KOSDI ISSN : 1976-2208 (Print)
ISSN : 2671-5287 (On-line)
www.sodi.or.kr

Journal of the Society of Disaster Information
Vol. 19, No. 4, pp. 950-957, December 2023
https://doi.org/10.15683/kosdi.2023.12.31.950

Original Article

유류 오염물 흡수가 가능한 반응재료의 다짐 특성-분광정보 상관관계 분석

Analysis of the Correlation between Compaction Characteristics and Spectral Information of Reactive Materials for Absorption of Oil Contaminant

홍기권*
Gigwon Hong*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Halla University, Wonju, Republic of Korea

*Corresponding author: Gigwon Hong, g.hong@halla.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The response technology is needed to prevent the spill of highly toxic oil contaminants in advance. Therefore, this paper described the results of an experimental study to predict the engineering properties of the developed reactive material. **Method:** Compaction tests and spectral information acquisition experiments were conducted on the reactive materials, and the results were evaluated. In addition, the correlation between spectral information and maximum dry unit weight was analyzed to evaluate the possibility of predicting the engineering properties for reactive materials. **Result:** The compaction test results showed that the maximum dry unit weight was in the range of approximately 9kN/m^3 to 10kN/m^3. The spectral information confirmed that the maximum reflectance decreased as the polynorbornene decreased. **Conclusion:** It was confirmed that the maximum dry unit weight of the reactive material for absorbing oil contaminants can be predicted using the maximum reflectance according to the component ratio of the reactive material.

Keywords: Oil Contaminant, Reactive Material, Maximum Dry Unit Weight, Spectral Information, Maximum Reflectance

요 약

연구목적: 강한 독성을 보유하고 있는 유류 오염물의 유출에 따른 확산을 미연에 방지할 수 있도록 사전 대응 기술이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 개발된 반응재료의 공학적 특성을 예측하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. **연구방법:** 반응재료에 대한 다짐시험 및 분광정보 획득 실험을 실시하였으며, 각각의 시험 및 실험 결과를 평가하였다. 그리고 반응재료의 공학적 특성 예측 가능성을 평가하기 위하여 분광정보와 최대건조단위중량의 상관관계를 분석하였다. **연구결과:** 다짐시험 결과, 최대건조단위중량은 약 9kN/m^3 ~ 10kN/m^3 범위로 확인되었다. 그리고 분광정보 획득 실험 결과로부터 반응재료의 폴리노보넨 감소에 따른 최대분광반사율은 감소하였다. **결론:** 반응재료의 구성성분 비율에 따라 비선형적 관계를 갖는 최대분광반사율과 최대건조단위중량 상관성으로부터 최대분광반사율을 통해 유류 오염물 흡수를 위한 반응재료의 최적량 예측이 가능함을 확인하였다.

핵심용어: 유류 오염물, 반응재료, 최대건조단위중량, 분광정보, 최대분광반사율

Received | 17 November, 2023
Revised | 30 November, 2023
Accepted | 4 December, 2023

OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

ⓒ Society of Disaster Information All rights reserved.

서 론

산업화가 지속되면서 국제적으로 다양한 오염물에 의한 지중의 오염 유출 사고가 빈번하게 발생되고 있기 때문에, 폐기물 및 유해화학물질에 기인한 지반 및 지하수 오염의 정화에 대한 중요성이 부각되고 있다(Han et al., 2015). 지중의 오염물 확산은 예측하기가 매우 어려울 뿐만 아니라, 오염된 후의 지반 및 지하수는 정화 및 복원이 매우 까다롭다(Park & Kim, 2018; Park, 2022). 이에 높은 신뢰성을 확보할 수 있는 오염물의 확산 예측 기술과 함께, 지반 내 설치되는 유류 탱크 및 화학 산업단지와 같은 오염물 유출 사고의 위험성이 높은 구조물에서의 사전 대응 기술 적용이 필요하다.

대표적인 오염물은 중금속 오염물과 유기오염물로 구분되며, 특히 유기오염물에의 범주에 속하는 유류 오염물은 비수용상액체(NAPLs)로 존재하여, 흙 입자에 강하게 흡착되는 특성을 가지고 있다. 이는 지중에서 장기간 상존하면서 지하수 흐름에 따라 거동하기 때문에, 매우 광범위한 지역을 오염시키는 원인이 된다. 또한 유류 오염물은 독성이 매우 강하기 때문에 지반의 지속성을 감소시킨다(Rodrigues et al., 2009). 따라서 지반환경공학적으로 매우 심각한 문제를 발생시키는 유류 오염물의 제거를 위한 연구가 지속되어야 한다(Ko, 2002; Jung, 2003). 유류 오염물 확산 방지와 같은 오염물 제어에 관한 많은 연구가 수행된 바 있다. Cho et al.(2020)은 마이크로파 가열에 의한 지반 내 총석유탄화수소(TPH)의 제거 메커니즘을 확인하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. Méndez et al.(2012)은 오염된 지반에서 탄화수소를 제거하기 위한 방법으로 동전기를 바탕으로 하는 전기화학적 기술을 통해 다양한 전극 재료의 특성을 분석하였다. Shackelford et al.(2016)은 벤토나이트 기반의 GCLs(geosynthetic clay liners)이 액체 흐름과 오염 물질 이동을 최소화하기 위한 오염물 차단벽으로 사용되는 점을 고려하여 수리전도도를 통한 오염물질의 이동 메커니즘을 통해 오염물 확산에 대한 평가를 수행한 바 있다. 이외에도 오염된 지반의 정화 및 오염물 확산 방지를 위해 지오신세틱스를 활용한 공법에 관한 다양한 연구가 수행된 바 있다(Collazos, et al., 2003; Park, 2007; Quaranta, et al., 2005).

분광정보는 분광계를 통해 흡수 및 반사된 빛을 파장 순으로 나타내어 반사율과 같은 특정한 결과를 시각적 및 수치적으로 도출한 결과를 의미하며, 이는 분광센서 기반의 카메라를 통해 획득한 이미지를 이용하게 된다(Lee et al., 2021). 모든 물체는 전자파에 대한 고유의 반사특성을 보유하고 있고, 이는 종류에 따른 에너지의 흡수 및 반사영역(파장대)이 다르기 때문에, 분광반사곡선 기반의 고유정보 추출이 가능하다(Dell'Endice et al., 2009; Lee et al., 2021). 이와 같은 특성을 바탕으로 분광정보는 수리, 환경, 지질 및 재료 특성 분석을 위해 많이 활용되고 있다(Ferreira et al., 2016; Lee et al. 2022; Nguyen et al., 2016).

따라서 본 연구에서는 지중에서의 유류 오염물 흡수를 위해 개발된 반응재료가 유출된 유류량에 대응할 수 있는 재료로서의 공학적 특성을 예측하기 위한 방법으로 다짐시험이 완료된 반응재료의 시료에 대한 분광정보 획득 실험을 수행하였다. 또한 실험 결과를 바탕으로 분광정보와 최대건조단위중량의 상관관계를 평가하였다.

유류 오염물 흡수용 반응재료

Fig. 1은 본 연구에서 활용한 반응재료를 차수재로서 적용하는 경우에 대하여 유류 오염물 흡수에 따른 차수 메커니즘을 나타낸 것이다. 반응재료는 지중에 설치되는 점을 고려하면, 일반적인 지하수 흐름 조건에서는 투수성을 유지하지만, 지중에서 유류 오염물 유출이 발생하여 반응재료에 접하게 되면, 흡수-팽창-겔화에 의한 반응으로 유류 오염물의 확산을 차단하는 역할을 한다. 이와 같은 반응재료는 표준사, 벤토나이트, 폴리올레핀 및 폴리노보넨(주 반응제)으로 구성되며, 모든 재료가 파우더 형태이기 때문에, 차수재료로 활용성을 확보하기 위해서는 흙 입자와의 혼재를 방지토록 직포 및 부직포 사이에 포설

하여 지중에 설치하게 된다(Fig. 2). 또한 Fig. 3과 같이 유류 오염물 유출이 가능한 다양한 지중 구조물에서 오염물 확산에 대한 사전 예방 차원으로 적용이 가능한 재료적 특성을 보유하고 있다. 반응재료에 대한 물리적 특성 및 흡수-팽창 정도에 관한 내용은 기존 연구(Park, 2021; Hong et al., 2023)를 통해 자세히 확인할 수 있다.

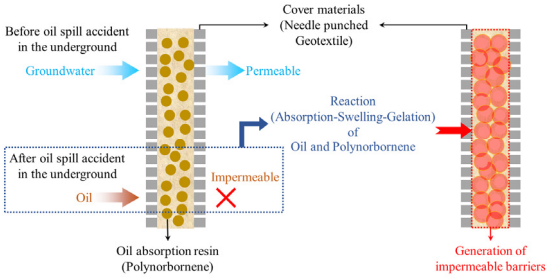


Fig. 1. Conceptual diagram on oil absorption of reactive materials (Park, 2021 [modified from ©2020.goldenpow])

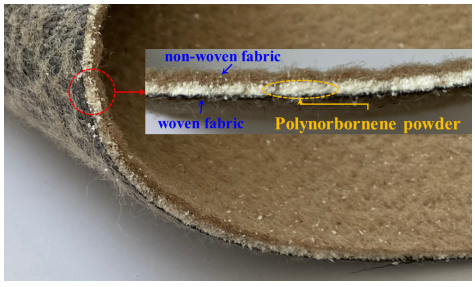


Fig. 2. Cross-section of the reactive materials with geosynthetics (Park, 2021)

<Gas station> <Industrial complex> <Landfill>

Fig. 3. Application of reactive materials with geosynthetics (Hong et al., 2023)

실내 실험

실험 조건

반응재료가 지반에서 발생하는 응력 조건에 대응할 수 있는 재료로서의 평가와 함께, 공학적 특성을 예측하기 위하여 실내 다짐시험 및 분광정보 획득 실험을 수행하였다. 전술한 바와 같이, 반응재료는 표준사, 벤토나이트, 폴리올레핀 및 폴리노보넨으로 구성되며, 각 성분별 구성비율에 따라 공학적 특성이 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 통해 도출된 바 있는 표준사 및 벤토나이트 구성비의 고정 조건에서 폴리올레핀과 폴리노보넨의 구성비율 변화에 따른 다짐시험 시료에 대한 분광정보 획득 실험을 실시하였다. 실내 실험에 적용된 반응재료의 구성성분에 따른 비율(중량비)은 Table 1에서 보는 바와 같으며, 이는 기존 연구(Hong et al., 2023)를 참고하였다.

다짐시험 및 분광정보 획득 실험

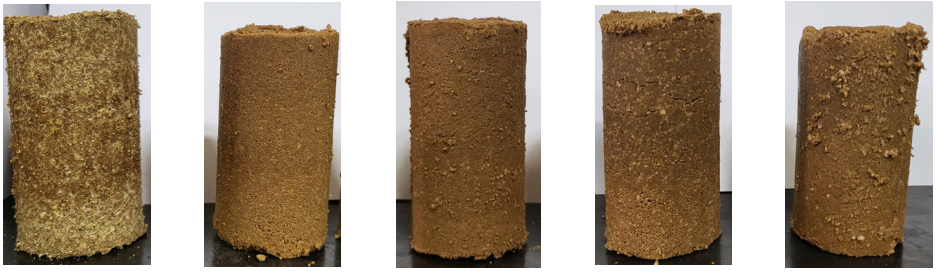
반응재료의 다짐시험은 별도의 시험규정이 존재하지 않기 때문에, 반응재료가 지중에 존치되어야 하는 점을 고려하여 흙의 다짐시험 방법(KS F 2312)을 준용하여 실시하였다. 다만, 시험에 적용되는 시료의 한계성을 고려하여 소형 몰드를 이용하여 A 다짐을 적용하였으며, 반응재료의 각 구성성분 비율에 따른 동일한 시료 조건에서 함수비를 증가시켜 시험을 수행하였다. 이때

Table 1. Composition ratio of reaction materials applied in the experiment

Classification	Composition of reaction materials			
	Sand (%)	Bentonite (%)	Polynorbornene (%)	Polyolefine (%)
Case 1			30	0
Case 2			24	6
Case 3	55	15	15	15
Case 4			6	24
Case 5			0	30

시험의 일관성을 확보하기 위하여 각 조건의 다짐시험은 3회 실시하여, 평균값을 적용하였다. Fig. 4는 다짐시험에 활용된 시험장치를 나타낸 것이며, Fig. 5는 각 반응재료의 각 구성성분 비율에 따른 대표적인 다짐시험 후의 시료를 나타낸 것이다.

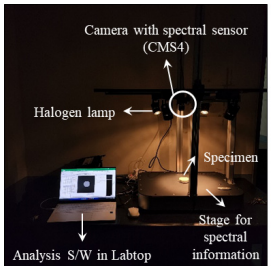
Fig. 4. Equipment for compaction tests



<Case 1> <Case 2> <Case 3> <Case 4> <Case 5>

Fig. 5. Representative specimen after compaction test

반응재료의 다짐시험 시료를 일부 추출하여 분광정보 획득을 위한 일련의 실험을 실시하였다. 이를 위한 분광정보 평가 시스템은 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 분광센서 기반의 이미지 촬영용 카메라, 스테이지, 광원 조절용 할로겐 램프 및 이미지 분석 프로그램(컴퓨터)으로 구성된다. 본 연구에서는 분광정보 획득을 위하여 CMS4(SILIOS사) 다분광 센서 기반의 카메라를 사용하였다. 다분광 센서(CMOS)는 550nm ~ 830nm의 파장대역에 대한 분광정보(9개 밴드, B & W) 획득이 가능하며, 30nm ~ 50nm 의 분광 성능을 가지고 있다. 이는 기존 연구를 통해 일반적인 흙의 함수량에 따른 분광정보 획득이 충분히 가능한 것으로 확인된 바 있다(Park et al., 2022). 분광정보 획득 실험은 다짐시험이 완료된 시료의 일부를 채취하여 시료캔에



<System composition>

<Image taking camera with spectral sensor[CMS4]>

Fig. 6. Multi-Spectral information evaluation system

담아 스테이지에 위치시킨 후, 다분광 이미지 촬영을 위한 시스템 셋업, 시료 이미지 촬영 및 프로그램 기반의 다분광 이미지 분석의 순으로 수행된다. Fig. 7은 분광정보 획득 실험 과정을 나타낸 것이다.

<Specimen set-up> <Multi-spectral acquisition system set-up> <Sample scan & spectral image acquisition> <Spectral image analysis>

Fig. 7. Procedure for spectral information acquisition experiment

실험 결과 및 분석

다짐 특성

반응재료의 구성성분 비율에 따른 다짐시험 결과를 Fig. 8과 같이 다짐곡선으로 도식화하였으며, 이를 바탕으로 최대건조단위중량과 최적함수비를 도출하였다(Table 2). 반응재료의 최대건조단위중량은 주 반응제인 폴리노보넨으로만 구성된 경우(Case 1)가 가장 낮은 것을 알 수 있었고, 폴리노보넨이 함유되지 않은 경우(Case 5)에는 가장 높은 최대건조단위중량을 보였다. 그리고 폴리노보넨과 폴리올레핀이 일정 비율로 구성된 경우(Case 2 ~ 4)에는 다소 편차는 있지만 유사한 최대건조단위중량을 갖는 것으로 확인되었다. 이와 같은 편차는 다짐시험 과정에서의 시험오차로서 전반적인 경향을 분석하는데에 문제가 없을 것으로 판단하였다.

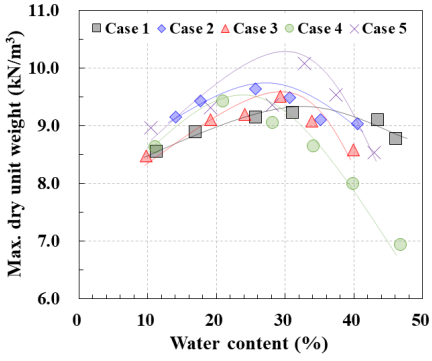


Fig. 8. Compaction curve of reactive materials

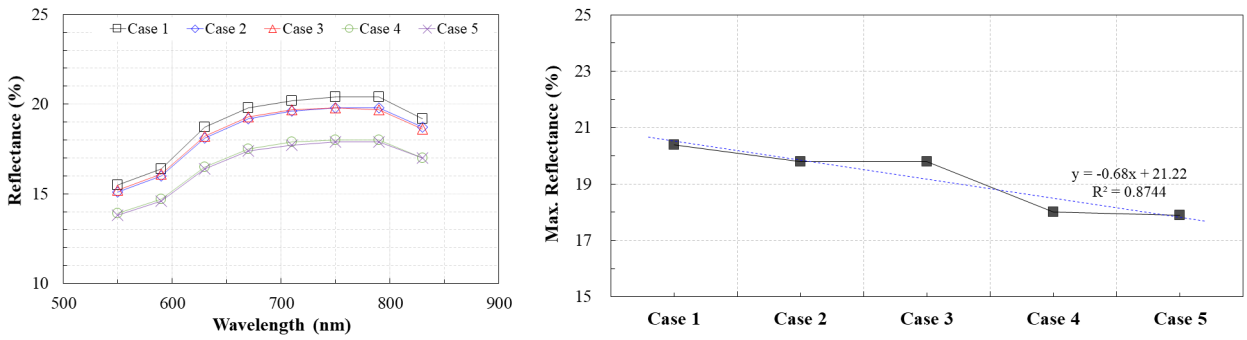
Table 2. Compaction test results

Classification	Optimum water content (ω_{opt}, %)	Maximum dry unit weight ($\gamma_{d(\max)}$, kN/m^3)
Case 1	31.0	9.2
Case 2	25.7	9.6
Case 3	29.3	9.5
Case 4	20.9	9.4
Case 5	32.9	10.1

분광정보 특성

반응재료의 분광정보 획득 실험 결과, 구성성분 비율 조건에 관계없이 750nm ~ 790nm 파장대역에서 최대분광반사율이 나타나는 것을 확인하였다. 이 결과는 기존 연구(Park et al., 2022)에서 흙의 최대분광반사율이 나타나는 파장대역과 유사한 결과로서, 지반 내에 상존하게 되는 반응재료의 특성을 충분히 다분광 정보로 평가가 가능함을 의미한다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이, 파장대역에 관계없이 주 반응제인 폴리노보넨의 성분비가 감소할수록 전반적인 분광반사율이 감소하는 경향을 보였다. 즉, 반응재료의 폴리노보넨 감소에 따른 최대분광반사율이 감소하였으며, 약 18% ~ 21% 범위를 보였다. 이때, Case 2 ~ 3과 Case 4 ~ 5의 최대분광반사율이 각각 유사한 값을 보였는데, 이는 폴리노보넨의 감소에 따른 영향으로 판단되었으며, 특히 폴리노보넨의 구성성분 비율이 폴리올레핀보다 현저하게 낮게 되면 최대분광반사율은 급격히 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 최대분광반사율의 감소 경향에 따른 선형적 추세식을 통해 폴리노보넨의 함유 정도를 고려한 지반 포설 재료로서의 성능 예측에 적용이 가능한 것으로 평가되었다.



<Relationship of wavelength-reflectance> <Max. reflectance by proportion of reactive material>

Fig. 9. Multi-Spectral information evaluation results

반응재료의 최대건조단위중량과 최대분광반사율의 상관관계

다짐 및 분광정보 특성 분석 결과를 바탕으로, 반응재료의 구성성분 비율에 따른 최대분광반사율과 최대건조단위중량의 상관관계를 Fig. 10과 같이 도식화하였다. 폴리노보넨의 성분비가 높을수록 최대분광반사율의 증가에 따라 최대건조단위중량은 비선형적으로 감소하는 것을 알 수 있었다.

상대적으로 실험 오차가 크게 발생한 것으로 판단되는 Case 4를 제외한 경우에서는 지수 또는 로그함수 기반의 비선형 추세가 가장 정확한 예측 관계를 보였으며, 실험적 오차를 고려한 경우에도 결정계수는 낮지만 지수 함수식으로의 예측이 가능한 것으로 평가되었다. 결정계수가 낮은 이유는 실험적 오차뿐만 아니라 반응재료의 구성성분 비율에 따른 실험 표본이 작기

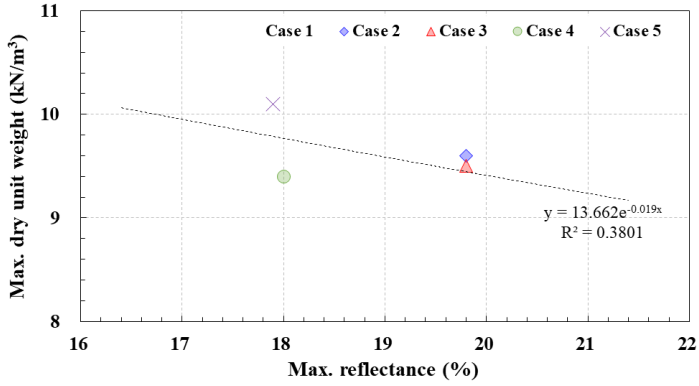


Fig. 10. Correlation between maximum dry unit weight and maximum reflectance for reactive materials

때문에 나타난 결과로 분석되었다. 그럼에도 불구하고 반응재료의 분광정보 특성을 바탕으로 지중의 유류 오염물 흡수를 위한 반응재료의 요구량 또는 최적량 평가에 있어서, 최대건조단위중량의 예측이 가능한 것으로 판단되었다.

결 론

본 연구에서는 지중에서 유류 오염물 유출 시, 오염물 확산을 예방할 수 있도록 개발된 유류 흡수용 반응재료의 공학적 특성 예측에 대한 가능성을 평가하기 위하여, 다짐시험 및 분광정보 획득 실험 결과를 통해 분광정보와 최대건조단위중량의 상관관계를 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 반응재료의 각 구성비에 따라 3회 실시된 다짐시험 과정에서 약 2% ~ 4% 수준의 시험오차가 있었지만, 반응재료의 구성성분 비율에 따른 최대건조단위중량의 차이가 명확한 것을 확인하였으며, 이를 통해 반응재료의 구성비를 고려한 최대건조단위중량 경향 분석이 가능함을 알 수 있었다.

(2) 분광정보 획득 실험을 통해 반응재료의 구성성분 중, 주 반응제(폴리노보넨)의 성분비가 감소할수록 분광반사율도 감소하는 특성이 확연하게 나타났다. 즉, 최대분광반사율의 평가 결과를 이용하여 반응재료의 성능 예측이 가능한 것으로 판단되었다.

(3) 다짐 및 분광정보 특성을 통해, 반응재료의 구성성분 비율에 따른 최대분광반사율과 최대건조단위중량은 비선형적 관계인 것을 확인할 수 있었다. 즉, 반응재료의 최대분광반사율을 이용하여 유류 오염물 흡수를 위한 반응재료의 최적량 예측이 가능함을 알 수 있었다. 다만, 본 연구에서는 다소 작은 실험 표본 기반의 결과를 이용하였기 때문에, 다짐시험 오차와 함께, 약 2% 미만의 분광정보 획득 실험 오차가 상관관계 분석결과에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 다양한 구성성분비의 동일한 실험 조건에 대한 보다 많은 결과를 획득하여 신뢰성을 증가시킬 수 있는 예측 방법의 제시가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work was supported by a research grant from 2023 Halla University.

References

[1] Cho, K., Myung, E., Kim, H., Purev, O., Park, C., 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, 5952.

[2] Collazos, O.M., Bowders, J.J., Bouazza, A. (2003). “Laboratory evaluation of prefabricated vertical drains for use in soil vapor extraction systems.” Journal of Ground Improvement, Vol. 7, No. 3, pp. 103-110.

[3] Dell’Endice, F., Nieke, J., Koetz, B., Schaepman, M.E., Itten, K. (2009). “Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest.” ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64, No. 6, pp. 632-639.

[4] Ferreira, M.P., Zortea, M., Zanotta, D.C., Shimabukuro, Y.E., de Souza Filho, C.R. (2016). “Mapping tree species in

tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data." Remote Sensing of Environment, Vol. 179, pp. 66-78.

[5] Han, J.-G., Kim, D.-C., Honf, K. (2015). "The effects of ph on microfluidics flow characteristics of heavy metals." Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 14, No. 1, pp. 23-32.

[6] Hong, G., Yeo, J., Park, J.-J., Lee, k., You, S.-Y., Choi, C.-L. (2023). "Spectral information characteristics of reactive materials for absorption of organic contaminant in the ground." 2023 Spring Geosynthetics Conference, Seoul, Korea, pp. 109-110.

[7] Jung, H.I. (2003). Remediation of Contaminated Groundwater by Prefabricated Vertical Drain. 2003 Geoenvironment, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea.

[8] Ko, S.O. (2002). Soil and Groundwater Remediation Technologies Trends and Field Application. 2002 Geoenvironment, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea.

[9] Lee, K., Ahn, H., Park, J.-J., Cho, J., You, S.-K., Hong, G. (2021). "A study on reliability analysis for prediction technology of water content in the ground using hyperspectral informations." Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 20, No. 4, pp. 141-149.

[10] Lee, K., Park, J.J., Hong, G. (2022). "Prediction of ground water content using hyperspectral information through laboratory test." Sustainability, Vol. 14, No. 17, 10999.

[11] Méndez, E., Perez, M., Romero, O., Beltran, E.D., Castro, S., Corona, J.L., Corona, A., Cuevas, M.C., 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.

[12] Nguyen-Do-Trong, N., Keresztes, J.C., De Ketelaere, B., Saeys, W. (2016). "Cross - polarised VNIR hyperspectral reflectance imaging system for agrifood products." Biosystems Engineering, Vol. 151, pp. 152-157.

[13] Park, J. (2021). "Evaluation of changes in the permeability characteristics of a geotextile - Polynorbornene liner for the prevention of pollutant diffusion in oil-contaminated soils." Sustainability, Vol. 13, No. 9, 4797.

[14] Park, J. (2022). "Permeability characteristics of geosynthetics vertical barrier connections for the prevention of contaminants diffusion." Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 18, No. 1, pp. 1-9.

[15] Park, J.J. (2007). Applicability of Prefabricated Vertical Drain System for Remediation of Contaminated Soils. Ph.D Thesis, University of Incheon.

[16] Park, J.J., 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.

[17] Park, J.-J., You, S.-K., Lee, K.-W., Yun, J.-M., Hong, G. (2022). "Effect of hydrophobic condition and water content on the spectral information of soil particle surface." Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 21, No. 4), pp. 93-100.

[18] Quaranta, J., Kunberger, T., Gabr, M.A. (2005). "WIDE application for subsurface hydraulic head control." ASCE-GI Specialty Conference, Geofrontiers 05, Geotechnical Special Publication No.142, Waste Containment and Remediation, Virginia, USA.

[19] Rodrigues, S.M., Pereira, M.E., da Silva, E.F., Hursthouse, A.S., Duarte, A.C. (2009). "A review of regulatory decisions for environmental protection: Part I - Challenges in the implementation of national soil policies." Environment International, Vol. 35, No. 1, pp. 202-213.

[20] Shackelford, C.D., Meier, A., Sample-Lord, K. (2016). "Limiting membrane and diffusion behavior of a geosynthetic clay liner." Geotextiles and Geomembranes, Vol. 44, No. 5, pp. 707-718.