

폐광산 지역 옥동천 퇴적물내에 포함된 중금속의 존재형태 및 이동성

김희중^{1*} · 양재의² · 이재영³ · 전상호¹

¹강원대학교 자연과학대학 환경과학과, ²강원대학교 생물환경학부, ³서울시립대학교 환경공학과

Fraction and Mobility of Heavy Metals in the Abandoned Closed Mine Near Okdong Stream Sediments

Hee Jung Kim^{1*} · Jae Yang² · Jai Young Lee³ · Sang Ho Jun¹

¹Department of Environmental Science, Kangwon National University

²Division of Environmental & Biological Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

³Department of Environmental Eng., University of Seoul

ABSTRACT

Fractional composition and mobility of some heavy metals in sediments from Okdong stream are investigated. The fractional scheme for heavy metals in the sediment was established for five chemically defined heavy metal forms as adsorbed fraction, carbonate fraction, reducible fraction, organic fraction, and residual fraction. The most abundant fraction heavy metals in the sediments is reducible and secondly abundant is organic fraction. Adsorbed fraction is minor part of the total heavy metals. Mobilization of heavy metals in the sediments from Okdong stream occur 19.8~56.7% of total cadmium concentrate. The most abundant fraction of the sediment metal is organic fraction in Cu, Pb metals investigated. Labile fraction of sediment metals are 0.5~48.5% of total Zn, 2.6~48.1% of total Pb, and 0.2~36.9% of total Cu, respectively. Most of labile fraction consists of reducible fraction for Cd, Zn, adsorbed fraction for Pb, reducible fraction for Cu, adsorbed fraction for Ni. The Mobilization of Zn and Cu is most likely to occur when oxygen depletes and that of Pb and Ni occurs when physical impact, oxygen depletion and pH reduction.

Key words : Sediment, Heavy metals, Mobility, Labile fraction

요 약 문

옥동천 퇴적물을 대상으로 중금속의 존재형태 및 이동성에 관하여 조사하였다. 퇴적물내의 중금속의 존재형태는 adsorbed fraction, carbonate fraction, reducible fraction, organic fraction, and residual fraction 다섯 가지 형태로 분류하였으며, 존재형태 중 제일 많은 부분을 차지하는 부분은 reducible fraction이며 다음으로 organic fraction과 residual fraction으로 나타났다. Adsorbed fraction은 중금속의 존재형태 미미한 부분으로 나타났다. 옥동천 퇴적물내의 총 카드뮴 중 수체로 이동 가능한 부분은 19.8~56.7%이며, 구리, 납의 경우 대부분이 organic fraction으로 나타났다. 구리와 납의 경우 이동 가능한 형태는 납의 경우 총 납의 농도 중 2.6~48.1%, 구리는 0.2~36.9%로 나타났으며, 아연은 0.5~48.5%로 나타났다. 카드뮴, 아연, 구리의 경우 이동 가능한 부분 중 대부분이 reducible fraction이며, 납과 니켈의 경우 adsorbed fraction으로 나타났다. 구리와 아연의 이동이 가능한 경우는 수중의 산소의 유무에 의해 결정되며, 납이나 니켈의 경우 수중에서의 물리적 영향, 수소이온의 농도가 증가, 산소의 고갈 등에 의해 수층으로 이동할 가능성이 높다.

주제어 : 퇴적물, 중금속, 이동성, 이동이 가능한 부분

*Corresponding author : hjkim60@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2004. 11. 15 게재승인일 : 2005. 2. 04

질의 및 토의 : 2005. 6. 30 까지

1. 서 론

80년대 후반부터 급속히 쇠퇴하기 시작한 광업은 현재 강원도 동남부지역에 많은 폐탄광과 휴·폐광된 금속광산을 산출하였다. 이러한 휴·폐광산은 주변 환경에 미치는 영향력이 크기 때문에 현재 정부에서도 광산 폐기물에 의한 토양 및 하천 오염의 영향 평가를 실시하고 있다. 그러나 일반적으로 처리되지 않은 광미나 광재, 퇴적물, 침출수, 유출수 등의 광산활동에 의해 발생된 물질에 함유된 유해 중금속의 농도는 우리나라의 토양환경보존법이나 수질환경보존법의 기준보다 높은 것으로 보고되고 있다(Park, 1996). 광산폐기물에 의한 광산 주변지역의 자연 환경 오염 가능성은 광산폐기물에 함유된 중금속들의 분포와 주변 환경에 따른 중금속의 용출 및 거동에 관한 지식이 없으면 적절한 접근이 불가능하다.

최근에 직면하고 있는 문제 중의 하나는 광산활동에 의해 발생된 광폐재들에 의한 것으로 광산폐수, 광산폐기물 등 여러 종류의 오염 물질이 지하수, 강, 토양을 포함한 자연 생태계에 유입되면서 유해물질의 양이 자정능력을 범위를 넘으면서 발생하는 환경문제이다(Forstner and Salomon, 1991). 이렇게 주변지역의 환경에 영향을 미치는 오염의 주원인은 광산 활동에 의해 발생하는 유해 중금속과 같은 오염물질과 휴·폐광이 된 후 광미 폐재장, 폐갱도, 폐석 등에서 발생하는 침출수와 용출되는 유해 중금속 등이며, 이러한 유해 중금속은 토양 및 수계로 이동하여 하천, 토양 및 농경지를 오염시키고 있다(Jung, 1995).

중금속의 존재형태와 용출 특성의 구명에 관한 연구는

광산활동에 의한 광산폐기물의 거동에 적용이 가능하고 특히 광미를 매립 또는 광재담에 의해 격리하였을 경우 강우에 의해 침식 또는 유실되어 주변 토양 및 하천으로 유입되었을 경우 폐재에 함유된 중금속이 하천으로의 이동, 또는 비산 시 주변지역 농경지의 오염 가능성을 예측하는데 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다. 또한 휴·폐광된 광산지역의 오염원을 제거할 수 있는 기술적인 접근방법이 이루어지기 위하여 휴·폐광된 광산지역을 대상으로 중금속에 의한 존재형태에 대한 이동 가능성에 대한 토의가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 옥동천 지역을 대상으로 폐탄광 및 휴·폐광된 금속광산에서 발생된 광폐재가 강우로 인한 침식으로 생성된 하천 퇴적물에 함유된 중금속(Pb, Cd, Zn, Cu, Ni)의 존재형태와 이동 가능성에 대해 규명하여 사후 관리대책이나 복원대책을 위한 기초적 자료를 제공하려고 한다.

2. 연구방법

2.1. 조사지점 및 시료채취

2.1.1. 조사지개요

강원도 동남부에 위치한 옥동천 유역은 영월군 상동읍을 중심으로 중동과 하동을 거쳐 남한강 상류에 이른다. 시료 채취를 위해 광산 폐기물의 이동 경로에 따른 하상 퇴적물 시료는 옥동천 수계의 상류에서부터 계획된 횡단 시료채취선의 토양시료와 동일한 횡단선상에서 채취하였으며, 옥동천 본류와 합쳐지는 지점에서는 지류의 상류와 합류지점에서 채취하였다. 연구지역에서는 1지점에서 10

Table 1. Description of sediment samples

| Sample ID | Sediment sampling locations | Site characteristics |
|-----------|--|--|
| M-S | Myungjin abandoned coal mine | Abandoned coal mine waste water(Yellow boy) |
| S-S | Seojin abandoned coal mine | Abandoned coal mine waste water(Yellow boy) |
| SD-S | Sangdong mine | Sangdong mine effluents |
| KD | Kedo mine | Kedo mine outlet water |
| US-S | Upperstream | Confluence water of abandoned coal mine waste Water and mine oeffluentsr |
| NT-R | New Tailing Dam of Sangdong mine | Reference water |
| NT-S | New Tailing Dam of Sangdong mine | Tailings Dam waste water |
| OT-S | Old Tailing Dam of Sangdong mine | Tailings Dam waste water |
| MS-S | Mid stream | Surface water |
| L-S | Limestone mine | Limestone mine waste water |
| OK-S | Okdong abandoned coal mine | Abandoned coal mine waste water |
| DS-S | Down stream(Okdong abandoned coal mine area) | Surface water |

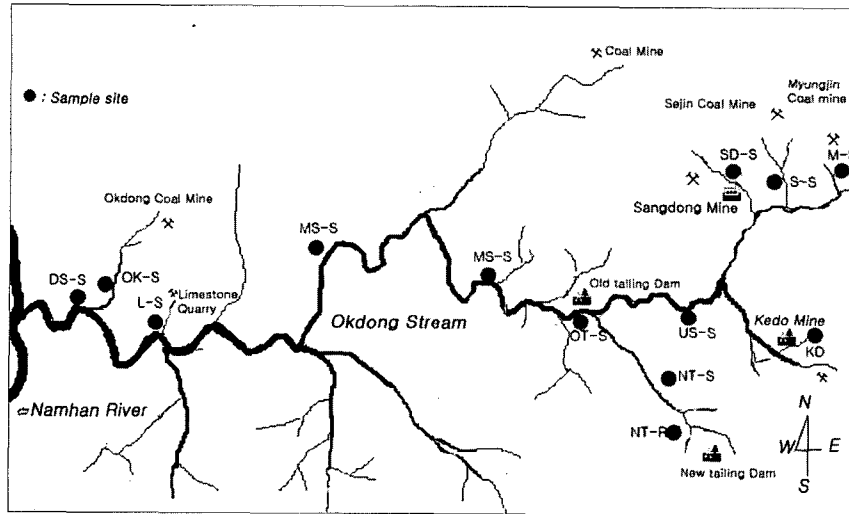


Fig. 1. Location map of sediment samples in the study area.

개를 채취하였으며 비교지역 수계 1지점의 시료 등 총 12지점에서 시료를 채취하였다. 시료의 특성은 Table 1과 시료채취지점은 Fig. 1에 나타냈다.

2.1.2. 시료의 전처리

각각의 채취지점에서 채취한 토양시료를 각각 폴리에틸렌 건조접시에 균일한 두께로 하여 통풍이 잘 되는 곳에서 음건시켰다. 음건시킨 시료는 나무망치로 분쇄하여 2 mm 표준체(8 mesh)를 통과시킨 후 다시 63 μm인 비금속 체(nylon bolting cloth sieve)로 체질한 후 각각의 시료를 균등 량 취하여 사분법에 의해 균일하게 혼합하여 분석용 시료로 사용하였다.

2.1.3. 분석 방법

(1) 입도분석

입도 분석은 체 분석(sieving method)과 침강 분석(pipette method)을 병행, 실시하였다. 입도 분석은 Shepard

(1954), 평균 입도(mean)는 Folk와 Ward(1966)의 분류 방법을 따랐다.

(2) 유기물 함량

시료를 110°C에서 건조시킨 후 2 mm 체를 통과한 시료 0.5 g를 취하여 550°C에서 2시간 가열한 후 가열하기 전과의 무게 차를 유기물 함량으로 하였다.

(3) 부식화도

표준퇴적물의 부식화도는 Hakanson과 Jansson(1983)의 구분법인 T-N과 작열감량의 비로서 결정하였으며, T-N과 작열감량의 비가 20 이하일 경우는 Oligohumic, 20~25 일 경우는 Mesohumic, 25이 이상일 때는 Polyhumic으로 구분된다.

(4) 중금속의 존재형태

분석한 중금속의 종류는 Cd, Ni, Pb, Zn, Cu 등이며, 중금속의 존재형태는 Tessier 등(1979)의 방법에 따라 흡착태 형태(adsorbed form), 탄산화합물과 결합된 형태(carbonate form), 철 및 망간산화물과 결합된 형태

Table 2. Sequential extraction procedure(Tessier et al., 1979)

| Chemical fraction | Extraction technique | Procedure |
|----------------------|------------------------------|---|
| ① Adsorbed fraction | Exchange with excess cations | 8 mL 1M-MgCl ₂ (pH 7.0), shaking for 5h at room temperature. |
| ② Carbonate fraction | Release by mild acid | 8 mL 1M-NaOAc(pH 5.0), shaking for 5h at room temperature. |
| ③ Reducible fraction | Reduction | 20 mL 0.04M-NH ₂ OH · HCl, shaking for 6h at 96±3°C. |
| ④ Organic fraction | Oxidation | 3 mL 0.02M-HNO ₃ + 5 mL 30% H ₂ O ₂ (pH 2.0), shaking for 2h at 85±2°C. 3 mL 30% H ₂ O ₂ , shaking for 3h at 85±2°C. After cooling to room temperature, 5 mL 3.2M-NH ₄ OAc(in 20% HNO ₃), shaking for 0.5h. |
| ⑤ Residual fraction | None | 2 mL HClO ₄ + 10 mL HF, digestion to near dryness. 1 mL HClO ₄ + 10 mL HF, evaporation to near dryness. 1 mL HClO ₄ evaporation until the appearance of white fumes. |

(reducible form), 유기물과 결합된 형태(organic form), 잔존물형태(residual form)로 분석하였고 이들의 합을 총량으로 하였다(Table 2).

3. 결과 및 토의

3.1. 이화학적 특성

연구지역 퇴적물의 이화학적 특성을 분석한 결과 폐탄광의 갱내수, 폐탄광의 침출수, 광재담 침출수 등이 배출되는 지류(명진폐탄광, 서진폐탄광, 옥동폐탄광, 상동광산 광재담 침출수)의 퇴적물에서 낮은 pH를 나타내고 있으며 유기물의 함량은 상동읍지역과 중·하류의 농경지가 발달한 지역이 전반적으로 부화되어 이 지역이 연구지역에서 인위적 활동에 의한 오염지역임을 알 수 있다.

폐탄광의 산성탄광폐수가 유입되는 지류에서 2.3~5.2로 강산성을 나타내었으나 상동광업소의 배출수가 유입되는 지류에서 6.9~8.3으로 중성 및 알칼리성에 해당되는 값으로 나타났으며(Table 3), 양이온치환용량은(CEC) 6.2~30.1 cmol⁽⁺⁾/kg으로서 우리 나라 일반 농경지 토양 평균 9.2 cmol⁽⁺⁾/kg(Park, 1996)보다 대부분의 전지역에서 높게 나타났다(Table 3). 이는 유해 중금속의 대부분이 양이온이라고 할 때 하천 퇴적물로부터 용출되는 유해 중금속을 하천의 수층 내부에서는 효율적으로 흡착할 수 없어, 하천 생태계에 중금속에 의한 오염 가능성이 판단된다.

퇴적물 내 질소의 함량은 0.2~2.1%로 상동광산 구광재담의 지하수 바닥의 퇴적물에서 2.1%로 가장 높은 값을 나타냈으며, 명진 폐탄광의 갱내수의 퇴적물에서 0.2%로 가장 낮은 값으로 나타났다(Table 2). 이러한 총 질소의 함량은 1993년 환경부(0.08%)와 서울특별시(0.2%)에서 제

안한 퇴적물 준설기준과 비교하면 전 지역에서 기준을 초과하는 값으로 나타났다. 또한 1973년 Federal Water Quality Administration(0.2%)에서 퇴적물 규제치와 비교해 볼 때 전 지역에서 오염된 퇴적물로 분류되었으며, 1977년 EPA와 ACOE(U. S. Army of Engineers)에 의해 육수와 해양에서 준설된 퇴적물의 오염정도 평가기준치와 비교하면 전 지역이 심하게 오염된 것으로 나타났다.

작열감량(Ignition loss)의 함량은 1.2~15.6%로 구광재담 지역의 정점 S-S에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 구광재담의 지하수 바닥의 퇴적물인 정점 OT-S에서 가장 낮은 값으로 나타났다. 이러한 작열감량 함량은 1993년 환경부(7.0%)와 서울특별시(10.0%)에서 제안한 퇴적물 준설기준과 비교하여 보면 하상퇴적물이 대부분 지역에서 기준을 초과하는 값으로 나타났다.

부식화 도는 0.6~47.4로 명진 폐탄광의 침출수가 유출되는 하천 퇴적물에서 76.6으로 가장 높은 부식정도를 나타낸 반면에 구광재담의 침출수가 배출되는 구광재담 지하수 퇴적물에서 4.8로 가장 낮아 부식화가 잘 진행된 상태로 나타났다(Table 3).

퇴적물의 입도는 대부분이 실트와 점토의 함량이 높은 siltclay로, 서진폐탄광지역의 퇴적물은 유속이 빠른 최상부지역인 정점 S-S(sand)을 제외한 전 지역이 sensicl, siltyclay로 나타났다. 이러한 결과는 상류지역의 입자 크기 대부분이 silt와 clay로 중·하류보다 미세한 입자구조를 가지고 있어 오염물질의 농도와 64 μm 이하 입자 사이에 밀접한 상관관계를 가지고 있는(Kyle, 1991; Baudo et al., 1990) 것으로 미루어 중·하류보다는 상류지역의 퇴적물의 오염물질농도가 높을 것으로 사료되며, 또한 재부유 가능성이 큰 크기로 조성되어 유속에 의해 오염물질

Table 3. Chemical and physical characteristic of sediments

| Site | pH | C.E.C. | TKN | Ig. | I.G/N | Texture |
|------|-----|------------|-----|------|-------|-------------|
| | 1:5 | cmol(+)/kg | (%) | (%) | | |
| M-S | 2.3 | 30.1 | 0.3 | 14.2 | 47.4 | clayey silt |
| S-S | 2.5 | 25.5 | 0.4 | 15.6 | 35.4 | silty clay |
| SD-S | 7.5 | 12.1 | 1.6 | 14.2 | 8.9 | clay sand |
| KD | 8.0 | 13.9 | 0.4 | 15.3 | 38.3 | silty sand |
| US-S | 6.9 | 13.3 | 1.6 | 14.3 | 8.9 | sansicl |
| NT-R | 5.7 | 9.6 | 0.3 | 14.2 | 47.4 | sand |
| OT-S | 7.5 | 13.2 | 2.1 | 1.2 | 0.6 | sand |
| MS-S | 7.8 | 10.5 | 0.6 | 13.7 | 24.0 | sansicl |
| L-S | 7.0 | 7.7 | 0.5 | 15.5 | 30.9 | sand |
| OK-S | 5.2 | 14.5 | 0.7 | 15.0 | 21.4 | sansicl |
| DS-S | 6.7 | 6.2 | 0.6 | 15.3 | 23.7 | sansicl |

이 하류로 이동할 가능성이 큰 것으로 판단된다.

3.2. 중금속의 존재형태

중금속이 민감한 환경변화에서 생물이용성과 하천수중 이동성에 가장 영향을 미칠 수 있는 형태는 adsorbed from이다. 그러나 퇴적물과 접하고 있는 수체의 심층부가 조건변화에 의해 pH가 낮아지거나 혐기성 상황이 되면 carbonate

from이 수중으로 이동하여 저서 생태계나 수중 생태계에 영향을 줄 것으로 예측된다(Hakanson and Jansson, 1983). 또한 퇴적물이 하천 깊은 곳이나 호수에 머물게 되면 하천과 호수의 특성상 수계의 심층이 혐기성 상황이 될 경우가 종종 발생하게되어 산화환원환경과 밀접한 관계를 가지고 있는 Reducible fraction이 수체나 생태계로 이동할 가능성이 매우 높아진다(Hakanson and Jansson, 1983).

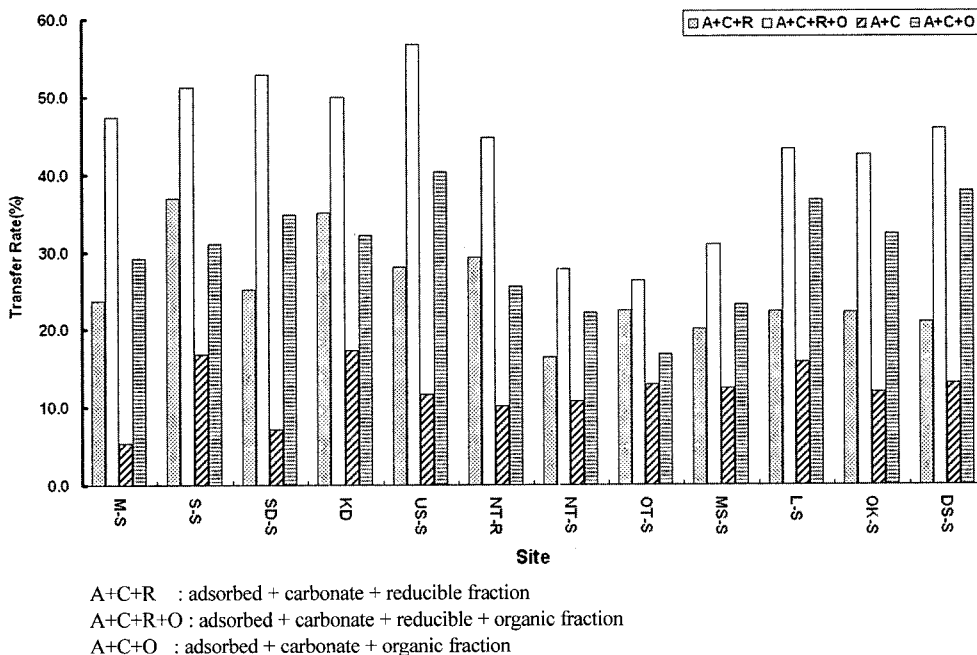


Fig. 2. The ratio of labile fraction to total metal content of cadmium in sediments.

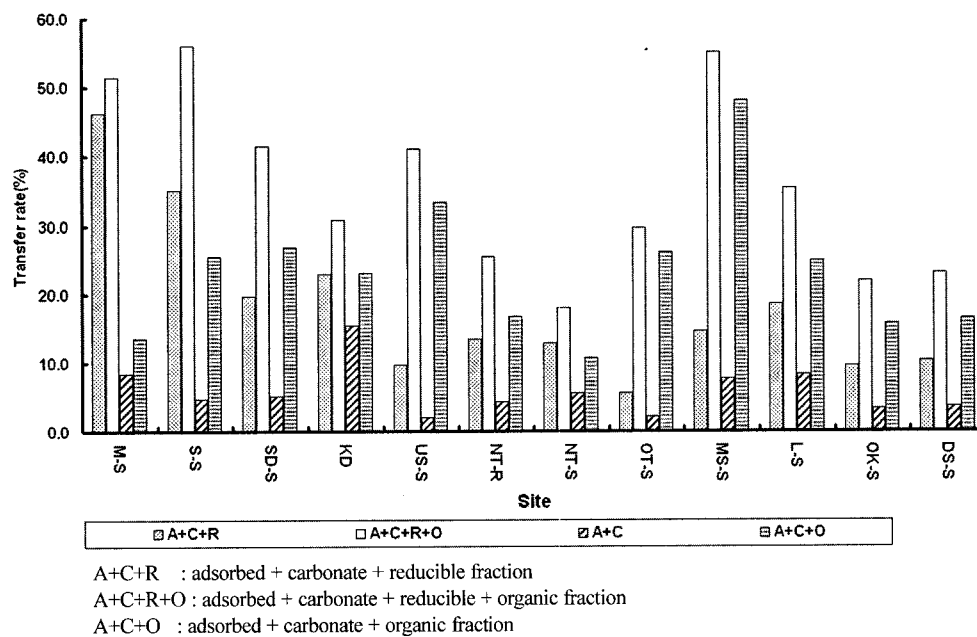


Fig. 3. The ratio of labile fraction to total metal content of lead in sediments.

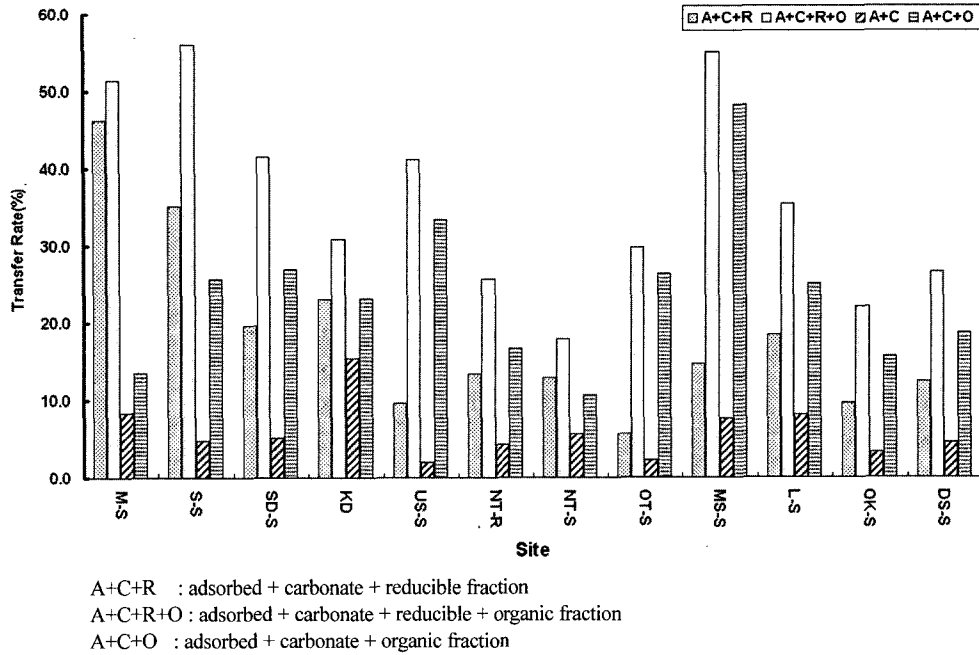


Fig. 4. The ratio of labile fraction to total metal content of zinc in sediments.

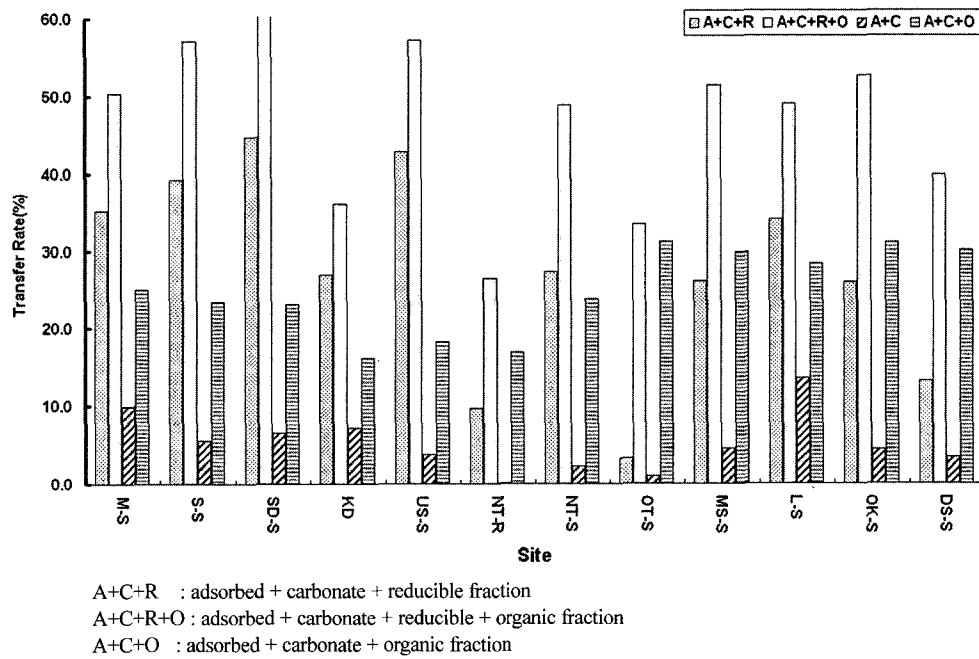


Fig. 5. The ratio of labile fraction to total metal content of copper in sediments.

Fig. 2, 3, 4, 5는 퇴적물 중 각 중금속의 총 농도 중 수체의 흐름에 의한 영향, 수소이온 농도의 증가 또는 수층의 용존 산소의 고갈에 의한 혐기성 상황으로 변화, 부식화도에 따른 유기물 분해에 의해 퇴적물 내의 중금속이 수체나 하천 생태계로 이동 가능성(labile)이 있는 Cd, Cu, Pb, Zn의 존재형태를 나타낸 것이다.

하천 퇴적물에 포함된 카드뮴 중 수체로 이동될 수 있는 labile한 부분은 19.8~56.7%로 상동읍 인구밀집지역의 지류와 폐탄광과 금속광산의 지류가 합류되는 정점 US-S에서 제일 이동성이 높게 나타났으며 폐탄광 지역의 지류가 유입되는 곳의 퇴적물에서 가장 낮은 값을 나타냈으며 (Fig. 2), 구리는 총량이 550.9~1,515.1 mg/kg로 상동광업

소의 배출수가 유입되는 지류의 퇴적물인 정점 SD-S에서 1,515.1 mg/kg으로 가장 높았으며 옥동 폐탄광의 침출수가 유입되는 지류의 퇴적물 정점 OK-S에서 550.9 mg/kg으로 가장 낮은 값으로 나타났다(Fig. 3).

납의 총량은 249.6~644.6 mg/kg로 옥동천 하류의 옥동 폐탄광의 배출 수와 옥동의 인구밀집지역의 생활하수가 유입되는 하천의 퇴적물인 정점 OK-S에서 가장 높았으며 거도 폐금속광산의 배출수가 유입되는 지류의 퇴적물인 정점 KD에서 249.69 mg/kg으로 가장 낮은 값으로 나타났다. 퇴적물에 함유된 납의 존재형태는 adsorbed fraction 0.2~18.8 mg/kg으로, carbonate fraction은 7.1~40.4 mg/kg, reducible fraction은 19.1~140.4 mg/kg, organic fraction은 12.2~188.8 mg/kg으로 나타났다. 서진 폐탄광의 산성광산배수가 유입되어 수체의 pH가 3.0 이하인 정점 S-S에서 125.7 mg/kg으로 가장 낮은 값으로 나타났다.

아연의 총량은 214.0~2,945.8 mg/kg으로 서진 폐탄광의 배출수가 함유되는 정점 S-S에서 2,945.8 mg/kg으로 가장 높은 값을 나타냈고, 폐탄광의 갱내수 및 침출수가 유입되는 지류와 상동광업소의 배출수가 유입되는 지류 및 거도 폐금속광산의 산성광산 배수가 유입되는 지류, 광재담의 침출수가 유입되는 지류가 함유되어 흐르는 본류의 중하류의 정점 MS-S에서 214.0 mg/kg으로 가장 낮은 값으로 나타났다.

아연의 존재형태는 adsorbed fraction 1.0~18.7 mg/kg, carbonate fraction은 4.3~68.7 mg/kg으로 나타났다.

Reducible fraction은 12.6~414.3 mg/kg으로, organic fraction은 12.2~630.4 mg/kg, residual fraction은 108.3~2787.0 mg/kg으로 나타났다.

연구지역인 옥동천 하천 퇴적물에 함유되어 있는 Cd, Cu, Pb, Zn의 존재형태는 특성상 residual fraction을 제외한 존재형태 중 organic fraction이 가장 높은 농도를 나타냈으나, yellow boy 현상을 보이는 지역의 퇴적물에서 reducible fraction이 가장 높은 부분 비율을 차지하였다. 이러한 것은 철산화물과 망간 산화물과 결합된 형태인 reducible fraction이 yellow boy의 구성물인 Fe_2O_3 및 SO_3 , H_2O 로 구성된 Schwertmannite($Fe_8O_8(OH)_{4.5}(SO_4)_{1.75}$) 침전 화합물은 모두 수산화물로서, 일반적으로 이들의 표면은 구조내에 존재하는 OH에 의해 정전기적으로 음성을 띄게 된다. 또한 이들이 수용액내에 존재하게 되면, 표면에 흡착된 H^+ 와 OH의 양에 따라 전하가 결정된다. 즉 pH가 낮으면, 수용액내의 H^+ 이온들이 정전기적으로 양성인 다른 금속이온들의 흡착을 방해하며, 반대로 pH가 높으면, 금속이온들이 침전물의 표면에 흡착되어 있는 H^+

이온과 교환반응을 하게 되어 침전물의 표면에 흡착될 수 있다(Sengupta, 1993). 따라서 하천수 화학조성의 변화에서 볼 수 있었던 부성분 원소들의 감소는 주성분원소가 침전됨에 따라 그들의 고상에 흡착되어 제거되어 퇴적물에 축적되는 것으로 사료된다 따라서 yellow boy 현상이 나타난 지역에서 중금속의 존재형태 중 대부분이 철산화물 구조에 의해 결합된 형태의 reducible fraction의 비율이 높게 나타난 것으로 사료된다.

유기물에 흡착된 중금속 또는 유기물 분해에 의해 유해물로 존재하는 중금속으로 호기성 상태에서 유기물의 분해시 용출이 일어날 가능성이 크므로 퇴적물의 분해의 정도를 평가할 수 있는 부식화를 분석하여 이동가능성에 대한 결과를 알아보는 것이 중요할 것으로 사료되며, 광물의 결정 구조 속에 존재하는 중금속으로 자연적 환경에서는 거의 용출이 되지 않으나 풍화 및 분해(decomposition) 등에 의해서 용출될 가능성이 있으나 매우 희박할 것으로 사료된다.

4. 결 론

옥동천 유역에 분포하는 명진, 서진, 옥동탄광 등의 폐탄광과 상동광업소, 거도광산 등의 금속광산, 광미폐재를 쌓아둔 광재담과 그 주변지역을 대상으로 퇴적물에 의한 오염현황을 파악하고 토의한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

퇴적물에 함유된 중금속 존재형태에 따른 이동 가능비에 대한 비교 결과 일부 중금속(Cd, Ni, Zn)에서 adsorbed fraction과 carbonate fraction 합이 오염지라고 예상되는 폐탄광 지역보다 금속광산과 석회광산 지역에서 높은 경향을 보여 이 지역은 낮은 pH에 의해 퇴적물 부분이 영향을 받았을 것으로 판단된다.

Cd, Cu, Pb은 pH가 낮게 나타내는 지역에서 reducible fraction 비율이 높아지는 경향을 보이고 있어 철 및 망간 산화물과 결합된 형태의 중금속이 퇴적되면서 나타나는 현상으로 사료되며, 이동가능성 부분에 대한 평가는 폐탄광 지역의 정점에서 높게 나타나 하천 퇴적물 복원에 있어서 우선 처리할 대상으로 판단된다.

참 고 문 헌

Park, Y.A., 1996, Designing and applicability of soil pollution indices for estimating quality of soil polluted with heavy metals and arsenic, *Korean Society of Soil and Ground Water Environment*, 1(1), 47-54.

- Forstner, U. and Salomon, W., 1991, Mobilization of metals from sediments, *Metals and Their compound in environment*, Ed. by E. Merian, p. 379-398.
- Jung, M.C., 1995, Heavy metal contamination of soil, plants, waters and sediments in the vicinity of metalliferous mine in Korea, Ph.D thesis, University of London, p. 455.
- Sengupta, M., 1993, Environmental impacts of mine drainage on streams of United States. *Env. Geol. Water Sic.*, **11**, 141-152.
- Park, Y.A., 1984, Distribution and transportation of fine-grained sediments on the innercontinental shelf off the Kuem river estuary, *Korea, J. of Geo. Soc. of Korea*, **20**(2), 154-168.
- Shepard, F.P., 1954, Nomenclature Based on sand-silt-clay ratios, *J. Sed. Pet.*, **24**, 151-158.
- Folk, R.L. and Ward, Y., 1966, A review of grain-size parameters, *Sedimentology*, **6**, 73-93.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, **51**(7), 844-851.
- Hakanson, L. and Jansson, M., 1983, Principles of lake sedimentology. Springer -Verlag, Berlin, p. 316.
- Kelly, R.T., 1980, Site investigation and material problems, in *Reclamation of Contaminated Land*. Society of Chemical Industry. p. 2/1-2/12.
- Baudo, R., Giesy, J.P., and Muntau. H., 1990, *Sediments : Chemistry and toxicity of In-place pollutants*, Lewis Publishers, INC., p. 450.