

장주기 전기비저항 모니터링 기법을 이용한 필댐의 안정성 평가

A Study on the Estimation of Stability of Fill Dam by Long-term Electrical Resistivity Monitoring

김 기 호¹ Kim, Gi-Ho
 임 희 대² Lim, Heui-Dae
 안 희 윤³ Ahn, Hee-Yoon

Abstract

Resistivity monitoring is based on the fact that a change in the porosity leads to the changes in water content and fine particles, which alter the electrical resistivity. At every embankment dam, internal erosion always occurs as time passes. The internal erosion generally develops into piping over a long time by backward erosion and concentrated leak, and finally leads to dam failure. Resistivity is known to be very sensitive to the changes in porosity in embankment dams. Thus resistivity monitoring is a reasonable method to find out the leakage zone. However, resistivity is strongly influenced by seasonal variation of temperature, TDS of reservoir water and water level. In this paper, we first installed electrodes permanently at the center of the crest. The electrical resistivity monitoring data was acquired every 6 hours from Apr. 3, 2011 to July. 31, 2012. To analyze the characteristics of monitoring data, each resistivity data was calculated from up to 2,950 data sets. The result indicated a seasonal resistivity variation due to related temperature. Finally, a quantitative method to estimate porosities of the embankment dam from the resistivity monitoring data was analyzed. The applicability and reliability were verified and the importance of electrical resistivity monitoring for obtaining reliable result was emphasized.

요 지

전기비저항 모니터링 탐사법은 공극의 변화는 입자와 함수율의 변화에 기인한다는 사실에 근간을 두고 있다. 모든 댐에서 내부 침식은 시간이 지날수록 발생하며, 시간이 지남에 따라 누수가 집중되고 결국 댐의 파괴에 이르게 한다. 전기비저항은 제체내 공극의 변화에 매우 민감하게 변화하는 것으로 알려져 있어 전기비저항 모니터링 탐사법은 누수탐지에 효과적으로 적용되어 왔다. 그러나 전기비저항은 온도의 계절 변화와 충고용융존물, 운영수위 등의 변화에 큰 영향을 받는다. 본 논문에서 우리는 댐마루 중앙부에 영구적으로 전극을 설치하고 2011년 4월 3일부터 2012년 7월 31일까지 매 6시간 마다 전기비저항 모니터링 탐사 자료를 획득하였다. 모니터링 데이터의 해석을 위해 각 전기비저항 데이터의 2,950여개가 넘는 데이터를 분석하였다. 그 결과 전기비저항은 온도의 영향으로 계절변화에 따라 변화함을 확인할 수 있었으며, 전기비저항 모니터링탐사로부터 제체의 공극률을 산출하고 분석하였다. 댐체에서 전기비저항 모니터링 탐사의 적용성과 안정성을 확인하였으며, 신뢰할 만한 전기비저항 모니터링 데이터의 중요성을 강조할 수 있었다.

Keywords : Electrical resistivity monitoring, Fill dam, Internal erosion, Seepage

1 정희원, 한국수자원공사 낙동강 통합물관리센터 센터장 (Member, Director General, Nakdong River Integrated Operations Center, K-water)

2 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ.)

3 정희원, (주)희송지오테크 이사 (Member, Director, Heesong Geotek Co., Ltd., Tel: +82-70-7510-1657, Fax: +82-31-8018-2990, ayoony1014@gmail.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

댐, 제방 등의 수리시설물은 그 특성상 시간이 경과함에 따라 자중 및 외력 등에 의해서 노후화되어 구조가 취약해지거나 성능이 저하되고 이에 따라 시설물의 안전성에 문제가 발생된다. 수리시설물의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 누수현상은 제체 전면에 걸쳐 일어나기 보다는 국부적으로 일어나는 경우가 대부분이고, 제체의 파괴나 대규모 누수 등에 의한 재해에 직접적으로 영향을 미치는 침투수는 층상으로 존재하기 보다는 수맥 상으로 존재하는 경우가 많다(Park and Kim, 1999). 특히, 제체 내의 균열이나 기초압반에 존재하는 불연속면 등을 통해 발생하는 내부 침식에 의한 파이핑 파괴는 추정이 어려울 뿐만 아니라 매우 급작스럽게 발생하기 때문에 가장 위험하다. 균열은 파이핑 파괴로 이어질 수 있는 복합적인 현상중의 하나이며 균열의 주요원인에는 양안의 급한 경사, 압축성 기초, 건설 재료의 응력-변형률 특성, 댐건설과정의 불연속성, 저수위의 변화속도 및 각 매질간의 강성차이에 의한 응력전이 현상 등이 있다. 초기 담수 시에는 비교적 낮은 수두 하에서도 코어의 수압할렬에 의한 집중누수 현상이 발생할 수 있으며 분산성 재료일 경우에는 침식이 용이하고 파이핑 가능성이 높다(Ahn, 2010).

수리시설물 제체의 누수현상을 탐지하기 위해 각종 물리탐사법이 적용되고 있는데 주로 전기비저항탐사가 사용되어 왔다(Chung et al., 1992; Lee et al., 2000; Song et al., 2001; Park et al., 2002). 물리탐사에 의한 저수지의 누수탐지는 일시적으로 탐사를 실시하여 전기비저항의 분포양상을 해석하여 누수구간을 판정하고 있었지만, 제체의 누수현상에 대해서 정밀하게 분석하여 보수·보강 대책을 세우기에는 부족한 점이 있다. 특히 제체의 중심부는 중심점토에 의해 저비저항대를 보여 이 구간에 대한 누수여부를 판정하기가 어렵다. 따라서 시

추조사와 육안관찰로 누수구간을 확인하여 이들 자료를 종합적으로 해석하여 누수구간을 판정하고 있는 실정이다. 또한 조사 당시 누수현상을 발견한다 하더라도 과거의 누수시기와 앞으로의 누수구간 진행 상태에 대해서 예측하기가 어려워 일반적으로 누수구간을 과대하게 설정하여 보수·보강대책을 세우는 경우가 많아 경제적이고 효율적인 유지관리 기법 개발의 필요성이 요구되고 있다. 이에 본 연구는 필댐의 침투거동에 대한 취약부 조사기법의 하나로서 전기비저항 모니터링 시스템을 구축하고 17개월간 장주기 전기비저항 모니터링 탐사를 수행하여 분석 알고리즘을 개발 하고 댐 및 제방의 침투거동 파악을 위한 예측방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 댐 운영수위, 강수량, 온도 변화에 대한 전기비저항 값의 변화를 비교분석 하였다. 또한 제체의 안정성 평가의 방법으로 전기비저항 모니터링 탐사 결과에서 공극률을 산출하고 제체의 안정성 평가 방법을 검토하였다.

2. 댐의 제원 및 조사 위치 결정

연구대상 댐은 댐마루 지반고 116m, 높이 37.3m, 제체길이는 390.5m의 중앙차수형 석괴댐이다(Fig. 1). 댐 단면의 사면경사는 상류측 1:2.2, 하류측 1:1.8이며, 가능 최고수위는 113.5m, 상시만수위는 109.7m로 총 저수용량이 8.74 백만 m^3 이다. 댐은 Zone1(Core 재), Zone 2(Filter 재), Zone3(Transition & Random 재), Zone 4(Rock 재) 및 사석의 5개의 zone으로 구성되어 있다.

모니터링 탐사는 통상적인 물리탐사에 비하여 측정의 정밀도가 훨씬 높아야 한다. 모니터링 탐사에서 송수신기간의 거리 및 위치에 따라 매우 민감하게 변화하므로 송수신의 기하학 위치는 물론 각종 탐사변수가 동일한 값으로 고정되어야만 한다. 댐에서의 전기비저항탐사는 대부분 댐마루에서 수행하게 되는데 댐마루에는

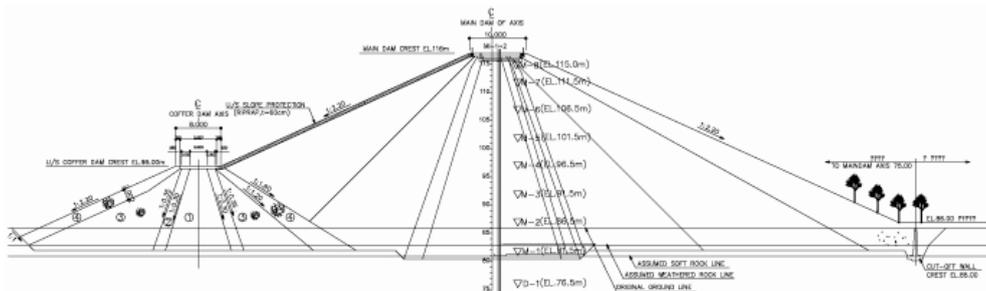


Fig. 1. Cross section of studies dam

다양한 상시관측 센서가 매설되어 있어 전기비저항탐사의 측면에서 전기적 잡음 요소로 작용하게 된다. 따라서 모니터링 탐사 측선의 위치 선정을 위해서는 잡음 수준의 파악을 위한 예비조사 과정이 필요하다. 예비조사는 댐마루의 상류측-상류사면 경계부 및 중앙부, 하류-하류사면 경계부, 하류사면 4개 측선에 대하여 각각 200m 길이의 탐사를 수행하고 각 위치별 측정자료의 신뢰성 및 신호수준을 검토하였다.

Fig. 2는 모니터링탐사 측선 매설 이전에 수행한 댐마루 중앙측선의 예비탐사 결과로서 Fig. 2(a)는 전기비저항탐사 결과이며, Fig. 2(b)는 측정자료의 신뢰수준을 검토하기 위한 전위 감쇠곡선이다. 필댐은 구조물의 특성상 동일한 재료를 이용하여 다짐과 성토 과정이 이루어지므로 재료의 물성은 수평적인 변화보다는 수직적인 변화가 발생하는 것으로 알려져 있다. Fig. 2(a)의 결과에서는 수평적인 물성변화 뿐만 아니라 수직적인 변화를 보이는데 대상 댐은 코아 재료원의 재료가 부족하여 마사토와 점토를 혼합하여 축조된 것으로 알려져 있는데 이러한 영향에 기인한 것으로 분석하였다. Fig. 2(b)는 Dist. 100m 이전구간 및 175m에서 일정수준 이상의 무작위 잡음 영향으로 전위감쇠 곡선이 교차하는 것을 확인할 수 있는데 고압 전력선이 본 댐의 방향과 거의 나란히 지나가며, 다수의 계측기 및 CCTV의 영향인 것으로 분석하였다. 한편, 댐마루 중앙측선 결과 이외의 3개의 측선결과는 잡음수준이 심각하여 댐마루 중앙측선을 모니터링 탐사 측선으로 선정하였다.

3. 전기비저항 모니터링 탐사의 해석

전기비저항 모니터링 탐사의 해석은 초기에 단일 측정자료를 독립 역산하여 얻어지는 전기비저항 분포단면을 전기비저항 변화비로 산정한 후 지하의 모델의 변화를 해석하는 기법이 주로 사용되어 왔다. 이러한 독립

역산에 근거한 해석방법은 다음과 같은 취약점을 갖는다. 첫 번째는 독립역산에 의한 각각의 해석결과에 사용되는 초기값이 서로 다르다는 문제이다. 두 번째 문제는 역산의 유일해 문제이며, 마지막으로 지하 모델의 규모와 물성대비가 작아, 전기비저항 변화량이 작을 경우에는 역산잡음(artifact)으로 변화대를 탐지하기 어렵다는 문제점을 안고 있다. 반면에 시간경과 역산법(time-lapse inversion)은 이상에서 기술한 독립역산의 문제점에 대안으로 활발히 연구되고 있다. 이 방법은 조사지역의 특성을 잘 보여주는 자료를 역산과정에서 획득한 모델변수를 기준모델로 설정하고, 이를 초기값으로 사용하면 역산과정에서 대부분의 모델변수들은 기준값에서 크게 차이 나지 않으며, 기준모델과 추정모델 사이의 차이를 최소화하는 제한을 주는 방법이다. 해석 알고리즘은 기준자료와 시간경과 자료의 차이나, 비를 모델변수로 사용하는 시간경과 역산법과 기준모델과 추정모델의 차이를 최소화하는 교차모델 제한자를 사용하는 방법으로 구분할 수 있다.

3.1 시간경과 역산 알고리즘

시간경과 역산법은 다음의 목적함수(S)를 최소화하는 모델변수를 추정하는 방법이다.

$$S = \| \mathbf{W}_d(\mathbf{e} - \mathbf{J} \Delta \mathbf{p}) \|^2 + \| (\mathbf{W}_m \Delta \mathbf{p}) \|^2 + \| \mathbf{W}_r \delta \mathbf{p} \|^2. \quad (1)$$

여기서 $\Delta \mathbf{p}$ 는 모델증분벡터, \mathbf{e} 는 측정자료와 이론자료 사이의 오차벡터(data misfit), \mathbf{J} 는 Jacobian 행렬, \mathbf{W}_d 와 \mathbf{W}_m 은 각각 자료벡터와 모델변수에 가해지는 제한자(constraint), 즉 가중행렬(weighting matrix)이다. 여기서 $\delta \mathbf{p} = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_{ref}| / \mathbf{p}_{ref}$ 로 시간경과에 의한 모델변수의 변화량을 기준모델변수로 나누어 준 값이며, \mathbf{W}_r 는 모델변수의 시간적 변화량에 가해지는 시간제한자 혹은 기준

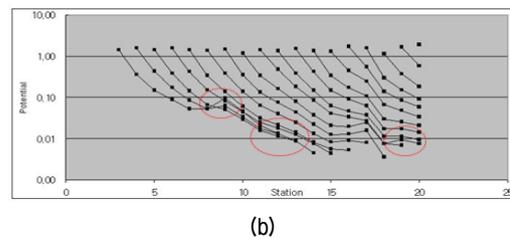
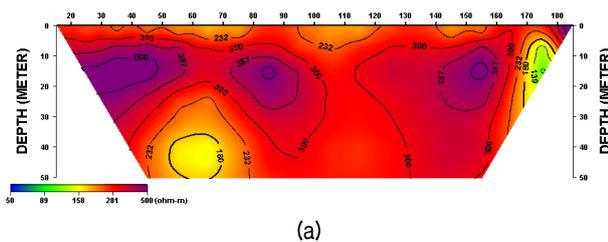


Fig. 2. Resistivity sections obtained from inversion of resistivity data set measured at August 9, 2010 (a) and potential drop curve (b), respectively

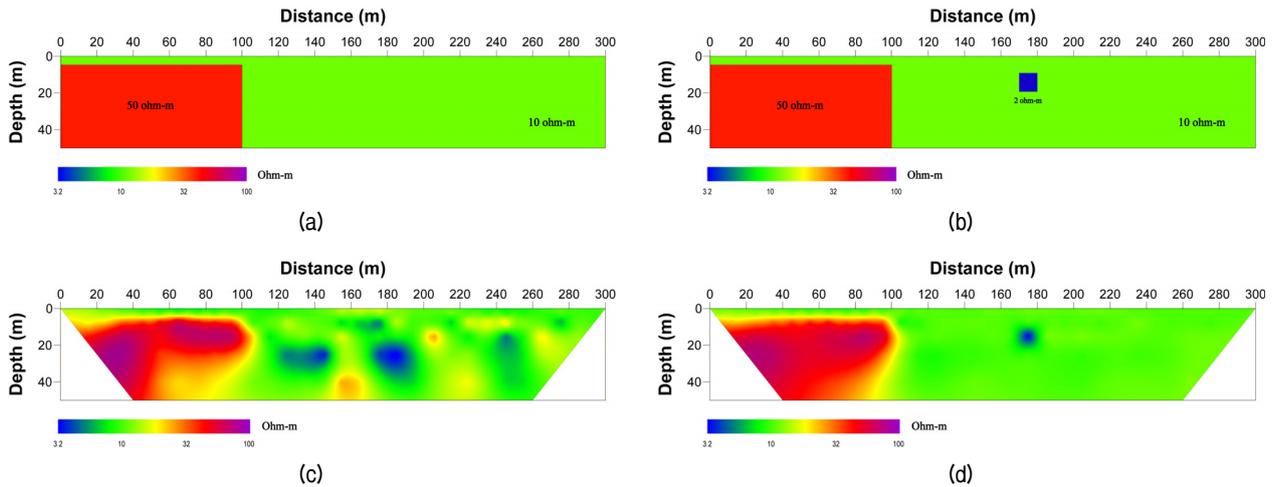


Fig. 3. (a) True model, (b) Time-lapse model and the results of (c) the reference model obtained from the independent inversion of calculated apparent resistivity data and (d) both changes and resolution of the model parameter

모델과 시간경과 모델(time-lapse model) 사이의 교차모델 제한자(cross-model constraint)이다(Ha, 2010).

시간경과 역산은 미세한 지하의 변화 양상을 탐지하는 것이 목적이므로 잡음의 영향은 독립역산에 비하여 더 크다고 할 수 있다. 따라서 효과적인 잡음 억제는 시간경과 역산의 성패를 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 시간경과 역산의 알고리즘 적용성을 살펴보고자 Fig. 3와 같이 기준모델과 시간경과 모델을 가정하고 독립역산 결과와 비교하였다. Fig. 3(a)는 기준모델이며, Fig. 3(b)는 시간경과 모델로서 Fig. 3(a)에 크기 10m × 10m, 전기비저항 2Ω-m인 사각형 전도성 이상체를 거리축으로 170~180m 구간, 심도 축으로 10~20m 구간에 추가하였다. 신뢰성 있는 모델링을 위해서 시간경과 모델에 대하여 쌍극자 배열 전기비저항탐사 2차원 모델링을 수행하고, 얻어진 겉보기 비저항 자료에 현장잡음 수준인 5% 무작위 잡음을 가미하여 잡음이 추가된 자료에 독립역산결과와 자료가중을 가한 시간경과 역산 결과를 비교하였다. Fig. 3(c)와 같이 독립역산 결과는 추가된 잡음으로 인하여 다수의 이상대가 불규칙하게 출현하고 있으며, 심지어 왜곡되어 전도성 이상체의 심도가 하부로 이동하여 나타나고 있으나 Fig. 3(d)의 시간경과 역산결과에서는 대부분의 잡음이 제거되었으며, 추가된 이상체를 정확하게 영상화하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 온도 보상 알고리즘

계절 변화에 따른 온도는 지중 내 전기전도도(전기비저항의 역수)에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다

(Waxman and Thomas, 1974; Sen and Goode, 1992). Hayley 등(2007, 2009)은 다양한 현장시험을 바탕으로 온도변화에 따라 지중 내 포화도의 영향이 달리 나타남을 규명한바 있다. 상기 연구에 의하면 우리나라와 같이 계절 변화가 뚜렷한 경우 정량적인 전기비저항 값을 산출하기 위해서는 온도에 대한 보정과정의 필요성을 제시하고 있다. 온도보상을 하는 방법은 전기비저항을 경험식에 의거하여 변환하는 방법과 계측에 의한 온도와 전기전도도 정보를 이용하여 온도구배와 전기전도도의 비를 이용하여 측정자료에 보상을 하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 Schlumberger(1972)가 제안한 식 (2)와 같은 경험식으로 특정온도로 변환할 때 사용된다.

$$R_2(T_2) = R_1(T_1) \times \frac{T_1 + 21.5}{T_2 + 21.5} \quad (2)$$

여기서 $R_1(T_1)$ 및 $R_2(T_2)$ 는 섭씨온도 T_1 과 T_2 에서의 전기비저항이며, 전기비저항과 온도의 단위는 각각 Ω-m와 °C이다. 일반적으로 온도보정은 25°C로 환산하여 계산한다. 이는 온도보정을 위한 기준온도 값이 필요한데 일반적으로 사용되는 기준온도는 25°C이기 때문이다. 이 방법은 짧은 주기의 전기비저항탐사 결과단면에서 해석한 온도 보상과정에 효과적일 수 있다. 그러나 정량적 해석을 위한 장주기 모니터링 탐사에서는 모니터링 탐사 측정자료에 온도 보상 알고리즘을 포함하여 해석하는 방법이 필요하다.

전기비저항탐사에서 해석한 지하모델은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{d}_{obs}^{TC} = \mathbf{A}(\mathbf{m}^{TC}), \text{ 여기서 } \mathbf{m}_{obs}^{TC} = \mathbf{m}_{true} + \Delta\mathbf{m} \quad (3)$$

여기서, d_{obs} 는 전기비저항탐사의 관측 자료이며, m 은 지하구조 모델, 기호 TC는 온도보상을 의미한다. 식 (3)에 대하여 테일러급수 전개하여 근사하면 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{d}_{obs}^{TC} \approx \mathbf{d}_{obs} + \frac{\partial \mathbf{d}_{obs}}{\partial \mathbf{m}} \Delta\mathbf{m}, \quad (4)$$

만약 공내수의 전기전도도와 온도계측이 가능하다면 전기전도도와 모델과의 관계는 다음 식으로 정의할 수 있게 된다.

$$\sigma_{std} = \left[\frac{m(T_{std} - 25) + 1}{m(T_t - 25) + 1} \right] \sigma_t \quad (5)$$

여기서 σ_{std} 는 기준자료에 대한 전기전도도, σ_t 는 전기비저항 모니터링 탐사 측정 시점에 대한 전기전도도이며, 모델 m 은 전기전도도와 온도구배와의 비로 정의할 수 있다. 식 (5)의 전기전도도를 모델에 대한 제한조건으로 재구성하여 다시 식 (1)에 대입함으로써 온도보상을 이용한 시간경과 역산을 수행하게 된다.

4. 전기비저항 모니터링 탐사의 결과 및 고찰

장주기 전기비저항 모니터링 탐사 측선은 예비조사 결과를 분석하여 댐마루 중앙부로 결정하였다. 탐사 측선은 영구설치 목적으로 50cm를 굴착하고 예비조사와 동일한 측선 길이인 200m를 매설하였다. 모니터링 탐사 자료의 측정은 순수 국내기술로 개발된 CDMA 통신방식을 채택한 모니터링 장비를 도입하여 장주기 전기비저항 모니터링 탐사를 수행하였다(Heesong Geotek, 2010).

장주기 전기비저항 모니터링 탐사의 분석은 2011년

4월 1일부터 2012년 7월 31일까지 약 16개월간의 측정 자료 총 데이터 2,952개에 대해 수행하였다. 탐사 자료는 6시간 간격으로 일 4 회 측정하였으며, 쌍극자 배열법으로 자료를 획득하였다. 획득한 장주기 모니터링 탐사 자료의 분석을 위해 강수량 및 댐 운영수위, 온도에 대한 정보는 K-water 데이터베이스 시스템을 이용하였다.

4.1 기준자료의 결정

Fig. 4는 기준자료(2011년 4월 5일)에 대하여 2011년 11월 16일 및 2012년 4월 5일 자료에 시간 경과역산법을 이용하여 수행한 전기비저항 결과 단면이다. Fig. 2의 결과와 비교했을 때, 전반적으로 유사한 특성을 보이고 있으나 전기비저항 값에 차이를 보이고 있다. 측정시점이 5개월 정도 차이가 나는 Fig. 4의 (a) 및 (b)의 결과는 유사한 댐 운영수위에 대한 결과임에도 불구하고 Dist. 60m 하부에서 전기비저항 변화가 상대적으로 큰 차이를 확인할 수 있다.

댐의 내부침식과 관련한 전기비저항은 Fig. 5와 같이 지하수, 온도, 매질의 종류, 총용존고용물(TDS, total dissolved solids)의 함량에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다(Johanson, 2004). Fig. 5에서 굵은 실선은 직접적으로 영향을 주는 물성이며, 가는 실선은 간접적인 영향, 점선은 직간접적인 영향보다는 상대적으로 연관성이 있음을 의미한다. Fig. 5에 의하면 침투류 파악을 위해서는 온도, TDS, 자연전위(SP)에 대한 정보가 필요하며, 전기비저항은 온도, SP 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 제시하고 있다. 정량적인 전기비저항 도출을 위해서 지반 물성과의 관계를 분석하는 것이 중요하며 이 과정이 반드시 필요하다.

Fig. 6은 전기비저항 모니터링 탐사 데이터베이스를 구축한 2011년 4월 1일부터 2012년 7월 31일까지의 기온, 댐 운영수위, 강수량을 함께 도시한 그래프이다. 장

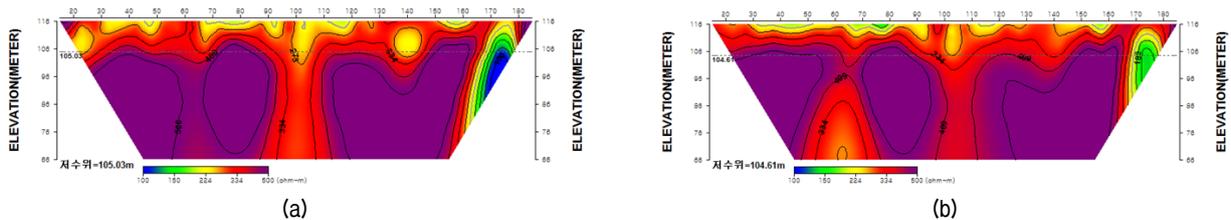


Fig. 4. Resistivity sections obtained from the time-lapse inversion of resistivity data set measured at November 16, 2011 (a), April 5, 2012 (b), respectively

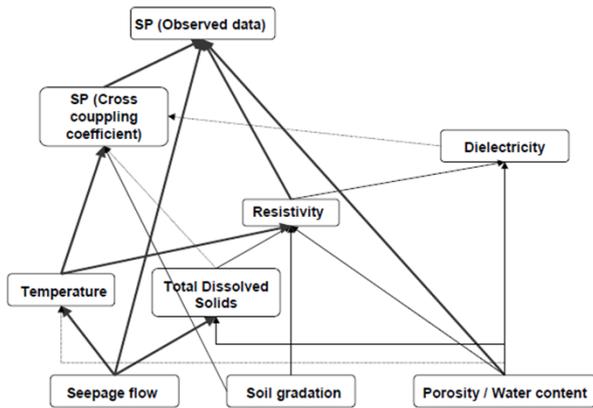


Fig. 5. Internal erosion's influence on the studied parameters (Johanson, 2004)

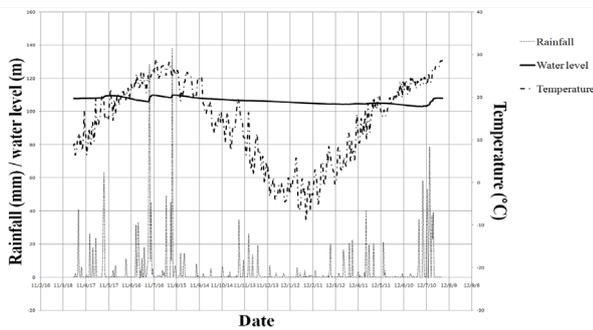


Fig. 6. Variation of the temperature, rainfall and water level with time

주기 모니터링 탐사의 해석을 위해서 Fig. 6에 도시된 정보와 전기비저항과의 관계를 살펴보고자 댐 운영수위 및 강수량, 온도 순으로 분석하였다.

4.2 댐 운영수위에 대한 전기비저항 변화

동일한 지반조건하의 전기비저항은 전기비저항-함수비의 관계에 의해 댐 운영수위가 가장 높을 경우 가장 낮은 전기비저항 값이 나타나게 된다. 이에 댐 운영수위와 전기비저항과의 관계분석을 위해서는 동일한 고도 값에서 추출한 전기비저항 값과 댐 운영수위의 변화를 살펴보는 것이 효과적이다. 한편, 전기비저항탐사에서 획득되는 전기비저항 값은 지하구조를 세분한 단위인 역산 블록을 기준으로 획득하게 되는데 이는 측정간격에 따라 결정된다.

Fig. 7은 전기비저항 자료의 해석을 위한 역산 블록을 도시하였다. 일반적으로 역산블록은 측정자료의 민감도(sensitivity)에 따라 결정하게 된다. 본 연구의 해석 알고리즘은 전기비저항 상용 해석 프로그램인 *DIPRO for*

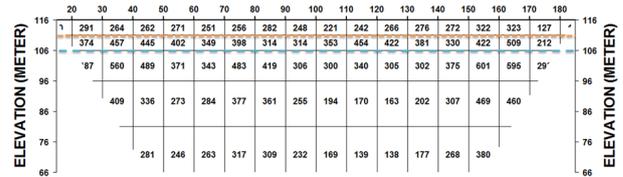


Fig. 7. Arrangement of the blocks used in a model with monitoring data

*windows*의 역산블록과 동일하게 설정하였다. 댐 운영수위-전기비저항과의 관계를 살펴보고자 역산블록을 고려하여 Fig. 7과 같이 댐 운영수위에 영향이 없었던 EL. 111m의 전기비저항 값과 댐 운영 수위에 변화가 있었던 EL. 106m에서의 전기비저항 값을 분석하였다.

장주기 모니터링 탐사에서 댐 운영수위는 제체의 내부침식 및 seepage 파악에 중요한 변수중 하나이다. 모니터링 탐사 기간 동안 운영수위는 EL. 103.1~109.7m 까지 약 7m 정도의 변화가 있었다. Fig. 8(a)는 최고 운영수위인 EL. 109.7m(July 17 2012)와 최저 운영수위인 EL. 103.1m(June 23 2012)의 해석결과에 대하여 Fig. 7의 EL. 106m과 111m에 해당하는 4개의 전기비저항 값을 도시한 그래프이다. Fig. 8(a)의 가로축은 전기비저항 해석결과와 위치를 의미하며, 세로축은 전기비저항 값이다. 전반적으로 운영수위가 높을수록 낮은 전기비저항 값을 보이고 있으나 Sta. 60~100m 구간의 전기비저항 값은 무작위 잡음에 의한 영향으로 역전되어 나타나고 있다.

Fig. 8(b)는 전기잡음 영향이 적은 Sta. 140m에서 EL. 111m 및 EL. 106m에서의 전기비저항 값과 댐 운영수위를 비교한 그래프이다. Fig. 6(b)에서 실선은 댐 운영수위에 영향을 받지 않은 EL. 111m에서의 전기비저항 값이며, 점선은 댐 운영수위가 지속적으로 변화하는 EL. 106m에서의 전기비저항 값이다. 댐 운영수위가 가장 높은 EL. 109.7m(July 17 2012) 자료의 전기비저항 값은 약 235~248Ω-m의 값을 나타나고 있으나 운영수위가 가장 낮았던 EL. 103.1m(June 23 2012) 자료에서는 271~273Ω-m의 범위로 나타났으며, 전기비저항의 변화는 전반적으로 10~14%의 변화를 보이고 있다. 한편, Fig. 8(b)의 결과를 살펴보면 기울기에 차이가 있다. Fig. 8(b)의 점선은 측정시점을 기준으로 댐 운영수위가 低에서 高로 변화하는 경우이며, 실선은 댐 운영수위가 高에서 低로 변화하는 경우에 해당한다. 댐 운영수위가 高에서 低로 변화하는 경우 제체의 함수비 감소는 중력에 의해서서히 이루어지므로 전기비저항 감소폭이 적게 나타

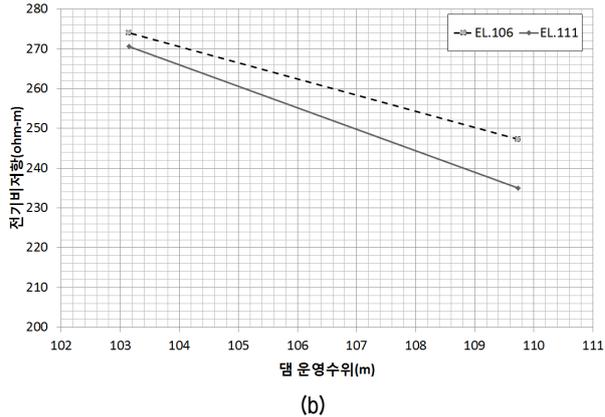
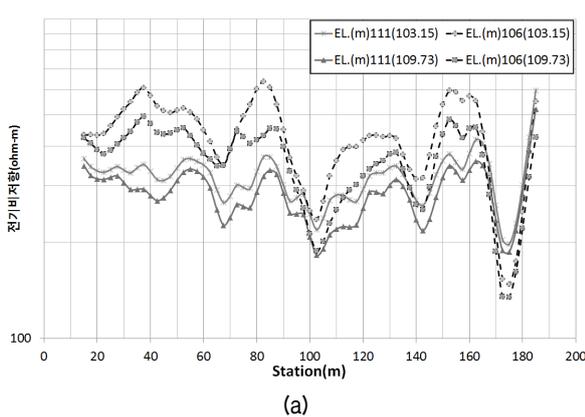


Fig. 8. Variation of electrical resistivity (a) with station, (b) versus water-level at 140 m electrode station

난 경우로 판단된다. 함수비의 변화는 댐 운영수위가 高→低의 변화량보다 低→高의 변화량이 작게 나타나는 것으로 알려져 있는데 장주기 전기비저항 모니터링 탐사를 통해 운영수위의 변화 파악이 가능하다는 점을 시사한다.

4.3 강수량에 대한 전기비저항 변화특성

강수량과 전기비저항 값의 변화를 분석하기 위해서는 강수량의 정보를 일누적강수량, 시간당 강수량 등으로 구분할 수 있다. 본 연구와 같이 일 4회 측정하는 장주기 전기비저항 모니터링 자료와 강수량의 관계를 분석하기 위해서는 강수량이 수~수십 mm 이상 지표에 함수비를 충분히 공급할 수 있는 수준이어야 한다. 기상청 통계에 따르면 2012년 기준 우리나라의 강수일수는 116회에 달하고 있으나 수~수십 mm 이상의 강수일수는 60일 전후로 알려져 있다. 수 mm 이하의 강수량은 소량이어서 강수량-전기비저항과의 통계적 분석에 어려움이 있다.

한편, 전기비저항 탐사측면에서 강수량은 댐 운영수위의 하부보다 상부 지층에 영향이 있다. 따라서 강수량-전기비저항 관계를 살펴보고자 댐 운영수위 상부층인 EL. 111m에서의 전기비저항과 일누적 강수량의 변화를 분석하였다. Fig. 9는 EL. 111m에서 일 누적강수량에 대한 전기비저항 값의 관계를 도시한 결과이다. Fig. 9의 결과에서 일 누적강수량이 증가할수록 전기비저항 값의 변화는 감소하는 특성을 보인다. 이 결과는 온도 및 댐 운영수위 등의 영향이 함께 포함되어 있다. 온도 및 댐 운영수위에 대한 변화를 고려하지 않았을 때, 최대 강수량 및 최소 강수량과 전기비저항 값을 비교해 본다

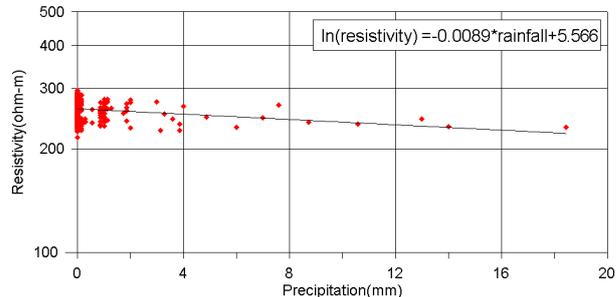


Fig. 9. Variation of electrical resistivity with accumulated precipitation in days

면 전기비저항의 변화량은 최대 20% 정도의 범위를 보이는 것으로 분석되었다. Fig. 6(b)의 댐 운영수위의 변화량보다 큰 변화량을 나타내는데 EL. 111m에서의 전기비저항 값이 강수에 직접적인 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 온도변화에 따른 전기비저항 변화특성

전기비저항-온도의 관계는 반비례하므로 동일한 지반의 전기비저항 값은 겨울철에 가장 큰 값을 보이게 된다. Fig. 10은 대상 댐의 온도변화와 전기비저항 값의 변화를 함께 도시한 것으로 빨간색 실선은 기온이며, 파란색 실선은 Sta. 140m에서의 전기비저항 값이다. Fig. 10의 해당 전기비저항 값은 EL. 111m와 EL. 106m에서의 전기비저항 값이다. Fig. 10의 결과에서 온도-전기비저항의 관계는 반비례관계가 뚜렷하게 나타나고 있으나 Fig. 10(a)에 비해 Fig. 10(b)는 변화량이 미세하게 작게 나타나고 있다. 이는 지표근처의 온도보다 지중의 온도변화가 덜 민감하기 때문인 것으로 추정하였다. 특이한 점은 각 최고점 및 최저점의 전기비저항 값이 온도와

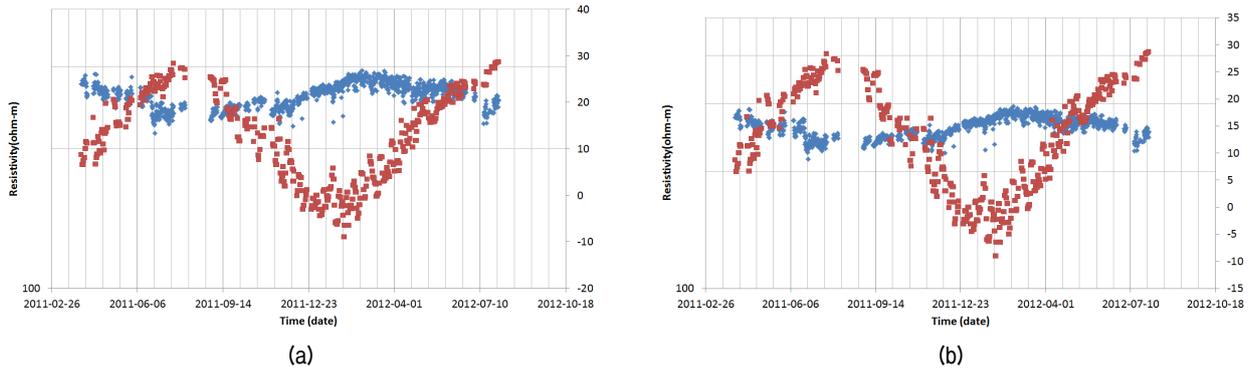


Fig. 10. Variation of the temperature, electrical resistivity with time at EL. 111 m (a), EL. 106 m (b), respectively

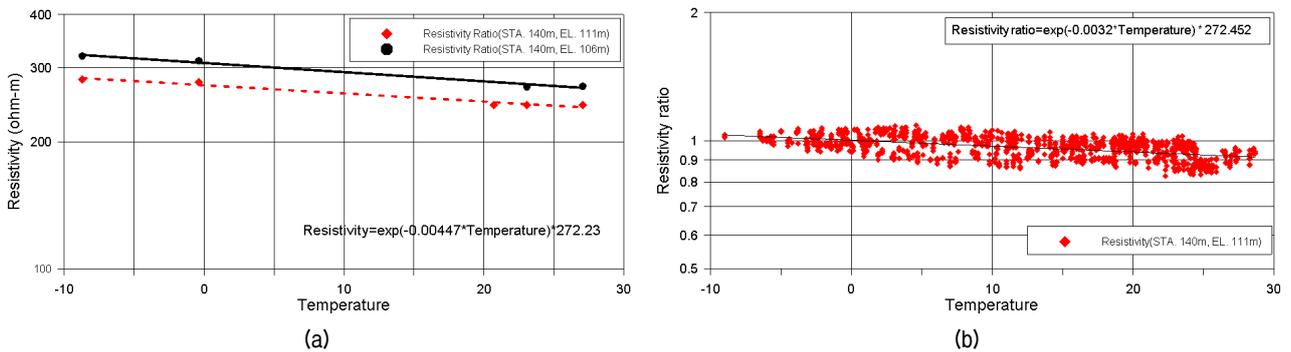


Fig. 11. Variation of the temperature versus electrical resistivity (a), and correlation of resistivity ratio for temperature at EL. 111 m (b)

지연 관계가 나타나고 있다는 점이다. 이는 구조물의 매질에 따른 비열의 차이에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 11(a)는 Sta. 140m 위치에서 EL. 111m와 106m에서의 온도-전기비저항과의 관계이다. Fig. 11(a)의 입력 값에 사용된 5개의 자료는 2011년 4월 및 9월, 12월, 2012년 4월과 7월 측정자료로서 강수량에 의한 영향을 최소화하기 위해 측정시점을 기준으로 7일간 강우가 없었던 자료를 선정하였다. 전반적으로 온도가 증가할수록 전기비저항 감소 현상은 나타나고 있으나 Fig. 8(b)의 결과와는 달리 EL. 111과 106의 기울기는 유사한 특성을 보인다. 이는 대상 심도에서 온도구배의 변화가 작다는 것으로 해석할 수 있다. Fig. 11(b)는 시간경과역산에 EL. 111m에서의 전기비저항 변화비의 결과이다. Fig. 11(b)의 결과에서 전체 전기비저항 모니터링 자료의 평균은 약 10%정도의 변화를 보이고 있으나 계절변화를 고려하는 경우 20% 넘는 차이를 보이고 있다. 온도-전기비저항의 최대 변화량은 운영수위-전기비저항의 최대 변화량보다 크게 나타나고 있는데 운영수위 및 온도 변화를 함께 고려해야 하는 경우 운영수위 상부층의 온도보상 과정이 필요하다고 할 수 있다.

5. 온도보상 알고리즘을 적용한 전기비저항 모니터링 탐사

앞 절에서 댐 운영수위 및 강수량, 온도 등과 전기비저항과의 관계를 분석한 결과 전기비저항 변화량은 10~20% 정도의 값으로 나타났다. 댐 운영수위 상부 지층의 전기비저항 값은 상대적으로 큰 변화폭을 나타내고 있으나 분석한 온도, 강수량, 댐 운영수위 등과의 직접적인 비교분석은 조심스럽게 이루어져야 한다. 예로 강수량이 거의 없었던 시기에도 전기비저항 값의 변화가 최대 20% 이상 변화하는데 이는 강수량의 영향보다는 댐 운영수위 또는 온도의 영향이라고 생각 할 수 있다. 온도변화의 경우 모든 모니터링 자료에 대한 영향을 주는 요소인 반면에 강수량 및 댐 운영수위는 모니터링 측정 시점에 따라 차이가 있을 수 있다. Johanson(2004)의 연구결과에 의하면 여름과 겨울철의 온도차가 40°C차이를 보인다면 전기비저항 변화는 최대 30% 까지 변화할 수 있다고 알려져 있어 온도보정은 반드시 필요한 과정이다.

Fig. 12는 식 (5)의 온도보상 알고리즘 효과를 확인하고자 온도보상 전후의 결과를 비교한 그래프이다. Fig. 12(a)는 온도보정 이전결과로서 Fig. 11(b)와 동일하며,

Fig. 12(b)는 온도 보정 이후 결과이다. Fig. 12(b)에서 온도보정에 의한 효과로 인해 전기비저항 변화량이 선형적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 일부 전기비저항 측정자료가 큰 오차를 보이는 측정지점은 있으나 강수량 및 주변 잡음의 의한 영향으로 판단된다. 한편, Fig. 12(b)는 온도보정을 수행했음에도 불구하고 미약하게 계절변화의 패턴을 보이고 있는데 온도보정에 사용된 온도 값은 지중온도가 아니라 지표온도이므로 실제 지중온도와 차이가 있기 때문이다. 정확한 분석을 위해서는 지표 및 지중온도센서를 함께 측정하여 해석하면 이러한 오차는 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 13은 계절변화에 대한 온도보상 알고리즘을 적용한 전기비저항 모니터링 탐사 결과이다. Fig. 13(a)는 2011년 4월 5일, Fig. 13(b)는 2011년 4월 28일, Fig. 13(c)는 2011년 7월 27일, 그리고 Fig. 13(d)는 2012년

5월 18일 총 4개의 모니터링 자료에 대한 전기비저항 결과 단면이다. 단위는 전기비저항 값인 $(\log)\Omega\cdot m$ 이다. Fig. 13의 좌측 결과는 온도보정 없이 수행한 경우이며, 우측은 온도보정을 수행한 결과이다. Fig. 13(a)~(d)의 결과는 연속성 있게 변화하고 있으나 Fig. 13(d)의 결과는 큰 차이를 보이고 있다. 만약 시간경과역산법을 적용했음에도 불구하고 온도보정을 수행하지 않고 단주기 전기비저항 모니터링 탐사로 Fig. 13(a)와 Fig. 13(d)의 결과를 획득하였다면 제체의 상태 평가에 오류를 범할 확률이 높게 된다는 것을 의미한다.

6. 장주기 모니터링 탐사에 의한 제체의 안전성 평가

전기비저항 모니터링 탐사는 제체의 전기비저항을

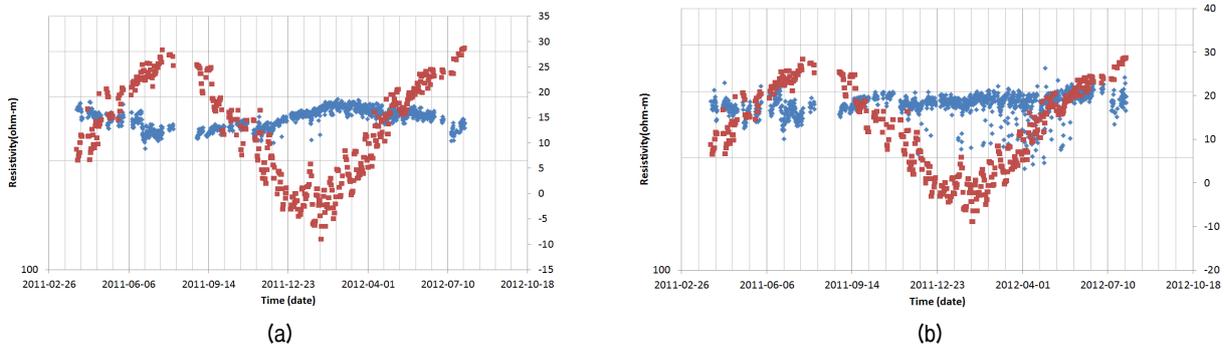


Fig. 12. Variation of the temperature versus resistivity for EL. 106 m by temperature correction before (a), and after (b), with time at 140 m, respectively

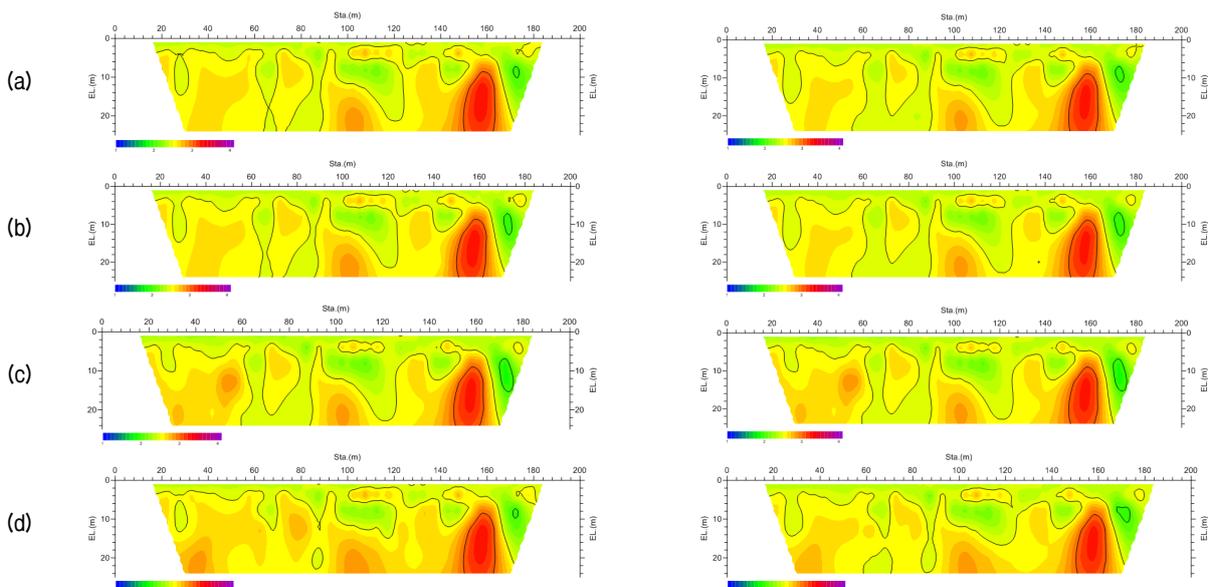


Fig. 13. Resistivity sections obtained from the time-lapse inversion (left column) and with temperature correction (right column) set measured at April 5, 2011 (a), April 28, 2011 (b), July 27, 2011 (c) and May 18, 2012 (d), respectively

결정하는 여러 가지 요인 중 시간에 따른 변화가 없다는 요소를 배제하고 해석을 할 수 있으므로, 제체의 공극률과 같이 제체의 누수와 직접적으로 연결되는 변수의 추정뿐만 아니라 누수구간의 위치나 확장에 대한 해석의 정확성도 높아지게 된다.

Archie(1942)의 경험식에서 공극율 ϕ 는

$$\phi = \left(\frac{\sigma}{c\sigma_w S^k} \right)^{1/m} \quad (6)$$

으로 정의할 수 있다. 여기서, m 은 고결지수, σ_w 는 공극수의 전기전도도, S^k 는 공극수에 대한 공극의 비, c 는 비례상수(Archie's constant)이다. 제체의 침윤선 하부의 지층은 공극수로 포화되어 있으며, 침윤선 상부는 공극수에 대한 공극의 비는 낮다. 따라서 제체의 전기비저항은 심도에 따라 변화한다고 볼 수 있으며, 건전한 제체의 경우에는 주변의 토사로 축조하였기 때문에 동일 심도에서는 유사한 값을 보일 것이다. 그러나 현장 자료를 획득하면 원지반의 영향 또는 이상구간으로 인하여 연구대상 댐과 같이 일정심도에서의 전기비저항 값은 높아지거나 낮아지는 특성을 보이게 된다.

Fig. 14는 식 (6)에 의해 전기비저항 값을 이용하여 산출된 공극율이다. 식 (6)의 공극율 산출을 위해서는 시추조사나 다양한 현장시험을 통해 고결지수, 공극수의 전기전도도, 비례상수 등을 측정하여야 한다. 그러나 제체의 시추조사는 현실적으로 위험과 어려움이 있어 Heritage Geophysics(2005) 에서 제시한 미고결 토사층에서의 고결지수 1.3, 공극수의 전기전도도 0.1, 비례상수는 0.88로 고정하였다. 조인기 등(2006)의 결과와의

차이점은 온도보상 알고리즘을 적용한 시간경과역산법으로 산출된 전기비저항 값이다.

Fig. 14에서 낮은 전기비저항 값의 영역에서 상대적으로 높은 공극율을 보여주고 있으며, 공백영역은 공극율이 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내고 있다. 이와 같은 해석은 여러 가지 가정 하에 전기비저항 값만을 이용하여 추정된 공극률이므로 절대적인 해석이 될 수 없다. 특히 전기비저항이 낮다고 해서 공극률이 항상 높다고 할 수 없으며, 또한 식 (6)에 의해 산정된 공극률이 높다고 해서 항상 누수가 일어나는 것은 아니라는 점이다. 전기비저항 모니터링 탐사에 의해 미세하게 변화하는 전기비저항 변화량을 이용하여 공극률의 변화양상을 파악하는 방법이 효과적일 수 있다.

일반적인 전기비저항 모니터링 탐사의 해석은 전기비저항 변화비를 이용하는데 제체 상태의 변화가 없을 경우에는 1로 수렴하고 제체내부 침식에 의해 누수현상이 발생하면 0에 수렴하는 양상을 보이게 된다. 만약 제체가 주변의 토취장에서 채취한 동일한 물성의 토사로 축조되었다면, 제체의 전기비저항은 Archie의 경험식에 의거하여 거의 공극수의 전기비저항에 좌우되며, 적어도 공극수의 전기비저항보다 낮은 전기비저항을 나타내기는 어렵다. 따라서 변화량이 작더라도 전기비저항이 낮을 경우에는 누수 위험구간으로 해석되는 것이 일반적이다.

$$n = \frac{\log \phi_2}{\log \phi_1} = \left(\frac{\log \frac{\sigma_2}{c\sigma_w S^k}}{\log \frac{\sigma_1}{c\sigma_w S^k}} \right) = \left(\frac{\log \frac{\rho_w}{c\rho_2 S^k}}{\log \frac{\sigma_1}{c\rho_1 S^k}} \right) \quad (7)$$

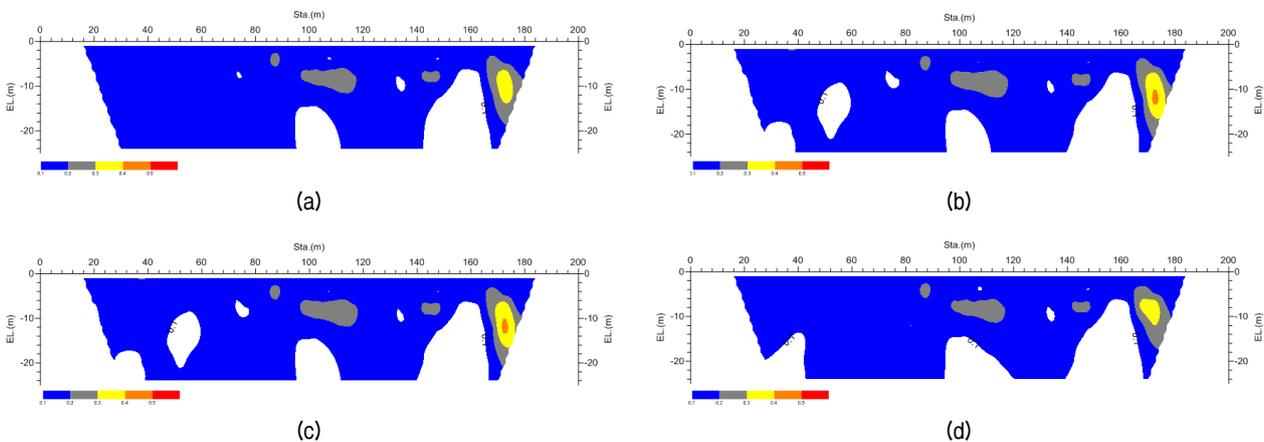


Fig. 14. Inverted porosity sections measured 4 different times when measurement data are Fig. 13 at April 5, 2011 (a), April 28, 2011 (b), July 27, 2011 (c) and May 18, 2012 (d), respectively

식 (7)은 식 (6)의 시간 t_1 에서의 공극률 ϕ_1 과 t_2 에서의 공극률 ϕ_2 의 비를 이용한 것으로 log scale 상에서 공극률의 비이다. 공극률의 변화가 없으면 1, 공극률이 증가하면 ($\phi_2 > \phi_1$) 작은 값을 나타내므로 제체의 안전도 지수(n)로 정의할 수 있다. ρ_w 는 공극수의 전기비저항이라 정의하면, t_1 에서의 공극률 ϕ_1 은 0~1.0의 범위의 값을 가지므로 n 이 증가하면 t_2 에서의 공극률 ϕ_2 는 감소하며, n 이 감소하면 증가한다는 것을 의미한다. 즉 안전도 지수 = $\phi_{\text{기준간극률}} / \phi_{\text{현재 측정 추정 간극률}}$ 으로 계산할 수 있게 된다. 본 연구에서 개발한 온도보상 알고리즘을 적용한 시간경과 역산법과 Cho et al.(2006)이 제시한 식 (7)을 이용하여 전기비저항 변화비를 산출하고 공극율을 산출할 수 있게 된다.

Fig. 15는 Fig. 13의 결과를 안전도 지수로 변환한 결과이다. 전반적으로 안전도 지수는 1보다 큰 값을 보이며 저비저항 이상대 우측에서 1보다 낮은 0.9의 값을 보이고 있다. 전기비저항 양상과는 좀 복잡한 결과를 나타내고 있는데 이는 식 (7)에 의한 방법이 모니터링 탐사에 의해 전기전도도 비만을 사용하기 때문에 전기비저항 값이 매우 낮은 구간도 상대적으로 높은 안전도 지수가 산출되었다.

제체의 공극율은 투수계수와 직접적으로 연관되어 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 전기비저항 값의 변화는 제체의 침투에 대한 안정성과 밀접한 관계를 갖고 있으며, 제체의 안전해석을 위해 침투에 대한 댐 및 제방의 안정성 평가는 크게 한계동수경사에 의한 piping 안정성

평가와 Justin의 한계유속에 의한 안정성 평가 방법으로 구분된다. 한계동수경사에 의한 방법은 제체의 공극율을 제체 전반에 대하여 일정한 상수값으로 간주하거나 가장 공극률이 큰 경우를 고려하므로, 전기비저항 모니터링 탐사에서 2차원의 공극률의 분포를 제시하는 방법에는 적합하지 않다. 오히려, 제체 및 기초의 토립자가 소류력에 의하여 입자가 밀려나가는 한계의 침투유속에 대한 안정을 검토하는 방법이 적합한 방법이라 할 수 있다. 즉, 공극율은 직접적으로 투수계수와 관련이 있으며, 동일 위치에서의 동수경사의 변화는 크지 않기 때문에 Darcy's 법칙에 의하여 $v = ki$ 형태에서 투수계수에 직접적인 영향을 받게 된다. 기준간극률에서의 속도가 한계속도의 안정요건을 만족한다고 가정하고, 안전율을 "2"로 가정하는 경우, 현재 측정된 간극률에 의한 속도가 기준간극률에 의한 속도의 2배 이하가 되도록 하여야 한다. 따라서 간극률의 제곱에 속도가 비례하게 되므로, 안전도지수 = $\phi_{\text{기준간극률}} / \phi_{\text{현재 측정 추정 간극률}}$ 의 값은 $1/\sqrt{2} \approx 0.7$ 이상이어야(약 30% 이하의 변화율이어야) 한다. 산출된 안전도 지수에 대한 정량적 기준이 미흡한 상태에서 제체의 안전성 여부를 현 상황에서 직접적으로 판단하기에는 다소 무리가 있을 수 있으나 제체의 안전도를 정량적으로 산출하기 위해서는 지속적으로 자료를 획득하고 분석하여야 한다. 향후 제체물성의 정보를 획득한다면 보다 합리적인 제체의 안정성 평가의 기준이 마련될 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

필댐을 모델로 구축된 장주기 전기비저항 모니터링 측정시스템 및 데이터베이스를 구축하여 전기비저항 모니터링 탐사를 수행하였다. 전기비저항 모니터링 탐사를 통해 계절별 변화를 살펴보고 전기비저항 변화에 대한 특성을 분석하고자 하였으며 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전기비저항 모니터링 탐사자료의 데이터베이스는 2011년 4월 1일부터 구축하였으며, 지난 16개월간의 측정자료를 바탕으로 댐 운영수위, 강수량, 온도 등의 정보와 전기비저항 값의 변화를 살펴보았다. 그 결과 댐 운영수위는 12~14%, 일 누적강수량은 최대 20%, 그리고 온도는 20%의 변화량을 보이는 것으로 나타났다.

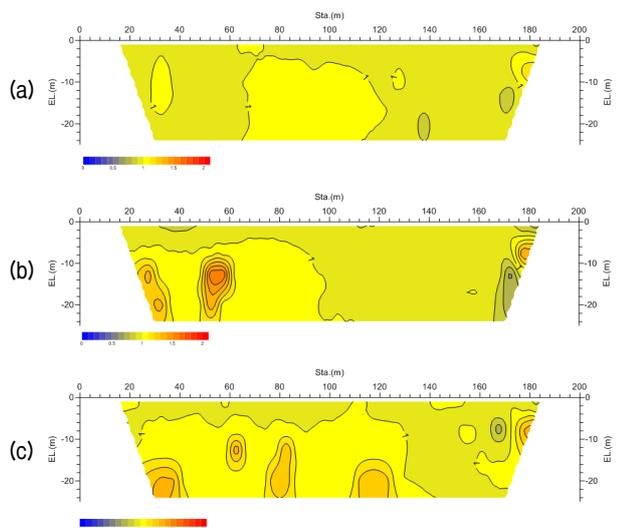


Fig. 15. Distribution of safety index calculated by equation (7) measured 4 different times for Fig. 14

- (2) 따라서 강수량을 제외하고 계절변화특성을 운영수위와 온도에 초점을 맞춰 온도보상 알고리즘을 개발하였다. 온도보상 알고리즘을 적용한 결과 연속성이 있는 전기비저항 값을 획득할 수 있었다.
- (3) 전기비저항과 운영수위, 강수량, 온도와의 관계는 복잡하게 연관되어 있다. 대상댐과 같이 운영수위의 변화가 작은 경우 전기비저항-운영수위의 변화량보다 전기비저항-온도와의 관계가 큰 변화량을 보이므로 온도보정은 장주기 모니터링 탐사 해석에 필수조건임을 확인할 수 있었다.
- (4) 한편, 전기비저항 모니터링 탐사에 의한 제체의 안정성 평가를 위해 선행연구에 의한 방법인 전기비저항 모니터링 탐사 결과로 부터 공극율을 산출하고 한계의 침투유속에 대한 안정을 검토하는 방법을 적용하여 안전도지수 $\phi_{\text{기준값}}/\phi_{\text{현재 측정 추정 값}}$ 의 값은 30%로 설정하여 제체의 안전지수 기준으로 추정하였다.
- (5) 본 연구결과 및 여러 연구자들에 의해 실시된 수리구조물에서의 전기비저항 모니터링 탐사는 측정주기가 일정하지 않아 정량적인 제체의 정보를 제공하기에는 다소 부족한 부분이 있다. 따라서 국내의 많은 수리구조물에서 다양한 물성정보와 계측정보를 수집하고 분석함으로써 향후 합리적인 기준이 마련될 수 있을 것이다. 따라서 본 논문은 앞으로 지속적인 보완, 개선을 통하여 효과적인 제체 안전 진단 기법으로 도입할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Archie, G. E. (1942), The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, 54-62.
2. Ahn, H. B. and Lim, H. D. (2010), Analysis of Electrical Resistivity Change in Piping Simulation of a Fill Dam, Journal of the Korean geotechnical society, Vol.26, No.4, pp.59-68.
3. Cho, I. K., Kang, H. J., Lee, B. H., Kim, B. H., Lee, S. S., Park, Y. K., and Lee, B. H. (2006), Safety Index Evaluation from Resistivity Monitoring Data for a Reservoir Dyke, Geophysical exploration, Vol.9, No.2, pp.155-162.
4. Chung, S. H., Kim, J. H., Yang, J. M., and Kim, Y. W. (1992), Delineation of water seepage in earth-fill embankments by electrical resistivity method, The journal of engineering geology, Vol.2, No.1, pp.47-57.
5. Ha, M. J., Cho, I. K., and Yong, H. H. (2012), Time-lapse Inversion of Electrical Resistivity Monitoring, Korean Society for Geosystem Engineering Symposium, 2012 May 3, pp.1-20.
6. Hayley, K., L. R. Bentley, M. Gharibi, and M. Nightingale (2007), Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring, Geophys. Res. Lett., 34, L18402, doi:10.1029/2007GL031124
7. Hayley, K., L. R. Bentley, and M. Gharibi (2009), Time-lapse electrical resistivity monitoring of salt-affected soil and groundwater, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 45, W07425.
8. Heesong Geotek (2010), Real-time Resistivity Monitoring System (Heesong Geotek Co., Ltd.).
9. Park, S. K. and, Kim, H. J. (1999), The State-of-the-Art of Geophysical Exploration Technology applied to Site Characterization in Civil Engineering and Construction in Japan, Conference 1999 Aug. 01, pp.1-20.
10. Park, S. K., Song, S. H., Choi, J. H., Choi, K. B., and Lee, B. H. (2002), Applicability of Geophysical Prospecting for water leakage detection in water utilization facilities, Symposium, 2002 Sept. 01, pp.179-195.
11. Sam Johansson (1997), Seepage Monitoring in Embankment Dams, ISBN 91-7170-792-1.
12. Schlumberger (1972), Log Interpretation: V.I. Principles: New York (Schlumberger Ltd.)
13. Song, S. H., Yong, H. H., An, J. K., and Kim, K. P. (2003), Application of Electrical and Small-Loop EM survey to the Identification of the Leachate at a Waste Landfill in Jeju Island Geophysical exploration, Vol.6, No.3, pp.143-152.

(접수일자 2013. 3. 27, 심사완료일 2013. 5. 8)