한국지반신소재학회논문집 제23권 1호 2024년 3월 pp. 1 ~ 7
J. Korean Geosynthetics Society Vol.23 No.1 March 2024 pp. 1 ~ 7

DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2024.23.1.001
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

지중 내 TPH, Phenol의 확산방지를 위한 선택적 차수재 제조에 관한 연구

A Study on the Selectively Block Barrier for Prevent the Spread of TPH and Phenol in the Ground

임호진[1,2], 조우리[2], 오승진[2], 김수희[2], 이재영[3]*
HoJin Lim[1,2], WooRi Cho[2], SeungJin Oh[2], SuHee Kim[2], JaiYoung Lee[3]*

[1]*Member, Researcher, Environmental Health Technoiogy Institute, 202-26 Heojun-ro, Gangseo-gu, Seoul 07532, Republic of Korea*
[2]*Member, Researcher, School of Environmental Engineering, University of Seoul., 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea*
[3]*Member, Professor, School of Environmental Engineering, University of Seoul., 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea*

ABSTRACT

In this study, a selecvively block barrier was developed to prevent the spread of contaminants (TPH, Phenol) in the ground only when contamination occurs. The materials were used Jumunjin sand, bentonite, polyolefin elastomer and spill hound marine. First, the properties and environmental hazards characteristics of materials were analyzed for evaluated their usability. Then, the possibility of use as a barrier material was confirmed by analyzing the water permeability characteristics that change after 24 hours of contact with contaminants. As a result of the analysis, the pH of each component was similar to the general groundwater pH range. In addition, the toxicity characteristics and the possibility of dissolution of hazardous substances, it was determined that there was no environmental hazard as the content was below the regulation value. Lastly, when comparing the permeability coefficient before and after contact with the contaminant, the permeability coefficient of approximately $\alpha \times 10^{-3}$cm/sec before contact was reduced to $\alpha \times 10^{-6}$cm/sec after contact with the contaminant.

요 지

본 연구에서는 지중 내 오염물질(TPH, Phenol)의 확산 방지를 위해 오염 발생시에만 선택적으로 차수성능을 발현하는 차수재를 제조하고자 하였다. 선택적차수재의 구성물질로는 주문진규사, 벤토나이트, 폴리올레핀 엘라스토머, 스필하운드 마린을 사용하였으며, 본 연구에서는 구성물질들의 활용가능성을 평가하기 위해 기초 특성 및 환경유해성을 확인하였으며 오염물질과의 접촉 24시간 후 변화되는 투수특성을 비교하여 차수재로서 사용가능성을 확인하였다. 각 구성물질의 pH는 일반 지하수 pH 범위와 유사하였으며 독성특성 및 유해물질 용출가능성 분석결과 기준치 이하의 함량을 보여 환경유해성은 없다고 판단되었다. 또한 오염물질 접촉 전·후 투수계수를 비교하였을 때, 접촉 전 $\alpha \times 10^{-3}$cm/sec 내외의 투수계수가 오염물질과 접촉 이후 $\alpha \times 10^{-6}$cm/sec로 감소된 결과를 보여 차수재의 비오염 상황에서는 투수성과 오염발생시 차수성능 발현을 확인할 수 있었다.

Keywords **:** Barrier, Selectively block, TPH, Phenol

1. 서 론

산업의 발달로 인해 다양한 화학물질들이 개발 및 사용되면서 매년 화학물질 유출사고가 발생되고 있고, 이에 의한 환경매체로의 영향에 대한 우려는 사회적 문제로 대두되고 있다. 특히 산업단지 또는 군부대 내 유류저장시설로 또는 주유소의 지하유류저장탱크 등에서 유출되는 유류는 토양 및 지하수에 지속적인 오염원으로 작용하고 있다 (Choi et al., 2019). 또한 가스 정제시설, 화학제품 생산시설 등에서 발생되는 페놀은 국내에서도 수계 또는 대기로

Received *11 Oct. 2023,* ***Revised*** *4 Jan. 2024,* ***Accepted*** *5 Feb. 2024*
****Corresponding author***
Tel: +82-2-6490-2876; Fax: +82-2-6490-2859
E-mail address: leejy@uos.ac.kr (J. Lee)

의 불법 유출이 일어난 적 있어 생태계 뿐만 아니라 결국 인체에 위해한 영향을 끼치는 오염원으로 알려져 있다 (Park and Kim, 2018).

지중 내 토양·지하수 오염은 지반 내 설치되어 있는 시설물에서의 직접적인 유출로 인해 발생 될 뿐만 아니라, 수계 또는 대기로 유출된 오염물질이 강우 등에 의해 토양 또는 지하수면 하부로 이동하여 오염이 발생 후 확산된다. 지중에서 발생된 오염은 육안으로 확인이 어려워 오염을 인지하였을때는 이미 오염이 축적되거나 확산이 크게 일어나 있는 경우가 많다. 또한 이미 인지된 오염이더라도 건물 하부와 같이 정화곤란부지에서 발생된 오염은 현행 정화기술로서 해결이 어려워 오염 피해를 방지하기 위해 새로운 오염관리와 이에 따른 기술 개발이 요구되고 있다 (Park et al., 2016).

따라서 본 연구에서는 이러한 오염 관리 방안으로서 선택적 차수재를 적용하고자 한다. 선택적 차수재란 비오염 상태인 지하수가 흐르는 조건에서는 투수성을 갖는 차수재이지만, 오염물질이 유출된 경우에만 차수력이 발생되는 차수재를 말한다. 현행기술로서 적용되고 있는 일반적인 차수재의 경우 오염물질이 없더라도 지하수와 접촉 시 차수성이 발현되어 지하수의 유동을 방해하는 등 주변 생태환경의 변화를 일으키는 단점이 있다. 선택적 차수재는 이러한 단점을 보완하여 화학물질의 유출사고가 일어나 긴급적으로 오염의 확산을 차단 시켜야 하거나, 지중 내 시설에서 발생 가능성이 있는 오염에 대한 사전 예방시설로 적용할 경우 비오염시 생태계로의 미치는 영향 감소 및 오염 확산 방지라는 두 가지 장점을 충족할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 유류와 페놀 오염의 확산 방지를 위한 선택적 차수재 제조를 위해 Ca-벤토나이트, 주문진 표준사, Polyolefin Elastomer(POE)와 Spill Hound Marine (SHM)을 이용하였다. 먼저 각 물질들을 차수재로 이용시 오염물질 흡착 가능성 및 지중 적용시 환경에 대한 영향 여부를 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM-EDS), pH, 유해물질함량 분석을 수행하였다. 다음 각 물질을 다양한 비율로 혼합 후,일축압축강도와 변수위투수시험을 통해 강도성과 투수성을 알아보고, TPH와 페놀을 접촉시킨 후 변수위 투수실험을 통해 선택적 차수재로서 이용 가능한 최적 혼합비를 선정하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 차수재 구성물질

본 연구에서는 사용한 차수재 구성물질은 주문진표준사, Ca-벤토나이트, Polyolefin Elastomer(POE)와 Spill Hound Marine(SHM)으로 Fig. 1과 같다. 주문진 표준사는 비오염상황에서 투수성능을 확보하기 위해 사용하였으며, Ca-벤토나이트는 주문진표준사에 의해 감소될 수 있는 강도를 보완하기 위해 첨가하였다. 이에 따라 벤토나이트는 기존 차수재에서 주로 사용되는 팽윤성이 높은 Na계열의 벤토나이트가 아닌 상대적으로 저팽윤특성을 갖는 Ca계열의 벤토나이트를 이용하여 강도에만 영향을 끼치게 조정하였다.

(a) Silica sand (b) Ca-Bentonite

(c) Polyolefin elastomer (d) Spillhound marine

Fig. 1. Materials for selectively block barrier

오염물질과 선택적으로 반응하기 위해 첨가한 POE는 폴리에틸렌 중에서 밀도가 상당히 낮은 VLDPE(Very Low Density Polyethlene)의 일종으로 메탈로센 촉매를 활용하여 에틸렌과 옥텐 또는 부텐의 공중합체이다. 다공질 매트릭스 구조를 갖은 POE는 기름과 같은 용매와 접촉시 모세관 현상에 의해 팽윤기작이 발현되어 차수성능을 발현할 수 있는 물질로 반응 현상은 Fig. 2와 같다.

마지막 구성재료로 사용한 SHM은 식물줄기에서 셀루로오스를 추출하여 만든 천연재생 흡착제로 기름 및 탄화수소류의 포집 능력이 좋은 것으로 알려져 있는 물질이다. SHM은 자연상태의 천연물질로 재생된 상태로 생분해가 가능한 물질로 지중환경에서 혹시 발생할 생태계로의 위해한 영향을 최소화 하고자 하였다. SHM은 Fleming Technical Ltd.사(UK)의 제조품을 사용하였다.

본 연구에서는 최적의 선택형 차수재를 제조하기 위해 각 구성물질을 다양한 비율로 혼합하여 사용하였으며, 실험에 사용한 비율은 Table 1과 같다. Yun et al.(2019)에 의해 선행 연구된 주문진표준사와 Ca-벤토나이트의 혼합비율을 토대로 비오염상황에서 지중 지하수 투수성능이 10^{-4}cm/sec 내외가 될 수 있는 주문진 표준사 55%, 벤토나이트 15%로 선정하였으며, 두 가지 반응물질의 합이 30% 비율이 되도록 혼합하였다.

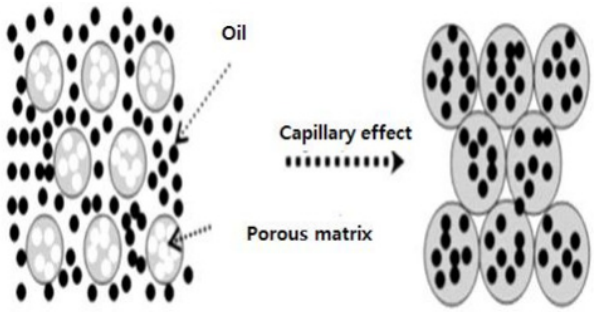


Fig. 2. Absorption mechanism of Polyolefin Elastomer

2.1.2 석유계총탄화수소 (Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)

본 연구에서 긴급 오염발생을 모사하기 위해 사용한 오염물질은 석유계총탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)로 휘발유, 경유, 정제유 및 원유와 같이 물리·화학적 특성 및 독성이 다른 수백종 이상의 화합물로 이루어진 유류화합물을 총칭한다. 본 실험에서는 S사의 시제품 경유를 사용하였다.

2.2 구성재료의 표면특성분석

본 연구에서 자용된 구성물질의 기초 특성을 확인하기 위해 X선 형광분석(X-ray fluorescence, XRF)와 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)분석을 수행하였다. XRF 분석은 시료의 광물 조성을 조사하기 위한 실험이며 사용기기는 Rigaku(Japan)사의 ZSX Primus Ⅱ를 이용하였다. SEM분석은 입자 구조 형상, 광물 형태 및 광물 상호간의 형상을 살펴보기 위해 실시하였으며 HITACHI(Japan)사의 S-4800 모델을 이용하여 분석하였다.

2.3 지중 적용 가능성 분석

선택적 차수재는 지중 투입을 목적으로 하기 때문에 지중에 미칠 영향을 확인하기 위해 수소이온농도(pH), 유해물질 함량, 일축압축강도 실험을 수행하였다. 먼저 pH는 '토양오염공정시험기준 Es 07320.1a'에 준하여 용출 후 pH미터(k-7000-PDC Multi meter, istek, Korea)를 이용하여 측정하였다(National Institute of Environmental Research, 2022). 다음 각 구성재료에서 발생 가능한 2차오염에 대해 확인하기 위해 재료들이 갖는 독성특성 및 유해물질 용출 가능성을 분석하였다. 독성특성은 EPA method 1311법인 Toxicity characteriestic Leaching Procedure(TCLP) (US EPA Method 1311, 1992)에 준해 수행하였으며(이하 동

Table 1. Mixing ratio of materials for selectively block barrier

(unit : w/w%)

No.	Silica Sand	Bentonite	POE	Spill hound
Case1	55	15	30	0
Case2			27	3
Case3			21	9
Case4			15	15
Case5			9	21
Case6			3	27
Case7			0	30

일), 유해물질 용출가능성은 인공강우에 의한 용출가능성을 모사한 실험인 폐기물공정시험기준 'ES 06150.e'에 수행하였다. 각 용출시험법에 의해 용출된 액상 시료는 ICP-OES(ICAP-7400, Thermo Fisher Scientific, USA)를 이용하여 Pb, As, Cd, Cu, Cr^{6+} 분석을 수행하였다.

또한 차수재로 이용 가능성을 확인하기 위해서는 투수성이 적합하여야 하지만, 지중 내 설치 시 지반내 압력을 견딜 수 있는 강도를 갖는것도 중요하다. 본 실험에서는 일축압축강도를 중심으로 강도특성을 살펴보았으며, 혼합비율로 제조된 차수재(Case 1-7)를 재령 후 28일차 강도를 분석하였다. 일축압축강도 분석을 위한 시편의 제작은 다짐실험을 통해 선정한 최적함수비(OMC)에 준한 수분함량에 따라 수분을 혼합 후 KS F 2329에 따라 공시체를 제작하였다. 공시체는 높이가 지름의 2배 이상이 되는 공시체인 5cm × 10cm로 제작하였으며 제작방법은 A다짐법을 이용하여 2.5kg의 래머로 25회씩 3층 다짐을 실시하였다. 양생은 밀봉양생을 실시하였으며 습도 90 ± 5%, 온도는 20 ± 3℃로 28일간 양생 후 한국산업표준 흙 시멘트의 압축 강도 시험 방법에 따라 압축강도시험기를 이용하여 측정하였다(KS F 2328, 2023).

2.4 투수특성

오염물질 접촉 전·후 투수능을 비교하기 위해 한국산업표준 흙의 투수 시험 방법에 준하여 투수시험을 수행하였다(KS F 2322, 2020) (이하 동일). 본 실험에서는 오염물질 접촉 후 투수계수가 낮아질 것을 감안하여 변수위투수시험으로 진행하였으며, 실험시 사용한 투수계수기는 Fig. 3과 같다 투수계수 분석을 위한 시편은 각 구성비율별 다짐시험으로부터 도출된 최적함수비를 사용하여 제조하였다.

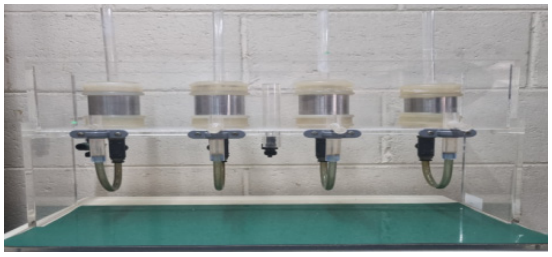


Fig. 3. Permeability meter (DIK-4012)

3, 실험결과

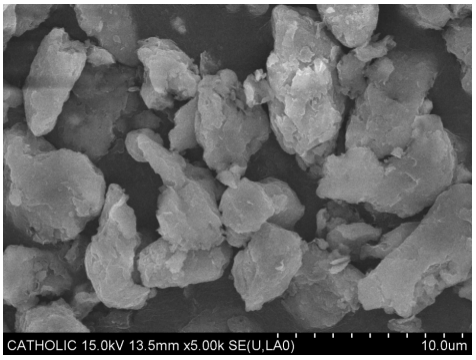
3.1 구성재료의 표면특성분석

본 연구에서 사용하는 차수재 구성재료들의 표면 특성을 분석하기 위해 XRF 분석과 SEM-EDS 분석을 수행하였다. 먼저 물질 특성상 분석이 어려운 POE를 제외하고 주문진사, 벤토나이트, SHM의 XRF 분석결과 주문진사는 모래 특성상 산소(O)와 규소(Si)의 함량이 51.25%와 35.82%로 가장 높은 함량을 보였으며, 벤토나이트는 Ca의 함량이 Na보다 더 높게 나타나 Ca-벤토나이트 계열임을 확인할 수 있었다. SHM의 경우 식물체로 제조한 흡착제인만큼 칼슘(Ca)의 함량이 54.3%로 가장 높게 나타났다(Table 2).

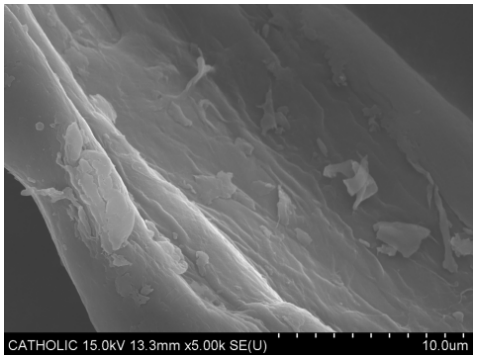
구성물질 중 오염물질을 흡착할 POE와 SHM의 표면

Table 2. XRF results for selectively block barrier materials

No.	Silica Sand	Bentonite	Spillhound Marine
O	51.2555	48.3653	N/D
Al	4.4428	N/D	N/D
Si	35.8258	22.0451	6.14
Mg	0.053	N/D	1.60
Ca	N/D	1.8605	54.3
Na	N/D	1.7561	1.62
Fe	N/D	N/D	N/D



(a) Polyolefin elastomer



(b) SHM

Fig. 4. SEM image of (a) POE and (b) SHM

특성을 확인하기 위해 SEM 분석을 수행한 결과는 Fig. 4와 같다. POE의 경우 SEM 이미지에서 확인할 수 있듯이 구형 모양의 물질에 다공성표면을 갖고 있었으며, SHM은 내부가 오목한 형태의 섬유조직을 갖고 있음을 확인하였다.

3.2 지중 적용 가능성 분석

3.2.1 수소이온농도(pH)

지중 내 생명체가 존재할 수 있는 pH의 범위는 대체적으로 pH 6~9 사이이므로, 차수재의 지중 삽입 후 생태계에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 주입 재료들의 pH도 중요하다. 본 연구에서 사용한 재료들의 pH는 7.27 ~ 9.25 사이로 나타나(Table 3) 향후 차수재를 주입시 생태계로의 영향은 미비할 것으로 판단된다.

3.2.2 유해물질 용출 특성

지중 내 차수재 적용 시 발생 할 수 있는 유해물질의 용출 가능성을 확인하기 위해 구성재료의 독성특성(TCLP)과 인공강우를 모사한 용출액을 이용한 유해물질 용출실험(KSLT)을 수행하였으며 그 결과는 Table 4, 5와 같다.

Table 3. pH of each material for selectively block barrier

	silica sand	Ca-Bentonite	POE	SHM
pH	7.40 ± 0.11	9.25 ± 0.32	7.27 ± 0.05	8.30 ± 0.14

먼저 TCLP 분석 결과 주문진사와 벤토나이트에서만 비소가 각각 0.014mg/L와 1.094mg/L 용출량을 보였지만 EPA 기준인 5.0mg/L 미만으로 나타났다. 다음 KSLT 분석 결과 또한 벤토나이트에서 비소만 각각 0.53mg/L, 0.924mg/L로 용출되었지만 「폐기물관리법 시행규칙」 [별표 1]에 제시된 기준인 1.5mg/L는 초과하지 않는 것으로 분석되어 본 재료들을 이용하여 차수재 제조 시 환경유해도는 미비할 것으로 판단된다.

3.2.3 일축압축강도

본 연구에서 제조하고자 하는 차수재는 지중 내 삽입을 목적으로 하므로, 차수재 구성물질의 혼합비율별 일축압축강도의 변화를 비교하였으며 그결과는 Fig. 5와 같다.

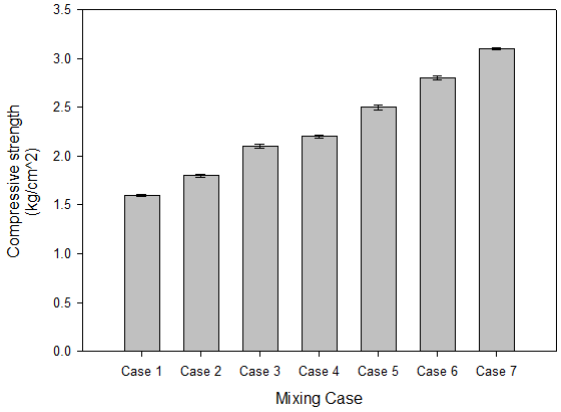


Fig. 5. Compressive strength

Table 4. TCLP results of each material for selectively block barrier

(unit : mg/L)

	Criteria*	Silica sand	Bentonite	POE	SPM
Pb	5.0	N.D	N.D.	N.D.	N.D.
As	5.0	0.014	1.094	N.D.	0.019
Cd	1.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cu		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
$Cr6^{+}$		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

* criteria : Regulation levels of EPA
**N.D. : Not detective

Table 5. KSLT results of each material for selectively block barrier

(unit : mg/L)

	Criteria*	Silica sand	Bentonite	POE	SPM
Pb	3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
As	1.5	0.53	0.924	N.D.	N.D.
Cd	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cu	3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
$Cr6^{+}$	1.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

* criteria : Wastes control Act
** N.D. : Not detective

Table 6. The results of hydraulic conductivity test

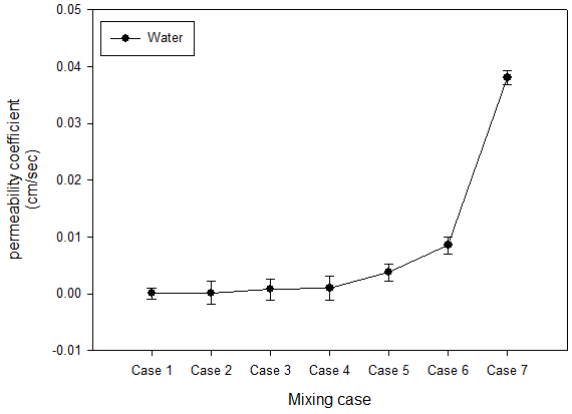
(unit : kg/cm^2)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Compressive strenth	1.60 ± 0.013	1.80 ± 0.015	2.10 ± 0.022	2.20 ± 0.018	2.50 ± 0.031	2.80 ± 0.002	3.10 ± 0.04

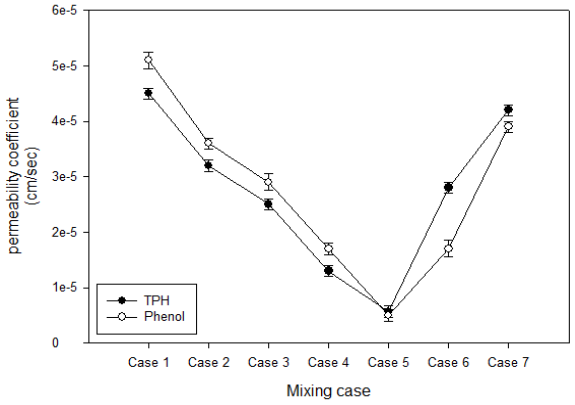
Table 7. The results of hydraulic conductivity test

(unit : cm/sec)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Contact with Noncontaminant water	5.8 × 10^{-5}	1.4 × 10^{-4}	7.3 × 10^{-4}	9.7 × 10^{-4}	3.8 × 10^{-3}	8.5 × 10^{-3}	3.8 × 10^{-2}
Contact with Disel	4.5 × 10^{-5}	3.2 × 10^{-5}	2.5 × 10^{-5}	1.3 × 10^{-5}	5.7 × 10^{-6}	2.8 × 10^{-5}	4.2 × 10^{-5}
Contact with Phenol	5.1 × 10^{-5}	3.6 × 10^{-5}	2.9 × 10^{-5}	1.7 × 10^{-5}	5.0 × 10^{-6}	1.7 × 10^{-5}	3.9 × 10^{-5}



(a) Water



(b) TPH and Phenol

Fig. 6. Hydraulic conductivity (a) Water and (b) TPH and Phenol

혼합비율은 Table 6과 같이 혼합하였으며, POE의 배합량이 감소하고 SHM의 배합량이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 SHM의 섬유조직이 구성물질간의 결합력을 높여주어 강도가 증가한 것으로 판단된다(Lynne et al., 2013).

3.3 투수특성

차수재 구성 재료의 혼합비율별 오염물질 접촉 전과 접촉 24시간 후 발현되는 투수성능을 비교하기 위해 변수위 투수실험을 진행하였다. 본 연구에서는 오염물질 유출에 대한 긴급상황을 모사하기 위해 경유 원유와 페놀 10,000 ppm을 각각 차수재에 접촉시켰으며, 접촉 전·후 투수계수의 변화는 Table 7과 Fig. 6과 같다 (이하 동일). 먼저 오염물질을 접촉하기 전 혼합비율에 따른 차수재의 투수계수는 5.8 × 10^{-5}cm/sec 에서 3.8 × 10^{-2}cm/sec로 SHM의 함량이 증가할수록 투수계수가 증가하는 경향을 보였다. POE는 합성수지로 물의 흡수 및 투수성이 낮으나, SHM의 경우 물질의 특성상 유류 성분만을 흡착하므로 물의 투수는 원활히 일어나 투수계수가 증가한 것으로 생각된다.

경유 및 페놀 접촉 24시간 후의 투수계수는 모든 혼합비율에서 감소하여 차수성능이 발현됨을 확인하였다. 그러나 두 오염물질 모두에서 SHM의 배합량이 27% 이상일 때, 21%의 혼합비율보다 투수계수가 오히려 증가하는 현상을 보였는데. 이는 POE가 오염물질과 접촉 후 팽윤하였을 때 발생된 미세공극에 SHM의 매트릭스 구조가 영향을 미쳐 투수계수가 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 주문진표준사, Ca-벤토나이트, POE와 SHM을 이용하여 지중 내 오염이 발생하였을때만 차수성

능을 발현하는 선택적 차수제를 제조하고자 하였다. 이를 위해 차수재의 특성분석 및 차수성능 확인을 위한 변수위 투수시험을 진행하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 지중 적용 가능성을 확인하기 위해 pH분석 및 유해물질 용출특성(TCLP, KSLT)을 분석하였을 때, 구성 물질의 pH는 7.27 ~ 9.25의 범위를 가져 지중환경에 미치는 영향이 미비할 것으로 판단되며, 유해물질 용출 또한 모든 항목에서 기준치 미만으로 나타나 환경 유해성 또한 낮은 것으로 사료된다.
- SHM의 혼합비율이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 보이는데, 이는 SHM이 갖고 있는 섬유조직에 의해 구성물질간 결합력을 높여 강도가 증가하는 것으로 판단된다.
- 차수재 구성재료의 혼합비율별 발현되는 차수성을 확인하기 위해 수행한 변수위 투수시험결과 모든 혼합비율에서 오염물질 접촉 24시간 후 투수계수가 감소하여 차수성이 발현됨을 확인하였으며 POE 9%(w/w), SHM 21%(w/w)의 혼합비율의 차수재가 경유 접촉 후 5.7×10^{-6}cm/sec, Phenol(원액) 접촉 후 5.0×10^{-6}cm/sec로 나타나 가장 높은 차수성을 보였다.

Acknowledgement

This work was supported by the 2023 sabbatical year research grant of the University of Seoul.

References

1. Choi, J. W., Yun, S. Y. and Lee, J. Y. (2019), “A study on the permeability characteristics for Trichlorethylene(TCE) selective reaction gelation resin mixtures”, *Journal of the Korea Society of Waste Management*, Vol.2019, p.109.
2. Korean Industrial Standards (2020), *Standard test methood for permeability of saturared soil*, KS F 2322.
3. Korean Industrial Standards (2023), *Test methood for compressive strength of molded soil cement cylinders*, KS F 2328.
4. Lynne, H., Trevor, V., Adriana, S., Craig, J., Roland, P., Clemens, M., David, C., Timothy, J. and Michael, C. (2013), “Structure of Cellulose Microfibrils in Primary Cell Walls from Collenchyma”, *Department of Chemistry*.
5. National Institute of Environmental Research (2022), *Standard for soil contamination process test*.
6. Park, J. J. and Kim, S. H. (2018), “Field investigation for identification of contamination sources in petroleumcontaminated site”, *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol.14, No.2, pp.141-153.
7. Park, Y. H., Hwang, S. I. and Jeong, S. G. (2016), “Best Management Practices of Troublesome Soil Contaminated Sites”, *Korea Environment Institute*, Vol.2016, pp.1-112.
8. US EPA(United States Environmental Protection Agency). (1992), *Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*, USA.
9. Yun, S. Y., An, H. K., Oh, M. and Lee, J. Y. (2019), “A study on the Evaluation of Permeability and Structure for Calcium Bentonite-Sand Mixtures”, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.18, No.2, pp.1-10.