

## 기체주입노즐의 내부유동양식의 구분

김 주 연\* · 이 상 용\*\*  
(1999년 8월 16일 접수)

### Identification of Internal Flow Pattern in Effervescent Atomizers

Joo Youn Kim and Sang Yong Lee

**Key Words :** Effervescent Atomizer(기체주입노즐), Two-Phase Flow Pattern(2 상유동양식), Bubbly Flow(기포류), Intermittent Flow(간헐류), Annular Flow(환상류)

#### Abstract

An experimental study was conducted to examine the internal flow patterns inside the mixing chamber of effervescent atomizers. The mixing chamber has the rectangular cross section (8mm × 2mm) and made of transparent acrylic plate for flow visualization. The parameters tested were the air/liquid ratio (ALR), injection pressure, and the nozzle orifice diameter. Three different flow regimes were observed; bubbly, annular, and intermittent flows. In the bubbly flow regime, the discharged mixture was disintegrated into drops through the bubble expansion and the ligament breakup. On the other hand, in the annular flow regime, the liquid annulus was disintegrated into small drops by the aerodynamic interaction between the phases due to the high relative velocities between the gas and the liquid. In the intermittent flow regime, the bubble-expansion/ligament-disintegration mode and the annulus-disintegration mode appeared alternatively. The correlations representing the transition criteria between the two-phase flow patterns within the mixing chamber were proposed based on the drift-flux models.

#### 기호설명

$ALR$	: 기체와 액체의 질량유량비(= $\dot{m}_g / \dot{m}_f$ )	$\dot{m}_f$	: 액체 질량유량 [kg/s]
$A_c$	: 혼합실 단면적 [ $m^2$ ]	$\Delta P_c$	: 분사 압력(= $P_c - P_{env}$ ) [Pa]
$C_0$	: 분포변수(distribution parameter)	$P_c$	: 혼합실 압력 [Pa]
$D_c$	: 혼합실 수력직경 [m]	$P_{env}$	: 주위기체 압력 [Pa]
$D_o$	: 노즐 출구직경 [m]	$Q_g$	: 기체 체적유량 [ $m^3/s$ ]
$g$	: 중력 가속도 [ $m/s^2$ ]	$Q_f$	: 액체 체적유량 [ $m^3/s$ ]
$h$	: 사각유로의 높이 [m]	$SMD$	: Sauter mean diameter [m]
$j$	: 겉보기속도(= $j_f + j_g$ ) [m/s]	$u_g$	: 기체 속도 [m/s]
$j_g$	: 기체 겉보기속도 [m/s]	$u_{gj}$	: 드리프트 속도(drift velocity) [m/s]
$j_f$	: 액체 겉보기속도 [m/s]	$u_f$	: 액체 속도 [m/s]
$\dot{m}_g$	: 기체 질량유량 [kg/s]	$u_r$	: 상대 속도(= $u_g - u_f$ ) [m/s]
		$w$	: 사각유로의 폭 [m]

#### 그리스문자

$\alpha$	: 기공률(void fraction)
$\delta$	: 액막두께(liquid film thickness) [m]
$\mu_f$	: 액체 점도 [kg/m·sec]
$\rho_g$	: 기체 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]

\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : e-hyunny@cais.kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3066 FAX : (042)869-8207

- $\rho_f$  : 액체 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\sigma$  : 표면 장력 [kg/s<sup>2</sup>]
- $\tau_i$  : 계면 전단응력 [Pa]
- $\tau_w$  : 벽면 전단응력 [Pa]

1. 서론

2-유체 미립화기 중의 하나인 기체주입노즐(effervescent atomizer)은 Fig. 1 과 같이 액체 유로에 기체를 직접 주입시켜 2상 유동을 형성, 분사 시키는 장치로서 Lefebvre 와 Wang<sup>(1)</sup>에 의해 처음으로 제안되었다. 이는 감압비등노즐(flash atomizer)의 장점을 수용하면서도 분무특성(기포의 생성)을 조절하기가 어렵다는 단점을 개선한 형태의 노즐이라고 할 수 있다.

기체주입노즐에 대한 기존의 연구로는 분사조건<sup>(1-3)</sup>(분사압력, 기체와 액체의 유량비(air-to-liquid ratio, ALR), 분사유량), 노즐의 기하학적 형상,<sup>(4)</sup> 분사액체 물성치<sup>(5,6)</sup> 등의 변화에 따른 미립화 성능에 관한 것들이 있다.

반면에 기체주입노즐의 미립화 기구(atomization mechanism)를 살펴보기 위한 연구들도 수행되었다.<sup>(3,7)</sup> 이러한 연구들은 혼합실(mixing chamber) 내부의 2상유동양식에 따라 미립화 기구가 변하고 있음에 주목하고 기체주입노즐의 2상유동양식과 미립화 기구의 상관관계를 밝히는데 주력하고 있다. Whitlow 와 Lefebvre<sup>(3)</sup>는 노즐내부유동의 가시적 관찰을 통해 ALR 이 증가하면서 노즐내부유동이 기포류(bubbly flow), 천이류(transition flow), 환상류(annular flow)로 변함을 관찰하였다. Santangelo 와 Sojka<sup>(7)</sup>는 홀로그래피(focused image hologram)를 이용하여 노즐출구에서의 미립화 특성을 살펴보았는데 낮은 ALR 에서는 기포가 압력강하에 의해 팽창하면서 액체를 미립화 시키는 기포팽창(bubble

expansion) 모드가 나타나는 반면, ALR 이 증가하면 노즐출구 중심부를 흐르는 빠른 속도의 기체가 환상형 액막을 미립화 시키는 트리(tree) 모드가 나타남을 밝혔다. 이러한 미립화 기구의 변화는 노즐 내부 2상유동양식 변화에 따른 것임을 쉽게 유추할 수 있다. 즉, 노즐 내부유동이 기포류인 경우는 기포팽창에 의한 미립화가, 환상류인 경우는 트리 모드에 의한 미립화가 나타나게 된다. Chin 과 Lefebvre<sup>(8)</sup>는 이를 주목하고 기체주입노즐의 노즐출구에서의 유동양식을 살펴보았다. 즉, 수평 및 수직유동에 대한 기존의 2상유동양식 선도를 이용하여 분사조건에 따른 기체주입노즐의 노즐 출구에서의 2상유동양식을 살펴보았으나 아직은 정성적인 결과로서만 의미가 있음을 언급하고 있다.

이러한 연구들을 종합해보면 기체주입노즐의 미립화 기구 해석을 위해서는 우선, 혼합실 내부 2상유동양식의 구분이 필수적이며, 이에 따른 미립화 특성 파악을 통해 노즐내부유동에 근거한 미립화 기구 해석이 요구된다고 할 수 있다. 그러나 기체주입노즐과 같은 미세유로에서 입구효과(entrance effect)를 고려한 2상유동양식 구분에 대한 연구결과는 아직 없다. 따라서 본 연구에서는 우선, 기체주입노즐의 혼합실 내부 2상유동양식과 미립화 기구의 연관성을 살펴보았다. 그리고 노즐 내부의 2상유동양식 구분을 위해 미세유로에 대한 기존의 연구결과를 검토하고 입구효과를 고려한 실험적 보정계수의 도입을 통해 혼합실 내부 2상유동양식을 예측하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

기체주입노즐의 내부유동양식 및 미립화 특성

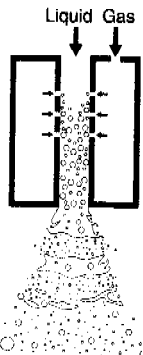


Fig. 1 Typical structure of effervescent atomizer

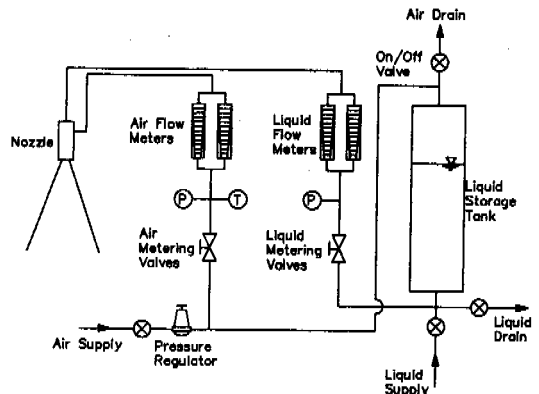


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

을 살펴보기 위한 실험장치는 Fig. 2와 같다. 분사액체는 물을 사용하였고 기체는 공기를 사용하였다. 분사액체는 정압기(pressure regulator)를 거친 압축공기를 이용하여 가압을 하는데 가압된 물은 미터링 밸브(metering valve)와 유량계를 거쳐 노즐로 유입된다. 또한 기체도 동일한 압축 공기 공급원으로부터 미터링 밸브와 유량계를 거친 후 노즐로 유입된다. 실험에 사용된 공기 유량계는 각각 1, 12, 50 l/min의 유량범위까지 측정할 수 있는 3종류로서 Dwyer사의 부유식(float) 유량계이며, 병렬로 연결되어 있다. 유량계는 버블미터를 사용하여 보정하였다. 액체유량 측정을 위하여 사용된 유량계는 각각 1.2, 7 l/min의 유량범위까지 측정할 수 있는 Dwyer사의 부유식(float) 유량계이며 질량측정법을 이용해 보정하였다. 실험에 사용한 변수들에 대한 불확실성 해석은 Kline<sup>(9)</sup>이 제안한 방법을 사용하여 수행하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

기체주입노즐은 혼합실 내부유동의 가시화를 위해 아크릴로 제작하였으며 개략도는 Fig. 3과 같다. 두께 2 mm의 황동판(brass plate)의 양면에 두께 12 mm의 아크릴을 고정시켜 내부유동을 살펴볼 수 있도록 하였으며 사각형태의 유로단면(8mm × 2mm) 위로 균일한 크기의 기포를 만들어 주기 위해 20 μm의 평균 공극크기(porosity)를 가지는 Mott사의 원판형 다공금속판을 통해 기체가

**Table 1 Summary of estimated uncertainties**

Primary quantities		Derived quantities	
Parameters	Uncertainties	Parameters	Uncertainties
$Q_f$	± 4 %	$\dot{m}_f$	± 4 %
$Q_g$	± 4 %	$\dot{m}_g$	± 6.4 %
$P_c$	± 5 %		

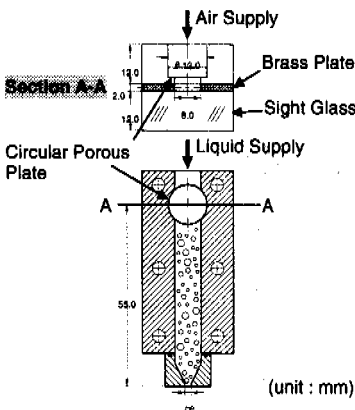


Fig. 3 Transparent atomizers used in experiments

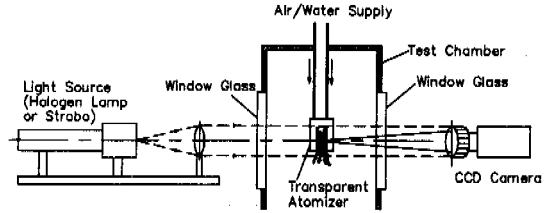


Fig. 4 Optical setup for flow visualization of internal flow pattern and atomization mechanism

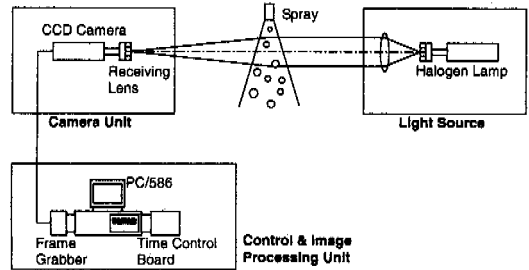


Fig. 5 Schematic diagram of drop/particle sizer using the image processing method

**Table 2 Test ranges**

Injection Pressure [bar]	2, 3, 4
Nozzle Orifice Diameter [mm]	1.2, 1.6, 2.0
Liquid Flow Rate [g/s]	6.6 ~ 66.5
Gas Flow Rate [g/s]	0.01 ~ 1.5
ALR	0.0006 ~ 0.19

유입되도록 제작하였다. 노즐출구 오리피스 직경  $D_o$ 는 1.2, 1.6, 2.0 mm 등 3가지를 준비하였다.

가시화 장치는 Fig. 4와 같이 크게 광원, CCD 카메라, 컴퓨터로 구성되며 스트로보 광원이 순간적으로 발광(10~20 μs)하면 CCD 카메라를 이용해 순간상을 얻고 이를 컴퓨터에 저장한다.

영상처리기술을 이용한 입경측정장치는 V-Tek사의 PMAS(Particle Motion Analysis System, MX-II)를 사용하였으며, 그 구성은 Fig. 5와 같이 광원(light source), CCD 카메라와 데이터처리 장치인 PC/586 등 세 부분으로 되어 있다. 광학장치의 배열은 광원을 측정부 뒤쪽에 설치하는 후방조명방식(back-illumination method)을 사용하였다. CCD 카메라(TM-7CN, Pulnix)는 영상 셀(image cell)의 크기가 8.4 μm × 9.8 μm 이고 해상도는 640 × 480 이다.

2.2 실험조건

본 연구에서 변화시킨 변수들의 범위는 Table 2에 나타내었다. 혼합실 단면적을 일정하게 유지하고 분사압력  $\Delta P_c (=P_c - P_{atm})$ 과 노즐출구직경을 변화

시키면서 혼합실 내부의 2상유동양식 및 미립화 특성을 살펴보았다. 실험은 각 분사압력의 조건하에서 ALR을 변화시키는 방식으로 행하여 졌으므로 액체유량이 증가하면 기체유량은 자연히 감소한다.

### 3. 실험결과 및 해석

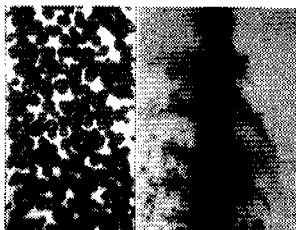
#### 3.1 노즐 내부 및 외부 유동특성

혼합실 내부의 2상유동양식이 미립화 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 우선 가시화 실험을 수행하였다. Fig. 6, 7은 가시화 결과로서 노즐 내부 및 외부 유동특성 관계의 전형적인 예를 나타내고 있다. 혼합실 내부유동양식을 살펴보면 ALR이 증가함에 따라 기포류(bubbly flow), 간헐류(intermittent flow), 환상류(annular flow) 등 3가지 유동양식이 나타나고 있음을 알 수 있다.

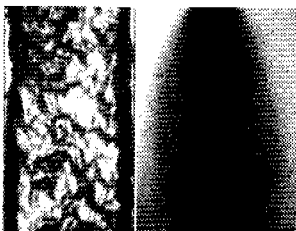
이에 따른 노즐 외부의 미립화 특성을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 6(a)의 기포류에서는 노즐출구의 오리피스를 기포와 액체가 번갈아 통과하게 된다. 기포가 통과하는 경우는 압력강하에 의해 기포가 팽창하면서 미립화 하기 때문에 많은 수의 작은 액적들이 형성된다. 그러나 액체가 통과하는 경우는 분사압력이 낮은 경우에 단공노즐에서 분출되는 액체가 정지된 주위기체와의 상호작용에 의해 미립화되는 전형적인 액주의 미립화 현상으로 볼

수 있으며, 이러한 액주 미립화에 대해 Rayleigh나 Weber 이론을 살펴보면 미립화 된 액적은 노즐출구직경 정도(order)의 크기를 가진다.<sup>(10)</sup> 이러한 기포류에서의 미립화 특성은 Santangelo와 Sojka<sup>(7)</sup>가 설명하는 기포팽창(bubble expansion) 모드, Whitlow와 Lefebvre<sup>(3)</sup>의 가시적 관찰을 통한 큰 액적의 존재에 대한 언급에서도 살펴볼 수 있다. Fig. 6(b)의 환상류에서는 전형적인 내부혼합형 공기총돌 미립화기(conventional internal air-blast atomizer)의 특성을 보인다.<sup>(8)</sup> 상대적으로 많은 유량의 기체는 노즐출구의 중앙에서 빠른 속도로 분사되고 분사액체는 환형 액막(annular sheet)의 형태로 분사되면서 두 상간의 상대 속도차에 의한 운동량 교환에 의해 미립화가 진행되며 미세한 액적들이 생성된다.

간헐류는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 기포류에서 환상류로 천이해가는 중간단계로서 불안정한(unstable) 유동특성을 보인다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 모두 동일한 분사조건을 유지시킨 상태의 내부유동 및 미립화 특성을 나열한 것이지만 (a)와 (b) 4장의 그림들이 순서대로 대응이 되는 것은 아니다. 단지, Fig. 7(b)의 ①은 기포류, ④는 환상류의 미립화 특성을 나타내며 ②, ③은 중간적인 형태를 나타내고 있다. 이는 Fig. 8에서의 개략도와 같이 노즐출구에서 기포류와 환상류가 반복적으로 나타나는 것으로 볼 수 있으며 따라서 이에 대응하는 미립화 특성도 기포류와 환상류 두 양식의 혼합된 형태가 된다.

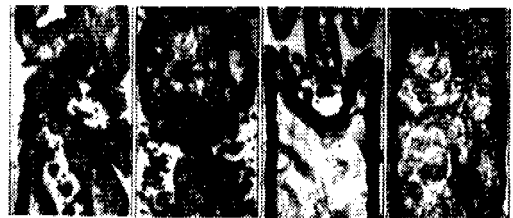


Internal flow External flow  
(a) ALR = 0.003



Internal flow External flow  
(b) ALR = 0.111

Fig. 6 Internal/external flow characteristics in bubbly and annular flow regimes. [ $\Delta P_c=4$  bar,  $D_o=1.6$  mm]



(a) Variation of internal flow pattern in the intermittent flow regime



(b) Variation of external flow characteristics in the intermittent flow regime

Fig. 7 Internal/external flow characteristics in intermittent flow regime. [ $\Delta P_c=4$  bar,  $D_o=1.6$  mm, ALR=0.017]

이는 입경분포 측정결과에서도 알 수 있다. Fig. 9는 Fig. 6, 7의 분사조건에서 측정된 입경분포인

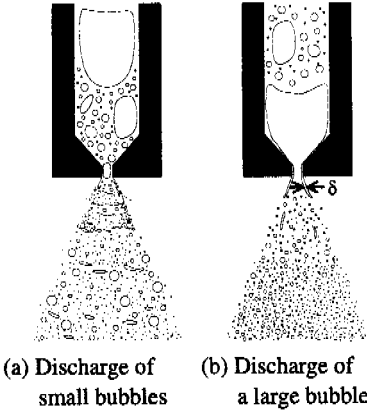
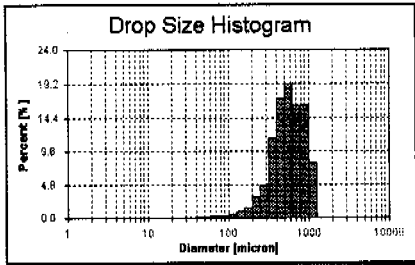
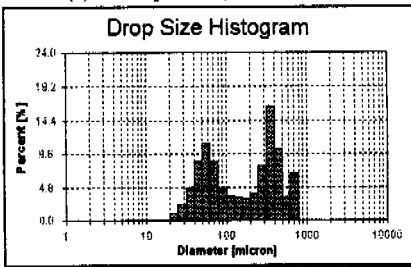


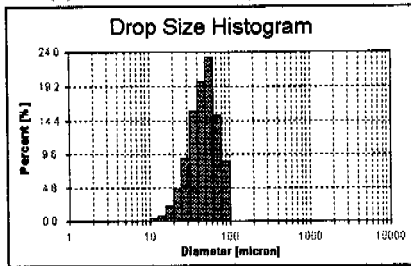
Fig. 8 Illustration of breakup pattern change with different bubble size inside the nozzle in intermittent flow regime



(a) Bubbly flow ( $ALR = 0.003$ )



(b) Intermittent flow ( $ALR = 0.017$ )



(c) Annular flow ( $ALR = 0.111$ )

Fig. 9 Drop size distribution with ALR. [ $\Delta P_c=4$  bar,  $D_c=1.6$  mm]

데 대략적으로 기포류 영역(Fig. 9(a))에서는 대부분 100  $\mu\text{m}$  이상의 입자들이, 환상류 영역(Fig. 9(c))에서는 대부분 100  $\mu\text{m}$  이하의 입자들이 존재함을 알 수 있다. 간헐류 영역(Fig. 9(b))에서는 두 양식의 혼합된 형태로 100  $\mu\text{m}$  이상과 이하의 입자들이 함께 존재해 두개의 정점(double peak)을 가지는 입경분포를 보여주게 된다. 즉, Fig. 9(b)는 크기가 전혀 다른 두 부류의 액적(액주분열에 의한 큰 액적과 환형 액막분열에 의한 작은 액적)이 공존하기 때문에 두개의 정점을 가지는 입경분포가 나타나는 것이다. 여기서 한가지 언급할 점은 Fig. 9는 측정된 입경분포를 체적분포로 나타내고 있다는 것이다. 예컨대 Fig. 9(a)의 기포류의 경우 100  $\mu\text{m}$  이하의 액적들이 존재하지 않는 것이 아니라 체적분포로는 상대적으로 아주 작게 나타난다는 점이다. 다시 말해서 Fig. 9(a)-(c)에서 전체 측정된 액적의 개수 중 100  $\mu\text{m}$  이하의 액적이 차지하는 비율은 각각 81.50 %, 98.97 %, 100.0 %로 나타나고 있으며 기포류의 경우에도 실제로는 기포팽창에 의해 미립화 된 많은 수의 작은 액적들이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 참고로 Fig. 9(a)-(c)의 단순평균입경( $D_{10}$ )은 각각 82.7  $\mu\text{m}$ , 38.3  $\mu\text{m}$ , 23.6  $\mu\text{m}$  이고 SMD는 각각 439.4  $\mu\text{m}$ , 96.1  $\mu\text{m}$ , 41.2  $\mu\text{m}$  이다.

결론적으로 미량의 기체를 사용하는 기포류 영역에서도 많은 수의 작은 액적들을 얻을 수 있지만 액주 미립화에 의한 소수의 큰 액적들이 존재하며, 미세한 액적들을 얻기 위해서는 노즐 내부 유동은 환상류가 되어야 함을 알 수 있다.

### 3.2 혼합실 내부의 2상유동양식 예측

3.1 절에서 살펴본 바와 같이 혼합실 내부의 2상유동양식에 따라 미립화 특성이 변화하기 때문에 미립화 기구를 해석하고 미립화 성능을 예측하기 위해서는 분사조건 및 노즐 형상의 변화에 따라 혼합실 내부의 2상유동양식을 적절히 예측할 수 있어야 한다.

2상유동양식은 2상유동 열전달 분야에서 많은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 주로 10 mm 이상의 직경을 가지는 원형관에 대해서 집중적으로 수행되었는데, 최근에는 전자장치 냉각, 고효율 밀집형 열교환기 등의 설계를 위해 미세유로에서 2상유동양식에 대한 연구도 진행되고 있다.

미세유로에서의 2상유동양식에 대한 연구들은 주로 5 mm 이하 직경의 원형관이나 5 mm 이하의 간극(gap)을 가지는 사각유로에 대해 수행되고 있다. 미세유로에서는 표면장력 및 마찰 압력강하의

영향이 크게 증가하기 때문에 10 mm 이상의 큰 수력직경을 가지는 관내유동에 비해 중력에 의한 영향을 상대적으로 무시할 수 있는 특성이 있다. 이를 이용해 Galbiati와 Andreini<sup>(11)</sup>는 무중력(microgravity) 하에서의 2상유동양식을 미세유로에서의 2상유동양식 실험을 통해 예측하고자 하였다. 이는 기체주입노즐과 같은 미세유로의 경우 유동방향(수평/수직)에 대한 영향을 크게 고려하지 않아도 됨을 의미한다. 이는 중력의 영향을 무시할 수 없는 10 mm 이상 원형관의 경우에는 유동방향이 수직인가 수평인가에 따라 유동양식이 달라지고 이에 따라 천이기준도 바뀌게 되지만 미세유로의 경우에는 중력의 영향이 무시될 수 있기 때문이다.

그러나 이러한 미세유로의 결과들을 직접적으로 적용하기에는 문제점이 있다. 이는 기존의 결과들이 유동이 충분히 발달한(fully developed) 상태에서 실험한 결과이므로 기체주입노즐과 같이 혼합실 길이가 짧아 유동이 충분히 발달되기 전에 분사되는, 즉, 입구효과(entrance effect)가 고려되는 경우와는 차이가 있기 때문이다. 또한 입구효과를 고려한 2상유동양식 실험은 아직 연구결과가 없다. 따라서 본 연구에서는 기체주입노즐과 같은 한정된 크기의 유로에 대하여 미세유로에서의 2상유동양식에 대한 기존의 연구 결과들을 검토하고 입구효과를 고려한 실험적 보정계수의 도입을 통해 혼합실 내부 2상유동양식을 예측하고자 한다. 아울러 실험에는 혼합실 내부유동의 가시화를 위해 사각유로를 사용하였지만 실제 노즐은 대부분이 원형관 형태를 사용하기 때문에 제시된 결과가 이러한 형상을 가지는 경우에 대해서도 적용이 가능해야 하며 이에 대한 타당성도 살펴보았다. 참고로 미세유로에 대해 본 연구에서 조사한 기존의 연구 결과들을 Table 3에 나타내었다.

3.2.1 기포류에서 간헐류로의 천이조건

미세유로에서 기포류의 존재한계 즉, 기포류에서 간헐류(슬러그류/처언류)로의 천이조건에 대한 연구는 Xu 등,<sup>(12)</sup> 이한주와 이상용,<sup>(13)</sup> Wilmarth와

Ishii<sup>(14)</sup>에 의해서 수행되었다. 특히, Mishima와 Ishii<sup>(15)</sup>는 10 mm 이상의 직경을 가지는 원형관의 수직유동에 대한 기포류의 천이조건을 제시하였는데 Wilmarth와 Ishii<sup>(14)</sup>는 미세 사각유로의 수직 유동에 대해 같은 조건식을 적용하면서 실험결과와 잘 일치하고 있음을 밝히고 있다. 이는 기포류의 천이조건이 유로의 형태에 관계없이 유사한 조건식의 사용이 가능함을 의미하고 있다. 이러한 연구들은 모두 기포류의 천이조건으로 드리프트-플럭스(drift-flux) 모델을 사용하고 있다. 드리프트-플럭스 모델에서 기체속도  $u_g$ 와 걸보기속도(volumetric flux)  $j$ 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$u_g = \frac{j_g}{\alpha} = C_0 j + u_{gj} \tag{1}$$

식 (1)에서  $u_{gj}$ 는 드리프트 속도(drift velocity)로서 기체 속도와 걸보기 속도와의 차이로 다음과 같이 정의되며

$$u_{gj} = u_g - j \tag{2}$$

$C_0$ 는 분포변수(distribution parameter)로서 Ishii<sup>(16)</sup>는 기포류에 대해 다음의 식으로 제시하였다.

$$C_0 = \begin{cases} 1.2 - 0.2\sqrt{\rho_g/\rho_f} & : \text{원형관} \\ 1.35 - 0.35\sqrt{\rho_g/\rho_f} & : \text{사각유로} \end{cases} \tag{3}$$

기포류의 상한조건을 구하기 위하여 식 (1)에서 기공률  $\alpha$  값으로 기포류에서 존재할 수 있는 최대기공률  $\alpha_{max}$ 를 사용하고  $j$  대신에 각 상의 걸보기 속도  $j_p j_g$ 로 정리하면

$$j_f = \left( \frac{1}{\alpha_{max} C_0} - 1 \right) j_g - \frac{1}{C_0} u_{gj} \tag{4}$$

Table 3 List of literatures surveyed in this study

Author	Orientation	Shape	Diameter or channel gap size [mm]	Criteria	
				Bubbly	Annular
Xu et al. <sup>(12)</sup>	vertical upward	rectangular channel	0.3, 0.6, 1.0	0	0
Lee and Lee <sup>(13)</sup>	horizontal	rectangular channel	0.4, 1.0, 2.0, 4.0	0	X
Wilmarth and Ishii <sup>(14)</sup>	horizontal/vertical	rectangular channel	1.0, 2.0	0	0
Lowry and Kawaji <sup>(19)</sup>	vertical upward	rectangular channel	0.5, 1.0, 2.0	X	0
Galbiati and Andreini <sup>(11)</sup>	horizontal	circular tube	1	X	0

를 얻는다. 식 (4)에서 기포류가 존재할 수 있는  $\alpha_{max}$ 와  $u_{gj}$ 를 결정한다면 기포류에서 간헐류(슬러그류/처언류)로 천이될 때의  $j_f$ 와  $j_g$  관계를 구할 수 있을 것이다.

기포류에서  $u_{gj}$ 는 Wilmarth와 Ishii<sup>(14)</sup>는 원형관의 경우에 대해 다음식을 사용하였으며

$$u_{gj} = \sqrt{2} \left[ \frac{\sigma g (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{0.25} (1 - \alpha_{max})^{0.75} \quad (5)$$

Xu 등<sup>(12)</sup>은 사각유로에 대해 다음 식을 사용하였다.

$$u_{gj} = 0.35 \sqrt{\frac{2(h+w)}{\pi}} g \quad (6)$$

기포류가 존재할 수 있는  $\alpha_{max}$ 는 다음과 같다. 기체유량(기공률)이 증가하면 기포가 응집(agglomeration) 및 합착(coalescence)이 일어나는 빈도가 급격히 증가하는데 이로 인해 작은 기포들이 슬러그 기포 혹은 cap bubble로 바뀌게 되면서 슬러그류 혹은 처언류로 천이되는 것이다. 이 때, 기포의 응집 및 합착이 일어나지 않는 기공률을  $\alpha_{max}$ 로 정의한다. 이때의  $\alpha_{max}$  값으로 Griffith와 Wallis<sup>(17)</sup>는 0.18을, Taitel 등<sup>(18)</sup>은 난류변동(turbulent fluctuation)을 고려하여 0.25를, Mishima와 Ishii<sup>(15)</sup>는 실험 및 기하학적 해석을 통해 0.3을 제시하고 있다. 이와 같이  $\alpha_{max}$  값이 차이를 보이는 이유는 대부분의 실험이 가시적 관찰을 통해 기포류의 존재한계를 결정하기 때문에 어디까지를 기포류로서 정의할 것인가에 따라 달라지기 때문이다. 최종적으로 식 (4)에  $\alpha_{max}$  값을, 그리고  $u_{gj}$  값으로 원형관은 식 (5)를, 사각유로는 식 (6)을 대입하면 기포류의 존재한계를 구할 수 있다.

Fig. 10은 제시된 기포류의 천이기준을 기체주입노즐의 실험결과와 비교한 것이다. Fig. 10을 살펴보면  $\alpha_{max}$  값으로 0.3과 식 (5), (6)의 원형관과 사각유로에 적용되는  $u_{gj}$ 를 각각 적용한 결과(lines (c),(d)로부터 동일한 수력직경을 가질 때 유로형태가 기포류의 천이기준에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다. 이는 식 (5), (6)의  $u_{gj}$ 를 본 연구에 대해 구해보면 0.1 이하의 값을 가지는 반면 본 연구의  $j_f$ 와  $j_g$  값들은 대부분 1 m/s 이상이기 때문에 상대적으로  $u_{gj}$ 는 기포류의 천이기준에 중요한 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 반면에  $\alpha_{max}$  값의 선정은 기포류 천이기준에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그런데 Fig. 10(lines (a), (b), (d))

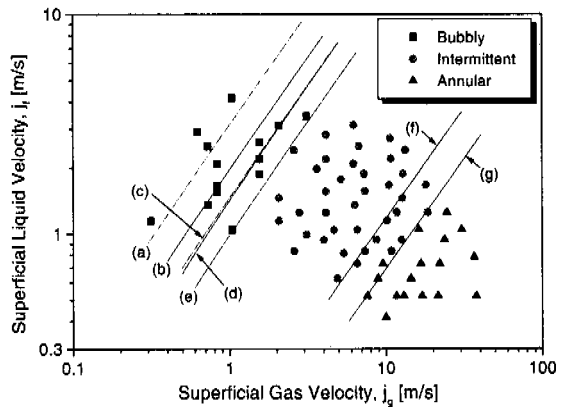
을 살펴보면 제시된 어느  $\alpha_{max}$  값을 사용해도 예측된 기포류의 존재 영역이 실험영역보다 작음을 알 수 있다. 이는 이들의 실험이 충분히 발달된(fully developed) 관 내 유동에서 수행되었음에 반해 혼합실 길이가 짧아 입구효과가 적용되는 본 연구의 실험결과와는 차이가 있기 때문이다. 즉, 혼합실 길이가 매우 짧기 때문에 제시된  $\alpha_{max}$  값보다 크더라도 기포의 응집 및 합착이 충분히 일어나기 전에 노즐 밖으로 분사되므로 기포류로 존재할 수 있는 것이다. 따라서 본 연구에서와 같이 입구효과를 고려하면 기포류가 유지될 수 있는  $\alpha_{max}$  값이 기존 연구결과보다 클 것으로 예측할 수 있다. 이 때 입구효과를 고려한  $\alpha_{max}$  값을 본 연구에 대해 실험적으로 결정하면 0.37이 된다.

결론적으로 Fig. 10과 같이 식 (4), (6)과  $\alpha_{max}$  값으로 0.37을 사용한 결과(line (e))는 실험결과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 기포류의 천이조건으로는 원형관에 대해서는 식 (4), (5)를, 사각유로에 대해서는 식 (4), (6)을 사용하고  $\alpha_{max}$  값은 0.37을 선택하면 된다.

### 3.2.2 간헐류에서 환상류로의 천이조건

미세유로에 대한 간헐류에서 환상류로의 천이 기준에 대한 연구는 Galbiati와 Andreini,<sup>(11)</sup> Xu 등,<sup>(12)</sup> Wilmarth와 Ishii<sup>(14)</sup> 그리고 Lowry와 Kawaji<sup>(19)</sup>에 의해서 수행되었다.

Lowry와 Kawaji<sup>(19)</sup>는 계면에서 기체와 액체의



Lines	$\alpha_{max}$	Channel shape	Flow regime
(a)	0.18 <sup>(17)</sup>	Rectangular	Bubbly flow
(b)	0.25 <sup>(18)</sup>	Rectangular	Bubbly flow
(c)	0.3 <sup>(15)</sup>	Round	Bubbly flow
(d)	0.3 <sup>(15)</sup>	Rectangular	Bubbly flow
(e)	0.37	Rectangular	Bubbly flow
(f)	-	Rectangular	Annular flow
(g)	-	Round	Annular flow

Fig. 10 Transition criteria between flow regimes

속도가 같다고 가정하고 벽면 전단응력에 의한 압력강하와 표면장력에 의한 힘의 평형이 깨지면 간헐유동에서 환상류로 천이한다고 보고 다음의 식을 제시하였다.

$$\frac{(1-\alpha)^3}{\alpha^2} = \frac{1}{2}(4-\pi)\frac{\mu_f j_f}{\sigma} \quad (7)$$

그러나 식 (7)은 두 상간의 속도가 같다고 가정함으로써 계면에서의 전단응력을 무시하고 있다는 점에서 기체주입노즐에 적용하기에는 의문이 있다. Galbiati와 Andreini,<sup>(11)</sup> Xu 등,<sup>(12)</sup> Wilmarth와 Ishii<sup>(14)</sup>는 환상류의 지배방정식으로부터 천이기준을 구했기 때문에 우선 이에 대해 알아보면 다음과 같다.

Fig. 11과 같이 관벽을 따라 액체가 흐르고 중심부에 기체가 흐르는 경우에 각 상에 대한 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$-\left(\frac{dp}{dz} + \rho_g g\right) = -\frac{\tau_i P_i}{\alpha A_c} \quad (8)$$

$$-\left(\frac{dp}{dz} + \rho_f g\right) = \frac{\tau_i P_i}{(1-\alpha)A_c} - \frac{\tau_w P_w}{(1-\alpha)A_c} \quad (9)$$

여기서  $P_i$ 는 기액 경계의 둘레길이(perimeter),  $P_w$ 는 벽면 둘레길을 의미한다. 식 (8), (9)에서 압력구배항을 소거하면

$$\frac{(\rho_f - \rho_g)g(1-\alpha)A_c}{P_w} = \tau_w - \frac{\tau_i \xi}{\alpha} \quad (10)$$

와 같이 되며 여기서  $\xi$ 와 비원형관의 동가 수력직경(equivalent hydraulic diameter)  $D_c$ 는

$$\xi \equiv \frac{P_i}{P_w} \quad (11)$$

$$D_c \equiv \frac{4A_c}{P_w} \quad (12)$$

로 정의된다. 기체상과 액체상의 둘레길이(perimeter) 비인  $\xi$ 는 원형관의 경우는  $\sqrt{\alpha}$ 의 값을 가지며 사각유로의 경우는 동가 수력직경  $D_c$ 를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\xi = 1 - \frac{D_c^2}{2A_c}(1-\alpha) \quad (13)$$

식 (10)에서 벽면에서의 전단응력(wall shear stress),  $\tau_w$  및 계면의 전단응력(interfacial shear stress)  $\tau_i$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_w = \frac{1}{2}f_w \rho_f u_f^2 = \frac{1}{2}f_w \rho_f \left(\frac{j_f}{1-\alpha}\right)^2 \quad (14)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2}f_i \rho_g u_g^2 = \frac{1}{2}f_i \rho_g \left(\frac{j_g}{\alpha} - \frac{j_f}{1-\alpha}\right)^2 \quad (15)$$

여기서 벽면마찰계수(wall friction factor)  $f_w$ 는

$$f_w = \begin{cases} 16Re_f^{-1} & Re_f < 2000 \\ 0.079Re_f^{-0.25} & Re_f \geq 2000 \end{cases} \quad (16)$$

$$Re_f = \frac{\rho_f j_f D_c}{\mu_f} \quad (17)$$

로 구할 수 있으며 계면마찰계수(interfacial friction factor)  $f_i$ 는 기공률의 함수로서 Wallis<sup>(25)</sup>는 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{f_i}{f_g} = 1 + 75(1-\alpha) \quad (18)$$

식 (18)에서 기체마찰계수  $f_g$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f_g = \begin{cases} 16Re_g^{-1} & Re_g < 2000 \\ 0.079Re_g^{-0.25} & Re_g \geq 2000 \end{cases} \quad (19)$$

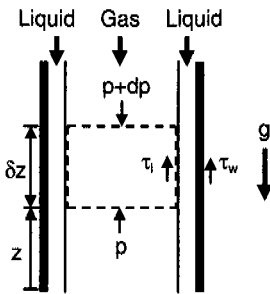


Fig. 11 Description of annular flow model within a rectangular channel



$$Re_g = \frac{\rho_g j_g D_c}{\mu_g} \quad (20)$$

최종적으로 식 (14), (15)를 식 (10)에 대입하면 기체와 액체의 겹보기 속도 및 기공률의 함수로서 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{(\rho_f - \rho_g)g(1-\alpha)A_c}{P_w} = \frac{1}{2} f_w \rho_f \left( \frac{j_f}{1-\alpha} \right)^2 - \frac{f_i \rho_g \xi}{2\alpha} \left( \frac{j_g}{\alpha} - \frac{j_f}{1-\alpha} \right)^2 \quad (21)$$

식 (21)에서 환상류가 시작될 때의 기공률을 결정하면 환상류로 천이될 때의 기체와 액체의 겹보기 속도의 관계를 구할 수 있다. Xu 등<sup>(12)</sup>은 환상류가 시작될 때의 기공률을 0.75의 상수로 가정하고, 이 값을 식 (21)에 대입하여 각 상간의 겹보기 속도의 관계를 구하였다. 이는 환상류로 천이할 때의 기공률이 상수라는 점에서 너무 단순화하고 있다. 반면에 Galbiati와 Andreini<sup>(11)</sup>, Wilmarth와 Ishii<sup>(14)</sup>는 환상류가 시작될 때의 기공률을 슬러그류/천연류에 대한 식 (1)의 드리프트 플럭스 모델에서 구하고 있다. 즉, 이들은 식 (1)과 식 (21)을 동시에 만족시키는 기공률과 겹보기 속도를 찾으면 되며, 이 조건이 환상류로 천이되는 조건이라고 설명하고 있다. 이 때, 식 (1)의  $u_{gj}$ 를 Galbiati와 Andreini<sup>(11)</sup>는 0으로 가정한데 비해 Wilmarth와 Ishii<sup>(14)</sup>는 다음의 식을 사용하였다.

$$u_{gj} = 0.35 \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_g)gD_c}{\rho_f}} \quad (22)$$

그러나 식 (22)의  $u_{gj}$ 는 그 값이 매우 작기 때문에 ( $u_{gj} < 0.2$ ) 본 연구에서도 0으로 가정하였으며 따라서 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{j_g}{\alpha} = C_0(j_f + j_g) \quad (23)$$

그런데 식 (23)에서 기공률을 구하기 위해서는 분포변수를 알아야 한다. Galbiati와 Andreini<sup>(11)</sup>는 실험적으로 구한 환상류의 천이조건으로부터 역으로 추적하여 분포변수를 구하였으나 10에서 50 기압의 범위에서 수행된 실험결과만을 맞추고 있기 때문에 이를 본 연구에 적용하기에는 의문이 있다.

반면에 Wilmarth와 Ishii<sup>(14)</sup>는 식 (3)의 Ishii<sup>(16)</sup>가 제시한 분포변수를 사용하였다. 최근에 Mishima와 Hibiki<sup>(21)</sup>는 분포변수에 대한 Kariyasaki 등<sup>(22)</sup>의 결과와 자신의 실험결과를 종합적으로 검토하고 혼합실 직경의 함수로서 다음의 식을 제시하고 있다.

$$C_0 = 1.2 + 0.5e^{-691D_c} \quad (24)$$

Fig. 10에는 본 연구에서 측정된 실험결과와 간헐류에서 환상류의 천이조건으로 식 (21), (23)과 분포변수로 사각유로에 대한 식 (3)(line (f)) 또는 원형관에 대한 식 (24)(line (g))를 사용한 결과를 비교한 것이다. Fig. 10을 살펴보면 line (g)가 실험결과와 좀 더 잘 일치하고 있지만 적용된 분포변수 값을 살펴보면 line (f)는 1.33, line (g)는 1.25로 그 차이가 크기 않다. 실제로 원형관 및 사각유로에 대한 분포변수의 실험결과를 살펴보면 1.2에서 1.4 사이에 존재하고 있으며<sup>(21,23)</sup> 이는 유로형태에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, Fig. 10의 line (f)와 line (g)의 차이는 유동양식의 가시적 판단에 따른 주관적인 오차 범위로 판단되며, 이를 고려하면 두 경우 모두 분포변수 값으로 사용할 수 있을 것이다. 단지, 식 (24)는 원형관 직경이 1에서 5 mm인 경우의 실험결과로부터 최소자승법(least square method)을 이용해 구한 것으로, 일반적인 기체주입노즐은 혼합실 단면이 원형이라는 점과 혼합실 직경에 따른 환상류의 천이조건을 찾을 수 있다는 점에서 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (21), (23), (24)를 간헐류로부터 환상류의 천이조건으로 제시하였다. 여기서 한가지 언급할 점은 기포류의 천이조건에서는 기체주입노즐의 경우에 입구효과를 고려해 실험적 보정을 하였지만 환상류의 천이조건에서는 이러한 실험적 보정을 하지 않더라도 실험 결과와 잘 일치하고 있다는 점이다. 이는 환상류의 경우에 기체유량이 상대적으로 매우 많아 기체 유입부에서부터 환상류의 형태로 진행되기 때문에 입구효과를 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

(1) 혼합실 내부 2상유동양식과 미립화 특성을 가시화 실험을 통해 살펴보았다. 혼합실 내부유동양식은 기포류, 간헐류, 환상류가 나타나며 기포류에서는 기포팽창 및 액주분열에 의한 미립화가, 환상류에서는 두 상간의 상대속도에 의한 미립화가, 간헐류에서는 두 유동양식의 혼합된 형태의

미립화가 나타난다. 이러한 미립화 특성은 입경분포 측정결과에도 나타나는데, 기포류에서는 대부분 100  $\mu\text{m}$  이상의 액적들이, 환상류에서는 대부분 100  $\mu\text{m}$  이하의 액적들이, 간헐류에서는 두 양식의 혼합된 형태로 100  $\mu\text{m}$  이상과 이하의 액적들이 함께 존재해 두 개의 정점을 가지는 입경분포를 보여주게 된다.

(2) 기체주입노즐의 운전조건에 따른 혼합실 2상유동양식을 예측하였다. 기포류에서 간헐류로의 천이조건은 드리프트 플럭스 모델과 입구효과를 고려해  $\alpha_{\text{max}}$  값으로 0.37을 사용하여 구할 수 있다. 간헐류에서 환상류로의 천이조건은 환상류에 대한 지배방정식과 드리프트 플럭스 모델에서 기공률을 구함으로써 구할 수 있다.

(3) 기체주입노즐의 혼합실 2상유동양식을 예측함으로써 이를 이용해 노즐내부 2상유동양식에 근거한 미립화 성능을 예측할 수 있는 기반을 마련하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업(98-0200-03-01-2)과 산학협력연구사업(98-2-09-04-01-2), 그리고 한국과학기술원 기관고유사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 특히, (주)V-Tek의 장비지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Lefebvre, A. H. and Wang, X. F., 1988, "Spray Characteristics of Aerated-Liquid Pressure Atomizers," *J. Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 4, pp. 293~298.
- (2) Roesler, T. C. and Lefebvre, A. H., 1989, "Studies on Aerated-Liquid Atomization," *Int. J. Turbo Jet-Engines*, Vol. 6, pp. 221~229.
- (3) Whitlow, J. D. and Lefebvre, A. H., 1993, "Effervescent Atomizer Operation and Spray Characteristics," *Atomization and Sprays*, Vol. 3, pp. 137~155.
- (4) Wang, X. F., Chin, J. S. and Lefebvre, A. H., 1989, "Influence of Gas-Injector Geometry on Atomization Performance of Aerated-Liquid Nozzles," *Int. J. Turbo Jet-Engines*, Vol. 6, pp. 271~279.
- (5) Buckner, H. N. and Sojka, P. E., 1991, "Effervescent Atomization of High Viscosity Fluids. Part I: Newtonian liquids," *Atomization and Sprays*, Vol. 1, pp. 239~252.
- (6) Lund, M. T., Sojka, P. E. and Lefebvre A. H., 1993, "Effervescent Atomization at Low Mass Flow Rates. Part I: The Influence of Surface Tension," *Atomization and Sprays*, Vol. 3, pp. 77~89.
- (7) Santangelo, P. J. and Sojka, P. E., 1995, "A Holographic Investigation of the Near-Nozzle Structure of an Effervescent Atomizer-Produced Spray," *Atomization and Sprays*, Vol. 5, pp. 137~155.
- (8) Chin, J. S. and Lefebvre, A. H., 1993, "Flow Patterns in Internal-Mixing Twin-Fluid Atomizers," *Atomization and Sprays*, Vol. 3, pp. 463~475.
- (9) Kline, S. J., 1985, "The Purposes of Uncertainty Analysis," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153-160.
- (10) 이상용, 1996, "액체의 미립화," 민음사.
- (11) Galbiati, L. and Andreini, P., 1994, "Flow Pattern Transition for Horizontal Air-Water Flow in Capillary Tubes: A Microgravity "Equivalent System" Simulation," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, No. 4, pp. 461~468.
- (12) Xu, J. L., Cheng, P. and Zhao, T. S., 1999, "Gas-Liquid Two-Phase Flow Regimes in Rectangular Channels with Mini/Micro Gaps," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 25, pp. 411~432.
- (13) 이한주, 이상용, 1999, "미세 수평 사각유로에서의 2상 유동 양식에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집*, 제 23 권, 제 4 호, pp. 492~501.
- (14) Wilmarth, T. and Ishii, M., 1994, "Two-Phase Flow Regimes in Narrow Rectangular Vertical and Horizontal Channels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, pp. 1749~1758.
- (15) Mishima, K. and Ishii, M., 1984, "Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 5, pp. 723~737.
- (16) Ishii, M., 1977, "One-Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes," *ANL Report ANL-77-47*.
- (17) Griffith, P. and Wallis, G. B., 1961, "Two-Phase Slug Flow," *ASME Journal of Heat Transfer*, pp. 307~320.
- (18) Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A. E., 1980, "Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes," *AICHE J.*, Vol. 26, No. 3, pp. 345~354.
- (19) Lowry, B. and Kawaji, M., 1988, "Adiabatic Vertical Two-Phase Flow in Narrow Flow Channels," *AICHE Symposium Series*, Vol. 44e, No. 34e, pp. 133~139.
- (20) Wallis, G. E., 1969, *One-Dimensional Two-Phase Flow*, McGraw-Hill.
- (21) Mishima, K. and Hibiki, T., 1996, "Some Characteristics of Air-Water Two-Phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 703~712.
- (22) Kariyasaki, A., Fukano, T., Ousaka, A. and Kagawa, M., 1992, "Isothermal Air-water Two-phase Up- and Downward Flows in a Vertical Capillary Tube (1<sup>st</sup> Report, Flow Pattern and Void Fraction)," *Trans. JSME (Ser. B)*, Vol. 58, pp. 2684~2690, in Japanese.
- (23) Mishima, K., Hibiki, T. and Nishihara, H., 1993, "Some Characteristics of Gas-Liquid Flow in Narrow Rectangular Ducts," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 1, pp. 115~124.