

# 소양호 탁수거동 해석을 위한 2차원 수치 모형의 보정 및 검증

## Validation and Calibration of 2D Numerical Model for Analysis of Turbidity Current Regimes in Soyang Reservoir

류인구\*, 정세웅\*\*, 윤성완\*\*\*

In Gu Ryu, Se Woong Chung, Sung Wan Yoon

### 요 지

최근 들어 이상 강우 현상으로 인한 기록적인 집중 강우와 더불어 토지 이용 변화로 인해 탁수의 발생 빈도가 증가하고 있다. 강우 유출로 유입한 탁수는 저수지 내 장기간 체류하면서 하류 하천의 수질 및 수생태계 뿐만 아니라 저수지 내부의 영양단계에도 많은 영향을 준다. 특히, 성층화된 저수지의 경우 높은 영양염류 농도를 포함한 탁수는 밀도류 거동 특성을 보이면서 수평 및 수직 혼합 과정을 거치면서 국부적인 부영양화 현상과 조류의 수화 현상의 원인이 되고 있다. 따라서 대형 저수지의 수질관리에 있어 하천 유입 탁수의 밀도류 해석, 저수지의 수온 성층 구조 변화, 부유입자의 동력학적 해석이 중요한 요소로 부각되어 왔다. 본 연구에서는 소양호를 연구 대상 지역으로 선정하여 2005년과 2007년 수문 사상을 바탕으로 2차원 횡방향 수치 모형을 구축하였다. 수치모형을 통해 수온 성층 구조의 재현성을 확인하였으며, 다양한 탁수 거동 모형을 구축하여 적용성을 평가하였다. 유입수의 SS(Suspended Solid)를 단일 입경으로 가정한 TM-1 모형, SS의 입경분포에 따라 3개의 그룹(SSi)으로 구분한 TM-2 모형, 3개 그룹을 포함하면서 저수지내 탁수 장기화로 인한 탁수 저감 효과를 1차 반응상수로 매개 변수화(유기물 함량( $a_0$ ) × 분해속도( $\lambda_a$ ))하여 수정된 지배방정식을 적용한 TM-3 모형을 사용하였다. 각각의 탁수 거동 모형은 2005년과 2007년 수문 조건에서 수온 성층 구조를 잘 재현하였다. TM-1 모형과 TM-2 모형을 비교해보면, 탁수 중심축의 최고 탁도에 대한 예측 성능은 TM-2 모형이 우수한 결과를 나타냈었다. 하지만, 장기 탁수 모의 시 저수지 수중 잔류 SS가 지속적으로 높게 나타나 중층 탁도를 과대평가하는 경향을 보였다. TM-3 모형이 TM-2 모형에 비해 수심별 탁도 분포에 대한 중심축 탁도가 저평가되는 경향을 보였지만 저수지 내 잔류 탁도에 대한 영향 부분에서는 개선된 결과를 나타내었다. 본 연구 결과는 저수지 탁수 밀도류 해석 및 운영 시스템에 활용 될 수 있으며, 선택 취수 설비 등의 수리 구조물의 영향 평가에 활용할 수 있다.

**핵심용어** : 탁수 예측 모델, 밀도류 해석, 소양호, CE-QUAL-W2

## 1. 서 론

하상계수가 높은 하천의 지형 조건, 토지 이용 변화등과 더불어 기록적인 집중 강우 등으로 탁수 발생 빈도가 증가하고 있다. 특히, 하천-저수지-하천의 물 순환 시스템을 통해 저수지로 유입

\* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 대학원 박사과정 · E-mail : ilovmi@chungbuk.ac.kr  
\*\* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 교수 · E-mail : chung@chungbuk.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 충북대학교 환경공학과 대학원 박사과정 · E-mail : mswhdqud@hanmail.net

되는 탁수는 장기적으로 하류 하천의 수질 및 수생태계에 영향을 줄뿐만 아니라, 탁수와 함께 유입하는 높은 농도의 영양염류는 저수지 내 부영양화와 조류의 수화현상을 유발하는 원인으로도 보고되고 있다(정세웅, 2004; 한국수자원공사, 2000).

강우-유출 과정에서 저수지 유입수는 유역과 하상으로 부터 유입된 다량의 토사와 입자상 물질들을 포함하고 탁한 밀도류의 형태로 저수지로 유입된다. 탁수는 전이구간에서 하천 특성의 운동 에너지가 소멸하면서 침강류(Plunge flow)로 변하여 저수지 내의 동일 밀도 층을 따라 이동한다(Fischer et al., 1979; Alavian et al., 1992; Chung and Gu, 1998). 성층화된 저수지에서 탁수 거동 해석은 정확한 수온 성층구조 해석과 더불어 하천 밀도류의 거동 해석, 그리고 부유입자의 동력학적 이송 해석에 대한 신뢰도가 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 소양호를 연구 대상 지역으로 선정하여 2005년과 2007년 수문 사상을 바탕으로 2차원 횡방향 평균 수치 모형을 구축하여 수온 성층 구조의 재현성을 평가하였다. 부유입자의 동력학적 이송 해석을 위해 3개의 수치모형을 구축하여 적용성을 평가하였다.

## 2. 탁수 거동 수치 모형 구축 및 결과

### 2.1 대상 지역 및 입력 자료 구성

탁수 장기화 문제가 발생했던 소양호를 연구 대상 지역(Fig. 1)으로 수치 모형의 유한 차분 격자를 구축하였다. 격자는 저수지 지형 실측자료를 사용하여 수평방향으로 500 m 간격의 138개 Segment와 수직 방향으로 1 m 간격의 최대 134개 Layer로 Fig 2와 같이 구성하였다. 지형 자료의 신뢰성을 확인하기 위해 모형에서 계산된 저수지 수위별 저수용량과 실측자료를 비교하여 AME(Absolute Mean Error), RMSE (Root Mean Square Error)을 산정하였다. AME와 RMSE 값은 각각  $48.63 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,  $55.90 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 총 저수용량에 약 2%의 오차를 보였다.

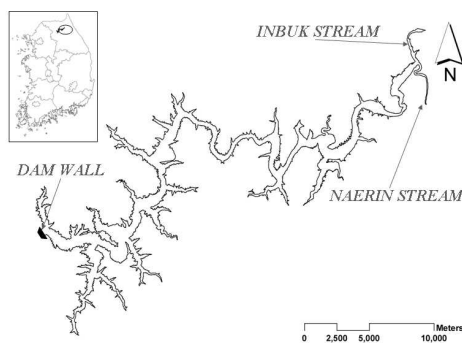


Fig 1. Layout of Soyang reservoir

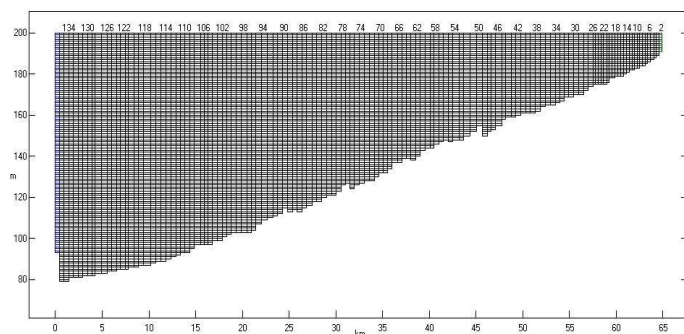


Fig 2. Grid system based on bathymetry data

### 2.2 입력 자료와 탁수 거동 예측 모형

#### 2.2.1 입력 자료의 구성

모의 대상 연도는 2005년, 2007년의 유량, 수질, 기상 등의 자료를 수집하여 적용하였다. 2005년 수문사상은 수온 성층 구조의 재현성과 모형의 매개 변수의 기본적 보정을 위해 사용하였고, 2007년 수문사상은 수온 성층 구조의 재현성을 확인 및 유입 부유입자 거동을 통해 탁수 예측 모형의 적용성 평가에 활용하였다. 유입수 수온 경계 조건의 경우 사구미교 지점에서 실측한 수온을

기준유량 200 m<sup>3</sup>/s, 300 m<sup>3</sup>/s 및 400 m<sup>3</sup>/s를 이용하여 다중회귀분석을 수행한 결과를 바탕으로 기온( $T_a$ ), 이슬점온도( $T_d$ ), 유량( $Q$ )에 대한 수온( $T_w$ ) 추정식을 산정하여 적용하였다. 유입수 SS 농도는 유입 유량과 측정된 SS 농도를 회귀 분석하여 유입 유량이 높은 경우 SS 농도의 비선형 증가를 고려하여 회귀식을 사용하였다. 댐 내 SS-탁도 관계는 소양강댐 취수탑 부근에서 실측한 SS 농도와 탁도를 회귀 분석하여 적용하였다(한국수자원공사, 2007). 기상 자료는 기온, 이슬점 온도, 풍향, 풍속, 운도로 각각의 기상자료는 이슬점 온도, 운도는 춘천 기상대 자료를 사용하였고, 풍향, 풍속, 기온 자료는 저수지 유역 내 위치한 양구 자동기상관측소(AWS) 자료를 이용하였다.

### 2.1.2 탁수 거동 예측 모형 구축

본 연구에서 3개의 탁수 거동 모형을 고려하였다. 첫 번째 탁수 거동 모델(TM-1)에서는 한국수자원공사(2007)의 연구를 바탕으로 탁도 유발 물질을 단일 입경( $d = 10 \mu\text{m}$ )의 SS로 가정하고, 침강속도는 댐 축 앞에서 실측한 수심별 탁도로 보정하여 0.55 m/d를 사용하였다. 그리고 두 번째 모델(TM-2)에서는 상류 유입 지점 시료의 입경분포 실험결과를 참고하여 SS를 입경 분포에 따라 3개 그룹으로 구분하였다. Stokes의 침강속도 산정식에서 입자 형상과 거칠기를 고려한 형상계수를 적용하여(식(2)) 시행착오 방법으로 침강속도를 보정하였다. 세 번째 탁수모델(TM-3)에서는 저수지내 탁도의 수직 분포와 방류수의 장기 탁도 보정을 위해 탁수에 포함된 부유물질 중 유기물 성분의 분해에 따른 탁도 저감효과를 1차 반응상수로 매개 변수화(식(3))하여 수정된 물질이송 지배방정식(식(1))을 적용하였다. TM-3 모형에 적용된 SS 관련 매개변수는 Table 2에 나타내었다.

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( BE_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( BE_x \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) - v_s \frac{\partial \Phi}{\partial z} - k_a \Phi \quad \text{식 (1)}$$

$$v_{si} = \frac{gd_s^2}{18\mu} (\rho_s - \rho_w) \times \gamma_s \quad \text{식 (2)}$$

$$k_a = a_0 \times \lambda_a \quad \text{식 (3)}$$

여기서,  $\phi_i$ 는 SS<sub>i</sub>의 농도(mg/L),  $v_{si}$ 는 침강속도(cm/s),  $g$ 는 중력가속도 (981 cm/s<sup>2</sup>),  $\rho_s$ 는 입자의 밀도 (2.65 g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_w$ 는 물의 밀도 (1.00 g/cm<sup>3</sup>),  $\mu$ 는 동점성계수(cm<sup>2</sup>/s),  $d$ 는 입자의 유효입경(cm),  $\gamma_s$ 는 형상계수 이다.

Table 2. Classification of SS particles and relevant diameter, attenuation rate

Items	Diameter( $\mu\text{m}$ )	$a_0$ (%)	$\lambda_a$ (d <sup>-1</sup> )	$k_a$ (d <sup>-1</sup> )
Group 1	1.635	20	0.08	0.016
Group 2	7.33	20	0.08	0.016
Group 3	24.05	20	0.08	0.016

## 2.3 모의 결과

### 2.3.1 수온 성층 구조의 재현성

다항목 수질 측정기(YSI)로 댐 앞에서 측정된 수심별 수온과 모의 수온을 비교 Table 3에 제시하였다. 수온 성층 구조의 모의값과 실측값의 통계량을 AME, RMSE로 평가 하였고, 모델의 수

은 성층 구조와 밀도류 거동에 대한 예측 신뢰도는 높은 것으로 평가 되었다.

Table 3. Evaluation of model performance for water temperature profiles at the dam site

Items	2005		2007	
	AME(°C)	RMSE(°C)	AME(°C)	RMSE(°C)
Average	0.527	0.747	0.808	1.259
Maximum	1.429	1.993	1.397	2.081
Minimum	0.068	0.092	0.321	0.489

### 2.3.2 시공간적 탁수 거동 결과

탁수 거동 예측 모형의 모의 값과 실측 자료를 비교한 결과와 통계 값은 Fig 3과 Table 4에 제시하였다. 각 탁수 거동 예측 모형에서 홍수 사상 발생한 후 초기 유입 SS 농도가 댐 앞 지점까지 도달하는데 걸리는 시간이 늦게 모의 되었다. 초기 유출수의 쓸림현상(wash out)이 유입 SS 농도를 추정할 SS-유량 관계식에 반영되지 않았기 때문이다. TM-1 모형에서는 취수 위치 이하의 저수지 구역(EL. 130 m ~ EL. 150 m)에서 높은 농도의 SS가 모의 되고 TM-2 모형의 경우 3개 그룹 중 입경이 가장 작은 Group 1의 SS가 지속적으로 잔류하여 SS 농도가 과대평가 되었다. TM-3 모형은 기존의 TM-1 과 TM-2 모형의 한계점으로 지적된 장기 탁도 모의에서 과대평가 되는 경향을 저감하기 위해 유기물 함량과 분해 속도를 1차 반응 상수로 매개 변수화하여 적용하였다. 탁수 발생 후 최초 측정값과 비교할 경우 TM-2 모형과 비슷한 경향을 보였으며, 이후 홍수 사상으로 인한 저수지내 탁수 분포는 TM-1 모형보다 TM-2 모형이 수심별 탁도 분포에 대한 오차가 낮고, 탁수 중심 층의 최고 탁도 지점에서 오차는 크게 나타났다. TM-3 모형의 경우 홍수기 이후(JDAY 274일)부터는 수심별 실측 탁도 분포와 모의 탁도 분포는 작은 오차를 나타내었다. TM-2 모형에 비해 TM-3 모형이 수심별 탁도 분포에 대한 중심축 탁도가 저평가되는 경향을 보였지만 저수지 내 잔류 탁도에 대한 영향 부분에서는 개선된 결과를 나타내었다.

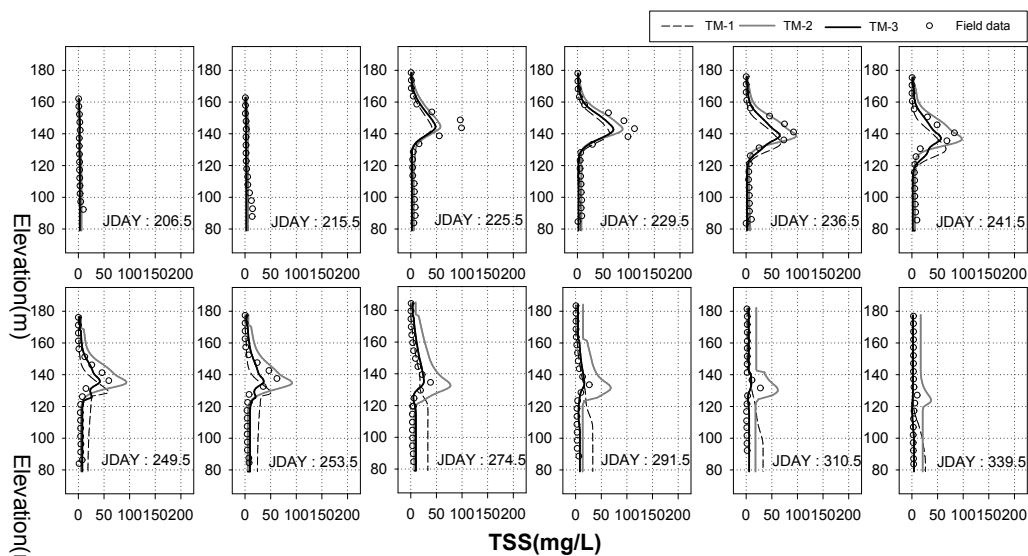


Fig 3. Comparison of SS concentration profiles at the dam site on 2007

Table 4. Evaluation of model performance for SS concentration profiles at the dam site

Items	TM-1		TM-2		TM-3	
	AME(℃)	RMSE(℃)	AME(℃)	RMSE(℃)	AME(℃)	RMSE(℃)
<b>Average</b>	<b>7.210</b>	<b>10.682</b>	7.474	9.592	<b>4.461</b>	<b>6.426</b>
<b>Maximum</b>	16.749	21.128	21.130	22.578	10.533	18.517
<b>Minimum</b>	1.435	1.756	1.033	1.434	0.990	1.766

### 3. 결 론

소양호를 연구 대상으로 2005년과 2007년 수문 사상에 대한 2차원 횡방향 평균 수치 모형을 구축하였고, 수온 성층 구조를 잘 재현하여 밀도류 거동의 신뢰도를 확인하였다. 탁수 거동 해석에 있어서 탁수 유발 물질을 단일 SS로 가정한 TM-1 모형과 입경 분포를 고려하여 3개의 SS 그룹으로 구성된 TM-2 모형을 구축하여 비교한 결과 탁수 중심축 최고 탁도에 대한 예측 성능은 TM-2 모형이 우수한 결과를 나타냈었다. 하지만, 장기 탁수 모의 시 저수지 수중 잔류 SS가 지속적으로 높게 나타나 중층 탁도를 과대평가 하는 경향을 보였다. 유입 부유물에 함유되어 있는 유기물의 분율과 분해속도를 매개변수화 하여 보정한 TM-3 모형이 장기 탁수 모의 시 개선된 결과를 보여주었다. 본 연구 결과는 저수지 탁수 밀도류 해석 및 운영 시스템에 활용 될 수 있으며, 선택 취수 설비 등의 수리 구조물의 영향 평가에 활용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 정세웅(2004). 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링, 대한환경공학회지, 제26권 제9호, pp. 970-978.
2. 한국수자원공사(2000), 댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발.
3. 한국수자원공사(2007), 다목적댐(소양강댐 등 4개댐) 탁수저감 방안 수립 용역 보고서(소양강댐).
4. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C. Y., Imberger, J., and Brooks, N.H.(1979), *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York, NY.
5. Alavian, V., Jirka, G.H., Denton, R.A., Johnson, M.C., and Stefan, H.G.(1992), Density currents entering lakes and reservoirs. *J. Hydr. Eng.*, 118(11), pp. 1464-1489.
6. Chung, S.W., and Gu, R.(1998), Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir. *J. Hydr. Eng.*, 124(7), pp. 704-711.