

## 에어리프트 펌프의 산소 전달 특성에 관한 연구

오 세 경  
경상대학교 해양과학대학 기관공학과

## Study on The Oxygen Transfer Properties of Airlift Pump

Se-Kyung OH

Department of Marine Engineering, College of Marine Science, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

The oxygen transfer coefficient was not significantly affected by either flow pattern, initial bubble size or the wastes present in the water studied. Surface active substances in the water did however influence the transition from bubble to slug flow.

Airlift with length to diameter ratios less than 50 suffered from considerable losses in efficiency. When properly designed, airlift pumping efficiencies were comparable to those of conventional centrifugal pumps and the oxygen transfer efficiency were as high as or higher than those of diffused aeration systems.

**Key words :** airlift pump, void fraction, oxygen transfer, bubble flow, slug flow

### 서 론

에어리프트 펌프는 다량의 물을 펌핑하는 양식장의 폐수처리 장치에서 많이 사용되고 있다. 공기는 물에 잠긴 수직관 하부에 연결된 관으로부터 주입되며 펌핑은 물과 같이 반출되는 공기 부력에 의해 이루어진다. 에어리프트 펌프의 유체 동력학에 관한 이론은 Reinemann 등 (Reinemann, 1987; Reinemann et al., in press) 여러 학자들이 이미 오래 전부터 규명해 오고 있으며, 그 외 몇몇 논문 (Zielinski et al., 1978; Nagy, 1979)에서는 에어리프트 펌프의 성능에 관하여 언급을 하고 있다. 그러나 양식장의 에어레이션에 중요한 몫을 차지하고 있는 에어리프트 펌프의 산소 전달과정에 관해서는 별다른 언급이 없는 형편이다. 본 연구의 목적은 에어리프트 펌프의 산소전달 특성을 조사하여 에어리프트 펌프를 양식장에 설치할 때 최적의 조건을 찾아 그 기능을 개선시키려는 데 있다.

### 이 론

물 속으로 들어가는 산소의 전달은 다음 3 단계로 생각할 수 있다. 가스/액체 공유 영역 표면에서는 가스의 확산과 대류에 의해 아주 얇은 막을 통해 일어나며 가스/액체 공유 영역에서는 두꺼운 성층 막을 통한 확산으로 전달비율이 상당히 제한을 받고 있다. 그리고 공유영역으로부터 멀리 떨어진 액체 속에서 산소 전달은 물 속의 산소 운동에 의한 것으로 산소 확산은 느리기 때문에 대류에 의해 완성되지 않으면 안된다. 에어리프트 펌프는 펌핑 과정에서 격심한 난류 현상을 일으키므로 산소 확

산이 빠르고 신속하게 이루어진다.

다음 식 (Barnhart, 1969; Naegel et al., 1977; Colt & Tchobanoglos, 1981; Clark & Flemmer, 1985)은 공기/물이 분리되어 있는 상태에서 산소 같은 용해되기 쉬운 가스의 전달 과정을 설명하는데 널리 사용되는 방정식이다.

$$\frac{C^* - C}{C^* - C^0} = e^{-K_{La}t} \quad (1)$$

여기서,

$C^*$  : 물의 산소 포화 농도 (mg/l)

$C^0$  : 에어리프트 펌프에 들어가기 직전의 수중 산소 농도 (mg/l)

$C$  : 펌프에 들어간  $t$  시간 후의 수중의 산소 농도 (mg/l)

$K_{La}$  : 수직관에서 산소 전달계수 ( $s^{-1}$ )

$$a = A/V$$

$A$  : 가스/액체 표면적 ( $m^2$ )

$V$  : 물의 체적 ( $m^3$ )

$t$  : 가스와 액체의 접촉 시간 (s)

이다.

액체와 공기가 접촉 시간  $t$ 는 단지 수직관 속에서 액체가 에어 리프트에 저장하며 머물러 있는 시간을 의미한다.

$$t = Z/V_1 \quad (2)$$

$Z$  : 수직관의 길이 (m)  $V_1$  : 수직관에서 평균 액체 속도 (m/s)

가스의 전달계수인  $K_{La}$ 는 가스 종류, 액체 속에서의 가스 분자의 분산율, 단위 액체 체적에 대한 가스/액체 표면적, 유체의 와류 및 액체의 온도 등과 함수 관계를 갖고 있다. 표준 온도 (20°C)에서 특성가스의 전달계수 값은 주로 2상 유체에서 파이프 레이놀즈수로 주어지며 (Lin et al., 1976; Nagel et al., 1977; Shilimkan & Stepanek, 1977; Kubota et al., 1978; Clark & Flemmer, 1985) 온도에 따른 변화 값은 다음 식으로 나타난다.

$$K_{La} = K_{La}^* \theta^{(T-20)} \quad (3)$$

여기서

$K_{La}^*$ : 20°C에서 수직관 내 산소 전달계수

$T$ : 온도 (°C)

$\theta$ : 가스 상수 1.02

이다.

그 외 다른 연구자들은 2상 가스/액체가 파이프 내를 흐를 때 질량이 어떻게 전달되는가에 관하여 연구를 하였다 (Shilimkan & Stepanek, 1977; Kubota et al., 1978; Clark & Flemmer, 1985). 그러나 이들 연구들은 1~10 m/s 속도 범위에서 행하여 흐름 속도가 1 m/s 이하로 운전되는 에어리프트에서는 적당하지 않았다. 그 이유는 높은 속도로 흐르는 2 상류가 낮은 흐름 영역 속에서도 항상 같은 것으로 간주할 수 없기 때문이다 (Reinemann et al., in press).

2상류의 유동력은 흐름 상태나 혼합유체의 면적에 따라 크게 변화한다. 에어리프트 펌프에서 유체 동력학적 변화는 여러 가지 흐름 패턴 때문에 더욱 복잡하다. 펌핑 초, 공기 유입구에 작은 구멍을 뚫어 공기를 공급하면 작은 공기 포의 움직임이 일어난다. 작은 기포들은 파이프 횡단면을 따라 상승하면서 분산된다. 기공율이 낮은 작은 공기포들은 초기상태 크기를 그대로 유지한 채 기포와 기포사이의 상호 작용은 거의 없다. 여기에 디퓨저를 사용해 압력을 더 높이면 원형이나 타원형의 기포가 생긴다. 만일 가스의 기공율이 25% 이상이라면 그 기포들은 유착되어 테일러 기포, 즉 가스 슬러키 형성된다. 평균적으로 튜브 직경보다 약 0.7배 이상의 큰 직경을 가진 기포들은 테일러 기포로 간주한다. 이 테일러 기포가 많으면 슬러키 흐름이 일어나는데 이것은 수직튜브의 직경이 약 20 mm 이하 일 때 일어난다. 그 이유는 좁은 관에서는 강한 표면장력이 작용하여 기포 표면을 안정시키기 때문이다 (Reinemann, 1987).

기포가 많이 발생하여 슬러키 흐름을 일으키는 영역에서 작은 기포들은 테일러 기포 밑에 집중적으로 모여 액체

슬러키 상태 속에 분포되어 있다. 이것은 다음 테일러 기포를 일으키기 위한 예비 모임이다. 이들 기포들이 존재하는 것은 직경이 큰 관들에서는 표면장력이 감소해 기포 표면이 불안정해 일어난 것이며 테일러 기포의 마지막 끝에 기포가 많이 발생하는 것은 극단적인 와류가 일어나서 압력저하가 순간적으로 일어났기 때문이다.

### 실험장치 및 방법

실험 장치는 대형 수조를 설치하고 이 대형 수조에서 직경이 36 mm 파이프를 연결해 공기와 물이 잘 순환할 수 있도록 루프식으로 구성하였다 (Fig.1). 수조 탱크의 용량은 4 리터이며 이 탱크에 산소를 제거한 물을 주입할 수 있게 했다. 그리고 실험장치의 높이는 2.25 m, 수직관

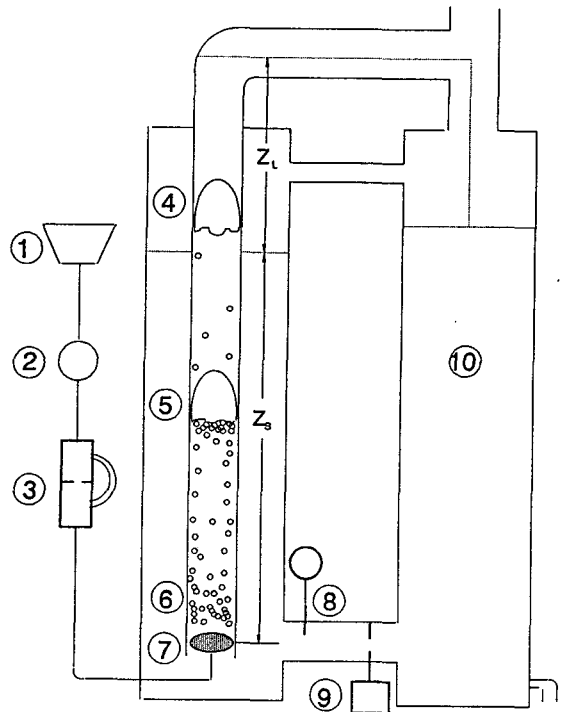


Fig. 1. Diagram showing experimental apparatus.

- ① Blower
- ② Valve
- ③ Air Flow Meter
- ④ Slug Flow
- ⑤ Bubbly Slug Flow
- ⑥ Bubble Flow
- ⑦ Air Stone
- ⑧ Oxygen Meter
- ⑨ Water Flow Meter
- ⑩ Water Tank

**Table 1. Water Quality Parameter**

Parameter	Tap Water	Waste water
pH	7.8	6.9
BOD (mg/liter)	0.0	60.9
Suspended solids (mg/liter)	0.0	97.5
Conductivity (umho/cm)	366.0	13000.0
Chloride (mg/liter)	13.8	41.0

의 길이는 2.10 m로 고정시켰다. 판의 리프트와 잠수는 장치 내에 있는 물의 양을 조절하므로써 변화되게 했다. 그리고 에어리프트 펌프의 잠수비  $\alpha = Z_s / (Z_s + Z_L)$ 는 수직관의 전 길이에 대한 물 속에 잠긴 판의 길이의 비다. 에어리프트 펌프 끝은 공기가 배출할 수 있도록 에어 벤트를 만들었으며 이곳으로 물도 공급될 수 있게 했다. 그리고 물이 순환하는 배관 장치는 대기와 밀폐시켰으며 에어리프트 펌프에 들어가기 전 산소량 조사하기 위해 산소 측정장치를 탱크 사이에 설치하였다.

공기는 수직관 하부에 있는 공기 유입구를 통해 주입하며 직경이 1~3 mm의 범위의 미세한 기포를 발생시키기 위해서 에어스톤을 사용했다. 이 에어스톤은 조밀한 구멍을 많이 뚫어 기포를 발생시키는 장치이다. 그 다음에 디퓨저를 사용해 공기를 작게 보내 기포만 흘러가게 하기도 하고, 많은 공기를 보내 슬러크 흐름이 일어나게 하기도 하였다. 그리고 커다란 가스포를 발생하기 위해 6 mm 유리관을 설치하여 슬러크 흐름이 일어나게 했다. 공기와 물 흐름은 정밀한 눈금이 그려진 메노메터와 플로우메터를 통해 유량을 측정했다.

실험중 물이 에어리프트 펌프를 통과할 때 가스 전달 과정이 어떻게 일어나는지 조사하기 위해 양식장의 폐수와 유입수를 주입하였다. 용존산소량이 낮은 양식장 폐수는 잔류 BOD (폐수의 정화 산소요구량)를 얻는 것이 필요하기 때문에 밀폐된 용기 속에 5일 동안 가만히 두었다. 그리고 나서 촉매제인 코발트와 함께 염화 아황산염을 투입하여 용존 산소를 제거했다. 실험에 사용된 수질의 파라미터는 표준분석 기술을 도입해서 분석했다 (Table 1).

에어리프트 펌프를 통해 산소전달율을 알기 위해 산소를 제거한 물을 수조에 넣은 후 블로워를 통해 공기를 주입시켰다. 이 때 유체의 온도 및 기압은 산소전달율에 영향을 주기 때문에 일정하게 유지하였다. 펌프 가동 후 물에 용해되는 산소농도는 그 값이 변하지 않을 때까지 YSI 모델 55를 갖고 30초 간격으로 측정을 했다. 이 때 용존산소의 값이 더 변하지 않고 안정상태로 되면 평균 유효 값으로 간주했다. 용존산소의 측정은 측정 당시 온도와 대기압과 관계가 있으므로 표준 온도 표준 압력 상

태하의 값을 기준으로 정해 계산하였다. 에어리프트 펌프를 제외한 장치내의 산소 전달계수는 시간에 대한 방정식으로 다음과 같다.

$$\ln \left[ \frac{C^* - C}{C^* - C^0} \right] = -K_L a' t \tag{4}$$

실험 장치 내 산소전달계수  $K_L a'$ 는 전 장치 속의 물 용량에 대한 가스/액체의 면적에 관한 식이다. 그러나 에어리프트 펌프 수직관에서 가스전달계수  $K_L a'$ 는 수직관속의 단위 수량 당 가스/액체의 일정 면적에 대한 값이다. 따라서 가스/액체 접촉이 유일하게 수직관속에서 일어나고, 나머지 부분은 대기와 공기포에 차단되어 있으므로 에어리프트 펌프의 산소 전달 계수는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$K_L a = K_L a' Q_{Ls} / Q_{Lr} \tag{5}$$

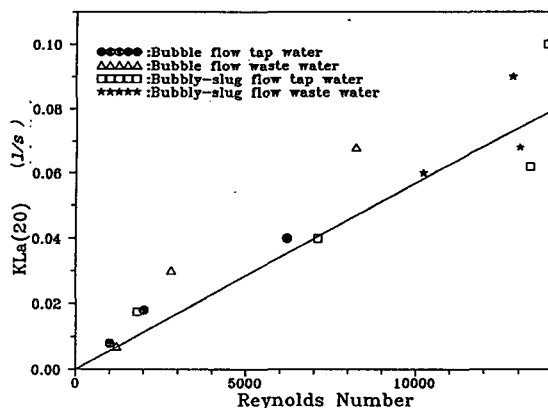
$K_L a'$ : 장치 내 가스전달 계수 ( $s^{-1}$ )

$Q_{Ls}$ : 장치내의 액체 체적 ( $m^3$ )

$Q_{Lr}$ : 수직관내의 액체 체적 ( $m^3$ )

### 결과 및 고찰

에어리프트 펌프의 수직관에서 산소 전달계수는 표준 온도 (20°C)에서 측정하였다. 파이프 계수인 레이놀즈수에 대한 산소 전달계수를 흐름 형태와 물의 종류에 따라 따져보면 기포 흐름, 유입수 (●)와 기포슬러크 흐름, 폐수 (★)와의 사이에 별다른 차이를 보여주지 않았지만 기



**Fig. 2. Correlation between oxygen transfer coefficient and Reynolds Number.**

포흐름, 폐수 ( $\Delta$ )와 높은 레이놀즈수에서의 기포슬릭 흐름, 유입수 ( $\square$ )에서는 상당한 차이가 있는 것을 발견했다 (Fig. 2). 이러한 현상은 Babbly-slug 유동이 될수록 Gas-slug 후부에서의 난류가 증대되어 가스 전달율을 증가시키기 때문이라고 사료된다.

그러나 다른 논문을 조사한 결과 레이놀즈수가 1000에서는 별 변화가 없었으나 1400 ( $R^2=0.92$ , SE of estimate=0.009) 넘는 범위에서는 산소 전달 계수와 밀접한 관련성이 있었다. 그것은 관내의 흐름이 난류상태가 되어 공기와 접촉면이 많아지고 대류이동이 활발해지기 때문이라고 사료된다.

$$K_{La}^* = 6.5 \times 10^{-6} Re \quad (6)$$

$K_{La}^*$ : 20°C에서 수직관의 산소 전달계수

기포와 슬릭이 공존하는 영역에서 가스/액체의 표면적은 작은 기포들이 무수히 많은 기포 흐름 영역에서의 표면적보다 작다. 이것은 가스의 전달율이 저하하는 것을 의미하고 있다. 그러나 가스 슬릭 후부에서 발생하는 난류는 산소와의 접촉을 많이 일으켜서 가스전달율을 오히려 증가시킨다. 이들 두 가지 효과는 상호보완 해 두 영역에서 가스 전달율을 일정하게 유지시키는 역할을 하는 것을 알 수 있다.

양식장의 공급수를 사용해서 실험해 본 결과, 기포가 왕성하게 상승하는 영역에서 공기포들은 평균 직경이 2~3 mm인 타원형을 이루었으며 기포의 유착은 가스 기공율이 약 25% 이상인 상태에서 이루어졌다. 그리고 양식장 폐수를 사용해 본 결과 평균 직경이 1~2 mm인 원형을 이루고 있었다. 가스 기공율이 약 30%이 될 때까지 기포유착은 양식장 폐수에서 관찰되지 않았다. 이러한 현상은 Keitel 등 (1982)이 발표한 것처럼 기포의 표면을 안정시키고 표면에 늘어붙는 표면활성물질이 매개체로 작용했기 때문이다 (Keitel & Onken). 실험에 사용한 폐수의 표면 활성물질은 기포의 크기에 영향을 주어 가스/액체의 표면을 증가, 즉 기포의 크기를 둔화시키고 있다는 것을 관찰하였다. 이러한 이유는 표면활성물질의 물리적, 화학적인 성질에 기인된 것으로 판단된다. 그러나 오염물질은 가스 전달율에는 감소를 가져왔다. 이것은 오염물질이 산소와의 결합에 부정적인 반응을 일으키기 때문이라 생각된다. 이들 두 가지 효과는 서로 상호 보완 작용을 일으켜 실제 유입수와 폐수 사이 산소전달율에 별다른 변화를 일으키지 않았다.

산소전달율을 예상하기 위해 에어리프트의 펌핑력을

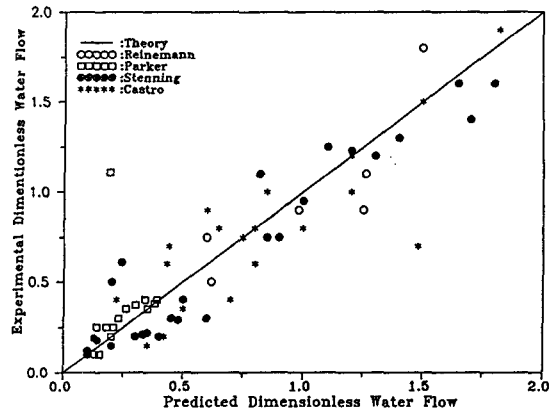


Fig. 3. Correlation experimental and predicted pumping rate

이는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 실험 장치에서 튜브 직경, 튜브 길이, 잠수비 그리고 공기유량은 측정할 수 있으므로, 펌핑되는 수량은 흐름 패턴에 따라 다음 실험 식으로 산출해 낼 수 있다 (Reinemann, 1987; Reinemann et al., in press). Fig. 3에서는 다른 연구자들의 실험 데이터와 이론적으로 계산한 예상 값과의 상관 관계를 나타내었다 (Castro et al., 1975; Nicklin, 1963; Parker and Suttle, 1987; Stenning and Martin, 1968). 그 결과 이론 값과 실험값 사이의 관계는 전 운전범위에 걸쳐 아주 양호하게 일치되는 것을 발견했다.

Slug flow (디퓨저를 사용하지 않음,  $D < 20$  mm)

$$V_g' = \Gamma V_m' + V_{bs}$$

$$\alpha = (1 - \epsilon)(1 + F)$$

$$\Gamma = 1.2 \quad Z/D \geq 15 \text{ 일 때}$$

$$\Gamma = \frac{16.8}{Z/D - 1} \quad Z/D < 15 \text{ 일 때}$$

Bubble flow (디퓨저 사용,  $\epsilon < 0.25$ )

$$V_g' = \Gamma V_m' + V_{bs}(1 + 1.4\epsilon)$$

$$\alpha = (1 - \epsilon) + (1 + 1.8\epsilon) F$$

$$\Gamma = 0.6 \quad Z/D \geq 15 \text{ 일 때}$$

$$\Gamma = \frac{8.4}{Z/D - 1} \quad Z/D < 15 \text{ 일 때}$$

Bubble-slug flow (디퓨저 사용 않음,  $\epsilon < 0.25$ )

$$V_g' = \Gamma V_m' + 0.75 V_{bs}$$

$$\alpha = (1 - \epsilon) + (1 + 1.5F)$$

$$\Gamma = 1.1 \quad Z/D \geq 15 \text{ 일 때}$$

$$\Gamma = \frac{14.3}{Z/D - 1} \quad Z/D < 15 \text{ 일 때}$$

$\Gamma$ : 2상류의 속도 계수 (무차원)

$\alpha$ : 잠수비 (무차원)  $\alpha = Z_g / (Z_s + Z_l)$

$\epsilon$ : 수직관에서 평균 가스 농도 (무차원)

$F$ : 파이프 1m당 물의 압력으로 표시된 마찰 수두손실 기틀기 (무차원)

$$F = \left[ \frac{1.7}{Z/D} + f \right] \frac{V^2}{2}$$

$V_{bs}$ : 0.25 m/s 유속 내 작은 기포의 상승속도

$V_g$ : 수직관 평균가스 속도 =  $\frac{Q_g}{A\epsilon}$  (m/s)

$V_l$ : 수직관에서 평균액체 속도  $\frac{Q_g}{A(1-\epsilon)}$  (m/s)

$V_m$ : 수직관에서 공기/물 혼합체의 평균속도

$$\frac{Q_l + Q_g}{A} \text{ (m/s)}$$

$Z/D$ : 직경에 대한 에어리프트 길이의 비 (무차원)

에어리프트 펌프의 입구와 출구에서 와류 흐름이 생겨 수두손실이 일어난다. 이 수두 손실은 마찰계수에 포함시켜 계산한다. 가스의 속도와 액체 속도, 그리고 펌프 입구에서의 가스 응축 상태는 속도 계수  $\Gamma$ 를 계산하는데 대단히 중요한 변수다. 속도계수  $\Gamma$ 의 값은 슬립의 크기 즉 가스와 액체 사이의 상대 운동의 크기에 따라 영향을 받는다. 따라서 1보다 큰 속도계수의 값은 가스와 액체 사이의 상대속도 증가를 의미한다. 그리고 상대속도가 증가하면 가스포의 상승으로 슬립현상이 커져서 펌핑수(水)의 용적 감소를 가져온다.

Fig4에 나타난 바와 같이 에어리프트 펌프의 최대 펌핑 효율은 기포 흐름의 경우에는 55이며 기포-슬러 흐름에서는 33이었다. 그리고 펌핑 효율은 직경에 대한 길이의 비율이 약 17 아래로 떨어질 때 급격히 감소했다. 즉 직경에 대한 길이의 비율이 17 이하면 펌핑력보다 슬립이 커져서 효율이 떨어지고 직경에 비해 관의 길이를 길게 하면 펌핑 효율이 증가하나 그 변화 값은 아주 미미했다. 그 이유는 직경에 대한 길이의 비율이 17 이하에서는 압력차이가 크게 나타나는 Developing region에 포함되었기 때문이다.

Parker and Suttle의 실험(1987)에 의해 나타난 데이터 값은 양식장에 많이 응용되고 있다.

Parker and Suttle에 의해 실험된 에어리프트 펌프는 직경에 대한 길이의 비가 2에서 30까지이며 직경에 대한

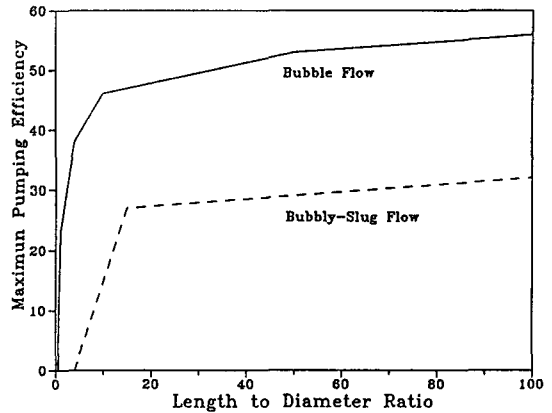


Fig. 4. Relationship between pumping efficiency and length to diameter ratio.

길이의 비율이 낮음에 따라 펌핑 효율도 낮게 되었다.

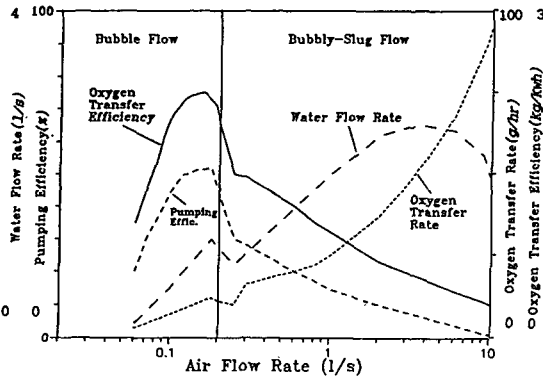
가스의 전달율은 공기와 물의 흐름 속도가 파악되면 쉽게 예상할 수 있다. 가스전달에 필요한 침투력은 액체의 평균 포화 가스농도와 평형 가스농도와의 차로 나타나며 평형 가스 농도는 물의 온도, 물의 염도 및 가스상태 속의 부분 압력과 함수 관계가 있다 (Colt, 1983).

공기/물의 혼합물이 에어리프트를 통해 유동함에 따라 평형 가스 농도는 수직관 내 압력 변화와 가스의 분자량 변화에 의해 달라진다. 따라서 그 값을 알기 위해 행한 가스 전달 분석은 플러 플로우 모델을 사용했다. 그리고 정확한 가스 전달 값을 알기 위해서 Clark & Flemmer (1985)가 제안한 모델을 사용했다. 그 모델은 단면 내의 압력과 평형 가스농도가 일정하다고 가정해서 수직관 단면을 10 cm 씩 나누어서 조사를 하였다. 각 종류의 가스의 평형가스농도는 기존 압력과 분자량으로부터 계산하였다. 물에 전달된 산소, 질소, 아르곤의 량도 이 방법을 통해 조사하였다. 10 cm 튜브에 들어있는 공기 속의 가스 분자량을 알기 위해 질량 평형법을 사용하였다. 이것은 전 가스 압력과 분자량의 변화로 수직관을 따라 상승하는 가스평형농도에 변화가 일어나는데 그 때 공기속의 분자량(무게)이 어떻게 변하는가를 조사하는 방법이다. 질소와 아르곤의 전달계수는 산소전달계수의 각각 1.03과 0.93배로 나타났다 (Thibodeaux, 1979). 이산화 탄소의 전달과 산소, 질소 그리고 전 가스 압력들의 영향은 공기중의 물 분자량이 0.1보다 작기 때문에 무시하였다. 펌프를 떠난 물 중에 있는 각 가스의 압력은 다음 식과 같이 계산할 수 있다 (Colt, 1983).

$$P' = \frac{C}{\beta} A$$

**Table 2. Physical Characteristics of the Major Atmospheric Gases (Colt,1983)**

Gas	K (mg/ml)	Mole fraction in dry air	A
N <sub>2</sub>	1.25043	0.78084	0.6078
O <sub>2</sub>	1.42903	0.20946	0.3518
Ar	1.78419	0.00934	0.4260
CO <sub>2</sub>	1.97681	0.00032	0.3845



**Fig. 5. Performance characteristics of airlift pumping and aeration system with changing airflow rates (tube diameter 0.05 m, submergence ratio 0.9, tube length 2.1 m, water temperature 15°C, input oxygen concentration 5 mg/liter).**

$\beta$ : 수중에 포함되어 있는 가스의 Bunsen 계수 (L/L atm)

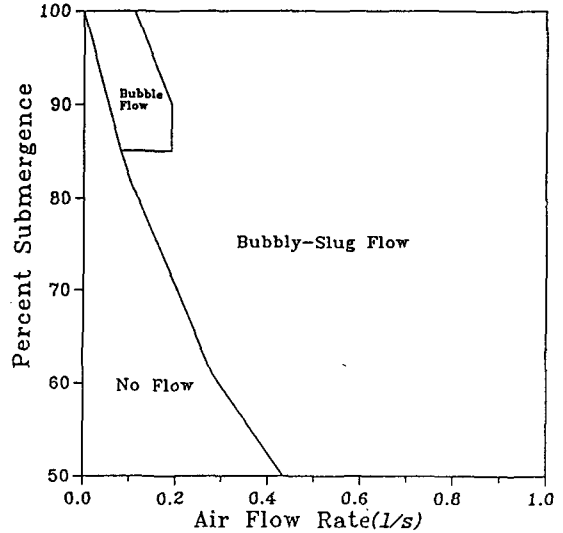
수중의 전 용존가스 압력 (TGP)는 다음과 같다.

$$TGP = P'_{N_2} + P'_{O_2} + P'_{Ar} + P'_{H_2O}$$

Table 2는 Colt (1983)가 권장한 전 가스의 압력 계산을 포화 백분율로 나타낸 것이다.

실험에 사용한 에어리프트의 펌핑과 에어레이션 성능 관계를 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 디퓨저는 약 0.21/s 이하의 공기 흐름율로 기포를 발생하는 것을 사용하였다. 이 공기흐름율 이상에서는 공기포의 파괴가 일어나 기포의 결합이 발생하여 기포슬릭 흐름이 일어났다. 기포 흐름에서 기포-슬릭 흐름으로 변환은 가스흐름율과 잠수비 그리고 수직관 튜브 속의 가스농도의 크기에 따라 많은 영향을 받았다.

기포흐름은 잠수비가 85% 이상일 때와 가스 흐름율을 낮게 했을 때에 일어났다 (Fig.6). 그러나 최대 가스 전달 효율과 펌핑 효율은 유체흐름이 활발한 기포 흐름 영역에서 일어났다. 기포 흐름영역에서, 최대 에어리프트의 산소 전달 효율은 기포 확산 에어레이션 시스템 갖고



**Fig. 6. Airlift flow pattern map (Tube diameter 0.05, tube length 2.1 m, water temperature 15°C, input oxygen concentration 5 mg/liter).**

연구한 Colt & Tchobanoglous (1981)의 값보다 약간 높았으며 U-튜브 에어레이터를 사용한 값과는 거의 근사하게 접근했다. 가장 높은 산소 전달 효율은 잠수 값이 100% 일 때 일어났다 (Fig.7). 이 잠수값 100%에서 운전은 물을 수면 위로 펌핑을 하지 않기 때문에 유용한 일을 한 것은 아니다. 그러나 이 운전은 연못이나 탱크 속에 있는 물을 혼합할 때나 공기를 주입할 때 유용하게 쓰이는 운전 방식이다.

에어리프트 펌프의 최대 펌핑 효율을 기포흐름 영역에서 얻었으며 이것은 원심펌프를 사용할 때 얻은 효율과 거의 동일했다 (Fig.8). 그러나 잠수비의 크기에 따라 리프트의 변화가 요구되기 때문에 그 기포흐름 영역은 실제적으로 상당한 제한을 받았다. 즉, 리프트 1단위를 얻는데 6단위의 잠수가 필요하므로 큰 잠수 깊이에서는 적당하지 않으며 리프트도 제한을 받아 펌핑이 불가능해졌다. 이런 문제와 더불어, 가스포의 부족상태는 가스의 과포화 값을 상대적으로 저하시키는 결과를 가져왔다. 펌프를 떠난 물 중에 용해되어 있는 가스의 압력도 잠수비에 비례했으며 에어리프트 펌프를 운전할 때 발생하는 최대 압력은 수직관 하부 압력과 동일했다. 그리고 동력

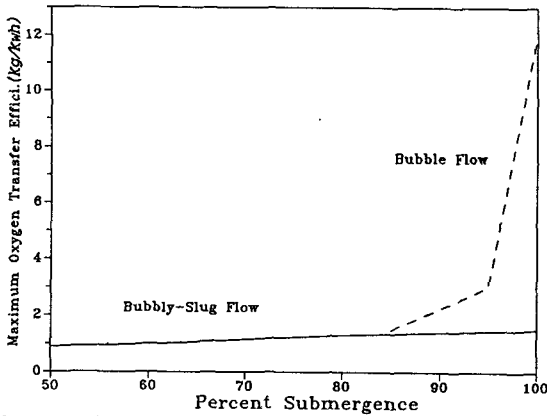


Fig. 7 Relationship between oxygen transfer efficiency and submergence ratio (tube diameter 0.05, tube length 2.1 m, water temperature 15 °C, input oxygen concentration 5 mg/liter).

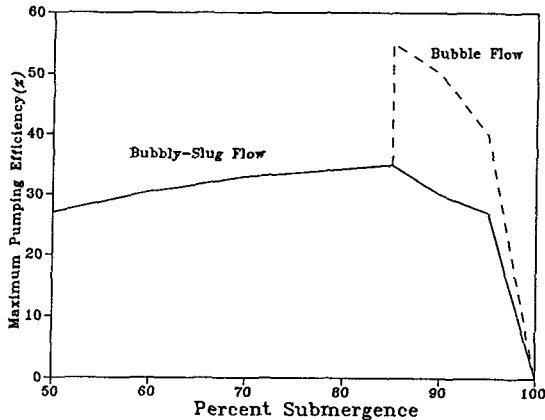


Fig. 8 Relationship between maximum pumping efficiency and submergence ratio (tube diameter 0.05, tube length 2.1 m, water temperature 15 °C, input oxygen concentration 5 mg/liter).

을 발생하는 포화가스는 튜브 길이, 흐름 속도, 그리고 그 튜브 속에 있는 용존산소량에 영향을 받았다.

전 가스의 포화 심물레이션은 광범위한 흐름 조건하에서 다양하게 수행하였다. 유입수 속에 포함되어 있는 전 가스 압력이 100% 포화상태보다 작게 되었을 때 전 가스 압력의 상한 값은 에어리프트 펌프의 잠수 값이 1미터 증가할 때마다 3%씩 과포화가 되는 것을 발견하였다. 즉 에어리프트의 잠수 값의 제한은 전 가스의 과 포화 값을 제한시킬 수 있는 것이다.

### 결 론

에어리프트 펌프를 운전함으로써 얻어진 흐름 패턴과 레이놀즈수를 광범위하게 변화시켜 연구 결과 다음 결론을

얻었다.

1. 산소 전달 계수는 흐름 패턴, 초기 기포 크기, 물 찌꺼기 등에 별다른 영향을 받지 않았다. 그러나 표면활성물질은 기포 흐름에서부터 슬러지 흐름에 이르기까지 산소 전달 과정에 영향을 주었다.

2. 수직관 길이와 직경과의 비가 50 이하인 에어리프트 펌프는 효율에 있어서 상당한 손실을 일으켰다.

3. 본 연구에 사용된 에어리프트 펌프의 효율은 상용 원심 펌프와 비슷한 결과를 얻었다. 그리고 산소 전달 효율은 디퓨저를 부착한 에어레이션 시스템보다 높았다.

4. 에어리프트 펌프의 잠수와 리프트는 지형 및 양식 종류에 따라 제한을 받는다. 본 연구에서 얻은 정보를 이용하면 에어리프트의 산소 전달 과정을 전 운전범위에 걸쳐 쉽게 예상할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- Barnhart, E. L., (1969), Transfer of oxygen in aqueous solutions. Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 95, 645~61.
- Castro, W. E., Zirlinski, P. B. & Sandifer, P. A., (1975), Performance characteristics of airlift pumps of short length and small diameter, In Proceedings of the 6th Annual Meeting World Mariculture Society, ed.J.W. Avault & Miller, R., World Mariculture Society. Baton Rouge, Los Angeles, pp.451~61.
- Clark, N. N. & Flemmer, R. L., (1985), Gas-liquid contacting in vertical two-phase flow, Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development, 24, 231~6.
- Colt, J. E., (1983), The computation and reporting of dissolved gas levels. Water Res., 17, 841~9.
- Colt, J. E. & Tchobanoglous, G. (1981), Design of aeration systems for aqua-culture, In Proceedings of the Bio-Engineering Symposium for Fish Culture American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. pp, 138~48.
- Colt, J. E. & Westers, H., (1982), Production of gas supersaturation by aeration, Trans. American Fisheries Society, 111, 342~60.
- Keitel, G. & Onken, U., (1982), Inhibition of bubble coalescence by solutes in air/water dispersions, Chemical Engineering Science, 37, 1635~8.
- Kubota, H., Hosono, Y. & Fujie, K. (1978), Characteristics evaluations of ICI airlift type deep shaft aerator, Journal of Chemical Engineering of Japan, 11, 319~25.
- Lin, C. H., Wang, B. S., Wu, C. S., Fang, H. Y., Kuo, T. F. & Hu,C.Y., (1976), Oxygen transfer and mixing in a tower cycling fermenter, Biotechnology and Bioengineering, 17, 1557~72.

- Naegel, O., Kurten, H. & Hegner, B., (1977), Design of gas/liquid reactors: mass transfer area and input of energy, In Two Phase Momentum, Heat and Mass Transfer in Chemical Process and Energy Engineering Systems, ed. F. Durst, G. V. Tsiklami & N. H. Afgan, Hemisphere Publishing Co., New York.
- Nagy, Z., (1979), The airlift aerator and its application in sewage treatment, *Progress in Water Technology*, 11, 101~9.
- Nicklin, D. J., (1963), The air-lift pump: theory and optimization, *Trans. Instrn. Chem. Engrs.*, 41, 29~39.
- Parker, N. C. & Suttle, M. A., (1987), Design of airlift pumps for water circulation and aeration in aquaculture, *Aquacultural Engineering*, 6, 97~110.
- Reinemann, D. J., (1987), A theoretical and experimental study of airlift pumping and aeration with reference to aquacultural applications, Ph. D. thesis, Cornell University, Ithaca, New York.
- Reinemann, D. J., Parlange, J. Y. & Timmons, M. B., (in press), Theory of small diameter airlift pumps. *International Journal of Multiphase Flow* (Accepted for Publication).
- Reinemann, D. J., Timmons, M. B. & Parlange, J. Y., (1988), Airpump: Interactive software for the design and evaluation of airlift pumping and aeration system, Cornell University Extension Bulletin No. 455, Available through Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Riley Robb Hall, Ithaca, NY 14853~5701.
- Shilimkan, R. V. & Stepanek, J. B., (1977), Interfacial area in concurrent gas-liquid upward flow in tubes of various size, *Chemical Engineering Science*, 32, 149~54.
- Stenning, A. H. & Martin, C. B., (1968), An analytical and experimental study of airlift pump performance, *Trans. ASME Journal of engineering for Power*, 94, 106~10.
- Thibodeaux, L. J., (1979), *Chambodynamics: Environmental movement of chemicals in air, water, and soil*, John Wiley & Sons. New York.
- Weiss, R. F., (1970), The solubility of nitrogen and oxygen in water and seawater, *Deep-Sea Research*, 17, 721~735.

---

1996년 10월 4일 접수

1997년 5월 8일 수리