

전기비저항 상시관측에 의한 제체 안전도 지수 산출

조인기^{1*} · 강형재¹ · 이병호² · 김병호³ · 이상선³ · 박영규³ · 이보현³

¹강원대학교 지구물리학과

²한국농촌공사 제주도본부

³한국농촌공사 환경지질사업처

Safety Index Evaluation from Resistivity Monitoring Data for a Reservoir Dyke

In-ky Cho^{1*}, Hyung-Jae Kang¹, Byoung-Ho Lee², Byoung-Ho Kim³,
Sang-Sun Yi³, Young-Gyu Park³ and Bo-Hyun Lee³

¹Kangwon National University, Dept. Geophysics

²Korea Rural Community & Agriculture Corporation, Jeju-do office

³Korea Rural Community & Agriculture Corporation, Office of Environmental Geology

요 약: 저수지 제체의 누수는 주로 세굴현상에 기인하며, 이 세굴현상은 주변의 토괴를 침식하여 결과적으로 제체의 파괴를 유발시키는 주된 요인이다. 따라서 누수구간의 탐지는 효과적인 제체의 유지관리에 필수적인 요소가 된다. 전기비저항 탐사는 저수지 제체의 안전진단에 가장 널리 사용되고 있는 물리탐사 방법으로 특히 세굴현상에 의한 누수구간의 탐지에 효과적인 것으로 알려져 있다. 하지만 기존의 전기비저항 탐사는 제체 마루에서 수행된 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산 단면상에서 저비저항대를 누수 위험 구간으로 해석하는 정성적인 단계에 머무르고 있다. 근자에 이르러 상시관측을 통한 전기비저항의 변화율을 이용한 해석방법이 제시되었지만 아직까지 제체의 안전도를 정량적으로 산출하는 기법에 관한 연구는 없는 실정이다. 제체내의 세굴현상이 진행됨에 따라 누수구간은 공극율이 증가하고, 공극율의 증가는 제체의 안전과 직결된다. 본 연구에서는 Archie의 경험식을 근거로 전기비저항 탐사에서 얻어진 전기전도도 자료를 제체부의 공극율로 변환하는 기법을 개발하였다. 또한 전기비저항 상시관측 자료를 이용하여 제체의 안전도 지수를 산출하는 방법론을 제시하고자 하였다.

주요어: 제체, 누수, 전기비저항 상시관측, 안전도 지수

Abstract: An abnormal seepage flow, which is mainly caused by the piping, is one of the major reasons for embankment dam failure. A leakage detection is therefore a vital part of an embankment dam's monitoring. Resistivity method, which is an efficient tool to detect leakage zones, has been used all over the world for an embankment dam's monitoring. Although the resistivity method gives us very useful information about the leakage problem, there is no more quantitative interpretation than the low resistivity zones in the 2-dimensional resistivity section are regraded simply as the anomalous seepage zones. Recently, resistivity monitoring technique is applied for the detection of leakage zones. However, its interpretation still remains in the stage of presenting the resistivity ratio itself. An increased seepage flow increases a porosity and an increasing porosity decreases the dam's stability. Therefore, the porosity is one of the major factors for an embankment dam's stability. Based on Archie's experimental formula, we try to evaluate a porosity distribution from the resistivity data which is obtained on the dam's crest. We also attempt to represent a procedure to evaluate a safety index of the embankment dam from the resistivity monitoring data.

Keywords: embankment dam, leakage, resistivity monitoring, safety index

서 론

2006년 2월 2일 접수; 2006년 4월 26일 채택

*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University,
Chunchon, Kangwon-Do, Korea

우리나라의 대표적인 농업기반시설인 저수지는 전국적으로 17,913개소가 존재하며, 그중 60년 이상 된 노후 저수지가 50% 이상을 차지하고 있다(박삼규 등, 2005). 일반적으로 저

수지 제체는 시간이 경과함에 따라 자중 및 외력에 의해 노후화되어 구조가 취약해지거나 성능이 떨어져 결과적으로는 안정성에 문제가 발생한다. 저수지 제체의 안정성을 저해하는 가장 큰 요인은 국지적으로 발생하는 세굴현상(piping)에 의한 누수인 것으로 알려져 있다. 세굴현상은 초기에는 국부적으로 일어나지만 주변의 토사를 이동시켜 점진적으로 확장되며 궁극적으로는 대규모 누수 및 제체의 파괴로 이어진다. 이러한 세굴현상은 특히 집중호우나 태풍으로 인하여 수위가 급상승할 경우에 급속하게 확장되어 대형 재해 및 인명피해를 유발시킨다.

농림부에서는 저수지의 안전을 확보하고, 효과적인 유지관리를 위하여 주기적인 안전진단과 개보수 작업을 실시하고 있다. 저수지에 정기적으로 실시되는 안전진단은 외관조사, 물리탐사, 시추조사의 순으로 이루어지며, 이들 조사에서 얻어지는 자료를 종합적으로 해석하여 누수구간을 판정하게 된다. 제체의 안전진단에 사용되는 물리탐사는 다양한 방법이 적용 가능하지만 국내의 경우에는 주로 전기비저항탐사가 주류를 이루고 있다 (Ogilvy *et al.*, 1969; 정승환 등, 1992; 이명종 등, 2000; Titov *et al.*, 2000; 송성호 등, 2001; 박삼규 등, 2002; 박삼규 등, 2005; 윤종열 등, 2005).

한편 제체의 누수구간 탐지를 위해 적용된 전기비저항 탐사 자료 해석은 주로 저비저항대를 누수위험구간으로 산정하는 정성적 방법을 사용하고 있는 실정이다. 최근에는 상시관측을 통하여 제체의 누수구간의 확장 여부를 예측하기 위한 시도가 이루어지고 있으나 아직 뚜렷한 해석방법이 없는 실정이다. 본 연구에서는 우선 전기비저항 탐사를 통하여 획득된 제체의 전기비저항 분포 단면으로부터 공극률 분포 단면을 추출하는 방법을 Archie의 경험식(Archie, 1942)으로부터 유도하였다. 또한 상시관측 자료를 사용하여 제체의 안전도 지수를 산출하여, 보다 정량적인 제체의 안전성 평가 기법을 제시하고자 한다.

저수지 제체의 구조 및 전기비저항 탐사

일반적으로 농업용 저수지의 제체는 주변의 토취장에 채취된 토사를 사용하여 축조된다. 따라서 제체를 구성하는 토사는 일반적인 지하 매질보다는 훨씬 균질하다고 가정할 수 있으며, 전기비저항 탐사의 관점에서 보면 전기비저항이 균질하다고 가정할 수 있다. 물론 제체의 건설시 여러 개의 토취장에서 토사를 채취할 경우에는 토사의 광물학적 특성 차이로 인하여 전기비저항이 다른 값을 보일 수 있다.

지하 매질의 전기비저항에 영향을 미치는 요소는 매질의 광물학적 특성, 공극율, 공극수의 전기비저항, 점토광물의 함량, 온도 등이 있다. 저수지 제체가 동일한 토사를 이용하여 축조되었다면 광물학적 특성과 공극수의 전기비저항은 제체 내에서 동일하다고 가정할 수 있다. 제체를 구성하는 토사에는 어느 정도의 점토가 혼재되어 있으며, 제체의 차수효과를 높이기

위하여 설치된 중심점토도 제체의 점토함량을 증가시킨다. 점토광물은 매질의 전기적 특성을 매우 복잡하게 하는 요소이며, 일반적으로 매질의 전기전도도를 증가시키는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서는 전기비저항 탐사 자료만으로 제체를 통한 누수구간의 정량적 평가를 위하여 점토의 영향을 고려하지 않았다. 공극율은 건전한 제체의 경우 심도에 따라 차이는 있겠지만 전반적으로 유사한 값을 보일 것이며, 누수구간에서는 상대적으로 높은 값을 나타낼 것이다.

Archie의 경험식에 의하면 공극율이 증가할수록 전기전도도는 증가하게 되며, 공극율의 증가는 누수구간의 발달로 연결될 가능성이 크다. 따라서 전기비저항 탐사 결과에서 전기전도도가 높은 구간은 공극율이 높은 구간, 즉 누수 가능성이 높은 구간으로 해석할 수 있다. 이러한 이론적 배경 하에서 전기비저항 탐사는 제체누수 탐지를 위한 유효한 물리탐사기법으로 널리 적용되고 있다. 다양한 전기비저항 탐사 기법 중 제체 누수구간의 탐지에는 분해능이 뛰어난 쌍극자 배열법이 널리 적용되고 있다. 탐사에서 얻어지는 축선 하부의 2차원적 전기비저항 분포를 해석하여 제체와 원지반과의 경계면, 누수구간에 관한 정보를 파악하고 제체의 개보수 계획 수립을 위한 기본 자료로 활용하게 된다.

한편 제체 마루에서 획득된 전기비저항 탐사결과는 제체의 전기비저항 분포를 제공하므로 누수구간으로 해석되는 저비저항대를 파악할 수 있으며, 비파괴 검사라는 장점이 있다. 그러나 이제까지의 해석은 주로 정성적으로 위험구간을 분간하는데 그치고 있으며, 공극율이 얼마인지, 나아가서는 투수율이 얼마이고 붕괴 위험성은 어느 정도인가에 대한 정량적인 판단 기준은 제시되지 않고 있다. 또한 저비저항대로 나타나는 구간도 외관조사에서는 누수징후가 전혀 없으며, 오랜 시간이 경과하여도 실제적으로 누수가 발생하지 않는 경우도 종종 발견된다. 심한 경우에는 전기비저항 탐사의 신뢰도를 의심받기도 한다. 이러한 해석상의 오류는 앞서 언급한 바와 같이 제체를 구성하는 토사의 성분이 구간에 따라 다를 수도 있으며, 기반암 내 발달한 지하지질구조의 영향, 저수지의 수위에 따른 함수량의 변화, 점토함량, 잡음 등 단 한 번의 전기비저항 탐사 결과만으로 해석하기 어려운 여러 가지 복잡한 요인에 의한 것으로 판단된다.

이러한 문제점을 해결할 수 있는 하나의 대안으로 도입된 방법이 상시관측이다. 전기비저항 탐사 상시관측에서 얻어지는 자료의 해석은 각각의 전기비저항 값 자체 보다는 시간에 따른 변화율을 해석하게 되므로 여러 가지 변수 중 시간에 따라 변화하지 않는 양들의 영향을 배제할 수 있다는 장점이 있다. 제체의 경우에는 지하 원지반의 지질구조, 점토함량 등이 시간에 따라 크게 변하지 않는다고 가정할 수 있으므로, 이들의 영향을 고려하지 않아도 된다. 따라서 상시관측에서 얻어진 전기비저항의 변화율을 해석한다면 제체의 공극율과 같이 누수와 직결되는 변수의 추정이 수월해지며, 해석의 정확성도 높

아지게 된다. 물론 전기비저항의 변화율을 해석하는 방법으로도 자료획득 및 역산의 정확도가 뒷받침되어야 하며, 이를 위해서는 제체에 전극을 고정시켜, 각 측정 시에 전극의 위치 및 전극의 접지상태에 변화가 없도록 해야 한다.

제체의 전기전도도와 공극율

매질이 공극수에 의해 완전히 포화된 경우 매질의 전기전도도 σ 와 공극율 ϕ 의 관계는 Archie의 경험식(Archie, 1942)에서 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma = c\sigma_w\phi^m \quad (1)$$

(1)식에서 σ_w 는 공극수의 전기전도도, m 은 1.3~2.2 사이의 값을 갖는 고결지수(cementation factor)이며, c 는 0.6~2.0 사이의 값을 보이는 비례상수이다.

일반적으로 저수지 제체는 유사한 토사로 축조되며, 건전한 제체라면 공극율, 공극수의 전기전도도, 고결지수 및 상수 c 는 큰 변화가 없을 것으로 판단된다. Table 1에 주어진 바와 같이 미고결 토사층(unconsolidated sand)의 경우에 공극율은 약 25% 정도이다. 따라서 토사로 축조된 제체의 경우도 이 주변의 값을 나타낼 것으로 예상되며, 심도에 따라 약간의 변화가 있을 것으로 판단된다.

제체에서 침윤선 하부의 공극은 공극수로 포화되어 있을 것이며, 이러한 공극수의 전기전도도는 전기탐사에서 얻어지는 전기비저항을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. Table 2에 주어진 바와 같이 물의 전기전도도는 매우 다양하여 증류수의 경우는 거의 부도체에 가까우며, 바닷물의 경우는 3 S/m 이상에 이르는 높은 값을 보인다. 제체내의 공극수는 토사에서 용해된 이온이 존재하기 때문에 적어도 저수지의 물보다는 전기전도도가 높을 것으로 판단되며, 대략 0.025~0.1 S/m 범위내의 값을 보일 것으로 예상된다.

Table 1. Porosity for various types of rocks (Heritage Geophysics, 2005).

type of rock		porosity (%)	permeability (m/s)
unconsolidated (soft sediment)	gravel	30	10^{-2}
	sand	25	10^{-4}
	clay	50	10^{-12}
consolidated (sandstone, limestone, granite, basalt)	massive	1	10^{-10}
	fissured/fractured	5	10^{-8}
	weathered	15	10^{-6}

Table 2. Conductivity for various types of waters (Heritage Geophysics, 2005).

type of water	very fresh	fresh	salted	very salted
conductivity (S/m)	0.005	0.05	0.1	3.3
resistivity (ohm-m)	200	20	10	0.3

전기전도도에 의한 공극률 추정

전기비저항 탐사가 제체의 누수탐지에 널리 사용되는 이유는 비파괴 검사이며, 비교적 저렴한 비용으로 제체 전체의 누수구간을 신속하게 파악할 수 있다는 장점 때문이다. 하지만 이제까지의 제체 누수탐지를 위한 전기비저항 탐사에서는 단순히 2차원 전기비저항 분포 영상에서 저비저항대를 누수구간으로 해석하는데 그치고 있다. 여기서는 탐사결과 얻어진 전기비저항 단면을 공극율 단면으로 변환하는 방법을 제시하고자 한다.

우선 전기비저항을 공극율로 변환하기 위해서는 (1)식에 주어진 Archie의 경험식을 사용해야 한다. 문제는 전기비저항 탐사결과만으로는 Archie의 경험식에 주어진 m , c , 및 σ_w 값을 얻어낼 수 없다는 점이다. 이들 값을 결정하는 방법은 크게 2가지 방법으로 구분할 수 있다. 가장 확실한 방법은 실측에 의한 방법으로 시추를 통하여 토사 시료를 채취하고 시험하여 각 변수를 추출하는 방법이다. 하지만 이는 상당한 시간과 경비가 소요되며 현실적으로 제체에 여러 개의 시추를 해야 한다는 어려움이 있다. 차선택은 적절한 가정을 하고 이들 변수를 고정시키는 방법이다.

개선된 Archie의 경험식에서 공극율은

$$\phi = \left(\frac{\sigma}{c\sigma_w s^k} \right)^{1/m} \quad (2)$$

이며, 여기서 s 는 공극수로 채워진 공극의 분률이다. 제체의 침윤선 하부에서는 토사가 완전히 공극수로 침윤되어 있고, 상부는 공극수로 채워진 공극의 분률이 상당히 낮다고 볼 수 있다. 이는 전기비저항 탐사에서 천부에 얇은 고비저항층이 나타나고 그 하부에 저비저항대가 나타나는 현상과 잘 부합된다. 따라서 제체의 전기비저항은 심도에 따라 변화한다고 볼 수 있으며, 건전한 제체의 경우에는 동일 심도에서는 유사한 값을 보일 것이다. 여기서는 전기비저항 탐사에서 얻어진 일정 심도에서의 전기전도도 평균값(σ_{avg})을 그 심도에서의 전기전도도로 간주한다. 한편 제체의 공극율은 심도가 증가할수록 지압의 증가로 인하여 감소하겠지만 여기서는 제체의 공극율이 전반적으로 균질하다고 가정하고, $\phi_{avg} = 0.2 \sim 0.3$ 범위내의 적절한 값을 설정한다. 또한 고결지수는 미고결 토사층으로 가정하고 $m = 1.3$ 을 적용한다. 이러한 가정 하에 각 심도에서의 평균 $c\sigma_w s^k$ 의 값을 (3)식을 사용하여 계산하고, 마지막으로 그 결과를 (2)식에 대입하여 각 점에서의 공극율을 산출하게 된다.

$$c\sigma_w s^k = \sigma_{avg} \phi_{avg}^{-m} \quad (3)$$

이 방법에 의해 추정된 공극율 분포 단면은 전기비저항의 수직적 변화에 의한 공극율의 변화를 억제하는 효과를 나타낸다. Fig. 1은 제체를 고비저항(200 ohm-m)의 침윤선 상부층, 저비

저항(100 ohm-m)의 제체부와 고비저항(1,000 ohm-m)의 원지반으로 이루어진 3층 구조로 가정하고, 축선의 중앙부에 저비저항(10 ohm-m)의 누수구간이 존재하는 2차원 모델에 대한 이론자료를 계산하고 이를 역산하여 얻어진 전기비저항 분포 단면과, 상기한 방법에 의해 추정된 공극을 분포 영상을 나타낸 것이다. 전기비저항 분포 영상에서는 상부의 고비저항층, 중간의 저비저항층과 원지반을 나타내는 고비저항층이 차례로 분포하고 중앙부에 저비저항을 보이는 누수대가 잘 나타나고 있다. 하지만 조사의 우선적인 목적이 누수구간의 탐지임에도 불구하고 전기비저항 단면에서는 누수구간이 강조되지 못하고 있다. 반면 공극을 단면에서는 층서구조에 의한 영향은 사라지고 누수구간에서만 높은 공극율을 보이고 있어 보다 명확한 해석이 가능해 보인다. 물론 이 결과에서는 원지반의 심도, 침윤선 등에 관한 정보가 없어진다는 단점도 있으며, 원래의 누수구간보다 하부로 공극율이 높은 구간이 확장되어 나타나고 있다.

Fig. 2는 강원도 소재 모 저수지에서 수행된 전기비저항 탐사 결과와 이로부터 추정된 공극을 분포 단면이다. 이 저수지는 제고가 20 m 내외이며 외관상으로는 누수가 확인되지 않는 건전한 저수지이다. 본 조사에 적용된 쌍극자 배열 전기비저항탐사에서 측정 간격은 5 m이며 전극전개수 $n=12$ 까지의

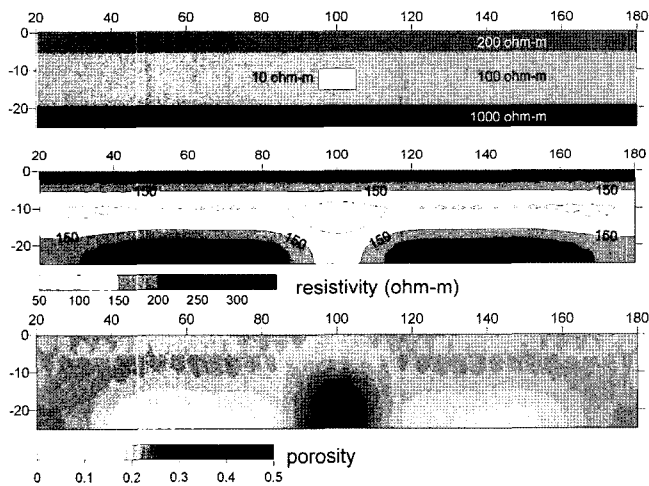


Fig. 1. True resistivity model, resistivity and porosity sections for a reservoir dyke model.

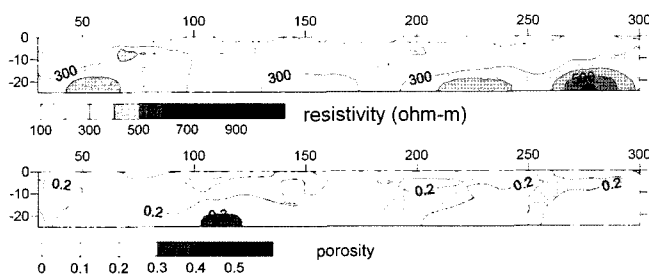


Fig. 2. Resistivity and estimated porosity sections of a reservoir dyke.

자료를 사용하였다. 전반적인 전기비저항 값의 범위는 150~600 ohm-m의 값을 나타내었다. 장마철에 측정이 이루어졌기 때문에 제체 상부도 강우에 의해 완전히 침윤되어 있는 상태였으며, 저수위는 만수위를 나타내고 있었다. 전기비저항 분포 단면에서 상부는 150 ohm-m의 얇은 저비저항대가 존재하고 그 하부에 300 ohm-m 정도의 비저항대가 두텁게 나타나고 있다. 하부에는 원지반에 의한 영향인 것으로 해석되는 400~600 ohm-m의 고비저항대가 국지적으로 출현하고 있다. 한편 누수 가능성이 있는 저비저항대는 30~40m 구간의 심도 10 m 지점, 100~120 m 구간의 심도 20 m 지점, 180 m 지점의 심도 15 m 지점 등이다. 예상한 바와 같이 공극율 단면은 전기비저항 단면보다 단순한 양상을 보이고 있어 해석이 용이하다. 전기비저항 단면에서 저비저항대로 나타난 지점이 공극율 단면에서도 상대적으로 높은 공극율을 보이고 있으며, 특히 100~120 m 지점의 공극율이 가장 높아서 35% 대에 이르고 있어 향후 누수 위험성이 가장 높을 것으로 판단된다. 30~40 m 구간의 심도 10 m 지점과 180 m 지점 심도 15 m 지점도 25% 정도의 공극율을 보이고 있어 향후 누수가 발생할 가능성이 있는 지점임을 알 수 있다.

하지만 이와 같은 해석은 여러 가지 가정 하에 전기비저항 자료만을 이용하여 추정된 공극율 값이므로 절대적인 해석이 될 수 없다. 특히 전기비저항이 낮다고 해서 공극율이 항상 높다고 할 수 없으며, 또한 공극율이 높다고 해서 항상 누수가 일어나는 것은 아니라는 점에 유의해야 한다. 또한 아직 공극율이 어느 정도가 되어야 누수가 일어나는가에 대한 객관적 기준이 마련되지 않았다는 점도 해석을 모호하게 하는 원인중의 하나이다. 따라서 해석결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 철저한 외관조사와 더불어 불교란 시료의 분석결과와 비교되어야 하며, 상시관측에 의한 전기비저항과 공극율의 변화양상을 주의 깊게 분석, 관찰한다면 전기비저항 탐사를 통한 효과적인 누수구간의 탐지가 가능할 것으로 기대된다.

상시관측에 의한 제체의 안전도 지수

제체의 누수구간 탐지를 위한 전기비저항 탐사 상시관측은 여러 가지 측면에서 장점이 있다. 우선 시간에 따라 전기비저항의 변화율에 관한 정보를 제공한다는 강력한 장점이 있다. 제체의 전기비저항을 결정하는 여러 가지 요인 중 시간에 변화하지 않는 요소를 배제하고 해석을 할 수 있으므로, 제체의 공극율과 같이 누수와 직접적으로 연결되는 변수의 추정이 수월해지며, 해석의 정확성도 높아지게 된다.

이제 상시관측 자료의 해석을 위한 이론적인 배경을 알아보자. 먼저 시간에 따라 고결지수 m , 공극수의 전기전도도 σ_w 및 c 값이 변화하지 않는다고 가정하고, 시간 t_1 과 시간 t_2 에서의 전기전도도를 σ_1 , σ_2 , 공극율을 ϕ_1 , ϕ_2 라 하면, (2)식으로부터 1차와 2차 측정의 공극율의 비는

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^{1/m} = \frac{1}{n} \quad (4)$$

이 되며, 이때 미고결 토사층의 고결지수 $m=1.3$ 을 적용한다. (4)식에서 2차 측정의 공극율과 안전도는 역비례관계에 있다. 따라서 여기서는 안전도 지수 n 을 (4)식과 같이 정의한다. 이와 같이 정의된 안전도지수는 전기전도도의 변화가 없을 경우에는 1을 가지며, 전기전도도가 증가할수록 0에 수렴하는 양상을 보이게 된다. 박삼규 등(2005)은 안전도 지수를 정의하지는 않았지만 전기비저항 비를 사용하여 전기비저항 비가 1보다 작으면 위험구간으로, 크면 안전구간으로 해석하였다. 물론 이러한 해석방법은 (4)식과 거의 동일한 의미를 가지며, 간편하게 상시관측 자료를 해석할 수 있다는 장점을 갖는다.

또 다른 분석방법은 로그 스케일 상에서 전기전도도와 공극율의 시간적 변화율을 고려하는 것이다. 우선 (2)식의 양변에 로그를 취하면

$$\log \sigma = \log c \sigma_w S^k + m \log \phi \quad (5)$$

(5)식에서 고결지수 m 은

$$m = \frac{\log \sigma_1 - \log c \sigma_w S^k}{\log \phi_1} = \frac{\log \frac{\sigma_1}{c \sigma_w S^k}}{\log \phi_1} \quad (6)$$

σ_w , m 과 c 가 시간에 따라 변화하지 않는다고 가정하고, (5)식을 시간에 대해 미분하면

$$\frac{\partial(\log \sigma)}{\partial t} = m \frac{\partial(\log \phi)}{\partial t} \quad (7)$$

(7)식을 전개하면

$$\log \sigma_2 - \log \sigma_1 = m(\log \phi_2 - \log \phi_1) \quad (8)$$

(6)식을 (8)식에 대입하면 새로운 안전도 지수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$n = \left(\frac{\log \phi_2}{\log \phi_1}\right) = \left(\frac{\log \frac{\sigma_2}{c \sigma_w S^k}}{\log \frac{\sigma_1}{c \sigma_w S^k}}\right) = \left(\frac{\log \frac{\rho_w}{c \rho_2 S^k}}{\log \frac{\rho_w}{c \rho_1 S^k}}\right) \quad (9)$$

이제 (9)식을 이용하여 공극수와 매질의 전기전도도로부터 안전도 지수를 계산할 수 있다. 이 경우에도 공극율 추정방법에서와 마찬가지로 (3)식을 사용하여 같은 심도에서의 $c \sigma_w S^k$ 의 평균값을 산출하여 사용한다. t_1 에서의 공극율 ϕ_1 은 0 ~ 1.0의 범위의 값을 가지므로 안전도 지수 n 이 증가하면 t_2 에서의 공극율 ϕ_2 는 감소하며, 지수값 n 이 감소하면 증가한다. 한편 매질의 전기전도도는 1.0 S/m 보다 훨씬 작은 값을 보이며 σ_1/σ_w 과 σ_2/σ_w 는 1.0 보다 작은 값을 나타낸다. 따라서 로그 함수의 특성상 전기전도도 σ_2 가 σ_1 보다 커지면 지수값 n 은 작아지게 되며, ϕ_2 는 ϕ_1 보다 큰 값을 보이게 된다. 즉 공극율이 증가하여 제체의 안전도가 감소함을 의미한다. 극단적으로 $\sigma_2 = c \sigma_w S^k$ 일 경우에는 $n = 0$ 이 되고, $\phi_2 = 1.0$ 이 되어 제체가 완전히 공동화되었음을 의미한다. 이상에서 지수값 n 은 로그 스케일상의 공극율 비로 정의되며 제체의 안전도 지수로 정의할 수 있다. 즉 안전도 지수 n 이 0에 가까울 경우에는 제체의 안전도가 낮아지며 1에 가까워질수록 높아짐을 의미한다.

(9)식에 의한 안전도 지수 산출법은 (4)식과는 확연한 차이를 갖는다. 가장 큰 차이는 (9)식에 주어진 안전도 지수는 공극수의 전기전도도를 지수 산정의 요소로 사용하고 있다는 점이다. 즉 공극수의 전기전도도를 제체가 가질 수 있는 전기전도도의 하한 값으로 가정하고 이를 기준으로 안전도 지수를 산출하는 방법이다. 반면 (4)식의 경우에는 단순히 전기전도도 비만을 사용하여 안전도 지수를 산출하므로 2차 측정에서의

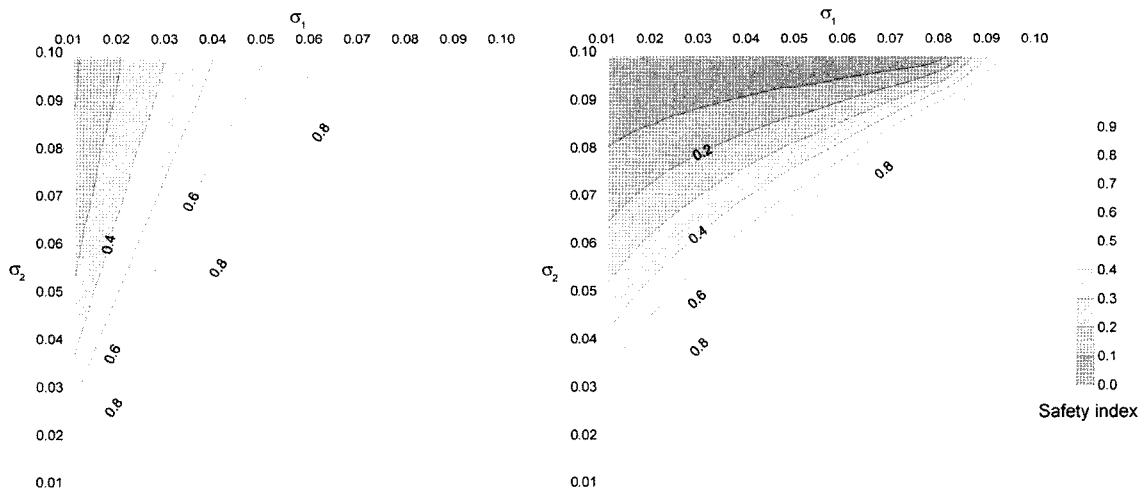


Fig. 3. Safety index distributions calculated by eq. (4) (left panel) and eq. (9) (right panel) as a function of σ_1 and σ_2 when $\sigma_w=0.1$ S/m and $S=1$.

전기전도도가 아무리 낮아도 1차 측정과의 비만 작으면 높은 안전도 지수를 나타낸다. 앞서 기술한 바와 같이 제체의 거의 물성이 유사한 토사로 축조되었다면, 제체의 전기비저항은 거의 공극수의 전기비저항에 좌우되며, 적어도 공극수의 전기전도도보다 높은 전기전도도를 나타내기는 어렵다. 따라서 변화량이 작더라도 전기전도도가 높을 경우에는 누수 위험구간으로 해석되어야 마땅하다.

Fig. 3은 (4)식과 (9)식에 의해 전기전도도 σ_1 과 σ_2 의 변화에 따른 안전도 지수를 비교한 것이다. 전기전도도가 감소하는 경우는 두 방법 모두 안전도 지수가 1보다 큰 값을 보이게 되며, 제체의 안전에 문제가 없을 것이므로 증가하는 경우만을 나타내었다. Fig. 3의 좌측에 나타난 (4)식에 의한 안전도 지수는 예상한 바와 같이 $\sigma_2 = \sigma_w$ 일 경우에도 σ_1 값에 따라 큰 변화를 보인다. 반면 우측의 (9)식에 의한 안전도 지수는 σ_1 이 작을 경우에는 (4)식의 의한 결과와 유사한 양상을 보이지만, σ_2 가 클 경우에는 σ_1 의 크기에 거의 관계없이 안전도 지수가 작은 값을 보인다. 이는 (9)식에 의한 안전도 지수가 전기전도도 비는 물론 σ_2 의 절대적인 크기를 보다 더 잘 반영하는 평가방법임을 입증해 주고 있다. 따라서 (4)식보다는 (9)식에 의한 방법이 보다 합리적인 제체 안전도 지수 산출 방법인 것으로 판단된다.

이론 및 현장 자료에 대한 안전도 지수

이제 앞서 제시한 3층 구조 모델에 대한 이론 자료에 대하여 안전도 지수를 산출해 보자. 우선 누수구간의 전기비저항이 1차 측정에서는 50 ohm-m, 2차 측정에서는 20 ohm-m, 최종 3차 측정에서는 공극수의 전기비저항인 10 ohm-m로 변화했다고 가정하자. Fig. 4에 나타난 바와 같이 전기비저항 단면에서는 침윤선 상부층, 제체 중심부, 원지반 층이 잘 구분되어 나타나고 있으며, 누수구간의 전기비저항이 감소함에 따라 전기비저항 분포 영상은 점차 누수구간의 전기비저항이 감소하는 양상을 보인다. 하지만 앞서 설명한 바와 같이 제체의 안전도

의는 관계없이 침윤선 상부와 원지반의 고비저항층의 영향으로 인하여 복잡한 양상을 보인다.

Fig. 5는 Fig. 4의 전기비저항 분포 영상이 상시관측에 의해 얻어진 자료라고 가정하고, (4)식과 (9)식에 의해 계산된 안전도 지수의 분포 영상을 나타낸 것이다. 두 단면 모두 층서구조의 영향이 억제되고 누수구간에서 작은 안전도 지수를 보이고 있어 명확한 해석이 가능하다. 특히 전기비저항 단면에서 전기전도도가 0.02 S/m에서 0.05 S/m 변화할 경우 이상대가 명확하게 나타나고 있지 못한데 반하여, Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 안전도 지수 영상에서는 미약하지만 이상대를 명확하게 표현하고 있다. 또한 Fig. 5(c)에 나타난 바와 같이 누수구간의 전기전도도가 0.02 S/m에서 0.1 S/m로 급격하게 변화한 경우가 0.05 S/m에서 0.1 S/m로 변화한 경우보다 훨씬 작은 안전도 지수를 보임을 알 있다. 이는 전기비저항 탐사 결과에서 전기비저항의 급격한 감소가 제체를 안전도를 감소시키는 것을 의미한다. 비록 Fig. 5에서는 (4)식과 (9)식에 의한 안전도 지수의 차이가 크게 나타나지는 않지만, 2차 측정에서의 전기전도도가 낮을 경우에는 (9)식에 의해 계산된 안전도 지수가 낮게 나타날 것이다.

Fig. 6은 2005년 7월 8일과 8월 8일 강원도 소재 모 저수지

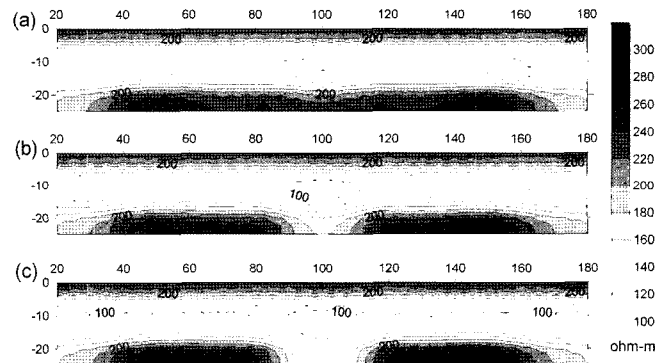


Fig. 4. Reisistivity sections obtained by the inversion of 2D theoretical modeling data when the conductivity of the leakage block is 0.02 (a), 0.05 (b) and 0.1 S/m (c), respectively.

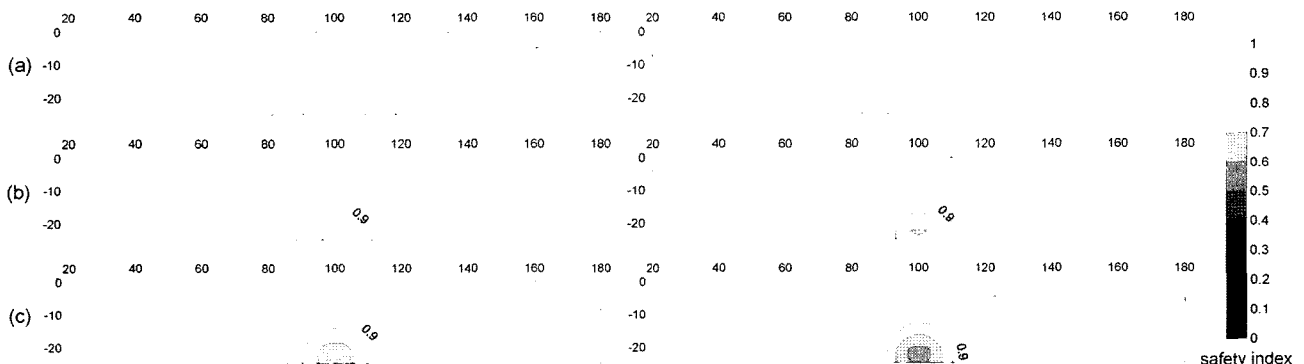


Fig. 5. Distribution of safety index calculated by equation (4) (left) and (9) (right) when the conductivity of the leakage block changes from 0.02 to 0.05 S/m (a), 0.05 to 0.1 S/m (b) and 0.02 to 0.1 S/m (c), respectively.

제체에서 수행된 쌍극자 배열 전기비저항 탐사자료를 역산하여 얻어진 전기비저항 분포 영상이다. 우기인 관계로 저수위는 만수위를 나타내고 있었으며, 측정 당일에 비가 내렸기 때문에 제체는 완전히 포화된 상태였다. 측정은 2회 모두 전극전개수 $n = 12$ 까지 이루어졌다. 1개월 정도의 시간이 경과했지만 전반적으로 매우 유사한 전기비저항 분포 양상을 보이고 있다. 단지 Fig. 6(a)에 나타낸 7월 8일 측정결과가 8월 8일 측정결과인 Fig. 6(b)에 비하여 전반적으로 전기비저항이 약간 감소한 것으로 나타나고 있다. 특히 누수 위험 구간으로 해석되는 100 ~ 120 m 구간과 180 m 지점의 전기비저항이 뚜렷하게 감소한 양상을 보이고 있다.

Fig. 7은 (4)식과 (9)식을 사용하여 Fig. 6의 전기비저항 자료를 안전도 지수로 변환한 결과이다. 두 경우 모두 안전도 지수가 전기비저항 분포 단면보다 훨씬 단순한 양상을 보이고 있으며, 누수 위험구간으로 해석되는 저비저항대에서 낮은 안전도 지수값을 나타내고 있다. 특히 (4)식에 의해 계산된 안전도 지수가 (9)식에 의한 안전도 지수보다 약간 복잡한 양상을 보인다는 점이다. 이러한 현상은 (4)식에 주어진 방법이 전기비저항의 고저에 관계없이 단순히 1차와 2차 측정에서의 전기전도도 비만을 사용하기 때문에 전기전도도가 낮은 구간도 그 값이 증가하지만 하면 안전도 지수는 감소하게 된다. 예를 들어 270 ~ 290 m 구간에 나타나는 고비저항대임에도 불구하고 2차 측정에서의 전기전도도가 1차 측정에서 얻어진 전기전도도 보다 높아졌기 때문에 안전도가 낮은 구간으로 나타나고 있다. 하지만 (9)식으로 계산된 안전도 지수에서는 2차 측정에서 얻어진 전기전도도가 낮기 때문에 안전도 지수가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 즉 (9)식에 의한 안전도 산출 방법은

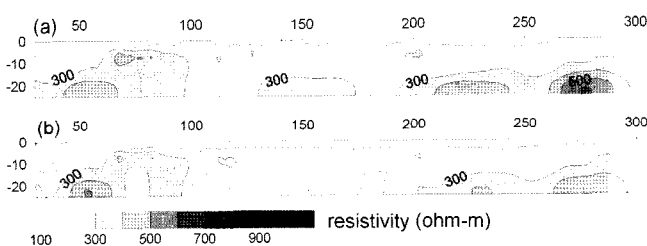


Fig. 6. Resistivity sections measured on 8, July (a) and 8, August (b), 2005 at a reservoir dyke.

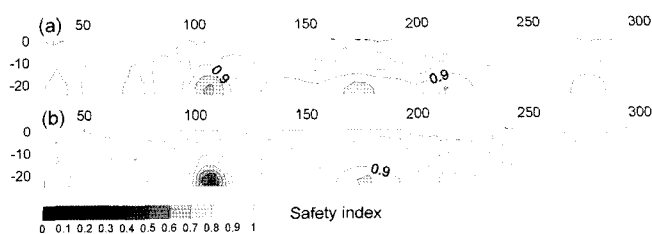


Fig. 7. Safety index sections by equation (4) (a) and (9) (b) extracted from resistivities measured on 8, July and 8, August, 2005 at a reservoir dyke.

전기전도도의 변화뿐 아니라 그 절대적인 크기도 반영한다고 볼 수 있다.

결 론

전기비저항 탐사는 농업용 수리시설물인 저수지의 효율적 유지관리를 위한 안전진단에 널리 적용되고 있다. 하지만 전기비저항 탐사자료의 해석은 단순히 저비저항대를 누수 위험구간으로 해석하는 초기 단계에 머무르고 있다. 최근에 상시관측이 도입되어 누수구간의 효율적인 탐지에 관한 연구가 진행되고 있으나 아직까지는 전기비저항 비를 이용한 방법 이외에는 뚜렷한 해석방법이 제시된바 없다.

제체의 누수의 가장 큰 원인은 세굴현상인 것으로 알려져 있으며, 세굴현상이 진행됨에 따라 제체 누수구간의 공극율이 증가하고, 결국 제체의 안전도가 위협받게 된다. 이 연구에서는 공극율이 제체의 안정성에 주요한 요소라는 점에 착안하여, 전기비저항 탐사에서 얻어진 전기비저항 분포 단면을 공극율 분포 단면으로 변환하는 방법을 Archie의 경험식을 근거하여 제시하였다. 또한 전기비저항 상시관측에서 얻어진 자료를 사용하여 제체의 안전도 지수를 산출하는 방법론을 제시하고자 하였다.

물론 전기비저항 탐사 자료만을 이용하여 공극율과 안전도 지수를 산출하기 위하여 많은 가정이 이루어 졌으며, 경우에 따라서는 이런 가정이 위배될 수도 있다는 위험성을 배제할 수 없다. 또한 산출된 안전도 지수에 대한 정량적 기준이 미흡한 상태에서 이를 근거로 제체의 안전성 여부를 현 상황에서 판단하기에는 무리가 따를 수밖에 없다. 하지만 제체의 안전도를 정량적으로 산출하기 위한 노력은 지속적으로 이루어져야 하며, 향후 다양한 경우에 대한 자료가 축적된다면 보다 합리적인 안전도 지수의 기준이 마련될 수 있을 것이다. 따라서 이 연구는 제체의 안전도를 정량적으로 평가하는 한 가지 방법론을 제시한 것이며, 앞으로 지속적인 보완, 개선을 통하여 효과적인 제체 안전진단 기법으로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 농림부가 주관하고 한국농촌공사가 시행하는 “수리시설물 재해예방 계측시스템 설치사업” 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, **146**, 54-62.

- Heritage Geophysics, 2005, Short note on the principles of geophysical methods for groundwater investigation, <http://www.geo-hydrology.com>.
- Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., and Bogoslovsky, V. A., 1969, Geophysical studies of water leakages from reservoirs, *Geophy. Prosp.*, **17**, 36-63.
- Titov, K., Loukhmanov, V., and Potapov, A., 2000, Monitoring of water seepage from a reservoir using resistivity and self polarization methods: case history of the Petergoph fountain water supply system, *First Break*, **18**, 431-435.
- 박삼규, 김정호, 서구원, 2005, 저수지 유지관리를 위한 전기비저항 모니터링 기법 응용, *물리탐사*, **8**, 177-183.
- 박삼규, 송성호, 최종학, 최보규, 이병호, 2002, 수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성, 땅과 물이 만나는 곳에서의 물리탐사, 한국지구물리탐사학회 제4회 특별심포지움 논문집, 179-195.
- 송성호, 권병두, 최종학, 김경만, 2001, 저수지 누수문제에 대한 수리지질 및 지구물리방법의 적용, *한국자원공학회지*, **38**, 292-300.
- 이명종, 김정호, 정승환, 송윤호, 2000, 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 이용한 제당 누수조사, 한국물리탐사학회 제2회 특별심포지움 논문집, 41-53.
- 정승환, 김정호, 양재만, 한규연, 김영웅, 1992, 전기비저항탐사에 의한 제당의 누수구간 탐지, *지질공학*, **2**, 47-57.
- 윤종렬, 김진만, 최봉혁, 2005, 하천제방의 안정성 평가기법 연구, 한국물리탐사학회, 대한지구물리학회 2005 공동학술대회 논문집, 111-116.