

건설폐기물인 순환골재를 이용한 수용액상에서의 혼합 중금속 제거 특성

신우석¹ · 김영기^{1,2,†}

¹국립한경대학교 해양과학기술연구센터

²국립한경대학교 화학공학과

Removal Characteristics of Mixed Heavy Metals from Aqueous Solution by Recycled Aggregate as Construction Waste

Woo-Seok Shin¹ and Young-Kee Kim^{1,2,†}

¹Institute of Marine Science and Technology Research, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea
²Department of Bioresources & Rural systems Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

요 약

본 연구에서는 순환골재를 이용하여 수용액상에서 혼합중금속의 제거능을 평가하였다. 순환골재는 주요 성분인 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 약 95% 함유되어 흡착제로서 유리한 조성을 가지고 있다. 동적흡착결과를 유사 1차 모델과 유사 2차 모델로 분석한 결과 두 모델 모두 실험결과에 잘 부합하는 것으로 나타났다. 평형흡착 실험은 Langmuir 모델에 잘 부합했고, Cu²⁺ > Pb²⁺ > Zn²⁺ ≅ Ni²⁺ > Cd²⁺ 순으로 흡착량이 높았다. 용액의 pH가 6에서 10로 증가함에 따라서 흡착률은 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 순환골재의 양이 증가함에 따라서 중금속의 흡착률은 증가하였지만, 단위 질량당 흡착량은 감소하였다. 본 연구 결과를 통해 순환골재는 중금속을 효율적으로 제거할 수 있는 흡착제로 판단된다.

Abstract – This study examined the removal rate of mixed heavy metals from aqueous solution using recycled aggregate. The recycled aggregate is favorable for the adsorbent because it contains about 95% (CaO, SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃), which are major ingredient of adsorbent for heavy metal. The kinetic data presented that the slow course of adsorption follows the Pseudo first and second order models. The equilibrium data were well fitted by the Langmuir model and showed the affinity order: Cu²⁺ > Pb²⁺ > Zn²⁺ ≅ Ni²⁺ > Cd²⁺. The results also showed that adsorption rate slightly increased with increasing pH from 6 to 10. Moreover, this trend is similar to results obtained as function of loading amount of recycled aggregate. Meanwhile, an unit adsorption rate was slightly decreased. From these results, it was concluded that the adsorbents can be successfully used the removal of the heavy metals from the aqueous solutions.

Keywords: Recycled Aggregate(순환골재), Mixed Heavy Metal(혼합 중금속), Adsorption(흡착), Capping Material(피복소재), Marine Sediment(해양퇴적물)

1. 서 론

중금속 오염 문제는 전 세계적으로 이슈가 되고 있으며, 특히 해양퇴적물 내 중금속 오염은 해양 생태계 뿐만 아니라, 퇴적물의 양질적 문제를 일으킬 수 있다(Gray[2006]). 이뿐만 아니라 결국에는 인간에게도 위협을 줄 수 있는 잠재적인 문제이다. 그러나 이런 이유에도 불구하고 해양오염퇴적물 정화 기술은 아직까지도 선진국 일부 나라에서 집중적으로 연구되고 있을 뿐, 현재 우리나라에서는

해양오염퇴적물의 정화는 대부분 준설(Dredging)에 의한 외해 투기 및 육상 매립에 의존하고 있는 실정이다. 하지만 런던 의정서에 의해 2012년도부터 외해 투기가 사실상 금지가 되었기 때문에 해양오염퇴적물의 정화를 위한 기술 개발은 매우 중요하게 인식되고 있지만, 해양오염퇴적물에 대한 적절한 관리 및 처리방법은 부족한 실정이다.

해양퇴적물 정화 기술로는 크게 자연정화(Monitored Natural Recovery), 현장 피복 공법(In-Situ Capping)과 준설(Dredging)이 있다(EPA[2005]). 자연정화는 친환경적인 정화기술이지만, 장기적인 처리 기간과 비교적 낮은 농도의 중금속 오염지역에 적용되는

[†]Corresponding author: kim@hknu.ac.kr

한계점을 갖고 있으며, 준설은 제거율이 높은 반면에 준설, 수송, 매립을 기반으로 하고 있어 비용이 많이 소요된다. 한편 현장 피복 공법은 자연정화방법이나 준설 등에 비해 상대적으로 짧은 기간에 오염된 퇴적물을 해양환경에서 고립시킬 수 있다는 장점이 있다. 게다가 이 현장피복 성능을 극대화 시키기 위해서 피복시공기술과 더불어 피복 소재의 중요성이 인식되고 있다. 특히, 피복 소재에 대한 지속적인 연구가 진행 중이지만 경제성이 확보된 안전한 소재의 개발은 미미한 실정이다.

지난 수십년간 중금속 제거를 위한 연구는 다양한 분야에서 이루어져 왔고, 인구증가와 더불어 산업발달에 의해 배출되는 다양한 폐수에 존재하는 중금속을 정화하고자 하는 연구는 많은 결과를 보여주고 있다(Kim[1997], Ahmaruzzaman[2011], Liu[2011]). 일반적으로 중금속을 제거하는데 가장 많이 이용되고 있는 활성탄은 제거 효율성은 높지만, 경제적으로 많은 부담을 안고 있다. 게다가 최근 산업활동에서 배출되는 폐기물 및 부산물의 증가는 사회·환경적으로 다양한 문제를 야기 시키고 있어, 이러한 문제점을 해결하기 위해 산업 및 농업 폐기물 및 부산물을 이용한 중금속 제거 정화 기술들이 보고되고 있다(Ahmaruzzaman[2011]). 특히, 건설폐기물에서 나오는 부산물인 순환골재(Recycled Aggregate)는 산성광산 배수 중화처리(Kim[2002]), 영양염류(질소, 인)를 차단하는 소재로 재활용하는 연구가 일부 진행되고 있을 뿐(Kim[2006], 兵頭正浩[2008]), 단일 중금속이 아닌 혼합 중금속에 의한 오염 가능성이 높은 해양오염퇴적물에서 중금속 제거에 관한 연구는 매우 제한적이다. 특히, 순환골재는 일반골재에 비해 품질이 떨어져 국내에선 아직까지 실구조물에 적용된 사례가 드물며, 부가가치가 비교적 적은 도로공사, 건설공사의 성·복토 및 매입용 재료로 사용되고 있는 실정이다(Ryou[2011]). 따라서 아직까지 비교적 활용성이 적은 순환골재를 갖고 혼합 중금속으로 오염된 해양퇴적물 피복소재로의 사용은 매우 기대되는 활용방법이라고 판단된다.

이에 본 연구에서는 해양환경퇴적물 내 혼합 중금속 제거를 위해 순환골재의 중금속 제거 특성의 기초자료를 알아보고자 건설폐기물 부산물인 순환골재를 이용하여 혼합 중금속 용액에서의 중금속 제거 특성을 살펴보았다. 이를 위하여 평형 및 동적 흡착실험을 수행하였고, pH에 의한 흡착 특성과 순환골재 주입량에 따른 중금속 제거 가능성을 평가하기 위하여 혼합 중금속 제거 실험을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 흡착제

순환골재는 경기도 화성시에 있는 (주)다원환경에서 생산된 순환골재를 사용하였다. 실험에 사용된 순환골재는 실험 전 증류수에 3회 세척하여 불순물을 제거하고, 105의 오븐에서 24시간 건조 후, 해양오염퇴적층에 피복소재로 이용시 인의적인 이벤트(예를 들어, 태풍, 홍수, 해일 등)가 발생하더라도 피복소재들이 재 부유되거나 쓸림 현상이 일어나지 않도록 하기 위해서 35번과 10번 체로 체질하

여 입경분포가 1.0~2.0 mm 크기로 체가름 후 사용하였다. 순환골재의 물리화학적 특성을 분석하기 위해 X-ray fluorescence spectrometry (XRF, XRF-1700, Shimadzu Co., Kyoto, Japan)와 Fast fourier spectroscopy (FT-IR, VERTEX 70; Bruker, Germany), Scanning electron microscopy (FE-SEM, S-3500N, Hitachi Co., Tokyo, Japan) 분석을 실시하였다.

2.2 회분실험

순환골재를 이용한 중금속 원소들의 흡착특성을 조사하기 위하여 사용한 용액은 Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} 및 Cd^{2+} (1000 mg/L; Accustandard Inc.) 표준원액용액을 실험 농도에 맞게 증류수로 희석 및 혼합하여 사용하였다. 시간에 따른 혼합 중금속의 동역학적 흡착 실험은 0.5 g의 흡착제와 50 mg/L의 혼합 중금속 용액(pH 4) 30 mL를 50 mL 튜브에 넣고 25 °C, 100 rpm의 조건으로 10, 30, 60, 120, 360, 720 min 교반 후 농도를 분석하였다. 농도에 따른 평형 혼합 중금속 흡착실험은 5, 10, 25, 50, 75, 100 mg/L의 혼합 중금속 용액농도에서 동역학적 흡착실험과 동일한 조건으로 24 h 교반 후 분석하였다. pH에 의한 중금속 흡착 특성을 살펴보기 위해서 50 mg/L의 혼합 중금속 용액을 1 M HNO_3 와 1 M $NaOH$ 로 pH를 6, 8, 10로 조절하였고, 교반 시간, 흡착제 주입량 및 용액의 부피는 평형 흡착과 동일한 조건으로 실험을 수행하였다. 흡착제 주입량에 의한 실험은 순환골재를 0.1 g, 0.5 g, 1 g, 2 g 넣고 50 mg/L의 혼합중금속 용액(pH 4) 30 mL와 교반시켰다.

교반 후 모든 시료는 3 μm 정량여과지(Advantes No. 6, Japan)로 여과 후 희석하여 ICP-MS (Agilent 7500 Series, USA)로 측정하였다.

2.3 데이터 분석

순환골재의 제거성능은 제거율(%)로 나타내었다.

$$\text{Removal}(\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

C_0 는 실험 전의 농도(mg/L), C 는 실험 후의 농도(mg/L)를 나타내고 있다.

순환골재의 동역학적 흡착실험결과는 유사 1차 모델(Pseudo first-order model)과 유사 2차 모델(Pseudo second-order model)을 이용하여 분석하였다(Ho[1999a], Ho[1999b]).

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (2)$$

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (3)$$

여기서 q_t 는 시간 t 일 때 여재 단위질량당 흡착된 중금속의 양(mg/g), q_e 는 평형상태에 도달하였을 때 흡착제의 단위질량당 흡착된 중금속의 양(mg/g), K_1 은 유사 1차 반응 상수(1/min), K_2 는 유사 2차 반응 속도 상수(g/mg/min)이다.

등은 흡착 실험결과는 Freundlich model과 Langmuir model을 이용하여 분석하였다.

$$S = K_f C^{1/n} \quad (4)$$

$$S = \frac{Q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (5)$$

S는 단위질량의 흡착제당 흡착된 중금속의 양(mg/g), C는 평형 상태에서 액상의 중금속의 농도(mg/L), K_f 는 분배계수(L/g), n은 Freundlich 상수, K_L 은 결합 에너지와 관련된 Langmuir 흡착상수(L/mg), Q_m 은 단위 질량의 흡착제 당 중금속의 최대 흡착량(mg/g)이다.

K_f , n, K_L , Q_m 은 실험 결과에 Freundlich model과 Langmuir model을 적용하여 값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 순환골재의 특성

순환골재는 CaO를 약 36.2%, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃는 각각 38.4%, 9.9%, 6.0%를 나타내어 54.3% 함유하고 있다(Table 1). 특히, Si/Al(3.9) 비율이 낮게 나타났다. 또한 물질 구성성분에 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO의 성분비가 높은 경우 중금속 흡착제로 사용 가능성을 나타내고 있어(Weng[1994]), 이는 순환골재가 중금속 제거에 적합한 흡착제로 판단된다.

Fig. 1은 순환골재의 표면 미세구조(SEM)를 관찰한 결과를 나타내고 있다. 순환골재는 활성탄과 달리 표면이 작은 입자들로 거칠게 표면이 나올 뿐 다공성은 찾아볼 수 없었다. Fig. 2은 순환골재에 있어서 중금속 흡착 후의 FT-IR 스펙트럼 변화를 나타내고 있다. 순환골재의 FT-IR 스펙트럼은 400~4000 cm⁻¹ 범위에서 평가되었다. 중금속 흡착 후, 3300~3400 cm⁻¹에서 강한 밴드를 나타내고 있지만 이러한 피크의 대부분은 물에 의한 영향 때문이라고 사료된다(Allahverdi[2009]). 게다가 1410~1470 cm⁻¹ 범위에서 보이는 피크는 탄산염 밴드(C=O)와 관련하고 있음을 나타내고 있다(Yu[1999], Mollah[1998]). 또한, 강한 피크를 보이고 있는 1000 cm⁻¹와 450 cm⁻¹ 피크는 각각 비대칭의 Si-O-Al의 결합과 SiO₄ 사면체에 있어서 평면 Si-O 결합과 관련이 있다(Clayden[1991], Ortego[1991]).

3.2 동역학적 흡착 실험

순환골재의 시간에 따른 중금속 흡착을 나타낸 결과(Fig. 3), Zn²⁺, Ni²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺ 및 Pb²⁺의 경우 360분 경과 후 평형에 도달하였다.

유사 1차 모델과 2차 모델을 이용한 분석 파라메타 결과를 Table 2에 나타낸 결과를 보면, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 경우 Cu²⁺ ≅ Pb²⁺ > Zn²⁺ > Ni²⁺ ≅ Cd²⁺, Cu²⁺ ≅ Pb²⁺ > Zn²⁺ > Ni²⁺ ≅ Cd²⁺ 순으로

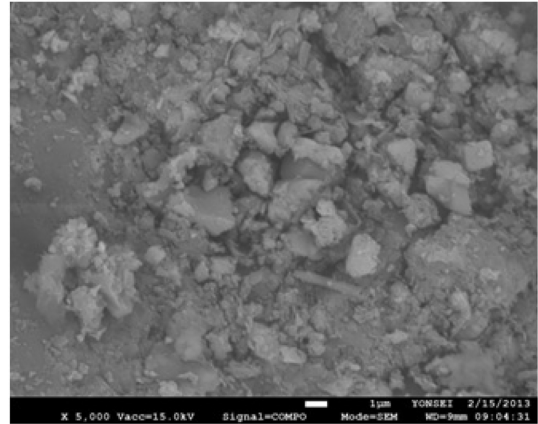


Fig. 1. SEM images of recycled aggregate.

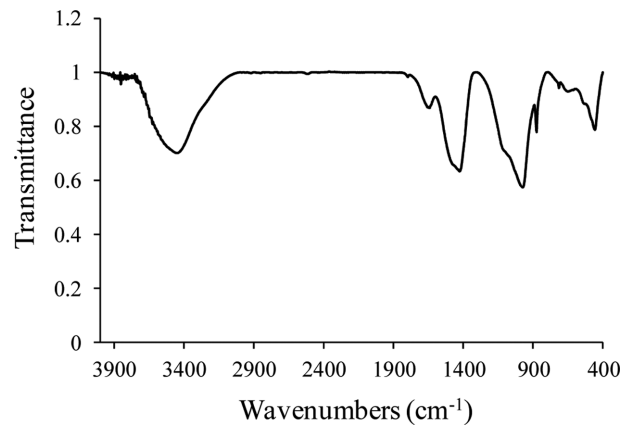


Fig. 2. FT-IR spectrum of recycled aggregate after heavy metal adsorption.

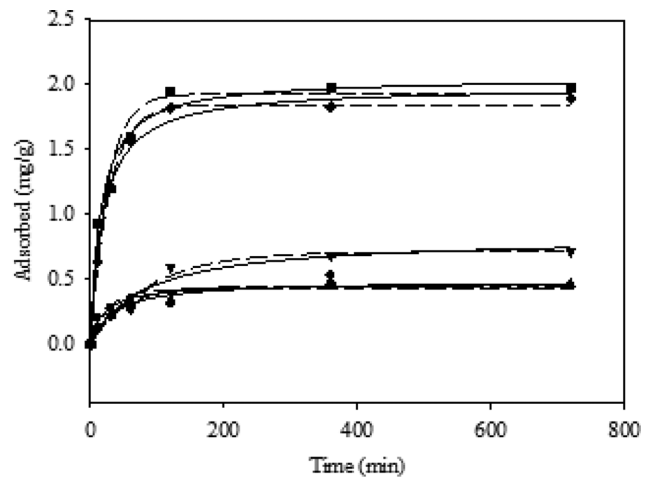


Fig. 3. Comparison of the measured and modeled adsorption time profiles for mixed heavy metal ions at pH 4. Symbols: (▲) Ni, (▼) Zn, (■) Cu, (◆) Pb, and (●) Cd. Lines: pseudo-first-order model (dashed line) and pseudo-second-order model (solid line).

Table 1. Physical and chemical compositions of recycled aggregate

| Coposition | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | MnO | K ₂ O |
|--------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------|--------------------------------|-----|-------------------|-------------------------------|-----|------------------|
| Recycled aggregate | 38.4 | 9.9 | 0.4 | 36.2 | 6.0 | 1.6 | 1.5 | 0.1 | 0.2 | 3.2 |

Table 2. Kinetic model parameters of pseudo-first-order and pseudo-second-order equations in recycled aggregate

| Initial concentration 50 mg/L | Pseudo first-order model | | | Pseudo second-order model | | |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| | q _e (mg/g) | k ₁ (1/min) | R ² | q _e (mg/g) | k ₂ (g/mg/min) | R ² |
| Ni ²⁺ | 0.448 | 0.021 | 0.943 | 0.490 | 34.390 | 0.977 |
| Zn ²⁺ | 0.714 | 0.011 | 0.970 | 0.824 | 78.196 | 0.960 |
| Cu ²⁺ | 1.931 | 0.039 | 0.956 | 2.056 | 15.535 | 0.982 |
| Pb ²⁺ | 1.844 | 0.036 | 0.996 | 1.987 | 18.696 | 0.993 |
| Cd ²⁺ | 0.425 | 0.038 | 0.829 | 0.468 | 19.230 | 0.897 |

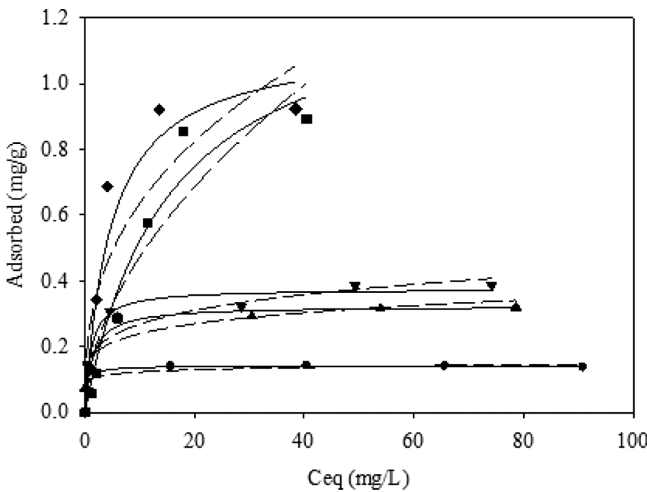


Fig. 4. Equilibrium adsorption data and model for mixed heavy metal ion. Symbols: (▲) Ni, (▼) Zn, (■) Cu, (◆) Pb, and (●) Cd. Lines: Freundlich model (dashed line) and Langmuir model (solid line).

각각 평형 흡착량을 나타냈으며, 유사 1, 2차 모델의 반응속도는 $Cu^{2+} \approx Cd^{2+} \approx Pb^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+}$, $Zn^{2+} > Ni^{2+} > Cd^{2+} \approx Pb^{2+} > Cu^{2+}$ 의 순서로 반응속도가 빠르게 나타났다. 순환골재의 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 상관계수(R²)는 Cd²⁺을 제외한 나머지 중금속에 대해서는 비교적 잘 부합하고 있음을 알 수 있었다(Table 2).

3.3 평형흡착실험

혼합 중금속의 평형흡착실험은 Fig. 4 같이 Freundlich 모델과 Langmuir 모델을 적용하였다. Table 3에서와 같이 Freundlich 모델에서 순환골재의 분배계수(K)는 Ni²⁺ (0.161 L/g), Zn²⁺ (0.167 L/g), Cu²⁺ (0.138 L/g), Pb²⁺ (0.267 L/g), Cd²⁺ (0.102 L/g)로 $Pb^{2+} > Zn^{2+} \approx Ni^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+}$ 순이며, 1/n 값은 Cd²⁺ (0.079), Ni²⁺ (0.171), Zn²⁺ (0.208), Pb²⁺ (0.376), Cu²⁺ (0.538) 순으로 1보다 작은 값을 형성하여 전체

적으로 강한 흡착경향을 나타내었다(AWWA[1999]). Langmuir 모델의 적용에서는 최대흡착량(Q_m)이 Cu²⁺ (15.381 mg/g), Pb²⁺ (4.764 mg/g), Ni²⁺ (1.379 mg/g), Zn²⁺ (1.129 L/g), Cd²⁺ (0.415 m/g)로 $Cu^{2+} > Pb^{2+} > Zn^{2+} \approx Ni^{2+} > Cd^{2+}$ 순으로 높고 흡착 상수값(K)은 $Cu^{2+} \approx Pb^{2+} > Zn^{2+} \approx Ni^{2+} > Cd^{2+}$ 순이었다. 순환골재의 흡착 실험 결과는 다층흡착을 가정한 Freundlich 모델보다 단층흡착을 가정한 Langmuir 모델이 더 잘 부합되는 것으로 나타났다(Hui[2005]).

3.4 pH의 영향

혼합 중금속 용액의 pH 변화에 따른 중금속 흡착특성 실험 결과 Fig. 5에서와 같이 pH 6에서 Cu²⁺와 Pb²⁺의 흡착량은 각각 2.997 mg/g, 2.978 mg/g으로 흡착량이 높게 나타났다. 한편 pH가 8로 증가함에 따라서, Cu²⁺와 Pb²⁺의 흡착량은 2.999 mg/g, 2.999 mg/g으로, pH 6에서의 흡착량에 비하여 흡착량의 변화량이 거의 없었다. Pb²⁺이온은 pH 5.5 정도에서 Pb(OH)⁺가 존재하지만, pH 6~12에서는 Pb(OH)⁺, Pb₃(OH)₄²⁺, PbCO₃(s), Pb₃(CO₃)₂(OH)₂(s), Pb(OH)₂(S),

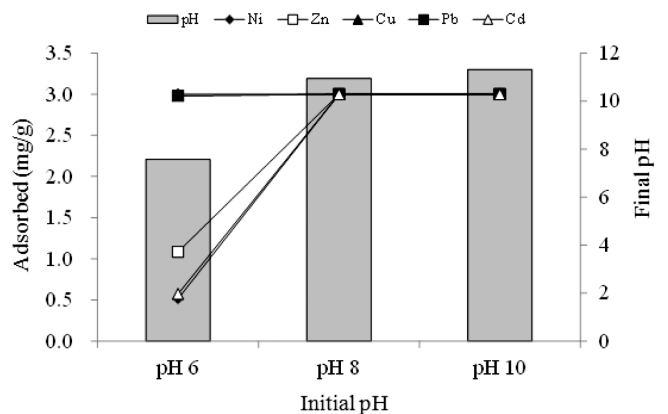


Fig. 5. Effect of solution pH on adsorption capacity for recycled aggregate.

Table 3. Model parameter for Freundlich and Langmuir model obtained from equilibrium sorption experiments

| Heavy metals | Freundlich model | | | Langmuir model | | |
|------------------|------------------|-------|----------------|-----------------------|----------|----------------|
| | K (L/g) | 1/n | R ² | Q _m (mg/g) | K (L/mg) | R ² |
| Ni ²⁺ | 0.161 | 0.171 | 0.937 | 1.379 | 0.323 | 0.948 |
| Zn ²⁺ | 0.167 | 0.208 | 0.913 | 1.129 | 0.376 | 0.955 |
| Cu ²⁺ | 0.138 | 0.538 | 0.907 | 15.381 | 1.324 | 0.960 |
| Pb ²⁺ | 0.267 | 0.376 | 0.802 | 4.764 | 1.130 | 0.910 |
| Cd ²⁺ | 0.102 | 0.079 | 0.845 | 0.415 | 0.142 | 0.871 |

Pb(OH)₃로 혼재하고 있으며 특히 pH 10 이하에서 잠재적인 납 침전물로서 PbCO₃(S), Pb₃(CO₃)₂(OH)₂(S), Pb(OH)₂(S) 등을 고려할 수 있다(Quy[2001]). 한편 pH 6 이상의 용액에서 Cu²⁺는 OH⁻ 이온이 증가함에 따라 Cu(OH)²⁺₄, Cu₂(OH)³⁺로 혼재하면서 침전 및 흡착이 높게 나타남에 따라 Cu²⁺는 침전에 의한 제거가 이루어짐을 알 수 있었다(Chen[2001]). 게다가 Zn²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺은 pH 6에서 각각 1.086 mg/g, 0.574 mg/g, 0.516 mg/g을 나타내어 Cu²⁺와 Pb²⁺에 비해 낮은 흡착량을 보였다. 그러나 pH 8에서는 Zn²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺의 흡착량은 전부 2.999 mg/g을 나타내고 있어 pH 6에서 8로 증가함에 따라서 흡착량이 크게 증가하였다. Zn²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺ 또한 pH 8 이상이 되면 Zn(OH)₂, Ni(OH)₂, Cd(OH)₂의 형성에 의한 침전작용이 일어날 것으로 사료된다(Srivastava[2005], Smiljanic[2010]). 순환골재에 있어서 높은 흡착량을 나타내는 경향은 pH를 증가시킨다고 보고된 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO 성분들이 함유되어 있어 흡착제 투입시 pH를 증가시키기 때문에 침전에 의한 제거가 높은 것으로 판단된다(Weng[1994], Lee[2004]).

3.5 흡착제 주입량 증가의 영향

흡착제의 주입량에 의한 특성을 비교하기 위하여 산성조건(pH 4)의 혼합 중금속용액에 순환골재의 주입량을 0.1 g에서 2 g으로 증가시켰고, 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 순환골재의 주입량이 0.1 g에서 2 g으로 증가함에 따라 Ni²⁺의 총 제거율은 7.5%에서 99%로 증가하였고 단위 질량당 흡착량은 1.133 mg/g에서 0.750 mg/g으로 감소하였다. Zn²⁺의 경우는 6.2%에서 99%로 증가한 반면 흡착량은 0.926 mg/g에서 0.750 mg/g으로, Cu²⁺의 제거율은 27.2%에서 99%로 흡착량은 4.079 mg/g에서 0.750 mg/g으로, Pb²⁺의 제거율은 61.4%에서 99%로 흡착량은 9.203 mg/g에서 0.749 mg/g로 감소하였다. 마지막으로 Cd²⁺의 경우 7.1%에서 99%의 제거율 증가와 1.072 mg/g에서 0.750 mg/g의 흡착량 감소의 경향을 나타내었다. Ni²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺ 모두에서 순환골재의 주입량이 증가함에 따라서 제거율은 증가하였지만, 단위 질량당 흡착량은 감소하였다.

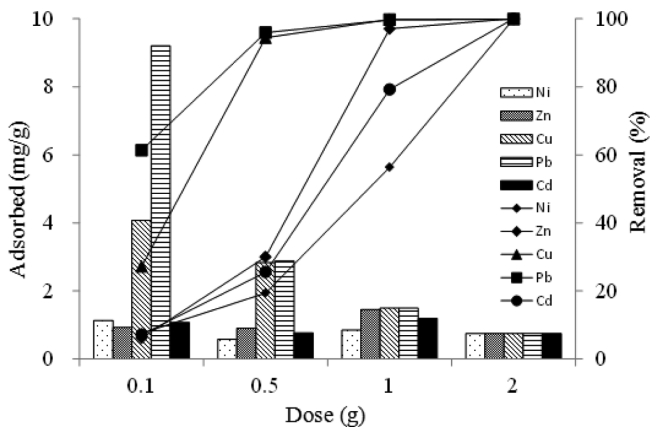


Fig. 6. Effect of adsorbent dose on adsorption capacity of recycled aggregate.

4. 결 론

본 연구에서는 건설폐기물인 순환골재를 이용하여 혼합 중금속 (Zn²⁺, Ni²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺)의 제거특성을 살펴보고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 혼합 중금속 (Zn²⁺, Ni²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺)에 대한 평형흡착은 모두 360분 후 도달 하였다. 유사 1, 2차 모델 결과 Cu²⁺, Pb²⁺ > Zn²⁺ > Ni²⁺, Cd²⁺순으로 0.4~2.1 mg/g의 흡착량을 나타냈고, 흡착 시간은 유사 1차 모델에서는 Cu²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺ > Ni²⁺ > Zn²⁺ 순으로, 2차 모델에서는 Zn²⁺ > Ni²⁺ > Cd²⁺, Pb²⁺ > Cu²⁺ 순으로 나타냈다.
2. 혼합 중금속 용액의 각각 중금속은 순환골재를 이용한 흡착에 있어서 상관계수(R²)가 Freundlich 모델(0.802~0.937)보다 Langmuir 모델(0.871~0.960)이 높게 나타내고 있어 Langmuir 모델에 잘 부합하고 있음을 시사하고 있다.
3. pH변화에 따른 실험결과 Cu²⁺와 Pb²⁺에서는 pH 변화에서도 흡착량은 거의 동일한 경향을 나타냈지만, Zn²⁺, Ni²⁺, Cd²⁺의 경우에는 pH 6에서 10으로 변화함에 따라 흡착량은 Zn²⁺(1.8 mg/g), Ni²⁺(2.384 mg/g), Cd²⁺(2.326 mg/g) 흡착량 변화가 각각 뚜렷하게 나타났다.
4. 순환골재는 주입량의 증가에 따른 중금속의 제거율은 Zn²⁺(92.8%), Cd²⁺(91.9%), Ni²⁺(91.5%), Cu²⁺(71.8%), Pb²⁺(37.6%) 순으로 증가를 나타냈으나 단위질량당 흡착량은 Pb²⁺(8.450 mg/g), Cu²⁺(3.329 mg/g), Ni²⁺(0.383 mg/g), Cd²⁺(0.322 mg/g), Zn²⁺(0.176 mg/g) 순으로 각각 감소가 나타났다.

후 기

이 논문은 2012년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(지속가능 해양오염 퇴적물 정화기술 개발).

참고문헌

[1] USEPA, 2005, Contaminated sediment remediation guidance for hazardous waste sites.
 [2] Kim, K.I., Choi, J.S., Im, H.G., 2006, "Reforming resource circulation policy for sustainable material management, Korea Environment Institute.
 [3] Ryou, J.S., Song, I.H., 2011, "An experimental study on field application of self-compacting concrete using recycled fine aggregate", Journal of the Korea institute for structural maintenance inspection, Vol. 10, 55-60.
 [4] Kim, E.H., Kim, J.K., Sung, N.C., 1997, "A study on removal of heavy metals and pH increasing effects in plating wastewater using oyster shells", Korea Society of Waste Management, Vol. 34, 414-419.
 [5] Kim, J.B., Oh, J.I., Park, C.S., 2002, "AMD (Acid Mine Drainage)

- neutralization using recycled-concrete aggregates”, *J. KSEE*, Vol. 24, 21-30.
- [6] Lee, H.S., Oh, Y.S., Lee, W.C., 2004, “A basic study on the recovery of Ni, Cu, Fe, Zn ions from wastewater with the spent catalyst”, *J. Kor. Inst. Res. Recycling*, Vol. 13, 3-8.
- [7] Ahmaruzzaman, M., 2011, “Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals”, *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol. 166, 36-59.
- [8] American Water Works Association, 1999, “water quality & treatment hand book”, McGraw-Hill.
- [9] Allahverdi, A., Kani, E.N., 2009, “Construction wastes as raw materials for Geopolymer binders”, *International J. Civil Engin.*, Vol. 7, 154-160.
- [10] Chen, G.Z., Fray, D.J., 2001, “Cathodic refining in molten salts: Removal of oxygen, sulfur and selenium from static and flowing molten copper”, *J. Appl. Electrochem.*, Vol. 31, 155-164.
- [11] Clayden, N.J., Esposito, S., Aronne, A., Pernice, P., 1991, “Solid state ^{27}Al NMR and FTIR study of lanthanum aluminosilicate glasses”, *J. Non-Cryst. Solids*, Vol. 11, 258-268.
- [12] Gray, C.W., Dunhan, S.J., Dennis, P.G., Zhao, F.J., McGrath, S.P., 2006, “Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red mud”, *Environ. Pollut.*, Vol. 142, 530-539.
- [13] Ho, Y.S., McKay, G., 1999a, “Thesorption of lead(II) ions on peat”, *Water Res.*, Vol. 33, 578-584.
- [14] Ho, Y.S., McKay, G., 1999b, “Pseudo-second order model for sorption processes”, *Proc. Biochem.*, Vol. 34, 451-465.
- [15] Hui, K.S., Chao, C.Y.H., Kot, S.C., 2005, “removal of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash”, *J. Hazard. Mater.*, Vol. B127, 89-101.
- [16] Liu, Y., Naidu, R., Ming, H., 2011, “Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases”, *Geoderma.*, Vol. 163, 1-12.
- [17] Mollah, M.Y.A., Lu, F., Cocke, D.L., 1998, “An X-ray diffraction (XRD) and fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) characterization of the speciation of arsenic (V) in Portland cement type-V”, *Sci. total Environ.*, Vol. 57, 224-231.
- [18] Ortego, J.D., Barroeta, Y., 1991, “Leaching effects on silicate polymerization, A FTIR and ^{29}Si NMR study of lead and zinc in Portland cement”, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 25, 1171-1174.
- [19] Palmer S.J., Nothling, M., Bakon, K., Frost, R., 2010, “Thermally activated seawater neutralised red mud used for the removal of arsenate, vanadate and molybdate from aqueous solution”, *J. colloid Interface Sci.*, Vol. 342, 147-154.
- [20] Quy, T. N., Bruce, A. M., 2001, “Lead adsorption and precipitation reactions on soil minerals”, *Symposia papers presented before the division of Environmental Chemistry American Chemical Society*, Vol. 41, 609-613.
- [21] Smiljanić, S., smiciklas, I., Perić-Grujić, A., Lončar, B., Mitrić, M., 2010, “Rinsed and thermally treated red mud sorbents for aqueous Ni^{2+} ions”, *chem. Eng. J.*, Vol. 162, 75-83.
- [22] Srivastava, P., Singh, B., Angove, M., 2005, “Competitiveadsorption behavior of heavy metals on kaolinite”, *J. ColloidInterface Sci.*, Vol. 290, 28-38.
- [23] Weng, C.H., Huang, C.P., 1994, “Treatment of metal industrial waste water by fly ash and cement fixation”, *J. Environ. Eng.*, Vol. 120, 1470-1487.
- [24] Yu, P., Kirkpatrick, R.J., Poe, B., McMillan, P.F., Cong, X., 1999, “Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): near-, mid-, and far-infrared spectroscopy”, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, 742-750.
- [25] Hyodo, M., Kuwabara, T., Sato, S., Nonaka, T., 2008, “Recycling of fine demolished concrete as functional overlying sand”, *Trans. The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering (JSIDRE)*, Vol. 257, 19-25.

2013년 3월 14일 원고접수

2013년 5월 2일 심사수정일자

2013년 5월 6일 게재확정일자