

Research Paper

HSPF-EFDC 모델을 연계한 홍수조절댐 수질 변화 예측

이영기* · 황상철** · 황현동*** · 나진영** · 유나영*** · 이한진**

K-water 수변환경처*, K-water 사업기획처**, (주)휴먼플래닛***

Water Quality Modelling of Flood Control Dam by HSPF and EFDC

Young-Gi Lee* · Sang-Chul Hwang** · Hyun-Dong Hwang*** ·
Jin-Young Na** · Na-Young Yu*** · Han-Jin Lee**

Waterfronts & Environment Dept., K-water, Daejeon, Korea*
Business Research & Planning Dept., K-water, Daejeon, Korea**
HumanPlanet Co., Daejeon, Korea***

요약 : 본 연구는 홍수조절댐의 운영패턴 변화에 따른 수질환경에 미치는 영향을 분석한 것이다. 홍수조절댐은 홍수시 하천유량을 일시적으로 담수하여 홍수를 지체시키는 한편, 평상시에는 자연하천 흐름상태를 유지하는 특성을 가지고 있다. 댐 건설 후 담수시 수질변화는 유역모델(HSPF)과 댐 내 수리-수질변화 모델(EFDC)을 연계하여 예측하였다. 강우시 유역에서 유출되는 비점오염원의 유출특성을 반영하기 위하여 HSPF 유역모델을 이용하여 분석하였으며, HSPF의 분석된 자료를 EFDC 모델의 입력 자료로 적용하였다. 수질모의 결과 댐 건설 후 수몰로 인한 오염원 감소와 강우시 일시적 저류로 인하여 수질이 향상되는 것으로 예측되었다. 또한 홍수조절댐의 특성상 담수되는 기간이 짧으므로(2~3일) 부영양화 등 수질 악영향은 거의 없는 것으로 분석되었다. 계획 중인 댐의 환경영향평가 단계에서는 모델의 충분한 보정을 할 수 없기 때문에 정확한 모의에 일부 한계가 있을 수 있다. 그러나 향후 실측자료 확보를 통하여 모델의 신뢰도를 향상시킨다면, 이를 활용하여 신규 홍수조절댐의 환경영향평가 시 다양한 운영조건에 따른 수환경의 영향을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 홍수조절댐, HSPF, EFDC, Grid Generator

Abstract : This study predicted the effect of operation pattern of flood control dam on water quality. Flood control dam temporarily impound floodwaters and then release them under control to the river below the dam preventing the river ecosystem from the extreme flood. The Hydrological

First Author: Young-Gi Lee, Dept. of Waterfronts & Environment, K-water, Daejeon 34350, KOREA, Tel: +84-42-629-3486, ground@kwater.or.kr

Corresponding Author: Hyun-Dong Hwang, HumanPlanet Co, Daejeon 34025, KOREA, Tel: +82-42-331-0191, skybeast@naver.com

Co-Authors: Sang-Chul Hwang, Dept. of Business Research & Planning, K-water, Daejeon 34350, KOREA, Tel: +82-31-412-1360, hsch@kwater.or.kr

Jin-Young Na, Dept. of Business Research & Planning, K-water, Daejeon 34350, KOREA, Tel: +82-43-840-1289, purist@kwater.or.kr

Na-Young Yu, HumanPlanet Co, Daejeon 34025, KOREA, Tel: +82-4-331-0194, cyulyme@nate.com

Han-Jin Lee, Dept. of Business Research & Planning, K-water, Daejeon 34350, KOREA, Tel: +82-42-629-3126, ihanjin@kwater.or.kr

Received: 5 July, 2017. Revised: 30 April, 2018. Accepted: 14 May, 2018.

Simulation Program Fortran (HSPF) and the Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) were adapted to predict the water quality before and after the dam construction in the proposed reservoir. The non-point pollutant delivery load from the river basin was estimated using the HSPF, and the EFDC was used to predict the water quality using the provided watershed boundary conditions from the HSPF. As a result of water quality simulation, it is predicted that the water quality will be improved due to the decrease of pollution source due to submergence after dam construction and temporary storage during rainfall. There would be no major water quality issues such as the eutrophication in the reservoir since the dam would impound the floodwater for a short time (2~3 days). In the environmental impact assessment stage of a planned dam, there may be some limitations to the exact simulation because the model can not be sufficiently calibrated. However, if the reliability of the model is improved through the acquisition of actual data in the future, it will be possible to examine the influence of the water environment according to various operating conditions in the environmental impact assessment of the new flood control dam.

Keywords : Flood Control Dam, HSPF, EFDC, Grid Generator

I. 서론

국내 기후변화와 관련된 연구로는 과거 관측 강수량 자료의 장기추세를 분석하여 총 강우량 증가, 총 강우일수 감소 및 80mm 이상 강우일수 증가의 결과를 제시한 바 있으며(Kim & Yim 2005), 국립방재교육연구원(NDMI, National Disaster Management Institute)에서 발간한 보고서에 따르면 국내 22개 관측소를 기준으로 과거 36년간의 관측 자료를 분석한 결과 봄과 겨울에는 강우량이 감소, 여름과 가을에는 증가하는 경향이 있음을 제시하였다(NDMI 2008). 이와 같이 국내의 연 강수량은 지속적으로 증가하고 있으며, 국지성 집중호우 역시 증가하고 있어 집중강우에 따른 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 또한, 도시화, 산업화로 대변되는 각종 개발 사업으로 인해 과거에 비해 동일한 호우사상에 대해서도 홍수량이 증가하여 피해 규모 또한 증가하는 경향을 보이고 있으며, 도심지 하천의 도시계획과 관련한 토지이용도의 제한 등이 적용되지 않아 홍수취약 지역에 무분별한 도시화 및 자산이 급증하여 잠재적, 상습적 홍수 피해 등을 피할 수 없는 실정이다.

강원도 원주시에 위치한 원주천 주변에는 원주시 시가지와 대규모 취락지 및 도시형 소규모 공장시설들이 위치해 있으며, 상류지역은 하상경사가 급하고

하류지역은 완만하여 홍수에 취약한 구조이다. 실제로 12년간(1998년~2009년) 사망 5명, 이재민 70명, 약 586억원의 재산 피해가 발생하였으며, 2010년에는 최대 247mm의 국지성 집중호우가 발생하여 원주천 둔치 주변의 차량 유실 및 주택침수가 발생하였고 총 피해액은 약 68억원으로 집계되었다. 홍수 피해 방지를 위해 상위계획에 따라 원주천 도심지역 치수계획빈도인 200년 빈도규모로 상향 정비하여야 하나, 원주천 주변은 도시화와 주거 밀집지역 개발 등으로 하도확장은 사실상 불가능한 실정으로 홍수방어를 위한 하도확장시 약 400억원이 발생되며, 비용에 비해 홍수저감효과는 미미하여 제방위주의 기존 치수사업만으로는 홍수방어에 한계가 있다는 정책적 판단 및 지역의 건의에 따라 홍수조절댐을 계획하였다(Wonju-si 2015).

홍수조절댐은 기존 댐과는 달리 홍수시 일시적으로 담수하여 홍수를 지체시키고, 평상시에는 현재와 같은 하천 흐름 상태를 유지하는 특성을 가지고 있다. 현재까지 환경영향평가단계에서 다목적댐(담수댐)에 대한 수질모의(변화) 다수 수행된바 있으나, 홍수조절댐에 대한 연구는 없었다. 앞으로 지역건외댐 건설 증가에 따라 소규모 홍수조절댐 건설이 증가할 것으로 전망되며, 운영패턴의 다양한 변화가 예상됨에 따라 금번 연구를 시행하였다.

본 연구에서는 기존 댐과는 다른 홍수조절댐이 수 환경에 미치는 영향을 분석하기 위하여 계획 중인 원주천댐을 사례로 홍수조절댐 운영시 수질 변화를 HSPF 유역모델과 EFDC 모델을 최초로 연계하여 예측·분석하였고, 향후 신규 홍수조절댐 환경영향평가 및 실제 댐 운영에 적용하는 방안을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상

1) 연구 대상 지역

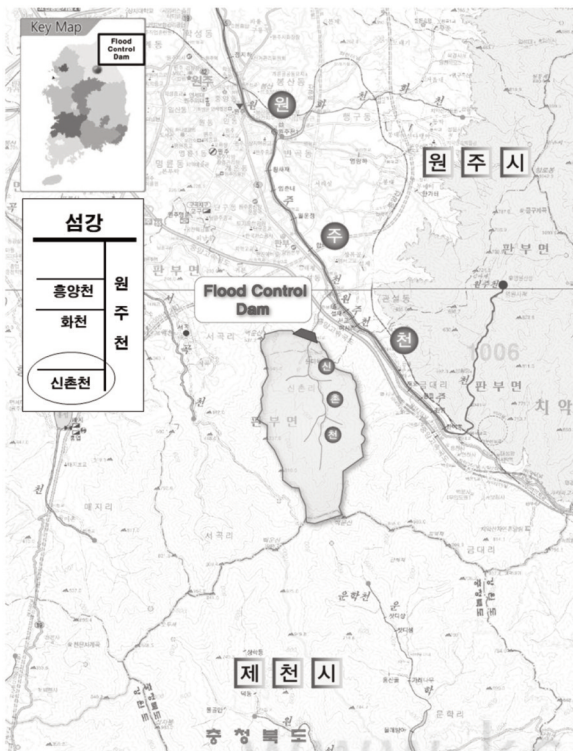
연구 대상은 현재 계획 중인 원주천 홍수조절댐으로 하였다. 원주천 홍수조절댐은 상습적으로 피해가 발생하는 원주천 유역의 홍수 방어를 위하여 상류인 신촌천에 건설을 계획하였으며, 2018년 현재 소규모 환경영향평가가 진행 중에 있다. 섬강의 제 2지류인 신촌천에 위치한 원주 홍수조절댐(Figure 1)은 유역면적 7.5km², 총저수용량 180만m³으로 홍수조절용

량은 174만m³으로 홍수시 일시적으로 담수하여 홍수를 지체시키는 것을 주요 목적으로 하며, 평상시에는 현재와 같은 하천의 흐름 특성을 유지하는 것으로 계획되어 있다.

2) 유역의 오염부하량 현황

전국오염원조사(2015년, 환경부)의 동리별 조사 자료 및 현장조사를 통하여 유역의 오염원을 조사한 결과 원주천댐 유역내 총 인구는 154명(오수처리 46명, 단독정화 108명)으로 조사되었으며, 가축은 한우 53마리, 사슴 6마리를 사육 중인 것으로 조사되었다. 토지이용은 임야가 90.5%로 가장 큰 것으로 조사되었다(Table 1).

조사된 오염원을 이용하여 “수질오염총량관리기술지침, 2014, 국립환경과학원”의 방법에 따라 배출부하량 산정결과 유역내 총 배출부하량은 BOD 19.53kg/일, T-N 23.53kg/일, T-P 1.58kg/일로 산정되었으며, 토지계와 축산계 배출부하량이 전체



Item	Unit	Value
□ Basin		
○ Basin area	km ²	7.5
○ Average rainfall	mm/년	1,333
□ Reservoir		
○ Flood water level	EL.m	236.10
○ Max water level	EL.m	237.48
○ Total storage capacity	백만m ³	1.80
○ Flood control storage capacity	백만m ³	1.74
○ Area	km ²	0.13
○ In flow(PMF)	m ³ /s	289.5
○ Out flow(PMF)	m ³ /s	262.0

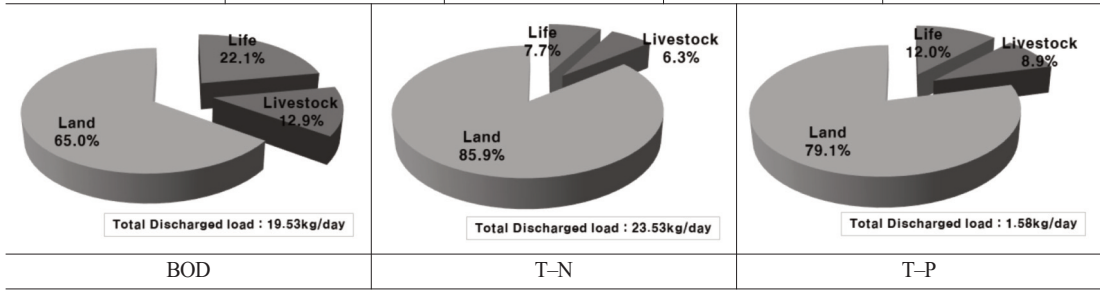
Figure 1. Research site.

Table 1. The current status of pollution source

Item	Population (person)	livestocks			Land use (km ²)					Sum
		Korean Cattle	Pig	Deer	Field	Paddy	Forest	Residential area	Others	
Dam Watershed	154	53	-	6	0.379	0.122	6.767	0.063	0.150	7.481

Table 2. Discharged pollutant loads in the watershed

Item	Discharged load (kg/day)			
	Life	Livestock	Land	Sum
BOD	4.31	2.52	12.70	19.53
T-N	1.82	1.49	20.22	23.53
T-P	0.19	0.14	1.25	1.58



부하량의 약 77.9%~92.7% 를 차지하고 있어 비점 오염 부하의 영향이 클 것으로 예상된다(Table 2).

2. 유역유출 해석

1) HSPF 모델의 개요

평상시 및 강우시 유역에서 유출되는 유량과 오염 부하량을 산정하기 위하여 유역모델인 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran, Ver 3.0)를 이용하였다. HSPF 모델은 1980년에 개발되어 이후로 지속적인 수정과 확장을 거듭해오고 있다. 수문 순환 과정에서 수량과 수질을 연속적으로 모의하려는 목적으로 많은 모델들이 독립적으로 개발되어 왔는데 HSPF는 서로 다른 기능을 가진 수문-순환 개별 모델들을 결합시킨 수량-수질의 복합 유출 모델이라 할 수 있다. HSPF는 도시지역과 비도시지역 모두에 적합한 모델로서 도시지역의 유출은 build-up/wash-off 모델을 사용하였고 비도시지역의 투수지역은 경험식과 토사침식 기작을 상세히 묘사하였으며, 투수지역(pervious land)을 대상으로

수문, 수질을 모의하는 PERLND 모듈, 불투수지역(impervious land)의 수문 및 수질을 모의하는 IMPLND 모듈, 수체 내의 수리 및 수질을 모의하는 RCHRES 모듈로 각각 나누어져 있다. 각각의 모듈에는 물의 흐름과 관계된 부분과 토사유출, 영양염류 등 수질과 관계되는 부분으로 구분되어 있다. 유역의 투수층과 불투수층의 수문, 수리 모의에 영향을 주는 요소는 강수, 식물 등에 의한 차단, 지표저류, 증발산, 침투, 지표수 유출, 중간 유출 및 지하수 유출 등이 있다. 각 요소들은 토지피복, 토양, 선행강우 조건 등에 의해 시간에 따라 변화한다. 수체 내 수리 모의는 흐름을 한 방향으로 보며 한 부분의 유입과 여러 방향의 유출 부분으로 구성되어 있다. 그리고 수체의 깊이에 대한 수표면적과 저류되는 수량과의 관계는 변하지 않는다는 가정을 기초로 하고 있다.

2) 모델 입력자료 구성

원주천댐 건설 예정지점을 최종 말단지점으로 배수구역을 구분한 후 1:5,000 지형도를 이용하여 수

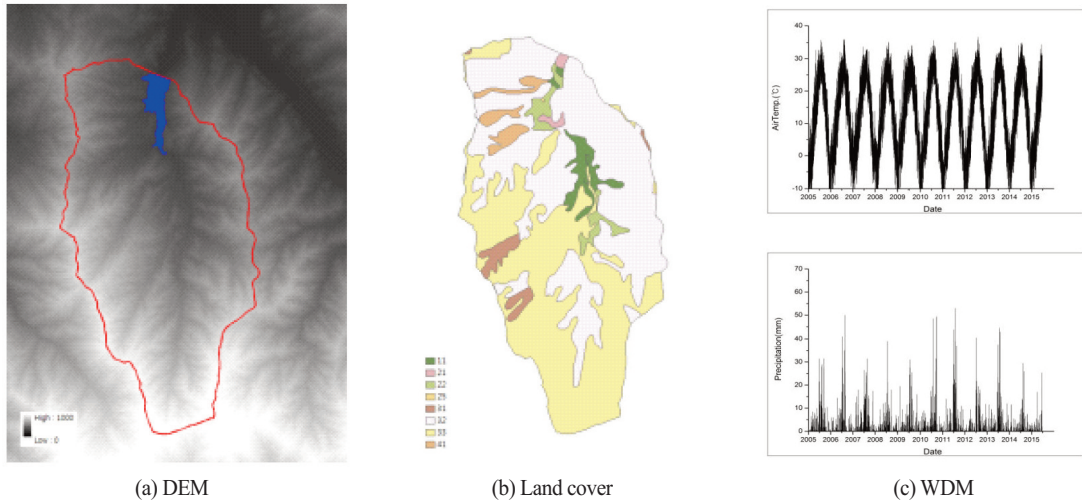


Figure 2. HSPF Input data.

치고도지도(Digital Elevation Model, DEM)을 생성하였다(Figure 2a). 토지이용도는 환경부에서 제공하는 중분류 지도(Figure 2b)를 사용하였으며, 원주천댐 유역은 총 7.5km²의 유역면적 중 약 91%가 산림지역으로 구성되어 있다.

모델에 입력하는 기상자료(Watershed Data in Management, WDM)은 해당 유역의 티센망을 고려하여 원주 관측소 자료를 사용하였으며, 결측 항목은 춘천관측소 자료로 구성하였다. 입력자료는 모델의 안정화 기간을 포함하여 2004년 1월 1일부터 2015년 7월 31일까지의 시간별 기온, 강수량, 이슬점온도, 풍속, 윤량, 일사량, 증발량 등 7개 항목이다(Figure 2c).

3) 모델의 보정 및 시나리오 구성

구성된 모델을 이용하여 2004년 1월 1일부터 2015년 7월 31일까지 유량, BOD, T-N, T-P를 모의하였다. 모델의 보정은 실측 결과와 모의 결과의 일치

정도를 확인하며 단순시행착오법을 활용하였으며, 실측 결과는 “원주천댐 건설사업 전략환경영향평가서, 2015, 원주시”에서 신촌천(댐 상류)의 2015년 2월 6일, 4월 9일, 7월 1일에 실측한 자료를 이용하여 오염부하량으로 환산(유량×농도)한 값을 적용하였다(Table 3). 수문과 수질 보정결과는 Figure 3과 같고 보정에 사용한 매개변수는 Table 4에 나타내었다.

원주천댐 유역은 대부분이 산지로 구성되어 비점오염원의 영향이 클 것으로 예상되며, 강우시 유출되는 비점오염원의 경우 토지피복, 오염원 분포 등이 동일하여도 선행 무강우일수, 강우강도, 강우지속시간 등에 따라 유출 부하량에 차이가 발생하므로, 댐 건설 전·후의 유역유출 오염부하량의 변화를 분석하기 위하여 10년(2005년~2014년) 장기 유출 모의를 실시하였다.

Table 3. Result of water monitoring

Date	Item	Q (m ³ /min)	Concentration			Load		
			BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	BOD (kg/day)	T-N (kg/day)	T-P (kg/day)
2015. 5. 6		0.926	0.8	2.12	0.012	1.04	2.75	0.02
2015. 4. 9		3.897	0.7	2.03	0.014	3.82	11.08	0.08
2015. 7. 1		1.608	1.0	1.98	0.018	2.25	4.46	0.04

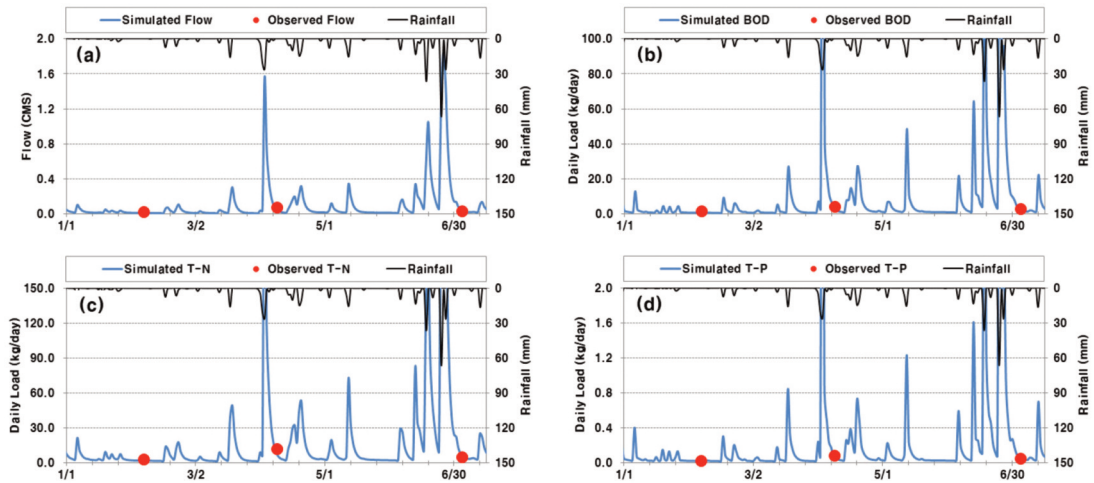


Figure 3. Calibration results; (a) Hydrological, (b) BOD, (c) T-N, (d) T-P.

Table 4. Model parameters used for calibration

Parameters		Definition	Range ¹⁾	Value
hydrological	LZSN	Lower zone nominal storage (in)	0.01~100	8
	INFILT	Soil infiltration capacity index (in/hr)	0.0001~100	0.4
	UZSN	Upper zone nominal storage (in)	0.01~10	2
	DEEPER	Fraction of Groundwater inflow to deep recharge	0~1	0.9
	AGWRC	basic groundwater recession rate (day ⁻¹)	~0.999	0.98
	IRC	Interflow recession parameter (day ⁻¹)	~0.999	0.5
	INTFW	Interflow inflow parameter	0~	5.0
Water-Quality	KBOD20	BOD decay rate at 20°C (hr ⁻¹)	0~	0.0005
	TCBOD	Temperature correction coefficient for BOD decay	1~2	1.06
	KODSET	Rate of BOD settling (ft/hr)	0~	0.0001
	KTAM20	Oxidation rate of total ammonia at 20°C (hr ⁻¹)	0~	0.010
	KNO220	Oxidation rate of nitrite at 20°C (hr ⁻¹)	0~	0.002
	KNO320	Denitrification rate of nitrate at 20°C (hr ⁻¹)	0~	0.002

자료 : 1. USEPA, Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) User's Manual, 2001

3. 홍수조절댐 수질변화 모의

1) EFDC 모델의 개요

건설 예정인 원주천댐(홍수조절댐)의 운영시 수질변화를 예측하기 위하여 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code; Hamrick 1992)모델을 적용하였다. EFDC 모델은 Virginia Institute of Marine Science에서 개발된 3차원 유동해석 모델이며, 수질변화, 부유사 이동, 독성물질 모델과 연결된 통합 버전의 모델로도 사용되고 있다. EFDC 모델은 총 4개의 기본

모듈로 구성되며 이 중 유체역학 모의 모듈은 다시 6개의 유동모듈로 구성된다. 유체역학 모의 모듈의 모의 결과는 수질모의(Water Quality), 유사 이동(Sediment transport), 독성물질(Toxics)모의에 연동되어 사용된다(Figure 4). 수질모의(Water Quality) 모듈은 용존산소, 화학적산소요구량, 조류, 탄소, 인, 질소, 규소 및 활성금속을 포함하는 총 22개의 수질 상태변수들로 구성된다. 유사 이동(Sediment transport) 모듈은 수체와 퇴적층으로 나누어 각각 모의되며, 각각의 수체와 퇴적층에서는 입경에 따라

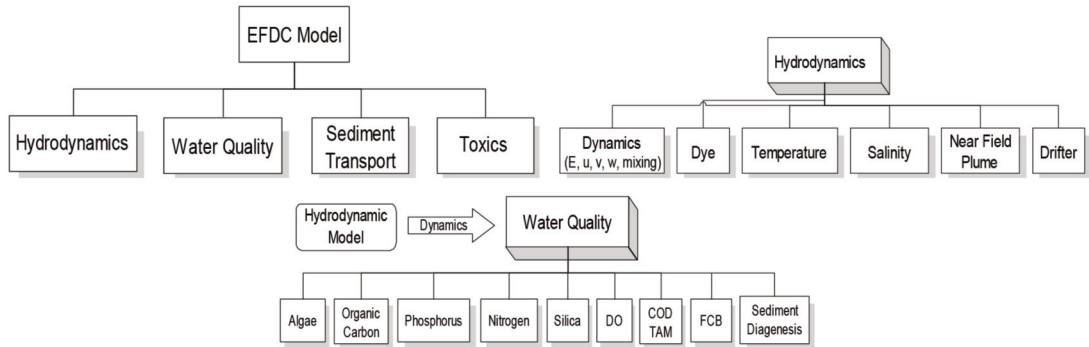


Figure 4. Components of EFDC Model.

점착성과 비점착성 유사로 나누어 계산한다.

2) 모의격자 구성

모의격자는 1:5,000 수치지형도를 바탕으로 3차원 모의격자 구성 프로그램인 Grid Generator를 활용하여 구성하였다. Grid Generator는 2016년 국내에서 개발된 EFDC 격자생성 소프트웨어로 Dxf 수치지도 및 배경맵 기반으로 단일/다수 폴리곤 형태의 격자를 생성할 수 있다. 가이드라인 기법을 사용하여 기존에 격자구성이 어려웠던 복잡한 하천의 격자를 쉽게 생성할 수 있으며, 금회 구성한 원주천댐과 같이 기본 하천과 홍수시 수위증가로 담수되는 홍수터 구간을 구분하여 구성할 수 있다. 또한 격자구성의 안정성을 확보하기 위하여 직교성 보정을 자동으로 수행하여 사용자의 편의를 높인 프로그램이다 (Humanplanet 2016).

원주천댐의 경우 평상시에는 일반 하천의 형태를 유지하고 홍수시에 물을 일시적으로 저류하여 댐 형태를 나타내기 때문에, 체류시간이 길어 화학적 반응계수의 영향을 크게 받는 일반 댐과는 달리 체적변화와 같은 물리적인 변화를 잘 반영하여야 한다. 이러한 홍수조절댐의 특성을 반영하기 위하여 Curvilinear Grid 형태로 구성하여 최대한 지형을 반영하였으며, 모델의 동등시간 등을 고려하여 구성하였다.

Curvilinear Grid 형태의 격자구성에서 수치해석의 안정성을 나타내는 직교성편차율(Orthogonal Deviation)의 안정적인 범위는 경험적으로 3이하 (P.M. Craig and D.H. Chung 2013)이며, Grid

Generator의 가이드라인 기법과 자동 직교성 보정 방법을 이용하여 구성된 결과, 금회 모의구간의 평균 직교성편차율(Orthogonal Deviation)은 2.907로 수치해석을 위한 모델 격자의 안정성이 확보된 것으로 판단된다(Figure 5). 모의 격자는 평균 크기 10.2m × 8.6m의 수평격자 1,355개와 수직층 3개로 구성하였다.

3) 반응계수 산정

일반적으로 현재 운영 중인 호소는 모델의 입력 자료로서 현재의 유입수질 등의 경계조건을 적용하고 동일한 시간대의 호 내 수질을 고려하여 모델 보정 후 장래 수질변화 예측을 실시하며, 이 때 모델의 보정단계에서 호 내 자정작용 및 각 호소의 유역상황이 고려된 매개변수를 산정한다. 그러나 원주천댐은 현재 조성이 되지 않은 호소이므로 호 내 수질변화를 대표할 수 있는 매개변수를 산정하기에 어려움이 있다. 이에 박재충 등(2010)은 건설 예정인 댐의 수질변화 예측시 국내에 기 적용한 각 매개변수의 평균값을 적용한 바 있다. 금회 예측 시에도 국내 호소의 일반적인 매개변수를 산정하기 위하여 댐의 규모, 유역면적 및 유역특성이 다른 용담댐, 대곡댐, 사연댐, 탐진댐, 영천댐 등에서 수질변화 예측시 적용하였던 매개변수의 평균값을 적용하였다(Table 5). 적용한 매개변수는 대부분 EPA에서 제시한 값의 범위에 있어 원주천댐 수질변화 예측을 위한 매개변수로서 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

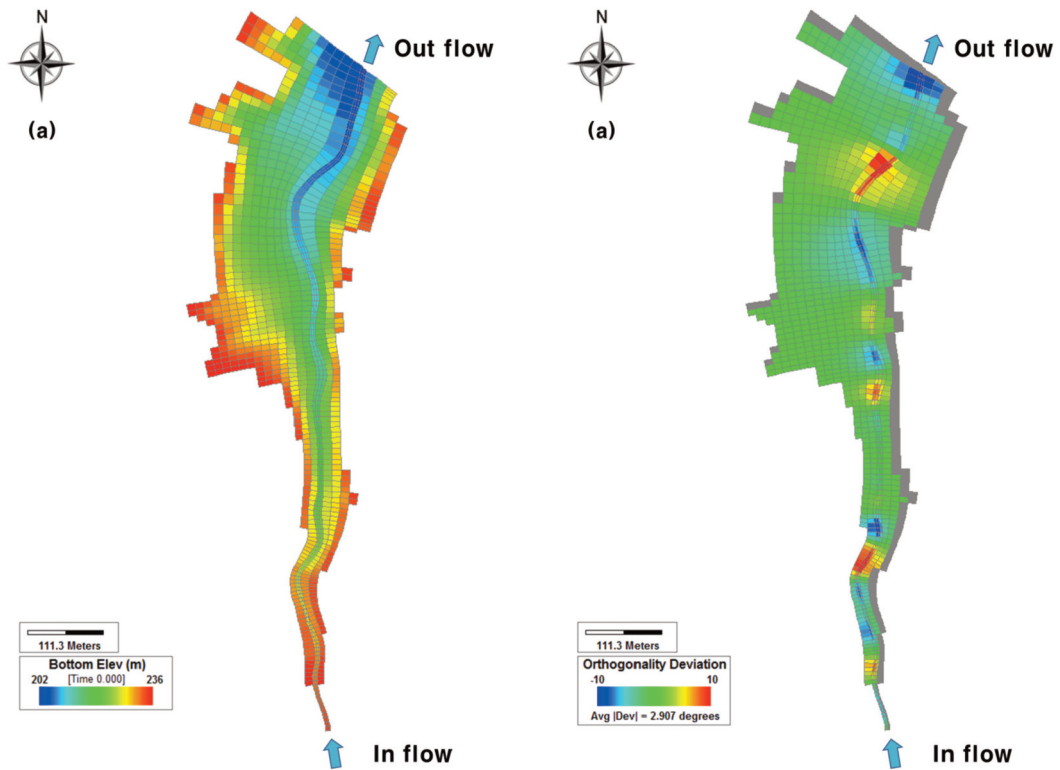


Figure 5. 3-Dimensional grid system for hydrodynamic and water quality Modeling; (a) Grid construction, (b) Orthogonal Deviation.

Table 5. Model parameters used for water quality calibration

Parameters	Number	Description and units	Range (EPA) ¹⁾	Range (Korea) ²⁾	Used Value ³⁾
NH ₃ -N	11	Nitrification rate (day ⁻¹)	0.025~0.16	0.1~0.6	0.25
	12	Constant 11, @20°C, Temp. coeff	1.02~1.08	1.08	1.08
	13	Nitrification, Half-saturation constant for oxygen limitation (mg O ₂ /ℓ)	–	0.5~2	1.63
NO ₃ -N	21	Denitrification rate (day ⁻¹)	0.002~1.0	0.01~0.09	0.038
	22	Constant 21, @20°C, Temp. coeff	1.02~1.09	1.08	1.08
	23	Denitrification, Half-saturation constant for oxygen limitation (mg O ₂ /ℓ)	–	0.1~2	0.9
Phyto-plank-ton	41	Maximum growth rate (day ⁻¹)	0.2~8.0	2~3	2.3
	42	Maximum growth rate Temp. coeff	1.0	1.068	1.068
	46	Carbon-Chlorophyll Ratio (mgC/mgChl-a)	10~100	50~200	125
	48	Half-saturation constant for Nitrogen (mg/L)	0.01~0.4	0.01~0.05	0.032
	49	Half-saturation constant for Nitrogen (mg/L)	0.0005~0.08	0.001~0.05	0.020
	52	Death Rate (day ⁻¹)	0.003~0.17	0.03~0.15	0.08
	57	Phosphorus to carbon ratio (mgP/mgC)	0.024~0.24	0.005~0.03	0.019
CBOD	58	Nitrogen to carbon ratio (mgN/mgC)	0.05~0.43	0.06~0.25	0.172
	71	Nitrification rate (day ⁻¹)	0.01~4.24	0.001~0.01	0.01
	72	Constant 71, @20°C, Temp. coeff	1.02~1.15	1.047	1.047

Table 5. Continued

Parameters	Number	Description and units	Range (EPA) ¹⁾	Range (Korea) ²⁾	Used Value ³⁾
O ₂	81	Oxygen to Carbon ratio	1.4~2.67	2.67	2.67
	82	Reaeration rate (day ⁻¹)	-	2~5	3.5
	83	Reaeration rate @20°C, Temp. coeff	-	1.024~1.03	1.028
Org-N	91	Dissolved organic nitrogen mineralization @20°C (day ⁻¹)	0.001~0.4	0.01~0.40	0.168
	92	Constant 91, @20°C, Temp. coeff	1.02	1.08	1.08
	93	Benthic, Organic nitrogen decomposition rate (Benthic reaction) (day ⁻¹)	0.0004~1.8	0.0004	0.0004
	94	Constant 93, @20°C, Temp. coeff	1.02~1.14	1.08	1.08
Org-P	100	Dissolved organic phosphorus mineralization @20°C (day ⁻¹)	0.003~0.8	0.10~0.22	0.196
	101	Constant 100, @20°C, Temp. coeff	1.08	1.08	1.08

자료 : 1. USEPA, The Water Quality Analysis simulation Program, WASP7.3, 2009
 2. Seo DI, Lee EH(2002), Kim(2003), Kwak(2001), K-Water(2007, 2009)
 3. Average value of water quality parameters applied to domestic dams

4) 시나리오 구성 및 경계조건

원주천댐은 원주천 유역의 홍수피해 예방을 위한 홍수방어 대책의 일환으로 평상시에는 댐 건설전과 거의 동일하게 수문을 개방 운영하고 강우시 및 홍수시 등의 치수적 목적에 한하여 일정한 시기에만 수문을 닫는 방식의 홍수조절용 댐으로 계획되었다. 이에 비강우시 유입유량을 하류로 전량 방류하여 호 내 담

수를 실시하지 않으며, 강우시 유입유량이 증가하면 하류 방류를 중단하여 담수를 시작한 후 유입유량이 감소하면 방류를 시작하여 담수 전 수위로 낮추는 운영 계획을 가지고 있다. 따라서 금회 수질모의에서는 10년 빈도 홍수기시 원주천댐 담수 후 수질 변화를 예측하였으며, 예측 시기는 원주기상청에서 관측한 2005년~2014년 강우사상 중 강수량이 255.5mm로

Table 6. Average daily maximum precipitation in the last 10 years(Wonju Meteorological Office)

Item	2005 7/1	2006 7/16	2007 8/4	2008 7/24	2009 7/12	2010 9/22	2011 7/3	2012 7/6	2013 7/22	2014 8/11
Rainfall (mm)	104.5	240	74	184.5	191.5	209	204.5	255.5	225	57.5

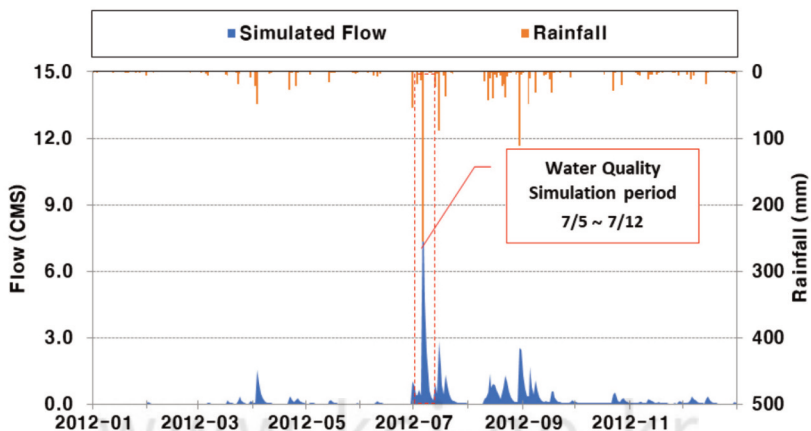


Figure 6. Daily watershed flow in Wonjucheon dam basin in 2012 (HSPF Simulation result).

Table 7. Water quality simulation period Daily average flow

Flow	July 2012							
	5 day	6 day	7 day	8 day	9 day	10 day	11 day	12 day
In flow (m ³ /s)	0.388	9.966	4.731	2.367	1.199	0.614	0.326	0.177
Out flow (m ³ /s)	0.388	0.000	0.000	0.000	6.418	6.418	6.418	0.177

Table 8. Fraction of water quality items for EFDC model input

Parameters	TOC/BOD	POC/TOC	DOC/TOC	PO ₄ -P/T-P	NH ₄ /T-N	NO ₃ /T-N
Fraction	1.450	0.212	0.788	0.603	0.202	0.718

가장 많았던 2012년 7월 6일을 기준으로 7월 4일~7월 12일로 선정하였다. 2012년 7월 6일의 강우량인 255.5mm는 댐 건설 예정지점에서 10년 빈도 홍수량 산정시 적용된 24시간 강우량인 254.1mm와 유사하다(Table 6). 수식에 의하여 계산된 10년 빈도별 홍수량과 금회 실제 강우조건에 따라 HSPF 모델을 이용하여 산정된 유출유량(Figure 6)은 임계지속시간, 시간당 강우량 등에 의하여 차이가 있을 수 있지만 금회 모의결과를 10년 빈도 홍수기와 유사한 경우로 가정하기에 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

수질모의의 운영시나리오는 홍수조절댐의 도입 목적과 기능을 반영하여 10년 빈도 홍수기시 유출유량(일평균 9.966m³/sec)이 가장 큰 2012년 7월 6일부터 담수로 인한 수위증가가 어느 정도 안정화되는 3일 동안 담수가 진행된 후 7월 9일부터 하류 방류를 시작하여 7월 12일까지 담수 전 수위로 낮추는 것으로 가정하였으며, 모의구간 내 일평균 유출입량은 Table 7에 나타내었다.

수질모의를 위한 수질 경계 농도는 강우에 의한 비점오염원 유입특성이 고려되어 출력된 유역모델 결과를 이용하였다. 수질 모의 기간으로 선정한 2012년 7월 4일~7월 12일의 유역 수질 농도는 BOD 0.60~1.81mg/L, T-N 1.643~2,350mg/L, T-P 0.013~0.052mg/L의 농도 범위를 나타내었다.

EFDC 수질 모델에 적용되는 모의대상 수질항목은 난분해성 입자상 유기물(RPOM), 분해성 입자상 유기물(LPOM), 용존상 유기물(DOM)에 대한 입력 자료를 요구하여, 유역모델 모의 결과인 BOD, T-

N, T-P를 세분화하여 입력하였다. 모델 입력자료 구성을 위하여 세분화하기 위한 분율은 “원주천댐 건설사업 전략환경영향평가서, 2015, 원주시”에서 원주천댐 예정지점 인근에서 조사한 자료를 분석하여 산정하였다. 조사된 자료를 분석한 결과 유입수질의 TOC는 TOC/BOD 분율(1,450)을 적용하여 산정하였으며, POC/TOC는 0.212, DOC/TOC는 0.788을 적용하였다. 유입수질의 T-P 중 PO₄-P는 PO₄-P/T-P 분율(0,603)을 이용하였으며, T-N 중 NH₄-N와 NO₃-N는 NH₄-N/T-N 분율(0,202)과 NO₃-N/T-N 분율(0,718)을 적용하였다(Table 8).

III. 연구결과 및 고찰

1. 유역유출 모의결과

10년 장기 모의를 실시하여 댐 건설 전·후의 유역 유출 오염부하량 변화를 연평균 부하량으로 분석한 결과 BOD 8.7%~18.9%, T-N 5.3%~7.7%, T-P 10.9%~16.7%의 저감효과를 나타내었다(Table 9). 연도별 유출부하량의 차이가 발생하는 것은 연도별로 총 강수량, 강우강도, 강우지속시간 등의 기상조건에 차이가 있기 때문으로 판단된다. 홍수조절지 댐 건설이후 유역 내 수물지 보상 등의 이유로 오염원이 감소하였으며, 이로 인하여 평균적으로 BOD 14.1%, T-N 6.2%, T-P 14.6%의 유출부하량이 감소하는 것으로 예측되었다.

Table 9. Analysis of watershed runoff load before and after dam construction

Year	Watershed runoff load (kg/day)								
	BOD			T-N			T-P		
	Before	After	Rate	Before	After	Rate	Before	After	Rate
2005	17.01	14.61	-14.1%	32.94	30.96	-6.0%	0.43	0.37	-14.0%
2006	16.50	15.06	-8.7%	36.06	34.14	-5.3%	0.46	0.41	-10.9%
2007	19.37	16.33	-15.7%	37.86	35.49	-6.3%	0.48	0.41	-14.6%
2008	13.98	11.34	-18.9%	25.28	23.34	-7.7%	0.36	0.30	-16.7%
2009	18.86	16.21	-14.1%	37.11	34.72	-6.4%	0.50	0.43	-14.0%
2010	20.74	18.02	-13.1%	38.72	36.45	-5.9%	0.51	0.44	-13.7%
2011	28.28	25.16	-11.0%	60.76	57.30	-5.7%	0.75	0.66	-12.0%
2012	19.20	16.51	-14.0%	37.18	34.87	-6.2%	0.49	0.43	-12.2%
2013	22.23	18.48	-16.9%	42.84	39.81	-7.1%	0.57	0.48	-15.8%
2014	10.00	8.24	-17.6%	19.27	17.90	-7.1%	0.24	0.21	-12.5%
Average	18.62	15.99	-14.1%	36.80	34.50	-6.2%	0.48	0.41	-14.6%

2. 댐내 수질변화 모의결과

집중강우로 인한 하천의 유량 증가시 하류 지역의 홍수 피해 방지를 목적으로 약 3일간 담수하였다가 약 3일 동안 방류하여 원래 하천의 형태를 되찾는 것을 가정하여 모의한 결과 수위는 담수 전 202.3EL.m에서 233.8EL.m까지 증가하는 것으로 예측되었다 (Figure 7). 이는 계획된 최고 만수위인 237.45EL.m를 넘지 않으므로 담수에 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

원주천댐 운영시 수질예측은 EFDC 모델을 이용

하여 TOC, T-N, T-P, Chl-a의 4개 수질항목에 대하여 실시하였다. 홍수시에 일시적 담수하는 기간 동안 TOC의 수질농도는 일평균 1.03mg/L~2.05mg/L로 호소수질환경기준 Ia(2mg/L 이하)~Ib(3mg/L 이하)등급의 수질을 나타내는 것으로 모의되었으며, T-N은 일평균 1.807mg/L~2.000mg/L로 호소수질환경기준 VI(1.5mg/L 초과)등급으로 모의되었다. T-P는 일평균 0.012mg/L~0.035mg/L로 호소수질환경기준 Ib(0.02mg/L 이하)~III(0.05mg/L 이하)등급의 수질을 나타내는 것으로 모의되었으며, Chl-a는 일평균 4.0mg/m³~4.1mg/m³로

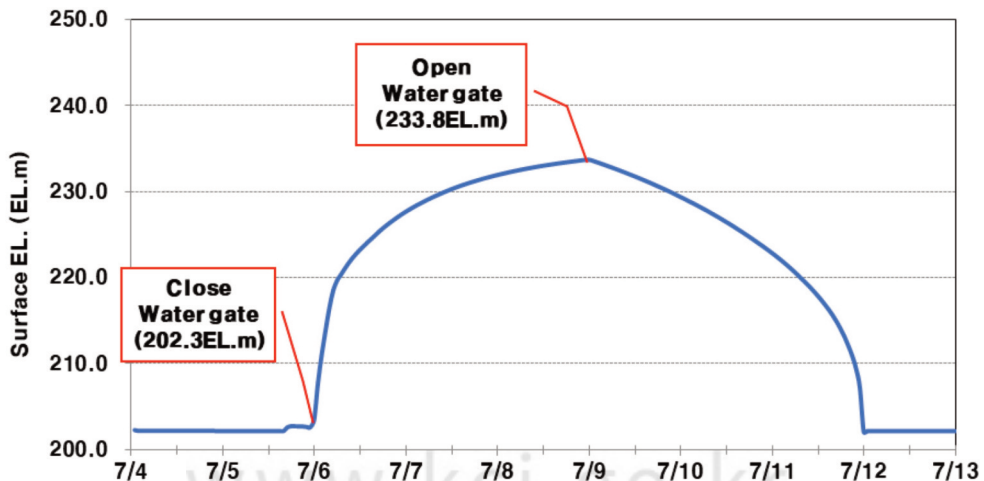


Figure 7. Change of water level according to the simulation conditions.

Table 10. Simulation result of water concentration change in dam during 10 years frequency rainfall

Day	TOC (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
7/5	1.76	2.000	0.028	4.0
7/6	2.05	1.878	0.035	4.0
7/7	1.37	1.878	0.020	4.0
7/8	1.24	1.807	0.018	4.0
7/9	1.15	1.824	0.015	4.1
7/10	1.05	1.884	0.012	4.0
7/11	1.03	1.918	0.012	4.0
Average	1.38	1.884	0.020	4.0

모의되었다(Table 10). 홍수조절댐의 특성상 담수되는 기간이 2~3일로 짧으므로 부영양화 등의 수질 악영향은 거의 없는 것으로 분석되었으며, 오히려 통수로 차단에 의하여 체적 및 수표면적이 증가하고, 초기 강우시 유입되었던 고농도의 오염물질이 초기 유출 이후 낮아진 농도로 유입되는 수체에 의하여 희석되어 수질 농도가 감소하는 것으로 모의되었다(Figure 8, 9, 10, 11).

하류 하천에 미치는 영향을 검토하기 위하여 댐 건설 전 초기강우가 포함된 2일간의 평균 수질과 댐 건설 후 일시적으로 담수 후 방류되는 3일간의 평균 수질을 비교하였다. 댐 방류 지점의 수질을 비교한 결과(Table 11) 대부분의 항목에서 댐 건설 후 초기강우의 저류효과 등의 이유로 수질오염도가 소폭 개선되는 것으로 예측되어 하류 하천에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

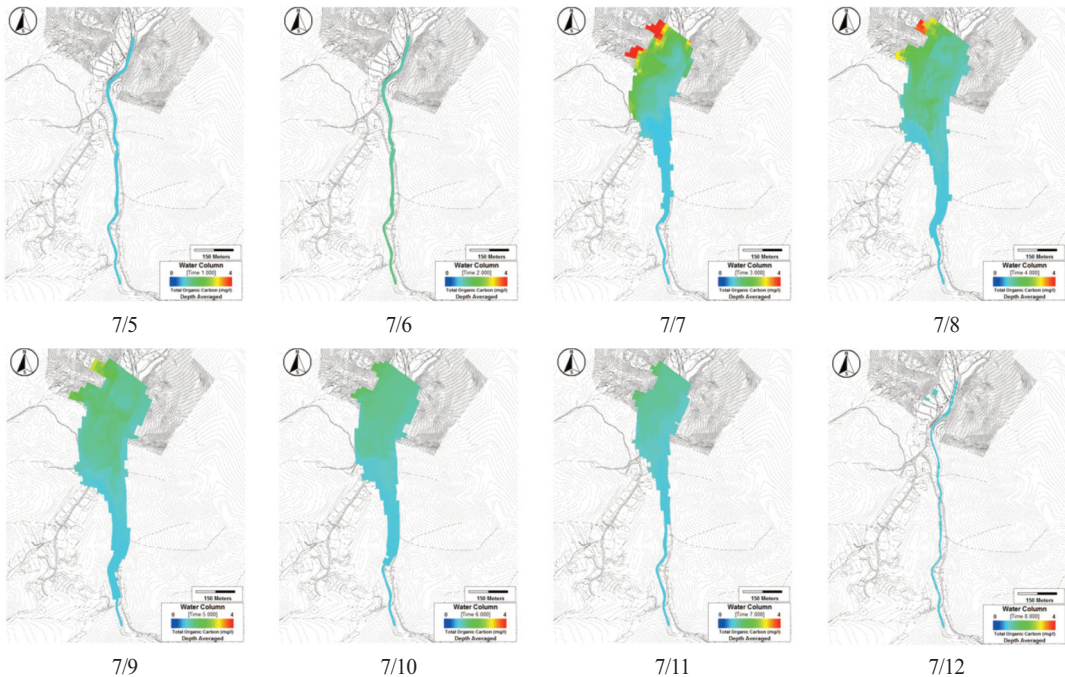


Figure 8. Water quality simulation result - TOC.

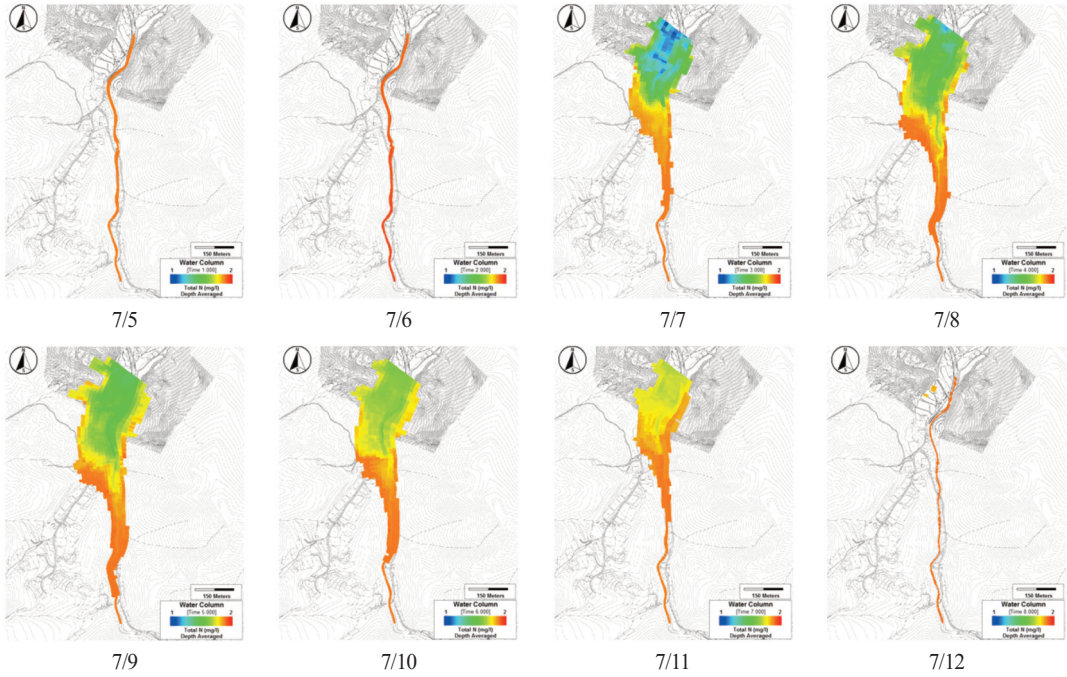


Figure 9. Water quality simulation result – T-N.

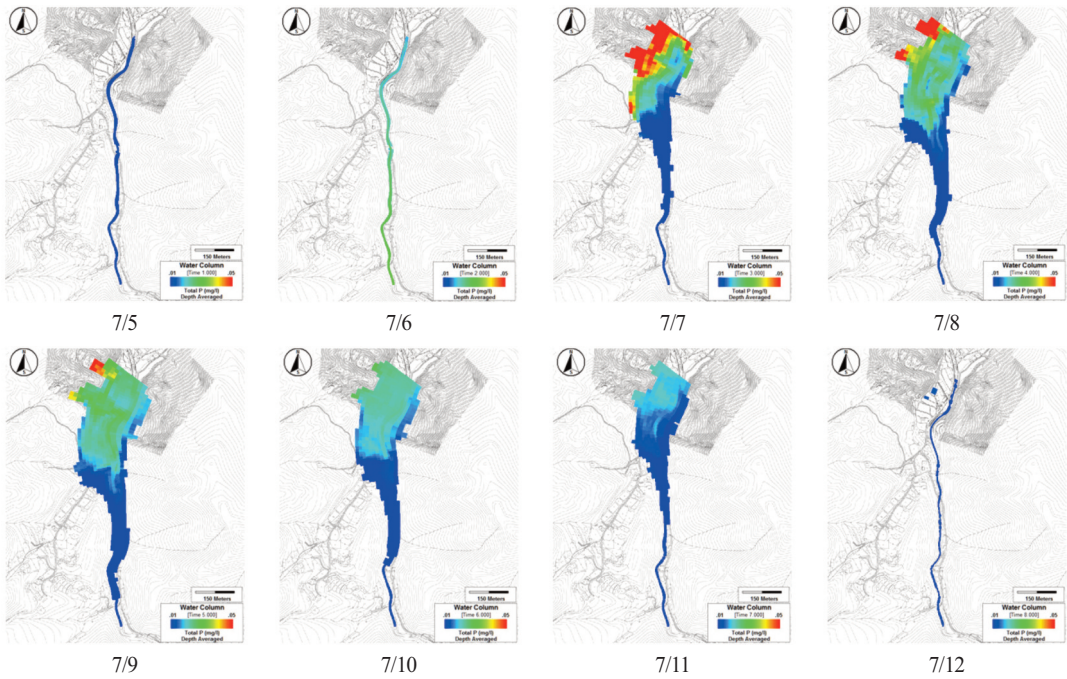


Figure 10. Water quality simulation result – T-P.

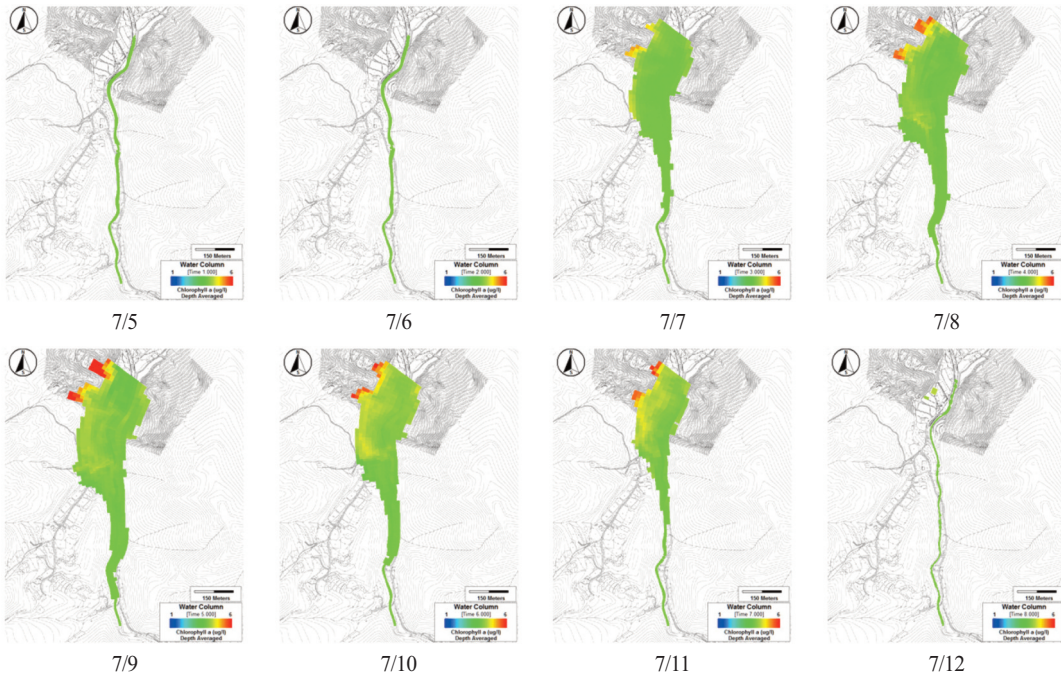


Figure 11. Water quality simulation result – Chl-a.

Table 11. Water quality simulation results before and after dam construction

Division		Simulation results (Dam discharge point)		
		BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
10 years frequency rainfall	Before	0.880	1.925	0.024
	After	0.740	1.875	0.013

IV. 결론

일정 규모 이상의 댐을 건설할 때에는 환경영향평가를 실시하여야 하며, 사업자는 각종 모델기법을 이용하여 댐 건설 후의 수질변화를 예측하여 평가서에 수록하고 있다(Park et al, 2010). 본 연구에서는 현행 환경영향평가에서 검토하는 호소 내 수질변화 예측 중 홍수조절댐에 대한 환경영향평가 기법을 제시하였다.

우선적으로 유역의 유출유량 및 오염부하량을 분석하기 위하여 지형자료, 토지이용지도, 기상자료 등을 적용하여 구축한 HSPF 모델을 이용하여 10년간의 유출유량과 오염부하량을 모의하였다. 10년간 다변하는 기상조건을 반영한 장기모의를 실시하여 다양한 기상조건 변화에 따른 비점오염유출량 변화가

포함된 댐건설 전·후의 유역유출 오염부하량 변화를 분석하였다. 또한 10년 모의기간 중 최대 강우조건에 따른 유역유출 유량 및 수질을 분석하여 댐 운영시 영향예측을 위한 기초자료를 제공하였다.

평상시는 하천의 형태를 유지하며, 홍수기에 일시적으로 수문을 닫아 저류하는 홍수조절용 댐의 특성을 최대한 반영하기 위하여 Curvilinear Grid 형태의 격자를 구성하였으며, 수치해석의 안정성을 나타내는 평균 직교성편차율(Orthogonal Deviation)을 3이하로 구성하여 모의 격자의 안정성을 확보한 후 수질변화 예측을 실시하였다. 홍수시에 일시적으로 담수하는 홍수조절댐의 특성상 댐 내의 체류시간이 짧아 조류 농도 증가 등의 수질 악영향은 거의 없는 것으로 분석되었으며, 오히려 통수로 차단에 의하여

비점오염저감시설 중 저류시설 형태를 나타내어 수질오염도가 다소 개선되는 것으로 모의되었다.

본 연구에서는 계획 중인 댐으로 충분한 모델의 검·보정을 수행할 수 없기 때문에 정확한 모의에는 일부 한계가 있을 수 있지만, 유역모델의 10년 장기 유출해석, 체류시간이 짧고 체적이 급변하는 홍수조절댐의 특성을 최대한 반영한 모델의 격자 구성 및 이를 이용한 수질변화 예측 등 환경영향평가단계에서 홍수조절댐의 수질영향 검토 방법을 제시하였다. 향후 실제 댐의 운영 시에는 강우시 유역유출 유량 및 수질의 실측, 유출 유량조건에 따른 통수문의 개폐, 하류 침수조건을 반영한 수문 개방 등 실제 상황을 반영하여 충분한 보·검증을 실시함으로써 모델을 보완할 수 있으며, 이를 활용하여 다양한 운영조건에 따른 수환경의 영향을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

논문의 내용과 체제를 세심하게 검토하여 주신 심사위원님들께 감사드립니다.

References

- Kim GS, Yim TK. 2005. Characterization of Long-term Trends of Rainfall and Stream Flow in South Korea. Korean Society of Water Environment Conference, pp.916-919. [Korean Literature]
- NDMI(National Disaster Management Institute). 2008. A Study on the Prediction of Climate and Social Change &the Analysis of Primary Factors of Increased Disasters in the 21st Century; Climate Change. [Korean Literature]
- Wonju-si. 2015. Wonjucheon dam Strategic Environmental Impact Assessment report. [Korean Literature]
- U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- HumanPlanet. 2016. EFDC Navigator User's Manual(A pre/post-processor for the Environmental Fluid Dynamics Code). [Korean Literature]
- P.M. Craig and D.H. Chung. 2013. A Simple Algorithm for Grid Generation Based on Laplace Equations. The 14th Asia Congress of Fluid Mechanics-14ACFM, October 15-19.
- Park JC, Choi JH, Song YI, Song SJ, Seo DI. 2010. Water Quality Modeling of Youngju Dam Reservoir by HSPF, EFDC and WASP. J. Environ. Impact Assess. 19(5): 465-473. [Korean Literature]
- USEPA. 2009. The Water Quality Analysis simulation Program, WASP7.3
- Seo DI, Lee EH. 2002. Water Quality Modelling of Daechung Lake - Effect of Yongdam Dam, Proceedings of Korean Society of Water Environment. 35(6): 737-751. [Korean Literature]
- Kim SJ. 2003. Evaluation of WASP5 as a Water Quality Model for Yongdam Reservoir, Master's thesis, Chungnam National University. [Korean Literature]
- Kwak DH. 2001. Water quality forecasting of Tam-Jin Dam with WASP5 model, Master's thesis, Chonnam National University. [Korean Literature]
- K-Water. 2007. Report of Water Quality Improvement basic plan of Sayeon Dam · Daegok Dam. [Korean Literature]
- K-Water. 2009. Report of Water Quality Improvement basic plan of youngcheon Dam.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2002.

EFDC Technical Memorandum; Theoretical and Computational Aspects of Sediment and Contaminant Transport in the EFDC Model.
U.S. Environmental Protection Agency. 2002.

User's Manual for Environmental Fluid Dynamics Code(EFDC).
Tetra Tech, Inc.. 2007. The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation, Volume 3 : Water Quality Module.