

연구논문

지구온난화가 대청호 수온 및 성층구조에 미치는 영향예측

차윤철 · 정세웅 · 윤성완

충북대학교 환경공학과

(2013년 6월 18일 접수, 2013년 7월 12일 승인)

Forecasting the Effect of Global Warming on the Water Temperature and Thermal Stratification in Daecheong Reservoir

Yoon Cheol Cha · Se Woong Chung · Sung Wan Yoon

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Manuscript received 18 June 2013; accepted 12 July 2013)

Abstract

According to previous studies, the increased air temperature can lead to change of thermal stratification structure of lakes and reservoirs. The changed thermal stratification may result in alteration of materials and energy flow. The objective of this study was to predict the effect of climate change on the water temperature and stratification structure of Daecheong Reservoir, located in Geum River basin of Korea, using a three-dimensional(3D) hydrodynamic model(ELCOM). A long-term(100 years) weather data set provided by the National Institute of Meteorological Research(NIMR) was used for forcing the 3D model. The model was applied to two different hydrological conditions, dry year(2001) and normal year(2004). It means that the effect of air temperature increase was only considered. Simulation results showed that the surface water temperature of the reservoir tend to increase in the future, and the establishment of thermal stratification can occur earlier and prolonged longer. As a result of heat flux analysis, the evaporative heat loss can increase in the future than now and before. However, the convective heat loss and net long wave radiation from water surface decreased due to increased air temperature.

Keywords : Daecheong reservoir, ELCOM, global warming, thermal stratification

I. 서론

기후변화에 관한 정부 간 패널 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 4차 보고서(IPCC, 2007)에 의하면, 1906 ~ 2005년 지구 평균기온의 장기경향이 0.74 °C/100년을 보이는 등 지구온난화가 가속화 되고 있다. 지구 온난화의 한 가지 원인인 온실가스(GHG) 배출은 산업혁명 이후 증가하기 시작하였고, 교토의정서상의 6종의 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) 배출량은 1970 ~ 2004년 사이 70 % 증가하였다(IPCC, 2007). 특히 20세기 후반기에 지구평균기온의 상승은 인위적 GHG 농도 증가에 기인할 가능성이 높으며, 현재 수준 또는 그 이상의 GHG 배출이 유지된다면 21세기에는 온난화와 기후 시스템에 나타난 변화가 20세기에 관측된 변화보다 더 심각할 가능성이 높을 것이다(IPCC, 2007).

지구 온난화는 하천, 저수지, 해양 등에서 수온과 물질의 흐름에 밀접한 관계를 가지고 있다. 특히 수심이 깊은 저수지 내에서 발생하는 성층현상은 수온 및 밀도차로 인하여 나타나는 현상으로, 표층수와 저층수의 혼합을 저해하여 수온, 영양염류, pH, DO 등의 분포에 영향을 미치게 된다(Imberger and Patterson, 1990; Martin and McCutcheon, 1999; Wetzel, 1983).

지구 온난화가 저수지에 미치는 영향에 대한 연구는 해외에서 활발하게 진행되어왔다. De Stasio 등(1996)은 북미 저수지에서 이산화탄소가 증가하는 시나리오에 대한 전 지구 기후변화모델(GCM) 결과에 근거하여 기후변화가 저수지 수환경에 미치는 영향을 연구 하였으며, 그 결과 기후변화의 영향으로 성층 형성시기의 단축, 성층 강도와 성층화 기간 증가, 여름철 표층 수온의 증가, 결빙기간 단축, 유량감소에 따른 체류시간 증가 등이 있을 것으로 예측하였다. 그리고 저수지 표면에서 겨울철 결빙기간이 한 달간 단축될 경우, 봄철 구조류에 의한 녹조 현상이 더 빨리 발생되며, 스웨덴의 Erken 저수지에서는 이러한 현상이 이미 나타나고 있는 것으로 보고된 바 있다(Weyhenmeyer *et al.*, 1999; Blenckner *et al.*, 2002). 또한 지구 온난화는 저수지 퇴적층의 온도를

상승시키는 결과를 초래하여, 퇴적층 미생물의 활성도를 높여 영양염류의 무기화속도를 증가 시키는 경향이 있으며(Goedkoop and Johnson, 1996; Hamilton *et al.*, 2002), 그 결과 늦은 봄과 이른 여름에는 식물성플랑크톤의 성장에 필요한 영양염류가 더 많이 공급되어 저수지의 1차 생산성을 높이는 결과를 초래하는 것으로 보고되었다(Blenckner *et al.*, 2002).

온대기후에 속하는 우리나라의 대부분 저수지에서는 여름철 뚜렷한 성층구조가 확인되고 있으며, 이러한 수온 성층현상은 심층수의 용존산소 고갈과 그에 따른 수질환경 악화, 강우 유출 후 유입하는 탁수의 밀도류 형성 등에 영향을 미치고 있다(정세웅 등, 2005). 최근에는 부영양화, 탁수유입으로 인한 문제를 해결하기 위해 수류차단막 설치 등과 같은 다양한 시도가 이루어지고 있으며(이홍수 등, 2010), 미래의 효과적인 수자원 관리를 위하여 기온 변화에 따른 저수지 수온 및 성층특성 변화에 대한 정확한 해석과 예측기술이 필요하다.

본 연구의 목적은 3차원 수리모델 ELCOM을 이용하여 지구온난화에 따른 대청호 내의 열수지를 모의하고, 수온 성층구조의 변동 경향을 분석하는데 있다. 이를 위해 기후변화정보센터(<http://climate.go.kr>)에서 A1B시나리오를 이용해 전망한 미래 기온 자료를 이용하여 과거에 발생한 대표적 갈수년(2001)과 평수년(2004)의 수문사상을 가정, 2050년 및 2100년의 대청호 내 수온분포 및 열수지 변화를 예측, 기준연도와 비교 하였다. 대표적 갈수년으로 2001년을 선택한 이유는 그 해에 대청호로 유입되는 유량과 댐에서 방류되는 유량이 적어 호수 내에 정체수역이 형성되어 조류의 증식에 적합한 환경이 조성되었으며, 그에 따른 조류의 대발생이 있었기 때문에 수질관리 측면에서 중요한 해에 해당하기 때문이다. 그리고 평수년은 예년 평균 강수량과 강수 패턴을 보인 해로써 2004년을 선택하였다. 따라서 본 연구는 수문사상은 동일한 조건으로 가정하고 미래 기온 상승이 갈수년과 평수년에 저수지 열수지와 수온성층구조에 어떤 영향을 미치는지를 규명하는데 의의가 있으며, 미래 토지이용 변화와 유역의 강우-유출 특성 변화를 포함한 지구온난화에 따른 영향 연구가 현

재 진행 중에 있다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상 지역

대청댐은 1980년 12월에 준공 되었으며, 대전을 비롯한 충청지역의 용수 공급, 전력 생산 그리고 하류의 홍수조절 등의 기능을 하고 있다. 댐의 유역면적은 3,204 km², 연간 용수공급량은 1,649백만 m³이며, 이 중 1,300백만 m³이 생활 및 농업용수로 사용되고 있다. 댐의 정상 표고는 EL. 83 m, 유역 연평균 유입량은 102 m³/s, 저수면적 72.8 km², 총 저수량은 1,490백만 m³이며, 저수지 내의 주요 수리구조물은 대전과 청주에 용수를 공급하는 2개의 취수탑, 6개의 수문을 갖춘 홍수조절용 여수로 그리고 수력발전과 댐 하류 용수 공급을 위한 발전 방류구가 있다(한국수자원공사, 2007).

2. 수치 모델

이번 연구에 사용된 ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)은 서호주대학교의 물연구센터(Centre for Water Research)에서 개발된 3차원 수리동역학 모델로 호수, 저수지, 하구, 해양 등에 다양한 적용이 가능하며, 수질-생태계 모형인 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)과 연동 할 경우 수리-수질 모의도 가능하다.

ELCOM에서 사용되는 지배방정식에는 운동량 방정식인 식(1) ~ (3), 연속방정식인 식(4), 자유수면 방정식인 식(5), 물질 또는 열 이송 방정식인 식(6)이 있다(Hodges and Dallimore, 2006). ELCOM은 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 운동량 방정식으로 사용하며, 유체의 특성에 대해서는 Boussinesq 가정과 정수압(Hydrostatic pressure) 이론을 사용한다. 그러나 수면경사에 따른 동수압의 작용이나 내부파에 의한 영향이 중요한 경우에는 비정수압(Non-hydrostatic)모드를 사용하여 수직방향의 운동량 방정식을 포함할 수도 있다. ELCOM은 수평방향 유속의 순간 변동성분에 의한

난류 폐합식은 수평와점성계수(Horizontal eddy viscosity, ν_h)를 사용하고 수직방향에 대해서는 확산 모델의 수직와점성계수(Vertical eddy viscosity, ν_v) 또는 혼합층(Mixed layer) 모델을 사용 한다. 운동량 방정식의 경우 준 음해법이 모델에서 사용되는데 2차 방정식 Euler-Lagrange 보간법을 사용하여 해를 구하며 자유수면 방정식은 공액경사법(conjugate gradient method)으로 해를 찾는다. 그리고 물질 이송 · 확산 방정식은 ULTIMATE(Leonard, 1991)방법과 3차 정확도를 갖는 QUICKEST(Leonard, 1979) 방법을 사용한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial x} \int_z^\eta \rho' dz \right\} \quad (1)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + f_v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial y} \int_z^\eta \rho' dz \right\} \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - f_v$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{h_0}^\eta u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{h_0}^\eta v dz \right] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + \omega \frac{\partial c}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_h \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_h \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_v \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + S_c \quad (6)$$

여기서 u 는 x 방향 유속(m/s), v 는 y 방향 유속(m/s), w 는 z 방향 유속(m/s), g 는 중력가속도(9.81 m/s²), η 는 표면 수위(m), ρ 는 밀도(kg/m³), ρ_0 는 물의 밀도(kg/m³), ρ' 는 밀도차(kg/m³), ν_h 는 운동량의 와확산계수(m²/sec), ν_v 는 운동량의 와확산계수(m²/sec), p 는 압력(N/m²), f 는 전향력계수($2\omega \sin\phi$), ω 는 지구자전각속도 7.29×10^{-5} rad/s,

ϕ 는 위도), K 는 물질의 수직방향 외확산계수(m^2/sec), 그리고 K_h 는 물질의 수평방향 외확산계수(m^2/sec)이다.

3. 입력자료 구성

ELCOM을 이용한 대청호 수온모의에 필요한 입력 자료에는 초기조건자료인 대청호 초기수온분포 및 수위자료와 경계조건자료인 유입 및 유출유량, 기상 자료, 유입수온자료 그리고 지형자료가 있다. 이번 연구는 2050년 및 2100년의 불확실한 미래를 대상으로 한 것으로 기후변화정보센터로부터 미래의 기온 예측자료를 제공받을 수 있었으나, 지구온난화에 따른 강수량 변화 및 그로 인한 유량변동, 풍향, 풍속, 기온, 태양복사에너지, 온도, 상대습도 등을 정확하게 예측해 내는 것에는 한계가 있었다. 따라서 2050년 및 2100년의 수문사상을 평수년과 갈수년 2가지 경우로 가정하고, 기온, 초기수온조건, 유입하천 수온을 제외한 나머지 입력자료는 실제로 갈수년이었던 2001년, 평수년이었던 2004년의 조건과 동일하다고 가정하였다.

(1) 2001년 및 2004년을 대상으로 한 모의 및 검·보정

미래의 대청호 수온모의에 앞서 평수년과 갈수년

을 가정한 2050년 및 2100년 대청호 수온모의 결과와 비교 기준이 되는 2001년과 2004년을 대상으로 대청호 수온모의를 실시하고, 모의 결과 값이 실제 2001년과 2004년의 대청호 내 수온분포를 얼마나 잘 재현하는지 적용성을 평가 해 보았다.

1) 지형자료

이번 모의에 사용된 지형자료는 대청호 유역의 수치지도를 바탕으로, ArcGIS를 이용하여 얻어낸 좌표를 이용하여 Figure 1과 같이 구성하였다. 격자크기는 가로 100 m, 세로 100 m, 수직방향 1 m 간격로 하였으며, 만들어진 셀은 총 128,401개이다. 대청호 내로 유입되는 하천은 금강본류, 소옥천, 회인천, 주원천, 삼산천, 품곡천 6개로 하였으며, 기후변화에 따른 열 수지와 수온성층 구조 변화를 관측하기 위한 모니터링 지점은 수심이 가장 깊은 댐 앞 지점(STA. 1)으로 설정하였다.

2) 초기조건 자료, 경계조건 자료 및 매개변수

대청호 초기 수위, 유입 유량 및 댐 방류량은 한국수자원공사에서 제공하고 있는 2001년 및 2004년의 댐 운영 자료를 사용하였으며, 한국수자원공사에서 제공하고 있는 유입 유량자료는 대청호 전체 유입 유

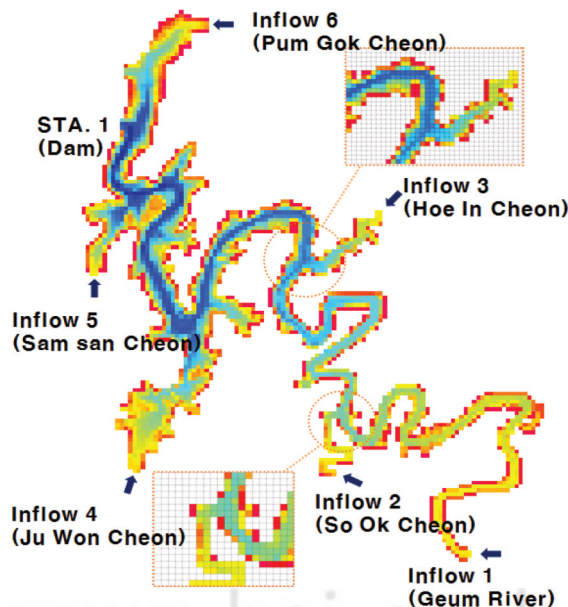


Figure 1. Layout of Daecheong Reservoir and location of the monitoring station

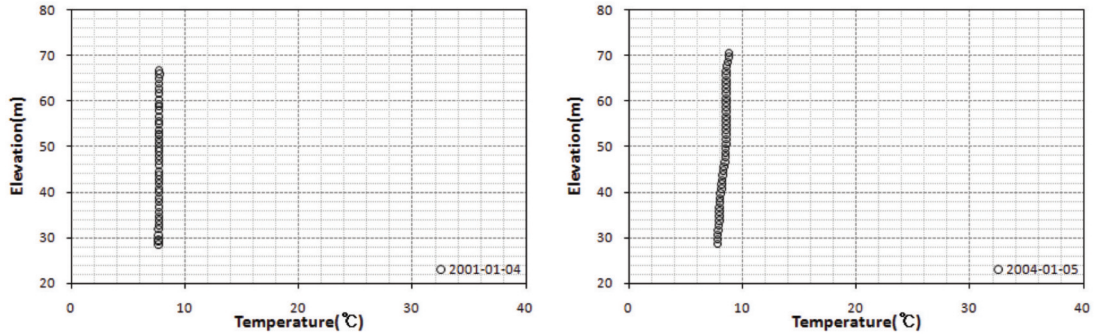


Figure 2. Initial vertical water temperature profile in 2001(left) and 2004(right)

Table 1. Model parameters

Parameters	Variable	Unit	Default
Horizontal eddy diffusivity	D_x	m^2/s	1
Bottom drag coefficient	C_D	-	0.005
Extinction coefficient for NIR(700-2000nm)	λ_{NIR}	/m	1
Extinction coefficient for PAR(400-700nm)	λ_{PAR}	/m	0.25
Extinction coefficient for UVA(320-400nm)	λ_{UVA}	/m	1
Extinction coefficient for UVB(300-320nm)	λ_{UVB}	/m	2.5
Mean albedo for short wave radiation	α_{SW}	-	0.08
Mean albedo for long wave radiation	α_{LW}	-	0.03

량자료이므로, 유입 하천별 유량을 구하기 위하여, 각각의 유입 하천 유역면적을 대청호 전체 유역 면적으로 나누어 유역면적비를 구한 후 전체 유입유량에 유입 하천별 유역면적비를 대입하여 각각의 하천별 유입 유량을 산정하였다.

기상자료는 대전기상청에서 제공하는 풍향, 풍속, 기온, 태양복사에너지, 운도, 상대습도자료를 사용하였다. 현재 한국수자원공사에서 제공하고 있는 댐 운영자료 중 유입유량은 강수량으로 인한 유량증가 값이 반영된 결과이므로, 기상자료 중 강수량 자료는 따로 사용하지 않았다.

2001년과 2004년의 대청호 초기수온 분포는 대청호에서 수질 다항목 측정장비(YSI)로 측정된 수심별 수온 측정자료를 이용하였으며, 모의 시작점인 1월에는 Figure 2와 같이 전체 수심에서 거의 동일한 수온 분포를 보였다.

각 하천별 유입수온자료는 실측값을 얻지 못하여 선행연구(정세웅과 오정국, 2006)에서 개발한 식을 이용하여 산정하였다. 사용된 식(7)에서 T_a 와 Q 는 기

온과 하천별 유입 유량을 의미한다.

$$T_w = 1.284 + 0.997 T_a - 0.002Q \tag{7}$$

ELCOM에서 대기-수체의 열 교환 계산과 수온예측에 영향을 미치는 매개변수들은 Table 1과 같다. 여기서 D_x 는 오염물질의 스칼라의 수평방향확산계수이며, C_D 는 수체와 바닥 경계면에서 작용하는 마찰 항력계수이다. 또한 광소멸계수는 근적외선인 NIR (Near infrared radiation, 700 ~ 2000 mm), 식물 플랑크톤의 1차 생산에 사용가능한 광합성에 유용한 에너지인 PAR(Photosynthetically active radiation, 400 ~ 700 mm), 자외선 A(UVA, 320 ~ 400 mm) 그리고 자외선 B(UVB, 300 ~ 320 mm)로 나누어 입력된다. ELCOM의 수온해석은 열역학적 이론에 근거한 물리적 모델이므로 수온 매개변수는 보정을 하지 않고 초기 값을 그대로 사용하였다.

3) 수온 성층구조 재현성 확인

ELCOM이 대청호의 실제 수온성층 구조를 얼마나 잘 재현하는지 확인하기 위하여 댐 앞 지점에서의 모

Table 2. Comparison of observed and simulated water temperatures in 2001 and 2004(unit: °C)

		2001	2004
AME	Average	1.80	1.41
	Standard deviation	0.38	0.44
	Maximum value	2.49	2.29
	Minimum value	0.84	0.88
RMSE	Average	2.19	1.73
	Standard deviation	0.50	0.68
	Maximum value	2.89	3.29
	Minimum value	0.93	1.00

의 값과 수온 실측값을 비교하였는데, 그 결과는 Table 2, Figure 3 및 Figure 4에 나타내었다.

2001년의 경우 평균 AME 값은 1.80 °C, RMSE 값은 2.19 °C였다. 또한 2004년의 경우 AME 값은 1.41 °C로 나타났으며, RMSE 값은 1.73 °C로 나타났다. 또한 2001년의 경우 8월 21일경 AME가 2.49 °C

로 가장 큰 값을 기록하였으며, RMSE는 6월 22일에 2.89 °C가장 높은 값을 기록하였다. 2004년의 경우 AME 값이 7월 13일에 2.29 °C로 가장 높게 나타났으며, RMSE는 7월 13일에 3.29 °C로 가장 높게 나타났다. 이러한 오차의 원인으로는 여름철 홍수기에 종종으로 유입되는 탁수의 영향과 대청호 내의 풍향 및 풍속 대신 대전 기상청의 기상자료를 이용 한 것 때문으로 사료된다. 특히 풍속은 수면의 증발량 및 표수층의 깊이에 영향을 주게 되는데, 대청호는 산지로 둘러싸여 있으므로 대전 기상청에서 측정된 풍속과는 차이가 있을 것으로 예상된다. 또한 풍속은 동일한 호수 내일지라도 지점에 따라 수면의 모양, 바람과의 호수충돌방향의 각도, 이송거리 등이 다르므로 호수 내 지점에 따라 차이를 보인다(김윤희 등, 2001).

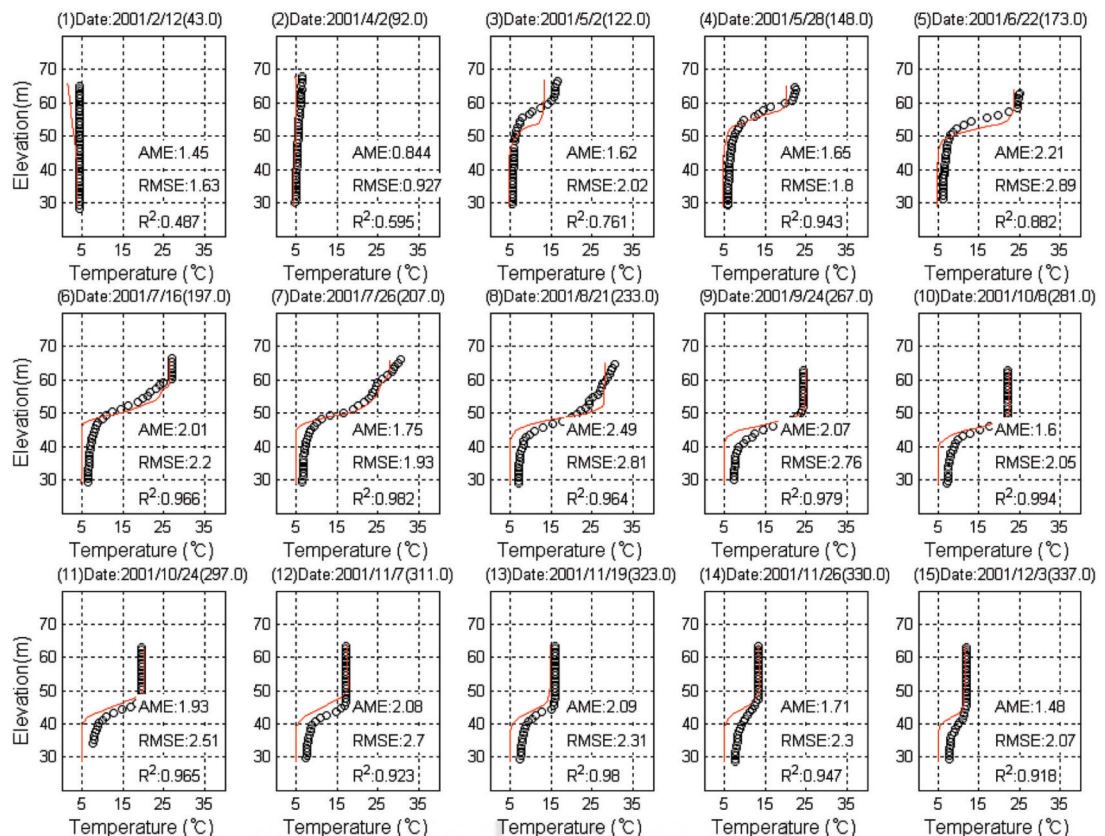


Figure 3. Comparison of simulated(line) and observed(symbol) water temperature profile in 2001

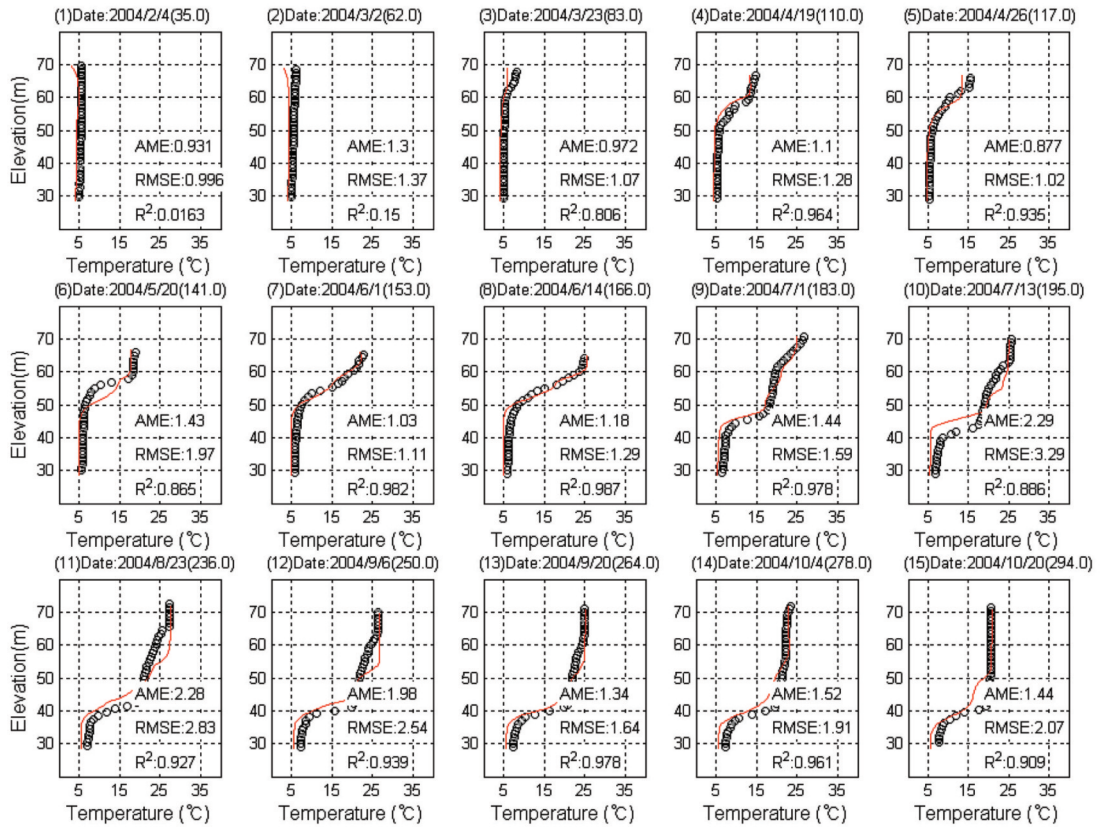


Figure 4. Comparison of simulated(line) and observed(symbol) water temperature profile in 2004

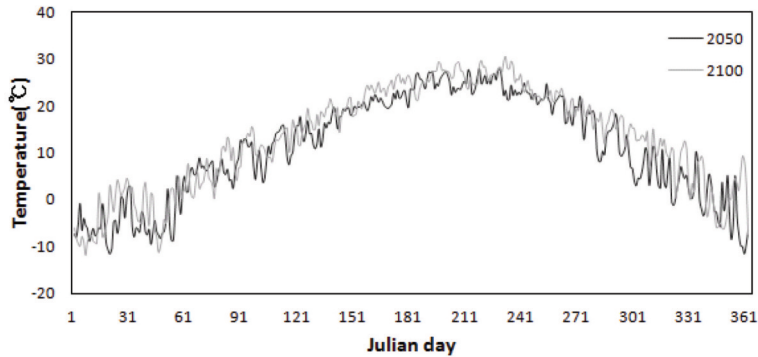


Figure 5. Predicted air temperature in 2050 and 2100

(2) 2050년 및 2100년 모의

1) 미래기온 전망

2050년 및 2100년의 기온자료는 기후변화정보센터에서 A1B 기후변화 시나리오(경제성장 지향, 지구주의 지향, 밸런스 형 에너지 정책)로 전망한 예측 자료를 이용하였는데, 이를 Figure 5에 나타내었다.

A1B 시나리오는 현재 이산화탄소의 배출량이 점차 증가하여 2050년경 정점에 도달한 다음 그 이후 다소 감소하는 시나리오로 대기 중 이산화탄소 농도는 2100년경 720ppm까지 도달할 것으로 예상되는 시나리오로, 화석 에너지 및 고효율 에너지원이 균형 있게 사용된다고 가정하며 현실에 가장 잘 부합되는

시나리오이다(권영아 등, 2007). 기상연구소에서 사용한 기후모델인 ECHO-G는 대기모델인 ECHAM4 (Roeckner *et al.*, 1996)와 해양모델인 HOPE-G (Legutke and Maire-Reimer, 1999)로 구성된 모델로, ECHO-G에서 생산된 자료는 약 400 km의 해상도를 가지고 있기 때문에 우리나라와 같이 복잡한 지형에 대해서 적용하는 것은 한계가 있다. 따라서 전 지구 기후변화 시나리오를 우리나라에 활용하기 위해서는 우리나라의 지형특성이 반영된 수십 km 규모의 고해상도의 자료 생산이 필요하며, 이를 위하여 지역기후모델인 MM5(Mesoscale Model Version 5)를 적용한 역학적 상세화 기법(Downscaling method)이 이용되었다(국립기상연구소, 2007).

2) 초기조건 및 경계조건 구성

2050년 및 2100년 대청호 수온분포 모의에서 유량 및 기상조건을 정확하게 예측하는 데에는 한계가 있기 때문에 2050년과 2100년을 평수년과 갈수년 각각 2가지 수문사상으로 가정하고, 기온, 초기수온조

건, 유입하천 수온을 제외한 나머지 입력자료인 대청댐 초기수위, 유량, 풍향, 풍속, 태양복사에너지, 온도, 상대습도 실제로 갈수년이었던 2001년과 평수년이었던 2004년의 자료와 동일한 조건을 가진다고 가정하였다.

대청호 초기수온분포는 표층수와 심층수의 온도차가 거의 나지 않는 1월을 대상으로 하였으며, Figure 6과 같이 실제 대청댐 표층수온과 기온 사이의 상관관계를 통하여 식(8)을 구하고, 식에 2050년 및 2100년의 기온자료를 대입하여 산정하였다. 또한 표층 및 심층층에서 동일한 온도를 가지는 것으로 가정하였고, 유입수온은 2001년 및 2004년 모의에서 사용했던 식(7)에 2050년 및 2100년의 기온자료와 각 수문사상에서의 유량을 대입하여 산정하였다.

$$T_w = 0.7676 T_a + 7.0288 \quad (8)$$

2050년 및 2100년의 모의에서 초기수온분포를 회귀식을 이용하여 산정하였기 때문에 이로 인한 오차 발생을 고려하여 모의 시작일로부터 90일정도의 모

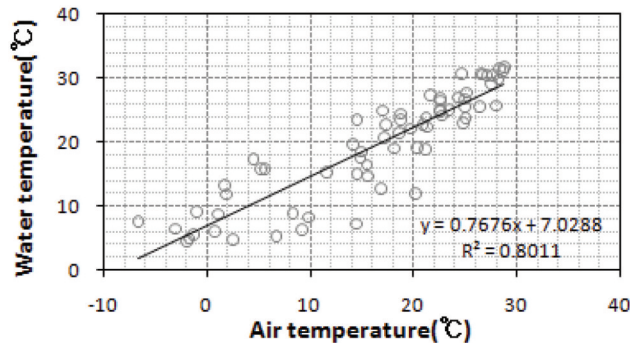


Figure 6. Relation between air temperature and water surface temperature

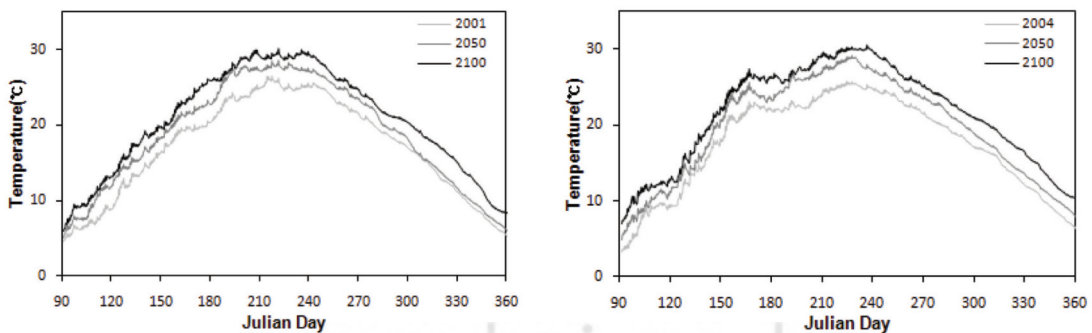


Figure 7. Forecasted surface water temperature assuming dry year(left) and normal year(right) conditions

텔 안정화기간을 두고, 안정화 기간이 지난 후인 4월 부터의 결과 값만을 분석 데이터로 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 표층 수온 및 연직 수온분포 변화

2001~2100년 동안의 기온이 A1B 시나리오에 따

라 변한다고 가정했을 때, 대청호의 표층 수온변화를 Figure 7에 나타내었다. 모의 결과 갈수년과 평수년 모두 해가 지날수록 표층수온이 동일한 날짜에서 증가하는 경향을 보였으며, 연중 3 ~ 4 °C의 온도차를 유지하였다. 모의기간동안의 2100년 댐 앞 지점 평균 표층수온은 기준연도와 비교하여 갈수년에 3.54 °C(표준편차 0.73 °C), 평수년에 3.85 °C(표준

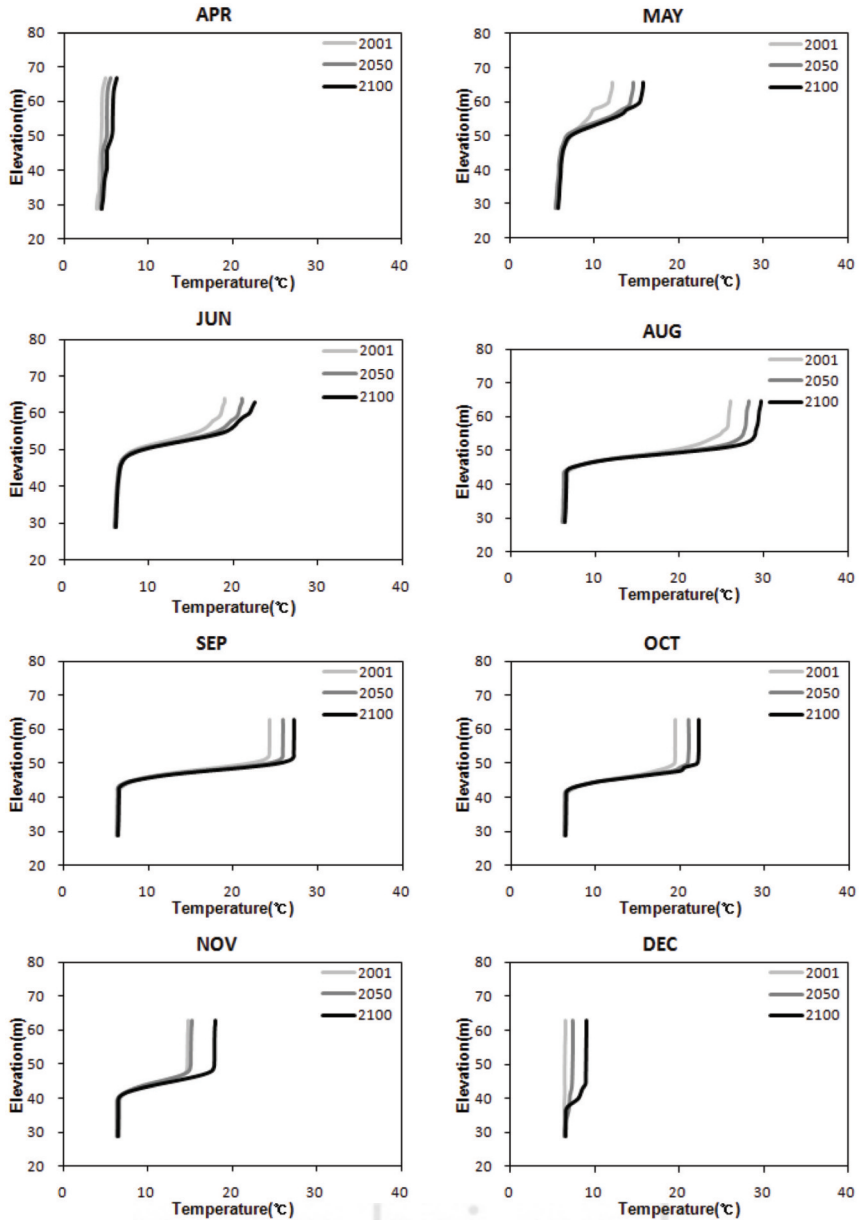


Figure 8. Forecasted vertical water temperature profiles assuming dry year condition

편차 0.58 ℃) 증가하였으며, 표층수의 최고온도는 각각 30.11 ℃, 30.58 ℃이었다.

기온 증가에 따른 대청호 내 수온성층구조 변동 경향을 살펴보기 위하여 Figure 8 및 Figure 9에 맴 앞 지점에서의 수온 profile을 나타내었다. 모의결과는 갈수년과 평수년 모두 미래로 갈수록 수온성층의 형성시기가 빨라지며, 여름철 성층강도가 더 강화되고

겨울철에는 수직혼합에 의한 전도현상(turn-over) 발생시기가 늦춰지는 것으로 나타났다. 갈수년과 평수년 모두 4월부터 표층이 가열되기 시작하며 성층구조가 형성되기 시작하였다. 5월부터 기준연도와 2100년의 표층수온은 약 4 ℃차이를 유지하기 시작했으며, 8월에는 표층수온이 최고에 도달하였고, 이후 표층이 냉각되기 시작하면서 서서히 성층구조가

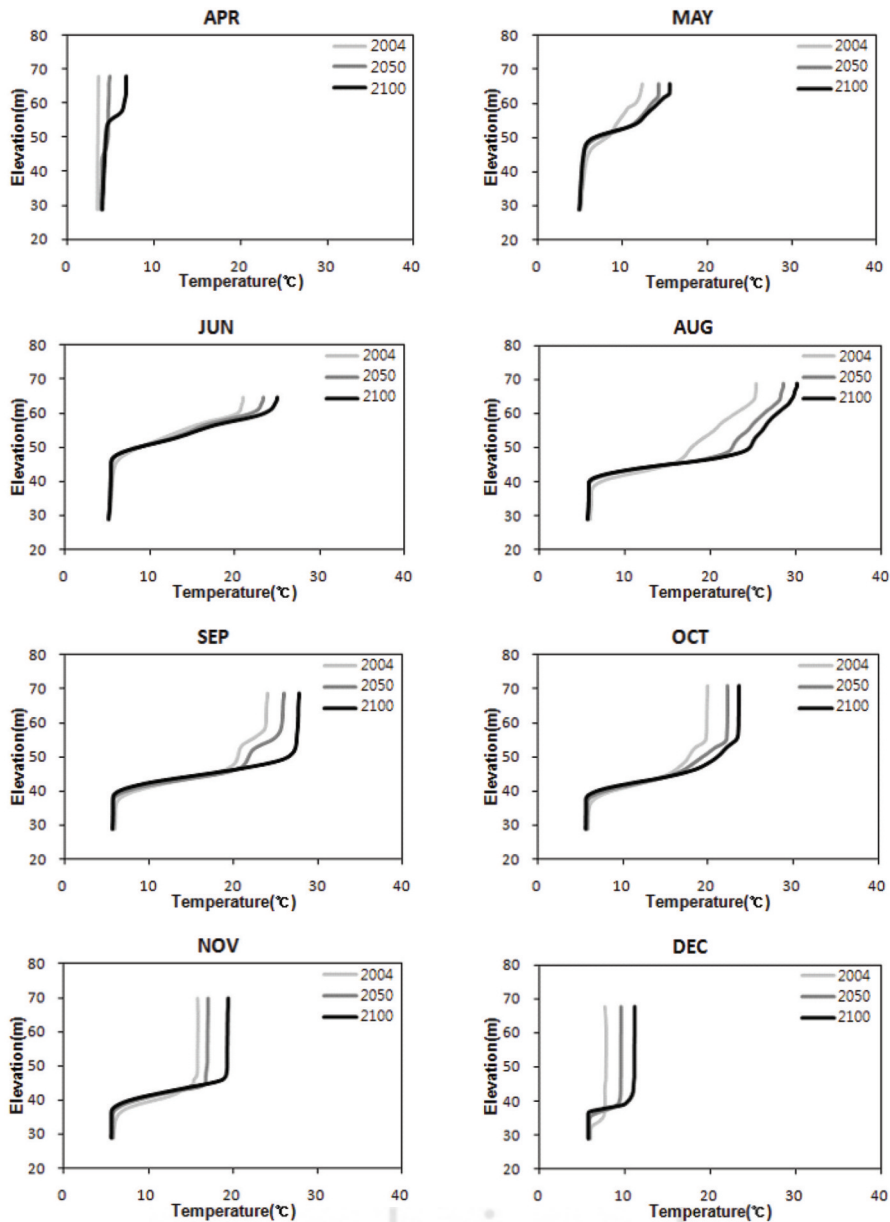


Figure 9. Forecasted vertical water temperature profiles assuming normal year condition

약화되었다. 표층과 달리 심층수는 기준연도와 큰 차이를 보이지 않았다. 심층수는 연중 10 °C이하를 계속 유지하였으며, 표층과 심층의 최대 온도차는 갈수년의 경우 2001년에 20.11 °C, 2100년에 23.61 °C이었으며, 평수년의 경우 2004년에 19.95 °C, 2100년에 24.75 °C이었다.

대청호 내의 성층형성 기간을 비교하기 위하여, 각 연도별로 표층과 심층수의 수온이 5 °C이상 차가나는 기간을 조사하였다. 그 결과 갈수년 조건에서 2001년은 5월 5일부터 11월 26일까지 205일 이었으며, 2100년에는 4월 19일부터 12월 11일로 2001년에 비하여 31일이 증가한 236일이었다. 평수년의 경우 2004년에는 4월 18일부터 12월 4일까지 230일 이었으며, 2100년에는 4월 6일부터 12월 23일까지 총 261일로 31일이 증가하였다.

대기 온도의 증가가 혼합층 및 수온약층의 형성 깊이에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 관찰되었다. 이는 성층 깊이에 가장 큰 영향을 미치는 바람의 영향, 홍수기 유입되는 유량을 같다고 가정했기 때문으로 사료된다.

2. 열수지 분석결과

ELCOM에서 열 수지는 단파 복사에너지(short wave flux, H_{sw}), 장파 복사에너지와 저수지 표면으로부터의 역복사(net long wave flux, H_H), 대기와 수면 수온 차이에 의한 대류 열 교환(sensible heat flux, H_s), 증발에 의한 열 손실(latent heat flux, H_L)로 나누어 계산되며, 대기와 수면의 순열복사량(net heat transfer, H_n)은 이들의 합수로 표현된다(정세웅, 2009).

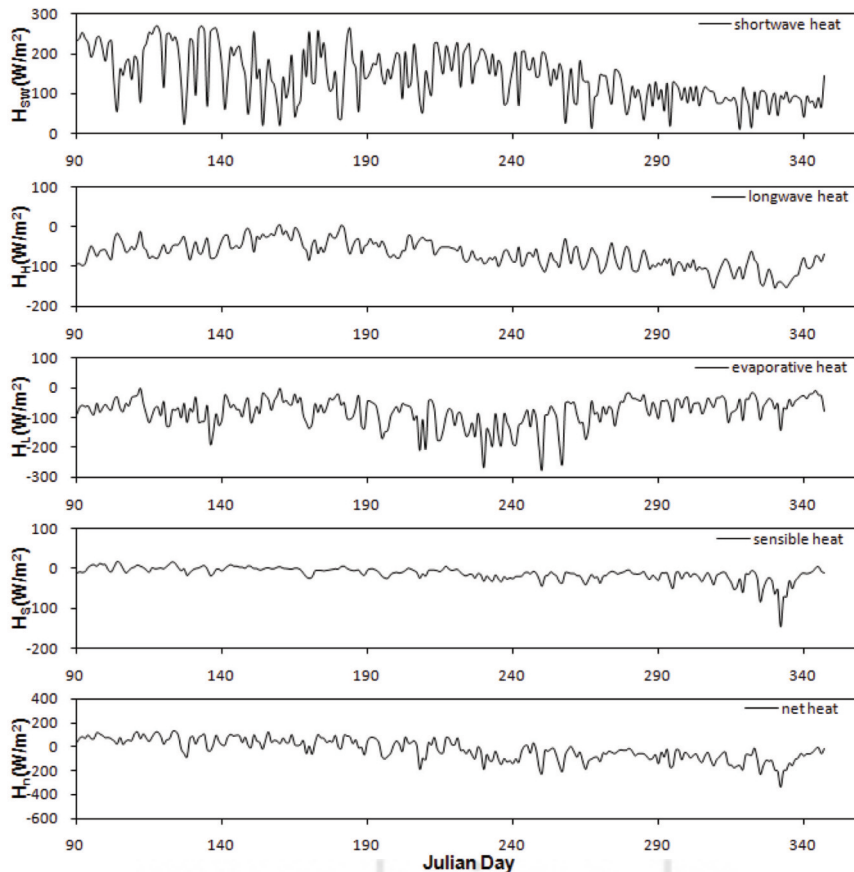


Figure 10. Estimated heat fluxes in the future based on the dry year condition

각각의 수문사상에서의 2100년 대청호에서의 대기 수면의 일평균 열교환수지 그래프를 Figure 10 및 Figure 11에 나타내었다. 여기서 양의 값은 대기에서 수표면으로 전달되는 열을 의미하며, 음의 값은 수표면에서 대기로의 열 손실을 나타낸다. 평수년과 갈수년의 모의기간동안 순열복사량(H_n)은 대체로 $-400 \sim 200 \text{ W/m}^2$ 의 범위를 기록했으며, 기온이 상승하기 시작하는 봄부터 8월까지 그 값이 대체로 양의 값을 기록하였으며, 그 이후는 음의 값을 보였다. 또한 표층수온이 높은 값을 기록한 8월에는 수면 증발로 인한 열 손실(H_s)이 가장 높게 나타났으며, 기온이 감소하기 시작하는 9월 이후에 대류로 인한 열 손실이 증가하기 시작하여, 12월에 가장 높은 값을 기록했다.

2100년의 일평균 열수지 변화량을 조사하기 위하

여 2100년과 기준연도의 열수지 값의 차를 Figure 12 및 Figure 13에 나타내었다. 그래프에서 양의 구간은 대기에서 수표면으로 전달되는 열의 증가를 나타내며, 음의 구간은 수표면에서 대기로 손실되는 열의 증가를 나타내는데, 갈수년과 평수년 모두 유사한 변화 경향을 나타냈다.

2100년에는 net long wave flux로 인한 수열량이 기준연도에 비하여 소폭 증가하였다. 이는 ELCOM에서 net long wave flux를 식(9)과 같이 장파복사로 인해 수표면으로 흡수되는 열과 수표면에서 방출되는 열의 합으로 계산하는데, 기온 증가로 인한 수열량이 수온 증가로 인한 손실량보다 많았기 때문으로 사료된다.

수표면에서의 증발로 인한 열 방출량은 기준연도와 비교하여 2100년에 훨씬 증가하였다. 이는

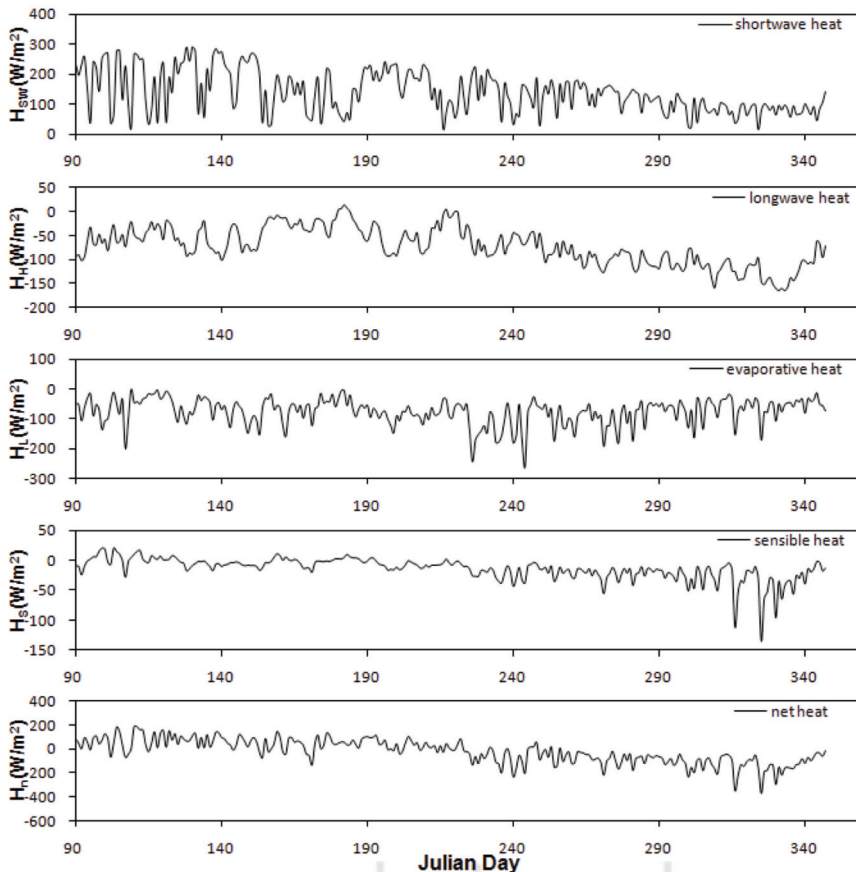


Figure 11. Estimated heat fluxes in the future based on the normal year condition

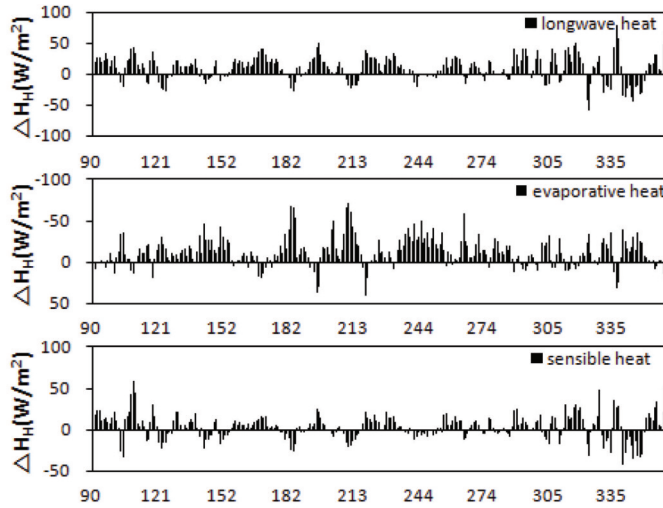


Figure 12. The magnitudes of heat flux changes between 2001 and 2100 based on the dry year condition

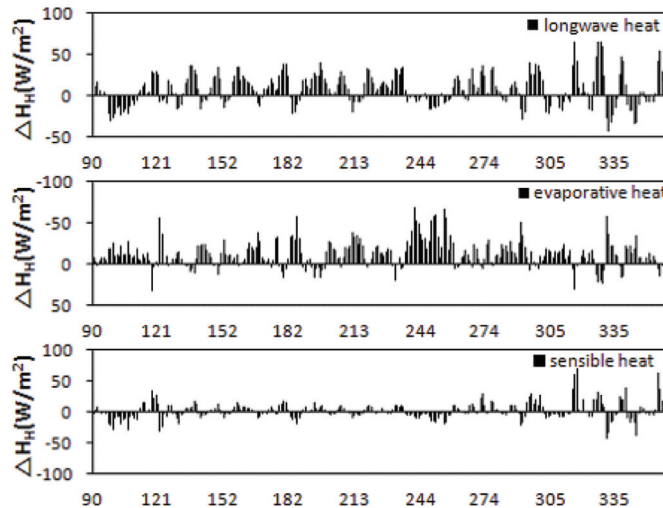


Figure 13. The magnitudes of heat flux changes between 2004 and 2100 based on the normal year condition

ELCOM에서 latent heat flux를 계산하는 식으로 식(10)이 사용되는데, 2100년의 대부분의 기간 동안 표층 수온이 기준연도보다 높게 유지되어, 표층에서의 증발량이 증가하였기 때문에 생각된다.

대류로 인해 대기에서 수표면으로 전달되는 열의 양은 기준연도보다 소량 증가하였다. ELCOM에서 sensible heat flux의 계산은 식(11)과 같이 기온과 표층수온의 차에 의해 결정되는데, 이 값이 기준연도보다 증가하여 대기에서 수표면으로 전달되는 열이 증가한 것으로 판단된다.

$$Q_{lw} = (1 - r_a^{(lw)})(1 + 0.17C^2)\epsilon_a(T_a)\sigma T_a^4 - \epsilon_w\sigma T_w^4 \quad (9)$$

$$Q_l = \min\left(0, \frac{0.622}{P} C_l \rho_a L_E U_a (e_a - e_s(T_s)) \Delta t\right) \quad (10)$$

$$Q_s = C_s \rho_a C_p U_a (T_a - T_s) \Delta t \quad (11)$$

여기서 r_a 은 알베도, C 는 운도(0 ~ 1), $\epsilon_a(T_a)$ 는 $9.37 \times 10^{-6} K^{-2} \times T_a^2$, σ 는 Stefan-Boltzmann constant($5.6697 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$), P 는 대기압(Pascals), C_l 는 latent heat coefficient(1.3×10^{-3}), L_E 는 물의 증발잠열($2.453 \times 10^6 J/kg$), e_a 는 대기 증기압(Pascals), $e_s(T_s)$ 는 T_s 에서의 포화증기압(Pascals),

C_s 는 sensible heat coefficient(1.3×10^{-3}), ρ 는 공기의 밀도(kg/m^3), C_p 는 일정 압력에서의 비열($1003 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), U_a 는 풍속(m/s)이다.

IV. 결론

본 연구에서는 A1B 시나리오를 이용하여 생성한 미래 기온 예측자료와 3차원 수리동역학모델 ELCOM을 이용하여 지구온난화로 인한 기온 상승이 2050년 및 2100년 대청호 수온 및 성층구조에 미치는 영향을 모의하고, 기온 및 수온 증가로 인한 열수지 변화를 분석하였으며, 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 갈수년과 평수년의 수문사상 모두 미래 저수지 표층 수온은 기준연도와 비교하여 증가할 것으로 전망되며, 갈수년의 경우 평균 $3.54 \text{ }^\circ\text{C}$ (표준편차 $0.73 \text{ }^\circ\text{C}$), 평수년의 경우 $3.85 \text{ }^\circ\text{C}$ (표준편차 $0.58 \text{ }^\circ\text{C}$)가 증가하였다.

둘째, 갈수년과 평수년의 경우 모두 표층과 달리 심수층의 수온은 큰 변화가 없이 연중 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하를 유지하는 것으로 나타났다.

셋째, 대기 온도 및 유입수온 증가로 인한 수온약층 형성 깊이는 변화가 없었다. 이는 수온약층 형성 깊이에 가장 큰 영향을 미치는 풍향, 풍속, 홍수기 유입유량을 변화 없이 고정된 값을 입력하였기 때문으로 사료된다.

넷째, 수온성층의 형성 시기와 기간은 갈수년과 평수년 모두 미래로 갈수록 수온성층형성시기가 빨라지며 장기화(31일 증가) 되고, 여름철 성층강도가 더욱 강화되고 겨울철 전도현상(turn-over) 발생시기는 늦춰지는 것으로 나타났다.

다섯째, 미래 저수지 열수지 분석결과, 표층 수온의 증가로 인하여 증발에 의한 열 손실량이 기준연도에 비하여 갈수년과 평수년 모두 증가하였다. 그러나 기온의 증가로 인해, 저수지 표면에서의 대류 및 장파복사로 인한 열 손실은 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일, 2001, 2차원 수리수질모델(CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링, 상하수도학회지, 15(1), 40-49.
- 국립기상연구소, 2007, 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 개발(III).
- 권영아, 권원태, 부경은, 최영은, 2007, A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망, 대한지리학회지, 42(3), 355-367.
- 이홍수, 정세웅, 정희영, 민병환, 2010, 대청호 수류차단막 설치 위치에 따른 녹조제어 효과 분석, 수질보전 한국물환경학회지, 26(2), 231-242.
- 정세웅, 오정국, 박재호, 윤성완, 2005, CE-QUAL-W2 모형의 수온 민감도분석 및 보정, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2005공동 추계학술발표회 논문집, 50-60.
- 정세웅, 오정국, 2006, 대청호 상류 하천에서 강우시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모형 개발, 한국수자원학회논문집, 39(1), 79-88.
- 정세웅, 이홍수, 최정규, 류인구, 2009, 3차원 ELCOM 모형을 이용한 대청호 수온성층 모의, 수질보전 한국물환경학회지, 25(6), 922-934.
- 한국수자원공사, 2007, 댐 운영 실무편람.
- Blenckner, T., Pettersson, K., Padisak, J., 2002, Lake plankton as tracer to discover climate signals, Verhandlungen Internationale Vereinigung Limnologie, 28, 1324-1327.
- De Stasio, B.T., Hill, D.K., Kleinhans, J.M., Nibbelink, N.P. Magnuson, J.J., 1996, Potential effects of global climate change on small, north-temperate lakes: Physics, fish, and plankton, Limnol. Oceanogr, 41(5), 1136-1149.
- Goedkoop, W., Johnson, R., 1996, Pelagic-benthic coupling: Profundal benthic

- community response to spring diatom deposition in mesotrophic Lake Erken, *Limnology and oceanography*, 41, 636-647.
- Hamilton, D.P., Spillman, C., Prescott, K.L., Kratz, T.K., Magnuson, J.J., 2002, Effects of atmospheric nutrient inputs on trophic status of Crystal Lake, Wisconsin, *Verhandlung Internationale Vereinigung de Limnologie*, 28, 467-470.
- Hodges, B. R. and Dallimore, C., 2006, *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: . Users Guide*, Centre for Water Research, University of Western Australia technical Publication.
- Imberger, J. and Patterson, J. C., 1990, Physical Limnology. In Wu, T. (ed.), *Advances in Applied Mechanics*, 27, Boston, Academic Press, pp. 302-475.
- IPCC, 2007, *Climate change 2007 : The Scientific Basis*, IPCC Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Legutke, S., and Maire-Reimer, E. ,1999, Climatology of the HOPE-G global ocean general circulation model. Technical report No. 21, German Climate Computre Centre (DKRZ), Hamburg, Germany, 90.
- Leonard, B. P., 1979, A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 19(1), 59-98.
- Leonard, B. P., 1991, the ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(1), 17-74.
- Martin, J. L., and McCutcheon, S. C., 1999, *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*, Boca Raton, CRC Press, Inc.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dumenil, L., Esch, M., Girogetta, M., Schlese, U., and Schulzweide, U., 1996, The atmospheric generation circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate. Max-Planck-Institute for Meteorology Report No. 218.
- Wetzel, R. G., 1983, *Limnology*, Philadelphia, PA., Saunders College Publishing
- Weyhenmeyer, G., Blenckner, T., Pettersson, T., 1999, Changes of the plankton spring outburst related to the North Atlantic Oscillation, *Limnol. Oceanogr*, 44, 1788-1792.