

## 간헐식 폭기형 수체순환장치 모델링

송무석<sup>†\*</sup>, 서동일<sup>\*\*</sup>

홍익대학교 조선해양공학과<sup>\*</sup>  
충남대학교 환경공학과<sup>\*\*</sup>

### A Modeling of Intermittent-Hydraulic-Gun-Aerator

Museok Song<sup>†\*</sup> and Dongil Seo<sup>\*\*</sup>

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Hongik University<sup>\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

A modeling of a hydraulic-gun-aerator is proposed to set up a design procedure for such devices. The aerators are used to destroy any thermal stratification that are responsible for the degradation of water quality of lakes. The aerator produces ascending flow by using air bubbles released instantly near the bottom of the lake into a cylindrical pipe installed vertically. Differently from the diffuser-aerators, they can pull up the cold, oxygen depleted water directly to the region of the free surface, and they are believed to work effectively especially for relatively deeper lakes. Their design procedure has not been established yet though, and we propose a model focusing on the exit flow velocity at the top of the aerator through the examination of presently operating devices.

※Keywords: Intermittent-Hydraulic-Gun-Aerator(간헐식폭기장치), Thermal de-stratification(온도성층파괴), Bubble plume(기포군), Entrainment(유입류)

#### 1. 서론

하절기 호수 등의 수체의 온도성층은 바닥층 수체의 산소부족과 수면 근처에서의 녹조발생 등의 다양한 수질문제를 야기한다(박주석 1987). 이들 문제의 부분적인 해결법으로 수체를 강제 혼합하

여 온도성층을 파괴하는 것이 제안되고 있으며, 이러한 온도성층의 파괴는 다양한 형태의 수체순환장치를 이용함으로써 가능하다(송무석과 서동일 2001, 송무석 등 2002(a), 송무석 등 2002(b)).

본 논문은 수체순환장치의 하나인 간헐식 폭기형 양수통 장치(Intermittent Hydraulic Gun Aerator, IHGA, Fig. 1)의 체계적인 설계에 활용될 수 있는 단순화된 모델의 개발에 관한 것이다. IHGA는 적당한 길이의 실린더(양수통)와 그 실린더의 하부에 설치된 펌프역할을 하는 공기저장실

접수일: 2003년 6월 16일, 승인일: 2005년 2월 5일

† 주저자, E-mail: msong@hongik.ac.kr

Tel: 041-860-2578

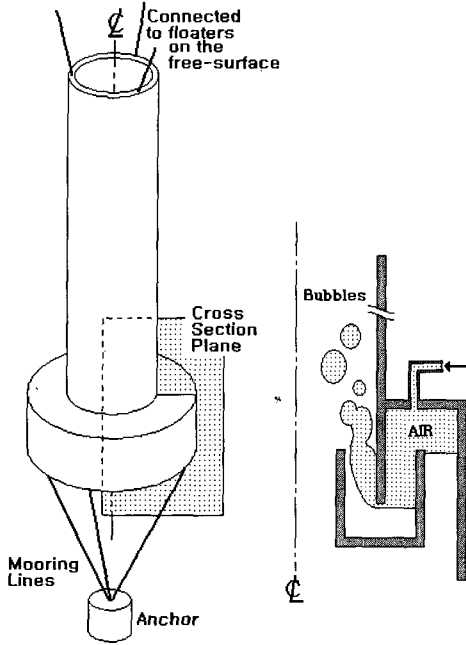


Fig. 1 Schematic description of an Intermittent-Hydraulic-Gun-Aerator(IHGA). Left is a perspective view as a whole and the right is a cross-section view of the lower air-chamber/pump portion.

로 이루어진 비교적 단순한 형태의 장치이다. 수체 바닥에 놓인 콘크리트 등의 앵커에 고정되어 있고 항상 수직의 자세를 유지하기 위하여 실린더의 상부는 수면에 떠 있거나 약간 잠겨 있는 부력에 연결되어 있다. 그림의 오른쪽은 하부의 공기저장실의 단면인데, 압축공기가 연속적으로 공급되어 공기저장실이 차면 순간적으로 공기가 실린더 내부로 빨려나가며 양수통 하부의 물을 함께 끌고 양수통 상부로 올라가는 개념이다.

이와 같은 폭기형 수체순환장치는, 넓은 범위의 수괴를 상승류로 중앙으로 유입되는 2차유동(entrainment)을 이용하여 순환시키는 산기식 장치와는 달리, 상대적으로 수온이 낮고 산소농도가 떨어진 바닥층의 물을 직접 상부로 끌어올리는 개념으로 일반적으로 수심이 10m 이상인 수체에 효과적으로 사용될 수 있다고 알려져 있다(Lorenzen and Fast 1977). 하지만 산기식이나 연속적으로

기포를 실린더 내에 공급하는 방식과는 달리, 참고가 될 수 있는 체계적인 설계법이 없고 기본형의 작동상태를 관찰하며 양수통의 길이 및 하부의 공기저장실의 크기 및 형태에 조금씩 변화를 주는 경험적인 제작이 이루어지고 있다.

장치에 의해 유지되는 상승류의 특성, 즉 양수통 상단에서 발생하는 제트유동의 속도는 양수통의 길이와 분당 기포분출 회수에 따라 달라진다. 양수통의 길이는 양수통 내부에서 상승하는 기포에 의해 물이 함께 가속될 수 있는 시간의 크기와 직결되어 있고, 단위시간당 폭기 횟수는 유동을 정상상태로, 일회성으로, 혹은 반복적으로 변하는 주기적인 것으로 볼 것인가에 관계된다. 수위가 낮아지는 등의 이유로 폭기 회수가 증가하면 양수통 내부의 유동은 간헐식이라기 보다는 연속적으로 공기를 분출하는 산기 장치가 양수통 내부에 있는 형태와 유사하게 되고, 반면, 분당 기포분출수가 확연히 단속적이 되면 순간적으로 방출되는 기포에 의해 실린더 내의 물이 밀려 올라오며 실린더의 상부에서 제트와 보오텍싱(vortex ring)이 함께 생성되어 수면으로 상승하는 유동이 형성된다.

이와 같이 IHGA의 유동은 단순한 듯 하면서도 환경과 작동 조건에 따라 성격이 전혀 다른 형태를 보일 수 있으며, 이러한 이유에서 주어진 조건에서 얻어지는 유동에 대한 충분한 이해가 장치의 효과를 극대화시키기 위해 반드시 필요하다. 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 양수통이 충분히 길고 기포의 분출도 비교적 짧은 주기로 이루어지는 경우에 대하여, 새로운 형상의 설계관점이 아닌, 기존의 형상에 대한 해석적 접근을 통하여 설계 모델을 제안하고자 하였다.

## 2. 폭기장치의 유동 해석개념

### 2.1 양수통 특성 변수

Fig. 1을 참조하여 가장 기본적인 양수통의 특성을 나타내는 변수들을 정리 해 보면, 양수통의 직경(D, m), 길이(H, m), 공급된 공기가 일시적으로 가두어져 있는 공간(공기저장실)의 부피( $\nabla_{ap}$ ,  $m^3$ ), 양수통의 하단의 수심( $h_b$ , m), 분당 폭기 회

수 (N), 즉 분출주기 ( $t_0=60/N$ , 초), 양수통 하단부의 수온( $T_B$ , K)과 밀도( $\rho_B$ ,  $\text{kg/m}^3$ ), 양수통 상단에서의 밀도( $\rho_T$ ,  $\text{kg/m}^3$ ) 등이 있다. 특별한 언급이 없을 경우, 첨자 T와 B는 각각 양수통의 상단과 하단부를 뜻하고, 아래첨자 a는 공기를, 그리고 p는 그 위치의 수심에 따른 압력 상태를 의미한다. 물에 대하여는 아래첨자가 없거나 w를 사용한다.

## 2.2 해석 개념

순간적으로 공기가 양수통의 하단에 유입된다고 가정하면, 양수통 내의 물은 공기방울이 상승하며 물에 전달하는 항력 형태의 힘에 의하여 가속을 받는다. 이 힘은 실린더 내벽에서의 마찰력과 양수통의 하부와 상부에서의 와류 발생에 기인하는 에너지 손실을 고려하면, 결국 양수통 내부의 수체를 상방향으로 가속시키는데 기여하는 힘은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$F_{up} = \nabla_{ap}(\rho_B - \rho_{ap})g - F_{wall} - F_{gates} \quad (1)$$

여기서 g는 중력가속도로  $9.8\text{m/s}^2$ ,  $\rho_{ap}$ 는 방출공기의 밀도로 대기압(101.3kPa, 수두로 환산하면 10.3m)과 양수통 하단의 수심을 고려하고 상온/대기압 상태의 공기 밀도를  $1.22\text{kg/m}^3$ 으로 하여 아래와 같이 구한다.

$$\rho_{ap} = \frac{1.22(h_b + 10.3)}{10.3} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2)$$

$F_{wall}$ 은 벽면의 마찰로 마찰계수(f)와 유속을 알 경우 아래와 같이 결정한다(Crowe et al. 2003).

$$F_{wall} = \frac{\pi\rho_w V_w^2 HDf}{8} \quad (3)$$

마찰계수 f는 양수통의 거칠기와 유속의 함수로, 양수통 내의 평균 유속을  $V_w$ 라 할 때,

$Re = V_w D / \nu_w$ 로 정의되는 레이놀즈수를 이용하여 아래와 같이 구한다. 양수통 거칠기  $k_s$ 는 특별한 정보가 없으면 0.26mm를 사용하고,  $\nu_w$

은 하층 물의 동점성계수이다(Crowe et al. 2003).

$$f = \frac{0.25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{k_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

$F_{gates}$ 는 양수통의 입구와 출구에서 유발되는 와류유동에 해당하는 손실로, 일반적인 확장관로 손실계수를 본 문제에서 주어진 변수들로 표현한 것이고(Crowe et al. 2003), 아래와 같이 된다.

$$F_{gates} = \frac{3\pi\rho_w D^2 V_w^2}{16} \quad (5)$$

가속을 받는 물의 무게는 실린더 내의 물과 실린더 상부와 하부의 부가질량을 함께 고려하여야 한다.

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

여기서  $\nabla_{cyl} (= \pi D^2 H / 4, \text{m}^3)$ 는 양수통 내부의 체적이다. 결국  $m_w$ 가 받는 가속도,  $a_w$ 는

$$a_w = F_{up} / m_w \quad (\text{m/s}^2) \quad (7)$$

로 된다. 위의 가속도를 적분하여 양수통 내의 유속 변화를 구한다. 매 순간에 유속이 다르고 따라서 대응되는 마찰력과 총 가속력이 변하므로 시간 간격을 충분히 작게 취하여 계산한다.

가속이 이루어지면 대응되는 마찰 등의 감속력도 증가하여 궁극적으로는 더 이상 가속이 발생하지 않는 상황을 예상할 수 있다. 하지만, 일반적으로 양수통의 길이는 제한적이기 때문에 충분한 가속이 이루어지기 전에 기포군이 양수통을 빠져나감으로써 감속이 발생할 수도 있고, 앞선 기포군이 양수통을 빠져 나가기 전에 또 다른 폭기로 인하여 추가 가속이 발생할 수도 있다.

## 3. 모델적용 계산예와 고찰

이상의 설명을 프로그래밍 하여 양수통의 형상

및 구동 조건을 변화시키며 예상되는 양수통 상부에서의 유속을 살펴 보았다. 본 질에서 사용된 양수통의 형상 특성은 현재 우리 나라의 호수에서 구동되고 있는 전형적인 장비들의 것들이다. 특별한 언급이 없을 경우 양수통의 직경은 0.5m, 길이는 9m, 공기저장실의 체적은 0.0835m<sup>3</sup>이다. 부력에 의하여 지속적으로 상승하는 기포의 상방향 상대속도는 0.3m/s로 하였다. 기포의 상승속도는 유체들의 물성과 기포의 크기에 따라 변하지만, 현재 기포군의 형상 특성에 대한 정보가 부족하여 1cm 전후의 크기를 가지는 일반적인 공기 기포의 경우를 상정하였다(Cliff et al. 1978). 또한 기포가 저장실에서 빠져나와 안정적으로 상승하며 물을 가속시키는 구간을 유효양수통 길이(H<sub>eff</sub>)로 설정하고, 이는 양수통 전체 길이에 대한 비로써(h<sub>eff</sub>=H<sub>eff</sub>/H) 임의로 정하였다.

3.1 일반특성

Fig. 2는 한번의 폭기가 이루어지는 경우의 유속과 기포군의 양수통 내에서의 수직 위치를 시간에 대해서 보이고 있다. 유속이 시간에 따라 증가하다가 기포군의 상승거리가 7.2m (양수통 길이 9m, 유효 길이비 h<sub>eff</sub>=0.8) 이상이 되면서 유속의 감속이 일어난다. 기포군이 양수통을 빠져나간 후에도 감속이 이루어지며 양수통을 통한 흐름이 존재하는데 이러한 유동은 상대적으로 운동량이 적어 수면까지 도달할 수 없을 수는 있지만, 하부의 수체에서 상부로 끌어올려진 물이므로 순환효과를 평가함에 있어서는 고려가 되어야 할 것이다.

3.2 연속폭기 효과

한편, 실제의 상황에서는 기포가 양수통을 떠난 후의 흐름이 있는 상태에서 다음의 기포공급이 이루어지거나 앞서 분출된 기포가 양수통 내에 머물고 있는 상황에서 후속되는 기포 분출이 있을 수 있다. 이렇듯 초기의 유동이 존재하는 경우와 기포군이 양수통 내에 여러개 존재하는 경우의 효과를 적절히 고려하면 주기적으로 안정된 양수통의 유동을 구할 수 있다.

이러한 효과를 고려하여 계산을 수행하면 (기포의 분출을 분당 4회 주었음) 아래의 Fig. 3와 같

은 결과를 얻는다. 그림에서 보듯이 방출 유속의 최대값은 2회째 이후의 방출에서 거의 안정된 값으로 얻어짐을 볼 수 있고, 이는 Fig. 2의 일회 방출의 경우보다 다소 증가된 값이다. 결국, 양수통에 의하여 유기되는 상승류는 기포의 분출을 거의 연속으로 하지 않는 한 본 연구에서 제안하는 방법을 따라 유속을 구하고 이를 적분하여 순환유동의 총량을 평가하는 것이 합당할 것으로 판단된다. 참고로 그림의 경우에 단위시간당 유량은 0.218m<sup>3</sup>/s이다.

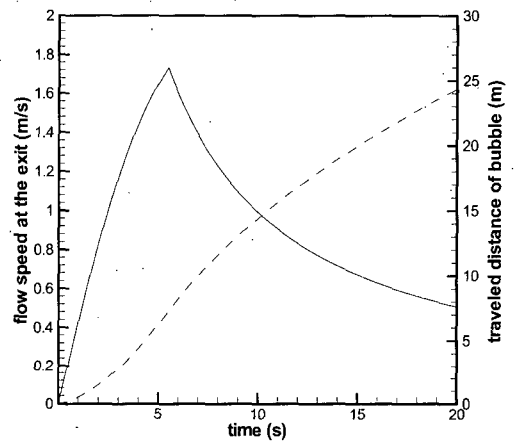


Fig. 2 Exit flow speed(solid line) and bubble location(dotted line) as functions of time. H=9m, ∇ap=0.0835m<sup>3</sup>, heff=0.8.

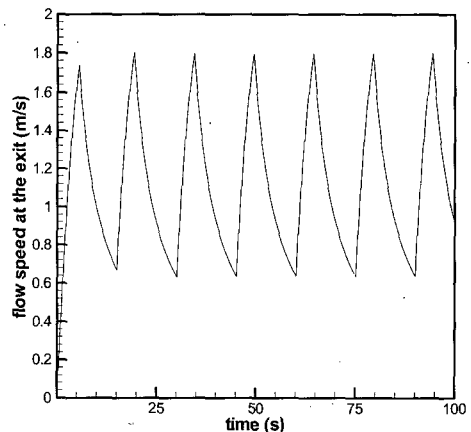


Fig. 3 Exit flow speed versus time. 4 pumpings per minute.

3.3 유효길이 및 기포양의 영향

아래의 Fig. 4은 양수통의 유효길이를 변화시키며 유기되는 유동을 관찰한 것이다. 전술한 바와 같이, 유효길이의 개념은 모형을 이용한 실험을 통하여 저장실에서 방출되는 기포의 거동을 분석하여야만 검증될 수 있다. 여기서는 단지 유효길이의 변화에 따른 상대적인 유속 변화 특성만 언급하고자 하였다. 예측 가능한 유동을 잘 보여주고 있으며, 길이가 짧을수록 가속이 일찍 끝나고 최대 유속도 현저히 줄어듦을 확인 할 수 있다.

Fig. 5에는 기포의 양을 변화시키며 유동의 속도를 살펴 보았다. 기포의 양이 줄수록 가속력이 부족하여 최대유속이 현저히 줄고 있음을 확인 할 수 있다.

이상에서, 기본적인 형상 및 구동 특성이 변할 때 예상되는 유동의 특성을 살펴 보았다. 양수통의 길이를 수심의 변화에 적응 할 수 있도록 제작하는 경우도 있고, 수위 변화로 인하여 공기공급율이 변할 수 있는데, 이러한 환경의 변화가 유동에 상당한 영향을 줄 수 있다는 사실을 확인할 수 있고, 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 다양한 변화 요인을 사전에 체계적으로 분석하여 최적의 설계 및 운영 방안을 도출할 필요가 있다.

4. 수체 순환효과 예측

이제 전 장의 모델을 이용하면 단일 폭기장치에서 만들어지는 유동을 예측할 수 있다. 본 장에서는 특정 온도성층 특성을 가지는 수체를 효과적으로 혼합하기 위하여 요구되는 폭기장치를 결정하는 과정을 설명하고자 한다.

4.1. 상승류의 영향영역 크기 평가

폭기장치를 통하여 만들어지는 상승류는 엄연히 시간에 대하여 변하는 값으로, 이에 따른 양수통 상부의 유동은 비정상 유동해석을 통하여서 엄밀하게 해석될 수 있겠다. 하지만, 본 연구에서는 시간에 대한 평균 유속을 이용하여 음의부력을 갖는 제트류의 상승모형을 활용할 것을 제안한다.

전 장의 모델을 이용하여 얻은 양수통 상단의 평균 유속을  $u_0$ 로 한다. 이제 Turner(1973)에 따

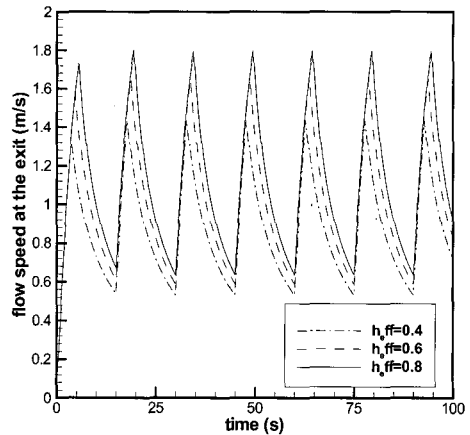


Fig. 4 Flow alteration associated with the variation of effective cylinder length.

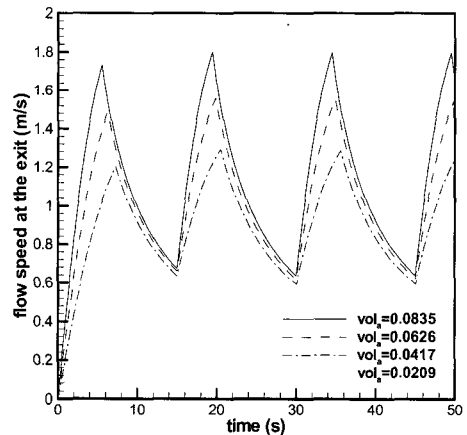


Fig. 5 Flow alteration associated with the variation of air volume( $\nabla_{ap}$ ,m<sup>3</sup>).

라 아래와 같이 운동량과 부력을 정의한다.

$$M_0 = \frac{\pi D^2 u_0^2}{4} ; B_0 = \frac{g' \pi D^2 u_0}{4} \quad (8)$$

여기서,

$$g' = \frac{\rho_b - \rho_T}{\rho_B} g ;$$

$$\rho_b = \frac{\rho_B u_0 t_0 \frac{\pi D^2}{4} + \rho_{ap} \nabla_{ap}}{u_0 t_0 \frac{\pi D^2}{4} + \left( \frac{10.3 + h_B}{10.3 + h_T} \right) \nabla_{ap}} \quad (9)$$

여기서  $\rho_p$ 는 양수통 상단에서 분출되는 기포와 물이 혼합된 상태의 평균 밀도이고, 아래첨자 T와 B는 각각 양수통 상단과 하단을 의미한다.  $g'$ 이 0보다 작으면 양의 부력을 갖는 상승류로 수면까지 도달하지만, 그 반대의 경우 아래의 식을 이용하여 상승류가 도달할 수 있는 높이의 최고치( $Z_m$ )를 구할 수 있다(Turner 1973).

$$Z_m = 1.85 M_0^{3/4} B_0^{-1/2} \text{ (m)} \quad (10)$$

따라서 폭기장치로 유기된 유동이 수면의 성층에 영향을 미치려면 이  $Z_m$ 값이 양수통의 상단과 수면과의 거리보다 크도록 하여야 한다. 또한 다소 보수적인 설계의 관점에서 본다면, 양수통을 벗어나며 기포가 끌고 올라온 물과 분리될 것이므로  $g'$ 을 구할 때  $\rho_p$ 를  $\rho_B$ 로 놓는 것이 안전한 방법이라 할 수 있다. 위의 식을 다시 쓰면,

$$\frac{Z_m}{D} = 1.29 \frac{u_0}{\sqrt{g'D}} \text{ 로 되어 상승류 최고점까지 거리의 양수통 직경에 대한 비는 Densimetric}$$

Froude number,  $Fr_D \equiv \frac{u_0}{\sqrt{g'D}}$ 의 함수임을 확인할 수 있다.

한편 상승류의 수평방향 영향반경( $R_f$ )은 Turner(1973)에 따라 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$R_f = 2.5^{2/3} \left( \frac{M_0}{g'} \right)^{1/3} \text{ (m)} \quad (11)$$

양수통형 간헐식 폭기 수체순환장치는 찬물을 더운쪽으로 가져다 섞는 개념으로, 단일 기포상승류 모델(single bubble plume flow)에 기초한 위의 영향반경은 장치의 효과를 적절히 평가한다고 보기는 어렵다. 실제적인 혼합 효과는 열교환이 고려되는 추가적인 연구를 통하여 엄밀하게 파악될 필요가 있다.

#### 4.2 공기 공급량 결정

이제까지 주어진 조건( $\nabla_{ap}$ 만큼의 공기를 분당 N번 공급)에서 단위시간당  $Q = u_0 \pi D^2 / 4$ 의 유체가 수면으로 끌어 올려진다는 것을 파악하였

다. 만약, 총 수체  $\nabla_{wt}$ 를  $d$ 일 동안 순환시키고자 한다면,

$$Q \times d \times 24 \times 3600 \times N_{unit} = \nabla_{wt} \quad (12)$$

로부터 장치의 개수,  $N_{unit}$ 과  $Q$ 를 파악한다.  $Q$ 를 알면 목표  $u_0$ 가 정해지고 이를 위한  $\nabla_{ap}$ 과  $N$ (분당 폭기수)를 역으로 구할 수 있다.

최종적으로, 대기압상태에서의 단위시간당 총 공기량( $\nabla_{atot}$ ,  $m^3$ )은 아래와 같이 된다.

$$\nabla_{atot} = \frac{\nabla_{ap} N}{60} \frac{(10.3 + h_B)}{10.3} \quad (13)$$

한편, 수체의 혼합을 위하여 성층상태인 수체의 위치에너지(PES)와 충분히 섞여서 수심간 수온차가 없는 상태의 위치에너지(PED)간의 차이에 해당하는 에너지( $\Delta PE$ )를 공급하여야 한다는 관점에서 접근하면, 요구되는 에너지의 크기는

$$\Delta PE = PED - PES \quad (14)$$

단위시간당 장치에 의하여 주어지는 운동에너지의 증가는 아래와 같이 표현되고,

$$\delta ke = 0.5 \rho_B Q u_0^2 = 8 \rho_B Q^3 / (\pi^2 D^4) \quad (15)$$

이 운동에너지의 증가를 요구되는 위치에너지와 같게 놓으면, 결국

$$\Delta PE = \delta ke \times d \times 24 \times 3600 \times N_{unit} \quad (16)$$

의 방식으로  $Q$ 와  $N_{unit}$ 을 결정할 수 있다.

#### 5. 결론

하절기 정체된 수체의 온도성층에 영향을 받는 각종 수질문제의 개선을 위하여 도입되고 있는 간헐식 폭기형 수체순환장치의 설계를 위한 모델을 제안하였다. 현재 시설되어 있는 형상에 대한 해석적 시각에서 모델링하였고 폭기장치의 상단에서

만들어지는 유속의 합리적인 평가에 초점을 두었다. 공급되는 공기의 부력을 기포에 의하여 양수통 내부의 수체에 주어지는 상승력으로 증가시키고 입구와 출구에서의 부가질량 및 관내의 마찰을 고려하는 모델을 사용하였다. 결과로 제안된 모델을 프로그램화하여 양수통의 길이, 공기저장실의 크기 그리고 분당 폭기수에 따른 영향을 살펴보았다. 또한, 제안된 모델을 이용하여 특정 수체의 온도성층 조건에서 효과적인 성층파괴를 위해 요구되는 순환장치의 조건을 제시하는 방법을 도출하였다. 모형시험을 통한 양수통 내의 기포 거동 분석과 이를 바탕으로 한 모델의 개선이 이후 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구의 일부는 한국과학재단의 첨단조선공학 연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 박주석, 1987, 적조발생현황의 변천과 대책, 수산진흥연구원.
- 송무석, 강현선, 서동일, 이상욱, 황현동, 2002(a), "공기공급을 이용한 호수의 성층파괴에 관한 기초 연구(I)," 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 157-160.

- 송무석, 강현선, 서동일, 황현동, 2002(b), "공기공급을 이용한 온도성층 파괴효과에 관한 기초 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 182-186.
- 송무석, 서동일, 2001, "공기공급을 이용한 호수의 수질개선," 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, pp. 95-96.
- Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E., 1978, Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press.
- Crowe, C.T., Roberson, J.A. and Elger, D.F., 2003, Engineering Fluid Mechanics, 7th Edition, John Wiley & Sons.
- Lorenzen, M. and Fast, A., 1977, A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management, Environ. Research Lab.
- Turner, I.S., 1973, Buoyancy effects in fluids, Cambridge.



< 송 무 석 >



< 서 동 일 >