Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 25, No. 5, pp.742-749 (2009)

팔당호와 청평호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성

이 규 · 최명재 · 박혜경† · 이장호

국립환경과학원 한강물환경연구소

Characteristics of Release Rate of Nutrients from Sediment in Lake Paldang and Lake Cheongpyeong

Kyoo Lee · Myung-Jae Choi · Hae-Kyung Park† · Jang-ho Lee

Han River Water Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 11 June 2009, Revised 3 August 2009, Accepted 12 August 2009)

Abstract

To examine the characteristics of the nutrient release from the sediments in two reservoirs, Lake Paldang and Lake Cheungpyeung, we analyzed physical and chemical properties of the sediments and calculated the nutrient release rates from the sediments. The particle properties of sediments in Lake Paldang changed from silt to sand after summer rainy season, especially in the water area of the Kyeungan River where the water depth was shallow and the width of river was narrow. The sediments in Lake Cheungpyeung had higher contents of silt and clay than in Lake Paldang, and the particle size was not much different before and after rainfall. The release rates of nutrients in two lakes varied with the kind of nutrients and the season. The release rates of DTN and NH_4^+-N in Lake Paldang were faster in spring than autumn. But the Lake Cheungpyeung showed similar values of release rates before and after summer rainy season. NO_3^--N and phosphorous were not released from sediments or were absorbed into sediments all the time in two lakes. Compared with other lakes, the sediments of two lakes consisted of bigger particles and had a lower organic matters content than other lake-type reservoirs. Due to the short hydraulic retention time and no stratification throughout the year in Lake Paldang and Lake Cheungpyeung, the release rates of nutrients from sediment in these reservoirs were lower than other lakes and this seems to be a typical characteristic of river-type reservoirs.

keywords : Disturbance of sediment, Localized torrential rainfall, Nutrients release rate, River-type reservoirs

1. 서 론

호수의 부영양화는 다량의 영양염이 유입됨으로 인해 식물플랑크톤을 포함한 미생물이 번성하고 내부생성유기물의 양이 증가하여 심층 산소소비량 증가와 같은 연쇄적인 반응을 일으키는 현상이다(박혜경 등, 2008; 송민경, 2007; Hakanson and Janson, 1983; UN, 1992). 이러한 현상이 심해지면 심층의 용존산소 고갈로 인해 호수 바닥의 퇴적물로부터 많은 양의 인산염이 용출되고, H_2S, CH_4와 같은 환원가스가 발생하여 악취를 유발하고 호수의 생물상에 큰 악영향을 주게 되는 등 수중생태계의 구조와 기능적 측면에서 물질순환의 불균형을 초래하게 된다(김범철 등, 1989; 김유경 등, 2007; 김종구와 오승철, 2007; Thornton et al., 1990; Wetzel, 2001).

하천 및 호소의 수질에 영향을 주는 영양염의 기원은 외부로부터 유입되는 오염물질에 의한 외부부하(external loading)와 오염물질의 용출에 의한 내부부하(internal loading)로 나뉘며(Boström et al., 1982) 국내의 다양한 하천 및 호소의 수질관리 방안을 강구하기 위해서는 두 요인 모두 적절한 평가가 필요하다(정하영과 조경제, 2003; Thornton et al., 1990). 특히 하천, 호소, 해역 등의 저층 퇴적물에는 영양염류를 포함한 오염물질들이 다량 함유되어 있으며(농업기반공사, 2005; 서동일, 1998), 수층과 끊임없이 물질교환이 이루어지고 있고 영양염과 중금속 및 유해화학물질이 침강 또는 용출되고 있어 수질 및 저서생태계에도 영향을 끼치게 된다(김도희, 2007; 이요상과 이경식, 2004; Hakanson and Janson, 1983; Lennox, 1984; Markus, 1990).

댐 형성 이후 수도권의 상수 공급원으로 중요하게 관리되어 온 팔당호와 청평호는 부영양화와 관련하여 외부부하에 대한 연구(김동섭 등, 1995; 김종민 등, 2005; 신재기 등, 2000; 조덕희 등, 2008)는 활발히 이루어져왔으나 퇴적층과 내부부하에 대한 평가는 부족하였다(Kim et al., 2003). 따라서 본 연구에서는 팔당호와 청평호의 퇴적물에서 발생하는 영양염류 용출의 특성을 파악하기 위하여 퇴적물의 물리·화학적 성질과 퇴적물로부터 질소와 인의 용출속도를 조사하였다.

† To whom correspondence should be addressed.
parkhk@me.go.kr

2. 연구방법

2.1. 조사지점 및 조사기간

조사지점은 수역 특성에 따라 팔당호는 4개, 청평호는 3개 수역으로 나누어 수역별 대표지점에서 조사하였다(Fig. 1). PD-L1은 팔당댐앞 지점으로 평균수심 19~20 m인 지점이고 PD-L2와 PD-L3는 팔당호 내 남한강 및 북한강 수역의 대표지점으로 평균수심이 7~9 m이며, PD-L4는 팔당호 내 경안천 수역의 대표지점으로 평균 수심이 3~4 m로 가장 낮다. CP-L1은 청평댐앞 지점으로 평균수심 20~22 m인 지점이며, CP-L2는 북한강본류와 홍천강지류가 합류하는 지점으로부터 약 5~6 km 하류 지점이며 평균수심이 19~21 m이다. CP-L3은 청평호 상류인 남이섬 지점으로 청평호 내 지점 중 가장 낮은 8 m의 평균수심을 보이고 있다.

조사기간은 2008년 4월부터 11월까지이며 계절별 용출 특성을 판단하기 위하여 4, 6, 9, 11월에 각 1회씩 동일한 지점에서 조사하였다.

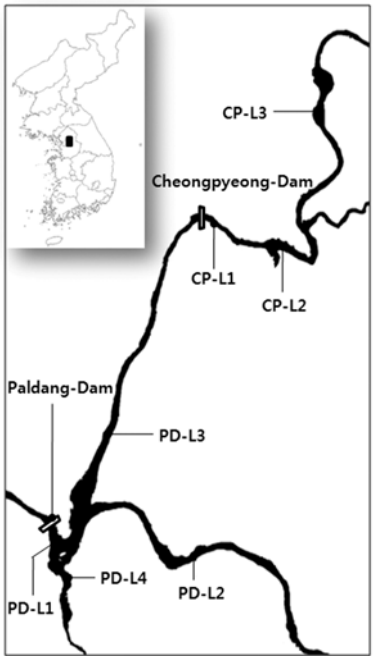

Fig. 1. The map of study site.

2.2. 퇴적물 및 수 시료 채취

퇴적물 분석 및 영양염류 용출실험에 사용한 퇴적물은 팔당호 수역별 대표지점 4지점 및 청평호 3지점에서 grab sampler를 이용하여 퇴적물의 표면부위만을 채취하였다. 용출실험에 사용한 상등수는 각 지점에서 퇴적물의 교란이 일어나지 않는 범위의 최하층에서 반돈채수기를 이용하여 채수하였다. 용출실험에 현장 조건을 반영하기 위하여 현장측정기(YSI-6600)를 이용하여 시료채취 당시의 수온, DO, pH를 측정하였다. 채취한 퇴적물은 용출실험을 위하여 현장에서 아크릴 재질의 원통형 실험장치(내경 8 cm, 높이 30 cm)에 퇴적물이 교란되지 않게 5 cm 높이까지 채우고 밀봉하였으며, 4°C, 암소에서 보관하여 실험실로 운반하였다.

2.3. 시료 분석

용출실험에 사용된 퇴적물의 특성을 분석하기 위하여 입도분석(Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd.), 강열감량(국립수산진흥원, 1997), 간극수(농업과학기술원, 2000)의 영양염류(T-N, NO_3^--N, NH_4^--N, T-P, PO_4^--P) 농도를 측정하였다. 간극수는 채취한 퇴적물을 50 mL Corning tube에 담아 원심분리기에서 7000 rpm에서 10분간 처리 후 분리된 상등수를 채취하였으며, 수질오염공정시험법에 준하여 분석하였다(환경부, 2004). 용출실험에 사용한 상등수는 채수한 심층수 시료를 GF/F 여지로 여과하여 사용하였으며, NH_4^+-N, NO_3^--N, DTN, PO_4^{3-}-P 및 DTP를 수질오염공정시험법에 준하여 분석하였다(환경부, 2004).

2.4. 용출실험

용출실험은 현장에서 실험실로 옮겨온 퇴적물에 현장조건을 반영하기 위하여 퇴적물을 채집한 아크릴 반응조에 해당 지점의 상등수를 1 L씩 균일하게 채우고 호기조건 및 현장온도를 유지하며 수행하였다. 호기조건은 밀폐한 반응조에 공기를 지속적으로 공급하여 유지하였으며 증발되는 수분을 보충하기 위하여 가습장치를 설치하였다(Fig. 2). 실험온도는 측정한 현장온도를 고려하여 봄철 조사(4월)에서는 팔당, 청평호 5°C, 여름철 조사(6월)에서는 팔당호 20°C, 청평호 15°C, 가을철 조사(9월)에서는 팔당, 청평호 20°C, 겨울철 조사(11월)에서는 팔당, 청평호 10°C로 설정하여 실험하였으며, 광합성에 의한 수체의 이화학적 변화를 차단하기 위하여 알루미늄호일로 반응조를 감싸 빛을 차단하였다.

퇴적물이 들어있는 실험장치에 상등수를 채우는 과정에서 물리적 충격에 의한 퇴적물의 부상을 최소화하기 위하여 상등수의 주입은 반응조의 벽면을 따라 튜브와 주사바늘을 사용한 사이펀의 원리를 이용하였다. 반응조 설치 후, 주입된 상등수 250 mL를 즉시 채취, 0일차 시료로 설정하였으며, 여과한 심층수 250 mL를 주입하였다. 4일 동안 1일 간격으로 동량의 상등수를 채취하였으며, 동량의 심층수를 주입하였다. 퇴적물 시료 당 2개의 반응조를 만들어 실험하였다.

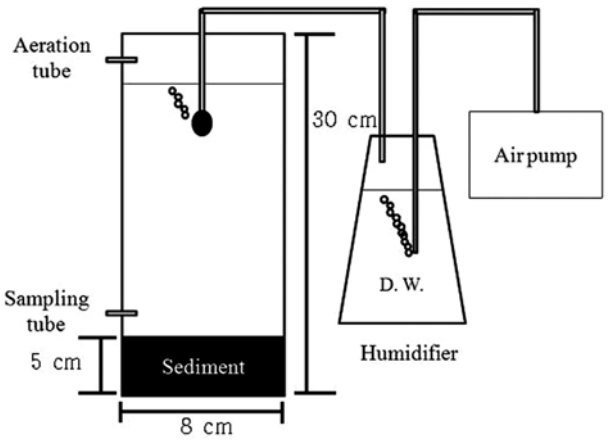

Fig. 2. The equipment of nutrient release experiment.

퇴적물로부터 영양염류 용출속도는 다음과 같은 식으로 산출하였다(조규송 등, 1991).

$$R = \frac{(C_t - C_0) \times V + \sum_{j=1}^{n}(C_{j-1} - C_{a(j-1)}) \times V_{a(j-1)}}{A \times t} \quad (1)$$

R : 단위면적당 용출속도 (mg/m^2/day)
C_t : t일의 농도 (mg/L)
C_0 : 0일의 농도 (mg/L)
C_{at} : t일 재주입한 시료의 농도 (mg/L)
V : 반응조의 상등수의 양 (L)
V_{at} : t일 재주입한 시료의 양 (L)
A : 퇴적물과 상등수의 접촉면적 (m^2)
t : 시간 (day)

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물 성상 및 간극수 중 영양염류 농도

실험에 사용된 각 지점 퇴적물의 강열감량 및 입도분석 결과, 퇴적물 내 유기 탄소의 농도를 반영하는 강열감량(Ignition loss)은 팔당호에서 1.8~7.6%의 범위를 보였으며, PD-L4 지점에서 4월에 가장 높은 값을, 11월에 가장 낮은 값을 나타내었고 나머지 지점은 비슷한 경향을 나타내었다. 청평호지점은 CP-L1 지점과 CP-L2 지점에서 팔당호 지점들에 비하여 평균적으로 높은 값을 보였으며 특히 CP-L2 지점은 최하류인 CP-L1 지점보다 더 높은 강열감량을 나타내 유기물 성분이 더 많이 퇴적된 것으로 보인다(Table 1).

입도분석의 결과도 강열감량과 비슷한 경향을 나타내었다. PD-L4 지점에서 집중강우기 전 퇴적물의 clay 및 silt의 비율은 약 4%, 70%인 반면, 강우기 후 퇴적물은 약 2%, 25%로 감소하였고 sand의 비율이 약 3배 증가하였다. PD-L2 지점과 PD-L3 지점의 경우는 강우기 후 sand의 비율이 증가하는 경향을 보였지만 그 비율은 크지 않았다. 청평호내의 입도분석 결과, 호내 지점 중 가장 상류 지점인 CP-L3 지점에서는 퇴적물의 성상이 모래와 굵은 자갈로 구성되어 있으며, sand의 구성비가 가장 높았고, 중류인 CP-L2와 댐 앞 CP-L1 지점의 입도는 silt의 비율이 가장 높은 비슷한 입도구성을 보였으며 팔당호 지점들에 비하여 더 미세한 입자로 구성됨을 확인할 수 있었다. 또한 강우기 전·후의 입도 구성의 차이가 거의 나타나지 않았다(Table 1).

PD-L4 지점에서 강우기 전, 후로 강열감량 및 입도분석결과가 현저한 차이를 보이는 이유로는 경안천 수역이 팔당호 내 다른 수역에 비해 좁은 하폭과 얕은 수심을 가지고 있기 때문에 여름철 집중강우기 동안 빠른 유속의 수체가 대량으로 유입되어 퇴적물의 교란과 침식이 일어났고 굵은 입자의 토사가 유입·침강되기 때문으로 판단된다. 이에 비하여 남한강과 북한강 수역은 경안천 수역보다 하폭이 더 넓고 깊은 수심을 가지고 있으므로 강우기 동안 경안천 수역에 비하여 유속 및 평시 대비 수량이 크게 증가하지 않는다. 이로 인하여 PD-L4에 비해 PD-L2와 PD-L3 지점의 강우기 전·후의 입도 변화가 크지 않았던 것으로 판단된다. 청평호는 CP-L3(남이섬지점)에서는 0.7%정도의 가장 낮은 강열감량을 보여 유기퇴적물이 거의 없음을 확인할 수 있었다. 청평호 내 상류에서 하류로 갈수록 퇴적물 입자 크기가 작아지고 중류 이하 특히 홍천강과 합류 후에 silt의 구성비가 가장 높은 입도 구성을 보였는데 이러한 결과는 CP-L2지점이 만곡에 의하여 유속이 감속하며 홍천강 유입수에 포함된 유기물이 퇴적된 것이 그 원인으로 판단된다. 또한 중류 이하의 수심이 20 m 이상인 청평호 수역에서는 2008년도 수준의 여름철 강우강도에 의한 퇴적물의 교란은 팔당호에 비하여 크지 않은 것으로 나타났다.

문헌에 보고된 다른 호소들의 퇴적물 성상과 팔당호 및 청평호 퇴적물을 비교한 결과, 다른 호소의 퇴적물은 clay+silt의 비율이 70~80%이상을 차지하는 반면 팔당호와 청평호의 퇴적물은 더 굵은 입자로 구성되어있으며 부식성 유기질의 함량이 낮음을 확인할 수 있었다(전상호과 박용안, 1989; 정준오 등, 2007; 조영철와 정세웅, 2007; Serruya et al., 1974). 이는 수심이 깊고 체류시간이 긴 호수와 달리 팔당호와 청평호는 체류시간이 짧고 돌발강우 등에 의한 영향이 큰 하천형호소로서 안정적인 퇴적층이 형성되기 어

Table 1. Ignition loss and composition of sediments used for nutrients release experiment

Site	Month	Ignition loss (%)	Composition of sediment (%)		
			Clay (<2㎛)	Silt (2-63㎛)	Sand (63㎛-2㎜)
PD-L1	Apr	7.4	3.9	51.1	45.0
	Jun	6.2	4.6	66.8	28.6
	Sep	5.2	2.7	57.4	40.0
	Nov	5.5	3.0	56.8	40.2
PD-L2	Apr	7.4	5.4	74.8	19.8
	Jun	2.9	4.2	70.2	25.6
	Sep	4.5	4.3	57.2	38.5
	Nov	5.6	3.7	59.2	37.1
PD-L3	Apr	6.3	3.5	63.4	33.1
	Jun	5.7	3.7	62.7	33.6
	Sep	6.7	3.1	56.3	40.6
	Nov	5.7	3.4	49.9	46.7
PD-L4	Apr	7.6	4.0	76.7	19.3
	Jun	5.2	4.0	70.6	25.4
	Sep	4.0	1.6	24.9	73.5
	Nov	1.8	1.6	25.0	73.4
CP-L1	Apr	6.6	5.5	76.2	29.3
	Jun	6.9	7.2	67.9	24.9
	Sep	6.8	5.2	63.8	31.0
	Nov	8.7	5.2	66.8	28.0
CP-L2	Apr	11.2	6.3	63.9	29.8
	Jun	11.6	6.1	76.8	17.1
	Sep	11.0	5.0	68.6	26.4
	Nov	11.0	5.7	71.2	23.1
CP-L3	Apr	0.7	0.7	8.5	90.8
	Jun	0.8	2.4	20.9	76.7
	Sep	-	-	-	-
	Nov	-	-	-	-

렵기 때문으로 판단된다.

퇴적물 중 간극수의 영양염류 농도를 분석한 결과, 팔당호 퇴적물 간극수의 총질소 및 암모니아성질소의 농도는 강우기 전의 PD-L4지점에서 20 mg/L 전후로 가장 높게 나타났다. 반면 PD-L4 지점에서 9월의 퇴적물은 silt가 거의 없는 sand로서 간극수의 채취가 불가능하였고 11월은 강우기 전에 비하여 16~32% 수준으로 낮아졌다. PD-L1의 결과도 이와 비슷한 경향을 나타냈다. 팔당호 내 남한강 및 북한강 수역의 대표지점인 PD-L2와 PD-L3의 결과는 두 지점 모두 4월이 가장 낮은 값을 나타냈으며 강우기 이후 오히려 간극수의 질소 항목 농도가 더 높게 나타났다. 청평호 지점들의 퇴적물 간극수 중 총질소 및 암모니아성질소 농도는 팔당호의 결과와 다른 양상을 보였다. CP-L1과 CP-L2 지점의 용존총질소는 강우기 전에 비하여 강우기 후 2~5배 이상 증가하였으며, 암모니아성질소의 농도도 4, 6월에 비하여 9월의 값이 더 높게 조사되었다. CP-L3의 퇴적물은 대부분의 입자가 sand 이상의 크기를 가지고 있어서 간극수의 채집이 불가능하였다. 인 항목의 농도는 팔당호와 청평호의 결과가 전체적으로 0.01~0.1 mg/L의 비교적 낮은 농도를 나타내며 큰 차이를 보이지 않았다.

3.2. 용출속도의 경시적 변화

팔당·청평호 퇴적물의 영양염류 용출속도의 경시적 변화를 알아보기 위하여 6월에 채취된 퇴적물을 이용하여 동일한 온도(20°C)에서 일별 용출속도를 구하였다(Fig. 3). 용출 진행에 따른 특성을 살펴보면, 팔당호와 청평호의 모든 지점에서 2~3일차까지 암모니아성질소의 용출이 관찰되다가 4일차에 크게 감소함을 확인할 수 있었으며 질산성질소는 계속적으로 감소하거나 큰 변화를 보이지 않았다. 용존총질소는 전 지점에서 계속 용출되었으며 특히 4일차에 급격하게 증가함을 알 수 있었다. 즉 4일차의 수체에는 이온성 무기질소가 아닌 유기물 형태의 용존성질소가 크게 증가하였으며 이는 용출된 질소를 이용하는 미생물의 증식에 의한 것으로 판단된다. 실험에 쓰인 현장수는 GF/F 유리섬유여지(pore size : 0.7 ㎛)를 이용하여 여과 후 멸균 등의 과정을 거치지 않은 시료이기 때문에 수중에 미생물(세균)이 존재하며, 실험에 이용한 퇴적물로부터의 미생물이 유입된 것으로 생각된다. 일반적으로 호수 중에 존재하는 미생물 중 유기물의 분해를 담당하는 미생물은 유기퇴적물이 쌓인 저층에서 더 큰 활성을 보이며(김명운 등, 1994), 특히 계절에 따른 overturn, 양식장에서의 먹이 공급, 식물플랑크톤

Table 2. Mean nutrients concentration (mg/L) of pore waters in sediments. The values are means ± S.D.

Site	Month	Content of nutrients in pore water			
		DTN*	NH_4^+-N	DTP**	PO_4^{3-}-P
PD-L1	Apr	10.839±0.457	8.442±0.166	0.086±0.000	0.022±0.001
	Jun	6.267±0.257	4.265±0.157	0.023±0.000	0.008±0.000
	Sep	2.545±0.081	1.458±0.100	0.042±0.000	0.031±0.000
	Nov	2.066±0.002	0.456±0.052	0.039±0.000	0.016±0.000
PD-L2	Apr	1.642±0.197	0.022±0.001	0.113±0.000	0.024±0.000
	Jun	3.039±0.301	0.765±0.103	0.021±0.001	0.004±0.000
	Sep	7.506±0.219	5.209±0.145	0.133±0.000	0.119±0.000
	Nov	6.128±0.112	2.969±0.145	0.180±0.001	0.150±0.001
PD-L3	Apr	0.863±0.114	0.507±0.087	0.113±0.001	0.006±0.000
	Jun	1.904±0.020	0.877±0.145	0.016±0.000	0.004±0.000
	Sep	4.751±0.147	3.387±0.097	0.021±0.000	0.013±0.000
	Nov	2.280±0.056	0.855±0.037	0.085±0.004	0.030±0.001
PD-L4	Apr	26.944±0.271	24.062±4.035	0.105±0.001	0.007±0.000
	Jun	14.068±0.985	12.509±0.286	0.037±0.000	0.009±0.001
	Sep	-	-	-	-
	Nov	4.478±0.028	1.622±0.247	0.062±0.004	0.021±0.001
CP-L1	Apr	2.091±0.175	1.754±0.066	0.075±0.001	0.010±0.000
	Jun	6.391±0.238	3.684±0.203	0.020±0.000	0.006±0.000
	Sep	11.476±0.625	7.834±0.413	0.016±0.001	0.014±0.000
	Nov	11.247±0.112	8.257±0.249	0.028±0.001	0.007±0.001
CP-L2	Apr	6.839±0.028	6.327±0.041	0.128±0.003	0.006±0.000
	Jun	8.825±0.236	6.109±0.103	0.074±0.000	0.009±0.001
	Sep	12.324±0.161	8.394±0.107	0.089±0.000	0.023±0.000
	Nov	10.578±0.009	5.552±0.141	0.138±0.004	0.026±0.000
CP-L3	Apr	-	-	-	-
	Jun	-	-	-	-
	Sep	-	-	-	-
	Nov	-	-	-	-

* Dissolved total nitrogen, ** Dissolved total phosphorus

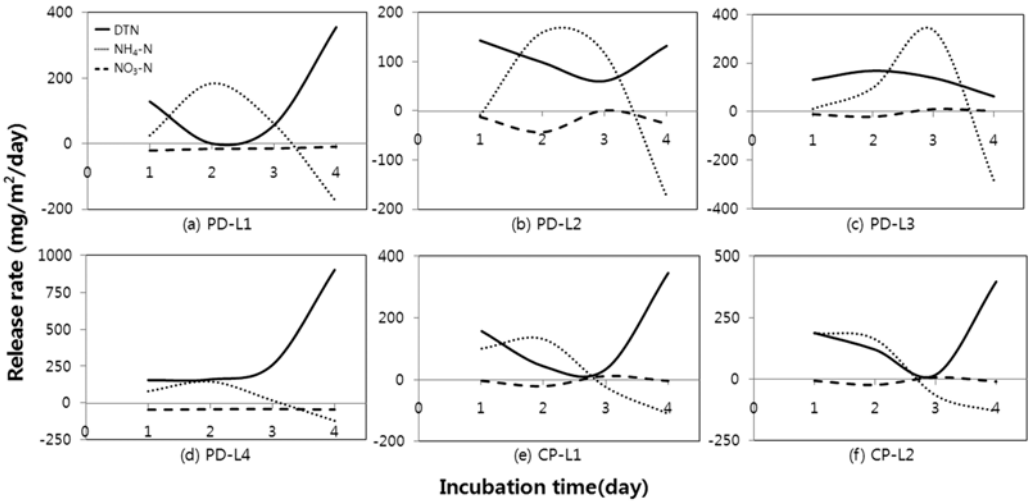

Fig. 3. Daily variation of nitrogen release rates from sediment in Lake Paldang and Lake Cheungpyeung in June 2008.

dead cell의 분해 등에 의하여 유기물이 증가하고 적절한 수온이 유지되면 수체 내의 미생물 개체수가 증가하게 된다(김명운 등, 1994; 신재기 등, 2001). 그러므로 적절한 온도가 유지되며 영양염류의 용출이 일어나는 반응조는 미생물이 증식하기 좋은 조건을 갖추고 있기 때문에 실험기간이 길어지게 되면 수체 내의 무기영양염류는 줄어들며 동시에 미생물에 의한 Desolved Organic Matter(DOM)의 증가에 의하여 용존총질소가 증가하는 것으로 판단된다.

한편 20~30일 이상 실험을 진행하여도 무기영양염류의 용출이 발생한 기존의 연구(유태종 등, 2003; 전상호과 박용안, 1989; 정준오 등, 2007; 조영철와 정세웅, 2007; Jean et al., 1996; Tina and Robert, 1996)에 비하여 본 연구에서는 4일차부터 이온성 영양염류의 용출이 일어나지 않거나 다른 기작에 의하여 이온성 영양염류가 대량 소비되는 것으로 추정된다. 이는 3.1.에서 언급한 바와 같이 굵은 입자의 얇은 퇴적층과 유기물의 부족 및 미생물에 의한 것으로 사료된다.

3.3. 퇴적물로부터 영양염류 용출 결과

현장온도를 반영하여 측정한 영양염류 용출량으로 지점별·시기별 단위면적당 영양염류 용출속도를 산정하였다. 질소 항목의 경우, 팔당호 전 지점에서 9월의 용출속도가 낮은 경향을 보였고 6월의 용출속도가 높은 경향을 나타냈다. PD-L4 지점에서 4월의 용존총질소 용출속도는 132.1 mg/m^2/day, 암모니아성질소는 168.9 mg/m^2/day로 가장 높은 속도를 보였으며, PD-L1과 PD-L4 지점의 9월의 용출속도가 낮았다. 질산성질소는 9월 PD-L4 지점의 결과를 제외한 모든 시기, 모든 지점의 용출속도가 음수를 나타내며 용출이 일어나지 않는 것으로 나타났다(Table 3). 본 조사는 호기적 조건에서 진행되었기 때문에 수중에서 탈질반응에 의한 질산성질소의 감소 가능성은 희박하기 때문에 질산성질소가 음의 용출속도를 나타낸 이유는 수중의 nanoplankton, 퇴적물 중에 존재하던 세균(김명운 등, 1994), 동물플랑크톤, benthic algae 등에 의한 질산성질소의 소모와(Gu and Alexander, 1993) 퇴적물로의 흡착 때문으로 판단된다(조영철과 정세웅, 2007).

팔당호 퇴적물에서 질소계 영양염류의 용출은 퇴적물 분석의 결과와 마찬가지로 여름철 집중강우기 전에 높은 값을 보였다. 수심이 얕고 저질 퇴적층이 잘 발달할수록 용출이 수질에 미치는 영향이 크며(정하영과 조경제, 2003) 특히 팔당호는 타 호소에 비하여 퇴적층의 발달이 부족하며 집중강우기 후에는 강우에 의한 사질토의 유입 및 유속에 의한 퇴적물의 교란에 의하여 퇴적물이 용출에 적합하지 않은 상태로 바뀐 것으로 판단된다.

반면 청평호는 팔당호와 다른 경향을 보여 CP-L1 지점의 용출속도는 강우기 전에 낮았으나 강우기 후 증가하는 경향을 나타내었고, CP-L2 지점의 경우 전 지점 중에서 평균적으로 가장 높은 용출속도를 보이며 강우기 전과 후의 차이가 크게 나타나지 않았고 11월 조사에서 실험온도가 10°C로 낮았음에도 불구하고 가장 높은 용출속도를 보였다(Table 3). 이러한 결과는 2008년도 수준의 여름철 강우강도 조건에서 청평호, 특히 홍천강 합류 이후의 지역에서는 강우에 의하여 흘러들어온 토사 및 유기물이 퇴적되어 용출이 용이한 상태의 퇴적물이 형성되었음을 나타낸다. CP-L3 지점은 최상류 지점으로 용출이 일어날 수 있는 조건의 퇴적물이 생성되지 않았기 때문에 용출실험에서 제외하였다. 인 항목의 경우, 팔당호와 청평호 모두 -23.7~0.5 mg/m^2/day의 용출속도를 보이며 모든 지점에서 용출이 일어나지 않거나 혹은 매우 적은 양만 용출되는 것으로 조사되어 연중 성층이 형성되지 않고 수체의 혼합이 지속적으로 일어나 심수층의 용존산소 농도가 표층과 크게 차이가 나지 않는 하천형 호수의 특성때문에 퇴적물에서의 인의 용출은 거의 일어나지 않는 것으로 판단된다.

팔당호와 청평호의 용출속도는 용존총질소와 암모니아성질소의 경우 다른 호수에 비해 비슷하거나 더 낮은 용출속도를 보였으며 용출속도의 변화폭이 컸다. 충주호에서 실시한 강필구 등(2006)에 연구에서는 용존총질소는 69.4~223.1 mg/m^2/day, 암모니아성질소 6.9~108.0 mg/m^2/day 범위였으

Table 3. Release rates (mg/m^2/day) of nitrogen and phosphorus from sediments in Lake Paldang and Lake Cheungpyeung. The values are means ± S.D.

Site	Month	Release rate of nutrients from sediment				
		DTN*	NH_4^+-N	NO_3^--N	DTP**	PO_4^{3-}-P
PD-L1	Apr	46.8±14.6	71.0±18.3	-17.1±3.0	-5.9±0.5	-3.5±1.0
	Jun	11.7±3.2	104.1±13.6	-19.4±2.5	-0.8±0.4	-4.6±0.1
	Sep	4.7±1.5	0.1±0.4	-7.4±3.5	-0.2±0.2	-0.4±0.3
	Nov	23.6±54.1	-0.9±0.1	-11.5±3.3	-2.4±0.1	-1.8±0.2
PD-L2	Apr	-41.9±14.4	2.4±4.2	-11.8±5.9	-5.4±2.2	-2.7±0.4
	Jun	37.5±17.2	75.2±9.3	-27.7±10.0	-2.9±0.2	-3.1±0.2
	Sep	23.0±4.5	22.4±4.2	-12.4±8.6	-1.8±0.1	-1.3±0.2
	Nov	26.6±36.2	22.1±13.1	-16.8±10.2	-1.3±0.1	-1.3±0.4
PD-L3	Apr	-15.2±5.5	1.4±7.7	-10.4±5.5	-3.2±0.6	-0.9±0.3
	Jun	51.0±28.1	54.6±0.1	-17.2±0.9	-0.1±0.2	-0.4±0.1
	Sep	15.6±12.4	21.2±3.4	-13.4±5.1	0.3±0.5	-0.2±0.0
	Nov	31.1±0.1	9.9±3.2	-2.3±3.5	-0.6±0.3	-0.5±0.0
PD-L4	Apr	132.1±86.6	168.9±82.8	-59.0±15.7	-23.7±0.8	-17.8±0.5
	Jun	48.0±36.5	115.8±7.0	-44.1±1.9	-5.2±0.5	-1.2±0.5
	Sep	11.4±1.2	-10.3±1.5	6.6±5.7	0.5±0.6	-0.4±0.5
	Nov	26.7±33.7	41.7±13.7	-19.0±1.4	-1.3±0.3	-2.3±0.3
CP-L1	Apr	-2.8±20.8	7.2±1.5	-2.1±13.4	-1.0±2.1	0.3±1.3
	Jun	-9.5±11.0	36.6±2.8	-3.8±8.5	-0.7±0.5	0.1±0.3
	Sep	32.7±9.6	51.3±5.0	-16.7±8.2	-0.6±0.2	-0.5±0.0
	Nov	124.6±81.4	86.5±22.0	-17.4±3.7	-1.0±0.3	-0.6±0.0
CP-L2	Apr	79.4±28.9	90.1±27.0	-10.4±2.2	-2.1±0.9	-1.0±0.2
	Jun	59.2±1.6	117.2±17.1	-3.0±3.9	0.2±0.5	0.0±0.3
	Sep	67.7±10.7	82.8±8.5	-12.1±2.8	-1.1±0.2	-0.9±0.2
	Nov	177.4±21.1	132.0±13.6	-7.4±2.2	-0.5±0.1	-0.4±0.2

* Dissolved total nitrogen, ** Dissolved total phosphorus

며, 소양호 결과인 한강물환경연구소(2005)의 연구는 용존총질소 2.21~346.7 mg/m^2/day, 암모니아성질소 0.53~25.83 mg/m^2/day 범위의 결과를 나타냈다. 또한 암모니아성 질소의 경우 낙동강(윤인길 등, 1999) 20.4 mg/m^2/day, 영산강(유태종 등, 2003) 88.2~333.2 mg/m^2/day 범위를 나타내었다. 인 항목의 경우, 타 호수에 비하여 용출이 일어나지 않거나 매우 낮은 용출속도를 보였다. 이런 결과는 용출이 잘 일어나지 않는 성상의 퇴적물과 유입·유출량이 저수량에 비해 상대적으로 큰 하천형 호소(공동수 등, 1996)의 특성때문에 연중 성층이 형성되지 않고 수체의 혼합이 지속적으로 일어나 심수층의 용존산소 농도가 호기성으로 유지되기 때문이라고 판단된다. 퇴적물에서의 영양염류 용출은 온도, pH, DO 등에 영향을 받으며, 인 항목의 경우 호기성 상태보다 혐기성에서 더 빠른 용출속도를 보인다고 보고되어있다(김태응과 임봉수, 1997; 유태종 등, 2003; 조영철과 정세웅, 2007; Bengtsson, 1975; Boström, 1984; Fillos and Swanson, 1975; Gallepp, 1979; Holdren and Armstrong, 1980; Kamp-Nielsen, 1974). 따라서 연중 심수층이 호기성 조건을 유지하는 팔당호나 청평호의 경우 퇴적층에서 인의 용출은 거의 일어나지 않을 것으로 판단된다.

3.4. 용출속도 및 용출인자간의 상관관계

용출속도와 용출관련인자간의 연관성을 알아보기 위해 Minitap(한글15)을 이용하여 상관관계분석을 하였다. 질소 항목의 용출속도와 용출관련인자 간의 상관관계를 살펴보면, 용출된 용존총질소와 암모니아성질소 값은 간극수의 용존총질소와 암모니아성질소와 유의한 양의 상관관계를 보이며 간극수의 질소농도가 높을수록 용출량과 속도가 증가함을 나타냈다. 반면 질산성질소는 음의 상관관계를 나타냈다. 물리·화학적 특성과 용출량과의 상관관계는 silt의 함량과 암모니아성질소의 용출속도가 각각 양의 상관관계를 보였으며 sand와는 음의 관계를 보였고, 강열감량과 용존총질소 및 암모니아성질소는 양의 관계를 나타냈다(Table 4). 이러한 결과로 볼 때 팔당호 및 청평호의 질소계 영양염류

Table 4. Correlation coefficient between release rates and related parameters

Correlation coefficient		Release rate of nutrients in sediment		
		DTN	NH_4^+-N	NO_3^--N
Nutrients in pore water	DTN	0.667**	0.808**	-0.727**
	NH_4^+-N	0.608**	0.775**	-0.755**
Particle size of sediment	Clay	0.215	0.397	0.081
	Silt	0.229	0.472*	-0.308
	Sand	-0.267	-0.518*	0.316
Ignition loss		0.513*	0.494*	0.133
Temperature		-0.127	-0.015	0.034

* P-value : **<0.01, 0.01≤*<0.05

용출에 영향을 주는 요인은 간극수 및 퇴적물의 상태인 것으로 판단된다. 인 항목의 용출속도와 인자 간의 상관관계는 표에 나타내지 않았으나, 상관계수가 -0.194~0.346의 값을 나타냈으며 통계적으로 유의하지 않았다.

4. 결 론

팔당호와 청평호의 퇴적물로부터 영양염류의 용출 특성을 파악하기 위하여 팔당호 4지점과 청평호 3지점에서 채취한 퇴적물을 사용하여 퇴적물 특성 분석 및 용출실험을 실시하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 팔당호의 퇴적물은 타 호수에 비하여 더 굵은 입자로 구성되어 있으며 부식성 유기물 함량이 낮았고, 여름철 집중강우기 전후로 경안천 수역의 퇴적물 성상이 silt질에서 sand질로 바뀌었으며 나머지 지점에서도 비슷한 양상을 나타냈다. 청평호의 퇴적물은 팔당호에 비하여 silt와 clay가 더 많았으며 집중강우 이후의 퇴적물의 변화가 크게 일어나지 않았다.
2) 팔당호 및 청평호 퇴적물의 영양염류 용출속도는 영양염류 종류 및 시기에 따라 차이를 보여 팔당호의 경우 암모니아성질소 및 용존총질소는 집중강우기 전에 용출속도가 높았고 집중강우기 후에 낮아졌으나 청평호는 강우기 전후로 용출속도가 큰 차이를 보이지 않았다. 질소 항목의 용출에 영향을 주는 요인은 간극수 중의 영양염류 농도 및 퇴적물의 상태인 것으로 나타났다. 한편 두 호수에서 모두 질산성 질소와 인은 용출이 일어나지 않거나 흡착되는 것으로 나타났다.
3) 팔당호와 청평호의 퇴적물에서 영양염류의 용출속도는 타 호소에 비하여 낮은 수준으로 나타났다. 이는 퇴적물의 입자가 굵고 유기물의 함량이 적으며 수리학적체류시간이 짧아 연중 성층이 형성되지 않고 수체의 혼합이 지속적으로 일어나 심수층의 용존산소 농도가 호기성으로 유지되는 하천형호소로서의 팔당호, 청평호의 특징을 잘 보여주는 결과이다.

사 사

본 연구는 2008년도 한강수계 환경기초조사사업「수계별 호소환경 및 생태조사」의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

강필구, 이상원, 박혜경, 변명섭, 공동수(2006). 충주호 퇴적물에서의 인과 질소 용출에 관한 연구. *공동춘계학술발표회논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 1321-1241.

공동수, 윤일병, 류재근(1996). 팔당호의 물수지 및 수문특성. *Korean Journal of Limnology*, **29**, pp. 51-64.

국립수산진흥원(1997). 해양환경공정시험법.

김도희(2007). 수 저층의 저질 조사(I); 저질 조사의 중요성과 분석에 관하여. *해양환경안전학회지*, **13**(1), pp. 93-102.

김동섭, 김범철, 황길순, 박주현(1995). 팔당호의 부영양화 경향(1988-1994). *수질보전 한국물환경학회지*, **11**(4), pp. 295-302.

김명운, 김민호, 김상종(1994). 대청호 생태계에서의 미생물 활성과 세균순환 고리. *Korean Journal of Limnology*, **27**(2), pp. 155-168.

김범철, 김동섭, 권오길(1989). 팔당호의 부영양화 실태. *J. KSWPRC.*, pp. 39-46.

김유경, 정세웅, 이흥수, 정용락(2007). 부상웨어 설치에 따른 대청호 조류 성장 억제 효과 수치모의. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 581-590.

김종구, 오승철(2007). 군산지역 저수지의 수질특성 및 부영양화 평가. *한국환경과학회지*, **16**(3), pp. 357-367.

김종민, 노혜란, 허성남, 양희정, 박준대(2005). 강우 및 유입 하천수가 팔당호 수질에 미치는 영향분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(3), pp. 277-283.

김태응, 임봉수(1997). 금강하구호 Sediment로부터 수질오염물질 용출특성에 관한 연구. *한국수질보전학회지*, **13**(3), pp. 245-253.

농업기반공사(2005). 서산A지구 간월호 수질개선시범사업 보고서.

농업과학기술원(2000). 토양 및 식물체 분석법.

박혜경, 변명섭, 최명재, 김용진(2008). 남한강 하류수역에서 식물플랑크톤 증식의 영향인자 및 수중유기물 기원. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(5), pp. 556-562.

서동일(1998). 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **20**(9), pp. 1219-1234.

송민경(2007). 간월호 표층 퇴적물에 함유된 인의 존재형태 및 용출 특성에 관한 연구. 이학석사학위논문, 강원대학교 대학원.

신재기, 박경미, 황순진, 조경제(2001). 경안천과 팔당호에서 총세균수의 분포 및 동태. *Korean Journal of Limnology*, **34**(2), pp. 119-125.

신재기, 조주래, 황순진, 조경제(2000). 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. *Korean Journal of Limnology*, **33**(4), pp. 387-394.

유태종, 현 미, 조재현(2003). 영산강유역 하천 저질토의 영양염류 용출률 측정. *상하수도학회지*, **17**(3), pp. 409-418.

윤인길, 김영진, 김성한, 김준현, 권오섭(1999). 서낙동강 저서층의 영양염 용출과 환경요인의 영향. *한국육수학회지*, **32**(1), pp. 1-7.

이요상, 이경식(2004). 대청호 유기퇴적물 분포 및 용출 특성. *대한환경공학회지*, Original Paper, pp. 665-669.

전상호, 박용안(1989). 소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출가능성에 대하여. *Korean Journal of Limnology*, **22**(3), pp. 261-271.

정준오, 이혜성, 김규휘(2007). C호소 퇴적오니로부터 영양염류의 용출특성에 관한 연구. *환경공동학술대회논문집*, 대한환경공학회·한국대기환경학회·한국폐기물학회, pp. 1992-1995.

정하영, 조경제(2003). 낙동강 하류 수계에서 저층수 및 저질퇴적층의 환경. *Korean Journal of Limnology*, **36**(3), pp. 311-321.

조규송, 이찬기, 나규환, 안태석, 김범철, 강인구, 권오길, 이해금, 전상호, 최준길, 이종범(1991). *호수환경조사법*. 동화기술.

조덕희, 김종수, 이우식(2008). 고품질 수돗물 생산을 위한

팔당 수질관리 방안. *상하수도학회지*, **22**(6), pp. 665-672.
조영철, 정세웅(2007). 남양호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성 분석. *대한환경공학회지*, Original Paper, pp. 1345-1352.
한강물환경연구소, 한강수계관리위원회(2005). 수중생태계 물질순환 및 에너지 흐름조사(II).
환경부(2004). *수질오염공정시험법*. 환경부고시 제2001-170호.
Bengtsson, L. (1975). Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment. *Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verh.*, **19**, pp. 1107-1116.
Boström, B. (1984). Potential mobility of phosphorus in different types of lake sediment. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.*, **69**, pp. 457-474.
Boström, B., Jansson, M., and Forsberg, C. (1982). Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, **18**, pp. 5-59.
Fillos, J. and Swanson, W. R. (1975). The release rate of nutrients from river and lake sedements. *Journal WPCF.*, **47**(5), pp. 1032-1042.
Gallepp, G. W. (1979). Chironomid influence on phosphorus release in sediment-water microcosms. *Ecology*, **60**(3), pp. 547-556.
Gu, B. and Alexander, B. (1993). Dissolved nitrogen uptake by a cyanobacterial bloom (anabaena flos-aquae) in a subarctic lake. *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, pp. 422-430.
Hakanson, L. and Janson, M. (1983). *Principles of Lake Sedimentology*. Springer-Verlag.
Holdren, G. C. and Armstrong, D. E. (1980). Fractors affection phosphorus release from intact lake sediment cores. *J. Environ. Qual.*, **14**, pp. 79-87.
Jean, L. W. C., Jonathan, R. P., and Walter, R. B. (1996). Seasonal and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen fluxed in Mobile bay, Alabama(USA): regulating factors and ecological significance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **141**, pp. 229-245.
Kamp-Nielsem, L. (1974). Mud-water exchange of phosphate and other ions in undisturbed sediment cores and factors affecting the exchange rates. *Arch. Hydrobiol.*, **73**, pp. 218-237.
Kim, L. H., Choi, E., and Stenstrom, M. K. (2003). Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments. *Chemosphere*, **50**(1), pp. 53-61.
Lennox, L. J. (1984). Laugh Ennell; Laboratory studies on sediment phosphorus release under varying mixing, aerobic and anaerobic conditions. *Freshwater Biology*, **14**, pp. 183-187.
Markus, H. (1990). Influence of the lugworm Arenicola marina on porewater nutrient profiles of sand flat sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **62**, pp. 241-248.
Serruya, C., Edelstein, M., Pollingher, U., and Serruya, S. (1974). Lake Kinneret sediments: Nutrient composition of the pore water and mud water exchanges. *Limnology and Oceanography*, **19**(3), pp. 489-508.
Thornton, K. W., Kimmel, B. L., and Payne, F. E. (1990). *Reservoir Limnology-Ecological Perspectives.* A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
Tina, M. and Robert, R. T. (1996). Theory and operation of continuous flow systems for the study of benthic-pelagic coupling. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **140**, pp. 257-269.
UN (1992). *Protection of Inland Waters Aginst Eutrophication.* ECE/ENVWA/26. New York.
Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd edition*, Academic Press, California.