

저수지의 수질 관리를 위한 간헐식 양수통형 인공 순환 장치의 설계 방법 개발

Design Methods of Intermittent Deep Draw Aeration System for Reservoir Water Quality Management

서동일^{1,*} · 송무석² · 황현동³ · 이은형³

Dongil Seo^{1,*} · Museok Song² · Hyundong Hwang³ · Eun-hyoung Lee³

1 충남대학교 환경공학과

2 홍익대학교 조선해양공학과

3 엠큐빅(주)

(2004년 3월 3일 접수; 2004년 5월 3일 최종수정논문 채택)

Abstract

Intermittent deep draw artificial circulation system is one of the most widely used destratification systems to control algal bloom in reservoirs in Korea. However, there have been neither theoretical background of design criteria nor operation guide line for efficient application of the system available for such systems. A design method was developed to calculate required compressor capacity and number of circulation units considering physical interactions between stratified water layers and plumes induced by the intermittent deep draw artificial circulation system. The program was tested with data observed in Yeoncho Lake. The results indicated that the developed method can applied in the fields successfully. Further validation processes would improve design and operation methods.

Key words: Algal bloom, Destratification, Intermittent Deep draw artificial circulation, Reservoir aeration, Yeoncho Lake

주제어: 부영양화, 성층파괴, 간헐식 인공순환장치, 호수 폭기, 연초호

1. 서 론

우리나라 저수지의 대부분은 유역에서 발생되어 유입되는 오염물질의 지속적인 증가로 인해 하절기의

녹조현상이 주기적으로 발생하고 있다. 많은 수의 저수지에서는 녹조현상 또는 산소 고갈현상에 의하여 발생하는 이취미 등의 문제점을 개선하기 위하여 인공순환장치를 설치·운영하고 있다. 인공순환장치의 종류는 매우 다양하나 우리나라에서 가장 널리 보급

되어 사용되고 있는 것들은 Fig. 1에 나타난 간헐식 양수통형 인공순환장치이다. 이는 주로 일본에서 많이 사용되고 있는 것으로 양수통의 하단에 간헐적으로 공기방울을 주입하여 하부의 수체를 상부로 끌어올려 순환시키는 장치이며 한국수자원공사가 관리하는 상수원용 저수지에 86기, 지자체가 관리하는 저수지에 53기 등이 설치되어 운영되고 있다. 그러나 우리나라에서 현재 사용되고 있는 인공순환 장치의 설계 및 운영방법은 간단한 경험식에 의존하는 경우가 대부분이었다. 서동일 등(2002)은 우리나라에 설치된 각종 인공순환장치의 실질적인 수질개선효율이 문제시되며 따라서 이에 대한 심도 있는 재검토가 이루어져야 할 것을 강조하였다. 따라서 본 연구에서는 간헐식 양수통형 인공순환장치를 중심으로 기존 국내의 설치 및 설계방법의 문제점을 분석하고 국외의 문헌과 관련된 자료를 조사하여 설계 방법을 개발 하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 국내 인공순환장치 설계방법

국내에서 사용되는 간헐식 양수통형 인공순환장치의 설계방법은 한국수자원공사 보고서(2000)에 잘 나타나 있다. 간헐식 양수통형 인공순환장치는 성층현상이 발생하였을 때 무산소 층이 되는 심층수를 수표면으로 양수하여 대기의 공기와 접촉시켜 산화시키는 것을 목적으로 하며 그 설계 방법은 다음과 같다.

1회당 양수량은 양수통의 체적을 의미하는 것으로서 다음과 같은 식으로 산정된다.

$$v = \frac{\pi}{4} D^2 \times L \quad (1)$$

v : 1회당 양수량(m^3 /회)

D : 양수통 내경(m)

L : 양수통 유효길이(m)

분출간격은 상하층의 수심차와 공기공급량 그리고 공기실의 용적을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다. 그러나 실제로 공기의 분출간격은 분당 4회씩으로 고정되어 사용되고 있다.

$$T = \frac{V \times (\Delta P + 10)}{10 \times q} \times 60 \times 1.1 \quad (2)$$

T : 공기분출시간 간격(sec)

V : 공기실 용적(L)

P : 수면으로부터 공기 분사구 까지의 수압(m)

q : 공기의 공급량(l/min)

1일 양수량은 양수통의 체적과 분출회수를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$Q = v \times \frac{60 \times 1440}{T} \\ = v \times 60 \times 1440 \times \frac{10 \times q}{V \times (\Delta P + 10) \times 60 \times 1.1} \quad (3)$$

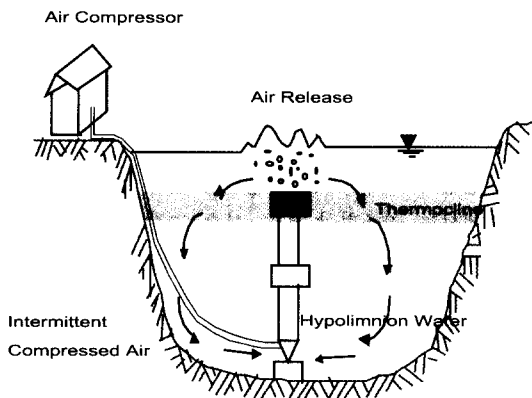
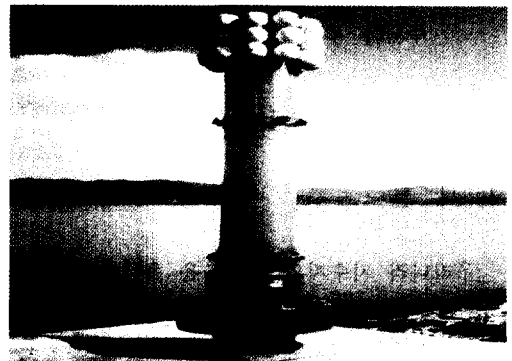


Fig. 1. Intermittent Deep Draw Aeration System.



저수지에서 양수통에 의하여 혼합이 되는 수량은 양수통에서 분사되는 원뿔모양의 수류의 체적을 계산하는 다음의 식에 의하여 계산된다.

$$\text{직접 교환수량} = \frac{1}{3} \times \frac{\pi}{4} \times 25^2 \times \Delta h \quad (4)$$

식 (4)에서 25m는 확산실험에 의하여 결정된 바 있는 확산 지름으로서 호수면에서의 교환영향 범위를 나타내며, h는 양수통의 상단과 수표면의 수심차를 의미한다.

위의 자료를 종합하여 다음과 같이 설치대수를 산정한다.

$$N = \alpha \frac{Q}{A} \quad (5)$$

N: 양수통의 필요수(대)

A: 양수통 1기당 평균 양수능력(m³/대)

Q: 수온성층 이하 심층수의 1일당 발생수량 (m³/d)
= V/T

V = 심층수의 용적(m³)

T = 수온성층 발생기간(day)

α: 여유계수 = 1.2

그러나 위의 방법은 호수의 형상 및 성층 특성을 반영하고 있지 않으며 공기에 의하여 유도되는 수체의 이동이 1:1로 대응하는 것으로 가정하는 문제점이 있다. 공기의 공급과 이에 의해 유도되는 수체의 흐름은 유체역학적으로 매우 복잡한 과정을 포함하며 특히 공기의 흐름이 연속적이지 않고 간헐적인 경우는 더욱 그러하다. 따라서 위와 같은 설계 방법은 성층과괴를 위한 장치의 설계에 적절하지 않으며 개선이 요구된다.

2.2. 국의 인공순환장치 설계방법

양수통형 인공순환장치는 온도가 낮은 심층의 물을 표층으로 이동시킴으로써 성층을 파괴시키는 장치이다. 표층으로 이동한 심층수는 대기와 접촉하여 풍부한 용존산소를 포함하는 표층수와 혼합된다. 밀도가 상대적으로 높은 차가운 수층은 Fig. 2에 나타난

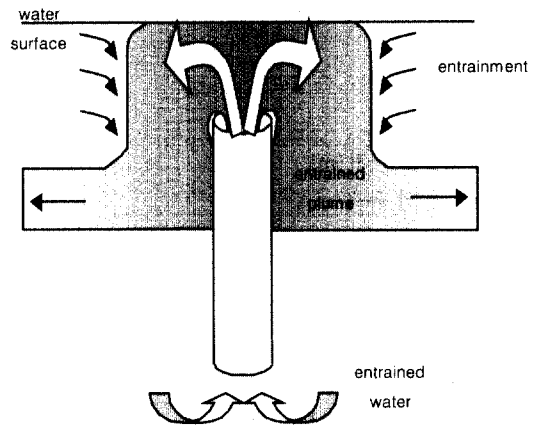


Fig. 2. Conceptual representation of deep draw aerator operation.

바와 같이 수평, 수직방향으로 확산되면서 수체의 유동을 일으키게 된다. 이 방법은 기포상승에 의하여 발생하는 유동의 개념(Schladow, 1993)과 거의 유사하나 수류가 양수통에서 방출되고 난 후에 혼합이 일어나는 차이가 있다. 장치에서 방출되는 기포류(bubble plume)의 평균 유속 u_0 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$u_0 = \frac{4 Q_0}{\pi D^2} \quad (6)$$

Q_0 = 양수통에서 분출되는 유량(m³/s)

D = 양수통의 지름(m)

이때 Q_0 의 밀도는 심층수의 밀도 $\rho_s + \Delta\rho$ 로 나타낼 수 있다. 이 방출되는 유체의 힘의 방향은 위로 향하지만 주위 수체의 압력에 의한 힘의 방향은 아래로 향하기 때문에 점차적으로 추진력은 감소하게 된다. Turner(1973)는 이 기포류가 상승할 수 있는 최대 거리 Z_m 을 계산하는 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$Z_m = 1.85 M_0^{\frac{3}{4}} B_0^{-\frac{1}{2}} [m] \quad (7)$$

M_0 = 초기 모멘텀 [m⁴/sec]

B_0 = 초기 부력 플럭스 [m⁴/sec²]

Turner(1973)는 다음의 식들을 이용하여 M_0 와 B_0

를 구할 수 있다고 하였다.

$$M_0 = \pi r_0^2 u_0^2 \quad (8)$$

r_0 = 노즐의 반경 (m)

u_0 = 노즐의 유속 (m/s)

$$B_0 = g' Q_0 \quad (9)$$

$g' = g \Delta \rho / \rho_r$ [m/sec²]

$\Delta \rho$ = 밀도차

ρ_r = 기준밀도 (1,000kg/m³)

Z_m 이 방출구부터 수표면까지의 거리(b)보다 작으면 방출된 수류는 수표면에 도달하지 못하게 되고, Z_m 이 b 와 같은 경우에 수표면에 도달하게 되며, 이보다 큰 경우에는 공기방울이 수표면을 통과하여 방출된다. 첫 번째 경우 상승류는 $\rho_r + \Delta \rho$ 의 밀도를 가지고 유량 Q_0 로 양수통 주위에서 반경 R 을(식 11 참조) 가지는 하강 수류를 형성하게 될 것이다. 이 경우 유체의 거동은 일반적인 부력에 관한 수류 방정식에 의하여 모델링 할 수 있다. 일반적으로 Z_m 이 b 보다 약간 높은 경우가 양수통의 설계에는 가장 적절한 조건이 된다. 이러한 경우 표면에 도달한 수류는 수표면을 약간 상승시킬 수 있는 모멘텀을 가지게 된다. 결과적으로 수평방향의 압력 차이가 발생하게 되며 이는 상승류의 최종 반경과 비슷한 정도의 두께를 가진 수층을 수평으로 이동시키는 힘이 되고(Zic et al., 1992), 최종적으로는 수직방향으로 하강하게 된다. Fannelop et al.(1991)은 수표면에 도달한 기포류가 수평방향으로 이동하는 거리는 상층 개구부와 수표면 사이 거리 b 의 약 6~10배 정도 된다고 보고한 바 있다. Zic 등(1992)은 수치 해석과 실험실 및 현장 실험을 통하여 수류가 상층의 수체와 거의 혼합되지 않으며 Froude number 0.7 정도가 이 표면의 수류가 하강하기 시작하는 경계라고 보고하였으며 이때의 동반계수(entainment coefficient)는 0.05 가량이라고 하였다. Asaeda and Imberger(1993)는 수평 이동 거리를 결정하기 위하여 수평방향의 압력 차이 의한 수평속도에 의해 발생한 수직 속도의 균형관계를 이용하였으며 이를 실험적으로 증명하기도 하였다. Asaeda and

Imberger(1993)의 실험 결과와 Zic 등(1992)의 수치 모의 결과는 표면 수류의 거동은 다음과 같이 간단하게 모델링 될 수 있다는 것을 나타낸다. 수평 수류의 바로 아래 부분은 매우 복잡한 유체의 거동이 발생하지만 Fischer 등(1979)는 방출 수류의 반지름은 수표면에서 약 0.1h까지 증가하고 전체 유량은 다음과 같다고 하였다.

$$Q = 0.25b M_0^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

또한 압력 경사와 관성력의 평형간의 관계에서 방사형 수류가 약 0.1h인 두께 b_f 를 가지고(Asaeda and Imberger, 1993) 체적이 보존되고 수평방향의 계면에서 혼합이 없다고 가정하면 방류 수류에 의해 시간에 따라 확산되는 수평반경 R 은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\pi R^2 b_f = Q t \quad (11)$$

이때 하강속도 v 는 다음과 같다.

$$v = g' t \quad [m/sec] \quad (12)$$

여기서 기포류의 하강은 반지름 방향 속도 Q/Rb_f 가 하강속도 v 와 같아질 때 다음과 같이 계산된다(Asaeda and Imberger, 1993).

$$R = \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{g'^{\frac{1}{3}} b_f^{\frac{2}{3}}} [m] \quad (13)$$

$b_f = 0.1h$ 이므로, 위의 식은 최종적인 반지름 R_f 와 같게 된다.

$$R_f = (2.5)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{M_0}{g'} \right)^{\frac{1}{3}} [m] \quad (14)$$

이 모델은 R_f 가 고정되었다고 보고 동반계수(entainment) 속도를 $0.05uf$ 로 보고 있다.

여기서 $u_f = Q/R_f b_f$ 이다. 표층의 물이 함유되면 수류의 밀도가 감소하며 동시에 표층의 밀도는 증가하는 효과가 발생할 것이다. 결과적으로 수류는 부력이 중

립인 지역에 도달하게 된다. 이 지점에서 수류는 멈추게 되며 수평방향으로 이동하게 된다.

3. 연구 내용

간헐식 인공순환장치는 넓은 범위의 수괴를 상승류의 동반효과에 의해 야기되는 2차 유동을 이용하여 순환시키는 공기류 장치와는 달리, 상대적으로 수온이 낮고 산소농도가 낮은 심수층의 수체를 직접 상부로 이동시키며 이에 따른 유동을 발생시키는 특성을 가지고 있다. 또한 간헐적으로 공기가 분출되므로 연속적으로 기포를 공급하는 방식과는 유동 측면에서 큰 차이가 있다. 산소 공급을 목적으로 양수통을 이용하는 인공순환 방법은 산기관을 이용하는 방법에 비하여 사례가 적은 편이며 특히 간헐식 방법에 대하여는 이론적인 방법을 찾아볼 수 없었다. 위에 정리된 방법은 연속식 양수통형 시스템을 설계하는 데 사용할 수 있는 것으로서 간헐식 양수통을 설계하는 데에는 직접 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 기존의 형상에 대한 해석적 시각에서 유체역학적인 이론을 정리하여 간헐식 인공순환장치에 적용할 수 있는 체계적인 설계방안을 개발하였다.

이 방법은 수류가 양수통내에서 이동하고 양수통에서 방출되고 난 후에 혼합이 일어나므로 상부의 개구부에서 방출되는 유량을 알고 있다면 이에 따른 유동은 하부에서 유입된 물의 밀도를 가지는 수층의 부력에 의한 흐름으로 간주되어 간단한 모델을 만들 수 있다.

간헐식에서는 순간적으로 방출되는 기포에 의해 실린더 내의 수체가 상승되며 실린더의 상부에서 제트와 보텍스링(vortex ring)이 함께 생성되므로 이러한 경우에는 수면으로 상승하는 유동을 기본 모델로 하여야 한다.

3.1. 양수통 상단 개구부에서의 분출 유속 산정

순간적으로 공기가 양수통의 하단에 유입된다고 가정하면, 양수통 내의 물은 공기방울이 상승하며 물에 전달하는 항력 형태의 힘에 의하여 가속된다. 이 힘을 실린더 내벽에서의 마찰력과 양수통의 하부와 상부에서의 에너지 손실로 보면, 결국 양수통 내부의 수체를 가속시키는데 기여하는 힘은 아래와 같이 나

타낼 수 있다.

$$F_{up} = \nabla_{ap} (\rho_B - \rho_{ap}) g - F_{wall} - F_{outlet} \quad (15)$$

여기서,

$$\nabla_{ap} = \text{하단에 설치된 공기통의 체적} [\text{m}^3]$$

$$\rho_B = \text{양수통 하단 주위의 밀도} [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$\rho_{ap} = \text{방출공기의 밀도} = \frac{1.22 (b_b + 10.4)}{10.4} [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$g = \text{중력가속도} (9.8 \text{m}/\text{s}^2)$$

$$F_{wall} = \text{마찰력} = \frac{\pi \rho_w V_w^2 H D f}{8} \text{ (Crowe, Elger and Roberson, 2001)}$$

$$F_{outlet} = \text{입구와 출구에서 흐름이 발생하기 위하여 요구되는 추가적인 에너지}$$

$$= \frac{3\pi \rho_w D^2 V_w^2}{16} \text{ (Crowe, Elger and Roberson, 2001)}$$

가속을 받는 물의 무게는 다음과 같이 실린더 내의 물과 실린더 상부와 하부의 부가질량을 함께 고려하여 나타낼 수 있다(Newman, 1986).

$$m_w = \rho_B \left[\nabla_{of} + \left(\frac{3}{2} \right) \frac{\pi D^3}{6} \right] [\text{kg}] \quad (16)$$

여기서,

$$\nabla_{of} = \text{양수통 내부의 체적} = \frac{\pi D^2 H}{4} [\text{m}^3]$$

이때 m_w 가 받는 가속도는 다음과 같이 표현된다.

$$a_w = F_{up} / m_w [\text{m}/\text{s}^2] \quad (17)$$

식 (17)의 가속도항을 적분하여 양수통의 개구부에서 분출되는 수류의 시간에 따른 유속과 유량을 구할 수 있다. 본 연구에서 간헐적으로 공급되는 양수통에서 방출되는 수체의 유속은 Fig. 3과 같이 모의되었으며, Table 1은 유속의 최대, 최소 및 평균값을 나타내고 있다. 이때 사용된 계수의 값은 연초호에 실제로 설치된 장치를 기준으로 하였으며 자세한 정보들은 다음과 같다: 양수통의 직경 = 0.5m, 총길이 = 8 m, 공급된 공기가 일시적으로 가두어져 있는 공기실

Table 1. Simulation results of induced by intermittent aerator

	Velocity (m/sec)	Flow (m ³ /sec)	Flow (m ³ /min)
MAX	1.554	0.305	18.3
MIN	0.519	0.102	6.12
Average	0.901	0.177	10.62

부피 = 0.0835m³, 분당 공기분출 회수 = 4회/min, 공기 및 수체의 밀도 = 3kg/m³과 1000kg/m³, 공기의 상승 속도 = 0.3m/s

3.2. 방출된 수류의 최고 상승높이 산정

Turner(1973)는 양수통에서 방출된 수류가 상승할 수 있는 최대 거리인 Z_m 이 양수통 상부와 수표면까지의 거리보다 약간 클 경우가 양수통 설계에 가장 적절한 조건이라고 보고하였다. 이때 Z_m 은 유속에 따라 그 높이가 좌우되므로 간헐식 인공순환장치에서는 최대값과 최소값이 구해질 수 있다. 따라서 양수통의 상단과 수면과의 거리는 보통 Z_m 의 평균값으로 설계를 하고 수심이 높아졌을 때에도 최대 Z_m 보다 거리가 커져서는 안된다. Z_m 을 계산하는 식은 식 (7)~식 (9)에 나타난 바와 같다. 앞에서 설명한 방법을 이용하여 산정된 평균 유속을 u_0 로 하여 Turner(1973)의 방법에 따라 아래와 같이 운동량과 부력을 결정할 수 있다.

$$M_0 = \frac{\pi D^3 u_0^2}{4} = 0.159$$

$$B_0 = \frac{g' \pi D^2 u_0}{4} = 0.004$$

상승류가 도달할 수 있는 높이의 최고치(Z_m) 구한다. 이때 Z_m 은 유속에 따라 그 높이가 결정되므로 최대값과 최소값이 나올 수 있다.

$$Z_m = 1.85 M_0^{3/4} B_0^{-1/2} \text{ (m)}$$

최대값: $u_0 = 1.554$ (m/s)일 때, 12.6m

최소값: $u_0 = 0.519$ (m/s)일 때, 4.2m

평균값: $u_0 = 0.901$ (m/s)일 때, 7.3m

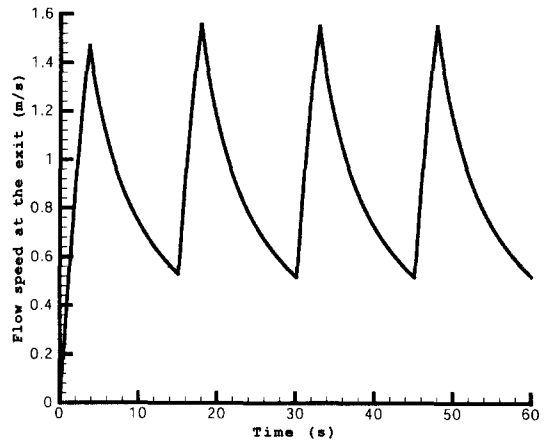


Fig. 3. Variation of Exit Velocity from Aeration Cylinder (4 times per minute).

3.3. 공기공급량 및 설치대수 산정

단순 혼합의 개념을 이용하여 인공순환장치의 용량을 산정하는 방법은 호수의 성층 특성을 반영하지 못하며 실제로 인공순환장치의 대수가 다소 과대하게 선정되는 경향을 나타낸다(서동일, 2004). 따라서 필요한 공기량과 설치 대수는 성층현상을 파괴하는 데에 공급하여야 하는 에너지를 고려하여 산정하는 것이 바람직하다. 수체가 완전히 혼합되었을 때와 성층 현상이 발생하였을 때의 위치에너지 차이는 간헐식 인공순환장치에 의하여 공급되어야 하는 운동에너지와 같다. 성층현상이 발생된 호수와 완전히 혼합된 호수의 위치에너지의 차이는 다음과 같이 계산한다(Davis, 1980).

$$\Delta PE = \int_0^b \rho_m g A(z) z dz - \int_0^b \rho(z) g A(z) z dz,$$

$$\rho_m = \frac{\frac{1}{b} \int_0^b \rho(z) g A(z) z dz}{V(b)} \quad (18)$$

여기서

$A(z)$ = 바닥으로부터 높이 h 에 위치하는 저수지의 면적 [m²]

$V(b)$ = 폭기 장치 상부의 저수지 체적 [m³]

m = 저수지 평균 밀도 [kg/m³]

단위시간당 운동에너지의 증가는 다음과 같이 표

현될 수 있다.

$$\delta_{kr} = 0.5 \rho_B Q u_0^2 = 8 \rho_B Q^3 / (\pi^2 D^4) \quad (19)$$

이 운동에너지의 증가가 부족한 위치에너지로 공급된다고 볼 수 있다.

$$\Delta PE = \delta_{kr} \times d \times 24 \times 3600 \times N_{unit} \quad (20)$$

여기서 N_{unit} 은 장치의 필요 대수를 의미한다. 연초댐에서 기록된 최대 성층현상은 1991년 8월 22일 기록된 것으로서 이 때 표수층의 수온이 23.1°C였으며 수심 16m의 수온이 8°C였다. 이 수치를 이용한 PE는 149,851,148(J)로 계산되었으며 이 성층현상을 파괴하여 상하층의 에너지가 같아지게 하는 기간을 3일로 가정하고 Table 1에 나타난 평균 유량(0.177m³/sec)을 사용하면 단위시간당 운동에너지 증가는 71.76 kg · m²/s³으로 산정된다. 식 (20)에 의해서 간헐식 양수통형 인공순환장치의 경우에는 9대의 장치가 필요하며 대기압 상태에서의 필요한 단위시간당 공기량은 분당 공기배출회수와 수심에 의한 압력수두 및 호스의 압력수두의 관계에서 다음과 같이 구할 수 있다 (Davis, 1980).

$$\begin{aligned} \nabla_{air} &= \frac{\nabla_{sp} N}{60} \left[\frac{10.4 + b_B}{10.4} + \text{호스의 압력수두} \right] \times \text{설치대수} \\ &= 12.58 \text{m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

그러나 실제로는 최대 성층현상이 발생하기 전에 인공순환 장치를 가동하는 것이 필요하므로 본 계산에는 최악의 경우에 대한 수치로 보는 것이 타당하다. 실제로 2002년에는 실토출량이 약 6.74m³/min인 압축기 한대만을 4월 8일부터 가동하여 성층현상이 성공적으로 제어된 것으로 보고된 바 있다(서동일, 2002). Fig. 4는 간헐식 인공순환 장치를 이용하는 경우 상하층의 수온 차이에 따라 성층현상을 제어하는데 필요한 공기량을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 현재 연초댐에 설치된 압축기 한대가 공급할 수 있는 공기량은 연초호의 상하층 수온차이가 섭씨 8도 가량 되었을 경우 파괴가 가능한 양으로 산정된다.

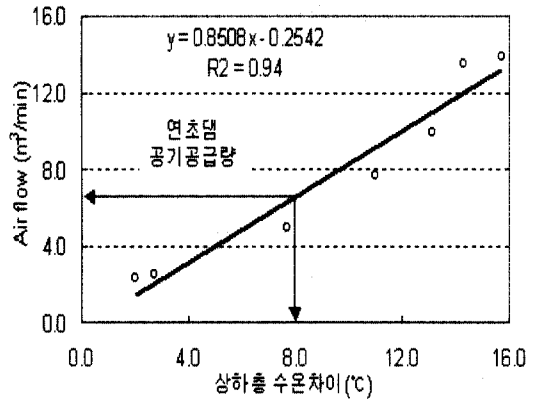


Fig. 4. Relationship between vertical temperature difference and required air flow in Yeoncho Lake.

모델의 보정 및 검증은 현장에서 관측된 결과를 토대로 이루어지는 것이 바람직하나, 연구 수행 당시 연초댐은 활발하게 이용되고 있는 상수원이므로 연구 기간 중 상수 공급에 영향을 줄 수 있는 시도는 이루어지지 못하였다. 그러나 연초댐이 2003년부터 수년에 걸쳐 보수공사에 들어가므로 이 시기를 잘 활용하는 경우 모델의 검증 및 보정이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 기존 간헐식 양수통형 인공순환장치의 설계방법을 분석하고 국외의 사례 및 문헌조사를 통하여 좀더 체계적인 방법들을 제안하였다. 제안된 인공순환장치의 설계방법에서는 간헐적으로 배출되는 공기방울에 의하여 움직이는 수체의 흐름을 유체역학적으로 분석하여 적용하였고, 기존의 방법에서 간과되었던 호수의 성층현상 발생시 특성을 반영하기 위하여 수체의 밀도 차이에 의한 위치에너지를 고려하였다. 이 방법을 사용하면 최대 성층현상을 고려하여 설치대수 및 필요한 공기량을 구하고 압축기의 용량을 산정할 수 있다. 또한 성층현상의 발생정도에 따라 필요한 공기량을 산출해 낼 수도 있어 이를 이용하여 성층파괴에 필요한 공기량을 조절하여 운영한다면 많은 비용이 절감될 수 있으리라 판단된다.

본 연구에서 개발된 방법들을 검증 보완하여 인공순환장치를 설치, 운영한다면 많은 비용이 절감되고,

효과적인 인공순환장치 운영이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 수도관리처의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이와 관련되신 오광진 처장, 정상기 부장, 이병두 과장 그리고 석관수 대리께 감사드립니다.

참고문헌

- 서동일 외 (1994) 수중 폭기에 따른 장래 수질변화예측 및 효과 규명에 관한 연구보고서, p. 417, 한국수자원공사.
- 서동일, 석관수, 이병두, 정상기 (2004) 우리나라 저수지의 수중 폭기 장치 운영에 의한 수질개선효과 분석, *상하수도학회지*, 18(3), pp. 366-376.
- 서동일, 송무석, 허우명 (2002) 수중 폭기 운영관리 최적화 보고서, p. 268, 한국수자원공사보고서.
- 서동일, 송무석, 황현동, 최재훈 (2004a) 저수지의 수질관리를 위한 산기판형 인공순환장치의 설계방법, *상하수도학회지*, 18(4), pp. 437-444.
- 서동일, 황현동, 이은형, 허우명 (2004b) 연초호의 인공 순환 장치 운영에 의한 수질개선효과 분석, *상하수도학회지*, 18(3), pp. 357-365.
- 한국수자원공사 (1991) 수중 폭기에 의한 대청호 수질개선 효과분석 보고서, p. 71.
- 한국수자원공사 (2002) 2001년 수중 폭기 효과분석 보고서, p. 217.
- 한국수자원공사 수도관리처 (2000) 2000 수중 폭기 효과분석 보고서(유지관리 및 운영지침서), p. 176.
- 한국수자원공사 수도운영처 (1993) 연초호 저수지의 수중 폭기에 의한 수질개선 효과분석 보고서, p. 120.
- Asaeda, T. and J. Imberger (1993) Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.* 249, pp. 35-57.
- Crowe, C. T., Elger, D. A. and J. A. Roberson (2001) *Engineering Fluid Mechanics*, p. 768, John & Wiley.
- Davis, J. M. (1980) Destratification of reservoirs - a design approach for perforated pipe compressed air systems, *Water Services - The Journal for Water, Sewage and Industrial Effluent Treatment*, August, pp. 497-504.
- Fannelop, T, Herschberg, S. and Kuffer, J. (1991) Structure current and recirculating cells generated by bubbles curtains and jets, *J. Fluid Mechanics* 229, pp. 629-657.
- Fischer, H., List, Koh, R., Imberger, J. and Brooks, N. (1979) *Mixing in Inland and Coastal Waters*, p. 483, Academic Press.
- Newman, J. N. (1986) *Marine Hydrodynamics*, p. 402, MIT Press.
- Turner, J. S. (1973) *Buoyancy effects in fluids*, p. 368, Cambridge University Press.
- Zic, K. and Stefan, H. (1988) Lake aerator effect on temperature stratification analyzed by 'MINLAKE' model, *Lake and Reservoir Management* 4(2), pp. 85-90.