

수직관에서의 이상유동 특성

Characteristics of Two-Phase Flow in Vertical Pipe

배병모*·심우건**

B. M. Bae * and W. G. Sim **

Key Words : Volumetric Quality(체적 건도), Superficial Velocity(겉보기 속도), Predominant Frequency(주요 진동수), Void Fraction(기공률), Flow Quality(건도), Strouhal Number(스트로울 수)

ABSTRACT

Two-phase flow exists in many industrial components. Characteristics of two-phase flow have been studied by many researchers; however, a further study of the two-phase is required for flow-induced vibration. Characteristics of two-phase flow were measured by force sensor at the end of a vertical pipe. The predominant frequency of fluctuation was obtained for various speeds of flow pattern. A correlation to slug frequency for horizontal flow was obtained by Heywood & Richardson (1979), while Legius et al (1997) for vertical flow. A coefficient based on the correlation is estimated and then compared to the existing ones. The existing empirical formulations for average void fraction were proposed by Wallis (1969), Zuber et al (1967) and Ishii (1970). In the present result, flow parameters, such as flow quality and real velocity, are evaluated with void fraction.

기호설명

- β : Volumetric Quality
- j : Superficial Velocity
- α : Void fraction
- ρ_f : Standard water density
- ρ_g : Standard gas density

1. 서론

이상유동 실험을 하기 위해서는 많은 투자와 노력이 필요하다. 그럼에도 불구하고, 많은 산업 설비가 이상 유동에서 작동되기 때문에 지난 2 세기 동안 여러 연구들이 이루어졌다. 기포류, 슬러그류, 반 환상류, 환상류와 같은 이상유동에서의 흐름 형상은 중요한 진동과 함께 수반 된다. 이런 문제들을 피하기 위해서는 이상유동의 특성 연구가 요구 된다. 이 진동들의 이해는 이상 유동이 사용 되는 기술의 개발과 공학적 문제에 적용을 하기 위하여 중요하게 고려된다.

이상유동에 대한 연구는 1949 년 Lockhard & Martinelli 에 의한 연구를 중심으로 많은 종류의 연구 결과물들이 도출 되었다. 최근에는 흐름에 의해 유발되는 진동과 기체/액체의 속도나 기공률과 같은 여러 변수들에 관심이 집중되고 있다.

본 연구 결과는 이상 유동에서의 진동 현상에 대하여 기술하였고 실험을 통해 얻어진 진동수를

현존하는 이론 식에 적용하여 비교해 보았다. 또, 기공률을 이론적으로 구하고 이를 이용해 이상유동에 관계 되는 변수들을 구해 보았다.

2. 이상유동의 실험적 고찰

2.1 이상유동의 흐름 형상

이상유동에서 가능한 흐름의 형상은 여러 가지이며 그 흐름의 형상은 기체와 액체의 비에 의해 일반적으로 결정된다. Fig. 1 에 주요 형상을 도시하였다.

2.2 실험의 절차

실험의 목적은 이상유동의 각 흐름 형상에서 속도 변화에 대해 진동수가 어떠한 특성으로 나타나는지를 알아보고, 얻어진 주요 진동수를 이용하여 이론적인 식을 고찰해 보는데 있다.

(1) 실험장치

Fig. 2 는 실험장치의 주요 구성과 장치의 사양을 보여주고 있다.

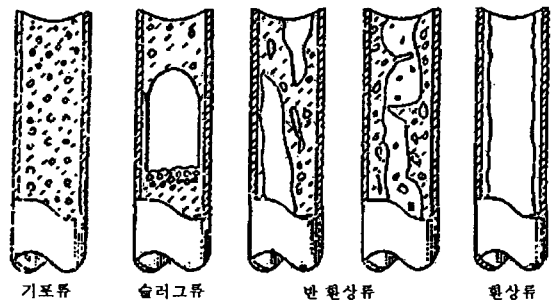


Fig. 1 Flow configurations

* 한남대학교 기계공학과 대학원(학생회원)

E-mail: byoung-mo@hanmail.net

Tel: (042) 629-8352, Fax: (042) 629-8293

** 한남대학교 기계공학과(정회원)

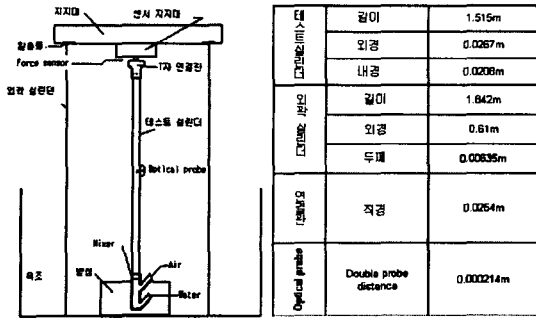


Fig. 2 Experiment at equipment

(2) 흐름 조건

이상유동에서 일어날수 있는 흐름 형상과 각 형상에서 속도와 주요 주파수를 Table 1 에 정리 하였다.

(3) 실제 가스 속도

실제 가스 속도는 관의 중앙에 설치된 Double fiber optical probe (Fig. 3)를 이용하여 측정하고 유동특성을 분석 하였다. 분석을 위해 LAB VIEW 가 사용 되었는데, 알고 있는 Fiber 간의 거리와 큰 기포간의 시간차를 이용하여 실제가스 속도를 구하였다.

Table 1. Flow Conditions

NO	Beta	gas flow Q _{gas} (m ³ /s)	liquid flow Q _{liquid} (m ³ /s)	Q _{total} (m ³ /s)	Superficial Velocity			Frequency (Hz)
					j _{gas} (m/s)	j _{liquid} (m/s)	J _{total} (m/s)	
1	0.25000	0.00009	0.00027	0.00036	0.26500	0.79500	1.06000	5.18750
2	0.25000	0.00017	0.00051	0.00068	0.50056	1.50167	2.00223	3.12500
3	0.25000	0.00026	0.00078	0.00104	0.76596	2.29667	3.06223	3.31250
4	0.25000	0.00034	0.00102	0.00136	1.00111	3.00334	4.00445	1.68750
5	0.25000	0.00043	0.00129	0.00172	1.26611	3.79834	5.06445	2.75000
6	0.50000	0.00018	0.00018	0.00036	0.53000	0.53000	1.06000	3.66750
7	0.49020	0.00025	0.00026	0.00051	0.73611	0.76596	1.50167	5.18750
8	0.50000	0.00035	0.00035	0.00070	1.03056	1.03056	2.06112	6.50000
9	0.50588	0.00043	0.00042	0.00085	1.26611	1.23667	2.50278	6.31250
10	0.50000	0.00052	0.00052	0.00104	1.53111	1.53111	3.06223	8.87500
11	0.50420	0.00060	0.00059	0.00119	1.76667	1.73723	3.50390	11.87500
12	0.50000	0.00068	0.00068	0.00136	2.00223	2.00223	4.00445	15.75000
13	0.49673	0.00076	0.00077	0.00153	2.23778	2.26723	4.50501	16.12500
14	0.50000	0.00085	0.00085	0.00170	2.50278	2.50278	5.00557	19.06250
15	0.50267	0.00094	0.00093	0.00187	2.76778	2.73834	5.50612	21.68750
16	0.50800	0.00102	0.00102	0.00204	3.00334	3.00334	6.00668	22.75000
17	0.75000	0.00051	0.00017	0.00068	1.50167	0.50056	2.00223	3.68750
18	0.75000	0.00102	0.00034	0.00136	3.00334	1.00111	4.00445	6.31250
19	0.75000	0.00153	0.00051	0.00204	4.50501	1.50167	6.00668	8.50000
20	0.75000	0.00204	0.00068	0.00272	6.00668	2.00223	8.00890	10.56250
21	0.75000	0.00255	0.00085	0.00340	7.50835	2.50278	10.01113	12.75000
22	0.75000	0.00306	0.00102	0.00408	9.01002	3.00334	12.01336	17.43750
23	0.95015	0.00162	0.00085	0.00247	4.77001	0.25028	5.02029	3.31250
24	0.95015	0.00324	0.0017	0.00501	9.54002	0.50056	10.04057	4.06250
25	0.95098	0.00485	0.00025	0.00510	14.28058	0.73611	15.01670	9.25000
26	0.95000	0.00646	0.00034	0.00680	19.02115	1.00111	20.02226	5.93750

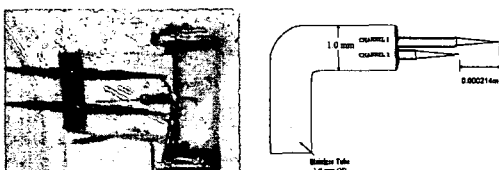


Fig. 3 Double fiber optical probe

(4) 데이터 수집 시스템

실험을 통해 얻어지는 데이터들은 아날로그 신호이기 때문에 컴퓨터의 사용이 가능한 디지털 신호로 바꿔주는 작업이 필요하다. 그 과정에서 일어나는 오차에 의한 잘못된 해석을 피하기 위해 해석 범위의 적절한 선택이 필요하다. 이번 연구에서 신호의 분석과 변환을 위해 OROS 라는 스펙트럼 분석기와 NV Gates 라는 상용프로그램을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 흐름연구의 조건

이상유동에서 흐름의 형상을 결정 할 수 있는 여러 가지 방법이 있다. 본 연구에서 흐름 조건의 타당성을 검토하기 위해 실험의 결과를 TAITEL et al 에 의해 도시된 도표⁽¹⁾와 비교 하여 Fig. 4 에 도시 하였다.

3.2 각 흐름 형상의 특징

Table 1 에 따른 각 흐름의 유동을 스펙트럼 분석기를 이용하여 FFT 분석을 한 후 그 특징에 대하여 알아보았으며 Fig. 5 ~ Fig. 8 에 예시하였다.

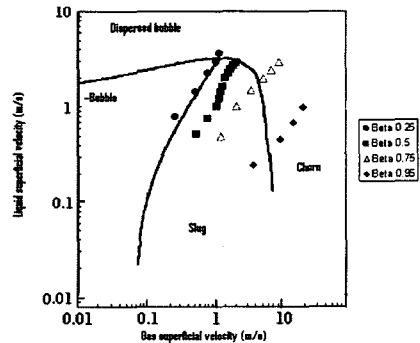


Fig. 4 Flow pattern map

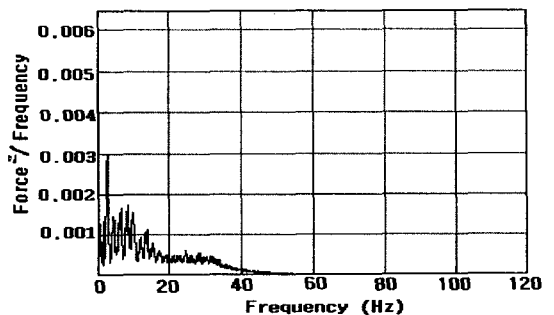


Fig. 5 FFT analyze of bubbly flow ($\beta=25\%$, $j=2m/s$)

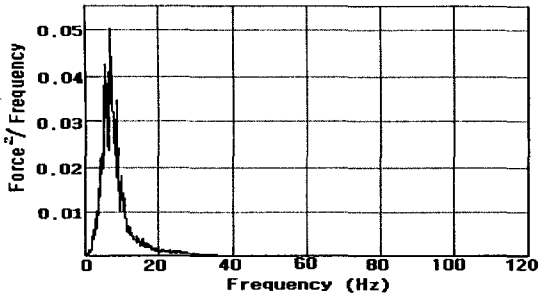


Fig. 6 FFT analyze of slug flow ($\beta=50\%$, $j=2\text{m/s}$)

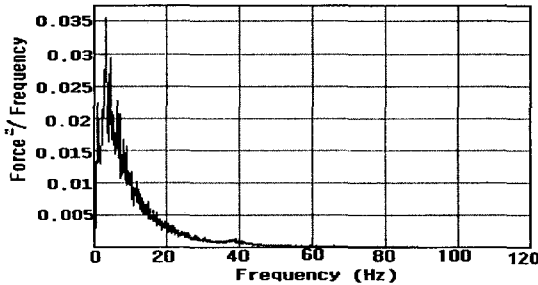


Fig. 7 FFT analyze of slug flow ($\beta=75\%$, $j=2\text{m/s}$)

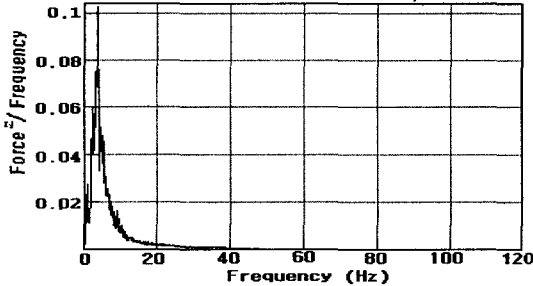


Fig. 8 FFT analyze of annular flow ($\beta=95\%$, $j=2\text{m/s}$)

3.3 주요 진동수

FFT 에 의해 확인된 주요 진동수를 속도에 따라 Table 2 에 정리하고 Fig. 9 에 도시 함으로서 그 특징을 쉽게 파악 할 수 있었다.

Table 2. Predominant Frequency

Bubbly(0.25)		Slug(0.5)		Slug(0.75)		Annular(0.95)	
Superficial Velocity (m/s)	Frequency (Hz)	Superficial Velocity (m/s)	Frequency (Hz)	Superficial Velocity (m/s)	Frequency (Hz)	Superficial Velocity (m/s)	Frequency (Hz)
1.06000	5.18750	1.06000	3.68750	2.00223	3.68750	5.02029	3.31250
2.00223	3.12500	1.50167	5.18750	4.00445	6.31250	10.04057	4.06250
3.06223	3.31250	2.06112	6.50000	6.00668	8.50000	15.01670	9.25000
4.00445	1.68750	2.50278	6.31250	8.00890	10.56250	20.02226	5.93750
5.06445	2.75000	3.06223	8.87500	10.01113	12.75000		
		3.50390	11.87500	12.01336	17.43750		
		4.00445	15.75000				
		4.50501	16.12500				
		5.00557	19.06250				
		5.50612	21.68750				
		6.00668	22.75000				

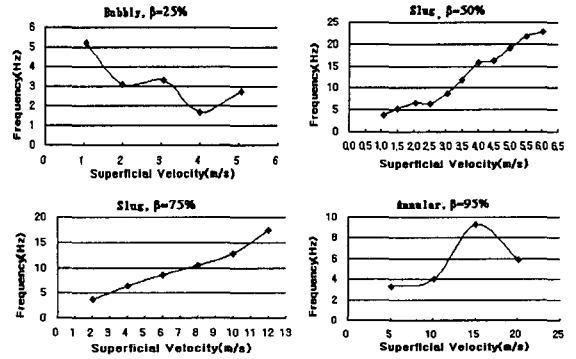


Fig. 9 The predominant frequency versus superficial velocity for each flow condition

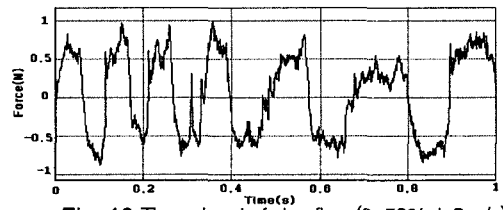


Fig. 10 Time signal of slug flow ($\beta=50\%$, $j=2\text{m/s}$)

4. 슬러그류

슬러그류 에서는 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 불안정한 운동량 유동이 일어난다. 그 유동에 의해 여러 특징들이 나타나고 이를 파악 하기 위한 연구가 요구되고 있다.

4.1 슬러그류 에서의 변수

흐름 형상에서 이해 되는 체적 건도, 실제 유속과 같은 변수들은 기공률에 의해 표현 된다. 그 기공률은 1965 년 Zuber & Findlay⁽²⁾에 의한 이론적 접근으로부터 시작하여 아래의 식(1)을 정의 하였다. 1969 년 Wallis⁽³⁾가 슬러그류 에서의 기공률을 구하기 위하여 식 (2)에 보정계수, C_0 와 평균 드리프트 속도, \overline{U}_{gj} , 를 제안 하였다. 본 연구에서 이론적인 기공률을 사용하여 Table 3 의 데이터들을 얻었고, 그 데이터들을 얻기 위해 식(3)의 변수들⁽⁴⁾을 이용하였다. 또, 유동의 모멘트 변화에 의하여 측정된 힘의 RMS 값을 실험적으로 얻을 수 있었으며 Table 3 에 나타내었다.

$$\alpha = \frac{\beta}{C_0 + \overline{U}_{gj}/j} \quad (1) \quad \overline{U}_{gj} = 0.345 \left[\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$C_0 = 1.2$$

$$U_l = \frac{Q_l}{(1-\alpha)A}, \quad U_g = \frac{Q_g}{\alpha A}, \quad s = \frac{U_g}{U_l}$$

$$x = \frac{1}{1 + \frac{\rho_l U_l (1-\alpha)}{\rho_g U_g \alpha}} \quad S.N = \frac{\text{Frequency} \cdot D}{j_{\text{fluid}}} \quad (3)$$

Table 3 Various parameters of slug flow

NO	Beta	Void fraction (by Zuber and Findlay)	U _l	U _g	U _{real center}	Slip Ratio	Flow Quality (-)	Strouhal number (-)	F _{rms} (N)
1	0.50000	0.37123	0.84199	1.42608	2.28177	1.69371	0.00120	0.14472	0.02433
2	0.49020	0.37601	1.22688	1.95550	3.74019	1.59388	0.00115	0.14084	0.04687
3	0.50000	0.39199	1.69498	2.62608	5.22199	1.54933	0.00120	0.13119	0.06747
4	0.50588	0.40079	2.06385	3.15550	5.88273	1.52894	0.00123	0.10617	0.07969
5	0.50000	0.39973	2.55072	3.82608	5.9625	1.50000	0.00120	0.12057	0.06826
6	0.50420	0.40517	2.92053	4.35550	6.47766	1.49134	0.00122	0.14218	0.06335
7	0.50000	0.40359	3.35714	4.95550	6.75122	1.47611	0.00120	0.16362	0.09734
8	0.49673	0.40236	3.79361	5.55550	6.89037	1.46443	0.00118	0.14793	0.08699
9	0.50000	0.40614	4.21443	6.15550	6.77458	1.46057	0.00120	0.15842	0.10930
10	0.50267	0.40925	4.63538	6.75550	6.82653	1.45738	0.00121	0.16473	0.12870
11	0.50000	0.40786	5.07199	7.35550	5.33637	1.45022	0.00120	0.15756	0.12730

Standard liquid density=998 Kg/m³, Standard gas density=1.2 Kg/m³, Surface of Test cylinder=0.0034 m², U_{gj}=0.155669

여기에서 U_l, U_g, S, x, S.N 은 실제액체속도, 실제 가스속도, Slip ratio, 체적 건도, 스트로울 수 이다

4.2 주파수 특성 계수의 추정

슬러그류의 이론적 상관 관계식 (4)는 1979 년 Heywood & Richardson⁽⁵⁾에 의해 정의 되었다. Heywood et al 은 내경 42mm 수평관 에서의 실험 을 통해 C=0.0434 를 제안 했으며, 1997 년 Legius et al⁽⁶⁾은 내경 50mm 수직관 에서의 실험 을 통해 C=0.0543 를 제안 하였다. 본 실험을 통해 주파수 특성 계수, C, 를 추정하여 Table 4 에 정리해 보았으며 이론에 의해 계산된 주파수, f_{slug}, 와 최근 실험에 의해 얻어진 주파수를 Fig 11 에 도시 하여 비교해 보았다. 흐름 조건 도표, Fig 4, 에 의하면 고속 구간은 흐름 패턴이 불안정하므로 그 구간을 제외하였다.

$$f_{slug} = C \left(\frac{Q_f}{Q_f + Q_g} \right)^{1.02} \left(\frac{2.02}{D} + \frac{j^2}{9D} \right)^{1.02} \quad (4)$$

Table 4 Estimation of coefficient

	C	실험 조건	
		관내경	관 특성
Heywood et al (1979)	0.0434	42mm	수평관
Legius et al(1997)	0.0543	50mm	수직관
Present Result	0.1066	20.8mm	수직관

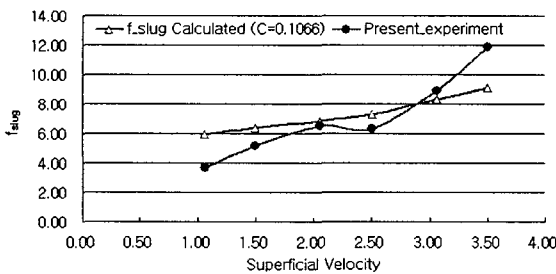


Fig. 11 Comparison of f_{slug}

5. 결론

본 연구를 통하여 이상유동에서의 진동 특성을 분석 하였으며, 이상유동 에서의 주요 변수들의 특성을 규명할 수 있었다. 각 흐름 형상에서 관찰 된 주요 진동수들은 60Hz 이하의 낮은 주파수 영역 이었고, 슬러그류 에서는 속도가 증가됨에 따라 주요 진동수도 증가된다는 사실을 알 수 있었다. 또한 액체의 겔보기 속도에 대하여 정의된 스트로울 수가 거의 변하지 않음을 알 수 있었고 운동량에 의한 힘의 RMS 값은 액체의 겔보기 속도에 대하여 일반적으로 증가함을 보였다. Optical probe 를 사용하여 관 중심점의 실제 가스 속도만을 알 수 있었지만 각 지점의 실제 가스속도를 구하는 등의 추후 연구가 필요하다. 슬러그류의 이론적 주파수를 구하기 위한 주파수 특성 계수는 아직도 미정인 상태 이지만 이후 더 많은 실험을 통하여 일반적 계수를 구할 수 있는 가능성을 보여 주었다. 본 연구는 각 흐름 형상을 고정 시키고 속도의 변화에 중점을 두었는데, 추후 연구에서는 각 흐름 형상에서의 다양한 흐름 형상에 대한 실험이 요구된다. 앞으로의 연구를 통하여 이상유동 특성에 대한 현존하는 이론들의 신빙성을 검토할 수 있을 것이다.

참고 문헌

(1) AZZOPARDI, B.J. and BAKER, G, 2003, Characteristics of periodic structures in gas/liquid two-phase flow, UK/Japan Two-Phase Flow Meeting, Guildford.
 (2) N. ZUBER and J. A. FINDLAY, 1965, Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems, Journal of Heat Transfer, PP. 453-459.
 (3) Wallis, G.B., 1969, One-dimensional two-phase flow McGraw-Hill
 (4) W.G.Sim , N.W.Mureithi and M.J.Pettigrew, 2004, Two-phase Flow Modeling in a Pipe Related to Flow-Induced Vibration, F.S.I Report, Ecole polytechnical of Montreal.
 (5) Heywood, N.I. and Richardson, J.F., 1979, Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe:Determination of liquid holdup By r-ray absorption, Chemical Engineering Science, 34, PP.17-30.
 (6) Legius, H.J.W.M., van den Akker, H.E.A. and Narumo, T., 1997, Measurement on wave propagation and bubble and slug velocities in cocurrent upward two-phase flow, Experimental Thermal and Fluid Science, 15, pp. 267-278.