

탄광슬러지를 이용한 금속광산 산성배수 처리 시 pH 및 온도의 영향

최명찬¹ · 임정현¹ · 권보연¹ · 장 민² · 심연식² · 김지형^{1*}

¹고려대학교 건축사회환경공학과, ²한국광해방지관리공단

Effect of pH and Temperature on the Adsorption of Heavy Metals in Acid Mine Drainage (AMD) Onto Coal Mine Drainage Sludge (CMDS)

Mingcan Cui¹ · Jung hyun Lim¹ · Boyoun Kweon¹ · Min Jang² · Yonsik Shim² · Jeehyeong Khim^{1*}

¹Determent of Civil Environmental and Architecture, Korea University, 5 Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Republic of Korea

²Mine Reclamation Corporation, 80-6 Coal Center, Susong-dong, Jongno-gu, Seoul, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the effect of pH and temperature on the adsorption behavior of acid mine drainage (AMD) on coal mine drainage sludge (CMDS) has been investigated during the treatment of coal mine drainage (CMD) by electrical purification method. The $pH_{zero\ point\ charge}$ (pH_{zpc}) of CMDS was 5. The removal ratio of copper, zinc, cadmium, iron were increased according to the increase of pH value. The adsorption amount of copper showed $0.64\ mg\ g^{-1}$ sludge. It was independent of pH value. The adsorption amount of the other metals showed 1.1 times when pH was 3. The adsorption amount of chromium was a little bit increased at the pH value higher than 7 due to a small amount of the chromium was eluted as $Cr(OH)_6^{3-}$. The amount of metals' absorption were decreased according to temperature was increase at pH value was 3. The selectivity order was $Cd > Fe > Zn > Cu$. The amount of absorption showed q_{max} Cu $2.747\ mg\ g^{-1}$ and Zn $2.525\ mg\ g^{-1}$ when pH value higher than 5. It was independent of temperature.

Key words : AMD, CMDS, Adsorption, pH effect, Temperature effect

요 약 문

본 연구에서는 석탄광산 배수(CMD)를 전기정화법으로 처리 시 발생하는 슬러지를 흡착제로 금속광산 산성배수(AMD) 중 중금속 처리 시 pH와 온도변화에 따른 중금속 흡착 거동을 연구하고자 하였다. 실험결과 CMDS의 $pH_{zero\ point\ charge}$ (pH_{zpc})는 5로 나타났다. pH 영향의 경우 구리, 아연, 카드뮴, 철은 pH 증가에 따라 제거율은 증가하였고, 구리의 경우 흡착량은 pH와 상관없이 $0.64\ mg\ g^{-1}$ sludge 로 나타났다. pH 5 이상일 때 기타 중금속 흡착량은 pH 3일 때의 1.1배로 나타났고 크롬의 경우 pH 7 이상에서 다소 증가하였는데 이는 크롬이 $Cr(OH)_6^{3-}$ 형태로 미량 용출되었기 때문이다. 온도의 영향에서 pH 3일 때 온도증가에 따라 중금속 흡착량은 증가하였고, 선택도 $Cd > Fe > Zn > Cu$ 순으로 나타났다. pH 5 이상에서 최대 흡착량(q_{max})은 Cu와 Zn의 경우 각각 $2.747\ mg\ g^{-1}$ 와 $2.525\ mg\ g^{-1}$ 로 더 이상의 흡착이 일어나지 않아 온도의 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

주제어 : 금속광산 산성배수, 석탄광산 산성배수 슬러지, 흡착, pH 영향, 온도 영향

1. 서 론

최근 산업의 발전에 따라 다종다양한 형태의 중금속이

이용되고 있지만 처리공정의 효율상의 한계성 때문에 미량의 중금속이 배출되어 생태계의 치명적인 위협요소로 부각되고 있다. 중금속 폐수는 일반적으로 침전법, 이온

*Corresponding author : hyeong@korea.ac.kr, cmc05@korea.ac.kr

원고접수일 : 2008. 7. 8 심사일 : 2008. 7. 8 게재승인일 : 2009. 2. 3

질의 및 토의 : 2009. 4. 30 까지

교환법, 분리막법, 활성탄흡착법, 전기화학적 처리법, 기포 분리법, 증발회수법 및 생체흡착법 등에 의해 처리되고 있다. 수산화 침전법은 슬러지의 다량 발생으로 인한 2차 처리의 문제점과 처리비용이 높아지는 단점이 있으며, 이온교환수지는 수중에 경금속이 존재할 때 효율이 낮아지는 단점이 있다. 활성탄 흡착공정은 우수하지만 운전비용에 있어 경제성이 떨어진다. 따라서 가격이 저렴하면서 일정한 흡착성을 가지는 흡착제에 대한 연구 및 공정개발이 이루어져야 한다.

국내외에서 산성광산배수를 처리하기 위한 기술은 우분과 석회석을 이용한 SAPS(Successive alkalinity producing drains)이며, 이 기술은 산성광산배수의 형성과 관련된 황산염을 환원시켜 침전을 유도하고 석회석으로 pH를 향상시키는 방법으로 주기적으로 기질물질을 교체한다면 우수한 자연처리 기술로 활용될 것이라 보고되고 있다 또한 날로 심각해지는 산성광산배수로부터의 위해성을 저감하기 위해 여러 연구자들에 의해 지속적인 처리기술이 개발되고 있으나(Eger et al., 1994; Flipek et al., 2003; Fiset et al., 2003, Kevin et al., 2005), 국내에서는 폐광산에 대한 적절한 조치 없이 방치되어 있는 경우가 많아 중금속으로 인한 토양오염 및 지하수의 오염의 원인으로 폐광산이 인식되어 해당지역 주민들의 불만은 매우 고조되어 있는 실정이다. 때문에 본 연구에서는 새로운 흡착제로 석탄광산 배수 처리 시 발생하는 슬러지를 이용하여 금속광산 산성배수를 처리하고자하였다.

중금속 흡착에 미치는 주된 요인 중 중금속의 초기농도, 용액의 pH 변화, 온도의 변화, 흡착제의 성질, 경쟁이온 및 리간드 등이 있다. 각자 조건 또는 결합조건에서 중금속 흡착에 미치는 영향 등은 많은 연구자들에 의해 연구되었다(Yong et al., 1990, 1992, 1993; Basta et al., 1992; Kurdi et al., 1983; Gao et al., 1997; Harter, 1992; Elliott et al., 1986; Kinniburgh et al., 1981; Peter et al., 1992) 그리고 Goethite(α -FeOOH)와 같이 pH에 따라 변하는 하이드록실기 표면을 가지고 있는 산화광물에 대한 온도변화에 따른 중금속의 흡착에 대한 연구는 카드뮴(Cd) 흡착의 경우(Johnson, 1990), 카드뮴과 코발트 흡착의 경우(Angove, 1999), 구리(Cu) 흡착의 경우(Rodda, 1996a), 납(Pb)과 아연(Zn) 흡착의 경우(Rodda, 1993, 1996b), 카드뮴과 아연 흡착의 경우(Trivedi, 2000)에 의해 연구되어졌다. 이들의 연구에 의하면 2가 금속 양이온과 표면 하이드록실기 흡착반응은 흡열반응으로 나타나 흡착반응에 대한 평형상수와 흡착용량은 온도 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 벤토나이트와

같이 동형치환에 의해 음전하를 가지고 있는 점토광물에 대한 온도변화에 납, 카드뮴, 구리, 아연의 흡착 반응은 온도증가에 따라 흡착평형상수와 흡착용량이 감소하는 발열반응인 것으로 보고하고 있다(Bereket, 1997).

또한 산화광물이나 순수한 광물이 중금속 흡착실험의 연구 결과에 의하면 온도 변화에 따른 영향이 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있다(Rodda et al, 1993; Johnson, 1990).

때문에 본 연구에서는 석탄 광산 배수 처리 시 발생하는 슬러지를 이용하여 금속광산 산성배수 처리 시 각 온도에 대하여 중금속 용액의 초기 pH를 3, 5, 8로 조절하여 중금속 제거 시 온도와 pH를 동시에 고려한 중금속 제거 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 흡착제로 석탄광산 산성배수를 전기정화법으로 처리 시 발생하는 슬러지(CMDS)를 사용하였고, 처리대상 폐수는 일광금속광산 산성배수(AMD)를 사용하여 pH와 온도의 변화가 흡착변화에 미치는 영향을 연구하였다.

2.1. 실험 재료

2.1.1. 처리대상 폐수(일광광산 산성배수)

금속광산 산성배수는 부산광역시 기장군에 위치하고 있는 일광광산(경도: 35°18'23.2"; 위도:129°, 13', 39.1")의 산성배수를 3단 침전조를 거쳐 처리한 후 유출 수를 처리수로 채집하여 사용하였다.

일광금속광산 산성배수를 채취하여 US EPA method 9045c 방법으로 분석한 결과 pH 3.3으로 강산성을 나타내었으며, Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer(ICP-AES, 5300DV/Perkin Elmer) 방법으로 중금속을 분석한 결과 Cu 25.5 mg L⁻¹; Zn 44 mg L⁻¹, Pb 1.626 mg L⁻¹, Cd 0.132 mg L⁻¹, Cr 0.004 mg L⁻¹로 나타났다. 물리화학적 결과는 Table 1, 2와 같다.

2.1.2 흡착재료(나전 광산 CMDS)

CMDS는 강원도에 위치한 나전 석탄광산 배수를 전기정화법으로 처리 시 발생하는 슬러지 케익을 사용하였고 물리화학적 특성은 Table 3, 4와 같다.

슬러지 표면적은 Brinier Emmett Teller : (BET) 측정기 (ASAP 2010, micromeritics Inc. USA) 방법으로 측정하였고 표면적은 151 m² g⁻¹, 유기물 함량은 18.33%, 슬러지 완충능력은 82.3 mmol H⁺ kg⁻¹ pH⁻¹이었다.

Table 1. Chemical characteristics of Yilguang Acid Mine Drainage (AMD)(unit: mg L⁻¹)

| Cu | Zn | Cd | Cr | Pb | As | Ni | Fe |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 25.5 | 44.0 | 0.132 | 0.004 | 1.626 | 0.014 | 0.108 | 98 |

Table 2. Physical characteristics of Yilguang Acid Mine Drainage (AMD)

| pH | EC ($\mu\text{m s}^{-1}$) | DO (mg L^{-1}) | ORP (mV) | TDS (g L^{-1}) | Acidity (mg L^{-1}) |
|-----|-----------------------------|---------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|
| 3.3 | 665 | 5.4 | 680 | 1.45 | 1,045 |

Table 3. Physical Characteristics of Coal Mine Drainage Sludge (CMDS)

| pH | EC ($\mu\text{s/s}$) | Moisture content (wt, %) | Surface areas ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) | Pore size \AA | Pore volume ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) |
|-----|------------------------|--------------------------|--|------------------------|---|
| 8.3 | 129.3 | 40.85 | 151 | 67.9246 | 0.25651 |

Table 4. Chemical Characteristics of Coal Mine Drainage Sludge (SMDS)

(unit : wt %)

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | MnO | P ₂ O ₅ | L.O.I |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|------|-------------------------------|-------|
| 6.65 | 0.52 | 64.74 | 8.60 | 0.32 | 0.13 | 0.08 | 0.02 | 0.38 | 0.11 | 18.33 |

X-ray Fluorescence Spectrometer / XRF-1700 / SHIMADZU(XRF); X-Ray Diffract meter/X'Pert PRO/ PHILLIPS;(XRD) 정성분석 결과 나전광산 슬러지는 석영 (quartz), 침철광(goethite / FeO(OH)), 흑운모(biotite / K(Mg, Fe)₃(OH)₂AlSi₃O₁₂)로 확인되었다.

CMDS를 X-ray Fluorescence Spectrometer / XRF-1700 / SHIMADZU(XRF) 방법으로 전 함량을 분석한 결과 Fe₂O₃ 함유량이 64.74%, CaO 함유량이 8.6%로 높게 나타났다. 재활용을 판단하기 위하여 Toxicity Characteristic Leaching Procedure, EPA method 1311(TCLP) 방법으로 유해성 용출 실험결과 As 0.05 mg kg⁻¹, Pb 0.071 mg kg⁻¹, Cu 0.1 mg kg⁻¹, Zn 0.05 mg kg⁻¹, Ni 0.03 mg kg⁻¹로 기준치 이하를 나타나 재활용 가능 물질로 판단된다.

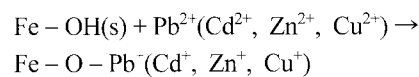
2.2. 실험 방법

일광 금속광산 산성배수 250 mL을 정확히 측정하여 유리병에 담은 후 슬러지 주입량을 40 g sludge L⁻¹ AMD로 한다. pH는 0.1 M, 0.01 M HNO₃와 NaOH를 이용하여 3, 8로 조절하여 사용하였고, pH 5.69는 슬러지와 일광광산폐수 혼합 시의 pH를 조절하지 않고 사용하였다. 온도는 5, 15, 25, 35°C로 보정한 후 진동횟수 120회 분⁻¹ 진탕기에 6시간 반응을 하였다. 시간 간격별로 시료를 채취하여 3,000 rpm 원심분리기에 5분간 원심분리 후 상등액을 채취하여 ICP-AES로 중금속 분석을 하였다.

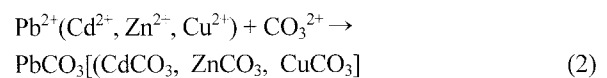
3. 결과 및 고찰

CMDS를 이용한 AMD처리 메커니즘은 흡착 혹은 착화 (Adsorption or complex), 침전(Precipitation), 공침(Co-precipitation)이다. 즉,

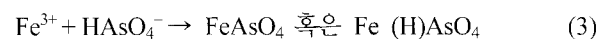
흡착 혹은 착화 메커니즘



침전메커니즘



공침메커니즘



이러 여러 가지 메커니즘에 의해 제거되는 중금속은 pH 및 온도의 영향을 받을 것으로 사료된다.

3.1. pH의 영향

일반적으로 중금속 흡착은 pH의 영향이 매우 크며 중성으로 갈수록 흡착량이 증가한다. 때문에 CMDS의 영전위 전하(pH_{zero point charge}: pH_{zpc})는 중금속 처리 시 pH 조절에 매우 중요하다. 본 연구에서는 pH를 3.09, 5.69(조절하지 않음), 8.84, 9.13, 11.83로 조절하고 상온 25°C에서 교반시킨 다음 30분간 안정시킨 후 상등액의 Zeta-potential을 zeta-meter기로 측정한 결과 Fig. 1에서 pH_{zpc}

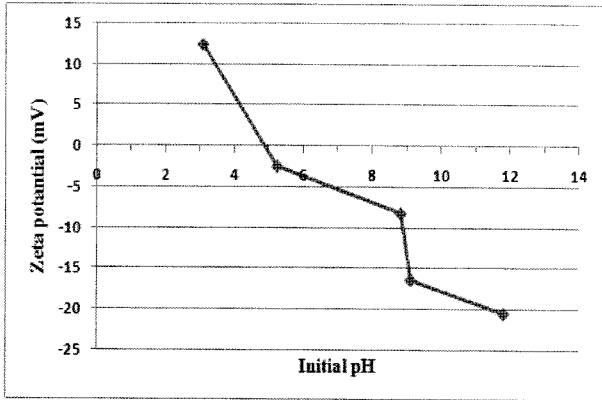


Fig. 1. Zeta potential of Naleon CMDS as a function of pH.

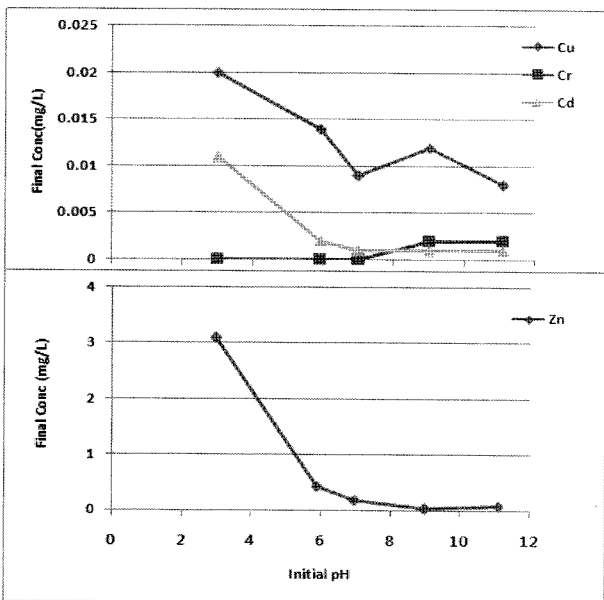


Fig. 2. Final heavy metals' concentration as a function of initial pH (Initial Cu 25.5 mg L⁻¹, Zn 44 mg L⁻¹, Cd 0.132 mg L⁻¹, Sludge 40 g L⁻¹ AMD, Temperature 25°C, Reaction time 6 hr).

5로 나타났다. pH 5 이상에서 CMDS의 표면전하는 음전하를 띠기 때문에 양이온 중금속에 대한 흡착 또는 착화물은 pH 증가에 따라 증가될 것으로 판단된다.

pH에 따른 CMDS의 중금속 흡착량의 변화를 알아보기 위하여 Fig. 2와 같이 슬러지 주입량을 40 g sludge L⁻¹ AMD 기준으로 일광AMD를 사용하였으며 중금속 초기농도 Cu 25 mg L⁻¹, Zn 40 mg L⁻¹, Fe 98 mg L⁻¹ Cd 0.132 mg L⁻¹, Cr 0.004 mg L⁻¹이었다. 온도 25°C, pH를 3~11로 변화 시켜 6시간 반응하였다. pH 3~11의 범위에서 모든 중금속 흡착량은 pH 증가에 따라 증가하였다. Cu, Cd, Zn는 pH 7 이상에서 더 이상 흡착량이 증가하지 않았으며, Cu의 흡착량은 pH 7에서 0.64 mg g⁻¹

sludge로 pH 3에서의 흡착량 보다 큰 차이를 나타내지 않았다. Zn의 경우 pH 7에서 흡착량은 1 mg g⁻¹ sludge로 pH 3에서의 흡착량 0.9 mg g⁻¹ sludge 보다 1.1배 정도 높게 나타났다. Cd의 경우도 Zn와 마찬가지로 pH 7에서의 흡착량은 pH 3에서의 흡착량 보다 1.1배 정도 많았다. 그러나 Cr의 경우 pH 7 이하에서 감소경향을 나타냈지만 pH 7이상에서 농도는 증가였다. 이는 pH 7.0 이상에서 Cr은 Cr(OH)₃에서 Cr(OH)₆³⁻ 형태로 미량이 다시 녹아나기 때문에 수중에 잔여 Cr 농도가 증가한 것으로 판단된다.

3.2. 온도의 영향

온도변화에 따른 중금속 흡착평형 자료로부터 얻을 수 있는 열역학적 함수들은 흡착과정을 이해하는데 도움을 줄 수 있다(Fokkink, 1990).

$$K_{ads} = \frac{-\Delta H^{\circ}}{RT} + \frac{\Delta S^{\circ}}{R} \quad (4)$$

온도와 pH에 따른 흡착 실험을 위한 조건은 슬러지 농도를 40 g sludge L⁻¹ AMD 기준으로 온도를 5, 15, 25, 35°C로 하였다. 각 온도에 대응되는 pH를 3, 8로 조정하였고(pH 5.69는 CMDS와 AMD 혼합 시 pH로 조절하지 않음), 시간에 따른 중금속 흡착 변화를 관찰 하였다.

중금속 이온이 흡착평형에 도달하면 폐 슬러지 단위 무게 당 흡착량(q_{eq})은 잔류 중금속이온의 평형농도(C_{eq})함수로서 흡착 등온 식으로 나타낼 수 있고, 흡착 등온 식은 폐 슬러지와 중금속이온 상호간의 흡착 특성에 의해 결정되므로 흡착등온 관계로부터 폐 슬러지의 흡착상태를 정량화하여 흡착재로서의 성능을 평가할 수 있다.

Langmuir 흡착등온 식은 피 흡착제간의 인력이 없는 단 분자 흡착으로 가정하여 얻어진 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{kq_{max}C_{eq}}{1+kC_{eq}} \quad (5)$$

Langmuir 흡착등온 식을 선형화하면 아래와 같다.

$$\frac{C_{eq}}{q_{eq}} = \frac{1}{kq_{max}} + \frac{1}{q_{max}}C_{eq} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 C_{eq}/q_{eq} 대 C_{eq}로 도시하여 q_{max}와 k를 구할 수 있다.

본 연구 결과 온도 25°C, 슬러지 주입량이 각각 500

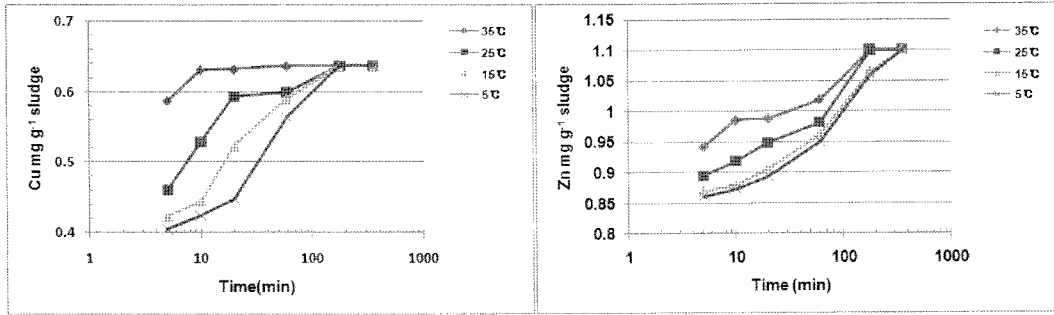


Fig. 3. Metals' absorption amount as a function of temperature (Sludge 40 g L⁻¹ AMD, pH 3, Reaction time 6 hr).

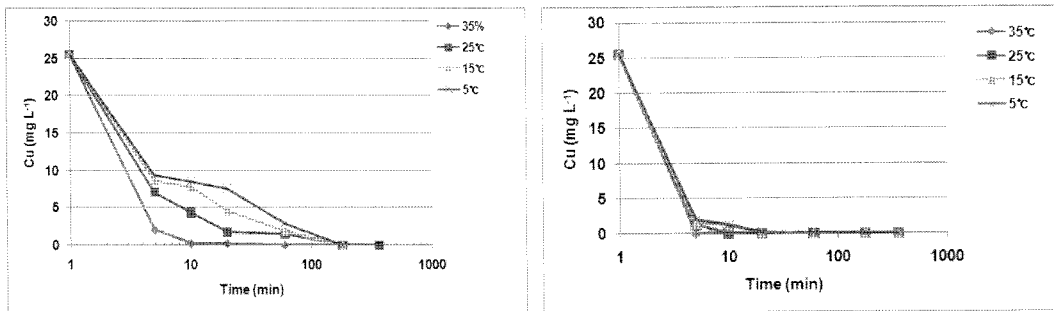


Fig. 4. Cu removal ratio as a function of pH-temperature-time (sludge 40 g L⁻¹ AMD, pH 3, 5.69).

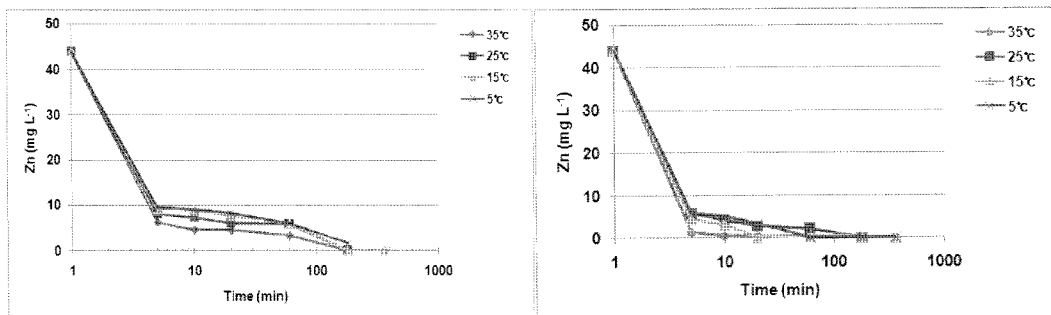


Fig. 5. Zn removal ratio as a function of pH-temperature-time (Sludge 40 g L⁻¹ AMD, pH 3, 5.69).

mL AMD/5, 10, 20, 30, 40 g sludge 일 때 Cu, Zn, Cd의 q_{max} 및 k 경우 각각 2.747 mg g⁻¹, 182 L mg⁻¹; 2.525 mg g⁻¹, 354 L mg⁻¹; 0.005 mg g⁻¹, 0.027 L mg⁻¹로 나타났다.

또한 온도에 따른 중금속 흡착량(q_{eq})을 분석한 결과 Fig 3과 같이 pH 3일 때 중금속 Cu, Zn의 흡착량은 온도 증가에 따라 증가하는 흡열반응으로 나타났다. pH 5 이상에서는 Cu와 Zn의 경우 최대 흡착량(q_{max})이 각각 2.747 mg g⁻¹, 2.525 mg g⁻¹로 더 이상의 흡착이 발생하지 않아 온도의 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

Fig 4, 5, 6에서 pH-온도-시간에 따른 중금속 Cu, Zn 및 Fe 및 Cd 농도는 초기 5분에 급속히 감소하였고 시

간에 따라 감소폭이 작았다. pH 3일 때 초기 5분에 Cu의 경우 온도가 5, 15, 25, 35°C일 때 제거율은 각각 63.5%, 66.3%, 72.2%, 92%로 온도 증가에 따라 제거량은 증가하였고 pH 5 이상에서는 온도의 영향을 받지 않고 5분 만에 평형에 도달하였다. Zn의 경우 pH 3, 온도 5, 15, 25, 35°C일 때 제거율은 각각 78.3%, 79%, 81.3%, 85.6%로 온도 증가에 따라 제거율은 감소하는 흡열반응으로 나타났다. pH 5 이상에서는 온도의 영향을 다소 받으나 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 pH 3의 낮은 pH 조건에서 온도증가에 따라 입자의 이동 속도가 빨라지고 점도가 낮아져 제타전위(Zeta potential)값이 작아져 Fig. 1에서 제타전위의 감소에 따라 pH는 증가하는

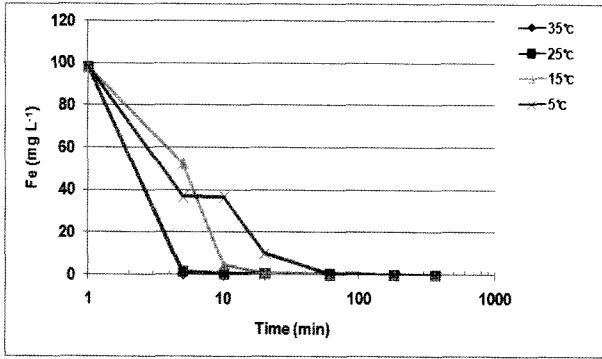


Fig. 6. Cd and Fe removal ratio as a function of pH-temperature-time (Sludge 40 g L⁻¹ AMD, pH 3).

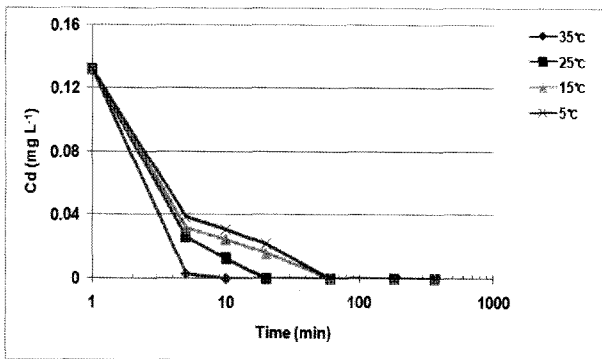


Fig. 7. Fe removal ratio as a function of temperature-time (Sludge 40 g L⁻¹ AMD, pH 3).

것으로 나타나 온도 증가에 따라 흡착량이 증가한 것으로 판단된다. pH 5 이상에서는 CMDS의 p_{H_{zpc}} 값이 5 이기에 CMDS의 표면 전위가 음전하를 띠기 때문에 양이온 중금속과 슬러지의 흡착 또는 착화 반응이 급속이 일어나 최대 흡착농도에 도달하였기에 온도의 영향을 적게 받은 것으로 판단된다.

또한 Fig. 7에서 Cd의 경우 pH 3, 온도 5, 15, 25, 35°C일 때 초기 5분에 제거율은 각각 70.5%, 75.8%, 80.3%, 97.7%로 온도 증가에 따라 제거율이 증가하였고, pH 5 이상에서는 Cd이 검출되지 않았다.

이는(Rodda, 1993; 1996a) 연구에서 Goethite(α -FeOOH)와 같이 pH에 따라 변하는 하이드록실기 표면을 가지고 있는 산화광물에 대한 온도변화에 따른 중금속의 흡착은 흡열반응으로 온도증가에 따라 흡착량이 증가한다는 연구 결과와도 일치하였다.

4. 결 론

CMDS를 흡착재로 AMD를 처리 시 pH 및 온도 특성

을 연구한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) CMDS의 p_{H_{zpc}}를 측정된 결과 5로 나타나 CMDS와 AMD혼합 시 pH가 5.69로 나타나 양이온 중금속 흡착이 용이할 것으로 판단된다.

(2) 금속광산 산성배수 중 중금속은 pH 증가에 따라 제거량은 증가하였고, 흡착량은 Cu의 경우 pH와 상관없이 0.64 mg g⁻¹ sludge을 나타내었으며, Zn, Cd, Fe의 경우 pH 5이상에서 흡착량은 pH 3일 때의 1.1배 이었다. Cr의 경우 pH 7 이상에서 Cr(OH)₆³⁻으로 미량 제 용출되어 pH 증가에 따라 증가하였다.

(3) 중금속흡착에 대한 온도의 영향은 온도증가에 따라 흡착량이 증가하는 흡열반응으로 나타났으며, pH 3일 때 중금속 선택도는 Cd > Fe > Zn > Cu 순이었다. pH 5이상에서 최대 흡착량에 도달하여 더 이상의 흡착이 발생되지 않아 온도의 영향을 받지 않았다.

때문에 CMDS를 새로운 흡착재로 사용 시 pH와 온도의 영향을 고려하여 사용하면 중금속 제거율을 높일 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 2008년도 광해방지기술개발 사업(R0710982)에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

기호설명

ΔH^0 = standard enthalpy change for the reaction

ΔS^0 = standard entropy change for the reaction

R = gas constant

q_{eq} = 흡착제 단위량 당 흡착된 중금속의 양(mg g⁻¹)

q_{max} = 흡착제 표면을 단일 층으로 덮었을 경우의 최대 흡착용량(mg g⁻¹)

C_{eq} = 흡착이 평형을 이루어진 후의 용액상의 중금속 농도(mg L⁻¹)

K_{ads} = 흡착평형상수(L g⁻¹)

참 고 문 헌

Angove, M.J., Wells, J.D., and Johnson, B.B., 1999, The influence of temperature on the adsorption of Cadmium (II) and Cobalt (II) on Goethite, *J. Colloid and Interface Science*, **211**, 281-290.

Basta, N.T. and Tabatabai, M.A., 1992, Effect of cropping sys-

- tems on adsorption of metals by soils: I single-metal adsorption, *Soil Science*, **153**, 108-114.
- Bereket, G., Aroguz, A.Z., and Ozel, M.Z., 1997, Removal of Pb (II), Cd (II), Cu (II), and Zn (II) from aqueous solutions by adsorption on bentonite, *J. Colloid and Interface Science*, **187**, 338-343.
- Darren, P.R., Bruce, B.J., and John, D.W., 1993, The effect of temperature and pH on the adsorption of copper, Lead and Zinc onto Goethite, *J. Colloid and Interface Science*, **161**, 57-62
- Elliott, H.A., Liberati, M.R., and Huang, C.P., 1986, Competitive adsorption of heavy metals by soils, *J. Environ. Qual.*, **15**, 214-219.
- Eger, p., Wagner, J., Kassa, Z., and Melchert, G., 1994, Metal removal in wetland treatment systems, *Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference/ Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, PA, 80-88.
- Fokink, L.G.J., Keizer, A.D.E., and Lyklema, J., 1990, Temperature dependence of cadmium adsorption on oxides, *J. colloid and interface science*, **135**, 118-131.
- Filipek, L.H., Hatton, C., Gusk, J., and Tsukamoto, T., 2003, Passive treatment of acid rock drainage (ARD): state of the practice, *Proceedings of the Tenth International Conference of Tailings and Mine Waste*, Colorado, USA, 293-303
- Fiset, J.F., Zinck, J.M., and Nkinamubanzi, P.C., 2003, Chemical stabilization of metal hydroxide sludge, *Proceeding of the X International Conference of Tailings and Mine Waste*, Vail, CO, USA, AA Balkema, 329-332.
- Gao, S., Walker, W.J., Dahlgren, R.A., and Bold, J., 1997, Simultaneous sorption of Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, and Cr on soils treated with sewage sludge supernatant, *Water, air, and soil pollution*, **93**, 331-345.
- Harter, R.D., 1992, Competitive sorption of Cobalt, Copper, and Nickel ions by a calcium-saturated soil, *Soil Sci. Soc.* **56**, 444-449.
- Johnson, B.B., 1990, Effect of pH, temperature, and concentration on the adsorption of cadmium on goethite. *ES & T*, **24**, 112-118.
- Kinniburgh, D.G. and Jackson, M.L., 1981, Cation adsorption by hydrous metal oxides and clay, in M.A. Anderson and A.J. Rubin[eds, *Adsorption of inorganics at solid-liquid interfaces*, Ann Arbor Science publishers, Michigan, 91-160.
- Kurdi, F. and Doner, H.E., 1983, Zinc and Copper sorption and interaction in soils, *Soil Sci. Soc.* **47**, 873-876.
- Kevina, B., Hallberg, D., and Johnson, B., 2005, Microbiology of a wetland ecosystem constructed to remediate mine drainage from a heavy metal mine, *Science of Total Environment*, **338**, 53-66.
- Peters, R.W. and Shem, L., 1992, Adsorption/desorption characteristics of lead on various types of soil, *Environmental progress*, **11**(3), 234-240.
- Rodda, D.P., Johnson, B.B., and Wells, J.D., 1993, The effect of temperature and pH on the adsorption of Copper (II), Lead (II), and Zinc (II) onto goethite, *J. colloid and interface science*, **161**, 57-62.
- Rodda, D.P., Wells, J.D., and Johnson, B.B., 1996a, Anomalous adsorption of Copper (II) on goethite, *J. colloid and interface science*, **184**, 564-569.
- Rodda, D.P., Johnson, B.B., and Wells, J.D., 1996b, Modeling the effect of temperature on adsorption of lead (II) and Zinc (II) onto goethite at constant pH, *J. colloid and interface science*, **184**, 365-377.
- Trivedi, P. and Axe, L., 2000, Modeling Cd and Zn sorption to hydrous metal oxides, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 2215-2223.
- Yong, R.N., Warkentin, B.P., Phadungchewit, Y., and Galvez, R., 1990, Buffer capacity and lead retention in some clay materials. *Water, Air, and Soil pollution*, **53**, 53-67.
- Yong, R.N. Mohamed, A.M.O., and Warkentin, B.P., 1992, Principles of contaminant transport in soils. *Developments in Geotechnical Engineering*, p. 327.
- Yong R.N. and Phadungchewit, Y., 1993, pH influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils. *Canadian Geotechnical*, **30**, 821-823.
- Yong, R.N. and MacDonald, E.M., 1998, Adsorption of Metals by Geomedia, Influence of pH, metal concentration, and soil component removal on retention of Pb and Cu by an illitic soil, *Adsorption of metals by geomedia*, Edited by Everett A. Jenne, Academic Press. 229-253.