

북한강 수계 대규모 탁수사상 발생에 의한 댐 저수지의 탁수 영향 분석

박형석 · 정세웅[†] · 정선아^{*}

충북대학교

^{*}K-water

Analyzing the Effect of an Extreme Turbidity Flow Event on the Dam Reservoirs in North Han River Basin

Hyung-Seok Park · Se-Woong Chung[†] · Sun-a Choung^{*}

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

^{*}Water Resources Research Center, K-water Institute

(Received 10 January 2017, Revised 6 April 2017, Accepted 14 April 2017)

Abstract

A long-term resuspension of small particles, called persistent turbidity, is one of the most important water quality concerns in the dam reservoirs system located in North Han River. Persistent turbidity may incur aesthetic nuisance and harmful effect on the ecosystem health, in addition to elevated water treatment costs for the drinking water supply to the Seoul metropolitan area. These sufferings have been more intensified as the strength and frequency of rainfall events increase by climate change in the basin. This study was to analyze the effect of an extreme turbidity flow event that occurred in 2006 on the serial reservoirs system (Soyang-Uiam-Cheongpyung-Paldang) in North Han River. The CE-QUAL-W2 model was set up and calibrated for the river and reservoirs system using the field data obtained in 2006 and 2007. The results showed that Soyang Reservoir released turbid water, which was classified as the TSS concentration is greater than 25 mg/L, for 334 days with peak TSS of 264.1 mg/L after the extreme flood event (592.7 mm) occurred between July 10 and 18 of 2006. The turbid water departed from Soyang Reservoir reached at the most downstream Paldang Reservoir after about 20 days and sustained for 41 days, which was validated with water treatment plant data. Since the released water from Soyang Reservoir had low water temperature and high TSS, an underflow formed in the downstream reservoirs and vertically mixed at Paldang Reservoir due to dilution by the sufficient inflow from South Han River.

Key words : CE-QUAL-W2, Extreme event, North Han River, Persistent turbidity, Turbidity flow

1. Introduction

우리나라의 강우는 지역별, 계절별로 편중되어 안정적인 수자원 확보 및 관리에 어려운 여건을 가지고 있다. 이에 따라 홍수조절, 용수 공급, 전력 생산 등의 목적으로 다양한 규모의 댐들을 건설하여 운영 중에 있다. 그러나, 댐은 대규모 홍수 발생시 수체의 흐름을 단절시켜 상류 유역으로부터 유입된 탁수를 호 내에서 장기간 체류시키고, 하류 하천에는 탁수를 장기간 방류하는 환경문제를 유발한다. 이러한 유역 내 하천과 저수지에서 탁수의 장기화는 수자원의 이용뿐만 아니라 수질과 생태계에 부정적 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Chung, 2004; Chung et. al., 2008; Kim and Jung, 2007). 저수지로부터 탁수방류가 장

기간 지속되면 하류에 위치한 정수장의 수처리비용 상승뿐만 아니라, 하천경관의 심미적 문제, 어획량 감소 등을 유발하며, 지역주민의 민원을 야기하여 사회적 이슈가 되기도 한다. 또한 탁수는 인을 포함한 다양한 비점오염물질을 저수지로 단시간에 다량 유입시켜 수질오염을 야기하며, 저수지내 퇴사를 일으켜 저수지의 정상적인 기능에 악영향을 미칠 수 있으며, 장기간 고탁도의 물이 하천으로 방류될 경우 어류의 서식환경에도 부정적 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Newcombe and Jensen, 1996).

본 연구의 대상 지역에 포함되는 소양강댐 유역에서는 과거 태풍 ‘예위니아’의 영향으로 2006년 7월 10일~18일까지 연평균 강수량(1,283 mm)의 46.2%에 해당하는 592.7 mm의 집중강우가 발생하였다. 이로 인해 소양호내 최고탁도는 1,256 NTU까지 상승하였으며, 방류수 최고탁도는 328 NTU를 기록하였다. 또한 중층의 고탁수를 우선 배제하는 댐 운영에도 불구하고 2006년 7월부터 2007년 2월까지 약 8개월간 30 NTU 이상의 탁수가 방류되었다(Yeom et. al., 2008). 이 시기에 팔당호를 취수원으로 하는 정수장

[†] To whom correspondence should be addressed.

schung@chungbuk.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 원수 탁도는 최고 257 NTU까지 상승하였으며, 30 NTU 이상의 고탁수가 30일 이상 지속되었다.

팔당호는 북한강과 남한강의 합류지점이며, 수도권 2천만 시민의 상수원으로 사용되는 중요한 수자원이다. 상류에는 소양강댐 이외에 춘천, 의암, 청평, 팔당, 충주, 횡성댐 등이 위치하고 있으며, 상류 댐으로부터 장기간 탁수 유출시 팔당호는 수자원 이용에 제약을 받을 수 있다. 특히, 최근 기후변화의 영향으로 탁수발생 빈도와 강도의 증가가 예상됨에 따라 수도권 상수원수의 탁수피해 저감을 위한 국가적 대책 마련이 시급하다(Kim et al. 2014; Ye et al. 2009).

댐 저수지의 탁수저감 대책으로는 유역내 토양침식 조절, 저수구역 내 퇴사댐 건설, 선택취수설비 도입 등의 방안이 있다(Chung and Oh, 2006; Gelda and Effler, 2007; Yajima et al., 2006). 소양강댐 저수지에도 2006년 대규모 탁수발생 이후 선택취수설비가 도입되었다. 그러나 대규모 탁수사상 발생시 선택취수설비의 최적운전을 위해서는 소양호 내에서의 탁수 유동해석 뿐만 아니라, 하류하천과 댐 저수지군에서의 연속된 시스템적 탁수 유동해석이 필요하다.

최근에는 센서기술과 컴퓨터 모델링 기술이 발달함에 따라 저수지 실시간 탁수 감시 및 예측 시스템을 도입하여 탁수를 보다 과학적으로 조절하기 위한 연구가 진행되어져 왔다(Chung and Oh., 2006; Hipsey et al., 2007). 또한 원격탐사기법, Landsat 영상분석 등 다양한 탁수모니터링 기술 개발 연구도 진행되고 있다(Potes et al., 2012; Effler et al., 2014).

국내에서 저수지 탁수 모의는 주로 2차원 횡방향 평균 수리·수질 모델인 CE-QUAL-W2(이하 'W2')가 자주 활용되어 왔으며, 탁수거동해석, 탁수저감 대책의 효과분석 등에 활용되고 있다(Chung, 2004; Chung et al., 2011; Kim et al., 2001; Lee et al., 2007). 또한 국외에서도 W2모델은 상수원으로 사용되는 저수지에서 탁수 유입시 유동해석과 취수원수 영향평가를 위한 수치모델링(Gelda et al., 2007), 선택취수 및 방류구 개조 등의 수리구조물 개선에 따른 탁수 저감 효과평가(New York City, 2009), 응집제 주입을 통한 탁수제어 효과 평가 연구(Gelda et al., 2012), 미래 기후변화에 따른 탁수 발생 예측(Samal et al., 2013) 등의 연구에 다양하게 활용되고 있다. 본 연구의 대상지역인 북한강 수계에서도 탁수 감시 및 예측시스템은 대규모 탁수사상 발생시 팔당호 상수원의 탁수발생을 선제적으로 예측하고 정수장의 수처리를 최적화하는데 활용 가능하다.

본 연구의 목적은 소양강댐 건설 이후 최대 규모의 탁수가 발생한 홍수사상을 대상으로 북한강 수계의 소양강댐 및 그 하류 댐 저수지군(의암-청평-팔당)에서의 탁수 유동 특성을 분석하고, 탁수의 장기화가 수도권 상수원수에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 대규모 탁수사상 발생에 따른 소양호 내 탁수 유동해석과 하류 저수지군에서의 탁수 도달과 지속시간에 대한 수치모의를 위해 W2모델을 적용하였으며, 특히 수도권의 주요 상수원인 팔당호에서 탁수의 도달시간, 밀도류 거동 특성, 고탁수 지속시간 등의 영향을 평가하였다. 본 연구결과는 향후 기후변화의 영향으로 더욱

자주 발생할 것으로 전망되는 극한 탁수 사상에 대한 탁수 예측 및 대응기술 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. Materials and Methods

2.1. 연구대상 지역

본 연구의 대상지역인 북한강 수계의 소양강댐과 그 하류 댐 저수지군의 위치와 수질 모니터링 장소는 Fig 1과 같다. 소양강댐은 북한강 지류인 소양강에 위치하며, 서울을 비롯한 수도권 인근지역에 생·공·농업용수 공급과 홍수 조절, 전력생산의 역할을 한다. 댐의 담수로 형성된 소양호는 만수면적 70.0 km², 총 저수용량은 2,900 백만m³, 최대수심이 120 m이며, 물의 수리학적 체류시간은 0.75년으로써 국내 최대 규모의 인공호이다. 소양호 유역은 강원도 고성군, 양구군, 인제군, 홍천군, 춘천시에 걸쳐있으며, 총 유역 면적은 2,703 km²이다. 소양호는 북쪽에서 인북천, 남쪽에서는 내린천이 유입하고 있으며, 유역 내 토지는 대부분 산림과 농경지로 이용되어 인구밀도가 낮으며 전형적인 산간 지방의 특징을 가지고 있다. 유역 내에는 토양이 유실되기 쉬운 고랭지 농업이 성행함에 따라, 강우 발생시 고농도의 유사를 포함한 탁수가 소양호로 유입하여 하천환경을 악화시킨다. 이로 인해 「비점오염원 관리지역 지정제도」에 따라 2007년에 비점오염 관리지역으로 지정되었다(Choi et al., 2014). 소양강댐은 최근 극한 최대가능강우(PMP) 사상에서 댐의 안전성을 확보하기 위해 보조여수로를 설치하였으며, 2006년에 발생한 대규모 탁수 사상 이후 탁수저감 대책시설로써 선택취수설비를 도입하였다.

의암댐은 북한강 본류와 소양강이 합류하는 지점의 약 10 km 하류에 위치하고 있으며, 홍수조절 및 전력생산의 기능을 제공한다. 의암호는 춘천댐 및 소양강댐 방류의 직접적인 영향을 받는 하천형 호수이며, 최근 연구결과에 의하면 소양강댐 증충에 차가운 방류수의 영향을 받아 유입수가 하층밀도류를 형성하여 수온성층이 발생한다(Choi et al., 2015). 청평댐은 의암댐 하류 약 44 km지점에 위치하고 있으며, 홍수조절 및 전력생산의 역할을 한다. 또한 청평호 내 대성리 관광단지과 청평유원지가 있어, 관광 및 수상레저 공간으로 활발히 이용되고 있다. 주요 지류하천으로 홍천강과 가평천이 있지만, 상류 의암댐 방류량이 유입유량의 90% 이상을 차지한다.

팔당댐은 북한강과 남한강의 합류 지점으로부터 하류 약 11 km 지점에 위치한다. 홍수조절, 전력생산, 용수공급 등의 역할을 하며, 연간 378백만Kw의 전력생산과 7,828 천 m³/일의 용수공급 능력을 보유하고 있다. 팔당호는 수도권의 상수원으로 사용되고 있어 수질환경 보전을 위해 1990년부터 환경정책기본법 제 22조에 의거 특별대책지역으로 지정되어 관리되고 있다. 현재 호소수를 수원으로 하는 정수장이 3개소가 있으며, 각 정수장의 2006년과 2007년의 탁도 실측자료를 분석하여 Table 1에 제시하였다. 일반적으로 정수장에서 탁도 30 NTU 초과시 고탁수 유입으로 판단한다. 2006년 팔당호 상류유역에서 대규모 탁수사상이

Table 1. Summary of turbidity data at water treatment plants that use raw water form Paldang Reservoir in 2006, 2007

| Items | 2006 | | | 2007 | | |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | plant1 | plant2 | plant3 | plant1 | plant2 | plant3 |
| Average (NTU) | 14.2 | 13.7 | 11.9 | 8.3 | 8.9 | 10.2 |
| Maximum (NTU) | 237 | 257 | 201 | 98 | 100 | 97 |
| Days of exceeding 30NTU | 39 | 43 | 37 | 12 | 6 | 13 |

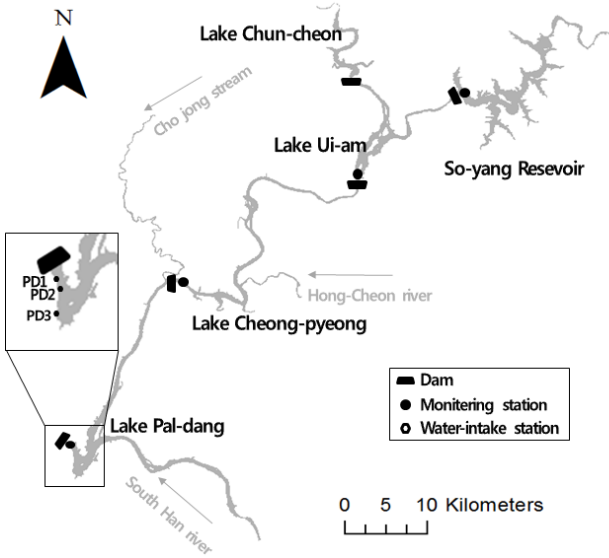


Fig. 1. Locations of the dam reservoirs and monitoring stations in North Han River.

발생함에 따라 팔당호를 취수원으로 하는 정수장에 고탁수 유입이 1개월 이상 지속되었다.

2.2. 탁수예측 모델 구축

2.2.1. 모델 개요

소양호와 그 하류 구간 팔당호까지의 하천-저수지 시스템의 수리 및 탁수 수치모의는 W2 모델을 사용하였다. W2 모델은 미공병단(US Army Corps of Engineers)에서 개발한 2차원 횡방향 평균(Laterally-averaged) 수리·수질 모델이다.

저수지 성층현상 및 밀도류 유동해석이 우수하며, 횡방향 완전혼합을 가정하기 때문에 우리나라 저수지와 같은 폭이 좁고 수심이 깊은 수체 모의에 효율적이다(Chung et al., 2005; Cole and Buchak, 1995). W2 모델은 저수지 수위변동, 유속분포(흐름 및 수심방향), 수온, 그리고 28개 수질항목에 대한 모의가 가능하며, 수리구조물, 유입 지류, 점·비점오염원, 취수(Withdrawal), 하류 방류(Releases) 조건에 대한 모의 기능을 포함한다. 그리고, 수체의 바닥 경사에 따른 중력의 영향을 고려하여 댐과 보 구조물 등에 의해 단절된 저수지-하천시스템의 연계 모의가 가능하며, 입력자료의 선형보간(Interpolation) 기능 등도 포함되어 있다. 현재 W2모델은 미공병단, 미개척국, 테네시주역관리청, 뉴욕시 환경보호국 등 미국의 주요 저수지관리 기관에서 수질 및 탁수 관리를 위한 모델로 광범위하게 활용되고 있다(Cole and Tillman, 1999, 2001; Gelda et al., 2012).

2.2.2 입력자료 구성

본 연구의 대상지역인 북한강 수계의 소양호와 의암-청평-팔당 구간을 대상으로 W2모델의 수치격자를 구성하였다. 소양호의 유한 차분 수치격자는 『소양강댐 저수지퇴사조사 측량용역 보고서』 자료를 바탕으로 구성된 선행연구(Chung et. al, 2011)의 자료를 활용하였으며, 흐름방향으로는 500 m간격으로 138개의 Segment와 수직 방향으로는 격자 간격 1 m로 최대 134개의 Layer로 구성하였다(Fig. 2(a)). 의암-청평-팔당호의 유한 차분 격자는 K-Water(2013)에서 제공한 자료를 사용하였으며, 흐름방향 총 149개 계산구간(segment)과 수직방향 총 119개의 수층(layer)로 구성하였다

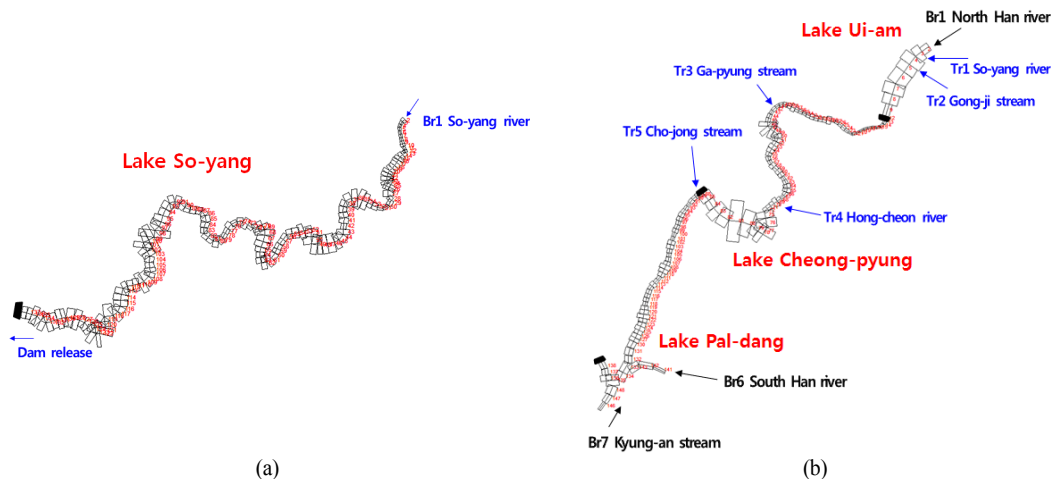


Fig. 2. Grid systems used for (a) Soyang and (b) Ui-am, Cheong-pyung, and Pal-dang reservoirs.

(Fig. 2(b)).

모의대상 수문년도는 소양강댐 축조 이후 최대 탁수사상이 발생한 2006년과 2007년 수문사상을 대상으로 하였다. 모델 구동에 필요한 초기조건은 저수위와 수심별 수온 및 TSS 농도 등이며, 한국수자원공사 및 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 댐 운영자료를 바탕으로 각 댐의 초기수위를 설정하였다. 또한, 환경부 물환경정보시스템의 측정망 자료(소양강댐1, 의암댐1, 청평댐1, 팔당댐2 지점)를 활용하여 각 댐별 모의 시작 시점의 초기 수온 및 수질 농도를 입력하였다.

경계조건으로는 유입량과 방류량, 기상자료, 그리고 본류와 지류의 유입수온과 TSS 농도 등이다. 유량 조건은 국가수자원종합정보시스템(WAMIS), K-water의 수문정보시스템, 한강홍수통제소 실시간 수문자료에서 제공하는 댐별 운영자료 및 유입지류별의 유량자료를 활용하여 물수지 분석을 통해 유입유량을 입력하였다. 기상자료는 기온(°C), 이슬점온도(°C), 풍향(Radian), 풍속(m/s), 운량(할)이며, 소양호는 춘천기상대 및 양구AWS, 의암-청평-팔당 구간은 양평기상대의 자료를 사용하였다. 소양호의 유입수질자료는 선현연구(Chung et al., 2011)에서 사용한 K-Water 실측자료를 동일하게 적용하였으며, 의암-청평-팔당 구간은 각 유입지류의 환경부 수질측정망 자료를 입력하였다.

2.2.3. 탁수 해석 및 평가방법

대규모 탁수사상 발생 이후 소양호에서 고탁수 방류가 장기화 될 경우 하류 구간에 미치는 영향을 파악하기 위해, 2006년과 2007년 2년에 걸쳐 연속된 수문사상에 대해 탁수 모의를 수행하였다. 소양호의 방류량 및 수질을 의암-청평-팔당호 모델의 경계조건으로 활용하였다. 모델의 종속변수인 TSS는 입자의 크기에 따라서 3개의 그룹으로 구분하였으며, 모델에 사용한 TSS 그룹별 침강속도 및 농도비는 Table 2와 같다.

소양호에 적용한 탁도-SS 농도 관계식은 K-Water (2007)의 실험 자료를 사용하여 유도하였으며 Eq. (1)과 같다.

$$SS = 0.80 \times Turbidity \ R^2:0.94 \quad (1)$$

탁수의 영향 평가는 각 저수지별 탁수 연속 방류 일수 및 탁수점유율을 평가하였다. TSS 25 mg/L 이상을 기준으로 고탁수로 분류하였으며, 탁수 발생 후 저수지내 탁수점유율(θ)을 Eq. (2)를 적용하여 산정하였다. 탁수 점유율은 저수지 총 저수용량 대비 고탁수량의 비를 의미한다.

$$\theta = \frac{V_t}{V_0} \quad (2)$$

여기서, V_t =Turbidity flow volume(SS>25 mg/L), V_0 =Reservoir volume

2.2.4. 모델의 평가

실측값과 모델 결과의 비교·평가는 AME(Absolute Mean Error) 및 RMSE(Root Mean Square Error), NSE(Nash-Surcliffe model efficiency coefficient)를 이용하였다. AME는 모의 값과 실측값 차이의 절대값을 산술평균한 오차로써 그 값이 0에 가까울수록 모델의 신뢰도가 높은 것으로 평가한다. RMSE는 모의값과 실측값의 차이를 제곱하여 산술 평균한 값의 제곱근으로써 역시 0에 가까울수록 모델의 신뢰도가 높다. NSE은 모의값과 실측값 차이의 제곱을 실측값과 실측평균값 차이의 제곱으로 나누어준 값으로 -∞에서 1사이 범위이며, 1에 가까울수록 모델의 신뢰도가 높다.

3. Results and Discussion

3.1 물수지 및 탁수 예측 모델 검증

모의기간인 2006년, 2007년 수문사상을 대상으로 소양호 및 의암-청평-팔당호의 일별 운영수위와 모의수위를 비교하여 물수지 재현성을 검증하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 소양호의 오차 크기는 AME와 RMSE값이 0.03 m, 0.04 m, NSE가 0.99로 높은 신뢰도를 보였다. 의암-청평-팔당댐은 발전용 댐으로 각 저수지의 연간 수위변화가 크지 않았으며, AME와 RMSE값도 0.08~0.13 m, 0.11~0.15 m 범위, NSE값은 0.98~0.99범위으로써 모델은 각 댐 저수지의 물수지 해석에 대한 높은 신뢰도를 나타내었다.

소양호 방류수 및 의암-청평-팔당호의 댐앞 모니터링 지점의 증층에서 실측한 TSS 농도자료와 모델의 예측농도를 시계열로 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 소양호의 TSS농도는 방류수의 실측 탁도를 TSS-탁도 관계식을 사용하여 변환한 값이며, 의암-청평-팔당호의 TSS농도는 주 또는 월 단위로 측정된 환경부의 수질측정망 자료이다.

모의결과 소양호의 TSS 예측오차는 AME 39.9 mg/L, RMSE 58.6 mg/L, NSE 0.63의 값을 나타냈다. 소양호 댐 방류수의 TSS농도의 시계열 추세 및 최고값을 적절히 재현 하였으나(Fig. 4(a)), 탁수 방류시점 및 피크 도달 이후에 방류수 TSS농도가 감소되는 부분에서 약간의 차이를 나타냈다. 이는 유입 탁수가 댐 앞으로 이동하는 과정에서 만곡부와 경사면 등에서 수치해석 과정에 운동량이 인위적으로 손실되어 도달시간이 지체된 것과 여수로를 통한 초기 탁수 배제 효과를 모델이 적절하게 반영하지 못한 것이 원인으로 판단된다.

의암-청평-팔당호는 각 댐앞 지점의 증층 실측 TSS 자료와 모델 예측 농도를 시계열로 비교하였다(Fig. 4(b-d)). 의암, 청평, 팔당호의 TSS예측 오차의 크기는 각각 AME 6.9 mg/L, 8.4 mg/L, 9.2 mg/L, RMSE 12.4 mg/L, 11.9 mg/L,

Table 2. Diameter, settling velocity, partition of TSS by each group

| Items | Group 1 | Group 2 | Group 3 |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| Diameter (µm) | 1.64 | 7.33 | 24.05 |
| Settling velocity (m/d) | 0.05 | 0.2 | 5 |
| Partition (%) | 60 | 30 | 10 |

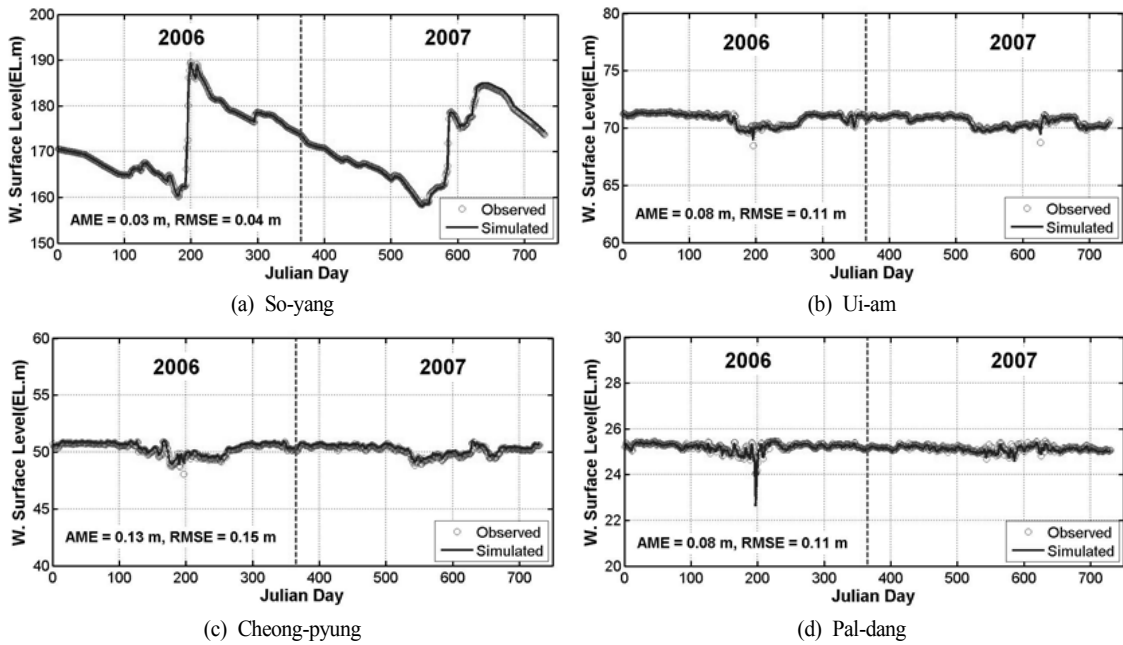


Fig. 3. Comparison of observed (Symbol) and simulated (line) water levels of each reservoir in 2006, 2007

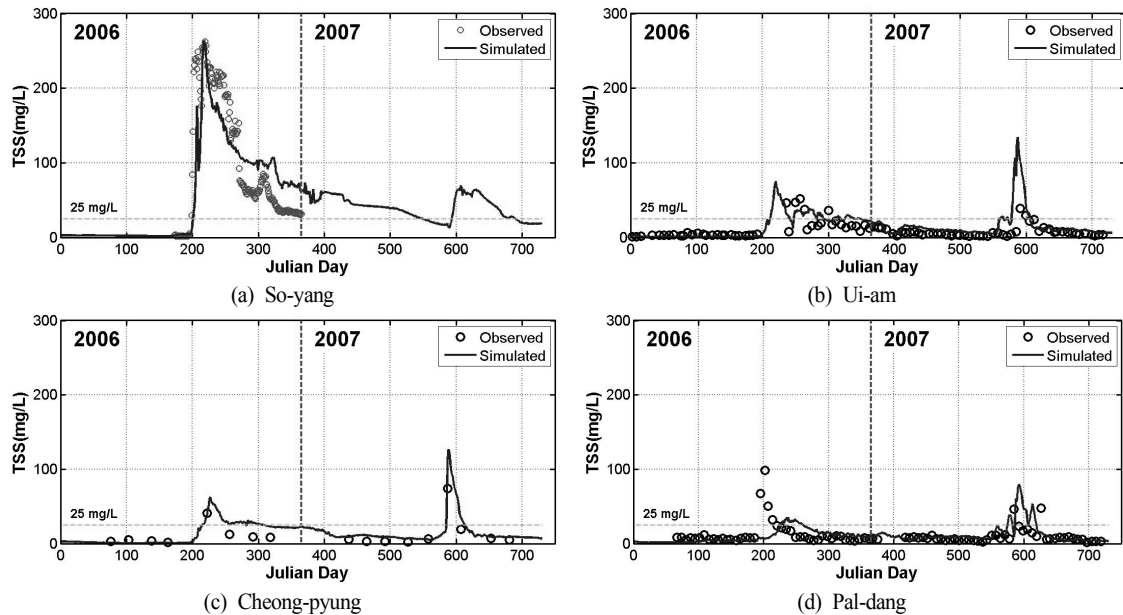


Fig. 4. Comparison of observed (Symbol) and simulated (line) TSS concentrations of each reservoir in 2006, 2007.

17.3 mg/L, NSE 0.53, 0.55, -0.50의 값을 나타냈다. 각 저수지 별로 모의결과는 실측값의 추세를 적절히 반영하였으나, 팔당댐의 침투 TSS 농도가 상류로부터 전파된 탁수가 도달하기 이전에 나타났다. 이는 팔당호로 직접 유입하는 지류인 경안천 등의 TSS 실측 자료가 부족(월단위 측정)하여 강우 직후 이들 하천에서 유입하는 탁수를 모델에서 고려하지 못한 것이 원인으로 판단된다. 수질측정망 자료는 주 또는 월단위 주기로 측정된 자료이며, 홍수발생시 급변하는 TSS 농도를 반영하기에는 한계가 있다. 이는 팔당호 TSS예측 모델 오차의 원인으로 작용하여, NSE가 -값이 도출되는 결과를 나타냈다. 탁수예측 모델의 불확실성을 저

감하기 위해서는 고 해상도의 TSS모니터링 자료가 필요하며, 홍수발생시에는 TSS에 비해 상대적으로 측정하기 쉬운 탁도를 연속 측정하는 방안이 효율적이다. 향후, 이들 취수장에 대한 탁수 예보의 정확도를 높이기 위해서는 팔당호 지류하천에 대한 실시간 탁도 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

3.2 탁수 영향 평가

2006년 수문사상에서 소양호와 팔당호에 대한 탁수모의 결과를 2차원(x-z) 종단도로 Fig. 5에 제시하였다. 7월 중순경에 소양호로 유입한 탁수는 저수지 내에서 중층 밀도류

를 형성하였으며, 약 1주일 후 댐 앞에 도달하여 EL.130 m~EL.170 m 구간에서 장기간 탁수층을 형성하였다. 강한 수온성층이 형성되어 있어 대규모 탁수가 유입하였음에도 탁수가 표층까지는 진출하지 못하고 중층에서 머무르는 경향을 보였다. 그러나, 11월 초순부터 수온성층이 약해지면서 표층으로 탁수가 전파되었으며, 저수지 전도현상과 함께 수직혼합 되어 탁수장기방류를 유발하였다.

팔당호로 유입한 탁수는 유입초기 밀도류를 형성하며 중층을 따라 이동하였으며, 시간이 경과함에 따라 남한강 유입수와 혼합하면서 주 방류구간(EL. 24 m)인 중·상층으로 탁수층이 이동하는 것으로 나타났다.

대규모 탁수사상 발생 이후 소양호와 하류구간인 의암-청평-팔당호에서 유입 최고 TSS농도, 방류수 최고 TSS농도, 고탁수 연속 방류일수, 호내 탁수점유율 등을 Table 3에 나타냈다. 소양호에서는 2006년 태풍 ‘에위니아’로 인한 대규

모 탁수사상 유입이후 7월 20일(Jday 201)부터 TSS 25 mg/L 이상의 탁수 방류를 시작하였으며, 방류수 최고 TSS 농도는 264.1 mg/L로 8월 6일(Jday 218)에 발생하였다. 이후 334일간 연속해서 탁수를 방류한 것으로 나타났으며, 이는 호내로 유입한 탁수가 저수지의 중·하층(취수구간 이하 수심)에서 장기간 체류하다 전도현상으로 수직 혼합이 발생하는 시기에 저수지 전층으로 확산된 것이 원인으로 판단된다.

의암호에서 탁수 방류는 168일간 지속되었으며, 소양호에서 최고 TSS농도의 탁수 방류이후 1.8일 뒤에 TSS농도는 최고 102.7 mg/L를 나타냈다. 청평호는 182일간 탁수방류가 지속되었으며, 방류수의 최고 TSS농도는 81.8 mg/L로 소양호 최고 TSS농도의 방류 이후 8.9일 이후에 발생하였다. 팔당호 방류수의 최고 TSS농도는 34.5 mg/L였으며, 소양호 최고 TSS농도 방류 19.9일 이후에 발생하는 것으로

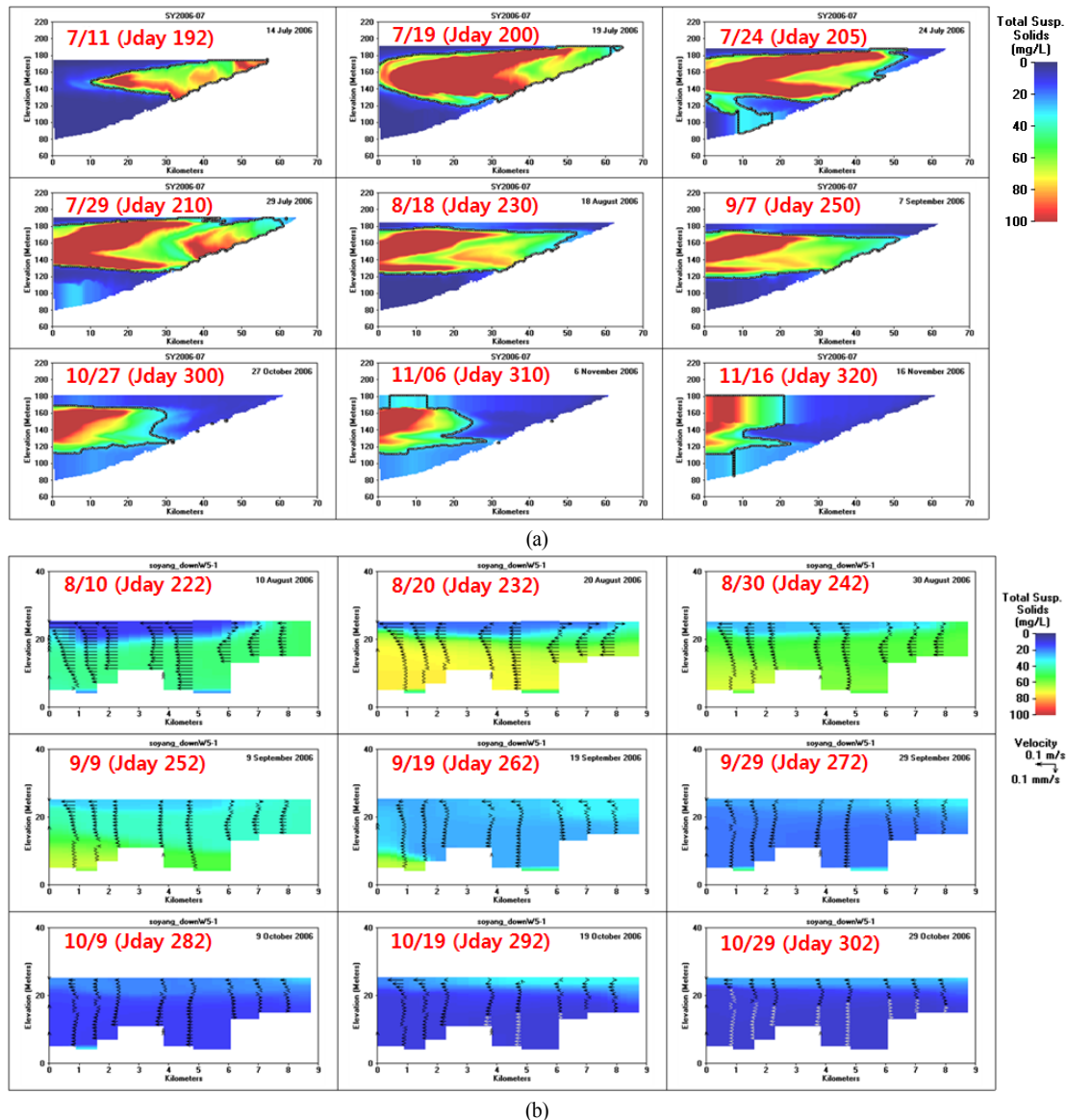


Fig. 5. Simulated density flow regimes of the turbid flow in two-dimensional(x-z) view at (a) So-yang reservoir and (b) Pal-dang reservoir in 2006.

Table 3. Turbidity flow evaluation of each reservoir

| Station | Maximum TSS of Inflow (mg/L) | Maximum TSS of Dam releases (mg/L) | Days of persistent turbidity flow (>25 mg/L) | Ratio of Turbidity flow in Reservoir* (θ , %) |
|--------------|------------------------------|------------------------------------|--|---|
| So-yang | 2,225 | 264.1 | 334 | 65.3 |
| Ui-am | 264.1 | 102.7 | 168 | 77.3 |
| Cheong-Pyung | 94.5 | 81.8 | 182 | 80.2 |
| Pal-dang | 81.0 | 41.4 | 41 | 41.8 |

* 300 days after event

나타났다.

의암호와 청평호는 소양호 탁수 유입 후 300일이 경과하는 동안 저수지내 탁수점유율이 각각 77.2%, 80.2%로 탁수 발생에 취약한 것으로 나타났다. 이는 두 저수지가 하천형 저수지로 체류시간이 짧고, 본류유량이 지류유량에 비해 지배적이기 때문이다. 팔당호는 동일 기간동안 41.8%의 탁수 점유율을 보였으며, 이는 남한강의 풍부한 수량이 혼합되어 상류로부터 유입한 탁수를 희석시킨 영향으로 판단된다.

소양호로부터 방류된 탁수는 저수지 중층의 낮은 수온과 높은 TSS 농도를 함유하고 있어, 의암호 바닥층으로 밀도류를 형성하며 유입하였다. 이는 Choi et. al.(2015)이 의암호에서 실험을 통해 발견한 현상과 동일하다. 탁수는 의암호를 통과하면서 댐구조물의 영향으로 저수지 중·하층을 따라 유동하면서 대부분의 큰 입경을 가지는 입자들이 침강 된다. 탁수가 청평호를 거쳐 팔당호에 도달했을 시점에는 대부분의 큰 입자들이 제거된 상태이며, 초기에는 저수지 바닥층을 따라 유동 후 시간이 경과됨에 따라 유입탁수의 밀도가 감소하면서 중·상층을 따라 유동한다. 남한강과 혼합되어 평균 탁수 점유율 및 TSS의 농도는 상류 저수지에 비해 상대적으로 낮으나, 탁수가 중·상층을 따라 유동에 따라 수자원활용에 제약이 발생할 것으로 판단된다.

의암-청평-팔당호의 모의결과로부터 각 저수지별 TSS 부하량을 산정하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 소

양호는 탁수 유입 후 300일이 경과하는 동안 댐 하류로 유출된 TSS 25 mg/L 이상의 탁수량은 233,345 m³이었다. 의암호로 유입한 총 탁수량은 238,191 m³이었으며 유출된 탁수량은 126,711 m³으로 111,480 m³의 고탁수가 지류(춘천댐 및 공지천)의 맑은물 유입에 따른 희석과 침강기작에 의해 감소한 것으로 판단된다. 동일기간 동안 청평호에서는 고탁수가 122,020 m³ 유입하였고, 113,199 m³가 유출되어 11,017 m³의 고탁수 저장, 팔당호에서는 188,515 m³이 유입, 177,778 m³이 유출되어 10,737 m³이 저장되는 것으로 나타났다. 위의 결과로 유추 해 볼 때 소양강댐에서 방류되는 고탁수는 하류 하천으로 전파되면서 희석과 침강에 의해 농도가 감소되는 것을 알 수 있다.

4. Conclusions

본 연구에서는 북한강 수계에 위치한 소양호와 그 하류 팔당호 구간을 대상으로 2차원 수리 수질 모델을 구축하고, 대규모 탁수사상 발생에 따른 소양호 하류 댐 저수지군에서의 탁수의 도달시간, 밀도류 거동 특성, 고탁수 지속시간 등에 대한 분석을 수행하였다. 본 논문에서 도출된 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 탁수 예측 모델은 2006년 7월에 태풍 에위니아에 의해 발생한 대규모 탁수사상에서 소양호와 하류구간인 의암

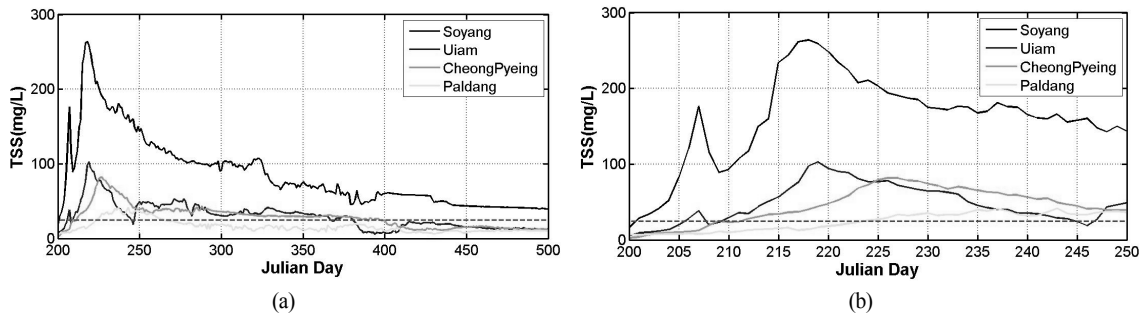


Fig. 6. Dam release TSS concentrations of each reservoir (a) from 2006/7/19 to 2007/6/15 (Jday 200-500), and (b) from 2006/7/19 to 2006/9/7 (Jday 200-250).

Table 4. Inflow and outflow turbid water volumes at each reservoir

| | So-yang | Ui-am | | Cheong-pyung | | Pal-dang | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|--------------|---------|----------|---------|
| | Outflow | Inflow | Outflow | Inflow | Outflow | Inflow | Outflow |
| Turbid water (m ³) | 233,345 | 238,191 | 126,711 | 122,020 | 113,199 | 188,515 | 177,778 |

호-청평호-팔당호에서 수위 변동 특성을 잘 재현하였으며, 소양호의 실측 방류수 TSS 농도와 의암-청평-팔당 댐앞 지점에서 실측한 TSS 농도의 시계열 추세도 적절히 모의 하였다. 그러나, 팔당호의 경우 직접 유입하천에서의 TSS 실측 자료가 부족하여 강우 초기 고탁수 발생을 재현하지 못해 정수장 탁수 예보의 정확도를 높이기 위해서는 팔당호 지류하천에 대한 실시간 탁도 모니터링이 필요하다.

2) 구축된 모델을 적용하여 2006년 대규모 탁수 사상 이후 각 저수지별 탁수영향평가를 수행한 결과, 방류수 최고 TSS 농도는 소양호 264.1 mg/L, 의암호 102.7 mg/L, 청평호 81.8 mg/L, 팔당호 41.4 mg/L로 나타났다. 소양호에서 최고 TSS농도 방류 이후 각 저수지별 최고 TSS 농도 발생 시기는 의암호 1.8일, 청평호 8.9일, 팔당호 19.9일 후에 나타났다.

3) TSS 25 mg/L 이상을 고탁수로 분류하여 2006년 7월 대규모 탁수 사상 발생 후 각 저수지별 고탁수 연속 방류 일수를 산정한 결과, 소양호 334일, 의암호 168일, 청평호 182일, 팔당호 41일로 나타났으며, 이는 동일 기간 동안 팔당호 취수원수의 실측자료와 유사한 결과이다.

4) 소양호 및 팔당호대상 밀도류 거동특성을 분석하였다. 2006년 소양호로 유입한 탁수는 EL. 130 m~EL. 170 m 구간에서 탁수층을 형성하였으며, 수온성층이 약해지는 11월 초순부터 호내에 잔류하는 탁수가 표층 및 저수지 전 구간으로 수직 혼합되어 탁수장기화를 유발하였다.

5) 소양호로부터 방류된 탁수는 낮은 수온과 높은 TSS농도의 영향으로 의암호의 바닥층을 따라 밀도류를 형성하며 유입하였으며, 의암호-청평호를 거치며 지류 유입에 따른 희석과 부유입자의 침강에 의해 탁수 점유율이 저감되었다. 팔당호에 도달한 탁수는 초기에는 저수지 바닥층을 따라 유입하며 밀도류를 형성하나, 시간이 경과함에 따라 남한강 유입수와 혼합하면서 저수지 중·상층으로 확산되었다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 17AWMP-B083066-04).

References

Choi, J. K., Min, J. H., and Kim, D. W. (2015). Three-dimensional Algal Dynamics Modeling Study in Lake Euiam Based on Limited Monitoring Data, Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(2), 181-195.

Choi, J. W., Kang, M. J., Ryu, J. C., Kim, D. I., Lim, K. J., and Shin, D. S. (2014). Assessing the Action Plans in the Control Area(Soyang Reservoir) of Non-point Source Pollution, Korea, *Journal of Environmental Science International*, 23(5), 839-852.

Chung, S. W. (2004). Regime of Turbidity Current into a Stratified Reservoir and Vertical Two-dimensional, Korea, *Journal of the Korean Society of Environmental Engineering*,

970-978.

Chung, S. W., Lee, H. S., and Jung, Y. R. (2008). Turbidity Modeling for a Negative Buoyant Density Flow in a Reservoir with Consideration of Multiple Particle Sizes, Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(3), 365-377.

Chung, S. W., Oh, J. K., and Ko, I. H. (2005). Simulations of Temporal and Spatial Distributions of Rainfall-induced Turbidity Flow in a Reservoir using CE-QUAL-W2, Korea, *Journal of Korea Water Resources Association*, 38(8), 655-664.

Chung, S. W., Park, H. S., Yoon, S. W., and Ryu, I. G. (2011). Effect of Installing a Selective Withdrawal Structure for the Control of Turbid Water in Soyang Reservoir, Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(6), 743-753.

Chung, S.W. and Oh, J. K. (2006) Calibration of CE-QUAL-W2 for a Monomictic Reservoir in Monsoon Climate Area, *Water Science and Technology*, 54(12), 29-37.

Cole, T. M. and Buchak, E. M. (1995). CE-QUAL-W2—A Two-dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, version 2.0, user manual: Vicksburg, Miss, *US Army Engineer Waterways Experiment Station Instruction Report EL-95-1*.

Cole, T. M. and Tillman, D. H (1999). Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2, *Miscellaneous Paper EL-99-1*.

Cole, T. M. and Tillman, D. H. (2001). Water Quality Modeling of Allatoona and West Point Reservoirs using CE-QUAL-W2, *U.S. Army Corps of Engineers*.

Effler, S., O'Donnell, D., Prestigiacomo, A., Pierson, D., Zion, M., Pyke, G., and Weiss, W. (2014). Robotic Monitoring for Turbidity Management in Multiple Reservoir Water Supply, *Journal of Water Resource Plan Manage*, 140(7), 04014007.

Gelda, R. K. and Effler, S. W. (2007). Modeling Turbidity in a Water Supply Reservoir: Advancements and Issues, *Journal of Environmental Engineering*, 133(2), 139-148.

Gelda, R. K., Effler, S. W., and Feng Peng (2012). Modeling Turbidity and the Effects of Alum Application for a Water Supply Reservoir, *Journal of Environmental Engineering*, 138(1), 38-47.

Hipsey, M. R., Imberger, J., Papanini, A., Antenucci, J. P., Soncini-Sessa, R., and Vincenzo-Spica, R. (2007). Towards a Dynamic and Adaptive System for real-time Decision Support in Aquatic Environments. In : *Proceedings of the 32nd International Association for Hydraulic Reserch*, Venice, Italy.

Kim, B. C. and Jung, S. M. (2007). Turbid Storm Runoffs in Lake Soyang and their Environmental Effect, Korea, *Journal of the Korean Society of Environmental Engineering*, 29(11), 1185-1190.

Kim, S. J., Park, G. A., Lee, Y. G., and Ahn, S. R. (2014). Development of a Meso-scale Distributed Continuous Hydrologic Model and Application for Climate Change Impact Assessment to Han River Basin, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 17(3), 160-174.

Kim, Y. H., Kim, B. C., Choi, K. S., and Seo, D. I. (2001).

- Modelling of Thermal Stratification and Transport of Density Flow in Soyang Reservoir using the 2-D Hydrodynamic Water Quality Model, Korea, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 15(1), 40-49.
- K-water. (2007). *The Report on a Establishment of the Trubid Water Reduction Plan for Multi-pirpose Dams(So-yang kang dam)*, K-water.
- K-water. (2013) *A Study of Dynamic Prediction and Preemptive Technology Response to Algal-derived Taste and Odor*, K-water.
- Lee, S. U., Kim, J. K., Noh, J. W., and Ko, I. H. (2007). Assessment of Selective Withdrawal Facility in the Imha Reservoir using CE-QUAL-W2 Model, Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(2), 228-235.
- New york city. (2009). *Watershed Water Quality Annual Report*, New york city.
- Newcombe, C. P. and Jenson, J. O. T. (1996). Channel Suspended Sediment and Fisheries: a Synthesis for Quantitative Assesment of Risk and Impact. *North American Journal of Fisheries Management*, 16, 693-727.
- Potes, M., Costa, M. J., and Salgado, R. (2012). Satellite Remote Sensing of Water Turbidity in Alqueva Reservoir and Implications on Lake Modelling, *Hydrology Earth System Sciences*, 16, 1623-1633.
- Samal, N. R., Matonse, Adao. H., Mukundan, R., Zion, M. S., Pierson, D. C., Gelda, R. K. and Schneiderman, E. M. (2013). Modelling Potential Effects of Climate Change on Winter Turbidity Loading in the Ashokan Reservoir, NY. *Hydrological. Process.*, 27, 3061 - 3074.
- Yajima, H., Kikkawa, S., and Ishiguro, J. (2006). Effect of Selective Withdrawal System Operation on the Longand Short-term Water Conservation in a Reservoir, *Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE*, 50, 1375-1380.
- Ye, L., Chung, S. W., Yoon, S. W., and Oh, D. G.(2009). Impact of Climate Change on Water Cycle and Soil Loss in Daecheong Reservoir Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(6), 821-831.
- Yeom, K. T., Ban, Y. J., and Kim, Y. U. (2008). Status of Turbid Water Management in Domestic Dam Reservoir and Improvement Plan, *Water for the Future*, 41(7), 35-42.