

사연댐 수위조절시 수질변화 분석

Analysis of the Water Quality Change Due to Water Level Control of Sayeon Dam

이 상 현* / 조 홍 제**

Lee, Sang Hyeon / Cho, Hong Je

Abstract

The Bangudae Petroglyphs, national treasure No. 285 is located within submerged upper districts of Sayeon dam supplying the main residential water in Ulsan. Of the many ways for the reservation of Petroglyphs located the altitude at 53~57 m, the plan that we take it out of the water lowering the water level from 60 m to 52 m has been examined mainly in case of controlling artificially the water level of the dam. In this paper, we examined expected problems from the loss of dam function and the change of water quality from water deterioration caused by the water level control of the Sayeon dam. Using the model of Vollenweider and CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), we analyzed the density change of BOD and COD, representative water quality index and the TP and TN, the main reason of algae growth. The result showed that the density of COD lowered a little but the density of TP and TN went up over 130% when controlling the water level from 60 m to 52 m. These changes cause a serious algae problem and if doing the water quality management as the density of TN and TP, the water quality would become worse. Water storage and supply residential water decreases, and the water quality becomes worse because of eutrophic state.

Keywords : Sayeon dam, water level, water quality change, nutritive salts (TN, TP)

요 지

울산시의 주요 생활용수공급댐인 사연댐 상류 수물지역 내에 국보 285호인 반구대 암각화가 위치하고 있다. 표고 53~57 m에 위치한 암각화 보존을 위한 여러 가지 방안 중, 사연댐 수위를 60 m에서 52 m로 낮추어 물 밖으로 끄집어내는 안이 주로 검토되어 왔다. 댐의 수위를 인위적으로 조절하는 경우 저수량 및 용수공급량 감소와 더불어 부영양화로 인해 수질이 나빠지게 된다. 본 연구에서는 사연댐 수위조절에 따른 수질악화로 댐의 기능상실과 수질변화로 인해 예상되는 여러 가지 문제점을 검토하였다. Vollenweider 모델과 CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) 모델을 이용하여 수위조절시 변화가 예측되는 대표적인 수질지표인 BOD 및 COD 그리고 조류성장의 주 원인이 되는 총인과 총질소의 농도변화를 분석하였다. 그 결과 사연댐의 수위를 60 m에서 52 m로 조절하는 경우, COD의 농도는 약간 낮아지지만 총질소와 총인은 약 130% 이상 농도가 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 심각한 조류문제를 일으킬 수 있으며, 사연댐의 수질관리를 영양염류의 농도를 대상으로 하는 경우 수질이 악화되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 사연댐, 수위조절, 수질변화, 영양염류 (TN, TP)

* 울산발전연구원 환경안전연구실 선임연구위원 (e-mail: shlee@udi.re.kr)

Senior researcher, Ulsan Development Institute Environment & Safety Divison, 915, Saneop-ro, Buggu, Ulsan 683-804, Korea

** 교신저자, 울산대학교 공과대학 건설환경공학과 정교수 (e-mail: hjcho@mail.Ulsan.ac.kr, Tel: 052-259-2262)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil & Environmental Engrg., Ulsan Univ., Ulsan 680-749, Korea

1. 서 론

2013년 우리나라의 강우현상을 살펴보면 지역별 양극화 현상이 매우 뚜렷하다. 6월 중순경까지는 남부지역을 중심으로 비교적 많은 비가 내릴 때 중부지역은 거의 비가 내리지 않았으나, 지난 2개월 동안은 오히려 중부지역은 한 달 넘게 장마가 지속된 반면 울산, 포항 및 경주 등 동남부 지역은 극심한 폭염과 여름 가뭄현상이 나타나고 있다. 수년 전 환경부에서는 수자원의 효율적 이용과 관리를 위해 우리나라를 9개 권역으로 나누어 각 권역별로 공동으로 이용할 수 있는 합리적인 안을 마련한 바 있으나, 정부 유관부처의 이해관계와 각 지자체간의 수리권 다툼으로 활용되지 못하고 있는 실정이다. 대표적으로 부산시의 남강댐과 합천댐 물이용, 대구·경북지역의 구미 상류지역 낙동강 물 취수 그리고 울산시의 운문댐과 밀양댐 물이용 등 전국적으로 가까운 수자원이 효율적으로 이용되지 못하고 있다.

2009년 12월 국토해양부가 고시하였던 ‘2025 수도정비기본계획’의 일환으로 ‘대구·경북지역 맑은 물 공급사업’은 ‘울산지역 맑은물 공급사업’과도 직접 연계되어 있다. 그런데 2011년 한국개발연구원의 용역결과 대구·경북 맑은 물 공급사업의 경제성이 없는 것으로 평가되어 두 사업 모두 중단된 상태이다. 울산권 맑은 물 공급사업은 울산시의 주요 생활용수공급댐인 사연댐 상류 수물지역내에 위치하고 있는 ‘국보 285호인 반구대 암각화 보존’과 연계되어 있다. 그동안 반구대 암각화 보존을 위해 여러 가지 방안이 검토되어 왔으며, 그 중 한가지 방안으로 표고 53~57m에 위치한 암각화를 물 밖으로 끄집어내기 위해 사연댐의 수위를 60m에서 52m로 낮추는 안이 주로 검토되어 왔다. 즉 사연댐의 수위를 52m로 낮추는 경우 사연댐의 유효저수량 약 2/3가 감소하게 되며, 그로 인해 사연댐 상류에 위치한 대곡댐과 연계하여 울산시에 공급하고 있는 생활용수 공급량이 하루 5.5만톤 감소하게 되므로, 이를 보충하기 위한 대체 수원으로서 운문댐의 물을 끌어오는 계획이다. 댐의 인위적 수위조절이나 가뭄 등에 의해 저수량이 감소하는 경우, 부영양화로 댐의 수질이 나빠지게 된다.

이에 대한 연구로는 댐저수지 유역의 오염부하 특성조사를 강우기와 비강우기로 나누어 삼진강댐 저수지 상류 유입하천에 대한 수질조사와 BOD, COD, T-N과 T-P에 대한 분석을 실시하였다(Lee and Kang, 2000). 보령 담수호의 수질보전을 위해 각 소유역 농업용저수지의 수질분석을 통한 갈수기 농업유역과 관개기간 동안 하천 및 농경지로 유입되는 오염원의 적정 관리방안을 제시하였고(Choi et al., 2001), 국내 대부분 저수지의 공통현상인 수

심이 얇은 부영양상태의 저수지에서 계절변화에 따른 수질변화 특성을 유입부하량과 연계하여 분석하였다(Kim and Hwang, 2004). 기존 저수지에 물리적 변화 없이 더 많은 수자원을 확보하기 위한 방안으로 다목적 저수지의 홍수 조절공간과 이수공간 사이에서 저수용량 재할당 방안을 제안하였다(Yi and Kwon, 2007). 안동댐을 대상으로 호소수의 오염물질 중 대표인자인 BOD, T-N, T-P 시·공간적 거동을 파악하기 위해 WASP7 모델을 이용하여 저수지의 수위와 방류조건에 따른 수질변화를 예측하였다(Kim, 2008). 대청호 본류 7개 지점과 유입지류 8개 지점을 선정하여 측정된 환경부 수질자료 분석을 통해 시·공간적 변이와 유입지류에 의한 대청호 수질의 영향을 분석하여 대청호 수질개선 방안을 제시하였다(Kim et al., 2012).

그동안 사연댐의 수위를 60m에서 52m로 낮추는 경우, 저수량 감소로 인한 용수공급량의 부족현상과 감소량의 추정이 주된 관심사였었고 수질도 악화될 것으로 막연히 예상만 하여왔다. 본 연구에서는 수위조절에 따른 수질 악화로 울산시 주요 상수원인 사연댐의 기능상실과 수질 변화로 인해 예상되는 여러 가지 문제점을 검토하는데 주안점을 두었다. 이를 위해 사연댐 수위조절시 변화가 예측되는 대표적인 수질지표인 BOD, COD 그리고 조류성장의 원인이 되는 영양염류인 총인(TP)과 총질소(TN)의 농도변화를 대상으로 수치모형을 활용하여 예측하였다.

2. 수질모형을 통한 분석

일반적으로 호소의 오염도 평가는 부영양화의 예측과 유기물 및 영양염류의 농도 변화를 기준으로 결정되며, 본 연구에서는 Vollenweider 모델을 통한 부영양화를 예측하였다. 그리고 COD나 영양염류의 예측은 물질수지에 근거한 호소를 하나의 반응기로 가정하고 접근하는 방법인 CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) 모델을 통해 간단한 경향을 파악하였다.

2.1 Vollenweider 모델

Vollenweider 모델은 인의 물질수지를 통해 호소의 영양상태를 분석하기 위한 간단한 접근방법으로 호소의 정상상태(steady state, $dP/dt = 0$), 호소 전체가 동질의 완전혼합반응조 (completely mixed reactor) 형태 그리고 총인으로서 영양상태를 대표한다는 가정에서 제시되었으며, Vollenweider 모델을 물질평형 방정식으로 제시하면 Eq. (1)과 같다.

$$V \frac{dp}{dt} = W - v_s A_s p - Qp \quad (1)$$

또는

$$V \frac{dp}{dt} = W - K_s p V - Qp$$

Eq. (1)의 양변을 체적 V로 나누면,

$$\frac{dp}{dt} = \frac{W}{V} - K_s p - \rho p \quad (2)$$

여기서,

$$K_s = \frac{v_s}{H} \quad (2a)$$

여기서, V =호수의 용적(부피) [L³]

P =호수의 총인 [M/L³]

Q =유출 수량 [L³/T]

A_s =호수의 표면적 [L²]

W =외부에서 유입되는 인 [M/T]

v_s =순침강속도 [L/T]

K_s =총인의 유실비율(= v_s/H) [1/T]

ρ =교환율(flushing rate) [1/T]

h =호수의 깊이 [L]

Fig. 1은 Vollenweider 모델 시스템의 도식이며, 정상상태($dp/dt=0$)에서 Eq. (1)의 해는 Eq. (3)과 같다.

$$p = \frac{W}{Q + v_s A_s} \quad (3)$$

여기서 A_s 는 수표면적이며, Eq. (3)에서 분자와 분모를 A_s 로 나누고 정리하면 Eq. (4)와 같게 된다.

$$p = \frac{W'}{q_s + v_s} \quad (4)$$

여기서, q_s 는 수리학적 표면부하량 또는 수리일류속도 (Q/A_s)라 하고 W' 는 표면부하량 (W/A_s)이며, Eq. (4)는 다음 Eq. (5)와 같이 변형될 수 있다.

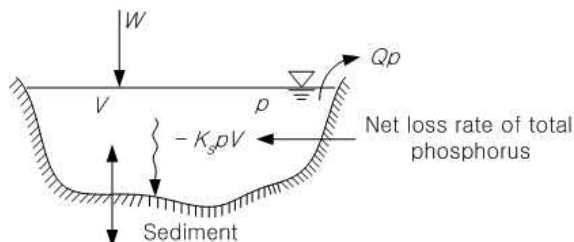


Fig. 1. Material Balance of P

$$p = \frac{W'}{H(\rho + K_s)} \quad (5)$$

여기서,

$$\rho = \frac{Q}{V} = \frac{1}{t_d} \quad (5a)$$

t_d 는 호수의 수리학적 체류시간이고, $H_p = V/A_s \cdot Q/A = Q/A_s = q_s$ 이다.

$K_s = v_s/H$ 이고, 침강속도 v_s 에 대해 Chapra and Tarapchak (1976)는 이 값을 16 m/yr와 12.4 m/yr로 제시하였으며, Rast and Lee (1978), Bachmann and Canfield (1979) 및 Higgins and Kim (1981) 등은 미국 호소의 경우 3~30 m/yr로 변화하는 것으로 조사하였다. 그런데 이러한 침강속도는 상당히 넓은 범위를 가지며 허용 가능한 인부하량을 계산하는 데 많은 영향력을 미치게 된다. 따라서 허용 가능한 총인의 부하량 W' 를 산정하기 위해서는 어느 정도까지가 총인 농도의 허용량이고, 어느 정도이면 초과량이 되는가를 알아야 한다. 일반적으로 사용되는 총인의 최대 허용농도는 0.010 mg P/l (g/m^3)이고, 총인의 과부하 농도는 0.030 mg P/l (g/m^3)이다. 이러한 기준농도를 적용하면, Eqs. (5) and Eq. (2a)로 부터 부하량은 다음 Eqs. (6) and (7)같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{허용 임계부하량:} \\ W' = 0.01(v_s + H\rho) \quad (g/m^2 \cdot yr) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{과잉 임계부하량:} \\ W' = 0.03(v_s + H\rho) \quad (g/m^2 \cdot yr) \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 2는 이러한 관계를 보여준다. 산정된 H_p 와 연간부하량으로 호수의 영양상태를 예측할 수 있으며, 부영양화된 상태라면 어느 정도 부하량을 감소시켜야 하는지를 Fig. 2로 부터 직접 파악할 수 있다.

2.2 CSTR 모델

호소 수질변화를 예측하는 모델로는 미국 EPA에서 개발한 WASP 모델과 미육군 공병단에서 개발한 WQRRS, CE-QUAL-W2 모델 등 2차원, 3차원 동적수질모델과 저수지를 단순한 1차 반응공학의 개념인 완전혼합 반응조로 예측하는 완전혼합반응(CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor, 이하 CSTR모델로 표기) 1차원 수질모델 등이 있다. 호소 수질예측을 위해 동적수질모델을 적용할 경우, 계절변화에 따른 수질데이터와 유황자료 등 다양한 입력 자료를 통해 수체내 복잡한 수질 메커니즘을 수치해석적 방법으로 분석하여야 한다. 하지만 현재 이러한 복잡한

수질예측 변수자료의 산출과 실측자료 부족 그리고 동적 모델의 구동에 따른 시간적 제한 등으로 현 상황에서 시물레이션하기에는 불가능하므로 본 연구에서는 1차원 모델인 CSTR 모델을 활용하였다. CSTR 모델은 기존의 상업화된 동적수질모델과 비교하여 상대적인 수질예측의 정확도와 신뢰성은 떨어지지만 호소내 오염물질 농도를 증가시키는 유입부하와 오염물질 농도를 감소시키는 유출, 반응, 침강, 용출 등을 고려할 수 있다. 그리고 수질모의를 통해 오염물질변화에 대한 수체의 반응을 적정수준에서 근사적으로 예측할 수 있어 대략적인 경향 파악은 가능하다. CSTR 모델의 개념도와 방정식을 Fig. 3과 Table

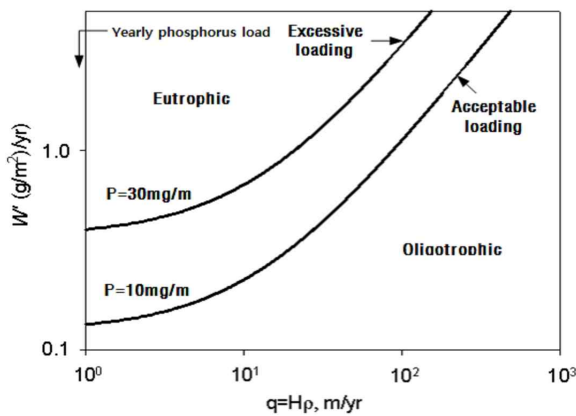


Fig. 2. Nutrition Material Loading Amount and Nutrition State of Lakes

1에 제시하였다.

2.3 부영양화 분석

부영양화란 물의 이용에 방해가 될 정도로 부착성 또는 부유성 수중식물(조류)이 과대 성장하는 것을 말하며, 주된 요인으로 질소(N)와 인(P)과 같은 영양물질의 과다 유입에 기인하는 것으로 알려져 있다.

수체의 부영양화 정도는 영양상태로 구분될 수 있으며, 호수의 영양상태에 따라 다음의 세 가지 호소로 구분된다. 빈영양(Oligotrophic)호는 깨끗하고 생산성이 낮은 호수, 중영양(Mesotrophic)호는 중간단계의 생산성을 갖는 호수, 부영양(Eutrophic)호는 자연상태의 호수에 비해 높은 생산성을 갖는 호수로 설명되며, 미연방 환경청에서 제시한 영양단계별 수질농도의 범위를 Table 2에 정리하

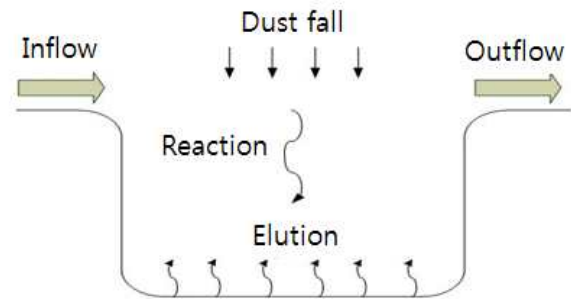


Fig. 3. Concept Map of CSTR Model

Table 1. CSTR Model Equation

$V \frac{dc}{dt} = W_{All} - Q_{out} C_{out} - k C_{out} V$ $\frac{dc}{dt} = \frac{W_{All}}{V} - \frac{Q_{out} C_{out}}{V} - k C_{out}$ $\frac{dc}{dt} = \frac{W_{All}}{V} - \left(\frac{Q_{out}}{V} + k \right) C_{out}$ $\frac{dc}{dt} + \left(\frac{Q_{out}}{V} + k \right) C_{out} = \frac{W_{All}}{V}$ $\left(\frac{Q_{out}}{V} + k \right) = \lambda,$ $\frac{dc}{dt} + \lambda C_{out} = \frac{W_{All}}{V}$ $e^{\lambda t} \text{ multiply}$	$e^{\lambda t} \frac{dc}{dt} + e^{\lambda t} \lambda C_{out} = e^{\lambda t} \frac{W_{All}}{V}$ $\int_{t=0}^{t=t} (e^{\lambda t} \cdot C)' = \frac{W_{All}}{V} \int_{t=0}^{t=t} e^{\lambda t}$ $(e^{\lambda t} \cdot C)_{t=0}^{t=t} = \frac{W_{All}}{V} \frac{1}{\lambda} (e^{\lambda t})_{t=0}^{t=t}$ $e^{\lambda t} \cdot C_t - e^{\lambda 0} \cdot C_0 = \frac{W_{All}}{V} \frac{1}{\lambda} (e^{\lambda t} - e^{\lambda 0})$ $e^{\lambda t} \cdot C_t - C_0 = \frac{W_{All}}{V} \frac{1}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1)$ $e^{\lambda t} \cdot C_t = C_0 + \frac{W_{All}}{V} \frac{1}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1)$ $C_t = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{W_{All}}{V} \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$
<p>where, V : Volume Q : Rate of inflow(in) and rate of outflow(out) C : Inflow concentration(in) and Outflow concentration(out) k : Response coefficient, Wall : Total inflow pollution load $Wall = \begin{matrix} Q_{in}C_{in} & + & W_{air} & + & W_{sediment} \\ \text{(Tributary inflow)} & & \text{(Air)} & & \text{(Release form pelagic zone)} \end{matrix}$</p>	

였다(USEPA, 1974).

그리고 부영양화를 평가하는 방법은 정성적인 방법과 단일항목에 의한 평가방법(투명도, 영양염류, Chl-a 농도), 복수항목에 의한 평가방법, 부영양화 지수에 의한 평가방법 등이 있으며, 최근에는 Table 3과 같이 다소 완화된 기준인 Vollenweider의 총인과 총질소 기준의 영양상태 분류방법도 있다.

3. 사연댐 수질모델 구성 방법

사연댐의 수질모델을 구성하기 위해서 Fig. 4와 같은 유역도를 근거로 수질조사 및 유량조사 자료를 활용하였

다. 수질측정지점으로 구량천, 반곡천, 대곡천2 지점이 있으며, 구량천, 반곡천의 수질 자료는 한국수자원공사의 보고서에서 조사된 자료를 이용하였고(K.W.R.C., 2008~2010), 대곡천2 지점은 환경부 수질측정망 자료를 사용하였다. 수질모델 자료로 입력하기 위한 각 지점별 수질자료는 2008~2010년까지의 한국수자원공사 보고서와 환경부 수질측정망 자료를 평균하여 사용하였다. 그 이유는 두 기관의 측정지점은 동일하나 환경부에서는 매월 1회씩 정기적으로 분석하지만 한국수자원공사는 부정기적으로 분석하므로 평균하여 변수를 단순화시켰다. 유량자료는 울산시 상수도사업본부 사연댐 자체유입량 자료와 한국수자원공사 보고서의 구량천과 반곡천 유량자료를 분석하여

Table 2. Nutrition State Classification of Lakes

Water index	Oligotrophy	Mesotrophy	Eutrophy
TP ($\mu\text{g/l}$)	< 10	10~20	> 20
Chlorophyll ($\mu\text{g/l}$)	< 4	4~10	> 10
Secchi depth (m)	> 4	2~4	< 2
Hypolimnetic oxygen (% saturation)	> 80	10~80	< 10

Table 3. Classification Standard in Nutrition Degree of Vollenweider

Nutritive conditions	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)
Ultraoligotrophy	< 0.005	< 0.20
Ineutrophy	0.005~0.01	0.20~0.40
Oligotrophy	0.01~0.03	0.30~0.65
Mesotrophy	0.03~0.10	0.5~1.50
Eutrophy	> 0.10	> 1.5

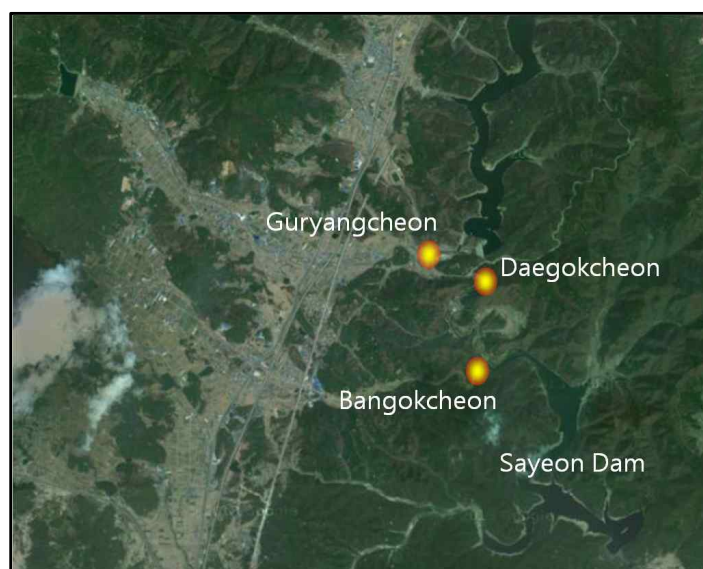


Fig. 4. Water Quality Survey and Discharge Estimation Point of Sayeon Dam Basin

유량배분을 계산한 후 모델에 적용하였다.

한편 부영양화 예측을 위한 Vollenweider 모델의 입력 자료는 Table 6에 제시하였다.

그리고 CSTR 수질예측 모델의 입력자료는 실험과 직접 측정을 통해 결정해야 한다. 본 연구의 수질 및 유량자료는 기존 보고서의 실제 측정자료를 활용하였고, 기타 반응계수 및 용출계수 등의 자료는 기존 문헌에서 추출하여 사연댐 수질예측에 적용하였다. 수질 및 유입 유량에 관한 입력자

료는 Table 7에 제시하였으며, 사연댐 수질자료는 환경부 측정망 사연2 지점의 2009~2010년까지 3년 평균농도를 근거로 하였다. 그리고 모델 예측에 필요한 각종 오염물질별 용출계수 및 반응계수는 Tables 8 and 9에 제시하였다.

또한 CSTR 모델에서 가장 중요한 용출부하량 자료는 실측된 자료가 없기 때문에 저수면적의 0~50%로 단계적 가정하에서 용출부하량을 결정하였다. 그리고 수질항목 별 반응계수는 Table 10과 같이 연 평균값을 기준으로 보

Table 4. Water Quality Density in every Point of Sayeon Dam

Division	COD (mg/L)			T-N (mg/L)			T-P (mg/L)		
	Guryang cheon	Bangkok cheon	Daegok cheon 2	Guryang cheon	Bangkok cheon	Daegok cheon 2	Guryang cheon	Bangkok cheon	Daegok cheon 2
2008 year	1.803	2.150	3.3	2.579	4.411	1.062	0.031	0.046	0.023
2009 year	1.858	2.242	5.5	2.357	4.496	1.457	0.026	0.031	0.012
2010 year	2.292	2.592	3.0	2.747	3.717	1.485	0.032	0.032	0.017
Average	1.984	2.328	3.9	2.561	4.208	1.335	0.030	0.037	0.017

Table 5. Average Input Discharge in Every Point of Sayeon Dam (average in 2008~2010)

Division	Daegok cheon 2	Bangkok cheon	Unit
Average inflow rate	39,999,144	16,680,543	m ³ /yr

Table 6. Input Data of Vollenweider Model

Input items	Application values		Unit	Note
Water level (H)	60	52	m	Full water level
Benevolence inflow concentration (P)	0.023		mg/L	Daegok cheon 2, Bangkok cheon water quality (3 years flow weighted mean concentration)
Yearly inflow rate (Q)	56,679,687		m ³ /yr	Daegok cheon 2 outflow + Bangkok cheon (5 years mean inflow)
Benevolence inflow load (W)	1,303,633		g/yr	P×Q
Watermark area (As)	1,960,000	1,260,000	m ²	
Pondage (V)	23,527,320	10,697,250	m ³	
Average Water level (h)	12.0	8.5	m	
Exchange rate (ρ)	2.41	5.30	1/yr	Yearly inflow rate / Pondage
q=hp	28.9	45.0		Exchange rate (ρ) × Lake water level (H)
Residence time (t)	151.5	68.9	day	1/ρ
Surface loading rates (W/A)	0.665	1.035	g/m²/yr	

Table 7. Input Data of CSTR Model of Sayeon Dam

Maximum water surface area (m ²)	Pondage (m ³)	Rate of inflow (m ³ /d)	Inflow water quality		
			COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
1,960,000	23,527,320	155,287	3.46	2.18	0.023

Table 8. Dissolved P Elution Rate Applied to Domestic Lakes

Lakes	Models	σ_2 (mg P/m ² /day)	Method
Youngsan Lake	-	1.16 (aerobic) 3.41 (anaerobic)	Laboratory study
Taehwa river	QUAL2E	0.01	Model calibration
Daecheong Lake	WASP5	0.02~1.17	Laboratory study
Saemangeum Lake	WASP5	13.3	Model calibration
Paldang Lake	WASP4	-30~4	Model calibration
Average		11.69	Now application

Table 9. Amoniac N elution Rate Applied to Domestic Lakes

Lakes	Models	σ_3 (mg N/m ² /day)	Method
Youngsan Lake	-	88.2 (aerobic) 10.61 (anaerobic)	Laboratory study
Taehwa river	QUAL2E	0.05	Model calibration
Daecheong Lake	WASP5	9.9~111.5	Laboratory study
Saemangeum Lake	WASP5	50	Model calibration
Paldang Lake	WASP4	20~300	Model calibration
Average		78.88	Now application

Table 10. Reaction Modulus Applied to Model

Response coefficient	Application values	Note
COD response coefficient (1/day)	-0.0000001	pollutant release rates in 50% of surface area of dam
T-N response coefficient (1/day)	0.01159	
T-P response coefficient (1/day)	0.03445	
COD response coefficient (1/day)	-0.0000001	40%
T-N response coefficient (1/day)	0.0109	
T-P response coefficient (1/day)	0.028	
COD response coefficient (1/day)	-0.00014	30%
T-N response coefficient (1/day)	0.01024	
T-P response coefficient (1/day)	0.0218	
COD response coefficient (1/day)	-0.000284	20%
T-N response coefficient (1/day)	0.00955	
T-P response coefficient (1/day)	0.0156	
COD response coefficient (1/day)	-0.00043	10%
T-N response coefficient (1/day)	0.00887	
T-P response coefficient (1/day)	0.00941	
COD response coefficient (1/day)	-0.000575	zero
T-N response coefficient (1/day)	0.0082	
T-P response coefficient (1/day)	0.0031	

정후 예측을 시행하였다.

4. 연구결과 분석

울산시 상수도본부의 사연댐 유·출입 유량자료와 2008~2010년까지 환경부 수질측정망 자료, 그리고 한국수자원공사의 대곡 및 사연댐 상류지역 수질조사 보고서의 자료를 근거로 사연댐 수위조절시 예상되는 수질변화를 Vollenweider 모델과 CSTR 모델로 예측하였다.

사연댐의 측정된 2008~2010년까지 연평균 총인 농

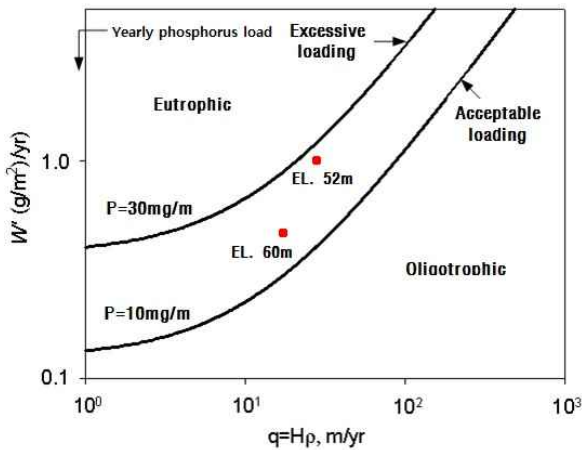


Fig. 5. Result of Vollenweider Eutrophic Judgement in Controlling Water Level of Sayeon Dam

도로 부영양화를 판단할 경우, 전술된 USEPA 자료와 Vollenweider 영양도 분류기준에 근거하면 현재 중영양 단계에 있는 것으로 판단된다. 사연댐 수위조절로 인한 Vollenweider 모형의 평가 결과, Fig. 5에 나타난 바와 같이 현재 중영양상태에서 60m에서 52m로 수위가 낮아질 경우에도 동일한 영양상태인 중영양상태를 유지하는 것으로 판단된다. 하지만 상대적으로 수위가 52m로 조절될 경우에는 부영양화(Eutrophication) 가능성이 더 높아지는 것으로 나타났다.

한편 CSTR 모델을 적용한 사연댐 수위변화시 예측되는 수표면적의 변화와 저수량은 Table 11에 제시하였으며, 이를 고려한 수질변화를 Table 12에 나타내었다.

CSTR 모델 예측결과, 사연댐을 수위조절 할 경우 체류시간은 151.5일에서 68.9일로 약 55% 감소하였다. 비점 오염원이나 기타 급격한 오염유입량의 변화가 없는 조건에서 댐내부의 용출부하량 변화에 따라 COD는 전반적으로 감소하며, 총질소(TN)와 총인(TP)의 경우는 증가하는 경향을 보였다. 특히, 용출부하량이 거의 없는 상태에서도 영양염류의 증가가 진행되는 것은 사연댐의 영양염류 농도보다 유입되는 영양염류의 농도가 높아 사연댐 수위조절시 호소내 가장 중요한 부영양화 문제가 상대적으로 심각해질 개연성이 높은 것으로 판단된다. 즉 COD 농도는 수위조절시 용출부하량 0%일 때 3.79 mg/L에서 3.64 mg/L로 4% 정도 낮아졌으며, 질소는 수위조절시 용출부하량 0%일

Table 11. Water Surface Area in Sayeon Dam and Water Storage Change in Controlling Water Level of Sayeon Dam

Input items	Application values		Unit
Water level (H)	60	52	m
Watermark area (As)	1,960,000	1,260,000	m ²
Pondage (V)	23,527,320	10,697,250	m ³
Residence time (day)	151.5	68.9	day

Table 12. Result of Water Quality Expectation in Controlling Water Level of Sayeon Dam

Water quality index	COD (mg/L)			T-N (mg/L)			T-P (mg/L)		
	60 m	52 m	I.&D.	60 m	52 m	I.&D.	60 m	52 m	I.&D.
P.R.R. 50%	3.79	3.74	▽0.05	0.97	1.35	△0.38	0.016	0.021	△0.005
P.R.R. 40%		3.70	▽0.09		1.35	△0.38		0.020	△0.004
P.R.R. 30%		3.68	▽0.11		1.35	△0.38		0.020	△0.004
P.R.R. 20%		3.66	▽0.13		1.35	△0.38		0.020	△0.004
P.R.R. 10%		3.65	▽0.14		1.34	△0.37		0.019	△0.003
P.R.R. zero		3.64	▽0.15		1.34	△0.37		0.018	△0.002

*P.R.R.: Pollutant release rates, I.&D.: Increase and decrease.

때 0.97 mg/L에서 1.34 mg/L로 138% 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 인의 경우는 0.016 mg/L에서 수위조절과 용출부하량이 0%일 때 0.018 mg/L로서 0.002 mg/L 증가 되고, 용출부하량이 50%일 때는 0.021 mg/L로서 2.5배인 0.005 mg/L 증가되는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

사연댐 수위를 60 m에서 52 m로 조절할 경우의 수질변화를 예측하기 위해 Vollenweider 모델과 CSTR 모델을 활용하여 분석하였다. 일반적으로 댐이나 호소를 대상으로 수질변화를 예측하는 모델로는 미국 EPA에서 개발한 WASP 모델과 미육군 공병단에서 개발한 WQRRS, CE-QUAL-W2 모델 등 2차원, 3차원 동적수질모델로 판단하는 것이 적절하지만, 물질수지에 근거한 1차 반응역학 개념의 CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) 모델을 통해 경향과약을 시도하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

사연댐의 Vollenweider 모델 적용 결과, 60 m에서 52 m로 수위가 낮아질 경우 급격한 부영양상태로 변화하는 것이 아니라 현재의 중영양상태를 유지하는 것으로 나타났다. 하지만 수위가 52 m로 조절될 경우에는 상대적으로 부영양화(Eutrophication) 가능성이 더 높아지는 것으로 분석되었다.

CSTR 모델을 이용하여, 사연댐의 수위를 조절하는 경우에 대한 수질변화에 대한 분석결과, 체류시간은 151.5 일에서 68.9일로 약 55% 감소하는 것으로 나타났다. 체류시간 감소와 유입 오염부하량을 고려한 상황에서 COD 농도는 수위조절시 용출부하량 0%일 때 3.79 mg/L에서 3.64 mg/L로 4%정도로 약간 낮아지는 경향을 보였다. 이는 사연댐으로 유입되는 외부 유입수질이 사연댐 내부 평균 COD 농도보다 양호하여 나타난 결과로 판단된다.

질소의 경우는 COD의 경우와 달리 최근 3년간 사연댐 평균 유입농도가 2.18 mg/L로 내부 평균농도 0.97 mg/L에 비해 약 225% 높은 것으로 조사되었다. 수위를 60 m에서 52 m로 조절하고 용출부하량 0%로 가정할 경우, 질소의 예측된 농도는 1.34 mg/L로서 평균농도 대비 약 138%로 급격히 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 수위조절로 인한 체류시간 감소가 오히려 사연댐 내부 질소 농도를 증가시키는 원인이 되는 것으로 판단된다.

인의 경우도 사연댐 최근 3년 평균 유입농도가 0.023 mg/L로서 내부 평균농도 0.016 mg/L에 비해 약 144% 높은 것으로 조사되었다. 수위조절로 인한 사연댐 내부 인 농도 0.016 mg/L에 대해 분석한 결과 용출부하량 0%일 때

0.018 mg/L이고 용출부하량 50%일 때 0.021 mg/L 로서 약 113~131%로 급격히 증가하였으며, 체류시간 감소가 사연댐 내부 인 농도를 증가시키는 것으로 나타났다.

질소와 인 같은 영양염류는 COD와 같은 유기물과는 달리 댐 내의 조류변성을 유발시키는 원인물질이며, 수위조절로 인한 농도증가는 현재보다 심각한 조류문제를 유발시킬 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 COD 보다는 영양염류 농도를 기준으로 수질관리를 평가할 경우, 사연댐 수위조절은 수질을 더욱 악화시키는 것으로 나타났다.

사연댐을 1차원 완전혼합반응조 형태의 개념으로 접근한 CSTR 수질예측 모델의 한계성과 문헌자료에 근거한 반응계수 산정 그리고 퇴적물 분석이 없는 상태에서 가정한 용출면적 등을 고려하면, 향후 3차원 동적모델을 활용한 정밀한 조사분석과 예측을 통해 보다 정확한 수질변화 분석이 필요한 것으로 판단된다.

References

- Bachmann, R.W., and D.E. Canfield, Jr. (1979). Role of Sedimentation in the Phosphorus Budget of Natural and Artificial Iowa Lakes, Project A-063-1A, Iowa State Univ. Ames, IA, p. 95
- Chapra, S.C., and Tarapchak, S.J. (1976). "A Chlorophyll a Model and Its Relationship to Phosphorus Loading Plots for Lakes." *Water Res. Res.*, Vol. 12, No. 6, pp. 1260-1264.
- Choi, J.K., Son, J.G., Koo, J.W., and Kim, Y.J. (2001). "Water quality of the agricultural reservoirs in Boryung watershed." *J. of Korean Society of Rural Planning*, Vol. 7, No. 1, pp. 89-98.
- Higgins, J.M., and Kim, B.R. (1981). "Phosphorus Retention Models for Tennessee Valley Authority Reservoirs." *Water Res. Res.* Vol. 17, No. 3, pp. 571-576.
- Kim, G.H., Lee, J.H., and An, K.G. (2012). "Spatio-temporal fluctuations with influences of inflowing tributary streams on water quality in Daechong reservoir." *J. Korean Society for Integrative Biology*, Vol. 45, No. 2, pp. 158-173.
- Kim, H.S., and Hwang, S.J. (2004). "Seasonal variation of water quality in a shallow eutrophic reservoir." *J. Korean Society for Integrative Biology*, Vol. 37, No. 2, pp. 180-192.
- Kim, S.J. (2008). *A prediction of the quality of water*

- according to both a water level of a reservoir and a outflow condition. *Master's thesis*. University of Kyungil, Hanyang-gup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, Korea.
- Korea Water Resources Corporation (2008~2010). Report of water quality monitoring of the upper region of Daegok and Sayoun Dam.
- Lee, Y.S., and Kang, B.S. (2000). "Characteristics of pollutant load from a dam reservoir watershed-Case study on Seomjinkang dam reservoir-." *J. of Korean Water Resources Association*, Vol. 33, No. 6, pp. 757-764.
- Rast, W., and Lee, G.F. (1978). Summary Analysis of the North American (US Portion) OECD Eutrophication Project: Nutrient Loading-Lake Response Relationship and Trophic State Indices, USEPA, Corvallis Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR 454, pp. EPA-600/3-78-008
- USEPA. (1974). The Relationship of Phosphorus and Nitrogen to the Trophic State of Northeast and North-Central Lakes and Reservoirs, National Eutrophication Survey Working Paper No. 23.
- Yi, J.U., and Kwon, D.S. (2007). "Effects on conservation and flood control systems according in normal water level change from Daechung multi-purpose reservoir." *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-10.

논문번호: 13-072	접수: 2013.09.05
수정일자: 2013.09.30	심사완료: 2013.09.30