

# Riser의 기액유동 특성에 따른 Air-lift 펌프의 성능예측

조 대 환\* · 박 찬 수\*

## A Prediction of the Air-lift Pump Performance by Gas-liquid Flow Characteristics of Riser

D. H. Cho · C. S. Park

**Key words :** Two - phase flow(이상류), Riser(라이저), Submergence rate(잠수비), Bubble(기포), Void fraction(보이드율), Gas - liquid Flow(기액이상류), Downcomer(하강관), Air - lift Pump(공기양정펌프)

### Abstract

As an effective means to convey crushed materials from seabed to on board ship and to raise hazardous or abrasive liquids, air-lift pump provides a reliable mechanism due to its simple configuration and easy-to-operate principle. The present study is focused on fundamental investigation of related performance by the analysis program based on the gas-liquid two-phase flow in circular pipes. The program covers pump operating in isothermal and vertical two-phase flow with Newtonian liquids. It is summarized as important result that an optimum air mass flow rate exists for the maximum lifted liquid mass flow rate in terms of a given submergence rates and furthermore, attachment of downcomer gives little effects on riser performance the conveyed liquid flow rate increases with larger submergence rate.

### 1. 서 론

특수한 양수펌프로써 오래 전부터 이용하고 있는 공기양정(air-lift)펌프는 양수 조작이 어려운 곳이나 물밀의 탐사, 특히 수중의 부서지기 쉬운 침전물을 손상시키지 않고 제거하거나 회전 임펠러를 손상시킬 수 있는 혼합물의 이송에 주로 이용된다. 이 펌프는 회전 또는 가동부가 없기 때문에

내식성을 요하거나 특히 유지 보수가 어려운 가혹한 환경에서 용이하게 이용할 수 있는 장점을 지니고 있으며, 최근에는 심해저의 광물자원으로 각광받는 망간 단괴의 수력펌핑에 의한 채광 기술<sup>1)</sup>로서 적용이 연구되고 있다. 그러나 일반적으로 효율이 낮기 때문에 널리 사용되지 않고 있으며 관련 연구도 그리 많지 않은 실정이다.

지금까지 주요 연구 결과를 보면, Nicklin<sup>2)</sup>이 수

\* 목포해양대학교 기관공학부(원고접수일 : 99년 3월)

직 관에서의 이상(二相)류인 슬러그류의 기포들의 움직임을 고찰하여 이들의 상승 속도에 관한 실험식을 레이놀즈수  $Re=8 \times 10^3$ 에서 제안하여 보이드율을 예측하는 방법을 제시하여 여러 연구자들이 이 결과를 인용하고 있다. Stenning<sup>3)</sup>은 가스-액체 사이의 마찰과 슬립을 고려한 1차원적인 공기양정 펌프의 운전 특성에 관한 실험 결과를 보고하였다. 전 양정 4.26m, 라이저(riser)의 내경 2인치의 조건에서 라이저의 일부가 수면 하에 잠겨 있을 때의 영향에 대하여 정량적인 데이터를 제시하였다. 그리고 라이저에서 부유물을 가진 공기양정 펌프에 대한 연구 결과가 Heywood<sup>4)</sup>에 의해 발표되었다. 이와 같은 실험적 연구의 결과로 제시된 실험식은 공기양정 펌프의 성능예측에 필요한 중요한 관계식을 제공하고 있다. 이와 같은 배경에서 이 연구에서는 공기양정 펌프의 주요부분인 라이저 즉, 수직상승관에 대한 기액유동 이론 및 기존의 연구 결과에 따른 실험식을 이용한 성능예측 프로그램에 의해 양수 성능을 고찰하였다. 그 결과 공기양정 펌프의 양수 성능은 잠수비와 라이저의 단면적에 근사적으로 선형비례하며 최적의 효율이 얻어지는 가스질량유량을 설정할 수 있음을 보였다.

## 2. 원리 및 이론해석

Fig.1은 공기양정 펌프의 배치도를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 라이저의 하부에서 가스

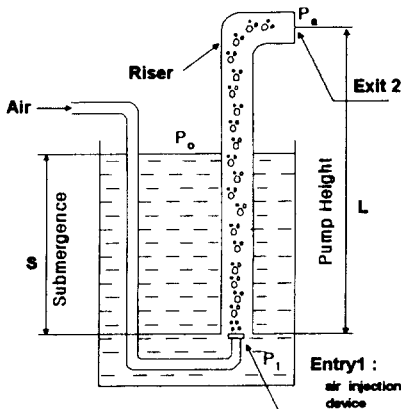


Fig. 1 Operation of air-lift pump

(공기 등)를 분사시키면 기액이상류가 얻어지며 주위의 유체와의 밀도 차로 인하여 구동력이 발생하게 된다. 이와 같은 기액혼합물의 상승 작용에 의하여 액체가 상부로 이송되거나 또는 작은 고품 혼합물들이 동반하여 이송된다. 이 연구에서는 고체 성분을 제외한 순수한 기액이상류의 관점에서 라이저 내부의 유동의 운동량 보존의 원리에 의해 공기양정 펌프의 양수 성능을 예측하고자 하였다.

식(1)은 에너지보존방정식이다.

$$(p_2 - p_1) = \int_1^2 \left( \frac{dp_g}{dz} + \frac{dp_f}{dz} + \frac{dp_a}{dz} \right) dz - \text{mixer loss} \quad (1)$$

단, 중력성분 :  $dp_g/dz$ , 마찰성분 :  $dp_f/dz$ , 동압력변화성분 :  $dp_a/dz$ 이다. 압력구배의 중력 성분은 식(2)와 같다.

$$\frac{dp_g}{dz} = -\frac{g}{g_c} [\alpha p_g + (1 - \alpha)p_L] \quad (2)$$

여기에서  $g_c$ 는 뉴우톤 제2법칙의 비례상수이고 보이드율  $\alpha$ 는 drift-flux 모델에 의해서 계산한다. 이 모델의 중요한 특징은 관련된 상(phase)들의 상대적인 운동을 고려하는 점이다. 가스상의 drift 속도  $U_{GV}$ 는 실제 가스상 속도와 총 걸보기 속도  $V (=V_G + V_L)$  차이로 식(3)으로 정의되며, 슬러그 흐름에 있어 가스상 속도는 기포 상승 속도  $U_b$ 와 같으므로 식(4)로 된다.

$$U_{GV} = U_G - (V_G + V_L) \quad (3)$$

$$U_{GV} = U_b - (V_G + V_L) \quad (4)$$

기포들이 총 걸보기 속도  $V$ 에 상대적으로  $U_\infty$ 의 속도를 갖는다고 가정하면,

$$U_{GV} = U_\infty \quad (5)$$

단,  $U_\infty$ 는 정체된 흐름에 있어 단일기포의 상승 속도이다. 식(4)에 식(5)를 대입하면 기포 상승 속도는 식(6)과 같다.

Nicklin 등<sup>2)</sup>은 이상류에서 액체흐름에 대한 기포의 운동에 관한 실험 연구를 통하여 기포들이 액체의 중심선 속도에 대하여 상대적인 속도로 상승함을 보고하고 식(7)의 실험식을 제안하였다. 식

(7)에서 1.2는 대략 난류배관유동에서 평균 유속에 대한 중심선 속도의 비를 나타낸다. 그리고 자유표면이 존재하고 유동에 대한 차원해석으로부터  $U_\infty$ 는 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$U_b = (V_G + V_L) + U_\infty \quad (6)$$

$$U_b = 1.2(V_G + V_L) + U_\infty \quad (7)$$

$$U_\infty = K\sqrt{gD} \quad (8)$$

식(8)에서  $K$ 는 0.345의 값을 갖는다. Wallis<sup>5)</sup>는  $K$ 의 값을 점성과 표면장력 효과를 고려하여 다음과 같이 제시하고 있다.

$$K = 0.345[1 - \exp(-0.01N/0.345)] \times [(1 - \exp(3.37 - N_{E0})/n)] \quad (9)$$

여기에서  $N$ 은 무차원 점도역수(dimensionless inverse viscosity)이고  $N_{E0}$ 는 Harrathy에 의해 제안된 Eötvös수<sup>6)</sup>이다,

$$N = \frac{1}{2} \frac{D^3 g (\rho_L - \rho_G) \rho_L^{1.5}}{\mu_L g_c} \quad (10)$$

$$N_{E0} = \frac{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}{\sigma g_c} \quad (11)$$

$n$ 은  $N$ 의 함수이고 다음 값에 의해 얻어진다.

$$n = 10 \quad N > 250 \quad (12)$$

$$n = 69 \quad 18 \leq N \leq 250 \quad (13)$$

$$n = 25 \quad N < 18 \quad (14)$$

보이드율  $\alpha$ 는 식(15)와 같으므로 식 (7)과 (8)을 대입하여 보이드율을 구할 수 있다.

$$\alpha = V_G / U_b \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{V_G}{1.2(V_G + V_L) + K\sqrt{gD}} \quad (16)$$

압력구배의 마찰 성분의 계산은 2상유동마찰손실배수  $\Phi_{LO}^2$ 에 의해 표현할 수 있다. 즉 이상 유동에서의 압력 강하 항은 단상액체 유동에 의한 마찰 강하 값에 적절한 보정계수를 곱한 것으로 유동조건 함수이다.

$$\frac{dp_f}{dz} = \Phi_{LO}^2 \times \left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{LO} \quad (17)$$

여기에서  $(dp/dz)_{LO}$ 은 총 질량유량(가스+액체)을 모두 액체로서 취급하여 구한 단상마찰 손실이다. 2상마찰손실배수  $\Phi_{LO}^2$ 의 계산은 Friedel<sup>7)</sup>이 제안한 식(18)에 의한다.

$$\Phi_{LO}^2 = E + 3.24FH / (Fr^{0.046} W_e^{0.035}) \quad (18)$$

여기에서

$$E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L}{\rho_G} \frac{f_{GO}}{f_{LO}} \quad (19)$$

$$F = x^{0.76} (1-x)^{0.224} \quad (20)$$

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.7} \quad (21)$$

$$Fr = G^2 / (Dg\rho^2 H) \quad (22)$$

$$\rho_H = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1} \quad (24)$$

식(19)에서  $f_{GO}$ 와  $f_{LO}$ 는 총 질량유량을 각각 모두 가스이거나 모두 액체라고 가정할 때의 Fanning 마찰계수이다. 식(25)에 의해 라이저 내부의 관내 마찰을 계산한다.

$$f = \left[3.6 \log_{10} \left\{ \frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7D}\right)^{1.1} \right\}\right]^{-2} \quad (25)$$

단,  $Re$ 는  $f_{GO}$ 의 경우  $Re_{GO}$ ,  $f_{LO}$ 의 경우  $Re_{LO}$ 를 적용한다. 압력구배에 따른 동압력변화 성분의 계산은 균질흐름 이론(homogeneous flow theory)을 이용하였다. 이 경우 양쪽 상이 완전하게 섞여서 밀도와 속도가 단일의 값으로 되어 식(26)으로 표현된다.

$$\frac{dp_a}{dz} = - \frac{G^2}{g_c} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\rho_H}\right) \quad (26)$$

건도  $1/\rho_H$ 는

$$\frac{1}{\rho_H} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (27)$$

라이저의 하부에서 주입 가스와의 혼합에 의해 발생하는 혼합기(mixer)의 손실은 라이저의 초기 입구 부분에서만 존재한다고 가정하고 가스 측의 질량과 운동량을 무시하여 다음의 식으로 구한다.

$$\Delta pm = \frac{\dot{m}_L}{Ag_c} (U_{L, mixer exit} - U_{L, mixer entry}) \quad (28)$$

$$= \frac{\dot{m}_L}{\text{Agc}} \left( \frac{VL}{1-\alpha} - V_L \right) \quad (29)$$

라이저입구부의 압력  $p_1$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$p_1 = p_L g S + p_{atm} + \Delta p_d \quad (30)$$

여기에서  $S$ 는 잠수높이이고,  $\Delta p_d$ 는 하강관(downcomer)이 존재하는 경우에 발생하는 압력 손실으로서 식(31)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta p_d = - \frac{\rho_L V^2 L}{2gc} \left( K_f + \frac{4fL_d}{D} \right) \quad (31)$$

여기에서  $K_f$ 는 직선 배관 부분을 포함하는 하강관에서의 모든 구성 부품의 손실계수의 합이다. 그리고  $L_d$ 는 직선 배관 부분의 총 길이이다. 하강이 없는 경우에는 식(30)에서의 마지막 항이 0이다.

다음으로 여기에서 제안하고 있는 성능 프로그램은 관내의 유동이 처언(churn)흐름으로부터 환상류(annular flow)영역 사이의 경계점까지 성능 해석이 가능하다. 이점을 넘으면 drift-flux 모델의 적용이 불가능해지며 이와 같은 계산경계점의 가스 속도는 Taitel과 Dukler<sup>8)</sup>의 그림으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$V_G = \frac{3.1}{\rho_G^{0.5}} [\sigma g c (\rho_L - \rho_G)]^{0.25} \quad (32)$$

라이저의 입구 압력  $p_1$ 까지 등엔트로피적으로 가스를 압축하는 데 필요한 동력은 다음과 같이 계산된다.

$$P = \frac{P_{atm} \dot{m} G}{\rho_G atm} \left( \frac{\gamma}{r-1} \right) \left[ \left( \frac{p_1}{P_{atm}} \right)^{\frac{r-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (33)$$

### 3. 성능예측

Air-lift의 성능예측을 위한 계산은 라이저의 내부 직경(D)과 잠수율(S/L), 그리고 하강관의 유무와 관련하여 각 조건별로 실행하였다.

Fig. 2는 계산순서도를 나타내고 있다. 기본적인 계산은 라이저의 내부 직경(D)이 0.051m이며 하강관이 없는 조건으로 하였다. 라이저에서 이론식을 만족하는 가스질량 유량을 반복 계산에 의해 구하고 이에 대한 액체 질량유량을 계산하였다.

Table 1. Program input data

	a	b	c	d	e	f	g	h
D[m]	0.051				0.0635	0.076	0.0635	0.076
S[m]	2	3	3.9	4.6	2	2	3	3
L[m]	7	8	8.9	9.6	7	7	8	8

- Atmospheric pressure : 101300 [Pa]  
 - Inlet pressure : 101300 [Pa]  
 - Pump exit pressure : 101300 [Pa]  
 - Pump operating temperature : 20[℃]  
 - Riser effective roughness height : 45E-6[m]

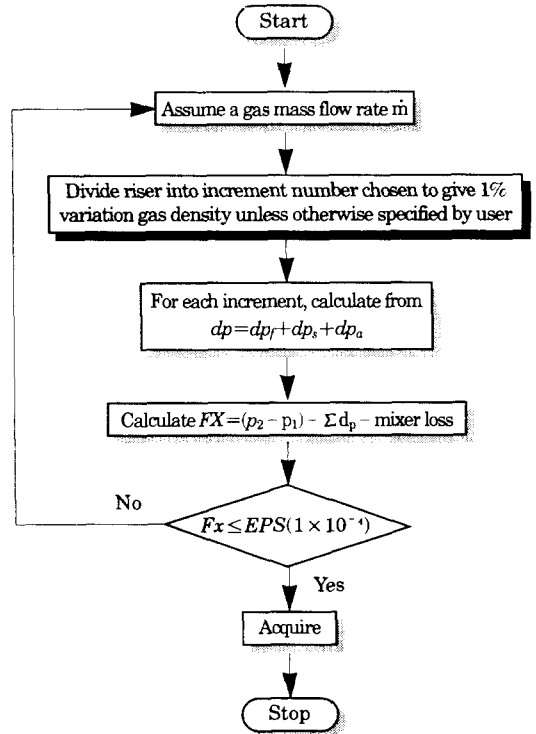


Fig. 2 Flow chart of performance

표1은 계산에 필요한 초기 데이터를 나타낸다. 펌프의 입출구 압력은 대기압으로 하였고, 라이저 내부 유체의 온도는 상온(20℃)을 기준으로 하였다. 온도와 펌프 높이, 그리고 관벽의 마찰계수에 따른 유동 변화는 고려하지 않았다. 단위는 SI 단위계로 통일하였다. Fig.3의 성능곡선은 하강관이 없을 경우 라이저 직경이 0.051m에 대하여 주입공기의 질량유량에 따른 양수량의 변화량을 잠수율에 따라 도시하고 있으며, 잠수율에 따라 양수성이 크게 변화하고 있음을 나타내고 있다. 그리고

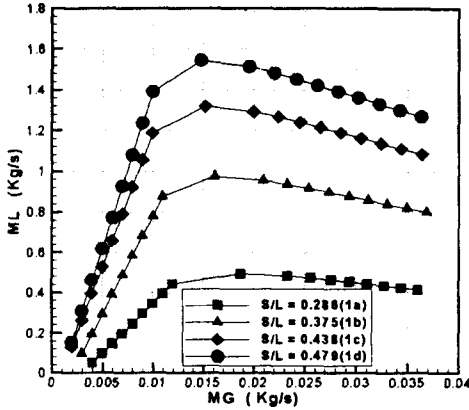


Fig. 3 Pump operating curves (1a, 1b, 1c, 1d)

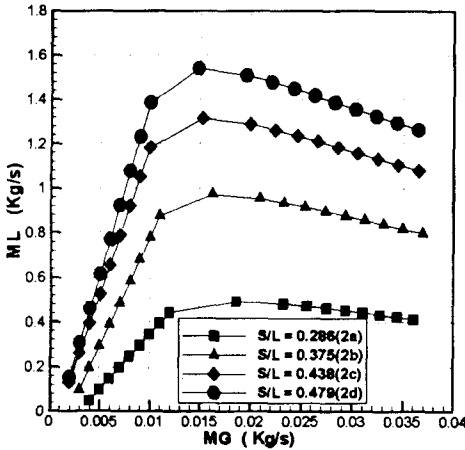


Fig. 4 Pump operating curves (2a, 2b, 2c, 2d)

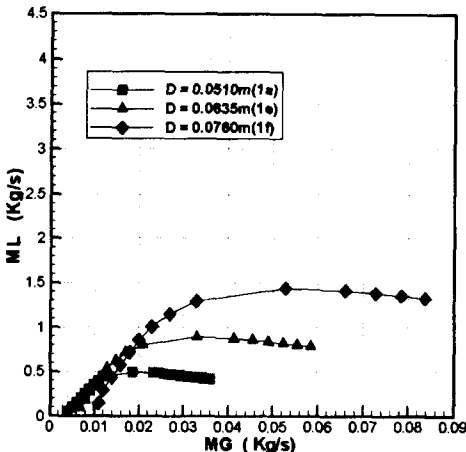


Fig. 5 Pump operating curves (1a, 1e, 1f)

공기양정펌프의 라이저에 공급되는 구동 공기량이 증가함에 따라 비례적으로 액체의 양수량이 정점까지 증가됨을 알 수 있다. 그러나 정점에 도달하게 되면 공기량의 증가와 관계없이 양수량이 줄어들어 공기 압축에 필요한 에너지의 소비만을 초래하게 된다. 이것은 정점 이후에 슬러그가 깨지게 되어 churn-turbulent 흐름 영역으로 바뀌게 되고 마찰 압력강하는 송기량의 증가와 더불어 급격하게 증가하기 때문에 추가적인 공기량의 증가는 액체의 양수량을 오히려 줄어든게 하기 때문이다.

Fig.4는 Fig.3과 같은 조건에서 하강관을 설치하였을 때의 결과를 보이고 있다. 하강관의 직경과 관의 거칠기는 라이저와 동일하게 적용하였고 하강관의 길이는 1.56m이다. Fig.3과 Fig.4를 비교하여보면 하강관의 유무에 따른 결과의 차이가 거의 나타나지 않고 있으며, 전체적인 성능은 하강관이 없는 경우가 오히려 하강 배관의 손실만큼 미소하게 높음을 볼 수 있다. 이것은 식(31)에 의해 구해진 하강배관의 손실이 전체출력에 비하여 무시할만큼 작기 때문이다.

Fig.5와 Fig.6은 잠수비가  $S/L = 0.286$ 과  $S/L = 0.375$ 로 일정할 때 내경의 변화에 따른 계산 결과를 도시하였다. 슬러그류에 있어서 라이저의 단면적이 증가함에 따라 양수량이 단조증가하고 있다. 즉, 공기양정펌프의 양수성능은 잠수율에 대하여 거의 선형적인 변화를 나타내고 있으며 라이저의 직경에 대해서는 일정한 기울기를 갖는 단조증가

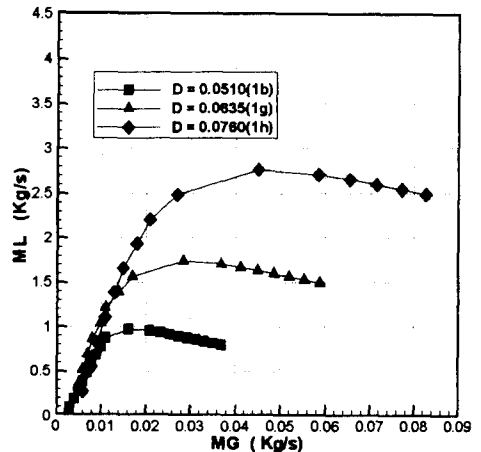


Fig. 6 Pump operating curves (1b, 1g, 1h)

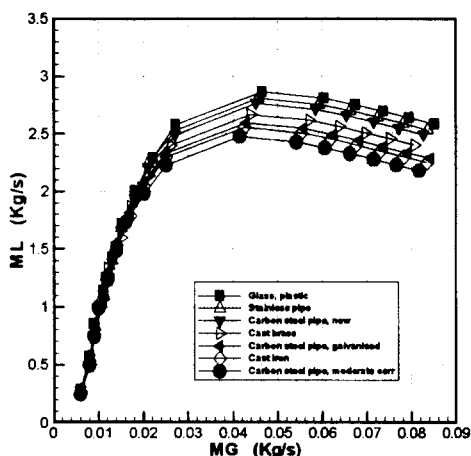


Fig. 7 Pump operating curves by pipe roughness

의 경향을 보이고 있다. 또한 라이저의 단면적과 잠수비가 일정하게 설계되었을 때에는 최적의 효율을 얻을 수 있는 가스질량유량비가 존재함을 알 수 있다.

Fig.7에서는 관의 거칠기에 따른 가스질량유량에 대한 액체질량유량을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 관이 거칠수록 양수량이 적어짐을 알 수 있다. 그 양은 가장 차이가 심한 플라스틱재질과 철재파이프(Carbon steel pipe, moderate corrosion)에서 가스질량유량 0.012kg/s 기준으로 거칠기가 낮은 플라스틱이 양수량을 14%정도 높일 수 있음을 알 수 있다. 즉, 관의 거칠기는 공기양정 펌프의 양수량에 영향을 미치므로 이송할 유체의 종류에 따라 적당한 재질의 라이저를 설치하여 운전특성의 최적화와 이에 따르는 경제성의 적절한 조합이 필요하다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 라이저 내부의 기본 유동에 대하여 기존의 실험결과에 따라 제안된 실험식과 기액유동의 이론을 바탕으로 전산프로그램에 의해 공기양정 펌프의 성능을 예측하고자 하였다. 계산결과 공기양정펌프(Air-lift pump)의 양수성능은 잠수율에 대하여 거의 선형적으로 증가하고 있으며 라이저의 직경에 대해서는 일정한 기울기를 갖는 단조증가의 경향을 보이고 있다. 그리고 변화율은

라이저의 직경이 클수록 더욱 증가함을 알 수 있고 잠수비가 같을 경우 하강관의 유무는 성능에 큰 영향을 미치지 않는다. 그리고 가스질량유량의 증가에 따라 공기양정펌프의 주요부품인 라이저 내부의 유동형태가 슬러그에서 churn-turbulent 흐름으로 천이하기 직전의 정점에서 최적의 효율이 얻어지는 가스질량유량을 설정할 수 있음을 보였다.

#### 기호설명

- A : 흐름의 단면적
- D : 배관내부직경
- G : 혼합체의 질량 속도,  $4(mG+m_L)/(\pi D^2)$
- L : 펌프 높이
- m : 질량 유량
- S : 잠수높이
- U : 실제 상승도
- $U_b$  : 슬러그 흐름에 있어 기포 상승 속도
- $U_{GV}$  : 가스 drift 속도,  $U_G - (V_G + V_L)$
- $U_{INF}$  : 정체 흐름에 있어 단일 기포 상승 속도
- V : 총 이상(二相)겉보기 전속도,  $(V_G + V_L)$
- x : 혼합물의 질량건도,  $m_G/(m_G + L)$
- z : 배관 축방향 길이(흐름 방향)

#### 그리스 문자

- $\alpha$  : 보이드율
- $\gamma$  : 비열비
- $\sigma$  : 표면장력
- $\epsilon$  : 유효 거칠기 높이
- $\rho_H$  : 혼합물의 균질밀도,  $[x/\rho_G + (1-x)/\rho_L]^{-1}$
- $\Phi^2_{LO}$  : 이상(二相)유동마찰손실배수

#### 하첨자

- G : 이상(二相) 혼합물의 가스요소
- L : 이상(二相) 혼합물의 액체요소
- 0 : 공급액체표면에서의 조건
- 1 : 상승배관입구에서의 조건
- 2 : 상승배관으로부터 출구조건

### 참고문헌

- (1) 윤치호, "심해저 망간 단괴 수력펌핑의 슬러그 유동 해석 연구", 제 2차 심해저 채광기술 세미나논문집 pp.43~62, 1996.
- (2) D.J.Nicklin, J.O.Wilkes and J.F.Davidsov, "Two-phase flow in vertical tube", Trans. instn Chem. Engrs, Vol. 40, pp.61-68, 1962.
- (3) A.H.Stenning and C.B.Martin, "An analytical and experimental study of an air-lift pump performance.", ASME J. Eng. Power, Vol. 90, pp. 106-110, 1968.
- (4) N.L.Heywood, R.A.Michalowicz and M.E. Charles, "Preliminary experimental investigation into the air-lift pump of shear-thinning suspension." Can. J. Chem. Engng, Vol. 59, pp. 42-51, 1981.
- (5) G.B.Willis, "One dimensional two-phase flow", McGraw-Hill, 1969.
- (6) T.Z.Harmathy, "Velocity of Large drop and bubbles in Media of infinite or Restricted extent", AIChE J.Vol.6, pp.281-286, 1960.
- (7) L.Friedel, "Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow." Paper E2, European Two-Phase Flow Grop Meeting, Ispra, Italy, 1979.
- (8) Y.Taitel and A.E.Dukler, "Multiphase Science and Technology", Vol.2, Hemisphere Publishing Corporation, 1986.

### 저 자 소 개



#### 조대환(趙大煥)

1964년 2월생. 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1995년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 졸업(공학박사). 1급기관사. 현재 목포해양대학교 전임강사. 당학회 증신회원



#### 박진수(朴燦洙)

1957년 3월생. 1978년 목포해양대 기관과 졸업. 1998년 목포대학교 기계공학과 졸업(석사). 1998년-현재, 목포해양대학교 전임강사.