

시화호 퇴적물의 유기탄소, 유기질소 및 중금속 함량과 분포

최정훈* · 강정원¹ · 홍대벽 · 박용안¹

*농업기반공사 농어촌연구원, ¹서울대학교 지구환경과학부

Distribution of Organic Carbon, Organic Nitrogen, and Heavy Metals in Lake Shihwa Sediments

JUNG-HOON CHOI*, JEONG WON KANG¹, DAE-BYUK HONG AND YONG-AHN PARK¹

Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation, Rural Research Institute, Ansan 425-170, Korea
¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-442, Korea

시화호 표층과 주상시료 퇴적물의 유기탄소(C_{org}), 유기질소(N_{org}), 중금속(Zn, Pb, Cr, Cu, Mn)의 함량과 분포를 규명하기 위하여 '97년 4월, 9월 그리고 '98년 3월에 총 30개의 퇴적물 시료가 채취하였다. 분석결과 표층 및 주상시료 퇴적물의 유기탄소·질소 그리고 중금속들의 함량과 분포는 조사시기와 정점별 차이에 따른 변화를 나타냈다. 표층 퇴적물의 유기탄소와 유기질소 함량은 시화호 안쪽의 육지에 인접할 수록 높은 값을 나타냈다. 이러한 분포는 주변 하천 및 공단으로부터의 영향인 것으로 사료된다. 표층 퇴적물의 중금속 함량은 유기탄소 함량과 일차적인 관계가 있다고 해석된다. 주상시료 퇴적물의 C/N비의 변화폭은 3~32이고 평균은 13.9를 나타냈다. 주상시료의 중금속 함량분포 경향은 유기탄소와 유기질소의 함량분포 경향과 유사하였다. 표층 퇴적물의 중금속 함량을 방조제 축조 이전과 이후로 비교했을 때 축조 후 증가한 중금속은 Cu이고, 반대로 낮은 함량을 보이는 중금속은 Zn와 Mn으로 조사되었다. 이와는 달리 Pb의 함량은 일정하였다. 시화호 배수갑문 내측 주변과 방조제 외측 연안 퇴적물의 중금속 함량은 유사하였다.

Distributions of organic carbon (C_{org}), organic nitrogen (N_{org}), and heavy metals (Zn, Pb, Cr, Cu, Mn) were investigated in Lake Shihwa sediments. Surface and core samples were collected in April and September, 1997 and March, 1998 for the study. The results show that these components contents are variable with sampling time and station. In surface sediments, both C_{org} and N_{org} have similar distribution pattern in which their high contents found in stations located near the land, indicating that the streams and industrial wastes seem to act as point sources. The C_{org} contents are linearly related with those of heavy metals. It appears, therefore, that the distribution of heavy metals may be partly controlled by a complex interplay of biogenic, terrestrial, and anthropogenic factors. The C/N ratios from three stations are in the range of 3-32, with an average of 13.2. Vertical profiles of heavy metals in sediment cores are similar to those of C_{org} and N_{org}. Copper content of sediments is enriched compared to that of reported value before dike construction, but Zn and Mn are not deposited considerably. Especially, Pb content show less variable. Currently, anthropogenic effects of industrial complex may not reached to drainage gate area where heavy metal contents are comparable with those adjacent to coastal sediments.

서 론

시화지구 개발사업은 간척지와 배후지 등 총 24,430 ha를 개발하여 수도권권의 공업용지와 도시개발용지를 공급함으로써 공장이전, 복합 영농단지 개발, 수도권과 농어촌의 휴식공간 조성 및 수자원 확보 등을 목적으로 수행된 사업이다. 그러나 시화호 주변에 위치하는 공단 및 하천에서 배출되는 많은 양의 오염물질을 효과적으로 처리하는데 실패함으로써 환경개선이라는 사회적 과제를 만들어냈다. 이에 시화호 수질개선을 위한 노력으로 하수처리장 신·증설, 수중폭기장치와, 환배수로의 설치 그리고 나아가서

는 해수를 유입시켜 해수와 희석을 통한 오염 부하량을 희석 저감시키려는 시도 등 다양한 대책을 시행하고 있다(허와 오, 1997; 한국해양연구소, 1999).

따라서 방조제 축조로 형성된 시화호는 따라서 환경보전 대책 수립에 따른 수질, 해양생태계, 지화학적인 관점 그리고 수질 모니터링 시스템 등에 다양한 분야에서 흥미로운 연구대상이 되고 있다(한국해양연구소, 1997, 1998). 시화호의 물리적인 특징은 끝막이 공사 후 6 m 이하의 수심에 잔존하는 저층해수로 인한 강한 염분 의존형 밀도 성층으로 대표될 수 있다(박 등, 1997; Han and Park, 1999). 이러한 성층구조(저염분-유산소의 표층수와 고염분-무산소의 저층수)하에서 환원상태인 퇴적물의 공극수를 통해 납과

*Corresponding author: cjh5181@karico.co.kr

암모니아 등 오염물질의 용출이 진행됨으로서 해저면이 먼 오염원(area source)으로 작용하고, 이로 인하여 저층 수질이 한층 가중되고 있다(한 등, 1997). 최 등(1997b)은 육상에서 유입되는 오폐수로 인하여 식물플랑크톤의 대증식 현상이 4계절에 걸쳐 계속 발생함을 보고하였으며, 최 등(1997a)은 과영양화된 시화호 상층은 연안 환경에 비해 높은 박테리아 개체수와 생산력이 있음을 보고하였다. 오염 부하량과 염분값의 변화는 동물플랑크톤 중 조성에 영향을 미치며 생태적으로 불안정한 상태임을 밝혀냈다(박과 허, 1997). 저서동물의 감소와 오염지시종의 일시적인 대량번식과 소멸 그리고 시화호 안쪽부터 방조제 부근 지역으로 가면서 무생물대가 점차 확산하는 경향 등은 저서환경의 오염정도를 대변하고 있다(류 등, 1997). 시화호의 어류 중 조성은 암모니아 농도, 수온, pH 등의 물리화학적 인자들을 포함하여 수질의 조건과 관계성을 보이고 있다(이 등, 1997).

해수의 유출·입에 따른 염분 변화는 수 환경변화에 주요 인자로서 인식되고 있으며, 이러한 수 환경에서 일어난 물질순환 결과들은 퇴적물에 잘 반영된다. 따라서 표층 퇴적물의 유기물과 중금속의 공간적인 분포는 현재의 오염물질들의 분포 특상을 이해하는데 도움이 된다. 나아가 주상시료 퇴적물을 통한 수직적인 퇴적구조 및 오염물질의 분포는 시간적 변화를 이해하는데 유용하게 쓰일 수 있다.

방조제가 형성된 후에 이루어진 시화호 퇴적환경에 관한 연구는 한국해양연구소(1998), 심 등(1998) 그리고 현 등(1999)이 있으며, 여기에는 퇴적상 변화와 공단 부근 및 배수갑문 주위에서 채취한 시추 퇴적물내 유기물 기원과 중금속 분포에 대한 해석 등의 내용이 포함되어 있다. 퇴적물 내에서 오염성분을 분석하는 것은 시·공간적 변화가 큰 수질에 비해 오랜기간 동안의 오염양상을 파악하는데 중요한 의미가 있다. 배수갑문 운용에 따른 표층 및 주상시료 퇴적물내 유기탄소, 유기질소, 중금속들의 시·공간적인 분포특성, 배수갑문 운용 전·후의 중금속함량 변화, 방조제 축조 전·후의 퇴적물내 중금속 함량변화 등을 본 연구에서 파악하고자 한다.

재료 및 방법

염분 및 퇴적물 채취

1997년 4월, 1997년 9월 그리고 1998년 3월에 3회에 걸쳐 시화호 배수갑문으로부터 시화호 상류에 이르기까지 총 11개의 정점을 선정하여 Hydrolab(수질자동 측정장비)를 이용하여 수심별로 염분을 측정하였다(Fig. 1a).

시화호 퇴적물채취는 염분 측정시기와 동일한 시기에 실시되었다. 조사지점은 배수갑문 주위에서부터 시화호 안쪽의 10정점을 선택하였으며(Fig. 1b), 이 중 3정점(3, 4, 10 in Fig. 1b)에서 주상시료 퇴적물 분석이 이루어졌다. 각 정점의 퇴적물채취는 중력식 채취기(gravity corer)를 이용하였는데, 표층 퇴적물은 주상시료 깊이가 0~5 cm내 퇴적물로 간주하였다. 이들 주상시료가 들어있는 PVC 코어들은 상하가 공기와 접하지 않도록 충분히 밀봉을 한 후 실험실로 운반하여 깊이별 분석에 필요한 시료를 얻었다.

주상시료 퇴적물 분석에 필요한 시료는 입도변화에 근거하여 0~5 또는 5~15 cm, 15~30 cm, 30~50 또는 30~60 cm 퇴적층에

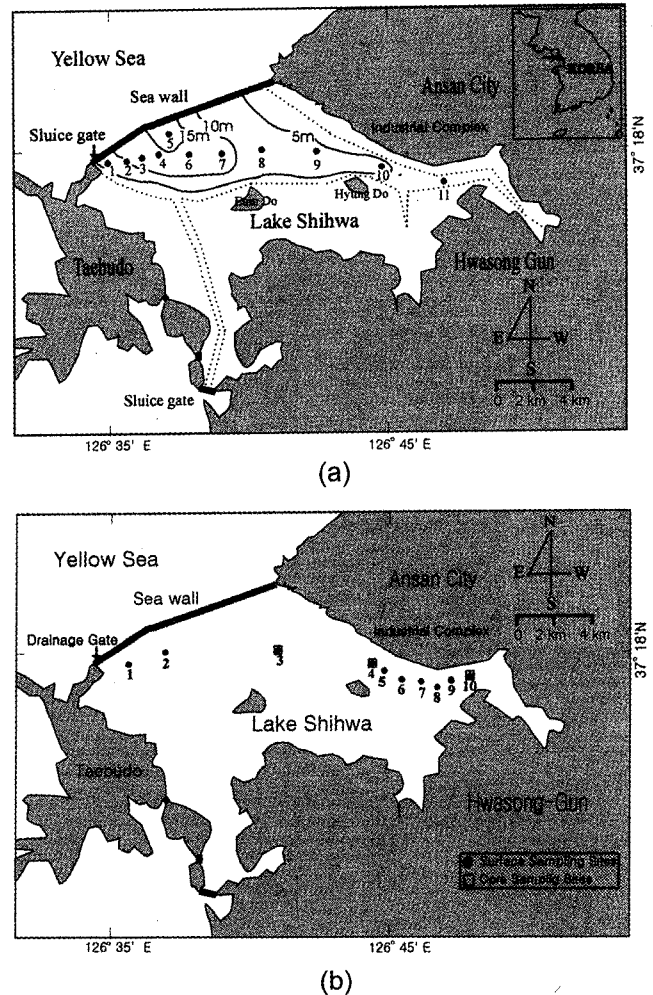


Fig. 1. (a) Bathymetry of the study area and the location of salinity sampling stations. The lightly dotted lines denote old tidal channels. Dyke construction has entrapped the Yellow Sea Water within the lake, and has cut off the vast tidal flats from tidal actions. Most of the tidal flats lying off the lake margins toward the land (i.e., the area between the lightly dotted lines and the surrounding land) will eventually be reclaimed, (b) Map showing the locations of the 10 surface-sediment sampling stations occupied during this work. Core samplings were also made at 3, 4, 10 stations denoted in □.

서 각각 일정량을 취하였다.

조사항목 및 분석방법

표층 및 주상시료에서 입도와 화학성분(유기탄소, 유기질소, Zn, Pb, Cr, Cu, Mn)들의 함량을 분석하였다. 입도분석은 유기물과 탄산염을 제거한 후 4φ 이하의 조립질 시료는 건식체질로 분석하였고, 4φ보다 세립한 시료는 침강법에 따라 분석한 후 Folk와 Ward (1957)의 방법에 의해 통계처리하였다. 유기물 함량은 $K_2Cr_2O_7(0.4N)$ 로 유기물을 산화·분해시키고 남은 크롬산을 $FeSO_4(NH_4)_2 \cdot SO_4 \cdot 6H_2O(0.2N)$ 로 적정해 유기물 산화에 소비된 크롬산에서 탄소량을 산출하였다. 유기질소는 총질소에서 암모니아성 질소(NH_4-N)함량을 빼 값으로, 총질소는 진한 황산과 촉매제를 가하여 분해 한 후 수기에 넣고 증류한 다음 수기에 받은 용액을 적정하여 총질소 함

량을 계산하였다. 암모니아성 질소는 입자에 흡착된 NH_4^+ 를 KCl 용액으로 치환한 후 MgO 시약을 사용하여 알칼리화 한 다음에 증류하여 적정하였다. 중금속 함량은 진한 질산과 과염소산 시약으로 분해한 후 일정량의 용액을 유도결합 플라즈마 원자방출분광법(ICP-AES)으로 정량하였다.

결과 및 고찰

해수유입에 따른 공간적인 염분분포

시화호의 수심은 작은 가리섬 동쪽부근이 평균수심 15 m 이하이며 최고수심 17.9 m를 나타내고, 오이도, 형도 사이는 평균수심 10 m의 범위이며 최고수심 14.2 m이고, 음섬 앞의 최고수심은 10.2 m, 사리포구 앞 수심은 4.0 m를 나타냈다(한국수자원공사, 1995; Fig. 1a). 배수갑문 개방이전 기간인 1997년 4월 염분의 공간적인 분포는 전수층이 14‰ 이하이고, 8 m 보다 깊은 수심에서 16‰ 이상을 나타냈다(Fig. 2a). 1997년 7월 22일부터 일일 2회씩 250만 m³/회의 해수를 유입시킨 결과 1997년 9월에는 5 m 보다 깊은 수심에서 20‰ 이상의 염분분포를 보이고(Fig. 2b), 1998년 2월 11일 이후 750~1000만 m³/회의 해수가 유입된 1998년 3월에는 시화호내 전수층이 30‰ 이상을 보이고 공단 및 하천수의 영향을 지속적으로 받는 지점 10, 11은 22~28‰를 나타냈다(Fig. 2c).

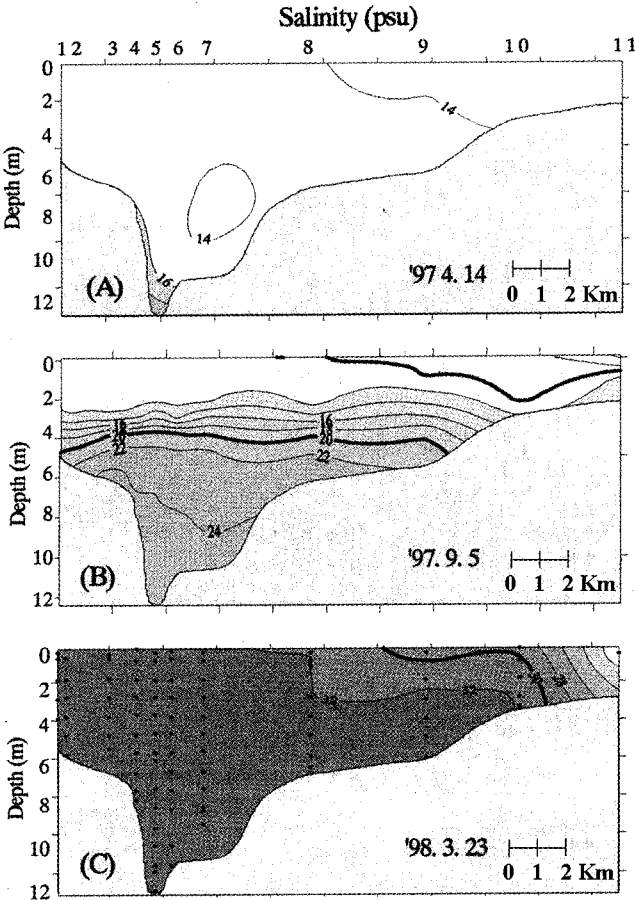


Fig. 2. Vertical distributions of salinity (a) April 14, 1997 (b) September 5, 1997 (c) March 24, 1998.

Sediment Composition (%)

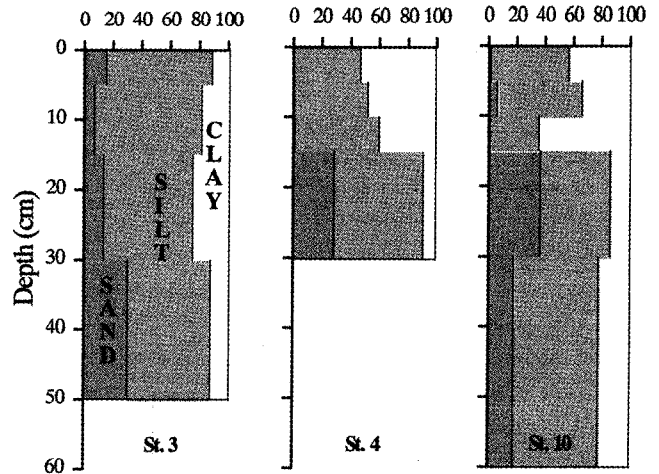


Fig. 3. Vertical distribution of sand, silt, and clay contents in sediment core taken from April of 1997.

퇴적물의 입도

조사기간 중 10지점의 표층 퇴적물과 3지점(3, 4, 10)의 주상시료에 대한 입도 조사는 1997년 4월 시료에서만 분석되었다. 퇴적물의 전반적인 퇴적물 형태는 니질성 실트질을 보이는데, 특징적으로 정점 1, 3, 7에서 모래성분이 10.2~30.5%로 다른 정점들의 0.3~1.8%과 비교해 많은 차이를 보였다. 그 결과 실트성분의 변화보다는 상대적으로 점토성분에서 11.2~20.4%의 낮은 함량이 분포하였다. 실트함량의 공간적인 변화는 39.6~73.6%(58.3±11.2)이고, 점토함량의 경우는 11.2~60.1%(35.4±16.5)이었다.

정점 3, 4, 10에서 조사된 두께 30, 50, 60 cm인 주상시료 퇴적물의 수직적 변화는 표층 퇴적물과 마찬가지로 모래와 점토함량 사이에 변화를 보이면서 3지점이 동일하게 코어 깊이 15 cm 아래의 퇴적물내 상대적으로 많은 모래성분이 포함되어 있다(Fig. 3). 이러한 3지점에 대한 모래, 실트, 점토함량의 각 수직적 함량범위는 0.5~36.5%(13.2±12.7), 34.4~74.8%(57.4±10.7), 9.7~64.6%(30.3±18.3)으로 표층 퇴적물과 비슷하였다.

현 시화호 퇴적환경은 1) 조개 파편을 포함한 모래질 펄, 2) 균질한 펄 또는 모래질 펄, 3) 층리가 발달한 펄 또는 모래질 펄의 퇴적상들로 구분된 바 있다(한국해양연구소, 1998). 조개파편을 포함한 모래질 펄 퇴적상 분포는 배수갑문 수로에 위치하며 무질서하게 산재되어 있는 조개파편들을 포함하고 있다. 일반적으로 조개파편이 풍부한 퇴적물 형성은 파랑에너지가 강하게 작용하는 해안선 근처 또는 수로의 잔류퇴적물이며 이때 구성되는 퇴적물은 주로 모래 크기 이상의 조립질 퇴적물로 구성된다(신, 1998). 층리가 발달한 펄 또는 모래질 펄의 퇴적상에서는 특징적으로 8~10 cm깊이 아래의 퇴적층에서 많은 모래성분을 포함하고 있다. 이 지역은 본 연구에서 정점 4, 10에 위치한다(Fig. 1b). 시화호내의 공단주변 표층퇴적물 정점 4, 10은 검은색을 나타내고 함유율이 높으며 환원상태에서 나타나는 황화수소 냄새가 심하였다.

유기탄소 · 질소의 분포

3회 조사에 걸쳐 측정된 표층 퇴적물내 유기탄소 함량은 범위

Table 1. Chemical analysis of surface sediments in Lake Shihwa.

Station	Year/Month	C _{org} (%)	N _{org} (%)	C/N (molar)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)
1	'97/4	0.12	0.05	3	112	101	43.1	47.5	277
	'97/9	0.38	0.04	11	46.6	30.5	19.5	10.4	272
	'98/3	0.67	0.05	16	45.5	9.05	21.3	14.5	221
2	'97/4	0.53	0.04	15	157	143	76.4	73.8	284
	'97/9	0.88	0.09	12	66.5	42.9	22.1	20.8	325
	'98/3	1.37	0.09	17	72.2	13.9	28.1	25.8	290
3	'97/4	0.15	0.03	6	126	107	53.9	51.1	255
	'97/9	0.97	0.11	11	135	44.1	35.6	90.5	250
	'98/3	0.44	0.04	13	47.3	6.04	14.0	20.4	179
4	'97/4	1.03	0.16	8	256	227	137	97.0	490
	'97/9	1.61	0.15	13	238	71.4	51.1	111	383
	'98/3	1.40	0.08	19	161	23.3	43.6	127	308
5	'97/4	1.01	0.12	10	70.9	82.1	23.7	20.6	193
	'97/9	1.26	0.14	10	284	91.7	47.4	136	472
	'98/3	1.06	0.07	19	189	18.3	39.4	119	265
6	'97/4	1.29	0.12	13	121	108	57.6	89.1	263
	'97/9	0.64	0.17	4	104	38.5	34.6	47.5	246
	'98/3	1.40	0.10	16	128	19.0	36.9	59.2	303
7	'97/4	1.08	0.12	11	143	127	41.9	98.5	357
	'97/9	1.14	0.12	11	211	51.0	44.2	84.4	349
	'98/3	1.70	0.09	23	932	106	90.6	307	338
8	'97/4	1.23	0.10	14	95.2	165	57.5	21.6	230
	'97/9	1.32	0.14	11	173	54.6	33.6	70.8	398
	'98/3	0.59	0.05	15	75.1	13.6	20.1	32.9	223
9	'97/4	0.88	0.08	12	57.9	80.4	34.4	16.7	179
	'97/9	1.00	0.12	9	207	61.3	34.5	79.8	467
	'98/3	0.91	0.09	12	142	28.0	34.0	51.0	356
10	'97/4	2.52	0.18	16	136	116	74.7	107	287
	'97/9	1.20	0.12	11	169	72.5	40.2	75.3	404
	'98/3	0.79	0.08	12	112	23.7	32.5	41.6	268

는 0.12~2.52%, 유기질소는 0.03~0.18%를 보였다(Table 1). 특히, 정점 1과 3의 낮은 함량은 상대적으로 이 두 지점이 많은 모래성분을 함유하고 있기 때문에 퇴적물의 입도 분포에 의해 유기탄소가 영향을 받은 것으로 사료된다(Fig. 4A).

각 정점에서 조사된 유기탄소·질소의 평균값 분포를 보면 전반적으로 정점 1~3에 비하여 정점 4~10까지 높은 분포를 나타냈다(Fig. 4). 이렇게 배수갑문 주변정점에 비해 공단주변 정점이 높은 유기탄소·질소함량을 보이는 지점들은 상대적으로 인근 육상의 공단폐수, 생활하수 및 하천들의 영향을 받는 지역에 위치하고 있으며, 여름철 수층에서 입자물의 침강속(flux)는 방조제 부근에서 170 g/m²·d이고 공단 하구 인근에서 최고 1800 g/m²·d로 10배 이상 높게 조사되었다(홍 등, 1996).

3지점(3, 4, 10)에 대한 전 조사시기의 코어 퇴적물에서 유기탄소·질소의 수직적 분포는 1998년 3월 정점 10의 20 cm에서의 분포를 제외하면 깊이가 증가 할수록 감소하였다(Fig. 5). 정점 3의 유기탄소와 유기질소의 변화폭은 각각 0.06~0.97%, 0.01~0.13%이었다. 정점 4에서는 각각의 변화폭이 0.26~2.60%, 0.03~0.24%으로 정점 3보다는 높은 값들이 분포를 하며 수직적으로 깊이가 20 cm 부근까지 감소하였다. 정점 10에서의 각각의 변화폭은 0.47~2.99%, 0.03~0.28%로 유기탄소 함량은 다른 지점들에

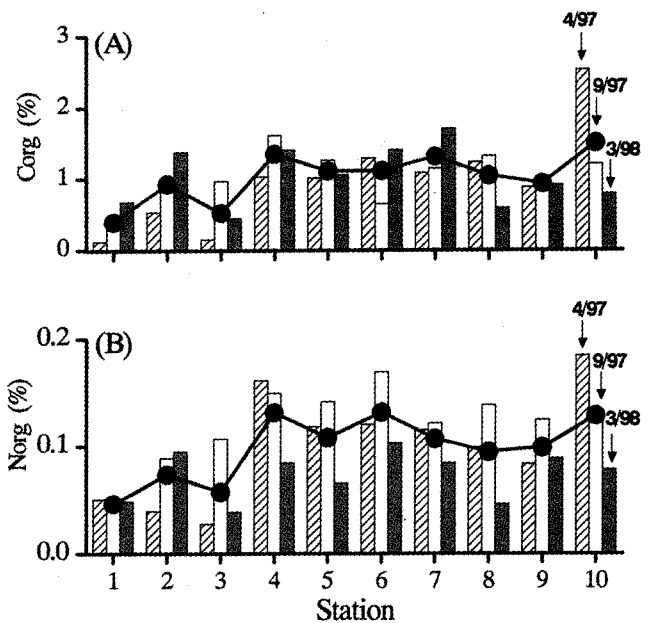


Fig. 4. Temporal and spatial variations of C_{org} and N_{org} contents in surface sediments. Solid squares were values averaging the abundances of three sampling times in each sampling station.

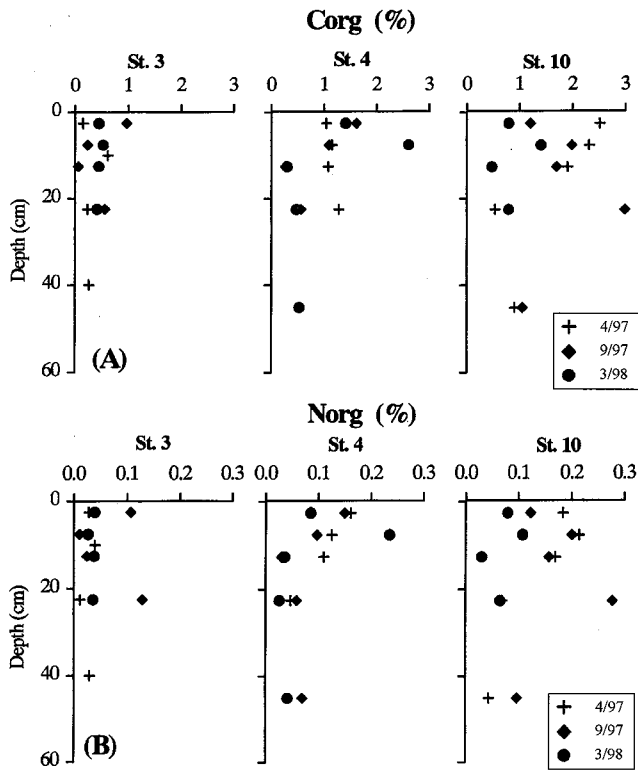


Fig. 5. Vertical distribution of C_{org} (a) and N_{org} (b) contents in sediment cores.

비해서 많으며, 유기질소 함량범위는 정점 4와 비슷하였다(Table 2).

본 연구결과 주상시료들에 대한 C/N비는 Table 2에 표시하였다. 3정점의 주상시료에서의 C/N의 비의 변화폭은 3~32, 평균값은 13.9를 나타냈다. 유기물의 특성을 지시하는 총유기탄소에 대한 총질소의 비(C/N ratio)는 여러형태의 유기물의 기원을 밝히는 데 이용된다. 해양생물의 기초생산에 의해 형성된 유기물은 C/N 비가 약 10 이하이고, 주변대륙으로부터 공급된 육상기원 유기물의 경우 C/N가 10 이상이다(Muller, 1997). Lee et al., (1992)에 의하면 시화 방조제가 완성되기 이전의 시화호 내 · 외측 표층퇴적물 400개의 시료에서의 평균 C/N 비율은 대부분 10이상이고 평균 15.5로 퇴적물내 유기물이 육상에서 공급된 것으로 해석하였다. 그러나 현 등(1999)은 시화호 내의 5개의 주상시료에서 10이하의 C/N 비율을 통해 대부분의 유기물은 시화호내의 생물생산에 의한 결과로 해석하였다. 본 연구결과는 이 들의 중간값에 해당한다. 또한 유기물 기원을 판단하는데 사용되고 있는 C/N 비율 이외에 입자성 유기탄소 동위원소비($\delta^{13}C$)를 적용한다. 시화호 공단 지역주변의 주상시료(최대 46 cm)내 수직적인 유기탄소 동위원소비의 범위는 -22.0~-23.7‰로 해양플랑크톤의 범위 -18~-24‰에 포함되며 육상유기물의 영향이 크지 않은 것으로 보고하였다(심 등, 1998).

일반적으로 기기분석적인 측면과 상대적인 안정성 때문에 C/N 비가 C/P에 비해서 유기물의 기원을 해석하는데 있어서 널리 사용되고 있다. 그러나 퇴적물내 유기물 함량은 다양한 기원에서 유래된 산물이기 때문에 C/N비율만을 가지고 유기물기원을 확인한다는 것은 한계가 있다. 더구나 이 비율은 지역적인 특성(풍화, 강

물을 통한 육상기원 유기물의 공급)과 퇴적환경의 특성(수층의 일차생산, 수심, 퇴적률, 유기물의 광물화 정도)에 따라 좌우된다(Ruttenberg and Goni, 1997).

일반적으로 우리나라의 도시지역을 배후지로 갖는 하천에서는 강우량의 증가에 따라 하천 유량이 증가하며 토양이 초지로 피복되어 있지 못하여 부유물질의 이동량 또한 증가한다(Hong et al., 1996). 특히 시화호 주변 배후지의 신도시 건설이 진행중으로 토양침식율이 매우 크다. 방조제 축조 이전에도 많은 양의 오염물질이 유입되었고 육상기원 유기물의 영향을 받았을 것으로 추정되며 방조제 축조 이후에는 육상기원 퇴적물의 영향이 더욱 많아질 것으로 추측된다. 따라서 공단주변 정점 주상시료에 대한 유기물의 기원을 전적으로 생물기원으로 볼 수 없으며 육상기원 유기물의 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

중금속의 함량과 분포

각 정점 표층 퇴적물의 조사시기별 중금속 함량 및 변화에 대해서 Table 1과 Fig. 6에 나타냈다. Zn은 특징적으로 '98년 3월의 정점 7에서 최대 932 ppm이 조사되었으며, 이 값을 제외한 3회

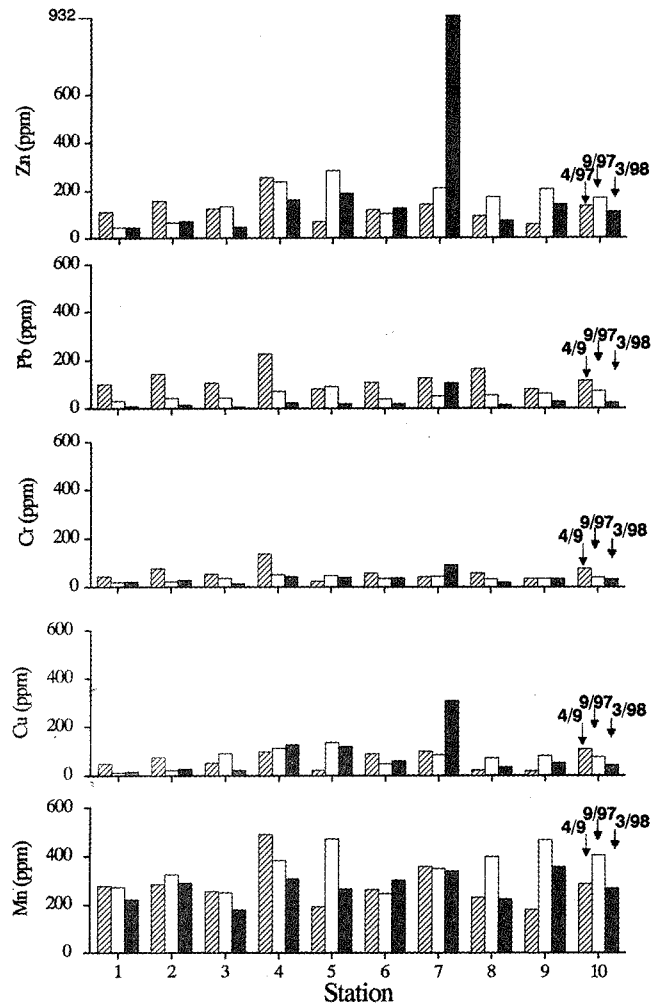


Fig. 6. Temporal and spatial variation of heavy metal contents in surface sediments.

Table 2. Chemical analysis of sediment cores in Lake Shihwa.

Year/Month	Station	Depth (cm)	C _{org} (%)	N _{org} (%)	C/N (molar)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	
'97/4	3	0-5	0.15	0.03	6	126	107	53.9	51.1	255	
		5-15	0.61	0.04	18	214	164	67.5	91.4	337	
		15-30	0.23	0.01	24	195	152	93.0	96.3	317	
		30-50	0.26	0.03	10	68.5	74.0	34.8	29.0	204	
	4	0-5	1.03	0.16	8	256	227	137	97.0	490	
		5-10	1.14	0.12	11	134	91.8	63.6	58.9	263	
		10-15	1.08	0.11	12	120	128	51.0	51.6	293	
		15-30	1.28	0.05	32	147	117	28.4	61.5	300	
	10	0-5	2.52	0.18	16	136	116	74.7	107	287	
		5-10	2.31	0.21	13	249	186	116	170	374	
		10-15	1.90	0.17	13	184	161	80.5	106	322	
		15-30	0.53	0.07	9	157	164	48.8	97.5	388	
			30-60	0.91	0.04	24	72.9	81.6	22.5	31.8	191
	'97/9	3	0-5	0.97	0.11	11	135	44.1	35.6	90.5	250
5-10			0.23	0.01	25	55.4	37.8	20.5	22.4	283	
10-15			0.06	0.02	3	35.8	30.4	17.7	12.9	241	
15-30			0.56	0.13	5	67.3	41.0	33.0	61.1	313	
4		0-5	1.61	0.15	13	238	71.4	51.1	111	383	
		5-10	1.08	0.10	13	202	57.4	66.3	145	371	
		10-15	0.26	0.03	10	135	53.9	34.0	103	360	
		15-30	0.56	0.06	11						
10		30-60	0.53	0.07	9	95.8	40.6	27.1	67.5	250	
		0-5	1.20	0.12	11	169	72.5	40.2	75.3	404	
		5-10	1.99	0.20	12	240	75.4	36.9	113	380	
		10-15	1.70	0.16	13	198	74.1	39.4	70.0	345	
			15-30	2.99	0.28	13	283	78.1	25.4	69.7	398
			30-60	1.06	0.10	13	184	66.6	57.5	113	359
'98/3	3	0-5	0.44	0.04	13	47.3	6.04	14.0	20.4	179	
		5-10	0.53	0.03	23	43.1	5.94	25.3	13.8	239	
		10-15	0.44	0.04	14	50.1	9.73	23.8	24.9	259	
		15-30	0.41	0.04	13	53.1	11.7	28.4	35.7	261	
	4	0-5	1.40	0.08	19	161	23.3	43.6	127	308	
		5-10	2.60	0.24	13	553	59.3	405	913	448	
		10-15	0.30	0.04	10	49.8	9.02	18.2	25.9	297	
		15-30	0.47	0.03	22	49.0	10.9	19.9	27.6	179	
	10	30-60	0.53	0.04	15	65.7	14.2	36.6	57.7	199	
		0-5	0.79	0.08	12	112	23.7	32.5	41.6	268	
		5-10	1.40	0.11	15	130	29.6	37.9	64.7	341	
		10-15	0.47	0.03	18	78.3	17.0	23.8	24.3	217	
			15-30	0.79	0.06	14	101	15.2	41.0	52.9	240

조사의 시·공간적인 변화폭은 45.5~284 ppm에 해당된다. Pb의 변화는 6~227 ppm으로 상대적으로 '97년 4월 조사에서 높은 함량을 나타냈다. Cr의 경우는 14~137 ppm의 변화를 보였다. Cu는 '98년 3월 정점 7에서 최대 307 ppm이 조사되었으며, 이 값을 제외한 전반적인 변화폭은 10~136 ppm이다. Mn의 함량변화는 179~490 ppm를 나타내며 그 변화폭은 다른 원소들보다는 작았다. 특징적으로 표층 퇴적물에서 Zn, Cu는 높은 상관성 ($r=0.92$)이 조사되었으며(Table 3), 일반적으로 두 원소는 생물활동과 관계하는 원소들로서 알려져 있다(Ergin *et al.*, 1996).

해수유입에 따른 표층퇴적물의 중금속함량 변화는 배수갑문 개

방이전 시기인 1997년 4월에 비하여 해수화된 시기의 1998년 3월 정점 4와 10에서 Cr 이외의 중금속과 유기질소의 감소를 나타냈다. 특히 정점 10에서 Pb는 모든 지점에서 감소하였다(Fig. 6과 Fig. 4). 따라서 해수를 유입시킨 결과 표층퇴적물내의 일부 중금속은 수층으로 확산되어 감소한 것으로 판단된다.

정점 및 조사시기별 중금속들의 수직적인 분포는 앞서 유기탄소·질소와 비슷하였다(Fig. 7). 정점 4에서 Zn, Cu, Mn 들은 코어 깊이 20 cm까지 감소를 보였다. '98년 4월의 5~10 cm 퇴적층에서 조사된 Zn(553 ppm), Cr(405 ppm), Cu(913 ppm)의 경우 다른 퇴적층의 값보다 2배 이상의 차이를 보였고, 현재로서는 이 높

Table 3. Correlation coefficients among the heavy metals in surface sediments (A) and in sediment cores (B).

(A)					
	Zn	Pb	Cr	Cu	Mn
Zn	1.00				
Pb	0.27	1.00	N=30		
Cr	0.54	0.83	1.00		
Cu	0.92	0.27	0.56	1.00	
Mn	0.40	0.33	0.44	0.44	1.00

(B)					
	Zn	Pb	Cr	Cu	Mn
Zn	1.00				
Pb	0.44	1.00	N=30		
Cr	0.84	0.23	1.00		
Cu	0.85	0.13	0.98	1.00	
Mn	0.80	0.46	0.52	0.56	1.00

은 값을 설명할 수 없기 때문에 전체의 함량변화에서 제외하였다. 3회 조사기간의 Zn의 함량변화는 35.8~283 ppm, Pb(5.94~227 ppm), Cr(14.0~137 ppm), Cu(13.8~170 ppm) 그리고 Mn(179~490 ppm)의 함량은 표층 퇴적물과 비슷한 범위를 보였다(Table 2). 정점 4의 중금속(Zn, Cu, Mn)과 유기탄소 및 유기질소 함량의 수직적 분포는 공통적으로 깊이 20 cm까지 감소하는 경향성을 나타냈다(Fig. 5와 Fig. 7). 이러한 분포는 정점 4의 같은 구간에서 세립입자가 줄어드는 것과 연관이 있는 것으로 사료된다(Fig. 3).

시화호 중금속간의 상관관계 및 방조제 축조 전·후의 함량비교

전 조사기간 동안 표층 퇴적물의 중금속들간 상관계수를 보면 뚜렷이 Cu-Zn($r=0.92$)와 Cr-Pb(0.83)들 간의 높은 상관성을 확인할 수 있었다(Table 3). 따라서 각 두 원소들간에 같은 기원 및 퇴적물 집적에 따른 비슷한 기작이 있음을 의미한다.

주상시료 깊이 5 cm 이상 되는 퇴적물에서 원소간 상관계수는 Zn-Cr($r=0.84$), Zn-Cu($r=0.85$), Zn-Mn($r=0.80$), Cr-Cu(0.98)들에서 높은 상관성을 보였다(Table 3). Mn-Zn의 관계는 Mn 수산화물이 주요한 Zn에 대해서는 운반자 역할을 한다. 일반적으로 퇴적물내 미량원소들 분포에 Mn 수산화물의 역할은 잘 알려져 있다(Ergin *et al.*, 1996). 그러나 본 연구에서 Zn를 제외한 다른 원소들과는 상관계수가 낮다(Table 3). Ahn *et al.*, (1995)은 공단앞 조간대 주상시료의 유기물과 중금속은 높은 친화력을 보이고, 중금속 원소 중 Cr, Mn은 점토함량과 높은 상관성을 보였으나 Pb, Cu는 점토 광물과 상관성이 없었다. 따라서 시화호 퇴적물에 많은 유기물의 공급과 퇴적물의 발달정도에 따른 산화·환원환경의 변화와 황산염이 소모되는 현상이 발생하고 있기 때문에(한 등, 1997), 이들 퇴적환경변화에 따라 중금속 분포가 영향을 받는 것으로 사료된다.

Table 4는 방조제축조 전·후의 표층퇴적물의 중금속 함량변화를 비교한 것으로 vicinity industrial complex에서는 공단 및 하천의 영향을 지속적으로 받는다고 판단되는 정점 4~10의 중금속 함량의 평균값을 나타내었고, vicinity of drainage gate에서는 배수갑문 운용에 직접적인 영향권으로 판단되는 정점 1~3의 평균값

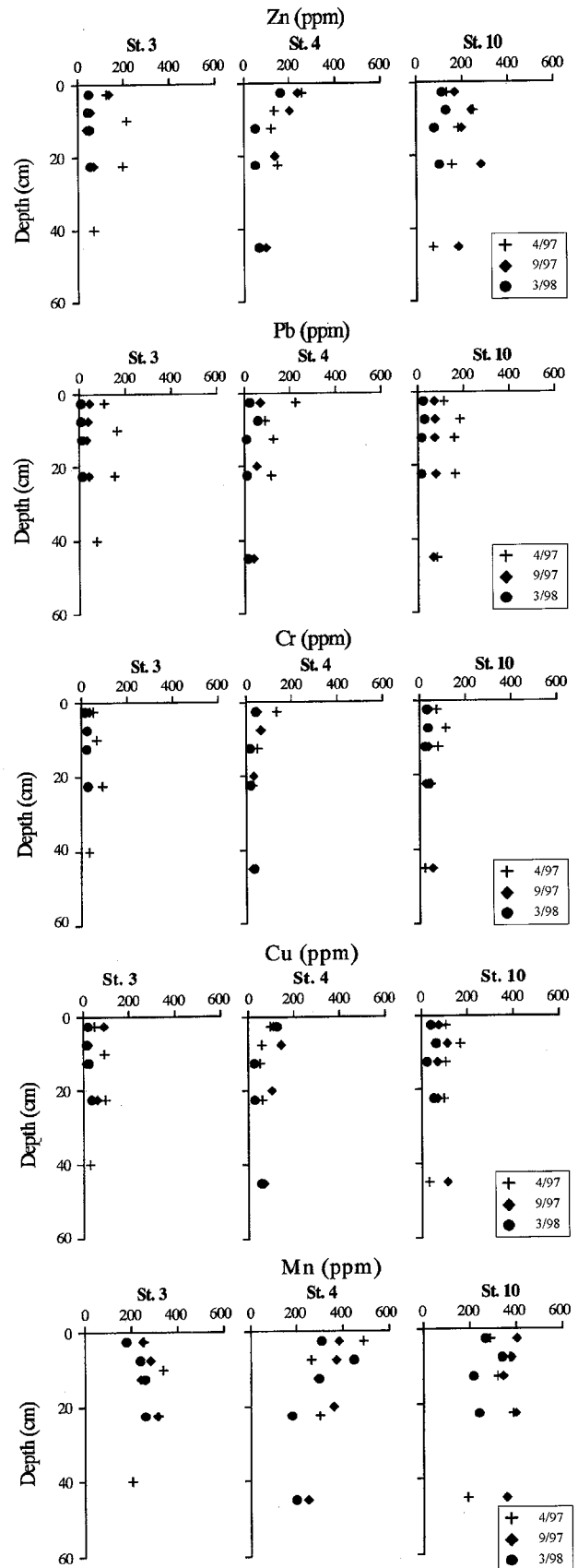


Fig. 7. Vertical distribution of heavy metal contents in sediment cores.

Table 4. Variation of heavy metal contents of the surface sediment in Shihwa Lake by construction of a seawall.

	(unit: ppm)					
	Zn	Pb	Cr	Cu	Mn	Source
Vicinity Industrial Complex	152.6	48.1	48	85.4	323	[1]
Vicinity Drainage Gate	89.8	24.5	34.9	39.4	261	
Kyeonggi Bay (total)	167	32		12	455	[2]
Banwoel Flat	242	31		33	635	
Adjacent Marine Sediment	58.9	25.5	48.6	20.3	644	[3]
Crustal Average	70	13	100	55	950	[4]

[1] this study; [2] Lee *et al.*, 1992; [3] KOWACO, 1998; [4] Mason and Moore, 1982.

을 나타냈다. 공단의 영향을 받는지역의 중금속함량이 배수갑문지역보다 Zn(차이 값; 62.8 ppm), Pb(23.6 ppm), Cr(13.1 ppm), Cu(46 ppm), Mn(62 ppm) 높았다. 과거 경기만 퇴적물('81년 시료 채취)환경과 비교하면 현 시화호 환경에서 증가를 보인 원소는 Cu이며, 반대로 낮은 함량을 나타낸 원소로는 Zn(차이 값; 45.8 ppm)와 Mn(차이 값; 163 ppm)이다. Pb의 함량(36.3 ppm)은 과거자료(32 ppm)와 비슷하였다. 또한 본 연구의 공단 앞 지역은 시화 방조제 내·외측의 400개의 시료중에 반월조간대('83년 시료채취)에 해당하는 지역으로 현 방조제 축조 후 함량증가를 보이는 원소는 Pb와 Cu이다(Lee *et al.*, 1992). 배수갑문 지역은 본 연구와 동일시기에 조사가 이루어진 1997년 3(2회), 7, 9, 12월과 1998년 3월에 총 6회에 걸쳐 조사한 표층퇴적물 150 여개의 시료에서 분석한 방조제 밖 조하대 환경의 결과와 비교 하였으며 그 결과 증가한 원소는 Zn와 Cu들이다. 이들 Zn, Pb 그리고 Cu 원소들은 각각 평균값과 비교해서 각각 1.7배, 2.8배, 1.1배정도 높다(한국수자원공사, 1998).

특징적으로 배수갑문주변과 연안퇴적물의 중금속 함량은 비슷한 분포를 보이고 있다. 또한 배수갑문 운용에 따라 해수를 유출·입 시킨 결과 '98년 3월에는 공단 앞 지역까지 영향을 미쳤다(Fig. 2). 그러나 지속적인 해수유입이 있더라도 공단주변의 오염된 퇴적환경을 개선하는데는 많은 시간이 소요될 것으로 사료되며 면오염원인 퇴적물의 수질에 미치는 영향이 크기 때문에 보다 적극적인 대책이 필요하다.

결 론

시화호 표층 퇴적물의 유기탄소·질소 함량은 각 정점별 조사시기에 따른 함량변화를 보이면서 상대적으로 시화호 안쪽 정점들에서 높은 함량들이 분포하였다. 또한, 중금속들과 유기탄소의 관계는 공간적인 유기물 분포가 부분적으로 중금속 분포에 영향을 주고 있는 것으로 사료된다. 배수갑문을 운용하여 해수를 유입시킨 결과 표층퇴적물내의 중금속은 수층으로 확산되어 일부 중금속 함량은 감소한 것으로 판단된다. 시화호내 중금속 함량분포는 경기만 혹은 연안 퇴적물 및 배수갑문 주변지역의 중금속 함량분포와 유사하다. 또한 해수의 지속적인 유출·입에 따라 해수가 공단부근 까지 영향을 미치더라도 공단주변의 오염된 퇴적환경을 개선하는데는 많은 시간이 소요될 것으로 사료되며 면오염

원인 퇴적물이 수질에 미치는 영향을 고려할때 보다 적극적인 대책이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사로부터 시화호 수질관리대책 연구과제의 일환으로 수행되었으며, 퇴적물분석에 협조해 주신 농촌환경연구실의 이복자 연구원에게 감사함을 전합니다. 논문을 세밀히 심사해주신 인하대학교 한명우, 서울대학교 이창복 교수님과, 한국해양연구소 홍기훈 박사님들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

류종성, 최진우, 강성길, 고철환, 허성희, 1997. 시화 방조제 건설 이후 시화호 다모류의 종 조성 및 서식밀도 변화. 한국해양학회지, 2: 101-109.

박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997. 시화호 산화·환원 환경하의 용존 유·무기 화합물의 생지화적 연구. 한국해양학회지, 2: 53-68.

박철, 허성희, 1997. 시화호와 인근해역의 동물플랑크톤 분포로 본 시화호의 생태적 안정성. 한국해양학회지, 2: 87-91.

심무준, 김은수, 김경태, 이기복, 강화성, 이광우, 1998. 시화호 퇴적물의 유기탄소, 황 및 중금속 분포. 한국물환경학회지, 14: 469-482.

신동혁, 1998. 한국 서해안 가로림만 조간대 퇴적환경과 홀로세 해수면 변동. 인하대학교 대학원 박사학위논문, 192 pp.

이태원, 문형태, 허성희, 1997. 시화호 수질 악화에 따른 시화호와 주변 해역 어류의 종조성 변화. 한국해양학회지, 2: 110-116.

최동한, 강석원, 송기돈, 허성희, 조병철, 1997a. 과역양성 시화호에서 박테리아의 분포 및 성장. 한국해양학회지, 2: 92-100.

최중기, 이은희, 노재훈, 허성희, 1997b. 시화호와 시화호 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차생산력에 관한 연구. 한국해양학회지, 2: 78-86.

한국수자원공사, 1998. 시화호 외해 연안환경영향조사 최종보고서, 1156 pp.

한국해양연구소, 1997. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(1차년도), BSPN 96325-985-4. 169 pp.

한국해양연구소, 1998. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(2차년도), BSPE 97610-00-1035-4. 230 pp.

한국해양연구소, 1999. 시화호 환경개선 및 종합개발 방안 연구, BSPE 98746-00-1189-2.

한명우, 박용철, 허성희, 1997. 시화호에서 암모니아와 납의 저층유출. 한국해양학회지, 2: 69-77.

허성희, 오임상, 1997. 인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구: 서문. 한국해양학회지, 2: 49-52.

현상민, 천종화, 이희일, 1999. 시화호의 퇴적환경과 중금속오염. 한국해양학회지, 4: 198-207.

홍기훈, 박선규, 홍대벽, 이상한, 1996. 시화호인공호수 입자성 침강 유기물. 해양연구, 18: 89-92.

한국수자원공사, 1995. 시화호수 담수호 수질보전 대책수립 수립조사보고서, 102 pp.

Ahn, I.Y., Y.C. Kang and J.-W. Choi, 1995. The influence of industrial effluents on intertidal benthic communities in Panwoel,

- Kyeonggi Bay (Yellow Sea) on the west coast of Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, **30**: 200–206.
- Ergin, M., B. Kazan and V. Ediger, 1996. Source and depositional controls on heavy metal distribution in marine sediments of the Gulf of skenderun, Eastern Mediterranean. *Mar. Geol.*, **133**: 223–239.
- Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river bar, a study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Petrol.*, **27**: 3–26.
- Hong, G.H., S.L. Cho and S.Q. Park, 1989. Nutrients and particulate organic matter in Lake Soyang during the thermally stratified period. *J. KS WPRC*, **5**: 35–46.
- Lee, C.B., Yoo, H.R. and Park, K.S., 1992. Distribution and Properties of Intertidal Surface Sediments of Kyeonggi Bay, West Coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **27**: 277–289.
- Han, M.W. and Park Y.C., 1999. The development of anoxia in the artificial Lake Shihwa, Korea, as a consequence of intertidal reclamation. *Mar. Pollut. Bull.*, **38**: 1194–1199.
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982. Principles of Geochemistry. Wiley, Newyork, 344 pp.
- Muller, P.J., 1977. C/N ratio in Pacific deep-sea sediments: effects of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**: 765–776.
- Ruttenberg, K.C. and Goni, M.A., 1997. Phosphorus distribution, C:N:P ratios, and ¹³Coc in arctic, temperate, and tropical coastal sediments: tools for characterizing bulk sedimentary organic matter. *Mar. Geol.*, **139**: 123–145.

2000년 9월 25일 원고접수

2000년 10월 26일 수정본 채택

담당편집위원: 한명우