

팔당호의 수리 및 수온 조사를 통한 물순환특성 분석

Analysis of Water Circulation Characteristics for Hydraulic and Water Temperature Investigation in Paldang Reservoir

최황정¹ · 조용철¹ · 유순주¹ · 송용식² · 류인구^{1*}

¹국립환경과학원 한강물환경연구소, ²(주)지오시스템리서치 부설연구소

Hwang Jeong Choi¹, Yong-Chul Cho¹, Soonju Yu¹, Yong Sik Song² and Ingu Ryu^{1*}

¹Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gyeonggi-Do 12585, Korea

²Research and Development Institute, GeoSystem Research Corporation, Gyeonggi-Do 15807, Korea

Received 12 March 2019, revised 14 March 2019, accepted 14 March 2019, published online 31 March 2019

ABSTRACT: This study investigated the spatial and temporal water circulation characteristics of Paldang Reservoir by continuous hydraulic and water temperature survey. Due to differences in water temperature and discharge pattern of Ipo Weir and Cheongpyeong Dam, the flow and temperature fluctuations were different in sections of Namhan River and Bukhan River in Paldang Reservoir. At the stratification period, the water temperature of the discharge of Ipo Weir was higher than that of the Cheongpyeong Dam. Therefore, in the surface layer of the downstream of Bukhan River, relatively high temperature water is located and back water phenomenon occurred, and convergence zone is formed. In the downstream section of Namhan River, low-temperature water was distributed in the middle and lower layers, and the upstream flow appeared to be difficult to mix with the surface layer.

KEYWORDS: Back water, Paldang Reservoir, Two-layer flow, Water circulation, Water temperature

요 약: 본 연구에서는 팔당호 내 주요지점에서 수심별 연속 수리 및 수온 조사를 수행하여 팔당호의 시공간적 물순환 특성을 파악하고자 하였다. 이포보와 청평댐에서의 수온 및 방류 패턴의 차이로 인하여 팔당호 내 북한강 및 남한강 구간에서의 흐름 및 수온 변동특성이 상이하게 나타났다. 수직혼합기에는 북한강과 남한강 구간의 전 층에서 하류방향 흐름이 우세하게 나타났다. 성층형성기에 이포보 방류수의 수온이 청평댐 방류수의 수온보다 높았으며, 이로 인해 북한강 하류 구간에서 표층은 상대적으로 고온수가 위치하여 상류방향 흐름으로 배수 현상이 나타나고 수렴대가 형성되었다. 남한강 하류 구간은 중층과 저층에서 저온수가 분포하여 상류방향 흐름이 나타나고 표층과 혼합되기 어려운 이층류 구조를 나타내었다.

핵심어: 배수, 팔당호, 이층류, 물순환, 수온

1. 서 론

하천 및 호소의 수질은 유역에서 유입되는 오염물질 뿐만 아니라, 수체의 정체 및 혼합과 같은 수리적 특성에 의해 많은 영향을 받는다. 일반적으로 수리적 특성

은 수체의 형상, 계절에 따른 강우형태 및 유입 지류의 영향이 복합적으로 반영되어 나타난다 (NIER 2008). 호소에서 수리 및 성층화 해석은 유입량 및 수질에 따라 물질의 이송-확산 해석 및 조류 발생에 미치는 영향 등을 규명할 수 있는 중요한 정보가 된다 (Yu et al. 2006).

*Corresponding author: ilovmi@korea.kr, ORCID 0000-0002-7491-3000

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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, provided the original work is properly cited.

따라서 수질오염물질의 이송 및 확산과 같은 복잡한 자연 현상에 대한 과학적인 수질 관리를 위해서는 현장 중심의 입체적인 수문기상, 수리, 수질 관측 자료의 축적과 함께 적절한 수치모델의 활용이 필수적이다(NIER 2014). 물환경 관리의 다양한 분야에서 수리수질 연계 모델링의 활용도가 높아지고 있으나, 수치모델링 결과의 신뢰성을 확보하기 위한 양질의 모니터링 자료는 대부분의 경우에 충분히 확보하기 쉽지 않다.

수도권 시민의 주요 상수원수인 팔당호는 한강수계 하천-저수지 연계 시스템의 한 구성 요소이다. 그 시스템 속에서 수질오염물질의 이동은 상·하류 간의 이송·확산의 해석과 더불어 호소 자체의 시공간별 특성을 고려한 환경수리학적 고찰이 필요하다(NIER 2014). 특히, 팔당호는 유역특성이 상이한 남한강, 북한강, 경안천이 합류되는 하천형 호수이기에 복잡한 혼합 양상을 보임과 동시에 시공간별 수리·수질 변화의 특이성이 존재한다. 이러한 복잡성과 특이성으로 인해 팔당호는 정밀 입체 모니터링 조사가 지속적으로 이루어져야 하는 지역이다.

팔당호의 종합적인 수리수질에 대한 조사연구는 과거에 몇 차례 수행된 바가 있다. NIER (2007)는 팔당호를 중심으로 유입하고 있는 3개 하천의 경계지점을 비롯한 주요 지점에 대하여 수질을 조사하였으며, 동시에 유속 및 유향, 유량을 음향도플러유속계(ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 횡단 측정하였다. 이에 따라 팔당호는 상류댐의 방류 여건에 따라 수리 및 수질 특성이 다르게 나타남을 확인하였다. NIER (2008)은 남한강과 북한강의 합류수역에 집중하여 수리와 수질에 대한 정밀조사를 수행하였으며, 청평댐의 주기적인 침투 방류가 팔당호의 수리 및 수질을 지배하는 주요 요인으로 제시하였다.

팔당호의 수리적 혼합, 수온성층, 유기물 및 영양염류의 시공간적 변화연구(Kim et al. 1995, Shin et al. 2003, Kim et al. 2005, NIER 2007, NIER 2008, Kim et al. 2008) 및 수치모형을 활용한 팔당호의 수리수질 해석에 대한 다양한 적용 사례(Shin and Ryu 1999, Na and Park 2005, Seo et al. 2009, NIER 2014)가 지속적으로 수행되고 있으나 충분한 실측자료가 부족한 상황에서 이루어 졌다. 따라서 조류 발생 측면과 수질오염물질의 이송 및 확산에 대한 기반 연구로 팔당호 수리동력학적 조사 분석 연구는 그 의미를 갖는다.

본 연구에서는 팔당호 내 주요지점에 대한 수심별 연

속수리(유속, 유향)와 수온 정밀조사를 수행하여 흐름 변동을 확인하였다. 이를 통해 팔당호 내의 시공간적 물순환 특성에 따른 수질에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상영역

본 연구에서는 남한강과 북한강이 두물머리에서 합류하여 경안천과 만나 팔당댐에 도달하는 팔당호를 대상으로 현장 조사 및 분석을 수행하였다(Fig. 1). 팔당호는 댐 및 보 등의 상류에서 유입되는 유입수가 호소 내 지형적인 특성에 따라 입체적으로 혼합되며, 유입량의 변동과 유입수의 이화학적 특성에 따라 수리 및 수질 특성이 시공간적으로 복잡하게 변화하는 수체이다.

팔당호의 주요 흐름 및 수온 변화 특성을 확인하기 위해서 총 3곳을 조사정점으로 선정하였다. 정점 PC1, PC2는 각각 북한강과 남한강의 하류에 위치하며, 팔당댐에서 11 km와 9.5 km 떨어져있다. 그리고 PC3는 팔당댐 상류 3 km 인근에 위치한다. 조사기간은 2016년 5

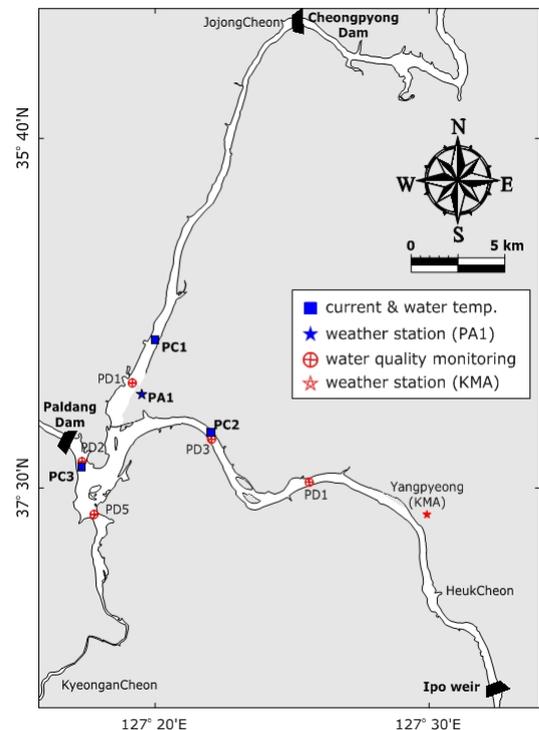
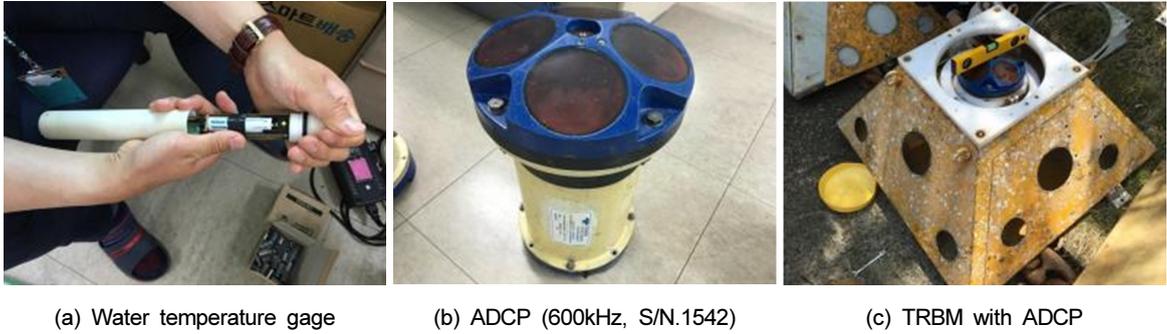


Fig. 1. Location of monitoring in Paldang Reservoir.



(a) Water temperature gage

(b) ADCP (600kHz, S/N.1542)

(c) TRBM with ADCP

Fig. 2. Installation of water temperature gauge and ADCP.

월 12일부터 6월 17일까지 총 37일이며, 수직혼합과 수온성층이 형성되는 시기를 고려하였다.

2.2 수심별 연속 수온조사

수심별 연속 수온조사를 위하여 계류전용 정밀수온계인 RBR Ltd.사의 TR-1050과 TR-1060를 사용하였다 (Fig. 2 (a)). 측정주기는 10초로 설정하고 계류줄에 수직 1 m 간격으로 수온계를 설치하였다. 고유속 환경에서도 장비가 유실되지 않도록 앵커와 체인으로 계류줄을 고정하였다. 또한 수온계를 전용프레임에 장착한 후 부이를 연결하고 깃발 및 야간점멸등을 함께 설치하여 선박의 안전운항 확보와 동시에 선박충돌로 인한 장비훼손을 사전에 방지하였다.

측정된 수온 자료의 품질을 점검하고 기초분석, 각 정점별 수온 시계열 및 수직분포 등을 비교하여 시공간별 수온의 변동특성을 분석하였다. 그리고 ADCP 자료와의 종합분석을 위해서 수온자료를 10분 평균한 후 이를 Kriging 방법을 적용하여 보간하였다.

2.3 수심별 연속 수리조사

수심별 연속 수리조사를 위하여 RDI사의 WH600 ADCP를 사용하였다(Fig. 2 (b)). 측정항목은 유속과 유향이며, 측정주기는 10분 간격이고, 10분 동안 2초마다 측정된 300개의 자료를 평균하여 저장하였다. 유속계의 층간격은 0.2 - 0.5 m, 하상과의 공백구간은 1 m 내외로 설정하였다.

측정장비를 안정적으로 설치하기 위해서 어군탐지기기를 이용하여 저면의 수평상태를 파악한 후, 채니기 (Grab sampler)를 이용하여 조사지점 저질의 입도상태를 확인하고 조사장비의 침하 가능성 여부를 확인하였

다. 어로 활동과 선박 운항에 의한 기기유실 방지 및 안정적인 자료 확보를 위하여 TRBM (Trawl Resistance Bottom Mount)에 ADCP를 장착하여 저면에 계류하고, 고유속 환경에서도 조사장비가 유실되지 않도록 앵커를 이용하여 TRBM을 고정하였다 (Fig. 2 (c)).

수심의 상부 20%, 50%, 80% 위치를 각각 표층, 중층, 저층으로 정의하고, 측정된 원시자료로부터 유속과 유향을 추출하여 이상자료 제거 및 진북 보정을 수행하였다. 각 정점별 유속·유향 시계열, 유속 장미도, 잔차류의 수직분포, 유속진행 벡터도 등을 분석하여 팔당호 내 유속의 변동특성 및 평균흐름특성을 확인하였다.

2.4 수괴 안정도

수온, 수온의 수직차(DT/DZ), 수온 단주기성분, 유속, 리차드슨 수(Richardson number, Ri), 성층계수를 분석하여, 이를 기반으로 수괴 안정도를 분석하였다. 수온의 전체 성분 중 단주기 성분만을 추출하기 위하여 Lanczos의 high pass 필터 (Lanczos 1956, Duchon 1979)를 사용하였다.

$$Y(f) = R(f) \cdot X(f) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$R(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \omega_k \exp(2\pi \cdot i \cdot f \cdot k \cdot \Delta) \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 Y(f)는 단주기 성분(°C), X(f)는 입력 자료(°C), R(f)는 주파수 응답함수(-), 는 가중치 (-), i는 시간(sec), f는 주파수(sec⁻¹), 는 자료추출 주기(sec)이다. 10초 간격으로 관측된 원시 수온자료를 그대로 사용하였고, high-pass 필터의 절단주기는 300초로 설정하여 이보다 긴 주기의 성분을 제거하였다. 가중치는 72를 적용하였고 10초 간격으로 결과를 출력하였다.

리차드슨 수는 밀도경사에 대한 유속경사의 무차원화된 비율로서 성층화된 유체의 수직혼합 정도를 나타내는 척도로 사용되며 다음과 같이 표현된다.

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서, u 는 유속 (m/s), ρ 는 밀도 (kg/m^3), T 는 수온 ($^{\circ}\text{C}$), g 는 중력가속도 (m/s^2), z 는 수직위치 (m)이다. 유속과 동일한 10분 주기로 수온을 평균하였고 이를 사용하여 밀도를 계산하였다.

수층의 성층분석을 위해 성층계수를 산정하였다 (Simpson and Bowers 1981, Rippeth et al. 2001). 성층계수는 수층을 완전히 혼합시키는데 필요한 단위 체적당의 일로서, 수층의 현재 위치에너지와 수층이 수직적으로 완전 혼합되었을 경우의 위치에너지간의 차이로 PEA (Potential Energy Anomaly)라고 표현된다. 수직적으로 밀도가 역전되면 음의 값을 보인다.

$$PEA = \frac{g}{H} \int_{-H}^0 (\bar{\rho} - \rho(z)) z \, dz \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서, H 는 총수심 (m), $\bar{\rho}$ 는 수심평균 밀도 (kg/m^3)이다. 리차드슨 수 계산시와 동일하게 10분 간격으로 평균된 수온자료를 사용하였고 수심은 동일 정점의 ADCP에서 관측된 10분 간격 자료를 사용하였다.

3. 조사 분석 결과

3.1 수온 변동 특성

각 정점별 수온의 수직분포 시계열을 도시하였다 (Fig. 3). 모든 지점에서 조사기간 초기인 5월 12일부터 5월 22일까지는 수직적인 수온차이 (DT/DZ)가 대부분 1°C 미만이었으며, 모든 층의 수온이 지속적으로 증가하는 수직혼합시기였다. 반면에 조사기간 후기인 5월 28일부터 6월 17일까지는 수직적인 수온차이가 증가하여 1°C 이상의 수온차이가 빈번하게 발생하는 성층형성시기였다. 또한 중·저층의 수온은 일정하며 표층 수온이 지속적으로 상승하였다. 팔당호 유입수인 청평댐과 이포보의 방류수의 수온을 비교해보면, 관측초기에는 유입수 수온(약 18°C)이 비슷하였으나 관측후기에는 남한강의 유입수온(약 21°C)이 북한강에 비해

최대 7°C 이상 높았다.

정점 PC1 (북한강 하류)에서 평균수온은 수면하 1 m에서 21.82°C , 수표면하 8 m에서 17.76°C 이었으며, 수면하 1 m에서 최고수온과 최저수온은 각각 27.29°C 와 17.09°C 로 10°C 이상의 차이로 크게 나타났다. 저층으로 내려갈수록 최저 및 최고수온이 낮아지고 수온의 변동폭도 작아졌다. 수면하 6 m 아래에서는 최고, 평균, 최저수온의 수직분포가 거의 균일하게 나타났다. 수직혼합시기에는 수면하 1 m에서 20°C 이상 수온의 출현율은 1.69%이고, 17°C 이하 수온은 나타나지 않았다. 반면 수면하 8 m에서 20°C 이상 수온은 나타나지 않으며, 17°C 이하 수온의 출현율은 36.98%였다. 성층형성시기에는 수면하 1 m에서 20°C 이하 수온은 나타나지 않았으며, 25°C 이상 수온의 출현율은 15.56%였다. 수면하 8 m에서 20°C 이상 수온은 나타나지 않으며 모든 자료가 $17 - 19^{\circ}\text{C}$ 에 분포하여 수온의 변동이 매우 작았다.

정점 PC2 (남한강 하류)에서 평균수온은 수면하 1 m에서 25.01°C , 수면하 8 m에서 17.65°C 이었으며, 수면하 1 m에서 최고수온과 최저수온은 각각 28.47°C 와 21.46°C 로 7.01°C 의 차이가 나타났다. 그리고 수면하 9 m에서 최고수온과 최저수온은 각각 18.59°C 와 16.91°C 로 1.68°C 의 작은 차이가 나타났다. 표층의 최고수온과

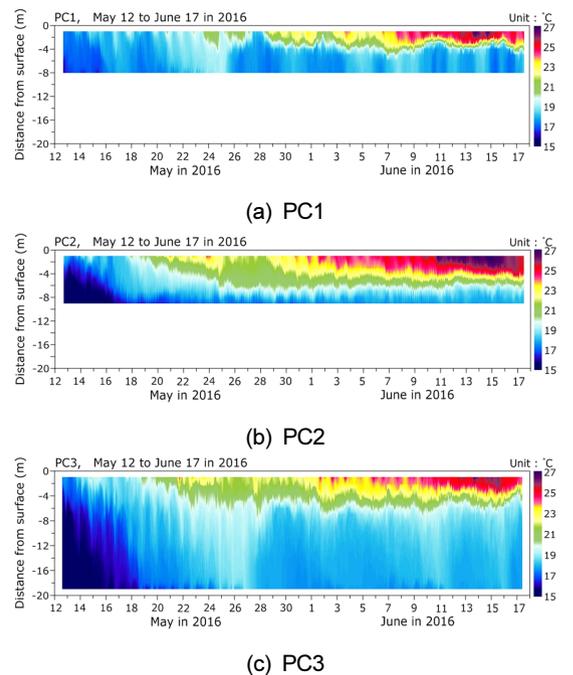


Fig. 3. Vertical distributions of water temperature.

평균수온이 다른 정점들보다 높게 나타나며, 수직적인 수온차가 가장 크게 나타났다. 수직혼합시기에는 수면하 1 m에서 20°C 이상 수온의 출현율은 26.02%이고, 17°C 이하 수온의 출현율은 0.54%였다. 수면하 8 m에서 20°C 이상 수온은 나타나지 않으며, 17°C 이하 수온의 출현율은 67.98%였다. 성층형성시기에는 수면하 1 m에서 20°C 이하 수온은 나타나지 않았다. 25°C 이상 수온의 출현율은 46.14%였다. 수면하 9 m에서 20°C 이상인 수온은 나타나지 않으며 모든 자료가 17 - 19°C에 분포하여 수온의 변동이 매우 작았다.

정점 PC3 (팔당댐 인근)은 평균수온은 수면하 1 m에서 22.67°C, 수면하 19 m에서 17.32°C이었으며, 수면하 1 m에서 최고수온과 최저수온은 각각 26.64°C와 16.89°C로 9.75°C의 차이가 나타났다. 수면하 9 m에서 최고수온과 최저수온은 각각 18.96°C와 15.02°C로 3.94°C의 차이가 나타났다. PC3는 수면하 7 m 아래에

서 최고, 평균, 최저수온의 수심에 따른 감소가 1°C/10 m 정도로 크게 작아졌다. 수직혼합시기에는 수면하 1 m에서 20°C 이상 수온의 출현율은 18.50%이고, 17°C 이하 수온의 출현율은 1.38%였다. 수면하 19 m에서 20°C 이상 수온은 나타나지 않으며, 17°C 이하 수온의 출현율은 93.74%였다. 성층형성시기에는 수면하 1 m에서 20°C 이하 수온은 나타나지 않았으며 25°C 이상 수온의 출현율은 8.57%였다. 수면하 19 m에서 20°C 이상 수온은 나타나지 않으며 모든 자료가 17 - 19°C에 분포하여 수온의 변동이 매우 작았다.

3.2 수리 변동 특성

3.2.1 정점별 유속 변동

정점 PC1의 층별 유속·유향 시계열 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 정점 PC1에서는 청평댐의 일주기 방류특

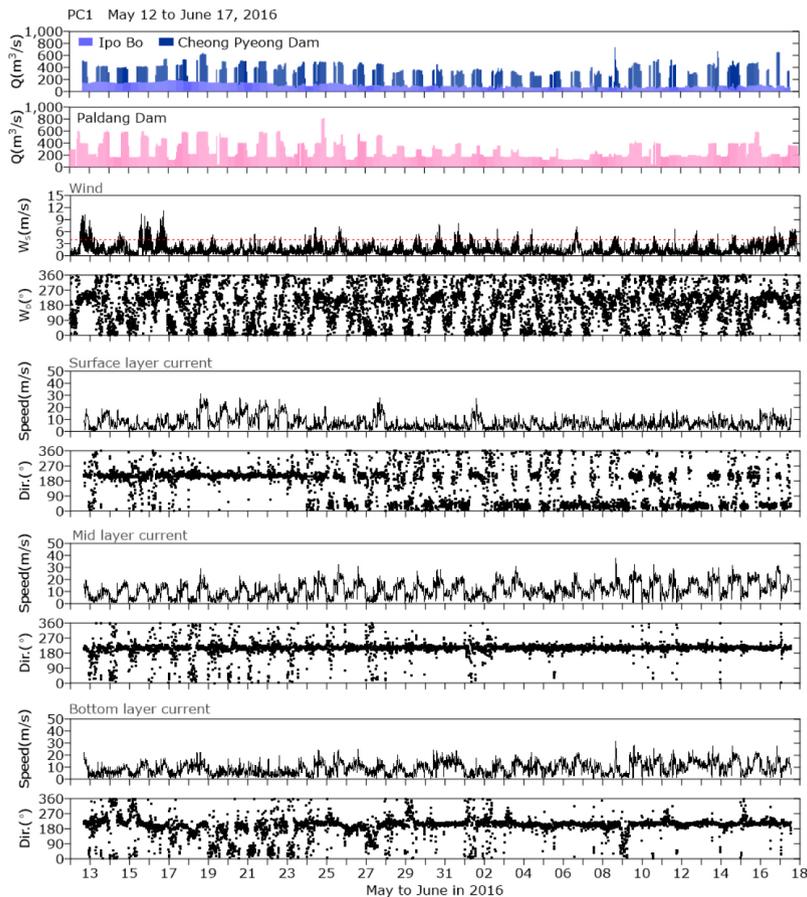


Fig. 4. Velocity and direction time series of flow by layer at PC1.

성으로 인하여 북한강 하류에 위치하는 PC1의 수리 특성이 변동되었다. 청평댐 무방류 시에는 유속이 대부분 0.1 m/s 미만으로 약하게 유지되며, 청평댐 방류 시에는 0.2 m/s 이상의 유속이 나타났다. 관측초기에는 하류방향으로 흐름이 나타났으나, 5월 25일 이후에는 수면부터 수면하 2 - 4 m까지 역류가 나타나는 이층류 현상이 확인되었다. 표층에서의 상류방향 흐름(역류)은 청평댐 방류가 종료된 직후부터 다음 방류 직전까지 지속되었으며, 그 아래층은 하류방향의 흐름을 보였다. 5월 19일부터 약 3일간 청평댐 방류 종료부터 다음 방류 시작 직전까지 바닥으로부터 3 - 4 m의 저층부에서 상류방향으로의 흐름이 나타났다. 이층류에 따른 유속의 변동 특성을 분석해보면, 전층 하류방향으로 흐르는 시기보다 이층류가 형성되는 시기에 유속이 더 강하며 0.2 m/s 이상의 유속이 나타났다. 또한 표층에서 상류방향으로 흐르는 시기에는 고유속이 저면으로부터 상부 4 - 7 m 사이에서 나타나고, 저층에서 상류방향으로 흐르는 시기에는 고유속이 표층에서 나타났다.

정점 PC2에서는 청평댐 방류 패턴과 다른 이포보의 지속적인 방류로 인하여 정점 PC1에 비해 유속 변동이 크지 않았다. 하층에서 상류방향, 상층에서 하류방향으로의 이층류가 나타났다. 팔당댐 방류량이 적은 시기에는 저층부에서 상류방향 흐름이 강화되었다. 팔당댐 방류량이 200 m³/s 이하인 6월 8일에는 상류방향 흐름이 나타나는 저층부의 두께가 약 6 m 정도였다. 저층의 상류방향 흐름은 약한 일주기 특성 변동특성이 나타났으며, 이는 청평댐의 주기적인 방류특성에 의한 것으로 청평댐 방류시 남한강 하류에 위치하는 정점 PC2의 저층부에서 남한강 상류방향 흐름이 형성되었다.

정점 PC3에서는 팔당댐 방류 영향을 가장 크게 받는다. 팔당댐 순간방류량이 400 m³/s 이상인 경우에 하류방향 흐름이 강화되며 주기성이 나타났다. 팔당댐 순간방류량이 700 m³/s 이상인 경우에는 모든 층에서 하류방향으로 0.2 m/s 이상의 유속이 나타났다. 팔당댐 순간방류량이 400 m³/s 이하인 기간이 수일 동안 지속되는 경우, 저층에서의 유속은 0.2 m/s 이하로 약해지거나 흐름이 발생하지 않았다.

3.2.2 시기별 흐름 변동 특성

수직혼합 시기에는 모든 정점의 전 층에서 평균흐름이 하류방향으로 향하였다 (Fig. 5). 정점 PC1의 표층은 하류방향 흐름이 86.8%로 상류방향 흐름보다 우세

하였고, 저층은 하류방향 흐름의 출현율이 81.5%로 상류방향 흐름보다 우세하며 표층에서의 하류방향 출현율보다도 높았다 (Fig. 5 (a)). 수면하 6 m 부근에서 0.07 m/s 내외의 평균 유속이 나타났고, 수면하 6 m의 상부와 하부로 갈수록 점차 감소하며 모든 층에서 0.04 m/s 이상으로 나타났다. 정점 PC2에서 표층은 하류방향 흐름이 97.4%로 상류방향 흐름보다 우세하였고, 저층은 하류방향 흐름 출현율이 85.5 %로 상류방향 흐름보다 우세하였다 (Fig. 5 (b)). 수면하 3 m 부근에서 0.07 m/s 내외의 평균 유속이 나타났고, 수면하 3 m의 상부와 하부로 갈수록 점차 감소하며 모든 층에서 0.03 m/s 이상으로 나타났다. 정점 PC3에서는 수면하 6 m 부근에서 0.09 m/s 내외로 가장 강하게 나타나며 상부와 하부로 갈수록 약해졌다. 정점 PC1에서는 관측 초반에 저층에서 상류방향과 하류방향 흐름이 번갈아 나타났으며, 이는 관측초기에 남한강 방류수의 수온이 북한강보다 더 낮았기 때문으로 사료된다. 특히, PC2와 PC3에서는 전 층에서 하류방향 흐름이 나타났다 (Fig. 5 (c)).

성층형성 시기에 잔차류의 수직분포는 정점별 층별로 상이한 특성을 보였다 (Fig. 6). 정점 PC1에서 표층은 상류방향의 흐름이 64.8%로 하류방향 흐름보다 우세하였고, 하류방향 흐름의 출현율이 93.2%로 상류방향의 흐름보다 우세하여 표층과는 다른 양상이 나타났다 (Fig. 6 (a)). 수면하 3 m 부근을 기준으로 상부에서는 상류방향, 하부에서는 하류방향 흐름이 나타났으며, 수면하 3 m에서는 평균유속이 0에 가까우며 상부로 갈수록 증가하고, 그 아래에서는 수면하 6 m 부근까지 유속이 점차 증가하다 바닥으로 갈수록 감소하였다. 정점 PC2에서 표층은 하류방향 흐름이 89.6%로 상류방향의 흐름보다 우세하였고, 저층은 상류방향 흐름이 60.2%로 하류방향 흐름보다 우세하였다 (Fig. 6 (b)). 그리고 정점 PC1과 같은 이층류가 나타나지만 방향은 반대였으며, 저면상 4 m 부근까지는 상류방향 흐름이 나타나고 그 위에서는 하류방향 흐름이 나타났다. 정점 PC3에서는 수직혼합시기와 유사하게 전층에서 하류방향 흐름이 나타났으며 (Fig. 6 (c)).

3.3 수괴 안정도 분석

수리, 수온 및 기상 등의 자료를 비교하여 팔당호 수체의 안정성 및 순환 특성을 분석하였다 (Fig. 7). 정점 PC1의 경우, 수온은 5월 22일까지 수직혼합에 의해 수

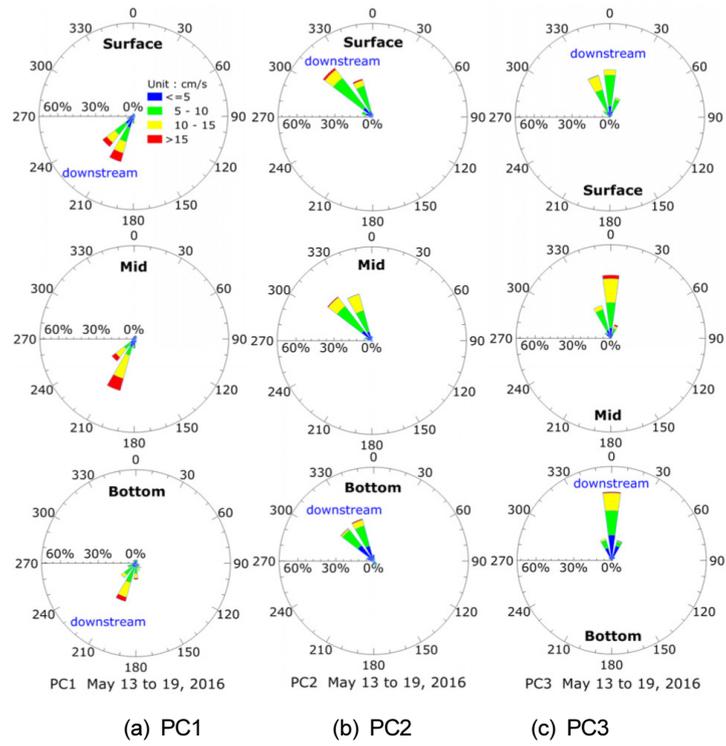


Fig. 5. Velocity roses by layer (vertical mixing period).

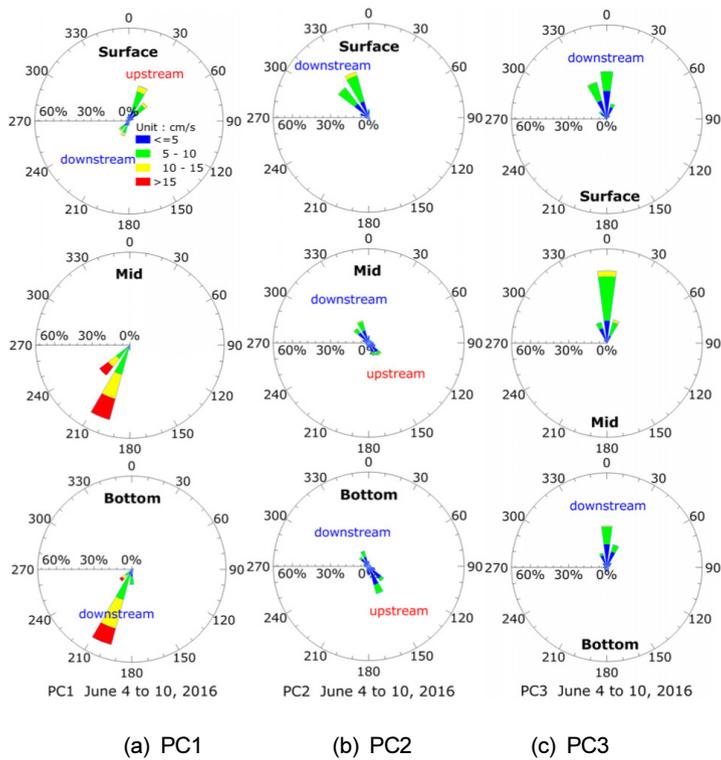


Fig. 6. Velocity roses by layer (stratification period).

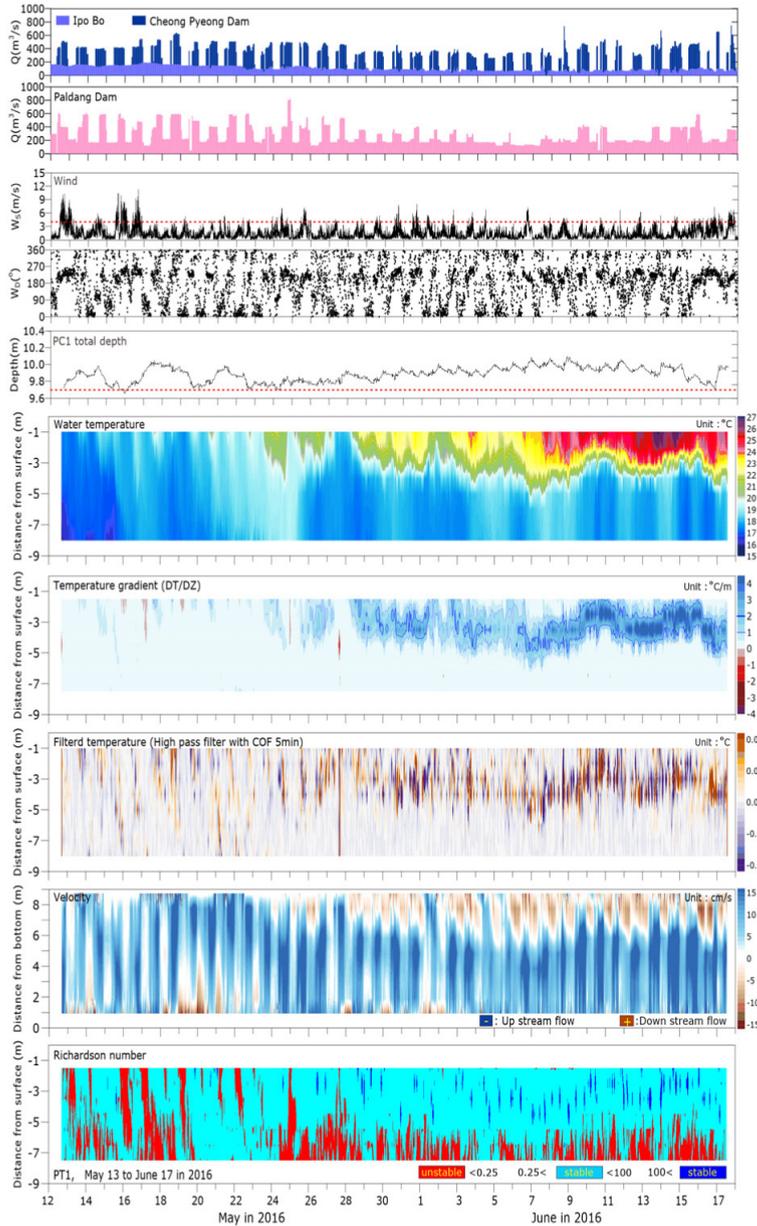


Fig. 7. Profiles and time series of discharge flow rate, wind speed, wind direction, water temperature, flow velocity and Richardson number at PC1.

직차의 변동특성이 작았으나 이후에는 증가하며, 남한 강수역보다 수온이 낮고 저수층의 두께가 두껍게 형성되었다. 유속은 수직혼합기에 청평댐 방류에 의해 모든 층에서 유속이 강화되며, 성층형성기에는 수온에 의한 하류방향 통수단면적 감소로 중층과 저층 유속이 강화되어 이층류가 뚜렷하게 나타났다. 리차드슨 수의 경우 표층과 중층은 대부분 기간 동안 안정 상태이며, 저층

은 대부분 불안정한 상태로 볼 수 있으며, 강풍 내습 및 방류량 증가 시 모든 층이 불안정하고 수직혼합이 강화됨을 알 수 있다. 수온의 수직차이가 크지 않고 수직혼합과 수직수온차 증가가 반복되는 5월 29일까지는 성층계수가 대부분 1 J/m^3 이하로 유지되며 일시적으로 1 J/m^3 에 가까운 값이 나타났다. 5월 29일 이후에는 1 J/m^3 이상이 지속적으로 유지되며 성층이 강화되었다.

정점 PC2는 전반적으로 북한강 수역보다 수온이 높고 저 수온 층의 두께가 상대적으로 얇다. 유속은 수직 혼합기에 전 수심에서 하류방향 흐름이 나타났으며, 성층형성기에는 중층과 저층에서 상류방향으로 유속이 강화되어, 뚜렷한 이층류가 나타났다. 리차드슨 수의 경우 대부분 기간에 모든 층이 안정 상태를 보였다. 성층계수는 정점 PC1과 유사한 특성을 보이며 변동하나 전반적으로 PC1보다 높은 값을 보였으며, 이는 정점 PC2가 PC1보다 수온의 수직차이가 더 크게 유지되었기 때문이다. 5월 19일 이후 성층형성의 기준이 되는 1 J/m^3 가 지속적으로 유지됨. 이는 일평균 기온이 20°C 이상으로 유지되기 시작하는 시기와 거의 일치하였다.

정점 PC3는 5월 19일경까지 수온의 수직변화가 작고 이후 증가하였다. 유속은 수직혼합기에 댐 방류로 모든 층에서 유속이 강화되었으며, 성층형성기에는 팔당댐 방류량에 따라 저층 유속이 0.02 m/s 미만까지 감소되었다. 리차드슨 수의 경우 표층과 중층은 대부분 기간에 안정 상태를 보였고, 저층은 대부분 불안정한 상태를 나타내었다. 전 관측기간 동안 성층계수 $\log(\text{PEA})$ 가 1 J/m^3 이하로 하강하지 않았다. 관측초기부터 6월 2일까지 지속적으로 증가하며 6월 2일부터 3 J/m^3 가 지속적으로 유지되었다.

4. 팔당호의 물순환 특성

4.1 3차원 순환 구조

복잡한 지형 및 다양한 지류의 유입, 댐 및 보의 방류 패턴 등의 다양한 요인들에 의하여 팔당호는 복잡한 3차원 순환구조를 보인다. 각 정점별 흐름특성과 수온변동이 크게 다르게 나타났으며, 이는 남한강의 이포보와 북한강의 청평댐에서 방류되는 방류수의 수온차이로 인한 성층특성에 영향을 받는다. 수직혼합시기에는 북한강 및 남한강의 전층을 통해 하류방향 흐름이 나타나며 방류시 유속이 빠르게 증가하였다. 성층형성시기에는 이포보와 청평댐 방류수의 수온 차이로 인해 흐름구조가 바뀌었다.

팔당호의 3차원 순환구조를 단면모식도로 표현하면 Fig. 8과 같다. 북한강 중하류의 표층은 이포보 기원의 고온수가 위치하며 상류방향 흐름이 나타난다. 반면에 저층은 청평댐 기원의 저온수가 위치하며 하류방향 흐름이 나타난다(Fig. 8 (a)). 또한 북한강 중류 부근에서 수렴대(convergence zone)가 형성되어 흐름이 정체되

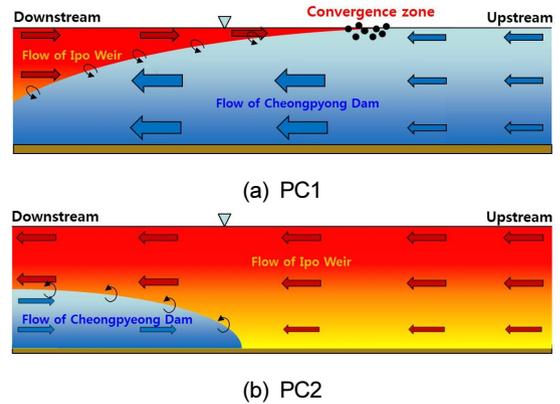


Fig. 8. Diagram of water circulation for stratification period in Paldang Reservoir.

는 현상이 발생된다. 북한강 중하류의 표층은 대부분 안정상태로 유지되므로 표층에 부유하는 물질이 수직 혼합이 이루어지기 어렵다.

남한강 하류의 표층은 이포보 기원의 고온수가 위치하며 하류방향 흐름이 나타난다(Fig. 8 (b)). 그리고 중·저층은 청평댐 기원의 저온수가 분포하며 상류방향 흐름이 나타난다. 청평댐에서 방류된 후 오랜 시간이 경과한 저온수가 저층에 체류한다.

4.2 물순환 특성이 수질에 미치는 영향

복잡한 3차원 순환구조는 팔당호의 수질변화에 중요한 영향을 미친다. 이를 확인하기 위해서 팔당호 내의 주요지점인 환경부 수질측정망 팔당댐1 - 4 (PD1 - PD4)에서 2012년부터 2018년까지 약 8일 간격으로 측정된 용존산소의 각 정점별 연간 저산소(2 mg/L 이하) 출현율을 Table 1에 제시하였다. 북한강 (PD4)에서는 2 mg/L 이하의 저산소가 나타나지 않았다. 반면에 대부분 성층이 형성되는 하절기 6, 7, 8월에 댐앞지점 (PD2)과 남한강 저층 (PD1, PD3)에서 저산소 현상이 발생되었다. 이는 성층 발생시 남한강 저층에서 상류 방향으로의 흐름이 형성되어 체류시간이 증가하지만, 수온약층 하부의 수괴 안정도가 높아서 용존산소 농도가 높은 표층수와의 수직혼합이 제한적이기 때문으로 판단된다.

북한강의 중·하류에서는 녹조가 빈번하게 발생하는데 이는 북한강 중·하류 표층에서 역류 발생으로 인하여 수렴대가 형성되는 것으로 판단된다. 따라서 중·하류의 표층에서 상류 방향으로의 흐름이 발생하

Table 1. The low-oxygen rate of bottom for each monitoring station (unit: %)

Year	PD1	PD2	PD3	PD4
2012	5	5	0	0
2013	0	0	0	0
2014	7	2	7	0
2015	21	37	13	0
2016	10	10	12	0
2017	3	5	2	0
2018	14	14	8	0

여 표층에서 체류시간이 증가하게 되며, 특히 수렴대에서 유기물질이 장기적으로 체류하는 동시에 표층의 수직안정도가 높아 조류발생에 호조건이 될 가능성이 높아진다.

5. 결론

본 연구에서는 팔당호 시공간적 물순환 특성을 파악하고자 주요지점 3곳에 음향도플러유속계를 저면에 설치하여 수심별 수리량을 정밀하게 측정하였다. 또한 동일 지점에 수심 1 m 간격으로 수온계를 설치하여 연속 수온자료를 취득하였다.

북한강 하류 지점에서는 청평댐의 일주기 방류특성으로 인해 일주기 흐름 변동이 뚜렷이 나타났으며, 청평댐 무방류기간 동안에 표층에서 상류방향으로 역류되는 배수 및 이층류 현상이 나타났다. 남한강 하류 지점은 저층에서 상류방향, 표층에서 하류방향으로의 이층류가 나타나며, 상하층의 두께는 팔당댐 방류량에 따라 변동되는 특성을 보였다. 팔당댐 인근 지점은 팔당댐의 순간방류량에 따라 흐름특성이 강하게 변동되었다.

수심별 수온 변화와 관련한 시기별 흐름 변화를 비교하면, 수직혼합기에는 북한강과 남한강 구간의 전 층에서 하류방향 흐름이 우세하게 나타났다. 성층형성기에는 이포보 방류수의 수온이 청평댐 방류수의 수온보다 높았고, 이로 인해 북한강구간에서 표층은 상대적으로 고온수가 위치하며 상류방향 흐름이 나타나고, 저층은 저온수가 위치하여 하류방향 흐름을 보였다. 청평댐의 간헐적 방류, 팔당댐과 이포보의 상시 방류의 영향으로 북한강 중류 부근에서 수렴대가 형성되는 것으로 판단된다. 남한강 구간은 표층에 상대적으로 고온수가 위치하며 하류방향 흐름이 나타나고, 중층과 저층에서는 저

온수가 분포하며 상류방향 흐름이 나타났다. 저온수가 저층에 체류하여 수체가 안정 상태로 유지되면서 표층과 혼합되기 어려운 구조를 나타내었다.

본 연구는 팔당호의 복잡한 물순환 특성에 따른 녹조 발생의 주요원인을 분석하는 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 다차원 수치모형을 현장조사 결과와의 비교를 통해 검·보정을 수행하고, 다양한 수문조건에서 팔당호의 수질관리방향을 이끌어내는 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였으며(NIER-RP2018-01-01-073), 2018년도 국립환경과학원 박사후 연수과정 지원사업에 의해 이루어진 것임.

References

- Duchon E.D. 1979. Lanczos filter in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology* 18: 1016-1022.
- Kim, D., Kim, B., Hwang, G. and Park, J. 1995. Trend of eutrophication in Lake Paldang (1998-1994). *Journal of Korean Society on Water Quality* 11(4): 295-302.
- Kim, J., Noh, H., Heo, S., Yang, H. and Park, J. 2005. A study on the water quality affected by the rainfall and influent rivers in Paldang Reservoir, Korea. *Journal of Korean Society on Water Quality* 21(3): 277-283.
- Kim, Y.K., Choi, G.W., Ham, M.S. and Kim, N.W. 2008. The Analysis of potential discharge by dam in Han River Basin at dry season. *Journal of Korean Water Resources Association* 41(11): 1143-1152.
- Lanczos, C. 1956. *Applied analysis*. Printice-Hall: 539.
- Na, E. and Park, S. 2005. 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: 901-910.
- National Institute of Environmental Research. 2007. *Multidimensional analysis on material transport in Lake Paldang(I)*.
- National Institute of Environmental Research. 2008. *Multidimensional analysis on material transport in Lake Paldang(II)*.
- National Institute of Environmental Research. 2014. *A spatially distributed modeling study on the algal dynamics in the middle-upper reaches of the North Han River, Korea(II)*.

- Rippeth, T.P., Fischer, N.R. and Simpson, J.H. 2001. The cycle of turbulent dissipation in the presence of tidal straining. *Journal of Physical Oceanography* 31: 2458-2471.
- Seo, I.W., Choi, N.J., Jun, I.O. and Song, C.G. 2009. Mixing Characteristics of nonconservative pollutants in Paldang Lake. *Journal of Civil Engineering* 29(3B): 221-230.
- Shin, D.S. and Ryu, J.K. 1999. Water quality simulation for Paldang Lake with RMA(I). *Journal of Korean Society on Water Quality* 15(1): 99-105.
- Shin, J., Hwang, S., Kang, C. and Kim, H. 2003. Limnological characteristics of the river-type Paltang Reservoir, Korea: hydrological and environmental factors. *Korean Journal of Limnology* 36(3): 242-256.
- Simpson, J.H. and Bowers, D. 1981. Models of stratification and frontal movement in the shelf seas. *Deep Sea Research* 28(7): 727-738.
- Yu, S., Ha, S. and Jung, D. 2006. The effect of current and temperature of a reservoir by the simulation of dam outflow. *Journal of Korean society on Water Quality* 22(6): 1060-1067.