

수용액에서 칼사이트형 탄산칼슘에 대한 납이온(II)의 흡착특성

홍성철 · 김문선 · 정재관[†]

성균관대학교 화학공학과

(2001년 6월 11일 접수, 2001년 8월 30일 채택)

Adsorption Characteristics of Pb(II) on Calcite-Type Calcium Carbonate in Aqueous Solutions

Sung Chul Hong, Moon-Sun Kim and Jaygwan G. Chung[†]

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received 11 June 2001; accepted 30 August 2001)

요 약

본 연구에서는 수용액의 납이온을 칼사이트형 탄산칼슘을 이용하여 효과적으로 제거하기 위해 10 Pb²⁺mg/l의 납수용액과 탄산칼슘 1.5 g/l을 반응기에 넣고 흡착실험을 실시했다. Langmuir와 Freundlich 흡착등온식의 신뢰도는 각각 97%와 76%로 Langmuir식의 신뢰도가 높았고 pH 1.6-4 범위에서 흡착량이 급격히 증가하여 pH 4에서는 98% 흡착이 이루어졌으며 그 이후의 범위에서는 거의 변화폭이 없었다. 20%와 35% 염산 수용액으로 각각 전처리하는 경우 20.5%, 14.1%의 흡착능 개선효과가 있었다. 수용액의 칼슘이온은 탄산칼슘에 대한 납이온의 흡착량이 증가할수록 증가되었지만 염산 수용액으로 전처리하는 경우 흡착량에 따른 납이온의 농도 변화는 거의 없었다.

Abstract – In this article, adsorption experiments were performed to remove effectively the lead ion(Pb²⁺) in aqueous solutions by the calcite-type calcium carbonate in a reactor to be placed both the lead solution of 10 Pb²⁺mg/l and the calcium carbonate of 1.5 g/l. Reliabilities of Langmuir and Freundlich adsorption isotherms were 97% and 76%, respectively, and the reliability of Langmuir adsorption isotherm was higher than that of Freundlich adsorption isotherm. The adsorption amount increased rapidly in range from pH 1.6 to pH 4 and then the 98% of total adsorption amount was approached at pH 4. Over pH 4, the variation of the adsorption amount was rarely observed. Adsorptivity of a calcium carbonate with the pretreatment of 20% and 35% HCl solutions was increased by 20.5% and 14.1%, respectively. Ca²⁺ concentration in aqueous solutions increased with an increasing adsorption amount of Pb²⁺ on CaCO₃ but the variation of a Ca²⁺ concentration by using the pre-treated CaCO₃ was seldom observed.

Key words: Calcite-Type Calcium Carbonate, Adsorption, Lead Ion(II), Calcium Ion(II)

1. 서 론

산업의 발달과 인구 증가로 산업화와 도시화가 급속히 이루어지면서 생활하수와 산업폐수에 의한 수질오염은 자연의 자정능력 한계를 넘어서 심각한 환경문제를 불러일으키고 있다. 산업폐수에 다량 함유되어 있는 중금속 물질은 유기물과는 달리 생물학적 방법이나 광분해 방법으로 처리가 어려우며 용해도가 높아 기계적으로 제거할 수 있는 방법에 한계가 있다[1]. 중금속 물질은 독성이 높아 낮은 농도에서도 인체에 심각한 영향을 미친다. 최근 중금속 이온을 함유한 물질은 오랜 기간 지속적으로 독성을 유지한다는 연구결과가 발표되면서 사회적 관심이 증대되고 있고 폐수 중의 중금속 이온 허용농도 규제는 더 강화되고 있다[2]. 납은 산업 공정에서 사용되고 있는 중요한 중금속 중의 하나로, 휘발유

에서는 블록킹 개선제(anti-knock agent)로 테트라에틸납(tetraethyllead)이 많이 첨가되어 있어 자동차 배기에 다량 포함되어 있고 페인트 공장 폐수와 폐촉진지 등에서 유출되는 납이온은 납중독을 일으키는 원인이 되는데 인체로 유입된 납은 인간의 몸(뼈조직)에 주로 축적되며 중추신경, 위장, 신장 및 혈액에 장애를 일으킨다[3]. 이런 이유로 국내 관련법에서는 납의 한계허용 농도를 0.05 mg/m³로 제한하고 있다[4].

생물학적 방법이나 광분해 처리법과는 달리 흡착공정은 폐수에서 중금속들을 제거하는데 효과적으로 이용되고 있으며[5] 납이온 제거를 위한 연구도 다양하게 진행되고 있다. Barbier 등[6]은 수용액에서 montmorillonite를 이용하여 납과 카드뮴의 흡착에 관한 연구를 했는데, pH 8까지 흡착능은 증가하였으며 Cd(II)보다 Pb(II)의 흡착이 더 빠른 속도로 이루어졌다는 결과를 발표했고 Nagata 등[7]은 zirconium(IV)-phosphate를 표면에 화학적으로 결합시킨 실리카를 이용하여 Cd(II), Pb(II), Hg(II)의 흡착특성을 비교했고 그 결과 Cd(II), Pb(II), Hg(II) 순으로 흡착이 잘 되었다는 사실을 알았다. Gupta 등[8]은 알루미늄 산업폐기물에서 얻어

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jgchung@yurim.skku.ac.kr

지는 적토(red-mud)를 이용하여 납과 크롬이 경쟁이온 관계에 있는 조건에서 각 금속이온 별 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식을 구명하였고 Seki와 Suzuki[9]는 이성분 복합유기흡착제(biopolymer composite)를 이용한 납이온의 흡착거동에 관한 연구에서 계면에서 일어나는 흡착 반응기구를 설명했다.

최근 저렴한 비용으로 쉽게 얻을 수 있는 무기분체 응용에 대한 연구는 많은 주목을 끌고 있다. 사용되는 무기분체로는 실리카, 알루미나, 탈크, 고령토, 탄산칼슘, 이산화티탄 등이 있으며 고기능성을 부여하기 위한 다양한 표면개질에 관한 연구가 이루어지고 있다[10]. 탄산칼슘은 고분자, 고무, 도료, 제지, 의약품 등에 광범위하게 사용되고 있으며 표면의 결정이 안정하고 다양한 형상으로 합성이 가능하다는 특징을 가지고 있다[11, 12]. 탄산칼슘은 제조방법에 따라서 자연 석회석을 분쇄하여 만든 중질 탄산칼슘과 화학적으로 합성하는 침강성 탄산칼슘으로 분류된다. 탄산칼슘의 결정구조에 따라 칼사이트(calcite), 아라곤나이트(aragonite), 바테라이트(vaterite)의 3종으로 구분되며 입방정계의 칼사이트형이 물성이 안정하고 우수하여 산업적으로 널리 사용되고 있다[13].

칼사이트형 탄산칼슘에 대한 연구로, Dalas 등[14]은 탄산칼슘은 광합성과 박테리아를 매개체로 합성이 가능하다고 발표했고 Geffroy 등[15]은 칼사이트 표면에 대한 폴리악릴레이트 흡착을 연구했는데 여기서 표면의 결정특성이 흡착물질의 거동에 영향을 미치는 변수라고 발표했다. Song 등[16]은 수용액에서 칼사이트 표면에 대한 알킬-폴리글리콜사이드의 조건별 흡착을 연구했는데, 흡착된 칼사이트의 분산성이 개선되었다고 발표했다. 양이온 셀룰로오스가 결합된 탄산칼슘에 대한 흡착을 연구한 Halab-Kessira와 Ricard[17]는 pH와 표면에 결합된 셀룰로오스의 농도가 흡착량에 영향을 미치는 변수임을 알았다. 바닷물에서 칼사이트에 대한 Pb(II)와 Cd(II), Na(I) 이온 간의 상호작용에 대하여 연구한 Bilinski 등[18]은 Pb(II)와 Cd(II)이온의 흡착속도가 Na(I)이온보다 우수하다는 사실을 알았고 Vengris 등[19]은 강산 용액으로 전처리된 점토(clay)를 이용하여 금속이온을 흡착했는데 전처리된 점토의 흡착능이 20% 이상 향상되었다고 발표했다.

본 연구에서는 칼사이트형 탄산칼슘에 대한 Pb²⁺이온의 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식을 구명했으며 흡착에 미치는 pH의 영향과 강산 용액을 이용한 탄산칼슘의 흡착능 개선 효과를 비교했고 흡착에 따라 변화하는 수용액의 Ca²⁺이온의 농도를 관찰했다.

2. 실험

2-1. 원료

흡착제로 사용한 탄산칼슘(Albaglos, Pfizer Co., U.S.A.)은 함량이 98% 이상의 순도를 갖는 칼사이트형 합성 탄산칼슘으로 평균입경(D₅₀)과 비표면적이 각각 0.6±0.1 μm(Fig. 1), 7±0.6 m²/g이었다[11, 13].

탄산칼슘은 Fig. 1과 같이 대체로 타원형의 형태로 칼사이트형 탄산칼슘 표면은 밀러지수(200)에 해당하는 결정면을 가지고 있다[20].

납 수용액은 평판상의 납(Yakuri Pure Chemicals Co., Japan)을 강산으로 용해시켜 제조했으며, pH조절에 사용한 시약으로는 수산화나트륨(Hayashi Pure Chemical Industries Ltd., Japan)과 염산(대정화학주식회사, 대한민국)을 사용했다.

2-2. 실험방법

실험은 1 l의 반응기에 탄산칼슘 1.5 g과 납 수용액 10 Pb²⁺mg/l를 넣고 초기 5분 동안 2,500 rpm의 조건으로 교반시킨 후 정지한 상태에서 흡착실험을 실시했다. 시료는 5 ml씩 채취했으며 시료의 납이온 농도는 원자흡수분광기(atomic absorption spectrophotometer: Model Z-6100, Hitachi Co., Japan)를 이용하여 측정했다[6, 7]. 납 수용액은 분말형태의 납을 6 N 질산용액에 용해해서 질산납산화물 고체로 건조시킨 후 다시

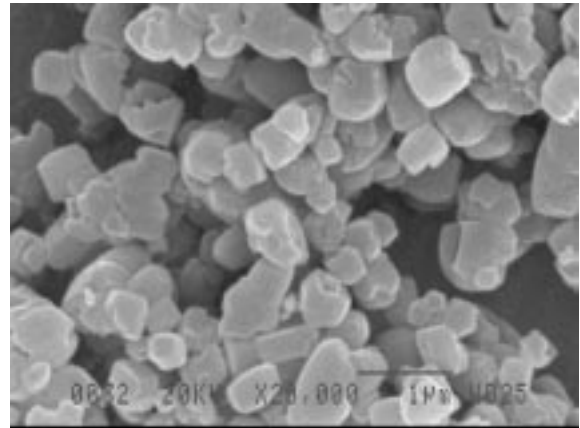


Fig. 1. SEM image of calcite-type calcium carbonate powders(magnification 20,000).

1 N 질산용액과 섞어서 1,000 Pb²⁺mg/l의 용액을 만들었다. 이렇게 만든 납수용액은 pH 2의 강산조건에서 보관을 하다가 10 Pb²⁺mg/l의 농도로 희석시켜 실험에 사용했다[21].

표면 전처리에 따른 흡착의 변화를 비교하기 위해 칼사이트형 탄산칼슘의 전처리는 다음과 같은 방법으로 실시했다[18]. 20%와 35% 염산 수용액을 제조하여 각각 탄산칼슘과 염산 수용액을 1:1의 중량비로 넣고 4시간 동안 끓였다. 염산이 모두 증발된 탄산칼슘을 20시간 동안 실온에서 건조시킨 후 증류수를 1:1의 중량비로 넣고 혼합물과 물이 분리될 수 있도록 충분히 정지시켰다. 물과 고형물을 분리한 후 상층부에 있는 물은 다시 제거하고, 남아있는 고형물의 1/3(부피 %)에 해당하는 물을 첨가하여 다시 혼합했다. 이렇게 얻어진 현탁액은 다시 25% 수산화나트륨 수용액으로 중화시켜 pH 7로 보정한 후 여과해서 60 °C에서 건조시키면 전처리 된 탄산칼슘이 된다.

탄산칼슘 표면에 납이온이 흡착되면서 탄산칼슘에서 이탈된 수용액의 Ca²⁺이온 농도를 알아보기 위해 이온 크로마토그래피 분석기(ion chromatography analyzer: GP-40-1, Dionex Co., U.S.A.)를 이용했다[22].

3. 결과 및 고찰

칼사이트형 탄산칼슘에 대한 납이온의 흡착특성을 연구하기 위해 흡착평형과 최적중량에 대한 실험을 Fig. 2와 3과 같이 실시했다.

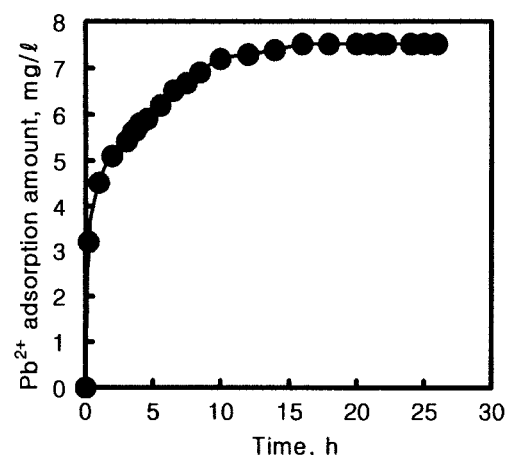


Fig. 2. Relationship between time and adsorption amount(initial concentration: 10 Pb²⁺mg/l, CaCO₃ concentration: 1.5 g/l, temp.: 20 °C, pH: 7).

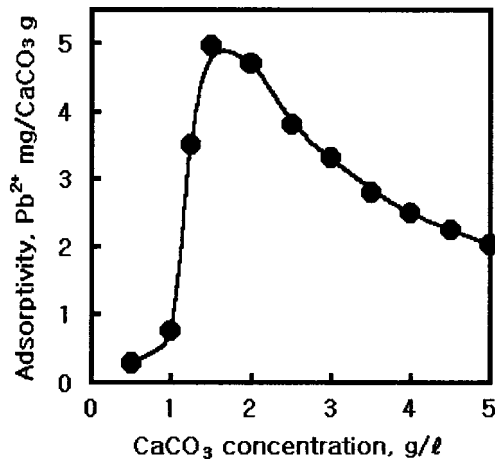


Fig. 3. Relationship between CaCO_3 concentration and adsorptivity(initial concentration: $10 \text{ Pb}^{2+} \text{ mg/l}$, temp.: 20°C , pH: 7).

흡착량은 초기부터 증가하다가 15시간 이후에 완만한 흡착이 이루어졌으며 흡착과 탈착이 더 이상 일어나지 않는다고 관찰되는 25시간을 평형상태로 보고 흡착평형 실험을 했다.

탄산칼슘 중량이 미치는 영향을 알아보기 위해 100 ml의 초자에 $10 \text{ Pb}^{2+} \text{ mg/l}$ 납 수용액과 탄산칼슘을 중량 별로 넣고 25시간 정지시킨 후 흡착능을 측정했으며 그 결과는 Fig. 3과 같다.

$0.5\text{--}1 \text{ g/l}$ 에서 서서히 흡착능은 증가하다가 $1\text{--}1.5 \text{ g/l}$ 의 범위에서 급속한 흡착능 증가가 관찰되었으며 1.5 g/l 에서 최대값을 나타냈다. 1.5 g/l 이후에는 탄산칼슘의 농도가 증가할수록 단위 중량에 대한 흡착능은 오히려 감소했다. 납수용액의 초기농도가 $10 \text{ Pb}^{2+} \text{ mg/l}$ 인 일정한 조건에서 흡착제로 사용되는 탄산칼슘의 총 표면적이 커질수록 흡착능은 증가하지만 흡착능이 최대가 되는 1.5 g/l 이상의 탄산칼슘 농도에서는 탄산칼슘의 총 표면적 증가에 대한 흡착된 납이온의 농도 증가량이 상대적으로 감소했기 때문에 실험에서 관찰되는 흡착능은 저하되었다. 1.5 g/l 보다 높은 탄산칼슘의 농도 범위에서 미립자 응집에 의한 탄산칼슘의 침전현상도 관찰되었다[23].

3-1. 흡착등온식

탄산칼슘과 납이온 간의 흡착을 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식으로 표현했다. Langmuir 흡착등온식은 실험식인 Freundlich 흡착등온식과는 달리 표면 흡착점에 한 분자만 흡착하며 흡착된 분자는 고정되고 모든 흡착점의 에너지 상태는 동일하다는 가정에서 설명된다[24]. 탄산칼슘 표면에 대한 납이온의 흡착량과 수용액에 잔존하고 있는 납이온의 관계를 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식 형태로 선형화했으며 Fig. 4와 5는 선형화된 직선식과 신뢰도(R^2)를 보여주고 있다.

탄산칼슘에 대한 납이온 흡착에서 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식의 신뢰도(R^2)는 각각 97%와 76%로 Langmuir식의 신뢰도가 Freundlich식의 신뢰도보다 높았다. 신뢰도는 선형화된 추세선과 실험값 간의 편차를 통계기법으로 분석한 수치로 pH 7에서는 Langmuir 흡착등온식으로 탄산칼슘과 납이온 간의 흡착특성을 설명하는 것이 바람직하다. Langmuir 흡착등온식의 신뢰도가 높다는 것은 칼사이트형 탄산칼슘 표면에 대한 납이온의 흡착은 단분자층 흡착을 위주로 진행된다는 것을 보여주는 것이며 이와 같은 결과는 제타 포텐셜의 변화를 이용한 Song 등[16]에 의해 보고된 바 있다.

3-2. pH의 영향

수용액에서 탄산칼슘에 대한 금속이온의 흡착은 물리적 흡착과 화학적

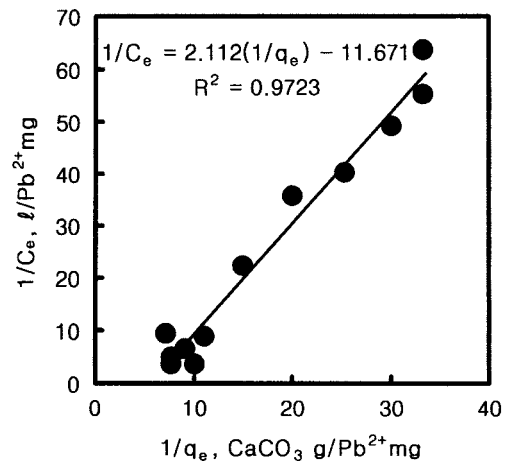


Fig. 4. Langmuir adsorption isotherm of Pb^{2+} on CaCO_3 (concentration of CaCO_3 : 1.5 g/l , pH: 7, temp.: 20°C).

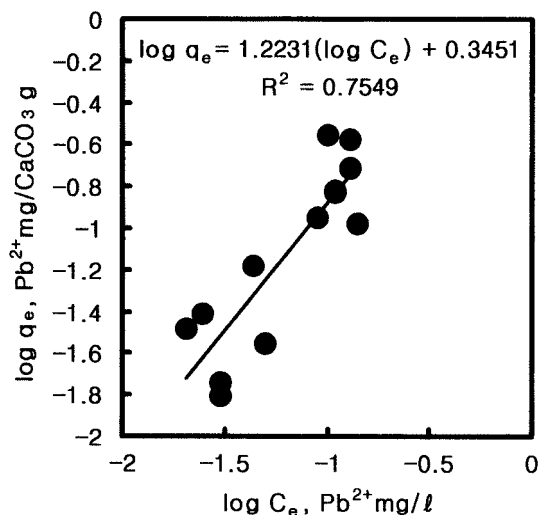


Fig. 5. Freundlich adsorption isotherm of Pb^{2+} on CaCO_3 (concentration of CaCO_3 : 1.5 g/l , pH: 7, temp.: 20°C).

적 흡착으로 구분되며 물리적 흡착은 온도의 영향을 받지만 화학적 흡착은 주로 정전기력[23]에 의해 진행되며 정전기력은 pH의 영향을 받는다[14, 24]. pH의 영향을 비교하기 위해 탄산칼슘 1.5 g/l 의 농도, 20°C 의 온도에서, pH 1.6-8 범위에서 25시간 동안 정지시킨 후 흡착량을 측정했으며 측정된 pH별 흡착 결과는 Fig. 6과 같다.

pH 1.6-4 범위에서 흡착량이 급격히 증가하여 pH 4에서는 98% 흡착이 되었으며 pH 4-8 범위에서는 거의 변화가 없었다. pH 4 이하의 산성 영역에서 흡착능이 낮은 이유는 수소이온의 농도와 관계가 있으며 지나치게 많은 수소이온은 탄산칼슘 표면에 흡착하려는 납이온의 활동도를 저하시키기 때문이다[17]. pH 8 이상의 염기성 영역에서는 납이온이 수산화와 반응하여 착염을 형성하려는 경향이 있어서 응집현상이 관찰되었다[25].

3-3. 표면 전처리의 영향

칼사이트형 탄산칼슘은 표면결정 구조가 안정한 무기분체로 흡착능이 작기 때문에 강산 용액의 전처리로 흡착능 개선효과를 비교하였다. 전처리에 사용된 용액은 염산 20%와 35%를 준비했다. 흡착능은 시간에 따라 흡착된 납이온의 양으로 비교했으며 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다.

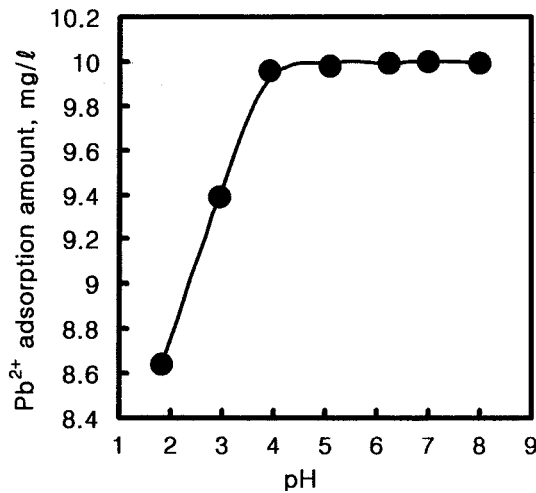


Fig. 6. Relationship between pH value and adsorbed Pb^{2+} amount (initial concentration: $10\text{ }Pb^{2+}\text{ mg/ℓ}$, concentration of $CaCO_3$: 1.5 g/ℓ , temp.: $20\text{ }^\circ\text{C}$).

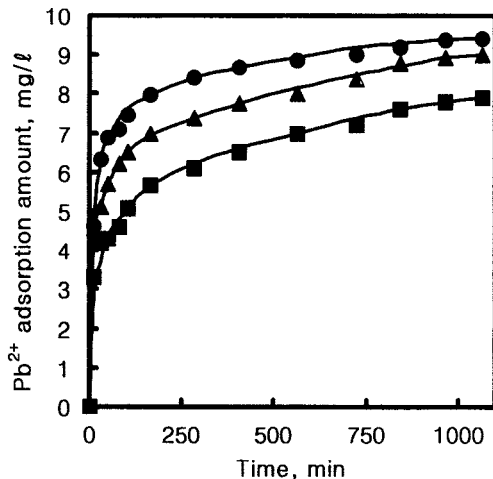


Fig. 7. Relationship between time and adsorbed Pb^{2+} amount depending on pretreatment conditions (■: none, ●: pretreatment of 20% HCl, ▲: pretreatment of 35% HCl, temp.: $20\text{ }^\circ\text{C}$, pH: 7).

전처리하지 않은 자연석 상태의 탄산칼슘은 250분, 1,000분 경과 후 각각 초기농도의 62%, 78%만 흡착되었으나, 염산 20% 수용액으로 전처리된 탄산칼슘의 경우에는 250분, 1,000분 경과 후 각각 86%, 94% 흡착되었다. 염산 35%로 전처리되는 경우, 250분에서는 74%가 흡착되고 1,000분에서는 89%가 흡착된 것으로 관찰되었다. 1,000분 동안 흡착이 이루어진 결과를 비교해 보면 20%와 35% 염산 수용액으로 전처리된 탄산칼슘은 기존 탄산칼슘에 비해 각각 20.5%, 14.1% 흡착능 개선 효과가 있는 것으로 나타났다.

3-4. Ca^{2+} 의 농도 변화

Fig. 8은 탄산칼슘에 대한 Pb^{2+} 흡착이 탄산칼슘 표면의 $Ca=C=O$ 과 어떻게 반응하는가를 알아보기 위해 이온 크로마토그래피 분석기(IC)를 이용하여 수용액 Ca^{2+} 의 농도를 측정 한 결과이다.

온도 $20\text{ }^\circ\text{C}$, pH 7의 조건에서 1.5 g/ℓ 의 농도로 탄산칼슘 혼합액을 교반했으며 X축과 Y축은 각각 측정시간(min), 도전율(μS , microsiemens)을 나타내며 도전율은 다시 환산프로그램에 의해 칼슘 농도($Ca^{2+}\text{ mg/ℓ}$)로 계산된다. Fig. 8의 (a)는 흡착 초기($t=0$)에 채취된 시료에 대한 분석

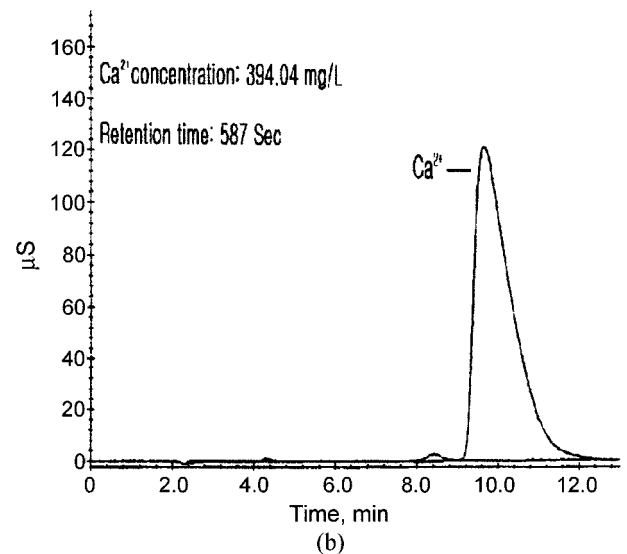
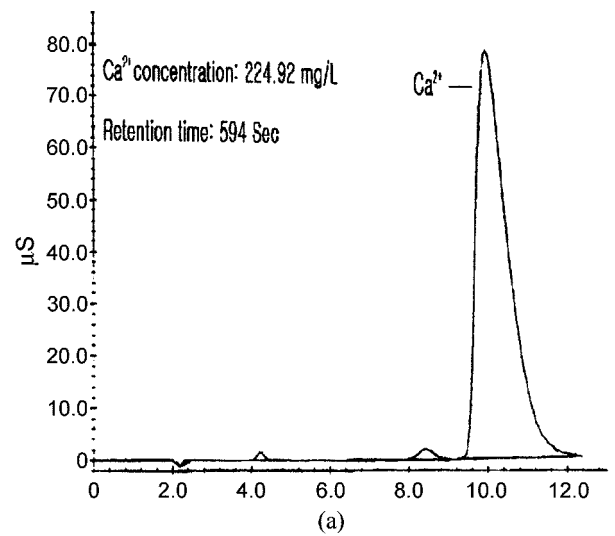


Fig. 8. Comparison of Ca^{2+} concentration between $t=0$ (a) and $t=25\text{ h}$ (b) ($CaCO_3$ concentration: 1.5 g/ℓ , temp.: $20\text{ }^\circ\text{C}$, pH: 7).

결과로, 칼슘이온은 측정시간 9.2 min 부근에서 관찰되며 Ca^{2+} 의 농도는 224.92 mg/ℓ (도전율: $80\text{ }\mu\text{S}$)이었으며 Fig. 8(b)와 같이 평형상태($t=25\text{ h}$)에서 채취한 시료의 Ca^{2+} 농도는 394.04 mg/ℓ (도전율: $120\text{ }\mu\text{S}$)였다.

탄산칼슘의 표면개질이 칼슘이온의 농도에 미치는 영향을 비교하기 위하여 Fig. 9와 같이 염산 수용액 20%와 35%로 각각 전처리한 탄산칼슘을 사용하여 흡착실험을 진행했는데 전처리가 안된 탄산칼슘을 사용하는 경우 납이온이 흡착됨에 따라 칼슘이온은 현저하게 증가하다가 1,000분 후에는 $385\text{ }Ca^{2+}\text{ mg/ℓ}$ 가 되었다. 그러나 염산 20%와 35% 수용액으로 각각 전처리된 탄산칼슘을 사용하는 경우에는 $t=0$ 에서의 칼슘 농도는 $270, 290\text{ }Ca^{2+}\text{ mg/ℓ}$ 로 높았으나 흡착에 따라 칼슘 농도의 폭은 크게 나타나지 않았다.

염산수용액으로 전처리된 탄산칼슘을 사용하는 경우 초기에는 칼슘이온이 많이 생성되었으며 납이온 흡착과 칼슘이온 생성 간의 관계는 Fig. 10에 나타났다.

전처리가 안된 탄산칼슘의 경우 Pb^{2+} 가 흡착됨에 따라 Ca^{2+} 의 생성량은 빠른 속도로 증가하고 있으나 20%, 35% 염산 수용액으로 전처리한 탄산칼슘을 사용하는 경우 Pb^{2+} 흡착량에 따른 Ca^{2+} 농도의 증가는 없었다. 이러한 결과로 칼사이트형 탄산칼슘은 수용액 속에서 물과 계면

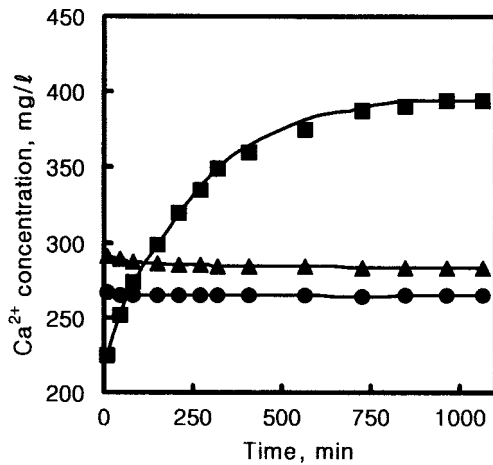


Fig. 9. Relationship between time and Ca^{2+} concentration on pretreatment with HCl solutions of 0, 20, and 35%, respectively (■: none, ●: pretreatment of 20% HCl, ▲: pretreatment of 35% HCl, pH: 7, temp. 20 °C, CaCO_3 concentration: 1.5 g/l, initial concentration: 10 Pb^{2+} mg/l).

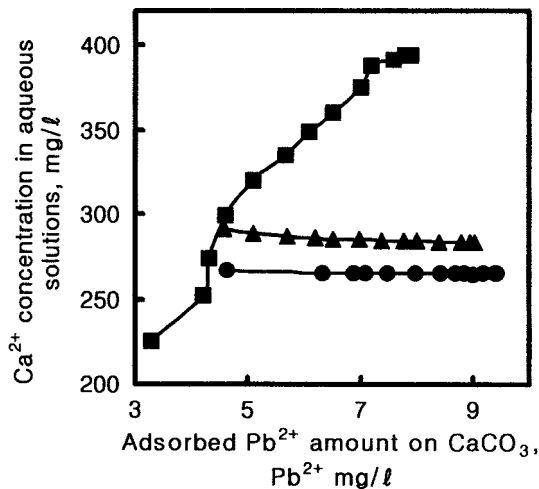


Fig. 10. Relationship between Pb^{2+} adsorption amount and Ca^{2+} concentration (■: none, ●: pretreatment of 20% HCl, ▲: pretreatment of 35% HCl, pH: 7, temp. 20 °C, CaCO_3 concentration: 1.5 g/l, initial concentration: 10 Pb^{2+} mg/l).

을 형성하면서 Ca^{2+} 양이온을 발생하며 Pb^{2+} 의 흡착이 진행됨에 따라 생성되는 Ca^{2+} 이온량은 증가했다는 사실을 알았다. 탄산칼슘 표면에 존재했던 Ca^{2+} 이온은 수용액의 Pb^{2+} 과 치환반응을 하기 때문에 수용액 Ca^{2+} 이온이 증가하며 [19] 전처리된 탄산칼슘을 사용하는 경우 Ca^{2+} 이온 농도의 변화폭이 작은 것은 염산 수용액으로 전처리되는 과정에서 표면에 존재하고 있던 Ca^{2+} 이온들이 대부분 분리되었고, 그 빈 자리에 Pb^{2+} 이온들이 흡착된 결과로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수용액에서 칼사이트형 탄산칼슘에 대한 Pb^{2+} 이온의 흡착을 효과적으로 구명하기 위해 10 Pb^{2+} mg/l의 납수용액과 탄산칼슘 1.5 g/l을 반응기에 넣고 실험을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

탄산칼슘과 납이온 간의 흡착에서 Langmuir와 Freundlich 흡착등은

식의 신뢰도는 각각 97%와 76%로 Langmuir식의 신뢰도가 높았으며 pH 1.6-4 범위에서 흡착량이 급격히 증가하여 pH 4에서는 전체의 98% 흡착이 되었으며 pH 4-8 범위에서는 거의 변화가 없었다. 20%와 35% 염산 수용액으로 전처리하여 표면을 개질하는 경우, 각각 20.5%, 14.1%의 흡착능 개선효과가 있었다. 탄산칼슘은 납이온의 흡착에 따라 칼슘 이온은 현저하게 증가했으며 염산수용액으로 전처리하는 경우 초기에 칼슘이온 농도는 높았으나 흡착에 따른 증가는 거의 관찰되지 않았다.

사용기호

- D_{50} : average diameter of CaCO_3 [μm]
 R^2 : reliability of correlation coefficient for adsorption isotherm [-]
 C_e : Pb^{2+} concentration in solutions at equilibrium state [Pb^{2+} mg/l]
 q_e : Pb^{2+} amount adsorbed on CaCO_3 at equilibrium state [Pb^{2+} mg/
 CaCO_3 g]
 t : adsorption time [h]

참고문헌

1. Lee, S. C. and Chung, J. G.: *HWAHAK KONGHAK*, **39**, 48(2001).
2. Artola, A., Martin, M., Balaguer, M. and Rigola, M.: *J. Colloid Interface Sci.*, **232**, 64(2000).
3. Niesink, R. J. M., Vries, J. D. and Hollinger, M. A.: "Toxicology Principles and Applications," CRC Press, New York, N.Y.(1996).
4. The Textbook Publishing Committee of Life and Chemistry: "Life and Chemistry," Freedom Academy, Seoul(1998).
5. Kim, M. S., Lee, S. C. and Chung, J. G.: *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(1), 83(2001).
6. Barbier, F., Duc, G. and Petit-Ramel, M.: *Colloids Surf.*, **166**, 153 (2000).
7. Nagata, N., Kubota, L. T., Bueno, M. I. M. S. and Peralta-Zamora, P. G.: *J. Colloid Interface Sci.*, **200**, 121(1998).
8. Gupta, V. K., Gupta, M. and Sharma, S.: *Wat. Res.*, **35**(5), 1125(2001).
9. Seki, H. and Suzuki, A.: *J. Colloid Interface Sci.*, **211**, 375(1999).
10. Kim, M. S. and Chung, J. G.: *J. Colloid Interface Sci.*, **233**, 31(2001).
11. Lee, G. H. and Chung, T. S.: *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **11**(1), 75 (2000).
12. Lee, G. H. and Chung, T. S.: *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(2), 170 (2001).
13. Lee, G. H.: Ph. D. Dissertation, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea(1999).
14. Dalas, E., Klepetsanis, P. G. and Koutsoukos P. G.: *J. Colloid Interface Sci.*, **224**, 56(2000).
15. Geffroy, C., Foissy, A., Lixon, P., Tournilhac, F. and Cabane: *Colloid Surf.*, **162**, 107(2000).
16. Song, M. G., Kim, J. Y. and Kim, J. D.: *J. Colloid Interface Sci.*, **226**, 83(2000).
17. Halab-Kessira, L. and Ricard, A.: *J. Colloid Interface Sci.*, **179**, 269 (1996).
18. Bilinski, H., Sirac, S., Kozar, S., Branica, M. and Schwuger, M. J.: *Wat. Res.*, **29**(8), 1993(1995).
19. Vengris, T., Binkiene, R. and Sveikauskaite, A.: *Appl. Clay Sci.*, **18**, 183(2001).
20. Gutjahr, A., Dabringhaus, H. and Lacmann, R.: *J. Crystal Growth*, **158**, 310(1996).

21. Hitachi Ltd.: "Analysis Guide for Polarized Zeem Atomic Absorption Spectrophotometry," Hitachi Ltd., Tokyo(1987).
22. Dionex Co.: "Quality Assurance Report," Dionex Co., No. 43174, U.S.A.(1995).
23. Kim, M. S. and Chung, J. G.: *HWAHAK KONGHAK*, **38**, 38(2000).
24. Morris, G. E., Vincent, B. and Snowden, M. J.: *J. Colloid Interface Sci.*, **190**, 198(1997).
25. Slejko, F. L.: "Adsorption Technology," Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y.(1985).