

동전기에 의한 점토슬러리의 침강 촉진에 관한 연구

A Study on the Electrokinetic Acceleration of Clayey Particles Settling in Suspension

김대호* · 이명호** · 김수삼***

Kim, Dae-Ho · Lee, MyungHo · Kim, Soo Sam

Abstract

The river maintenance processing has revealed that the river beds in Korea have been significantly polluted in various ways for the last two decades. Thus, the dredging, transportation and landfilling of these contaminated materials are attracting public attention these days. In this study, electrokinetic method was applied in order to accelerate the settling processes of clay particles in suspension and evaluate the factors affecting the settling behaviour. It has been found from the testing results that the settling velocity under the influence of electrokinetics was much faster than the gravitational one, and the water content of slurry soil reduced significantly after the electrokinetic processing. The initial water content of slurry soil should be one of the important factors affecting the settling behaviour as well as variation of water content, and hence the electrokinetic processing would be the cost-effective method for the field application.

Keywords : clay soil, electrokinetics, settling velocity, slurry, river beds, water content

요 지

최근 하천 정비를 통해 하상퇴적토의 오염과 이들 오염준설토의 운송 및 매립에 관한 관심이 고조되고 있으며, 준설토의 함수비를 감소하고자 다양한 노력이 진행되고 있다. 본 연구에서는 점토질 슬러리의 침강을 촉진시키기 위하여 동전기적 현상을 적용하였으며, 실내 실험을 통해 슬러리의 침강 촉진에 영향을 미치는 인자를 파악하고자 하였다. 실험결과 동전기적 침강의 경우 자연 상태의 중력 침강에 비해 입자의 침강속도가 현저히 증가함을 알 수 있었으며, 함수비도 현저히 감소함을 확인하였다. 슬러리의 초기함수비 변화는 점토입자의 침강 및 압밀 거동에 중요한 영향을 미치게 되므로 현장 적용 시 효율을 판단하는 중요한 변수로 작용할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 점토슬러리, 동전기적 침강, 침강속도, 하상퇴적토, 함수비

1. 서 론

산업 활동의 결과로 발생된 산업부산물(ex. 유독성 오염물질)의 하천 유입은 하천수 뿐만 아니라 하상퇴적토까지 오염시키고 있는 실정이다. 지난 10여 년간 오염된 하상퇴적토를 처리하는 다양한 방법이 제안되어 왔다(US EPA, 1994; US EPA, 1999; Mulligan et al., 2001a; Mulligan et al., 2001b; US EPA, 2005).

오염준설토를 정화시설로 운반하여 정화한 후 매립하는 경우, 슬러리 상태인 준설토는 먼저 미세입자들이 침강·퇴적하여 압밀이 완료되기까지 많은 시간을 필요로 하기 때문에 고함수비 준설토의 침강 및 압밀을 촉진시키는 공법에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 과거 준설점토에 대한 침강·압밀특성에 관한 연구는 국내외에서 진행되었다(Kynch, 1952; McRoberts and Nixon, 1976; 김수삼, 1983; US

EPA, 1997; Lee, 2000; 이송 외, 2002; 유남재 외, 2005; Lee, 2007; 이명호 외, 2008).

준설토와 같은 미세 점토입자의 침강형태는 분산침강, 응집침강, 구간침강 및 압밀침강의 4가지로 구분되며, 침강의 형태를 결정하는 요인은 응집(flocculation)의 형성에 영향을 미치는 염분의 농도, 침강 단계의 최종함수비와 침강속도에 영향을 미치는 슬러리의 농도 등이 있다(Imai, 1980; Bowden, 1988). 점토-수분-전해질의 시스템으로 구성된 토양을 통해 유체, 전기, 이온 및 열 등이 흐를 수 있으며, 단면을 흐르는 양은 전도계수에 의해 결정된다. 이때 전기의 이동만을 고려한 경우, 전압구배가 토양과 같은 대전된 다공질매체 내에 작용하게 되면 전기삼투(electro-osmosis), 전기영동(electrophoresis), 전기이동(electro-migration)과 같은 동전기현상(electrokinetic phenomena)이 복합적으로 발생하게 된다(Mitchell, 1993; Acar and Alshawabkeh, 1993; Yeung,

*현대산업개발(주) 시원

**교신저자 · 인덕대학 토목환경설계과 교수 (E-mail : mhlee@induk.ac.kr)

***참여회원 · 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수 (E-mail : kimss@hanyang.ac.kr)

1994).

본 연구에서는 준설토의 매립 시 오랜 시간에 걸친 슬러리의 침강거동과 체적 감소에 대한 문제를 극복할 수 있는 공법을 제시하고자 동전기적 현상을 이용한 점토질 준설토의 침강 촉진에 관한 연구를 수행하였다. 이명호 외(2008)의 연구가 슬러리 내에 존재하는 전해질 이온의 영향에 따른 침강거동이라면, 본 연구는 슬러리의 매립 시 초기함수비의 영향에 따른 침강거동이라고 할 수 있으며, 실험 결과를 이용하여 점토의 침강 촉진에 영향을 미치는 인자를 파악하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험장비

칼럼은 점토입자의 침강거동을 관찰하기 위하여 지름 100mm, 높이 500mm의 투명아크릴로 제작되었다. 동전기 적용 시 시간의 경과에 따라 전류를 측정하였고, 전압경사의 변화를 관찰하기 위하여 칼럼의 벽면에 전압 측정용 칩(stainless steel probe)을 40mm 간격으로 설치하였다(Fig. 1 참조). 칼럼의 상부와 하부에는 직류(DC)전류를 공급하기 위하여 전극판(stainless steel disc)을 설치하여 동전기적 침강의 경우 칼럼의 상·하부에 각각 음(-)극과 양(+)극을 적용하였다(김대호, 2008).

2.2 실험방법

점토슬러리의 침강거동에 있어서 초기함수비의 영향을 조사하고자 전압구배를 일정하게 유지하면서 초기함수비를 600%, 1200%, 2400%로 변화시켜 수행하였다(Table 1 참조). 침강실험을 진행하기에 앞서 실험조건에 따라 시료의 초기함수비를 조절한 후 시료의 균질성 확보를 위해 약 2~3 시간에 걸쳐 셰이커(shaker)를 이용하여 카올린 점토와 증류수를 함께 교반하였다. 시료의 교반이 끝난 후, 칼럼에 시료 투기 시 기포 생성을 최소화하기 위하여 깔때기를 사용하였으며 시료의 초기 높이는 400mm로 동일하게 하였다. 칼럼

Table 1. Testing conditions

실험 No.	함수비 (%)	공급 전압 (V)	초기 슬러리 pH
Case 1	600	-	7.83
Case 2	600	80	7.78
Case 3	1200	-	7.76
Case 4	1200	80	7.69
Case 5	2400	-	7.82
Case 6	2400	80	7.73

에 투기하고 남은 시료는 초기함수비와 pH를 측정하여 실험 조건과 동일한지 확인하였다. 실험 중에는 시료의 표면침하량, 전류 및 전압을 측정하였으며, 실험 종료 후에는 시료의 최종 퇴적고에 따라 10~20mm 높이로 층을 나누고 시료를 채취하여 함수비 및 pH를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면침하 vs 시간

본 연구에서는 점토슬러리의 거동을 지배하는 구간을 규정하기 위하여 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 동전기적 침강곡선을 표면침하 vs 시간으로 나타내고, 초기 변곡점까지의 구간을 전기영동 현상이 슬러리의 침강거동을 지배하는 (1) 전기영동에 의한 침강(electrophoresis settling)구간으로, 두 번째 변곡점까지의 구간을 전기영동에서 전기삼투의 영향으로 바뀌는 (2) 천이영역(transition region)구간으로, 두 번째 변곡점을 지나면서 전기삼투에 의한 간극수의 배수가 종료되어 체적 감소가 더 이상 발생하지 않는 (3) 전기삼투 압밀 종료(end of electro-osmosis consolidation)구간으로 정의하였다. Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 전기영동에 의한 침강구간에서는 슬러리의 표면이 선형적으로 급격하게 침하하며, 천이영역구간에서는 침강속도가 현저히 감소함을 알 수 있다.

Fig 3(a)는 초기함수비를 600%로 설정한 경우, 중력에 의

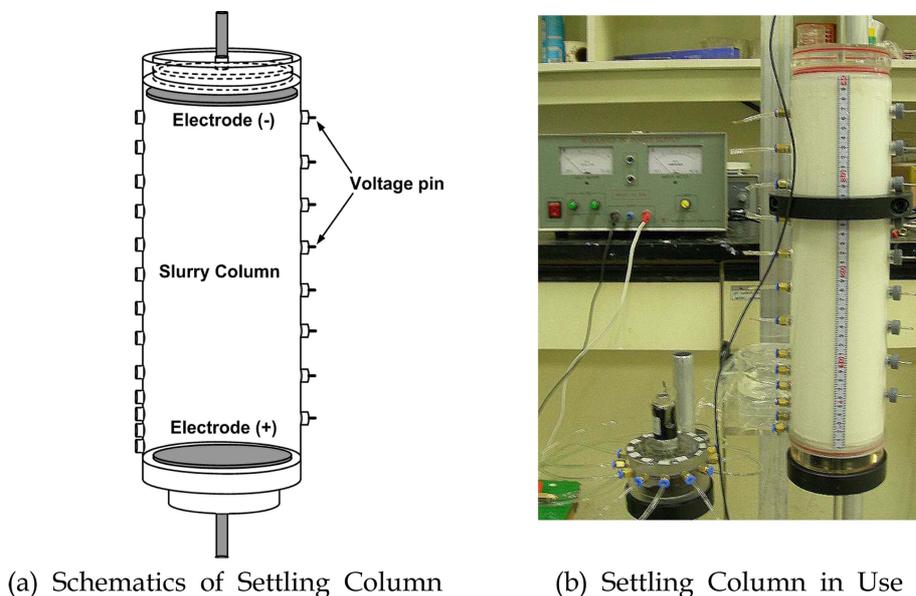


Fig. 1 Testing Apparatus

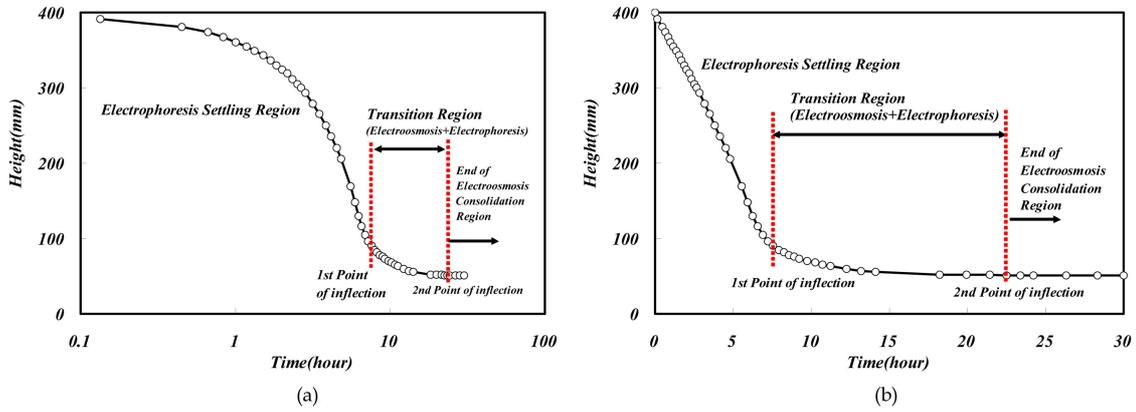


Fig. 2. (a) Log time vs height - electrokinetic settling, (b) time vs height - electrokinetic settling

해 침강하는 슬러리의 거동을 보여준다. 실험 초기 슬러리는 침강하지 않고 부유 상태로 존재하며, 약 30분이 경과하면서 균일한 크기로 응집된 점토입자는 슬러리와 상등수 간의 뚜렷한 계면을 형성하며 침강하는 구간침강(zone settling)의 형태를 보이며 0.15mm/hr의 평균속도로 침강하였다. 실험 시작 후 약 33시간 동안 5mm 내외의 표면침하를 확인하였다. Fig. 3(b)는 Case 1과 유사한 조건의 슬러리에 2V/cm의 전압구배를 적용시킨 경우 슬러리의 침강 거동을 나타낸다. 앞서 언급했던 (1) 전기영동에 의한 침강, (2) 천이영역 및 (3) 전기삼투 압밀종료의 각 구간은 변곡점을 기준으로 구분하였다. 직류전류를 공급하면서부터 약 7시간 동안 전기

영동에 의한 점토입자의 침강축진으로 약 244mm의 표면침하가 발생하였으며, 동시에 칼럼의 하부에는 퇴적층이 형성되었다. 약 7시간 이후 슬러리의 계면과 칼럼의 하부에서 퇴적된 점토층이 만나 동전기에 의한 간극수의 배출이 촉진되어 약 18시간 동안 85mm의 체적 감소가 발생하였다.

Fig. 4는 초기함수비가 1200%인 슬러리의 침강거동을 나타낸다. 중력침강의 경우 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이, 실험 초기 부유 상태로 있던 슬러리가 약 10분 후부터 0.2mm/hr의 평균속도로 침강하여 총 28시간 동안 약 6mm의 계면침하가 발생하였다. 이는 Fig. 3(a)에서 초기함수비가 600%인 경우에 비해 침강이 신속하게 개시되었음을 알 수

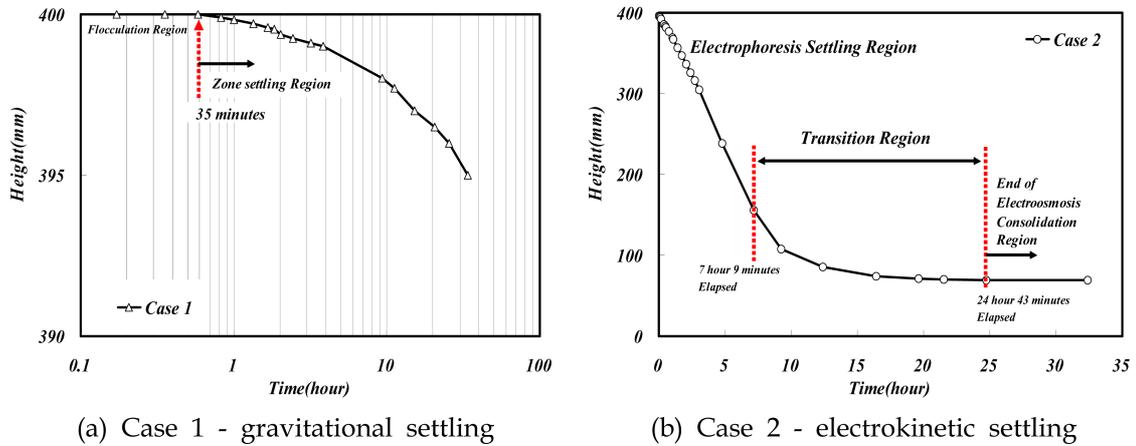


Fig. 3. Time vs height - initial water content: 600%

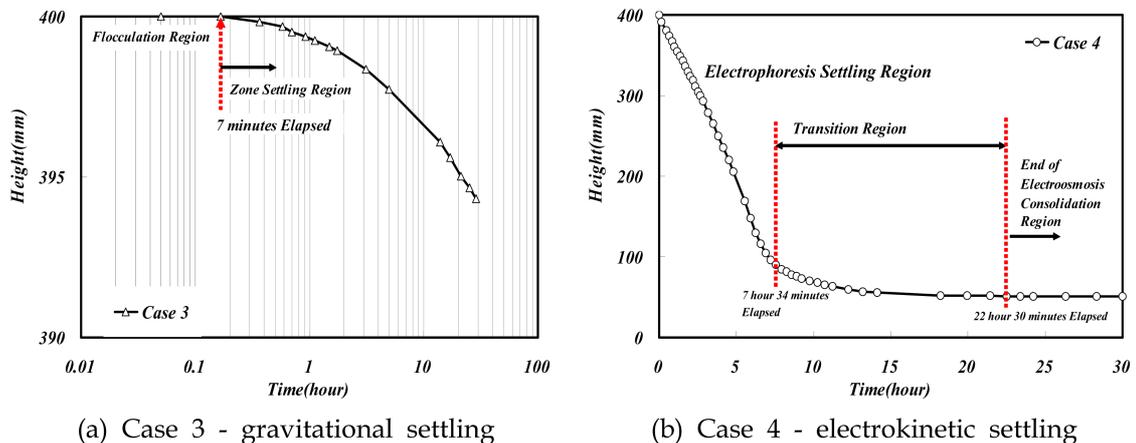
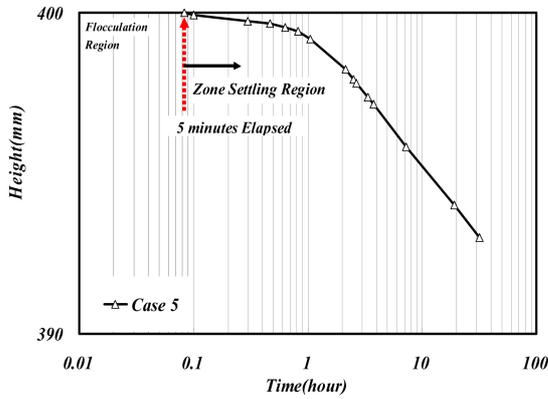
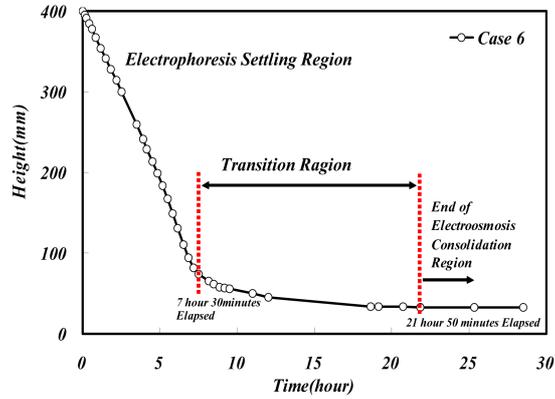


Fig. 4. Time vs height - initial water content: 1200%



(a) Case 5 - gravitational settling



(b) Case 6 - electrokinetic settling

Fig. 5. Time vs height - initial water content: 2400%

있다. Case 3과 같은 초기조건으로 수행된 전기영동에 의한 침강의 경우(Fig. 4(b) 참조), 2V/cm의 전압구배를 약 8시간 동안 적용하여 300mm 이상의 표면침하가 발생되었다. 8시간 이후부터 슬러리의 표면과 칼럼의 하부에서부터 퇴적된 점토층이 만나 동전기에 의한 간극수의 배출이 촉진되어 약 15시간 동안 40mm의 체적 감소가 발생하였다.

Fig. 5는 초기함수비가 2400%인 슬러리의 침강거동을 나타낸다. 초기함수비가 1200%인 슬러리보다 빠른 속도로 구간침강이 발생되었으며(Figs. 4(a) 및 5(a) 참조), 약 5분 경과 후 Case 3보다 조금 빠른 속도(i.e. 0.22mm/hr)로 침강하여 총 31시간 동안 약 7mm의 표면침하가 발생되었다. 전기영동에 의한 침강의 경우(Fig. 5(b) 참조), 약 8시간에 걸쳐 신속한 체적 감소가 발생하여 약 320mm 이상의 표면 침하가 발생하였다. Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이, 10시간 이상의 천이영역 구간에서는 전기삼투에 의한 간극수의 배출과 전기영동에 의한 점토슬러리 침강촉진으로 40mm 이상의 체적 감소가 발생하였다.

3.2 침강속도 vs 초기함수비

Fig. 6은 초기함수비의 변화에 따른 침강속도의 증가율을 나타낸다. 중력침강(i.e. Case 1, 3, 5)의 경우, 구간침강(zone settling)이 발생하는 동안 평균침강속도는 각각

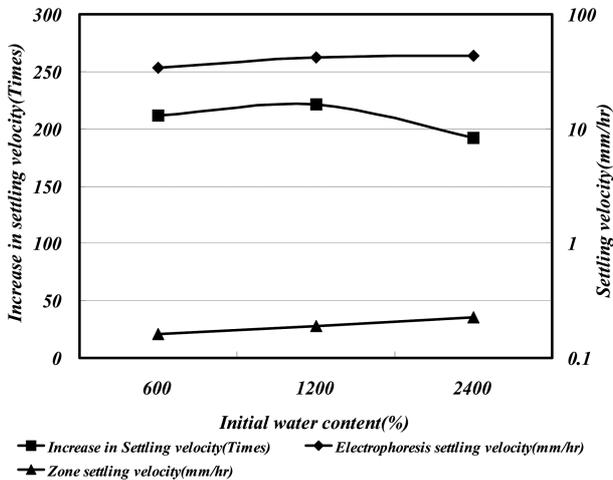


Fig. 6. Increase in settling velocity and settling velocity vs initial water content

0.15mm/hr, 0.2mm/hr, 0.22mm/hr로 측정된 반면, 2V/cm의 전압구배를 적용한 전기영동에 의한 침강(i.e. Case 2, 4, 6)의 경우, 평균침강속도는 각각 34mm/hr, 42mm/hr, 43mm/hr로 각각의 함수비에서 중력침강에 비해 침강속도의 증가율은 각각 211배, 221배, 192배로 나타났다. 이와 같이 동전기의 적용으로 슬러리의 침강속도에 급격한 차이가 발생하는 이유는 실험에 사용된 점토입자의 평균입경이 0.4 μ m로 매우 미세하여 입자간 정전기적 반발력이 커서 침강이 가능한 크기의 플록을 형성하기 어렵기 때문이다. 초기함수비가 증가하는 경우, 중력침강과 동전기에 의한 침강 모두 침강속도가 증가하였는데, 이는 슬러리의 농도가 낮을수록 침강 시 개체농도의 증가에 따른 입자 상호간 간섭의 영향이 줄어들기 때문이라고 판단된다.

3.3 최종평균함수비 vs 초기함수비

Fig. 7은 초기함수비의 변화에 따른 최종평균함수비(실험 종료 후, Case 1, 2, 3, 4, 5, 6의 해체 시)와 각각의 함수비에서 중력침강에 비해 감소된 동전기적 침강에 의한 퇴적토의 최종평균함수비의 감소율을 나타낸다. 초기함수비가 600%, 1200%, 2400%에서 중력에 의한 점토슬러리의 침강 실험이 종료된 때의 최종평균함수비는 각각 688%, 1620%, 2994%로 나타났으며, 2V/cm의 전압구배를 적용시킨 경우

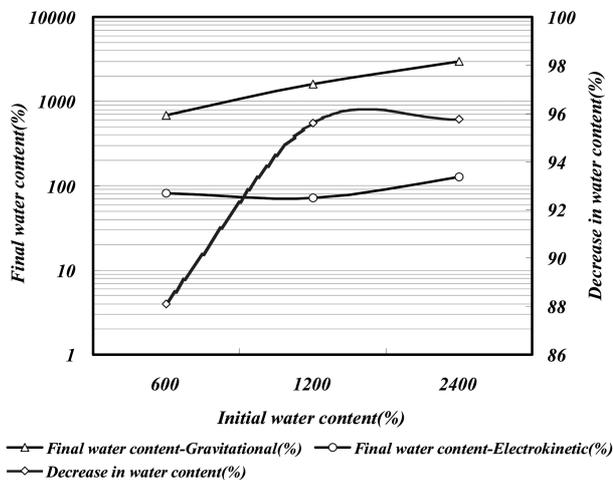


Fig. 7. Final water content and decrease in water content vs initial water content

(i.e. Case 2, 4, 6)의 최종평균함수비는 각각 82%, 71%, 127%로, 중력침강에 대한 동전기적 침강의 최종함수비 감소율은 각각 88.1%, 95.6%, 95.8%로 나타났다. 따라서 점토 슬러리의 중력침강에 비하여 동전기적 침강의 경우, 침강의 촉진뿐만 아니라 최종함수비의 감소에도 매우 효과적이라고 판단된다. 따라서 동전기에 의한 침강속도의 증가와 배수를 촉진시키기 위해서는 고함수비의 점토슬러리가 효과적이라고 판단된다.

4. 결 론

실내실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다:

1. 중력침강의 경우, 입경이 작은 점토입자가 부유한 채 슬러리상태로 존재하였고, 초기함수비의 변화에도 불구하고 침하가 거의 발생하지 않았다. 따라서 미세한 입자로 구성된 오염준설토의 경우, 정화 및 정화 후의 함수비 감소에 어려움이 많을 것으로 예측된다.
2. 동전기적 침강의 경우, 미세 입자에도 불구하고 전기영동의 영향으로 중력침강에 비해 현저히 빠른 평균침강속도를 나타내었고 함수비의 감소도 크게 나타났다.
3. 전기영동에 의한 침강곡선으로부터 시간에 따라 다음과 같이 (1) 전기영동에 의한 침강, (2) 천이영역, 및 (3) 전기삼투 압밀종료의 세 구간으로 분리되며, 이들 구간 별 거동특성은 전체 슬러리의 침강거동에 영향을 주게 된다.
4. 일반적으로 슬러리의 농도가 낮을수록 침강 시 개체농도의 증가에 따른 입자 상호간 간섭의 영향이 줄어들기 때문에 중력침강 시 초기함수비의 증가는 침강속도를 증가시킬 것으로 기대되지만, 전해질 이온의 영향이 거의 없는 경우 부유 상태를 유지할 것으로 판단된다.
5. 동전기적 침강의 현장 적용 시, 준설토를 효과적으로 매립하기 위하여 고함수비 조건을 유지하여야하며 대규모 매립공사의 경우 효율성이 다소 저하될 것으로 사료된다.

참고문헌

김대호(2008) 동전기에 의한 점성토슬러리의 침강 촉진과 중금속 추출에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교 대학원 토목공학과.

김수삼(1983) 한국 서해안(반월지역) 해성점토의 침강에 관한 실험적 연구, 박사학위논문, 중앙대학교 대학원 토목공학과.

유남재, 이종호, 정길수, 박병수(2005) 준설매립지반의 압밀거동에 관한 원심모형실험과 수치해석, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제25권 제4호, pp. 241-247.

이명호, 김대호, 김수삼(2008) 점토슬러리의 침강 및 압밀 거동에 관한 연구, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제28권 제

3호, pp. 143-148.

이송, 심민보, 전종구(2002) 조립토가 혼합된 준설토의 침하량 예측, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제22권 제3호, pp. 263-273.

Acar, Y.B. and Alshawabkeh A.N. (1993) Principles of electrokinetic remediation, *Environmental Science Technology*, Vol. 27, No. 13, pp. 2638-2647.

Bowden, R.K. (1988) *Compression behaviour and shear strength characteristics of a natural silty clay sedimented in the laboratory*, D.Phil. Thesis, Oxford University.

Imai, G. (1980) Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials, *Soils and Foundation*, Vol. 21, No. 1, pp. 7-20.

Kynch, G. J. (1952) A theory of sedimentation, *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 48, pp. 166-176.

Lee, M. (2000) *An experimental and analytical study of electrokinetic consolidation*, M.Sc. Thesis, Oxford University.

Lee, M. (2007) Electrically induced settling and consolidation behaviour of soft soil, *Journal of Civil Engineering*, Springer, Vol. 11, No. 4, pp. 185-191.

McRoberts, E.C. and Nixon, J.F. (1976) A theory of soil sedimentation, *Canadian Geotechnical Journal*, Elsevier, Vol. 13, No. 3, pp. 294-305.

Mitchell, J.K. (1993) *Fundamentals of Soil Behavior*, Wiley Inter-Science.

Mulligan, C.N., Yong, R.N., and Gibbs, B.F. (2001a) An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 85, pp. 145-163.

Mulligan, C.N., Yong, R.N., and Gibbs, B.F. (2001b) Heavy metal removal from sediments by biosurfactants, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 85, pp. 111-125.

US EPA (1994) *Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program*, Remediation Guidance Document, US Environmental Protection Agency Great Lakes National Program Office, EPA 905-B94-003, Chicago.

US EPA (1997) *The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the United States*, National Sediment Quality Survey, Vol. 1, EPA 823-R-97-006, Office of Water, Washington, DC.

US EPA (1999) *Fast track dredged material decontamination demonstration for the port of New York and New Jersey*, Report to congress on the water resources and development acts of 1990, 1992, and 1996, pp. 1-59.

US EPA (2005) *Contaminated sediment remediation guidance for hazardous waste sites*, US Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 540-R-05-012 OSWER 9355.0-85 December.

Yeung, A.T. (1994) *Electrokinetic flow processes in porous media and their applications*, *Advances in porous media*, Elsevier, Vol. 2, pp. 309-395.

(접수일: 2008.4.1/심사일: 2008.5.1/심사완료일: 2009.11.11)