

동해안 석호 퇴적물의 간극수에 함유된 금속류의 화학종 분포

김동진[†] · 김민철* · 유진열* · 권상용** · 서용찬* · 양재의*** · 오승륜 · 옥용식***
환경부 · *상지대학교 환경공학과 · **강원대학교 환경학과 · ***강원대학교 자원생물환경학과

(2008년 3월 31일 접수, 2008년 6월 30일 채택)

Metal Speciation in the Lagoon Sediment Interstitial Water from the Northeast Coast, Korea

Dongjin Kim[†] · Minchul Kim* · Jinyull Yoo* · Sangyong Kwon** · Yongchan Seo* ·
Jae E. Yang*** · Seung-yoon Oh · Yong Sik Ok***

Ministry of Environment, Republic of Korea · *Department of Environmental Technology, Sangji University
**Department of Environmental Science, Kangwon National University
***Division of Biological Environment, Kangwon National University

ABSTRACT : Sediment and interstitial water samples from ten lagoons in the Northeastern coastal part of South Korea were analyzed to obtain the concentrations of metals and inorganic ligand. These data, coupled with pH and ionic strength, were used to compute the aqueous speciation of the metals in the interstitial water using the MINTEQA2 equilibrium program. The K and Na were almost entirely present as the free aqua ions, but Co, Cd, Ni, Pb and Zn were existed as various metal-ligand complexes. Metals such as Al, As, and Cr formed 3~4 metal-ligand complexes. In the interstitial water with high chloride concentrations, almost all of the metals were dominated by free aqua ions. Metals of Cd, Co, Ni, Pb and Zn were bound as chloride-metal complexes of the type $M^{x+} + xCl^-$, and Fe, Mn and Mg were dominated by sulfate equilibria ($M^{2+} + SO_4^{2-}$). Hg(II) was speciated as $HgCl_2(aq)$, $HgCl_3^-$ and $HgCl_4^{2-}$. However, in the interstitial water with low chloride concentrations, Hg(II) and Cd(II) were existed as chloride-metal complexes, metals of Cu, Mg, Mn, Ni, Pb and Zn were dominated by sulfate equilibria, and the speciation of Fe(II) was bound as $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)_3(aq)$. However, Al, As and Cr were dominated by hydroxy-metal and oxide-metal species in nearly all of the lagoons.

Key Words : Lagoon, Sediment, Interstitial Water, Metal, Speciation

요약 : 호소나 하천바닥의 퇴적물에는 많은 양의 미량 금속이 함유되어 있으며, 퇴적물과 간극수 사이에는 미량 금속들의 교환이 일어난다. 간극수로 이동된 미량 금속들은 쉽게 수환경으로 확산되어 수생태계에 독성을 유발한다. 그러나 이러한 미량 금속들은 존재형태에 따라 수생물에 미치는 독성이 다르다. 따라서 본 연구에서는 경포호 등 10개의 동해안 석호에 대한 퇴적물의 간극수를 분석하고 화학종 분포 예측 프로그램(MINTEQA2)을 이용하여 미량 금속들의 존재형태를 예측하여 수환경에서의 독성 여부를 확인하였다. 퇴적물에서 추출한 간극수의 미량 금속 분석결과를 예측 결과, K와 Na는 자유이온형태로 존재하고 있었으며, Al, As 및 Cr 등은 자유이온 형태를 비롯한 3~4개의 착물을 형성하였고 Ca, Co, Cd, Ni, Pb 및 Zn 등은 10개 이상의 다양한 착물을 형성하였다. 염분도가 높은 청초호 등(Group I호소)은 Cd, Co, Ni, Pb, Hg 및 Zn이 주로 염화 착물을 형성하였으며, Fe, Mn 및 Mg는 황산화 착물을 형성하였다. 그러나 염분농도가 낮은 천진호 등(Group II호소)은 Hg와 Cd가 염화 착물을 형성하였으며, Cu, Mg, Mn, Ni, Pb 및 Zn는 황산화 착물을 형성하였다. Fe는 $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)_3(aq)$ 등의 수산기 착물을 형성하였다. 또한 염분농도와 상관없이 Al, As 및 Cr은 전체 호소에서 수산기 및 산화형태의 착물을 형성하였다. 대부분 호소의 간극수에 존재하는 미량 금속들은 자유이온(M^{x+})형태로 존재하고 있었으며, 그 외에 $M^{x+} + xCl^-$ 와 $M^{2+} + SO_4^{2-}$ 의 착물을 형성하고 있어 수환경으로 확산될 경우 생태계 독성 및 축적을 일으킬 것으로 생각된다.

주제어 : 석호, 퇴적물, 간극수, 중금속, 화학종

1. 서론

동해안 석호는 약 3,500년 전에 지각변동과 하구에 사주 및 사취가 발달하면서 생성된 자연호이다.¹⁾ 석호는 내륙의 담수호와 달리 담수와 해수가 혼합된 기수(汽水)적 특성을

가지며, 수심이 얇음에도 불구하고 표층과 심층의 혼합이 제한되어 심층 산소고갈이 자주 발생한다.²⁾ 이러한 석호는 오랜 기간 동안 유역으로부터 오염물질이 유입되어 호수 바닥에는 많은 퇴적물이 쌓여있으며, 퇴적물에는 Al, Fe 등 중금속 함량이 매우 높은 상태이다.¹⁾

일반적으로 중금속이나 미량 오염물질들(trace pollutants)은 수환경에 유입될 경우 부유성 고형물질에 흡착되어 수중에 머물다가 호수의 바닥에 퇴적하게 된다. 이러한 퇴적

[†] Corresponding author
E-mail: jinner@me.go.kr
Tel: 02-2110-6765

Fax: 02-507-6282

현상으로 인해 수중의 오염물질은 침전되어 퇴적물에 축적되지만, 고형물질과 함께 퇴적된 미량 오염물질들은 생물학적, 화학적 반응을 거쳐 수환경으로 재용출되기 때문에 잠재적인 수질오염원으로 작용할 수 있다.³⁾ 퇴적물 입자는 작을수록 표면적이 넓어 많은 물질들을 흡착할 수 있어 퇴적물의 오염축적이 증가될 수 있으며 또한 이온교환 능력이 커지는 것으로 알려져 있다.⁴⁾

호수바닥 퇴적물의 입자 사이에 존재하는 간극수(interstitial water)에는 상층의 물(bulk water)보다 이온의 농도가 높게 존재하고, 고형입자와 간극수 사이에서 이온의 교환 반응이 일어나며, 간극수의 이온은 수환경으로 쉽게 확산되어 수생물에 노출될 수 있다. 따라서 간극수는 퇴적물과 물 환경 사이의 지구화학적 평형 반응과 생물유효성(bioavailability)을 조절하는 중요한 역할을 한다.⁵⁾

물에 존재하는 오염물질의 총 농도는 오염의 지표(index)가 될 수 있으나 오염물질의 생물유효성 또는 독성은 물에 존재하는 물질의 화학종(species)에 의존한다고 알려져 있다.⁴⁾ 물에 존재하는 오염물질 중 금속류는 자유이온(free ion: M^{n+}) 형태일 경우 수생물에 가장 높은 독성을 일으키며, 또한 금속-리간드 착물(metal-ligand complex) 형태도 독성을 유발한다고 보고되고 있다.⁶⁾ Stauber와 Florence는 수중에 존재하는 중금속의 화학종이 조류, 동물플랑크톤 및 무척추동물의 유충 등에 독성을 나타낸다고 보고하였다.⁷⁾ Schuytema 등은 Cd의 독성에 관한 연구에서 퇴적물에 결합된 Cd는 독성이 낮으나, 간극수에 존재하는 자유이온상태의 Cd는 독성을 보인다고 보고하였다.⁸⁾ 또한 Cu, Cd, Hg 등이 퇴적물과 결합한 것보다 간극수에 존재할 경우 *Daphnia magna*와 *Chironomus tentans*에 더 높은 독성을 일으킨다고 보고되고 있다.^{9,10)}

물 환경 중에 존재하는 금속의 화학종을 분석하는 것은 일부 이온 형태의 경우는 가능하지만 양이온-리간드(음이온)의 복합체(complex)에 대해서는 분석기법이 없기 때문에 양이온과 리간드의 평형상태에서의 열역학적 안정화상수(stability constant)에 근거한 모델링 program으로 계산하고 있는 실정이다. 화학종의 변화는 존재하는 양이온과 음이온의 활성도(activity), pH, 이온강도 등에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서 물과 퇴적토(sediment)에 존재하는 금속의 화학종에 관한 연구는 금속의 생물독성, 거동 및 노출경로 등을 확인하기 위해 필수적인 단계이다. 특히 간극수에서의 금속이온 화학종은 퇴적물과 상층 물과의 화학적 동적 평형상태를 이루고 있으므로 지구화학적으로 매우 중요하다. 그러나 담수호, 하천 및 해양의 퇴적물에 대한 오염정도를 연구한 사례는 많이 있었으나, 동해안 석호와 같이 기수역 환경의 퇴적물에 관한 오염연구와 퇴적물에 존재하는 간극수에서의 오염정도와 화학종 변화에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 동해안 석호의 퇴적물에서 간극수를 추출하고, 추출된 간극수의 화학적 조성과 중금속 농도를 분석하여 간극수 중의 금속 화학종(speciation) 변화를 산출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 퇴적물 및 간극수 시료채취

간극수 채취를 위한 석호 퇴적물은 경포호, 향호, 매호, 영랑호, 청초호, 광포호, 봉포호, 천진호, 송지호, 화진포호 등 10개 호소의 중앙 지점에서 각각 1개의 시료를 채취하였다. 그러나 화진포호, 송지호와 같이 두개로 구분되어 있는 호소는 각 호소의 중앙지점에서 2개의 시료를 채취하였다. 퇴적토는 US EPA(United States Environmental Protection Agency)의 “Sampling and Analysis Methods (2000)”에 준하여 Grab 채취기로 채취하였다. 채취 시 퇴적토 상부층의 물은 쏟아내고 상부로부터 10~15 cm의 퇴적물을 시료 봉지에 담아 공기와 접촉을 최소화하여 냉장(4°C) 보관하였다. 간극수 추출은 비혼합용액치환(immiscible liquid displacement) 법(Yang and Skogley, 1989)을 이용하였다. 추출방법은 저질토 80 g을 250 mL polycarbonate 원심분리용기에 담고 과량의 비혼합용액(Freon: 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroethane; density = 1.57 g/cm³)을 넣어 -5°C 상태에서 30분간 5,000 rpm으로 원심분리한 후 membrane filter(0.45 μm)로 여과하여 분석용 시료로 하였다. 채취한 석호 퇴적물의 입도는 입도분석기(Mastersizer 2000, Malven)로 분석하였다.

2.2. 간극수의 화학적 특성 분석

퇴적물로부터 추출된 간극수의 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 및 Mg^{2+})은 원자흡광광도계(Perkin Elmer 5100 PC)로 분석하였다. 간극수의 중금속(Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)은 US EPA 6020A 방법에 따라 ICP-MS(Varian Ultramass 700)로 분석하였다. Hg는 Mercury Analyzer(Cetac M-6000A)로 분석하였다. 분석 대상원소 중 원자량이 80 amu 이하인 금속은 poly-atomic effect에 의한 간섭을 제거하기 위하여 oxide interference, double charge interference를 낮추어 분석하였다. 모든 분석에 대하여 QC/QA를 실시하였다. 또한 분석과정에서 발생할 수 있는 drift 현상을 보정하기 위해 내부표준물질(45Sc, 89Y, 115In, 209Bi)을 사용하였다. 중금속 분석을 위해 사용된 표준원액과 내부표준물질은 Inorganic Venture사의 표준물질을 사용하였다. 간극수의 무기리간드인 Cl^- , SO_4^{2-} 는 Ion Chromatograph(Metrohm 761)로 분석하였으며, NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} 는 수질자동분석기(AA3, BRAN+LUBBE)로 분석하였다. 분석에 사용된 표준원액은 Inorganic Venture사의 표준물질을 구입하여 사용하였다. 퇴적물로부터 추출된 간극수의 pH와 EC는 추출되는 즉시 pH meter(FieldLab pH, Schott)와 conductivity meter(HandyLab, Schott)를 사용하여 측정하였다. 이온세기(IS, moles/L) 및 총용존염(TDS)는 식 (1)과 식 (2)와 같이 산출하였다.^{11,12)} 총알칼리도 측정은 중화적정법을 이용하여 측정하였다.

$$\text{Ionic Strength(M)} = 0.013 \times \text{EC(dS/m)} \quad (1)$$

$$\text{Total Dissolved Solid(TDS; mg/L)} = 640 \times \text{EC(dS/m)} \quad (2)$$

2.3. 간극수의 금속 화학종 변화 모델링

간극수 내 금속이온, 리간드 이온, 금속-리간드 복합체에 관한 화학종 분포는 간극수의 pH, 전기전도도, 금속이온의 농도 및 무기 리간드 농도를 입력 변수로 하여 MINTEQA2를 사용하여 산출하였다.¹³⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 분석보장 및 품질관리(QA/QC)

Table 1은 청초호의 퇴적물로부터 추출한 간극수에 존재하는 중금속과 무기 리간드의 분석을 위한 정도관리 결과를 보여주고 있다. 기지 첨가시료에 대한 분석결과의 회수율은 76.83~120.45% 오차범위는 0.26~8.77%로 높은 정확도와 정밀도를 보였으며, 사용한 중금속 방법에 대한 검출한계는 중금속별로 0.0066~2.537 ug/L로 계산되었다. Standard method에서는 중금속분석의 경우 정확성은 오차범위를 10% 이내, 기지첨가시료의 회수율은 80~120%를 허용한계로 하고 있다.

3.2. 석호 퇴적물의 물리·화학적 특성

3.2.1. 퇴적물의 입경분포

석호의 퇴적물은 입도분석기(Mastersizer 2000, Malven)로 분석하였으며, 평균 입도는 16.369~43.093 μm로 주로 실트질과 점토질(silt & clay, < 63 μm)의 입경분포를 보였다(Fig. 1). 10개의 석호 중 주변에 농경지가 많이 분포한 경포호(26 km²) 및 화진포호(4.7 km²)가 20 μm 이하의 작은 입경분포를 보였으며, 향호, 매호, 청초호, 광포호 등은 32~43 μm로 비교적 큰 입경분포를 보였다. 그러나 이러한 입경분포는 김 등이 연구한 팔당호의 퇴적물 입도가 사질토 및 실트질로 조사된 것과 달리 석호는 매우 작은 편이었다.¹⁵⁾ 이렇게 석호 퇴적물의 입경이 작은 것은

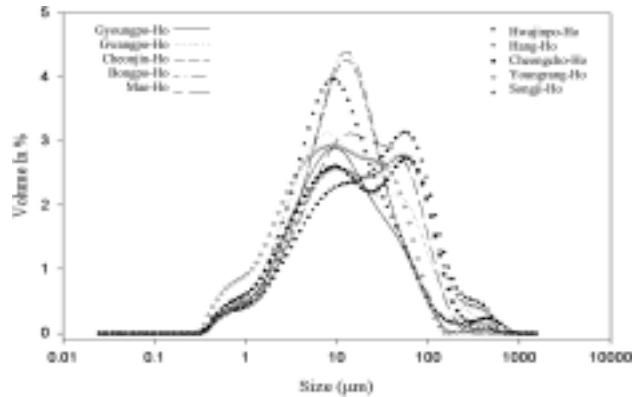


Fig. 1. Particle size distribution of ten lagoon sediments collected from the Northeastern coast of the South Korea.

Table 1. Quality assurance and control data of metal and inorganic ligand analyses for the interstitial water extracted from the Cheongcho-Ho sediment

Elements	Unit	Interstitial water from Cheongcho-Ho sediment						
		MDL ¹⁾	1st. result	2nd. result	RPD ²⁾ (%)	MS ³⁾ (%)	MSD ⁴⁾ (%)	RPD(%)
Ca	mg/L	-	419	418	0.29	92.25	94.40	2.30
K	mg/L	-	476	488	2.57	91.74	89.54	2.43
Mg	mg/L	-	1,264	1,264	0.00	93.20	93.50	0.32
Na	mg/L	-	11,126	11,388	2.33	120.45	114.60	4.98
Al	μg/L	0.047	104.60	106.87	2.14	93.71	97.87	4.34
As	μg/L	0.026	54.84	56.48	2.96	86.43	83.33	3.65
Cd	μg/L	0.014	1.32	1.17	11.74	87.18	87.41	0.26
Co	μg/L	0.081	0.88	1.06	19.28	95.09	96.07	1.03
Cr	μg/L	0.298	17.67	17.31	2.09	98.00	98.53	0.54
Cu	μg/L	0.239	21.84	22.14	1.37	76.83	79.78	3.77
Fe	μg/L	2.537	992	1,058	6.42	87.73	95.78	8.77
Hg	μg/L	0.0066	0.0081	<0.0066	-	98.30	100.10	1.81
Mn	μg/L	0.028	224.76	226.39	0.72	91.16	89.39	1.96
Ni	μg/L	0.040	18.98	21.54	12.63	89.55	91.15	1.77
Pb	μg/L	0.046	55.81	69.20	21.42	93.38	93.02	0.39
Zn	μg/L	0.154	13.61	19.25	34.36	96.82	98.05	1.27
Cl ⁻	mg/L	-	18,713	18,020	3.77	-	-	-
NH ₄ ⁺	mg/L	0.008	9.61	9.58	0.31	81.53	88.23	7.89
PO ₄ ³⁻	mg/L	0.020	<0.006	<0.006	-	108.40	109.60	1.10
SO ₄ ²⁻	mg/L	-	3,136	3,148	0.38	-	-	-

¹⁾MDL : Method Detection Limit, ²⁾RPD : Relative Percent Difference, ³⁾MS : Matrix Spike Recovery, ⁴⁾MSD : Matrix Spike Recovery Duplicate

Table 2. Metal concentrations of ten lagoon sediments collected from the Northeastern coast of the South Korea

Unit	Lagoons									
	GP ¹⁾	H ²⁾	M ³⁾	CC ⁴⁾	YR ⁵⁾	SJ-I ⁶⁾	SJ-II ⁷⁾	HJ-I ⁸⁾	HJ-II ⁹⁾	
Al	mg/g	32.4	21.1	30.5	24.0	35.7	36.5	31.5	32.1	31.3
Fe	mg/g	30.1	20.2	22.3	23.0	25.8	34.2	32.4	34.1	35.7
Mn	µg/g	420.4	340.4	388.7	351.2	379.5	359.1	351.6	493.6	569.8
As	µg/g	5.9	13.4	5.8	13.4	10	12.2	11.8	10.3	8.8
Cd	µg/g	ND	0.2	0.1	6.1	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3
Cu	µg/g	11.7	20.2	8.9	122.7	32	38.5	31.7	27.8	29.6
Cr	µg/g	46.5	41.4	31.4	53.6	43	103.7	84.0	69.5	72.2
Hg	µg/g	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.1
Ni	µg/g	17.4	18.3	14.7	22.4	22.2	54	46.5	25.9	26.7
Pb	µg/g	17.6	21.7	22.9	37.8	33.7	31.1	34.2	26.4	21.4
Zn	µg/g	120.7	95.9	126.6	320.6	193.6	133.9	147.9	126.9	139.5
Se	µg/g	3.8	3.2	3.4	3.7	3.6	5.8	6.3	5.2	4.3
Co	µg/g	16.6	8.7	9.5	9.1	11.3	31.6	20.8	19.5	17.8

¹⁾ GP: Gyoungpo-Ho ²⁾ H: Hyang-Ho ³⁾ MH: Mea-Ho ⁴⁾ CC: Chungcho-Ho ⁵⁾ YR: Youngrang-Ho
⁶⁾ SJ 1: Songhji-Ho I ⁷⁾ SJ 2: Songji-Ho II ⁸⁾ HJ 1: Hwajinpo-Ho I ⁹⁾ HJ 2: Hwajinpo-Ho II

석호가 자연호소로써 호소변의 경사가 완만하고, 호소주변에 발달한 습지대로 인하여 사질토의 유입이 대부분 차단되고 상대적으로 무게와 입도가 작은 점토질과 실트질 토양이 유입되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.2. 석호 퇴적물의 중금속 함유량

Table 2는 석호퇴적물에 존재하는 중금속의 농도를 보여주고 있으며, Table 3은 석호인접 지역에서 채취한 토양의 중금속 농도를 보여주고 있다. As, Cd 및 Hg는 각각 5.8~13.4 µg/g, ND~6.1 µg/g 및 0.1~0.4 µg/g으로 석호 주변의 일반토양보다 약 10~130배 정도 높은 편이었다. 퇴적물에 존재하는 Cu와 Pb 등 다른 중금속의 농도도 주변 토양에 존재하는 농도보다 높은 편이었다(Table 2, 3). 특히 청초호의 경우 As, Cd, Cu, Pb, Zn 등의 중금속 농도가 다른 호소보다 매우 높았는데, 이것은 석호 주변이 도시화되었고 청초호가 항만으로 지정되는 등 호소주변에서 각종 선박과 관련된 활동으로 인해 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다. 원주지방환경청 연구에 의하면 석호 퇴적물의 Al과 Fe 등 지질학적 광물의 농도가 각각 2.1~3.6%, 2.0~3.4%로 보고되고 있다.¹⁾

김 등은 팔당호 퇴적물의 중금속 농도가 Cd: 0.01~0.44 µg/g, Cu: 1.7~21 µg/g, Pb: 2.1~16 µg/g, Cr: 0.3~4 µg/g, Zn: 2.5~56 µg/g 범위로 보고하였다.¹⁵⁾ 동해안 석호 퇴적물의 중금속 농도는 이들보다 약 10배 정도 높았다. US EPA의 기준에 의한 동해안 석호 퇴적물의 오염정도를 분류하면 Fe, As는 “오염이 심함”, Mn, Cu, Cr, Ni, Zn 등은 “중간오염”, Hg, Pb는 “오염안됨”으로 조사되었다(US EPA 1993). 따라서 “오염이 심함”으로 나타난 As에 대해서는 오염의 원인 규명과 아울러 관리방안을 마련해야 할 것을 생각된다. As는 독성이 매우 높은 중금속으로 지하수나

Table 3. Metal concentrations of the soil collected from the representative lagoon areas

	Cd (µg/g)	Cu (µg/g)	As (µg/g)	Hg (µg/g)	Pb (µg/g)
Gangneung	0.065	0.423	0.103	0.020	1.403
Sokcho	0.046	0.842	0.108	0.040	3.032
Goseong	0.071	1.088	0.904	0.011	1.670

생물농축된 식품에 장기적으로 노출될 경우 암, hyperkeratosis, arsenicosis, melanosis 등을 초래하는 것으로 보고되고 있다.

3.3. 퇴적물 간극수의 화학적 조성

Table 4는 석호 퇴적물로부터 추출한 간극수의 화학적 조성을 보여주고 있다. 석호 퇴적물에서 추출한 간극수의 pH는 6.93~8.08이었다. 양이온은 Ca 3.97~419.30 mg/L, K 5.98~482.20 mg/L, Mg 2.73~1,264.00 mg/L, Na 15.96~11,257.00 mg/L로 조사되었다. 해수에 다량 존재하는 Mg 농도는 석호 중 수질의 염분농도가 높은 순서에 따라 청초호 > 화진포호 > 경포호 > 송지호 > 영랑호 > 향호 > 매호 > 봉포호 > 천진호 순으로 조사되었다. 무기 리간드는 Cl 0.2~17.1 g/L, SO₄ 0.06~2.80 g/L, HCO₃⁻ 11.64~88.93 mg/L, CO₃²⁻ 0.01~1.01 mg/L, NH₄⁺ 0.34~36.50 mg/L, NO₃⁻ 1.14~6.26 mg/L, PO₄³⁻ N.D.~6.73 mg/L로 조사되었다.

석호 중 염분 농도가 가장 높은 청초호가 양이온의 농도가 가장 높았으며, 무기 리간드 중 Cl⁻ 및 SO₄²⁻ 농도도 가장 높았다. 이에 반해 해수와 교환이 거의 이루어지지 않는 봉포호와 천진호는 양이온 농도와 무기 리간드(NO₃⁻ 제외) 농도가 가장 낮았다. 또한 이온강도(IS: ionic strength)와 TDS도 유사한 경향을 보였으며, 알칼리도(HCO₃⁻, CO₃²⁻

Table 4. Chemical composition of the interstitial water extracted from ten lagoon sediments

Unit	Lagoons												
	GP ¹⁾	H ²⁾	M ³⁾	CC ⁴⁾	YR ⁵⁾	GWP ⁶⁾	BP ⁷⁾	CJ ⁸⁾	SJ-I ⁹⁾	SJ-II ¹⁰⁾	HJ-I ¹¹⁾	HJ-II ¹²⁾	
pH	7.70	8.08	7.83	7.28	7.95	7.87	7.25	6.93	7.73	7.85	7.84	7.95	
EC	mS/cm	39.0	26.2	12.1	53.0	18.5	11.2	0.3	0.2	25.1	27.8	32.0	38.9
IS [†]	mmole/L	507.0	340.6	157.2	689.0	239.9	146.1	3.4	2.5	326.3	361.4	416.0	505.7
TDS	mg/L	24960.0	16768.0	7737.6	33920.0	11808.0	7193.6	166.4	123.8	16064.0	17792.0	20480.0	24896.0
Alkalinity	mg/L	60.0	90.0	30.0	24.0	70.0	38.0	11.7	16.7	24.0	54.0	32.0	40.0
Cl ⁻	mg/L	11905.0	7625.0	3342.0	17100.0	5376.0	2946.0	243.7	169.1	7560.0	8540.0	9675.0	12475.0
SO ₄ ²⁻	mg/L	1579.5	220.7	396.6	2796.0	337.2	346.6	461.0	59.5	1144.0	810.6	1336.0	1761.5
HCO ₃ ⁻	mg/L	59.69	88.93	29.78	23.95	69.37	37.70	11.64	16.65	23.85	53.61	31.76	39.62
CO ₃ ²⁻	mg/L	0.28	1.01	0.19	0.04	0.58	0.26	0.02	0.01	0.12	0.36	0.21	0.33
NH ₄ ⁺	mg/L	9.69	36.50	6.97	9.60	33.58	0.38	4.33	0.34	7.73	19.52	7.91	7.63
NO ₃ ⁻	mg/L	1.32	1.86	2.59	2.12	1.59	1.16	3.53	6.26	1.21	1.40	1.14	1.42
PO ₄ ³⁻	mg/L	1.83	1.64	0.61	<0.02	5.74	0.94	<0.02	<0.02	0.37	6.73	1.30	<0.02
Ca	mg/L	288.60	154.70	68.82	419.30	118.70	69.01	7.50	3.97	171.20	176.20	226.40	271.20
K	mg/L	299.10	184.80	85.10	482.20	125.60	118.70	10.77	5.98	166.40	224.70	261.30	317.10
Mg	mg/L	862.00	325.00	217.00	1264.00	390.00	207.00	4.17	2.73	551.00	578.00	710.00	873.00
Na	mg/L	6888.00	2857.00	2542.00	11257.00	3041.00	2006.00	25.49	15.96	4508.00	4956.00	5971.00	7392.00
Al	µg/L	95.926	105.430	104.029	105.738	72.991	96.574	74.955	103.300	80.233	65.206	64.454	72.906
Fe	µg/L	614.677	478.643	243.861	1025.389	402.626	424.131	118.407	124.415	567.304	460.284	613.173	733.172
Mn	µg/L	3123.879	62.111	127.091	225.579	483.668	1853.366	135.920	1061.812	211.415	25.791	788.572	39.130
Cd	µg/L	2.566	1.265	4.214	1.253	0.681	0.610	2.031	1.256	4.660	0.646	0.539	2.224
Cu	µg/L	35.813	30.591	34.146	21.996	17.024	17.938	24.719	31.889	39.162	20.893	21.077	42.046
Cr	µg/L	27.537	61.428	23.090	17.495	45.047	22.647	4.846	6.440	20.480	27.183	18.793	22.632
Hg	µg/L	<0.0066	0.615	<0.0066	<0.0066	<0.0066	<0.0066	0.502	0.047	<0.0066	0.015	0.069	<0.0066
Pb	µg/L	23.689	21.232	67.051	62.509	13.875	15.009	14.670	13.245	176.442	5.719	11.259	25.524
As	µg/L	36.350	23.624	13.160	55.664	20.716	18.399	1.219	0.930	25.135	25.699	27.228	35.657
Ni	µg/L	15.369	11.167	12.475	20.261	7.752	5.893	3.626	5.760	13.487	12.237	17.001	15.473
Zn	µg/L	8.735	5.058	1.679	16.435	<0.154	<0.154	14.225	<0.154	4.705	<0.154	<0.154	29.396
Co	µg/L	0.910	0.712	0.766	0.975	0.699	0.565	0.211	1.346	0.643	0.804	0.682	0.891

¹⁾ GP: Gyoungpo-Ho ²⁾ H: Hyang-Ho ³⁾ M: Mea-Ho ⁴⁾ CC: Chungcho-Ho ⁵⁾ YR: Youngrang-Ho
⁶⁾ GWP: Gwangpo-Ho ⁷⁾ BP: Bongpo-Ho ⁸⁾ CJ: Cheonjin-Ho ⁹⁾ SJ 1: Songhji-Ho I ¹⁰⁾ SJ 2: Songji-Ho II
¹¹⁾ HJ 1: Hwajinpo-Ho I ¹²⁾ HJ 2: Hwajinpo-Ho II [†] Ionic Strength

포함)는 향호, 청초호, 경포호 등이 가장 높았고, 봉포호 및 천진호가 가장 낮았다. 석호 퇴적물의 간극수에 대한 화학적 조성을 Horne과 Goldman의 기수호 분류기준에 따라 구분한 결과 Group I(염분도가 0.5% 이상인 호소)에는 경포호, 향호, 매호, 청초호, 영랑호, 광포호, 송지호, 화진포호가, Group II(염분도가 0.5% 이하인 호소)에는 봉포호, 천진호가 해당되었다(Table 4).¹⁶⁾

간극수의 Al 농도는 64.45~105.74 µg/L 범위로 향호, 매호, 청초호, 천진호 등이 100 µg/L 이상으로 높은 편이었으며, 영랑호, 화진포호 및 봉포호가 낮았다. Fe는 118.4~1,025.4 µg/L로 청초호가 가장 높았고, 봉포호 및 천진호가 가장 낮았다. Mn은 경포호가 3,123.9 µg/L로 가장 높았고 광포호 및 천진호도 높은 편이었다. 이에 반해 향호와 송지호 복호, 화진포호 복호 등은 낮았으며, 매호, 청청호도 낮았다.

간극수에 존재하는 주요 중금속인 Cd, Cu, Cr, Pb, As의 농도는 각각 0.5~4.7, 17.0~42.0, 4.8~61.4, 5.7~176.4, 0.9~55.7 µg/L 범위를 보였다. As는 청초호가 55.7 µg/L로 가장 높았고, 경포호와 화진포호도 비교적 높은 편이었으나, 봉포호와 천진호는 각각 1.2 µg/L, 0.9 µg/L로 가장 낮았다. Hg, Ni, Zn 및 Co 농도는 다른 중금속의 농도보다 낮은 편이었다. 간극수의 중금속 농도는 석호에 따라 달랐으며, 석호간에 일정한 경향을 보이지 않았고 시료를 채취한 지역에 따라 농도차이를 보였다(Table 4).

퇴적물 내 금속농도는 Al, Fe이 다른 금속에 비해 100배 이상 높았으나(Table 2), 간극수에서는 이들보다 알칼리 및 알칼리토금속(Na, Mg 등)이 더 높게 조사되었다. Richard 등이 연구한 캐나다 Qu'Appelle River의 퇴적물 간극수 분석결과와 비교한 결과, Al이 12~90 µg/L, Mn이 73~2,200 µg/L로 석호 간극수 보다 높았으나, Cd는 1~9 µg/L, Co

는 2~3 µg/L로 석호가 더 낮은 수준을 보였다.¹²⁾ 이는 석호와 자연수와의 차이 및 지역의 토양과 지질학적 차이에 기인된 것으로 판단된다. 해수에 영향을 많이 받는 청초호, 화진포호 및 송지호 등 호소들의 간극수에는 알칼리 및 알칼리토금속의 농도가 높았다. 그러나 담수호 성격을 가지는 천진호 및 봉포호는 이들 금속의 농도가 매우 낮았다. 또한 Al 등 전이금속들의 농도분포는 각 호소별로 특별한 경향성을 보이지 않아 지질특성이나 유역에서 유입되는 오염물질에 따라 농도 차이를 보이는 것으로 생각된다.

3.4. 퇴적물 간극수 중의 금속류 화학종 분포

석호 퇴적물 간극수에 존재하는 금속의 화학종을 금속과 리간드 간의 열역학적 안정화상수에 근거하여 MINTEQA2로 계산한 결과를 Table 5와 6에서 보여주고 있다. Table 5는 간극수중의 염분도가 높은 석호(Group I)간극수의 모

델링 결과이며, Table 6은 염분농도가 낮은 2개 석호(Group II) 간극수의 화학종 모델링 결과이다.

3.4.1. Group I 석호 간극수에서의 금속 화학종 분포

Ca, Mg, Na, K 및 Al 등은 전자주개인 산소를 함유하는 리간드, 즉 탄산염이온, 수산이온 등과 잘 결합을 하지 만, 간극수 내의 탄산염농도가 낮아 대부분 자유이온상태로 주로 존재하였다(Table 5). Ca는 Ca²⁺ 형태가 84.5~95.3% 존재하였고, Mg는 Mg²⁺ 형태가 89.0~98.5%, Na는 Na⁺ 형태가 98.6~99.8%, K는 K⁺ 형태가 98.2~99.8% 존재하는 것으로 계산되었다. Al은 대부분 Al(OH)₄⁻ 형태가 96.3~99.5% 존재하는 것으로 계산되었다. As는 HAsO₄²⁻ 형태가 83.3~97.0% 존재하였고 주로 5가 형태이었다. Cd는 CdCl₃⁺가 42.5~61.8%, CdCl₂(aq)가 11.9~40.1%, Cd²⁺가 3.0~23.0%로 계산되었다. 그러나 염분도가 높은 청초호는 CdCl₃⁻이 11.08%로 비교적 높았다. Co는 Co⁺가 65.0~

Table 5. Predominant metal species in the interstitial water of lagoon sediments classified as Group I by Horne and Goldman

Element	Primary Species ²⁾	Secondary Species ³⁾
Al	Al(OH) ₄	Al(OH) ₂ ⁺ , Al(OH) ₃ (aq), AlOH ²⁺
As ⁴⁾	HAsO ₄ ²⁻ , H ₂ AsO ₄ ⁻	AsO ₄ ³⁻
Ca ⁵⁾	Ca ²⁺ , CaSO ₄ (aq)	CaCl ₂ (aq), CaCl ⁺ , CaCO ₃ (aq), CaHCO ₃ ⁺ , CaHPO ₄ (aq), CaNH ₃ ²⁺ , CaPO ₄ ⁻
Cd ⁶⁾	Cd ²⁺ , CdCl ⁺ , CdCl ₂ (aq)	CdCl ₃ ⁺ , CdCO ₃ (aq), CdOH ⁺ , CdOHCl(aq), CdSO ₄ (aq), Cd(SO ₄) ₂ ²⁻
Co	Co ²⁺ , CoCl ⁺ , CoSO ₄ (aq)	Co(NH ₃) ₃ ²⁺ , Co(OH) ₂ (aq), CoCO ₃ (aq), CoHCO ₃ ⁺ , CoHPO ₄ (aq), CoOH ⁺
Cr	CrO ₄ ²⁻ , NaCrO ₄ ⁻	HCrO ₄ ⁻ , KCrO ₄ ⁻
Cu ⁷⁾	Cu ²⁺ , CuCO ₃ (aq), CuOH ⁺	Cu(CO ₃) ₂ ²⁻ , Cu(OH) ₂ (aq), Cu ₂ (OH) ₂ ²⁺ , CuCl ⁺ , CuCl ₂ (aq), CuHCO ₃ ⁺ , CuNH ₃ ²⁺ , CuSO ₄ (aq)
Fe ⁸⁾	Fe ²⁺ , FeSO ₄ (aq)	FeHCO ₃ ⁺ , FeHPO ₄ (aq), FeOH ⁺
Hg	HgCl ₂ (aq), HgCl ₃ ⁻ , HgCl ₄ ²⁻	Hg(NH ₃) ₃ ²⁺ , Hg(OH) ₂ , HgClOH(aq)
K	K ⁺	KSO ₄ ⁻
Mg ⁹⁾	Mg ²⁺ , MgSO ₄ (aq)	MgCO ₃ (aq), MgHCO ₃ ⁺ , MgHPO ₄ (aq), MgOH ⁺
Mn ¹⁰⁾	Mn ²⁺ , MnSO ₄ (aq), MnCl ⁺	MnCl ₂ (aq), MnCl ₃ ⁻ , MnHCO ₃ ⁺ , MnOH ⁺
Na	Na ⁺	NaHCO ₃ (aq), NaSO ₄ ⁻
Ni ¹¹⁾	Ni ²⁺ , NiCl ⁺ , NiSO ₄ (aq)	Ni(NH ₃) ₃ ²⁺ , NiOH ⁺ , Ni(OH) ₂ (aq), NiCO ₃ (aq), NiHCO ₃ ⁺ , NiNH ₃ ²⁺
Pb ¹²⁾	Pb ²⁺ , PbCl ⁺ , PbCl ₂ (aq), PbCO ₃ (aq), PbOH ⁺	Pb(CO ₃) ₂ ²⁻ , Pb(OH) ₂ (aq), Pb(SO ₄) ₂ ²⁻ , PbCl ₃ ⁻ , PbCl ₄ ²⁻ , PbHCO ₃ ⁺ , PbSO ₄ (aq)
Zn ¹³⁾	Zn ²⁺ , ZnCl ⁺ , ZnSO ₄ (aq), ZnOHCl(aq)	Zn(OH) ₂ (aq), Zn(SO ₄) ₂ ²⁻ , ZnCl ₂ (aq), ZnCl ₄ ²⁻ , ZnCO ₃ (aq), ZnHCO ₃ ⁺ , ZnOH ⁺

¹⁾ Pore waters containing high concentrations of chloride(GP, H, M, CC, GWP, SJ-1, SJ-2, HJ-1, HJ-2).
²⁾ Each species accounts for ≥ 5% of total molar concentration of metal. Together, the primary species account for ≥ 90% of the total metal.
³⁾ Each species accounts for ≥ 0.01% but ≥ 5% of the total molar concentration of the metal.
⁴⁾ H₂AsO₄⁻ is a secondary species in the H, YR, HJ-1, HJ-2.
⁵⁾ CaSO₄(aq) is a secondary species in the H-P, Y.
⁶⁾ CdCl₃⁺ is a primary species in the GP, CC, HJ-1, HJ-2.
⁷⁾ CuNH₃²⁺ is a primary species in the H, YR, SJ-2; CuCl⁺ is a primary species in the CC.
⁸⁾ FeSO₂(aq) is a secondary species in the H, CC, YR.
⁹⁾ MgSO₄(aq) is a secondary species in the H, CC, YR, GWP.
¹⁰⁾ MnSO₄(aq) is a secondary species in the H, M, CC, YR, GWP.
¹¹⁾ NiSO₄(aq) is a secondary species in the H, CC, YR, GWP.
¹²⁾ PbCl⁺, PbOH⁺ is a secondary species in the CC; PbCl₃⁻ is a primary species in the CC.
¹³⁾ ZnOHCl(aq) is a secondary species in the M, CC; ZnCl₂(aq) is a primary species in the CC; ZnCO₃(aq) is a primary species in the H.

Table 6. Predominant metal species in the interstitial water of lagoon sediments classified as Group II by Home and Goldman

Element	Primary Species ²⁾	Secondary Species ³⁾
Al ⁴⁾	Al(OH) ₄ ⁻	Al(OH) ₂ ⁺ , Al(OH) ₃ (aq), AlOH ²⁺
As	HAsO ₄ ²⁻ , H ₂ AsO ₄ ⁻	AsO ₄ ³⁻
Ca	Ca ²⁺ , CaSO ₄ (aq)	CaCl ⁺ , CaCO ₃ (aq), CaHCO ₃ ⁺ , CaNO ₃ ⁺
Cd	Cd ²⁺ , CdCl ⁺ , CdSO ₄ (aq)	CdCO ₃ (aq), CdHCO ₃ ⁺ , CdNO ₃ ⁺ , CdOH ⁺ , CdOHCl(aq), CdCl ₂ (aq), Cd(SO ₄) ₂ ²⁻
Co	Co ²⁺ , CoSO ₄ (aq)	Co(NH ₃) ₂ ²⁺ , Co(OH) ₂ (aq), CoCl ⁺ , CoCO ₃ (aq), CoHCO ₃ ⁺ , CoNO ₃ ⁺ , CoOH ⁺
Cr	CrO ₄ ²⁻ , HCrO ₄ ⁻	NaCrO ₄ , KCrO ₄ ⁻
Cu	Cu ²⁺ , CuCO ₃ (aq), CuSO ₄ (aq), CuOH ⁺	Cu(CO ₃) ₂ ²⁻ , Cu(OH) ₂ (aq), Cu ₂ (OH) ₂ ²⁺ , CuCl ⁺ , CuHCO ₃ ⁺ , CuNH ₃ ²⁺ , CuNO ₃ ⁺
Fe	Fe(OH) ₂ ⁺ , Fe(OH) ₃ (aq)	Fe(OH) ₄ ⁻
Hg	HgCl ₂ (aq), HgClOH(aq)	Hg(NH ₃) ₂ ²⁺ , Hg(OH) ₂ , HgCl ₃ ⁻ , HgCl ₄ ²⁻
K	K ⁺	KSO ₄ ⁻
Mg	Mg ²⁺ , MgSO ₄ (aq)	MgCO ₃ (aq), MgHCO ₃ ⁺
Mn	Mn ²⁺ , MnSO ₄ (aq)	MnCl ⁺ , MnHCO ₃ ⁺ , MnNO ₃ ⁺ , MnOH ⁺
Na	Na ⁺	NaHCO ₃ (aq), NaSO ₄ ⁻
Ni ⁵⁾	Ni ²⁺ , NiSO ₄ (aq)	NiCl ⁺ , NiCO ₃ (aq), NiHCO ₃ ⁺ , NiNH ₃ ²⁺ , NiNO ₃ ⁺ , NiOH ⁺
Pb ⁶⁾	Pb ²⁺ , PbCl ⁺ , PbCO ₃ (aq), PbOH ⁺ , PbSO ₄ (aq)	Pb(CO ₃) ₂ ²⁻ , Pb(OH) ₂ (aq), Pb(SO ₄) ₂ ²⁻ , PbCl ₂ (aq), PbHCO ₃ ⁺ , PbNO ₃ ⁺
Zn	Zn ²⁺ , ZnSO ₄ (aq)	Zn(OH) ₂ (aq), Zn(SO ₄) ₂ ²⁻ , ZnCl ⁺ , ZnCO ₃ (aq), ZnHCO ₃ ⁺ , ZnOH ⁺ , ZnOHCl(aq)

¹⁾ Pore waters containing low concentrations of chloride(BP, CJ).

²⁾ Each species accounts for ≥ 5% of total molar concentration of metal. Together, the primary species account for ≥ 90% of the total metal.

³⁾ Each species accounts for ≥ 0.01% but ≥ 5% of the total molar concentration of the metal.

⁴⁾ Al(OH)₃(aq) is a primary species in the CJ.

⁵⁾ NiHCO₃⁺ is a primary species in the CJ.

⁶⁾ PbHCO₃⁺ is a primary species in the CJ.

84.3%, CoCl⁺가 8.1~33.4%, CoSO₄⁰가 0.99~8.8%로 계산되었다. Cr은 CrO₄²⁻가 54.2~76.7%로 계산되어 주로 Cr(Cl)로 존재하고 있음을 알 수 있었다. Cu는 금속-탄산염착물(CuCO₃⁰)이 36.3~68.5%, 금속-수산기착물(CuOH⁺)이 10.4~20.6%, 자유이온(Cu²⁺)형태가 7.0~31.0%로 존재하였다.

Fe는 주로 자유이온(Fe²⁺)형태로 84.7~97.7%로 계산되었다. 그 외에 일부 FeSO₄⁰ 형태의 착물을 형성기도 하였다. Mn은 Mn²⁺가 77.8~91.7%, MnCl⁺가 3.2~14.7%, MnSO₄⁰가 1.9~9.3%로 계산되었다. Ni는 Ni²⁺형태가 69.2~84.2%, NiCl⁺가 6.0~18.0%로 계산되었다. Pb는 호수별로 많은 차이를 보였으며, 주로 PbCl⁺, PbCl₂⁰, PbCO₃⁰, Pb²⁺, PbOH⁺ 등으로 계산되었다. 일부 석호의 간극수에서 검출된 Zn은 Zn²⁺형태가 56.3~79.1%로 계산되었고, ZnCl⁺, ZnOHCl⁰, ZnSO₄⁰ 등의 존재형태로 계산되었으며, Cl⁻ 농도가 높은 청초호는 ZnCl₂⁰가 7.98%로 비교적 높게 계산되었다.

3.4.2. Group II석호 간극수에서의 금속 화학종 분포

Na와 K는 Group I과 같이 free ion이 각각 98.1~99.7%, 97.5~99.7%로 계산되었다. Ca는 Ca²⁺가 61.0~91.3%, CaSO₄⁰가 8.1~38.9%로 계산되었다. Mg도 Mg²⁺가 66.3~93.0%, MgSO₄²⁻가 6.5~33.6%로 계산되었다. Al은 대부분 Al(OH)₄⁻

형태로 계산되었으며, As는 HAsO₄²⁻가 52.4~70.2%, H₂AsO₄⁻가 26.8~47.6%로 계산되었다. Cd는 Cd²⁺가 45.0~68.1%로 가장 많았으며, CdCl⁺는 22.9~24.8%, CdSO₄⁰가 6.2~22.9%로 계산되었다. Co는 Co⁺가 2.8~88.6%, CoSO₄⁰가 6.8~34.8%로 계산되었다. Cr은 Group I과 비슷하게 CrO₄²⁻가 75.4~86.6%로 계산되었다. Cu는 Cu²⁺가 33.4~42.7%로 계산되었으며, 금속-탄산염 형태와 금속-수산기 형태의 착물도 형성하였다. Fe는 금속-수산기(Fe(OH)₂⁺)가 84.5~92.0%, Fe(OH)₃⁰가 8.0~15.2%를 차지하였다. Mn은 Mn²⁺가 66.4~93.0%, MnSO₄⁰가 6.3~32.8%로 계산되었다. Ni와 Pb는 Group I과 비슷하게 다양한 착물을 형성하였는데, Ni는 Ni²⁺가 62.5~87.0%, NiSO₄⁰가 6.7~34.7%로 계산되었으며, Pb는 Pb²⁺ > PbSO₄⁰ > PbCO₃⁰ > PbOH⁺ > PbCl⁺ 순으로 존재하는 것으로 계산되었다. Zn은 붕포호가 Zn²⁺이 59.57%, ZnSO₄⁰이 36.26%로 계산되었다.

4. 결론

동해안 석호는 유입 수량이 적어 수체의 교환율이 낮으며, 유역에서 유입되는 오염물질이 퇴적하여 호소 내에 장기간 축적된다. 이러한 결과로 수체 교환율이 큰 호소에

비해 석호는 상대적으로 퇴적물 및 간극수에 Cu, Cd, Cr, As, Pb 등 많은 유해 중금속들이 높은 농도로 축적되어 있었다. 이들 금속 외에 간극수에는 알칼리 및 알칼리토금속(Na, Mg, K, Ca 등)이 매우 높게 검출되었으며, 검출농도는 호소내의 염분도와 비례하였다($R^2 > 0.96$). 또한 As, Fe 및 Ni도 염분도와 비교적 높은 상관성 보였다($R^2 > 0.84$). 이것은 호소내부로 해수가 유입되며, 유입된 해수가 밀도 차에 따라 침층으로 가라앉아 간극수에서 높은 농도를 보인 것으로 생각된다. 따라서 해수의 유입이 석호의 수질이나 퇴적물에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

간극수의 금속별 존재형태를 모델링한 결과, K와 Na는 자유이온 형태로 계산되었다. Al, As 및 Cr는 자유이온을 포함한 3~4개 종류의 착물을 형성하였으며, Ca, Co, Cd, Ni, Pb 및 Zn는 10개 이상의 다양한 착물을 형성하였다.

해수유입으로 인해 염분도가 높은 청초호 등은 Cd, Co, Ni, Pb 및 Zn이 염화 착물을 형성하였으며, Hg도 $HgCl_2(aq)$, $HgCl_3^-$, $HgCl_4^{2-}$ 등으로 모두 염화 착물을 형성하였다. 또한 Fe, Mn 및 Mg은 황산화 착물을 형성하였다. 그러나 염분농도가 낮은 친진호 등은 Hg와 Cd이 염화 착물을 형성하였으며, Cu, Mg, Mn, Ni, Pb 및 Zn은 황산화 착물을 형성하였다. Fe는 $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)_3(aq)$ 등으로 수산기 착물을 형성하였다. 특히 Al, As 및 Cr 등은 염분농도와 상관없이 전체 석호에서 수산기 및 산화형태의 착물을 형성하였다.

화학종 분포 모델링 결과, 석호 퇴적물에 존재하는 간극수의 금속류 존재형태는 해수유입이 많은 Group I은 M^{x+} , $M^{x+} + xCl^-$ 와 $M^{2+} + SO_4^{2-}$ 형태의 착물을 형성하였다. 이에 반해 염분도가 낮은 Group II는 M^{x+} 와 $M^{2+} + SO_4^{2-}$ 형태의 착물이 주를 이루었다. 간극수에 존재하는 미량 금속류는 Group I 호소들이 미량 금속의 농도가 높았고, 존재형태가 주로 자유이온(free aqua ion)와 금속 착화물을 형성하고 있어 Group II 호소보다 수생태계에 미치는 영향이 클 것으로 생각된다.

대부분의 석호들은 퇴적물이 실트와 점토질로 입경이 매우 작아 바람에 의한 교란이나 전도(turnover) 현상에 의해 쉽게 상층으로 확산된다. 이러한 확산은 퇴적물뿐만 아니라 간극수도 함께 일어나며, 간극수에 존재하는 자유이온 형태의 금속과 착물형태의 금속들이 쉽게 수환경로 확산되어 생태계 독성 및 축적을 일으킬 것으로 생각된다.

동해안 석호의 수질오염 특성은 오염부하량 중 93% 이상이 호소 퇴적층에 의한 오염부하로 보고되고 있다. 이러한 석호의 수질개선을 위해 호소 내부의 오염물질 제거는 필수적인 개선방법이 되고 있다. 또한 석호는 유역에서 많은 토사가 유입되어 호소 수면적(저수량 등)을 감소시키고 있어 호소의 오염물질 제거와 수면적 확보를 위해 호소 퇴적물의 준설사업이 자주 실시되고 있다. 그러나 과거에 경포호 등 일부 석호에서 실시된 퇴적물 준설사업이 내부 오염물질 제거보다는 모래채취에 그쳐 수질개선 효과를 얻지 못하였을 뿐 아니라, 석호내부에 생태계 교란,

오염물질 확산 및 축적 등을 초래하였을 가능성이 매우 높다. 따라서 호소의 퇴적물 준설은 퇴적물(간극수 포함)에 존재하는 오염물질의 연구·검토가 필요하다. 특히 퇴적물의 준설을 실시할 경우 이러한 오염물질을 완전히 호소 외부로 제거하여야 한다. 또한 퇴적물(고형물)과 같이 준설된 침층수 및 간극수 등 상등수를 분리하여 처리함으로써 수환경에 미치는 영향을 최소화해야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 강원대학교 농업과학연구소의 지원으로 일부 기기분석 등이 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 원주지방환경관리청, 98 동해안 석호 조사 보고서, pp. 168 (1999).
2. Kwon, S. Y., Heo, W. M., Lee, S. H., Kim, D. J., and Kim, B. C., "The limnological survey of a coastal lagoon in Korea(4); Lake Songgi," *Kor J. Limnol.*, **38**(4), 461~473(2005).
3. 박석순, "퇴적물 초기 속성작용과 미량 오염물질의 거동," *대한환경공학회지*, **17**(9), 825~834(1995).
4. Cho, Y. G., Lee, C. B., and Choi, M. S., "Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea," *Marine Geology*, **159**, 111~129(1999).
5. Landrum, P. F. and Robbins, J. A., "Bioavailability of sediment-associated contaminants to benthic invertebrates: Sediments," 『Chemistry and Toxicity of In-place Pollutants』 R. Baudo, J. Giesy. and H. muntau.(Eds.), Ann Arbor, Lewis Publishers Inc., pp. 237~263 (1990).
6. Rhoades, J. D. Soluble salt. In: Method of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological Properties, 2nd ed., Page, A. L. Miller, R. H. and Keeney, D. R.(Eds.), Madison: American society of agronomy, pp. 167~179 (1982).
7. Sunda, W. G., Tester, P. A., and Huntsman, S. A., "Effects of cupric and zinc ion activities on the survival and reproduction of marine copepods," *Marine Biology*, **94**, 203~210(1987).
8. Stauber, J. L., and Florence, T. M., "Mechanism of toxicity of ionic copper complexes to algae" *Marine Biology*, **94**, 511~519(1984).
9. Schuytema, G. S., Nelson, P. O., Malueg, K. W., Nebeker, A. V., Krawczyk, D. F., Ratcliff, A. K., and Gakstatter, J. H., "Toxicity of cadmium in water and sediment slurries to 'Daphnia magna'," *Environ. Toxicol. Chem.*, **3**, 293~308(1984).
10. Cairns, J. Jr., Nebeker, A. V., Gakstatter, J. H., and

- Giffis, W., "Toxicity of Copper-spiked sediments to freshwater invertebrates," *Environ. Toxicol. Chem.*, **3**, 435 ~ 446(1984).
11. Guchte van de, C., and Mass-Diepeveen, J. L., "Screening sediments for toxicity: A water-concentration related problem," Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences, **1607**, pp. 81 ~ 91(1988).
 12. Griffin, R. A. and Jurinak, J. J., "Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soils extracts," *Soil Sci.*, **116**, 26 ~ 30(1973).
 13. Farrell, R. E., Yang, J. E., Huang, P. M., and Liaw, W. K., "Chemical Composition and Metal Speciation in Porewaters from the upper Qu'Appelle River Basin, Saskatchewan," *Water Poll. Res. J. Canada*, **28**(1), 83 ~ 109(1993).
 14. Allison, J. D., Brown, D. S., and Novo-Gradac., MINTEQA2/PRODEFA2, A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: Version 3.0 User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA. EPA/600/3-91/021(1991).
 15. 김석구, 이미경, 안재환, 강성원, 전상호, "퇴적물 내 입도와 유기물 함량이 영양염 및 중금속 농도에 미치는 영향," *대한환경공학회지*, **27**(9), 923 ~ 931(2005).
 16. Horne, J. A. & Goldman, R., *Limnology*, 2nd ed., Mac-Graw-Hill, New York, pp. 576(1994).