

## 동전기에 의한 점토슬러리의 침강 촉진에 관한 연구

### Settling behaviour of clay slurries enhanced by using electrokinetics

김대호<sup>1)</sup>, Dae-Ho Kim, 김수삼<sup>2)</sup>, Soo Sam Kim, 이명호<sup>3)</sup>, MyungHo Lee

1) 한양대학교 토목공학과 석사, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hanyang University

2) 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hanyang University

3) 한양대학교 토목공학과 연구교수, Research Associate, Dept. of Civil Eng., Hanyang University

**SYNOPSIS** : A completion of settling process takes a lot of time for dredged materials of high moisture content, such as contaminated sludge, in landfill site. In general, additives (e.g. flocculants) are used for reducing settling time of such colloidal material, which results in the increase of sludge volume, and hence much space is required in landfill site. This study is to suggest alternative method in order to enhance the settling process of cohesive clayey soils. A number of gravitational sedimentation tests as well as electrokinetic experiments were conducted to investigate the variation of initial moisture content on the settling behaviour of clay slurry. Surface settlement, electric current and local voltage gradient were monitored during the experiment, and moisture content and soil pH were measured after the experiment. From the results, the application of electrokinetics was found to be effective in volume reduction (i.e. increase of settling velocity and decrease of final moisture content) by comparison with gravitational settling process.

**Key words** : electrophoresis, gravitational settling, kaolinite, moisture content, settling velocity

## 1. 서 론

현재 매립지에 고함수비의 준설토를 매립할 시 침강 시간의 단축을 위하여 응집제를 첨가하여 매립하고 있는 실정이다. 이 경우, 응집제 등의 화학약품으로 인하여 슬러지 생산량이 증가하게 되어 매립지의 공간 부족을 초래하고 있다. 따라서 준설토의 매립 시 응집제의 사용 없이 오염준설토의 침강 속도 및 체적 감소를 촉진시킬 수 있는 시스템이 개발된다면 매립지의 공간 확보와 이로 인한 경제적 파급효과까지 얻을 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 준설토의 매립 시 기존 처리 방법의 문제점인 장기간의 침강 시간과 슬러지 체적 증가의 문제점에 대한 대안 공법을 제시하고자 동전기에 의한 점토슬러리의 침강 촉진에 관한 연구를 수행하였으며, 점토의 침강 촉진에 영향을 미치는 인자를 파악하여 침강에 효과적인 방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 이 론

토양, 간극수 및 전해질로 구성된 지반을 흐르는 물질에는 유체, 전기, 화학이온 및 열 등이 있으며 단면을 흐르는 수량은 전도계수 및 흡 입자와 간극수의 상대적인 이동을 일으키는 추진력에 의하여 결정된다(Mitchell, 1993). 이들 중 전기만을 고려한 경우 전기적 구배가 지반과 같은 대전된 다공질 매체 내에 작용하게 되면 전기삼투, 전기영동과 같은 동전기현상(electrokinetic phenomena)이 복합적으

로 발생하게 된다(Mitchell, 1993). 여기서 전기삼투(electroosmosis)는 외부에서 직류전류가 가해질 경우 액체 상태인 간극수가 이동하는 것인 반면, 고체 상태인 입자가 이동하는 것을 전기영동(electrophoresis)이라 한다. 여기에 추가적으로 외부에서 전류가 가해졌을 때 이온이 반대 극성으로 이동하는 전기이온이동(electromigration)현상이 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험방법 및 실험조건

동전기의 적용 시 초기 함수비에 따른 점토 슬러리의 침강에 관한 영향을 조사하고자 일정 전압구배에 대한 초기 함수비의 변화(600%, 1200%, 2400%)로 일련의 침강실험을 수행하였으며, 실험 조건은 Table 1에 종합하여 나타내었다. 실내 침강 실험을 진행하기 위해 앞서 실험 조건에 따라 초기 함수비를 조절한 뒤 시료의 균질성 확보를 위해 약 1시간에 걸쳐 셰이커(shaker)를 이용하여 카올리나이트 점토와 증류수를 함께 교반하였다. 시료의 교반 종료 후, 칼럼(column)에 시료 투기 시 기포 생성을 최소화하기 위하여 호스로 연결된 깔때기를 사용하였으며 시료의 초기 높이는 모든 case에 대하여 400mm로 동일하게 적용하였다. 동전기 침강의 경우, 칼럼의 상·하단에 설치된 전극(electrode disc)에 각각 음(-)극과 양(+)극을 적용하였다. 칼럼에 투기하고 남은 시료는 초기 함수비와 pH를 측정하여 초기 함수비가 실험 조건과 동일하게 조성되었는지를 확인하였다. 침강실험 중에는 표면침하량, 전류 및 전압을 측정하였으며, 실험 종료 후에는 시료의 최종 높이에 따라 약 15mm의 높이로 분리하여 시료를 채취하였으며 높이에 따른 함수비 및 pH를 측정하였다.

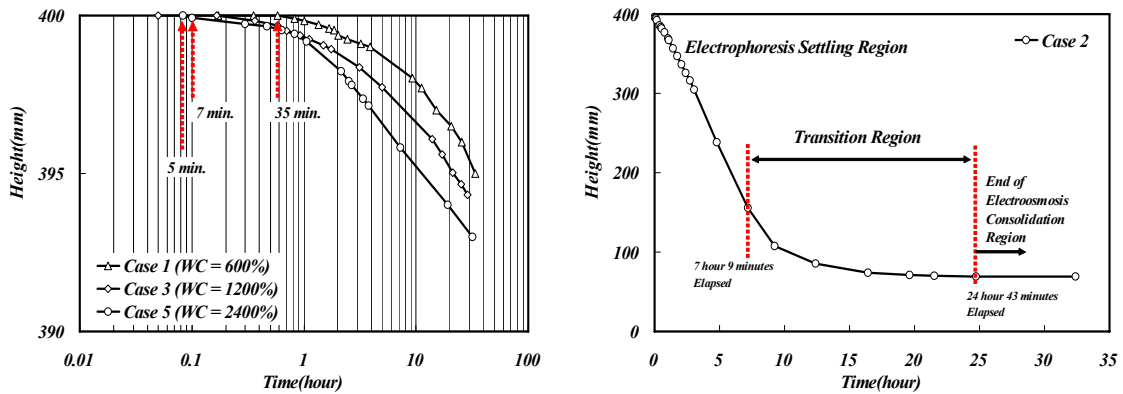
<Table 1> Experimental Condition

Test No.	Water Content(%)	Electrolyte Solution	Applied Voltage (V)
case 1	600	De-ionised	-
case 2	600	De-ionised	80
case 3	1200	De-ionised	-
case 4	1200	De-ionised	80
case 5	2400	De-ionised	-
case 6	2400	De-ionised	80

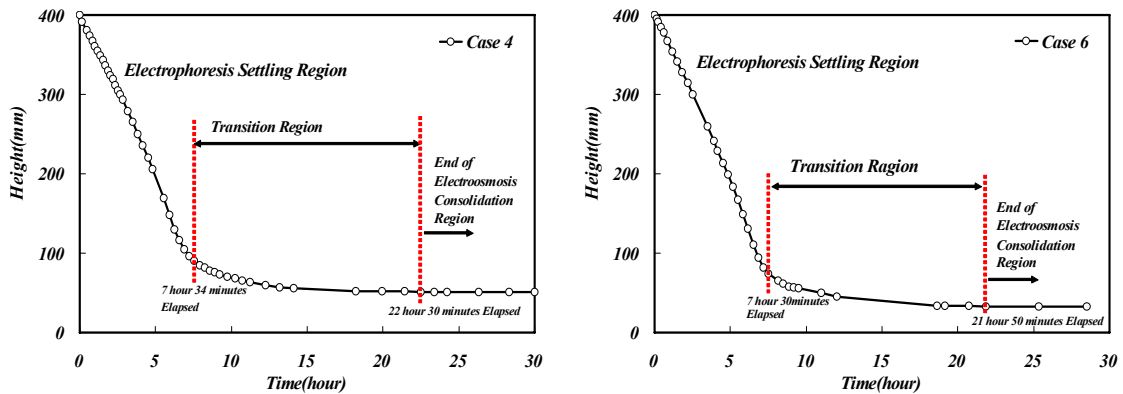
### 4. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)에는 초기 함수비를 600%, 1200% 및 2400%로 설정한 경우 점토슬러리가 중력에 의하여 침강하는 거동을 시간에 따라 나타내었다. 초기 함수비가 600%, 1200%, 2400%의 경우 실험 개시 후 각각 35분, 7분, 5분 동안은 점토슬러리의 계면이 침강하지 않고 부유 상태로 존재하였으며, 이후 물과 점토슬러리 간에 뚜렷한 계면을 나타내며 침강하는 구간침강(Zone settling)의 형태를 보이며 각각 0.15mm/hr, 0.2mm/hr, 0.22mm/hr의 평균 속도로 침강이 진행되었다. 실험 종료 후, 각각의 함수비에서 계면고의 침강 거리는 약 5~7mm로 매우 작은 침강만을 나타내었다. Fig. 1(b)에는 초기 함수비가 600%인 점토슬러리에 2V/cm의 전압구배를 적용시켰을 경우의 시간에 따른 침강거동을 나타내었다. 전기영동 침강구간과 천이영역, 전기삼투 압밀종료구간은 log-계면고축 표현법으로 변곡점을 기준으로 구분하였으며, 이를 Fig. 1(b)의 시간-계면고 그래프에 나타내었다. 본 논문에서 나타내는 모든 시간-계면고 그래프들의 전기영동 침강구간과 천이영역, 전기삼투 압밀종료구간의 구분은 모두 이와 동일한 방법을 사용하였다. 실험 개시 후 약 7시간 동안 전기영동에 의한 점토입자의 침강 촉진에 의하여 약 244mm의 침강이 발생하였으며 동시에 칼럼의 하단부에는 점토의 퇴적이 발생되었다. 약 7시간 이후에는 점토슬러리의 계면과 칼럼의 하단부에서부터 퇴적된 점토층이 만나 동전기에 의한 간극수의 배출

이 촉진되어 약 18시간 동안 85mm의 퇴적고 감소가 발생하였다.



(a) case 1, 3, 5 gravitational settling (b) case 2, electrokinetic settling  
 <Fig. 1> Time vs Height - case 1, 2, 3 and 5

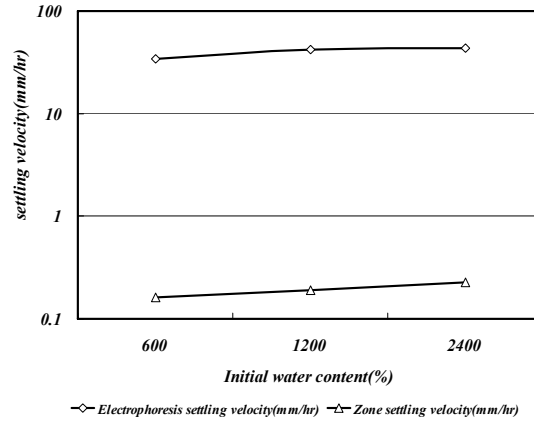


(a) case 4, electrokinetic settling (b) case 6, electrokinetic settling  
 <Fig. 2> Time vs Height - case 4 : 1200%, case 6 : 2400%

Fig. 2에는 초기 함수비를 1200%, 2400%로 설정한 경우 점토슬러리가 동전기에 의해 침강하는 거동을 시간에 따라 나타내었다. Fig. 2(a)에는 초기 함수비를 1200%로 설정한 점토슬러리에 2 V/cm의 전압구배를 적용시켰을 경우의 침강거동을 시간에 따라 나타내었다. 실험 개시 후 약 8시간 동안은 전기영동에 의한 점토입자의 침강촉진에 의하여 310mm의 표면침하량이 발생하였고 동시에 칼럼의 하단부에도 점토의 퇴적층이 형성되었다. 약 8시간이 경과한 뒤 점토슬러리의 표면과 칼럼의 하단부에서부터 퇴적된 점토층이 만나 동전기에 의한 간극수의 배출이 촉진되어 약 15시간 동안 40mm의 퇴적고 감소가 발생하였다. Fig. 2(b)에는 초기 함수비가 2400%인 점토슬러리에 2 V/cm의 전압경사를 적용시켰을 경우의 시간에 따른 침강곡선을 나타내었다. 실험 개시 후 약 8시간 동안 전기영동에 의한 점토슬러리의 침강은 325mm가 발생하였고, 약 14시간의 천이영역구간 동안 동전기에 의한 간극수의 배출과 전기영동에 의한 점토슬러리 침강촉진으로 약 41mm의 퇴적고의 감소가 발생하였다.

Fig. 3에는 초기 점토슬러리의 함수비 변화에 따른 case 1, 3, 5의 평균 침강 속도와 case 2, 4, 6의 전기영동 구간 평균 침강 속도를 나타내었다. 중력에 의한 점토슬러리의 침강을 관찰한 case 1, 3, 5는 구간침강(Zone settling)동안 각각 0.15mm/hr, 0.2mm/hr, 0.22mm/hr의 평균 침강 속도를 나타낸 반면 2 V/cm의 전압경사를 적용 시킨 case 2, 4, 7의 경우는 34.15mm/hr, 42.12mm/hr, 43.4mm/hr의 전기영동 구간 평균 침강 속도를 나타내었다. 이와 같이 중력만이 적용된 case 1, 3, 5에서 침강이 매우 느리게 나타나는 이유는 실험에서 사용된 카올리나이트 점토입자의 평균 입경의 크기가 0.4 $\mu$ m로 매우 미세하여 입자간의 정전기적 반발력이 크기 때문에 침강 가능한 크기의 플록(floc)의 형성이 어려

위 침강이 거의 일어나지 않기 때문이다. 하지만 직류가 적용된 case 2, 4, 6의 점토슬러리에서 침강이 빠르게 발생하는 이유는 음의 전하를 띄고 있는 점토가 하단부의 양(+)극을 향해 이동하는 전기영동 현상의 발생 때문이다. 또한 함수비가 커질수록 중력에 의한 침강과 동전기에 의한 침강 모두 가장 빠른 침강 속도를 나타내었는데, 이것은 점토슬러리의 농도가 낮을수록 침강 시 고체 농도의 증가에 따른 입자 상호간 간섭의 영향이 줄어들기 때문이라고 판단된다.



<Fig. 3> Settling velocity vs initial water content; case 1&2 (WC=600%), case 3&4 (WC=1200%), case 5&6 (2400%)

## 5. 결론

1. 입경이 작은 점성토에 동전기를 적용한 경우, 중력에 의존하여 침강 하는 경우에 비해 상대적으로 빠른 침강 속도를 나타내었다.
2. 초기 함수비에 따른 침강 속도를 비교해 볼 때, 동전기를 적용한 침강 시 초기 함수비가 증가하더라도 침강 촉진 증대 효과는 제한적일 것이라 판단된다.

## 참고 문헌

G. Imai (1980), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", *Soils and Foundation*, Vol. 21, No. 1, 7-20.

E. J. Kynch (1952), "A Theory of Sedimentation", *Transaction of the Faraday Society*, No. 48, 166-176

J. K. Mitchell (1993), "Fundamental of soil behavior", 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.

MyungHo Lee (2007), "Electrically Induced Settling and Consolidation Behaviour of Soft Soil", *Journal of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 11, No. 4, 185-191.

Soo Sam Kim, MyungHo Lee and Dae-Ho Kim (2008), "Electrokinetic Settling and Sedimentation Behavior of Cohesive Soils in Dilute Suspension", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, Taylor & Francis, Vol. 43, No. 8.