

복통을 갖는 저수지의 결함 조사 및 보수보강 방안

Methodologies for Survey and Retrofit of Small Dams Pierced by Diversion Tunnel

장 봉 석* 임 은 상** 오 병 현***
Jang, Bong Seok Im, Eun Sang Oh, Byung Hyun

Abstract

There are almost 18,000 dams including about 1,200 large dams in Korea. The large dams are well operated and maintained by KWATER(Korea Water Resource Corporation), KRC(Korea Rural Community & Agriculture Corporation) and KHNP(Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.). Several research reports concern with the safety of these large dams are presented but there is no paper concerned with small dams which has diversion tunnel through the dam body. The purpose of this study is to show the common defects of small dams according to various cases of degradation of dams and the repair and retrofit methods which applied to the damaged dams. And this study performed resistivity survey to evaluate the effect of retrofitting dam. Also, this study tries to present the solution which concerned with these common defects in maintenance and design steps.

요 지

국내에는 약 18,000여개의 댐이 있는 것으로 보고되고 있다. 이 중에서 대댐으로 분류되는 1,200여 개의 대댐은 비교적 양호하게 운영 관리되고 있으나, 지자체 등에서 관리하는 소규모의 댐들은 대부분 제체를 관통하는 복통을 갖고 있으며, 제도적 장치의 미비와 전문 인력의 부족으로 체계적인 유지관리가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구에서는 소규모 댐들에서 자주 발생하는 결함의 유형에 대해서 고찰하고, 결함의 보수보강을 통하여 소규모 댐의 안전을 확보할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 또한, 전기비저항 탐사를 통하여 결함의 진행정도를 파악하고, 보수보강 이후의 보수보강 효과를 판정하는 방법론을 제시하고자 하였다.

Keywords : Diversion tunnel, Small dam, Resistivity survey

핵심 용어 : 복통, 댐, 전기비저항

* 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

** 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

*** 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원

E-mail : concrete@kwater.or.kr 042-870-7607

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

국내에 운영관리 되고 있는 댐은 18,000 여개에 달하며, 댐 높이 15m 이상의 대댐은 1,200 여개이다. 국내의 주요한 대댐은 한국수자원공사, 한국농촌공사, 한국수력원자력주식회사 등에서 체계적으로 운영 관리하고 있다. 국내 대댐에서 발생한 구조적 안전상의 문제점, 유지관리 차원의 문제점 및 댐체의 보수보강 등에 대하여 몇몇 연구들을 통하여 보고된 바 있다. 이에 비하여 작은 규모의 댐(저수지)은 대부분 지방자치단체에서 관리 책임을 맡고 있으며 각 지방자치단체에서는 전문 인력의 부족으로 관리실태가 미흡한 것이 현실이다. 국민의 인명과 재산을 보호하기 위하여, 이러한 문제점에 대비하여 정부에서도 제도적 준비를 해오고 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 대댐에 비하여 상대적으로 안전관리의 사각지대에 놓여있다고 할 수 있는 소규모 댐(저수지)에 발생할 수 있는 문제점들을 실제 사례를 중심으로 제시하고, 이러한 문제점들을 보수보강을 통하여 안전성을 확보한 방법 그리고 향후 유사한 문제점들이 발생하지 않도록 하기 위한 설계시 고려 사항을 제시하고자 하였다.

2. 복통을 갖는 저수지의 결함 유형

2.1 결함 유형 및 조사⁽¹⁾⁽³⁾

복통을 갖는 저수지의 전형적인 단면 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 복통을 갖는 저수지는 대부분의 대댐의 시공시에 도입하고 있는 가배수 터널을 댐체의 외부에 설치하지 않고, 댐체 내부에 마제형 또는 박스형의 터널을 설치하여 댐의 축조시에는 가배수 터널의 기능으로 사용하고 완공 후에는 취수용 파이프 등을 설치하여 활용하는 것이 일반적이다. 이러한 형태는 국내의 중소규모 댐에서 흔하게 볼 수 있으며 가끔 규모가 작은 대댐에서 적용된 사례도 있다.

이러한 형태의 저수지에서 흔히 발생하고 있는 문제점 중에서 댐체의 구조적 안전과 직접적으로 관련되는

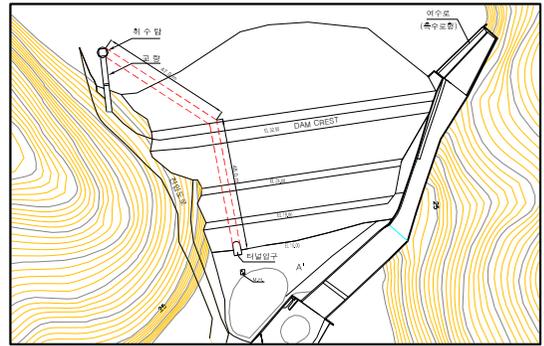


Fig. 1 복통을 갖는 저수지의 평면도

것은, 복통 콘크리트의 조인트부 또는 복통 콘크리트의 열화부로 누수시 코어재료의 유실로 일어나는 댐체 정상부의 함몰 공동(sink hole) 현상이다. 함몰 공동은 흙댐의 주요 파괴 징후들 중에 한 가지로서 흙댐의 안전관리 부분에서 매우 중요한 결함 항목이다. 이러한 문제점은 주로 댐의 안전과 직결되는 사항으로 전국의 소규모 댐들에서 공통적으로 발생하고 있을 것으로 추정된다.(Table 1 및 Fig. 2~4)

Table 1 복통을 갖는 저수지의 주요 결함 유형

	발생부위 및 원인	댐 안전도 관련중요도
함몰 공동 (sink hole)	내부 토사 유실로 인하여 댐체 정상부에 함몰현상 발생	◎
코어재 유출	복통의 조인트, 균열 또는 열화부위에서 누수가 심각해져서 발생	◎
여수로 벽체 전단 균열	댐체와 접한 여수로 벽체에서 주로 발생, 연결 바닥슬래브의 침하 또는 부압의 작용으로 추정	◎
물갯선 변형	댐체 내부의 토사 유실 또는 댐체의 변형으로 인한 물갯선의 이상 변형	○
여수로 벽체 누수	댐체와 접한 여수로벽체의 시공불량 또는 열화로 인한 공동, 재료 분리 부분으로 누수 다량발생	○
여수로 벽체 균열	여수로 벽체에서 시공불량 또는 신축이음 미설치로 인하여 발생	○
여수로 바닥 마모	얇은 방류로 인한 마모, 박리, 박락 현상이 일반적임	△
정수지 바닥 쇄굴	정수지 바닥 및 하류 바닥의 쇄굴, 마모에 의한 철근 노출	△

◎ : 매우 중요, ○ : 중요, △ : 보통, ×:직접 관련 없음



Fig. 2 댐체 정상부 함몰 상태



Fig. 4 복통 내부 코어재료 유출 상태



Fig. 3 복통 천정부의 누수 상태

위에서 설명한 현상이 나타난 저수지에 대하여 원 인규명을 위한 각종 조사(전기비저항 탐사, 시추 조사, 현장 원위치 실험 및 실내 실험, 정밀육안 검사, 비 파괴 시험 등)를 실시하여 정확한 원인을 파악하였다.

2.2 전기비저항 조사 결과⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

본 연구의 대상은 복통식 구조를 갖고 있는 제체와 가배수터널 균열로의 토사유출 및 정상부의 함몰 형상은 Fig. 2~4와 같으며, 복통의 균열을 통하여 차수 역할을 하는 코어부의 세립분이 유출된 상태였고 그 유출정도가 상당히 진행된 시점에서 정상부에 함몰이 발생한 상태였으며 이에 대한 대책이 시급한 상황이었다. 이러한 댐체 내부에 발생한 결함을 알아보기 위하여 주로 이용되는 일차적인 진단방법이 전기비저항 탐

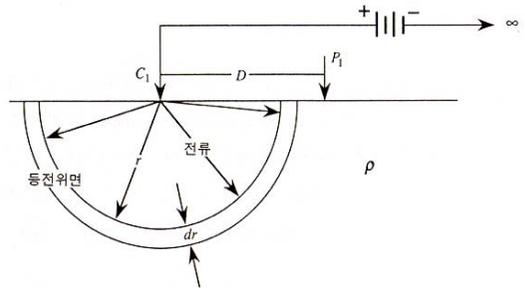


Fig. 5 균일 매질에서의 전위차

사법이며, 이 전기비저항 탐사법은 전류흐름의 쉽고 어려운 정도인 전기비저항이라는 물성치를 이용하여 지반의 구조를 알아보기 위한 탐사법이며 그 원리는 다음과 같다. 균일한 매질에 Fig. 5와 같이 하나의 전류전극 C1이 존재하면 전류는 사방으로 전달되어지고 이에 직각인 타원의 등전위면이 형성되어 전위차(dV)을 아래의 식(1)과 같이 표현 할 수 있다. 따라서 P1점에서의 전위차(V_{p1})은 식(2)와 산정할 수 있다.

$$dV = i(R) = i(\rho \frac{l}{A}) = i(\rho \frac{dr}{2\pi r^2}) \quad (1)$$

$$V_{p1} = \int_D^\infty dV = \frac{i\rho}{2\pi r^2} \int_D^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{i\rho}{2\pi D} \quad (2)$$

여기서, i 는 전류, R 은 저항, ρ 는 비저항, A 는 전류진행 단면적이다. 또한, Fig. 6에서처럼 전류전극과 전위전극이 배열돼 있는 경우에는 아래와 같이 비저항

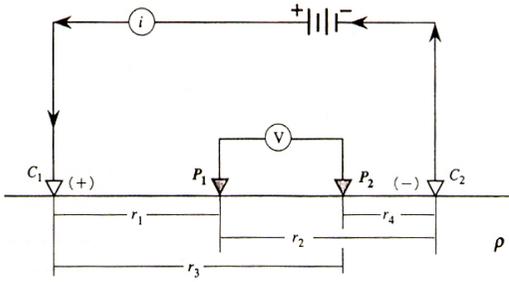


Fig. 6 배열에서의 전위차

을 산정할 수 있다. 이 배열에서의 전위차는 (+)(-)인 두 개의 전류전극이 존재하기 때문에 식(3)과 산정할 수 있고,

$$V_{p_1} = \frac{i\rho}{2\pi r_1} - \frac{i\rho}{2\pi r_2}, \quad V_{p_2} = \frac{i\rho}{2\pi r_3} - \frac{i\rho}{2\pi r_4} \quad (3)$$

이 두 전류전극의 전위차는,

$$\Delta V = V_{p_1} - V_{p_2} = \left(\frac{i\rho}{2\pi r_1} - \frac{i\rho}{2\pi r_2} \right) - \left(\frac{i\rho}{2\pi r_3} - \frac{i\rho}{2\pi r_4} \right) \quad (4)$$

이고 이로부터 비저항 ρ 를 계산하면 식(5)가 된다.

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{i} \left(\frac{1}{1/r_1 - 1/r_2 - 1/r_3 + 1/r_4} \right) = G \frac{\Delta V}{i} \quad (5)$$



Fig. 7 탐사측선 및 시추위치

여기서, G 는 전극간격과 전극배열에 의하여 결정되는 거리계수이고, 쌍극자·웨너·슬럼버저 등의 배열에 따라서 이 거리계수가 다르게 된다. 즉, 식(5)에서 산정되는 비저항은 배열에 따라서 그리고 측정 장소에 따라서 그 전기적 물성이 다르기 때문에 이를 겉보기 비저항이라고 부른다. 다시 말하면 이 겉보기 비저항은 지반고유의 물성치가 아니라 측정방법, 전극배열, 전극간격, 전극계의 위치 등에 의존하기 때문에 이 겉보기 비저항의 변화로부터 지하구조물을 추정하는 탐사법이라고 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 체체의 손상정도를 알아보기 위하여 Fig. 7에서와 같이 4개 측선에 대한 전기비저항 탐사와 3개소의 시추조사를 수행하였으며 시추조사결과 Table 2와 같은 함몰부분을 제외하면 비교적 양호한 토질결과를 얻었다.

Table 2 시추조사 결과

시추위치	심도 (m)	지층상태	구성성분	특기사항
BH-1 (정상부 함몰구간의 좌측 15m지점)	0.0~5.0	표토 및 필터층	자갈 및 모래섞인 실트질 점토	N치: 1.5m-3/30 3.0m-35/30
	5.0~24.0	코어존	점토	N치: 6.0m-24/30 7.5m-18/30
	24.0~27.5	하부층	자갈 및 모래섞인 점토	N치: 27.0m-22/30
BH-2 (정상부 함몰구간의 좌측 2m지점)	0.0~7.0	표층 및 필터층	자갈 및 모래섞인 실트질 점토	N치: 1.5m-29/30 3.0m-11/30
	7.0~17.0	코어존	점토	N치: 15.0m-50/23 16.5m-14/30
BH-3 (정상부 함몰구간의 우측 6m지점)	0.0~7.0	표층 및 필터층	자갈 및 모래섞인 점토	N치: 1.5m-10/30 6.0m-13/30
	7.0~18.0	코어존	점토	N치: 7.5m-14/30
	18.0~	기반암		N치: 15.0m-16/30 16.5m-13/30

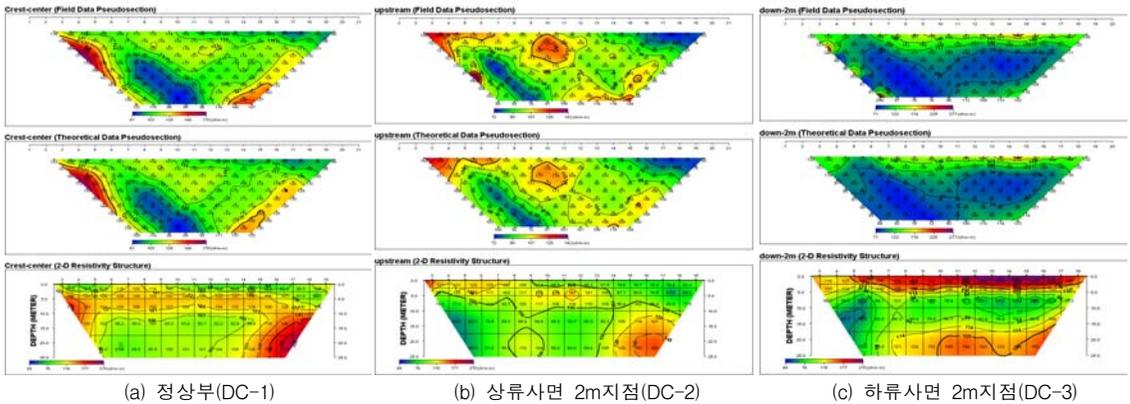


Fig. 8 그라우팅 보강 전의 전기비저항 역산결과(보수·보강 전)

본 연구에서는 2차원의 전기비저항 이미지를 획득하기 위하여 쌍극자 배열의 전기비저항 탐사가 수행되었으며, 그라우팅 보강 전의 역산결과를 Fig. 8에 나타낸 것으로서 이 역산과정은 일반적으로 3개의 그림으로 나타내는데, 겉보기비저항 분포 모델의 이론치(중)가 현장에서 측정한 측측치(상)에 일치하도록 반복적으로 수정해 가는 방법으로 전기비저항 분포 모델(하)을 산출한다.

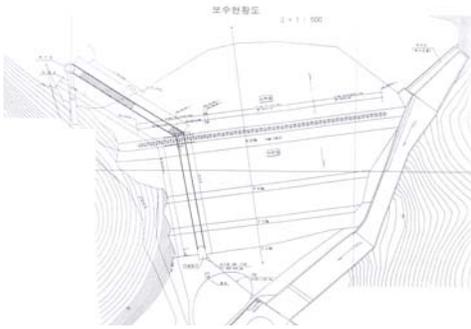
Fig. 8에서 각각의 전기비저항 역산결과에서 나타난 것처럼 대상체에서 조사한 전기비저항 분포의 대부분이 수평 방향으로로는 비교적 일정한 양상을 보이며, 깊이 방향으로만 일정하게 변하는 양상을 보이고 있다. 단, 정상부와 상류사면에서 측정된 자료의 경우, 통관이 지나는 위치의 직상부에서 서로 다른 양상의 분포가 보이고 있다. 즉, 정상부 측선의 경우 통관 직상부에서 낮은 비저항이 통관의 위치에서 관찰되고 그 윗부분에서는 약한 고비저항이 관찰되고 있으나, 하류사면의 경우 통관 부근에서 높은 비저항이 관찰되고 그 윗부분에서도 마찬가지로 높은 비저항이 관찰되고 있다. 이러한 현상은 통관 내부를 채우고 있는 물과 직접적인 관련이 된 것으로 보인다. 즉, 정상부의 측선을 측정하던 당시에, 통관은 물로 거의 채워져 있는 상태였으나, 하류사면의 측선이 측정될 당시에는 통관 내부 조사를 위해 펌프를 통해 채워져 있던 물을 빼놓은 상태였다. 이로 인해, 통관 내부 터널이 물로 채워진 당시에는 저비저항대로 나타났고 물이 배출되고 나

서 고비저항대로 변한 것으로 보인다. 그러나 통관의 윗부분에서는 이와 상관없이 계속해서 높은 비저항대를 보이고 있는데, 이는 저수위가 비교적 낮은 상태이기 때문에 세립분이 유출된 코어부가 포화되어있지 않은 상태에 있기 때문으로 판단된다. 또한 상류 및 하류사면의 우안부에서 상대적으로 낮은 비저항대가 나타나고 있으며 이는 이 부분 역시 연약대가 존재한다는 것을 의미한다고 하겠다.

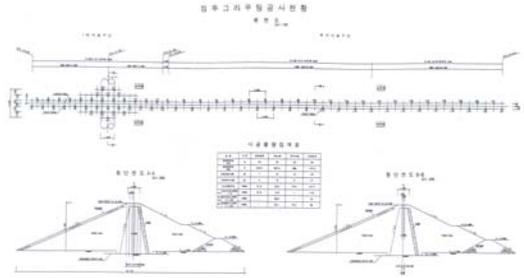
2.3 보수보강 대책

이러한 조사를 종합하여 판단한 결과, 대상 댐의 당시 상태는 가배수터널에 다수의 조인트와 균열부로 누수가 발생하고 있었으며 이러한 터널내 누수현상은 그 상부 체체내의 코어존 및 사력존 재료를 유실시켰고 체체내 공동현상이 진행됨에 따라 체체 정부에 함몰현상이 발생되었다. 중심코어형 사력댐에서의 코어재 유실은 차수기능 상실 및 과도한 누수발생으로 진행되어 댐의 붕괴까지 우려되는 것이 일반적인 현상이다.6

따라서, 함몰현상이 발생한 댐체와 복통의 교차지점을 중심으로 댐체의 충전 및 차수대책의 시행(침투그라우팅을 통한 보강)하였으며 복통에서 누수가 발생하고 있는 조인트 및 균열부 역시 터널의 내·외부에 대하여 보수보강(배면 차수, 습식균열 보수, 표면처리 등)을 실시하여 댐체의 안전성을 확보하도록 하였다.(Fig. 9)



(a) 그라우팅 보강 현황도



(b) 그라우팅 보강 계획도

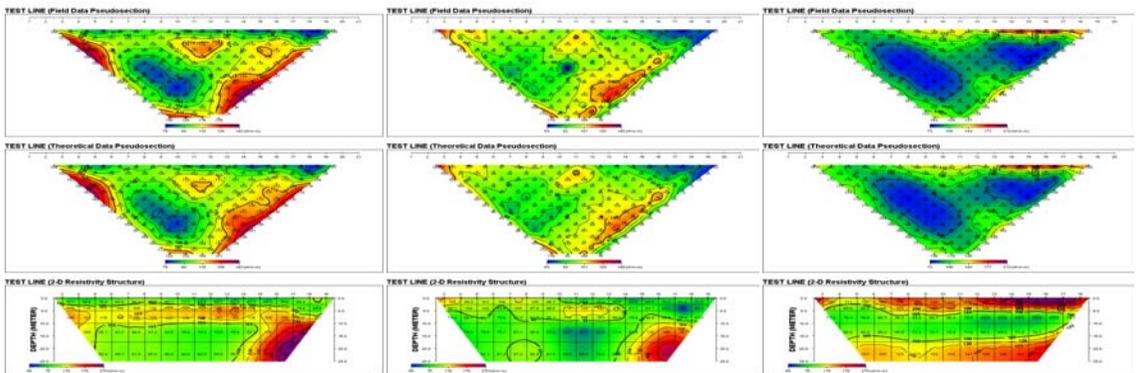
Fig. 9 그라우팅 보수·보강 실시 계획

3. 보수보강 및 효과 검증

차수성 확보를 위한 제체의 보수·보강공법의 선정은 보수·보강공법의 차수효과, 현장상황, 시공성, 안정성, 경제성 및 시공실적 등과 함께 코어존의 함몰현상을 고려하여 Fig. 9와 같이 그라우팅에 의한 보수·보강 계획을 수립하였다.

보수·보강 후의 탐사결과를 살펴보면, Fig. 10(a)에 보는 것과 같이 측점 8~10 부근의 깊이 10m에서 비교적 일정한 비저항 값을 보이고 있으며, 다소 낮은 비저항을 나타내면서 연속적으로 변하고 있는 것을 볼 수가 있다. 또한 Fig. 10(b)에서 보는 것처럼 상류사면 2m 부근의 전기비저항 역산결과, 통관이 위치하는

것으로 추정되는 지점에서 주변보다 높은 비저항 (100~110 Ohm-m)을 보이고, 통관 부근에서는 70~80 Ohm-m 의 비저항이 보이고 있으며 깊이 10m 이하의 중심부에서는 50 Ohm-m 정도의 비저항이 고르게 나타나고 있다. 이와 같은 특성을 보강 이전의 비저항 자료와 비교하면, Fig. 10(b)상의 왼편(측점 번호 3~6번) 부근의 저 비저항대가 보강 이후 상당히 개선 된 것을 알 수 있다. 여기서 주목해야 할 것은 단순히 저비저항대가 보강 이후에 비저항 값이 상승한 것이 아니라, 주변과 비슷한 비저항 값을 보인다는 것이다. 이는 보강 이전에 저비저항 값을 보이던 우안부와의 접합부(측점 3~6번)가 보강을 통해 주변과 비슷한 비저항 특성을 보이도록 바뀌었으며,



(a) 정상부(DC-1)

(b) 상류사면 2m지점(DC-2)

(c) 하류사면 2m지점(DC-3)

Fig 10. 그라우팅 보강 후의 전기비저항 역산결과(보수·보강 후)

이는 보강에 따른 효과인 것으로 파악된다. 또한 보강 이후의 전기비저항 단면에서 10m 이하 깊이에서 전반적으로 낮은 비저항 값을 보이는 것은 보강 이전에 비해 수위가 3m 이상 상승한 것에 의한 효과로 보인다. 수위 상승에 의해 댐체의 코어 부분이 젖은 상태이기 때문에 비교적 낮은 비저항대가 나타났지만, 이는 지극히 정상적인 분포로서 중앙부에 비해 통관 주변에서 약간 더 높은 비저항 분포를 보이는 것은 상대적으로 이 부분에 그라우팅 재료가 더 스며들어 비저항 값의 상승을 가져온 것으로 보인다. 즉, 보강 이전에 통관 주변에서 코어부의 손상 상태가 심한 것으로 나타났는데 이로 인해 통관 주변에 더 많은 그라우팅 재료가 침투되어 상대적으로 건전한 중심부분 보다 답수 후의 비저항이 다소 높게 나타나는 것으로 보인다.

결론적으로 상류 2m 부근의 쌍극자 자료로부터 그라우팅에 의한 보강이 순조롭게 이루어졌으며, 댐체가 지극히 정상적인 비저항 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 수평적으로 고르게 비저항 분포가 나타나고 있으며, 보강 이전의 비저항 단면에서 복잡한 양상을 보이던 통관 주변의 비저항 분포가 물리적으로 이해할 수 있는 양호한 분포를 보이고 있다.

상류사면과 대칭이 되도록 하류사면 2m 부근에서 전기비저항 탐사를 수행하였고 그 결과를 Fig. 8(c)에 보였다. 하류 사면의 자료는 제체의 3차원 효과로 인하여 4 저수부의 수위에 극명하게 영향을 받는 상류 사면 자료와 달리, 비교적 정확하게 제체 하부의 효과를 나타내므로 제체 안정성 평가에 있어 매우 유용하다고 하겠다. 즉, 7번 측정 부근 깊이 10m 지점에서의 비저항 변화가 보강 전후를 차이로 극명하게 나타나고 있다. 보강 전에는 높게 나타나던 비저항 값의 분포가 보강 이후 전 영역에서 고르게 분포하고 있으며, 특히 7번 측정 부근에서 비저항 값이 보강 전처럼 높게 나타나지 않고 연속적으로 나타나고 있다.

4. 복통을 갖는 저수지설계의 고려사항

앞에서 설명한 바와 같이 복통을 갖는 저수지에서 발생할 수 있는 결함 유형과 이에 대한 대책 방안을 살펴보면, 여수로의 열화, 마모 등에 대한 사항은 큰

크리트 내구성 그리고 시공시 콘크리트 품질 확보 등의 비교적 쉽게 접근 가능한 문제점들과 복통의 누수로 인한 내부 공동 발생과 같이 근본적으로 설계 개념을 바꾸어 대처해야 하는 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 복통을 갖는 저수지에서 댐체의 안전과 직접적으로 관련된 문제의 원인이 되는 복통의 누수 문제를 근본적으로 예방하기 위하여 설계시에 반드시 반영해야 할 사항으로 다음의 방법들을 제안한다.

- 1) 복통 콘크리트의 강도 및 내구성 기준 도입
- 2) 복통 조인트의 위치를 댐체 코어부에서 이격 설치
- 3) 복통 설치 후 외부에서 방수 실시 후 댐체 축조

5. 결론

본 연구에서는 실제 사례를 중심으로 복통을 갖는 저수지들에 발생하는 일반적인 결함유형을 제시하고, 이에 대한 조사방법, 보수보강 방안, 보수보강 효과 판정 그리고 향후 설계시 중점 고려사항 등을 제시하였다.

- 1) 탐사 당시의 상황(수위, 날씨, 계절, 현장 조건)과 보수·보강 지역에 대한 정확한 정보 등을 충실히 고려한다면, 전기비저항 탐사는 제체의 연약대에 대한 보수·보강효과를 간접적으로 확인하는 방법으로 매우 경제적이고 효율적인 방법이다.
- 2) 고찰한 제체의 보수·보강 효과에 대한 물리탐사 방법의 해석 결과, 보강 효과를 비교적 정확하게 평가할 수 있는 것으로 분석되었으며, 제체 역시 제 기능을 회복한 것으로 확인되었다. 향후, 수위에 따른 지속적인 전기비저항 탐사를 통하여 보다 안정적인 제체의 모니터링이 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 향후 신규 저수지의 설계시에 본 연구에서 제시하는 방법들을 반영하면 저수지의 안전성을 장기적으로 확보할 수 있을 것으로 기대한다.
- 4) 또한, 복통을 갖는 저수지들에서 이러한 결함들이 많이 발생되어 있는 것으로 추정되므로 각 관리책임 기관에서 이에 대한 정밀 조사를 실시하여 댐 안전성확보를 위하여 적절한 보수보강 대책을 수립할 것을 제안한다.

참고문헌

1. 한국수자원공사, “○○저수지 정밀안전진단 및 실시설계보고서”, 2005.
2. 임은상, 오석훈, 김영경, 오병현, “그라우팅에 의한 댐체의 보강효과 평가를 위한 전기비저항탐사”, 지구물리, 9권 4호, 2006, pp. 455-462.
3. 장봉석, 오병현, 김기영, 박한규, “복통을 갖는 저수지의 결함유형”, 한국구조물진단학회 봄 학술발표회 논문집, 2006, pp. 559-562.
4. 임은상, 김기영, 김범주, 조성은, “제체 그라우팅보강 전·후의 전기비저항 이미지 분석에 관한 연구”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2006, pp. 1292-1295.
5. 오석훈, 김형수, “필댐의 3차원 기하효과에 따른 전기비저항 왜곡 효과 분석”, 지구물리, 제8권 4호, 2005, pp. 211-214.
6. Hee-Dae Lim, Kyu-Hwan Lee, Jae-Yuon Lee and Byung-Hyun Oh, “Leakage Investigations, Remedical Works and Its Effects on Seepage Control of Unmun Dam”, Proceeding of Workshop on Dam Safety Problems and Solutions-Sharing Experiences, ICOLD 72nd Annual Meeting, May 16-22, 2004, pp. 225-243.

(접수일자 : 2007년 2월 8일)