

이상 유동에 놓인 관군의 표면에 작용하는 압력 분포

심 우 건*†

* 한남대학교 기계공학과

Pressure Distribution over Tube Surfaces of Tube Bundle Subjected to Two-Phase Cross-Flow

Woo Gun Sim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.,

(Received August 22, 2011 ; Revised September 26, 2012 ; Accepted October 8, 2012)

Key Words : Two-Phase Cross Flow(이상 횡 유동), Two-Phase Friction Multiplier(이상유동 마찰 승수), Pressure Coefficient(압력계수), Void Fraction(기공률), Volumetric Quality(체적건도)

초록: 이상 횡 유동은 응축기, 증발기와 원자로 증기발생기와 같은 쉘과 튜브의 열 교환기에서 볼 수 있다. 이상 유동장에 놓인 구조물에 작용하는 수동력을 이해하기 위해서는 이상유동의 특성을 이해하는 것이 중요하다. 이상 유동의 유동특성과 유동변수를 소개하고 관군에서의 압력손실과 실린더에 작용하는 압력분포에 의한 수동력을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 실험부 입구에서 이상유동은 혼합되었으며 실험은 횡 방향 이상 유동장에 놓인 정규 삼각형 배열을 갖는 관군을 사용하여 수행하였다. 관군에서의 흐름방향 압력손실을 측정하여 이상유동의 마찰승수를 계산하고 이론적 결과와 비교하였다. 또한 특정 실린더에 작용하는 원주 방향 압력 분포의 측정결과와 이상유동의 기초이론에 근거하여 압력손실계수의 분포 및 항력계수에 미치는 체적건도와 단위면적당 질량유량의 효과를 평가하였다. 튜브 표면에 작용하는 측정된 압력을 수치해석방법으로 적분하여 항력계수를 계산하였다. 작은 질량 유량의 경우에 측정된 마찰 승수는 기존의 이론 결과와 잘 일치하며 압력분포에 의한 항력계수에 작용하는 기공률의 영향은 기존의 실험결과와 정성적으로 유사한 경향을 보이고 있다.

Abstract: Two-phase vapor-liquid flows exist in many shell and tube heat exchangers such as condensers, evaporators, and nuclear steam generators. To understand the fluid dynamic forces acting on a structure subjected to a two-phase flow, it is essential to obtain detailed information about the characteristics of a two-phase flow. The characteristics of a two-phase flow and the flow parameters were introduced, and then, an experiment was performed to evaluate the pressure loss in the tube bundles and the fluid-dynamic force acting on the cylinder owing to the pressure distribution. A two-phase flow was pre-mixed at the entrance of the test section, and the experiments were undertaken using a normal triangular array of cylinders subjected to a two-phase cross-flow. The pressure loss along the flow direction in the tube bundles was measured to calculate the two-phase friction multiplier, and the multiplier was compared with the analytical value. Furthermore, the circular distributions of the pressure on the cylinders were measured. Based on the distribution and the fundamental theory of two-phase flow, the effects of the void fraction and mass flux per unit area on the pressure coefficient and the drag coefficient were evaluated. The drag coefficient was calculated by integrating the measured pressure on the tube by a numerical method. It was found that for low mass fluxes, the measured two-phase friction multipliers agree well with the analytical results, and good agreement for the effect of the void fraction on the drag coefficients, as calculated by the measured pressure distributions, is shown qualitatively, as compared to the existing experimental results.

- 기호설명 -

A_w	: 실험부 덕트의 단면적	C_{Dp}	: 압력에 의한 항력계수
C_p	: 압력계수	d	: 실린더의 직경
		F_{Dp}	: 압력에 의한 항력
		f_{LO}	: 액체 유동만 고려한 마찰계수
		G_p	: 단위 면적당 흐르는 피치 질량 유량
		p	: 관군에서 실린더 사이의 피치
		Re_{Lo1}	: 동일유량의 액체유동에 의한 레이놀즈 수

† Corresponding Author, wgsim@hnu.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

S	: 액체유속에 대한 기체의 속도비(미끄럼비)
U_p	: 피치 유속
U_∞	: 덕트 내 자유 흐름 유속
x	: 질량건도
α	: 기공률
β	: 체적건도
$\phi_{LO}^2 = (dp/dl)_{TP} / (dp/dl)_{LO}$: 이상유동 마찰 승수
μ	: 점도
ρ	: 밀도
참자	
l, g & p	: 액체, 기체 및 피치
LO	: 동일유량의 액체만의 유동(Liquid only Flow)
TP	: 이상 유동

1. 서 론

이상유동은 원자력 발전소의 증기공급계통의 증기발생기와 같은 쉘과 튜브의 열교환기에서 볼 수 있다. 지난 수십 년 동안 원자력 산업의 유동유발진동과 관련하여 이상유동에 관한 연구가 수행되었다. 유동유발진동의 가진력은 구조물에 과도한 진동을 발생시키며 오랜 시간을 경과하며 마모와 피로의 원인이 되었다. 열 교환기 튜브손상의 줄이기 위하여 유동유발진동의 가진력과 관련된 설계지침이 필요하게 되었다. 증기발생기의 단상유동에 의한 수동력은 Blevins,⁽¹⁾ Fritz,⁽²⁾ Pettigrew & Taylor⁽³⁾ 와 Price⁽⁴⁾에 의하여 이상유동에 의하여 발생하는 수동력은 Carlucci,⁽⁵⁾ Carlucci & Brown⁽⁶⁾과 Pettigrew 등^(7,8,9) 등에 의하여 연구되었다. 그럼에도 불구하고 유동유발진동과 관련하여 이상유동의 물리적 특성에 관한 연구는 미비한 편이다. 이상유동은 기포, 슬러그 혹은 파동 등으로 유동 영역이 구분된다(Jones & Zuber,⁽¹⁰⁾ Legius 등⁽¹¹⁾).

균질유동 모델과 이질유동 모델이 이상유동을 해석하기 위하여 현재 널리 사용되고 있다. Schrage 등⁽¹²⁾은 급속 개폐 밸브를 사용하여 공기-물의 횡유동에 놓은 일렬배열 관군에 흐르는 이상유동의 기공률을 측정하였다. 실험에 의하면 기공률은 질량유량에 따라 변하며 균질평형모델에 의하여 과대하게 예측됨을 보였다. 균질모델은 기체와 액체의 속도차를 고려하지 않는다. 상향으로 흐르는 기포와 슬러그 유동에서 기체는 중앙으로 흐르려고 하고 기체의 속도는 흐름의 중앙에서 가장 크다. 따라서 중앙점에서의 기체의 유속은 평균유속에

비하여 크다. 매우 작은 유속의 기포유동에서는 기체와 액체 사이의 상대유속은 부력과 항력의 평형으로부터 결정된다. 이때 기공률은 질량 유량에 의하여 영향을 받지 않는다. 편류 용합유동 모델(drift-flux model)은 각상의 운동보다는 상대운동에 초점을 맞춘 이질유동(separated-flow model)에 기초하였다. Zuber & Findlay⁽¹³⁾에 의해 제안되어 편류용합유동 모델에 적용된 이론은 여러가지 유동모델(Ishii 등,⁽¹⁴⁾ Zuber 등,⁽¹⁵⁾ Wallis⁽¹⁶⁾)을 제시하는 자료로 사용되었다.

배관 내에 흐르는 기체와 액체의 혼합유동에서 압력손실에 대한 연구는 오래 전에 Lockhard & Martinelli⁽¹⁷⁾에 의하여 실험에 의하여 수행되었으며 이 방법은 각종 유동형태에 사용할 수 있다. 기공률을 예측하기 위하여 (Baroczy,⁽¹⁸⁾ Turner & Wallis⁽¹⁹⁾ 등에 의하여 여러 가지 모델이 제시되었다. 모델 사이의 유사성이 있으며 Butterworth⁽²⁰⁾는 여러 가지 실험결과를 분석하여 새로운 실험식을 제안하였다. 즉 유동의 동적 특성을 고려하여 각종 유동형태(bubbly flow, bubbly-slug flow, slug flow and annular flow)로 구분하여 적절하고 유용한 실험식을 제시하였다. 유동형태는 유체의 표면장력, 각상의 밀도와 점도 및 실험부의 기하학적 형상에 의하여 영향을 받으며 Maritnelli 변수와 무차원 기체유속에 따라 도시된 Grant 유동형태 지도에 의하여 분류할 수 있다.⁽²¹⁾

이상유동의 동적 특성을 이해하기 위하여 기공률의 변동성을 확률 밀도 함수(probability density function)를 사용하여 분석할 수 있고 각종유동의 동적 특성을 구별할 수 있다(Jones & Zuber,⁽¹⁰⁾ Cheng 등⁽²²⁾). 수평관군에 흐르는 이상유동의 동특성에 대한 정보를 수집하기 위하여 개선된 기공률 모델이 Feenstra 등⁽²³⁾에 의하여 개발되었다.

수평 관군에 작용하는 이상 횡 유동에 의한 감쇠를 예측하기 위하여 어렵적 이론 모델이 Sim⁽²⁴⁾에 의하여 개발되었다. 이 모델을 개발하기 위하여 기존의 각종 기공률 모델, 이상유동 마찰승수 모델을 검토하였으며 관군에 적용되는 이상유동 감쇠비에 대한 기존의 실험 결과를 활용하였다. 이 모델을 활용하여 충분히 넓은 범위의 질량유량, 건도, 피치비에 적용하여 기존의 실험결과와 비교하였으며 비교적 잘 일치함을 보였다. 따라서 이상유동의 감쇠비를 예측하는데 유용하게 사용할 수 있다. 그러나 이 모델에는 여러 가지 실험계수를 사용하였으며 기존의 여러 가지 기공률 모델과 이상유동마찰승수 모델을 사용하여

계산하고 실험적으로 제시된 감쇠비에 근사한 결과를 얻는 적절한 모델을 선정하여 결과를 제시하였다. 따라서 선정된 모델에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 관군에서의 이상유동 마찰승수와 기공률에 대한 보다 많은 정보가 요구되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 회전 삼각형 배열 관군에 작용하는 마찰승수 및 항력계수를 실험적으로 구한 연구가 Sim & Mureithi⁽²⁵⁾에 의하여 수행되었다. 두 개의 실험루프가 설계되어 항력과 압력손실을 측정하여 항력계수와 마찰승수를 계산하여 기존의 어렵적 해석모델의 결과와 비교하였다.

이상 유동장에 놓인 구조물에 작용하는 수동력을 이해하기 위하여 이상유동의 상세한 특성을 알고 있는 것은 상당히 중요한 일이다. 이상 유동장에 놓인 관군의 튜브에 작용하는 수동력을 이해하기 위해서는 튜브 표면에 작용하는 압력의 분포에 대한 정보를 얻는 것이 속도 분포의 정보를 얻는 것보다 더 우선적이다. 본 연구에서 이상 유동장에 놓인 정규 삼각형 배열의 관군에서 유동방향의 압력손실에 의한 마찰승수와 실린더의 표면에 작용하는 압력분포를 실험적으로 측정하여 평가하였다, 직경에 대한 피치는 $p/d = 1.41$ 이며 실린더의 직경은 32 mm. 피치질량유량 및 기공률의 영향이 검토되었다.

2. 관군에 흐르는 이상 횡 유동

2.1 균질 이상 유동 유동변수

이상유동에 놓인 유연성성 실린더에 작용하는 동적 특성을 규명하기 위하여 유동해석이 요구된다. 본 해석에서 이상유동에 대한 균질 모델이 검토되었으며 이 때에 기체의 속도와 액체의 속도는 같다고 가정된다. 균질유동의 체적 건도, β , 는 기체와 액체의 체적 유량비로 계산된다.

$$\beta = \frac{\dot{Q}_g}{\dot{Q}_l + \dot{Q}_g} \quad (1)$$

체적 건도를 사용하여 이상유동의 평균밀도와 덕트에서의 자유흐름 속도를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho_h = \rho_l(1 - \beta) + \rho_g\beta, \quad U_\infty = \frac{\dot{Q}_l + \dot{Q}_g}{\rho_h A_\infty} \quad (2)$$

여기에서 A_∞ 은 덕트의 단면적이다. 관군의 유동유발전동을 해석하기 위하여 관군의 피치 유

속, U_p , 을 다음과 같이 정의한다

$$U_p = U_\infty \frac{P}{p - d} \quad (3)$$

2.2 수평관군에 흐르는 이상 횡 유동의 기공률 수평 관군 주위에 흐르는 상향-횡 유동의 기공률을 예측하기 위하여 하나의 기공률 모델이 실험 결과에 근거하여 Feenstra 등⁽²³⁾에 의하여 제시되었다. 여기서 기공률은 유동의 단면에서 기체가 차지하는 면적비, $\alpha = A_g / (A_g + A_l)$, 를 나타내며 균질 유동에서는 체적건도와 같으나 비균질 유동에서는 기체와 액체의 속도비, $S = u_g / u_l$, 와 질량건도, x , 로서 표현할 수 있다.

$$\alpha = \left[1 + S \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

여기서 ρ_g & ρ_l 은 각각 기체와 액체의 밀도이고 S 는 미끄럼률로서 액체에 대한 기체와 속도비(미끄럼률)를 나타낸다. 비균질 이상유동에서는 속도비는 일반적으로 1 보다 크다. 균질유동의 기공률 즉 체적 건도는 속도비를 1 로 하여 구할 수 있다. Feenstra 등⁽²³⁾에 의하여 제시된 기공률을 계산하는 실험식에서는 속도비를 표면장력, 밀도비, 피치 질량유량, 피치비 기체속도 등으로 조합된 무차원 변수(Richardson 수, Ri , 와 capillary 수, Cap)의 함수로 표현하였다. 이 모델은 관군 내에 흐르는 이상 유동의 기공률을 구하기에 적절하나 초기계산에서 기체속도가 미지수이기에 적절한 값을 대입하여 미끄럼률을 구하고 기체유속을 다시 계산하여 미끄럼률이 수렴된 값을 얻을 때까지 반복계산이 요구된다.

덕트내에 흐르는 이상유동의 평균 기공률을 예측하기 위한 기존의 모델(Lockhard & Martinelli,⁽¹⁷⁾ Baroczy,⁽¹⁸⁾ Turner & Wallis⁽¹⁹⁾)을 평가하여 유사성과 상관관계가 Butterworth⁽²⁰⁾에 의하여 검토되었다. 모든 경우에 평균 기공률은 동일한 형태의 방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \left[1 + K \left(\frac{1-x}{x} \right)^a \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^b \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^c \right]^{-1} \quad (5)$$

여기에서 μ_g & μ_l 는 각각 기체와 액체의 점도를 나타낸다. 각각의 모델에 사용되는 상수 K , a , b 와 c 는 Table 1 에 정리하였다. Fig. 1 에 각각의 모델을 사용하여 구한 기공률과 미끄럼률을 질량 건

도의 향으로 도시하였다. 이상유동의 기공률은 균질 유동 모델에 의하여 크게 계산되며 따라서 미끄럼틀은 적게 예측된다. 관군에 적용할 수 있는 Feenstra 등⁽²³⁾에 의하여 제시된 기공률과 비교하면 Lockhard & Martinelli⁽¹⁷⁾ 모델의 결과가 유사하여 본 논문에서는 기공률을 Lockhard & Martinelli 모델을 사용하여 구하였다.

2.2 이상 유동 압력손실

이상유동에 놓인 관군의 튜브에 작용하는 항력은 관군의 배열 형태, 피치비 및 레이놀즈 수 등에 의하여 영향을 받는 압력을 고려하여 구할 수 있다. 이상유동의 유속과 항력의 관계는 관군 내에서의 압력 손실과 유속의 상관관계를 분석하여 규명할 수 있다. 일반적으로 항력은 튜브상이 생성되는 와류에 의하여 영향을 받기 때문에 피치비의 함수로서 나타낼 수 있으며 어긋난 배열의 관군(staggered bundle)에서 피치비가 감소할수록 증가함을 보이고 있다. 관군에서의 항력은 상류 관열에서 생성되는 난류성분에 영향을 받기 때문에 단일관에 작용하는 항력과 그 특성이 다르다.

이상유동의 압력손실은 평균 기공률과 유동형태와 관련되어 있다. 유동형태에 따라 각 위치에서의 기공률의 변화는 상당히 다르다. 따라서 유동형태에 대한 정보가 이상유동을 평가할 때에 우선되어야 한다. 일반적으로 이상유동의 압력손실은 주로 점도에 의한 마찰과 가속도와 중력에 의하여 영향을 받는다.

이상유동 마찰 압력 손실은 이상유동과 동일한 질량 유량이 흐르는 단상유동의 압력손실의 향으로 표현된다. 즉 이상유동과 동일 질량이 흐르는 단상 유동의 압력손실에 대한 이상유동의 압력 손실비를 나타내는 이상유동 마찰 승수는 $\phi_{LO}^2 = (dp/dl)_{TP} / (dp/dl)_{LO}$ 으로 정의된다. Martinelli and Nelson⁽²⁶⁾은 증발이 시작되는 입구에서부터 건도는 비례적으로 증가한다고 가정하여 마찰승수를 덕트 출구의 건도와 압력의 향으로 표현하였다.

따라서 이상유동의 압력손실은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dp}{dl}\bigg|_{TP} = \phi_{LO}^2 f_{LO} \frac{G^2}{2\rho_l d_e} + G^2 \frac{1}{\rho_l} \left[\left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \frac{dx}{dl} + [\alpha\rho_g + (1+\alpha)\rho_l] g \right] \quad (6)$$

여기에서 우측의 항은 순차적으로 마찰, 가속도와 중력 항을 각각 나타낸다. 관군에 액체만 흐르는 경우의 마찰계수는 Poiseuille의 방정식으로 표현된다.

Table 1 Values of constants suggested by the various correlations and models by Butterworth⁽²⁰⁾

	K	a	b	c
Homogeneous;	1	1	1	0
Lockhard & Martinelli(1949)	0.28	0.64	0.36	0.07
Baroczy(1963);	1	0.74	0.65	0.13
Turner & Wallis (1965);	1	0.72	0.40	0.08

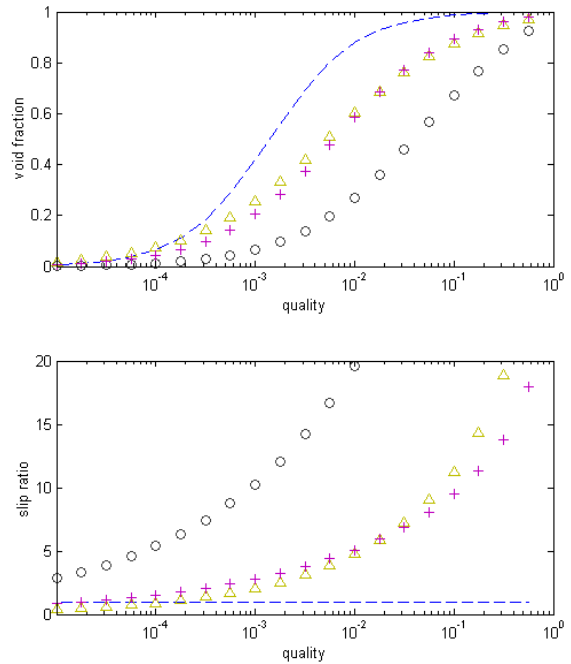


Fig. 1 Comparison of average void fraction and slip ratio suggested by the various correlations and models; --; Homogeneous, +; Lockhard & Martinelli,⁽¹⁷⁾ △; Baroczy,⁽¹⁸⁾ o; Turner & Wallis⁽¹⁹⁾

$$f_{LO} \approx \frac{64}{Re_{LO}} \quad \text{층류유동}$$

$$f_{LO} \approx \frac{0.316}{Re_{LO}^{1/4}} \quad \text{난류유동} \quad (7)$$

동일 질량의 액체만이 흐르는 유동에 대한 레이놀즈 수는 $Re_{LO} = \rho_l \mu_p d / \mu_l$ 으로 표현된다.

균질유동에서의 마찰승수는 이론적으로 유도되며 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dp}{dl}\bigg|_{TP} = \frac{dp}{dl}\bigg|_{LO} \left[1 + x \frac{1/\rho_g - 1/\rho_l}{1/\rho_l} \right] \left[1 + x \frac{\mu_l - \mu_g}{\mu_g} \right]^{-1/4} \quad (8)$$

비균질 유동에 대한 마찰승수는 여러 가지 모델에 의하여 계산할 수 있다. Levy⁽²⁷⁾는 이상유동의 모멘텀 교환 이론에 근거하여 마찰 승수를 건도와 기공률의 함수로 간단하게 표현하였다.

$$\frac{dp}{dl}\bigg|_{TP} = \frac{dp}{dl}\bigg|_{LO} \frac{(1-x)^{1.75}}{(1-\alpha)^2} \quad (9)$$

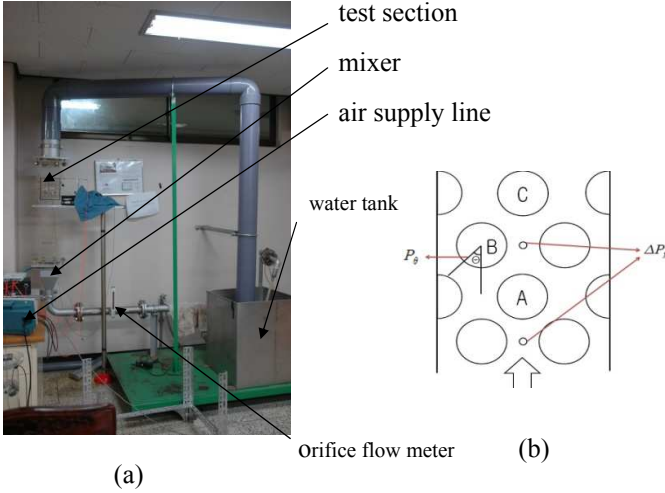


Fig. 2 (a) Experimental test loop and (b) Array of normal square tube bundles. $d=32\text{mm}$, $p/d=1.41$.

3. 실험장치와 실험절차

3.1 실험 루프

정규 삼각형 배열의 주위에 흐르는 이상유동의 압력손실과 관 마찰 승수를 규명하기 위하여 실험이 수행되었다. 실험장치는 Fig. 2 에 보인 것처럼 실험부, 수조관, 탱크액체펌프, 기체 공급관과 혼합기 등으로 구성되었다. 물과 공기의 유량은 각각 오리피스 유량계와 공기 부양구를 사용한 공기 유량계를 사용하여 측정하였다. 실험부 상류에 설치된 혼합기를 사용하여 공기와 물을 잘 섞이도록 하였다. 실험부의 단면은 정사각형으로 가로세로가 $90 \times 90 \text{ mm}$ 이며 길이는 0.8 m 이다. 직경에 대한 피치비는 1.41 이며 실린더의 32mm 이다. 실험부에는 압력분포를 측정할 수 있는 3 개의 회전 실린더와 25 개의 고정 실린더로 구성되었으며 10 렬로 배열되었다. 벽면 효과를 최소화하기 위하여 한쪽은 벽면에 반쪽 실린더를 부착하였으며 다른 쪽은 실린더의 길이를 직경에 비하여 비교적 길게 설계하였다. 회전 실린더는 원주 방향의 압력분포를 측정하기 위하여 회전시킬 수 있고 각각 한 개의 압력공이 뚫어져 있으며 압력공은 차압계에 연결되어 있다. 비교적 안정된 이상유동에서 압력을 측정하기 위하여 회전실린더는 7~9 열에 배열하였다. 관군의 상류와 하류에서의 압력차를 측정하기 위하여 2 개의 별도의 압력공을 실험부 덕트의 표면에 설치하였다. 이 압력차를 활용하여 관군에서 이상유동 마찰승수를 계산하였다.

3.2 압력계측과 압력손실계수

관군 사이의 이상유동 마찰 승수와 실린더 주위의 압력손실 계수의 분포를 계산하기 위하여 관군 사

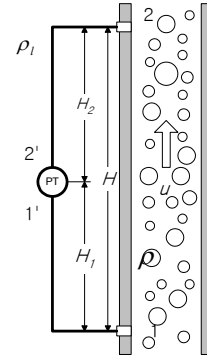


Fig. 3 Pressure measurement

이의 압력차와 실린더 원주방향의 압력차를 각각 측정하였다. 이상유동의 압력은 섭동 성분을 포함하여 압력차는 30 초간 측정된 평균값으로 계산하였다. Fig 3 에 보이 듯이 압력공과 차압계사이의 압력 전달관에는 물이 채워져 있으며 이로 인하여 실제 압력차와 차압계에 측정된 압력차는 차이가 있다. 즉 측정된 압력차, ΔP_M , 은 압력전달관 내의 액체에 의한 중력 효과가 첨부되어 있다. 따라서 실제 압력차는 아래 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$\Delta P_{JTP} = \Delta P_M + Hg(\rho_l - \rho) \quad (10)$$

여기에서 이상유동의 밀도는 균질유동의 경우에 $\rho_h = \rho(1 - \beta) + \rho_g \beta$ 을 비균질 유동의 경우에 $\rho_a = \rho(1 - \alpha) + \rho_g \alpha$ 을 사용하여 각각 계산한다. 따라서 비균질 유동의 경우에 관군 사이의 흐르는 이상유동의 평균 기공률을 측정하여 이상유동의 밀도를 계산하여야 한다. 관군 사이의 기공률을 측정하기 위한 여러 가지 방법이 현재 여러 연구자에 의하여 수행되고는 있으나 상당한 어려움이 따르고 있다. 본 실험에서는 관군 사이의 기공률을 측정하지 않고 이론적으로 이상유동의 관군의 기공률을 계산하였다. 즉 Lockhard & Martinelli⁽¹⁷⁾ 의 모델을 사용하여 기공률을 계산하였다.

관군의 열사이의 마찰압력손실은 측정된 압력손실을 압력공사이의 열 수로 나누어 계산할 수 있다. 따라서 이상유동 마찰 승수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\phi_{LO}^2 = \frac{dP_{JTP} / z}{dp / dl |_{LO} \cdot p'} \quad (11)$$

여기에서 p' 는 열 사이 피치 간격을 표시하고 dP_{JTP} 는 z 열 사이의 마찰손실을 나타낸다.

각각의 질량유량과 기공률에서 압력손실에 의한 항력을 계산하기 위하여 실린더 표면에 작용하는 압력구배를 측정해야 한다. 일반적으로 원주방향의 압력구배는 운동량에 대한 무차원 변수인 압력손실계수로 표현된다.

$$C_p = 1 - \frac{P_{\theta=0} - P_{\theta}}{\rho U_p^2} \quad (12)$$

위 식에서 $P_{\theta=0}$ 는 실린더 Fig. 2(b)에 표시된 $\theta=0$ 에서의 압력을 나타낸다. 또한 밀도는 기공률에 근거한 이상유동의 밀도이며 피치속도 U_p 는 식 (3)으로 구할 수 있다.

3.3 압력 구배에 의한 항력계수

실린더의 표면에 작용하는 압력에 의한 항력은 측정된 압력의 항력방향 성분을 원주방향으로 적분하여 구할 수 있다. 따라서 실린더 단위길이 작용하는 압력에 의한 항력은 다음과 같이 계산한다.

$$F_{Dp} = 2 \int_0^{\pi} (P_{\theta} - P_{\theta=0}) (d/2) \cos \theta d\theta \quad (13)$$

측정된 압력을 원주방향으로 적분하기 위하여 일반적인 수치해석 방법을 사용하였다. 항력은 이상유동의 운동에너지에 대한 무차원 변수인 항력계수로 표현할 수 있다.

$$C_{Dp} = \frac{F_{Dp}}{\frac{1}{2} \rho U_p^2 A} \quad (14)$$

위 식에서 A 는 유속에 대한 실린더의 투사면적을 나타낸다.

4. 실험결과 및 토론

4.1 이상유동 마찰 손수

전 절에서 소개하였듯이 항력계수를 계산하기 위하여 이상유동의 유동형태, 기공률, 압력손실에 대한 정보가 필요하다. 이 전의 연구(Sim and Mureithi⁽²⁵⁾)에서 보였듯이 항력계수는 유동형태와 기공률에 대한 다양한 모델을 고려하여 매우 복잡한 계산으로 이론적으로 예측할 수 있다. 이상유동에서의 유동유발진동을 이해하기 위하여 이러한 정보는 유용하게 활용될 수 있다. 유동형태는 액체의 표면장력, 각상의 점도, 유로의 형상, 기공률 및 중력 항에 의하여 영향을 받는다. 그러나 아직 관군에 흐르는 이상유동에 관한 유동형태에 대한 정보가 상당히 부족하다. Grant의 유동형태 지도(Pettigrew and Taylor⁽²¹⁾)에 따르면 이상유동은 분무흐름, 기포흐름 및 간헐흐름으로 대별된다. 분무와 기포흐름을 연속적 흐름으로 본다면 간헐흐름은 파열적 가스흐름 뒤에 액체유동이 따르는 주기적 흐름으로 표현할 수 있다.

Fig. 1에 보이듯이 비균질 유동 모델로 구한 기공률은 균질유동으로 구한 기공률(이 때는 체적건도라고

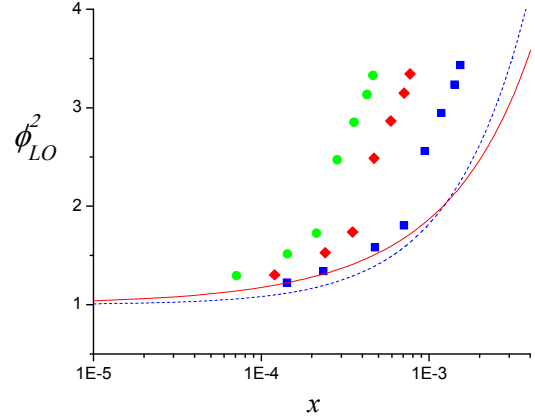


Fig. 4 Friction multipliers by homogeneous (—), non-homogeneous (---) models and measured pressure drop. (G_p [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] = 2317(●), 1424(◆) and 717(■))

도 표현함)에 비하여 작다. 이는 기체의 유속이 비균질 유동에서 액체의 유속보다 빠르기 때문이다.

본 실험은 정구 삼각형 배열($p/d=1.41, d=32\text{mm}$)에서 3개의 단위 면적당 피치 질량 유량($G_p=2371, 1421$ & 717 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$])에서 수행되었다. 측정된 마찰압력 손실로부터 구한 이상유동 마찰손수를 Fig. 4에 도시하고 이론적 결과와 비교하였다. 측정된 범위의 건도에서는 비균질 유동 모델(Levy⁽²⁷⁾ 모델)과 균질유동 모델로 각각 구한 이론적 마찰손수는 거의 유사함을 보이고 있다. 측정된 범위 이상의 건도에서는 비균질 유동모델로 구한 마찰손수는 균질모델의 결과와 비교하여 비교적 큼을 보이고 있다(Sim and Mureithi⁽²⁵⁾). 그림에 보이듯이 일정 범위의 낮은 건도에서는 실험과 이론결과가 비교적 일치하나 일정 건도 이상에서 이론결과에 비하여 급격히 증가함을 보이고 있다. 이는 유동형태가 기포흐름에서 간헐흐름으로 비교적 일찍 변하기 때문이라고 판단된다. 작은 질량유량의 경우에는 이론의 결과에 근접함을 보이고 있다.

4.2 실린더 표면의 압력분포 및 압력계수

관군의 실린더의 표면에 작용하는 압력 구배는 실린더의 위치, 피치비와 레이놀즈 수에 따라 변한다. 본 연구에서는 전술하였듯이 7~9 열에 설치한 회전 실린더(AB & C- Fig. 2(b))에서 측정된 압력을 고려하여 원주방향의 압력 구배를 검토하였다.

경계층 외부 흐름에 의하여 주로 영향을 받는 압력 구배에 대한 정보는 수동력을 계산할 때에 일반적으로 속도 구배에 대한 정보보다 더 중요하다. 박리 유동장을 포함하는 실린더 뒤의 후류에서는 실린더 표면에 수직방향으로 압력은 변하지 않는

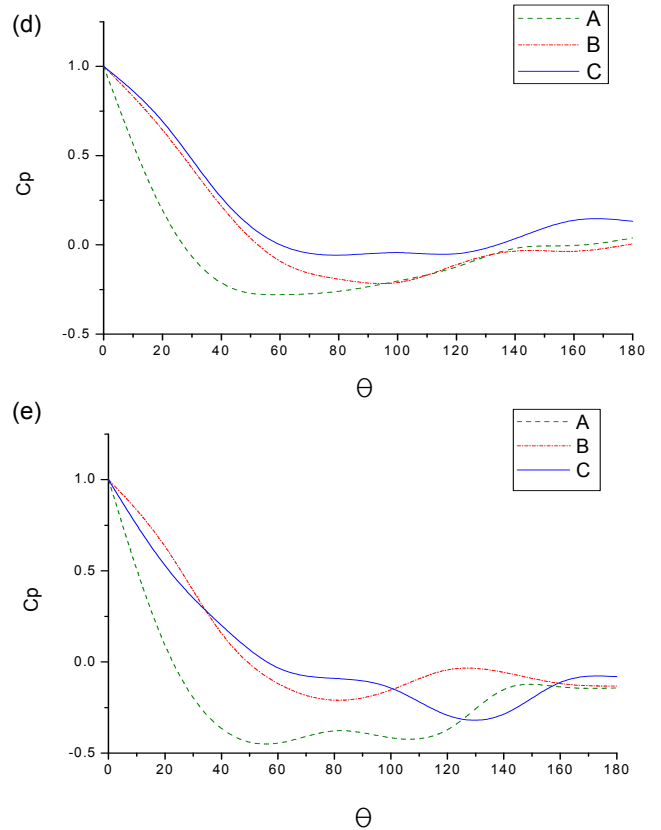
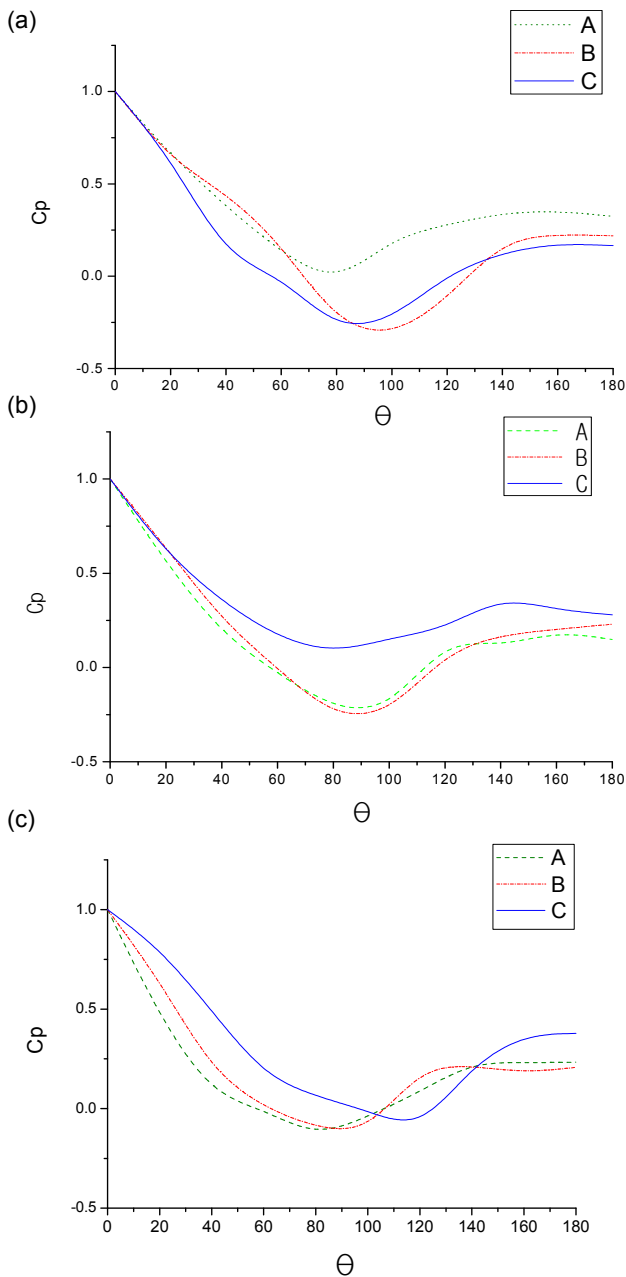


Fig. 5 Pressure coefficient distribution over tube surface in the rows(A, B and C) shown in Fig. 2 for $G_p = 2371 \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]}$; a) $\beta = 0\%$ b) $\beta = 4\%$ c) $\beta = 11\%$, d) $\beta = 19\%$, e) $\beta = 26\%$.

다. 이는 후류 영역에 근접한 경계층 외부유동에서 속도는 일정함을 나타내고 경계층이 분산되기 시작한다. 박리점의 상류에서는 베르누이의 방정식에 의하여 유속이 증가하면 압력은 감소한다.

피치질량($G_p = 2371 \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]}$)에서 체적건도를 변화시키면서 7~9 열의 의 실린더 표면에 작용하는 원주방향의 압력계수 분포를 Fig. 5에 도시하였다. 실린더 뒤쪽 후류에서 압력이 일정하기 시작하는 박리점이 9 열(C)의 실린더가 다른 경우에 비하여 비교적 뒤에 있음을 알 수 있었으나 열 사이에서 압력계수의 분명한 차이점을 표현하기가 어렵다. 단상 유동의 경우에는 일반적으로 관군

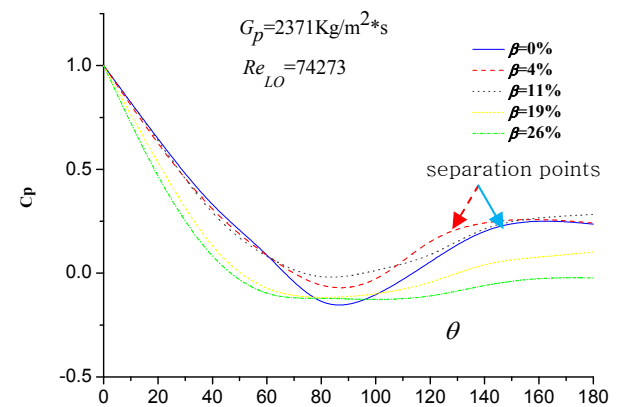


Fig. 6 Pressure coefficient distribution over tube surface, averaged in the rows (A, B and C) for $G_p = 2371 \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{s)]}$

열사이의 압력계수는 아임계 레이놀즈 수 영역에서는 크게 변하지 않는다. 아임계 흐름에서는 박리점 이전의 상류유동에서는 층류 유동이며 박리점 이후는 난류 유동의 특성이 나타난다. 3 개 열의 압력계수 의 평균을 Fig. 6에 도시하였으며 비

교적 작은 체적건도의 경우 ($\beta < 11\%$)에 체적건도에 따라 압력계수의 분포가 유사함을 보이고 있다. 이는 압력분포가 이상유동의 운동에너지에 비교적 비례하여 변함을 나타낸다. 박리점은 압력계수가 비교적 일정하기 시작하는 점으로서 그 후류에는 경계층이 분산되기 시작하고 기체와 액체가 완전히 혼합되고 재순환되어 일정유속을 유지한다고 설명할 수 있다. 비교적 작은 체적건도의 경우 $\theta \approx 130^\circ$ 부근에서 발생됨을 보이고 있으며 높은 체적건도의 경우에 재순환 영역이 확산됨을 보이고 있다.

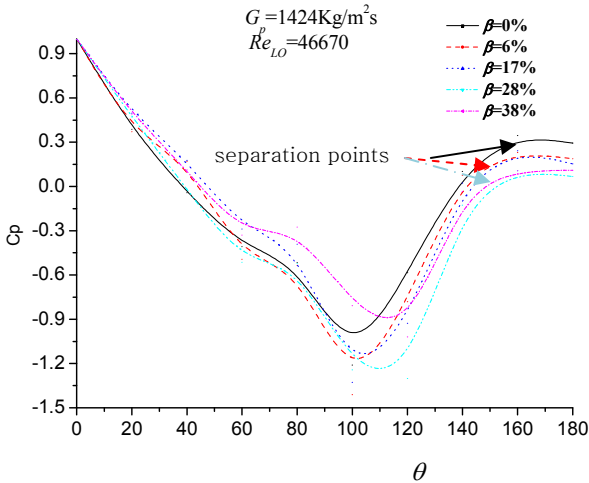


Fig. 7 Pressure coefficient distribution over tube surface, averaged in the rows (A, B and C) for $G_p = 1424 [kg/(m^2 \cdot s)]$

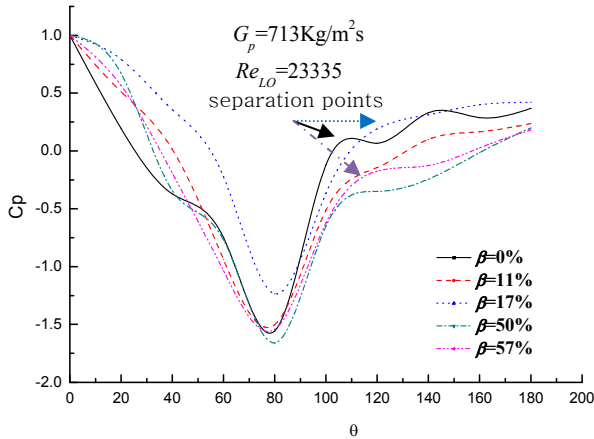


Fig. 8 Pressure coefficient distribution over tube surface, averaged in the rows (A, B and C) for $G_p = 717 [kg/(m^2 \cdot s)]$

동일 조건에서 좀 더 작은 질량유량에 대한 압력계수의 원주방향 분포를 Fig. 7 ($G_p = 1424 [kg/(m^2 \cdot s)]$)와 Fig. 8($G_p = 713 [kg/(m^2 \cdot s)]$)에 각각 도시하였다. 각각의 분포는 A, B 과 C에 작용하는 압력분포의 평균값을 나타낸다. 이미 예시한 높은 질량 유량($G_p = 2371 [kg/(m^2 \cdot s)]$)에 비하여 최고 유속점에서의 압력차가 감소하며 압력계수의 최저점이 질량유량이 감소함에 따라 더 작음을 보이고 있다. 이는 압력계수가 이상유동의 운동에너지 혹은 운동량에 따라 영향을 받음을 나타낸다. 관군의 어긋난 정규 삼각 배열에서 비교적 작은 질량유량일 때에 전 실린더를 통과한 유량이 후류 실린더의 최고 유속점 근처로 몰리는 현상이 발생할 수 있다.

4.3 항력계수

압력에 의한 항력은 식(13)을 사용하여 원주방향의 압력분포를 적분하여 구하였으며 비균질 유동을 가정하여 이상유동의 운동에너지에 대한 무차원 변수 항력계수를 Fig. 9에 도시하였다. 압력에 의한 항력계수는 체적건도에 의하여 영향을 받으며, 비교적 작은 질량유량의 경우를 고려하면 체적건도에 대하여 포물선 형태로서 기존의 항력 실험에 의한 결과(Sim and Mureithi⁽²⁵⁾)와 정성적으로 유사하다. 이전의 실험은 점성에 의한 항력을 포함하는 전체 항력에 대한 균질유동의 항력계수로서 본 계산 결과와 직접 비교할 수는 없으나 피치 질량유량이 감소하면 항력계수는 증가하는 동일한 특성을 보이고 있다.

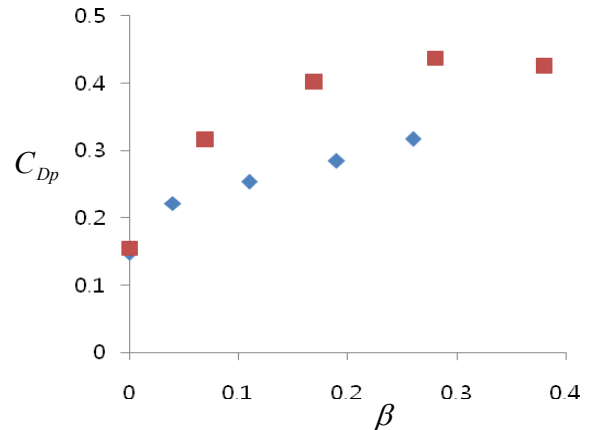


Fig. 9 Drag coefficient obtained by the pressure distributions. ($G_p [kg/(m^2 \cdot s)] = 2317(\blacklozenge)$ and $1424(\blacksquare)$)

5. 결 론

후 기

충분히 혼합된 공기와 물을 공급할 수 있는 실험장치를 제작하여 이상 유동장에 놓인 정규 삼각형 배열에서 관군 사이의 압력차와 실린더에 작용하는 압력분포를 측정하였다. 정규삼각형 배열의 피치비는 $p/d=1.41$ 이고 실린더의 직경은 $d=32mm$ 이다. 실린더의 압력분포는 두 개의 단위 면적당 피치 질량 유량 ($G_p=2371, 1421$ & $717 [kg/(m^2 \cdot s)]$) 에서 관군의 7~9 열에서 측정하였다. 관군 사이의 압력차와 이상유동의 기공률에 따르는 운동에너지를 고려하여 이상유동의 마찰압력계수를 검토하였다. 기공률은 비균질 유동에 가정하여 Lockhard & Martinelli⁽¹⁷⁾의 모델을 사용하여 구하였으며 이론적인 이상유동의 마찰계수는 Levy⁽²⁷⁾의 모델을 사용하여 계산하였다. 측정된 원주방향의 압력분포와 이상유동의 운동에너지를 사용하여 압력계수를 정의하고 원주방향의 압력계수 분포를 평가하였다. 측정된 압력분포를 원주방향으로 적분하여 압력에 의한 항력을 구하고 이로부터 항력계수를 계산하였다.

이상유동의 압력계수는 이상유동의 밀도, 평균 피치유속과 운동에너지를 항으로 표현할 수 있다. 실험으로 구한 마찰계수는 비교적 작은 질량유량에서는 이론적 결과와 비교적 잘 일치한다. 동일 유량에서 건도가 증가하며 일정 건도에서 마찰계수가 급속히 커짐을 보이고 있다. 이는 관군에서 기포유동으로부터 간헐유동으로 변하기 때문이라고 판단된다. 원주방향의 압력차는 질량유량에 따라 증가하나 압력계수 변화의 크기는 질량유량에 따라 감소하였다. 또한 동일 질량유량에서 압력계수의 분포는 비교적 낮은 체적 건도에서는 서로 유사함을 보이고 있다. 이상유동의 압력계수의 분포는 이상유동의 속도에너지 혹은 운동량에 의하여 영향을 받음을 알 수 있다. 압력에 의한 항력계수는 질량유량이 증가하면 감소하고 작은 질량유량의 경우에는 체적건도에 대하여 근사적으로 포물선 형태가 됨을 보이고 있다.

이상유동에 놓인 실린더에 작용하는 압력에 의한 항력의 특성을 규명하기 위한 시도가 이루어졌으나 제작된 실험장치에서는 높은 체적건도의 실험이 불가능하여 수행되지 못한 아쉬움이 있었다. 이상 유동장에 놓인 관군의 유동유발진동의 기구를 유동학적 측면에서 이해하기 위한 좀 더 많은 실험 결과가 필요하며 본 연구와 관련하여 다른 배열과 피치비에 대한 실험이 요구되고 있다.

이 논문은 2011년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (1) Blevins, R.D., 1990, "Flow-Induced Vibration," Second Edition, *Van Nostrand*, New York
- (2) Fritz, R.J., 1972, "The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids," *ASME Journal of Engineering for Industry*, 94, pp.167~173.
- (3) Pettigrew, M. J., Taylor, C.E., 1991, "Fluidelastic Instability of Heat Exchanger Tube Bundles; Review and Design Recommendations," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 113, pp. 242~256.
- (4) Price, S.J., 1995, "A Review of Theoretical Models for Fluidelastic Instability of Cylinder Arrays in Cross-Flow," *Journal of Fluids and Structure*, 9, pp. 463~518.
- (5) Carlucci, L.N., 1980, "Damping and Hydrodynamic Mass of a Cylinder in Simulated Two-Phase Flow," *Journal of Mechanical Design*, 102, pp597~602.
- (6) Carlucci, L.N. and Brown, J.D., 1983, "Experimental Studies of Damping and Hydrodynamic Mass of a Cylinder in Confined Two-Phase Flow," *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 105, pp.83~89.
- (7) Pettigrew, M.J., Taylor, C.E. and Kim, B.S., 1989a, "Vibration of Tube Bundles in Two Phase Cross Flow; Part 1 – Hydrodynamic Mass and Damping," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 111, pp. 466~477.
- (8) Pettigrew, M.J., Tromp, J.H., Taylor, C.E. and Kim, B.S., 1989b, "Vibration of Tube Bundles in Two Phase Cross Flow; Part 2 – Fluid-Elastic Instability," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 111, pp. 478~487.
- (9) Pettigrew, M.J. and Taylor, C.E., 2003, "Vibration Analysis of Shell-and-Tube Heat Exchangers; An Overview- Part 2: Vibration Response, Fretting-Wear, Guidelines," *Journal of Fluids and Structure*, 18, pp. 485~500.
- (10) Jones, Owen C. Jr., and Zuber, N., 1975, "The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow," *International Journal of Multiphase Flow*, 2, pp. 273~306.
- (11) Legius, H.J.W.M., van den Akker, H.E.A. and Narumo, T., 1997, "Measurements on Wave Propagation and Bubble and Slug Velocities in Cocurrent Upward Two-Phase Flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15, pp. 267~278.

- (12) Schrage, D.S., Hsu, J.T. and Jensen, M.K., 1988, "Two-Phase Pressure Drop in Vertical Cross Flow Across a Horizontal Tube Bundle," *AIChE J*, 34, pp.107~115.
- (13) Zuber, N. and Findlay, J., 1965, "Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow System," *Trans. ASME Journal of Heat Transfer*, 87, pp. 453~468 .
- (14) Ishii, M., Chawla, T.C. and Zuber, N., 1976, "Constitutive Equation for Vapor Drift Velocity in Two-Phase Annular Flow," *AIChE*, 22(2), pp.283~289,
- (15) Zuber, N., Staub, F.W., Bijwaard, G. and Kroeger, P.G., 1967, "Steady State and Transient Void Fraction in Two-Phase Flow System," GEAP 5471.
- (16) Wallis, G.B., 1969, *One-Dimensional Two-Phase Flow*, McGraw-Hill.
- (17) Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., 1949, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes," *Chemical Engineering Progress*, 45, pp. 39~48.
- (18) Baroczy, C.J., 1963, "Correlation of Liquid Fraction in Two-Phase with Application to Liquid Metals," NAA-SR-8171.
- (19) Turner, J.R.S. and Wallis, G.B., 1965, *The Separated-Cylinders Model of Two-Phase Flow*, NYO-3114-6, Thayer's School Eng., Dartmouth College.
- (20) Butterworth, D., 1975, "A Comparison of Some Void-Fraction Relationships for Co-Current Gas-Liquid Flow," *International Journal of Multiphase Flow*, 1, pp. 845~850.
- (21) Pettigrew, M. J., and Taylor, C.E., 1994, "Two-Phase Flow-Induced Vibration: an Review," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 116(3), pp. 233~253.
- (22) Cheng, H., Hills, J.H. and Azzopardi, B.J., 2002, "Effects of Initial Bubble Size on Flow Pattern Transition in a 28.9 mm Diameter Column," *International Journal of Multiphase Flow*, 28, pp. 1047~1062.
- (23) Fenstra, P.A., Weaver, D.S. and Judd, R.L., 2000, "An Improved Void Fraction Model for Two-Phase Cross-Flow in Horizontal Tube Bundles," *International Journal of Multiphase Flow*, 26, pp. 1851~1873.
- (24) Sim, W.G., 2007, "An Approximate Damping Model for Two-Phase Cross-Flow in Horizontal Tube Bundles," *2007 ASME Pressure Vessel and Piping Division Conference*, San Antonio, USA, PVP2007-26176.
- (25) Sim, W. G. and Mureithi, Njuki, W., 2010, "Drag Coefficient and Two-Phase Friction Multiplier On Tube Bundles Subjected to Two-Phase Cross-Flow," *ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division / K-PVP Conference*, Bellevue, Washington, USA, PVP2010-25073.
- (26) Martinelli, R. C. and Nelson, D. B., 1948, "Prediction of Pressure Drop During Forced Circulation Boiling of Water," *Transactions of ASME*, 70, pp. 695~702.
- (27) Levy, S., 1960, "Steam Slip-Theoretical Prediction from Momentum Model," *Trans. ASME, series C, J. Heat Transfer*, 82, pp. 113~124.