

건조 · 가열처리가 청초호 퇴적물 중 중금속의 화학적 존재형태에 미치는 영향

전상호* · 박길옥 · 김휘중 · 안혜정¹ · 김신희²

(*강원대학교 환경학과, ¹남캘리포니아대학 약학부,
²오클라호마대학 식품영양학과)

Effects of Drying and Heating on the Chemical Species of Heavy Metals in Lake Chungcho Sediments. *Jun, Sang-ho**, *Gilok Park*, *Heejoung Kim*, *Haejung An*¹ and *Shinhee Kim*² (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon Kangwon, 200-701, Korea; ¹School of Pharmacy, University of Southern California, LA, USA, ²Department of Nutrition & Food Science, 351 HES, Oklahoma State University, Stillwater OK 74078, USA)

The chemical forms of Cd, Cu, Pb, and Zn were analysed by sequential extraction technique to evaluate the effects of drying and heating of dredged sediments from Lake Chungcho. The most abundant fraction of Cd, Cu, and Zn in the wet and untreated sediment was organic/sulfidic fraction that is stable in reducing environment such as the bottom condition of Lake Chungcho, while Pb dominated in residual fraction. This means that the source of Cd, Cu, and Zn in the Chungcho lake sediment is related to the organic degradation and Pb to the erosion from surrounding rocks.

With drying and oxidation by dredging, heating treatment, and disposal of the lake sediment, the chemical forms of studied metals changed greatly from organic/sulfidic fraction to adsorbed and reducible fractions which are more labile in oxygenated environment. Organic/sulfidic fraction of Cd, Cu and Pb in the wet sediment was transformed with drying and heating treatments to the labile ones like adsorbed and reducible fraction, but Zn to carbonate and reducible fraction. Heating of the sediment at 320°C greatly increased the labile fraction of Cd and Cu, while that at 105°C for Pb and Zn.

It is believed that the increase in labile forms of heavy metals in the sediments by drying and heating is caused by the contact with oxygen during drying and heating and by the increase of pH of the pore water at the expense of organic/sulfidic fraction. It is concluded that the drying and oxidation currently used in the treatment of dredged sediment can increase labile forms of heavy metals in the sediment, and the potential of the metal availability from the sediment.

Key words : chemical form, sequential extraction, drying, heating treatment, labile form, metal pollution

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

서론

청초호는 동해안 속초 해안에 해류에 의한 사주의 연장에 의해 생성된 기수호로서 평균 해면은 19.5 cm, 대조차는 19.4 cm, 소조차 9.1 cm, 평균조차 14.2 cm의 소조차 환경 (microtidal environment) 수역이다(전 등, 1996).

청초호 일대의 지질은 중생대 주라기 흑운모 화강암과 이를 부정합으로 덮고 있는 제4기 층적층으로 구성되어 있으며 흑운모 화강암이 광범위하게 분포되어 있다. 주요 구성 광물은 석영, 장석, 흑운모로 상대적으로 풍화에 강한 광물로 구성되어 있다.

청초호는 국내의 자연 석호 중 가장 넓은 유역면적 (25.63 km²)을 가지며 유입하천으로는 청초천 등 10여개 하천에서 도시하수, 축산폐수, 수산업과 관련된 산업폐수가 직접 유입되고, 동해와 연결되어 있으나 물의 순환이 제한되기 때문에 수질오염현상이 심한 상태이다(전 등, 1996). 속초시에서는 이러한 청초호의 수질개선을 위하여 하수종말처리장 건설, 해수순환용 채널 건설, 퇴적층 준설 등을 하여 수질개선이 나타나고 있다.

청초호는 수질개선을 위하여 호소 퇴적물을 준설하여도 유입 하천의 오염물질을 제거하지 않는 한 단시간에 재 퇴적이 일어나고 표층의 연니(ooze)에 의해 수질오염의 가능성이 큰 호소이고, 준설된 퇴적물을 적절한 처리 없이 속초 연안에서 30 km 떨어진 해안에 투기하고 있어 2차 오염원으로 작용할 가능성이 있다.

청초호의 퇴적물은 점토 함량이 높은 빨질 퇴적물로 퇴적물에 함유된 중금속의 존재형태 분석 결과, 수층으로 용출 가능한 부분의 비율이 높았고, 중금속의 대부분은 유기물 또는 황화물의 형태 (organic/sulfidic form)로 존재하는 비율이 높다(전 등, 1996).

퇴적물에 함유된 중금속은 호소 바닥의 혐기성 상태에서는 매우 안정한 organic/sulfide형이 많기 때문에 준설 등에 의해 대기 중에 노출되거나 용존산소 함량이 높은 상부 수층에 노출되면 존재형태가 변하기 때문에, 육상이나 해양 투기에 앞서 퇴적물의 적절한 처리가 필요하다(전과 김, 1990; Kazutoshi *et al.*, 1993; Hsiao *et al.*, 1998).

준설 퇴적물 처리 시 탈수 및 고형화, 석회나 알럼 처리 등의 방법이 처리의 용이성 때문에 많이 이용되고 있으나, 최근에는 준설 시에 나타나는 2차 오염 등으로 인해 이런 방법의 사용에 대한 재검토가 필요하게 되었다. 현재 우리나라에서는 준설 퇴적물의 처리에 대한 평가기준이나 관리기준이 설정되어 있지 않아 이에 의한 환경적 영향을 고려하지 않고 인근 토양에 매립하거나 먼 바

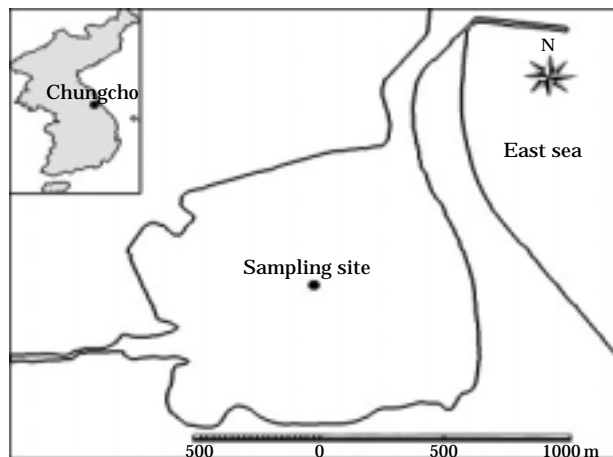


Fig. 1. Geographical location of sampling site in Lake Chungcho.

다에 투기하고 있다. 현재 준설 퇴적물 처리·처분기술과 재이용 기술 등 연구개발이 미진한 상태이고, 처리에 있어서도 대규모 부지확보에 많은 비용이 소요될 뿐 아니라 주변수역의 환경오염을 유발할 가능성이 있다.

청초호에 대한 연구는 석호에 대한 육수학적 관점에서 행한 연구가 있으나, 수질개선의 일환으로 실시되고 있는 퇴적물 준설과 특히 준설퇴적물에 함유된 중금속의 용출, 존재형태, 이동과 관련된 연구는 수 편에 불과하다(전 등, 1996; 허 등, 1999; 허 등, 2001; 박, 2003).

본 연구에서는 수질개선을 위해 2002년 대규모 준설 시행 기간에 청초호(Fig. 1)의 퇴적물을 채취하여 건조·가열 처리가 퇴적물에 함유된 중금속의 화학적 형태에 미치는 영향을 알아보고, 이와 관련된 수질오염 가능성을 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시료 채취 및 저장

2002년 5월에 청초호의 중앙에서 Ponar grab을 이용하여 표층 퇴적물을 채취하였다. 시료 채취기에 의한 오염을 피하기 위하여, 금속과 닿지 않은 가운데 부분을 취하여 폴리프로필렌 봉지에 담아 공기를 제거한 후 냉장 상태로 실험실로 운반하였다.

2. 시료 전처리

시료의 전처리는 채취 시료가 실험실에 도착한 즉시 시작하였다. pH 측정은 풍건한 시료 10.0 g을 취한 후 중

류수 50 mL를 가하여 pH meter (Model 735p, Istek Co.)를 이용하여 측정하였다. 중금속의 존재형태 분석에서는 퇴적물 시료 1.0 g을 각각 3개씩 취해 습시료는 건조시키지 않고 그대로 사용하였고, 풍건시료는 직경 90 mm의 petri dish에 담아 실온에서 건조(환경부, 2002)하였으며, 105, 320, 550°C 처리시료는 1.0 g의 시료를 전기로에서 각각 2, 4, 24시간씩 가열한 후 사용하였다.

3. 수분 함량 (Water content)과 강열 감량 (Loss on Ignition)

수분 함량은 습시료와 105°C로 건조한 시료의 무게 차를 다시 습시료 무게로 나누어 구하였다. 강열감량은 105°C와 550°C의 무게 차를 105°C의 무게로 나누는 방식으로 구하였으며 (APHA, 1992), 3회 분석하여 그 평균값을 각각 취하였다.

4. 총유기질소 함량 (Total Kjeldahl nitrogen content)

퇴적물의 유기질소 분석은 Kjeldahl 법 (APHA, 1992)에 의하여 시료를 황산으로 분해시켜 암모니아성 질소 형태로 전환시켜 정량하여 측정하였으며, 3회 분석하여 그 평균값을 취하였다. 퇴적물의 부식화도는 Hakanson (1983)의 방법에 따라 강열감량과 총질소의 비로 구했는데, 그 값이 20 이하면 oligohumic, 20~25이면 mesohumic, 25 이상이면 polyhumic으로 하였다.

5. 입도 분석

풍건시킨 퇴적물 시료를 염분 제거, 유기물 제거, 철분 제거 후 calgon으로 확산시킨 후 입도 분석기 (Mastersizer 2000, Malvern Ins.)를 사용하여 조직분류, 평균입도, 10, 50, 90% 누적 입경, 비표면적을 알아보았다. 조직분류는 Shephard (1954)의 분류법 (Carver, 1971)에 따랐다.

6. 중금속의 농도 표시, 존재형태와 수질 오염 가능성 평가

중금속의 농도는 105°C로 건조한 시료에 대한 농도로 나타내었고 존재형태는 Tessier *et al.* (1979)의 방법에 따라 adsorbed metal, carbonate metal, reducible metal, organic/sulfidic metal, residual metal로 구분하였다. 이때, 총 함량은 각 존재형태별 함량의 합으로 하였다. 중금속 분석은 ICP-MS (Ultramass 700, Varian)로 분석하였다. 분석의 정밀도는 같은 시료를 세 번 분석하여 측정하

였으며, 변동계수 (coefficient of variation)는 카드뮴 (Cd)이 adsorbed, carbonate, reducible, organic/sulfidic, residual metal에 대해 각각 9.1, 9.9, 10.0, 5.8, 5.6%이고, 구리 (Cu)는 9.0, 11.6, 4.8, 2.9, 4.9%이고, 납 (Pb)은 9.1, 5.1, 4.5, 6.9, 10.0%이며, 아연 (Zn)은 4.4, 16.1, 12.9, 1.9, 6.3%였다.

수질 오염을 일으킬 가능성에 대한 평가는 퇴적물에 함유된 중금속의 총량에 대해 수층의 교란, 수체 혹은 퇴적물에 함유된 과도한 유기물량이 분해 시 발생할 수 있는 물리 및 화학적인 영향에 따라 민감하게 이동될 수 있는 부분인 adsorbed fraction, reducible fraction의 비율로서 판단하였다. 처리 후 organic/sulfidic fraction의 대부분은 organic fraction으로 간주하였다.

결 과

1. 현장에서 관찰된 퇴적물 시료의 성상과 화학조성

채취기로 채취할 당시의 시료는 검은색을 띠었고 황화수소 냄새가 심하게 났으며, 손으로 만졌을 때 미끈거리는 느낌을 가질 수 있었다.

퇴적물 시료의 pH는 6.4, 수분 함량은 68.2%, 강열감량은 12.0%, 총질소 함량은 0.4%이였으며, 부식화도는 30으로 polyhumic으로 유기물의 분해가 잘 진행된 상태였다.

2. 입도 분포

청초호 퇴적물의 입도 조성은 clay (25.8%), silt (67.2%), sand (7.0%)로 siltyclay로서 세립질의 함량이 높았다. 비표면적은 1.35 m² g⁻¹이었고, 10, 50, 90%의 누적 입경은 각각 1.9, 9.3, 46.6 μm였다.

이러한 결과는 의암호, 춘천호와 비교하여도 청초호 퇴적물의 세립질 함량이 높아 수체의 물리적 영향이 클 것으로 판단되는 준설 등에 의해 부유되어 호수 안의 부유물질의 증가와 부유된 미세 입자 확산과 재 퇴적으로 인한 오염 범위의 증가 및 저서생태계의 교란을 가중시킬 가능성이 클 것으로 판단된다.

청초호 표층 퇴적물의 물리화학적 특징과 습시료에 함유된 중금속의 함량을 Table 1에 나타내었다.

3. 퇴적물에 함유된 중금속의 존재형태

1) 습시료에 함유된 중금속의 존재형태

청초호 퇴적물에 함유된 Cd의 존재형태별 비율은

adsorbed form, carbonate form, reducible form, organic/sulfidic form, residual form이 각각 4.0, 9.6, 3.5, 54.7, 28.2%이다. Cu는 1.8, 0.6, 3.3, 65.9, 28.4%, Pb는 0.5, 3.5, 24.1, 31.9, 40.0%이며, Zn은 각각 1.1, 0.3, 5.9, 48.3,

Table 1. Physico-chemical characteristics and total metal concentrations of untreated surface sediment from Lake Chungcho.

Contents	
pH	6.4
Water content (%)	68.2±0.1 ^{a)}
Ignition loss (%)	12.0±0.2
Total nitrogen (%)	0.4±0.0
Sediment texture	Particle size distribution (%)
Sand	7.0
Silt	67.2
Clay	25.8
Heavy metal	Concentration (mg kg ⁻¹)
Cd	2.6±0.1
Cu	44.0±0.7
Pb	37.0±2.0
Zn	141.3±2.7

^{a)}standard deviation

44.4%로서 4가지 금속 모두 혐기성 상태에서 안정한 organic/sulfidic form의 비율이 높았다.

2) 건조 · 가열처리 후 중금속의 존재형태

Cd, Cu, Zn은 습시료에서 organic/sulfidic form이 가장 많았다. 그러나 온도 증가에 따라 이 부분이 줄어들고 adsorbed form과 reducible form의 불안정한 형태가 많아졌으며 활성을 나타내지 않는 부분인 residual form의 함량이 높았다. Pb는 carbonate form과 reducible form의 함량이 증가하였다.

건조, 가열처리 후 각 금속별 존재형태별 특성은 다음과 같고 그 자료는 Fig. 2에 나타내었다.

(1) Cd

처리 온도에 따른 존재형태별 함량비를 보면 25°C 처리시료에서 adsorbed form, carbonate form, reducible form, organic/sulfidic form, residual form이 각각 15.2, 9.7, 3.2, 52.8, 19.1%이며, 105°C 처리시료에서는 22.4, 10.5, 15.4, 23.8, 27.9%였다, 즉 25°C와 105°C 처리시료에서는 organic/sulfidic form의 비율이 낮아지고 adsorbed, reducible form의 비율이 높아지며, carbonate form의 비율은 거의 변화가 없었다. 320°C 처리시료에서는

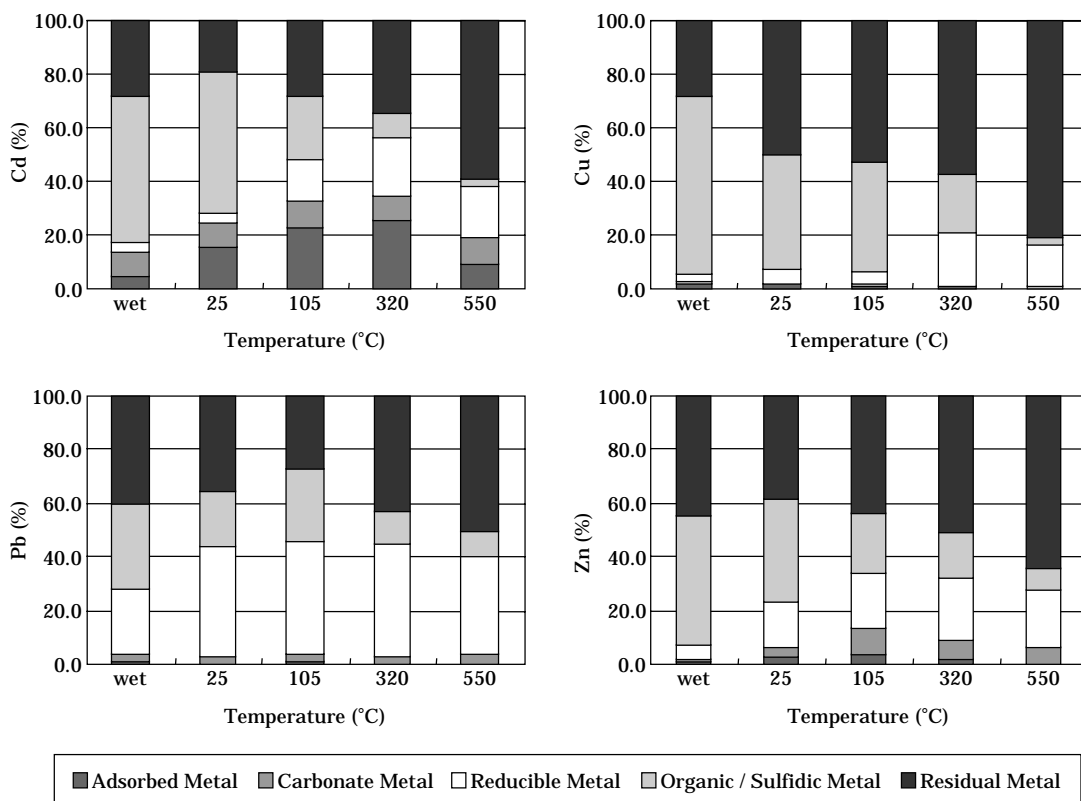


Fig. 2. Fractional composition of Cd, Cu, Pb and Zn after drying and heating of surface sediments from Lake Chungcho.

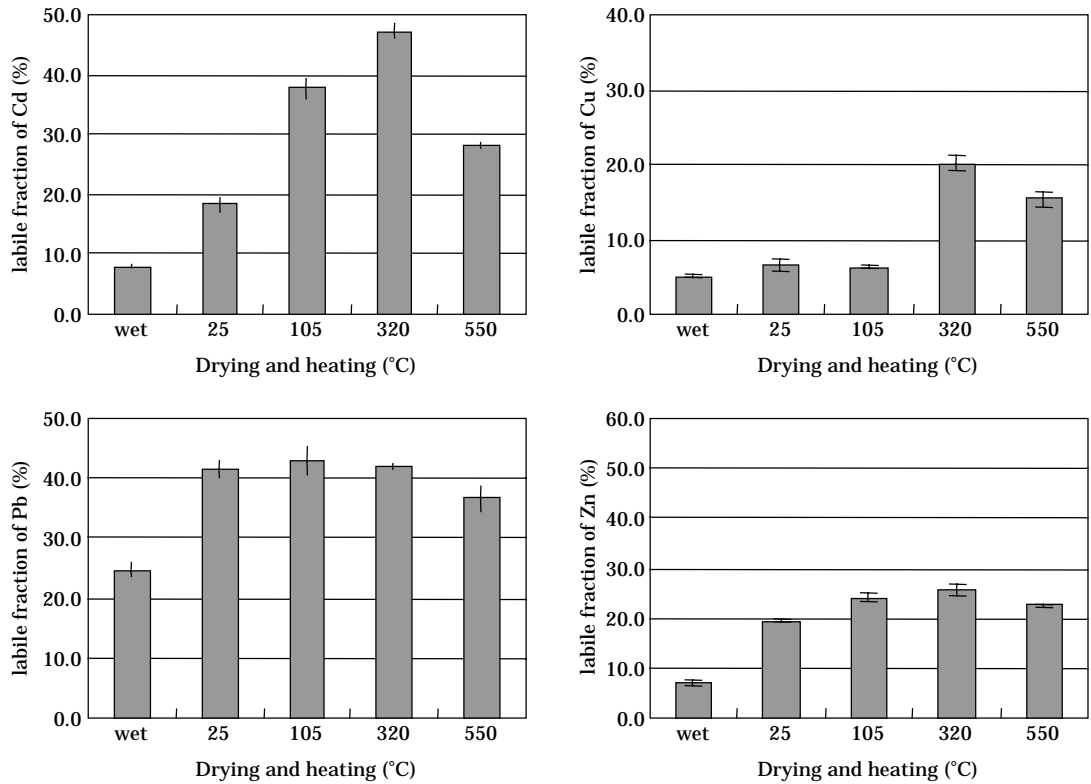


Fig. 3. Fractional percent of labile form of Cd, Cu, Pb and Zn after drying and heating of surface sediments from Lake Chungcho.

25.4, 8.9, 21.8, 9.2, 34.7%, 550°C 처리시료에서는 8.8, 10.4, 19.4, 2.4, 59.3%로 각각 나타났다. 따라서 550°C 처리시료에서 organic/sulfidic form이 크게 낮아지고, 안정한 형태인 residual form이 증가하였다. 그러나 320°C 처리시료에서는 adsorbed form의 비율이 최고를 나타내었다.

처리 온도를 높일수록 organic/sulfidic form은 급격히 낮아지기 시작하여, adsorbed와 reducible form으로 변하였고, residual form으로도 많은 부분이 이동하였다. 높은 온도로 가열한 시료에서 수층으로 쉽게 용출될 수 있는 부분인 adsorbed form과 reducible form의 비율이 증가하였다.

(2) Cu

구리의 존재형태별 함량비를 처리 온도에 따라 살펴보면, 25°C로 처리한 시료에서 adsorbed form, carbonate form, reducible form, organic/sulfidic form, residual form이 각각 1.6, 0.6, 4.9, 43.2, 49.7%, 105°C로 처리한 시료에서 1.1, 0.5, 5.2, 40.6, 52.6%를 각각 나타내어 이 온도에서는 adsorbed, carbonate, reducible fraction은 거의 변화가 없었다. 320°C 처리시료에서는 0.5, 0.5, 19.7,

21.9, 57.4%로 reducible form의 비율이 증가하였고, 550°C 처리시료에서는 0.2, 0.6, 15.2, 3.1, 80.9%를 나타내어 residual form의 비율이 가장 높았다.

(3) Pb

처리 온도 변화에 따른 존재형태별 함량비를 adsorbed form, carbonate form, reducible form, organic/sulfidic form, residual form으로 각각 살펴보면 25°C 처리시료에서 0.3, 2.2, 41.0, 21.5, 35.0%, 105°C 처리시료에서 0.5, 3.2, 42.4, 27.1, 26.8%, 320°C 처리시료에서 0.2, 2.6, 41.8, 12.1, 43.3%, 550°C 처리시료에서 0.2, 3.4, 36.4, 9.1, 50.9%로 각각 나타났다. 25°C 처리시료와 105°C 처리시료에서는 습시료와 비교하여 그 변화폭이 그리 크지 않았으나 550°C 처리시료에서 organic/sulfidic fraction이 감소하였다

(4) Zn

처리 온도 변화에 따른 존재형태별 함량비를 adsorbed form, carbonate form, reducible form, organic/sulfidic form, residual form으로 각각 살펴보면 25°C 처리시료에서 2.8, 3.2, 16.6, 38.6, 38.8%, 105°C 처리시료에서 3.8, 9.2, 20.4, 22.4, 44.3%, 320°C 처리시료에서 2.1, 6.2, 23.6,

16.8, 51.2%, 550°C 처리시료에서 0.4, 5.5, 22.2, 7.4, 64.4%를 나타내었다.

입자 표면에 흡착된 형태로 존재하는 adsorbed form은 105°C로 가열했을 때 가장 높은 비율을, 550°C에서 가장 낮은 비율을 나타내었다. Carbonate form과 reducible form은 습시료일 때 가장 낮았으나, 수층으로 이동 가능성이 큰 부분인 reducible form은 처리온도 증가시 그 비율이 증가하였고, organic/sulfidic form은 처리온도가 증가함에 따라 증가하였다.

4. 처리 온도에 따른 용출 가능성

퇴적물에 함유된 Cd 중 수층으로 이동 가능한 부분의 비율은 습시료, 25, 105, 320, 550°C에서 각각 7.6, 18.4, 37.8, 47.2, 28.2%로서 320°C 처리시료에서 가장 높은 이동가능성을 나타내었다. Cu는 각각 5.1, 6.5, 6.3, 20.2, 15.4%로 처리온도를 높임에 따라 organic/sulfidic form의 비율이 줄어들고, residual form의 비율이 증가하였다. Pb는 24.6, 41.6, 42.9, 42.0, 36.6%로 처리온도를 높일수록 용출가능한 부분의 비율이 증가하였고, Zn은 7.0, 19.4, 24.1, 25.7, 22.5%로 습시료에서 가장 낮은 이동가능성을, 320°C에서 가장 높은 이동가능성을 나타내었다.

각 처리온도별 용출 가능한 중금속의 비율을 Fig. 3에 나타내었다.

고 찰

청초호 퇴적물의 조성은 세립질 함량이 높아 준설 등에 의한 물리적 교란이 있을 경우에는 재 부유되어 세립질 퇴적물에 의한 부유물질의 증가와 미세 입자에 의한 호수 바닥의 피복 등 오염을 가중시킬 가능성이 있다.

퇴적물에 함유된 오염물질의 농도는 오염 물질의 유입 외에도, 입도나 유기물 함량과도 밀접한 관련이 있어 청초호 퇴적물에 함유된 중금속의 농도와 존재형태 결정에 중요한 인자로 작용한 것으로 보인다 (Förstner and Wittmann, 1979; Förstner, 1989; Hakanson and Jansson, 1983).

청초호 퇴적물에 함유된 중금속의 존재형태별 분석에서 처리하지 않은 습시료에서는 Cd, Cu와 Zn은 organic/sulfidic form의 비율이 가장 높은 점으로 보아 유역에서 유입된 유기물의 분해와 황화물의 생성이 퇴적 중금속의 가장 중요한 근원으로 사료된다. Pb는 residual form의 비율이 가장 높아 유역의 침식이 가장 중요한 근원이며, organic/sulfidic form의 비율도 다음으로 높아 Pb에서도

유기물의 분해와 황화물이 중요한 근원이었다.

Cd의 존재형태 분석에서는 습시료보다 25°C와 105°C 처리시료에서 혐기성에서 안정적인 organic/sulfidic form의 중금속을 변화시켜 adsorbed form과 reducible form이 크게 증가하여 수층으로 용출될 수 있는 양을 증가시킬 가능성이 있으며 (Maienthal and Becker, 1976), 오염 퇴적물이 육상에 투기될 경우에는 공기와의 접촉 시간이 길어 수층으로 용출될 수 있는 양을 증가시킬 가능성이 많다 (Birch, 1960). 이러한 결과는 일본의 초부영양호수인 테가누마 호수의 결과와 유사하게 나타났다 (Kazutoshi *et al.*, 1993).

건조·가열처리되어 reducible form의 비율이 높아진 준설 퇴적물이 강우 시 깊은 호소에 침전되거나 해양 깊은 곳에 침전되면 혐기성 상태로 되어 reducible form이 다시 용출되어 나올 가능성이 크므로 건조·가열처리는 오히려 수층으로의 이동 가능성을 증가시킬 수 있다고 사료된다 (Förstner and Wittmann, 1979).

중금속의 존재형태 중 organic/sulfidic form은 호수 바닥의 혐기성 상태에서는 상대적으로 안정한 형태인 sulfide로 존재하기 때문에 (Förstner, 1989; Kersten and Forstner, 1986), 청초호 퇴적물에 함유된 유기물의 부식화도로 보아 퇴적물의 처리과정에서 산소의 존재하에 건조·가열될 때 organic form이 reducible form이나 residual form으로 변화되기보다는 sulfide로 존재하는 금속이 reducible이나 residual로 변한 것으로 사료된다.

산소 존재하에서 처리온도를 높여줌에 따라 상대적으로 쉽게 용출될 수 있는 부분인 adsorbed form과 reducible form의 비율이 늘어나는 경향을 나타내었는데, 이는 호수 퇴적물이 혐기성 상태에서는 안정한 형태인 organic/sulfidic form으로 존재하다가 준설로 퇴적물이 대기중에 노출되어 건조와 산화가 일어나 존재형태가 변화된 것으로 사료된다 (Tessier, 1979; Kazutoshi *et al.*, 1993).

청초호 퇴적물에 함유된 중금속의 존재형태 중 수층으로 이동 가능한 부분의 비율은 조사 대상 중금속에서 처리하지 않은 시료보다 온도를 높여 처리한 시료에서 높게 나타나 건조·가열 처리가 오히려 용출 가능성을 증가시킬 수 있다고 사료된다.

결 론

수질개선을 위해 대규모 준설이 시행되고 있는 청초호 표층퇴적물에 함유된 중금속의 화학적 존재형태와 준설

퇴적물의 건조·가열처리에 의한 중금속의 존재형태 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 건조·가열처리를 하지 않은 청초호 퇴적물 습시료에서 Cd, Cu와 Zn은 organic/sulfidic form의 비율이 가장 높은 점으로 보아 유기물의 분해와 황화물의 생성이 퇴적 중금속의 가장 중요한 근원으로 사료되며, Pb는 residual form의 비율이 가장 높아 유역의 침식이 가장 중요한 근원으로 사료된다.

2) 건조·가열처리시 organic/sulfidic form의 비율이 줄어들고 adsorbed form과 reducible form의 비율 증가는 organic/sulfidic form이 산소와 접촉하거나 pH의 상승에 의해 형태가 변한 것으로 사료된다.

3) 준설퇴적물의 건조와 가열처리는 퇴적물에 함유된 중금속을 물에 더 쉽게 용출될 수 있는 형태로 변화시킬 수 있다고 사료된다.

4) 현재 이용되고 있는 오염퇴적물의 처리법에서 건조·가열처리는 퇴적물 내에 존재하는 중금속에 의한 수질오염을 가중시킬 가능성이 있다.

사 사

이 연구는 2002년도 강원대학교 학술연구조성비로 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

인 용 문 헌

- 박길옥. 2003. 건조·가열처리 및 석회처리가 청초호 퇴적물에 포함된 중금속의 존재형태에 미치는 영향, 강원대학교 석사학위논문.
- 전상호. 1990. 호수퇴적물의 준설편 길이 결정, 경포호 수질오염 방지 조사 연구보고서, 강릉시, 120-143.
- 전상호, 전방옥, 유성환. 1996. 동해안 자연호수의 수질조사, 동해안 호수보존심포지움, 강릉경제정의실천시민연합, 83-118.
- 전상호, 김휘중. 1990. 경포호의 준설편에 의한 수질개선가능성에 관하여, 한국지구과학회지 11: 174-180.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해안 석호의 부영양화 평가, 한국육수학회지 32: 141-141.
- 허우명, 이상균, 권상용, 김동진, 김범철. 2001. 동해안 석호의 육수학적 조사 (1): 청초호, 한국육수학회지 34: 206-214.
- 환경부. 2002. 토양오염공정시험방법.

- APHA. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th.ed, Port City Press
- Birch, H.F. 1960. Nitrification in soils after different periods of dryness, Plant Soil, 12: 81-96.
- Carver, R.E. 1971. Procedures in Sedimentary Petrology, Wiley-Interscience, pp. 653.
- Förstner U.G. and T.W. Wittmann. 1979. Metal pollution in the aquatic environment, Springer-Verlag, Berlin. 486.
- Förstner U. 1989. Contaminated Sediments in Lecture Notes in Earth Sciences 21, Springer-Verlag, pp. 157.
- Hakanson L. and M. Jansson. 1983. Principles of lake sedimentology, Springer-Verlag, Berlin, 316.
- Kazutoshi, S., M. Okazaki and S. Matsumoto. 1993. The chemical phase changes in heavy metals with drying and oxidation of the lake sediment, Water Res. V27: 1243-1251.
- Kersten, M. and U. Forstner. 1986. Chemical fractionation of heavy metals in anoxic estuarine and costal sediments, Wat. Sci. Technol. 18: 121-130.
- Maienthal, E.J. and D.A. Becker. 1976. A survey on current literature on sampling, sample handling for environmental materials, and long-term storage, Interface, 5: 49-62.
- McLaren, T.G. and D.V. Cuawford. 1973. The fractionation of copper in soils, J. Soil Sci. 24: 172-181.
- Ping-Chin Hsiao and Lien LO Shang. 1998. Fractionation and leachability of Cu in lime-treated sewage sludge, Wat. Res. V32: 1103-1108.
- 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, Environ. Geol. V41: 352-357.
- Salomons, W. and V. Forstner. 1980. Trace metal analysis on polluted sediments II, Evaluation of environmental impact, Environ. Technol. Lett, 1: 506-517.
- Tessier, P.G., C. Campbell and M. Bisson. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, Anal. Chemi. V51: 844-851.
- Wong, J.W.C., K.M. Lai, D.S. Su and M. Fang. 2001. Availability of heavy metals for Brassica chinensis grown an acidic loamy soil amended with a domestic and an industrial sewage sludge, Water, Air, Soil Pollu. 128: 339-353.

(Manuscript received 2 July 2005,
Revision accepted 5 September 2005)