

## 새만금 방조제 체절 과정 중 새만금 주변해역 표층수의 수질과 중금속 분포 특성

김경태<sup>1,†</sup> · 김은수<sup>1</sup> · 김성수<sup>2</sup> · 박종수<sup>3</sup> · 박준건<sup>1</sup> · 조성록<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양환경 방제연구부

<sup>2</sup>국립수산과학원 환경관리과

<sup>3</sup>국립수산과학원 연구기획과

## Water Quality and Heavy Metals in the Surface Seawaters of the Saemangeum Area during the Saemangeum-dike Construction

Kyung Tae Kim<sup>1,†</sup>, Eun Soo Kim<sup>1</sup>, Seong Soo Kim<sup>2</sup>, Jong Soo Park<sup>3</sup>,

Jun Kun Park<sup>1</sup> and Sung Rok Cho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marine Environment & Pollution Prevention Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>2</sup>Environment Management Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea

<sup>3</sup>Research & Development Planning Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea

### 요 약

새만금 방조제 공사 과정 중의 새만금 해역 표층수 주요 수질의 시·공간적 분포 특성을 파악하기 위하여 2002년에 총 4회(4월, 5월, 8월, 11월)에 시료를 채취하여 염분, 화학적산소요구량(COD), 용존 영양염류(DIN, Silicate)와 중금속 분석을 수행하였다. 전체 조사기간 동안 염분, COD, DIN 및 Silicate는 각각 13.08~31.96 psu, 0.12~3.43 mg/L, 0.001~2.638 mg/L 그리고 0.010~3.181 mg/L의 범위를 나타내었다. 각 조사 때마다 COD와 DIN은 담수가 유입하는 만경강 하구 정점에서 가장 높았다. 영양염류들의 농도 분포는 물리적 혼합에 의하여 조절되고 있음을 강하게 지시하여 낮은 염분을 보인 새만금 내측 해역에서 높고, 상대적으로 염분이 높은 외해역에서 낮았다. 용존 중금속의 농도 범위는 Co 0.006~0.115 µg/L, Ni 0.26~0.114 µg/L, Cu 0.14~0.93 µg/L, Zn 0.04~0.53 µg/L, Cd 0.010~0.043 µg/L, Pb 0.010~0.795 µg/L, 산가용성 Hg은 0.25~4.16 ng/L였다. Cd를 제외한 중금속들은 만경강 하구(정점 1 또는 3)에서 가장 높게 나타났다. 일반적으로 중금속은 외해방향(저염분→고염분)으로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, 육상 기원에 의한 영향으로 DIN 및 Silicate에 대하여 양의 상관성을 보였다. 한편, Cd 농도는 염분에 의한 부유물질로부터의 탈착에 의하여 고염분에서 높고 저염분에서 낮았다. 11월에 Co, Zn, Cu와 Pb는 금강 유출수의 제한적인 영향으로 새만금 외해 북부 해역에서 높은 농도를 보였다. 대부분의 용존 중금속 농도는 과거 이 해역의 자료보다 약간 낮았지만 자연적인 환경을 가진 Lena강 하구보다 높았다.

**Abstract** – In order to investigate spatial and temporal distributional characteristics of major water qualities in the Saemangeum area during the Saemangeum dike construction, salinity, COD, dissolved nutrients(DIN, Silicate) and heavy metals were analyzed from the surface water collected in April, May, August and November 2002. The overall value of Salinity, COD, DIN, and silicate in surface waters were in the range of 13.08~31.96 psu, 0.12~3.43 mg/L, 0.001~2.638 mg/L, and 0.010~3.181 mg/L, respectively. The COD and DIN in each survey showed the highest concentration at the mouth of Mangyeong river estuary(St. 1) where freshwater flow into the Saemangeum area. The concentrations of nutrients were high in the inner part of the Saemangeum dike with low-salinity, and low nutrients in the outer part of the dike with high-salinity, which strongly indicated that concentrations were adjusted by physical mixing. The ranges of dissolved metals and acid-soluble Hg in surface seawater were 0.006~0.115 µg/L for Co, 0.26~0.114 µg/L for Ni, 0.14~0.93 µg/L for Cu, 0.04~0.53 µg/L for

<sup>†</sup>Corresponding author: ktkim@kordi.re.kr

Zn, 0.010~0.043 µg/L for Cd, 0.010~0.795 µg/L for Pb, and 0.25~4.16 ng/L for Hg. The highest concentrations of some metals except for Cd were found at the estuary(Sts. 1 or 3). In most cases, a decreasing order of metal concentrations towards open sea(low-salinity→high-salinity) was observed and showed positive relationship with DIN and silicate caused by land base pollutants input. On the other hand, due to Cd desorption from suspended solids in saline water, dissolved Cd concentrations were high in high-salinity area and low in low-salinity. In November, Co, Zn, Cu and Pb were relatively high in the northern area of the outer-side of Saemangeum, which was only influenced by the Geum river discharge. The concentrations of most dissolved metals of this study were lower than those of the past data in this area, but higher than those in Lena river estuary under the pristine environment.

**Keywords:** Saemangeum(새만금), Surface seawater(표층수), Water quality(수질), Dissolved nutrient(용존 영양염류), Heavy metal(중금속)

## 1. 서 론

하구는 담수와 해수가 만나 혼합되는 수역으로 생태적 가치, 홍수와 해일피해 저감 등의 자연재해 방지와 및 환경적으로 가치가 높은 지역이다. 반면 도시 및 산업 활성화의 적지 등 사회·경제적으로 개발과 이용 압력이 높은 곳이다(이 등[2001]). 이에 따라 오래 전부터 각 나라는 증가하는 토지 수요를 충족하기 위하여 갯벌이 발달된 해안이나 하구지역을 지속적으로 매립하여 왔다(Desplanque[1982]; Chowhury[1982]; Cook[1982]). 우리나라의 경우 서·남해안은 간만의 차가 크고, 해안의 만곡이 발달된 리아스식 해안의 특징을 가지고 있어 간척의 적지로 평가되어 왔다. 1960년대 이후 급속한 도시화, 산업화에 따른 임야의 잠식으로 국토 가용면적이 한계를 나타내면서 잠식된 농지의 대체, 임해 공업단지 및 택지 조성 등 여러 가지 목적으로 용지확보의 필요성이 증대되어 대규모 간척 사업이 많이 이루어졌다(농어촌진흥공사[1996]).

한편 간척 지구에는 다양한 목적의 용수 확보를 위하여 담수호를 만들기도 하는데(농어촌진흥공사[1996]), 담수호는 육상 수계와 해양의 경계 지역에 위치하기 때문에 육상 오염물질 부하량 증가와 호수물의 정체에 의한 수질 악화로 원래의 이용 목적을 이루기 어려울 수도 있다(정[1998]). 국내에서 인공 담수호의 오염현상은 시화호에서 심각하게 대두되었는데 특히 정확한 오염 실태 파악과 대책 마련 및 실행의 미흡에 따라 담수화 과정 중에 나타난 오염, 즉 부영양화, 중금속 및 유기화합물질 오염이 보고되었다(박 등[1997]; 김 등[2002]; 한국해양연구소[1997]; Hyun *et al.*[2004]; Li *et al.*[2004]).

본 연구 대상 지역인 새만금지구 간척사업은 만경강과 동진강의 하구 지역에서 이루어지는 총 면적 40,100 ha, 외곽 방조제 길이 33 km에 이르는 거대한 공사이다. 그 주변에는 군산, 익산, 전주, 부안 및 김제 등의 도시와 대규모 농지, 그리고 축산 시설 등이 산재해 있다(농림부농진공[1997]). 이 간척사업은 농지, 산업용지와 수자원 확보를 위한 개발 논리에 대응하여 해양 환경, 특히 갯벌의 보전과 가치 재평가, 수질 관리대책 미흡에 따른 제2의 시화호 우려 등, 사회·경제적으로 관심의 대상이 되고 있다. 새만

금 방조제 체절 이전의 환경 특성과 물질 거동을 파악하기 위하여 다수의 연구가 수행되었는데 대표적으로 만경강 하구와 새만금 방조제 내측의 유기탄소 거동과 분포 특성(박 등[2006]), 해수 및 퇴적물 중의 유기염소계 농약의 분포 특성(홍 등[2006]), Nonylphenol과 IBP의 시공간적 분포(Li *et al.*[2005]), 유기인계 농약의 분포(이 등[2006]), 조간대와 조하대 퇴적물 중의 중금속 분포(김 등[2003]; 조 등[2001]) 등이 있었다. 또한 새만금 방조제 체절 전과 후의 일반수질 및 영양염의 변화에 대한 연구(양 등[2008]) 등이 있으나 이 지역 하구와 연안 해수 중의 중금속에 대한 연구는 빈약한 실정이다.

일반적으로 중금속은 자연수 중에 극미량으로 존재하며, 수계로 유입된 중금속은 다양한 매체들로 이동하게 된다. 수중에서의 존재는 용존, 입자 형태로 대별되며, 최종적으로 퇴적물에 축적되지만 여러 가지 과정에 의하여 수중으로 재용해되어 수자원의 질을 악화시킬 수도 있다. 또한 중금속은 먹이연쇄와 생물농축에 의하여 먹이 사슬의 최상위인 사람에게 다량 축적될 경우 독성을 일으키는 유해물질로(Förstner and Wittmann[1981]), 우리 나라에서도 사람의 건강보호를 위한 항목으로 환경 기준에 지정되어 있다.

한편 주변의 환경 요인이 다양하게 작용하는 연안 수계의 중금속 분포와 거동에 있어 염분, 영양염류, DOC 등의 수질 인자들이 연관되어 있는 것으로 나타났으며(Byrd *et al.*[1990], Salomons and Förstner[1984]; Schindler[1991]; Sharp *et al.*[1984]), 이를 위하여 정확성 높은 자료가 요구된다. 특히 수중에 존재하는 중금속의 정확한 농도를 알기 위해서는 제반과정에 청결기술을 필요로 하고 있으며, 청결기술을 적용하지 않았을 경우 환경의 변화와 거동 및 오염 대책을 마련하는데 한계를 가지며, 자료로서 활용 가치가 낮다(김 등[2002]; Bruland[1983]; Burton and Statham[1990]; Windom *et al.*[1991a]).

따라서 본 연구에서는 대단위 간척을 위한 방조제 공사가 진행 중인 새만금 해역에서 주요 수질 조사와 청결기술을 적용한 중금속 조사·분석을 실시하여 수질 현황과 각 수질 인자들의 분포 특성을 파악하고, 방조제 완공 이후의 환경 변화 비교·분석 및 환경 관리를 위한 기초 정보를 확보할 목적으로 연구를 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

새만금 사업의 외곽 방조제는 총 4개 구간으로 구성되며, 1호 방조제는 전북 부안군 변산면 대항리에서 군산시 옥도면 가력도리의 4,694 m로 1991년 11월 28일에 공사를 시작하여 1998년 12월 30일에 준공되었다. 2호(9,936 m), 3호(2,693 m), 4호(11,436 m) 방조제는 모두 1992년 6월 10일에 공사를 착수하여 2009년 12월에 준공을 예정하고 있지만 방조제의 물막이 공사 완료는 이미 이루어졌다. 즉 3호 방조제는 1994년 7월 25일, 4호 방조제는 2003년 6월 10일, 그리고 2호 방조제는 가장 늦은 2006년 4월 21일에 물막이 공사가 완료되었다. 조사가 수행된 2002년은 1호 방조제가 이미 준공되었고, 3호 방조제의 물막이공사 완료된 이후이며, 2호 및 4호 방조제의 물막이 공사 이전에 해당한다(<http://www.isaemangeum.co.kr>).

본 연구를 위한 새만금 해역 표층수 시료는 만경강 하구를 포함하여 새만금 방조제 내측해역에 5개 정점, 방조제 외측해역에 7개 정점을 선정하여 2002년 4월, 5월, 8월, 11월에 1회씩 채취하였으며(Fig. 1), 내측과 외측 조사는 일정상 각각 1일씩 수행되었지만 각 조사 때마다 두 척의 선박으로 구역을 분할하여 조사하였다. 본 연구에서는 중금속 조사 정점에서 염분, 화학적 산소요구량(COD), 용존 영양염류(DIN, Silicate) 시료를 채취 분석하였으며, 염분은 다항목 자동수질측정기(YSI-6600)를 이용하여 현장

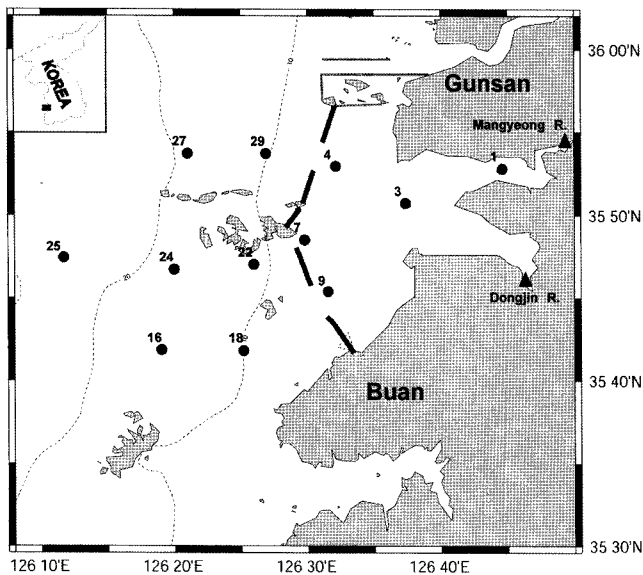


Fig. 1. Map of sampling stations in the Saemangeum area.

에서 측정하였으며, COD는 시료를 채취하여 냉동 보관하여 실험실에서 해양환경공정시험방법(해수부[2005])에 의한 알칼리법으로 분석하였다. 용존 영양염류 역시 해수를 GF/F 여과지로 여과하여 해양환경공정시험방법에 준하여 분석하였다.

용존 중금속 시료는 미리 산 세척한 폴리에틸렌병을 PVC 막대 끝의 PC판에 Tygon tubing을 이용하여 고정된 후 선수에서 조사선이 정점에 도착하기 위하여 속도를 줄였을 때 채취하여 PE 백으로 이중 포장하여 플라스틱 통에 보관하였다(Boyle *et al.*[1981]). 시료는 현장 실험실로 이동하여 Class 100 수준의 Clean bench내에서 산 세척한 pore size 0.4  $\mu\text{m}$ (직경 47 mm) PC 막여과지(Nuclepore)로 여과하여 여과액과 부유물질을 분리한 후 여과액에는 고순도 HCl(Merck, ultrapur)을 가하여 pH 2이하로 보관하였다.

용존 중금속(Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn)의 분리-농축은 크린룸의 Clean bench내에서 Danielsson *et al.*[1978]의 APDC-DDTC-Freon 용매추출법을 변형한 이 등[1989]의 방법에 따랐으나 용매는 CFC-113 대신 대체물질로 개발되어 활용되는 HCFC-141b( $\text{CH}_2\text{ClCF}_2$ )를 정제하여 사용하였고, 분리-농축이 끝난 후 ICP-MS(Perkin Elmer, Elan 6100)를 이용하여 측정하였다. 모든 시약은 중금속 오염을 배제하기 위하여 이 등[1989]에 따라 정제 후 사용하였으며, 정확도 점검을 위하여 NRC(National Research Council Canada)의 CASS-3도 함께 분석하였다. 수은은 산 세척한 300mL 유리병에 표층수를 채취하여 정제된 HCl 3 mL를 가하여 자동 수은증기 발생장치와 금포집 장치에 농축한 다음(김 등[1998]), 원자형광분광기(Tekran 2500)를 이용한 CVAFS법으로 측정하였다.

캐나다 NRC의 표준물질을 분석한 결과는 Table 1에 나타내었다. 해수 내 용존 중금속의 분석 정확도 검증을 위한 CASS-3의 각 원소의 평균 회수율은 Pb의 91.7%에서 Co의 105%의 범위였으며, 측정된 모든 중금속의 평균 농도는 보증농도 범위 내에 있었다.

## 3. 결과 및 고찰

2002년 4월, 5월, 8월, 11월에 채취한 새만금 해역 표층수에 대한 염분, COD, DIN, 규산염(Silicate)와 중금속 분석 결과는 Table 2에 제시하였으며, 각 항목별로 분포를 살펴보았다.

### 3.1 염분, 화학적산소요량(COD), 용존무기질소(DIN), 규산염(Silicate, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ )의 분포

새만금 해역에서 염분은 4월 29.31~31.96 psu(평균 31.58 psu),

Table 1. Analytical results of CASS-3 nearshore seawater reference materials for determination of dissolved metals in waters

Element	Certified value	Concentration measured (Mean $\pm$ 1SD)	Mean recovery (%)	N
Co ( $\mu\text{g/L}$ )	0.041 $\pm$ 0.009	0.043 $\pm$ 0.004	105	6
Ni ( $\mu\text{g/L}$ )	0.386 $\pm$ 0.062	0.394 $\pm$ 0.023	102	6
Cu ( $\mu\text{g/L}$ )	0.517 $\pm$ 0.062	0.520 $\pm$ 0.021	101	6
Zn ( $\mu\text{g/L}$ )	1.24 $\pm$ 0.25	1.29 $\pm$ 0.06	104	6
Cd ( $\mu\text{g/L}$ )	0.030 $\pm$ 0.005	0.031 $\pm$ 0.003	103	6
Pb ( $\mu\text{g/L}$ )	0.012 $\pm$ 0.004	0.011 $\pm$ 0.002	91.7	6

Table 2. General water quality and dissolved heavy metals of surface waters collected in 2002 in Saemangeum area

Month	St.	Salinity	COD	DIN	Silicate	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg*
		(psu)		(mg/L)				(µg/L)				
April	1	29.31	2.01	0.111	0.023	0.115	1.14	0.90	0.25	0.036	0.050	0.70
	3	31.62	1.11	0.004	0.024	0.051	0.46	0.42	0.09	0.032	0.025	0.58
	4	31.65	0.90	0.015	0.031	0.054	0.56	0.60	0.08	0.043	0.026	0.45
	7	31.88	1.06	0.013	0.010	0.036	0.39	0.33	0.09	0.034	0.025	0.58
	9	31.83	1.36	0.010	0.018	0.052	0.47	0.50	0.10	0.038	0.024	0.70
	16	31.90	1.09	0.008	0.010	0.023	0.53	0.52	0.09	0.040	0.018	0.58
	18	31.90	0.84	0.002	0.017	0.040	0.54	0.58	0.07	0.043	0.019	0.54
	22	31.90	0.70	0.001	0.013	0.031	0.46	0.52	0.14	0.037	0.022	0.54
	24	31.96	0.57	0.002	0.016	0.012	0.41	0.47	0.13	0.037	0.014	0.54
	27	31.68	0.54	0.012	0.014	0.038	0.49	0.54	0.14	0.037	0.026	0.35
29	31.76	1.00	0.004	0.029	0.050	0.48	0.57	0.12	0.039	0.036	0.50	
May	1	24.18	3.03	1.707	0.141	0.055	1.06	0.79	0.35	0.014	0.050	2.75
	3	28.78	1.35	0.219	0.041	0.072	0.49	0.58	0.19	0.026	0.017	0.50
	4	30.26	0.94	0.068	0.029	0.069	0.51	0.47	0.18	0.028	0.027	0.38
	7	31.04	0.89	0.036	0.026	0.061	0.50	0.49	0.19	0.031	0.075	0.50
	9	30.89	1.14	0.028	0.038	0.066	0.48	0.41	0.17	0.031	0.022	0.63
	16	31.38	1.00	0.006	0.032	0.037	0.43	0.33	0.23	0.033	0.051	0.50
	18	31.29	0.68	0.014	0.026	0.038	0.47	0.43	0.27	0.035	0.026	0.50
	22	31.01	0.86	0.015	0.016	0.034	0.48	0.26	0.24	0.010	0.027	0.50
	24	31.46	0.37	0.021	0.018	0.020	0.38	0.36	0.08	0.036	0.017	0.50
	25	31.05	0.97	0.021	0.015	0.020	0.36	0.31	0.07	0.032	0.015	0.25
27	30.09	0.79	0.059	0.021	0.043	0.32	0.14	0.12	0.030	0.027	0.38	
29	30.84	1.06	0.023	0.028	0.038	0.30	0.16	0.15	0.032	0.031	0.25	
August	1	13.08	3.43	2.638	3.181	0.047	0.70	0.68	0.41	0.019	0.019	3.07
	3	24.79	0.77	1.039	1.297	0.065	0.58	0.64	0.29	0.042	0.050	1.20
	4	28.08	1.54	0.678	0.914	0.034	0.37	0.37	0.07	0.035	0.012	1.07
	7	29.94	0.74	0.453	0.487	0.025	0.37	0.18	0.22	0.036	0.016	1.07
	9	29.76	0.59	0.304	0.372	0.049	0.36	0.47	0.18	0.041	0.019	1.07
	16	30.24	1.13	0.020	0.049	0.013	0.29	0.26	0.09	0.027	0.013	0.54
	18	30.31	2.04	0.015	0.178	0.018	0.34	0.38	0.12	0.034	0.010	0.40
	22	30.48	1.20	0.073	0.443	0.017	0.34	0.33	0.08	0.033	0.012	0.48
	24	30.64	0.12	0.115	0.088	0.013	0.30	0.38	0.04	0.037	0.011	0.40
	25	30.95	0.15	0.037	0.137	0.013	0.27	0.23	0.06	0.029	0.013	0.40
27	28.72	0.99	0.044	0.184	0.015	0.26	0.35	0.06	0.029	0.010	0.40	
29	26.40	1.85	0.013	0.097	0.011	0.28	0.51	0.09	0.019	0.011	0.54	
November	1	30.19	2.07	0.499	0.644	0.035	0.77	0.41	0.19	0.032	0.025	4.16
	3	30.92	1.45	0.233	0.445	0.025	0.43	0.55	0.07	0.031	0.023	3.04
	4	31.41	1.41	0.151	0.407	0.023	0.41	0.55	0.12	0.034	0.033	1.88
	7	31.10	1.20	0.217	0.471	0.039	0.40	0.54	0.04	0.031	0.025	2.31
	9	31.12	1.13	0.204	0.489	0.028	0.33	0.33	0.06	0.029	0.024	2.22
	16	31.46	0.71	0.144	0.316	0.020	0.35	0.43	0.05	0.038	0.025	1.26
	18	31.54	0.54	0.149	0.373	0.035	0.41	0.46	0.05	0.038	0.034	0.99
	22	31.66	0.65	0.135	0.367	0.018	0.30	0.40	0.08	0.034	0.024	1.33
	24	31.80	0.59	0.091	0.256	0.006	0.29	0.37	0.17	0.033	0.015	1.49
	27	31.84	0.60	0.103	0.312	0.056	0.38	0.45	0.53	0.028	0.179	2.32
29	31.38	0.51	0.185	0.420	0.042	0.41	0.49	0.36	0.033	0.091	1.12	

\*Acid-soluble phase

5월 24.18~31.46 psu(평균 30.19 psu), 8월 13.08~30.95 psu(평균 27.78 psu), 11월에 30.19~31.84 psu(평균 31.31 psu)의 범위였다. 시기별 염분의 평균은 4월에 가장 높았으며, 11월에는 4월의 농도에

근접한 값을 나타내면서 정점간의 차이(표준편차)가 가장 적었다. 하지만 8월에는 염분의 평균이 다른 시기보다 가장 낮고 표준편차는 가장 크게 나타났다(Fig. 2). 모든 조사시기마다 정점 1에서

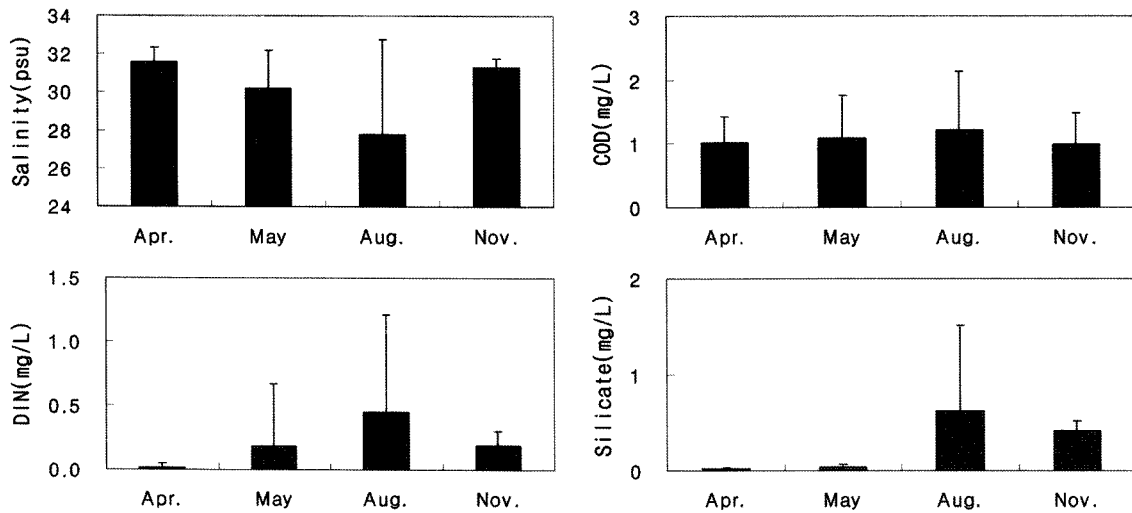


Fig. 2. Seasonal average(bar) and standard deviation(line) values of water quality parameters in the Saemangeum area.

가장 낮은 염분을 나타내었는데 이는 만경강 하구에 위치하여 다른 정점보다 담수의 영향권에 근접해 있기 때문이다. 5월과 8월에 정점 1과 3은 내측의 방조제 주변 또는 외측해역에 비해 낮은 염분을 나타내었는데 부안관측소 기준으로 380.5 mm의 월별 강우량을 나타내면서(<http://www.kma.go.kr>) 하천수 유출량을 지시할 수 있는 월별 평균 수위가 다른 시기보다 2.6~5.4배 증가한 8월에(<http://www.yeongsanriver.go.kr>) 정점 1에서는 13.08 psu로 전체 조사시기 중 가장 낮은 염분을 나타내었다. 8월에는 방조제 내측의 다른 정점도 30 psu 이하였고, 외측도 금강 하구와 인접한 정점 29에서 26.40 psu로 다소 낮은 염분을 나타내었다. 새만금 방조제 외측 해역을 포함하는 전주포연안 해양환경측정망 자료에서도 하계에 금강 하구에서 저염분을 나타내었다(<http://www.nfrdi.re.kr>). 한편 하계인 8월, 정점 1, 2를 제외하면 방조제 내·외측 해역은 염분의 차이가 크지 않았다. 이는 유역내의 담수 유출 영향이 제한적이며, 방조제 공사가 진행 중인 상태의 개방 구간으로 해수 교환이 원활하기 때문이라 생각된다.

COD는 4월 0.54~2.01 mg/L(평균 1.02 mg/L), 5월 0.37~3.03 mg/L(평균 1.09 mg/L), 8월 0.12~3.43 mg/L(평균 1.21 mg/L), 11월 0.51~2.07 mg/L(평균 0.99 mg/L)의 범위였다. 평균 농도로는 8월에 가장 높고 그 외의 시기에는 비슷한 평균 농도를 보였으며, 표준편차 역시 8월에 가장 크게 나타났다(Fig. 2). 조사시기마다 염분이 낮게 나타난 정점 1은 가장 높은 COD를 나타내었는데 강우량이 가장 많은 8월에 가장 높은 3.43 mg/L, 5월에도 3.03 mg/L을 보였으나 그 외의 시기에는 약 2 mg/L로 다소 낮았다. 정점 1을 제외한 경우 내, 외측 모두 대부분 1 mg/L 내외의 농도를 나타내었으며, 11월의 경우 외측 해역이 내측보다 뚜렷하게 낮은 농도를 나타내었다(Table 2). COD는 저염분에서 높고 고염분에서 낮아서 육상 기원 오염물질의 영향을 반영하고 있으며, 이는 염분과 높은 상관성으로 잘 나타나고 있다(Table 3). 그러나 4월의 상관성은 정점 1의 농도에 지배되어 있으며, 고염분 정점만을 보면

다소 산란이 되었고, 그 외의 시기는 전체적으로 고른 분포를 나타내었다.

용존 질산염, 아질산염, 암모늄염의 합을 의미하는 용존무기질소(DIN)은 4월 0.001~0.111 mg/L(평균 0.017 mg/L), 5월 0.006~1.707 mg/L(평균 0.185 mg/L), 8월 0.013~2.638 mg/L(평균 0.453 mg/L), 11월 0.091~0.499 mg/L(평균 0.192 mg/L)의 농도 범위였다. 각 시기별 평균 농도는 4월의 경우 가장 낮았는데 그 농도는 5월과 11월의 약 1/10, 8월의 1/26 정도였고, 강우에 의한 담수 유출량이 많은 8월에는 가장 높은 농도를 나타내었다. 표준편차는 염분의 변화가 가장 심한 8월에 가장 크게 나타났다(Fig. 2). 위에서 살펴 본 수질 항목과 같이 DIN은 만경강 하구의 정점 1에서 조사시기마다 가장 높은 농도를 나타내었다. 전체적으로 보면 8월에는 내측 해역은 높은 농도이나 외측은 농도가 매우 낮았으며, 다른 시기에는 정도 차이가 있으나 내측이 외측 해역보다 다소 높았다. 11월에는 내외측간의 농도 차이가 크지 않지만 외측 해역은 질산염의 높은 농도로 인하여 다른 조사 시기보다 높은 DIN 농도를 보였다(Table 2). Fig. 3에는 염분과 영양염 간의 상관성을 나타내었다. 각 시기의 DIN 농도는 염분에 대하여 높은 음의 상관성을 나타내었는데 11월의 경우 비록 좁은 염분 범위이지만 DIN은 염분과 높은 음의 상관성( $R=-0.964$ )을 보였으며, 염분의 변화가 크게 나타난 8월에도 양호한 상관성을 나타내었다. 4월에 나타난 높은 상관성( $R=-0.984$ )은 정점 1에 의한 기여가 크며, 이 정점을 제외하면  $R=-0.448$ 로 낮아지기도 하였다. 하지만 전체적으로 보면 염분에 의하여 DIN 농도가 지배되는 경향이 강하여 육상 기원에 의한 유입이 크게 나타나고 있음을 지시하고 있다. 이러한 경향은 담수 유출량이 많고 대조차 환경을 가진 한강 하구 및 경기만 주변 연안에서 뚜렷하였으며(임 등[2007a]; 한국해양연구원 [2007]), 그리고 주변에 소하천과 도시 및 산업지역이 발달하고 있는 반폐쇄성 만인 마산만에 대한 조사(임 등[2007b])에서도 나타난 바 있다.

Table 3. Correlation coefficients(R) among the water quality parameters

April											
	Salinity	COD	DIN	Silicate	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg
Salinity	1.000										
COD	-0.800	1.000									
DIN	-0.987	0.810	1.000								
Silicate	-0.303	0.249	0.218	1.000							
Co	-0.914	0.849	0.886	0.514	1.000						
Ni	-0.967	0.778	0.961	0.307	0.882	1.000					
Cu	-0.841	0.585	0.822	0.422	0.780	0.927	1.000				
Zn	-0.857	0.527	0.846	0.079	0.663	0.790	0.735	1.000			
Cd	0.166	-0.179	-0.131	0.202	-0.098	0.066	0.328	-0.294	1.000		
Pb	-0.863	0.745	0.833	0.514	0.925	0.803	0.732	0.725	-0.163	1.000	
Hg	-0.436	0.788	0.459	-0.069	0.441	0.415	0.222	0.297	-0.246	0.281	1.000
May											
	Salinity	COD	DIN	Silicate	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg
Salinity	1.000										
COD	-0.948	1.000									
DIN	-0.966	0.947	1.000								
Silicate	-0.949	0.965	0.981	1.000							
Co	-0.374	0.371	0.225	0.332	1.000						
Ni	-0.889	0.897	0.937	0.941	0.368	1.000					
Cu	-0.727	0.708	0.728	0.759	0.549	0.854	1.000				
Zn	-0.597	0.657	0.640	0.691	0.364	0.777	0.614	1.000			
Cd	0.594	-0.593	-0.569	-0.513	-0.198	-0.620	-0.330	-0.584	1.000		
Pb	-0.203	0.306	0.289	0.329	0.251	0.378	0.289	0.448	-0.126	1.000	
Hg	-0.915	0.915	0.981	0.975	0.212	0.960	0.737	0.696	-0.565	0.339	1.000
August											
	Salinity	COD	DIN	Silicate	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg
Salinity	1.000										
COD	-0.775	1.000									
DIN	-0.942	0.657	1.000								
Silicate	-0.943	0.693	0.993	1.000							
Co	-0.531	0.184	0.669	0.656	1.000						
Ni	-0.863	0.578	0.942	0.943	0.803	1.000					
Cu	-0.778	0.540	0.688	0.694	0.690	0.756	1.000				
Zn	-0.820	0.532	0.884	0.865	0.762	0.933	0.654	1.000			
Cd	0.496	-0.629	-0.252	-0.269	0.398	-0.048	-0.146	-0.085	1.000		
Pb	-0.324	-0.085	0.413	0.399	0.820	0.640	0.571	0.602	0.421	1.000	
Hg	-0.920	0.668	0.979	0.965	0.661	0.903	0.642	0.896	-0.270	0.339	1.000
November											
	Salinity	COD	DIN	Silicate	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg
Salinity	1.000										
COD	-0.891	1.000									
DIN	-0.964	0.838	1.000								
Silicate	-0.940	0.832	0.924	1.000							
Co	-0.109	-0.006	0.178	0.271	1.000						
Ni	-0.842	0.753	0.930	0.798	0.322	1.000					
Cu	-0.096	0.203	-0.004	0.078	0.278	0.123	1.000				
Zn	0.257	-0.258	-0.106	-0.178	0.625	0.111	-0.008	1.000			
Cd	0.154	-0.241	-0.143	-0.257	-0.405	-0.050	0.117	-0.488	1.000		
Pb	0.371	-0.359	-0.257	-0.256	0.765	-0.037	0.088	0.924	-0.443	1.000	
Hg	-0.818	0.884	0.819	0.749	0.215	0.763	0.058	0.068	-0.515	-0.038	1.000

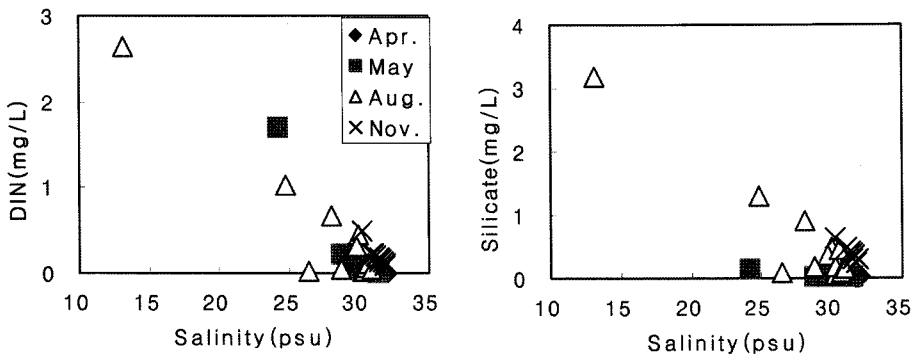


Fig. 3. Relationship between salinity and dissolved nutrients.

규산염 농도는 4월에 0.010~0.031 mg/L(평균 0.019 mg/L), 5월 0.015~0.141 mg/L(평균 0.036 mg/L), 8월 0.049~3.181 mg/L(평균 0.619 mg/L), 11월 0.256~0.644 mg/L(평균 0.409 mg/L)의 농도 범위를 보였다. 시기별 평균 농도는 4월과 5월의 경우 아주 낮은 농도를 나타내었지만 8월과 11월은 가장 낮은 농도를 나타낸 4월보다 각각 20, 30배 정도 높았다. 정점간의 표준편차는 8월에 가장 크게 나타났다(Fig. 2). 각 시기별 최대농도는 4월의 경우 비교적 낮은 0.031 mg/L를 보인 정점 4에서 관찰되었으나 그 외의

시기에는 정점 1에서 4월보다 매우 상승한 농도를 나타내었다. 5월의 경우 저염분의 영향을 받는 정점 1과 3을 제외한 정점들은 4월의 농도와 비슷하였고 내외측간의 차이도 크지 않았다. 강우량이 많았던 8월에는 만경강 하구의 정점 1을 비롯하여 방조제 내측의 정점들은 뚜렷하게 높은 농도를 보였으며, 외측 해역은 고군산군도 주변의 정점 22에서 높았으나 전반적으로 내측보다 현저히 낮은 농도를 나타내었는데 이는 외해수의 영향이 상대적으로 크게 작용함과 더불어 금강에 의한 규산염의 기여가 염분 변화에

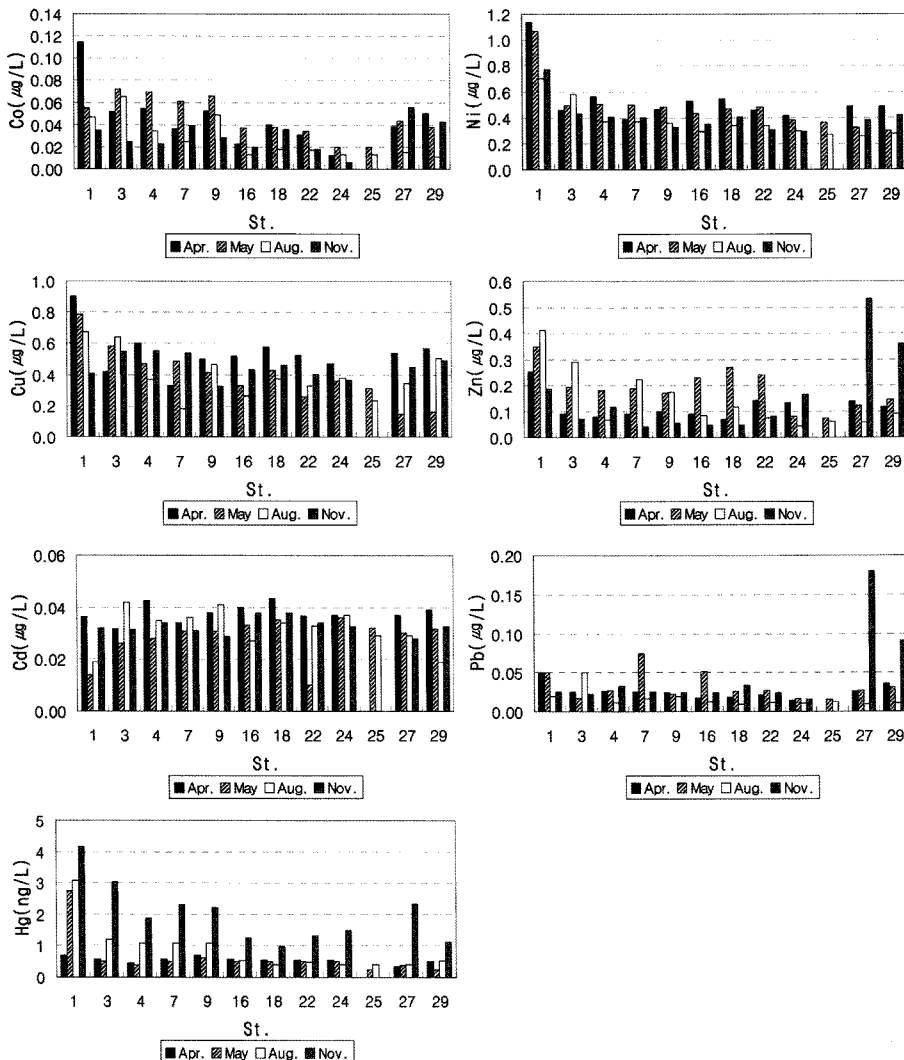


Fig. 4. Distribution of dissolved heavy metals and acid soluble Hg in surface waters of the Saemangeum area.

버금가는 영향을 미치지 못하였을 가능성에 기인한 것으로 보인다. 염분과 규산염의 상관관계는 8월과 11월의 경우 전체적으로 분포가 양호한 상관성을 보였으나 4월과 5월에는 저염분을 보인 정점 1의 자료 유무에 따라 상관계수는 큰 차이를 나타내었다(Fig. 3). 염분을 고려했을 때 고염분역의 영양염(DIN, Silicate) 분포는 4월과 5월이 8월과 11월보다 상대적으로 낮은 농도를 나타내었는데 이는 춘계에 육지로부터 상대적으로 공급이 제한되고 식물플랑크톤의 증식에 의한 소비 증가, 하계의 담수 유출에 의한 육지로부터 다량 공급, 그리고 추계에 유입량 및 수계에서의 소비 감소에 의한 결과로 판단된다.

### 3.2 중금속 분포

각 원소별 공간 분포를 보면 용존 Co의 경우는 4월에 0.012~0.115  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.046  $\mu\text{g/L}$ )의 범위로 분포하였다. 최저 농도는 고군산군도 서쪽의 정점 24에서 나타났으며, 가장 높은 농도는 만경강 하구에 위치한 정점 1에서 나타났는데 이 정점에서는 다른 정점들에 비해서 약 2 psu 이상 낮은 염분을 나타내었다. 이들 두 정점을 제외하면 농도의 분포 범위는 비교적 좁은 편이었으며, 방조제 내측보다는 외측에서 전반적으로 낮은 농도였다. 5월에는 0.020~0.072  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.046  $\mu\text{g/L}$ )로 평균 농도는 4월과 같으며, 농도 범위는 4월보다 좁았다. 정점 3에서 가장 높은 농도였으며, 정점 24와 25에서 가장 낮았는데, 방조제 내측은 0.05  $\mu\text{g/L}$  이상, 방조제 외측은 0.05  $\mu\text{g/L}$  이하로 구분되었다. 8월에는 0.011~0.065  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.027  $\mu\text{g/L}$ )로 5월과 마찬가지로 정점 3에서 가장 높은 농도를 나타내었으며, 북쪽 방조제 외측의 정점 29에서 가장 낮게 나타났다. 방조제 외측의 정점에서는 0.02  $\mu\text{g/L}$  이하로 전체 조사 시기 중에서 비교적 낮은 농도에 해당하였으며, 전 해역 평균 농도 역시 다른 시기보다 낮게 나타났다. 11월에는 0.006~0.056  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.030  $\mu\text{g/L}$ )이었는데, 정점 24에서의 농도는 11월 뿐 아니라 전체 조사시기 중에서 가장 낮았으며, 북쪽 방조제 외측에 위치한 정점 27과 29에서 다른 정점보다 높은 농도를 나타내었다.

용존 Ni은 4월에 0.39~1.14  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.54  $\mu\text{g/L}$ )의 분포 범위였는데, 최저 농도와 최고 농도는 각각 방조제 내측의 정점 9와 정점 1에서 나타났다. 이 시기에 정점 1에서 Co도 높게 나타난 바 있으며, 이 자료를 제외하면 0.5  $\mu\text{g/L}$  내외의 비교적 균일한 분포였다. 5월에는 0.30~1.06  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.48  $\mu\text{g/L}$ )의 범위로 분포하였는데, 정점 1에서 4월과 비슷한 수준으로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 외측의 북쪽 정점에서 낮은 농도를 보였는데 4월보다는 낮은 값이었다. 8월에는 0.26~0.70  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.037  $\mu\text{g/L}$ )로 앞선 2회의 조사와 유사한 농도 분포로 정점 1을 비롯한 방조제 내측에서 높았고, 방조제 외측에서는 낮았으며, 이 시기의 전체 평균 농도는 Co와 마찬가지로 다른 시기에 비해서 가장 낮았다. 11월에는 0.26~0.77  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.41  $\mu\text{g/L}$ )이었는데, 역시 정점 1에서 가장 높았지만 4월과 5월보다는 낮으며, 8월과 비슷한 수준이었다.

용존 Cu의 각 시기별 분포 범위는 4월에 0.33~0.90  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.54  $\mu\text{g/L}$ ), 5월에 0.14~0.79  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.39  $\mu\text{g/L}$ ), 8월에 0.18~0.68  $\mu\text{g/L}$

(평균 0.40  $\mu\text{g/L}$ ), 11월에 0.33~0.55  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.45  $\mu\text{g/L}$ )였다. 11월 조사를 제외한 모든 조사에서 가장 높은 농도는 각 시기마다 최저 염분을 나타낸 만경강 하구의 정점 1에서 나타났으며, 이는 육상 기원을 지시하고 있다. 정점들간의 염분 차이가 다른 시기에 비해 비교적 적은 11월 조사에서는 정점 4에서 가장 높게 나타났으며, 최저 농도는 5월의 경우 방조제 외측의 정점 27에서 나타났으나 그 외의 4월, 8월, 11월 조사에서는 모두 방조제 내측에 위치하며 내측의 다른 정점보다 외해수의 영향을 많이 받는 정점 7 또는 정점 9에서 나타났다. 각 시기의 평균 농도는 4월에 가장 높았으며, 5월과 8월은 비슷한 수준으로 낮았다. 최고 및 최저 농도가 방조제 내측에서 나타나기도 하지만 전반적으로 저염분을 나타내는 정점을 제외하면 방조제 내측과 외측의 농도 차이는 크지 않았으며, 5월의 경우에만 방조제 내측에 비해 외측에서 전체적으로 낮은 농도를 보였다.

용존 Zn의 각 시기별 분포 범위를 보면 4월에는 0.07~0.25  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.12  $\mu\text{g/L}$ ), 5월에는 0.07~0.35  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.19  $\mu\text{g/L}$ ), 8월에 0.04~0.41  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.14  $\mu\text{g/L}$ ), 11월에 0.04~0.53  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.15  $\mu\text{g/L}$ )였다. 가장 높은 농도는 11월을 제외하면 만경강 하구의 정점 1에서 나타났으며, 11월에는 Co의 경우와 같이 정점 27에서 가장 높았으며, 정점 29에서도 다소 높은 농도를 보였다. 8월의 경우에는 다른 시기에 비해 방조제 외측에서 내측보다 낮은 농도를 나타내는 것이 뚜렷하였으나 그 외의 조사에서는 농도 분포 형태가 서로 다르게 나타났다. 즉 4월에는 가장 높은 농도를 나타낸 정점 1을 제외하면 방조제 외측에서도 전반적으로 방조제 내측보다 높은 농도를 나타내는 경우가 많았고, 5월에는 방조제 외측의 남쪽 정점에서 높고 방조제 외측 해역의 북쪽 또는 서쪽에 위치한 정점들에서 낮은 농도를 나타내었다. 그러나 11월에는 북쪽 두 정점에서 높고 그 외의 정점에서는 비교적 낮은 농도 분포였다.

용존 Cd은 4월에 0.032~0.043  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.038  $\mu\text{g/L}$ )의 농도 범위였다. 가장 높은 농도는 각각 방조제 내측과 외측에 위치한 정점 4와 정점 18에서 나타났으나 전체적으로 정점간의 변화는 크지 않은 균일한 분포였다. 5월과 8월에는 각각 0.010~0.036  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.028  $\mu\text{g/L}$ ), 0.019~0.042  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.032  $\mu\text{g/L}$ )로 최저 농도는 각각 방조제 외측의 정점에서 나타났으나 다른 시기 및 다른 정점에 비해 염분이 낮은 만경강 하구의 정점 1에서도 비교적 낮은 농도를 나타내었다. 11월에는 0.028~0.038  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.033  $\mu\text{g/L}$ )의 범위로 4월과 같이 전체적으로 비교적 균일한 분포였다. 이와 같이 다른 중금속보다 변동이 크지 않고 담수 영향이 큰 하구에서 낮은 농도를 나타내는 것은 육상 기원의 기여가 크게 작용하지 않음을 지시한다.

용존 Pb는 4월 0.014~0.043  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.038  $\mu\text{g/L}$ ), 5월 0.015~0.075  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.032  $\mu\text{g/L}$ ), 8월 0.010~0.050  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.016  $\mu\text{g/L}$ ), 11월 0.015~0.179  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.045  $\mu\text{g/L}$ )의 범위였다. 4월 조사에서만 만경강 하구의 정점 1에서 가장 높은 농도를 나타내었으며, 5월과 11월에는 각각 방조제 내측의 정점 7과 방조제 외측의 정점 27에서 가장 높았다. 5월 조사에서는 정점 2에서 4월과 같은



농도로 가장 높았다. 4월과 8월에는 비교적 낮은 농도이며, 정점 간 차이가 크지 않았으나 5월과 11월에는 차이가 다소 컸는데 특히 11월에는 외측 해역의 금강 하구에 인접한 정점 27과 29에서 다른 시기에 비해 매우 높은 농도를 나타내어 조사기간 중 가장 높은 평균 농도를 나타내었다.

산 가용성 Hg는 4월에 0.35~0.70 ng/L(평균 0.55 ng/L), 5월에 0.25~2.75 ng/L(평균 0.64 ng/L), 8월에 0.40~3.07 ng/L(평균 0.89 ng/L), 11월에 0.99~4.16 ng/L(평균 2.01 ng/L)의 범위였으며, 모든 조사시기에 정점 1에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 가장 높은 농도를 나타낸 정점 1의 자료를 제외하면 4월과 5월에는 비교적 균일하게 분포하였으며, 8월과 11월에는 앞의 두 조사보다 다소 큰 변화폭을 보였다. 전체적으로 보면 방조제 내측이 외측보다 높은 Hg 농도를 나타내고 있었다. 특히 11월에는 모든 정점이 다른 시기보다 높은 농도를 나타내면서 만경강 하구에서 외해로 가면서 감소하는 분포하였는데 이는 만경강에 의한 오염과 더불어 시기별로 오염 부하에 있어 절대적인 농도의 차이가 크게 나타났을 가능성이 있다.

이상에서 살펴 본 분포 양상을 고려하면 Cd를 제외한 경우 방조제 내측의 주요 하천으로부터 유입이 지배적인 것으로 판단된다. 한편 11월에는 특히 Co, Zn, Pb의 경우 방조제 외측의 북부

에 위치한 정점 27과 29에서 일시적으로 높은 농도를 나타내었는데 이것은 금강 하구에 위치한 항구 및 산업 시설에 의한 영향의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

한편 하구를 포함한 해양 환경에서 물질의 분포 및 거동에 염분은 중요한 물리, 생지화학적 인자이다. 담수와 해수가 혼합되는 하구 지역은 생지화학적인 작용이 활발한 곳으로 육상 기인 물질의 해양 유입 억제 기능을 하는 등 그 중요성이 크다(Schubel and Kennedy[1984]). 중금속 역시 이러한 지역에서 급격한 변화를 보이며, 염분과 밀접한 관계를 갖는데(Sharp *et al.*[1984]; Byrd *et al.*[1990]), 이것은 염분 변화가 중금속의 흡·탈착 및 화학종의 분포에 크게 영향을 미치기 때문이다(Millero *et al.*[1987]).

Fig. 5에는 담수 및 육상 기원 물질의 일부 항목인 염분, 용존 무기질소(DIN)와 규산염(Silicate)과 일부 중금속 간의 관계를 나타내었다. 각 조사 시기에 따라 분포의 변화가 크지만 대부분의 경우 염분이 상승함에 따라 중금속 농도는 낮아지는 경향을 나타내었으며, 특히 Ni은 다른 중금속에 비해서 각 시기별로 염분과 높은 음의 상관성( $R=-0.967\sim-0.842$ )을 나타내었다(Table 3). 그러나 Cd의 경우는 4, 8, 11월에는 염분에 대하여 약한 정의 상관성을, 5월에는 다소 높은 상관성을 보였다( $R=0.594$ ). 일반적인 환경에서 Cd은 용존 형태의 농도가 담수에서 낮고 해수에서 오히려

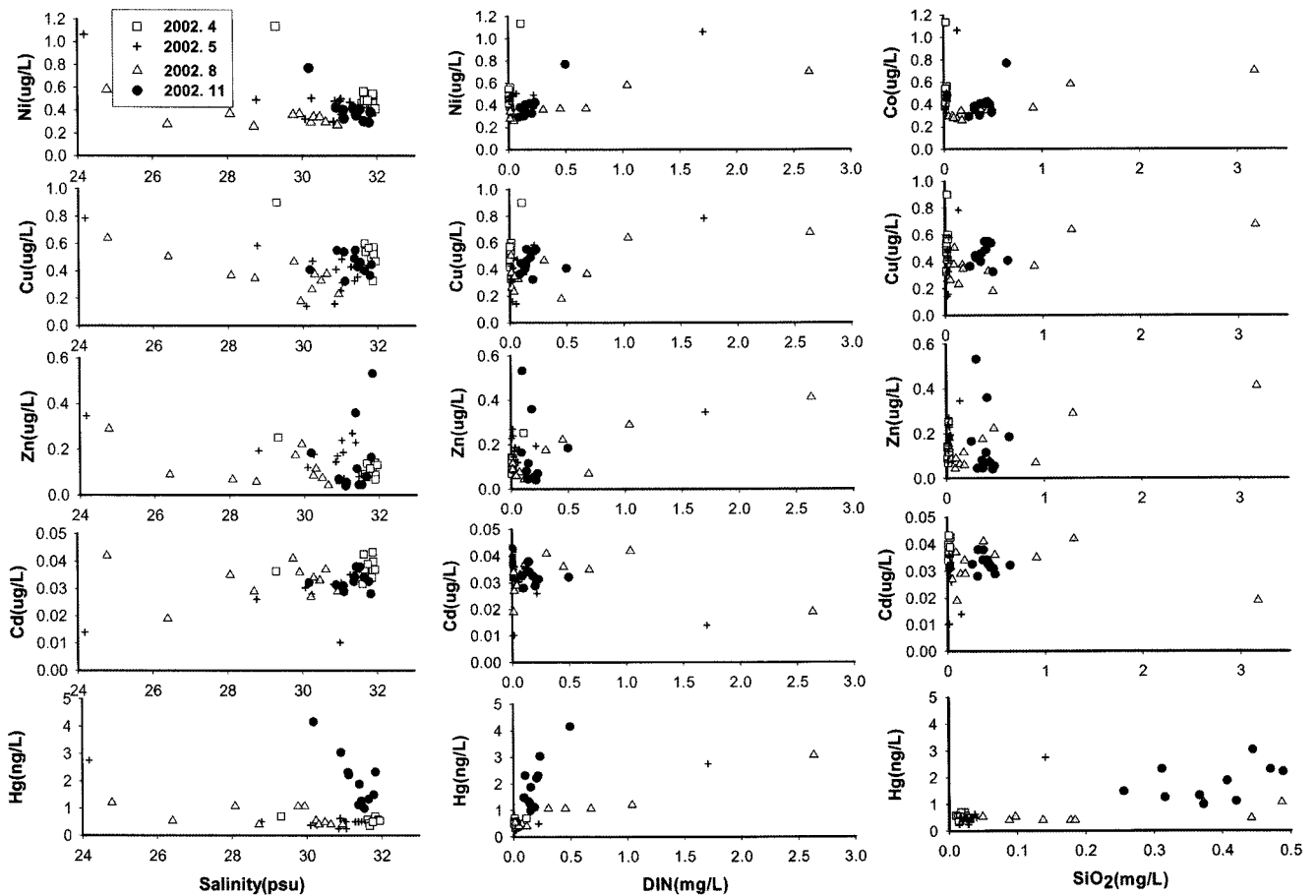


Fig. 5. Relationships between general water quality parameters (Salinity, DIN, Silicate) and heavy metals.

**Table 4.** Comparison of dissolved heavy metal concentrations of surface waters( $\mu\text{g/L}$ )

Region	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Source
Geum River estuary	-	-	0.84~1.52	3.35~13.4	0.009~0.032	0.025~0.365	KORDI[1993]
Saemangeum	0.032~0.188	0.32~1.99	0.50~1.93	0.10~1.89	0.004~0.026	0.10~0.177	KORDI[1999]
Lena River estuary	-	0.23~0.49	0.36~0.75	0.25~0.66	0.002~0.023	0.002~0.031	Martin <i>et al.</i> [1993]
Bristol Channel & Severn estuary	-	-	1.7~4.7	-	0.011~0.140	0.020~10.0	Harper[1991]
Saemangeum	0.006~0.115	0.26~1.14	0.14~0.90	0.04~0.53	0.010~0.043	0.010~0.179	This Study

높는데 이것은 Cd이 담수와 해수의 혼합 지역에서 염분의 영향으로 부유물질로부터 탈착 또는 재생산되어 용존 Cd-chloro 화합물을 형성하기 때문이다(Edmond *et al.*[1985]; Martin *et al.*[1993]; 윤과 김[1998]). 이상과 같은 염분에 대한 각 용존 중금속과의 상관성은 1998년 새만금 방조제 내측에 대한 조사에서도 이미 나타난 바 있으며, 본 연구와 유사한 결과였다(한국해양연구소[1999]). 그러나 염분 외에도 중금속과 결합할 수 있는 용존 유기물의 양, 외부 유입, 수괴 내의 생지화학적 작용에 의해서 중금속의 화학종 및 분포는 영향을 받는다(Martin *et al.*[1993]; Windom *et al.*[1991b]).

그러나 본 연구에서는 주요 수질 인자로 조사된 COD 및 용존 영양염류에 한정하여 상관성을 살펴보았다. 시기에 따라 상관성의 변화가 있으나 COD에 대하여서는 Cd의 경우 모든 시기에 음의 상관성을 보였는데 5월과 8월에 다소 양호하였다(Table 3). Pb는 8월과 11월, Zn은 11월에 음의 상관성을 보였으나 모두 낮은 상관성을 보였다(Table 3). Ni, Cu, Zn, Hg는 각 시기별로 0.5이상의 상관계수(R)를 나타내는 경우가 많았지만 만경강 하구의 정점에 의하여 편향된 결과를 보였으며, 이를 제외하면 전체적으로 분산이 되어 있었다. 용존무기질소(DIN)와 규산염과 각 중금속과의 상관관계에서는 11월을 제외하면 Cd 이외의 모든 금속들이 비교적 양호한 양의 상관성을 가졌으며, Cd은 모든 시기에 걸쳐 음의 상관성을 나타내었다. 그리고 11월에는 Ni과 Hg는 다른 중금속에 비해 높은 상관관계를 보였다( $R=0.749-0.930$ ). 이와 같이 중금속이 영양염과의 관계에서 양의 상관성을 갖는 것은 담수 영향이 지배적으로 나타나는 환경을 지님으로서 육상 기원 오염에 기인하기 때문이며, 이는 염분과의 분포가 뒷받침하고 있다.

Table 4에는 본 연구 지역 및 주변 지역의 자료, 그리고 외국의 하구 지역 용존 중금속의 농도 범위를 나타내었다. 각 조사 자료는 시기 뿐 아니라 염분의 차이가 존재하므로 단순한 농도 비교로는 한계가 있을 것이며, 참고로 과거 조사 자료의 염분은 금강(1993년 5월)은 15.56~26.80 psu, 새만금(1998년 7월)은 6.79~28.10 psu이였으며, Lena강 하구(1989년 9월)의 경우 0.02~27.78 psu, Bristol Channel(1987년 10월)은 약 22~35.3 psu의 범위로 추정되었다. 한편 새만금 주변 해역에 대한 수층의 중금속에 있어서 본 연구와 비교 가능한 수준으로 발표된 자료는 극히 제한되어 있으며, 한국해양연구소[1999]의 자료 역시 1회 실시된 조사 결과이므로 본 조사와 정량적인 비교에는 한계가 있을 것이다. 또한 금강 하구 자료(한국해양연구소[1993])는 조사 지역이 다르고 1회 조사 자료이기 때문에 본 조사 자료와 직접적인 비교를 하기 어렵지만 새만

금 외측 북부 해역의 유입원에 대한 기초적인 자료가 될 수 있을 것이다. 본 조사 결과는 Cd과 Pb의 경우 과거 새만금 해역의 중금속 농도와 비슷하거나 약간 높은 편이지만, Co, Ni, Cu, Zn는 낮았다. 금강 하구의 자료 가운데 Cd은 본 조사인 새만금 해역의 자료들과 대체로 비슷한 농도 범위를 나타내었다. 그러나 Cu, Zn, Pb는 최저 및 최대 농도 모두 본 조사보다 높은 값을 나타내었는데, 특히 금강 하구의 Zn는 본 조사에 비해서 최저농도는 83배, 최대 농도는 25배 높게 나타났다. 이는 만경강 하구를 포함하는 본 조사 지역보다 금강 하구가 도시 및 항구, 산업 시설 등의 영향을 받고 있기 때문이다. 본 조사 자료를 비교적 자연적인 유역 환경을 가지며 북극해로 유입하는 Lena강 하구의 중금속 농도와 비교하면 본 조사의 각 원소별 최저 농도는 Ni은 비슷하고, Cu와 Zn는 높았으며, 최고 농도를 비교하면 Zn을 제외한 중금속들은 Lena강 하구보다 높는데, Pb의 경우 약 6배까지 차이가 있었다. 영국의 Severn 하구의 유역에는 도시와 산업시설이 발달되어 있으며(Apte *et al.*[1990]), 이 하구와 Bristol Channel의 자료와 비교하면 Cd의 최저 농도만 비슷할 뿐 그 외 중금속의 최저 및 최대 농도는 본 조사가 훨씬 낮았다.

#### 4. 결 론

2002년에 총 4회에 걸쳐 새만금 주변해역 표층수에 대하여 중금속과 주요 수질 인자인 염분, COD, 용존영양염류(DIN, Silicate)의 조사를 실시하였다. 염분은 만경강 하구 정점에서 낮았으며, 강수량이 많은 8월엔 전체 정점이 다른 시기보다 낮은 염분을 보였는데 이 시기에 내측해역은 30psu 이하를 나타내었다. 4, 5, 11월에 하구 정점들(Sts. 1, 3)을 제외하면 내외측 해역은 염분의 차이가 적었으며, 이것은 방조제 개방 구간으로 해수의 교환이 원활하기 때문이다. 강우에 의한 다량의 담수 영향으로 COD, DIN, Silicate는 8월에 가장 높은 평균 농도를 보였으며, 높은 표준편차를 나타내었다. 4월과 5월에는 낮은 농도를 나타내었으며, 하구의 정점을 제외하면 내, 외측간의 농도 차이는 크지 않았다. 각 항목들은 시기별로 염분에 대하여 높은 음의 상관성을 나타내어 담수 기원의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다. 용존 중금속은 조사 시기 및 정점에 따라서 다양한 변화를 나타내었는데 Cd을 제외하면 만경강 하구 및 방조제 내측 정점에서 높고, 방조제 외측에서 낮은 경향이어서 방조제 내측의 하천에 의한 영향이 작용하고 있었다. Cd의 경우 시기별 변동이 다른 중금속보다 적었는데 이는 육상 기원에 의한 영향이 상대적으로 크지 않기 때문이

다. Cd는 5월에 염분과 높은 정의 상관성을 보였으며, 이것은 염분 증가에 의한 이온강도 상승으로 부유물질로부터 Cd이 탈착되어 용존 Cd-chloro 화합물을 형성하기 때문이다. 시기별로 정도의 차이는 있으나 Cd를 제외한 중금속들은 염분에 대하여 음의 상관성, 영양염에 대하여 양의 상관성을 나타내는 빈도가 높았으며, 이것은 주변의 육상 유입원에 의한 영향을 많이 받은 결과이다. 그리고 본 연구의 Co, Ni, Cu, Zn는 이 해역의 과거 자료보다 낮았으며, Cd를 제외한 중금속은 금강 하구보다 낮았다. 외국의 자료와 비교하면 자연적인 환경을 가진 Lena강 하구보다 높았으며, Cu와 Pb는 영국의 Bristol Channel보다는 아주 낮은 수준이었다.

후 기

본 연구는 해양수산부와 국토해양부의 “새만금해양환경보전대책을 위한 조사연구(PM13903, PM51002)”사업의 일환으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사해 주시고 좋은 의견을 주신 심사자에게 감사드립니다.

참고문헌

[1] 김경태, 조성록, 이수형, 강성형, 이진영, 1998, “금 포집 장치와 냉증기 원자흡수분광법을 이용한 수은 전처리 시스템의 자동화”, 해양연구, 20, 251-260.  
 [2] 김경태, 이수형, 김은수, 조성록, 박칭길, 2002, “시화호와 주변 하천 표층수중의 중금속 거동 특성”, 한국해양환경공학회지, 5(1), 51-67.  
 [3] 김종구, 유선재, 조은일, 안옥성, 2003, “새만금 갯벌의 중금속 분포 특성”, 한국수산학회지, 36(1), 55-61.  
 [4] 농림부농어촌진흥공사, 1997, 새만금지구 담수호 수질보전 대책수립 조사연구.  
 [5] 농어촌진흥공사, 1996, 한국의 간척, 405 p.  
 [6] 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997, “시화호 산하-환원 환경하의 용존 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구”, 한국해양학회지, 2(2), 53-68.  
 [7] 박준건, 김은수, 김경태, 조성록, 박용철, 2006, “만경강 하구역의 유기탄소 거동 및 분포”, 한국해양환경공학회지, 9(3), 131-140.  
 [8] 양재삼, 정용훈, 지광희, 김현수, 최정훈, 김원장, 2008, “새만금 방조제 체질 이후 초기의 수질변화에 관한 연구”, 한국해양환경공학회지, 11(4), 199-213.  
 [9] 윤이용, 김경태, 1998, “강릉 남대천 수계의 중금속 분포 및 거동특성 연구”, 대한환경공학회지, 20(8), 1039-1049.  
 [10] 이동수, 김경태, 홍기훈, 이수형, 1989, “한강 본류와 지류의 중금속 농도분포”, 한국수질보전학회지, 5(1), 47-56.  
 [11] 이동호, 홍상희, 심원준, 박준건, 김은수, 2006, “새만금 해양 환경에서 해수 중 유기인계 농약의 시공간적 분포”, Ocean & Polar Res., 28, 331-337.  
 [12] 이창희, 이병국, 유혜진, 2001, 하구-석호 육해전이수역 통합 환경관리방안 연구. 한국환경정책평가연구원 보고서(KE/2001),

349 p.  
 [13] 임동일, 노경찬, 장풍국, 강선미, 정희수, 정래홍, 이원찬, 2007a, “한국 서해 경기만 연안역에서 수질환경의 시-공간적 변화 특성과 조절 요인”, Ocean and Polar Res., 29, 135-153.  
 [14] 임동일, 김영옥, 강미란, 장풍국, 신경순, 장만, 2007b, “한국 남해 마산만에서 수질환경의 계절적 변동과 기초생산 제한인자”, Ocean & Polar Res., 29, 349-366.  
 [15] 정병호, 1998, 간척개발의 효과, 농공기술, 598 p.  
 [16] 조영길, 류상욱, 구영경, 김주용, 2001, “새만금 조간대 표층 퇴적물의 성분원소 함량과 지화학적 특성”, 한국해양학회지, 6(1), 27-34.  
 [17] 한국해양연구소, 1993, 황해의 해양오염 조사 및 대책 연구, 136 p.  
 [18] 한국해양연구소, 1997, 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구, 169 p.  
 [19] 한국해양연구소, 1999, 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(3차년도), 363 p.  
 [20] 한국해양연구원, 2007, 수도권매립지의 침출처리수 방류에 따른 어업피해 감정, 1269 p.  
 [21] 해양수산부, 2005, 해양환경공정시험방법, 400 p.  
 [22] 허성희, 오임상, 1997, “인공호수 시화호 주변해역의 생태계 연구: 서문”, 한국해양학회지, 2(2), 49-52.  
 [23] 홍상희, 심원준, 이동호, 임운혁, 오재룡, 김은수, 2006, “새만금 해양환경에서의 잔류성 유기염소계 농약의 분포 및 특성”, Ocean & Polar Res., 28, 317-329.  
 [24] Apte, S.C., Gardner, M.J., Gunn, A.M. Ravenscroft, J.E. and Vale, J., 1990, “Trace metals in the Severn estuary: a Reappraisal”, Mar. Pollut. Bull., 21, 393-396.  
 [25] Boyle, E.A., Husted, S.S. and Jones, S.P., 1981, “On the distribution of copper, nickel, and cadmium in the surface waters of the North Atlantic and North Pacific Ocean”, J. Geophys. Res., 86, 8048-8066.  
 [26] Bruland, K.W., 1983, Trace Elements in Seawater, p. 157-220, In: Chemical Oceanography(8), ed. by Riley, J.P. and Chester, R., Academic Press, New York.  
 [27] Burton, J.D. and Statham, P.J., 1990, Trace metals in seawater. p. 5-25, In: Heavy metals in the marine environment, ed. by Furness, R.W. and Rainbow, P.S., CRC Press, Boca Raton, U.S.A.  
 [28] Byrd, J.T., Lee, K.W., Lee, D.S., Smith, R.G. and Windom, H.L., 1990, “The behavior of trace metals in the Geum Estuary, Korea”, Estuaries, 13(1), 8-13.  
 [29] Chowhury, A.T., 1982, Polder development in Bangladesh, Paper II: The land reclamation project, p. 13-123, In: Polders of the world. Vol 1: Polder projects land and water management aspects, ed. by International Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands.  
 [30] Cook, P.D., 1982, The reclamation of land on the eastern coast of England, p. 207-216, In: Polders of the world. Vol 1: Polder projects land and water management aspects, ed. by International Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands.

- [31] Danielsson, L.G., Magnusson, B. and Westerlund, S., 1978, "An improved metal extraction procedure for the determination of trace metals in sea water by atomic absorption spectrometry with electro-thermal atomization", *Anal. Chim. Acta*, 98, 47-57.
- [32] Desplanque, C., 1982, Dykelands(polders) along the Bay of Fundy, Canada, p. 5-14, In : Polders of the world. Vol 1: Polder projects land and water management aspects, ed. by International Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands.
- [33] Edmond, J.M., Spivack, A., Grant, B.C., Hu, M.H., Chen, Z.X., Chen, S. and Zong, X.Z., 1985, "Chemical dynamics of the Changjiang estuary", *Cont. Shelf Res.*, 4, 17-36.
- [34] Förstner, U. and Wittmann, G.T.W., 1981, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, New York, 486 p.
- [35] Harper, D.J., 1991, "The distribution of dissolved cadmium, lead and copper in the Bristol Channel and the outer Severn estuary", *Mar. Chem.*, 33, 131-143.
- [36] Hyun, S., Kim, E.S. and Paeng, W.H., 2004, "Heavy metals contamination and spatial differences in redox condition of the artificial Shihwa Lake, Korea", *J. Environ. Sci.*, 13, 479-488.
- [37] Li, D., Kim, M.S., Oh, J.R. and Park, J.M., 2004, "Distribution characteristics of nonylphenols in the artificial Lake Shihwa, and surrounding creeks in Korea", *Chemosphere*, 56, 783-790.
- [38] Li, D., Dong, M., Shim, W.J., Hong, S.H., Oh, J.R., Yim, U.H., Jeung, J.H., Kannan, N., Kim, E.S. and Cho, S.R., 2005, "Seasonal and spatial distribution of nonylphenol and IBP in Saemangeum Bay, Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 51, 966-974.
- [39] Martin, J.M. and Whitfield, M., 1983, The significance of the river input of chemical elements to the ocean, p. 265-296, In: *Trace metals in sea water*, ed. by Wong, C.S., Boyle, E., Bruland, K.W., Burton, J.D., and Goldberg, E.D., Plenum Press, New York and London.
- [40] Martin, J.M., Guan, D.M., Elbaz-Poulichet, F., Thomas, A.J. and Gordeev, V.V., 1993, "Preliminary assessment of the distribution of some trace elements(As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn) in a pristine aquatic environment: the Lena River estuary(Russia)", *Mar. Chem.*, 43, 185-199.
- [41] Millero, F.J., Izaguirrel, M. and Sharma, V.K., 1987, "The effect of ionic interaction on the oxidation in natural waters\*", *Mar. Chem.*, 22, 179-191.
- [42] Salomons, W. and Förstner, U., 1984, *Metals in the Hydrocycle*, Springer-Verlag, Berlin, 349 p.
- [43] Schindler, P.W., 1991, The regulation of heavy metal concentrations in natural aquatic systems, p. 94-159, In: *Heavy Metals in the Environment*, ed. by Vernet, J.P., Elsevier Science Publishers, New York.
- [44] Schubel, J.R. and Kennedy, V.C., 1984, The estuary as a filter: An introduction. p. 1-11, In: *The estuary as a filter*, ed. by Kennedy, V.C., Academic Press, Orland.
- [45] Sharp, J.H., Pennock, J.R., Church, T.M., Tramontano, J.M. and Cifuentes, L.A., 1984, The estuarine interaction of nutrients, organics, and metals: A case study in the Delaware estuary, p. 241-258. In: *The estuary as a filter*, ed. by Kennedy, V.C., Academic Press, Orland.
- [46] Windom, H.L., Byrd, J.T., Smith, R.G., and Huan, F., 1991a, "Inadequacy of NASQAN data for assessing metal trends in the Nation's Rivers", *Environ. Sci. Technol.*, 25(6), 1137-1142.
- [47] Windom, H., Byrd, J., Smith, R.G., Hungspreugs, M., Dharmvanij, S., Thumtrkul, W. and Yeats, P., 1991b, "Trace metals-nutrient relationships in estuaries", *Mar. Chem.*, 32, 177-194.
- [48] <http://www.isaemangeum.co.kr>
- [49] <http://www.kma.go.kr>
- [50] <http://www.nfrdi.re.kr>
- [51] <http://www.yeongsanriver.go.kr>

2009년 1월 22일 원고접수

2009년 2월 16일 심사완료

2009년 2월 18일 수정본 채택