

성토재료로서 인산석고의 공학적 · 환경적 특성

The Engineering and Environmental Properties for Utilization of Phosphogypsum as Embankment Materials

이 용 수*1 Lee, Yong-Soo
정 형 식** Chung, Hyung-Sik
정 하 익** Chung, Ha-Ik

Abstract

Phosphogypsum is a by-product obtained from the phosphoric acid process for manufacturing fertilizers. It consists mainly of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and contains some impurities such as P_2O_5 , F^- , and organic substances. The annual world production of this material is up to 180 million tons and is expected to reach up to 380 million tons, and was up to 1.57 million tons in Korea. The object of this paper is to analyze some of the physical and environmental properties of phosphogypsum when used as embankment materials. Geotechnical and environmental laboratory tests including sieve analysis, gravity test, compaction test, pH test and leaching test are performed for various mixing ratios between phosphogypsum and granite soil. The results of physical and environmental laboratory tests for mixed specimens with phosphogypsum are shown to be environmentally safe, and the mixture can be used as embankment materials.

요 지

인산석고(phosphogypsum)는 비료생산과정에서 발생하는 산업부산물로, 주요구성성분은 이수석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)의 성분이 대부분이고 여기에 인(P_2O_5), 철(F)와 유기물질 등으로 이루어져있다. 전세계적으로 인산석고 발생량은 현재 1억8천만톤이고 향후 약 3억8천만톤 발생될 것으로 추정되며, 국내에는 약 157만톤이 발생되고 있다. 본 연구는 성토재료로 인산석고를 활용할 경우 이에대한 물리적 환경적 특성을 분석하였다. 이를 위하여 인산석고와 화강토 혼합비율에 따른 입도분석, 비중시험, 다짐시험, CBR시험, pH시험 및 용출시험 등 일련의 실험을 실시하였다. 실험결과, 인산석고 혼합재료를 성토재료로 활용할 경우 환경적으로 유해한 영향이 적으며, 산업부산물의 자원화 차원에서 대체 성토재료로 활용이 가능한 것으로 나타났다.

Keywords : Embankment material, Phosphogypsum, Recycling, Waste gypsum

1. 서 론

인산석고(phosphogypsum)는 비료생산과정에서 발생하는 산업부산물로, 주요구성성분은 이수석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)의 성분이 대부분이고 여기에 인(P_2O_5), 철(F)와 유기물질 등으로 이루어져있다. 인산석고는 자연적인

발생원과 인위적인 발생원으로 구분하는데, 자연적인 발생원은 정확하게 알려져 있지 않은 상태이다. 다만 인위적인 발생원은 산업공정에서 발생하는 것과 환경 오염방지 공정에서 발생하는 것으로 알려져 있다.

인산석고는 인산제조과정에서 인광석 1톤에서 석고 부산물이 4.5~5.5톤 발생되고 있다. 현재 인산석고는

*1 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*2 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수
*3 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

15,000만톤정도 발생되고 있다. 인산(phosphoric acid, P_2O_5)과 인산석고는 1970년부터 2000년까지 매년 15%씩 증가하는 것으로 추정하고 있다(Chang, 1990). 특히, 비료생산과정에서 발생하는 인산석고는 미국의 플로리다주에서 1990년 3,700만톤/년 발생되고 있으며, 루이지애나주에서는 860만톤/년이 발생되고 있다. 남아프리카(South Africa)에서는 36만톤~48만톤/년이 발생되고 있으며, 국내는 1999년 현재 약 157만톤/년이 발생되고 있다.

인산석고의 활용 연구로 Blight(1969)는 남아프리카의 인산공장에서 발생하는 석고에 대하여 투수특성, 압밀특성, 전단강도를 분석하여 폐기물 매립장에 쌓여있는 석고 매립장의 안정성을 분석하였고, 또한 이를 성토재료로 활용하기 위하여 석고의 물리적 역학적 특성을 분석하였다. 분석결과, 대상 시료의 입경은 200번체 통과량이 75~85%이고 비소성(NP)으로 실트 크기의 결정체로 나타났으며, 압밀체적 변화비는 이차압밀특성을 갖는 유효응력의 형태로 나타났고 석고의 압밀계수(C_v)는 $0.3\text{cm}^2/\text{sec}$, 투수계수(k)는 $2 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{sec}$ 로 분석하였다. Wrench와 Blight(1985)가 남아프리카의 인산제조과정에서 발생하는 인산석고에 석회(lime)를 혼합하여 중성화시킨 재료에 대하여 다짐특성, 투수특성, 압축강도 특성, 전단특성을 분석하였다. 그 결과, 중성화된 재료는 높은 압축성을 보이고 있는 것으로 나타났다.

Taha(1989)는 인산석고에 시멘트, 플라이애쉬를 혼합한 재료를 도로의 노상재료로 활용하는 연구를 하였다. 그 결과, 인산석고만으로는 노상재료로 충분하지 않은 것으로 나타났다. 그 후 Pericleous와 Metcalf(1996)는 Taha(1989)의 연구를 보완하기 위하여 인산석고에 포트랜드 시멘트를 혼합하여 노상재료로 적용하였다. 이들의 연구에서는 포트랜드 시멘트로 처리된 인산석고가 고밀도를 가지며, 회복탄성계수도 높은 것으로 나타났고, 시멘트의 혼합비도 4%에서 12%로 혼합하는 것이 경제적인 것으로 나타났다.

국내에서는 오영인, 김광일, 신은철(2001)이 폐석고의 성토매립재 활용 연구를 하였으며, 이 연구에서는 티타늄제조과정에서 발생하는 폐석고와 준설토 혼합비율에 따른 지반공학적 특성과 환경적 특성을 분석하였다. 연구결과, 폐석고가 매립성토재료로써 활용할 수 있으며, 환경적으로 안정한 것으로 보고하고 있다.

따라서, 본 연구는 인산비료제조과정에서 발생하는 인산석고가 성토재료로 적합한지에 대하여 공학적 특

성과 환경적 특성을 분석하였다. 인산석고 혼합재료에 대하여 공학적 특성시험은 입도분석시험, 비중시험, 다짐시험, CBR시험 등과 환경특성시험은 pH, 용출시험 등의 일련의 실내시험을 실시하였다. 이는 산업부산물 재활용 차원에서 인산석고를 성토재료로 활용할 수 있다면, 현재 막대하게 투여되는 일반토사 및 쇄석을 다소 줄일 수 있으며, 또한 산업부산물이 단순한 폐기물이 아니라 새로운 자원의 발생원으로 경제적 가치를 얻을 수 있을 것이다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 시료는 비료생산과정에서 발생된 산업부산물인 인산석고로, 이는 흔히 주변에서 볼 수 있는 자연적인 석고의 광물조성성분($CaSO_4$)과 거의 비슷하다. 단지 자연적인 석고와 다른 점은 수용성 불화물(water-soluble fluoride)과 인(P_2O_5)을 포함하고 있으며 특히, 인(P_2O_5)은 석고결정 격자형으로 치환되어 있다. 인산석고는 산업부산물로 재활용하려면, 폐기물관리법에 의하면 일반토사를 70%이상 혼합 사용하도록 하고 있다. 화강풍화토는 우리나라의 어디서든지 볼 수 있는 흙으로, 사용한 화강풍화토는 경기도 OO지역에서 채취한 시료를 사용하였다.

2.2 실험방법

인산석고가 성토재료로 적합한지에 대한 판단을 하기 위하여, 인산석고와 화강풍화토에 대하여 공학적 특성분석을 실시하였다. 또한, 화강풍화토에 인산석고를 10%, 20%, 30%까지 일정하게 혼합하였다.

인산석고를 성토재료로 활용하기 위해서는 한국토지공사 품질관리지도서(1994), 도로공사 시방서(1996)과 도로설계편람(2000)에서 제시한 흙의 다짐시험(KS F 2312) A 또는 B 방법에 의한 최대건조밀도 90%이상의 밀도가 되도록 다짐하는 사항과 다짐후 밀도가 $1.5\text{t}/\text{m}^3$ 이상인 재료를 사용하는 사항 그리고 최대입경 150mm 이하인 재료를 요구하고 있다. 따라서, 입도분석시험(KS F 2302), 다짐시험(KS F 2312), 비중시험(KS F 2308), 액성한계시험(KS F 2303), 소성한계시험(KS F 2304) 등의 기본특성시험과 실내 CBR시험(KS F 2320)

을 실시하였다. 특히, CBR시험은 화강풍화토와 인산석고의 혼합방법을 층별방법과 혼합방법 조건에 대하여 실시하였다.

인산석고는 산업부산물로 화강풍화토와 인산석고의 혼합재료에 대한 pH시험(KS F 2103)과 용출시험을 실시하였다. 용출시험은 국내 폐기물관리법 및 미국 RCRA의 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure)와 장기용출시험(Continuous Column Leaching Test)을 실시하여 발생하는 침출수를 분석하였다. 또한, 인산석고 활용에 따른 주변토양에 미치는 영향을 분석하기 위하여 토양오염공정시험법에 의한 용출시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인산석고와 화강풍화토의 기본 물리적 특성

표 1은 실험대상 재료인 인산석고와 화강풍화토의 화학적 구성성분을 나타내고 있다. 표 1에 의하면 인산석고의 주요성분은 CaO 37.17%, SiO₂ 2.59%로 전체 약

39.76%로 나타났으며, 전체 함량의 약 50%는 황산염(sulfate, SO₄)으로 나타났다. 화강풍화토의 주요성분은 SiO₂ 61.51%, Al₂O₃ 19.38%, Fe₂O₃ 7.48%로 전체 구성성분의 약 88.37%를 차지하고 있다.

표 2는 인산석고와 화강풍화토의 물리적 특성을 나타내고 있다. 인산석고와 화강풍화토의 입도분포의 결과를 살펴보면, 인산석고의 최대입경은 0.25mm, 화강풍화토는 9.5mm이고, 0.074mm 통과량은 인산석고가 97.14%, 화강풍화토는 47.67%로 나타났다. 인산석고의 균등계수와 곡률계수는 3.59와 2.61, 화강풍화토의 균등계수와 곡률계수는 16.67과 0.77로 나타났다. 연경도를 살펴보면, 인산석고는 비소성이고, 화강풍화토는 액성한계 27.2%, 소성지수 7.66으로 나타났다. 비중은 화강풍화토가 2.64, 인산석고가 2.45이고, 흙의 통일분류법에 의하면, 인산석고는 ML이고, 화강풍화토는 SC로 분류된다. 한편, 미국의 플로리다와 남아프리카 인산석고의 특성을 살펴보면, 0.074mm체 통과량이 대략 75~85%이고, 액소성한계는 비소성이며, 비중은 2.27~2.40 정도로 국내 인산석고와 유사함을 알 수 있다.

표 1. 인산석고와 화강풍화토의 화학성분

구성	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I	합계
화강 풍화토	0.21	61.51	19.38	7.48	0.99	0.08	0.97	3.95	0.24	0.13	5.06	99.99
인산석고	37.17	2.59	0.25	0.12	0.02	0.00	0.02	0.04	0.01	0.74	5.72	46.68*

L.O.I : Loss on Ignition

* 전체 함량중 53.32%는 황산염(SO₄)임.

표 2. 인산석고와 화강풍화토의 기본특성

구분	인산석고	화강풍화토	FLPG	SFPG
입도분포	최대입경, mm	0.25	9.5	-
	4.76mm체 통과량, %	100	95.01	100
	0.074mm체 통과량, %	97.14	47.67	82
	D ₁₀ , mm	0.017	0.012	0.01
	D ₂₀ , mm	0.044	0.03	0.018
	D ₃₀ , mm	0.052	0.043	0.024
	D ₆₀ , mm	0.061	0.2	0.05
	균등계수, Cu	3.59	16.67	5.0
연경도	곡률계수, Cg	2.61	0.77	1.15
	액성한계, LL %	-	27.20	-
	소성한계, PL %	NP	19.56	NP
흙의 분류	소성지수, PI %	NP	7.66	NP
	통일분류	ML	SC	ML
비중	비중	2.452	2.642	2.35
				2.27~2.40

FLPG : Florida Phosphogypsum(chang, 1990)

SFPG : South Africa Phosphogypsum(Blight, 1969; Wrench & Blight, 1985)

3.2 인산석고 혼합비율에 따른 다짐밀도의 변화

인산석고 혼합비율에 따른 다짐특성을 분석하기 위하여 화강풍화토에 인산석고를 10%, 20%, 30% 혼합하여 A다짐과 D다짐을 실시하였다. 표 3은 인산석고와 화강풍화토 그리고 인산석고를 화강풍화토에 일정한 비율로 혼합한 재료에 대한 A와 D 다짐시험결과이며, 그림 1은 인산석고 혼합비율에 따른 다짐방법별 최대건조밀도의 변화를 나타낸 것이며, 그림 2는 인산석고 혼합비율에 따른 다짐방법별 최적함수비의 변화를 도시한 것이다. 표 3에 의하면, A다짐에서 인산석고의 최대건조밀도는 1.316g/cm³, 최적함수비 25.74%로 나타났으며, 화강풍화토의 최대건조밀도는 1.812g/cm³, 최적함수비는 12.24%로 나타났다. 인산석고 혼합비율이 10%에서 30%로 증가할수록 최대건조밀도가 1.736g/cm³에서 1.596g/cm³으로 약 8%정도 감소하였으며, 최적함수비는 16.22%에서 19.83%로 약 22%정도 증가하는 것으로 나타났다. D다짐결과에서는 인산석고 혼합비율이 10%에서 30%로 증가할수록 최대건조밀도가 1.813g/cm³에서 1.783g/cm³으로 약 1.7%정도 감소하였으며, 최적함수비는 11.94%에서 16.72%로 약 40%정도 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, 인산석고의 혼합비 증가에 따른 밀도의 감소

는 다짐에너지가 큰 D 다짐에서 적게 나타났으나 최적함수비는 크게 나타났다. 전반적으로 인산석고의 혼합비율이 증가할수록 최대건조밀도는 감소하였으며, 최적함수비는 증가하는 것으로 나타났는데 이는 함수비의 증가는 인산석고의 자체에 수분을 보유하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 인산석고 혼합비율에 따른 CBR 변화

인산석고 혼합재료를 성토재료로 활용하기 위하여 실내 CBR 시험을 실시하였다. 실내 CBR 조건은 그림 3과 같이 혼합조건과 층별조건으로 실시하였다. 표 4는 인산석고 혼합비율에 따른 실내 CBR 값을 나타내고 있고, 인산석고 혼합비율에 따른 CBR 분포를 그림 4에 도시하였다.

표 4에서 혼합조건과 층별조건의 수정 CBR 값을 살펴보면, 혼합조건에서 인산석고 혼합비율이 10%에서 30%으로 증가할 때 수정 CBR값은 7.0%에서 6.2%로 약 11%정도 감소하였으며, 층별조건에서 인산석고 혼합비율이 증가할수록 수정 CBR 값은 7.3%에서 6.1%로 약 16%정도 감소하는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 정리하면, 인산석고 혼합비율이 증가할수록 수정 CBR 값은 감소하는 것으로 나타났으며, 인

표 3. 화강풍화토와 인산석고의 혼합비율에 따른 다짐시험결과

혼합비율 화강풍화토:인산석고	A 다짐		D 다짐		비 고
	최대건조밀도(g/cm ³)	최적함수비(%)	최대건조밀도(g/cm ³)	최적함수비(%)	
100 : 0	1.812	12.24	1.881	11.27	
90 : 10	1.736	16.22	1.813	11.94	
80 : 20	1.674	16.55	1.796	14.83	
70 : 30	1.596	19.83	1.783	16.72	
0 : 100	1.316	25.74	-	-	

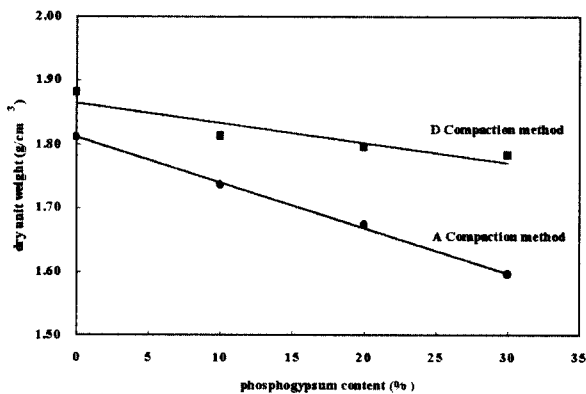


그림 1. 인산석고 혼합비율에 따른 다짐방법별 최대건조밀도의 변화

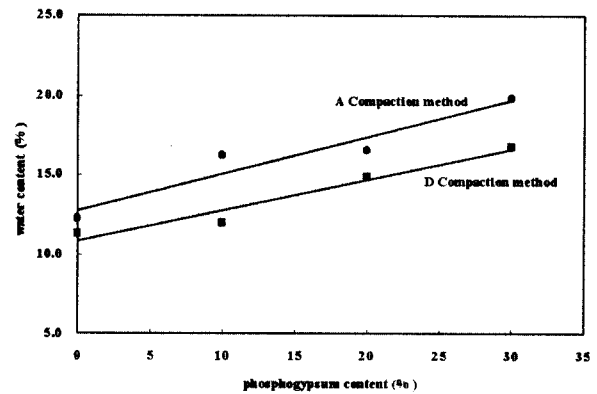


그림 2. 인산석고 혼합비율에 따른 다짐방법별 최적함수비의 변화

표 4. 화강풍화토와 인산석고의 혼합비율에 따른 CBR 시험결과

혼합비율 화강풍화토 : 인산석고	층별 CBR(%)	혼합 CBR(%)
100 : 0	-	8.0
90 : 10	7.0	7.3
80 : 20	6.3	6.3
70 : 30	6.2	6.1

산석고의 층별조건과 혼합조건에 대한 수정 CBR 값은 층별조건이 혼합조건보다 다소 크게 나타났다. 더욱이, 인산석고를 성토재료로 활용하기 위해서는 관련 기준을 검토하여야 한다. 성토재료에 대한 수정 CBR 기준을 살펴보면, 일반성토에 대한 일정한 규정은 없으나, 도로시방서(1996)와 도로설계편람(2000)에서 하부노상에 대한 수정 CBR 기준이 수정 5이상이면 사용이 가능하므로 인산석고 혼합재료의 수정 CBR값이 최소기준 5이상으로 나타나 성토재료로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

3.4 인산석고 혼합비율에 따른 팽창비의 변화

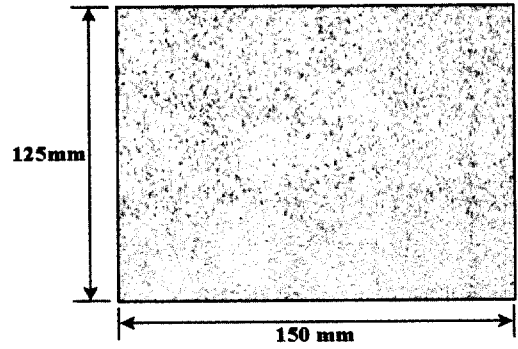
인산석고 혼합비율에 따른 팽창비를 살펴보았다. 표 5는 인산석고 혼합비율에 따라 혼합조건에 따른 팽창비는 96시간 수침한 결과이며, 그림 5는 혼합조건에 대한 팽창비이고 그림 6은 층별조건에 대한 팽창비를 나타내고 있다.

인산석고 혼합조건에서 팽창비의 변화를 살펴보면, 10회 다짐에서 인산석고 혼합비율이 10%에서 30%로 증가할 때 팽창비가 27% 감소하였고, 25회 다짐에서는 약 46%, 55회 다짐에서는 약 45%정도 감소하는 것으로 나타났다. 반면 층별조건에서 인산석고 혼합비율이 증가할수록 10회 다짐에서 약 10%, 25회 다짐은 13%, 55회 다짐은 16%정도 감소하는 것으로 나타났다.

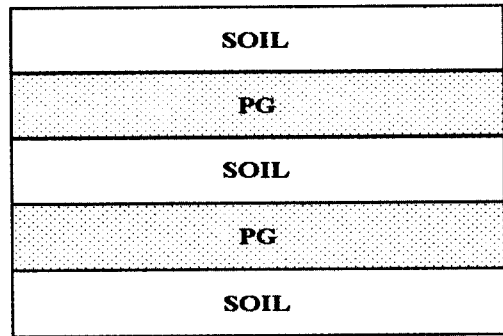
인산석고 10% 혼합한 재료의 팽창비를 혼합조건에 따라 비교하면, 10회 다짐에서 혼합조건이 층별조건보다 팽창비가 크게 나타났으나 25회와 55회 다짐에서는 팽창비가 적게 나타났다. 그러나 인산석고 혼합비율이

표 5. 화강풍화토와 인산석고 혼합비율에 따른 팽창비 결과 (단위 %)

혼합비율 화강풍화토:인산석고	혼합조건			층별조건		
	10회	25회	55회	10회	25회	55회
100 : 0	0.015	0.0094	0.0082	-	-	-
90 : 10	0.0083	0.0077	0.0044	0.0078	0.0076	0.0072
80 : 20	0.0073	0.0061	0.0035	0.0075	0.0074	0.0070
70 : 30	0.0060	0.0041	0.0024	0.0070	0.0066	0.0060



(a) 혼합 방법



(b) 층별 방법

그림 3. CBR 시험조건

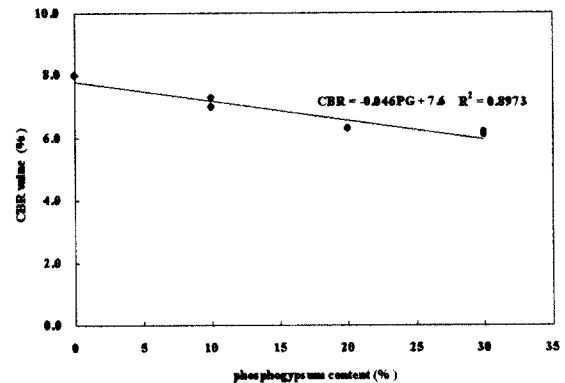


그림 4. 인산석고 혼합비율에 따른 CBR 변화

20%와 30%일 때 혼합조건이 층별다짐조건보다 팽창비가 적게 나타났다.

따라서, 인산석고 혼합조건에 대한 팽창비는 인산석고 혼합비율이 증가할수록 팽창비가 감소하는 것으로

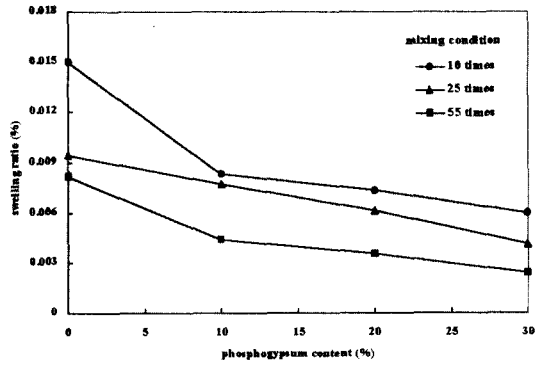


그림 5. 인산석고 혼합비율에 따른 혼합조건의 팽창비 변화

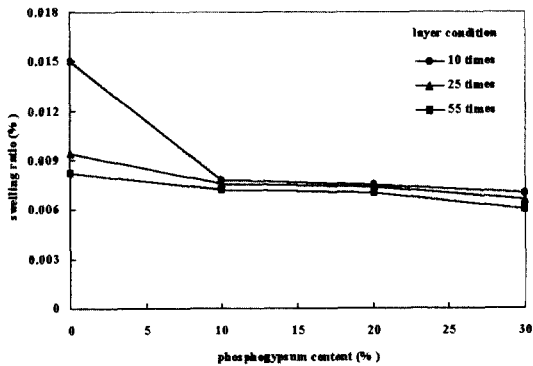


그림 6. 인산석고 혼합비율에 따른 층별조건의 팽창비 변화

나타났으며, 다짐회수가 증가할수록 팽창율이 적은 것으로 나타났다. 이는 다짐에너지의 증가로 입자들의 밀도가 증가한 것으로 생각된다. 또한, 혼합조건과 층별조건을 비교하면 층별조건의 팽창비 감소율이 혼합조건보다 적은 것으로 나타났다. 이는 인산석고가 무기질 성

분으로 저압축성 특성을 가지고 있고 흙 입자상에 인산석고 입자들이 흙 입자 간극을 채웠기 때문인 것으로 생각된다.

3.5 인산석고 혼합재료의 용출특성

폐기물 중에 함유되어 있는 유해물질은 우수 및 기타 침투수에 의해 폐기물로부터 용출되어 지하수 및 침출수의 오염부하를 가증시킬 수 있다. 용출시험은 이러한 특성을 평가하는 방법으로 널리 사용되며, 유해폐기물과 유해성이 없는 폐기물을 구별하는 기준으로 이용되기도 한다. 본 연구에서는 용출시험은 국내 폐기물 공정시험법과 미국 RCRA의 TCLP법에 의하여 인산석고, 화강풍화토, 그리고 인산석고 혼합재료에 대하여 용출시험을 실시하였다.

표 6에 의하면, 인산석고와 화강풍화토 그리고 인산석고 혼합재료는 국내 폐기물 관리법과 미국의 RCRA에서 요구하는 기준에 모두 만족하는 것으로 나타나 인산석고를 활용함에 따른 환경적 유해성이 적은 것으로 판단된다.

3.6 인산석고 혼합재료에 대한 장기용출특성

인산부산석고의 장기활용에 따른 환경적 특성을 분석하기 위하여 컬럼시험(Continuous Column Leaching Test)을 이용하여 용출특성을 분석하였다. 장기용출시

표 6. 화강풍화토와 인산석고 그리고 인산석고 혼합재료의 용출시험결과 (단위:mg/l)

용출법		항목	Cd	As	Pb	Hg	Cr ⁶⁺	Cu	시안	유기인	TCE	PCE
			(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
		KMS기준 (mg/l)	0.3	1.5	3.0	0.005	1.5	3.0	1.0	1.0	0.1	0.3
		RCRA기준 (mg/l)	1.0	-	5.0	0.2	5.0	-	-	-	-	-
화강풍화토 + 인산석고	100:0	폐기물	ND	0.023	0.010	ND	0.006	0.003	ND	ND	ND	ND
	90:10	폐기물	ND	0.004	0.005	ND	0.006	ND	ND	ND	ND	ND
	80:20	폐기물	0.002	0.007	0.014	ND	0.004	ND	ND	ND	ND	ND
	70:30	폐기물	0.002	0.010	0.006	ND	0.013	ND	ND	ND	ND	ND
	0:100	폐기물	0.001	0.065	0.013	ND	0.058	0.011	ND	ND	ND	ND
화강풍화토 + 인산석고	100:0	TCLP	ND	0.012	0.002	ND	0.002	0.001	ND	ND	ND	ND
	80:20	TCLP	0.001	0.002	0.003	ND	0.003	ND	ND	ND	ND	ND
	70:30	TCLP	0.001	0.002	0.003	ND	0.008	ND	ND	ND	ND	ND
	60:40	TCLP	0.002	0.003	0.002	ND	0.003	ND	ND	ND	ND	ND
	0:100	TCLP	0.007	0.037	0.017	ND	0.014	0.006	ND	ND	ND	ND

주) ND : Not Detected
TCE : 트리클로로에틸렌(Trichloroethylen)
PCE : 폴리클로리네이티비페닐(Polychlorinated biphenyl)

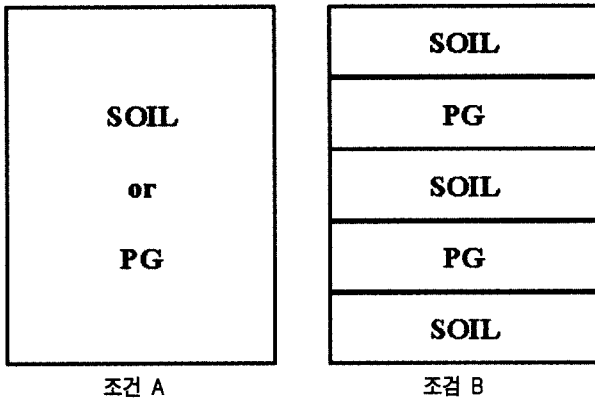


그림 7. 인산석고 혼합비율에 따른 장기용출 조건

험은 컬럼내에 실험대상 시료를 채우고 간헐적 또는 연속적으로 증류수 또는 지하수 등과 같은 주입수를 자연적으로 폐기물 시료를 통과시켜 발생된 침출수의 성분을 분석하는 방법이다.

컬럼시험을 위한 컬럼내 주입수는 현장의 여건을 고

표 7. 장기 용출시험의 유입량

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균강수량*(mm)	32.95	21.40	97.12	117.18	153.40	218.75	268.07	220.25	100.50	73.78	46.53	15.47
실내주입량(ml)	129.33	84.00	381.18	459.94	602.10	858.59	1052.2	864.48	394.46	289.60	182.60	60.71

* 5년동안의 월 강수량 평균

표 8. 침출수 수질분석 결과(계속)

대상규모 지역구분		1일 침출수 배출량 2,000m ³ 미만			
		생물학적 산소요구량 mg/l	부유물질량 mg/l	화학적산소요구량 mg/l	
청정지역		40	40	50	
가 지역		80	80	90	
나 지역		120	120	130	
특례지역		30	30	40	
화강풍화토		1차	5.0	30	37
		2차	1.5	17	31
인산석고		1차	4.7	25	30
		2차	0.68	11	4
혼합조건	인산석고10%	1차	4.9	22	24
		2차	2.4	8.7	18
	인산석고20%	1차	3.6	21	27
		2차	1.4	4.3	14
	인산석고30%	1차	2.7	23	33
		2차	1.5	6.7	17
층별조건	인산석고10%	1차	6.9	27	36
		2차	0.44	5.0	10
	인산석고20%	1차	8.7	24	36
		2차	0.84	3.5	13
	인산석고30%	1차	3.6	26	36
		2차	0.11	4.2	11

려하여 수도수를 사용하였으며, 컬럼을 통해 발생된 침출수는 수질환경보전법의 수질오염공정시험법에 의거하여 분석하였다. 장기 용출시험을 위한 시험시료의 조건은 다음과 같다.

- 화강풍화토, 준설풀토, 인산석고
- 화강풍화토와 인산석고의 혼합비율에 따른 혼합 및 층별조건

컬럼에 주입하는 인공강우는 전남 OO지역의 1994년부터 1999년까지의 5년동안의 강수량을 근거로 하였으며, 월별 5년 평균의 값을 선정하였다. 본 실험에서는 1개월의 5년 평균 강수량을 3일로 선정하였으며, 주입 유량은 월 강수량을 컬럼 면적을 고려하여 산정하였다. 표 7은 컬럼에 주입한 주입량을 나타내고 있다.

인산석고 혼합재료에 발생되는 침출수 분석결과, 수질환경보전법에서 요구하는 항목을 만족하는 것으로

표 8. 침출수 수질분석 결과

구분	항목	수소 이온 농도	*노르말헥산 추출물질함량 mg/l	페놀 함유량 mg/l	시아 함유량 mg/l	크롬 함유량 mg/l	용해성철 함유량 mg/l	아연함유량 mg/l	구리 함유량 mg/l	카드뮴 함유량 mg/l	수은 함유량 mg/l	유기인 함유량 mg/l
가 지역	5.8~8.0	30	3	1	2	10	5	3	0.1	0.005	1	
나 지역	5.8~8.0	30	3	1	2	10	5	3	0.1	0.005	1	
특례지역	5.8~8.0	30	5	1	2	10	5	3	0.1	0.005	1	
화강풍화토	1차	6.9	ND	ND	ND	0.044	ND	0.012	0.004	ND	ND	
	2차	7.14	ND	ND	ND	0.038	ND	0.006	0.001	ND	ND	
인산석고	1차	2.7	ND	ND	0.146	0.088	1.520	0.269	0.162	ND	ND	
	2차	4.58	ND	ND	0.140	0.077	0.023	ND	0.015	ND	ND	
혼합 조건	인산석고 10%	1차	6.9	ND	ND	ND	0.021	0.004	0.006	0.007	ND	ND
		2차	7.35	ND	ND	ND	0.015	0.002	0.004	0.002	ND	ND
	인산석고 20%	1차	6.8	ND	ND	ND	0.026	0.023	0.026	0.006	ND	ND
		2차	7.08	ND	ND	ND	0.016	0.012	0.013	0.004	ND	ND
	인산석고 30%	1차	6.6	ND	ND	0.053	0.033	0.029	ND	0.014	ND	ND
		2차	6.72	ND	ND	0.028	0.021	0.019	ND	0.008	ND	ND
층별 조건	인산석고 10%	1차	6.9	ND	ND	ND	0.034	0.023	0.011	0.013	ND	ND
		2차	7.33	ND	ND	ND	0.028	ND	0.009	0.001	ND	ND
	인산석고 20%	1차	6.8	ND	ND	0.057	0.044	0.019	0.014	0.011	ND	ND
		2차	7.04	ND	ND	0.047	0.033	0.014	0.008	0.016	ND	ND
	인산석고 30%	1차	6.6	ND	ND	0.009	0.038	0.032	0.019	0.012	ND	ND
		2차	6.78	ND	ND	ND	0.028	ND	0.010	ND	ND	ND

*동식물유지류

구분	항 목	비소함유량 mg/l	납함유량 mg/l	6가크롬 함유량 mg/l	용해성망 간함유량 mg/l	불소 함유량 mg/l	PCB 함유량 mg/l	색도 (도)	총인 mg/l	트리클로 로에틸렌 mg/l	테트라클로 로에틸렌 mg/l	NH ₃ -N mg/l	음이온계 면활성제 mg/l	
														청정지역
가 지역	0.5	1	0.5	10	15	0.003	300	8	0.3	0.1	60	5		
나 지역	0.5	1	0.5	10	15	0.003	400	8	0.3	0.1	60	5		
특례 지역	0.5	1	0.5	10	15	0.003	400	8	0.3	0.1	60	5		
화강풍화토	1차	ND	0.081	ND	0.087	0.22	ND	82	0.01	ND	ND	1.2	0.22	
	2차	ND	0.067	ND	0.053	0.32	ND	68	0.01	ND	ND	0.9	0.13	
인산석고	1차	ND	0.181	ND	4.272	0.18	ND	65	0.66	ND	ND	6.0	0.08	
	2차	ND	0.014	ND	0.103	0.22	ND	74	2.57	ND	ND	2.88	ND	
혼합 조건	인산석고 10%	1차	ND	0.046	ND	0.019	0.21	ND	89	0.04	ND	ND	2.4	0.25
		2차	ND	0.223	ND	0.512	0.01	ND	92	0.06	ND	ND	3.1	0.20
	인산석고 20%	1차	ND	0.057	ND	0.412	0.17	ND	47	0.03	ND	ND	1.2	0.32
		2차	ND	0.312	ND	0.861	0.03	ND	50	0.05	ND	ND	1.92	0.12
	인산석고 30%	1차	ND	0.048	ND	2.790	0.40	ND	74	0.02	ND	ND	1.2	0.17
		2차	ND	0.162	ND	3.023	0.10	ND	82	0.08	ND	ND	2.1	0.09
층별 조건	인산석고 10%	1차	ND	0.009	ND	ND	0.22	ND	41	0.05	ND	ND	1.2	ND
		2차	ND	0.148	ND	0.434	0.12	ND	55	0.60	ND	ND	1.92	ND
	인산석고 20%	1차	ND	0.011	ND	ND	0.10	ND	24	0.09	ND	ND	1.2	0.04
		2차	ND	0.048	ND	0.360	0.22	ND	31	2.12	ND	ND	0.96	0.02
	인산석고 30%	1차	ND	ND	ND	3.359	0.16	ND	48	0.12	ND	ND	1.2	0.12
		2차	ND	0.033	ND	0.247	0.16	ND	31	2.25	ND	ND	2.88	0.08

나타났다. pH의 변화는 인산석고의 pH가 2.5이고, 화강 풍화토와 혼합재료에서 pH가 6~7 정도로 나타났는데 이는 화강풍화토와 중화된 것으로 생각된다. 그러나 화강풍화토에 따라 pH가 5이하로 측정될 가능성이 있으므로 pH에 대한 조절이 필요하다. 부유물질량에서 인산 석고 혼합재료의 초기 부유물질이 다소 크게 나타났으나 2차 측정결과는 매우 적게 나타났다. 화학적 산소요 구량은 인산석고에서는 매우 적게 나타나지만 혼합재 료에서는 다소 크게 나타났는데, 이는 화강풍화토의 유기물에 의한 것으로 생각된다. 또한, 일부항목이 수질환경보전법의 청정지역에서 요구하는 기준치 보다 크게 나타났으나 수질환경보전법의 가지역, 나지역, 특례지 역에 대한 기준치보다는 적게 나타났다.

4. 결 론

인산비료제조과정에서 발생하는 인산석고가 성토재 료로 적합한지에 대하여 공학적 특성과 환경적 특성을 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 인산석고의 공학적 특성을 살펴보았다. 인산석고의 기본적 특성으로 비중은 2.45 정도이며, 200번체 통과량이 97%이상으로 나타났으며, 흙의 분류에 의하면 ML계열로 무기질 실트 및 극히 가는 모래 등의 성질을 갖는다.
- (2) 인산석고와 화강풍화토의 혼합재료에 대한 역학적 특성을 살펴보았다. 다짐특성은 인산석고의 혼합비 율이 증가할수록 최대건조밀도는 감소하였으며, 최 적함수비는 증가하는 것으로 나타났다. CBR 특성은 인산석고 혼합비율이 증가할수록 수정 CBR 값은 감소하는 것으로 나타났으며, 인산석고의 층별조건 과 혼합조건에 대한 수정 CBR 값은 층별조건이 혼 합조건보다 다소 크게 나타났다. 따라서, 인산석고 혼합재료의 수정 CBR값이 최소기준 5이상으로 나 타나 성토재료로 활용이 가능한 것으로 판단된다.
- (3) 인산석고 및 화강풍화토 그리고 인산석고 혼합재료 에 대한 용출시험결과, 국내 용출시험기준과 미국 RCRA 기준치 이하로 나타나 주변환경에 대한 영향 은 적은 것으로 판단된다.

- (4) 인산석고 및 화강풍화토 그리고 인산석고 혼합재료 에 대한 장기용출시험결과, 인산석고 혼합재료에 대 한 pH의 변화는 대략 6~7 정도로 나타났으나, 인산 석고의 pH가 2.5이므로 향후 pH 조절이 필요한 것 으로 판단된다. 또한, 생물학적 산소요구량, 부유물 질량, 화학적 산소요구량, 중금속 등의 검토 항목의 대부분이 기준치 이내로 나타났다. 따라서, 인산석 고를 성토재료 활용할 경우, 수질환경보전법의 청정 지역을 제외한 가지역, 나지역, 특례지역에 한하여 활용하는 것이 바람직하다.
- (5) 이상의 일련의 실험을 통한 통하여 인산석고는 성토 재료 활용할 경우, 성토재료로서 공학적 기준에 적 합하며, 환경적으로 그 유해성이 적은 것으로 생각 된다. 따라서, 인산석고가 단순한 폐기물이 아닌 자 원으로써 재활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2000), 도로설계편람(II).
2. 건설교통부(1996), 도로공사 표준시방서.
3. 오영인, 김광일, 신은철(2001), "폐석고를 활용한 성토매립지반 의 지반공학적 특성과 환경적 영향 분석", 대한토목학회논문집, 제21권 제1-C호, pp.19-26.
4. 인천대학교 공업개발연구소(1997), 폐석고를 활용한 매립성토재 개발에 관한 연구, 한국타타늄.
5. 한국토지공사(1994), 품질관리지도서.
6. Blight, G. E.(1969), "Waste gypsum as an embankment material", Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.39-43.
7. Chang, W. F.(1990), Engineering properties and construction appli cations of phosphogypsum, Phosphate Research Institute University of Miami, University of Miami Press.
8. Florida Institute of Phosphate Research(2000), Tonnage of Phospho gypsum Gener ated, Strategic Assessment of Florida's Environment.
9. Pericleous, M. I., and Metcalf, J. B.(1996), "Resilient modulus of cement-stabilized phosphogysum," Journal of Materials in Civil Engineering, Materials Engineering Division, Vol.8, No.1, pp.7-10.
10. Taha, R.(1989), Utilization of by-product gypsum in road construc tion, Doctor of Philosophy Dissertation, Texas A&M University.
11. Wrench, B. P., and Blight, G. E.(1985), "Compressibility of neut ralized phosphogypsum", Proceedings of the Eleventh Interna tional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, pp.1321-1326.

(접수일자 2001. 6. 20)