

# 전기저항 측정기법을 이용한 오염물질 누출감지시스템의 개발: II. 현장모형시험을 통한 매립지에의 적용성 평가

## Development of Contaminant Leakage Detection System Using Electrical Resistance Measurement: II. Evaluation of Applicability for Landfill Site by Field Model Tests

오 명 학* <sup>1</sup>	Oh, Myoung-Hak	이 주 형* <sup>2</sup>	Lee, Ju-Hyung
박 준 범* <sup>3</sup>	Park, Jun-Boum	김 형 석* <sup>4</sup>	Kim, Hyung-Suk
강 우 식* <sup>5</sup>	Kang, Woo-Sik		

### Abstract

Field model tests were performed to develop the grid-net landfill leachate leakage detection system using electrical resistance. Electric circuit tests were also carried out to investigate the expected electrical effects of grid-net electric circuit. The resistance of leaking point showed lower value than that of non leaking point. Grid-net leakage detection system was thought to be effective to locate the leachate leaking point. The measured electrical resistance along the wire including the leaking point was slightly reduced following the reduction of electrical resistance at the leaking point, which was explained by electric circuit test results.

### 요 지

본 논문에서는 격자망식 전선배치에 의한 침출수 누출감지시스템을 개발하기 위하여 현장모형시험을 통하여 적용성을 평가하였으며, 전기회로시험을 통하여 격자망 전선 배치에서 발생하는 전기회로적 효과를 파악하고자 하였다. 침출수는 전기저항을 감소시키기 때문에 누출지점에서는 다른 지점에 비해 낮은 전기저항값을 나타내었다. 따라서, 전기저항을 측정하는 본 누출감지시스템에 의하여 임의 지점에서 발생하는 침출수의 누출 감지가 가능하였으며, 평면적 분포도를 통하여 누출위치의 파악이 가능하였다. 전기저항이 감소된 지점과 동일한 전선상에 위치한 다른 센서에서의 측정값도 약간 감소하는 경향을 나타내었으나, 이는 저항이 작은 곳으로 전류의 흐름이 발생하는 전기회로적 효과로 설명할 수 있었다.

**Keywords :** Electrical conductance, Electrical resistance, Electric circuit, Leachate, Leak detection

### 1. 서 론

매립지에서 발생하는 침출수는 인근 토양과 지하수

및 하천을 오염시키기 때문에 그 위해성이 매우 크다. 따라서 매립지를 선정, 시공하는 경우 바닥층에 차수재를 설치하여 침출수의 누출을 방지한다. 그러나 바닥 지

\*1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul Nat'l Univ.)

\*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul Nat'l Univ.)

\*3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 조교수 (Member, Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul Nat'l Univ.)

\*4 순천향대학교 정보기술공학부, 부교수 (Associate Professor, Division of Information Technology, Soonchunhyang Univ.)

\*5 (주)진우기술, 대표이사 (CEO, Jinoo, co. Ltd.)

반층과 차수재 재료의 성질, 차수재 설치 작업의 정확성, 차수재간 결합의 정도에 따라서 차수재의 많은 부분에 누출이 발생할 수 있다(Colucci, 1995; Darilek et al., 1996). 특히 대부분의 차수재 손상은 차수재 상부에 덮개층을 설치하는 과정중에 발생한다. 즉, 보호토양 포설 시나 공사 장비나 차량에 의해 또는 바닥의 날카로운 돌 등으로 인하여 차수막이 손상되는 것으로 나타났다(Yeung et al., 1997; 정하익, 1998). 외국의 경우 Laine and Darilek(1993)은 전체 850,000m<sup>2</sup>면적의 매립장에 대하여 누출여부를 조사한 결과 평균 1,000m<sup>2</sup>당 2.25개의 지점에서 누출이 발생하고 있음을 발표한 바 있고, Laine and Miklas(1988)는 수동식 누출지점 탐사법으로 61개소를 조사한 결과 10,000m<sup>2</sup>당 평균 34.4개의 누출지점을 감지하였음을 보고한 바 있다(Darilek 등, 1989). 아직 국내에는 매립지 차수재의 파손에 의한 침출수의 누출에 대한 통계가 보고된 바 없지만 이에 대한 문제는 심각할 것으로 판단된다. 따라서 매립이 완료되기 이전에 누출을 조기에 감지하여 차수재의 파손된 위치를 파악하고 차수시스템을 보수하여 주변 지반의 오염을 최소화하여야 한다.

매립장 차수재에서 발생하는 누출에 대한 조사는 지반환경적 측면에서 기본적인 부분이라 할 수 있다. 누출에 대한 조사는 모니터링정을 설치하여 조사하는 방법과 누출감지시스템을 설치하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 누출감지시스템은 실험실에서 샘플의 별도 분석 없이 현장에서 누출발생 초기에 누출여부와 누출지점을 찾아낼 수 있는 장치이므로 오염물질이 확산되기 이전에 오염도를 조사할 수 있다.

본 논문에서는 현장모형시험을 통하여 격자망 전선 배치에 의한 저항측정기법을 이용한 감지시스템의 침출수 누출감지에 대한 적용성을 평가하였으며, 전기회로시험을 통하여 격자망 전선배치에서 나타나는 전기회로적 효과를 분석하였다.

## 2. 기존의 누출감지시스템

현재 사용되고 있는 차수막 파손에 의한 누출조사방법으로는 매립지 하부의 배수공의 수질변화를 측정하여 감지하는 지하수 수질측정법, 이중차수막간 배수층 수질검사로 누출여부를 측정하는 이중차수막간 수질측정법, 이중차수구간을 나누어 구획설치한 배수관의 수질 변화에서 감지하는 이중 차수와 구획배수방법, 강수

량과 침출수량, 증발량, 보유수 및 표면유출량의 관계로 감지하는 수량계산법, 지하수 배수관에 미량성분의 수질변화르 누출여부를 감지하는 극미량 추적자(tracer) 측정방법이 있다(이재성 등 1999).

누출감지에 대한 모니터링을 자동화하기 위하여 최근에는 전기적 특성을 이용한 누출감지시스템이 개발되었다. 전기적 특성을 이용한 누출감지시스템은 차수막의 내부와 외부에 각각 전극을 설치하는 것을 기본원리로 한다. 차수막으로 사용되는 sheet는 전기적으로 높은 절연성을 나타내기 때문에 차수막의 내측과 외측에 전압을 가하여도 전류는 거의 흐르지 않는다. 그러나 차수막이 파손되면 파손부에서 전기전도상태가 되므로 전류의 흐름이 발생하게 된다. 전기적 특성을 이용한 누출감지시스템은 센서의 설치방식에 따라 쌍전극법(Two Electrode Method), 전극격자배치법(Electrode Grid Method), 이동전극시스템(Moving Electrode System) 등이 있으며, 분석방법에 따라 차수막 파손시 발생하는 전위분포의 변화를 이용하는 전위법과 차수막파손시 전류투과량의 변화로 파손유무를 측정하는 전류법 등으로 구분된다(이재성 등, 1999; Oh and Park, 2000; 박준범, 2000).

차수막의 절연성을 이용하여 차수막의 내부와 외부에 전극을 설치하여 전류를 공급하는 방식은 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 첫째, 합성수지 차수막이 설치되지 않은 매립지에 대해서는 적용할 수 없다. 또한 합성수지차수막이 설치된 곳이라 하더라도 매립지의 경계부근에서 전류의 이동이 발생할 수 있기 때문에 정확한 모니터링이 용이하지 않다. 둘째, 매립지 외부에 설치되는 전극은 가능한한 매립지로부터 멀리 떨어진 지점에 설치하여야 하는데 이것이 용이하지 않다. 셋째, 누출지점을 찾는 방식이 핀홀(pin hole)과 같은 작은 파손에 의해 형성되는 점전류원으로 가정한 전위계산식에 의해 계산된다. 그러나 매립지에서의 차수재 파손이 실제적으로는 접합불량이나 증장비에 의한 파손과 같은 찢김이나 크기가 큰 파손이 발생하게 되므로 식의 가정조건에 맞지 않으므로 누출지점의 위치파악에 있어서 잘못된 정도를 줄 가능성이 있다(Frangos, 1997).

여러 가지 형태의 누출조사기법이 개발되었지만 아직까지 완전한 누출감지시스템은 만들어지지 않았다. 이상적인 시스템은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다(Frangos, 1997; Hix, 1998; Oh and Park, 2000; 박준범, 2000).

- 설치비용과 관리비용이 적절해야 한다.
- 정확하게 누출지점을 감지해야 하고, 오작동이 없어야 한다.
- 충분한 내구성을 가져야 한다.
- 측정 작업이 자동화되어야 한다.
- 어떤 유형의 매립지나 침출수에 대해서도 적용가능해야 한다.
- 매립지 하부의 전체 지역에 대한 공간적인 모니터링이 가능해야 한다.

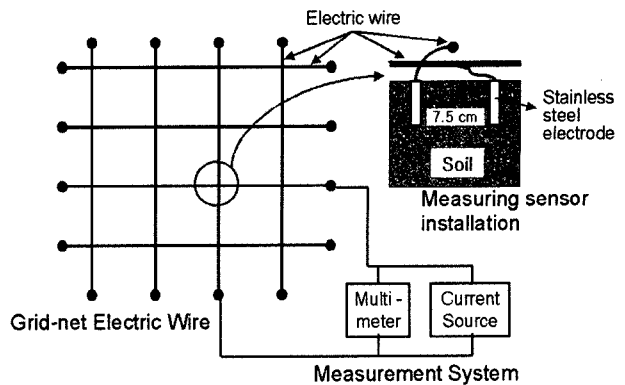


그림 1. 저항측정 누출감지시스템의 개요도

### 3. 시스템의 개요

본 연구에서 개발하고자 하는 감지시스템은 그림 1과 같이 전선을 격자망으로 구성하고, 각 전선의 교차점에 센서를 설치하는 것을 기본형태로 한다. 차수막의 내부와 외부에 전극을 설치하는 기존 방법의 문제점을 개선하기 위하여 매립지 하부에 설치된 센서에 의해서 전류의 공급과 측정이 동시에 이루어지도록 하였다. 본 시스템은 격자형 전선의 교차점에 설치된 측정센서에서 측정되는 전기저항(Electrical resistance)과 이의 역수인 전기전도도(Electrical conductance)의 분석을 통하여 누출지점을 감지한다. 본 센서에서의 저항측정은 그림 1과 같이 전류공급장치와 전위차 측정장치로 구성된 측정 시스템을 통하여 이루어진다. 각 센서에서의 저항 측정은 격자망 전선망에서 가로와 세로의 전선을 하나씩 선택하여 연결함으로써 전기회로를 구성하는 원리를 이용한다. 즉, 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 대한 측정이 이루어지게 된다.

### 4. 실험방법

#### 4.1 현장모형시험방법

현장모형시험은 본 연구에서 개발하고자 하는 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 정방형이며, 대상부지를 깊이 1m 정도 굴착한 후 합성수지막을 설치하여 실험중 침출수가 원지반으로 유입되는 것을 방지하였다. 방수막을 설치한 후 굴착한 흙과 인근 흙을 이용하여 복토하고, 다짐을 수행하여 지반을 조성하였다. 다짐이 완료된 후 1m 간격으로 가로 10줄, 세로 10줄의 전선을 배치하고, 각 전선의 교차점에 두 측정전극 사이의 간격이 7.5cm인 전기저항 측정센서를 설치하였다. 누출감지시스템의 설치가 완료된 후 합성수지막을 덮어 현장조성을 완료하였다.

실험의 수행 절차는 그림 2에 제시한 흐름도와 같다. 먼저 누출이 발생하기 전의 초기 저항값을 모든 지점에 대하여 측정하였다. 측정은 정밀전류원(Keithley 220)으로 1mA의 전류를 공급하고, 이때 발생하는 전위차를 멀티미터로 측정하였다. 방수막의 임의지점에 인위적으로 핀홀(pin hole) 형태의 파손과 찢김 형태의 파손부분을 만들고, 여기에 침출수 주입을 위하여 깔때기형태의 파이프를 접합하여 침출수가 파손부위로 누출되도록 형성하였다. 그림 3은 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 전기저항 자료를 분석하여 추정된 침출수 오염대와 실제 누출에 의한 오염대를 비교하여 누출감지시스템의 정확성을 검증하였다.

현장모형시험을 수행하여 단일지점의 누출과 두 지점에서 동시에 누출이 발생하는 경우 누출지점의 감지정확도를 평가하였다. 현장모형시험의 내용은 표 1에 정리한 바와 같으며, 각 실험에서 인위적으로 조성한 누출지점은 그림 4에 도시하였다.

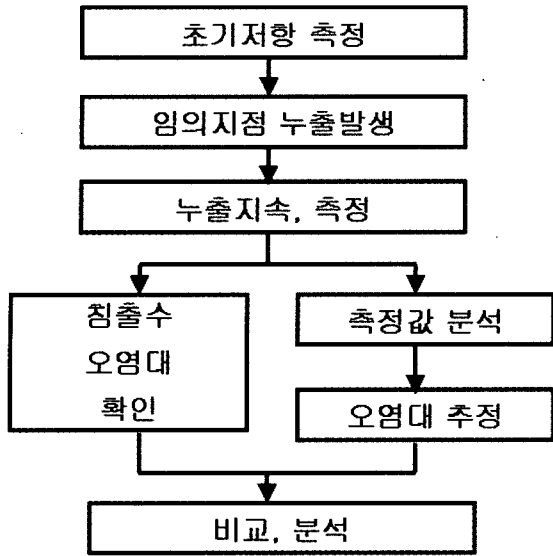


그림 2. 실험수행절차

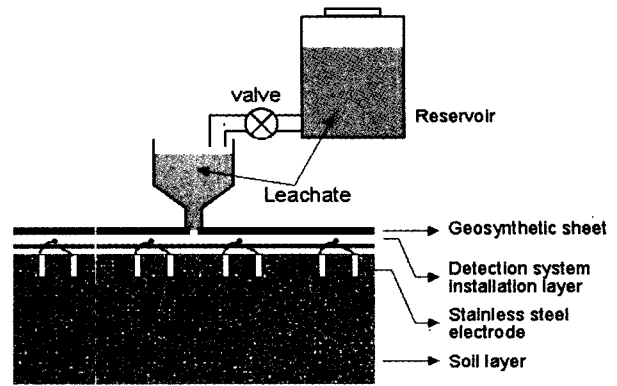


그림 3. 합성수지막의 파손부를 통한 침출수의 누출실험 단면도

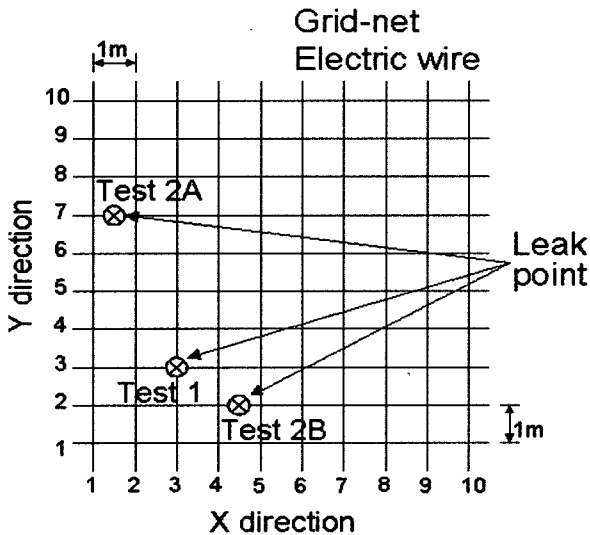


그림 4. 현장모형시험에서의 전선배치와 누출지점

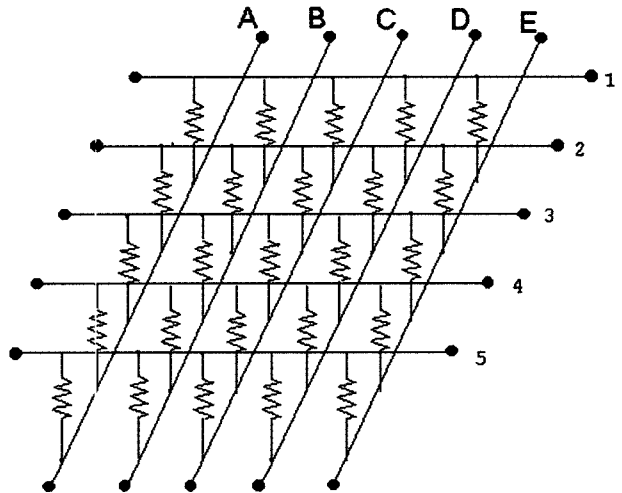


그림 5. 전기회로의 구성

표1. 현장모형시험 수행 내용

	damage type	total leaching amount	leaching time (hour)
Test 1	pin hole	7.5 L	9
Test 2	A	crack	7 L
	B	pin hole	8 L

#### 4.2 전기회로시험

격자망 전선배치에 의한 전기회로의 구성방식에 따른 전기회로적 특성을 파악하기 위하여 전기회로 시험을 수행하였다. 전기회로시험은 흙에서 측정되는 저항값을 실제 저항기(resistor)로 치환하여 격자형으로 설치된 전선에 연결하여 저항값의 변화에 따른 영향을 평가

하였다. 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-C

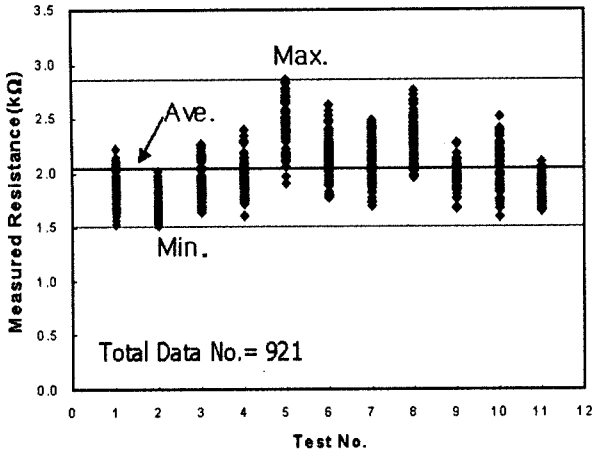


그림 6. 오염되지 않은 지반에 대한 저항 측정값

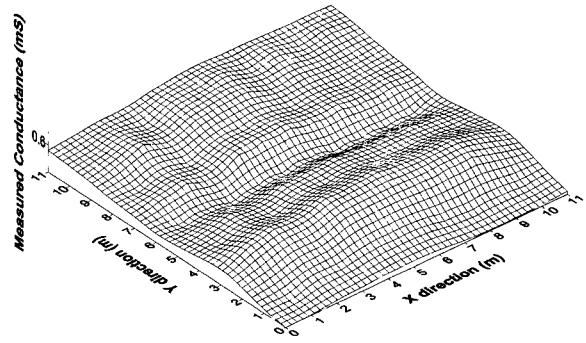


그림 7. 침출수 누출 발생 전의 전기전도도 분포

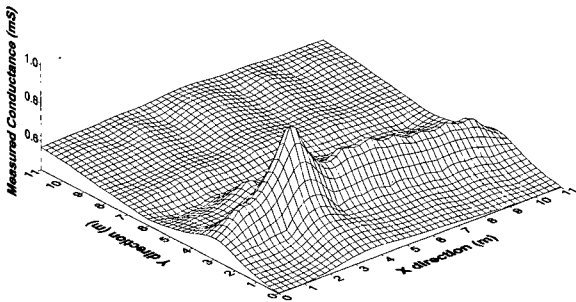


그림 8. 단일 지점의 침출수 누출 발생시의 전기전도도 분포

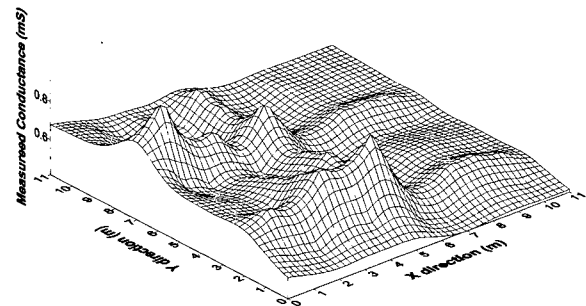


그림 9. 두 지점에서 동시에 누출이 발생한 경우 전기전도도의 분포

는 51kΩ, 5-D는 20kΩ으로 바꾼 경우에 대해서도 분석하였다.

## 5. 결과 및 분석

### 5.1 현장모형시험 결과

#### 5.1.1 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 측정한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에 제시된 결과는 오염물질의 누출 발생 전의 상태에서 측정된 결과와 오염물질의 누출이 발생한 경우라 하더라도 침출수의 영향을 받지 않은 것으로 간주할 수 있는 누출지점에서 충분히 멀리 떨어진 지점에서 측정된 값들을 정리한 것이다. 여기서, 침출수의 유입이 없는 상황에서 측정된 저항값은 1.51kΩ~2.86kΩ의 범위에서 측정되었으며, 평균값은

2.04kΩ을 나타내었다. 침출수의 누출이 발생하지 않은 지반에서 측정된 저항값에서의 변화는 지반의 다짐도나 함수비의 불균질성과 측정센서의 설치간격의 오차에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

#### 5.1.2 침출수에 대한 누출감지도 평가

그림 7은 침출수의 누출이 발생하기 전의 실험부지 전체에 대한 전기전도도(electrical conductance) 측정값의 분포도를 보여준다. 침출수는 전기저항을 감소시키기 때문에 침출수의 누출지점에서 피크(peak)가 발생하도록 표현하기 위하여 전기저항의 역수인 전기전도도로 표현하였다. 100개의 측정센서에서 측정된 저항값은 1.51kΩ(=0.66mS)~2.02kΩ(=0.50mS)의 범위를 나타내었다.

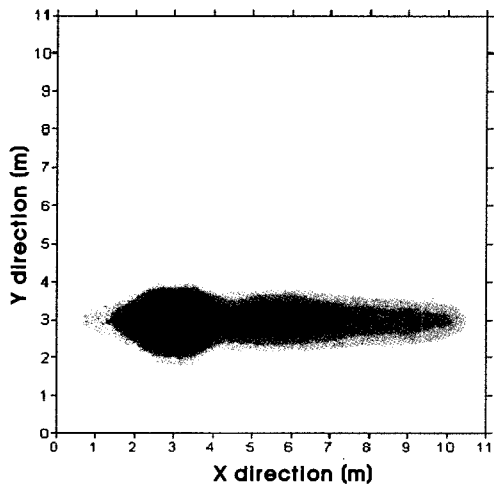
침출수의 누출이 발생한 경우의 전기전도도 분포를 그림 8, 9에 도시하였다. 단일지점에서 누출이 발생한 경우의 전기전도도 분포를 보인 그림 8에서 (3m, 3m)지점에서 0.94kΩ(=1.06mS)의 저항값을 나타내었으며, 이는 다른 지점에 비해 크게 작은 값이므로 누출이 발생한 것으로 판단할 수 있다. 또한 두 지점에서 동시에 누출

이 발생한 경우의 전기전도도 분포인 그림 9에 의하면 누출이 발생한 것으로 판단되는 (1m, 3m)지점과 (5m, 2m) 지점의 전기저항값이 각각  $0.99k\Omega(=1.01mS)$ 과  $1.08k\Omega(=0.93mS)$ 으로 감소되었다.

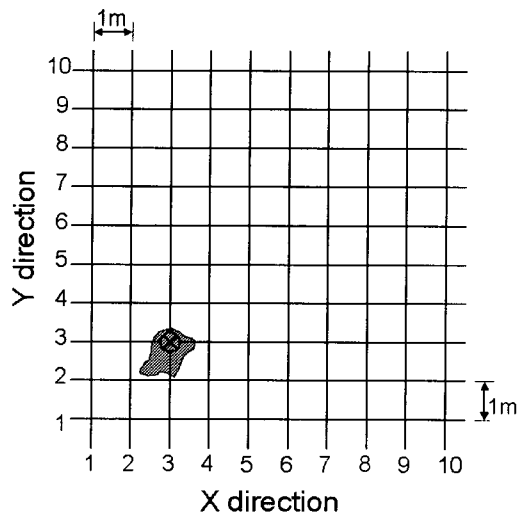
그림 8, 9에서 침출수의 누출이 발생한 것으로 판단되는 전기전도도의 피크를 보이는 지점과 동일한 라인에서의 전기전도도값이 크게 측정된 경향을 보인다. 그림 8에서 이는 침출수를 감지한 것이 아니라 전기회로적 특성에 의해 나타나는 효과로 판단되며, 전기회로적 효과에 대해서는 뒤에 설명할 것이다. 그러나, 전기회로적 효과에 의해 발생하는 전기전도도의 증가, 즉 본 실험이 수행된 조건에 대해서 전기저항감소의 효과는 침출수에 의한 전기전도도의 증가 혹은 전기저항감소와

는 구별이 가능한 정도로 발생하기 때문에 침출수의 누출지점의 감지에는 무리가 없는 것으로 판단된다.

그림 10, 11은 누출감지시스템에서 측정된 값에 의한 침출수의 누출지점의 추정과 실제 침출수 오염대를 비교한 그림이다. 그림 10, 11의 (a)는 측정된 값으로부터 추정된 누출예상지역을 나타낸 것이며, (b)는 실제 실험 수행 직후 직접 확인된 침출수 오염대를 도시한 것이다. 이때 실험이 수행된 시간은 오염물질의 확산이 영향을 줄 만큼 긴 시간이 아니고 누출된 침출수는 차수재 하부에서 수평방향으로 퍼지면서 지반하부로 침투하기 때문에 침출수 오염대의 평면적 분포는 실험수행 직후 별도의 분석없이 확인 가능하였다. 단일지점에서 누출이 발생한 경우나 두 지점에서 동시에 누출이 발생한 경우

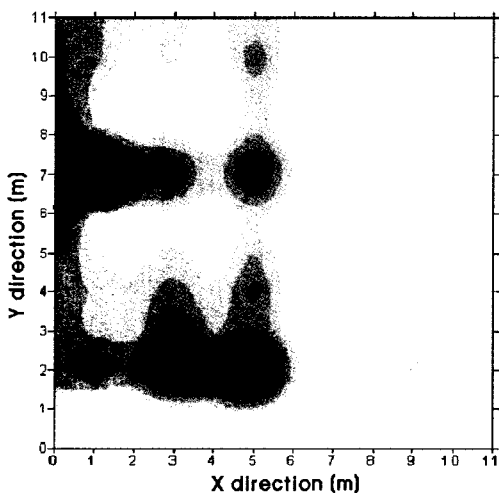


(a) 측정값에 의한 누출지점의 추정

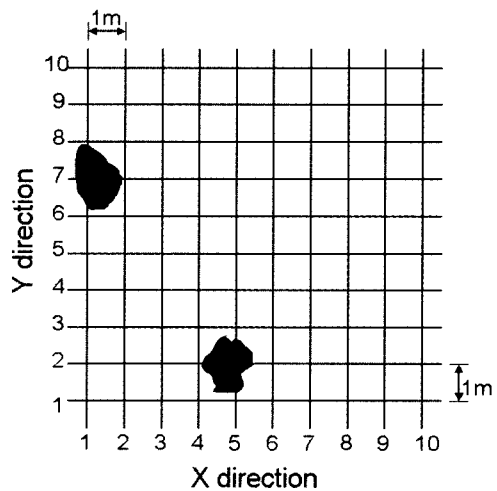


(b) 실제 침출수 오염대

그림 10. 추정된 침출수 누출지점 실제 침출수 오염대의 비교(단일지점 누출)



(a) 측정값에 의한 누출지점의 추정



(b) 실제 침출수 오염대

그림 11. 추정된 침출수의 누출지점과 실제 침출수 오염대의 비교(두 지점의 동시 누출)

에 대한 실험결과에서 누출감지시스템에 의한 측정값으로부터 추정된 침출수 누출 예측지점과 실제 침출수의 누출지점이 거의 일치하였다. 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 모니터링 하는 것이 가능한 것이다.

### 5.1.3 누출지속에 따른 저항값의 변화

누출이 지속됨에 따라 침출수의 누출지점과 그 밖의 지점에서의 저항값 변화경향을 그림 12에 도시하였다. 그림 12에 의하면 누출이 발생하기 시작한 후 단지 몇 시간 이내에 침출수 누출지점에서의 저항값의 감소가 뚜렷하게 나타났기 때문에 침출수 누출 발생 초기에 누출지점의 감지가 가능함을 나타낸다. 또한 누출이 종료된 9시간 이후에서부터 측정이 계속된 360시간까지에 대해서 누출지점의 저항값은 계속 작게 측정되었으며, 그 외의 지점에서의 저항측정값도 큰 변화를 보이지 않았다. 즉, 차수재의 파손부위를 통해 침출수의 누출이 발생하여 지속되다가 침출수의 지반내로의 유입이 종료되더라도 지반내에 이미 누출된 침출수의 영향으로 인하여 저항값의 감소가 오래 지속되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 시스템을 응용하여 침출수의 누출감지 뿐만 아니라 침출수 오염대에 대한 조사도 가능할 것으로 판단된다.

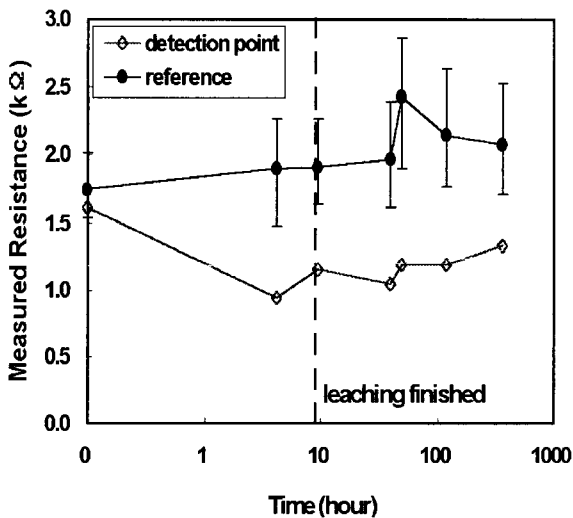


그림 12. 침출수 누출시간에 따른 측정저항값의 변화

## 5.2 전기회로적 특성분석

전기회로시험의 결과는 다음의 표 2~5와 같다. 표 2에서 실제 1MΩ의 저항에 대한 측정값이 365~362kΩ 정도로 작게 측정되었다. 또한 표 3~5에서 저항이 작은 값으로 바뀐 지점이 위치하는 줄과 열의 경우 저항치가 함께 낮아지는 현상을 보였다. 즉, 표 3, 4에서 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. 또한 표 5에서 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 감소효과를 나타내었다. 전류는 통상적으로 저항이 낮은 쪽으로 많이 흐르는 경향이 있는데, 본 시험의 경우도 같은 전선에 연결된 저항쪽으로도 전류의 흐름이 형성되기 때문에 저항 측정치가 실제 저항값보다 조금 작게 나온 것이라 판단되었다.

전기회로시험을 통해 얻은 결과에 의하면 실제 모형 실험에서 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 8, 9에서 보이는 바와 같이 누출지점 이외의 지점에서 전기전도도가 증가하는 효과 혹은 전기저항이 감소하는 효과를 나타내게 된다. 이와 같은 현상은 전기회로분석에 의한 보정을 통하여 제거가능할 것으로 판단된다.

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 2. 모두 1M $\Omega$ 인 경우 저항값 (k $\Omega$ )

	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 3. 1-A의 저항을 1k $\Omega$ 으로 바꾼 경우 저항(k $\Omega$ )

	A	B	C	D	E
1	0.98	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 4. 2-C의 저항을 51k $\Omega$ 으로 바꾼 경우 저항(k $\Omega$ )

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

표 5. 3-B는 51k $\Omega$ , 5-D는 20k $\Omega$ 로 바꾼 경우 저항(k $\Omega$ )

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

## 6. 결론

전선의 격자형 배치에 의한 전기저항 측정을 이용한 누출감지시스템의 적용가능성을 평가하기 위하여 수행한 현장모형시험과 격자형 전선배치에서의 측정기법에 대한 전기회로시험을 토대로 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 격자망으로 전선을 배치하고 각 교차점에 측정 센서를 설치하여 모든 센서에 대한 저항을 측정함으로써 대상지반의 침출수 누출여부와 누출지점에 대한 평면적인 모니터링이 가능하다. 침출수의 누출이 발생

하지 않은 오염되지 않은 지반에서의 전기저항 측정값은 특정한 범위의 값을 나타내었으며, 침출수가 누출되는 경우 누출지점에서의 저항 측정값은 다른 지점의 저항값에 비하여 크게 감소하는 경향을 나타내어 저항값의 측정에 의한 침출수의 누출감지가 가능함을 확인하였다.

(2) 본 누출감지시스템은 지반에 침출수가 유입됨으로써 지반의 저항값이 감소되는 원리를 이용하여 지반의 전기저항을 측정하여 누출을 감지하는 기법이다. 따라서, 누출지점의 개수와 합성수지막의 파손형태에 관계없이 누출지점을 정확하게 감지할 수 있었으며, 침출수의 누출이 발생한 초기에 이에 대한 감지가 가능하였다.

(3) 현장모형시험에서 누출지점과 동일한 전선상에 위치한 센서에서의 측정저항값의 감소 즉, 전기전도도의 증가경향은 전기회로적 효과로 설명될 수 있다. 전기회로시험을 통하여 격자형 전선배치에 의한 저항측정기법에 있어서의 전기회로적 효과를 분석한 결과 실제 저항보다 작게 측정되는 경향을 나타내었다. 또한 특정지점의 저항값이 감소하게 되면, 감소된 저항이 연결된 동일전선상에 위치한 저항의 측정값이 다른 지점의 측정값보다 작게 측정되며 이는 전류가 저항이 작은 쪽으로 흐르려는 경향에 기인한다. 전기회로효과의 분석을 통하여 현장에서 전기저항 측정값에 대한 정량적인 보정이 가능할 것으로 판단된다.

(4) 본 논문에서 제시한 전기저항 측정기법을 이용한 누출감지시스템이 현장에서 효과적으로 적용되기 위해서는 계절별 전기저항값의 변화경향과 지하수위 상승에 의한 전기저항값의 감소 효과 등에 대한 추가적인 고려를 통하여 누출감지에서의 오작동 가능성을 최소화하기 위한 방향의 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 격자망식 전선배치기법에 의한 전기저항 측정기법을 응용하여 다양한 오염물질에 대한 적용성 평가가 이루어진다면, 지하저장탱크에서의 유류 누출감지시스템과 같은 형태로의 개발도 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 “98엔지니어링 핵심 기반 공통 기술/구조물의 안전성과 경제성을 높이기 위한 최첨단 특수 지반



조사 기술 개발 및 DB 구축”의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며, 연구 수행에 도움을 주신 과학기술부와 한국 건설기술연구원 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 박준범, 오명학 (2000), “매립장의 침출수 및 지하저장탱크 누출 감지시스템 소개”, 토목, 제48권, 제1호, pp.56~63.
2. 이재성, 정민우, 핑기정 (1999), “매립지 토양의 전기적 전도특성 측정에 관한 연구”, 한국환경분석학회지, 제2권, 제2호, pp.85~90.
3. 정하익 (1998), *지반환경공학*, 도서출판 유림.
4. 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*, pp.437~452.
5. Darilek, G. T., Corapcioglu, M. Y., and Yeung, A. T. (1996), “Sealing leaks in geomembrane liners using electrophoresis”, *Journal of Environmental Engineering*, Vol.122, No.6, pp.540~544.
6. 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, pp.437~452.
7. Frangos, W. (1997), “Electrical detection of leaks in lined waste disposal ponds”, *Geophysics*, Vol.62, No.6, pp.1737~1744.
8. Hix, K. (1998), “Leak detection for landfill liners-Overview of tools for vadose zone monitoring”, *Technology status report, U.S.EPA*.
9. Laine, D. L. and Darilek, G. T.(1993), “Locating leaks in geomembrane liners of landfills covered with a protective soil”, *Geosynthetics '93 Vancouver, Canada*, pp.1403~1412.
10. Laine, D. L. and Miklas, M. P. Jr (1988), “Detection and location of leaks in geomembrane liners using an electrical method: case histories” *Proc. of the 10th National Conference Superfund '89*, Washington D.C., pp.35~40.
11. 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.
12. US.EPA (1988), *Must for USTs-A summary of the new regulations for the underground storage tank systems*, EPA/530/ UST-88/008, Office of Underground Storage Tanks, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
13. Yeung, A. T., Darilek, G. T., and Corapcioglu, M. Y..(1997), “Electrophoresis: Innovative technique to repair leaking impoundments”, *Proceeding of the Conference Geotechnical Special Publication No.71*, Mineapolis, Minnesota, pp.560~573.

(접수일자 2001. 10. 8, 심사완료일 2001. 12. 16)