동전기기술에 의한 오염된 연약토 및 슬러지의 압밀 및 정화

Consolidation and Remediation of Contaminated Soft Soils and Sludges by Electrokinetics

정하익[1] Ha-Ik Chung, Gilliane C. Sills[2]

[1] 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Eng. Div. KICT
[2] 영국 옥스포드대학교 지반공학그룹 교수, Professor, Soil Mechanics Group, Univ. of Oxford

SYNOPSIS : This paper presents sedimentation, consolidation and remediation of the contaminated soft soils and sludges such as marine dredging waste, marine sediments, mine tailing waste, and sewage sludge by electrokinetics. A series of laboratory experiments including variable conditions such as contamination levels, solid contents, and applied voltage rates were performed with the contaminated soft clay specimen mixed with organic substance. Investigated are specimen density, pore pressure, specimen settlement, dewatering rate, current flow, outflow rate, and outflow concentration. The test results showed that the soft soils were consolidated and organic substances in the soils were removed by applied voltages. The results indicated that this process can be used efficiently to reduce the waste volume, stabilize the soft sludge, and clean up the contaminated soil.

Key words : sedimentation, clay, sludge, contamination, clean up, settlement, dewatering

1. 서 론

동전기기술(electrokinetics)은 1930년 후반기부터 지반분야에서 연약지반의 압밀, 굴착지반의 안정, 지하수의 배수, 사면의 안정, 말뚝의 지지력 증진 등에 적용되어 왔다. 그리고 최근에는 슬러지의 침전, 매립장의 오염물질 차단, 차수막의 보수, 오염물질의 우회, 오염지반의 정화 등의 환경분야에도 부분적으로 적용되고 있다. 동전기기술은 이와 같이 여러 분야에 효과적으로 적용될 수 있는데 특히, 연약지반의 압밀, 슬러지의 침전 및 탈수, 오염지반의 정화에 매우 효과적인 것으로 나타났다(Banerjee(1980), Chung(1997), Rodsand(1996), Penn(1996), Sapna(1996), Shang(1997a,b), Yin(1996)).

지금까지 수행된 동전기기술에 관한 연구는 동전기침전, 동전기압밀 및 동전기정화에 대한 연구가 각각 개별적으로 연구되어 왔다. 따라서 이들 기법을 동시에 적용할 경우에 생기는 복합효과(coupling effect)에 관한 연구결과는 얻지 못하였다. 또한 동전기기술 적용에 따른 지반의 공학적특성, 오염물질 제거특성 등이 동전기작업 완료후 결과만 제시되었지 동전기작업중에 일어나는 중간현상은 제시되지 못하였다.

동전기기술을 적절하게 조화하게 되면 상기에 언급된 적용분야에 대하여 동시에 2개이상의 복합적인 효과를 얻을 수가 있다. 특히, 동전기기술을 이용하여 슬러지침전, 연약지반압밀 및 오염지반정화 효과

를 동시에 얻을 수 있다면 오염된 슬러지류의 안정화 및 정화 등 지반 및 환경분야에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에는 오염된 해성준설토, 연안침전물, 하상침전물, 저수지 침전물, 광산슬러지, 산업슬러지, 상하수슬러지, 연약토 등을 현지 또는 매립장에서 침전, 압밀, 정화를 동시에 시키는 효과적인 방안을 모색하여 보았다. 그리고 이에 따른 지반의 공학적 특성 및 오염물질의 제거특성 등에 관한 시계열적인 변화특성을 규명하여 보았다.

2. 동전기 실험

2.1 실험계획

본 연구에서는 오염된 연약토를 대상으로 먼저 동전기압밀기법을 이용하여 공시체를 배수압밀을 시킨 후에 동전기정화기법을 이용하여 공시체내의 오염물질을 제거하는 실험을 실시하였다. 동전기압밀시에는 공시체의 상부를 음극 그리고 공시체의 하부를 양극으로 하여 공시체의 침하는 하향으로 공시체내 간극수의 배수는 상향으로 되도록 하였다. 동전기압밀실험후 동전기정화시에는 동전기실험에서 상향으로 배수된 유출수를 사이펀식으로 제거하고 DDW의 세척수를 초기 공시체의 시료높이보다 1cm높게 채웠다. 그리고 공시체의 상부를 양극 그리고 공시체의 하부를 음극으로 하고 공시체의 하부를 열어 공시체내 간극수가 하향으로 배수되도록 하였다.

본 실험에서는 고형물의 함량이 중량비로 15, 25%이고 에틸렌글리콜의 오염농도가 중량비로 25, 50%이며 공급전압이 20, 30V인 조건을 조합하여 4가지를 실시하였다. ECR1실험은 고형물의 함량을 25%, 에텔렌글리콜의 오염농도를 25%, 초기밀도를 1.198g/cm^3 그리고 공극전압을 30V로 한것이고 ECR2실험은 고형물의 함량을 25%, 에텔렌글리콜의 오염농도를 25%, 초기밀도를 1.198g/cm^3 그리고 공극전압을 20V로 한것이다. ECR3실험은 고형물의 함량을 15%, 에텔렌글리콜의 오염농도를 25%, 초기밀도를 1.113g/cm^3 그리고 공극전압을 30V로 한것이고 ECR4실험은 고형물의 함량을 25%, 에텔렌글리콜의 오염농도를 50%, 초기밀도를 1.220g/cm^3 그리고 공극전압을 30V로 한것이다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용한 동전기 압밀/정화실험 장치는 크게 동전기셀, 전원공급장치, 유입수공급장치, 유량측정장치로 구성되었으며 이의 개념도는 그림 1과 같다. 동전기셀장치는 원통형셀, 하부캡으로 구성되어 있으며 전원공급장치는 정전압과 정전류의 공급이 가능한 전원공급기와 부속장치로 구성되었다. 유입수공급장치는 동전기셀 상부에 설치하며 동전기가동기간중 항상 일정한 유량을 공급할 수 있도록 mariotte bottle과 부속장치로 구성되어 있었다. 유량측정장치는 동전기셀 하부에 설치하며 메스실린더로부터 동전기셀을 통하여 유출하는 유량을 측정하도록 되어 있었다.

동전기셀은 원통형의 칼럼으로 perspex재질을 사용하였다. 본 재료는 비전도성이기 때문에 시료를 통과하는 전기장을 1차원화 하는데 무리가 없다. 또한 물이나 가스가 전혀 통과되는 않는 불투수성이고 화학물질의 침해에 저항성이 매우 큰 재료이다. 동전기셀 상부에는 mariotte bottle를 설치하여 필요시 일정한 유입수가 공급가능하도록 하였다. 그리고 동전기셀 바닥에는 저수조를 설치하고 이를 메스실린더로 연결시켜 전기삼투 유출량을 측정하도록 하였다. 간극수압 측정용 port간의 거리는 시료의 길이와 압밀량을 고려하여 적정한 간격으로 하였다.

2.3 사용재료

흙시료로는 영국산 Speswhite Kaolin을 사용하였다. 실험대상 오염물질로는 유기물질로 하였으며 그 중에서도 취급상에 위해성이 낮고 용이 구할 수 있는 에틸렌글리콜(ethyleneglycol: $CH_2(OH)CH_2OH$)을 사용하였다. 동전기실험시 오염물질을 시료에 넣을 때에는 오염농도에 따라 초순수와 일정한 량을 혼합

하여 사용하였다. 동전기정화실험시 공시체내의 오염물질을 세척하기 위하여 공시체의 양극으로부터 유입수를 공급하였다. 유입수가 오염물질의 농도에 영향을 미치지 않기 위해서는 순수한 물을 사용하여야 한다. 그리고 물속에 존재하는 공기가 동전기작업중에 전류의 흐름에 영향을 미쳐서는 안된다. 따라서 본 연구에서는 물속에 기포 및 이온농도가 제거된 초순수(DDW: deaired deionized water)를 사용하였다.

2.4 측정방법

본 연구에서는 동전기 작용에 따른 시료의 연속적인 밀도변화 및 오염물질의 이동추적을 위하여 특수 X-ray장비를 이용하였다. X-ray장비의 전경사진은 그림 2와 같다. X-ray장비에 의한 밀도의 측정원리는 비파괴적으로 물체를 관통하는 방사선의 원리를 이용하는 것으로 흙시료내를 향하여 방사선을 발사한후 이를 통과하는 방사선의 count rate를 측정하여 이로부터 밀도를 구하도록 한 것이다.

간극수압은 동전기셀의 벽면에 설치된 port에 연결된 플라스틱파이프를 통하여 전달되는 압력을 multiplex unit에 접속된 센서를 통하여 read out unit에서 읽도록 되어 있다. 본 시스템은 특수하게 고안된 것으로 하나의 센서를 이용하여 다수의 간극수압을 동시에 측정할 수 있는 장점이 있다. 기타 파라미터로는 침하량, 전압, 전류, pH, 함수비, 유출수량, 오염농도 등을 측정하였다. 전압 및 전류측정은 multimeter로 하였고 pH측정은 pH미터기를 사용하였다. 유출수량 측정은 메스실린더에 새겨진 눈금을 이용하였고 오염농도 측정은 액상 및 고상의 밀도측정용인 densimeter를 이용하였다.

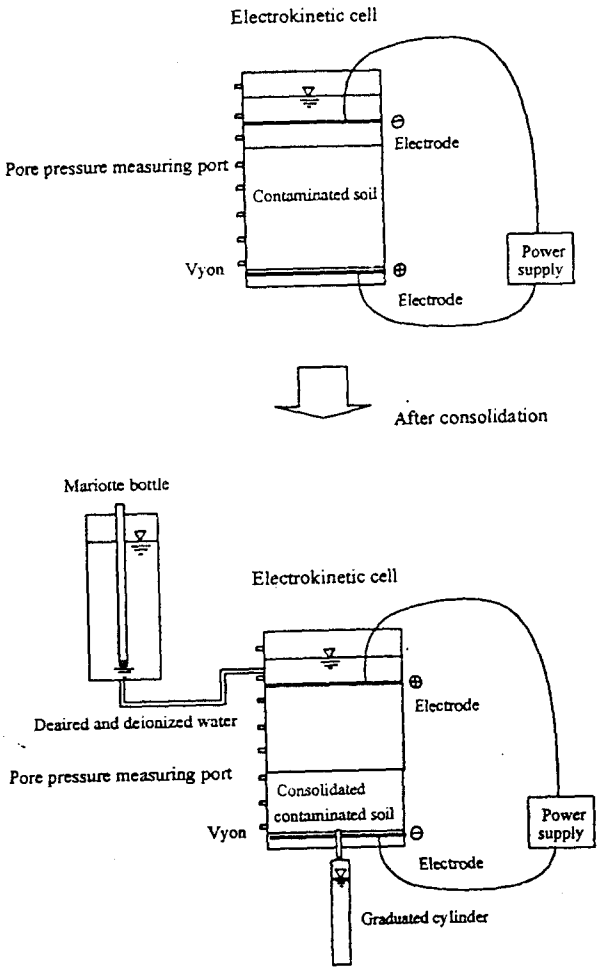

그림 1. 동전기 압밀/정화 실험 개념도

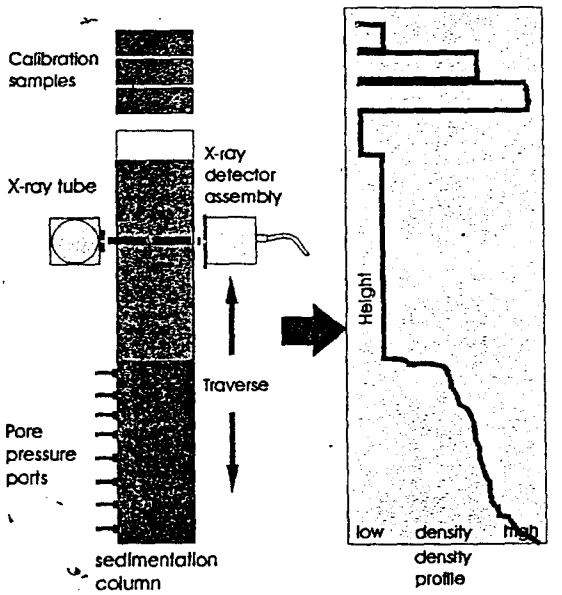

그림 2. X-ray 장비

3. 실험결과 및 토론

3.1 지반의 압밀특성

3.1.1 공시체의 밀도

오염된 연약토를 대상으로 먼저 동전기압밀기법을 이용하여 공시체를 배수압밀을 시키고 동전기정화기법을 이용하여 공시체내의 오염물질을 제거하는 과정에서 발생되는 공시체의 밀도변화를 살펴보고자 한다. 그림 3은 고형물의 함량을 25%, 에틸렌글리콜의 오염농도를 25%, 초기밀도를 1.198g/cm^3 그리고 공극전압을 30V로 한 ECR1실험중에서 동전기압밀시에 발생한 공시체의 밀도변화이다. 동전기압밀시에는 공시체의 상부를 음극 그리고 공시체의 하부를 양극으로 하여 공시체의 침하는 하향으로 공시체내 간극수의 배수는 상향으로 되도록 하였다. 그림에서 시간이 경과함에 따라 공시체내의 간극수가 상향으로 배수가되고 공시체가 하향으로 침하하여 공시체의 밀도가 증가함을 알 수 있다. 동전기 가동초기 3시간까지는 공시체의 중앙부보다는 공시체 상단의 음극과 공시체하단의 양극이 크게 증가하였는데 이의 밀도크기는 하단부가 크게 나타났고 12시간 경과후에는 공시체 상단부의 밀도가 하단부보다 약간 증가하였다. 그리고 12시간 이후부터는 공시체 상단에서 하단으로 갈수록 밀도가 증가하였다. 동전기 가동초기 3시간까지 발생하는 공시체 상단부의 밀도증가는 동전기의 작용에 의하여 부의 간극수압이 발생하기 때문에 압밀이 발생한 때문이며, 공시체 하단부의 밀도증가는 공시체하단부의 배수에 의하여 발생하는 부의 간극수압에 의한 압밀효과가 때문이다. 그리고 3시간이후부터 하단부의 밀도가 증가하는 이유는 시간이 하단부의 배수에 의한 압밀효과가 상단부의 동전기에 의한 압밀효과보다 크기 때문이다.

그림 4는 ECR1실험중에서 동전기압밀실험후에 실시한 동전기정화시에 발생한 공시체의 밀도변화 곡선이다. 동전기정화시에는 공시체의 상부를 양극 그리고 공시체의 하부를 음극으로 하여 공시체의 침하 및 공시체내 간극수의 배수는 하향으로 되도록 하였다. 그림에서 시간이 경과함에 따라 공시체내의 오염물질이 배수제거됨으로 인하여 공시체의 밀도가 감소함을 알 수 있다. 이는 공시체내의 오염물질인 에틸렌글리콜이 동전기작용에 의하여 DDW로 대치제거됨으로 인하여 에틸렌글리콜과 DDW의 밀도차만큼 공시체의 밀도변화가 발생하였기 때문이다.

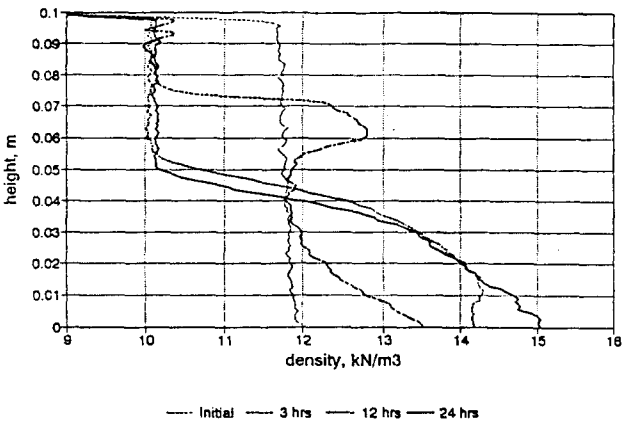

그림 3. 동전기압밀에 의한 공시체의 밀도

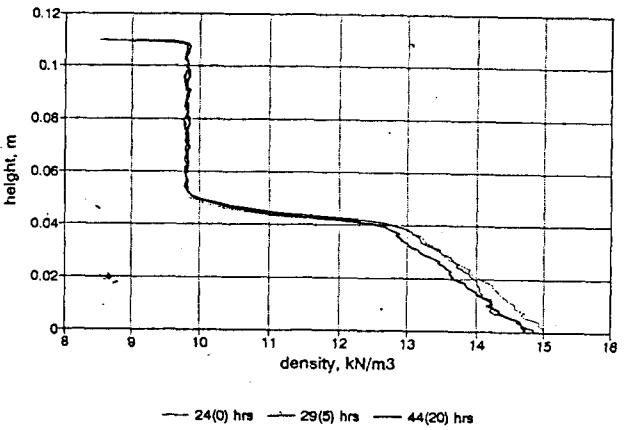

그림 4. 동전기정화에 의한 공시체의 밀도

3.1.2 간극수압

동전기압밀 및 정화실험시에 동전기셀의 벽면에 일정한 간격으로 설치된 간극수압측정용 port로부터 간극수압을 측정하여 과잉간극수압을 산정하였다. ECR3실험에서 동전기압밀시에 발생한 과잉간극수압

을 그림 5에 도시하였다. 동전기압밀이 진행됨에 따라 부의 과잉간극수압이 증가됨을 알 수 있다. 초기 시료는 정의 과잉간극수압을 가지나 시간이 경과됨에 따라 전기삼투작용에 의하여 부의 과잉간극수압이 발생되었다. 이러한 부의 과잉간극수압은 공시체가 침하되는 원인을 제공하게 된다. ECR3실험에서 동전기정화시에 발생한 과잉간극수압을 그림 6에 도시하였다. 여기에서도 마찬가지로 동전기 가동초기부터 공시체에 내재된 부의 간극수압이 동전기정화가 진행됨에 따라 더욱 큰 부의 값을 갖게 되었다. 고형물 함량이 15%인 ECR3실험의 동전기압밀실험 및 동전기정화실험시에서 발생된 부의 과잉간간극수압은 고형물의 함량이 25%인 ECR1 및 ECR2의 실험보다 작게 나타났는데 이는 고형물 함량의 차이에 의한 공시체의 밀도차 때문으로 보인다.

3.1.3 침하량

ECR1, ECR2, ECR3 및 ECR4의 4개 실험에서는 실험시료로서 오염된 연약토를 사용하였기 때문에 동전기압밀 및 동전기정화시 공시체에 압밀현상이 발생하였다. 따라서 이로인하여 공시체가 침하하고 공시체내의 간극수가 배수되는 현상이 발생하였다. 동전기압밀 및 동전기정화시에 발생한 침하특성곡선을 그림 7에 도시하였다. 그림에서 종좌표는 경과시간이고 종좌표는 초기공시체의 높이에 대한 침하량의 비이다. 여기에서 경과시간 24시간까지는 동전기압밀에 의하여 발생된 침하량이고 24시간이후부터는 동전기정화에 의하여 발생된 침하량이다. 그림에서 보는 바와 같이 동전기압밀시에 침하의 대부분이 발생하고 동전기정화시에는 거의 침하가 발생되지 않았다. 단지 ECR2의 경우에만 동전기정화시에 약간의 침하가 발생하였다.

본 실험에서 적용된 시료조건에 대한 동전기압밀 및 정화실험의 경우 공시체의 침하는 시간이 경과함에 따라 증가하며 24시간이내에 거의 대부분이 발생하였고 그 이후에는 추가적인 침하가 발생되지 않고 거의 일정하게 유지되었다. 그리고 최종침하율의 분포는 4.6~7.2으로서 약 46~72%의 침하가 발생하여 45%이상의 침하량을 기록하였다. 이러한 결과는 오염된 슬러지류의 폐기물을 단기간내에 압밀, 침하시켜 고밀도화 및 안정화시키는데 본 동전기기술이 효과적으로 적용될 수 있음을 시사해준다.

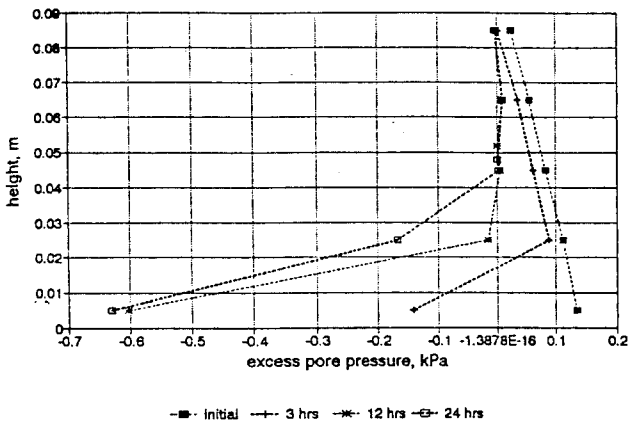

그림 5. 동전기압밀에 의한 공시체의 간극수압

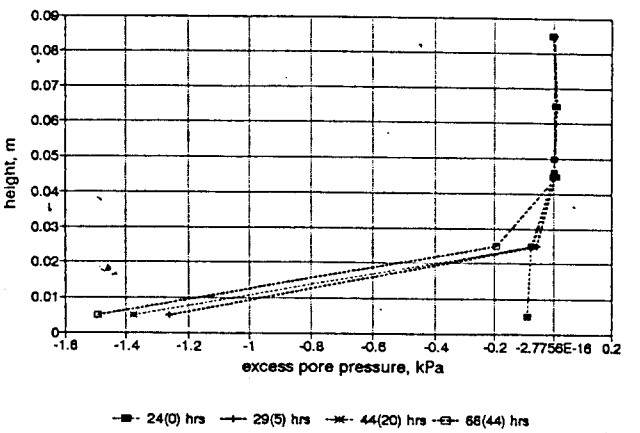

그림 6. 동전기정화에 의한 공시체의 간극수압

3.1.4 탈수량

본 실험조건에서 동전기압밀시에는 공시체내의 용액은 상향으로 탈수 및 배수되고 고형물은 하향으로 침하하게 된다. 동전기압밀 실험중에 측정된 침하량을 이용하여 시간경과에 따른 탈수량을 살펴보았다. 그림 8에 도시된 바와 같이 공시체내 간극수의 탈수량은 시간이 경과함에 따라 증가하였다. 4개의 실험조건에 따라 정도의 차이는 있지만 최종 탈수량은 ECR1의 경우 약 430ml, ECR2의 경우 약 370ml,

ECR3의 경우 약 580ml 그리고 ECR4의 경우 약 420ml가 발생되었다. 따라서 초기 슬러리상태 공시체의 체적인 817ml인 점을 감안할 때 각각의 실험조건에 대하여 약 53%, 45%, 71% ,51% 가량의 체적감소가 발생된 것이다.

따라서 본 실험을 통하여 동전기기술에 의하여 고함수비의 연약지반 및 슬러지내에 있는 오염수를 효과적으로 탈수될 수 있음을 시사해 준다. 그리고 실험조건에 따른 탈수량을 살펴보면 공급전류가 클수록, 고형물의 함량이 적을수록, 유기성 오염농도가 작을수록 탈수량이 증가하는 것으로 나타났다.

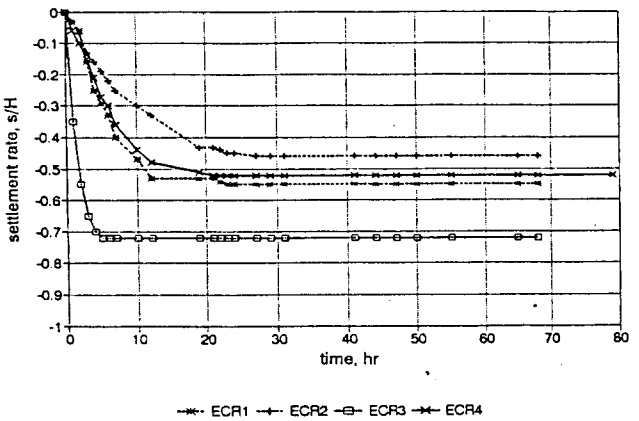

그림 7. 동전기압밀/정화에 의한 공시체의 침하특성

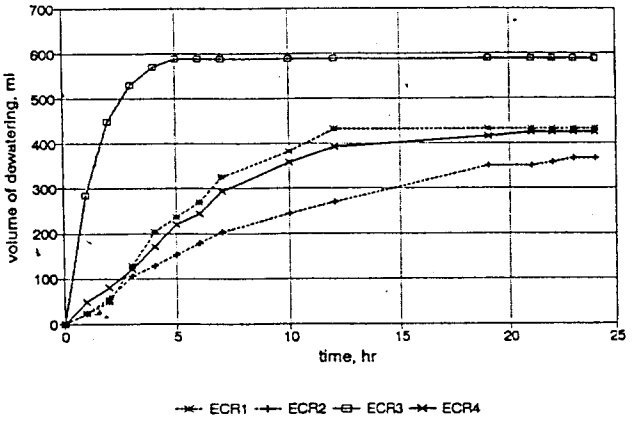

그림 8. 동전기압밀에 의한 탈수량

3.2 오염물질 제거효과

3.2.1 유출수량

본 연구에서는 동전기압밀실험시에는 공시체내의 간극수가 상향으로 배수, 탈수되었으며 동전기압밀실험후 동전기정화실험시에는 공시체내의 간극수 및 외부에서 공급되는 세척수가 하향으로 유출되었다. 여기에서는 동전기정화실험시에 공시체의 하부로 배수되는 유출수를 살펴보았다. 동전기정화실험시에는 공시체내의 오염물질을 제거하기 위하여 세척수로서 공기가 제거된 초순수를 동전기 가동기간동안 양극으로부터 계속해서 공급하였다. 공급수는 mariotte bottle을 이용하여 전체 높이가 공시체 바닥으로부터 항상 11cm가 되도록 유지하였다.

동전기정화실험시에 전기삼투 및 배수작용에 의하여 공시체를 통과하여 하향으로 흐르는 유출수의 변화를 시간경과에 따라 그림 10에 도시하였다. 그림에서 모든 실험조건의 경우 시간경과에 따라 유출량이 증가함을 알 수 있다. 이의 증가율은 ECR1, ECR2 및 ECR4는 초기부터 완만하게 증가하였으나 ECR3는 초기부터 급격하게 증가하였다. 본 실험결과로부터 공급전압이 30V인 ECR1과 공급전압이 20V인 ECR2를 비교해 볼 때 공급전압이 클수록 유출량이 많음을 알 수 있고 고형물의 함량이 25%인 ECR1, ECR2 및 ECR4와 고형물의 함량이 15%인 ECR3을 비교해 볼 때 고형물의 함량이 적을수록 유출량이 많음을 알 수 있다. 또한 오염농도가 25%인 ECR1과 오염농도가 50%인 ECR4을 비교해볼 때 오염농도가 낮을수록 유출량이 많음을 알 수 있다.

3.2.2 유출수의 농도

본 연구에서는 동전기정화실험에 의하여 공시체내에 있는 오염물질이 시간경과 및 유출량에 따라 어느정도 제거되는지를 살펴보기 위하여 동전기정화실험시에 유출되는 유출수를 일정한 간격으로 채집하여 유출수내에 존재하는 오염물질의 농도를 측정하였다. 그림 11에 동전기정화 시간이 경과함에 따라

변화되는 유출수의 농도비를 도시하였다. 그림에서 동전기정화실험시에 어느 일정한 시간까지는 유출수에서 거의 초기 오염농도에 해당되는 오염농도가 측정되었는데 이는 공급수의 유입에 의하여 공시체내에 존재하는 오염물질이 먼저 유출되기 때문이다. 그리고 일정한 시간이 경과한 후에는 유출수의 오염농도가 점차 감소하였는데 이는 오염물질이 공시체내를 통과하는 공급수에 점차 세척되어 희석되기 때문이다. 오랜시간경과후 최종적으로 공시체내에 있는 오염물질이 공급수에 의하여 완전히 세척되어 유출수의 오염농도가 0이 되었다.

공시체내의 오염물질이 50% 제거되는데 소요되는 즉, 오염농도비가 0.5가 되는 시간은 ECR1의 경우에는 약 46시간, ECR2의 경우에는 약 56시간, ECR3의 경우에는 약 27시간 그리고 ECR4의 경우에는 약 55시간으로 나타났다. 그리고 공시체내의 오염물질이 완전히 100% 제거되는데 소요되는 즉, 오염농도비가 0이 되는 시간은 ECR1의 경우에는 약 65시간, ECR3의 경우에는 약 34시간 그리고 ECR4의 경우에는 약 79시간으로 나타났다. 이상으로부터 오염물질의 제거에 소요되는 시간은 공시체내에 공급되는 전압이 높을수록, 공시체를 형성하는 고형물의 함량이 적을수록 그리고 공시체내의 초기오염농도가 작을수록 크다는 것을 알수 있다.

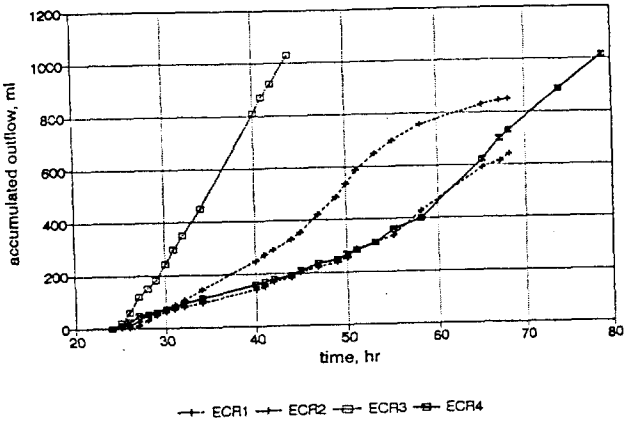

그림 10. 동전기정화에 의한 유출량

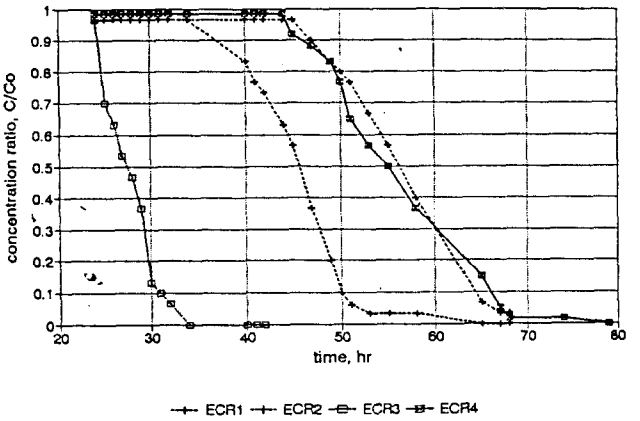

그림 11. 동전기정화시 시간경과에 대한 유출수의 농도

4. 결론

본 연구에서는 오염된 연약토를 대상으로 먼저 동전기압밀기법을 이용하여 공시체를 배수압밀을 시키고 동전기정화기법을 이용하여 공시체내의 오염물질을 제거하는 복합동전기기법을 고안하여 보았다. 동전기압밀시 시간경과에 따라 공시체내의 간극수가 상향으로 배수가되고 공시체가 하향으로 침하하여 공시체의 밀도가 증가함을 알 수 있다. 동전기압밀후 동전기정화시에는 시간이 경과함에 따라 공시체내의 오염물질이 유출되어 공시체의 밀도가 감소함을 확인할 수가 있다. 동전기압밀이 진행됨에 따라 초기시료는 정의 과잉간극수압을 가지나 시간이 경과됨에 따라 전기삼투작용에 의하여 부의 과잉간극수압이 발생되었다. 그리고 동전기정화작업시에도 부의 과잉간극수압이 커지는 것으로 나타났다.

동전기압밀시에 침하의 대부분이 발생하고 동전기정화시에는 거의 침하가 발생되지 않았다. 공급전압이 클수록, 고형물의 함량이 적을수록, 오염농도가 낮을수록 침하량이 증가되는 것으로 나타났다. 공시체내 간극수의 탈수량은 시간이 경과함에 따라 증가하였다. 탈수량은 공급전류가 클수록, 고형물의 함량이 적을수록, 유기성 오염농도가 작을수록 탈수량이 증가하는 것으로 나타났다. 동전기정화실험시에 일정한 시간이 경과한 후에는 유출수의 오염농도가 점차 감소하였는데 이는 오염물질이 공시체내를 통과하는 공급수에 점차 세척되어 희석되기 때문이다. 오랜시간경과후 최종적으로 공시체내에 있는 오염물질이 공급수에 의하여 완전히 세척되어 유출수의 오염농도가 0이 되었다.

참고문헌

1. Banerjee, S. and J. K. Mitchell (1980), In-situ volume-change properties by electro-osmosis - Theory, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, pp. 347-365.
2. Chung, H. and B. Kang (1997), Removal of lead from contaminated Korean marine clay by electrokinetic remediation technology, *Geoenvironmental Engineering*, pp. 423-430.
3. Rodsand, T., Y. B. Acar and G. Breedveld (1996), Electrokinetic extraction of lead from spiked Norwegian marine clay, *Geoenvironment 2000*, pp. 1518-1534.
4. Penn, M., C.Savvidou and E.E.Hellawell, Centrifuge modelling of the removal of heavy metal pollutants using electrokinetics, *Environmental Geotechnics*, pp.1055-1060, 1996.
5. Sapna, A. (1996), Electro-osmsis in soils, University of Oxford, *Department of Engineering Science.*
6. Shang, J. Q. (1997), Electrokinetic dewatering of clays as engineered soil covers, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 78-86.
7. Shang, J. Q. (1997), Electrokinetic sedimentation: a theoretical and experimental study, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 305-314.
8. Yin J., R.J.Finno, and J.R.Feldkamp, Electro-osmotic mobility measurement for Kaolinite clay, *Geoenvironment 2000*, pp.1550-1563, 1996.