

일일 및 중간복토재로서 인산석고 재활용을 위한 실험 연구

An Experimental Study on the Utilization of Phosphogypsum as Daily and Intermediate Cover Materials

이 용 수*¹ Lee, Yong-Soo

정 형 식*² Chung, Hyung-Sik

Abstract

Phosphogypsum is a by-product 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 150 million tons and is up to 1.57 million tons in Korea. Therefore studies describe application of phosphogypsum to daily and middle cover materials in landfill. For this purpose, experiments were performed to evaluate the engineering properties of the material by sieve analysis, specific gravity, consistency of soil, compaction, CBR, permeability, and environmental characteristics of leaching test, reactor test. The results of this study are as follows : The mixing and layer conditions of CBR value are 6.2~6.3%, coefficient of permeability is $\alpha \times 10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$. And leaching test results are far below than those of regulatory requirement of Waste Management Act, Soil Environment Preservation Act in Korea and RCRA in USA. Therefore phosphogypsum can be used as daily and intermediate cover materials in landfill.

요 지

인산석고(phosphogypsum)는 인산비료 생산과정에서 발생하는 부산물로, 주요성분은 이수석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)가 대부분이고 여기에 인(P_2O_5), 불소(F)와 유기물질 등으로 이루어져있다. 전세계적으로 인산석고는 약 15,000만톤정도 발생되고 있으며, 국내에서는 약 157만톤/년이 발생되고 있다. 본 연구는 폐기물 매립장의 일일 및 중간복토재로서 인산석고의 활용성을 분석하였다. 이를 위하여 입도분석, 비중, 연경도, CBR, 투수시험, 용출시험과 우수배제 시험 등 일련의 실험을 실시하였다. 실험결과, 인산석고 혼합과 층별 조건에서 CBR값은 6.2~6.3%, 투수계수는 $\alpha \times 10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 나타났고, 용출시험결과, 관련법에서 요구하는 기준 값이하로 나타났으며, 우수배제시험결과에서 인산석고 혼합토의 우수배제율이 일반화강토와 비슷하게 나타났다. 따라서, 인산석고를 일일 및 중간복토재로 활용하는 것이 유용할 것으로 판단된다.

Keywords : Cover materials, Phosphogypsum, Recycling

1. 서 론

인산석고(phosphogypsum)는 인산비료 생산과정에서 발생하는 부산물로, 주요성분은 이수석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

가 대부분이고 여기에 인(P_2O_5), 불소(F)와 유기물질 등으로 이루어져있다. 인산석고는 인광석 1톤에서 석고 부산물이 4.5~5.5톤 발생된다. 전세계적으로 인산석고는 약 15,000만톤정도 발생되고 있으며, 미국의 플

*1 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과, 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., yslee@kict.re.kr)

*2 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

로리다주는 약 3,700만톤/년, 루이지애나주에서는 약 860만톤/년(Chang, 1990; FIPR, 2000), 남아프리카는 36만톤~48만톤/년이 발생되고 있다(Blight, 1969). 국내에서는 2000년 현재 약 157만톤/년이 발생되며, 재활용은 약 98만톤/년 정도 활용되고 있다(이용수의 2인, 2001; 한국건설기술연구원, 2001).

인산석고의 재활용 연구는 주로 토목, 농업 등에서 다양한 분야로 활용하려고 시도하고 있다. 토목분야의 활용연구로 Blight(1969)는 인산석고를 성토재료로 활용하기 위하여 물리·역학적 특성을 분석하였고, Wrench & Blight(1985)는 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 하였고, 그 후 Pericleous & Metcalf(1996)는 Taha(1989)의 연구를 보완하기 위하여 인산석고에 포틀란트 시멘트를 혼합하여 노상재료로 적용하였다. 국내에서는 오영인의 2인(2001)이 폐석고의 성토매립재 활용연구를 하였으며, 이 연구는 티타늄제조과정에서 발생하는 폐석고와 준설토 혼합비율에 따른 지반공학적 특성과 환경적 특성을 분석하였다. 이용수의 2인(2001)은 비료제조과정에서 발생하는 인산석고를 도로 성토재료 활용 가능성을 제시하였다.

연약지반 및 지반안정재료의 연구로 Evans & Bell(1981)은 황토(loess)의 안정처리재료, Holm, G., Tränk, R., Ekström, A.(1983), Kujala(1983)는 폐석고와 석회를 혼합하여 연약지반의 심층처리에 대한 연구를 하였고, Petrukhin(1994)는 염토(鹽土, saline soil)와 석고에 대하여 역학적 특성을 분석하였다.

농업분야의 연구로 인산석고를 작물생육에 필수성분인 석회와 유향을 포함하고 있어 오래 전부터 활용하여 왔다. Mitchell 외 9인(2000)은 관개수(灌溉水)로 염수를 이용할 때 농작물과 토양의 물리적 특성에 석고가 미치는 영향을 분석하였다. 국내에서는 경성대학교(2000)는 인산석고와 석탄회를 일정한 비율로 혼합한 재료를 작물재배에 활용하는 연구를 하였다.

이상과 같이 인산석고에 대한 국외의 활용연구는 다양하지만 국내에서 인산석고의 활용은 주로 석고보드, 시멘트 첨가제, 식물성장촉진제 등 한정되어 있는 실정이고, 연구도 초보적인 단계에 있다. 그러므로 대량으로

발생되는 인산석고를 다양한 분야로의 확대 적용이 필요하므로, 본 연구에서는 인산석고를 폐기물 매립장의 일일 및 중간복토재로서의 활용성을 분석하였다.

인산석고를 활용함에 있어서 국내 폐기물관리법에서는 (1) 폐기물공정시험법에 의해 유해물질 함유기준이 내이어야 하고, (2) 매립시설의 복토재 등으로 사용하는 경우에는 선별·파쇄 등의 중간처리후 일반 토사류 등과 혼합·중화하는 적정 재활용 공정을 거치며, (3) 일반 토사류 등과 혼합 사용하는 경우, 일반 토사류 등의 비율을 부피기준으로 70%이상으로 하여야 한다.

따라서, 본 연구는 인산석고의 재활용 및 자원화 차원에서 폐기물 매립장의 일일 및 중간 복토재로서의 적용성을 분석하였다. 이를 위하여 인산석고와 화강토에 대하여 XRF, XRD 등 화학적 성분분석을 실시하였고, 입도시험, 비중시험, 액·소성한계시험, 다짐시험 등 물리적 특성과 투수시험, CBR 시험 등 역학적 특성을 분석하였다. 또한, 인산석고 복토재 활용에 따른 우수에 대한 침식과 배제율 등을 분석하였다. 인산석고 활용에 따른 유해물질 분석하기 위하여 국내 폐기물 공정시험법과 토양오염공정시험법 그리고 미국 RCRA의 TCLP법에 의한 용출시험을 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

인산석고(phosphogypsum)는 인산비료 생산과정의 일정한 공정을 거쳐 슬러리 상태로 석고 매립장으로 모아지게 된다. 석고 매립장으로 투여된 석고 슬러리는 자연적으로 침출수가 빠져나가 석고만이 쌓이게 된다. 본 연구에 사용된 인산석고는 석고 매립장에 약 1년간 야적되어 있는 석고를 사용하였다. 또한, 일반 토사류로는 경기지역의 화강토를 사용하였다.

표 1은 인산석고와 화강토의 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 53.32%는 황산염(sulfate, SO₄)으로 나타났다. 이러한 결과는 Chang(1990)의 연구결과와 비슷하게 나타났다. 화강토의 주요성분은 SiO₂ 61.51%, Al₂O₃ 19.38%, Fe₂O₃ 7.48%로 전체 구성성분의 약 88.37%를 차지하고 있다.

그림 1은 화강토의 XRD 결과로, 석영(quartz)과 정장

표 1. 인산석고와 화강토의 화학구성성분

구성성분	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	Total
화강토	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 , Sulfate(SO₄) 53.32%

석(orthoclase), 사장석(plagioclase) 그리고 운모(mica) 광물들이 존재함을 알 수 있고, 그림 2는 인산석고의 XRD 결과로, 대부분 이수석고(CaSO₄ · 2H₂O)로 이루어져 있음을 알 수 있다. 그림 3은 인산석고와 화강토의 SEM 결과이다. 그림 3은 화강토를 300배 확대한 사진으로 광물입자들이 상당히 풍화를 받아 전체적으로 둥글게 깨어진 모양이며 더 작은 입자들이 표면에 붙어있는 것을 볼 수 있으며, 시료중에 얇은 판상의 입자는 운모광물로 판단된다. 이는 XRD 시험결과도 일치하는 결과이다. 그림 4는 인산석고의 SEM으로 100 μ m 정도의 입자를 확대한 사진으로 석고가 단사정계(monoclinic)의 가수황산염임을 확인할 수 있다.

2.2 실험방법

인산석고의 일일 및 중간 복토재로서 활용성을 분석하기 위하여 인산석고와 화강토 그리고 화강토에 인산석고를 30% 혼합재료에 대하여 물리·역학 시험과 환경적 시험 그리고 우수배제 실험을 실시하였다.

2.2.1 물리·역학적 시험

물리적 특성을 파악하기 위하여 입도시험, 비중시험, 액·소성한계시험 등을 실시하였으며, 역학적 시험은 투수시험, CBR 시험 등을 실시하였다.

물리적 시험은 KS F 기준에 의해 실시하였고, 다짐시

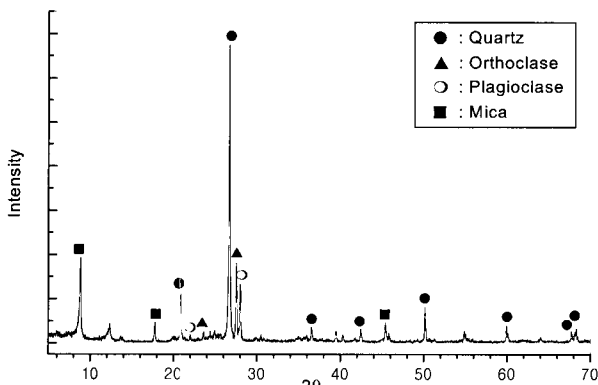


그림 1. 화강토의 XRD 결과

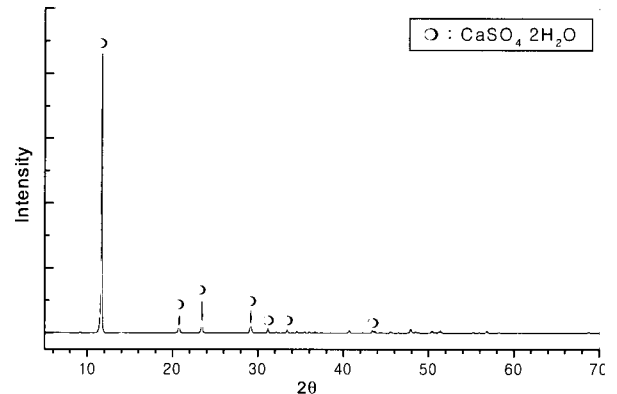


그림 2. 인산석고의 XRD 결과

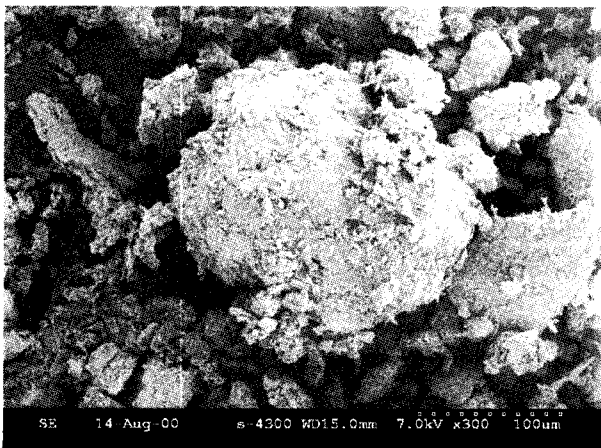


그림 3. 화강토의 SEM 결과(x300)

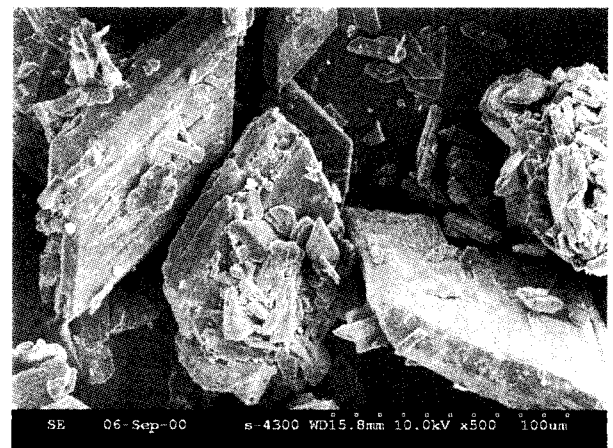


그림 4. 인산석고의 SEM 결과(x500)

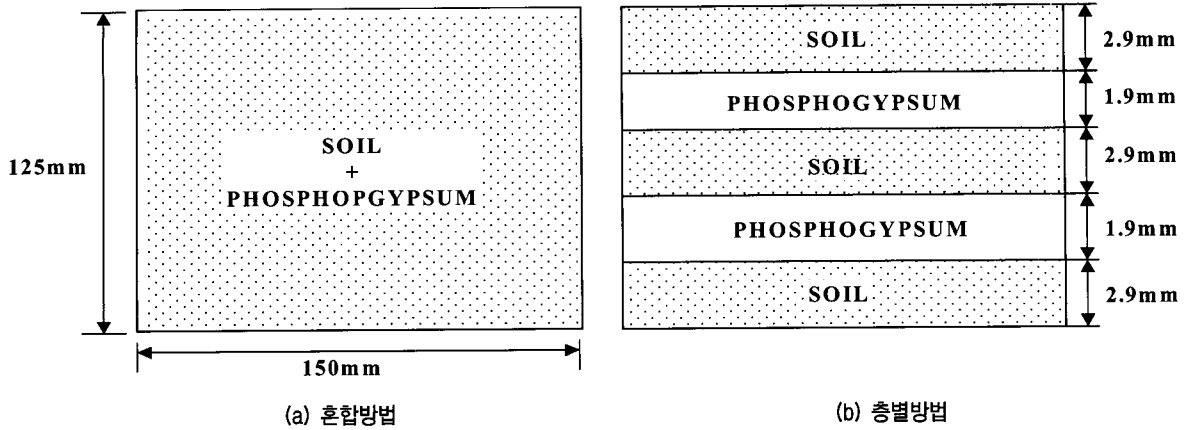


그림 5. CBR 시험조건

험은 KS F 2312의 A·D 다짐시험을 실시하였다. 역학적 시험은 투수시험 KS F 2322에 변수위 투수시험방법으로 실시하였으며, 시료제작은 A 다짐결과에 의하여 최적함수비와 최대건조밀도 95%조건으로 제작하였으며, 투수몰드는 직경이 10 cm, 높이 12cm인 강성벽 투수시험기를 사용하였다. CBR 시험은 KS F 2320에 의하여 실시하였으며, D 다짐결과에 따라 최적함수비와 최대건조밀도 95%로 시료를 제작하였고, 혼합조건은 그림 5와 같이 층별조건과 혼합조건으로 실시하였다.

2.2.2 환경적 시험

인산석고 활용에 따른 환경적 특성 시험은 용출시험을 실시하였으며, 용출시험은 미국 RCRA의 TCLP법, 국내 폐기물공정시험법과 토양오염공정시험법에 따라 용출시험법을 실시하였다.

2.2.3 우수배제시험

우수배제 기능을 분석하기 위하여 두께 5mm의 아크릴을 사용하여 크기 0.5m×0.5m×0.2m의 우수배제장치를 제작하였다. 이때 복토층 상·하부의 경사를 5%

로 하였는데, 이는 복토층 상부에서의 우수 흐름을 원활히 하기 위한 것이고, 하부에 유출수를 받아내기 위한 집수통을 설치하였다. 일일 및 중간 복토재의 기능은 악취억제, 병원균억제, 지표수 오염방지, 차량접근의 용이 등을 주요 기능으로 하므로, 본 실험에서는 매립쓰레기의 하층은 고려하지 않았고, 실험에 사용된 복토재의 다짐 밀도는 A 다짐 결과에서 최대건조밀도 95%가 되도록 3회 다짐하여 총 15cm 두께로 포설하였다.

강우의 적용은 폐기물 매립장의 복토가 끝난 복토층 위에 일정시간 동안 강우를 적용하여 복토층 표면의 침식량과 우수 배제율을 측정하였다. 이때 복토층 설치 후 24시간 양생시킨 후 실험을 진행하였다. 적용유량은 I지역의 1994년~1999년간 5년동안 연평균 강우량 1722.8mm, 연평균 강우일 95일을 적용면적 0.25m²에 대한 유량으로 계산하면 0.03 l/min이 된다. 본 실험에서는 적용시간을 줄이기 위하여 계산된 유량값의 5배인 0.15 l/min으로 하였고, 이때 유속은 1.0×10⁻⁵m/sec이다.

3. 결과 및 분석

3.1 물리적 특성

표 2는 인산석고와 화강토의 물리적 특성을 나타내고 있다. 인산석고와 화강토의 입도분포를 살펴보면, 인산석고의 최대입경은 0.25mm, 화강토는 9.5mm이고, 0.074mm 통과량은 인산석고가 97.14%, 화강토는 47.67%로 나타났다. 인산석고의 균등계수와 곡률계수는 3.59와 2.61, 화강토의 균등계수와 곡률계수는 16.67과 0.77로 나타났다. 연경도를 살펴보면, 인산석고는 비소성이고, 화강

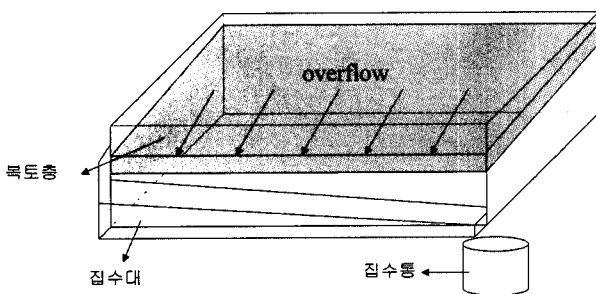


그림 6. 우수배제 실험장치

표 2. 인산석고와 화강토의 물리적 특성

구분	화강토	인산석고	FLPG	SFPG	TIPG	
입도 분포	최대입경, mm	9.5	0.25	-	-	4.76
	4.76mm 통과량, %	95.01	100	100	100	99.9
	0.074mm 통과량, %	47.67	97.14	82	75	0.23
	D ₁₀ , mm	0.012	0.017	0.01	0.002	0.23
	D ₂₀ , mm	0.03	0.044	0.018	0.0035	0.4
	D ₃₀ , mm	0.043	0.052	0.024	0.005	0.58
	D ₆₀ , mm	0.2	0.061	0.05	0.009	1.5
	균등계수, C _u	16.67	3.59	5.0	4.50	11.39
연경도	곡률계수, C _w	0.77	2.61	1.15	1.38	2.25
	액성한계, LL %	27.20	-	-	-	43.10
	소성한계, PL %	19.56	NP	NP	NP	38.96
흙의 분류	소성지수, PI %	7.66	NP	NP	NP	4.14
	통일분류	SC	ML	ML	ML	OL or ML
비중	AASHTO 분류	A-4	A-4	A-4	A-4	A-1
	비중	2.642	2.452	2.35	2.27~2.40	2.76

FLPG : 플로리다인산석고(Chang, 1990)

SFPG : 남아프리카인산석고(Blight, 1969; Wrench & Blight, 1985)

TIPG : 티타늄석고(오인영, 김광일, 신은철, 2001)

토는 액성한계 27.2%, 소성지수 7.66으로 나타났다. 비중은 화강토가 2.64, 인산석고가 2.45이고, 흙의 통일분류법에 의하면, 인산석고는 ML이고, 화강토는 SC로 분류된다. 한편, 미국의 플로리다 인산석고(FLPG)와 남아프리카 인산석고(SFPG)의 특성을 살펴보면, 0.074mm 체 통과량이 대략 75~85%이고, 액·소성한계는 비소성이며, 비중은 2.27~2.40 정도로 나타났다. 따라서, 국내 인산석고도 외국의 인산석고와 물리적 특성이 유사함을 알 수 있다.

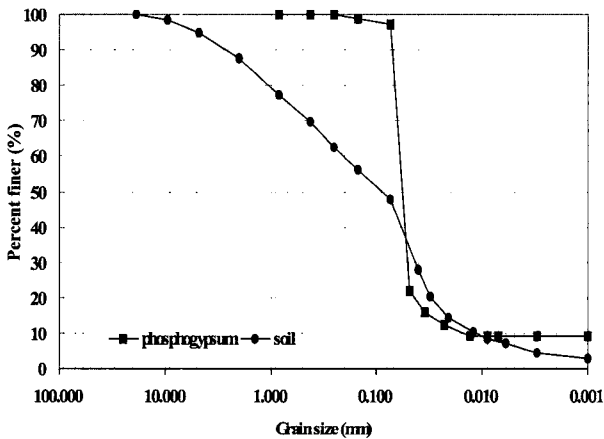


그림 7. 인산석고와 화강토의 입도분포곡선

3.2 역학적 특성

3.2.1 다짐특성

인산석고와 인산석고 30% 혼합토에 대한 A 다짐과 D 다짐시험을 실시하였고, 그 결과를 표 3에 나타내었다. A 다짐시험결과, 인산석고의 최대건조밀도는 1.316g/cm³, 최적함수비 25.74%로 나타났으며, 화강토의 최대건조밀도는 1.812g/cm³, 최적함수비는 12.24%로 나타났다. 인산석고 30% 혼합토의 최대건조밀도는 1.596g/cm³, 최적함수비는 19.83%로 나타났다. D 다짐시험결과, 화강토는 1.881g/cm³, 최적함수비 11.27%로 나타났으며, 인산석고 30% 혼합토는 최대건조밀도 1.783g/cm³, 최적함수비 16.72%로 나타났다.

다짐방법에 따른 최적함수비와 최대건조밀도의 변화를 살펴보면, 인산석고 30% 혼합토에 대하여 D 다짐의 최대건조밀도가 A 다짐의 최대건조밀도보다 11.72% 증가하였으며, 최적함수비는 15.6% 감소하였다. 이는 D 다짐에너지가 A 다짐에너지보다 크기 때문이다. 즉, 다짐에너지의 차이로 D 다짐시 토립자의 간극이 A 다짐보다는 작아지게 되는데, 이는 다짐에너지가 증가할수록 토립자의 구조 배열이 면모화 구조에서 분산구조로 변화되기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. 인산석고 및 화강토의 역학적 특성

구분		화강토	화강토 70% + 인산석고 30%	인산석고
A 다짐시험	최대건조밀도(g/cm ³)	1.812	1.596	1.316
	최적함수비(%)	12.24	19.83	25.74
D 다짐시험	최대건조밀도(g/cm ³)	1.881	1.783	-
	최적함수비(%)	11.27	16.72	-
CBR 시험	층별조건(%)	-	6.2	-
	혼합조건(%)	8.0	6.1	-
투수계수(cm/sec)		1.437×10^{-6} cm/sec	5.81×10^{-6} cm/sec	62.1×10^{-6} cm/sec

3.2.2 투수특성

대상시료에 대한 투수시험을 실시하였다. 그 결과, 화강토의 투수계수는 1.437×10^{-6} cm/sec이고, 인산석고 30% 혼합하였을 때 투수계수는 5.81×10^{-6} cm/sec, 인산석고의 투수계수는 6.21×10^{-5} cm/sec로 나타났는데, 이는 Blight(1969)의 결과와 유사하게 나타났다. 현행 복토재에 대한 투수계수의 기준은 없으나 폐기물관리법에서는 투수계수가 낮은 양질의 토사를 활용하도록 되어있다. 일반적으로 토사의 투수계수범위는 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ cm/sec의 범위이며, 이러한 투수계수의 범위는 매립장의 가스누출방지의 역할이 가능하다 하였다(남영우 외 2인, 2000). 따라서, 본 실험결과 투수계수가 $1 \times 10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec로 복토재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 지지력 특성

폐기물 매립장의 복토재 사용후 차량하중 등 사용장비의 주행성을 확보해야 하므로, 이를 파악하기 위하여 실내 CBR 시험을 실시하였다. 실내 CBR 조건은 그림 5와 같이 혼합조건과 층별조건으로 실시하였다. 이는 인산석고를 현장조건에 따라 활용하는 방법을 고려한 것이다. 실험결과, 화강토는 8.0%로 나타났으며, 인산석

고 30% 혼합토는 혼합조건과 층별조건에 따라 혼합조건에서 6.2%, 층별조건에서 6.3%로 나타났다. 이는 인산석고 30% 혼합에 따른 건조밀도의 감소에 의한 것으로 판단된다.

일일 및 중간 복토재의 지지력 기준은 없으나 일반적으로 도로공사표준시방서(1996)와 도로설계편람(2000)에서 하부노상에 대한 수정 CBR 기준에 의하면, 수정 CBR 5이상이면 차량하중에 견딜수 있으므로 이를 기준으로 보면, 인산석고 혼합토의 수정 CBR 값이 최소기준 5이상이므로 차량 하중에 대하여 주행성 및 지지력 등을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

4. 우수배제 특성

일일 및 중간 복토재로 활용하기 위하여 우수배제 실험을 통하여 복토재의 침식 및 우수배제율을 분석하였다. 그림 8과 그림 9는 화강토와 인산석고 30% 혼합토에 대한 우수배제 실험결과를 나타낸 것이다.

그림 8은 시간경과에 따른 우수배제율로, 화강토인 경우, 시간이 경과함에 따라 63.56%에서 72.0%로 증가하였으며, 인산석고 30% 혼합토는 61.11%에서 75.56%

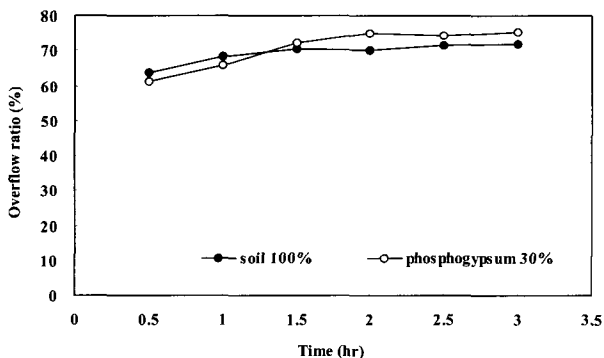


그림 8. 화강토와 인산석고 혼합토의 우수배제율

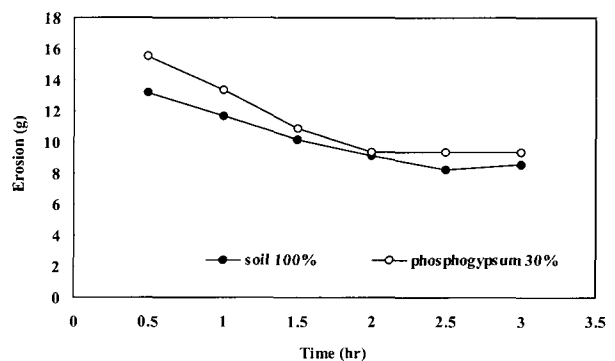


그림 9. 화강토와 인산석고 혼합토의 침식량

표 4. 용출시험결과

시험방법	항목	Cd	As	Pb	Hg	Cr ⁶⁺	Cu	CN	Org.P.	TCE	PCE
폐기물공정 시험법 (mg/l)	기준	0.3	1.5	3.0	0.05	1.5	3.0	1.0	1.0	0.1	0.3
	화강토	ND	0.023	0.01	ND	0.006	0.003	ND	ND	ND	ND
	인산석고	0.001	0.065	0.013	ND	0.053	0.011	ND	ND	ND	ND
	인산석고 30% 혼합토	0.002	0.010	0.006	ND	0.013	ND	ND	ND	ND	ND
RCRA의 TCLP (mg/l)	기준	1.0	-	5.0	0.2	5.0	-	-	-	-	-
	화강토	ND	0.012	0.002	ND	0.002	0.001	ND	ND	ND	ND
	인산석고	0.007	0.037	0.017	ND	0.014	0.006	ND	ND	ND	ND
	인산석고 30% 혼합토	0.002	0.003	0.002	ND	0.003	ND	ND	ND	ND	ND
토양오염공 정시험법 (mg/kg)	나지역	12	20	400	16	12	200	120	30	-	-
	화강토	0.001	0.124	0.150	ND	ND	0.062	ND	ND	ND	ND
	인산석고	0.160	0.465	0.055	ND	ND	0.405	ND	ND	ND	ND
	인산석고 30% 혼합토	0.04	0.09	0.10	ND	0.06	0.13	ND	ND	ND	ND

* ND : Not Detected , TCE : Trichloroethylen , PCE : Polychlorinated biphenyl

로 증가하였다. 그림 9는 시간경과에 따른 침식량으로 화강토인 경우, 13.24g에서 8.56g으로 약 35.34% 감소하였으며, 인산석고 30% 혼합토는 15.56g에서 9.34g으로 39.9% 감소하였다.

실험 3시간 경과 후 우수배제율, 침식량에 대하여 화강토와 인산석고 30% 혼합토를 비교하면, 우수배제율은 화강토가 72.0%, 인산석고 30% 혼합토는 75.56%로 인산석고 30% 혼합토가 약 7.35%정도 큰 것으로 나타났으며, 침식량은 화강토가 8.56g, 인산석고 30% 혼합토는 9.34g으로 인산석고 혼합토가 약 8.35%로 크게 나타났다. 이는 인산석고의 미세입자가 화강토 입자 사이를 채움으로서 우수의 침투가 화강토보다 적게 되어 우수 배제율이 크게 나타난 것으로 판단된다. 이상으로 인산석고 30% 혼합토의 우수에 의한 침식과 우수 배제율이 화강토와 비교하여 그 정도차이가 미소하므로 일일 및 중간 복토재로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 용출특성

폐기물에 함유되어 있는 유해물질은 우수 및 기타 침투수에 의해 폐기물로부터 용출되어 지하수 및 침출수의 오염부하를 가중 시킬 수 있다. 따라서 본 실험은 인산석고 혼합토에 대하여 우수 및 기타 침투수에 의해 유해물질이 발생되는지 여부를 판단하기 위하여 용출시험을 실시하였다. 용출시험은 회분식 용출시험법(Batch Leaching Test)을 실시하였고, 분석장비는 유도결합플라즈마질량분석기를 사용하였다. 회분식 용출시험은 국내 폐기물관리법의 폐기물공정시험법과 토양환경보전

법의 토양오염공정시험법 그리고 미국 RCRA의 TCLP 법에 의해 실시하였다.

인산석고, 화강토, 인산석고 30% 혼합토에 대하여 용출시험 결과를 표 4에 나타내었다. 실험결과를 살펴보면, 폐기물관리법, 토양환경보전법의 토양오염우려기준 나지역 그리고 미국 RCRA의 기준에 유해물질이 모두 법적 규제치 이하로 나타났다. 따라서, 인산석고를 복토재로 활용하여도 환경적 영향이 적은 것으로 판단된다.

6. 결론

폐기물 매립장의 일일 및 중간 복토재로서 인산석고를 활용성을 분석하기 위하여 일련의 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 물리적 시험결과, 인산석고의 0.074mm 통과량은 97.14%이고, 비소성이며, 비중은 2.45로 나타났다. 흙의 분류법에 의하면, 인산석고는 ML이고, 인산석고는 최대건조밀도 1.316g/cm³, 최적함수비 25.74%로 나타났으며, 인산석고 30% 혼합토의 최대건조밀도는 1.596~1.783g/cm³, 최적함수비는 16.72~19.83%로 나타났다.
- (2) 투수시험결과, 인산석고 30% 혼합하였을 때 투수계수는 5.81×10⁻⁶cm/sec, 인산석고의 투수계수는 6.21×10⁻⁵cm/sec로, 일반토사류의 투수계수 범위인 1×10⁻⁵~1×10⁻⁷cm/sec이내로 복토재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 혼합조건과 층별조건에 따른 CBR시험 결과, CBR값

이 6.2~6.3%으로 차량 하중에 대하여 주행성 및 지지력 등을 확보할 수 있으므로 현장여건을 고려하여 복토재 시공조건으로 두가지 모두 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

- (4) 우수배제율, 침식량에 대하여 화강토와 인산석고 30% 혼합토를 비교하면, 두가지 조건에 대하여 실험결과의 차이가 미소하므로, 일일 및 중간 복토재로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 인산석고, 화강토 그리고 인산석고 혼합토에 대한 용출시험결과, 국내 용출시험기준인 폐기물관리법, 토양오염보전법 그리고 미국 RCRA 기준의 대부분 항목이 기준 이하로 나타나 환경에 대한 영향이 비교적 적은 것으로 판단된다.
- (6) 이상으로 대규모로 발생하는 인산석고를 폐기물 매립장의 일일 및 중간 복토재로 활용 적용성을 분석한 결과 그 적용 가능한 것으로 나타났으며, 이는 산업부산물인 인산석고가 단순 폐기물보다는 하나의 자원화로서 그 역할이 클 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 경성대학교(2000), 석고·석탄회의 농업적 대량 활용기술개발, 남해화학주식회사.
2. 남영우, 박태욱, 박주양(2000), "매립지 복토재로의 재활용을 위한 하수슬러지의 부산석회계 고화재를 이용한 안정화 연구", 한국폐기물학회지, 제17권 제5호, pp.658~664.
3. 오인영, 김광일, 신은철(2001), "폐석고를 활용한 성토매립지반의 지반공학적 특성 및 환경적 영향분석", 대한토목학회 논문집 제21권 제1-C호, pp.19~26.
4. 이용수, 정형식, 정하익(2001), "성토재료로서 인산석고의 공학적·환경적 특성", 한국지반공학회논문집 제17권 제4호, pp.331~339.
5. 한국건설기술연구원(2001), 인산부산물석고의 매립성토재 및 지반재료로서 유효활용에 관한 연구, 남해화학주식회사.
6. 건설교통부(1996), 도로공사표준시방서.
7. 건설교통부(2000), 도로설계편람-토공 및 배수.
8. 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.
9. Chang, W. F.(1990), Engineering properties and construction applications of phosphogypsum, Phosphate Research Institute University of Miami, University of Miami Press.
10. Florida Institute of Phosphate Research(2000), Tonnage of Phosphogypsum Generated, Strategic Assessment of Florida's Environment.
11. Mitchell, J. P., Shennan, C., Singer, M. J., Peters, D. W., Miller, R. O.(2000), Prichard, T., Grattan, S. R., Rhoades, J. D., May, D. M., and Munk, D. S., "Impacts of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water", Agricultural Water Management 45, pp.55~71.
12. Petrukhin, V. P.(1994), "Gypsum and Saline Soils", Proceedings of the Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.265~266.
13. Pericleous, M. I., and Metcalf, J. B.(1996), "Resilient modulus of cement-stabilized phosphogypsum", Journal of Materials in Civil Engineering, Materials Engineering Division, Vol.8, No.1, pp.7~10.
14. Tata, R.(1989), Utilization of by-product gypsum in road construction, Doctor of Philosophy Dissertation, Texas A&M University.
15. Wrench, B. P., Blight, G. E., "Compressibility of neutralized phospho gypsum", Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, pp.1321~1326(1985).
16. Holm, G., Trank, R. and Ekström, A.(1983), "Improving Lime Column Strength With Gypsum", Improvement of Ground, Proceedings of The Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.903~907.
17. Kujala, K.(1983), "The Use of Gypsum in Deep Stabilization", Improvement of Ground, Proceeding: of The Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.903~907.
18. Petrukhin, V. P.(1994), "Gypsum and Saline Soils", Proceedings of the Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.265~266.
19. Evans, G. L., & Bell, D. H.(1981), "Chemical Stabilization of Loess, New Zealand", Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.649~658.

(접수일자 2001. 12. 7, 심사완료일 2002. 2. 2)