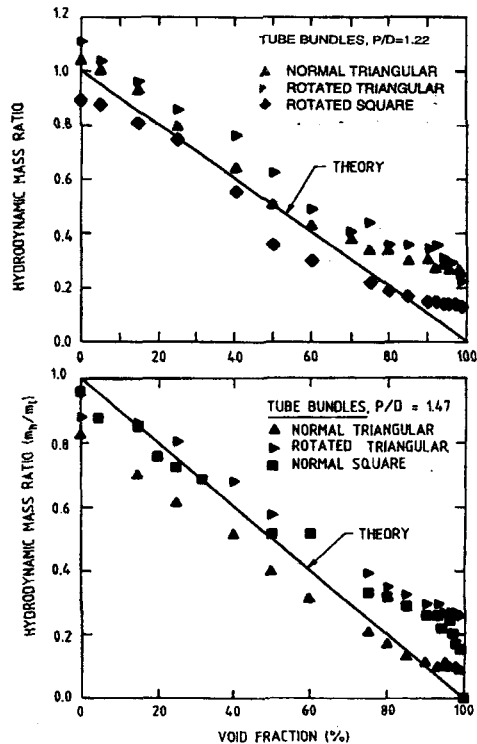


그림 3 Comparison between experiment and theory on hydrodynamic mass.

부가질량비란 2상 유체에서의 부가질량( $m_b$ ) 대 물속에서의 부가질량( $m$ )에 대한 비율이다.

실험결과는 Rogers 등<sup>(4)</sup>이 제시한 이론식과 비교되었다. Rogers 등은 중앙에 위치한 관을 에워싸고 있는 인접한 관에 의한 관의 국한성(confinement)을 모의하는 등가직경,  $De$ ,을 사용하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$m_b = \left( \frac{\rho \pi D^4}{4} \right) \left[ \frac{(D_e/D)^2 + 1}{(D_e/D)^2 - 1} \right] \quad (5)$$

여기서, 삼각형 형상의 관군의 경우,  $De/D = (0.96 + 0.50 P/D) P/D$ , 사각형 형상의 관군의 경우,  $De/D = (1.7 + 0.56 P/D) P/D$ . 80% 이하의 보이드율에서 실험결과와 계산값은 잘 일치하는 경향을 보인 반면에, 80% 이상에서는 실험결과가 크게 나왔다. 이같은 현상은 역시 보이드율이 높아질수록 유동형태가 천이유동(intermittent flow regime)으로 변하기 때문이다. 그러나 임계유속 이하의 유량에서 부가질량은 인접한 관의 운동에 큰 영향을 미치지 못하므로 균질의 유체밀도와 관의 국한성을 모의한 등가직경을 사용한 식 (5)는 부가질량을 계산하는데 사용할 수 있다.

## 5. 감쇠

2상 유체에서의 감쇠값은 유동형태에 따라 변한다. 유체탄성 불안정이 일어나는 부근의 유량에서 관의 감쇠는 확연하게 감소하는 현상을 보였다<sup>(2)</sup>. 이것은 수력학적인 힘과 관들간의 커플링 현상에 기인한다. 2상 유체에 기인하는 가진력은 광대역의 랜덤성분을 갖고 있어서 관의 고유진동수 부근에서 일정하다. 이 상태에서 관의 응답스펙트럼은 주파수 응답함수이므로 감쇠값을 계산할 수 있다.

그림 4는 일정한  $P/D$ 에서 관군의 배열형상에 따른 감쇠값을 보이고 있다. 여기서 감쇠값은 구조물 감쇠, 점성감쇠 및 2상유동 성분에 의한 감쇠가 모두 포함된 것이다. 대체로 2상 유동에서 감쇠값은 물속에서의 감쇠값보다 상당히 높아서 40 ~ 80% 보이드율에서 4.0 ~ 5.0%에 달했다. 보이드율이 낮아질수록 감쇠값은 감소하여 물속에서의 감쇠값은 1.0 ~ 2.0%에 접근했다. 반면에 80% 이상

에서는 공기중에서의 감쇠값보다 훨씬 높은 값인 2.0 ~ 3.0%를 보였다. 특히, 이같은 현상은  $P/D = 1.22$ 인 관군에서 더욱 심했다. 2상 유동성분에 기인하는 감쇠값은 관의 국한성의 영향을 고려하기 위해 국한성 계수,  $C$ ,를 사용하여 정규화(normalize) 되었다.

$$C = \frac{[1 + (D/D_e)^3]}{[1 - (D/D_e)^2]^2} \quad (6)$$

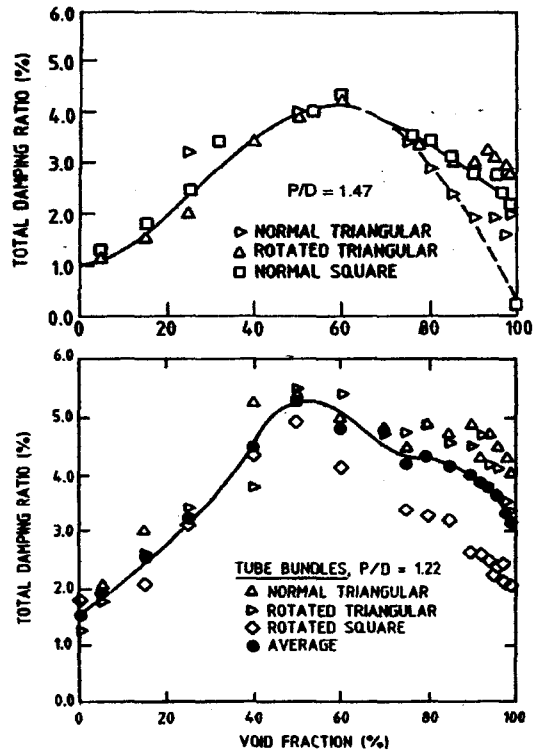


그림 4 Total damping ratio

정규화된 2상유동 성분에 기인하는 감쇠는 그림 5와 같다. 예상했던 것처럼, 관군의 국한성이 더 클수록, 즉 관군의  $P/D$ 가 작을수록, 관의 감쇠값은 대체로 더 큰 값을 보였다. 한편, 일정한  $P/D$ 에서 관군의 배열형상에 따른 감쇠값은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 열교환기 설계관점에서 볼 때, 관군의 배열형상에 따라 관의 감쇠값을 상이하게 사용하는 것은 바람직스럽지 않다. 따라서, 그림 5의 실선 처럼 모든 관군의 감쇠값을 포함하는 보

수적인 값이 열교환기 설계시 사용되어야 한다.

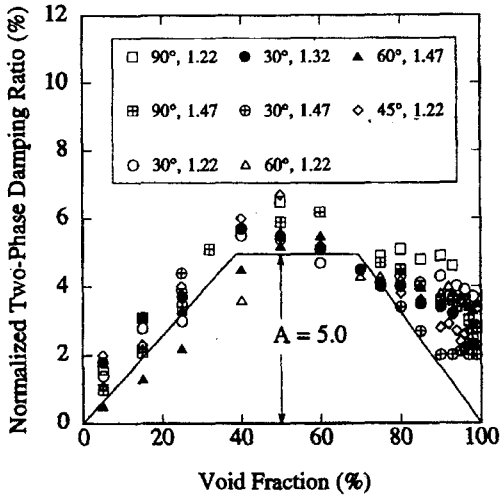


그림 5 Effect of void fraction on two-phase damping in cross-flow: two-phase damping ratio normalized for  $P/D$  using equation (6)

## 6. 유체탄성 불안정

유체탄성 불안정은 무차원 유속,  $U_p/fD$ , 과 무차원 질량-감쇠항,  $2\pi \zeta m / \rho D^2$  으로 수식화될 수 있다<sup>(5)</sup>. Connors 관계식에 의하면 관의 전장에 걸쳐 균일한 횡유동을 받고 있는 관군의 경우,

$$U_p / fD = K (2\pi \zeta m / \rho D^2)^{0.5} \quad (7)$$

여기서, 피치 유속,  $U_p$ , 은  $\dot{m}_p / \rho$ ,  $f$  는 질량유량,  $\dot{m}_p$ , 에서의 관의 고유진동수,  $m$  은 부가질량,  $m_h$ , 을 포함하는 단위길이당 관의 질량,  $\rho$  는 2상 유동의 균질한 밀도, 그리고  $\zeta$  는 관의 전체 감쇠값이다. 식 (7)을 사용하고 유체탄성 불안정을 발생시키는 임계질량유동율을 유동실험으로부터 구하므로 유체탄성 불안정 상수,  $K$ , 를 도출할 수 있다. 그림 6은  $P/D$ 가 상이한 삼각형 관군의 유체탄성 불안정 결과를 보이고 있다. 관의  $P/D$ 가 작을수록 유체탄성 불안정이 현저히 낮은 질량유동율에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 유체탄성 불안정 현상이 두 영역으로 구분됨을 알 수 있다. 보이 드율 약 80% 이하의 영역에서는 무차원 질량-감

쇠 항의 지수가 약 0.5로서 식 (7)과 동일하였다. 반면에 보이 드율 80% 이상의 영역에서 이 값은 약 0.1로 낮아짐을 알 수 있다. 이 현상은 실험유동의 유동 영역(flow regime)의 변경으로 설명된다. 실험유동을 Grant의 유동영역도에 적용한 결과에 의하면 보이 드율 80% 근방에서 유동영역은 기포유동(bubble flow)으로부터 간헐적 유동(intermittent flow)으로 변화하는 천이구역에 해당된다. 이같은 현상은 그림 2의 유동방향 스펙트럼에서 볼수 있듯이 약 4 Hz 이하의 모드 발생과 실험시 육안관찰로 확인되었다. 또한 이같은 현상은 부가질량 및 감쇠 결과에서도 나타났다.

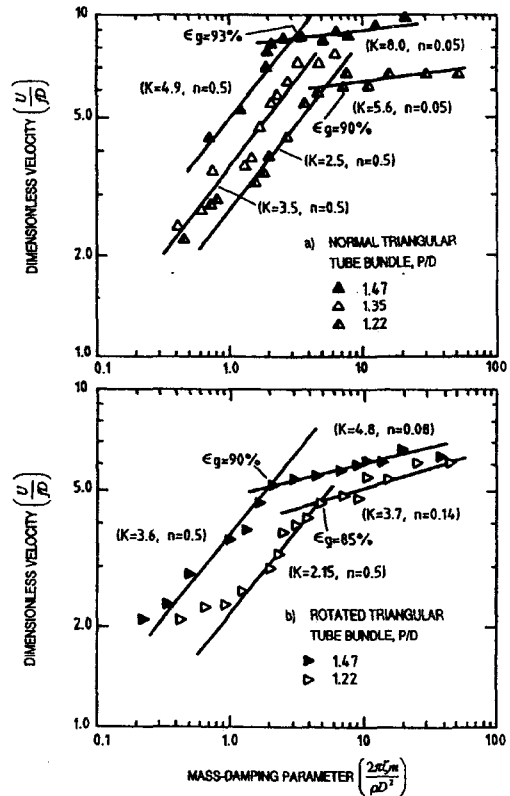


그림 6 Fluidelastic instability in two-phase cross flow: effect of  $P/D$

열교환기 설계시 간헐적 유동영역은 피해야 한다. 간헐적 유동영역에서의 실험결과를 무시하고  $P/D$ 가 유체탄성 불안정 상수,  $K$ , 에 미치는 영향은 그림 7과 같다. 그림으로 알 수 있듯이,  $P/D$ 는

무차원 유동유로(flow path),  $(P-D)/D$ , 와 관련이 있는데, 이것을 설계 지침으로 사용할 수 있도록 수식화 하면 다음과 같다.  $P/D < 1.47$ 인 경우에

$$K = 4.76 (P-D) / D + 0.76 \quad (8)$$

모든 관군은  $P/D$ 에 영향을 받는데, rotated 삼각형( $60^\circ$ )이 유체탄성 불안정에 가장 취약한 것으로 밝혀졌다.

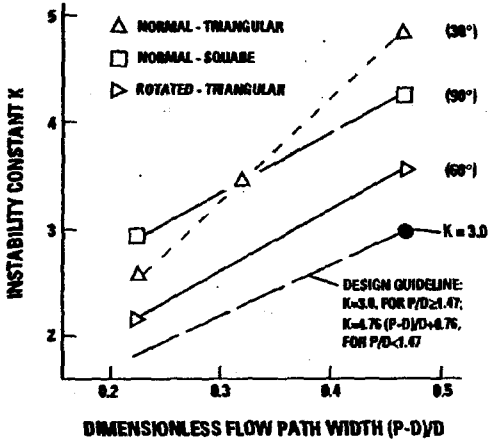


그림 7 Effect of  $P/D$  on fluidelastic instability constant in two-phase cross flow

흥미롭게도 단상유동(물)에서 모든 관군은 그림 8에서 알 수 있듯이  $P/D$ 에 관계없이 거의 동일한 불안정 상수,  $K$ , 값을 보였다.

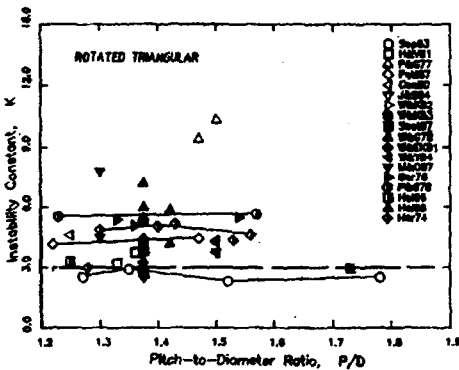


그림 8 Effect of  $P/D$  on fluidelastic instability constant for rotated triangular tube bundle in single-phase cross flow

## 7. 난류여기진동 가진

일정한 보이드율에서 질량유동율이 증가함에 따라 관의 진동응답치는 유체탄성 불안정 이전에서 점진적으로 증가한다. 이 영역의 질량유동율에서 관의 진폭은 난류여기진동에 의한 가진력에 기인하는 것으로 밝혀졌다.

관의 평균평방진폭,  $(\bar{Y}^2)$ , 과 관의 단위길이당 난류 유동에 의한 가진력의 power spectral density,  $S_F(f)$ , 간의 관계는 난진동 이론으로부터 계산할 수 있다<sup>(6)</sup>. 관 전장에 걸쳐서 등분포하고 공간적으로 상관된(correlated) 랜덤력을 받는 관의 1차 모드에 대한 관의 평균평방진폭,  $\bar{Y}^2(\ell)$ , 은 다음과 같이 수식화 된다.

$$\bar{Y}^2(\ell) = 0.613 S_F(f) / (16\pi^2 f^3 \zeta m^2) \quad (9)$$

랜덤가진력이 공간적으로 상관된다는 가정은 엄밀히 정확하지 않지만, 상이한 관군 배열형상의 진동 응답치를 비교하는데 편리하다. 따라서, 만일 모든 관군에서 랜덤가진력의 공간적 상관관계가 비슷하다고 가정될 수 있다면 이것은 타당한 접근법이다. 진동응답치와 질량유동율간의 관계는 질량유동율 지수,  $b$ ,를 사용하면  $(\bar{Y}^2)^{0.5} \propto \dot{m}^b$  이다. 지수  $b$ 는 보이드율 변화에 따라 많이 분산되었지만, 대체로 보이드율 25 ~ 90%에서  $b = 1.0$ 에 접근하는 경향을 보였다. 보이드율 25% 이하에서는 자료가 많이 분산되었는데, 주기적 와류방출(periodic wake shedding) 현상이 나타나서 분석하기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 모든 난류자료를 포함할 수 있도록  $b = 1.0$ 을 사용하였다. 이것은 가진력의 단순화된 normalized power spectral density (NPSD)를 다음과 같이 계산할 수 있게 한다.

$$NPSD = \frac{S_F(f)}{(\dot{m}_p D)^2} \quad (10)$$

보이드율 변화에 따른 NPSD 값은 그림 9와 같다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 난류여기진동에 의한 가진력은  $P/D$ 에 크게 영향을 받지 않는다. 또한 관군의 배열형상에 따른 가진력도 실질적으로 동일하게 나타났다. 실제 열교환기에서는 모든 유동

방향이 존재하기 때문에 설계시 최악의 유동방향을 고려하여야 한다. 따라서, 모든 실험자료를 포함하는 직선을 취해서 수식화하면 다음과 같다.

$$NPSD = 10^{(0.03\epsilon_r - 3)}, \text{ for } 25 < \epsilon_r < 90\% \quad (11)$$

90% 이상의 보이드율에서는 직선의 기울기가 몹시 변했는데, 이것은 앞서 설명한 것 처럼 간헐적 유동영역에 기인한다. 따라서 열교환기 설계시 간헐적 유동영역은 피하여야 한다.

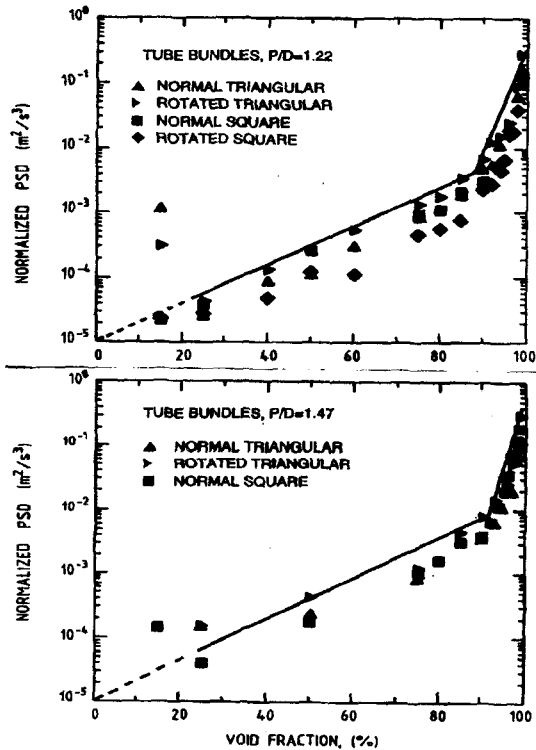


그림 9 Normalized power spectral density of random turbulence excitation

## 8. 결 언

2상 횡유동을 모의한 공기-물 혼합물에서  $P/D$ 가 1.22, 1.32 및 1.47인 삼각형 및 사각형 배열의 관군에 대한 유동실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 부가질량은 균질한 2상유동의 혼합물 밀도와 인접 관에 기인하는 국한성에 관련이 있다.  $P/D$ 가 작을수록 약간 높은 부가질량을 나타냈다.

2) 모든 관군의 감쇠 특성은 비슷했다. 보이드율의 영향은 지배적이어서 보이드율 40 ~ 80%에서 최대값을 나타냈다. 감쇠값은  $P/D$ 가 작아질수록 증가하는 경향을 보였다.

3) 유체탄성 불안정은 유동영역에 따라 매우 상이했다. 기포유동에서는 Connors의 관계식을 만족하였으나 간헐적 유동영역에서는 Connors의 관계식을 따르지 않고 매우 낮은 질량유동율에서 발생했다. 관의  $P/D$ 는 유체탄성 불안정 상수에 큰 영향을 미쳐서  $P/D = 1.47$ 인 관군이  $P/D = 1.22$ 인 경우보다 약 50% 컸다.

4) 난류여기진동에 의한 관의 진폭은 질량유동율에 대체로 비례했고, 가진력에 미치는  $P/D$ 의 영향은 미미했다. 관군의 배열형상에 대한 영향도 적은 것으로 밝혀졌다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Taylor, C. E., Pettigrew, M.J., Axisa, F. and Villard, B., Experimental Determination of Single and Two-Phase Cross Flow-Induced Forces, ASME PVP-104, pp. 31- 39, 1986
- [2] 김범식, 손갑현, 김병구, 2상 횡유동을 받는 튜브집합체의 추가질량과 감쇠. 대한기계학회논문집 제 13권 제 6호, pp. 1128 - 1146, 1989
- [3] Carlucci, L.N. & J.D. Brown, Experimental Studies of Damping and Hydrodynamic Mass of a Cylinder in Confined Two-phase Flow. ASME J. Vibration, Stress and Reliability in Design. 105: 83-89, 1983
- [4] Rogers, R.J., C.E. Taylor & M.J. Pettigrew, Fluid Effects on Multispan Heat Exchanger Tube Vibration. Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Conf., San Antonio, Texas, ASME Publication H00316: 17-26, June, 1985
- [5] Pettigrew, M.J., J.H. Tromp, C.E. Taylor & B.S. Kim, Vibration of Tube Bundles in Two-Phase Cross-Flow: Part 2, Fluidelastic Instability. ASME J. Pressure Vessel Technology. 111(4): 478-487, 1989
- [6] Taylor, C.E., J.G. Currie, M.J. Pettigrew & B.S. Kim, Vibration of Tube Bundles in Two-Phase Cross-Flow: Part 3, Turbulence-Induced Excitation. ASME J. Pressure Vessel Technology. 111(4): 488-500, 1989