

## 혼합반응 차수재의 투수특성 연구

### The Permeability Characteristics of the Reactive Soil - Bentonite Landfill Liner

이강원<sup>1)</sup>, Kang-Won Lee, 황의석<sup>2)</sup>, Eui-Seok Hwang, 안기봉<sup>3)</sup>, Ki-Bong An, 정하익<sup>4)</sup>, Ha-Ik Jeong  
김학문<sup>5)</sup>, Hak-Moon Kim

<sup>1)</sup> (주)평화엔지니어링 토질부 대리, Pyeong Hwa Engineering

<sup>2)</sup> 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University.

<sup>3)</sup> 한국파라마운트(주) 대표이사, Principal, Korea Paramount Inc.

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Dept. of Civil Engineering, KICT.

<sup>5)</sup> 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University.

**SYNOPSIS :** The purpose of this paper is to investigate permeability characteristic of soil-bentonite landfill liner and development of desirable liner system. In this study, permeability tests for soil-bentonite, reactive soil-bentonite and apply bentomat and reactive mat are carried out under the low and high water pressure. According to test result, additional amount of bentonite decreases the coefficient of permeability up to the bentonite mixture ratio of 15%. Therefore, the permeability test for landfill liner's indicated that the use of general water would be in more safe side because the liner system show low permeability duet decrease effect of porous by suspended soil(SS). The permeability of leachate for Zeolite mixture ratio 0, 5, 10% with bentonite mixture ratio 15% showed negligible variation in the permeability with general water. Therefore, Zeolite could be used as a successful that is available purification material for the treatment of leachate, without changing the of landfill liners. Also odious smell could be removed by adding smell amount of Zeolite to the leachate. It was revealed that the bentomat and reactive mat installed in soil-bentonite layer effectively improved the permeability as well as purification of the leachate.

**Key words :** zeolite, soil-bentonite landfill liner, reactive soil-bentonite landfill liner, permeability tests

## 1. 서론

인구증가와 생활수준의 향상으로 인하여 쓰레기 배출량이 급격히 증가하고 있으며, 쓰레기처리에 따른 많은 문제점이 발생되고 있다. 쓰레기 처리방법중 환경오염물질 배출 및 지역사회 의 소각장의 거부로 인하여 매립의 방법이 많이 채택되고 있다. 그러나, 매립장 하부의 차수층의 품질과 시공상의 문제점 등으로 인하여 확실한 차수가 되지 않아 침출수 유출 발생가능성이 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 매립장 하부의 바닥 차수층의 투수품질을 내구연한까지 될 수가 있도록 보다 확실한 차수 시스템 연구가 필요하여 현재  $1 \times 10^{-7}$ cm/sec의 투수계수를 가진 벤토매트와 벤토매트내에 침출수의 흡착과 이온반응이 가능한 Zeolite를 첨가한 차수시스템에 대한 연구를 통해 차수층의 투수품을 고도화 할 수 있는 최적의 불투수 혼합차수시스템에 대한 투수특성을 연구하는데 있다.

## 2. 실험

### 2.1 실험대상물질의 기본물성

본 실험에 사용된 재료는 화강풍화토와 벤토나이트로, 화강풍화토는 충청남도 00지구의 인근에서 채취한 화강풍화토를 사용하였다. 실내시험을 위한 화강풍화토의 시료는 24시간 노건조시킨 후 4번체 통과시료를 사용하였다. 표 1은 화강풍화토에 대한 기본물성치의 결과를 나타내고 있다.

표 1. 화강풍화토의 기본물성

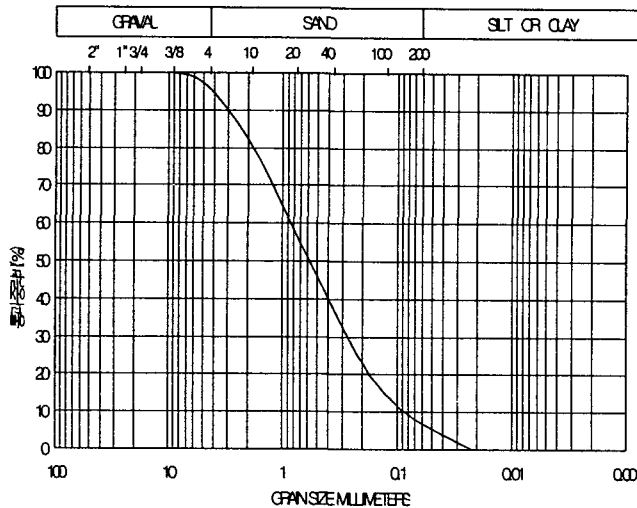


그림 1. 화강풍화토의 입도분포

시험항목	시험결과	
	시험내용	화강풍화토
비중	비중( $G_s$ )	2.62
현장함수비	자연함수비(%)	11
액·소성	액성한계(LL,%)	—
	소성한계(PL,%)	NP
	소성지수(PI)	—
입도	유효입경( $D_{10}$ ,mm)	0.085
	$D_{30}$ (mm)	0.28
	$D_{60}$ (mm)	0.85
	균등계수, $C_u$	10
	곡률계수, $C_g$	1.09
	통일분류	SW-SM
	#200번체 통과량(%)	8.53
A 다짐	최적함수비(%)	13
	최대건조밀도( $t/m^3$ )	1.88

#### 2.1.1 벤토나이트, Zeolite 및 침출수의 화학적 구성성분 및 함량

다음 표 2와 표 3은 본 연구에서 사용된 벤토나이트와 Zeolite 및 침출수의 화학적 구성성분을 나타내고 있다.

표 2. 벤토나이트와 Zeolite의 화학적 구성성분 및 함량

구성성분	함량(%)	
	벤토나이트 (미국산)	Zeolite (국내산)
SiO <sub>2</sub> (규산)	61.7	65.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (산화알루미늄)	20.1	13.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (산화철)	4.3	13.2
MgO(산화마그네슘)	2.6	0.92
CaO(산화칼슘)	1.0	3.57
Na <sub>2</sub> O(산화나트륨)	2.5	2.03
K <sub>2</sub> O(산화칼륨)	0.3	1.77
LOI	5.8	—
Ig-Loss(건조감량)	—	11.2
C·E·C (양이온치환능력)	—	70 ~ 140(meq/100g)

표 3. 침출수 성분(수도권 매립지)

항목	침출수 (mg/L)
pH	6.3
BOD <sub>5</sub>	14,585
COD <sub>cr</sub>	24,835
SS	190
T-N	589
NH <sub>3</sub> -N(as N)	301
Alk	3,555
T-P	4.79
Cu	0.177
Cd	0.004
Cr <sup>+6</sup>	0.127

## 2.1.2 Zeolite 의 흡착특성

흡착이란 다공성매질을 형성하고 있는 토립자와 오염물질의 물리-화학작용에 의하여 토립자표면에 오염물질이 달라붙는 것을 말한다. 흡착에는 이온교환 및 van der Waals힘에 의한 물리적 흡착과 원자결합 등에 의한 화학적 흡착이 있다. 토립자에 흡착되는 오염물질의 양(S)는 오염물질의 농도(C)에 따라 변한다. 오염물질의 흡착정도는 실내실험으로부터 산정이 된다. 흡착량은 다음 식으로 표현된다(Yong, etc. 1992).

$$S = K_d C^b \quad (1)$$

$$\log S = b \log C + \log K_d \quad (2)$$

여기에서 S는 다공성매질의 건조단위 중량당 흡착 또는 침전된 양이고 C는 오염물질의 농도이다.

그러므로 이와같은 제오라이트의 흡착특성의 장점을 통해 침출수의 농도저하 및 오염정화를 위해 제오라이트의 적용시의 영향을 분석하고자 하였다.

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 변수위 투수시험

시험방법은 한국공업규격기준인 변수위시험(KSF 2322)의 규정에 따라 변수위 투수시험기를 사용하여 투수계수를 구하였다.

$$k = 2.3 \times \log_{10} \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \times \frac{a \cdot L}{A(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

여기서, k : 투수계수(cm/sec)

$t_1, t_2$  : 각각 시험 시작 및 종료시간(sec)

$H_1, H_2$  : 각각 시간  $t_1, t_2$ 에서 실측한 시료하부에서 Stand Pipe 수위(cm)

a : Stand Pipe 단면적 ( $\text{cm}^2$ ), A : 시료의 단면적 ( $\text{cm}^2$ ), L : 시료의 길이(cm)

시험의 몰드는 A다짐 몰드를 사용하였으며, 혼합차수재와 혼합차수재에 2가지 종류의 매트를 적용한 시험몰드를 제작하여 시험을 실시하였다. 다짐시험 결과로부터 구한 최대건조밀도의 95%이상 그리고 최적함수비보다 2% 높은 습윤층의 함수비로 하여 3cm씩 2층으로 정적다짐을 실시하여 직경 10cm, 높이 6cm의 시료를 제작하여 투수시험을 실시하였다. 혼합차수재, 벤토매트는 혼합차수재 중간에 벤토매트를 설치하여 시료를 제작하였다. 시료의 포화를 위하여 우선 몰드를 24시간 이상 일반수에 수침시켜 모세관 현상으로 시료의 물이 차도록 하였고 진공펌프를 이용하여 시료내의 기포를 제거한 후에 일반수와 침출수를 각각 사용하여 투수시험을 실시하였다. 시료의 포화도를 확인하기 위하여 실험중에는 유입량과 유출량을 각각 측정하였고 실험 종료후에는 시료의 함수비를 측정하였다.

### 2.3.2 압력식 정수위 투수시험

시험방법은 그림 2와 같이 실시하였고 공시체는 변수위 투수시험에서 사용한 A다짐 몰드에 가압을 하여 투수 되는 양을 2시간마다 측정하여 다음과 같은 식 (4)로 투수계수를 구하였다.

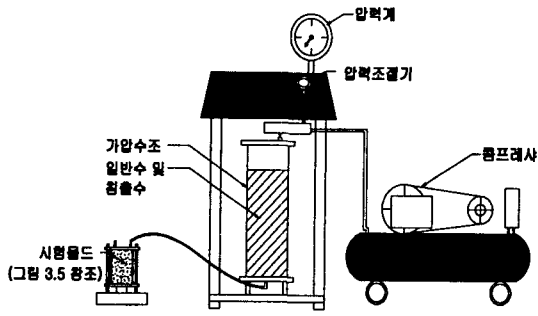


그림 2. 가압 투수시험기

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (4)$$

여기서, k : 투수계수(cm/sec)  
t : 투수량 측정시간(sec)  
h : 압력을 수위로 환산한 높이(cm)  
P : 압력(kg/cm<sup>2</sup>)  
A : 시료의 단면적 (cm<sup>2</sup>)  
L : 시료의 길이(cm)

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 혼합 차수층의 공학적 특성

##### 3.1.1 화강편화토와 벤토나이트 혼합비에 따른 투수특성

혼합차수재의 일반수 및 침출수에 대한 투수특성은 다음 그림 3 및 그림 4와 같은 결과를 나타내었다

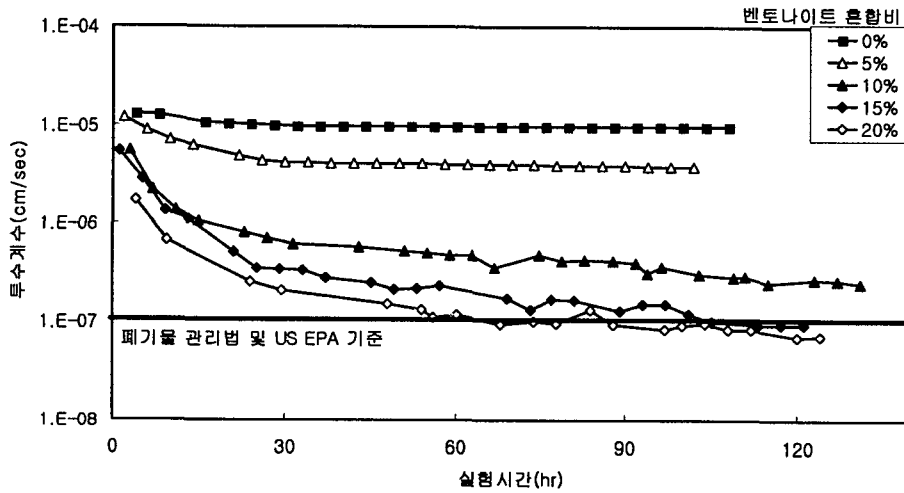


그림 3. 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수(일반수)

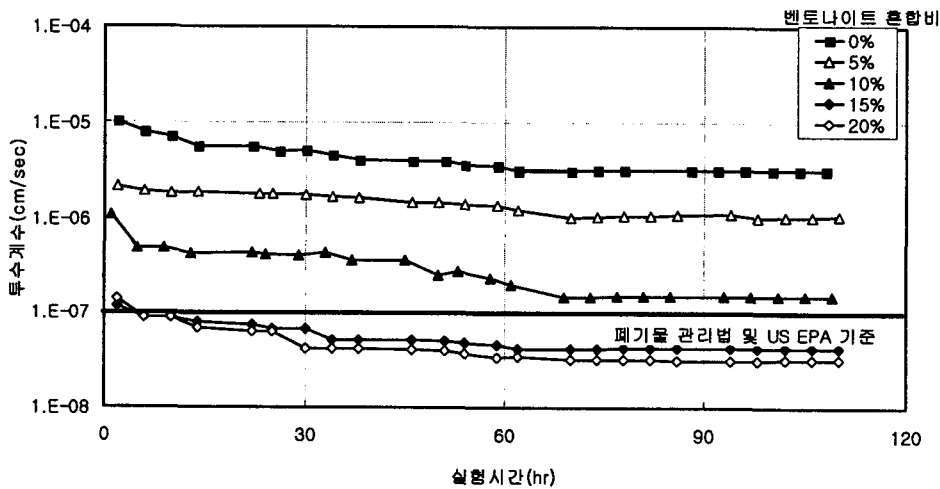


그림 4. 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수(침출수)

모든 시료는 일정한 시간이 경과함에 따라서 투수계수가 점진적으로 감소하였고 비교적 안정된 값을 나타내었다. 혼합비에 따라서 일반수에 대해서는  $9.87 \times 10^{-6} \text{cm/sec} \sim 3.13 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 나타났고 일반수와 침출수에 의한 투수실험에서 폐기물 관리법기준인  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 를 만족시키는 혼합비는 15% 이상에서 나타났다.

### 3.1.2 화강풍화토와 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수의 변화

다음과 같이 표 4는 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수의 변화를 나타내고 있다.

표 4. 혼합비에 따른 투수실험결과

벤토나이트 혼합비(%)		0	5	10	15	20
투수계수 (cm/sec)	일반수	$9.87 \times 10^{-6}$	$4.44 \times 10^{-6}$	$2.31 \times 10^{-7}$	$9.13 \times 10^{-8}$	$7.04 \times 10^{-8}$
	침출수	$3.21 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-6}$	$1.47 \times 10^{-7}$	$1.47 \times 10^{-7}$	$3.13 \times 10^{-8}$

벤토나이트 혼합비가 증가함에 따라 혼합차수재의 투수계수가 지수함수관계로 투수계수가 감소하였고 혼합비 15%이상부터는 폐기물 관리법 기준인  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하의 투수계수를 보였다. 그러나 혼합비 15%이상부터는 벤토나이트의 팽창성으로 인한 공극감소효과가 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

일반수와 침출수에 의한 투수계수의 차이는 침출수 성분중 부유물질(SS)의 함유로 인한 공극의 감소 현상이 더 크기 때문에 투수계수의 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

## 3.2 혼합 반응차수재의 공학적 특성

### 3.2.1 Zeolite의 혼합비에 따른 투수특성

다음 그림 5와 그림 6은 벤토나이트 10%, 15% 혼합한 혼합차수재를 기준으로 하여서 Zeolite를 벤토나이트의 중량비 5%, 10%를 혼합한 혼합반응차수재의 투수실험결과를 나타내었다.

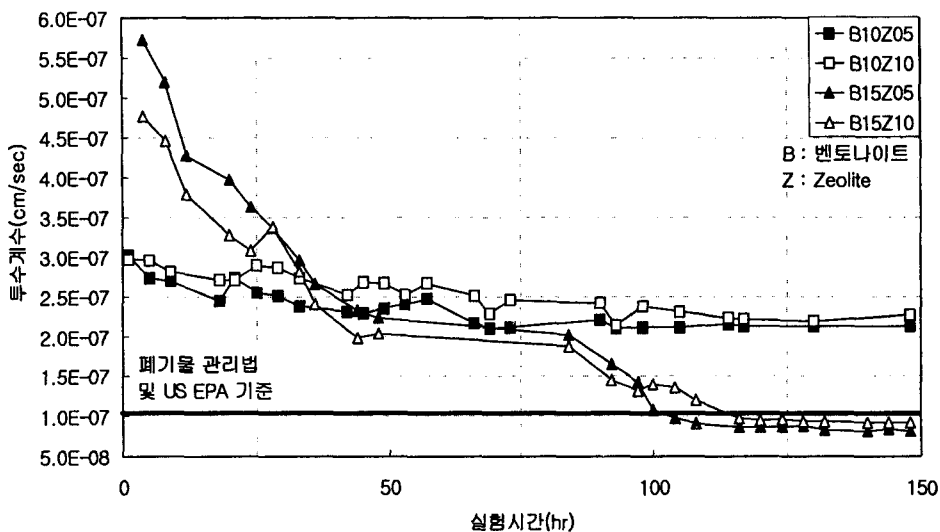


그림 5. 혼합 반응차수재 투수계수(일반수)

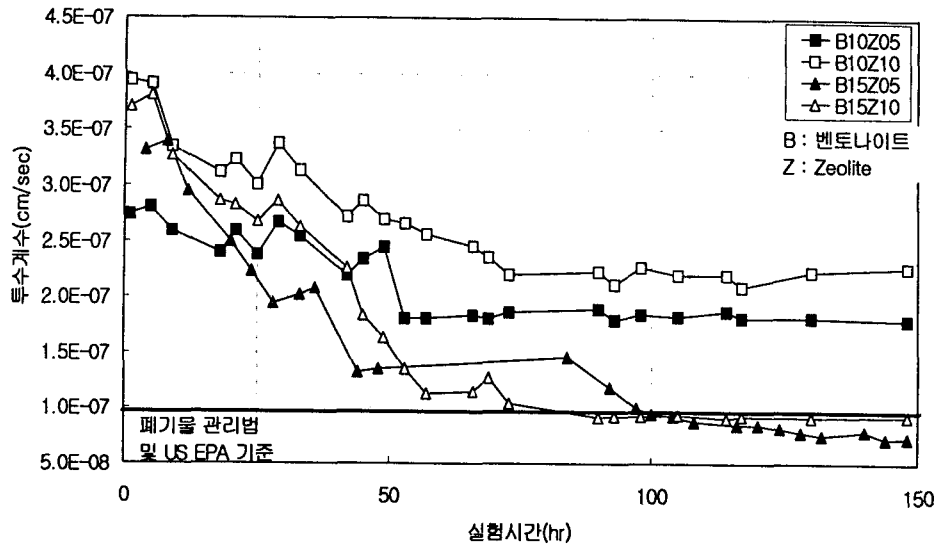


그림 6. 혼합 반응차수재 투수계수(침출수)

일반수 및 침출수를 이용한 투수실험 결과 Zeolite를 혼합한 혼합반응차수재의 투수계수도 벤토나이트 혼합비 15%에서 폐기물 관리법 기준인  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$  기준을 만족하는 것으로 나타났다.

### 3.2.2 Zeolite 혼합비에 따른 투수계수의 변화

다음과 같이 표 5는 Zeolite 혼합비에 따른 투수계수의 변화를 나타내고 있다.

표 5. Zeolite 혼합비에 따른 투수실험결과

벤토나이트 혼합비(%)	Zeolite 혼합비(%)	투수계수(cm/sec)	
		일반수	침출수
10	0	$2.31 \times 10^{-7}$	$1.47 \times 10^{-7}$
	5	$2.12 \times 10^{-7}$	$1.801 \times 10^{-7}$
	10	$2.275 \times 10^{-7}$	$2.27 \times 10^{-7}$
15	0	$9.13 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^{-8}$
	5	$8.23 \times 10^{-8}$	$7.20 \times 10^{-8}$
	10	$9.20 \times 10^{-8}$	$9.30 \times 10^{-8}$

다음과 같이 Zeolite의 혼합비에 따라서 투수계수는 벤토나이트 10%에서는 폐기물 관리법 기준보다 크지만 벤토나이트 15%에서는 Zeolite 혼합비 5, 10%에 상관없이 폐기물 관리법 기준이하로 나타났다.

Zeolite 혼합비에 따라서 일반수 및 침출수를 이용한 투수실험결과 유사한 결과를 나타내었다. 그러므로 Zeolite 혼합비 5, 10%에서는 차수재의 투수특성에 영향을 미치지 않아 침출수의 정화특성재료로 사용 가능함을 알 수 있다. 또한 투수실험 후 침출수는 악취가 상당부분 제거되었다. 이는 반응물질인 Zeolite가 악취의 원인인 암모늄 이온을 제거하여 나타나는 것으로 판단된다.

### 3.3 메트릴 적용한 차수재의 공화적 특성

#### 3.3.1 벤토메트 및 반응메트릴 적용한 혼합차수재와 혼합반응차수재의 투수특성

다음 그림 7은 벤토나이트 15%를 혼합한 혼합차수재에 벤토매트, 벤토매트내 벤토나이트의 중량비로 Zeolite 5, 10%를 혼합한 반응매트를 설치한 혼합차수재와 그림 8은 벤토나이트 15%에 Zeolite 10%를 혼합한 혼합반응차수재에 벤토매트, 벤토매트내 벤토나이트 중량비로 Zeolite 5, 10%를 혼합한 반응매트를 설치한 혼합반응차수재의 투수실험결과를 나타내었다.

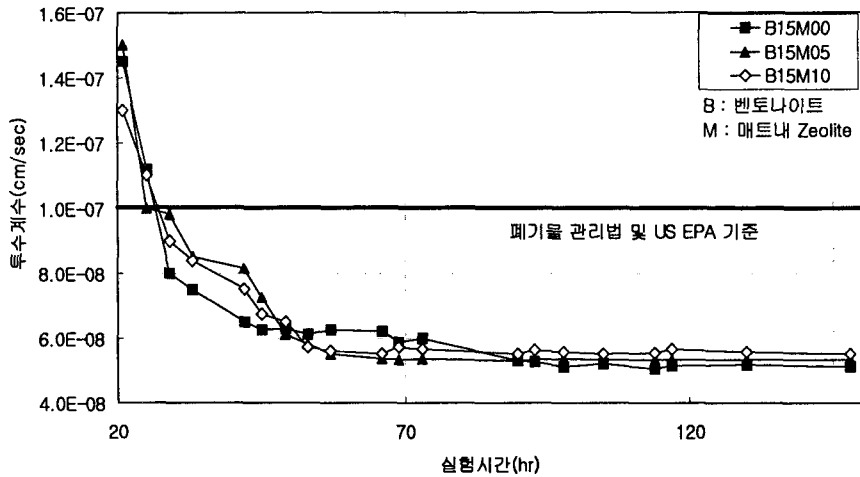


그림 7. 벤토매트 및 반응매트를 적용한 혼합차수재의 투수계수 변화

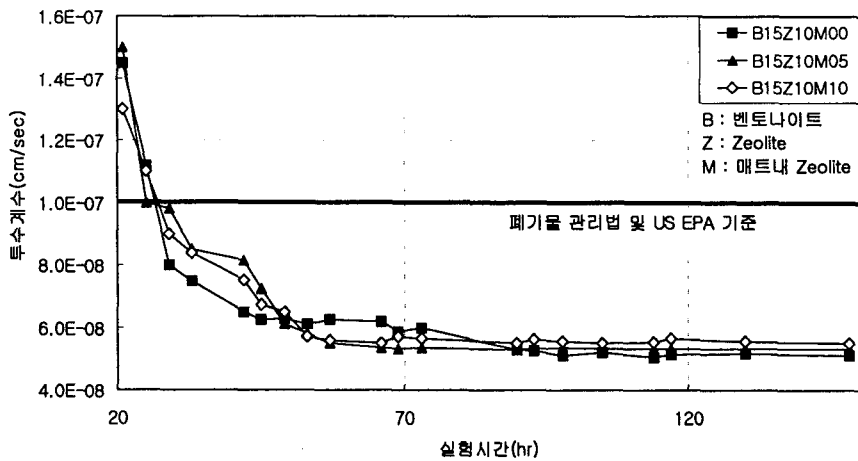


그림 8. 벤토매트 및 반응매트를 적용한 혼합반응차수재 투수계수

혼합차수재와 혼합반응차수재에 벤토매트와 반응매트를 적용한 차수재의 투수실험결과, 투수계수는  $5.11 \times 10^{-8} \text{cm/sec} \sim 5.50 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 유사한 결과를 보였고 폐기물 관리법 기준  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하로 나타났다. 최적의 벤토나이트 혼합비 15% 인 경우에 비해 최소 43%의 투수계수가 작게 나타내었다. 그러므로 혼합차수층에 벤토매트의 적용성이 우수하므로 차수에 대한 안전율을 향상시킬 수 있었다.

## 4. 결 론

혼합차수재에 반응물질인 Zeolite를 혼합한 혼합반응차수재의 투수특성을 규명하기 위하여 벤토나이트, Zeolite에 대한 혼합비를 변환시켜 일반수와 침출수를 이용한 투수실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 벤토나이트가 증가함에 따라 혼합차수재의 투수계수가 지수함수 관계로 감소하였고 혼합비 15%이상 부터는 벤토나이트 혼합비가 커질수록 투수계수의 감소효과가 크게 나타나지 않았다. 그러므로 벤토나이트의 최적의 혼합비는 15%로 판단된다.
- (2) 일반수와 침출수를 사용한 혼합차수재에 대한 투수실험에서 일반수에 비하여 침출수의 투수계수가 더 낮은 결과를 나타내었다. 이는 침출수의 부유물질(SS)에 의하여 공극의 감소효과로 인한 것으로 판단된다. 그러므로 폐기물 매립장 차수재의 투수실험에서 침출수가 일반수에 비해 투수계수가 낮게 나오므로 일반수에 의한 실험이 더 안전측으로 설계될 수 있는 것으로 판단된다.
- (3) 최적의 벤토나이트 혼합비 15%에 Zeolite 혼합비 0, 5, 10%에서 일반수 및 침출수를 이용한 투수실험결과 유사한 값이 나타나, Zeolite 혼합비 5, 10%에서는 차수재의 투수특성에 영향을 미치지 않았다. 또한 투수실험 후 침출수에 악취가 상당부분 제거되었는데 이는 악취의 원인인 암모늄 이온이 Zeolite 에 흡착된 것으로써 반응물질인 Zeolite 가 침출수의 정화특성재료로 효과적임을 알수 있었다.
- (4) 혼합차수재와 혼합반응차수재에 벤토매트와 반응매트를 적용한 차수재의 투수실험결과 최적 벤토나이트 혼합비 15% 인 경우에 비해 최소 43%의 투수계수가 작게 나타나 혼합차수층에 벤토매트의 적용성이 우수하므로 차수에 대한 안전율을 향상시킬 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(1995), "폐기물 매립지 차수재 개발, 연구보고서, KICT/95-GE-1202", 한국건설기술연구원.
2. 박준범(2001). "지하수 오염물질의 종류에 따른 투수성 반응벽의 반응물질 선정", 2001지반환경.
3. 장연수, 이광열(2001), "지반환경공학", 구미서관.
4. 정하익, 이용수(1996), "폐기물 매립장에서의 GCL 차수재 적용", 한국지반공학회 봄학술발표회지.
5. 정하익(1994), "오염지반 및 지하수의 정화기술", 한국건설기술연구원, 건설기술정보, 통권 133호.
6. David E. Daniel and Howard M. Liljestrand(1984), Effects of landfill leachates on natural liner systems.
7. Knitter, C. C., HasKell, K. G. and Peterson, M. L.(1993), "Use of Low Plasticity Silt for Soil Liners Cover" in Proceeding of the 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis Prakash, Ed., pp.1255~1259.
8. Sharma, H. D., and Kozicki(1988), " The Use of Synthetic and/or Soil-Bentonite Liner for Groundwater Protection" , on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis Prakash, Ed., pp.1149~1156.
9. Shan, H.Y., Daniel, D.E. (1991). Results of laboratory tests on a geotextile/bentonite liner material Proceedings of the Geosynthetics 91, Vol. 2, pp. 517~535.
10. Stark, T.D. (1998). Bentonite migration in geosynthetic clay liners. Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, pp. 315~320.