

표면처리된 AlPO_4 에 대한 납 이온의 흡착 거동 분석

김용호¹ · 길현석¹ · 강광철³ · 최석남¹ · 이석우^{1, 2, *}

¹공주대학교 화학과, ²그린홈에너지기술연구소, ³(주)마이크로필터
(2011. 3. 24. 접수, 2011. 6. 28. 승인)

Analysis of adsorption behavior of lead ion on to surface modified AlPO_4 materials

Young Ho Kim¹, Hyun Suk Kil¹, Kwang Cheol Kang³,
Suk Nam Choi¹ and Seog Woo Rhee^{1, 2, *}

¹Department of Chemistry, College of Natural Sciences, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

²Green Home Energy Technology Research Center, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

³Microfilter Co., Ltd., Jinchun, 365-842, Korea

(Received March 24, 2011; Accepted June 28, 2011)

요약: 세제 제조시설 폐수의 유기물을 틀로 하여 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 과 H_3PO_4 의 반응으로 AlPO_4 -계 물질을 합성하였다. 소성된 AlPO_4 -계 물질을 APTMS, 석신산 무수물과 반응시켜 표면을 카르복실기로 바꾸었다. 분말 XRD 결과, 특징적인 AlPO_4 -계 물질의 패턴을 얻었으며, 물질의 형태는 SEM으로 조사하였고, 작용기는 FT-IR 분석으로 확인하였다. 중류수에 분산시킨 고체의 표면 전위 측정 결과, $\text{AlPO}_4\text{-NH}_2$ 는 양의 표면 전하를 갖는 반면, $\text{AlPO}_4\text{-COOH}$ 는 음의 표면 전하를 갖는 것으로 나타났다. 합성된 AlPO_4 -계 물질을 이용하여 수용액에서 유해 중금속의 제거 실험을 수행하였다. 납 이온은 표면에 존재하는 카르복실기와 착물을 형성하며 물질에 흡착되었고, 흡착 분배계수는 91.1 mL/g이었다. 결론적으로 본 연구에서 고찰한 AlPO_4 -계 물질은 수환경에서 유해 중금속 이온의 제거에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: AlPO_4 -type material was synthesized by a reaction of $\text{Al}(\text{OH})_3$ and H_3PO_4 with organic templates from wastewater of detergent manufacturer. The surface of material was coated with carboxylate groups by the reaction of succinic anhydride with surface amino groups which were formed by treatment of the material with APTMS. Powder XRD patterns showed the characteristic patterns of AlPO_4 . Morphology of the material was examined using a SEM and the functional groups were investigated by FT-IR analysis. The surface charge of a aqueous suspension was analyzed: $\text{AlPO}_4\text{-NH}_2$ has positively charged surface while $\text{AlPO}_4\text{-COOH}$ has negatively charged one. They were used for the removal of toxic metals from aqueous solution. The lead ions were adsorbed on the surface by the formation of complexes with carboxylate of surface and K_d was 91.1 mL/g. In conclusion, the $\text{AlPO}_4\text{-COOH}$ might be applicable in the removal of toxic metal ions from aqueous system.

Key words : AlPO_4 , ion-exchange, lead, surface charge, complex formation

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)41-854-8491 Fax : +82-(0)41-856-8613

E-mail : jsanrhee@kongju.ac.kr

1. 서 론

계면활성제, 치약, 비누 및 기타 세제제조 시설은 각종 형태의 비누 및 원료상태의 글리세린, 계면활성제 및 합성세제, 두발용 조제품, 인체방향성 제품, 미용 또는 메이크업용 조제품 및 기타 화장품, 치약 및 구강위생용품, 실내방향제품 및 방취제품, 표면광택제 및 조제왁스 등을 제조하는 산업활동을 지칭한다.¹ 세제 제조시설에서 사용하는 주원료들은 계면활성제로 사용되는 sodium lauryl ether sulfate (SLES), sodium salt of linear alpha olefin sulphonate (AOS), linear alkylbenzenesulfonate (LAS), dimethyl lauryl amine oxide (AO), oleic acid, lauric acid, myristic acid, trimethylamine (TEA) 등이 있고, 섬유유연제용으로 tetraalkylammonium salt 등이 포함되며, 치약의 제조 공정에서 연마제로 사용되는 실리카와 죽염의 NaCl 등이 포함된다.

세제 제조시설에서는 정제, 증류 공정에서 폐수가 발생할 수 있지만, 용기 및 바닥의 세정과정에서 대부분의 폐수가 발생된다.¹ 따라서 폐수에는 원료로 사용하는 물질들과 부산물들이 포함된다. 세제 제조시설에서 배출되는 폐수는 물리·화학적인 방법으로 처리한 뒤 최종적으로 생물학적인 방법으로 처리하여 방류한다.¹ 집수조에 저장된 폐수를 중화반응, 응집, 가압부상과정을 거쳐 처리하며, 생물학적 처리 후 고도처리인 모래여과 및 활성탄여과를 병행하고 있다. 치약 제조시설의 경우에는 세제 제조시설에 비해 비교적 높은 농도의 오염물질을 함유하고 있는 폐수가 발생된다. 따라서, 치약 제조시설의 폐수처리는 주로 물리·화학적인 방법으로 처리한 후 필요시 생물학적인 방법으로 처리한다. 폐수를 집수조에 집수한 후 중화조에서 중화시켜 응집침전 후 부상분리 또는 가압부상 등의 방법으로 처리하고, 유기물을 제거하기 위하여 폭기조를 설치하고, 활성슬러지를 이용한 생물학적 처리를 한다. 필요시 여과 등의 후속처리를 실시한다. 부산물인 고흡슬러지는 탈수 후 소각 또는 매립처리된다.

1982년, Wilson 등에 의해 인산 알루미늄, $AlPO_4-n$ 이 합성된 이래로 다양한 종류의 다공성 $AlPO_4-5$ 가 얻어졌으며, 열안정성이 매우 우수한 메조기공 물질로 흡착제 또는 촉매 지지체로 사용되었다.^{2,3} 일반적으로 초기에는 아민을 틀(template)로 사용하여 젤 전구체 반응에 의한 수열합성 방법에 의해 메조기공 물질을 합성하였으며,^{4,6} 최근에는 다양한 틀과 알루미늄 제공

물질을 사용하여 메조기공 물질을 합성하고 있다. $Al(OH)_3$ 과 H_3PO_4 를 반응시킨 후, 틀로서 유기화합물을 첨가하여 $AlPO_4$ -계 다공성 물질을 합성한 사례들이 있다.^{7,8}

Silane 화합물 중에서 $RSiCl_3$, 또는 $R'Si(OR'')_3$ 들은 고체 표면에 존재하는 OH기와 반응하여 표면에 안정한 자기조립 단분자막(self-assembled monolayer)을 형성한다.⁹⁻¹² 지금까지 SiO_2 표면의 개질을 위하여 다양한 작용기(- CH_3 , - NH_2 , - $COOH$, - SH , - OH 등)를 갖는 silane 화합물에 대한 연구가 진행되었으며, 다른 조성을 갖는 표면에 적용하기 위한 연구들이 최근에 발표되고 있다. 매우 간단한 실험 조건에서 화학적 결합을 통한 안정한 표면을 형성하고, 기판이 가지고 있는 표면 특성과 다른 표면을 형성하기 때문에 매우 유용한 표면 개질 방법으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 세제 제조시설에서 발생하는 폐수에 $Al(OH)_3$ 과 H_3PO_4 를 가한 후, 수열반응을 시켜 $AlPO_4$ -계 물질을 합성하였고, 말단 위치에 - NH_2 작용기를 갖는 silane 화합물을 이용하여 $AlPO_4$ -계 물질의 표면에 - NH_2 를 도입하였으며, 석신산 무수물과 반응시켜 - $COOH$ 작용기를 도입하여 특성을 규명하였다. 최종적으로 고체 표면에 도입된 카르복실산과 수용액에 존재하는 중금속 납 이온 사이의 상호작용으로 제조된 물질에 의한 납 이온의 흡착 및 제거 특성을 평가하여 폐자원의 재활용 가능성을 살펴보았다.

2. 실험

2.1. 폐수의 특성 규명

본 연구에서는 세제 제조시설 중의 하나인 애경 청양공장에서 발생하는 폐수(pH=6.2) 원액을 전처리 없이 사용하였다. 폐수의 주요 성분은 양이온성, 중성 및 음이온성 계면활성제이며, 치약 제조공정에 사용되는 미세분말 실리카(지름 ~10 μm)와 NaCl이 포함되어 있다. 폐수에 존재하는 비휘발성 고형물의 함량을 측정하기 위하여 1000 g의 폐수를 대기 중에서 120 °C의 중탕으로 가열하여 휘발성 물질과 수분을 증발시켰다. 원소분석(Fisons, EA1108, 한밭대학교), ICP-AES (Thermo Elemental, Thermo, ICAP 6000, 한밭대학교), 열무게 분석(TGA, TA Instruments, SDT 2960, 한밭대학교)을 통하여 고형물의 특성을 규명하였다. 고형물의 강열 감량(loss on ignition)을 측정하기 위하여 3.00 g의 고형물을 도가니에 담아 전기로(Thermo Scientific, FB1410M-33)에 넣고 600 °C에서 1시간 동

안 가열한 후, 질량 감소를 측정하였다.

2.2. AlPO_4 -계 물질의 합성

본 실험에 사용한 시약은 Sigma-Aldrich Chemical Co. (MO, USA), Junsei Chemical Co. (Japan)에서 구입하였으며, 모두 시약급 제품으로 추가적인 정제없이 사용하였다. Dimethylformamide (DMF)는 분자체를 이용하여 건조한 후 사용하였다.

1 L 둥근바닥 플라스크에 100 mL의 증류수를 넣고, 7.78 g (0.10 mol)의 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 을 넣은 후 실온에서 자기교반하면서 7.53 mL (0.11 mol)의 85% H_3PO_4 을 1시간 동안 천천히 첨가하였다. 얻어진 젤을 60 °C 증탕에서 3시간 동안 자기교반하였다. 200 mL의 세제 폐수를 첨가한 후, 60 °C 증탕에서 3시간 더 반응시킨 후, 온도를 높여 150 °C의 증탕에서 72시간 동안 환류시켰다. 생성된 고체를 여과하여 증류수로 3회 세척한 후, 증류수 50 mL에 분산시켜 150 °C에서 18시간 동안 수열반응을 시켰다. 고체를 여과하여 증류수로 3회 세척한 후, 60 °C 오븐에서 24시간 동안 건조하였다(소성전 AlPO_4 로 지칭). 전기로를 이용하여 600 °C의 공기 중에서 3시간 동안 소성하였다(소성후 AlPO_4 로 지칭).

2.3. AlPO_4 -계 물질의 표면 개질

100 mL 비커에 들어 있는 60 mL의 95% EtOH에 5.11 g의 소성후 AlPO_4 를 분산시킨 후, 5분 동안 초음파처리(Branson 5510)를 하였다. 혼합물을 자기교반하면서 5분 간격으로 100 μL 씩 3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS)을 10회 첨가하였다. 혼합물을 10분간 더 교반한 후 여과하여 isopropanol로 4회 세척한 후, 105 °C 오븐에서 2시간 동안 건조하였다($\text{AlPO}_4\text{-NH}_2$ 로 지칭). 50 mL의 건조된 DMF가 들어 있는 250 mL의 둥근바닥 플라스크에 1.0 g의 석신산 무수물을 녹여 용액을 만들었다. 이에 3.02 g의 $\text{AlPO}_4\text{-NH}_2$ 를 분산시킨 후 실온에서 밀봉된 상태로 24시간 동안 자기교반하였다. 혼합물을 여과한 후 DMF로 3회 세척하고, 증류수로 3회 세척한 후, 60 °C 오븐에서 24시간 동안 건조하였다($\text{AlPO}_4\text{-COOH}$ 로 지칭).

2.4. 물리화학적 분석

합성된 물질의 X-선 회절분석은 X-선 회절 분석기(D/MAX2000, Rigaku)를 이용하여 Cu K α 조사선으로 $2\theta = 4^\circ/\text{min}$ 스캔속도로 5~70°까지 측정하였다. 합성된 물질의 형상은 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-

6335F, JEOL)으로 분석하였으며, 물질 표면의 화학적 조성은 EDS (energy dispersive spectrometry, Oxford, JEOL)로 분석하였다. KBr에 ~2%의 분말시료를 넣어 펠릿을 제작한 후, 적외선 분광기(Spectrum 100, Perkin Elmer, Inc.)를 이용하여 FT-IR 스펙트럼을 얻었다. 증류수에 분산된 시료의 표면전위는 Zeta potential analyzer (Brookhaven Instruments Co., ZetaPALS)를 이용하여 측정하였다. 생성물의 온도에 따른 열분해 반응에 의한 질량 감소는 열무게 분석(TGA, TA Instruments, SDT 2960)을 실시하여 관찰하였다. 승온 속도는 20 °C/min을 사용하였다.

2.5. 납 이온 흡착실험

0.10 M NaClO_4 로 이온세기가 맞추어진 1.10 mM 농도의 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 수용액 500 mL가 들어 있는 폴리프로필렌 용기에 0.55 g의 $\text{AlPO}_4\text{-COOH}$ 를 분산시켜 25 °C에서 밀봉한 상태로 자기교반하였다. 일정한 시간 간격으로 3 mL의 시료를 채취하여 주사기 필터(Millipore, 0.22 μm)로 여과하여 고형물이 제거된 시료를 얻었다. 수용액 중에 포함된 납 이온의 농도는 BAS100W Electrochemical System 기기로 측정하였으며, 전극은 controlled growth mercury electrode (Bioanalytical System Inc.)를 사용하였고, Osteryoung square wave voltammetry (OSWV) 전압전류법으로 측정하였다. 수용액의 pH는 반응 전과 후에 pH meter (Thermo Electron Co., Orion 5 Star)를 이용하여 측정하였다. 납 이온의 초기농도에서 특정 시간에 측정된 농도를 빼줌으로써 $\text{AlPO}_4\text{-COOH}$ 에 의해 흡착된 납 이온의 양을 계산하였다.

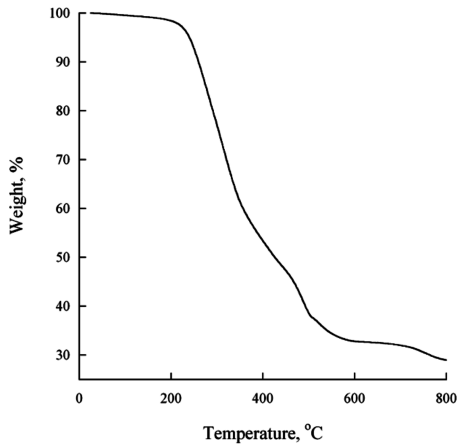
3. 결과 및 고찰

3.1. 폐수의 화학적 조성.

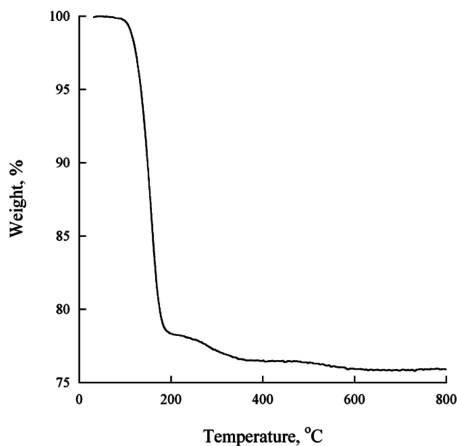
세제 제조시설에서 채취한 폐수의 특성을 Table 1에 나타내었다. 1000 g의 폐수를 증발시켜 3.2 g의 고형물을 얻었다. 고형물에는 탄소(53.6%)의 함량이 가장 높았으며, 수소의 함량은 8.6%이었고, 질소와 황의 함량은 각각 0.82%와 3.48%이었다. 이는 세제 제조시설에서 주로 탄소와, 수소, 황을 포함하는 SLES, AOS, LAS 등을 원료로 사용하기 때문이며, 섬유 유연제용으로 tetraalkylammonium salt 등이 사용되기 때문이다. 전기로를 이용하여 600 °C에서 가열한 후 측정된 고형물의 가열 감량은 71.8%이었다. 고형물의 열무게 분석에 대한 도표를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 열

Table 1. Characteristics of wastewater from detergent manufacturer

	Contents, %
Solid Matter	0.32±0.02
Loss on Ignition of Solid Matter	71.8±2.8
Elements	
C	53.64
H	8.62
N	0.82
S	3.48
Ca	1.13
Mg	0.33
Fe	0.02
Zn	0.02
Residue	31.94



(a)



(b)

Fig. 1. TGA diagrams of (a) solid cake from wastewater and (b) AlPO_4 -type material synthesized with aluminum hydroxide and phosphoric acid with organic templates from wastewater of detergent manufacturer.

에 의해 소실되는 양(71.2%)은 강열 감량에 의한 양과 일치하였다. 열에 의해 유기물은 이산화탄소, 물 그리고 작은 분자로 소실되며(200~450 °C), 금속수산화물의 수산화이온은 물로 이탈하고(~600 °C), 금속탄산염의 탄산이온은 이산화탄소로 이탈된다(~800 °C).¹³⁻¹⁵ 강열 후 고형물에 잔류하는 물질은 실리카, NaCl, CaO 등 무기물이다(XRD 결과는 나타내지 않음).

3.3. AlPO_4 -계 물질의 형성

폐수의 유기물질을 틀로 사용하여 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 와 인산으로부터 합성된 AlPO_4 -계 물질(소성전 AlPO_4)은 소성에 의해 유기물질, 물, 이산화탄소, 작은 분자량 물질 등이 제거되어 25.7%의 감량을 나타내었다. 소성전 AlPO_4 의 열무게 분석에 대한 도표를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 약 215 °C까지 21.74%의 감량이 일어났는데, 이는 AlPO_4 단위당 2개 존재하는 물분자(결정수)의 이탈에 의한 것이다.^{16,17} 약 450 °C까지 일어나는 질량 감소(1.80%)는 유기물의 연소로 인한 이산화탄소, 물 그리고 작은 분자의 소실로 인한 것이며, 수산화이온의 열분해에 의한 물의 이탈(~600 °C)과, 금속탄산염의 열분해로 인한 이산화탄소의 이탈(~800 °C)이 이어진다(0.63%).¹³⁻¹⁵

합성된 물질의 분말 XRD 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 소성전 AlPO_4 (Fig. 2(a))는 variscite 형태의 $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 형태의 물질(JCPDS card No. 25-18)임을 확인할 수 있었다. 600 °C에서 소성에 의해 물질의 상변화가 일어났으며, 소성후 AlPO_4 (Fig. 2(b))의 XRD 패턴은 합성 AlPO_4 (JCPDS card No. 50-303)와 유사

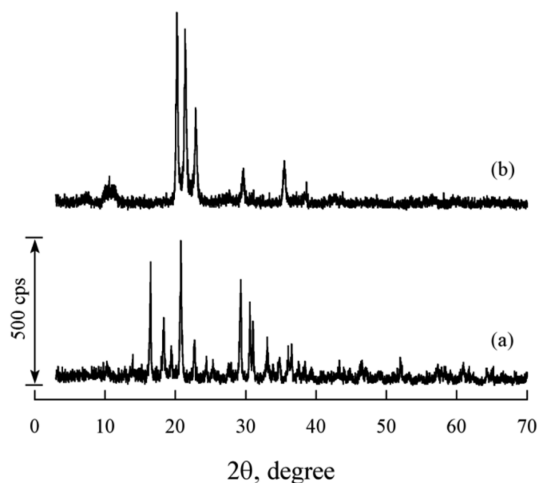


Fig. 2. XRD patterns of (a) AlPO_4 -type material, and (b) its calcined product.

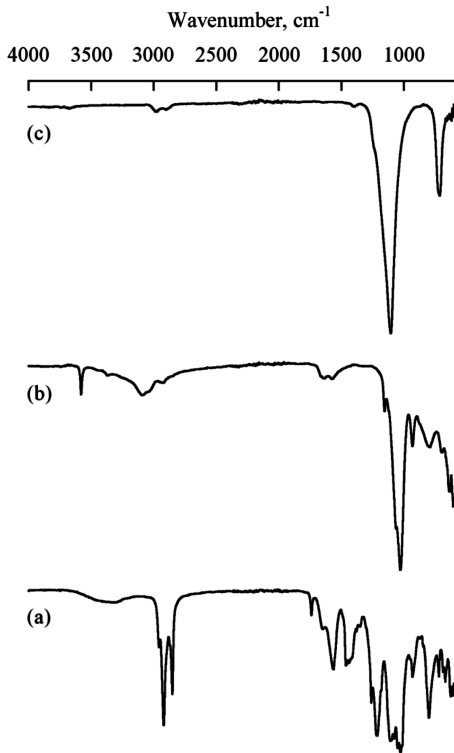


Fig. 3. FT-IR patterns of (a) solid cake from wastewater, (b) AlPO_4 -type material, and (c) its calcined product.

한 패턴을 나타내었다.

FT-IR 분석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 폐수 고형물의 스펙트럼(Fig. 3(a))에는 SLES, AOS, LAS 등을 원료로 지방족 탄화수소의 C-H 신축진동($2959, 2920, 2856 \text{ cm}^{-1}$)과 굽힘 진동(1465 cm^{-1})을 확인할 수 있다. $1640\sim 1400 \text{ cm}^{-1}$ 사이에 나타나는 피크는 방향족 C=C 신축에 의한 것이다. Sulfonate의 S=O에 의한 피크는 1350 cm^{-1} 과 1151 cm^{-1} 를 중심으로 나타난다. 1109 cm^{-1} 를 중심으로 나타나는 피크는 포함된 실리카에 의한 것이다. 소성전 AlPO_4 는 3580 cm^{-1} 에서 반응하지 않고 잔류하는 소량의 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 에 의한 O-H 기의 날카로운 신축 피크를 나타낸다. 3365 cm^{-1} 에서 나타나는 약한 피크는 수소결합을 이룬 O-H 기의 신축과 물의 O-H 신축 피크이다. $3090, 3054 \text{ cm}^{-1}$ 를 중심으로 하는 폭넓은 피크는 SLES, AOS, LAS 등에 포함된 벤젠고리의 C-H, 2934 cm^{-1} 는 알킬기의 C-H 신축에 의한 것이다. 물분자의 굽힘은 1641 cm^{-1} 를 중심으로 하는 피크에 나타나며, 방향족 C=C 신축에 의한 피크는 1641 cm^{-1} 과 1569 cm^{-1} 를 중심으로 하는 피크에 나타난다. SLES, AOS, LAS 등의 S=O에 의한

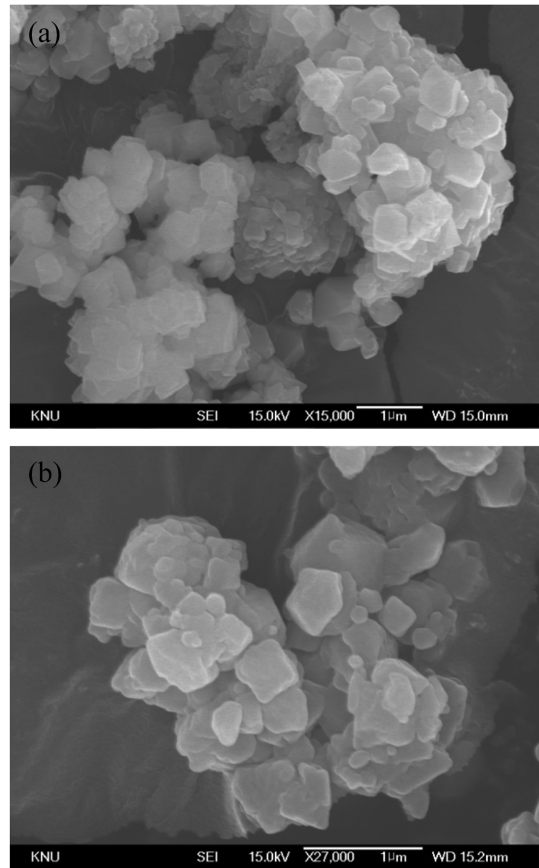


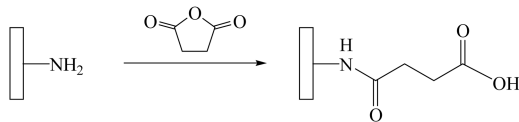
Fig. 4. SEM images of (a) AlPO_4 -type material, and (b) its calcined product.

피크는 1151 cm^{-1} 를 중심으로 나타난다. 1019 cm^{-1} 를 중심으로 하는 피크는 형성된 수화된 AlPO_4 에 의한 피크이다. 소성에 의해 결정수와 유기물질들이 제거되면서 유기물질의 작용기에 의한 피크들이 사라지고, 1103 cm^{-1} 를 중심으로 하는 피크와 708 cm^{-1} 를 중심으로 하는 피크만이 남아 있는데, 이는 AlPO_4 의 전형적인 피크이다.¹⁸⁻²¹

FE-SEM으로 관찰한 합성된 AlPO_4 -계 물질들의 형태를 Fig. 4에 나타내었다. 소성전 AlPO_4 (Fig. 4(a))와 소성후 AlPO_4 (Fig. 4(b))는 약 $1 \mu\text{m}$ 보다 작은 크기의 다면체 형태의 입자들로 이루어져 있음을 알 수 있다. 소성에 의해 틀로 사용한 유기물과 결정수의 제거로 인한 겔보기 형태의 변화는 없는 것으로 판단된다.

중류수에 분산시킨 각 물질들의 표면 전위를 Fig. 5에 나타내었다. 합성된 AlPO_4 물질의 표면전위는 음의 값을 갖는 것으로 보고되었다.²² 중류수에 분산시킨 AlPO_4 물질의 표면에 수화에 의해 P-OH, -Al-OH

기가 형성되고,^{23,24} 일정한 이온세기, 온도에서 용액의 pH에 따라 표면전위는 영향을 받는다. 소성전 AIPO₄의 표면전위는 -23.01 mV로 관찰되어 약산성 pH 영역(pH~5.6)에서 음전하를 띠고 있는 것으로 나타났다. 표면에 존재하는 대부분의 O-H 기가 탈양성자화(deprotonated)되어 음전하를 띠는 것으로 판단된다.^{23,24} 소성후 AIPO₄의 표면전위는 -30.72 mV로 소성전 AIPO₄에 비해 더 큰 음의 표면전위를 나타내었다. 틀을 이루고 있는 유기물이 제거되면서 표면전위가 음의 방향으로 변한 것으로 판단된다. APTMS로 처리한 AIPO₄-NH₂는 +39.73 mV로 높은 양전하를 띠는 것으로 관찰되었다. 이는 아민으로 처리된 표면이 등전점보다 낮은 pH에서 양성자화(protonated)되어 표면의 일부가 AIPO₄-NH₃⁺ 형태로 전환되었음을 의미한다.^{11,12,25} AIPO₄-COOH는 -22.38 mV로 음전하를 띠는 것으로 관찰되었다. AIPO₄-NH₂를 석신산 무수물로 처리하면, 표면의 -NH₂가 석신산 무수물과 반응하여 아마이드를 형성하여 석신산 무수물이 표면에 결합하게 된다. 다른 말단은 카르복실산으로 전환되어 Scheme 1과 같이 AIPO₄-COOH로 전환된다. 약한 산인 카르복실산은 수용액에서 일부가 이온화되어 결과적으로 표면전하는 음의 값을 갖게 된다.¹²



Scheme 1. AIPO₄-NH₂와 석신산 무수물과의 반응으로 AIPO₄-COOH의 형성.¹²

3.4. 납 이온의 흡착

1.10 mM Pb(NO₃)₂ 수용액 500 mL에 AIPO₄-COOH 0.55 g을 분산시킨 후, 시간에 따른 납 이온의 흡착 등온선을 Fig. 6에 나타내었다. 실험 결과, 초기에는 빠른 속도로 수용액으로부터 납 이온이 제거되어 AIPO₄-COOH에 흡착되는 것을 관찰할 수 있으며, 약 40시간이 경과되면 흡착량이 포화되어 농도가 일정해지는 것을 관찰하였다. 흡착 반응에 의하여 수용액에 존재하는 납 이온의 농도의 감소량은 0.10 mM이다. 수용액의 pH는 납 이온의 흡착으로 인한 수소 이온의 방출로 인하여 반응 전 5.6에서 반응 후 4.2로 낮아졌다. Aualitita 등은 고체 표면에 이온이 흡착될 때, 중요한 인자로서 고체 결정의 구조, 표면적, 표면의 전하 등을 거론하였는데,²⁶ 본 연구에서 납 이온은

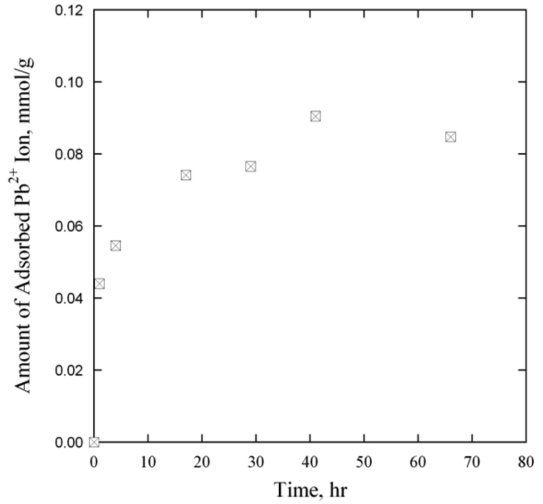


Fig. 6. Sorption behavior of the Pb ions on the AIPO₄-COOH as a function of time at 25 °C. 0.55 g AIPO₄-COOH/500 mL solution.

AIPO₄-COOH의 표면에 존재하는 카르복실산 이온과 착화합물을 형성하며 고체에 흡착된다.^{27,28} 이 과정의 분배계수($K_d = [Pb^{2+}]_{solid}/[Pb^{2+}]_{sol'n}$)를 계산하면 91.1 mL/g로 얻어진다. 여기서 K_d는 납 이온의 흡착에 대한 분배계수(mL/g), [Pb²⁺]_{sol'n}는 수용액에서의 납 이온의 농도(mmol/mL), [Pb²⁺]_{solid}는 고체 흡착제에 흡착된 납 이온의 농도(mmol/g)이다.

4. 결 론

세제 제조시설에서 발생하는 폐수에 Al(OH)₃과 H₃PO₄를 가한 후, 수열반응을 시켜 AIPO₄-계 물질을 합성하였다. 생성된 고체 화합물에 APTMS를 처리하여 표면을 -NH₂ 작용기로 개질한 후, 석신산 무수물과의 반응으로 COOH 기를 갖는 AIPO₄-COOH를 제조하였다. 수용액에 존재하는 납 이온은 AIPO₄-COOH와 반응하여 착물을 형성하며 고체의 표면에 흡착되며, 흡착에 대한 분배계수는 91.1 mL/g로 얻어졌다. 따라서 폐자원의 개질을 통하여 기능성 물질인 AIPO₄-COOH를 제조하였으며, 이 물질은 납 이온 등 중금속의 흡착 및 제거에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2010-0028289)

의 지원으로 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- National Institute of Environmental Research, 2006.
- S. T. Wilson, B. M. Lok, C. A. Messina, T. R. Cannan and E. M. Flanigen, *J. Am. Chem. Soc.*, **104**(4), 1146-1147 (1982).
- Y. Wan, C. D. Williams, J. J. Cox and C. V. A. Duke, *Green Chem.*, **1**(3), 169-171 (1999).
- M. E. Davis and R. F. Lobo, *Chem. Mater.*, **4**(4), 756-768 (1992).
- I. Braun, G. Schulz-Ekloff, D. Wöhrle and W. Lautenschläger, *Micropor. Mesopor. Mat.*, **23**(1-2), 79-81 (1998).
- T. Kodaira, K. Miyazawa, T. Ikeda and Y. Kiyozumi, *Micropor. Mesopor. Mat.*, **29**(3), 329-337 (1999).
- J. H. Park, S. H. Park and S. H. Jhung, *J. Kor. Chem. Soc.*, **53**(5), 553-559 (2009).
- B. V. S. Kumar, K. Byrappa, K. M. L. Rai, M. K. Devaraju, M. S. V. Kumar and C. Ranganathaiah, *Ind. J. Chem.*, **46A**(1), 86-90 (2007).
- A. Ulman, *Chem. Rev.*, **96**(4), 1533-1554 (1996).
- N. L. Jeon, K. Finnie, K. Branshaw and R. G. Nuzzo, *Langmuir*, **13**(13), 3382-3391 (1997).
- A. Suwalski, H. Dabboue, A. Delalande, S. F. Bensamoun, F. Canon, P. Midoux, G. Saillant, D. Klatzmann, J.-P. Salvetat and C. Pichon, *Biomaterials*, **31**(19), 5237-5245 (2010).
- Y. An, M. Chen, Q. Xue and W. Liu, *J. Colloid Interface Sci.*, **311**(2), 507-513 (2007).
- J. M. Cervantes-Uc, J. V. Cauich-Rodríguez, H. Vázquez-Torres, L. F. Garfías-Mesías and D. R. Paul, *Thermochim. Acta*, **457**(1-2), 92-102 (2007).
- N. Huang and J. Wang, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **84**(2), 124-130 (2009).
- J. M. Hwu, G. J. Jiang, Z. M. Gao, W. Xie, and W. P. Pan, *J. Appl. Polym. Sci.*, **83**(8), 1702-1710 (2002).
- H. Ren and F. Xin, *Catal. Commun.*, **7**(11), 848-854 (2006).
- D. Chakraborty, J. N. Ganguli and C. V. V. Satyanarayana, *Micropor. Mesopor. Mat.*, **137**(1-3), 65-71 (2011).
- D. L. Pavia, G. M. Lampman, G. S. Kriz and J. R. Vyvyan, "Introduction to Spectroscopy", 4th Ed., pp. 15-86, Brooks/Cole, Cengage Learning, Belmont, U.S.A., 2009.
- W. Mekky and P. S. Nicholson, *J. Mater. Proc. Technol.*, **190**(1-3), 393-396 (2007).
- Y. Ma, N. Li and S. Xiang, *Micropor. Mesopor. Mat.*, **86**(1-3), 329-334 (2005).
- N. Venkatathri, *Mater. Lett.*, **58**(1-2), 241-244 (2003).
- E.-P. Ng, L. Delmotte and S. Mintova, *Green Chem.*, **10**(10), 1043-1048 (2008).
- D. A. Kron, B. T. Holland, R. Wipson, C. Maleke and A. Stein, *Langmuir*, **15**(23), 8300-8308 (1999).
- B. Parltitz, U. Lohse and E. Schreier, *Micropor. Mater.*, **2**(3), 223-228 (1994).
- M. I. Goller, C. Barthet, G. P. McCarthy, R. Corradi, B. P. Newby, S. A. Wilson, S. P. Armes and S. Y. Luk, *Colloid Polym. Sci.*, **276**(11), 1010-1018 (1998).
- T. U. Aualitita and W. E. Pickering, *Talanta*, **34**(2), 231-237 (1987).
- A. Chadlia, K. Mohamed, L. Najah and M. M. Farouk, *J. Hazard. Mater.*, **172**(2-3), 1579-1590 (2009).
- O. Karnitz Jr., L. V. A. Gurgel, J. C. Perin de Melo, V. R. Botaro, T. M. S. Melo, R. P. F. Gi and L. F. Gil, *Biores. Technol.*, **98**(6), 1291-1297 (2007).