

원통 내부의 전열관 배열에 따른 유체부가질량특성 수치해석

Numerical Analysis of Hydrodynamic mass for various Tube Arrays in a circular cylindrical shell

양금희† · 유기완* · 박치용**

Keum-Hee Yang, Ki-Wahn Ryu and Chi-Yong Park

Key Words : Steam generator (SG, 증기발생기), Flow-induced vibration (FIV:유동유발진동), added mass (유체부가질량)

ABSTRACT

The outermost SG tubes have more structural problems than inside tubes. Many studies have used a uniform added mass coefficient for all of the SG tubes during the FIV analysis. The purpose of this study is to find out the added mass coefficients for each tube in a cylindrical shell. When a number of tubes are increased, added mass coefficients are also increased. And added mass coefficients at outermost tubes are less than those of inside tubes. According to gap changes between outermost tube and cylindrical shell, added mass coefficients are decreased with increasing the gap. When the gap has very large value, it shows that the added mass coefficient is asymptotically converged to the value of the tube array in a free fluid field.

1. 서 론

기 호 설 명

- ϕ : 2차원 속도 포텐셜
- $\alpha_{kl}, \beta_{kl}, \sigma_{kl}, \tau_{kl}$: 2×2 부가질량계수 행렬의 요소
- ψ_{ij} : x 축을 기준으로 튜브 i 와 j 의 각도
- $m(s)$: 튜브의 유효질량 분포 [kg/m]
- $m_t(s)$: 튜브 재질의 질량 [kg/m]
- $m_{pf}(s)$: 튜브 내부 냉각수의 질량 [kg/m]
- $m_a(s)$: 부가질량 [kg/m]
- c : 부가질량상수
- $\rho(s)$: 튜브 외부 유체 밀도 [kg/m^3]
- d : 튜브 외경 [m]
- D_e : 튜브 주위의 등가직경 [m]
- N : x 축으로의 최외곽 튜브 번호

우리 나라는 2011년 2월말 기준 21기가 상업운 전 중에 있으며, 총 설비 용량은 18,716 MW로서 1978년에 비해 32배 이상으로 증가하였다. 원자력 발전은 2000년대 이후 90 % 이상의 높은 이용률을 보이고 있다⁽¹⁾.

최근 오일 값 폭등에 따르는 영향은 자원이 부족한 우리 나라로써는 큰 문제가 될 수 있다. 하지만 우리나라 공급이 비교적 안정적이며, 소량의 연료만으로도 장기간에 걸쳐 발전할 수 있을 뿐만 아니라 이산화탄소 등을 생성하지 않아 친환경적이라는 장점이 있어 최근 국제적으로 원전 건설 붐이 일고 있다.

원자력 발전의 주요 구성 요소는 원자로, 증기발생기 (SG), 터빈 및 복수기로 이루어져 있다. 이중 증기 발생기 튜브에서의 유체유발진동은 튜브의 손상을 일으킬 수 있어, 안정성을 확보할 필요가 있다.

부가질량 (added mass)의 존재는 1776년에

† 전북대학교 대학원 항공우주공학과
 * 교신저자; 정회원, 전북대학교 항공우주공학과
 E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr
 Tel : (063) 270-4286, Fax : (063) 270-2472
 ** 한전 전력연구원 원자력 연구실

DuBuat⁽²⁾의 실험에 의해서 구형 진자가 까딱거릴 때 그 작은 진동주기에 대한 유체의 효과에 주목하면서 실험적으로 발견되었다. 진자의 무게가 실제의 무게보다 무겁다는 가정을 하지 않으면 예측치와 실험 결과 사이의 일관된 차이에 대해 설명할 수 없다는 것이다.

Chen은 원통내의 로드나 핵연료 다발 등에 대한 부가질량 계산 방법에 대해 많은 연구를 수행한 바 있다⁽³⁾. 유체의 연성 효과에 의해서 원통 다발 내에서는 한 튜브의 거동이 다른 튜브들을 가진시키며, 여러 튜브 다발이 동시에 반응하게 된다. 따라서 튜브 다발은 서로 연성된 고유 진동 모드를 가지며, 그것 중에는 위상 상관성을 지니고 같은 진동수로 진동하게 된다. 2개의 튜브가 근접한 경우나 동축 튜브인 경우는 단순화된 예가 된다. 그러나 증기발생기처럼 튜브 다발이 무수히 많은 경우를 다루기 위해서는 일반화된 수식의 전개가 필요하다. 특히 무한한 유체에 잠긴 튜브 다발이 아닌 유한한 영역의 원통 내부에 잠겨있는 튜브 다발에 대한 연구가 필요하게 된다.

튜브의 진동특성을 파악하기 위해서는 유체 내에 잠긴 튜브와 동일 위상으로 움직이는 유체의 부가질량을 얻어내는 것이 필수적이다. 배열형상에 따른 부가질량계수는 Chen⁽⁴⁻⁶⁾이나 Pettigrew⁽⁷⁻⁸⁾ 등이 제안하였다. 그러나 이 값들은 유체 내에서 일정하게 배열된 튜브들에 대하여 적용이 가능하나 증기발생기 외곽 shell 근방의 튜브에 직접 적용하기 위한 자료는 제공하지 않고 있다. 보통 외곽 부근의 튜브는 부가질량계수가 내부보다 작아 난류 가진에 의한 프렛팅 마모 입장에서는 불리할 수 있으며, 진동 방향에 따른 다른 부가질량계수 값을 갖게 된다. 따라서 이러한 영향을 파악하기 위한 연구가 필요하다.

2. 수치해석 절차

2.1 유체부가질량 계수 해석

유체는 2차원 비압축성 비점성 비회전의 포텐셜 유동이라 가정한다. 튜브의 길이는 무한대로 보고, 튜브 간의 축은 서로 평행하다고 가정한다. 유체의 속도 포텐셜은 미지의 계수를 갖는 순열로 표현하고 경계 조건을 이용하여 역행렬을 통해 이 계수들을 구한다. 이 계수들을 이용하여 튜브에 작용하는 압

력과 유체역학적인 힘을 구할 수 있다.

2차원 속도 포텐셜 $\phi(r, \theta, t)$ 는 Laplace 방정식을 만족하며 수식으로 표현가능하다. 이상유체에서 임의의 단면 형상을 갖는 물체가 비정상 거동을 할 때 이 물체에 작용하는 힘은 물체 주위의 압력을 면적분하여 얻을 수 있게 된다. 2차원 $x-y$ 좌표계에서 임의의 형상을 갖는 하나의 물체가 비정상 거동을 할 때 그 물체가 유체에 의해서 받는 단위길이당 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{xx} & m_{xy} \\ m_{yx} & m_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 []의 값은 유체부가질량 행렬을 나타내며 식 (1)은 간단히 $F_i = m_{ij}\ddot{x}_j$ 와 같다. 만일 반경이 R 인 튜브다발은 생각한다면 부가질량은 튜브의 단면적에 비례하고 그 비례상수가 부가질량계수가 되어 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$m_{ij} = \rho\pi R^2 \begin{bmatrix} \alpha & \sigma \\ \tau & \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

일반적으로 여러 튜브가 모인 다발을 생각하면 l -튜브를 제외한 모든 튜브가 정지되어 있고, l -튜브에 의해서 k -튜브에 미치는 부가질량 행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{ij} = \rho\pi R^2 \begin{bmatrix} \alpha_{kl} & \sigma_{kl} \\ \tau_{kl} & \beta_{kl} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 부가질량 계수 $\alpha_{kl}, \beta_{kl}, \sigma_{kl}, \tau_{kl}$ 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 이 부가질량계수들 중에서 $\alpha_{kk}, \beta_{kk}, \sigma_{kk}, \tau_{kk}$ 를 self-added mass coefficients라 하고 k -튜브 자신의 가속에 의해서 작용되는 유동하중에 비례하는 값들이며, 이를 제외한 다른 계수들을 mutual-added mass coefficients라 하고 다른 튜브에 의해서 k -튜브에 발생하는 유동하중에 비례하는 값들을 나타낸다⁽³⁾.

보통 증기발생기 내의 튜브의 진동 모드는 in-plane 모드 혹은 out-of-plane 모드이기 때문에 실제적으로 σ_{kl} 이나 τ_{kl} 값은 사용되지 않는다. 그리

$$\begin{aligned}
\alpha_{kl} &= -\alpha_{klI} - \sum_{j=1}^{\infty} J \left(\frac{R_{0k}}{R_0} \right)^{J-1} \{ \alpha_{0,k} \cos(J-1)\psi_{0k} + \tau_{0,k} \sin(J-1)\psi_{0k} \} - \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{l=1}^k \star (-1)^J J \left(\frac{R_j}{R_{kj}} \right)^{J+1} \{ \alpha_{j,k} \cos(J+1)\psi_{kj} + \tau_{j,k} \sin(J+1)\psi_{kj} \} \\
\beta_{kl} &= -\beta_{klI} - \sum_{j=1}^{\infty} J \left(\frac{R_{0k}}{R_0} \right)^{J-1} \{ -\sigma_{0,k} \sin(J-1)\psi_{0k} + \beta_{0,k} \cos(J-1)\psi_{0k} \} - \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{l=1}^k \star (-1)^J J \left(\frac{R_j}{R_{kj}} \right)^{J+1} \{ \sigma_{j,k} \sin(J+1)\psi_{kj} - \beta_{j,k} \cos(J+1)\psi_{kj} \} \\
\sigma_{kl} &= -\sigma_{klI} - \sum_{j=1}^{\infty} J \left(\frac{R_{0k}}{R_0} \right)^{J-1} \{ \sigma_{0,k} \cos(J-1)\psi_{0k} + \beta_{0,k} \sin(J-1)\psi_{0k} \} - \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{l=1}^k \star (-1)^J J \left(\frac{R_j}{R_{kj}} \right)^{J+1} \{ \sigma_{j,k} \cos(J+1)\psi_{kj} + \beta_{j,k} \sin(J+1)\psi_{kj} \} \\
\tau_{kl} &= -\tau_{klI} - \sum_{j=1}^{\infty} J \left(\frac{R_{0k}}{R_0} \right)^{J-1} \{ -\alpha_{0,k} \sin(J-1)\psi_{0k} + \tau_{0,k} \cos(J-1)\psi_{0k} \} - \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{l=1}^k \star (-1)^J J \left(\frac{R_j}{R_{kj}} \right)^{J+1} \{ \alpha_{j,k} \sin(J+1)\psi_{kj} - \tau_{j,k} \cos(J+1)\psi_{kj} \}
\end{aligned} \quad (4)$$

고 튜브 내부에서는 $\alpha_{kl} = \beta_{kl}$ 의 영향을 보이거나 외곽 튜브는 두 값이 차이를 보인다.

2.2 부가질량 계수의 비교

튜브의 유효 질량분포는 각 위치에서 1차측 유체 밀도, 튜브 금속 밀도, 부가 질량의 합으로 구한다. 부가 질량은 2차측 유체 밀도와 튜브 다발의 형상에 의해서 결정되며, 그 식은 (5)와 같다⁽⁹⁾.

$$\begin{aligned}
m(s) &= m_t(s) + m_{pf}(s) + m_a(s), \\
\text{여기서 } m_a(s) &= c\rho(s)\pi R^2 \quad (5)
\end{aligned}$$

여기서, R , $\rho(s)$ 는 각각 튜브 반경, 튜브 외부 유체 밀도를 나타낸다. c 는 부가질량 계수를 구하기 위한 방법으로 Pettigrew 등은 간단히 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$c = \frac{(D_e/d)^2 + 1}{(D_e/d)^2 - 1} \quad (6)$$

여기서, 튜브의 배열이 Fig. 1과 같이 삼각 배열인 경우 $D_e/d = (0.96 + 0.5p/d)p/d$ 이고, 사각 배열인 경우 $D_e/d = (1.07 + 0.56p/d)p/d$ 이다. 여기서 p 는 튜브의 피치, d 는 튜브의 외경, p/d 는 튜브의 피치와 직경의 비, D_e 는 튜브 주위의 등가 직경이다.

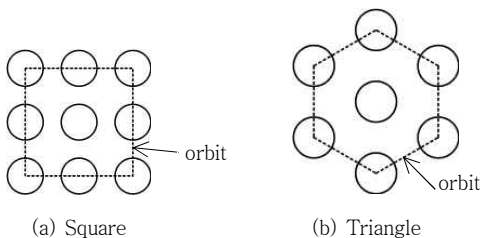


Fig. 1 Arrangement of a tube bank

Pettigrew의 부가질량 계수 c 는 증기발생기 내부 튜브의 모드해석을 위해 활용되며, 튜브의 진동방향이나 외곽에 존재 여부에 상관없이 배열형상과 p/d 비를 통해 얻어낸 일정한 값을 사용하여 왔다.

Chen은 포텐셜 유동장에 놓인 튜브 다발에 대해 수치해석을 통해 부가질량 계수를 얻어내었다. Pettigrew와 Chen의 피치비에 따른 부가질량 예측 결과 값은 서로 큰 차이가 없다.

그러나 부가질량 계수는 튜브의 진동 방향에 따라 다른 값을 가질 뿐 아니라 내부에 있는 튜브보다는 작은 값을 갖는다. 따라서 엄밀하게는 외곽 튜브의 경우에는 하나의 부가질량계수만 가지고 정확한 해석을 할 수 없게 된다.

2.3 유체부가질량 계수의 분포

(1) 튜브 개수에 따른 부가질량 계수

OPR1000 계열 증기발생기 튜브의 경우 피치비는 수직부분은 1.33 수평부분은 1.64가 된다. Fig. 2 (a)는 Fig. 1의 삼각배열을 원형의 다발 형상에 맞게 확대시켜나간 것이다. Orbit을 늘린다고 할 때, 다발의 총 튜브 개수(J)는 Table 1과 같다. Fig. 2 (a)에서와 같이 다발 내부의 가장 안쪽이 1번 튜브이며, x -축 상의 가장 외곽 orbit에 있는 튜브의 번호가 N 이라 한다. Fig. 2 (b)와 같이 인접한 튜브 중심 사이의 길이가 1피치가 된다.

Fig 3은 $p/d=1.33$ 일 때, orbit 수 증가에 따라서 x 축에 놓여있는 튜브들의 부가질량계수를 나타낸 것이다. x -방향 부가질량계수와 y -방향 부가질량계수 모두 다발 중앙에서 가장 크며 외곽으로 갈수록 감소한다.

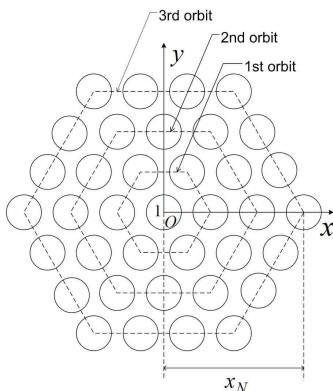
Fig. 4는 orbit 수에 따라서 부가질량계수의 변화가 어떠한지를 좀 더 세밀히 살펴본 결과이다. 다발 중앙 튜브에서의 부가질량계수가 최외곽 튜브에서의 부가질량계수보다 크다. 중앙 튜브에서는 x -방

항 부가질량계수인 α_{11} 과 y -방향 계수인 β_{11} 값이 거의 같다. 최외곽 튜브의 부가질량계수인 $\alpha_{N,N}$ 과 $\beta_{N,N}$ 가 차이를 보이고, y 축 방향의 부가질량계수인 $\beta_{N,N}$ 이 더 작다는 것을 알 수 있다.

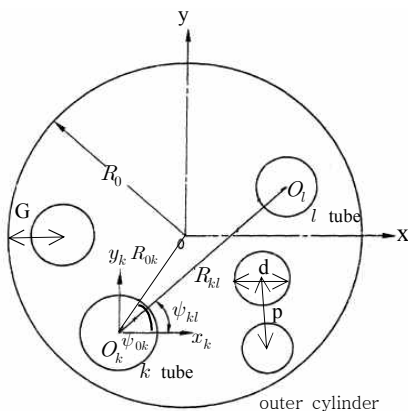
하지만 모든 부가질량 계수들이 orbit의 수가 증가함에 따라 증가하며, 특정 값으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 이것은 실제 원전은 반원을 기준으로 하더라도 8,400여개에 달하지만, 제한된 수치해석 여건에 의해 169개의 튜브 결과를 가지고도 증기발생기 튜브에 적용이 가능하다고 판단할 수 있다.

Table 1 Cylinders according to number of orbits

Orbit	0	1	2	3	4	5	6	7
Number of tubes(J)	1	7	19	37	61	91	127	169



(a) Triangular tube bundle (3-orbit around the No. 1 tube)

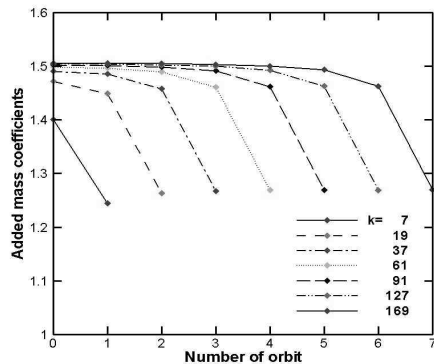


(b) View of SG tubes and outer cylinder
Fig. 2 Schematic diagram for tube bundle

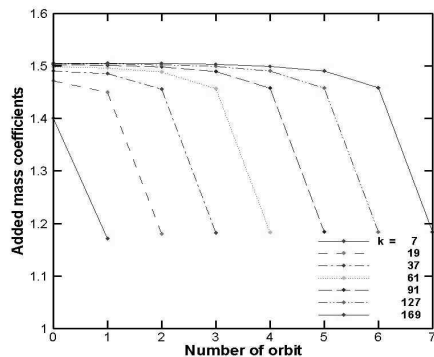
(2) 원통과 튜브 다발 사이의 거리 (G)

169개의 튜브 다발이 유체가 채워진 원통 안에 있다고 가정하고, 원통과 튜브 다발 사이의 거리를 늘려가면서 부가질량계수를 살펴본다. Fig. 2 (b)에 보면, 원통 반지름 R_0 에서 최외곽에 위치한 튜브 중심 x_N 을 뺀 값을 G 로 표시한다.

$p/d=1.33$ 일 때와 $p/d=1.64$ 일 때의 x 및 y -방향 부가질량 계수(α_{kk} , β_{kk})들을 비교한 것이 Fig. 5와 Fig. 6이다. G/p 가 커질수록 모든 부가질량계수가 점점 작아지는 것을 알 수 있다. G/p 가 증가해도 다발 중앙에서의 α_{11} , β_{11} 값의 차이가 거의 없다. 하지만 다발의 최외곽의 부가질량계수 값들은 내부 튜브와는 다르게 차이를 보이고 있어 튜브의 진동 모드에 따라 다른 값을 선택할 필요성을 보여주고 있다. $p/d=1.33$ 일 때의 부가질량 계수들의 값이 $p/d=1.64$ 일 때의 부가질량계수들의 값보다 크다.



(a) Added mass coefficients (α_{kk})



(b) Added mass coefficients (β_{kk})

Fig. 3 Added mass coefficients for various number of tubes

Fig. 5와 Fig. 6을 보면 알 수 있듯이 G/p 값이 무한히 커지게 되면 외곽 실린더의 영향을 무시하는 자유공간에 튜브가 있는 경우와 같은 결과를 보인다.

Fig. 7은 중앙 튜브와 최외곽 튜브의 부가질량계수를 비교한 것이다. 상대오차를 알아보기 위해 식 (7)을 적용하였다.

$$\epsilon_\alpha = \frac{\alpha_{11} - \alpha_{NN}}{\alpha_{11}} \times 100 (\%)$$

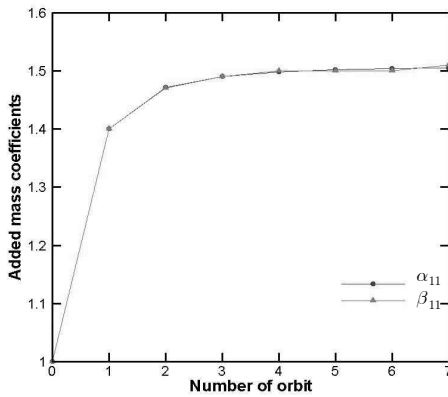
$$\epsilon_\beta = \frac{\beta_{11} - \beta_{NN}}{\beta_{11}} \times 100 (\%)$$

(7)

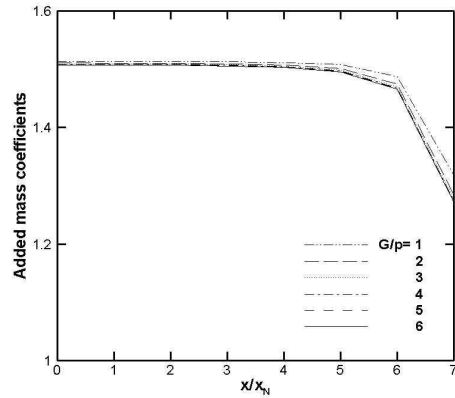
G/p 값이 증가함에 따라 상대오차가 증가한다. Table 2를 보면 G/p 를 무한히 증가시키게 되면 ϵ_α 는 15.7 %와 ϵ_β 는 21.3 %로 각각 수렴하는 것을 알 수 있다. G/p 가 커질수록 튜브 다발을 둘러싸고 있는 외곽 원통의 영향력에서 벗어난다는 것을 다시 한 번 알 수 있다.

Table 2 Relative errors according to G/p

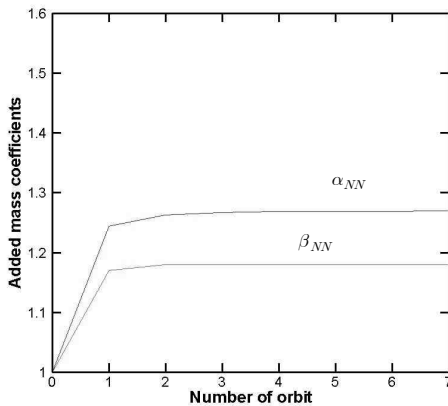
G/p	1	2	3	4	5	6	∞
$\epsilon_\alpha(\%)$	12.9	14.9	15.4	15.5	15.6	15.6	15.7
$\epsilon_\beta(\%)$	13.7	18.9	20.2	20.7	20.9	21.0	21.3



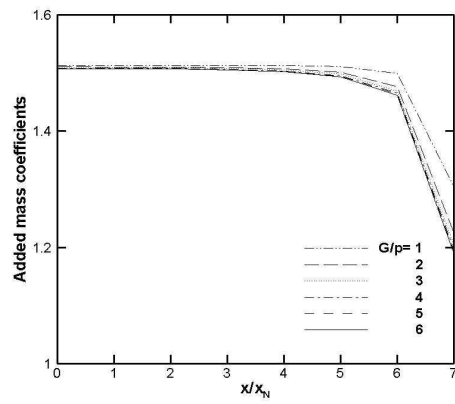
(a) Central tube



(a) α_{kk}



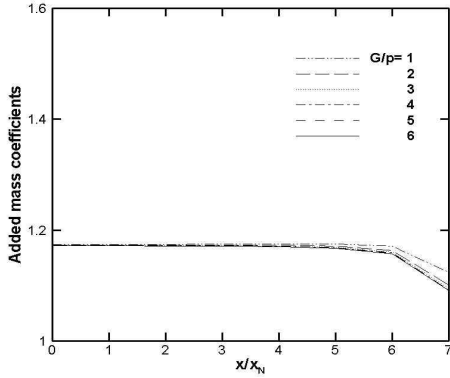
(b) Outermost tube



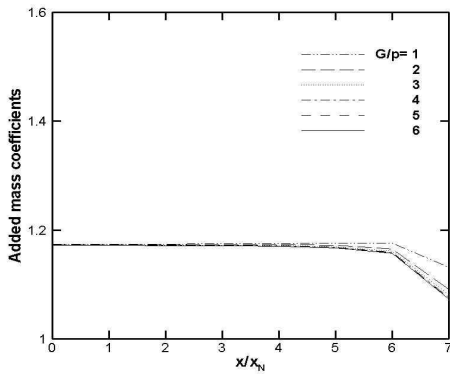
(b) β_{kk}

Fig. 4 Added mass coefficients according to orbit numbers

Fig. 5 Added mass coefficients for $p/d = 1.33$



(a) α_{kk}



(b) β_{kk}

Fig. 6 Added mass coefficients for $p/d=1.64$

3. 결 론

본 연구에서는 포텐셜 유동 가정을 통해서 삼각배열을 갖는 튜브들에 대해서 외곽 원통이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 튜브 다발의 중심으로부터 바깥 방향으로의 유체부가질량계수 분포를 수치해석하였다. 본 연구를 통해 얻어낸 결론은 다음과 같다.

다발을 이루는 튜브의 수가 증가할수록 부가질량계수는 점점 증가하다가 특정 값으로 수렴한다. 튜브의 개수가 충분히 클 때는 튜브 다발 개수는 169개의 경우 충분한 수렴치를 보여주었다.

튜브 다발을 원통이 감싸고 있을 때, 튜브 다발의 최외곽과 원통 사이의 거리 G/p 가 증가하면 전반적으로 튜브의 부가질량은 감소한다. 이 경우 다발 중

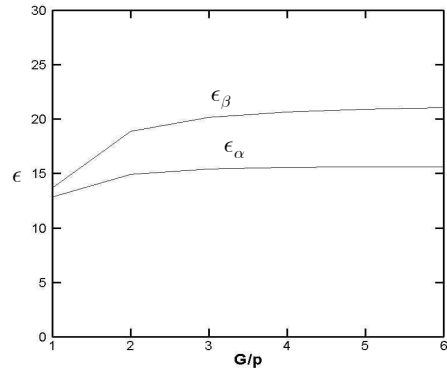


Fig. 7 Relative errors according to G/p

양 튜브와 최외곽튜브의 상대오차는 G/p 가 증가하면서 특정 값으로 수렴함을 볼 수 있었다. 또한 튜브 다발 중앙에서는 x -축과 y -축 방향의 부가질량계수가 동일한 값을 가지나 외곽으로 가면 두 값은 차이를 보여주어 진동 모드 형상에 따라 서로 다른 부가질량계수를 선택할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No, 2009T100100644).

참 고 문 헌

- (1) Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, "http://www.khnp.co.kr/"
- (2) P. L. DuBuat, Principles d'Hydraulique (3rd edition), Diot, Paris, 1816
- (3) S. S. Chen and Ho Chung, "Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass Part I : Circular Cylindrical Structure", United States, 1976
- (4) S. S. Chen, "Vibration of Nuclear Fuel Bundles," Nucl. Eng. Des., Vol. 35, pp. 399~422, 1972

(5) S. S. Chen, and G. S. Rosenberg, "Free Vibration of Fluid-Converging Cylindrical Shells," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.* Vol. 96, pp. 420~426, 1974

(6) S. S. Chen, and G. S. Rosenberg, "Dynamics of a Coupled Shell-Fluid System," *Nucl. Eng. Des.* Vol. 32, pp.302~310, 1975

(7) M. J. Pettigrew, C. E. Taylor, and B. S. Kim, "Vibration of Tube Bundles in Two-Phase Cross-Flow: Part 1 - Hydrodynamic Mass and Damping," *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technology*, Vol.

111, pp. 466~477, 1989

(8) R. G. Rogers, C. Taylor, and M. J. Pettigrew, "Fluid Effects on Multi-Span Heat Exchanger Tube Vibration," ASME PVP Conference, San Antonio, Tex., June, 1984

(9) K. W. Ryu, C. Y. Park, and H. N. Rhee, "Effects of Support Structure Changes on Flow-induced Vibration Characteristics of Steam Generator Tubes," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 42, No. 1, pp. 97~108, 2010