

## $^{13}\text{C}$ 추적자를 사용한 시화호 상류역에서의 식물플랑크톤 크기에 따른 1차생산성 측정에 관한 연구

이연정 · 김민섭 · 원은지 · 신경훈\*

(한양대학교 해양환경과학과)

An Application of  $^{13}\text{C}$  Tracer for the Determination of Size Fractionated Primary Productivity in Upper Stream of Lake Shihwa. Lee, Yeon-Jung, Min-Seob Kim, Eun-Ji Won and Kyung Hoon Shin\* (Department of Environmental Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea)

Primary productivity was determined by using  $^{13}\text{C}$  tracer according to different cell size of phytoplankton through *in situ* incubation experiments in upper stream of the Lake Shihwa. The average concentration of chlorophyll *a* was  $14 \mu\text{g L}^{-1}$  demonstrating an eutrophic water. The ratio of POC/Chl-*a* was lower than 30, reflecting that the origin of organic matter might be mainly phytoplankton. The primary productivity was  $93.9 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  at St. 1, which was about 40-fold lower than the average value of the lake ( $3,972 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) determined by Choi *et al.* (1997) before opening of gate but it was higher than the average primary productivity ( $3.98 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) reported by KOWACO in 1993 before constructing dam. The fractionated size (20~53  $\mu\text{m}$ ) of phytoplankton community account for 51% of total primary productivity, indicating the highest assimilation rate. This study suggest that  $^{13}\text{C}$  tracer methodology should be applied as a useful approach for the water ecological research in the future.

**Key words :**  $^{13}\text{C}$  tracer method, primary productivity, size fraction, phytoplankton, Lake Shihwa

### 서 론

호수생태계의 기능 및 특성을 파악하여 수질을 보다 효과적으로 관리하기 위해서는 무엇보다 호수 내 유기물의 총량과 기원 및 순환과정에 대해 조사하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 호수의 유기물은 크게 외부로부터 유입되는 외부기원 유기물 (allochthonous organic matter) 과 호수 내에서 식물플랑크톤과 대형수생식물 등의 1차 생산에 의해 생성되는 내부기원 유기물 (autochthonous) 로 나누어진다. 본 연구 지역인 시화호는 수자원 확보를

위해 1994년 방조제를 건설하면서 생긴 인공호수로서 그 동안 인근 유역으로부터 각종 오염물질이 유입되어 호수 내 수질이 급격히 악화되면서 사회적인 문제로 대두되었다. 그러나 1997년 당초 수자원 이용이 목적이었던 담수화 추진계획을 포기하고 방조제의 일부구간에 갑문을 설치하여 해수를 유통시켰고, 그 후에 갑문 주변을 중심으로 수질이 크게 개선되어 지고 있는 상황이다(신 등, 2000). 그러나 최근에도 하절기 시화호 상부 및 중앙 유역의 저층수에서는 용존산소가 거의 고갈되어 저서생물이 생존하기 어려운 무산소 환경이 보고되고 있으며(박 등, 2003), 이는 시화호 내 유기물의 과잉공급에 의한

\* Corresponding author: Tel: 031) 400-5536, Fax: 031) 416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

결과라고 할 수 있다. 나아가 식물플랑크톤에 의한 자체 생성유기물이 시화호 내 수층 유기물의 상당량을 차지한다는 연구보고(한국해양연구소, 1999)를 고려할 때, 시화호 내 1차생산에 의한 유기물 공급 속도 및 그 순환과정에 대해 연구하는 것은 매우 중요하다. 1차생산을 측정하는데 있어 방사성동위원소인  $^{14}\text{C}$ 보다 친환경적이고 안정적인 동위원소인  $^{13}\text{C}$ 를 사용하는데 있어서의 정당성을 얻고자 여러 연구자들이 각각의 방법을 통해 얻은 1차생산력 결과의 차이를 비교해 보았으며(Slawyk *et al.*, 1977, 1979; Hama *et al.*, 1983; Satoh *et al.*, 1985), Slawyk 등(1977, 1979)은 다음과 같은 상관식을 얻었다.

$$\rho^{14}\text{C} = 1.119\rho^{13}\text{C} + 0.162 \quad (r=0.911)$$

여기서  $\rho^{14}\text{C}$ 와  $\rho^{13}\text{C}$ 는 각각의 방법을 통해 측정된 흡수속도이다. 비록  $^{14}\text{C}$  방법에 의한 결과 값이  $^{13}\text{C}$  방법을 통해 얻어진 값보다 높게 나타났지만 이러한 차이는 추적자 실험에서 무시할 수 있다고 한다(Slawyk *et al.*, 1979).

1차생산에 있어 미세플랑크톤 (<20  $\mu\text{m}$ )이 차지하는 비율이 비교적 높고, 식물플랑크톤의 크기 분포가 먹이사슬 동태와 해양 생태계의 에너지 효율에 매우 중요한 영향을 미치고 있음이 밝혀지면서(Ryther, 1969; Parsons and LeBrasseur, 1970; Walsh, 1976; Malone, 1980) 국내와 국외에서 이에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 시화호에서는 20  $\mu\text{m}$ 보다 작은 *Thalassiosira* 종(규조강)과 *Prorocentrum minimum*(와편모류)이 내부에 우점(해양수산부, 2001)하고 있음에도 불구하고 이에 대한 자료가 아직 없는 실정이다.

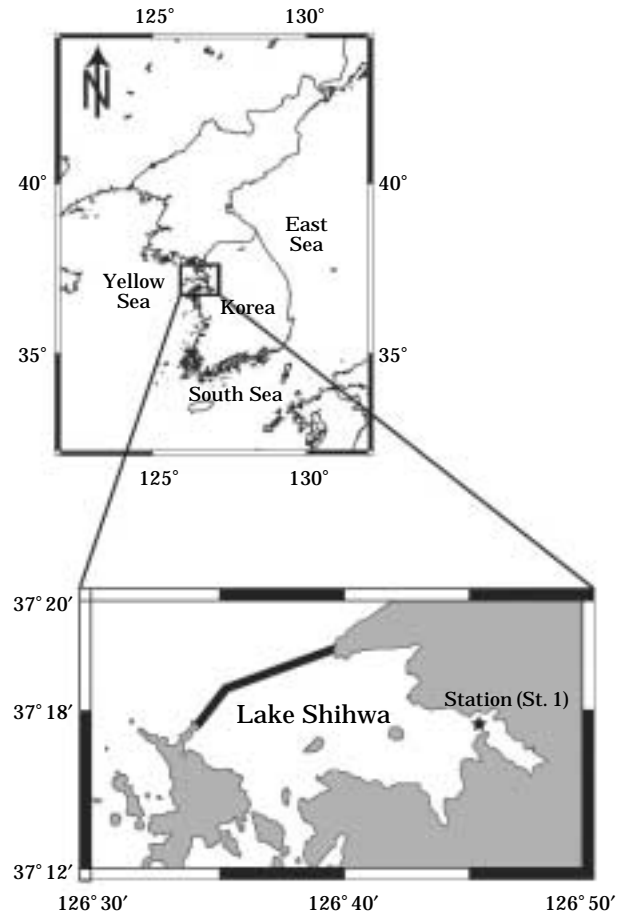
따라서 본 연구에서는 식물플랑크톤의 크기에 따른 각각의 엽록소 *a*의 농도를 조사하고  $^{13}\text{C}$  추적자를 사용한 현장 배양방법으로 1차생산성을 측정하여 각 크기별 식물플랑크톤이 총 1차생산에 기여하는 정도를 규명하고, 나아가 시화호 내 자체생성 유기물의 순환을 파악하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구지점 및 환경요인

본 연구는 2004년 4월 13일 시화호 내 열병합 발전소 앞에 1개의 정점을 선정하여 실시하였다. 채수하는 깊이는 표층광량에 대한 상대적 광도가 100% (표층, 0.3 m), 50% (중층, 1.5 m), 5% (저층, 2.5 m)인 곳으로 구분하였다.

pH와 수온은 Horiba U-10을 이용하여 측정하였다. 영



**Fig. 1.** A map showing a sampling station in the Lake Shihwa.

양염류 ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ )는 깊이별로 채수된 시료를 47 mm GF/F 여과지에 통과시켜 여액을 125 mL Nalgene bottle에 담아 냉동 운반하여 분석하기 전까지 냉동보관한 후 Strickland and Parsons (1968)의 방법에 따라 UV-spectrophotometer (Cary 50 series)를 이용하여 측정하였다.

### 2. 플랑크톤의 크기 분류 및 현장 배양실험

해수를 mesh size가 20  $\mu\text{m}$ 인 sieve와 53  $\mu\text{m}$ 인 sieve에 통과시켜 플랑크톤의 크기를 구분하였다. 모든 크기의 플랑크톤이 포함된 해수는 sieve를 사용하지 않고 총 시료를 사용하였다. 이에 대한 모식도는 Fig. 2와 같다.

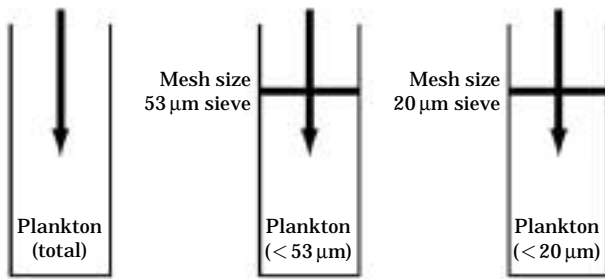
플랑크톤의 크기를 분류한 후 시료 내에  $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$  (98%)를 첨가시켜 자연 상태에서 약 1.1% 정도 존재하는  $^{13}\text{C}$ 의 존재비를 약 10% 정도까지 높여준 후 현장에서 6 시간 동안 배양하였다.  $^{13}\text{C}$ 를 이용한 현장 배양실험의 원

리는 Fig. 3과 같다.

<sup>13</sup>C를 첨가한 배양시료 내에서 새로 생성된 유기물에는 <sup>13</sup>C를 첨가하지 않은 것에 비해 더 많은 <sup>13</sup>C가 존재하게 되고, 이와 같이 증가된 <sup>13</sup>C 원자의 백분율을 측정함으로써 식물플랑크톤이 단위 시간 당 단위 면적 내에서 만들어 내는 유기탄소의 양, 즉 1차생산 속도를 알 수 있다.

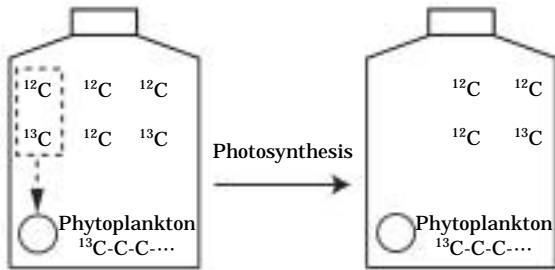
**3. 엽록소 a 및 1차생산성**

엽록소 a는 배양 후, 시료를 여과하여 여과지를 90% 아세톤으로 추출한 후 Fluorometer (10-AU-005-CE)로 분석하였다. 1차생산성 측정을 위하여 배양이 끝난 시료

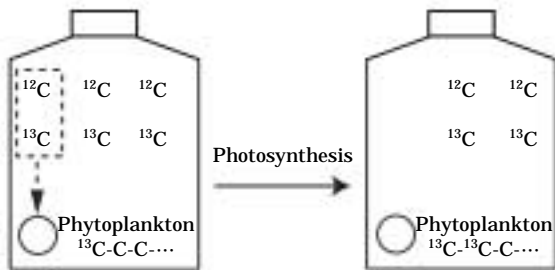


**Fig. 2.** A scheme of size fractionation.

**(A) Natural condition**



**(B) Enriched condition**



**Fig. 3.** Description of *in situ* culture experiment through phytoplankton photosynthesis using <sup>13</sup>C tracer (A) natural <sup>13</sup>C abundance condition, (B) <sup>13</sup>C enrichment condition.

를 미리 태운 (450°C, 4시간) 25 mm GF/F 여과지로 여과한 후, 1N 염산증기로 여과지의 무기탄소를 제거하여 원소-질량분석기 (Elemental Analyzer-Mass Spectrometer) 로 유기탄소양과 입자성 유기탄소 중에 <sup>13</sup>C 원자의 백분율을 분석하였다. 시료는 전처리 후, 틸캡에 넣어 알래스카대학 물환경연구소 (WERC: Water Environmental Research Center)에서 분석을 실시하였다. 그 후 Hama *et al.* (1983)의 방법에 따라 1차생산 속도를 계산하였다.

$$Production\ rate\ (\rho_c(t)) = \frac{\Delta POC(t)}{t} = \frac{a_{is} - a_{ns}}{a_{ic} - a_{ns}} \times \frac{POC(t)}{t}$$

$a_{is}$  : <sup>13</sup>C atomic percent of particulate matter at the end of the incubation

$a_{ns}$  : <sup>13</sup>C atomic percent in natural (nonincubated) sample

$a_{ic}$  : <sup>13</sup>C atomic percent in dissolved inorganic carbon in the incubation bottle

$t$  : Incubation time

$\Delta POC(t)$  : Increase in POC (Particle Organic Carbon) concentration during the incubation

$POC(t)$  : Concentration of POC (Particle Organic Carbon) at the end of the incubation

**결과 및 고찰**

**1. 환경요인**

연구정점의 유광층 내에 표층, 중층, 저층에서의 pH는 8.3의 값을 보였고, 수온은 11°C로 깊이에 따른 차이가 나타나지 않았다. 깊이별 영양염 농도는 Fig. 4와 같다.

인산염은 5.8~6.0 μmol L<sup>-1</sup>의 범위로 평균 5.9 μmol L<sup>-1</sup>였고, 깊이에 따라 차이가 거의 없었다. 암모니아염의 농도는 8.8~12.8 μmol L<sup>-1</sup>의 범위로 평균 10.8 μmol L<sup>-1</sup>였다. 질산염과 아질산염 합은 15.8~20.2 μmol L<sup>-1</sup>의 범위로 평균 18.0 μmol L<sup>-1</sup>였으며 암모니아염의 깊이별 농도변화의 경향과 같았다. 영양염의 농도는 모두 저층에 비해 표층에서 낮은 값을 나타냈다. 이는 식물플랑크톤의 광합성 활동이 활발한 표층과는 달리 저층에서는 광합성 활동이 활발하지 않고, 가라앉은 유기물이 미생물에 의해 분해되어 영양염의 농도가 높은 것이라 보여 진다.

해양과 해양생물체내에서 C:N:P의 존재비를 Redfield ratio라고 하며, 이 비는 106:16:1이다. 이 중, 용존무기질소(DIN)의 농도와 용존무기인(DIP)의 농도를 이용하여 N/P 비를 보았으며 이는 Table 1과 같다. 여기서 DIN

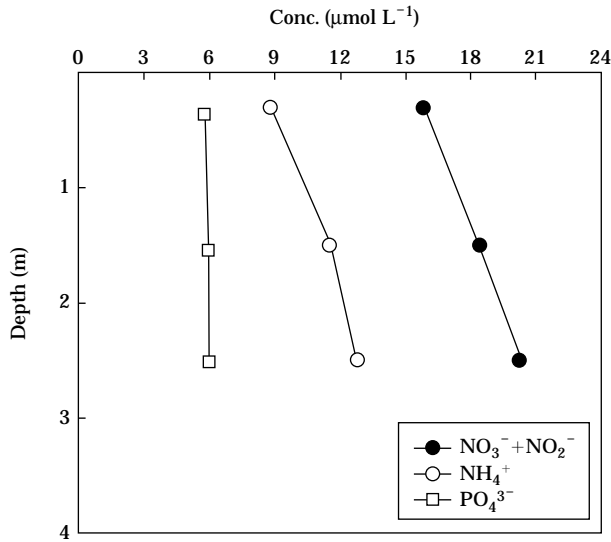


Fig. 4. Vertical distribution of nutrients concentration at the station 1 in the Lake Shihwa.

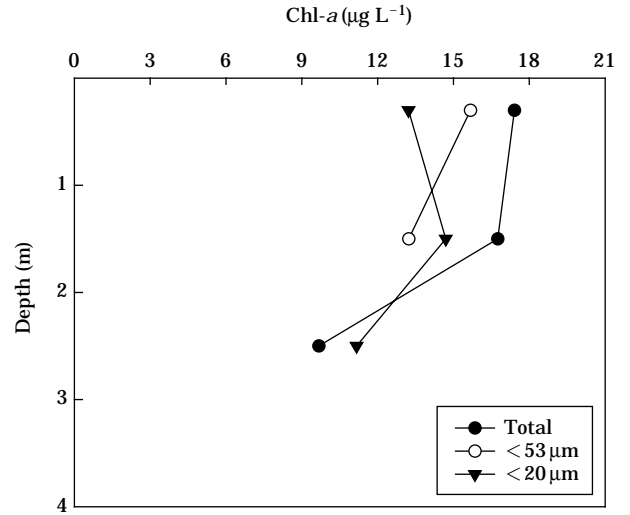


Fig. 5. Vertical distributions of total and the fractionated size of chlorophyll a concentration in the Lake Shihwa.

Table 1. The ratios of DIN/DIP at three depths.

Depth (m)	DIN (µmol L <sup>-1</sup> )	DIP (µmol L <sup>-1</sup> )	DIN/DIP
0.3	24.6	5.8	4.2
1.5	29.9	5.9	5.1
2.5	33.0	6.0	5.5

은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 농도의 합으로, DIP는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 농도로 정의하였다.

본 연구 결과 N/P 비의 평균값은 4.9로 Redfield ratio와 비교할 때 P에 비해 N의 농도가 낮았다. 실제적으로 N/P 비와는 별도로 용존무기질소와 용존무기인의 절대농도가 높아 현재는 영양염이 제한요인으로 전혀 작용하지 않으나 앞으로 외부로부터의 영양염 유입이 없이 기초생산력이 크게 증가할 경우 P에 비해 N이 먼저 고갈되어 제한요인으로 작용할 가능성이 있다고 볼 수 있다.

### 2. 크기별 엽록소 a

6시간 배양 후 측정된 엽록소 a의 농도는 Fig. 5와 같이 20 µm 이하의 크기는 중층에서, 53 µm 이하와 총 시료(total)는 표층에서 가장 높았다. 총 시료의 엽록소 a 농도는 9.7~17.4 µg L<sup>-1</sup>의 범위로 평균 14.6 µg L<sup>-1</sup>였다. 53 µm보다 작은 플랑크톤을 배양한 시료는 13.2~15.7 µg L<sup>-1</sup>의 농도범위를 나타내며, 평균값은 14.5 µg L<sup>-1</sup>였다. 본 농도는 저층의 자료가 없기 때문에 저층농도를 제

외한 평균값이다. 20 µm보다 작은 플랑크톤을 배양한 시료는 11.2~14.7 µg L<sup>-1</sup>의 농도범위를 나타내며, 평균값은 13.0 µg L<sup>-1</sup>이다. 본 연구정점의 평균 엽록소 a 농도는 약 14 µg L<sup>-1</sup>로 부영양 해역의 기준인 10 µg L<sup>-1</sup> (EPA, 1976; Marchetti, 1984)보다 높기 때문에 이 해역은 부영양화 상태라고 판단할 수 있다.

총 시료의 엽록소 a 농도는 표층에 비해 저층에서 급속히 감소되는데 표층에서는 활발한 광합성 활동에 의해 높은 값을 보이고 저층에서는 투과되는 빛의 양이 감소함에 따라 식물플랑크톤의 생산이 제한되어 비교적 낮은 값을 보이는 것으로 사료된다. 53 µm보다 작은 플랑크톤을 배양한 후 측정된 엽록소 a의 농도 역시 중층보다 표층에서 높았다. 반면에 20 µm보다 작은 플랑크톤을 배양한 후 측정된 엽록소 a의 농도는 중층에서 최대였고, 53 µm보다 작은 플랑크톤을 배양한 시료보다 높았다. 그리고 저층에서는 총 시료의 엽록소 a 농도보다도 높았다.

### 3. 크기별 1차생산력

Table 2에서 POC (t)는 배양이 끝난 후 측정된 입자성 유기탄소의 농도이며, a<sub>is</sub>는 배양이 끝난 후 입자물질 중에서 <sup>13</sup>C 원자가 차지하는 비율이다. 1차생산 속도는 이 두 값에 비례하여 나타나므로, 입자성유기탄소 중에 외부기원물질의 농도가 높으면 식물플랑크톤에 의한 1차생산 속도가 실제보다 높게 측정될 가능성이 있다. 이에 배양 후 입자성유기탄소의 값이 실제 식물플랑크톤에 의한 것

**Table 2.**  $a_{is}$ , POC (t)/chlorophyll *a* and production rate of total and the fractionated size at three depths in euphotic layer.

Depth (m)	Size	$a_{is}$ (%)	POC (t)/Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{gC } \mu\text{gChl-}a^{-1}$ )	Production rate ( $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ )
0.3	Total	1.94	27.5	51.3
	< 53 $\mu\text{m}$	1.95	12.2	23.3
	< 20 $\mu\text{m}$	1.29	22.1	3.9
1.5	Total	1.89	19.4	39.7
	< 53 $\mu\text{m}$	1.96	24.2	42.0
	< 20 $\mu\text{m}$	1.32	25.1	12.2
2.5	Total	1.34	24.2	8.1
	< 53 $\mu\text{m}$	1.36	-	11.2
	< 20 $\mu\text{m}$	1.73	18.9	15.7

인지를 알아보기 위하여 입자성유기탄소와 엽록소 *a*의 농도비를 조사하였다. 1994년 Montagnes 등은 살아있는 식물플랑크톤의 입자성유기탄소와 엽록소의 비는 40에 가까움을, 1977년 Eppley 등은 이 비가 100 이상이면 육지지원입을 제시하였다. 이번 연구에서는 대부분이 30 이하 (Table 2)로 입자성유기탄소는 육지지원물질보다 식물플랑크톤에 의한 것으로 보여진다. 표층과 중층에서 20  $\mu\text{m}$ 보다 작은 식물플랑크톤을 배양한 시료의  $a_{is}$ 값이 낮은 것으로 보아 다른 시료보다 <sup>13</sup>C가 적게 흡수 됐음을 알 수 있다. 그러나 저층에서는 가장 높은 값을 보였다. 1차생산 속도는 표층에서 총 시료가 51.3  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , 53  $\mu\text{m}$  이하가 23.3  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , 20  $\mu\text{m}$  이하가 3.9  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 였다 (Table 2). 중층에서는 총 시료가 39.7  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , 53  $\mu\text{m}$  이하가 42.0  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , 20  $\mu\text{m}$  이하가 12.2  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 였으며, 저층에서는 총 시료가 8.1  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , 53  $\mu\text{m}$  이하가 11.2  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , 20  $\mu\text{m}$  이하가 15.7  $\mu\text{gC L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 였다 (Table 2). 표층에서는 총 시료의 1차생산력이 가장 크지만, 중층에서는 미세하게나마 53  $\mu\text{m}$ 보다 작은 식물플랑크톤의 1차생산력이, 저층에서는 20  $\mu\text{m}$ 보다 작은 식물플랑크톤의 1차생산력이 가장 컸다. 이는 총 시료는 전체를 배양한 반면 sieve를 통과한 시료에는 mesh size보다 큰 플랑크톤이 제거되었기 때문에 대부분의 동물플랑크톤이 제거되어 나타난 결과라 사료된다. 동물플랑크톤은 밝은 낮에는 하층에 분포하여 포식자를 피하고 야간에 표층으로 올라와 먹이를 취한다는 가설 (Roger, 1971)이 있으며, 우리나라 서해 연안역과 같이 조류가 강하고 수심이 비교적 얇은 지역도 이러한 일주 수직이동이 있음이 관찰 (Park et al., 1991)되었다. 이러한 관점에서 본다면 저층에서 20  $\mu\text{m}$ 보다 작은 식물플랑크톤이 총 시료보다 많은 양의 탄소를 생산한 것은 동물플랑크톤의

**Table 3.** Relative contribution of the fractionated size of primary productivity.

Size	Production rate ( $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	Relative contribution (%)
> 53 $\mu\text{m}$	21.2	22.5
20~53 $\mu\text{m}$	48.0	51.1
< 20 $\mu\text{m}$	24.8	26.4

제거에 의한 영향을 반영하는 것으로 사료된다.

각 수심에 따른 1차생산성을 단위 면적 당 기초생산성으로 계산하면 93.9  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 였으며, 각 크기별 식물플랑크톤이 이 값에 기여하는 정도는 Table 3과 같다. 연구정점에서 53  $\mu\text{m}$ 보다 큰 식물플랑크톤은 총 1차생산량 중에서 22.5%를, 20~53  $\mu\text{m}$  크기의 식물플랑크톤은 51.1%를, 20  $\mu\text{m}$ 보다 작은 크기의 식물플랑크톤은 26.4%를 차지하고 있다. 총 기초생산에 대한 20  $\mu\text{m}$ 보다 작은 식물플랑크톤의 기여도는 천수만에서는 53% (신 등, 1990), 제주도 문섬 산호서식지 주변에서는 59% (이 등, 2000)인데 반해 이들 수역보다 낮은 값을 보였고, 오히려 20~53  $\mu\text{m}$  크기의 식물플랑크톤이 기여하는 정도가 훨씬 높게 나타났다.

배수갑문을 개방하기 이전 최 등 (1997)의 연구 결과에서 시화호의 3월 평균 기초생산력은 3,583  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 였고, 5월 평균은 4,743  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 였다. 그러나 이번 연구에서 총 기초생산력은 93.9  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 최 등 (1997)의 결과보다 매우 낮았다. 이러한 차이는 정점이나 계절에 의한 영향일 수 있지만, 배수갑문 개방이나 하수처리장 건설 등 시화호 수질 개선을 위한 지속적인 노력에 따른 결과로도 생각된다. 그러나 물막이 공사 이전인 1993년 측정된 시화호의 평균 기초생산력인 3.48  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$  (한국수자원공사, 1993)보다는 여전히 높았다.

Table 4는 우리나라의 다른 호수나 연안수역의 기초생산력을 나타낸 것으로 대부분의 수역에서 93.9  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 보다 높았다. 이번 연구는 새로운 방법을 통해 기초생산력을 측정하였지만 한 정점에서 실시되었기 때문에 시화호의 대표값이라 할 수 없다. 그러므로 좀 더 많은 정점에서의 <sup>13</sup>C 추적자를 첨가한 현장 배양실험을 통해 시화호의 평균 기초생산력을 알아 볼 필요가 있다고 사료된다.

#### 4. 동화계수

빛이 광합성에 있어 제한요소로 작용하지 않을 때, 식물플랑크톤의 엽록소에 의한 탄소 고정 능력은 단위 엽록소 당 1차생산력으로 표시하며 이 비를 동화계수(assi-

**Table 4.** Primary productivity in the rivers, lakes and coastal waters in Korea.

Region	Primary productivity (mgC m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	References
Lake Soyang	100~1,800	Kim <i>et al.</i> , 1989
Lake Paldang	500~1,000	Kim <i>et al.</i> , 1990
Lake Daechung	200~2,500	Hwang <i>et al.</i> , 1994
Han River	360~6,600	Jung <i>et al.</i> , 2001
Southern waters of the East Sea	284~4,574	Shim <i>et al.</i> , 1984
Mid-eastern coast of Yellow Sea	361.54	Kang <i>et al.</i> , 1992

**Table 5.** Variation of assimilation numbers according to the different cell size of phytoplanktons.

Size	Assimilation number (mgC mgChl <sup>-a</sup> d <sup>-1</sup> )
> 53 μm	6.5
20~53 μm	26.8
< 20 μm	0.5

assimilation number)라 하고 (Falkowski, 1981), 크기별 동화계수는 Table 5와 같다. 저층은 빛이 5% 밖에 도달하지 않기 때문에 고려하지 않았다.

동화계수는 Table 5와 같이 53 μm보다 큰 식물플랑크톤은 6.5 mgC mgChl<sup>-a</sup> d<sup>-1</sup>, 20~53 μm 크기의 식물플랑크톤은 26.8 mgC mgChl<sup>-a</sup> d<sup>-1</sup>, 20 μm 이하는 0.5 mgC mgChl<sup>-a</sup> d<sup>-1</sup>였으며, 대청호나 (13.1 mgC mgChl<sup>-a</sup> hr<sup>-1</sup> 한국수자원공사, 1993) 경기만 (1.24~24.28 mgC mgChl<sup>-a</sup> hr<sup>-1</sup> 강 등, 1992)보다 낮았다. 엽록소 *a*의 농도가 10 μg L<sup>-1</sup> 이상인 부영양 수역임에도 불구하고 낮은 생산성과 동화계수를 나타내는 것으로 미루어 보아 식물플랑크톤의 활성도가 낮은 것으로 판단할 수 있다.

Malone (1980)은 미소부유생물 (nanoplankton)의 동화계수가 소형부유생물 (microplankton)보다 크면 미소부유생물이 더 빨리 자라고, 작으면 소형부유생물이 더 빨리 자란다는 사실을 밝혔다. 그리고 Cole (1986)은 그 값이 서로 비슷하면 둘의 성장속도는 비슷함을 밝혔다. 이 정점에서 동화계수로 미루어보면 20~53 μm의 식물플랑크톤 성장속도가 가장 빠르고, 다음은 53 μm보다 큰 식물플랑크톤이며, 20 μm보다 작은 식물플랑크톤의 성장속도가 가장 느리다고 볼 수 있다.

## 적 요

본 연구는 시화호 상류역의 한 정점에서 식물플랑크톤

을 크기별로 구분하여 <sup>13</sup>C 추적자를 이용한 현장 배양실험을 통해 각각의 1차생산성을 측정하였다. 연구정점에서 평균 엽록소 *a*의 농도는 약 14 μg L<sup>-1</sup>로 부영양 해역의 분류기준인 10 μg L<sup>-1</sup>보다 높은 값을 보이므로, 이 해역은 부영양화 상태라고 판단할 수 있다. 배양 후의 입자성유기탄소와 엽록소 *a*의 농도비는 30 이하로 유기탄소의 주요 기원은 식물플랑크톤이었다. 표층에서는 총 1차생산량이 가장 크지만, 저층에서는 20 μm보다 작은 식물플랑크톤의 1차생산량이 가장 크게 나타났는데 이는 동물플랑크톤의 제거에 의한 결과로 추측된다. 이번 연구정점에서의 기초생산 속도는 93.9 mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 1997년 배수갑문 개방 전에 측정된 평균값 (3,972 mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)의 1/40 수준이었으나 1993년 물막이 공사 이전에 측정된 평균값 (3.48 mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)보다는 높았다. 20~53 μm 크기의 식물플랑크톤이 1차생산에 51%의 기여를 하는 것으로 나타났으며, 동화계수가 가장 높게 나타나 이들의 성장속도가 가장 빠르다고 볼 수 있다. 본 연구를 통해서 시화호에서 처음으로 식물플랑크톤 크기에 따른 1차생산성을 <sup>13</sup>C 추적자를 사용하여 살펴보았다. 이 연구방법은 방사성 동위원소인 <sup>14</sup>C에 비해 안전하며, 분자수준의 생산 유기물 조성을 규명할 수 있는 장점이 있어 향후 수권 생태계 물질순환 및 에너지흐름에 관한 연구에 다양하게 응용될 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구에서 시료의 안정동위원소 분석을 맡아주신 미국 알래스카대학 물환경연구소 안정동위원소 분석실의 Norma와 Tim에게 감사드리며 논문의 심사를 맡아주신 세분의 선생님과 원고의 교정에 도움을 준 윤숙희양에게 감사를 드립니다. 이 논문은 2003년 한양대학교 교내 연구비 지원으로 연구되었습니다.

## 인 용 문 헌

- 강연식, 최중기, 정경호, 박용철. 1992. 서해 중동부 연안수역과 경기만에서 일차생산력과 동화계수에 관한 연구. 한국해양학회지 27(3): 237-246.
- 김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 일차생산. 한국육수학회지 23: 167-179.
- 김범철, 조규승, 허우명, 김동성. 1989. 소양호 부영양화의 추이. 한국육수학회지 22(3): 151-158.
- 박준건, 김은수, 조성록, 김경태, 박용철. 2003. 시화호 수질의

- 연변화 양상에 대한 연구. *Ocean and Polar Research* **25** (4): 459-468.
- 신윤근, 심재형, 조준성, 박용철. 1990. 천수만 미세플랑크톤의 상대적중요성 : 종조성, 개체수, 클로로필 및 일차생산력. *한국해양학회지* **25**(4): 217-228.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000. 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태. *한국육수학회지* **33**(2): 109-118.
- 심재형, 신윤근, 이원호. 1984. 1982년도 광양만 식물플랑크톤 군집의 분포에 관한 연구. *한국해양학회지* **19**(2): 172-186.
- 이준백, 좌중현, 강동우, 공유봉, 오봉철. 2000. 제주도 문섬 산호서식지 주변의 생물생태학적 특성 : II. 식물플랑크톤의 군집동태와 1차생산력. *Algae* **15**(1): 37-47.
- 정성민, 김형봉, 김범철. 2001. 한강하류에서의 식물플랑크톤의 일차생산력 및 유기물부하. *기초과학연구집* **12**: 121-128.
- 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희. 1997. 시화호와 시화호 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차생산력에 관한 연구. *한국해양학회지, 바다* **2**(2): 78-86.
- 한국 수자원 공사. 1993. 93 시화지구 개발 시화 공업단지 조성사업 환경 관리조사. 317pp.
- 한국해양연구소. 1999. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구. 50-62pp.
- 해양수산부. 2001. 시화호 지역포럼 자료집 2001년 3월 제2차. 71-72pp.
- 황길순, 김동섭, 허우명, 김범철. 1994. 대청호의 일차생산과 가두리양어장 및 유역으로부터의 유기물부하량. *한국육수학회지* **27**(4): 299-306.
- Cole, B.E., J.E. Cloern and A.E. Alpine. 1986. Biomass and productivity of three phytoplankton size classes in San Francisco Bay. *Estuaries*, **9**: 117-126.
- EPA. 1976. Water quality criteria research of the U.S. Environmental Protection Agency. Proceed of EPA sponsored symp, EPA 600. 185pp.
- Eppley, R.W., W.G. Harrison, S.W. Chisholm and E. Stuart. 1977. Particulate organic matter in surface waters off California and its relation to photosynthesis. *Journal of Marine Research*, **35**: 671-696.
- Falkowski, P.G. 1981. Light-shade adaptation and assimilation numbers. *J. Plankton Res.*, **3**: 203-216.
- 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  $^{13}\text{C}$  isotope. *Mar. Biol.* **73**: 31-36.
- Malone, T.C. 1980. Size-Fractionated Primary Productivity of Marine Phytoplankton. In: Primary Productivity in the sea (P.G. Falkowskj; Ed.). Plenum Press, New York. 301-319pp.
- Marchetti, R. 1984. Quadro analitico complessivo dei risultati delle iodangini condense negli acque costiere dell'Emilia Romagna: situazione e ipotesi di intervento, Regione Emilia Romagna, 310pp.
- Montagnes, D.J.S., J.A. Berges, P.J. Harrison and F.J.R. Taylor. 1994. Estimating carbon, nitrogen, protein and chlorophyll *a* from volume in marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **39**: 1044-1060.
- Park, C., K.H. Choi and C.H. Moon. 1991. Distribution of Zooplankton in Asan Bay, Korea with Comments on Vertical Migration. *Bull. Korean Fish. Soc.* **24**(6): 472-482
- Roger, C. 1971. Les Euphausiaces du pacifique equatorial et sud-tropical zoogeographe, ecologie, biologie et situation trophique, provence, marseille; These d'Etat, Univ.
- Ryther, J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* **166**: 72-76.
- Satoh, H., Y. Yamaguchi, N. Kokubun and Y. Aruga. 1985. Application of infrared absorption spectrometry for measuring the photosynthetic production of phytoplankton by the stable  $^{13}\text{C}$  isotope method, *La mer.* **23**: 171-176.
- Slawyk, G. 1979.  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  uptake by phytoplankton in the Antarctic upwelling area: Results from the Antipro I cruise in the Indian Ocean sector, *Aust. J. Mar. Freshwater Res.* **30**: 431-448.
- Slawyk, G., Y. Collos and J.C. Auclair. 1977. Ther use of the  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  isotope for the simultnaeous measurement of carbon and nitrogen turnover rates in marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 925-932.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Pearsons. 1968. A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Can.* **167**: 311.
- Walsh, J.J. 1976. Models of the Sea. In : The ecology of the sea (D.H. Chshing and J.J. Walsh., eds.). Black well Sci. Publ., Oxford. p. 389-446.

(Manuscript received 19 January 2006,  
Revision accepted 15 March 2006)