

소형 에어리프트 펌프의 성능특성에 관한 연구

A Study on Performance Characteristics of Small Airlift Pump

오세경 · 이강용

S. K. Oh and G. Y. Lee

Key Words : Airlift Pump(에어리프트 펌프), Water Flow Rate(유량), Aeration(기포 혼입), Submergence Ratio(잠수비), Air Flow Rate(공기량)

Abstract : Performance data in the literature on air lift pumps have been based primarily on pumps of long length and large diameter (high lift pumps). Since mariculture operations involve pumps of relatively short length and small diameter, performance data are required for efficient operation. To provide such data, an experimental apparatus was designed and fabricated to test all lift pumps from 2.1 to 3.4 cm inside diameter and from 40 to 300 cm in length. Instrumentation was provided to measure water flow rate and air flow rate as well as water temperature, air temperature, and pressure throughout the system. Results from this study correlate well with high lift pump data in that, for a given pump geometry, maximum water flow occurs for a specific air flow rate. Driving the pump with air flows larger or smaller than this optimum flow rate will decrease the pumping rate. The optimum flows are significantly different for low lift pumps compared to high lift pumps. However, the pumping rate for low lift pumps approaches that for high lift pumps with increasing length.

1. 서론

에어리프트 개념은 독일 광부 Carl E. Loescher에 의해서 1797년에 발견되었다. 그 후 에어리프트 펌프는 거의 50년 동안, 주로 지하의 깊은 물을 퍼 내거나 광산에서 광물을 채취하는 데 사용되었다. 그러다가 Deviney¹⁾는 흡입물질이 펌프에 부착되어 손상을 주거나 펌핑 도중 부서지기 쉬운 내용물을 제거하는 수중 작업에 응용하였고, 1974년 Andeen²⁾은 이상류의 흐름을 이용하여 하수 폐수를 처리하는데 사용하게 되었다.

Picker³⁾는 수심이 350 m나 되는 깊이에서 광범위한 운전조건을 주어 일련의 실험을 행하였고, Rennick와 Rough⁴⁾는 층류 흐름으로 기름과 함께 운전되는 에어리프트 펌프를 하나의 모델로 하여 펌프의 성능 시험을 행하였다.

에어리프트 손실은 기포가 상승할 때 일어나는

슬립 손실과 펌프의 출·입구 손실이 있는데, 공기의 슬립 손실은 다른 손실에 비해 압도적으로 크다. Stepanoff⁵⁾는 '에어리프트의 열역학적 이론'이란 논문에서 에어리프트 펌프에 마찰 손실을 고려하여 이론적으로 해석하였다.

Spotte⁶⁾는 기계식 펌프보다 에어리프트 펌프가 저수두 고압 운전할 때 원심펌프보다 효율이 높은 것을 입증하였다. 에어리프트 펌프는 운반, 설치, 설계, 제작, 운전 등이 용이하고 단순한 해양생물 양식에 특별한 문제가 되고 있던 산소 공급이나 물 순환 등을 해결해 주는 방법으로 가장 널리 사용하게 되었다. 그러나 지금까지 나온 문헌에는 에어리프트 펌프의 성능 데이터(Spotte; Stennlng and Martin⁷⁾; Hervol and Pyle⁸⁾)는 주로 길이가 3.7 m 이상의 고양정 펌프의 실험에 근거를 두고 있었다.

이 논문은 양식업자들이 해양생물 계통에서 일반적으로 사용할 수 있는 저양정펌프에 관한 성능 데이터를 찾는 데 목표를 두었다. 그래서 각 펌프의 성능 데이터를 얻기 위해 여러 가지 실험장치를 만들었으며, 최대 펌핑을 얻기 위해 잠수비를 조정

접수일 : 2000년 7월 1일
오세경 : 경상대학교 수송기계공학과/해양산업연구소
이강용 : 경상대학교 기관공학과 대학원

해 에어리프트에 맞는 성능 데이터 등을 나타내도록 하는데 노력하였다. 그리고 연구의 필요성에 따라 파이프 직경과 길이와의 관계, 잠수비와 토출유량과의 관계, 공기량과 물의 토출량과의 관계를 비교하여 에어리프트 펌프의 성능을 규명하려 하였다.

2. 이론

에어리프트 펌프는 파이프가 물에 얼마나 잠겨 있느냐 하는 비율에 따라 성능에 상당한 변화를 준다. 에어리프트 펌프는 파이프 밖의 물과 파이프 안의 물-공기의 혼합물 사이에 존재하는 비중차로 운전된다. 만일에 공기가 분사되지 않으면 관내의 압력은 관 밖의 압력과 같다.

관 속으로 공기의 분사를 계속하면 관 속에 있는 물-공기 혼합물의 비중은 낮게 된다. 그리고 관로 내부 및 외부의 압력이 균형상태에 있다면 그 관계를 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$x\gamma_m = x_1\gamma \quad (1)$$

공기가 물보다 밀도가 낮기 때문에 혼합물의 비중은 물의 비중보다 낮다(즉, $\gamma_m < \gamma$). 그리고 x 는 식(1)에서 평형을 유지하기 위하여 x_1 보다 크지 않으면 안 된다. 이와 같이 해서 파이프 안의 물-공기 혼합체는 식(1)이 충족될 때까지 상승한다.

그리고 공기공급이 계속됨에 따라 $x_1\gamma$ 는 $x\gamma_m$ 보다 크게 되어 충분한 공기흐름이 유지되는 한 에어리프트 하단부 속으로 물이 흡입될 만큼 힘을 얻어 펌핑은 계속된다.

그러나 만일 공기가 연속적인 상태로 에어리프트 펌프 속으로 과다하게 공급된다면 비중은 상당히 차이가 나서 균형을 잃게 된다. 즉, $x - x_1$ 은 펌프의 리프트 x_2 를 초과 할 것이고 에어리프트 상단부에서 슬립 현상이 생겨 물은 배출되지 않고 공기만 배출될 것이다.

$x\gamma_m$ 과 $x_1\gamma$ 가 같게 될 때 공기는 펌핑을 유지시키는데 필요한 최소량만 흐르게 된다. 만일 x_2 가 펌핑이 시작되는 지점과 같다면 잠수된 파이프의 길이 x_1 과 공기량 G 와의 관계는 Andeen에 의해서 다음 식(2)로 주어진다.

$$x_2 = \frac{G}{1 - Gx_1} \quad (2)$$

그림 1에서 도시한 바와 같이 공기가 주입됨에 따라 물은 속도 V_1 을 갖고 펌프의 하부로 빨려 들

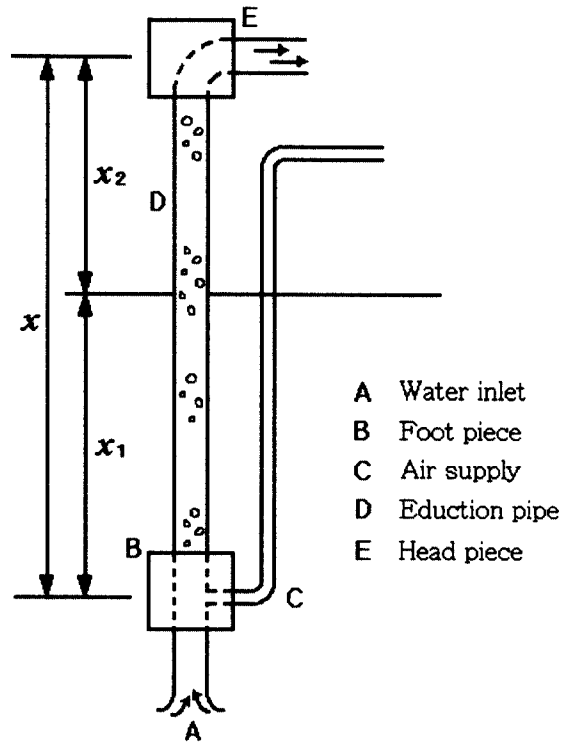


Fig. 1 Schematic of airlift pump

어가 공기와 함께 혼합되어 분출된다. 그 혼합체는 속도 V_2 를 갖고 파이프 속에서 상승하게 되는 데 이 때 공기와 물의 상승속도는 동일한 것으로 가정한다. 그 다음 배출도중 공기와 물 사이에서 약간의 분리 현상이 일어나며 각 성분들은 그 자신의 평균 속도 (V_g : 공기의 평균 속도, V_f : 물의 평균 속도)를 갖고 상승한다.

펌프 입구에서 정압을 P_1 이라고 하면 베르누이 정리로부터 펌프내의 압력을 식(3)으로 나타낼 수 있다. 여기서 P_a : 대기 압력, ρ_f : 액체 밀도, g : 중력가속도, g_c : 뉴턴의 제2법칙의 상수.

$$P_1 = P_a + \rho_f \frac{g}{g_c} H - \rho_f \frac{V_1^2}{2g_c} \quad (3)$$

공기 블로워에서 공기유량 Q_g 가 분사된다면 분사기를 떠난 혼합체의 속도를 V_2 라고 하고 공기 밀도의 변화를 무시하면 유체흐름은 다음 방정식(4)로 나타난다. 여기서 Q_f 는 물의 유량이다.

$$AV_2 = Q_g + AV_1 = Q_g + Q_f \quad (4)$$

이것을 혼합체의 유출 속도로 나타내면 다음 식(5)와 같이 나타난다.

$$V_2 = V_1 \left(1 + \frac{Q_g}{Q_f}\right) \quad (5)$$

에어리프트 펌프 상·하단부에서 물의 흐름 상태를 알기 위해 연속흐름 방정식을 쓰면,

$$\rho_2 AV_2 = \rho_f AV_1 \quad (6)$$

를 얻는다($\rho_g < \rho_f$).

$$\rho_2 = \rho_f \frac{V_1}{V_2} = \frac{\rho_f}{\left(1 + \frac{Q_g}{Q_f}\right)} \quad (7)$$

그리고 Todorki 등은 펌핑에 필요한 최소한의 공기량을 다음과 같이 주었다.

$$G_m = \frac{0.35(1-a)A\sqrt{gD}}{1.2a-0.2} \quad (8)$$

식(8)은 물이 가득 채워진 수직 파이프 속에서 공기 슬러그의 상승속도에 근거를 두고 있다. Todorki⁹⁾ 등은 파이프 직경이 2.5~10 cm, 길이 4~42 m, 잠수비가 0.4~0.8 사이에서 방정식(8)이 실험 결과와 잘 일치한다는 것을 발견했다.

3. 실험장치 및 방법

공기 입구와 액체 출구를 가진 에어리프트 펌프의 성능 데이터를 얻기 위한 장치도를 그림 1에 나타냈다.

에어리프트 펌프를 운전하기 위해 블로워로부터 나온 공기는 압력조정기와 조정밸브를 통해 펌프의 입구에 공급되어진다. 공기량은 로터미터로 측정했다. 공기온도와 압력은 표준 단위로 측정하였으며, 에어리프트 펌프에서 펌핑된 물은 중력탱크에 차는 것을 스톱워치로 측정했다. 시험 탱크에 연결되어 있는 강수관으로 탱크내의 수량을 조정하게 했다.

실험에 사용된 파이프는 길이가 40~300 cm의 속이 매끈한 아크릴 관이다. 이들 파이프의 내경은 2.1, 2.4, 3.4 cm로 했다. 이 연구에서 실험한 잠수비($a=x_1/x$)는 40, 50, 60과 70%로 하였다.

모든 실험은 계측 오차를 줄이기 위해 적어도 3 번씩 반복 실험하였으며 오차 범위는 $\pm 2\%$ 안에

들게 했다.

최대 펌핑율에서 에어리프트 펌프로부터 나오는 유동형태를 관찰한 결과, 강하고 주기적인 맥동현상을 보여주었으나 최대펌핑율 아래에서 배출은 안정적인 흐름상태를 보여주었다. 펌프의 동적 특성을 측정하기 위해 시험탱크 사이의 파이프 라인에 전자식 유량계를 설치하여 흐름량을 측정하였다. 전자식 유속계의 주파수 범위는 공기주입으로 인하여 발생하는 흐름 파동을 측정하기에 충분히 높은 3 Hz 였다. 유속계로부터 동적 신호는 아날로그 탭 레코더에 기록했으며, AD변환기로 수치를 변환시켜 컴퓨터에 있는 Random 데이터 분석 프로그램을 사용하여 분석했다.

4. 결과 및 고찰

그림 2(a), (b)는 전형적인 에어리프트 펌프의 성능 커브를 보여주며, 와류유동에서 공기 흐름과 액체 흐름의 특성을 나타내고 있다. 에어리프트 펌프의 유량은 배출과정에서 슬립이 일어나 두 펌프 사이에 상당한 차이가 있었다. 이 차이는 하부에서 상부로 배출하는 과정에서 파이프 길이가 다르기 때문에 일어나는 변화로 받아들여졌다. 잠수비 값은 상부 헤드 피스에서만 계산했고 하부 헤드 피스의 잠수비는 100%로 잡았다.

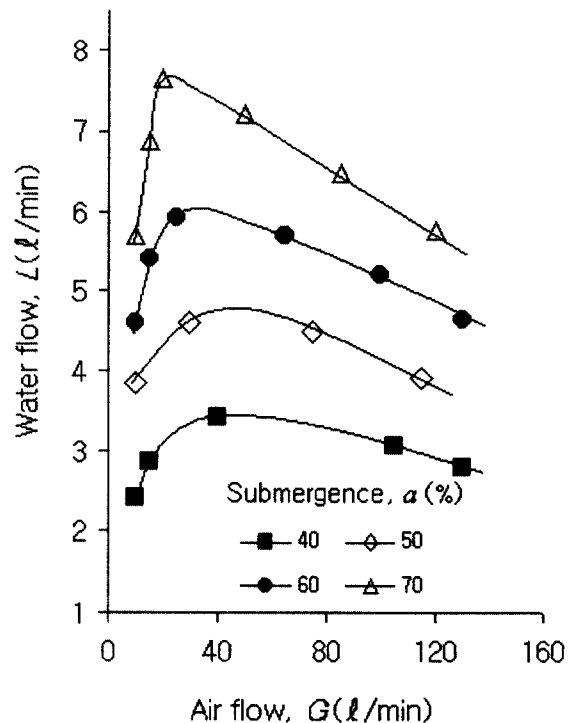


Fig. 2(a) Relationship between water flow L and air flow G (Len.=150cm, Dia.=2.1cm)

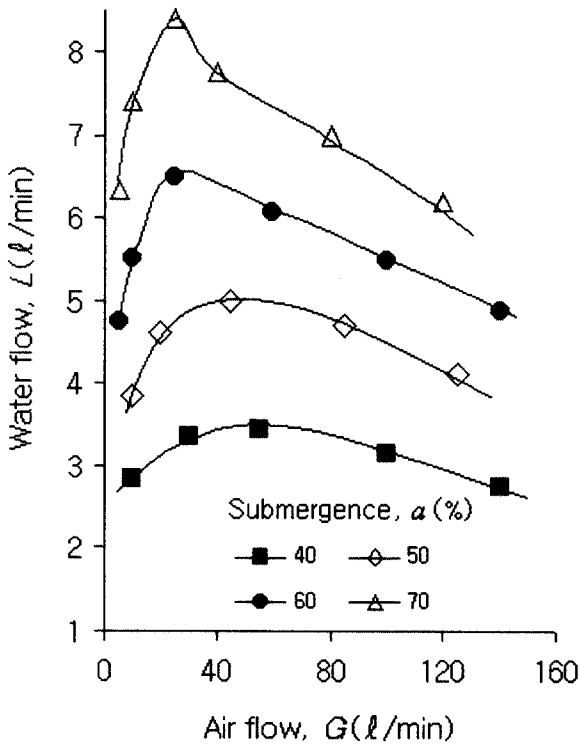


Fig. 2(b) Relationship between water flow L and air flow G (Len.=200cm, Dia.=2.1cm)

그림 2(a)에서 알 수 있듯이 파이프 길이가 150 cm, 직경이 2.1 cm인 에어리프트 펌프는 잠수비가 증가함에 따라 물의 토출량이 많아지는 것을 알 수 있다. 그리고 공기량이 30~40 l/min에서 최적 상태를 나타내고 있으며, 직경이 같으나 펌프의 길이가 긴 그림 2(b)는 잠수비가 40, 50%에서 그림 2(a)보다 완만한 유량 변화가 일어났다.

그림 3(a)와 (b)는 직경을 3.4 cm로 하고 길이를 각각 100과 150 cm로 한 경우이다. 이것도 잠수비 70%에서 공기량에 따라 유량의 변화가 극심하게 일어났으며 잠수비가 40%에서는 완만한 곡선을 그렸다.

이들 실험결과들은 같은 형태의 펌프를 대상으로 한 문헌 속의 데이터^{7,8)}와 정성적으로 잘 일치했다. 최대 펌핑율은 잠수비와 공기량의 변화에 따라 상대적으로 증감하였다.

그림 2, 3에서 보여주듯이, 공기량은 잠수비가 클수록 최대 유량에 차이가 크게 났으며 최대치를 벗어난 상태에서 유량의 감소는 완만하게 이루어졌다. 펌프가 일을 하는 유용한 범위, 즉 물의 토출을 일정하게 유지시키는 공기량의 범위는 직경과 잠수비의 감소에 따라 감소되었다. 그것은 공기의 과잉 공급으로 에어리프트 펌프에서 슬립이 일어났기 때문이며, 한정된 양의 물을 펌핑하는데 한정된 양의 공

기를 필요로 하다는 것을 보여주고 있다. 따라서 이러한 관계들의 규명으로 보다 효율적인 에어레이션과 물순환량을 결정할 수 있을 것이다.

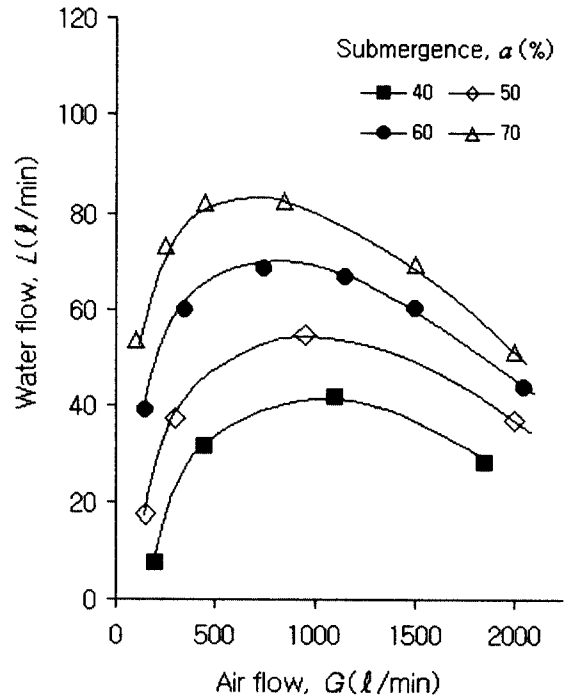


Fig. 3(a) Relationship between water flow L and air flow G (Len.=100cm, Dia.=3.4cm)

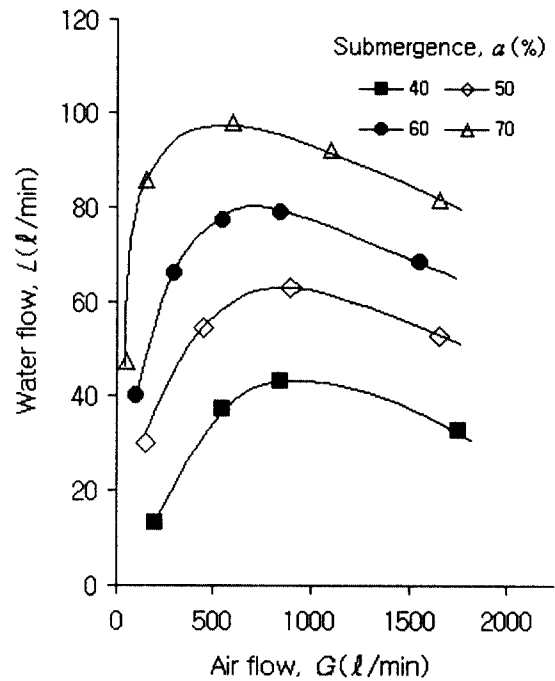


Fig. 3(b) Relationship between water flow L and air flow G (Len.=150 cm, Dia.=3.4 cm)

그림 4는 직경이 2.1 cm이고 길이가 각각 0.4, 0.8, 1.2, 1.8, 2.4, 2.8 m인 펌프를 조사 대상으로 한 실험 결과이다.

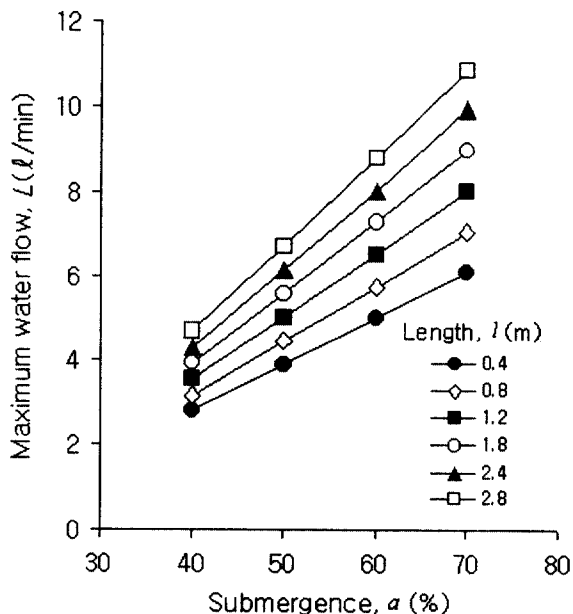


Fig. 4 Relationship between submergence a and maximum water flow L (Dia.=2.1cm)

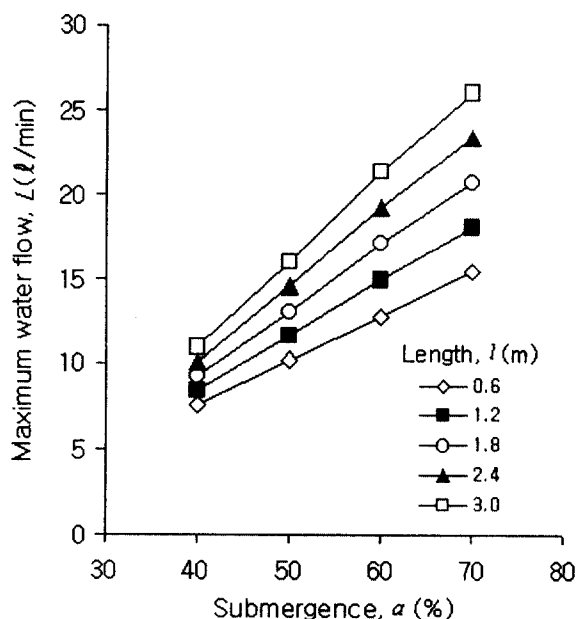


Fig. 5 Relationship between submergence a and maximum water flow L (Dia.=2.4 cm)

그림 5는 직경이 2.4 cm이고 길이가 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 m인 펌프를 조사 대상으로 하여 실험

한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 유량을 얻기 위해서는 잠수비가 커야 한다. 그리고 잠수비와 유량의 변화에서 펌프의 길이가 길 수록 유량의 기울기가 완만해 졌다. 이것은 펌프 길이가 짧을수록 에어리프트 펌프의 성능이 좋아지는 것을 의미했다. 즉 펌프의 길이가 3.0 m일 때보다 길이 0.6 m일 때 상당히 완만한 유량변화가 일어났다.

그리고 흥미있는 것은 에어리프트 펌프를 구동할 때 에어리프트 펌프 길이의 영향이었다. 문헌에 나오는 수많은 데이터는 모두 배출 파이프 길이는 잠수를 하기 위한 펌핑 수두의 표준요소로만 사용되었다. 그러나 본 연구에서 배출 파이프 길이는 저장정 펌프의 펌핑율에 영향을 끼치는 중요한 파라미터가 되었다.

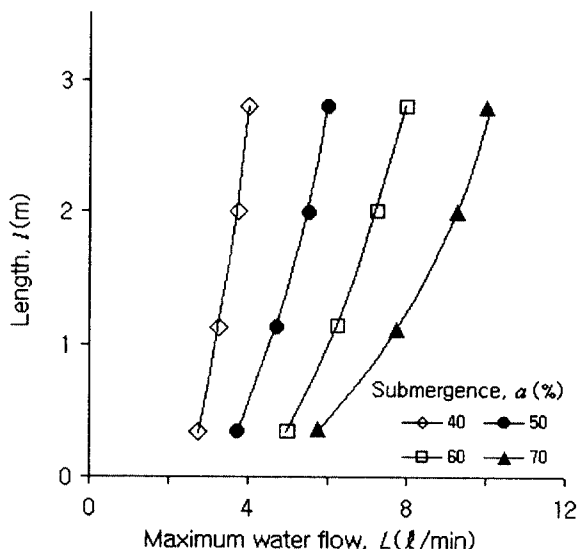


Fig. 6 Relationship between length l and maximum water flow L (Dia.=2.1cm)

그림 6은 그 길이의 영향을 표시하고 있다. 그림 중 곡선 커브는 위로 오목하며 이는 수직 점근선에 가깝게 접근하는 것으로 나타났다. 이 수직 점근선은 고양정 펌프를 연구한 논문에서 발견할 수 있는 유량변화와 거의 일치했다.

그림 7은 직경이 일정한 파이프에서 고양정과 저장정 펌프 성능 사이에 아주 상당한 차이가 있다는 것을 나타내었다. Spotte과 Stenning는 유량이 30~60 l/min으로 변하는 반면, 길이 0.6과 3.0 m에서 실험한 펌프는 10~25 l/min의 범주를 벗어나지 않았다. 다만 Hervol만은 본 실험 결과와 유사한 값을 보여 주었다.

그림 8은 양식장에서 실험 데이터로 사용하기

위해 그린 무차원 성능 커브이다. 최대 유량을 표준화하기 위해 최적의 공기량과 최적의 직경, 그리고 길이 사이의 관계를 표준화시켰다. 이러한 성능 표시 방법은 에어리프트 펌프의 보편적인 성질을 나타내는데 도움을 주었다. 잠수비가 작을수록 단위 L/G 에 대해서 L/D 의 기울기는 급박하게 되며, 잠수비가 클수록 L/G 의 값이 커짐에 따라 L/D 의 기울기는 완만하게 되는 것을 알 수 있었다.

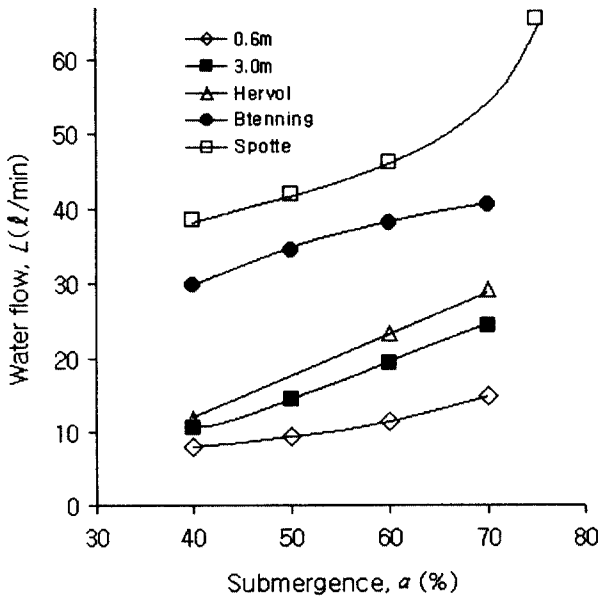


Fig. 7 Relationship between water flow l and submergence a

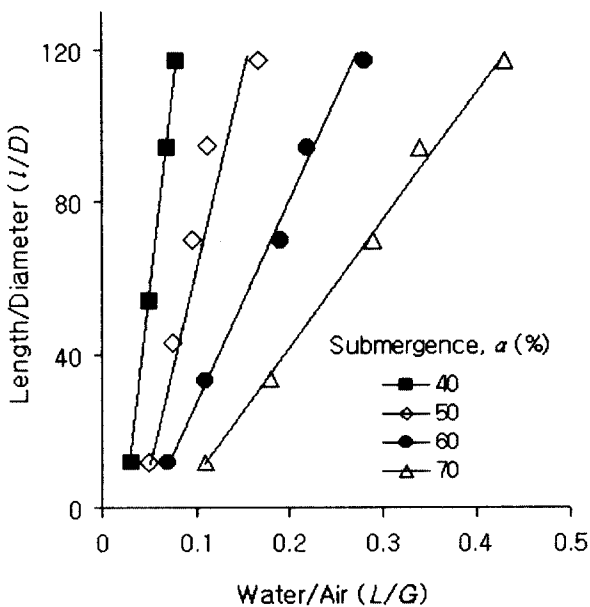


Fig. 8 Relationship between length/diameter L/D and water/air L/G

5. 결론

- 1) 저양정 펌프는 고양정 펌프에서와 마찬가지로 최적 공기량을 공급할 때 최대 유량을 얻었다. 이 최적율보다 공기 흐름을 크게 하거나 작게 하여 운전할 때는 유량의 감소를 가져왔다.
- 2) 저양정 펌프에 얻어진 펌핑율은 파이프의 길이를 증가시켜서 실험한 고양정 펌프의 펌핑율과 비슷하게 접근했다. 그러나 길이가 짧은 펌프에서 펌핑율은 잠수비를 같게 해도 고양정 펌프보다 크게 낮았다.
- 3) 여러 가지 잠수비 조건 하에서 최대 유량/최적 공기량 비와 파이프 길이/직경 비 사이의 관계를 나타낸 결과 잠수비가 큰 경우일수록 파이프 길이/직경 비 변화에 따른 배출 유량 변화가 심했다.

참고문헌

1. C. A. Deviney, "Air lifts Compressed Air", 1967
2. G. B. Andeen, "Bubble pumps Compressed Air Mag", pp. 16~18, 1974
3. F. Pickert, "The Theory of the Air-Lift Pump", Vol. 34, pp. 19~20, 1982
4. G. E. Rennick and R. L. Rough, "Vertical Flow of Oil and Gas Mixtures in small-Diameter Siphon-Type Flowstrings", United States Bureau of Mines RI6670, 1985
5. A. J. Stepanoff, "Thermodynamic Theory of the Air Lift", Trans. ASME, Vol. 51, pp. 49~55, 1979
6. S. H. Spotte, "Fish and Invertebrate Culture", John Wiley and Sons New York, 1970
7. A. H. Stenning and C. B. Martin, "An analytical and experimental study of air lift pump performance", Journal of Engineering for Power, 1967
8. H. J. Hervol and R. H. Pyle, "Aeration got you down?", Part 2, Industrial Waste Treatment, A-15, 1974
9. Torocki, Ichiro, Yoshifusa Sato, and Toru Honda. Performance of airlift Pump. Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers 16(94) : pp. 733~741, 1973