

북한강수계 호수의 POC와 DOC 분포와 조류밀도의 관계

김기용 · 김범철[†] · 엄재성 · 최영순 · 장창원 · 박혜경*

강원대학교 자연과학대학 환경학과

*국립환경과학원

The Distribution of POC and DOC in Four Reservoirs on the North Han River and the Relationship with Algal Density

Kiyong Kim · Bomchul Kim[†] · Jaesung Eom · Youngsoon Choi · Changwon Jang · Hae-kyung Park*

Department of Environmental Science, Kangwon National University, Korea

*National Institute of Environmental Research

(Received 26 March 2009, Revised 14 September 2009, Accepted 17 September 2009)

Abstract

Spatial and temporal distributions of POC and DOC were surveyed in the North Han River system, Korea. The proportion of algal cells was calculated in four reservoirs (Lakes Soyang, Paro, Chunchon, and Uiam). Monthly average DOC concentrations ranged from 1.5 to 2.3 mg C/L, and POC showed larger variation than DOC (range 0.3 to 1.9 mg C/L). The average proportion of POC in TOC was higher than those of typical natural lakes. Due to the influence of the Asian summer monsoon, the seasonal variation in POC concentration depended on heavy rain events occurring during the summer. POC concentrations increased during the summer monsoon season due to turbid storm runoff laden with debris, while DOC concentrations did not increase. The highest POC concentrations were observed in Lake Soyang in 2006 when a severe rain event occurred. In two deep stratified reservoirs (Lake Soyang and Paro) storm runoffs formed an intermediate turbidity layer with high POC and chlorophyll concentrations which is thought to originate from terrestrial debris and periphyton transported by inflowing streams. The proportion of algal cells in total POC was much lower than for most natural lakes, and it varied with season; low in the monsoon season and high in dry seasons with algal blooms. An analysis of POC concentration and chlorophyll a concentration showed that the ratio of POC/Chl.a varied from 24 to 80.

keywords : POC, DOC, Chl.a, Han River, Reservoir

1. 서론

수중의 유기물함량은 수중생태계의 에너지원으로서 에너지 흐름을 반영하는 기본적인 지표이다. 수중생태계의 유기물함량은 에너지원으로 필수적인 요소이지만 과잉으로 존재하는 경우에는 수중동물과 물이용에 장애를 주는 원인이 된다. 유기물의 과잉은 수중의 산소고갈현상을 일으켜 동물상에 피해를 주고, 정수과정에서 장애물질로 작용하며, 염소소독 시 발암물질을 생성할 수 있으므로 수중유기물의 거동은 생태학적 연구와 수질관리에 있어서 매우 중요한 연구대상이다(Shon et al., 2006).

수중의 유기물함량을 나타내는 지표에는 산소요구량(oxygen demand)과 탄소함량의 두 가지가 사용되고 있는데 산소요구량은 유기물의 에너지 함량을 더 잘 나타내는 장점을 가지고 있으나 측정오차가 크다는 단점을 가진다. 근래 유기탄소(total organic carbon, TOC)측정기의 보급이 확

대됨에 따라 측정이 빠르고 자동화가 용이하며, 정밀도가 높은 탄소함량 측정이 확산되고 있다(Page and Dillon, 2007). 그러나 TOC 측정기는 유기물의 환원정도를 구분하지 못하므로 탄수화물과 지방의 예와 같이 동일한 양의 탄소가 가지는 에너지 함량 차이를 구별할 수 없으며, 입도가 큰 입자는 시료를 주입하는 주입구에서 걸려져 측정에서 배제되는 기술적인 문제도 가지고 있다.

유기물은 입자크기에 따라 여과지에 걸러지는 입자성유기탄소(Particulate organic carbon, POC)와 여과지를 통과하는 용존유기탄소(Dissolved organic carbon, DOC)로 구분하기도 한다. POC와 DOC는 생태학적 특성과 환경학적 의미에서 차이를 가지므로 유기물농도를 보고할 때 TOC보다는 POC와 DOC로 구분하여 표현하는 것이 더 많은 정보를 준다(Thurman, 1985). POC는 수중생태계에서 여과섭식(filter feeding)동물의 먹이가 될 수 있고, 호수 내에서 침강에 의해 수층으로부터 저질로 이동하는 기작을 가지며, 정수공정에서도 응집침전에 의해 쉽게 제거될 수 있다. 반면에 DOC는 여과섭식이 불가능하므로 박테리아와 원생동물 등의 미생물먹이사슬(microbial food web)을 거쳐야만 상위의

[†] To whom correspondence should be addressed.

bkim@kangwon.ac.kr

영양단계에 에너지를 전달할 수 있다는 생태학적 특성을 가진다. 수질관리의 측면에서 보면 호수의 DOC는 대부분 난분해성 부식질로 구성되어 있어 분해속도가 느리며 호수 내 침강제거 기작이 없으므로 먼 하류까지 장거리를 이동하여 수질에 영향을 미치며, 정수공정에서의 제거율도 낮은 특성을 가진다. 그러므로 수질모델링에 있어서도 과거에는 단순히 유기물의 총량을 BOD 형태로 모의하는 방법이 많이 사용되었으나, 근래에 사용되는 호수수질모델에서는 수중의 유기물을 POC와 DOC로 구분하여 모의하고 있으므로 수질모델의 보정을 위해서는 기초적으로 POC와 DOC의 자료가 필요하다(Cole and Wells, 2001).

유기탄소를 측정하는 기기에는 액체시료를 측정하는 TOC analyzer와 고체시료를 측정하는 CHN 원소분석기가 있다. 수중의 유기탄소측정용으로 널리 사용되는 TOC 측정기는 액체시료를 측정하는 기기로서 수중의 POC와 DOC를 구분하지 않고 함께 측정한다. 따라서 POC를 측정하기 위해서는 TOC를 측정하고 나서 여과시료를 대상으로 DOC를 측정하여 그 차이로부터 구하여야 한다($POC=TOC-DOC$). 그러나 대부분의 TOC 측정기에서는 사용하는 시료의 양이 매우 적기 때문에 불균질한 POC의 시료를 주입하는 과정에서 입자의 포함 정도에 따라 측정치가 달라지는 변이를 가질 수 있다. 또한 시료의 주입에는 주로 microsyringe를 사용하고 있는데 입도가 큰 detritus, colony를 형성한 algae, 동물플랑크톤 등의 입자는 주입과정에서 배제되기 쉽다. 그러므로 철저한 homogenization 전처리를 거치지 않은 용존유기탄소 측정치는 TOC와 DOC의 중간 정도의 값을 보여주게 된다.

또한, 일반적으로 호수의 TOC는 TOC측정기의 분석한계(detection limit) 근처의 낮은 농도를 보이는데, 하천과 호수의 POC는 TOC의 약 10%정도에 불과하고, 대부분은 DOC 형태로 존재하므로(Thurman, 1985; Wetzel, 2001) POC를 TOC와 DOC의 차이로부터 구한다는 것은 매우 오차가 큰 방법일 수밖에 없다. 본 연구에서는 북한강 4개 호수에서 POC와 DOC의 정밀한 분포 연구를 위하여 DOC는 여과한 액체시료를 대상으로 TOC 측정기를 사용하여 측정함으로써 POC의 간섭을 배제하였으며, POC는 여과지를 사용하여 많은 양의 고체시료를 채취하고 CHN 분석기를 사용하여 측정함으로써 정확한 농도를 측정하고자 하였다. 또한 측정된 POC와 DOC의 변화를 외부로부터의 홍수 유입, 식물플랑크톤의 번무 등의 요인과 비교함으로써 변동의 경향과 기작을 고찰하였다.

2. 연구방법

북한강 상류에 위치한 소양호, 파로호, 춘천호, 의암호 4개 호수를 대상으로 DOC와 POC, Chl.a 농도를 조사하였다. 소양호는 북한강의 지류인 소양강에 위치한 국내 최대 규모의 인공호로서 유역이 산간지방이므로 인구밀도가 낮고 큰 오염원이 없으며, 최대 수심은 118 m로서 우리나라에서 가장 깊은 저수지이고, 수리학적 체류시간은 약 274 일로서 우리나라에서 가장 길다. 파로호는 소양호와 다른

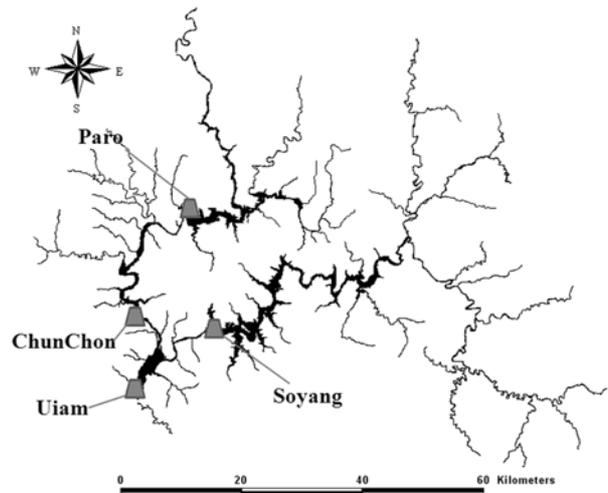


Fig. 1. The map showing the study reservoirs.

Table 1. Hydrological characteristics of four study reservoirs

	Soyang	Paro	Chuncheon	Uiam
Watershed area (km ²)	2,518	850	859	471
Total storage (10 ⁶ m ³)	2,900	1,000	150	80
Maximum depth (m)	118	77	29	20
Residence time (day)	277	115	14	4

북한강 본류 수계 내에 위치한 인공호로 면적은 38.9 km² 이고 저수량은 약 10억톤이다. 춘천호는 파로호 하류지역의 위치한 호수로 면적은 14.3 km²이다. 의암호는 이 두 개의 물줄기가 만나는 아래 지점에 위치하는 호수면적 15 km², 길이 8 km의 작은 호수이다. 춘천호와 의암호는 연평균 체류시간이 15일 미만인 하천형 호수의 특성을 가지고 있으며 소양호와 파로호는 수심이 깊고 성층현상이 강한 특성을 가진 호수이다(Fig. 1, Table 1).

소양호에서는 1997년과 2006~2008년에 조사하였으며, 나머지 3개의 호수는 2008년 1월부터 12월까지 조사하였다. 각 호수의 댐 앞 인근 하류부 지점에서 0, 2, 5, 10 m 그리고 이하 수심에서는 10 m 간격으로 각 호수의 최대 수심까지 조사하였다.

DOC는 시료를 여과하여 여과액을 냉동 보관 후, 측정시에 1N HCl을 첨가하여 pH를 2이하로 낮추어 무기탄소를 제거한 후 고온연소산화법(HTCO method)을 사용하는 Shimadzu 5000A TOC분석기를 이용하여 측정하였으며, 무기탄소제거를 위해 CO₂ free 혼합가스로 폭기하는 Nonpurgeable organic carbon법을 사용하였다(APHA et al., 1998). POC는 CHN원소분석기(FlashEA 1112)를 이용하여 측정하였다. 시료를 여과한 GF/F 여과지를 tin foil로 싸서 자동시료채취기에 넣고 측정하였다. DOC, POC는 3반복 측정하였으며 측정의 표준편차는 각각 평균 0.04, 0.05 mgC/L이었다. Chl.a는 채취한 시료를 GF/C 여과지로 여과 후, 냉동

보관하였다가 7일 이내에 측정하였다. 측정시에는 여과지를 homogenizer로 마쇄한 후 90% 아세톤으로 추출하여 UV 흡광도계를 이용한 Standard Methods의 trichromatic method (APHA et al., 1998; UNESCO, 1966)를 사용하여 계산하였다. 조류의 유기탄소량은 문헌에서 보고된 평균적인 C/Chl.a 비 37.5:1를 적용하여 Chl.a 농도로부터 환산하였다(Comerma et al., 2003; Peterson, 1978). 월별 강수량은 강원지방기상청의 춘천과 화천관측소의 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

4개 호수 가운데에서 DOC와 POC는 의암호에서 각각 평균 1.83, 1.01 mgC/L로서 가장 높았으며, 춘천호(1.59, 0.77 mgC/L), 소양호(1.60, 0.69 mgC/L), 파로호(1.49, 0.53 mgC/L) 순으로 나타났다(Table 2). DOC는 4개 호수 모두에서 평균 2 mgC/L를 넘지 않는 농도를 보였는데 이는 다른 나라의 자연호수보다는 상대적으로 낮은 수준이며(Thurman, 1985), 부영양호인 중국의 Hongfeng 호, Baihua 호, 일본의 Kasumigaura 호보다 낮고(Takeo and Handa, 1983; Fukushima, 1996; Li et al., 2008), 빈영양호인 러시아의 Baikal 호 및 일본의 Biwa 호와 비슷하다(Sugiyama et al., 2004; Yoshioka et al., 2002). Thurman(1985)이 제시한 호수의 영양상태에 따른 DOC의 분포와 비교해 보면 4개 호수는 모두 빈영양호에 해당하는 값으로서 본 연구의 조사대상호수가 빈영양호보다는 중영양호 내지 부영양호에 가까운 영양상태를 보이는 호수인 점을 고려할 때 우리나라 호수의 DOC가 동일한 영양상태의 외국 호수에 비하여 낮은 편인 것을 알 수 있다.

POC와 DOC의 시공간적 분포를 보면 4개의 호수 가운데 소양호와 파로호가 서로 유사한 경향을 보였다. 계절변동을 보면 수직혼합기인 겨울(1~3월)에는 DOC와 POC가 수직적으로 균일하고 낮은 값을 유지하다가 늦봄에서 여름까지 표층에서 DOC가 높아졌는데 이는 봄철에 성층의 안정도가 높은 상태에서 규조류의 증식과 강수유입에 의해 증가한 것으로 해석된다. 소양호와 파로호에서는 8월에 중층에서 DOC와 POC가 높은 농도를 보였는데 이는 홍수 시 유입수가 수심 20 m 이하의 호수중층으로 유입되었기 때문인 것으로 해석된다.

소양호에서는 여름 성층기에 유입하는 하천수의 수온이 호수 표층보다 낮아 중층으로 유입하고 있으며 이 유입수는 부유물질을 많이 함유하고 있어 중층 탁수대를 형성하

는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서 조사된 결과를 보면 여름에 중층에서 높은 POC 농도를 보였는데 이는 중층의 탁수대형성 때문인 것으로 판단된다. 11월 이후 수직혼합기에는 다시 DOC, POC는 모두 전 수심에서 균일하게 낮은 값을 보였다. 한편 호수 심층의 저질 부근에서는 10월 이후에 높은 DOC가 나타났는데 이는 봄부터 성층이 지속되면서 저질의 유기물이 용출되어 축적된 것으로 보인다. 소양호와 파로호에서 시간적 변동과 수직변이가 유사한 경향을 보였는데 이는 두 호수가 수심이 깊고 유역 오염원이 적다는 공통점을 가지고 있기 때문인 것으로 해석된다.

춘천호에서는 DOC와 POC가 1.29~2.10, 0.10~2.02 mgC/L의 범위를 보였고 위의 두 호수보다는 수직적인 농도 변화가 크지 않았다. 이는 춘천호의 체류시간이 짧아 성층이 약하고 수직혼합이 활발하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 1~3월은 호수 표면이 결빙되어 조사를 하지 못하였는데 해빙 후 4, 5월까지의 혼합기로서 수직적으로 균일하게 낮은 농도를 보이다가 여름철인 6, 7월에는 성층현상과 식물플랑크톤 증가로 DOC, POC가 표층에서 높아졌다. 10월 이후 겨울에는 DOC, POC 모두 감소하였다.

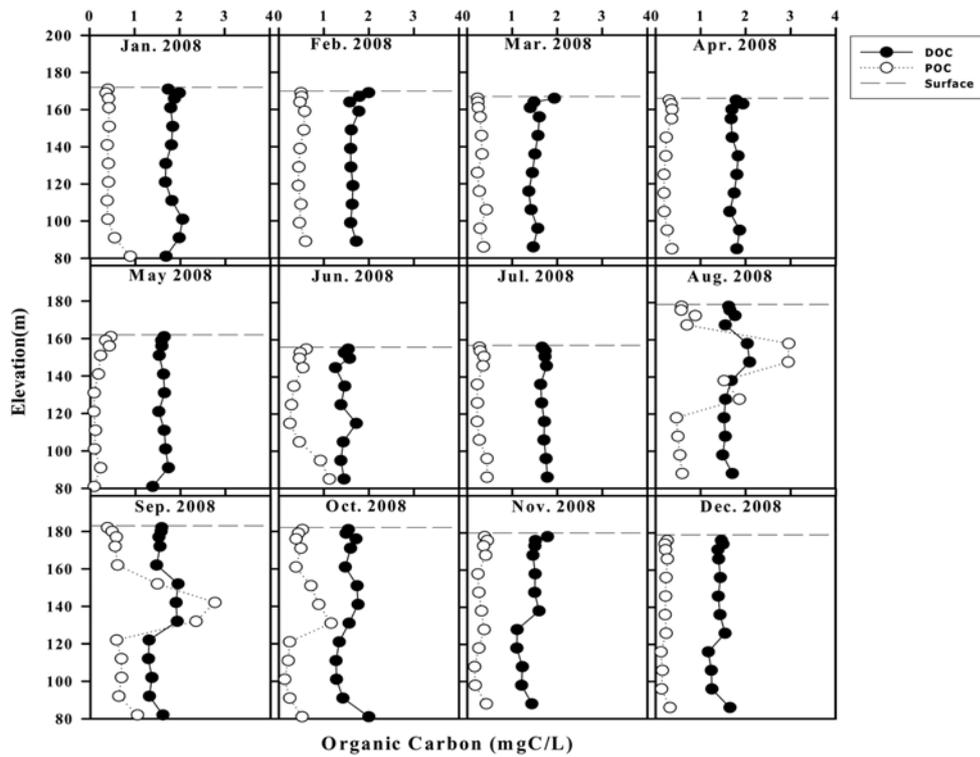
의암호에서는 DOC, POC가 각각 1.30~2.56, 0.10~2.63 mgC/L의 범위를 보였다. 의암호 역시 춘천호와 마찬가지로 수직적 변화가 크지 않았으며, 계절적으로도 DOC는 연중 고르게 비슷한 농도를 유지하였다. 그러나 POC는 2월까지 낮은 농도를 보이다가 봄철에서 가을철까지 높은 농도를 유지한 후 11월 이후부터 다시 낮아졌다. 특히 10월에 POC가 가장 높았다.

각 호수 표층만을 대상으로 POC와 Chl.a의 변화를 살펴 보면, Chl.a의 최대치는 소양호, 파로호, 춘천호, 의암호에서 각각 4.9, 8.2, 10.5, 39.8 µg/L로서 5월에서 10월 사이에 나타났으며 겨울에는 낮은 농도를 보였다(Fig. 2). 호수 별로 살펴보면 소양호에서는 늦봄에서 여름철까지 높았고 8월 집중강우 후에 9~12월은 낮아졌는데 1, 2월보다는 높았다. 파로호에서는 여름철에 점점 높아지는 경향을 보였고 9월에 가장 높았다. 그리고 그 후에 다시 낮아졌다. 춘천호에서는 6월에 가장 높았고 그 이후로 12월까지 감소하는 경향을 보였다. 의암호에서는 다른 호수들보다 평균적으로 높았으며 3월 이후로는 계속 10 µg/L 정도의 값을 보였다. 특히, 10월에는 40 µg/L에 가까운 매우 높은 값을 보였다. 그리고 모든 호수에서 표층 POC 역시 여름철 이후 높게 나타났다. 전체적으로 살펴보면 상대적으로 얕은 수심을 가진 춘천호와 의암호에서 Chl.a가 더 높았다. Chl.a와 POC는 대체적으로 유사한 계절적 변동 경향을 보였다.

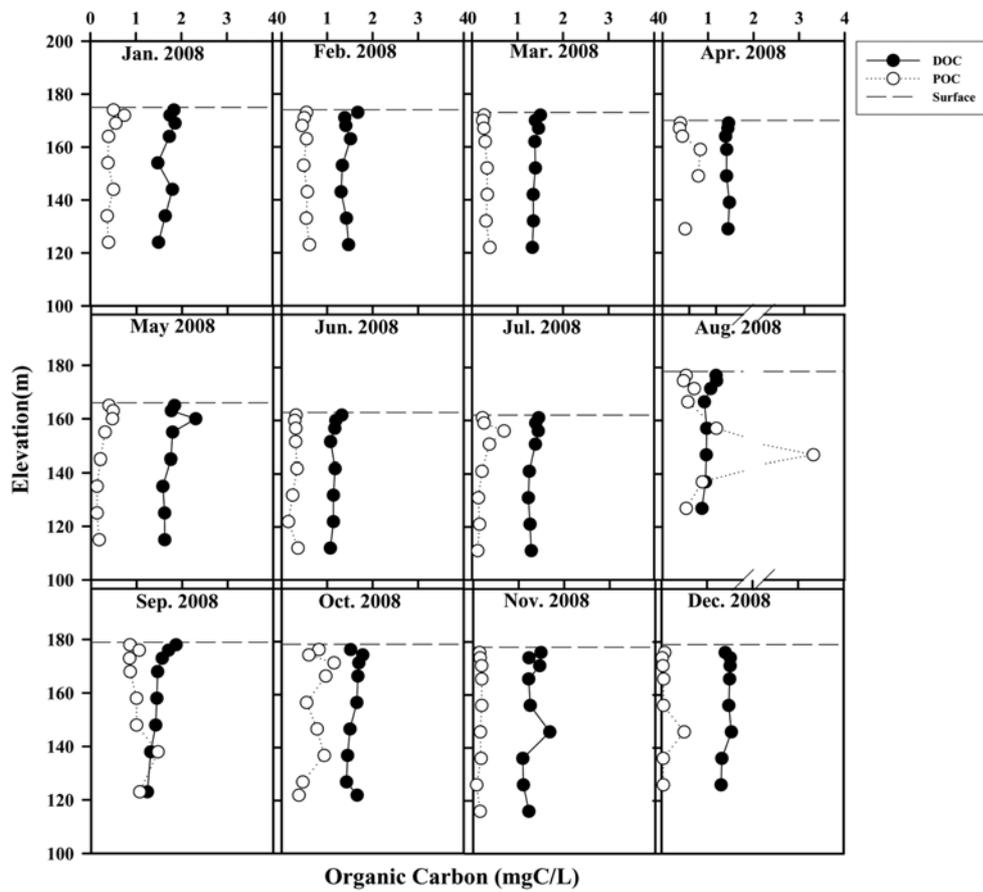
POC안에 포함된 조류세포의 함량비를 조사한 결과 겨울철에 함량비가 높은 것으로 나타났다. 소양호에서는 POC에 대한 조류세포의 비율이 50%가 넘지 않았는데, 이와는 달리 춘천호에서는 7월에 60%, 의암호에서는 4, 7, 10, 11월에 각각 60, 72, 74, 74%의 높은 비율이 나타났으며, 특히 파로호와 의암호에서는 12월에 100%가 넘는 값이 나타나기도 하였다. 100%가 넘는 조류기여율이 나타난 것은 이 시기에 조류의 Chl.a 함량이 높아 C/Chl.a의 비가 본 연구에서

Table 2. Averages of DOC, POC, and DOC/POC ratio in four reservoirs on the North Han River

Lake	year	DOC (S.D.)	POC (S.D.)	DOC/POC	n
Soyang	1997	2.32 (±1.07)	0.33 (±0.37)	7.64	373
	2006	1.67 (±0.63)	1.87 (±0.33)	0.89	140
	2007	1.78 (±0.55)	0.78 (±0.58)	2.28	127
	2008	1.60 (±0.23)	0.69 (±0.55)	2.33	182
Paro	2008	1.49 (±0.22)	0.53 (±0.60)	2.81	96
Chunchon	2008	1.59 (±0.23)	0.77 (±0.75)	2.06	52
Uiam	2008	1.83 (±0.27)	1.01 (±0.52)	1.81	60

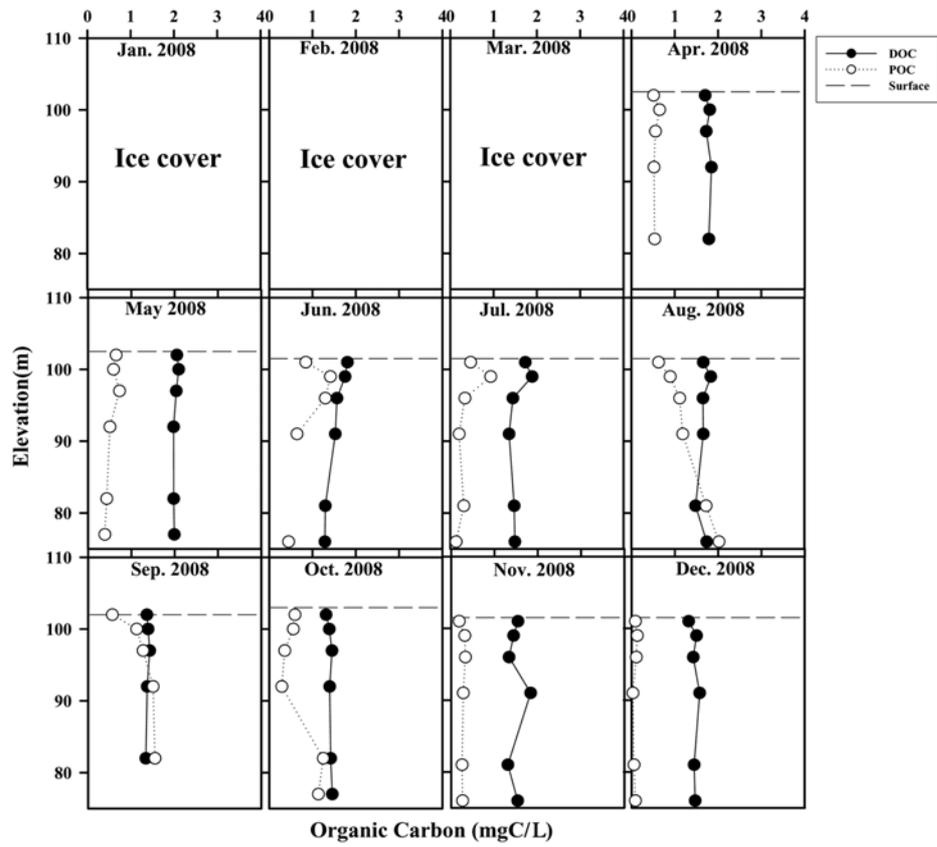


(a) Lake Soyang

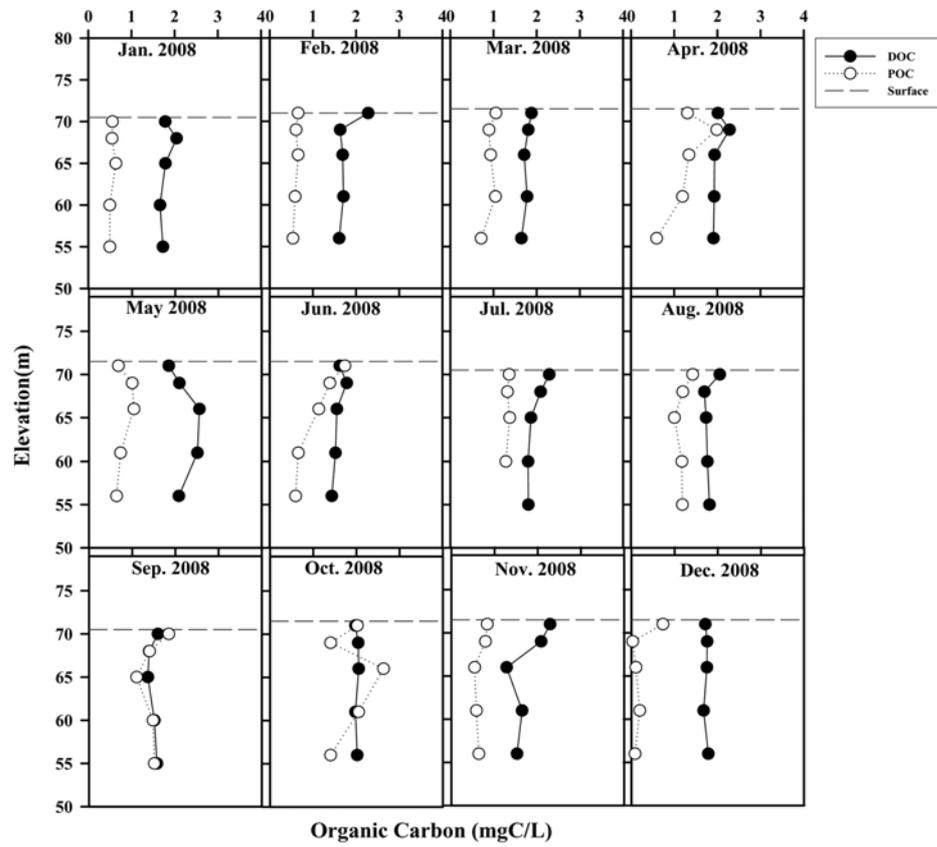


(b) Lake Paro

Fig. 2. Vertical profiles of DOC and POC in four reservoirs on the North Han River.



(c) Lake Chunchon



(d) Lake Uiam

Fig. 2. Vertical profiles of DOC and POC in four reservoirs on the North Han River (continued).

조류생체량 추정에 사용한 비보다 낮았다는 것을 시사한다. DOC/POC 비는 소양호, 파로호, 춘천호, 의암호에서 각각 2.81, 2.06, 1.81, 2.33로서 파로호에서 가장 높았으며 의암호에서 가장 낮았다. 소양호와 파로호에서는 여름철에 비율이 가장 낮았다. 그 중에 소양호에서는 봄에 DOC의

증가로 그 비율이 가장 높았으나, 여름 강우 직후 POC가 증가하면서 가장 낮은 비율을 보였다(Fig. 3). 또한 과거와 비교하였을 때 DOC는 감소하고 상대적으로 POC가 증가하여 낮은 DOC/POC비를 보였다(Table 3).

Table 3. The proportions of algal carbon in POC at surface layers (%)

Month	Lakes			
	Soyang	Paro	Chunchon	Uiam
Jan.	15	8	No data (ice covered)	13
Feb.	11	6		21
Mar.	18	19		20
Apr.	28	9	25	60
May	37	30	29	47
June	29	20	38	33
July	28	46	60	72
Aug.	16	17	24	32
Sep.	13	27	24	33
Oct.	30	19	8	74
Nov.	25	50	34	74
Dec.	38	184	62	172
Mean	24	37	37	54

호수에서 DOC 분포에 관한 연구보고를 보면 온도에 따른 밀도차로 수직성층이 일어날 경우 깊은 수심에서 용존 산소의 부족으로 인해 DOC가 높은 경우가 있으나 (Thurman, 1985), 일반적으로 DOC는 밀도에 의한 성층이나 계절적 물질대사 활동의 변동에도 불구하고 계절적, 수직적 변동이 크지 않은 것으로 알려져 있다(Wetzel, 2001). 반면에 POC는 호수에서 외부로부터의 detritus 유입에 따라 변동하기도 하고, 표층에서는 식물플랑크톤의 영향 때문에 농도가 높아지기도 하므로 DOC에 비하여 변동이 크다 (Thurman, 1985). 또한 여름철 집중 강우로 인해 외부로부터의 POC가 증가하기도 한다(Kim et al., 2000). 본 연구에서도 DOC의 변동이 작고 POC의 변동이 큰 것으로 나타났으며 POC 변동의 주원인은 조류의 번성과 탁수의 유입의 두 가지로 볼 수 있다.

본 연구에서 측정된 호수들의 TOC를 선행 연구와 비교하면 소양호와 파로호는 큰 차이가 없지만 의암호와 파로호는 다소 과거보다 높아졌다(김범철 등, 2007). DOC의 계절변동을 보면 겨울에 낮고 늦봄부터 여름까지 높은 경향

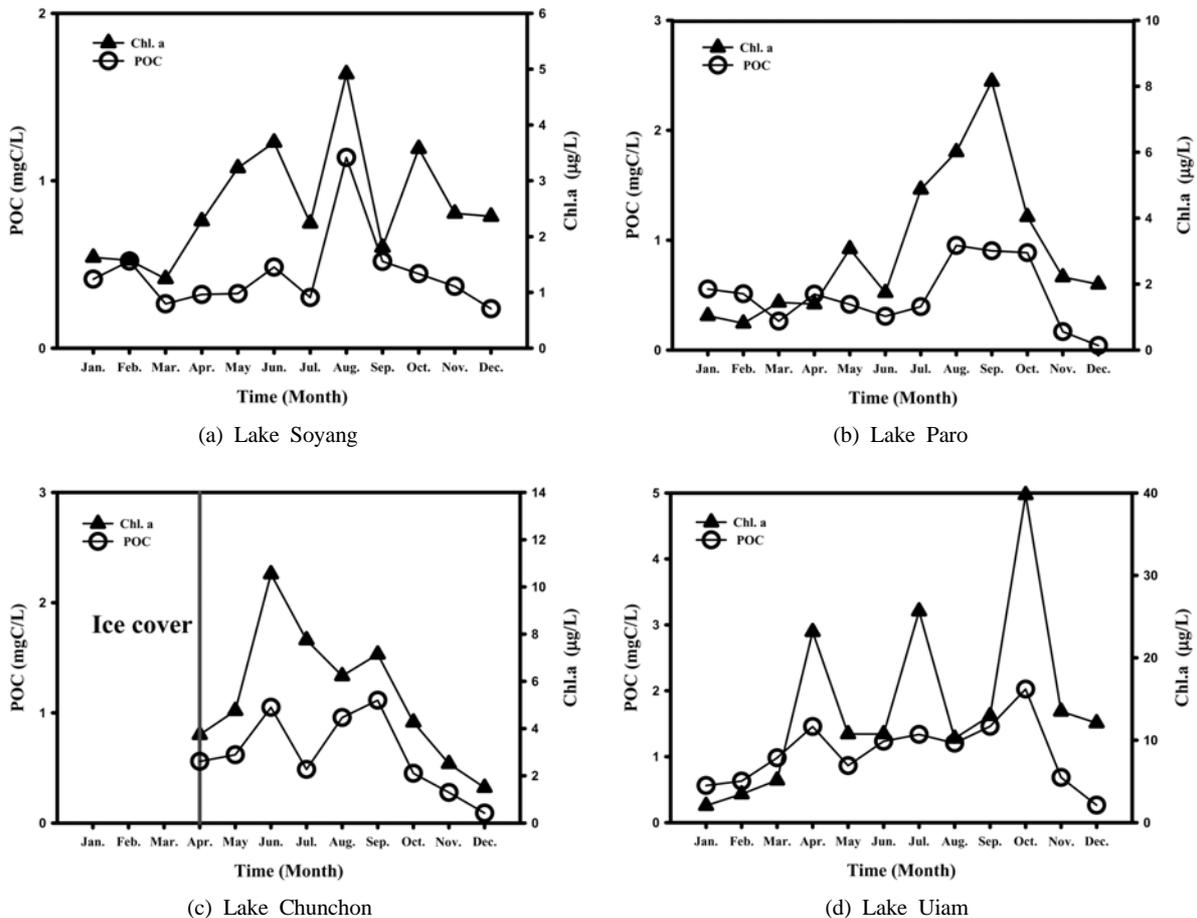


Fig. 3. Monthly variations of POC and Chlorophyll *a* concentration in the epilimnions of Lake Soyang, Paro, Chunchon and Uiam (2008).

을 보였다(Fig. 2). 이 경향은 아시아 여러 호수에서 DOC가 봄부터 가을까지 따뜻한 계절에 높다는 Wen 등(2008)의 연구결과와 일치한다. 이는 여름에 호수의 표층에서 식물플랑크톤이 증가하기 때문인 것으로 사료되며, 식물플랑크톤의 증식은 흔히 DOC증가의 원인이 된다(Kim et al., 2000; Takehiko et al., 1996; Takeo and Hand, 1983).

소양호는 10월 심층에서 DOC가 높았는데 이는 표층의 플랑크톤과 여름철 강우를 통해 유입된 입자성 유기물이 침강하여 심층에서 분해가 천천히 일어나 DOC형태로 전환된 결과로 사료된다. 이는 과거 문헌에서도 수심에 따른 DO감소가 심층 DOC에 영향을 준다는 의견과 일치한다(Thurman, 1985). 비교적 수심이 낮은 춘천호와 의암호는 다른 호수와 달리 수직적인 변이가 나타나지 않았다.

POC는 여름 집중강우 후에 높아졌는데, 이는 우리나라의 기후 특성인 몬순 기후로 인하여 여름철 집중강우 시 많은 외부기원 유기물이 유입된다는 연구 보고에서 제시된 바와 같이 외부로부터의 입자성 유기물의 증가가 원인인 것으로 사료된다(Kim et al., 2000). 근래 소양강유역에서는 많은 탁수가 발생하고 있으며 부유물질을 구성하는 물질 가운데에는 무기부유물질 뿐 아니라 낙엽 등의 입자상 유기물질도 다량 포함되어 있을 것으로 추정된다. 본 연구에서 측정된 DOC/POC는 자연호에서 측정된 평균치인 보다 낮았는데, 일반적으로 하천에서는 POC가 많으며, 강우 시 유역으로부터 POC가 많이 유입하는 우리나라 저수지의 특성으로 인하여 자연호와 하천의 중간적인 비를 보인 것으로 보인다(Wetzel, 2001).

본 연구에서 DOC/POC 비의 변동은 갈수기에는 높고, 여름에 홍수 후에 낮아지는 계절변동을 보였다. 변동의 주원인은 POC의 변동이었는데, 이는 홍수기에 POC가 많이 유입하여 장기간 저장되기 때문인 것으로 사료된다. 특히 2006년도는 소양호에서 POC가 가장 높은 값을 기록한 해였는데 극심한 폭우로 인하여 상류에서 많은 탁수가 유입하였기 때문이다(김범철과 정성민, 2007). 또한 과거 소양호를 대상으로 조사한 문헌들의 결과(김범철 등, 1998; Kim et al., 2000)보다 DOC/POC 비가 감소하였는데 이는 DOC의 감소 때문이 아니라 최근 탁수발생으로 인한 POC의 증가 때문인 것으로 사료된다. 소양호에서 수년간의 변화를 검토해보면 DOC의 농도는 과거와 유사하나 POC는 1997년에 비하여 증가한 것으로 나타났다. 이는 최근의 소양강유역의 탁수발생증가와 관련이 있는 것으로 볼 수 있다. 즉, 탁수발생이 토사의 유실과 함께 퇴비, 낙엽 등의 유기물의 유출을 수반하는 것이며 이 영향이 수개월간에 걸쳐 나타나는 것이다.

여름 홍수기에 POC의 유입이 크게 증가하기는 하지만 본 연구에서 표층의 POC의 변동과 Chl.a의 변동은 비슷한 계절적 변동패턴을 나타냈는데, 이것은 대체적으로 홍수기의 POC가 증충으로 유입하고 호수표층의 POC의 계절변동은 식물플랑크톤의 증감에 의해 더 크게 좌우된다는 것으로 해석할 수 있다. 호수에서 표층의 POC가 식물플랑크톤의 영향을 많이 받는다는 과거 연구결과들과도 일치하는 경향이다(김범철 등, 1998; 조영근 등, 1995; Choi et al., 1995;

Sondergaard et al., 1995). 본 연구에서는 표층 POC 가운데 조류가 차지하는 비율을 Chl.a와 POC의 비로부터 추산하였다. 그 결과 표층 POC내 조류세포의 양은 의암호에서 가장 높았는데 이는 의암호가 춘천시 하수의 영향으로 인하여 부영양화되었기 때문인 것으로 해석된다.

일반적으로 체류시간이 긴 자연호에서는 내부생성유기물의 비율이 높고 체류시간이 짧은 하천이나 저수지에서는 외부기원유기물의 비율이 높다. 그러나 본 연구에서는 가장 체류시간이 짧은 의암호에서 조류의 비율이 가장 높은 것으로 나타났는데 이는 의암호의 부영양화가 심하다는 것을 시사하는 결과로 볼 수 있다. 김범철 등(1996)은 낙동강에서 조류의 점유비율이 24%인 것으로 보고하였는데 이와 비교해 보면 의암호(54%), 춘천호(37%), 파로호(37%)에서는 이보다 높았으며 소양호(24%)에서는 비슷한 값을 보였다. 그러나 덴마크의 부영양화 자연호인 Frederiksborg Slotsso호에서 조사된 값은 4개 호수보다 모두 높은 값을 보였다(Morten et al., 1995). 또 다른 문헌에 제시된 자연호의 비율도 본 연구의 조성비율보다 높았다(Thurman, 1985). 이는 우리나라 호수는 하천과 호수의 중간적인 성격을 띠는 인공호이므로 육상에서 유입하는 debris가 자연호보다 많기 때문인 것으로 해석된다.

본 연구에서 조류의 조성비율이 가장 높은 것은 12월 파로호와 의암호로서 조류세포의 기여도가 100%를 초과하는 것으로 산정되었다. 겨울에는 주변으로부터의 유입이 없으므로 외부기원 유기물의 양이 적었을 것으로 생각되며, 우점종의 특성상 POC/Chl.a 비가 낮아졌을 가능성도 있다. 조류세포의 Chl.a 함량은 조류의 종류에 따라 달라지며, 빛 조건 등의 성장인자에 의해 달라진다. 겨울에는 혼합수심이 깊어 조류세포가 받는 광량이 감소하는데, 빛이 감소하면 그 영향은 종조성의 변화와 함께 조류의 Chl.a 함량이 평균이상으로 증가하는 생리적 변화로 나타날 수 있으며 그 결과가 겨울에 조류 조성비율이 100% 이상으로 산정된 것으로 보인다.

본 연구에서는 수중의 POC 총량을 측정하였으며 조류세포만을 분리하여 algal POC만을 측정하는 것이 기술적으로 불가능하기 때문에 현장조사 자료로부터 조류세포의 POC/Chl.a 비를 완벽하게 측정할 수는 없다. 또한 조류를 순수 배양하여 Chl.a 함량을 측정하는 경우에는 배양조건에 따라 함량이 달라지고, 배양조건이 현장과 일치하지 않기 때문에 현장의 Chl.a 함량을 재현할 수는 없다. 따라서 호수마다 환경조건에 따라 조류의 Chl.a 함량은 변이를 가질 수 있으며, 조류이외의 다른 유기부유물질이 적은 시기를 택하여 우점종별로 POC/Chl.a의 비를 측정하여 이로부터 함량을 구하는 것이 적절한 대안이다.

각 호수의 POC/Chl.a 관계식의 기울기로부터 C(mg/L)/Chl.a(mg/L)의 비를 추정할 수 있는데 호수별로 큰 차이를 보이고 있다. 소양호에서는 식물플랑크톤의 bloom이 발생하지 않아서 유의적인 상관관계를 보이지 않았으며, 파로호와 춘천호에서는 각각 80과 65를 보인 반면에 의암호에서는 24의 낮은 값을 보였다(Fig. 4). 일본의 Kasumigaura호에서는 65의 비가 보고된 바 있으며(Aizaki and Otsuki, 1987) 유럽

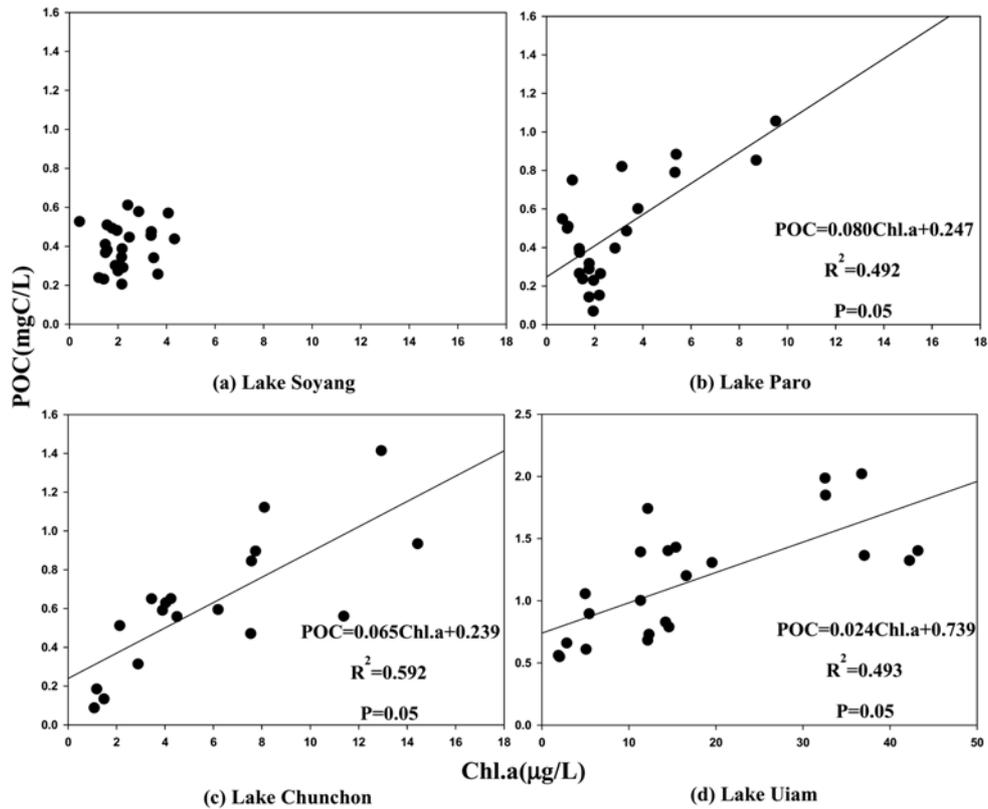


Fig. 4. Plot of POC vs Chl.a of epilimnions in four reservoirs.

의 Lake Frederiksborg에서는 50이 보고된 바가 있다(Rieman et al., 1989) Kim 등(2000)은 소양호에서 1995년에 POC/Chl.a 비가 77이었고 cyanobacteria가 우점한 1996년에는 43인 것으로 보고한 바 있어 본 연구에서 측정된 POC/Chl.a 비는 기존의 보고된 결과와 유사한 범위에 드는 것으로 볼 수 있으며 파로호와 춘천호는 다소 큰 비를 보였고 의암호에서는 낮은 비를 보인 것으로 평가할 수 있다.

의암호는 다른 3개의 호수보다 부영양한 영양상태를 보였으며 여름에 Microcystis 속의 cyanobacteria가 우점종으로 출현하였는데 cyanobacteria는 세포크기가 다른 조류에 비하여 작은 종류이며, 일반적으로 세포크기가 작은 조류들의 Chl.a 함량이 높고 생리적 비활성도가 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 의암호에서 조류 bloom이 일어났을 때 POC/Chl.a 비가 낮은 이유는 cyanobacteria의 우점 때문인 것으로 해석되며 이는 소양호에서 cyanobacteria가 우점할 때 C/Chl.a 비가 작다는 보고와도 일치하는 경향이다(Kim et al., 2000). 일반적으로 부영양화현상의 판정에서는 주로 Chl.a 농도를 사용하여 간접적으로 조류밀도를 추정하므로, Chl.a 농도는 수질모델보정 등의 수질관리 분야에서 그 중요성이 크며 앞으로 식물플랑크톤의 Chl.a 함량의 변이에 관한 더 많은 연구가 필요하다.

4. 결론

북한강 수계의 4개 호수(소양호, 파로호, 춘천호, 의암호)

에서 유기물 농도를 DOC와 POC로 구분하여 조사한 결과, DOC는 연평균은 1.5~1.8 mg/L의 분포를 보였으며, POC의 연평균은 0.5~1.8 mg/L의 분포를 보였다. 수심이 깊고 성층이 강한 소양호와 파로호에서는 홍수기에 중층에서 높은 POC가 관측되어 POC의 변동이 DOC보다 더 크게 나타났으며, 특히 2006년도에는 큰 홍수가 발생하여 3 mg/L에 이르는 가장 높은 POC를 기록하였다. 의암호와 춘천호는 연중 수직혼합이 활발한 하천형 호수의 특성을 보였으며 수직적인 변이가 작았다. 전반적으로 DOC는 다른 나라의 동일한 영양상태의 호수와 비교하여 낮은 편이었다. 계절적인 변화를 살펴보면 식물플랑크톤의 양의 증가하였던 늦봄부터 여름까지 DOC와 POC가 높고 가을과 겨울에는 균일하게 낮은 값을 보였다. POC는 여름 집중강우 시에 유입되는 외부기원 유기물에 의해 가장 높은 농도를 보였다. 모든 호수의 표층에서는 식물플랑크톤이 증가할 때 표층에서 DOC와 POC가 증가하는 경향을 보였고, POC에 대한 조류의 조성비율은 연평균 24~54%의 분포를 보였다. 조류의 조성비율은 7월에 홍수가 발생하기 이전에 춘천호에서 60% 의암호에서 72%의 높은 비율을 보였는데, 특히 부영양화도가 높은 의암호에서 가장 높은 것으로 나타났다. 8월에 홍수 후에는 조류의 조성비율이 가장 낮은 것으로 보아 외부 기원 detritus의 유입이 많았던 것으로 해석된다. 조류의 Chl.a 함량을 시사하는 POC/Chl.a의 비는 파로호에서 80, 춘천호에서 65의 값을 보인 반면에, 의암호에서는 cyanobacteria가 번성하는 시기에는 24의 낮은 값을 보여

cyanobacteria의 Chl.a 함량이 높은 것을 시사하였다.

사 사

본 연구는 2008년도 환경기초조사사업 '수계별 호소환경 및 생태조사' 연구의 지원으로 수행되었음. 저자 중 김기용은 2009년도 BK21 사업의 장학지원을 받았음.

참고문헌

- 김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규(1996). 부영양한 낙동강수계에서 유기물오염에 대한 조류 1차생산의 기여도. *한국조류학회지*, **11**(2), pp. 231-237.
- 김범철, 정성민(2007). 소양호의 탁수발생 실태와 환경학적 영향. *대한환경공학회지*, **29**(11), pp 1185-1190.
- 김범철, 정성민, 장창원, 김재구(2007). 호수와 하천에서 유기물 오염도의 지표로서 BOD, COD와 TOC의 비교 및 분해율 산정. *대한환경공학회지*, **29**(6), pp. 640-643.
- 김범철, 최광순, 김철구, 이유희, 김동섭, 박제철(1998). 소양호의 DOC와 POC의 분포. *한국유수학회지*, **31**(1), pp. 17-24.
- 조영근, 이동훈, 김상중(1995). 식물플랑크톤 생장이 소양호 수층의 유기물 분포에 미치는 영향. *한국유수학회지*, **28**(2), pp. 137-150.
- Aizaki, M. and Otsuki, A. (1987). Characteristic of variations of C:N:P:Chl ratios of season in eutrophic shallow Lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.*, **48**, pp. S99-S106.
- APHA, AWWA, and WEF (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th eds.*, American Public Health Association, Washington DC.
- Choi, C., Heo, S., Lee, K., Choi, Y., Kwak, H., and Kim, E. (1995). Distribution of particulate organic matter in the Kum River, Korea. *Rep. Suwa Hydrobiol.*, Shinshu University, Japan, 9, pp. 101-110.
- Cole, T. M., and Wells, S. A. (2001). *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.1*, User Manual. U.S. Army Corps of Engineers.
- Comerma, M., Garcia, J. C., Romero, M., Armengol, J., and Simth, K. (2003). Carbon flow dynamics in the pelagic community of the Sau Reservoir(Catalonia, NE Spain). *Hydrobiologia*, **504**, pp. 87-98.
- Fukushima, T., Park, J., Imai, A., and Matsushige, K. (1996). Dissolved organic carbon in a eutrophic lake; dynamics, biodegradability and origin. *Aquatic Sciences.*, **58**(2), pp. 139-157.
- Kim, B., Choi, K., Kim, C., Lee, Y., and Kim, Y. (2000). Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Wat. Res.*, **34**(14), pp. 3495-3504.
- Li, W., Wu, F., Liu, C., Fu, P., Wang, J., Mei, Y., Wang, L., and Guo, J. (2008). Temporal and spatial distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in two small lakes on the Southwestern China Plateau. *Limnology*, **9**, pp. 163-171.
- Page, D. and Dillon, P. (2007). *Measurement of the Biodegradable Fraction of Dissolved Organic Matter Relevant to Water Reclamation via Aquifers*. CSIRO. Australia, pp. 4.
- Peterson, B. J. (1978). Radiocarbon uptake: Its relation to net particulate carbon production. *Limnol. Oceanogr.*, **23**(1), pp. 179-183.
- Rieman, B., Simonsen, P., and Stensgaard, L. (1989). The carbon and chlorophyll content of phytoplankton from various nutrient regimes. *J. Plank. Res.*, **11**(5), pp. 1037-1045.
- Shon, H., Erdei, L., and Kim, J. (2006). Constituent of Natural Organic Matter (NOM) and its effect in water. *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**(2), pp. 119-124.
- Sondergaard, M., Hansen, B., and Markager, S. (1995). Dynamics of dissolved organic carbon lability in a eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr.*, **40**, pp. 46-54.
- Sugiyama, Y., Anegawa, A., Kumagai, T., Harita, Y., Hori, T., and Sugiyama, M. (2004). Distribution of dissolved organic carbon in lakes of different trophic types. *Limnology*, **5**, pp. 165-176.
- Takeo, H. and Handa, N. (1983). The seasonal variation of organic constituents in a eutrophic lake, Lake Suwa, Japan. Part II. Dissolved organic matter. *Arch. Hydrobiol.*, **98**(4), pp. 443-462.
- Thurman, E. M. (1985). *Organic Geochemistry of Natural Waters*. Maritinus Nijhoff / Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- UNESCO (1966). Determination of photosynthetic pigments in seawater. *UNESCO Monographs on Oceanographic Methodology*, 1, paris, pp. 12-18.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology ; Lake and River Ecosystems*, 3rd edition, Academic press, San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo.
- Yoshioka, T., Ueda, S., Khodzher, T., Bashenkaeva, N., Korovyakova I., Sorokovikova L., and Gorbunova, L. (2002). Distribution of dissolved organic carbon in Lake Bikal and its watershed. *Limnology*, **3**, pp. 159-168.