

계절별 수온에 따른 점토의 침강압밀 특성 연구

The effect of seasonal water temperature on sedimentation characteristics of dredged clay

옥영석¹⁾, Youngsuk Oak, 안용훈²⁾, Yonghoon An, 이철호³⁾, Chulho Lee, 최항석⁴⁾, Hangseok Choi

¹⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, Graduate student, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.

⁴⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수, Associate professor, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.

SYNOPSIS : The sedimentation rate of particles in a suspension is a function of particle size, initial slurry water content and salinity. Many researches conducted on the behavior of dredged soils have centered on such factors. However, there have been few attempts to assess another important influence factor of seasonal water temperature on designing the placement of dredged materials. In this paper, the effect of seasonal water temperature on sedimentation characteristics of dredged clay was investigated with consideration of three different water temperatures, that are 5°C, 15°C, 35°C, which represent critical water temperatures in winter, spring or fall, and summer, respectively. A series of experimental results reveal that the sedimentation rates for the water temperature of 15°C and 35°C are very similar each other, but that of 5°C that represents a winter season leads to a considerably delayed sedimentation compared to the others. This may be attributable to the retardation of ion-leaching from clay particles at low water temperature.

Keywords : sedimentation rate, seasonal temperature variation, ion-leaching

1. 서론

준설 매립시 침강과정과 압밀과정에 대한 명확한 이해는 준설 매립계획 및 장기 거동 침하 예측에 있어서 매우 중요한 요소이다. 침강형태는 토립자의 침강시 입자간에 서로 영향을 미치지 않고 다른 입자와 응집하지 않는 단독입자로 침강하는 경우와 서로 다른 입자간의 충돌로 입자들이 응집해서 침강하는 경우로 크게 분류할 수 있다.

토립자의 침강에 영향을 미치는 요인에 대한 연구는 일반적으로 초기 슬러리 함수비, 투기방법 및 염도 등에 대해서만 실시되어 왔고(유남재 등, 2000; 구자갑, 2003), 온도에 의한 침강거동에 대해서는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 토립자의 침강과정에 수온이 미치는 영향을 파악하기 위해 항온 항습기를 사용하여 계절별로 가정된 특정 온도로서 여름 35°C, 봄·가을 15°C, 겨울 5°C에 해당하는 온도로 고정하여 슬러리 함수비 300%, 500%, 700%, 900%, 1100%, 1300%에 대하여 침강압밀시험을 수행하였다. 침강과정에서 생기는 상층액의 용존 이온도와 온도와의 관계를 규명하여 계절별 온도에 따른 침강거동

특성을 파악하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 침강과정에 미치는 온도의 영향

침강과정에서 슬러리의 용존 이온도가 달라짐에 따라 토립자의 확산 이중층의 팽창 정도가 달라지므로 침강속도에 영향을 준다. 용존 이온이란 용매와 용질이 반응하여 용질에 흡착되어 있는 이온이 용탈(leaching)되어 용매에 녹아 있는 이온이다. 용질에서 이온의 용탈정도는 용매(물)의 온도와 비례 관계가 있으므로 온도가 높아지면 더 많은 이온이 용탈될 수 있다. 만약 겨울철에 준설 매립이 이루어진다면 낮은 수온이 토립자에 흡착되어 있는 이온의 용탈이 적어지므로 슬러리의 용존 이온도가 낮아지게 된다. 슬러리의 낮은 용존 이온도는 토립자의 확산 이중층을 팽창시켜 침강속도를 감소하게 한다. 이는 상층액에서의 용존 이온도를 전기 저항값을 측정함으로써 간접적으로 비교 가능하다. 용존 이온도가 낮으면 전류가 잘 흐르지 못하기 때문에 전기 저항값은 증가한다. 즉, 전기 저항과 용존 이온도는 반비례 관계가 된다.

3. 시험내용 및 방법

3.1 시료의 준비와 물성시험

본 연구에서는 실제 해안에서 채취한 준설토 대신 균등한 물성치 유지가 용이한 카올리나이트를 이용하여 침강압밀 과정에 수온이 미치는 영향을 연구하였다. 실험에 사용된 카올리나이트의 기본 물성치는 다음의 표 1과 같으며 통일분류법에 의하여 CH로 분류되었다.

표. 1 시료의 기본물성치

구분	흙의 분류	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI, %)	비중 (Gs)
Kao	CH	67.2	30.8	36.4	2.65

실험에 사용한 카올리나이트는 일반 판매업체에서 구한 것으로 순수 카올리나이트(kaolinite) 점토광물이 아니고 약간의 분순물이 함유되어 있다. 따라서 XRD 분석을 통해 카올리나이트 시료의 성분을 확인한 결과 표 2와 같은 결과를 얻었다. 카올리나이트내에 석영(Qtz), 할로이사이트(Ha), 일라이트(III), 백운모(Mu), 녹니석(Chl)이 약 48% 함유되어 있음을 알 수 있다. 특히, 본 시료 내에는 montmorillonite가 함유되지 않아 점토 입자사이의 확산 이중층구조에 대한 영향은 비교적 적을 것이라 판단된다.

표. 2 XRD 분석결과

구 성	Qtz	Ha	Ka	Mu+III	Chl
함유량 (%)	9.2	3.1	62.0	7.0	18.7

3.2 온도별 침강과정 시험

본 연구에서는 카올리나이트에 대하여 동일한 슬러리 함수비 조건에서 슬러리 온도 차이에 의한 침강

속도를 비교하고 상층액의 전기 저항을 측정함으로써 이온의 용탈정도를 비교하였다. 침강시험은 항온 항습기(그림 1)를 사용하여 계절별 특정 온도를 모사하기 위해 여름 35℃, 봄·가을 15℃, 겨울 5℃에 해당하는 온도로 고정하여 슬러리 함수비 300%, 500%, 700%, 900%, 1100%, 1300%에 대하여 침강압밀시험을 수행하였다. 침강압밀시험은 시간에 따른 계면고 변화가 발생하지 않고 과잉간극수압이 완전 소산했을 때 시험을 종료한다(최항석 등, 2006, 2007).



(a) 항온 항습기 외부 모습



(b) 항온 항습기 내 시료

그림 1. 온도에 따른 침강압밀시험

전기 저항 탐침장치(그림 2)를 사용하면 침강과정 완료 후 시료 표면위에 생긴 상층액의 저항을 측정할 수 있다. 전기 저항 시험은 그림 3과 같이 상층액에 전류를 흘려 발생하는 전위차를 측정하여 저항값을 산출하고 이를 통해 온도별로 실시한 침강시험에 대해서 상층액의 용존 이온도를 간접적으로 비교할 수 있다.

전기 저항 탐침장치(그림 2)는 전기 저항 측정을 위한 LCR Meter(전압은 1.275V이고 주파수는 100kHz)와 본 연구를 위해 제작된 전기 저항 탐침(two-terminal방식)을 사용하여 중심전극과 외부전극에 각각 두 쌍의 동축 전선을 연결하여 저항을 측정)으로 구성되어 있다(Lee, 2003).

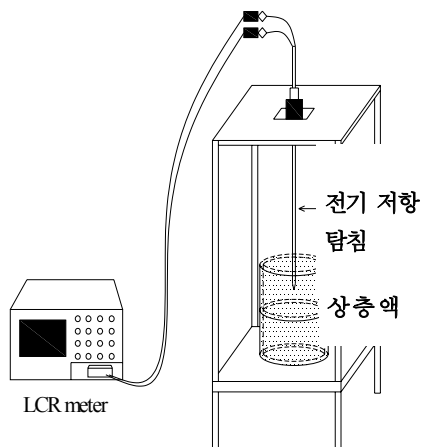


그림 2 전기 저항탐침 측정

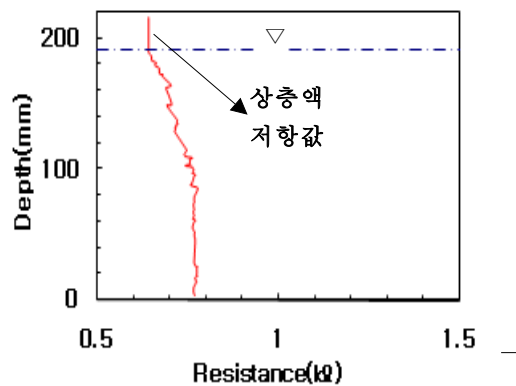


그림 3 깊이별 전기 저항 측정

4. 침강압밀시험 결과

4.1 온도별 계면고 높이변화

그림 4에서 그림 9는 카올리나이트 시료에 대한 슬러리의 온도별 시간경과에 따른 계면고 변화를 초기 슬러리 함수비에 따라 침강압밀곡선으로 나타낸 것이다. 또한 Yano가 1985년에 제안하였던 방법에 의해 시료에 대한 자중압밀의 시·종점을 파악하기 위해 시간축을 대수로 표현하였다.

실험결과에서 보듯이, 온도 35℃의 침강속도는 온도 15℃의 침강속도에 비해 조금 빠른 경향을 보이거나 차이가 미미하게 나타났다. 하지만 온도 5℃에서의 침강속도는 온도 15℃와 온도 35℃의 침강속도에 비해 매우 느린 경향을 보이고 있다. 이는 준설토 매립시 침강속도가 계절에 따라 수온의 영향을 받을 수 있기 때문에 이를 준설토 투기계획에 적절히 반영해야 함을 알 수 있다. 즉, 겨울철에는 실제 준설토 침강압밀속도가 실험실에서 예측한 속도보다 상당히 늦어질 수가 있다.

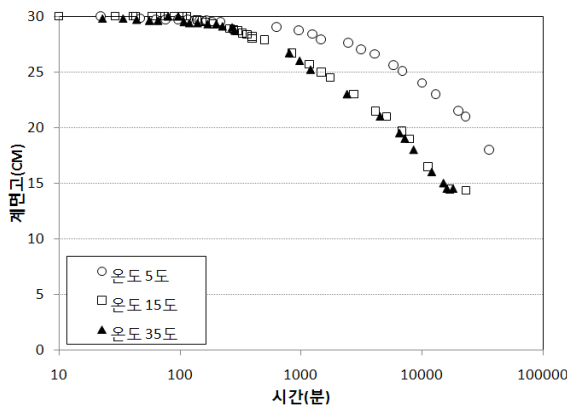


그림 4 초기 슬러리 함수비 300%에 침강곡선

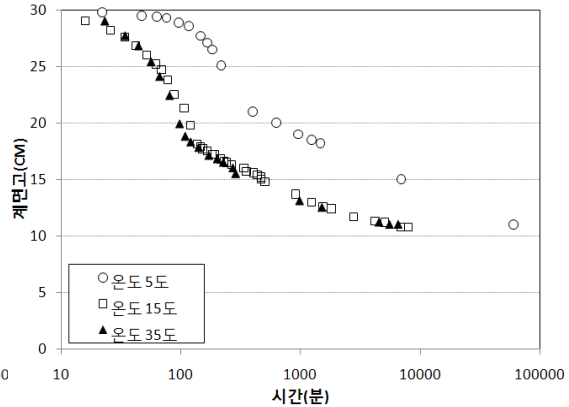


그림 5 초기 슬러리 함수비 500%에 대한 침강곡선

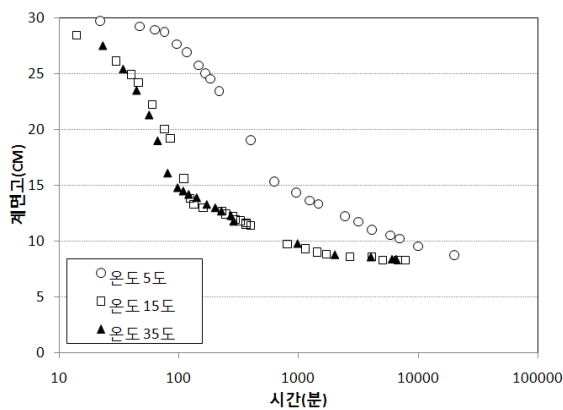


그림 6 초기 슬러리 함수비 700%에 대한 침강곡선

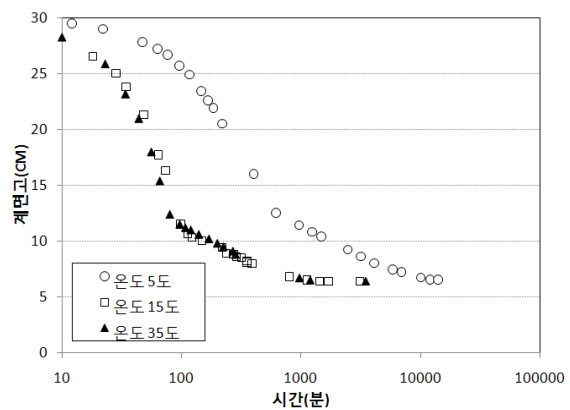


그림 7 초기 슬러리 함수비 900%에 대한 침강곡선

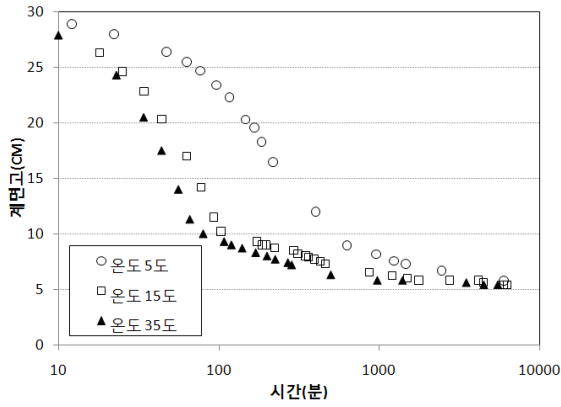


그림 8 초기 슬러리 함수비 1100%에 대한 침강곡선

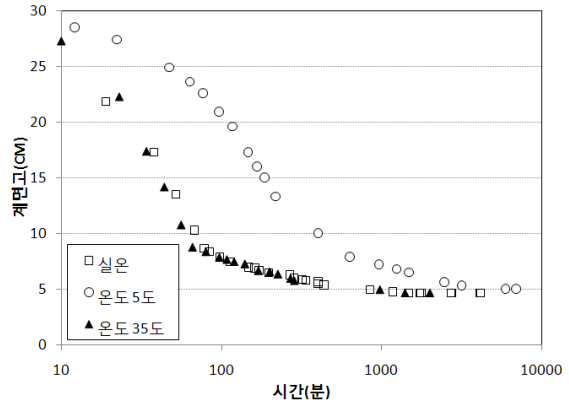


그림 9 초기 슬러리 함수비 1300%에 대한 침강곡선

표 3에서는 카올리나이트 시료에 대한 슬러리 온도별 침강압밀시험 결과에서 자중압밀시점 및 자중압밀 종점을 비교하고 있다. 자중압밀시점은 침강속도가 현저히 느려지는 시점으로 추정하였고, 시간에 따른 계면고 변화가 없는 시점을 자중압밀종점으로 추정하였다. 그리고 시간-침하량 관계를 양대수 눈금으로 나타낸 침강곡선에서 자중압밀 시작시점과 종료시점을 산정한 후 식 (1)을 이용하여 그 기울기를 계산함으로써 침강압밀계수(C_s)를 산정하였다.

$$\log H = \log h_1 - C_s \cdot \log t \quad (1)$$

여기서, H = 임의 시간의 계면고

h_1 = 1mim에서 $H=h_1$ 으로 되는 높이를 나타내는 상수

C_s = 침강압밀계수

t = 시간

표 3에서 보듯이 동일한 초기 슬러리 함수비 상태에서는 온도가 증가함에 따라 자중압밀시·종점시간이 빨라지며 침강압밀계수가 증가하는 경향을 보이고 있다.

표 3. 자중압밀 시작시점과 종료시점 추정과 침강압밀계수

초기 함수비 (%)	온도	자중압밀시점		자중압밀종점		침강압밀 계수 (cm/min)
		t_0 (min)	H_{t_0} (cm)	t_{100} (min)	$H_{t_{100}}$ (cm)	
300	5°C	1	30	4077	26.6	0.014
	15°C	1	30	839	26.7	0.017
	35°C	1	30	800	26.7	0.017
500	5°C	400	21	60037	11.2	0.125
	15°C	137	18.1	5069	11.3	0.133
	35°C	120	18.3	4500	11.2	0.135
700	5°C	627	15.3	20000	8.7	0.163
	15°C	134	13.8	2000	8.8	0.166
	35°C	97	14.8	1710	8.6	0.172
900	5°C	610	12.5	10020	6.7	0.222
	15°C	98	11.5	1128	6.5	0.234
	35°C	80	12.4	975	6.7	0.246
1100	5°C	627	9	6000	5.8	0.194
	15°C	103	10.2	1773	5.7	0.198
	35°C	80	10	975	5.7	0.218
1300	5°C	627	7.9	5908	5	0.204
	15°C	80	8.4	1178	4.8	0.208
	35°C	66	8.8	975	5	0.209

4.2 용존 이온도와 전기 저항관계

초기 슬러리 함수비에 따라 온도별 상층액의 전기 저항을 표 4와 그림 10에 나타냈다. 온도 15°C와 온도 35°C에서는 상층액의 전기 저항이 비슷하게 산정이 되었지만 온도 5°C에서는 상층액의 전기 저항이 온도 15°C와 온도 35°C에 비해 크게 측정되었다. 이는 온도가 낮은 경우 카올리나이트에 흡착되어 있는 이온의 용탈(leaching)이 적어 토립자의 확산 이중층이 온도 15°C와 온도 35°C 경우에 비하여 크게 팽창하므로 침강속도가 감소하게 된다.

표 4. 온도별 상층액 전기 저항

초기 슬러리 함수비 (%)	전기 저항(kΩ)		
	5°C	15°C	35°C
300	0.167	0.143	0.142
500	0.187	0.152	0.149
700	0.163	0.151	0.144
900	0.178	0.153	0.145
1100	0.164	0.159	0.158
1300	0.156	0.154	0.149

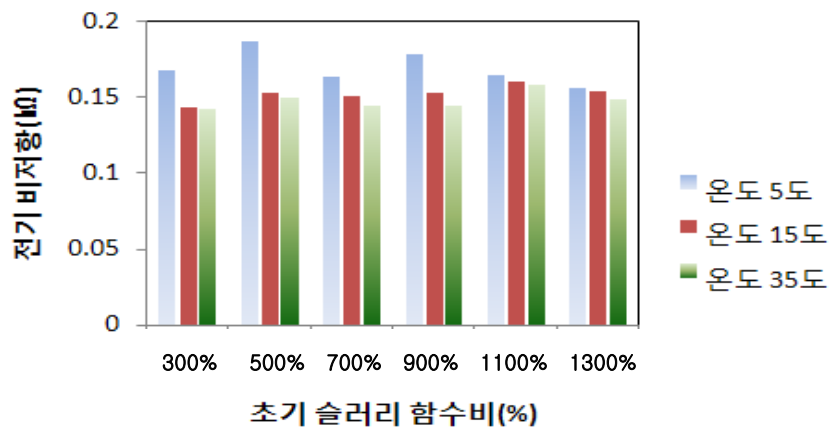


그림 10 온도별 상층액 전기 저항

토립장의 확산 이중층의 두께는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다(Mitchell and Soga, 2005).

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 D k T}{2 n_0 e^2 v^2}} = \text{thickness of double layer} \quad (2)$$

식 (2)에서 확산 이중층 두께(1/K)는 온도의 제곱근에 비례하여 증가하지만, 동시에 유전상수(D)의 제곱근에도 비례한다. 하지만, 유전상수는 온도에 반비례하므로 온도와 유전상수의 곱(D×T)은 일반적인 온도범위에서 거의 일정한 값을 갖는다. 따라서, 자유수에 존재하는 이온의 종류 및 밀도가 일정한 경우에는 온도의 변화가 확산 이중층 두께에 미치는 영향은 미미하다(Mitchell and Soga, 2005). 하지만, 본 연구결과에서는 슬러리 온도에 따라 토립자로부터 이온의 용탈(leaching) 정도가 달라지므로 침강과정에서 슬러리의 용존 이온도가 달라짐에 따라 토립자의 확산 이중층의 두께가 식 (2)에 의해 달라진다. 즉, 만약 낮은 슬러리 온도에서는 토립자에 흡착되어 있는 이온이 적게 용탈되므로 슬러리의 용존 이온도가

낮아지게 된다. 슬러리의 낮은 용존 이온도는 토립자의 확산 이중층을 팽창시켜(1/K 증가) 침강속도를 감소하게 한다.

5. 결론

계절별 수온 변화에 따른 카올리나이트의 침강속도를 파악하고자 온도 5°C, 15°C, 35°C에 대하여 침강 압밀시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 온도 35°C에서의 침강속도는 온도 15°C의 침강속도에 비해 조금 빠른 경향을 보이거나 차이가 미미하게 나타났다. 하지만 온도 5°C에서의 침강속도는 온도 15°C와 온도 35°C의 침강속도에 비해 매우 느린 경향을 보이고 있다.
2. 온도가 낮은 경우 카올리나이트에 흡착되어 있는 이온의 용탈(leaching)이 적게 된다. 이는 상층액에 대한 전기 저항값 비교를 통해 용탈 정도를 간접적으로 비교가 가능하다. 수온이 낮은 경우, 카올리나이트에 흡착되어 있는 이온의 용탈(leaching)이 적어 토립자의 확산 이중층의 팽창이 온도 15°C와 온도 35°C에 비해 크게 일어나기 때문에 침강속도가 감소한다.
3. 본 연구에서는 카올리나이트를 사용하여 침강속도가 계절에 따른 수온의 영향을 받을 수 있음을 보여주고 있다. 이는 당초 계획했던 준설토 투기계획과는 다른 결과가 나올 수 있음을 보여준다. 하지만, 본 연구에서는 실제 준설토 대신 카올리나이트를 이용하여 경향을 파악 하였으므로 실제 준설토에 대한 추가시험을 통해 해석결과의 검증이 필요하다. 향후 다양한 준설토의 특성과 온도에 관한 충분한 데이터가 축적된다면, 국내 준설토매립장 설계에 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 구자갑 (2003), "준설토매립점토의 침강 및 자중압밀 특성", 환경대학교 논문집, 제 35집, pp. 67-78.
2. 유남재, 이종호, 전상현, 이종용 (2000), "준설토의 침강특성에 관한 실험적 연구", 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제 20권, pp. 113-122.
3. 최항석, 최한영, Stark, T.D. (2006), "준설토매립지반의 침하거동 예측을 위한 준설토의 역학적 거동 특성", 한국지반공학회, 준설토매립위원회 학술발표회, 교총회관, 서울, 8월 25일, pp. 75-86.
4. 최항석, 옥영석, 이철호, 이종선 (2007), "인천지역 준설토의 압밀특성 분석과 현장매립 상태 예측방법 연구", 준설토매립 기술위원회 학술발표회 논문집, 교총회관, 서울, 8월 24일, pp 95-104
5. Lee, J. S. (2003), "High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing.", Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
6. Mitchell, J.K., and Soga, K., "Fundamentals of Soil Behavior", 3rd ed., John Wiley, New York, 2005.