

저수지의 수질 관리를 위한 산기판형 인공 순환 장치의 설계 방법 개발

Design Method of Diffuse Bubble Plume Aerators for Water Quality Management of Reservoirs

서동일^{1,*} · 송무석² · 황현동³ · 최재훈³

Dongil Seo^{1,*} · Museok Song² · Hyundong Hwang³ · Jae-hun Choi³

1 충남대학교 환경공학과
2 홍익대학교 조선해양공학과
3 (주)엠큐빅

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

Abstract

To control algal bloom in reservoirs in Korea, artificial circulation systems have been applied. Diffuser block aeration systems have been increasingly used in Korean reservoirs especially for shallow ones. However, there has been no sound theoretical background for the design and operation of the system. Also there has not been sufficient post-installation studies to validate the effectiveness of the system. As a result, it has been repeatedly reported that the success of the system is not certain. Proper consideration on thermal stratification regimes of reservoirs and flow dynamics induced by bubble plumes are essential elements in design processes of the aeration system. This paper discusses the current methods in the design of diffuser type aeration system and suggests a new design method based on fluid mechanical theory. Example calculations were discussed using observed data of the Yeoncho Dam and it seems that the results represent the current situation successfully.

Key words: Algal bloom, Thermal stratification, Diffuser aeration system, Bubble plume, Yeoncho Lake

주제어: 부영양화, 성층파괴, 산기판형 인공순환장치, 공기류, 연초호

1. 서론

인공순환 기술은 동절기의 결빙을 제어하기 위하여 개발되었으며 호소의 수질을 관리하기 위하여 사

용되기 시작한 것은 1960년대 중반부터인 것으로 알려져 있다. 수체의 인공순환을 위하여 기계적인 혼합 장치, 수류, 공기방울 등이 사용되며 다수의 호소에서 성층현상이 방지되거나 파괴되었던 사례가 다수 보고된 바 있다(Cooke et. al., 1993). 이 방법을 성공

*Corresponding author Tel: +82-42-821-6679, FAX : +82-42-822-5610, E-mail: seodi@cnu.ac.kr (Seo, D.I.)

적으로 적용하는 경우 심수층의 산소 농도가 증가하여 호기성 생물의 서식 조건이 개선되거나 산화 조건이 형성되어 저니층으로부터 철 또는 망간과 같은 물질이 용출되는 것을 억제할 수 있다. 또한 유체가 수직적으로 유동하면서 표수층의 수온을 감소시키고 조류가 태양광에 노출되는 시간을 감소시킴으로써 조류의 서식조건을 악화시켜 녹조현상을 제어할 수도 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 심수층의 암모니아 농도와 수온이 증가하여 친냉성 어류의 서식환경을 악화시키는 부작용이 발생할 수도 있는 것으로도 보고된 바도 있다. 또한 인공순환 시설의 용량이 충분하지 않은 경우 심수층의 영양염류가 표층으로 이동하거나, 식물성 플랑크톤의 서식 범위가 넓어지는 등의 부작용 또한 발생할 수 있다. 따라서 수질관리를 목적으로 인공순환 장치를 설치하는 경우에는 해당 호소의 물리, 화학 및 생물학적 특성과 장치의 운영에 따라 발생하는 현상을 함께 고려하여 적절한 기능 및 규모를 산정하는 것이 매우 중요하다.

우리나라에서 상수원으로 사용되고 있는 대부분의 호소는 부영양화 현상이 점차로 심화되는 경향을 나타내고 있으며 이에 따라 조류의 과잉성장으로 인한 호소의 미관문제, 상수의 이취미의 발생 또는 상수처리를 위한 비용증가 등과 같은 문제점이 발생하고 있다. 우리나라에서 상수원으로 사용되는 다수의 저수지에서는 위와 같은 수질문제를 개선하기 위한 방법으로 수중폭기장치를 설치, 운영하는 하고 있으며 2003년 현재 전국적으로 377기 가량이 설치된 것으로 집계되고 있다. 호소의 인공 순환 방식에는 크게

기계적인 혼합에 의한 방법과 공기의 주입에 의한 방법의 두 가지가 있으나 설치가 용이하고 운전이 간편한 후자가 널리 사용되는 경향이다.

일반적으로 호소에 성층현상이 발생한 경우, 대기로부터 공급되는 산소는 표층수에만 국한되며 심층수에는 산소고갈에 의한 부작용이 발생할 수 있으나 인공순환을 실시하는 경우에 성층현상이 방지 또는 제어될 수 있다. 일반적으로 인공순환장치에서는 호소 바닥으로 방출되는 공기에 의해 심층부의 물이 표층으로 이동되어 혼합이 이루어지는데 주입되는 공기의 에너지가 호소의 안정을 파괴할 만큼 충분한 경우에는 호소의 완전 혼합을 유도할 수 있다. 따라서 인공순환장치의 설계는 댐의 물리적 특성, 성층 특성 그리고 수질 특성 등이 적절하게 고려되어야만 실질적인 수질관리 효과를 나타낼 수 있다. 그러나 기존의 인공순환장치의 설치 및 운영은 간단한 경험식에 의존하는 경우가 대부분이었으며 운영효과에 대한 분석 또한 충분하게 이루어지지 않은 것으로 보인다.

본 연구는 산기식 인공순환장치를 대상으로 국내외의 관련 문헌을 조사하고 순환장치의 설계 및 운영에 대한 이론적인 근거를 제공하기 위하여 수행되었으며 거제도의 연초댐을 대상으로 시험적인 계산을 적용하여 보았다.

2. 이론적 배경

2.1. 기존의 산기판형 인공순환장치 설계 방법

산기판형 인공순환장치는 Fig. 1과 같이 호소 바닥

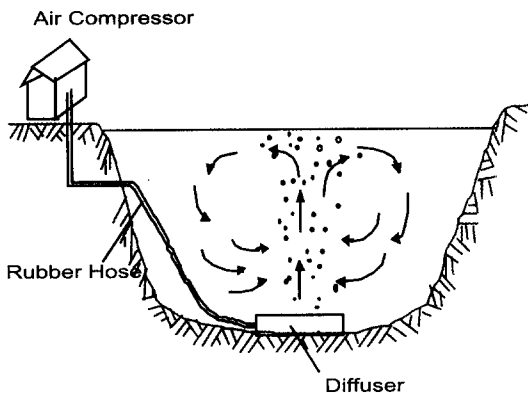


Fig. 1. Artificial Aeration System - Diffuser Block Type.

에 설치한 산기관을 통하여 공기방울을 연속적으로 배출하는 장치이다. 우리나라에서는 시화호에서 처음 소개된 이후(안상은, 1997) 한국수자원공사가 관리하는 저수지를 중심으로 보급되어 왔으며 현재 한국수자원공사에서 198기, 지자체에서 28기 등 약 226기 정도가 설치되어 운영되고 있는 것으로 조사되고 있다(한국수자원공사, 2002).

현재 국내에 설치되어 가동되는 산기관형 인공순환장치의 설계 방법은 크게 1) 수체의 체적과 폭기조 1기가 순환시킬 수 있는 유량을 기준으로 하는 방법 2) 생물학적 폐수처리 공법에서 흔히 사용되는 대상 지역 수체의 산소소모율($g/m^3 \cdot day$)에 의거 공급 공기량을 산정하는 방법을 사용하는 것으로 대별할 수 있다(한국수자원공사, 2000). 위 두 가지 방법은 모두 호소를 완전하게 혼합되는 수체로 보고 있으나 정체된 호소내의 녹조현상과 유동은 호내의 수직적인 온도 또는 밀도변화와 밀접한 관계가 있으며 따라서 장치의 설계에는 이러한 사항이 반드시 고려되어야 한다.

호소의 성층현상을 제어하거나 산소농도를 증가시키기 위하여 주로 사용되는 방법은 공기의 주입, 기계적 혼합 또는 순산소를 주입하는 방법이 사용된다. Davis(1980)는 호소의 성층현상을 제어하기 위하여 이론식과 경험식을 조합하여 긴 파이프 형태의 산기관을 이용한 인공순환 장치의 설계에 사용할 수 있는 식을 제안하였고, Meyer(1991)는 Davis의 식을 바탕으로 파이프형 산기관을 설계할 수 있는 spreadsheet program을 개발한 바 있다. Fannelop(1990) 등은 산기관에서 발생하는 공기방울의 흐름에 의한 수체 흐름의 이론을 정리한 바 있으며, Robertson(1991) 등은 여러 개의 산기관에서 발생하는 공기방울의 상호작용에 대하여 보고한 바 있다. Schladow(1992)는 기포흐름의 부력과 성층화된 수체의 밀도사이에서 상승하는 수체를 두 개의 무차원 상수로서 묘사하였고, 1993년에는 앞서 발견한 두 개의 무차원 변수를 이용하여 수체를 효과적으로 순환시킬 수 있는 공기량을 계산하였다. Patterson and Schladow(1993)는 기포흐름 산기관 장치의 설계방법을 제시하면서 공급되는 총 공기량이 클수록 성층현상이 빨리 파괴되며 산기관의 개수는 장기적으로 보았을 때 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 Patterson and

Schladow(1993)가 제시한 방법을 중심으로 폭기 장치의 용량 및 대수를 결정하는 방법을 제시하고자 한다.

2.2. Schladow의 인공순환장치의 설계 방법

2.2.1. 이론

Schladow(1992, 1993)는 기포류(Bubble Plume)의 부력과 밀도차에 의해 성층화된 상부의 수층사이의 물리적인 특성을 이용하여 폭기장치를 설계하는 기법을 제안한 바 있다. Schladow(1993)는 성층현상을 파괴할 수 있는 공기의 흐름은 부력과 성층현상의 세기의 함수이며 이들은 수심과 비선형의 관계를 나타내며 기포류를 결정하는 두 가지의 무차원 변수, M과 C는 다음과 같이 정의된다고 하였다.

$$M = \frac{Q_0 P_a (\lambda^2 + 1)}{4 \pi \alpha^2 \rho_r H^2 u_B^3}; \text{ source strength}$$

$$C = \left(\frac{N^3 H^3}{g Q_0} \right) \left(\frac{H}{b_a} \right); \text{ stratification strength}$$

$$P_a = \text{Atmospheric pressure [1 atm = } 10^5 \text{ p}_a = 10^5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sec}^2]$$

$$b_a = \text{Equivalent head of water (= } p_a / \rho_r g), \text{ at sea level } b_a = 10.2 \text{ [m]}$$

$$\rho_r = \text{Reference water density}$$

$$g = \text{Gravitational acceleration}$$

$$Q_0 = \text{Volumetric gas flow rate from the bubble source at atm [l/sec]}$$

$$u_B = u_s (\lambda^2 + 1)$$

$$u_s = \text{Slip velocity of bubbles relative to the liquid in the plume (0.3m/sec)}$$

$$N = \text{Buoyancy frequency; } \left(-\frac{g}{\rho_r} \frac{d\rho(z)}{dz} \right)^{1/2}$$

$$\lambda = \text{Dispersion term (0.3)}$$

$$\alpha = \text{Entrainment coefficient (0.083)}$$

Fig. 2는 산기관에 의한 기포흐름 개념도로서 기포에 의하여 유도되는 상승류는 부력과 마찰 손실 등의 역학적인 평형관계에 따라 호소표면에 도달하기 전에 파괴될 수도 있다는 것을 보여주고 있다.

이 방법에서는 저수지 바닥에 위치한 산기관을 통

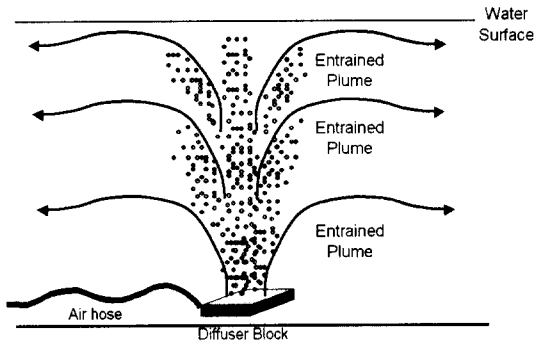


Fig. 2. Conceptual representation of bubble plume aeration.

하여 압축공기가 공급되고, 상승하는 공기방울은 주변의 수층을 견인하여 공기와 수체가 혼합된 기포류를 형성한다. 이 기포 상승류는 부력이 평형을 이루는 지점까지 상승하며, 계속적인 공기의 주입은 이러한 평형지점을 상승시키는 효과를 가져오게 된다. Schladow(1993)는 두 가지의 매개 변수 M과 C를 이용하여 각 공기상승류가 효율적으로 작용하도록 조절할 수 있다고 보고하였다.

이 모델에서는 견인된 수류가 저수지의 표수층에 도착될 수 있는 정도 만큼만 충분한 운동에너지가 질 수 있도록 하는 경우에 최대의 효율을 나타내는 것으로 보고 있다. M과 C, 그리고 기계적인 효율의 관계는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

여기서 기계적인 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{mech} = (PE_f - PE_i) / W_{in}$$

P_1 = 수표면의 절대 기압 [kg/m · sec²]

P_2 = 산기관이 위치한 수심의 절대 기압 [kg/m · sec²]

Δt = 기포흐름의 유지 기간 [sec]

PE = 수층의 위치에너지, [$f = \text{kg m}^2/\text{s}^2$]

$W_{in} = 2.303 P_1 Q T \Delta \log(P_2/P_1)$; 압축공기에 의한 등온 일량

i, f = 처음과 끝을 의미

매개변수 M과 C는 수심, 공기량 그리고 성층의 세기와 같은 세 가지의 변수를 포함하고 있다. 따라서 수심과 공기량이 일정한 경우 각 M값에 따른 C의

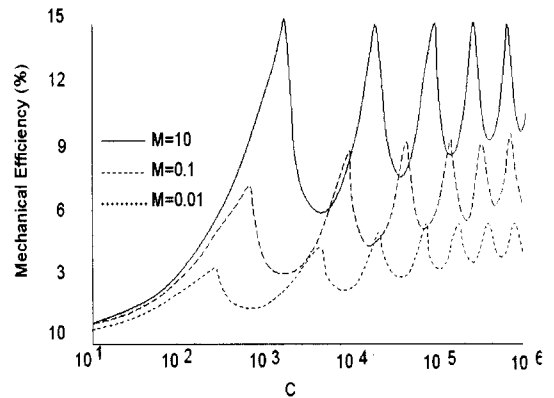


Fig. 3. Mechanical Efficiency as a function of C for various M values.

변화는 성층현상에 따른 밀도의 함수이다. 성층 현상이 파괴되어 감에 따라 해당 저수지에서는 C값이 감소하고 Fig. 3 오른쪽에서 왼쪽으로 이동하는 현상이 발생한다. 임의의 M값에 대해 C값이 첫 번째 극대점 (peak)의 왼쪽에 위치한 경우 성층 파괴 효율은 0에 가까울 수 있다. 그러나 첫 번째 극대점의 오른쪽에 위치한 경우, 성층 파괴 효율은 약간의 진동이 있기는 하나 일정한 범위 내의 값을 보이게 된다. M값이 클수록 효율은 증가되나 C값이 첫 번째 극대점 왼쪽에 위치할 정도로 작아지는 경우가 발생하여 낮은 효율이 발생할 수도 있다. 수심과 성층의 강도가 일정한 경우 M-C 곡선 내에서 적절한 위치에 따라 필요한 공기주입량을 결정할 수 있다. 그러나 공기 주입량은 M, C 그리고 효율을 독립적으로 나타내는 데 사용할 수 없으며 M 또는 C가 먼저 결정되어야 한다.

기포 상승류의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 첫 번째 극대점에 대한 상대적인 C값이다. 이 값은 상수가 아니며 M값에 따라 달라진다. 다수의 모의 결과에 의하면, 초기 C값은 M-C 곡선 상에서 첫 번째와 두 번째 극대점 사이에서 두 번째 극대점에 가까운 쪽의 값을 택하는 것이 최적인 것으로 보고되고 있다. 물리적으로 이러한 초기 조건은 기포 상승류가 한번의 내부 이탈점(수류가 밖으로 빠져나가는 지점)을 가지며 수표면에 도달하였을 때 양수의 모멘텀을 가지는 것을 의미한다. 성층이 파괴되면서 내부의 이탈점은 점차적으로 상승한다. 이 공기상승류모델은 1

차원 저수지 모의 모델인 DYRESM(Imberger and Patterson, 1981)에 사용되고 있다.

2.2.2. 계산방법의 정립

위의 이론을 토대로 성층파괴를 위한 산기장치의 용량을 결정하기 위한 방법을 다음과 같이 정리하였다. 여기서 인공순환장치의 용량이란 대상 수체에 발생한 성층현상을 일정 시간 내에 파괴할 수 있는 컴프레서의 용량과 필요한 산기장치의 대수를 결정하는 것을 의미한다.

① 최대 성층 현상의 결정

인공순환 장치가 설치되지 않았을 경우 발생 가능한 성층현상 또는 수심별 온도분포를 선정한다.

② 성층현상의 선형화

설계 대상 성층현상은 대상 수체의 바닥에 상대적인 등가 위치에너지가 가지는 선형 수온 식으로 다시 표현될 수 있다고 본다. 즉 $\partial T/\partial Z$ 를 (상층수온-하층수온)/(상하간 깊이)로 가정하고 층별로 선형 수온분포를 구한다. 층별로 선형 수온분포를 구하여 각 선형 수온에 대해 수층의 밀도를 계산하고 이들 값을 이용하여 $PES_{\text{선형}} = g \Delta r_i^{\text{선형}} V_i b_i$ 을 계산한다. 이 선형 위치에너지가 $PES_{\text{선형}} = PES$ 의 관계를 만족하는 $\partial T/\partial Z$ 가 선형수온 기울기가 된다.

③ 공급되어야 하는 위치에너지의 계산

성층화된 호소와 완전 혼합된 호소 간의 위치에너지의 차이를 계산한다.

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

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

여기서

$A(z)$ = 바닥으로부터 높이 b 에 위치하는 저수지의 면적 [m^2]

$V(b)$ = 폭기 장치 상부의 저수지 체적 [m^3]

m = 저수지 평균 밀도 [kg/m^3]

④ 효율(η) 결정

단계 2에서 계산된 등가 선형수온 기울기와 Fig. 4와 같이 Schladow(1993)가 제시한 도표를 이용하여 에너지의 효율(η)을 결정하며, 에너지 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{\text{ech}} = (PE_f - PE_i) / W_{\text{iso}}$$

$$W_{\text{iso}} = 2.303 P_1 Q T \Delta t \log(P_2 / P_1)$$

P_1 = 수표면의 절대 기압 [$kg/m \cdot sec^2$]

P_2 = 산기관이 위치한 수심의 절대 기압 [$kg/m \cdot sec^2$]

Δt = 기포흐름의 유지 기간 [sec]

PE = 수층의 위치에너지, [$J = kg m^2/s^2$]

$W_{\text{iso}} = 2.303 P_1 Q T \Delta t \log(P_2 / P_1)$; 압축공기에 의한 등온 일량

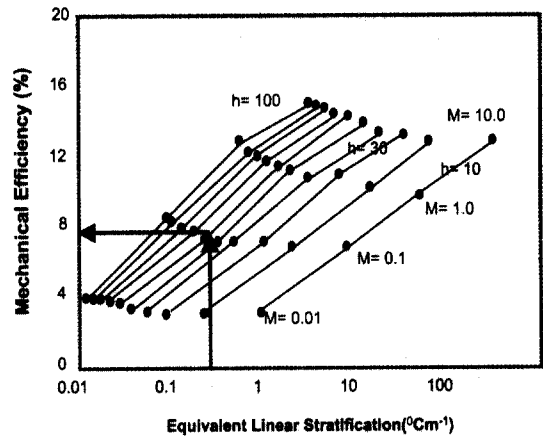
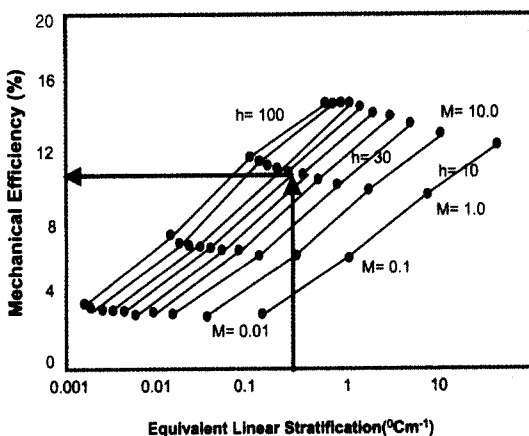


Fig. 4. Design charts for mechanical efficiency.

i, f = 처음과 끝을 의미

⑤ 필요한 전체 공기량의 계산

적절한 성층과괴시간을 가정하여 다음의 식으로부터 필요한 전체 공기량 Q_T 를 계산할 수 있다.

$$Q_T = W_{iso} / [2.303 P_i \Delta t \log(P_2/P_1)]$$

압축기에서 공급해야 하는 최종적인 공기량은 위에서 계산된 전체 공기량에 호스의 마찰저항에 의해 손실되는 공기량을 더해 주어야 한다.

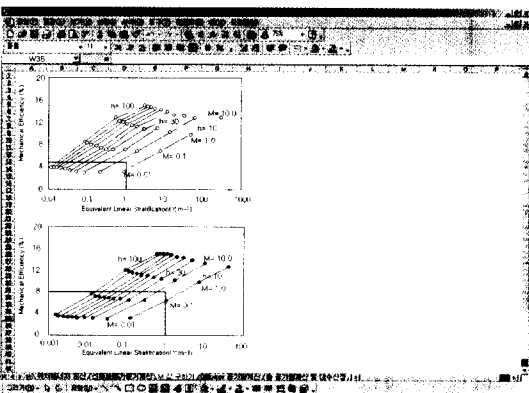
⑥ 영향반경을 고려한 설치 대수 산정

산기관이 너무 밀집해 있으면 기포류가 뭉쳐지는 효과가 발생하여 공기에 의한 에너지가 충분히 전달되지 못하고 대기 중으로 방출되는 효과가 발생할 수

도 있다. 따라서 산기장치를 적절한 거리에 이격시키는 것은 장치의 효율을 최대화하기 위해 중요한 사항이 된다. 산기관 사이의 적정 거리는 소위 "영향반경"에 근거하여 결정하는 것이 합리적인데, 이 영향반경은 특정 기포류에 의하여 만들어질 수 있는 혼합수체의 반경으로 일반적으로 정의된다. 연구자에 따라 영향반경의 정의와 크기, 온도성층정도 및 기포강도의 영향에 대한 고려 등에 일관성이 없어서 일반적으로 적용될 수 있는 영향반경의 크기를 수심의 특정 배수로 말하기는 어렵다. 또한 수심이 깊고 수심간 온도차가 클 경우 최하단의 수체가 수면까지 상승할 수 없다. Fanelop 등(1980)은 수심의 2.5배, Goossens (1979)의 경우 수심의 4~7배 등으로 보고한 바 있으며, Fanelop 등(1991)은 이들을 간단히 요약하고 있다. 본 연구에서는 수심과 수층간의 온도차가 상대적

a) Sheet 1 - Data Input

b) Sheet 2 - Equivalent slope



c) Sheet 3 - Mechanical Efficiency

d) Sheet 4 - Airflow and Number of Unit

Fig. 5. Spreadsheet program for design of bubble plume aerator.

으로 작아서 기포류가 수직방향으로 단일 순환류를 만드는 경우에 대해 전술한 연구결과와 자체 수치실험에 근거하여(서동일 등, 2002) 수류의 영향반경을 수심의 6배로 고려하여 설치대수를 산출한다. 즉 수심이 h 일 경우 다음의 식에서 설치 산기판의 개수를 구할 수 있다.

$$A = \pi(6h)^2 \times N_{mit}$$

2.2.3. 인공순환장치 설계 Program의 개발

위의 설계방안을 고려하여 Excel program의 Macro 기능을 이용하여 프로그램을 작성하였다. 이 프로그램은 총 4개의 sheet로 구성되어 있으며 그 내용은 다음과 같다. 그러나 M-C curve를 이용하여 효율을 산정하는 부분은 설계자의 판단이 필요하므로 완전 자동화될 수는 없다 Fig. 5는 개발된 program의 각 sheet를 보여주고 있다.

3. 연구 결과

연초댐에는 산기판형 인공순환장치 9기, 간헐식 양수통형 인공순환장치 7기가 함께 운영되고 있다. 본 계산에서는 연초댐에 산기판형 인공순환장치만이 설치된 경우, 연초댐의 성층현상을 파괴시키는 데 필요한 공기량과 장치의 댓수를 산정하여 보기로 한다. 연초댐의 최대 성층현상은 1991년 8월 22일에 기록된 것으로서 상층은 23.1°C 그리고 하층은 8°C로서 약 15°C 가량의 수온 차이를 나타낸 바 있다. 위와 같은 방법을 통하여 계산된 결과에 의하면 성층파괴에 필요한 공기량은 12.41m³/min이며 필요한 장치의 수는 25대로 산정되었다. 그러나 2002년의 경우, 연초댐에서 실 토출량이 약 6.74m³/min인 4대의 공기압축기 중 한 대만을 4월 8일부터 가동하였을시 가동 4일째인 4월 12일에는 상하층의 차이를 1°C 미만으로 제어할 수 있었으며 이후 계속해서 하나의 압축기로 충분한 순환이 이루어진 것으로 관찰되고 있다. Fig. 6는 산기식 인공순환장치를 사용하였을 경우 연초호의 여러 가지 성층조건에 따라 필요한 공기량을 보여 주고 있다. 연초호의 경우 동일한 조건에서 성층현상을 파괴할 때, 산기판식을 사용하였을 경우가 간헐식 장치를 사용했을 경우보다 필요한 공기량이

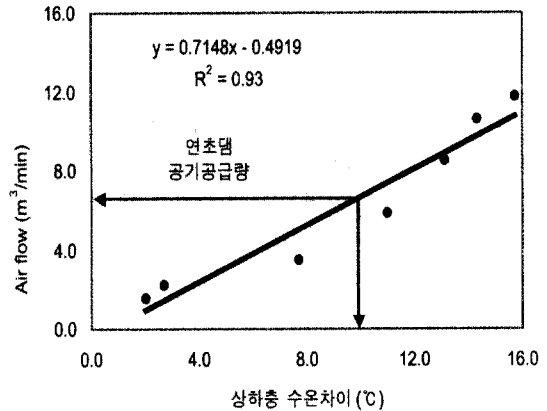


Fig. 6. Relationship between vertical temperature difference and required air flow in Yeoncho Lake.

작은 것으로 나타나고 있다. 그러나 이러한 계산 결과는 연초호의 저수지 형상과 저수지 특성을 고려하였을 경우에 한하며, 따라서 장치에 의한 성층파괴 효과는 경우에 따라 다를 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 호내의 녹조현상의 부작용을 저감하기 위하여 사용되는 산기판형 인공순환 장치의 설계방법을 정리하고 설계 프로그램을 개발하였다. 기존의 인공순환 장치를 설계하는 방법들은 크게 수리학적 체류시간의 개념이나 폐수처리시설의 공기 공급 장치의 설계 방법 또는 설계자의 경험에 의존하여 왔으나 본 연구에서는 조금 더 과학적인 이론에 근거하여 대상호소의 성층현상을 파괴하는데 필요한 에너지를 공급할 수 있는 압축기의 용량과 산기장치의 대수를 산정할 수 있도록 하였다. 또한 사용자의 편의를 도모하기 위하여 Excel을 이용한 설계프로그램을 개발하였다. 우리나라에서는 인공순환 장치를 봄철에서 가을까지 계속적으로 운영하는 경향인데 이에 따른 동력비와 압축기의 내구성이 운영비의 가장 큰 부분을 차지하고 있다. 본 방법의 가장 큰 장점은 대상 호소의 성층조건에 따라 필요한 압축기의 용량을 즉시 산정할 수 있으므로 압축기를 탄력적으로 운영하여 동일한 조건의 성층파괴의 효과를 유지하면서 동력 및 관리 비용의 절감 효과를 기대할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 수도관리처의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이와 관련되신 오 광진 처장, 정 상기 부장, 이 병두 과장 그리고 석 관수 대리께 감사드립니다.

참고문헌

- 서동일, 송무석, 허우명 (2002) 수중폭기 운영관리 최적화 보고서, p. 268, 한국수자원공사 보고서.
- 서동일 (2004) 우리나라 저수지의 수중폭기장치 운영에 의한 수질개선효과 분석, *상하수도학회지*, **18**(3), pp. 366-376.
- 서동일, 송무석, 황현동, 이은형 (2004a) 저수지의 수질관리를 위한 간헐식 양수통형 인공순환장치의 설계방법 개발, *상하수도학회지*, **18**(4), pp. 445-452.
- 서동일, 황현동, 이은형, 허우명 (2004b) 연초호의 인공 순환 장치 운영에 의한 수질 개선 효과 분석, *상하수도학회지*, **18**(3), pp. 357-365.
- 안상은 (1997) 시화호의 수질현황과 호소수질회복 방안에 관한 연구, 충남대학교 환경공학과 석사학위논문.
- 한국수자원공사 (2000) 2000 수중폭기 효과분석 보고서 (유지관리 및 운영지침서), p. 176.
- Cooke, G. Dennis, Welch, E. B., Peterson, S. A. and Newroth, P. R. (1993) Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, Second Edition, p. 419-450, Lewis.
- 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. K. and Sjoen, K. (1980) Hydrodynamics of underwater blowouts, AIAA 8th Aerospace Science Meeting, January 14-16, Pasadena, CA, AIAA paper 80-0219.
- Fannelop, T., Herschberg, S. and Kuffer, J. (1991) Surface current and recirculating cells generated by bubbles curtains and jets, *J. Fluid Mechanics*, **229**, pp. 629-657.
- Goossens, L. K. (1979) Reservoir destratification with bubble columns, Thesis, Delft University Press.
- Imberger, J., and Patterson, J. (1981) A dynamic reservoir simulation model, DYRESM, Transport models for inland and coastal waters, Fischer ed., pp. 310-361, Academic Press, NY.
- Meyer, Edward B. (1991) Pneumatic destratification system design using a spreadsheet program, E-91-1, pp. 1-6, Information Exchange Bulletin, WOTS (Water Operations Technical Support), US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station.
- Patterson, J. C. and Schladow, S. G. (1993) Destratification of Lower Hollywood Reservoir, Report prepared for Los Angeles Department of Water and Power, p. 59, Centre for Water Research, The University of Western Australia, Australia.
- Robertson, D., Schladow, S., and Patterson, J. (1991) "Interacting bubble plumes: the effect on aerator design", *Environmental Hydraulics*, Lee and Cheung Eds., Balkema Rotterdam, Netherland.
- Schladow, S. G. (1992) Bubble plume dynamics in a stratified medium and the implications for water quality amelioration in lakes, *Water Resources Research*, **28**(2), p. 313-321.
- Schladow, S. G. (1993) Lake destratification by bubble-plume systems: Design methodology, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **119**(3), pp. 350-368.