

## 미소중력하의 기액이상류의 유동양식

최 부 홍<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2003년 5월 6일, 심사완료일 : 2003년 5월 21일)

### Flow Patterns of Gas-Liquid Two-Phase Flow under Microgravity

Bu-Hong Choi<sup>†</sup>

**Key words** : Flow Pattern(유동양식), Microgravity(미소중력), Void Fraction(보이드율), Heat management system(배열시스템)

#### Abstract

Microgravity experiments were conducted to determine the effect of liquid and gas superficial velocities on flow behaviors. Flow behaviors observed under microgravity conditions can be classified into five flow patterns: bubble, Taylor bubble, slug, semi-annular and annular flows. Transition boundary between four flow patterns could be determined by drift-flux model. It was also found that the effect of gravity and pipe inclination on flow pattern transition was not significant in the inertia dominant region.

#### 1. 서 론

지상에서 낙하탑 및 항공기를 이용한 미소중력하의 기액이상류에 관한 연구는 28년 전 Heppner<sup>1)</sup>에서 비롯되었다. 지금까지 많은 연구자들의 노력에 의해 미소중력하의 유동특성 중 일부가 밝혀지기도 했다. 즉 지상에서 보다 기액 양상이 대칭적으로 분포, 슬립비의 감소 및 부드러운 환상액막을 형성한다는 등이다. 그러나 미소중력하에서는 부력이 소실되기 때문에 유동거동이 지상과는 크게 다르고 아직 해명되지 않은 유동·전열 특성도 많다. 또한 미소중력환경을 얻기 위한 대규모 설비 및 그에 따른 막대한 비용 때문에 미

소중력실험에 대한 접근성이 용이치 않으며 유용한 데이터도 부족하여 우주용 배열시스템의 기초설계에 필요한 정리식도 확립되어 있지 않다. 미소중력하의 기액이상류의 기초유동특성 중 특히 유동양식전이 및 물리적 개념을 도입한 유동양식선도 개발에 관한 연구가 Dukler<sup>2)</sup>, Zhao<sup>3)</sup>, Bousman<sup>4)</sup>, Crowely<sup>5)</sup> 및 Rezkallah<sup>6)</sup>에 의해 행해졌다. 그러나 그들 대부분이 한정된 실험 범위에서 실시되어졌고 이론적 해석에 의해 개발된 유동양식선도 또한 미소중력하의 실험결과와의 적합성 여부가 입증되지 않아 금후의 연구가 기대된다.

본 연구를 위해 작동유체로서 내경 10mm의 단열수평관내를 흐르는 공기와 물 및 포물선 비행이

<sup>†</sup> 책임저자(고베대학교 연구원), E-mail : choibuhong@hotmail.com, T : 063)857-7849

가능한 MU-300항공기가 사용되어졌다. 또한 종래 연구 보다 폭 넓은 유량조건하에서 실시된 미소중력실험으로부터 유용한 유동양식, 보이드울 및 마찰압력손실 등에 관한 데이터가 얻어졌다. 그러나 본 연구에서는 유동양식에 관해서만 기술한다. 또한 동일 유량조건으로 실시된 수평류 및 수직류 관한 지상실험으로부터 얻은 유동양식과의 비교, 종래의 유동양식모델과의 적합성 여부 및 Drift-flux 모델<sup>7)</sup>을 이용한 미소중력하의 유동양식선이 예측결과 및 미소중력하의 유동양식에 관한 새로운 정리법에 대해서도 기술한다.

## 2. 실험방법

우주공간은 저온, 고진공 및 미소중력이라는 지상과는 매우 다른 환경이다. 이들 환경조건중 미소중력환경은 이상유체를 채용하는 배열시스템에 지배적인 영향을 미친다. 미소중력환경을 얻기 위한 수단으로서 자유낙하를 이용하는 방법과 궤도상의 중력과 원심력의 조합을 이용하는 방법으로 대별된다. 전자에는 낙하탑, 항공기 소형로켓트, 후자에는 우주왕복선, 자유비행물체 및 우주스테이션이 해당된다. 그러나 단기간에 집중적으로 데이터를 얻을 수 있고 실험수행자가 탑승하여 직접 실험조작 가능한 장점 때문에 현재 지상에서 실시되는 대부분의 미소중력실험은 항공기를 이용한다.

본 실험에 사용된 MU-300항공기의 표준비행패턴을 Fig.1에 보인다. 최고속도를 얻기 위한 하강비행구간(A-B), 포물선 비행전의 상승비행구간(B-C), 포물선 비행구간(C-E) 및 수평비행 복귀를 위한 조작비행구간으로 구성되어 있고 일련의 비행중 항공기내에 형성되는 중력 레벨을 Fig.2에 보인다. 또한 포물선 비행중의 미소중력레벨은  $10^{-2}g(g=9.8m/s^2)$ 이하, 유지시간은 20초 정도이다. 실험은 소정의 항공구역에서 1시간당 6~10회 정도 포물선 비행으로 실시된다. 또한 실험비행중의 기내는 상온, 표준대기압 상태이며 수평비행중의 중력레벨은 지상(1g)과 같다.

이상유체 실험루프의 개략을 Fig.3에 보인다. 작동유체는 물과 공기이다. 물은 기어펌프에 의해

미소중력하에서 기액분리가 용이하도록 스테인레스메쉬가 충전된 분리탱크로부터 액유량계를 거쳐 혼합부에 보내어 진다. 한편 공기탱크내의 공기는 입계노즐 및 가스유량계를 거쳐 혼합부에서 물과 혼합된다. 혼합부에서 배출된 기액이상류는 500mm의 조주구간, 시험부 및 보이드울 측정부를 거쳐 분리탱크에서 기액이 분리되고 공기만 대기로 방출되는 구조로 되어있다. 시험부에는 관내 유동거동의 육안관찰 및 고속 카메라로 촬영시 관의 굴절율을 보상하기 위한 워터자킷이 부착되어 있다. 유동양식의 판별에 이용되는 관내의 기액 양상의 분포상황, 즉 보이드울은 구리로 된 4개의 원형전극에 정전압(DC5V)을 인가하는 직류정전압 방식에 의해 측정된다. 실험은 Table 1에 보이는 가스 및 액유량을 파라미터로 하여 실시하였다.

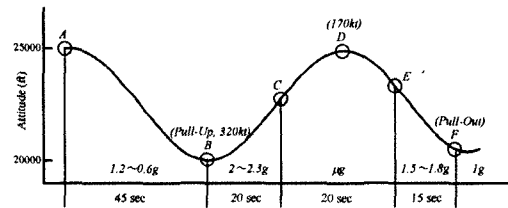


Fig. 1 Typical parabolic flight of MU-300 airplane.

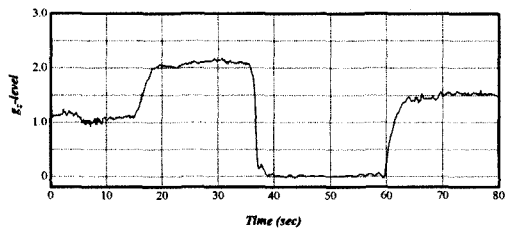


Fig. 2 Gravity level during parabolic flight of MU-300 airplane.

Table 1 Experimental ranges.

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

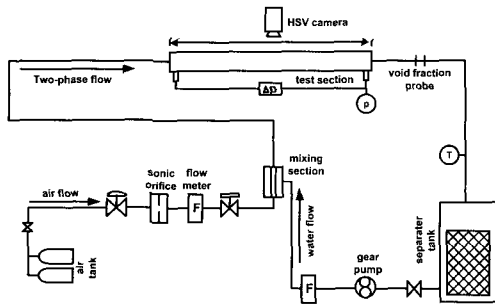


Fig. 3 Schematic of test loop.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동양식 천이 메카니즘

미소중력하의 유동거동은 실험중의 육안관찰, 고속 카메라에 의해 녹화된 영상의 면밀한 분석 및 시계열 보이드율 데이터를 병행하여 기포류, 테

일리기포류, 슬러그류, 준환상류 및 환상류로 분류되었다. Fig.4는 액상 및 기상의 겉보기유속  $j_L$ ,  $j_G$ 가 각각 일정한 경우 각상의 유량 증가가 유동거동에 미치는 영향을 보인다.  $j_L=0.21\text{m/s}$ 로 일정한 경우, 거의 관내경 크기의 기포가 관중심부를 따라 흐르지만, 기상유량의 증가와 함께 기포는 기포간의 충돌후 합체되어 매우 부드러운 계면을 갖는 포탄형의 테일리기포로 천이하고 최대 안정길이까지 성장한다. 그러나 기상유량이 더욱 증가되면 기포의 성장은 정지하고 도리어 기상의 난류력에 의해 테일리기포의 후단부분에서 기포의 분열이 발생하고 액슬러그내에 다수의 소기포가 존재하는 슬러그류로 천이한다. 여기에 가스유량이 더 증가되면 기상의 관성력에 의해 액상의 중심부가 관통되고 결국 기액 양상이 완전 분리된 환상류로 천이한다. 한편  $j_G=0.41\text{m/s}$ 로 일정한 경우에는 액상유량의 증가와 함께 긴 테일리기포가 증가된 액상의 관성력에 의해 분열되어 점점 작아지게 되고, 액상의 겉보기 유속  $j_L=2.53\text{m/s}$ 에서는 매우 작은 기포가 관단면상에 균등 분포한 기포류 형태로 흐르는 유동거동을 보인다.

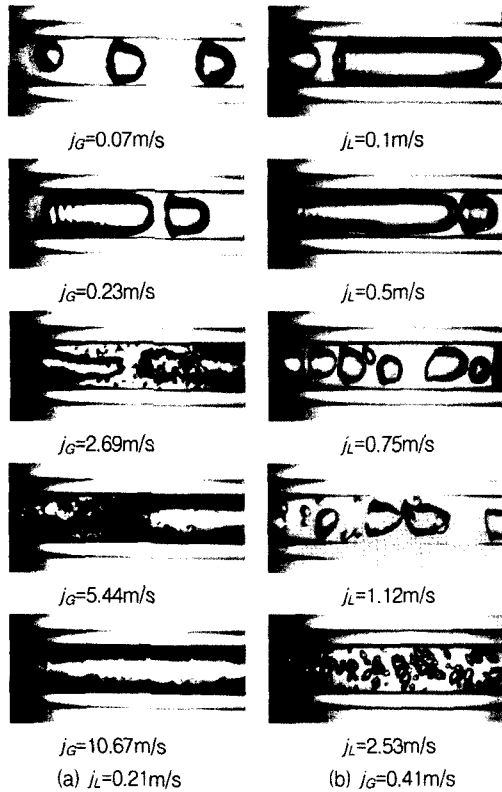


Fig. 4 Influence of  $j_G$ ,  $j_L$  on flow behaviors.

#### 3.2 종래 유동양식 모델과의 적합성

기액이상류의 물리적 메카니즘을 기초로 한 Taitel<sup>8)</sup>, Weisman<sup>9)</sup>의 유동양식 중 천이식에 중력항을 고려하여 얻은 천이경계와 미소중력하의 유동양식결과와 비교한 결과를 Fig.5에 보인다. 그림중의 실선은 Taitel의 천이경계, 파선은 Weisman의 천이경계를 각각 나타낸다. 또한 굵은 실선과 파선은 중력항을 0.01g로, 가는 실선과 파선은 1g로 각각 외삽하여 얻은 천이경계를 나타낸다. 또 0.01g로 외삽한 그들의 천이경계와 실험 결과간의 비교에 있어서, 본 실험에서는 층상류양식이 관찰되지 않았고, 기포류와 테일리기포류간의 그들의 천이식이 존재하지 않아 이들 영역에 대한 비교평가는 할 수 없다. 그러나 그림으로부터 중력이 감소함에 따라 중력외삽 천이경계는 보다 낮은  $j_L$ ,  $j_G$ 쪽으로 향하고 층상류의 영역이 감소하는 것으로부터 정성적으로는 일치함을 알 수 있다. 또 본 실험결과와 준환상류와 환상류영역에 대해

Taitel의 간헐류와 환상류간의 천이경계만이 비교적 좋은 예측을 보인다. 이는 지상장의 유동특성을 예측하기 위해 개발된 모델들을 고도의 신뢰성 및 안정성을 요구하는 미소중력하에 적용하기 위해서는 사전 검토가 충분히 행해져야 함을 시사한다.

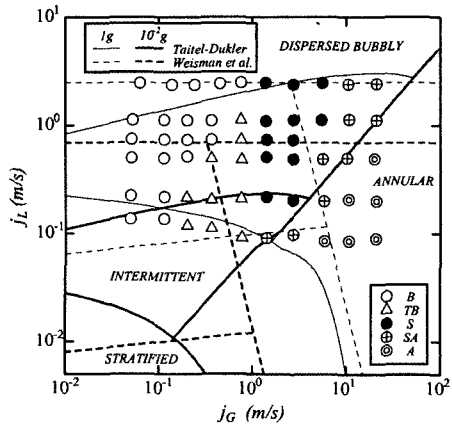


Fig. 5 Comparison of Taitel and Weisman model with microgravity flow pattern data.

3.3 드리프트플럭스 모델을 이용한 유동양식 천이 보이드율 계산

보이드율 측정부의 구리제 원형 전극에 접촉하는 액상의 비율에 따라 변하는 출력신호를 이용해서 계산한 시간평균 보이드율을 다음의 드리프트 플럭스 모델로 정리한 결과를 Fig.6에 보인다.

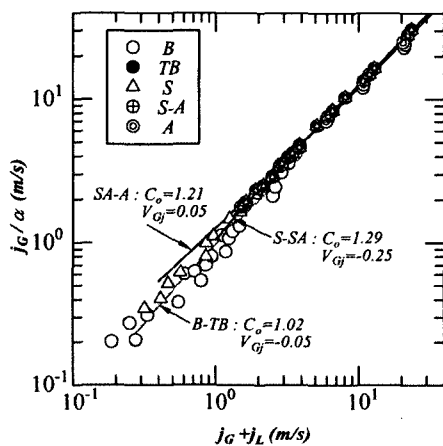


Fig. 6 Correlation of void fraction with drift-flux model.

$$\frac{j_G}{\alpha} = Co(j_G + j_L) + V_{Gj} \quad (1)$$

여기서  $Co$ 는 관단면상의 상분포 및 유속에 의존하는 분포 파라미터,  $V_{Gj}$ 는 부력에 의해 발생하는 드리프트속도이다. 그림중의 실선은 평균보이드율을 최소자승법으로 구한 각 유동영역에 대한  $Co$ 의 근사선이다. 또한 미소중력하에서도 잔류중력의 영향으로 인해 드리프트속도  $V_{Gj}$ 가 존재하지만 무시할 정도로 작은 값들이다. 따라서 각 유동영역간의 천이보이드율은  $V_{Gj}=0$ 으로 가정함과 동시에 실험으로부터 얻은 상관식 (기포류-테일러기포류:  $j_L=1.5j_G$ , 슬러그류-준환상류:  $j_L=0.12j_G$ , 준환상류-환상류:  $j_L=0.03j_G$ )을 식(1) 대입하면 구하여지며 그 결과를 Table 2에 정리했다. 또한 천이보이드율을 기초로 한 유동양식선도를 Fig.7에 보인다.

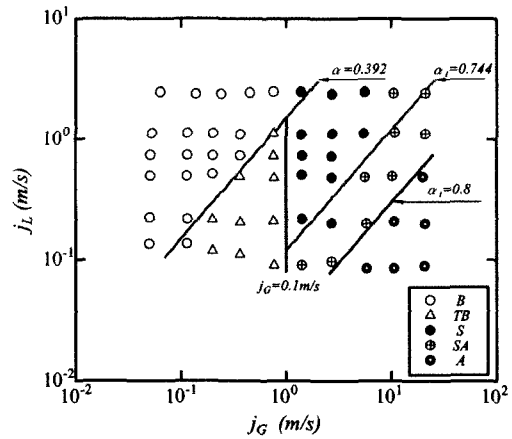


Fig. 7 Flow pattern map for microgravity.

Table 2 Transitional void fraction.

Transition	Transitional void fraction
Bubble~Taylor bubble	$\alpha_t=0.392$
Slug~Semi·Annular	$\alpha_t=0.744$
Semi·Annular~Annular	$\alpha_t=0.8$

3.4 지상 실험결과와의 비교

미소중력( $\mu g$ ), 지상의 수평류(1g수평류) 및 수

직류(1g수직류) 실험으로 얻은 유동양식전이 결과를 Fig.8에 보인다. 그림중의 실선은 유동양식전이 결과를, 팔호안의 약자 ST, TB는 각각 층상류, 테일러기포류를 나타낸다. 그림으로부터 층상류양식은  $\mu g$  및 1g수직류에서는 관찰되지 않았음을 알 수 있다. 기포류와 테일러기포류(혹은 플러그류)간의 전이는 모두 기울기 1.0의 선으로 나타나지만 1g수평류 < 1g수직류 <  $\mu g$  순으로 큰 보이드율에서 전이가 발생함을 알 수 있다. 테일러기포류와 슬러그류간의 전이는 1g수직류의 경우  $j_L = -0.384j_G + 0.94$ 에서, 1g수평류와  $\mu g$ 의 경우에는  $j_G = 1.0m/s$ 에서 발생한다. 즉  $j_L \leq 0.51m/s$ 의 범위에서는 1g수직류가 1g수평류와  $\mu g$ 보다 큰  $j_G$ 에서 전이가 발생한다. 이것은 1g수직류의 경우 기상과 벽면간의 액막이 중력의 영향을 받아 유하함과 동시에 기상의 흐름에 저항으로 작용하기 때문으로 여겨진다. 슬러그류와 준환상류간의 전이는 1g수평류의 경우  $j_G = \text{일정}$ 의 조건에서 발생하지만 1g수직류와  $\mu g$ 는 기울기 1.0의 선으로 나타난다. 그러나  $\mu g$ 가 1g수직류 보다 큰 보이드율에서 전이가 발생한다. 이것은 1g수직류의 경우 액막에 미치는 중력과 기상의 관성력간의 힘의 균

형에 따라 정역 양방의 액막류가 존재하고, 그들이 충돌하는 지점에서 큰 파가 형성되어 결국 액상에 의한 관폐쇄가 발생하기 쉽기 때문으로 여겨진다. 준환상류와 환상류간의 전이는 모두 기울기 1.0의 선으로 나타난다. 이것은 관성력이 지배하는 영역에서는 중력의 크기, 파이프의 경사각도에 그다지 영향을 받지 않음을 나타낸다.

#### 4. 결 론

MU-300항공기를 이용한 미소중력실험을 종래보다 폭 넓은 유량범위에서 실시하여 유용한 유동양식데이터를 얻었으며, 본 연구로부터 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 미소중력하의 유동양식은 기포류, 테일러기포류, 슬러그류, 준환상류 및 환상류로 분류되었다.
2.  $j_L = 0.21m/s$ 로 일정인 경우, 기상유량의 증가와 함께 유동양식은 기포류에서 테일러기포류, 슬러그류, 준환상류를 거쳐 환상류로 전이해 간다.
3. Taitel의 간헐류와 환상류간의 전이경계와 준환상류와 환상류영역에 대한 실험결과와 비교적 일치한다.
4. 드리프트플럭스 모델을 이용하여 유동양식전이 보이드율을 구할 수 있다.
5. 관성력 지배 영역에서는 중력의 크기, 파이프의 경사각도가 유동양식에 미치는 영향은 적다.

#### 참고문헌

[1] Heppner, D.B., King, C.D., and Littles, J.W., Zero-G Experiments in Two-Phase Fluids Flow Regimes, ASME, 75-ENAs-24, pp1-8, 1975.  
 [2] Dukler, A. E., Fabre, J. B and Vernon, R., Gas-Liquid Flow at Microgravity Conditions: Flow Patterns and Their Transitions, Int.. J. Multiphase Flow, 14-4, pp389-400, 1988.

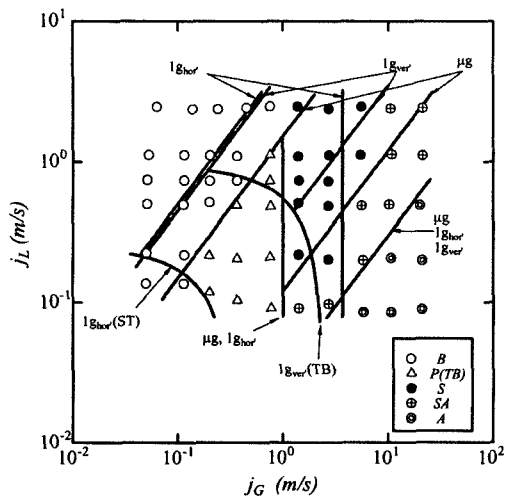


Fig. 8 Flow pattern map for horizontal flow under microgravity, horizontal flow and vertical flow at normal gravity.

- [3] Zhao, L., Rezkallah, K. S., Gas-Liquid Flow Patterns at Micro-gravity, *Int. J. Multiphase Flow*, 19, pp751-763, 1993.
- [4] Bousman, W. S., Studies of Two-Phase Gas-Liquid Flow in Microgravity, *NASA Contractor Report 195434*, pp85-212, 1995.
- [5] Crowely, C. J. and Izenon, M.G., Design Manual for Microgravity Two-phase Flow and Heat Transfer, AL-TR-89-027, pp1-49, 1989.
- [6] Rezkallah, K. S., Recent Progress in the Study of Two-Phase Flow at Microgravity Conditions, *J. Adv. In Space Research*, 16, pp123-132, 1995.
- [7] Zuber, N. and Findlay, J.A., Average Volumetric Concentration in Two Phase Flow Systems, *J. Heat Ttransfer*, 87-4, pp453-468, 1965.
- [8] Taitel, Y., and Dukler, A. E., A Model for Predicting Flow Regime Transition in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, *AIChE J.*, 22-1, pp47-55, 1976.
- [9] Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J. and Crawford, T., Effects of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.5 (1979), 437-462.

### 저 자 소 개



#### 최부홍 (崔美洪)

1970년 1월29일생, 1994년 2월 한국 해양학교 기관공학과 졸업, 1999년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 2002년 일본 고베대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 고베대학 연구원.