

## 안정동위원소 추적자 실험을 통한 이매패류의 남조류 (*Microcystis aeruginosa*) 저감효과 평가

서연지 · 김민섭<sup>1,\*</sup>

한국해양과학기술원 대양자원연구센터, <sup>1</sup>국립환경과학원 환경측정분석센터

**Control of Cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) Blooms by Filter-feeder Bivalves (*Unio douglasiae*, *Anodonata woodiana*) : an In Situ Mesocosm Experiment using Stable Isotope Tracers.** Seo, Yeon-Ji (0000-0002-1791-3186) and Min-Seob Kim<sup>1,\*</sup> (0000-0002-0365-7468) (Global Ocean Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Haean-ro 385, Yeong Do, Busan, Republic of Korea; <sup>1</sup>Environmental Research Complex, Hwangyong-ro 42, Seo-gu, Incheon 22689, Republic of Korea)

**Abstract** Stable isotope tracers were first applied to evaluate the *Microcystis* cell assimilation efficiency of bivalves, since the past identification method has been limited to tracking the changes of each chl-*a*, clarity, and nutrient. The filter-feeders (*Sinanodonta woodiana* and *Unio douglasiae*) were assessed under the condition of cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) blooms through an in mesocosm experiment using <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N dual isotope tracers. Chl-*a* concentration in the treatment mesocosm was dramatically decreased after the beginning of the second day, ranging from 116 to 66 µg L<sup>-1</sup>. In addition, the incorporated <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N atom % in the *S. woodiana* bivalve showed higher values than *U. douglasiae* bivalves. The results demonstrate that *U. douglasiae* has less capacity to assimilate toxic cyanobacteria derived from diet. Our results therefore also indicate that *S. woodiana* can eliminate the toxin more rapidly than *U. douglasiae*, having a larger detoxification capacity.

**Key words:** *Microcystis aeruginosa*, *Unio douglasiae*, *Sinanodonta woodiana*, stable isotope tracer, bio-control

## 서 론

강, 바다, 호수 등의 수중생태계에 산업폐수, 생활하수 등의 점오염원과 농지 및 산림으로부터 유출되는 불특정 비점오염원의 유입에 따라 영양물질이 축적되면서 조류의 대발생이 나타난다(Kononen *et al.*, 1996; Beklioglu, 1999). 특히 여름철 긴 체류시간, 높은 수온과 광량으로 인

해 발생하는 남조류 (genera *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* and *Oscillatoria*) 대발생은 전세계적인 문제점으로 대두되고 있으며, 부영양화 현상이 지속되면서 전체 식물플랑크톤 조성의 90% 이상을 차지할 정도로 크게 변성한다(Sarnelle, 1993). 수생태계에서 남조류 (e.g. cyanobacteria)는 1차 생산자로서 먹이원으로 흡수되어 먹이사슬을 거쳐 상위 섭식단계까지 에너지를 공급하지만, 이차생성물질로서 독성이 함유된 cyanotoxins, microcystins (MCs) 등을 체내에 합성하기 때문에 섭식자의 주요 내장 기관에 악영향을 미쳐 높은 치사율이 발생한다(Dittmann *et al.*, 2006; Piola *et al.*, 2008). 이러한 변화는 생태계 건강

Manuscript received 19 September 2018, revised 30 September 2018, revision accepted 30 September 2018  
\* Corresponding author: Tel: +82-32-560-8384, Fax: +82-32-560-7905, E-mail: candyfrog77@gmail.com

을 악화시키며, 동물플랑크톤(Koski *et al.*, 1999), 새우류(Engstrom *et al.*, 2001), 이매패류(Bontes *et al.*, 2007), 어류(Tester *et al.*, 2000)를 거쳐 결국에는 최상위 섭식자인 인간에게까지 영향을 미치고 있다(Magalhaes *et al.*, 2001).

지금까지 호소수의 녹조 및 남조류 제어를 포함하는 수질관리 기술로서 여러가지 방법들이 소개되었다. 물리적인 방법으로는 준설, 폭기, 차광망, 수초 설치 및 부착조류 제거 등이 있으며, 화학적인 방법으로는 응집부상분리, 제초제, 황산동 등이 개발되었다(Jeffries and Mills, 1990). 이러한 방법들은 직접적이고 효과가 뚜렷하지만, 비용이 많이 들고 일시적이며 다른 생물에 대한 독성 또는 화학물질에 의한 2차적인 환경오염과 같은 부정적 요소를 가지고 있다(Cooke and Welch, 1993). 이러한 관점에서 최근 세계적으로 부각되고 있는 생태친화적 방법으로 생물학적 수질개선 기법(Biomanipulation)이 각광받고 있다(Shapiro, 1978; Carpenter, 1985). Biomanipulation은 생태계내 먹이사슬을 이용한 생물조절의 한 방법으로서, Top-down 효과를 이용하여 어류(zooplanktivore)의 개체수를 조절함으로써 동물플랑크톤으로 하여금 조류를 제어하거나 또는 직접 조류를 섭식하는 어류(planktonivore) 혹은 패류를 도입하는 방법(Carpenter, 1985; Hwang *et al.*, 2001), 수생식물(macrophytes)을 이용하여 수층의 영양염을 감소시킴으로써 녹조발생을 제어하는 Bottom-up 방법도 이용되었다(Strand and Weisner, 2001).

최근 들어 이매패류가 가진 여과능력을 조류제어와 관련된 수질개선에 응용하고자 하는 노력이 유럽을 중심으로 연구되어 왔으며, 다양한 이매패류의 응용은 상당한 잠재성을 가지고 있다(Gosling, 2003). 유럽과 북미에서는 담수산 이매패류인 얼룩말조개(zebra mussel)의 생리생태학적 연구가 상당히 진행되었으며(Nalepa and Schloesser, 1993), 그 결과를 이용한 수질개선의 응용적 측면도 시도되었다(Neumann and Jenner, 1992). 국내에서는 재첩과 말조개 등에 대한 여과율 연구와 이를 수질개선에 활용하는 연구들이 실내에서 수행된 바 있다(Hwang *et al.*, 2004). 그러나 국내에 서식하는 담수산 이매패류에 대한 기초 생태학적 연구는 어느 정도 결과를 축적하고 있으나 현장 적용의 수준에는 이르지 못하고 있다.

본 연구는 남조류(*Microcystis aeruginosa*) 발생이 빈번한 신구저수지에서 이매패류(*Sinanodonta woodiana* and *Unio douglasiae*)를 이용한 조류 제어를 평가하고자  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  안정동위원소 추적자를 이용하여 메소코즘 실험을 실시하였다. 기존의 연구가 생물학적 수질개선 기법을 평가하기 위해 클로로필 및 영양염류 농도 분석, 투명도 측정 등을 이용하였지만(Benndorf *et al.*, 1990; Jeppesen *et al.*,

1997; An *et al.*, 2010) 안정동위원소 추적자 실험은 라벨링된 무기태( $\text{H}^{13}\text{CO}_3^-$ ,  $^{15}\text{NH}_4^+$ ) 이온을 사용하여 생태계내 에너지 흐름을 추적함으로써(Peterson *et al.*, 1987) 생물 조절을 평가할 수 있는 새로운 기법으로서 사용되어질 수 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지점

신구저수지는 충청남도 서천군(36°10'N, 126°37'E)에 위치한 소규모 농업용 저수지로서, 최대 수심은 7 m, 평균 수심은 3.5 m, 면적은 0.1 km<sup>2</sup>이며 유효 저수량은 3.88\*10<sup>5</sup> ton이다. 저수지의 경계에는 농경지가 존재하며, 2개의 유입구가 존재하고 있어 저수지의 영양염 농도 증가에 큰 영향을 미치고 있다. 이로 인해, 여름철 부영양화 현상이 지속적으로 발생하며 주로 군집체를 형성하는 남조류(*M. aeruginosa*) 등의 발생이 빈번하게 일어난다. 평균 엽록소 *a*의 농도는 25 µg L<sup>-1</sup>이다.

### 2. 안정동위원소 추적자 ( $^{13}\text{C}$ , $^{15}\text{N}$ )을 이용한 메소코즘 현장실험

이매패류의 남조류(*M. aeruginosa*) 저감효과 연구를 위한 메소코즘 현장실험은 전체 식물플랑크톤 중 조성의 90% 이상을 남조류가 차지하는 시기에 신구저수지에서 수행하였다. 테플론 재질의 격자형 메소코즘(1.2\*1.2\*2.0 m, 3,300 L)을 실험군과 대조군 각 2개씩 설치하였으며, 장기간의 안정화 시간을 거쳐 현장의 자연 상태를 유지하도록 하였다(Fig. 1). 메소코즘에 첨가할 추적자( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ )는 NaHCO<sub>3</sub> (Isotech;  $^{13}\text{C} > 99\%$ )와 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Isotech;  $^{15}\text{N} > 99\%$ )를 사용하였으며, 메소코즘 수층의 용존성 탄소(DIC, Dissolved inorganic carbon) 및 용존성 질소(DIN, Dissolved inorganic nitrogen)의  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  농도가 15%까지 증가되도록 제조하였다. 추적자를 메소코즘에 첨가한 후 식물플랑크톤이 충분히 섭취하도록 수일간의 안정화 시간을 거친 후 이매패류를 메소코즘에 첨가하여 3주 동안 총 10회에 걸쳐 대상 생물을 채집하였다(1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 22일).

- (1) 대조군(C - mostly *M. aeruginosa*)
- (2) 실험군(TB - Bivalve addition: *S. woodiana*, *U. douglasiae*)

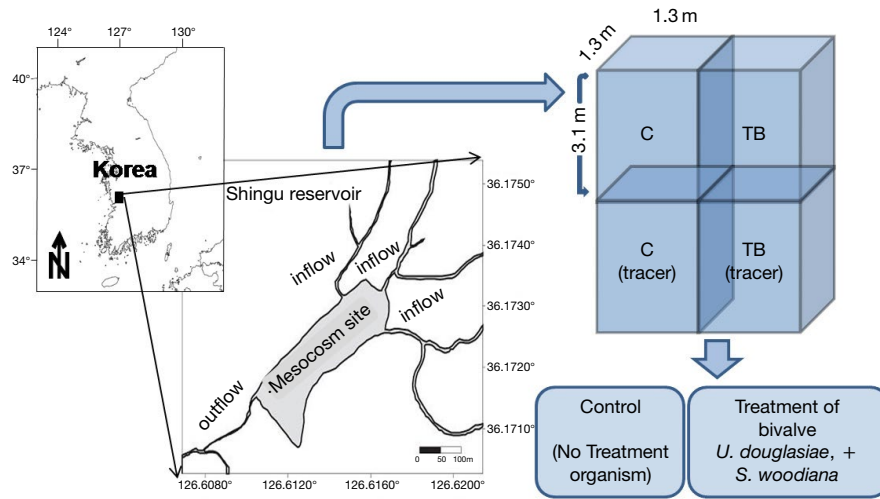


Fig. 1. A map showing the experimental mesocosm site in Shingu reservoir. The filled circle represents the sampling station for this study. The mesocosm was designed to include a control and treatments of TB (Bivalve : *U. douglasiae*, *S. woodiana*).

3. 수질조사 분석항목 및 방법

수온, 용존산소, 탁도는 다항목 수질측정기 (YSI Sonde 6600)를 이용하여 측정하였다. 엽록소 *a*의 농도는 담수를 직경 47 mm, 구경 0.65 μm의 유리섬유 여과지 (glass fiber filter paper, GF/F)에 여과한 후 90% 아세톤으로 추출하여 fluorescence spectrophotometer (Turner Design, 10R)를 사용하여 분석하였다. 총질소 (TN) 및 총인 (TP)은 Strickland and Parsons (1972)의 방법에 의거하여 UV-Spectrophotometer (Cary 50, Varian)를 사용하여 분석하였다.

4. 식물플랑크톤 정성 및 정량 분석

조류밀도는 100 mL 시료를 취하여 Lugol 용액으로 고정하고 균일하게 혼합한 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경 (Axiostar plus, ZEISS, Germany)하에서 세포수를 계수하고 출현종을 동정하였다. 동물플랑크톤은 플랑크톤 네트로 수직 예인한 시료를 포르말린으로 고정한 후 해부현미경 하에서 동정 및 계수하였다.

5. 탄소, 질소 함량 및 안정동위원소비 분석

입자성 유기물 시료의 탄소 함량 및 안정동위원소비를 측정하기 위해서 1 N 염산을 이용하여 진공 데시케이터 안에서 24시간 증기처리를 통하여 무기태 탄소를 제거해 주었다. 이때패류 시료는 부위별 (근육, 아가미, 내장 등)로 구분한 후 시료분쇄기 (FRITSCH-planetary mono mill,

Pulverisette 6, Germany)를 사용하여 분말 형태로 갈아주었다. 후에 1N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거해 준 후 증류수를 이용하여 산을 제거하고 동결건조하였다. 총 질소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 염산 처리가 결과 값에 영향을 미치지므로 전처리를 하지 않았다 (Kim *et al.*, 2016). 시료내 유기물의 %C, %N, δ<sup>13</sup>C, δ<sup>15</sup>N 비는 원소분석기와 연계된 continuous flow 방식의 안정동위원소 분석기 (EA-IRMS : Elemental Analyzer - Isotope Ratio Mass Spectrometry, vario Micro cube-Isoprime 100 - Elementar-GV Instrument, U.K)를 이용하여 분석하였다. 안정동위원소비는 ‰로 표현되며 δ 계산식은 아래와 같다.

$$\delta = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

$$R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}, {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$$

국제표준물은 δ<sup>13</sup>C는 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite), δ<sup>15</sup>N은 N<sub>2</sub> (atmospheric air)를 이용하였다. δ<sup>13</sup>C 분석을 위한 표준물질은 IAEA-C-6 (Sucrose), USGS24 (Graphite)이며, δ<sup>15</sup>N 분석을 위한 표준물질은 IAEA-N-2 (Ammonium Sulfide), IAEA-NO-3 (Potassium nitrate)을 사용하였다. 각각의 분석 표준편차는 0.1‰, 0.2‰이다.

결 과

1. 환경변화

수온, 용존산소 및 pH는 메소코즘 실험 기간 동안 대조

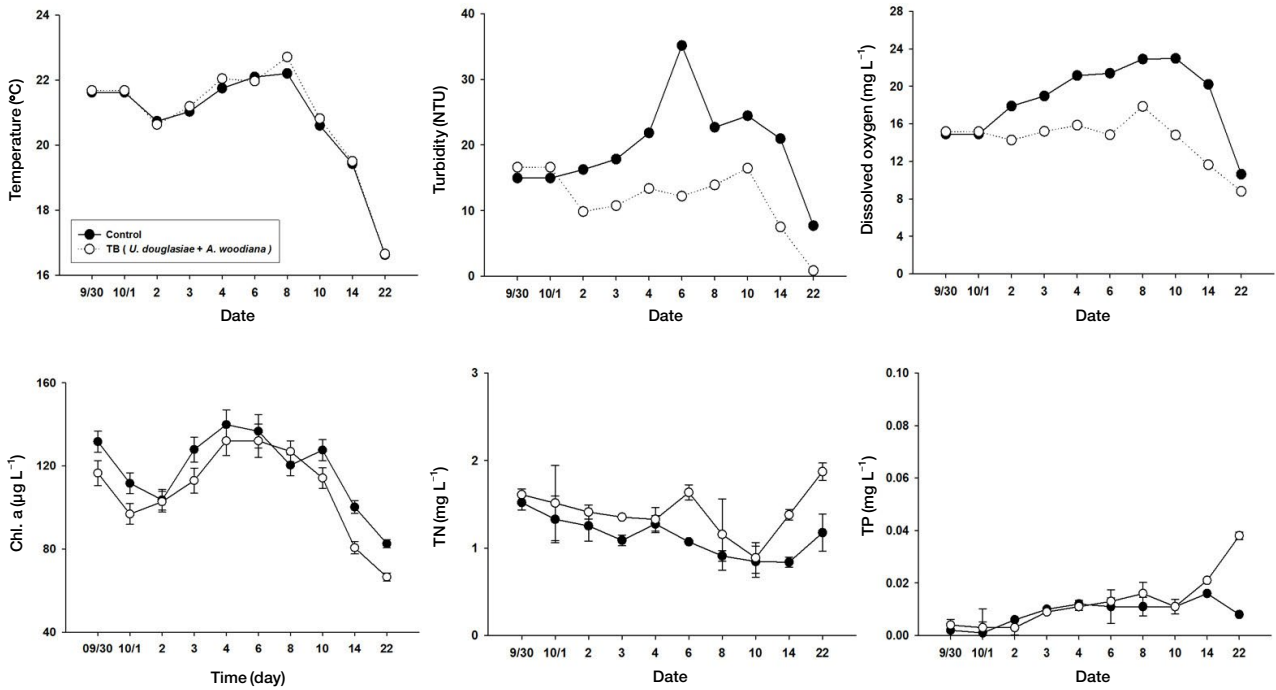


Fig. 2. Water quality conditions (water temperature, Chl-*a*, DO, turbidity, DIN and DIP) in each mesocosm in Shingu reservoir (C: control, TB: *U. douglasiae*, *S. woodiana*).

Table 1. Major species and relative proportions (%) of phytoplankton taxa in the initial mesocosm in Shingu reservoir.

Class	Species	Relative proportion (%)
Cyanophyceae	<i>Microcystis aeruginosa</i>	97.71
	<i>Oscillatoria</i> sp.	
	<i>Spirulina</i>	
Chlorophyceae	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	0.80
	<i>Closterium aciculare</i>	
	<i>Pediastrum simplex</i>	
	<i>Scenedesmus</i> sp.	
	<i>Staurastrum</i> sp.	
	<i>Gloeocystis gigas</i>	
Cryptophyceae	<i>Cryptomonas ovate</i>	0.04
Euglenophyceae	<i>Trachelomonas</i> spp.	0.13
Bacillariophyceae	<i>Aulacoseira</i> sp.	1.32
	<i>Cyclotella</i> sp.	
	<i>Navicular</i> sp.	
	<i>Synedra</i> sp.	
	<i>Nitzschia</i>	

군과 실험군에서 비슷한 경향을 보이고 있으나 수온은 10일부터 22일까지 21.8°C에서 16.8°C로 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 2). 클로로필 *a*의 농도는 대조군에서 전체 실험기간 동안 131 µg L<sup>-1</sup>에서 103 µg L<sup>-1</sup>로 감소하는 경향을 보이고 있으며 실험군에서도 116 µg L<sup>-1</sup>에서 66 µg L<sup>-1</sup>로 감소하는 경향을 보이고 있어 대조군보다 낮은 농도를 나타내고 있다(Fig. 2). 이러한 결과는 이매패류가 남조류를 섭식하였기 때문에 수층 내 클로로필 농도가 줄어든 것으로 여겨진다. 용존산소의 농도는 실험군에서 15.2 mg L<sup>-1</sup>에서 8.7 mg L<sup>-1</sup>로 감소되는 경향을 보이고 있으나 대조군에서는 반대로 증가하는 경향을 보이다가 실험 종료시에 감소하고 있다(Fig. 2). 탁도는 대조군에서 15 NTU부터 최고 35 NTU로 증가와 감소를 반복하고 있으나, 실험군에서는 16.6 NTU에서 0.8 NTU까지 뚜렷한 감소를 보이고 있다(Fig. 2). 메소코즘 실험 기간 동안 탁도의 변화는 엽록소 *a* 및 용존산소의 농도와 비슷한 경향을 보이고 있어 이매패류에 의한 생물조절 기법에 의한 영향으로 여겨진다. 또한, 총 질소의 농도는 실험기간 동안 대조군에서 1.52 mg L<sup>-1</sup>에서 1.17 mg L<sup>-1</sup>로 큰 변화를 보이고 있지 않으며, 실험군에서는 1.61 mg L<sup>-1</sup>에서 1.87 mg L<sup>-1</sup>로 오히려 대조군보다 높은 농도를 보이고 있다. 이는 이매패류가 여과 섭식을 통해 남조류를 소화한 후 요소 및 암모니아 형

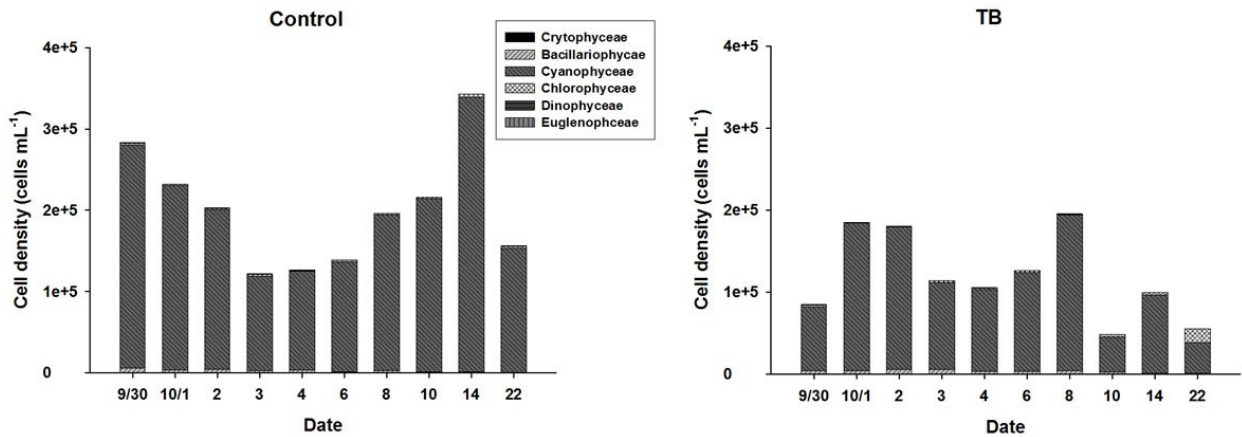


Fig. 3. Cell density of phytoplankton in each mesocosms (C: control, TB: *U. douglasiae*, *S. woodiana*) in Shingu reservoir.

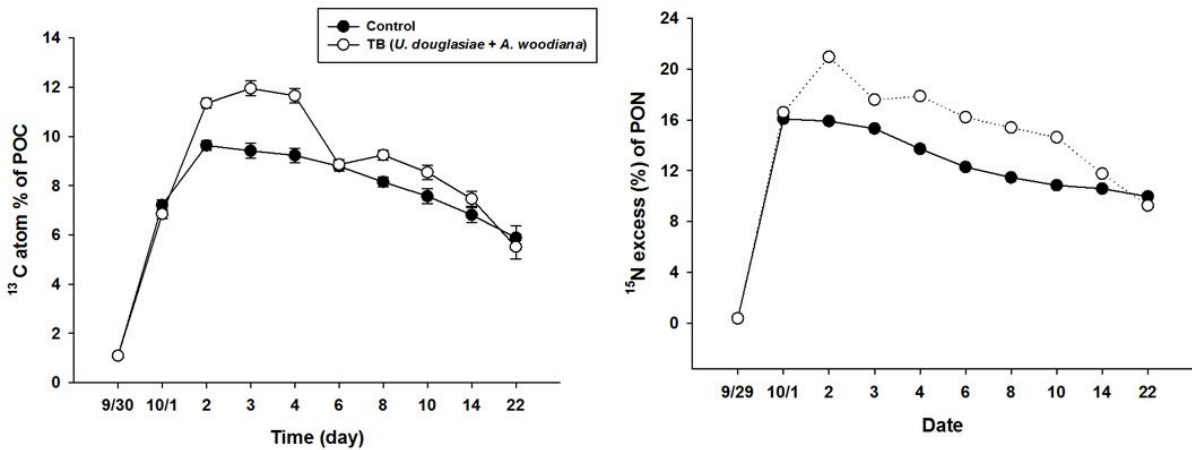


Fig. 4.  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  atom % of POM in each mesocosm in Shingu reservoir during the experimental period.

태로 다시 수층으로 배출한 결과로 여겨진다(Fig. 2). 총 인의 농도는 대조군과 실험군 모두 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 2).

## 2. 식물플랑크톤 생물량의 변화

연구 기간중에서 식물플랑크톤은 *M. aeruginosa* 종이 전체의 97% 이상을 차지하고 있으며 다음으로 규조류, 녹조류가 1% 내외를 차지하고 있다(Table 1). 대조군은 실험 개시일부터 종료시까지 정량적으로 증감을 반복하면서 감소를 보이지만(283,200 to 156,120 cell mL<sup>-1</sup>), 실험군에서는 1일부터 급격한 감소를 보이고 있어(295,430 to 55,160 cell mL<sup>-1</sup>) 대조군과는 큰 차이가 나타나고 있다(Fig. 3). 실험군에서 위와 같은 변화는 이매패류에 의한 생물조절

기법으로 인하여 식물플랑크톤의 정량 및 정성 변화에 영향을 미치는 것으로 여겨진다.

## 3. 입자태 유기물 및 이매패류의 안정동위원소비 변화

입자태내의  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  atom %는 실험군에서 1.08~5.51, 0.37~8.74의 범위를 보이고 있어 대조군보다(1.08~5.88, 0.37~9.96) 낮은 동화율이 나타나고 있다. 이는 실험군에서의 수생식물에 의한 생물조절 기법이 식물플랑크톤의 광합성 능력을 저해하고 있다고 여겨진다. 이매패류 중 *S. woodiana*의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 원자(atom) %는 각각 1.08~1.41%, 0.37~1.16% 실험기간 동안 여과섭식을 통해 남조류를 먹이원으로써 흡수한 것으로 여겨진다. 그러나 *U. douglasiae*의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 원자(atom) %

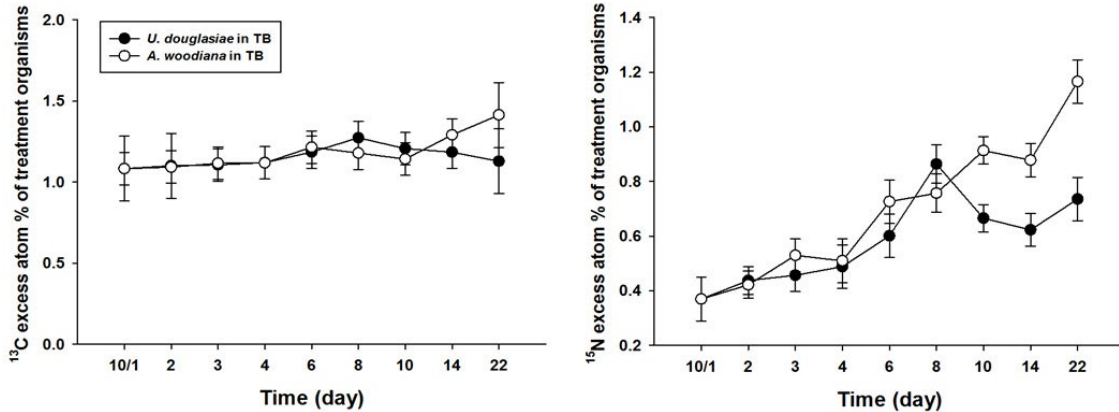


Fig. 5.  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  atom % in different part of the treatment organisms (TB: *U. douglasiae*, *S. woodiana*) in Shingu reservoir during the experimental period.

는 각각 1.08~1.13%, 0.37~0.73%로 *S. woodiana*보다 낮은 동화율을 보여 먹이원으로서 적절하지 않는 것으로 여겨진다(Fig. 4).

## 고찰

### 1. 이매패류의 남조류 섭식을 변화

본 연구에서는 t-test 통계분석 결과 탁도( $p < 0.001$ ), 클로로필 농도( $p < 0.001$ ) 및 식물플랑크톤 생물량( $p < 0.005$ )의 변화가 실험군과 대조군에서 유의한 차이가 있음을 보여주었다. 클로로필 농도와 탁도 모두 실험군이 대조군보다 낮은 농도를 보인 것은 투여한 이매패류 2종이 남조류(*M. aeruginosa*)를 섭식함으로써 수질의 투명도가 높아졌음을 의미한다. 그러나 감소된 Chl-*a* 농도로 이매패류가 남조류를 직접 섭식한 결과라고 말할 수 없다. 이매패류는 생리적 특성상 일부 먹이를 소화시키지 않고 무기형태의 영양염 혹은 배설물(feces 혹은 pseudofeces) 형태로 수층으로 배출하기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 이매패류의 남조류 섭식 효율을 판단하기 위하여 클로로필 농도 외에 패류 체내의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 원자량(atom %)을 조사하였다.

무기태 형태( $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ ,  $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 추적자는 광합성을 통해 유기물 형태로 남조류 체내에 동화되고 새로운 세포를 합성한다. 이매패류 체내의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 원자량(atom %) 증가는 새로 합성된 식물플랑크톤 세포가 여과섭식 활동을 통해 이매패류 유기체 세포내로 동화되었음을 나타낸다. 본 연구에

서 실험기간 동안 실험군의 클로로필 농도와 식물플랑크톤 생물량은 점차적으로 감소하였으며, 이매패류 체내의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 원자량(atom %)은 점차적으로 무거운 경향을 보인다. 이러한 결과는 이매패류가 섭식을 통해 남조류 성장을 억제할 수 있음을 나타낸다.

담수생태계에서 여과섭식 특성을 가진 이매패류(bivalves)는 미세 박테리아부터 동물플랑크톤에 이르기까지 다양한 크기의 생물 혹은 무생물 입자들을 섭식할 수 있고, 식물플랑크톤 개체수를 크게 줄일 수 있으며 수질 선명도를 크게 높일 수 있다(Vanderploeg *et al.*, 2001). 특히, unionid 종의 이매패류는 크기가 클수록 많은 양을 여과할 수 있고 식물플랑크톤의 밀도를 현저히 감소시킬 수 있다(Vaughn *et al.*, 2004). 국내 선행연구로서 Lee (2008) 및 Park (2008)의 연구에 따르면 본 연구에서 사용한 *U. douglasiae* 종이 남조류 대발생에도 높은 생존률 및 여과율로 수질을 개선하는데 효과적이라고 보고하였다. 또한 다른 담수산 이매패류의 여과율 연구결과와 비교해 볼 때, 말조개의 단위 중량당 여과율은 참재첩에 비해 2~3배 이상 낮지만 개체당 여과율은 4배 이상 높게 나타났고 *Sinanodonta anatine* 종의 여과율과 비슷한 수치를 나타냈다(Bontes *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2001). 그러나 패류의 여과율은 종간의 차이가 있고, 먹이원의 종류, 패류의 밀도, 그리고 수온 등과 같은 여러 환경요인에 의해 영향을 받는다(Hwang *et al.*, 2004). 본 연구결과에서도 *S. woodiana* 종과 *U. douglasiae* 종이 서로 다른 남조류 섭식율을 나타내었다. *S. woodiana*의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 원자(atom) %는 각각 1.08~1.41%, 0.37~1.16%로 *U. douglasiae*의 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 원자(atom) % (1.08~1.13%, 0.37~0.73%) 보다 높은 동화율을 보여 더 많은 남조류 개



체를 먹이원으로 섭식하고 있다. Watanabe *et al.* (1997)은 *S. woodiana*, *U. douglasia* 및 *Cristaria plicata* 종이 남조류(*M. aeruginosa*) 대변성 기간 동안  $1 \pm 5$  mg 독성 마이크로시스틴(Microcystin)을 축적한다고 보고하였고, 이러한 독성 마이크로시스틴이 먹이 섭취량에 영향을 주기 때문에 여과 섭식율의 차이를 보인다고 보고하였다. 또한, Yokoyama & Park (2002)의 연구에서는 *S. woodiana* 종 체내에 축적된 마이크로시스틴 농도가 *U. douglasia* 종보다 항상 낮았으며 *S. woodiana* 종이 체외로 독성 물질을 가분(pseudofaeces) 형태로 배설한 결과로 보고하였다.

본 메소코즘 실험 결과를 통해 *S. woodiana* 종이 *U. douglasia* 종보다 많은 남조류(*M. aeruginosa*)를 섭식한다고 여겨지며 이는 *S. woodiana* 체내에 독성 마이크로시스틴을 무독화 하거나 소화가 어려운 입자들을 체외로 배설하기 때문으로 여겨진다. 그러므로 부영양화 호수에서 조류제어를 위한 *S. woodiana* 종의 이용 가능성은 상당히 높은 것으로 여겨진다.

## 2. 이매패류를 이용한 수질개선효과

얼룩말조개(*Dreissena polymorpha*)는 수중의 유기물을 제거하는 생물학적 필터로서 수질정화에 관한 연구가 지속적으로 보고되었다(Naddafi *et al.*, 2007). 그러나 *D. polymorpha*는 외래 부착성 패류로서 기존 토착종의 개체 감소나 서식지 환경 변화를 비롯하여 배수로, 배수관의 막힘 등 생태계에 부정적인 효과를 주는 것 이외에도 연한 매질 바닥의 호소나 하천에서는 적응성이 낮다는 단점을 보여주었다. 아시아 혹은 국내에서 자생하는 unionid 종은 경질 기질을 선호하는 *D. polymorpha*보다 부드러운 기질이 있는 얕은 호수 또는 저수지에 더 잘 적응한다. 부영양화가 빈번하게 발달하는 국내 호수 또는 저수지에 남조류가 대발생할 때 외래 침입종인 *D. polymorpha*보다 국내 자생종인 *S. woodiana* 종을 이용한 생물제어가 적합하다고 여겨진다. 선행연구에서 *Sinanodonta* sp.와 *Unio* sp. 종은 많은 양의 입자를 여과할 수 있다고 보고되었고(Vaughn *et al.*, 2004), 특히 *Sinanodonta* sp. 종은 *D. polymorpha*보다 평방 미터당 12배 높은 여과율을 보였다(Bontes *et al.*, 2007). 또한, 독성 마이크로시스틴 농도가 높은 남조류 대 발생 환경에서도 *Sinanodonta* sp. 종이 *D. polymorpha*보다 높은 섭식율을 보인다고 보고되었다. 그러므로 본 연구에서 사용된 *S. woodiana*는 부영양화 농경지와 호수에서 대량의 독성 남조류 번식을 감소시킬 수 있는 생물로 이용할 수 있을 것이며, 안정동위원소 추적자는 이를 평가할 수 있는 유용한 지시자로서 활용 가능할 것이다.

## 적 요

생물조절기법(Biomanipulation)을 이용한 수질개선 방법으로서, 이매패류인 *S. woodiana* 종이 여과섭식을 통해 남조류(*M. aeruginosa*)를 효율적으로 제어할 수 있다는 것을 안정동위원소( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) 추적자 실험을 통하여 밝혀내었다. 이매패류를 이용하여 호소수의 남조류 번성을 억제함으로써 호소 건강성을 회복시키는 것도 중요하지만, 외래 종보다는 국내 자생종을 활용하는 것이 생태계 변화를 최소화 할 수 있다는 것을 고려해야 할 것이다.

## 사 사

본 연구과제는 국립환경과학원 연구사업 R&D 예산으로 수행하였습니다.

## REFERENCES

- An, K.G., J.Y. Lee, K.K. Hema, S.J. Lee, S.J. Hwang, B.H. Kim, S.K. Park and H.Y. Um. 2010. Control of algal scum using top-down biomanipulation approach and ecosystem health assessments for efficient reservoir management. *Water Air Soil Pollutant* **205**: 3-24.
- Beklioglu, M. 1999. A review on the control of eutrophication in deep and shallow lakes. *Turkish Journal of Zoology* **23**: 327-336.
- Benndorf, J. 1990. Conditions for effective biomanipulation: conclusions derived from whole-lake experiments in Europe. *Hydrobiologia* **200/201**: 187-203.
- Bontes, B.M., A.M. Verschoo, L.M. Dionisio Pires, E. Van Donk and B.W. Ibelings. 2007. Functional response of Anodonta anatine feeding on a green algal and four strains of cyanobacteria, differing in shape, size and toxicity. *Hydrobiologia* **584**: 191-204.
- Cooke, G.D., E.G. Welch, S.P. Peterson and P.R. Newroth. 1993. Restoration and management of lakes and reservoirs (2nd ed.). 548pp. Lewis. Boca Raton.
- Dittmann, E. and C. Wiegand. 2006. Cyanobacterial toxins-occurrence, biosynthesis and impact on human affairs. *Molecular Nutrition & Food Research* **50**:7-17.
- Engstrom, J., M. Vihherluoto and M. Viitasalo. 2001 Effects of toxic and non-toxic cyanobacteria on grazing, zooplanktivory and survival of the mysid shrimp *Mysis mixta*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **257**: 269-280.
- Gosling, E. 2003. Bivalve molluscs: biology, ecology and cul-

- ture. Oxford; Fishing News Books.
- Hwang, S.J., H.S. Kim and J.K. Shin. 2001. Filter feeding effects of a freshwater bivalve on phytoplankton. *Korean Journal of Ecology and Environments* **34**: 298-309.
- Hwang, S.J., H.S. Kim, J.K. Shin, J.M. Oh. 2004. Grazing effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* Prime) and large zooplankton on phytoplankton communities in two Korean lakes. *Hydrobiologia* **515**: 161-179.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, M. Søndergaard, T.L. Lauridsen, L.J. Pedersen and L. Jensen. 1997. Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. *Hydrobiologia* **342/343**: 151-164.
- Jeffries, M. and D. Mills. 1990. *Freshwater Ecology : Principals and Applications*. Belhaven Press: London; 283.
- Kim, M.S., W.S. Lee, K.S. Kumar, K.H. Shin, W. Robarge, M.S. Kim and S.R. Lee. 2016. Effects of HCl pretreatment, drying and storage on the stable isotope ratios of soil and sediment samples. *Rapid Communication Mass Spectrometry* **30**: 1567-1575.
- Kononen, K., J. Kuparinen, K. Makela, J. Laanemets, J. Pavelson and S. Nommann. 1996. Initiation of cyanobacterial blooms in a frontal region at the entrance to the Gulf on Finland, Baltic Sea. *Limnology and Oceanography* **41**: 98-112.
- Koski, M., M. Rosenberg and M. Viitasalo. 1999. Reproduction and survival of the calanoid copepod *Eurytemora affinis* fed with toxic and non-toxic cyanobacteria. *Marine Ecology Progress Series* **186**: 187-197.
- Lee, Y.J., B.H. Kim, N.Y. Kim, H.Y. Um and S.J. Hwang. 2008. Effect of temperature, food concentration of *Unio douglasiae* on *Microcystis aeruginosa*. *Korean Journal of Ecology and Environments* **41**(S): 61-67.
- Magalhaes, V.F., R.M. Soares and S.M.F.O. Azevedo. 2001. Microcystin contamination in fish from the Hacarepaga Lagoon (Rio de Janeiro, Brazil): ecological implication and human health risk. *Toxicon* **39**: 1077-1085.
- Naddafi, R., K. Pettersson and P. Eklov. 2007. The effect of seasonal variation in selective feeding by zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) on phytoplankton community composition. *Freshwater Biology* **52**: 823-842.
- Nalepa, T.F. and D.W. Schloesser. 1993. *Zebra mussels: Biology, impacts and control*. Lewis, Boca Raton, Florida.
- Neumann, D. and H.A. Jenner. 1992. *The zebra mussel-Ecology, Biological Monitoring and First Applications in the Water Quality Management*. Gustav Fischer, New York.
- Park, K.S., B.H. Kim, H.Y. Um and S.J. Hwang. 2008. Effects of dissolved oxygen and depth on the survival and filtering rate and pseudofeces production of a filter-feeding bivalve (*Unio douglasiae*) in the cyanobacteria bloom. *Korean Journal of Ecology and Environments* **41**(S): 50-60.
- Peterson, B.J. and B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **18**: 293-320.
- Piola, R.F., I.M. Suthers and D. Rissik. 2008. Carbon and nitrogen stable isotope analysis indicates freshwater shrimp *Paratya australiensis* Kemp, 1917 (Atyidae) assimilate cyanobacterial accumulations. *Hydrobiologia* **608**: 121-132.
- Sarnelle, O. 1993. Herbivore effects on phytoplankton succession in a eutrophic lake. *Ecological Monographs* **63**: 129-149.
- Shapiro, J. and D.I. Wright. 1984. Lake restoration by biomanipulation. *Freshwater Biology* **14**: 371-383.
- Strand, J.A. and S.E.B. Weisner. 2001. Dynamics of submerged macrophyte populations in response to biomanipulation. *Freshwater Biology* **46**: 1397-1408.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. (Bull.)*. pp. 167-311.
- Tester, P.A., J.T. Turner and D. She. 2000. Vectorial transport of toxins from the dinoflagellate *Gymnodinium breve* through copepods to fish. *Journal of Plankton Research* **22**: 47-61.
- Vanderploeg, H.A., J.R. Liebig, W.W. Carmichael, M.A. Agy, T.H. Johengen, G.L. Fahnenstiel and T.F. Nalepa. 2001. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) selective filtration promoted toxic *microcystis* blooms in saginaw bay (lake huron) and lake erie. *Canadian Journal of Fisheries and Aquat Science* **58**: 208-221.
- Vaughn, C.C., K.B. Gido and D.E. Spooner. 2004. Ecosystem processes performed by unionid mussels in stream mesocosms: Species roles and effects of abundance. *Hydrobiologia* **527**: 35-47.
- Watanabe, M.F., H.D. Park, F. Kondo, K. Harada, H. Hayashi and T. Okino. 1997. Identification and estimation of microcystins in freshwater mussels. *Natural Toxins* **5**: 31-35.
- Yokoyama, A. and H.D. Park. 2002. Mechanism and prediction for contamination of freshwater bivalves (*Unionidae*) with the cyanobacterial toxin microcystin in hypereutrophic Lake Suwa, Japan. *Environmental Toxicology* **17**: 424-433.