

공기양정(Air-Lift)펌프의 양수특성에 관한 연구

김동균* · 이철재** · 배석태** · 조대환***
(99년 5월 10일 접수)

A Study on Lifting Characteristics of Air-Lift Pump

Dong-Kyun Kim* · Cheol-Jae Lee** · Suk-Tae Bae** · Dae-Hwan Cho***

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 onboard 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 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. The comparison between riser performance of the conveyed liquid flow rate calculated by the computer program and measured data with large scale air lift pump system constructed in 200 meter depth vertical tank reveals similar distribution.

1. 서 론

공기양정(air-lift)펌프는 양수 조작이 어려운 곳이나 물밑의 탐사, 특히 수중의 부서지기 쉬운 침전물을 손상시키지 않고 제거하거나 회전 임펠러를 손상시킬 수 있는 혼합물의 이송에 이용하는

특수한 양수펌프이다. 이 펌프는 회전 또는 가동부가 없기 때문에 내식성을 요하거나 특히 유지보수가 어려운 가혹한 환경에서 용이하게 이용할 수 있는 장점을 지니고 있으며, 최근에는 심해저의 광물자원으로 각광받는 망간 단괴의 수력펌핑에 의한 채광 기술¹⁾로의 적용이 연구되고 있다.

* 동아대학교 대학원

** 동명대학

*** 정회원, 목포해양대학교 기관공학부

그러나 공기양정펌프는 효율이 낮기 때문에 널리 사용되지 않고 있다. 지금까지의 관련된 주요 연구 결과를 보면, Nicklin²⁾이 수직 관에서의 이상(二相)류인 슬러그류의 기포들의 움직임을 고찰하여 이들의 상승 속도에 관한 실험식을 레이놀즈수 8×10^3 에서 제안하여 여러 연구자들이 이 결과를 인용³⁾하고 있다. Stenning⁴⁾은 전 양정 4.26m, 라이저(riser)의 내경 2인치의 조건에서 라이저의 일부가 수면 하에 잠겨 있을 때의 가스-액체 사이의 마찰과 슬립을 고려한 1차원적인 공기양정 펌프의 운전 특성에 관하여 정량적인 데이터를 제시하였다. 그리고 라이저에서 부유물을 갖는 공기양정펌프에 대한 연구 결과가 Heywood⁵⁾에 의해 발표되었다. 이와 같은 배경에서 이 연구에서는 공기양정펌프의 주요부분인 라이저 즉, 수직상승관에 대한 기액 유동 이론 및 기존의 연구 결과에 따른 실험식을 이용한 성능예측 프로그램에 의해 양수 특성을 운전조건에 따라 고찰하고 기존의 실험결과와 비교하였다. 그 결과 공기양정펌프의 양수성능은 잠수비와 라이저의 단면적에 근사적으로 선형비례하며 최적의 효율이 얻어지는 가스질량유량을 설정할 수 있음을 보였다.

2. 원리 및 이론해석

Fig. 1은 공기양정펌프의 배치도를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 라이저의 하부에서 가스(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 고형 혼합물들이 동반하여 이송된다. 이 연구에서는 고체 성분을 제외한 순수한 기액이상류의 관점에서 라이저 내부의 유동의 운동량 보존식에 의해 공기양정펌프의 양수특성을 예측하고자 하였다.

공기양정펌프의 라이저 입출구의 정압의 차이는 운동량보존의 원리에 의해 식(6)으로 표현된다.

$$(p_2 - p_1) = \int_1^2 \left(\frac{dp_g}{dz} + \frac{dp_f}{dz} + \frac{dp_a}{dz} \right) dz - \Delta P_m \quad (6)$$

보이드율 α 는 drift-flux모델에 의해서 계산한다. 이 모델의 중요한 특징은 관련된 상(phase)들의 상대적인 운동을 고려하는 점이다. 가스상의 drift 속도 U_{GV} 는 실제 가스상 속도와 총 결보기 속도 $V (= V_G + V_L)$ 의 차로 정의되며, 슬러그 흐름에 있어 가스상 속도는 기포 상승 속도 U_b 와 같다. 총 결보기 속도 V 가 정체된 흐름 내의 기포가 단일기포의 상승 속도 U_∞ 의 속도를 갖는다고 가정하면 기포 상승 속도는 식(7)과 같다.

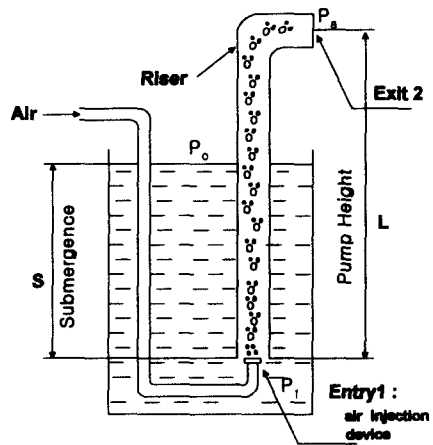


Fig. 1 Operation of air-lift pump

Table 1 Summary Component equations

Component	Equation
Gravity	$\frac{dp_g}{dz} = -\frac{g}{g_c} [a\rho_G + (1-a)\rho_L]$ (1)
Friction	$\frac{dp_f}{dz} = \phi^2_{LO} \times \left(\frac{dp_f}{dz} \right)_{LO}$ (2)
Momentum change	$\frac{dp_a}{dz} = -\frac{G^2}{g_c} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\rho_H} \right)$ (3)
Mixer loss	$\Delta p_m = -\frac{\dot{m}_L}{Ag_c} \left(\frac{V_L}{1-a} - V_L \right)$ (4)
Power	$P = \frac{p_{atm} \dot{m}_G}{\rho_{atm}} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left[\left(\frac{p_1}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$ (5)

Nicklin 등²⁾은 이상류에서 액체흐름에 대한 기포의 운동에 관한 실험 연구를 통하여 기포들이 액체의 중심선 속도에 대하여 상대적인 속도로 상승함을 보고하고 식(7)의 상수가 $k=1.2$ 의 실험식을 제안하였다. 여기에서 상수 k 는 난류배관유동에서 평균 유속에 대한 중심선 속도의 비를 나타낸다. 그리고 자유표면이 존재하는 유동의 차원해석으로부터 U_∞ 는 식(8)로 나타낼 수 있다. 식(8)에서 K 는 0.345의 값을 갖는다.

Wallis⁶⁾는 점성과 표면장력 효과를 고려하여 K 의 값을 식(9)와 같이 제시하였다. 여기에서 N 은 무차원 점도역수(dimensionless inverse viscosity)이고 N_{Eo} 는 Harrathy에 의해 제안된 Eötvös⁷⁾이다.

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

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

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

보이드율(V_G/U_b) α 는 식(7)과 식(8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{V_G}{1.2(V_G + V_L) + K\sqrt{gD}} \quad (10)$$

압력구배의 마찰 성분의 계산은 2상유동마찰손실배수 ϕ^2_{LO} 에 의해 표현된다. 여기에서 $(dp_f/dz)_{LO}$ 은 총 질량유량(가스+액체)을 모두 액체로서 취급하여 구한 단상마찰 손실이다. 2상마찰손실배수 ϕ^2_{LO} 의 계산은 Friedel⁸⁾이 제안한 식(11)에 의한다.

$$\phi^2_{LO} = E + 3.24FH / (F_r^{0.045} W_e^{0.035}) \quad (11)$$

라이저 내부의 관내 마찰은 식(12)에 의해 계산하며 Re 는 f_{CO} 의 경우 Re_{CO} , f_{LO} 의 경우 Re_{LO} 를 적용한다. 여기에서 f_{CO} 와 f_{LO} 는 총 질량유량을 각각

모두 가스가거나 모두 액체라고 가정할 때의 Fanning 마찰계수이다.

$$f = \left[3.6 \log_{10} \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7D} \right)^{1.1} \right) \right]^{-2} \quad (12)$$

표1의 압력구배에 따른 동압력변화 성분의 계산은 균질흐름 이론(homogeneous flow theory)을 이용하였다. 이 경우 양쪽 상이 완전하게 섞여서 밀도와 속도가 단일 값으로 되므로 표1의 식(3)으로 표현된다.

라이저의 하부에서 주입 가스와의 혼합에 의해 발생하는 혼합기(mixer)의 손실은 라이저의 초기 입구 부분에서만 존재한다고 가정하고 가스 측의 질량과 운동량을 무시하여 표1의 식(4)에 의해 구한다.

라이저 입구부의 압력 p_1 은 식(13)으로 표현되며, 하강관(downcomer)이 존재하는 경우에 발생하는 압력 손실 Δp_d 는 식(14)에 의해 구한다.

$$p_1 = \rho_L g S + p_{atm} + \Delta p_d \quad (13)$$

$$\Delta p_d = - \frac{\rho_L V^2 L}{2g_c} \left(K_f + \frac{4fL_d}{D} \right) \quad (14)$$

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(13)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 Dukler⁹⁾의 그림으로부터 식(15)로 구할 수 있다.

$$V_G = \frac{3.1}{\rho_G^{0.5}} [\sigma g g \alpha (\rho_L - \rho_G)]^{0.25} \quad (15)$$

라이저의 입구 압력 p_1 까지 등엔트로피적으로

가스를 압축하는데 필요한 동력은 Table 1의 식(5)에서와 같이 계산된다.

3. 성능해석

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

Table 2는 계산에 채택한 배관용 스테인레스 강관의 JIS-G-3459 및 ASTM A312, BS3605(STS 304 TP)규격을 나타내고 있다.

Table 3은 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.

Table 2 Specification Stainless steel pipe(Sch40) unit(mm)

Nominal size	Outside diameter	Wall thickness	Inside diameter	Roughness
50A	60.5	3.9	52.7	25 × 10 ⁻³
65A	76.3	5.2	65.9	
80A	89.1	5.5	78.1	
100A	114.3	6.0	102.3	
125A	139.8	6.6	126.6	

Table 3 Program input data

	a	b	c	d	e	f	g	h
D[m]	0.0659				0.0527	0.0781	0.1023	0.1266
S[m]	2	3	3.9	4.6	3	3	3	3
L[m]	7	8	8.9	9.6	8	8	8	8

- Atmospheric pressure : 101300 [Pa]
 - Inlet pressure : 101300 [Pa]
 - Pump exit pressure : 101300 [Pa]
 - Pump operating temperature : 15~30[℃]
 - Riser effective roughness height : 25E-6[m]

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

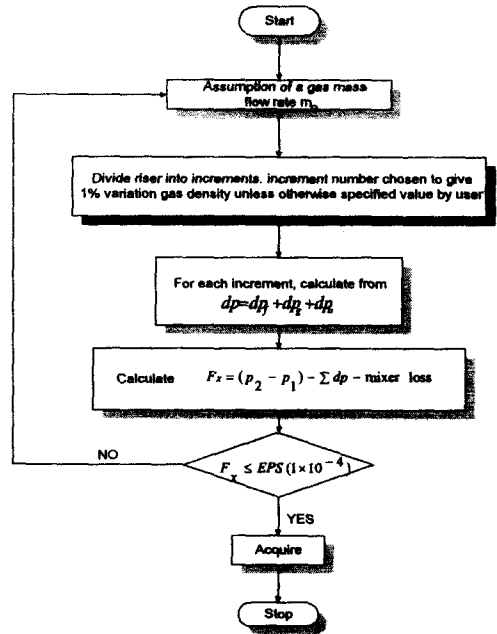


Fig. 2 Flow chart of performance calculation

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 잠수비가 S/L = 0.375로 일정할 때 스테인레스 파이프의 내경이 공칭규격으로 50A에서 125A까지 5종류에 대한 계산을 하고 양수특성을 도시하였다. 슬러그류에 있어서 라이저의 단면적이 증가함에 따라 양수량이 일정한 기울기를 갖는 단조증가의 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 가스질량유량이 일정할 경우 라이저의 관 직경의 변화에 따른 액체질량유량을 도시하였다. 가스질량유량의 변화에 따른 토출량은 라이저의 직경변화에 따라 최적의 가스질량유량이 얻어질 수 있음을 보이고 있다.

Fig. 5의 성능곡선은 하강관이 없을 경우 라이저 직경 0.0659m에 대하여 주입공기의 질량유량에 따른 양수량을 잠수율의 변화에 따라 도시한 것이다. 잠수율에 대한 라이저의 높이의 비가 1에 근접함에 따라 양수량이 거의 비례적으로 증가하고 있다. 그리고 양수량은 라이저에 공급되는 구동 공기량이 증가함에 따라 정점에 도달 한 후 감소함을 알 수 있다. 이것은 정점 이후에 슬러그가 깨지게 되어 churn-turbulent 흐름 영역으로 천이 되기 때문이다.

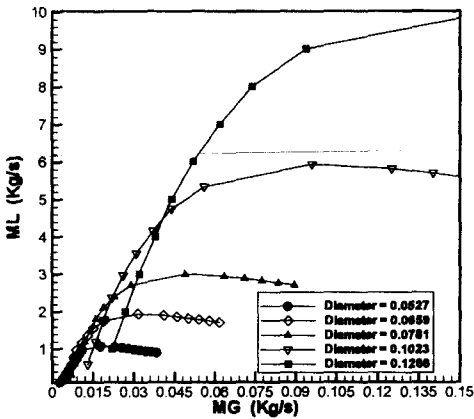


Fig. 3 Pump operating curves according to pipe diameter of stainless steel ($S/L = 0.375$)

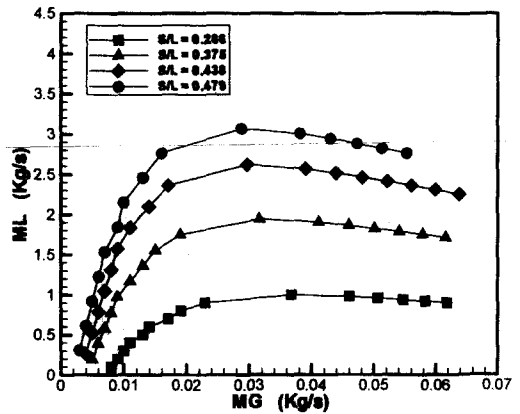


Fig. 5 Pump operating curves of submergence rates (stainless steel pipe diameter : 0.0659m)

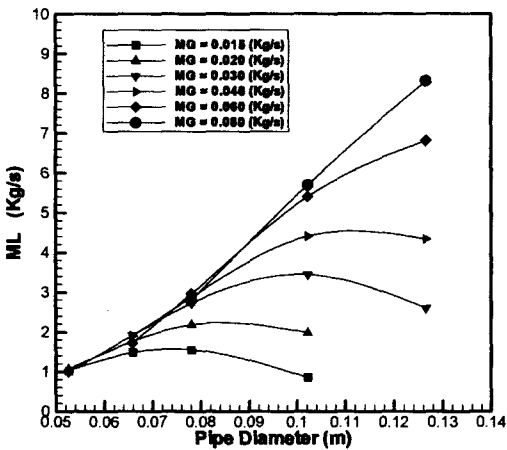


Fig. 4 Pump operating curves according to mass flow rate of gas ($S/L = 0.375$)

Table 4 Effective roughness height

Material(pipe)	Typical effective roughness height(meter)
Cast iron	180×10^{-6}
Grass, plastic	1.5×10^{-6}
stainless steel	25×10^{-6}
Carbon steel, new	45×10^{-6}
Carbon steel, galvanized	150×10^{-6}
Carbon steel, modeate corrosion	250×10^{-6}

Table 5 Comparison data for Fig. 8

No.	S [m]	L [m]	D [mm]	Remark
1	9.962	11.72	46.7	Experiment
2	9.894	11.64	75.7	Calculation
3	10.013	11.78	129.5	Calculation
4	12.40	18.24	155.4	Experiment
5	27.73	32.63	155.4	Experiment

이 경우 마찰에 의한 압력강하 현상은 송기량의 증가와 더불어 급격하게 증가하기 때문에 추가적인 공기량의 증가는 액체의 양수량을 오히려 줄어 들게 된다. 즉, 라이저의 단면적과 잠수비가 일정하게 설계되었을 때에는 최적의 효율을 얻을 수 있는 가스질량유량을 설정할수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 계산조건중 온도를 15℃에서 30℃까지 5℃간격의 변화를 주었을 때 가스질량유량에 대한 양수특성을 도시한 것이다. 온도에 따른 양수특성은 최적의 가스질량유량보다 많은 공기를 공급할 경우 온도의 증가에 따라 효율의 감소폭이 커지고 있으나, 최적의 가스질량유량이 공급되는 점에서는 거의 영향이 없음을 나타내고 있다. 따라서 공기양 정펌프의 운전조건의 설정에 온도의 영향을 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

Fig. 7은 라이저로 이용되는 상용관의 내부 거칠기(Table 4)가 양수특성에 미치는 영향을 계산하여 나타낸 것이다. 관의 내벽의 거칠기가 클수록 양수 특성이 크게 저하됨을 알 수 있다. 플라스틱재질과 철재파이프(carbon steel pipe, moderate corrosion)를 비교하여 보면, 가스질량유량 0.012kg/s를 기준으로 거칠기가 낮은 플라스틱 재질의 라이저에서 토출되는 액체질량유량이 약 14% 정도 높게 나타나고 있다. 따라서 공기양정펌프의 라이저 재질에 관한 사항도 구조 강도 및 이송유체의 종류에 따른 부식의 영향 등과 함께 설계에 반영되어야 한다.

Fig. 8은 200m의 깊이를 갖는 거대규모의 공기양정 펌프시스템의 실험¹⁰⁾에서 비교데이터로 제시하였던 실험역실험과 수치계산의 운전조건을 이 연구에서 개발한 공기양정펌프의 성능해석 컴퓨터프로그램에 적용하여 상호 비교하여 나타낸 것이다.

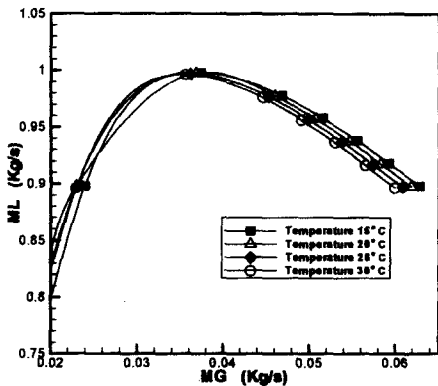


Fig. 6 Pump operating curves according to operating temperature(pipe diameter : 0.0659m)

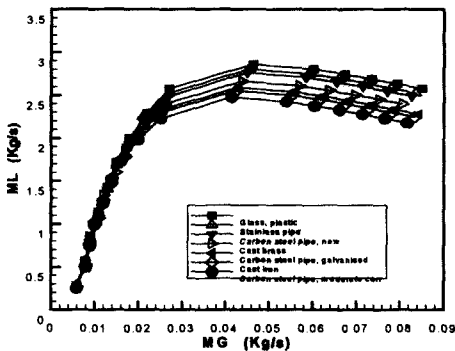


Fig. 7 Pump operating curves of pipe roughness (pipe diameter:0.0527, S/L = 0.286)

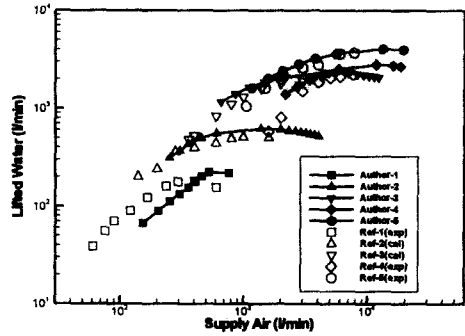


Fig. 8 Comparison of liquid flow rate

Table 5는 일본 공해자원연구소의 40m의 실험역실험과 소규모 공기양정펌프의 수송특성수치계산의 운전조건을 나타내고 있다. 실험은 46.7mm와 155.4mm의 두가지 직경을 갖는 라이저에 대해 잠수비 변화에 따른 결과가 제시되었으며 75.7mm와 129.5mm의 직경에 대해서는 수치계산의 결과가 제시되었다. 2~40N³/min이고 잠수비는 0.68~0.8이다. 그림에서 5가지의 운전조건에서 조건2와 조건3의 경우 경향은 일치하고 있으나 따라 5가지 경우에 대해 비교한 수치계산의 결과 및 실험결과의 전체적인 경향은 일치하고 있다.그러나 가스질량유량이 다소 높게 나타나고 있는 점에 대해서는 차후에 면밀한 검토가 필요하다.

4. 결 론

이 연구에서는 라이저 내부의 기본 유동에 대하여 기존의 연구결과에 따라 제안된 실험식과 기액 유동의 이론을 바탕으로 공기양정 펌프의 성능 예측을 위한 전산프로그램을 개발하여 양수특성을 고찰한 결과 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 공기양정펌프(air-lift pump)의 양수성능은 잠수율에 대하여 거의 선형적으로 증가하고 라이저의 직경에 대해서는 일정한 기울기를 갖는 단조 증가의 경향을 나타내었다.
- 2) 공기양정펌프 라이저 내부의 유동형태가 슬러그에서 churn-turbulent 흐름으로 천이하기 직전의 정점에서 최적의 효율을 얻을 수 있는 가스질량유량을 설정할 수 있음을 보였다.

- 3) 최적의 가스질량유량이 공급되는 점에서 온도에 따른 양수효율의 변화는 거의 없으나 라이저의 내부 거칠기가 클수록 양수특성이 크게 저하된다. 가스질량유량 0.012kg/s를 기준으로 거칠기가 낮은 플라스틱과 철재파이프의 재질을 갖는 라이저의 경우 양수효율이 약 14%의 차이를 보였다.
- 4) 200m의 깊이를 갖는 거대규모의 공기양정 펌핑 시스템의 실험에 비교데이터로 제시된 실험실 실험 및 수치계산에서 얻어진 양수특성과 비교하여 유사한 결과를 얻었다. 동일한 가스질량유량에 대해 양수량이 다소 높게 나타난 것은 계산조건을 라이저내부의 기액이상류로 한정했기 때문이며 차후에 고체입자 수송을 포함하는 다상류의 유동특성을 포함하는 성능예측프로그램의 개발이 필요하다.

기호설명

- A : 흐름의 단면적, [m²]
 D : 배관내부직경, [m]
 G : 혼합체의 질량 속도, $4(\dot{m}_G + \dot{m}_L)/(\pi D^2)$, [kg/(Sm²)]
 g_c : 뉴우톤 제2법칙의 비례상수
 L : 펌프 높이, [m]
 m : 질량 유량, [kg/s]
 P : 정압, [Pa]
 S : 잠수높이, [m]
 U : 실제 상승속도, [m/s]
 U_b : 슬러그 흐름의 기포 상승 속도, [m/s]
 U_{GV} : 가스 drift 속도, $U_G - (V_G + V_L)$, [m/s]
 V : 총 이상(二相)겉보기 전속도, $(V_G + V_L)$, [m/s]
 z : 배관 축방향 길이(흐름 방향), [m]

그리스 문자

- α : 보이드율
 γ : 비열비
 σ : 표면장력, [N/m]
 ϵ : 유효 거칠기 높이, [m]

ρ_H : 혼합물의 균질밀도, $[x/\rho_G + (1-x)/\rho_L]^{-1}$, [kg/m³]

ϕ_{LO}^2 : 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 유동해석 연구", 제 2차 심해저 채광기술 세미나 논문집, pp.43~62, 1996
- 2) Nicklin, D.J., J.O. Wilkes and J.F.Davidsov, "Two-Phase Flow in Vertical Tube", Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol. 40, pp.61~68, 1962
- 3) 이상용, 김병주, 김무환, "이상유동열전달", 대영사, pp.216~234, 1993
- 4) Stenning, A.H. and C.B. Martin, "An Analytical and Experimental Study of an Air-Lift Pump Performance", Trans. ASME J. Eng. for Gas Turbines & Power, Vol. 90, pp.106~110, 1968
- 5) Heywood, N.L., 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
- 6) Willis, G.B., "One Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill, 1969
- 7) Harmathy, T.Z., "Velocity of Large Drop and bubbles in Media of Infinite or Restricted Extent", Amer. Inst. Chem. Eng. J. Vol. 6, pp.281~286, 1960
- 8) Friedel, L., "Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow," Paper E2, European

- Two-Phase Flow Group Meeting, Ispra, Italy, 1979
- 9) Taitel, Y., and A.E. Dukler, "Multiphase Science and Technology", Vol. 2, Hemisphere Publishing Corporation, 1986
- 10) Saito, T. et al., "Lifting Characteristics of Manganese Nodules by Air Lift Pump under Steady Conditions", Vol. 32, No. 10, 採鑛と保安, 1986