

해양심층수 취수를 위한 기포펌프의 적용성 연구

신필권* · 김현주* · 홍석원* · 최학선*

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

A Study on Applicability of Air-lift Pump for Deep Seawater pumping

P. K. Shin*, H. J. Kim*, S. W. Hong*, H. S. Choin*

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Deep Sea Water 해양심층수, Air-Lift Pump 공기양정(기포) 펌프, Gas-Liquid Flow(기-액 유동)

ABSTRACT: Deep sea water has cold temperature, abundant nutrients and minerals, and good water quality. For the purpose of drawing up deep sea water without pump pit construction, the authors are considering to use air-lift pump. This report describes fundamental experimental investigation for air-lift pump characteristic and improvement in efficiency.

1. 서 론

현재 전 세계적으로 인구증가와 환경오염에 따른 물 부족이 심화되고 있으며, 이에 대응하기 위한 다양한 수자원 보호 및 신규 수원 개발이 절실히 요구되고 있다. 우리나라도 예외는 아니어서 현재 수자원의 효율적 이용 및 취수원 다변화를 위해 노력하고 있다.

취수원으로서의 해양심층수의 이용은 최근에 주목받고 있는 분야이다. 해양심층수는 수심 200m 이하의 깊은 곳에 존재하는 해수자원으로 저온(2℃이하), 청정성, 부영양성, 미네랄성 등의 특징을 가지고 있어 에너지, 수산, 식품뿐만 아니라 식수로서도 활용이 기대되고 있다.

해양심층수를 이용한 제품의 가격을 낮추려면 먼저 저비용의 취수방법이 개발되어야 한다. 해양심층수 취수기술이 앞서 있는 일본에서는 취수된 해양심층수를 효율적으로 저수조로 송수하기 위하여 펌프를 사용하고 있으며, 효율을 높이기 위해 siphon을 이용하고 있다. Siphon을 이용하기 위해서는 펌프를 일정 깊이만큼 굴착하여 펌프를 저장하여 운용할 수 있는 펌프 피트(pit)를 건설해야 한다. 대개 펌프피트는 관경에 따라 다르지만 4~20m 정도 굴착하여 지반 아래에 건설하게 된다. 이때 펌프피트 건설에 따른 전체 취수비용이 상당히 증가하게 되며, 펌프피트를 건설하기 위한 넓은 공간도 조성되어야 한다. 따라서 별도의 펌프피트를 이용하지 않고 취수된 해양심층수를 저수조까지 효율적으로 송수할 수 있는 경제적으로 뛰어난 취수방법이 요구된다.

본 연구에서는 펌프 피트를 건설하지 않고 해양심층수를 취수할 수 있는 방법으로 기포펌프(또는 공기양정펌프)(airlift pump)를 활용하는 방안이 주목하여 이의 적용성에 관한 기초

적 실험을 수행하였다. 기포펌프는 수중에 잠긴 양수관(揚水管) 아래 끝으로 압축공기를 불어 넣어 기포가 관 안에서 상승하면서 물을 끌어올리는 펌프이다. 비교적 구조가 간단하고 다른 동력이 거의 필요 없으며 압축공기만으로 급수된다는 장점이 있다. 이를 심층수 양수에 적용할 경우 심층수내의 용존산소량을 증가시키는 효과도 기대할 수 있어 심층수를 수산양식에 이용할 때 이점이 된다.

2. 본 론

2.1 기포펌프의 개념

Fig.1은 기포펌프의 구조와 작동원리를 나타낸다. 공기관을 통해 압축공기를 양수관 속으로 혼입시키면, 양수관 속은 물보다 가벼운 기-액 혼합체로 되므로 부력의 원리에 따라 관 외부의 물에 의하여 양수관 입구의 물을 밀어 올리게 된다. 관내에 주입된 기포는 위로상승하면서 관내 압력감소에 의해 팽창하게 되는데 이때 양수관 내에는 기포-유체, 기포-기포의 상호작용에 따라 기포유동(bubble flow), 슬러그 유동(slug flow), 거품유동(froth flow), 환상유동(annular flow), 안개유동(mist flow) 등 다양한 기-액상의 유동패턴이 형성·소멸된다. 양수관 길이가 매우 길어서 기포 팽창이 문제가 되는 경우에는 하류관 직경을 단계적으로 확대하거나 양수관 토출부에 배압을 걸어 기포의 팽창을 억제하는 방법을 사용될 수 있다.

기포펌프는 구조가 간단하고 가동부가 없기 때문에 수리의 염려가 적으며 내식성을 요하거나 가혹한 환경에서도 사용이 가능한 장점이 있다. 그러나 다음과 같이 수동력과 압축기 동력으로 표현되는 효율이 15~30% 정도로 낮은 단점이 있다.

$$\eta = \frac{\text{수동력}}{\text{공기압축기 축동력}} = \frac{\gamma Q H}{L} \quad (1)$$

일반적으로 기포펌프의 양수량은 다음과 같은 항목들에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다.

- 공기주입율 : Q
- 잠수비 : H_s/L
- 상승관 직경
- 혼합물의 총 높이 : $L = H_s + H_L$
- 상류관 길이 : H_u

본 실험에서는 비교적 큰 관경을 지닌 기포펌프의 공기주입량(Q)과 잠수비(H_s/L)의 관계를 중심으로 펌프 성능을 조사했다.

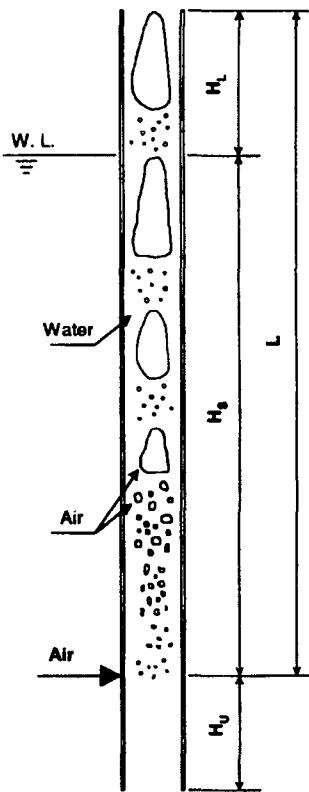


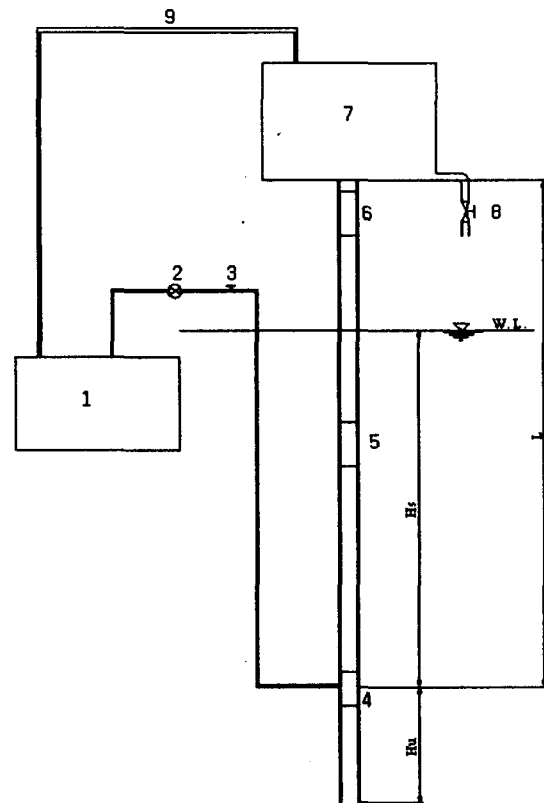
Fig.1 Schematic of air-lift pump

2.2 실험장치 및 방법

해안에서 3km~4km 떨어진 지점에서 수심 300m 이하의 해양심층수를 하루 5000톤 취수한다고 가정하면, 약 10m이상의 펌프피트를 건설해야 원활한 취수가 이루어진다. 그러므로 기포펌프의 상승관 길이도 10m이상으로 제작해야 실제 적용 가능한 데이터를 얻을 수 있다.

Fig.2는 위와 같은 상황을 고려해 설계한 기포펌프 시스템의 개략도이다. 상승관의 직경은 125mm이고 전체 길이는 10m이다. 공기압축기(1)는 V형 왕복동식이며 최대 토출량은 1272ℓ/min이다. 공기압축기에 전동기 속도를 제어할 수 있는

인버터를 설치하여 토출량을 조절할 수 있도록 했다. 공기유량계(2)는 맥동류에도 오차발생이 적은 면적식 유량계를 설치했으며 유량을 미세하게 조절하기 위해 유량조절밸브(3)를 설치했다. 기포분사 장치(4)는 Fig.3에 나타난 것처럼 공기분사프레임에 다양한 크기의 노즐을 교체할 수 있도록 하여 기포크기를 최적으로 조절할 수 있도록 했다. 또한 swirl을 일으켜 기포 상승에너지를 극대화 시키고 기포가 상승관 중앙으로 부상할 수 있도록 분사노즐을 배열했다. 상승관 재질은 PVC 이며 상부 두 지점에 투명관(5, 6)을 설치하여 유동형태를 파악할 수 있도록 했다. 공기탱크(7)는 기액 분리장치가 설치되어 있으며 밀봉이 되어 있어 압력조절이 가능하다. 이는 기포의 팽창을 제어할 수 있도록 하기 위함이다. 또한 탱크의 압축공기를 공기압축기로 보내 압축기 효율을 높임으로써 기포펌프의 단점인 낮은 효율을 개선하고자 했다. 본 실험은 설계한 기포펌프 시스템의 대략적인 성능을 파악하고자 하는 것이므로 압축공기 순환 및 공기탱크 압력의 효율은 논의하지 않았다.



- 1: 공기압축기 2: 유량계 3: 유량조절밸브 4: 기포분사장치
- 5, 6: 투명관 7: 공기탱크 8: 유량조절밸브
- 9: 압축공기 순환관

Fig.2 Arrangement of experimental apparatus

Fig.4는 제작된 기포펌프가 깊이 16m 수조의 수면위에 있는 사진이다. 기포 주입시 부력이 발생하여 상승관이 수직상태를 유지하기가 어려우므로 상승관 하단에 중량추를 매달아 수직상태가 유지되도록 했다.

기포펌프의 토출유체는 기-액 혼합액이며, 왕복동형 압축기를 사용하므로 약간의 맥동이 가미된 상태로 토출되므로 유량 센서나 기계식 계측기 등을 통한 정확한 유량계측이 어렵다. 그러므로 본 실험에서는 일정량이 토출되는 시간을 측정해 유량을 계측했다. 유량은 각 실험조건에서 6회씩 측정하여 최대 및 최소치를 제외한 4회의 평균값을 사용했다.

실험조건은 Table.1과 같다. 상승관의 직경은 125mm로 일정하고 공기분사 노즐은 출구직경 2mm인 노즐을 사용했다. 잠수비(H_b/L)는 0.5부터 0.05씩 증가시켰으며 이에 따라 주입수심(H_s)을 결정했다. 공기량은 $0\text{kg/s} \sim 0.0212\text{kg/s}$ 범위에서 미소하게 변화시켰다.

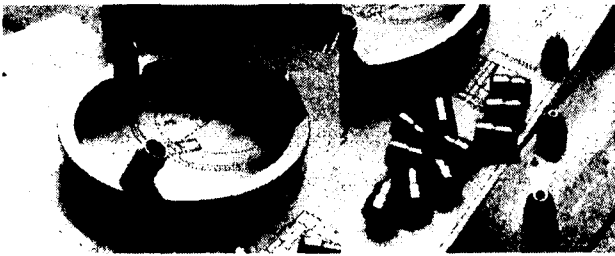


Fig.3 Air injection frame (left); Air Nozzle (right)



Fig.4 Overview of air-lift pump system

Table.1 Experimental conditions

주입수심(H_s)	양수높이(L)	양정(H_t)	잠수비(H_b/L)
4.5	9m	4.5	0.5
4.95		4.05	0.55
5.4		3.6	0.6
5.85		3.15	0.65
6.3		2.7	0.7
6.75		2.25	0.75

2.3 결과 및 고찰

Fig. 5는 잠수비를 변화시켰을 경우 공기량과 양수량의 관계를 나타낸 것이다. 잠수비가 일정할 경우 공기량 증가에 따라 양수량은 정점에 도달한 후 감소하는 경향이 나타난다. 그리고 잠수비가 증가할수록 양수량은 증가한다. 그래프에서 점선은 각 잠수비에서 최대 양수량 조건을 연결한 것이다. 잠수비가 작아질수록 최대 양수량을 얻기 위해서는 더 많은 공기량을 주입해야한다. 이 그래프는 기포펌프의 전형적인 특성을 나타내고 있다. 공기량 증가에도 불구하고 양수량이 증가감소 경향으로 나타나는 것은 정점이후에 슬러그가 깨져 거품유동이나 환상유동으로 변하기 때문이다. 이론적으로 최대 양수량은 유동형태가 슬러그에서 chun-turbulent 흐름으로 천이하기 직전에 얻을 수 있다고 알려져 있다.

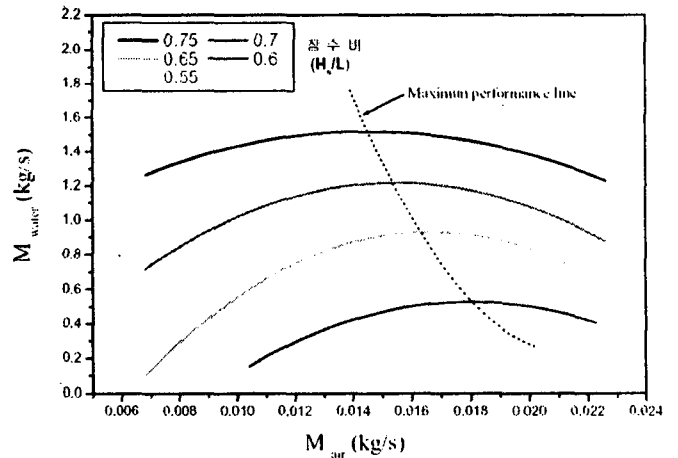


Fig. 5 Variation of water flow with air flow and maximum performance curve

Fig.6는 최대 잠수비(0.75)에서 최대 양수량이 나타나기 직전과 직후의 상승관 내의 유동사진이다. 왼쪽 파이프 사진은 공기량이 0.012kg/s 일 때이며 오른쪽은 0.018kg/s 일 때이다. 하부 사진을 보면 두 조건 모두 슬러그와 거품이 공존하는 유동 형태이며 오른쪽 유동은 거품 유동이 거의 주를 이루는 것을 볼 수 있다. 상부에서는 그 차이가 더욱 뚜렷이 나타난다. 즉 상부 오른쪽 유동관을 보면 물이 끓는것 같은 거품형태로 토출이 일어난다.

이 두 조건에서의 식(1)로 효율을 계산했을 때 20% 이하의

효율이 얻어졌다. 그러므로 기포펌프의 효율향상을 위해서는 토출부의 압력을 대기압 이상으로 높여 과도한 기포생성을 억제하는 동시에 여기서 압축된 공기를 재활용하는 방법이 필요하다고 판단된다.



Fig.6 Air lift patterns in riser according to mass flow rate of air
(Left: $M_{air}=0.012$ kg/s, right: $M_{air}=0.018$ kg/s)

Fig.7은 공기량변화를 기준으로 잠수비와 양수량의 관계를 나타낸 것이다. 공기량이 일정한 경우 잠수비와 양수량은 거의 비례관계에 있다. 공기량이 감소할수록 곡선의 기울기가 커지며 그래프의 오른쪽으로 이동한다. 즉, 공기량이 감소할수록 잠수비 변화에 민감하게 반응하며, 양정(H_L)은 급격히 감소함을 볼 수 있다.

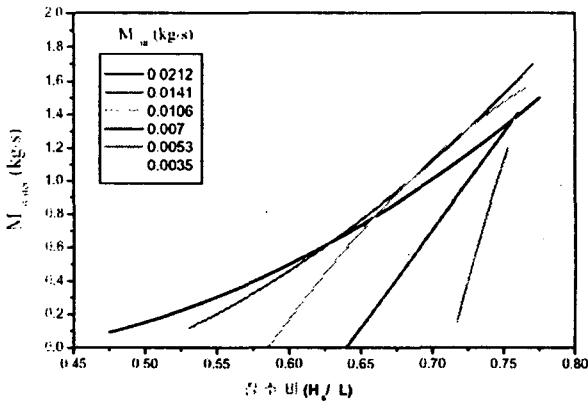


Fig.7 Variation of water flow with submergence ratio

5. 결 론

펌프 피트를 건설하지 않고 해양심층수를 취수할 수 있는 방법으로 기포펌프를 활용하는 방안이 주목하여 이의 적용성을 실험하였다.

실험결과 기포펌프를 적용하기 위해서는 무엇보다 20%이하로 나타난 낮은 효율을 향상시키는 것이 필요하다. 이를 위해서는 관직경 및 길이에 따라 최대 토출량을 얻을 수 있도록 기포분사 노즐의 크기와 토출압을 최적화 시켜야 하며, 토출압을 공기압축기로 재순환 시켜 압축기 효율을 향상시키는 방안을 고려할 수 있다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 '해양심층수 다목적 개발' 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Collier, J. G. and Thome, J. R. (1996). "Convective Boiling and Condensation", McGraw Hill Book Co., New York.
- Davies, R.M and Taylor, G.I. (1950). "The Mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes", Proc. Roy. Soc. Vol A200, pp357
- Nicklin, D. J. (1963). "The air lift pump : theory and optimization", trans. Chem. Engrs. Vol.41, pp29-39
- Nicklin, D.J and Wilkes and J.F. Davidso. (1962) "Two-Phase Flow in vertical tube", Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol. 40, pp 61-68
- Pickert, F. (1932). "The theory of air lift pump", Engineering, Vol.34, pp 19-20
- Stenning, A. and Martin, C. (1968) "An analytical and experimental study of air-lift pump performance", ASME journal of engineering for Power, pp106-110
- Reinemann, D.J. (1987) "A theoretical and experimental study of airlift pumping and aeration with reference to aquacultural applications", PhD. thesis, Cornell Univ