

## 수직상향류 공기-물 이상유동영역 판별

이바로\* · 장영준\* · 고민석\* · 이보안\*\* · 이연건\*\* · 김신\*\*\*†

\*제주대학교 에너지공학과, \*\*제주대학교 원자력과학기술연구소

(2013년 8월 5일 접수, 2013년 11월 18일 수정, 2013년 11월 18일 채택)

## Vertical Upward Air-Water Two-Phase Flow Regime Identification

Ba-Ro Lee\*, Young-Jun Jang\*, Min-Seok Ko,\*

Bo-An Lee\*\*, Yeon-Gun Lee\*\*, Sin Kim\*\*\*†

\*Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University,

\*\*Institute for Nuclear Science and Technology, Jeju National University

(Received 5 August 2013, Revised 18 November 2013, Accepted 18 November 2013)

### 요 약

이상유동은 원자력 발전소 내 노심과 석유 수송 등 여러 산업 분야에서 빈번히 관찰된다. 이상유동영역은 두 상의 성질과 유량의 차이, 그리고 유로의 구조에 따라 결정된다. 유동영역의 판별은 시스템 설계 및 안전 해석에 있어 중요하기 때문에 많은 이론과 실험 연구들이 수행되었다. 본 연구는 파이프 내의 이상유동장에서 각 이상유동영역 및 천이경계에서의 특징 파악을 위한 기초 연구로서, 30 mm의 내경을 갖는 수직관의 수직상향류 공기-물 이상유동영역을 고속카메라와 Wire-mesh sensor(WMS)를 이용하여 판별하였다. 또한 유동양식을 정량적으로 판별하기 위해 액막 두께를 적용하였다. 판별한 실험 데이터를 Taitel 외와 Mishima와 Ishii의 유동양식선도와 비교하였다. 실험을 통해 판별한 유동영역은 기존의 유동양식선도와 전체적으로 잘 일치함을 보였다.

주요어 : 이상유동영역, 공기-물 수직상향류, 고속카메라, 와이어메쉬 센서

Abstract - Two-phase flow is frequently observed in many industries such as nuclear power plants and oil transportation. Two-phase flow regime depends on the flow rates, the fluid properties and the structure of flow channels. Since the identification of the flow regime is of great importance in the system design and the safety analysis, a number of theoretical and experimental investigations have been performed. This paper presents a basic research on the characteristics of each flow regime and transition boundary in the two-phase flows. The flow regime of the upward air-water flow in the vertical tube, 30 mm in the inner diameter, is distinguished by using the high-speed camera and the Wire-mesh sensor(WMS). The identified experimental data are compared with the flow regime maps proposed by Taitel et al, Mishima and Ishii. Even though there is slight difference in the transition boundary, the experimental data show general agreement with these flow regime maps.

**Key words** : Two-phase flow regime, Upward air-water flow, High-speed camera, Wire-mesh sensor

†To whom corresponding should be addressed.  
Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University  
Tel : 064-754-2315 E-mail : sinkim@jejunu.ac.kr

## 1. 서 론

이상유동은 원자력 발전소 내 노심 및 증기 발생기

와 석유 수송 등 여러 산업 분야에서 빈번히 관찰된다. 이상유동장에서는 두 상의 유량이나 유체의 성질, 유로의 기하학적 구조에 따라 다양한 유동영역이 관찰된다. 이상유동에 대한 보존 방정식을 풀기 위해서 부가적으로 필요한 두 상간의 질량, 운동량 및 에너지 교환율에 대한 구성 관계식들은 유동영역에 의존한다. 그러므로 시스템 설계 및 안전 해석에 있어 유동영역을 판별할 수 있는 정보를 미리 알아야 한다.

이런 이유 때문에 유동영역 판별과 관련한 많은 이론 및 실험 연구들이 수행되었다. 수직관의 경우 대표적으로 기체와 액체의 운동량속을 이용한 Hewitt과 Roberts의 선도[1]와 이론적인 근거를 제시한 Taitel 외의 이상유동선도[2], 드리프트-플럭스 모델(Drift flux model)을 이용하여 작성한 Mishima와 Ishii의 선도[3], 그리고 걸보기속도를 이용한 Wallis[4]의 선도 등이 있다.

본 연구는 파이프 내의 이상 유동장에서의 각 이상 유동영역의 특징 및 천이경계에서의 특징 파악을 위한 기초 연구이다. 이를 위해 제주대학교 원자력 과학기술 연구소에 구축된 30 mm의 내경(두께 10 mm)을 갖는 실험 루프를 사용하였다. 시각화 자료를 얻기 위해 고속 카메라와 와이어 메쉬 센서(Wire-mesh sensor: WMS)를 설치하였다. 고속 카메라는 축방향 가시화를 위해 사용하였고, WMS는 파이프 내부의 상 분포를 얻기 위해 활용하였다. 또한 유동영역 판별의 정량적인 표현을 위해 WMS를 통해 얻은 액체 길이 인자(liquid length factor)를 도입하고 적용하였다.

## 2. 천이 메커니즘

### 2-1 기포류(bubbly flow)에서 슬러그류(slug flow)로의 천이

낮은 액체 유량일 때 기포류에서 슬러그류로 천이 하기 위해서는 기포들의 결합(coalescence)이 필요하다. 기체유량이 증가하면 기포밀도(bubble density)가 증가하고 기포들의 간격이 좁아지면서 잦은 충돌로 인하여 결합률이 증가한다.

Taitel 외는 슬러그류로의 천이가 기공률(void fraction) 0.25 일 때 발생한다고 가정하였으며, Hinze[5], Brodkey[6]의 이론 및 Blasius 방정식을 조합한 식으로 슬러그류로의 천이를 구별하였다. 또한 실험을 통하여 내경 50 mm 이하의 수직관에서는 분산기포류(finely dispersed bubble flow)만이 존재함

을 밝혔다. 이는 액체 유량에서 발생하는 난류력(turbulent force)에 기인한다. 그리고 Mishima와 Ishii는 드리프트 플럭스 모델(drift flux model)을 적용하여 기포류에서 슬러그류로의 천이가 기공률이 0.3일 때 발생한다고 구분하였다. 두 이론의 천이 메커니즘에 대한 천이 경계 방정식은 Table 1에 정리하였다.

### 2-2 슬러그류(slug flow)에서 처언류(chum flow)로의 천이

기포류에서 기체 유량이 증가하면 슬러그류에 도달하게 하는데, 여기서 기체 유량을 더욱 더 증가시키게 되면 처언류로의 천이가 발생한다. 하지만 처언류를 정확히 정의하는 것이 어렵기 때문에 슬러그류에서 처언류로의 천이 경계는 매우 모호하다. 따라서 처언류로의 천이 경계에 대한 수많은 연구가 진행되었으며 현재도 진행 중에 있다.[2-4, 7-11, 20] 슬러그류에서 처언류로의 천이 경계를 판별하는 기준은 대표적으로 다음과 같이 3가지로 분류한다.

첫 번째 기준은 테일러 기포 주위에 있는 액막에서의 상대적인 기체 속도에 의해 발생하는 플러딩(flooding) 조건을 발견하는 경우이다. Nicklin과 Davison[11], Wallis, Govan 외 등은 위와 같이 천이 메커니즘을 정의하였다.

또 다른 기준으로 Taitel 외는 슬러그류에서 처언류로의 천이를 입구역역현상(entry region phenomenon)이라고 가정하였다. Fig. 1과 같이 두 개의 연속한 테일러 기포를 가정하면, 기포 속도는 Nicklin[11]에 의해 주어진다. 또한 아래의 기포는  $l_s$

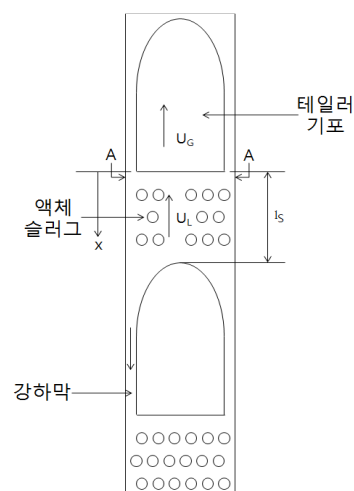


Fig. 1. Slug flow geometry.

**Table 1.** Equations of transition boundary.

	Taitel 외.[2]	Mishima와 Ishii[3]
BBY to SLG	$j_\ell + j_g = 4.0 \left\{ \frac{D^{0.429} (\sigma/\rho_\ell)^{0.089}}{\nu_\ell^{0.072}} \left[ \frac{g(\rho_\ell - \rho_g)}{\rho_\ell} \right]^{0.446} \right\}$	$\alpha > 0.3$
SLG to CHN	$\frac{l_E}{D} = 40.6 \left( \frac{j_M}{\sqrt{gD}} + 0.22 \right)$	$\alpha \geq 1 - 0.813 \left\{ \frac{(C_0 - 1)j_M + 0.35 \sqrt{(\Delta\rho g D / \rho_\ell)}}{j_M + 0.75 \sqrt{(\Delta\rho g D / \rho_\ell)} (\Delta\rho g D^3 / \rho_\ell \nu_\ell^2)^{1/18}} \right\}^{0.75}$
CHN to ANL	$\frac{j_g \rho_g^{1/2}}{[\sigma g (\rho_\ell - \rho_g)]^{1/4}} = 3.1$	$(1) j_g = \sqrt{\left( \frac{\Delta\rho g D}{\rho_g} \right)} (\alpha - 0.11)$ $(2) j_g \geq \left( \frac{\sigma g \Delta\rho}{\rho_g^2} \right)^{1/4} N_{\mu L}^{-0.2}$

\*\*BBY: 기포류, SLG:슬러그류, CHN:처언류, ANL:환상류

가 충분히 길 때 앞선 기포와 같은 속도로 움직일 것이다. 이러한 경우 안정된 슬러그류라고 한다. 하지만 그렇지 않은 경우,  $l_s$ 가 짧아지면 A-A에서의 액체 흐름은 강하막(falling film)처럼 벽 주위로 내려간다. 이때 질량 연속성을 유지하기 위해 테일러 기포의 꼭짓점 부분 속도는 반드시 증가하며, 결국 아래의 기포는 위의 기포를 추월할 것이다. 그 결과 두 테일러 기포가 합쳐지게 되고 액체 슬러그는 분해되며 처언류로의 천이가 발생한다.

그리고 Mishima와 Ishii는 테일러 기포와 액체슬러그가 포함된 전체 영역에 대한 평균 기공률이 테일러 기포 영역의 기공률보다 높을 때 처언류로의 천이가 발생한다고 했다.

두 이론의 천이 메커니즘에 대한 천이 경계 방정식은 Table 1에 정리하였다.

Figure 1은 전형적인 슬러그류에서의 테일러 기포 및 액체 슬러그를 나타내고 있다.  $U_G$ 는 기체 기포의 상승속도로  $U_G = \frac{j_g}{\alpha}$ 이며,  $U_L$ 은 평균 액체 속도로  $U_L = \frac{j_\ell}{1-\alpha}$ 이다. 또한  $l_s$ 는 액체 슬러그의 길이이다.

2-3 처언류(chum flow)에서 환상류(annular flow)로의 천이  
기체 유량이 충분히 크게 되면 환상류로의 천이가 된다. 파이프 내벽에 인접한 액막은 위로 흐르고

기체 유량에 의해 파이프 중심의 액적들은 상향으로 흐른다. 액막은 물결모양의 경계면을 가지고, 또한 일부 경계면이 기체에 의해 부서지는 경우도 발생한다.

Taitel 외는 Turner의 이론[12]을 바탕으로 환상류의 존재 유무를 결정하였다. 이에 따라 중력과 액적에 작용하는 항력 사이의 균형에 의해 기체 속도를 결정했고, Hinze의 최대 안정 방울 크기에 대한 이론[5]을 적용하여 천이를 규정했다. Mishima와 Ishii는 두 개의 메커니즘을 가정하여 환상류로의 천이 경계를 개발했다. 이에 따르면 큰 기포를 따라 흐르는 액막 영역에서의 역류가 발생하거나, 유입(entrainment)이나 변형(deformation)에 의한 큰 물결이나 액체 슬러그가 붕괴될 때 천이가 발생한다. 첫 번째 메커니즘의 가정에 따라 환상류에 대한 드리프트-속도 상관관계(annular drift-velocity correlation)에  $j_\ell = 0$ 일 때의 액막에서 역류조건을 적용하여 천이 경계 방정식을 유도하였으며, Ishii의 보고서[16]에 의해 대략적으로 정리하였다. 두 번째 메커니즘에 대해서는, 물결 최고점에서의 기체가 이끄는 전단력과 표면장력을 유지하는 힘과의 균형으로 천이를 결정했다.

### 3. 실험

#### 3-1 실험 장치

Figure 2는 실험을 수행한 루프의 간략도이다. 위 루프는 7개의 주요 요소로 구성되며, ① 메인탱크, ②

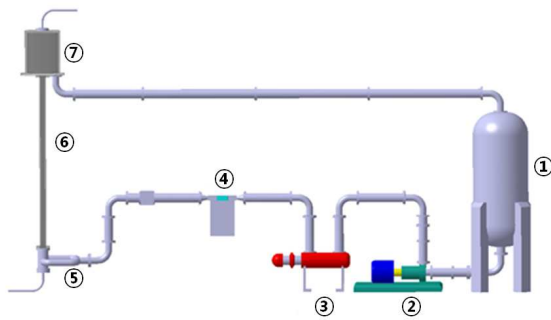


Fig. 2. Experimental vertical loop

메인펌프(5 마력), ③ 온도 변화를 최소화하기 위한 예열기, ④ 코리올리스 질량 유량계(오차:  $\pm 0.15\%$ , 최대 초당 400 kg 측정 가능), ⑤ 기-액 주입구, ⑥ 아크릴 테스트 섹션(길이 3360 mm, 내경 30 mm), ⑦ 기-액 분리기로 구성되었다.

메인탱크 내의 물은 5 마력의 메인펌프를 통과하여 예열기로 향하게 된다. 예열기를 거친 물은 질량 유량계를 거쳐서 기-액 주입구로 향하게 된다. 여기서 액체는 기체와 혼합물을 형성하게 된다. 기체는 15 마력의 압축기로부터 공급을 받는다. 기-액 혼합물은 테스트 섹션을 따라 상향으로 흐르게 되고 기-액 분리기에 의해 분리되어 기체는 대기 중으로 유출되고 액체는 다시 메인탱크로 순환된다.

### 3-2 실험 조건

유동영역 판별 실험에서 각 상의 겉보기속도는 액체의 경우 0.1~4.7 m/s이고, 기체의 경우 0.1~20.0 m/s까지 적용하였다. 유동영역의 가시화를 위해 고속 카메라와 WMS를 이용했다. 고속카메라는 일본 Photron 사의 Fastcam SA4 모델로 기본 1024 × 1024 픽셀의 해상도로 촬영이 가능하며 최대 속도는 500,000 fps(128 X 16 픽셀)이다. 테스트 섹션의 주입구로부터 2750 mm( $L/D \approx 92$ ) 떨어진 위치에 설치했고 촬영했다.

WMS는 일반적으로 전압을 공급하는 transmitter layer와 전류를 수신하는 receiver layer로 구성된다. 각각의 layer는 유한한 개수의 와이어를 포함하고, 이들 와이어는 일정한 거리로 떨어져 있다. Transmitter 와이어로부터 전압이 인가됨과 동시에 receiver 와이어의 전압이 0V(ground)로 컨트롤되면, 이들 사이의 전압차에 의해 receiver 와이어 방향으로 전류가 흐른

다. 이때, 전류의 크기는 이들 와이어 사이에 채워진 매질의 전기 전도도의 크기와 부피(액체분율)에 비례하여 결정된다. 실험에 사용한 와이어 메시 센서는 16 × 16 시스템(16 transmitter wires, 16 receiver wires)으로 이들 와이어 전극 사이의 분리 거리는 1.875 mm이고, transmitter layer와 receiver layer는 1.1 mm의 거리로 떨어져 있다. WMS는 테스트 섹션의 주입구로부터 2800 mm( $L/D \approx 93$ ) 떨어진 위치에 설치하였다. [13-15]

## 4. 실험 결과

본 연구에서는 유동영역 판별을 위해 기체 및 액체 속도를 변화 시키면서 고속카메라를 이용하여 축 방향 이미지를 촬영하였고 WMS를 이용하여 단면의 상 분포를 나타냈다. 기체 및 액체의 유량이 저유량일 경우 고속카메라의 시각적 자료만으로도 유동 영역판별이 가능하지만, 고유량일 경우, 고속카메라 이미지만으로는 유동 영역을 판별하기 어렵다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 WMS를 통해 얻은 단면에서의 상 분포 이미지 및 액막 두께(liquid film thickness)를 종합하여 유동 영역을 판별하였다.

### 4-1 고속카메라 및 WMS 이미지 결과

Figure 3은  $j_e = 3.0$  m/s이고  $j_g = 0.3$  m/s일 때 전형적인 기포류에 대한 고속카메라 이미지(Fig. 3. (a))와 WMS를 통해 얻은 상 분포 이미지(Fig. 3. (b))를 볼 수 있다. 이들 이미지들을 통해 볼 때, 기포류의 특징이라 할 수 있는 연속적인 액체상에 많은 기포들이 다양하게 존재함을 알 수 있다.

액체 유량이 감소하게 되면 난류붕괴(turbulent breakup)가 감소하게 된다. 이는 기포들의 결합을 증가시키며 테일러 기포가 존재하는 슬러그류로의 천이가 발생하게 된다. 이를 Fig. 4에서 확인 할 수 있다. Figure 4 (a)는 고속카메라로 테일러 기포를 촬영한 영상이고 Fig. 4 (b)는 WMS로 테일러 기포의 앞부분에 대한 이미지이다.

기체 유량이 더 증가하게 되면 액막에서는 큰 파형이 생겨나고 파형 두께에 의해 액막은 불안정하게 된다. 파형에 있는 물은 액적 형태로 분리되어 파이프 중심을 향하며 불안정한 모습을 띄게 된다. 이때를 플러딩(flooding) 조건이라 한다.[8] 플러딩 현상은 처언류의 중요한 특징 중 하나이다. Figure 5에서 플

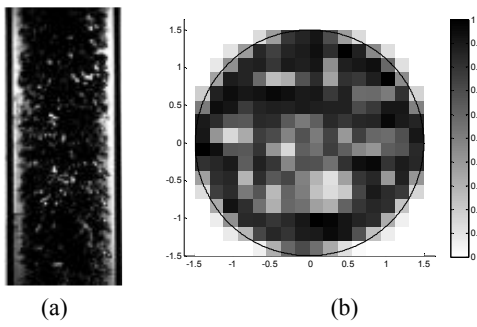


Fig. 3. (a) High speed camera result and (b) WMS result for  $j_\ell = 3.0$  m/s and  $j_g = 0.3$  m/s.

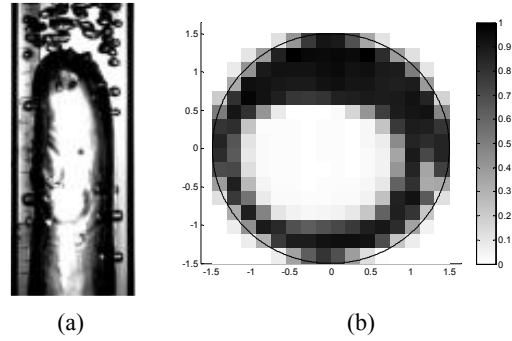


Fig. 4. (a) High speed camera result and (b) WMS result for  $j_\ell = 0.3$  m/s and  $j_g = 0.2$  m/s.

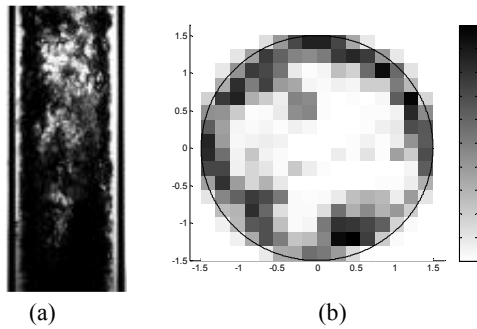


Fig. 5. (a) High speed camera result and (b) WMS result for  $j_\ell = 0.3$  m/s and  $j_g = 6.0$  m/s.

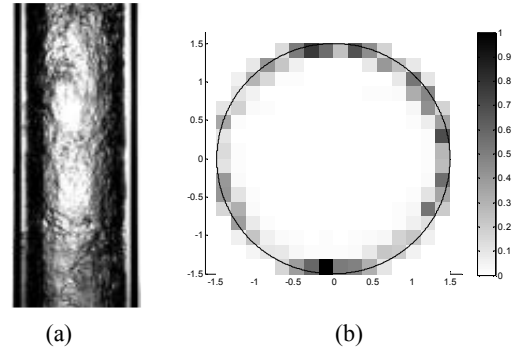


Fig. 6. (a) High speed camera result and (b) WMS result for  $j_\ell = 0.3$  m/s and  $j_g = 20.0$  m/s.

러딩 현상을 확인할 수 있다. 고속카메라의 결과를 보면  $j_g$ 가 약 5.0 m/s 이상에서 플러딩 현상을 확인할 수 있다. 플러딩 현상에 도달하게 되면 발생한 기포들의 방해로 고속카메라 이미지만으로는 테일러 기포의 경계를 찾기가 어렵다. 하지만 단면에서 일어나는 이상 유동의 상 분포를 알 수 있으면 구분이 가능하다. WMS의 데이터를 이용하여 처언류를 2가지 기준으로 판별하였다. 첫 번째는 내부의 형태가 혼란스러운 경우이다. 내부의 혼란스러운 모습은 방해 파형 (disturbance wave)에 의해 설명할 수 있다.[18] 방해 파형은 평균 액막 두께의 약 5배 정도 되는 크기를 갖는 파형으로 처언류와 환상류에서 볼 수 있다. 두 번째 기준은 처언류에서는 환상류와는 다르게 관 중심으로 흐르는 기체 코어를 막는 파형이 관찰되는 경우이다. 이는 거대 파형(huge wave)이며 방해 파형과는 다르게 처언류에서만 관찰할 수 있는 현상이다.

기체 유량을 더 증가시키게 되면 기체는 빨라진 속도에 의해 액막에서 떨어진 액적을 이끌고 올라간다.

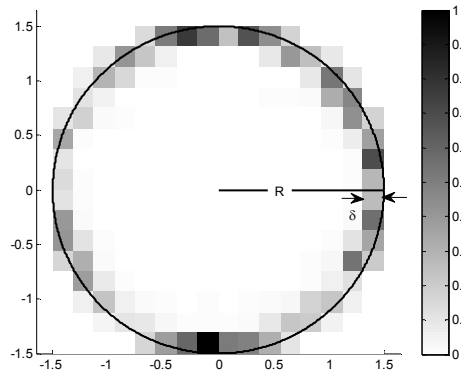


Fig. 7. Liquid film thickness

생성된 액적들이 기체상 내부로 들어가지만 환상류로의 판별이 가능한 기체 코어가 생성된다. Figure 6은  $j_\ell = 0.3$  m/s이고  $j_g = 20.0$  m/s일 때의 이미지이며, 단면 이미지를 통해 볼 때 기체 코어가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

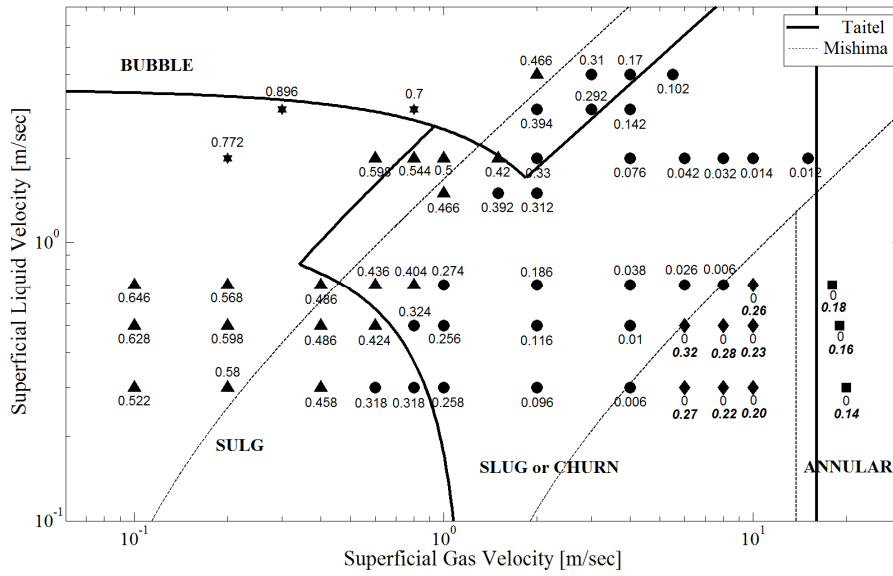


Fig. 8. Identification of two-phase flow regime.

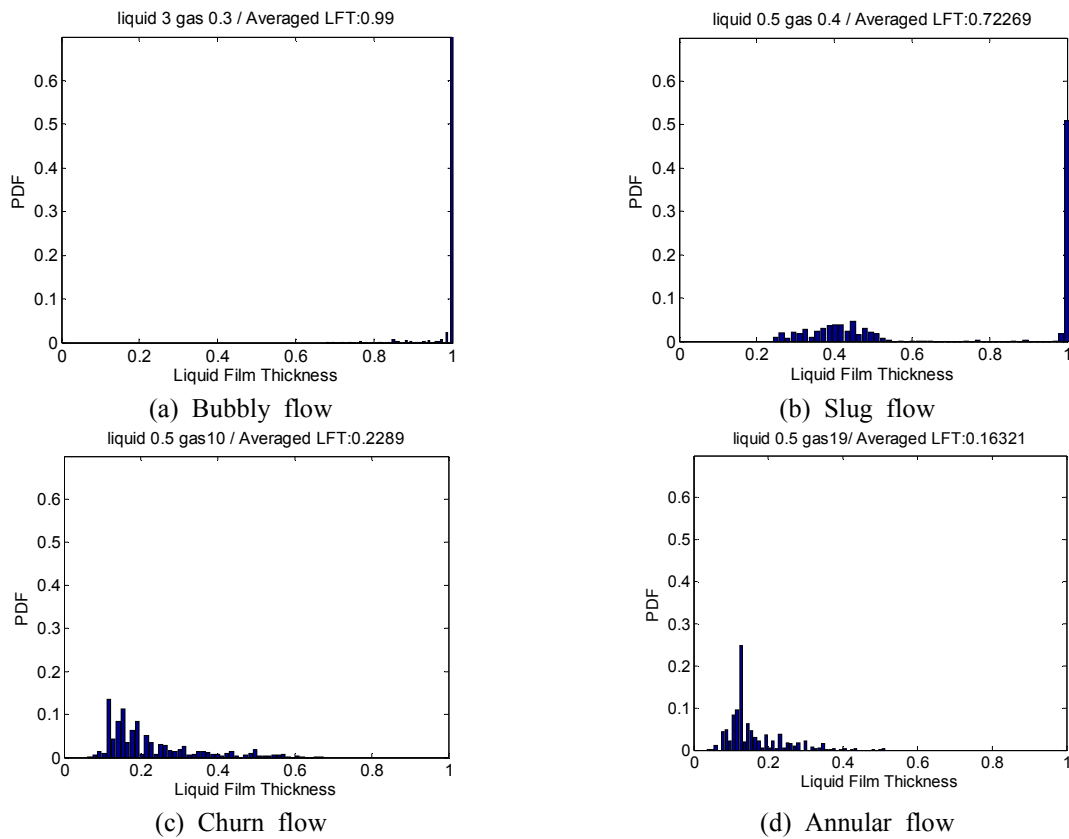


Fig. 9. Probability density function of averaged liquid film thickness for flow regime

4-2 액막 두께를 적용한 유동양식 판별

본 연구에서는 유동양식을 정량적으로 구분하기 위해서 무차원화 한 액막두께( $\delta^*$ ) 값을 적용하였다.  $\delta^*$ 는  $\delta/R$ 로 정의 하였다. 여기서  $\delta$ 는 액막 두께이고

R은 파이프의 반경이다.

Figure 8은 실험 결과를 종합하여 Taitel 외의 선도와 Mishima와 Ishii의 선도에 30 mm의 내경을 갖는 수직관의 이상유동영역을 판별한 그림이다. 실선은

Taitel 외의 선도이고 점선은 Mishima와 Ishii의 선도이며, 내부의 기호인 ★, ▲, ●, ◆, ■는 각각 기포류, 슬러그류, 처언류, 환상류를 나타내고 있다.

유동영역의 정량적 구분을 위해 Fig. 8에 나타난 것과 같이, 시간에 대한  $\delta^* = 1(\delta_{full})$ 이 되는 즉, 액막이 파이프 단면 전체를 차지하는 경우의 확률을 적용하였다. 본 연구에서는  $\delta_{full} \geq 0.7$ 인 영역은 기포류,  $0.4 \leq \delta_{full} < 0.7$ 인 영역은 슬러그류,  $0 < \delta_{full} < 0.4$ 인 영역은 슬러그류와 처언류의 경계,  $\delta_{full} = 0$ 인 영역은 처언류와 환상류인 것으로 구분하였다. 위 조건에 해당하는 전형적인 유동영역에 대한 예를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 유동 양식에 따라 액막이 파이프 단면 전체를 차지하는 비율이 달라지고 있음을 알 수 있다. 그런데 처언류와 환상류인 경우 기체의 속도가 액체의 속도보다 상대적으로 크기 때문에 액막이 파이프의 단면 전체를 차지 할 수 없다. 그래서 처언류와 환상류를 구분하기 위해서 시간에 대한 액막 두께의 평균값( $\bar{\delta}^*$ )으로 이용하였다. 이 값은 Fig. 8에서 진한 기울임 글꼴로 나타내었다. 즉  $\bar{\delta}^* \geq 0.2$ 인 경우는 처언류로 정의 하였고  $\bar{\delta}^* < 0.2$ 인 영역은 환상류로 구분하여 나타내었다. 본연구의 실험 결과는 Taitel 외의 선도와 대체적으로 잘 일치함을 확인 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 각 이상유동영역의 특징 및 천이경계에서의 특징 파악을 위한 기초 연구로서, 30 mm의 내경을 갖는 실험 루프에 고속 카메라와 WMS를 설치하여 실험을 진행하였다. 그리고 실험을 통해 얻은 유동영역 가시화 결과를 검증하기 위해 수직상향 이상유동의 대표적 선도인 Taitel 외[2]와 Mishima와 Ishii[3]의 이상유동선도와 비교하였다. 실험 결과 값은 전체적인 선도의 모습과 크게 다르지 않음을 확인할 수 있었다. 특히 유동영역을 정량적으로 판별하기 위하여 WMS 데이터를 이용하여 액막 두께가 시간에 대해 파이프의 한 단면 전체를 차지하는 경우의 비율을 적용하였다. 대체적으로 실험 결과는 Taitel 외의 선도와 잘 일치하는 것을 확인 하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2013학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

1. Hewitt, G. F. and Roberts, D. N.: "Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flow photography", United Kingdom Atomic Energy Authority Report AERE-M 2159 (1969)
2. Taitel, Y., Barnea, D., Dukler, A. E.: "Modeling flow pattern transition for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes", J. AIChE., 26, pp.345-354 (1980)
3. Mishima, K. and Ishii, M.: "Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes", Int. J. Heat Mass Transfer, 27, pp.723-736 (1984)
4. Wallis, G. B.: "One-dimensional two-phase flow: Chapter 7", McGraw-Hill, New York 11 (1969)
5. Hinze, J. O.: "Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes", AIChE., 1, pp.289-295 (1955)
6. Brodkey, R. S.: "The phenomena of fluid motion", Addison-Wesley Press (1967)
7. Govan, A. H., Hewitt, G. F., Richter, H. J., Scott, A.: "Flooding and churn flow in vertical pipes", Int. J. Multiphase Flow, 17, pp.27-44 (1991)
8. Jayanti, S. and Hewitt, G. F.: "Prediction of the slug-to-churn flow transition in vertical two-phase flow", Int. J. Multiphase Flow, 18, pp.847-860 (1992)
9. Spedding, P. L., Woods, G. S., Raghunathan, R. S., Watterson, J. K.: "Vertical two-phase flow Part 1: Flow regimes", I. Chem. E., 76, pp.612-619 (1998)
10. Mossis, R. and Griffith, P.: "Entrance effects in a two-phase slug flow", J. Heat Transfer, 84, pp.29-38 (1962)

11. Nicklin, D. J. and Davidson, J. F.: "The onset of instability in two-phase slug flow", Inst. Mech. Engr., Proc. of Symp. on Two-Phase Flow, Paper 4 (1962)
12. Turner, R. G., Hubbard, M. G., Dukler, A. E.,: "Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquid from gas wells", J. Petroleum Tech., 21, pp.1475-1482 (1969)
13. Prasser, H. -M., Bottger, A., Zschau, J.: "A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows", Flow Measurement and Instrumentations, pp.111-119 (1998)
14. Prasser, H. -M., Scholz, D., Zippe, C.: "Bubble size measurement using wire-mesh sensors", Flow Measurement and Instrumentations, pp.299-312 (2001)
15. Prasser, H. -M., Krepper, E., Lucas, D.: "Evolution of the two-phase flow in a vertical tube-decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors", Int. J. Therm Sci, pp.17-28 (2002)
16. Ishii, M.: "One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes", ANL Report, ANL-77-47 (1977)
17. Hibiki, T. and Ishii, M.: "One-dimensional drift-flux model for two-phase flow in a large diameter pipe", Int. J. Heat Mass Transfer, 46, pp.1773-1790 (2003)
18. Hewitt, G. F. and Hall-Taylor, N. S.: "Annular two-phase flow", Pergamon Press. (1970)
19. Wang, K., Bai, B., Cui, J., Ma, W.: "A physical model for huge wave movement in gas-liquid churn flow", Chemical Engineering Science, 79, pp.19-28 (2012)
20. Chen, X. T. and Brill, J. P.: "Slug to churn transition in upward vertical two-phase flow", Chemical Engineering Science, 52, pp.4269-4272 (1997)