

폐 콘크리트 재생순환자원 부산물 슬러지의 활용 기초연구

신희영 · [†]지상우* · 우정연 · 안기오** · 안상호***

한국지질자원연구원 광물자원연구본부, *한국지질자원연구원 지구환경연구본부,
한국지질자원연구원 국토지질연구본부, *한국지질자원연구원 기술사업화부

A Feasibility Study on the Utilization of by-Product Sludge Generated from Waste Concrete Recycling Process

Hee-young Shin, [†]Sangwoo Ji*, Jeong-young Woo, Gi-oh Ahn** and Sang-ho An***

*Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
*Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
**Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
***R&D Tech-Biz Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

요 약

폐콘크리트의 순환자원화 과정에서 발생하는 슬러지의 활용 방안을 찾기 위하여, 기본특성 분석과 고알칼리 상등수의 pH 중화실험을 수행하였다. 슬러지의 평균입도(d50)는 42.4 μm 이며, -45 μm (-325 mesh) 크기의 미립자가 전체 슬러지 질량의 60% 이상을 차지한다. 미립자의 주요광물은 백운모와 탄산염광물이었으며, 미립으로 갈수록 탄산염 광물의 비율이 늘어났다. 또한 미립으로 갈수록 중금속의 함량이 증가했는데, 토양오염 우려기준의 2지역 기준값 보다는 낮았다. 고액분리를 위한 응집제의 사용은 기존 공정에서 과량의 응집제를 사용하고 있어서 별다른 효과를 관찰할 수 없었다. 슬러지 pH (약 12)가 높기 때문에 산 첨가에 의한 중화효과가 미미하였지만, 슬러지가 포함하고 있는 높은 농도의 Ca이온으로 인해 CO₂ 가스를 주입하는 방법으로 8.5 미만으로 중화가 가능하였다. 또한 침전물에 대한 XRD 분석 결과는 고순도의 CaCO₃로 회수될 수 있음을 보여주었다.

주제어 : 건설폐기물, 폐콘크리트, 재생순환, 슬러지, CaCO₃

Abstract

The characteristics analysis and pH neutralization test were carried out to use of slurry generated from recycling processes of construction wastes. D (5.0) of raw sludge was 42.4 μm and over 60 % of sludge distribute under 45 μm (-325 mesh). Muscovite and carbonate minerals were main minerals of fine particles, and the portion of carbonate minerals increased as particle size decreased. Although the more heavy metals were observed in the finer particle size, the contents was found to be less than Korean contaminated soil regulation (area 2). The effects of flocculants addition for accelerating solid-liquid separation were negligible because the slurry already contains excess of coagulant added in the waste concrete recycling process. It was difficult to neutralize the sludge supernatant due to high pH (about 12) by adding acids, but the introduction of CO₂ decreased the pH to 8.5. The precipitate recovered during CO₂ introduction was determined to be CaCO₃ with XRD, and it indicates that high pure CaCO₃ could be obtained during the process.

Key words : Construction waste, Waste Concrete, Recycling, Sludge, CaCO₃

· Received : March 29, 2016 · Revised : April 12, 2016 · Accepted : May 19, 2016

[†]Corresponding Author : Sangwoo Ji (E-mail : swji@kigam.re.kr)

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, 124 Gwahank-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34132, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 우리나라는 30여 년 전 건설된 상가 및 아파트, 일반주택 등 콘크리트 건물의 고층화 및 노후화로 인한 재건축사업에 따라 일반 건설폐기물의 발생량이 증가하고 있다. 이에 따라 건설폐기물 재활용 촉진을 위한 규제개선과 건설폐기물 순환골재의 의무사용 대상 사업자 확대가 되고 있다. 우리나라는 선진국처럼 건물 외장을 두고 내부만 교체 또는 수선하여 사용하는 것이 아니라 노후된 건축물을 해체 후 재건축 하는 경향이 높다. 따라서 건설폐기물 발생량의 증가속도는 선진국에 비해 매우 크다.^{1,2)} 국내 건설폐기물 총 발생량은 6천8백만여 톤이 발생되고 있으며, 이 중 약 65%인 4천4백만 톤이 페콘크리트이다. 발생하는 건설폐기물의 98%를 재활용하고 있으며, 그중 95.5% 순환골재로 재활용하고 있다³⁾. 건설폐기물의 재활용을 위한 제도의 발전으로 인해 순환골재의 재활용률과 의무사용량이 높아짐에 불구하고, 실질적인 공사현장의 재활용률은 수요자의 부정적인 시각, 처리장과의 거리, 비용의 상승 등으로 인해 높지 않은 형편이다. 또한 재활용 되지 못하고 남은 건설폐기물은 매립처분 되어야 하나 매립지의 부족에 따른 폐기물의 처리비용 상승이 큰 부담이 되고 있다.⁴⁾

건설폐기물 중 재활용이 가능한 물질로 가장 많은 양을 차지하는 것은 페콘크리트다. 페콘크리트의 재생순환자원화 과정에서는 반복 분쇄과정에서 발생하는 미분말과 표면세척 및 불순물 분리에 사용되는 물이 혼합된 슬러지가 발생되는데, 이렇게 부산물로서 슬러지 중에 포함된 고형물은 투입된 페콘크리트의 약 40% 가량이 된다. 발생하는 슬러지는 순환자원화 과정에서 발생하는 미분말을 다량 함유하고 있으며 함유율은 95%에 이른다. 이러한 슬러지는 별다른 활용처를 찾지 못하여 현재 폐기되고 있다. 이렇게 폐기되는 양은 중간처리장에 이미 반입된 양에 포함되어 실제로 재활용되는 건설폐기물의 양은 통계량보다 훨씬 적어지게 된다.⁵⁾ 이러한 페콘크리트에 포함된 미분말의 재활용을 위한 연구는 주로 미분말 자체를 활용하는 측면에서 연구되거나,^{6,7)} CO₂ 저감을 위한 광물탄산화에 이용하기 위한 연구가 진행되었다.⁸⁻¹¹⁾ 그러나 부산물로 발생하는 슬러지에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 재생순환자원화의 효율을 높이는 측면에서도 슬러지에 포함된 미분말을 회수하여 재활용할 수 있도록 할 필요성이 있다. 미분말은 석회석 미분말과 같은 방법의 활용이 가능할 수 있다.¹²⁾ 또한, 페콘크리트에 포함된 시멘트 성분에 의해

슬러지 상등수는 pH 12가량의 강알칼리성 폐수로 방류되어 환경기준에 맞도록 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 건설폐기물 중 페콘크리트 재활용 과정에서 발생하는 부산물인 슬러지의 활용 방안을 모색하기 위하여, 슬러지 기본특성을 분석하고, 발생하는 고알칼리 폐수의 pH를 방류수 수질 기준인 pH 8.5 이하로 중화하기 위한 방안을 찾고자 수행하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 페콘크리트 재생순환 공정에서 발생하는 슬러지를 활용하기 위하여 재활용을 위한 물성평가와 방류수 수질관리를 위한 중화 방법 두 가지로 나누어 실험을 수행하였다. 슬러지는 인천에 소재한 페콘크리트 재생순환자원화 회사인 B자원의 페콘크리트 재생순환과정에서 발생하는 건조 상태인 슬러지를 사용하였다.

2.1. 슬러지 물성평가

건식 및 습식조건에서 입도분석을 수행하였다. 원시료를 건조 후 마노절구에 넣어 파쇄 후 부피 배합비(물/시료 3.0)로 광액을 제조하였다. 교반기에 광액을 넣어 교반속도 450 rpm 교반시간 30분인 조건으로 해쇄하였다. 해쇄 한 시료를 1차로 뒤 1분의 대기시간을 갖고 상등액(이하 Float)와 침전물(이하 Sink)로 나누었다. 다음으로 정식규격인 표준체(45, 140, 200, 270, 325 mesh)를 사용하여 골재의 체가름 시험 방법(KS F 2502)에 준하여 수행하였다. 체가름은 건식법과 습식법을 각각 수행하였다.

슬러지의 유기물 함량에 의한 특성 영향을 보고자 소성 실험을 수행하였다. 각각의 시료를 도가니에 1g씩 담고 전기로에 넣은 뒤 200°C 부터 100°C 단위로 온도를 높여 각 온도에서 10분 동안 유지시킨 후 무게의 변화를 관찰하였다. 사용된 시료는 원시료(Raw)와 체질 후 45 mesh 체망에서 잔류하는 시료(+45 mesh)로 비교실험을 수행하였다.

슬러지의 고액분리 효율을 평가하기 위해 플라스틱 임호프콘(Imhoff cone)에 고체함량 농도 5%인 광액을 제조하여 넣고 응집제의 농도를 다르게 하여 시간에 따른 슬러지 침강 높이 변화와 탁도(turbidity) 변화를 관찰하였다. 응집제로는 Sodium Silicate Solution SS-1호를 사용하였고, 농도는 0.005% ~ 0.7%까지 변화를 주면서 실험하였다. 탁도는 휴대형 탁도계(Hach 2100P Portable Turbidimeter, USA)를 이용하여 측정하였다.

Table 1. Particle size distribution with standard sieve

Sample	Dry		Wet	
	waight (g)	wt. ratio (%)	waight (g)	wt. ratio (%)
+45mesh	21.29	11.11	8.26	1.93
45 ~ 200 mesh	37.26	19.45	74.74	17.48
200 ~ 270 mesh	21.84	11.40	48.95	11.45
270 ~ 325 mesh	8.46	4.42	13.58	3.18
-325 mesh	102.74	53.62	282.00	65.96

2.2. 슬러지 및 방류수 중화실험

슬러지의 고액분리 후 방류되는 방류수의 pH를 방류수 기준인 8.5이하가 되도록 하기 위해 중화실험을 진행하였다. 산을 이용한 중화실험은 고체함량 5% 광액 슬러지 50 ml에 0.1 mol 염산(HCl)과 0.1 mol 황산(H₂SO₄)을 0.25 ml/min.씩 넣으며 pH 변화를 관찰하였다. 산중화의 한계를 해결하고자 이산화탄소(CO₂) 가스 주입에 의한 중화실험을 수행하였다. CO₂ 가스 주입 실험은 슬러지 시료(#1 & #2)와 필터링을 통해 분리한 상등수(#3 & #4) 각 250 mL에 99% CO₂ 가스를 5 ml/min.의 속도로 주입하면서 pH 변화를 관찰 하였다.

2.3. 분석방법

체가름 후 각 입단별 슬러지의 입도를 Mastersizer 2000 (Marvern Co.)을 사용하여 분석하였다.

시료의 광물조성은 XRD (X-ray diffraction, X'pert MPD, Philips)를 이용하여 분석하였다. 2θ 각의 범위를 0.01°단위로 하여 0.04°/s의 속도로 3 - 65° 범위에서 측정하였다. XRD 정량분석은 Rietveld method를 적용한 소프트웨어인 SiroQuarnt™ program (version 3.0)을 사용하였다.

슬러지의 화학조성은 건조된 슬러지 원시료와 건식법에 의해 입단별로 분리된 시료를 각각 산처리 후 습식분석법에 의해 Ca 함량을 정량하였다. 또한 각 시료를 산을 이용하여 완전용해 후 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy, Optima 5300DV, Perkin Elmer)를 이용하여 중금속 함량을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 입도분포

Table 1과 2는 체가름 시험에 따라 검식 및 습식에

의한 입단별 시료량과 입도분포 분석 결과이다. 습식법의 경우 분류과정 중 광액에서 거품이 다량 발생하였다. 건식과 습식방법에 의한 체가름 실험 결과에서 습식법의 경우가 45 mesh 체에 잔존하는 시료이 양이 건식법에 의한 것보다 크게 감소하였다. 이는 큰 입자에 부착되어있던 미립자들이 습식체질 과정에서 분리되었기 때문으로 판단된다. 입도분포 분석(건식 체가름 시료 사용)에서 +45 mesh 시료의 평균입도가 45 ~ 325 mesh 사이의 시료들 보다 작게 나오는 오차를 발생하였는데, 이 역시 건식법에서 미립자가 큰 입자에 부착된 체로 있다가 분리되어 분석되었기 때문으로 해석된다. -45 μm 크기에 해당되는 -325 mesh 시료의 시료량이 건식 53.62%, 습식 65.96%로 슬러지에 존재하는 미립자의 양이 50 ~ 60%인 것으로 나타났다. 건식에서 -325 mesh 시료량이 작은 것은 큰입자에 부착된 양 때문으로 판단된다. 1분간의 침강시간동안 분리된 Float의 경우 D(0.5)가 19 μm정도로 -325 mesh 시료와 유사한 값을 보인다.

Table 2. Particle size distribution by particle size analyzer

Sample	Diameter		
	D(0.1)	D(0.5)	D(0.9)
Raw	4.294	42.398	183.346
Float	3.156	18.643	71.895
Sink	3.910	32.991	143.655
+45 mesh	3.887	31.975	144.709
45 ~ 200 mesh	13.28	95.971	214.990
200 ~ 270 mesh	40.031	70.902	112.591
270 ~ 325 mesh	8.355	59.740	113.683
-325 mesh	2.939	18.933	53.450

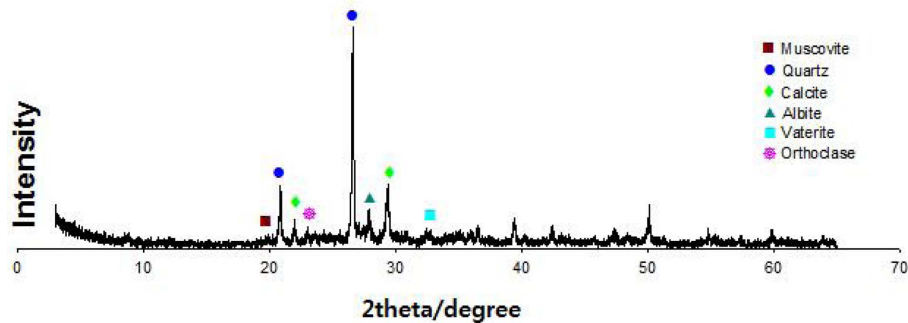


Fig. 1. XRD Qualitative analysis of raw sludge.

3.2. XRD 분석

Fig. 1과 Table 3은 슬러지 광액 제조한 원시료의 XRD 정성분석 그래프 및 정량분석 결과표이다. 슬러지 원시료에는 백운모(Muscovite) 32.1%, 석영(Quartz) 24.1% 및 방해석(Calcite) 16.6%가 주 구성광물로 존재하고 있다. 방해석과 동질이상 광물인 바테라이트(Vaterite)가 10% 존재하여 탄산염광물이 26.6%로 백운모 다음으로 많이 존재한다. 백운모의 경우 방해석과 같이 강도가 약해서 순환자원화 과정에서 미립으로 분쇄되어 슬러지에 다량 함유되는 것으로 생각된다. 미립인 -325mesh 시료의 경우 백운모 28.7%, 석영 14.9%, 방해석 25.1% 및 바테라이트 6.1%로 탄산염광물의 함량이 31.2%로 가장 많은 것으로 나타났다. 석영과 장석류는 주로 200~270 mesh 및 270~325 mesh 시료에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 슬러지의 미분말을 구성하는 주요광물은 백운모와 탄산염광물이며, 200~325mesh 사이의 입자에 좀 더 강한 강도의 규산염광물인 석영과 장석류가 많이 분포함을 알 수 있다.

3.3. 슬러지 화학조성 분석

Table 4은 각 입도 분포에 따른 습식(Ca)분석한 결과

와 ICP-MS에 의한 중금속 분석 결과이다. Float 시료의 Ca 함량이 14.5%로 Sink 시료에 비해 높게 나타났다. 입단별 분석 결과에서는 XRD 정량분석 결과에서 분석된 탄산염 광물의 함량과 유사한 경향을 보여주었다. 중금속 농도를 보면 Cu와 Zn가 다소 높은 값을 보이며, 입도가 작아질수록 중금속의 농도가 높아지는 것을 볼 수 있다. Cu와 Zn의 농도는 토양환경보전법의 토양오염우려기준 1지역 기준값 보다는 높고 2지역 기준값 보다는 낮은 상태이다. 따라서 슬러지의 재활용 용도를 정할 때 중금속의 함량을 고려하여 환경문제가 발생하지 않도록 주의할 필요가 있다.

3.4. 유기물 분석

Fig. 2는 100°C 단위로 온도를 높이며 소성 잔류물의 무게 변화를 관찰한 그래프이다. Raw의 경우 900°C까지 온도를 높였을 때 초기 무게 대비 80% 이상의 무게가 잔류하였다. +45 mesh 시료의 경우 200~300°C에서 잔존율이 급격하게 감소되었다. 이후 온도 증가에 따라 Raw와 비슷한 정도의 잔존율 감소가 보였다. 이는 +45 mesh 시료에 플라스틱, 목재 등 유기물 성분이 다량 함유되어 있기 때문으로 판단된다. 유기물

Table 3. XRD Quantity analysis

(wt.%)

	Muscovite	Quartz	Calcite	Albite	Vaterite	Orthoclase
Raw	32.1	24.1	16.6	13.5	10.0	3.8
+45 mesh	33	24.8	18.8	10.1	6.7	6.6
45~200 mesh	29.9	14.8	23.3	16.8	9.7	3.6
200~270 mesh	21.8	26.0	21.5	15.7	4.6	10.5
270~325 mesh	24.8	29.9	15.1	19.3	-	10.9
-325 mesh	28.7	14.9	25.1	11.9	6.1	4.4

Table 4. Chemical compositions analyzed by ICP-MS and wet method

Sample	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Ca	
	(mg/kg)					wt %	
Raw	107	407	6.62	< 5.00	112	11.4	
Float	188	435	10.8	< 5.00	130	14.5	
Sink	114	341	7.47	< 5.00	108	11.2	
+45mesh	153	385	8.96	< 5.00	124	10.4	
45 ~ 200 mesh	113	325	5.48	< 5.00	108	10.4	
200 ~ 270 mesh	107	320	< 5.00	< 5.00	104	7.72	
270 ~ 325 mesh	171	366	5.53	< 5.00	109	7.58	
-325mesh	329	528	9.91	< 5.00	136	11.4	
Environmental regulation for soil (Warning)	Area 1	150	300	25	4	200	-
	Area 2	500	600	50	10	400	-

은 일반적으로 300 ~ 400°C에서 열분해를 거쳐 탄소가 무정형 탄소가 되는 반응을 탄화되었다고 일컫는데 위의 결과에서 확인할 수 있었다. 따라서 슬러지 재활용 시 +45 mesh 이상에서는 유기물 제거 공정이 필요할 수 있다.

탄산칼슘(CaCO₃)은 825°C 이상에서 열분해 되어 CaO와 CO₂로 분해된다. Raw의 소성 후 잔류물에 대한 XRD 분석 결과에서 800°C 소성 후 부터는 방해석 피크가 사라지는 결과를 보였다.

3.5. 침강실험

침강실험에서 초기 매우 빠르게 고액분리가 진행되었다(Fig. 3). 응집제 투입량이 증가에 따라 0.2%까지는 탁도 개선 효과가 있었지만, 더 높은 농도에서는 오히려 효과가 떨어졌다. 15분 이후로는 응집제 농도의 영향이 없는 것으로 판단된다. 응집제를 첨가한 시료들의

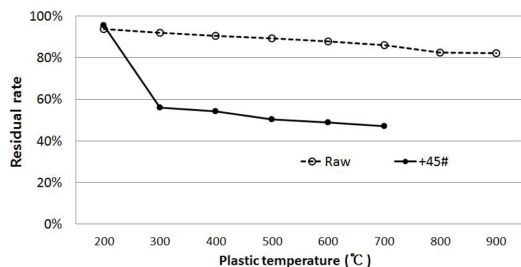


Fig. 2. The Residual rate of sludge as heating temperature increased.

탁도변화는 Raw 시료와 비교하여 응집제의 효과가 크게 나타나지는 않는데, 이는 현장에서 과량의 응집제를 사용하고 있고 슬러지 상등수의 50% 이상을 재순환하여 사용하면서 슬러지에 응집제 성분이 상당량 남아 있기 때문이다. 이러한 영향은 광산 선광폐수 처리에서도 발생되고 있다¹³⁾.

3.6. 중화실험

산을 이용한 중화실험에서 염산을 이용한 경우 약 11 ml, 황산을 이용한 경우 약 7.5 ml의 산을 첨가하였

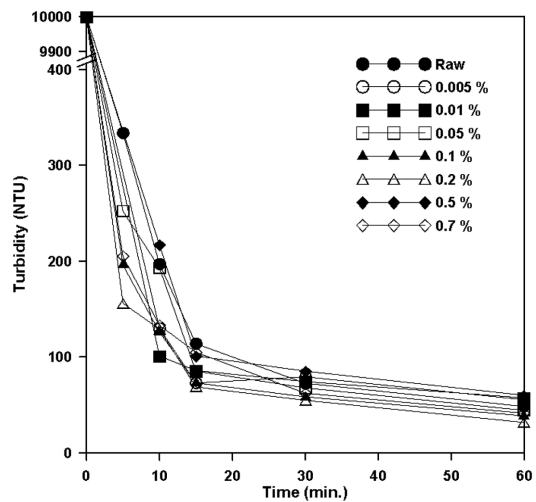


Fig. 3. Turbidity variation with time as flocculant dosing.

을 때 pH 8.5 이하로 낮아졌다(Fig. 4(a)). 산 첨가를 종료한 후 시간이 경과함에 따라 pH가 다시 상승하였다(Fig. 4(b)). 이는 고체 상태로 존재하던 탄산염광물이 용해되면서 pH를 상승시키는 것으로 산에 의한 중화의 한계가 있음을 알 수 있다.

CO₂ 가스 주입실험에서는 반응 후 5분 안에 pH가 6.3에 수렴하였으며, 반응 종료 후 서서히 pH가 상승하

여 #1과 #2의 경우 52시간 경과에서 pH가 8까지 상승하였다(Fig. 5(a)). 상등수만 분리한 경우인 #3과 #4는 반응 종료 후에도 pH의 상승폭이 작아서 7가량에서 수렴하였다. Fig. 5(b)의 침전물에 대한 XRD 분석 결과에서 침전물은 거의 대부분 CaCO₃로 존재하여 고순도의 CaCO₃로 회수될 수 있음을 보여주었다(Fig. 5(c)).

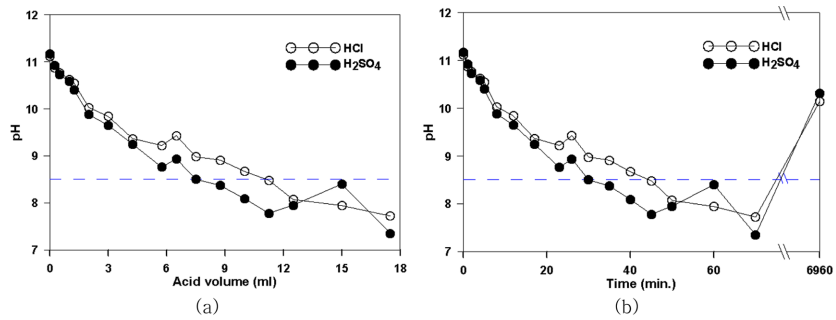


Fig. 4. pH variation of sludge as (a) acid dosing and (b) time.

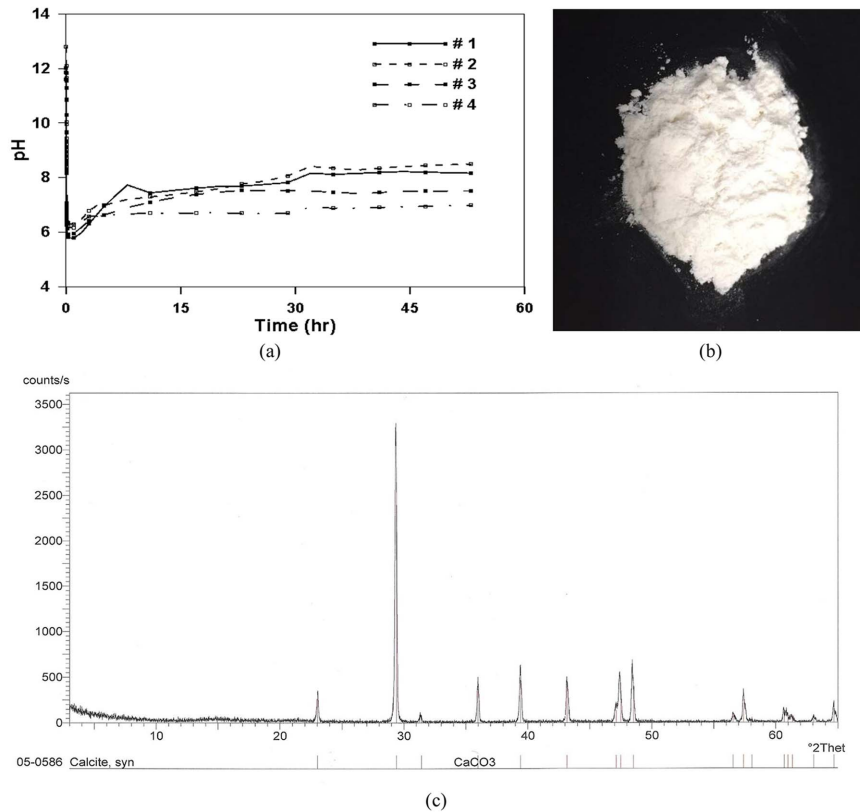


Fig. 5. (a) pH variation of sludge and drain as CO₂ purging, (b) dried precipitate at # 3, and (c) XRD pattern of precipitate.

4. 결 론

본 연구는 페콘크리트의 순환자원화 과정에서 발생하는 부산물인 슬러지의 활용 방안을 모색하기 위하여, 슬러지 기본특성을 분석하고, 발생하는 고알칼리 폐수의 pH를 방류수 수질 기준인 pH 8.5 이하로 중화하기 위한 방안을 찾고자 수행하였다.

페콘크리트의 순환자원화 부산물 슬러지는 평균입도 (D(0.5)) 42.4 μm 의 입도를 갖는데, 전체 슬러지 질량에서 -45 μm (-325 mesh) 크기의 미립자가 60% 이상을 차지한다.

슬러지의 XRD 분석에서 미립으로 갈수록 탄산염 광물의 비율이 늘어났으며, 미분말을 구성하는 주요광물은 백운모와 탄산염광물이었다.

미립으로 갈수록 중금속의 함량이 증가했는데, 토양 오염 우려기준의 2지역 기준값 보다는 낮았다. 따라서 슬러지의 재활용 용도를 정할 때 환경문제를 고려하여 정할 필요성이 있다.

고액분리를 위한 응집제의 사용은 기존 공정에서 과량의 응집제를 사용하고 있어서 별다른 효과를 관찰할 수 없었다.

슬러지 상등수의 높은 pH는 산치리에 의한 중화로는 효과를 얻기 어렵지만, 슬러지가 포함하고 있는 높은 농도의 Ca이온으로 인해 CO₂ 가스를 주입하는 방법이 효과적이다. 또한 침전물에 대한 XRD 분석 결과는 고순도의 CaCO₃로 회수될 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원 자체사업(15-7617)의 지원에 의해 수행되었습니다. 당 연구를 지원해주신 관련자분들께 감사드립니다.

References

- Hong, S.W., Park, S., Ahn, Y.S., 2004: A Research on the Efficient Way and the Analysis of the Actual Condition for Recycling Waste Concrete Discharged as Construction Waste, J. of the Architectural Institute of Korea : Structure & construction, 20(2), pp97-104
- Jo, J.K., 2014: A Study on the effective recycling system through domestic construction wastes and current circumstance, Thesis for Master Degree of Yeungnam Univ., p.68
- MEV, 2013: The 4th National Waste Statistics Survey of MEV, Ministry of Environment (MEV), p.880
- Berndt, M. L., 2009: Properties of Sustainable Concrete Containing Fly Ash, Slag and Recycled Concrete Aggregate, Construction and Building Materials, 23(7), pp2606-2613.
- Kim, Y.J. and Chung, M.H., 2012: Study on the recycling of the construction wastes and reformation of the system, J. of The Organic Resource Recycling Association, 20(2), pp27-35
- Song, H. et al., 2014: Image and Phase Analysis of Low Carbon Type Recycled Cement Using Waste Concrete Powder”, J. of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2(4), pp314-320
- Kim, Y.J., Choi, Y.W., Kim, Y.J., 2015: Utilizability of Waste Concrete Powder as a Material for Soil Pavement, J. of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 3(3), pp277-282
- Ahn, J.W. and Yoo, K.S., 2009 : The Solidification of CO₂ by Using Waste Cement and Inorganic Waste By-Products, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 18(3), pp3-10
- Choi, Y.H. et al., 2014 : Studies for CO₂ Sequestration Using Cement Paste and Formation of Carbonate Minerals, J. Miner. Soc. Korea, 27(1), pp17-30
- Kim, W.R., 2015, Neutralization of AMD and CO₂ Sequestration using Waste Concrete, Thesis for Master Degree of Kangwon National Univ., p.57
- Jang, S.M., 2016: Optimization of design parameters on mineral carbonation using waste concrete, Thesis for Master Degree of Kongju National Univ., p.88
- Jo, B.W., Choi, J.S., Kim, K.T., 2013: A Study on the Strength Properties of Green Mortar Using Limestone Powder, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 22(3), pp36-42
- Park, J.H. et al., 2016: Optimizing the addition of flocculants for recycling mineral-processing wastewater, Geosystem Engineering, 19(2), pp83-88



신 희 영

- 한양대학교 자원공학과 학사
- 한양대학교 자원공학과 석사
- 한양대학교 자원공학과 박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구
구본부 책임연구원



지 상 우

- 한양대학교 자원공학과 학사
- 한양대학교 자원공학과 석사
- 한양대학교 지구환경시스템공학과 박사
- 현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 책임연구원



우 정 연

- 세명대학교 바이오환경공학과 학사
- 세명대학교 환경안전시스템공학부 석사
- 전 한국지질자원연구원 광물자원연구
본부 연수연구원



안 기 오

- 한밭대학교 제어계측과 학사
- 광운대학교 산업정보대학원 석사
- 현재 한국지질자원연구원 국토지질연
구본부 책임기술원



안 상 호

- 방송통신대학교 농학과 학사
- 현재 한국지질자원연구원 기술사업화
부 기술원