

# 하계 강우기 전·후 신구저수지 내 입자성유기물의 수직분포 및 기원 연구 - 탄소 및 질소 안정동위원소비의 활용 -

김민섭 · 이연정 · 신경훈\* · 황순진<sup>1</sup>

(한양대학교 해양환경과학과, <sup>1</sup>건국대학교 환경과학과)

**A Study on Vertical Distribution and Origin of Particulate Organic Matter in Shingu Reservoir in Pre-monsoon and Post-monsoon Period - Application of Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratio-. Kim, Min-Seob, Yeonjung Lee, Kyung-Hoon Shin\* and Soon-Jin Hwang<sup>1</sup> (Department of Environmental Marine Science, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea; <sup>1</sup>Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)**

The vertical distribution and origin of particulate organic matter (POM) were investigated in Shingu reservoir on 4th July (pre-monsoon) and 7th August (post-monsoon) 2006. High turbid water (120 NTU) were found at 4.5 m water depth in post-monsoon period. The average C/N ratio of POM was about 5.70 and 6.96 in surface water and bottom water, respectively in pre-monsoon period, exhibiting the close values to its ratio in phytoplankton cell. However, the average C/N ratio was 7.10 in surface water and 12.81 in bottom water in post-monsoon period. In addition, the  $\delta^{13}\text{C}$  values of POM in pre-monsoon period ranged from  $-25.1\text{‰}$  to  $-26.1\text{‰}$  in whole water column, but the  $\delta^{13}\text{C}$  values of POM in post-monsoon period showed relatively wide range between  $-23.2\text{‰}$  and  $-27.5\text{‰}$ . The apparently lighter values (average- $27.5\text{‰}$ ) in near bottom water (4.5 m water depth) demonstrate that POM in high turbid water in post-monsoon period may be derived from the outside terrestrial plants through heavy rainfall during the summer monsoon period. The present study suggests that carbon and nitrogen stable isotope ratios as well as C/N ratios should be useful indexes to clarify the origin of POM.

**Key words : carbon and nitrogen isotope, POM, Shingu reservoir**

## 서 론

저수지의 부영양화는 물의 효율적 이용과 생태계의 건전한 기능수행을 저해하는 조류의 비정상적인 대발생을 초래하며, 저층에서의 산소고갈, 저서생물의 고사, 독성물질 용출로 인한 생물들의 피해 등이 나타나 용수로서의 기능을 상실하게 한다(이, 2003). 우리나라의 농업용 저

수지는 생활하수, 축산폐수와 같은 비점오염원의 수계유입으로 부영양화와 조류 발생이 빈번하여(Hwang, 2003), 수질관리에 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다(농림부, 2003). 따라서 농업용 저수지의 부영양화 및 녹조 발생 방지를 위하여 외부오염원의 저감 노력이 필요하며(Schinder, 1974; 김, 2004), 나아가 저수지 수생태계의 기능 및 특성을 파악하기 위한 수층 내 유기물의 총량 및 에너지 순환과정에 대한 정확한 해석이 요구된다.

\* Corresponding author: Tel: 031) 400-5530, Fax: 031) 416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

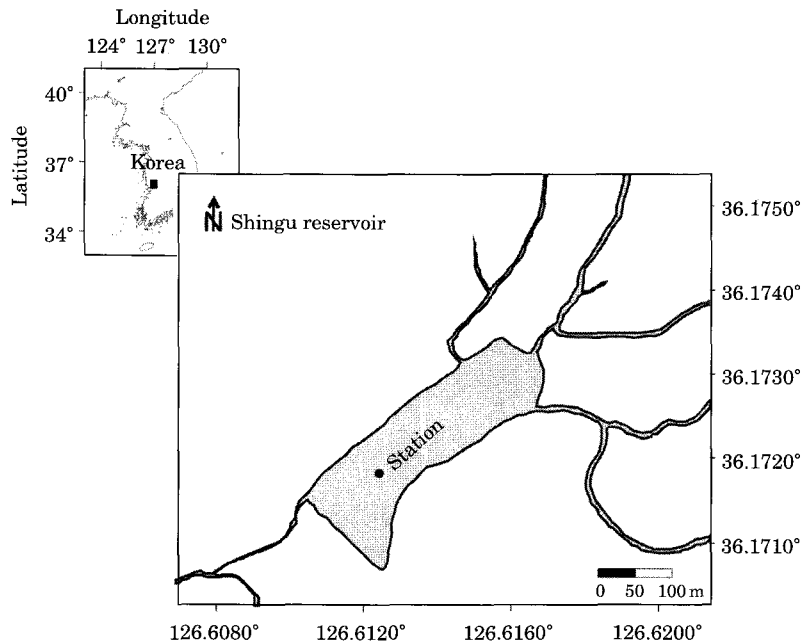


Fig. 1. A map showing a study area in Shingu reservoir.

저수지 내 유기물은 그 기원에 따라 크게 내부 생성 유기물과 외부로부터 유입된 유기물로 구분될 수 있는데, 전자는 주로 식물플랑크톤과 수생식물에 의해 생성되며, 후자는 주변 지역의 식생으로부터 기인된 유기물이라고 할 수 있다(Fry and Sherr, 1984; Owens, 1987). 수계 내 유기물의 기원을 파악하는 데 있어서 유기탄소와 질소의 비(C/N비)와 탄소안정동위원소 비( $\delta^{13}\text{C}$ )가 유용하게 사용될 수 있다는 가능성이 제기되어 왔다(Osmond *et al.*, 1981; Meyers, 1997). 왜냐하면 내부기원인 식물플랑크톤의 C/N비가 6~7 정도인 반면 육상기원 유기물의 C/N비는 15 이상을 나타내기 때문이며, 또한  $\delta^{13}\text{C}$ 비는 외부기원 유기물의 경우 식물플랑크톤의  $\delta^{13}\text{C}$ 비인 대략 -20%보다 가벼운 평균 -27‰ 정도를 나타내기 때문이다. 본 연구에서는 우리나라 농업용 저수지에 외부로부터 유기물이 집중적으로 유입되는 시기로 알려져 있는 하계 장우기를 전·후로 신구저수지에서 저수지 내의 유기물 존재형태(입자성/용존성, POM/DOM)와 수직 분포의 변화를 조사하고 나아가 안정동위원소비를 분석하여 입자성 유기물의 기원을 규명하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사

신구저수지는 충청남도 보령시 주안면에 위치한 농업

용 저수지로서(면적 0.1 km<sup>2</sup>, 최대수심 7.0 m). 유역면적은 2.55 km<sup>2</sup>이며 유로연장이 각각 1.3, 3.4 km인 2개의 유입수로 가지고 있다. 평균수심이 3.9 m이고 유효 저수량은 38.8만 톤이며 연평균 엽록소 *a* 농도가 25  $\mu\text{g L}^{-1}$  이상인 우리나라의 대표적인 부영양화 저수지이다(농림부, 2000). 연구는 장우기 전·후인 2007년 7월 4일과 8월 9일 두 차례에 걸쳐 각각 실시되었다. 조사지점은 저수지 중앙의 수심이 깊은 곳을 선정하였으며(Fig. 1) 장우기 전에는 수심이 3.5 m, 장우기 후에는 수심이 4.5 m를 나타내었다.

### 2. 분석항목 및 방법

#### 1) 수질조사

기초적인 수질 데이터(pH, 수온, 탁도, 전기전도도)는 수질측정기(U-10, Horiba, Japan)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 광량은 광량계(Li-1000, Li-COR, USA)를 사용하여 측정하였다. 수심에 따라서 50 cm 간격으로 측정하였으며 오전, 오후로 2회에 걸쳐 측정하였다.

#### 2) 크기별 엽록소 *a*의 농도

신구저수지 내 크기에 따른 입자성 부유물질과 유기물질의 농도, 엽록소 *a*의 농도, 입자성 유기탄소의 농도 차이를 알아보기로 채(망목 크기: 100, 63, 20  $\mu\text{m}$ )를 이용하여 크기를 나누어 분석을 실시하였다. 엽록소 *a*의 농도를 측정하기 위한 시료는 각 수심별로 채수한 후 크기를 나

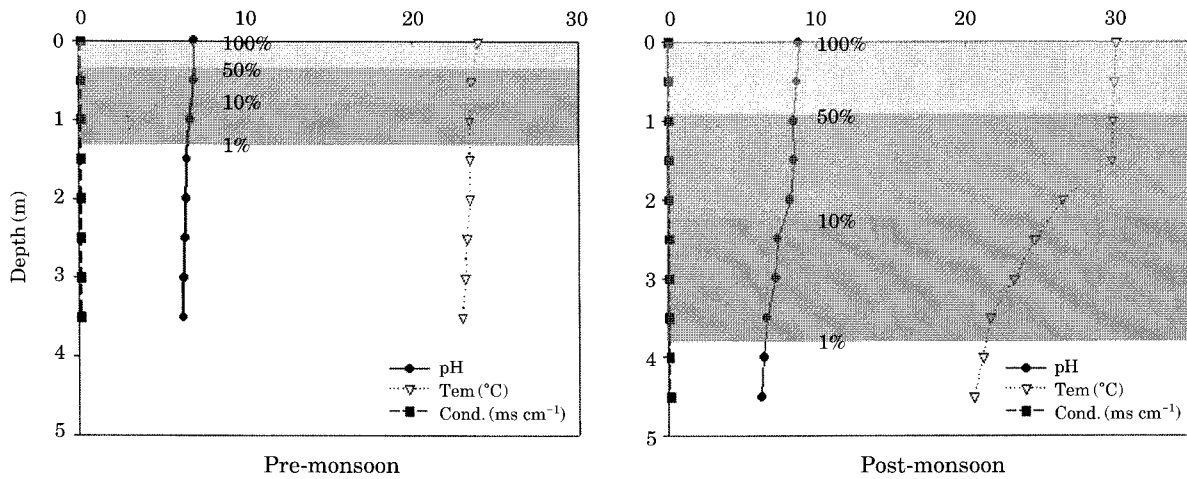


Fig. 2. Temporal and vertical variation of temperature, pH and conductivity in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

누어 평균 구경이 대략 0.65이고 직경 47 mm인 유리섬유 여과지 (Glass fiber filter paper, GF/F)에 여과한 후 90% 아세톤으로 추출한 뒤 UV-Spectrophotometer (Cary 50, Varian, Australia)를 사용하여 분석하였다.

**3) Suspended Particle Meter/Particle Organic Meter (SPM/POM)**

입자성 부유물질 (SPM)과 입자성 유기물 (POM)은 각 수심별로 채수한 후 각 크기별로 미리 무게를 측정한 여과지 (GF/F)에 여과한 후 70°C의 oven에서 건조시켜 데시케이터에 넣어서 방냉한 후 무게를 측정한다. 그 후 아래 식에 따라 계산한다.

$$SPM (mg L^{-1}) = (b - a) / V$$

- a: 여과하기 전 여과지 (GF/F)의 무게 (mg)
- b: 여과 한 후 여과지 (GF/F)의 무게 (mg)
- v: 여과 한 물의 양 (L)

POM은 SPM을 측정된 여과지를 450°C에서 1시간 동안 태워 유기물을 제거한 후 무게를 측정한다.

$$POM (mg L^{-1}) = SPM (mg L^{-1}) - \text{태운 후의 여과지의 무게 (mg)}$$

**4) 입자성 유기물질의 유기탄소, 총질소 함량 및 안정동위원소비**

현장에서 시료를 채수한 후 25 mm 여과지에 여과시킨 후 1N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거한 뒤 동결 건조기에서 건조시킨다. 시료는 틴 (Tin) 캡에 넣어 알래스카 대학 (University of Alaska) 물환경연구센터 (Water Envi-

ronmental Research Center)에 있는 원소-질량분석기 (Delta V plus, Finnigan, Germany)를 이용하여 탄소와 질소 함량 및 안정동위원소비의 분석을 하였다.

$$\delta^{13}C, \delta^{15}N = \{R(\text{sample}) / R(\text{standard}) - 1\} \times 1000 (‰)$$

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

${}^{13}C : {}^{12}C$ 는 PDB (Pee Dee Belemnite),  ${}^{15}N : {}^{14}N$ 는  $N_2$  (Air)를 표준물질로 사용하였다.

**결과 및 토의**

**1. 하계 강우기 전 · 후의 저수지 내 수질 환경 변화**

신구저수지에서 수 표층의 상대광량 100, 50, 10, 1%에 해당되는 수심을 조사하였다. 강우기 전에는 광량 1% 지점이 전체수심 3.8 m보다 얕은 1.2 m에 불과하였으나 강우기 후에는 전체수심 5 m에 가까운 3.8 m로 조사되었다 (Fig. 2). 이는 강우기 전 표층 탁도 (Turbidity)가 68 NTU로 강우기 후의 12 NTU의 비해 높기 때문이다 (Fig. 3). 수온과 pH는 광량의 변화로 인해 수심에 따라서 변동을 보였고, 전기전도도는 수심에 따라서 거의 변동이 없었다. pH는 강우기 전의 조사에서 표층에서 6.92, 수심 3.5 m에서 6.27로 감소하고 있고, 강우기 후에는 표층 8.82, 수심 4 m 지점에서 6.41로 감소하고 있다. 이는 강우기 후에 표층에서 광합성에 의한 pH의 증가를 나타내고 있다. 수온은 강우기 전에 표층에서 24°C, 수심 3.5 m 지점에서 23°C로 감소하고 있으나 강우기 후에 표층에서

30.1°C, 수심 4 m 지점에서 21.1°C로 변화폭이 높게 나타나고 있다. 이는 강우기 후에 수온이 상승하여 표층과 저층 사이에 성층이 형성되었기 때문이다. 탁도는 강우기 전에 오전에는 표층에서 60 NTU, 수심 3.5 m에서 89 NTU로 증가하고 있다(Fig. 3). 강우기 후에는 표층에서 12 NTU, 수심 4.5 m에서 120 NTU로 증가하고 있다. 강우기 후에 저층에서의 탁도가 강우기 전의 저층에서의 탁도보다 높은 것으로 보아 하계 강우기에 호우로 인해 외부로부터 유입된 유입물질이 저수지의 저층에 존재하는 것으로 추측된다.

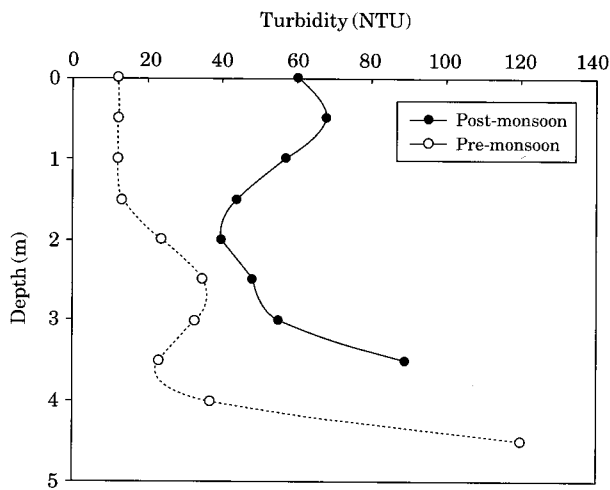


Fig. 3. Vertical distribution of turbidity in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

본 연구에서는 저수지 내 수심에 따라서 부유물질의 크기를 구분하지 않은 총 시료(total)와 체(sieve)를 사용하여 부유물질을 세 가지(20, 63, 100 μm)의 크기로 구분한 시료에 대해 엽록소 a 농도를 측정하였는데, 크기에 따른 엽록소 a의 농도에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 4). 이는 20 μm 이하의 작은 크기의 식물플랑크톤이 우점하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 강우기 전 조사에는 표층에서 총 엽록소 a의 농도가 99.1 μg L<sup>-1</sup>로 높은 농도를 보이지만 강우기 후에는 18.3 μg L<sup>-1</sup>로 낮은 농도를 보였고 저층에서도 108.6 μg L<sup>-1</sup>(강우기 전)에서 23.19 μg L<sup>-1</sup>(강우기 후) 낮은 농도를 보였다. 이러한 현상은 수층의 일차생산력이 감소한 것이라고 보기보다는 호우시기에 많은 양의 물이 저수지 내로 유입되어 희석된 효과라 여겨진다. 수심 역시 강우기 후에는 5 m, 강우기 전에는 3.8 m로 차이를 보이는 것 역시 이를 뒷받침해주는 자료라 생각된다. 엽록소 a의 농도는 수심에 따라서는 강우기 전, 후 모두 표층보다는 중층에서 높은 농도를 보였으며 저층에서 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 총 엽록소 a 뿐만 아니라 크기별로 구분한 엽록소 a 농도에서도 유사한 경향을 보여주었다.

강우기 전에는 SPM 중에 POM이 차지하는 비율이 전 수심에 걸쳐 높게 나타나고 있으며, 강우기 후의 조사에 비해서도 보다 높은 농도를 보였다. 이는 강우기 전 탁도의 농도가 강우기 후보다 높은 결과와 일치한다. 그러나 강우기 후에 수심 4.5 m 지점에서 SPM의 농도가 높게 나타났는데(Fig. 5). 이러한 결과는 강우기 후에 저층에서 탁도가 크게 증가하여 SPM의 농도가 높을수록 오히려

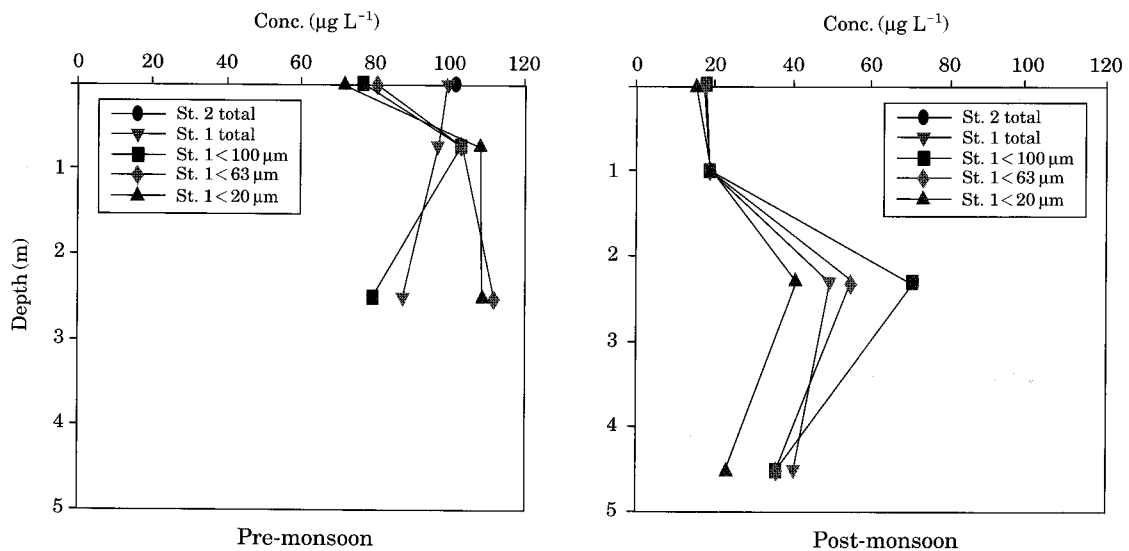


Fig. 4. Vertical distribution of Chl. a concentration in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

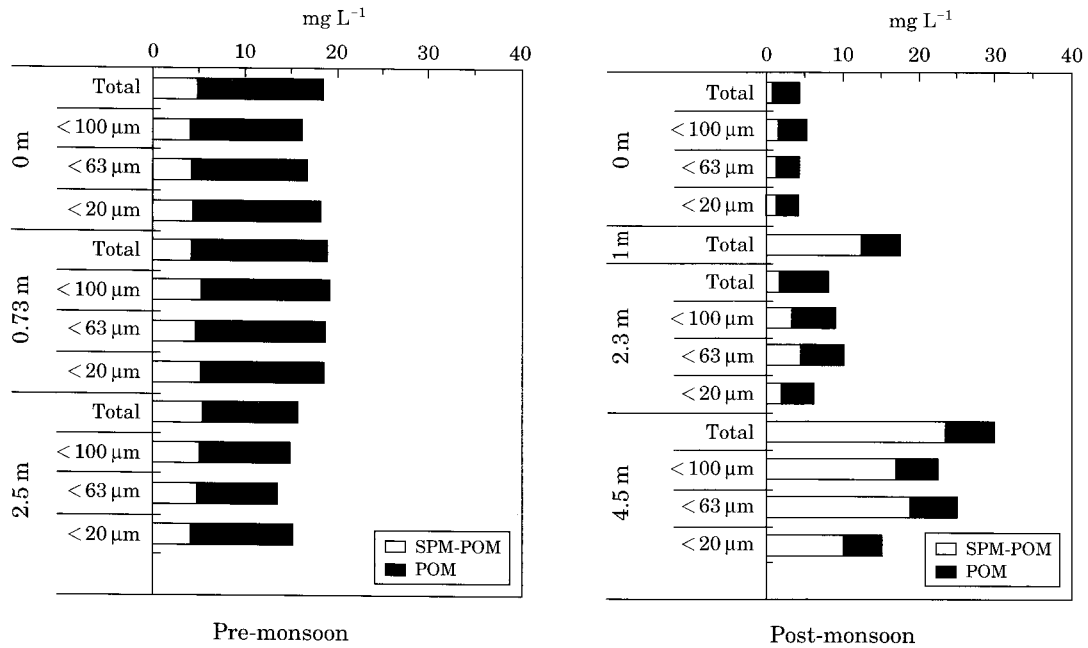


Fig. 5. Vertical distribution of SPM and POM concentration in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

Table 1. TN and TP concentration in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

Depth	Pre-monsoon			Post-monsoon		
	TN ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	TP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	TN/ TP	TN ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	TP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	TN/ TP
0 m	920	31.3	29.3	1875	48.1	38.9
2 m	1152	51.8	22.3	1971	46.8	42.1
4 m	1543	59.2	26.0	-	-	-

POM의 비율이 낮게 나타나는 것으로 보여진다. 이는 강우기 후의 저층의 입자물질의 구성요소는 유기물보다 무기물이 크게 기여하고 있음을 나타내고 있다.

신구저수지에서 두 차례 조사를 통해 총질소와 총인인 농도를 측정하였는데, 강우기 전 조사에는 TN/TP의 비가 22.3~29.3의 범위를 보이지만 강우기 후 조사에는 38.9~42.1로 높은 수치를 보이고 있다(Table 1). Smith (1983)는 표층의 TN/TP비가 29보다 작을 때, 남조류가 우점한다고 보고한 바 있으며, Tilman and Kiesling (1984)는 TN/TP비가 9보다 작고 온도가 20°C 이상일 때, 남조류가 출현한다고 보고한 바 있다. 이러한 관점에서 본다면 강우기 전, 후 조사에서 남조류가 출현하지 않은 이유가 TN/TP비가 충분히 낮지 않아서라고 사료된다.

Table 2. Vertical distribution of C/N ratio of particle organic matter in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

Data	Depth	C/N ratio
Pre-monsoon	0 m	5.70
	1 m	5.48
	2.5 m	6.96
Post-monsoon	0 m	7.10
	2.5 m	7.26
	4.5 m	12.81

## 2. 저수지 내 입자성유기물의 수직분포와 기원 해석

강우기 전의 조사에서는 수심에 따라서 POC의 농도가 4.96~6.68  $\text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내며 DOC의 농도는 3.82~3.96  $\text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 있다. 그러나 강우기 후의 조사에서는 POC의 농도가 1.73~5.32  $\text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 있고 DOC의 농도가 2.18~2.57  $\text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 있어 전체적으로 강우기 전보다 강우기 후의 POC와 DOC의 농도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 강우기 후에 높은 탁도를 나타냈던 수심 4.5 m의 저층에서는 DOC의 농도 증가는 뚜렷하지 않았으나 POC의 농도가 크게 증가한 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6).

강우기 전, 후의 입자성 유기탄소의 C/N비는 분명한

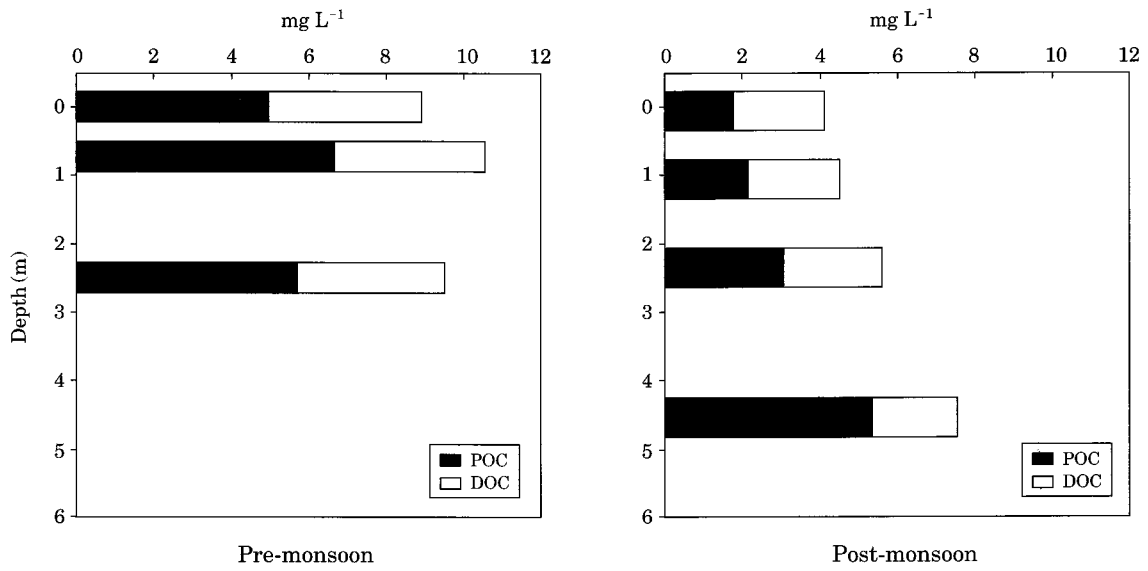


Fig. 6. POC and DOC concentration in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

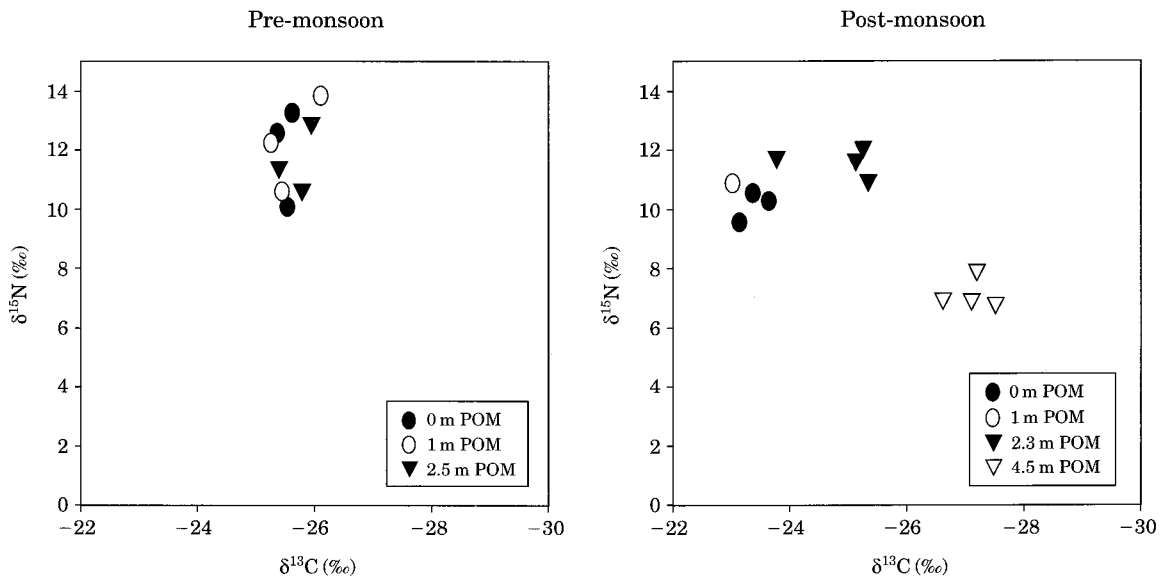


Fig. 7. Plots of organic carbon and total nitrogen stable isotope ratio of particle organic matter in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon 2007.

차이를 보여 주고 있는데 (Table 2), 강우기 전에 표층 0 m에서 C/N비는 5.70이며 저층 2.5 m에서 C/N비는 6.96으로 차이를 보이고 있다. 하지만 강우기 후에 표층 0 m에서의 C/N비는 7.10이나 저층 4.5 m에서의 C/N비는 12.81로 강우기 전보다 높은 변화를 보이고 있다. 이와 같이 강우기 후에 저층의 C/N비가 큰 폭으로 증가하는 것은 강우시기에 호우로 인해 외부로부터 육지기원 유기

물이 유입되어 신구저수지의 중앙부 저층에 존재하고 있다는 것을 나타낸다. 우리나라는 몬순 기후의 영향으로 여름철에 자주 폭우가 발생하며 농경지 등이 침식되어 대량의 탁수가 발생되고 있으며 (김 등, 2003), 국내 최대 인공호인 소양호에서 발생하는 탁수의 발생근원이 주로 강우시 상류하천에서 유입되는 부유물이라는 연구사례가 있다 (허 등, 1998).

본 연구에서는 신구저수지의 저층에 존재하는 높은 탁도를 나타내는 부유물의 기원을 연구하기 위하여 유기탄소와 총질소의 안정동위원소비를 측정하였다(Fig. 7). 강우기 전에는 수심에 따른 모든 유기물의  $\delta^{13}\text{C}$  값이  $-25.1 \sim -26.1\text{‰}$ 로 1‰ 내외의 비슷한 범위를 가지며  $\delta^{15}\text{N}$  값은  $10.5 \sim 13.7\text{‰}$ 로 약 3‰의 차이를 보이고 있다. 강우기 후에는 수심에 따라 입자성 유기탄소의  $\delta^{13}\text{C}$  값이  $-23.2 \sim -27.5\text{‰}$ 로 약 5‰ 정도의 큰 차이를 나타내었으며, 입자성 총질소  $\delta^{15}\text{N}$  값도  $6.9 \sim 12.0\text{‰}$ 으로 약 5‰ 정도의 상대적으로 큰 차이를 보이고 있다. 일반적으로  $\delta^{13}\text{C}$ 는 유기물의 기원을 반영한다고 할 수 있으며 (Meyers, 1997),  $\delta^{15}\text{N}$ 은 유기물의 기원 이외에도 영양단계 또는 무기질소원의 존재형태 등에 따라 변동될 수 있으나 (Vanderklift, 2003), 신구저수지의 입자성유기물은 강우기 전, 후에 수심에 따라  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{15}\text{N}$  값이 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 이는 강우기 후 외부로부터의 유기물 유입에 의하여 저수지 내 유기물의 유기탄소와 총질소 안정동위원소비가 크게 차이를 보이게 되는 것으로 여겨진다. 특히 강우기 후의 조사에서 저층 4.5 m 유기물의  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{15}\text{N}$  값은 C/N비 값과 같이 상부 수층의  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{15}\text{N}$  값과 큰 차이를 보이는데 이는 강우기 후 외부로부터 기원이 뚜렷이 다른 육상 식물 유기물이 저수지 내로 유입되어 저층에 높은 농도로 존재하고 있다는 것을 반영한다고 할 수 있다. 이와 같은 결과로 볼 때 하계 강우기 후 신구저수지에는 외부로부터 유입된 육상식물기원의 유기물이 저수지 내 저층 수생태계의 주요 에너지원으로서 기여할 수 있다고 사료된다.

적 요

본 연구는 부영양상태의 신구저수지에서 강우기 전·후의 수질 변화와 강우기 유입수의 영향을 평가하기 위해 이루어졌다. 강우기 전에는 수심에 따른 수온차가 1°C 이하였지만 강우기 후에는 4°C차 이상까지 벌어져 수온 약층이 뚜렷하게 형성되었다. 탁도는 강우기 전보다 강우기 후에 표층에서 12 NTU, 저층 120 NTU로 크게 증가하였다. POC의 농도는 강우기 전의 조사에서 수심에 따라서  $4.96 \sim 6.68 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 강우기 후의 조사에서는  $1.73 \sim 5.32 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 있어 전체적으로 강우기 전보다 강우기 후의 POC의 농도가 낮았으나 수심에 따라서 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, DOC의 농도는 강우기 전의 조사에서  $3.82 \sim 3.96 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 있고, 강우기 후의 조사

에서  $2.18 \sim 2.57 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내고 있어 전체적으로 강우기 전보다 강우기 후의 DOC 농도는 감소하고 있다. 또한 강우기 후 저층의 높은 탁도층에서 강우기 전보다 입자성유기물의 C/N비가 크게 증가하였고 입자성 유기물의  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{15}\text{N}$  값이 뚜렷하게 가벼운 값을 보이는 것으로 볼 때 저수지 주변 유역에서 유입된 유기물의 영향을 크게 받았다는 것을 알 수 있다. 본 연구 결과로 볼 때 농업용 저수지인 신구저수지는 하계 강우기시 유입 하천을 통해 외부로부터 유입된 육상식물 유기물이 저층에 부유된 상태로 존재하며 이는 저수지 내 저층 수생태계의 에너지 흐름에 영향을 줄 수 있는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 “생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발”(306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

김범철, 저만식, 김윤희. 2003. 아시아 몬순지역에서의 수질관리 방안. 춘천 물 포럼 발표논문집. pp. 59-77.  
 김호섭, 황순진. 2004. 얕은 부영양 저수지의 육수학적 특성: 계절에 따른 수질변화. 육수지 37: 180-192  
 농림부·농업기반공사. 2000. 농업용수 수질오염원 조사 종합 보고서.  
 이광식, 윤경섭, 김형중, 김호일. 2003. 농업용 저수지의 부영양화와 수질관리방안. 한국환경농경학회지 22(2): 166-171.  
 허우명, 김범철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 육수지 31: 1-8.  
 Edmonson, W.T. and J.T. Lehman. 1981. The effect of changes in the nutrient income on the condition of lake Washington. *Limnol. Oceanogr.* 26: 1-29  
 Fry, B. and E.B. Sherr. 1984.  $\delta^{13}\text{C}$  measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contrib. Mar. Sci.* 27: 196-229.  
 Happer, D. 1992. Eutrophication of fresh water: principles, problems and restoration. Chapman and Hall. pp. 199-200.  
 Hwang, S.-J., C.G. Yoon and S.K. Kweon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy & Water Environment* 1: 43-52.  
 Meyers, P.A. 1997. Organic geochemical proxies. *Organic Geochemistry* 27: 213-250.

- Osmond, C.B., N. Valaane, S.M. Haslam, P. Uotila and Z. Roksandic. 1981. Comparison of  $\delta^{13}\text{C}$  values in leaves of aquatic macrophytes from different habitats in Britian and Finland; some implications for photosynthetic processes in aquatic plants. *Oecologia* **50**: 117-124.
- Owens, N.J.R. 1987. Natural variation in  $^{15}\text{N}$  in the marine environment. *Adv. Mar. Biol.* **24**: 390-451.
- Schindler, D.W. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science* **184**: 897-899.
- Simith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by bluegreen algae in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.
- Tilman, D. and R.L. Kiesling. 1984. Freshwater algal ecology: taxonomic trade-offs in the temperature dependence of nutrient competitive abilities. pp. 314-319.
- Vanderklift, M.A. and S. Ponsard. 2003. Source of variation in consumer-diet  $\delta^{15}\text{N}$  enrichment. *Oecologia* **136**: 169-182.
- Wong, W.W. and W.M. Sackett. 1978. Fractionation of stable carbon isotopes by marine phytoplankton. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* **42**: 1809-1815.

(Manuscript received 31 December 2007,  
Revision accepted 4 February 2008)