

# 폐기물매립지 침출수 누출방지를 위한 벤토나이트 복합라이너

원필기, A. van Zomeren\*

## 1. 서론

우리나라에서는 발생 폐기물의 대부분을 매립방법으로 처리하고 있으나 차수층 및 침출수 처리장 등이 설치되지 않은 불량 매립지 형태가 대부분으로서 지하수 오염 및 지반환경오염 등의 심각한 문제점을 내포하고 있었다. 그러나 최근 폐기물 매립 및 처리에 관한 규정이 점차 강화되어 차수층 및 침출수 처리시설 등이 설치된 위생매립장이 조성되고 있다. 일반적으로 폐기물 매립지에서 발생할 수 있는 오염물질 침출수는 주변토양과 지하수를 오염시키는 주원인으로서 이의 효율적인 제거와 처리를 위하여 효과적인 차수 시설이 필요한 실정이다.

종래의 경우, 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)공법, 또는 흙 벤토나이트 공법, 고화처리 공법 등을 차수 공법으로 사용하여 폐기물 매립장을 조성하였으나, 침출수의 차수 측면에서 여러 가지 문제점을 내포하고 있었다.

상기 기술들의 단점을 극복하기 위해 호클리(Hockly) 및 반 데르 슬루트(Van der Sloot)(1989년) 등이 "인위적인 불투수성 침전물 생성"이라는 새로운 개념을 복합라이너(Composite Liner)를 도입하였다.

이후, 네덜란드 ECN(Energy Research Center)과 캐나다 WTI(Water Technology International Corp.)사의 공동으로 출원한 미국특허(제5502268호)에는 상기 개념을 도입한 폐기물을 차폐하는 방법(Method for Sealing of a Mass of Waste)이 제시되었으나 이는 단순한 시약상의 화학반응 조합으로서 실제 폐기물 매립지 차수층에 적용하기에는 적절한 시약 대체재료(첨가제)에 대한 검증이 결여되어 있으며, 화학반응기간의 장기화로 인한 불투수성 침전물 생성 이전에 침출수가 누출될 수 있어 실용성이 결여되어 있다. 따라서 본 연구에서는 상기의 단점들을 보완하고 차수능 및 흡착능이 뛰어난 벤토나이트 복합라이너 차수시스템을 개발하여 그 효과를 검증하고자 하였다.

\*1 G&G Consultants 지반공학부 이사  
(soiljin@hanmail.net)

\*2 비회원, Senior Researcher, Department of Clean Fossil Fuels, ECN(Energy Research Center) of the Netherlands



## 2. 벤토나이트 복합라이너(BCL, Bentonite Composite Liner)의 개요 및 반응원리

벤토나이트 복합라이너는 상호 반응성이 있는 물질을 각각 혼합하여 조성한 최소 2개의 층으로 구성되며 이는 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수의 주변이동 및 오염을 효과적으로 차단할 수 있는 바닥차수층을 조성하는 것으로 경우에 따라 사면부 및 최종덮개층 등을 조성하여 완전폐합형 차수층을 조성하는데 적용할 수 있다. BCL차수층은 크게 상부층(CTL, Top Layer of Bentonite Composite Liner)과 하부층(CBL, Bottom Layer of Bentonite Composite Liner)으로 구성되며 각각의 층은 현장사용토에 일정 중량비의 첨가제(CT, Top Material in Composite Liner 및 CB, Bottom material in Composite Liner)를 특정한 조건으로 혼합·다짐함으로써 조성되며 전체적인 설치개념은 그림 1과 같다.

벤토나이트 복합라이너에 의해 조성된 차수층은 투수계수  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하의 저투수능을 목표로 하며, 또한 예기치 못한 외부충격 및 지반변형 등에 의하여 벤토나이트 복합라이너가 손상되어 이 손상 부위를 통하여 침출수의 주변환경으로의 누출상황 발생시 벤토나이트 복합라이너 내부의 상호 화학반응에 의하여 침출수 차단능의 회복이 가능한 기능을 갖고 있으며 이 주요기능과 관련된 전체반응을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 수분흡수시 제오라이트형 벤토나이트의 팽윤 작용
- 2) 상부층과 하부층의 상호화학반응에 의한 불투수성 침전물 형성
- 3) 1)과 2)의 결과에 의한 간극 및 결합부위 충전

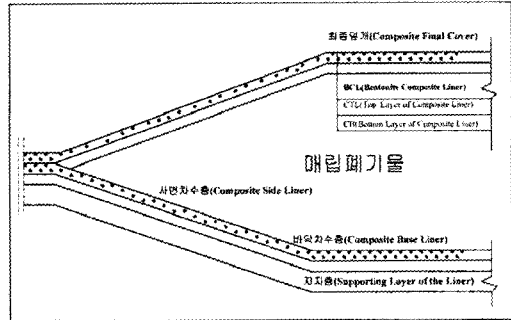


그림 1. BCL 개념도

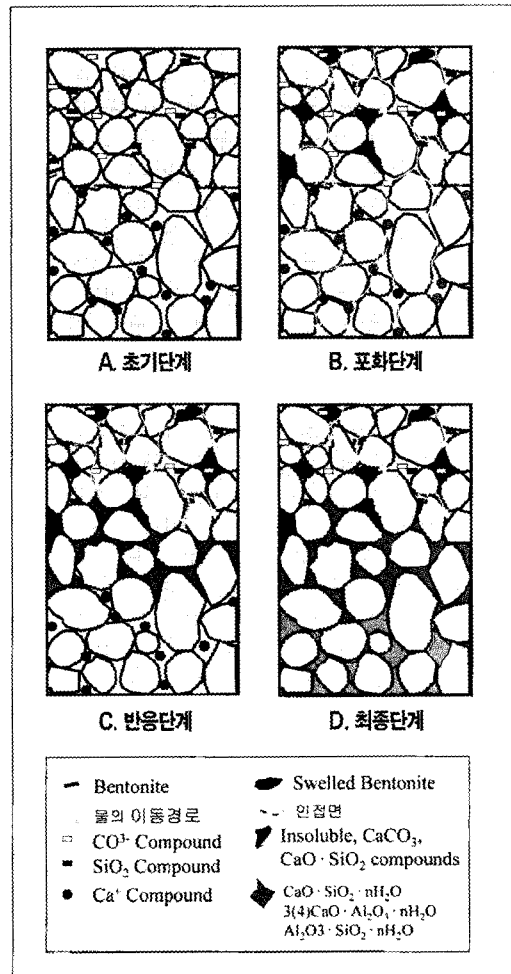


그림 2. BCL의 반응단계

상기 과정 중 1)의 과정인 벤토나이트의 팽윤작용은 차수층의 표면균열 및 미세간극을 통한 침출수 이동시 제오라이트형 벤토나이트의 침출수내 수분 흡수에 의해 발생하며 이로 인해 일차적으로 결합부위 및 차수층내 간극을 충전할 수 있다. 또한 1)의 과정을 벗어난 손상부위, 즉 쓰레기나 작업차량의 과도한 하중 또는 지진 등에 의해 차수층 전체의 구조적인 불안정을 초래하는 균열이나 단차 등이 발생하여 침출수가 주변환경으로 누출되는 상황이 발생할 경우 2)와 3)의 반복과정에 의하여 손상부위가 보수되어 다시 최초의 저투수능을 회복할 수 있으며 전체과정은 초기단계(Initial Phase), 포화단계(Saturation Phase), 반응단계(Reaction Phase), 최종단계(Final Phase)로 구성되며 그림 2와 같다.

상기 반응과정은 BCL의 주 구성재료인 흙의 종류와 그 흙의 간극의 형태에 따라 확산(Diffusion)과 침전(Precipitation)에 좌우되고 토립자 사이의

간극이 큰 사질토의 경우 불투수성 침전물의 생성은 침전현상이 우세하고 간극이 작은 점성토의 경우 확산현상이 지배적인 역할을 한다. 이때 결합부위를 충전하는 새로운 불투수성 침전물은 침출수에 의해 해리된 BCL의 첨가제 CT 및 CB이온의 상호화학 반응 작용에 의해 생성되고 이러한 반응은 결합부위가 완전히 충전되어 최초의 저투수능을 회복할 때까지 반복 지속된다.

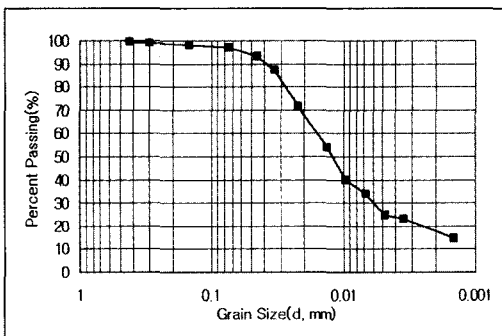
### 3. 벤토나이트 복합라이너 재료

BCL의 구성재료는 일반적으로 1)흙(현장사용토) 2)상부층 첨가제(CT) 3)하부층 첨가제(CB)로 구성된다.

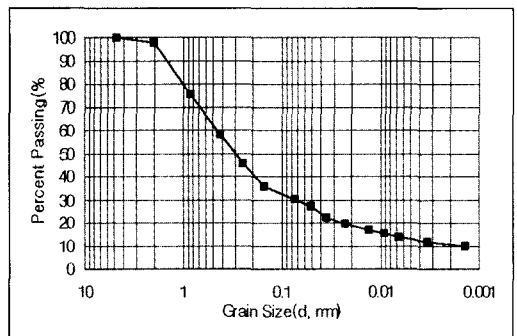
#### 3.1 흙(Soil)

표 1. 시료토의 기본특성

구분	비중 (Gs)	액상한도 (LL)	소성한도 (PL)	액대입비율도 (D <sub>max</sub> ) V/m <sup>3</sup>	유기질수분 (O.M.C) %	시험방법
점성토	2.63	33.08	16.08	1.67	17.0	KS F 2312 A
사질토	2.67	N.P	N.P	1.83	14.2	KS F 2312 A



a) 점성토



b) 사질토

그림 3. 입도분포곡선



본 실내시험에 사용된 점성토 및 사질토의 기본적인 토질조건 및 입도분포는 표 1 및 그림 3과 같다.

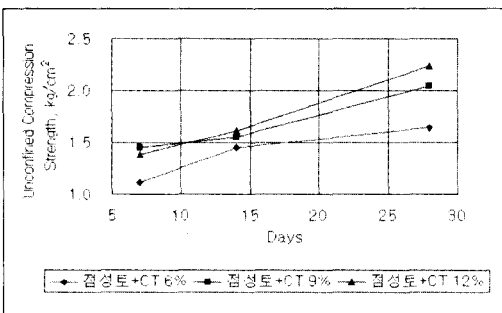
### 3.2 상부층 첨가제(CT, Top Material in Composite Liner)

상부층 첨가제(CT)는 차수층을 조성하는 흙에 일정비율로 혼합하는 재료로서 ①제오라이트형 벤토나이트 ②하부첨가제(CB)와 반응하여 침전 및 응집 작용이 가능한 재료로 구성되며 이때 ②는 대부분 비정질 실리카로 구성된 천연 퇴적광물이다.

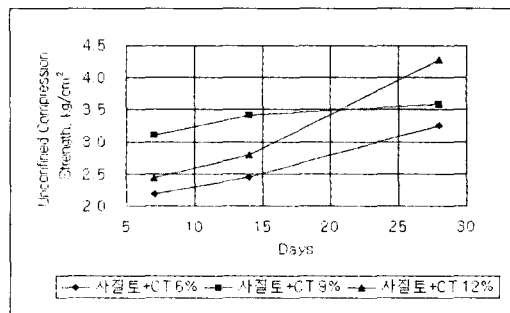
### 3.3 하부층 첨가제(CB, Bottom Material in Composite Liner)

하부층 첨가제(CB)도 상부층 첨가제와 마찬가지로 차수층을 조성하는 흙에 일정비율로 혼합하는 재료로서 복합라이너에 결합부위가 발생할 경우 상부층의 재료와 활발히 반응할 수 있는 Ca계의 물질을 다량으로 함유하고 있다.

## 4. BCL의 역학적 개량특성



a) 점성토



b) 사질토

그림 4. 일축압축강도 시험 결과

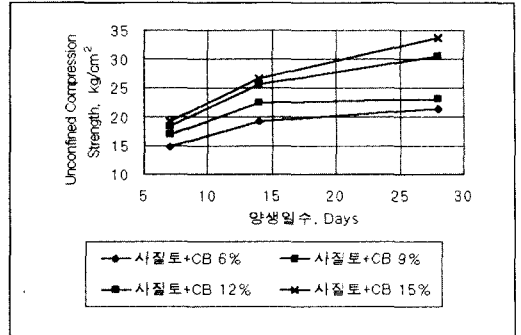
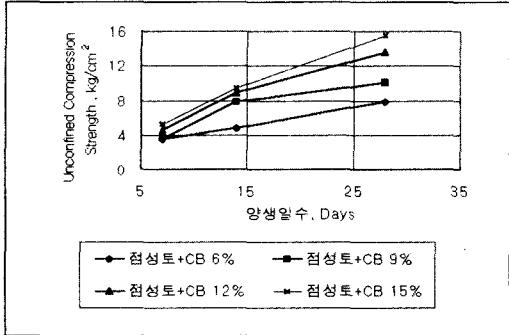
## 4.1 일축압축강도특성

일축압축강도시험을 위한 공시체는 직경 D=5cm, 높이 H=10cm(Table 2.7) 규격의 원통형 공시체로서, 다짐시험에서 구한 배합비 및 최적함수비를 기준으로 KS F 2312 A 다짐에너지로 환산한 다짐에너지(5.625kg·cm/cm³)로 다져서 제작하였으며 재령일수별(7, 14 및 28일) 일축압축강도시험을 실시하였다.

### 4.1.1 상부층 첨가제(CT)에 의한 일축압축강도

CT에 의한 일축압축강도 증진효과는 점성토의 경우  $\sigma_{28}$ (재령 28일 일축압축강도)은 첨가제의 양에 따라 1.1~2.2kg/cm², 사질토의 경우 2.2~4.3kg/cm²의 일축압축강도를 나타내었으나 이는 첨가제에 의한 강도의 발현보다는 흙 자체의 다짐효과에 의한 것으로 판단되며 시험결과는 그림 4와 같다.

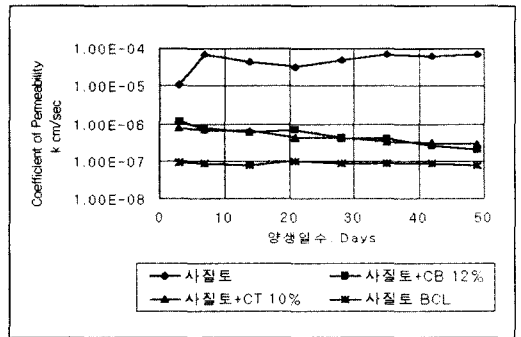
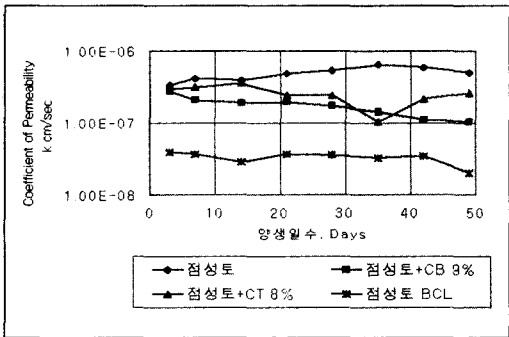
CT는 수분이나 침출수 침투시 이온화되기 쉬운 경향을 갖고 있는 재료로서 강도보강을 위하여 다른 첨가물을 혼합할 경우 주기능인 벤토나이트의 팽창에 의한 자체균열보수 및 CB와의 반응을 유발하는 CT의 효과적인 하향이동에 영향을 미칠 수가 있는 것으로 판단된다.



a) 점성토

b) 사질토

그림 5. 일축압축강도 시험결과



a) 점성토

b) 사질토

그림 6. 투수시험결과

#### 4.1.2 하부층 첨가제(CB)에 의한 일축압축강도

CB에 의한 일축압축강도 증진효과는 점성토의 경우 재령 28일 일축압축강도는 첨가제의 양에 따라 3.9~15.5kg/cm<sup>2</sup>, 사질토의 경우 15~40.7kg/cm<sup>2</sup>의 일축압축강도를 나타내었으며 시험결과는 그림 5와 같다.

시험결과 CB의 첨가량이 증가하고, 재령일수가 경과할수록 실내 공시체의 일축압축강도는 증가하는 경향이 나타났다.

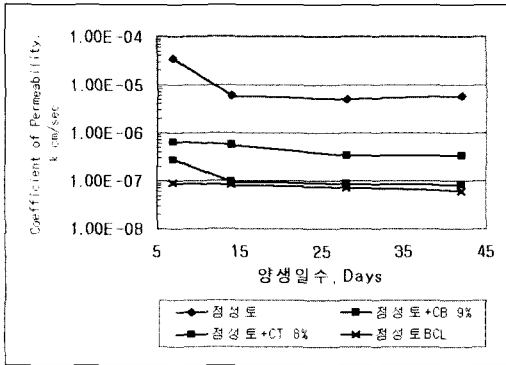
CT와 CB의 화학반응성과 소정의 강도확보를 고려한 CB의 적정첨가량은 현장사용토의 최대전조단 위중량( $\gamma_{dmax}$ )에 대하여 점성토 시료의 경우

10~12% 및 사질토 시료의 경우 8~12% 정도가 적당한 것으로 판단되었다.

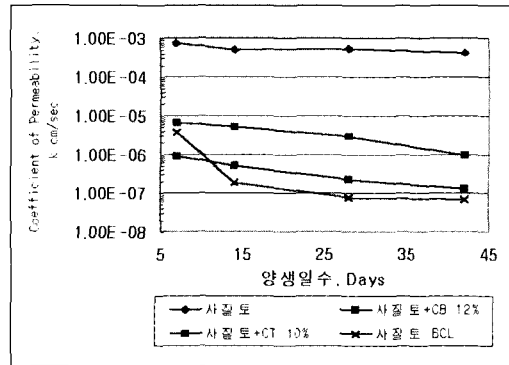
#### 4.2 투수특성

##### 4.2.1 변수위투수시험

본 시험에서는 외부에서 직경 10cm, 길이 12cm의 투수시험 공시체를 제작하여 습윤양생 후 직경 15cm의 투수시험용 몰드에 공시체를 삽입하고 투수시험용 몰드와 공시체 사이의 틈새를 나트륨형 벤토나이트(팽윤도 약 20배 정도)로 충전하여 벽면효과를 최소화하였다. 또한 진공압과 함께 공시체에서



a) 점성토



b) 사질토

그림 7. 자동삼축투수시험 결과

는 0.2~0.3kg/cm<sup>2</sup>의 배압(Back Pressure)을 가해 공시체의 포화시간을 단축시켰으며 점성토 및 사질토에 대한 각각의 실험결과는 그림 6과 같다.

상기 결과에 의하면 2층으로 구성된 BCL 표준 공시체의 경우 폐기물 매립지 차수층 시설기준인 1×10<sup>-7</sup>cm/s의 저투수성을 만족하였으며, 이는 물이 상부(CT)층을 통과하는 도중 상부층 첨가제(CT)에 섞여있는 반응성 이온물질이 투수시험에 사용된 증류수에 의해 해리되어 하향 이동된 후, CB 이온들과 반응하여 간극내에 미세침전을 형성, 간극을 충전한 결과로 판단된다.

#### 4.2.2 자동삼축투수시험(투수시험ASTM-D 5084, '94)

삼축투수시험은 Flow Trac-II 자동삼축시험기(미국, GEOCOMP Co.)를 이용하여 수행하였으며 시험결과는 그림 7과 같다.

점성토 및 사질토로 구성된 각각의 공시체에 대한 시험결과, BCL표준공시체의 경우 최초의 투수계수는 점차 감소하여 폐기물 매립지 차수층 시설기준인 1×10<sup>-7</sup>cm/s의 투수계수조건을 만족하였고, CT공시체 및 CB공시체 단독으로 성형하여 제작한 공시체

보다 훨씬 낮은 투수계수를 나타냄으로써 CT 및 CB의 반응에 의한 투수계수 저감효과가 입증되었다.

## 5. BCL의 불투수성 침전물의 형성 확인

### 5.1 Jar Tester를 이용한 응집시험

본 시험은 빠른 시간내에 불투수성 침전물을 형성시키기 위하여 CT 및 CB를 각각 일정량씩 비이커에 넣고 물을 혼합한 후 12~24시간 동안 완속교반·용출시킨 각각의 상등액을 동일량씩 취하여, 하부층 첨가제 상등액을 서서히 교반하는 도중 상부층 첨가제 상등액을 가하였으며 그 결과 1~2분 경과 후에 사진 1과 같이 젤라틴 형태의 플록(Floc)이 형성된 후 시간이 경과함에 따라 점차 미세한 좁쌀형태의 침전으로 발전하는 형태를 보였다.

### 5.2 불투수성 침전물에 대한 검증시험

본 시험은 일반흙보다 투수계수가 현저히 높은 표

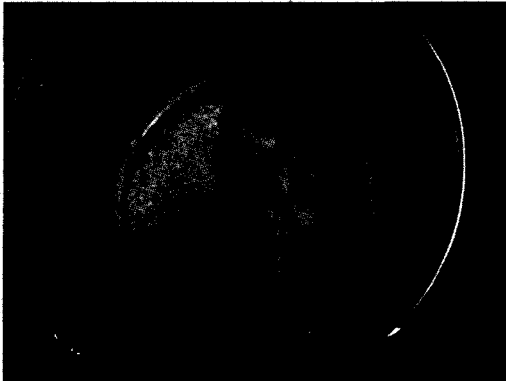


사진 1. 불용해성 침전물의 형성

준사를 흙재료로 사용하였고, 여기에 각각 상부층(표준사+CT 8%), 하부층(표준사+CB 9%)을 비다짐으로 제작한 BCL 공시체 내부에 물을 채운 후 대기압 상태에서 자연유하시켜 지속적으로 물을 통과시킨 결과 약 1~2시간 경과후 투수성이 현저하게 저하되고 최대 7일 이내에 아크릴 몰드내의 물의 흐름이 완전히 종료되었다. 이는 상부층과 하부층의 경계면에서 약 1~3mm정도 두께로 형성된 불투수성 침전물의 영향으로 판단되었으며 이 침전물의 정확한 성상을 파악하기 위하여 사진 2에서와 같이 표준 BCL 경계면에서 절취한 박편시료를 성형하여 새롭게 형성된 물질의 구성상태를 확인하기 위해 주사전자현미경 분석(SEM), 에너지분산분석 시스템(EDS)을 실시하였다.

### 5.2.1 SEM(Scanning Electron Micrograph) 및 EDS분석

주문진 표준사를 흙재료로 사용한 표준 BCL 몰드의 상·하부 경계면에서 떼어낸 박편시료에 대해 177 $\mu$ m 미만의 입자만 분리하여 SEM분석( $\times 2,000$ )한 결과는 사진 2와 같으며 중앙의 모래입자 주변에 다각형 침전물이 형성되어 표준사의 간극을

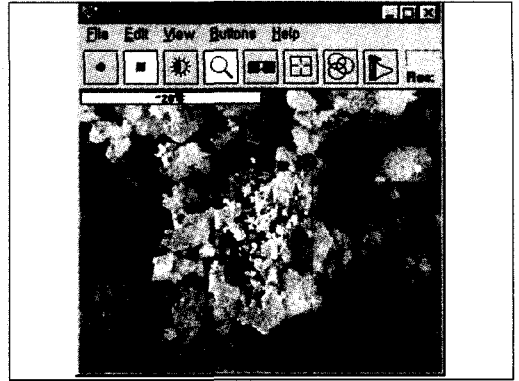


사진 2. 경계면내 불용용해성 침전물의 생성(SEM( $\times 2000$ ))

메우고 있는 것으로 나타났다.

## 6. 결론

본 연구목적은 내구성 및 내투수성 뿐만 아니라 오염물질에 대한 흡착능력이 뛰어난 벤토나이트 복합라이너(Bentonite Composite Liner, BCL)의 재료를 개발하여 실(Seal)의 생성, 복합라이너의 물리적 특성 및 투수성 등을 검증하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 불투수성침전물의 대부분은 칼사이트(Calcite) 및 규산칼슘 수화물로 판명 되었으며 이러한 물질들은 BCL의 경계면에서 반고체상태로 존재하며 두층 간 경계면의 공극을 충전하여 BCL의 침출수 누출에 대한 저항성을 높이는 것으로 판단된다.
2. 점성토 및 사질토에 상부층첨가제(CT)를 혼합하여 제작된 실내제작 공시체의 배합비별 재령 28일차 일축압축강도( $\sigma_{28}$ )는 각각 점성토 1.1~2.2kg/cm<sup>2</sup> 및 사질토 2.2~4.3kg/cm<sup>2</sup>의



범위에 존재하는 것으로 나타났다.

3. 점성토 및 사질토에 하부층첨가제(CB)를 혼합하여 제작된 실내제작 공시체의 재령28일차 일축압축강도( $\sigma_{28}$ )는 각각 점성토 공시체의 경우 3.9~15.5kg/cm<sup>2</sup> 및 사질토 공시체의 경우 15~40.7kg/cm<sup>2</sup>의 범위에 존재하는 것으로 나타났다.
4. 표준 BCL 공시체에 대한 변수위 및 자동삼축 투수시험에 의한 투수계수 측정 결과 재령28일차 투수계수(K28)는 점성토 및 사질토 공시체 공히 폐기물매립지 차수층 설치기준인 1×10<sup>-7</sup>cm/sec이하의 법적투수계수 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
5. 본 기술은 국내 폐기물매립장내 차수층 및 사면차수층(Side Liner)이나 최종덮개층(Final Cover), 오염된 침천물의 덮개(Cover), 인공 호수나 연못 등의 차수층, 폐광산의 침출수 차단용 차수층 등 다양한 분야에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

하는 벤토나이트의 지구화학 및 광물생성 관계”, 한국광물학회지, 제7권, 2호.

2. 선진엔지니어링(1995), “수도권매립지(3공구) 기반시설 조성사업 실시설계보고서”, 수도권매립지 운영관리조합, 서울, pp410~447
3. British Geological Survey(1993), “Bentonite: Industrial Minerals Laboratory Manual. Mineralogy and Petrology Series”, Technical
4. Bowles, Joseph E.(1988), “Foundation Analysis and Design 4th edition”, McGraw-Hill
5. Nevins, M.J. and Weintritt, D.J.(1967), “Determination of cation exchange capacity by methylene blue adsorption”. Amer. Ceram. Soc. Bull. 46, 587-592
6. Sharma, H .D. and Lewis, S. P.(1994), “Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills”, John Wiley & Sons, Inc., pp.158~192
7. Taylor, R. K.(1985), “Cation exchange in clays and mudrocks”. Jour. Chem. Biotechnol. 35A, 195-207.
8. Van der Sloot, H. A.(1997), “The Self-forming and Self-repairing Method”, ECN-RX-97-037 Report, September.

### 참고 문헌

1. 노진환, 오성진(1994), “양남지역 제3기층에 부존

### 광고 게재 모집 안내

월간 “地盤”에 게재할 광고를 다음과 같이 연중 수시로 모집하오니 지면을 통하여 회사를 홍보하고자 하는 업체 및 회원은 신청하여 주시기 바랍니다.

- 다 음 -

(단위: 만원 / 회)

		표지 2, 4	표지 3	내지
컬러	라	60	50	45
흑	백	40	30	25

※ 1년 단위 계약 10% DC, 특별회원사 15% DC (1년 단위 계약 10% DC 추가)