

CFD를 이용한 현장 댐조건에서의 산기식 수중폭기장치 설계인자 분석 연구

Analysis of Design Factors of an Aeration System in Field Condition of Dam Reservoir using CFD

신상민*, 이승재**, 김성훈***, 이상은****, 박희경*****, 염경택*****

Shin, Sangmin · Lee, Seungjae · Sung Hoon Kim · Lee, Sangeun · Park, Heekyung · Yum, Kyungtaek

요 지

우리나라 주요 수자원인 댐 저수지는 여름철 성층현상으로 인해 많은 수질문제가 발생하여 산기식 수중폭기장치를 설치하고 있다. 그러나 산기식 수중폭기장치의 설계인자들은 대부분 lab-scale의 실험연구를 통해 검토되고 설계에 반영되고 있어 실제 댐 저수지에 적용하기 위해서는 현장적용성을 고려하여 개선될 필요가 있다. 따라서 본 연구는 실제 댐 저수지의 현장조건을 고려하여 CFD 모의실험을 통해 산기식 수중폭기장치의 설계인자인 무차원변수 D_N (Destratification Number)과 탈성층 영향반경 및 효율을 검토하였다. 그 결과 현장조건에서의 D_N 값은 lab-scale 실험조건보다 더 넓은 범위를 가지며, 단위수심당 탈성층 영향반경은 D_N 값이 증가할수록 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 탈성층 효율은 D_N 값이 증가할수록 선형적으로 증가하다가 증가율이 감소하면서 일정해지는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 산기식 수중폭기장치, 무차원변수(D_N), 탈성층효율, 영향반경, CFD

1. 서 론

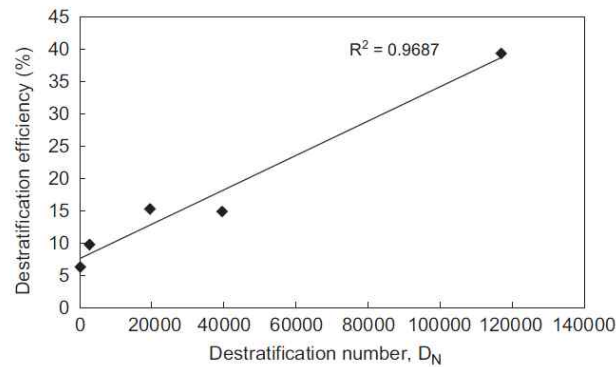
우리나라는 댐을 통한 용수공급이 수자원 총 이용량의 약 53%를 차지하고 있지만, 여름철이 되면 댐 저수지의 상하층 온도차로 인해 성층이 형성되어 심층부의 산소고갈과 조류 발생 등 많은 수질문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인공적으로 저수지내 물순환을 유도하는 산기식 수중폭기장치를 설치하고 있으며, 이는 기술적으로 간단하고 경제적인 방법으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 실제로 설치된 산기식 수중폭기장치들은 설치비와 비교할 때 수질개선효과가 만족스럽지 않은 경우가 더러 있다. 산기식 수중폭기장치의 설계 방안에 대하여 많은 연구자들에 의해 지속적으로 연구가 이루어져 왔으나 (김성훈 외, 2005; Asaeda et al., 1993; Yum et al., 2008), 대부분 lab-scale의 실험연구를 통해 설계인자를 검토하고 설계에 반영하고 있어 실제 댐 저수지에 적용하기 위해서는 개선하는 방법 등이 필요한 것으로 판단된다.

현장 댐저수지에서의 산기관 영향반경은 산기관 영역을 지나가는 유체 흐름으로 인해 비대칭적으로 형성되기 때문에 영향반경 산정기준을 단순하게 정의하는 것은 어렵다. 또한 탈성층효율의 경우, Yum et al.(2008)이 Lab-scale 실험을 통해 무차원변수와 탈성층효율간의 관계를 나타낸 Fig.1을 보면, D_N 값이 현장 조건에 해당하는 120,000일 때 약 40%의 탈성층효율이 발생하는 것으로 산

* KAIST 건설 및 환경공학과 · E-mail : nuno7989@kaist.ac.kr
** KAIST 건설 및 환경공학과 · E-mail : leejoin@kaist.ac.kr
*** 한국수자원공사 · E-mail : sunghoonkim@kwater.or.kr
**** KAIST 미래도시연구소 · E-mail : peregian78@gmail.com
***** KAIST 건설 및 환경공학과 · E-mail : hpark57@kaist.edu
***** 한국수자원공사 · E-mail : yumkt@kwater.or.kr

정되었지만, Zic et al. (1992)는 수중폭기장치에 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. 이는 lab-scale 실험에 의해 검증된 탈성층효율값은 실제 현장 조건에 잘 부합되지 않아 개선의 여지가 다소 있다는 것을 의미한다.

따라서 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 수중폭기장치 설계인자를 재검토하려는 목적을 갖는다.



출처 : Yum et al., (2008)

Figure 1. 무차원변수(D_N)과 탈성층효율과의 관계

2. 연구방법

2.1 댐 저수지의 현장 조건 검토1)

우선 댐 저수지의 현장조건을 파악하기 위해 산기식 수중폭기장치가 실제로 설치되어 있는 보령댐과 운문댐을 대상지로 선정하여 수심, 유속, 표심층 온도차, 온도분포 등의 댐 환경조건과 산기관 설치대수 및 폭기량 등의 산기관 운영조건들을 검토하였다.

2.2 CFD 모형 구축

CFD (Computational Fluid Dynamics) 모형은 2상 3차원 모형을 기반으로 하며 연속방정식 (continuity equation), 운동량 방정식(momentum equation), 에너지 방정식(energy equation)과 같은 지배방정식이 사용되었다. 또한 CFD 시뮬레이션을 위해 상용프로그램인 CFX ver.11.0이 사용되었으며, 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 1과 같다. 또한 시뮬레이션 해석은 시간에 따른 변화를 볼 수 있도록 transient 해석을 기본으로 하였으며, 이때의 최대 반복계산 횟수 (max. iteration number)는 100번으로 설정하였다.

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

Table 1. 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

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

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

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -P' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + B \tag{2}$$

여기서, U는 속도 (m/s), ρ는 밀도 (kg/m³), P'(=P+ρgz)는 압력 (N/m²), B는 체적력 (N), μ_{eff}는 유효점성 (kg/m·s), t는 시간 (sec)이다. 유효점성은 난류를 고려한 점성으로, 본 연구에서는 난류의 해석에 사용되는 난류 모델로 'k-εmodel'을 선정하였으며, 따라서 유효점성은 유체점성(μ)과 난류점성(μ_T)과의 합으로 나타낼 수 있으며, 식(3)과 같이 계산된다. C_μ는 난류점성계수이다.

$$\mu_T = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \tag{3}$$

2.3 CFD 모형의 시뮬레이션 및 검증

CFD 모형에 적용된 현장조건은 앞서 언급된 보령댐과 운문댐 조사자료를 분석한 결과를 바탕으로 하여 한방향으로 0.9cm/s의 흐름유속을 가지는 유입수가 존재하며, 수심은 30m이고, 초기 온도분포는 표심층 온도차가 약 10℃이며 수온약층이 존재한다. 유입수의 온도분포는 초기 온도분포와 동일한 것으로 가정하였다. 폭기량은 조사대상댐에서 운영되고 있는 300LPM을 적용하였다. 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

CFD 모의 실험은 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 수중폭기장치 설계인자 분석

2.5.1 무차원변수 D_N

D_N (Yum et al.; 2008)은 기체-액체간 슬립속도를 이용하여 기포 크기가 plume 거동에 미치는 영향을 간접적으로 고려한 무차원변수로써, 식(4)와 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.

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

2.5.2 산기관 영향반경

본 연구에서의 산기관 영향반경은 산기식 수중폭기장치의 안전한 설계를 위해 산기관으로 유입되는 방향의 짧은 영향반경인 보수적인 영향반경 (Conservative Radius)으로 정의하였다. 또한 폭기에 의해 발생하는 물리적인 흐름영역 보다는, 에너지효율 (Local destratification efficiency) 즉, 폭기에 의해 밀도류의 퍼텐셜 에너지의 변화가 존재하는 영역까지를 영향반경으로 보았다. 에너지효율은 식(5)와 같이 산정된다 (Asaeda and Imberger, 1993).

$$\eta_E(\text{에너지효율}) = \frac{PE}{KE} = \frac{\Delta PE}{\rho^* g Q_0 H_A \ln \left(1 + \frac{H}{H_A} \right)} \Delta t \quad (5)$$

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

2.5.3 탈성층효율

현장 댐저수지는 산기관을 중심으로 전면이 개방되어 있는 공간이기 때문에, 밀폐된 공간에서 처럼 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(5)와 유사하되, 영향반경 내의 부피에 대한 퍼텐셜 에너지 변화량을 고려하였다. 식(5)에서 Δt 는 탈성층이 발생하는 시점까지의 산기관 가동시간이며, 현장에서의 탈성층 발생 시점은 지속적인 성층 유입수의 유입으로 인해 뚜렷하지 않으므로 본 연구에서는 수심에 따른 온도분포가 시간에 대해서 거의 일정할 때로 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CFD 모형 검증 결과

속도장 및 온도분포 검증은 결정계수 (r^2)값이 각각 0.88, 0.60 수준이었다. 성층정도에 큰 영향을 미치는 표심층 온도분포의 발생오차는 작았으며, 측정 오차 및 다양한 외부영향이 존재하는 현장 자료임을 감안할 때 구현된 모형은 충분히 유용한 것으로 판단되었다.

3.2 현장조건에서의 D_N 범위

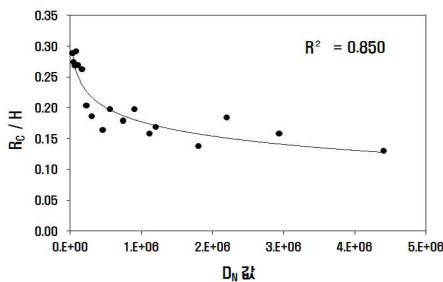
운문댐, 보령댐의 현장조건을 반영한 무차원변수 D_N 은 30,000~4,500,000 범위로 산정되었으며, 댐 저수지의 규모가 커질수록 더 큰 D_N 값을 포함하는 범위로 산정될 수 있음을 알 수 있었다.

3.3 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 H 과 현장조건에서의 D_N)간의 관계는 Fig.2의 (a)와 같이 산정되었다.

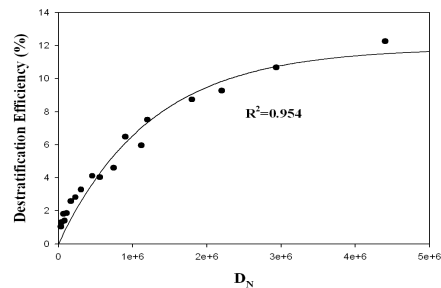
3.4 탈성층 효율 ()

D_N 과 탈성층 효율간의 관계를 산정한 결과는 Fig.2의 (b)에 나타내었다. 현장에서의 탈성층 효율은 D_N 값이 작은 범위에서는 선형적으로 증가하다가 큰 범위에서는 증가율이 감소하면서 일정해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 최대 탈성층효율은 약 12% 수준에서 수렴하는 것으로 분석되었다.



$$R_c/H = -0.033 \ln D + 0.64$$

(a) D_N 에 따른 단위수심당 영향반경



$$\eta = 11.848 \times [1 - e^{-8.064 \times 10^{-7} D}]$$

(b) D_N 에 따른 탈성층효율

Figure 2. D_N 에 대한 단위수심당 영향반경 및 탈성층효율

4. 결론

댐 호소의 수질개선을 위해 수중폭기장치가 설치되고 있으나, 아직 확실한 수질개선 효과로 이어지고 있지 않다. 이 문제의 상당부분은, 수중폭기장치가 현장조건을 고려하여 최적설계되고 있지 않은 데 기인한 것으로 저자들은 판단하였다. 본 연구는 현장 적용성 높은 산기식 수중폭기장치 설계방안을 고찰하려는 목적하에, 댐 환경, 성층 유입수, 수체 흐름, 폭기량 등 댐환경 및 운영조건을 고려하여 산기식 수중폭기장치의 주요 설계인자를 분석하였다. 그 결과 lab-scale 실험조건에 의해 분석된 산기식 수중폭기장치 설계인자를 실제 댐 현장조건을 고려하여 검토하고 개선하였다. 따라서 이를 통해 산기식 수중폭기장치를 설계한다면 현장적용성이 높은 설계가 가능할 것이며 효과적인 여름철 댐 저수지 관리를 위해 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 김성훈, 김재윤, 박희경 (2005) 버블 플룸을 이용한 탈성층의 평가 : 차원해석 및 설계방법론의 제시, *상하수도학회지*, **19**(6), pp.827-837.
2. Asaeda, T. and Imberger, J. (1993) Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, 249, pp. 35-57
3. 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