한국지반환경공학회 논문집
제12권 제5호 2011년 5월 pp. 43~50

슬러지 혼합토의 공학적 특성

The Engineering Characteristics of the Sludge Mixed Soil

김 정 운[1)] · 김 명 균[2)] · 배 우 석[†]
Kim, JungUn · Kim, MyeongKyun · Bae, WooSeok

ABSTRACT : As a result of population growth and economic growth, household and industrial wastes continue to rapidly increase every year. Especially, sewage sludge produced at final stage is increasing with the constant construction and putting in good order of the sewage plant. In addition to the government's prohibition for filling up the sludge, it became more and more difficult to discharge wastes to the sea as London Dumping Convention '96 came into effect. And sewage sludge and the livestock wastes are expected to be thoroughly prohibited from discharging to the sea from 2012. So we need desperately economical and useful alternatives to compact and reuse these wastes. The purpose of this study is to evaluate the utilization of solidified sludge-soil mixture as an enhancement and covering material. To determine the proper mixed ratio of solidified sludge, this study conducted basic physical properties tests, compaction tests, uniaxial compression tests, and permeability test. It was found that the higher the ratio of solidified sludge, the lower the coefficient of permeability. Upon the results of particle size distribution, the mixed ratio of solidified sludge that meet the enhancement material condition was 59% or lower for SP granite soil and 48% or lower for SM granite soil respectively.

Keywords : Sewage sludge, Solidified sludge-soil mixture, Mixed ratio, Compaction tests, Permeability test

요 지 : 최근 인구 증가 및 경제성장으로 인한 생활수준의 향상과 더불어 산업의 고도화로 인하여 산업폐기물이 매년 증가 추세에 있다. 그중 우리나라의 하수처리장에서 최종산물로 발생하는 하수슬러지는 하수관거정비 및 하수처리장 건설사업의 지속적인 추진으로 인해 하수슬러지의 양은 매년 크게 증가하고 있지만 슬러지의 직매립 금지와 런던협약 '96 의정서가 발효되면서 폐기물의 해양배출규제가 대폭 강화됨에 따라 하수슬러지의 해양배출이 사실상 어려워지고 있으며, 2012년부터는 하수슬러지 및 축산폐수의 해양배출을 전면 금지할 계획에 있어 매립처분 및 해양 배출을 대체할 경제적이면서 실용적인 감량화 및 재활용기술이 절실히 요구되고 있다. 이 연구의 목적은 하수슬러지를 주재료로 사용하고, 지역토사를 혼합재로 사용하면서 복토재 및 쌓기재료로 적합한 혼합비율을 결정하는 것이다. 적절한 혼합 비율을 결정하기 위해 기본적인 물리적 특성실험, 다짐실험, 일축압축실험, 투수실험을 수행했다. 그 결과 슬러지고화물의 비율이 높을수록 투수 계수가 낮아졌다. 결론적으로 매립지 복토재 상태에 부합하는 최적의 투수계수는 슬러지 고화물의 혼합비가 13%이거나 그 이상일 때 얻어졌고 쌓기재에 만족하는 슬러지 고화물의 비율은 흙의 종류에 따라 SP일 경우 48% 이하일때, SM일 경우 59% 이하의 비율일 때 충족되었다.

주요어 : 하수슬러지, 슬러지 고화물-흙 혼합토, 혼합비, 다짐시험, 투수시험

1. 서 론

최근 산업의 고도화로 인하여 도시폐기물이나 산업폐기물의 발생량이 매년 증가 추세에 있어 이들의 처리가 새로운 사회 문제로 대두되기 시작하였으며, 매년 막대한 예산이 소요되고 있다. 그중 우리나라의 하수처리장에서 최종산물로 발생하는 하수슬러지의 양은 매년 크게 증가하여 2011년에는 2005년 대비 약 43% 정도가 증가된 10,071tonf/day이 발생될 것으로 예측되고 있다. 이렇게 발생된 슬러지는 대부분 매립에 의존하였으나 2003년부터 1일 1만톤 이상의 시설용량을 가진 하수처리장에서 발생되는 슬러지의 직매립이 금지되면서 해양배출에 크게 의존하여 2005년에는 발생량의 77%를 해양배출로 처리하였다. 그러나 런던협약 '96 의정서가 발효되면서 폐기물의 해양배출 규제가 대폭 강화됨에 따라 하수슬러지의 해양배출이 사실상 어려워지고 있으며, 2012년부터는 하수슬러지 및 축산폐수의 해양배출을 전면 금지할 계획에 있어 매립처분 및 해양배출을 대체할 경제적이면서 실용적인 감량화 및 재활용 기술이 절실히 요구되고 있다.

이러한 폐기물의 공학적 활용을 위해 유남재 등(1994)은 하수슬러지를 매립장에 단순히 투기하는 소극적 처리에서 소정의 혼화재를 첨가하여 하수슬러지의 물성을 증진시킴으로써 건설재료로의 적극적 활용이 가능한 처리 방안을 연구하였다. 김영관 등(1995)은 석회를 사용하여 화학적으로

1) 비회원, 청주대학교 토목환경공학과 석사
2) 정회원, 청주대학교 환경조경토목공학부 토목환경공학전공 교수
† 정회원, (주)나노지오이엔씨 기술연구소장(E-mail : old1007@hanmail.net)

안정된 슬러지를 포졸란 특성을 지닌 플라이애쉬와 혼합하여 쓰레기 매립지 복토재로 재활용하는 방안에 관한 타당성을 지반공학적 특성을 중심으로 발표한 바 있으며, 유남재 등(1999)은 슬러지와 화강풍화토의 혼합물은 80%에서, 슬러지와 플라이애쉬 혼합물은 60%에서 최대건조단위중량과 최적함수비의 변화가 큼을 밝힌 바 있고, 남영우 등(2001)에서는 생석회만을 사용한 것과 제조된 다성분 고화재를 사용하여 양생한 개량체를 비교하여 우선적으로 강알칼리 및 중금속을 해결하고 토공재료인 쌓기재로서의 재활용 가능성을 연구하였다. 또한 박흥규 등(2002)은 모래와 유기질토의 혼합토는 유기질토 혼합비 40% 내에서는 쌓기재로서의 활용이 가능하며 풍화토와 유기질토의 혼합토는 유기질토 혼합비 30% 이내에서 토공재로서 활용이 가능하다고 발표하였으며, 김민길(2007)은 하수슬러지에 혼합고화 처리한 고화토를 복토재로 활용하기 위하여 악취의 제어와 강도증진을 위한 첨가재를 개발하였다.

국외의 경우 Barlaz 등(1990)과 Rhew 등(1995)은 석회로 안정된 매립지의 복토는 침출수를 중화하여 매립지내의 토양을 중성 상태로 만들고 혐기성 분해를 촉진하여 매립지를 조기에 안정화시킬 수 있다고 발표하였다. Shenbaga(1996)는 플라이애시와 흙의 혼합비에 따른 복토재 개발에 대하여 연구하였으며, Indraratna 등(1996)은 산업부산물인 철강슬래그와 점토 석회를 혼합한 복토재에 대하여 발표하였다.

그러나 슬러지와 같은 유기질토계 흙들은 악취와 고함수비, 효용성이 떨어지는 흙들로 분류되어 양질의 흙으로 치환하거나 지반보강 대책을 강구해야하는 실정이며, 폐기물 zero화나 폐자원의 재활용을 고려할 때 이와 같은 불량한 흙의 물성을 보강하여 그 효용성을 극대화할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 안정 처리된 하수슬러지 고화물이 혼합된 혼합토의 공학적 특성을 조사한 후 토목재료로서의 활용 가능성에 대해 연구하였다.

2. 실험재료 및 물리적 특성

폐기물 매립 후 안전한 관리를 위하여 매립지의 위생 및 경관 향상, 주변 환경 보호대책 등의 기능을 고려하여 적당한 토양을 선택하여 복토재를 사용하고 있으며, 지표수의 침투를 방지하기 위한 기준으로 유기성 점토가 함유되지 않은 흙으로 액성한계 50%이하, 소성지수 25%이하, 최대 건조밀도 1.5t/m^{3}를 제시하고 있다. 또한 쌓기재로의 활용을 위하여 상부와 하부노상, 노체에 대해 25～50% 이하의 #200체 통과율과 10～30이하의 소성지수, 1.5 이상의 건조밀도와 2.5～10이상의 수정CBR을 갖도록 규정하고 있다. 자세한 기준은 표 1과 같으

표 1. 일반국도의 품질기준

	구분	품질기준						시공		
규정	쌓기위치	최대치수 (mm)	수정 CBR	4.75mm 체통과율 (%)	0.075mm 체통과율 (%)	소성지수	slaking 율(%)	건조 밀도 (tf/m^3)	다짐 두께 (cm)	다짐도 (%)
고속도로 전문시방서 (‘98 개정)	노상	100 이하	10 이상	25/100	0/25	10 이하	-	1.5 이상 (14.71kN/m^3)	20	95
	노체	300 이하	2.5 이상	-		-	-	1.5 이상 (14.71kN/m^3)	30	90
고속도로 전문시방서 (‘96 개정)	노상	100 이하	10 이상	25/100	0/25	10 이하	-	1.5 이상 (14.71kN/m^3)	20	95
	노체	300 이하	2.5 이상	-		-	-	1.5 이상 (14.71kN/m^3)	30	90
도로설계 요 령 (‘96 개정)	상부노상	100 이하	10 이상	25/100	0/25	10 이하	-	-	20	95
	하부노상	150 이하	5 이상	-	50 이하	30 이하		-	20	90
	노체	-	2.5 이상	-		-	-	1.5 이상 (14.71kN/m^3)	30	90
도로공사 표준시방서 (‘09 개정)	노상	100 이하	10 이상	25/100	0/25	10 이하	-	-	20	95
	노체	300 이하	2.5 이상	-	-	-	-	1.5 이상 (14.71kN/m^3)	30	90
도로공사 표준시방서 (‘96 개정)	노상	100 이하	10 이상	25/100	0/25	10 이하	-	-	20	95
	하부노상 (60cm)	150 이하	5 이상		50 이하	20 이하				
	노체	150 이하		-	-	-	-	1.5 이상 (14.71kN/m^3)	30	90

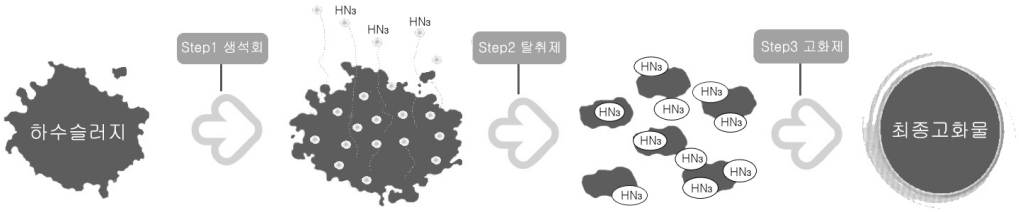


그림 1. 슬러지 고화물의 생성과정

며 본 연구에서는 안정 처리된 하수슬러지 고화물이 혼합된 혼합토의 활용성을 평가하기 위해 실험을 통하여 공학적인 특성을 파악하였다.

2.1 슬러지 고화물

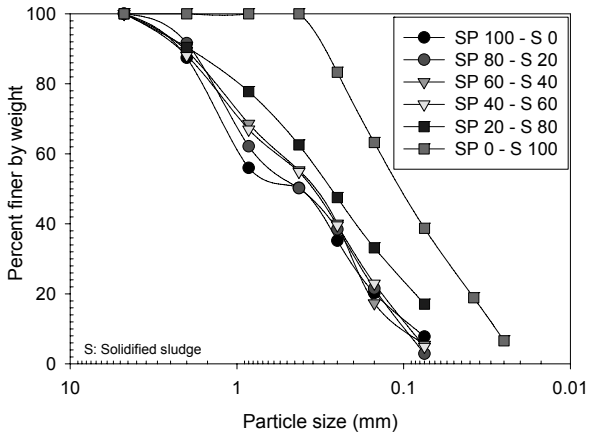
하수슬러지가 복토재, 쌓기재와 같은 토목재료로 사용되기 위해서는 오염물질의 배출을 억제해야 하며 시공 가능하여야 하고 장기적 안정성을 유지해야 한다. 따라서 본 연구에서는 환경공학적으로 처리한 슬러지를 매립장의 복토재와 쌓기재로서 재활용하기 위해 현지토를 대상시료로 사용하였다. 혼합을 위해 사용된 슬러지 고화물은 그림 1과 같은 공정을 통하여 생석회 46.15%, 탈취제 38.46%, 고화제 15.39%의 함량으로 만들어졌다(김민길, 2007). 생석회는 흡수발열반응으로 수분을 감소시키고 Na^{+} 및 Mg^{2+}에 의한 이온교환반응으로 단립화 및 용출 억제 능력이 있으며, 탈취제는 정수장 슬러지로 제조한 미세 공극구조의 다공성 물질로 Al과 PO_4^{3-}성분을 이용, 수열합성반응으로 3차원구조 물리적 흡착 원리를 통해 암모니아가스 발생을 억제한다. 고화제는 산업부산물을 이용하여 고화반응 촉진에 의한 반응시간 단축으로 조기 안정화를 시킬 수 있다. 슬러지 안정화 실험으로 생성된 슬러지 고화물은 혼합직후 고화체의 표면 1cm에서 10ppm 내외이며, 고화체 내부에서도 30ppm 정도의 수준을 나타내어 기존 재료보다 둔화되고 있고 용출시험결과 국내 및 미국기준보다 적게 검출되어 2차오염의 우려가 존재하지 않음을 알 수 있다.

김민길(2007)은 실험에 사용한 하수슬러지가 고형화 처리 후 지정폐기물의 판정기준인 pH 12.5 이하의 수치를 보이고 있으며, 고화 시 문제가 되는 암모니아의 악취를 효과적으로 제어되어 폐기물관리법상의 복토재 규정을 만족하고 있다고 주장하고 산업부산물을 활용한 보조첨가제와 하수슬러지를 활용한 인공복토재를 개발한 바 있다. 그러나 본 인공복토재는 많은 양을 필요로 하는 현장에서는 매우 제한적일 수밖에 없으므로 현장 발생토와 혼합하여 복토재는 물론 쌓기재로의 활용가능성을 모색하는데 본 연구의 목적이 있다.

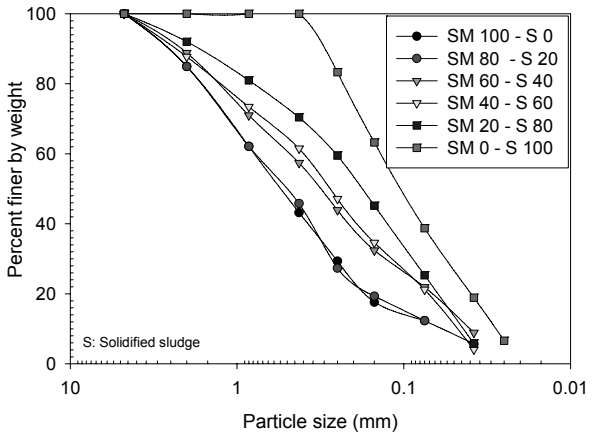
2.2 혼합재료

본 연구에서는 대상현장에서 쌓기나 복토재로 쉽게 사용할 수 있는 재료와 혼합했을 경우의 특성을 평가하기 위해 화강풍화토를 주된 혼합재료로 선정하였으며, 시료 채취 시 샘플링 오차를 줄이고 시료의 대표성을 높이기 위해 충청북도 청주시 우암산 인근의 두 장소(A, B)에 격자망을 설정하여 각각 10개 시료를 채취한 후, 지역별로 혼합하여 A, B지역의 대표시료로 결정하였고 시료는 24시간 동안 노건조시킨 뒤 No.4 체를 통과한 시료만을 사용하였다.

A, B지역의 화강풍화토와 슬러지 고화물에 대한 체분석



(a) A지역



(b) B지역

그림 2. 혼합토의 입도분포곡선

결과 그림 2와 같이 #200 통과량이 각각 5.1, 12.3, 55.5%로 통일분류법 상 A지역의 화강풍화토는 SP, B지역의 화강풍화토는 SM이었으며 슬러지 고화물은 MH에 해당되는 것으로 분석되었다.

2.3 혼합토의 물리적 특성

고형화된 슬러지와 처리가 필요한 현장잔여토의 성토재나 복토재로의 활용을 위한 최적의 배합비를 결정하기 위해 화강풍화토의 함량을 건조토의 무게를 기준으로 20% 씩 증가시켜가며 기본 물성실험(비중, Atterberg 한계 및 체분석)을 수행하였으며, 환경적인 변화를 확인하기 위해 혼합비별 pH의 변화를 측정하여 표 2와 같은 결과를 도출하였다.

화강풍화토의 경우 #200체 통과율은 각각 4.89%와 12.3%, 곡률계수는 각각 0.529와 0.505, 균등계수는 각각 11.53과 19.74로 나타났으며, 슬러지 고화물의 경우는 #200체 통과량이 55.5%, 곡률계수 0.747, 균등계수는 5.357로 나타났고 슬러지 혼합물의 비중이 커질수록 실트크기의 세립토 함량이 증가하여 균등계수는 증가하지만 곡률계수는 일정한 경향성을 보이지 않는 것으로 평가되었다. 슬러지 혼합토를 복토재로 이용하는 경우에는 특별한 기준이 없어 모든 혼합비에서 사용이 가능할 것으로 판단되나 쌓기재로 사용하기 위해서는 #200체 통과량이 25% 미만이어야 하므로 그림 3과 같이 SP혼합토에는 59%이하, SM혼합토에는 48%이하로 슬러지 고화물을 혼합할 경우에 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

또한 비중실험 결과, 그림 4와 같이 슬러지 고화물의 혼합비가 증가할수록 비중이 선형적으로 감소하는 경향이 SP혼합토 시료와 SM혼합토 시료에서 거의 유사하게 나타나고 있으며, 이러한 현상은 슬러지 고화물 내에 유기물이 다량 함유된 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 고화물의 비중이 일반적인 슬러지에 비해 큰 것은 유기물이 생석회나 첨가재에 의한 고화처리를 통해 상당부분 물리적 흡착효과를 발휘했기 때문인 것으로 판단된다.

아터버그한계 실험결과 SP혼합토는 화강풍화토의 혼합비가 감소할수록 액성한계가 증가하는 경향을 보이며, 특히 혼합비 40~60% 범위에서 액성한계가 급격히 변화하고 있으나 SM혼합토는 실트성분이 다량 함유되어 있어 명확한 액성한계를 보이지 않는 것으로 나타났다. pH 값은 그림 5와 같이 화강풍화토가 각각 6.22, 4.96로 약산성을 띠고 있으나 약염기성인 슬러지 고화토가 혼합됨에 따라 7.5~7.99 사이의 값을 보여 중성화 되어가는 경향이 나타나고 있고 슬러지 고화물의 혼합비 증가에 따른 SP 및 SM혼합토의 pH 변화는 대체

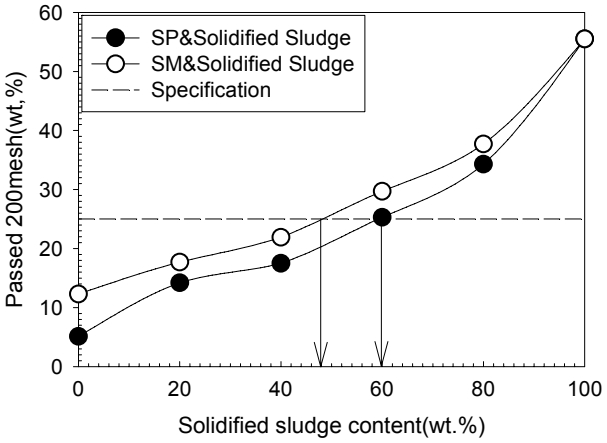


그림 3. 슬러지고화토 혼합비에 따른 #200 통과량

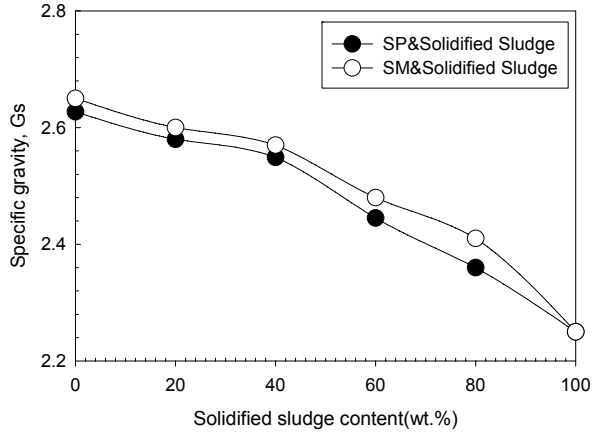


그림 4. 슬러지고화토 혼합비에 따른 비중변화

표 2. 혼합토의 물리적 특성

SP 혼합토(A)	화강토 혼합비 (%)	비중	액성한계 (%)	#200 통과율 (%)	pH	SM 혼합토(B)	화강토 혼합비 (%)	비중	액성한계 (%)	#200 통과율 (%)	pH
SP(0)	0	2.25	74.31	55.5	7.99	SM(0)	0	2.25	74.31	55.5	7.99
SP(20)	20	2.36	59.68	34.3	7.94	SM(20)	20	2.41	NP	37.7	7.69
SP(40)	40	2.45	51.85	25.3	7.91	SM(40)	40	2.48	NP	29.7	7.69
SP(60)	60	2.55	38.53	17.5	7.84	SM(60)	60	2.57	NP	21.9	7.62
SP(80)	80	2.58	23.62	14.2	7.50	SM(80)	80	2.60	NP	17.7	7.58
SP(100)	100	2.63	19.81	4.9	6.22	SM(100)	100	2.65	NP	12.3	4.96

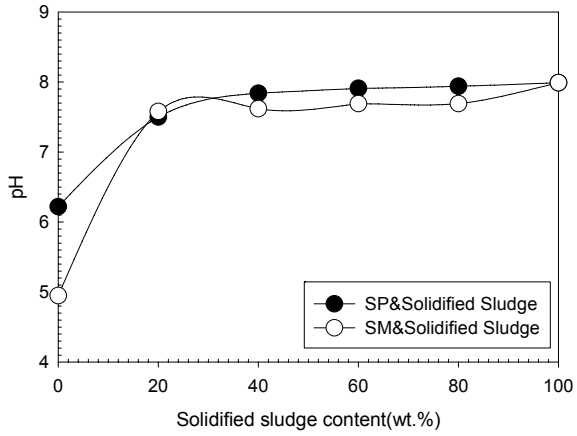


그림 5. 슬러지고화토 혼합비에 따른 pH변화

로 크지 않은 것으로 평가되었다. 따라서 하수슬러지의 고형화 과정을 통해 환경적인 위해요소들도 상당부분이 해소된 것으로 판단된다.

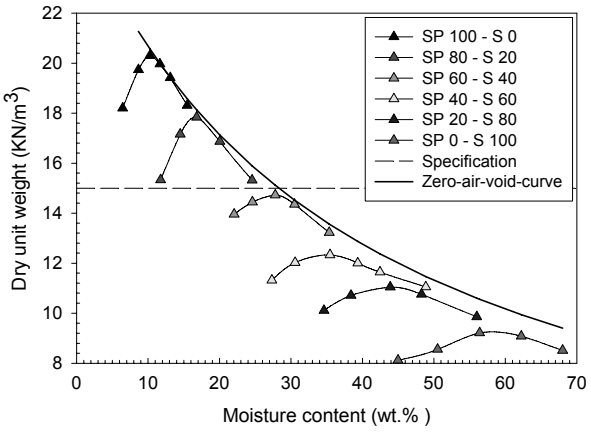
3. 역학실험결과 및 분석

3.1 다짐시험

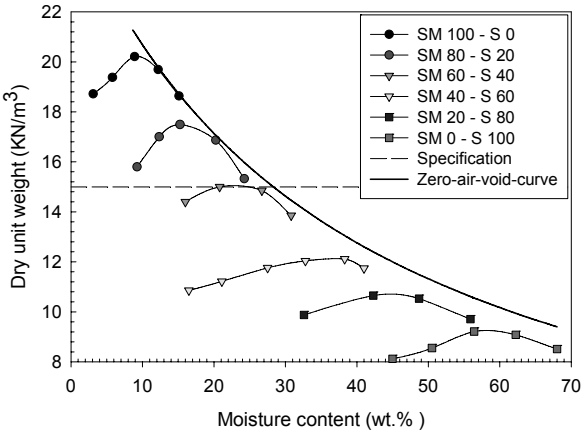
슬러지의 지반공학적 활용을 위한 다짐 특성과 투수특성을 평가하기 위해 혼합비에 따른 수정다짐시험(KS F 2312)을 시행하였으며 시험결과는 그림 6과 같다.

시험결과 화강풍화토(SP 및 SM)의 혼합비가 클수록 다짐곡선은 기울기가 급한 종 모양을 보이나, 슬러지 고화물의 혼합비가 증가하면 다짐곡선의 기울기는 완만해지고 최대건조단위중량이 감소하는 경향이 나타났으며, 슬러지 고화토의 혼합비가 30~40% 수준일 때 슬러지 고화물의 혼합토가 쌓기재로 사용하기 위한 기준 값을 만족시키는 것으로 나타났다.

최대건조단위중량($r_{d\max}$)과 최적함수비(OMC)는 표 3과 같이 슬러지 고화물이 각각 10.63kN/m^3과 57.5%, 현지 SP 화강풍화토는 각각 20.03kN/m^3과 10.4%, 현지 SM화강풍



(a) SP 혼합토



(b) SM 혼합토

그림 6. 슬러지고화토 혼합비에 따른 다짐곡선 변화

화토는 각각 19.58kN/m^3과 8.8%로 나타났으며, 그림 7과 같이 슬러지 고화물의 혼합비가 증가함에 따라 최대건조단위중량은 감소하나 최적함수비는 그림 8과 같이 혼합비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 이유는 슬러지 고화물의 혼합비가 증가하면 세립분의 함량이 증가하여 보유되는 물의 양이 많아지고, 이에 따라 수화반응이 활발하게 일어나 슬러지의 부피가 팽창하기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 최대건조단위중량과 최적함수비는 슬러지 고화물의 혼합비가 각각 40~60%, 20~30%에서 급격

표 3. 혼합토의 다짐특성

SP 혼합토(A)	화강토 혼합비 (%)	비중	γ_{dmax} (kN/m^3)	OMC (%)	CBR	SM 혼합토(B)	화강토 혼합비 (%)	비중	γ_{dmax} (kN/m^3)	OMC (%)
SP(0)	0	2.25	10.63	57.5	4.7	SM(0)	0	2.25	10.61	57.5
SP(20)	20	2.36	11.05	44.1	5.3	SM(20)	20	2.41	11.36	44.2
SP(40)	40	2.45	12.30	35.5	6.1	SM(40)	40	2.48	12.28	34.0
SP(60)	60	2.55	14.73	27.7	8.1	SM(60)	60	2.57	14.23	22.9
SP(80)	80	2.58	17.84	16.6	10.5	SM(80)	80	2.60	17.50	14.2
SP(100)	100	2.63	20.03	10.4	12.8	SM(100)	100	2.65	19.61	8.5

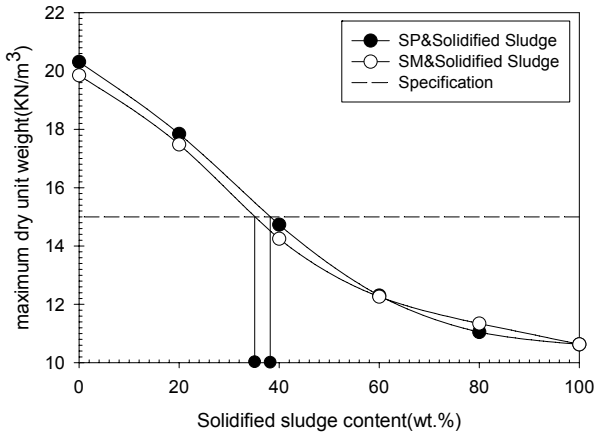


그림 7. 슬러지고화토 혼합비에 따른 최대건조단위중량의 변화

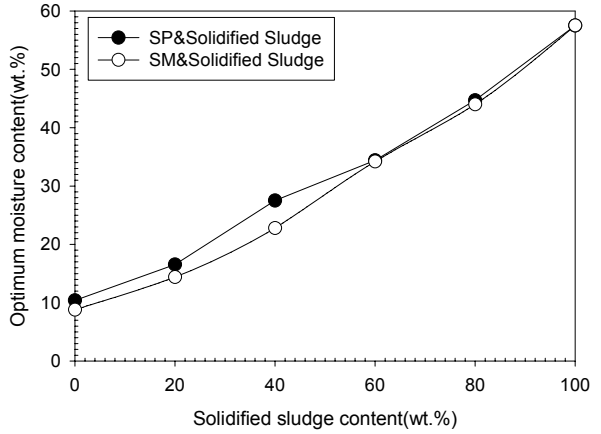


그림 8. 슬러지고화토 혼합비에 따른 최적함수비의 변화

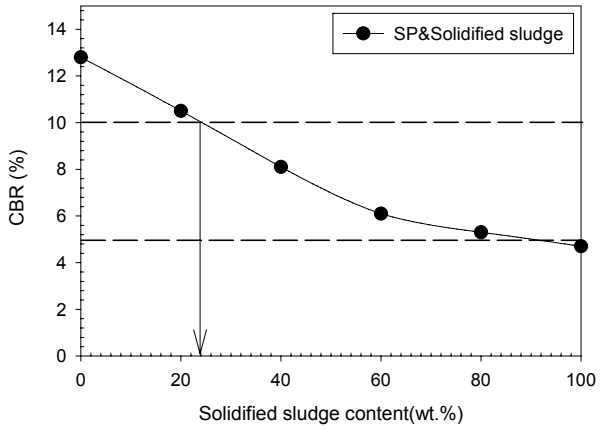


그림 9. 슬러지고화토 혼합비에 따른 수정지지력비의 변화

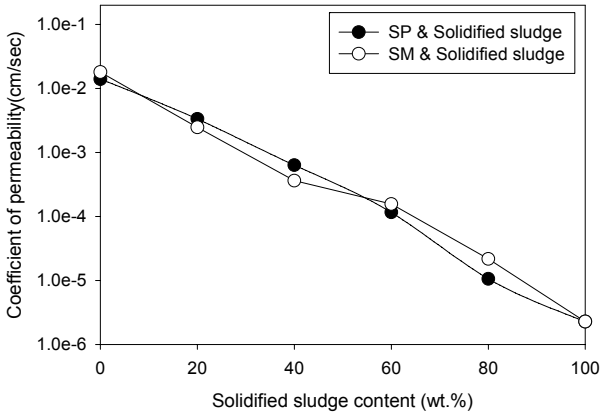


그림 10. 슬러지고화토 혼합비에 따른 투수계수의 변화

한 변화를 보이고 있어 슬러지 고화물의 혼합토를 쌓기재로 활용하기 위해서는 슬러지 고화물의 혼합비가 SP혼합토의 경우 38% 이하, SM혼합토의 경우 35% 이하이여야 쌓기재 기준을 만족시킬 것으로 판단된다.

3.2 CBR시험

CBR시험은 다짐 에너지를 변화시켜서 다진 공시체를 수침한 후 관입 저항력을 측정한 결과로 구한 수정 지지력비로 포장을 지지하는 노상토의 강도, 압축성, 팽창성, 수축성 등을 결정하는 시험이다. 본 연구에서는 혼합시료의 지지력을 판정하고 쌓기재의 품질기준을 만족하는 화강풍화토의 혼합비를 평가하기 위하여 시료의 관입량에 따른 하중강도를 측정하여 수정지지력비를 산정하였다.

실내 CBR시험결과 수정 CBR값은 4.7～12.8%로 슬러지 고화토의 혼합비가 증가함에 따라 CBR값이 감소되는 경향을 보이며 60% 이상에서 감소율이 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 그림 9와 같이 쌓기재(노상)의 품질기준을 만족하는 혼합비는 24% 정도로 평가되었으며 하부노상의 경우에는 일부 시방조건에서는 90% 정도에서도 만족할 수 있는 것으로 나타났다.

3.3 투수실험

혼합토의 투수성을 평가하기 위해서 본 연구에서는 정·변수위 투수시험을 수행하였으며 실험결과 그림 10과 같이 혼합토의 투수계수가 1.4×10^{-2}～2.3×10^{-6}cm/sec의 범위를 보이고 있어 슬러지 고화토의 함량이 증가할수록 투수성의 저하를 보이고 있는 것으로 평가되었다.

흙의 종류에 따라 SM과 SP혼합토에서 각각 혼합비 40%와 60%에서 곡률의 변화가 발생하였으나 슬러지혼합토의 비율에 따라 두 혼합토가 유사한 변화양상을 보이고 급격한 투수성 저감 효과를 나타내지는 않는 것으로 분석되었다.

3.4 일축압축시험

본 연구에서는 슬러지 고화물과 화강풍화토의 혼합토를 복토재 등으로 활용할 경우 최소한의 강도를 확보할 수 있는지를 파악하기 위해 일축압축시험을 시행하였다. 일축압

표 4. 혼합토의 강도 및 투수특성

SP 혼합토(A)	화강토 혼합비	투수계수 (cm/sec)	일축압축강도 (MPa)	SM 혼합토(B)	화강토 혼합비	투수계수 (cm/sec)	일축압축강도 (MPa)
SP(0)	0	2.27×10^{-6}	0.829	SM(0)	0	2.27×10^{-6}	0.829
SP(20)	20	1.06×10^{-5}	1.333	SM(20)	20	1.79×10^{-5}	1.404
SP(40)	40	3.16×10^{-4}	1.540	SM(40)	40	6.56×10^{-5}	1.622
SP(60)	60	6.32×10^{-4}	1.736	SM(60)	60	3.62×10^{-4}	1.828
SP(80)	80	3.34×10^{-3}	1.824	SM(80)	80	2.47×10^{-3}	1.904
SP(100)	100	0.014	1.912	SM(100)	100	0.018	2.012

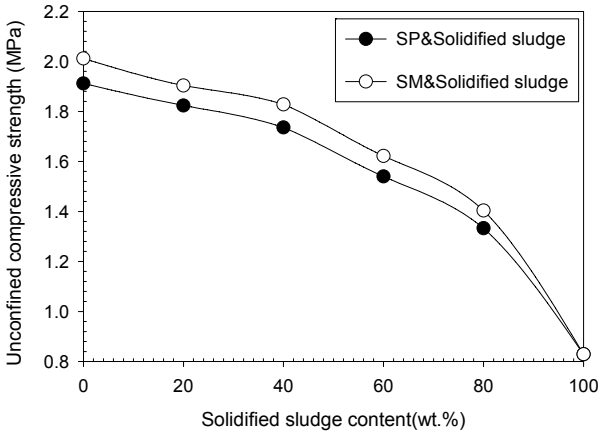


그림 11. 슬러지고화토 혼합비에 따른 일축압축강도의 변화

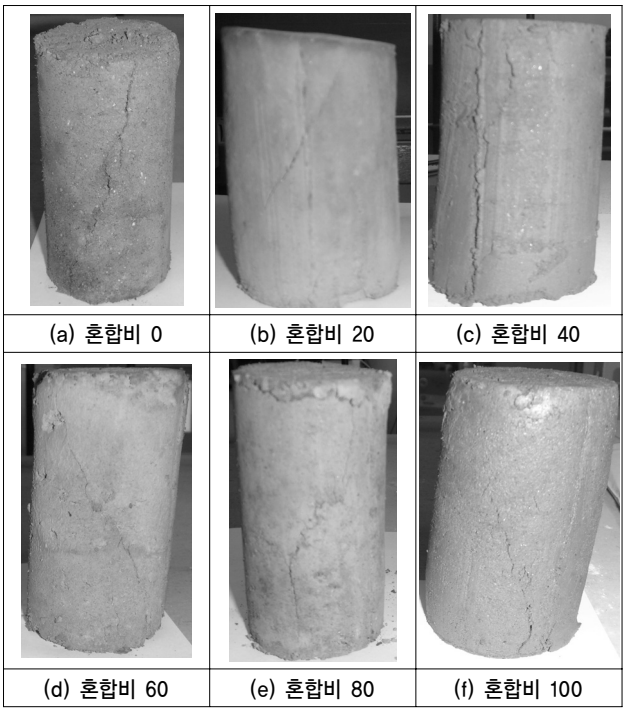


그림 12. 슬러지고화토 혼합비에 따른 시료의 파괴 형상

축강도시험용 시료는 표준 다짐에너지에 준한 에너지 값에 따라 다짐율 95% 이상으로 다짐시험에서 얻는 최적함수비보다 2~3% 습윤 측에서 직경과 높이를 1:2의 비로 맞추어 성형하고 90% 이상으로 습윤 양생하였으며, 1%/min의 변형률로 압축하면서 일축압축시험을 실시하였다.

실험결과 대부분의 시료는 그림 11에 보이는 바와 같이 슬러지 고화물의 혼합비가 증가함에 따라 일축압축강도가 감소하였으며 그림 12와 같이 취성파괴를 나타냈다. 또한 모든 혼합토에서 슬러지 고화물의 혼합비가 40%를 상회하는 경우 급격한 강도 저하 현상이 나타났으며 표 4와 같이 흙의 종류에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 환경공학적으로 고형화하여 만든 하수슬러지 고화토를 토목공학적으로 이용하기 위한 가능성을 규명하기 위해 주재료로 슬러지 고화토를 사용하고 혼합재료로 화강풍화토(SP, SM)를 사용하여 혼합한 혼합토에 대해 공학적 특성을 평가하였으며, 그 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 흡수발열반응과 수열합성반응으로 흡착된 입자의 악취 제거와 고형화를 통해 환경공학적으로 조기 안정화 처리한 후 고형화하여 만든 하수슬러지 고화토는 액성한계 74.31%, #200체 통과량 55.5%인 MH로 분류되며, 10.63kN/m^3, 57.5%의 최대건조단위중량과 최적함수비를 보이며 2.27×10^{-6}cm/sec의 투수계수를 갖는 저투수성 재료인 것으로 나타났다.

(2) 슬러지 혼합토를 복토재로 이용하는 경우에는 특별한 기준이 없어 모든 혼합비에서 가능하나 쌓기재로 사용하기 위해서는 SP혼합토에는 59% 이하, SM혼합토에는 48% 이하로 슬러지 고화물을 혼합할 경우에 기준을 만족하며, 약염기성인 슬러지 고화토가 혼합됨에 따라 7.5~7.99로 슬러지 고화물의 혼합비 증가에 따른 pH 변화는 대체로 크지 않은 것으로 평가되므로 하수슬러지의 고형화 과정을 통해 환경적인 위해요소들도 상당부분이 해소된 것으로 판단된다.

(3) 다짐시험결과 최대건조단위중량과 최적함수비는 슬러

지 고화물의 혼합비가 각각 40～60%, 20～30%에서 급격한 변화를 보이고 있어 슬러지 고화물의 혼합토를 쌓기재로 활용하기 위해서는 슬러지 고화물의 혼합비가 SP혼합토의 경우 38% 이하, SM혼합토의 경우 35% 이하이여야 쌓기재 기준을 만족시킬 것으로 판단된다.

(4) 실내 CBR시험결과 수정CBR값은 4.7～12.8%로 슬러지 고화토의 혼합비가 증가함에 따라 CBR값이 감소되는 경향을 보이며 60% 이상에서 감소율이 둔화되는 경향을 나타내고 있고 쌓기재(노상)의 품질기준을 만족하는 혼합비는 24% 정도로 평가되었다.

(5) SP 혼합토에서는 투수계수가 1.4×10^{-2}～2.3×10^{-6}cm/sec의 범위를 보이고 SM 혼합토의 경우 투수계수가 1.8×10^{-2}～2.3×10^{-6}cm/sec의 값을 나타내어 슬러지 고화토의 함량이 증가할수록 투수성의 저하를 보이고 있는 것으로 평가되었고, SM과 SP혼합토에서 각각 혼합비 40%와 60%에서 곡률의 변화가 발생하였으나 슬러지혼합토의 비율에 따른 두 혼합토의 변화양상은 유사하며 급격한 투수성 저감 효과를 나타내지는 않는 것으로 분석되었다.

(6) 일축압축실험결과 대부분의 시료는 취성파괴로 혼합비에 반비례하였으며, 모든 혼합토에서 슬러지 고화물의 혼합비가 40%를 상회하는 경우 급격한 강도 저하 현상이 나타났으며, 흙의 종류에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김민길(2007), *정수장 슬러지를 활용한 하수슬러지의 고화처리 및 복토재 제조 연구*, 박사학위논문, 충남대학교, pp. 1～124.
2. 김영관, 조흥재(1995), 석회 안정화 슬러지와 플라이애쉬 혼합재의 매립지 복토재로의 이용타당성에 대한 연구, *한국폐기물학회지*, Vol. 12, No. 4, pp. 410～420.
3. 남영우, 박태욱, 박주양, 박경태(2001), 성토재로의 재활용을 위한 하수슬러지의 석회계 고화재를 이용한 안정화 연구, *한국폐기물학회지*, Vol. 18, No. 7, pp. 612～618.
4. 박흥규, 구제민(2002), 유기질 혼합토의 토공재로서의 활용에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 3, No. 4, pp. 29～35.
5. 유남재, 김영길, 박병수, 정하익(1999), 하수슬러지의 차수재 및 복토재로의 이용타당성에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 15, No. 2, pp. 43～71.
6. 유남재, 김영관, 조흥재, 장지희(1994), 안정화된 도시하수 슬러지의 매립지 성토재 및 복토재 활용에 관한 연구, *1994년도 학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp. 673～676.
7. Barlaz, M. A. Ham, R. K. and Schaefer, D. M.(1990), Methane Production from Municipal : A Review of Enhancement Techniques and Microbial Dynamics, *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, Vol. 19, No. 6, pp. 557～584.
8. Indraratna, B. and Chowdhury, R. N.(1996), Improvement of a Residual Soil with Industrial By-products, *Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics*, IS-Osaka96, Japan, Vol. 2, pp. 733～738.
9. Rhew, R. D. and Barlaz, M. A.(1995), Effect of Lime-stabilized Sludge as Landfill Cover on Refuse Decomposition, *Journal of Environmental Engineering,* ASCE, Vol. 121, No. 7, pp. 499～506.
10. Shenbaga, R. K.(1996), Fly Ash and Fly Ash-Soil Mixture for Embankment Construction, *Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics*, IS-Osaka96, Japan, Vol. 2, pp. 757～762.

(접수일: 2011. 2. 10 심사일: 2011. 3. 3 심사완료일: 2011. 4. 3)