

# $^{13}\text{C}$ 추적자를 이용한 팔당호 수변역 부유 및 부착조류의 일차생산력과 광합성 색소 생산속도 연구

민준오 · 하선용<sup>1</sup> · 허진<sup>2</sup> · 신경훈\*

한양대학교 해양융합공학과, <sup>1</sup>한국해양과학기술원 부설 극지연구소, <sup>2</sup>세종대학교 환경에너지공간융합학과

**Primary Productivity and Photosynthetic Pigment Production Rates of Periphyton and Phytoplankton in Lake Paldang using  $^{13}\text{C}$  Tracer.** Jun oh Min (0000-0003-1550-8336), Sun Yong Ha<sup>1</sup> (0000-0003-1361-2930, Jin Hur<sup>2</sup> (0000-0001-6735-1946) and Kyung Hoon Shin\* (0000-0002-3169-4274) (Department of Marine Science and Convergence Technology, Hanyang University, 55 Hanyangdeahak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do 15588, Republic of Korea; <sup>1</sup>Korea Polar Research Institute (KOPRI), Division of Polar Ocean Science, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Republic of Korea; <sup>2</sup>Department of Environment & Energy, Sejong University, Seoul 05006, Republic of Korea)

**Abstract** The primary productivity and production rate of photosynthetic pigment of periphyton and phytoplankton were estimated using a  $^{13}\text{C}$  stable labeling technique in May 2011, in the waterfront of Lake Paldang. Primary productivity of periphyton ( $28.15 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) was higher than phytoplankton production ( $0.14 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). The net production rates of photosynthetic pigments (Chl *a* and Fucoxanthin) of periphyton were  $2.53 \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  and  $0.12 \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectively. On the other hand, the net production rate of pigments on phytoplankton (Chl *a* :  $0.023 \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Fucoxanthin:  $0.002 \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) was lower than that of periphyton. Specific production rates of individual pigments of phytoplankton to the total primary productivity indicate the predominance of diatom (Fucoxanthin) species in phytoplankton assemblage in Lake Paldang. The net individual production rate of pigments by  $^{13}\text{C}$  tracer was a useful tool to estimate the contribution of each phytoplankton class for total primary productivity, and it is possible to calculate the seasonal contribution of each phytoplankton class to the total primary productivity in the aquatic ecosystems. This study is the first report on photosynthetic pigment production rates of periphyton and phytoplankton.

**Key words:** pigment production rate, primary productivity, stable isotope, periphyton, Paldang

## 서 론

부착조류는 하천생태계에서 주요한 일차생산자로서 다양한 기질에 부착하여 높은 생물량과 생산력으로 생태계의 먹이사슬 근간을 이룬다(Stevenson, 1996). 부착조류의

생물량은 광량과 유속에 비례하고(McIntire and Phinney, 1965; McIntire, 1966), 기질의 종류에 따라 부착조류 성장 시기의 차이는 있지만 생물량 증가는 비슷한 경향을 보이며(Thomas and David, 1983), 기질 표면의 거칠기에 따른 생물량 차이는 크지 않은 것으로 알려져 있다(Goldsborough and Hickman, 1991).

생태계(ecosystems)의 생지화학적(biogeochemical) 특성에 따라 부착조류는 전체 유기물(organic matter) 생산력의

Manuscript received 12 June 2019, revised 22 July 2019,  
revision accepted 30 July 2019

\* Corresponding author: Tel: +82-31-400-5536, Fax: +82-31-416-6173,  
E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

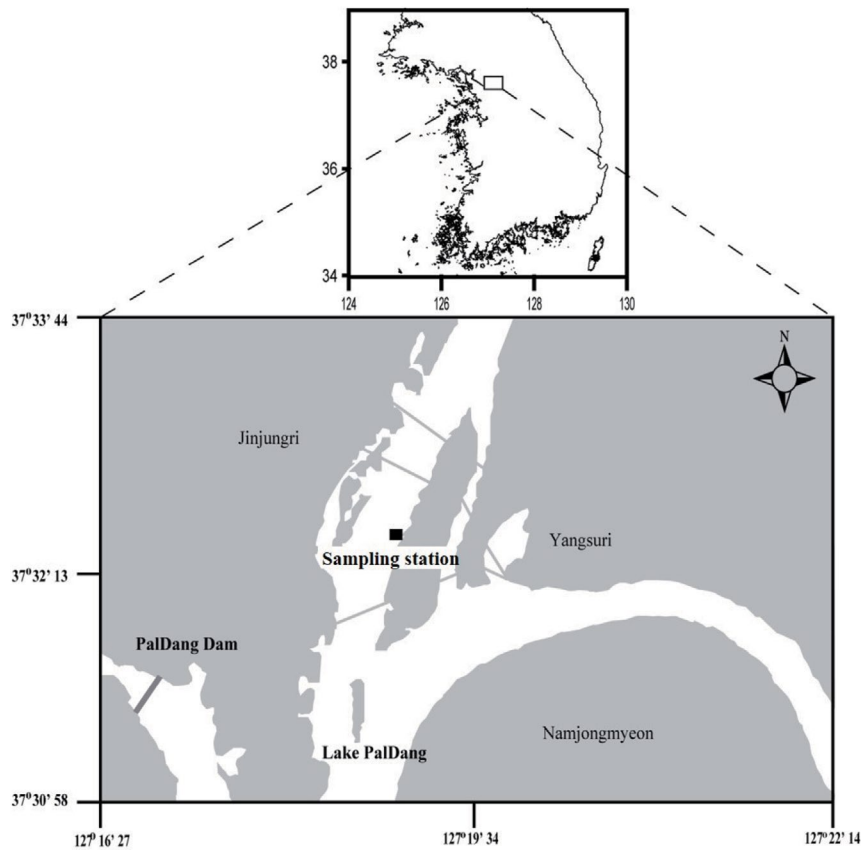


Fig. 1. A map showing a study area in the Lake Paldang.

90%가량 차지한다는 연구결과를 보고한 바 있다(Wetzel, 1990). 부착조류의 생산력은 물리, 화학적인 수괴 상태 (water conditions)와 수층 구조(aquatic system)의 형태학적인 요인에 좌우된다고 보고하고 있다(Wetzel, 1983). Engle and Melack (1993)의 보고에 의하면, 부착조류의 성장 속도는 용존영양염류(dissolved nutrients)와 주변 강으로부터 유입되는 부유 퇴적물(suspended sediment)에 의해 결정된다. 부착조류와 부유조류는 환경조건의 변화에 따른 대사활성도 차이가 크고 성장과 사멸과정이 매우 짧기 때문에 호수 내 물질 생산과 순환에 매우 중요한 역할을 한다(Adamus and Stockwell, 1983). 국내에서의 부착조류에 대한 기능적 연구로는 인공기질에 따른 사상성 부착조류의 성장 요인 (Park *et al.*, 2006), 인공습지에서 갈대부착조류의 유기물생산력(Choi *et al.*, 2009), 낙동강 수계 내 청수성 부착조류 분포특성(Jo *et al.*, 2014), 안정동위원소를 이용한 부착조류 먹이기원 추적(Gal *et al.*, 2012)과 조류(algal) 유래 유기물의 생분해능(Lee *et al.*, 2016) 등이 수행되었지만  $^{13}\text{C}$  추적자를 이용한 현장에서의 일차생산력 비교 연구는 전무한 실정이다. 또한 본 연구에서 시도된 부착조류 및 부유조류의 지표

색소(diagnostic pigment) 및 보조색소(accessory pigment)의 생산속도(carbon production rate) 결정은 국내에서 최초로 시도 되었으며 이와 같은 결과는 추후 광합성 효율 및 일차생산력에 기여하는 식물플랑크톤 군집을 파악하는 데 이용될 수 있을 것으로 보인다. 그동안 선행연구 사례를 보면 식물플랑크톤 생체량 당 탄소 흡수율(carbon uptake)을 가늠할 수 있는 지표로 assimilation number (carbon uptake rate normalized to chl. *a*)가 사용되었으며, 식물플랑크톤의 생리상태(physiological state)를 평가하는 데 활용하였다(Cloern *et al.*, 1995). 또한 방사성동위원소인  $^{14}\text{C}$ 를 표지한 식물플랑크톤 색소(carotenoid, chlorophyll pigment)를 통해 군집별 성장률 및 생리상태를 파악하기 위한 연구 결과들이 보고되었다(Redalje and Law, 1981; Goericke and Welschmeyer, 1993; Pinckney *et al.*, 1996; Morabito *et al.*, 2004).

본 연구에서는 방사붕괴를 하지 않는 탄소 안정동위원소 ( $^{13}\text{C}$ )를 이용한 현장 배양실험을 통해서 Chl *a* 및 Carotenoid 색소에 직접 표지(labeling)하여 부유조류와 부착조류의 광합성 효율 정도를 파악하였으며, 부착조류와 부유조류의 일

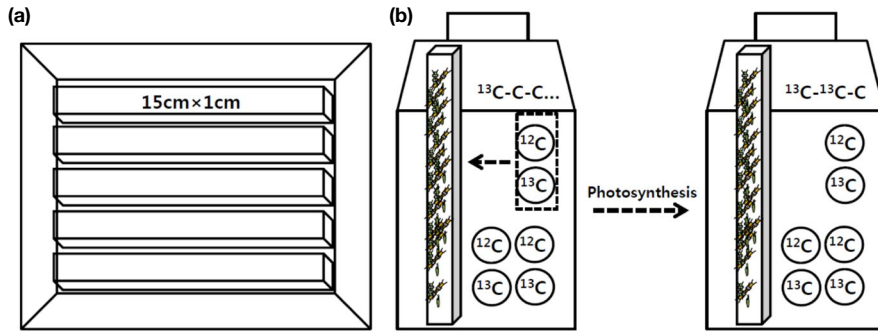


Fig. 2. Description of *in situ* culture experiment through periphyton photosynthesis using <sup>13</sup>C tracer (a) cultivation substrate size (b) <sup>13</sup>C enrichment condition.

차생산력을 비교함으로써 하천 생태계 내 공급되는 유기물의 기여도를 간접적으로 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구지역 및 조사시기

팔당호는 1973년 북한강과 남한강 그리고 경안천의 세 지류가 모이는 지점에 댐을 건설하여 이루어진 인공호로 전형적인 하천형 호수이다. 본 연구는 한강물환경연구소 앞 수변 지역의 부착생물(periphyton)이 많이 부착되어 있는 1개 정점을 선정하여 2011년 4월 27일부터 5월 24일까지 수심 0.7 m 현장에 인공기질을 설치하였다(Fig. 1). 부착조류 배양실험에 이용된 모든 기질은 부착생물의 부착이 용이하도록 사포를 이용하여 거칠기를 주었으며 부착조류의 일차생산력 및 색소조성 측정을 위한 인공기질은 15 cm × 1 cm의 HDPE 소재의 바(bar)를 사각형 tray에 줄을 이용하여 고정하였다(Fig. 2a).

### 2. 부착조류의 일차생산력 측정

부착조류의 일차생산력 산정은 1 L PC Bottle에 부착조류가 부착된 바(bar)를 넣고 현장수를 미리태운(450°C, 4시간) 45 mm GF/F 여과지로 여과한 후 NaH<sup>13</sup>CO<sub>3</sub> (98%)를 첨가하여 현장에서 4시간 동안 배양하였다(Fig. 2b). 배양 후 부착조류는 주걱(spatula)을 이용하여 인공기질로부터 분리 후 동결 건조하였다. 건조된 시료는 무게 측정(dry weight) 후 1 N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거하였으며, 시료는 주석(tin) 캡슐에 싼 후 원소-질량분석기(EuroEA-Isoprime irms, GV instruments, UK)로 분석하였다.

또한, 수층 내 존재하는 부유조류의 1차 생산력과 비교하기 위하여 동일 지점에서 표층수 300 mL를 채수 후 대형동물

Table 1. HPLC system and solvent gradient (Jeffrey *et al.*, 1997a).

|                |  |
|----------------|--|
| HPLC/Collector | Agilent 1200s  |
| Column         | ZORBAX Eclipse XDB – C18 column (250 × 4.6 mm, 5 μm) |
| Solvent A      | 80:20 Methanol : 0.5 M ammonium acetate              |
| Solvent B      | 90:10 Acetonitrile : D.I Water                       |
| Solvent C      | Ethly acetate  |

\*D.I Water: Deionized Water

플랑크톤을 제거하기 위해 100 μm 망목으로 거른 후 부착조류 시료와 동일조건 하에 현장 배양을 실시하였다. 배양이 끝난 부유조류의 시료는 25 mm GF/F 여과지로 여과한 후 진한 염산 증기로 무기탄소를 제거 후 원소-질량분석기(EuroEA-Isoprime irms, GV instruments, UK)로 분석한 후 Hama *et al.*(1983)의 계산식에 따라 일차생산 속도를 계산하였다.

$$\text{Production rate (qc (t))} = \frac{\Delta\text{POC (t)}}{t} = \frac{a_{is} - a_{ns}}{a_{ic} - a_{ns}} \times \frac{\text{POC (t)}}{t} \quad (1)$$

a<sub>is</sub> : 배양 후 입자성 물질의 <sup>13</sup>C 원자 비율(%)

a<sub>ns</sub> : 배양 전 자연상태의 <sup>13</sup>C 원자 비율(%)

a<sub>ic</sub> : 배양병 내 용존무기탄소의 <sup>13</sup>C 원자 비율(%)

t : 배양시간

POC (t) : 배양시간 동안 입자성유기탄소 농도

ΔPOC (t) : 배양시간 동안 입자성유기탄소 농도 증가량

단위 Chl *a*당 일차생산력(Chl *a* specific production rate: Chl *a* SPR)은 일차생산력을 단위면적당으로 계산된 Chl *a*의 함량을 나누어 계산하였다.

### 3. 부유조류 및 부착조류의 색소생산력 측정

부착조류와 부유조류의 색소분석을 위한 시료는 고성능

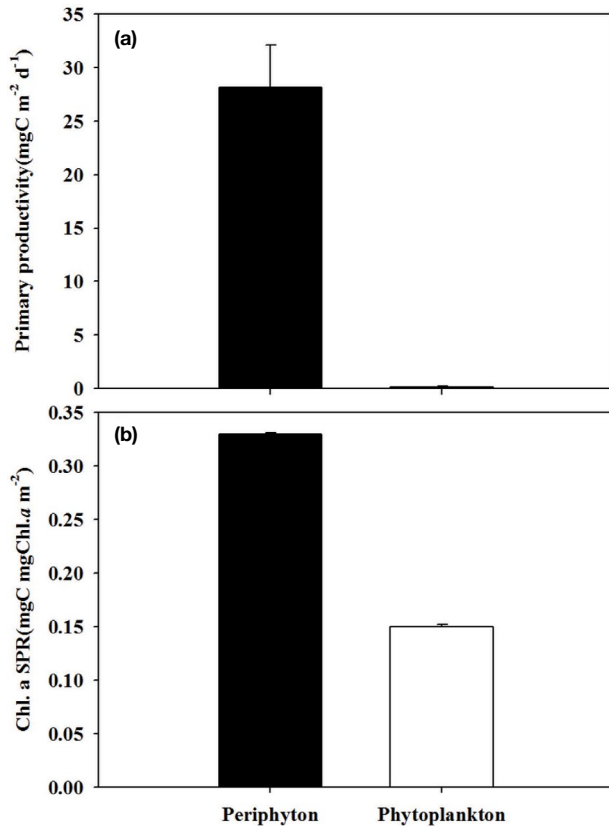


Fig. 3. Primary productivity and Chl a specific production rate (Chl a SPR) of periphyton and phytoplankton in the Lake Paldang.

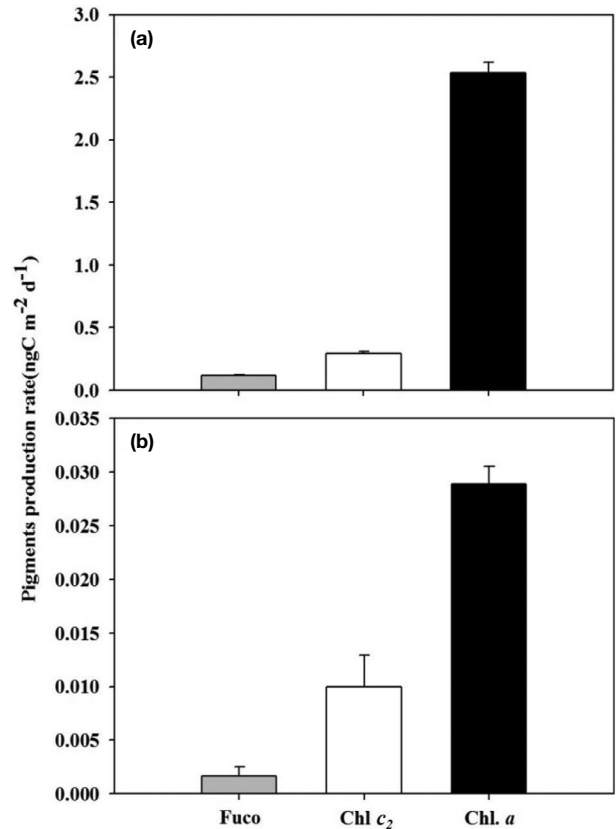


Fig. 4. Pigment production rate of (a) periphyton and (b) phytoplankton in the Lake Paldang.

액체 크로마토그래피 (High Performance Liquid Chromatography; HPLC (Agilent, Technologies 1200 series, USA))를 이용하여 분석하였다 (Table 1). 현장 배양된 부착조류의 색소는 플라스틱 바(bar)에 부착되어 있는 조류를 주걱 (spatula)을 이용하여 분리 후 동결 건조하였다. 건조된 시료는 무게 측정 (dry weight) 후 테프론 Bottle에 넣고 100% 아세톤 5 mL 첨가하여 Ultrasonic sonicator (30 sec, 50 W)를 이용하여 분쇄 후 냉 암소에서 12시간 추출하였다. 분쇄 시 손실을 보정하기 위하여 Cantaxanthin (Internal Standard) 100 µL을 첨가하였다. 현장 배양된 부유조류의 색소 또한 채수 후 450°C에서 4시간 태운 47 mm GF/F 여과지로 여과한 후 부착조류 분석방법과 동일하게 실시하였다. 아세톤을 이용하여 추출된 시료는 Syringe filter (PTFE, 0.20 µm Hydrophobic)를 이용하여 여과 후 1 mL을 취하여 Water packing (300 µL 3차 증류수 혼합)하여 분석하였다. HPLC System과 분석 조건은 Table 1에 나타내었으며, 각 지표색소의 피크 동정은 Standard pigment와 Retention time (R.T)을 비교하여 결정하였으며, 분석색소의 약어는 SCOR 규정 (Chlorophyll a : Chl a, Chlorophyll c<sub>2</sub> : Chl c<sub>2</sub>,

Fucoxanthin: Fuco)에 따라 표기하였다.

Standard pigment는 Chl a (Sigma-Aldrich Co.), Chl c<sub>2</sub>, Fuco, (DHI Inc., Denmark)를 이용하였다. 표준색소의 정량식은 흡광계수 (Jeffrey *et al.*, 1997b)를 이용하여 Park *et al.* (1997) 식에 의해 계산하였다.

식물플랑크톤 색소의 생산력 측정을 위한 시료는 각 색소를 R.T (retention time)와 최대 흡광도에 따라 fraction collector (Agilent, G1364C/FC, USA)를 이용하여 분취하였고, 다시 2 mL micro tube에 옮긴 후 미리 태운 GF/F 필터 조각을 tube에 넣은 후 centrifugal evaporator (EYELA, CVE-200D)를 통하여 추출용매 (solvent)를 완전 제거 후 색소를 흡착시켰다. 이후 주석 (tin) 캡슐에 시료를 싣 후 원소-질량분석기를 이용하여 각 compounds 내 <sup>13</sup>C 값을 측정하였다. 이후 Hama *et al.* (1983)의 식을 응용한 Ha *et al.* (2012, 2014)의 계산식을 이용하여 각 compound의 생산속도 (SPR)와 Chl a의 turnover rate를 구하였다.

$$\Delta SPR(t) = SPR \times \frac{a_{is} - a_{ns}}{a_{ic} - a_{ns}} \quad (2)$$

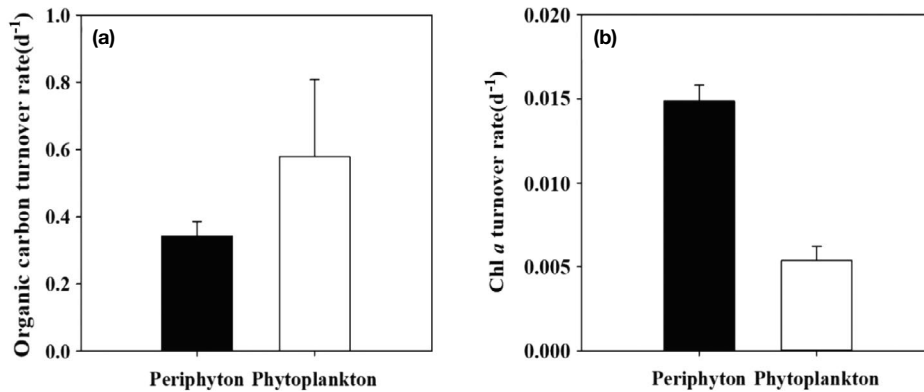


Fig. 5. Organic carbon turnover rate (a) and Chl *a* turnover rate (b) in the Lake Paldang.

SPR(*t*): 배양시간 동안 광합성으로 생성된 지표색소의 탄소량

$a_{is}$ : 배양된 각 지표색소의  $^{13}C$  원자 비율(%)

$a_{ns}$ : 배양전 각 지표색소의  $^{13}C$  원자 비율(%)

$a_{ic}$ : 배양병 내 용존무기탄소의  $^{13}C$  원자 비율(%)

SPR: 배양 종료시 각 특정 지표색소의 탄소 농도

$$\text{Turnover rate (t)} = \frac{a_{is} - a_{ns}}{a_{ic} - a_{ns}} \times \frac{1}{t} \quad (3)$$

또한 본 연구결과의 평균값(mean values) 및 표준편차(standard deviations) 범위는 3개의 replicates를 계산해서 얻어진 결과이다.

## 연구 결과

### 1. 일차생산력

부착조류의 단위면적당 일차생산력은  $28.15 (\pm 3.93) \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 값을 보였으며, 같은 정점에서 실시된 수층내 부유조류의 일차생산력은  $0.14 (\pm 0.05) \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 값을 보였다(Fig. 3a).

단위 Chl *a* 당 일차생산력은 부착조류의 경우  $0.35 (\pm 0.07) \text{ mgC mg Chl } a^{-1} \text{ d}^{-1}$ 로 부유조류의 단위 Chl *a* 당 일차생산력  $0.17 (\pm 0.01) \text{ mgC mg Chl } a^{-1} \text{ d}^{-1}$ 보다 약 2배 높은 결과를 보이고 있다(Fig. 3b). 부착조류의 생산에 의한 유기탄소 순환속도(turnover rate)는  $0.34 (\pm 0.04) \text{ day}^{-1}$ 로 약 3일의 순환 속도를 보이고, 부유조류의 탄소고정에 의한 입자성유기탄소 순환 속도는  $0.58 (\pm 0.23) \text{ day}^{-1}$ 로 약 2일의 순환 속도를 보였다(Fig. 5a).

### 2. 광합성 색소 생산력

본 연구에서 처음 시도된 부착조류와 부유조류의 광합성 색소 생산력은 일차생산력과 유사하게 부착조류의 Chl *a* 생산력이 높은 값을 보이고 있으며(Fig. 4a), 단위 Chl *a*의 농도 또한 부착조류(average =  $86.01 \pm 2.14 \mu\text{g L}^{-1}$ )가 부유조류(average =  $1.87 \pm 0.07 \mu\text{g L}^{-1}$ )에 비해 매우 높은 결과를 보였다. 부착조류의 Chl *a*의 생산력은  $2.53 (\pm 0.09) \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 값으로 부유조류의 Chl *a*의 생산력  $0.023 (\pm 0.58) \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 보다 높은 값을 보이고 있다.

또한 부착조류의 경우, Fucoxanthin (Fuco)의 생산력은  $0.12 (\pm 0.002) \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이고, Chl *c*<sub>2</sub>의 경우  $0.23 (\pm 0.01) \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 을 각각 보이고 있다(Fig. 4a). 이러한 경향은 부유조류에서도 유사하게 나타나고 있으며, 부유조류의 Fuco의 생산력은  $0.002 (\pm 0.0008) \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이고, Chl *c*<sub>2</sub>는  $0.01 (\pm 0.002) \text{ ngC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  값을 보이고 있다(Fig. 4b). HPLC를 이용하여 분리 정제된 순수 Chl *a* 및 보조색소인 Fuco와 Chl *c*<sub>2</sub>의 생산력은 부착조류와 부유조류의 일차생산력과 유사한 경향을 보이고 있다. 부착조류와 부유조류의 Chl *a*의 turnover rate는 부착조류가  $0.015 \text{ d}^{-1}$ 의 속도로 부유조류( $0.005 \text{ d}^{-1}$ )보다 빠른 것으로 나타났다(Fig. 5b).

## 고찰

### 1. 부착조류와 부유조류의 일차생산력

본 연구에서는 국내에서 처음으로  $^{13}C$  추적자를 이용하여 현장에서 부착조류의 일차생산력 및 부유조류의 일차생산력을 측정하여 비교 고찰하였고, 미세조류의 색소(Chl *a*, Fuco, Chl *c*<sub>2</sub>)의 단위 시간당 생산력을 탄소 안정동위원소 추적자

**Table 2.** Comparison of primary productivity of periphyton and phytoplankton in each area.

| Region                        | Primary productivity (mgC m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) | References                  | Remarks                       |
|-------------------------------|---|-----------------------------|-------------------------------|
| Lawrence, US                  |   |                             |                               |
| Phytoplankton                 | 118.9   | Wetzel <i>et al.</i> , 1972 | <sup>14</sup> C methods       |
| Periphyton                    | 2001  |                             |                               |
| Neusiedlersee, Austria        |   |                             |                               |
| Phytoplankton (Littoral)      | 20  | Khondker and Dokulil, 1988  | Various methods               |
| Periphyton                    | 11.6  |                             |                               |
| Eagle, US                     |   |                             |                               |
| Phytoplankton                 | 356   | Huntsinger and Maslin, 1976 | Oxygen and biomass techniques |
| Periphyton                    | 1153  |                             |                               |
| Paldang, Korea                |   |                             |                               |
| Phytoplankton (Riparian area) | 0.14  | This study, 2011            | <sup>13</sup> C method        |
| Periphyton                    | 28.1  |                             |                               |
| Phytoplankton (Dam station)   | 1,397   | Unpublished data, 2010      |                               |

를 이용하여 비교하였다. 팔당호 수변 지역의 부착조류의 생산력은 같은 수역의 부유조류에 비해 상당히 높은 탄소고정속도(carbon uptake rate)를 보이고 있다(Table 2). 이러한 결과를 보이는 것은 조류의 생체량 차이에 의한 것으로 볼 수 있으며 또한 수변 지역에서의 광 제한성과 수위의 변동, 퇴적물과 수괴 간의 상호작용(interaction), 그리고 무기염류와 유기염류 간 상호교환작용(exchange)과 같은 환경적인 요인도 배제할 수 없을 것으로 판단된다(Wetzel, 2001).

호수 수변 수역의 미세조류(부유조류 및 부착조류)들은 호수 중앙 수역의 부유조류의 생산력에 비해 상당히 낮은 생산력을 보인다. 선행 연구 결과와 비교하여 보면 2010년 5월 팔당댐 앞 정점에서 부유조류의 일차생산력은 1,397 mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 수변 지역의 부유조류에 비해 매우 높은 생산력을 보였다(Table 2). 이는 수변 지역에서의 부유조류는 환경적 요인 및 부착조류와의 경쟁에 의해 매우 낮은 생산력을 보이는 것으로 볼 수 있다. 기존 선행 연구 결과에서도 호수 수변 수역에서의 부유조류와 부착조류 간 생산력 차이는 부착조류의 생산력이 부유조류에 비해 50배 이상 높은 지역이 있을 뿐만 아니라 오히려 부유조류의 생산력에 비해 낮은 경우도 존재하고 있다(Table 2). Lawrence 호의 경우, 부착조류의 유기탄소가 호수 내로 유입되는 주된 유기물로 알려져 있으며, 유역면적이 작음에도 불구하고 호수의 생산성에 약 4분의 3을 차지한다고 보고하고 있다(Wetzel *et al.*, 1972). 반대로 Neusiedlersee 호와 같은 경우, 부착조류의 유기물 생산이 호수 내 생산성에 적은 기여도를 보이기도 한다고 알려져 있다(Khondker and Dokulil, 1988). 따라서 호수 수변 지역의 부착조류는 서식 환경조건 및 호수의 형태학적 특성에 따라 일

차생산력에 차이가 있음을 알 수 있다(Wetzel, 2001).

## 2. 부착조류와 부유조류의 지표색소 생산속도

식물플랑크톤은 다양한 지표색소를 가지고 있으며 색소 분석을 통해 강(class) 수준에서의 군집 조성을 알 수 있다(Jeffrey *et al.*, 1997a, b; Schluter *et al.*, 2000; Gibb *et al.*, 2001).

기존 국내 연구에서는 <sup>13</sup>C 추적자를 이용하여 일차생산력(총 탄소고정속도)을 산정 하였으나(Lee *et al.* 2006, 2011; Min *et al.* 2011, 2012), 본 연구에서는 각 군집별 생산력 및 생리상태를 파악하기 위해 부착조류 및 부유조류의 지표색소에 <sup>13</sup>C 추적자를 이용하여 분자화합물 수준의 생산력을 측정하여 미세조류의 군집별 생산력의 차이를 확인할 수 있는 결과를 제시하였다(Fig. 4).

현장 배양실험을 통해 얻어진 부착조류의 규조류 지표색소인 Fuco의 생산속도는 Chl *a* 생산속도에 4.6 (±0.3)%를 나타내었으며, 부유조류의 Fuco의 생산은 5.8 (±1.2)%의 상대적인 비율을 보였다. 조류간 Chl *a*의 turnover rate 결과에서 부착조류가 부유조류 보다 3배 이상 빠른 결과를 보여 생체량 차이 외에도 생리활성도 차이가 일차생산력에 영향을 주었을 것으로 판단된다(Fig. 5b). 각 조류의 일차생산력과 지표색소 간 생성속도가 차이를 보이는 것은 식물플랑크톤 군집 조성에 따라 지표 색소의 상대적인 기여도가 다를 수 있고 여러 환경인자(영양염과 자외선)에 의해 생성유기물이 편향되는 경향을 보이는 것에 의해 설명될 수 있다.

본 연구에서는 미세조류 중 규조류의 대표 색소 Fuco와 Chl *c*<sub>2</sub>의 생산속도만 측정함으로써 종 간의 차이는 확인하지

못하였으나, 규조류 생산속도나 생리활성도를 부유조류와 부착조류의 일차생산력(총 탄소고정속도) 결과를 비교 제시하고 있으며, 향후 다양한 분류지표 보조색소(taxominic associate pigment) 분석을 통하여 조류 분류 강(class)별 탄소고정속도 및 일차생산력을 계산하는 것이 가능할 수 있을 것으로 예상된다.

## 적 요

팔당호 수변지역 내 부유조류와 부착조류의 일차생산력은 부착조류의 일차생산력이 더 높게 나타났다. 따라서 수변 지역이나 하천에서는 부착조류에 의한 유기물 생성이 주요한 수생태계 에너지 공급원이 될 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 국내에서 처음으로 지표색소의 생산속도 분석결과가 제시되었는데 향후 일차생산력을 측정하는 데 있어서 조류의 총 일차생산력으로 국한된 측정 방법을 좀 더 세분화하여 특정 조류의 기여도 및 개별 생산력을 판단하는 데 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

**저자기여도** 연구구상 및 설계: 허진 & 신경훈 & 민준오 & 하선용, 자료수집 및 분석: 민준오 & 하선용, 해석: 민준오 & 하선용 & 신경훈, 초고작성: 민준오, 원고교정: 민준오 & 하선용 & 신경훈, 원고편집: 민준오, 최종원고 검토: 신경훈. 본 연구에 참여한 저자는 논문 결과 및 출판될 최종본을 검토 후 동의하였음.

**이해관계** 본 연구에 참여한 모든 저자들은 학술출판에 있어서 어떠한 이해충돌의 여지가 없음.

**연구비** 본 연구는 한강수계 난분해성 물질 증감요인 규명 및 관리방안 연구비로 진행됨(2008년 4월~2011년 12월 31일, 한강수계관리위원회, 역무대행기관: 국립환경과학원 한강물환경연구소). 이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1A4A1015393).

## REFERENCES

- Adamus, P.R. and L.T. Stockwell. 1983. A method for wetland functional assesment : VII. 1. Critical review and evaluation concepts, US Dept. Transportaion, Fedral Highway Administration, Report FHWA. p. 82-83.
- Choi, D.H., K.S. Choi, G.S. Hwang, D.S. Kim, S.W. Kim and H. Kang. 2009. Primary Production by Epiphytic Algae Attached on the Reed in Constructed Wetlands for Water Treatment. *Environmental Engineering Research* **31**(10): 839-900.
- Cloern, J.E., C. Grenz and L. Videgar-Lucas. 1995. An empirical model of the phytoplankton chlorophyll: carbon ratio the conversion factor between productivity and growth rate. *Limnology and Oceanography* **40**(7): 1313-1321.
- Engle, D.L. and J.M. Melack. 1993. Consequences of riverine flooding for seston and the periphyton of floating meadows in an Amazon floodplain lake. *Limnology and Oceanography* **38**(7): 1500-1520.
- Gal, J.G., M.S. Kim, Y.J. Lee, J.W. Seo and K.H. Shin. 2012. Food web of Aquatic Ecosystem within the Tamjin River through the Determination of Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratios. *Korean Journal of Limnology* **45**(2): 242-251.
- Gibb, S.W., D.G. Cummings, X. Irigoien, R.G. Barlow, R. Fauzi and C. Mantoura. 2001. Phytoplankton pigment chemotaxonomy of northeastern Atlantic. *Deep Sea Research II* **48**: 795-823.
- Goerick, R. and N.A. Welschmeyer. 1993. The carotenoid-labeling method: measuring specific rates of carotenoid synthesis in natural phytoplankton communities. *Marine Ecology Progress Series* **98**: 157-171.
- Goes, J.I., N. Handa, S. Taguchi and T. Hama. 1994. Effect of UV-B radiation on the fatty acid composition of the marine phytoplankton *Tetraselmis* sp: Relationship to cellular pigments. *Marine Ecology Progress Series* **114**: 259-274.
- Goldsborough, L.G. and M. Hickman. 1991. A comparison of periphytic algae biomass and community structure on *scirpus validus* and on a morphologically similar artificial substratum. *Journal of Phycology* **27**: 196-206.
- Ha, S.Y., Y. Kim, M. Park, S. Kang, H. Kim and K. Shin. 2012. Production of mycosporine-like amino acids of in situ phytoplankton community in Kongsfjorden, Svalbard, Arctic. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* **114**: 1-14.
- Ha, S.Y., H.S. La, J.O. Min, K.H. Chung, S.H. Kang and K.H. Shin. 2014. Photoprotective function of mycosporine-like amino acids in a bipolar diatom (*Porosira glacialis*): evidence from ultraviolet radiation and stable isotope probing. *Diatom Research* **29**(4): 399-409.
- Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura. 1983. Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable <sup>13</sup>C isotope. *Marine Biology* **73**: 31-36.
- Huntsinger, K.R.G and P.E. Maslin. 1976. Contribution of phytoplankton, periphyton, and macrophytes to primary production in Eagle Lake, California. *California Department of Fish and Wildlife* **62**: 187-194.
- Jeffrey, S.W. and M. Veski. 1997a. Introduction to marine phytoplankton and their pigment signatures, p. 37-84. In: *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines*

- to Modern Methods (Jeffrey, S.W. *et al.* eds.). UNESCO, Paris.
- Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura and S.W. Wright. 1997b. Phytoplankton Pigments in Oceanography (Jeffrey, S.W. *et al.*, eds.). UNESCO Publishing, Paris.
- Jo, M.H., M.S. Byun, J.S. Sim and S.H. Jang. 2014 Geographic Distribution of Periphyton Diatom Species: A Case Study of *Achnanthes convergens* in Nakdong River Basin. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **17**(3): 175-194.
- Khondker, M. and M. Dokulil. 1988. Seasonality, biomass and primary productivity of epipelagic algae in a shallow lake (Neusiedlersee, Austria). *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* **16**(5): 499-515.
- Lee, Y.J., M.S. Kim, E.J. Won and K.H. Shin. 2006. An Application of  $^{13}\text{C}$  Tracer for the Determination of Size Fractionated Primary Productivity in Upper Stream of Lake Shihwa. *Korean Journal of Limnology* **39**(1): 93-99.
- Lee, Y.J., J.O. Min, Y.S. Shin, S.H. Kim and K.H. Shin. 2011. Temporal and Spatial Variations of Primary Productivity in Estuary of Youngsan River and Mokpo Coastal Areas. *Korean Journal of Limnology* **44**(4): 327-336.
- Lee, Y.J., B.M. Lee, J. Hur, J.O. Min, S.Y. Ha, K.T. La, K.T. Kim and K.H. Shin. 2016. Biodegradability of algal-derived organic matter in a large artificial lake by using stable isotope tracers. *Environmental Science and Pollution Research* **23**(9): 8358-8366.
- McIntire, C.D. and H.K. Phinney. 1965. Laboratory studies of periphyton production and community metabolism in lotic environments. *Ecological Monographs* **35**: 237-58.
- McIntire, C.D. 1966. Some effects of current velocity on periphyton communities in laboratory streams. *Hydrobiologia* **27**: 559-70.
- Min, J.O., S.Y. Ha, B.H. Choi, M.H. Chung, W.D. Yoon, J.S. Lee and K.H. Shin. 2011. Primary Productivity and Pigments Variation of Phytoplankton in the Seomjin River Estuary during Rainy Season in Summer. *Korean Journal of Limnology* **44**(3): 303-313.
- Min, J.O., S.Y. Ha, B.H. Choi, M.H. Chung, S.H. Youn, W.D. Yoon, J.S. Lee and K.H. Shin. 2012. Seasonal Variation of Primary Productivity and Pigment of Phytoplankton Community Structure in the Seomjin Estuary. *Korean Journal of Limnology* **45**(2): 139-149.
- Morabito, G., W. Hamza and D. Ruggju. 2004. Carbon assimilation and phytoplankton growth rates across the trophic spectrum: an application of the chlorophyll labelling technique. *Journal of limnology* **63**(1): 33-43.
- Park, M.O. and J.S. Park. 1997. HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* **32**: 46-55.
- Park, K.S., S.J. Hwang, H.S. Kim, D.S. Kong and J.K. Shin. 2006. Factors to Affect the Growth of Filamentous Periphytic Algae in the Artificial Channels using Treated Wastewater. *Korea Journal of Limnology* **39**(1): 100-109.
- Pinckney, J.L., D.F. Millie, K.E. Howe, H.W. Paerl and J.P. Hurley. 1996. Flow scintillation counting of  $^{14}\text{C}$ -labeled microalgal photosynthetic pigments. *Journal of Plankton Research* **18**(10): 1867-1880.
- Redalje, D.G. and E.A. Laws. 1981. A new method for estimating phytoplankton growth rates and carbon biomass. *Marine Biology* **62**: 73-79.
- Schluter, L., F. Mohlenberg, H. Havskum and S. Larsen. 2000. The use of phytoplankton pigments for identifying and quantifying phytoplankton groups in coastal areas: testing the influence of light and nutrients on pigment/ chlorophyll a ratios. *Marine Ecology Progress Series* **192**: 49-63.
- Shin, K.H., T. Hama, N. Yoshie, S. Noriki and S. Tsunogai. 2000. Dynamics of fatty acids in newly biosynthesized phytoplankton cells and seston during a spring bloom off the west coast of Hokkaido Island, Japan. *Marine Chemistry* **70**: 243-256.
- Shin, K.H., T. Hama and N. Handa. 2003. Effect of nutrient conditions on the composition of photosynthetic products in the East China Sea and surrounding waters. *Deep-Sea Research II* **50**: 389-401.
- Stevenson, R.J. 1996. An introduction to algal ecology in freshwater benthic habitats, p. 3-30. *In: Algal Ecology : Freshwater Benthic Ecosystems* (Stevenson R.J., M.L. Bothwell and R.L. Lowe, eds.). Academic Press, San Diego.
- Thomas, D.F. and G.N. David. 1983. Characteristics of epiphyte communities on natural and artificial submersed lotic plants: Substrate effects. *Arch Hydrobiol* **3**: 293-301.
- Wetzel, R.G. 1972. The role of carbon in hard water marl lakes, 1: 84-97. *In: Nutrient and Eutrophication: The limiting Nutrient Controversy* (Linkens, G.E. ed.). Special Symposium, American Society of Limnology and Oceanography.
- Wetzel, R.G. 1983. Recommendations for future research on periphyton, p. 339-346. *In: Periphyton of Freshwater Ecosystems* (Wetzel, R.G. ed.). Dr W. Junk Publishers, The Hague.
- Wetzel, R.G. 1990. Land-water interfaces: metabolic and limnological regulators. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **24**: 6-24.
- Wetzel, R.G. 2001. Land-water interfaces: Attached microorganisms, Littoral algae, and Zooplankton, p. 578-621. *In: Limnology: Lake and River Ecosystems*. Academic press.