

의암호 수체 흐름과 혼합 패턴에 관한 모델 연구

박성원 · 이해원 · 이용석¹ · 박석순*

이화여자대학교 환경공학과, ¹한림성심대학교 보건환경과

A Hydrodynamic Modeling Study to Analyze the Water Plume and Mixing Pattern of the Lake Euam. Park, Seongwon, Hye Won Lee, Yong Seok Lee¹ and Seok Soon Park* (Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University; ¹Department of Health and Environment, Hallym Polytechnic University)

Abstract A three-dimensional hydrodynamic model was applied to the Lake Euam. The lake has three inflows, of which Gongji Stream has the smallest flow rate and poorest water. The dam-storage volume, watershed area, lake shape and discharge type of the Chuncheon Dam and the Soyang Dam are different. Therefore, it is difficult to analyze the water plume and mixing pattern due to the difference of the two dams regarding the amount of outflow and water temperature. In this study, we analyzed the effects of different characteristics on temperature and conductivity using the model appropriate for the Lake Euam. We selected an integrated system supporting 3-D time varying modeling (GEMSS) to represent large temporal and spatial variations in hydrodynamics and transport of the Lake Euam. The model represents the water temperature and hydrodynamics in the lake reasonably well. We examined residence time and spreading patterns of the incoming flows in the lake based on the results of the validated model. The results of the water temperature and conductivity distribution indicated that characteristics of upstream dams greatly influence Lake Euam. In this study, the three-dimensional time variable water quality model successfully simulated the temporal and spatial variations of the hydrodynamics in the Lake Euam. The model may be used for efficient water quality management.

Key words: hydrodynamic model, residence time, mixing pattern, Lake Euam, steady zone, water plume

서 론

의암호는 1967년에 수력발전을 목적으로 준공된 의암댐으로 조성된 인공호로서 주요 유입원은 상류 춘천댐과 소양강댐의 방류수이다. 이들 두 댐의 방류수의 저수량, 저수 형태, 방류 방식 및 유역의 특성 등 상이한 물

리적 차이는 의암호 수체의 시/공간적 수리 이동 및 수질 분포에 영향을 미친다. 또한 의암호 내부에 크고 작은 하중도가 위치하고 있어 춘천댐과 소양강댐 방류수가 쉽게 혼합되지 않는다. 특히 유역에 춘천시가 위치하고 있어 점 및 비점오염부하의 유입이 심하고, 특히 오염 농도가 높은 공지천과 춘천하수처리장 방류수가 유입된다. 따라서 의암호는 지속적인 외부 유입 유기물 제거에 막대한 예산과 인력이 투입되었음에도 불구하고 그간 효과적인 수질개선이 나타나지 않았다.

온대 지역 호소의 수직 혼합 특성은 수온 성층과 전도 현상에 의해 좌우될 수 있으며 수심에 따른 수온 차

Manuscript received 17 July 2013, revised 12 August 2013,
revision accepted 17 October 2013

* Corresponding author: Tel: +82-2-3277-3546, Fax: +82-2-3277-3275,
E-mail: ssp@ewha.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

이는 물의 수직적 혼합을 방해하여 수체 내 에너지와 물질 교환을 방해한다. 특히 수심이 깊고 유기 퇴적물이 풍부한 호소의 경우 심층의 산소 전달이 방해를 받아서 혐기성 조건이 형성되게 된다(Na and Park, 2005a). 온도 변화에 따른 전도 현상으로 인해서 수체가 수직적으로 혼합되는 경우에는 심층과 퇴적물층의 오염물질 등이 표층으로 부상하여 호소의 수질 변화에 영향을 미치게 된다(Salecon and Thebault, 1996; Chapra, 1997). 이처럼 호수에서 수질은 외부 오염부하량과 더불어 유기물의 내부 생산 증가 인자로서 수체가 지닌 수평적 흐름과 성층 등 수리 특성에도 밀접한 관계를 가지고 있다(Seo, 1998; Choi *et al.*, 2007).

호수와 같이 다양한 수리이동이 예상되는 수역의 수질관리를 위해서는 수리이동 특성에 대한 연구의 선행이 필요하다. 수리이동 특성에 대한 선행 연구는 수체의 혼합 거동에 따른 수질변화, 유기물 내부생성이 예상되는 정수역 파악 그리고 수질관리에 필요한 대표 수질과 대상 지점을 선정하는 등 수체의 시공간적 특성을 반영한 수질관리 연구에 중요한 의미를 가진다. 수체의 형상과 유입 지류의 특성 등 내/외부적인 복합적인 영향을 받는 호소 내 수리 현상을 파악하기 위해서는 모델링을 이용한 연구가 필요하다. 적절한 모델을 선정하여 활용하면 수체 내의 수리 이동 특성을 파악할 수 있으며, 수질 변화에 영향을 미치는 인자를 정량적으로 분석할 수 있는 등 합리적인 수질관리 대책을 수립할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 상류 댐 및 유입 지류의 물리적, 지형적 특성을 고려하여 의암호 수체의 혼합 거동을 해석하고 수질 분포에 영향을 주는 인자로 수체간 혼합 과정을 파악하고자 한다. 이를 위하여 의암호 지형과 유입 및 유출 구조에 적합한 수리 및 수질 모델을 적용하였으며 재현성이 검토된 모델 결과를 바탕으로 의암호의 시/공간적 혼합 특성과 체류시간의 분포를 예측하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지역

의암댐은 북한강 본류의 춘천댐과 소양강 합류점에서 약 10km 하류에 위치한 강원도 춘천시 신동면 의암리에 위치한 중력댐이다. 의암호의 총저수량은 8천 톤이며, 주요 유입원은 크게 북한강에 위치한 춘천댐과 소양강에 위치한 소양강댐의 방류수이다. 소양강댐은 총저수량이 29억 톤에 달하고, 발전, 홍수 조절 및 용수 공급 등의 기능을 가진다. 소양강댐은 강우량이 많은 7, 8, 9월

에 유입량이 많음에도 불구하고 방류량이 적다. 춘천댐의 방류량은 유입량 패턴과 비슷한 특성을 가진다. 이러한 특성은 의암댐 방류량에도 적용된다. 의암호에는 소양강댐 방류수와 춘천댐 방류수가 유입하며 이들 두 방류수에 비하여 매우 적은 유량이지만 춘천하수처리장 방류수를 비롯하여 수질이 비교적 좋지 않은 7개의 소하천이 유입하고 있다(Park and Lee, 1998; Huh *et al.*, 2004).

소양강댐의 방류수원인 소양호의 경우 단위 저수면적당 유역면적 값은 38.61이며 춘천댐으로 형성된 춘천호는 4,735 km²의 유역면적을 가지지만 단위 저수면적당 유역면적 값은 330.73로 소양호에 비하여 약 8.5배 크다. 소양호의 저수면적이 70.0 km²인 것을 감안할 때, 춘천호는 유역 강우량과 유출 수질에 영향이 클 것으로 예상된다. 또한 체류시간의 경우 춘천호가 16일이지만 소양호의 경우 266일로 유입수가 장기간 정체하여 수온 성층을 형성하며 방류수의 특성이 방류 수위에 의해 크게 영향을 받을 것으로 예상된다.

의암호 유역에는 춘천기상관측소가 운영 중이며 춘천댐, 소양강댐과 의암댐에서 안정적인 댐 운영을 위하여 각 지역의 강우량을 지속적으로 관측하고 있다. 춘천기상관측소의 1991~2010년의 20년간 관측된 자료를 분석한 결과, 연평균 강우량은 약 1,175 mm이며, 2005년 이후 계속 평균치보다 높은 강우량을 보이며 증가추세를 보이고 있다. 2005년 이전에는 1995, 1998, 1999, 2003년의 강우량이 평균치 이상의 많은 강우량을 보이는 반면 다른 년도는 평균치를 크게 밑도는 강우량을 나타낸 경우가 많이 관측되었다. 의암호 유역은 온대 몬순 기후와 태풍의 영향으로 연간 강우량의 약 80%에 해당하는 양이 6월에서 9월 사이에 집중된다. 월 평균 강우량의 범위는 약 7.94~360.63 mm이며, 그 중에서도 7월과 8월에 평균 약 360.63 mm와 301.82 mm이 집중되는 것으로 관측되었다.

2. 모델 원리

본 연구에서는 의암호의 시·공간적 수리이동 특성을 분석하기 위하여 3차원 시변화 수리 모델, GLLVHT (Generalized Longitudinal-Lateral-Vertical Hydrodynamics and Transport)를 이용하였다. 이 모델은 1974년 처음 개발되어 현재까지 널리 사용되고 있는 폭방향 평균화 2차원 수리모델, GLVHT (Generalized Lateral-Vertical Hydrodynamics and Transport) 모델의 확장 모델로서 Edinger and Buchak (1980, 1985)에 의해 개발되었으며, 1990년 중반 이후 다양한 수질 문제 해결을 위해

강, 호소, 하구 그리고 해양 등 전 세계 40여 개의 수체에 적용된 바 있다(Edinger *et al.*, 1998; Edinger, 2001; Wu *et al.*, 2001; Camp *et al.*, 2010; Dargahi and Setegn, 2011). 우리나라에서는 팔당호, 새만금, 및 한강 수계 등의 수리 및 수질 예측 연구에 사용된 바 있다(Na and Park, 2005b, 2006; Kim and Park, 2012, 2013; Lee and Park, 2013).

GLLVHT 모델은 수체의 수리학적 이동을 결정하기 위하여, 평면 운동 방정식(Horizontal Momentum Balance Equation), 연속방정식(Continuity Equation), 구성성분의 이동 방정식(Constituent Transport Equation) 그리고 상태방정식(Equation of State) 등의 방정식을 기초로 구성되어 있다. 모델의 기본구조는 x 방향 유속(U), y 방향 유속(V), z 방향 유속(W), 자유 수표고(z'), 밀도(ρ), 구성성분의 농도(C_n) 등 6개의 미지수로 구성된 6개의 방정식의 해에 의해 형성된다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = g \frac{\partial z'}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_{z'}^z \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) dz - \frac{\partial UU}{\partial x} - \frac{\partial VU}{\partial y} - \frac{\partial WU}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = g \frac{\partial z'}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_{z'}^z \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz - \frac{\partial UV}{\partial x} - \frac{\partial VV}{\partial y} - \frac{\partial WV}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial z} = - \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial z'}{\partial t} = - \int_z^h \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) dz - \int_z^h \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right) dz \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial t} = - \frac{\partial UC_n}{\partial x} - \frac{\partial VC_n}{\partial y} - \frac{\partial WC_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C_n}{\partial z} \right) + H_{C_n} \quad (5)$$

$$\rho = f(C_1, C_2, \dots, C_n, T) \quad (6)$$

여기서, $U, V, W = x, y, z$ 방향의 유속 ($m s^{-1}$), $g =$ 중력가속도 ($m s^{-2}$), $\rho =$ 밀도 ($kg m^{-3}$), $t =$ 시간 (s), $z' =$ 자유 수표고 (m), $A_x, A_y, A_z = x, y, z$ 방향의 운동 확산 계수 ($m^2 s^{-1}$), $f =$ 코리올리(Coriolis) 상수, $SM_x, SM_y =$ 외부 유입 및 유출에 의한 모멘텀의 변화 ($m s^{-2}$), $h =$ 총 수심 (m), $C_n =$ 구성 성분의 농도 ($g m^{-3}$), $D_x, D_y, D_z =$ 구성 성분의 x, y, z 방향 확산 계수 ($m^2 s^{-1}$), $H_{C_n} =$ 구성 성분의 생성 또는

소멸율 ($g m^{-3} s^{-1}$), $T =$ 수온 ($^{\circ}C$)이다.

3차원 시변화 수리 모델, GLLVHT에서 수온은 다음에 제시한 식(7)에 의해 계산되며, 수표면과 대기 사이의 열교환은 식(8)에 제시된 수표면 열수지식(Surface Heat Balance Equation)을 이용하여 계산된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial UT}{\partial x} - \frac{\partial VT}{\partial y} - \frac{\partial WT}{\partial z} + \frac{\partial \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} + \frac{1}{\rho C} \frac{\partial H_n}{\partial z} \quad (7)$$

$$H_n = [(H_s - H_{sr}) + (H_a - H_{ar})] - (H_b \pm H_c \pm H_e) \quad (8)$$

여기서, $H_n =$ 연직 방향으로의 단위면적당 열 전달량 ($W m^{-2}$), $H_s =$ 수표면으로 입사되는 단파광선의 열량 ($W m^{-2}$), $H_{sr} =$ 수표면에서 반사되는 단파광선의 열량 ($W m^{-2}$), $H_a =$ 수표면으로 입사되는 장파광선의 열량 ($W m^{-2}$), $H_{ar} =$ 수표면에서 반사되는 장파광선의 열량 ($W m^{-2}$), $H_b =$ 수표면에서 대기로 전달되는 열량 ($W m^{-2}$), $H_c =$ 수표면과 대기 사이의 온도차에 의해 전도되는 열량 ($W m^{-2}$), $H_e =$ 증발에 의해 손실되는 열량 ($W m^{-2}$)이다.

GLLVHT는 미국 JEEAI(J. E. Edinger Associates, Inc.)에서 개발한 3차원 시변화 모델링을 지원하는 통합시스템 GEMSS(Generalized Environmental Modeling System for Surface waters)를 수체 내 시간에 따른 유속, 수표고 및 구성 성분의 농도를 계산하기 위한 기반 모델로 포함하고 있다. GEMSS에는 다양한 수질 모델들이 3차원 시변화 수리 모델, GLLVHT와 결합 가능하도록 모듈 형식으로 포함되어 있으며, 이들 수질 모델은 사용자의 목적에 따라 선택적으로 사용될 수 있고 3차원 시변화 모델과 함께 모델 수행을 지원하기 위한 전처리 프로그램과 모델 결과 후처리 프로그램이 포함되어 있다. 본 연구에서는 모델 입력 자료 구축과 모델 결과 후처리를 용이하게 하기 위하여 GEMSS를 이용하였으며, 다양한 모델 모듈 중 수체의 유속 및 수표고 변화를 기반으로 수온, 보존성 물질의 변화에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

3. 모델 구성 및 경계 조건

본 연구에서 적용하는 모델의 경계조건은 춘천댐과 소양강댐 유입과 의암호의 방류의 영향을 고려하기 위하여 북서쪽의 춘천댐과 동쪽의 소양강댐 방류 지점을 시작으로 의암댐 방류까지로 모델 적용 범위를 설정하였다(Fig. 1).

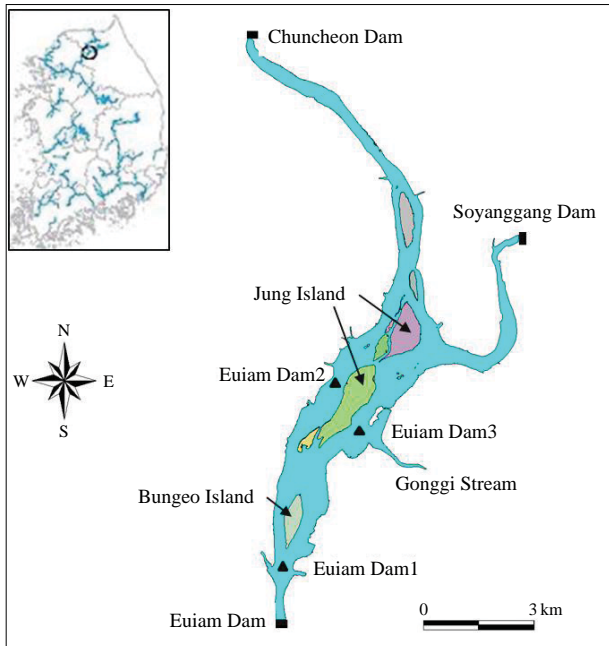


Fig. 1. The boundary of model application and the monitoring locations in the study area.

3차원 시변화 모델링 지원을 위한 통합 시스템 GEMSS에는 모델 격자망 생성 및 편집을 위한 전처리 프로그램인 GRIDGEN이 포함되어 있으며, 이를 이용하여 모델 격자망을 구성하기 위해서는 대상 수체의 경계와 수심에 대한 GIS 자료가 요구된다. 본 연구에서는 의암호 수체 경계에 대한 GIS 자료를 바탕으로 580개의 수표면 격자를 구축하였다. 또한 국토해양부의 하천 정비계획서에서 제시한 자료와 2011년 5월 3일과 9월 23일에 실측한 자료를 기초로 바닥 지형을 재현하였다. 그 결과 580개의 수표면 격자에 대해 하상 표고가 EL. 54.23~69.75 m로 분석되었고, 본 연구에서는 1.93 m의 간격으로 총 15개의 수층을 구성하였다. 이는 연구의 중요 부분인 의암호 내의 크고 작은 섬과 골재섬(Aggregate island) 및 춘천하수처리장 방류 위치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

구성된 모델 격자망을 바탕으로 3차원 시변화 모델을 수행하기 위하여 수표면으로의 강우와 춘천댐, 소양강댐 및 공지천, 울문천, 만천천, 덕두원천, 금산천, 한계천, 지내천 등 7개의 지류 및 춘천하수처리장에서의 처리된

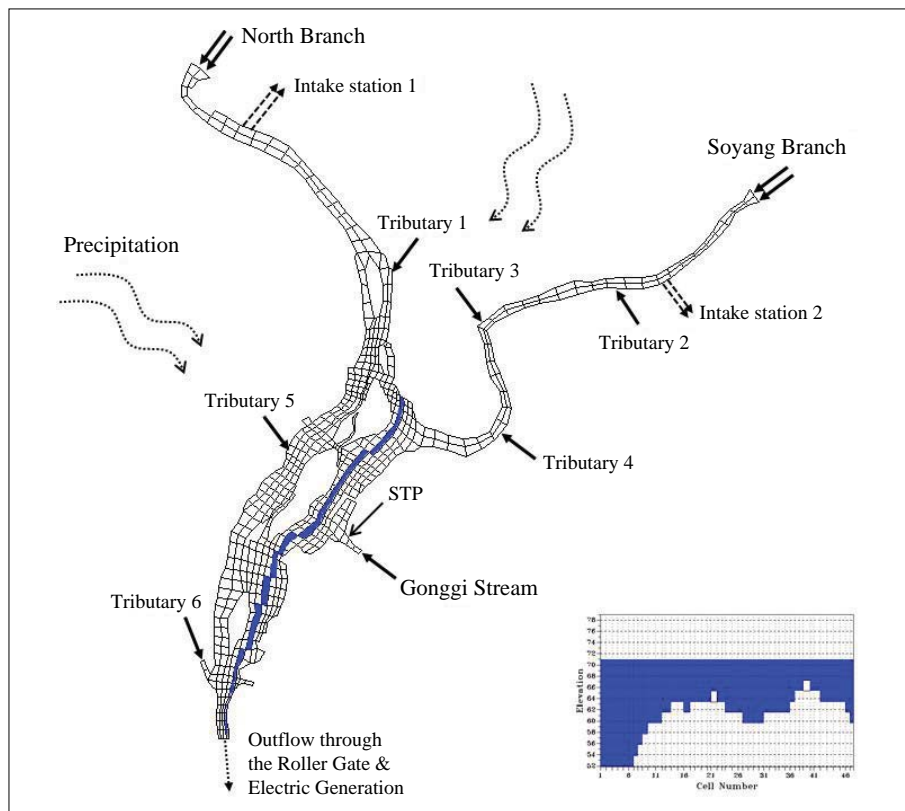


Fig. 2. Surface modeling grid for the study area and model boundary conditions (Tributary 1-Hangae, 2-Gina, 3-Yulmun, 4-Mancheon, 5-Geumsan, 6-Duckduwon/Intake 1-Yongsan, 2-Soyang).

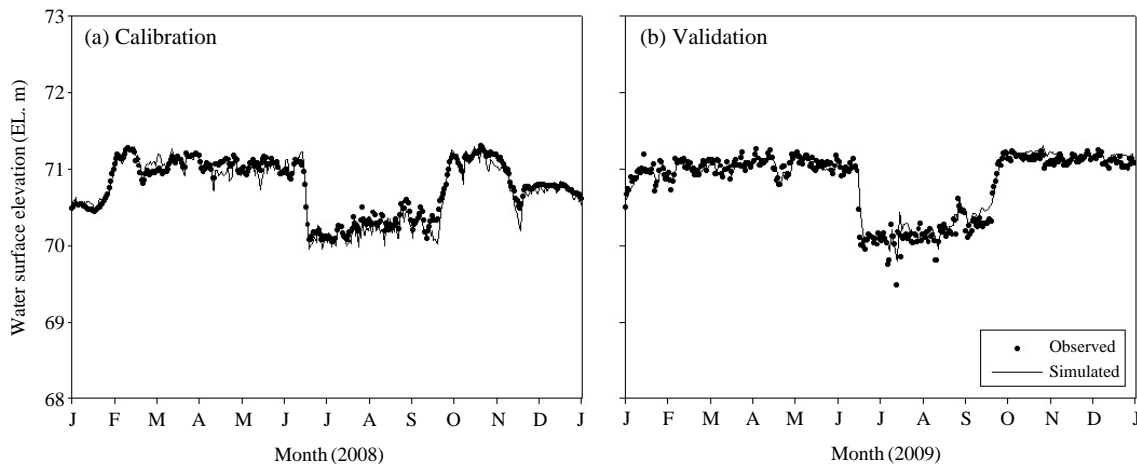


Fig. 3. Calibration and validation results of the water surface elevation between observed and simulated data.

배출수를 유입 경계조건, 의암댐에서의 방류와 용산취수장과 소양취수장 등 2개의 취수유량을 유출경계조건으로 설정하였다(Fig. 2). Fig. 2 하단 격자는 수표면 격자 중 음영으로 표시된 부분의 북에서 남 방향의 수층 격자이다.

경계조건으로 사용된 댐 방류량의 자료에 해당하는 춘천댐, 소양강댐 및 의암댐 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 각 댐 수문자료 중 일자료를 사용하였다. 춘천하수처리장의 방류량 자료는 기관의 일방류량 자료를 제공받았으며, 공지천을 포함한 7개의 지천의 유입량은 의암댐의 물수지를 계산하여 지천의 유역면적비로 분배하여 산정하였다. 수온과 전기전도도도의 자료는 춘천댐과 소양강댐의 방류 후 하류에 위치한 수질측정망 춘천과 소양강2 지점의 자료, 공지천은 수질측정망 공지천3자료, 춘천하수처리장의 자료는 해당기관의 포기조 수온 자료를 활용하였다. 공지천을 제외한 6개 지천의 자료는 2008년 4월부터 2009년 11월까지 약 8일 간격으로 실측한 강원지역환경기술개발센터의 자료를 활용하였다. 또한 의암호 유역의 강우량 자료는 인근의 춘천기상대 자료를 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 3차원 시변화 모델의 보정 및 검정

의암호에 적용된 3차원 시변화 수리모델, GLLVHT 모델의 재현성 검토를 위하여 수온과 전기전도도에 대한 모델 보정 및 검정을 수행하였으며, 다른 기상 및 수문 조건에서 나타나는 수리 현상에 대한 모델의 예측능

을 평가하기 위하여 일반적인 강우조건을 갖는 2008년 1월부터 12월까지의 자료를 모델 보정에, 2009년 1월부터 12월까지의 자료를 모델 검정에 이용하였다. 모델 보정 및 검정 기간 동안의 댐 방류량은 댐 앞 지점 수위에 대한 실측값과 모델값을 비교하였다. 그 결과 수위의 보정 및 검정에 대한 RMSE는 각각 0.1, 0.11 를 나타내며, 유입 및 유출에 대한 수위변화가 적절히 재현되고 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 3).

의암호 수표면에서의 연중 수온 및 전기전도도 변화에 대한 모델 보정 및 검정 결과를 실측값과 함께 Fig. 4 및 Fig. 5에 제시하였으며, 실측값은 환경부 수질 측정망 중 모델 적용 범위 내에 위치하고 있는 의암댐1, 2, 3 지점, 총 3개 수질측정지점에서의 월별 측정 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 수온과 전기전도도에 대한 모델의 재현성 분석을 위해서 모의값과 실측값을 비교하였다. 모델의 재현성을 평가하기 위한 도구로 RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), RE (Relative Error), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 수온과 전기전도도의 모의값과 실측값의 RMSE를 계산하였다. RMSE는 모의값과 실측값의 오차를 나타내는 지표로 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 0에 가까울수록 신뢰도가 높음을 의미한다(Jung *et al.*, 2008).

모델 보정 결과 수표면 수온에 대한 모델 예측값은 실측값과 잘 일치하고 있으며, 수표면 전기전도도는 중도의 서쪽에 위치하며 춘천댐에서 방류되는 북한강의 영향이 큰 의암댐2 지점을 제외하고 실측값과 적절히 일치하였다. 의암댐1 지점은 실측 횟수가 많은 자료를 바탕으로 모델결과를 비교해 보면 대체로 비슷한 경향으

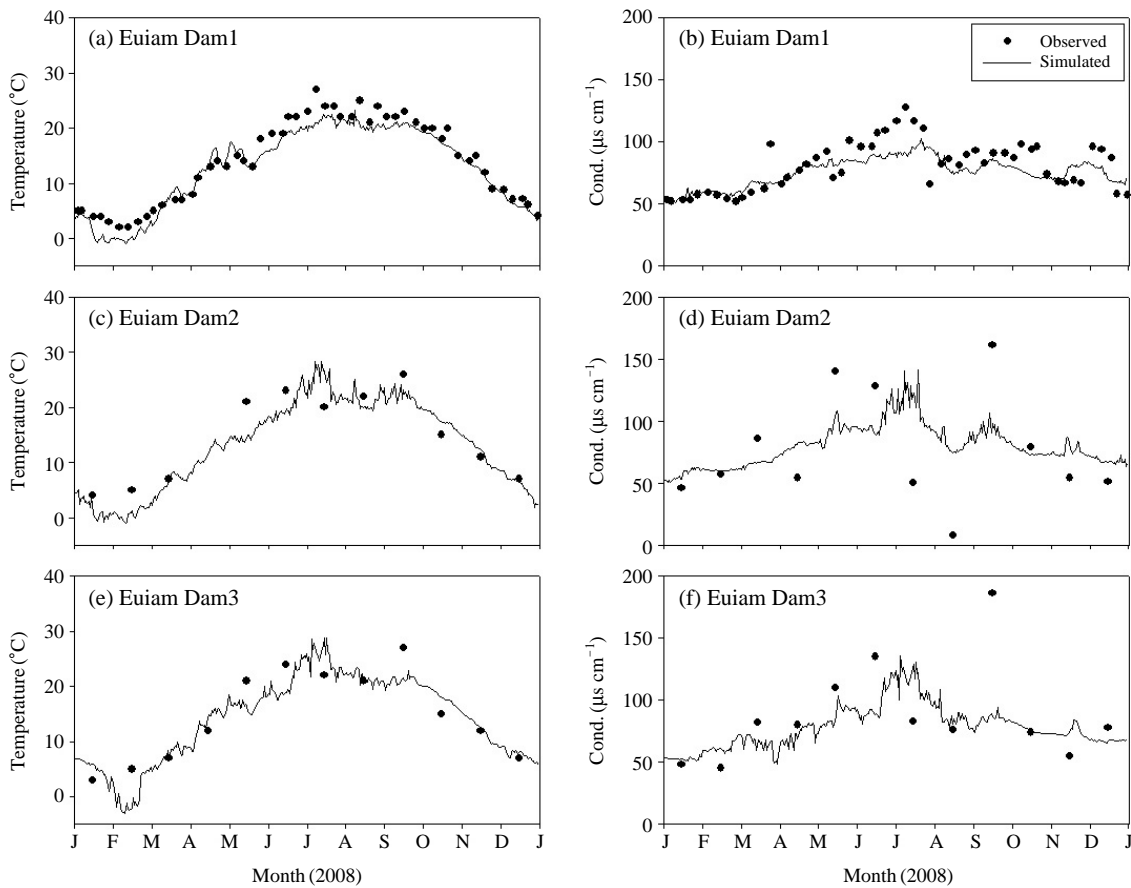


Fig. 4. Calibration results of temperature and conductivity at the surface water.

로 변화하고 있지만 강수량이 많은 7, 8월에 실측치 보다 낮게 예측되었다. 일반적으로 하수처리장에서는 전기 전도도를 측정할 자료가 대부분 존재하지 않으며, 춘천 하수처리장 역시 전기전도도가 미측정되었다. 따라서 일반적인 하수처리장의 배출수 전기전도도의 평균 자료를 적용하여 모델 예측값에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 수온과 전기전도도의 RMSE는 각각 2.10~4.17°C, 13.97~40.64 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 의 범위를 가지는 것으로 분석되었다.

보정된 GLLVHT 모델의 예측력을 검증하기 위하여 모델 보정시와 동일한 수리 계수를 적용하여 모델 검증을 실시하였으며, 그 결과 모델 예측값과 측정값은 적절한 일치를 보였다. 수온과 전기전도도의 RMSE는 각각 3.17~3.84°C, 10.49~30.37 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 의 범위를 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 모델 보정 및 검증의 결과로부터 본 연구에서 적용한 GLLVHT 모델이 상이한 강우 및 유량 조건에서 나타나는 의암호 내 열수지와 혼합 양상을 잘 재현하고 있다고 판단되었다.

2. 의암호 수체 혼합 특성 고찰

의암호는 우리나라의 기후 특성상 연중 지류의 유입량 변동폭이 크며 상이한 목적을 가진 상류 댐의 운전으로 수리 및 수질에 영향을 많이 받고 있다. 의암호 수체의 혼합특성을 고찰하고자 재현성이 검토된 3차원 모델의 표층 수온과 전기전도도 분포 결과를 활용하였다 (Fig. 6 및 Fig. 7).

가을철과 겨울철에는 소양강댐의 방류 유량이 많고 수온이 높은 특징을 가지고 있다. 특히 겨울철 춘천댐의 유량은 매우 적어 상대적으로 전기전도도가 낮은 소양강댐 방류수의 수온이 의암호의 온도 분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 춘천댐 방류수의 낮은 수온의 영향 범위에서는 상대적으로 높은 전기전도도 분포를 보이고 있다. 봄과 여름철에는 춘천댐의 방류수의 수온이 높으며, 의암호가 소양강댐 방류보다 춘천댐 방류의 영향을 크게 받아서 전체적으로 높은 수온을 보이고 있다. 이는 춘천댐의 방류뿐만 아니라 일사량이 많은 기간으

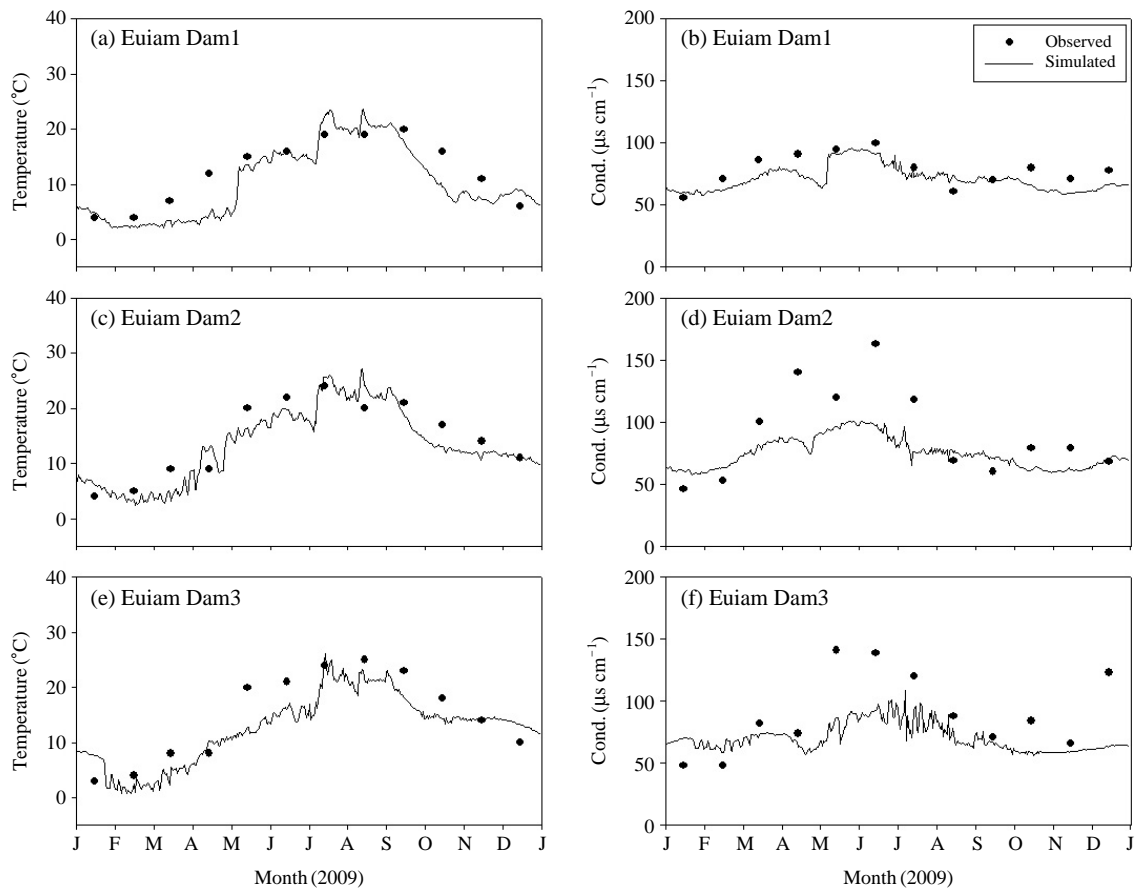


Fig. 5. Validation results of temperature and conductivity at the surface water.

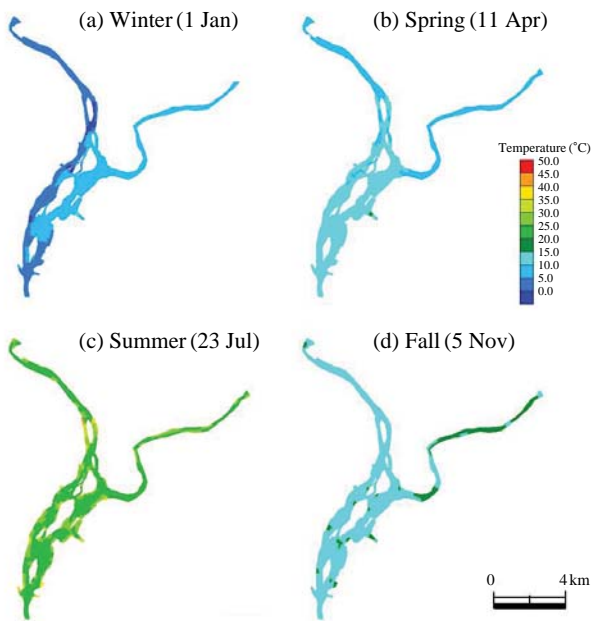


Fig. 6. Seasonal variation of surface water temperature distribution.

로 의암호의 상·중류의 수위가 낮아서 온도의 증가가 큰 것으로 판단된다.

전기전도도는 춘천하수처리장과 공지천의 높은 유입으로 유입지점 부근에 고농도 분포를 보인다. 의암호 하류인 의암댐 부근까지 높은 전기전도도의 특징을 가지고 있으며, 일부 경우에 역류 현상으로 인하여 하중도의 우측, 소양강댐 방류 부분까지 영향을 주는 것을 알 수 있다.

3. 체류시간에 따른 정수역 분포

기존의 연구에서 의암호의 체류시간이 우리나라의 다른 호소와 비교했을 때보다 짧아서 성층화가 거의 이루어지지 않는다고 알려져 왔다. 하지만 연구대상 유역의 개발, 지형의 특성과 기간별 지류의 유량 변동 등으로 인하여 호소 내 부분별 체류시간의 차이가 야기될 것으로 예상된다(Park and Park, 2002). 본 연구에서는 의암호 내 정수역의 공간적 분포 특성을 분석하기 위하여 3

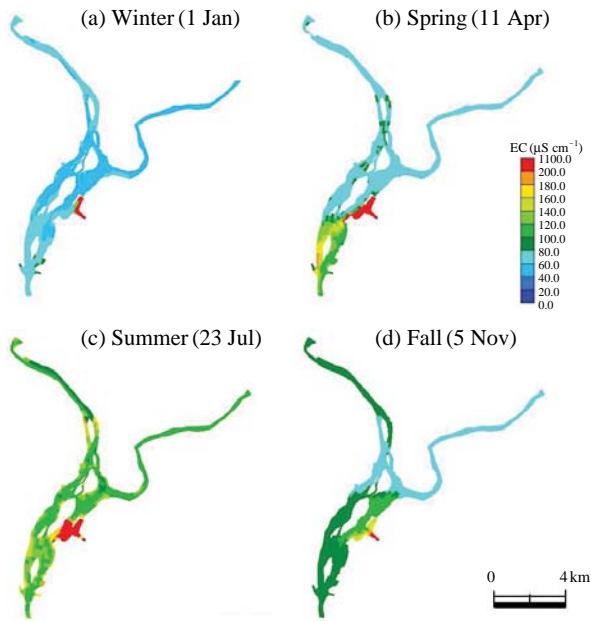


Fig. 7. Seasonal variation of surface conductivity distribution.

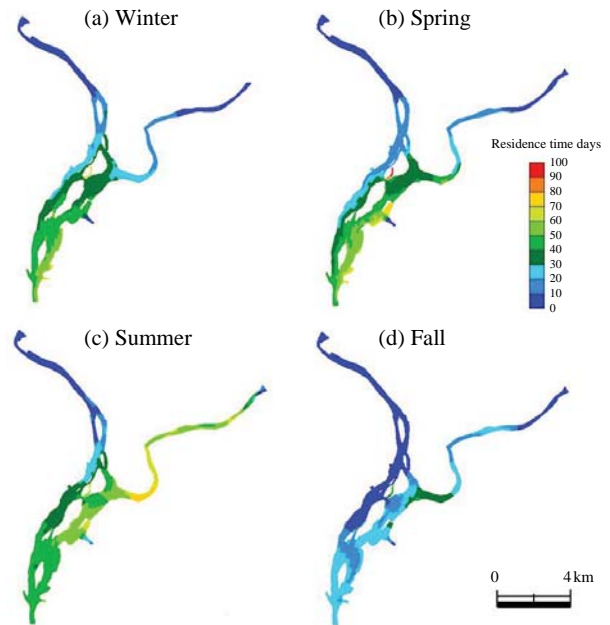


Fig. 8. Seasonal variation of the residence time within the lake.

차원 시변화 모델의 추적자 시뮬레이션을 수행하였다. 일반적으로 체류시간은 수체 부피에 대한 유출량의 비로 정의되지만, 이는 수체 내 흐름이 정상상태 및 완전 혼합 상태라는 가정 하에 성립되기 때문에 수체 내 흐름이 불균일한 경우에는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 Edinger (2001)에 의해 제안된 방법에 기초하여 보존성 물질의 초기농도가 일정 농도 수준, 즉 1/e까지 감소하는 데 걸리는 시간으로 체류시간의 공간적 분포를 추정하였다. 추적자 시뮬레이션에서는 수체 내 초기 농도를 100 mg L^{-1} , 모델의 유입경계조건으로 고려된 지류들과 강우로부터의 유입 농도는 0 mg L^{-1} 로 설정하였으며, 춘천댐과 소양강댐 방류량의 차이에 의한 체류시간 특성을 분석하기 위하여 춘천댐이 소양강댐 방류량보다 큰 경우, 그 반대의 경우에 대하여 추적자의 시뮬레이션을 반복 수행하였다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 의암호의 체류시간은 춘천댐과 소양강댐의 방류수가 유입되는 상류 수역은 체류시간이 비교적 짧게 나타나며 댐에 가까운 하류로 갈수록 길어지는 것을 알 수 있다. 하지만 북한강은 중도 부근에서 수심이 낮아지기 때문에 소양강댐 방류량이 많은 시기에는 중도 부근까지 역류현상이 발생하여 체류시간이 증가하게 된다. 소양강댐 방류 부근에도 춘천댐 방류량이 많은 시기에 역류현상이 발생한다. 하중도의 우안에서 공지천과 춘천하수처리장이 유입되는 수역, 중도의 우안에서는 연중 20일 이상의 체류시간을 보이고

있다.

우리나라의 대부분의 호소는 수체의 유량이 많아지는 여름 몬순기간에 연중 가장 짧은 체류시간을 보인다. 의암호 역시 여름철 집중 강우시에는 유입 및 유출의 급격한 증가로 체류시간은 크게 감소하며, 춘천댐과 소양강댐의 방류수는 약 10일 이하의 짧은 체류시간으로 의암호로 유입되는 것으로 예측되었다. 춘천댐과 소양강댐의 방류량은 계절별로 차이를 보이며, 봄과 여름철에는 춘천댐 방류량이 많고 가을과 겨울철에는 소양강댐 방류량이 많은 경향이 있다. 이러한 방류량의 차이는 의암호 내 체류시간의 변화에도 영향을 미치며 소양강댐의 방류량이 많은 가을과 겨울철에 상대적으로 짧은 체류시간을 보이고 있다. 공간적으로는 중도의 우안보다는 좌안의 체류시간이 더 짧은 것을 알 수 있다.

4. 유입지류의 흐름경로

의암호로 유입되는 춘천댐과 소양강댐의 방류 및 공지천의 주요 흐름 경로를 분석하기 위하여 모델 보정 결과를 바탕으로 추적자 시뮬레이션을 수행하였다. 추적자 시뮬레이션에서는 추적자의 초기 농도가 0 mg L^{-1} 인 수체로 각 댐 방류수와 유입 지류로부터 100 mg L^{-1} 농도의 추적자가 연속적으로 유입된다고 가정하였으며, 춘천댐과 소양강댐 및 공지천에 대한 시뮬레이션은 개별적으로 수행하였다.

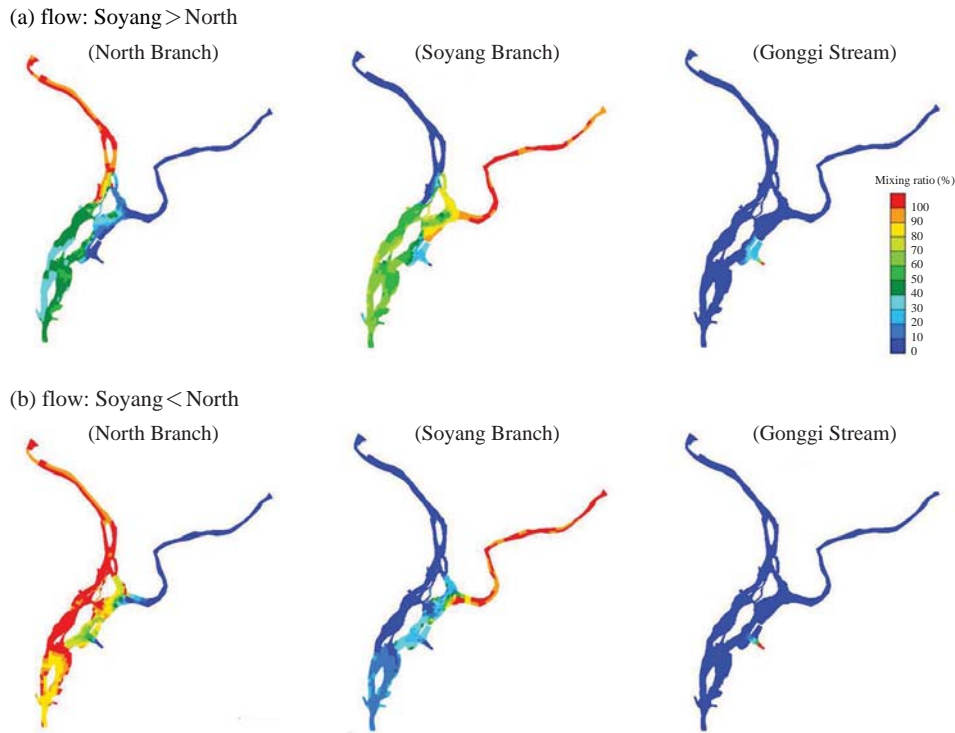


Fig. 9. Horizontal spreading patterns of the incoming flows.

의암호로 유입되는 춘천댐과 소양강댐 및 공지천의 표층 흐름 경로를 파악한 결과는 Fig. 9에 제시하였다. Fig. 9(a)는 춘천댐에 비하여 소양강댐의 방류량이 많은 시기에 해당하는 흐름의 경로이다. 의암호 내 표층에서는 소양강댐의 방류가 많은 비중을 차지하며, 특히 중도의 우안의 상류부까지 소양강댐의 방류수가 역류하는 현상이 나타나며, 중도의 좌안과 봉어섬 상류부에서 소양강댐 방류수가 흐르는 것을 알 수 있다. 춘천댐의 방류량이 큰 경우에는 소양강댐의 방류수가 중도 좌안에 거의 영향을 주지 않고 우안을 따라서 그대로 방류되는 특징을 보이며, 춘천댐의 방류수가 중도 좌안 및 소양강댐 방류 합류지점까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 공지천의 방류수는 소양강댐의 방류수가 많은 시기에 동시에 증가하여 공지천과 의암호 합류부의 상류로 역류하는 현상을 보이고 있다.

적 요

본 연구에서는 상류 댐 및 유입 지류의 물리적, 지형적 특성을 고려하여 의암호 수체의 혼합 거동을 해석하고 수질 분포에 미치는 인자로 수체간 혼합 과정을 파악

하기 위하여 3차원 시변화 모델, GEMSS 모델 시스템을 구축하였다. 실측 자료를 바탕으로 적용 모델의 재현성을 검토한 결과 본 연구에서 적용된 GLLVHT 모델은 상이한 강우 및 유량 조건에서 의암호 내 열수지 및 수체 혼합 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단되었으며, 모델 보정 결과를 바탕으로 의암호의 수온, 전기전도도 그리고 체류시간의 시·공간적 분포와 유입지류의 흐름 특성을 분석하였다.

의암호는 상이한 목적을 가진 소양강댐과 춘천댐의 방류량과 유입 지류의 큰 변동폭에 수리 및 수질이 영향을 많이 받고 있다. 의암호는 봄과 여름철에는 수온이 높은 춘천댐의 방류량에 상대적으로 영향을 크게 받아, 전체적으로 높은 수온 분포를 나타낸다. 반면 가을과 겨울철에는 소양강댐의 방류 유량이 많고 수온이 높고, 춘천댐의 유량이 매우 적어 상대적으로 전기전도도가 낮은 소양강댐 방류수의 수온이 의암호의 온도 분포에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 전기전도도는 춘천하수처리장과 공지천의 높은 유입으로 하류 의암댐 부근까지 높은 전기전도도의 분포를 나타낸다.

의암호의 체류시간은 춘천댐과 소양강댐의 방류수가 유입되는 상류 수역은 체류시간이 비교적 짧게 나타나며 의암댐 부근의 하류에서 점차 증가하는 것으로 분석

되었다. 중도 부근의 낮은 수심으로 인해 소양강댐 방류량이 많은 시기에는 역류현상이 발생하여 체류시간이 일시적으로 증가한다. 또한 하중도의 우안에서 공지천과 춘천하수처리장이 유입되는 수역, 중도의 우안에서는 연중 20일 이상의 체류시간을 보이고 있다. 이러한 정체수역에서는 지류들의 혼합률이 저하되고 유속이 낮은 특징을 가지기 때문에, 식물성 플랑크톤의 과대성장 우려가 있어 수질관리에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다. 여름철 집중 강우시에는 유입 및 유출의 급격한 증가로 체류시간은 크게 감소하며, 춘천댐과 소양강댐의 방류수는 약 10일 이하의 짧은 체류시간으로 의암호로 유입되는 것으로 예측되었다.

의암호 내 표층에서는 소양강댐의 방류가 많은 비중을 차지하며, 특히 중도의 우안의 상류부까지 소양강댐의 방류수가 역류하는 현상이 나타나며, 중도의 좌안과 봉어섬 상류부에서 소양강댐 방류수가 흐르는 것을 알 수 있다. 춘천댐의 방류량이 큰 경우에는 소양강댐의 방류수가 중도 좌안에 거의 영향을 주지 않으며 우안을 따라서 그대로 방류되는 특징을 보인다. 또한 봉어섬 상류부를 통하여 춘천댐의 방류수가 중도 좌안 및 소양강댐 방류 합류지점까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 공지천의 방류수는 소양강댐의 방류수가 많은 시기에 동시에 증가하여 공지천과 의암호 합류부의 상류로 역류하는 현상을 보이고 있다.

사 사

본 연구는 강원녹색환경지원센터의 연구 지원으로 수행되었으며 연구비를 지원한 강원도청 맑은물보전과 현장 조사와 자료 협조에 도움을 준 춘천시청, 수자원공사 강원본부, 한국수력원자력 한강본부 관계자 분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Camp, J.S., E.J. LeBoeuf and M.D. Abkowitz. 2010. Application of an enhanced spill management information system to inland waterways. *Journal of Hazardous Materials* **175**(1-3): 583-592.
- Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling, McGraw-Hill, New York.
- Choi, J.H., S.A. Jeong and S.S. Park. 2007. Longitudinal-vertical hydrodynamic and turbidity simulations for prediction of dam reconstruction effects in Asian monsoon area. *Journal of The American Water Resources Association* **43**(6): 1444-1454.
- Dargahi, B. and S.G. Setegn. 2011. Combined 3D hydrodynamic and watershed modelling of Lake Tana, Ethiopia. *Journal of Hydrology* **398**(1-2): 44-64.
- Edinger, J.E. 2001. Waterbody hydrodynamic and water quality modeling. An introductory workbook on three dimensional water body hydrodynamics and water quality modeling including modeling software, ASCE Press, Reston, VA.
- Edinger, J.E. and E.M. Buchak. 1980. Numerical Hydrodynamics of Estuaries, p. 115-146. In: Estuarine and Wetland Processes with Emphasis on Modeling (Hamilton, P. and K.B. Macdonald, eds.). Plenum Press, New York.
- Edinger, J.E. and E.M. Buchak. 1985. Numerical Waterbody Dynamics and Small Computers, p. 705-710. In: Proceeding of ASCE 1985 Hydraulic Division Specialty Conference on Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age, American Society of Civil Engineers, Lake Buena Vista, Florida.
- Edinger, J.E., E.M. Buchak and V.S. Kolluru. 1998. Modeling Flushing and Mixing in a Deep Estuary. *Water, Air, and Soil Pollution* **102**: 345-353.
- Huh, I.R., G.H. Lee, K.J. Han, J.Y. Choi and U.H. Jeong. 2004. The study on decline plan of primary production organic matter of Uiam lake basin. *Journal of Korean Society Environmental Health* **30**(1): 50-58.
- Jung, Y.R., S.W. Chung, I.G. Ryu and J.K. Choi. 2008. Two-Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Simulations for Coinjunctive System of Daechong Reservoir and Its Downstream. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**(5): 581-591.
- Kim, E.J. and S.S. Park. 2012. Multidimensional hydrodynamic and water temperature modeling of Han river system. *Journal of Korea Society on Water Environment* **28**(6): 866-881.
- Kim, E.J. and S.S. Park. 2013. Multidimensional dynamic water quality modeling of organic matter and trophic state in the Han River system. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **35**(3): 151-164.
- Lee, H.W. and S.S. Park. 2013. A hydrodynamic modeling study to estimate the flushing rate in a large coastal embayment. *Journal of Environmental Management* **115**: 278-286.
- Na, E.H. and S.S. Park. 2005a. A three-dimensional modeling study of lake Paldang for spatial and temporal distributions of temperature, current, residence time, and spreading pattern of incoming flows. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **27**(9): 978-988.
- Na, E.H. and S.S. Park. 2005b. A hydrodynamic modeling study to determine the optimum water intake location in Lake Paldang, Korea. *Journal of the American Water Resources Association* **41**(6): 1315-1332.
- Na, E.H. and S.S. Park. 2006. A hydrodynamic and water quality modeling study of spatial and temporal patterns of

- phytoplankton growth in a stratified lake with buoyant incoming flow. *Ecological Modeling* **199**: 298-314.
- Park, J.Y. and J.W. Lee. 1998. Development of lake water clean technology for increasing water quality of Euam-Lake branch in Bukhan River: Characteristics of ultrafiltration for lake water. *Journal of Korean Society of Water Quality* **14**(2): 167-175.
- Park, O.R. and S.S. Park. 2002. A time variable modeling study of vertical temperature profiles in the Okjung lake. *Korean Journal of Limnological Society* **35**(2): 79-91.
- Salecon, M.J. and J.M. Thebault. 1996. Simulation model of a mesotrophic reservoir (Lac de Pareloup, France): Melodia, an ecosystem reservoir. *Water Science and Technology* **84**: 163-187.
- Seo, D.I. 1998. Stratification characteristics and water quality management strategies of Daechung lake. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **20**(9): 1219-1234.
- Wu, J., E.M. Buchak, J.E. Endinger and V.S. Kolluru. 2001. Simulation of cooling-water discharges from power plants. *Journal of Environmental Management* **61**: 77-92.