

Electrokinetic 정화기술에 의한 토양내의 납성분 제거

정하익

한국건설기술연구원 지반연구실

요 약

본 연구에서는 전기화학적 정화방법인 electrokinetic 정화기술을 이용하여 오염된 토양내에서 중금속을 제거하는 방안을 연구하였다. 이를 위하여 납을 혼합하여 오염시킨 점토시료에 대하여 정화가동시간, 공급전류, 오염농도를 다르게 하고 3가지의 향상기법을 적용시켜 정화실험을 실시하였다. 실험결과를 토대로 유입수 및 유출수의 pH, 오염토의 pH, 전기포텐셜, 유출수량, 전기전도도 등 오염토의 물리화학적 성질변화를 구명하고 정화가동조건 및 향상기법적용에 따른 오염토내의 납 제거효과를 파악하였다. 본 연구를 통하여 electrokinetic 정화기술은 투수성이 낮은 점성토 토양내의 중금속을 제거하는데 매우 효과적인 것으로 판명되었다.

1. Electrokinetic 정화기술 개요

Electrokinetic기술이 토양공학분야에 처음 적용되기 시작한 것은 1930년대 후반기부터이며 적용분야로는 전기삼투를 이용한 연약토양의 압밀과 안정분야이었다. 그 이후에 굴착토양의 안정, 지하수의 배수, 사면의 안정, 말뚝의 마찰력 증진 등에 부분적으로 적용되었다. 그러나 시대적 부흥에 의하여 electrokinetic기술을 토양공학 뿐만아니라 환경분야에도 적용하려는 노력이 증대되었다. 따라서 슬러지 농축 및 탈수, 매립장 수평 및 연직 차폐, 차수막 누수 보수, 지중내 오염물질 우회, 오염토양 정화 등에의 활용방안이 강구되기도 하였다.

Electrokinetic 정화는 지중내에 직류전기를 공급하여 토양로부터 오염물질을 추출하는 것이다. 지중내에 설치된 전극에 직류전기가 가해지면 여러과정을 거쳐 전기삼투, 전기이온이동 등의 electrokinetic현상이 발생하여 흙-물-전해질 시스템(soil-water-electrolyte system)이 물리·화학·수리학적으로 변화되며 오염물질이 이동, 제거된다. 포화된 지중내에 전극을 삽입하고 직류전원을 연결하면 전자는 전원의 음극으로부터 양극으로 흐른다. 이때 음극에서는 용액에 전자를 주고 양극에서는 용액으로부터 전자를 얻어서 전극 바로 주위에서 물이 이온화 되어 전기분해(electrolysis)가 생긴다. 따라서 양극에서는 물의 산화가 일어나고 음극에서는 물의 환원이 일어나므로 양극에서는 산소가 방출되고 음극에서는 수소가 방출된다. 그리고 양극에서는 산전선(acid front)이 생성되고 음극에서는 염기전선(base front)이 형성된다.

Electrokinetic 정화과정을 통하여 토양내에 전기화학적 성질상에 큰 변화가 생겨 염과 토립자 광물의 침전/용해의 화학반응현상이 일어나게 된다. 토양의 간극수내 물질이동은 이러한 침전물의 형성과 용해에 크게 영향을 받는다. 전기분해에 의하여 음극에서 생성되는 염기전선에 의하여 부분적으로 중금속 이온이 수산화침전을 일으킨다. 침전정도는 이온물질의 종류에 따라 다르며 흡입자와 간극수의 pH에 크게 영향을 받는다. 음극부에 침전된 침전물은 양극에서 생성되는 산전선이

음극으로 진행하면서 용해되며 용해정도는 토양 및 침전물의 종류에 따라 다르게 된다.

간극수에 존재하거나 토립자표면으로부터 탈착된 오염물질은 자신들의 전하특성에 따라 양극 또는 음극방향으로 이동 하게 된다. 오염물질의 이동은 전기삼투흐름에 의한 간극수의 이류(advection), 외부에서 가해지거나 내부에서 생성된 수리포텐셜차에 의한 간극수의 이류, 농도경사에 의한 확산(diffusion) 및 전기경사에 의한 이온이동(migration) 등에 이루어 진다. 전기삼투현상에 의하여 물과 오염물질이 음극으로 이동하고, 전기이온이동현상에 의하여 양이온은 음극으로, 음이온은 양극으로 이동된다.

2. 실내 모형실험

본 연구에서는 정화가동시간, 공급전류, 오염농도 및 향상기법에 따른 electrokinetic 정화효과를 살펴보기 위하여 다음과 같은 실험계획을 수립하였다. Electrokinetic 정화실험시 실험조건에 따라 정화가동시간은 5, 15, 30일로 하였으며 공급전류는 10, 50, 100mA로 하였다. 또한 오염농도는 500, 5,000, 50,000mg/kg으로 하였고 향상기법은 침전방지제, 착화제 및 용해제 주입방법을 적용하였다. 이들을 조합하여 전체로는 11개 조건으로 실험을 실시하였다. 본 연구에서 적용한 electrokinetic 정화실험장치는 셀(cell), 전극, 전원공급기로 구성되어 있다. 셀은 원통관으로 재질은 부식 및 내화학성이 강한 플렉시유리(plexiglass)와 아크릴 재질로 되어 있으며 규격은 직경 10cm, 길이 10cm 그리고 체적 785cm³이다. 셀의 양단에는 체적이 300cm³인 전극조를 부착하였으며 여기에는 유입수 및 유출수의 유동을 위한 공간과 밸브구멍 그리고 가스의 방출을 위한 밸브구멍을 설치하였다. 각 전극조에는 수조를 연결하여 물이 공급, 순환되도록 하였다.

본 연구의 electrokinetic 정화실험에 사용된 오염대상 흙시료는 서해안의 김포 해안매립지역에서 채취한 해성점토이다. 실험대상 오염물질로는 중금속으로 하였으며 이들 중에서도 국내뿐만 아니라 전세계적으로 토양오염도가 크고 환경적인 측면에서 위해성이 매우 큰 납을 선정하였다. 지중 또는 시료내에 전원을 공급하면 전기삼투현상에 의하여 지하수 또는 간극수가 토체를 투과하여 양극에서 음극방향으로 이동하게 된다. 따라서 본 electrokinetic 정화실험시에는 양극에 저수조를 설치하여 이로부터 electrokinetic 셀내에 물을 지속적으로 급수하여 전기삼투에 의한 물의 투수량만큼 계속 충전되도록 하였다. 여기에서 급수되는 침투수로는 이온물질이 제거된 초순수를 사용하였다. 음극에는 저수조와 메스실린더를 설치하여 양극으로부터 시료를 투과한 물을 집수하고 수량을 측정하도록 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 오염토의 pH

Electrokinetic 정화작업에 따른 오염토의 pH 변화를 살펴보기 위하여 정화실험 완료후 pH미터기를 이용하여 시료의 각 절편에 대하여 pH를 측정하였다. 정화가동시간에 따른 오염토내 pH 변화를 살펴보면 그림 1에 도시한 바와 같다. 그림에서 횡좌표는 양극으로부터의 거리를 전체 셀 길이로 나누어 정규화한 거리비이고 종좌표는 pH 변화이다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전체적으로 양극부의 pH는 2~4 정도의 범위에 속해 있고 음극부의 pH는 3~10의 범위에 속해 있어 음극부보다는 음극부의 pH가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 공시체의 초기 pH가 약 7 정도가 되므로 음극부에서는 공시체의 초기 pH이하로 감소하였

고 음극부에서는 정화가동시간에 따라 공시체의 초기 pH보다 증가 또는 감소하였다. 여기에서 양극부와 음극부라고 하는 용어는 토양공시체의 중앙을 중심으로 하여 양극과 음극의 한쪽을 가르킨다. 이와같이 음극부의 pH가 감소하고 음극부의 pH가 증가하는 이유는 전기분해에 의하여 양극에서는 수소이온(H⁺)이 생성되고 음극에서 수산이온(OH⁻)이 생성되었기 때문이다.

3.2 오염토내의 납 제거효과

Electrokinetic 정화작업에 의한 토양내 오염물질 제거효과를 살펴보기 위하여 정화실험을 완료한 후에 시험시료를 10개의 절편으로 절단하여 각 절편에 대한 오염물질의 잔류농도를 측정하고 초기농도와 최종농도와의 비율을 구하여 상호 비교분석하였다. Electrokinetic정화에 의한 납성분의 제거효율을 살펴보면 그림 2에 도시한 바와 같다. 그림에서 횡좌표는 양극으로부터의 거리비이고 종좌표는 초기농도에 대한 잔류농도의 농도비이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 정화가동시간 5일인 경우에는 양극으로부터 거리비가 0.6까지는 오염물질이 제거되어 감소된 반면 나머지 공시체 구간에서는 오히려 증가하였다. 즉, 양극부에서 제거된 오염물질이 음극방향으로 이동되어 축적됨을 보여주고 있다. 공시체의 전체길이를 따라 측정된 오염물질의 잔류농도비는 정화가동시간이 5일인 경우에는 0.3~1.6 정도, 정화가동시간이 15일인 경우에는 0.09~0.15 정도, 그리고 정화가동시간이 30일인 경우에는 0.04~0.06 정도가 된다.

따라서 정화작업에 의한 공시체내의 납 제거율은 정화가동시간이 5, 15일 및 30일인 경우 공시체위치에 따라 각각 -60~70%, 85~91% 및 94~96%의 범위로서 공시체 전체의 평균제거율은 각각 13%, 88% 및 95% 이다. 정화작업후 토양내에 잔존하는 납의 최대잔류량을 살펴보면 정화가동시간이 5일인 경우에는 음극부에 오히려 축적되어 초기농도 5,000mg/kg보다 증가된 8,000mg/kg, 15일인 경우에는 725mg/kg 그리고 30일인 경우에는 300mg/kg 이다. 그러므로 잔류량도 정화가동시간이 증가함에 따라 감소한다.

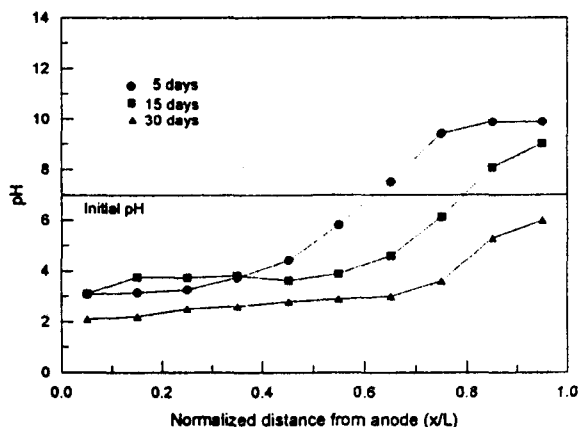


Fig 1 Final distributions of pH value across soil specimen by operating duration

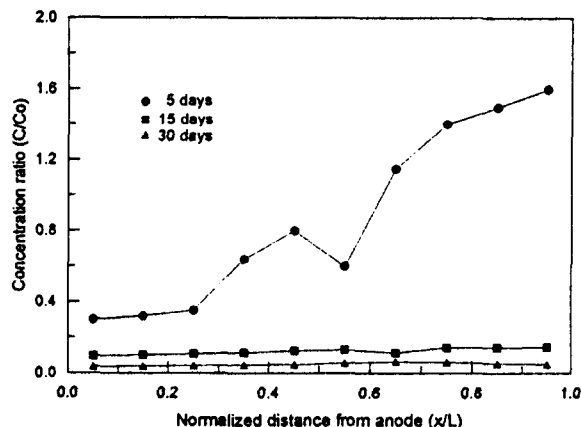


Fig 2 Distributions of final concentration of Pb across the specimen by operating duration

4. 결론

본 연구에서는 전기삼투 및 전기이온이동 이론 등이 기본메카니즘을 이루고 있는 electrokinetic 정화기술을 이용하여 오염된 토양내에서 중금속을 제거하는 방안을 연구하였다. 이를 위하여 오염된 점토시료를 대상으로 모형실험을 실시하였다. 연구결과 양극에서 생성된 수소이온은 음극으로 이동하며 이로 인하여 토양이 산성화되고 초기 7정도의 pH가 양극부에서는 2~4, 음극부에서는 3~10으로 되었다. 수소이온의 이동량은 정화가동시간 및 공급전류가 클수록, 오염농도가 낮을수록 증가하며, 향상기법중에서 용해제 주입방법의 경우가 가장 크게 증가되었다. 전기삼투에 의한 유출수량은 정화가동시간 및 공급전류가 커질수록, 오염농도가 낮을수록 증가하며, 향상기법을 적용하지 않은 경우보다 적용한 경우가 증가하였다. 유출수량은 40시간 이내에는 발생하지 않고 300시간까지는 급격하게 증가하였으며 그 이후에는 미소하게 증가하였다. 공급전류 50mA, 납오염농도 5,000mg/kg인 조건에서 정화가동시간 5, 15 및 30일에 따른 점토공시체 전 길이의 평균 납제거율은 13, 88 및 95%이었다. 정화가동시간이 5일인 단기간의 경우에는 양극부에서는 오염물질이 제거되고 음극부에서는 제거된 오염물질이 축적되어 오히려 증가되었으며, 반면에 15일 이상의 장기간인 경우에는 음극부에 이동·축적된 오염물질까지도 공시체 전체를 통하여 고르게 제거되었다. Electrokinetic 정화기술은 투수계수가 10^{-7} cm/sec 이하인 불투수성의 점성토토양 및 토립자에 강하게 흡착된 중금속의 제거에 효과적인 것으로 판명되었다.

참고문헌

1. Acar, Y. B., Gale, R. J., Putnam, G., and Hamed, J. (1989), "Electrochemical processing of soils: Its potential use in environmental geotechnology and significance of pH gradients," 2nd International Symposium on Environmental Geotechnology, Shanghai, China, May 14-17, Envo Publishing, Bethlehem, PA, Vol. 1, pp. 25-38.
2. Banerjee S. and J. K. Mitchell (1980), "In-situ volume change properties by electro-osmosis-theory" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 106, No. GT4, pp. 347~363.
3. Fetzer, C. A. (1967), "Electro-osmotic stabilization of West Branch Dam", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, No. SM 4, pp. 85~106.
4. Putnam, G. A. (1988), Determination of pH gradients in the electrochemical processing of kaolinite, Msc., Louisiana State University, 256 p.
5. Yeung, A. T. (1993), "Waste containment using electro-kinetics", Geology and Confinement of Toxic Wastes, Geoconfine 93, pp. 585~590.