

## 공기부양 펌프의 관직경과 잠수비 변화에 따른 기포 형상과 성능에 관한 실험적 연구

김승환\* · 손채훈\*† · 황준영\*\*

\* 세종대학교 기계공학과, \*\* 한국생산기술연구원

### Experimental Study of Performance and Bubble Pattern of Air-Lift Pumps with Various Tube Diameters and Submergence Ratios

Seung Hwan Kim\*, Chae Hoon Sohn\*† and Jun Young Hwang\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sejong Univ.,

\*\* Korea Institute of Industrial Technology

(Received May 1, 2013 ; Revised July 24, 2013 ; Accepted July 29, 2013)

**Key Words:** Airlift Pump(공기부양 펌프), Two Phase Flow(2상 유동), Submergence Ratio(잠수비), Tube Diameter(관 직경)

**초록:** 공기부양 펌프는 액체 내 공기부양 효과에 의해 양수 조작이 어려운 액체 및 액체 내의 침전물을 손상 없이 토출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 이용하여 DCFC(Direct Carbon Fuel Cell)에서 고온의 용융된 연료를 혼합 및 순환시키기 위해 공기부양 펌프를 적용할 수 있다. 이를 위한 연구의 일환으로 공기부양 특성을 파악하기 위한 기초 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 공기부양 펌프 시스템을 구축하여 저수통 내에 모사 액체로 물을 채우고 관(tube)을 삽입한 후, 관 하단부에 가스유량을 공급하여 상단부의 토출유량을 측정하였다. 설계 인자로서 관직경과 잠수비를 변경하면서 이에 맞는 공기유량을 공급하였고, 정해진 각 조건에서 생성된 관 내부의 기포(bubble) 형상을 디지털 카메라로 촬영, 그 형상을 네 단계로 구분하였다. 펌프의 성능을 이론식을 모델링하여 실험 데이터와 비교하였고, 토출유량을 측정하여 물이 토출되는 시작점인 가스유량과 전체 유량비와의 상관관계를 분석하였다.

**Abstract:** An airlift pump can be used to pump liquids and sediments within itself, which cannot easily be pumped up by a conventional method, by using the airlift effect. This characteristic of the airlift pump can be exploited in a DCFC (Direct Carbon Fuel Cell) so that molten fuel with high temperature may be carried or transported. The basic characteristics of airlift are investigated. A simple system is constructed, where the reservoir is filled with water, a tube is inserted, and air is supplied from the bottom of the tube. Then, water is lifted and its flow rate is measured. Bubble patterns in the tube are observed in a range of air flow rates with the parameters of the tube diameter and submergence ratio, leading to four distinct regimes. The pumping performance is predicted, and the correlation between the supplied gas flow rate and the induced flow rate of water is found.

- 기호설명 -

$A$  : 면적 ( $m^2$ )  
 $C_0$  : 유체 슬러그 속도 분포계수  
 $D$  : 관직경 (m)  
 $B_0$  : Bond 수  
 $f$  : 마찰계수  
 $g$  : 중력가속도 ( $m/s^2$ )

$\Delta P_f$  : 마찰 압력손실 ( $N/m^2$ )  
 $Q_G$  : 체적가스유량 ( $m^3/s$ )  
 $Q_L$  : 체적액체유량 ( $m^3/s$ )  
 $Q'_G$  : 무차원 체적가스유량  
 $Q'_L$  : 무차원 체적액체유량  
 $Re$  : Reynolds 수  
 $V_m$  : 액체 슬러그 평균속도 (m/s)  
 $V'_m$  : 무차원 액체 슬러그 평균속도  
 $V_{Ts}$  : 정지유체 데일러 기포 상승속도  
 $V'_{Ts}$  : 무차원 정지유체 기포 상승속도

† Corresponding Author, [chsohn@sejong.ac.kr](mailto:chsohn@sejong.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

$Z_l$  : 관이 잠수되지 않은 길이 (m)  
 $Z_s$  : 관이 잠수된 길이 (m)

그리스문자

$a$  : 잠수비  
 $\epsilon$  : 가스 공극 비  
 $\nu$  : 유체의 동 점성계수 ( $m^2/s$ )  
 $\rho$  : 밀도 ( $kg/m^3$ )  
 $\sigma$  : 표면장력 (N/m)

### 1. 서론

공기부양 펌프의 개념은 1700년대 후반 독일에서 발견하였고, 그 이후로 꾸준히 많이 사용되어 왔다. 특히 침전물을 손상 없이 이송할 수 있다는 장점 때문에 일반 펌프를 사용 할 수 없는 분야나, 광산 산업, 오페수, 흙탕물 등의 이송에 사용되고 있다. 1962년에 D.J. Nicklin<sup>(1)</sup>은 이상 기포 유동(two-phase bubble flow) 이론을 발표하였고, 1990년에 D. J. Reinemann<sup>(2)</sup>은 작은 직경을 갖는 공기부양 펌프의 연구를 진행하여 관직경 20 mm 이하의 조건에 적합한 이론을 정립하여 발표하였다.

본 연구에서 수행할, 기체부양 원리를 이용한 펌프 작용 실험은 DCFC(direct carbon fuel cell; 직접탄소 연료전지) 시스템의 한 부분으로서, 연료전지의 연료인 탄소-탄산염 혼합 매개체의<sup>(3)</sup> 혼합 및 이송을 원활하게 하기위한 관점에서 수행되었다. 본 서브시스템의 필요성은, DCFC 시스템의 작동조건(700~900℃)에서 연료의 고온 안정성을 위하여 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 가스로 기포(bubble)를 만들어 유체를 순환 및 혼합하기 위해 제안되었다. DCFC 시스템은 고온의 작동조건에서 지속적인 운전을 필요로 하기 때문에, 기존의 펌프나 혼합 장치로는 혼합 매개체의 혼합 및 이송이 불가능하다. 혼합매개체의 고온 작동 조건에서의 문제점인 열화학적 안정성(부식, 점성에 의한 점착)의 연구는 현재 진행 중에 있으며, 혼합물은 900℃에서 점도는 물비에 따라 2~4 cp이고, 혼합물을 고온으로 만드는데 어려움이 있다.<sup>(4)</sup> 때문에 본 연구에서는 기본적으로 특성이 잘 알려진 물을 모사 작동유체로 채택하고 공기 부양을 이용하여 펌프 성능 실험을 수행하고자 한다.

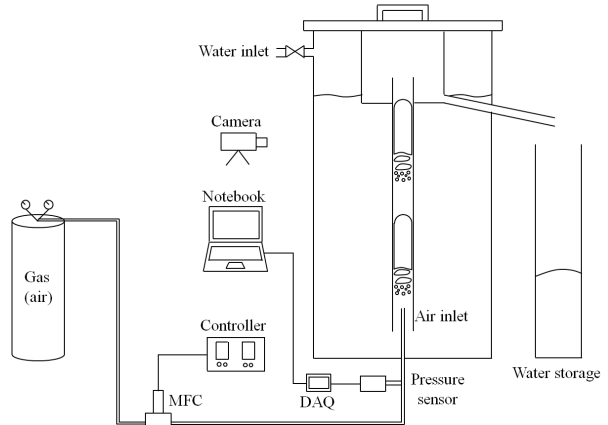


Fig. 1 Schematic diagram for the airlift pump system

이를 위해 Fig. 1 에서와 같이 공기부양 펌프 (airlift pump) 실험 장치를 구성하고, 연료인 탄소-탄산염 대신에 물을, 부양 기체로는 CO<sub>2</sub> 가스 대신에 공기(air)를 모사 유체로 사용하고자 한다. 실험 장치에 대한 설명은 뒤에 자세히 기술하였다. 다양한 조건에 따른 실험을 통해 기포 형성 특성과 토출 유량을 파악하고 관련된 유동 특성을 조사하였다.

### 2. 연구방법

#### 2.1 이론적 접근

기초적인 공기부양 현상의 이론적 접근은 D. J. Reinemann에 의해 수행되었다. 본 연구의 이해를 위해 아래에 주요사항을 간략히 요약하였다. 공기부양 펌프의 중요한 인자(parameter)인 잠수비(submergence ratio),  $\alpha$ 는 관 전체길이 중에 관이 물속에 잠긴 비율로서 Fig. 2에 나타낸 변수를 이용하여 다음 식으로 정의된다.

$$\alpha = \frac{Z_s}{Z_s + Z_l} \tag{1}$$

위의 잠수비는 관이 물에 잠긴 깊이,  $Z_s$ 의 수두로 표현가능하며, 이는 관 내부에 가스유량을 공급하여 기포가 물과 혼합되어 상승할 때의 압력과, 이때 발생하는 마찰에 의한 압력 손실을 고려해야 하며,  $(1-\epsilon)$ 을 곱해줘야 한다.<sup>(5)</sup> 그리고 기체의 무게는 액체의 무게에 비해 상대적으로 가볍기 때문에 무시할 수 있다는 가정이 필요하다.  $Z_s$ 의 수두압은 다음과 같고,

$$\rho g Z_s = \rho g(1-\epsilon)(Z_s + Z_l) + (1-\epsilon)\Delta P_f \tag{2}$$

여기서  $\epsilon$ 은 공극비(gas void ratio)로, 기포가 물과 혼입, 생성되어 상승할 때, 이중에 가스가 차지하는 비율을 나타내고,  $\Delta P_f$ 는 마찰압력손실(frictional pressure drop)로서 평균속도에 의해 발생하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{Q_G}{(C_0 V_m + V_{Ts})A} \quad (3)$$

$$\Delta P_f = f \frac{(Z_s + Z_l)\rho V_m^2}{2D} \quad (4)$$

여기서 식 (3)의  $C_0$ 는 액체 슬러그 속도분포 계수(liquid slug velocity profile coefficient)로, 관측에서의 액체속도와 액체슬러그 평균속도의 비이다. 이 속도 분포계수로는 층류(laminar flow) 영역과 난류(turbulent flow) 영역으로 구분지어 사용하는데 층류영역에서는 2.0을, 난류영역에서는 1.2를 사용한다. 본 연구에서는 유량관계의 초점을 선형적 부분(층류영역)에 두고 있기 때문에,  $C_0$ 값을 2.0으로 설정하여 모델링하였다. 다음으로 액체 슬러그의 평균속도( $V_m$ )를 가스유량과 액체유량을 이용하여 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$V_m = \frac{Q_G + Q_L}{A} \quad (5)$$

다음으로 식 (4)에서 사용된  $f$ 는 마찰 계수(friction factor)로 레이놀즈(Reynolds)수에 따라 결정되며 다음과 같이 분류하여 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$f = \frac{64}{Re} \quad (Re \leq 2100) \quad (6)$$

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (Re \geq 3500) \quad (7)$$

앞서 설명한 체적 가스유량( $Q_G$ ), 액체유량( $Q_L$ ), 정지유체 테일러 기포상승속도( $V_{Ts}$ ), 액체 슬러그의 평균속도( $V_m$ )를 관성력과 중력의 비를 의미하는 프루드(Froude) 수의 개념을 적용하여 다음의 식들로 무차원화 하여 나타낼 수 있다.

$$Q'_G = \frac{Q_G}{A\sqrt{gD}} \quad (8)$$

$$Q'_L = \frac{Q_L}{A\sqrt{gD}} \quad (9)$$

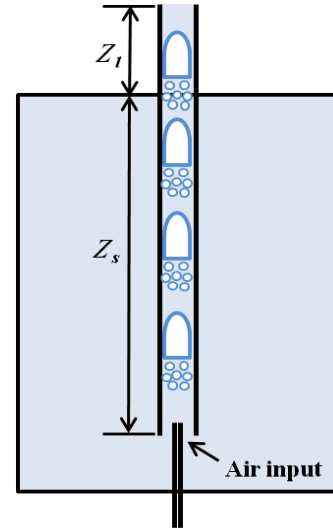


Fig. 2 Typical airlift pump

$$V'_{Ts} = \frac{V_{Ts}}{\sqrt{gD}} \quad (10)$$

$$V'_m = Q'_G + Q'_L \quad (11)$$

식 (10)의  $V_{Ts}$ 는 정지유체 테일러 기포의 상승속도(rise velocity of the Taylor bubble in still fluid)를 나타낸다. 여기서 테일러 기포란, 공기와 액체의 혼입된 기포가 관을 통해 수직 상승하면서 기포 끝 부분이 반구형 모양으로 형성되고, 관 벽과 얇은 수막(water film)을 형성하는 것을 말한다. 추가적으로  $V'_{Ts}$ 는, 부력과 표면장력의 비를 의미하는 본드(Bond) 수를 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$Bo = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (12)$$

$$V'_{Ts} = 0.352(1 - 3.18Bo^{-1} - 14.77Bo^{-2}) \quad (13)$$

식 (13)은  $d=20$  mm이하의 경우에서 사용되는 실험식이며, 본 연구에서 사용이 가능하다.<sup>(8)</sup> 위의 식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하여  $Q'_G$ 를 구한 후, 식 (11)에 대입하여  $Q'_L$ 을 구하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$Q'_L = V'_m - (C_0 V'_m + V'_{Ts}) \left( 1 - \frac{\alpha}{1 + \frac{f}{2} V'^2_m} \right) \quad (14)$$

위의 식들을 이용하여 필요한 값들을 구하고, 이러한 이론모델링 값과 본 연구에서 측정한 실험 데이터를 비교 분석하고자 한다.

## 2.2 실험 방법

공기부양 펌프의 실험 장치 구성도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같고, 중앙에 위치한 관의 직경을 세 가지 직경(8, 11, 18 mm)으로 변화시키며, 이중 실험할 관 직경을 선택하여 장착한다. 물 입구(water inlet) 부분에서 밸브를 열어 물을 저수통으로 공급하여 원하는 잠수비에 도달하게 한다. 물이 공급되어 차오르는 공간과 내부의 관 상단으로부터 물이 토출되는 공간은 분리되어 있기 때문에 원하는 잠수비를 맞출 수 있다.

가스(gas)로는 공기(air)를 사용하였고, 가스통의 밸브를 열고 실험으로 설정된 가스공급 유량을 공급 유량을 제어기(KRO-4000)를 이용하여 실험 유량을 맞게 설정한 후 질량유량계(TSC-210)를 작동시켜 가스를 배관을 통해 공급한다. 관 하단부에서 공급된 가스는 관 하단부에서 기포를 생성하여 물과 혼입되어 수직 상승한다. 관에서 기포가 생성되어 상승할 때 전면부에 디지털카메라(Nikon D60)를 설치하고 후면부에 조명(LED BL-500P)을 설치하여 기포 상승을 back light strobe imaging 기법을 이용하여 촬영하였다. 관을 통해서 상승한 혼입된 기포와 물은 관 상단부에서 공기는 대기 중으로 배출되고, 토출유량은 물 저장고(water storage)에 저장된다. 이때 토출유량이 안정적으로 나올 때까지 기다렸다가, 기포형성과 토출유량이 일정해지면 1분간 저장량을 측정하여 실험을 진행하였다. 저수통 내부 관(tube) 하단부에서 공급된 공기에 의해 기포가 발생하여 부력과 초기속도로 인해 관 안에서 기포가 물과 혼입되어 상승, 상단부로 물이 토출된다. 관직경(tube diameter), 잠수비에 맞는 가스유량( $Q'_G$ )을 변경해가며 실험하였고, 위의 각 조건에서 기포(bubble)의 형상 변화를 디지털카메라로 촬영, 형상을 특징에 따라 4단계로 분류하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기포(bubble) 형상 정의

실험을 진행하면서 공급된 가스유량이 관을 통해 공기와 물이 혼입, 상승하며 기포를 생성하며

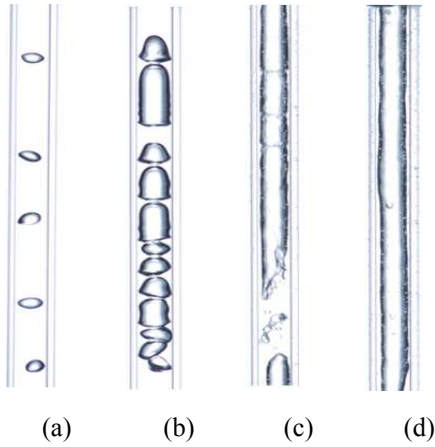
물이 관 상단으로부터 토출되는데, 결과를 분석하기에 앞서 이 과정에서 생성되는 기포의 형상에 관하여 설명하고자 한다. Pedram Hanafizadeh<sup>(9)</sup>는 관직경 50 mm 에서의 기포 형상을 6단계로 구분하였다. 본 연구는 이와는 다르게 관 직경 20 mm 이하의 조건에서 기포의 형상을 촬영하였다<sup>(10)(11)(12)</sup>. 기포의 형상과 그에 따른 유동을 Fig. 3~5의 (a) ~ (d)에서와 같이 bubbly flow, slug flow, churn flow, annular flow 등의 네 단계로 나누었다. 세 가지 관직경 (8, 11, 18 mm), 잠수비 0.8의 조건에서 앞의 2.2절 실험 방법에서 기술한 바와 촬영하였다. 잠수비 0.8에서 촬영한 기포형상 사진으로 설명한 이유는, 잠수비 0.9와 1에서도 같은 기포 형상이 발생하지만, 잠수비가 낮아질수록 물의 토출 압력이 증가하여 기포의 형상의 변화가 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 본 연구에서는 다른 연구와는 다르게 잠수비 1의 조건에서도 실험을 진행하였는데, 그 이유는 향후 예정된 DCFC 시스템의 초점이 잠수비 1에서 고온의 혼합 탄산염을 혼합 및 이송하는데 그 목적이 있기 때문이다. Fig. 6에서 잠수비 0.8에서의 각 관 직경별 무차원 가스유량( $Q'_G$ )에 대한 무차원 토출유량( $Q'_L$ )의 변화를 나타내었고, 기포 형상에 따라 구분한 유동 단계를 표시하였다.  $0 < Q'_G < 4$ 의 영역과 좀 더 확대된  $0 < Q'_G < 0.6$ 의 영역에 대하여 각각 Fig. 6(a)과 Fig. 6(b)에 나타내었으며, 각 영역의 특성은 다음과 같다.

#### (a) Bubbly flow

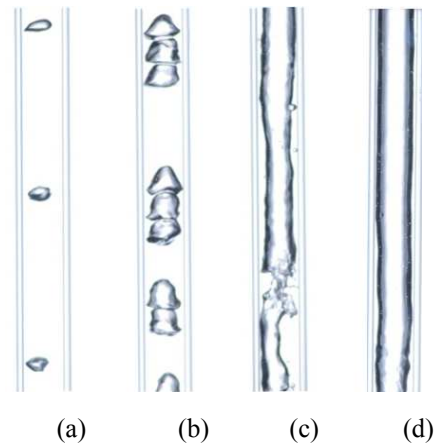
Bubbly flow가 발생하는 가스유량( $Q'_G$ ) 영역에서는 기포가 개별단위로 주기성을 갖고 하나씩 수직상승하며, 토출유량( $Q'_L$ )은 발생하지 않는다. 기포의 형상은 Figs. 3~5의 (a)와 같고, Fig. 6 (a)의 그래프 앞부분을 확대한 (b)의 bubbly로 표시한 영역이다. 기포가 물과 혼입되어 관 상단 부까지 상승하기는 하나, 관 끝까지 상승하지 못하거나 상승하더라도 상단부에서 수면이 흔들거릴 뿐 작은 압력차에 대해서도 토출유량은 발생하지 않는다.

#### (b) Slug flow

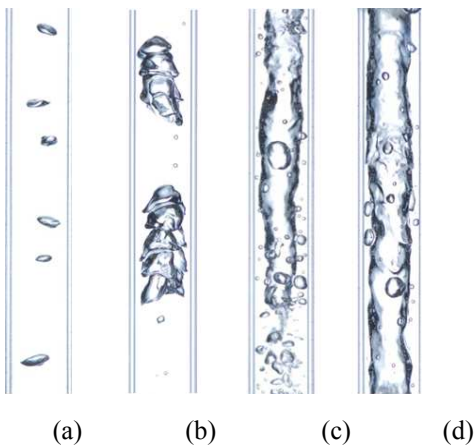
Slug flow는 Fig. 3~5 (b)로서, 기포가 주기성을 갖고 무리지어 상승하는 현상을 보이며, 비로소 액체 토출유량( $Q'_L$ )이 발생한다. Fig. 6(b)의 확대



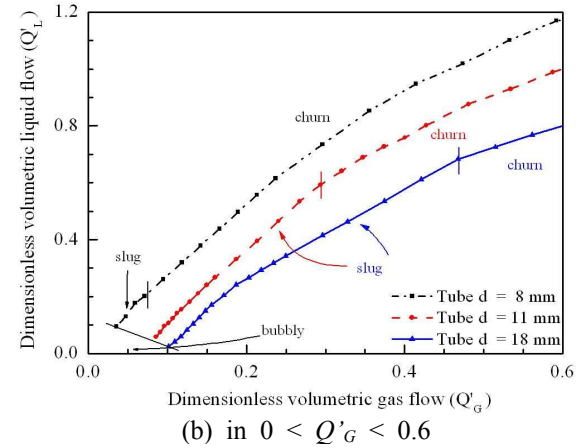
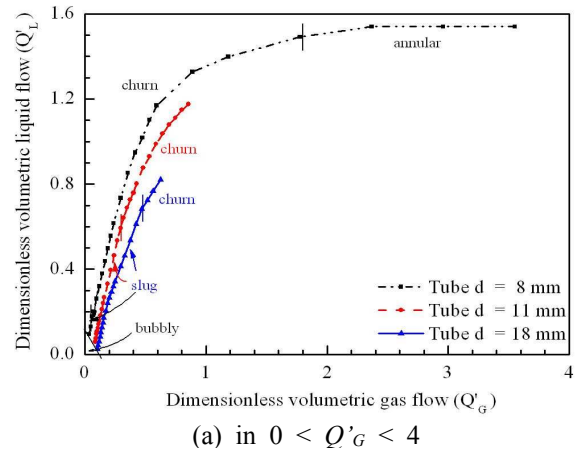
**Fig. 3** Photographs of bubble pattern in airlift pump with the tube diameter of 8 mm,  $Q'_G$  (a) 0.011, (b) 0.11, (c) 2.12, (d) 3.55



**Fig. 4** Photographs of bubble pattern in airlift pump with the tube diameter of 11 mm,  $Q'_G$  (a) 0.012, (b) 0.26 (c) 2.13, (d) 3.45



**Fig. 5** Photographs of bubble pattern in airlift pump with the tube diameter of 18 mm,  $Q'_G$  (a) 0.008, (b) 0.12, (c) 1.09, (d) 1.4



**Fig. 6** Classified bubble pattern dimensionless volumetric liquid flow( $Q'_L$ ) as a function of dimensionless volumetric gas flow( $Q'_G$ ) in tubes with diameters of 8, 11, 18 mm for submergence ratio,  $a$ , 0.8

한 영역에서, 토출유량( $Q'_L$ )이 발생하는 부분을 자세히 살펴보면, 관 직경 8 mm에서는  $Q'_G = 0.035$  에서 토출유량( $Q'_L$ )이 발생하기 시작하는 반면, 관 직경 11 mm와 18 mm에서는 각각  $Q'_G = 0.085$  와  $Q'_G = 0.101$ 에서 발생한다. 즉, 직경이 증가할수록 더 많은 가스유량( $Q'_G$ )을 공급해야 토출유량이 발생한다.

slug flow 영역에서는 그래프에서 나타나 있듯이 토출유량의 증가율이 가스유량에 대하여 선형적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. slug flow는 기포의 앞부분이 반구형의 형상을 가지고 있으며, 그 밑으로는 작은 기포들이 상승하다가, 어느 일정높이 이상 상승하면 기포들이 합쳐져 Fig. 3(b)의 위쪽의 긴 기포가 생성되는 것을 볼 수 있다. 이와 마찬가지로 관 직경 11 mm에서도 비슷한 현상이 관찰되었으나, 관 직경 18 mm에서 관

찰되는 기포의 형상은 앞의 두 직경과는 다르다. Fig. 5(b)와 같이 기포 여러 개가 같이 상승하기는 하나, 반구형의 기포가 완벽하게 생성되어 관 전체를 채우고 상승하지는 않는다. 그 이유는 관 하단의 가스가 공급되는 배관의 직경이 6.35 mm로서, 실험한 세 개의 관 직경 모두 가스공급 배관이 동일하기 때문이다. 즉, 관 직경이 8, 11 mm인 경우에는 기포가 생성된 후, 기포가 관 전체를 채우고 상승하는 것을 볼 수 있으나, 18 mm에서는 기포가 모여서 상승하기는 하나 관 전체를 채우지는 못한다. 또한 상대적으로 입구 영역의 길이가 짧아 기포가 완전하게 발달하지 못하여 기포의 형상이 앞의 두 직경과는 다르게 나타났다.

### (c) Churn flow

Churn flow는 Fig. 3~5 (c)와 같은 형상으로, 가스유량이 증가하여 공기가 관 벽면을 제외한 대부분의 영역을 차지하며 상승하는 것을 볼 수 있다. 형상을 살펴보면, 길게 연결된 공기 기둥이 생성되기는 하나 기포의 흐름이 끊기며, 밑으로 작은 기포들이 생성된다. 다음 기포가 생성되기 전까지 그 사이에 물이 차고, 다음 기포가 생성되어 상승한다. 이렇게 생성된 기포는 주기성 없이 반복되며 발생한다.

Fig. 6(a) churn으로 표시된 영역을 관 직경 8 mm에서 살펴보면 굉장히 넓은 영역( $0.059 < Q'_G < 1.77$ )에 걸쳐 분포하는 것을 알 수 있다. 역시 직경이 작을수록 churn flow가 작은  $Q'_G$ 에서 나타나며,  $Q'_G$ 가 증가함에 따라 유량 관계 곡선의 기울기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 기울기가 감소하는 이유는 다음과 같다. Fig. 3(c)에서와 같이 기포가 관 대부분을 차지하고 상승하는 것을 볼 수 있는데,  $Q'_G$ 가 증가할수록 관 내부에 가스가 차지하는 비율이 증가하면서 가스와의 계면이 감소, 토출할 수 있는 물의 양이 크게 증가하지 않기 때문에 기울기가 감소한다. 관 직경 11 mm를 에서도  $Q'_G$ 가 증가함에 따라 기울기가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 직경 18 mm는 실험장비의 운용이 더 이상 어렵기 때문에 실험하지 않았으나, 가스유량 증가에 따른 기포 형상의 변화는 관찰할 수 있었다.

### (d) Annular flow

Annular flow는 Fig. 3~5의 (d)로서 공급된 가스유량이 관 중심에 공기가 가득차서 끊임없이 상

승하는 형상이다. Fig. 6(a)의 관 직경 8 mm를 살펴보면, annular 부터는 가스유량을 더 증가시켜도 토출유량이 더 이상 증가하지 않고 일정한 것을 볼 수 있다. 그 이유는 가스의 유량을 증가시키면 관내 상승하는 공기의 유량이 더욱 많아져, 벽 근처를 제외한 모든 영역에 공기 기둥이 형성되며 관 벽으로는 수막(water film)<sup>(13)</sup>이 형성되고, 이 수막의 형성 때문에 토출유량의 증가는 더 이상 증가하지 않고 일정해지기 때문이다.

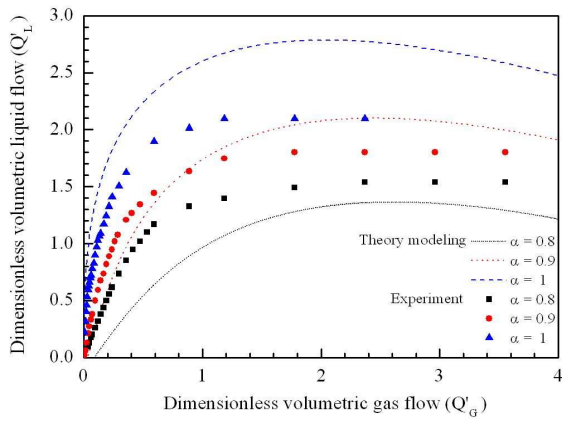
### 3.2 펌프의 성능 및 유량비

식 (1) ~ (14)를 토대로 실험 조건에 대한 유량 관계를 모델링하였고, 실험데이터와 비교하였다. 본 모델은 기포가 유체 내에서 상승하는 slug 유동으로 가정하였으며, 이때, 상대적으로 낮은 유량에 대하여 유효한 유량 관계는 식 (14)에 보인 바와 같이  $V'_{Ts}$ ,  $a$  와  $f$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

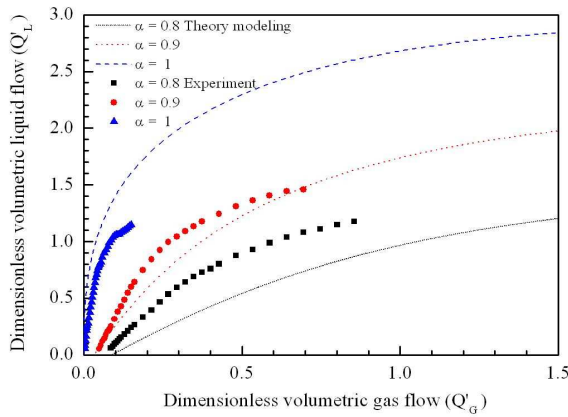
Fig. 7은 세 가지 관 직경(8, 11, 18 mm), 세 잠수비(0.8, 0.9, 1)에서의 무차원 가스유량( $Q'_G$ )에 대한 무차원 토출유량( $Q'_L$ )의 관계를 나타낸 그래프이다.  $Q'_G$ 의 증가에 따른  $Q'_L$ 의 변화는 모델링 데이터와 실험 데이터가 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한, 잠수비가 0.9 인 경우에 모델링과 실험 결과가 더욱 잘 일치하며, 잠수비가 1인 경우에는 모델링이 액체 유량을 과대 예측하고, 반대로 잠수비가 0.8 인 경우에는 과소 예측하는 것을 확인할 수 있다. 유량이 작을 때 ( $Q'_L$ ,  $Q'_G$ ,  $V'_m \ll 1$ ), 식 (14)를 다음과 같은 선형 관계로 단순화할 수 있다.

$$Q'_L = \left( \frac{1}{C_0(1-\alpha)} - 1 \right) \left( Q'_G - \frac{1-\alpha}{1-C_0(1-\alpha)} V'_{Ts} \right) \quad (15)$$

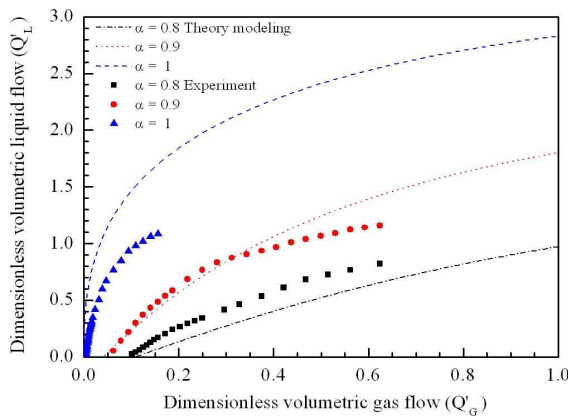
식 (15)에서 볼 수 있듯이,  $Q'_L$ 과  $Q'_G$ 의 유량관계 기울기는 잠수비( $a$ )만의 함수로서 잠수비가 증가하여 1에 근접할수록 증가한다. 또한, 식 (15)로부터  $Q'_L$ 이 발생하기 시작하는 최소  $Q'_G$  (유량 토출 시작점)는 잠수비와 함께 관 직경의 함수로서 잠수비가 증가할수록 더 작은 값을 갖는 반면, 관 직경이 증가할수록 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 유량관계 특성은 Fig. 6과 Fig. 7의 실험 결과에서도 뚜렷이 확인할 수 있다. 유량이 더욱 증가하면 식 (14)의 비선형적 특성으로 인하여 그래프의 기울기가 감소하는 구간



(a) Tube diameter 8 mm

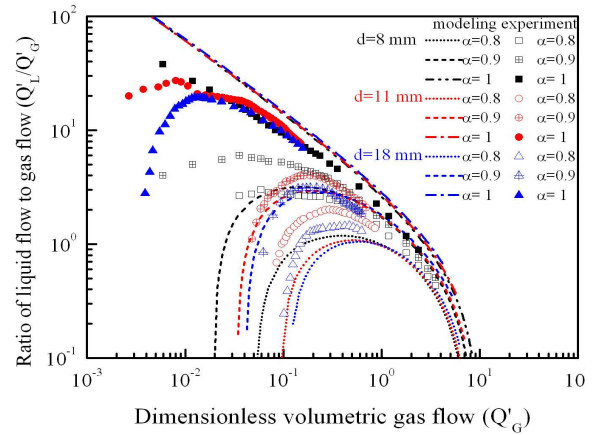


(b) Tube diameter 11 mm



(c) Tube diameter 18 mm

**Fig. 7** Dimensionless volumetric liquid flow( $Q'_L$ ) as a function of dimensionless volumetric gas flow( $Q'_G$ ) in tubes with diameters of (a) 8, (b) 11, and (c) 18 mm for various submergence ratio  $a$  0.8, 0.9, 1 at theoretical modeling and experiment



**Fig. 8** Ratio of liquid flow to gas flow( $Q'_L/Q'_G$ ) as a function of dimensionless volumetric gas flow( $Q'_G$ ) in tubes with tube diameters of 8, 11, and 18 mm and for submergence ratios of 0.8, 0.9, and 1.

이 나타나는데, 이 영역부터는 churn flow에 해당하며, 식 (13) 및 식 (14)의 유효성을 보장하기 어렵게 된다. 그러나 현상적으로도 공기가 관 대부분을 차지하며 상승하는 churn flow에서는 관내에서 물과 공기의 영역 분리 현상이 발생하기 시작하므로 토출유량의 증가가 선형적으로 유지되지 못하는 당연하다. 가스 유량이 더욱 증가하여 annular flow 영역으로 발전하면 관내의 물과 공기가 완전히 분리되면서 토출유량이 더 이상 증가하지 않고 일정해진다.

Fig. 8은 다양한 관 직경 및 잠수비에 대하여 가스유량( $Q'_G$ )의 증가에 따른 토출유량과 가스유량의 유량비( $Q'_L/Q'_G$ ) 변화를 보여주는 실험 결과이다. 모델링과 실험데이터를 한 그림에 표시, 둘 모두 상승 하강곡선이 서로 비슷한 양상을 보이며 감소한다. 앞서 Fig. 7에서 설명한 잠수비 0.9를 기준으로 두 데이터간의 값은 상당히 일치하며 잠수비 0.8에서는 과소예측, 잠수비 1에서는 과대예측된 결과가 유량비 비교에서도 같은 경향성을 나타내고 있다.  $Q'_G$ 가 증가함에 따라서, 초기에는 유량비가 증가하다가 감소하는 비선형적인 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 여기서 관 직경 8mm 잠수비 1의 경우 유량비의 증가 및 최고점 없이 감소가 시작되는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 더 작은 가스유량으로 갈수록 토출유량이 발생하는 양이 매우 적으며, 본 실험의 초점은 액체의 순환 및 이송이기 때문에 실험하지

않았다. 이때, 직경이 작고 잠수비가 높을수록 유량비의 최고점이 큰 값을 갖으며, 동시에  $Q'_G$ 가 더 작은 값에서 최고점이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 식 (12)에서  $Bo$ 수는 직경의 제곱에 비례하므로 직경이 증가할수록 식 (13)의  $V'_{Ts}$ 값도 증가하게 된다. 이 값은 식 (14)의 토출 유량 값에 영향을 주게 되는데 직경이 증가할수록  $Q'_L$ 값이 감소하며 잠수비가 높아질수록 값은 증가한다. 때문에 같은 가스유량을 공급하더라도 직경이 작고 잠수비가 높을수록 최고의 유량비가 나타나게 된다. 초기에 관 직경과 잠수비 조건에 대하여 서로 다른 값과 기울기로 증가하던 유량비는 최고점을 지난 후에는 서로 간에 비슷한 양상을 보이며 감소하는 현상을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 공기부양 펌프의 기본적인 수력학적 특성과 성능을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 모사 액체로는 물을, 모사 기체로는 공기를 사용하였다. 관직경과 잠수비를 실험 인자로 하여 가스유량을 변화시키며 공급하여 관에서 gas와 물이 혼입되어 상승하면서 관 상단부에서 토출되는 물의 유량을 측정하였다.

(1) 세 가지 관직경(8, 11, 18 mm)의 잠수비 0.8 조건에서 기포의 형상을 촬영하였다. 가스유량에 따라서 기포형상이 바뀌는데, 특징에 따라 이것을 네 가지로 구분하였다. 기포가 주기적으로 형성되어 개별적으로 상승하는 bubbly flow, 형성된 기포가 주기성을 갖고 무리지어 상승하는 slug flow, 관 대부분을 차지하고 상승하지만 주기성 없이 반복하여 상승하는 churn flow, 관 전체를 공기기둥이 차지하고 관 벽으로 수막이 형성되는 annular flow 영역이다.

(2) 위의 기포의 형상을 가스유량( $Q'_G$ )과 토출 유량( $Q'_L$ )의 관계에 따라 살펴보면, 토출유량이 발생하지 않는 bubbly 영역, 토출유량과 기체유량의 관계가 선형적인 slug 영역, 토출유량의 증가율이 감소하는 churn 영역, 토출유량이 더 이상 증가하지 않고 일정해 지는 annular 영역으로 구분할 수 있다.

(3) 잠수비가 감소할수록, 또한 관 직경이 증가할수록 토출유량( $Q'_L$ )을 발생시키기 위하여 더 많은 가스유량 ( $Q'_G$ )의 공급이 필요하였다.

(4) 모델링과 실험을 비교하였으며, 잠수비 0.9에서 두 데이터가 상당히 잘 맞았고, 모델링 데이터는 잠수비 1에서는 과다 예측, 잠수비 0.8에서는 과소 예측되었다.

(5) 토출유량과 가스유량의 유량비( $Q'_L/Q'_G$ )는  $Q'_G$ 에 대하여 증가 후 감소하는 비선형적인 변화를 보였으며, 초기에 각 조건에 대하여 서로 다른 값과 기울기로 증가하던 유량비는 최고점을 지난 후에는 서로 비슷한 양상을 보이며 감소하였다.

#### 후 기

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20113020030010)입니다.

#### 참고문헌

- (1) Nicklin, D.J., 1962, "Two-Phase Bubble Flow," *Chemical Engineering Science*, Vol. 17, pp. 693~702.
- (2) Reinemann, D.J., Parlange, J.Y. and Timmons MB., 1990, "Theory of Small-Diameter Airlift Pumps," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 16, No. 1, pp. 113~122.
- (3) Lee, S.C., Song, J.H., Jeon, C.H. and Jang, Y.J., 2011, "Measurement of Viscosity and Fluid Characteristics for Molten Carbonate Electrolyte," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, pp. 155~158.
- (4) Janz, G.J., Allen, C.B. and Bansal, N.P., 1979, "Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage," *Rensselaer Polytechnic Institute*, New York, pp. 384~395.
- (5) Nakoryakov, V.E., Kashinsky, O.N. and Kozmenko, B.K. 1986, "Experimental Study of Gas-liquid Slug Flow in a Small Diameter Vertical Pipe," *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 12, pp. 337~355.
- (6) Kouremenos, D.A. and Staicos, J., 1985, "Performance of a Small Air-Lift Pump," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol. 6, No. 3, pp. 217~222.
- (7) White, E.T. and Beardmore, R.H., 1962, "The Velocity of Rise of Single Cylindrical Air Bubbles Through Liquids Contained in Vertical Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 17, pp. 351~362.



- (8) Nickens, H.V. and Yannitell, D.W., 1987, "The Effects of Surface Tension and Viscosity on the Rise Velocity of a Large Gas Bubble in a Closed, Vertical Liquid-Filled Tube," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 13, No. 1, pp. 57~69.
- (9) Hanafizadeh, P., Ghanbarzadeh, S. and Saidi, M.H., 2011, "Visual Technique for Decection of Gas-Liquid Two-Phase Flow Regime in the Airlift Pump," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 75, pp. 327~335.
- (10) Moisisdis, C.T. and Kastrinakis, E.G., 2010, "Pressure Behaviour in Riser Tube of a Short Airlift Pump," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 65~73.
- (11) Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A. and Ahmed, W.H., 2009, "Air-Lift Pumps Characteristics Under Two-Phase Flow Conditions," *International journal of heat and Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 88~98.
- (12) Bendiksen, K.H., 1984, "An Experimental Investigation of the Motion of Long Bubbles in Inclined Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 467~483.
- (13) Decachard, F. and Delhay, J.M., 1996, "A Slug-Churn Flow Model for Small-Diameter Airlift Pumps," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 627~649.