

## 시화호 상류 기수역에서 입자성유기물에 대한 조류영향

최광순\* · 김세원 · 김동섭 · 허우명<sup>1</sup>

한국수자원공사 K-water연구원, <sup>1</sup>강원대학교 환경공학과

**Effect of Algal Fraction to Particulate Organic Matter in the Upper Regions of a Brackish Lake Sihwa. Choi, Kwangsoon\*, Sea-won Kim, Dong-sub Kim and Woomyoung Heo<sup>1</sup> (K-water institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea; <sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kang-won National University, Samcheok 245-711, Korea)**

**Abstract** To estimate the effect of algae to particulate organic matter in the upper regions of brackish Lake Sihwa, temporal and spatial variations of particulate organic carbon (POC) and phytoplankton pigments (chlorophyll a; Chl-a, pheophytin-a; Pheo-a), and their relationships were studied at seven sites of the brackish regions from March to October 2005 and 2006. POC concentration varied from 1.0 to 76.6 mg L<sup>-1</sup> (mean 7.4 mg L<sup>-1</sup>), with maximal concentrations occurring in the middle parts of the study area in spring of 2005 and 2006. Concentrations of Chl-a and Pheo-a varied from 1.3 to 942.9 µg L<sup>-1</sup> (mean 71.0 µg L<sup>-1</sup>) and 1.4 ~ 1,545.5 µg L<sup>-1</sup> (mean 59.9 µg L<sup>-1</sup>), respectively, and corresponded closely with variation in POC. During the study period Pheo-a concentration was 44.2% of total Chl-a, implying that non-living or inactive phytoplankton is also the important part of phytoplankton-derived POC in brackish regions of Lake Sihwa. From the positive linear relationships between POC and phytoplankton pigments (POC with Chl-a (r=0.93), total Chl-a (r=0.88), and Pheo-a (r=0.81)), it is suggested that phytoplankton was a significant component of POC in the upper regions of brackish Lake Sihwa. On the other hand, the ratios of POC/Chl-a and POC/total Chl-a (Chl-a+Pheo-a) were 82.9 and 35.9, respectively. The ratio of POC/total Chl-a is similar to those reported in previous studies, including 40 ~ 60 in estuaries. This study suggests that Pheo-a concentration is considered in estimation of POC concentration from phytoplankton pigments in aquatic systems with high content of Pheo-a, like an upper region of blackish Lake Sihwa.

**Key words:** particulate organic matter, algal-derived, pigments, correlation, blackish water

### 서 론

수중의 유기물은 수중생태계의 탄소순환과정에서 분해자의 에너지원과 상위 먹이연쇄과정으로 전달되는 에

너지원으로서의 중요한 역할을 하는 한편, 그 함량이 많아지면 수중의 산소고갈현상, 정수처리의 장애 및 발암물질 생성 등 수질을 악화시키기는 주요 원인이 되기 때문에 수질오염의 정도를 판단하는 지표로도 사용된다 (Krasner *et al.*, 1994; Wetzel, 2001).

호수 내 유기물의 함량은 유역으로부터의 외부기원유기물과 호수내의 1차생산자에 의한 내부기원유기물에 의해 결정되는데, 호수의 영양상태가 증가할수록 자체 생성유기물의 비중이 더 커진다 (Wetzel, 2001). 그리고 대

Manuscript received 27 September 2013, revised 2 December 2013, revision accepted 7 December 2013  
\* Corresponding author: Tel: +82-42-870-7463, Fax: +82-42-870-7419, E-mail: kchoi@kwat.or.kr

부분 호수에서는 식물플랑크톤이 중요한 1차생산자의 역할을 한다. 그러므로 호수생태계의 전반적인 대사과정을 파악하고 수질을 관리하는데 있어, 식물플랑크톤의 현존량 및 수중 유기물 함량에 대한 기여도 평가에 대한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 식물플랑크톤의 현존량을 대신하는 지표로 엽록소 a (chlorophyll a; Chl-a)가 널리 이용되고 있다. 그리고 식물플랑크톤의 현존량으로부터 유기물을 산정하거나 또는 식물플랑크톤 기원의 유기물기여도를 평가하는 방법의 하나로 입자성유기물 (particulate organic carbon; POC)/Chl-a 비가 사용된다 (Paolo and Shigeru, 2000). POC/Chl-a 비는 식물플랑크톤의 종과 생리상태 그리고 환경요인에 의해 차이를 보이지만 (Jonge, 1980), 많은 연구에 의하면 식물플랑크톤의 POC/Chl-a가 30~60 범위를 보이며 (Malone, 1977; Colijn, 1982; Peterson and Festa, 1984), 자연 수체에서 그 비가 100 이하일 때 수체의 POC가 주로 식물플랑크톤에 기원되는 것으로 보고 있다 (Berg and Newell, 1986).

한편 식물플랑크톤이 활성을 잃거나 죽게 되면 Chl-a에서 Mg원자가 이탈되는데 이를 pheophytin a (Pheo-a)라고 하며, Chl-a에 대한 Pheo-a 비율로부터 식물플랑크톤의 생리적활성도를 가늠할 수 있다 (Schwarzenegger *et al.*, 2006). 현재 한국과 일본에서 Chl-a공정시험법으로 채택하고 있는 UNESCO법 (ME, 1999)은 Chl-a와 Pheo-a를 구분하지 않고 식물플랑크톤 총량을 측정하는 반면, 국제 Standard Methods인 Lorenzen법 (Lorenzen, 1967)은 이들을 구분하여 측정할 수 있기 때문에 식물플랑크톤의 현존량과 함께 생리상태를 파악하는데 좋은 방법이라 할 수 있다. 그리고 식물플랑크톤이 쇠퇴하거나 동물플랑크톤 등 상위 포식자의 섭식활동이 왕성한 시기 또는 식물플랑크톤의 사멸에 영향을 줄 정도로 환경변화가 심한 수체에서 식물플랑크톤 기원 유기물을 평가할 경우에는 POC/Chl-a 비와 함께 POC/Pheo-a 또는 POC/총 Chl-a (Chl-a+Pheo-a; total Chl-a) 비도 함께 고려할 필요가 있다.

본 연구의 대상지인 시화호 상류부는 담수와 해수가 공존하는 기수역으로 시공간적인 염분변동이 심하고, 화학성분이 강하게 형성되어 수체의 혼합이 매우 제한적이며 영양염류와 유기물농도가 매우 높은 특성을 보인다 (Park *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 2008a, b). 이러한 기수역의 물리화학적 특성 및 수질환경으로 인해 시화호에서는 매년 봄에 식물플랑크톤의 대량증식 현상이 발생하고 여름에는 저층수에서 산소고갈 현상 및 악취발생 등 수질문제가 빈번히 발생하고 있어 (Park *et al.*, 1997; Choi

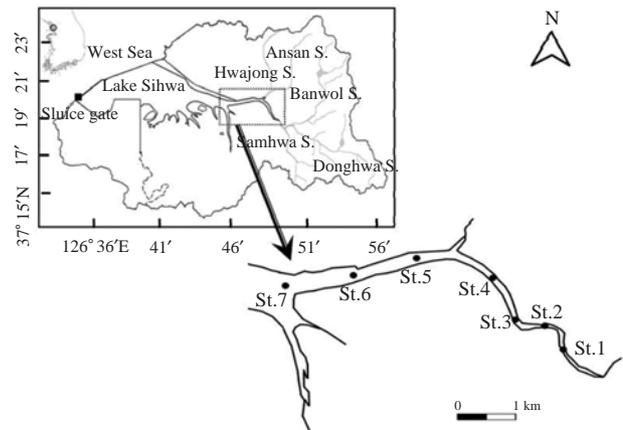


Fig. 1. Map showing the sampling sites in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

*et al.*, 2008a), 이 구역에 대한 수질오염의 원인규명과 체계적인 수질관리가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 시화호 기수역에서 식물플랑크톤의 현존량과 POC의 시공간적 분포를 조사하고, Chl-a/Pheo-a 비, POC/Chl-a 비 및 상관관계로부터 식물플랑크톤의 생리적활성도와 유기물기여도를 평가하여, 시화호 기수역의 수질관리대책 수립에 대한 기초자료를 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

시화호는 경기도 안산시, 시흥시, 화성시 일대의 서해안에 12.7 km의 방조제가 완공됨에 따라 생성된 인공호로 유역면적은 476.5 km<sup>2</sup>, 수표면적은 47.7 km<sup>2</sup>, 평균수심은 5.8 m, 총 저수량은 332 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이다 (Fig. 1). 수표면적에 대한 유역면적 비가 약 10배로 국내 다른 댐 저수지 (30~50배)에 비해 작기 때문에 유역으로부터 유입되는 연간 유입수량은 214 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>으로 총 저수량에 비해 적은 반면, 1997년부터 배수갑문을 통한 해수유통이 이루어져 이를 고려한 수리학적 체류시간은 15일 정도이다 (MMAF, 2005). 그러나 해수유통에 의한 물순환은 대부분 방조제 근처에서 일어나고 시화호 상류부에 매우 제한적인 특성을 보인다.

본 연구의 대상지인 시화호 상류 기수역으로 유입되는 하천은 총 5개 (반월천, 동화천, 삼화천, 안산천과 화정천)이며, 연간 총 유입수량은 88.6 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>으로 시화호 전체 유역으로부터 유입되는 연간 유입수량의 약 41.4%를 차지한다 (MMAF, 2005). 기수역의 수심은

2m 이내로 매우 낮지만 염분도 분포는 0.1~29.9 psu의 범위로 시공간적으로 큰 차이를 보인다(Choi *et al.*, 2008a). 대체로 상류에서 하류로 갈수록 높고, 표층이 낮고 심층이 높은 전형적인 기수역의 양상을 보이며, 이러한 염분도의 시공간적 차이는 담수의 유입이 증가하는 강우시기에 뚜렷한 경향을 보인다.

## 2. 조사 및 분석방법

시화호내 염분도의 변동이 큰 상류부의 7km구간을 기수역의 범위로 정하였고, 기수역내에 7개 지점을 선정하여 2005년부터 2006년까지 3월부터 11월에 걸쳐 총 26회 조사하였다(Fig. 1). 2005년에는 월 2회 실시하였고, 2006년에는 월 1회 실시하였다.

각 조사지점의 표층수를 채취하여 POC, 부유성 고형물(suspended solids; SS), Chl-a, Pheo-a를 분석하였다. POC는 450°C에서 미리 태운 GF/F 여과지로 시료를 여과한 후 여과지를 냉동 보관하였다가 황탄소분석기(LECO, CS-444)로 측정하였다. SS는 미리 무게를 단 GF/C 여과지에 시료를 여과한 후 105°C에서 3시간 건조시킨 후 여과 전후의 여과지의 무게차로부터 산출하였다(ME, 1999). Chl-a와 Pheo-a는 GF/F 여과지로 시료를 여과한 후 여과지를 냉동 보관하였다가 분석 당일 냉동된 여과지를 분쇄기(tissue homogenizer)에 넣고 90% acetone을 가하여 분쇄한 후 원심 분리하여 상층액을 취하여 분광광도계로 흡광도를 측정하였다. 이후 0.18N HCl로 산 처리(최종 HCl농도; 0.003M)한 후 다시 한번 흡광도를 측정하고 Lorenzen(1967)법으로 Chl-a와 Pheo-a 농도를 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 입자성물질의 시공간적 분포

#### 1) 부유성고형물(SS)

조사기간 동안 기수역 전구간의 SS농도는 6.8~449.6 mg L<sup>-1</sup>의 범위로 시공간적으로 변동이 큰 것으로 나타났다(Fig. 2a). 2005년에는 4월, 6월, 8월에 기수역의 중류부인 St.3~St.5 지점에서 나타났던 반면, 2006년에는 4월과 5월에는 중류부 St.3 지점, 그리고 10월에는 상류부인 St.1과 St.2 지점에서 높은 경향은 보였다. 그리고 시화호 기수역의 평균 SS농도는 40.8 mg L<sup>-1</sup>로 같은 기간 시화호의 평균 SS농도 7.2 mg L<sup>-1</sup>(MMAF, 2005, 2006)에 비해 높았다. 기수역은 담수와 해수의 혼합에

의한 응집침전과 강한 염분성층에 의해 물의 혼합이 제한적이기 때문에 하천과 해양으로부터 유입된 입자성 현탁물질이 이 구간에 모여 고탁도(turbidity maxima)층이 자주 형성된다(McLusky and Elliott, 2004). 그리고 이러한 기수역의 고탁도층은 형성과 규모는 하천과 해양으로부터 유입되는 부유물질의 양, 수체의 염분분포 및 순환정도 등에 의해 결정된다. 시화호 기수역의 2005년도 염분도 분포는 기수역의 중류인 St.3과 St.4 지점에서 수평 및 수직적 염분성층이 매우 강하게 형성되었다는 Choi *et al.* (2008a)의 연구결과로부터 시화호 기수역 중류부의 높은 SS농도는 기수역의 전형적인 특성에 의한 것으로 사료된다. 그리고 시화호 기수역에서 매년 나타나는 식물플랑크톤의 대량증식 또한 SS를 증가시키는 원인으로 판단된다.

#### 2) 입자성유기탄소(POC)

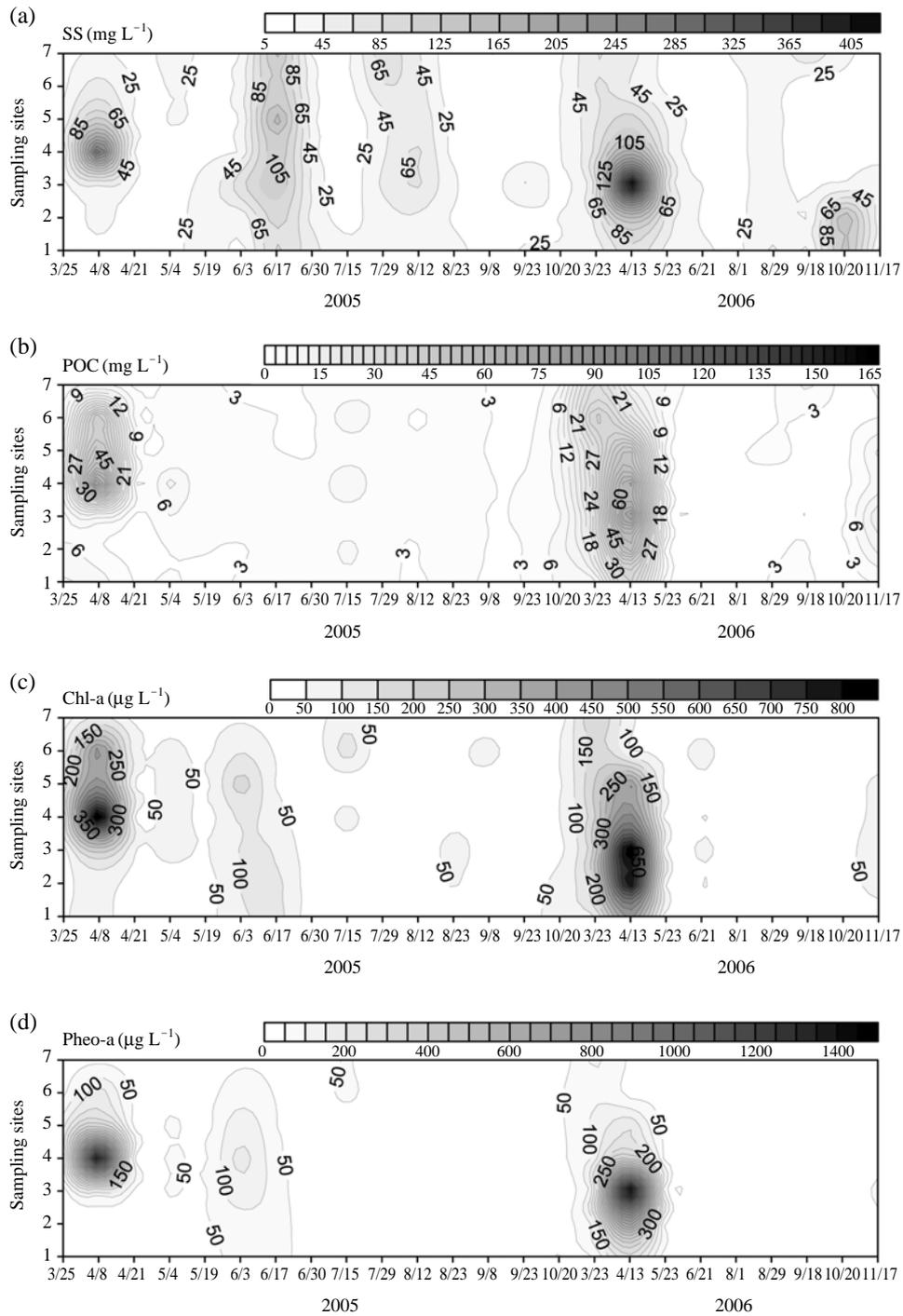
POC 농도는 1.0~76.6 mg L<sup>-1</sup>(평균 7.4 mg L<sup>-1</sup>)의 범위로 2005년과 2006년 모두 봄에 높은 경향을 보였지만, 공간분포는 상이한 것으로 나타났다(Fig. 2b). 2005년에는 St.4지점에서 POC 최대치(74.0 mg L<sup>-1</sup>)를 보이며 St.5지점에서 St.3지점까지의 구간에서 높은 양상을 보인 반면, 2006년에는 St.3지점에서 최대치(76.6 mg L<sup>-1</sup>)를 보였고 최상류지점인 St.1을 포함하여 기수역 전구간에서 높은 값을 보였다. 봄철 이외 시기의 POC 농도는 10 mg L<sup>-1</sup> 이하의 수준으로 지점간 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

전 세계 자연수의 평균 POC 농도는 해양(0.05 mg L<sup>-1</sup>) < 빈영양호(0.2 mg L<sup>-1</sup>) < 부영양호(1.7 mg L<sup>-1</sup>) < 강(2.0 mg L<sup>-1</sup>)의 농도를 보인다(Wetzel, 2001). 시화호 기수역의 평균 POC 농도는 7.4 mg L<sup>-1</sup>으로 시화호의 2005년과 2006년 평균 농도 1.7 mg L<sup>-1</sup>(MMAF, 2005, 2006)에 비해 4배 이상 높은 값을 보였으며, 우리나라 남해안 연안의 진해만, 고성만, 강진만의 평균 POC 농도 0.3~0.4 mg L<sup>-1</sup>(Lee *et al.*, 2001)에 비해서는 20배 정도 높았다. 또한 일본의 Seto내만의 기수역에서의 POC 농도 0.2~16.5 mg L<sup>-1</sup>에 비해서도 높은 값을 보였다(Magni and Montani, 2000). 한편 고탁도층이 형성되는 프랑스 Seine River 하구에서의 POC 농도가 1~73 mg L<sup>-1</sup>으로 시화호 기수역과 비슷한 값을 보였다(Bodineau *et al.*, 1998).

#### 3) 식물플랑크톤 색소

##### (1) Chl-a

식물플랑크톤의 현존량을 나타내는 지표인 Chl-a 농



**Fig. 2.** Temporal and spatial distributions of suspended solids(SS), particulate organic carbon (POC), chlorophyll-a (Chl-a), and pheophytin-a (Pheo-a) in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

도는 1.3~942.9 μg L<sup>-1</sup>의 범위로 기온이 상승하는 봄에 높은 경향을 보였으며, 2005년과 2006년 모두 4월에 각각 942.9 μg L<sup>-1</sup>와 910.6 μg L<sup>-1</sup>의 최고 값을 보였다 (Fig. 2c). 그 이후 5월과 6월에 50~100 μg L<sup>-1</sup> 수준으

로 감소하였고 강우시기에는 20 μg L<sup>-1</sup> 이하로 매우 낮은 농도를 보였다. 지점별 Chl-a 농도는 계절에 따라 상이한 분포를 보였지만, 전반적으로 상하류 지점에 비해 중류지점에서 높은 값을 보였다. Chl-a 농도의 최대치는

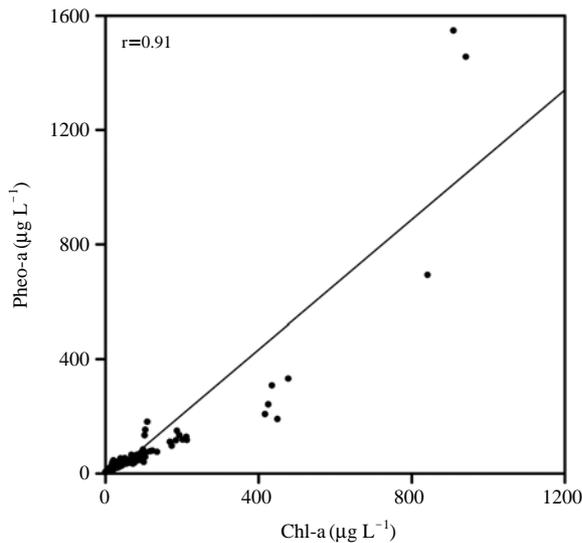


Fig. 3. Correlations between Chl-a, and Pheo-a concentration in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

POC와 마찬가지로 2005년에는 St.4 지점 ( $942.9 \mu\text{g L}^{-1}$ )에서 보였으며, 2006년에는 St.3 지점 ( $910.6 \mu\text{g L}^{-1}$ )에서 나타났다. 기수역의 평균 Chl-a 농도는  $71.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 같은 시기의 시화호 평균 Chl-a 농도  $20.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 에 비해 3.5배 이상 높게 나타났다.

일반적으로 해수와 담수가 공존하는 기수역은 유역으로부터 오염물의 부하량이 크고 염분성층에 의한 수체 혼합이 제한된 수역으로 다른 수체에 비해 식물플랑크톤의 성장하기에 유리한 조건으로 적조 등 부영양화 현상이 빈번히 발생하는 특성을 보인다(Nixon, 1990; Horne and Goldman, 1994; Heo *et al.*, 1999; Tsutsumi, 2006). 시화호는 1997년 배수갑문을 통한 해수유동 이후 기수 환경으로 변화했고 이와 함께 식물플랑크톤의 우점종도 와편모조류를 중심으로 기수 또는 해수종으로 전환되었다 (Shin *et al.*, 2000). KOWACO (2006)는 봄철 시화호 기수역에서 높은 Chl-a 농도는 와편모조류인 *Heterocapsa triquetra*의 대량증식에 의한 것이라고 보고하였다. 시화호는 1996년부터 해수유동을 포함한 다양한 수질개선대책 사업을 수행한 결과 2005년 기준 COD 3등급 수준으로 수질이 개선되었지만, 아직 시화호 상류 기수역의 POC 농도와 Chl-a 농도는 매우 높은 수준으로 이 구간에 대한 개선대책 수립이 필요할 것으로 판단된다.

(2) Pheo-a

Pheo-a 농도는  $1.4 \sim 1,545.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, Pheo-a 최고치는 Chl-a와 마찬가지로 2005년과 2006

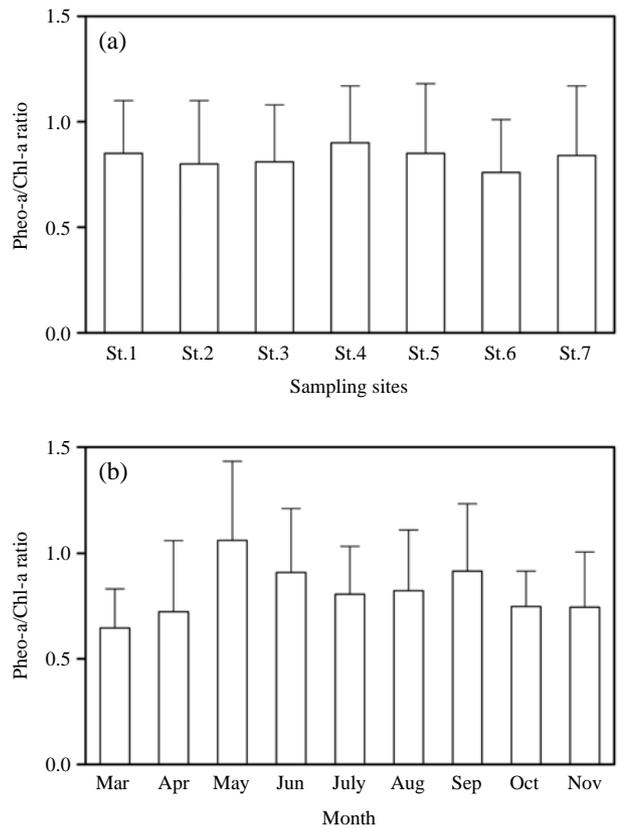


Fig. 4. Temporal and spatial variation of Pheo-a/Chl-a ratio in the upper regions of brackish Lake Sihwa. Bars represent standard deviation.

년 4월 St.3과 St.4 지점에서 나타났다(Fig. 2d). Pheo-a 농도의 시공간적 분포는 전반적으로 Chl-a와 유사한 경향을 보였으며, Pheo-a와 Chl-a 농도 상관분석에서 양의 상관( $r=0.91$ )을 보였다(Fig. 3). Pheo-a/Chl-a 비는  $0.37 \sim 1.94$  (평균 0.83)의 범위를 보였으며, St.4 지점에서 평균 0.90으로 가장 크게 나타났다(Fig. 4a). 그리고 월별 평균 Pheo-a/Chl-a 비는  $0.64 \sim 1.06$ 으로 3월에 가장 작고 5월에 가장 큰 값을 보였다(Fig. 4b).

일반적으로 식물플랑크톤의 Pheo-a 함량은 식물플랑크톤의 생리상태에 따라 달라지는데 식물플랑크톤의 성장이 왕성한 시기에는 Pheo-a가 거의 없으나, 활성을 잃어 쇠퇴하는 시기에 Pheo-a를 함량이 증가한다. Schwarzenegger *et al.* (2006)의 보고에 의하면 San Francisco Estuary의 11개 지점에서 조사된 Pheo-a 함량이 total Chl-a의  $6 \sim 77\%$  (평균 30%) 범위를 보였으며, 식물플랑크톤이 쇠퇴하는 시기에 높은 것으로 나타났다. 시화호 기수역에서는 Pheo-a 농도가 total Chl-a 농도의  $27.1 \sim 65.9\%$  (평균 44.2%)의 범위를 보여 죽거나 활성을 잃

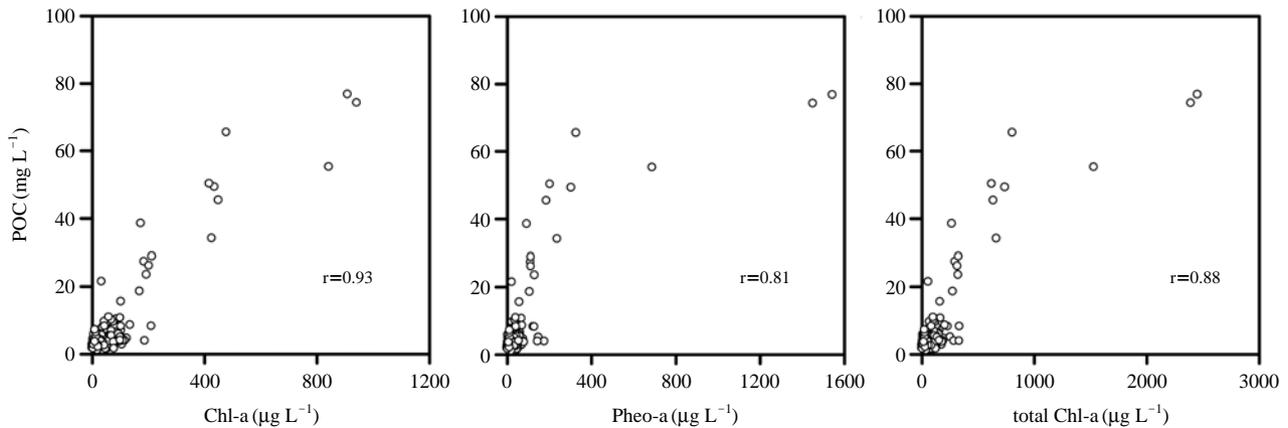


Fig. 5. Correlations of POC against Chl-a, Pheo-a, and total Chl-a concentration in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

Table 1. Relationships between POC and Chl-a concentration in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

Sampling sites	Equations	Regression coefficient ( $R^2$ )	n
St.1	POC=70.1 Chl-a+1.39	0.879	24
St.2	POC=63.0 Chl-a+1.72	0.942	
St.3	POC=81.4 Chl-a+0.68	0.945	
St.4	POC=88.0 Chl-a+1.79	0.905	
St.5	POC=105.4 Chl-a+0.65	0.889	
St.6	POC=100.3 Chl-a+1.34	0.692	
St.7	POC=95.8 Chl-a+1.57	0.659	
All sites	POC=82.9 Chl-a+1.51	0.858	168
	POC=35.9 total Chl-a+2.60	0.779	168

은 식물플랑크톤이 많은 양을 차지하고 있는 것으로 판단된다. 이렇게 시화호 기수역에서 높은 Pheo-a 농도는 식물플랑크톤의 자가분해와 동물플랑크톤 등 상위소비자에 의한 섭식활동에 그 원인을 들 수 있을 것이다. 그리고 또 다른 원인으로는 시화호 기수역은 수심이 2m 이내로 얕기 때문에 해수 유입 시 바닥에 가라 앉았던 식물플랑크톤 사체가 재부상하여 Pheo-a 농도가 높았을 가능성도 있다.

## 2. 식물플랑크톤 색소와 POC와의 상관관계

시화호 기수역에서 식물플랑크톤의 색소(Chl-a, Pheo-a, Total Chl-a) 농도와 POC 농도와 높은 양의 상관으로부터, 식물플랑크톤이 기수역 POC 기원의 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다(Fig. 5). 그리고 색소별 POC와의 상관계수( $r$ )는 Chl-a (0.93) > Total Chl-a (0.88) > Pheo-a (0.81) 순으로 나타나 활성이 있는 식물플랑크톤이 POC 분포에 가장 밀접한 관계가 있는 것으로 나타

났다.

Chl-a와 POC와의 회귀식으로부터 지점별 POC/Chl-a 비는 63.0~105.4(전체지점 82.9)의 범위로 조사지점에 따라 차이를 보였으며, 회귀식의 결정계수( $R^2$ )는 0.659~0.945(전체지점 0.858)의 범위로 중상류부에서 높고 하류부(St.6, St.7)에서 낮았다(Table 1). POC/Chl-a 비는 식물플랑크톤의 종과 생리상태, 영양염류, 빛, 수온 등의 환경요인에 따라 시공간적으로 큰 변동을 보이지만(Jonge, 1980; Geider *et al.*, 1997), 최근까지도 수중생태계에서 식물플랑크톤의 POC 함량을 산정하고 또한 POC의 기원을 규명하는데 POC/Chl-a 비가 많이 사용되고 있다(Magni and Montani, 2000; Arin *et al.*, 2002).

시화호 기수역의 POC/Chl-a 비는 하구(30~60, Malone, 1977; Colijn, 1982; Peterson and Festa, 1984), 해양(10~90, Eppley *et al.*, 1977), 시화호(45, MMAF, 2005), 시화호 배양시료(27.5, Lee *et al.*, 2006), 소양호 남조류 bloom시료(43~77, Kim *et al.*, 2000)에서 보고된 값에 비해 큰 반면, 진해만, 고성만, 강진만(109~

956, Lee *et al.*, 2001)에 비해서는 작은 값을 보였다. 그리고 POC/Chl-a 비가 100 이하 일 때 POC는 주로 식물플랑크톤에 기인된다는 Berg and Newell (1986)의 연구결과를 기준으로 하였을 때, 시화호 기수역의 POC는 외부기원 보다는 식물플랑크톤에 의한 내부기원으로 판단된다.

한편 시화호 기수역에서 Pheo-a 농도가 Total Chl-a 농도의 평균 44.2%로 많은 부분을 차지하고 있으며, 또한 Pheo-a와 POC의 유사한 시공간적 분포(Fig. 2)와 높은 양의 상관관계(Fig. 5)로부터 활성을 잃거나 죽은 식물플랑크톤(detritus)도 시화호 기수역의 POC의 함량에 많은 기여할 것으로 판단된다. Pheo-a 농도를 포함한 total Chl-a와 POC 농도와의 회귀식으로부터  $R^2$ 은 0.779로 Chl-a와 POC에서의  $R^2$ 값(0.858)보다 작아 회귀식에 대한 적합도는 떨어지나, POC/Total Chl-a 비가 35.9로 하구에서의 POC/Chl-a 비 30~60 (Malone, 1977)의 범위의 값을 보였다. 그러므로 시화호 기수역과 같이 Pheo-a가 많은 수체에서 POC에 대한 식물플랑크톤 기여도를 평가할 경우 Pheo-a 농도를 고려할 필요가 있으며, 식물플랑크톤의 색소로부터 식물플랑크톤 기원의 POC 농도를 산정할 경우 POC/Chl-a 비보다 POC/Total Chl-a 비를 사용하는 것이 더 적합할 것으로 판단된다.

## 적 요

해수와 담수가 공존하는 시화호 상류 기수역에서 입자성유기물에 대한 조류의 영향을 평가하기 위하여, 2005년과 2006년 3월부터 11월까지 기수역내 7개 지점을 대상으로 입자성유기탄소(particulate organic carbon; POC), 식물플랑크톤 색소(chlorophyll a; Chl-a), pheophytin a; Pheo-a)의 시공간적 변동과 상관관계를 분석하였다. 조사기간 동안 POC 농도는  $1.0 \sim 76.6 \text{ mg L}^{-1}$  (평균  $7.4 \text{ mg L}^{-1}$ )의 범위로 봄에 높은 계절변화를 보였으며, 염분성층이 강하고 고탁도층이 형성되는 중류부에서 높은 값을 보였다. 살아있는 식물플랑크톤의 현존량의 지표로 이용되는 Chl-a 농도는  $1.3 \sim 942.9 \mu\text{g L}^{-1}$  (평균  $71.0 \mu\text{g L}^{-1}$ ) 범위로 매우 높은 값을 보였고, 4월에 중류부에 최고치를 보여 POC와 유사한 변동을 보였다. 한편 Pheo-a 농도는  $1.4 \sim 1,545.5 \mu\text{g L}^{-1}$  (평균  $59.9 \mu\text{g L}^{-1}$ )의 범위로, total Chl-a의 평균 44.2%로 죽거나 활성을 잃은 식물플랑크톤의 양이 많은 것으로 나타났다. POC 농도는 식물플랑크톤 색소와 강한 양의 상관(Chl-a ( $r=0.93$ ), total Chl-a ( $r=0.88$ ), >Pheo-a ( $r=0.81$ ))을

보였는데, 이는 시화호 기수역에서 식물플랑크톤이 POC의 중요한 기원임을 시사한다. 한편 식물플랑크톤 색소와 POC와의 회귀식으로부터 POC/Chl-a 비(82.9)보다 POC/total Chl-a 비(35.9)가 하구에서 조사된 POC/Chl-a 비(40~60)에 더 유사한 것으로 나타났다. 그러므로 시화호 기수역과 같이 Pheo-a 농도가 높은 수역에서는 조류기원성 POC를 산정하거나 또는 수체의 POC 농도에 대한 식물플랑크톤의 기여도를 평가할 때 Chl-a 농도와 함께 Pheo-a 농도도 함께 고려할 필요가 있다.

## 사 사

본 연구는 한국수자원공사의 “시화호 수질개선을 위한 기초조사 및 연구(2006)”의 일환으로 수행되었습니다. 시료채취와 분석에 도움을 주신 한국수자원공사 연구원들께 감사 드립니다.

## REFERENCES

- Arin, L., X.A.G. Moran and M. Estrada. 2002. Phytoplankton size distribution and growth rates in the Alboran Sea (SW Mediterranean): short term variability related to meso-scale hydrodynamics. *Journal of Plankton Research* **24**: 1019-1033.
- Berg, J.A. and R.I.E. Newell. 1986. Temporal and spatial variations in the composition of seston available to the suspension feeder *Crassostrea virginica*. *Estuarine and Coastal Marine Science* **23**: 375-386.
- Bodineau, L., G. Thoumelin, V. Beghin and M. Wartel. 1998. Particulate organic matter composition in the Estuarine Turbidity Maxima (ETM) of the Seine River estuary. *Hydrobiologia* **373/374**: 281-295.
- Choi, K., S.W. Kim, D.S. Kim, Y.T. Oh, W.M. Heo, Y.K. Lee and Y.S. Park. 2008a. Temporal and spatial distributions of basic water quality in the upper regions of brackish Lake Sihwa with a limited water exchange. *Korean Journal of Limnological Society* **41**: 1-10.
- Choi, K., S.W. Kim, D.S. Kim, W.M. Heo, Y.K. Lee, I.S. Hwang and H.J. Lee. 2008b. Eutrophication in the upper regions of brackish Lake Sihwa with a limited water exchange. *Korean Journal of Limnological Society* **41**: 216-227.
- Colijn, F. 1982. Light absorption in the waters of the Ems-Dollard estuary and its consequences for growth of phytoplankton and microphytobenthos. *Netherlands Journal of Sea Research* **21**: 25-33.
- Eppley, R.W., W.G. Harrison, S.W. Chisholm and E. Stewart. 1977. Particulate organic matter in surface waters off

- Southern California and its relationship to phytoplankton. *Journal of Marine Research* **35**: 671-696.
- Geider, R.J., H.L. MacIntyre and T.M. Kana. 1997. Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and the chlorophyll a:carbon ratio to light, nutrient-limitation and temperature. *Marine Ecology Progress Series* **148**: 187-200.
- Heo, W.M., B. Kim and M.S. Jun. 1999. Evaluation of eutrophication of lagoons in the Eastern Coast of Korea. *Korean Journal of Limnological Society* **32**: 141-151.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill College. Singapore.
- Jonge, V.N.de. 1980. Fluctuation in the organic carbon to chlorophyll a ration for estuarine benthic diatom populations. *Marine Ecology-Progress Series* **2**: 345-353.
- Kim, B., K. Choi, C. Kim, U.H. Kim and Y.H. Kim. 2000. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Research* **34**: 3495-3504.
- KOWACO (Korea Water Resources Corporation). 2006. Elementary survey and research for water quality improvement in Lake Sihwa. KOWACO.
- Kransner, S.W., M.J. Scilimenti and E.G. Means. 1994. Quality degradation: implication for DBP formation. *Journal of American Water Works Association* **86**: 34-47.
- Lee, P.Y., C.K. Kang, W.J. Choi, W.C. Lee and H.S. Yang. 2001. Temporal and spatial variations of particulate organic matter in the southeastern coastal bays of Korea. *Journal of Korean Fisheries Society* **34**: 57-69.
- Lee, Y.J., M.S. Kim, E.J. Won and K.H. Shin. 2006. An application of <sup>13</sup>C tracer for the determination of size fractionated primary productivity in upper stream of Lake Shihwa. *Korean Journal of Limnological Society* **39**: 93-99.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equation. *Limnology and Oceanography* **12**: 343-346.
- Magni, P. and S. Montani. 2000. Water chemistry variability in the lower intertidal zone of an estuary in the Seto Inland Sea, Japan: seasonal patterns of nutrients and particulate compounds. *Hydrobiologia* **432**: 9-23.
- Malone, T.C. 1977. Environmental regulation of phytoplankton productivity in the lower Hudson Estuary. *Estuarine and Coastal Marine Science* **5**: 157-171.
- McLusky, D.S. and M. Elliott. 2004. *The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats, and Management*. Oxford University Press, New York.
- ME (Ministry of Environment). 1999. KEOM Standard Method for Water. ME.
- MMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries). 2005. The Project for Improvement of Marine Environment of Lake Sihwa. MMAF.
- MMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries). 2006. The Project for Improvement of Marine Environment of Lake Sihwa. MMAF.
- Nixon, S.W. 1990. Marine eutrophication: a growing international problem. *Ambio* **19**: 101.
- Park, Y.C., J.K. Park, M.W. Han, S.K. Son, M.K. Kim and S.H. Huh. 1997. Biogeochemical study of dissolved organic and inorganic compounds under Oxic/Anoxic environment in Lake Shihwa. *"The Sea" The Journal of the Korean Society of Oceanography* **2**: 53-68.
- Peterson, D.H. and J.F. Festa. 1984. Numerical simulation of phytoplankton productivity in partially mixed estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Science* **19**: 563-589.
- Shin, J.K., D.S. Kim and K.J. Cho. 2000. Dynamics of water environmental factors and phytoplankton before and after inflow of seawater in Shingwa Reservoir. *Journal of the Environmental Sciences* **9**: 109-117.
- Tsutsumi, H. 2006. Critical events in the Ariake Bay ecosystem: Clam population collapse, red tides, and hypoxic bottom water. *Plankton Benthos Research* **1**: 3-25.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology*. 3th ed., Academic Press, New York.