

과중력 환경에서의 기액이상류

최부홍*, 최주열**

Gas-Liquid Two-Phase Flow at Hyper-Gravity Conditions

Bu-hong Choi+, Ju-yeol Choi++

Abstract : Some useful flow regime data are obtained from the experiments using the flight producing hyper-gravity (2g) conditions and on ground (1g) with the identical flow conditions. The flow regime data obtained at 1g and 2g conditions are compared with new dimensionless flow regime map using Fr, Bo and We number related with gravity, surface tension and inertia force.

Key words : Gas-Liquid Two-Phase Flow(기액이상류); Hyper-Gravity(과중력); Flow Regime(유동양식); Frictional Pressure Drop(마찰압력손실)

1. 서론

공기와 물과 같은 이성분계 기액이상류는 기액 양상의 유량비에 따라 다양한 유동거동을 보인다^{(1),(2)}. 또한 유동과 전열은 상호 밀접한 관계, 즉 기상과 액상의 시간적, 공간적 분포 특성이 전열특성과 압력손실에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 기액이상류의 시간적, 공간적 분포특성은 특히 중력의 크기가 변화하면 기액이상류에 작용하는 힘들간의 균형 즉, 중력, 관성력 및 표면장력 등간의 균형이 변화하여 유동특성과 전열특성이 매우 달라진다. 기존의 유동양식천이메카니즘과 마찰압력손실을 예측하기 위한 대부분의 모델과 상관식들은 지상에서 실시한 많은 실험결과에 기초를 두고 있다. 그러나 이러한 모델과 상관식들은 중력이 변할 때 즉, 중력이 지구중력의 크기보다 작거나 큰 조건에서의 기액이상류에 대한 유동특성^{(3),(4)}을 예측하는데 여러 가지 문제점이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 여기에서는 지상 및 과중력 조건에서 실시한 기액이상류 유동특성 실험을 통하여 얻어진 결과들을 비교, 분석하고 중력의 영향을 고려한 새로운 무차원 유동양식선도에 대해서도 기술한다.

2. 실험장치 및 실험방법

이상유체 실험루프의 개략을 Fig.1에 보인다. 작동유체는 물과 공기이다. 물은 기어펌프에 의해 분리탱크로부터 액유량계를 거쳐 혼합부에 보내어 진다. 공기탱크내의 공기는 임계노즐 및 가스유량계를 거쳐 혼합부에서 물과 혼합된다. 혼합부에서 배출된 기액이상류는 500mm의 발달구간, 시험부 및 보이드율 측정부를 거쳐 분리탱크에서 기액이 분리되고 공기만 대기로 방출되는 구조로 되어있다. 시험부에는 관내 유동거동의 육안관찰 및 고속 카메라로 촬영시 관의 굴절율을 보상하기 위한 워터자켓이 부착되어 있다. 유동양식의 판별에 이용되는 관내의 기액 양상의 분포상황, 즉 보이드율은 구리로 된 4개의 원형전극에 정전압(DC5V)을 인가하는 직류정전압 방식에 의해 측정된다. 마찰압력손실은 측정 범위가 다른 두개의 차압계(P7D, 0~500mmH₂O, 0~3500mmH₂O, 오차: ±%FS)에 의해 측정되며, 측정 간격은 600mm이다. 실험은 Table 1에 보이는 가스 및 액유량을 파라미터로 하여 실시하였으며, 과중력(2g)실험은 항공기내에 형성된 과중력환경에서 실시되었다.

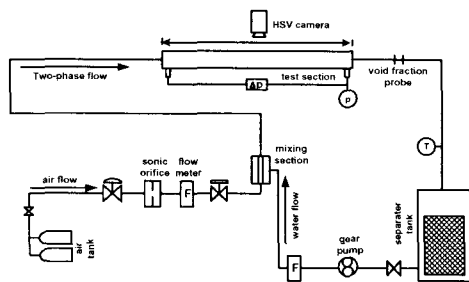


Fig.1 Schematic of two-phase flow test loop.

Table 1 Experimental ranges.

Working fluid	Superficial velocity (m/s)	Reynolds number
Air	$j_G=0.03-21$	$21-1.4 \times 10^4$
Water	$j_L=0.1-2.6$	$1 \times 10^3-2.8 \times 10^4$

3. 무차원 유동양식선도

Fig.2는 지상(1g) 및 과중력(2g)조건에서 실시한 실험을 통하여 얻은 유동양식데이터를 기초로 작성한 유동양식선도이다. 그림에서 횡축과 종축은 각각 기상과 액상의 겉보기 속도($j_G = Q_G/A$, $j_L = Q_L/A$)이며, 그림중의 실선은 1g 및 2g조건에서의 유동양식천이 경계이며, 데이터는 2g조건에서의 것이다. 그림으로부터 2g의 층상류의 영역은 1g의 것에 비해 5배 정도 넓게 분포하며, 기포류-플러그류간의 유동양식천이도 2g의 것이 먼저 발생하는 것을 알 수 있다. 2g의 층상류 유동양식 영역이 1g에 비해 넓게 분포하는 것은 증가된 중력에 의해 층상류로부터 플러그류 혹은 슬러그류로의 유동양식천이를 일으키는 액상의 파의 성장이 억제되기 때문으로 여겨진다. 또한 기포류-플러그류간의 유동양식천이가 2g의 조건에서 먼저 발생하는 것은 관 상부를 따라 흐르는 기포들간의 충돌 확률이 1g에 비해 증가되어 긴 기포 플러그로의 성장이 용이하기 때문으로 생각된다. 그러나 플러그류-슬러그류간의 유동양

* 최부홍(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail: bhchoi@mail.mmu.ac.kr, Tel: 061)240-7311

** 최주열, 목포해양대학교 기관시스템공학부

식천이는 중력의 크기에 관계없이 $j_G = 0.1 \text{ m/s}$ 에서 발생하는데, 이는 각 중력조건에서 기포 플러그의 길이가 거의 같기 때문이며, 이 천이경계는 관성력과 표면장력의 비인 $We = \rho_G D j_G^2 / \sigma$ 로도 평가할 수 있다. 또한 슬러그류-순환상류간의 유동양식천이의 경우에는 1g의 경우가 먼저 발생하는데, 이는 2g의 경우 증가된 부력에 의해 액슬러그내의 기포가 관 상부에 1g의 것보다 많이 존재하게 됨에 따라 액슬러그내의 최대보이드율(maximum void fraction)을 형성하기 어렵기 때문으로 여겨진다. 그러나 관성력이 지배적인 힘으로 작용하는 순환상류와 환상류 유동양식간의 천이는 중력에 관계없이 $j_L = 0.03 j_L$ 에서 발생한다. 지금까지 기술한 내용에서 알 수 있듯이, 각 유동양식간이 천이는 힘들간의 상호 균형 즉, 중력, 표면장력 및 관성력간의 힘의 균형에 따라 발생하며, 이 힘들에 관련된 무차원수는 Fr(Froude number), Bo(Bond number), We(Weber number)가 있고, 그들의 정의는 각각 다음과 같다.

$$Fr = \frac{\sqrt{\text{inertia force}}}{\sqrt{\text{gravity force}}} = \sqrt{\frac{\rho l^2 j^2}{\rho g l^3}} = \frac{j}{\sqrt{gl}} \quad (1)$$

$$Bo = \frac{\text{gravity force}}{\text{surface tension force}} = \frac{\rho g l^3}{\sigma l} = \frac{\rho g l^2}{\sigma} \quad (2)$$

$$We = \frac{\text{inertia force}}{\text{surface tension force}} = \frac{\rho l^2 j^2}{\sigma l} = \frac{\rho l j^2}{\sigma} \quad (3)$$

또한 위의 식(1), (2), (3)에 포함된 대표길이 l 을 관경 D 로 대체하고 무차원수들을 조합하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{Bo We}{Fr} = \frac{g^{1.5} \rho^2 D^{3.5} j}{\sigma^2} \quad (4)$$

또한 식(4) 중의 결보기속도 j 에 기체와 액체의 결보기속도 j_G 와 j_L 를 각각 대입하여 얻은 결과를 횡축과 종축으로하는 무차원유동양식선도를 Fig.3에 보인다. Fig.3중에는 중력의 변화에 따른 유동양식의 변화를 보다 명확하게 보여주기 위해 Fig.2의 1g 및 2g 조건의 유동양식데이터 외에 부가적으로 미소중력(μg)조건에서 얻은 유동양식데이터도 포함시켰다. 또한 Fig.3중의 실선은 Fig.2의 순환상류-환상류 유동양식천이경계를 새로운 무차원유동양식선도에 나타낸 결과이다. 또한 그림으로부터 순환상류-환상류간의 유동양식천이경계는 중력의 변화에 영향을 받지 않음을 알 수 있으며, 이 영역에서는 중력과 표면장력보다 관성력이 지배적으로 작용하기 때문으로 판단된다.

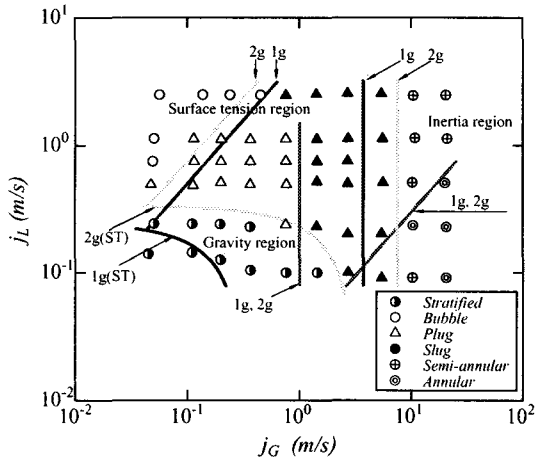


Fig.2 Flow regime map for 1g and 2g conditions.

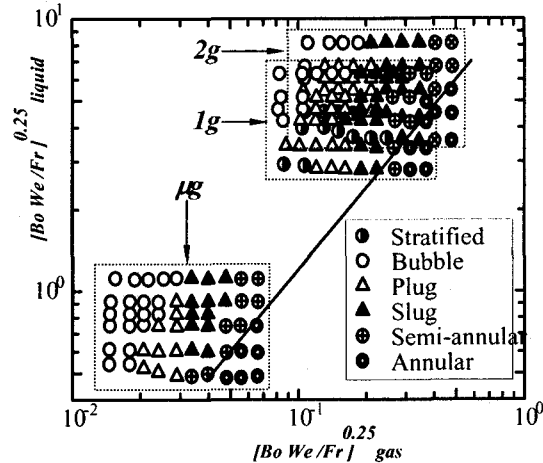


Fig.3 Dimensionless flow regime map.

4. 결 론

과중력(2g)조건에서의 층상류 영역은 1g의 것에 비해 5배 정도 넓게 분포하며, 기포류-플러그류간의 유동양식천이도 1g 보다 먼저 발생한다. 또한 기액이상류의 유동특성에 영향을 미치는 중력, 표면장력 및 관성력에 관련된 무차원수 Fr, Bo, We의 조합으로 만들어진 새로운 무차원 유동양식선도는 기존의 기체와 액체의 유속을 기초로 하여 제작된 유동양식선도에 비해 중력변화 효과를 뚜렷하게 표현할 수 있으며, 순환상류와 환상류 유동양식 영역은 중력의 영향보다는 관성력의 영향이 우세함을 알았다.

참고문헌

- [1] 藤井照重, 赤川浩爾, 伊藤裕, “氣液二相流の動的配管計画”, 日刊工業新聞社, pp. 5-9, 1999.
- [2] 赤川浩爾, “氣液二相流”, コロナ, pp. 9-35, 1974.
- [3] A.A.M. Delil, “Microgravity two-phase flow and heat transfer”, NLR-TP-99429, pp. 3-23, 1999.
- [4] S. B. Reddy, V. K. Mathur, “Two-Phase Flow Regime Map Predictions under Microgravity”, AIChE Journal, pp. 137-139, 1988.