

팔당호 수온, 유속, 체류시간의 시·공간적 분포 및 유입지류 흐름에 관한 3차원 모델 연구

나은혜 · 박석순[†]

이화여자대학교 공과대학 환경학과

(2005년 8월 17일 접수, 2005년 9월 29일 채택)

A Three-Dimensional Modeling Study of Lake Paldang for Spatial and Temporal Distributions of Temperature, Current, Residence Time, and Spreading Pattern of Incoming Flows

Eun-Hye Na · Seok-Soon Park[†]

Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT : A three-dimensional dynamic model was applied to Lake Paldang, Han River in this study. The model was calibrated and verified using the data measured under different ambient conditions. The model results were in reasonable agreements with the field measurements in both calibration and verification. Utilizing the validated model, we analyzed the spatial and temporal distributions of temperature, current, residence time, and spreading pattern of incoming flows within the lake. Relatively low velocity and high temperature were computed at the surface layer in the southern region of the Sonae island. The longest residence time within the lake was predicted in the southern region of the Sonae island and the downstream region of the South Branch. This can be attributed to the fact that the back currents caused by the dam blocking occur mainly in these regions. Vertical thermal profiles indicated that the thermal stratifications would be occurred feebly in early summer and winter. During early spring and fall, it appeared that there would be no discernible differences at the vertical temperature profiles in the entire lake. The vertical overturns, however, do not occur during these periods due to an influence of high discharge flows from the dam. During midsummer monsoon season with high precipitation, the thermal stratification was disrupted by high incoming flow rates and discharges from the dam and very short residence time was resulted in the entire lake. In this circulation patterns, the plume of the Kyoungan stream with smallest flow rate and higher water temperature tends to travel downstream horizontally along the eastern shore of the south island and vertically at the top surface layer. The model results suggest that the Paldang lake should be a highly hydrodynamic water body with large spatial and temporal variations.

Key Words : Hydrodynamic Model, Thermal Stratification, Circulation Pattern, Residence Time, Spreading Pattern, Lake Paldang

요약 : 본 연구에서는 한강수계의 팔당호에 3차원 시변화 모델을 적용하였으며, 상이한 강우 및 유량 조건에서의 실측자료를 이용하여 적용 모델의 재현성을 검토하였다. 모델의 보정 및 검증 결과 모델 예측값은 실측값과 적절한 일치를 보였으며, 재현성이 검토된 모델 결과를 바탕으로 팔당호의 수온, 유속, 체류시간의 시·공간적 분포와 유입지류의 흐름 특성을 분석하였다. 팔당호 수표면에서는 일반적으로 소내섬 남쪽 수역에서 다른 수역에 비해 다소 높은 수온과 낮은 유속이 유지되는 것으로 나타났다. 또한 소내섬 남쪽 수역과 남한강 수역 하류 부분에서는 연중 대부분의 기간 동안 국지적으로 긴 체류시간이 유지되고 있으며, 이는 이들 수역에서 블로킹으로 인한 상류 방향으로의 역류가 발생하기 때문인 것으로 분석되었다. 한편 팔당호에서는 초여름과 겨울에 약한 수온성층이 형성되며, 초봄과 가을에는 성층이 파괴되어 전 수층에서 유사한 수온을 보이나 댐 방류의 영향으로 인해 수체의 수직 혼합은 발생하지 않았다. 집중 강우가 발생하는 여름철에는 유입 및 유출량의 급격한 증가로 인해 수온 성층이 파괴되며, 전 수역에서 체류시간이 크게 감소하는 것으로 예측되었다. 이러한 수체 흐름 하에서 남, 북한강 그리고 경안천은 각각 다른 방향으로부터 팔당호로 유입된 후 구별된 흐름 경로를 통해 댐까지 이동하게 되며, 특히 경안천은 소내섬 남쪽 수역에서 유입된 후 댐에 이르기까지 일반적으로 소내섬 서쪽 호반을 따라 표층을 중심으로 이동하는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과 팔당호는 수온, 유속 그리고 체류시간의 시·공간적 변화가 매우 심하며, 수온 성층의 발달이 미약하나 유입지류의 수온 차이로 인해 밀도류가 형성되는 것으로 나타났다.

주제어 : 수리모델, 수온성층, 혼합형태, 체류시간, 흐름경로, 팔당호

1. 서론

팔당호는 1973년 건설된 발전용 댐에 의해 형성된 인공

호이며, 현재 일 평균 약 4백만 톤의 용수를 수도권에 공급하는 국내 최대 규모의 광역상수원으로서 중요한 역할을 담당하고 있다. 뿐만 아니라 팔당댐 방류수는 댐에서 잠실 수중보 사이에 위치하고 있는 여러 지방 상수도 취수장에서 취수원수 수질에 직접적인 영향을 미치고 있다. 따라서 팔당호가 상수원으로서의 역할을 다하기 위해서는 적정 수질의

[†] Corresponding author
E-mail: ssp@ewha.ac.kr
Tel: 02-3277-3546

Fax: 02-3277-3275

지속적 확보가 요구된다. 그러나 팔당호는 지난 1980년대 이후 부영양화가 계속 진행되어 왔으며 많은 수질 개선 대책이 시행되었음에도 불구하고 녹조 현상이 매년 반복되고 있다.¹⁻⁵⁾

호수의 수질은 유역으로부터의 오염물질 유입뿐만 아니라 수체의 정체 및 혼합과 같은 수리적 특성과 밀접한 연관을 갖는다. 온대지역 호수에서 수직 혼합 특성을 좌우하는 현상으로는 수온 성층 및 전도 현상을 들 수 있는데 수심에 따른 수온 차이로 인해 야기되는 수온 성층은 물의 수직 혼합을 억제하여 상·하층간의 에너지와 물질 교환을 방해한다. 특히 수심이 깊고 유기퇴적물이 많은 호수의 경우 심층으로의 산소 전달이 방해됨에 따라 혐기성 조건이 형성되기도 하며, 혐기성 조건 하에서 철이나 망간 등이 환원되어 용존됨에 따라 이들에 부착되어 있던 인산염이 유리되어 수층으로 용출된다.⁶⁻¹⁰⁾ 수온 성층이 파괴되어 수체가 수직으로 혼합되는 전도 현상이 발생하는 경우에는 심층 및 퇴적층의 오염물질 그리고 퇴적물로부터 용출된 영양염류 등이 표층으로 부상하여 호수의 수질 변화에 중요한 영향을 미치게 된다.^{6,11)} 호수 내 물의 수평적 흐름 특성 또한 수질 현상에 중요한 영향을 미친다. 일본 아사히담 호수에서는 풍향이 수표면 흐름에 직접적인 영향을 미치며, 풍향에 따른 정체 수역 형성 여부가 식물성 플랑크톤의 과대 성장과 공간적 분포 특성을 결정하는 것으로 보고되었다.¹²⁾ 미국 마리온(Marion) 호에서는 물흐름의 공간적 차이가 영양물질의 이동 및 존재 형태 그리고 식물성 플랑크톤의 성장 및 분포에 지배적인 영향을 미치는 것으로 조사되었다.¹³⁾ 또한, 미국 체로키(Cherokee) 호와 빌리 치누크(Billy Chinook) 호에서 유입 지류의 수온이 호수 내 물의 흐름을 결정하며, 이는 수질에 직접적이고 중요한 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다.^{14,15)}

즉 호수에서 나타나고 있는 수질 문제에 대한 근본 원인을 파악하고 수질 개선을 위한 합리적인 정책을 수립하기 위해서는 대상수체의 수리적 특성과 이들 특성이 수질 변화에 미치는 영향을 규명하여야 한다. 수리적 특성은 수체의 형상, 기상 조건 그리고 유입 지류의 특성을 비롯하여 수체 내·외부에서 나타나는 다양한 조건들에 의해 복합적인 영향을 받기 때문에 시·공간적으로 제약이 따르는 현장 조사 자료만으로 이를 체계적으로 규명하는데 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 20세기 후반부터는 다양한 형태의 모델들이 개발되고 활용되어 왔다. 특히 최근에는 수체 내 정밀한 수리 현상을 포함하는 수질모델이 개발되고 있으며, 이를 이용하여 수리적 특성이 수질 변화에 미치는 영향을 규명하고 효과적인 수질관리 방안을 도출하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.¹¹⁻¹⁶⁾

본 연구는 팔당호에 대한 과학적이고 합리적인 수질관리정책 수립을 위하여 연중 호수에서 나타나는 수리적 특성을 규명하는데 목적이 있다. 이를 위해 팔당호의 지형과 유입 및 유출 구조에 적합한 수리모델을 적용하였으며, 재현성이 검증된 모델 결과를 바탕으로 계절에 따른 호 내 수온, 유속 그리고 체류시간 분포 등 주요 특성을 분석하였다.

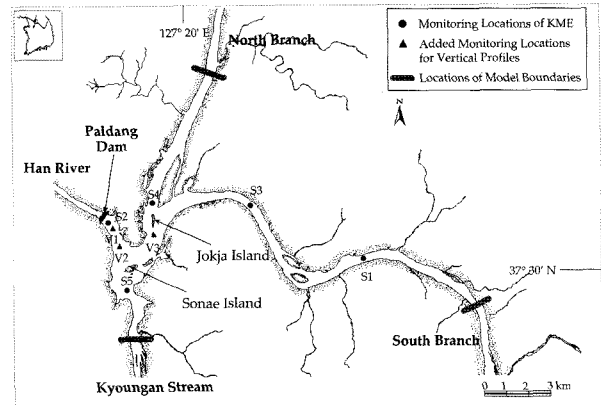


Fig. 1. The boundary of model application and the monitoring locations in the study area.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지역

팔당호는 남한강, 북한강 그리고 경안천 합류 지점에 댐을 건설함에 따라 형성된 인공호로 수체의 형상이 좁고 긴 수지형 호수이다(Fig. 1). 팔당댐의 수위는 수력발전을 위한 유효 낙차 확보를 위하여 만수위 EL. 25.5 m와 저수위 EL. 25.0 m 사이에서 조절되고 있으며, 상시만수위인 EL. 25.5 m 기준으로 수표면적 28.9 km², 저수용량 255.3×10⁶ m³, 평균 수심 8.8 m이다.

팔당호의 유역면적은 약 23,800 km²로 수표면적에 대한 유역면적의 비가 약 824에 이르며, 이는 국외의 호수 중 일본 비와호 5, 수와호 39, 미국 미시간호 2, 에리호 3 그리고 국내의 호수 중 소양호 39, 충주호 69에 비해 매우 크다. 특히 팔당호의 주요 유입 지류인 남한강, 북한강 그리고 경안천의 유역 면적은 팔당호 전체 유역 면적의 99% 이상을 차지하고 있으며, 따라서 팔당호의 수리 및 수질은 이들 세 지류 유역으로부터의 강우와 오염물질 유출에 직접적인 영향을 받는다. 한편 팔당호로 유입되는 경안천의 경우 남, 북한강에 비해 유량이 매우 작으며, 겨울철을 제외한 연중 대부분의 기간 동안 다소 높은 수온이 유지되고 있다.¹⁷⁾ 이렇듯 유량과 수온이 상이한 세 지류가 각각 다른 방향으로 유입됨에 따라 팔당호 내 흐름이 매우 복잡하다. 또한 팔당호는 유입유량에 비해 저수용량이 매우 작아 체류시간이 짧은 하천형 호수로 호 내 수리 및 수질은 지류로부터 유입되는 유량 및 수질의 변화에 따라 경시적으로 변화한다. 그런데 팔당호로 유입되는 세 지류는 본순 기후에 의한 여름철 집중강우의 영향으로 계절에 따른 유량 및 수질의 변이가 심하며, 특히 남, 북한강의 유량 및 수질은 상류에 위치하고 있는 여러 개 댐에서의 유출에 의해 크게 영향을 받는다. 즉 팔당호는 복잡한 지형과 유역 환경으로 인하여 시·공간적 수리 및 수질 변화가 매우 심한 수체이다.

2.2. 모델 원리

본 연구에서는 시·공간적 변이가 큰 팔당호의 수리적 특성을 분석하기 위하여 3차원 시변화 수리 모델, GLLVHT

(Generalized Longitudinal-Lateral-Vertical Hydrodynamic and Transport)를 이용하였다. 이 모델은 1974년 처음 개발되어 현재까지 널리 사용되고 있는 폭방향 평균화 2차원 수리모델, GLVHT(Generalized Lateral-Vertical Hydrodynamic and Transport) 모델의 확장 모델로서 Edinger and Buchak^{18,19)}에 의해 발표되었으며, 1990년 중반 이후 다양한 수질 문제 해결을 위해 강, 호수, 하구 그리고 해양 등 전 세계 40여 개의 수체에 적용된 바 있다.²⁰⁾

GLLVHT 모델의 기본식은 식 (1)과 (2)의 평면 방향(x, y) 유속에 대한 운동 방정식, 식 (3)의 연직 방향(z) 유속에 대한 연속 방정식, 식 (4)의 자유 수표고에 대한 연직 적분화 연속 방정식, 식 (5)의 구성 성분에 대한 이동 방정식 그리고 식 (6)의 밀도에 대한 상태방정식으로 구성되어 있으며, 6개의 미지수-x방향 유속(U), y방향 유속(V), z방향 유속(W), 자유 수표고(z'), 밀도(ρ) 그리고 구성 성분의 농도(C_n)-에 대한 6개 방정식의 해는 기본모델구조를 형성한다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = g \frac{\partial z'}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^z \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) dz - \frac{\partial UU}{\partial x} - \frac{\partial UV}{\partial y} - \frac{\partial UW}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) - fV + SM_x \quad (1)$$

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

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

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

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

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

여기서, U, V, W = x, y, z방향의 유속(m/sec), g=중력가속도(m/sec²), ρ = 밀도(kg/m³), t = 시간(sec), z' = 자유 수표고(m), A_x, A_y, A_z = x, y, z방향의 운동 확산 계수(m²/sec), f = 코리올리(Coriolis) 상수, SM_x, SM_y = 외부 유입 및 유출에 의한 모멘텀의 변화(m/sec²), h = 총 수심(m), C_n = 구성 성분(염분도, 보존성 물질, 퇴적물 등)의 농도 (g/m³), D_x, D_y, D_z = 구성 성분의 x, y, z방향 확산 계수(m²/sec), H_{C_n} = 구성 성분의

생성 또는 소멸율(g/m³/sec), T = 수온(°C)이다.

위에 제시된 6가지 지배방정식 외에 수표면 열 교환, 열수 지식과 같은 모델에서 사용되는 보조식은 Edinger²⁰⁾에 상술되어 있다.

한편 GLLVHT는 미국 JEEAI(J. E. Edinger Associates, Inc.)에서 개발한 3차원 시변화 모델링 지원을 위한 통합시스템, GEMSS(Generalized Environmental Modeling System for Surface waters)²¹⁾에서 수체 내 시간에 따른 유속 및 수표고 그리고 구성 성분의 농도를 계산하기 위한 기반 모델로 포함되어 있다. GEMSS에는 다양한 수질 모델들이 GLLVHT와 결합 가능하도록 모듈 형식으로 포함되어 사용자의 목적에 따라 선택적으로 사용할 수 있으며, 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, 여러 모델 모듈 중 수체의 유속 및 수표고 변화에 기초하여 수온, 염분도, 보존성 물질의 변화에 대한 시뮬레이션이 가능한 HDM(HydroDynamic Module)을 사용하였다.

2.3. 모델 구성 및 경계 조건

팔당호는 대형 하천이 유입되는 개방형 호수로 수체의 경계를 설정하기가 모호하다. 본 연구에서는 팔당댐 배수의 영향과 모델 경계 조건에 대한 입력 자료 수집의 용이성을 고려하여 남한강 유입부 방향은 양평교 지점, 북한강 유입부 방향은 문호천 유입 직하류 지점 그리고 경안천 유입부 방향은 광동교 지점을 모델적용범위로 설정하였다(Fig. 1).

한편 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 팔당호 수체 경계에 대한 GIS 자료 구축을 위하여 국립지리원의 1 : 25,000 수치지도를 이용하였으며, 이를 바탕으로 312개의 active cell로 구성된 수표면 모델 격자망을 생성하였다(Fig. 2). 또한 국립환경연구원²²⁾과 건설교통부^{23,24)}에 제시된 수심측정자료를 기초로 팔당호 수심 분포에 대한 GIS 자료를 구축하고, 이를 이용하여 수체의 바닥 지형을 재현하였다. 그 결과 312개 active cell에서의 하상 표고 범위는 EL. 3.7~24.5 m로 분석되었으며, 본 연구에서는 EL. 2.5~32.0 m의 수심 범위에 대해 1.0~2.0 m 간격으로 총 23개의 수층을 구성하였다. 결과적으로 팔당호는 총 3,802개의 grid elements로 구분되었으며, 이는 댐 방류 및 호 내 취수 위치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

구성된 모델 격자망을 바탕으로 3차원 시변화 모델을 수행하기 위하여 수표면으로의 강우와 남, 북한강 그리고 경안천으로부터의 유입을 유입경계조건, 댐에서의 발전 및 수문 방류와 호 내 위치하고 있는 광역 및 지방상수도 취수장에서의 취수를 유출경계조건으로 설정하였다. 남, 북한강 그리고 경안천으로부터 유입되는 유량을 입력하기 위해 건설교통부

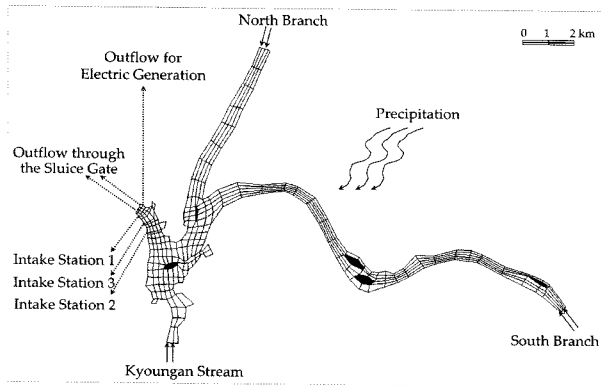


Fig. 2. Surface modeling grid for the study area and model boundary conditions.

에서 운영중인 수위관측소 중 세 지류의 유입 경계 지점의 직상류에 위치한 여주, 청평 그리고 경안관측소의 일유량자

료를 이용하였으며, 한국수력원자력에서 제공하는 팔당댐 관리자료로부터 일강우량자료를 획득하였다. 상수도 취수장으로부터의 취수량은 한국수자원공사와 광주시 상수도사업소에서 제공하는 취수장별 일별 취수실적자료를 이용하였으며, 댐으로부터의 발전 및 수문 방류량은 강우 및 지류로부터의 유입량, 취수량 그리고 댐 앞 지점에서의 수위 변동에 기초하여 팔당호의 불수지를 재현함으로써 산정하였다. 댐 앞 지점에서의 수위는 팔당댐 관리자료의 일별 수위관측자료를 이용하였다. 한편 남, 북한강 그리고 경안천 유입수의 수온 및 전기전도도 자료는 환경부 수질측정망 중 각 지류의 유입 경계지점에 위치한 강상, 삼봉리 그리고 경안천6 지점의 측정자료를 이용하였으며, 그 밖에 모델 수행을 위해 요구되는 기상자료는 팔당댐 관리자료와 기상청에서 운영 중인 기상관측소 중 팔당호와 가장 인접한 양평 및 수원관측소의 일별 관측자료를 이용하였다.

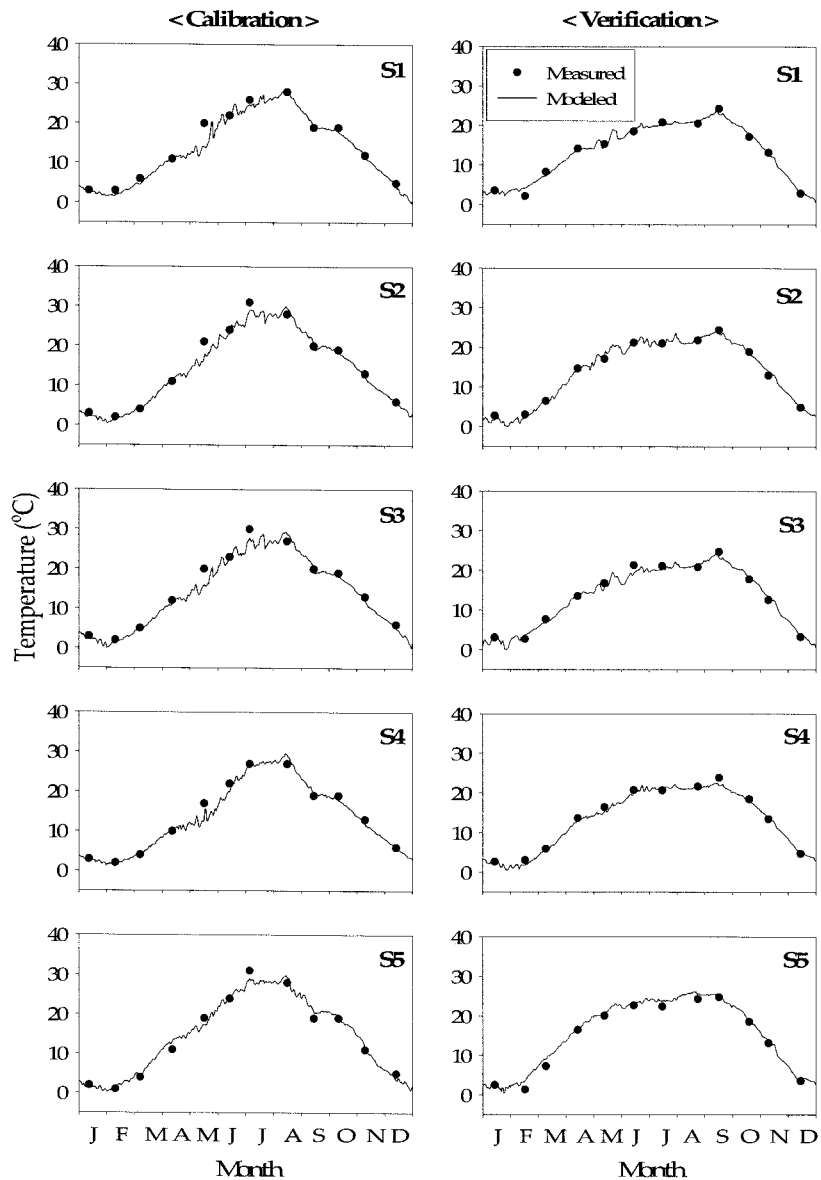


Fig. 3. Model calibration and verification results of the surface water temperature.

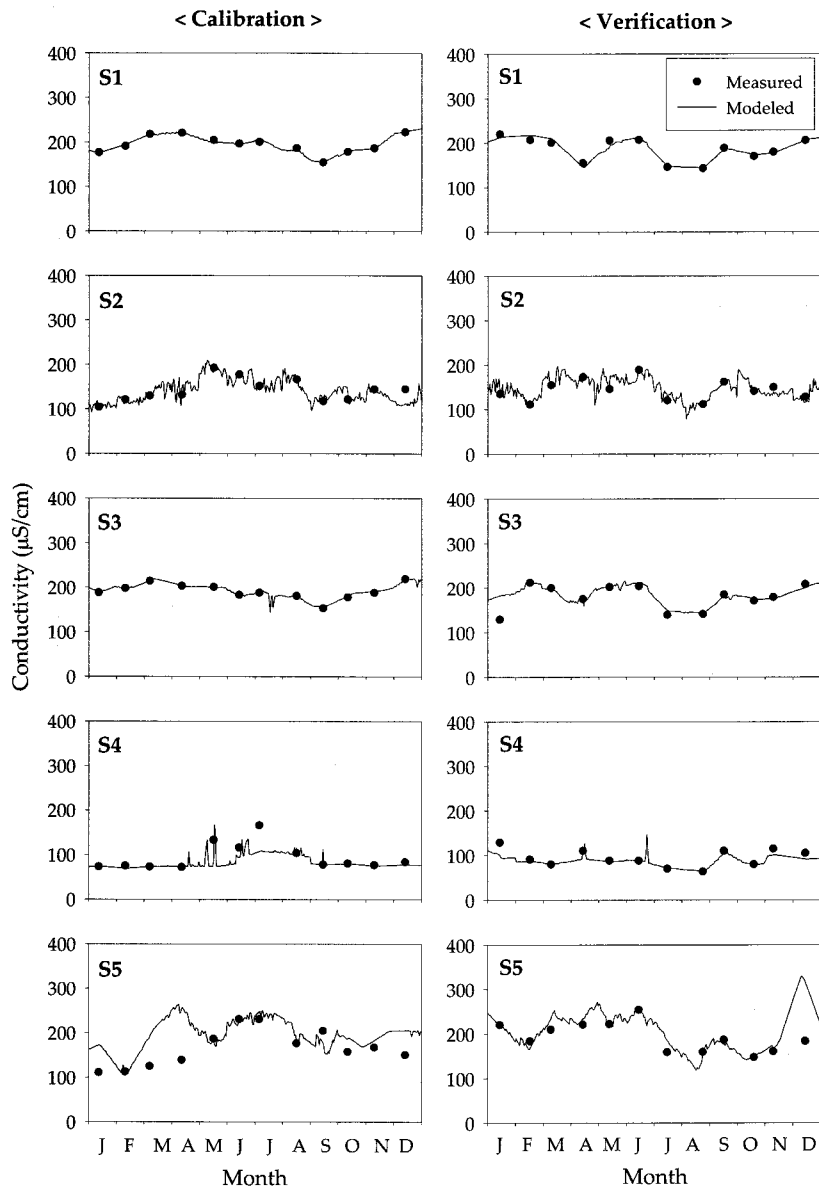


Fig. 4. Model calibration and verification results of conductivity at the surface water.

2.4. 모델 보정 및 검증

팔당호에 적용된 3차원 시변화 수리 모델, GLLVHT 모델의 재현성 검토를 위하여 수온과 전기전도도에 대한 모델 보정 및 검증을 수행하였으며, 다른 기상 및 수문 조건에서 나타나는 수리 현상에 대한 모델의 예측능을 평가하기 위하여 일반적인 강우 조건을 갖는 2000년 1월부터 12월, 2001년 7월부터 10월까지의 자료를 모델 보정에 최근 10년 동안 연간 강우량이 가장 많았던 1998년 1월부터 12월까지의 자료를 모델 검증에 이용하였다. 모델 보정 및 검증 기간 동안의 댐 방류량은 댐 앞 지점 수위에 대한 실측값과 모델값 사이의 오차를 ±0.05 m 이내로 유지함으로써 산정되었다.¹⁷⁾

팔당호 수표면에서의 연중 수온 및 전기전도도 변화에 대한 모델 보정 및 검증 결과를 실측값과 함께 Fig. 3과 4에 제시하였으며, 실측값은 환경부 수질 측정망 중 모델 적용

범위 내에 위치하고 있는 5개 수질측정지점에서의 월별 측정 자료를 이용하였다(Fig. 1). 모델 보정 결과 수표면 수온에 대한 모델 예측값은 실측값과 잘 일치하고 있으며, 수표면 전기전도도에 대한 모델 예측값 역시 S5지점을 제외한 대부분의 지점에서 실측값과 적절히 일치하였다. S5지점의 전기전도도에 대한 모델 보정 결과에서 약간의 불일치 경향이 나타나는 것은 이 지점이 시간에 따른 수질 변화가 심한 경안천이 합류되는 수역에 위치하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 보정된 GLLVHT 모델의 예측력을 검증하기 위하여 모델 보정시와 동일한 수리 계수를 적용하여 모델 검증을 실시하였으며, 그 결과 모델 예측값과 실제 측정값은 적절한 일치를 보였다. 이러한 모델 보정 및 검증 결과로부터 본 연구에서 적용된 GLLVHT 모델이 상이한 강우 및 유량 조건에서 나타나는 팔당호 내 열수지와 남, 북한강 그리고 경안천의 혼합 양상을 잘 재현하고 있다고 판단되었다.

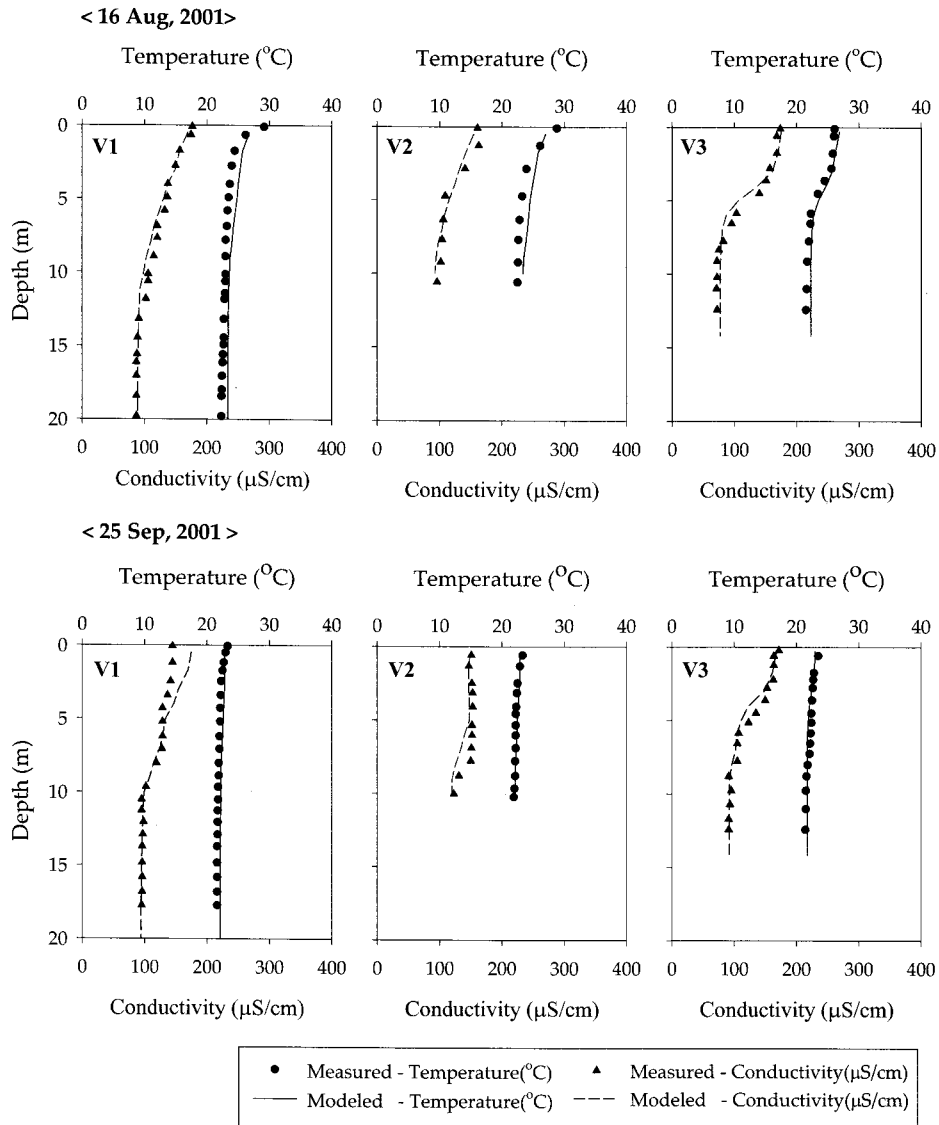


Fig. 5. Model calibration results of vertical temperature and conductivity profiles.

한편 본 연구에서는 연직 수온 및 전기전도도 분포에 대한 적용 모델의 재현성을 검토하였으며, 이를 위해 요구되는 호 내 수심별 실측자료 수집을 위하여 현장 조사를 수행하였다. 현장 조사는 모델 보정 기간인 2000년도 유사한 일 반적인 강우 조건을 갖는 2001년에 수행되었으며, 팔당호의 수리·수문 조건이 상이하다고 판단된 8월과 9월에 호 내 3 개 지점에서 각각 1회씩 실시되었다(Fig. 1). 이들 측정지점에서는 약 1 m 간격으로 수심별 조사가 이루어졌으며, 수 온과 전기전도도의 수심별 측정을 위하여 다항목 수질자동 측정장비(YSI Model 6820)를 이용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 8월에는 수심이 깊어짐에 따라 수온이 다소 감소하는 경향을 보이고 있으며, 반면 9월에는 상하층 간의 수온 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 8월 중순부터 9월 중순까지 발생한 집중 강우에 의해 팔당호의 유입 유 량이 급격히 증가함에 따라 수체의 수직 혼합이 비교적 잘 이 루어졌기 때문인 것으로 사료된다. 수체가 비교적 안정된 8 월에는 전기전도도 역시 표층에서 심층에 비해 다소 높게 유

지되고 있으며, 반면 수체의 수직적으로 혼합되는 9월에는 상하층간의 전기전도도 차이 역시 8월에 비해 크게 감소하 는 것으로 관찰되었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 본 연구 에서 적용된 3차원 시변화 수리 모델은 이러한 팔당호 내 연 직 수온 및 전기전도도 분포를 잘 모의하고 있는 것으로 나 타났으며, 이러한 결과로부터 GLLVHT 모델의 모의 결과가 팔당호 내 수온 성층 및 전도 현상을 실제와 유사하게 재 현하고 있는 것으로 판단되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수온 분포

팔당호 수표면 수온의 시·공간적 분포 특성을 분석하기 위하여 모델 보정 결과를 바탕으로 수표면에서의 등온 곡선 을 계절별로 제시하였다(Fig. 6). 그림에서 보는 바와 같이 팔당호 내 표층 수온은 소내섬을 경계로 공간적 차이를 보 이며, 소내섬 남쪽 수역에서 호 내 다른 수역에 비해 겨울철

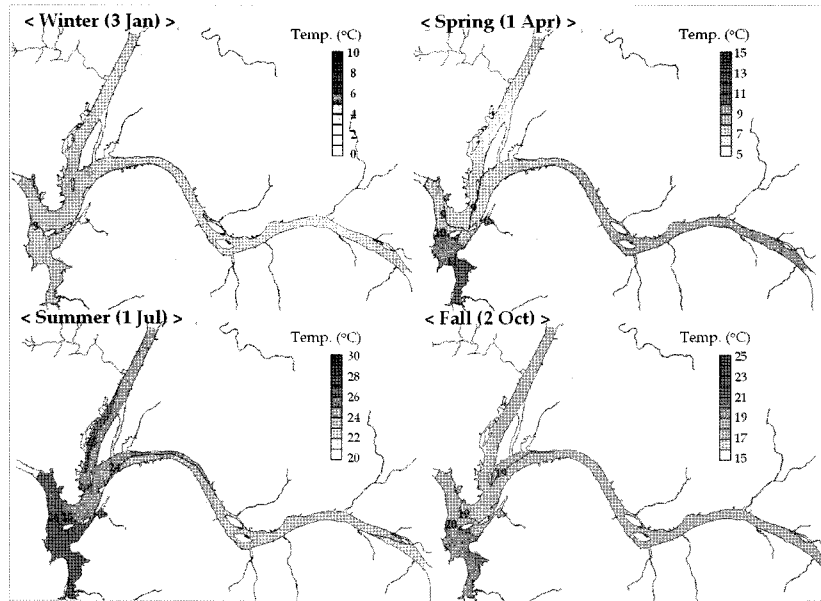


Fig. 6. Seasonal variation of surface water temperature distribution.

을 제외한 연중 내내 다소 높은 수온이 유지되는 것으로 예측되었다. 앞서 언급한 바와 같이 남, 북한강의 경우 상류에 위치하고 있는 댐의 영향으로 인하여 연중 대부분의 기간 동안 경안천에 비해 다소 낮은 수온이 유지되고 있으며, 팔당호 수표면에서의 공간적 수온 차이는 이러한 세 유입지류의 수온 차이에 의해 야기되는 것으로 판단된다.

모델 보정 결과로부터 팔당호 내 주요 3개 지점 - 세 지류가 합류하는 댐 앞 지점, 남, 북한강 물이 합류하는 죽자도 남쪽 지점, 경안천이 유입되는 소내섬 남쪽 지점 - 에서의 수심별, 계절별 등온 곡선을 Fig. 7에 제시하였으며, 이를 바탕으로 호 내 연직 수온 분포의 계절별 변화 특성을 살펴 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 팔당호에서는 겨울철에 기온 하강의 영향으로 전 수층의 수온이 4°C 이하로 유지되며, 1월 초에서 2월 중순까지는 수심이 깊어짐에 따라 온도가 상승하는 역성층(Inverse Stratification)이 매우 약하게 형성되는 것으로 예측되었다. 이러한 현상은 국내 다른 인공호에서 겨울철에 전 수층에 걸쳐 4°C 이상의 등온 상태가 유지되는 것과 구별되며,^{25~27)} 이는 수심이 얇은 팔당호에서 겨울철 기온 하강에 의한 영향을 더 많이 받기 때문인 것으로 사료된다.^{6,28)} 봄부터는 기온이 상승하여 수표면이 가열됨에 따라 겨울내 형성되었던 역성층이 파괴되며, 점차 수심이 깊어짐에 따라 온도가 낮아지는 수온 성층이 형성되기 시작한다. 기온이 계속적으로 상승함에 따라 수온 성층은 안정되는 경향을 보이거나 댐 앞 지점에서의 상하층간 수온 차이는 6월에 이르러서도 최대 약 8°C에 불과하였다. 즉 수심이 얇고 체류시간이 짧은 하천형 호수인 팔당호에서는 수온 성층의 발달이 미약하며, 이는 대청호, 소양호를 비롯한 국내 대규모 댐 호에서 하절기를 중심으로 안정된 수온 성층이 형성되는 것과 구별된다.^{25~27,29~31)} 한편 연중 최고 기온이 유지되는 한여름에는 오히려 수심에 따른 수온 구배가 적어지는 것으로 나타났으며, 이는 이 시기에 발생하는 집

중 강우로 인하여 유입 및 방류량이 급격히 증가함에 따라 체류 시간이 매우 짧아진 팔당호가 등온의 유입수에 의해 연속적으로 대체되기 때문인 것으로 판단된다. 가을부터는 유입량이 다시 안정되나 기온의 하강으로 표층이 냉각됨에 따라 파괴된 수온 성층이 재형성되지 못하며, 수심별 수온은 거의 균일한 분포를 보이는 것으로 나타났다.

3.2. 유속 분포

팔당호 수표면에서의 수체 이동 특성을 분석하기 위하여 모델 보정 결과를 바탕으로 수표면 유속의 공간적 분포를 Fig. 8에 제시하였다. 팔당호 수표면에서는 일반적인 수문 조건 하에서 하류방향으로의 안정된 흐름을 보인다(Fig. 8(a)). 이러한 안정된 흐름에서 남, 북한강은 죽자도 부근 수역에서 합류되며, 소내섬 남쪽 수역에서는 호 내 다른 수역에 비해 낮은 유속 분포를 보였다. 이는 세 유입지류 중 가장 작은 유량을 갖고 소내섬 남쪽 수역으로 유입되는 경안천 물의 흐름이 남, 북한강 물에 의해 차단되기 때문인 것으로 판단된다. 한편 팔당호 유입량이 댐 방류량에 비해 많아지는 시기에는 때때로 댐에 의한 블로킹 현상이 발생하는데 이 시기에는 유속이 낮은 소내섬 남쪽 수역에서의 수표면 흐름이 경안천 유입부 방향으로 역류하는 현상이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 8(b)). 또한 댐 블로킹 현상이 북한강 유량이 증가하는 시기에 발생하는 경우에는 남, 북한강이 합류되는 죽자도 부근 수역에서 북한강이 남한강의 흐름을 차단하여 남한강 유입부 방향으로의 역류가 야기되며, 이 때 야기된 역류는 죽자도에서 남한강 상류 방향으로 약 18 km 지점까지 영향을 미치는 것으로 예측되었다(Fig. 8(c)). 반면 북한강 유입부 방향으로의 역류 현상은 매우 드물게 발생하며, 역류가 발생하는 경우에도 죽자도에서 북한강 상류 방향으로 약 2 km 이내의 매우 제한된 범위 내에서 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 8(d)).

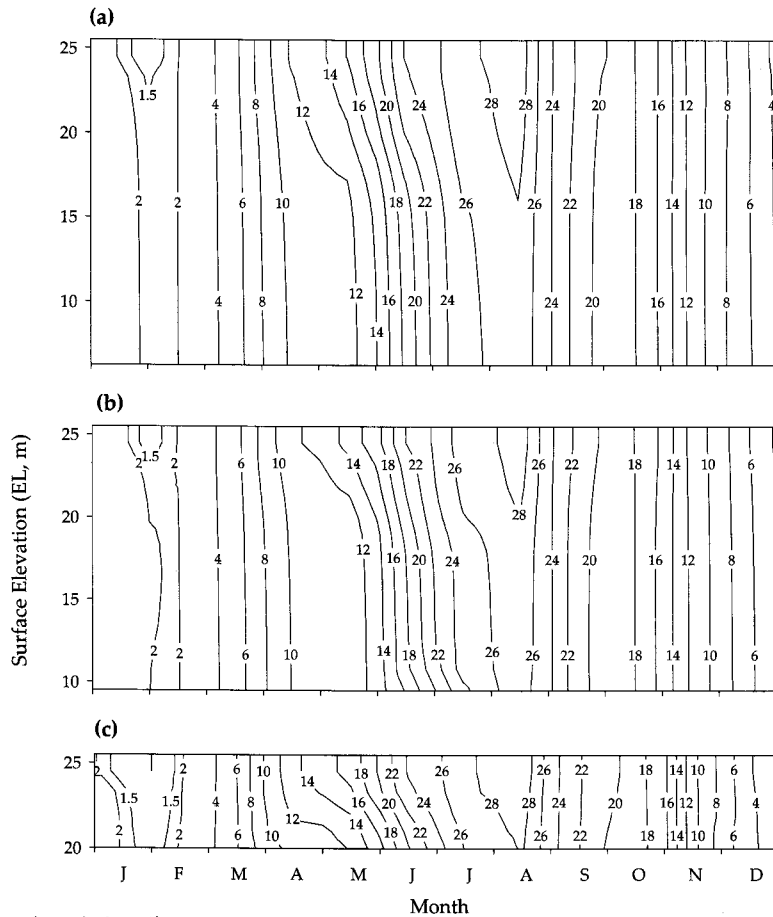


Fig. 7. Simulated isothermal variations(°C) at (a) immediate upstream of the dam, (b) the southern region of the Jokja Island, and (c) the southern region of the Sonae Island.

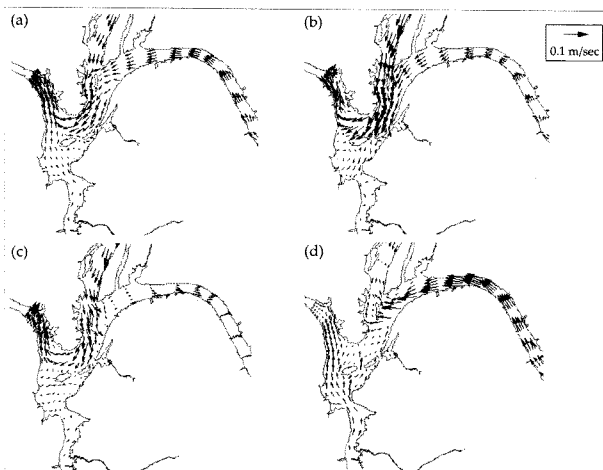


Fig. 8. Water circulation patterns at surface layer: (a) typical circulation pattern(13 Oct, 2000), (b) back current to the Kyoungan Stream(8 Feb, 2000), (c) back current to the south branch(11 Dec, 2000), and (d) back current to the north branch(18 May, 2000).

한편 모델 보정 결과로부터 남, 북한강이 합류하는 죽자도 남 쪽 수역에서 댐 앞 에 이르는 수직 단면에서의 계절별 수온 및 유속 분포를 Fig. 9에 제시하였으며, 이 때 수온은 등온선으로 유속은 벡터로 표현되었다. 그림에서 보는 바와 같이 수온 성

층이 형성되는 초여름과 겨울철에는 비교적 안정된 하류 방향으로의 흐름을 보이며, 방류가 발생하는 댐 앞 지점에서는 성층 분포가 다소 고르지 못한 것으로 예측되었다. 반면 초봄과 가을에는 성층이 파괴되어 전 수층에서 균일한 수온 분포를 보이고 있으나 수체의 수직 혼합 즉 전도 현상은 발생하지 않는다. 이는 댐에서의 발전용수 방류로 인한 하류 방향으로의 흐름이 수체의 이동에 가장 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다.

3.3. 체류시간 분포

본 연구에서는 팔당호 내 체류시간의 공간적 분포를 분석하기 위하여 3차원 시변화 모델의 보정 결과를 바탕으로 추적자 시뮬레이션을 수행하였다. Edinger²⁰⁾에 의해 제안된 방법에 기초하여 추적자 시뮬레이션에서는 수체 내 초기 농도를 1,000 mg/L, 모델의 유입경계조건으로 고려된 세 지류와 강우로부터의 유입 농도는 0 mg/L로 설정되었으며, 수역별 체류시간의 계절적 변화 특성을 분석하기 위하여 각 계절을 대표하는 시점에서 추적자의 초기 농도를 재설정하여 시뮬레이션을 반복 수행하였다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 여름철 집중 강우 기간을 제외한 연중 대부분의 기간 동안에는 남, 북한강 그리고 경안천이 유입되는 팔당호 상류 수역을 중심으로 상대적으로 짧은 체류시간이 유지되는 것으로 분석되었다. 북한강 수역과

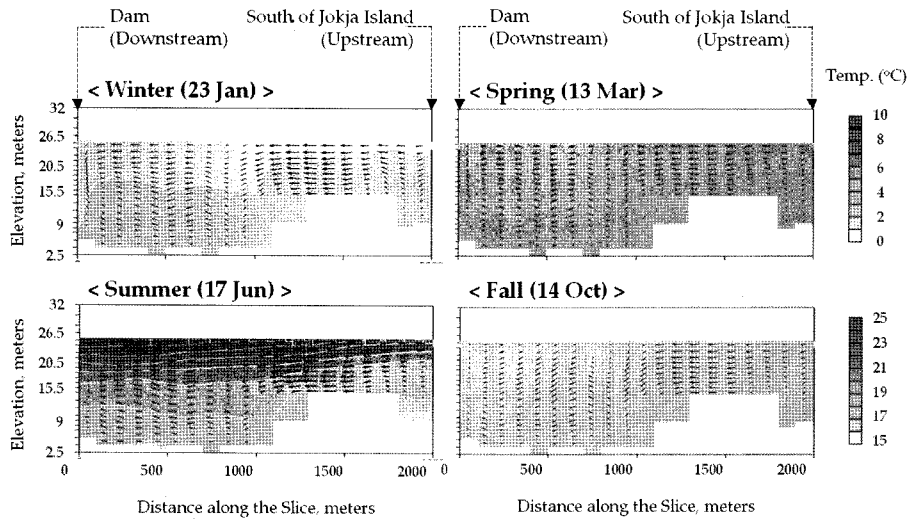


Fig. 9. Seasonal variation of water temperature and velocity profiles.

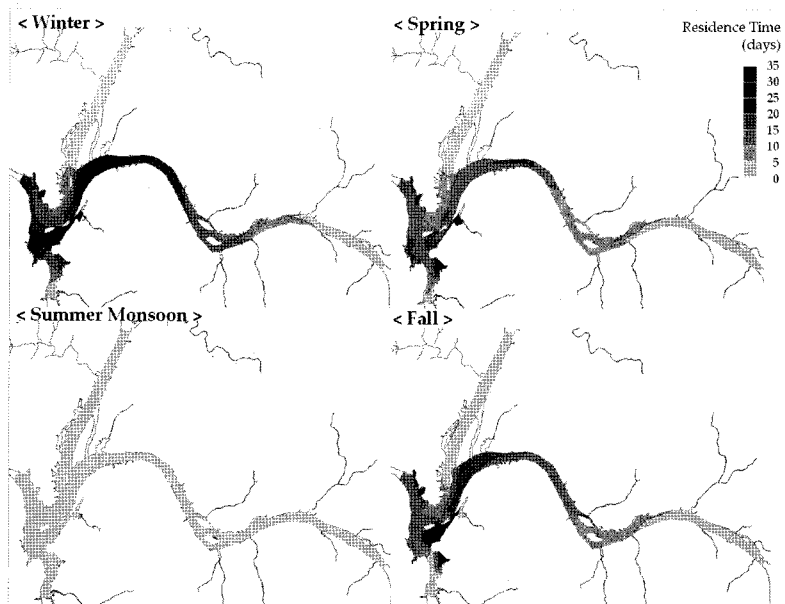


Fig. 10. Seasonal variations of the residence time within the lake.

남한강 수역의 상류 부분에서의 체류시간은 연중 내내 5일을 초과하지 않으며, 특히 북한강 수역에서는 유입된 북한강 물이 죽자도 부근에서 남한강 물과 합류 될 때까지 정체 현상이 거의 없는 것으로 예측되었다. 또한 팔당호 내 체류시간은 세 지류의 유입 지점에서 댐에 가까워질수록 증가하는 경향을 보였다. 그러나 팔당호에서 가장 긴 체류시간이 유지되는 수역은 남한강 수역의 하류 부분과 소내섬 남쪽 수역으로 나타났으며, 이러한 결과는 앞서 제시된 팔당호 수표면에서의 수체 흐름 특성 분석 결과에 의해 뒷받침될 수 있다. 경안천이 유입되는 소내섬 남쪽 수역에서는 상대적으로 유량이 큰 남, 북한강 유입수에 의해 흐름이 차단되어 수체의 흐름이 약할 뿐만 아니라 댐 블로킹에 의한 역류 현상이 자주 발생하며, 북한강의 유량 증가와 함께 댐 블로킹 현상이 발생하는 경우에는 남한강 수역 방향으로의 역류가 발생하는 것으로 분석된 바 있다(Fig. 8). 즉 소내섬 남쪽

수역과 남한강 수역의 하류 부분에서는 호 내 다른 수역에 비해 정체된 흐름을 보이게 되므로 이들 수역에서 국지적으로 긴 체류시간이 나타나는 것으로 판단된다. 한편 여름철 집중 강우시에는 유입 및 유출량의 급격한 증가로 체류시간이 크게 감소하며, 팔당호 대부분의 수역에서 오염물질이 정화되는데 걸리는 시간이 약 5일 이내로 급격히 감소하는 것으로 예측되었다.

3.4. 유입지류 흐름경로

팔당호로 유입되는 남, 북한강 그리고 경안천의 주요 흐름 경로를 분석하기 위하여 모델 보정 결과를 바탕으로 추적자 시뮬레이션을 수행하였다. 추적자 시뮬레이션에서는 추적자의 초기 농도가 0 mg/L인 수체로 각 유입지류로부터 100 mg/L 농도의 추적자가 연속적으로 유입된다고 가정하였으며, 남, 북한강 그리고 경안천에 대한 시뮬레이션은 개별적으로 수행되었다.

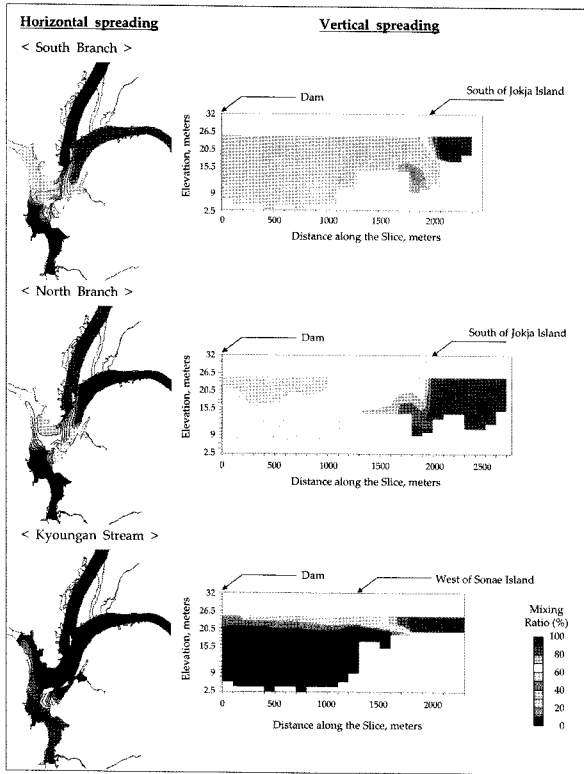


Fig. 11. Horizontal and vertical spreading patterns of the incoming flows.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 팔당호로 유입된 경안천 물은 소내섬을 지나 댐 앞 지점에 이르기까지 일반적으로 소내섬 서쪽 호반을 따라 이동하는 것으로 나타났으며, 이는 앞서 살펴본 바와 같이 경안천으로부터 유입된 물이 상대적으로 큰 유량을 갖는 남, 북한강 혼합수에 의해 흐름이 차단되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 댐 블로킹 현상으로 인해 야기되는 역류는 때때로 경안천 유입수의 흐름을 소내섬 남쪽 부분에만 제한시키거나 또는 죽자도 근처까지 확장시키는 것으로 예측되었다. 남한강과 북한강 유입수의 경우에는 죽자도와 소내섬을 지나 댐 앞 지점에 이르기까지 일반적으로 남한강 유입수는 소내섬 동쪽 호반을 따라 이동하며, 북한강 유입수는 소내섬 북쪽 호반을 따라 이동하는 것으로 나타났다. 그러나 댐에서의 블로킹 현상으로 인해 야기되는 역류는 때때로 남한강 유입수의 흐름을 소내섬 동쪽 수역에만 제한시키거나 또는 북한강 유입수의 흐름을 남, 북한강 합류지점에서 남한강 방향으로 약 5 km 상류까지 확장시키는 것으로 예측되었다.

한편 팔당호로 유입된 남, 북한강 물은 댐까지 도달하는 동안 일반적으로 전 수층에 걸쳐 균일한 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 반면 경안천으로부터 유입된 물은 일반적으로 표층을 중심으로 댐까지 이동하는 것으로 예측되었다. 이렇듯 세 지류가 구별된 연직 흐름 경로를 갖는 것은 이들 지류 사이의 수온 차이에 의한 것으로 판단된다. 즉 경안천 유입수는 겨울철을 제외한 연중 내내 남, 북한강 유입수에 비해 다소 높은 수온을 보이고 있으며, 따라서 연중 대부분의 기간 동안 낮은 밀도를 유지하는 경안천 물은 일반적

으로 표층을 따라 댐에 이르게 된다. 반면 남, 북한강 유입수의 수온은 연중 대부분의 기간 동안 큰 차이를 보이지 않으며, 따라서 유사한 밀도를 갖는 남, 북한강 물은 댐에 이르는 동안 일반적으로 전 수층에 걸쳐 수직 혼합이 잘 이루어지는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 최대 규모의 용수공급원인 팔당호의 수리적 특성을 분석하기 위하여 3차원 시변화 모델을 적용하였다. 실측 자료를 바탕으로 적용 모델의 재현성을 검토한 결과 본 연구에서 적용된 GLLVHT 모델은 상이한 강우 및 유량 조건에서의 팔당호 내 열수지 및 수체 혼합 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단되었으며, 모델 보정 결과를 바탕으로 팔당호의 수온, 유속 그리고 체류시간의 시·공간적 분포와 유입지류의 흐름 특성을 분석하였다.

팔당호 수표면에서는 남, 북한강에 비해 유량이 작고 수온이 다소 높은 경안천이 유입되고 있는 소내섬 남쪽 수역에서 다른 수역에 비해 연중 대부분의 기간 동안 다소 높은 수온과 낮은 유속이 유지되는 것으로 나타났다. 또한 댐 블로킹 현상이 일어나는 경우에는 소내섬 남쪽 수역과 남한강 수역 하류 부분에서 상류 방향으로의 역류가 발생하며, 따라서 연중 대부분의 기간 동안 이들 수역에서 국지적으로 긴 체류시간이 유지되는 것으로 분석되었다. 한편 수심이 얇고 체류시간이 짧은 팔당호에서는 초여름과 겨울에 수온성층이 형성되나 성층의 발달 정도가 미약하며, 초봄과 가을에는 성층이 파괴되어 전 수층에서 균일한 수온 분포를 보이고 있으나 댐에서의 발전 방류에 따른 하류 방향으로의 흐름으로 인하여 수직적 혼합 즉 전도 현상은 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 여름철 집중 강우시에는 유입 및 유출량의 급격한 증가로 전 수역에서 체류시간이 크게 감소하며, 봄부터 형성되었던 수온성층이 파괴되는 것으로 나타났다. 이러한 수체 흐름 하에서 각각 다른 방향으로부터 유입된 남, 북한강 그리고 경안천은 구별된 흐름 경로를 가지며, 특히 소내섬 남쪽 수역으로 유입된 경안천 물은 일반적으로 소내섬 서쪽 호반을 따라 표층을 중심으로 댐 앞까지 이동하는 것으로 분석되었다.

결과적으로 팔당호는 복잡한 지형, 유입지류의 유량 및 수온 차이 그리고 여름철 집중 강우 등으로 인하여 수온, 유속 그리고 체류시간의 시·공간적 변화가 매우 심하며, 수층간 수온 차이에 의한 수온 성층 및 전도 현상은 미약한 반면 유입지류의 수온 차이로 인해 밀도류가 형성되는 것으로 나타났으며, 이렇듯 시·공간적 변화가 심한 팔당호의 수리적 특성은 호 내 유기물질 및 영양물질의 분포, 식물성 플랑크톤의 성장 등 팔당호 수질에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원 금수강산21 과제 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김범철, 김동섭, 권오길, “팔당호의 부영양화 실태,” 한국수질보전학회지, **5**(2), 39~46(1989).
2. 김동섭, 김범철, 황길순, 박주현, “팔당호의 부영양화 경향(1988-1994),” 한국수질보전학회지, **11**(4), 295~302(1995).
3. 김종민, 허정남, 노혜란, 양희정, 정완중, 임연택, “팔당호 수질의 계절별 변화특성 및 장기 추세,” 한국물환경학회지, **18**(1), 67~76(2002).
4. 박혜경, 정원화, “팔당호의 장기간 식물성 플랑크톤 발생 추이,” 한국물환경학회지, **19**(6), 673~684(2003).
5. 한명수, 유재근, 유광일, 공동수, “팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재,” 한국육수학회지, **26**(2), 141~149(1993).
6. Chapra, S. C., Surface Water-Quality Modeling, McGraw-Hill, New York(1997).
7. Larsen, D. P., Schults, D. W., and Malueg, K. W., “Summer internal phosphorus supplies in Shagawa Lake,” *Limnology and Oceanography*, **26**, 740~753(1981).
8. Nurnburg, G. K., “The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia,” *Limnology and Oceanography*, **29**, 111~124(1984).
9. Park, S. S. and Jaffe, P. R., “Development of a sediment redox potential model for the assessment of post depositional metal mobility,” *Ecological Modelling*, **91**, 169~181(1996).
10. Park, S. S. and Jaffe, P. R., “A numerical model to estimate sediment oxygen level and demand,” *Journal of Environmental Quality*, **28**(4), 1219~1226(1999).
11. Salecon, M. J. and Thebault, J. M., “Simulation model of a mesotrophic reservoir(Lac de Pareloup, France): MELODIA, an ecosystem reservoir management model,” *Ecological Modelling*, **84**, 163~187(1996).
12. Kawara, O., Yura, E., Fujii, S., and Matsumoto, T., “A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi river dam reservoir,” *Water Science and Technology*, **37**(2), 245~252(1998).
13. Tufford, D. L. and McKellar, H. N., “Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina(USA) costal plain,” *Ecological Modelling*, **114**, 137~173(1999).
14. Kim, B. R., Higgins, J. M., and Bruggink, D. J., “Reservoir circulation patterns and water quality,” *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, **109**(6), 1284~1294(1983).
15. Yang, Z., Khangaonkar, T., DeGasperi, C., and Marshall, K., “Three-dimensional modeling of temperature stratification and density-driven circulation in Lake Billy Chinook, Oregon,” *Proceeding of the 6th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling*, American Society of Civil Engineers, New Orleans, pp. 411~425(2000).
16. Miyanaaga, Y., “Modelling of stratified flow and eutrophication in reservoirs,” *Ecological Modelling*, **31**, 133~144(1986).
17. 나은혜, 팔당호 수질관리를 위한 3차원 시변화 모델 연구, 이화여자대학교 박사학위 청구논문(2005).
18. Edinger, J. E. and Buchak, E. M., “Numerical Hydrodynamics of Estuaries in Estuarine and Wetland Processes with Emphasis on Modeling,” Hamilton, P. and Macdonald, K. B.(Eds.), Plenum Press, New York, pp. 115~146(1980).
19. Edinger, J. E. and Buchak, E. M., “Numerical waterbody dynamics and small computers,” *Proceedings of ASCE 1985 Hydraulic Division Specialty Conference on Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age*, American Society of Civil Engineers, Lake Buena Vista(1985).
20. Edinger, J. E., 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(2001).
21. J. E. Edinger Associates, Inc. Home Page, <http://www.jeeai.com>, Aug(2005).
22. 국립환경연구원, 호소 내 조류대발생에 대한 수면제어기술에 관한 연구(I) : 팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발(1998).
23. 건설교통부, 북한강 하천조사 보고서(1990).
24. 건설교통부, 남한강 수리모형실험 보고서(1997).
25. 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일, “2차원 수리수질모델을 이용한 소양호 수온성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링,” 대한상하수도학회지, **15**(1), 40~49(2001).
26. 박옥란, 박석순, “옥정호의 연직 수온분포에 관한 시변화 모델 연구,” 한국육수학회지, **35**(2), 79~91(2002).
27. 서동일, “대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **20**(9), 1219~1234(1998).
28. Martin, J. L. and McCutcheon, S. C., Hydrodynamics and transport for water quality modeling, Lewis Publishers, New York(1999).
29. 김종민, 박준대, 노혜란, 한명수, “소양호와 팔당호 수질의 수직 및 계절적 변화,” 한국육수학회지, **35**(1), 10~20(2002).
30. 선연중, 조철, 김병춘, 허인애, 윤준현, 장남익, 차성식, 조양기, “주암호의 계절별 수온 구조와 열수지 변화,” 한국육수학회지, **36**(3), 277~285(2003).
31. An, K. G., “Seasonal patterns of reservoir thermal structure and water column mixis and their modifications by interflow current,” *Korean Journal of Limnology*, **34**(1), 9~19(2001).