

pH에 따른 점토차수재의 특성

Effect of pH Level on the Characteristics of a Landfill Clay Liner Material

정 수 정¹ Jung, Soo-Jung
김 태 형² Kim, Tae-Hyung
이 용 수³ Lee, Yong-Su

Abstract

In this study, experiments are conducted to find out the effect of waste leachate on landfill clay liner system. Tensile test, hydrometer analysis and crack pattern test were conducted on sand-bentonite mixtures with different pH values of water. The tensile strength of specimen compacted with pH 9 of water is smaller than that of specimen compacted with for pH 3 and 6 of water. That is, the higher the pH value, the smaller the tensile strength, because a higher pH solution decreases flocculation phenomenon. The percent finer also increased with high pH value in particle size distribution of fine grained soil (<0.075 mm), because the velocity of particles settling decreases. This trend becomes the clearer as the content of bentonite, becomes the larger, because the higher pH value decreases flocculation structure of fine soils. The results of the crack pattern tests also showed the effect of pH values of water.

요 지

본 연구에서는 폐기물 매립지에서 점토차수재에 대한 폐기물 침출수의 영향에 대해 알아보려고 모래-벤토나이트 혼합토를 사용하여 인장시험, 비중계분석, 균열패턴 관찰을 실시하였다. 인장시험 결과, pH 9의 혼합수를 사용하여 다짐한 공시체의 인장강도는 pH 3, pH6의 혼합수로 다짐한 공시체의 인장강도보다 작게 나타났다. 다시 말해, 인장강도는 높은 pH에서 감소하며 이것은 pH가 증가할수록 면모화현상이 감소하기 때문이다. 또한 비중계분석에서는 pH가 증가할수록 토립자의 침강속도가 느려져 세립자의 함유량이 높게 나타났다. 이것은 pH가 증가함에 따라 점토 입자의 면모구조가 감소하기 때문이며 이러한 경향은 벤토나이트의 함유량이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 균열패턴 관찰 결과에서도 pH의 영향을 확인할 수 있었다.

Keywords : Clay liner, Crack, pH, Sand-bentonite mixture, Waste leachate

1. 서 론

산업사회의 고도 성장과 대량 소비문화의 발달, 그리고 인구의 도시 이동으로 인한 거주지역의 밀집화 등으

로 폐기물의 발생량이 해마다 증가되고 폐기물의 종류도 다양화되고 있다. 이러한 증가추세에 있는 폐기물은 도시환경과 자연생태에 막대한 영향을 초래하고 있기 때문에 고도의 대용량 처리기술이 요구되지만 현재까

1 정회원, 한국시설안전기술공단 연구원 (Member, Researcher, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation)

2 정회원, 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Division of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지의 기술로는 문제 해결이 어려운 실정이다. 폐기물의 처리기술은 일반적으로 재활용, 소각, 매립의 세 가지 형태가 있는데 그 중에서 양적인 측면에서 보면 매립처리하는 양이 소각재를 포함하여 전체 폐기물 발생량의 80%에 이른다(장연수, 이광열, 2006).

폐기물 매립장은 특별한 차폐시설 및 배수 처리시설이 없이 투기 매립될 경우 지반오염을 일으키는 주요 오염원이 된다. 이를 방지하기 위하여 미국의 경우 HDPE와 같은 인공 합성 차수재와 다진 흙점토 차수재를 복합하여 일반 쓰레기 매립장은 1세트, 유해 폐기물 매립장은 2세트로 시공하도록 하고 있으며 하부 차수재와 비슷한 구조의 최종 복토시설을 설치하여 강우가 쓰레기 내로 침입, 침출수화하는 것을 최소화하도록 하고 있다. 폐기물 매립장의 바닥부 차수시설 및 복토층 차수시설은 매립지에서 가장 중요한 시설로서 매립대상 폐기물의 종류, 유해정도에 따라 최적의 차수구조체계를 설계하며 국가별로 설치기준과 환경보호에 대한 정책에 따라 다양한 차수방법을 채택하고 있다. 국내폐기물관리법에는 일반폐기물 매립장의 경우 2.0mm(지정폐기물의 경우 2.5mm) 이상의 합성차수재를 1겹 이상 포설하고 하부에 투수계수 10^{-7} cm/sec 이하의 점토-벤토나이트 등의 차수재를 0.5m(지정폐기물의 경우 1.0m) 이상을 포설하도록 되어 있다(환경부, 1999, 2001). 합성차수재 상부에는 투수계수 10^2 cm/sec, 두께 30cm 이상의 침출수 집배수층을 시설하여 발생한 침출수를 신속히 배재하는 동시에 합성차수재 층을 보호하도록 하였다. 이러한 매립장의 구조는 과거의 차폐시설 없이 처리하던 것보다 진일보한 것이기는 하지만 아직도 해결하여야 하는 다음과 같은 문제점이 있다.

매립된 폐기물은 화학오염물을 포함하는 침출수를 발생시키고 이러한 오염원은 확산현상 등을 통하여 외부로 빠져나가게 되어 점토차수재에 영향을 미치게 된다. 또한 매립지 차단시스템에서 균열이 발생하게 되면 그 기능이 상실되어 오염원이 유출되기도 한다. 그림 1은 매립지 차단시스템에서의 균열 발생으로 인하여 유발되는 지반오염에 대하여 지적인 Allen(2001)의 논문이다. 이 같은 문제는 이들 매립지를 건설할 때 매립지 전체구조물의 안정에 대한 검토는 충분히 이루어졌지만, 차단재로 사용된 세립토의 균열에 대한 검토와 오염원이 세립토에 미치는 영향을 충분히 고려하지 않았기 때문이다.

최근에는 폐기물 매립장의 차수시스템으로 토목섬유

를 이용한 형태의 Liner를 많이 시공하고 있는 추세이다. 하지만 이러한 인공섬유의 경우 화학물질에 대한 저항력이 약하고 시공 시 작업 부주의에 의한 “Wrinkle” 현상이 발생되기 쉽다. 또한 아직까지 현장 시공특성을 고려한 접합성 평가에 대한 특별한 규정이나 평가방법이 구체화되어 있지 않은 실정이라 토목섬유를 차수시스템으로 사용한다하더라도 오염원의 유출을 완전히 차단하기는 힘들다(한국지반공학회, 2004).

점토차수재의 품질관리에 있어서 주요 영향 인자는 흙의 종류, 점토의 함량 및 입경분포 그리고 점토의 조성 등이다. 흙은 오염물의 성분에 따라 강도 특성 및 흙의 구조와 조성상태가 변질될 수 있는데(Ogata et al., 1982), Desai and Ahn(1995)은 모래와 벤토나이트의 혼합토에 NaCl을 추가한 흙에 대하여 강도시험을 수행하여 흙의 강도가 변화하는 것을 나타낸 바 있다(장연수, 이광열, 2006). 오염된 간극수는 전기전도도, 부피변화, 압축성 그리고 전단강도에까지 영향을 미치게 되어 모든 이온을 제거한 순수한 물일 경우와는 다른 흙의 거동을 일으킨다는 것은 이미 알려진 바이다(Evan and Fang, 1986; Naik, 1986; Meegoda and Rajapakse, 1993; Fernandez and Quigley, 1988). 또한, 최근 알려진 바에 의하면 유기성 폐기물의 농도가 높을 경우 점토차수재는 이중층의 수축으로 인하여 투수성의 증가가 발생하는 것으로 보고 있으며 낮은 농도에서의 장기적인 안정성도 충분히 입증되지 않았다(장연수, 이광열, 2006).

또한 매립장에 매립되는 폐기물은 간극비와 압축성이 크기 때문에 매립이 진행되는 동안뿐만 아니라 매립이 완료된 후에도 상당기간 동안 침하가 지속적으로 발생한다. 매립된 폐기물은 형상 및 특성이 불규칙하기 때

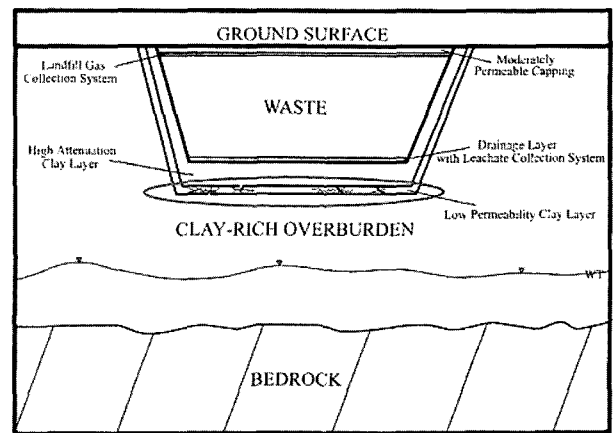


그림 1. 매립지 차단시스템의 균열(Allen, 2001 그림 수정)

문에 국부적으로 간극비나 압축성이 다양한 것이 일반적이다. 이러한 경우에는 최종복토층에 균열이 발생하며 이로 인하여 지표면이 파손되거나 원래의 표면경사를 유지하지 못하게 되어 부등침하량이 크게 발생함에 따른 상부구조물의 붕괴를 유발할 수 있다. 뿐만 아니라 폐기물에 포함된 셀룰로오스, 전분, 단백질 등이 여러 미생물들의 작용으로 인하여 용해 가능한 물질이나 가스로 변하게 되는데 이로 인하여 고형폐기물의 부피가 감소하고 구조가 파괴되면서 최종복토층에서 불규칙적인 침하 및 균열 등이 발생한다(그림 2).

본 연구에서는 이 같은 현상을 규명하기 위하여 오염된 침출수의 성분과 pH 농도에 대한 문헌조사를 실시하였다. 특히, pH에 대한 점토차수재의 영향을 중점적으로 파악하였다. 서로 다른 pH 농도를 가지는 혼합수를

사용하여 다짐된 점토차수재의 균열을 파악하고자 간단한 방법으로 인장강도를 산정하였다. 또한 차수기능을 하도록 하는 세립분의 오염원에 따른 입도분포 변화를 알아보고자 비중계분석을 실시하였으며, 마지막으로 온도변화에 따른 균열생성을 분석하고자 자연 상태에서의 균열패턴을 관찰하여 이 결과들을 종합함으로써 오염원 특히 pH에 대한 점토차수재의 특성을 파악하고자 한다.

2. 폐기물 오염원의 종류와 특성

매립된 폐기물에서는 각종 오염물질이 존재하는 침출수가 발생하게 된다. 폐기물의 성분을 동반한 침출수는 성분에 따라 환경오염의 정도와 우려기준이 다른데,

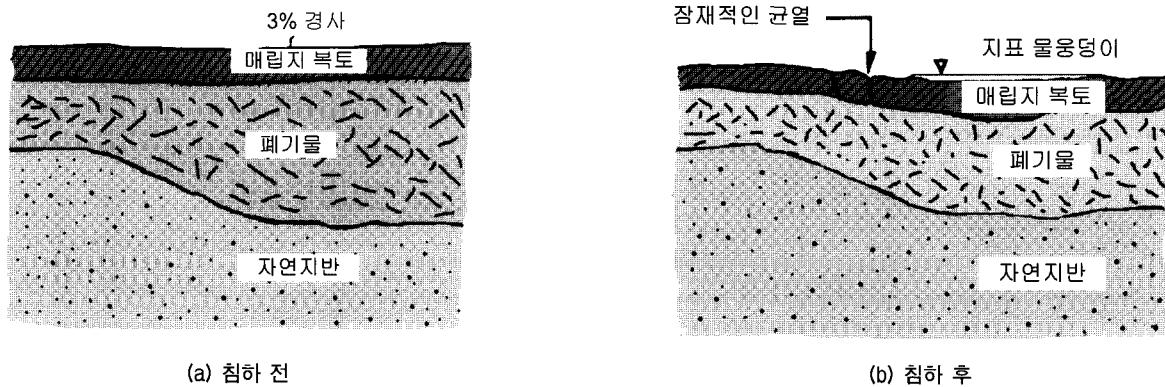


그림 2. 최종복토층의 균열 및 파손

표 1. 일반폐기물 매립지 내부 침출수의 성분조성과 pH 농도(Naylor et al., 1978)

결정요소 (Determinant)	고형 폐기물 매립장 (USEPA, 1973) (mg/L)	생활쓰레기 매립장 (Kunkel and Shade, 1976) (mg/L)	생활쓰레기 매립장 (Eavison, 1969) (mg/L)
알칼리성(CaCO ₃)	Nil-20,850	7,000-7,800	1,400-6,400
BOD(5 day)	9-54,610	13,800-16,800	21-340
COD	Nil-89,520	46,600-2,400	-
총 유기성 탄소	-	9,250-10,300	-
칼슘(Ca)	5-4,080	2,230 ^a	40-690
마그네슘(Mg)	16.5-15,600	727 ^a	70-308
나트륨(Na)	Nil-7,700	1,440 ^a	390-1,600
칼륨(K)	2.8-3,700	680 ^a	240-800
염소(Cl)	34-2,800	1,325-1,375	360-1,800
황산(SO ₄)	1-1,826	265-411	10-350
암모니아 질소(NH ₃ N)	Nil-1,106	336-340	140-990
위기성 질소	-	22-33	8-40
총 용존량	Nil-42,276	5,661-6,086	-
철(Fe)	0.2-5,500	1,510 ^a	9-72
pH	3.7 - 8.5	5.8 - 6.2	6.3 - 8.2

^a평균값

일반폐기물 매립지와 산업폐기물 매립지에서 발생하는 폐기물의 성분은 다음의 표 1, 2와 같다. 표 1의 일반폐기물 매립지 침출수의 경우 고형폐기물 매립장에서 발생하는 침출수가 생활폐기물 매립장에서 발생하는 침출수보다 대부분의 성분 농도의 값이 큰 폭의 범위를 가졌으며 K, Mg, Ca, Na의 성분이 다량 함유되어 있었

다. 또한 고형폐기물 매립장에서 발생하는 침출수의 pH는 3~9의 범위를 가졌으며 생활 쓰레기 매립장의 경우 5~8 범위의 pH를 가졌다. 산업활동에 의해 발생하는 폐기물인 산업폐기물의 경우는 산업활동 주체의 형태에 따라 조성성분이 아주 다양하게 나타나는데 표 2에 제시된 여러 가지 철강산업폐기물 침출수의 성분을 보

표 2. 산업폐기물 침출수의 성분조성과 pH 농도(Philipp et. al., 1986)

성분	프랑스	미국	독일	오스트리아	남아프리카	일본	영국	이태리
BF 슬러지								
pH	7.6	5	8.37	7.65	7.30	8.0	7.5	5
As(mg/L)	-	<0.5	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01
Cd(mg/L)	<0.05	0.33	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.05	0.04
Cr(total)	<0.05	<0.1	<0.04	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Ni(mg/L)	<0.05	<0.1	<0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	0.10
Pb(mg/L)	<0.05	290.0	0.09	0.04	<0.01	0.05	0.57	<0.01
Zn(mg/L)	6.8	2600	0.61	0.89	0.86	0.39	1.7	2580
탈황 슬래그								
pH	6.45	5	10.86	11.02	10.2	10.0	9.3	5
As(mg/L)	-	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	0.01
Cd(mg/L)	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05
Cr(total)	<0.05	<0.1	<0.04	0.01	<0.05	0.01	<0.05	<0.05
Ni(mg/L)	90.0	-	0.04	0.09	0.09	1.64	-	1036
Pb(mg/L)	7.4	-	<0.02	0.01	<0.05	0.07	0.07	16.0
Zn(mg/L)	<0.05	0.7	0.02	<0.01	<0.01	0.20	0.20	9.0
용광로 분지								
pH	12.50	5	12.59	12.52	-	12.8	11.7	5
As(mg/L)	-	<0.05	<0.01	0.02	-	<0.01	-	0.20
Cd(mg/L)	<0.05	0.05	<0.01	0.02	-	<0.01	<0.05	0.04
Cr(total)	31.4	17.0	31.0	71.0	-	29.9	16.0	4.0
Ni(mg/L)	<0.05	<0.1	<0.04	<0.01	-	<0.01	<0.05	0.33
Pb(mg/L)	13.3	<0.1	16.0	23.6	-	1.5	11.2	<0.01
Zn(mg/L)	3.05	<0.1	3.5	4.3	-	0.03	3.1	184.0
정제 슬래그								
pH	11.9	5	12.57	12.18	11.50	12.5	11.0	5
As(mg/L)	-	<0.05	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	-	0.06
Cd(mg/L)	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.1	<0.01	<0.05	0.08
Cr(total)	<0.05	<0.1	<0.04	<0.01	<0.5	0.04	<0.05	0.08
Ni(mg/L)	<0.05	<0.1	<0.04	<0.01	<0.1	<0.01	<0.05	<0.01
Pb(mg/L)	<0.05	0.1	0.38	<0.01	<1.0	0.01	<0.05	<0.01
Zn(mg/L)	<0.05	<0.1	0.13	<0.01	<0.1	0.05	<0.05	<0.02
콘버터 분진								
pH	11.87	5	11.75	12.25	11.80	11.5	-	-
As(mg/L)	-	0.06	<0.01	0.06	<0.05	<0.01	-	0.02
Cd(mg/L)	0.05	0.22	<0.01	0.03	<0.05	<0.01	-	<0.01
Cr(total)	68.0	45.0	69.0	170.0	84.8	54.2	-	36.0
Ni(mg/L)	<0.05	5.2	<0.04	<0.05	0.07	0.01	-	0.11
Pb(mg/L)	<0.05	0.1	0.45	5.4	<0.1	0.04	-	<0.01
Zn(mg/L)	<0.05	24.0	<0.02	<0.05	<0.01	0.04	-	<0.02

면 유해중금속들인 Cr, Cd, Pb, As이 포함되어 있음을 확인할 수 있었다. 또한 미국과 이태리의 경우를 제외하고는 대개의 철강산업폐기물의 침출수가 높은 pH(염기성) 성향을 가짐을 알 수 있었다. 이처럼 폐기물은 종류와 지역에 따라 구성하는 물질이 매우 다양하며 구성성분의 함유량도 국부적으로 큰 차이를 보인다. 이들 다양한 성분들이 점토 차수재에 미치는 영향을 개별적으로 모두 분석하고 이를 복합적으로 검토하는 것은 매우 어려우므로 본 연구에서는 pH에 대한 점토차수재의 영향만을 파악하는 것으로 제한하였다.

3. 시험

3.1 시료준비

본 연구에서는 폐기물매립지 점토차수재로 많이 사용되는 벤토나이트 혼합토를 사용하였다. 벤토나이트는 국내 회사인 동양벤토나이트에서 제조한 벤토나이트로서 몬트모릴로나이트(montmorillonite) 함유량이 80% 이상인 것으로 선택하였다. 모래는 일반 토질시험에서 주로 사용되는 압축강도시험용 주준진표준사(KSL5100)를 사용하였다. 시료는 벤토나이트 중량혼합비율이 5%, 10%,

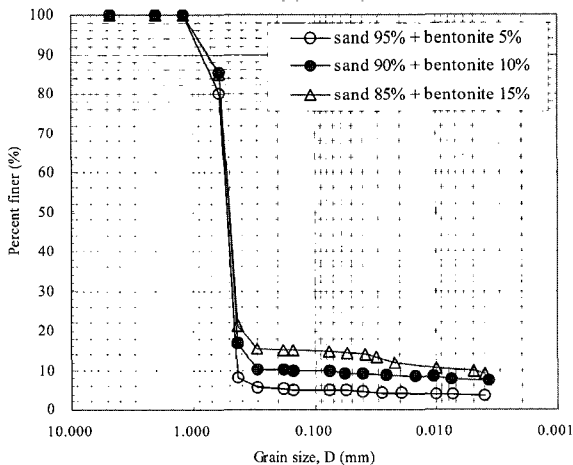


그림 3. 시료의 입도분포곡선

표 3. 모래-벤토나이트 혼합토의 특성

Mixing Rate	Compaction		Atterberg Limit		#200(%)	Gs	Coefficient of Permeability(cm/sec)	USCS
	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	O.M.C(%)	Liquid Limit	Plastic Limit				
5%	1.59	17.1	N.P		5.00	2.61	9.78×10^{-7}	SP-SC
10%	1.61	17.6	30.48	16.93	10.00	2.58	1.97×10^{-7}	SP-SC
15%	1.62	18	47.31	22.88	15.00	2.57	2.91×10^{-9}	SC

15%가 되도록 균질하게 혼합하여 준비하였으며, 시료의 특성은 표 3과 그림 3에서 보는 바와 같다. 차수재의 설계에 있어 가장 중요한 것은 침출수의 누출을 억제하기 위하여 투수계수 1×10^{-7} cm/sec를 확보할 수 있는 저투수성의 재료 선정인데 선택된 세 가지의 혼합토 모두가 법에서 규정하고 있는 차수재의 투수계수와 유사하게 나타났다.

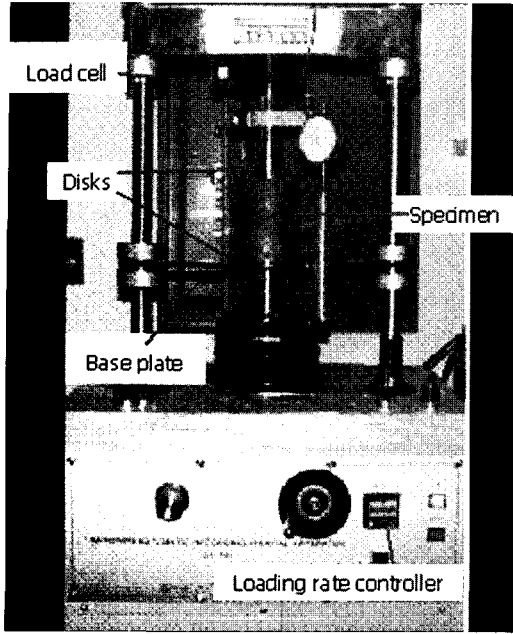
오염원에 따른 점토차수재의 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 pH를 다르게 조정된 혼합수를 사용하였다. 사용된 혼합수의 pH는 일반폐기물 매립장에서 발생하는 침출수의 pH 범위를 참고로 하여 3, 6, 9의 3가지로 준비하였다. pH를 조정하기 위해서 먼저 증류수에 NaOH를 첨가하여 pH 9가 되도록 조절한 후, HNO₃를 조금씩 가해 pH 6, pH 3의 혼합수를 만들어 사용하였다.

3.2 시험방법

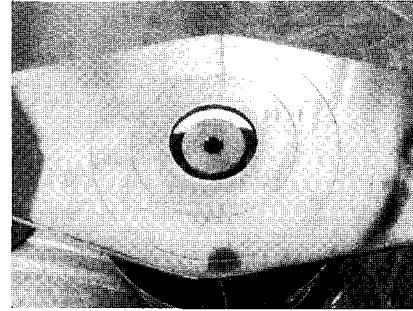
3.2.1 인장강도시험

본 연구에서는 다져진 점토차수재의 하중재하에 따른 균열 특성을 파악하고자 간단한 방법으로서 다짐된 혼합토의 인장강도를 측정하였다. 인장강도 측정을 위한 시험장치로는 김찬기 등(2005)이 일축관입시험(UP)을 이론적 실험적 측면에서 개선하여 제안한 개량일축관입시험기(Improved Unconfined Penetration test, IUP test)를 사용하였다. 개량일축관입시험기는 눈금 표시가 되어있는 밀판을 제작하여 공시체와 디스크의 정렬을 용이하게 하였을 뿐만 아니라 미끄럼, 마찰, 응력집중 등을 제거하였다.

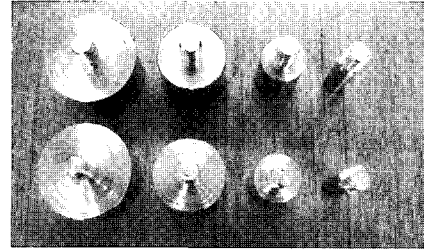
본 인장강도 시험 장치의 방법은 다음과 같다. 먼저 시료를 최적함수비 조건에서 A다짐(KS F 2312)으로 공시체를 준비한다. 단위중량 계산을 위하여 준비된 공시체 무게를 측정한다. 인장시험기에 같은 직경의 두 개의 디스크를 아래와 윗부분의 Load frame에 설치한 후, 디스크 중심과 공시체의 중심이 모두 일직선상에 정렬되도록 두 디스크 사이에 공시체를 놓는다. 공시체가 올려



(a) 하중 프레임



(b) 밀판



(c) 디스크

그림 4. 개량일축관입시험기(Improved Unconfined Penetration test)

표 4. 시험 목록

Tensile Strength Test		
Content of bentonite(%)	pH	Rate of strain(%/min)
5	3	0.1, 0.5, 1.0
	6	0.1, 0.5, 1.0
	9	0.1, 0.5, 1.0
10	3	0.1, 0.5, 1.0
	6	0.1, 0.5, 1.0
	9	0.1, 0.5, 1.0
15	3	0.1, 0.5, 1.0
	6	0.1, 0.5, 1.0
	9	0.1, 0.5, 1.0
Hydrometer Analysis and Crack Pattern Test		
Content of bentonite(%)	pH	
5	3, 6, 9	
10	3, 6, 9	
15	3, 6, 9	

진 밀판을 수평을 유지하며 위로 올려주어 공시체의 윗면과 Load frame의 윗부분에 설치된 디스크 면이 거의 맞닿도록 하며 공시체의 아랫면 역시 아랫부분의 디스크 면과 거의 맞닿도록 설치한다. 공시체 및 시험기기가 준비되면 분당 연직변형 재하속도를 달리하여 시험기기를 작동시킨다. 본 연구에서는 오염정도에 따른 인장강도 특성을 알아보기 위하여 서로 다른 pH 농도를 가지는 물(pH 3, 6, 9)을 혼합수로 사용하여 공시체를 제작하였다. 개량일축관입시험장치는 기기를 작동시키는

재하속도와 하중재하디스크의 크기에 따라 인장강도가 다르게 나타나는 것을 확인한 바 있다(정수정 등, 2006). 본 연구에서는 선행연구결과(정수정 등, 2006)와 ASTM 규정에 따라 0.1~1.0%/min의 재하속도와 25.4mm의 직경 크기의 디스크로 시험을 실시하였다. 인장강도 측정을 위한 시험은 표 4와 같은 내용으로 수행되었다.

3.2.2 비중계분석

점토차수재가 저투수성기능을 하기 위해서는 세립분(<0.075m)의 입도분포 파악이 매우 중요하다. 오염된 폐기물 침출수로 인한 점토차수재의 입도 변화를 알아보기 위하여 pH를 다르게 조정된 혼합수를 사용하여 비중계분석(ASTM D 422-63)을 실시하였다. 비중계분석은 물 속으로 가라앉는 흙 입자의 침강원리를 근거로 하는 것으로, 토립자의 크기별 함유량을 Stokes의 법칙에 따라 침강속도를 이용하여 구한다. 비중계분석은 벤토나이트 중량혼합비율을 5%, 10%, 15%로 조절한 모래-벤토나이트 혼합토를 각각 pH 3, 6, 9의 조정된 혼합수에 대하여 실시하였으며 수행된 비중계시험내용은 표 4와 같다.

3.2.3 균열패턴 관찰

폐기물의 화학적 작용에 의하여 매립지 차단시스템 내부의 온도는 상승하게 되는데 이로 인한 건조 균열이

발생하게 된다. 이러한 온도변화에 따른 균열 양상을 간접적으로나마 확인하기 위하여 Fang(1997)이 제안한 균열패턴시험을 실시하였다(그림 5). 시험방법은 다음과 같다. 벤토나이트 중량혼합비 5%, 10%, 15%의 모래-벤토나이트 혼합토를 대략 50~100g정도씩 준비한다. 각각의 혼합토를 pH 3, 6, 9의 혼합수를 사용하여 액성한계(ASTM 4318-98)의 함수비로 5분 이상 충분히 반죽한다. 그 다음 반죽된 시료를 유리판에 일정한 두께로 얇게 펴 20°C 이상의 상온에서 48시간 자연 건조시킨 후

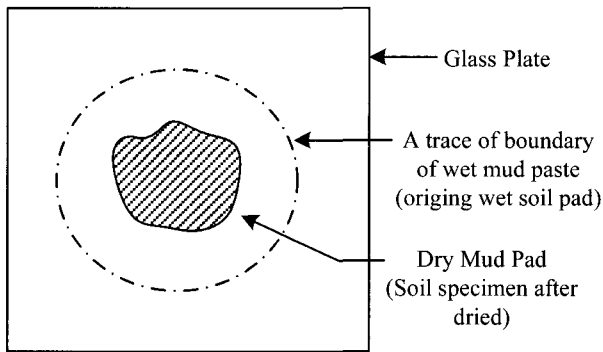
사진 촬영을 하여 균열의 모양과 특성을 관찰하였다. 수행된 균열패턴 시험의 목록은 비중계시험 목록과 같다(표 4).

4. 결과 및 고찰

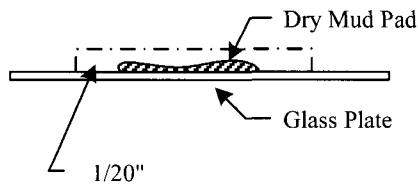
4.1 인장강도

서로 다른 pH의 혼합수를 사용하여 벤토나이트 혼합비율 5, 10, 15%인 각각의 시료에 대하여 인장강도 측정 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서 보면 모래-벤토나이트 혼합토의 인장강도는 벤토나이트 혼합비율이 증가할수록 점점 커지는 것을 알 수 있다. 또한 벤토나이트 함유량이 5%인 혼합토에서는 그 영향이 미비하나 벤토나이트 함유량 10%, 15%의 혼합토에서는 혼합수의 pH에 따라 인장강도가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 pH에 대한 영향은 세립분인 벤토나이트의 함유량이 증가할수록 확실하게 나타났다. pH에 대한 영향이 가장 뚜렷하게 나타난 벤토나이트 혼합비율 15%의 혼합토의 경우를 살펴보면 혼합토의 인장강도는 pH가 증가할수록 조금씩 감소하여 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 흙의 pH가 증가 할수록 면모화현상이 감소하게 된다.

점토 입자 구조의 면모화는 입자의 면과 모서리가 결합하여 입자덩어리를 형성하는 것으로 pH의 값이 작을수록 발달되는 구조이다. 이유는 혼합수에 수소 H⁺이온의 농도가 높으면 점토입자표면의 음전하와 잘 결합하여

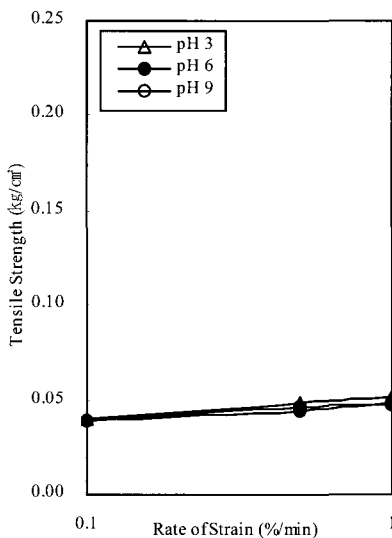


(a) 건조 후 시료

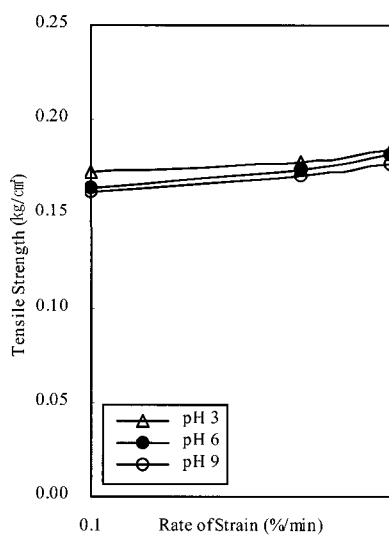


(b) 건조 후 시료의 종단면

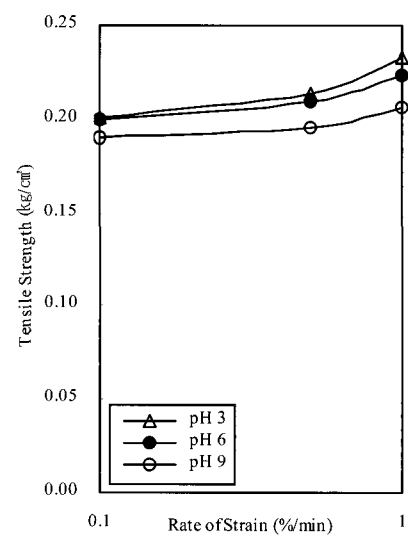
그림 5. 균열패턴 관찰 방법(Fang, 1997)



(a) 벤토나이트 5% 혼합토



(b) 벤토나이트 10% 혼합토



(c) 벤토나이트 15% 혼합토

그림 6. pH에 따른 인장강도 변화

입자간 반발력인 적어 전체적으로 이산화 보다는 면모화 하려는 경향이 강해지기 때문이다. 그 외 점토의 분산전 기이중층의 두께가 얇을수록, 전해질 농도가 높을수록 발달된다. 입자의 면과 모서리가 결합된 면모화 구조에서는 인장에 대한 저항이 커 인장강도가 크게 나타남을 알 수 있다. pH에 대한 인장강도 변화는 Naik(1986)가 지적인 pH 농도에 따른 전단강도와는 다른 경향을 보이는데 이것은 전단과 인장의 작용 메카니즘의 차이에 의한 것으로 사료된다.

4.2 비중계 분석

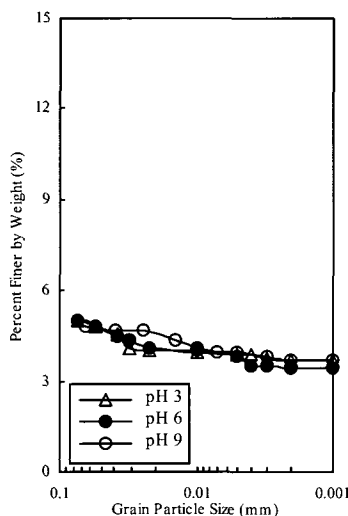
pH 3, 6, 9로 조절한 혼합수를 사용하여 벤토나이트 혼합비율 5%, 10%, 15%인 각각의 시료에 대하여 비중계분석을 실시한 결과는 다음 그림 7과 같다. 각각의 모든 혼합토는 서로 다른 pH의 혼합수에 따라 실제의 입도분포와 다르게 변화하여 나타났다. 이 같은 pH에 따른 영향은 세립분인 벤토나이트가 많이 함유된 혼합토일수록 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 그림 7에서 보면 각각의 모든 시료에서 혼합수의 pH가 증가함에 따라 크기가 작은 입자의 함유율이 높게 나타났다. 흙의 pH가 증가하게 되면 토립자의 면모화구조가 이산구조로 변하게 되어 침전도에 있어서 분산화경향을 증가시킨다. 이로 인하여 토립자의 침강속도가 느려진다. 따라서 침강속도에 의해 토립자의 크기를 결정하게 되는 비중계 분석에서는 pH가 증가할수록 작은 입자의 함유율이 높

은 것으로 나타나는 것임을 알 수 있다. 벤토나이트의 중량혼합비율이 5%인 혼합토에서는 pH에 따른 경향이 일정하게 나타나지 않았는데 이것은 흙 시료 중 세립분의 양이 매우 적어 다소 오차가 생긴 것으로 추정된다. 이와 같은 점토 입자의 입도분포 변화는 흙의 투수성을 변화시키므로 추후에 동일한 시료에 대하여 pH를 달리 한 혼합수를 사용하여 투수시험을 수행하여 투수기능의 변화를 확인할 예정이다.

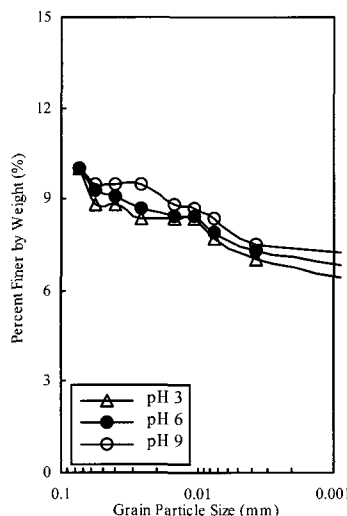
4.3 균열패턴 관찰

자연상태에서 48시간 건조시킨 균열패턴 관찰결과는 그림 8에서 보는 바와 같다. 각각의 혼합토는 벤토나이트의 혼합비율이 증가할수록 균열이 보다 크고 뚜렷하게 나타났다. 이것은 물에 의한 영향을 많이 받는 벤토나이트의 함량이 많아졌기 때문이며 물에 의한 벤토나이트 입자의 팽창과 수축의 비율이 동일하지 않기 때문이다. 반죽할 때 사용된 혼합수의 pH에 따라 균열의 경향이 인장시험, 비중계분석과 비슷할 것으로 기대하였으나 명확한 구분을 할 수 있을 정도의 균열의 경향이 다르지는 않음을 알 수 있다. 다만 입자의 면과 모서리가 결합된 면모화 구조의 점토 입자에서 보다 큰 균열이 발생될 것으로 예상된다.

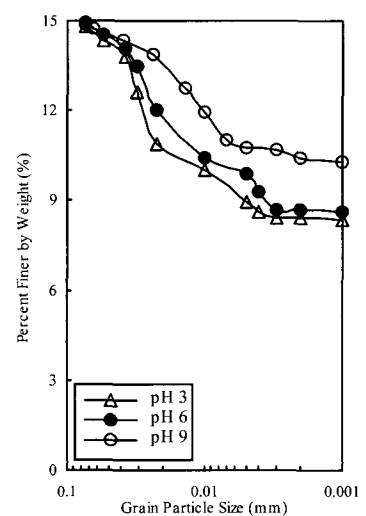
본 연구에서는 세립토의 함유량이 5~15%인 혼합토의 pH에 따른 인장강도, 입도분포, 균열패턴에 미치는 영향을 확인하였다. 하지만 인근지역이나 매립지 현장의 흙



(a) 벤토나이트 5% 혼합토



(b) 벤토나이트 10% 혼합토



(c) 벤토나이트 15% 혼합토

그림 7. pH에 따른 세립분의 입도분석 변화

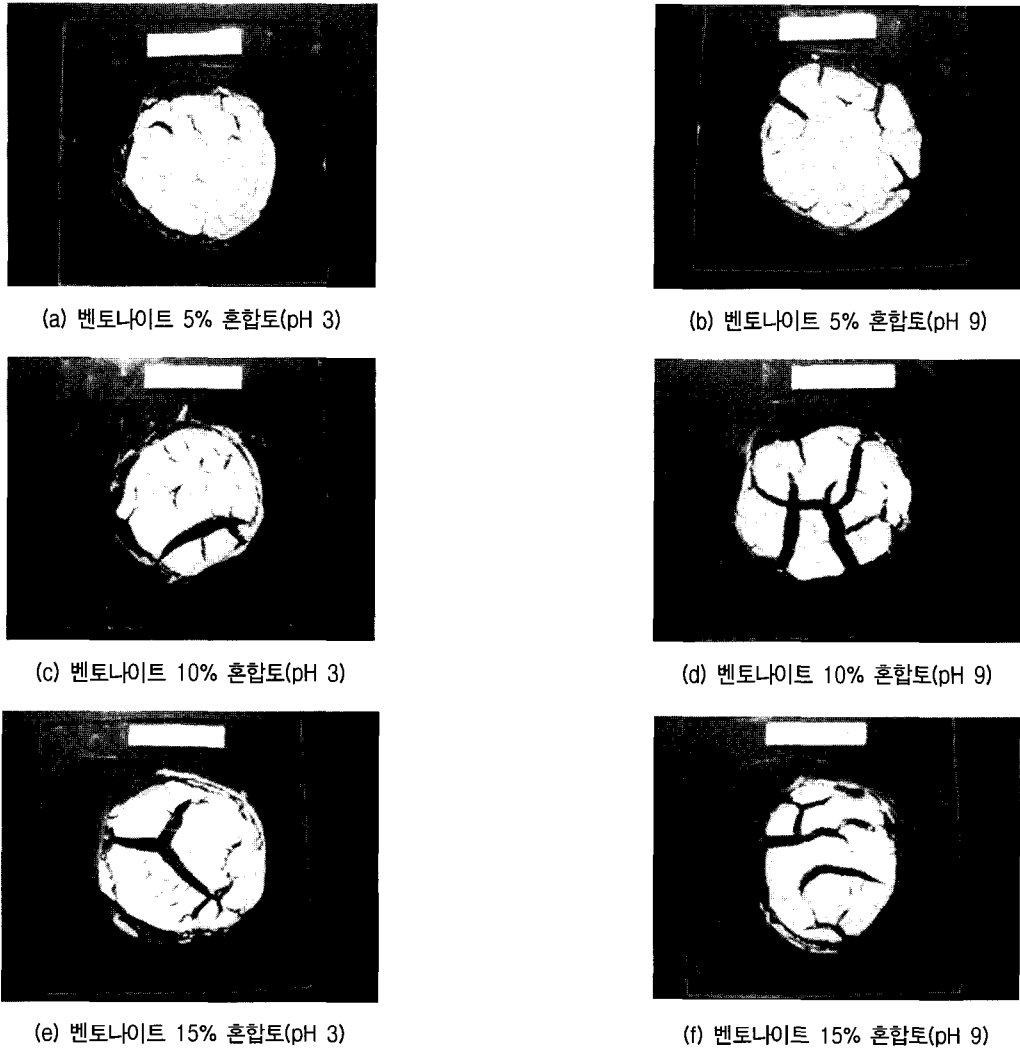


그림 8. 간극수의 pH 변화에 따른 균열모양의 비교

을 투취하여 매립장 차수재로 사용하는 경우 차수재의 저투수성 기능을 확보하기 위해서는 세립토의 함량이 39~50% 이상이 요구되는데(한국지반공학회, 2004) 세립분의 함유량이 많아질수록 오염원(pH)에 따른 영향을 많이 받는 것으로 보아 실제 점토차수재가 오염원에 의해 받는 영향은 본 연구결과보다 더욱 클 것으로 사료된다. 이와 같은 입자구조의 변화는 흙의 구조와 관련된 많은 변수(예를 들면, 전단강도, 인장강도, 압축, 압밀, 투수 등)에 영향을 미치게 되어 그 값을 변화시키게 된다. 그러므로 순수한 물이 아닌 다양한 오염성분의 오염된 물과 접하게 되는 지반환경구조물의 안정성을 판단할 때에는 전단강도에 근거한 구조물전체에 대한 검토뿐만 아니라 이러한 오염원의 영향에 대해서도 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 폐기물 매립지의 오염원에 따른 점토차수재의 특성 변화를 파악하고자 점토차수재로 많이 사용되는 벤토나이트 혼합토를 이용하여 pH를 달리한 혼합수에 대한 인장시험, 비중계분석, 균열패턴 관찰을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 혼합수의 pH가 증가함에 따라 인장강도가 조금씩 감소하여 나타나는데 이는 흙 입자의 면모화구조의 감소에 의한 것으로 보인다. 이러한 pH에 따른 차이는 벤토나이트 혼합비율이 많아짐에 따라 크게 나타남을 확인할 수 있다.
- (2) 세립분(<0.075m)의 입도분포는 pH가 증가함에 따라 크기가 작은 입자의 함유율이 높게 나타나며 이러한 경향은 벤토나이트 혼합비율이 많아짐에 따라

확연히 나타남을 알 수 있다. 이것은 pH가 증가할수록 입자의 면화구조가 감소하여 이에 따라 침강속도가 느려진 것에 의한 것임을 알 수 있다.

- (3) 세립분의 함유량이 증가할수록 균열 모양이 보다 크고 뚜렷하게 나타났으나, 균열에 대한 혼합수의 pH영향을 분명하게 구분하기는 어려웠다.
- (4) 인근지역이나 매립지 현장의 흙을 토취하여 차수재로 사용하는 경우 저투수성 기능을 확보하기 위해서 세립토의 함량이 39~50% 이상이 요구되는데 세립분의 함유량이 많아질수록 오염원(pH)에 따른 영향을 많이 받는 것으로 보아 실제 점토차수재가 오염원에 의해 받는 영향은 본 연구 결과 보다 더욱 클 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2004년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2004-205-D00170). 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21 WIS 사업팀」의 지원비를 받았음.

참 고 문 헌

1. 김찬기, 김태형, 권영선, 국현숙 (2005), “개량된 일축관입시험에 의한 다짐된 화강풍화토의 인장강도 특성”, 2005 대한토목학회 학술발표회.
2. 정수정, 김찬기, 김태형 (2006), “다짐된 모래-벤토나이트 혼합토의 인장강도와 산성도에 따른 혼합토의 균열패턴에 관한 연구”, 2006 한국지반공학회 춘계학술발표회.
3. 장연수, 이광열 (2006), “지반환경공학”, 구미서관, pp.3-7, 107-122,

- 144-152.
4. 한국지반공학회 (2004), “지반환경[폐기물 매립 및 토양환경]”, 구미서관, pp.14-19.
5. 환경부 (1999, 2001), 폐기물 관리법.
6. Allen, A. (2001), “Contaminant landfills: The myth of sustainability”, *Engineering Geology*, Vol.60, pp.3-19.
7. Desai, C. S. and Ahn, T. B. (1995), “Effect of chemical transport on seepage, stress-deformation and stability analysis of soil embankment”, to be submitted.
8. Evans, J. C. and Fang, H. Y. (1986), “Triaxial equipment for permeability testing with hazardous and toxic permeates”, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 9(3), pp.126-132.
9. Fang, H. Y. (1997), “Introduction to environmental geotechnology”, CRC Press LLC, pp.169-173.
10. Fang, H. Y., Daniels, J. L. and Kim, T. H. (2004), “Pollution intrusion on soil-pavement system”, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol.130, No.4, pp.526-534.
11. Fernandez, F. and Quigley, R. M. (1988), “Viscosity and dielectric constant controls on the hydraulic conductivity of clayey soils permeated with water soluble organics”, *Canadian Geotechnical Journal*, 25, pp.582-589.
12. Meegoda, J. N. and Rajapakse, R. A. (1993), “Long-term hydraulic conductivities of contaminated clays”, *ASCE Env. Engineering Journal*, 119(4), pp.725-743.
13. Naik, D. (1986), “Effect of temperature and pore fluid on shear characteristics of clay”, *Proc. 1st international Symposium Environmental Geotechnology*, 1, pp.382-390.
14. Naylor, J. A., Rowland, C. D., Young, C. P., and Barger, C. (1978), “The investigation of land fill sites”, *Water Research Center, Herts, England*, pp. 68.
15. Ogata, N., Yasuda, M. and Kataoka, T. (1982), “Salt concentration effects of strength of frozen soils”, *Proc., 3th. Int. Symp. on Groud n Freezing*, pp.3-10.
16. Philipp, J. A., Endell, R., Raguin, J. and Dechelette, W. (1986), “Leaching test characterization of iron and steel industry waste”, *Hazardous and Industrial SolidWaste Testing Disposal*, Vol.6, ASTM STP 933, pp.7-27.

(접수일자 2007. 1. 8, 심사완료일 2007. 8. 6)