

부유물질 크기분포를 고려한 저수지 탁도 예측 모델 개선

Improvement of Reservoir Turbidity Prediction Model with Considering Particle Sizes of Suspended Sediments

이흥수*, 정세웅**, 류 환***, 정희영****

Heung Soo Lee, Se Woong Chung, Huan Liu, Hee Young Jeong

요 지

댐 저수지에서 지속적인 탁도를 유발하는 물질은 쉽게 침강되지 않는 20 μm 이하의 작은 부유물질(SS)이며, 가을 수직혼합 시기까지 침강되지 않은 부유물질은 다시 재부상하는 경우도 발생한다. 저수지내 탁도의 장기 체류는 수자원 이용과 하류하천의 수생태계에 다양한 문제를 야기하고 있어 일부 댐에서는 실시간 탁도 감시 장치를 설치하고 취수설비를 개선하는 등의 탁수저감 대책의 노력을 기울이고 있으나, 시설의 최적 운영을 지원할 수 있는 탁수 거동 및 탁도 예측에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히, 탁도는 물 속에 존재하는 부유물질의 광학적 특성(light attenuation)을 나타내는 지표로써 SS와는 물리적인 물성이 달라 실시간 계측자료(탁도)와 모델의 모의 변수(SS)가 다른 문제점 때문에 모델링에 어려움이 있었다. 지금까지 탁도 모델링은 대부분 탁도와 SS의 상관관계를 이용하는 방법을 사용하였다. 그러나 이 방법은 탁도-SS 관계가 실측지점과 입자크기분포에 따라 달라지는 특성 때문에 변환과정에 예측결과의 불확실성이 내재한다는 지적을 받아왔다. 본 연구의 목적은 저수지로 유입한 탁수의 보다 과학적이고 정확한 탁도 예측을 위해 탁도를 유발하는 부유물질의 입자크기 분포와 공간적으로 변하는 탁도-SS의 상관관계를 고려할 수 있는 표준화된 탁도 모델링 방법을 개발하고, 실측자료를 사용하여 제시된 탁도 모델링 방법의 예측 성능을 평가하는데 있다. 부유물질의 이송-확산-침강 모델은 2차원 횡방향 평균 수리 모델과 연결(coupling)되어 수행되며, 저수지 수면을 통한 열 교환, 바람과 바닥 조도에 의한 난류혼합과 성층해석, 하천 유입수의 저수지내 밀도류 유동, 그리고 입자 크기별 부유물질의 독립침강을 해석한다. 부유입자의 크기분포와 공간적으로 서로 다른 탁도-SS 관계를 고려한 탁도 예측모델은 기존의 탁도를 종속변수로 사용한 예측 방법 또는 단일 입자크기를 사용한 모델보다 개선된 모의결과를 보여주었다. 본 연구에서 제시된 탁도 예측 알고리즘은 실시간 탁도감시와 예측 모델링, 그리고 댐 방류수 탁도 관리를 위한 선택취수 설비의 운영을 위한 의사결정지원시스템에 적용 가능할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 저수지, 탁도 모델링, 탁수, 부유물질, 탁도-SS 관계

1. 서 론

탁도는 SS에 비해 측정비용이 저렴하며, 센서를 이용한 현장측정이 용이하기 때문에 수환경 모니터링 및 수질 평가 항목으로도 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 탁도와 SS는 물리적으로 다른 의미를 가지고 있으며, 측정하는 기기의 종류, 위치, 부유물질의 물리적 특성에 따라 다른 관계를 보일 수 있다. 탁도는 부유입

* 정희원 · 충북대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : hslee@chungbuk.ac.kr

** 정희원 · 충북대학교 환경공학과 부교수 · E-mail : schung@chungbuk.ac.kr
baobeiyitouzhu@hotmail.c

*** 비회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : om
lullurarrahaha@hanmail.ne

**** 비회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : t

자의 크기분포, 비표면적, 전기적 특성, 빛의 산란 특성에 영향을 받으므로, 동일한 SS 농도에 대해서도 탁도 값은 다르게 나타날 수 있다.

지금까지 탁도 모델링은 대부분 탁도와 SS의 상관관계를 이용하는 방법을 사용하였다. 그러나 이 방법은 탁도-SS 관계가 입자크기분포에 따라 달라지는 특성 때문에 탁도를 SS로 변환하는 과정에서 모델 변수값에 불확실성이 포함된다는 지적을 받아왔다(Gelda and Effler, 2007). 따라서 탁도를 유발하는 부유입자의 물리 화학적 특성을 정확히 모델에 반영하기 위해서는 입자크기별로 세분화된 부유입자 그룹별 SS 농도를 모델의 종속변수로 채택하여야 하며, 탁도-SS의 공간적 변동 특성을 고려하여 탁도를 예측하여야 한다. 본 연구의 목적은 보다 과학적이고 정확한 저수지 탁도 거동 예측을 위해 탁도를 유발하는 유입 부유물질의 입자크기 분포와 공간적으로 변하는 탁도-SS의 관계를 고려할 수 있는 표준화된 탁도 모델링 방법을 개발하고, 실측 자료를 사용하여 제시된 탁도 모델링 방법의 예측 성능을 평가하는데 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상

모델의 적용 대상인 대청호는 금강유역의 최대상수원으로써 용수공급, 홍수피해 경감 및 수력발전 등을 담당하고 있다. 용수공급을 위한 취수탑은 저수지내 추동수역과 문의수역에 2개가 있고, 대청호 직하류 조정지점에 2개가 있다. Fig. 1에 한국수자원공사의 월간측정과 주간측정지점인 장계교(R1), 대정리(R2), 회남교(R3) 및 댐 앞(R4)과 청주와 대전에 상수원수를 취수하는 문의, 추동 취수탑을 나타내었다. 대청호 상류인 금강 유입수의 탁도와 수온 측정을 위한 실시간 계측 장치(YSI6920)는 2004년 6월 말부터 2006년 10월까지 댐 축으로부터 89 km 상류 지점에 설치하여 매 시간마다 자료를 수집하였다.

본 연구에 사용한 수리모델의 수치격자와 매개변수는 Chung et al.(2006)의 선행연구에서 구축한 검증된 입력자료를 사용하였다. 수치 격자구성은 실측 저수지 지형자료를 근거로 5개의 branch와 64개의 segments, 69개의 layers로 구성하였으며(Fig. 1), 지형자료의 정확도를 검증하기 위해 저수지 수위-용량 곡선과 수위의 관측값과 모의값을 비교하였다. 모델의 경계조건인 저수지 유입량과 방류량 자료는 국가수자원관리종합정보 시스템(www.wamis.go.kr)에서 추출하여 사용하였다. 모의기간인 2004년 6월 1일~9월 30일 중 실시간 유입 수 수온과 탁도 관측이 이루어진 6월 28일부터 자료는 금강본류 상류 옥천지점에서 1시간 단위로 실측한 자료를 사용하였으며, SS농도는 실측 탁도를 SS-탁도 관계로 변환하여 산정하였다. 실측자료가 없는 기간(6월 1일~6월 27일)의 수온은 실측수온과 기상자료의 회귀식을 사용하여 산정하였으며, SS 농도는 저수지 유입량과 SS 부하량 관계식을 이용하여 산정하였다.

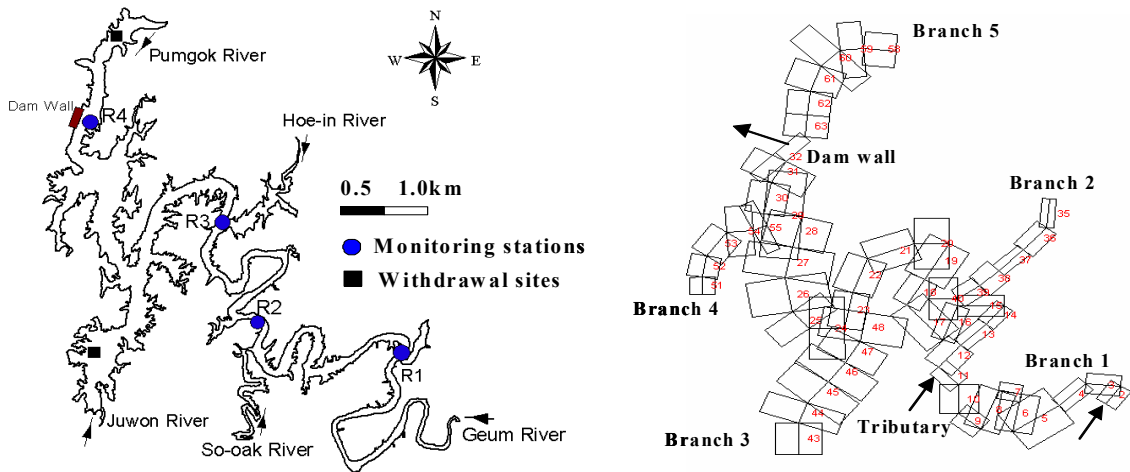


Fig. 1. Layout of Daechong Reservoir, locations of monitoring stations(left), and segmentation for simulations(right)

2.2 모델의 적용 및 평가

수리해석 모델은 저수지 수체를 흐름방향과 수심방향의 2차원으로 해석하고, 성층화 현상 및 밀도류 유동 해석이 용이한 CE-QUAL-W2 모형(이후 W2)을 사용하였다(Cole and Wells, 2004). W2 모델은 횡방향으로 완전혼합을 가정하기 때문에 폭이 좁고 길며, 수심이 깊은 우리나라 저수지 수체에 매우 적합하다(정 등, 2005). W2 모델은 운동방정식, 연속방정식, 수위, 수압, 밀도 및 이송-확산 방정식의 횡방향으로 평균화된 유체 운동방정식을 다양한 유한차분 수치해석기법을 사용하여 계산한다(Chung and Gu, 1998).

W2 모델은 SS의 침강속도를 고정된 상수값으로 가정하므로, 성층화된 저수지에서 수심별로 변하는 수온의 영향을 고려하지 못하는 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 기존 모델의 침강속도 알고리즘을 수정하여 Stokes식에 의해 입자의 침강속도가 시공간적으로 계산되도록 수정하였다. 본 연구에서 사용한 부유입자의 2차원 횡방향 평균 이송-확산-침강 모델의 지배방정식은 식 (1)과 같다. 이 모델은 입자의 크기별 침강속도의 차이를 고려할 수 있으며, 성층화 저수지에서 수심별 수온변화가 침강속도에 미치는 영향을 반영할 수 있도록 개선된 방법에 해당한다.

$$\frac{\partial BSS_i}{\partial t} + \frac{\partial UBSS_i}{\partial x} + \frac{\partial WBSS_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_x \frac{\partial SS_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_z \frac{\partial SS_i}{\partial z} \right) - v_{s_i}(x, z) \frac{\partial SS_i}{\partial z} \quad (1)$$

여기서, SS_i = laterally averaged concentration of SS group i, g/m^3 , E_x = longitudinal SS dispersion coefficient, m^2/sec , E_z = vertical SS dispersion coefficient, m^2/sec , α = the fraction of organic compounds in suspended solids that cause turbidity in water.

W2 모델은 대기와 수면의 열 교환 플럭스를 모의하기 위해 대기 기온과 이슬점 온도, 풍향과 풍속, 태양의 단파복사량과 온도 자료를 필요로 한다. 풍향과 풍속은 문의 먼사무소에 설치한 자동기상관측소(AWS) 자료를 사용하였으며, 나머지 자료는 대전기상대의 관측자료를 수집하여 사용하였다. 저수지 수리와 수온에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수에 대한 민감도 분석과 보정과정에 대한 상세한 내용은 선행연구(Chung et al., 2006)에 제시되었다. SS입자 모델에 필요한 SS 크기별 그룹 분율과 각 그룹입자의 대표직경은 2005년과 2006년 홍수기 동안 대청호 내 4개 지점(R1, R2, R3, R4)의 중층 탁수층에서 채수하여 실험한 입도분석 결과를 사용하였다. 모의기간인 2004년과 2005-2006년은 홍수규모와 수문사상이 유사하여 이 기간 동안 저수지로 유입한 SS의 물리적 물성은 비슷한 것으로 가정하였다. 실험으로 결정하지 않은 입자의 형상과 거칠기, 그리고 밀도의 불확실성을 고려하기 위해 입자의 형상 보정계수값(γ_s)을 도입하고 모의결과와 실측 탁도값을 비

교하여 γ_s 를 결정하였다. 본 연구에 사용된 SS 그룹별 입경, 분율, 그리고 보정계수는 Table 1과 같다.

Table 1. Classification of SS particles and relevant fraction, density, and particle from correction factor

Class	Diameter (μm)	Fraction (%)	ρ_s (kg/m^3)	γ_s
SS ₁	1.0	20	2,650	0.41
SS ₂	5.0	50	2,650	0.41
SS ₃	20.0	30	2,650	0.47

모델의 오차크기와 신뢰도를 평가하기 위해 AME(absolute mean error), RMSE(out Mean Square Error)를 이용하였다. AME(절대평균오차)는 실측값과 모의값 잔차의 절대값을 산술평균한 값이고, RMSE(평균제곱오차의 평방근)는 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균제곱오차를 구하여 제곱근을 구한 것으로 단위가 실제 변량의 단위와 같고 그 값이 0에 가까울수록 모의결과의 정확도가 높고 모델의 성능이 우수하다는 것을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SS 입자크기별 침강특성

성층 저수지에서 입자크기별 침강특성을 평가하기 위해 가상 수치모의를 실시하였다. 모델의 적용기간은 2004년 6월 1일부터 8월 31일까지 3개월간이며, 모의조건은 유입수와 유출수에 의한 영향과 바람에 의한 수직 난류 혼합효과를 고려하지 않음으로써 부유입자의 침강에 대한 특성만 비교하였다. 수치모의 실험을 위한 SS 농도의 초기조건은 저수지내 입도분석 결과를 고려하여 입경 1 μm (SS₁), 5 μm (SS₂), 20 μm (SS₃)의 3개 그룹으로 구분하였으며, 각각의 그룹에 대하여 저수지 수면으로부터 7 m 수심 구간에 100 mg/L의 일정한 농도가 분포하는 것으로 가정하였다. Fig. 2는 각 SS 입자 그룹의 수직농도 분포와 TSS의 농도 분포를 모의 경과시간 10일, 30일, 60일, 90일별로 각각 비교한 것이다. 모의결과, 부유입자의 크기에 따라 저수지내 수직 농도 분포가 매우 상이함을 보여준다. 가장 큰 입경을 가진 SS₃는 10일 경과 후 대부분 바닥에 퇴적한 상태이며, R3와 R4의 수체에서는 전혀 나타나지 않고 있다. 반면에 SS₂는 시간이 경과하면서 차츰 침강하여 중층에 위

치하였으며, 가장 작은 입경을 가진 SS₁은 표층에 지속적으로 잔류하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 저수지에서 정확한 TSS의 농도 분포를 모의하기 위해서 입자의 크기분포를 고려한 그룹화가 필요하며, 각 그룹의 크기와 분율을 파악하기 위한 입도분석이 필요함을 시사한다.

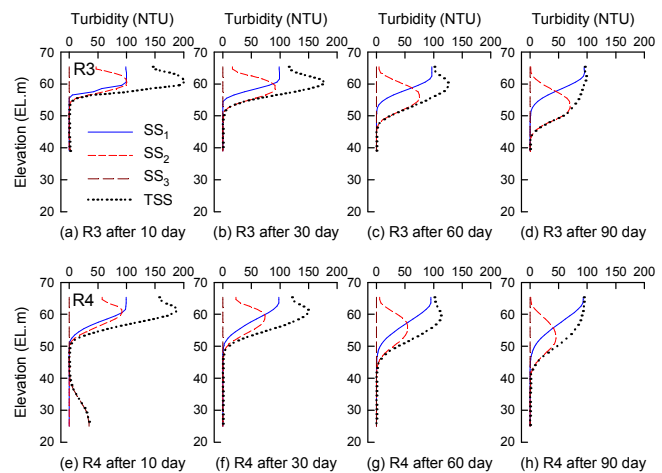


Fig. 2. Profiles of simulated ISS groups and TSS with RUN1 model

3.2 탁도 모델의 성능 검증

Fig. 3은 6월 중순 이후부터 9월 초순까지 회남수역(R3)과 댐앞지점(R4)에서 실측한 탁도의 수직분포 자

료와 모의결과를 비교하여 제시한 것이다. RUN1은 SS를 크기에 따라 3가지 그룹으로 구분하여 모의한 것이며, RUN2는 대표입경 5 μm 의 단일 SS로 모의한 것이다. RUN3는 RUN2와 동일한 반면, 입자의 침강속도를 형상계수를 고려하지 보정하지 않고 Stokes 식에 의해 산정한 1.92 m/d를 직접 사용한 결과이다. 모의결과는 총 SS로 합산하고 해당 지점에서의 탁도-SS 관계로부터 다시 탁도로 변환하여 실측탁도와 비교하였다.

R4에서 RUN1은 RUN2보다 부유물질의 수직분포 예측성능에 있어서 훨씬 개선된 결과를 보여주고 있다. RUN3은 탁수가 유입한지 일주일 후에 대부분의 입자가 수온약층 아래로 하강하고 있어 실측값과 다른 양상을 보였다. RUN1은 탁수가 유입한 직후 최고 SS 농도값과 탁수층의 수직분포를 잘 모의하였으나, 235.5일 이후부터 급격하게 감소하는 실측 최고 SS 농도값을 잘 반영하지 못하는 것으로 나타났다. R4에서 다중 SS로 모의한 RUN1의 AME는 23.2~41.9 mg/L(평균 32.2 mg/L)로써 단일 SS로 모의한 RUN2의 32.3~65.5 mg/L(평균 51.7 mg/L)보다 오차의 평균이 37.8% 감소하였다. RMSE도 RUN1은 RUN2보다 평균 37.0% 감소한 것으로 나타났다(Table 2). 따라서 부유입자의 동력학과 탁수 거동 예측의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 입경분포와 입자크기별 침강속도를 고려한 모의가 중요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 탁도를 유발하는 부유물질의 입자크기 분포와 공간적으로 변하는 탁도-SS의 관계를 고려할 수 있는 표준화된 탁도 모델링 방법을 개발하고, 실측자료를 사용하여 제시된 탁도 모델링 방법의 예측성능을 평가하였다. 부유입자의 크기분포를 3개의 그룹(1, 5, 20 μm)으로 나누어 모의한 결과(RUN1)는 하나의 대표입경 (5 μm)으로 모의한 것(RUN2)보다 실측값과의 오차를 37%이상 줄일 수 있었다. 또한, 부유입자의 침강속도 산정시 입자의 형상계수를 보정하지 않고 Stokes 식으로 산정한 침강속도를 직접 사용할 경우 (RUN3), 모델은 탁도의 실측 수직분포를 제대로 반영할 수 없는 것으로 나타났다.

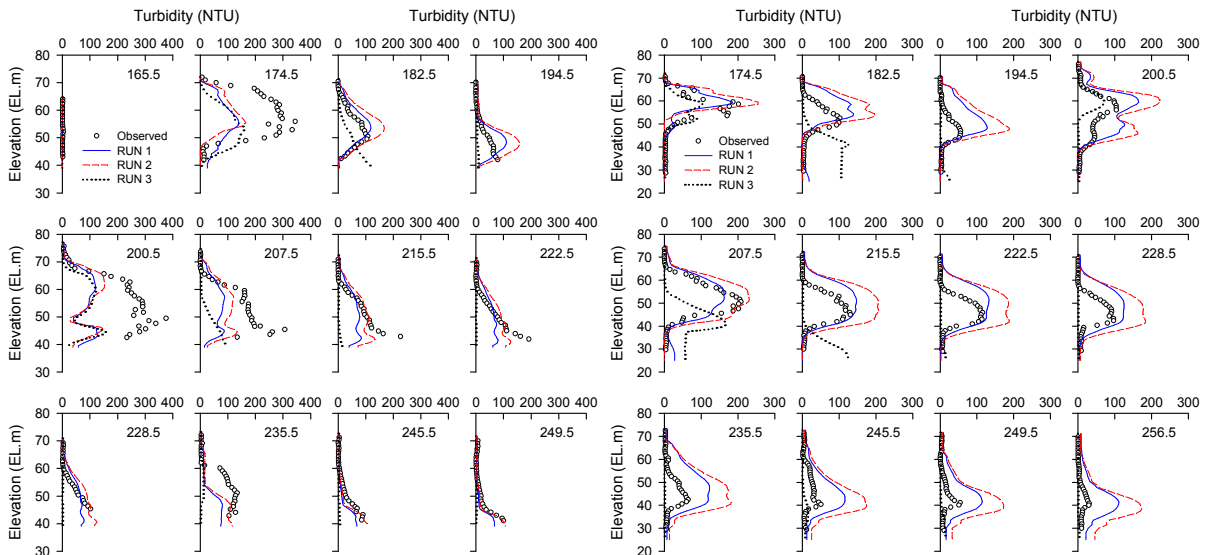


Fig. 3. Comparisons of simulated and observed turbidity profiles for difference time at R3(left) and R4(right)

Table 2. Statistics showing the performance of different particle dynamics models at R4

Julian day		174.5	182.5	194.5	200.5	207.5	215.5	222.5	228.5	235.5	245.5	249.5	256.5	Mean
RUN1	AME	23.3	31.5	34.1	34.2	23.2	30.9	31.4	34.6	41.9	33.0	33.1	34.7	32.2
	RMSE	44.7	43.5	46.4	44.8	29.2	42.9	45.0	44.4	50.4	42.3	42.2	43.8	43.3
RUN2	AME	32.3	44.3	50.9	53.6	33.3	60.4	57.7	59.0	65.5	54.2	53.8	55.4	51.7
	RMSE	53.6	65.7	70.5	71.3	45.8	76.2	73.5	73.2	80.4	70.5	70.3	74.0	68.8

참 고 문 헌

1. 정세웅, 오정국, 고익환(2005). CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간적분포 모의, 한국수자원학회 논문집, 제38권 제8호, pp. 655-664.
2. Chung, S. W., and Gu, R.(1998). Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir. J. Hydr. Eng., 124(7), pp. 704-711.
3. Chung, S. W., Oh, J. K., and Ko, I. H.(2006). Calibration of CE-QUAL-W2 for a monomictic reservoir in monsoon climate area. Water Sci. & Tech., 54(12), pp. 29-37.
4. Cole, T. M., and Wells, S. A.(2004). CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.2 User Manual, Instruction Report EL-03-1, U.S. Army Corps of Engineers. USA.
5. Gelda, R. K., and Effler, S. W.(2007). Modeling turbidity in a water supply reservoir: Advancements and issues. J. Environ. Eng., 133(2), pp. 139-148.