

Research Paper

취수 수심이 합천호의 수온성층과 방류 수온에 미치는 영향 모델링

정선아 · 김혜지 · 이혜숙

한국수자원공사 K-water 연구원

Modeling the Effect of Intake Depth on the Thermal Stratification and Outflow Water Temperature of Hapcheon Reservoir

Sun-A Chong · Hye-Ji Kim · Hye-Suk Yi

K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

요약: 1970~1980년대 준공된 우리나라의 다목적댐 저수지에는 발전방류를 위한 고정식 취수구가 심층에 설치되어 있어 일부 댐 하류에서는 냉수 방류에 의한 농작물 냉해, 안개 일수 증가 등의 문제점이 제기된 바 있다. 본 연구에서는 고정식 취수구를 통해 심층 취수가 이루어지고 있는 합천호를 대상으로 취수 수심이 저수지의 수온 성층 구조와 방류 수온에 미치는 영향을 분석하였다. 3차원 수리수질모형인 AEM3D를 이용하여 합천호의 연직 수온 분포를 재현하고 계절별 수온성층 구조를 분석하였으며, 수문 조건에 따른 수온성층 변화를 비교 분석하기 위하여 풍수해와 갈수해를 대상으로 모델링 하였다. 또한 취수심 변경 시나리오를 적용함으로써 취수 수심이 수온성층 구조에 미치는 영향을 분석하였다. 모의 결과 심층 취수를 표층 취수로 변경할 경우 수온약층의 형성 위치가 풍수해 6.5 m, 갈수해 6.8 m 감소하여 더 얇은 수심에 형성될 것으로 분석되었다. 또한 수체 안정도 지수인 Schmidt Stability Index (SSI)와 Buoyancy frequency (N^2)가 증가하여 수온성층 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 표층 취수시 연평균 방류수온이 풍수해 3.5°C, 갈수해 5.0°C 증가하여 하류하천의 영향은 감소하나, 호내의 저수온층 수체적과 수온성층 강도가 증가하므로 추후 수질관리를 위해 취수심을 댐 운영의 주요인자로 고려해야 할 것으로 판단된다.

주요어: 심층 취수, 수온성층 구조, 방류 수온, 3차원 모델링, AEM3D

Abstract: Korea's multi-purpose dams, which were constructed in the 1970s and 1980s, have a single outlet located near the bottom for hydropower generation. Problems such as freezing damage to crops due to cold water discharge and an increase the foggy days have been raised downstream of some dams. In this study, we analyzed the effect of water intake depth on the reservoir's water temperature stratification structure and outflow temperature targeting Hapcheon Reservoir, where hypolimnetic withdrawal is drawn via a fixed depth outlet. Using AEM3D, a three-dimensional

First & Corresponding Author: Sun-A Chong, Tel: +82-42-870-7455, E-mail: jsa@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0003-4422-5546

Co-Authors: Hye-Ji Kim, Tel: +82-42-870-7453, E-mail: hyejji6387@kwater.or.kr, ORCID: 0009-0007-0712-6166

Hye-Suk Yi, Tel: +82-42-870-7454, E-mail: yihs@kwater.or.kr, ORCID: 0000-0003-0721-0193

Received: 6 November, 2023. Revised: 27 November, 2023. Accepted: 1 December, 2023.

hydrodynamic water quality model, the vertical water temperature distribution of Hapcheon Reservoir was reproduced and the seasonal water temperature stratification structure was analyzed. Simulation periods were wet and dry year to compare and analyze changes in water temperature stratification according to hydrological conditions. In addition, by applying the intake depth change scenario, the effect of water intake depth on the thermal structure was analyzed. As a result of the simulation, it was analyzed that if the hypolimnetic withdrawal is changed to epilimnetic withdrawal, the formation location of the thermocline will decrease by 6.5 m in the wet year and 6.8 m in the dry year, resulting in a shallower water depth. Additionally, the water stability indices, Schmidt Stability Index (SSI) and Buoyancy frequency (N^2), were found to increase, resulting in an increase in thermal stratification strength. Changing higher withdrawal elevations, the annual average discharge water temperature increases by 3.5°C in the wet year and by 5.0°C in the dry year, which reduces the influence of the downstream river. However, the volume of the low-water temperature layer and the strength of the water temperature stratification within the lake increase, so the water intake depth is a major factor in dam operation for future water quality management.

Keywords: Hypolimnetic withdrawal, Thermal stratification structure, Outflow water temperature, Three-dimensional modeling, AEM3D

I. 서론

우리나라 대부분의 인공저수지는 온대 지역에 위치하는 기후적 특성과 폭이 좁고 수심이 깊은 지형적 특성을 가지고 있어 수온 성층(thermal stratification) 현상이 관찰되고 있다. 성층화된 저수지에서는 상·하층 간 열과 물질교환이 저해되므로 심수층(hypolimnion)에서 하절기 낮은 수온과 용존 산소 고갈은 빈번하게 보고되고 있으며, 일부 저수지에서는 저산소 상태에서 용출 작용으로 인해 영양염, 망간, 철 등의 농도가 높게 나타나기도 한다(Higgins et al. 2007; Beutel et al. 2008; Winton et al. 2019). 심수층의 물은 주로 발전 방류를 위한 시설물(penstock)을 통해 하류 하천으로 방류되며, 댐 하류하천의 수질과 수생태에 영향을 미칠 수 있다. 1970~1980년대 준공된 우리나라의 다목적댐 저수지에는 발전 방류를 위한 고정식 취수구가 설치되어 있어 일부 댐 하류에서는 심층 취수(hypolimnetic withdrawal)에 따른 냉수(cold water) 방류가 하류하천의 농작물 냉해와 안개 일수 증가를 야기한다는 문제점이 제기되기도 하였다(Chung & Oh 1997; Jeon et al. 2002). 이를 완화하기 위해 본 댐의 발전 방류수를 저류하였다가 균등 방

류하는 조정지댐이 설치되어 운영되고 있으며, 더욱 근본적 해결책으로서 1990년대 이후 건설된 대부분의 댐에서는 선택적 취수시설(selective withdrawal)이 설치되어 운영되고 있다.

국외에서는 수력 에너지 생산을 위한 심층수 방류가 하류 하천의 수온에 미치는 영향에 대하여 1960년대부터 호주와 미국 등을 중심으로 연구가 이루어져 왔으며, 특히 온대 지역에서 하절기 냉수 방류가 댐 상하류 수온의 연속성 측면에서 큰 단절을 일으킨다고 보았다(Caissie 2006; Olden & Naiman 2010). 호주에서는 Macquarie River의 Burrendong Dam 하류에서 댐 건설 후 하절기 수온이 8~12°C 감소되었고(Gray et al. 2019), Mitta Mitta River의 Dartmouth Dam 하류에서 8~10°C 범위의 감소가 보고되었다(Pardo et al. 1998). 미국에서는 Green River의 Flaming Gorge Dam 하류에서 댐 건설 전 하절기 최대 21°C였던 수온이 댐 건설 후 9~12°C로 감소된 것으로 관측되어(Bolke 1979), 호주와 유사하였다. 심층에서 방류된 저수온의 물은 하류로 유하하면서 대기와의 열 교환, 지류 및 지하수 유입 등의 영향을 받아 수온을 회복하게 되는데, 이 회복 거리는 댐의 크기와 체류 시간, 방류량 등에 영향을 받아 다양하게

나타난다(Ward 1985; Webb 1996; Caissie 2006).

호주의 Murray-Darling River 유역에서는 Murrumbidgee, Marquarie, Mitta Mitta, Namoi, Murray 등의 주요 하천에 건설된 댐으로 인해서 하절기 냉수 방류의 영향이 수백 킬로미터에 달한다고 보고되고 있으며(Ryan et al. 2001; Preece, 2002; Todd et al. 2005), Stevens et al.(1997)는 미국 Colorado River의 Glen Canyon Dam 하류에서 하천의 수온이 댐 건설 전과 같은 수준으로 회복하는데 930 km가 필요할 것으로 추정하기도 하였다.

심층 방류 댐 하류에서 열 체계(thermal regime)의 변화는 하절기 수온 감소 현상 외에도 최고 수온시기가 수 주에서 수 개월 지연되는 현상과 동절기의 수온 상승, 수온의 일교차 및 계절별 진폭의 감소 등을 포함한다(Ryan et al. 2001; Caissie 2006; Chaaya & Miller 2021). 이렇듯 자연 상태의 수온 체계가 인위적인 조건에서 변화하게 되면 수생태계에 직접적인 영향을 미치게 되는데, 어류의 산란과 성장, 토착종의 개체수 감소 및 종조성의 변화에도 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Clarkson & Childs 2000; Olden & Naiman 2010; Lugg 2014).

댐 방류수의 수온을 제어하기 위한 기술적인 방법으로는 선택취수탑을 설치하여 취수 수심을 변경하거나 취수탑에 커튼(curtain)을 설치하여 심층의 물이 취수구로 유입하는 것을 억제하는 방법이 있으며, 저수지 내의 수온 성층을 파괴하는 탈성층화(destratification), 예를 들면 대류식 및 산기식 물순환 장치를 설치하는 방법 등이 있다. Svoboda (2020)에 의하면 미국의 Folsom Dam, Flaming Gorge Dam, Hungry Horse Dam, Cougar Dam 등에서 하류 하천의 저수온 개선을 위해 선택적 취수탑이 추가적으로 설치되어 운영되고 있다. 호주의 Burrendong Dam에서는 방류수 수온을 제어하기 위한 커튼(thermal curtain)을 취수탑에 설치하여 기존의 냉수 방류 수온 회복 거리를 200 km에서 45 km로 단축하였다(Gray et al. 2019).

본 연구는 국내에서 심층 취수에 의해 하류 하천으로의 방류가 이루어지고 있는 합천호를 대상으로 취수 수심이 저수지의 수온성층 구조와 방류수온에 미

치는 영향을 분석하고자 수행되었다. 3차원 수리수질 모형을 이용하여 인공호의 복잡한 물리적 특성을 반영하고 물의 거동을 분석하였으며, 이를 통해 댐의 과학적 운영과 시설물 개선에 활용하는 것을 목표로 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상지 현황

연구 대상지인 합천호는 낙동강의 지류인 황강에 위치한 저수지로서, 낙동강 하류지역의 안정적인 용수 공급, 산업 시설 및 농경지의 홍수피해 조절, 급증하는 전력 수요에 대응하는 목적으로 건설된 합천다목적댐에 의해 형성된 인공호이다(Figure 1(a)). 합천댐은 1989년 12월 준공되어 현재까지 운영되고 있으며 유역 면적은 925 km²로서 황강 전체 유역의 70%, 낙동강 수계 전체 유역의 4%를 점유하고 있다. 총 저수용량은 790×10⁶ m³이며 발원지로부터 댐까지의 거리는 63 km, 저수지 길이는 30 km이다. 연간 용수공급량은 599×10⁶ m³이며, 10만 kWh 발전시설용량을 갖추고 있어 연간 148 GWh의 전력을 생산한다. 계획홍수위는 EL. 179 m이고 저수지의 가장 깊은 수역의 바닥 고도가 EL. 100 m로서 최대수심은 약 80 m이다. 댐 상류 6.5 km 지점에 취수탑이 위치하고 있으며(Figure 1(b)), 취수구는 EL. 125~140 m에 고정식으로 설치되어 있다. 취수구를 통해 취수된 물은 도수터널을 거쳐 하류로 방류되며 댐 하류 6.5 km 지점에는 총 저수용량 1.8×10⁶ m³의 조정지댐이 설치되어 있어 본 댐으로부터 3시간 침투 발전을 통해 방류된 물을 조절하여 방류하고 있다.

2. 모델선정 및 입력자료 구축

합천호는 폭이 좁고 수심이 깊은 전형적인 인공호의 지형적 특성을 가지고 있으며, 상류 6.5 km에 취수탑이 위치하고 있고 수심 30 m 이상에서 취수가 이루어지고 있어 연직방향으로 독특한 수리적 특성을 가진 수체이다. 이러한 특성을 잘 재현하기 위해 본 연구에서는 3차원 수리동력학-수생태 연동 모델인 AEM3D를 적용하였다. AEM3D는 서호주 대학(The

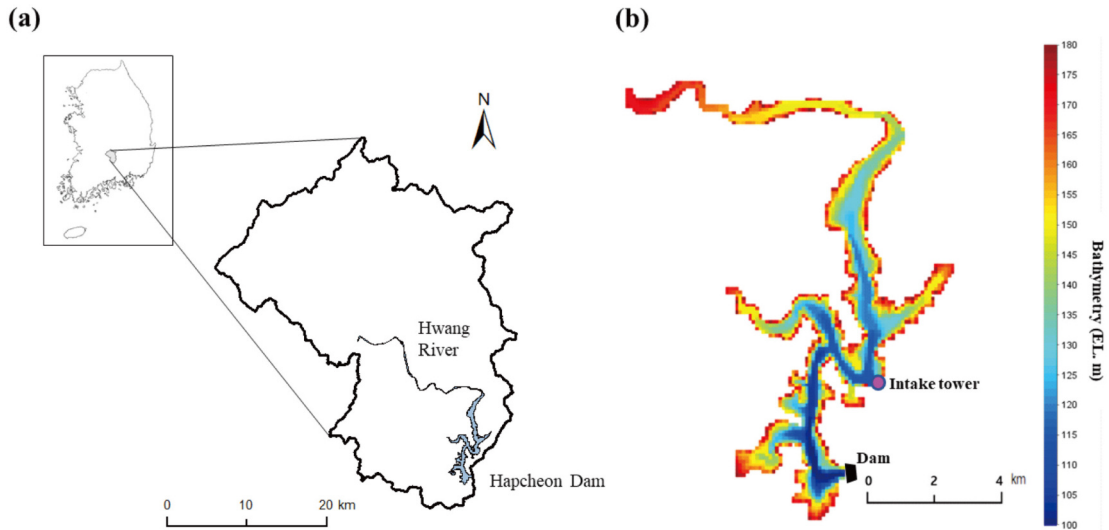


Figure 1. (a) Location of Hapcheon Reservoir; (b) Bathymetric map of the Hapcheon Reservoir including the location of intake tower.

University of Western Australia)의 물연구센터(CWR, Centre for Water Research)에서 개발된 ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) – CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)을 기반으로 호주 HydroNumerics사에서 개발한 모델이다(Hodges & Dallimore 2019). 지배방정식은 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이송-확산방정식이 포함된다. 운동량 방정식은 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하며, 기본적으로 유체의 특성에 대해서는 Boussinesq 가정과 수직방향의 운동량 방정식은 정수압(Hydrostatic pressure) 이론을 사용하지만, 비정수압(Non-hydrostatic)이 중요한 경우에는 non-hydrostatic code 옵션을 사용하여 수직방향의 운동량 방정식을 포함할 수 있다.

본 연구대상지인 함천호를 대상으로 AEM3D 모델을 적용한 모델 모식도는 Figure 1(b)와 같다. 격자 셀의 크기는 $100\text{m} \times 100\text{m} \times 1\text{m}$ ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$)으로 구성하였으며 도메인(domain)의 셀 수는 1,894,536개, total wet cell은 총 88,196개의 격자를 구성하였다. 유입지류 경계조건으로서 황강 분류를 설정하였으며, 방류 경계조건은 취수탑 발전방류, 수문 방류로 세분화 하여 구성하였다. 각각의 유입량과 방류량은 K-

water 운영통합정보시스템(WRO)의 시간별 자료를 사용하였다. 기상자료는 기상청 합천 기상대의 시간별 기온, 상대습도, 풍향, 풍속, 기압 자료를 사용하였으며 일사량과 운량 자료는 진주 기상대의 관측 자료를 사용하여 입력하였다. 경계 수문자료는 K-water에서 운영하고 있는 수질통합정보시스템(WQE)의 실시간 수질자동측정기 황강 유입수 시간별 측정 자료를 활용하였다.

3. 모델 재현성 평가

모델 성능은 모델링 결과와 관측값 간의 적합성을 조사하는 데 자주 사용되는 RMSE(제곱 평균 오차)와 AME(절대 평균 오차)를 사용하여 평가하였다. 각각의 값은 다음 방정식으로 계산된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

$$AME = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n}$$

여기서 n 은 측정된 값과 예측된 값의 쌍의 수이고, O 는 관측값, P 는 모델 예측값이다. 모델의 물수지 재현력을 평가하기 위해 수위 예측에 대한 적합성을 평가하였고, 수온성층 재현력을 평가하기 위하여 연직

방향의 수온 예측 정확도를 산정하였다. 수위와 연직 방향 수온의 관측자료는 각각 K-water 운영통합정보시스템(WRO)의 자료와 K-water 수질통합정보시스템(WQE)의 실시간 수질자동측정기 1 m 간격 계측 자료를 사용하였다.

4. 취수 수심이 수온성층 구조에 미치는 영향 분석

저수지의 수온성층 구조에 영향을 미치는 인자는 대기로부터 빛과 열에너지, 저수지 체적 및 수심 등 지형적 요인, 유입량, 방류량과 체류시간 등 수문학적 요인에 의해 다양하게 나타날 수 있다(Higgins et al. 2007; Winton et al. 2019). 합천댐의 취수 수심은 고정되어 운영되고 있으므로 심층에 고정된 취수구를 통한 장기적 댐의 운영이 수온성층 구조에 미치는 영향을 분석하기 위하여 시나리오를 구성하여 비교하였다. 현재 취수심을 반영한 운영과 선택적 취수탑을 가정하여 표층 취수(표층~수심 3m)를 가정했을 경우를 모델 시나리오로 구성하여 모의하였다. 또한, 수문조건에 의해 저수지의 수위와 유출입량의 차이가 크게 나타나므로 분석 기간을 풍수해와 갈수해로 구분하여 각각의 수문조건에서 수온성층 구조 변화와 이때 취수심이 미치는 영향을 함께 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기상 및 수문 특성

취수심과 함께 수문 조건이 합천호의 수온성층 구조와 방류 수온에 미치는 영향을 분석하기 위해 풍수해와 갈수해를 구분하여 모델링을 수행하였다. 풍수해는 2010년을 선정하였고 갈수해는 2017년을 선정하였으며, 각 연도의 기상 및 수문 특성을 비교한 결과는 Table 1과 같다. 댐 건설 후 2021년까지의 운영 기간동안 평균값을 예년 평균값으로 보고 월별 강수량과 월평균 유입량 및 방류량을 각각의 연도와 비교하여 나타내었다. 풍수해인 2010년에는 6월을 제외하고 예년과 비슷하거나 높은 강수량과 유입량을 보였으며 특히 8~9월에 강우가 집중되었음을 알 수 있다. 갈수해인 2017년의 강수량과 유입량은 예년 대비 현저하게 낮았는데 예년 연강수량이 1,315 mm 인 반면 2017년은 751 mm 이었다. 이는 2010년의 1,590 mm 와 비교하였을 때 47% 수준으로 두 해 간에 수문 조건 차이가 매우 컸음을 나타낸다. 이러한 수문 기상 조건과 댐 운영에 의한 수위 변화의 차는 Figure 2의 수위 비교 그래프를 통해 확인할 수 있으며, 수문조건에 따른 수온성층 구조의 차이에 대해서는 뒤에서 자세하게 분석하였다.

Table 1. Monthly meteorological and hydrological data for Hapcheon Dam in 2010, 2017 and comparison with past data

Month	Meteorological Data			Hydrological Data					
	Rainfall (mm)			Monthly Average Inflow (m ³ /s)			Monthly Average Outflow (m ³ /s)		
	1989-2021 ^{a)}	2010	2017	1989-2021	2010	2017	1989-2021	2010	2017
January	25.6	22.0	0.6	4.6	2.1	5.2	16.9	8.8	7.0
February	36.4	90.4	36.0	6.0	7.9	5.3	15.9	11.2	11.2
March	56.8	68.0	32.2	8.6	10.0	3.6	15.0	14.5	9.2
April	82.2	90.0	53.5	11.2	10.0	8.6	17.1	15.6	9.3
May	91.0	113.1	28.2	10.0	15.5	2.0	19.7	17.0	18.6
June	152.7	22.8	55.3	16.9	3.2	1.7	21.8	22.3	22.1
July	296.1	294.6	143.7	57.7	40.3	5.7	22.6	7.3	20.2
August	292.9	544.6	167.0	60.4	125.7	15.0	31.8	10.8	8.5
September	164.2	246.6	127.5	43.4	83.3	10.6	27.7	42.6	2.7
October	56.8	57.0	88.8	13.4	10.0	10.8	19.0	20.0	3.6
November	38.4	9.1	1.7	6.7	4.8	3.0	17.3	19.6	6.8
December	21.6	30.8	16.1	5.7	4.0	2.3	18.5	21.5	15.9

a) Period after dam construction and operation

Table 2. Hydraulic parameters used in AEM3D for Hapcheon Reservoir

Parameters	Variable	Unit	Assigned Value	Reference
Horizontal eddy diffusivity	D_x	m^2/s	1	
Bottom drag coefficient	C_D		0.005	0.005 ^{a)}
Extinction coefficient for NIR (700-2000 nm)	λ_{NIR}	/m	1	1 ^{a)}
Extinction coefficient for PAR (400-700 nm)	λ_{PAR}	/m	0.4	0.25-0.4 ^{a),b)}
Extinction coefficient for UVA (320-400 nm)	λ_{UVA}	/m	1	1 ^{a),b)}
Extinction coefficient for UVB (300-320 nm)	λ_{UVB}	/m	2.5	1-2.5 ^{a),b)}
Mean albedo for short-wave radiation	α_{SW}		0.08	0.08 ^{a),b)}

Sources: ^{a)} Chung et al. (2009), ^{b)} Han et al. (2021)

2. 모델 재현성 평가

모델 보정에 사용된 수리 계수는 Table 2에 제시하였으며, 타 연구에서 적용되었던 값을 비교하여 함께 나타내었다. 물수지에 대한 재현성은 관측 수위와 모델에서 계산된 수위를 비교하여 분석하였으며, 그 결과는 Figure 2와 같다. 풍수해인 2010년의 경우 7월에서 9월 사이 많은 강우로 인해 수위가 급증하였고 이러한 수위변화를 모델이 적절하게 재현하였다. 2010년 수위에 대한 모델 에러는 RMSE와 AME 각

각 0.76, 0.03 m 였다. 갈수해인 2017년에는 8월까지 수위가 지속적으로 감소하였으며 9~10월에 다소 상승하였으나 변동 폭이 적었다. 수위 변동 폭이 적은 2017년의 수위 예측 정확도가 더 우수하였으며 RMSE와 AME 각각 0.14, 0.02 m로 계산되었다.

수온성층 구조 재현에 대한 모델 적합성은 수온성층이 뚜렷한 여름과 가을을 대상으로 연직 수온분포 모의 결과를 비교하여 재현성을 평가하였다(Figure 3). 풍수해인 2010년의 수심별 수온분포를 모델이 매우

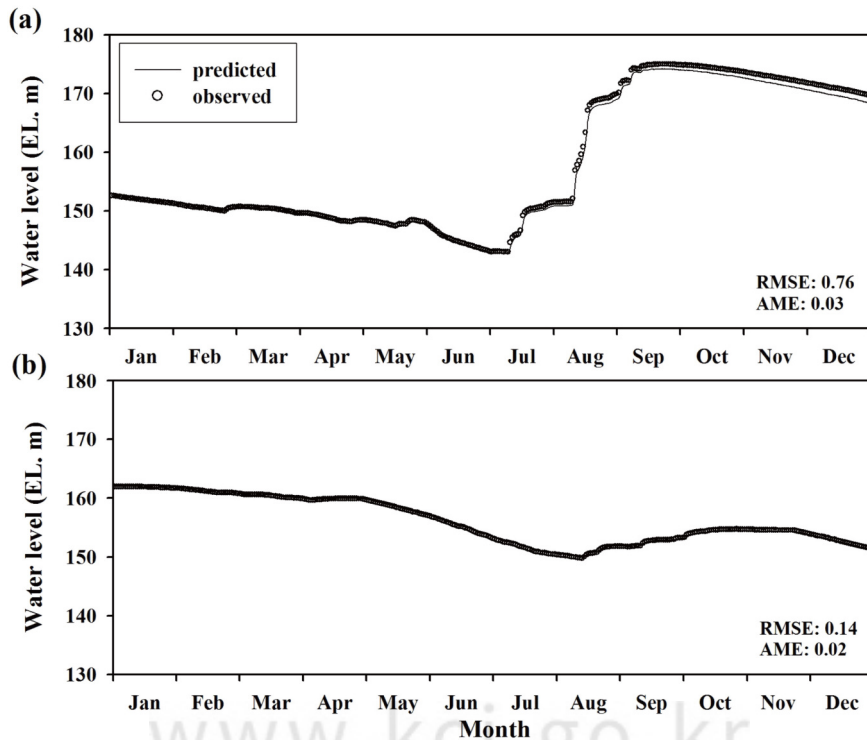


Figure 2. Comparison of predicted and observed water levels; (a) 2010, (b) 2017.

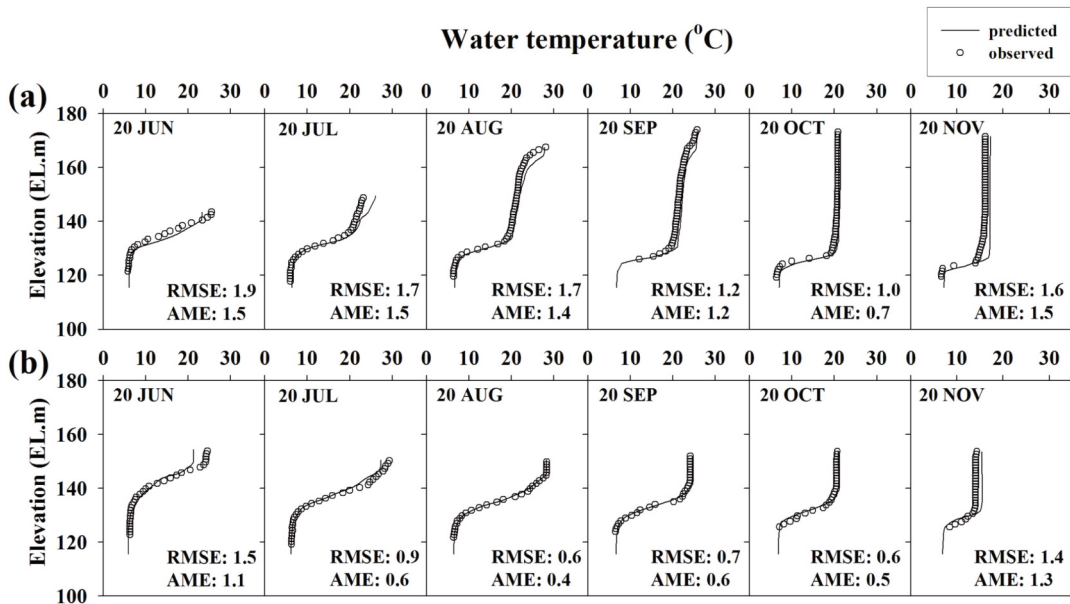


Figure 3. Vertical profiles of temperature observed and predicted in (a) 2010, (b) 2017.

적절하게 모의하였으며 특히, 수온약층의 형성 위치와 대규모 강우 유입수에 의한 중층 밀도류의 위치 등을 모델이 우수하게 재현하였다(Figure 3(a)). 2010년 연직수온 분포 예측의 RMSE는 1.0~1.9°C, AME는 0.7~1.5°C 범위로 나타났다. 갈수해인 2017년의 모의 결과도 마찬가지로 수심별 수온을 모델이 정확도 높게 예측하는 것으로 나타났다. 강우량이 적어 수체가 안정적으로 변화하였으므로 풍수해에 비해 모델에러가 감소하였는데, RMSE는 0.6~1.5°C, AME는 0.4~1.3°C 수준이었다.

3. 수문조건에 따른 수온성층 구조와 방류수온

합천호의 연직 수온분포에 대한 재현력을 검증한 AEM3D 모형 결과를 이용하여 풍수해와 갈수해 조건에서 수온성층 구조를 비교 분석하였다. Figure 4는 취수탑 지점에서의 연간 연직 수온분포를 연속적으로 나타낸 그래프이며, Figure 4(a)는 풍수해, Figure 4(b)는 갈수해의 결과를 제시하였다. 고정된 취수구의 취수심 범위를 함께 나타내었으며, 모델에서 계산된 연직 수온분포에서 수심별 수온의 변화가 가장 큰 지점인 수온약층 깊이(thermocline depth)를 계산하여 그래프에 함께 나타내었다. 이때 수온약층의 계산

은 R package로 제공되는 rLakeAnalyzer(Winslow et al. 2018) 프로그램을 사용하여 계산하였으며, 자세한 계산 이론과 계산식은 Read et al. (2011)를 참고하였다.

수층 간 수온의 차이가 발생하여 수온 성층이 형성되는 시기는 풍수해와 갈수해 모두 4월 이후로 나타났으며, 초기수위가 상대적으로 높았던 갈수해에는 약 EL. 150 m에서 수온약층이 형성되기 시작한 반면 풍수해에는 초기수위가 낮아 약 EL. 140 m에서 수온약층이 형성되기 시작하였다. 5월 이후 기온이 빠르게 상승하여 하절기(6월~9월)에는 표층과 심층의 수온차가 크게 나타나 안정된 수온성층을 나타내는 것으로 분석되었으며, 10월 이후 기온 하강에 따라 상층부터 혼합되기 시작하여 12월 말 경에는 전도(turnover)가 일어나는 것으로 분석되었다.

풍수해와 갈수해 수온성층 구조의 가장 큰 차이점은 수온약층의 형성 깊이였다. 연평균 수온약층의 형성 깊이는 2010년에 수심 27.8 m, 2017년에 15.0 m로 계산되어 풍수해에 상대적으로 깊은 수심에 수온약층이 형성됨을 확인할 수 있었다. 풍수해에는 8월 이후 대규모 강우 유입수가 유입하며 수위가 크게 상승하였고 수온약층의 깊이는 하강하는 경향을 나타냈다.

강우 유입수의 수온은 20℃ 내외였으며 넓은 층을 형성하며 유입하였다. 이러한 현상은 Figure 3을 통해서도 확인할 수 있으며, 풍수해와 갈수해 수온성층 구조 상의 가장 큰 차이로 나타났다.

수온성층 구조를 파악하는 또 다른 방법으로 연직 수온 분포로부터 계산되는 수체 안정화도 index가 많이 이용되는데(Read et al, 2011; Pujoni et al, 2017), 본 연구에서는 여러 index 중 Schmidt Stability (Idso 1973)와 Buoyancy frequency (Read et al, 2011)를 대표 지표로 하여 수체 안정화도를 계산하였다(Figure 5, Figure 6). Schmidt Stability Index (SSI)는 성층화된 호수를 완전히 혼합하는데 필요한

에너지의 양을 단위면적으로 나타낸 값으로서 값이 클수록 안정화도가 높고 혼합에 많은 에너지가 필요하다는 것을 뜻한다. Buoyancy frequency (N^2)는 연직방향으로 밀도의 구배를 갖는 유체에서 성층의 안정화도를 측정하는 지표로서 값이 클수록 밀도 구배 강도가 크다는 것을 의미한다. 각 지수의 계산식은 Read et al. (2011)를 참고하였고 rLakeAnalyzer (Winslow et al. 2018) 프로그램을 사용하여 계산하였다.

2010년도와 2017년도의 수온성층에 의한 안정화도를 비교하였을 때 8~9월을 제외하고 갈수해인 2017년도의 SSI가 상대적으로 높은 것으로 나타났

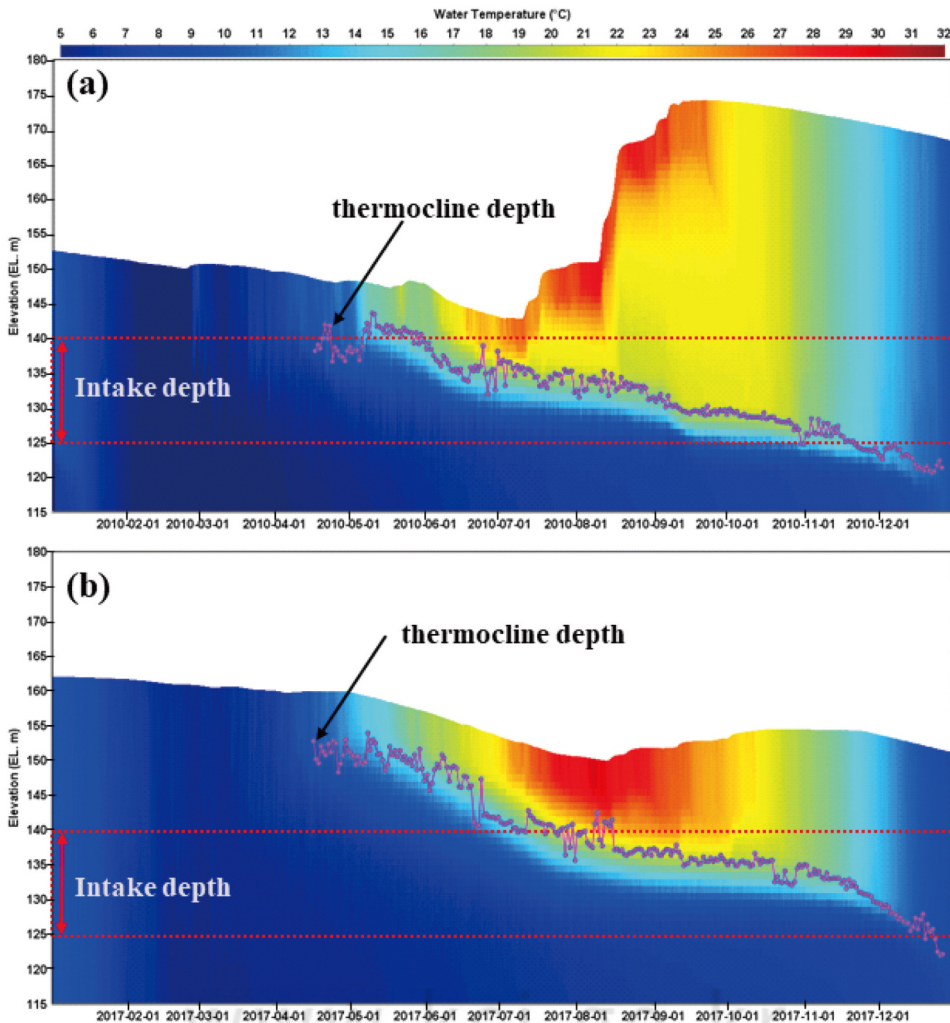


Figure 4. Comparison of temporal and vertical distributions of temperature simulated in (a) 2010, (b) 2017.

다(Figure 5). 성층이 뚜렷한 시기인 4~10월의 평균 SSI는 2010년에 1,451 J/m², 2017년에 1,528 J/m²로 계산되었으며 2010년에는 8~9월에 높은 SSI를 나타낸 반면 2017년에는 7~8월에 높은 SSI를 보였다. 4~10월의 평균 N²는 2010년과 2017년에 각각 0.0031,

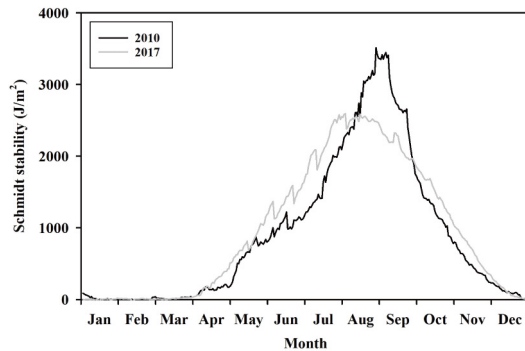


Figure 5. Comparison of Schmidt stability index calculated in 2010 and 2017.

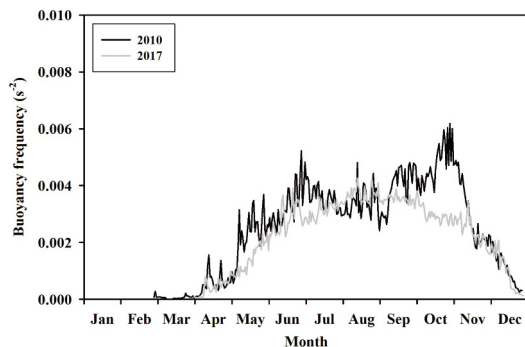


Figure 6. Comparison of Buoyancy frequency calculated in 2010 and 2017.

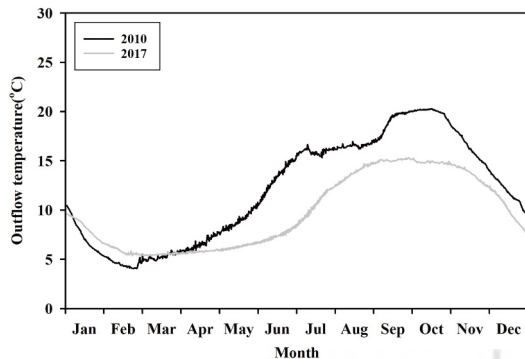


Figure 7. Comparison of outflow temperature simulated in 2010 and 2017.

0.0026 s⁻²로 계산되어 유사하였으나 2010년에 상대적으로 높았다(Figure 6). 이는 Buoyancy frequency가 수온약층에서 밀도 구배에 의한 안정화 강도를 계산하므로(Winslow et al. 2018), 2010년에 수온약층이 깊은 수심에 형성되며 이 때의 밀도 구배가 상대적으로 컸음을 의미한다. 단, 7~8월에는 2017년의 N²가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

한편, 수문조건에 따라 상이한 수온성층 구조에 의해 고정된 취수구로부터 취수되는 방류수의 수온도 달라지는 것으로 나타났다. 연중 연직수온 분포와 취수구간을 함께 나타낸 Figure 4를 살펴보면 풍수해인 2010년에는 취수구간 내에 수온약층의 상단, 즉 수온이 높은 구간이 상대적으로 많이 포함되며, 2017년에는 수온약층의 하단인 수온이 낮은 구간이 많이 포함되는 것을 알 수 있다. 따라서 풍수해에 상대적으로 높은 수온의 수층이 많이 취수되며 갈수해에는 낮은 수온의 수층이 취수되는 것으로 나타났다. 이를 반영하여 모델에서 계산된 방류수온의 결과를 풍수해와 갈수해를 비교하여 Figure 7에 제시하였다. 전체적인 방류수온은 풍수해에 높았으며, 연평균으로 2010년에 12.1℃, 2017년에 9.7℃로 계산 되었다. 월별로 가장 차이가 크게 나타난 시점은 6월로 풍수해와 갈수해의 월평균 수온 차이가 5.6℃인 것으로 분석되었다. 방류수온이 최고인 시점은 풍수해에 10월, 갈수해에 9월로 계산되었으며 풍수해에 최고수온 시기가 더 지연되는 것을 알 수 있었다.

4. 취수심 변경에 따른 수온성층 구조 및 방류수온 변화 예측

합천호의 고정된 취수 위치가 수온성층 구조에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 유입되는 경계조건이 동일한 상태에서 방류조건 위치만 변경하여 모델링을 수행하였다. 비교조건은 현재 심층 취수(EL. 125~140m)하는 경우와 선택적 취수탑을 가정하여 변화하는 수위에 맞추어 표층 취수(표층~수심 3m)하는 경우를 비교 분석하였다. 국외에서는 선택취수탑 신설, 기존 취수탑에 커튼(curtain) 등의 구조물 설치와 같은 대책을 통해 심층 취수 위치를 상층부로 변경한 사례가 다수 있으며(Sherman 2000; Svoboda

2020; Chaaya & Miller 2021), 국내에서는 소양강 댐에 선택취수탑을 추가로 신설하여 고정된 발전방류 취수심에서 상층까지 선택하여 취수할 수 있도록 변경한 사례가 있으므로, 여기서는 구조물 개선을 통한 취수 위치의 변경을 가정하였다. Figure 8과 Figure 9는 각각 2010년과 2017년의 모의 결과이다. Figure 8(a)는 현재 취수 위치로 운영하였을 경우 취수탑 지점에서의 연직 수온분포를 시간별로 연속하여 표현한 것이다. 반면 Figure 8(b)는 2010년도 기상과 유입 경계 조건이 모두 동일한 상태에서 취수심을 표층으로 변경하는 것을 가정하여 모의한 결과이다. 취수심 변경으로 수온성층 구조의 큰 변화가 있을 것으로 예측되었으며, 특히 수온약층의 형성 깊이가 상부로 이동하는 현상이 뚜렷하게 예측되었다. 연평균 수온약층 깊이가 심층 취수시 수심 27.8 m에서 표층 취수시 21.3 m로 감소하였고, 표층 취수하는 경우 수온이 낮은 심층(hypolimnion)의 수체적이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 2017년의 모의 결과도 마찬가지로 수온약층 깊이가 변화하는 것으로 모의되었다

(Figure 9). 갈수해 4~8월의 평균 수온약층 깊이는 심층 취수시 수심 15.0 m에서 표층 취수시 8.2 m로 감소할 것으로 예측되었다.

이러한 현상은 국외에서도 유사한 사례를 찾아볼 수 있었는데, 일본의 Ogouchi dam은 1957년에서 1991년까지 심층취수로 운영되었다가 하류의 냉수 방류 문제로 인하여 1992년에 표층 취수를 할 수 있는 선택적 취수시설을 추가적으로 설치하여 운영하였다. 그러나 표층 취수 이후 수온약층의 형성 깊이가 얕아지고 수온성층의 강도가 관찰되었다(Duka et al. 2021a, 2021b). Nürnberg(2007)도 약 40개의 유럽 호수와 8개의 북미 호수에서 조사한 결과를 바탕으로 심층 취수시 수온약층의 형성 깊이가 깊어지고 수온성층의 안정화도가 감소함을 보고하였다.

취수 위치의 변경이 수온성층 강도에 미치는 영향을 수온성층 안정화지수(SSI 및 N^2) 비교를 통해 분석한 결과, 표층 취수하는 경우 수온약층의 강도가 전반적으로 크게 상승하였다(Table 3). 특히 갈수해인 2017년 하절기에 N^2 값이 뚜렷하게 증가하였는데 이

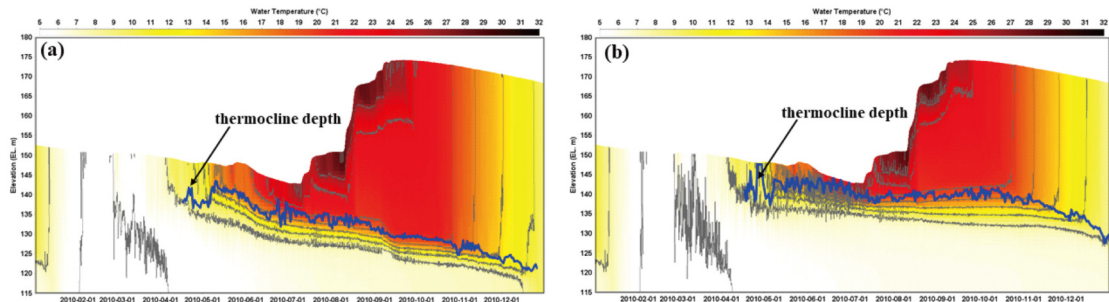


Figure 8. Simulation results of thermal stratification with the changes of intake depth in 2010; (a) hypolimnetic withdrawal, (b) epilimnetic withdrawal.

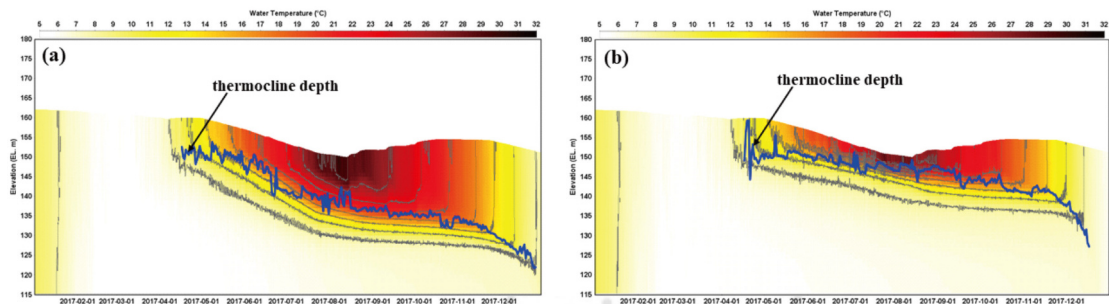


Figure 9. Simulation results of thermal stratification with the changes of intake depth in 2017; (a) hypolimnetic withdrawal, (b) epilimnetic withdrawal.

Table 3. Comparison of the monthly average SSI and N^2 in 2010 and 2017 with the changes of intake depth

Month	Schmidt Stability Index (J/m^2)				Buoyancy frequency (s^{-2})			
	2010		2017		2010		2017	
	HW ^{a)}	EW ^{b)}	HW	EW	HW	EW	HW	EW
April	139	102	218	188	0.0005	0.0003	0.0004	0.0003
May	625	491	798	631	0.0022	0.0019	0.0014	0.0015
June	1,033	534	1,383	847	0.0033	0.0048	0.0028	0.0035
July	1,634	1,422	2,156	1,049	0.0036	0.0053	0.0031	0.0081
August	2,795	3,132	2,509	1,363	0.0034	0.0038	0.0037	0.0076
September	2,706	3,465	2,133	1,599	0.0040	0.0025	0.0035	0.0044
October	1,213	2,337	1,470	1,302	0.0048	0.0024	0.0030	0.0027
November	465	1,000	656	569	0.0029	0.0021	0.0024	0.0016

^{a)}HW: hypolimnetic withdrawal, ^{b)}EW: epilimnetic withdrawal.

는 갈수해에 강우 유입수 및 증층 밀도류에 의한 수온 약층의 변화가 적기 때문인 것으로 판단된다. SSI는 표층 취수로 변경 가정 시 2010년에 증가하는 것으로 예측되었고(5~10월 평균, 1,876 → 2,178 J/m^2), 2017년에는 다소 감소하는 것으로 예측되었다(5~10월 평균, 1,718 → 1,122 J/m^2). 이는 SSI가 수온약층의 두께와 표층 수온 등의 조건에 따라 계산 결과가 크게 달라져 다른 수온성층 안정화지수와 항상 선형 관계를 나타내지 않기 때문인데, Ogouchi dam의 수온성층 구조를 분석한 선형 연구에서도 유사한 결과를 찾아볼 수 있었다(Duka et al. 2021b). 이러한 결과를 종합해 볼 때, 합천댐의 심층 취수로 인해 수온 약층의 형성 깊이가 깊은 수심에 형성되고 표층 취수시와 비교하여 수온성층의 강도가 약하게 형성되었던 것으로 판단할 수 있었다.

한편, 취수심 변화에 따른 방류 수온의 예측 결과는 Figure 10과 Table 4에 제시하였다. 현재의 심층 취수에서 표층 취수로 수심을 변경하는 경우 방류 수온이 크게 상승 할 것으로 예측되었다. 2010년 연평균 방류수온은 심층 취수시 12.1°C에서 15.6°C로 3.5°C 상승이 예측되었고, 2017년은 9.7°C에서 14.7°C로 5.0°C 상승하는 것으로 예측되었다. 심층 취수시 갈수해에 방류수온이 더 낮았기 때문에(Figure 7), 수온상승 폭이 상대적으로 크게 나타났다. 월별로는 5월~9월의 상승폭이 컸으며, 2017년 7월 평균수온이 최대 12.7°C로 크게 상승하는 것으로 예측되었다. 반면 11월과 12월에는 수온이 감소할 것으로 예측되었는데, 이는 표층 취수할 경우 심수층의 수체적이 커지므로 기온하강에 의한 성층 파괴와 전도(turnover)시 상승의 수온이 더 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

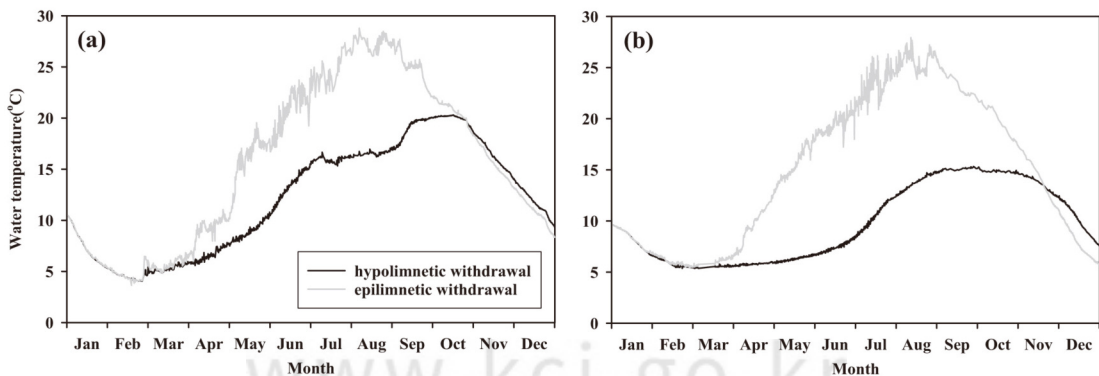


Figure 10. Comparison of outflow temperature with the change of intake depth; (a) 2010, (b) 2017.

Table 4. Monthly outflow water temperature in 2010, 2017 with the change of intake depth

Month	Outflow temperature(°C)					
	2010			2017		
	HW ^{a)}	EW ^{b)}	Δt ^{c)}	HW	EW	Δt
January	7.1	7.1	0.0	8.2	8.2	0.0
February	4.6	4.7	0.1	5.8	6.0	0.2
March	5.3	5.7	0.4	5.5	6.0	0.5
April	6.5	9.1	2.6	5.7	9.0	3.3
May	9.1	16.2	7.1	6.3	15.4	9.1
June	13.0	20.4	7.4	7.4	19.4	12.0
July	15.9	24.6	8.7	10.3	23.0	12.7
August	16.6	27.4	10.8	13.7	25.7	12.0
September	18.9	25.1	6.2	15.1	23.4	8.3
October	19.9	20.6	0.7	14.8	19.4	4.6
November	16.2	15.5	-0.7	13.2	13.2	0.0
December	11.6	10.8	-0.8	9.9	7.8	-2.1

^{a)}HW: hypolimnetic withdrawal, ^{b)}EW: epilimnetic withdrawal, ^{c)} Δt : temperature difference (EW-HW).

따라서 Sherman(2000) 및 Chaaya & Miller (2021)에 보고된 바와 같이 선택취수는 댐 하류하천의 열 체계를 개선하는 가장 적극적이고 효과적인 방법이며, 하절기 저수온 현상 외에도 동절기 고수온 현상을 개선하는 데에도 효과가 있을 것으로 분석되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 심층 취수 저수지의 복잡한 물리적 특성을 반영할 수 있는 3차원 모델을 이용하여 취수심이 수온성층 구조에 미치는 영향과 이에 따른 방류수온의 관계에 대하여 분석하였다. 대상지는 심층에 고정된 취수구가 설치되어 운영 중인 합천호를 대상으로 하였으며, 취수심 조건과 함께 수문조건이 연직수온 분포에 미치는 영향을 종합적으로 분석하기 위해 풍수해와 갈수해를 선정하여 모델링 하였다. 시뮬레이션에는 3차원 수리동력학-생태학적 모델인 AEM3D 모델이 적용되었다. 모델의 재현성은 물수지에 대하여 수위 예측 결과를 검증하였고, 수온성층 구조에 대하여 연직 수온분포를 검보정하여 모델 예측 적합성을 평가하였다. 수온성층이 뚜렷한 여름과 가을을 대상으로 연직 수온분포 모의 정확도를 평가한 결과 수심별 수온, 수온약층의 형성 위치 등을 모

델이 우수하게 재현함을 확인하였다.

수문조건에 따른 연직수온 분포를 비교 분석한 결과, 풍수해와 갈수해 수온성층 구조의 가장 큰 차이점은 수온약층의 형성 깊이였다. 연평균 수온약층 깊이는 풍수해에 수심 27.8 m, 갈수해에 수심 15.0 m로 계산되어 풍수해에 상대적으로 깊은 수심에 수온약층이 형성되는 것으로 나타났다. 또한 수체 안정화도 지수인 Schmidt Stability Index(SSi)와 Buoyancy frequency (N^2)를 계산하여 수온성층 강도를 비교 분석한 결과, 4~10월의 평균 SSi는 풍수해에 1,451 J/m², 갈수해에 1,528 J/m²로 갈수해에 높았고, N^2 는 풍수해와 갈수해에 각각 0.0031, 0.0026 s⁻²로 유사한 수준이었다. 하절기의 전반적인 수온성층 안정화도를 비교하였을 때 갈수해에 더 강한 성층이 형성되었다고 판단할 수 있었다. 한편, 수문조건별 연평균 방류수온을 비교한 결과 풍수해에 12.1°C, 갈수해에 9.7°C로 계산 되어 풍수해에 더 높았다. 이는 수온성층 구조의 차이에 기인하였으며 풍수해의 수온약층이 더 깊은 수심에 형성되어 취수구간의 수온이 상대적으로 높았기 때문으로 분석되었다.

취수심을 현재 심층 취수에서 표층으로 변경하는 시나리오를 적용하여 취수심이 수온성층 구조에 미치는 영향을 분석한 결과 연직수온 분포의 큰 변화가 관

찰되었으며, 특히 수온약층의 형성 깊이가 얕아지는 현상이 뚜렷하였다. 연평균 수온약층 깊이가 풍수해에 심층 취수시 수심 27.8 m에서 표층 취수시 21.3 m로 6.5 m 감소하였고, 갈수해에는 심층 취수 수심 15.0 m, 표층 취수 8.2 m로 6.8 m 감소하였다. 수온성층 안정화지수를 비교한 결과, 표층 취수하는 경우 N^2 이 증가하여 수온약층의 강도가 상승하는 것으로 예측되었고, SSI는 수문조건별로 상이했으나 전반적으로 표층 취수시 증가하였다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 합천댐의 심층 취수로 인해 수온약층의 형성 깊이가 깊어지고 수온성층의 강도가 약하게 형성되었던 것으로 판단할 수 있었다.

심층 취수에서 표층 취수로 수심을 변경하는 경우 연평균 방류수온은 풍수해에 3.5℃ 상승(12.1℃→15.6℃)하며, 갈수해에는 5.0℃ 상승(9.7℃→14.7℃)하는 것으로 예측되었다. 심층 취수시 갈수해에 방류수온이 더 낮았기 때문에 수온상승 폭이 상대적으로 크게 나타났으며, 7월 평균수온이 최대 12.7℃로 가장 크게 상승하였다. 반면 11월과 12월에는 표층 취수시 심수층의 수체적이 크므로 기온하강에 의한 상하층간 혼합시 수온이 낮아져 방류수온이 낮아지는 것으로 분석되었다.

본 연구 결과와 유사하게 해외 여러 사례에서 심층 취수시 수온성층이 약하게 형성되는 현상이 관찰되었으며(Nürnberg 2007; Carr et al. 2020; Duka et al. 2021a, 2021b), 취수심 변화에 따라 용존산소 농도 분포, 영양염 용출 등에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 본 연구는 합천호의 현재 심층 취수에 의한 수온분포를 성공적으로 재현하고, 표층 취수시 수온성층 구조의 변화와 방류수온을 예측하여 제시하였다. 그러나 향후 취수심 변경에 따른 연직 DO 농도 구배, 영양염 분포, 성층강도 증가에 의한 조류발생 등의 변화를 추가적으로 연구할 필요성이 있다. 또한, 기후변화로 인한 하천의 수온상승과 냉수성 생물의 서식지 감소 문제를 완화하기 위해 선택 취수를 통한 취수심 변경이 적용되기도 하므로(Rheinheimer et al. 2014), 선택 취수 및 취수심에 대한 다각적인 분석이 필요할 것으로 보인다. 국내에서는 선택 취수설비를 통한 댐의 취수심 변경이 탁수 발생시 중층 고탁

도 유입수를 배제하기 위한 방안으로 주로 검토되어 왔으나(Lee et al. 2007; Chung et al. 2011), 추후 수온성층 성층 구조 변화와 함께 수질 영향을 면밀하게 분석하여 취수심을 댐 운영의 주요인자로 고려해야 할 것으로 판단된다.

References

- Beutel MW, Leonard TM, Dent SR, Moore BC. 2008. Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn, and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an oligo-mesotrophic lake. *Water Research* 42(8-9): 1953-1962.
- Bolke EL. 1979. Dissolved-oxygen depletion and other effects of storing water in Flaming Gorge Reservoir, Wyoming and Utah. Geological Survey. Water-supply paper 2058. pp. 34-35.
- Caissie D. 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51(8): 1389-1406.
- Carr MK, Sadeghian A, Lindenschmidt K, Rinke K, Morales-Marin L. 2020. Impacts of varying dam outflow elevations on water temperature, dissolved oxygen, and nutrient distributions in a Large Prairie Reservoir. *Environmental Engineering Science* 37(1): 78-97.
- Chaaya FC, Miller B. 2021. A Review of artificial destratification techniques for cold water pollution mitigation. Sydney: UNSW Water Research Laboratory; pp. 1-47.
- Chung SO, Oh CJ. 1997. A Study on cold-water damage on paddy field at the downstream of the Unmoon Dam. *Kyungpook National University Agricultural Research Bull.* 15: 39-46. [Korean Literature]
- Chung SW, Hipsev MR, Imberger J. 2009. Modelling

- the propagation of turbid density inflows into a stratified lake: Daecheong Reservoir, Korea. *Environ. Model. Softw.* 24: 1462-1482.
- Chung SW, Park HS, Yoon SW, Ryu IG. 2011. Effect of installing a selective withdrawal structure for the control of turbid water in Soyang Reservoir. *Journal of Korean Society on Water Quality* 27(6): 743-753. [Korean Literature]
- Clarkson RW, Childs MR. 2000. Temperature effects of hypolimnial-release dams on early life stages of Colorado River Basin big-river fishes. *Copeia* 2: 402-412.
- Duka MA, Shintani T, Yokoyama K. 2021. Mediating the effects of climate on the temperature and thermal structure of a monomictic reservoir through use of hydraulic facilities. *Water* 13(8): 1-18. [1128]
- Duka MA, Shintani T, Yokoyama K. 2021. Thermal stratification responses of a monomictic reservoir under different seasons and operation schemes. *Science of the Total Environment* 767: 1-15. [144423]
- Gray R, Jones HA, Hitchcock JN, Hardwick L, Pepper D, Lugg A, Seymour JR, Mitrovic SM. 2019. Mitigation of cold-water thermal pollution downstream of a large dam with the use of a novel thermal curtain. *River Research and Applications* 35(7): 855-866.
- Higgins J, Martin J, Edinger J, Gordon J. 2007. Energy production and reservoir water quality. Virginia; American Society of Civil Engineers.
- Han J, Kim S, Kim D, Lee S, Hwang S, Kim J, Chung S. 2021. Development of high-frequency data-based inflow water temperature prediction model and prediction of changes in stratification strength of Daecheong Reservoir due to climate change. *Journal of Environmental Impact Assessment* 30(5): 271-296. [Korean Literature]
- Hodges B, Dallimore C. 2019. Aquatic ecosystem model: AEM3D v1.0 user manual. Victoria; HydroNumerics.
- Idso SB. 1973. On the concept of lake stability. *Limnol. Oceanogr.* 18: 681-683.
- Jeon BI, Kim IG, Lee YM. 2002. A change of local meteorological environment according to dam construction of Nakdong-River: I. Meteorological data analysis before and after dam construction. *Journal of the Environmental Sciences* 11(3): 161-168. [Korean Literature]
- Lee S, Kim J, Noh J, Ko IH. 2007. Assessment of selective withdrawal facility in the Imha Reservoir using CE-QUAL-W2 model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(2): 228-235. [Korean Literature]
- Lugg A, Copeland C. 2014. Review of cold water pollution in the Murray & Darling Basin and the impacts on fish communities. *Ecological Management & Restoration* 15(1): 71-79.
- Nürnberg GK. 2007. Lake responses to long-term hypolimnetic withdrawal treatments. *Lake and Reservoir Management* 23: 388-409.
- Olden JD, Naiman RJ. 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology* 55(1): 86-107.
- Pardo I, Campbell IC, Brittain JE. 1998. Influence of dam operation on mayfly assemblage structure and life histories in two south-eastern Austrian streams. *Regulated Rivers: Research & Management* 14: 285-295.
- Pujoni D, Brighenti L, Bezerra-Neto J, Barbosa F,

- Assuncao R, Maia-Barbosa P. 2019. Modeling vertical gradients in water columns: A parametric autoregressive approach. *Limnol. Oceanogr. : Methods* 17, 320-329.
- Preece RM, Jones HA. 2002. The effect of Keepit Dam on the temperature regime of the Namoi River, Australia. *River Research and Applications* 18(4): 397-414.
- Read JS, Hamilton DP, Jones ID, Muraoka K, Winslow L, Kroiss R, Wu CH, Gaiser E. 2011. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environ. Model. Softw.* 26: 1325-1336.
- Rheinheimer DE, Null SE, Lund JR. 2015. Optimizing selective withdrawal from reservoirs to manage downstream temperatures with climate warming. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 141(4): 04014063.
- Ryan T, Webb A, Lennie R, Lyon J. 2001. Status of cold water releases from Victorian Dams. Heidelberg; Victorian Department of Natural Resources and Environment.
- Sherman B. 2000. Scoping Options for mitigating cold water discharges from dams. Canberra: CSIRO Land and Water; pp. 1-47.
- Svoboda C. 2020. Review of Temperature control options for reservoir release flows. Denver: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation; pp. 1-22.
- Stevens LE, Shannon JP, Blinn DW. 1997. Colorado River benthic ecology in Grand Canyon, Arizona, USA: dam, tributary and geomorphological influences. *Regulated Rivers: Research and Management* 13: 129-149.
- Todd CR, Ryan T, Nicol SJ, Bearlin AR. 2005. The impact of cold water releases on the critical period of post-spawning survival and its implications for Murray cod (*Maccullochella peelii peelii*): a case study of the Mitta Mitta River, southeastern Australia. *River Research and Applications* 21: 1035-1052.
- Ward JV. 1985. Thermal characteristics of running waters. *Hydrobiologia* 125: 31-46.
- Webb BW. 1996. Trends in stream and river temperature. *Hydrological Processes* 10: 205-226.
- Winslow L, Read J, Woolway R, Brenttrup J, Leach T, Zwart J, Albers S, Collinge D. 2018. rLakeAnalyzer: Lake Physics Tools. R package version 1.11.4.1, URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/rLakeAnalyzer/rLakeAnalyzer.pdf>. Accessed May 8, 2023.
- Winton RS, Calamita E, Wehrli B. 2019. Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. *Biogeosciences* 16(8): 1657-1671.