

지반환경조사용 환경콘 관입시스템 개발을 위한 기초연구

A Study on the Development of Envi-Cone Penetrometer System

정하익¹⁾, Ha-Ik Chung, 홍승서²⁾, Seung-Seo Hong, 김영진³⁾, Young-Jin Kim,
홍성완⁴⁾, Sung-Wan Hong, 광무영⁵⁾, Moo-Young Kwak

- 1) 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Dept., KICT
- 2) 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT
- 3) 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Eng. Dept., KICT
- 4) 한국건설기술연구원 토목연구부 연구위원, Senior Research Fellow, Civil Eng. Dept., KICT
- 5) 대조바이오텍 주식회사 대표이사, President, DaeJo Biotech Corporation

SYNOPSIS : In recent years there has been a steady increase in geoenvironmental engineering projects where geotechnical engineering has been combined with environmental concerns. Many of these projects involve some investigation of contaminant in the ground. There are many techniques such as geophysical, drilling, sampling, and pushing techniques for investigation of contaminated ground. The most rapidly developing site characterization techniques for geoenvironmental purposes involve direct push technology, that is, penetration tests. In this study, the envi-cone penetrometer system is developed by modification of traditional cone penetration test. The electrical resistivity sensor, pH sensor, thermometer are installed in envi-cone penetrometer system. This envi-cone penetrometer system provides a continuous profile of measurements, and it is rapid, repeatable, reliable and cost effective.

Key words : environment, cone, penetrometer, contamination, ground, investigation

1. 서론

오염된 토양 및 지하수의 관측에는 물리탐사, 관입조사, 채취조사 등 다양한 방식이 적용되고 있다. 물리탐사는 지표에서 탄성파, 전기, 레이더 등을 이용하여 지중내의 오염범위, 오염농도, 오염두께, 지질 구조 등을 파악하는 것이고, 관입조사는 콘관입장비를 지반에 직접 삽입하여 콘에 장착된 센서에서 반응하는 지중의 오염특성을 분석하는 것이다. 또한 채취조사는 대상지역의 오염시료를 채취하여 실험실에서 오염물질의 오염도를 정밀하게 분석하는 방법이다. 본 연구에서는 궁극적으로 오염시료를 채취하지 않고 오염지반의 오염상황을 과학적이고 경제적으로 조사하고자 지중환경특성을 측정할 수 있는 관입형 환경콘 시스템을 개발하고자 한다.

상기와 같은 연구를 위하여 본 논문에서는 일차적으로 실내 모형실험을 실시하여 환경콘 시스템의 현장 적용성을 타진하였다. 실내실험은 크게 전기비저항, pH, 온도를 측정할 수 있는 실내모형콘 실험과 지반내의 오염물질을 추출하는 오염물추출실험으로 나뉘어 실시하였다. 시험대상지반은 국내에서 널리 분포되어 있는 화강풍화토를 사용하였고, 오염물은 디젤유 및 침출수를 사용하였다. 또한 물을 사용하여 오염되지 않은 시료의 측정결과와 비교하였다. 모형콘은 원하는 형태나 간격으로 전극링을 설치하여 전기비저항을 측정할 수 있도록 하였고, 콘의 내부에 pH센서와 온도센서를 장착하여 오염물질에 따른 pH와 온도를 측정하였다. 오염물 추출장치는 토양의 간극 속에 함유되어 있는 오염물을 추출장치 끝에 부

착된 다공질캡을 통과하여 펌핑되도록 하였고, 채취된 간극수는 농도분석을 실시하였다. 시험결과로부터 지중오염 변화에 따른 전기전도도와 유류농도의 상호 연관성을 분석하였고 추출한 오염수와 대하여 성분분석을 통하여 납, 카드뮴, 구리의 농도를 분석하였다.

2. 지반환경조사용 환경콘 시스템

2.1 연구동향

최근 들어 지반환경공학(Geoenvironmental Engineering)분야와 관련된 사업들이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 사업들은 지반오염과 관련되어 지반조사 및 정화 등으로 광범위하게 전개되고 있다. 토양 환경 보전업무 편람(환경처, 1996)에 제시하고 있는 오염토양 조사법은 지표시료를 채취하여 실험실에서 오염도를 측정하게 되어 있어 경제적으로 많은 양의 정보를 단시간에 얻기에는 한계가 있다. 따라서 지반관입장비에 오염물을 측정할 수 있는 측정센서나 샘플러를 부착하여 여러 심도에서 필요한 오염정보를 단시간에 얻을 필요가 있다.

관입방법에 의한 지반오염조사는 CPT장비에 온도센서를 부착하여 지중의 생물/화학적 반응에 의한 오염물을 판정하는 것으로부터 전기센서를 부착하여 지반의 오염도를 측정하는 것까지 매우 다양하다. 전기기법은 Krozen(1981)에 의하여 모래의 밀도를 측정하는데 사용되었고, Horsnell(1988)과 Campanella(1991)등에 의하여 오염지반을 측정하는 데에 사용되었다. Campanella(1991)은 전기비저항은 흙과 간극수에 커다란 영향을 받음을 규명하였고, Bratton(1993)은 pH센서를 이용하여 산화물질이 많이 함유되고 있는 오염지반의 pH를 측정하였다. Oile(1992)는 pH와 전기비저항, Redox Potential을 측정할 수 있는 Chemicone을 이용하여 네덜란드의 석유화학단지내의 저장탱크 주변의 오염도를 측정하였다. 미육군공병단은 1991년에 Site Charaterization and Analysis Penetration Sysytem(SCAPS)을 개발하여 석유오염지역에 대한 지반조사를 실시한 바 있다. 한편, 유류로 오염된 지역에서는 UV센서를 이용하여 지반의 오염도를 탐지하기도 한다.

2.2 환경콘 시스템

본 연구에서 최종적으로 개발하고자 하는 환경콘 관입시스템(이하 환경콘)의 개략도는 그림 1과 같다. 지중에 오염된 다양하고 복잡한 오염상황을 판단하기 위하여 환경콘은 전기비저항, Redox Potential, pH, 온도, 오염물 추출(Suction)장치를 사용하여 오염물질에 대한 정보를 종합적으로 파악하여 오염지역을 정확히 조사할 수 있도록 하였다.

본 장비에 장착된 전기비저항 측정용 전극링은 부식이 적고 전기전도율이 좋은 티타늄 재질로 제작하였고, 내부로 전선을 배선하여 원하는 형태나 간격으로 전기비저항을 측정할 수 있도록 하였다. Redox Potential과 pH센서는 전극이 파손되는 것을 방지하기 위하여 전극을 평면으로 가공하였고, 무보충식 센서를 사용하여 센서의 보충액을 교체하는 불편함을 없앴다. 또한, 콘의 중간부분에 온도센서를 장착하여 오염물의 생물/화학적 변화에 따른 지중의 온도변화를 측정할 수 있도록 하였다. 환경콘의 내부에 장착된 오염물 추출장치는 토양의 간극 속에 존재하고 있는 오염물을 채취하여 실험실에서 오염물을 정밀분석할 수 있도록 하였다. 또한 측정심도별로 실험이 끝난 후, 환경콘 내부에 연결된 관으로 물을 주입하여 센서들을 세척한 후에 다음의 측정을 진행하도록 하였다.

그림 2와 같이 본 연구를 통하여 개발되는 환경콘은 오염예상지점에 관입하여 오염측정센서들의 오염민감도를 깊이별로 관측하여 측정센서별로 반응한 결과를 분석할 수 있다. 또한 각 측정값의 상호관계를 분석하여 좀더 정확하고 종합적인 결과를 분석하여 오염지역의 오염범위, 오염농도, 오염두께, 지질구조 등을 종합적으로 판단하여 향후 지반정화 대책공법을 마련하는 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

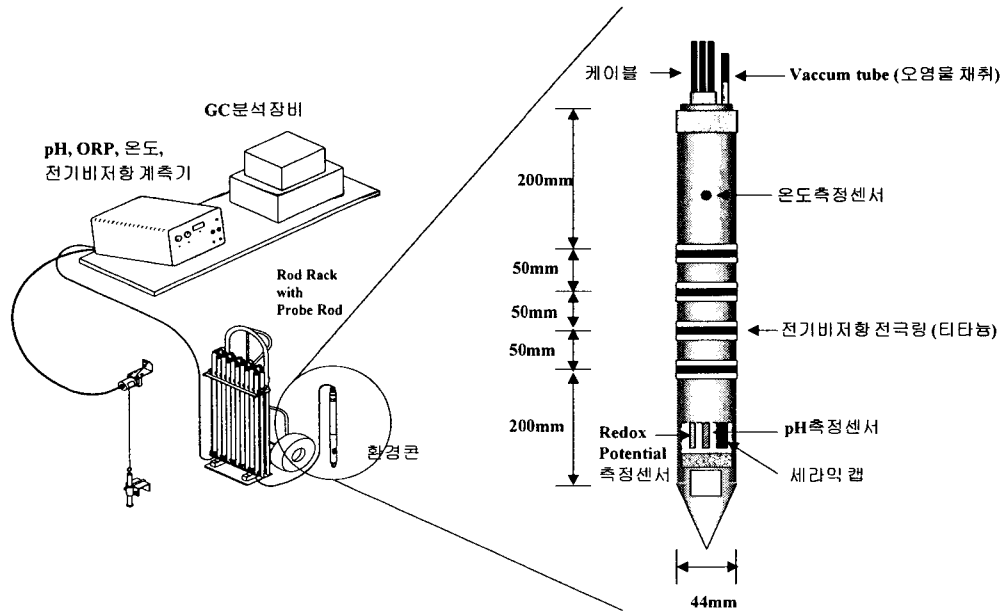


그림 1. 환경콘 관입시스템

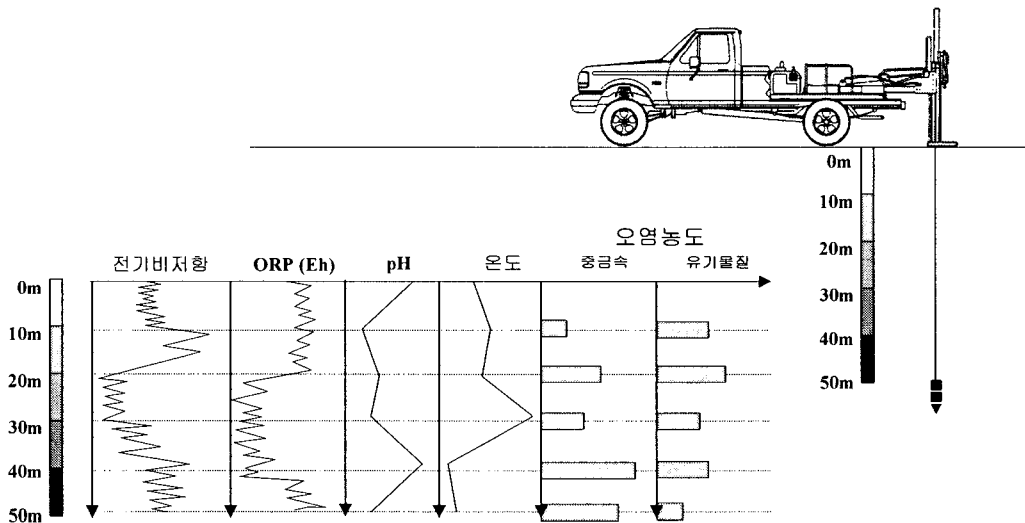


그림 2. 환경콘 관입시스템의 측정항목

3. 실내모형실험

본 실험은 식물 환경콘시스템을 개발하기 위한 기초연구단계로 전기비저항, pH, 온도 및 지반오염도를 측정할 수 있는 실내모형콘을 제작하여 관련 실험을 실시하였다.

3.1 모형콘에 의한 전기비저항, pH 및 온도 측정

실내모형콘 실험에서 조성된 시료는 화강풍화토 지반으로 봉천동 인근야산에서 채취하여 24시간동안 노건조시킨 후, #4(4.76mm)체를 통과시킨 시료를 실험에 사용하였다. 인공지반은 물과 침출수 및 디젤유의 혼합시료에 대한

다짐시험 결과를 바탕으로 최대건조밀도의 80%로 다짐하였다. 오염물질인 일반수, 일반수와 디젤유의 혼합물(혼합비 1:1), 디젤유, 침출수, 침출수+일반수(혼합비 1:1), 침출수와 디젤유의 혼합물(혼합비 1:1)을 흙시료에 골고루 혼합하여 사용하였다. 오염물질의 함수비의 변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 오염물질의 함수비를 5%, 10%, 20%로 하였다. 전기비저항치의 측정방법은 Schlumberg방법과 Wenner방법(전극간격 : 20cm)을 사용하였고, pH와 온도는 계측기로부터 출력되는 값을 측정하였다.

모형콘은 전기가 통하지 않은 플라스틱재질로 제작하였으며, 원하는 형태나 간격으로 비저항치를 측정할수 있게 전극링을 설치하였다. 전극링은 티타늄재질로 열전도도 및 열팽창율이 작고 고도의 내식재료로서 전도도 센서의 전극용으로 우수한 재료이다. 또한 콘의 끝부분과 중간부분에 각각 pH센서와 온도센서를 장착하였다. pH센서는 전극이 파손되는 방지하기 위하여 전극을 평면으로 처리하였고 무보충식 센서를 사용하여 센서의 보충액을 교체하는 불편함을 줄였다. 모형시험에 사용한 토조는 콘 상에서 전위가 분포하는 영향거리를 고려하여 그보다 조금 넓은 300mm로 하였고 높이는 1,000mm이었다. 또한 모형콘의 전기적 성질을 고려하여 재질을 PVC로 하였다. 토조는 PVC관을 이용하여 제작하였으며 바닥면은 오염물이 누수되지 않게 방수/처리하였다.

3.2 추출장치에 의한 오염간극수 채취

본 실험은 향후, 환경콘 관입시스템내에 장착하게 될 오염물 추출장치를 개발하기 위한 기초단계로 토양의 간극 속에 함유되어 있는 오염물을 추출하기 위한 기초실험이다. 여기에서 오염물로 침출수를 사용하였다. 침출수는 침출수 원액 100%와 침출수와 일반수를 1:1로 혼합한 혼합물을 사용하였다.

실험은 30cm×20cm×20cm(h) 크기의 플라스틱 상자에 화강토를 다짐도 80%로 조성하였고, 김포매립장에서 채수한 침출수 4ℓ를 화강토에 부어 토양이 완전하게 포화될 수 있도록 하였다. 24시간 경과 후, 진공펌프를 사용하여 침출수를 추출하였다. 화강토에 투여되기 전의 원수와 추출장치로 추출된 채취수에 대하여 화학성분분석을 실시하여 원수와 성분 비교하였다. A1 110F Atomic Absorption Spectrometer를 이용하여 원수 및 채취수내의 납, 구리, 카드뮴의 중금속 함유량을 분석하였다.

4. 결과분석 및 고찰

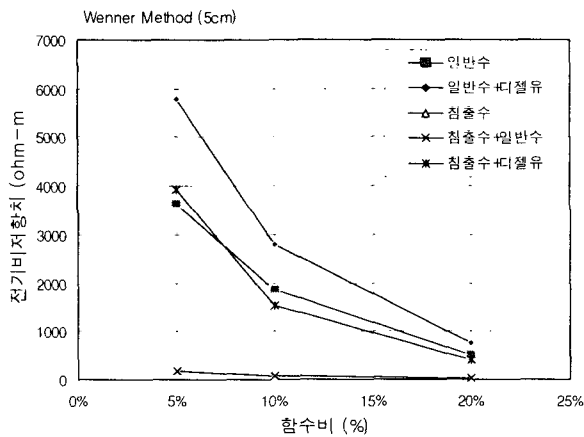
4.1 전기비저항 측정결과

모형콘을 사용하여 실내실험에서 측정한 전기비저항값을 그림 3에 제시하였다. 일반수를 사용한 경우는 함수비가 증가할수록 일반수에 함유되어 있는 이온물질의 영향으로 전기비저항값이 감소하였다. 일반수와 침출수의 혼합물에서 전기비저항치는 일반수와 비교할 때, 상당히 작은 전기비저항값을 나타냈다. 침출수를 사용한 경우의 전기비저항치는 일반수를 혼합한 경우와 비교하였을 때, 최대 1/20정도로 전기비저항치가 크게 감소하였으며, 일반수와 침출수를 혼합한 경우와 비교하여도 전기비저항값은 약 2/3에서 1/2정도로 작게 나타났다. 다양한 이온 성분을 함유하고 있는 침출수는 전기비저항 센서의 감지가 잘 반응되고 있었다. 디젤유로 오염된 토양은 전기비저항값이 상당히 크기 때문에 측정이 되지 않았다. 일반수와 디젤유의 혼합물의 경우, 전기비저항값은 일반수의 경우보다 약 1.5배정도 크게 나타났다. 디젤유와 침출수를 혼합한 경우, 일반수를 값과 비슷하게 나타났다. 위와 같은 결과에서 전기비저항이 높은 디젤유가 전기비저항이 낮은 침출수와 혼합하여 일반수와 비슷한 비저항값을 나타낸 것으로 판단된다.

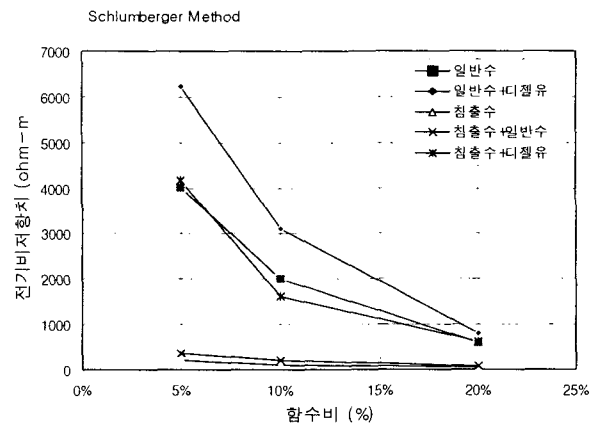
오염된 지반에 대해 전기비저항값의 변화정도를 파악하기 위하여 전기비저항비를 다음과 같이 표현하였다.

$$\text{비저항비} = \frac{\text{오염물이 함유된 지반의 비저항값}}{\text{오염되지 않은 일반수가 함유된 지반의 비저항값}} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 산출한 비저항비를 분석한 결과, 그림 4와 같이 디젤유가 혼합된 오염물의 비저항비는 일반수의 비저항비인 1보다 큰 값을 보이며, 침출수 성분의 오염물에는 비저항비는 작은 값을 나타냈다. 침출수는 전기비저항비가 상당히 작은 값을 나타내고 있으나, 디젤유는 측정되지 않거나, 침출수나 일반수가 혼합된 디젤유는 침출수의 전기저항비의 변화에 비해 크게 변화되지 않았다. 전기비저항치는 오염물질이 함유된 오염지반의 오염정도를 간단하게 판단하는데 이용될 수 있다.

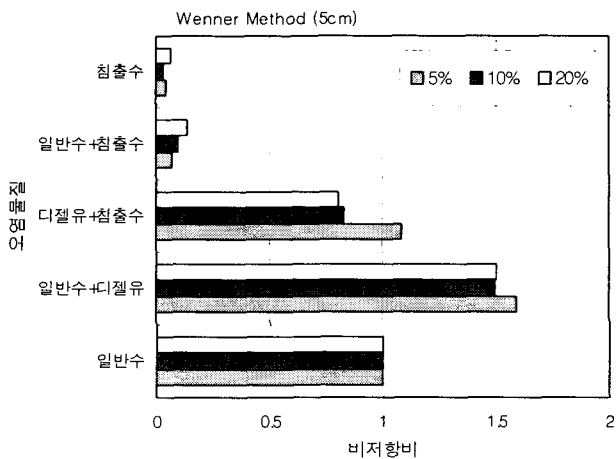


(a) Wenner방법 (전극배열 5cm)

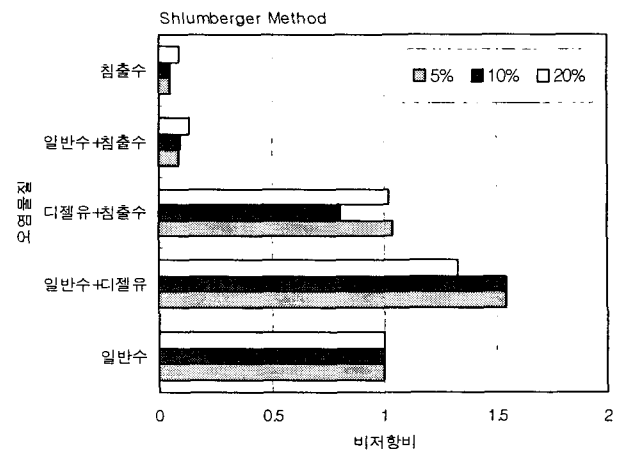


(b) Schlumberger방법

그림 3. 전기비저항 측정결과



(a) Wenner방법 (전극배열 5cm)



(b) Schlumberger방법

그림 4. 전기비저항비 산정결과

4.2 pH 측정결과

환경콘에 장착된 pH센서를 통하여 측정된 오염토양의 pH는 그림 5와 같이 전체적으로 5.15~7.66의 범위로 나타났다. 전체적으로 디젤유가 함유된 오염지반의 pH값이 일반수와 침출수가 함유된 지반의 pH값보다 크게 나타났다. 측정된 pH값은 함유비 및 함수비에 따라 크게 변화되지는 않았다. 본 연구에서 사용된 일반수, 침출수 및 유류의 pH가 거의 비슷한 크기를 가지고 있기 때문에 이들로 오염된 지반의 pH값도 크게 변화가 없었다. 그러나

본 환경콘에 장착된 pH센서는 민감도 및 정밀도가 매우 높은 것이기 때문에 실제 강한 산성이나 알칼리성으로 오염된 지역에서는 pH를 성공적으로 측정할 수 있을 것이다.

4.3 온도 측정결과

환경콘에 장착된 온도센서를 통하여 측정된 오염토양의 온도는 그림 6과 같이 일반토양의 경우에는 8.9~9.1℃로 나타났고, 침출수로 오염된 토양의 경우에는 10.7℃에서 14.6℃, 디젤유로 오염된 토양의 경우에는 9.0℃에서 9.2℃로 측정되었다. 온도측정에서는 오염물의 종류나 함유비의 변화에 따라 온도의 변화가 크게 영향을 받지 않았으며, 이는 생물/화학적 반응에 의하여 열이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 전체적으로 측정값은 약 9℃ 정도로 나타났으나 침출수의 경우에는 함유비 5%에서는 14.6℃로 크게 나타났다. 측정당시의 실험실내의 실내온도값과 측정된 온도 값이 비슷하게 나타났고, 상기와 같은 결과는 지중의 오염물의 영향보다는 실내온도의 변화에 따라 온도값이 변화가 발생된 것으로 판단된다. 이로부터 본 환경콘에 장착된 온도센서를 통하여 지중환경내의 온도를 정밀하게 측정할 수 있음이 입증되었다.

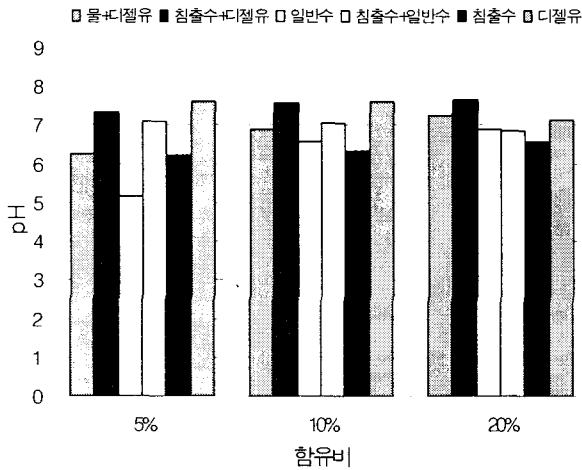


그림 5. pH 측정결과

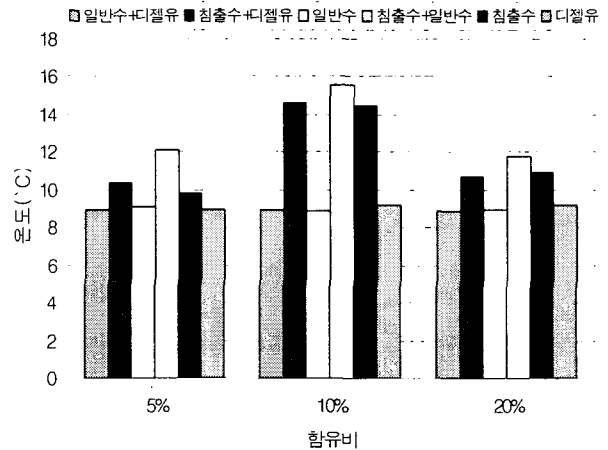


그림 6. 온도 측정결과

4.4 채취수의 오염도 분석결과

오염물 추출장치를 이용하여 침출수로 오염된 지반내에서 추출한 간극수에 대한 성분분석 결과를 정리하면 표 1과 그림 7에 나타난 바와 같다. 성분분석 당시, 실험실의 실내온도는 20℃로 동일하게 유지하였다. 간극수에 포함된 오염물질 중에서 구리, 카드뮴, 납 등의 중금속의 농도를 분석하였다.

채취한 침출수(이하 채취수)와 흙과 혼합하기 전의 침출수(이하 원수)에 대한 성분분석결과를 살펴보면, 원수의 납과 카드뮴의 함유량이 채취수의 함유량보다 2배 이상으로 많은 것으로 나타났다. 이것은 화강토가 중금속을 흡착하여 채취수의 중금속 함유량이 줄어든 것으로 판단된다.

표 1. 원수와 채취수의 중금속 농도분석 결과

측 정 종 목	침출수 (원 수)	침출수 (채취수)	침출수+물, 50%희석 (원 수)	침출수+물, 50%희석 (채취수)
온 도(℃)	20.2	20.0	20.1	20.1
구 리 (ppm)	N.D	N.D	N.D	N.D
카드뮴 (ppm)	0.199	0.098	0.123	0.041
납 (ppm)	0.246	0.099	0.201	0.023

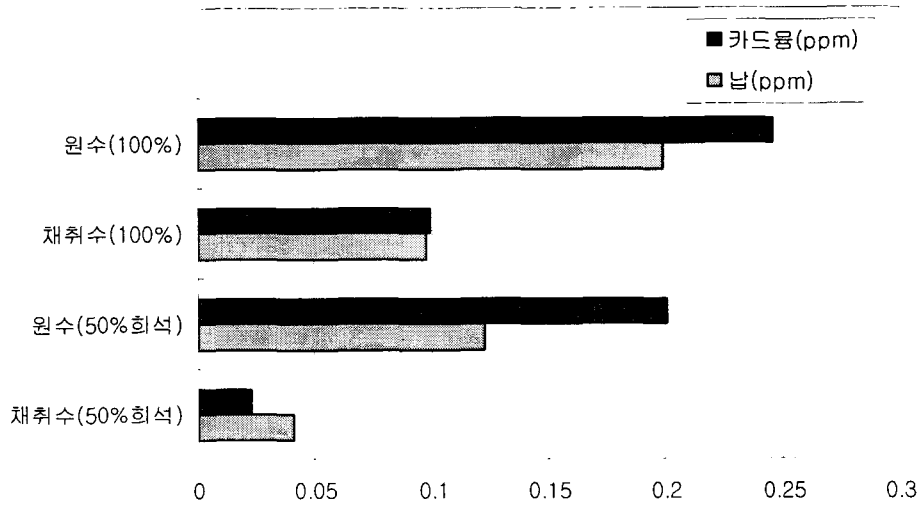


그림 7. 원수 및 채취수의 농도분석 결과

5. 결론

- 1) 모형콘을 사용하여 실내실험을 수행한 결과, 일반수와 침출수를 사용한 경우는 함수비가 증가할수록 일반수에 함유되어 있는 이온물질의 영향으로 전기비저항값이 감소하였다. 특히, 침출수를 사용한 경우의 전기비저항치는 일반수를 혼합한 경우와 비교하였을 때보다 전기비저항치가 크게 감소하였다. 다양한 이온성분을 함유하고 있는 침출수는 전기비저항값이 가장 작게 나타났다. 디젤유로 오염된 토양은 전기비저항값이 측정이 되지 않았다.
- 2) 각각의 오염물에 대한 비저항비에서 디젤유는 일반수의 비저항비인 1보다 큰 값을 보이며, 침출수의 비저항비는 1보다 작은 값을 나타냈다. 침출수는 전기비저항비가 작은 값을 나타냈지만, 디젤유가 함유된 오염물은 측정되지 않거나, 침출수가 함유된 오염물의 전기저항비의 변화에 비해 크게 변화되지 않았다.
- 3) pH측정에서 디젤유가 함유된 지반의 측정치가 일반수와 침출수가 함유된 지반의 값보다 크게 나타났다. 또한 온도측정에서는 오염물의 종류나 함수비의 변화에 따라 영향을 받지 않았으며, 실험실내의 실내온도와 비슷한 값을 나타냈다.
- 4) 오염물 추출장치를 이용한 간극수의 성분분석 결과, 혼합하기 전의 납과 카드뮴의 함유량이 채취한 침출수의 함유량보다 약 2배 이상으로 많은 것으로 나타났다. 이것은 화강토가 중금속을 흡착하여 채취수의 중금속 함유량이 줄어든 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 엔지니어링핵심 사업의 1차년도 연구인 “구조물의 안전성과 경제성을 높이기 위한 지반조사기술 개발 및 D/B 구축”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 오염지반의 거시적 분포 및 오염원의 형태조사기법 개발, '96연구개발사업 연차보고서, 1997
2. 신은철, 홍승서, 원유로 오염된 사질토의 공학적 특성, 한국토양환경학회논문집, Vol. 2, No. 1, 1997
3. 윤길립 외 4인, 오염지반의 전기비저항치와 토성과의 상관성 연구, 한국지반공학회지 Vol.14 No.2, pp.79~92, 1998
4. 정하익 외 2인, 오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 1995
5. 정하익, 지반환경공학, 도서출판 유림, 1998
6. 환경처, 토양질 측정현황, 한국환경연감, 1987-1991
7. Campanella, R. G. and I. Wemees, "Development and use of an electrical resistivity conr for groundwater contamination studies", Canadian Geotechnical Journal, 27(5), pp. 557-567, 1990.
8. Brandl, H. and P. K. Robertson., Geo-environmental site investigation, specification and characterization, Environmental Geotechnics, A.A. Balkema, 1997.
9. Acar, Y. B. & D. E. Daniel, Geoenvironment 2000: characterization, containment, remediation, and performance in environmental Geotechnics, geotechnical Special publication No. 46, ASCE, 1995
10. Robison, R. "Detecting leaks electronically", Civil Engineering, v. 66, 1996
11. Rumer, R. R. and J. K. Mitchell, "Assessment of barrier containment technologies" International Containment Technology Workshop, Baltimore, Maryland, 1995
12. Sandberg, C. and M. Masia, "Advances in hydrocarbon leak detection with a distributed sensor system that is vapor intensive", Advances in instrumentation and control: Proceedings of the ISA International Conference and Exhibit, 1991
13. Tuncan, A. and S. Pamuku, "Geotechnical properties of petroleum and sludge contaminated marine sediments", Proceeding of the second international offshore and polar engineering conference, pp.388-397, 1992
14. White, C. C. and R. D. Barker, "Electrical leak detection system for landfill liners: a case history", Groundwater Monitor Remediation, v.17, No.3, 1997
15. Williams, C. V., S. D. Dunn and W. E. Lowry, "Tracer verification and monitoring of containment systems (II)", Proceedings of the Ingernational Containment Technology Conference, St. Petersburg, Florida, 1997