

## 석회 처리에 의한 오염 퇴적물 내 중금속의 형태 변화 및 용출 가능성

박길옥 · 전상호\*

(강원대학교 환경과학과)

**Chemical Forms and Release Potential of Heavy Metals from the Lime Treated Sediments.**  
*Park, Gilok and Sangho Jun\* (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon 200-701, Korea)*

Chemical forms and release potential of heavy metals were studied in the lime treated sediment of lake Chungcho. Chemical forms of heavy metals were analyzed using a sequential extraction method, and release potential of heavy metals was evaluated by the ratio of the content of labile forms to total metal one. Dominant form of Cd, Cu, Pb, and Zn in the untreated sediments was organic/sulfidic form that is stable in the reducing environment such as the bottom of Lake Chungcho. With liming of the sediment, the chemical forms of studied metals were greatly changed from organic/sulfidic form to adsorbed and reducible form, especially Cd and Cu to adsorbed and reducible form, but Pb and Zn to reducible form. It is believed that increase of unstable form of heavy metals in the sediments by liming was caused by the increase of pH of the pore water at the expense of organic/sulfidic form. Thus, we concluded that the liming approach currently used in the treatment of dredged sediments might cause the increase of labile form which is easily dissolved, and may increase the release of metals from the sediment into overlying water.

**Key words :** lime treatment, sediment, sequential extraction method, chemical form distribution, release potential

### 서 론

청초호는 강원도 속초시의 중앙에 위치하고 호소면적 1,362 km<sup>2</sup>, 최고수심 5 m, 유역면적 25.63 km<sup>2</sup>로 우리나라 자연 호수 중 가장 넓은 석호이며 부영양화가 심한 상태에 있다(전 등, 1996, 2005; 허 등, 2001). 본 호수는 동해와 연결된 기수호로서 조차의 차이가 작은 환경(microtidal environment)하에 있고(전 등, 1996) 담수원으로는 청초천 등 10여 개의 소규모 지천이 유입되고 있으며(속초시, 1998) 해수 교환이 원활하지 않아 수질 악화 및 장기간에 걸친 호소 퇴적물로 인한 악취 발생 등

문제점이 나타나고 있다. 이제까지 청초호에 대한 연구는 동해안 일대의 석호에 대한 육수학적 연구가 일부 진행되었으나, 수질 개선의 일환으로 실시되고 있는 퇴적물 준설과 특히 준설토에 함유된 오염물 및 중금속의 화학적 형태 및 수층으로의 용출 가능성과 이동성에 관한 연구는 일부에 지나지 않는 실정이다(전과 김, 1990; 박, 2003; 전 등, 2005).

청초호 준설퇴적물은 물을 다량 함유하고 있어 화학약품으로 급속 응집 침전시키고 있다. 침전시킨 퇴적물은 속초항에서 30 km 동해상에 투기하고 상등수와 미세입자는 호수로 유출시켜 높은 함량의 부유물이 관찰된다. 이에 속초시는 오염이 심화되고 있는 청초호의 수질을 개

\* Corresponding author: Tel: (033) 250-8573, Fax: (033) 251-3991, E-mail: junsang@kangwon.ac.kr

선하기 위하여 하수종말처리장건설, 해수순환용 채널 건설 및 호소 퇴적토 준설 등을 실시하였다. 그러나 바다와의 교류가 폐쇄되어 있는 청초호는 수질 정화를 위하여 호수 퇴적물을 준설하여도 유입 하천의 오염 물질을 제거하지 않는 한 단시간에 재퇴적이 일어나고 표층의 연니(ooze)에 의해 수질오염 현상이 발생되어(전, 1996; 전 등, 2005) 준설퇴적물을 호수 인근 토양에 투기한 경포호에서와 같이 수화현상이 심해질 가능성이 있다(전, 1996). 호소 바닥의 혐기성 상태의 퇴적물을 준설하여 호기성 상태의 대기에 노출될 경우 오염물질의 화학적 존재형태가 변하게 된다(전과 김, 1990; Saeki *et al.*, 1993; Ping-Chin and LO, 1998; 박, 2003; 전 등, 2005).

석회 처리법은 그 방법이 비교적 간단하여 오염된 퇴적물이나 도시 하수 슬러지 등의 냄새나 독성 물질을 제거하기 위한 방법으로 수세기 동안 사용되어 왔다(Outwater, 1994; Sloan and Basta, 1995). 산성 호수가 많은 스웨덴에서는 호수 퇴적물이나 하천 수계의 오염 물질의 정화를 위하여 석회 처리방법을 광범위하게 적용하고 있으며 호수 중 절반 정도인 6,500여 개 오염 호수에 대하여 본 방법을 적용하여 처리하고 있다(Dickson *et al.*, 1995; Swedish Environmental Protection Agency, 1997). 그간 처리의 용이성 등으로 쉽게 접근하였던 매립이나 알림 처리 방법으로 인한 문제점이 제기됨에 따라 재이용에 대한 연구가 진행되고 있다. 여러 선진국의 경우 준설 퇴적물을 토양과 함께 섞어 작물을 키우는 데 사용하고(Qinglin *et al.*, 2001; Wong *et al.*, 2001), 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서는 하수 슬러지와 하천이나 호소의 준설 퇴적물의 투기에 대한 규제를 강화하고 있다.

우리 나라에서는 청초호를 비롯한 여러 지역의 준설퇴적물의 투기에 대한 환경적 영향을 고려하지 않고 적절한 처리과정 없이 외해에 투기하고 있어 오염된 호수의 준설퇴적물에 대한 처리방안 및 재활용에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 수질개선을 위해 준설이 시행되었던 청초호 퇴적물에 대하여 석회처리가 호수 퇴적물에 함유된 중금속의 화학적 형태에 미치는 영향을 알아보고 이러한 화학적 형태 변화에 따른 중금속의 용출 가능성을 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 시료 채취 및 저장

시료는 2002년 5월에 청초호의 중앙에서 Ekman 채니기를 사용하여 표면에서 5 cm까지를 채취하였다. 채취시

채니기에 의한 오염을 피하기 위하여 금속과 닿지 않은 부분을 취하여 냉장 상태로 실험실로 운반하였다.

### 2. 시료 분석

실험에 사용된 퇴적물 시료는 채취된 습시료 및 습시료에 석회  $[Ca(OH)_2]$ 를 습시료 무게 대비 5%, 10%, 15%, 20%를 각각 가하여 균질화한 후 24시간 동안 실온에 밀봉한 채로 두었다가 1.0 g씩 각각 3개의 시료를 만들어 분석에 사용하였다.

#### 1) pH 측정

pH 측정은 시료를 풍건하여 10.0 g을 취한 후 증류수 50 mL를 가하여 간헐적으로 저어주면서 1시간 경과 후 pH 측정기 (Model 735p, Istek Co.)를 이용하여 측정하였다.

#### 2) 수분 함량과 완전연소가능량 (Ignition Loss)

수분 함량은 퇴적물 시료를 5.0 g씩 취하여 습시료와 105°C의 무게차를 습시료의 무게로 나누어 구하였다. 3회 분석하여 그 평균값을 취하였다. 완전연소가능량은 퇴적물을 105°C와 550°C의 무게차를 105°C 무게로 나누어 구하였다 (APHA, 1992). 3회 분석하여 그 평균값을 취하였다.

#### 3) 유기질소 함량 (Total kjeldahl nitrogen content)

유기질소 분석은 Kjeldahl법 (APHA, 1992)에 의하여 시료를 황산으로 분해시켜 암모니아성 질소 형태로 전환시켜 정량하여 측정하였다. 각 시료당 3회 분석하여 평균값을 취하였다. 퇴적물의 부식화도는 완전연소가능량과 총질소의 비로 했는데 20 이하는 oligohumic, 20~25는 mesohumic, 25 이상은 polyhumic으로 하였다 (Hakan-son and Jansson, 1983).

#### 4) 입도분포

입도 분석은 풍건 후 분석에 미치는 영향을 제거하기 위하여 염분, 유기물 및 철분을 제거하였고 calgon으로 확산시킨 후 입도 분석기 (Mastersizer 2000, Malvern Ins.)를 사용하였고 Shephard (1954)의 분류법에 따라 평균입도를 구하였다.

#### 5) 중금속의 화학적 존재형태

연속추출은 퇴적물이나 토양 내 중금속의 거동, 환경에의 유해성 정도 예측을 목적으로 하며 본 연구에서는 Tessier *et al.* (1979)의 방법에 따라 분석하였다. 이 연속추출방법은 크게 5단계로 나누어지는데 미립자의 표면에 흡착된 형태인 adsorbed fraction (이하 흡착된 형태), 탄

산염의 형태로 존재하는 carbonate fraction (이하 탄산염 형태), 금속 산화물과 공침된 형태로 존재하는 reducible fraction (이하 공침된 형태), 유기물과 관련되거나 유화물 형태로 존재하는 organic/sulfidic fraction (이하 산화성 형태), 퇴적물 자체의 구성 성분과 관련된 residual fraction (이하 광물 형태)으로 구분하여 분석하였고, 총함량은 각 존재형태별 중금속의 합으로 계산하였다. 각각의 존재형태에서 여과(0.45 µm membrane filter)한 여액을 ICP-MS (Ultramass 700, Varian)로 Cd, Cu, Pb, Zn 등을 분석하였다.

각 존재형태별 분석방법을 살펴보면 흡착된 형태는 pH 7.0으로 조정된 1M의 MgCl<sub>2</sub> 용액을 가하여 실온에서 1시간 동안 수욕상에서 반응시킨 여액을 사용하였고, 탄산염 형태는 pH 5.0으로 조정된 1M의 NaOAc 8 mL를 넣은 후 5시간 동안 반응시킨 시료를 사용하였다. 공침된 형태의 중금속은 0.04 M NH<sub>2</sub>OH·HCl 20 mL를 가하여 96°C에서 반응 후 여과하였고 산화성 형태는 0.02 M HNO<sub>3</sub>과 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 3.2 M NH<sub>4</sub>OAc를 사용하였으며 광물 형태는 HClO<sub>4</sub>과 HF를 사용하여 분해시킨 후 12 N HCl 과 증류수로 용해시켜 분석에 사용하였다.

분석의 정밀도는 같은 시료를 세 번 분석하여 측정하였으며 변이계수(Coefficient of variation)는 Cd은 흡착된 형태, 탄산염 형태, 공침된 형태, 산화성 형태, 광물 형태가 각각 9.1%, 9.9%, 10.0%, 5.8%, 5.6%이고 Cu는 9.0%, 11.6%, 4.8%, 2.9%, 4.9%이고, Pb은 9.1%, 5.1%, 4.5%, 6.9%, 10.0%이며 Zn은 4.4%, 16.1%, 12.9%, 1.9%, 6.3%이다.

#### 6) 중금속의 이동가능성

중금속의 이동도는 퇴적물 내 총 함량 보다는 고형물과의 결합 형태에 따라 달라질 수 있다(Stalika *et al.*, 1999). 수층으로 이동 가능한 부분은 Tessier *et al.* (1979)이 제안한 5가지 결합 형태 중 고형물과의 결합력이 약하여 수층의 교란이나 수체 또는 퇴적물에 함유된 유기물의 분해로 인한 pH 변화나 염분도 증가시에 이동이 일어날 가능성이 큰 부분인 흡착된 형태와 유기물 분해 등에 의한 산화환원전위의 변화시 이동가능한 부분인 공침된 형태의 합으로 하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 퇴적물의 이화학적 특징

채취 당시의 시료는 청회색 빛을 띠었고 심한 악취와

황화수소 냄새가 났으며 손으로 만졌을 때 미끈거리는 느낌이 있었다.

퇴적물 시료의 pH는 6.4, 수분 함량은 68%, 완전연소 가능량은 12%, 총질소 함량은 0.4%였다. 퇴적물의 부식화도는 30으로 polyhumic으로 분류되어(Hakanson and Jansson, 1983) 유기물의 분해가 잘 진행된 상태임을 알 수 있었다.

#### 2. 입도 분포

청초호 퇴적물의 평균 입도 조성은 점토 25.8%, 실트 67.2%, 모래 7.0%로 의암호, 춘천호 등에 비해 세립질 함량이 높은 것으로 나타나 수체의 물리적 영향이 클 것으로 판단되는 준설 과정동안 세립질의 부유물질의 증가와 부유된 미세 입자 확산과 재 퇴적으로 인한 오염 범위의 증가 및 저서생태계의 교란을 가중시킬 가능성이 클 것으로 판단된다(전 등, 2005).

분석하고자 하는 시료의 입자 크기는 그 지역의 수리학, 지형학, 퇴적학의 중요한 지표가 된다(Friedman and Sanders, 1978; Goudie, 1981). 일반적으로 퇴적물에 함유된 오염물질의 농도는 세립질 퇴적물 함량과 매우 높은 상관성을 갖고 있다(Saeki *et al.*, 1993). 재부유 가능성이 큰 크기로 조성되어 있는 청초호는 퇴적층에 물리적 교란이 있을 경우에는 오염물질이 잘 제거되지 않을 것으로 판단된다. 또한, 준설시 오염물질이 재부유되어 수층으로 이동할 가능성이 클 것으로 사료되며(전, 1991) 지속적으로 도시 하수와 산업 폐수의 영향을 받은 퇴적물에서는 중금속의 농도와 화학적 존재형태에 중요한 인자로 작용하

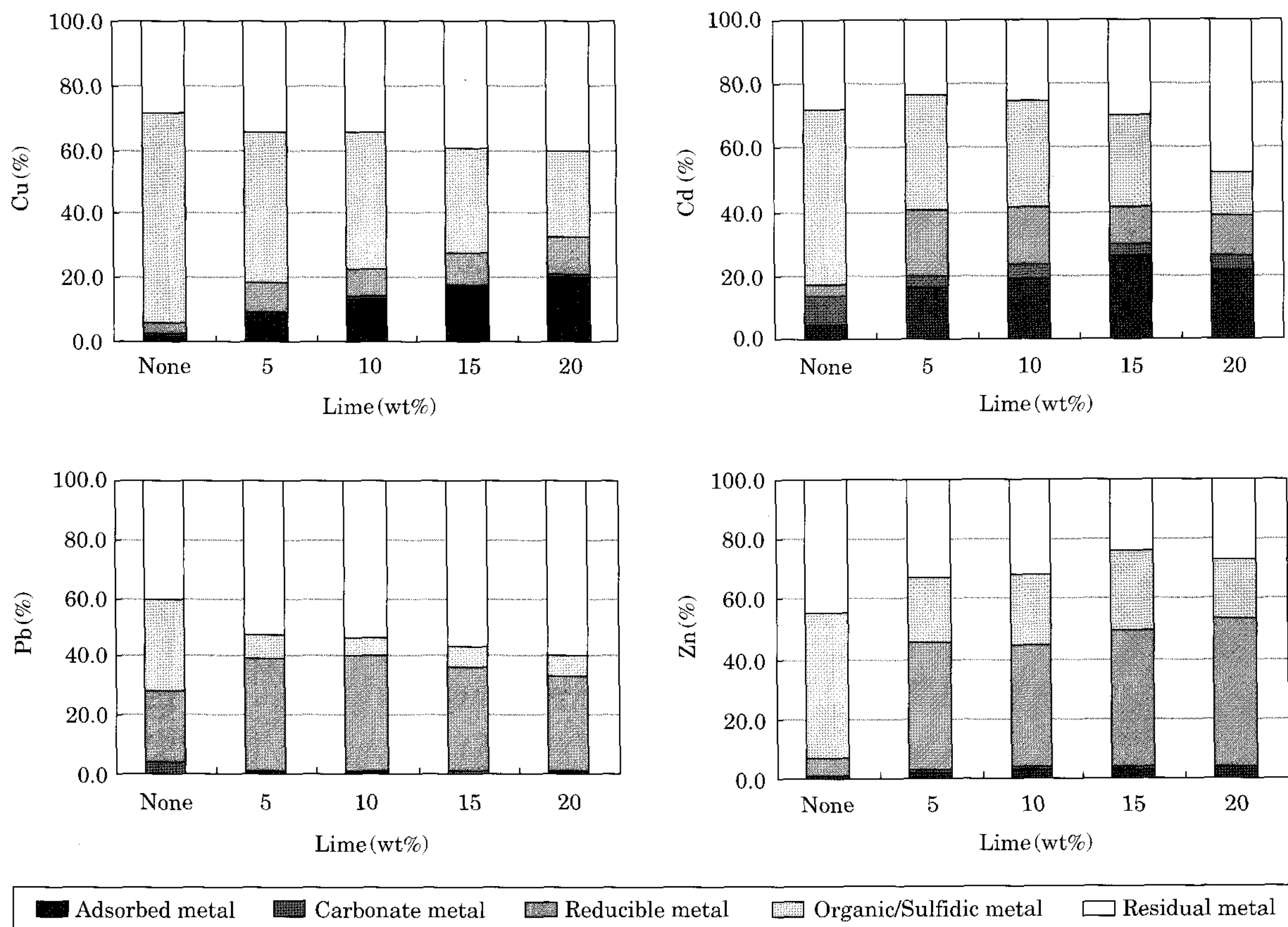
**Table 1.** Physico-chemical characteristics and concentrations of heavy metals of untreated surface sediment in Lake Chungcho.

Content	Characteristic
pH	6.4
Water content (%)	68.2±0.1
Loss on ignition (%)	12.0±0.2
Total nitrogen (%)	0.4±0.0
Particle size distribution (%)	
Sand	7.0
Silt	67.2
Clay	25.8
Heavy metal	Mean±S.D. <sup>a</sup>
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	2.6±0.1
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	44.0±0.7
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	37.0±2.0
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	141.3±2.7

<sup>a</sup>S.D: standard deviation

**Table 2.** Fractional compositions of Cd, Cu, Pb and Zn of untreated surface sediment from Lake Chungcho. (unit: mg kg<sup>-1</sup>)

Metal	Fraction					Total
	Adsorbed fraction	Carbonate fraction	Reducible fraction	Organic/Sulfidic fraction	Residual fraction	
Cd	0.11±0.02	0.25±0.03	0.09±0.01	1.44±0.08	0.74±0.04	2.64±0.15
Cu	0.79±0.05	0.26±0.03	1.45±0.07	28.98±0.83	12.49±0.61	43.98±0.70
Pb	0.19±0.02	1.30±0.07	8.92±0.20	11.81±0.81	14.81±1.48	37.02±1.97
Zn	1.55±0.05	0.42±0.07	8.33±1.08	68.23±1.27	62.72±3.98	141.26±2.73



**Fig. 1.** Fractional compositions of Cd, Cu, Pb and Zn after liming of sediments from Lake Chungcho.

여 퇴적물 내 중금속의 농도가 높을 것으로 사료된다.

Table 1에 청초호 표층 퇴적물의 이화학적 특징을 나타내었다.

**3. 중금속의 화학적 존재형태별 농도와 수층으로 이동가능성 평가**

**1) 미처리 시료에 함유된 중금속의 존재형태별 농도와 비율**

청초호 표층 퇴적물에 함유된 중금속의 화학적 존재형

태별 함량을 구분하여 살펴보면 Cd의 경우 흡착된 형태, 탄산염 형태, 공침된 형태, 산화성 형태, 광물 형태가 각각 0.11±0.02, 0.25±0.03, 0.09±0.01, 1.44±0.08, 0.74±0.04 mg kg<sup>-1</sup>이고, Cu는 0.79±0.05, 0.26±0.03, 1.45±0.07, 28.98±0.83, 12.49±0.61 mg kg<sup>-1</sup>, Pb은 0.19±0.02, 1.30±0.07, 8.92±0.20, 11.81±0.81, 14.81±1.48 mg kg<sup>-1</sup>이며 Zn은 1.55±0.05, 0.42±0.07, 8.33±1.08, 68.23±1.27, 62.72±3.98 mg kg<sup>-1</sup>이었다(Table 2).

청초호 표층 퇴적물에 함유된 중금속의 화학적 존재형태별 비율을 흡착된 형태, 탄산염 형태, 공침된 형태, 산



화성 형태, 광물 형태로 구분하여 살펴보면 Cd는 4.0, 9.6, 3.5, 54.7, 28.2%였고 Cu는 1.8, 0.6, 3.3, 65.9, 28.4%, Pb는 0.5, 3.5, 24.1, 31.9, 40.0%, Zn은 1.1, 0.3, 5.9, 48.3, 44.4%로서 조사 금속 모두 호수 바닥의 혐기성 상태에서 안정한 부분으로 존재하는 산화성 형태의 비율이 높았다. 청초호 퇴적물에 함유된 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 존재 형태별 비율은 미처리시료에서 산화성 형태의 비율이 높았으나 석회처리 시료에서는 이 부분의 비율이 줄어든 반면 흡착된 형태와 공침된 형태로 형태 변화되어 이 부분의 비율이 증가하였다.

## 2) 석회처리 시료에 함유된 중금속의 존재형태별 비율

석회 미처리 시료에 함유된 Cd, Cu, Zn의 존재형태별 비율은 산화성 형태가 가장 많았으나 석회 처리 시료에서 흡착된 형태와 공침된 형태의 비율이 증가하였고 산화성 형태의 비율은 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 1에 석회처리에 따른 Cd, Cu, Pb, Zn의 총량에 대한 존재형태별 비율을 나타내었다.

### (1) Cd

Cd의 존재형태별 비율을 살펴보면 흡착된 형태는 미처리 시료에서 4.0%로 낮았으나 석회 15% 함유 시료에서 26.5%로 높게 나타났다. 탄산염 형태는 미처리 시료가 석회 함유 시료보다 함량 비율이 높게 나타났다. 공침된 형태는 석회 5% 함유 시료에서 20.1%로 높았다. 산화성 형태는 미처리 시료에서 함량 비율이 높았으나 석회 함량 증가에 따라 낮아지는 경향을 나타내었다. 광물 형태는 석회 함량 증가에 따라 높게 나타났다.

Cd의 존재형태 중 산화성 형태는 호수 바닥의 혐기성 상태에서는 안정한 형태로 존재하기 때문에 미처리 시료에서 이 부분의 비율이 높았으나 준설 시 대기중에 노출·건조되면서 산화되어 불안정한 형태인 흡착된 형태와 공침된 형태로 변화되어 수층으로 용출될 가능성이 크다고 사료된다(Saeki *et al.*, 1993).

청초호 퇴적물에 함유된 Cd의 존재형태 중 유기물이나 황화물의 형태로 존재하는 산화성 형태가 많은 것은 그동안 호수 주변에서 배출하는 도시하수와 수산물 가공시의 배수 등으로 퇴적물이 혐기성에 가까운 상태로 되어 있기 때문으로 사료된다.

퇴적물 내의 중금속은 호수 바닥의 혐기성 상태에서는 황화수소나 고체 황화물로 주로 존재한다(Load and Church, 1983; Howarth and Jorgensen, 1984; Nriagu and Soon, 1985; Swider and Mackin, 1989; 황 등, 2007). 이러한 중금속은 산소에 의해 쉽게 파괴될 수 있기 때문

에 퇴적물 내에 황화물과 결합된 형태의 중금속이 과량 존재하게 되면 준설시 대기중 노출로 인하여 이러한 부분의 중금속이 수층으로 용출될 가능성이 높을 것으로 사료된다.

### (2) Cu

Cu의 존재형태별 비율을 살펴보면 흡착된 형태는 미처리 시료에서 가장 낮았고 석회함량 20%에서 가장 높았으며 탄산염 형태는 석회 함량에 따른 차이가 크지 않았다. Fe와 Mn의 산화물과 공침된 형태로 존재하는 공침된 형태는 미처리 시료에서 가장 낮은 함량비를 나타내었고 20% 함유 시료에서 가장 높았다. 산화성 형태는 미처리 시료에서 함량 비율이 높았으나 석회 함량 증가에 따라 이 부분의 비율이 감소하는 경향을 나타내었다. 광물의 결정 내에 존재하는 광물 형태는 석회 함량 증가에 따라 함량 비율이 높게 나타났다.

석회처리는 하수 슬러지에 포함된 Cu의 존재형태 중 혐기성 상태에서 상대적으로 안정한 형태로 존재하는 산화성 형태를 불안정한 부분인 흡착된 형태와 공침된 형태로 형태 변화시켜 Cu의 용출을 높일 가능성이 매우 큰 것으로 알려져 왔다(Ping-Chin and LO, 1998). 특히 Cu는 유기물과 친화력이 높은 금속으로(McLaren and Cuawford, 1973; Emmerich *et al.*, 1982) 청초호와 같이 유기물의 함량이 높은 호수에서는 석회 처리로 인하여 퇴적물 내 Cu의 용출을 증가시킬 가능성이 높을 것으로 사료된다.

청초호 퇴적물에 함유된 Cu는 석회 미처리 시료에서 유기물과 황화물의 형태로 존재하는 산화성 형태의 비율이 높았으나 석회 첨가로 인하여 pH가 높아져 오히려 수층으로 이동 가능성이 높은 흡착된 형태와 공침된 형태의 비율이 증가하였다. 이는 토양이나 수층으로 중금속의 용출을 억제하기 위한 목적으로 행해지는 석회 처리가 오히려 Cu의 용출을 증가시킬 가능성이 있는 것으로 판단한다.

### (3) Pb

Pb의 존재형태별 함량 비율 중 흡착된 형태와 탄산염 형태는 석회 함량에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다. 공침된 형태는 미처리 시료에서 가장 낮은 함량비를 나타내었고 석회 10% 함유 시료에서 가장 높았다. 산화성 형태는 미처리 시료에서 비율이 가장 높았으나 석회 함량 증가에 따라 급격히 낮아지는 경향을 보였다. 공침된 형태는 석회 함량 증가에 따라 함량 비율이 높았다. Pb의 경우 석회 첨가 시료에서 산화성 형태의 함량 비율이 줄어들고 이동 가능성이 적은 광물 형태로 변화되어

안정화되는 부분도 있으나 이동가능성이 큰 부분인 공침된 형태로도 일부 변화되어 수층으로의 Pb의 용출을 일으킬 가능성이 있는 것으로 사료된다.

(4) Zn

Zn의 존재형태별 함량비는 석회 미처리 시료에서 흡착된 형태와 공침된 형태가 가장 낮았고 탄산염 형태는 큰 변화가 없었다. 수층이 호기적 상태로 될 때 용출가능성이 큰 부분인 산화성 형태는 미처리 시료에서 가장 높았고 석회 함유량 증가에 따라 점점 낮아지는 경향을 나타내었다. 광물 형태는 석회 함유량 증가에 따라 낮아지는 경향을 보였다.

Zn의 경우 석회 미처리 시료에서 산화성 형태와 광물 형태의 비율이 높았으나 석회 함유량 증가에 따라 이 두 부분의 비율이 줄어든 반면 공침된 형태는 49.7%로 증가되어 수층으로의 용출량을 늘릴 가능성이 높은 것으로 판단된다. 이는 산성 호수 내 중금속 제거를 위해 시행된 수산화칼슘 처리 사례에서와 같이 퇴적물 내 Zn의 농도가 증가한 것은 수산화칼슘처리로 인하여 pH의 증가에 따른 것으로 사료된다(Dillon and Smith, 1984; Roghe-

rud and Fjeld, 2001).

3) 석회 처리 후 수층으로 이동가능성

퇴적물에 함유된 중금속 중 수층으로 이동가능한 부분의 비율을 알아 본 결과 Cd의 경우 미처리 시료에서 7.9%였으나 석회 함유량 5, 10, 15, 20%에서 36.6, 37.6, 38.0, 34.7%로 급격히 증가하였다. Cu는 미처리 시료에서 5.1%였으나 석회함량 5, 10, 15, 20%에서 18.2, 23.0, 27.5, 31.8%로 20%함유 시료에서 가장 높게 나타났다. Pb은 미처리 시료에서는 24.6%였으나 석회 함유량을 5, 10, 15, 20%로 증가함에 따라 38.9, 40.2, 36.0, 33.6%로 증가하였으나 석회함량에 따른 차이는 크지 않았다. Zn은 미처리 시료에서 7.0%였으나, 5, 10, 15, 20% 석회 함유량 변화시 45.1, 44.0, 49.0, 53.2%로 이동 가능 부분의 비율이 크게 증가하였다.

석회 함유량에 따라 수층으로 이동 가능한 부분의 비율이 가장 높은 경우를 살펴보면 Cd의 경우에는 15%, Cu는 20%, Pb은 10%, Zn은 20%에서 크게 높아져 수층으로 용출되는 양을 늘릴 가능성이 높은 것으로 사료된다.

Fig. 2와 Fig. 3에 석회 함유량 변화에 따라 수층으로 이

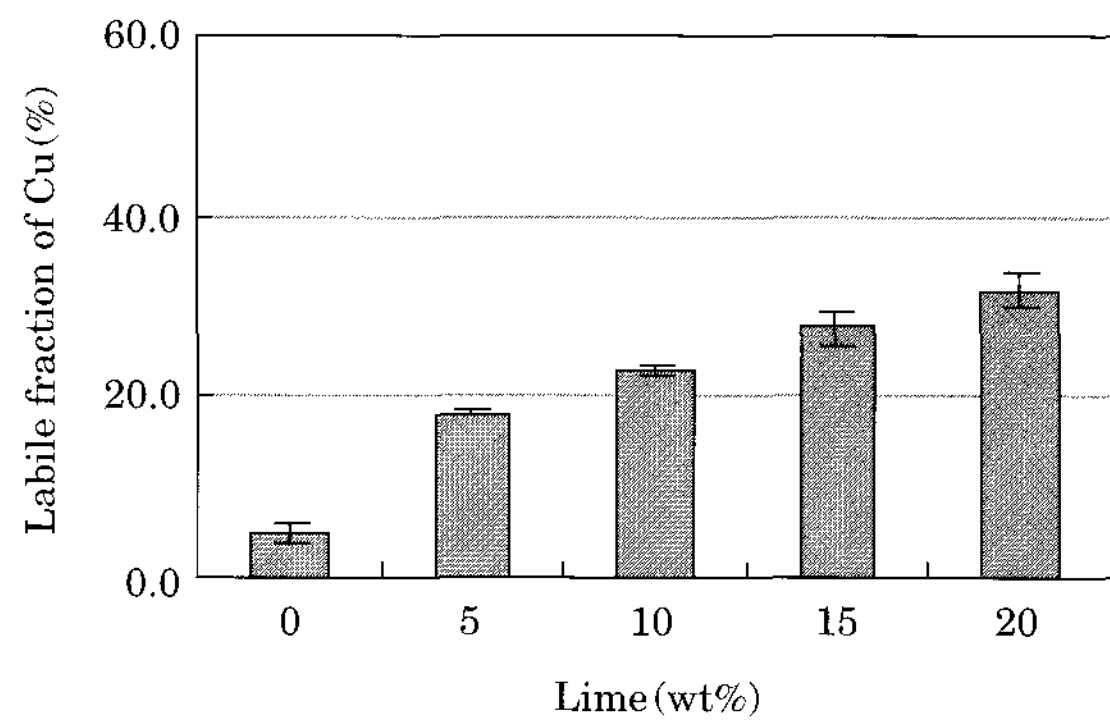
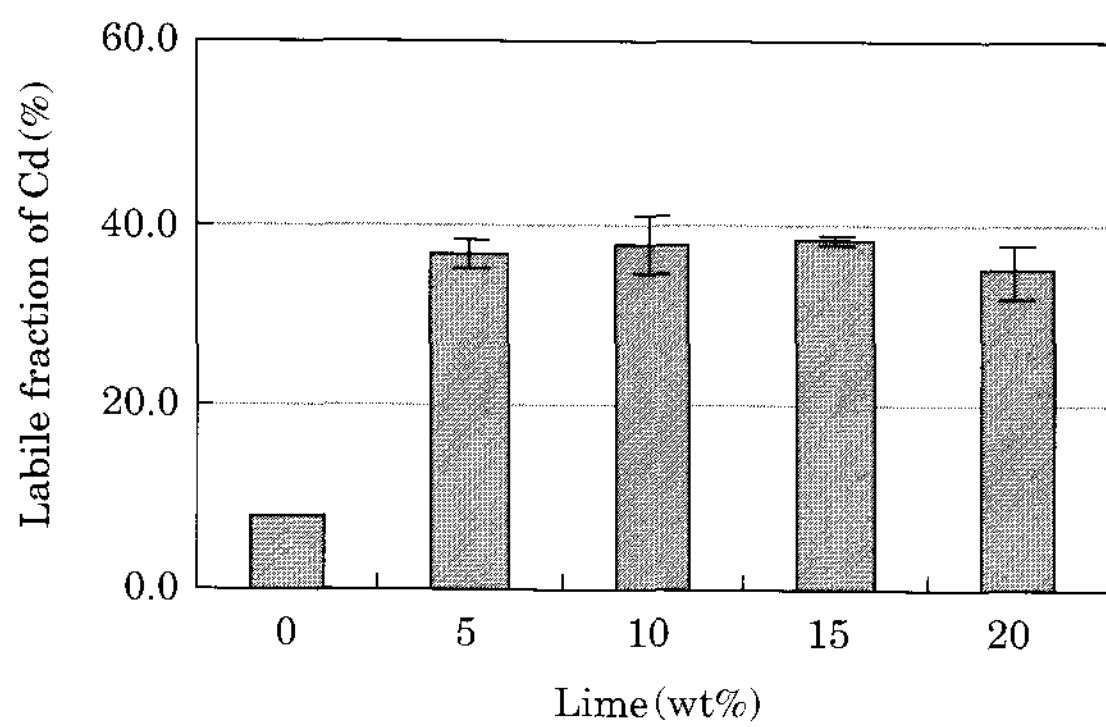


Fig. 2. Fractions of labile form of sediment Cd and Cu after liming.

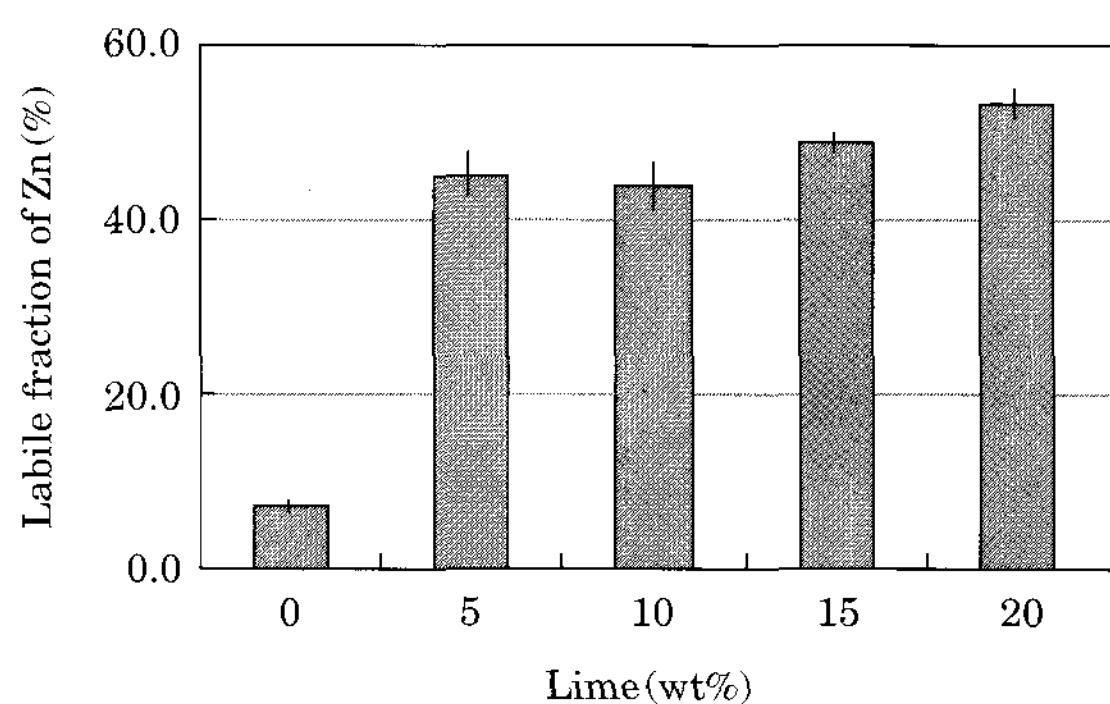
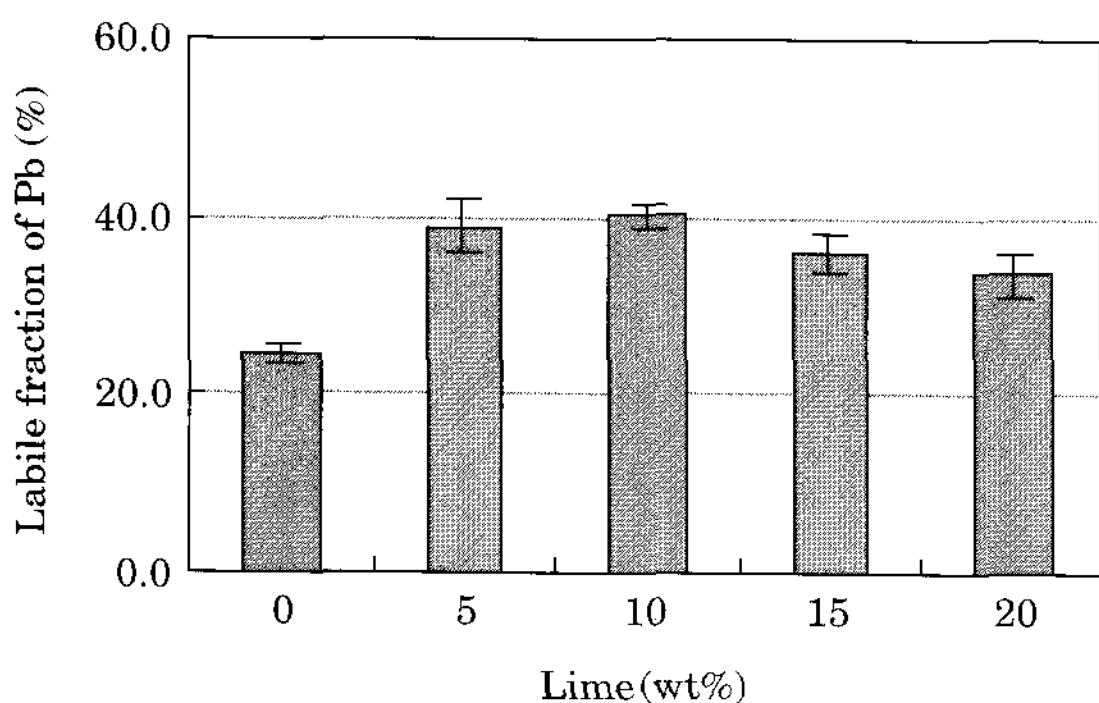


Fig. 3. Fractions of labile form of sediment Pb and Zn after liming.

동기능한 금속별 함량 비율을 나타내었다

## 결 론

준설에 의한 청초호 수질 개선 효과를 알아보기 위하여 준설퇴적물에 함유된 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn)에 대하여 석회처리 후 화학적 존재형태 비율 변화와 수층으로의 이동 가능성을 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

청초호 퇴적물 내 중금속의 화학적 형태 분석에서 석회미처리 시료의 경우 Cd, Cu와 Zn은 산화성 형태가 많아 유기물의 분해와 관련된 부분과 이에 따른 황화물의 침전이 중요한 요인으로 사료되며 Pb은 산화성 형태 외에도 광물 형태가 많아 유기물의 분해와 관련된 부분과 황화물의 침전뿐만 아니라 유역의 침식도 중요한 요인으로 사료된다.

석회 처리시 석회 함량 증가에 따라 혐기성 상태에서 안정한 상태로 존재하는 부분인 산화성 형태가 광물 형태로 형태 변화되어 안정화시키는 효과도 있으나 용출가능성이 높은 공침된 형태로도 변화되어 호소 퇴적물의 처리시에 적용되는 중금속 저감 처리 방법 중 석회처리는 환경적인 면에서 수질오염을 일으킬 가능성을 높일 수 있다.

수층으로 이동 가능한 부분의 비율은 Cd의 경우 석회 함량 15%, Pb은 10%, Cu와 Zn은 20%로 처리한 시료에서 높은 것으로 나타나 석회처리에 의하여 수층으로 용출되는 양을 늘릴 가능성이 크다고 사료된다.

오염퇴적물의 석회처리는 퇴적물 내에 존재하는 중금속의 화학적 형태를 물에 더 쉽게 용출되어 나올 수 있는 형태로 변화시켜 수질오염을 가중시킬 가능성이 있다.

## 적 요

오염물질을 제거하기 위한 방법 중 하나인 석회 처리를 통하여 청초호 표층 퇴적물에 함유된 중금속의 존재 형태 변화와 환경변화시 수층으로의 용출가능성을 알아보았다. 연속추출 방법을 사용하여 중금속의 화학적 형태를 분석하였고 수층으로의 용출 가능성은 흡착된 형태와 공침된 형태의 합으로 하였다.

석회 처리 전의 청초호 퇴적물에 함유된 Cd과 Cu 및 Zn의 존재형태는 호수 바닥과 같은 혐기성 상태에서 안정된 산화성 형태가 많았으나 석회 처리 시료에서는 이

부분의 비율이 줄어든 반면 용출되기 쉬운 부분인 흡착된 형태와 공침된 형태의 비율이 증가하였다. 이는 석회 첨가로 인한 공극수의 pH 상승과 대기중에 노출로 인한 산화에 의한 것으로 판단된다.

수층으로 이동 가능한 부분의 비율은 Cd의 경우 석회 함량 15%, Pb은 10%, Cu와 Zn은 20%에서 높게 나타나 중금속으로 오염된 퇴적물의 석회 처리는 퇴적물에 함유된 중금속의 용출을 증가시킬 가능성이 있는 것으로 사료된다.

## 인 용 문 헌

- 박길옥. 2003. 건조·가열처리 및 석회처리가 청초호 퇴적물에 포함된 중금속의 존재형태에 미치는 영향. 강원대학교 석사학위논문.
- 속초시. 1995. 청초호퇴적물준설사업 실시설계보고서.
- 속초시. 1998. 속초시도시기본계획.
- 전상호. 1991. 호소 퇴적물 준설이 수질에 미치는 영향의 평가 방법에 관한 연구. 한국환경과학연구 협의회. 60 p.
- 전상호. 1996. 한국의 주요 호수 및 강물의 오염 특징과 개선 방안. 국제환경심포지엄. 국제환경포럼, p. 1-14.
- 전상호, 김휘중. 1990. 경포호의 준설에 의한 수질개선가능성에 관하여. 한국지구과학회지 11: 174-180.
- 전상호, 박길옥, 김휘중, 안혜정, 김신희. 2005. 건조·가열처리가 청초호 퇴적물 중 중금속의 화학적 존재형태에 미치는 영향. 한국육수학회지 38: 334-340.
- 전상호, 전방옥, 유성환. 1996. 동해안 자연호수의 수질조사 동해안 호수 보존 심포지엄. 강릉경제정의실천시민연합, p. 83-118.
- 허우명, 이상균, 권상용, 김동진, 김범철. 2001. 동해안 석호의 육수학적 조사(1): 청초호. 한국육수학회지 34: 206-214.
- 황경엽, 박성열, 백원석, 정재호, 김영훈, 신원식, 이남주, 황인성. 2007. 낙동강 퇴적물 내 중금속 존재형태 및 용출 가능성. 상하수도학회지 21(1): 113-122.
- APHA. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed.
- Dickson, W., H. Borg, C. Ekstrom, E. Hornstrom and T. Groenlund. 1995. Reliming and reacidification effects on lakewater-chemistry, plankton and macrophytes. *Water, Air, and Soil Pollution* 85: 919-924.
- Dillon, P.J. and P.J. Smith. 1984. Trace metal and nutrient accumulation in the sediments of lakes near Sudbury, Ontario, p. 375-416. *In: Environmental Impacts of Smelters* (Nriagu, J.O., ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Emmerich, W.E., L.J. Lund, A.L. Page and A.C. Chang. 1982. Predicted solution phase forms of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.* 11: 178-

- 182.
- Friedman, G.M. and J.E. Sanders. 1978. Principles of sedimentology. Wiley, New York. 792 p.
- Goudie, A. (ed). 1981. Geomorphological techniques. Allen and Unwin, London. 395 p.
- Håkanson, L. and M. Jansson. 1983. Principles of lake sedimentology Springer-Verlag, Berlin. 316 p.
- Howarth, R.W. and B.B. Jørgensen. 1984. Formation of  $^{35}\text{S}$ -labeled elemental sulfur and pyrite in coastal marine sediments (Limfjorden and Kysing Fjord, Denmark) during short term  $^{35}\text{SO}_4^{2-}$  reduction measurements. *Geochim. Cosmochim. Acta* **48**: 1807-1818.
- Hsiau, P.C. and S.L. LO. 1998. Fractionation and leachability of Cu in lime-treated Sewage Sludge. *Wat. Res.* **32**: 1103-1108.
- Lord, H.C. J. and T.M. Church. 1983. The geochemistry of salt marshes sedimentary ion diffusion, sulfate reduction, and pyritization. *Geochim. Cosmochim. Acta* **47**: 1381-1391.
- McLaren, T.G. and D.V. Cuawford. 1973. The fractionation of copper in soils. *Journal of Soil Science* **24**: 172-181.
- Nriagu, J.O. and Y.K. Soon. 1985. Distribution and isotopic composition of sulfur in lake sediments of northern Ontario. *Geochim. Cosmochim. Acta* **49**: 823-834.
- Outwater, A.B. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals. CRC press, Florida. p. 101-111.
- Rogherud, S. and E. Fjeld. 2001. Trace element contamination of Norwegian lake sediments. *Ambio* **30**: 11-19.
- Saeki, K., M. Okazaki and S. Matsumoto. 1993. The Chemical phase changes in heavy metals with drying and oxidation of the lake sediment. *Wat. Res.* **27**: 1243-1251.
- Shepard, F.P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sed. Pet.* **24**: 151-158.
- Sloan J.J. and N.T. Basta. 1995. Remediation of acid soils by using alkaline biosolids. *J. Environ. Qual.* **24**: 1097-1103.
- Stalika, C.D., G.A. Pilidis and S.M. Tzouwara-Karayanni. 1999. Use of a sequential extraction scheme with data normalization to assess the metal distribution in agricultural soils irrigated by lake water. *Sci. Total Environ.* **236**: 7-18.
- Swedish Environmental Protection Agency. 1997. Biologisk mangfald i kalkade sjoar-utvardering av IKEU-programmets sex forsta ar. Report, 4816 p.
- Swider, K.T. and J.E. Mackin. 1989. Transformation of sulfur compounds in marsh-flat sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**: 2311-2323.
- Tessier, P.G.C. Campbell and M. Bisson. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* **51**: 844-851.
- Wong, J.W.C., K.M. Lai, D.S. Su and M. Fang. 2001. Availability of heavy metals for Brassica chinensis grown on an acidic loamy soil amended with a domestic and an industrial sewage sludge. *Water, Air, and Soil Pollution* **128**: 339-353.
- Xie, Q., X. Zhang, D. Wang, J. Li, Y. Qin and Y. Chen. 2001. Research on the effect of sludge fertilizer on farmland and the safety of heavy metals in a karst area. *Env. Geology* **41**(3/4).

(Manuscript received 4 March 2008,  
Revision accepted 23 May 2008)