

점토슬러리의 침강 및 압밀 거동에 관한 연구

Settling and Consolidation Behaviour of Cohesive Soil Slurry

이명호* · 김대호** · 김수삼***

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

Abstract

This paper demonstrates settling and further consolidation behaviour of dredged clayey soils during landfilling. The effects of initial moisture content, electrolyte type and concentration on settling and consolidation behaviour were examined and evaluated by laboratory column tests. Electrokinetic tests were carried out with modified settling column to compare the soil behaviour under the gravity. From the testing results, the settling velocity increased due to the effects of cations in the electrolyte solution, and electrically induced settlements were found to be greater than those under the gravity.

Keywords : clayey slurry, electrokinetics, electrolyte, moisture content, settling behaviour

요 지

점토질 입자를 다량으로 포함하는 준설토의 매립 시 발생하는 침강 및 압밀 거동에 대하여 조사하고자 일련의 실내실험을 수행하였다. 카울린 점토를 사용하여 초기함수비, 전해질의 종류 및 농도 등 다양한 조건에서 침강실험을 실시하였으며, 침강을 촉진하고 압밀에 의한 체적감소를 극대화하기 위하여 동전기프로세스를 채택하여 자연 상태의 침강 및 압밀 거동과 비교·분석하였다. 실험 결과 전해질 용액에 존재하는 다양한 양이온의 영향으로 침강속도가 증가하였으며, 자연 상태의 침강 거동에 비해 동전기적 침강의 경우 더 많은 침하량을 유발시켰으며 함수비의 감소를 확인하였다.

핵심용어 : 점토슬러리, 동전기, 전해질, 함수비, 침강거동

1. 서 론

여러 다양한 경로를 통해 하천 등으로 유입된 오염물은 하상에 침전되어 수질에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 잠재적인 오염원으로 존재한다(US EPA, 1997). US EPA는 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 수은(Hg), 니켈(Ni) 및 아연(Zn) 등을 가장 유해한 중금속으로 지정하였으며, 정화 사업에 있어서 오염 준설토를 최우선으로 해결해야 할 과제로 결정한다(Cameron, 1992).

우리나라의 경우 무역항 및 연안항의 항로 유지를 위한 준설토사업으로 매년 약 30million/m³ 이상의 준설토가 발생되고 있으며(해양수산부, 2004), 미국의 경우 약 300million/m³의 침전 퇴적물이 선박의 항로를 유지시키기 위하여 준설토되는데 이들 대부분이 중금속 등으로 오염되어 있고, 약 10%는 처리가 불가능할 정도로 심각하게 오염되어 있는 실정이다(US EPA, 1999).

침전물은 여러 다양한 경로를 통해 호수, 강, 강어귀(estuaries), 대양 등으로 이동되면서 저면에 가라앉은 미세한

흙 입자 등으로 유기물(organic matter), 산화철(iron oxides), 탄산염(carbonates), 황화물(sulfides) 및 공업용수(industrial water) 등으로 구성된다. 오염 침전물의 두드러진 특징은 주로 점토질 흙으로 구성되며 유기물을 다량 함유하고 표면적이 넓은 미세입자에 흡착되는 경향이 있으며, 중금속류는 황화물과 결합된 형태로 발견된다(Sposito, 1984; Zagula & Beltinger, 1993; Bourg, 1995).

중금속으로 오염된 흙의 정화를 위한 공법은 다수 알려져 있으나, 오염 침전물의 처리에 대해서는 알려진 바가 거의 없는 실정이다(Mulligan et al., 2001a). 오염 침전물의 주된 구성 물질인 흙의 종류에 따라 상당히 차이가 있기 때문에 육상에서 오염지반에 적용 가능한 기술이라도 오염 침전물에는 효과가 적을 수도 있다(Mulligan et al., 2001b).

본 논문에서는 오염 준설토를 폐기물매립장에 처리할 경우, 이들 고함수비의 미세 점토입자들이 자연 상태에서 침강하여 압밀되는 과정을 조사하고자 하였다. 또한 이들 오염 준설토의 경우, 압밀이 완료되는데 많은 시간이 소요되기 때문에 동전기프로세스를 적용하여 이들 점토입자들의 침강 및

*정회원 · 교신저자 · (주)한준지오택 토양환경연구팀 팀장 (E-mail : mhleecok@paran.com)

**한양대학교 대학원 토목공학과 석사 졸업

***참여회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

압밀을 촉진시키고자 하였으며, 동전기영동(electrophoresis)과 동전기삼투(electroosmosis) 각각의 프로세스가 침강·압밀에 주는 영향을 조사하고자 하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 실험에 사용된 흙 시료는 카울린 점토로서 흰색을 띠며 입자가 매우 고운 특징이 있다. 시료의 물성은 표 1에 나타난 바와 같다. 염화나트륨(NaCl)을 이용하여 다양한 농도의 전해질 용액을 준비하였다. 실내실험 용 중금속으로 유독성 등을 감안하여 아연을 선택하였으며, 질산아연($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)으로 준비한 전해질 용액을 사용하여 중금속으로 오염된 준설토를 모사하고자 하였다.

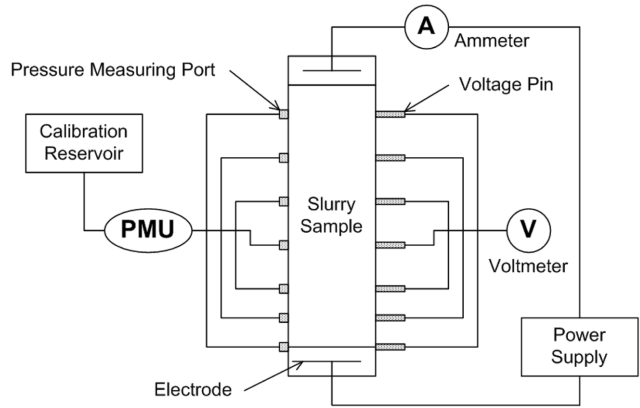
표 1. 카울린 점토의 물성

Typical properties	Value
Average particle size	0.4 μ m
325 mesh residue	0.01 %
Specific gravity	2.58
Liquid limit	42 %
Plasticity index	16 %
pH	7.0
Moisture content	1.0 % max.
Oil absorption	40 ~ 45 g/100g

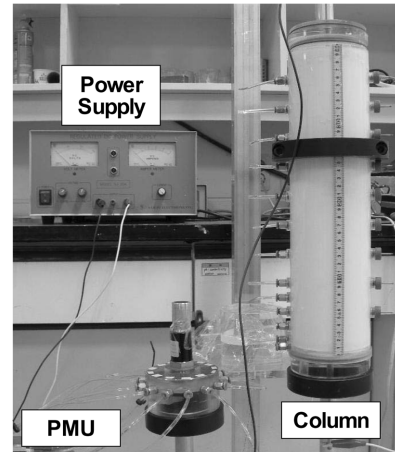
2.2 실험장비

그림 1(a)에 나타난 바와 같이 지름 100mm, 높이 500mm의 칼럼(column)을 이용하여 점토슬러리의 침강거동을 조사하였다. 미세입자들이 침강·퇴적되어 압밀되면서 발생·소멸하는 과잉간극수압의 측정을 위하여 칼럼의 측면에 간극수압포트(pressure port)를 설치하였고, 동전기프로세스 중 시료 내부에 형성되는 전압구배(voltage gradient)를 측정하기 위하여 전압측정침(voltage pin)을 설치하였다. 간극수압의 측정은 압력측정유닛(pressure measuring unit: PMU)을 이용하였으며, 매 측정 시 트랜스듀서의 교정을 통하여 정확도를 높였으며 칼럼의 각 포트에 연결되어 시료 높이에 따른 과잉간극수압의 분포를 파악할 수 있도록 설계되었다(그림 1(b) 참조). 점토슬러리의 동전기적 침강거동을 관찰하기 위하여 칼럼의 상·하부에는 부식 방지를 위한 스테인리스(stainless steel)전극을 설치하였고, 전류계(ammeter)를 통해 직류전원(dc power supply)에 연결하였다.

카울린의 경우, 예비실험을 통해 약 1시간의 혼합으로 균질한 슬러리 상태가 됨을 확인하였다. 점토슬러리의 초기함수비는 무게(흙 시료 & 전해질 용액)의 비로 조절하였고, 약 2시간에 걸쳐 셰이커(shaker)를 이용하여 혼합하였다. 시료 혼합 후, 슬러리는 30mm 내경의 튜브를 통해 칼럼에 주입·설치되었다. 칼럼에 슬러리가 주입된 시점으로부터 실험이 시작되었으며, 시간에 따른 점토슬러리의 침강거동은 시료의 표면침하량을 측정함으로써 이루어졌다. 동전기프로세스의 경우, 침강 중에 시료의 각 지점에서의 전압구배 및 시간에 따른 전류의 변화를 측정하였다. 실험 종료 후, 각



(a)



(b)

그림 1. 동전기 칼럼: (a) 모식도; (b) 구성

지점에서의 시료를 채취하여 함수비, pH 및 중금속의 이온 농도를 측정하였다.

2.3 실험조건

실험은 크게 초기함수비가 500%인 그룹(case1, 2, 3)과 2000%인 그룹(case4, 5, 6)으로 나뉜다. case1의 경우 전해질 용액으로 증류수(distilled water)를 사용하였으며, case3은 해성점토의 침강거동을 모사하고자 0.02M NaCl 용액으로 점토슬러리를 조성하였다. 초기함수비가 2000%인 그룹에서는 case4의 경우 수돗물을 이용하여 슬러리를 준비하였고, case6의 경우 중금속으로 오염된 준설토의 경우를 모사하고자 농도가 약 700mg/L인 아연용액과 혼합하여 점토슬러리를 조성하였다. case2와 case5의 경우, 동전기프로세스에 의한 침강거동을 관찰하기 위하여, case2는 case1과 유사한 초기조건으로, case5는 case4와 유사한 초기조건으로 시료를 준비하고 칼럼의 상·하부에 각각 음(-)극과 양(+극)을 설치하여 음(-)전하를 띠는 점토입자의 침강을 촉진시킬 수 있도록 하였다. 공급전압은 case2의 경우 80V, case5의 경우 40V를 가하였기 때문에 두 시료에 모두 약 200V/m의 전압구배로 직류전류를 공급한 셈이다. 동전기적 침강 중 저항의 변화에 따라 전류가 변화하는 전압고정(fixed voltage)조건으로 동전기 실험을 수행하였다(Yeung et al., 1997). 실험조건은 표 2에 나타난 바와 같다.

표 2. 실험조건

Test No.	Initial H_t ^{a)} (mm)	Initial w ^{b)} (%)	Electrolyte solution	i_e ^{c)} (V/m)	Initial pH	Duration (hr)
case1	400	500	Distilled	-	-	48
case2	400	500	Distilled	200	-	58
case3	400	500	0.02 M NaCl	-	-	57
case4	200	2000	Tap	-	7.7	11
case5	200	2000	Tap	200	7.7	12
case6	200	2000	700 mg/L Zn	-	5.2	10

^{a)} H_t : height, ^{b)} w : moisture content, ^{c)} i_e : voltage gradient.

3. 결 과

3.1 침강거동

그림 2(a)는 초기함수비가 약 500%인 점토슬러리의 시간에 따른 표면침하량을 나타낸다. 증류수로 혼합된 카올린의 경우(case1), 약 50시간의 중력침강으로 2.5% 미만의 침하량(10mm)이 발생하였다. case1은 약 12시간 후 중력침강으로 인한 침하량이 약 4% 정도로 표면침하량의 관측만으로는 대부분의 점토입자들이 부유 상태로 존재하고 있는 듯하다. 해성점토를 모사한 경우(case3), 증류수로 혼합한 경우(case1)보다 비교적 빠른 침강거동을 보여주었다. 시간에 따른 침하량도 약 50시간의 중력침강으로 case1에 비해 10배(25%)정도 크게 나타났다. 동전기적 침강(case2)의 경우, 80V의 직류전류를 공급하자 그림 2(a)에서와 같이 급격한 표면침하가 일어났으며, 약 16시간의 동전기프로세스로 80% 이상의 침하량이 발생되었고 시료의 높이는 약 70mm로 압축되었다.

그림 2(b)는 초기함수비가 약 2000%인 점토슬러리의 시간에 따른 표면침하량을 나타낸다. 수돗물과 혼합된 카올린의 경우(case4), 약 10시간의 침강으로 57% 정도의 침하량(110mm)이 발생하였는데 그림 2(a)에 나타난 case1의 경우보다 상대적으로 빠른 침강거동을 보여주었다. 동전기적 침강(case5)의 경우, case4와 유사한 조건으로 점토슬러리를 준비하였으며 40V의 전압을 가한 뒤 침강거동은 그래프에서 볼 수 있듯이 전류공급 약 2시간 동안 case4와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 이후, 약 3시간에 걸쳐 중력침강의 경우보다 훨씬 빠른 속도로 침강하여 최종 시료의 높이는 약 37mm(침하량 80%)로 압축되었다. 증류수로 오염된 준설토를 모사한 경우(case6), 수돗물로 혼합한 경우(case4)나 동전기적 침강(case5)보다도 훨씬 빨리 침강하여 약 1시간의 중력침강으로 시료의 높이가 절반 정도로 압축되었으며 약 10시간의 침강으로 70% 정도의 침하량(160mm)이 발생하였다.

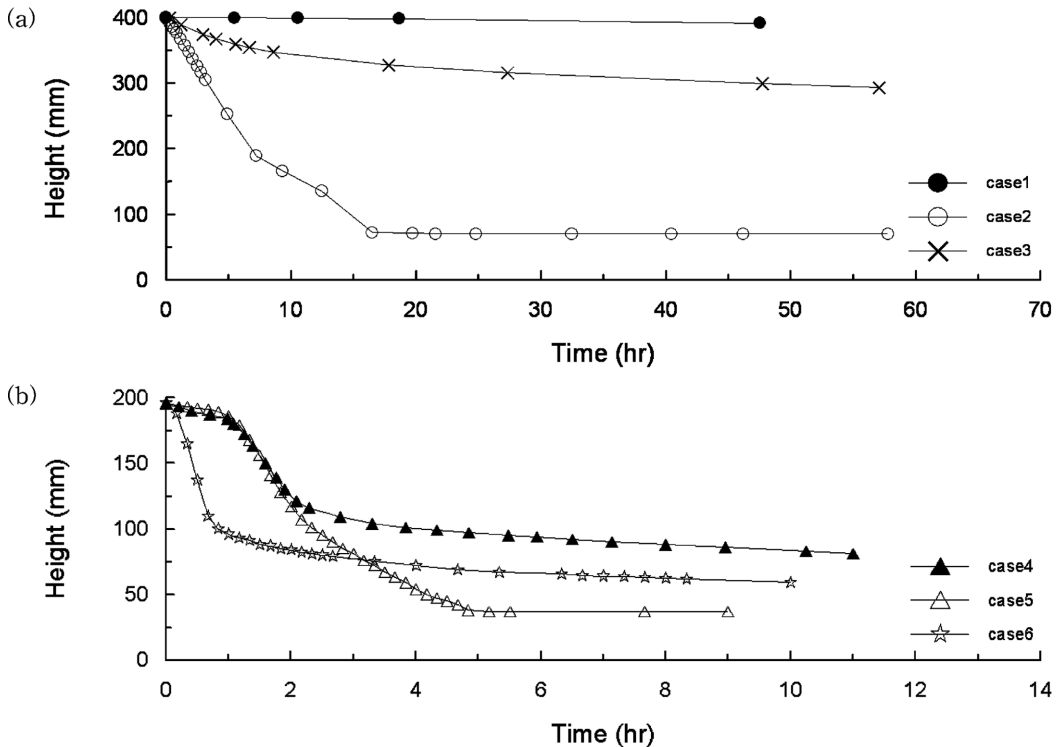


그림 2. 점토슬러리의 침강거동, 표면침하량 vs. 시간 곡선: (a) case1, 2, 3; (b) case4, 5, 6; case1: 500%, 증류수, 중력침강; case2: 500%, 증류수, 동전기적 침강; case3: 500%, 0.02 M NaCl, 중력침강; case4: 2000%, 수돗물, 중력침강; case5: 2000%, 수돗물, 동전기적 침강; case6: 2000%, 700 mg/L Zn, 중력침강

3.2 전류 및 전압구배

그림 3은 case2와 case5에서 측정된 시간에 따른 전류의 변화를 나타낸다. case2의 경우 초기 시료의 높이 400mm에 대해 80V의 전압이 공급되었으며, 최초로 측정된 전류는 60mA이고 이후 약 4시간에 걸쳐 완만하게 증가하다 감소하여 12시간 이후에는 약 20mA까지 떨어졌다. case6의 경우 초기 시료가 약 200mm로 40V의 전압이 공급되었으며, 측정 전류는 13mA에서 약 4시간에 걸쳐 15mA로 증가하였다가 감소하는 경향이 case2의 경우와 유사하다.

그림 4는 case2로부터 동전기프로세스 중 칼럼의 측면에서 측정된 전압구배를 나타낸다. 0시간 및 5시간 프로파일로부터 시료 내에서 형성된 전압구배는 전류 공급 최초 5시간 동안 선형적임을 알 수 있다. 동전기적 침강이 발생됨에 따라 시료 내에 형성된 전압구배는 양(+)극 부근(칼럼의 저면)에서부터 약 50mm까지의 지역에서 급격히 증가하고, 그밖에 시료 대부분의 영역에 걸쳐 감소하는 경향을 보여준다(그림 4 전압구배 프로파일 참조).

3.3 함수비, pH, 아연 추출

그림 5는 침강이 완료된 뒤 측정된 시료의 함수비를 나타낸다. 중력침강(case1)의 경우 초기함수비가 약 500%인 점토슬러리가 침강한 결과 시료의 하단부에서 함수비가 약 350%로 감소하였으나, 시료의 대부분에 걸쳐 함수비가 약 700%까지 증가하였다. 한편, 동전기적 침강의 경우 시료의 함수비는 하부에서 상부로 올라가면서 증가하였지만 함수비의 폭은 약 50~70%로 대략 균질하게 전체적으로 감소하였음을 알 수 있다.

그림 6은 동전기프로세스 후 시료의 pH 분포를 나타낸다. 초기 수돗물의 pH는 8.5였으며, 카올린과 혼합 후 점토슬러리의 pH는 7.7로 감소하였다. 중력침강(case4)의 경우, 침강 완료 후 pH는 7.7로 변화가 없었으나, 동전기적 침강의 경우 동전기프로세스 완료 후 양(+)극 부근에서는 pH가 6 이하로 감소하였으며 음(-)극 부근에서는 9 이상으로 증가하였다.

동전기적 침강이 완료된 후, 유도결합플라즈마(ICP)로 시료 및 상등수(overlying water)에 남아있는 아연이온의 농도

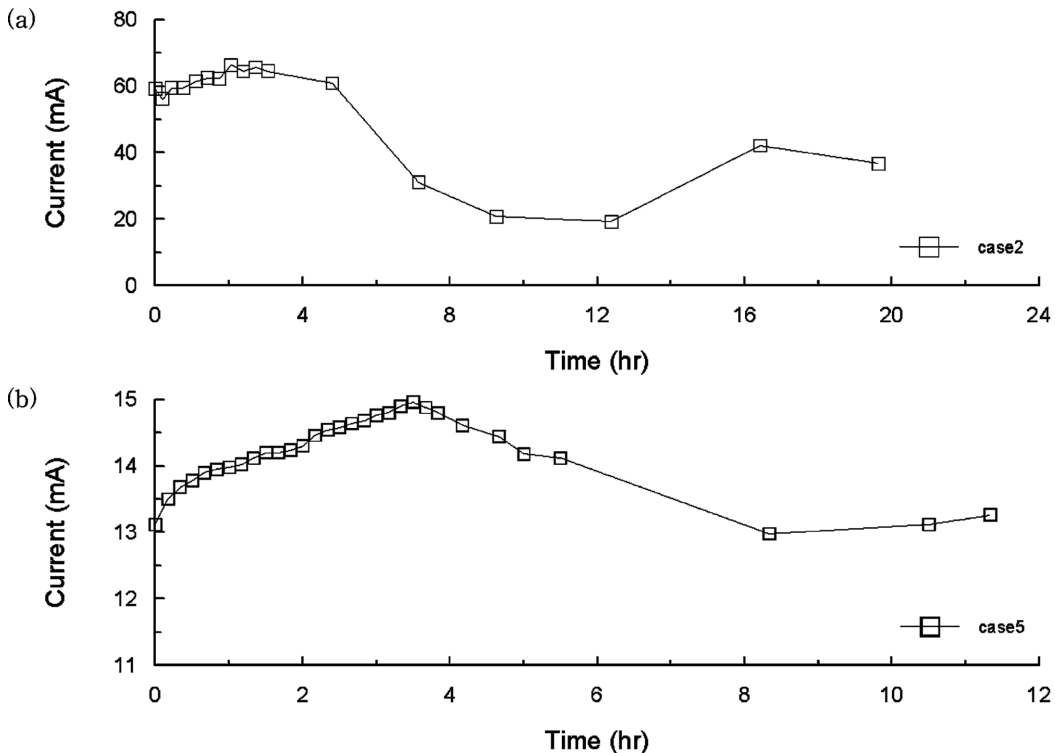


그림 3. 동전기적 침강 시 발생된 전류의 변화: (a) case2: 500%, 증류수; (b) case5: 2000%, 수돗물

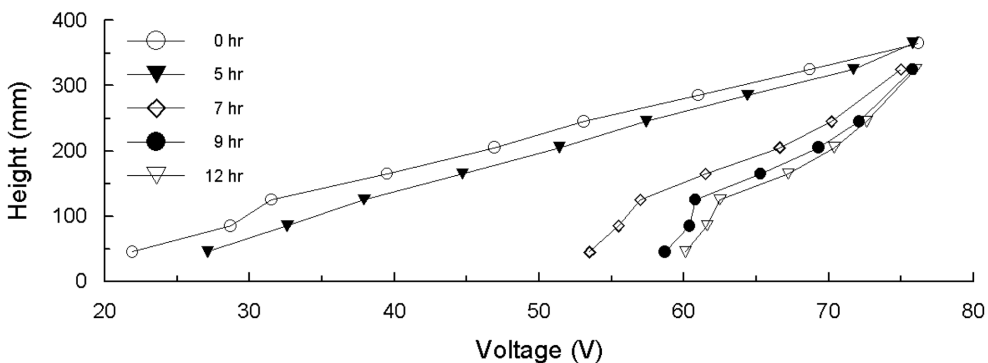


그림 4. 동전기적 침강 시 발생된 전압구배의 변화 case2: 500%, 증류수

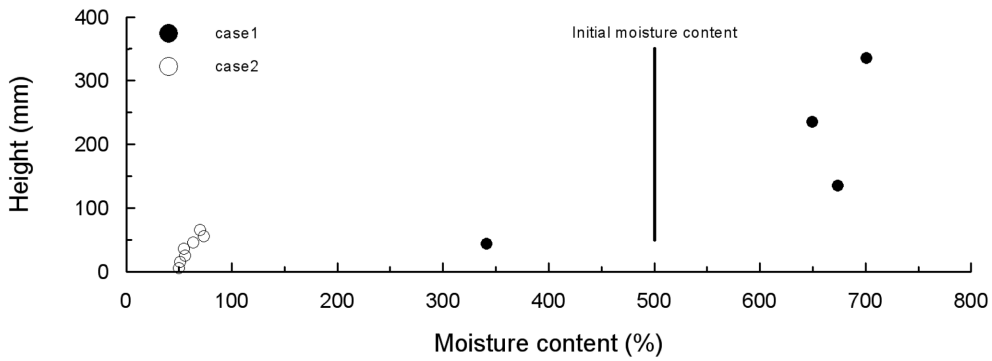


그림 5. 침강 완료 후 시료의 함수비 변화: case1: 500%, 증류수, 중력침강; case2: 500%, 증류수, 동전기적 침강

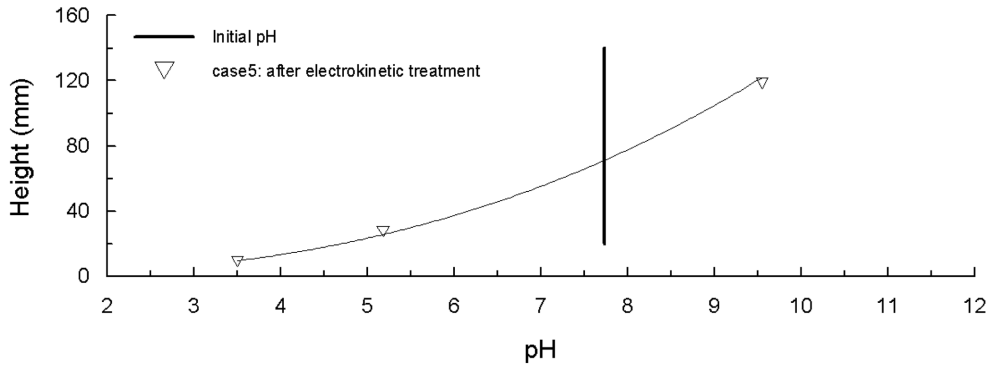


그림 6. 동전기적 침강에 의한 pH의 변화: case5: 2000%, 수돗물, 동전기적 침강

를 분석한 결과 아연으로 오염된 시료로부터 추출된 아연의 양은 약 90%로 나타났다. 시료로부터 추출된 제거율은 약 90%이지만, 추출된 아연의 대부분이 pH가 높은 음(-)극 부근에서 침전되어 시료의 표면에 가라앉은 상태로 발견되었다.

4. 고 찰

다양한 조건에서 침강실험을 수행한 결과 고함수비 점토질 입자의 침강거동으로부터 여러 다양한 양상을 관찰할 수 있었다. case4의 침하곡선은 전기·화학적 영향에 의한 전형적인 간섭침강(hindered settling)의 유형을 보여주었으며, case1의 경우 전기·화학적으로 평형상태가 유지되어 미세 입자들이 유체 속에 부유 상태로 존재함을 알 수 있었다(Kynch, 1952; McRoberts and Nixon, 1974; Bowden, 1988). 이들 부유 상태로 존재하는 입자들의 확산이중층(diffuse double layer)은 첨가된 염화나트륨의 영향으로 수축되어 입자 간에 플록(floc)을 형성하여 침강함으로써 case1에 비해 빠른 침강거동을 보여주었다(Sposito, 1984). 그림 2(b)의 case6으로부터 점토입자들이 부유 상태에서 플록을 형성하는데 아연이온에 의한 영향이 염화나트륨의 영향보다 훨씬 크게 작용하였음을 알 수 있다.

case2의 경우, 전기·화학적으로 평형상태를 유지하고 있는 점토슬러리에 동전기력(electrokinetic force)을 가하게 되면 음(-)전하를 띤 점토입자들은 동전기영동의 효과에 의해 반대의 극성을 띤 양(+)극 방향으로 이동하게 되고, 칼럼의 바닥에 설치된 양(+)극의 영향으로 입자들은 칼럼의 하단부로 이동하여 퇴적된다. 이때 전류의 변화는 초기 60mA에서 증가하기 시작하여 동전기적 영향에 의해 칼럼 내에 존재하

는 이온들을 활성화(activation)시킴으로써 시료 내의 전기전도도(electrical conductivity)가 향상되며, 따라서 전류는 증가하게 된다(그림 3 참조). 이후 침강과 함께 퇴적된 점토입자들로 인하여 간극수가 형성되어 전류의 이동에 저항이 생기고 따라서 시스템 내에서 전류는 감소하게 된다(Lee, 2000).

동전기프로세스에 의한 pH 변화로 알 수 있듯이 직류전류에 의해 양(+)극에서는 수소(H^+)이온이, 음(-)극에서는 수산화(OH^-)이온이 발생되며 이들은 각각 음(-)극과 양(+)극으로 이동하게 된다(Mitchell, 1993). 이들 음(-)극 방향으로 이동하는 양전하를 띤 이온들과 양(+)극 방향으로 이동하는 음전하를 띤 이온들을 산/염기전선(acid/base fronts)이라 하며, H^+ 의 이동속도가 OH^- 의 이동속도에 비해 월등히 빠르기 때문에 동전기프로세스 후 시료는 대부분 산성화된다(Acar & Alshawabkeh, 1993). 전류의 변화에서 보았듯이 일정시간 이후에는 전류가 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 침강에 따른 저항의 증가 및 이들 이동 중인 산/염기전선이 어느 지점에서 만나게 되어 중성화(neutralisation)가 일어나며 전기전도도가 감소하기 때문이다. 본 실험에서도 case5의 경우 동전기적 침강이 완료된 후의 pH 변화는 압밀된 시료 전체가 산성화($pH < 5$)되었고, 상등수의 경우 알칼리화($pH > 9$)되었다. 따라서 시료의 표층 부근에서 중성화가 일어났으며 저항의 증가로 인해 효율이 감소하였음을 알 수 있다.

동전기적 침강 시, 시료 내에 형성되는 전압구배는 시간이 지남에 따라 칼럼의 하부 즉, 점토입자가 퇴적되어 쌓이는 양(+)극 부근에서 증가함을 전압구배 프로파일로부터 확인하였다(그림 4 참조). 동전기력의 크기는 공급된 전압구배에 의해 결정되기 때문에, 양(+)극 부근에서 높은 전압구배를

감사의 글

본 연구는 한양대학교 BK21 (Brain Korea 21) 연구사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

형성함으로써 동전기삼투에 의한 흐름이 극대화되며 따라서 침강된 입자들이 흙의 구조를 형성함과 동시에 간극수가 배출되는 효과에 의해 압밀됨을 의미한다(Yeung, 1994). 한편, 그림 5의 함수비 프로파일에서 보았듯이, case1의 경우 초기 함수비 500%에서 중력침강이 종료된 후 시료의 상부는 함수비가 약 700%로 증가하였고 하부에서만 약 350%로 감소함으로써 실제로 점토입자에 의한 퇴적층은 약 100mm 정도이며 상부는 콜로이드(Colloid)형태의 미세입자들로 부유되어 있음을 확인하였다.

동전기적 침강에서 가장 두드러진 특징으로 자유침강(free settling)조건에서 동전기영동에 의한 입자 이동의 가속화는 관측되지 않았다. 즉, 초기함수비가 2000%의 경우 입자들의 밀도가 낮은 부유 상태로 전기·화학적 상호작용이 미약하기 때문에 자유침강이 생기며 이때 동전기력을 가하여도 동전기영동에 의한 입자의 이동 효과는 거의 없음을 확인하였다. 초기함수비가 500%인 경우, 부유 상태에서 입자들 간의 밀도가 상대적으로 높기 때문에 입자간의 거리가 근접하게 되며 따라서 전기·화학적 상호작용에 의해 서로 평형상태를 유지하게 된다. 이때 동전기력을 가해주면 음(-)으로 대전된 입자들이 동전기영동의 영향으로 양(+)극 방향으로 이동하게 되므로 그림 2(a)에서 보았듯이 급격한 침강이 발생하게 된다.

5. 결 론

실내실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다:

1. 고함수비 점토슬러리의 침강 시, 다양한 양이온 전해질의 영향으로 점토입자에 존재하는 확산이중층이 수축하여 플록의 형성을 유도하게 되며 이로 인해 침강속도가 증가함을 확인하였다.
2. 일반적으로 중력침강에 비해 동전기적 침강의 경우 더 많은 침하량을 유발시켰으며, 자유침강의 경우 동전기영동의 영향은 미비하였으나 침강이 완료된 뒤 동전기삼투에 의한 압밀 등의 효과로 현저한 체적감소가 발생하였다.
3. 전압구배는 프로세스 초기에 선형적이며 침강이 진행됨에 따라 비선형으로 변화된다. 또한 전압구배는 산/염기전선의 영향으로 흙 시료 내에서 극대화되어 동전기삼투에 의한 흐름을 유발시킨다.
4. 전압고정 조건으로 동전기적 침강을 유도하면 초기 이온의 활성화에 의해 전류가 증가하며 침강이 진행됨에 따라 시료의 압밀 및 산/염기전선의 형성으로 인해 전류는 감소하게 되고 효율의 저하를 초래하게 된다.
5. 전기·화학적으로 평형을 이루고 있는 슬러리의 침강은 시간이 경과함에 따라 시료의 상부에서는 콜로이드 물질이 부유 상태로 존재하며, 시료의 하부에서는 점토입자들이 퇴적·압밀됨을 확인하였다. 동전기적 침강으로 현저한 체적 및 함수비의 감소를 확인할 수 있었다.

- 해양수산부(2004) 해양수산통계연보 2004.
- Acar, Y. B. and Alshawabkeh A. N. (1993) Principles of electrokinetic remediation, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 27, No. 13, pp. 2638-2647.
- Bourg, A. C. M. (1995) Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural and provoked mobility, *Springer*, Berlin, pp. 19-31.
- Bowden, R. K. (1988) *Compression Behaviour and Shear Strength Characteristics of a Natural Silty Clay Sedimented in the Laboratory*, D.Phil. Thesis, Oxford University.
- Cameron, R. E. (1992) Guide to site and soil description for hazardous waste site characterisation, *Environmental Protection Agency*, EPA/600/4-91/029.
- Kynch, G. J. (1952) A theory of sedimentation, *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 48, pp. 166-176.
- Lee, MyungHo (2000) *An Experimental and Analytical Study of Electrokinetic Consolidation*, M.Sc. Thesis, Oxford University.
- McRoberts, E. C. and Nixon, J. F. (1976) A theory of soil sedimentation, *Can. Geotech. J.*, 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, *J. Hazard. Mat.*, Vol. 85, pp. 145-163.
- Mulligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. (2001b) Heavy metal removal from sediments by biosurfactants, *J. Hazard. Mat.*, Vol. 85, pp. 111-125.
- Sposito, G. (1984) *The Surface Chemistry of Soils*, Oxford University Press, Inc., New York.
- 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.
- Yeung, A. T. (1994) Electrokinetic flow processes in porous media and their applications, *Advances in Porous Media*, Elsevier, Vol. 2, pp. 309-395.
- Yeung, A. T., Scott, T. B., Gopinath, S., Menon, R. M., and Hsu, C. (1997) Design, fabrication, and assembly of an apparatus for electrokinetic remediation studies, *Geotech. Testing J.*, ASTM, Vol. 20, No. 2, pp. 199-210.
- Zagula, S. J. and Beltinger, E. W. (1993) Developing a remediation strategy for contaminated sediments: selecting, removal, treatment, disposal and re-use alternatives, *Proceedings of the 48th Purdue Industrial Waste Conference*, Lewis Publishers, pp. 199-213.

(접수일: 2007.4.4/심사일: 2007.5.2/심사완료일: 2008.4.13)