

폐석고 침전제를 이용한 불소폐수 처리특성

김성준 · 전용태 · 원찬희[†]

전북대학교 환경공학과

Treatment Characteristics of Fluoride Wastewater by Waste Gypsum as a Precipitant

Sung-Joon Kim · Yong-Tae Jeon · Chan-Hee Won[†]

Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University
(Received 5 July 2010, Revised 23 August 2010, Accepted 1 September 2010)

Abstract

The features of precipitating reaction of fluoride have been examined by employing waste gypsum as a precipitant. The major component of waste gypsum was examined to be CaO with minor components of SO₃, SiO₂. In the experimental condition, the precipitating reaction of fluoride progressed rapidly within a few minutes after the reaction started and reached its equilibrium in 10 minutes. Kinetic analysis showed that the precipitating reaction of fluoride generally followed a first order and second order with decreasing rate constant with the initial dosage of precipitant. XRD analysis showed that the crystalline structure of precipitate was mainly CaF₂ with partly Ca₅(PO₄)₃(OH).

keywords : Fluoride, Lime, Precipitation, Waste gypsum, XRD analysis

1. 서론

첨단산업의 발달로 인하여 다양한 성상의 많은 양의 폐수가 발생되고 있으며, 폐수중에 함유하고 있는 오염물질의 종류도 증가하고 있다. 불소는 반도체 산업과 금속 산업에서 표면 처리제로 광범위하게 사용되고 있으며, 이에 따라서 발생하는 폐수중에 고농도로 함유되어 배출되고 있다. 발생하는 폐수의 성상에 대한 조사에 의하면 약 40 mg ~ 100,000 mg/L의 농도로 함유되어 있으며(Benefield et al., 1982), 불소에 노출될시 1 mg/L이하에서는 충치를 예방하는 효과가 있지만 그 이상의 농도에 노출될시 치아의 얼룩, 내분비선, 갑상선, 간 등 다른 장기에 손상을 가져오는 것으로 알려져 있다(Cengeloğlu et al., 2002). 이러한 불소폐수처리에 다양한 처리공법이 적용되고 있으며, 특히 칼슘이온을 이용한 침전법은 오염물질을 신속히 저감시킬 수 있으며 공정의 경제적 효율이 높아 널리 적용되고 있다. 침전 및 응집공정은 추가적인 화학물질에 따른 다량의 슬러지 발생이 따름에도 고농도의 목적물질을 빠르게 저감시킬 수 있는 장점과 경제적인 특징으로 불소 폐수처리에 적용되어 온 방법이다. 이에 비하여 흡착 및 이온 교환은 공정의 특성상 방법이 간단하여 광범위하게 연구되고 있으나 제거능력의 한계 농도가 있으므로 유입수의 전처리 공정이 추가되어야 하고 재생의 횟수에 따라서 사용할 때 효율

이 저감되는 단점을 보인다.

기존의 불소폐수 처리에 적용된 침전제로는 생석회나 폭넓게 적용되고 있으며 활성알루미나, 희토류원소를 이용한 침전법(Kim et al., 2000)등 생석회를 대신하는 다양한 침전제의 적용에 대한 연구가 진행되었다. 하지만 칼사이트(최원호와 박주양, 2007), 시멘트 페이스트(변혜경 등, 2007), Fly ash(Chaturvedi et al., 1990), 폐 글썽질(이진숙과 김동수, 2007) 등 칼슘이온을 함유한 폐기물을 이용한 폐수처리공정에 대한 연구는 흡착처리에 한정되어 진행되었으며 침전처리에 대한 연구는 미비하다.

한편, 인산제조공정, 석유화학 및 발전 산업 전반에서 발생하는 폐석고의 발생량은 1999년 이후 감소하는 경향을 보였으나 Fig. 1에서 보이는 것처럼 2008년 기준 5,059 ton/day로 증가하고 있다(환경부·한국환경자원공사, 2009). 이러한 폐석고의 활용은 일부분 건축자재의 보조제로 재활용되는 부분이 한정되어 있는 것이 현실이다. 이에 발생하는 대부분의 폐석고는 매립장에 야적되어 침출수발생과 야적장의 부지확보 등 많은 문제점이 발생시키고 있다. 이에 매년 증가하는 발생량에 대비하여 재활용되는 폐석고 처리량에 한계가 있기 때문에 대책마련이 시급하다(이정미, 2006). 따라서 본 연구에서는 기존 침전제로 사용된 생석회를 대체하여 폐석고의 침전제로서의 적용가능성을 판단하는데 중점을 두었다. 이에 폐석고에 대한 기본 물성 조사 및 불소폐수에 대한 폐석고 침전제 이용에 따른 침전반응의 특성 및 침전물의 특성을 파악하여 폐자원의 활용방안에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
ksjduck@empal.com

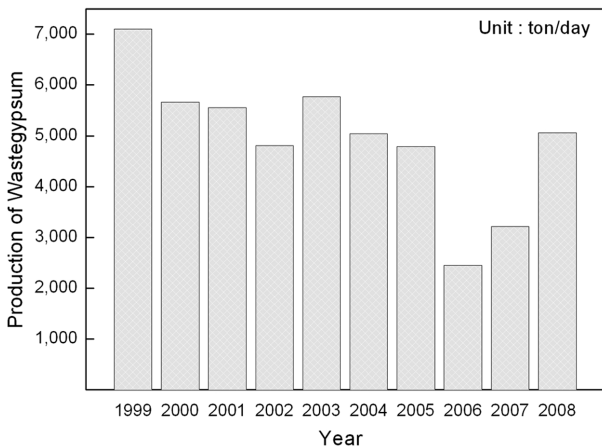


Fig. 1. Production of Wastegypsum.

2. 연구방법

폐석고의 불소 침전반응 실험에 앞서 폐석고와 불소폐수의 pH에 따른 반응특성을 예측하기 위하여 화학 평형 모델링 프로그램인 MINTEQA2(Metal Speculation Equilibrium Model System for Surface and Ground Water, version 4.03 for DOS, U.S. EPA Center for Exposure Assessment Modeling)를 사용하여 불소와 칼슘의 반응특성을 모의하여 침전실험의 기초자료로 적용하였다. 불소폐수와 인산석고의 특성상 폐수중에 일정량의 인산염을 포함하고 있다. 이에 따라서 각 물질의 반응예측 input data는 F⁻와 PO₄³⁻의 반응system을 구성하는 주요인자인 Ca²⁺와 F⁻와 PO₄³⁻를 input component로 설정하였으며, 수중의 CO₃²⁻의 농도는 고려하지 않았다.

본 실험에서 침전제로 적용한 시료는 N화학에서 인산제조 공정에서 발생하는 폐석고를 이용하였다. 실험에 사용하기 전 폐석고의 균질화를 위하여 야적장에서 채취한 폐석고 시료를 고르게 혼합한 후 105°C의 건조기에 건조한 후 Sieve No.100이하로 체가름 하여 150 μm 이하의 균등한 분말을 이용하였다. 또한 폐석고의 비교 대상으로는 수처리용 생석회(CaO 96%, 충무화학)를 사용하였으며 폐석고와 같은 방식으로 전처리를 하여 사용하였다. 전 처리한 폐석고와 석회를 각 조건에 맞도록 증류수에 용해하여 액상 상태로 만들어 실험에 이용하였다.

폐석고의 성분분석을 위하여 XRD분석을(Dmax2500, Rigaku, Japan)실시하였으며, 폐석고중 2가 양이온의 함유량 분석을 위하여 ICP-EOS(720-ES, Varian, USA)를 이용하여 분석을 실시하였다.

실험에 사용한 인공 폐수는 Sodium fluoride(NaF, >98% pure, Duksan pure chemicals Co.)와 Potassium dihydrogen phosphate(KH₂PO₄, >98% pure, Duksan pure chemicals Co.)를 증류수에 용해시켜 0.5 mole 용액을 제조하여 농도에 맞도록 희석하여 사용하였다. 불소의 특성을 고려하여 모든 실험에서 PE용기를 반응기로 사용하였으며 반응용액의 총 부피는 200 mL로 조절하였다. 농도가 조절된 인공 폐수에 설정된 양의 침전제를 첨가한후 150 rpm의 교반조건에서 침전 반응시켰으며 반응시간과 평형 조건에서의 잔류 불소 농도를 관찰하였다. 또한 반응 pH에 의한 침전반응의 특성을 관찰하기 위하여 실제 폐수와 같은 조건으로 조정하기 위하여 불소와 인산염 인공폐수를 각각 10 mM로 희석하여 1:1의 비율로 혼합한 폐수에 폐석고 용액을 첨가하여 반응pH를 4, 6, 8, 10으로 조정하여 30분간 반응시킨 후 각 물질의 잔류 농도를 측정하였다.

침전 처리에 따른 용액중 잔류F⁻의 분석은 용액에 완충액을 첨가하여 이온강도 및 분석 pH를 조절한 후 pH/ISE (Ion selective Electrode) meter(ORION, medel 720A, U.S.A)를 이용하여 측정하였다. 또한 폐석고의 첨가에 따라서 생성된 침전물의 성장비교를 위하여 침전물을 여과한 후 80°C 오븐에서 건조시킨 시료를 분쇄하여 분말로 만든 다음, X-선 회절기(XRD, Dmax2500, Rigaku, Japan)를 이용하여 각 시편에 대하여 X-선 회절분석을 하였다. 회절조건은 CuKα의 관구를 사용하여 40 kv, 30 mA로 scan speed 40/min, step size 0.05, slit는 DS 1°, SS 1°, RS 0.3 mm, 회절범위 20 ~ 80° (2θ)로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폐석고의 성분분석

침전제로 사용한 폐석고의 화학조성분석 및 시료 분석결과를 Table 1과 Table 2에 나타내었으며 Fig. 2는 시료의 XRD분석 결과를 나타낸 것이다. 폐석고중 주요 산화물은 CaO, SO₃, SiO₂ 등이 주요 산화물로 구성되어 있으며 기타 물질이 일부 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

분석결과, 폐석고중 CaO는 30.7%로 생석회중 함유된 CaO의 함량에 비하여 낮게 나타났다. 이는 불소제거에 필요한 생석회와 폐석고의 투입량이 차이를 보일 것으로 예상되며, 같은 농도로 침전제를 용해시켜 실질적으로 제거되는 불소의 농도를 측정할 필요가 있을 것으로 판단된다. 폐석고 시료중 Ca와 Mg의 농도가 각각 52.0 mg/kg과 20.5 mg/kg으로 불소와 반응하는 2가 양이온이 Ca에 제한적이

Table 1. Chemical composition of waste gypsum

Oxide	CaO	SO ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Crystal water	Adhesive water	Gypsum
Composition (wt %)	30.70	43.02	1.28	0.20	0.05	0.10	0.10	0.10	18.32	24.18	92.55

Table 2. Analysis of waste gypsum

Components	Al	Ca	Cd	Cu	Cr	Fe	Mg	Mn	Pb	Si	Zn	F
Concentration (mg/kg)	3.26	52.0	-	0.10	0.02	1.83	20.5	0.29	0.06	9.63	0.15	0.55

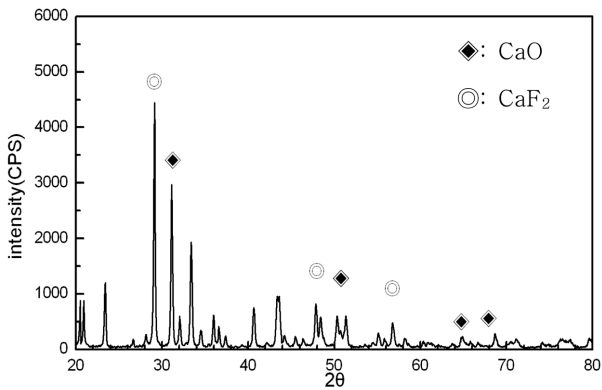


Fig. 2. XRD pattern of waste gypsum (power:40 kw 30 mA, scan speed: 4°/min, X-ray source: 1.54056 Å Cu).

지 않고 Mg와 반응을 예상할 수 있다. 따라서 침전반응에서 생성되는 침전물질의 XRD분석을 실시, 불소이온과 반응하는 물질을 확인할 필요가 있을 것으로 판단하였다.

3.2. 화학평형모델에 의한 pH변화에 따른 불소침전 반응 예측

pH의 변화에 따른 불소의 침전반응에 대한 입력데이터는 Table 3에 나타냈고 모의결과를 Fig. 3에 나타내었다. 불소와 인산염의 혼합비율이 0.5와 1.0의 비율로 존재할 경우 불소농도가 pH의 변화에 따라 일정하게 감소하는 경향을 관찰하였으며 pH 4이상에서부터 안정적인 제거를 보였다. 그러나 인산염 농도에 증가에 따라 제거되는 불소농도가

Table 3. Input data of Changes in concentration of phosphate for the prediction of precipitation reaction

Input data	Values (mole/L)
F ⁻	1.0×10 ⁻²
PO ₄ ³⁻	5.0×10 ⁻³ ~ 2.5×10 ⁻²
Ca ²⁺	3.0×10 ⁻²
pH	1 ~ 14

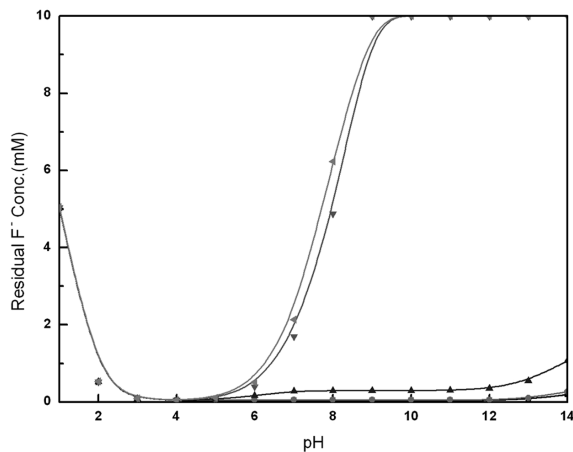


Fig. 3. Variation in the residual concentration depending on concentration ratios [PO₄³⁻]:[F⁻]. ■:0.5 ●:1.0 ▲:1.5 ◀:2.0 ▶:2.5

감소하였으며, pH 4이상에서는 잔류불소농도가 증가하는 경향을 보였으며 pH 10이상의 조건에서는 거의 제거되지 않고 잔류하는 것을 관찰할 수 있었다.

모델링 결과 불소의 제거율에 인산염의 농도의 증가와 pH에 대한 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 불소와 인산염이 혼합된 상태에서 효율적인 침전반응을 유도하기 위해서는 물질에 대한 안정적인 반응을 유도하는 pH로 조정하여 침전을 유도하는 것이 안정적인 처리효율을 나타낼 것으로 예상되었으며 실제 침전실험에 대한 조건도 pH 4에서 실시하여 검토하는 것이 타당할 것으로 판단하였다.

3.3. 반응시간에 따른 불소의 제거 및 반응속도론적 고찰

폐수처리에 있어서 시간은 공정의 적용 타당성을 판단할 수 있는 수치로 여겨지며 침전물의 형성이 단시간에 이루어지는 것이 공정의 효율적인 운영을 유도할 수 있다고 판단된다. 이에 따라서 생석회와 폐석고의 반응시간에 따른 불소의 제거율을 비교하였으며 그 결과를 바탕으로 침전반응에 대한 반응속도론적 측면을 관찰하여 폐석고의 불소 침전제로서의 적용 가능성을 검토하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 시간에 따른 불소 농도의 변화를 살펴 보기 위하여 초기 불소농도 10 mM로 고정된 인공폐수 200 mL에 불소를 함유한 폐수의 일반적인 침전조건(Kettunen and Keskitalo, 2000; Liu et al., 2002; Raichur et al., 2001)과 불소와 칼슘에 대한 MINTEQ 결과(김영임과 김동수, 2007)와 실험에 앞서서 실행한 모델링 결과를 고려하여 pH를 4로 조정하여 10%로 증류수에 용해한 폐석고와 생석회를 각각 3%, 5%, 13%의 첨가비율로 투입한 후 시간에 따른 잔류 불소농도의 변화를 나타낸 것이다. 폐석고와 생석회 모두 반응시작 약 3분 이내에 농도의 급격한 변화가 관찰되었으며 약 10분이 지난 후 농도의 변화가 미미하였고, 30분 이후 농도의 변화가 관찰되지 않았다. 침전반응이 완료된 후 pH의 변화는 초기에 조정된 값에서 큰 변화를 보이지 않았으나 소폭 감소하는 경향을 보였다. 불소의 초기 감소농도가 폐석고에 비하여 생석회의 결과가 보다 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났으며 이는 생석회가 포함하고 있는 CaO의 함량에 따른 결과로 판단된다. 침전제의 첨가비율이 증가할수록 불소의 초기 감소폭이 증가하는 것으로 보였으며 반응시간에 따라서 일정한 농도를 유지하며 침전제의 투입량에 따라서 감소되는 불소의 농도가 달라지는 것을 알 수 있었다. 이는 칼슘과 불소의 침전물 형성시 식 (1)에서 처럼 칼슘 1 mole과 2 mole의 불소가 반응하는 것으로 침전제 투입량의 증가에 따라서 불소와 반응하는 칼슘 농도의 증가에 따른 결과로 판단된다.



반응 pH의 조정에 따른 불소와 인산염의 처리특성 실험 결과 pH의 조정에 따라서 불소와 인산염의 제거에 큰 영향을 끼치는 것으로 관찰되었으며 실험결과를 Fig. 6에 나

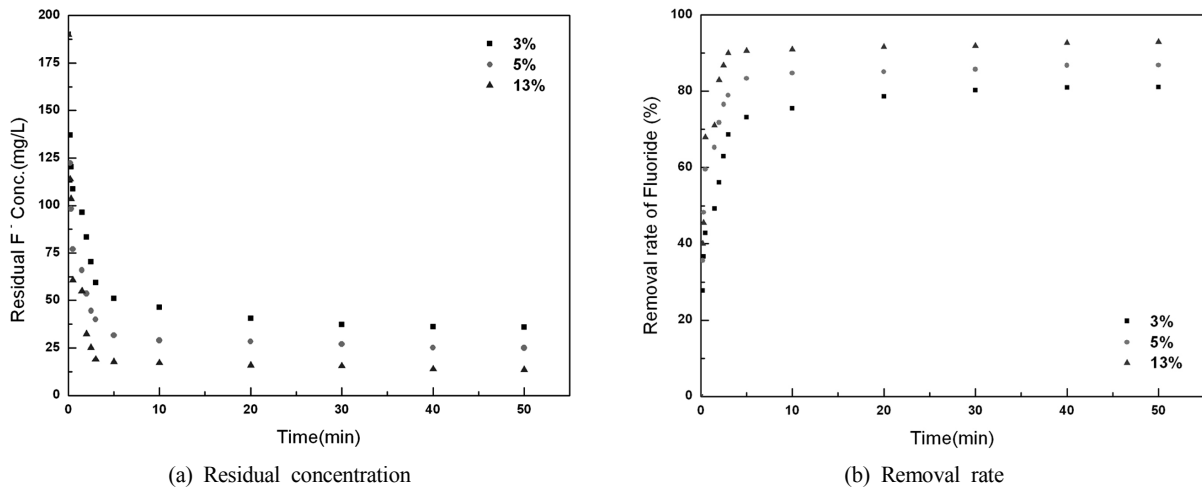


Fig. 4. Changes in the residual concentration of fluoride depending on the precipitant rate (Lime).

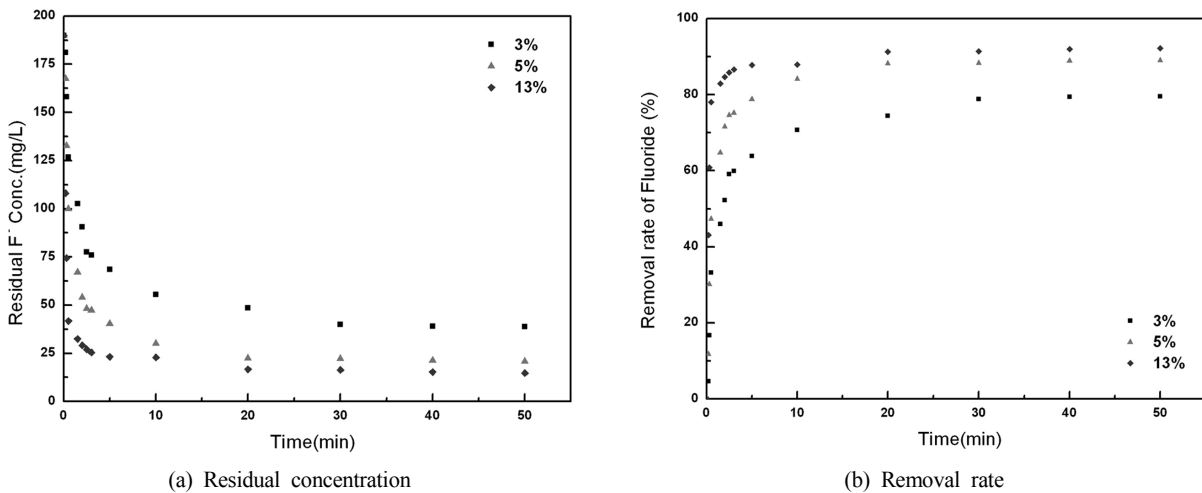


Fig. 5. Changes in the residual concentration of fluoride depending on the precipitant rate (gypsum).

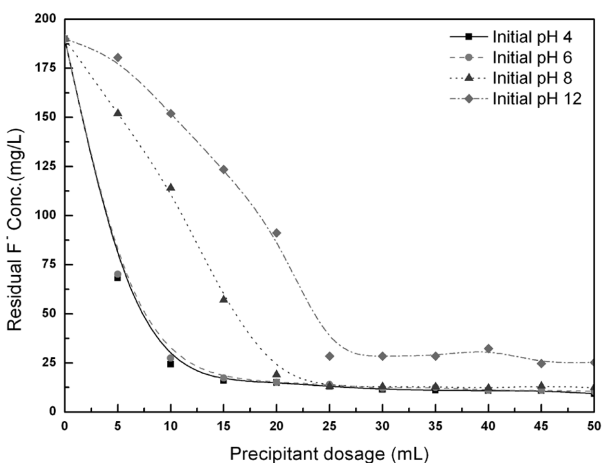


Fig. 6. Variation in the residual concentration of fluoride depending on the reaction pH.

타내었다. pH 4, 6, 8, 12의 조건에서 일정한 경향으로 불소가 제거되었으며 pH 8의 조건에서 불소의 제거량이 감소하는 모습을 관찰할 수 있었다. 이것은 pH의 증가에 따라서 수중의 칼슘이온과 인산염의 반응이 진행되면서 불소

의 침전을 방해함에 따라서 나타난 결과로 판단되며 pH 12에 이르러 불소의 제거량은 초기 pH에 비하여 약 23 mg/L 감소하였다.

이러한 결과는 모델링의 결과와 일치하는 결과로 불소와 인산염의 혼합상태로 발생하는 불소폐수의 특성상 적절한 반응 pH의 조정에 의하여 안정적인 침전반응을 유도할 수 있을 것으로 판단되었다.

물성분석에서 예측한 결과를 확인하고 폐석고와 반응하여 생성된 침전물의 성상을 분석하기 위하여 침전반응 종료 후 생성된 결정물질의 XRD분석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. XRD pattern 분석결과 물성분석에서 결정이 예상되었던 Magnesium fluoride(MgF₂)는 확인되지 않았다. 대부분의 생성물질은 Calcium fluoride(CaF₂)와 Hydroxylapatite (Ca₅(PO₄)₃(OH))로 확인되었다. Hydroxylapatite가 확인된 원인은 폐석고가 인산제조공정에서 발생하는 인산석고 슬러리로 일부 인산염을 포함하여 생성된 것으로 판단된다. 따라서 불소와 반응하는 물질은 Ca가 Mg에 비하여 우선적으로 반응을 하는 것으로 판단되어지며 폐석고에 함유된 불소물질에 의한 침전물이 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

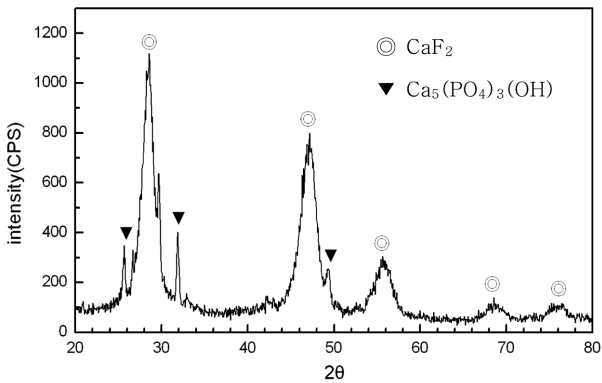


Fig. 7. Specific XRD patterns of crystal depending on the different precipitant (power:40 kw 30 mA, scan speed: 4°/min, X-ray source: 1.54056 Å Cu).

또한 불소와 침전반응을 이룰 수 있는 2가 양이온이 폐수 중에 공존시 침전반응에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

각 침전제의 투입에 따른 불소의 초기 농도 변화에 따른 침전 반응에 대하여 속도론적 해석을 위하여 폐석고와 생

석회의 침전반응 결과 중 초기 반응시간 0~3분 범위의 자료를 이용하여 식 (2)와 (3)을 적용하여 1차, 2차 반응속도식에 적용하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었으며 침전제의 첨가비율별 회귀직선식으로부터 도출된 반응속도상수(k)와 상관계수(r^2)를 Table 4에 정리하였다.

$$\text{First Oder} : -\ln \frac{C}{C_0} = kt \quad (2)$$

$$\text{Second Oder} : \frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} = kt \quad (3)$$

각 침전반응의 초기 상태에서 결정계수를 비교하였을 1차 반응에 의하여 불소가 제거되는 것을 보여주었다. 하지만 침전제 농도의 증가에 따라서 2차 반응에 가깝게 진행되는 것을 알 수 있었다. 따라서 침전제의 농도증가에 의한 불소의 반응은 1차 반응에서 2차 반응으로 진행된다. 또한 폐석고와 생석회의 반응시간 및 반응속도에서 큰 차이를 보이지 않았으며 이를 통하여 동일한 반응을 보이는 것으로 판단된다.

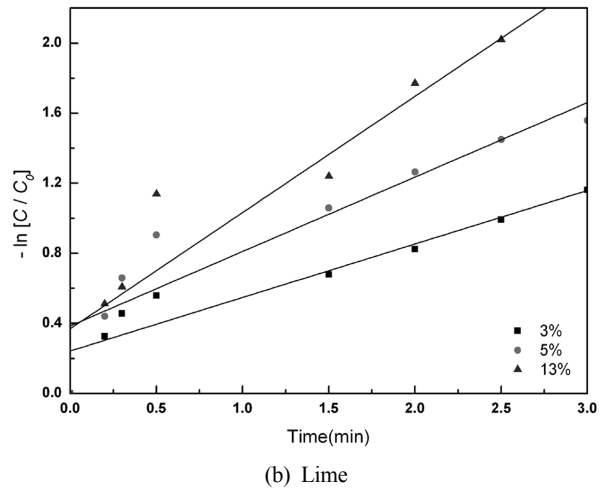
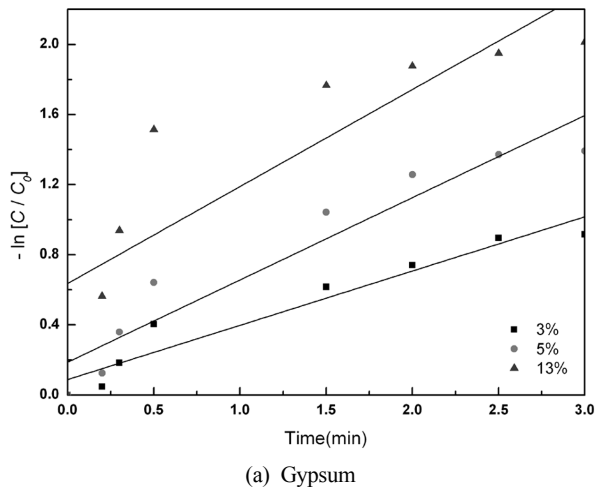


Fig. 8. Kinetics of fluoride removal for the first order depending on the precipitant rate.

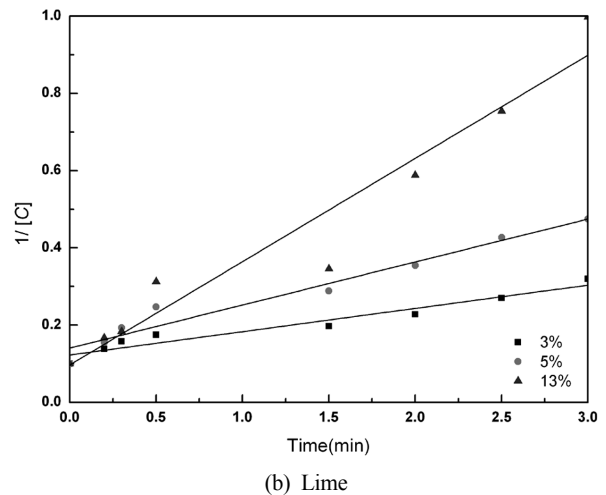
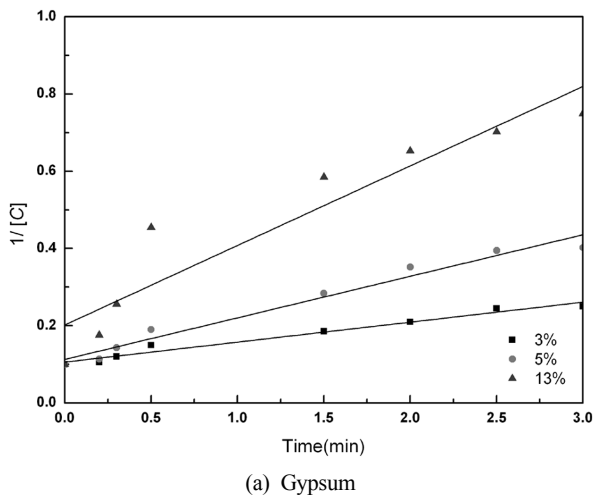


Fig. 9. Kinetics of fluoride removal for the second order depending on the precipitant rate.

Table 4. Rate constants and determination coefficients of the removal of fluoride for several kinetics

Kinetics	Precipitant rate	Gypsum		Lime	
		Rate constant (h ⁻¹)	Determination coefficient	Rate constant (h ⁻¹)	Determination coefficient
First Order	3%	0.3094	0.9264	0.3055	0.8776
	5%	0.4692	0.9016	0.4250	0.8360
	13%	0.5532	0.6964	0.6633	0.9077
Second Order	3%	0.0517	0.96810	0.0602	0.9330
	5%	0.1076	0.9680	0.1114	0.9505
	13%	0.2059	0.8709	0.2674	0.9311

3.4. 경제성 평가 및 폐석고 적용에 대한 고찰

본 실험에서 제거물질로 선정된 불소폐수처리에 사용되는 처리 약품비용을 비교하여 경제성 평가를 실시하였으며 5,000 m³/day의 폐수처리를 기준으로 사용된 침전제 투입량 및 비용 등을 Table 5에 정리하였다.

처리용량에 대비하여 각 공정에 따라서 322.5 kg/day의 생석회와 64 kg/day의 가성소다가 투입되며 이에 따라서 월간 약품비용이 각각 1,083,600원, 299,520원으로 산출되었으며 각 공정에 따른 처리효율은 각각 90%이상의 제거효율을 보이는 것으로 예상되었다. 위의 결론을 종합하여 볼 때 기존 불소폐수처리에 사용된 생석회를 대체하여 폐석고를 적용할시 연간 약 70%의 운영비용이 절감될 것으로 판단된다.

폐기물로 인한 환경오염 예방중심의 기존 폐기물 정책은 최근의 원자재·에너지난 및 기후변화 등에 적극 대응하기 위해 자원순환 촉진을 통한 자원생산성 제고를 목표로 정책 패러다임을 전환하였다. 패러다임 전환에 따라 정책체계 또한 기존의 감량·재활용·처리중심에서 생산소비·물질 재활용·에너지회수·처리 선진화를 통한 녹색성장 달성으로 한 단계 발전시켰다. 이러한 정책 초점에 발맞추어 산업활동에 의하여 발생하는 산업폐기물의 다각적인 활용방안이 연구 적용되고 있다.

본 연구에서는 기존의 침전제로 사용되는 석회를 대체하여 인산제조공정에서 발생하는 폐석고를 이용하여 불소와 인산염의 침전반응을 유도하여 대체 침전제로서의 폐석고의 가능성을 검토하여 건축자재로 국한되어 있는 폐석고의 다른 활용방안에 대하여 연구하였다. 또한 다양한 농도의 폐수에 대하여 석회와 비교 실험을 통하여 적용가능성을 검토한 결과 석회와 비교하여 90%이상의 제거효율을 보였으며 운영비용면에서도 70%이상의 절감효과를 얻을 수 있었다.

Table 5. Comparison of economical efficiency

Item	Precipitant	Lime	Wastegypsum
Processing Capacity (m ³ /day)		5,000	
Lime dosage (kg/day)		322.5	-
NaOH dosage (kg/day)		-	64.0
Unit cost of Lime (won/kg)		112	-
Unit cost of NaOH (won/kg)		-	156
monthly operation cost (won)		1,083,600	299,520
yearly operation cost (won)		13,183,800	3,644,160
Cost saving		-	-72%

연구의 결과에 의하여 폐석고의 불소 침전제로서의 적용가능성을 확인할 수 있었으나, 각 물질의 침전반응에 직접적으로 영향을 미치는 CaO의 함량의 불균일에 따라서 과량이 첨가될 수 있는 문제점이 나타날 수 있다. 이에 따라서 실제 공정에 적용되기 앞서 폐석고 품질의 균질화가 필요하며, 침전처리에서 발생하는 2차적인 폐슬러지에 대한 활용 및 처리방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 침전제로 사용되는 석회를 대체하여 인산제조공정에서 발생하는 폐석고를 이용하여 불소의 침전반응을 유도하여 대체 침전제로서의 폐석고의 가능성을 검토하여 건축자재로 국한되어 있는 폐석고의 다른 활용방안에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폐석고에 대한 XRD분석과 ICP분석과 CaO의 함량은 약 30.7%로 생석회에 비하여 약 1/3수준으로 함유되어 있어 불소의 침전반응에 직접적으로 영향을 미치는 CaO의 함량의 불균일에 따라서 과량이 첨가될 수 있는 문제점이 나타날 수 있다. 이에 따라서 실제 공정에 적용되기 앞서 폐석고 품질의 균질화가 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 불소의 침전반응은 pH4의 조건에서 침전제 투입 후 수분 이내에 급속하게 진행되었으며 약 10분후 평형에 도달하는 것으로 나타났으며, 침전제의 투입량의 증가에 따라서 불소의 초기 감소폭이 증가하며 반응시간에 따라서 일정한 농도를 유지하며 침전제의 투입량에 따라서 감소되는 불소의 농도가 달라지는 것을 알 수 있었다.
- 3) 생석회와 폐석고에 대한 불소의 반응은 동일한 반응으로 1차 반응에 가깝게 반응이 진행되었다. 그러나 침전제 농도의 증가에 따라서 2차 반응에 가깝게 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 불소에 대한 폐석고와 생석회의 반응은 투입되는 침전제의 농도에 따라서 1차 반응에서 2차 반응으로 진행되는 것으로 판단된다.
- 4) 산업활동에서 발생하는 폐기물의 재활용적인 측면에서 의미있는 자료로 판단되나, 폐기물의 이용에 의하여 발생할 수 있는 2차오염물질에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

김영임, 김동수(2007). 칼슘침전법에 의한 불소 처리에 관한

- 연구. 수질보전 한국물환경학회지, **24**(12), pp. 2151-2161.
- 변혜정, 최원호, 박주양(2007). 시멘트 페이스트를 이용한 혼합 불산폐수 처리. 대한환경공학회지, **29**(8), pp. 909-914.
- 이정미(2006). 폐인산석고의 재결정법에 의한 고순도 석고 제조에 관한 연구. 박사학위 논문, 인하대학교.
- 이진숙, 김동수(2007). 폐굴집질을 흡착제로 한 불소 폐수 처리특성에 관한연구. 수질보전 한국물환경학회지, **23**(2), pp. 222-227.
- 최원호, 박주양(2007). Granular Calcite 충전컬럼을 이용한 불산폐수 처리. 대한토목학회논문집B, **27**(4B), pp. 461-467.
- 환경부, 한국환경자원공사(2009). 2008 전국폐기물 발생 및 처리현황.
- Benfield, L. D., Judkins, J. F., and Weand, B. L. (1982). *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*, Prentice-Hall, Inc., U.S.A.
- Cengeloğlu, Y., Kir, E., and Ersöz, M. (2002). Removal of fluoride from aqueous solution by using red mud. *Separation and Purification Technology*, **28**, pp. 81-86.
- Chaturvedi, A. K., Yadava, K. P., Pathak, K. C., and Singh, V. N. (1990). Defluoridation of water by adsorption on fly ash. *Water, Air and Soil pollution*, **49**, pp. 51-61.
- Kettunen, R. and Keskitalo, P. (2000). Combination of membrane technology and limestone filtration to control drinking water quality. *Desalination*, **131**, pp. 271-283.
- Kim, J. W., Shin, S. H., Song, H. W., and Kim, D. S. (2000). Application of rare earth compounds for the treatment of phosphate and fluoride in wastewater. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **22**(16), pp. 1127-1137.
- Liu, R., Guo, J., and Tang, H. (2002). Adsorption of Fluoride, Phosphate, and Arsenate Ions on a New Type of Ion Exchange Fiber. *J. of Colloid and Interface Science*, **248**, pp. 268-274.
- Raichur, A. M. and Basu, M. J. (2001). Absorption of Fluoride onto Mixed Rare Earth Oxides. *Separation and Purification Tech*, **24**, pp. 121-127.