저수지의 장기 고탁수 사상에 적합한 탁수 예측 모형

Prediction Model suitable for Long-term High Turbidity Events in a Reservoir

홍준영* · 정석일** · 김병현***

Hong, Junyoung*, Jeong, Seokil**, and Kim, Byunghyun***

Abstract

The turbidity events caused by Typhoon “Kong-rey” in 2018 were selected as the measured turbidity data required to build the CE-QUAL-W2 model. The turbidity, water temperature, climate data, and discharge measured in the main dam were used as input data for numerical simulations. To ensure the reliability of the parameters, the turbidity events caused by Typhoon “Mitak” in 2019 were additionally selected, and optimal parameters for water temperature and other parameters were selected using case by case simulation. The analysis showed that the error rate and reliability were relatively good as the turnover phase approached through the turbidity rise and fall periods. The results of the verification of the maximum and average turbidity were better than those of the verification of the period-specific simulation. Thus, the models constructed in this study were determined to be suitable for the flood season.

Key words : CE-QUAL-W2, Turbidity, Turbid Water, Measurement Data, Reservoir

요 지

CE-QUAL-W2 모형 구축에 필요한 실측 탁도 자료로 2018년 태풍 ‘콩레이’에 의해서 발생한 탁수 사상을 선정하고 당시 유입 지류와 본댐에서 측정한 탁도, 수온, 기후자료, 방류량 등을 수치모의의 입력자료로 활용하였다. 매개변수의 신뢰도를 확보하고자 2019년 태풍 ‘미탁’에 의해서 유발된 탁수 사상을 추가로 선정하였으며, 수온 및 기타 매개변수에 대하여 Case별로 시뮬레이션을 수행하여 최적의 매개변수를 선정하였다. 분석 결과 탁도 상승기와 탁도 하강기를 거쳐 전도 현상 발생 시기가 다가올수록 오차율과 신뢰도가 상대적으로 양호한 것으로 나타났고, 최고 탁도와 평균 탁도에 대해서 검증한 결과는 모의 기간별 검증 결과보다 더 양호한 결과를 나타내었으므로 본 연구에서 구축한 모형은 홍수기에 적합한 모형으로 최종 판단하였다.

핵심용어 : CE-QUAL-W2, 탁도, 탁수, 실측 데이터, 저수지

1. 서 론

하절기 홍수기간 집중강우로 인해 발생한 유사가 저수지로 유입되면, 저수지 표수층 하부에 고밀도 탁수층을 형성하게 되고, 만약 이를 적기에 배제하지 못할 경우에는, 고밀도 탁수층이 수평 방향 확산 현상과 연직 방향 전도 현상으로 인해 저수지 전영역에 분포하게 된다. 댐과 같은 저수지에서

는 정체된 탁수가 장기간 하류로 방류됨에 따라, 이로 인한 수자원 이용량의 감소, 수생태계 영향, 경관의 저해, 하류 지역 정수장의 수처리 비용 증가 등 많은 사회적인 문제를 유발시킬 수 있다.

장기간에 걸친 탁수 유입 저감대책 시행에도 불구하고 임하댐 등 일부 다목적댐에서 탁수 발생이 지속되는 이유 중에는 지류를 통해 유입되는 탁수에 대한 정확한 실측

*정회원, K-water 낙동강유역본부 차장(E-mail: jyhong@kwater.or.kr)

Member, Deputy Director of Nakdong River Watershed Headquarters of K-water

**K-water 낙동강유역본부 선임연구원(E-mail: si.j@kwater.or.kr)

Senior Researcher, Nakdong River Watershed Headquarters of K-water

***교신저자, 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-53-950-7819, Fax: +82-53-950-6564, E-mail: bhkmc@knu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyungpook National University

정보가 부족했던 것도 주요한 사유라고 판단된다. 태풍 등 특정의 단기 탁수 사상(Event)에 대해서만 실측 자료가 제한적으로 축적되어 있다 보니 그동안 탁수 거동에 대한 체계적이고 장기적인 분석을 시행하기에는 어려움이 많았다. 그러나, 최근에 와서 수질 자동측정장치가 지속적으로 확대 설치되고 있고, 이를 통하여 실시간으로 지류와 저수지 내 탁도를 계속할 수 있는 자동화 시스템이 구축됨에 따라, 실측 자료를 기반으로 한 탁수 장기 거동분석이 가능하게 되었다.

저수지 내 탁수의 유동과 계절별 탁도 변화 양상을 분석하기 위한 수리 또는 수질 예측 모형으로는 WQRRS, WASP, CE-QUAL-W2 모형 등이 있다. 이중 CE-QUAL-W2 (또는 W2) 모형은 저수지나 호수의 수리학적 특성을 2차원적으로 해석할 수 있고 수질도 모의할 수 있으며, WASP의 단점을 보완할 수 있는 모형으로서, 수체의 폭이 좁고 긴 수체에서 계절에 따른 수질 변화를 예측하는데 지금도 널리 이용되고 있다. CE-QUAL-W2 모형은 대상 수체를 흐름방향과 연직 방향으로 구분하여 폭방향으로 평균화한 유속, 수온, 수표고 등을 모의하고 이들의 변화에 따른 수질 변화를 모의한다. 또한, 점원 및 비점원 유입과 수문 방류, 취수, 월류 등 실제와 유사한 형태의 유입 및 유출에 대한 표현이 가능하며, 장기간에 걸친 시계열 단위의 변화 모의도 가능하다.

CE-QUAL-W2 모형에 대한 연구를 살펴보면, Wass et al. (1997)은 부유물질(SS)과 탁도와와의 상관관계를 조사하였고, Debele et al. (2006)은 복잡한 하천 유역에서 상류 유역과 하류 유역 간의 수질 모델 결합에 대하여 연구를 수행하였으며, Lee et al. (2007)은 W2 모형을 활용하여 임하댐 선택배제 시설의 운영 효과를 분석하였다. Lee et al. (2008)은 용담댐과 임하댐 유역에서 HSPF와 연계한 저수지 탁수 현상 모형에 대한 연구를 진행하였고, Ha and Lee (2008)는 대청호에서의 저수지 수질해석을 위해 W2 모형을 적용한 바 있다. Kim and Kang (2013)은 CE-QUAL-W2 모형으로 합천댐에 발생하는 수온 성층, 탁수의 거동 및 수질을 예측하기 위하여, 수온 매개변수를 산정하는 과정에 대하여 연구를 진행하였다. An et al. (2014)은 SWAT과 CE-QUAL-W2 모형을 연계 적용하여 저수지로 유입되는 하천의 유량 및 탁수 발생량을 모의하고, 저수지 내 탁도 변화 및 부영양화 영향평가를 수행하여, 저수지의 수환경 변화를 전망하였다. Park et al. (2017)은 북한강 수계에 위치한 소양호와 하류 팔당호 구간을 대상으로 2차원 수리/수질 모형을 구축하고, 대규모 탁수 사상 발생에 따른 소양호 하류 댐 저수지군에서의 탁수 도달시간, 탁수 지속시간 등에 대하여 분석을 수행하였다.

본 연구에서는, 낙동강 유역의 댐 중에서 최근까지도 탁수 문제가 이슈화되고 있는 임하댐을 연구 대상으로 선정하여, 지류에서 유사가 유입된 이후 저수지 내에서 확산하는 과정을 2차원 모형을 이용하여 분석하고, 장기 시계열 실측 자료와 비교함으로써 임하댐의 고탁수 사상에 최적화된 탁도 예측 모형을 구축하고자 하였다. 2차원 모형으로는 인공호

수의 수질 모의에 자주 활용되는 CE-QUAL-W2 모형을 선정하였으며, 모의 대상으로 2018년 태풍 ‘콩레이’ 상륙 시 유발된 고탁수 사상을 선정하였다. 또한, 모형 구축에 필요한 최적 매개변수 선정을 위해서는 2019년 태풍 ‘미탁’ 상륙 이후 관측된 탁도 자료를 활용함으로써 탁수 모형의 신뢰도와 적합성을 높이하고자 하였다. 이와 같이 임하댐 고탁수 사상에 적합한 탁수 모형을 구축함으로써 향후 댐 운영관리자가 고탁수 유입 전·후 댐 방류량 결정을 포함한 댐 운영의 전반에 대한 의사결정을 하는데 가이드라인 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 방법

2.1 저수지 모형

CE-QUAL-W2 모형은 미공병단(U.S Army Corps of Engineers)에서 1986년 개발한 이래 지금까지 지속적으로 개선되어 오고 있다. Edinger and Buchak (1975)에 의해 개발된 원 모형은 Laterally Averaged Reservoir Model (LARM)으로 알려져 있으며, 지류가 없는 저수지에 최초로 적용되었다. 이어서, Generalized Longitudinal-Vertical Hydrodynamic and Transport Model (GLVHT)는 LARM 모형에 여러 지류와 하구 경계조건이 추가되어 발전하였고, 2020년 현재는 CE-QUAL-W2 Version 4.2.2까지 개발된 상태이다(Wells, 2020).

CE-QUAL-W2 모형은 2차원의 횡방향 평균화 수리·수질 모형으로서, 폭 방향의 수질이 균일하다고 가정한다. 상대적으로 길이 방향과 수심 방향으로 수질 변화가 크고, 폭이 좁은 긴 수체에 적합하다고 할 수 있다. 현재 CE-QUAL-W2 모형은 미 육군공병단(U.S Army Corps of Engineers), 미 개척국(USBR), 테네시 유역관리청(TVA) 등 미국의 주요 저수지 관리기관에서 저수지의 수질 관리를 위한 모형으로 광범위하게 활용되고 있다(Cole and Tillman, 1999; Cole and Tillman, 2001).

이렇게 다양한 장점이 있는 모형이기는 하나, CE-QUAL-W2 모형의 지배방정식은 횡방향 평균화를 고려하기 때문에, 횡방향으로 수질 변화가 큰 대규모 수체에는 적합하지 않다고 알려져 있으며, 수질을 모의함에 있어 극도로 복잡한 수질 현상을 계산식으로 변환하기 때문에, 수질 현상에 영향을 미치는 몇몇 인자가 포함되지 않을 수도 있다. 따라서, 모의 시작 전 과거 관측자료를 면밀히 분석하여 대상 수체의 상태를 최대한 정확하게 대변할 수 있도록 최적의 매개변수를 선정하는 데 신중을 기하여야 한다.

2.2 연구 유역

임하댐 중권역(1,976 km², 임하댐 하류 및 길안천 유역 포함)에 대한 토지 피복 특성을 분석한 결과, 토사 유실에 가장 큰 영향을 주는 농경지 비율이 약 15.0%로 나타났다

(WAMIS). 특히, 임하댐 상류 유역(1,361 km²)에 대한 토지 이용 현황 또한 산림(임야)과 농업용 토지(논, 밭)가 유역면적의 92%를 차지하고 있다(Table 1). 이러한 농경지 분포특성으로 인해 강우 발생 시 많은 토사가 하천으로 유입되는 것으로 판단되며, 이러한 토사 유입은 지질적인 특성이 함께 반영되어 저수지 고탁수로 연결된다는 점에서, 하천 주변의 농경지 분포는 많은 환경적 문제를 일으킬 가능성이 있다고 보아야 할 것이다.

탁수 발생의 근원을 추적하기 위해서 2019년 태풍 ‘미탁’ 상륙 이후 고탁도 발생 시기에 취수탑 지점에서 탁수 시료를 채수하였으며, 토양 시료로는 고탁수 유입이 관찰된 반변천 상류 78 km 문상교 지점, 상류 72 km 덕봉교 지점에서 2종류의 토양을 채취하였다(Fig. 1).

시료를 육안 관찰한 결과, 붉은색 또는 적갈색을 띠었으며 쉽게 풍화되는, 가는 미세입자로 구성된 황토로 추정되었고, 입도분석 결과(USDA, 美) 미립질이 풍부한 Silty Loam으로 나타났다(K-water, 2019). 이처럼 임하댐 상류 유역은 주로 백악기 퇴적암이 넓게 분포하여, 셰일(Shale) 등의 점토광물이 풍화에 의해 상당량 본류로 유입되었을 가능성이 크며 (Hwang and Jung, 2006), 유역지질, 토사유출량, 산사태, 점토광물, 침강시간 등을 평가항목으로 선정하여 탁수 발생 가능성에 대한 정량적 평가를 실시한 결과 매우 높은 수준으로 나타났다(Jung, 2010).

3. 저수지 탁도 예측 모형 구축

3.1 입력 데이터의 구축

CE-QUAL-W2 모형의 격자는 HEC-RAS 단면의 거리

간격과 동일하게 총 107개의 구획(Segment)으로 구분하였고, 깊이 방향으로로는 댐의 정상부 표고를 기준으로 70개의 수층(Layer)으로 구성하였다. 격자 구성 시 반변천(BR1)을 본류로 지정하고, 용전천(BR2)과 대곡천(BR3)을 반변천에 대한 지류로 처리하였으며, 각 지류에서의 유입을 고려하기 위하여 각각 가지(Branch)로 구성하였다(Fig. 2).

2018년 10월 1일부터 12월 5일까지 임하댐 저수구역 내 탁도 자동측정장치 중 반변천(광덕교), 용전천(청송)에서 측정한 유입수의 탁도와 수온의 시계열 자료를 탁도 모의를 위한 기초자료로 활용하였다. 반변천 상류의 탁도 관측지점인 광덕교(반변천 상류 29 km)와 용전천 상류의 관측지점인 청송(용전천 상류 28 km)에서 측정된 일별 최고 탁도와 일별 평균 수온을 나타내면 Table 2와 같다.

대곡천의 경우는 지류 유입부에 탁도 측정시설이 없어 유입수에 대한 탁도 측정기록이 없는 관계로 반변천, 용전천의 탁도 기록에 유역 면적비(반변천 : 용전천 : 대곡천 = 0.63 : 0.27 : 0.10)를 적용하여 유입 탁도를 산정하였다. 대곡천의 수온으로는 반변천(광덕교), 용전천(청송)에서 측정한 수온의 평균값을 산정하여 모의 시 입력자료로 활용하였다.

모의 기간인 2018년 10월 1일부터 12월 5일까지 임하댐 저수구역 내 주요 수질 자동측정장치에서 측정한 탁도자료를 확인한 후 Surfer를 통하여 재현한 임하댐의 2차원적 탁수 분포현황은 Fig. 3과 같다.

특히, 상류 유역으로부터 고탁수가 유입되어 저수지 내에서 확산되기 시작하는 10월 6일부터 10월 9일 까지 탁수 거동현황을 추가로 분석해 보면 Fig. 4와 같이 댐축을 주변으로 중층에 고탁수층이 형성된 이후 선택취수 설비를 통하여

Table 1. Land use Status in Upper Basin of Imha Dam (ME, 2018)

Sum (km ²)	Field	Paddy Field	Forest land	Fallow	Etc.
1,361.2	95.2	40.5	1,114.2	9.5	101.8
(100%)	(7.0%)	(3.0%)	(81.9%)	(0.7%)	(7.4%)

Fig. 1. Turbid Water Near Intake Tower and Soil in Upper Basin of Imha Dam (K-water, 2019)

Fig. 2. Basin Map and Grid Configuration for CE-QUAL-W2 Model

Table 2. Inflow Water Turbidity and Water Temperature of Branches

Date	Banbyeoncheon Stream (BR1) (Gwangdeokgyo Bridge)		Yongjeoncheon Stream (BR2) (Cheongsong)	
	Maximum Turbidity (NTU)	Average Temperature (°C)	Maximum Turbidity (NTU)	Average Temperature (°C)
10/01/2018	2.80	15.98	3.00	16.90
10/02/2018	1.40	16.77	3.20	17.08
10/03/2018	0.30	16.97	1.80	17.59
10/04/2018	5.20	17.54	2.90	17.43
10/05/2018	3.60	16.60	10.10	18.15
10/06/2018	2,097.30	16.90	2,060.30	16.77
10/07/2018	153.30	16.50	61.10	17.03
10/08/2018	35.50	16.67	13.00	17.06
10/09/2018	32.60	16.34	5.90	16.55
10/10/2018	7.00	16.23	8.80	16.44
...	...	...	...	...
11/08/2018	0.80	12.12	1.60	12.78
11/09/2018	38.80	11.83	3.00	12.52
11/10/2018	37.50	10.50	16.70	11.68
11/11/2018	15.70	10.53	33.00	11.50
11/12/2018	8.60	10.34	3.50	11.56
...	...	...	...	...
12/02/2018	0.20	4.82	1.00	6.03
12/03/2018	2.80	6.59	1.20	8.16
12/04/2018	2.30	4.70	1.80	9.40
12/05/2018	0.00	0.00	1.80	3.68

하류지역으로 탁수가 배제되어 저수지 내 탁도가 개선됨을 확인할 수 있었다.

각 지류별 유입량은 현재 정확한 측정이 불가능한 것으로

확인되어, 전체 유입량을 유역 면적비(반변천 : 용전천 : 대곡천 = 0.63 : 0.27 : 0.10)로 나누어 각각 산정하였다. 모의에 필요한 저수지의 초기 수위, 탁도 및 수온은 수치모의 시작

Fig. 3. Two-Dimensional Turbidity Changes by Major Sites in the Reservoir

Fig. 4. Behavior of High Turbidity Layer by Major Sites in the Reservoir

Table 3. Coefficients Affecting Thermal Calibration and Variation of w/t by WSC

Coefficient	Name	Simulated Values	Variation of water temperature by WSC
Wind sheltering coefficient	WSC	0.0, 0.1, 0.7, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	
Solar radiation absorbed at the water surface	BETA	0.1, 0.45, 0.8, 2.0	
Extinction for pure water	EXH2O	0.1, 0.25, 0.45, 0.9, 5.0, 50.0	
Extinction due to inorganic suspended solids	EXSS	0.1, 0.5	
Extinction due to organic suspended solids	EXOM	0.1, 0.5, 1.0, 2.0	
Longitudinal eddy viscosity	AX	0.5, 1.0, 5.0	
Longitudinal eddy diffusivity	DX	0.5, 1.0, 5.0	

시점인 2018년 10월 1일 00시(Julian Day = 274.000)에 측정된 댐측 자료를 사용하였다. 초기 저수지 수위는 EL.150.540 m이었으며, 댐측의 탁도와 수온은 당시 댐측에서 관측된 시계열 자료에서 발췌하여 입력자료로 활용하였다. 임하댐 저수구역에 대한 기상자료를 구축하기 위하여 임하댐에서 가장 가까운 곳에 위치한 안동 기상관측소(136)에서 측정된 시간대별 기온, 풍속, 풍향, 이슬점 온도, 운량을 조사하여 입력자료로 활용하였다.

취수탑을 통한 댐 하류 방류량(발전 방류량)은 2018년 10월 1일부터 12월 5일까지 측정된 시계열 단위의 실측 방류량 자료를 활용하였다. 영천댐 도수로($Q = 4.71 \text{ m}^3/\text{s}$)와 안동-임하댐 연결터널($Q = 135 \text{ m}^3/\text{s}$)을 통해서도 저수지 밖으로 탁수를 배제할 수 있기는 하나, 영천댐 도수로 취수탑과 댐측과의 이격거리는 약 4 km로서 홍수기 시 댐측의 탁도 변화에 직접적인 영향을 미치는 것은 어렵다고 판단하였고, 안동-임하댐 연결터널은 당시 미가동 상태였으므로 저수지 외부로의 방류량 산정에서 제외하였다.

3.2 모형의 주요 매개변수

CE-QUAL-W2 모형에 사용되는 주요 매개변수는 크게 수온 관련 매개변수와 기타 매개변수로 분류할 수 있다. 수온 분포 관련 보정은 일반적으로 바람차폐계수(Wind Sheltering Coefficient, WSC)를 이용하는 것이 보편적이며, 이 값은 기본값 자체를 ‘Calibration Parameter’로 규정하고 있다(Wells, 2020). 태풍 ‘미탁’ 상륙 이후 고탁도가 지속되었던 ‘19년 10월 28일에서 ‘19년 11월 7일까지 10일 동안의 탁수 사상에 대해서 수온 관련 매개변수가 수온의 변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 매개변수별 수치해석 조건은 Table 3과 같다.

수온 관련 7가지 매개변수에 대하여 모의값을 변경해가면서 수온 변화에 미치는 영향을 분석한 결과, WSC를 제외한 대부분의 매개변수는 수온에 미치는 영향이 미미한 것으로 조사되었으며, WSC의 경우는 $WSC = 0.7$ 일 때가 실측된 성층 현상을 가장 정확하게 재현하는 것으로 나타났다(Table 3). 일반적으로 저수지 수온 분포에 가장 영향을 많이 미치는

요인은 기상자료와 유입 지류의 수온이지만, 지류에서 유입되는 유량과 수온 분포를 수치모형으로 정확하게 재현하는 것은 현실적으로 불가능에 가까우며, 풍속 자료 또한 임하댐 인근이 아닌 기상관측소 자료를 사용할 수밖에 없는 현실적인 제약이 있다. 따라서, 많은 연구자료에서 모형에 탑재된 기본값(Default)으로도 비교적 정확하게 수온 분포를 재현하고 있으므로, WSC 보정만으로도 충분한 결과를 도출할 수 있다고 판단된다.

임하댐 탁도 예측의 정확도 개선을 위하여, 수온 관련 매개변수에 이어 탁도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 다양한 변수들에 대해서도 민감도 분석을 실시하였다. 모의 기간은 수온 변화 모의 시와 동일하게 ‘19년 10월 28일에서 ‘19년 11월 7일까지 10일 동안으로 설정하였으며, 주요 7가지 매개변수에 대해서 탁도에 미치는 영향을 분석하였다. 선정한 주요 매개변수와 Case별 입력값은 다음의 Table 4와 같다.

Fig. 5의 분석 결과에서도 알 수 있듯이, 최고 탁도는 Case 7, 수표면 탁도는 Case 8이 실측 자료와 비교하여 가장 근사한 값을 모의하는 것으로 나타났으며, 수심 평균 탁도는 Case 4가 가장 실측값과 유사하였다. 중요 변수인 SSS는 0.30 m/d일 때 정확도가 상대적으로 높음을 확인할 수 있었고, 기타 수리학적 매개변수는 탁도 변화에 미치는 영향이 상대적으로 낮은 것으로 조사됨에 따라, 기본값을 이용하는 것이 예측결과의 정확도 향상에 유리할 것으로 판단하였다. 일반적으로 저수지 탁도는 최고값을 기준으로 관리하고 있으며, 실측치 대비 정확도도 가장 높은 Case 7을 기본 매개변수로 선정하여 연구를 수행하기로 하였다.

3.3 저수지 탁수 영향 모의

W2 모형에서는 탁도의 직접적인 모의가 불가능하기 때문에 탁도(NTU)와 SS (부유사 농도, mg/ℓ)의 상관관계를 이용하여 모의를 수행하게 되는데, 유입 지류 탁도에 대한 별도의 보정절차 없이 댐측에서 측정된 실측치와 모의 결과를 비교한 결과, 모의 초기를 제외하고는 탁도와 수온 모두 크게 불일치하는 경향을 나타냈다. 따라서, 모의 시 탁도값이 과대

Table 4. Turbidity Simulation Cases

Case	Parameter Values						
	SSS	TSED	AX	FI	AZC	FRICC	AZMAX
1	0.09	14.0	1.0	0.015	W2	CHEZY	0.001
2	0.5	14.0	1.0	0.015	W2	CHEZY	0.001
3	1.0	14.0	1.0	0.015	W2	CHEZY	0.001
4	0.09	10.0	1.0	0.010	TKE	MANN	1.0
5	0.09	10.0	0.5	0.010	TKE	MANN	1.0
6	0.5	10.0	1.0	0.010	TKE	MANN	1.0
7	0.3	10.0	1.0	0.010	TKE	MANN	1.0
8	0.3	14.0	0.5	0.015	W2	CHEZY	0.001

SSS : Suspended solids settling rate, TSED : Sediment temperature coefficient,
 AX : Longitudinal eddy viscosity, FI : Interfacial friction factor
 AZC : Form of vertical turbulence closure algorithm, FRICC : Friction factor type,
 AZMAX : Maximum value for vertical eddy viscosity

Fig. 5. Variation in Numerical Analysis Results Over Time

평가되는 경향을 탁도와 SS의 관계를 $SS (mg/l) = \text{계수} \times \text{Turbidity (NTU)}$ 로 계산하는 과정상의 문제로 판단하여, 보정계수를 조정해가며 시행착오법을 통해 최적의 계수를 선정하고자 하였다.

기본적으로 탁도(NTU)와 부유물질(SS)은 선형관계를 유지(Wass et al., 1997) 하지만, 상호 관계를 보다 명확히 정립하기 위해서, 기존의 연구(2004년~2012년)에서 제시되었던 SS-탁도의 관계식을 우선적으로 검토하였다. K-water (2004)가 댐축에서 실측한 결과는 0.06이었으며, 2007년에 조사한 결과는 0.44로 나타났다. Lee et al. (2007)은 0.4, Lee et al. (2008)은 1.022로 선정하였으며, Kim (2012)은 0.3으로 SS와 탁도와의 관계를 정의하였다. 이처럼 임하댐

저수구역 내 토양 성분의 다양화로 인하여 SS-탁도와의 관계는 조사 위치와 조사 시기에 따라 다양하게 나타날 수 있으므로 SS를 탁도와 함께 장기간 동시에 실측하는 것이 가장 효과적이나, 측정에 소요되는 시간과 비용, 조사인력 운용 등의 측면에서 현실적으로 불가능에 가까우므로 시행착오법 등을 통하여 추정하기로 하였다. 0.4부터 0.05까지 시행착오법을 이용하여 분석해 본 결과, 유입 지류의 탁도 보정에 0.1을 적용하였을 때, 댐축의 실측치와 모의 결과가 상대적으로 가장 유사한 것으로 나타났다(Fig. 6). 그리고, 전반적으로 탁도 보다는 수온의 모의 결과가 실측치와 더 유사한 경향을 나타냈으며, 계수가 작을수록 모의 결과와 실측치가 더 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 또한,

Fig. 6. Comparison of Measured and Simulated Values (Coefficient = 0.1)

계수의 크기는 다르지만 전도 현상 발생 시기가 가까워질수록 공통적으로 관측치와 모의 결과 간의 오차폭이 줄어들어 확인할 수 있었다.

이와 같이 실측치와 모의 결과 간에 오차가 발생하는 원인으로는, 실측 자료 부족에 따른 SS-탁도와와의 상관관계 추정, 미계측 지류에 대한 유역 면적비 적용, 모의는 2차원으로 수행되지만 실제로는 3차원적 거동을 하는 탁수의 유동 특성, 위치별로 상이한 부유사의 침강속도와 구성성분 미고려, 기상관측소와 저수지 간의 기상관측 오차 등 다수의 불확실한 요소가 내재되어 있기 때문으로 판단된다.

3.4 검증 및 오차 분석

모형의 오차는 결정계수(R^2 , Coefficient of Determination), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 및 신뢰성 지수(Reliability Index, RI)를 이용하여 산정하였다. R^2 은 실측값과 모의값의 상관관계를 나타낼 수 있는 지표로서 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 모의값은 실측값과 높은 상관성을 가지게 된다. RI는 신뢰성 지수로서 두 값 사이의 일치성 또는 모형의 적합도(Model Goodness of

Fit)를 평가하는 지표이며, 두 값이 완전히 일치하면 1이 되고 차이가 커질수록 값이 증가하게 된다. R^2 , RMSE 및 RI의 계산식은 Table 5와 같다.

댐축의 실측 탁도값에 가장 근접한 Case인 SS (mg/l) $\approx 0.1 \times \text{Turbidity (NTU)}$ 경우에 대하여 모형 오차를 검증하기 위해 결정계수(R^2)과 평균제곱근오차(RMSE), 신뢰성 지수(RI)를 이용하였다. 분석 결과, Table 6에 나타난 바와 같이 탁수 유입 이후 20여 일까지는 결정계수(R^2)가 0.932까지 증가할 정도로, 모의 결과와 실측값이 비교적 잘 일치하는 경향을 나타냈으나, 이후 시일이 경과 할수록 오차율이 다소 커지는 경향을 보였다. 이것은 유입 지류에서 부유물질(SS) 미측정에 따른 탁도와 부유물질 간의 상관관계 미확인, 지류 또는 댐축에서 탁도와 수온의 결측(미측정), 실측이 아닌 유역 면적비로 환산하여 입력하는 지류별 유입량, 저수지 구간별로 상이할 수 있는 침강속도 미고려, 수시로 변경되는 댐 하류 방류량 및 취수구 위치, 매개변수 입력값의 오차 등을 원인으로 들 수 있다.

이와 같이 다양한 내·외부적 요인의 변화를 모형 구축 시 즉각 반영하지 못함으로써, 장기 모의 시에는 오차율이

Table 5. Calculation Formulas for R^2 , RMSE and RI

R^2	RMSE	RI
$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$	$\exp \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log \frac{O_i}{P_i})^2}$

where, O_i : measurement data, P_i : simulated data.

Table 6. Error Analysis by Simulation Period

Date	Turbidity			Water Temperature			Remarks
	R^2	RMSE	RI	R^2	RMSE	RI	
Oct. 5th	0.328	1.28	3.34	0.991	0.58	1.02	After 5 days
Oct. 10th	0.910	21.35	2.24	0.942	1.76	1.07	After 10 days
Oct. 20th	0.932	7.95	2.06	0.911	1.99	1.08	After 20 days
Oct. 30th	0.137	20.64	2.16	0.899	1.91	1.08	After 30 days
Nov. 20th	0.026	10.65	1.53	0.820	1.94	1.09	After 51 days
Dec. 5th	0.856	7.59	1.39	0.963	0.73	1.04	After 66 days

Fig. 7. Error Analysis for Maximum & Average Turbidity

증가하는 것으로 추정된다. 다만, 12월 5일의 경우와 같이 저수지 내 전도 현상이 수심 전층으로 확대되고, 탁도가 10 NTU 이하의 낮은 값을 유지하는 등 탁수 거동이 안정화된 이후에는 실측치와 모의 결과가 다시 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

다음으로 수온에 대하여 모형을 검증한 결과, 결정계수 (R^2)와 신뢰성 지수(RI) 등 모든 지수가 탁도 대비 양호한 값을 나타냈으며, 모의 결과도 전체적으로 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이것은 수층별 수온의 분포가 탁도보다는 상대적으로 더 변동폭이 작고, 시기별로도 변화양상이

크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

모의 시기별 탁도와 수온에 대한 검증절차를 완료한 후, 최고 탁도와 평균 탁도에 대해서도 실측치와 모의 결과에 대한 오차 분석을 시행하였다. 분석 결과, Fig. 7에 나타난 바와 같이, 모의 기간별 검증 결과보다는 최고값과 평균값에 대한 검증의 경우가 오차율과 신뢰도 측면에서 더 우수한 결과를 나타내었다. 일부 기간에서 오차 발생율이 다소 큰 경향을 보였으나, 탁도 상승기와 탁도 하강기 이후 전도 현상 발생 시기에 대해서는 오차율과 신뢰성 지수가 상대적으로 양호한 것으로 나타나서 고탁수가 유입되는 홍수기

저수지의 탁수 거동 현상을 모의하는 데는 적합한 것으로 판단하였으며, 저수지 탁도 관리는 최고값을 기준으로 하는 점 등을 고려, 금회 연구에서 선정한 탁수 모형과 보정계수는 적절한 것으로 최종 판단하였다.

4. 결 론

임하댐 유역 내 반변천 상류 일대는 쉽게 풍화되는 세일과 실트암이 주로 분포하여, 이들 지층이 적색 탁수 발생원으로 작용하고 있으며, 특히 하천 주변의 높은 농경지 비율이 강우와 함께 토사가 하천으로 유입되는 직접적인 원인을 제공하고 있음을 확인하였다. 탁수가 저수구역에 미치는 영향을 알아보기 위하여 본 연구에서는 CE-QUAL-W2 모형을 사용하여 본댐의 탁도 변화 양상을 모의하였다. 모형 구축에 필요한 실측 탁도 자료로는 태풍 ‘콩레이’에 의해서 발생한 2018년 10월 1일부터 12월 5일까지의 탁수 사상을 선정하여 당시 유입 지류와 본댐에서 측정한 탁도, 수온, 기후자료 등을 수치모의의 입력자료로 활용하였다. 단, 대곡천과 같이 실측 자료가 없는 경우에는 지류별 유역 면적비와 타 지류의 평균값을 적용하여 추정하였다. 3개 지류의 유입량은 현재 정확한 측정이 불가능하여 탁도와 마찬가지로 유역 면적비를 활용하여 산정하였으며, 모의에 필요한 댐측의 초기 입력자료(저수지 수위, 탁도, 수온 등)는 모의 시작 시점인 2018년 10월 1일 00시에 관측된 자료를 활용하였다.

W2 모형에 사용되는 매개변수의 신뢰도를 확보하고자 실측 자료로 2019년 태풍 ‘미탁’에 의해서 유발된 탁수 사상을 추가로 선정하였으며, 수온 및 기타 매개변수 14가지에 대하여 총 60여 가지 Case별로 모의 값을 조정해가며 시물레이션한 결과, $WSC = 0.7$, $SSS = 0.3 \text{ m/day}$ 일 때 실측 데이터와 가장 유사한 거동을 나타냄을 확인할 수 있었다. W2 모형에서는 탁도의 직접적인 모의가 불가능하기 때문에 탁도와 부유물질(SS)의 상관관계를 이용하여 모의를 수행하게 되는 데, 시행착오법을 통하여 반복한 결과 지류 탁도 보정 시 $SS \text{ (mg/l)} \approx 0.1(\text{계수}) \times \text{Turbidity (NTU)}$ 의 관계를 적용했을 경우가 모의 결과와 실측치가 가장 유사한 것으로 나타났다.

탁수 거동을 모의한 후 검증한 결과, 모의 개시 후 20여 일까지는 비교적 실측치와 잘 일치하였으나, 장기화 될수록 오차 발생률이 다소 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 탁도 상승기와 탁도 하강기를 거쳐 전도 현상 발생 시기가 다가올수록 오차율과 신뢰도가 상대적으로 양호한 것으로 나타남으로써, 홍수기 저수지의 탁수 현상을 모의하는 데는 적합한 것으로 판단하였다. 또한, 최고 탁도와 평균 탁도에 대해서 검증한 결과는 모의 기간별 검증 결과보다 더 양호한 결과를 나타내었으므로, 평소 저수지 탁도 관리는 최고값을 기준으로 하는 점 등을 고려, 본 연구에서 구축한 모형은 적절한 것으로 최종 판단하였다.

본 연구에서는 2018년 임하댐에서 발생한 탁수 사상을

장기간 시계열 단위까지 분석하고, 2019년 탁수 사상을 이용하여 최적의 매개변수를 선정하는 등 지속적으로 증가 추세에 있는 임하댐의 고탁수 사상에 적합한 탁수 거동 모형을 구축함으로써 탁수 유입 시 방류량 결정 등 댐 운영에 필요한 참고자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 다만, 지류 유입부에서 측정한 부유물질 조사자료가 없어 탁도와 부유물질과의 상관관계를 직접적으로 구할 수 없었고, 일부 지류는 수질 측정장치가 설치되어 있지 않아 유역 면적비 등을 활용하여 추정함으로써, 단기 모의 시에는 비교적 양호한 결과를 도출할 수 있었으나, 모의 기간이 장기화 될 경우는 다소 오차가 발생하는 경향을 나타냈다. 따라서, 이와 같은 제약사항을 개선하기 위해서는 임하댐 유역 내 탁수 모니터링 지점을 적극적으로 확대하고, 실측 자료에 대한 정기적인 검보정 절차를 병행하여야 하며, 중·장기적으로 추진중인 탁수 저감 대책에 대한 개량적 평가와 관련 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

또한, 탁수 대응을 위한 의사결정 기간을 최소화하고 적기에 탁수 배제를 시행하기 위해서는 선택취수 위치 조정, 안동댐 대체 공급, 수계 내 임하댐 수요량 대체 공급, 임하댐 최대 발전방류 등으로 분류되어 있는 단계별 탁수 대응 절차를 고도화하여 탁도 수준별로 세분화된 대응 시나리오로 개선시켜야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1I1A3074459).

References

- Ahn, S.R., Ha, R., Yoon, S.W., and Kim, S.J. (2014). Evaluation of Future Turbidity Water and Eutrophication in Chungju Lake by Climate Change Using CE-QUAL-W2. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 145-159.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (1999). *Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2*. U.S. Army Corps of Engineers, Miscellaneous Paper EL-99-1.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (2001). *Water Quality Modeling of Allatoona and Wast Point Reservoir Using CE-QUAL-W2*. U.S. Army Corps of Engineers, ERDC/EL SR ; 01-3.
- Debele, B., Srinivasan, R., and Parlange, J.Y. (2006). Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins. *Environmental Modeling*

- & Assessment, Vol. 13, Issue 1, pp. 135-153.
- Edinger, J.E., and Buchak, E.M. (1975). *A Hydrodynamic, Two-Dimensional Reservoir Model: The computational Basis*. Contract No. DACW 27-74-C-0200, U.S. Army Engineer Division, Ohio River, Cincinnati, OH.
- Ha, S.R., and Lee, J.I. (2008). Calibration and Verification of CE-QUAL-W2 Model for Measuring Water Quality in the Daecheong Reservoir. *Journal of Korean Society of Environment Impact Assessment*, Vol. 17, No. 6, pp. 349-356.
- Hwang, S.G., and Jung, K.Y. (2006). Geology in Drainage Field of the Imha Dam and Origins of High Turbid Water in the Imha Lake, Andong. *Journal of the Korean Society of Natural Resources and Environmental Geology*, Vol. 39, No. 6, pp. 771-786.
- Jung, G.C. (2010). *Quantifying Assessment for Turbid-Water Occurrence Possibility in Hydrologic Basins*. Ph.D. dissertation, Kyungpook National University.
- Kim, B.R., and Kang, B.S. (2013). Parameter Sensitivity Analysis for Spatial and Temporal Temperature Simulation in the Hapcheon Dam Reservoir. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1181-1191.
- Kim, D.I. (2012). *The Alternative Analysis of The Basin Turbidity Reduction Effects on The Reservoir and Downstream River*. Ph.D. dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- K-water (2004). *The Establishment of the Turbidity Reduction Plan for Imha Dam*, Report.
- K-water (2019). *Soil Survey Results of Upstream of Imha Dam and Semi-Variable Stream*, Report.
- Lee, H.S., Jung, S.A., Park, S.Y., and Lee, Y.S. (2008). Modeling Study of Turbid Water in the Stratified Reservoir using linkage of HSPF and CE-QUAL-W2. *Journal of Korean Society Of Environmental Engineers*, Vol. 30, No. 1, pp. 69-78.
- Lee, S.W., Kim, J.G., No, J.W., and Ko, I.H. (2007). Assessment of Selective Withdrawal Facility in the Imha Reservoir Using CE-QUAL-W2 Model. *J. Korean Soc. Water Environ.*, Vol. 23, No. 2, pp. 228-235.
- Ministry of Environment (ME) (2018). *2016 Ministry of Environment National Pollution Source Survey*, Report.
- Park, H.S., Chung, S.W., and Chung, S.A. (2017). Analyzing the Effect of an Extreme Turbidity Flow Event on the Dam Reservoirs in North Han River Basin. *Journal of Korea Society on Water Environment*, Vol. 33, No. 3, pp. 282-290.
- Water Resources Management Information System (WAMIS). Retrieved from <http://wamis.go.kr> (accessed on 16 October 2020).
- Wass, P.D., Marks, S.D., Finch, J.W., Leeks, G.J.L., and Ingram, J.K. (1997). Monitoring and preliminary interpretation of in-river turbidity and remote sensed imagery for suspended sediment transport studies in the Humber catchment. *Science of the Total Environment*, Vol. 194-195, pp. 263-283.
- Wells, S.A. (2020). *CE-QUAL-W2: A two dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality Model*. Version 4.2.2 User's Manual. Portland State University.

Received	■	April 5, 2021
Revised	■	April 6, 2021
Accepted	■	April 14, 2021