

# 전기비저항탐사를 이용한 터널라이닝 누수조사 연구

신종호<sup>1\*</sup>, 신용석<sup>2</sup>, 윤종열<sup>3</sup>, 김호중<sup>4</sup>

## A Study on leakage monitoring of tunnel linings using the electric resistivity survey

Jong-Ho Shin, Yong-Seok Shin, Jong-Ryeol Yoon, Ho-Jong Kim

**Abstract** Tunnels acting as drains involve groundwater-related problems such as deterioration of drainage systems or leakage through the linings. Generally initial and minor leakage problems can not be recognized by naked eyes. When the leakage over the linings is noticed, damages to structures and facilities have already occurred and could be considerable. Therefore it is vital to recognize initial leakage as early as possible and provide appropriate measures. Detection of leakage under operation requires installing piezometer. However, that may cause destruction of water proofing sheet which is generally not allowed. In this study electric resistivity method, one of the geophysical surveys, was adopted to detect possible leakage through tunnel linings. Physical lining models were made in the laboratory. The electric response was monitored for varying hydraulic conditions. It is shown that the method is very useful to detect initial leakage and monitor the malfunction of drainage system. Furthermore the method can also be used to check the quality of any repairing works of linings.

**Keywords:** Tunnel leakage, resistivity survey, physical model, drainage system

**요 지** 우리나라에서 흔히 채택하고 있는 배수형 터널은 배수시스템 열화 혹은 수압작용에 따라 누수가 발생하는 문제점을 내포하고 있다. 누수는 소량일 경우 외관으로 드러나지 않아, 육안으로 확인할 단계가 되면 이미 라이닝 손상 혹은 설비에 영향을 미치는 상황이 되어 초기에 인지하고 대책을 마련하는 것이 매우 중요하다. 그러나 운영 중인 배수터널의 누수거동을 확인하기 위해서는 터널을 훼손하여 배면을 조사하여야 하는데, 이는 터널 유지관리상 허용되기 어렵다. 본 연구에서는 비파괴 물리탐사법인 전기비저항 탐사법을 이용하여 터널의 방수막을 훼손하지 않고, 누수여부를 파악하는 새로운 시도를 하였다. 모형 라이닝을 제작하여 습윤정도, 혹은 열화에 따른 누수거동을 탐사한 결과 전기비저항 탐사법이 라이닝 배수기능 모니터링 혹은 누수조사에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다. 또한 이 방법은 라이닝 누수 보수공사 후, 추가 누수여부의 조사 및 보수공사 점검에도 유용하게 활용될 수 있음을 보였다.

**주요어:** 터널 누수, 전기 비저항탐사, 실내 모형, 배수 시스템

### 1. 서 론

수리시설물은 그 특성상 시간이 경과함에 따라 자중 및 외력 등에 의해서 노후화되어 구조가 취약해지거나 성능이 저하되고 이에 따라 시설물의 안전성에 문제가 발생한다. 수리시설물의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 누수현상은 제체 전면에 걸쳐 일어나기보다는 국부적으로 일어나는 경우가 대부분이다(박삼규 등, 2002).

수리시설물 중 터널은 차량 및 철도 등의 교통수단이 직접적으로 이동하는 경로가 많으므로 안전성이 요구되

며, 특히 사고 발생 시 큰 인명피해를 초래한다는 사안에서 평상시 안정성 평가가 필요하다. 따라서, 지하에 시공되어 노후화된 터널의 효율적인 유지·보수를 위해서는 비파괴 시험을 이용한 터널 라이닝의 건전도를 평가하는 것이 필수적이다(김영근 등, 1997). 터널의 안정성 평가는 비파괴검사법을 많이 사용하며, 그 중 현재 사용되는 물리탐사방법 중 물에 대한 존재 유·무를 용이하게 검사할 수 있는 방법으로 전기비저항 탐사법이 있다. 송성호 등(2002)은 전기비저항을 이용한 저수지 그라우팅 구간 평가 방법을 제안하였고, 박삼규 등(2002)은 저수지 및 방조제에서의 누수탐지에 전기비저항탐사법을 이용하여 수분 포화도에 따른 비저항값을 비교하였다.

일반적으로 터널 라이닝은 투수계수가 작고 누수가 있더라도 소량인 경우 쉽게 발견되지 않는다. 수압작용

<sup>1</sup>정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

<sup>2</sup>정회원, 한국시설안전기술공단 지하시설 실장, 공학박사

<sup>3</sup>삼보지오텍 기술연구소장, 이학박사

<sup>4</sup>건국대학교 토목공학과 석사과정

\*교신저자: 신종호 (jhshin@konkuk.ac.kr)

의 영향은 변형과 누수로 나타나는데, 변형은 계측으로 감지 가능하지만 소량누수의 경우는 탐지가 용이치 않다. 누수 여부의 판단을 위해 시공된 터널 라이닝을 천공하게 되면 방수막이 파손되므로 비파괴탐사를 고려하는 것이 바람직하다. 비파괴탐사 방법 중에서 전기비저항 탐사법이 지하수의 존재 유·무 판단에 용이하므로 본 연구의 대상탐사법으로 채택하였다(한국건설기술연구원, 2006). 또한 전기비저항 탐사의 경우는 누수탐사의 보수·보강의 확실성을 점검하는 방법으로도 활용가능하다. 본 연구에서는 전기비저항 기기를 사용하여 터널 라이닝을 모사한 실내시험에서 습윤 상황별 라이닝의 전기비저항 값 차이를 통하여 누수여부를 파악하고자 하였다.

## 2. 전기비저항 탐사와 2차원 해석 고찰

전기탐사(electric survey)는 지하의 전기적 물성 차이에 의한 전위차를 측정함으로써 지하 구조를 조사하는 탐사법으로서 현재 광상 탐사 외에 지하의 파쇄대나 단층 등의 지질구조 조사, 지하수 조사, 토목 지반조사 등 다방면에 적용되고 있다(손호웅 등, 2000). 전기탐사는 지반의 전기적 성질을 조사하는 탐사법이기 때문에, 지층이 다를지라도 전기적 성질이 같으면 이를 구별하는 것은 어렵다. 반면, 같은 지층일지라도 물을 함유하고 있는 상태에 따라 전기적 성질이 달라지므로 이를 구별하는 것은 가능하다.

전기비저항 탐사방법은 크게 수직 탐사, 수평 탐사 그리고 2차원 탐사 세 가지로 대별된다. 이들 탐사 방법은 조사 장소의 상황이나 조사 목적에 따라서 달리 사용되지만 최근에는 2차원 탐사를 주로 사용하고 있다. 탐사 방법이나 조사 장소의 상황, 조사 목적에 따라 최적의 전극 배열을 사용한다(김정호 등, 2001). 2차원 탐사의 경우에는 쌍극자배열, 단극배열, 단극-쌍극자배열, 슬림 버저배열, 웨너배열법 등이 있는데 본 시험에서는 다양한 전극배열법 중 분해능이 탁월하여 전기비저항 변화 측정 정확도가 높은 쌍극자 배열을 이용하여 콘크리트의 비저항 값을 측정하고자 하였다(전기비저항탐사(I), 1998; 전기비저항탐사(II), 1998).

본 연구에서는 실내시험을 통해 얻어진 가비저항값을 모형시험의 조건과 병합하여 프로그램을 통해 역산하였

다(송성호 등, 2002). 전기비저항 탐사 수치모델링은 2차원 모델링을 사용하였으며, 여기에 활용된 지배방정식은 다음과 같다(김전수 등, 2003; Sharma, 1997; 전기비저항탐사, 1999).

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(r-r_s) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(x)\delta(y)\delta(z) \quad (1)$$

여기에서,  $J$ : 전류밀도,  $\rho$ : 전기비저항,  $r$ : 원점으로부터 관측점까지의 거리,  $r_s$ : 원점으로부터 절리원까지의 거리,  $t$ : 시간,  $x, y, z$ : 3차원 직교좌표계,  $\delta(x)$ : 디랙의 델타함수(delta function)

식 (1)은 전류 연속 방정식으로서 위의 식을 전위를 이용하여 벡터 변환을 하면 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \nabla \sigma(x,y,z) \cdot \nabla V(x,y,z) + \sigma(x,y,z) \nabla^2 V(x,y,z) \\ = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(r-r_s) \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서,  $\sigma$ : 전기전도도,  $V$ : 전위

2차원 공간에서 특정 주향 방향( $y$ 축 방향)으로는 물성 변화가 없다고 가정하면  $\partial \sigma / \partial y = 0$ 이며, 따라서 전기전도도를  $\sigma(x,y,z) = \sigma(x,z)$ 로 나타낼 수 있다. 전위의 경우, 전류 전원이 점원의 형태이므로 점원이 놓이는 절대적 지점에 대해서 주향 방향으로 변화가 있다. 전원이 지하구조의 주향 방향과 평행한 선형인 경우에는 전위도  $x$  및  $z$ 에만 종속적인 양으로 표현할 수 있다.  $x$  및  $z$ 에만 종속되는 전기전도도 표현을 이용하여, 식 (2)를 다음과 같이 식 (3)으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \{ \sigma(x,z) V(x,y,z) \} + \sigma(x,z) \nabla^2 V(x,y,z) \\ - V(x,y,z) \nabla^2 \sigma(x,y) \\ = -2 \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(x-x_s) \delta(y-y_s) \delta(z-z_s) \end{aligned} \quad (3)$$

위 식을 변수  $y$ 에 대한 코사인 변환을 수행하면, 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \{ \sigma(x,z) \phi(x, K_y, z) \} + \sigma(x,z) \nabla^2 \phi(x, K_y, z) \\ - \phi(x, K_y, z) \nabla^2 \sigma(x,z) - 2 K_y^2 \sigma(x,z) \phi(x, K_y, z) \\ = -2 \tilde{\rho} \delta(x-x_s) \delta(z-z_s) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서,  $K_v$ : 공간파수,  $\phi$ : 파수영역전위,  $\tilde{Q}$ : 파수영역전하밀도를 나타낸다.

2차원 전기 비저항 문제는 식 (4)의 미분 방정식 형태로 주어지며, 이의 해는 ‘전위는 전기전도도에 의해 구분되는 영역  $\sigma(x, z)$ 의 경계에서 연속이며, 이 경계의 수직 성분에 해당되는 전류 밀도는 연속이다.’라는 경계 조건에 의해 수치해석적으로 구해진다.

본 연구에서는 이와 같은 이론을 이용하여 측정치에 대한 수치해석을 실시하고 그 결과를 그림농도 기법으로 표시하였다.

### 3. 전기비저항 탐사를 이용한 배수기능 모니터링 시험

#### 3.1 시험개요 및 장비

본 연구에서는 실내시험을 통하여 지하수 유입에 따른 터널 라이닝 내의 지하수 누수 유무를 판단하기 위한 다양한 조건을 설정하여 콘크리트 전기비저항 값의 변화를 측정하고자 하였다. 1차 라이닝을 모사하기 위해 무근 콘크리트와 4개의 D-13철근을 조립한 보강재 콘크리트를 만들어 각각의 비저항 값의 변화도 비교하였다. 누수의 효과는 제작된 콘크리트 판을 실내수조에서 포화시킴으로써 모사하였다.

본 연구에서 사용된 전기비저항 탐사기기는 전류저항을 최소화하기 위해 고출력이며 S/N비(신호 대 잡음비)가 높은 SYSCAL Pro(사진 1)를 사용하였다. 그 밖에 부수적 장비인 전선과 전극은 본시험에 적합하도록 고안하여 사용하였다. 즉, 전선은 가볍고, 피복 재질이 우

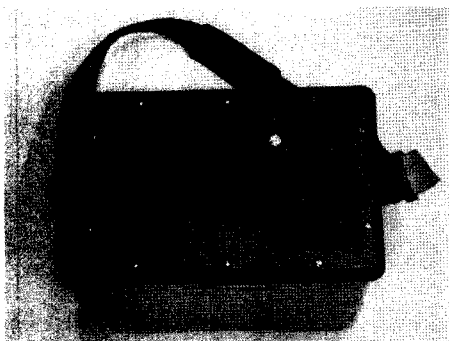


사진 1. SYSCAL Pro 전기비저항 측정기기

수하여 쉽게 상하지 않고, 절연상태가 좋으며, 물에 강한 것으로 하였다. 전류전극과 전위전극은 30~40 mm 정도의 길이로 전선을 단단히 연결하고 테이프를 감아, 기천공된 콘크리트에 잘 밀착되도록 관입 설치하였다.

#### 3.2 콘크리트 시험체 제작

본 시험은 터널 라이닝 내에서 지하수의 누수 여부를 판단하는데 그 의의가 있으므로 라이닝을 모사한 실내 시험을 하기 위해서는 터널 라이닝 시공시의 조건을 연구 목적에 맞게 재현하는 것이 중요하였다. 실내 시험을 위해서 라이닝을 모사한 콘크리트 판을 제작하였다.

라이닝은 1차 라이닝과 2차 라이닝으로 구분 제작하였으며 1차 라이닝은 무근 콘크리트와 강지보 혹은 lattice girder를 모사하기 위한 보강재 콘크리트로 구별하여 제작하였고, 2차 라이닝은 무근콘크리트로 제작하였다. 1차 라이닝은 건조와 포화상태 두 가지로 시험조건을 설정하였다. 반면에 2차 라이닝은 네 가지 케이스로 건조, 습윤, 부분습윤 및 포화로 시험조건을 설정하였다.

콘크리트 예상설계 값은 실제 터널 시공 시에 사용되는 라이닝 물성 값을 도입하여 실내 제작하였고, 배합설계 조건은 표 1에 나타내었다. 또한 콘크리트 라이닝 실내모형제작 배합설계 값은 표 2에 나타내었다. 콘크리트

표 1. 콘크리트 배합설계 조건

조건	물성값
강도	21 MPa
굵은골재 최대치수	25 mm
슬럼프	120 mm
공기량	4.5%
시멘트 비중	3.15
잔골재 밀도	2.6
굵은골재 밀도	2.65
잔골재 조립율	2.8

표 2. 배합설계 값

	단위골재량 (t/m <sup>3</sup> )	부피 (t/m <sup>3</sup> )	요구량 (ton)
단위 수량	0.1834	0.2	0.0664
단위 시멘트량	0.332	0.2	0.03668
잔골재량	0.746	0.2	0.1492
굵은골재량	1.0	0.2	0.2

표 3. 일축 압축 강도 시험 값

실험명	콘크리트의 압축강도 시험 방법			
	2006년 11월 9일			
시험일				
공시체 번호	1	2	3	4
재 령	28일	28일	28일	28일
평균지름(m)	0.15	0.15	0.15	0.15
단 면 적(m <sup>2</sup> )	0.0177	0.0177	0.0177	0.0177
평균높이(m)	0.297	0.296	0.296	0.297
파괴하중(ton)	39.1275	37.9287	36.3636	40.8591
압축강도(ton/m <sup>2</sup> )	2210.6	2142.9	2054.4	2308.4
평균압축강도(ton/m <sup>2</sup> )	2179.1			
설계압축강도(ton/m <sup>2</sup> )	2400.0			
오차율(%)	9.20			

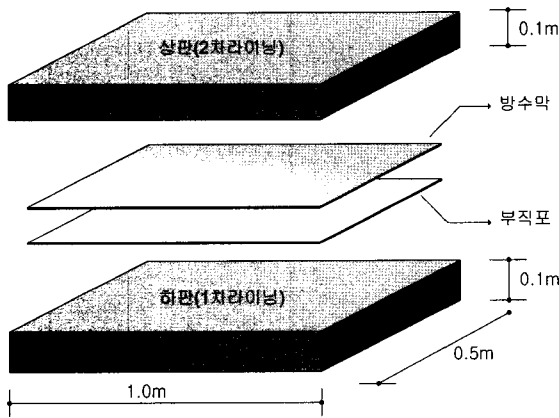


그림 1. 라이닝 모사체 규격

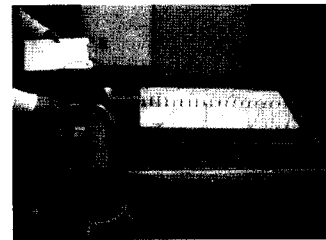


사진 2. 실내모형시험 전경

콘크리트에 탐침봉을 정밀하게 접지시키기 위해 천공 작업을 실시하였으며, 천공용 작업판을 제작하여 천공 작업의 정밀도를 높였다. 콘크리트 상판의 천공위치는 그림 2에 나타내었다.

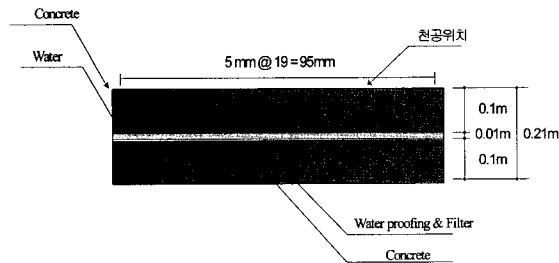


그림 2. 라이닝 단면 및 탐침 설치위치

제작 후 재령 28일째 일축 압축 강도 시험을 실시하였으며 강도 시험 결과는 표 3에 나타내었고, 실내모형 시험을 위해 제작된 콘크리트 규격은 그림 1에 나타내었다.

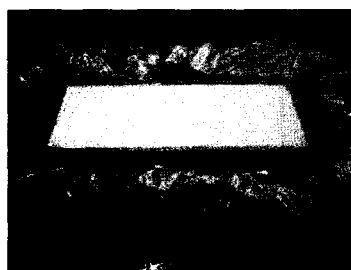
### 3.3 시험조건

모형 시험은 누수 조건에 따른 터널 라이닝 내부의 지하수 누수여부 파악에 중점을 두었다. 콘크리트 하판을 터널 1차 라이닝으로, 콘크리트 상판을 2차 라이닝으로 재현하여 시험체를 제작하였으며, 상판과 하판 사이에는 실제 터널 라이닝을 모사하기 위하여 방수막과 부직포를 삽입하였다. 터널 내 지하수의 유입량이 일정한 것이 아니므로 건조상태와 습윤상태 그리고 포화상태로 시험을 계획하였다.

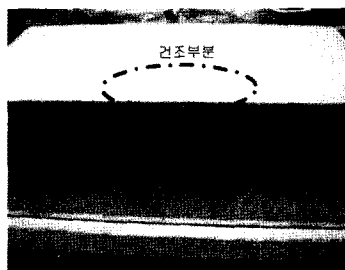
누수의 진행과정은 시간의 흐름에 따른 비저항 값 변화로 나타내어 비교·분석하였다. 전기비저항의 여러 배열법 중에서 본 시험에서는 쌍극자배열(dipole-dipole)

표 4. 전기비저항 시험조건

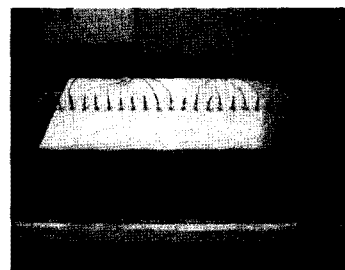
	방수재 기준		기타
	상판	하판	
Case 1	건조	건조	완전건조상태 (상·하판무근과 상판무근·하판보강재의 비저항 값 비교)
Case 2	건조	포화	무근터널라이닝 방수상태(비배수) (상·하판무근인 경우 시간경과에 의한 비저항 값 비교)
Case 3	건조	포화	철근보강터널라이닝 방수상태(비배수) (상판무근·하판보강재인 경우 누수량 차이에 의한 비저항 값 비교)
Case 4	습윤	포화	부분누수상태 (상·하판무근일 경우 상판의 부분 습윤 상태의 비저항 값 비교)
Case 5	포화	포화	완전누수상태 (상·하판무근이며 완전 포화 시 시간경과에 의한 비저항 값 비교)



(a) 수침조건



(b) 누수조건



(c) 부분누수조건

사진 3. 시험 조건별 예시

법을 사용하였다. 실내시험 현장사진은 사진 2에 나타내었고, 본 시험의 적용조건은 표 4에 나타내었다.

습윤상태와 포화상태는 지하수 누수 모사를 위하여 콘크리트 판을 물에 수침을 시킨 후에 시험하였다. 수침은 각 case에 맞게 완전수침과 부분수침으로 나누어 시험하였다. 각 시험 case는 사진 3에 나타내었다.

### 3.4 시험결과 및 분석

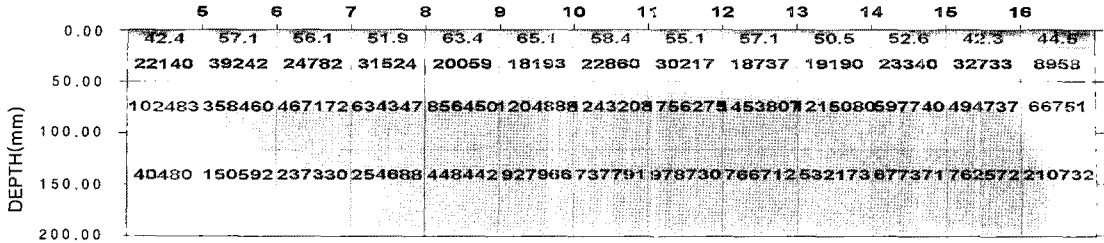
콘크리트 시험체의 상하판 조건을 건조·습윤·포화 등으로 구분하고 시험은 총 5가지로 구분하여 수행하였다. 또한 시간경과와 보강재의 유·무에 관해 비저항 값을 비교하여 시간과 철근 그리고 습윤상태의 상관관계를 파악하고자 하였다. 쌍극자배열을 사용해서 나온 자료는 역산을 위해 자료처리 소프트웨어인 DIPRO for windows 프로그램을 사용하여 2-D 단면으로 나타내었다. 결과에 나타난 전기비저항 값의 단위는 ohm-m이다.

#### 3.4.1 완전건조상태(Case 1)

이 시험은 완전 건조 상태에서 하판보강재의 감지 여부를 파악하기 위해 실시한 것이다. 시험한 데이터(date)를 2-D변환 그림으로 비저항 값을 나타내었다. 심도 100 mm 이상의 비저항 값을 비교해보면, 무근콘크리트(그림 3)와 철근콘크리트(그림 4)의 경우 하판 철근이 있는 경우 하부 비저항이 약간 감소하나 뚜렷하게 하판 철근여부를 판단할 정도는 아님을 알 수 있다. 이 시험 결과로부터 보강재 중앙에 측점을 배열함으로써 시험결과에 보강재의 영향을 배제하고 순 누수의 영향만 고려할 수 있음을 알 수 있다.

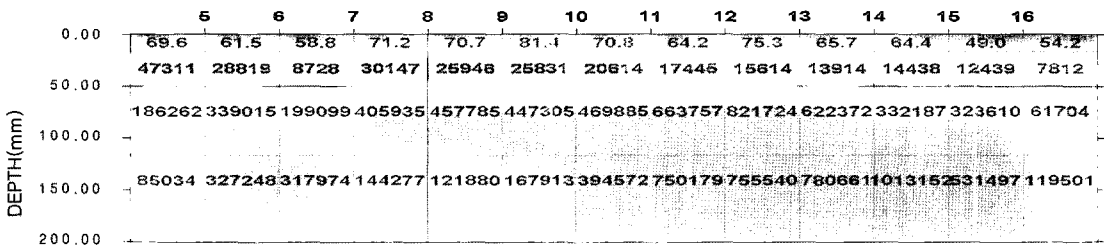
#### 3.4.2 무근터널라이닝 방수상태(Case 2)

그림 5와 그림 6의 경우는 라이닝 내 누수에 따른 1차 라이닝과 2차 라이닝 사이의 지하수량에 따른 비저항 값의 차이를 나타낸 것이다. 누수량의 차이가 전기비저항 값에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위한 시험이



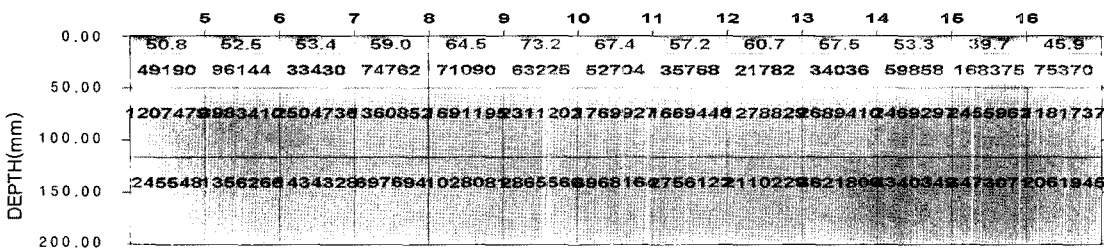
100 1495 22360 334369 4999998 (ohm-m)

그림 3. 상·하판 무근·방수막과 부직포를 넣은 완전건조 상태



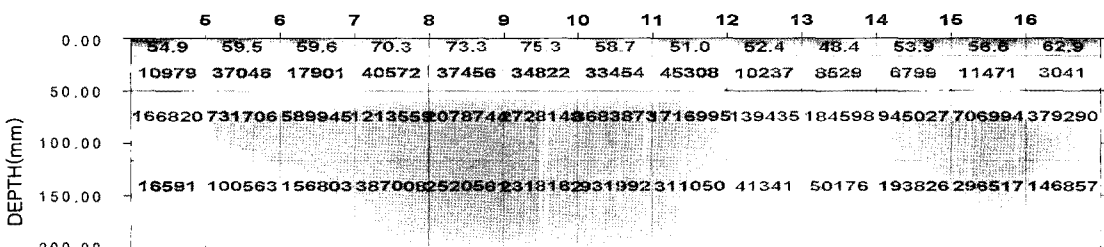
100 1495 22360 334369 4999998 (ohm-m)

그림 4. 상판무근-하판보강재-방수막과 부직포를 넣은 완전건조 상태



100 1495 22360 334369 4999998 (ohm-m)

그림 5. 상·하판 무근-하판포화-부직포 부분포화



100 1495 22360 334369 4999998 (ohm-m)

그림 6. 상·하판 무근-하판과 부직포 포화-수침인양직후

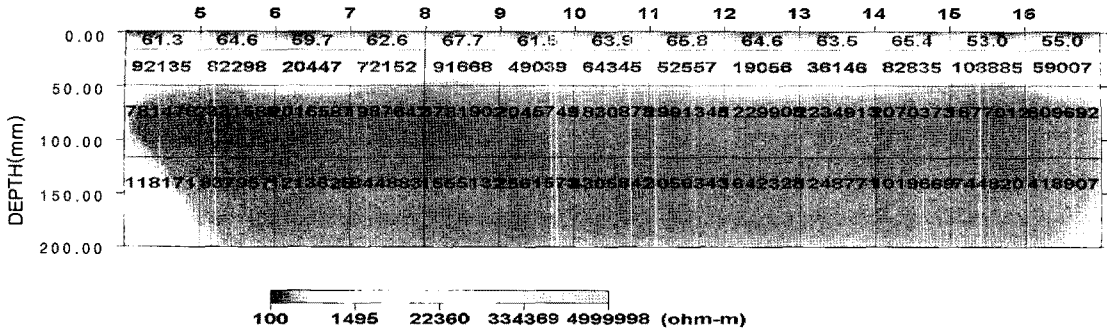


그림 7. 상·하판 무근·하판과 부직포 포화-건조 1일경과

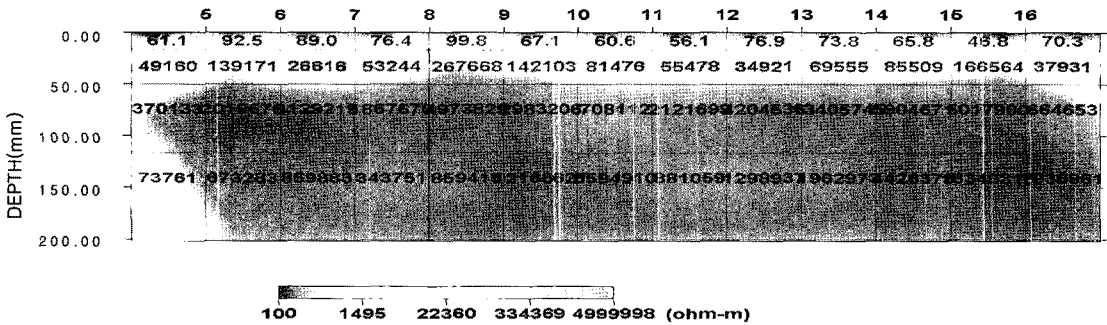


그림 8. 상·하판 무근·하판과 부직포 포화-건조 2일경과

다. 그림의 심도 100 mm 영역에서 볼 수 있듯이 수분 함유량에 따라 전기비저항 값은 달라진다. 그림 5를 고 비저항대(전기비저항 값이 높게 나타나는 구역)가 나타난 경우라고 한다면 그림 6은 저비저항대(전기비저항 값이 낮게 나타나는 구역)가 나타난 경우라 할 수 있다. 누수로 인해 라이닝 내부에 수분 함유량이 많아지면 전기비저항 값은 작아지는 것을 알 수 있다.

그림 7과 8의 경우는 앞서 보았던 그림 6의 시험 case 를 각각 1일과 2일 실온에서 건조한 후 측정된 결과를 보인 것이다. 수침을 시킨 후 시간의 경과에 따라 포화 상태에서 건조상태로 변화할 때 전기비저항 값의 변화를 측정할 값이다. 그림 6~8에서 보면 알 수 있듯이 시간경과에 따라 콘크리트에 나타나는 전기비저항 값은 증가함을 알 수 있다. 위의 시험결과로 라이닝의 포화 상태와 건조상태의 전기비저항 값의 변화는 정량적으로 나타낼 수 있다. 위 시험의 경우 시간의 경과를 제외한다면 영향 요인을 배제하기 위해서 시험동안 시험실 온도를 20°C로 일정하게 유지하였으며 비저항 값 측정 소요시간도 동일하게 하여 시험하였다. 그림 9는 시간의

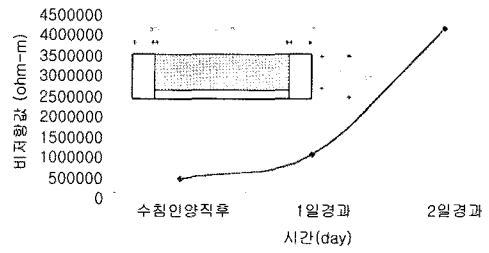


그림 9. 비저항값 변화(탐침번호 4~17 부분 비저항값 측정-경계조건제외)

경과에 따른 비저항 값의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 6~8의 비저항 값의 평균을 나타내었으며, 경계조건의 비저항은 포함시키지 않았다.

3.4.3 철근보강터널라이닝 방수상태(Case 3)

본 시험은 부직포 포화상태 감지 여부를 파악하기 위하여 수행되었으며 시험 조건은 case 2와 같게 설정하였다. 부직포의 포화상태가 case 2의 경우에 비해 건조상

태이며, 상판과 하판사이에 물은 주입하지 않았으며 하판에는 보강재가 삽입되어 있다. 그림 10의 경우는 부직포에 물이 약간만 흡수되어 있는 상태이며, 그림 11의 경우는 부직포에 물이 많이 흡수되어 있는 상태이다. 위의 시험결과 그림에서 보면 부직포에 물이 충분한 경우 비저항 값은 약간은 감소하나, 수분포화정도를 뚜렷하게 판단할 정도는 아니다. 위 시험결과로부터 방수막이 완전한 경우 부직포의 포화상태는 전기비저항 값에 거

의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

### 3.4.4 부분누수상태(Case 4)

그림 12는 부분누수상태(사진 3)를 측정하여 나온 결과 값이다. 상판을 1~10번의 위치까지는 물에 수침시키지 않았으며 그 밖의 부분을 물에 수침을 시켜 시험을 한 case이다. 그림 12를 보면 비저항 값이 왼쪽 부분 즉, 물에 수침시키지 않은 부분이 수침시킨 부분에 비해 높

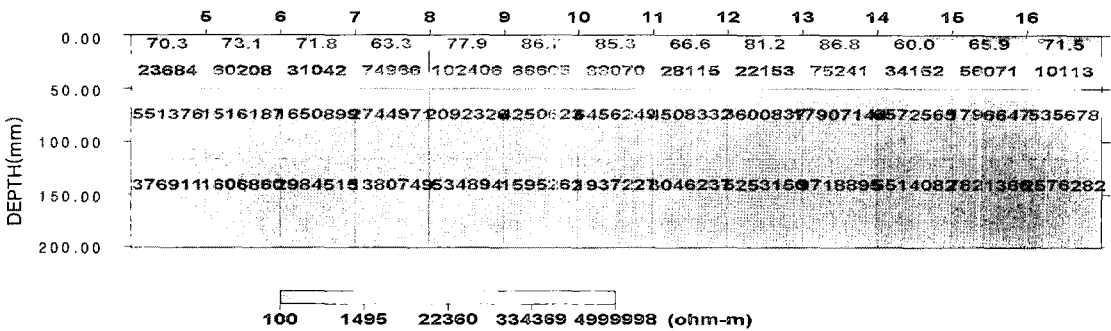


그림 10. 상판 무근-하판 철근-하판포화-부직포 부분포화

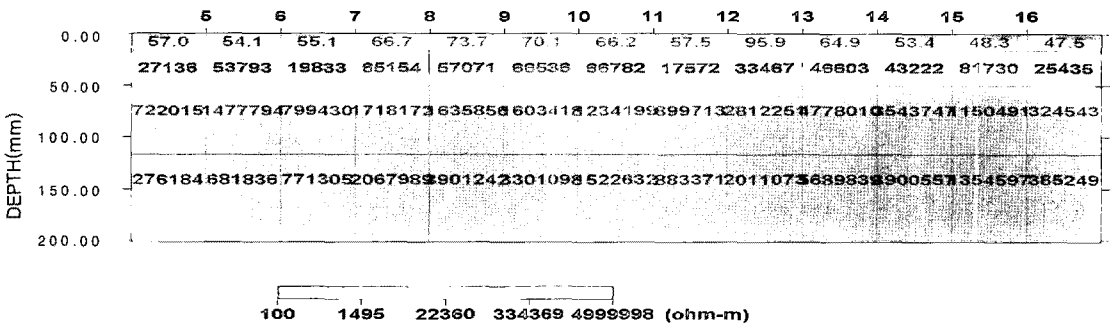


그림 11. 상판 무근-하판 철근-하판과 부직포 포화

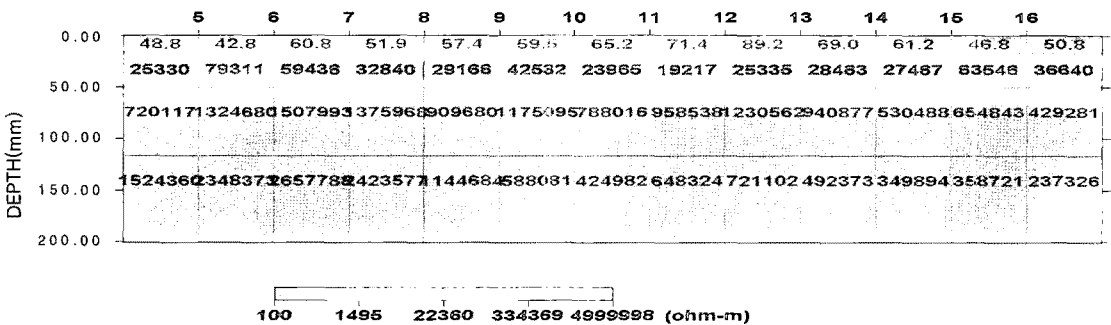


그림 12. 상-하판 무근-상판우측습윤-상판좌측건조-하판과 부직포 포화



은 비저항대 영역을 나타냄을 알 수 있다. 위 시험은 같은 조건 하에서 측정을 했기 때문에 물의 존재 유무를 판단하기에 적절한 case라 할 수 있다. 건조부분의 비저항 값이 습윤상태의 값에 비해 큰 비저항을 나타내었다.

그림 13의 경우는 상판아래 부분을 반수침을 시킨 후에 시험한 결과 값이다. 그림 13과 앞서 제시된 그림 5를 비교해보면, 상판의 수침여부에 따라 비저항 값의 차이가 있음을 알 수 있다. 심도 100 mm 이하 영역에서

는 비저항 값의 차이가 있기 때문에 지하수 유무에 따른 비저항 값의 변화를 확인할 있으며, 누수의 존재 여부도 판단 가능하다.

### 3.4.5 완전누수상태(Case 5)

터널 배수 시스템에 이상이 발생하여 라이닝이 포화 되는 경우를 모사한 시험 case로 그림 14와 15는 상·하 판 모두 완전 수침시킨 후에 측정한 결과를 나타낸 것이

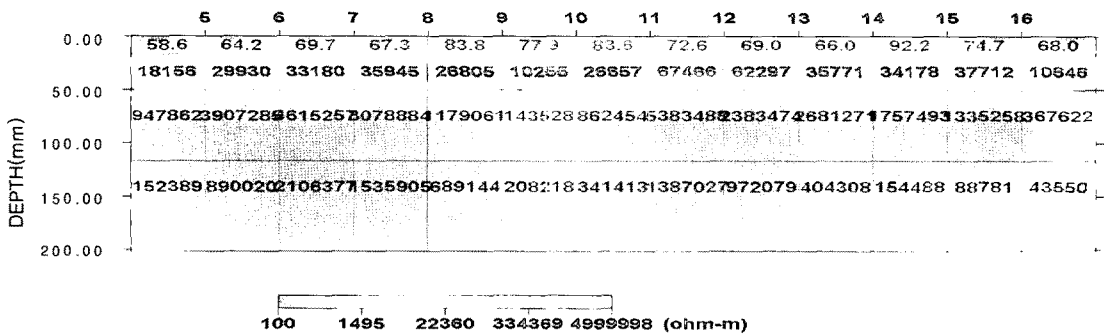


그림 13. 상·하판 무근·상판하부습윤·하판과 부직포 포화

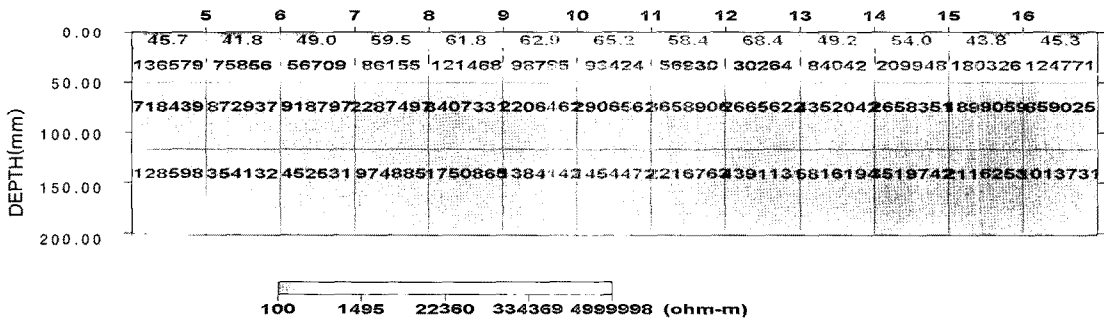


그림 14. 상·하판 무근·상·하판과 부직포 4시간포화

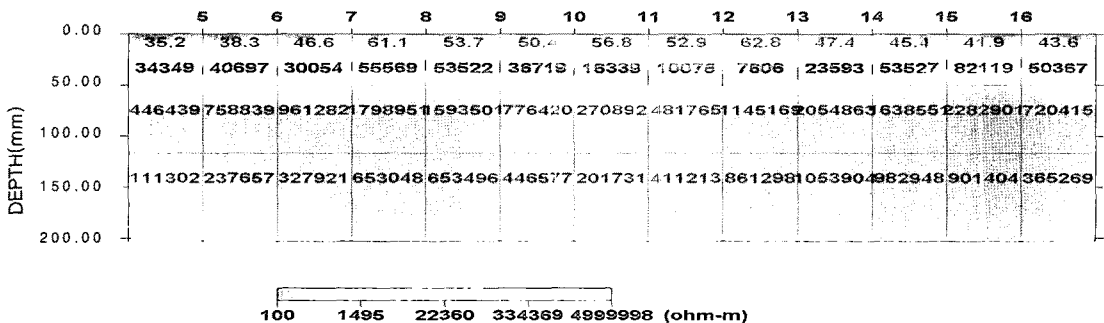


그림 15. 상·하판 무근·상·하판과 부직포 24시간포화

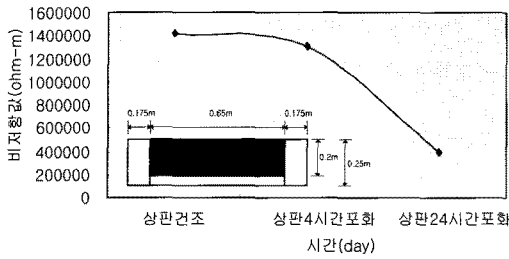


그림 16. 비저항값 변화(탐침번호 4~17 부분 비저항값 측정-경계조건제외)

다. 수침 시간을 4시간과 24시간으로 나누어 시험한 결과 24시간 동안 수침을 시킨 후에 시험한 경우 비저항 값이 작게 나온 것을 확인할 수 있다. 3.4.2절에서 나타난 그림 5와 연계하여 시간에 따라 라이닝이 포화되는 정도를 나타내면 시간의 경과에 따라 상판까지 지하수 유입이 있어 전기비저항 값이 작아진다는 것을 알 수 있다.

그림 16은 지하수 유입을 가정해서 건조상태에서 습윤상태로 점차 변화하는 경우의 비저항 값의 차이를 앞서 언급한 그림 9와 동일한 방법으로 각각 그림 5, 그림 14 그리고 그림 15의 비저항 값을 평균하여 나타낸 것이다. 3가지 경우 모두 하판은 수침한 후에 시험하였고 상판만 각기 다른 case를 적용하여 지하수 유입에 따른 습윤상태를 모사한 것이다. 비저항 값의 평균을 그래프로 나타낸 그림 16은 그림 9와 반대의 경우로 건조상태에서 습윤상태로 변화하였다. 이로부터 점차 습윤도가 높아질수록 전기비저항 값이 점차 작아짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

터널 누수 검사 시 육안조사가 가장 신뢰할 수 있는 결과를 제시할 수 있으나 육안조사를 위하여 터널 라이닝을 파손시킨다면 터널 고유 기능에 큰 문제점을 야기시킨다. 따라서 터널 라이닝에 손상을 주지 않으며 누수 여부를 판단하기 위한 방법으로 비파괴시험이 유용하다. 그 중에서 지하수 누수 유무 판단은 전기비저항 탐사법을 적용할 수 있음을 확인하였다.

현재 시공된 라이닝과 같은 물성 값을 가진 콘크리트 판을 제작하여 축소모형시험을 실시하였고, 각 case의 전기비저항 값을 비교하여 지하수 존재 유무 판단을 하

였다. 완전건조상태에서 보강재가 비저항 값에 미치는 영향이 거의 없음을 case 1에서 판단할 수 있고, 시간경과에 따라 지하수량에 따른 비저항 값의 변화는 case 2와 case 5에서 확인할 수 있다. Case 3을 통하여 방수막이 비배수 조건을 만족할 경우 부직포의 포화정도는 비저항 값에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 동일한 조건하에서 누수여부 판단의 가능성은 case 4의 부분누수 시험 결과를 통하여 확인할 수 있다.

시험 결과를 종합하면, 일반적으로 건조상태에서는 높은 비저항 값을 나타내며 습윤상태에서는 낮은 비저항 값을 나타낸다. 그러므로 터널 라이닝 내 누수가 발생했을 때 전기비저항 탐사를 이용하여 비저항 값을 측정하여 누수 구간의 판단이 가능하다. 또한 누수 구간을 찾아서 보수보강을 한 후에 시간 경과에 따라 비저항 값을 측정하여 보강 후 배수 시스템의 이상여부 판단이 용이하다. 보수보강 후에 전기비저항 값을 측정하여 누수가 발생한 시점보다 비저항 값이 점차 높아진다면 이는 곧 더 이상의 지하수 유입이 없다는 것과 배수 시스템의 정상유지로 결론내릴 수 있다.

실내모형시험으로 나타난 결과를 실제 현장(in-situ)에 적용하기 위해서는 누수 여부 판단에 중점을 두어야 한다. 실내시험의 경우 항상 같은 조건을 유지하기가 쉽고 시험에 변수가 많지는 않지만 현장에서 전기비저항 탐사를 하기 위해서는 전류의 고출력을 위해 접지저항을 최소화하는 등의 주변 조건을 제어하는 것이 필요할 것으로 보인다.

결론적으로 실내모형시험결과 터널 라이닝 내부의 배수상태를 파악하기 위한 비파괴탐사법 중 전기비저항탐사는 지하수 존재 유·무 판단에 적합한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였고, 실제 현장의 지하수 누수 여부는 비저항 값의 변화비교를 통해서 예측 가능성을 확인하였다. 본 누수탐사법은 터널 라이닝뿐 아니라 사면보호공으로 적용하고 있는 슛크리트에도 적용을 확대할 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국시설안전기술공단이 지원하여 건국대학교와 공동 수행한 “잔류수압을 받는 배수형 터널의 안정성평가 및 보수·보강기술개발” 연구의 일환으로 수행되었으며, 한국시설안전공단의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김건수, 조인기, 김기주 (2003), “수치 및 축소 모형실험에 의한 2차원 전기비저항 탐사에서의 지형효과에 관한 연구”, 한국물리탐사학회논문집, Vol. 6, No. 4, pp. 165-170.
2. 김영근, 장정범, 김영진 (1997), “적외선 열화상기법을 이용한 콘크리트 터널 라이닝의 비파괴 시험에 관한 연구, 한국 암반공학회 논문집”, Vol. 7, No. 1, pp. 75-83.
3. 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환 (2001), “2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구”, 한국물리탐사학회논문집, Vol. 4, No. 3, pp. 59-69.
4. 대한지구물리탐사학회 (1999), “전기비저항탐사”, 대한지구물리학회 단기 강좌 교육 교재, pp. 1-44.
5. 박삼규, 송성호, 최종학, 최보규, 이병호 (2002), “수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성”, 한국지구물리탐사학회 제 4회 특별 심포지움, pp. 179-195.
6. 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수 (2000), “지반환경 물리탐사”, 시그마프레스, 서울, pp. 305-412.
7. 송성호, 장의웅, 김진호, 김진성, 김진춘 (2002), “전기비저항 수직탐사를 이용한 저수지 그라우팅 구간 평가”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 12, No. 1, pp. 63-73.
8. 한국건설기술연구원 (2006), “터널건설 환경영향 최소화 기술”, 터널건설 관련 재해 최소화 및 예방기술 개발 3차년도 연차보고서, pp. 87-125.
9. 한국지구물리탐사학회 (1998), “전기비저항탐사(I)”, 물리탐사, Vol. 1, No. 2, pp. 140-143.
10. 한국지구물리탐사학회 (1998), “전기비저항탐사(II)”, 물리탐사, Vol. 1, No. 3, pp. 188-195.
11. Sharma, P.V. (1997), Environmental and engineering geophysics, Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 207-264.



신 종 호

건국대학교  
토목공학과  
부교수, 공학박사

E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr



신 용 석

한국시설안전기술공단  
지하시설  
실장, 공학박사

E-mail: sys3281@kistec.or.kr



윤 종 열

삼보지오텍  
기술연구소장  
이학박사

E-mail: jryoon@geotek.co.kr



김 호 중

건국대학교  
토목공학과  
석사과정

E-mail: dutuby@konkuk.ac.kr