

## 전기비저항을 이용한 지반오염누출감지시스템 개발

### Subsurface Contaminant Leak Detection System using Electrical Resistivity Measurement

박준범<sup>1)</sup>, Junboun Park, 오명학<sup>2)</sup>, Myoung Hak Oh, 이주형<sup>3)</sup>, Ju Hyung Lee

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.

<sup>2)</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.

<sup>3)</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.

**SYNOPSIS** : Leakage detection system can possibly locate leak point without laboratory analysis. Several different types of sensors provide these benefits. But the use of these technologies is not widespread, mainly because of cost. Each of the leakage detection systems available has different advantages and disadvantages. The ideal system would be affordable, durable enough to last through the life of the landfill, automated, and applicable to all types of landfills. The laboratory tests were performed to investigate the relationship between electrical resistivity and the unsaturated subsurface condition and to evaluate the contamination due to leachate based on measuring electrical resistivity. The results of experiment show that the electrical resistivity of soil decreases as moisture density increases. The electrical resistivity of soil decreases as the concentration of leachate in pore fluid increases. These facts indicate that electrical resistivity method can be a promising tool in detecting of leachate. Also, the field model tests were conducted to verify that detection of leachate leak point on detection system using electrical characteristics is accurate. Field model test results of leakage detection system imply that the leakage detection system using electrical characteristics have the great potential of detecting exactly the leak point of leachate.

**Key words** : leak detection system, electrical resistivity, leachate

## 1. 서론

지반 오염을 일으키는 원인은 여러 가지가 있으나 침출수가 가장 큰 문제점으로 부각되고 있으며 실제로 지반 및 지하수의 오염에 있어서 가장 큰 비중을 차지하고 있다.

쓰레기의 처리 방법은 국내의 경우 소각과 재활용에 대한 비율이 증가하고는 있지만 아직

도 대부분은 매립에 의한 처리를 하고 있다. 현재 매립이 차지하는 비율은 거의 70%에 해당하며 앞으로 획기적인 처리법이 개발되지 않는 한 매립에 의한 처리는 당분간 쓰레기 처리에서 중요한 위치를 차지할 것이다. 그러나 현재까지의 매립지는 차수시설이 제대로 갖추어지지 않은 비위생매립지가 그 수의 상당부분을 차지했으며 최근에 많이 설치되고 있는 위생매립지도 시공과 관리의 경험부족으로 인접지역에 적지 않은 피해를 주고 있다.

매립지에서 흘러나오는 침출수는 인근 토양과 지하수 및 하천을 오염시키기 때문에 그 위해성이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 매립지를 선정, 시공하는 경우 바닥층에 차수재를 설치하여 침출수가 매립지 하부의 토양과 지하수를 오염시키는 것을 방지한다. 그러나 이렇게 차수재를 설치하여도 바닥 지반층과 soil cover 재료의 성질, soil cover와 차수재 설치작업의 정확성, 특히 차수재 간의 결합(welding) 작업의 숙련도 등에 따라서 차수재(liner)의 많은 부분이 파손된 채 매립이 진행된다. 이런 상태에서 매립이 진행되면 파손된 차수재를 통해 침출수가 누출되어 장기간에 걸쳐 인접 지역을 오염시키게 된다. 외국의 경우 Laine and Darilek(1993)은 전체 850,000m<sup>2</sup> 면적의 매립장에 대하여 누출여부를 조사한 결과 평균적으로 1,000m<sup>2</sup>당 2.25개의 지점에서 누출이 발생하고 있음을 발표한 바 있고, Darilek et al.(1989)은 1,000m<sup>2</sup>당 3.4개의 누출지점이 있었다고 발표하였다. 아직 국내는 구체적으로 그 양과 심각성이 보고된 바는 없지만 국내에서도 외국에 못지않게 차수재의 파손이 있으리라는 것은 쉽게 짐작할 수 있다.

현재의 오염 조사 방법은 오염이 의심되는 지역이나 피해가 발생한 지역에 대하여 시료를 채취하여 분석하거나 지구물리화학적 방법을 이용하여 조사하는 방법이 많이 수행되고 있다. 시료를 채취하여 실험실에서 분석하는 방법은 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 시료를 샘플링하는데 시간이 많이 소요되고 비용이 많이 든다. 또한 샘플링은 시간에 따라 연속적이지 않고, 시료의 샘플링이나 운반과 분석과정에서 시료가 추가적으로 오염될 가능성도 지니고 있다(Kaya and Fang, 1997). 지구물리화학적 방법은 기존의 샘플링방법의 많은 단점을 보완하고 있지만 시간에 따른 지속적인 분석을 수행하지는 못한다. 그리고 두 방법 모두 오염이 어느 정도 진행된 이후에 수행하게 된다는 문제가 있다.

그러므로 쓰레기 매립장에서는 매립이 완료되기 이전에 차수재의 파손된 위치를 파악해서 차수 시스템을 교체 및 보수하는 등의 적절한 조치를 신속히 취하여 침출수와 유류로 인한 주변 환경의 오염을 최소화하기 위한 시스템이 요구되어진다. 그러나 현재 개발되어 있는 누출감지시스템은 특정한 형태의 시설에 한정되어 오염물질 누출을 감지하도록 개발되어 있으며 매우 비용이 많이 소요되기 때문에 널리 활성화되어 쓰이지 못하고 있다.

본 논문에서는 먼저 현재까지 외국에서 개발된 누출감지시스템의 종류와 특성을 정리하였다. 또한 전기비저항을 이용한 누출감지시스템의 개발을 위하여 먼저 지반의 전기적 특성과 침출수로 인한 전기비저항의 변화경향을 도출하였으며, 이를 토대로 전기비저항측정기법을 활용한 누출감지시스템을 개발하여 현장모형시험을 통하여 이의 적용성을 평가하였다.

## 2. 기존의 누출감지시스템

### 2.1. 누출감지시스템의 개요

매립장 차수재(landfill liner)에서 발생하는 누출에 대한 조사는 폐기물 처리와 지반환경적

측면에서 기본적인 부분이라고 할 수 있다. HDPE(High Density Polyethylene) 차수막 설치 시 완벽한 용접시공을 하지만 많은 경우 차수막이 손상되어 추후 쓰레기 매립시 침출수가 누출되고 있는데 그중 대부분의 손상(90%이상)은 보호토양 포설시나 다른 공사의 장비나 차량에 의해서 또는 바닥의 날카로운 돌이나 이물질로 인하여 차수막이 손상되어 있는 것으로 나타나있다(정하익, 1998). 따라서 공사 완료후 쓰레기 매립직전에 손상된 부위를 정확하게 찾아내어 보수할 수 있는 시스템이 요구된다. 또한 필요한 경우에는 매립중이나 혹은 매립 완료 후에도 차수막의 손상여부를 감지할 수 있는 기능을 지속적으로 갖추어야 한다.

매립장에서의 침출수의 누출에 대한 조사는 모니터링정을 설치하여 조사하는 방법과 누출 감지 시스템을 설치하는 방법으로 나누어볼 수 있다. 누출 감지 시스템은 실험실에서 샘플의 별도 분석없이 조기에 현장에서 누출 여부와 누출지점을 찾아낼 수 있는 장치이다. 그러나, 누출감지 시스템은 주로 비용의 문제 때문에 아직까지 널리 사용되지는 않았다. 최근 국내에서 현재 건설중이거나 건설계획중인 매립지는 위생매립지의 개념으로 건설되므로 누출 감지시스템이 설치되거나 설치를 검토하는 사례가 증가하는 추세에 있다(박준범 등, 2000).

그러나 아직까지 완전한 비포화대(vadose zone) 모니터링 시스템은 만들어지지 않은 상태이며, 이상적인 시스템은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- 가격이 적절해야 한다.
- 매립지의 수명이 다 할 때까지 유지될 수 있는 충분한 내구성을 가져야 한다.
- 누출 지점과 누출 양을 정확히 측정해야 한다.
- 측정 작업이 자동화되어야 한다.
- 어떤 유형의 매립지나 침출수에 대해서도 적용 가능해야 한다.
- 매립지 아래의 전체 지역에 대하여 공간적인 모니터링을 수행할 수 있어야 한다.

## 2.2. 외국의 오염물질 누출감지시스템

매립장의 침출수 혹은 지하저장탱크의 누출감지 시스템이란 누출이 발생한 즉시 누출 여부와 그 위치를 파악할 수 있는 시스템을 말한다. 따라서 누출감지 시스템을 설치하는 것은 오염이 어느 정도 진행된 이후에 조사하는 어느 모니터링 기법과는 달리 지반과 지하수의 오염을 막기 위한 가장 적극적인 형태의 방법이라 할 수 있다. 침출수의 누출을 조기에 감지하여 보수함으로써 오염물질의 확산을 조기에 차단하고 오염초기에 정화작업을 수행할 수 있기 때문이다.

현재까지 개발된 누출감지 시스템은 전기적 성질을 이용한 누출감지 시스템이 가장 많이 개발되었으며, 트레이서 시스템과 같은 파이프라인의 누출감지에 사용되는 것을 매립지에 적용한 시스템도 있다. 또한 지구물리탐사법을 응용한 방법도 있고, 최근에 개발되고 있는 방법으로 광섬유나 음향을 이용한 방법도 있다. 각 방법들은 그 원리 및 측정방법에 따라 설치방법도 다르고 각각의 장단점이 있기 때문에 현장에 설치할 경우에는 현장의 특성과 설치 목적에 맞는 시스템을 선택하여 사용하여야 한다. 각 시스템의 특징을 표 1에 정리하였다. 아직까지 완전한 누출감지시스템은 개발되지 않았기 때문에 현재까지도 오염물질의 누출감지를 위한 센서개발에 대한 연구가 계속 진행중이다.

표 1. 외국의 누출감지시스템 특징요약

Monitoring Technique	Installable anytime	Locates leak	Determines size	Widely available	Reusable	Tests automatically
Two electrode method	○				○	
Electrode grid method		○	○		○	
Diffusion hoses		○	○		○	○
Capacitance sensors		○		○	○	
Tracers	○				○	
Sensing cables		some		○	some	○
Geosynthetic membrane monitoring system		○			○	
SEAttrace		○	○		○	
LIDAR	○				○	

### 2.2.1. 전기적 방법(Electrical Method)

#### (1) 쌍전극법(Two Electrode Method)

이 방법은 전기적 성질을 이용한 가장 간단한 방법으로서 하나의 전극(electrode)은 매립지 안쪽에 설치하고 다른 하나는 차수재에 의해 차단된 지역(containment area)의 외부 지반에 설치한다. 두 전극사이에 전기장을 걸어주면 차수재의 전기적 저항이 매우 크기 때문에 차수재에 결함이나 손상이 없다면 전류의 흐름이 감지되지 않을 것이다. 그러나 전류 흐름이 감지되었다면 누출이 있음을 나타낸다. 이 방법은 차수재 아래에 어떤 센서도 설치하지 않기 때문에 기존의 매립지에서 누출을 감지하는데 특히 유용하다. 그러나 단지 누출의 유무만을 알 수 있고 누출의 수, 크기, 위치를 파악할 수 없다. 즉, 누출지점의 수나 누출량과 관계없이 누출에 의한 전류의 흐름이 발생할 수 있으므로 누출의 여부만을 조사할 수 있다.

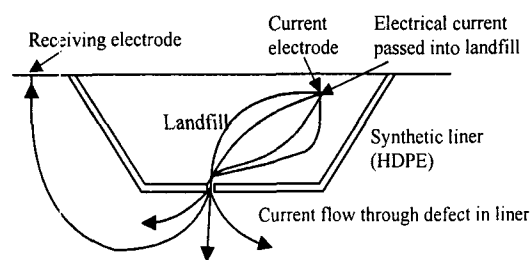


그림 1. 매립지에서 liner의 결함으로 인한 전류의 흐름

#### (2) 전극 격자 배치법(Electrode Grid Method)

이 방법은 근본적으로는 쌍전극법과 유사하나 매립장을 건설할 때 차수재 아래에 전극을 격자형으로 설치하여 누출위치 파악을 용이하게 한 방법이다. 격자형으로 설치된 전극(electrode)은 전극 주위의 지역에 전류를 통하게 하고 각 전극 주변 지반의 전압을 측정하는데 사용된다. 침출수는 이온성 성분을 많이 포함하고 있으므로 침출수의 누출이 발생한 지점에서는 높은 전압을 나타내게 된다. 그러나 매립지 건설중에 차수재 아래에 전극을 설

치해야 하므로 기존의 매립지에는 적용할 수 없다.

(3) 이동전극 시스템(Moving Electrode System)

이동전극 시스템은 1980년대에 미국에서 개발된 것으로 다른 방법들과 마찬가지로 지오멤브레인의 절연성을 이용하여 차수재에 누출이 발생할 경우 그 위치에서 발생하는 높은 전류 흐름을 감지한다. 쌍전극법(Two Electrode Method)의 원리를 발전시킨 방법으로 그 대략적인 구성은 그림 2와 같다. 차수재를 경계로 매립물과 인접지반에 각각 전극을 위치시켜 전류를 흐르게 하고, 매립장 표면에서 전극을 이동시키면서 전압포텐셜을 구한다. 어떠한 누출도 일어나지 않는 경우는 전압포텐셜이 일정하게 나타난다. 그러나 누출이 일어나 그 곳에 전류밀도가 커지게 되면 전압포텐셜이 이상적으로 크게 나타난다. 차수재가 단일차수 시스템(single lined system) 경우는 다른 한 극을 인접 지반에 위치시키고 차수재가 이중 차수 시스템(double lined system)인 경우는 한 극을 누출 감지 지역(leak detection zone)에 위치시킨다.

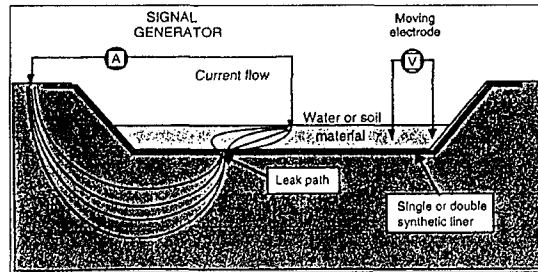


그림 2. 이동전극 시스템의 개요도 (Colucci et al, 1995)

(4) 전류밀도 측정법

매립지 바닥에 감지기를 설치하고 감지기 상부에 지오멤브레인과 보호층을 설치한다. 감지기 상부에 설치된 전기회로를 통하여 전원을 가하고 차수막 하부의 감지기로부터 전류밀도를 측정한다. 차수막에 파손이 발생한 경우에는 이 부분에서 비정상적인 전류흐름이 발생하게 된다. 콘트롤 박스에 수집된 데이터의 전산처리를 통해 2차원 및 3차원의 등고선을 그릴 수 있으며, 등고선에서 첨두점이 바로 차수막이 파손된 지점을 가리킨다. 본 차수막 누출 감지 시스템은 단일 차수막 뿐만 아니라 이중 차수막의 파손 감지도 가능하다.

(5) 적용사례

영국의 Sandy Lane 매립지는 1995년에 건설될 때 전기적 성질을 이용한 누출감지 시스템인 쌍전극법(two electrode method)과 전극격자법(electrode grid method)을 적용하여 시공하였다. 이 매립지에서는 누출 위치를 찾아내기 위하여 전극들을 격자로 차수재 아래에 설치하였다. 하나의 전극을 차수재 검사에 대한 전류 공급원(current source)으로서 차수재 위의 보호층(protection layer)에 설치하였다. 차수재 아래쪽에 설치된 전극이 전류를 감지하면 차수재의 갈라진 틈을 통한 누출을 알 수 있다. 그림 3에 나타난 바와 같이 20m 간격으로 스테인리스스틸(stainless steel)로 만들어진 전극(electrode)이 차수재 아래쪽에 설치되었다. Multi-core cable이 각각의 전극과 외부의 측정장소에 위치한 장비와 연결되어 있으며,

전극주위는 높은 전도도를 가진 벤토나이트로 보강된 모래로 채워져 있다. 이 시스템은 원래 차수재가 설치된 후 차수재의 연속성을 확인하기 위해 사용되었다. 작업 첫해에는 한달에 한번씩 모니터링이 수행하여 자료를 수집하고, 1년 후에는 그 이전의 자료에 기초한 계획에 의해 모니터링이 수행되었다(White and Barker, 1997).

다른 예로서 Westec, Inc.에서 개발된 전기적 누출감지 시스템을 들 수 있다. 이 시스템은 12V의 전지로 작동하며 컴퓨터에 의한 데이터 분석을 통하여 누출에 대한 3차원의 그래픽 이미지를 통하여 누출의 여부, 위치, 양을 파악할 수 있다고 한다. 이 시스템은 1987년 이래로 미국 서부에서 10개 현장, 총 20,000,000 ft<sup>2</sup> 이상의 면적에 설치되었다(Robison, 1996).

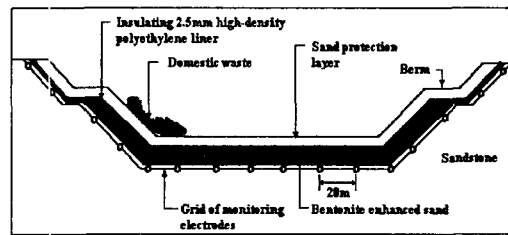


그림 3. Sandy Lane 매립지에 적용된 누출감지 시스템(White and Barker, 1997)

### 2.2.2. 정전용량 센서(Capacitance Sensors)

정전용량 센서(capacitance sensors)는 흙의 유전상수(dielectric constant)를 측정하는 것이다. 건조한 흙의 유전상수는 약 5정도이고, 물의 유전상수는 80정도이므로 흙이 오염물질의 누출에 의해 습윤해지면 유전상수는 증가한다. 그러므로 시간에 따른 유전상수의 변화를 측정하게 되면 그 지역의 누출 발생여부를 알 수 있다.

정전용량 센서는 몇몇 회사에 의해 농업용으로 상용화되어 있다. 이것은 자동으로 함수비를 얻을 수 있도록 프로그래밍되어 있기 때문에 특별히 오염물질이 아니라 모든 액체에 대해 값이 표시된다. 각 탐침(probe)은 주위 흙의 유전상수만을 측정하기 때문에 원하는 적용 범위에서 누출을 감지하기 위해서는 더 많은 탐침이 요구되고, 그렇게 되면 더 많은 비용이 소요된다. 매립장에 적용할 경우에는 매립장 건설 이전에 탐침을 매설하여야 한다.

미국의 Troxler Electronic Laboratories에서 개발된 Sentry 200 Environmental Moisture Monitor System은 탐침(probe)과 케이블로 8개의 탐침까지 연결 가능한 탐침판독기(probe reader)라는 중심장치로 구성되어 있다. 탐침판독기는 자료의 검색을 위하여 data logger에 연결되어있다. 탐침과 탐침판독기는 그림 4와 같다. 1995년 4월에 캘리포니아주, 샌디에고의 San Marcos 매립지에 Sentry 200 EMMS가 설치되었다. 60개의 탐침과 8개의 탐침판독기가 사용되었으며, 자동으로 하루에 4번 함수비를 측정하여 2주에 한번 데이터를 분석하였다.

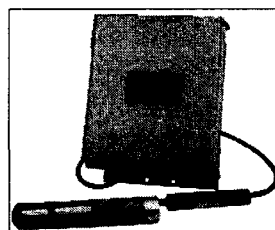


그림 4. Sentry 200 EMMS의 탐침과 탐침판독기

### 2.2.3. 확산관(Diffusion Hoses) 방법

확산관(diffusion hoses)은 원래 파이프에서의 누출을 감지하기 위해 개발되었다. 이 시스템은 매립지 아래 지반에 기체가 통과할 수 있는 튜브를 네트워크로 구성하여 설치한다. 일정시간 후에 관(hose)에서 기체가 배출되면 검출기는 오염물질의 농도를 펌핑 시간(pumping time)에 대한 함수로 기록한다. 오염물질이 검출되는 시간을 관측함으로써 누출 지점을 1~2m 범위의 정확성을 가지고 결정할 수 있다. 튜브 속으로 누출되어 확산되는 농도는 흙 속에서의 농도와 비례하기 때문에 튜브 속 기체의 농도를 분석함으로써 누출량을 결정할 수 있다. 또한 검출기를 통하여 밖으로 나오는 오염된 기체를 샘플링하여 GC(Gas Chromatography)나 다른 분석방법을 이용하여 누출성분을 파악할 수 있다. 그림 5는 확산관 방법의 개요도를 보여준다.

확산관법은 저장탱크와 파이프라인에 폭넓게 사용 가능하다. 이 시스템은 자동화된 것이기 때문에 작업을 수행하는 데 많은 시간이 소요되지 않으며, 자동화 시스템을 작동하는 데 소요되는 비용도 그다지 비싸지 않다. 그러나, 확산관 시스템에 의해 빠르게 누출을 감지하기 위해서는 침출수는 증기(vapor)를 생성해야 한다. 침출수가 어떤 기체도 생성하지 않는다면 이 시스템은 침출수가 직접 튜브에 접촉하여 액체 자체가 튜브에 확산되기 전까지는 누출을 감지할 수 없다. 따라서 침출수가 증기를 생성하지 않으면 확산관은 차수재에 아주 가깝게 설치되어야만 누출되는 지점을 감지할 수 있는 가능성이 높아진다. 그러나 이렇게 되면 설치비용이 매우 많이 소요된다(Sandberg and Masia, 1991).

예를 들어 Siemens에서 제작된 LEOS 누출 감지 시스템의 경우 관은 내구성있는 플라스틱의 몇 개의 층으로 구성되어 있다. 튜브는 정제된 공기로 가득차 있고 이 공기를 반도체 가스 센서에 의해 시험하여 오염물질을 조사하게 된다. 초기 경보가 있으면 누출의 위치와 농도의 분포를 보여준다. 관의 길이에 대해 0.5% 정도의 정확도를 가지고 누출 지점을 감지할 수 있다고 한다.

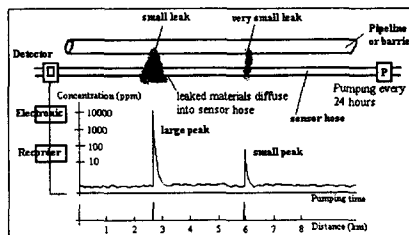


그림 5. 확산관 방법에 의한 누출 감지에 대한 개요도(Stammler and Bol, 1985)

### 2.2.4. 트레이서(Tracers) 시스템

#### (1) 일반적인 트레이서 시스템 개요

트레이서(tracers)를 사용한 누출감지 방법은 저장탱크와 파이프라인에서 사용되도록 고안되었으나 매립지의 누출감지에도 사용이 가능하다. 누출을 검사하기 위하여 휘발성의 화학물질 트레이서를 매립지 안으로 주입하고 매립지의 경계선 근처에 관입된 탐침을 통하여 트레이서가 감지된다면 누출이 발생한 것이다.

이 시스템에서는 트레이서의 물성을 알고 이를 측정하기 때문에 침출수의 구성성분은 크게 관계되지 않는다. 트레이서 시스템은 어떠한 유형의 차단 시설에서도 적용이 가능하다. 또한 트레이서 방법은 탐침이 대상 시설물의 경계면 근처에 설치되기 때문에 매립지의 운영

에 있어 그 시기에 관계없이 누출을 검출할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 대부분의 트레이서 시스템은 누출지점은 찾아낼 수 없고 단지 누출 여부의 판별만이 가능하며, 간극기체에 대한 샘플을 수집하여 분석하는 기술이 필요하기 때문에 비용이 많이 소요된다. 또한 이 시스템에서는 자동적으로 샘플을 수집하거나 분석하는 작업은 불가능하다.

Tracer Research Corporation의 Tracer Tight<sup>®</sup> 시스템은 석유저장시설과 운송시설뿐만 아니라 유해폐수 시스템과 매립지 차수재의 누출감지에 적용되었다. 자동 누출 검출기를 이용하여 흙 속의 트레이서와 탄화수소(hydrocarbon)의 존재여부에 대해 샘플을 연속적으로 수집하고 분석할 수 있다. 모뎀을 통하여 원격 컴퓨터에 의해 샘플에 대한 자료를 수집할 수도 있다.

## (2) SEAttrace<sup>®</sup>

SEAttrace<sup>®</sup> 시스템은 기체상의 트레이서(tracers)를 사용한 누출감지 시스템이다. SEAttrace<sup>®</sup>는 Inverse Global Optimization Code로 데이터를 분석함으로써 누출의 시작 시간과 위치, 크기를 결정할 수 있다. 그림 6은 SEAttrace<sup>®</sup> 시스템의 개요를 보여주는 그림이다. SEAttrace<sup>®</sup>는 그림에 나타난 바와 같이 차수재의 바깥쪽에 멀티포인트 모니터링 시스템이 설치되어야 한다. 그런 다음에 sulfur hexafluoride나 carbon dioxide 같은 트레이서 가스를 대상이 되는 차단지역 즉, 매립지 내부로 주입된다. 만약 모니터링 포트에 가스가 도달하게 되면 각 모니터링 지점에서 간극 기체 중 트레이서의 양을 시간에 따라 측정한다. Global optimization code를 사용하여 누출의 위치, 양, 기간에 대한 최적해를 구하게 된다. 현장 실험에 의하면 SEAttrace<sup>®</sup>는 0.5m 범위 내에서 누출위치에 대한 감지가 가능하고 0.2m 범위 안에서 누출양에 대한 측정이 가능하다.

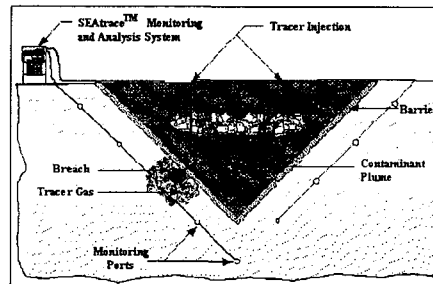


그림 6. 지중내 차단벽 모니터링을 위한 SEAttrace 시스템의 개요도

## 2.2.5. 전기-화학적 감지 케이블(Electro-Chemical Sensing Cables)

### (1) 원리 및 특징

전기-화학적 감지 케이블(electro-chemical sensing cables)은 원래 지하저장탱크와 파이프라인에서 누출을 감지하기 위해 고안되었다. 오염물질이 감지 케이블(sensing cable)에서 물리적, 화학적 변화를 일으키는 것을 기본원리로 하고 있다. 화학적 감지 케이블(chemical sensing cables)은 여러 가지 오염물질에 대해서 폭넓게 사용되며, 특히 탄화수소를 검출하는데 주로 사용된다.

이 시스템을 매립장에 적용하기 위해 각 매립장에서 생성되는 특수한 형태의 침출수를 감지할 수 있는 특별한 케이블을 설치해야 한다. 그러나 침출수 검출에 특별히 적합한 케이블



은 아직까지 상용화되어 있지 않다. 또한, 하나의 케이블은 케이블 주변의 좁은 영역에 대해서만 오염물질을 검출할 수 있다는 것이 단점이다.

### (2) SMART CABLE<sup>®</sup> 시스템

Noverflow Inc.에서 개발한 SMART CABLE<sup>®</sup>은 두 가지 형태의 광섬유누출감지선(fiber optic leak detection cables)으로 되어 있다. 센서의 첫 번째 유형은 폴리머(polymer) 코팅의 팽창과 분해에 의해 오염물질과의 접촉이 차단되는 원리를 이용하였다. 광학적 시간 영역 반사계(optical time domain reflectometer)는 케이블을 통해 빛 파동을 보내어 차단지점으로 부터 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하여 누출의 위치를 조사한다. 이 케이블은 50 mile까지의 거리에 대해 모니터링이 가능하다. 센서의 두 번째 유형은 오염물질이 케이블을 통해 이동하는 빛 파동이 굴절 변화를 일으키는 것을 원리로 한다. 빛을 방사하는 다이오드와 포토 디텍터가 누출을 감지하기 위해 사용된다. 효소가 특수한 화학물질에 혼합되지 않는다면 센서는 가역적이다. 이러한 유형의 케이블은 높은 시각적 감쇠효과를 지닌 섬유로 만들어졌기 때문에 100 ft까지의 거리에 대하여 모니터링이 가능하다. 두 가지 모두 유기부식제와 석유 탄화수소화합물을 검출할 수 있으며, 산업용과 도시 폐기물 매립장에 적용 가능하다. 또한 이 장비는 태양열 에너지에 의해 작동하기 때문에 전지나 다른 전원이 필요하지 않다.

### (3) TraceTek<sup>®</sup> 시스템

Raychem에서 개발한 TraceTek<sup>®</sup>라는 누출감지 시스템은 물이나, 전도성 액체, 연료, 유기 용매까지도 감지한다. 그림 7은 이 시스템의 개요를 보여준다. 원리를 살펴보면, 케이블은 두 개의 회로를 가지고 있는데, 하나는 전류를 전달하는 회로이고, 다른 하나의 회로는 경보 장치를 포함하고 있다. 두 회로 사이에 전기적 접촉이 생기면 경보가 발생하도록 되어 있다. 전기적 접촉은 전도성 유체에 의하여 하나의 회로에서 다른 회로로 전류가 전달되는 것을 말한다. 또한 전기적 접촉은 전선사이의 직접 접촉에 의해서도 발생한다. 내부 감지 케이블 주위를 둘러싸고 있는 전도성 폴리머 슬리브(conductive polymer sleeve)는 대상오염물질과의 접촉에 의해 팽창된다. 외부 차단 브레이드(outer containment braid)는 안에서 팽창하는 폴리머(polymer)와 감지전선(sense wire)을 같이 조이게 된다. 이와 같은 방법으로 누출이 검출되면 누출지점은 자동으로 파악된다(Sandberg and Masia, 1991).

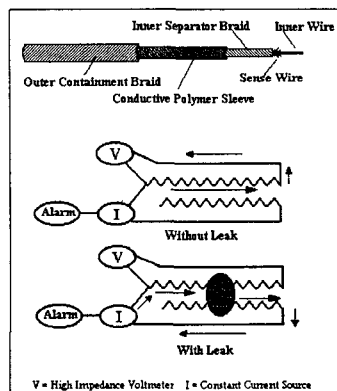


그림 7. Raychem의 hydrocarbon 센서와 감지 메카니즘(Sandberg and Masia, 1991)

### 2.2.6. 지오멤브레인 모니터링 시스템(Geosynthetic Membrane Monitoring System)

Sandia 국립연구소는 지오멤브레인에 광섬유(fiber optics)를 내장시켜서 변형에 대해 모니터링 할 수 있는 멤브레인을 개발하였다. 광섬유선(fiber optic line)에 만들어놓은 마이크로밴드(microbend)라고 하는 작은 주름 때문에 변형을 측정할 수 있다. 이것을 이용하여 매립장의 차수재와 덮개(cap)로 사용되는 지오멤브레인이 늘어나거나 찢어지는 것을 조사하는데 이용된다. 마이크로밴드는 전체 광섬유(optical fiber)를 따라 존재하거나 혹은 섬유(fiber)의 일부분에 만들어 놓을 수 있다. 지오멤브레인이 찢어지거나 늘어나게 되면 마이크로밴드는 퍼지게 되고 그렇게 되면 광학적(optical) 신호가 변화하는 방식으로 파손상태를 전달되게 된다. 광섬유(optical fiber)는 지오멤브레인을 제작하는 과정에서 압출성형되어 만들어지거나 지오멤브레인을 제작한 후에 얇게 만들어서 접착, 접합할 수도 있다. 이 시스템의 개요는 그림 8과 같다.

지오멤브레인 모니터링 시스템에 대한 현장시험이 1997년에 실시되었다. 국부적 혹은 전체적인 함몰을 시뮬레이션하기 위해 43×4.5m 크기의 지오멤브레인이 시험장에 덮개(cap)로 설치되었다. 시험 셀에서 조직 기포(fabric bladder)와 내부 튜브로부터 물과 공기가 배수됨에 따라 3개월 동안 지오멤브레인의 변형이 측정되었다. 센서에 의해 측정된 데이터로서 함몰이 발생한 위치와 크기를 알 수 있었다.

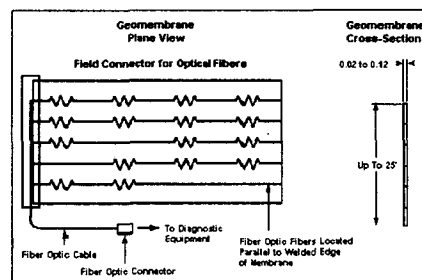


그림 8. Geosynthetic Membrane Monitoring System 개요도

### 2.2.7. LIDAR 시스템

LIDAR(Light Detection and Ranging)는 원격 탐지에 의해 거리를 결정하는데 전파(radio waves)를 주고받는 대신에 광파(light waves)를 사용한다. LIDAR는 대기권 상태를 측정하는데 널리 사용되고 있으나, 지중에서 사용하는 것도 가능하다. 구멍 뚫린 수평방향의 튜브를 매립지에서 지하수위 위쪽의 동수경사가 하강하는 지점에 설치하면 LIDAR를 사용하여 튜브로 들어온 오염물질 증기를 검출할 수 있다. 누출 감지를 위해 일반적으로 사용되는 레이저의 한 예는 Lasersonic이다. Lasersonic을 사용하는 방법은 다음과 같다. 트레이서 가스로서 sodium hexafluoride를 대상물 내부에 넣고 대상물을 향해 Lasersonic을 조준하면 공기중으로 빠져나간 기체가 레이저의 빛 에너지에 강하게 흡착된 다음 음파(sound wave)로서 그것을 방출한다. 이 음파를 수신하여 누출 위치를 찾아낼 수 있다. 이 시스템은 새롭게 건설되는 매립장이나 이미 건설되어 있는 매립장 모두에 적용 가능하다.

### 2.2.8. 음향 모니터링(Acoustic monitoring) 시스템

음향을 이용한 방법(acoustic methods)은 주로 파이프나 밸브에서의 가스 누출을 감지하는데 사용되어지는 방법이다. 매립장에도 적용이 가능하다. 흙을 통하여 침출수가 흐를 때

작은 소리가 발생하는데, 굵은 모래나 자갈을 통하여 10mm/s나 그 이상의 속도로 흐르는 유체가 발생하는 소리는 감지가 가능했다. 매립장 저면의 차수재 아래쪽 굵은 입자의 층에 파 유도장치(wave guide)를 설치하고 지오마이크로폰에 파 유도장치를 연결하여 음파를 모니터링한다. 파 유도장치의 양쪽 끝에 지오마이크로폰이 있으면 소리가 양쪽 끝으로 이동하는 시간을 알 수 있기 때문에 누출 위치의 결정이 가능하다(Stammler and Bol, 1985).

### 2.2.9. 그 밖의 방법

미국 미시간주의 레논에 있는 Venice Park Recycling and Disposal Facility는 시각적으로 누출을 감지할 수 있는 시스템을 만들었다. 차수재를 따라 파이프 네트워크를 설치하여 누출이 예측되는 지점의 파이프 시스템 안으로 카메라를 들여보낼 수 있다. 이 카메라를 통하여 시각적으로 누출을 조사할 수 있다(Dunson, 1996).

독일의 Koberling는 지오택스타일(geotextile) 안에 전선을 설치하여 침출수가 전선에 접촉함으로써 누출을 감지할 수 있는 시스템을 개발하였다. 그러나 지오택스타일 안에 전선을 설치하기 어렵고 값이 비싸다는 단점이 있다(Stammler and Bol, 1985).

## 3. 감지된 누출지점의 봉합

### 3.1. 누출지점 봉합법의 개요

누출지점이 감지되면 침출수의 누출이 계속되는 것을 막기 위하여 누출지점에 대한 보수작업이 즉시 수행하여야 한다. 기존의 누출지점을 봉합(sealing)방법은 보통 다음과 같은 절차에 의하여 수행된다. ① 매립지 내의 폐기물을 임시로 다른 곳으로 옮긴다. ② 누출지점 근처를 깨끗하게 만든다. ③ 누출지점을 용접등의 방법으로 봉합한다. ④ 다른 누출가능성에 대하여 시험을 수행한다. ⑤ 옮겨놓았던 폐기물을 다시 매립지로 옮긴다. 이 방법은 다음과 같은 단점을 가지고 있다. 먼저 보수작업을 수행하는 동안 폐기물을 임시로 옮기기에 적당한 장소가 요구된다. 또한 이 작업을 진행하는 데에는 많은 시간이 소요되며, 폐기물의 운반이나 보관 과정에서 작업자나 인근 주민들이 유해물질에 노출될 위험성도 가지고 있다(Darilek et al. 1996; Yeung et al. 1997). 따라서, 최근에는 더 신속하고, 신뢰성 있고 경제적인 방법을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 누출지점 봉합방법으로 개발된 기술로는 전기영동을 이용한 방법과 그라우팅을 하는 방법이 있다. 본 논문에서는 전기영동을 이용한 누출지점 봉합법을 소개하고자 한다.

### 3.2. 전기영동에 의한 누출지점 봉합(Electrophoretic Leak Sealing Method)

Darilek et al.(1990)은 매립지의 차수재에 누출이 발생한 경우에 이를 봉합할 수 있는 방법으로 전기영동을 이용한 방법을 제안하였다. 전기영동(electrophoresis)이란 직류전기장이 작용된 영역에서 대전된 부유입자들이 자신이 가지고 있는 전하부호와 반대의 극으로 이동하는 것을 말한다. 예를들면 점토입자는 음(-)전하를 띠고 있기 때문에 직류전기장 내에서 양(+)극쪽으로 이동하게 된다.

그림 9는 전기영동에 의한 매립지 누출지점 보수방법의 원리를 보여주는 그림이다. 매립

지 내부에 음(-)극, 외부에 양(+ )극을 설치하고 전극에 직류 전압을 걸어주면 음전하를 띤 점토입자는 전기영동에 의하여 양극쪽으로 이동하게 된다. 즉 매립지 내에 점토슬러리 등을 넣고 전기장을 걸어주면 전기영동현상에 의해 점토 슬러리가 차수재 천공부를 통하여 매립지 외부의 양극방향으로 이동하게 되는데 이때 천공부분 주위에 점토캐일이 형성되어 차수막 천공부를 메우게 된다(Darilek, 1990; Tuncay et al. 1995; Yeung et al. 1997).

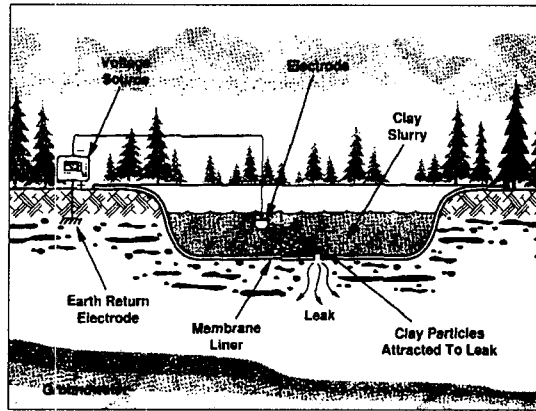


그림 9. 전기영동에 의한 누출지점 봉합법의 개요(Darilek et al, 1996)

## 4. 전기비저항의 기본 개념

### 4.1. 전류전도기작

전류는 암석이나 광물 내를 전자전도(electronic conduction), 전해액전도(electrolytic conduction)와 유전전도(dielectric conduction)의 세 가지 방식으로 전도된다(Robinson and Coruh 1988). 전자전도는 자유전자에 의해 발생하는 전류의 흐름이다. 전해액전도는 용액중에 포함된 이온에 의한 전류의 흐름을 말한다. 유전전도는 자유전자가 거의 없거나 아주 없는 매우 나쁜 전도체나 절연체에서 이온이나 쌍극자들의 분극현상에 의하여 발생한다. 지반과 같은 다공질 매체의 전해액전도에 대한 특성은 전기비저항에 의해 대표될 수 있으며, 유전전도에 대한 특성은 유전상수의 측정에 의해 평가될 수 있다.

### 4.2. 전기비저항의 정의

지반에 전류가 흐르게 되면 전류가 흐르는 통로상의 두 지점 사이에는 매질의 저항에 비례하는 전위차가 발생하게 된다(손호웅 등, 1999). 전기저항은 전류가 흐르는 통로상의 길이(L)에 비례하고 단면적(A)에는 반비례하므로 다음 식(1)과 같이 된다.

$$R = \rho L / A \quad (1)$$

이 식에서  $\rho$ 는 물체의 모양, 크기에는 관계없는 비례상수로 시료의 전기적 특성을 나타내며 전기비저항(electrical resistivity)이라 불린다. 전기비저항의 표준단위는 ohm-meter이며 전기비저항의 역수는 전기전도도(electrical conductivity)가 된다.

일반적으로 자연 상태에 존재하는 오염되지 않은 지반은 일정한 범위의 전기비저항값의 범위를 가지게 되며 지반이 오염되면 전기비저항이 달라지게 된다. 침출수와 같은 이온성 오염물질의 경우에는 간극수의 전기비저항을 감소시키게 되고, 디젤과 같은 비전도성 오염물질의 경우에는 전기비저항을 증가시키게 되어 전기비저항 값의 차이로 지반의 오염도를 조사할 수 있다.(Campanella and Weemees,1990; Okoye et al.1995; Kaya and Fang,1997)

### 4.3. 전기비저항에 영향을 주는 인자

전기비저항은 간극수의 전기비저항값, 간극률(porosity)에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Abu-Hassanein et al. 1996). 포화된 사질토의 경우 전기비저항(electrical resistivity)은 흙 입자 자체의 절연성을 가정하여 Formation factor(FF)로 표현될 수 있다 (Jackson et al. 1978). Formation factor는 다음의 식(2)와 같이 정의된다.

$$FF = \frac{\text{resistivity of the porous medium}}{\text{resistivity of the pore fluid}} \quad (2)$$

Formation factor는 간극유체의 전기비저항값의 차이에 의한 흙의 전기비저항값의 차이를 배제하고 지반 내 pore-channel의 복잡한 형태와 입자들의 배열에 의한 영향을 나타내기 위한 factor이다. 일반적으로 Formation factor는 Archie(1942)의 경험식으로 알려져 있다. (식 3)

$$FF = an^{-m} \quad (3)$$

여기서, n은 간극률, a, m은 상수로서 흙의 종류에 따라 결정되는 값으로, a는 unconsolidated soil의 경우에는 대략 1의 값을 갖고, m은 각 입자들의 cementation 정도에 의해 결정되는 값이라고 가정하였다. m은 보통 cementation factor라고 불리며, pore network의 tortuosity와 inter-connectivity에 관련된 값이다. 모래의 경우 1.4~2.2의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. Atkins and Smith(1961)에 의하면 Archie's law는 cohesionless particle system에서 잘 맞으며 m은 흙 입자 모양에 따라 결정되는 값이라고 하였다. Keller and Frischknecht(1966)에 의하면 m은 cementation 정도에 의해 결정된다고 하였다. Talor-Smith(1971)는 marine sediment에 대한 실험을 통해 sand의 경우 간극률이 0.6보다 작을 때 m=1.5, clay의 경우 간극률이 0.6보다 클 때 m=2.0을 만족시킨다고 보고하였다. Barnes et al.(1972)은 quartz에 대해 m=1.40, dolomite sand에 대해 m=1.66을 제안하였다. Windle and Wroth(1975)는 두 가지 종류의 천연 quartz sand에 대해 m=1.52, 1.58의 값을 제시하였다.

전기비저항은 포화도에 의해서도 영향을 받는다. 불포화지반(unsaturated soil)의 전기비저항( $\rho$ )은 포화지반(saturated soil)의 전기비저항( $\rho_{sat}$ )과 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = S^{-B} \quad (4)$$

여기서, S는 포화도이고, B는 경험적 상수이다.

이 식은 포화도가 critical value,  $S_{cr}$  보다 큰 경우에만 적용이 가능하다.  $S_{cr}$ 은 흙 입자 표면 주위에 연속적인 물의 막(film)을 유지하는데 필요한 최소한의 물의 양과 관계된 값이다. 따라서 포화도가  $S_{cr}$  보다 작아질 경우에는 전기비저항이 위의 식을 만족하지 않고 급격한 증가가 발생하게 된다.

Keller and Frischknecht(1966)는 어떤 온도 T에서 흙의 전기비저항을 18℃에서 측정된

값을 기준으로 다음의 관계식을 도출하였다.

$$\rho_T = \frac{(5)^{\rho_{18}}}{1 + \alpha(T - 18)}$$

여기서,  $\alpha$ 는 경험적인 상수로서  $0.025^\circ\text{C}^{-1}$ 의 값을 취한다.

## 5. 지반의 전기비저항 특성

### 5.1. 실험방법

실험에 사용된 토양은 화강풍화토로서 통일분류법상 입도분포가 좋은 모래(SW)로 분류되었으며 입도분포는 그림 10과 같고, 기본물성을 표 2에 정리하였다. 오염되지 않은 지반의 간극수로는 수도물(tap water)을 사용하였다. 오염물질은 김포매립지에서 채취한 침출수로 탈이온수(deionized water)를 이용하여 질량비 10%, 20%, 30%로 희석하여 사용하였다. 김포매립지에서 채취한 침출수의 성분과 각 성분의 농도는 표 3과 같다.

본 연구에서는 직류전류에 의한 전기비저항을 측정하였다. 전기비저항측정을 위한 시료의 성형을 위하여 Harvard miniature 다짐몰드와 동일한 규격의 몰드를 제작하였다. 몰드는 절연성의 아크릴로 제작하였으며 양끝에는 황동전극을 연결할 수 있도록 고안되었다. 그림 11은 전기비저항 측정 방법을 보여주는 개요도이다. 노건조한 시료를 물과 골고루 혼합하여 함수비를 조절하고 함수비가 맞추어진 시료를 측정몰드에 넣고 측정몰드에서 직접 다짐을 수행하였다. 다짐이 완료되면 위쪽에 황동전극을 설치하고 전기비저항을 측정하였다. 전기비저항의 측정방법은 시료 양끝의 구리전극을 통하여 정밀전류원(Keithley 220)으로 1mA의 직류전류를 공급하여 시료에 1차원의 전기장이 형성되도록 하고 시료양단의 전위차를 voltage meter로 측정하였다. 전기비저항은 다음의 식(6)에 의하여 계산된다.

$$\rho = k \frac{V}{I} \frac{A}{L} \quad (6)$$

여기서,  $V$ 는 전위차,  $I$ 는 전류,  $A$ 는 시료의 단면적,  $L$ 은 시료의 길이이고,  $k$ 는 보정계수이다. 아크릴 벽면에 의한 전류의 왜곡효과에 대한 보정을 위하여 0.001M, 0.005M, 0.01M, 0.05M농도의 NaCl 용액을 이용하여 몰드에서의 전기비저항값을 측정한 결과 측정된 전기저항과 실제전기비저항과는 선형적인 경향을 나타내었으며, 이에 따라 보정계수( $k$ )는 0.88로 구해졌다. 온도에 의한 영향을 배제하기 위하여 실험시 온도는  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하여 측정하였다. Shang et al.(1995)에 의하면 직류전류(DC)를 오랜 시간 작용하게 되면 분극현상(polarization)과 온도상승을 일으켜 시료의 전기비저항값을 변화시킬 수 있다고 하였기 때문에 전기비저항 측정은 짧은 시간에 완료하도록 하여 오차를 최대한 배제하였다.

용액의 전기전도도와 전기비저항은 전기전도도계(Orion 550A)를 사용하여 ASTM D1125-91에 의해 측정하였다. 전기전도도는 온도의 증가에 크게 영향을 받기 때문에 측정시 온도는  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다(Abu-Hassanein et al. 1996).

표 2 화강풍화토의 물리적 특성

Soil	Weathered granite soil
Specific gravity	2.63
Organic content	1.97 %
Coefficient of curvature( $C_c$ )	1.4
Coefficient of uniformity( $C_u$ )	8.4
Plasticity Index	N.P.
USCS	SW
Maximum dry unit weight	1.97 t/m <sup>3</sup>
Optimum Moisture Content	9.5 %

표 3 김포매립지 침출수 성분(환경부, 2000)

(단위 : mg/ℓ)

	BOD	COD <sub>Mn</sub>	COD <sub>Cr</sub>	T-N	T-P	NH <sub>3</sub> -N	TS	Cl <sup>-</sup>	Cu	Cd	Pb	As	Cr <sup>6+</sup>	Hg	Zn
최소	1,484	928	3,477	1,602	10.90	1,529	11,790	3,617	0.064	N.D.	N.D.	N.D.	0.044	N.D.	0.602
최대	2,976	1,171	5,291	2,148	16.59	2,018	16,360	5,177	1.065	0.173	0.213	N.D.	0.160	N.D.	2.152
평균	2,145	1,042	4,457	1,964	13.13	1,814	13,620	4,313	0.202	0.018	0.046	N.D.	0.103	N.D.	1.303

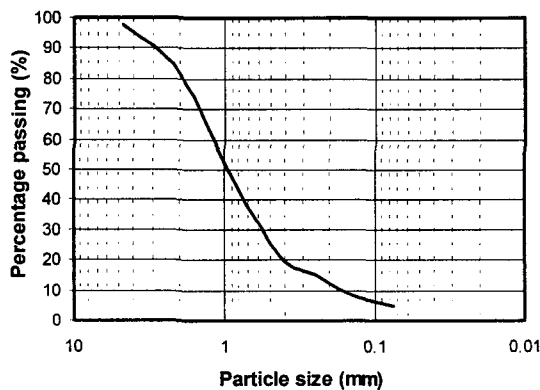


그림 10 화강풍화토의 입도분포곡선

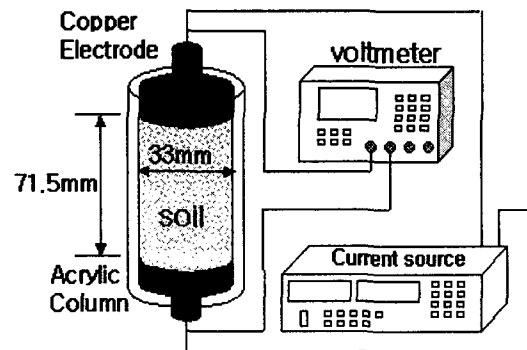


그림 11 전기비저항 측정물드와 측정방법

## 5.2. 용액의 전기비저항

전기전도도계를 사용하여 측정한 용액의 전기전도도와 전기비저항은 다음의 표 4와 같다. 오염되지 않은 간극수로 사용된 수도물(tap water)의 경우 700 $\Omega$ m 정도의 전기비저항을 나타내었다. 문헌에 의하면 오염되지 않은 지하수의 전기비저항은 20~2000 $\Omega$ m로 제시되어 있으므로 수도물을 이용하여 오염되지 않은 일반적인 간극수로 사용한 것은 합리적인 것으로 판단할 수 있다(한정상, 1999).

디젤의 경우 0.01300 $\mu$ S/cm의 범위에서 측정가능한 전기전도도 셀로는 측정이 불가능하였으며, 이는 디젤의 전기전도도가 0.01 $\mu$ S/cm보다 작음, 즉 전기비저항이 1,000,000 $\Omega$ m 이상인 비전도성 물질임을 추론할 수 있다. 김포매립지에서 채취한 침출수의 전기비저항은 0.5 $\Omega$ m의 작은 전기비저항을 나타내었으며, 이는 침출수 성분중에 포함된 많은 이온성분들에 의한 것

이다. 침출수의 전기비저항은 실험에 사용된 수돗물이나 일반수의 전기비저항에 비하여 매우 작으므로 전기적 특성 조사에 의한 침출수의 감지가 가능함을 나타낸다. 또한 침출수의 농도가 10%에서 30%로 커짐에 따라 전기전도도는 비례하여 증가하는 경향을 나타내며, 전기비저항은 반비례하는 경향을 나타내었다.

표 4. 용액의 전기전도도와 전기비저항

Solution	Electrical Conductivity (mS/cm)	Electrical Resistivity (ohm-m)
DI water	$0.45 \times 10^{-3}$	22,515
Tap Water	0.14	70.44
Leachate 10%	2.36	4.24
Leachate 20%	4.54	2.20
Leachate 30%	6.54	1.53
Leachate 100%	20.58	0.49
Diesel	N.A.	N.A.

### 5.3. 불포화 지반의 지반조건에 따른 전기비저항의 변화

#### 5.3.1. 함수비와 건조단위중량의 영향

사질토의 경우 흙 입자를 통한 표면전도의 효과가 작기 때문에 전기비저항값은 간극 내에 포함된 물에 의한 영향을 크게 받는다(e.g. McCarter 1984; Oh and Park 2000). 지반 내에서 전류는 그림 12에 나타낸 바와 같이 세 가지 전도경로를 갖는다; 첫째, 흙입자들끼리의 접촉을 통한 전류전도경로, 둘째, 접촉하고 있지 않은 흙입자 사이에 용액이 존재하여 생기는 전류전도경로, 셋째, 용액만에 의한 전류전도경로(Smith and Arulanandan, 1981). 함수비의 증가에 의한 전기비저항의 감소는 이온의 증가와 전류전도경로의 증가로 설명될 수 있다. 그러나, 같은 함수비라 하더라도 다짐조건을 다르게 하여 다짐상태가 변하게 되면 전기비저항 값은 변화를 보이게 된다. 그림 13은 동일한 함수비를 갖는 시료에 대하여 건조단위중량의 변화에 따른 전기비저항값의 변화경향을 보여준다. 같은 함수비를 갖는 흙 시료의 건조단위중량이 증가함에 따라 전기비저항값은 감소하는 경향을 보인다. 동일한 함수비에서 건조단위중량의 증가는 흙 시료의 간극내에 공기가 차지하는 부분의 감소를 의미한다. 간극 내에 존재하는 공기는 간극수를 통한 전류의 흐름을 방해한다. 즉, 간극 내에 존재하는 공기는 전류흐름경로를 차단하거나 혹은 전류 흐름의 굴곡도(tortuosity)를 커지게 하기 때문에 건조단위중량이 증가함에 따라 전기비저항이 감소한다.

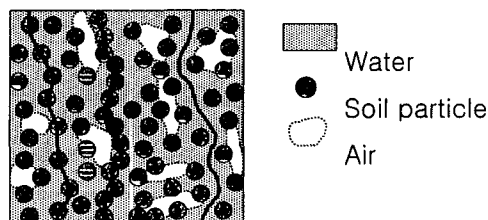


그림 12. 지반 내에서의 전류전도경로



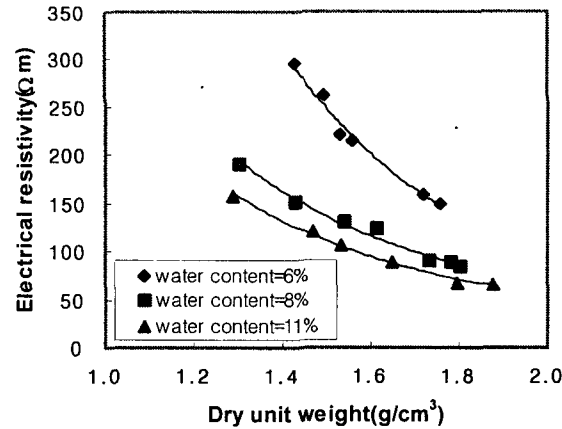


그림 13 건조단위중량의 변화에 따른 전기비저항의 변화

### 5.3.2. 수분밀도(moisture density)의 영향

전기비저항은 함수비와 다짐도 영향을 모두 받기 때문에 이 두 가지 변화를 모두 고려할 수 있는 변수로 수분밀도(moisture density)를 사용하였다.

수분밀도,  $m_d$ 는 단위 부피의 토체에 대한 물의 질량비로 정의되며, 다음 식 (7)과 같이 함수비와 건조단위중량의 곱으로 계산될 수 있다(Selig and Mansukhani 1975).

$$m_d = \frac{W_w}{V_t} = \omega \gamma_d \quad (7)$$

여기서,  $W_w$ 는 물의 무게,  $V_t$ 는 토체의 전체 부피,  $\omega$ 는 함수비,  $\gamma_d$ 는 건조단위중량이다. 물의 단위중량이  $1\text{g/cm}^3$ 이라고 가정하면 다음 식(8)과 같이 표현될 수 있다.

$$m_d = \frac{W_w}{V_t} = \frac{V_w \gamma_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_t} = n_s \quad (8)$$

여기서,  $V_w$ 는 물의 부피,  $v_w$ 는 물의 단위중량이다.

수분밀도는 함수비의 변화와 건조단위중량으로 표현되는 다짐도 변화를 모두 반영하는 인자이다. 또한 물의 단위중량이  $1\text{g/cm}^3$ 인 경우에는 특정 부피의 soil mass 내에 존재하는 물의 부피를 나타내는 volumetric water content를 나타낸다.

그림 14는 전기비저항을 측정된 모든 시료에 대한 수분밀도와 전기비저항과의 관계를 보여준다. 수분밀도가 증가함에 따라 전기비저항은 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 수분밀도의 증가는 함수비의 증가 혹은 건조단위중량의 증가를 반영한다. 수분밀도가 증가함에 따라 전기비저항이 감소하는 이유는 두 가지로 설명될 수 있다. 첫째는 흙 속에 포함된 간극수 내에 존재하는 물의 양의 증가이고 둘째는 건조단위중량의 증가에 의한 간극내 공기부분의 감소이다. 즉, 간극내 물의 증가와 공기부분의 감소에 의한 간극수의 connectivity 증가는 간극수를 통한 전류전도경로의 증가를 가져오기 때문에 전기비저항은 감소하게 된다.

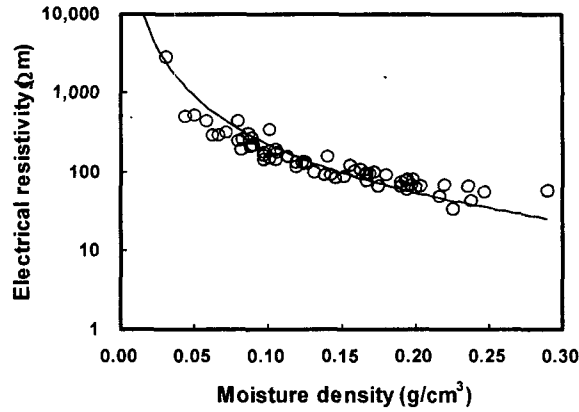


그림 14. 수분밀도(moisture density)의 변화에 따른 전기비저항의 변화

#### 5.4. 침출수에 의한 전기비저항의 변화

침출수를 10, 20, 30%로 희석시킨 용액을 간극수로 이용하여 성형한 시료의 전기비저항을 측정된 결과를 수분밀도와 전기비저항의 관계로 도시한 결과는 그림 15와 같다. 이 결과에 의하면 침출수로 오염된 불포화 사질토 지반의 경우에도 수분밀도의 함수로 표현될 수 있음을 알 수 있으며, 수분밀도가 증가함에 따라 전기비저항이 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 침출수의 농도가 높아짐에 따라 전기비저항은 실험이 수행된 수분밀도의 범위에 대해서 전체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 16은 특정한 수분밀도에 대하여 침출수 농도에 따른 흙의 전기비저항 변화경향을 나타낸 것으로 동일한 수분밀도에 대하여 침출수의 농도가 증가함에 따라 전기비저항이 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 전기비저항 측정에 의하여 침출수에 의한 오염정도를 정량적으로 평가할 수 있음을 나타내는 것이다. 다만, 이때 수분밀도에 대한 조사가 선행되어야 정확한 오염도의 평가가 가능하다.

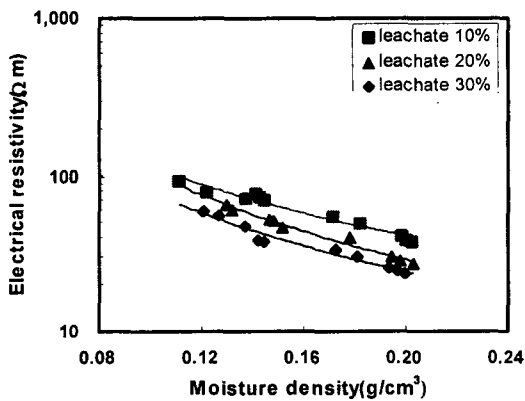


그림 15 수분밀도와 전기비저항의 관계

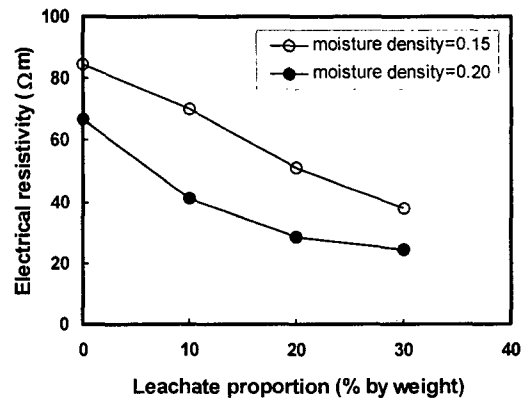


그림 16 침출수의 농도에 따른 전기비저항

## 6. 전기비저항 측정기법을 이용한 누출감지시스템의 개발

### 6.1. 시스템의 개요

본 연구에서 개발하고자 하는 감지시스템은 그림 17과 같이 전선을 격자망으로 구성하고, 각 전선의 교차점에 센서를 설치하는 것을 기본형태로 한다. 본 센서에서의 저항측정은 그림 17과 같이 전류공급장치와 전위차 측정장치로 구성된 측정시스템을 통하여 이루어진다. 각 센서에서의 저항 측정은 격자망 전선망에서 가로와 세로의 전선을 하나씩 선택하여 연결함으로써 전기회로를 구성하는 원리를 이용한다. 즉, 격자형 전선망에서 가로와 세로 전선을 한 가닥씩 선택하여 측정기의 +, - 단자에 연결하면 하나의 폐회로가 이루어져 전선의 교차점에 설치된 센서에 대한 측정이 가능하게 된다. 같은 방식으로 전선을 바꿔가며 측정기에 연결하는 방식으로 설치된 모든 센서에 대해 측정한다.

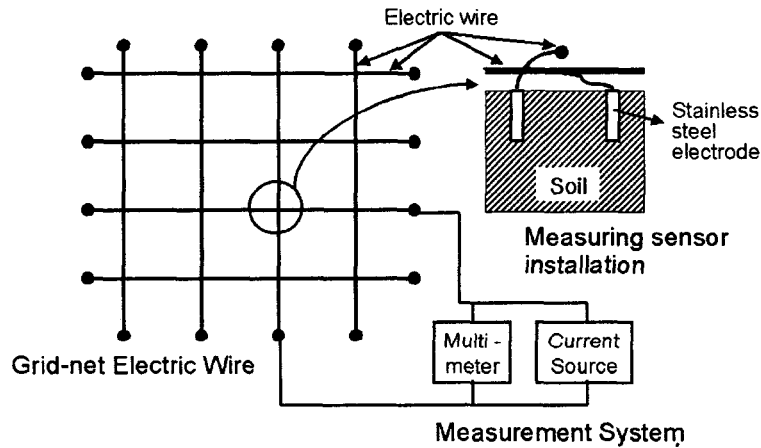


그림 17. 전기비저항 측정기법을 이용한 누출감지시스템의 개요도

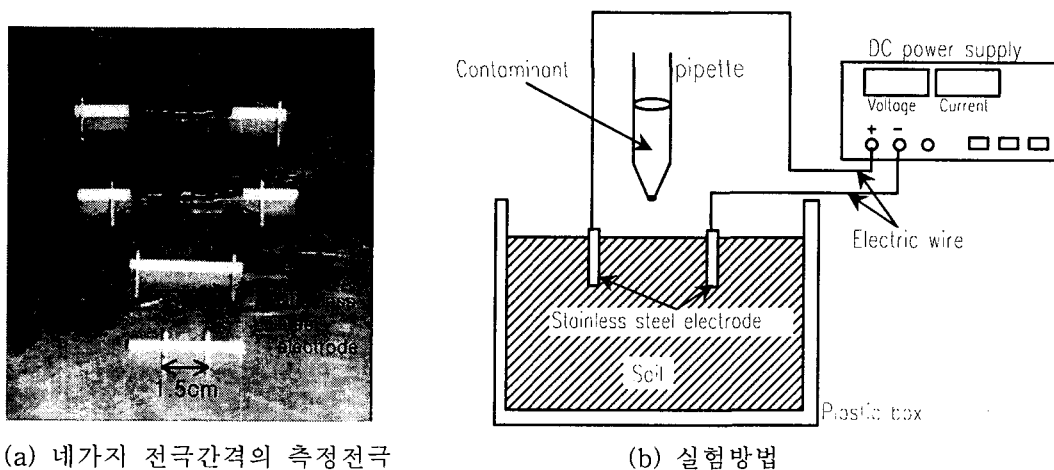
### 6.2. 실험방법

#### 6.2.1. 측정센서의 설계인자 도출을 위한 실험방법

실험에 사용된 흙은 화강풍화토이며, 오염되지 않은 간극수로는 수도물(tap water)을 사용하였고, 이온농도에 대한 영향을 분석하기 위하여 질량농도 1%, 5%, 10%의 NaCl 용액을 조제하여 사용하였다. 실제 오염물질에 대한 누출감지도를 평가하기 위하여 비전도성 오염물질인 디젤과 전도성 오염물질인 침출수에 대한 감지도를 평가하였다. 디젤은 주유소에서 구입한 동절기용 디젤을 사용하였다. 침출수는 김포매립지에서 침출수 처리시설로 유입되는 침출원수를 채취하여 사용하였다.

본 연구에서는 누출감지시스템에 설치될 수 있는 형태인 두 개의 전극으로 구성된 측정센서로 전기저항을 측정하여 지반으로 유입되는 오염물질의 감지도를 평가하고자 하였다. 흙시료의 전기저항을 측정하기 위하여 그림 18(a)와 같이 1.2cm 길이의 스테인리스 스틸

(stainless steel) 두 개가 1.5cm, 3.5cm, 5.5cm, 7.5cm의 간격을 갖는 네 종류의 측정전극을 제작하였다. 흙시료에 대한 전기저항 측정은 전류의 흐름에 영향을 주지 않을 정도로 큰 20cm×14cm×12.5cm(h) 크기의 절연성 플라스틱 상자에 수돗물과 골고루 혼합하여 함수비가 조절된 화강풍화토를 넣고 동일한 방법으로 다져진 모든 경우의 시료에 대하여 네 종류의 측정센서를 각각 흙에 설치하고 DC power supply(HP E3612A)로 전압과 전류의 값을 측정하였다. 오염물질의 누출전후의 저항값의 변화를 비교하기 위한 실험은 실제 오염물질이 지반내로 누출이 발생하는 상황을 모사하여 그림 18(b)와 같은 방식으로 수행하였다. 함수비를 맞추어 성형한 시료에 전극을 설치하여 초기 저항값을 측정하고, 측정전극의 중심에 피펫으로 오염물질 50ml 주입한 후 시료의 저항값을 측정하였다.



(a) 네가지 전극간격의 측정전극

(b) 실험방법

그림 18. 전기저항 측정전극 및 실험방법

### 6.2.2. 현장모형시험방법

현장모형시험은 본 연구에서 개발하고자하는 전기저항 측정에 의한 침출수 누출감지시스템의 적용성을 평가하기 위하여 수행되었다. 실제 매립지에서는 침출수의 누출상황을 조절할 수 없기 때문에 모형현장을 조성하여 실험을 수행하였다.

현장모형실험을 위해 조성된 부지는 가로, 세로 각 11m 크기의 정방형으로 1m 간격으로 가로 10줄, 세로 10줄의 전선을 배치하고, 각 전선의 교차점에 두 측정전극 사이의 간격이 7.5cm인 전기저항측정센서를 설치하였다. 누출감지시스템의 설치가 완료된 후 합성수지막을 덮어 현장조성을 완료하였다.

실험의 수행 절차는 그림 19에 제시한 흐름도와 같다. 그림 20은 누출감지시스템의 설치 단면과 합성수지막의 파손으로 인한 침출수 누출실험의 단면도를 나타낸 것이다. 침출수의 누출에 따른 모든 측정센서에서의 저항값을 측정하고, 실험이 완료된 후에 합성수지막을 제거하여 실제 침출수에 의한 오염대를 확인하였다. 현장에서 측정된 전기저항자료를 분석하여 추정된 침출수 오염대와 실제 누출에 의한 오염대를 비교하여 누출감지시스템의 정확성을 검증하였다.

현장모형시험을 수행하여 단일지점의 누출과 두 지점에서 동시에 누출이 발생하는 경우 누출지점의 감지 정확도를 평가하였다. 현장모형시험의 내용은 표 5에 정리한 바와 같으며, 각 실험에서 인위적으로 조성한 누출지점은 그림 21에 도시하였다.

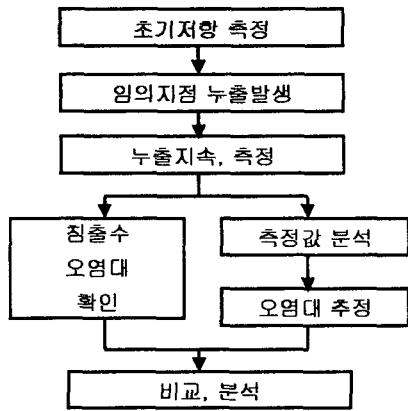


그림 19 실험수행절차

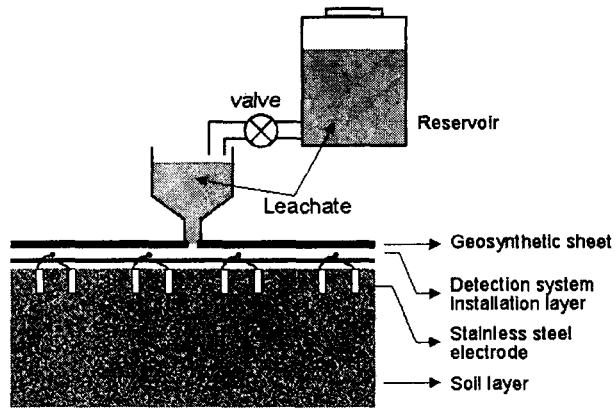


그림 20 누출감지시스템의 설치단면도 및 주입방법

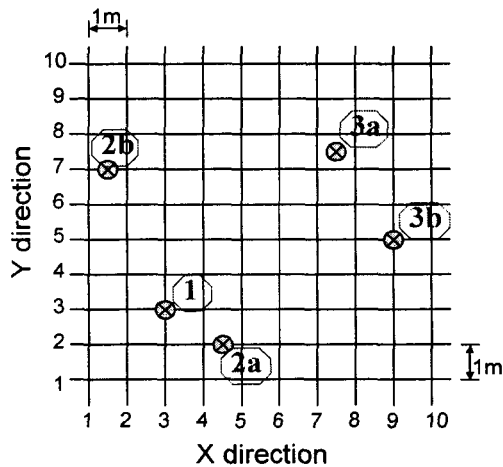


그림 21. 현장모형시험에서의 전선배치와 누출지점

### 6.2.3. 전기회로시험

격자망 전선배치에 의한 전기회로의 구성방식에 따른 전기회로적 특성을 파악하기 위하여 전기회로 시험을 수행하였다. 전기회로시험은 그림 22와 같이 흙에서 측정되는 저항값을 실제 저항소자로 치환하여 격자형으로 설치된 전선에 연결하여 저항값의 변화에 따른 영향을 평가하였다. 이를 위해 가로, 세로로 각 5개의 전선을 배치하고 전선의 교차점에서 전선을 저항소자로 연결하여 본 연구에서 고안한 누출감지시스템과 같은 형태를 갖도록 하였다. 먼저 오염이 되지 않은 지반은 모든 지점에서 거의 일정한 저항값의 분포를 보인다는 가정하에 모든 교차점에 1MΩ의 저항을 설치하고, 가로, 세로 전선을 각 하나씩 선택하여 측정기에 연결하여 모든 교차점에서 저항값을 측정하였다. 그 후에 이온성 오염물질이 유입되어 한 지점의 저항이 작게 측정되는 상황을 모사하여 1-A의 저항을 1kΩ으로 바꾼 경우, 3-B의 저항을 51kΩ으로 바꾼 경우에 대해 실제 측정되는 저항값을 분석하였다. 또한 두 지점에서 누출이 발생하여 두 지점의 저항값이 동시에 감소되는 경우를 분석하기 위하여 2-C는 51kΩ, 5-D는 20kΩ으로 바꾼 경우에 대해서도 분석하였다.

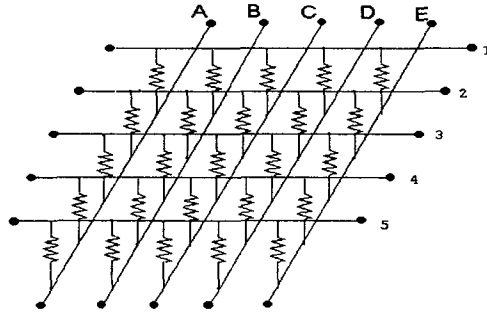


그림 22. 전기회로의 구성

### 6.3. 오염물질 감지에 대한 최적 전극간격

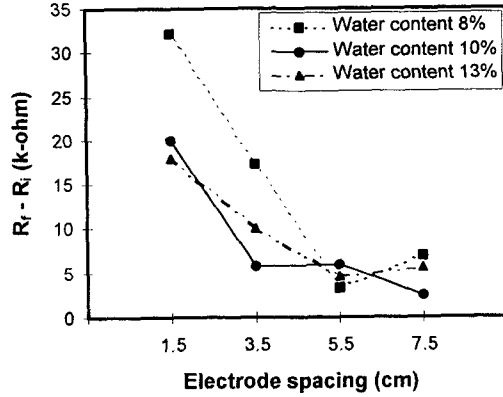
오염물질의 누출에 대한 감지정도를 평가하고, 각 오염물질의 감지에 최적의 전극간격을 도출하기 위하여 오염물질의 주입 전후의 전기저항값을 측정하였다. 디젤의 경우 비전도성 용액이기 때문에 디젤의 주입으로 인하여 전기저항값은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 비전도성 물질인 디젤이 전류의 흐름을 차단하여 전류흐름의 굴곡도를 증가시키기 때문이다. 반면 NaCl 용액과 침출수의 경우에는 주입 후 전기저항이 크게 감소하였다.

전기저항 측정값에 의하여 오염물질의 누출을 감지하는 경우 오염물질에 대한 감지민감도가 크려면 오염물질 누출전후의 측정값 변화량이 크게 나타나야 오염물질의 누출여부에 대한 판단이 용이하다. 그림 23은 측정전극간격에 대하여 디젤, NaCl 용액, 침출수를 주입한 경우 주입전후에 측정된 저항값의 변화량을 도시한 것이다. 그림 23(a)에 의하면 비전도성 물질인 디젤의 경우에는 네 가지의 전극간격 중에서 1.5cm의 경우 디젤의 주입전후의 저항값의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 전극간격이 넓어짐에 따라 전류흐름 경로는 더 넓은 영역에 대해서 형성될 수 있기 때문이다. 즉, 디젤과 같은 비전도성 물질이 주입된 경우 전극간격이 넓어짐에 따라 우회경로에 의한 전류전도가 가능하기 때문에 저항값의 증가량이 작아지는 것으로 판단된다. 반면 그림 23 (b), (c)에 의하면 전도성 물질인 NaCl 용액과 침출수가 주입된 경우 전기저항은 감소하는 경향을 나타내며, 전극간격이 7.5cm일 때 저항값의 감소량이 크게 나타났다. 이때 용액 주입 후의 전기저항은 큰 차이가 없으나 전극간격이 넓을수록 주입 전 상태의 저항값이 크기 때문에 저항값의 감소량이 큰 것으로 보인다.

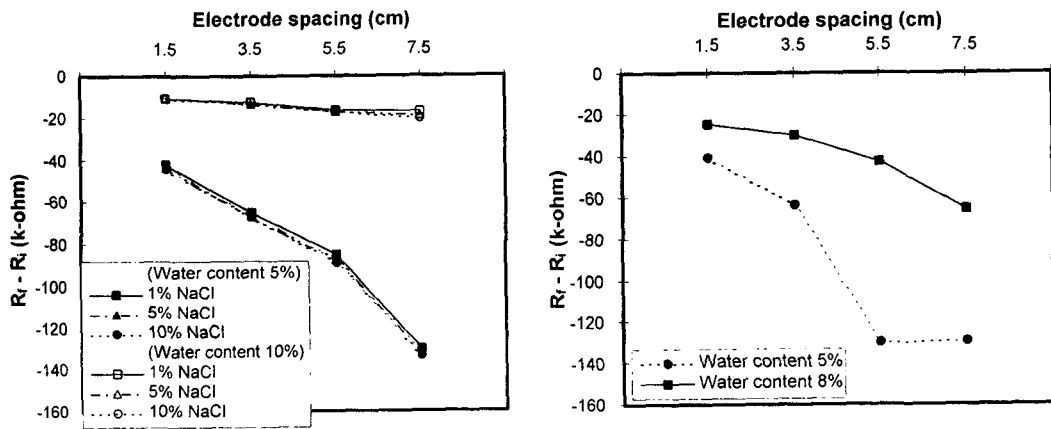
오염물질의 누출감지를 목적으로 전기저항 측정기법을 적용할 경우 대상 오염물질의 전기적 성질에 따라 누출감지도가 측정전극간격의 영향을 받으므로 적용대상 오염물질의 전도성을 평가하여 감지민감도가 높은 전극간격을 결정하여 현장에 적용하여야 한다.

함수비의 증가에 의한 전기저항의 감소효과와 이온성분의 증가에 의한 전기저항의 감소정도를 평가하기 위하여 동일한 조건하에서 수돗물 50ml를 주입한 경우와 침출수 50ml를 주입한 경우에 측정된 전기저항값을 비교하여 그림 24에 도시하였다. 그림 24에 의하면 네 가지의 전극간격에 대하여 수돗물을 주입한 경우의 전기저항값이 침출수를 주입한 경우의 전기저항값보다 2~4배 정도 더 크게 나타났다. 수돗물이 주입된 경우에 저항값의 감소원인은 함수비의 증가로 판단할 수 있으며, 침출수가 주입된 경우에는 함수비의 증가와 이온성분의 증가에 의하여 저항값이 감소하게 된다. 즉, 수돗물을 주입한 경우의 저항값에 대하여 침출

수를 주입한 경우의 저항값이 더 작게 나타나는 것은 수돗물보다 침출수가 함유하는 이온성분이 많기 때문에 발생하는 것이다.



(a) Diesel



(b) NaCl

(c) Leachate

그림 23. 측정전극간격에 따른 용액 투여 전후의 측정 저항값 변화

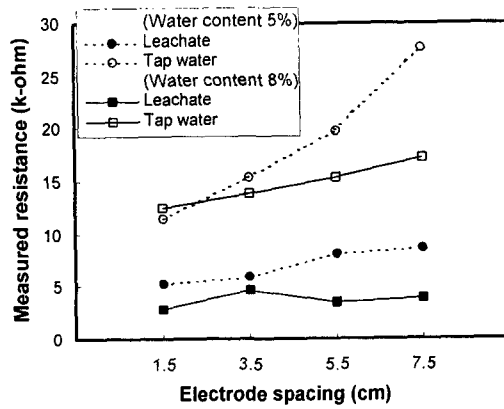


그림 24. 물과 침출수에 의한 전기저항 측정값의 변화 비교

## 6.4. 격자망 누출감지시스템의 적용성

### 6.4.1. 현장모형시험 결과

#### (1) 오염되지 않은 지반의 전기저항 측정값

침출수로 오염되지 않은 조건하에서 측정될 수 있는 값의 범위를 파악하기 위하여 지반을 조성하고 누출감지실험을 하기 이전에 측정된 저항값들에 대한 분석을 수행하였다. 오염되지 않은 상태에서 저항값을 측정된 결과는 그림 25와 같다. 여기서, 침출수의 유입이 없는 상황에서 측정된 저항값은 1.51kΩ~2.86kΩ의 범위에서 측정되었으며, 평균값은 2.04kΩ을 나타내었다. 오염되지 않은 지반의 전기저항값은 일정한 범위내에서 측정되는 것을 확인할 수 있다. 침출수의 누출이 발생하지 않은 지반에서 측정된 저항값에서의 변화는 지반의 다짐도나 함수비의 불균질성과 측정센서의 설치간격의 오차에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

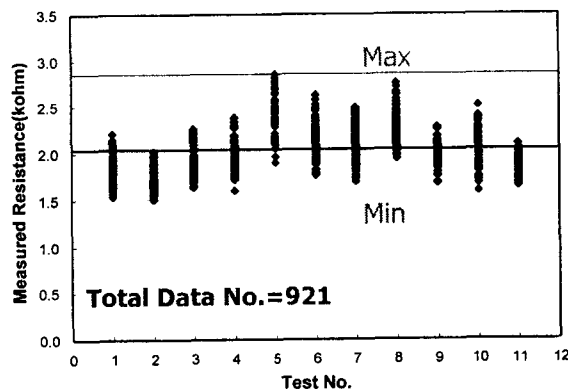


그림 25. 오염되지 않은 지반에 대한 저항 측정값

#### (2) 침출수에 대한 누출감지도 평가

그림 26은 침출수의 누출이 발생하기 전의 전기전도도(electrical conductivity)의 분포도를 보여준다. 침출수는 전기저항을 감소시키기 때문에 침출수의 누출지점에서 peak로 표현되도록 하기위하여 전기저항의 역수인 전기전도도로 나타내었다.

침출수의 누출이 발생한 경우의 전기전도도 분포를 그림 27~29에 도시하였다. 단일지점에서 누출이 발생한 경우의 전기전도도 분포를 보인 그림 27에서 (3m, 3m)지점에서 낮은 전기비저항값(높은 전기전도도)을 나타내었다. 또한 두 지점에서 동시에 누출이 발생한 경우의 전기전도도 분포인 그림 28에 의하면 누출이 발생한 것으로 판단되는 (1m, 3m)지점과 (5m, 2m)지점의 전기저항값이 크게 감소(전기전도도 증가)되었다.

그림 29에서는 침출수가 누출되는 지점에서의 전기전도도 증가경향이 뚜렷하게 나타났으며, 물이 주입된 지점에서는 전기전도도의 증가가 나타나지 않았다. 이는 본 침출수 누출감지시스템이 오염되지 않은 일반수와 침출수와의 구분이 가능함을 확인해 주는 결과이다. 일반적으로 침출수가 주입되는 경우에는 침출수 내에 존재하는 많은 이온성분들과 이온화된 중금속 성분들의 영향에 의하여 전하를 운반하는 이온의 수가 절대적으로 증가하기 때문에 이온에 의한 전하의 운반이 활발해져서 전기저항의 감소효과를 나타내게 되기 때문이다.

그림 27~29에서 침출수의 누출이 발생한 것으로 판단되는 전기전도도의 피크를 보이는



지점과 동일한 전선상의 다른 측정센서에서도 전기전도도값이 약간 크게 측정된 경향을 보인다. 이는 침출수를 감지한 것이 아니라 전기회로적 특성에 의해 나타나는 효과로 판단된다. 그러나, 전기회로적 효과에 의해 발생하는 전기전도도의 증가, 즉 전기저항감소의 효과는 침출수에 의한 전기전도도의 증가 혹은 전기비저항의 감소에 비해 훨씬 작기 때문에 침출수의 누출지점의 감지에는 무리가 없는 것으로 판단된다.

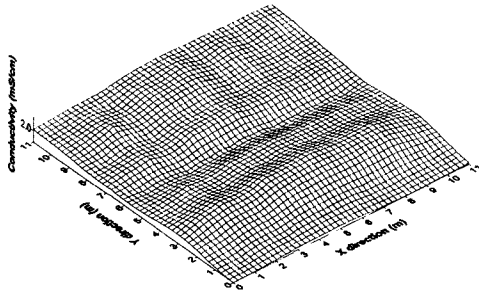


그림 26 침출수 누출 발생 전의 전기전도도 분포

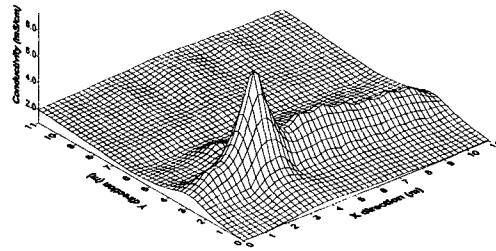


그림 27 단일지점의 침출수 누출 발생시 전기전도도 분포

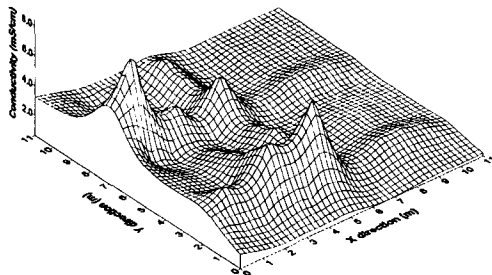


그림 28 두 지점에서 동시에 누출이 발생한 경우 전기전도도 분포

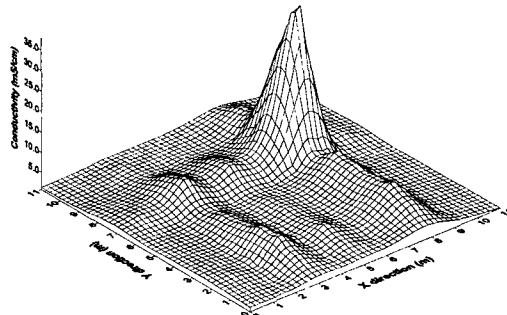
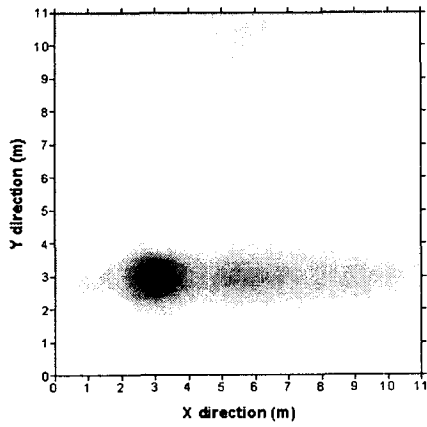
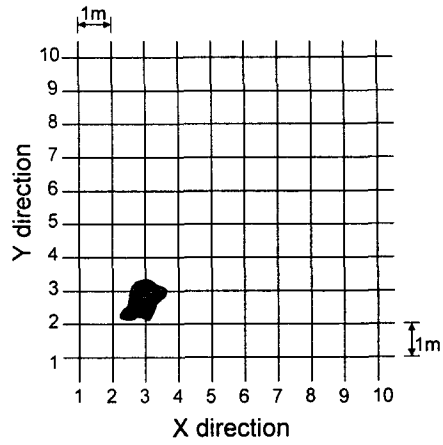


그림 29 침출수의 누출과 일반수 누출이 동시에 발생한 경우 전기전도도 분포

그림 30~32는 누출감지시스템에서 측정된 값에 의한 침출수의 누출지점의 추정과 실제 침출수 오염대를 비교한 그림이다. 단일지점에서 누출이 발생한 경우나 두 지점에서 동시에 누출이 발생한 경우에 대해 모두 침출수의 누출지점을 정확하게 감지하였다. 또한 차수재의 파손형태와 관계없이 모든 침출수의 누출지점의 감지가 가능함을 알 수 있다. 이는 본 시스템이 차수재의 절연성을 이용한 감지기법이 아니라 침출수의 존재유무에 따라 저항값이 변하는 원리를 이용한 것이므로 침출수의 유입을 직접적으로 모니터링 하는 것이 가능한 것이다.

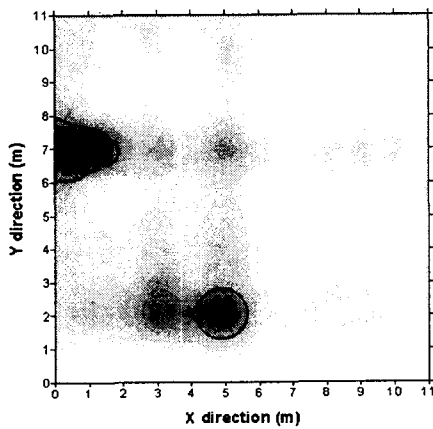


(a) 측정값에 의한 누출지점의 추정

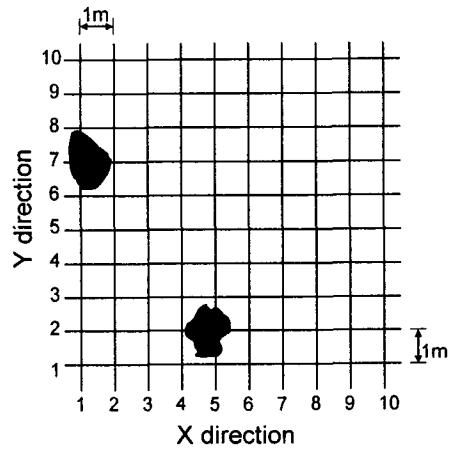


(b) 실제 침출수 오염대

그림 30. 추정된 침출수 누출지점 실제 침출수 오염대의 비교(단일지점 누출)

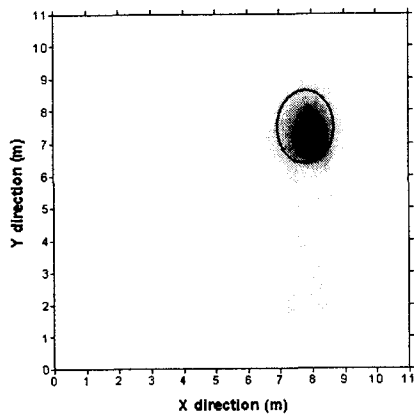


(a) 측정값에 의한 누출지점의 추정

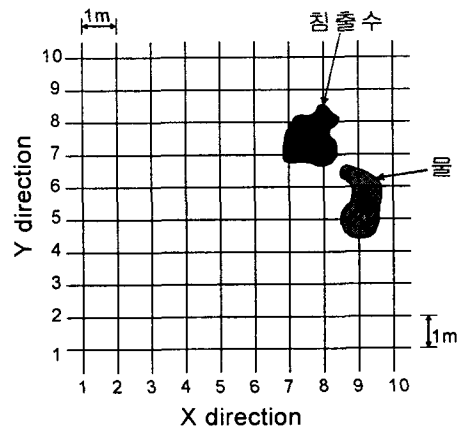


(b) 실제 침출수 오염대

그림 31. 추정된 침출수의 누출지점과 실제 침출수 오염대의 비교(두 지점의 동시 누출)



(a) 측정값에 의한 누출지점의 추정



(b) 실제 침출수 오염대

그림 32. 추정된 침출수의 누출지점과 실제 침출수 오염대의 비교(침출수와 물의 누출)

### 6.4.2. 전기회로적 특성분석

전기회로시험의 결과는 다음의 표 5~8과 같다. 표 5에서 실제 1MΩ의 저항에 대한 측정값이 365~362kΩ 정도로 작게 측정되었다. 또한 표 6~8에서 저항이 작은 값으로 바뀐 지점이 위치하는 줄과 열의 경우 저항치가 함께 낮아지는 현상을 보였다. 표 6, 7에서 한 지점의 저항이 다른 지점보다 작은 저항이 연결된 경우 그 지점의 측정값은 실제 저항소자의 값과 비슷하게 측정되었으나 저항이 감소된 지점과 동일한 전선상에 위치한 소자의 측정값이 다른 지점들에 비해 더 작은 값으로 측정되는 경향을 나타내었다. 표 8에서 3-B지점과 5-D지점에 작은 저항값의 소자를 연결한 경우에 3-B, 5-D 지점을 포함하는 3, 5, B, D 전선에 연결된 소자의 저항측정값이 모두 감소하였으며, 특히 두 지점의 저항감소효과가 교차되는 3-D와 5-B 지점에서는 다른 지점보다 더 큰 감소를 나타내었다. 전류는 통상적으로 저항이 낮은 쪽으로 많이 흐르는 경향이 있는데, 이 경우도 같은 전선에 연결된 저항쪽으로도 전류의 흐름이 형성되기 때문에 저항 측정치가 실제 저항값보다 작게 나온 것으로 판단된다.

전기회로시험을 통해 얻은 결과에 의하면 실제 모형실험에서 나타나는 누출지점과 동일한 전선상에서 발생하는 전기전도도의 증가효과 즉, 저항의 감소효과에 대한 설명이 가능하다. 즉, 침출수의 누출지점은 다른 지점에 비해 작은 저항을 갖게 되므로 그 지점의 저항값이 감소하게 된다. 그렇게 되면 전기회로적 효과에 의해 누출지점과 동일한 전선상에 존재하는 센서에서의 전기저항 측정값이 실제 저항값보다 좀 더 감소하는 효과를 보이게 되기 때문에 그림 27~29에서 보이는 바와 같이 누출지점 이외의 지점에서 전기전도도가 증가하는 효과 혹은 전기저항이 감소하는 효과를 나타내게 된다.

본 실험결과에 의하면 전선의 격자형 배치에 의한 측정기법에서는 측정저항이 실제의 저항보다 작게 측정되는 경향이 있으며 또한 특정 지점의 저항이 감소하면 동일 전선상에 위치한 다른 지점의 저항측정값도 다소 감소하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서, 전기회로분석을 통하여 측정값에 대한 정량적인 보정기법의 개발도 가능할 것이다.

표 5 모두 1MΩ인 경우 저항값

(단위 : kΩ)

	A	B	C	D	E
1	360	358	356	356	356
2	362	361	357	360	358
3	358	356	355	356	355
4	362	360	357	357	358
5	360	360	357	358	359

표 6 1-A의 저항을 1kΩ으로 바꾼 경우 저항

(단위 : kΩ)

	A	B	C	D	E
1	<b>0.98</b>	288	286	287	286
2	289	356	353	356	353
3	285	352	350	351	350
4	289	359	356	356	353
5	288	356	353	353	365

표 7 2-C의 저항을 51kΩ으로 바꾼 경우 저항

(단위 : kΩ)

	A	B	C	D	E
1	357	354	296	353	352
2	300	299	<b>47.1</b>	298	296
3	354	352	295	352	351
4	358	356	297	353	353
5	358	359	298	357	356

표 8 3-B는 51kΩ, 5-D는 20kΩ로 바꾼 경우 저항

(단위 : kΩ)

	A	B	C	D	E
1	351	294	347	289	347
2	353	267	348	292	349
3	296	<b>46.8</b>	293	215	294
4	352	296	348	290	348
5	292	216	288	<b>19.4</b>	290

## 7. 결론

지반 내 오염물질 누출감지시스템의 개발을 위하여 외국의 누출감지시스템을 조사하고, 실내실험을 통하여 지반의 전기적 특성을 파악하고, 격자형 누출감지시스템의 적용성을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 현재까지 개발된 누출감지 시스템은 전기적 성질을 이용한 누출감지 시스템이 가장 많이 개발되어 있다. 각 방법들은 그 원리 및 측정방법에 따라 설치방법도 다르고 각각의 장단점이 있기 때문에 현장에 설치할 경우에는 현장의 특성과 설치 목적에 맞는 시스템을 선택하여 사용하여야 한다.

(2) 불포화 사질토의 전기비저항은 함수비가 증가함에 따라 감소하고 건조단위중량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 불포화 사질토 지반의 전기비저항은 수분밀도의 증가에 따라 지수적으로 감소하는 함수관계를 나타낸다. 수분밀도는 함수비의 증가에 의한 전기비저항 감소와 다짐정도의 증가에 의한 간극수의 connection 증가에 의한 전기비저항 감소를 모두 반영한 인자이다. 침출수로 오염된 경우에도 전기비저항은 수분밀도의 함수로 표현될 수 있으며, 침출수의 오염농도가 증가함에 따라 전기비저항이 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과에 의하면 불포화 지반의 수분밀도에 대한 평가가 선행된다면 불포화 지반의 침출수 오염도에 대한 정량적 평가가 가능할 것으로 판단된다.

(3) 누출감지시스템에 대한 현장적용성을 평가하기 위하여 현장모형시험을 수행한 결과 침출수의 오염대를 정확하게 감지하였다. 그러나 저항이 감소된 지점과 동일전선에 연결된 다른 센서에서의 저항 감소효과가 발생하는데 이는 전기회로적인 특성에 의해 나타나는 것으로 판단된다. 향후 전기회로 모델링을 통한 정량적인 평가가 수행된다면 측정값에 대한 보정을 통하여 더 정확한 평가가 수행될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 대한토목학회 소연구회 지원사업으로 일부 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 박준범, 오명학 (2000) 매립장의 침출수 및 지하저장탱크 누출감지시스템 소개, 토목, 제 48권, 제1호, 56-63
- (2) 손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수 (2000) *지반환경 물리탐사*, 시그마프레스
- (3) 정하익 (1998) *지반환경공학*, 도서출판 유림
- (4) 한정상 (1999) *지하수 환경과 오염*, 박영사
- (5) 환경부 (2000) 폐기물 매립지에서 배출되는 오염물질로 인한 환경피해의 인과관계 규명 및 피해액 산정을 위한 연구
- (6) Abu-Hassanein, Z.S., Benson, C.H. and Blotz, L.R. (1996) Electrical resistivity of compacted clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 397-406
- (7) Archie, G.E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some

- reservoir characteristics, *Trans. AIME*, 146, 54-62
- (8) Arulanandan, K. (1991) Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(2), 319-330
- (9) ASTM (1991) Standard test methods for electrical conductivity and resistivity of water, *D 1125-91*, Philadelphia, Pa
- (10) Atkins, E.R. and Smith, G.H. (1961) The significance of particle shape in formation factor-porosity relationship, *Journal of Petroleum Technology*, 13, 285-291
- (11) Barnes, B.B., Corwin, R.F., Beyer, J.H. and Hildenbrand, T.G. (1972) Geology prediction: developing tools and techniques for the geophysical identification and classification of sea-floor sediments, *U.S. Dept. Commerce Publication*, NOAA Tech. rep. ERL224-MMT-C2, p.163
- (12) Campanella, R.G. and Weemees, I. (1990) Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies, *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 557-567
- (13) Colucci, P. and Lavagnolo, M.C. (1995) Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners, *Proceedings Sardinia '95*, 5th International Landfill Symposium, 437-452
- (14) Darilek, G.T. (1990) Electrophoretic sealing of leaks in geomembrane liners, *Proceeding HAZTECH International 90 Conference*, Inst. for Int. Res.
- (15) Darilek, G.T., Corapcioglu, M.Y., and Yeung, A.T. (1996) Sealing leaks in geomembrane liners using electrophoresis, *Journal of Environmental Engineering*, 122(6), 540-544
- (16) Darilek, G.T., Laine, D.L. and Parra, J.O. (1989) The electrical leak location method for geomembrane liners-development and applications, *Industrial Fabrics Association International Geosynthetics '89 Conference*, San Diego, CA, 437-452
- (17) Dunson, C. L. (1996) Technology today: landfills with vision, *World Wastes*, 39
- (18) Eller, H. and Denoth, A. (1996) A capacitive soil moisture sensor, *Journal of Hydrology*, 185, 137-146
- (19) Jackson, P.D., Taylor-Smith, D. and Stanford, P.N. (1978) Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands, *Geophysics*, 43(6), 1250-1268
- (20) Kaya, A. and Fang, H.Y. (1997) Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity, *Journal of Environmental Engineering*, 123(2), 169-177
- (21) Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966) *Electrical methods in geophysical prospecting*, Oxford, Pergamon Press
- (22) Laine, D.L. and Darilek, G.T. (1993) Locating leaks in geomembrane liners of landfills covered with a protective soil, *Geosynthetics '93 Vancouver*, Canada, 1403-1412
- (23) McCarter, W.J. (1984) The electrical resistivity characteristics of compacted clays, *Geotechnique*, 34(2), 263-267
- (24) Oh, M.H. and Park, J.B. (2000) Laboratory tests for the development of the contaminant leakage detection system in soil, *Proceeding of GeoEng 2000*, International

- Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia, Vol. 2, p.286
- (25) Okoye, C.N., Cotton, T.R., and O'Meara, D. (1995) Application of Resistivity Cone Penetration Testing for Qualitative Delineation of Creosote Contamination in Saturated Soils, *Geoenvironment 2000*, 151-166
- Robinson, E.S. and Coruh, C. (1988) *Basic Exploration Geophysics*, John Wiley & Sons
- (26) Robison, R. (1996) Detecting leaks electronically, *Civil Engineering*, 66
- Sandberg, C. and Masia, M. (1991) 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*
- (27) Selig, E.T. and Mansukhani, S. (1975) Relationship of soil moisture to the dielectric property, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the ASCE*, 101(GT8), 755-770
- (28) Shang, J.Q., Lo, K.Y. and Inculet, I.I. (1995) Polarization and conduction of clay-water-electrolyte systems, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(3), 243-248
- (29) Smith, S.S. and Arulanandan, K. (1981) Relationship of electrical dispersion to soil properties, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(GT5), 591-604
- (30) Stammmer, M. and Bol, J. (1985) Evaluation of methods for monitoring landfill barriers, *International TNO Conference on Contaminated Soil*
- (31) Taylor-Smith, D. (1971) Acoustic and electrical techniques for sea-floor sediment identification, *Proceeding of International Symposium on Engineering Properties of Sea-Floor Soils and their Geophysical Identification*, Seattle, Washington, 253-267
- (32) Tuncay, K., Kambham, K.K.R., and Corapcioglu, M.Y. (1995) Electrophoretic sealing of impoundment leaks, *Geoenvironment 2000*
- (33) White, C.C. and Barker, R.D. (1997) Electrical leak detection system for landfill liners: a case history, *Ground Water Monitor Remediation*, 17(3)
- (34) Windle, D. and Wroth, C.P. (1975) Electrical resistivity method for determining volume changes that occur during a pressuremeter test, *Proceeding of Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh N.C., 497-510
- (35) Yeung, A.T., Darilek, G.T., and Corapcioglu, M.Y. (1997) Electrophoresis: Innovative technique to repair leaking impoundments, *In Situ Remediation of the Geoenvironment, Proceeding of the Conference Geotechnical Special Publication No.71*, Minneapolis, Minnesota, 560-573