

흙 입자 표면의 소수성 조건과 함수비가 분광정보에 미치는 영향

Effect of Hydrophobic Condition and Water Content on the Spectral Information of Soil Particle Surface

박정준¹, 유승경², 이광우³, 윤중만⁴, 홍기권^{5*}

Jeong-Jun Park¹, Seung-Kyong You², Kwang-Wu Lee³, Jung-Mann Yun⁴, Gigwon Hong^{5*}

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

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03656, Republic of Korea

³Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 10223, Republic of Korea

⁴Member, Professor, Dept. of Construction Information System, ShinAnsan University, 135 Shinansandeahak-ro Danwon-gu, Ansan, Republic of Korea

⁵Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Halla University, 28 Halladae-gil, Wonju-si, Gangwon-do 26404, Republic of Korea

ABSTRACT

This study describes the evaluation results on the effect of soil particle surfaces coated with various hydrophobic conditions on spectral information according to water content. Wettability test and spectral information evaluation test were performed on the hydrophobic coated standard sand. When the standard sand was coated with 1%, 3%, and 5% hydrophobic, the contact angles of sand-water interface were 130°~143°, 129°~144°, and 131°~144°, respectively. This means that the contact angle increased as the degree of hydrophobic coating increased at the same drying time, but the range of the contact angle had the same wettability. This means that the contact angle increases as the hydrophobic coating degree increases at the same drying time, whereas the contact angle range has the same wettability. As a result of spectral information evaluation, the maximum spectral reflectance of the dried sand with hydrophobic condition decreased compared to that of the hydrophilic sand, as the degree of hydrophobic increased. However, the maximum spectral reflectance was increased by increasing the degree of hydrophobic under the same water content conditions.

요 지

본 연구에서는 다양한 소수성 조건으로 코팅된 흙 입자 표면이 함수비 조건에 따라 분광정보에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 소수성으로 코팅된 표준사의 흡윤성 실험 및 분광정보 평가 실험을 수행하였다. 흡윤성 평가 결과, 1%, 3% 및 5%로 소수성 코팅된 표준사의 건조시간에 따른 표준사-물 경계면의 접촉각은 각각 약 130°~143°, 약 129°~144°와 약 131°~144°의 범위를 보였다. 이는 동일한 건조시간에서 소수성 코팅 정도가 증가할수록 접촉각은 증가하였지만, 접촉각의 범위는 동일한 범주의 흡윤성을 갖는 것을 의미한다. 분광정보 평가 결과, 소수성 상태를 갖는 건조된 표준사는 친수성 상태의 표준사에 비하여 소수성 수준의 증가에 따라 최대분광반사율이 감소한 반면에, 동일한 함수비 조건에서는 소수성 정도가 증가할수록 최대분광반사율이 증가하는 것으로 평가되었다.

Keywords : Hydrophobic, Hydrophilic, Wettability, Spectral information, Water content

Received 11 Dec. 2022, Revised 19 Dec. 2022, Accepted 20 Dec. 2022

*Corresponding author

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

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

1. 서론

전 세계적으로 지속되고 있는 산업 성장으로 중금속 및 유류와 같은 다양한 오염물로 인해 지반이 끊임없이 오염되고 있다. 이와 같은 오염물은 지반 조건(포화 또는 불포화)과 지하수 유동에 기인해 지반 내 거동이 다르게 나타난다. 즉, 오염물의 확산은 흙 입자 표면 및 지하수 조건에 따른 영향을 받기 때문에, 오염물의 확산 제어를 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(Cho et al., 2020; Mendez et al., 2012; Shackelford and Meier, 2016).

흙은 입경에 따라 크게 조립토 및 세립토로 구분될 수 있는데, 흙 입자 크기에 의한 구성 성분과 흙 입자 표면 조건에 따라 흙 입자 사이에서의 습윤장력 차이가 지하수 흐름 특성에 영향을 미치게 된다(Kim et al., 2022). 즉, 흙 입자의 표면 조건은 지하수의 흐름 속도 변화를 유발하고, 지하수에 기인하는 지반의 포화 및 불포화 조건은 오염물의 거동을 예측하는데 중요한 영향인자로 작용하게 된다(Kim et al., 2022). 따라서 흙의 구성 성분과 함께 흙 입자 표면 조건을 고려하여 지반 내의 함수비 조건에 의한 습윤장력이 지하수 유동에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.

오염물은 크게 중금속 및 유류와 같은 유기오염물로 구분될 수 있는데, 이는 지중에 복합적으로 분포하는 경우가 많다. 특히, 비수용상액체(NAPLs)로 존재하는 오염물은 흙 입자와의 흡착과 함께, 지하수 조건에 따른 포화 및 불포화 거동에 의해 광범위한 지역을 오염시키는 오염원으로 작용하게 된다. 이에 장기간 환경문제를 유발하는 오염원의 제거 및 복원기술 개발과 관련한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Collazos et al., 2003; Jung, 2003; Ko, 2002; Quaranta et al., 2005). 그러나 기존의 오염원 제거 및 복원기술과 관련한 다양한 연구들은 주로 지반의 투수성, 포화 및 불포화 조건을 기반으로 하는 정화시스템에 초점을 맞추고 있어, 흙 입자의 표면 조건을 고려한 오염원 확산의 근본적인 원인을 해결하기에는 다소 미흡한 실정이다. 이에 최근에는 재료의 표면 상태와 유류 오염물의 흡착을 규명하기 위하여 물에 대한 재료의 습윤성에 관한 연구가 수행되기도 하였다(Doshi et al., 2018).

한편, 모든 물체는 전자파에 대한 고유의 반사 특성을 가지고 있으며, 물체의 종류에 따른 분광반사는 에너지의 흡수 및 반사 파장대가 각기 다르기 때문에 물체가 보유하고 있는 고유정보 추출이 가능하다고 알려져 있다. 이와

같은 분광반사 특성을 통해 물체의 분류 또는 성분 분석이 가능한데, 이는 센서 종류(다분광, 초분광 등)에 따라 입사되는 빛을 분광시켜 특정 파장대에서 수십에서 수백 개의 분광정보를 확보할 수 있다(Endice et al., 2009). 즉, 물체에 따른 고유의 광학적 성질 및 반사 특성에 대한 분석이 가능하기 때문에, 다양한 정보의 정량적 분석이 가능하다. 이를 바탕으로 최근 지반 내 함수비 조건에 따른 분광반사율을 기반으로 스펙트럼 지수를 이용한 함수비 예측에 관한 연구가 수행된 바 있다(Lee et al., 2022).

본 연구에서는 흙 입자의 표면 조건과 오염물 거동의 상관성을 규명하기 위한 기초연구로서, 소수성 표면 상태의 흙 입자에 대하여 습윤성(Wettability) 평가 실험을 수행하였고, 흙 입자의 소수성 조건 및 흙의 함수비에 따른 분광정보 획득 실험을 실시하였다. 즉, 다양한 소수성 조건으로 코팅된 흙 입자 표면이 함수비에 따라 분광정보에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 분광정보 평가 실험

2.1 실험 내용

다양한 소수성 조건으로 코팅된 흙 입자에 대하여 함수비에 따른 분광정보 획득 실험을 위하여 습윤성 실험과 분광정보 평가 실험을 실시하였고, 평가 대상 시료는 표준사를 이용하였다.

먼저, 소수성 표면 상태의 표준사 입자에 대한 습윤성 평가 실험을 위하여 표준사와 소수성 코팅 용액의 중량비를 1%~5%까지 2% 간격으로 코팅하였고, 코팅용액은 Rust-Oleum사의 다용도 발수코팅제를 이용하였다. 이때 표준사와 코팅용액을 배합한 후, 표준사 입자 표면의 코팅 시간에 따른 습윤성 평가를 위하여 동일한 소수성 코팅 조건에서 1시간, 2시간, 4시간, 8시간, 16시간, 24시간 동안 건조하였다. Table 1은 습윤성 실험내용을 나타낸 것이다.

재료의 습윤성은 재료 표면과 물이 이루는 접촉각

Table 1. Wettability experiment condition of sand

Soil classification (USCS)	Degree of hydrophobic coating (%)	Drying time (H)
SP	1	1, 2, 4, 8, 16, 24
	3	
	5	

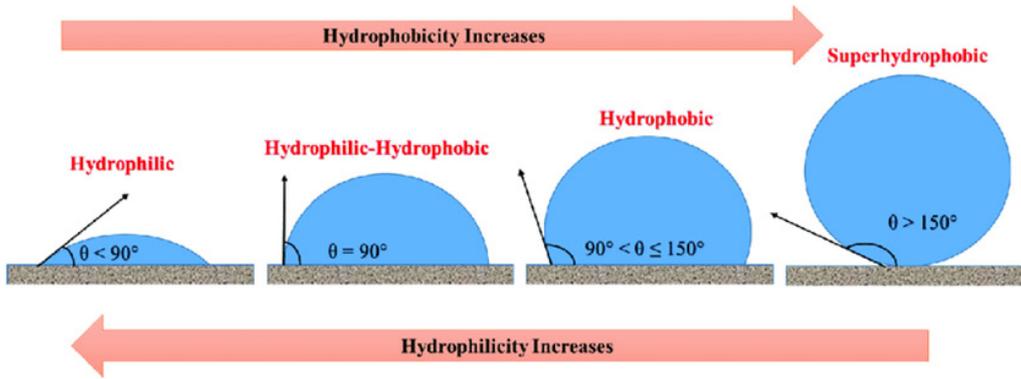


Fig. 1. Wettability of water on the flat surface (Doshiet al., 2018)

Table 2. Experiment cases for spectral information acquisition of sand surface coated with hydrophobic

Classification	Degree of hydrophobic coating (%)	Water Content (%)
HC-0	0	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
HC-1	1	
HC-2	2	
HC-3	3	
HC-4	4	
HC-5	5	

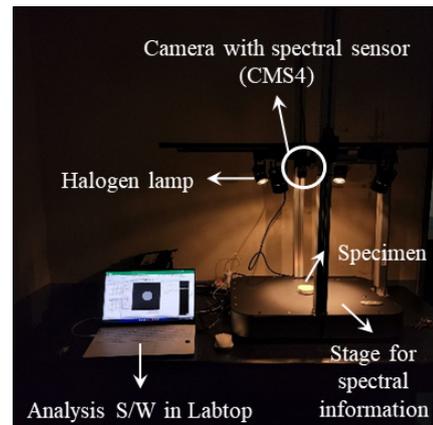
※ HC-0: hydrophilic condition

(contact angle)에 따라 친수성, 소수성 및 초소수성으로 구분하여 평가할 수 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 표준사의 소수성 코팅 조건과 건조시간에 따라 표준사-물 경계면의 접촉각을 바탕으로 습윤성을 평가하기 위하여, 각 실험조건에 대한 물방울 테스트(water droplet test)를 실시하였다.

소수성으로 코팅된 표준사의 함수비 조건에 따른 분광정보 평가 실험은 습윤성 실험 결과를 고려하여 수행되었다. 즉, 친수성 조건의 표준사와 각 소수성 조건으로 배합 후 24시간 동안 건조된 표준사에 대하여 0%~21%까지 3% 간격의 함수비 조건을 적용한 시료의 분광정보를 획득하였고, 실험 종류는 Table 2에서 보는 바와 같다.

2.2 분광정보 평가를 위한 시스템 및 실험 방법

Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이, 본 연구에서 사용한 분광정보 평가 시스템은 크게 분광센서 기반의 이미지 획득 카메라, 분광정보 촬영 스테이지, 광원 조절용 할로겐 램프 및 분석용 컴퓨터로 구성된다. 분광이미지 획득 카메라는 다분광센서를 기반으로 하는 SILIOS사의 CMS4 모델을 사용하였다(Fig. 2(b)). 카메라의 주요 성능을 요약하면, CMOS



(a) System composition



(b) Camera with spectral sensor

Fig. 2. Spectral information evaluation system

센서를 기반으로 550nm~830nm의 파장대역에서 9개 밴드에 대한 분광정보 획득이 가능하고, 평균 30nm ~50nm 수준이 분광능을 보유하고 있다. 이와 같은 성능은 일반적인 흙의 함수량에 따른 분광정보 획득이 충분히 가능한 수준이라 할 수 있다.

분광정보 평가를 위한 실험 방법을 요약하면 Fig. 3에 나타낸 바와 같다.

먼저, 친수성 또는 소수성 표면 상태가 구현된 표준사를 계획된 함수비 조건으로 균일하게 배합한 후, 분광정보 획득을 위한 스테이지에 거치시킨다. 그리고 암실 조건에서 할로겐 램프를 이용하여 광원을 조절한 후, 분광이미지 획득 카메라로 시료를 스캔한다. 마지막으로 소프트웨어를 이용하여 스캔이 완료된 이미지의 분광정보를 분석하는데, 이때 분광정보의 신뢰성 확보를 위하여 획득한 시료

이미지의 다양한 구역에서 대하여 분광정보를 확인함으로써 오차를 최소화할 수 있도록 한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 표준사의 소수성 조건 및 건조시간에 따른 습윤성 평가

Fig. 4는 물방울 테스트를 통한 습윤성 실험 결과를 나

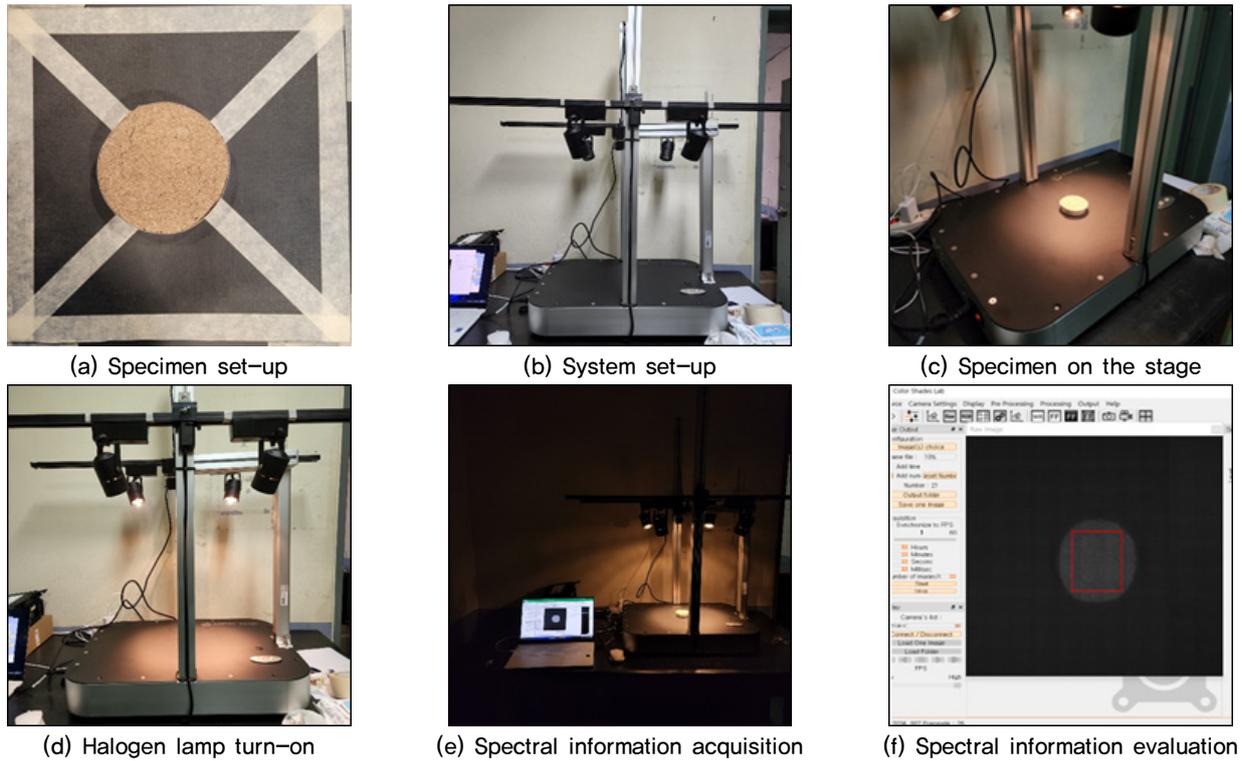


Fig. 3. Experiment procedure for spectral information evaluation

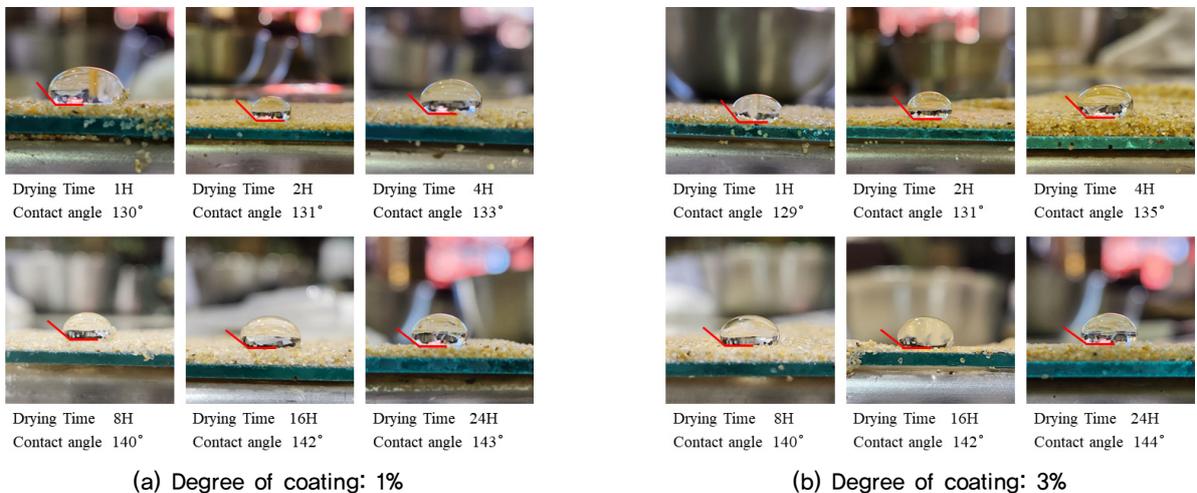
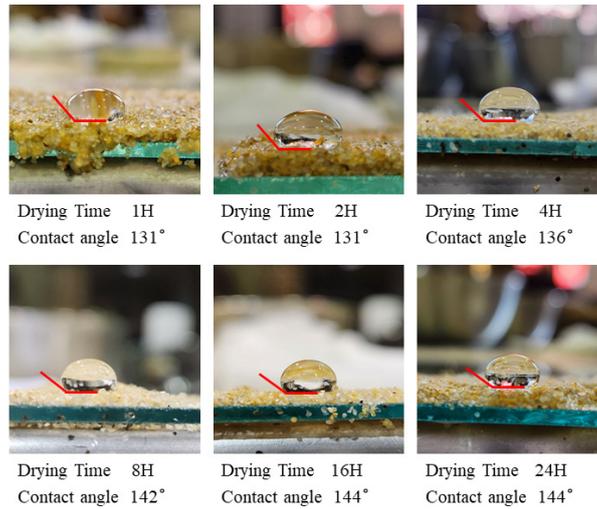


Fig. 4. Contact angle Measurement of a sand surface coated with hydrophobic



(c) Degree of coating: 5%

Fig. 4. Contact angle Measurement of a sand surface coated with hydrophobic (continued)

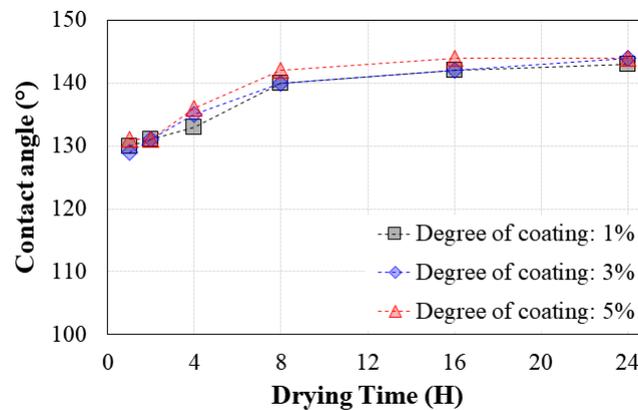


Fig. 5. Experiment results in wettability of hydrophobic coated sand

타낸 것이다. 표준사의 소수성 코팅 정도가 1%인 경우, 건조시간에 따른 표준사-물 경계면의 접촉각은 약 130°~143°의 범위를 보였으며, 3% 및 5%로 소수성 코팅된 표준사에 대한 접촉각은 각각 약 129°~144°와 약 131°~144°의 범위를 보였다.

실험 결과를 이용하여 Fig. 5와 같이 건조시간과 접촉각의 관계를 평가하였다. 먼저, 소수성 코팅 정도에 관계없이 건조시간 증가에 따라 접촉각이 증가하였지만, 건조시간이 8시간~24시간 사이에서는 그 증가율이 감소하거나 수렴하는 경향을 보였다. 그리고 동일한 건조시간에서 소수성 코팅 정도가 증가할수록 다소 차이는 있지만 접촉각은 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 모든 실험 조건에서의 접촉각은 Fig. 1과 같이 소수성 상태의 습윤성을 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 본 연구에서 사용한 소수성 코팅 용액으로 표준사의 소수성 상태를 모사함으로써, 오염물이 흡착된 흙 입자의 표면 조건에 따른 지하수 흐름

특성의 평가가 가능할 수 있음을 의미한다. 다만, 본 연구에서 수행한 분광정보 획득 실험에서는 소수성 코팅 후 건조시간을 최대 접촉각이 나타난 24시간으로 적용하되, 소수성 정도 및 함수비 조건만을 고려하였다.

3.2 소수성 및 함수비 조건을 고려한 표준사의 분광정보 평가

전술한 바와 같이, 분광정보 획득 실험에서는 다분광 센서를 이용하여 표준사의 소수성 정도에 따른 함수비 조건별 분광정보를 획득하였고, 이를 통해 최대 분광반사율을 평가하였다.

Fig. 6은 각 실험조건에 대하여 분광정보를 바탕으로 분광반사율을 나타낸 것이다. 소수성 정도에 관계없이 함수비가 없는 소수성 코팅 용액으로만 건조된 상태의 표준사가 가장 높은 분광반사율을 보였다. 그리고 함수비의 증가

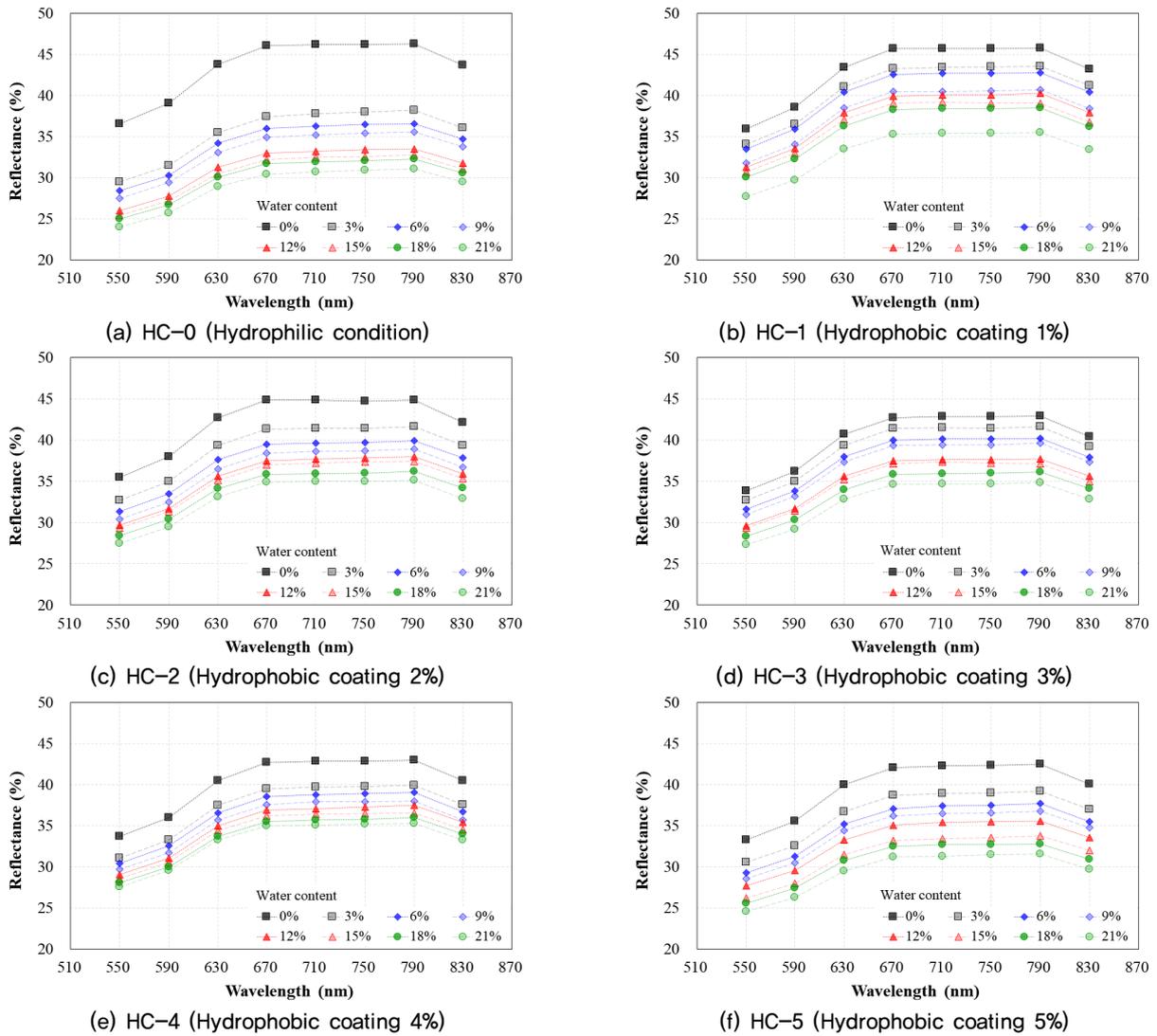


Fig. 6. Experiment results for spectral information evaluation

Table 3. Maximum reflectance of hydrophobic coated sand

Water content (%)	Max. reflectance (%)						Variation ratio of max. reflectance to HC-0 (%)				
	HC-0	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5
0	46.3	45.8	44.8	42.9	43.0	42.5	-1.1	-3.2	-7.3	-7.1	-8.2
3	38.2	43.6	41.6	41.6	39.9	39.2	14.1	8.9	8.9	4.5	2.6
6	36.6	42.8	39.9	40.2	39.1	37.7	16.9	9.0	9.8	6.8	3.0
9	35.6	40.7	38.9	39.6	38.0	36.8	14.3	9.3	11.2	6.7	3.4
12	33.5	40.3	38.0	37.7	37.5	35.6	20.3	13.4	12.5	11.9	6.3
15	32.8	39.2	37.4	37.3	36.6	33.8	19.5	14.0	13.7	11.6	3.0
18	32.3	38.5	36.2	36.1	36.0	32.8	19.2	12.1	11.8	11.5	1.5
21	31.1	35.5	35.1	34.8	35.3	31.6	14.1	12.9	11.9	13.5	1.6

에 따라 분광반사율은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 모든 조건에서의 최대 분광반사율은 750nm~790nm의 파장대역에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 함수비 조건에 따른 최대분광반사율을 평가하였다.

Table 3 및 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 모든 실험 조건에서 함수비가 증가할수록 최대분광반사율은 감소하는 경향으로 확인되었다. 그리고 표준사의 표면이 친수성 상태(HC-0)인 경우, 소수성 상태에 비하여 함수비 증가에 따른

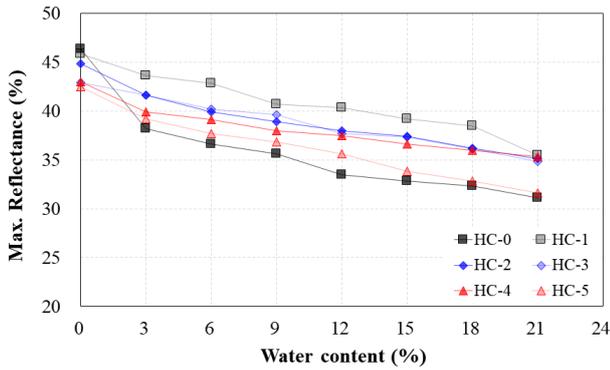


Fig. 7. Relationship of water content and max. reflectance

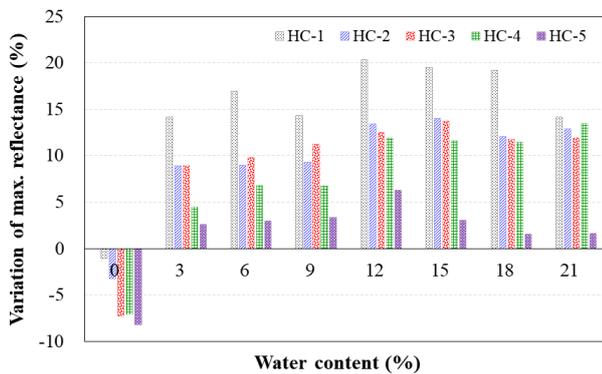


Fig. 8. Variation in max. reflectance of hydrophobic compared to hydrophilic

최대분광반사율이 가장 낮은 것으로 평가되었다. 다만, 친수성 표면 상태를 갖는 완전 건조된 표준사의 최대분광반사율은 가장 높은 46.3%로 확인되었다.

이와 같은 각 실험 조건에서의 최대분광반사율을 이용하여 친수성 표면 상태의 표준사 대비 소수성 표면 상태를 갖는 표준사의 최대분광반사율의 변화를 분석하였다(Table 3, Fig. 8). 소수성 표면 상태를 갖는 완전 건조된 표준사는 친수성 표면의 표준사에 비하여 소수성 코팅 수준의 증가에 따라 최대분광반사율이 1.1%~8.2%까지 감소하였다. 그리고 동일한 함수비 조건에서 소수성 정도가 높을수록 최대분광반사율은 함수비별로 1.5%~20.3% 범위의 증가율을 보였다. 특히, 소수성 정도가 가장 낮은 경우(HC-1)의 최대분광반사율의 증가율이 가장 높을 것으로 평가되었다.

이는 함수비가 0%인 경우에는 표준사의 광물학적 색상이 분광반사율에 큰 영향을 미치게 되지만, 함수비가 증가할수록 수분의 영향이 증가하면서 최대분광반사율이 감소하기 때문인 것으로 판단되었다. 또한 소수성 코팅 정도와 함수비가 증가할수록 친수성 표면을 갖는 표준사의 분광반사 특성과 유사한 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 소수성 조건으로 코팅된 흙 입자 표면이 함수비에 따라 분광정보에 미치는 영향을 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 1%, 3% 및 5%로 소수성 코팅된 표준사의 건조시간에 따른 표준사-물 경계면의 접촉각은 각각 약 130°~143°, 약 129°~144°와 약 131°~144°의 범위를 나타내었다. 이를 통해 동일한 건조시간에서 소수성 코팅 정도가 증가할수록 접촉각은 증가하였지만, 접촉각의 범위는 동일한 범주의 습윤성을 갖는 것을 알 수 있었다.
- (2) 분광정보 획득 실험을 통해 분광반사율을 평가한 결과, 함수비의 증가에 따라 분광반사율은 감소하였으며, 최대 분광반사율은 750nm~790nm의 파장대역에서 발생하는 것으로 확인되었다. 이에 최대분광반사율을 이용하여 친수성 표면 상태의 표준사 대비 소수성 표면 상태를 갖는 표준사의 최대분광반사율의 변화를 분석한 결과, 소수성 상태의 완전 건조된 표준사는 친수성 상태의 표준사에 비하여 소수성 수준의 증가에 따라 최대분광반사율이 감소하였지만, 동일한 함수비 조건에서 소수성 정도가 높을수록 최대분광반사율은 증가하는 것으로 분석되었다.
- (3) 함수비가 0%인 경우에는 표준사의 광물학적 색상이 분광반사율에 큰 영향을 미치게 되지만, 함수비의 증가에 따라 최대분광반사율은 수분의 영향을 크게 받는 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 표준사에 대한 제한적인 분광정보 평가를 실시하였다. 이에 다양한 지반 조건에서 오염물이 흡착된 흙 입자 상태를 모사함으로써, 흙의 구성 성분에 따른 소수성 및 함수비 조건이 고려된 분광정보 평가를 통해 스펙트럼 지수 기반의 지하수 유동 예측을 위한 연구가 지속될 필요가 있다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT). (NRF-2022R1F1A1074256)

References

1. 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, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 5952.
2. Collazos, O. M., Bowders, J. J. and 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. Doshi, B., Sillanpää, M. and Kalliola, S. (2018), "A review of bio-based materials for oil spill treatment", *Water Research*, Vol.135, No.15, pp.262-277.
4. Endice, D. F., Nieke, J., Koetz, B., Schaepman, M. E. and Itten, K. (2009), "Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest", *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.64, No.6, pp.632-639.
5. Jung, H. I. (2003), Remediation of Contaminated Groundwater by Prefabricated Vertical Drain, 2003 Geoenvironment, *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*, pp. 183-201.
6. Kim, J. H., Hong, G. and Park, J. J. (2022), "Effect of Surface Condition of Soil Particles According to Water Content on Spectral Information of Soils", 2022 KOSDI conference.
7. Ko, S. O. (2002), Soil and Groundwater Remediation Technologies Trends and Field Application, 2002 Geoenvironment, *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*, pp.129-156.
8. Lee, K., Park, J. J. and Hong, G. (2022), Prediction of Ground Water Content Using Hyperspectral Information through Laboratory Test. *Sustainability*, 14, 10999.
9. Mendez, E., Perez, M., Romero, O., Beltran, E. D. and Castro, S. (2012), Effects of electrode material on the efficiency of hydrocarbon removal by an electrokinetic remediation process. *Electrochim. Acta*, Vol.86, pp.148-156
10. Quaranta, J., Kunberger, and 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.
11. Shackelford, C. D. and Meier, A. (2016), Sample-Lord, K. Limiting membrane and diffusion behavior of a geosynthetic clay liner. *Geotext. Geomembr.*, Vol.44, pp.707-718.