



모래의 입경, 점토 광물 특성에 따른 모래-점토 혼합토의 세립토 이탈현상

Influence of Sand Grain Size and Clay Mineralogy on Suffusion of Sand-Clay Mixtures

주인철* · 원종묵**

Joo, Incheol*, and Won, Jongmuk**

Abstract

Suffusion is a type of internal erosion caused by the detachment of fine particles. Additionally, continuous suffusion reduces the stability of geotechnical infrastructures. In this study, the impact of clay mineralogy and sand grain size on the suffusion of sand-clay mixtures was investigated using two-dimensional laboratory experiments on nine different sand-clay mixtures made of three types of sands (K3, K4, and K5) and clays (kaolinite, illite, and bentonite). The breakthrough curve for each sample was obtained for the top/middle/bottom outlets of the designed cell to measure and analyze the amount of detached clay. It was observed that as the sand grain size decreased, the amount of detached clay was more and clays with kaolinite exhibited greater suffusion than those with illite. Bentonite exhibited the lowest amount of detached clay owing to its high swelling potential. The influence of clay mineralogy and sand grain size on the suffusion has been discussed based on the obtained breakthrough curves.

Key words : Suffusion, Sand-clay Mixture, Laboratory Experiment, Sand-grain Size, Clay Mineralogy

요 지

세립토 이탈현상은 많은 내부침식 현상 중 하나이며 지반내 미세입자의 탈착으로 인해 발생한다. 지속적인 세립토 이탈현상은 지반구조물의 안정성을 저해하게 된다. 본 연구에서는 점토 광물의 특성과 모래 입자의 크기에 따른 세립토의 이탈을 확인하기 위해 2차원 실내 세립토 이탈 실험을 수행하였다. 실험에는 3가지 다른 종류의 모래(K3, K4, K5)와 점토(Kaolinite, Illite, Bentonite)를 이용하여 총 9가지 모래-점토 혼합토에 대한 세립토 이탈 실험을 진행하였다. 이후 시료별 유출곡선을 산정하여 점토/모래 별 세립토 이탈량을 측정하고 분석하였다. 본 연구에서는 모래의 입경 크기가 작을수록 세립토의 이탈량이 증가하는 경향을 나타내었고, 일라이트에 비해 카올리나이트에서 더 많은 세립토의 이탈이 나타났다. 또한 팽창성이 큰 벤토나이트의 경우 세립토의 이탈량이 가장 낮게 측정되었다. 유출곡선을 통해 산정된 상부/중간/하부에서의 세립토 유출량을 통하여 점토 광물의 종류 및 모래 입경 크기에 따른 세립토 이탈을 고찰하였다.

핵심용어 : 세립토 이탈, 모래-점토 혼합토, 실내실험, 입경 크기, 점토 광물

1. 서 론

유체의 영향을 받는 지반 구조물은 사면활동, 월류, 그리고 내부침식으로 인해 큰 피해를 입는다. 그 중 내부침식은 토양

강도를 크게 감소시켜 토사로 이루어진 제방 및 댐과 같은 지반구조물의 손상과 파괴를 유발 할 수 있다(Bendahmane et al., 2008). 제방 및 댐 붕괴의 약 1/3은 내부침식에 의해 발생한다(Xu and Zhang, 2009). 내부침식은 지반 내 유체의

*정회원, 울산대학교 건설환경공학부 석사과정(E-mail: ox9618@naver.com)

Member, Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

**교신저자, 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 부교수(Tel: +82-2-259-2279, Fax: +82-259-2629, E-mail: jmwon@ulsan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

흐름에 의하여 토양을 구성하는 미세입자들이 손실되는 현상을 의미한다(Zhong et al., 2018). 내부침식 현상은 느리고 지속적으로 진행되며, 외부로 나타나는 현상을 찾기 어렵기 때문에 제방이나 댐과 같은 구조물의 안전관리를 어렵게 한다(Kim et al., 2016). 또한 지반의 내부침식 현상은 침식이 진행됨에 따라 세립토 이탈에 의해 공극이 커지고, 유량이 증가함에 따라 침식을 더욱 가속화 시킨다(Wan and Fell, 2004). 이는 지하수와 관련된 지반구조물의 안정성과 산사태, 싱크홀 같은 자연재해에 큰 영향을 끼치며, 따라서 내부침식에 대한 연구는 현재까지 광범위하게 진행되어 왔다(Fell et al., 2003; Chang and Zhang, 2011).

Fell and Fry (2013)는 내부침식을 집중 누출 침식(concentrated leak), 후방 침식(backward erosion), 접촉 침식(contact erosion) 및 세립토 이탈(suffusion)로 구별하였다. 이 중 세립토 이탈은 구조물이나 기초 지반을 구성하는 흙의 내부 및 외부 침식을 유발하여 토양강도를 매우 감소시킨다. 세립토는 실트나 점토와 같은 미세입자로 다량 함유된 흙으로 광물의 성분과 함유량에 따라 그 물리적/화학적 성질이 달라지며 세립토의 함유량에 따라 강도, 투수계수와 같은 흙의 공학적인 특성이 달라지게 된다. 세립토 이탈에 의한 내부침식은 점토의 이탈과 부착에 의해 이루어진다. 점토는 작은 입자의 크기로 인해 동유체력에 의해 기존 지반에서 쉽게 이탈하기 때문에 내부침식에 취약하다(Jiang et al., 2017). 점토를 포함한 모래지반에서 지반의 공극의 크기가 커지면 세립토 이탈량 또한 증가한다(Ahfir et al., 2009). 따라서 점토입자의 세립토 이탈은 다공성 매체 내 점토 입자의 이동에 관한 이해가 수반되어야 한다.

세립토 이탈에 의한 내부침식 연구는 지반구조물의 안정성과 자연재해 예방에 필수적이다. 세립토 이탈 정도는 지반 내 모래의 입경 크기, 세립자의 종류에 따라 달라지게 되는데, 이에 따른 연구는 주로 1차원 실내 토양칼럼 실험을 통하여 이루어진다(Won et al., 2021; Choe et al., 2022; Won et al., 2022). 위의 연구에서 수행된 모래와 점토의 종류가 세립토 이탈현상에 미치는 영향은 제방, 댐과 같은 지반구조물 안전과 산사태, 싱크홀과 같은 지반재해 예방이 필요하다.

본 연구는 2차원 흐름에 의한 모래-점토 혼합토의 세립토 이탈현상을 규명하기 위하여 디자인된 셀을 이용한 실내 내부침식 실험을 수행하였다. 측정된 점토의 유출곡선을 통하여 모래의 입경 크기, 점토의 종류에 따른 세립토 이탈 현상을 고찰하고 각각의 인자가 세립토 이탈에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 유체 흐름에 의한 세립토 이탈

일반적으로 흙은 다양한 크기의 입자를 포함하고 있다. 이 중 상대적으로 크기가 작은 세립토는 지하수 유동과 같은 유체의 흐름으로 인하여 조립토 공극 사이로 흐르게

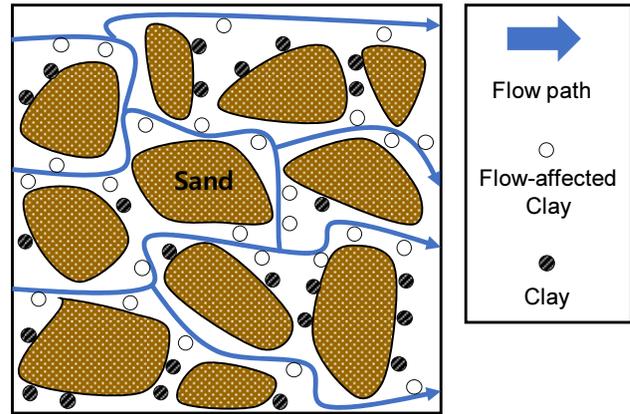


Fig. 1. Schematic Drawing of Clay-Sand Mixture Subjected to Hydrodynamic Forces

된다. 세립토 유출은 세립토의 탈착으로 인해 시작되며 조립토 표면과 세립토 사이에는 서로 부착하려는 인력 에너지가 작용한다. 이 인력 에너지의 크기가 외부에서 작용하는 힘보다 적으면 탈착이 일어나게 된다.

Wan and Fell (2008)은 모래-세립토 혼합토에서 내부침식이 발생하기 위한 세 가지 조건을 제안하였다.

- 1) 세립토의 크기는 모래의 공극 크기보다 작아야 한다.
- 2) 세립토의 부피가 모래의 공극 부피보다 적어야 한다.
- 3) 세립토가 유체의 흐름에 의하여 모래 사이의 공극을 통과 가능한 충분한 크기의 동유체력이 작용되어야 한다.

동유체력을 받는 모래-점토 혼합토의 세립토 이탈 메커니즘에 대한 모식도는 Fig. 1과 같다. 모래 내에 점토입자가 존재하는 경우 동유체력에 직접적으로 영향을 받는 점토(flow-affected clay)와 그렇지 않은 점토로 나눌 수 있다. 세립토 이탈은 flow-affected clay에서 먼저 진행되며 세립토 이탈이 진행되면서 물의 흐름이 바뀌게 되어 초기에 동유체력에 영향을 받지 않는 점토도 시간이 지남에 따라 세립토 이탈을 하게 될 가능성이 존재한다.

3. 실험시료 및 실험방법

3.1 시료의 특성

본 연구에서는 세 가지 입경 크기를 가진 인조 규사(K5, K4, K3)와 대표적인 점토 광물인 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(illite), 벤토나이트(Bentonite)를 이용하여 모래-점토 혼합토를 조성하였다.

모래의 최대 간극비는 funnel을 사용하는 방법(ASTM D4254, 2006)을 이용하여 측정하였고, 최소 간극비는 진동 테이블을 사용한 방법(ASTM D4253, 2000)을 이용하여 측정하였다. 모래의 체 분석 방법과 점토에 대한 비중계 테스트(ASTM D854-00, 2000)를 진행하여 모래와 점토에 대한 입도분포를 측정하였고, 이를 통해 시료의 중간 입자 크기

(d_{50})를 산정하였다. 모래와 점토 시료별 특성은 Table 1을 통하여 요약하였다. 실험에 사용한 모래의 입도분포곡선은

Table 1. Properties of Sand and Clay Used in This Study

	G_s	e_{max}	e_{min}	d_{50} (mm)	C_u
K5	2.65	0.96	0.71	0.83	1.79
K4	2.65	0.97	0.70	1.22	1.51
K3	2.65	0.98	0.69	1.7	1.64
Kaolinite	2.47	-	-	10.5×10^{-3}	11.87
Illite	2.71	-	-	9.0×10^{-3}	6.43
Bentonite	2.12	-	-	1.0×10^{-3}	-

Note: G_s = specific gravity, e_{max} = maximum void ratio, e_{min} = minimum void ratio, d_{50} = median grain size, C_u = coefficient of uniformity.

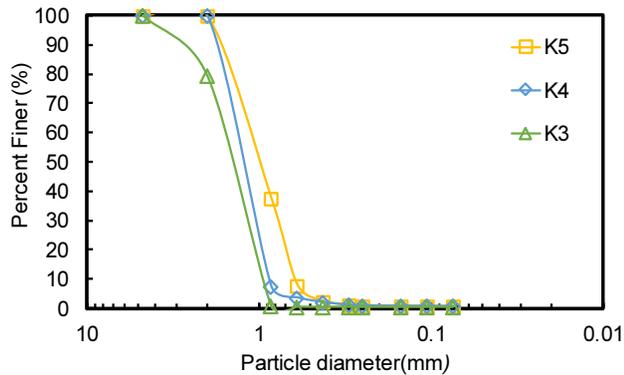


Fig. 2. Particle Size Distribution of Sand Used in This Study

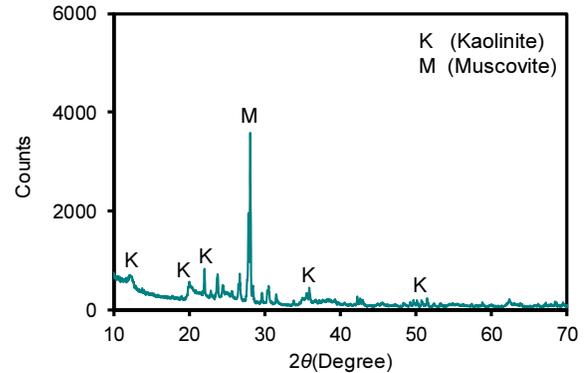
Table 2. X-ray Fluorescence Results of the Clay Used in Study (Analysed by the Korea Basic Science Institute)

Composition	Mass percentage (%)		
	Kaolinite	Illite	Bentonite
SiO ₂	51.6	60.7	50.8
Al ₂ O ₃	33.8	20.2	15.7
CaO	9.16	0.175	3.14
Fe ₂ O ₃	2.81	9.35	22.1
K ₂ O	0.855	6.97	0.247
Na ₂ O	0.85	0.471	1.94
MgO	0.38	0.572	2.6
TiO ₂	0.285	1.11	1.45
P ₂ O ₅	0.114	0.159	0.476
SrO	0.09	0.017	0.064
MnO	0.026	0.129	0.084
CuO	0.02	-	0.055
ZnO	0.011	0.02	0.056

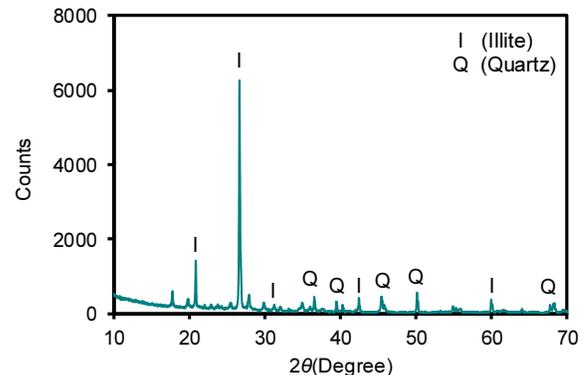
Fig. 2를 통해 나타내었다.

본 실험에 이용된 점토 시료의 광물학적 및 화학적 조성은 각각 XRD (X-ray diffraction)와 XRF (X-ray fluorescence)를 측정하여 분석하였고 그 결과를 각각 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다. XRD와 XRF의 결과를 통하여 본 연구에 이용된 세 가지 점토의 주성분은 카올리나이트, 일라이트, 몬모릴라이트임을 확인하였다.

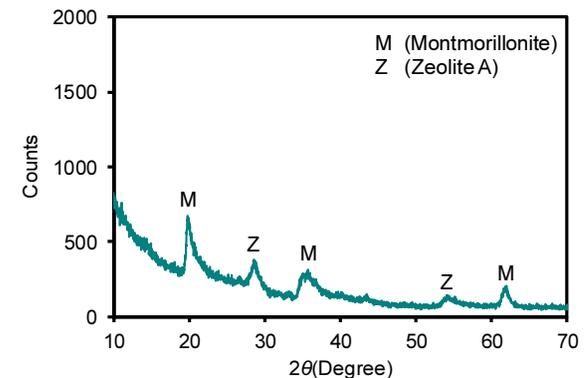
본 실험에 사용된 모래와 점토 사진은 Fig. 4에 나타내었다.



(a) Kaolinite



(b) Illite



(c) Bentonite

Fig. 3. X-ray Diffraction Patterns of (a) Kaolinite, (b) Illite and (c) Bentonite Used in Study (Analysed by the Korea Basic Science Institute)

3.2 실험 기구 및 방법

3.2.1 내부침식 셀 디자인

본 연구에서는 2차원 흐름을 고려한 모래의 입경 및 점토 광물 특성에 따른 세립토의 유출량을 측정하기 위해 높이 20 cm, 폭 3 cm, 길이 30 cm의 내부침식 셀을 제작하였다(아크릴 두께 1 cm; Fig. 4). 설계된 셀은 유입구 부분과 시료 조성 부분, 그리고 3개의 유출부로 설계하였다. 셀의 유입구 부분에서는 펌프의 작동으로 인한 유체의 파동을 줄여주는 역할을 하는 동시에 작은 구멍이 단면 전체에 분포된 아크릴 판을 이중으로 설치하여 용액이 일정한 방향으로만 흐르는 현상을 방지하고 용액이 셀의 단면에 균일하게 흐를 수 있도록 하였다. 시료의 크기는 높이 20 cm, 폭 3 cm, 길이 20 cm로 시료 조성 시 모래-점토 혼합토 모래의 이탈을 방지하기 위하여 유입구와 연결되는 부분에 #200번체 크기의 플라스틱 메쉬를 설치하였다. 칼럼 유출부에는 바닥으로부터 0 cm, 8 cm, 16 cm 간격으로 밸브를 설치하여 높이에 따른 세립토 이탈량을 비교할 수 있도록 제작하였다. 유출부의 각 밸브마다 #200번체 크기의 플라스틱 메쉬를 부착하여 실험 진행 시 점토가 아닌 모래의 유출을 방지하도록 설계하



Fig. 4. Picture of Sand and Clay Used in This Study

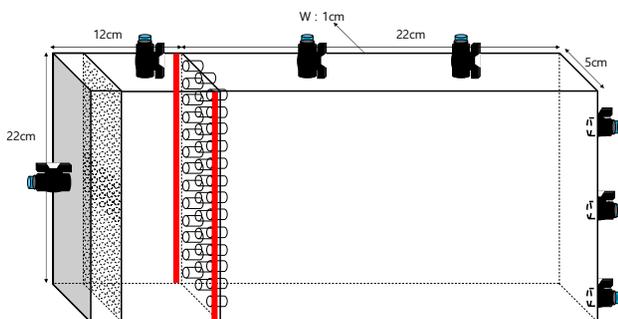


Fig. 5. Schematic Drawing of Column

였다. 실험에 사용된 실내 내부침식 칼럼의 도면은 Fig. 5에 나타내었다.

3.3 실험 기구 및 방법

실험방법은 시료 준비, 시료 조성, 시료 유출, 탁도 측정 및 농도 변환 4가지 순서로 나눌 수 있다. 먼저 모래 입자에 부착되어 있는 불순물들을 제거하기 위해 소니케이터(Sonicator)를 이용하여 물의 탁도가 10 NTU 이하가 될 때까지 모래입자의 세척을 진행하였다. 이후 상대밀도 70%에 해당하는 건조된 모래와 모래기준 3% 비율(중량비)의 점토를 준비한 후 모래와 점토가 잘 혼합될 수 있도록 비커에 나누어 담아 30분간 교반시켜 주었다. 칼럼 내 시료 조성 단계에서는 Wet pluviation 방법을 이용하여 포화된 모래-점토 혼합토를 조성하였다. 또한 칼럼 내 용액의 수위를 조절하여 시료 조성 시 점토 입자의 segregation 현상을 방지하였다. 또한 칼럼 내 공기가 용액의 흐름을 막아 균일한 용액의 흐름을 방해하지 않도록 칼럼 내의 공기를 모두 제거해주었다. 그 후 각 실험 기구들을 연결하고 유량조절 펌프(Peristaltic pump)를 작동시켜 유출된 용액을 50 ml conical tube를 이용하여 샘플링하였다. 칼럼 유출구 부분의 유출 밸브의 높이를 일정하게 설치하여 유입구와 유출부의 수두차로 인한 영향을 제거하였다. 유출된 용액의 점토 농도는 탁도계를 사용하여 측정하였다. 측정된 탁도는 선형관계의 탁도-점토 농도 간의 관계식을 통하여 점토 농도로 변환하였다. 실험의 모식도는 Fig. 6에 나타내었다.

본 실험에서는 0.01 M NaCl 용액을 이용하여 칼럼 내 모래-점토 혼합토를 포화시킨 후 3 pore volume (PV)에 해당하는 0.01 M NaCl을 주입하여 조성된 시료를 안정화시킨 후, 3-way valve를 이용하여 탈이온수(DI)를 주입하여 이온농도를 낮추며 실험을 진행하였다.

Dampener를 제작하여 용액 주입부와 내부침식 셀 사이에 디자인된 Dampener를 배치하였다. Dampener를 이용하여 유량조절 펌프로부터 발생하는 유체의 파동을 최소화시켜 주었고 이온농도를 점진적으로 감소시켰다. 또한 Dampener 하단에 시료 교반기(Magnetic stirrer)를 위치시켜 용액 주입

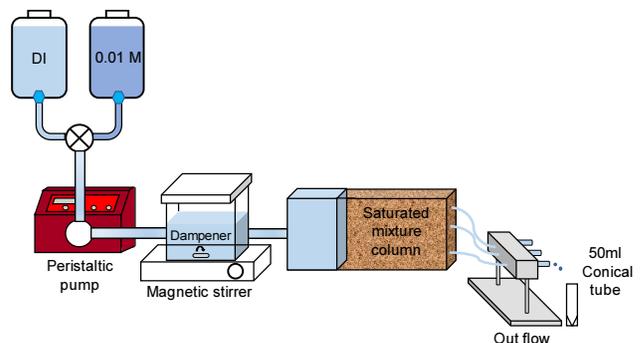


Fig. 6. Schematic Drawing of the Experimental Setup

중 내부 용액이 교반 될 수 있도록 하였다. Dampener 내부에는 0.01 M NaCl 용액을 모래의 종류에 따라 각각 2,170 ml (K5), 2,160 ml (K4), 2,150 ml (K3)을 초기에 넣어 15 PV를 기준으로 칼럼 내 이온농도가 거의 0에 수렴하도록 하였다. 모래에 따른 Dampener 내의 0.01 M NaCl 용액 부피(V)는 Eq. (1)을 통하여 산정하였다.

$$\frac{dc}{dt} = \frac{Q}{V}(C_{in} - C) \quad (1)$$

C (M)는 Dampener 내의 시간에 따른 이온농도를 나타내며, t (min)는 시간, Q (ml/min)는 유량, C_{in} (M)는 유입되는 용액의 이온농도를 나타낸다. 본 실험에서는 DI를 주입하였으므로 C_{in} 은 0이 된다.

3.4 실험조건 및 결과 분석

본 연구에서는 총 9가지(3가지 모래, 3가지 점토)의 모래-점토 혼합토 시료에 따른 세립토 이탈을 측정하였다. 유량조절 펌프를 이용하여 펌프에서 45 ml/min (유속 = 0.75 cm/min)의 유량이 셀에 가해지도록 고정하였고 따라서 세립토 이탈은 이온농도의 감소에 따라서 유발되었다.

실험을 통해 측정된 점토의 유출량은 각 시료별 유출곡선(Breakthrough curve)를 통해 산정되었다. 또한 유출곡선의 면적을 사다리꼴 방법(Trapezoid method)을 이용하여 높이별 유출량(Bottom, Middle, Top)과 총 유출량을 산정하였다.

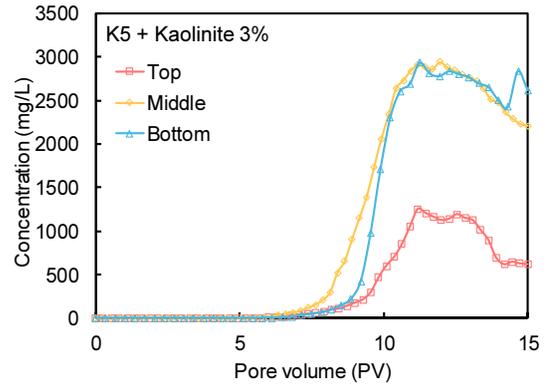
4. 실험 결과

4.1 모래의 입경 크기에 따른 영향

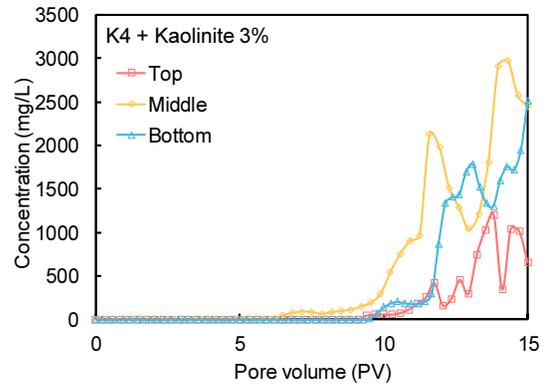
Figs. 7, 8, 9는 각각 Kaolinite, Illite, Bentonite가 세가지 모래(K5, K4, K3)와 혼합된 상태에서의 세립토 유출곡선을 나타낸다.

Figs. 7, 8, 9에서 나타난 바와 같이 동일한 점토로 혼합된 혼합토에서 세립토 유출량은 K5 > K4 > K3 순으로 측정되었다. 이를 통하여 전반적으로 모래 입자의 크기가 작아질수록 유출되는 점토의 양이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 K5의 모래 평균 입경(d_{50})의 크기가 K4, K3의 평균 입경 크기(Table 1)에 비해 작아 유량에 의해 가해지는 더 큰 동유체력 때문인 것으로 생각된다(Choe et al., 2022). 또한 주어진 상대밀도(70%)의 실험조건에서 K5의 간극비가 더 높기 때문에(K5의 e_{min} 값이 K3, K4보다 더 크다) 탈착된 점토가 유체의 흐름에 따라 유동할 수 있는 공간이 많아져 세립토의 이탈 현상이 증가하게 된 것으로 사료된다.

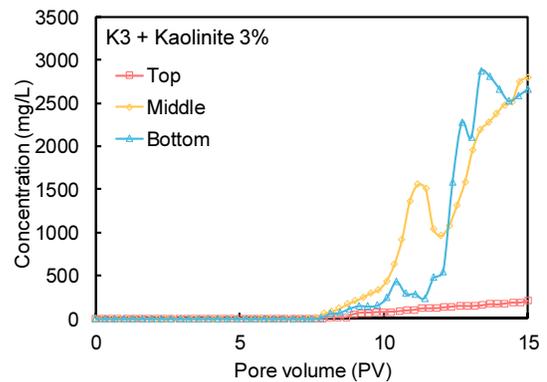
Figs. 7과 8에 나타난 바와 같이 카올리나이트와 일라이트의 경우 대체적으로 유출부의 중간 유출부(middle)와 하부 유출부(bottom)에서 상부 유출부(top)보다 더 높은 농도의 세립토가 유출되었다. 이를 통하여 카올리나이트와 일라이트



(a) K5 sand



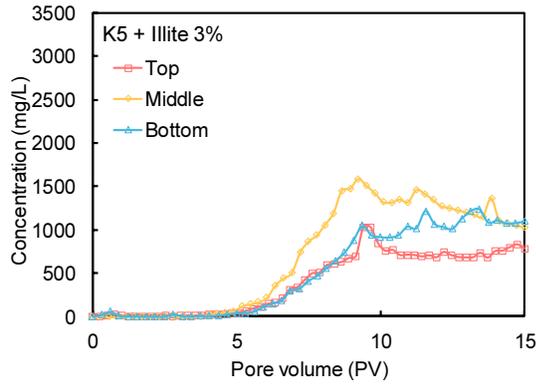
(b) K4 sand



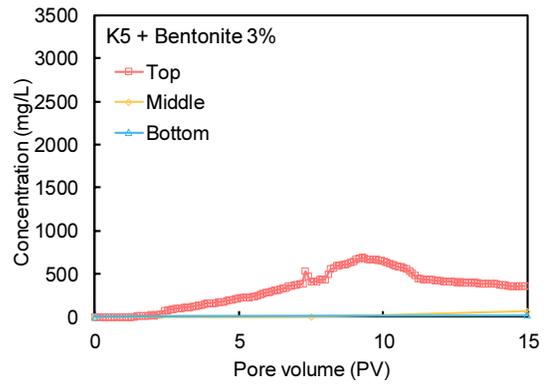
(c) K3 sand

Fig. 7. Observed BTCs of 3% Kaolinite for (a) K5 Sand, (b) K4 Sand and (c) K3 Sand

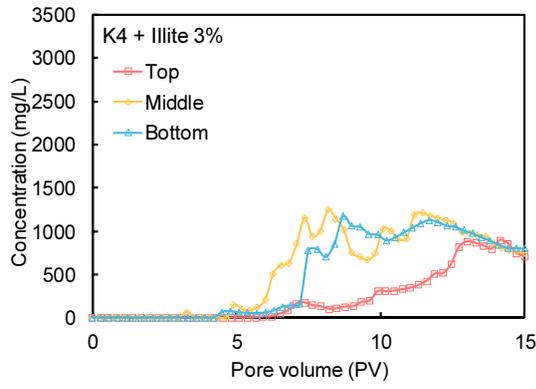
트의 경우 탈착(detachment)이 발생하면 물의 흐름과 중력의 영향을 받아 탈착된 점토입자가 셀의 하부쪽으로 이동함을 유추할 수 있다. 하지만 Fig. 10에 나타난 바와 같이 벤토나이트의 경우 상부 유출량이 하부와 중간보다 더 높게 나타났다. 이는 팽창성이 큰 벤토나이트 입자가 이온농도 감소에 따라 탈착된 후 유출부까지 흐르지 못하고 다시 재부착되었기 때문으로 생각된다. 벤토나이트는 카올리나이트와 일라이트에 비해 상대적으로 큰 팽창성을 가져 더 큰 재부착 효과가 나타나며 이로 인해 중간과 하부에서 폐색현상이 나타나고



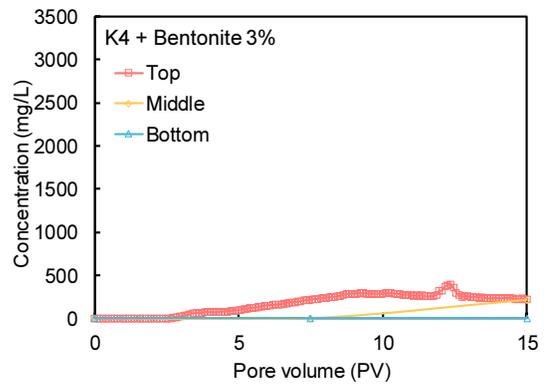
(a) K5 sand



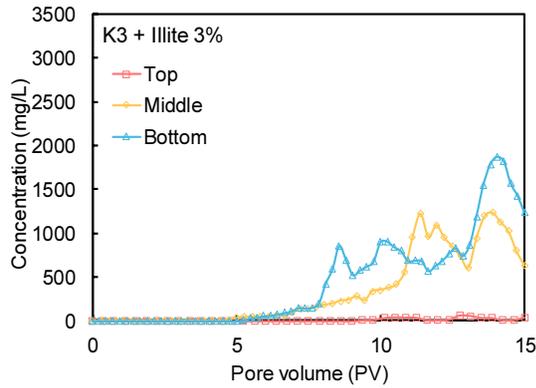
(a) K5 sand



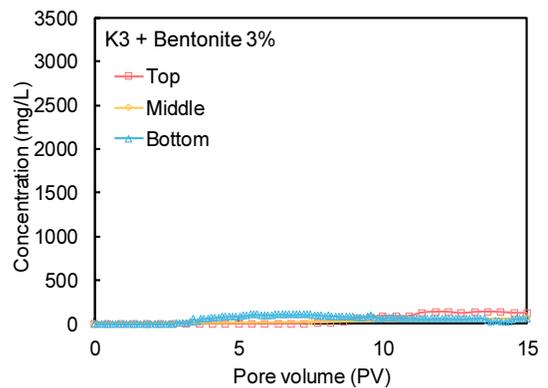
(b) K4 sand



(b) K4 sand



(c) K3 sand



(c) K3 sand

Fig. 8. Observed BTCs of 3% Illite for (a) K5 Sand, (b) K4 Sand and (c) K3 Sand

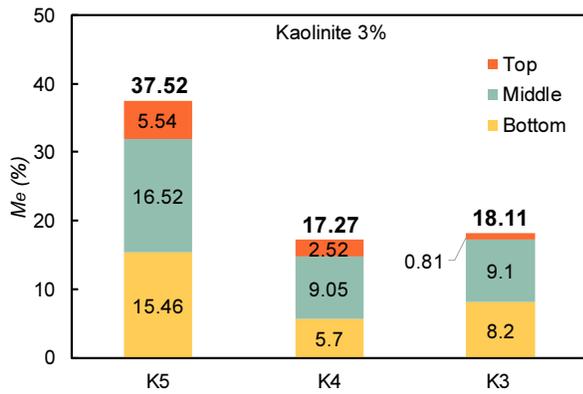
Fig. 9. Observed BTCs of 3% Bentonite for (a) K5 Sand, (b) K4 Sand and (c) K3 Sand

상부에서 대부분의 벤토나이트 입자가 유출된 것으로 생각된다. 이와 같이 점토의 종류에 따라 상이한 상부, 중부, 하부에서의 세립토 유출량은 점토의 팽창성이나 점토 광물 종류가 세립토 이탈에 크게 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

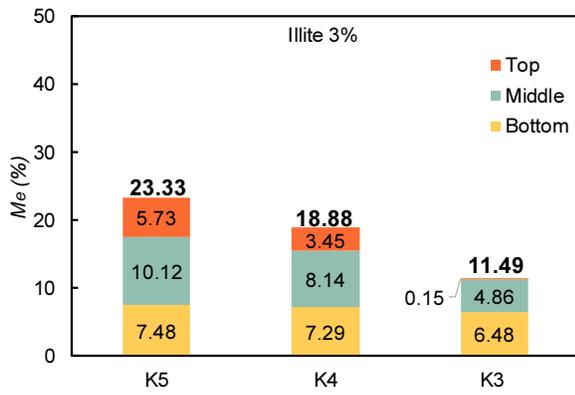
카올리나이트와 일라이트의 경우 중/하부와 상부와의 유출량 차이는 K3모래의 경우 K4, K5모래에 비해 크게 나타났다(Figs. 7 and 8). 이를 통하여 상대적으로 입자가 큰 모래의 경우 더 큰 공극으로 인하여 중력의 효과가 더 크게 나타남을 알 수 있다. K3모래의 큰 공극분포는 탈착된 점토의 중력에

의한 하방향 이동을 더 자유롭게 하여 Figs. 7(c)와 8(c) 같이 대부분의 세립토가 중/하부에서 유출되는 결과를 나타내는 것으로 사료된다.

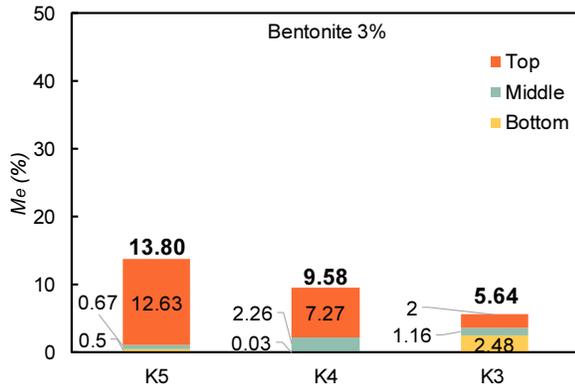
칼럼 내 이온농도가 낮아지면 모래와 점토 간의 인력이 약해져 세립토의 이탈이 쉽게 일어난다(Mesticou et al., 2014; Chetti et al., 2016). 하지만 이온농도가 감소함에 따라 계속적으로 증가하지 않는 유출곡선은 탈착된 점토의 재부착이 발생함을 의미한다. 본 연구에서 설계된 셀보다 흐름방향으로 더 큰 셀을 사용할 경우 flow channel의 길이가 더 길어지기



(a) K5 sand



(b) K4 sand



(c) K3 sand

Fig. 10. Observed BTCs of 3% Bentonite for (a) K5 Sand, (b) K4 Sand and (c) K3 Sand

때문에 재부착 효과는 더 크게 발생할 것으로 생각되며(Won et al., 2023) 실제 현장에서는 이 효과가 더 크게 발생 될 것으로 생각된다.

4.2 점토 광물의 특성에 따른 영향

Fig. 10은 점토에 따른 세립토 유출량을 막대그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 통해 동일한 모래로 이루어진 혼합토에서 점토의 종류에 따라 세립토 유출량에 차이가 나타나

는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 점토를 구성하는 광물의 종류(Table 2, Fig. 3)가 다르기 때문에 세립토 이탈량에 차이가 발생한 것으로 사료된다. 점토를 구성하는 광물의 종류와 그 비율이 다르고 광물이 가지는 특성이 다르므로 점토의 부착에너지에 차이가 발생하며 세립토 이탈량 역시 차이를 보이는 것으로 사료된다. Fig. 10(a)에 나타난 가장 높은 카올리나이트 유출량은 부착에너지 측면에서는 카올리나이트의 부착에너지가 가장 낮은 것임을 의미한다.

하지만 벤토나이트 경우 카올리나이트와 일라이트에 비해 높은 팽창성을 가지고 있기 때문에(Hamza, 2016) 부착에너지 뿐만 아니라 세립토 이탈 평가에 팽창성 역시 고려되어야 한다. Fig. 10(c)에 나타난 바와 같이 벤토나이트의 경우 카올리나이트와 일라이트에 비해 낮은 세립토 유출량이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 팽창성이 높은 점토는 공극 막힘을 유발하여 투수를 낮추고 유체흐름에 의한 입자의 이동을 방해하기 때문에(Jung et al., 2018) 벤토나이트의 높은 팽창성이 세립토의 이탈을 감소하게 만드는 것으로 볼 수 있다. 또한 상부 유출부에서 가장 높은 벤토나이트의 유출량(Fig. 10(c))은 중간/하부 유출부 부근에서 벤토나이트의 높은 팽창량으로 인한 폐색현상이 나타났음을 의미한다.

Figs. 10(a)와 (b)에서 나타난 바와 같이 일라이트의 세립토 이탈량이 카올리나이트보다 더 적게 측정되었다. 이는 Seghir et al. (2014)에 나타난 연구 결과와 일치하며 이를 통하여 입자 종횡비의 크기가 클수록 세립토 이탈량이 감소하는 것을 볼 수 있다(Won et al., 2021). (일라이트는 카올리나이트 보다 더 긴 종횡비를 가지고 있다(Inoue, 1995)). 벤토나이트 역시 카올리나이트에 비해 약 500배 가량 높은 종횡비가 클수록 점토의 이탈량이 감소하는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 모래의 입경 크기, 점토 광물의 특성에 따른 세립토 이탈 현상을 실내 내부침식 칼럼 실험을 통하여 분석하였다. 3종류의 모래(K5, K4, K3)와 점토 광물 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 벤토나이트(Bentonite)로 구성된 총 9종류의 모래-점토 혼합토를 이용하여 세립토 이탈량을 측정하고 각 영향인자들이 내부침식에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 동일한 점토로 구성된 모래-점토 혼합토에서 세립토 이탈량이 K5 > K4 > K3 순서로 나타났다. 이는 크기가 작은 모래 입자가 유량에 따른 동유체력을 더 많이 받아 점토의 탈착 현상이 증가하는 것으로 사료된다.
- (2) K3모래의 중/하부 높이의 세립토 이탈량이 K4, K5모

- 래에 비해 높게 측정되었다. 이는 입자가 큰 모래일수록 더 큰 공극으로 인해 중력의 영향으로 하방향 이동이 더 자유롭게 이루어지기 때문이라고 생각된다.
- (3) 팽창성이 큰 벤토나이트의 경우 세립토 이탈량이 낮게 측정되었다. 이는 공극 막힘을 유발하고 공극을 통한 유체의 흐름을 방해하여 전체적으로 유체 흐름에 의한 벤토나이트의 이탈을 감소시키고 벤토나이트의 이탈이 상부 유출부로 집중됨을 유발하였다.
- (4) 본 연구에서는 중형비가 큰 점토(벤토나이트 > 일라이트 > 카올리나이트)일수록 세립토 이탈량이 낮게 측정되었다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022RIC1C1007296)이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Ahfir, N.D., Benamar, A., Alem, A., and Wang, H. (2009). Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles: A laboratory study. *Transport in Porous Media*, Vol. 76, pp. 289-307.
- ASTM D4254. (2006). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*. West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials.
- ASTM D4253. (2000). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. ASTM International.
- ASTM D854-00. (2000). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. American Society for Testing and Materials.
- Bendahmane, F., Marot, D., and Alexis, A. (2008). Experimental parametric study of suffusion and backward erosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 57-67.
- Chang, D.S., and Zhang, L.M. (2011). A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 34, No. 6, pp. 579-589.
- Chetti, A., Benamar, A., and Hazzab, A. (2016). Modeling of particle migration in porous media: application to soil suffusion. *Transport in Porous Media*, Vol. 113, pp. 591-606.
- Choe, Y., Choi, H., and Won, J. (2022). Suffusion of a sand-clay mixture: impact of the ionic-concentration gradient, clay type, sand-grain size and hydraulic gradient. *Géotechnique*, pp. 1-15.
- Fell, R., and Fry, J.J. (2013). State of the art on the likelihood of internal erosion of dams and levees by means of testing. *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, Vol. 1, pp. 1-99.
- Fell, R., Wan, C.F., Cyganiewicz, J., and Foster, M. (2003). Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 4, pp. 307-314.
- Hamza, A.A. (2016). *Volume change and strength behavior of expansive clay stabilized with scrap tire rubber*. Master's thesis, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ).
- Inoue, A. (1995). Determination of aspect ratios of clay-sized particle. *Clay Science*, Vol. 9, No. 5, pp. 259-274.
- Jiang, N.J., Soga, K., and Kuo, M. (2017). Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 143, No. 3, 04016100.
- Jung, J., Cao, S.C., Shin, Y.H., Al-Raoush, R.I., Alshibli, K., and Choi, J.W. (2018). A microfluidic pore model to study the migration of fine particles in single-phase and multi-phase flows in porous media. *Microsystem Technologies*, Vol. 24, pp. 1071-1080.
- Kim, W.Y., Lim, J.Y., Mok, Y.J., and Jung, Y.H. (2016). A comparative study on geotechnical system response probabilities of fill dams in Korea using internal erosion toolbox. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 36, No. 2, pp. 245-258.
- Mesticou, Z., Kacem, M., and Dubujet, P. (2014). Influence of ionic strength and flow rate on silt particle deposition and release in saturated porous medium: experiment and modeling. *Transport in Porous Media*, Vol. 103, pp. 1-24.
- Seghir, A., Benamar, A., and Wang, H. (2014). Effects of fine particles on the suffusion of cohesionless soils. Experiments and modeling. *Transport in Porous Media*, Vol. 103, No. 2, pp. 233-247.
- Tombác, E., and Szekeres, M. (2006). Surface charge heterogeneity of kaolinite in aqueous suspension in comparison with montmorillonite. *Applied Clay Science*, Vol. 34, No. 1-4, pp. 105-124.

- Wan, C.F., and Fell, R. (2004). Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 4, pp. 373-380.
- Wan, C.F., and Fell, R. (2008). Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 3, pp. 401-407.
- Won, J., Choe, Y., Yang, Y., and Choi, H. (2023). Impact of clay particle reattachment on suffusion of sand-clay mixtures. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, doi:10.1016/j.jrmge.2022.12.013
- Won, J., Kim, T., Kang, M., Choe, Y., and Choi, H. (2021). Kaolinite and illite colloid transport in saturated porous media. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 626, 127052.
- Won, J., Kim, T., Kang, M., Choe, Y., and Choi, H. (2022). Suffusion of sand-clay mixture by three-staged change of ionic strength. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 59, No. 11, pp. 2008-2013.
- Xu, Y., and Zhang, L.M. (2009). Breaching parameters for earth and rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 12, pp. 1957-1970.
- Zhong, C., Le, V.T., Bendahmane, F., Marot, D., and Yin, Z.Y. (2018). Investigation of spatial scale effects on suffusion susceptibility. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 144, No. 9, 04018067.

Received	March 8, 2023
Revised	March 9, 2023
Accepted	March 20, 2023