

강우기 후 신구 농업용 저수지 먹이망에 미치는 외부기원 유기물의 영향 - 안정동위원소비 활용 -

김민섭^{1,2} · 이연정¹ · 안광국³ · 김백호⁴ · 황순진⁵ · 신경훈^{1,*}

¹한양대학교 해양환경융합과, ²국립환경과학원 환경측정분석센터, ³충남대학교 생명과학부,
⁴한양대학교 생명과학과, ⁵건국대학교 환경과학과

Allochthonous Organic Matter Contribution to Foodweb in Shingu Agricultural Reservoir after Rainfall Period. Kim, Min-Seob^{1,2}, Yeon-Jung Lee¹, Kwang-Guk An³, Baik-Ho Kim⁴, Soon-Jin Hwang⁵ and Kyung-Hoon Shin^{1,*} (Department of Marine Science and Convergence Technology, Hanyang University, Seoul 147-704, Korea; ²Department of Fundamental Environment Research, Environmental Measurement & Analysis Center, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea; ³Department of Bioscience and Biotechnology, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea; ⁴Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ⁵Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Abstract The origin of particulate organic matter (POM) and food web structure were investigated in Shingu reservoir based on stable isotope analysis from pre-monsoon (July) to post-monsoon (September) 2007. According to the depth in Shingu reservoir, the ¹³C and ¹⁵N values of POM for pre-monsoon period were non-significant distinction, while it was significant variation after rainfall period. The $\delta^{13}\text{C}$ values of POM in pre-monsoon period ranged from -25.1‰ to -26.1‰ in whole water column, but the $\delta^{13}\text{C}$ values of POM in post-monsoon period showed relatively wide range between -23.2‰ and -27.5‰ . The apparently lighter values (average -27.5‰) in near bottom water (7 m water depth) demonstrate that POM in high turbid water in post-monsoon period may be derived from the outside terrestrial plants (allochthonous) through heavy rainfall during the summer monsoon period. After rainfall period, ¹³C and ¹⁵N values of *D. brachyurum* showed -23.3‰ and 12.2‰ , respectively, while *B. longirostris* showed -27.1‰ and 8.7‰ , respectively. It suggested that *D. brachyurum* mainly feed on POM in autochthonous organic matter pool, but *B. longirostris* mainly consumed POM in allochthonous organic matter pool after rainfall period. Carbon and nitrogen stable isotope ratios were markedly different among secondary consumers. The carp (*C. carpio*) and catfish (*S. asotus*) were in the higher trophic level and crucian carp (*C. auratus*) and mudfish (*M. mizolepis*) were in the lower trophic level. ¹³C and ¹⁵N values of *Z. platypus* didn't significantly changed between before and after rainfall period. But *P. parva* and *C. auratus* apparently changed the ¹³C and ¹⁵N values after rainfall period. It is suggested that *P. parva* and *C. auratus* seem to feed allochthonous food source while *Z. platypus* depend on autochthonous food source.

Key words: carbon and nitrogen isotope, POM, foodweb, allochthonous, autochthonous

Manuscript received 15 March 2014, revised 30 March 2014,
revision accepted 31 March 2014
* Corresponding author: Tel: +82-31-400-4158, 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.

서 론

저수지나 호수 내 유기물은 그 기원에 따라 내부기원 유기물 (autochthonous organic matter)과 외부기원 유기물 (allochthonous organic matter)로 구분되며, 전자는 주로 식물플랑크톤과 저서미세조류, 수생식물, 부착조류 등에 의해 생성되고 후자는 주변 유역의 식생으로부터 기인된 유기물이라고 할 수 있다 (Fry and Sherr, 1984; Owens, 1987). 강우기의 집중호우와 유입 수량 증가는 외부기원의 입자성, 용존성 물질을 저수지 내로 운반하고 혼합을 일으키는 주요 원인으로 작용한다 (Hwang *et al.*, 2002). 강우기내에 저수지로 대량 유입된 고탁수층은 수온층을 형성하는 깊이에서 밀도류를 형성하여 하류부로 침강하면서 안정된 수층대를 형성하여 저수지내에 장기간 체류하게 된다 (Park *et al.*, 2005). 이러한 환경 변화는 저수지 생태계내로 다량의 외부기원 유기물 유입을 야기시켜, 먹이 사슬 (food web)에 영향을 미친다 (Tamelander *et al.*, 2009). 최근 국내에서는 하계 강우기 이후에 고탁수층의 유입이 담수생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 팔당호는 빈번한 강우로 체류시간이 짧고 식물플랑크톤 현존량이 매우 적어서, 식물플랑크톤에 의한 내부생산 기여도가 약 5%로 매우 낮았으나 강우기가 아닌 시기에는 체류시간이 길어지면서 식물플랑크톤에 의한 내부생산 기여도가 29%로 높아졌다고 밝혀졌다 (Park *et al.*, 2004). 낙동강에서는 강우기간 후에 탁도증가와 수체의 체류시간 감소로 인해 Chl *a* 농도가 연중 최저치를 기록하였으며 (Park *et al.*, 2002), 대청호 및 소양호에서도 비슷한 보고가 이루어졌다 (An *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2004).

강, 호수, 해양 퇴적물내에 유기물질 (organic matter)은 수생물 (phytoplankton, macrophytes.) 및 육상 (trees, grasses, animals) 기원으로부터 기인되는 heterogeneous한 유기물의 총체이다 (Meyers *et al.*, 2001). 이러한 유기물들의 안정동위원소비를 결정하는 중요한 요소는 서로 다른 기원으로부터 오는 C, N, S의 안정동위원소비의 차이 (end-member) 및 기여도에 의해 결정된다 (Brodie *et al.*, 2011). 일반적으로 해양 (marine), 육지 (terrestrial), 습지 (marsh) 기원 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-5 \sim -35\%$ 의 범위를 가지며, 해양기원 유기물은 $-23 \sim -18\%$, 육상기원 유기물은 $-28 \sim -25\%$ 의 값을 가진다 (Meyers *et al.*, 1997). 그 중에서 광합성 기작의 차이에 따라서 C_3 식물 계열은 $-35 \sim -22\%$ 의 값을 가지며, C_4 식물 계열은 $-15 \sim -6\%$ (Smith and Epstein, 1971)의 범위를 나타

낸다. 그러므로 $\delta^{13}\text{C}$ 는 유기물의 기원을 파악하는 연구에 많이 이용되고 있다 (Wildhaber *et al.*, 2012). $\delta^{15}\text{N}$ 는 다양한 nutrient pool 중에서 nitrogen source를 밝히는데 사용되어졌다 (Meyers, 1997). 일반적으로 육지기원 유기물의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 해양기원 유기물보다 가벼운 값을 가지며 (Rau *et al.*, 1981), 가축 분뇨에서 발생한 암모니아 화합물로 만들어진 합성 비료는 20~30%의 무거운 $\delta^{15}\text{N}$ 를 나타내고 있어서 질소의 기원을 추적하는 연구에 활용되고 있다 (Costanzo *et al.*, 2001). 또한, 탄소 ($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소 ($\delta^{15}\text{N}$) 안정동위원소비는 생태계내 먹이의 기원을 파악하고 영양단계를 이해함에 있어서 중요한 기법으로 사용되어졌다 (Fry and Sherr, 1984). 일반적으로 $\delta^{13}\text{C}$ 는 1% 미만의 변동으로 유기물의 기원을 반영하며, $\delta^{15}\text{N}$ 은 약 3~5%의 분별작용으로 영양단계를 설명하는데 사용된다 (DeNiro and Epstein, 1978).

신구저수지는 충청남도 보령시 주안면에 위치한 소규모 농업용 저수지로서, 2개의 유입수로를 가지고 있다 (Kim *et al.*, 2004). 강우가 집중되는 6월과 8월 시기에 수위 변화와 함께 수질의 뚜렷한 변화를 나타내며, 질소 및 인등의 농도 변화가 나타나는 얇은 수심의 부영양화성 저수지이다 (Kim *et al.*, 2004). 국내에서는 안정동위원소비를 활용한 하구 및 연안 생태계의 먹이사슬 연구 (Kang *et al.*, 2003; Yang and Shin, 2009), 강 및 호수 생태계 연구 (Gal *et al.*, 2012) 등은 연구 사례가 있으나 저수지에서의 연구는 거의 전무한 실정이다. 본 연구에서는 하계 강우기를 전, 후로 외부기원 유기물이 신구저수지로 집중적으로 유입되는 시기에 입자성 유기물, 동물플랑크톤, 어류등의 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석을 통해 신구저수지내 먹이사슬의 변화를 규명하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사지점

신구저수지는 충청남도 서천군 보령시 주안면 ($36^{\circ} 10' \text{N}$, $126^{\circ} 37' \text{E}$)에 위치한 농업용 저수지로서, 최대 수심은 7 m, 평균 수심은 3.5 m, 면적은 0.1 km^2 이며 유효저수량은 $3.88 \times 10^5 \text{ ton}$ 이다. 저수지의 경계에는 농경지가 존재하며, 유로 연장이 각각 1.3, 3.4 km인 2개의 유입수로가 존재하고 있어 저수지의 영양염 농도 증가에 큰 영향을 미치는 우리나라의 대표적인 부영양화 저수지이다 (Kim *et al.*, 2004). 연구는 강우기 전, 후인 2007년 7월과 9월 두 차례에 걸쳐 각각 실시되었으며 조사

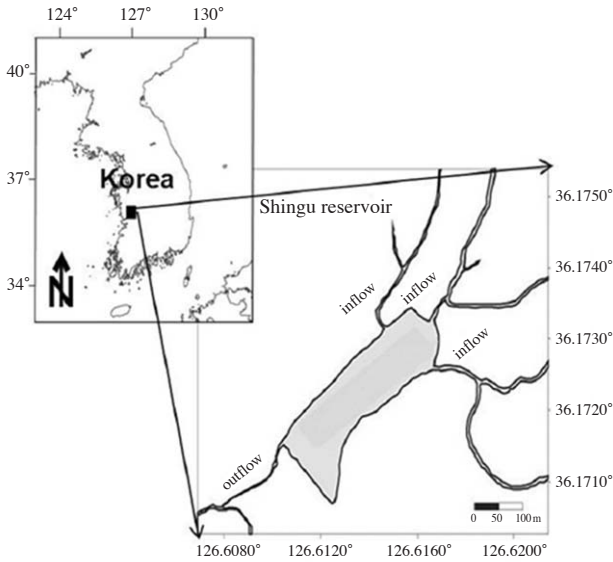


Fig. 1. A map showing a study area in Shingu reservoir.

지점은 저수지의 중앙의 수심이 깊은 곳을 선정하였다 (Fig. 1). 강우기 전인 7월에는 평균 수심이 3.5 m이며, 강우기 후에는 수심이 7 m이다 (Ministry of agriculture and forestry, 2007).

2. 수질자료

수질 시료는 반돈채수기를 이용하여 채수하였으며, 기초적인 환경데이터 (수온, 탁도, pH)는 수질측정기 (Horiba, U-10)를 이용하여 수심에 따라서 측정하였다. 강우기 전인 7월에는 표층, 1.5 m, 3.5 m에서 측정하였으며, 강우기 후인 9월에는 표층, 3 m, 6 m에서 측정하였다. Chl *a* 농도는 담수를 직경 47 mm, 구경 0.65 μ m의 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.

3. 생물시료

입자태 시료 (POC, TN)는 수질 시료와 같은 위치에서 채집하였으며, 플랑크톤 네트 (20 μ m)를 이용하여 동물플랑크톤을 제거해 준 후, 남은 원수를 450°C, 24시간 동안 태워서 유기물을 제거해 준 GF/F 여과지 (47 mm, 0.45 μ m)에 여과하였다. 동물플랑크톤은 플랑크톤 네트 (망목크기 64 μ m)로 수직 예인한 시료중에서 우점종인

요각류 (*Diacyclops thomasi*), 지각류 (*Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina longirostris*)를 광학현미경 (Axio-star plus, ZEISS, Germany)을 이용하여 핀셋으로 직접 채집하였다. 어류 채집은 족대 (망목크기 4×4 mm) 및 투망 (망목크기 5×5 mm)을 이용하였다. 어류채집은 1시간 동안 실시하였으며, 채집구간은 저수지 규모를 감안하여 조사 지점별로 50 m 구간 내에서 실시하였다.

4. 탄소, 질소 안정동위원소비 분석

입자태 및 동물플랑크톤 시료는 1N 염산을 이용하여 진공 데시케이터 안에서 24시간 증기처리를 통하여 무기태 탄소를 제거해준 후 NaOH를 이용하여 산을 중화 해주었다. 어류 시료는 근육만 구분한 후 동결건조를 통해 수분을 제거하고, 시료분쇄기 (FRITSCH-planetary mono mill, Pulverisette 6, Germany)를 사용하여 분말 형태로 갈아주었다. 이후에 DCM:MeOH (2:1)을 사용하여 지질부분을 제거해준 후 1N 염산을 이용하여 24시간 동안 무기태 탄소를 제거해 준 후 증류수를 이용하여 산을 제거하고 동결건조하였다. 총 질소 안정동위원소비 측정을 위한 시료는 지질제거 및 염산 처리가 결과값에 영향을 미치지므로 전처리를 하지 않았다 (Bunn *et al.*, 1995). 입자태 시료는 25 mm GF/F 여과지에 여과한 시료를 분석하였고 동물플랑크톤은 약 100개체를 25 mm GF/F 여과지에 없어서 분석하였으며, 어류 시료는 0.5 mg 내외의 시료를 이용하여 분석하였다. 각 시료의 탄소, 질소 안정동위원소비 측정은 한양대학교 공동기기센터에 있는 원소 (Euro EA 3000-D, Italy)-질량 분석기 (Isoprime; GV Instrument, U.K.)를 이용하여 분석하였다. 탄소는 VPDB (Vienna PeeDee Belemnite), 질소는 대기중 N₂를 표준물질로 사용하였다. 탄소, 질소 안정동위원소비는 아래와 같은 계산을 이용하여 계산하였다.

$$\delta X = \left\{ \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{std}}}{R_{\text{std}}} \right\} \times 1000 (\text{‰}),$$

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

결과 및 고찰

1. 강우기 전·후의 환경변화

수온은 강우기 전에 표층에서 27.5°C, 수심 3 m 지점에서 23.3°C로 약간 감소하고 있으나 강우기 후에는 표층에서 32.1°C, 수심 7 m 지점에서 22.5°C로 크게 감소하고 있다 (Table 1). 이는 강우기 전보다 강우기 후에

Table 1. Environmental parameters (temperature, turbidity, Chl *a*, TN, TP) in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon period.

Depth	Pre-monsoon					
	Temperature (°C)	Turbidity (NTU)	Chl <i>a</i> (µg L ⁻¹)	TN (µg L ⁻¹)	TP (µg L ⁻¹)	TN/TP
0 m	27.5	60	99.1	920	31.3	29.3
1.5 m	26.2	67	92.4	1,152	51.8	22.3
3 m	23.3	89	85.6	1,543	59.2	26.0
Depth	Post-monsoon					
	Temperature (°C)	Turbidity (NTU)	Chl <i>a</i> (µg L ⁻¹)	TN (µg L ⁻¹)	TP (µg L ⁻¹)	TN/TP
0 m	32.1	44	28.3	1,948	46.7	41.7
3 m	25.3	37	47.5	2,012	49.1	40.9
7 m	22.5	116	40.1	2,326	55.3	42.6

Table 2. POC and PON concentration in Shingu reservoir in pre-monsoon and post-monsoon period.

Pre-monsoon					Post-monsoon				
Depth	POC (mg L ⁻¹)	PN (mg L ⁻¹)	POC/PN	POC/Chl <i>a</i>	Depth	POC (mg L ⁻¹)	PN (mg L ⁻¹)	POC/PN	POC/Chl <i>a</i>
0 m	4.9	1.1	5.7	49.4	0 m	1.7	4.1	7.1	60.1
1.5 m	5.6	0.9	5.4	60.6	3 m	4.3	1.6	7.2	90.4
3 m	5.7	1.2	6.9	66.5	7 m	5.3	2.4	12.8	132.1

표층에서의 수온이 상승하여 저층과 수온 차이에 의한 성층이 형성되기 때문이다. Chl *a* 농도는 강우기 전에 표층에서 99.1 µg L⁻¹로 높은 수치를 보이지만 9월에는 28.3 µg L⁻¹로 낮은 농도를 보였고 저층에서는 85.6 µg L⁻¹에서 40.1 µg L⁻¹로 낮은 농도를 보였다(Table 1). 이러한 현상은 강우기 전에 저수지의 수심이 4m에서 강우기 이후에 7m로 증가될 때 많은 양의 물이 유입되어 희석된 효과라 여겨진다. 강우기 전에 TN/TP의 비가 22.3~29.3의 범위를 보이지만 9월 조사 때는 41.7~42.6으로 높은 수치를 보이고 있다(Table 1). 탁도는 강우기 전에 표층에서 60 NTU, 수심 3m에서 89 NTU, 강우기 후에는 표층에서 44 NTU, 수심 7m에서 116 NTU로 증가하고 있다(Table 1). 강우기 후에 표층보다 수심 7m에서 크게 증가하고 있는 것으로 보아 호우로 인해 외부로부터 유입된 유입물질이 저수지의 저층에 존재하는 것으로 여겨진다. 입자성 유기탄소(POC) 및 입자성 질소(PN)의 농도 변화 및 POC/Chl *a*, POC/PN의 변화가 이를 뒷받침 해주고 있다(Table 2). 강우기전에 입자성 유기탄소의 농도는 표층에서 4.9 mg L⁻¹, 수심 3m에서 5.7 mg L⁻¹로 작은 변화를 보이고 있지만, 강우기 후에는 표층에서 7.1 mg L⁻¹, 수심 7m에서 12.8 mg L⁻¹로 큰 변동을 보이고 있다. POC/Chl *a* 변화는 강우기전에 표층에서 49.4, 수심 3m에서 66.5의 미비한 변

화를 보이지만, 강우기 후에는 표층에서 60.1, 수심 7m에서 132.1로 큰 변화를 보이고 있다. Montagnes *et al.* (1994)은 살아있는 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소와 Chl *a* 농도가 40에 가깝다고 발표하였고 Eppley *et al.* (1971) 등은 입자성 유기탄소와 Chl *a* 농도가 100 이상이면 육지기원임을 제시하였다. 이에 근거하여 강우기 전보다 강우기 후에 수심 7m에서 POC/Chl *a* 비가 100 이상이므로 육지기원 물질의 영향을 많이 받는 것으로 여겨지며, 외부에서 많은 유기물이 유입수로를 따라서 신규저수지로 유입되어 나타난 결과라 사료 된다. 강우 시기에 호우로 인해 외부로부터 유입된 유기물은 저수지 저층에 존재하는 것으로 여겨지며, 강우기후의 수온 약층의 형성, 탁도의 증가, POC/PN의 비가 이를 뒷받침 해주고 있다. 우리 나라는 몬순 기후의 영향으로 여름철에 장마가 발생하며 상류하천에서 유입되는 부유물, 농경지 등의 침식으로 인해 발생한 탁수는 저수지 및 소양호와 같은 대형호내로 유입하여 밀도류를 형성하는 것으로 보고되고 있다(Hu *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2004).

2. 동물플랑크톤의 먹이원 변화

강우기 전에는 수심에 따른 입자성 유기물의 δ¹³C 값이 -26.1~-25.1‰로 1‰ 내의 변동을 보이며 δ¹⁵N 값은

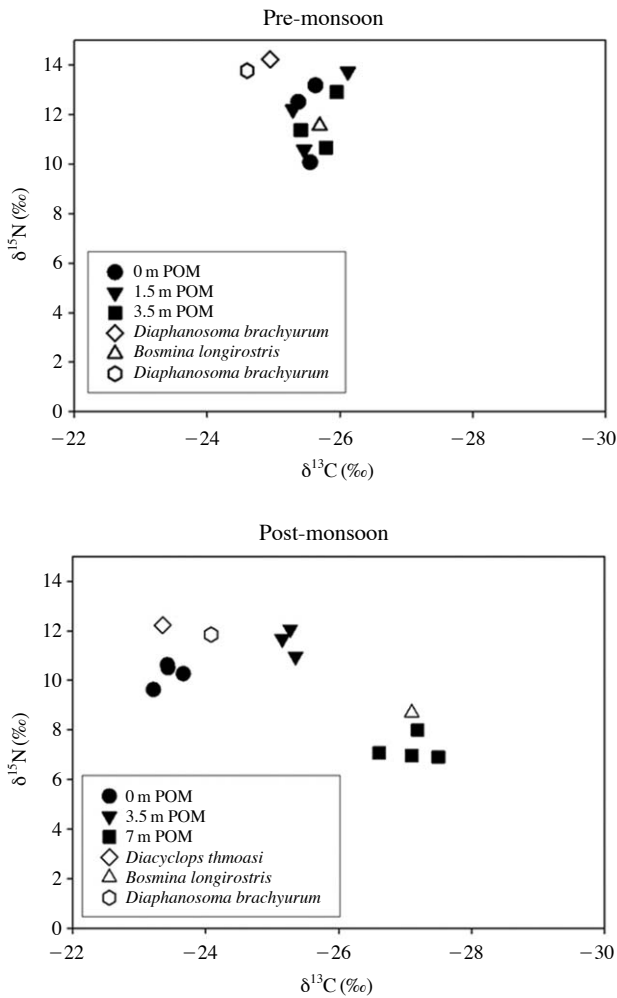


Fig. 2. Plots of organic carbon and total nitrogen stable isotope ratio of particle organic matter in Shingu reservoir in Pre-monsoon and Post-monsoon period.

10.5~13.6‰로 약 3‰의 차이를 보이고 있다(Fig. 2). *B. longirostris*은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -25.6‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 값은 11.5‰의 값을 가진다. 모든 유기물과 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 0.5‰ 내의 변동을 보이며, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 입자성 유기물에 비해서 뚜렷이 무거운 경향이 보이지 않는다. *D. brachyurum* 및 *D. thmoasi*은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 각각 -24.6‰ , -24.9‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 13.7‰, 14.2‰의 값을 가진다. 모든 유기물과 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 약 2‰ 이내의 변동을 보이므로 먹이 기원으로 입자성 유기물 외에 다른 먹이원의 영향을 복합적으로 받는 것으로 여겨진다. $\delta^{15}\text{N}$ 값은 약 0.5‰ 이내에서 입자성 유기물보다 무거운 값을 가진다. 강우기 이후에는 수심에 따른 모든 입자성 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 $-23.2 \sim -27.5\text{‰}$ 로 5‰의 큰 변동을 보이고 있으며, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 6.9~12.0‰로 약 5‰의 높은 차이를 보이고 있다

(Fig. 2). 또한, 강우기 이전과는 달리 수심에 따른 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 값이 확연한 차이를 보이고 있어 서로간의 뚜렷한 특징을 보이고 있다. 표층에서는 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 -23.5‰ , 10.2‰, 3.5 m 수심에서는 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 -25.2‰ , 11.6‰, 수심 7 m에서는 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 -27.3‰ , 7.5‰로 수심별로 뚜렷한 특징을 나타내고 있다. 이는 강우 후 외부로부터의 유기물 유입에 의하여 저수지내 유기물의 유기탄소, 질소 안정동위원소비가 큰 변동을 보이는 것으로 여겨진다. 강우기 이후 수온 증가에 따른 성층화와 유입수로를 통해서 외부로부터 유입된 기원이 다른 유기물이 안정동위원소비의 변동을 야기하는 것이다. 특히 수심 7 m의 유기물은 표층의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 값과 다른 값을 보이며 이는 강우 후 외부로부터의 성질이 다른 유기물이 저수지내로 유입되어 저층에 존재한다는 것을 나타낸다. Kim *et al.* (2007)은 강우시 발생하는 탁수의 영향으로 남한강 및 북한강 인근에 위치한 하천 지역에서 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 1~2‰ 정도 무겁게 나타났고, 이는 농경지역에서 유출된 C_4 계열의 작물에 의한 것이라고 보고하고 있다. 또한 본문에서 언급한 탁도, 입자성 유기탄소(POC) 및 입자성 질소(PN)의 농도 변화 및 POC/Chl *a*, POC/PN의 변화가 이를 뒷받침 해주고 있다(Tables 1, 2). 강우기에 집중 호우로 인해 하천을 통해 저수지로 유입되는 외부기원 유기물은 주로 비생물 입자가 대부분을 차지하며(Wetzel, 2001) 토양성분, 부식질 및 동식물 사체 등이 근간을 이룬다(Wotton, 1994). 연구지역과 같은 얕은 수심의 저수지에서는 인위적인 강제 배출시스템이 없기 때문에 중층에서 고립 또는 분산되어 시간이 경과함에 따라 최종적으로 저층에 침강하게 된다(Wetzel, 2001). 따라서 외부로 유입되는 탁수는 동태에 따라서 저수지에서 구간별 층이 형성될 뿐만 아니라 수중 생태계에 교란적 영향을 미치기 때문에 중요한 변수가 될 수 있다(Shin *et al.*, 2003, 2004; Park *et al.*, 2008).

동물플랑크톤의 탄소 및 질소 안정동위원소비는 호수 및 저수지내 먹이원의 기원을 파악하고 영양단계를 이해 하는데 이용되어 왔다(Fry and Sherr, 1984). 같은 서식처안에서 동물플랑크톤 종들간의 안정동위원소비 차이는 에너지의 흐름 및 서식하는 수환경의 교란등의 영향을 설명하는데 유용한 정보를 제공한다(Lee *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010). 신구저수지에서 강우기 이후에 동물플랑크톤인 *D. brachyurum*은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -23.3‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 값은 12.2‰, *D. thmoasi*은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -24.0‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 값은 11.8‰의 값을 나타내고 있다. 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 표층 유기물과 비교하였을 때 1‰ 이내에서 변동하고,

$\delta^{15}\text{N}$ 값이 2‰ 정도 무거운 값을 나타내기 때문에 주로 표층 유기물이 먹이원인 것으로 여겨진다. 하지만 여과 섭식을 하는 *B. longirostris*은 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -27.1‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 값은 8.7‰ 의 값을 나타내고 있어 수심 7 m 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 값을 반영하고 있다. 이는 *B. longirostris*이 다른 동물플랑크톤 중에 비하여 기원이 다른 입자성 유기물을 섭식하고 있음을 시사하고 있다. 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 변동은 외부기원 유기물과 내부기원 유기물의 먹이원으로서의 상대적인 기여로 나타날 수 있다(Grey et al., 2001). 본 연구에서는 동물플랑크톤이 강우기 이전에는 내부기원 유기물을 먹이원으로 하는 것으로 여겨지나 강우기 이후에는 내부기원 유기물 이외에 외부에서 유입된 외부기원 유기물을 섭식하고 있는 것으로 나타나고 있다. Lee et al. (2010)의 연구에 따르면, 요각류(*C. vicinus*)와 지각류(*D. galeata*, *B. longirostris*) 사이에서 섭식기능의 차이 및 먹이 선호도에 따라서 탄소 및 질소 안정 동위원소비의 차이가 보인다고 보고하고 있다. 그러나, Grey et al. (2001)의 연구에 따르면 동물플랑크톤의 중에 따라서 섭식능력의 차이는 보였으나, *Eudiaptomus*의 경우에는 식물플랑크톤의 생산력이 높은 시기임에도 불구하고 외부기원 유기물을 이용하였으며 *Daphnia*의 경우에는 거의 식물플랑크톤을 먹이원으로 이용함을 보고하였다. 본 연구에서 조사한 cyclopoid copepod는 주로 여과섭식을 하며 (Dobberfuhl et al., 1997), *Diaphanosoma*는 여과 섭식뿐만 아니라 주 먹이원인 식물플랑크톤은 물론 섬모충 및 박테리아까지도 먹이원으로 이용하기 때문에 매우 광범위한 종이다(Park et al., 2010). 그러므로 본 연구에서 제시한 *Bosmina*와 *Diaphanosoma* (또는 *Diacyclops*) 사이의 탄소, 질소안정동위원소비의 차이가 반드시 호내 유기물 기원의 양적인 변화에 의존하여 섭식활동을 하는 것은 아니며, 오히려 종에 따라 먹이선택성을 가지고 있을 가능성이 있다. 또한, 수온성층이 강화된 시기이고 외부기원유기물의 유입이 중층이 아닌 저층으로 유입되는 수문학적인 특성을 고려하여 이들 동물플랑크톤의 수직분포와 먹이활동을 하는 수심을 고려할 필요가 있을 것이다. 본 연구의 결과와 같이 안정동위원소비를 활용한 강우기 전후의 동물플랑크톤의 먹이원의 변동은 호수생태계에서 상위 영양단계의 에너지원의 흐름을 이해하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

3. 먹이사슬 변화

강우기 전후 신구저수지에서는 어류가 총 13종 381개

체가 출현하였으며, 붕어(*C. auratus*), 밀어(*R. brunneus*), 참붕어(*P. parva*)가 가장 우점하는 종으로 나타났다. 강우기 이전에는 붕어(*C. auratus*), 떡붕어(*C. cuvieri*), 점줄종개(*C. lutheri*), 잉어(*C. carpio*), 미꾸리(*M. anguillicaudatus*), 미꾸라지(*M. mizolepis*), 대륙송사리(*O. sinensis*), 동자개(*P. fulvidraco*), 참붕어(*P. parva*), 밀어(*R. brunneus*), 버들치(*R. oxycephalus*), 메기(*R. oxycephalus*), 피라니(*Z. platypus*)가 발견되었으며, 강우기 이후에는 붕어(*C. auratus*), 점줄종개(*C. lutheri*), 잉어(*C. carpio*), 미꾸리(*M. anguillicaudatus*), 미꾸라지(*M. mizolepis*), 대륙송사리(*O. sinensis*), 동자개(*P. fulvidraco*), 참붕어(*P. parva*), 밀어(*R. brunneus*), 피라니(*Z. platypus*)가 발견되었다.

신구저수지내에서 7월에는 *P. fulvidraco*, *C. carpio*, *S. asotus* 등의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $19.1\sim 21.2\text{‰}$ 로 상위영양단계를 이루고 있으며, 그 밖의 *Z. platypus*, *M. anguillicaudatus*, *M. mizolepis*, *R. oxycephalus*, *R. brunneus*, *C. atratus*, *P. parva*, *P. fulvidraco* 등의 어류의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $14.7\sim 16.3\text{‰}$ 로 비슷한 수준의 영양단계를 가지고 있다(Fig. 3). 9월에는 *P. fulvidraco*, *C. auratus* 등의 어류의 질소안정동위원소비가 $16.9\sim 17.5\text{‰}$ 로 상위영양단계를 나타내고 있으며, *Z. platypus*, *P. parva* 등의 어류의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $12.5\sim 14.8\text{‰}$ 로 비슷한 수준의 영양단계를 보이고 있다(Fig. 3). 강우기 전후를 살펴보면 어류의 종의 차이가 나타나고 그 중에서 *C. auratus*, *Z. platypus*, *P. parva*이 7월과 9월에 모두 발견되었다. *C. auratus*은 7월과 9월 모두 *Z. platypus*, *P. parva*에 비해 상위영양단계에 속해 있었다. 이들의 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 살펴보면 *C. auratus*은 강우전(-18.2‰)보다 강우후(-19.2‰)에 약 1‰ 가벼워졌으며 *Z. platypus*은 강우전(-22.7‰)과 강우후(-22.6‰)의 차이가 보이지 않았고 *P. parva*은 강우전(-21.2‰)보다 강우후(-23.7‰)로 약 2.5‰ 가벼워졌다. *C. auratus*의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 강우전(19.1‰)보다 강우후(16.4‰)에 약 2.7‰ 가벼워졌으며 *Z. platypus*은 강우전(14.5‰)과 강우후(15.1‰)의 변화가 미비하였으나 *P. parva*은 강우전(14.65‰)보다 강우후(12.34‰)로 약 2.3‰ 가벼워졌다. 이러한 변화는 강우후에 $\delta^{13}\text{C}$ 값과(-27.9‰)와 $\delta^{15}\text{N}$ 값이(6.9‰) 가벼운 외부기원 입자성 유기물(plant detritus)에 의해 어류의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 변동이 생긴 것으로 여겨진다.

수생태계내의 동물플랑크톤의 안정동위원소비는 지역과 종에 따라 매우 넓은 범위를 보이며, 먹이원 및 섭식 형태에 따라서 다양한 안정동위원소비를 나타낸다(Grey et al., 2001; Lee et al., 2008; Gal et al., 2012). 영양단계가 높은 어류(상위 포식자)는 주된 먹이원인 동

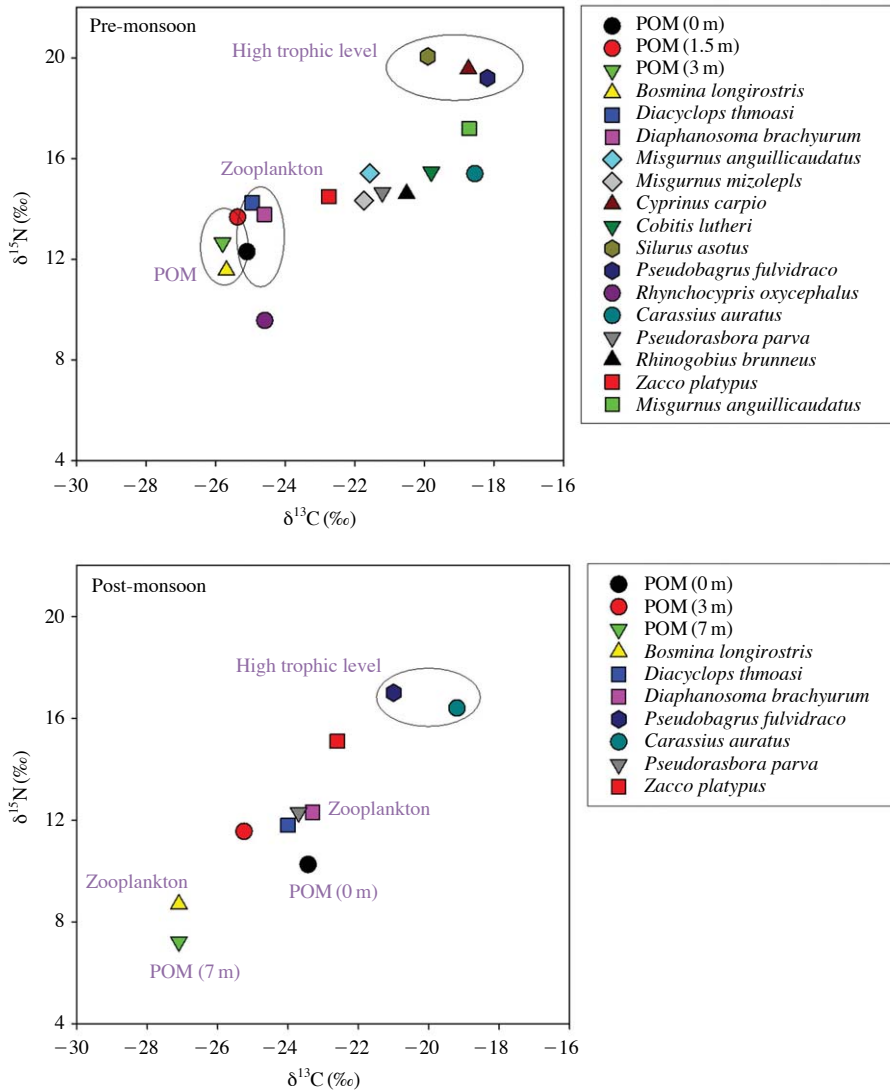


Fig. 3. Carbon and nitrogen stable isotope ratio of aquatic organism in Shingu reservoir; POM: particulate organic matter, DOM: dissolved organic matter).

물플랑크톤 혹은 유기물에 의하여 안정동위원소비의 차이를 나타내며, 먹이원의 안정동위원소비 변동은 상위 섭식자인 어류의 안정동위원소비에 반영된다(Doi *et al.*, 2005). Gal *et al.* (2012)의 연구에 따르면, 상위 섭식자인 어류가 탐진강 유역의 상류에서 하류로 이동하면서, 암석 부착조류의 먹이원 기여도 증가로 인하여 안정동위원소비 변동에 영향을 준 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 강우후에 외부로부터 유입된 유기물을 섭식하는 일부 어류로 인하여 어류의 안정동위원소비 변동이 생긴 것으로 여겨진다. 이러한 특성은 어류 종의 종류에 따라서 다르게 나타난다. *Z. platypus*은 안정동위원소비의 변동이 미비하지만, *C. carpio*와 *P. parva*은 그 변화

가 크다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, *Z. platypus*은 내부기원 유기물 혹은 이를 먹이원으로 하는 하위 소비자를 섭식하지만, *C. carpio*와 *P. parva*은 강우기 이후에는 외부기원 유기물 혹은 이를 먹이원으로 하는 하위 소비자를 섭식하는 것으로 여겨진다. 즉, 신구저수지에 서식하는 어류는 강우후에 내부기원 유기물보다는 외부기원 유기물에 의해 먹이에 의한 에너지 전달경로가 큰 영향을 받은 것으로 여겨진다. 그러므로 신구저수지에서 강우후에는 내부기원 유기물보다는 외부기원 유기물에 의해 먹이에 의한 에너지 전달경로가 전체적인 먹이사슬에 큰 영향을 미치는 것으로 여겨진다.

적 요

수심이 얇고 부영양화 특성이 강한 신구저수지에서는 강우시기에 집중 호우등으로 인하여 유입수로를 통하여 외부기원 유기물이 유입되는 경향이 있다. 이러한 외부기원 유기물은 환경변화(탁도, 수온약층, POC/PN), 입자성 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값으로 특성 지어진다. 동물플랑크톤의 경우, 강우기 이전에는 내부기원 유기물을 먹이원으로 하는 것으로 여겨지나 강우기 이후에는 내부기원 유기물 이외에 외부에서 유입된 외부기원 유기물을 섭식하고 있는 것으로 나타나고 있다. 특히 *B. longirostris*이 다른 동물플랑크톤(*D. brachyurum*, *D. thomasi*)에 비하여 기원이 다른 입자성 유기물을 섭식하고 있음을 시사하고 있다. 이러한 변화는 상위섭식자인 어류의 먹이원 변화를 야기하며, *Z. platypus*은 내부기원 유기물 혹은 이를 먹이원으로 하는 하위 소비자를 섭식하지만, *C. carpio*와 *P. parva*은 강우기 이후에는 외부기원 유기물 혹은 이를 먹이원으로 하는 하위 소비자를 섭식하는 것으로 여겨진다. 수심이 얇고 유입 수로가 존재하는 농업용 저수지의 경우에는 강우 후 외부기원 유기물이 수생태계 에너지 흐름에 크게 영향을 주는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국 연구재단 과제 지원(2012R1A2A2A02012617), 농림부 핵심전략과제(과제번호: 306009-03-2-HD110) 및 2014년도 국립환경과학원 박사후 연수과정 지원 사업에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- An, K.G. 2000. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **33**: 342-349.
- Brodie, C.R., J.S.L. Casford, J.M. Lloyd, M.J. Leng, T.H.E. Heaton, C.P. Kendrick and Z. Yongqiang. 2011. Evidence for bias in C/N, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of bulk organic matter, and on environmental interpretation, from a lake sedimentary sequence by pre-analysis acid treatment methods. *Quaternary Science Reviews* **30**: 3076-3087.
- Costanzo, S.D., M.J. O'Donohue, W.C. Dennison, N.R. Loneragan and M. Thomas. 2001. A new approach for detecting and mapping sewage impacts. *Marine Pollution Bulletin* **42**: 149-156.
- DeNiro, M.J. and S. Epstein. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **42**: 495-506.
- 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.
- Fry, B. and E.B. Sherr. 1984. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contribution in Marine Science* **27**: 196-229.
- Gal, J.K., M.S. Kim, Y.J. Lee, J.W. Seo and K.H. Shin. 2012. Foodweb of aquatic ecosystem within the Tamjin river through the determination of carbon and nitrogen stable isotope ratio. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **45**(2): 242-251.
- Grey, J., R.I. Jones and D. Sleep. 2001. Seasonal changes in the importance of the source of organic matter to the diet of zooplankton in Loch Ness, as indicated by stable isotope analysis. *Limnology and Oceanography* **46**: 505-513.
- Heo, W.M., B.C. Kim, Y.H. Kim and G.S. Choi. 1998. Storm runoff of phosphorus from nonpoint sources into lake Soyang and transportation of turbid watermass within the lake. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **31**(1): 1-8.
- Hwang, S.J., K.G. An and J.G. Ru. 2002. Reservoir Limnology. Shinkwang, 373p.
- Kang, C.K., J.B. Kim, K.S. Lee, J.B. Kim, P.Y. Lee and J.S. Hong. 2003. Trophic importance of benthic microalgae to macrozoobenthos in coastal bay systems in Korea: dual stable C and N isotope analyses. *Marine Ecology Progress Series* **259**: 79-92.
- Kim, B.C. and Y.H. Kim. 2004. Phosphorus cycle in a deep-reservoir in Asian Monsoon area (lake Soyang, Korea) and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **37**(2): 205-212.
- Kim, H.S. and S.J. Hwang. 2004. Seasonal variation of water quality in a shallow eutrophic reservoir. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **37**(2): 180-192.
- Kim, J.G., B.C. Kim, S.M. Jung, C.W. Jang, M.S. Shin and Y.Y. Lee. 2007. The distribution of DOM and POM and the Composition of stable isotopes in streams of agricultural and forest watershed located in the Han river system, Korea. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **40**(1): 93-102.
- Lee, J.Y., B.C. Kim, T. Yoshioka and S. Hino. 2008. The different isotopic signatures of co-existing zooplankton species in two alpine lakes. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **41**(3): 294-300.
- Lee, J.Y., J.K. Kim, Y.Y. Jung and B.C. Kim. 2010. Isotopic differences among zooplankton taxa and seasonal variation of zooplankton community coexisting with Microcystis. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **43**(1): 1-10.
- Meyers, P.A. 1997. Organic geochemical proxies. *Organic Geo-*

- chemistry* **27**: 213-250.
- Meyers, P.A. and J.L. Teranes. 2001. Sediment organic matter. *In: Tracking Environmental Change Using Lake Sediment: Physical and Geochemical Methods*, vol 2. (Last, W.M. and J.P. Smol, eds). Kluwer Academic Publishers, Holland.
- Ministry of agriculture and forestry. 2007. Development of techniques for water quality management of agricultural reservoirs using biomanipulation (food chain).
- 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. *Limnology and Oceanography* **39**: 1044-1060.
- 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 Britain and Finland: some implications for photosynthetic processes in aquatic plants. *Oecologia* **50**: 117-124.
- Owens, N.J.R. 1987. Natural variation in ^{15}N in the marine environment. *Advances in Marine Biology* **24**: 390-451.
- Park, H.K., U.H. Lee and D.I. Jung. 2004. Organic carbon budget during rainy and dry period in Paldang reservoir. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **37**(3): 272-281.
- Park, J.C., J.W. Park, J.K. Shin and H.M. Lee. 2005. Dynamics of high turbid water caused by heavy rain of Monsoon and Typhoon in a large Korean reservoir (Andong Reservoir). *Korean Journal of Ecology and Limnology* **38**(1): 105-117.
- Park, J.C., S.W. Jung, J.W. Park and H.J. Kim. 2008. Spatial and temporal dynamics of turbid water in hypolimnetic discharging reservoir (Andong), South Korea. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **41**(3): 360-366.
- Park, S.B., S.K. Lee, K.H. Chang, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2002. The impact of monsoon rainfall (Changma) on the changes of water quality in the lower Nakdong river (Mulgeum). *Korean Journal of Ecology and Limnology* **35**(3): 160-171.
- Rau, G.H. 1981. Low $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in hydrothermal vent animals: ecological implications. *Nature* **289**: 484-485.
- Rau, G.H., T. Takahashi and D.J. Des Marais. 1989. Latitudinal variation in plankton ^{13}C : Implications for CO_2 and productivity in past oceans. *Nature (London)* **341**: 516-518.
- Shin, J.K., C.K. Kang and S.J. Hwang. 2003. Daily variations of water turbidity and particle distribution of high turbid-water in Paldang reservoir, Korea. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **36**(3): 257-268.
- Shin, J.K., S.A. Jeong, I.W. Choi and S.J. Hwang. 2004. Dynamics of turbid water in a Korea reservoir with selective withdrawal discharges. *Korean Journal of Ecology and Limnology* **37**(4): 423-430.
- Smith, B.N. and S. Epstein. 1971. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiology* **47**: 380-384.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada Bulletin 167, 2nd ed. 310pp.
- Tamelaender, T., C. Kivimae, G.J. Richard, P. Bellerby, E. Renaud and K. Svein. 2000. Base-line variation in stable isotope values in an Arctic marine ecosystem: effects of carbon and nitrogen uptake by phytoplankton. *Hydrobiologia* **630**: 63-73.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.
- Wildhaber, Y.S., R. Liechti and C. Alewell. 2012. Organic matter dynamics and stable isotope signature as tracers of the sources of suspended sediment. *Biogeosciences* **9**: 1985-1996.
- Wotton, R.S. 1994. *The Biology of Particles in Aquatic Systems*. 2nd ed. CRC Press, Inc. USA. 325pp.
- Yang, J.Y. and K.H. Shin. 2009. Identification of the food sources-metabolism of the pacific oyster *Crassostrea gigas* using carbon and nitrogen stable isotopic ratios. *Korean Journal of Environmental Biology* **27**(3): 279-284.