



산기식 물순환장치 설계인자 연구: 현장 댐 조건을 고려한 CFD 해석 중심

A Study on Design Factors of Air Diffuser Systems in Reservoirs: Application of Field Conditions to the CFD Simulation

신상민¹ · 이승재¹ · 이상은² · 박희경¹ · 염경택³

Shin, Sangmin¹ · Lee, Seungjae¹ · Lee, Sangeun^{2*} · Park, Heekyung¹ · Yum, Kyungtaek³

1 KAIST 건설 및 환경공학과, 2 KAIST 미래도시연구소, 3 한국수자원공사

(2011년 1월 24일 접수 ; 2011년 3월 26일 수정 ; 2011년 3월 31채택)

Abstract

This study aims at examining the design factors of the air diffuser system in a particular view of field conditions, and thus improving the procedures currently applied to design the system. First, the CFD model is built for an air diffuser system suitable for field conditions of real reservoirs. Then, the design factors, including destratification number, destratification radius and efficiency of the air diffuser system, are analyzed after a series of simulations over various field conditions. The result shows successful correlations of design factors with D_N at the condition, and they lead to estimate of the destratification radius and efficiency of air diffuser system based on D_N . It is finally concluded that the design factors are improved such that the air diffuser system is suitable for the field conditions of dam reservoirs.

Key words : Air Diffuser System, Destratification Number, Destratification Efficiency, Destratification Radius, Design Factor, CFD

주제어 : 산기식 물순환장치, 무차원변수(D_N), 탈성층효율, 영향반경, 설계인자, CFD

1. 서론

우리나라에는 전국 각지에 대규모 다목적댐과 소규모 용수전용댐을 건설하여 각종 생·공·농업용수 등을 공급해 오고 있으며, 댐을 통한 용수공급이 수자원 총 이용량의 약 53%를 차지하고 있다 (국토해양부, 2006). 그러나 여름철 온도가 높아지는 시기가 되면, 상하층 온도차로 인해 표층부 저밀도 수체와 심층부의 고밀도 수체가 서로 섞이지 않고 정체되어 성층을 형성하게 되는데, 성층화가 상당기간 지속되는 경우 연직방향으로의 열전달과 물질전달이 저해되어 심층부의 산소고갈과 그로 인한 수질 악화 등 많은 문

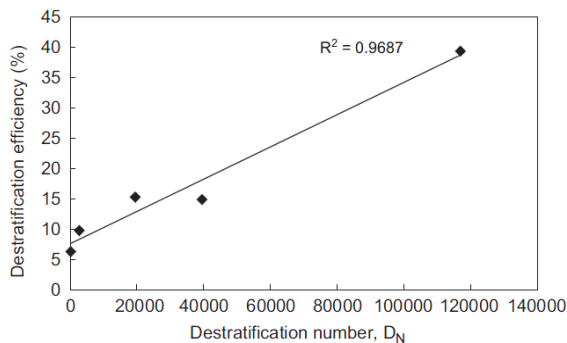
제가 발생된다 (김성훈 외, 2006; 박상준과 박희경 외, 2008). 이러한 수질관리상의 문제를 극복하기 위해서 인공적으로 저수지내 물순환을 시키는 대안이 최근 들어 선호되고 있으며, 이에 많은 다목적댐과 용수전용댐을 대상으로 산기식, 간헐식, 대류식 등의 물순환장치들이 설치되어 오고 있다 (최돈혁과 강호, 1998; 서동일 외, 2002, 2004; 박상준과 박희경 외, 2008; Yum et al., 2008). 이 중에서, 산기식 물순환장치는 댐 저수지의 탈성층 및 수질개선효과가 높을 뿐만 아니라 기술적으로 간단하고 경제적인 방법으로 알려져 있다 (Wuest et al., 1992).

산기식 물순환장치는 일차적으로 탈성층 발생이 주목적

* Corresponding author Tel:+82-42-350-4549, Fax:+82-42-350-3610, E-mail: peregian78@gmail.com(Lee, S.)

이며 이어서 표층 수온저감, 심층 용존산소 공급, 영양염류 용출 억제, 난류발생에 의한 조류성장제어와 같은 효과들을 제공할 수 있는 것으로 알려져 있다 (김재운, 2007; 박상준과 박희경 외, 2008; Vickie et al., 2006; Paul et al., 2009). 하지만 기존 연구 (Knoppert et al., 1970; Drury et al., 1975; Imtez et al., 2000)에서는 성층정도가 고려되지 않은 일률적인 폭기는 저층의 영양물질을 표층으로 공급하여 오히려 수질을 악화시킬 수 있음을 보인 바 있다. 그 결과, 실제로 설치된 물순환장치들은 높은 설치비와 비교할 때 수질개선효과가 만족스럽지 않은 경우가 더러 있다. 많은 연구자들이 산기식 물순환장치의 수질개선 효과를 높이기 위해 주로 설계인자인 무차원변수, 탈성층효율, 산기관 영향반경 등에 대한 lab-scale 실험연구를 진행하고 있다 (김성훈 외, 2006; Asaeda et al., 1993; Schladow, 1993; Tsujimura, 2004; Yum et al., 2008). 하지만, 이러한 연구는 실제 댐 저수지에 적용하기 위해 다음과 같이 현장의 여건이 추가적으로 고려될 수 있도록 개선하는 방법 등이 필요한 것으로 판단된다.

산기관 영향반경은 주로 폭기에 의해 발생하는 수표면 흐름영역에 대한 연구가 진행되었는데, Fannelop et al.(1991)은 균질한 비성층 유체의 경우 plume 유체가 수표면에 충돌해서 진행되는 거리(R)를 대략적으로 수심의 약 6배정도라고 하였으며, Asaeda and Imberger(1993)은 수체 상층부에서 발생하는 인트루전(intrusion)¹⁾이 미치는 거리를 폭기량(Q_0)과 성층주파수(N)의 함수로, 약 $(Q_0g/N^3)^{1/4}$ 라고 하였다. 하지만, 실제 댐 저수지 산기관 영향반경을 이처럼 단순하게 정의하는 것은 어렵다. 산기관 영역을 지나가는 유체 흐름으로 인해 영향반경이 비대칭적으로 형성되기 때문이다.



출처 : Yum et al., (2008)

Figure 1. 무차원변수(D_N)와 탈성층효율과의 관계

탈성층효율은 기포에 의해 공급된 운동에너지가 수체의 위치에너지로 전환되는 정도를 나타낸 것으로, Asaeda et al. (1989; 1993)는 저수지 탈성층화를 위한 bubble plume (공기 부력류) 설계시 가장 중요한 설계인자로 간주하였다. 그러나 현장 댐에 설치될 산기식 물순환장치 설계인자로 탈성층효율이 사용될 경우 lab-scale 실험에 의해 검증된 탈성층효율값은 실제 현장 조건에 잘 부합되지 않아 개선의 여지가 다소 있다. 예를 들어, Yum et al. (2008)는 Lab-scale 실험을 통해 무차원변수와 탈성층효율간의 관계를 Fig.1과 같이 제시한 바 있다. 하지만 그 결과를 보면, 현장 댐 저수지를 대상으로 실측한 과거의 연구 결과와 잘 맞지 않는 경우도 발생한다. Fig.1에서는 D_N 값이 현장 조건에 해당하는 120,000일 때 약 40%의 탈성층효율이 발생되는 것으로 산정되었지만, Zic et al. (1992)는 물순환장치에 의한 현장 댐 저수지에서의 탈성층효율은 3%이상 기대하기 어렵다고 하였으며, 이외에도 Matsunashi and Miyagawa (1990), Asaeda and Imberger (1993)는 각각 4~5, 8~12% 정도를 현장에서의 최대 탈성층효율로 제시하였다.

앞에서 설명한 바와 같이, 최근 연구자들이 제시한 설계인자들은 무차원변수의 범위, 산기관 영향반경, 물순환장치에 의한 탈성층효율 등에 대해 실제 댐 저수지의 현장 조건에 맞춰 개선될 필요가 있다. 본 연구에서는 댐 저수지의 현장조건을 감안하여 CFD 모형을 구축하고 실제 보령댐과 운문댐의 현장조사자료를 바탕으로 CFD 모형을 검증하고자 한다. 그리고 현장의 댐환경 및 운영조건을 달리하는 18개의 case를 구성하여 CFD 분석을 수행한 뒤 기존의 산기식 물순환장치 설계인자를 재검토하려는 목적을 갖는다.

2. 연구 방법

앞서 제시한 연구목적을 달성하기 위해, 현장 댐저수지의 산기식 물순환시스템은 Fig.2와 같은 절차로 분석되었다.

2.1 댐 저수지의 현장 조건 검토

우선 댐 저수지의 현장조건을 파악하기 위해 산기식 물순환장치가 실제로 설치되어 있는 보령댐과 운문댐을 대상으로 선정하였다. 또한 추후 CFD 모형 구현을 위해 현장조건은 Table 1과 같은 댐 환경조건과 산기관 운영조건 자료가 필요한 것으로 판단되었다. 특히, 기존의 lab-scale 실험에서와 달리, 현장 댐 저수지내 수체는 유입, 유출, 바람 등의 영향으로 지속적인 흐름을 갖기 때문에 유속을 고려하였다.

1) 폭기에 의해 토출되는 기포가 주위의 유체를 연행하여 함께 상승하다가 일정 높이에 이르면 연행된 유체는 (-)부력이 증가하여 상승 plume 바깥쪽으로 방출되는데 이러한 현상을 인트루전이라고 함

Table 1. 현장조건 조사항목

댐 환경조건	산기관 운영조건
▶ 수심, 유속, 표심층 온도차, 온도분포	▶ 설치대수, 폭기량

주) 각 자료들은 한국수자원공사가 발주한 “물순환시스템 설계 및 운영기술의 표준화 사업”에서 환경시설관리공사가 2009년 6월에서 2010년 7월까지 실시한 현장조사 결과를 기초로 함

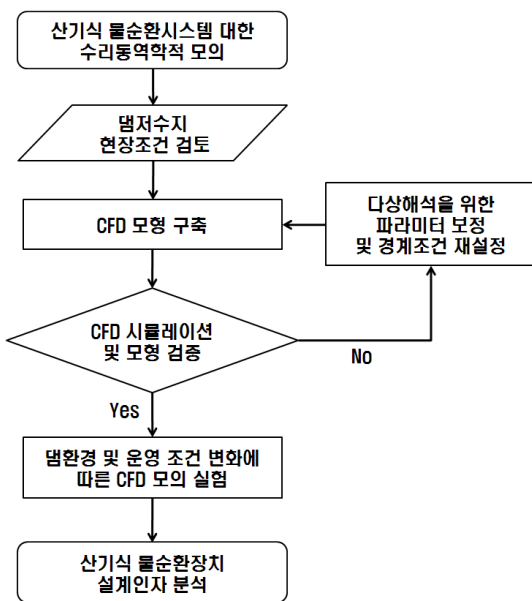


Figure 2. 현장조건을 고려한 산기식 물순환장치 설계인자 분석절차

2.2 CFD 모형 구축

CFD (Computational Fluid Dynamics) 모형은 수작업이나 개인용 컴퓨터로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장을 해석하는 데에 유용한 방법으로 토목, 환경, 항공 등 여러 전문분야에서 널리 사용되고 있다. 유한체적법(FVM: Finite Volume Method) 등을 이용하여 작은 셀로 분할하고 각각의 경계조건을 두어 해를 구하는 방법으로, 본 연구에서는 CFX-4와 CFX-TASCFlow를 기반으로 하는 상용프로그램인 CFX ver.11.0이 사용되었다. 구현된 모형의 형상은 시뮬레이션의 효율성과 계산 부하를 감안하여 산기관 한 기당 길이, 폭, 수심을 100m×100m×30m의 장방향 입체로 구성하였다. 그 외, 모형 구축시 적용된 해석 영역의 해상도, 격자크기 (Mesh Size), 벽면 경계조건, 공기조건 및 외부효과에 대한 가정사항들은 Table 2와 같다. 또한 시뮬레이션 해석은 시간에 따른 변화를 볼 수 있도록 transient 해석을 기본으로 하였으며, 이때의 최대

반복계산 횟수 (max. iteration number)는 100번으로 설정하였다.

CFD 모형에서 사용되는 연속방정식과 운동방정식 (Navier-Stokes equation)은 각각 식(1)과 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -P' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (2)$$

여기서, U는 속도 (m/s), ρ는 밀도 (kg/m³), P'(= P + ρgz)는 압력 (N/m²), B는 체적력 (N), μ_{eff}는 유효 점성 (kg/m/s), t는 시간 (sec)이다. 체적력은 하향의 중력 가속도를 고려하여 산기관에서 토출되는 공기방울에 미치는 부력을 계산하였다. 유효점성은 난류를 고려한 점성으로, 본 연구에서는 난류의 해석에 사용되는 난류 모델로 'k-ε model'을 선정하였으며, 따라서 유효점성은 유체 점성(μ)과 난류점성(μ_T)과의 합으로 나타낼 수 있으며, 식(3)과 같이 계산된다. C_μ는 난류점성계수이다.

$$\mu_T = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

k-ε model은 속도차에 의해 발생하는 와류-점성 가설을 바탕으로 난류의 운동에너지(k)와 난류에너지 소산율(ε)에 따르는 수송방정식(transport equation)을 계산하며 그 때 각각의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (5)$$

여기서 C_{ε1}, C_{ε2}, σ_k, σ_ε은 k-ε 난류모델 상수이다. P_k는 점성과 부력에 의한 난류생성항(turbulence

Table 2. CFD 모형에 적용된 가정 사항

구분		CFD 모형 적용 및 가정
해석영역의 해상도(grid 수)		▶ unstructured(tetrahedral) mesh ▶ Semi-field Scale 약 140,000개 ▶ 해석격자는 tetra 형태를 기본으로 함
Mesh Size		▶ 0.2(Min)~10(Max)
경계조건	열교환	▶ 모든 외벽은 단열조건
	상부	▶ 상부는 Degassing 조건(air만 빠져나가는 것으로 가정)
	벽면	▶ 모든 외벽에 대하여 공기는 free-slip 조건, 물은 non-slip조건
기포(공기)	기포경	▶ 지름 0.003m의 원형
	가정사항	▶ 수심에 따라 크기는 일정 ▶ 기포 상승시 형태가 일정 ▶ 기포 상승 중 병합 등 무시
외부효과		▶ 일상적인 유입유출 및 대기기온 외 바람 등의 기상조건 고려안함

production)으로 식(6)과 같다. P_{kb} 는 부력생성항 (Buoyancy production)으로 식(7)과 같다.

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U(3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (6)$$

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} g \cdot \nabla \rho \quad (7)$$

2.3 CFD 모형의 시뮬레이션 및 검증

시뮬레이션을 위해, CFD 모형에 적용된 현장조건은 앞서 언급된 보령댐과 운문댐 조사자료를 분석한 결과를 바탕으로 결정하였다. 즉, 적용 조건은 산기관을 중심으로 한 방향으로 흘러가는 유입수가 존재하며, 유입수의 흐름 유속은 조사대상 댐에 설치된 산기식 물순환장치의 비영향권 유속을 분석하여 0.9cm/s로 적용하였다. 위의 적용유속은 측정된 현장조사자료 중 정규분포를 따른다고 가정하여 95%의 신뢰구간을 만족하는 자료를 선택하여 평균한 값이다. 수심은 30m이며, 초기 온도분포로는 상층부에 수온약층이 존재하고 표심층 온도차가 약 10℃인 온도분포를 적용하였다. 유입수의 온도분포는 초기 온도분포와 동일한 것으로 가정하였다. 폭기량은 조사대상댐에서 운영되고 있는 300LPM을 적용하였다. 마찬가지로, 보령댐과 운문댐의 현장자료와 시뮬레이션 결과에 대해서 산기관 근처 표층부의 속도장 및 수심별 온도분포를 서로 비교함으로써 모형을 검증하였다.

2.4 댐환경 및 운영조건 변화에 따른 CFD 모의 실험

댐저수지 환경 및 산기관 운영에 관한 현장조건이 산기식 물순환장치 설계인자에 미치는 영향을 분석하기 위해 수심, 표심층 온도차, 폭기량에 대해 총 18가지 경우를 구성하였다. 본 연구 대상댐의 현장조건을 기준으로, 수심은 댐의 홍수기, 평수기, 갈수기를 고려하여 40m, 30m 20m로, 표심층온도차는 여름철의 강한 성층과 초봄 또는 늦가을의 약한 성층을 감안하여 12℃, 8℃로, 폭기량은 현재 가동중인 폭기량 300LPM으로부터 100LPM만큼 증가 또는 감소하는 경우로 조건을 달리하였다.

2.5 산기식 물순환장치 설계인자 분석

각 경우에 따라 무차원변수 D_N 값과 주요 설계인자인 영향반경 및 탈성층효율은 다음과 같이 산정하였다.

(1) 무차원변수 D_N

Yum et al. (2008)은 산기관에서 토출되는 기포의 크기가 plume의 흐름구조와 혼합능력에 영향을 미치는 것을 감안하여, 기포경의 영향을 고려한 D_N (Destratification Number)이라는 무차원변수를 제시한 바 있다. D_N 은 기체-액체간 슬립속도를 이용하여 기포 크기가 plume 거동에 미치는 영향을 간접적으로 고려한 무차원변수이며, 식(8)과 같이 저수지 바닥에서의 폭기량 Q_B (m^3/s), 성층주파수 N (s^{-1}), 수심 H (m), 그리고 기포의 슬립속도 u_s (m/s), 연행계수 α 등으로 구성된다.

$$D_N = \frac{N^6 H^7}{4\pi\alpha^2 Q_B g u_s^3} \quad (8)$$

Yum et al. (2008)은 기존의 무차원변수 P_N , M_H , U_N 과 함께, 산기식 물순환장치 주요 설계인자인 탈성층효율과의 관계를 분석한 결과 D_N 이 더 높은 상관관계를 보임을 증명하였다.

(2) 산기관 영향반경

실제 댐 저수지는 산기관 영향반경을 지나가는 유체 흐름이 존재하여 영향반경이 비대칭적이다. 즉, 산기관으로 유입되는 방향으로의 영향반경은 짧으며 산기관을 지나 유출되는 방향으로의 영향반경은 상대적으로 길다. 이 중 산기관으로 유입되는 방향의 짧은 영향반경은 실제 댐 저수지의 안전한 설계를 위해서는 더 큰 의미를 갖는 것으로 판단되며, 이에 보수적인 영향반경 (Conservative Radius)으로 정의하였다. 한편, 산기관의 폭기에 의해 성층수체를 혼합시키면 밀도가 큰 무거운 유체는 상승해서 가벼운 유체와 섞여 퍼텐셜 에너지 (Potential Energy, PE)가 커지게 된다. 이는 산기관의 영향범위 내에서는 산기관이 공급하는 운동 에너지 (Kinetic Energy, KE)에 의해 수체의 퍼텐셜 에너지의 변화가 존재한다는 것을 의미한다. 따라서 폭기에 의해 발생하는 물리적인 흐름영역 보다는, 에너지효율 (Local destratification efficiency) 즉, 폭기에 의해 밀도류의 퍼텐셜 에너지의 변화가 존재하는 영역까지를 산기관 영향반경으로 보았다. 폭기에 의해 발생하는 에너지효율은 Fig.3과 같이 산기관으로부터 멀어질수록 감소하지만, 폭기가 아닌 수체의 일상적인 흐름에 의해서도 퍼텐셜 에너지의 변화가 존재한다. 따라서 본 연구에서 산기관의 보수적 영향반경은 산기관에서 유입되는 방향으로 거리별 에너지 효율을 산정한 뒤 에너지효율이 감소하는 기울기와 일상적 흐름에 의해 발생하는 에너지효율의 추세선과 만나는 점을 영향반경으로 간주하였다.

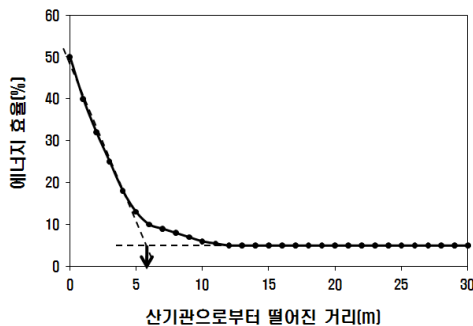


Figure 3. 산기관 영향반경 산정방법

에너지효율은 산기관으로부터 떨어진 지점에 대하여, 정해진 시간동안 폭기에 의해 수체에 공급되는 물리적인 에너지가 퍼텐셜 에너지를 증가시키는데 사용된 백분율로, 식 (9)와 같이 산정된다 (Asaeda and Imberger, 1993).

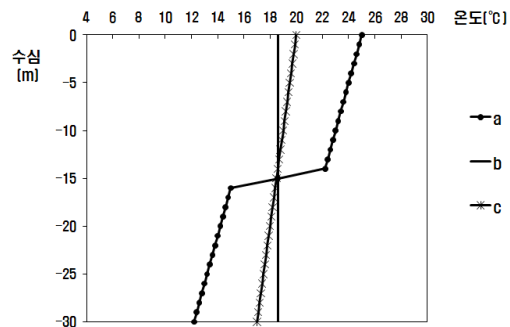
$$\eta_E(\text{에너지 효율}) = \frac{PE}{KE} = \frac{\Delta PE}{\rho^* g Q_0 H_A \ln\left(1 + \frac{H}{H_A}\right) \Delta t} \quad (9)$$

여기서, H_A 는 대기압 수두 (m)를 t 는 산기관 가동 시간 (sec)이다. 또한 ρ^* 는 기준밀도 (kg/m^3)를 의미하며 UNESCO (1981)에서 제시한 온도와 밀도의 관계식을 참고하였다

(3) 탈성층효율

현장 댐저수지는 산기관을 중심으로 전면이 개방되어 있는 공간이기 때문에, 밀폐된 공간에서처럼 폭기에 의해 해석 영역 전체의 완전한 혼합이 발생하지는 않는다. 따라서 본 연구에서의 탈성층효율은 폭기에 의해 퍼텐셜 에너지 변화가 존재하는 산기관 영향반경내로 한정하였다. 탈성층효율의 산정방법은 공간적 차원에서의 에너지효율로써 식(9)와 유사하되, 영향반경 내의 부피에 대한 퍼텐셜 에너지 변화량을 고려하였다.

식(9)에서 Δt 는 탈성층이 발생하는 시점까지의 산기관 가동시간으로, 수심에 따른 온도분포를 통해 탈성층을 확인하고 그 때까지의 산기관 가동시간을 적용해야한다. 그러나 현장 댐 저수지의 경우, 산기관 영향범위로 지속적인 성층수가 유입되어 재성층화되려는 경향이 있어, 전도현상이 발생하는 시기를 제외하고는 전구간 온도가 일정해지는 시점, 즉, 이론적 탈성층을 확인하기 어렵다. 따라서 본 연구에서 탈성층의 발생은 Fig.4와 같이 수심에 따른 온도분포가 시간에 대해서 거의 일정할 때로 간주하였다.



(a : 성층시 온도분포, b : 탈성층시 이론적 온도분포, c : 탈성층시 현장 온도분포)

Figure 4. 산기관 가동에 따른 온도분포의 변화

3. 결과 및 검토

3.1 CFD 모형 검증 결과

Fig.5는 조사대상 댐의 현장자료와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 속도장 검증은 결정계수 (r^2) 값이 약 0.88 정도로 매우 잘 일치하는 결과를 보였으며, 온도분포 검증은 시뮬레이션 시간이 길어질수록 오차범위가 조금 증가하나 r^2 값이 약 0.60 수준이었다. 온도분포를 자세히 살펴보면, 수체의 표심층 온도는 시뮬레이션 시간에 관계없이 발생오차가 적으나, 수체 중층부의 온도는 시뮬레이션 시간이 길어질수록 오차가 증가하여 r^2 이 감소하였다. 그러나 수체

의 성층정도에 큰 영향을 미치는 온도분포는 발생오차가 적은 표심층부 온도분포이고, r^2 값은 시뮬레이션 시간에 크게 민감하지 않으며, 측정 오차 및 다양한 외부영향이 존재하는 현장 자료임을 감안할 때 구현된 모형은 충분히 유용한 것으로 판단되었다.

3.2 댐환경 및 운영조건 변화에 따른 CFD 모의실험 결과 및 검토

Table 3은 댐환경 및 운영조건 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 요약하고 있다.

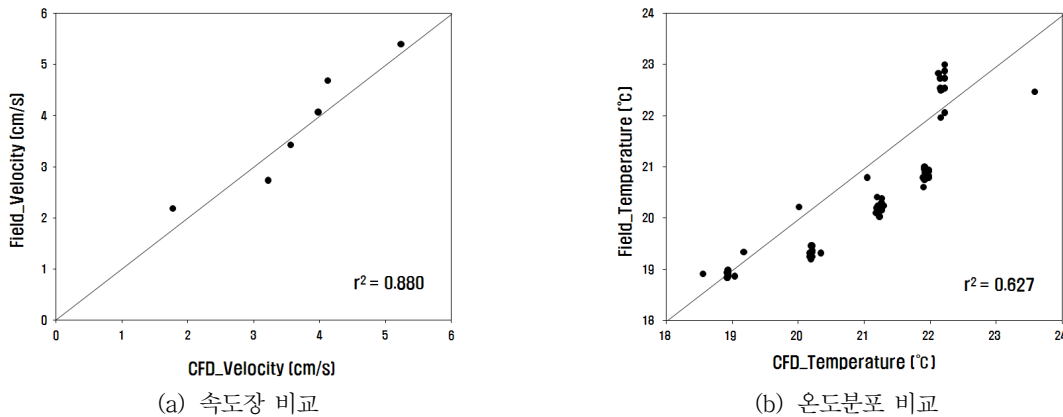


Figure 5. 현장자료 및 시뮬레이션 결과 비교

Table 3. 댐환경 및 운영조건 변화에 따른 물순환장치 설계인자 분석

수심 (m)	표/심층 온도차 (°C)	폭기량 (LPM)	D_N	영향반경 (m)	단위수심당 영향반경 (R_c/H)	영향반경내 탈성총효율 (%)
40	12	400	2,200,759	7.39	0.185	9.3
		300	2,934,346	6.32	0.158	10.7
		200	4,401,519	5.22	0.131	12.3
	8	400	899,567	7.93	0.198	6.5
		300	1,199,422	6.77	0.169	7.5
		200	1,799,133	5.53	0.138	8.7
30	12	400	557,622	5.94	0.198	4.0
		300	743,496	5.37	0.179	4.6
		200	1,115,244	4.76	0.159	6.0
	8	400	227,930	6.11	0.204	2.8
		300	303,906	5.59	0.186	3.3
		200	455,859	4.92	0.164	4.1
20	12	400	82,748	5.84	0.292	1.4
		300	110,330	5.39	0.269	1.9
		200	165,495	5.25	0.263	2.6
	8	400	33,823	5.78	0.289	1.0
		300	45,097	5.48	0.274	1.3
		200	67,646	5.37	0.269	1.8

(1) 현장조건에서의 D_N 범위

운문댐, 보령댐의 현장조건을 반영한 무차원변수 D_N 은 30,000 ~ 4,500,000 범위로 산정되었으며, 조사대상댐 보다 큰 규모의 댐이면 이 범위보다 더 큰 D_N 값이 산정될 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 현장에서의 D_N 값은 Yum et al. (2008)이 실험으로 산정한 120,000 이하 보다 더 넓은 범위를 갖게 됨을 확인하였다.

(2) 댐환경 및 운영조건 변화에 따른 영향반경

댐환경 및 운영조건 변화에 따른 보수적 영향반경은 수심, 표심층 온도차, 폭기량에 따라 조금씩 차이는 보이지만 약 5~8m 수준인 것으로 분석되었다. 또한 보수적 영향반경은 수심이 깊고 표심층 온도차가 적으며 폭기량이 클수록 증가하는 것을 확인하였다. 결과적으로, 두 무차원변수들 (단위수심당 영향반경 R_c/H 과 현장조건에서의 D_N) 간의 관계는 Fig.6과 같이 산정되었다. 즉, D_N 이 증가할수록 R_c/H 은 대수적으로 감소하는 것을 알 수 있으며, D_N 에 대한 영향반경은 식(10)를 이용하여 예측될 수 있다.

$$R_c/H = -0.033 \ln D_N + 0.64 \quad (10)$$

위의 결과는 기존연구와 비교할 때에도 만족스럽다고 할 수 있다. Fannelop et al.(1991)은 균질한 비성층 유체에서 폭기에 의해 표층에서 발생하는 물리적인 흐름영역을 제시하였는데, 실제 댐저수지는 성층유체이며 폭기량 등이 고려되지 않고 수심에만 의존하여 계산되므로, 설계인자로서의 영향반경으로 고려되기에는 과다 산정되는 것으로 분석되었다. 또한 Asaeda and Imberger(1993)는 표층부 인트루전이 미치는 영역을 제시한 바 있는데, 본 연구 결과와 비교하였을 때 약 5~30% 정도 크게 산정되었지만 큰 차이라 하기 힘들다. bubble plume의 인트루전이 발생하여 전달되는 영역은 성층수체의 퍼텐셜 에너지의 변화가 발생하는 데, 이는 곧 에너지효율이 존재하는 범위를 말한다. 즉,

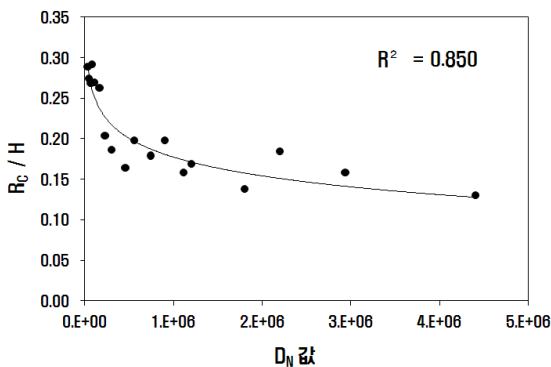


Figure 6. D_N 에 대한 단위수심당 영향반경

Asaeda and Imberger(1993)의 표층부 인트루전이 미치는 영역은 본 연구의 영향반경과 비슷한 의미를 갖는 것으로 판단된다. 그러나 현장에서는 산기관 방향으로 유입되는 흐름이 존재하고 그 방향은 일정하지 않기 때문에 산기관으로 유입되는 방향의 보수적 영향반경을 고려하는 것이 설계인자로서 더 큰 의미를 갖는 것으로 판단된다.

(3) 탈성층 효율

댐환경 및 운영조건을 변화시키면서, D_N 과 탈성층 효율 간의 관계를 산정한 결과는 Fig.7과 같다. 현장에서의 탈성층 효율은 D_N 이 작을 때에는 선형적으로 증가하다가 어느 정도 이후에는 증가율이 감소하면서 일정해지는 것을 확인할 수 있다. 즉, D_N 범위가 다소 좁은 lab-scale에서 탈성층 효율이 거의 선형으로 증가함을 앞서 언급한 바 있다. 더 넓은 D_N 범위를 가지는 현장조건을 고려하여 CFD 시뮬레이션을 수행한 결과, 탈성층효율이 D_N 값에 따라 증가하지만, 증가율은 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 최대 탈성층효율은 약 12% 수준에서 수렴하는 것으로 예상되었다. 이 값은 현장자료를 중심으로 물순환장치의 최대 탈성층효율을 제시한 기존 연구 (Matsunashi and Miyagawa, 1990; Asaeda and Imberger, 1993)을 잘 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. Fig.7의 결과로부터, 해당 D_N 에 대한 영향반경 내 탈성층효율 η 은 식(11)과 같이 예측할 수 있다. 식(10)과 식(11)은 산기식 물순환장치 설계와 관련되어 유용한 시사점을 제공한다. 먼저 목표 탈성층 효율이 선정된다면, 식(11)으로부터 적절한 D_N 값을 산정할 수 있으며, 이어서 해당되는 폭기량을 구할 수 있다. 또한 식(10)으로부터 목표 탈성층효율이 발생하는 영향반경을 예측할 수 있다.

$$\eta = 11.848 \times [1 - e^{-8.064 \times 10^{-7} D_N}] \quad (11)$$

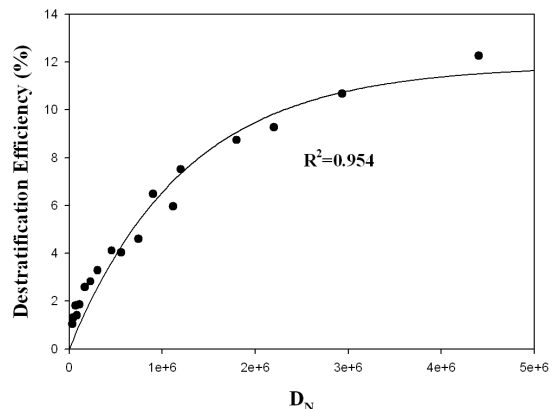
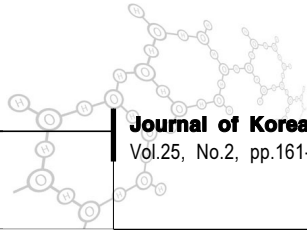


Figure 7. D_N 에 대한 영향반경 내 탈성층 효율



4. 결론

댐 호소의 수질개선을 위해 물순환장치가 설치되고 있으나, 아직 확실한 수질개선 효과로 이어지고 있지 않다. 이 문제의 상당부분은, 물순환장치가 현장조건을 고려하여 최적설계되고 있지 않은 데 기인한 것으로 저자들은 판단하였다. 본 연구는 현장 적용성 높은 산기식 물순환장치 설계방안을 고찰하려는 목적하에, 댐 환경, 성층 유입수, 수체 흐름, 폭기량 등 댐환경 및 운영조건을 고려하여 산기식 물순환장치의 주요 설계인자를 분석하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 산기식 물순환장치 설계인자를 분석하기 위해 CFD 시뮬레이션을 수행기로 하였으며, 속도장, 온도분포에 대한 보령댐과 운문댐의 현장조사 결과를 바탕으로 CFD 모형을 검증하였다.
- (2) 산기식 물순환장치의 보수적인 영향반경은 약 5~8m 수준으로 분석되었으며, 수심이 깊고 표심층 온도차가 적으며, 폭기량이 클수록 증가하였다. 또한 단위수심당 영향반경(R_C/H)은 D_N 이 증가할수록 대수적으로 감소하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 현장조건을 고려하였을 경우, Lab-scale 실험과 달리, 탈성층효율은 D_N 이 작을 때에는 선형적으로 증가하다가 점점 증가율이 감소하면서 일정해지는 것을 확인하였으며, 현장조건에서 발생하는 최대탈성층효율은 약 12% 수준에서 수렴하는 것으로 분석되었다. 이러한 차이는, lab-scale의 실험은 주로 일반적인 탈성층 메커니즘을 분석하기 위해 성층강도, 수심, 폭기량, 기포경 등의 영향인자들에 초점을 두고 수행한 반면, 현장 댐저수지에서는 성층수의 지속적인 유입, 일상적인 흐름 등 외부영향인자들의 영향이 존재하기 때문인 것으로 사료된다.
- (4) 현장조건을 고려하여 분석된 결과를 바탕으로, 기존의 산기식 물순환장치 설계방안 (김성훈 외, 2005)은 다음과 같이 개선될 수 있다.
 - ① 댐환경 현장자료 조사를 바탕으로 수체의 성층특성 파악
 - ② 목표 탈성층효율 결정된 뒤, 식(8)과 식(11)으로 무차원변수 D_N 과 설계폭기량 산정
 - ③ 탈성층효율 및 설계폭기량과 함께, Kim et al.(2010)의 탈성층 효율식을 이용해 전체산기면적 산정
 - ④ 전체산기면적을 단위 산기관면적으로 나누어 전체 산기관 설치대수 산정
 - ⑤ 식(10)을 이용하여 목표 탈성층효율이 발생하는

산기관 영향반경 산정

- ⑥ 상기 결과를 CFD 시뮬레이션을 통해 재확인하고, 탈성층효율 및 탈성층 발생시간, 운전비용 등을 검토 후 최종 결정

사 사

본 연구는 한국수자원공사의 2010년 “물순환시스템 설계 및 운영기술의 표준화 지원 사업”에 의해 지원받은 것으로서, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

국토해양부 (2006), *수자원장기종합계획*
 김성훈, 김재윤, 박희경 (2005) 버블 플룸을 이용한 탈성층의 평가 : 차원해석 및 설계방법론의 제시, *상하수도학회지*, **19**(6), pp.827-837.
 김성훈, 김재윤, 박희경 (2006) 수리동역학적 해석을 통한 탈성층 제어인자 및 거동 분석, *강릉대학교 대한환경공학회 2006 추계학술연구발표회 논문집*, D-1-2, pp.256-265
 김재윤 (2007) *수리동역학적 요인에 의한 조류성장 제어 효과 분석*, KAIST, 박사 학위 논문
 서동일, 석관수, 이병두, 정상기 (2004) 우리나라 저수지의 수중 폭기 장치의 설계 방법 및 용량 분석, *상하수도학회*, **18**(3), pp.366-376
 최돈혁, 강호 (1998) 수중폭기장치 운영에 따른 호소의 수질변화, *한국수질보전학회지*, **14**(1), pp.47-56
 서동일 외 (2002), *수중폭기운영관리최적화보고서*, 충남대학교, 한국수자원공사
 박상준, 박희경 외 (2008), *수어댐 수중폭기장치 효율분석 최종연구보고서*, 한국수자원공사, KAIST
 Asaeda, T. and Imberger, J. (1989) Behaviors of bubble plumes in a linear stratification, *Proc. JSCE*, 411,
 Asaeda, T. and Imberger, J. (1993) Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, 249, pp. 35-57
 Drury D.D., Porcella D.B. and Gearheart R.A. (1975) The effects of artificial destratification on the water quality and microbial populations in Hyrum Reservoir, *Utah Water Res. Lab., Utah State University, Logan, Utah*, PREJEW011-11
 Fannelop, T.K., Hirschberg, S. and Kuffer, J. (1991) Surface current and recirculation cells generated by bubble curtains and jets, *J. Fluid Mech.*, 229, pp.629-657

- Imteaz, M.A. and Asaeda, T. (2000) Artificial mixing of lake water by bubble plume and effects of bubbling operations on algal bloom, *Wat. Res.*, **34**, pp.1919-1929
- Knoppert P.L., Rook J.J., Hofker T. and Oskam G. (1970) Destratification experiments at Rotterdam, *J. Am. Water Wastewater Assoc.*, **62**, pp.448-454
- Matsunashi S. and Miyanaga Y. (1990) A field study on the characteristics of air bubble plume in a reservoir, *J. Hydrosoci. and Hydr. Engrg.*, **8**(2), pp.65-77
- Paul a. Gantzer, Lee D. Bryant, John C. Little (2009) Effect of hypolimnetic oxygenation on oxygen depletion rates in two water-supply reservoirs, *Wat. Res.*, pp.1700-1710
- Schladow, S. G. (1993) Lake destratification by bubble plume systems: Design methodology, *J. Hydraul. Eng.*, **119**(3), pp.350-368
- Sung Hoon Kim, Jae-yun Kim, Heekyung Park, and No-Suk Park (2010) Effect of Bubble Size and Diffusing Area on Destratification Efficiency in Bubble Plumes of Two-Layer Stratification, *J. Hydraul. Eng. (ASCE)*, **136**(2), pp.106-115
- Tsujimura S. (2004) Water management of Lake Yogo targeting internal phosphorus loading, *Lakes & Reservoir : Research and Management* **9**, pp171-179
- UNESCO (1981), The practical salinity scale 1978, and the international equation of state 1980, 10th Report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards, *UNESCO Practical Paper in Marine Science*, **36**, pp.13-21
- Vickie L. Singleton, John C. Little (2006) Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems - A review, *Environ. Sci. Technol.*, pp.7512-7520
- Wuest, A., Brooks, N.H., and Imboden, D.M. (1992) Bubble plume modeling for lake restoration, *Wat. Resour. Res.*, **28**, pp.3235-3250
- Yum K., Kim S.H. and Park H. (2008) Effects of plume spacing and flowrate on destratification efficiency of air diffusers, *Wat. Res.*, **42**(13), pp.3249-3262
- Zic, K., Stefan, H. G., and Ellis, C. (1992) Laboratory study of water destratification by a bubble plume, *J. Hydraul. Res.*, **30**(1), pp.7-27