

고빈도 DO 및 수온 센서 자료를 이용한 대청호 생태계 신진대사 산정

김성진^{1a} · 정세웅^{1b,†} · 박형석^{1c} · 오정국² · 박대연^{1d}

¹충북대학교 환경공학과

²환경보전협회 기술지원부

Estimation of Ecosystem Metabolism Using High-frequency DO and Water Temperature Sensor Data in Daecheong Lake

Sung-Jin Kim^{1a} · Se-Woong Chung^{1b,†} · Hyungseok Park^{1c} · Jungkuk Oh² · Daeyeon Park^{1d}

¹Department of Environmental Engineering Chungbuk National University

²KEPA (Korea Environmental Preservation Association) Technical Support Department

(Received 30 August 2018, Revised 8 October 2018, Accepted 12 October 2018)

Abstract

The lakes' metabolism bears important information for the assessment of the carbon budget due to the accumulation or loss of carbon in the lake as well as the dynamics of the food webs through primary production. A lake-scale metabolism is evaluated by Gross Primary Production (GPP), Ecosystem Respiration (R), and Net Ecosystem Production (NEP), which is the difference between the first two values. Methods for estimating GPP and R are based on the levels carbon and oxygen. Estimation of carbon is expensive because of the use of radioactive materials which requires a high degree of proficiency. The purpose of this study was to estimate Lake Daecheong ecosystem metabolism using high frequency water temperature data and DO measurement sensor, widely utilized in the field of water quality monitoring, and to evaluate the possibility of using the application method. High frequency data was collected at intervals of 10 minutes from September to December 2017 by installing a thermistor chain and a DO sensor in downstream of Daechung Dam. The data was then used to estimate GPP, R and NEP using the R public program LakeMetabolizer, and other metabolism models (mle, ols, kalman, bookkeep). Calculations of gas exchange coefficient methods (cole, crsius, heiskanen, macIntyre, read, soloviev, vachon) were compared. According to the result, Lake Daecheong has some deviation based on the application method, but it was generally estimated that the NEP value is negative and acts as a source of atmospheric carbon in a heterotrophic system. Although the high frequency sensor data used in this study had negative and positive GPP and R values during the physical mixing process, they can be used to monitor real-time metabolic changes in the ecosystem if these problems are solved.

Key words : Ecosystem metabolism, Gross primary production, Lake Metabolizer, Net primary production, Respiration

^a 박사과정(Ph.D. Student), znssungjin2@naver.com, <https://orcid.org/0000-0002-4722-7240>

^{1b,†} Corresponding author, 교수(Professor), chung@chungbuk.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-8596-4970>

^{1c} 박사수료(Ph.D. Student), qwrs07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6218-1826>

² 과장(Manager), type710@epa.or.kr, <https://orcid.org/0000-0003-0923-7146>

^{1d} 석사과정(Master Student), qkrtjdwls15@hanmail.net, <https://orcid.org/0000-0003-4874-9435>

1. Introduction

하천, 저수지, 호소에서 신진대사의 산정은 1차 생산을 통한 먹이망의 동력학뿐만 아니라, 수체 내 탄소의 축적과 손실에 따른 탄소 수지(carbon budget), 그리고 식물플랑크톤(이후 조류)의 성장과 소멸단계에 대한 평가에 필요한 중요한 정보를 제공한다. 우선 호소와 저수지 같은 육상 담수는 유역 내 다양한 유기물이 수송, 저류, 퇴적된 후 분해된 최종산출물인 이산화탄소와 메탄을 대기 중으로 배출하는 중요한 역할을 한다(Chung et al., 2016; Wetzel, 2001). 해당 수체가 탄소를 흡수하는 시스템(autotrophic system)인지 또는 배출하는 시스템(heterotrophic system)인지에 대한 평가도 생태계 신진대사를 산정함으로써 판단 가능하다(Hanson, 2003). 즉, 총 1차 생산(Gross Primary Production, GPP)과 호흡(Ecosystem Respiration, R)의 차에 해당하는 순생산(Net Ecosystem Production, NEP)이 양의 값을 가지면 탄소 흡수시스템이며, 음의 값을 가지면 배출시스템에 해당한다고 평가할 수 있다.

또한 최근 전지구적 기온상승과 잦은 폭염의 발생, 그리고 하천 구조물 설치에 따른 정체수역의 증가로 인해 여름철 녹조(algal bloom)현상이 빈번히 발생하고 있다. 녹조는 심층수의 산소고갈, 저서생물의 고사, 정수장 여과지 폐색, 이·취미 발생 등 물 이용과 수생태계의 건강성에 심각한 영향을 미친다. 따라서 녹조문제는 가장 중요한 사회적 이슈의 하나로 대두되어 사람과 수생태계의 건강을 위해 적절한 관리가 필요하다. 녹조발생을 사전에 감지하고 예보하는데, GPP와 R의 변화는 중요한 역할을 한다(Staeher et al., 2010). 즉, 동일한 조류 생체량이 수중에 존재하더라도 조류가 성장하는 단계인지 사멸하는 단계인지 판단하기 위해 GPP, R, NEP의 변화를 활용할 수 있다(Isles et al., 2017).

호소 규모의 생태계 신진대사는 직접측정이 불가능하며, GPP, R, NEP로 산정할 수 있다(Winslow et al., 2016). GPP는 식물이나 조류가 단위시간당 광합성을 하여 고정된 총 에너지량을 말하며, R은 호흡으로 사용되는 에너지를 말한다. GPP는 녹조현상이 발달되는 시기에는 남조류에 의한 광합성이 증가하기 때문에 증가하고, 반면에 사멸하는 시기에는 감소한다. 호소에서 GPP와 R의 산정은 연간 또는 분기간의 장기 변화는 많이 연구되어 왔지만(Choi et al., 2009), 일간 또는 주간 단위의 단기간 산정 연구는 드물다. 일사량과 온도 등의 단기적 기상변화는 광합성 속도에 분명한 영향을 미친다(Staeher and Kaj, 2007). 생태계의 1차 생산량은 조류의 밀도, 수온, 일사량, 영양염류의 농도 등의 시간적인 변동에 따라 크게 변하며, 정확한 측정을 위해서는 고빈도 자료(High-frequency data)가 필요하다. 고빈도 자료는 원하는 측정 센서를 원하는 수심에 고정을 해 놓고 연속 측정하는 것이다.

조류의 1차 생산량을 측정하는 방법은 크게 탄소를 이용하는 방법과 산소를 이용하는 방법으로 나뉜다. 산소를 이용하는 방법은 대표적으로 현장에서 직접 측정하는 명병-암병법(Light and Dark Bottles Methods)이 있다. 이 방법은

적은 비용으로 특별한 장비 없이 1차 생산량을 측정할 수 있지만, 측정시간이 오래 걸리며 실시간 계측이 어렵다. 또한 광호흡 현상으로 인하여 호흡이 광합성보다 큰 종속영양군집(heterotrophic community)에서는 1차 생산량이 과소평가 되거나 음의 값을 나타낼 수 있다(Kho, 2016). 탄소를 이용하는 방법에는 대표적으로 ^{14}C 방사성동위원소법이 있다. ^{14}C 방사성동위원소법은 방사성동위원소인 ^{14}C 를 이용하여 일정시간 배양 후 조류의 탄소 흡수율을 측정하여 측정된 탄소량을 계산하는 방법으로 오차가 큰 산소를 이용하는 방법 대신에 표준방법으로 사용되고 있다. ^{14}C 방법은 첨가된 ^{14}C 양에 따라 감도를 조절할 수 있으므로 1차 생산량이 매우 낮은 곳에서도 측정이 가능하다. 하지만 방사성 물질을 사용하므로 시간과 비용이 많이 들고, 고도의 숙련도가 필요하다(Kho, 2016). 또한 실외에서 방사성물질을 사용하는데 제약이 따르므로 현장에서 실시간 계측이 어렵다. 따라서 보다 실용적이고, 효과적으로 1차 생산량을 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 최근 수질모니터링 분야에서 고빈도 수온 및 DO측정 센서 자료의 활용이 증가하고 있는데, Kim et al. (2012)와 Honti et al. (2016)에서는 호소와 하천에서 고빈도 DO 데이터를 이용하여 총 일차생산량을 측정하였고, Kim et al. (2012)에서는 부영양화 된 도심하천에서 산소고갈 기상조건의 영향 연구에 고빈도 DO데이터를 활용하였다. 또한 Khac et al. (2018)에서는 고빈도 측정 센서(수온, 전기전도도, pH, DO)를 이용하여 성층화 기간 동안 물리적 변수(수온, 전기전도도, pH, DO)와 생물학적 변수(Chl-a, phycocyanin)간의 변화를 분석하였다.

본 연구의 목적은 고빈도 수온 및 DO 측정 센서 자료를 이용하여 대청호에서의 생태계 신진대사를 산정하고, 적용된 방법의 활용가능성을 평가하는데 있다. 고빈도 자료는 2017년 9월부터 12월까지 대청댐 앞 지점에 수온계 체인과 DO 센서를 설치하여 10분 간격으로 수집하였다. 수집된 자료는 R 공개 프로그램인 LakeMetabolizer (Winslow et al., 2016)를 이용하여 GPP, R, NEP를 산정하였으며, 다양한 신진대사 산정 모델(mle, ols, kalman, bookkeep)과 기계교환계수 산정방법(cole, crsius, heiskanen, macIntyre, read, soloviev, vachon)을 적용하여 그 결과를 비교·분석하였다. 본 연구결과는 지속적으로 증가하고 있는 고빈도 센서 자료(빅데이터)를 이용하여 수생태계의 물리적 특성과 신진대사의 변화를 효율적으로 모니터링 할 수 있는 방법을 제공하는데 의의가 있으며, 저수지 수생태 연구, 탄소 순환 및 수지 분석, 유해 녹조 발생의 사전 예측 등에 활용 가능하다.

2. Materials and Methods

2.1 Description of site

본 연구의 대상지역(Fig. 1)인 대청호(36.5°N, 127.5°E)는 대청댐이 건설되면서 형성된 인공저수지로, 길이가 길며 폭이 좁은 형상을 가지고 있다. 중위도 몬순기후대에 속하며, 용수공급, 홍수조절, 수력발전 등의 기능을 수행한다. 총

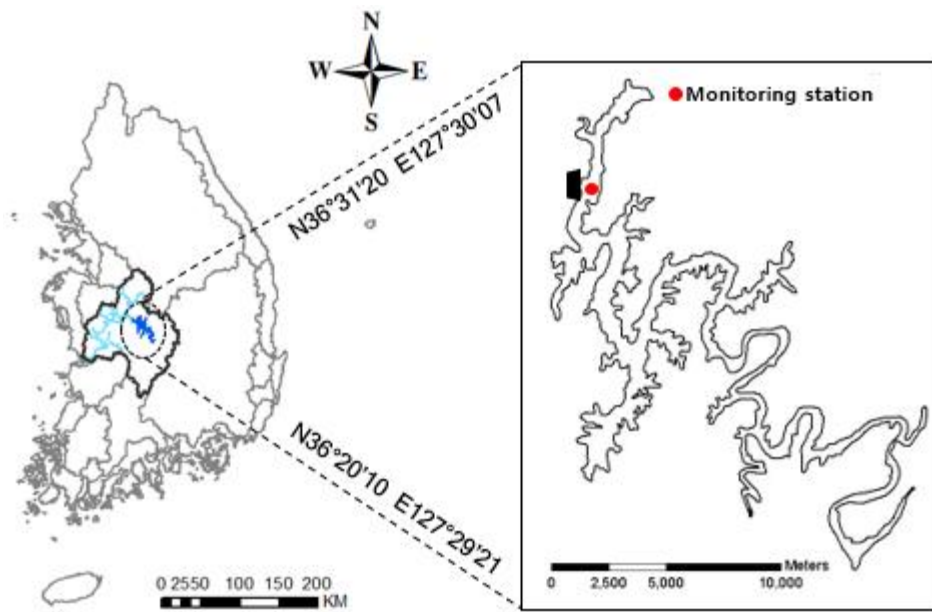


Fig. 1. Location of the study site and monitoring station.

유역면적은 3,204 km², 저수지 표면적은 72.8 km²으로 유역면적/저수면적의 비는 44.0이다. 총 저수용량은 1,490백만 m³이며, 유효저수용량은 790백만 m³이다. 대청호의 평균수심은 20 m 내외이며, 조사기간 동안 댐 앞 지점의 수심은 최대 42 m까지 관측되었다.

2.2 Sampling and analysis

고빈도 측정을 위한 현장 실험은 대청댐 앞 지점(Fig. 1)에서 2017년 9월부터 12월까지 총 4개월 동안 이루어졌다. 댐 앞 지점 저수지 중앙에 부표(N 36° 28' 28" E° 127 29' 16")가 설치된 지점에서 모니터링을 진행하였으며, 조사기간 동안 저수지 수심은 37~42 m의 변동 폭을 보였다. 조류의 1차 생산성을 정밀하게 측정하기 위해 수온계 체인과 DO 센서를 설치하고 수심별 연속 모니터링을 실시하였다. 수온계(HoBO Water Temp Pro onset, USA)는 수심 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 21, 24, 27, 30, 33 m에 센서를 설치하였으며, DO 측정기(HOBO Dissolved Oxygen Data logger)는 표층에 설치하여 10분 간격으로 측정하였다.

동일 기간의 상대습도, 기온, 풍속 등 기상자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 제공하는 자료를 수집하여 활용하였으며, 광합성유효방사(Photosynthetically Active Radiation, PAR)는 시간당 일사량 자료를 활용하여 단위를 MJ/m²에서 W/m²로 변환한 뒤 LakeMetabolizer package의 sw.to.par 기능을 활용하여 산정하였다.

2.3 Analysis of thermal stratification and stability of the lake

조사기간 동안 수온의 성층구조와 수체의 안정도 등 물리학적 특성은 rLakeAnalyzer (Winslow et al., 2016)를 사용하여 분석 하였다. rLakeAnalyzer의 입력 자료는 저수지

지형, 저수위, 풍속, 염분도, 수심별 수온 등 이다. 수심별 수온자료를 시계열로 도식화하고, 수온성층구조와 수체의 안정성 변화를 파악하기 위해 thermocline depth (m), Schmidt stability (St), Lake number (LN)를 산정하였다. St는 수체의 성층강도를 나타내는 지표이며, LN은 성층강도와 풍력으로부터 유도된 내부 수직혼합강도의 비를 나타내는 지표이다(Idso, 1973; Imberger and Patterson, 1990). 두 지표 모두 값이 클수록 수체가 안정되어 있음을 의미한다. 수체의 안정화 지수를 현장 조사를 통해 수집한 환경변수의 프로파일 자료와 연계하여 성층강도 변화를 해석하였다.

2.4 LakeMetabolizer

LakeMetabolizer는 공개된 R package로써 저수지와 호수 등의 신진대사를 평가하기 위한 목적으로 개발되었다(Winslow et al., 2016). 호수와 저수지 등의 표층에 DO 센서를 설치하여 연속측정하면, DO는 시간에 따라 변화하는데 그 이유는 두 가지가 있다. 첫 번째는 조류의 광합성과 호흡, 수중 유기물의 분해 같은 생물학적 영향이며, 두 번째는 수체와 대기간의 기체교환과 같은 무생물학적 영향이다. LakeMetabolizer는 대기-수체 간 경계면에서 O₂의 물리적인 교환과 조류 등에 의한 생물학적 영향으로 인한 DO의 변화를 각각 산정하여 해당 수체의 GPP, R, NEP를 산정하여 제시한다.

LakeMetabolizer를 사용하여 호수 생태계의 신진대사를 산정하기 위해서는 고빈도로 측정된 DO 자료와 수심별 수온 측정 자료, 상대습도, 풍속, PAR, 저수지 면적 등 메타데이터가 필요하다. 고빈도 측정 자료로부터 metabolism model을 구동시키기 전에 기체 교환 계수(k_{gas}), 혼합층 깊이(z_{mix}), 포화 DO 농도(do.sat) 등을 계산하여야 한다. z_{mix} 계수는 rLakeAnalyzer (Winslow et al., 2016)의 ts.meta.

Table 1. Required input data and corresponding estimation functions used to calculate lake metabolism by LakeMetabolizer

Input	Description	Functions
doobs	DO concentration observations (mg/L)	<i>load.all.data, load.ts</i> (from rLakeAnalyzer)
do.sat	Equilibrium DO concentration for specific temperature, pressure and salinity (mg/L)	<i>o2.at.sat</i>
k.gas	Gas and temperature specific gas transfer coefficient (m^{-1})	<i>k600.2.kGAS, k.* models</i>
irr	Photosynthetically active radiation (typically $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	<i>sw.to.par</i>
z.mix	Actively mixed layer depth (m)	<i>ts.meta.depths</i> (from rLakeAnalyzer)
wtr	Water temperature used to: calculate k.gas, estimate the z.mix, and fit respiration ($^{\circ}C$)	<i>load.all.data, load.ts</i> (from rLakeAnalyzer)

Table 2. Comparisons of the structure of the 4 different metabolism models included in LakeMetabolizer

Model	Underlying statistics	Error structure	Error type	Parameters fit	Photosynthesis irradiance relationship	Respiration temperature relationship	Output
<i>bookkeep</i>	Algebra	None	None	None	None	None	GPP, R, NEP
<i>kalman</i>	Maximum likelihood & Kalman filter	Gaussian	Process & observation	ι, ρ, Q, H	Linear	Log-linear	GPP, R, NEP
<i>mle</i>	Maximum likelihood	Gaussian	Observation or process	ι, ρ	Linear	Log-linear	GPP, R, NEP
<i>ols</i>	Linear regression	Gaussian	Process	ι, ρ	Linear	Log-linear	GPP, R, NEP

depths 기능을 사용하여 계산하였으며, *do.sat*은 DO 센서 깊이에서 측정된 온도를 사용하여 계산하였다(Table 1). 또한 각 센서의 설치 수심에서 수중 광량을 파악하기 위해 Kd (light extinction coefficient) 값을 산정하여야 한다. Kd 값은 조류의 광합성에 유용한 에너지인 PAR를 기준으로 대청호 회남 지역의 평균 투명도(Secchi depth: SD, m)인 2.87 m를 이용하여 0.5로 산정하였다(Cho et al., 2012). 이러한 파생 데이터들을 계산한 후에 LakeMetabolizer의 metab 기능을 사용하여 시계열 자료를 metabolism model에 적용하였다. 같은 입력자료를 사용하여 총 4개의 신진대사 산정모델(*metab.bookkeep, metab.kalman, metab.mle, metab.ols*)과 (Table 2) 7종류의 기체교환계수(*k.cole, k.crusius, k.vachon, k.heiskanen, k.macIntyre, k.read, k.read.soloviev*)를 사용하여 GPP, R, NEP를 산정하고 결과를 비교하였다 (Table 3).

2.4.1 Metabolism models

Metabolism models은 Maximum likelihood estimation (Mle), Ordinary least squares (Ols), Kalman filter (Kalman), Bookkeeping (Bookkeep)모델을 사용하였다.

Mle 모델은 최대 우도추정법(Maximum likelihood estimation)을 사용하여 매개변수를 조절하며, 주어진 자료에서 발생 가능성이 가장 높은 매개 변수 세트를 찾아서 신진대사를 산정한다. Mle 모델은 별다른 가정없이, 주어진 관측결과를 바탕으로 신진대사를 쉽게 산정하며, 관측결과에 의존해서 판단하기 때문에 관측횟수 및 관측결과에 정확성에 따라서 신진대사 산정의 결과가 크게 좌우된다 (Hanson et al., 2008).

Ols 모델은 가스 농도 및 관련 기타 데이터에 대해 최소자승법(Ordinary least squares)을 사용하여 신진대사를 산정하며, 시간에 따라 metabolism 매개변수를 산정할 수 있다.

Table 3. Required time series and metadata inputs for each gas flux coefficient model

Item	Model						
	cole	crusius	vachon	heiskanen	macIntyre	read	soloviev
Wind speed	○	○	○	○	○	○	○
Wind sensor height	○	○	○	○	○	○	○
Atmospheric pressure				○	○	○	○
Air temperature				○	○	○	○
Downwelling shortwave				○	○	○	○
Net longwave				○	○	○	○
Lake latitude						○	○
Lake area			○			○	○
Active mixed layer depth				○	○	○	○
Water surface temp				○	○	○	○
Relative humidity				○	○	○	○

Ols 모델은 선형 회귀를 바탕으로 하며, 선형 회귀는 수온을 자연로그로 취한값(log_eT)과 일사량(I)으로부터 생물학적 요인으로 변화된 DO를 산정하는데 사용된다(Hanson et al., 2008).

Kalman 모델은 Kalman filter를 사용하여 과정 및 관측 오차를 설명하는 상태 공간 모델로써, ols, mle 모델과 같이 과정오차를 조절한다. 이 모델은 최대 우도 방정식을 사용하여 매개변수를 조절하며, 주어진 자료의 예상 매개변수의 값은 Kalman filter를 사용하여 계산된다(Harvey, 1990; Kalman, 1960).

Bookkeeping 모델은 가장 단순한 신진대사 산정 모델로 수체에서 하루 동안 DO의 변화가 NEP와 가스 교환에 의해 영향을 받는다고 가정한다. 일몰 후 GPP는 0으로 가정하며, 일몰 후 저녁과 일출 전 아침 사이의 NEP값을 이용해 평균 호흡률을 산정한다. Bookkeeping 모델은 metabolism model 중에서 오차를 포함하지 않고, 데이터로부터 metabolism 매개변수를 산정하지 않는 유일한 방법이다(Cole et al., 2000).

2.4.2 Gas transfer coefficient models

지금까지 대기-수면간 기체교환 플럭스를 추정하기 위한 많은 모델들이 발표 되었으며, 이 중 LakeMetabolizer에 포함된 모델의 개요는 Table 2에 제시하였다. 모든 기체 교환 모델은 k₆₀₀ 값을 반환하며, 이 값은 Schmidt number (Sc)₆₀₀ (또는 CO₂ 20°C, O₂ 17.5°C)로 정규화 된 것이다. 기체교환 플럭스 산정에 사용하는 풍속(U10)은 수면 위 10 m에서 측정된 풍속을 의미한다. U10은 식 (1)와 같이 계산되며, 여기서 H_{wind}는 측정 고도(m), Wind는 풍속이다. 기체 교환 모델은 크게 경험적 기체 교환 모델과 표면갱신 기체 교환 모델로 나뉘어진다.

$$U10 = Wind \times \left(\frac{10}{H_{wind}} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (1)$$

추적기체를 이용한 대기-수체 간 기체 교환 연구들은 호수 수면 위 풍속과 k와의 강한 상관관계를 보여 주었으며, 풍속을 이용하여 기체교환계수(k)를 산정하는 다양한 경험적 기체 교환 모델을 제시하였다. 이러한 모델들은 k가 바람에 의해서만 동적으로 변한다고 가정한다. 경험적 기체 교환 모델은 Cole et al. (1998)와 Crusius and Wanninkhof (2003), Vachon and Prairie(2013)가 있으며, 가장 자주 인용되는 경험적 k 산정 모델은 Cole et al. (1998)와 Crusius and Wanninkhof이다. 경험적 기체 교환 모델 중 Vachon and Prairie는 k 산정에 호수 면적을 포함하여 계산한다.

Cole et al. (1998)는 풍속과 k₆₀₀의 멱함수 관계를 기반으로 한 모델로써, 호소에서 기체교환속도 산정에 널리 사용되는 모델 중 하나이다(Cole et al., 1998). 이 모델은 여러 호수에서 SF₆를 추적 기체로 사용하여 유도되었으며, 평균 풍속과 k₆₀₀의 멱함수 관계를 기반으로 한다(Cole et al.,

1998).

Crusius and Wanninkhof은 빈영양의 작은 호수에서 SF₆ 추적기체를 사용하여 호수에서 k₆₀₀과 풍속을 연관지어 해석한 모델이다. Crusius and Wanninkhof은 저풍속에서 최적화 된 모델이며 bilinear, power, and constant/linear 모델이 자주 사용된다(Crusius and Wanninkhof, 2003).

Vachon and Prairie은 풍속과 호수 면적에 근거한 이변량 모델이다. k와 바람이 강한 상관관계를 가져도, 기체 교환 모델이 k를 산정하는데, 오차가 발생된다. 이러한 오차를 줄이기 위해 Vachon and Prairie은 호수 면적을 모델에 포함시켜 k를 산정하여 오차 발생을 최소화하였다(Vachon and Prairie, 2013).

표면 갱신 기체 교환 모델은 바람 외에 기체 교환에 영향을 미치는 일련의 과정들을 사용한다. 표면 갱신 기체 교환 모델은 대기-수체에서 발생하는 난류를 난류 운동 에너지의 소멸 속도로서 설명한다(MacIntyre et al., 2010; Read et al., 2011). 표면 갱신 기체 교환 모델에는 Heiskanen, MacIntyre, Read, Read and Soloviev이 있으며, Heiskanen은 Heiskanen et al. (2014)의 방법에 따라 gas flux를 산정하며, wind shear와 부력 flux를 포함한 경계층 접근법을 사용함으로써 k₆₀₀를 산정한다. Heiskanen 모델은 유사성 척도가 없기 때문에 표면 갱신 모델보다 k₆₀₀을 추정하는데 더 독립적이다(Heiskanen et al., 2014).

MacIntyre는 MacIntyre et al. (2010)에 의해 공식화된 표면 갱신 모델로써, 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$k_{600} = c_1 (\epsilon v)^{0.25} \quad (2)$$

여기서, c₁은 1.2로 경험적으로 파생된 계수이며, v는 물의 동점성 계수, ε는 Lombardo and Gregg (1989)에 의해 계산된 난류 운동 에너지의 소멸 속도로 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\epsilon = c_2 \left(c_3 \times \beta + 1.76 \times \frac{u_{*w}^3}{\kappa \times z_{aml}} \right) \quad (3)$$

여기서, c₂와 c₃는 경험적으로 분리된 상수로 각각 0.84, 0.58이다. u_{*w}는 수체 내면 마찰 속도(m/s)로 rLakeAnalyzer package (Winslow et al., 2016)를 사용하여 계산된다. κ=0.41은 von Karman 상수이고, z_{aml}은 실제 혼합층의 깊이(m)를 나타낸다. 부력 flux는 β(m²/s³)로 나타내며, 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{g \alpha H^*}{c_{pw\rho}} \quad (4)$$

여기서, g=9.81은 중력 가속도(m/s²), α는 물의 열 팽창계수(°C⁻¹), H*는 효율적인 열 flux (J/m²/s), C_{pw}는 일정 압력에서 물의 비열(kg/m³)이다(MacIntyre et al., 2010).

Read는 k₆₀₀을 wind shear와 이류를 추가하여 난류를 해

석하여 모델을 확장시켰다(Read et al., 2011).

Read and Soloviev는 Read 모델을 확장시킨 모델로써, Read 모델에서 쇄파(breaking wave)를 추가하여 해석한다(Soloviev et al., 2007).

3. Results and Discussion

3.1 Analysis of thermal stratification and stability of the reservoir

조사 기간 동안 대기기온의 시계열 변화를 Fig. 2(a), 대청호의 수심별 수온 및 수온 전이층 두께(Metalimnion thickness)의 변화를 Fig. 2(d)에 나타내었다. 또한, Lake Analyzer를 이용해 분석한 ST와 LN 값의 시계열 변화를 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)에 각각 제시하였다. ST와 LN 값 산

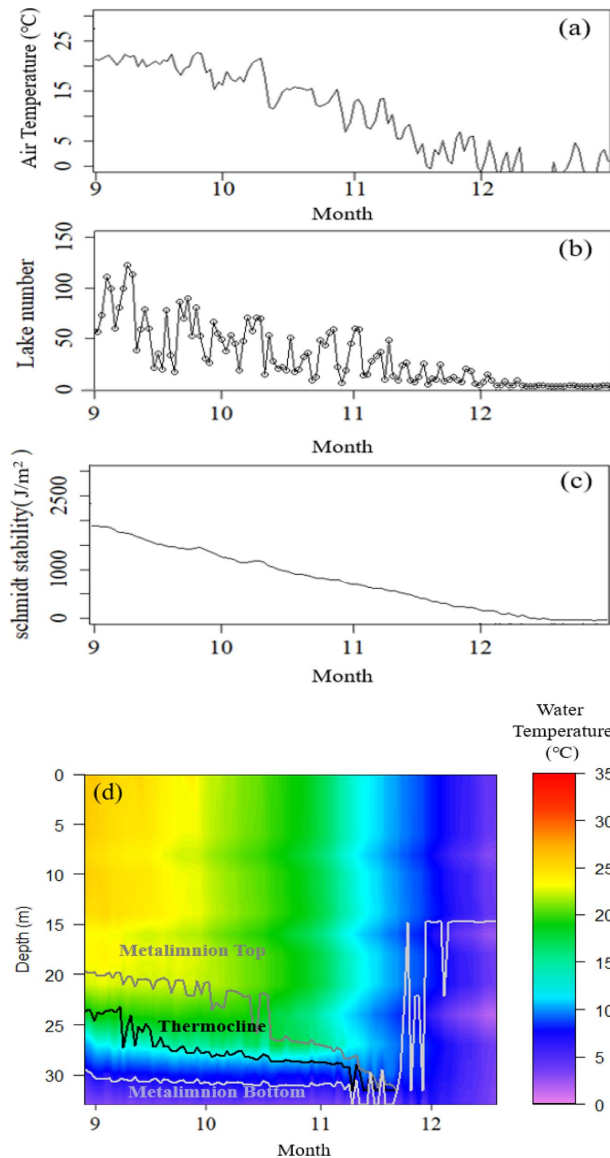


Fig. 2. Temporal variations of (a) air temperature, (b) Lake number, (c) Schmidt stability, and (d) time-depth profile of water temperature.

정에 사용된 입력자료는 2017년 9월 12일~12월 31일까지 10분단위로 측정된 수심별 수온 자료이다.

조사기간 동안 ST는 5.68~1,725.79 J/m², LN은 0.05~87.28의 범위를 보였다. 실험 시작 시점인 9월 중순(9/12)에 기온은 15.6°C이었으며, ST는 1,687.97 J/m²으로 안정된 수온성층이 형성되어 있었다. 9월 12일에 1,725.79 J/m²로 가장 강한 성층강도를 보였으며, 8월의 연속된 강우(225.2 mm) 이후에 대규모의 유량이 유입하면서 성층강도가 약화되는 경향을 보였다. 수위가 상승함에 따라 표층수의 두께도 약 20 m가량으로 증가하였으며, 수온전이층의 두께도 강우발생 전 12 m 내외에서 15.6 m까지 증가하였다가 강우 발생 직후 6.6 m로 급격한 변동이 나타났다. 이는 강우 유입수로 인해 수위가 급격히 상승하면서 일시적으로 수체가 불안정해진 것이 원인으로 판단된다.

10월 말(10/30)부터 평균기온이 10°C 이내로 떨어지면서, 수온 전이층의 두께가 급격히 감소하며(8.8 → 4.4 m), 이 시기의 ST는 790.2 J/m²로 나타났다. 이후 11월 말(11/27)에 ST가 약 300 J/m² 이하로 떨어지면서, 수온성층이 대부분 해소되는 것으로 나타났다. 대기기온이 감소함에 따라 성층강도가 약해지고, 수온약층(thermocline)의 중심도 점점 깊어지는 경향을 나타냈다.

조사기간 동안의 풍속과 PAR 그리고 표층의 DO 농도와 포화DO농도의 편차를 Fig. 3에 시계열로 제시하였다. 관측 기간 동안 평균 풍속은 1.5 m/s였으며, 최대풍속은 2017년 9월 15일에 3.4 m/s를 보였다. PAR는 평균 260.29였으며, 일 주기 변화를 보였다. 호소 표층의 DO 농도는 일부 기간을 제외하면 대부분 불포화 상태였으며, 일주기로 증가하

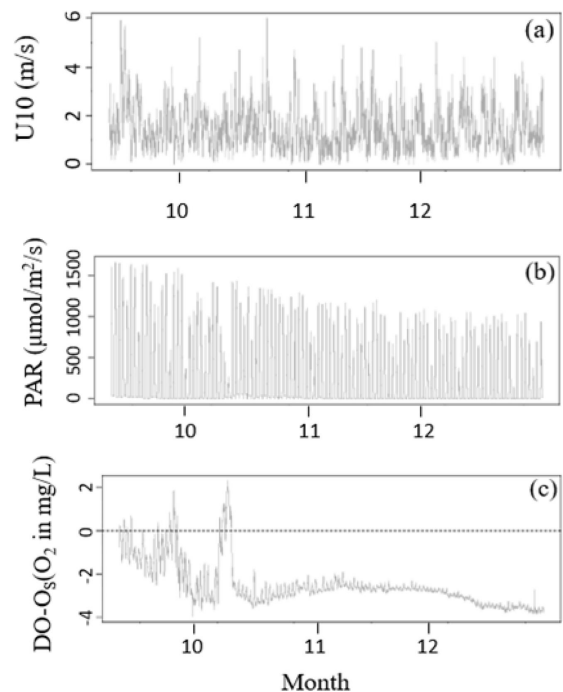


Fig. 3. Temporal variations of (a) wind speed, (b) photo-synthetically active radiation (PAR), and (c) DO deviations from saturation.

고 감소하는 패턴을 보였다. 9월 중순과 10월초에 DO 농도가 포화농도 이상으로 일시적으로 증가하는 현상이 발생하였는데, 이는 9월 11일의 32.9 mm와 10월초의 23.1 mm의 폭우로 인해 수중의 DO가 일시적으로 증가한 것으로 판단된다.

3.2 Results of GPP, R, NEP

신진대사 모델별, 기체전달계수 함수별로 산정한 NEP의 시계열 변화는 Fig. 4와 같다. NEP는 신진대사 모델의 종류에 대해서는 큰 편차를 보이지 않았으며, 기체전달계수는 여름철보다 풍속이 큰 겨울철에 큰 편차를 보였다. NEP는 9월부터 10월 중순까지는 양의 값과 음의 값이 반복적으로 나타났으나, 그 이후에는 대부분의 음의 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 기온의 하강과 함께 저수지 내 조류의 생체량 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 해석할 수 있다. GPP와 R은 몇몇 기간에 각각 음의 값과 양의 값을 보였다. 생태학적으로 음의 GPP와 양의 R의 값은 불가능하지만, 수중 용존산소를 사용하여 metabolism을 평가할 때는 종종 음의 GPP와 양의 R 값을 반환한다(Winslow et al., 2016). 이러한 결과는 생물학적 기작에 의한 DO 변동 신호가 바람에 의한 혼합과 같은 물리적 혼합에 의한

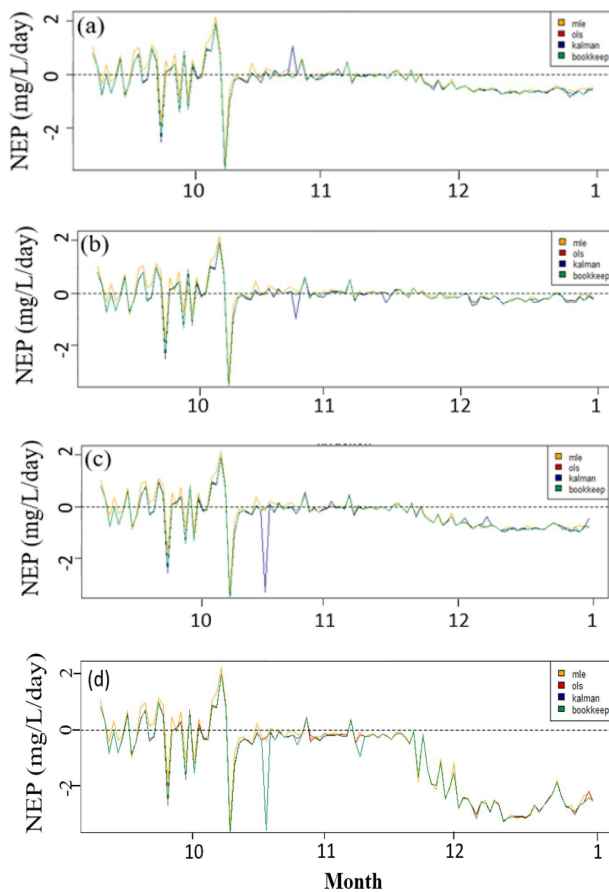


Fig. 4. Temporal variations of Net Ecosystem Production (NEP) according to metabolism model in Daechung Lake ((a): cole, (b): crusius, (c): vachon, (d): macIntyre).

DO변화에 의해 압도될 때 자주 발생한다(Rose et al., 2014).

LakeMetabolizer의 7가지 기체교환계수 함수별, 그리고 4가지 신진대사 모델별로 산정한 GPP, R, NEP 결과는 Fig. 5 및 Table 5 ~ Table 7과 같다. LakeMetabolizer의 기체 교환 계수 함수의 선택은 호소의 신진대사를 평가하는데 상당히 중요하다(Dugan et al., 2016). GPP는 기체 교환 계수에 따라 편차가 크지 않은 것으로 나타났다 (Fig. 5a). 하지만, Bookkeep 모델의 GPP범위는 -0.08 ~ 8.85 mgO₂/L/day로 다른 모델(mle, ols, kalman) 대비 큰 편차를 보였다. metabolism model에 각각 다른 기체 교환 계수를 적용하였을 때 GPP값은 전반적으로 비슷한 패턴의 양상을 보였으며, 경험적 기체 교환 모델(-0.19 ~ 4.50 mgO₂/L/day)과 표면갱신 기체 교환 모델(-0.51 ~ 4.56

Table 4. Estimated Gross Primary Production (GPP) rates according to metabolism model in Daechung Lake

Index		GPP (mgO ₂ /L/day)				
Metabolism model	k.gas	Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
mle	cole	-0.15	4.47	0.70	0.29	0.92
	crusius	-0.19	4.43	0.68	0.30	0.92
	heiskanen	-0.29	4.56	0.77	0.35	0.93
	macIntyre	-0.51	4.56	0.82	0.48	0.90
	read	-0.25	4.48	0.68	0.27	0.93
	soloviev	-0.28	4.48	0.67	0.27	0.93
	vachon	-0.18	4.50	0.69	0.28	0.92
ols	cole	-0.34	4.79	0.74	0.41	0.93
	crusius	-0.35	4.78	0.73	0.42	0.93
	heiskanen	-0.24	4.86	0.81	0.47	0.92
	macIntyre	-0.19	4.86	0.87	0.53	0.90
	read	-0.34	4.79	0.73	0.41	0.94
	soloviev	-0.34	4.79	0.73	0.41	0.94
kalman	cole	-0.34	4.74	0.74	0.41	0.93
	crusius	-0.35	4.73	0.72	0.40	0.93
	heiskanen	-0.25	4.81	0.81	0.47	0.92
	macIntyre	-0.19	4.80	0.86	0.51	0.89
	read	-0.35	4.74	0.72	0.35	0.93
	soloviev	-0.40	4.74	0.72	0.35	0.94
bookkeep	cole	-0.03	8.72	1.55	0.75	1.74
	crusius	-0.08	8.70	1.45	0.61	1.79
	heiskanen	0.32	8.85	1.88	1.33	1.64
	macIntyre	0.30	8.84	2.17	1.99	1.56
	read	0.06	8.72	1.59	0.90	1.72
	soloviev	0.06	8.72	1.59	0.90	1.72
	vachon	0.00	8.72	1.59	0.86	1.72

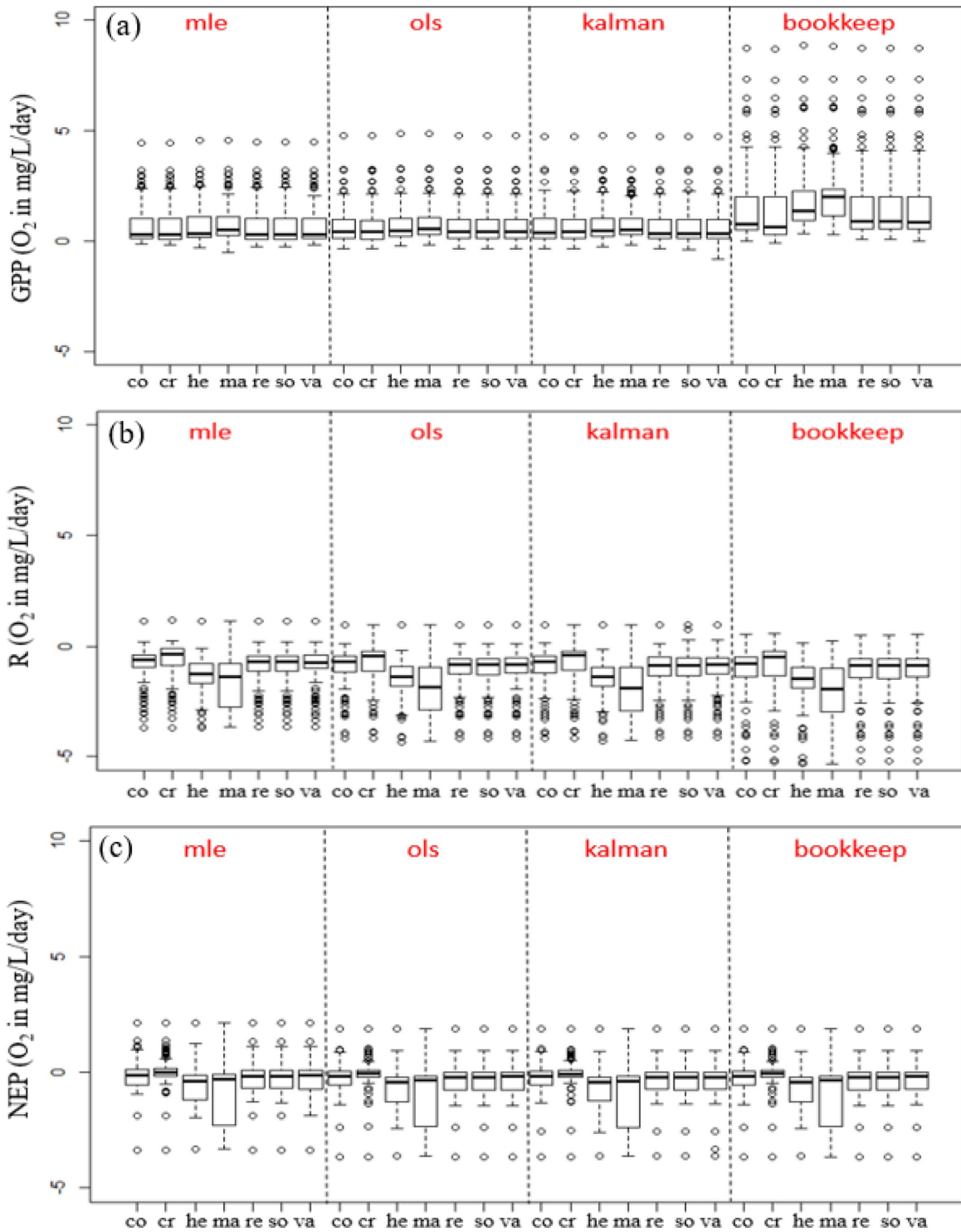


Fig. 5. Estimate results of metabolism according to kgas in Daechung Lake (co:cole, cr:crusius, he:heiskanen, ma:macIntyre, re:read, so:soloviev, va:vachon)

mgO₂/L/day)간의 범위 차이도 크지 않은 것으로 나타났다.

4가지 모델에서 모두 표면갱신 기체 교환모델의 k.macIntyre를 사용하였을 때 평균 1.18 (0.82~2.17) mgO₂/L/day로 가장 높은 값을 가졌다. 또한 mle 모델에서 k.soloviev는 평균 0.67 (-0.28~4.48) mgO₂/L/day로 가장 낮은 값을 가졌

으며, bookkeep 모델에서는 k.crusius가 평균 1.45 (-0.08~8.70) mgO₂/L/day로 가장 낮은 값을 가졌다. ols, kalman 모델에서는 각각 crusius, read, soloviev가 평균 0.73 (-0.35~4.74) mgO₂/L/day, 평균 0.72 (-0.40~4.74) mgO₂/L/day로 가장 낮은 값을 가졌다.

R은 metabolism model에 따라서는 편차가 거의 없었지

Table 5. Estimated Ecosystem Respiration (R) rates according to metabolism model in Daechung Lake

Index		R (mgO ₂ /L/day)				
Metabolism model	k_gas	Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
mle	cole	-3.69	1.15	-0.82	-0.61	0.82
	crusius	-3.70	1.16	-0.66	-0.34	0.87
	heiskanen	-3.72	1.12	-1.30	-1.25	0.79
	macIntyre	-3.65	1.13	-1.71	-1.39	1.10
	read	-3.68	1.15	-0.90	-0.70	0.81
	soloviev	-3.68	1.15	-0.90	-0.70	0.81
	vachon	-3.68	1.15	-0.89	-0.73	0.81
ols	cole	-4.16	0.98	-0.97	-0.70	0.91
	crusius	-4.17	0.98	-0.81	-0.43	0.97
	heiskanen	-4.36	0.97	-1.44	-1.38	0.86
	macIntyre	-4.30	0.97	-1.86	-1.82	1.11
	read	-4.16	0.98	-1.05	-0.83	0.89
	soloviev	-4.16	0.98	-1.05	-0.83	0.89
	vachon	-4.16	0.98	-1.04	-0.83	0.89
kalman	cole	-4.16	0.98	-0.98	-0.70	0.91
	crusius	-4.16	0.98	-0.82	-0.40	0.96
	heiskanen	-4.32	0.97	-1.44	-1.38	0.85
	macIntyre	-4.25	0.98	-1.89	-1.87	1.13
	read	-4.15	0.98	-1.04	-0.84	0.89
	soloviev	-4.15	0.98	-1.04	-0.84	0.91
	vachon	-4.15	0.98	-1.05	-0.82	0.90
bookkeep	cole	-6.45	0.55	-1.16	-0.76	1.22
	crusius	-6.44	0.59	-1.01	-0.48	1.28
	heiskanen	-6.51	0.16	-1.63	-1.47	1.13
	macIntyre	-6.50	0.24	-2.03	-1.92	1.29
	read	-6.45	0.49	-1.25	-0.88	1.20
	soloviev	-6.45	0.49	-1.25	-0.88	1.19
	vachon	-6.46	0.53	-1.23	-0.88	1.20

만, 기체교환계수 함수에 따라 편차를 보였다(Fig.5(b)). 모든 metabolism model에서 경험적 기체 교환 모델을 사용하였을 때가 평균 -0.95 (-6.46 ~ 1.16)로 표면갱신 기체 교환 모델을 사용하였을 때 평균 -1.36 (-6.51 ~ 1.15)보다 높은 값을 가졌다. 기체 교환 계수 중 경험적 기체 교환 모델의 k.crusius를 사용하였을 때 평균 -0.83 (-6.44 ~ 1.16)로 가장 컸고, 표면갱신 모델의 k.macIntyre를 사용하였을 때 평균 -1.87 (-6.51 ~ 1.15)로 가장 작았다.

NEP는 대체로 음의 값을 보여 대청호는 종속영양시스템으로써 대기 중 탄소의 배출원으로 작용하고 있는 것으로 평가되었다(Fig. 5c). metabolism model에 따라 다른 기체 교환 계수를 사용하였을 때 NEP값은 R과 비슷한 패턴의 양상을 보였다. 모든 metabolism model에서 경험적 기체 교환 모델을 사용하였을 때가 평균 -0.18 (-3.66 ~

Table 6. Estimated Net Ecosystem Production (NEP) rates according to metabolism model in Daechung Lake

Index		NEP (mgO ₂ /L/day)				
Metabolism model	k_gas	Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
mle	cole	-3.37	2.15	-0.13	-0.13	0.64
	crusius	-3.38	2.15	0.02	-0.03	0.58
	heiskanen	-3.31	2.14	-0.53	-0.39	0.84
	macIntyre	-3.32	2.14	-0.89	-0.32	1.30
	read	-3.36	2.15	-0.22	-0.18	0.71
	soloviev	-3.36	2.15	-0.23	-0.18	0.71
	vachon	-3.36	2.15	-0.20	-0.15	0.68
ols	cole	-3.65	1.91	-0.23	-0.18	0.63
	crusius	-3.65	1.91	-0.08	-0.07	0.59
	heiskanen	-3.63	1.91	-0.63	-0.45	0.81
	macIntyre	-3.64	1.90	-0.98	-0.37	1.26
	read	-3.65	1.91	-0.32	-0.21	0.69
	soloviev	-3.65	1.91	-0.33	-0.21	0.69
	vachon	-3.65	1.91	-0.30	-0.20	0.67
kalman	cole	-3.65	1.91	-0.22	-0.20	0.65
	crusius	-3.65	1.90	-0.10	-0.11	0.60
	heiskanen	-3.63	1.91	-0.63	-0.44	0.80
	macIntyre	-3.64	1.90	-1.03	-0.38	1.28
	read	-3.64	1.91	-0.32	-0.21	0.69
	soloviev	-3.64	1.91	-0.32	-0.24	0.70
	vachon	-3.64	1.91	-0.32	-0.23	0.73
bookkeep	cole	-3.66	1.92	-0.23	-0.19	0.63
	crusius	-3.66	1.92	-0.08	-0.07	0.59
	heiskanen	-3.64	1.92	-0.63	-0.45	0.81
	macIntyre	-3.65	1.91	-0.98	-0.37	1.26
	read	-3.65	1.92	-0.32	-0.21	0.69
	soloviev	-3.65	1.92	-0.33	-0.21	0.69
	vachon	-3.65	1.92	-0.30	-0.20	0.67

2.15)로 표면갱신 기체 교환 모델을 사용하였을 때 평균 -0.54 (-3.65 ~ 2.15)보다 높은 값을 가졌다. 기체 교환 계수 중 경험적 기체 교환 모델의 k.crusius를 사용하였을 때 평균 -0.06 (-3.66 ~ 2.15)로 가장 컸고, 표면갱신 모델의 k.macIntyre를 사용하였을 때 평균 -0.97 (-3.65 ~ 2.14)로 가장 작았다.

본 연구에서 대청호를 대상으로 산정한 GPP의 값을 선행 연구 자료와 비교한 결과(Table 7), 조사기간 동안 대청호의 GPP값은 주암호에서 보고된 GPP보다 높았으며, 동북호, 영산호에 비해 낮았다(Yeongsan and Seomjin Watershed Management Committee, 2006). 한편, 국외의 경우는 Little Aror Vitae Lake와 Trout Bog에서 산정한 GPP보다는 낮은 값을 보였지만, Spakling Lake에 비해 높은 값을 나타내었다.

Table 7. Comparison of Gross Primary Production (GPP) rates estimated in this study with previous studies

Lake	GPP (mgO ₂ /L/day)	Reference
Daecheong	-0.8 ~ 8.85 (mean 0.98)	This study
Juam	0.0064 ~ 3.90 (mean 0.69)	1
Yeongsan	0.0035 ~ 67.91 (mean 6.51)	
Little Arbor Vitae Lake	3.1 ~ 3.7 (mean 3.4)	2
Spakling Lake	0.2 ~ 0.35 (mean 0.28)	
Trout Bog Lake	3 ~ 6.5 (mean 4.75)	

*1) Yeongsan and Seomjin Watershed Management Committee(2006). 2) Staehr et al. (2010)

결과를 보면 전반적으로 GPP에서는 bookkeep 모델이 가장 높았는데, 이는 bookkeep 모델이 빛에 의존하지 않은 model이며, 가장 적은 통계학적인 가정을 지니기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 bookkeep 모델은 매개변수를 산정하는데 과정, 관찰 오차를 포함하며, 오차가 크다면 metabolism을 산정하는데 큰 영향을 줄 수 있다. 또한 NEP의 시계열 변화를 보면 10월 말과 12월말에서 다른 모델에 비해 kalman 모델에서 NEP 급 증가·급 감소함을 보였는데, 이는 kalman 모델이 다른 모델과 달리 과정 오차를 통합하며, DO data가 nosiy할 때, 더 민감함을 보이기 때문으로 판단된다.

4. Conclusions

본 연구에서는 고빈도 수온과 DO 센서 자료와 호소의 신진대사 산정 프로그램인 LakeMetabolizer를 사용하여 다양한 metabolism model과 기체교환계수 함수 적용에 따른 대청호의 생태계 GPP, R, NEP를 산정하였다. 연구결과는 온대지역에 위치한 성층 저수지에서 고빈도 센서 자료를 이용한 생태계 신진대사 연속 산정 연구에 중요한 의미를 가진다. 특히 본 연구에서 사용한 LakeMetabolizer는 공개된 R 패키지로써 누구나 쉽게 이용할 수 있는 장점이 있다.

LakeMetabolizer에서 제공하는 4가지의 다른 신진대사 산정방법에 7가지 다른 기체 교환 계수를 사용하여 GPP를 산정한 결과, GPP는 bookkeep 모델에서 가장 높았으며, mle 방법에서 가장 낮았다. 이는 bookkeep 방법이 빛에 의존하지 않는 model이며, 가장 적은 통계학적인 가정을 지니기 때문인 것으로 판단된다. 또한 기체교환함수의 경우는 k.macIntyre에서 가장 높은 값을 가졌다. 산정한 GPP의 값을 선행 연구 자료와 비교한 결과 조사기간 동안 대청호의 GPP값은 주암호에서 보고된 GPP보다 높았으며, 영산호에 비해 낮았다. 이것은 영산호의 Chl-a 농도가 주암호와 대청호에 비해 높아 조류 광합성에 의한 GPP가 높게 측정된 것으로 판단된다. 한편 대청호는 연구 대상지점이 댐 앞 지점이어서 주암호에 비해 Chl-a가 낮아 GPP가 낮게 산정된 것으로 사료된다. 한편 국외의 경우는 Little Aror Vitae Lake와 Trout Bog에서 산정한 GPP보다는 낮은 값을 보였지만, Spakling Lake에 비해 높은 값을 나타내었다.

R의 경우 mle 모델에서 가장 높은 값을 나타냈으며, bookkeep 모델에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 기체교환계수에 따라서는 k.crusius 일 때 가장 높았으며, k.macIntyre 일 때 가장 낮았다. NEP는 mle 모델에서 가장 높은 값을 나타내었고, 나머지 모델에서는 비슷한 값을 보였다. 기체교환계수에 따라서는 R과 마찬가지로, k.crusius 일 때 가장 높았으며, k.macIntyre 일 때 가장 낮았다.

연구결과에 따르면 대청호는 적용한 신진대사 모델과 기체교환계수 함수에 따라 다소 편차는 있었으나, 대체로 NEP 값이 음의 값을 보여 종속영양시스템으로 평가되었으며, 이는 기존의 연구결과(Chung et al., 2016)와 같이 대청호가 대기 중 탄소의 배출원으로 작용하고 있는 것을 시사한다. 이러한 결과는 식물플랑크톤의 1차생산에 의한 CO₂ 동화작용보다 외부로부터 유입된 유기물의 분해에 따른 CO₂ 생성이 더 큰 것이 원인으로 보인다. 그러나 본 연구결과는 댐 앞 지점을 대상으로 하고 있어 영양물질 농도가 높고 1차생산성이 높은 전이대 또는 수변구간에서는 다른 양상을 보일 수 있으므로 정확한 평가를 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 사용한 고빈도 센서 자료는 이류와 대류 같은 난류에 의한 물리적인 혼합이 지배하는 기간에 GPP와 R이 각각 음의 값과 양의 값을 보이는 문제점을 보여주었다. 이는 대청호와 같은 개방수면에서 생물학적 요인보다 물리적 요인에 의한 산소농도 변화가 훨씬 큰 경우에 고빈도 측정센서를 이용하여 1차 생산량을 추정하는 방법의 한계점에 해당한다. 이러한 문제점들을 해결한다면 호소 생태계의 실시간 신진대사 변화를 모니터링하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 댐 앞 지점을 대상으로 진행하여, 연구결과가 대청호 전체를 대변하기에는 한계가 있다. 향후 대청호의 여러 지점을 대상으로 metabolism을 산정할 계획이다. 또한, 호소 외에 녹조가 자주 발생하는 하천에도 이 방법을 적용하여 비교·분석 할 예정이다.

Acknowledgement

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 18AWMP-B083066-05) 및 2018년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 개인기초연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(한국연구재단-2017-R1D1A3B03-201613104).

References

- Cho, W. H., Yum, K. T., Kim, J. S., Ban, Y. J., and Chung, S. W. (2012). Study on algae occurrence in Daecheong reservoir, *Environmental Impact Assessment*, 21(3), 367-380.
- Choi, D. H., Choi, K. S., Hwang, G. S., Kim, D. S., Kim, S. W., and Kang, H. (2009). Primary production by epiphytic algae attached on the reed in constructed wetlands for water treatment, Korea, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 31(10), 893-900. [Korean Literature]
- Chung, S. W., Yoo, J. S., Park, H. S., and Schladow, S. G. (2016). Estimation of CO₂ emission from a eutrophic reservoir in temperate region, *Journal of Korean Society on Water Environment Methods*, 32(5), 433-441. [Korean Literature]
- Cole, J., Nina, J., and Caraco F. (1998). Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆, *Limnology and Oceanography*, 43, 647-656. [Korean Literature]
- Cole, J. J., Michael, L. P., Carpenter, S. R., and Kitchell, J. F. (2000). Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations, *Limnology and Oceanography*, 45(8), 1718-1730.
- Crusius, J. and Wanninkhof, R. (2003). Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake, *American Society Limnology and Oceanography*, 48(3), 1010-1017.
- Dugan, H. A., Woolway, R. I., Santoso, A. B., Corman, J. R., Jaimes, A., Nodie, E. R., Patil, V. P., Zwart, J. A., Bentrup, J. A., and Hetherington, A. L. (2016). Consequences of gas flux model choice on the interpretation of metabolic balance across 15 lakes, *Inland Waters*, 6, 581-592.
- Hanson, P. (2003). *Metabolism in the surface waters of north temperature lakes*, Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, USA.
- Hanson, P., Carpenter, S. R., Kimura, N., Wu, C., Cornelius, S. P., and Kratz, T. K. (2008). Evaluation of metabolism models for free-water dissolved oxygen methods in lakes, *American Society of Limnology and Oceanography*, 6, 454-465.
- Harvey, A. C. (1990). *Forecasting, structural time series models and the Kalman filter*, Cambridge University Press.
- Heiskanen, J. J., Mammarella, I., Haapanala, S., Pumpanen, J., Vesala, T., Macintyre, S., and Ojala, A. (2014). Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake, *Tellus Series B Chemical And Physical Meteorology*, 66, 22827.
- Honti, M., Istvánovics, V., Staehr, P. A., Brighenti, L. S., Zhu, M., and Zhu, G. (2016). Robust estimation of lake metabolism by coupling high frequency dissolved oxygen and chlorophyll fluorescence data in a Bayesian framework, *International Society of Limnology*, 6, 608-621.
- Idso, S. B. (1973). On the concept of lake stability, *Limnology and Oceanography*, 18, 681-683.
- Imberger, J. and Patterson, J. C. (1990). Physical limnology, *Advances in Applied Mechanics*, 27, 303-475.
- Isles, P. D. F., Rizzo, D. M., Xu, Y., and Schroth, A. W. (2017). Modeling the drivers of interannual variability in cyanobacterial bloom severity using self-organizing maps and high-frequency data, *Inland Waters*, 7(3), 333-347.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
- Khac, V. T., Hong, Y., Plec, D., Lemaire, B. J., Dubois, P., Saad, M., and Brigitte, V. L. (2018). An automatic monitoring system for high-frequency measuring and real-time management of cyanobacterial blooms in urban water bodies, *An Open Access Journal of Processes*, 6(11), 1-15.
- Kho, E. H. (2016). *Comparison of chlorophyll fluorescence method and ¹⁴C method to estimate primary production in Korean waters*, Department of Materials Science and Engineering College of Engineering Seoul National University.
- Kim, S. J., Shin, M. S., Kim, J. K., Lee, J. Y., Jeong, K. J., Ahn, B. Y., and Kim, B. C. (2012). Oxygen fluctuation monitored with high frequency in a eutrophic urban stream and the effect of weather condition, *The Korean Society of Limnology*, 45(1), 34-41. [Korean Literature]
- Lombardo, C. P. and Gregg, M. C. (1989). Similarity scaling of viscous and thermal dissipation in a convecting surface boundary layer, *Journal of Geophysical Research*, 94, 6273-6284. [Korean Literature]
- MacIntyre, S., Jonsson, A., Jansson, M., Aberg, J., Turney, D. E., and Scott, D. M. (2010). Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake, *Geophysical Research Letters*, 37(24), 1-5.
- Read, J. S., Hamilton, D. P., Jones, I. D., Muraoka, K., Winslow, L. A., Kroiss, R., Wu, C. H., and Gaiser, E. (2011). Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data, *Environmental Modelling & Software*, 26, 1325-1339.
- Rose, K. C., Winslow, L. A., Read, J. S., Read, E. K., Solomon, C. T., Adrian, R., and Hanson, P. C. (2014). Improving the precision of lake ecosystem metabolism estimates by identifying predictors of model uncertainty, *Limnology and Oceanography Methods*, 12, 303-312.
- Soloviev, A., Donelan, M., Graber, H., Haus, B., Schlussel, P. (2007). An approach to estimation of near-surface turbulence and CO₂ transfer velocity from remote sensing data, *Journal of Marine Systems*, 66, 182-194.
- Staehr, P. A. and Kaj, S. J. (2007). Temporal dynamics and regulation of lake metabolism, *Limnology and Oceanography Methods*, 52(1), 108-120.

- Staehr, P. A., Bade, D., Van de Bogert, M. C., Koch, G. R., Williamson, C., Hanson, P., Cole, J. J., and Kratz, T. (2010). Lake metabolism and the diel oxygen technique: state of the science, *Limnology and Oceanography Methods*, Methods 8, 628-644.
- Vachon, D. and Prairie, Y. T. (2013). The ecosystem size and shape dependence of gas transfer velocity versus wind speed relationships in lakes, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70, 1757-1764.
- Winslow, L. a., Zwart, J. A., Batt, R. D., Dugan, H. A., Woolway, R. I., Corman, J. R., Hanson, P. C., and Read, J. S. (2016). Lake Metabolizer: an R package for estimating lake metabolism from free-water oxygen using diverse statistical models, *International Society of Limnology*, 6, 622-636.
- Yeongsan and Seomjin Watershed Management Committee (2006). *Investigation of mechanisms and processes of eutrophication in the Yeongsan and Seomjin river systems*, Yeongsan and Seomjin Watershed Management Committee.
- Wetzel, R. G. (2001). *Lake and River Ecosystems*, Academic Press, Limnology, New York. ISBN 9780127447605. [Korean Literature]