



인산석고 시멘트 혼합토의 공학적 · 환경적 특성 연구

A Study on the Engineering and Environmental Characteristics of Phosphogypsum-Cement-Soil Mixtures

장동수 · 연규석 · 김기성 · 하선효 · 김용성[†]

Chang, Dong Su · Yeon, Kyu Seok · Kim, Ki Sung · Ha, Seon Hyo · Kim, Yong Seong

ABSTRACT

This study aimed to investigate the engineering and environmental characteristics of phosphogypsum-cement-soil mixtures composed of phosphogypsum, soil, and a small amount of cement was analysed on the basis of the unconfined compression test, the tensile strength test, the freezing and thawing test, the wetting and drying test, SEM and EDS analysis, XRD analysis and Leaching test. The specimens were manufactured with soil, cement and phosphogypsum. The cement contents was 10 %, and the phosphogypsum contents was 10, 20, 30, and 40 % by the weight of total dry soil. Each specimen was manufactured after curing at constant temperature and humidity room for 3, 7 and 28 days, after which the engineering characteristics of phosphogypsum-cement-soil mixtures were investigated using the unconfined compression test, the tensile strength test, the freezing and thawing test, the wetting and drying test. The basic data were presented for the application of phosphogypsum-cement-soil mixtures as construction materials. To investigate the environmental characteristics, leaching test was performed and the leaching test results were far below than of regulatory requirement of Waste Management Act in Korea. Therefore the results show that phosphogypsum is environmentally safe and can be used as construction materials in environmental aspect.

Keywords: Compression test; EDS; phosphogypsum; SEM; soil mixtures; XRD

1. 서 론

최근 고도의 경제성장 및 활발한 국가기간 산업의 확충으로 파생된 산업폐기물 및 생활폐기물의 환경오염이 심각한 가운데 해양투기 및 매립이 금지되어 폐기물의 처리 및 재활용에 대한 연구가 국가적인 차원에서 시급한 실정이다. 국내 폐석고는 비료 공업에서 부산물로 발생하는 인산석고 (Phosphogypsum), 불산 제조 시 부산되는 불산Ⅱ형 무수석고, 화력발전소에서 발생하는 배연 탈황석고, 그 외 티타늄 공장에서 폐기물로 나오는 티탄 석고로 구분될 수 있다.

국내에서 탈황석고, 인산석고, 티탄석고 등을 포함한 부산석고의 발생량은 약 400만톤/년이며 이 중 화력발전소의 배연탈황석고는 약 180만톤이 발생되어 석고보드, 시멘트 원료 등으로 전량 소비되고 있으며, 인산비료 생산과정에서 발생하는 인

산석고는 약 200만톤/년 이상 발생되어 시멘트 원료, 석고보드, 비료용 등으로 인산석고 전체 발생량의 약 65 %인 130만톤/년 이 재활용되고 있다. 그러나 1997년 IMF 이후 국내 건설경기 의 침체로 석고소비량이 급감하고 중국산 저가 석고제품 사용 및 탈황석고 발생량의 증가 등으로 인산석고의 잉여량이 급격하게 증가하고 있다. 이에 따라 적치량도 크게 증가하여 2006년 기준으로 인산석고의 누적량은 약 1,948만톤에 이르고 있으며, 지속적으로 증가하는 추세이므로 인산석고의 재활용 방안 개발이 시급히 요청되고 있다 (Kim, 2010).

폐석고에 대한 국외연구로서 Blight (1969)는 인산석고를 토 목분야의 성토재료로 활용하기 위하여 물리·역학적 특성을 분석하였고, Wrench and Blight (1985)는 인산석고에 석회 (lime) 를 혼합하여 중성화 시킨 재료에 대하여 다짐특성, 투수특성, 압축강도특성, 전단특성을 분석한 결과, 중성화된 재료는 높은 압축성을 보이고 있는 것으로 보고하였다. Taha (1989)는 인산석고에 시멘트, 플라이애시를 혼합한 재료를 도로의 노상재 료로 활용하는 연구를 하였고, 그 후 Pericleous and Metcalf (1996)는 Taha (1989)의 연구를 보완하기 위하여 인산석고에 포틀랜드 시멘트를 혼합하여 노상재료로 적용하였으며, Petrukhin (1994)는 염토와 석고에 대한 역학적 특성을 분석하였다. 최근

* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6463

Fax: +82-33-251-6463

E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr

2011년 4월 22일 투고

2011년 5월 26일 심사완료

2011년 5월 30일 게재확정

에는 폐석고를 지반 개량 및 건설재료로 활용하기 위한 시도들이 활발하게 진행되고 있다 (Ahmed et al., 2011; Garg et al., 2011).

국내 연구로는 성토 매립재로 활용을 위한 고찰 (Oh et al., 2001; Lee et al., 2001; Kim et al., 2009), 벽돌, 블록과 같은 콘크리트 2차 제품으로 활용을 위한 검토 (Jo et al., 2000; Mun et al., 2006), 석고처리에 의한 염해토양의 제거 연구 (Koo, 1984) 등이 있으나 인산석고 활용성 제고를 위해서는 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

기존 연구들은 폐기물 처리 기술에 있어서 운송비를 간과하여 경제적 측면에서 실용성이 떨어지거나 건축용 재료로 실용화하기 위해 재처리해야 되기 때문에 시간과 경비가 더 소요되는 등의 문제점을 가지고 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 인산석고 재활용 공장을 현장에 설치하여 벽돌 또는 블록과 같은 건설자재를 생산하는 방식으로 폐기물의 고부가가치 자원화를 이룩함으로써 운송비에 대한 부담을 완화할 수 있는 방안을 고려해 볼 수 있을 것이다.

본 연구는 이러한 기초하에 진행되는 인산석고의 건설자재료의 활용을 위한 기초적 연구로서 인산석고 및 시멘트 혼합물에 따른 혼합토의 다짐 특성, 압축강도, 인장강도, 동결융해, 건습 특성, 미세구조 등의 분석을 통해 인산석고-시멘트 혼합토의 강도 및 내구 특성을 구명하고, 이를 통해 현장에서 인산석고 시멘트 혼합토를 건설재료로서 활용하는데 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 사용 재료

본 연구에 사용된 혼합토는 ○○대학교 인근 현장의 터파기 시 발생된 굴착토를 사용하였으며, 인산석고는 전남 여수시 소재 ○○화학 공장에서 발생하고 있는 폐석고를 채취하여 사용하였다.

Table 1 및 Fig. 1은 본 연구에 사용된 흙의 기본 물성 및 입도분포곡선을 나타내며, 골재는 0.074 m체 통과율이 11.9%, 균등계수는 13.6, 곡률계수는 1.0으로서 통일분류법에 의한 흙의 분류는 SW-SM으로 분류된다. 인산석고의 입도분포는 0.074 m체 통과율이 99.1%, 균등계수는 2.6, 곡률계수는 3.6이며, 통일분류법에 의해 ML로 분류된다. 시멘트는 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, Table 2~3은 각각 사용된 골재 및 시멘트의 역학적 특성과 화학적 성분을 나타낸다.

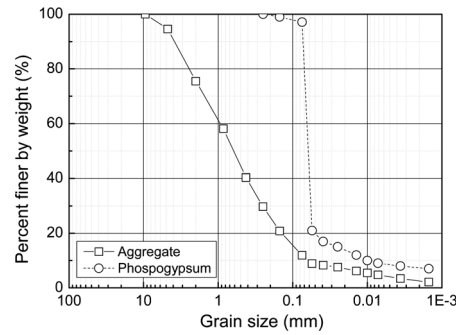


Fig. 1 Grain size distribution curve

Table 1 Physical properties of coarse aggregates

Type	Size (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M	Bulk density (kg/m ³)
Coarse	4.75~40	2.73	1.36	6.77	1,592
	0.15~4.75	2.66	1.62	6.54	1,559

Table 2 Mechanical properties of normal portland cement

S.G	Setting time (h-min)		Compressive strength (MPa)		
	Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	5-7	7-20	19.4	21.6	32.3

Table 3 Chemical compositions of portland cement and phosphogypsum (Unit: %)

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
Cement	21.09	4.84	63.85	3.32	3.09	1.13	0.29	2.39	-	-
Phosphogypsum	2.59	0.25	37.17	0.02	-	0.13	0.01	0.12	0.02	0.74

2. 배합설계 및 제작

가. 배합

인산석고 시멘트 혼합토의 배합 설계는 Lee et al. (2001)의 연구를 참고하여 최적 배합 조건을 찾기 위해 토질역학 분야에서 주로 사용되는 혼합토의 전체 중량에 대한 중량비로 결정하였으며, Table 4에 나타난 바와 같이 시멘트는 10%, 인산석고는 10, 20, 30, 40%를 혼입하는 네 가지 조건으로 하여 시험을 수행하였다.

Table 4 Mix designs of phosphogypsum cement soil mixtures (Unit: %)

Aggregate	Cement	Phosphogypsum	Remarks
80	10	10	
70		20	
80		30	
50		40	

나. 다짐

각 시료의 최적함수비 및 최대건조밀도 산출을 위한 다짐은 $\phi 50 \times 100$ mm 몰드용 다짐봉에 의한 다짐방법에 의해 실시하였으며, 강도 측정을 위한 공시체 제작 시에도 동일함 방법으로 다짐시험을 수행하였다.

다. 공시체 제작

다짐시험에서 산출된 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 하여 수량 및 물량을 산정한 후 다짐 시험과 동일한 수준의 다짐에너지를 나타낼 수 있도록 $\phi 50 \times 100$ mm 몰드에 재료를 투입하고 3층으로 나누어 다짐을 실시하였다. 재령에 따른 강도 특성을 구명하기 위하여 재령 3, 7일 및 28일 동안 양생을 실시하였다.

3. 시험방법

가. 일축압축강도 시험

일축압축강도시험은 KS F 2314 (흙의 일축 압축 시험 방법)에 준하여 재령 3, 7일 및 28일에 $\phi 50 \times 100$ mm인 공시체를 일축압축시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하였다.

나. 인장강도 시험

인장강도시험은 KS F 2423 (콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험 방법)에 준하여 재령 3, 7일 및 28일에 $\phi 50 \times 100$ mm인 공시체를 일축압축시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하여 측정하였다.

다. 동결융해 시험

동결융해 시험은 KS F 2332 (다져진 흙 시멘트 혼합물의 동결 융해 시험 방법)에 준하여 공시체를 성형한 후에 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 -23 °C 보다 높아지지 않는 동결개비닛에 24시간의 동결과 온도 21 °C, 상대습도 100 %인 습윤 양생실에서 24시간동안 융해하기를 12주기 반복하여 다음의 (1)식에 의해 흙-시멘트 손실량을 측정하였다.

$$\text{흙 시멘트의 손실율 (\%)} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

여기에서, A: 처음에 계산된 노 건조 질량에서 최종 수정된 노 건조 질량을 뺀 값, B: 처음에 계산된 노 건조 질량

라. 건습 시험

건습시험은 KS F 2330 (다져진 흙 시멘트 혼합물의 습윤 및

건조 시험 방법)에 준하여 공시체를 성형한 후에 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 5시간의 수침과 42시간동안 71 °C의 건조로에서 건조하기를 12주기 반복하여 동결융해시험과 동일한 방법으로 흙-시멘트 손실량을 측정하였다.

마. SEM

혼합토의 수화특성을 분석하기 위하여 재령 0일 및 7일된 공시체에서 샘플을 채취하여 주사전자현미경 (scanning electronic microscope, SEM)을 이용하여 수화생성물의 형태 및 분포를 비교하였다.

바. EDS 및 XRD

혼합토의 수화특성을 분석하기 위하여 재령 0일 및 7일된 공시체에서 샘플을 채취하여 에너지 분산법 (Energy dispersive spectroscopy, EDS) 및 X-선 회절분석법 (X-ray diffraction, XRD)을 이용하여 수화생성물의 구성성분을 확인하였다.

사. 용출시험

인산석고 시멘트 혼합토의 환경적 영향 분석을 위해 재령 0일 및 28일된 공시체에서 샘플을 채취하여 국내 폐기물공정시험법에 따른 용출시험을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

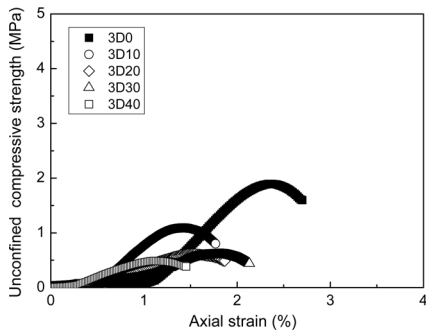
1. 압축 및 인장강도 특성

가. 인산석고 혼합물에 따른 강도 특성

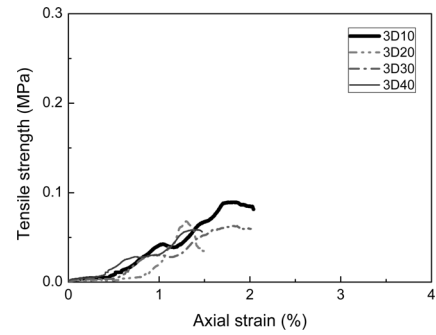
인산석고의 혼합률에 따른 일축압축강도 및 인장강도의 영향을 분석하기 위하여 시멘트비를 10 %로 일정하게 고정시킨 다음 인산석고의 혼합률을 10, 20, 30, 40 %로 달리하여 공시체를 만든 후 일축압축 및 인장강도시험을 실시하였다.

Fig. 2는 인산석고 혼입율에 따른 혼합토의 압축강도-변형률 곡선을 나타내며, 인산석고를 혼입하지 않은 경우 (시멘트 10 % + 흙 90 %)와의 비교를 위해 Kim and Kim (2010)의 연구 결과의 일부를 인용하여 함께 도시하였다.

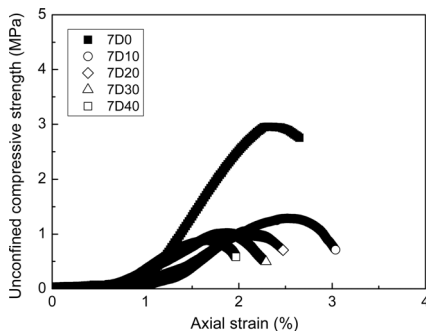
Fig. 2에서 보는 바와 같이 인산석고 시멘트 혼합토는 인산석고 혼합률에 관계없이 인산석고를 혼입하지 않은 경우 즉 시멘트 혼합토 보다 압축강도가 작은 경향을 나타내었다. 인산석고를 혼입하지 않은 시멘트 혼합토의 경우 28일 강도가 4.48 MPa 이나 인산석고 10, 20, 30, 40 % 혼입에 따라 인산석고 시멘트 혼합토의 압축강도는 각각 1.09, 0.61, 0.60, 0.49 MPa로서 강도가 저하됨을 알 수 있다. 이는 인산석고의 혼입율이 높아질수록 인산석고가 시멘트와 반응하지 못하고 경화체 내부에



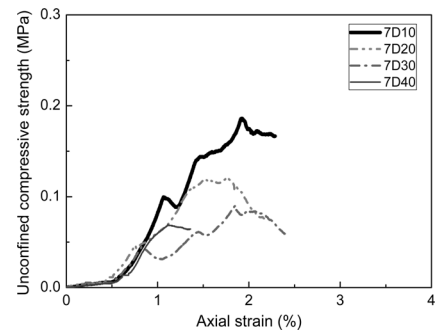
(a) 3 days



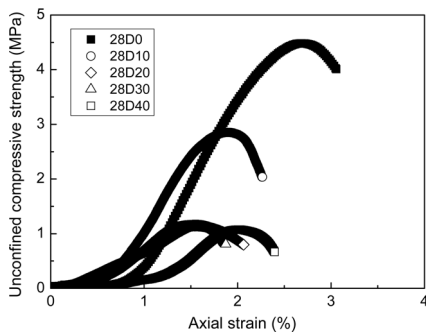
(a) 3 days



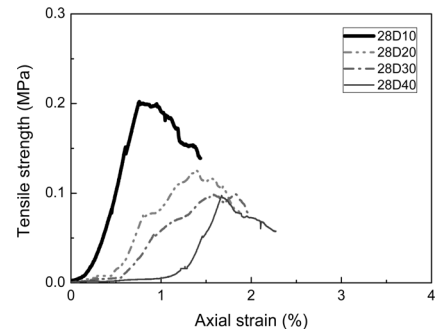
(b) 7 days



(b) 7 days



(c) 28 days



(c) 28 days

Fig. 2 Unconfined compressive strength vs. axial strain

Fig. 3 Tensile strength vs. axial strain

석고 자체 그대로 존재하며 시멘트의 수화반응을 방해하기 때문으로 판단된다.

따라서 시멘트만을 바인더로 사용한 경화체에 강도를 증진하기 위해서는 많은 양의 인산석고 혼입은 곤란한 것으로 판단된다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 인산석고 혼입률이 20%를 넘어서게 되면 강도 값이 거의 비슷한 양상을 띠고 있다. 따라서 인산석고의 재활용 촉진 및 강도 증진을 위해서는 시멘트 이외의 바인더가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 인산석고 혼입율에 따른 혼합토의 인장강도-변형률 곡선을 나타내며, 재령에 따라 다소 강도 차이를 나타내나 그

차이는 미미함을 볼 수 있다.

Table 5는 정량적 분석을 위해 압축 및 인장강도 최대 값을 수치로 나타낸 것으로 3일 강도를 기준으로 했을 때 7일 및 28일 압축강도는 1.18~1.88배 및 1.88~2.62배를 나타내었다. 또한, 7일 및 28일 인장강도는 1.17~2.38배 및 1.67~2.50배를 나타내었다.

나. 재령에 따른 강도 특성

Fig. 4는 양생일수의 영향을 검토하기 위해 재령 3일 및 7일, 28일에 대한 인산석고 함유 비율에 따른 압축 및 인장강도를

Table 5 The list of peak strength and strength ratio

Items P-gypsum	Days	Compressive strength			Tensile strength		Strength ratio
		Peak (MPa)	Strain (%)	Strength ratio	Peak (MPa)	Strain (%)	
10 (%)	3	1.09	1.41	1.00	0.08	1.76	1.00
	7	1.29	2.52	1.18	0.19	1.92	2.38
	28	2.85	1.88	2.62	0.20	0.76	2.50
20 (%)	3	0.61	1.50	1.00	0.06	2.02	1.00
	7	1.04	2.06	1.70	0.12	1.76	2.00
	28	1.15	1.55	1.89	0.13	1.39	2.17
30 (%)	3	0.60	1.80	1.00	0.06	1.80	1.00
	7	0.99	1.85	1.65	0.09	1.85	1.50
	28	1.13	1.55	1.88	0.10	1.82	1.67
40 (%)	3	0.49	1.12	1.00	0.06	1.58	1.00
	7	0.88	1.64	1.80	0.07	1.12	1.17
	28	1.08	2.01	2.20	0.10	1.67	1.67

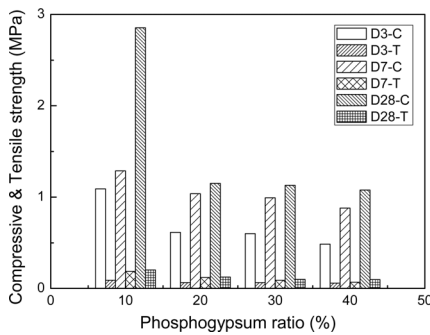


Fig. 4 Compressive and tensile strength distribution with curing ages

나타낸 것이다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 인산석고 혼합률이 커질수록 강도는 작아지나 일정 한계인 10~20 % 사이를 넘어서게 되면 강도가 거의 같아지게 됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 인산석고 혼합률이 작을 때에는 시멘트의 수화 작용이 강도에 작용하는 역할이 커지게 되지만 인산석고 혼합률이 커지게 되면 시멘트와의 수화작용이 흙 보다는 수월하지 못하게 되어 상대적으로 시멘트의 수화 작용의 역할이 줄어들게 되는 것으로 판단된다.

Table 6은 재령에 따른 압축강도 및 인장강도와 28일 강도 값으로 나눈 강도비를 함께 표시한 것으로 압축강도의 경우 3일 강도는 28일 강도의 38~53%를 기록하고 있다. 7일 강도는 45~90%를 나타내며 인산석고의 혼합률이 높을수록 3일 강도 및 7일 강도 값이 높게 나타남을 알 수 있다. 인장강도의 경우 3일 강도는 28일 강도의 44~63%를 기록하고 있으며, 7일 강도는 71~96% 정도임을 알 수 있다. 한편, 인산석고 시멘트

Table 6 The list of compressive and tensile strength ratio

Items P-gypsum (%)	Compressive strength (MPa)					Tensile strength (MPa)					Strength ratio Tensile/compressive
	3 days	7 days	28 days	3/28	7/28	3 days	7 days	28 days	3/28	7/28	
10	1.09	1.29	2.85	0.38	0.45	0.09	0.19	0.20	0.44	0.92	0.07
20	0.61	1.04	1.15	0.53	0.90	0.06	0.12	0.13	0.50	0.96	0.11
30	0.60	0.99	1.13	0.53	0.88	0.06	0.09	0.10	0.63	0.91	0.09
40	0.49	0.88	1.08	0.45	0.82	0.06	0.07	0.10	0.60	0.71	0.09

혼합토의 인장강도는 압축강도의 7~11 % 수준인 것으로 나타났다.

2. 동결융해 및 습윤건조 특성

Fig. 5는 동결융해 사이클에 따른 인산석고 시멘트 혼합토의 손실량과 인산석고 혼합률과 관계를 나타낸 것이다. 인산석고 혼합을 10, 20, 30, 40 %에 따른 동결융해 실험 결과 손실율은 각각 0.877, 1.146, 2.151, 3 %이었으며, 건습시험 후 손실율은 각각 1.356, 1.441, 2.266, 3.438 %로 나타났다. 인산석고 혼합률이 클수록 손실률도 커지는 경향을 보였는데, 인산석고 시멘트 혼합토의 동결융해 및 건습시험에서는 시멘트의 수화작용의 역할이 중요하게 작용함을 반증하는 것이라 할 수 있다. 특히 할 만 한 점은 인산석고 혼합률이 20 %일 때를 경계로 하여 동결융해 및 건습시험 모두 많은 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

여러 문헌에 따르면 10~15 %인 이하의 손실율은 12회 동결융해 사이클 후 표면에 가까운 흙의 강도에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 알려져 있어 (Chamberlain et al., 1990), 본 실험 결과 인산석고 시멘트 혼합토는 건설재료로서 사용하는데 있어 동결융해 및 건습 저항을 확보한 것으로 판단된다. 다만 인산석고 및 시멘트 혼합토를 현장에서 활용할 때에는 인산석고 혼합률은 현장 여건에 따라 적절히 조정하여야 할 것이다.

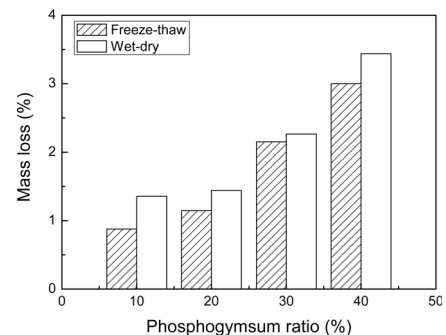


Fig. 5 The results of freeze-thaw test and wet-dry test

3. 미세구조 특성

Fig. 6 및 Fig. 7은 인산석고 10 % 및 40 %가 혼합된 인산석고 시멘트 혼합토에 대한 재령 0일 및 7일 시료에 대하여 주사전자현미경 (SEM, S-4300 Hitachi)에 의해 10,000배로 측정된 재료 내부의 미세 구조를 나타낸 것이다. 샘플 표면의 SEM 분석 결과 재령 7일에서 시멘트 수화에 의하여 수화 생성물이 생성된 것을 볼 수 있으며, 인산석고 혼합비 40 %보다 10 %의 경우에서 침상의 에트린자이트 생성이 더 확연함을 알 수 있다.

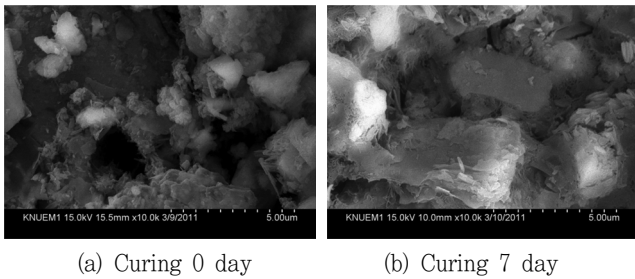


Fig. 6 SEM analysis (phosphogypsum ratio 10 %)

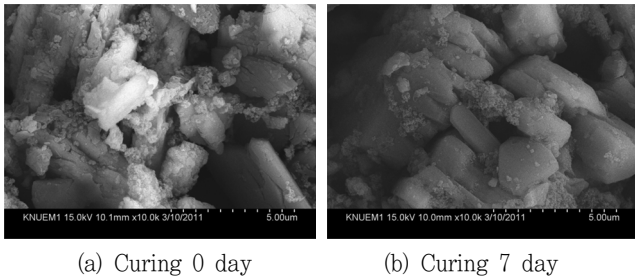
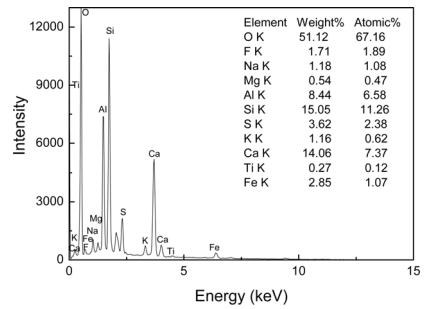


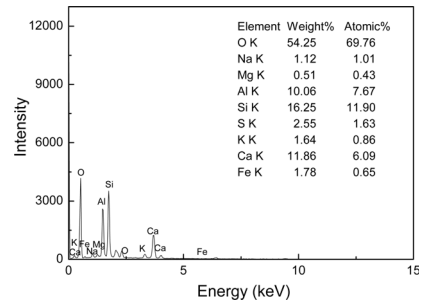
Fig. 7 SEM analysis (phosphogypsum ratio 40 %)

Fig. 7에서는 다수의 인산석고 결정을 확인할 수 있는데 비해 Fig. 6에서는 그다지 많이 찾아볼 수 없음을 인산석고 혼합률과 일맥상통한다 할 수 있다. 일반 콘크리트의 경우 시멘트의 혼입량이 많기 때문에 다량의 수화생성물이 형성되는 반면, 시멘트 혼합토 재료의 경우 시멘트의 혼입량이 상대적으로 적기 때문에 혼합토의 간극에 채워진 시멘트의 수화에 의해 소량의 수화생성물이 형성되고 간극을 충전하는 것으로 판단된다 (Kellsen, 1996). 시멘트에 의하여 생성된 수화생성물은 흙과의 결합력을 증가시킬 뿐만 아니라 강도 증진에 기여하는데 Fig. 2 및 Fig. 3에서 살펴 본 바와 같이 인산석고를 적게 혼합할수록 강도가 크게 되는데 이러한 원인에 대해서 Fig. 6 및 Fig. 7은 잘 설명해 준다고 할 수 있다.

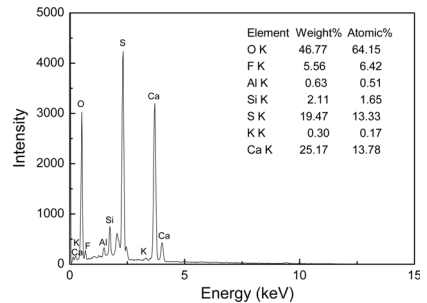
보다 정량적인 분석을 위해 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타난 바와 같이 SEM 분석을 수행한 시료에 대하여 EDS 분석과 XRD 분



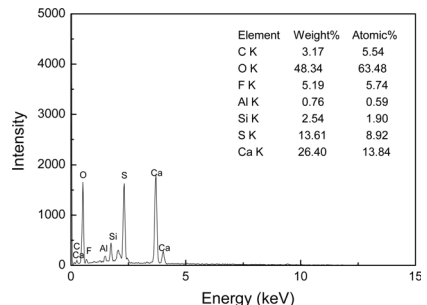
(a) Phosphogypsum ratio 10 % (refer to Fig. 6 (a) curing 0 day)



(b) Phosphogypsum ratio 10 % (refer to Fig. 6 (a) curing 7 day)

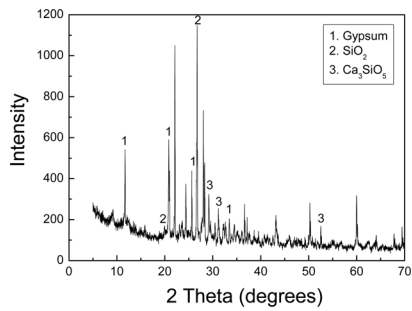


(c) Phosphogypsum ratio 40 % (refer to Fig. 7 (a) curing 0 day)

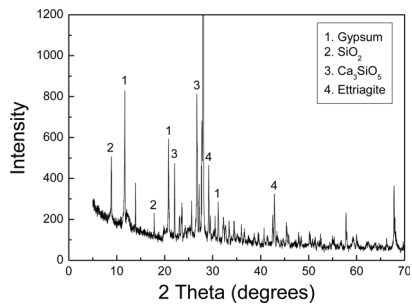


(d) Phosphogypsum ratio 40 % (refer to Fig. 7 (b) curing 7 day)

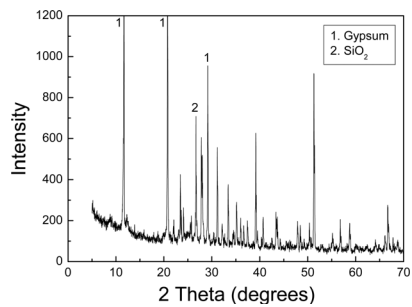
Fig. 8 EDS spectrum of the Phosphogypsum-cement-soil mixtures



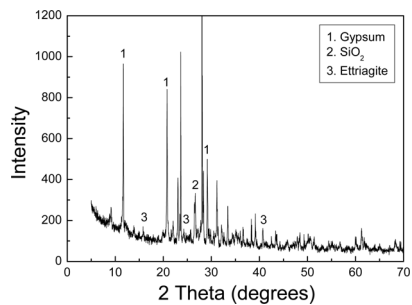
(a) Phosphogypsum ratio 10 %
(refer to Fig. 6 (a) curing 0 day)



(b) Phosphogypsum ratio 10 %
(refer to Fig. 6 (a) curing 7 day)



(c) Phosphogypsum ratio 40 %
(refer to Fig. 7 (b) curing 0 day)



(d) Phosphogypsum ratio 40 %
(refer to Fig. 7 (b) curing 7 day)

Fig. 9 XRD diagram of the Phosphogypsum-cement-soil mixtures

석을 수행하였다. Fig. 8은 인산석고 혼합률 10 %와 40 % 시료에 대하여 EDS 분석을 수행한 것을 나타낸 것으로 인산석고 혼합률 10 %의 경우에는 O와 Si, Ca가 주성분인데 비해 인산석고 혼합률 40 %의 경우에는 O와 Ca, S가 주성분임을 알 수 있다. 인산석고 혼합률이 10 %인 경우 Na, Mg, Fe 등이 검출되었으나 혼합률 40 %의 경우에는 검출되지 않아 다소 구성 성분에 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 7일 경과 후의 수화 생성물 확인을 위해 XRD 분석을 수행한 결과를 나타낸 것으로 인산석고 혼합률 10 % 및 40 % 모두 gypsum 및 SiO₂가 주성분으로 나타났으며 7일 경과 후 Ettringite가 생성 되었음을 확인할 수 있다. 다만 인산석고 10 %의 경우가 Ettringite 생성이 더 확연하며 인산석고 혼합률 40 %의 경우에 규산칼슘 수화물 생성이 미미함을 알 수 있다.

4. 환경적 영향 분석

폐기물 중에 함유되어 있는 유해물질은 우수 및 기타 침투수에 의해 폐기물로부터 용출되어 지하수 및 침출수의 오염부하를 가중시킬 수 있다. 용출시험은 이러한 특성을 평가하는 방법으로 널리 사용되며, 유해폐기물과 유해성이 없는 폐기물을 구별하는 기준으로 이용되기도 한다.

본 연구에서 용출시험은 국내 폐기물공정시험법에 의하여 인산석고 시멘트 혼합토에 대하여 용출시험을 실시하였으며, ○○대학교 공동실험실습관의 기자재를 활용하였다. 시료는 인산석고 혼합비 40 %인 혼합토의 재령 0일과 28일 두 시료를 대상으로 시험을 실시하였다.

인산석고 시멘트 혼합토에 발생하는 침출수 분석 결과, Table 7에서 보는 바와 같이 두 시료 모두 수질환경보전법에서 요구하는 항목을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 인산석고 시멘트 혼합토는 환경적 영향이 미미한 것으로 볼 수 있으며 건설 재료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 7 Results of leaching test for phosphogypsum-cement-soil mixtures

Method \ Item		Cd (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)	Hg (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	P (ppm)
KSM of WMA (mg/l)	Standard	0.3	3	1.5	0.05	1.5	3	1
	0 Day	0.008	0.012	N.D.	0.006	0.08	0.004	0.011
	28 Day	0.004	0.005	N.D.	0.004	0.075	0.018	N.D.

N.D.: Not Detected

IV. 결 론

본 연구에서는 인산석고 혼입율에 따른 인산석고 시멘트 혼합

토의 압축강도, 인장강도, 동결융해, 건조 특성, 미세구조 분석, 용출시험 등의 분석을 통해 인산석고 시멘트 혼합토의 강도 및 환경적 특성을 구명하고자 하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 인산석고 시멘트 혼합토는 인산석고 혼합비율이 증가함에 따라 압축강도 및 인장강도는 감소하는 경향을 나타냈으며, 인산석고 혼합률이 20 % 이상일 때 강도 감소율은 급격히 줄어드는 것으로 나타났다
2. 인산석고 혼합률이 10~40 %인 인산석고 시멘트 혼합토의 7일 강도는 28일 강도의 45~90 %를 나타내며, 인장강도는 71~96 % 정도인 것으로 나타났다.
3. 인산석고 시멘트 혼합토는 시멘트 혼합토에 비해 28일 강도 기준으로 25% 수준에 미치지 못하는 것으로 나타났으며 이는 인산석고의 혼합율이 높아질수록 인산석고가 시멘트와 반응하지 못하고 경화체 내부에 석고 자체 그대로 존재하며 시멘트의 수화반응을 방해하기 때문으로 판단된다.
4. 동결융해 및 건조 습윤시험 결과 인산석고의 혼합율이 10, 20, 30 40 %인 경우 모두 4 % 이하로 나타나 동결융해 및 건조 습윤 저항성을 확보한 것으로 나타나 인산석고 혼합이 동결융해 및 건조 습윤에 대한 저항력 증진에 일정 정도 역할을 담당하는 것으로 나타났다.
5. 현장에서 시멘트만을 바인더로 사용한 경화체에 강도를 증진하기 위해서는 많은 양의 인산석고 혼입은 곤란한 것으로 판단되며, 인산석고의 재활용 촉진 및 강도 증진을 위해서는 시멘트 이외의 바인더가 추가적으로 필요한 것으로 사료된다.

이 논문은 강원대학교 공동실험실습관의 장비 (SEM) 지원과 농업생명과학연구소의 기자재 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Ahmed, A., K. Ugai, and T. Kamei, 2011. Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials* 25: 208-217.
2. Blight, G. E., 1969. Waste gypsum as an embankment material. *Proc. of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 39-43.
3. Chamberlain, E. J., I. Iskveer, and S. E. Hunsiker, 1990. Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils. *Proceedings International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural Range and Forest Lands* 145-155. Spokane, WA.
4. Garg, M., A. K. Minocha, and N. Jain, 2011. Environment hazard mitigation of waste gypsum and chalk: Use in construction materials. *Construction and Building Materials* 25: 944-949.
5. Jo, B. W., Y. J. Kim, and E. M. Hwang, 2000. The study on the development of construction materials with chemical by-product gypsum. *Proc. of the Korean Concrete Institute Conference* 351-354 (in Korean).
6. Kellsen, K. O., 1996. Heat curing and post-heat curing regimes of high-performance concrete: influence on microstructure and C-S-H composition. *Cement and Concrete Research* 26(2): 295-307.
7. Kim, Y. I., and Y. S. Kim, 2010. Unconfined compressive strength and micro-structure properties of CSG materials due to specimen size. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(4): 93-101 (in Korean).
8. Kim, Y. S., D. E. Suh, W. B. Kim, and W. B. Lee, 2009. Engineering characteristics of the light weight soil using phosphogypsum and EPS beads. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 10(6): 19-25.
9. Kim, W. B., 2010. Geotechnical characterization of artificial aggregate made from phosphogypsum as a drainage material. Thesis for the Degree of Master, Gwangju: Chonnam National University.
10. Koo, J. W., 1984. A Laboratory study for reclamation of salt-affected soils by gypsum amendment and water management practices. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 26(2): 85-96 (in Korean).
11. Lee, Y. S., H. S. Chung, and H. I. Chung, 2001. The engineering and environmental properties for utilization of phosphogypsum as embankment materials. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 17(4): 331-339 (in Korean).
12. Mun, K. J., W. K. Hyung, W. C. Park, S. Y. So, and Y. S. Soh, 2006. The strength properties of cement matrix containing high-volume wasted phosphogypsum with binder types. *Proc. of the Korean Concrete Institute Conference* 881-884 (in Korean).
13. Oh, Y. I., K. I. Kim, and E. C. Shin, 2001. Geotechnical characteristics and environmental effect of reclaimed

- land by utilizing waste gypsum. *The KSCE Journal of Civil Engineering* 21(1C): 19-26 (in Korean).
14. Pericleous, M. I., and J. B. Metcalf, 1996. Resilient modulus in civil engineering. *Journal of Materials in Civil Engineering* 8(1): 7-10.
15. Petrukhin, V. P., 1994, Gypsum and Saline Soils. *Proc. of the Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 265-266.
16. Taha, R., 1989. Utilization of by-product gypsum in road construction. Doctor of Philosophy Dissertation, Texas A&M University.
17. Wrench, B. P., and G. E. Blight, 1985. Compressibility of neutralized phosphogypsum. *Proc. of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 3: 1321-1326.