

## 소양호에서 외부기원유기물의 유입, 유출 특성

박혜경<sup>†</sup> · 권오윤\* · 정동일

국립환경과학원 물환경연구부

\*한국해양연구소

## Characteristics of Allochthonous Organic Matter in Large Dam Reservoir, Lake Soyang

Hae-Kyung Park<sup>†</sup> · Oh-youn Kwon\* · Dongil Jung

Water Environment Research Department, National Institute of Environment Research

\*Korea Ocean Research and Development Institute

(Received 28 October 2010, Revised 28 December 2010, Accepted 29 December 2010)

### Abstract

To identify the inflow and outflow characteristics of allochthonous organic matters and examine the change of allochthonous organic matter load pattern due to the climate change, we investigated the temporal variations of DOC and POC concentrations within inflow water and dam discharge water and spatio-temporal distribution of POM within the lake water in Lake Soyang which is the largest dam reservoir in Korea in 2006. Most of allochthonous DOC flowed into the lake water during initial rain and was not affected by the amount of precipitation, whereas most of allochthonous POC flowed into during concentrated heavy rain and the concentration of POC was significantly associated with the amount of inflow water and precipitation. Calculated annual allochthonous organic matter loads in Lake Soyang from 2003 to 2006 using the regression equation between the amount of inflow water and the concentration of POC indicate allochthonous organic matter loads are mainly affected by total influx and extreme influx of inflow water. The spatio-temporal distribution of POM indicated allochthonous organic matter of inflow river during flood period in July transported from upper part to middle and lower part of the lake a month later respectively along the middle layer of water column in Lake Soyang.

**keywords** : Allochthonous organic carbon, Climate change, C/N ratio of POM, Lake Soyang

### 1. 서론

우리나라는 여름 장마철에 연간 강우량의 70% 이상의 강우가 내리는 특성 때문에 홍수조절과 저수 및 발전을 위해 하천 중에 댐을 건설하였고 그 결과 많은 인공 호수가 생기게 되었으며 90% 이상의 용수가 인공호수를 포함한 지표수에서 공급되고 있다. 하천에 댐을 건설하면서 생긴 인공호수는 이화학적 그리고 생물학적 특성이 자연호수와 다르게 상류하천의 유입량, 댐 수문의 불규칙한 방류와 그에 따른 불일정한 수리학적 체류시간에 강하게 영향을 받는 특수한 수생태계이다.

우리나라 최대의 인공호인 소양호는 북한강 수계의 지류인 소양강에 소양댐이 건설되면서 조성된 댐호로 자연호수와 같이 수심이 깊고 체류시간이 길어 호수형 인공호로 구분되며 여름철에 수온에 의한 성층을 나타내는 온대일순환호수이다. 소양호는 북한강 수계 상류에 위치하고 있어 소양댐의 방류량 및 방류수질은 하류에 위치한 의암, 청평호와 국내 최대의 상수원인 팔당호의 수질과 생태계에 큰 영향을 미친

다. 특히 1990년대 후반부터 소양강 유역에서 고령지 채소재배 등으로 강우 시 유역의 탁수 발생이 증가하고 있고 부유물질의 농도도 점차 높아지고 탁수발생기간도 길어지고 있으며(김범철과 정성민, 2007; 허우명 등, 1998; Kim et al., 2000), 최근 들어 기후변화의 영향으로 강우 강도가 세지면서 탁수 발생 정도가 더 심화될 가능성이 높다(Bates et al., 2008).

유기물은 지표수의 화학, 생물학을 조절하는 중요한 결정 인자이며 유기물 농도는 수질관리의 주 대상이다. 따라서 담수역의 수질관리를 위해서는 유기물의 기원과 거동을 밝히는 것이 매우 중요하다. 호수와 하천의 중요 구성인자인 유기물은 자생(내부생산)적 그리고 외부유래의 2개의 기원이 있다. 외부유래 유기물은 주로 강우 동안 유역 하천에서의 범람(runoff)과 함께 수중생태계로 유입된다(Onstad et al., 2000). 내부생산 유기물은 호내에서 식물플랑크톤과 수생식물의 광합성에 의해 내부에서 생산된다. 이런 기원별 유기물의 양과 기여도는 수계별로 크게 차이가 나며 체류시간, 연안대의 발달, 영양상태 등에 의해 결정된다(Cole et al. 2002; Park et al., 2009; Wetzel, 2001). 강우시 유역에서 유입되는 탁수에는 다량의 입자성유기물과 인, 질소 등의 영양물질이 포함되어 있고 따라서 탁수의 유입은 호내 유기물 거동에도 큰 영향을 미친다(Park et al., 2009).

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

parkhk@me.go.kr

본 연구에서는 북한강 및 한강 하류 수계의 호수와 하천의 수질에 절대적인 영향을 미치는 소양호에서 태풍에 동반한 집중강우로 인해 예년에 비해 유입유량이 매우 많았던 2006년에 유입하천을 통해 유입되는 외부유입유기물과 댐방류유기물의 특성을 조사하여 소양호의 외부유입유기물 특성 및 호내 거동을 밝히고 또한 기후변화로 인한 강우패턴 변화에 따른 외부유입유기물의 유입패턴 변동 가능성을 검토하여 대형 인공호에서 유역의 토지이용도 변화 및 기후변화로 인한 유기물 오염의 저감대책 수립을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 조사지점 및 조사시기

본 조사의 대상호수인 소양호는 북한강 최대 지류인 소양강에 소양댐이 건설되면서 조성된 인공호로 총저수용량 2,900백만톤, 수표면적 70.0 km<sup>2</sup>, 평균수심 42 m, 수리학적 체류시간이 약 270일의 우리나라 최대 호수이다. 소양호의 주요 유입하천은 소양호 상류에 위치한 내린천과 인북천으로 이 두 유입지천의 유역면적이 전체 유역면적의 약 73%를 차지하고 있다. 따라서 소양호로 유입되는 유입수의 유기물 농도를 조사하기 위해 주요 유입천인 내린천과 인북천이 합류된 직후인 살구미교 지점(Inflow)에서 2006년 4월부터 11월까지 평수기에는 매주 1~3회, 집중강우기에는 1일 100 mm 이상의 집중강우 시 강우직전부터 강우직후까지 1~3시간 간격으로 시료를 채취하였다. 소양호는 호내에 취수구가 없기 때문에 호수 외부로 방류되는 출구는 댐에서 방류되는 것뿐이다. 따라서 유출유기물을 조사하기 위해 소양댐 방류구 하류 세월교 지점(Outflow)에서 2006년 4월부터 11월까지 주 1회~월 1회의 간격으로 시료를 채취하였다. 한편 소양호 내에서 유기물의 거동을 파악하기 위해 2006년 4월부터 11월까지 매일 1회 호 내 상류부터 하류까지 3개 대표 지점(L1, L2, L3)을 선정하여 각 지점에서 0, 1, 2, 5, 10 m와 그 이하는 10 m 간격으로 시료를 채취하였다(Fig. 1).

### 2.2. 시료의 분석

채취한 시료를 냉암 조건에서 실험실로 옮긴 후 유기물과 부유물질(SS)을 분석하였다. 유기물은 용존유기탄소(Dissolved organic carbon, DOC)와 입자성유기탄소(Particulate organic carbon, POC)로 나누어 분석하였다. 550°C에서 미리 태운 GF/F를 사용하여 시료를 여과한 후 여과액을 TOC analyzer(Shimadzu TOC-VCTH)로 분석하여 DOC로 하였으며, 여과지에 잔존한 부분은 무기탄소를 제거하기 위해 12N HCl로 산처리한 후 CHN analyzer로 분석하여 C와 N을 구하였고 이중 C를 POC로 하였으며, DOC와 POC의 합을 총유기탄소(Total organic carbon, TOC)로 하였다. 입자상유기물(Particulate organic matter, POM)의 C/N ratio는 CHN analyzer로 분석하여 얻은 C와 N 값을 이용하여 몰비(molar ratio)를 구하였다.

소양댐의 수위, 저수량, 유역강우량, 유입량, 방류량 자료는 국가수자원관리종합정보 인터넷 홈페이지(www.wamis.go.kr)에 게재된 댐 운영정보의 2003년부터 2006년까지의 일자료를 이용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 수리수문학적 인자

2006년 1월부터 12월까지의 소양댐 수위, 유입, 유출량과 유역강우량을 조사한 결과, 연평균 수위는 172.6 m(160.1~189.6 m)로 연중 29.4 m의 큰 수위변동을 보였고 유역평균 연강우량은 1,616 mm으로 예년에 비해 많았으며 특히 7월 중순에 우리나라를 통과한 태풍 에위니아 전후로 태풍에 동반된 집중강우의 영향으로 7월 한달 동안 832 mm의 비가 내려 연강우량의 절반이 집중되었고 일 최대강우량은 7월 15일 173 mm이었다(Fig. 2). 2003년부터 2006년까지의 연강우량을 비교해 보면 2003년에 1,694 mm, 2004년 1,481 mm, 2005년 1,226 mm로 3년 만에 큰 비가 내렸음을 알 수 있다(Table 1).

하천에 조성된 인공댐호의 유입량은 상류의 유입하천

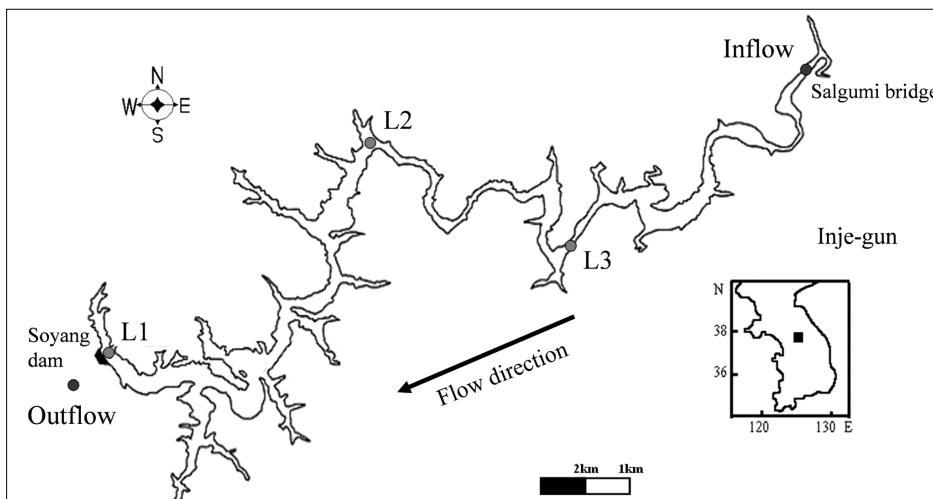
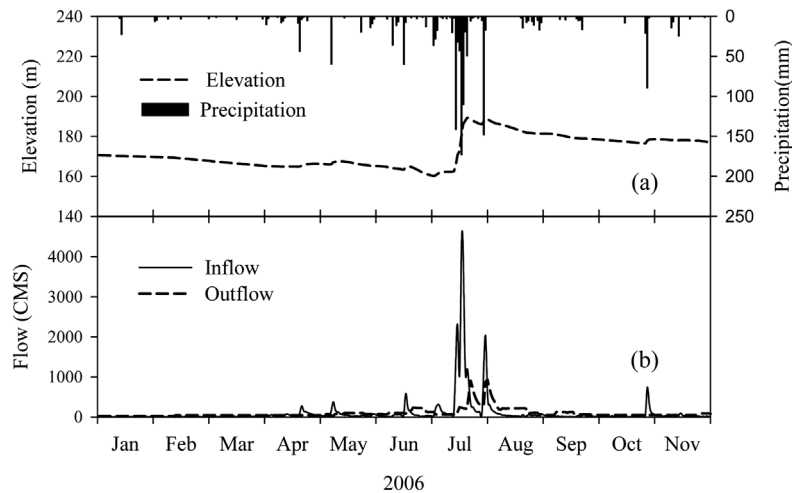


Fig. 1. Sites map of Lake Soyang and its inflow and outflow.

**Table 1.** Comparison of annual mean values of hydrological parameters in Lake Soyang (2003 - 2006)

Parameters	Year	2003	2004	2005	2006
Annual total precipitation (mm)		1,694	1,481	1,239	1,616
Annual average influx ( $m^3/s$ )		108	81	64	96
Annual average efflux ( $m^3/s$ )		105	83	68	91
Annual average elevation (m)		174.2	173.4	171.4	172.6
Annual average water volume ( $10^6$ ton)		1,513.2	1,478.4	1,393.9	1,466.3
Hydraulic retention time (day)		166	206	235	183

**Fig. 2.** Time series record of daily elevation ((a), dashed line), the amount of precipitation ((a), black bar), the amount of inflow ((b), solid line) and outflow ((b), dashed line) of waters in Lake Soyang in 2006.

유입량이 대부분을 차지하며 유입하천 유입량은 다시 유역 강우량과 바로 직결된다. 1월부터 6월까지의 일평균 유입량은  $36 m^3/s$ 이었으나, 7월 한 달 동안의 일평균 유입량은  $798 m^3/s$ 이었으며, 이후에는 유입량이 감소하여 8월부터 12월까지의 일평균 유입량은  $33 m^3/s$ 로 전체적으로 7월을 제외하고는 비슷한 유입량을 보였다(Fig. 2). 일 최대강우량을 보인 7월15일에 일 최대유입유량도  $4,208 m^3/s$ 로 가장 많았다. 한편 소양댐은 북한강 상류에 위치하고 있어 발전 뿐 만 아니라 하류 지역의 물공급 및 홍수 조절 등 다목적용 댐이다. 따라서 봄철 갈수기부터 여름철 집중강우기 전에는 하류 지역의 물 공급과 여름철 강우기 유입량을 예상하여 방류를 증가시켜 수위가 낮아지고, 강우기 이후에는 하류의 홍수방지를 위해 방류량을 조절하여 수위가 높아진다. 조사기간 동안의 댐방류량은 봄부터 점차 증가하였다가 8월을 기점으로 감소하였는데, 1월부터 4월까지 평균 방류량은  $37 m^3/s$ , 5월  $79 m^3/s$ , 6월  $134 m^3/s$ , 7월  $308 m^3/s$ , 8월  $172 m^3/s$ 이었으며, 이후 9월부터 12월까지는  $63 m^3/s$ 이었다. 2003년 이후 3년 만에 7월의 집중강우로 인해 7월 19일 오후 2시부터 8월 3일 오후 2시까지 일평균  $543.9 m^3/s$ 로 수문방류가 실시되었다. 그러나 소양호는 국내 최대 저수량을 갖는 대형 호수로 7월 집중강우 시에도 하류지역의 홍수 방지를 위해 최대한 호내에 물을 저류시켰기 때문에 강우량이 직접적으로 반영된 유입유량에 비해 방류량의 변동 폭이 적게 나타났다(Fig. 2).

### 3.2. 유기물 외부 유입 특성

4월 2일부터 11월 29일까지 소양호로 유입되는 유입수의 유기물 농도를 조사한 결과 형태별 농도를 보면 DOC가  $0.8\sim 3.5 mgC/L$ , POC는  $0.4\sim 473.5 mgC/L$ , 그리고 DOC와 POC를 더한 TOC는  $1.2\sim 476.4 mg/L$ 의 범위를 보여 DOC는 경시적 변동이 크지 않았으나 POC는 매우 큰 폭의 경시적 변동을 보였다(Fig. 3).

DOC는 집중 강우기에 평수기보다 약간 더 높은 농도를 보였으나 평수기와 강우기의 농도차이는 크지 않아 강우가 유입농도에 미치는 영향은 미미한 것으로 조사되었다. 강우시 유역에서의 유기물 유출은 초기 강우에 의해 대부분이 유출되고 그 이후에는 더 큰비가 내려도 유기물 유출이 작은 것으로 알려져 있다(Parks and Baker, 1997). 본 조사에서도 DOC의 경우 강우 초기에 농도가 증가하였으며 강우가 지속된 경우 더 이상의 농도 증가 없이 일정하거나 감소한 농도를 보여 대부분이 초기 강우와 함께 유입되는 것으로 나타났다. 그러나 POC는 비강우기에 비해 강우기에 매우 높은 농도를 보였고, 집중호우가 내린 시기에는 최고 1,100배 이상의 높은 농도를 보여 강우에 의해 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. DOC와 POC의 비를 보면 비강우기인 봄철에는 1 이상으로 유입 유기물에서 용존형태가 더 많았으나 집중강우기인 6월 중순 이후부터 7월까지 1 미만으로 입자상유기물의 형태가 훨씬 많았고 8월 이후부터 다시 DOC 농도가 더 높게 나타나 비강우기에는 주로 DOC의 형태로, 강우기에는 주로 POC의 형태로 소양호

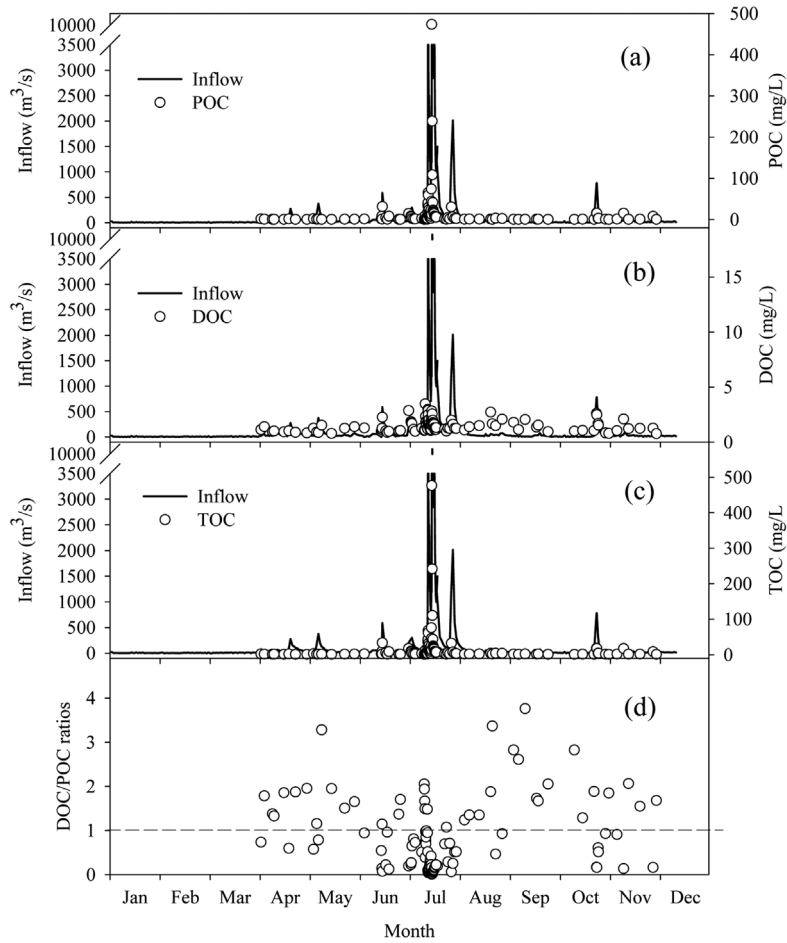


Fig. 3. Time series record of the amount of inflow and the concentrations of POC (a), DOC (b), TOC (c) and the ratio of DOC versus POC (d) of inflow water in Lake Soyang in 2006.

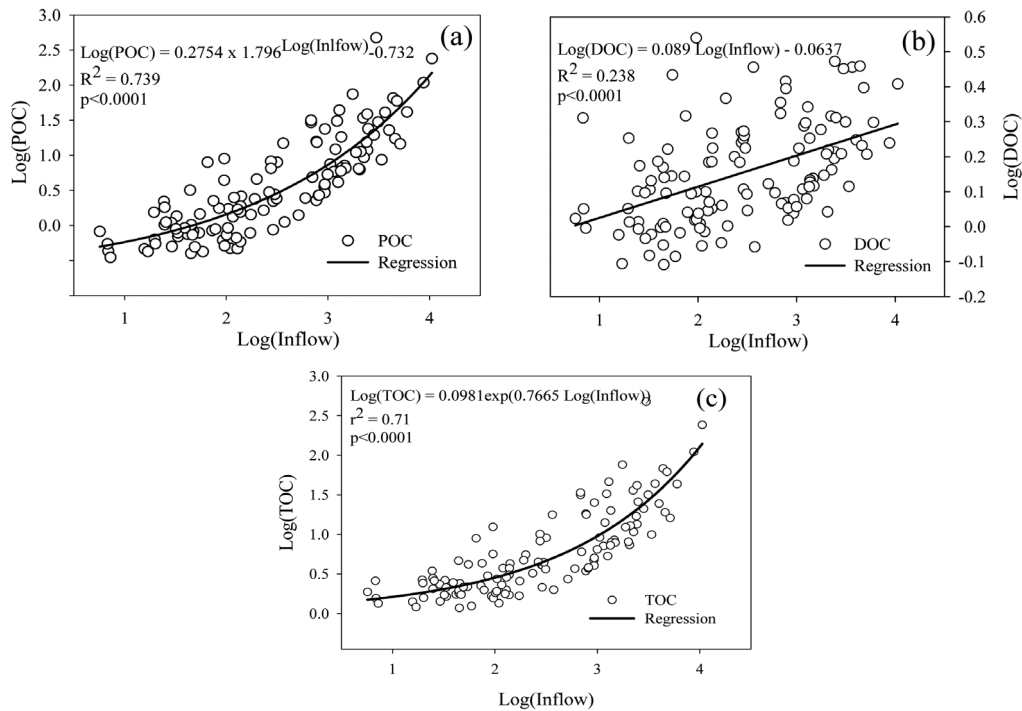


Fig. 4. The result of regression analysis between the amount of inflow water and the concentration of POC (a), DOC (b) and TOC (c).

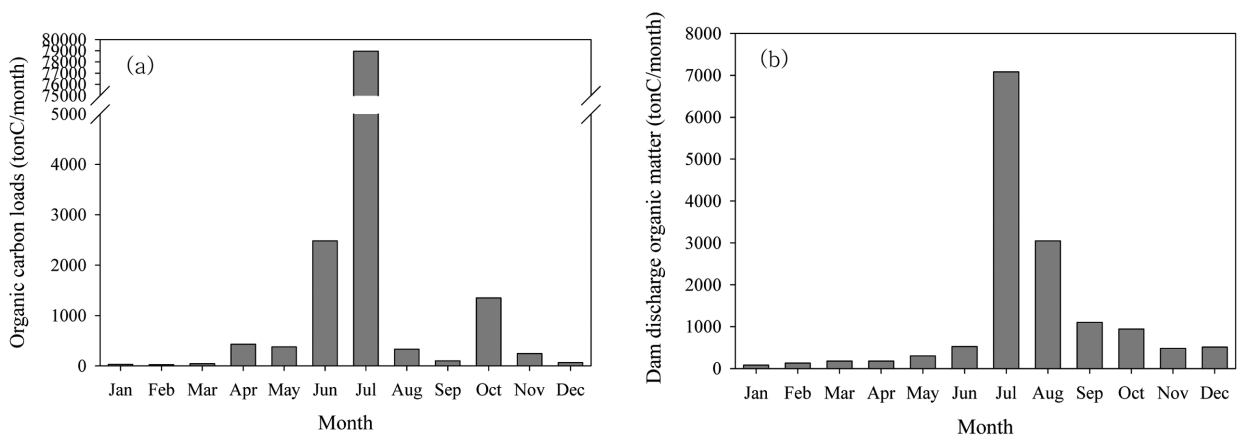


Fig. 5. Monthly allochthonous organic matter loads (a) and dam discharge (b) in Lake Soyang in 2006.

로 유입되는 것으로 조사되었다. TOC의 최대 농도는 476.4 mgC/L로 7월 15일 오전에 채수한 시료에서 나타났으며 이 시기는 7월 12일부터 시작된 집중호우로 유입유량이 1,000 m<sup>3</sup>/s를 지속적으로 초과하고 있었고 최대 농도가 나타난 7월 15일 오전에 유입유량도 10,000 m<sup>3</sup>/s를 초과하며 최대 유량을 보였다. 유입유량과 형태별 유입유기물농도간의 상관관계를 통계 분석한 결과, POC 농도는 유입유량과 높은 상관계수를 가진 지수상관을 보였으나 DOC는 유입유량과 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 그런데 DOC와 POC를 합한 TOC의 경우 POC와 마찬가지로 유입유량과 상관관계가 높게 나타났다. 이 현상은 상관관계에 영향을 크게 미치는 고농도 범위에서 POC가 TOC의 대부분을 차지하므로 POC의 영향으로 TOC와 유입유량간의 상관관계도 높게 나타난 것으로 판단된다(Fig. 4). 이런 결과들로 볼 때 소양호의 유입유기물 농도는 유입하천의 유량과 거의 유사한 패턴으로 변동하며, 따라서 유입유량이 많을수록 그 속에 포함된 유입유기물의 농도도 높아지고 그 유기물의 형태는 입자상 유기물임을 알 수 있었다.

연간 외부유입유기물 부하량을 산정하기 위하여 상류 유입하천 유입지점의 실측 유기물농도(TOC) 결과가 있는 날은 실측결과를 사용하고 실측결과가 없는 날은 위에서 얻은 TOC 농도-유입유량 상관식을 이용하여 매일의 유입유량에서 TOC 유입농도를 계산하고, 매일의 유입유량과 유입유기물농도를 곱하여 1일 유기물유입량을 산정하고, 1일 유기물유입량을 월별로 합산하여 월간 유입유기물량을 산정한 결과, 1월부터 12월까지 최소월과 최대월의 값이 약 3,300배의 차이를 보여 매우 큰 편차를 나타내었다. 평수기 또는 갈수기에 해당되는 봄철과 겨울철에는 월간 100 tC 이하로 유입되었으나 집중강우가 있었던 7월에는 약 80,000 tC의 유기물이 유입되어 대부분의 외부유입유기물이 집중강우기에 유입되는 것으로 나타났다(Fig. 5(a)).

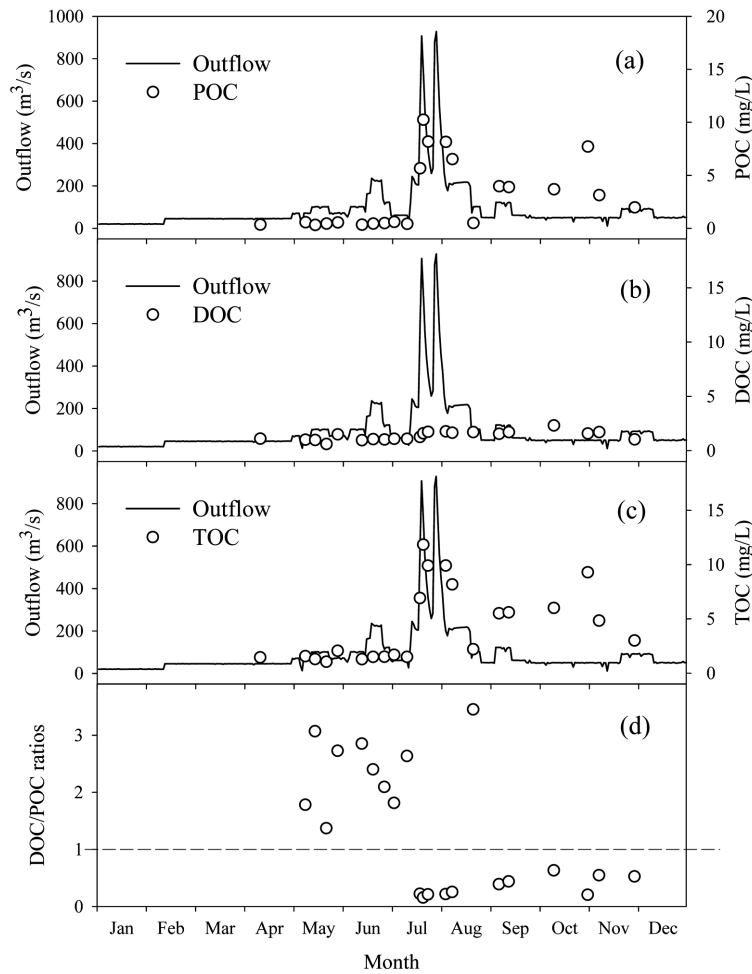
### 3.3. 유기물 외부 유출특성

소양호는 호내에 취수구가 없기 때문에 호수 외부로 방류되는 출구는 댐에서 방류되는 것뿐이다. 4월부터 11월까지 댐방류수를 통해 방류되는 유기물의 형태별 농도를 보

면 DOC와 POC는 각각 0.6~2.3, 0.3~10.2 mg/L의 범위를 보였다(Fig. 6). 조사기간 동안의 DOC 및 POC의 농도 편차는 각각 0.4와 3.3 mg/L로 POC가 더 큰 편차를 보였으나 유입하천의 유입유기물과 비교하면 방류수 POC의 농도 편차가 그리 크지 않았다.

각 형태별 유기탄소의 경시적 변동을 보면 비강우기인 5월까지의 두 형태 모두 낮은 농도로 농도변화가 거의 없었으며 강우가 시작된 6월에도 큰 변화가 없었다. 그러나 7월 중순의 집중호우로 소양댐의 수문방류가 시작된 시점부터 POC의 농도가 급격하게 증가하였으며 방류량이 감소하기 시작한 8월부터 11월까지도 지속적으로 높은 농도를 보였다. 이런 현상은 소양호의 댐방류 방식이 수위 130~150 m의 중층방류 방식으로, 집중강우기 동안 유입하천에서 유입된 후 호내에서 중층에 밀도류를 형성하고 있는 탁류가 중층방류를 통해 지속적으로 방류되었기 때문에 나타난 현상이다(김윤희 등, 2001). 유입하천에서 유입되는 유입유기물과 마찬가지로 방류유기물에서도 DOC의 농도는 시기에 따른 변동이 거의 없이 일정하지만 POC는 강우, 유입유량 등의 수리수문학적 인자에 크게 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 한편 DOC대 POC의 비를 보면 비 강우기에는 1 이상이었고 7월을 기점으로 1 이하의 값을 보여 비강우기에는 주로 DOC의 형태로 방류되지만 강우기에는 탁류의 영향으로 POC의 형태로 주로 방류되는 것으로 나타났다.

연간 댐방류유기물량을 산정하기 위하여 댐 방류지점의 실측 유기물농도(TOC) 결과가 있는 날은 실측결과를 사용하고 실측결과가 없는 날은 내삽법을 이용하여 일별 댐 방류 유기물 농도를 구하여 매일의 방류량과 방류유기물농도를 곱하여 일간 댐 방류 유기물량을 산정하고, 월별로 합산하여 월간 댐방류유기물량을 산정한 결과, 1월부터 12월까지 방류유기물량은 79~7,084 tC/month의 범위를 보였으며 유입유기물량과 같이 월별로 큰 편차를 보였다. 평수기 또는 갈수기에 해당되는 봄철과 겨울철에는 월간 100 tC 이하로 방류되었으나 집중강우가 있었던 7월에는 약 7,000 tC의 유기물이 방류되었으며 방류유량이 감소한 8월부터 10월까지도 중층 탁수대의 지속적인 방류로 상당히 많은 방류유기물량을 보였다(Fig. 5(b)). 소양호로 유입되는 외부



**Fig. 6.** Time series record of the amount of dam discharge water and the concentrations of POC (a), DOC (b), TOC (c) and the ratio of DOC versus POC (d) of discharge water in Lake Soyang in 2006.

유입유기물량과 댐방류를 통해 유출되는 유기물량이 경시적 변동패턴은 유사하나 수지로 볼 때 큰 차이를 보이는데 이는 강우기에 주로 POC 형태로 유입된 유입유기물중 토사 등의 대형부유물질은 호내를 체류하는 동안 많은 부분이 침강되고 최하류인 댐앞까지 침강되지 않은 미세부유물질이 댐방류를 통해 방류되기 때문으로 판단된다.

본 조사에서 얻은 유입유량-TOC 농도 상관식을 2003년부터 2005년까지 각 해의 유입유량에 적용하여 연간 외부유입유기물을 산정하여 보았다(Table 2). 2003년부터 2005년까지 연간 외부유입유기물량은 7,510,156 ~ 25,906,870 tC/y의 범위로 산정되어 2006년 외부유입유기물량의 약 9 ~ 31%에

지나지 않았다. 특히 2006년에 비해 오히려 연 강우량과 유입유량이 더 많았던 2003년에도 외부유입유기물량은 2006년의 31%에 불과하였는데 일유입유량의 표준편차를 보면 2003년에 비해 2006년이 훨씬 커 2006년에 유입유량의 일시적 증가폭이 매우 컸음을 보였고 특히 일 최대유입유량을 보면 2003년에는 2,531 m³/s이었으나 2006년에는 4,208 m³/s로 훨씬 많았다(Table 1, 2). 따라서 유입유량에 따라 유입유기물 농도가 지수적으로 증가하는 상관식을 적용한 결과, 총유입유량은 많았으나 극단적인 유입유량은 없었던 2003년에 비해 일시적으로 극단적인 유입유량을 나타낸 2006년에 유입유기물량이 매우 많게 산정된 것으로 판단된다.

**Table 2.** Annual values of hydrological parameters and calculated value of annual influx of allochthonous organic matter in Lake Soyang (2003~2006)

Year	Annual influx of water (ton)	Maximum daily inflow (m³/s)	Standard deviation of daily inflow (m³/s)	Annual influx of allochthonous organic matter (tonC/y)
2003	3,334,585,140	2,531	260.5	25,906,870
2004	2,511,900,900	2,810	232.8	19,858,485
2005	1,949,133,240	833	99.8	7,510,156
2006	3,011,890,608	4,208	371.2	84,430,373

그런데 소양호 유입수의 총인 농도와 유입유량 상관식을 도출한 연구결과들에서 1995년 이전에 비해 1996년 이후에 상관식의 기울기가 0.36에서 0.52로 약 1.4배 증가하였고(허우명 등, 2004) 2006년에 조사된 총인농도와 유입유량 상관식의 기울기는 0.64로 더 증가하였다(한강물환경연구소, 2006). 기울기가 증가한다는 것은 유입유량의 증가에 대한 총인 농도 증가폭이 더 커진다는 것을 의미한다. 따라서 근래 1996년 이후 소양호 유역에서는 인의 유출량을 증가시키는 큰 변화가 있음을 알 수 있다. 강우시 대부분 입자형태로 유입되는 유기물의 유입특성은 강우시 주요 유입형태가 입자상인 인의 유입특성과 유사할 것으로 추정된다(한강물환경연구소, 2009). 따라서 유역에서의 유기물 유출량 역시 인 유출량과 마찬가지로 과거에 비해 유입유량에 따른 유출폭이 더 커졌을 가능성이 높다. 최근 들어 소양호 상류 하천 유역에서 고령지 농업 등의 비점오염원 유출 증가(김범철과 정성민, 2007)와 기후변화에 따른 극한 기후의 증가 즉 강우 강도의 증가와 편중화(Bates et al., 2008)가 소양호 유역에서의 인과 유기물 유출량 변동에 영향을 주는 것으로 판단되며 특히 기후변화에 따른 강우강도 증가의 영향은 2003년과 2006년의 경우를 보더라도 계속 심화될 가능성이 높다. 따라서 소양호의 수질 및 수생태계 뿐만 아니라 북한 강 수계 댐군의 수질, 수생태계 관리를 위해서도 소양호 유역에서 탁수 유출저감을 위한 대책이 시급하다고 하겠다.

3.4. 유입유기물의 거동

소양호 내 POC의 4월부터 11월까지 수심별 분포를 조사한 결과 시기별, 그리고 수심별로 다른 분포를 보였고(Fig. 7(a)),

소양호 전체에서 0.2~34.6 mgC/L의 범위를 보여 넓은 농도 범위를 보였다.

POC의 지점별 분포패턴을 보면 소양호 내에서 최상류로 유입하천 유입지점에서 가장 가깝고 수심이 가장 낮은 L3 지점에서는 다른 지점에 비해 일찍 농도의 증가가 나타나 6월부터 7월까지 농도가 높았으며 오히려 9월 이후에는 낮은 농도를 보였다. 수심이 40~60 m로 연간 변동하는 L2 지점에서는 8월에 수위가 올라가면서 심수층의 POC 농도가 증가하였고 9월부터 심수층의 농도는 서서히 감소하였다. 호내에서 최하류이며 수심이 가장 깊은 L1 지점에서는 7월부터 시작하여 수위 130~150 m 층과 바닥층에서 높은 농도를 보였고 11월까지 약간의 농도감소는 있었으나 이런 현상이 지속되었다. 이런 현상은 외부에서 유입된 입자상 유기물이 포함된 탁류가 밀도차이에 의해 호내에서 중층으로 유입되어 댐앞까지 유하하면서 나타나는 현상으로, 이런 결과로 볼 때 탁류가 먼저 유입된 상류 지점에서는 8월 조사 시에는 이미 대부분 침강되고 침강되지 않은 탁류는 중층을 따라 유하하여 중류(L2)와 하류(L1)까지 시차를 두고 유하하는 것을 알 수 있다.

호소의 수중 유기물의 기원은 유역으로부터 유입되는 외부 유래와 호내에서 식물플랑크톤과 수생식물의 1차 생산에 의한 생산, 세포의 자가분해, 사체의 미생물 분해로부터의 배출 등의 내부생성이 있다. 호수내 유기물의 기원을 밝히는 주요 지표로서 POM의 C/N 비를 들 수 있다(Ostrom et al., 1998; Wang et al., 2004). POM의 C/N 비는 토양(흙, 관속 식물 잔재)유래, 수중(식물플랑크톤) 유래에서 퇴적물 유래까지의 유기물 기여도를 구분하는데 자주 이용된다. 통상적

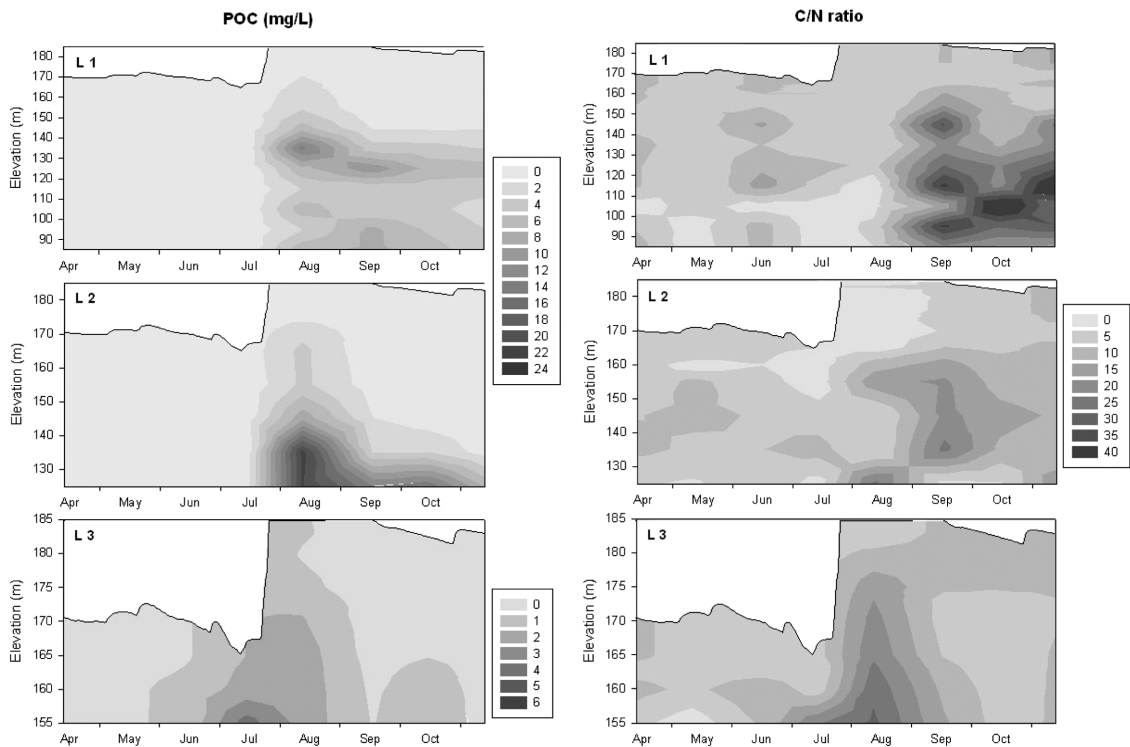
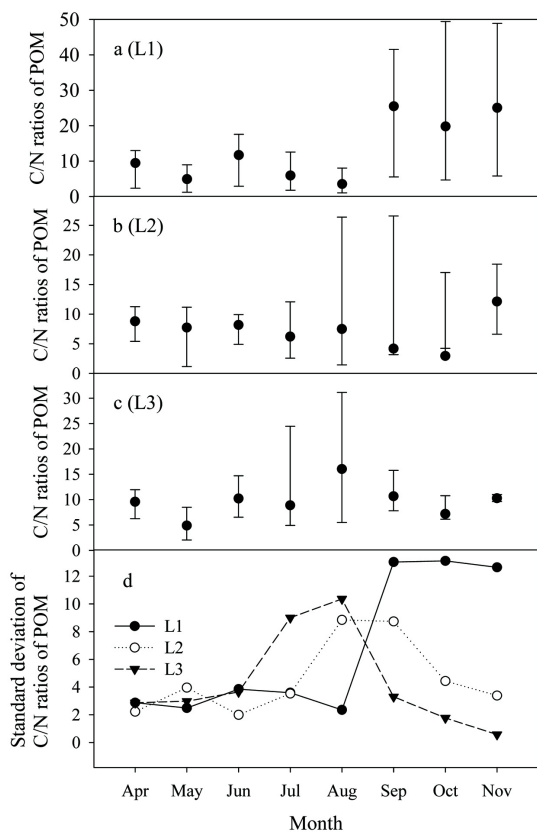


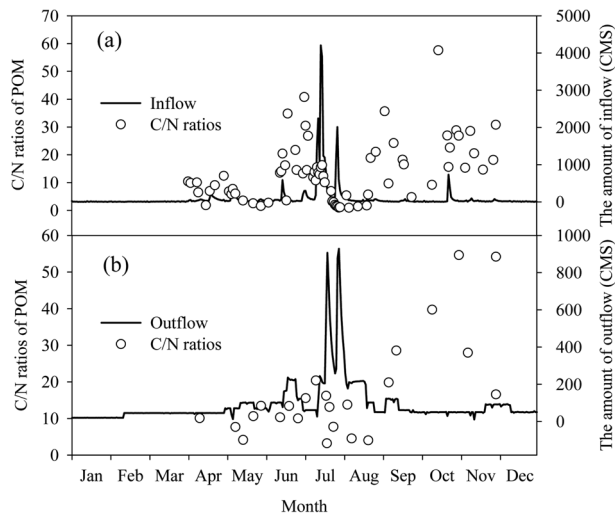
Fig. 7. Depth-time diagrams of isopleths of POC (a) and C/N ratio of POM (b) at lacustrine sites in Lake Soyang in 2006.



**Fig. 8.** The range(a, b, c) and standard deviation (d) of C/N ratios of POM for all vertical samples by month at the lacustrine sites(L1, L2, L3) in Lake Soyang in 2006. Error bars indicate the maximum and minimum value of C/N ratio, black circles indicate average value by depth.

으로 순수한 토양유기물(>10)과 관속식물 잔재(>20)의 통상적인 C/N 비는 담수식물플랑크톤의 C/N ratio(~6.7)에 비해 더 높다.

본 조사에서 소양호 수체내 POM의 C/N 몰비(molar ratio)를 조사한 결과 1.0~49.4의 넓은 범위로 나타났다(Fig. 7(b)). 그런데 시기와 지점 그리고 수심에 따라 서로 다른 변동을 보여 시기와 지점에 따라 POM의 성상이 서로 다를 것을 시사하였다. 먼저 최상류 유입지점인 L3 지점에서는 4월부터 6월까지 C/N 비가 2.0~14.7의 범위로 낮았으며 6월에 약간 높아졌으나 큰 차이는 없었고 수심별 POM C/N 비의 표준편차도 2.9~3.6으로 수심에 따른 차이가 크지 않았다(Fig. 8). 그러나 7월부터 바닥층에서 갑자기 매우 높은 비를 보였고 8월에도 역시 마찬가지로 양상을 나타내어 이 시기의 유기물 기원이 외부 토양 유래임을 보였다. 또한 이 시기의 수심별 표준편차는 각각 9.0과 10.4로 수심에 따라 큰 편차를 보였다. 9월부터 11월까지 6월과 유사한 값을 보였고 수심에 따른 편차는 매우 적어 균질한 C/N 비를 보였다. 호내 중류 지점인 L2 지점에서는 4월부터 7월까지 수심에 따른 편차가 없이 대체적으로 낮은 C/N 비를 보였으나 8월부터 9월까지 깊은 수심에서 매우 큰 C/N 비를 보였고 이에 따라 수심별 편차도 증가하였다. 10월부터 11월에



**Fig. 9.** Time series record of the amount of inflow water and C/N ratio of allochthonous POM (a) and dam discharge water and POM (b) in Lake Soyang in 2006.

는 7월 이전까지에 비해 수심 20~40 m 층에서 높은 C/N 비를 보였으나 8, 9월에 비해 낮아졌으며 또한 수심별 편차는 크게 줄어 수심에 따른 차이가 적었다. 하류의 L1 지점에서는 4월부터 8월까지 전 수심에서 POM의 C/N 비가 낮았고 표준편차도 적었으나 9월부터 11월까지 수심 20 m 이하에서는 매우 높은 값을 보였고 따라서 수심별 표준편차도 커졌다. 이런 결과로 볼 때 유하방향에 따라 7월부터 상류인 L3 지점부터 시작하여 하류인 L1 지점까지 지점별로 약 한 달의 시간차를 두고 유역에서 유래한 POM이 호내의 POM에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 특히 호수 중심부에서는 중층에서 머무는 것으로 나타났다.

소양호로 유입되는 유입수와 수위 약 130 m의 중층에서 방류되는 댐방류수에 존재하는 POM의 C/N 비를 Fig. 9에 나타내었다. 유입수 중에 존재하는 POM의 C/N 비는 6월 초까지는 거의 10 이하의 낮은 값을 보였으나 초기 강우가 있던 6월 중순 이후 급격히 높아져 20 이상을 초과하였으며 집중호우 직후인 8월 초에는 오히려 매우 낮은 비를 보였고 8월 하순부터 다시 급격히 높아져 일시적인 감소는 있었으나 지속적으로 높은 비를 보였다. 한편 방류수의 경우 7월초 일시적으로 POM의 C/N 비가 20을 초과하였으나 8월까지 10 이하로 낮았으며 9월부터 급격히 증가하여 11월까지 지속되었다. 유입수와 방류수 POM의 C/N 비와 호내 POM의 C/N 비를 비교해 보면 6월 중순 이후 7월 초까지 초기 강우와 함께 유입하천으로 유입된 외부유래 유기물은 가장 가까운 L3 지점에서 7월과 8월까지 영향을 미쳤고 이것은 계속 호내에서 흐르면서 L2 지점에는 8월에 도달하였고 L1 지점에는 9월에 도달한 것으로 판단된다. 또한 댐 앞 지점인 L1 지점에서 9월 이후부터 11월까지 지속적으로 높았던 C/N 비는 중층방류가 이루어진 소양댐 방류수 POM의 C/N 비에 직접적으로 영향을 미쳤을 것이다. 8월 하순부터 유입수에서 높아진 C/N 비는 그러나 L3 지점에 영향을 미치지 않았는데 이는 이 시기에는 유입유량이 많지 않



아 6월 중순과 같이 집중강우로 인해 유입유량이 많고 따라서 일시적으로 체류시간이 짧아진 시기와 달리 유입하천의 POM이 호내로 유입되는 과정 중에 대부분 침강되거나 생물화학적 변화가 일어났기 때문으로 추정된다.

한편 하류의 L2와 L1 지점에서는 9월 이후 중층 이하에서 낮은 C/N 비를 보였고 그 이외의 시기와 수심에서는 낮은 C/N 비를 보여 체류시간이 긴 소양호에서 집중강우와 같이 유입유량이 크게 증가하여 체류시간이 일시적으로 짧아지는 시기를 제외하면 상류 하천에서 유입된 유기물이 직접 하류의 호내 유기물 성장에 영향을 미치지 않고, POM의 기원이 식물플랑크톤의 1차 생산과 세균, 원생동물, 동물플랑크톤을 거쳐 수중생태계 먹이망에 연결되는 microbial loop을 통한 2차 생산 등 호내 유기물 생산 기구를 통해 유래하는 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

대형 인공댐호에서 유기물의 외부 유입, 유출특성 및 호내 거동을 밝히고 기후변화에 따른 외부유입유기물의 유입 패턴 변동 가능성을 검토하기 위해 우리나라 최대 인공호인 소양호에서 유입 및 유출유기물 농도의 경시적 변동과 호내 거동을 조사한 결과, 유입하천을 통해 유입되는 유입유기물 중 DOC는 대부분이 초기 강우와 함께 유입되며 강우량에 큰 영향을 받지 않는 반면 POC는 집중호우가 내린 시기에 최고 1,100배 이상의 높은 농도를 보여 강우에 의해 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 유입유량과 형태별 유입유기물농도간의 상관분석 결과 유입수중 DOC 농도는 유입유량과 낮은 상관관계를, POC 농도는 높은 상관관계를 보여 유입유기물 중 POC 농도는 강우량 및 유입유량에 절대적으로 좌우되는 것으로 조사되었다. 한편 댐방류로 유출되는 유기물도 유입유기물과 유사한 경시적 변동을 보였으나 유출되는 POC의 농도 편차는 크지 않았고, POM의 C/N ratio를 이용하여 유입유기물의 호내 거동을 추적한 결과 집중강우시 유입된 외부기원 유기물은 유하방향에 따라 호내 상류에서 하류인 댐앞까지 약 2개월의 시간차를 두고 중층을 따라 유하되며 유입된 유기물이 호내에 장기간 체류하는 동안 변화과정을 거치는 것으로 나타났다. 이런 결과로 볼 때 집중강우기에 상류 댐호에서 유입된 유기물은 해당 호수 뿐만 아니라 중층 방류방식에 따라 댐하류로 유출되어 하류의 수계에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 유입유량-유기물농도 상관관계식을 이용하여 연간 외부유입유기물량을 산정한 결과, 외부유입유기물량은 유입유량 극값에 크게 영향을 받는 것으로 나타나 기후변화에 따라 강우강도가 커질수록 외부유입유기물량이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 최근의 소양호 상류 유역의 토지이용도 변화 및 기후변화로 인한 강우강도 증가는 외부유입유기물량의 증가로 이어질 가능성이 매우 높고 이렇게 유입된 유기물은 소양호 뿐만 아니라 하류의 하천 및 댐호에도 영향을 미치게 되므로 소양호 및 북한강 하류 댐군의 수질 및 수생태계 관리를 위해서는 소양호 유역에서

탁수 유출저감대책이 우선적으로 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 2006년 한강수계 환경기초조사사업 『수중생태계 물질순환 및 에너지흐름 조사 - 소양호』의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국가수자원관리종합정보(2010). <http://wamis.go.kr/>.
- 김범철, 정성민(2007). 소양호의 탁수발생 실태와 환경학적 영향. *대한환경공학회지*, Special Feature, pp. 1185-1190.
- 김윤희, 김범철, 서동일, 최광순(2001). 2차원 수리 수질모델(CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링. *상하수도학회지*, **15**(1), pp. 40-49.
- 한강물환경연구소 한강수계관리위원회(2006). *수중생태계 물질순환 및 에너지 흐름조사 - 소양호*.
- 한강물환경연구소 한강수계관리위원회(2009). *수계별 호소 환경 및 생태조사 II*.
- 허우명, 김윤희, 김범철(2004). 소양호 유역의 탁수발생과 인부하량 변동. 제12회 세계 물의날 기념 심포지엄 ‘소양호 생태계의 특성과 보존’.
- 허우명, 김범철, 김윤희, 최광순(1998). 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. *Korean J. Limnol.*, **31**(1), pp. 1-8.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., and Palutikof, J. P. Eds. (2008). Climate change and water. *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC Secretariat, Geneva.
- Cole, J. J., Carpenter S. R., Kitchell, J. F., and Pace, M. L. (2002). Pathways of organic carbon utilization in small lakes: Results from a whole-lake <sup>13</sup>C addition and coupled model. *Limnol. Oceanogr.*, **47**, pp. 1664-1675.
- Kim, B., Choi, K., Kim, C., Lee, U., and Kim, Y. H. (2000). Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Res.*, **34**, pp. 3495-3504, doi:10.1016/S0043-1354(00)00104-4.
- Onstad, G. D., Canfield, D. E., Quay, P. D., and Hedges, J. I. (2000). Sources of particulate organic matter in rivers from the continental USA: Lignin phenol and stable isotope compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, pp. 3539-3546, doi:10.1016/S0016-7037(00)00451-8.
- Ostrom, N. E., Long, D. T., Bell, E. M., and Beals, T. (1998). The origin and cycling of particulate and sedimentary organic matter and nitrate in Lake Superior. *Chemical Geology*, **152**, pp. 13-28.
- Park, H. K., Byeon, M. S., Shin, Y. N., and Jung, D. I. (2009). Sources and spatial/temporal characteristics of organic carbon in two large reservoirs with contrasting hydrologic characteristics. *Wat. Resour. Res.*, **45**, W11418, doi:10.1029/2009WR008043.
- Parks, S. J. and Baker, L. A. (1997). Sources and transport of

- organic carbon in an Arizona River-Reservoir system. *Wat. Res.*, **31**, pp. 1751-1759.
- Wang, X. C., Chen, R. F., and Gardner, G. B. (2004). Sources and transport of dissolved and particulate organic carbon in the Mississippi River estuary and adjacent coastal waters of the northern Gulf of Mexico. *Marine Chemistry*, **89**, pp. 241-256.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed., Elsevier, New York.