

지중에 설치된 반응성 라이너의 TPH 차단 효과에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Barrier Effect of Reactive Liner Installed Underground Against TPH

박정준¹, 이경주², 정덕윤², 이상민², 이기철³, 홍기권^{4*}

Jeongjun Park¹, Kyungju Lee², Deokyun Jeong², Sangmin Lee², Kicheol Lee³, Gigwon Hong^{4*}

¹Member, Research Professor, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

²Non-Member, Undergraduate Student, Dept. of Urban Infra Engineering, Halla University, 28 Halladae-gil, Wonju 26404, Republic of Korea

³Member, Visiting Researcher, Corporate Affiliated Research Institute, UCI Tech, 313 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

⁴Member, Assistant Professor, Dept. of Urban Infra Engineering, Halla University, 28 Halladae-gil, Wonju-si 26404, Republic of Korea

ABSTRACT

This study described the results of a model experiment simulating TPH(Total Petroleum Hydrocarbon) spill in the ground to evaluate the TPH barrier effect of the reactive liner. The model experiment considered the ground and TPH spill location, and the barrier effect of the reactive liner was evaluated by the change in the ground permeability coefficient over time due to groundwater flow. The experiment results showed that the permeability coefficient of the ground decreased over time regardless of whether fine-grained soil was included, when the TPH spill conditions were the same. In addition, the permeability coefficient of the ground containing fine-grained soil was confirmed to be lower. However, the impermeability characteristic of the liner (10^{-6} cm/s) due to the TPH reaction were clearly expressed only in sandy soils where the spill location was close to the liner, when the groundwater flow time after the TPH spill was 24 hours. As a result of evaluating the effect of TPH spill distance on the barrier effect of the liner, although there were differences depending on ground conditions, the blocking effect of the liner could be expected within 24 hours only when the leak occurred within 0.50D from the liner. There were differences depending on the ground conditions, but the barrier effect of the liner could be expected within 24 hours only under TPH spill condition within 0.50D from the liner.

요 지

본 연구에서는 반응성 라이너의 TPH(Total Petroleum Hydrocarbons) 차단 효과를 평가하기 위하여, 지중의 TPH 유출을 모사한 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 지반 및 TPH 유출 위치를 고려하였고, 반응성 라이너의 차단 효과는 지하수 유동에 의한 시간 경과에 따른 지반의 투수계수 변화로 평가하였다. 그 결과, TPH 유출 조건이 동일할 때, 세립토 함유 여부에 관계없이 시간 경과에 따른 지반의 투수계수는 감소하였고, 세립토가 함유된 지반의 투수계수가 더욱 낮은 것을 확인하였다. 그러나 TPH 유출 후 지하수 유동 시간이 24시간일 때, 유출 위치가 라이너에 가깝고 모래지반인 경우에서만 TPH 반응에 의한 라이너의 불투수성 조건(10^{-6} cm/s)이 명확하게 발현되었다. TPH 유출 거리가 라이너의 차단 효과에 미치는 영향을 평가한 결과, 지반 조건에 따른 차이는 있지만, 라이너로부터 0.50D 이내에서 유출되는 경우만 24시간 내에 라이너의 차단 효과를 기대할 수 있었다.

Keywords : TPH(Total Petroleum Hydrocarbon), Barrier, Reactive liner, Contaminant, Diffusion

Received 4 Dec. 2024, Revised 11 Dec. 2024, Accepted 13 Dec. 2024

*Corresponding author

Tel: +82-33-760-1843; Fax: +82-33-760-1261

E-mail address: g.hong@halla.ac.kr (G. Hong)

1. 서론

산업 활동을 위한 산업단지 및 주유소 등에 유출되는 오일에 의한 지반과 지하수의 오염은 심각한 환경적·사회적 문제로 지속적으로 대두되고 있다(Greekdrink et al., 1996; Zhang et al., 2011; Choi et al., 2020). 원유의 주성분인 석유계 총탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)는 오일로 오염된 지반에서 가장 흔하게 발견될 수 있는 대표적인 지반환경 오염원이다(Xu et al., 2011; Ławniczak et al., 2020). 이러한 TPH가 지중에서 발견되면 지하수 유동에 의해 이미 오염범위가 확산된 것으로 보고, 다양한 정밀조사를 실시하게 된다. 그리고 조사 결과를 이용하여 정화계획이 수립되는데, 이때 직·간접적으로 매우 큰 경제적 비용이 소모되는 경우가 대부분이다. 따라서 TPH에 의해 오염된 지반을 보다 경제적이고 효율적으로 복원하기 위한 많은 연구들이 수행되었다.

Diplock et al.(2009)는 탄화수소에 대한 생물학적 방법에 의한 효율을 데이터에 의존하기 보다는 실험적 결과를 바탕으로 생물학적 정화의 효율성을 평가하기 위한 접근 방법이 중요하다고 보고한 바 있다. Adetutu et al.(2013)은 화학적 및 분자적 방법론을 이용해 오염된 지반에서 탄화수소 생분해에 대한 효율 저감요소를 평가하였다. Jho et al.(2014)는 TPH로 오염된 지반에 대해 지속성 확보를 위한 최적의 농경 기간을 예측하기 위해 생물학적 분해 방법의 적용을 통해 정화처리 비용 및 기간에 대한 감소 효과를 분석하였다. Hong et al.(2018)은 미생물 대사를 통한 헤모글로빈 기반 정화 방법이 원유로부터 오염된 지반의 정화에 적용이 가능한 것으로 평가한 바 있다. Kim et al.(2019)는 오랫동안 원유로 오염된 지반을 정화하기 위한 방법으로 생물학적 공정만을 적용하게 되면 비효율적이기 때문에, 바이오세척과 바이오파일 공정을 순차적으로 적용하게 되면 오염된 지반을 효율적으로 정화할 수 있다고 판단하였고, 실험을 통해 TPH가 86% 정도 제거됨을 확인하였다. Cho et al.(2020)은 마이크로파 가열을 통해 지중에 분포한 TPH 제거 메커니즘을 조사하였고, 세립질 지반에 비해 조립질 지반에서의 TPH 제거 효율이 높은 것으로 평가하였다. Méndez et al.(2012)은 동전기를 이용한 전기 화학적 방법을 통해 지중의 탄화수소를 제거하기 위한 재료 특성을 연구하였고, Li et al.(2018)은 지중에서 석유 오염물을 정화함과 동시에 오일을 회수하기 위한 기술을 연

구하였다. Park et al.(2013)은 생분해 배수재를 이용하여 물리적 특성 평가 및 현장실험을 통해 중금속으로 오염된 지반의 정화 효율을 분석하였다.

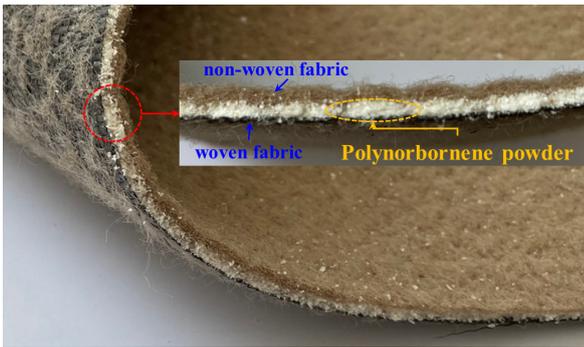
이와 같이 TPH를 포함한 다양한 오염물의 정화를 위한 연구들 외에도 오염물 거동 메커니즘, 오염물의 격리, 확산 방지, 확산 예측, 제어 및 이를 위한 재료 특성과 관련한 많은 연구가 수행된 바 있다(Cartaud et al., 2005; Southen and Rowe, 2005; Barroso et al., 2006; Park, 2007; Katsumi et al., 2008; Kang and Shackelford, 2009; Shin and Kim, 2011; Bohnhoff and Shackelford, 2013; Pinedo et al., 2013; Han et al., 2015; Shackelford et al., 2016; Shin and Lee, 2019). 특히, Goutam Mukherjee et al.(2022)은 최근까지 수행된 수많은 연구들의 리뷰를 통해 흔히 접할 수 있는 다양한 오염물들이 복잡한 혼합물이 되어 새로운 종류의 오염물로 형성되는 메커니즘과 함께 생태계 영향성에 대하여 포괄적인 연구 결과를 제시하였다. 그럼에도 불구하고 TPH를 포함한 오염물이 지중 유출 발생 시, 즉각적으로 대응하거나 확산 전에 차단될 수 있는 기술에 관한 연구가 미미한 것이 사실이다.

본 연구에서는 지중에서 유출된 TPH가 지하수 유동에 의한 확산이 일정시간 이후 즉시 차단될 수 있도록 개발된 반응성 라이너를 이용하여 지반의 세립토 함유 및 TPH 유출 조건을 고려한 TPH 반응 모형실험을 수행하였다. 그리고 실험결과를 이용하여 시간 경과에 따른 지반의 투수 계수를 산정하여 반응성 라이너의 TPH 차단 효과를 평가하였다.

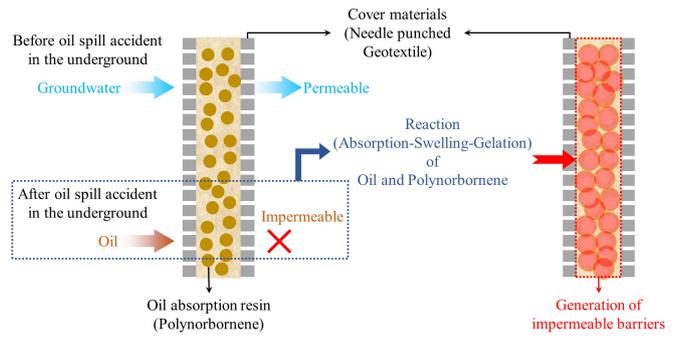
2. 반응성 라이너의 TPH 차단 평가 실험

2.1 실험 재료

모형실험에 사용된 반응성 라이너는 지하수 유동 조건에서 TPH에만 선택적으로 반응해 차단 성능을 발휘하도록 개발된 바 있다(Hong et al., 2023a). 반응성 라이너의 TPH 반응은 주 반응제인 폴리노보넨과 함께 벤토나이트 및 폴리올레핀에 의해 흡수-팽창-겔화의 과정을 거쳐 발생된다(Lee et al., 2023). 반응성 라이너는 반응재료를 직포와 부직포가 구속하는 GCL(geosynthetic clay liner)과 유사한 형태를 갖고 있으며, TPH 반응 메커니즘 및 물리적인 성질은 기존 연구(Park, 2021; Hong et al., 2023a, 2023b)



(a) Example of cross-section (Park, 2021)



(b) Conceptual diagram on reaction mechanism of liner-TPH (Park, 2021 [modified from ©2020.goldenpow])

Fig. 1. Overview of reactive liner

Table 1. Soil properties

Soil classification	Properties	
Joomunjin standard sand	Cu	1,94
	Cg	0,91
	U.S.C.S.	SP
Fine-grained soil	LL (%)	39,4
	PL (%)	31,3
	PI (%)	8,1
	U.S.C.S.	ML

로부터 자세한 확인이 가능하다. 그리고 본 연구에 적용된 반응성 라이너의 반응기작을 유발하는 반응재료의 성분별 구성비는 모래, 벤토나이트, 폴리노보넨 및 폴리올레핀이 각각 55%, 15%, 15% 및 15%이다. Fig. 1은 반응성 라이너의 단면과 반응 메커니즘의 개요도를 보여준다.

모형실험을 위한 지반은 통일분류법에 의해 빈입도 모래로 확인된 주문진 표준사와 함께, 세립토는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 저압축성 실트의 특성을 갖는 황토를 적용했다. 모형지반 모사를 위한 각 흙시료의 공학적 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다.

2.2 실험 방법 및 내용

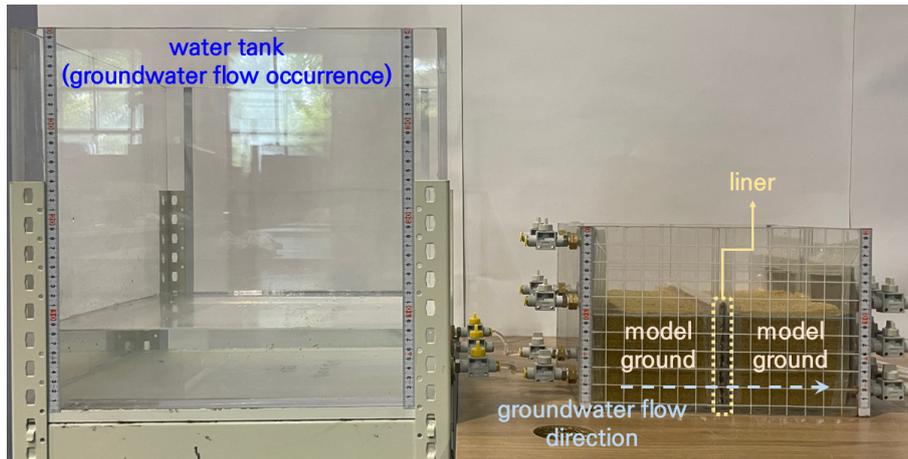
Fig. 2는 반응성 라이너의 TPH 차단 효과를 평가하기 위한 모형실험 장치 및 개요도를 보여준다. 먼저, 실험장치는 정수두 또는 변수두 조건의 지하수 유동을 발생시킬 수 있는 수조, 모형지반 모사가 가능한 토조로 구성되어 있으며, 토조는 지하수 유입구 및 모형지반을 투과한 지하수의 유출구가 제작되어 있다(Fig. 2(a)).

Fig. 2(b)는 실험 방법에 대한 개요도를 나타낸 것으로서, 모형지반은 TPH 유출과 지하수 유동이 원활할 수 있

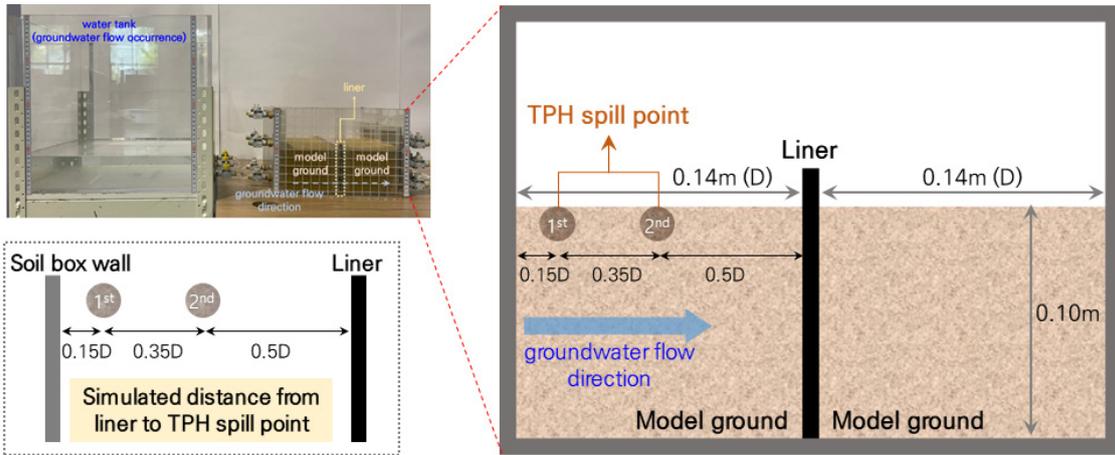
도록 상대밀도 약 35% 조건으로 모사하였다. 그리고 지하수 유입부측의 토조 벽면과 반응성 라이너의 거리(D=0.14m)를 고려해 라이너로부터 거리비 약 0.85D 및 0.50D의 위치에서 지표에 TPH 유출을 발생시켰다. 즉, 라이너로부터 TPH 유출 거리가 차단에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 지하수 유동은 변수두 시험 방법을 준용(라이너가 없는 경우 정수두)하였고, TPH는 상대밀도로 모사된 흙의 중량 대비 10%를 적용하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 실험 과정은 토조 내부 라이너 설치, 상대밀도 조건을 고려한 모형지반 층별 모사, TPH 유출, TPH의 지반 내 침투시간 확보 후 지하수 유동 발생(24시간)의 순서로 요약할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이, TPH 차단 효과 평가를 위한 모형실험은 지반 조건과 TPH 유출 조건을 고려하여 수행하였고, Table 2는 실험 내용을 나타낸 것이다. 먼저, 차수재가 없는 경우에 대하여 모형지반의 투수성을 확인하기 위한 실험과 TPH 반응 전 차수재가 모형지반의 투수성에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 그리고 Fig. 2(b)와 같이 TPH 유출 위치에 따라 세립토 함유 조건을 고려한 실험을 실시하였다. 지반 조건은 표준사 조건과 표준사에 세립토 함유율 5%를 적용한 조건으로 하였다.

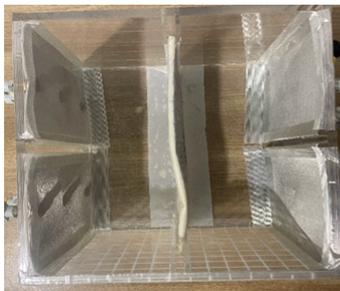


(a) Apparatus configuration



(b) Experiment schematic

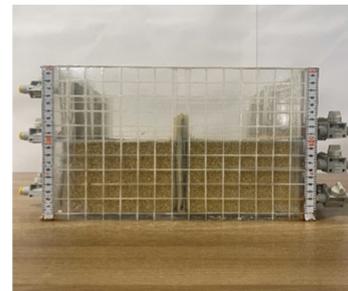
Fig. 2. Overview of model experimental apparatus



(i) Liner installation



(ii) Formation of model ground for each layer



(iii) Completion of model ground formation



(iv) TPH spill simulation



(v) TPH spill

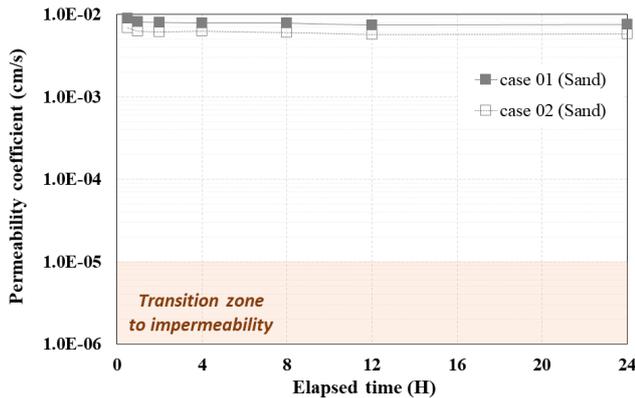


(vi) Groundwater flow occurrence

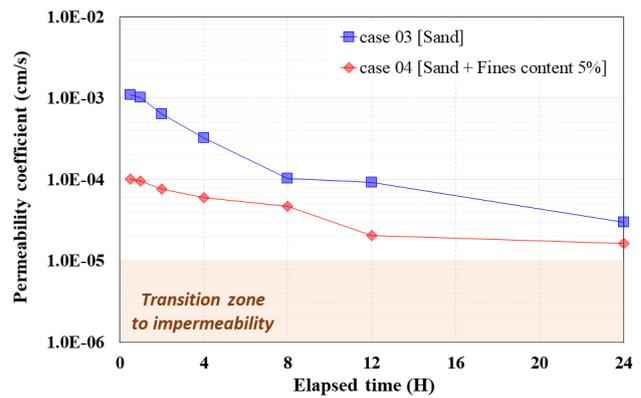
Fig. 3. Experiment process

Table 2. Experiment cases

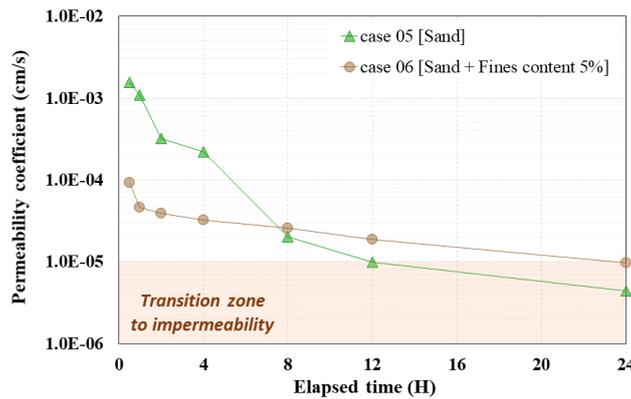
Classification	Condition			
	Distance from liner	TPH	Liner	Soil type
Case 01	—	—	—	Sand
Case 02	—	—	●	Sand
Case 03	0.85D	●	●	Sand
Case 04		●	●	Sand + Fines content 5%
Case 05	0.50D	●	●	Sand
Case 06		●	●	Sand + Fines content 5%



(a) TPH spill distance from liner = 0



(b) TPH spill distance from liner = 0.85D



(c) TPH spill distance from liner = 0.50D

Fig. 4. Calculation results of permeability coefficient by TPH–liner reaction according to soil type

3. 실험 결과 및 분석

3.1 지반 조건별 TPH 반응에 따른 라이너의 차단 효과

Fig. 4와 같이, 실험 조건에 따른 지반의 투수성에 대한 평가 결과를 경과시간과 투수계수 관계로 나타내었다. 먼저, 지반의 투수성에 있어서 반응성 라이너의 영향을 확인하기 위하여 TPH의 유출 모사 없이 라이너 유무 조건만 고려한 실험 결과, 단순한 모래 지반(case 1)의 투수계수는 시간 경과에 따라 매우 미소한 차이는 있지만, 약 8.0×10^{-3} cm/s의 투수성을 보였다. 그리고 모래 지반에 라이너만 설

치된 경우(case 2)의 투수계수도 약 6.0×10^{-3} cm/s의 투수성을 갖는 것으로 확인되었다(Fig. 4(a)). 즉, 라이너 설치 유무에 따른 지반의 투수성은 일반적인 모래지반의 특성과 유사한 것으로, 실험에 적용된 라이너가 지하수 유동의 저항요소로 작용하지 않는 것으로 평가되었다. 다만, 지하수가 라이너를 완전히 투과하기 이전에 라이너의 부직포가 지하수를 흡수하는 과정에서 라이너 투과 이전 지반에서 불규칙한 일정 높이까지 지하수가 포화되는 것을 확인하였다. 즉, 지하수 유동의 안정화를 위한 약간의 시간이 요구되는 것을 확인할 수 있었으나, 투수계수에 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되었다.

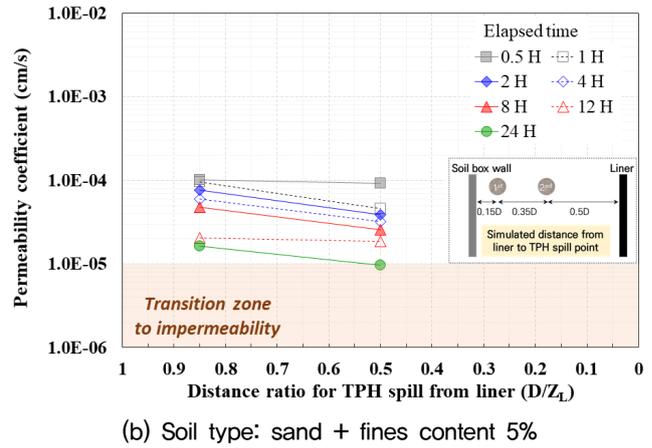
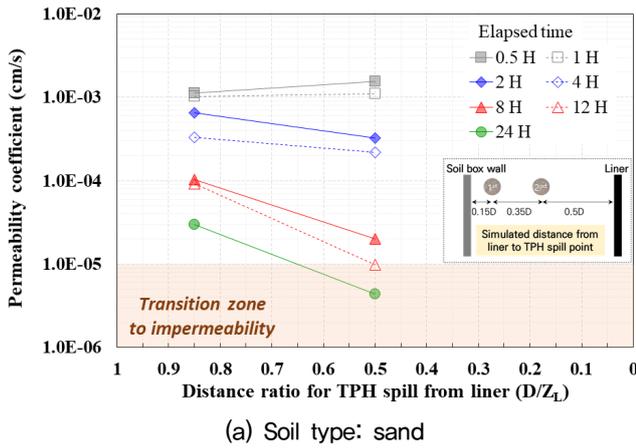


Fig. 5. Evaluation results on barrier effect of liner according to distance ratio of TPH spill

동일한 TPH 유출 조건에서 모형지반의 세립토 함유 여부에 따른 반응성 라이너의 차단 효과를 평가하였다. Fig. 4(b)와 같이, 라이너부터 0.85D 위치(Fig. 2(b) 참조)에서 TPH 유출을 모사한 경우에 세립토 함유 여부에 관계없이 시간 경과에 따른 지반의 투수계수는 감소하였고, 세립토가 함유된 지반의 투수계수가 더욱 낮은 것을 확인하였다. 그리고 동일한 경과시간 동안 모래 지반의 투수계수 감소율은 세립토가 함유된 지반에 비하여 전반적으로 크게 나타났다. 즉, 투수계수의 감소는 지하수 유동에 따라 TPH가 이동하여 라이너와의 반응에 기인하였고, 특히 세립토가 함유된 지반의 투수계수와 함께 그 감소율이 낮게 나타난 원인은 지반 조건의 영향이 크게 작용한 것으로 평가되었다. 그러나 24시간이 경과한 시점까지 모래 지반과 세립토 함유 지반의 투수계수는 각각 $2.98 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 및 $1.63 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 로 차단 효과의 발현 기준인 불투수성 조건(10^{-6} cm/s)에 도달하지는 못하였다.

Fig. 4(c)는 라이너부터 0.50D 위치(Fig. 2(b) 참조)에서 TPH 유출을 모사한 경우의 투수계수 산정결과를 나타낸 것으로서, 0.85D에서 유출을 모사한 실험 결과와 유사한 투수계수 감소 및 감소율 경향을 보였다. 특히, 세립토가 함유된 지반에서는 24시간이 경과했을 때, $9.70 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 의 투수계수를 보인 반면에, 모래 지반의 경우에는 경과시간이 각각 12시간 및 24시간일 때의 투수계수가 $9.80 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 및 $9.70 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 로 확인되었다. 이는 모래지반의 투수성이 높기 때문에 세립토 함유 지반에 비하여 라이너의 차단 효과에 따른 불투수성 조건(10^{-6} cm/s)에 도달하는 시간이 감소된 것으로 평가되었다.

3.2 TPH 유출 거리가 라이너의 차단에 미치는 영향

TPH 유출 거리에 따른 라이너의 차단 효과와 그 영향을 평가하기 위하여, 경과시간별로 TPH 유출 거리비($D[\text{TPH 유출 거리}] / Z_L[\text{라이너 설치 깊이}]$)에 따른 투수계수 관계를 Fig. 5와 같이 나타내었다.

Fig. 5(a)와 같이, 모래 지반 조건에서 TPH 유출 거리가 높은 경우(0.85D)의 투수계수가 낮은 경우(0.50D)에 비하여 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 실험 과정에서의 오차로 판단된 초기시간을 제외하고 시간이 경과함에 따라 투수계수 감소율이 크게 증가하는 것으로 확인되었다.

Fig. 5(b)는 세립토가 함유된 지반 조건에서 TPH 유출 거리에 따른 투수계수 관계를 나타낸 것으로서 모래 지반의 결과와 유사한 것으로 나타났지만, TPH가 라이너와 반응에 따른 차단 효과가 발현되는 시점은 약 24시간 경과 시이기 때문에, 모래 지반(약 12시간 경과 시)에 비하여 약 2배 가량 지연되는 것으로 평가되었다. 또한 모래 지반에서는 유출 거리에 따라 투수계수 차이가 크게 나타나는 반면에, 세립토 함유 지반에서는 그 차이가 상대적으로 매우 작게 나타났다. 이는 지하수 유동에 영향을 미치는 지반 조건이 TPH 이동에도 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었으며, TPH 유출 거리에 따른 라이너의 차단 효과와 함께 차단 시점 또한 상이한 것을 의미한다. 즉, TPH 유출 거리가 라이너의 설치 깊이에 대한 설계인자로 적용될 필요가 있는 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 지중의 TPH 유출 모사를 통해 반응성 라이너의 차단 효과를 평가하기 위하여 지반 및 TPH 유출 위치를 고려한 일련의 모형실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

동일한 TPH 유출 조건에 따른 지반 조건이 라이너의 차단 성능에 미치는 영향을 평가한 결과, 동일한 경과시간에서 TPH 유출 위치가 라이너에 가까울수록 모래 지반의 차단 효과는 세립토가 함유된 지반에 비하여 높은 것을 알 수 있었다. 다만, 세립토 함유 지반에서는 차단 효과가 낮은 것으로 평가되었지만, 라이너로부터 TPH 유출 위치가 감소했을 때에는 24시간 이내에 불투수성의 차단 효과 발현이 시작된 것으로 미루어, TPH 유출 위치에 따라 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

TPH 유출 거리가 라이너의 차단 효과에 미치는 영향을 평가하기 위하여, TPH 유출 거리비(D/Z_L)로 정규화하여 지반 조건별 투수계수를 분석하였다. 그 결과, TPH 유출 거리가 낮은 경우에는 반응성 라이너가 짧은 시간에 불투수성의 차단 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 세립토가 함유된 지반에서는 모래 지반에 비하여 차단 효과의 발현이 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 TPH 유출 거리비를 반응성 라이너의 시공깊이 산정을 위한 설계인자로 적용될 필요가 있음을 확인하였다.

본 연구에서 도출된 결론은 지하수 유동의 변동성을 고려하지 않았으며, 제한적인 지반 조건 및 TPH 유출 거리에 대한 모형실험 결과를 제시하였다. 따라서 세립토 함유 조건 및 유출 거리를 세분화하여 라이너의 TPH 반응에 따른 차단효과를 보다 정량적으로 평가하고, 시공을 위한 설계요소로 예측이 가능한 연구가 지속될 필요가 있다.

Acknowledgement

This research was funded by Korea Ministry of Environment, Korea Environmental Industry and Technology Institute(KEITI), grant number 2021002470006.

References

1. Adetutu, E., Weber, J., Aleer, S., Dandie, C. E., Aburto-Medina, A., Ball, A. S. and Juhasz, A. L. (2013), "Assessing impedi-

ments to hydrocarbon biodegradation in weathered contaminated soils", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.261, pp.847-853.

2. Barroso, M., Touze-Foltz, N., Maubeuge, K. and Pierson, P. (2006), "Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.24, No.3, pp.139-155.

3. Bohnhoff, G. L. and Shackelford, C. D. (2013), "Improving membrane performance via bentonite polymer nanocomposite", *Applied Clay Science*, Vol.86, pp.83-98.

4. Cartaud, F., Goblet, P. and athalie Touze-Foltz, N. (2005), "Numerical simulation of the flow in the interface of a composite bottom liner", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.23, No.6, pp.513-533.

5. Cho, K., Myung, E., Kim, H., Purev, O., Park, C. and Choi, N. (2020), "Removal of Total Petroleum Hydrocarbons from Contaminated Soil through Microwave Irradiation", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol.17, No.16, p.5952.

6. Choi, B., Lee, S. and Jho, E. H. (2020), "Removal of TPH, UCM, PAHs, and Alk-PAHs in oil-contaminated soil by thermal desorption", *Applied Biological Chemistry*, Vol.63, p.83.

7. Diplock, E. E., Mardlin, D. P., Killham, K. S., Paton, G. I. (2009), "Predicting bioremediation of hydrocarbons: Laboratory to field scale", *Environmental Pollution*, Vol.157, No.6, pp.1831-1840.

8. Goutam Mukherjee, A., Ramesh Wanjari, U., Eladl, M. A., El-Sherbiny, M., Elsherbini, D. M. A., Sukumar, A., Kannampuzha, S., Ravichandran, M., Renu, K. and Vellingiri, B. (2022), "Mixed Contaminants: Occurrence, Interactions, Toxicity, Detection, and Remediation", *Molecules*, Vol.27, No.8, 2577.

9. Greekdrink, M. J., Van Loosdrecht, M. C. M. and Luyben, K. Ch. A. M. (1996), "Biodegradability of diesel oil", *Biodegradation*, Vol.7, pp.73-81.

10. Han, J. G., Kim, D. C. and Hong, K. (2015), "The Effects of pH on Microfluidics Flow Characteristics of Heavy Metals", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.1, pp.23-32.

11. Hong, G., Yeo, J., Jeong, D., Park, J. J. and Lee, K. (2023a), "Variation of spectral information according to mixing conditions of reactive materials for oil contaminant absorption", *KGS Spring National Conference 2023*, Yeosu, Korea, pp.325-326.

12. Hong, G., Yeo, J., Park, J. J., Lee, K., You, S. Y. and Choi, C. L. (2023b). "Spectral Information Characteristics of Reactive Materials for Absorption of Organic Contaminant in the Ground", *2023 Spring Geosynthetics Conference*, Seoul, Korea, pp.109-110.

13. Hong, J. K., Jho, E. H., Choi, H. S. and Kang, G. (2018), "Role of hemoglobin in hemoglobin-based remediation of the crude oil-contaminated soil", *Science of The Total Environment*, Vol.627, pp.1174-1181.

14. Jho, E. H., Ryu, H. and Shin, D. (2014), "Prediction of landfarming period using degradation kinetics of petroleum hydrocarbons: test with artificially contaminated and field-aged soils and commercially available bacterial cultures", *Journal of Soils and Sediments*, Vol.14, pp.138-145
15. Kang, J. B. and Shackelford, C. D. (2009), "Clay membrane testing using a flexible-wall cell under closed-system boundary conditions", *Applied Clay Science*, Vol.44, No.1-2, pp.43-58.
16. Katsumi, T., Ishimori, H., Onikata, M. and Fukagawa, R. (2008), "Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.26, No.1, pp.14-30.
17. Kim, T., Hong, J. K., Jho, E. H., Kang, G., Yang, D. J., Lee, S. J. (2019), "Sequential biowashing-biopile processes for remediation of crude oil contaminated soil in Kuwait", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.378, p.120710.
18. Lawniczak, Ł., Woźniak-Karczewska, M., Loibner, A. P., Heipieper, H. J. and Chrzanowski, Ł. (2020), "Microbial Degradation of Hydrocarbons-Basic Principles for Bioremediation: A Review", *Molecules*, Vol.25, No.4, p.856.
19. Lee, J. Y., Oh, S. J., Kim, S. H., Lee, K., Park, J. J. and Hong, G. (2023), "Evaluation on Strength Characteristics of Reactive Materials to Prevent the Diffusion of Organic Pollutants", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.22, No.4, pp.35-42.
20. Li, D. C., Xu, W. F., Mu, Y., Yu, H. Q., Jiang, H. and Crittenden, J. (2018), "Remediation of Petroleum-Contaminated Soil and Simultaneous Recovery of Oil by Fast Pyrolysis", *Environmental Science & Technology*, Vol.52, No.9, pp. 5330-5338.
21. Méndez, E., Perez, M., Romero, O., Beltran, E. D., Castro, S., Corona, J. L., Corona, A., Cuevas, M. C. and Bustos, E. (2012), "Effects of electrode material on the efficiency of hydrocarbon removal by an electrokinetic remediation process" *Electrochimica Acta*, Vol.86, pp.148-156.
22. Park, J. (2021), "Evaluation of Changes in the Permeability Characteristics of a Geotextile-Polynorborene Liner for the Prevention of Pollutant Diffusion in Oil-Contaminated Soils", *Sustainability*, Vol.13, No.9, 4797.
23. Park, J., Choi, C. and Shin, E. (2013), "Analysis of Heavy Metal Contaminated Soils Remediation Using Reactive Drains", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.12, No.1, pp.29-38.
24. Park, J. J. (2007), Applicability of Prefabricated Vertical Drain System for Remediation of Contaminated Soils. Ph.D Thesis, University of Incheon, Korea.
25. Pinedo, J., Ibañez, R., Lijzen, J. and Irabien, A. (2013), "Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances", *Journal of Environmental Management*, Vol.130, pp.72-79
26. Shackelford, C. D., Meier, A. and Sample-Lord, K. (2016), "Limiting membrane and diffusion behavior of a geosynthetic clay liner", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.44, No.5, pp.707-718.
27. Shin, E. C. and Kim, J. S. (2011), "Experimental Study on Freezing Soil Barrier Wall for Contaminant Transfer Interception", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.10, No.2, pp.29-34.
28. Shin, E. C. and Lee, H. M. (2019), "Applicability of Recycled Soil Mixed with Bentonite-Polymer for Waste Landfill Liner", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.18, No.4, pp.63-73.
29. Southen, J. M. and Rowe, R. K. (2005), "Modelling of thermally induced desiccation of geosynthetic clay liners", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.23, No.5, pp.425-442.
30. Xu, J., Xin, L., Huang, T. and Chang, K. (2011), "Enhanced bioremediation of oil contaminated soil by graded modified Fenton oxidation", *Journal of Environmental Sciences*, Vol.23, No.11, pp.1873-1879.
31. Zhang, Z., Hou, Z., Yang, C., Ma, C., Tao, F. and Xu, P. (2011), "Degradation of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in petroleum by a newly isolated *Pseudomonas aeruginosa* DQ8", *Bioresource Technology*, Vol.102, No.5, pp.4111-4116.