

모래와 세립토로 구성된 소수성 흙의 습윤성 분석

Analysis on Wettability of Soil Composed of Sand and Fine-Grained Soil with Hydrophobic Surface

박정준¹, 이기철², 유승경³, 윤중만⁴, 홍기권^{5*}

Jeong-Jun Park¹, Kicheol Lee², Seung-Kyong You³, 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, Research Director, Corporate Affiliated Research Institute, UCI Tech, 313 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

³Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03656, Republic of Korea

⁴Member, Professor, Dept. of Construction Information System, ShinAnsan University, 135 Shinansandeahak-ro Danwon-gu, Ansan 15435, 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 described the test results to evaluate the effect of fines content on the wettability of sandy soil composed of hydrophobic soil particles. Wettability was evaluated using the contact angle obtained from the water drop test results for Jumunjin standard sand and sandy soil containing fines content. The test results showed that the wettability of sandy soil composed of sand and fine-grained soil changed depending on the hydrophobic level and fines content. The influence of fines content on the wettability of sandy soil was analyzed. It was found that 1% and 3% hydrophobic sandy soil with 5% fines content decreased by 94.4% and 32.4%, respectively, compared to the contact angle of standard sand. In addition, the contact angle reduction ratio for sandy soil with a 5% hydrophobic level and a fines content of 5% and 10% were 24.4% and 37.3%, respectively. In other words, the wettability of the soils should be evaluated considering the fines content to predict the behavior of contaminants, because the fines content has a significant impact on the value and increase/decrease ratio of the contact angle of sandy soil

요 지

본 연구에서는 흙 입자 표면이 소수성으로 구현된 사질토에 대하여 세립토 함유율이 사질토의 습윤성에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험을 수행하였다. 습윤성은 주문진 표준사와 세립토가 함유된 사질토에 대하여 물방울 시험 결과로부터 얻은 접촉각으로 평가하였다. 시험 결과, 모래와 세립토로 구성된 사질토의 습윤성은 소수성 수준과 세립토 함유율 조건에 따라 변화하였다. 세립토 함유율이 사질토의 습윤성에 미치는 영향을 평가한 결과, 5% 세립토 함유율 조건에 있어서 소수성 수준이 1%와 3%인 사질토의 접촉각은 표준사의 접촉각에 비하여 각각 94.4%, 32.4%가 감소하였다. 그리고, 소수성 수준이 5%인 경우, 5%와 10%의 세립토 함유율 조건에 대한 접촉각 감소율은 각각 24.4%와 37.3%였다. 즉, 세립토 함유율은 사질토 접촉각의 크기 및 증감율에 큰 영향을 미치기 때문에, 오염물 거동 예측에 있어서 지반의 세립토 함유율에 따른 습윤성 평가가 수반되어야 한다.

Keywords : Fines content, Particle surface, Hydrophobic, Hydrophilic, Wettability

Received 12 Dec. 2023, Revised 15 Dec. 2023, Accepted 18 Dec. 2023

*Corresponding author

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

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

1. 서론

세계적으로 도시 및 산업 개발 속도가 매우 빠르게 진행되고 있으며, 동시에 대기 및 지반 오염도 가속화되고 있다. 특히, 지반에서의 오염은 토양 및 지하수 오염이 함께 발생하는 경향을 보이는데, 오염 경로가 매우 다양해 신속한 해결이 요구되는 심각한 사회적 문제로 인식되고 있다 (Han et al., 2015; Park and Kim, 2018).

지반 내 오염물은 지하수의 포화 및 불포화 조건에 따라 유동 특성이 다르게 나타난다(Park et al., 2022). 이는 오염물의 이류, 분산, 확산, 흡착 등과 같은 거동에 영향을 미치기 때문에, 오염물 거동을 평가하기 위해서는 지하수 유동 특성에 관한 영향인자와 함께, 지중 오염물 제거 및 정화와 관련한 다양한 접근방법의 연구가 필요하다(Méndez et al., 2012; Shackelford et al., 2016).

흙은 입도분포에 따라 습윤장력의 차이가 발생하고, 흙 입자의 표면 조건에 의해 지하수 유동이 변하게 된다(Kim et al., 2022). 이는 흙의 입도분포와 함께 지하수 유동 특성이 오염물 거동의 영향요소로 작용하는 것을 의미한다 (Kim et al., 2022; Park et al., 2022). 따라서 오염물 거동 예측을 위해서는 흙의 입도 조건과 흙 입자의 표면 조건에 따른 습윤장력을 평가할 필요가 있으며, 입자(particle)로 구성된 재료의 습윤장력은 습윤성(wettability) 실험으로 확인할 수 있다. 이에 Doshi et al.(2018)은 흡착 재료의 표면 상태가 유류 오염물 분리에 미치는 영향을 분석하기 위하여 흡착 재료의 습윤성을 평가한 바 있다.

Lourenço(2018)은 흙의 습윤성은 지반 내 침투, 흐름, 유출 등에 많은 영향을 미치기 때문에, 입상 재료에 대한 재료 표면의 습윤성 평가가 매우 중요함을 제시하였다. Bachmann and McHale(2009)은 흙 입자의 접촉각이 흙의

습윤성에 매우 중요한 영향요소임을 고려하여 다양한 분석 모델을 이용해 접촉각을 평가하였다. Goebel et al.(2005)은 지반 내 유기물의 안정화에 대하여 흙의 습윤성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. de Jesus Duarte et al.(2022)는 바이오차(biochar) 등의 재료를 이용하여 모래의 침투능력에 소수성 성질의 영향을 평가하였으며, Abel et al.(2013)은 물방울 시험(water drop test)를 통해 바이오차(biochar)가 흙의 습윤성에 미치는 영향을 분석한 바 있다. Adamczuk et al.(2022)는 다양한 광물입자로 구성된 흙의 습윤성 실험을 통해 광물입자의 영향을 평가하였다. 이와 같이, 흙의 습윤성이 미치는 다양한 영향요소를 평가하기 위하여 미시적 관점에서의 흙 입자 표면에 대한 다양한 실험적 연구가 수행된 바 있다.

본 연구에서는 지중 오염물 거동과 흙의 구성 성분 및 흙 입자의 표면 조건의 상관관계를 평가하기 위한 연구의 일부로서, 흙 입자 표면이 소수성으로 구현된 사질토에 대하여 세립토 함유율이 사질토의 습윤성에 미치는 영향을 분석하기 위한 습윤성을 평가하였다.

2. 습윤성 평가

2.1 개요

재료의 습윤성은 물방울 시험(water drop test)을 통해 재료의 표면에 물이 이루는 접촉각(contact angle)으로 평가할 수 있으며, Fig. 1과 같이 접촉각에 따라 친수성 및 소수성 등으로 표면 특성을 구분할 수 있다. 본 연구에서는 소수성 표면을 갖는 사질토의 습윤성에 대하여 세립토 함유율이 미치는 영향을 평가하기 위하여, 물방울 시험을 실시하여 접촉각을 평가하였다.

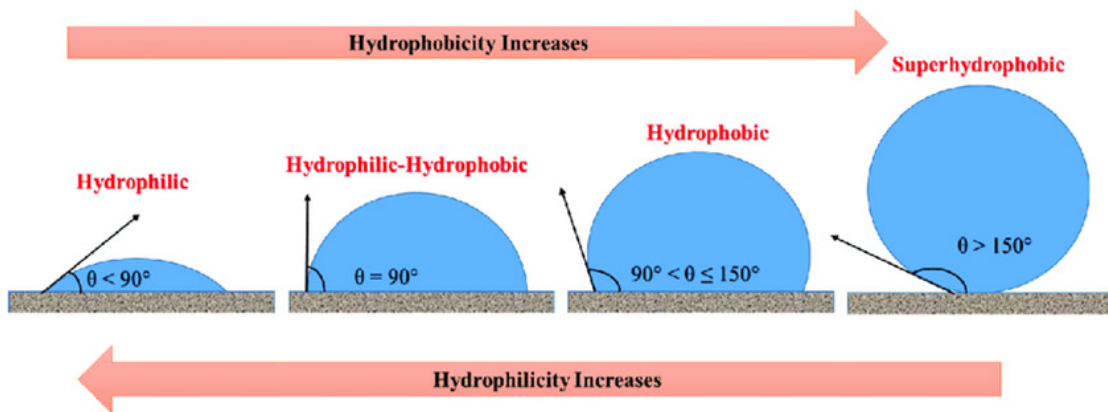


Fig. 1. Wettability of water on the flat surface (Doshi et al., 2018)

시험에 활용된 흙 시료는 주문진 표준사와 세립토를 혼합한 경우와, 세립토가 함유되지 않은 표준사로 준비하였다. 주문진 표준사는 통일분류법에 의해 빈입도 모래로 확인되었으며, 세립토는 약 8의 소성지수를 갖는 저압축성 실트를 적용하였다. Table 1은 주문진 표준사와 세립토의 공학적 특성을 나타낸 것이다.

2.2 시험 방법 및 내용

시험을 위한 흙 시료는 주문진 표준사에 세립토를 각각 5% 및 10%를 혼합하였으며, 표준사 또는 사질토의 소수

Table 1. Soil properties

Soil classification	Properties	
	Joomunjin standard sand	Cu
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

Table 2. Water drop test condition

Classification	Condition	
	Hydrophobic coating of soil particles	Soil type
Case 01	0% [Hydrophilic]	Standard sand
Case 02		Standard Sand + fines content 5%
Case 03		Standard Sand + fines content 10%
Case 04	1%	Sand
Case 05		Standard Sand + fines content 5%
Case 06	3%	Standard Sand + fines content 10%
Case 07		Sand
Case 08		Standard Sand + fines content 5%
Case 09	5%	Standard Sand + fines content 10%
Case 10		Sand
Case 11		Standard Sand + fines content 5%
Case 12		Standard Sand + fines content 10%

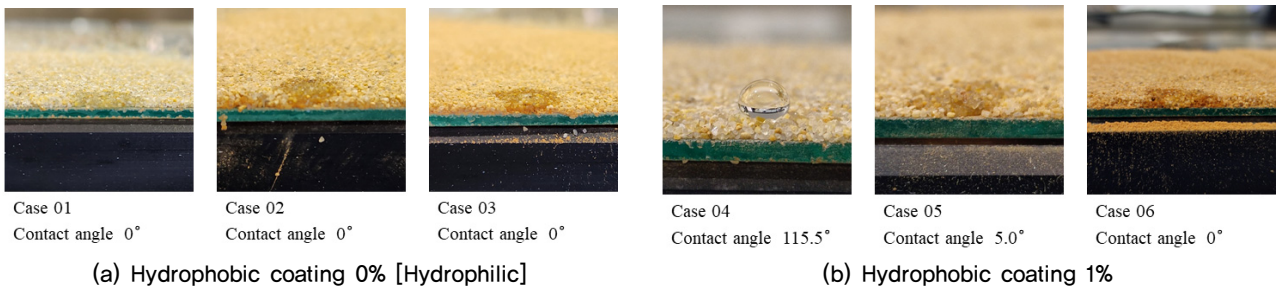


Fig. 2. Contact angle from water drop test (representative case)

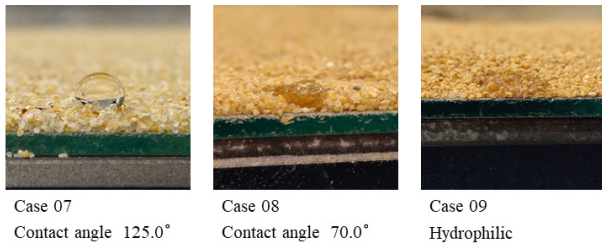
성 표면 조건을 구현하기 위하여 소수성 코팅 용액을 적용하였다. 그리고 소수성 코팅 수준에 대한 영향을 살펴보기 위하여, 각각의 흙 시료에 대하여 소수성 용액을 1%, 3%, 5%의 중량비로 적용하여 흙 입자의 소수성 표면 조건을 모사하였고, 24시간 동안 건조한 후 물방울 시험을 수행하였다. 이때 물방울이 흙 시료 표면에 낙하하면서 위치에너지를 의해 흙 입자가 이동하지 못하도록 스폰이드를 이용하여 흙 시료에 최대한 근접한 상태에서 시험을 실시하였다.

한편, 세립토가 혼합된 사질토의 조성구분과 흙 입자의 소수성 표면 조건을 모사하는 과정에서 흙 시료의 균질성에 따른 시험결과의 신뢰성 확보를 위해 모든 조건의 시험은 각각 3회씩 수행하였고, Table 2는 시험 조건을 나타낸 것이다.

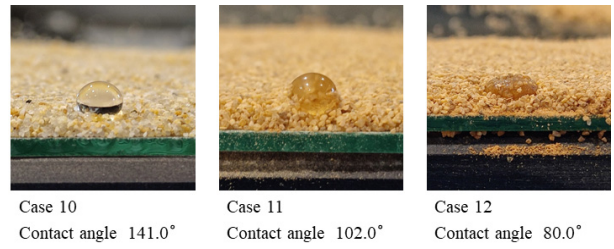
3. 결과 및 분석

3.1 소수성 조건에 따른 사질토의 습윤성

전술한 바와 같이, 습윤성 평가를 위한 물방울 시험은 시험 조건에 따라 각각 3회씩 수행되었다. Fig. 2는 물방울 시험 결과로부터 확인된 표준사 및 사질토의 흙 입자에 대



(c) Hydrophobic coating 3%



(d) Hydrophobic coating 5%

Fig. 2. Contact angle from water drop test (representative case) (continued)

Table 3. Test results

Classification	Contact angle (°)		Classification	Contact angle (°)	
	Test results	Mean value		Test results	Mean value
Case 01	0,0	0	Case 07	136,5	133,2
	0,0			138,0	
	0,0			125,0	
Case 02	0,0	0	Case 08	70,0	90
	0,0			95,0	
	0,0			85,0	
Case 03	0,0	0	Case 09	0,0	0
	0,0			0,0	
	0,0			0,0	
Case 04	121,5	118,0	Case 10	141,0	140,8
	117,0			143,0	
	115,5			138,5	
Case 05	5,0	6,7	Case 11	108,0	107,0
	10,0			111,0	
	5,0			102,0	
Case 06	0,0	0	Case 12	80,0	88,3
	0,0			90,0	
	0,0			95,0	

한 대표적인 습윤성 결과를 나타낸 것이다. 표준사(case 01, 04, 07, 10)를 제외한 사질토는 대부분 소수성 표면 특성을 명확하게 나타내지 못하는 것을 육안으로 알 수 있었다.

Table 3은 습윤성 평가를 위하여 시험 조건별로 3회씩 수행한 물방울 시험 결과로부터 도출된 접촉각 및 평균값을 나타낸 것이고, Fig. 3은 소수성 수준에 따른 평균 접촉각을 도식화한 것이다.

먼저, 소수성 수준이 0%인 경우, 세립토 함유율에 관계 없이 친수성의 표면 특성을 보였다. 소수성 수준이 1%인 경우, 표준사의 흙 입자는 소수성 표면 특성이 확연하게 나타났다. 그러나 세립토 함유율이 5%인 사질토는 소수성 수준이 0%인 경우에 비하여 접촉각이 다소 증가하였음에도 불구하고, 친수성의 표면 특성을 갖는 것으로 확인되었으며, 세립토 함유율이 10%인 사질토는 접촉각이 0°인 친수성 표면 상태를 보였다.

소수성 수준이 3%인 경우, 표준사의 접촉각은 소수성

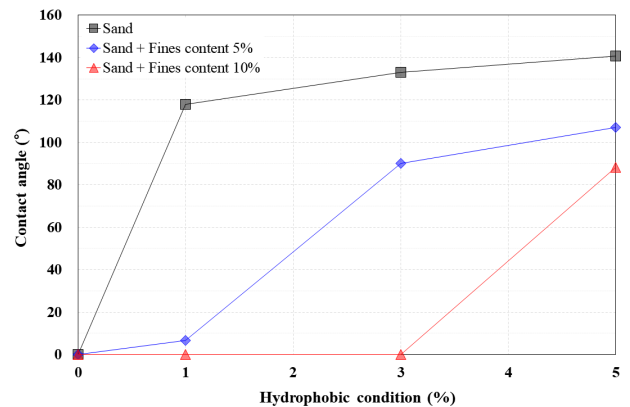


Fig. 3. Relationship of Hydrophobic condition – contact angle

수준이 1%인 접촉각에 비하여 평균 12.9%가 증가하였다. 세립토 함유율이 5%인 사질토는 소수성 수준이 1%인 경우에 비하여 접촉각이 크게 증가하면서 소수성 표면 특성으로 변하였음을 확인할 수 있었다. 그리고 세립토 함유율이 10%인 사질토는 여전히 접촉각이 0°인 친수성 표면 상태를 보였다.

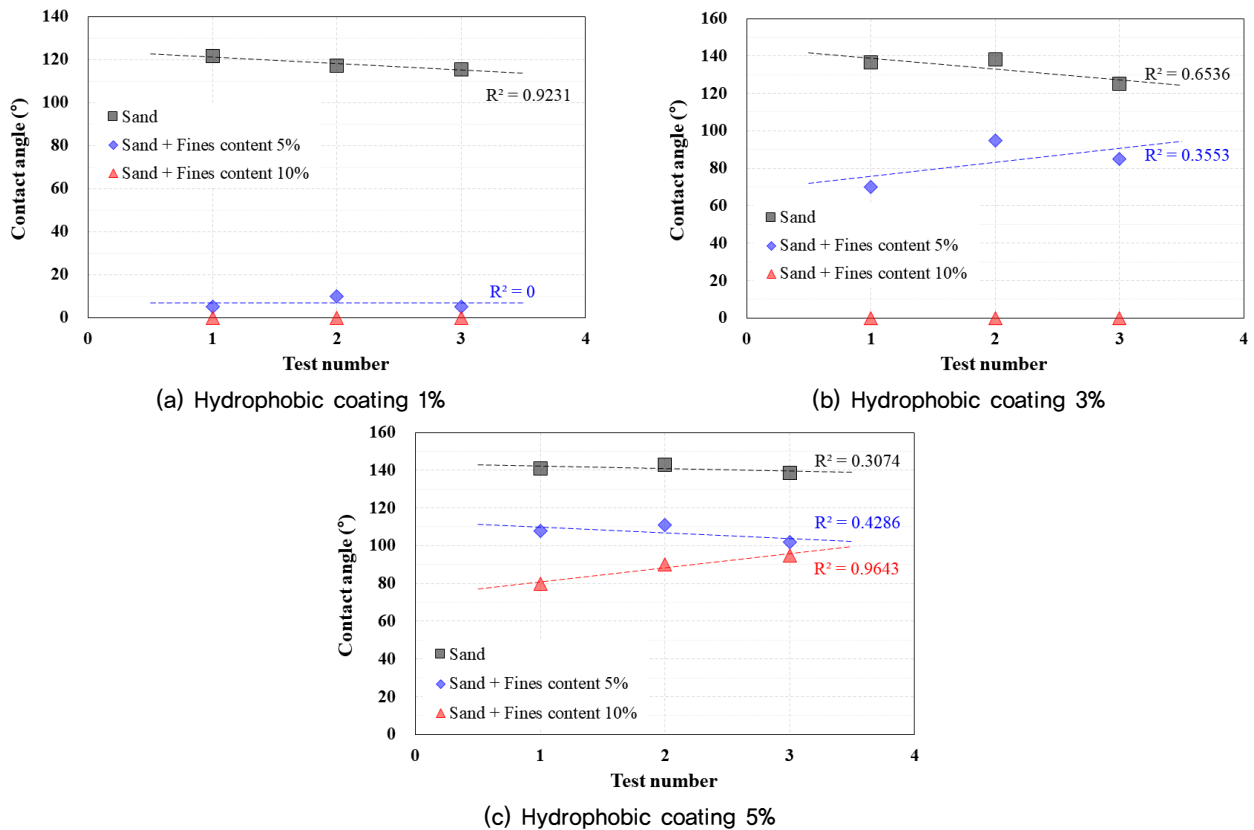


Fig. 4. Variation of contact angle

소수성 수준이 5%인 경우, 표준사의 접촉각은 소수성 수준이 1%인 접촉각에 비하여 평균 19.4%까지 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 세립토 함유율이 5%인 사질토는 소수성 표면 특성을 갖는 3% 소수성 수준의 접촉각에 비하여 평균 18.9%가 증가하는 것으로 확인되었고, 세립토 함유율이 10%인 경우에도 소수성 표면 특성에 가까운 접촉각을 갖는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 각 시험 조건에 따라 3회의 접촉각을 평가하여 시험 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 이에 시험 결과의 오차 수준을 확인하기 위하여 3회 평균 접촉각 대비 오차율을 평가하였다. 이때 접촉각이 0%로 나타난 시험 조건(case 01, 02, 03, 06, 09)은 제외하였다.

소수성 수준이 1%인 경우, 표준사(case 04)는 평균 접촉각 대비 약 $\pm 2\% \sim 3\%$ 의 오차범위를 보였으며, 5% 세립토 함유율 조건(case 05)에서는 약 $\pm 33\%$ 의 오차범위가 나타났다. 소수성 수준이 3%인 경우에는 표준사(case 07)와 5% 세립토 함유율 조건(case 08)이 각각 약 $\pm 2\% \sim 7\%$, 약 $\pm 5\% \sim 29\%$ 의 오차범위를 갖는 것으로 평가되었다. 마지막으로 소수성 수준이 5%인 경우의 오차범위는 표준사(case 10), 5% 세립토 함유율 조건(case 11) 및 10% 세립토 함유율 조건(case 12)이 각각 약 2% 이내, 약 \pm

1% ~ 5%, 약 $\pm 2\% \sim 10\%$ 로 확인되었다. 이를 바탕으로 표준사는 모든 시험 조건에서 유사한 오차범위를 갖는 것으로 평가되었다. 그러나 사질토의 경우에는 동일한 소수성 수준에서 세립토 함유율이 증가하면 접촉각의 오차범위가 커졌으며, 동일한 세립토 함유율 조건에서는 소수성 수준이 증가할수록 오차범위가 감소하는 것을 알 수 있었다. Fig. 4는 오차 수준을 평가하기 위해 활용된 시험 조건에 따른 접촉각의 변화를 나타낸 것이다. 이와 같이 오차의 원인은 각 시험 조건에서 표준사와 세립토가 혼합된 흙시료의 미소한 균질성 및 소수성 코팅의 미소한 차이에 의한 것으로 추정되었다.

3.2 세립토 함유율이 습윤성에 미치는 영향

세립토 함유율 조건이 사질토의 습윤성에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 소수성 수준에 따라 세립토 함유율과 접촉각의 관계를 Fig. 5와 같이 도식화하였고, 접촉각은 평균값을 이용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 친수성 표면 특성을 갖는 0%의 소수성 수준은 세립토 함유율과 관계가 없는 것으로 확인되어 분석 조건에서 제외하였다.

소수성 수준이 1%인 경우, 표준사를 기준으로 5% 세립

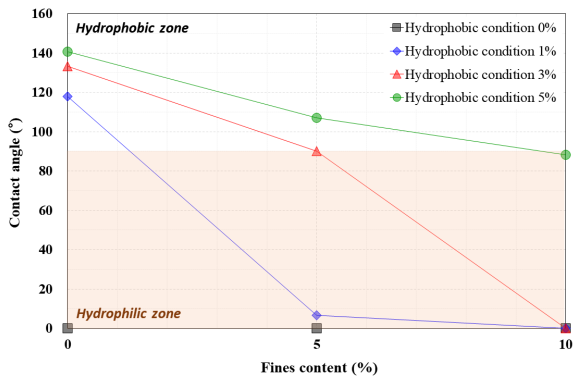


Fig. 5. Contact angle from water drop test

토 함유율 조건의 접촉각은 94.4%가 감소하였으며, 10% 세립토 함유율 조건에서는 접촉각이 발생하지 않아 100% 감소하였다. 그리고 소수성 수준이 3%인 경우에는 5% 세립토 함유율 조건의 접촉각이 표준사의 접촉각에 비하여 32.4% 감소하였으며, 10% 세립토 함유율 조건에서는 소수성 수준이 1%인 경우의 결과와 동일하였다. 마지막으로 소수성 수준이 5%인 경우, 5% 및 10%의 세립토 함유율 조건에 대한 접촉각 감소율은 각각 24.4%와 37.3%로 확인되었다. 즉, 동일한 소수성 수준에서 세립토 함유율이 증가할수록 접촉각은 감소하였으며, 소수성 수준이 높을수록 세립토 함유율의 증가에 따른 접촉각 감소율은 낮은 것으로 평가되었다. 이는 세립토가 사질토의 습윤성에 큰 영향을 미치는 것을 의미하기 때문에, 오염물 거동 예측에 있어서 지하수 유동성을 평가하기 위해서는 지반의 세립토 함유율에 의한 습윤성을 고려할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 흙 입자 표면이 소수성으로 구현된 사질토에 대하여 세립토 함유율이 사질토의 습윤성에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 물방울 시험 결과로부터 표준사는 흙 입자 표면의 소수성 수준이 높을수록 접촉각이 지속적으로 증가하였고, 모래와 세립토로 구성된 사질토는 소수성 수준과 세립토 함유율 조건에 따라 친수성에서 소수성 표면 특성으로 변화하는 것을 확인하였다.
- (2) 접촉각의 오차 수준을 평가한 결과, 사질토는 동일한 소수성 수준에서 세립토 함유율이 증가함에 따라 오

차범위가 확대되었으며, 동일한 세립토 함유율 조건의 소수성 수준이 높을수록 오차범위는 감소하였다. 이는 세립토가 시험 대상 흙 시료의 균질성 및 소수성에 영향을 미친 것으로 추정되었다.

- (3) 세립토 함유율 조건이 사질토의 습윤성에 미치는 영향을 평가한 결과, 세립토 함유율은 사질토 접촉각의 크기 및 증감율에 큰 영향을 미치기 때문에, 오염물 거동 예측에 있어서 지반의 세립토 함유율에 따른 습윤성 평가가 수반되어야 한다.

Acknowledgement

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

References

1. Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M. and Wessolek, G. (2013), "Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil", *Geoderma*, Vol.202-203, pp.183-191.
2. Adamczuk, A., Gryta, A., Skic, K., Boguta, P. and Jozefaciuk, G. (2022), "Effect of Different Minerals on Water Stability and Wettability of Soil Silt Aggregates", *Materials*, Vol.15, No.16, p.5569.
3. Bachmann, J. and McHale, G. (2009), "Superhydrophobic surfaces: a model approach to predict contact angle and surface energy of soil particles", *European Journal of Soil Science*, Vol.60, No.3, pp.420-430.
4. de Jesus Duarte, S., Hubach, A. and Glaser, B. (2022), "Soil water balance and wettability methods in soil treated with biochar and/or compost", *Carbon Research*, Vol.1, p.31.
5. 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.
6. Goebel, M. O., Bachmann, J., Woche, S. K. and Fischer W. R. (2005), "Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter", *Geoderma*, Vol.128, No.1-2, pp.80-93.
7. Han, J. G., Kim, D. C. and Hong, K. (2015), "The Effects of pH on Microfluidics Flow Characteristics of Heavy Metals", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.14, No.1, pp.23-32.
8. 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.
9. Lourenço, S. D. N., Saulick, Y., Zheng, S., Kang, H., Liu, D., Lin, H. and Yao, T. (2018), “Soil wettability in ground engineering: fundamentals, methods, and applications”, *Acta Geotechnica*, Vol.13, pp.1-14.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Park, J. J., You, S. K., Lee, K. W., Yun, J. M. and Hong, G. (2022), “Effect of Hydrophobic Condition and Water Content on the Spectral Information of Soil Particle Surface”, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.21, No.4, pp.93-100.
 13. 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.