

탈수 처리된 석탄 광산 슬러지의 복토재 재활용방안

최명찬¹ · 임정현¹ · 예의평¹ · 장민² · 심연식² · 김지형^{1,*}

¹고려대학교 건축 사회공학과, ²한국광해방지 관리공단

Dehydration of a Coal Mine Drainage Sludge for the Potential Landfill Cover

Ming-Can Cui¹, Jung-Hyun Lim¹, Yeai Phyun¹, Min Jang², Yon-Sik Shim², and Jee-Hyeong Kim^{1,*}

¹Determent of Civil Environmental and Architecture, Korea University, 5 Anam-dong, Seoul 136-701, Korea.

²Mine Reclamation Corporation, 80-6 Coal Center, Susong-dong, Jongno-gu, Seoul, Republic of Korea

A coal mine drainage sludge(designated as CMDS) is mainly generated during physicochemical treatment or electrical purification of the drainage abandoned mine that include dissolved heavy metal.

To understand the possibility of an application of the dehydrated CMDS as the landfill cover medium of hygienic a reclaimed ground, an laboratory experiment was performed to investigate the physicochemical and geoenvironmental characteristics of the dehydrated CMDS. To improve the geoenvironmental characteristics of the dehydrated CMDS, the liquid limit, plasticity limit test, compaction method test, strength test, and hydraulic conductivity test were performed with the lithification material mixed sludge. When the mixed ratio of the sludge and the lithification material was more than 1:06, the compaction method was A method, the moisture content less than 33.5%, the strength of mixed sludge was 8.2 kg cm⁻², the hydraulic conductivity was 2.7 × 10⁻⁶ cm sec⁻¹, the sludge was up to the landfill standard of US Environmental Protection Agency (US EPA).

Key words: CMDS, Compaction method, Moisture content, Strength, Hydraulic conductivity

서 언

수도권 매립지 관리공사의 2002년도 연말 통계에 따르면, 일일 평균 일반 복토재 사용량은 약 4,300여 톤에 이른다.(수도권 매립지 관리공사, 2002) 이를 연장으로 환산하면 약 150 여 만톤 이나 되는 엄청난 물량이다. 이 복토재를 확보 하려면 많은 양의 토사가 필요한데 이는 주로 공사장, 산이나 하천을 깎아 내고 파헤쳐서 얻는 것이 대부분이고 일부는 지하철 공사에서 나오는 토양을 복토재료로 사용하고 있는 실정이다. 이러한 토사의 확보 방법은 모두가 많은 인건비, 물류비용 등의 부대비용이 들어간다. 무기성 산업 폐기물을 대체 복토재료로 개발해서 자원을 재활용하고 아울러 복토예산의 절감, 환경오염의 저감, 폐기물 감량 등의 효과를 기대할 필요가 있다.

2006년 기준 무기성 산업폐기물 폐석회(고)는 약 200 만 톤/년, 석탄회 약 600 만톤/년으로 많으나 재활용되고 비율은 현저히 낮다.(환경부, 2006) 또한 97

년 7월에 개정된 폐기물 관리법에 의해 2001년 1월 1일 이후에는 배출업소의 유기성오니를 바로 매립하여서는 안 된다고 규정하고 있다. 유기성 폐기물의 직매립이 금지되고 해양투기 등에도 “런던협약 96의정서”, 환경단체의 저지활동, 정부정책 등에 부응하여 2011년 이후에는 금지될 것으로 예상되므로 (산업자원부, 해양수산부, 1996) 새로운 처분 방안의 검토가 시급한 실정이다. 이러한 분위기에 편승하여 최근에는 슬러지의 재활용을 위한 연구가 많이 수행되고 있는데 재활용방법 중 많이 연구되고 대량으로 소요될 수 있는 분야는 매립지 복토재로서의 재활용이다.

구체적으로 벨기에 Flanders 지방에서는 재활용 폐기물과 슬러지를 혼합하여 매립지의 복토재로 이용하고 있으며, 미국의 경우 탈수오니를 석회로 안정화시켜 매립지의 복토재 대용으로 사용하고 있고, (US EPA, 1993)에서는 하수슬러지를 쓰레기 매립지의 일일 복토재 또는 최종복토재로의 자원으로 활용하도록 권고하고 있다. 유용한 처리방법 중 하나인 고화처리 방법은 좁은 국토로 인하여 매립지 확보 및 복토를 위한 토사의 안정적인 확보에 어려움이 예상되는 국내 현실을 감안한다면 토사를 대체할 대용 복토재의

접 수 : 2008. 7. 7 수 리 : 2008. 9. 18

*연락처 : Phone: +82232903318,

E-mail: hyeong@korea.ac.kr

개발 및 실용화는 기존 매립지의 수명 연장과 경제적인 측면에서 중요한 의미를 가진다. 또한 처리시설의 건설 및 운전엔 큰 비용이 들지 않는 기술로 실제 적용이 쉽고 경제적이며 대량 처리가 가능한 환경 친화적인 슬러지 처리기술로서 유기성 슬러지의 직 매립 금지조치에 대한 하나의 적극적인 대응방안이 될 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구에서는 시멘트와 같은 자경성을 가진 폐석회, Fly ash등을 사용하여 고화제의 단가를 낮추어 경제성을 도모하고자 하였고, 전기정화법으로 석탄광산 산성배수를 처리 시 발생하는 슬러지를 인공복토재로 사용가능성을 파악하기 위하여 비료공장 등에서 부산물로 배출되는 폐석회와 Fly ash, 포틀랜드 시멘트 등을 적절하게 배합하여 액성 소성한계시험, 압축강도시험, 투수시험을 통하여 복토재 기준에 적합여부를 판단하여 슬러지의 재활용 가능성을 연구하였다.

재료 및 방법

실험재료 본 연구에 사용된 슬러지는 전기정화법으로 석탄광산 배수를 처리 하고 기계로 탈수 처리한 슬러지이다. coal mine drainage sludge (CMDS)는 원수의 성분이나, 운전조건에 따라 입도에 다소의 차이는 있으나, 4계절의 탈수 슬러지의 입경을 분석한 결과 평균 입도는1.061-2.356 m이었다. 본 연구를 위해 시료가 채취된 12-1월에 슬러지의 pH 8.3, 강열감량은 18.5%, 수분함량 24.5%이었다. XRD(X-ray diffractometer/X' pert PRO/PHILLIPS)정성분석 결과 석영(Quartz),

침철석(Goethite/FeOOH), 자철석(Magnetite/Fe₃O₄) 이 검출되었고, ICP-AES (Inductively coupled plasma

atomic emission spectrometer/OPTIMA 5300 DV/Perkin Elmer)전 함량 분석결과 주요성분인 Fe₂O₃ 64.7 68.7 wt %, CaO 8.6 10.5 wt %, Al₂O₃ 0.52 0.79 wt %, MgO 0.32 0.56 wt % 으로 검출되었다. 유해성 용출 특성을 분석하기 위하여, Table 1에서 한국폐기물 공정시험법(KSLP: Korea standard leaching procedure)과 US EPA에서 사용되고 있는 TCLP(Toxicity characteristic leaching procedure, EPA method 1311)방법으로 분석한 결과 Table 1과 같이 모든 수치가 기준치 이하로 검출되어 재활용 가능할 것으로 판단된다.

고화제 본 연구에 사용된 고화제는 소다회(Na₂CO₃)제조공정에서 발생하는 폐석회 또는 복합비료 생산과정에서 발생하는 폐석고(CaSO₄·2H₂O), 미분탄을 연료로 사용하는 화력발전소등의 연소 보일러에서 발생하는 비산회 또는 플라이 애쉬(Fly ash), 연약지반이나 팽창성 토사의 안정제로 많이 이용되고 있고 강도증진의 효율을 높이는 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고화제는 폐석회:시멘트:비산회를 무게비율로 (0.3:0.3:0.4) 하여 사용하였다.

실험방법

혼합비율 산정 탄광슬러지와 고화제의 혼합비율에 따른 보강효과를 검토하기 위하여 슬러지와 고화제의 혼합비율을 중량비율로 1:1, 1:0.8, 1:0.6, 1:0.4 시료를 혼합하여 각각의 시료에 대하여 액성, 소성한계시험, 다짐시험, 압축강도시험, 투수시험을 실시하였다.

Table 1. Comparison Korea standard leaching procedure and US EPA TCLP standard.

Method	KSLT	TCLP
object	Industrial waste judgment	Leachate Monitoring (Industrial waste)
Preprocessing	5.0 ~ 5.5 mm	9.5 mm
Shake	Returning horizontality shake Shake wide: 4~5 cm Shake number:200 rpm	Rotary Extraction Device Shake number:30 rpm
Shake time	6hr	18hr
pH	Distilled water in HCl addition pH 5.8~6.3 control	Fluid 1: 4.93±0.05 Fluid 2: 2.88±0.05
waste	10:1 100 g above	20:1
separation	1 μm membrane filter	0.6~0.8 μm membrane filter
Instrument;	2 L Flask	2 L의 Teflon or PE

액성 · 소성 시험 액 · 소성한계시험 중 소성상태에서 액성 상태로 변하는 순간의 함수비를 구하기 위한 시험이 액성한계 (LL, Liquid Limit) 시험이며, 일반적으로 액성한계가 크면 팽창 및 수축성이 크게 된다. 그리고 흙의 소성상태와 반고체 상태의 한계를 나타낼 때의 함수비를 구하는 시험이 소성한계 (PL, Plastic Limit) 시험이다. 소성한계는 노반재료의 적부판정에 주요한 요소가 되며, 흙의 분류뿐만 아니라 흙의 공학적 성질을 구하기 위한 중요한 요소이다. 여기서 LL-PL 이 소성지수 (PI, Plastic Index)가 되며, 이 결과를 이용하여 흙을 분류할 수 있게 된다. 입자가 가는 세립토의 흙의 분류는 1948년 Casagrande가 제안한 LL-PI 관계를 6개의 영역으로 나타낸 소성도표 (Plastic chart)가 주로 이용되고 있으며 이 결과와 통일 분류법 (USCS, Unified Soil Classification System)을 이용해 흙의 성질을 파악할 수 있다. 액성 소성 한계 실험은 KS F2303 방법과 KS F2304 방법을 이용하여 실시하였다.

다짐시험 흙의 다짐 시험목적은 흙 시료에 함수비를 변화시키며 동일한 부피와 에너지로 다져서 함수비-건조단위중량 관계의 다짐곡선을 그린 후 최대건조단위중량, 최적함수비를 선택하여 시공현장에 알맞은 다짐 함수비의 범위를 구하는 것이다. 본 실험에서는 KS F 2312의 규정에 의거하여 수도권 매립지에서 사용되는 A 다짐방식을 택하여 시험을 실시하였다.

압축강도 시험 압축강도시험용 시료는 다짐시험을 통해 구한 각 혼합비율에서 최적 함수비와 최대건조단위중량 상태로 제조하였으며 압축형 시료성형 몰드 지름 70 mm, 높이 150 mm의 KS F 2314를 이용하여 온

도 25°C, 습도 95%가 유지되는 항온 항습기에 투입하여 일정기간 양생을 거친 뒤 Digital식 압축강도시험기를 이용하여 공시체의 압축강도를 분석하였다.

투수 시험 투수시험용 시료는 압축강도시험을 통해 구한 각 혼합비율에서 최적 변형율과 최대압축강도 상태로 제조하였으며 실험방법은 ASTM D 5084를 이용하여 삼축압축 투수계수 실험방법을 선택하였다.

복토재 기준 매립장의 복토는 사용되는 목적에 따라 크게 세 가지로 구분 할 수 있다. 즉 일일복토, 중간복토, 최종복토이다. 국내에서는 복토재의 조건에 대해 명확한 언급은 없으나 수도권 매립지 기반시설 조성사업 공청회자료에서 투수계수를 $5 \times 10^{-5} \text{ cm sec}^{-1}$ 제한 한바 있고, 차량이동에 필요한 압축강도는 0.5 kg cm^{-2} 이상을 요구하고 있다. 폐기물 관리법에도 일일복토, 중간복토, 최종복토의 두께만 나타내고 있을 뿐 특별한 기준이 없는 실정이다. 미국의 경우는 복토재 용도를 충족하는 적절한 재료라면 이용이 가능하다고 언급하고 있다. Table 3는 미국 환경청 (US. EPA)에서 요구하는 복토재의 기준이다.

Table 3. Regulation US EPA regarding materials for covering sanitary landfill.

Item	US EPA Regulation
Liquid limit (LL)	Under 50%
Plasticity Index (PI)	Under 25%
Max. Dry density	More than 1.5 t m^{-3}
Porosity	Under 42%
Content of organic clay and mud	Small quantity

Table 2. Contents of heavy metal tested by CMD sludge rural development administration.

Item	Standard amount for designated waste	KSLP			TCLP	
		Spring	Autumn	Winter	Spring	Winter
	mg kg ⁻¹					
Pb	3.0	0.052	0.071	0.01	0.021	0.011
Cu	3.0	0.011	ND	0.022	0.018	0.023
As	1.5	0.034	ND	0.021	0.024	0.035
Hg	0.005	ND	0.002	ND	ND	ND
CN-	1	ND	ND	ND	ND	ND
Cr6+	1.5	0.012	ND	0.067	ND	0.006
Organic phosphor	1.0	ND	ND	ND	ND	ND
TCE	0.1	ND	ND	ND	ND	ND
PCE	0.3	ND	ND	ND	ND	ND
Oil	5%	5%	5%	5%	5%	5%

ND: Not detected

결과 및 고찰

입도 분석 결과 전기정화법으로 석탄광산 배수를 처리한 후 탈수된 슬러지의 입도를 레이저 회절법 (Model: Seishin LMS-300)으로 분석한 결과 평균 입경은 Fig.1에서 볼 수 있듯이 입자의 크기는 1.061 2.356 m로 전체적으로 입도의 분포가 고르게 분포되어 미국 농무성 (USDA)분류법에 의해 점토로 판명되었고, 투수계수 시험결과 $8.5 \times 10^{-5} \text{ cm sec}^{-1}$ 로 국내 복토재 규정의 투수계수 $1 \times 10^{-5} \text{ cm sec}^{-1}$ 이하를 약간 상회하는 수준으로 다소의 보강만 이루지면 복토재로서의 성능을 충분히 발휘할 수 있다고 판단된다.

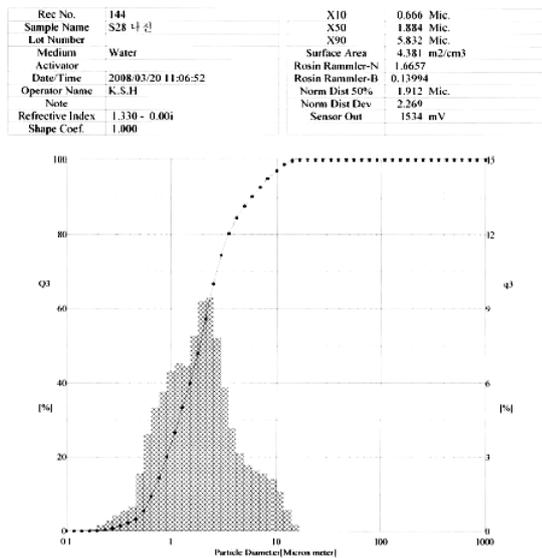


Fig. 1. Grain size distribution curve.

탄광슬러지와 고화재 혼합비율에 따른 액소성 한계 실험 혼합비율 1:1, 1:0.8, 1:0.6, 1:0.4일 때 각각의 액성한계 (LL), 소성한계 (PL), 소성지수 (PI)는 Table 4에 나타냈다. 또한 소성지수는 각 혼합비율에서 높게 나타나 US EPA 기준치 10% 이상과 이탈리아

아 기준치 10% 이상을 만족 할 수 있었다. 또한 미국 위스콘신주 기준치 15% 이상도 만족하였다. 미국 농무성 분류법을 이용한 흙의 분류방법에서는 점토 계열로 분류되었고, 소성지수가 혼합비율 1:0.6이상에서 19.4%이하로 적합성이 좋은 것으로 나타났다.

또한 Murray 등(1996)에 의하면 흙의 액성한계와 소성지수가 소성도의 A-Line(National Rivers Authority's: NRA, 1992의 data를 plotting 한 결과임) 아래에 위치할 경우 실트나 모래질 흙으로 큰 투수계수를 갖기 때문에 매립지 복토재/차수재로는 부적합하다. 따라서 A-line위에 위치한 적합(Suitable) 또는 최소적합(Marginal) 영역에 속해야 한다. 본 연구에서 사용된 석탄광산 슬러지의 경우 Fig.2에서 알 수 있는 바와 같이 적합영역에 속하는 토사로 나타났다.

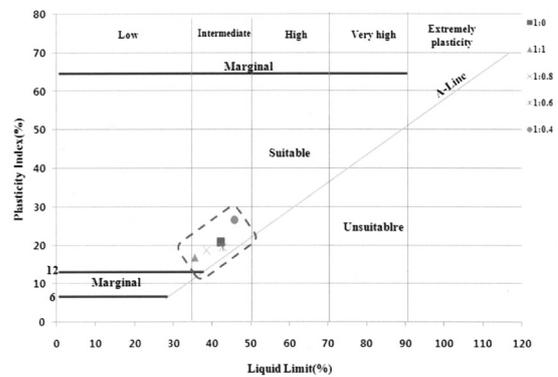


Fig. 2. Plasticity chart showing index property of CMD sludge.

다짐실험 결과 Figure 3은 탄광슬러지와 고화재 혼합비율에 따른 다짐시험곡선을 나타내고 있다. 이는 현장에서 임의의 함수비로 흙을 다질 때 예상되는 단위중량을 결정하기 위하여 실시하며 슬러지와 고화재의 혼합비율이 1:1, 1:0.8, 1:0.6, 1:0.4 일 때 최대건조밀도와 최적함수비는 각각 1.296 g cm⁻³, 27.5%: 1.275 g cm⁻³, 32%: 1.240 g cm⁻³, 33.5%: 1.196 g cm⁻³, 36.5%로 고화재의 혼합비율이 증가할수록 최대건조단

Table 4. Geotechnical characteristics of mixture sludge.

Item	CMD sludge and Lithification material mixture ratio			
	1:1	1:0.8	1:0.6	1:0.4
mixture ratio	1:1	1:0.8	1:0.6	1:0.4
LL(Liquid limit) (%)	35.5	38.6	42.8	45.9
PL(Plastic limit) (%)	17.8	19.2	20.52	23.1
PI(Plasticity Index) (%)	16.8	18.6	19.4	26.2
Porosity (%)	26.4	28.6	32.5	38.6
Optimum moisture content (%)	27.5	32	33.5	36.5
Max dry density (g cm ⁻³)	1.296	1.275	1.240	1.196
Strength (kg cm ⁻²)	11.3	12.7	8.2	10
Hydraulic conductivity (cm sec ⁻¹)	5.7×10^{-6}	1.8×10^{-6}	2.7×10^{-6}	1.6×10^{-6}

위중량 값은 증가하고 최적함수비는 떨어지는 경향을 볼 수 있었다.

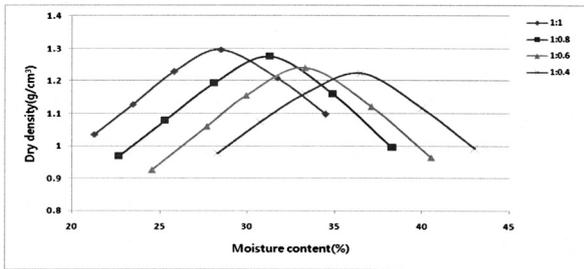


Fig. 3. Results of compaction test.

압축강도 실험 결과 Figure 4에서 각 혼합비율과 습윤 양생 일에 따른 압축강도 실험결과를 나타내었고 모든 혼합비율은 중량비로 혼합하였다. 국내의 경우 복토재에 대해서는 폐기물 관리법에서 포설두께만 규정하고 있을 뿐 강도나 투수계수에 대한 명확한 규정은 제시되고 있지 않다. 그러나 일반적으로 건설기계의 주행이 가능한 강도가 0.5 kg cm^{-2} (강화영 등, 2002; Rhew 등, 1995) 이상이므로 본 연구 결과에서 복토재 강도 권고치로 0.5 kg cm^{-2} 이상을 기준으로

사용하였다. 혼합비별로 혼합 후 1, 3, 7일 양생된 모든 혼합비에서 압축강도는 $8.2 \sim 26.4 \text{ kg cm}^{-2}$ 로 매립지 복토재 강도 권고치인 0.5 kg cm^{-2} 이상의 강도를 보여 매립지 복토재로의 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 모든 양생기간에서 혼합비율이 증가할수록 압축강도도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고화재 중 생석회(CaO), 비산회, 시멘트 등의 포졸란 및 탄산화 반응에 의해 미립자인 점토, 콜로이드 성분이 단립화하고 이에 따라 입도분포가 변화하여 양질토로 개량되어 일축압축강도가 증가한 것으로 매립 중장비의 주행성 및 지지력이 향상될 것으로 기대된다.

투수 실험 결과 Table 5에 탄광슬러지와 고화재의 각 혼합비율에 대한 투수계수 실험결과를 나타냈다. 복토재의 투수계수 역시 국내에는 명확한 기준은 없으나 1995년 수도권 매립지 기반시설 조성사업 공청회자료에 따르면 복토층에 대한 투수계수 설계 적용 조건을 $5 \times 10^{-5} \text{ cm sec}^{-1}$ (김응호 등, 1999; 수도권매립지 운영관리조합, 1995)로 제시하고 있으며 석회 안정화슬러지를 복토재로 이용하고 있는 미국은 New Jersey 주 Middlesex County 에서는 투수계수의 범위를 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm sec}^{-1}$ (강화영 등, 2002)로 제시

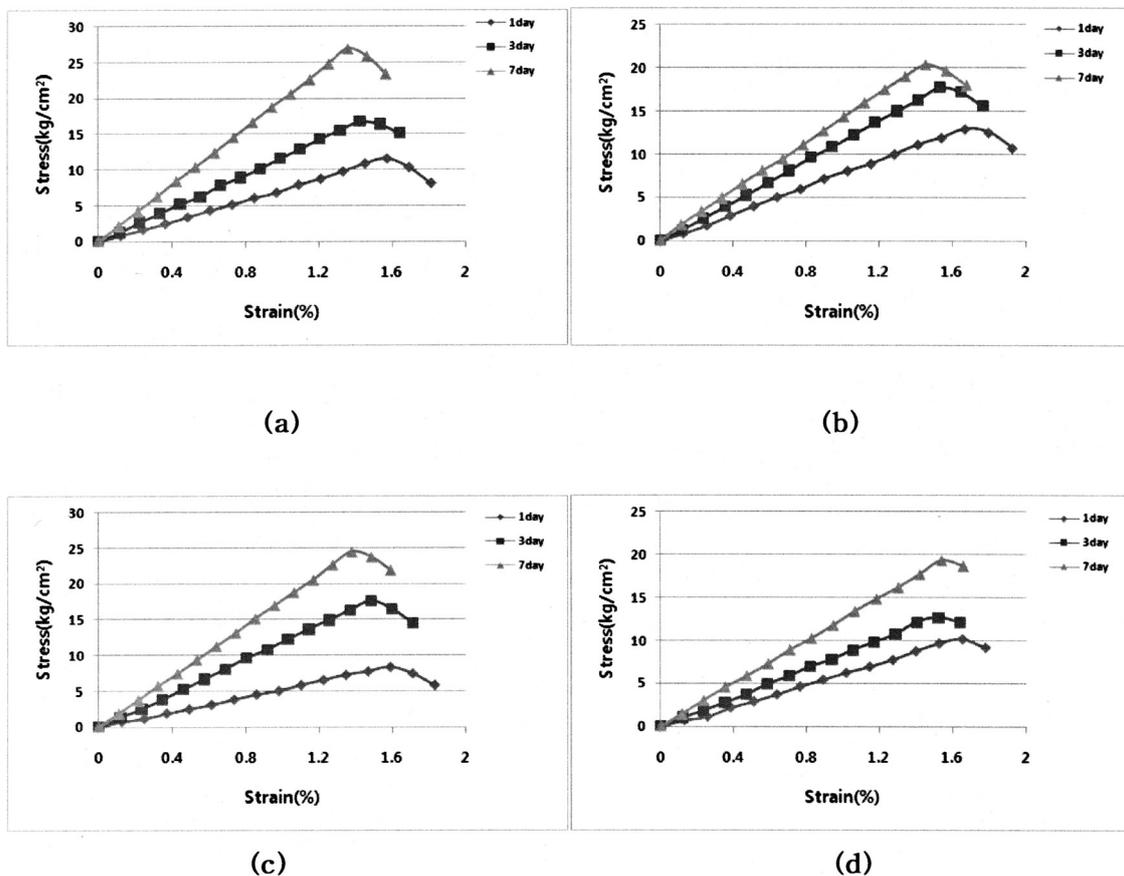


Fig. 4. Results of unconfined compression test for mixed sludge. (a) mixed ratio 1:1; (b) mixed ratio 1:0.8; (c) mixed ratio 1:0.6; (d) mixed ratio 1:0.4

Table 5. Triaxial permeability test.

Compaction method	A			
Mixing ratio	1:1	1:0.8	1:0.6	1:0.4
Curing day	Hydraulic conductivity (cm sec ⁻¹)			
1day	5.7×10 ⁻⁶	1.8×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁶
3day	3.2×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻⁶	2.2×10 ⁻⁶	9.5×10 ⁻⁷
7day	1.7×10 ⁻⁶	6.5×10 ⁻⁷	1.3×10 ⁻⁶	4.2×10 ⁻⁷

하고 있다.

투수시험은 Channeling 방지를 위해 Flexible Wall Membrane 타입의 삼축압축시험 방법을 택하여 투수 시험을 수행하였다. 실험결과 모든 혼합비에서 매립지 복토재의 투수계수 권고치인 5×10⁻⁵ cm sec⁻¹이하를 만족하는 4.2×10⁻⁷~1.7×10⁻⁶의 값을 보였으며, 압축강도가 증가할수록 투수계수는 감소하였다.

결 론

본 연구에서는 일반폐기물로 분류되는 석탄광산 배수 처리 시 발생하는 슬러지의 복토재로의 재활용가능성을 모색하기 위하여 슬러지를 고화재와 혼합한 후 다양한 실내시험을 실시하여 미국 환경청(US EPA)에서 규정한 쓰레기 매립장의 복토재 기준에 적합한 혼합토를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 탄광슬러지의 입도를 분석한 결과 1.061-2.356 m로 미국 농무성 (USDA)분류법에 의해 점토로 판명되었다.
2. 다짐시험결과 탄광슬러지와 고화재의 혼합비율이 1:0.6 이상에서 최적 함수율은 33.5% 이하 이고, 압축강도의 경우 모든 혼합비율에서 건설기계의 주행이 가능한 강도인 0.5 kg cm⁻²를 만족하는 값을 보여 매립 중장비의 주행성 및 지지력이 향상될 것으로 판단된다.
3. 투수계수의 경우 복토재의 조건인 5×10⁻⁵ cm sec⁻¹를 만족하는 4.2×10⁻⁷~1.7×10⁻⁶ cm sec⁻¹의 값을 보였다. 이는 생석회의 고화반응, 비산회의 포졸란 반응, 시멘트의 수화반응에 의해 공시체 내부 공극이 치밀해져 강도 증가와 투수계수 감소가 일어나는 것으로 판단된다.
4. 슬러지와 고화재의 혼합비율을 중량비로 1:0.6이상, 다짐방식은 A 다짐, 함수율은 33.5% 이하로 하면

슬러지를 중간 복토재로 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 실험을 통해 생성된 인공 복토재는 단순한 혼합에 의해 단 시간 내에 복토재를 생산할 수 있으며, 시료의 전처리가 없다는 장점과 폐부산물의 재활용이라는 측면에서 인공복토재로의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 2008년도 광해방지기술개발 사업 (R0710982)에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

인 용 문 헌

Murray EJ, Rix DW, Humphrey RD 1996. Evaluation of clays as linings to landfill IN: Bentley, S.P.(ED), Engineering Geology Waste Disposal, Geological Society engineering geology special publication No. 11, London

Rhew R D and Barlaz A. 1995. Effect of limestabilized sludge as landfill cover on reuse decomposition, EnV. Eng, 99: 499-505

US. EPA:40CFR Parts 503, 1993. Standards for the use and disposal of sewage sludge rule, Federal Register, 58(32): 9247-9420

강화영, 김종진, 이영동, 삭상숙, 정정조 2002. 유기성 폐기 슬러지를 이용한 매립 장 복토재 개발, 대한환경공학회, 24(9): 1569-1577

김응호, 조진규, 조태룡 1999. 제강전로슬래그로 고화처리된 하수소화슬러지의 일 일/중간복토재로의 활용을 위한 토질공학적 특성, 한국물환경학회지, 15(2): 277-282

수도권매립지 운영관리조한 1995. 수도권매립지(3공구)기반시설 사업공청회 자료, 245-246

수도권 매립지 관리공사 통계자료, 2002

런던협약 96의정서, 1996

폐기물 관리법, 1997

환경부 통계자료, 2006

산업자원부, 해양수산부, 1996