

# 플라이애시-벤토나이트 혼합 점토차수재의 공학적 특성에 관한 연구

## A Study on the Engineering Characteristics of Soil - Fly Ash - Bentonite Liner

이 창 환<sup>1)</sup> · 김 명 균<sup>†</sup>

Lee, Changhwan · Kim, Myeongkyun

**ABSTRACT :** As household and industrial wastes continue to rapidly increase every year, the demands for landfill sites are also increasing. However, the construction of landfill sites causes many problems due to the high costs of liners, while the leachate from the landfills generates secondary contamination of surrounding lands and groundwater. The purpose of this study is to determine the proper mixing ratio to meet the liner conditions (must be less than  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec), using the local soil as the main material and using fly ash, bentonite, and cement as the mixing materials. The possibility of using this mixture as the liner for landfill sites was examined. To determine the proper mixing ratio, this study conducted basic physical properties tests, compaction tests, consolidation tests, and uniaxial compression tests. It was found that the higher the ratio of bentonite, the lower the coefficient of permeability, and the higher the ratio of fly ash, the higher the coefficient of permeability. The reason for this is that, while bentonite expands and fills pores, fly ash cannot fill the pores because the particles have a round shape and do not have adhesion. In conclusion, the optimum coefficient of permeability that meets the landfill liner condition was obtained when the ratio of bentonite was 15% or higher. If fly ash was mixed, the landfill liner condition was met when the ratio of bentonite was 15% or higher and the ratio of fly ash was 20% or lower.

**Keywords :** Landfill, Fly ash, Bentonite, Liner, Permeability

**요 지 :** 가정 및 산업폐기물 등은 매년 급격한 증가 추세에 있으며, 이에 따라 쓰레기 매립지의 수요가 점점 늘어가는 실정이다. 그러나 매립지 건설은 차수층의 고비용으로 인하여 많은 문제점이 발생되고 있으며, 매립지에서 발생하는 침출수는 주변 토양 오염은 물론 지하수 오염 등 2차 오염의 원인이 되고 있다. 이에 본 연구는 매립지 후보지로 선정된 현지토를 주 재료로 사용하고 플라이애시, 벤토나이트, 시멘트를 혼합재료로 사용하여 차수재 조건( $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하)을 만족시킬 수 있는 적정 혼합비를 결정하고 매립지 차수재로서의 이용 가능성을 규명하는데 그 목적이 있다. 적정 혼합비를 산정하기 위하여 기본 물성 시험과 함께 다짐 시험, 압밀 시험 및 일축 압축 실험을 실시하였으며, 실험 결과 벤토나이트 혼합비의 증가에 따라 투수계수가 감소하고 있으나 플라이애시의 혼합비의 증가에 따라 투수계수는 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 각각 벤토나이트의 팽창에 의한 간극 충전과 플라이애시 입자의 모양이 구형이고, 점착성이 없어 간극을 충전하지 못하기 때문으로 판단된다. 결론적으로 벤토나이트의 함량비가 15% 이상일 때 매립지 차수재 조건을 만족하는 최적 투수계수인 것으로 나타났으며 플라이애시를 혼합하는 경우 벤토나이트를 15% 이상 첨가한 상태에서 플라이애시를 20% 이하로 대체할 경우 매립지 차수재 조건을 만족하여 그 적합성이 판명되었다.

**주요어 :** 매립지, 플라이애시, 벤토나이트, 차수재, 투수계수

## 1. 서 론

국내 폐기물 발생량의 대부분이 매립에 의존하고 있기 때문에 2차적인 환경 문제를 일으키지 않기 위해서는 차수재의 역할이 매우 중요하다. 우리나라 폐기물 관리법 시행규칙(2007)은 점토·점토광물 혼합토 등으로 두께 45cm 이상 투수계수가  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하가 되도록 설치하거나 점토·점토광물 혼합토 등으로 두께 30cm 이상 투수계수가  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하가 되도록 설치한 후 그 위에 두께 1.5mm 이상인 합

성고분자 차수막을 설치하도록 규정하고 있으며, 투수계수와 일축 압축 강도 두 가지를 만족하는 최소의 혼합 비율을 산정하여 경제적이고 안전한 차수층 시공을 하도록 제시하고 있다. 이러한 차수재는 초기에 혼합토 차수재, 점토 차수재, 지오멤브레인 차수재 등이 이용 되었으며, 현재는 기존차수재의 단점을 보완하고 효과를 증진한 고분자 합성재료와 벤토나이트의 결합체인 GCL이나, MCG(muscovite-carbon-gypsum)를 활용한 차수재, 화강풍화토와 벤토나이트를 혼합한 SSHH 차수재, 양질의 지오멤브레인, 벤토나이트, 스프레이차수

1) 비회원, 청주대학교 이공대학 토목환경공학과 석사과정

† 정회원, 청주대학교 이공대학 토목환경공학과 교수(E-mail : mkkim@cju.ac.kr)

재, 시이트파일, 슬러리월, 그라우트커튼 등의 차수재 등이 이용되고 있다. 그 중 혼합 차수재를 보면 흙-벤토나이트, 흙-시멘트, 흙-석회 등에 대한 연구가 진행중에 있으나 아직까지 기초 자료, 설계법, 시방서에 이르기까지 미비한 실정이다.

1970년대에 쓰레기 매립장의 차수재를 개발하기 시작한 이후 Auvinet와 Hiriart(1980)는 점토차수재에 관한 연구를 하였고, Lundgren(1981)과 Chapuis(1981)는 흙-벤토나이트 차수재에 관한 연구로 인공혼합차수재 개발에 중요한 역할을 하였다.

화력발전소에서 생성되는 산업 부산물로서 플라이애시를 재활용하기 위한 연구는 김춘한(2007)이 플라이애시를 사용한 고유동 콘크리트의 고강도화에 대한 연구를 통해 플라이애시가 많은 건설 현장에서 사용됨을 보여주고 있고, 폐기물 매립장 차수재 건설재료로서 플라이애시의 사용가능성은 이미(Usmen et al., 1988) 밝혀진 바 있으며, 조재범 등(2002), 정문경 등(1998)도 플라이애시를 활용한 차수재에 대한 개발 연구를 발표하였다.

그리고 국내에서는 신은철 등(1998)과 정하의 등(1993)이 폐석화-점토 및 플라이애시-화강풍화토의 차수재 연구를 수행하였으며, 정문경 등(1998)은 플라이애시와 벤토나이트 혼합재를 폐기물 매립장 차수재로 활용하기 위한 연구에서 벤토나이트 첨가에 따라 투수계수가 감소하며 그 이유가 벤토나이트의 팽창에 의한 간극의 충전 때문인 것으로 주장하였다. 또한 김대만 등(2006)이 화강풍화토-벤토나이트 혼합토에 대해 화강풍화토의 입경을 고려한 유효간극률 산정식을 제안하고 실측치와 근사한 투수계수 예측식을 제안하였다.

따라서 현재 쓰레기 매립지 후보지인 지역의 현지토를 사용하여 매립지 차수재로서의 이용 가능성을 규명하고, 주 재료와 혼합 재료의 광물 조성 및 화학 조성과 물리적 특성을 조사하였으며 재료들을 일정비율로 혼합하여 다짐 시험, 압밀 시험, 일축 압축 강도 시험을 실시하여 최적 혼합비를 연구하였다.

## 2. 실내 시험

### 2.1 실험 재료

매립지 차수재로서 이용 가능성을 만족하기 위해서는 투수성이 적합하고 시공이 가능해야 하며 장기적인 안정성을 확보해야 한다. 본 연구는 재활용을 위해 플라이애시를 사용하고 고화재로 시멘트를 적용하였으며, 현지의 화강풍화토를 주 재료로 사용하였다.

주 재료로 사용된 현지토는 현재 쓰레기 매립지 후보지로 거론되고 있는 충북 ○○군 지역에서 채취 하였으며, 지표 1m 심도에서 채취한 후 노건조 후 상온에서 방치하여 실험에 사용하였다(이하 현지토).

혼합 재료로는 플라이애시로 현지토만 혼합한 경우 보다 역학적 성질을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대되므로 매립지 지반 안정 문제를 해결 할 수 있는 좋은 대안이 될 것으로 판단된다. 플라이애시는 정제 플라이애시로 K회사의 KS품질인증 제품으로 입자의 크기는 평균 20~30 $\mu$ m, 주 성분은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 비중은 2.15~2.30인 제품을 사용하였으며, 벤토나이트는 투수계수의 저감 효과를 목적으로 K회사의 나트륨계 제품을 사용하였다. 벤토나이트는 비중이 작고 입경이 작아 비표면적이 크므로 체적 팽창률이 높고 소성과 점성이 크며 물과 반응이 커 차수를 목적으로 한 재료로 많이 사용된다. 시멘트는 강도를 증진 시키는 목적으로 A회사의 제품인 포틀랜드 시멘트(1종)을 사용하였다.

## 2.2 물리학적 시험

### 2.2.1 X-선 회절 및 형광분석

X-선 회절분석 시료의 광물 조성을 조사하기 위한 실험이며, 사용기기의 제조사는 Philips의 X'Pert MPD모델이며, scan range는 5-85degree(2theta), scan size는 0.04degree, scan speed는 2 degree/min, power는 40kV/30mA, target은 CuK $\alpha$ 이다. X-선 형광분석은 시료의 지구화학적 특성을 조사하며 주·부성분 원소들의 함량을 측정하였으며, 측정 기기는 SHIMADZU(Japan)의 XRF-17000 분석 조건은 L.O.I 측정 - 950도씨 30분 Ignition 후 30분 냉각 후 측정, 무게비의 차이로 계산, Glass Bead - 시료 : 용융제(Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) = 1 : 7 비율로 혼합, 검량선 - 16개의 표준 시료로 작성, 가속 전압 전류(40kV, 70mA), 3회 측정 후 평균값을 계산하였다.

### 2.2.2 물리적 시험

본 연구는 흙의 공학적인 판단을 위하여 함수량 시험은 KS F 2306, 비중 시험은 KS F 2308, 입도 분포는 KS F 2302, pH는 KS F 2103에 준하여 시행하였다. 현재 US EPA(1993)는 소성지수(PI)를 10%이상으로 규정하고 있으나, 국내 폐기물 관리법에는 소성지수(PI)에 대한 규정은 없다. 하지만, 본 연구는 혼합한 시료들을 아터버어그 한계 실험(KS F 2303과 KS F 2304)을 통하여 소성지수(PI)를 유도하여 US EPA(1993)의 규정에도 적합한지 연구하였다. 또한 입자 구조 형상, 광물 형태 및 광물 상호간의 형상을 살펴보기 위하여 주사전자현미경 분석(SEM : scanning electron microscopy)을 실시하였으며, Hitachi사의 S-2500C모델을,

분해능은 149eV, 가속 전압은 0.5kV-30kV를 사용하였으며, 부대 장비로는 EDS(Sigma MS2)를 이용하였다.

## 2.3 역학 시험

### 2.3.1 다짐 시험

김영수 등(1995)과 정하익(1998)은 최적함수비보다 2~3% 습윤 측의 함수비 조건에서 최소 투수계수를 가진다고 하였다. 따라서 본 연구는 가장 합리적인 다짐 조건을 통해 투수 시험 조건을 상기와 같은 조건으로 실시하기 위해 다짐 시험을 선행 실시하였다. 다짐 시험은 실내와 현장 시험 결과를 통해 다짐도를 비교하고, 다짐 효과에 따른 투수계수의 특성을 알고자 KS F 2312에 준하여 시행하였다.

### 2.3.2 압밀 시험

벤토나이트 시료는 침수에 따른 팽창으로 인하여 물이 Stand pipe로 역류하는 현상을 나타내고 많은 시간이 소요되는 등 투수계수 측정이 곤란하여 본 연구는 KS F 2316(흙의 압밀 시험 방법)에 따라 압밀 시험을 수행하였다. 투수계수는  $\sqrt{T}$ 법으로 산출하였으며, 혼합 다짐 시편은 함수비를 최적함수비 2% 습윤 측으로 조절한 시료를 최대건조밀도의 95% 상태로 다짐하였다.

본 연구에서 압밀 시험시 사용한 실험 장치는 지렛대 하중 전달 방식에 의하여 하중을 전달하는 점중하중 재하에 의한 하중제어식 표준 압밀기로 시료와 압밀링 사이에 주변마찰력을 최소화하기 위하여 Silicone grease로 옆게 처리한 후 압밀 시험을 수행하였다.

### 2.3.3 일축 압축 시험

시료의 성형 방법은 동적 다짐에 의한 방법과 정적 다짐에 의한 방법이 있다. 동적 다짐에 의한 Trimming sample은 균질한 시료 성형에 문제가 제기될 여지가 있으므로 본 연구는 정적 다짐에 의한 Undercompaction method를 사용하였다. 정순용 등(1997)은 정적인 방법으로 다져진 시료와 불균관 시료에 대한 시험을 실시하여 변형률 1%의 미소변형률상태에서는 거의 일치하는 거동을 나타낸다고 하였다.

일축 압축 강도 시험용 시료의 성형은 표준 다짐 에너지에 준한 에너지 값에 따라 다짐을 95%이상으로 하여 다짐 시험에서 얻는 최적함수비 보다 2~3% 습윤 측에서 제작하여 실험을 하였다. 함수비를 최적함수비 보다 크게 한 것은, 이론적으로 투수계수는 최적함수비일 때 최소가 되지만 실측에 의하면 최적함수비 건조 측에서 면모화(flocculated)되

고 변형된 집합체(aggregate)로 존재하여 상대적으로 큰 간극이 연결되어 있는 반면, 최적함수비 습윤 상태에서는 분산(dispersed)되어 간극 크기가 작아지기 때문에 투수계수는 최적함수비의 습윤측에서 최소가 되기 때문이다. KS F 2314(흙의 일축 압축 시험 방법)의 규정에 의해 No.4(4.75mm)번체를 통과한 시료를 사용하였고, 절개형 황동물드(miter box)를 이용하여 직경과 높이를 1:2의 비로 맞추어 성형하였고, 재령 기간내 함수비를 유지하기 위해 항온수조에서 20±2°C, 90%이상의 습도 상태에서 1일, 7일, 14일, 28일간 습윤 양생 하였으며, 1%/min의 변형률로 압축하면서 실험을 실시하였다.

## 2.4 실험 조건

각각의 원시료에 대해서는 자연 건조시킨 다음 물리학적 특성을 평가하기 위해 함수량 시험, 비중 시험, 아티버어그 한계시험, 입도 분석, pH시험을 수행하였으며, 광물 조성과 지구화학적 특성을 파악하기 위하여 X-선 회절분석과 X-선 형광분석을 수행하였다. 또한 혼합시료는 혼합비에 따른 변화가 매우 크므로, 다짐 시험을 통해 구한 값을 바탕으로 주재료인 현지토에 시멘트의 혼합비율을 평가하고 중량비를 3%로 고정한 후(이종우, 2000), 벤토나이트의 혼합비를 0%~18%로 3%씩 변화를 주어 결정하고 투수계수와 일축 압축 강도의 역학적 특성을 비교 분석하였다. 차수재 기준을 만족하는 벤토나이트의 혼합비를 가지고, 시멘트와 함께 혼합비를 고정하였으며, 플라이애시의 혼합비를 0%~82%로 약 20%씩 변화를 주어 매립지 차수재가 요구하는  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하의 투수계수를 만족하는 혼합점토차수재의 적정 혼합비를 연구하기 위하여 다음 표 1과 같이 실험을 실시하였다.

표 1. 혼합비의 변화

시 료	현지토 (SW-SM)	플라이애시	벤토나이트	시멘트
A - 1	94%	0%	3%	3%
A - 2	91%	0%	6%	3%
A - 3	88%	0%	9%	3%
A - 4	85%	0%	12%	3%
A - 5	82%	0%	15%	3%
A - 6	79%	0%	18%	3%
B - 1	82%	0%	15%	3%
B - 2	62%	20%	15%	3%
B - 3	41%	41%	15%	3%
B - 4	22%	60%	15%	3%
B - 5	0%	82%	15%	3%

표 2. 시료의 물리적 특성

시료	함수비 (%)	비중	액성한계 (%)	소성지수 (%)	D <sub>10</sub> (mm)	곡률계수	균등계수	200mesh 통과량(%)	pH	통일분류
현지토 (SW-SM)	21.77	2.65	25.12	3.86	0.160	1.717	15	5.12	4.18	SW-SM
플라이애시	0.10	2.04	29.74	-	0.034	0.879	1.735	77.91	9.37	ML
벤토나이트	13.94	2.50	212.7	165.5	0.027	0.851	2.148	85.93	9.59	CH
시멘트	0.24	3.11	-	-	0.027	0.660	1.630	84.28	10.27	-

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 물리학적 특성

##### 3.1.1 물리적 특성

표 2를 보면 현지토는 비중이 2.65로 일반적인 모래질 흙의 값을 나타냈으며, 지형상의 원인으로 자연함수비는 21.77%이며, pH값은 4.18로 산성을 보이고 있는 것으로 나타났다. 플라이애시는 2.04로 KS규격 1.95와 유사한 값을 얻었는데, 이는 K회사에서 구입한 정제 플라이애시 제품이기 때문인 것으로 판단된다. 벤토나이트는 2.50로 측정되었고, 시멘트는 3.11로 보통포틀랜드시멘트 규정은 3.05이상이어야 하는데 규정값에 만족 하였으며, 시멘트는 풍화 작용이나 분순물이 포함되게 되면 비중이 낮아지는데 높은 값을 보이는 것으로 보아 시료 보관 상태가 양호한 상태에서 실험한 결과로 판단된다.

아터버그 한계 실험 결과 현지토는 액성한계(LL) 25.12%, 소성한계(PL) 21.26%, 소성지수(PI) 3.86%로 나타났고, 플라이애시는 액성한계(LL) 29.74%로 나타났으며 플라이애시는 점성이 없어서 소성한계를 구할 수가 없어 소성지수(PI)를 구하지 못하였다. 벤토나이트는 액성한계(LL) 212.7%, 소성한계(PL) 47.20%로 소성지수(PI)가 165.5%로 나타났다. 혼합비에 따른 아터버그 특성을 분석한 결과 그림 1, 2와 같이 벤토나이트의 증가에 따라 액성한계는 선형적인 증가 추세를 보이며 함량이 9%를 넘어서서 급격한 소성지수의 증가 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시의 함량이 증가함에 따라 점성이 감소하여 액성한계가 감소하며 미소한 소성지수의 변화를 보임을 알 수 있다. 그러나 모든 혼합비에 있어서 혼합시료가 실험 결과 표 3 과 같이 US EPA(1993)법 규정(소성지수 10%이상)을 만족하고 있음을 알 수 있다.

주재료 4가지를 입도 분석 한 결과를 보면, 플라이애시는 #200체 통과량이 77.91%, 곡률계수(Cc) 0.879, 균등계수(Cu) 1.735로 나타났으며, 벤토나이트는 #200체 통과량이 85.93%, 곡률계수(Cc) 0.851, 균등계수(Cu) 2.148로 나

표 3. 혼합시료의 아터버그 한계 실험 결과

시료	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI, %)
A - 1	31.26	20.79	10.47
A - 2	33.41	22.47	10.94
A - 3	37.62	25.94	11.68
A - 4	45.71	27.21	18.50
A - 5	52.15	29.42	22.73
A - 6	63.27	30.12	33.15
B - 1	52.15	29.42	22.73
B - 2	50.24	27.46	22.78
B - 3	48.03	28.93	19.10
B - 4	41.53	-	-
B - 5	35.12	-	-

- : Not analysed

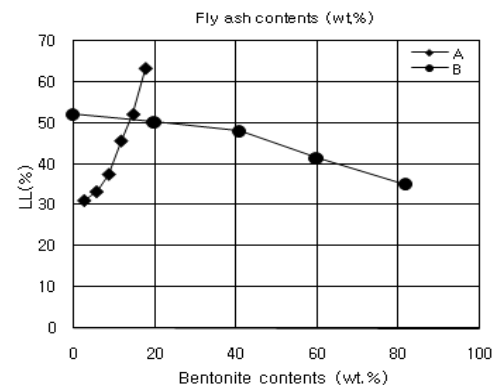


그림 1. 혼합비에 따른 액성한계의 변화

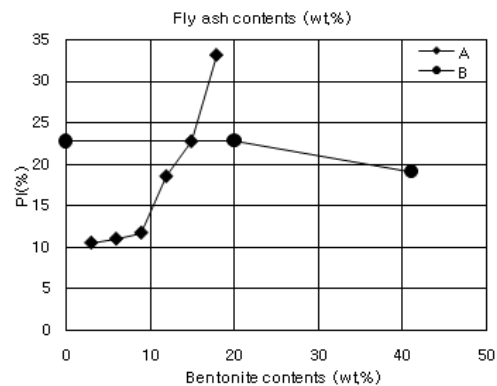


그림 2. 혼합비에 따른 소성지수의 변화

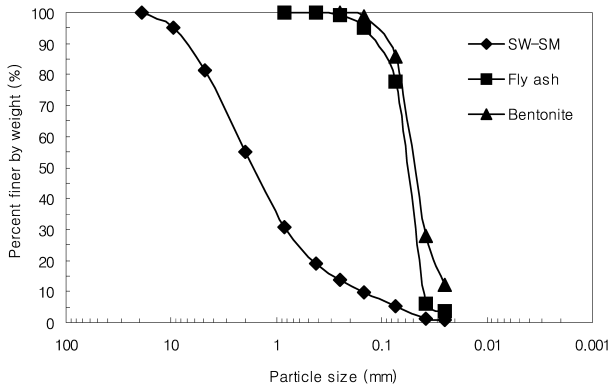


그림 3. 원시료의 입도 분포 곡선

타났다.

입도 분석한 결과를 토대로 현지토를 분류 해보면, #.200 체 통과량이 5.12%으로 나타났으며, 곡률계수(Cc) 1.717, 균등계수(Cu) 15, 소성지수가(PI) 3.86%으로 나타나 통일 분류법상 SW-SM으로 분류되었다. 또한 플라이애시도 분류해보면 무기질로 ML로 분류되며, 벤토나이트는 액성한계가 50%이상이며 CH로 분류되었다.

### 3.1.2 광물 조성

본 연구는 원시료의 구성 성분을 파악하기 위하여 X-선 회절분석을 실시하였으며 분석결과 광물 조성이 그림 4~6과 같이 나타났다. X선 회절분석 결과의 회절강도(intensity)는 광물의 결정성에 비례하는데, 플라이애시의 구성 성분인 석영과 물라이트는 광물의 결정성이 높아 확연히 식별되고, 현지토는 주 구성 광물이 석영과 사장석이며, 부성분 광물은 녹니석과 백운모로 나타나고 있다. 또한 벤토나이트는 석영과 베이델라이트, 세니딘을 광물로 함유하고 있다.

### 3.1.3 화학 조성

현지토와 벤토나이트의 주부성분 원소의 함량을 표 4에서 보면, 현지토의  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO$ ,  $P_2O_5$ 의 함량은 벤토나이트와 큰 차이를 나타내지 않으나,  $SiO_2$ ,

표 4. 원시료의 주·부성분 원소의 함량(wt.%)

성분	현지토 (SW-SM)	벤토나이트	보령 플라이애시 (정문경 등, 1998)
$SiO_2$	64.45	57.44	46.47
$Al_2O_3$	14.21	11.58	30.09
$K_2O$	2.65	1.24	0.71
$Na_2O$	1.60	2.51	0.38
$Fe_2O_3$	5.78	1.42	5.07
$CaO$	0.35	2.37	5.26
$MgO$	2.54	3.76	0.87
$TiO_2$	0.84	0.08	1.71
$MnO$	0.13	0.02	0.03
$P_2O_5$	0.15	0.08	1.15
L.O.I	6.70	18.54	7.54
Total	99.41	99.04	99.28

$Fe_2O_3$  : Total Fe      L.O.I : Loss of ignition

$Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  함량을 보면 현지토가 각각 64.45%, 14.21%, 5.78%로 벤토나이트 함량 57.44%, 11.58%, 1.42%보다 다소 높은 값을 보인다. 이러한 벤토나이트는 물과 반응할 경우 원체적의 13~16배 까지 팽창하며, 무게의 5배까지 물을 흡수하는 특성을 가지고 있다. 또한 정문경 등(1998)에 의하면 플라이애시에 함유된 CaO는 분석 결과와 같이 매우 소량이므로 포졸란 반응이 적을 것으로 예상되며  $SiO_2$ 의 활성도가 낮아 혼합차수재의 투수계수 저감에 큰 역할을 하지 못할 것으로 판단된다.

## 3.2 역학 특성

### 3.2.1 다짐 특성

주재료의 다짐 특성을 보면, 현지토의 최대건조단위중량( $r_{dmax}$ )과 최적함수비(OMC)는 각각  $1.85g/cm^3$ , 14.27%로 나타나며, 플라이애시는  $1.31g/cm^3$ , 24.05%, 벤토나이트는  $1.22g/cm^3$ , 45.87%로 나타났으며, 입자가 작을수록 최대건조단위중량은 감소하나, 최적함수비는 증가하는 경향을 알 수 있다.

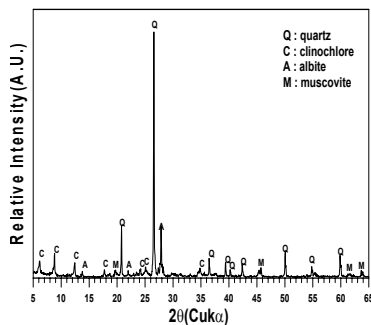


그림 4. 현지토의 X-선 회절분석

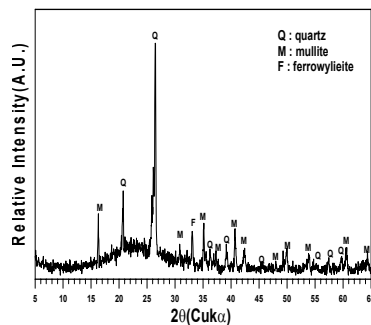


그림 5. 플라이애시의 X-선 회절분석

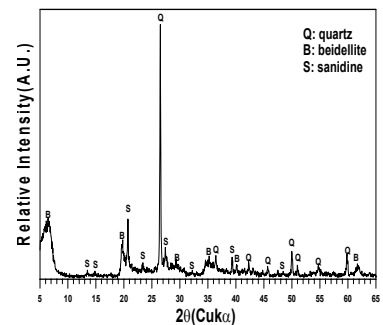


그림 6. 벤토나이트의 X-선 회절분석

혼합시료의 다짐 특성을 보면, A-1시료(벤토나이트 3%)에서 A-6(벤토나이트 18%)까지 벤토나이트를 3%씩 증가하여 실험 한 결과, 벤토나이트량이 증가 할수록  $1.69\text{g}/\text{cm}^3$ 에서  $1.52\text{g}/\text{cm}^3$ 로 최대건조단위중량은 감소하며, 최적함수비는 18.72%에서 25.71%으로 증가하는 경향을 나타내어 다짐 곡선이 오른쪽 하향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 최적함수비의 변화가 증가하는데, 이는 비표면적이 커 큰 수분 흡착 능력을 가진 벤토나이트의 혼합비가 증가하여 보유되는 물의 양이 많아지며 수화 반응의 증가로 비중이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

B-1시료(플라이애시 0%)에서 B-5(플라이애시 82%)까지 플라이애시를 약 20%씩 증가시켜 다짐 시험을 한 결과, 최대건조단위중량은  $1.55\text{g}/\text{cm}^3$ 에서  $1.36\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 감소하는 경향을 보였으며, 최적함수비도 24.50%에서 23.65%로 감소하는 결과를 볼 수 있다. 이는 플라이애시가 점성이 없으며 입도 분포가 균등하여 간극이 커지기 때문에 혼합비의 증가에 따라 감소하는 것으로 판단된다.

그림 9, 10과 같이 벤토나이트의 증가에 따라 최대건조단위중량이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있으며 최적함수비는 상반되며 선형적인 증가를 나타내고 있다. 또한,

플라이애시의 변화에 따른 최적함수비의 변화는 매우 작은 것으로 나타났다.

### 3.2.2 투수 특성

다짐 시험 결과를 통하여 최대건조밀도의 95%이상, 최적 함수비 보다 2~3% 습윤 측으로 다진 시료를 이용하여 투수계수를 측정하기 위해 압밀 시험을 실시하였다. 실험 결과 현지토의 투수계수는  $6.74 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{sec}$ 로 나타나 매립장 차수재로서의 요건인  $1 \times 10^{-7}\text{cm}/\text{sec}$  이하의 조건을 충족시키지 못하며, 플라이애시의 투수계수도  $3.27 \times 10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$ 로 고투수성 값을 나타냈다. 그림 11을 보면 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 투수계수가 감소하는 경향을 보인다. 특히 벤토나이트의 혼합비가 9%일 때부터 급격히 감소하는 경향을 보이며, 15%일때 매립지 차수재의 조건인  $1 \times 10^{-7}\text{cm}/\text{sec}$  이하의 투수계수를 나타내어 차수재 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 홍철호(2000), 김수문 등(2000)이 발표한 바와 같이 점토질은 벤토나이트의 함량이 5%일 때 만족하고, 풍화토를 사용할 경우 15%일 때 차수재의 조건을 만족한다는 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다. 이와 같이 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 투수계수가 감소하는 이유는 수화 반응에 의한 벤토나이트

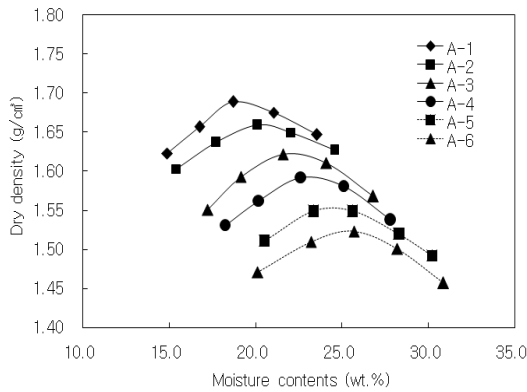


그림 7. A혼합시료에 대한 다짐 곡선

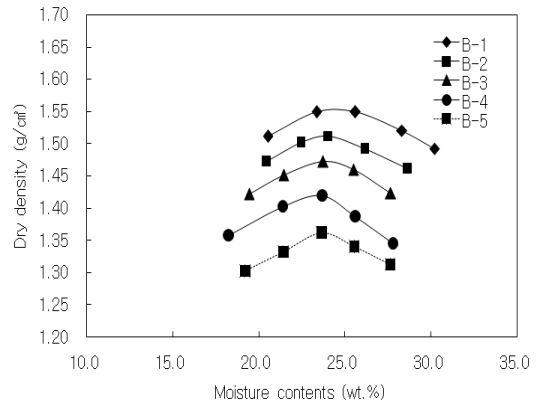


그림 8. B혼합시료에 대한 다짐 곡선

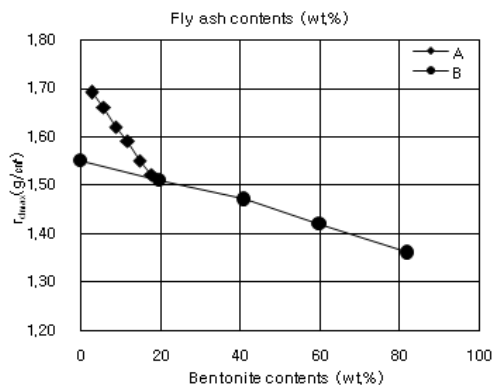


그림 9. 혼합비에 따른 최대건조단위중량의 변화

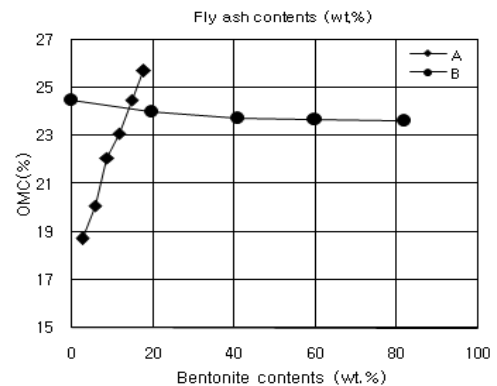


그림 10. 혼합비에 따른 최적함수비의 변화

트의 부피 팽창으로 인하여 다짐간에 간극을 채워줌으로서 간극 범위가 좁아지는 관계 때문으로 판단된다. 다시 말하면, 정문경 등(1998)이 밝힌 바와 같이 플라이애시의 CaO나 SiO<sub>2</sub> 성분은 함량이 작거나 활성도가 낮아 투수계수 저감에 큰 역할을 하지 못하므로 주로 벤토나이트의 팽창에 의해 결정 되는 것으로 판단된다.

그림 12를 보면 플라이애시가 20%일 때 매립지 차수재의 조건인  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하 조건을 만족하고, 플라이애시의 혼합비가 계속 증가함에 따라 투수계수가 점진적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 플라이애시가 점성이 없어, 입자 사이의 간극을 충전하지 못했기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 다시 말하면 플라이애시의 입자의 형상이 현지토와 다른 다공질 구형인 형상을 갖고 있는 것과 두시료의 입도 분포가 서로 다르기 때문으로, 이는 그림 13과 같이 현지토의 입자가 판상의 입자 형상을 갖고 있으며, 플라이애시는 그림 14처럼 구형으로 두 시료의 입자가 입자와 입자의 공극을 치밀하게 메우지 못하기 때문이다.

이상과 같이 A, B의 혼합시료에 대하여 투수 특성을 평가해본 결과, 벤토나이트의 함량비가 15% 이상일 때 투수계수가 매립지 차수재 조건을 만족하는 최적 투수계수인 것

으로 나타났으며 플라이애시를 혼합하는 경우 벤토나이트를 15% 첨가한 상태에서 플라이애시를 20% 이하로 대체할 경우 매립지 차수재 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

### 3.2.3 강도 특성

그림 15, 16에서 벤토나이트의 재령 기간 및 혼합비 증가에 따른 일축 압축 강도의 변화 특성을 보면 벤토나이트의 혼합비가 증가 할수록 강도는 미소하게 증가하는 것으로 보이나 이는 벤토나이트의 혼합비 증가가 일축 압축 강도에 영향을 준다고는 판단 할 수 없다. 그 이유는 재령 기간에 따른 일축 압축 강도 변화 특성을 보면 재령 기간이 길수록 일축 압축 강도가 증가하는 것을 보면 알 수 있다. 1일 보다 7일에서 급격히 증가하며, 그 이후 14일 부터는 증가하는 폭이 작아지는 경향을 보인다. 그러므로 A혼합시료에서 일축 압축 강도에 영향을 주는 것은 시멘트의 혼합률을 배제한 경우 벤토나이트의 혼합비가 아닌 재령 기간인 것으로 판단된다.

그림 17, 18에서 플라이애시의 혼합비 증가에 따른 일축 압축 강도의 변화 특성을 보면 플라이애시가 증가 할수록 강도가 증가하는 경향을 보이며, 재령 기간에 따른 일축 압

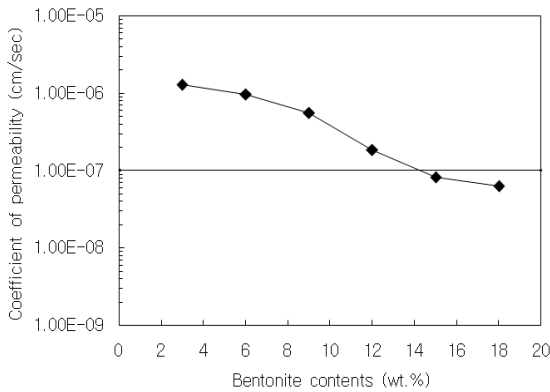


그림 11. 벤토나이트 함량에 따른 투수계수의 변화

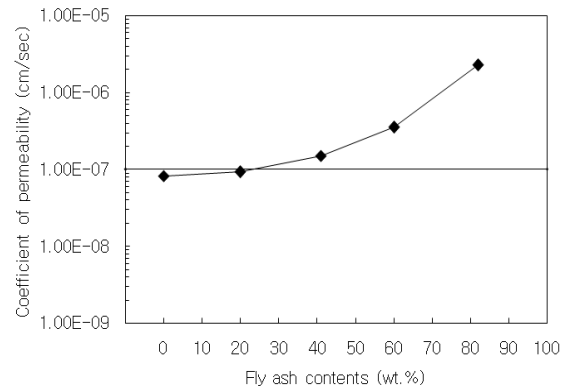


그림 12. 플라이애시 함량에 따른 투수계수의 변화

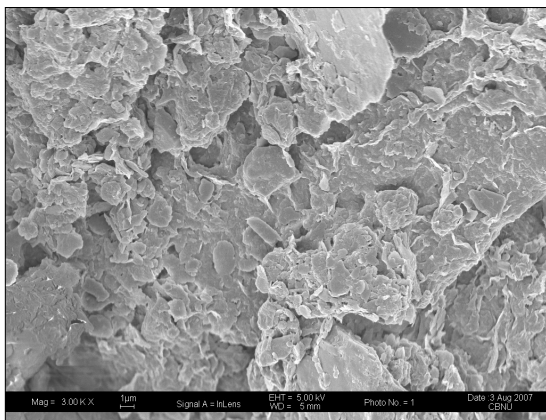


그림 13. SEM 분석 사진(B-1 7day)



그림 14. SEM 분석 사진(B-5 7day)

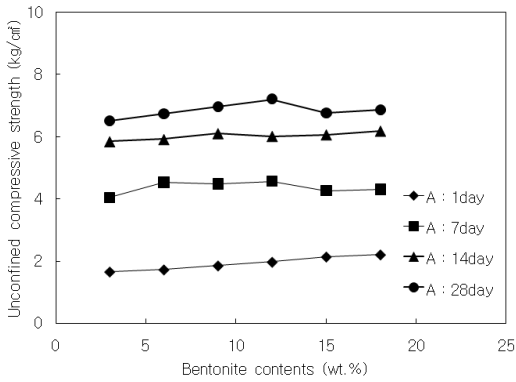


그림 15. 벤토나이트 혼합비에 따른 강도 변화

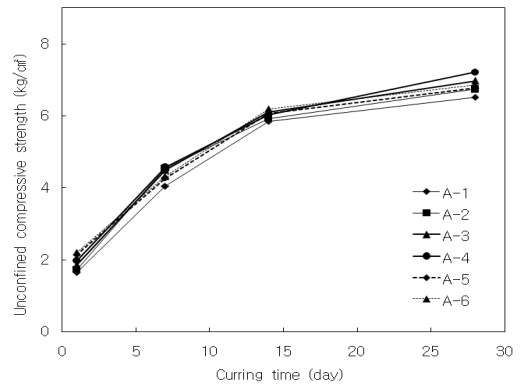


그림 16. 재령 시간에 따른 강도 변화(A)

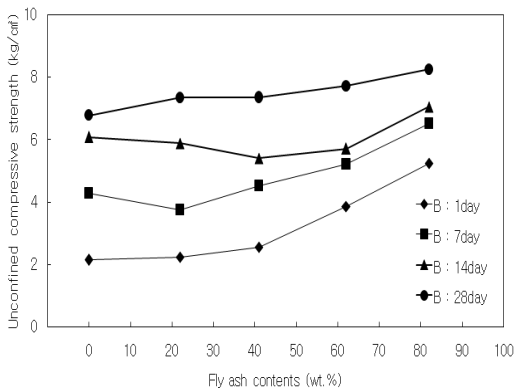


그림 17. 플라이애시 혼합비에 따른 강도 변화

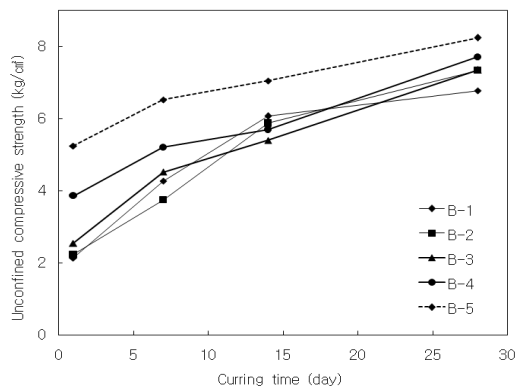


그림 18. 재령 시간에 따른 강도 변화(B)

축 강도 변화 특성을 보아도 재령 시간이 길수록 일축 압축 강도가 증가하는 경향을 보인다. 이처럼 높은 일축 압축 강도를 위해서 플라이애시의 첨가가 중요하지만 플라이애시의 증가에 따라 투수계수도 증가하기 때문에 매립지 차수재의 투수계수 조건에 만족하기 위해서는 플라이애시의 혼합비에 대한 조절이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

플라이애시-벤토나이트 혼합 점토차수재의 공학적 특성을 규명하기 위해 쓰레기 매립지 후보지로 거론되고 있는 현지토를 주재료로 이용하고, 혼합재료로 플라이애시, 벤토나이트, 시멘트를 이용하였다. 주재료와 혼합재료에 대해 물리학적 실험과 역학 실험을 통해 매립지 차수재로서의 이용 가능성을 규명하는데 목적을 두고 그에 대한 타당성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) A혼합시료를 보면, 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 최대건조단위중량은  $1.69g/cm^3$ 에서  $1.52g/cm^3$ 으로 감소하는 경향을 보이며, 반면 최적함수비는 18.72%에서 25.71%으로 증가하는 경향을 보이는데 이는 벤토

나이트의 혼합비가 증가함에 따라 보유되는 물의 양도 많아지며 수화 반응의 증가로 비중이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. B혼합시료의 경우 플라이애시 혼합비가 증가함에 따라 최대건조단위중량은  $1.55g/cm^3$ 에서  $1.36g/cm^3$ 으로 감소하는 경향을 보였으며, 최적함수비도 24.50%에서 23.65%로 감소하였다, 이는 플라이애시가 점성이 없으며 입도 분포가 균등하여 간극이 커지기 때문에 혼합비가 증가함에 따라 감소하는 것으로 판단된다.

- (2) 혼합시료 A의 경우 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 투수계수가 감소하는 경향을 보이며, 벤토나이트의 혼합비가 15%일 때  $8.17 \times 10^{-8} cm/sec$ 로 매립지 차수재의 조건을 만족한다. 또한 혼합시료 B는 플라이애시가 20%일 때  $9.27 \times 10^{-8} cm/sec$ 로 매립지 차수재의 조건을 만족하지만, 안전성 확보를 위해 20% 이하로 혼합하여야 한다고 판단된다.
- (3) A, B의 혼합시료에 대하여 투수 특성을 평가해본 결과, 벤토나이트의 함량비가 15% 이상일 때 매립지 차수재 조건을 만족하는 최적 투수계수인 것으로 나타났으며 플라이애시를 혼합하는 경우 벤토나이트를 15% 이상 첨가한 상태에서 플라이애시를 20% 이하로 대체



할 경우 매립지 차수재 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

이와같이 현지토나 플라이애시는 그 자체만으로는 차수재로서의 조건을 충족시키지는 못하는 것으로 나타났으나, 관련 시험을 실시하여 현지토와 벤토나이트, 플라이애시의 적정 혼합비를 연구하고 역학적 성질을 향상 시킨다면 매립지 혼합차수재를 개발함에 있어 대체재로의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김대만, 김기영 (2006), 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성, *한국지반환경공학회논문집*, 제7권, 제6호, pp. 45~56.
2. 김수문, 엄희남, 임남웅 (2000), 벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향, *대한환경공학회논문집*, 제22권, 제3호, pp. 495~504.
3. 김영수, 이상복, 정성관 (1995), 퇴적암 풍화토의 공학적 특성;대구경북지역을 중심으로, *한국지반공학회지*, 제11권, 제4호, pp. 63~74.
4. 김춘한 (2007), *플라이애쉬를 사용한 고유동 콘크리트의 고강도에 대한 연구*, 석사학위논문, 동양대학교대학원, p. 7.
5. 신은철, 김성환 (1998), 폐석회의 점토차수재로서 활용에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, 제14권, 제5호, pp. 29~38.
6. 이종우 (2000), *폐석고와 Fly Ash를 재활용한 차수재의 최적 혼합비 산정을 위한 실험적 연구*, 석사학위논문, 중앙대학교 대학원, p. 58.
7. 정문경, 서경원, 이용수 (1998), 플라이애시 혼합차수재의 투수특성과 미세구조, *한국지반공학회논문집*, 제14권, 제1호, pp. 109~124.
8. 정순용, 김동수, 이승래, 권기철 (1997), 화강풍화토의 거동 특성 규명을 위한 비교란 시료채취기 개발, *한국지반공학회논문집*, 제9권, 제3호, pp. 13~23.
9. 정하익, 장연수 (1993), 폐기물 매립장의 차폐재와 침출 화학 성분과의 상호작용분석, *한국지반공학회논문집*, 제9권, 제3호, pp. 49~60.
10. 정하익 (1998), *지반환경공학*, 유림, p. 676.
11. 조재범, 현재혁, 최경훈, 박호식, 서경아 (2002), 매립장 차수재로서의 MCG와 Fly Ash, Geocrete의 역학적 특성 비교 평가 연구, *한국폐기물학회논문집*, pp. 178~181.
12. 홍철호 (2000), *벤토나이트 혼합 차수재의 공학적 특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 청주대학교 대학원, pp. 46~51.
13. 환경부 (2007), *폐기물처리시설의 설치기준*, 폐기물관리법시행규칙 별표9.
14. Auvinet, G. Y. and Hiriart, G. (1980), An Artificial Cooling Pond for the Rio Escondido Coal Fired Power Plant, *Proceedings, ASCE Symposium on Surface Water Impoundments*, Minneapolis, Vol. 2, pp. 1089~1098.
15. Chapuis, R. P. (1981), Permeability Testing of Soil-Bentonite Mixtures, *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 4, pp. 744~745.
16. Lundgren, T. A. (1981), Some Bentonite Sealants in Soil Mixed Blankets, *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 2, pp. 349~354.
17. Usmen, M.A., Bowders, J.J., and Gidley, J.S. (1988), "Low Permeability Liners Incorporating Fly Ash", *Proc. of ASCE National Convention*, Nashville, TN, USA, pp. 50~65.
18. U.S EPA (1993), "Soild Waste Disposal Facility Criteria : Technical Manual", EPA 530-R-93-019.

(접수일: 2008. 2. 29 심사일: 2008. 2. 29 심사완료일: 2008. 8. 13)