

계측시스템에 의한 저수지 제체의 안정성 평가

Safety Evaluations of Reservoir Embankment by Instrument System

김미현* · 이달원**,[†]

Kim, Mi Hyun* · Lee, Dal Won**,[†]

ABSTRACT

This study analyzed data on the pore water pressure, the ground water level, the horizontal displacement and the resistivity monitoring from instrument system, which is established to evaluate the safety in reservoirs. The pore water pressure in the embankment ranged from 0.035~1.116kg/cm². The seepage that piping showed, as well as the leakage from the reservoirs are acceptable for the safety management of the reservoir. The maximum horizontal displacement and direction analyzed from the measured inclinometer data gives us very effective information to evaluate the safety in reservoirs. The resistivity monitoring technique, which is obtained on the reservoir crest, is an efficient tool to detect leakage zone.

The safety index (SI) was predicted by the resistivity monitoring, and was evaluated to have a safety level of 0.8-1.0 at all reservoirs. Safety evaluations of reservoir through instrument systems are effective when studying the embankment, when the results of the instrument system have been analyzed compositively.

Keywords: Reservoir; instrument system; resistivity; reservoir; safety index

1. 서 론

농업기반시설물의 대부분을 차지하고 있는 저수지는 대부분 필댐으로 이루어져 있으나, 콘크리트댐에 비하여 재료자체의 공학적 성질이 다양하며 불균질하여 그 거동을 예측하기가 어렵다.

농업기반시설물은 '08년 현재 전국에 저수지 17,679개소, 양배수장 7,178개소, 방조제 1,593개소 등이 산재해 있고, 1945년 이전에 9,380개소 (53%), '46~'71년은 6,203개소 (35.1%)가 설치되어 30년 이상된 저수지가 80%이상에 달하고 있다.⁷⁾

최근 기상이변과 이상강우 등에 의한 자연재해가 급증하고

시설물물의 안전에 대한 관심이 고조되어 한국농어촌공사에서는 1995년부터 2007년까지 2,450개소의 시설물에 대하여 정밀안전진단을 실시하고 있고, 2003년부터 54개소의 농업용저수지에 간극수압계, 지하수위계, 지중경사계, 전기비저항탐사계 등의 계측시스템을 구축하고 지속적으로 현장 계측을 시행하고 있다.^{7),8)}

농업기반시설 정밀안전진단시 제체의 안전성 평가는 자연재해대책법에서 규정한 총저수량 50만 m³ 이상, 높이 15m 이상의 저수지와 저수용량 2,000만 m³ 이상의 저수지, 국가관리 방조제 시설물에 대하여 내진검토를 실시하고 있다. 또한 농업기반시설관리규정의 2종 시설 중 사면안정해석이 필요하다고 판단되는 저수지에 대하여 시굴 및 시추조사를 시행하여 토질시험성과를 이용한 사면안정해석을 실시한다.^{6),8),9),12)}

그러나 시설물이 안전진단 당시는 양호한 상태로 평가되더라도 이후의 유지관리 상태 및 외적 요인 등에 의해 잔존해 있는 위험요소가 노출되어 제체의 안전에 영향을 미칠 수 있다.

농업기반시설물의 정밀안전진단이 실시되면서 안정성에 대한 관심을 가지게 되었고 계측자로 관리 및 분석의 중요성이 부각되면서 이에 대한 심도 있는 연구가 수행되어지고 있다.

* 한국농어촌공사 기술본부

** 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목전공

[†] Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5793

Fax: +82-42-821-8877

E-mail address: dwlee@cnu.ac.kr

2009년 8월 31일 투고

2009년 11월 3일 심사완료

2009년 11월 6일 게재확정

국내의 경우, 소양강댐 (1973년)을 시작으로 많은 양의 계측기가 매설되어 운영되어 계측기의 특성 및 댐 거동 분석에 관한 연구가 진행되었고, 국토해양부, 수자원 공사, 한국전력공사, 한국농어촌공사 등에서 댐 설계기준, 댐 안전유지관리 평가지침, 농업생산기반정비사업계획 설계기준, 정밀안전진단 실무지침 등이 제정되어 안전성 평가에 적용하도록 하고 있다. 특히, 국내에서 수행된 저수지 제체의 안전진단에 주로 적용하는 공법은 Archie 의 경험식을 기본이론으로 제체 누수가능성을 판단하기 위한 전기비저항 물리탐사기법이 널리 이용되고 있다.⁴⁾

국외의 경우는 댐 안정성 평가 기술 관련 현황 중 미국은 대댐학회에서 재난유발가능성이 있는 대형 댐의 안정성을 조사하고 불안정한 상태의 댐에 대하여 안전도 평가지침에 의해 체계적인 정밀조사와 안전진단을 수행하고 있고, 댐의 운영 및 안전관리를 위한 법률이 제정되어 운영되고 있다. 호주의 경우에도 댐의 규모별로 분류하고 댐 안전성 법률에 의해 위험도를 평가 관리하고 있고, 유럽의 경우에도 주기적인 안전진단을 지침서에 의해 실시하고 있으며, 일본에서는 하천법 및 댐 유지관리에 필요한 규정들을 명시되어 운영되고 있다.

그러나 우리나라의 농업기반 시설물은 준공연도가 오래되어 시공당시의 계측기는 노후되었거나 파손되어 현재 대부분의 시설에서 유지되고 있지 않은 것이 현실이다. 또한 계측기의 특성과 상관관계 및 거동 분석 결과 등의 미활용 등으로 계측기들이 장기적인 안전성을 확보하지 못한 채 지속적인 계측이 이루어지지 않고 있고, 계측된 자료 또한 효과적으로 이용되지 못하고 있는 실정이다.^{9),10),11),13)}

따라서 농업기반시설 중 주요시설물에 계측기를 설치하여 장기계측을 실시하고 위험요소를 조기에 발견함으로써 재해를 사전에 예방하고 시설물의 안전성 확보와 효율적인 유지관리를 도모하여야 한다.

본 연구에서는 농업용 저수지의 재해예방 및 안전관리를 위하여 계측시스템을 구축하고, 간극수압, 지하수위, 지중변위 및 전기비저항탐사 등의 계측자료와 수치해석 결과를 비교분석하여 저수지 제체의 안정성을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 분석대상 지구

재해예방을 위한 계측시스템은 저수량 50만톤 이상의 1종 시설물 중에서 제고 15 m 이상이며 저수량 100만톤 이상의 시설물 중 재해발생시 대량의 인명 및 재산피해가 예상되거나 정밀안전진단 실시 후 기간이 오래 경과된 지구 중에서 우선순위로 선정하였고, 현재 1종 저수지 804개소 중 2003년~2007

Table 1 A summary of 4 reservoirs

Name	Built (yr)	Height (m)	Length (m)	Drainage Area (ha)	Irrigation area (ha)	Total capacity (ha-m)
Keum Kwang (Gyeongido)	1961	19.5	249.0	4,830	2,134	1,059
Kyeong Po (Kangwondo)	1972	17.7	134.0	1,180	205	142.8
Hwa San (Chungbuk)	1959	18.8	169.0	980	407	189.0
Jin Rye (Gyeongnam)	1978	36.0	253.0	450	221	115.5

Name	Classification	Piezometer location	Ground water indicator location	Inclinometer location	Resistivity monitoring (m)
Keum Kwang	Earth fill dam	GL-21m	GL-21m	GL-22m	210
Kyeong Po	Earth fill dam	GL-19.5m	GL-19.5m	GL-23m	90
Hwa San	Earth fill dam	GL-20m	GL-21m	GL-21.2m	250
Jin Rye	Earth fill dam	GL-34m	GL-32m	GL-37m	230

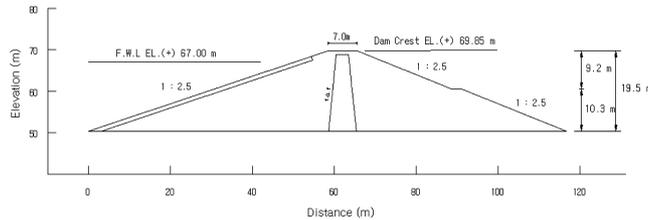


Fig. 1 A cross sections of Keum Kwang reservoir

년까지 54개소의 저수지에 대하여 계측시스템을 설치하였다.

계측시스템은 저수지 제체 전구간에 전기비저항 탐사선을 매설하고 간극수압계, 지하수위계 및 지중경사계를 각각 1조씩 설치 후 일정간격으로 연간 3~4회 측정하였다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 2003년에 설치한 10개의 저수지 중 다수의 계측자료를 보유하고 있고 계측치의 변화가 발생하여 분석이 필요한 4개의 저수지를 대상으로 계측자료와 수치해석 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 1은 4개의 저수지 중 경기도 안성시 금광면에 위치한 금광저수지로 1961년에 준공되어 농업기반 1종 시설물로서 주 수원공으로 40년 이상 경과한 중심코어형 필댐이다. 제고는 19.5 m이고, 제장은 249.0 m, 유역면적은 4,830 ha, 수혜면적은 2,134 ha, 총 저수량 1,059만 톤, 유효저수량은 1,055만 톤이다. 상류사면의 기울기는 2.5, 하류사면 기울기는 2.5이며 하류사면 상단에 소단이 설치되어 있다.

Fig. 2는 4개저수지에 매설된 계측기의 설치 평면도를 나타낸 것이다.

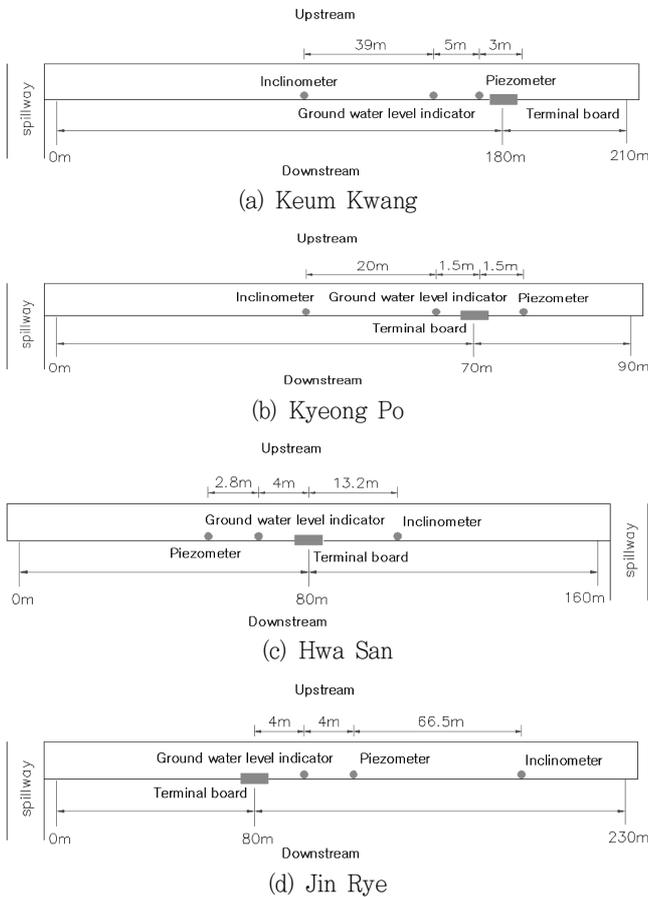


Fig. 2 A plan figure of the measuring systems

2. 계측시스템의 구축

저수지의 계측은 담수 후 구조물이 어떻게 거동하는가를 파악하기 위하여 이용된다. 따라서 거동을 장기적으로 관측하고 이상여부를 탐지하기 위해서는 미리 계측의 목적을 설정하고 이에 대한 계측계획을 수립하여 체계적이고 효율적인 계측이 되도록 하여야 한다. 특히 최근에는 유한요소법과 같은 수치해석법에 의해 전체적인 댐의 거동을 상세히 파악할 수 있게 됨에 따라 가능한 이러한 해석결과를 계측 계획에 반영함으로써 보다 합리적인 계측계획을 수립하도록 해야 한다.^{2),5)}

현장에 사용된 계측기는 흙의 유효응력에 의한 설계 및 시공 관리의 필요성에 따라 지반 내의 물의 흐름을 파악하고 수집된 자료를 이용하여 지반의 안정검토를 하고자 진동현식 간극수압계와 수압식 자동 지하수위계를 설치하였다.

또한 지반내의 수평변위의 발생방향, 크기, 속도 등을 측정하는데 이용되며, 장기계측을 통해 측정된 변위를 이용하여 저수지의 안정도를 검토하고 지반변형의 진행속도를 관측하여 갑작스런 변형을 측정하고자 지중경사계를 설치하였다.

쌍극자배열 전기비저항탐사는 제체의 수평, 수직적 전기전도도 변화를 비교적 간단하면서도 정확하게 탐사하는 방법으로 각종 지질구조 조사에 가장 널리 사용된다.^{1),4)}

저수지에서는 일반적으로 제체 내의 공극이 물과 같은 유체로 채워져 있는 경우 전도성을 갖게 되므로 낮은 비저항치를 갖게 되고 축조된 시설물의 표면에서 전위를 측정함으로써 낮은 비저항값의 이상으로 구조물의 일부구간을 통한 누수 유로 추적이 가능하다.

전기비저항 측정 (Resistivity monitoring)은 매설 파이프라인 또는 전선 등과 같이 측정에 영향을 주는 잡음 (noise) 요인을 최소화하고 전극 접촉은 양호해야 하며 저항은 낮고 일정하게 유지되어야 한다. 전극은 내구성이 강한 스테인레스 전극봉을 사용하였으며 5 m 간격으로 매설하였고, 측선은 지형 효과 및 지질조건 등을 고려하여 댐마루 하류사면 측으로 전구간에 매설하여 측정하였다.

3. 분석방법

간극수압계로부터 얻은 계측결과를 이용하여 간극수압/저수위-시간곡선을 나타내고 이로부터 계측 시기별 간극수압의 변화 및 저수위의 변화에 따른 간극수압의 경향을 분석하였다. 지하수위계는 시기별로 저수위가 변화를 통하여 제체 내부의 공극 및 침투유로의 유무에 대하여 분석하였다.

저수지의 단면, 투수계수, 저수위 등을 이용한 수치해석을 통하여 침투류 수두, 침투유량, 파이핑, 동수경사 등을 예측할 수 있으며 이를 통하여 누수량 및 댐의 안전성을 분석하였다. 수치해석방법은 Darcy의 법칙 및 Laplace 방정식을 이용하여 포화 및 비포화 흐름을 유한요소로 해석하는 프로그램의 하나인 SEEP/W를 이용하여 분석하고 계측시스템을 통한 계측자료와 비교하였다.^{3),16)}

경사계 자료로부터 심도에 따른 수평변위량을 도시하여 제체 내부의 심도에 따른 변위량의 크기와, 시간 경과에 따라 제체 변위에 따른 안정성을 분석하였다.

제체의 사면안정 해석은 한계평형해석법에 의해 SLOPE/W를 이용하여 분석하였다.

전기비저항탐사 결과를 이용하여 다음과 같이 안전도 지수를 산출하고 그 안정성을 판단하였다. 전기전도도 (σ)와 공극율(n)의 관계는 Archie (1942)의 경험식으로부터 다음과 같이 나타낸다.¹⁾

$$\sigma = c \sigma_w n^m \dots\dots\dots (1)$$

σ_w : 공극수의 전기전도도, n : 공극율, c : 비례상수(0.6~2.0),

m : 사이의 값을 갖는 고결지수(cementation factor 1.3~2.2)

$$\text{고결지수는 } m = \frac{\log \sigma - \log c \sigma_w}{\log n} = \frac{\log(\sigma/c \sigma_w)}{\log n} \dots\dots (2)$$

시간 t_1 과 시간 t_2 에서의 전기전도도를 σ_1, σ_2 , 공극율을 n_1, n_2 라 하면,

$$\log \sigma_2 - \log \sigma_1 = m(\log n_2 - \log n_1) \dots\dots\dots (3)$$

안전도지수 SI 는 다음과 같다.

$$SI = \frac{\log n_2}{\log n_1} = \frac{\log(\sigma_2/c \sigma_w)}{\log(\sigma_1/c \sigma_w)} = \frac{\log(\rho_w/c \rho_2)}{\log(\rho_w/c \rho_1)} \dots\dots\dots (4)$$

안전관리기준은 안전도 지수가 1에 가까울수록 안전한 제체이며 0에 가까울수록 제체의 누수에 대한 위험 구간으로 판단한다.

III. 결과 및 고찰

1. 간극수압과 지하수위의 변화에 따른 안정성 평가

Fig. 3은 다수의 계측자료를 보유하고 있는 연구대상 저수지 4개소에서 2004년부터 2006년까지 측정된 간극수압 (P.W.P)과 실제 저수위 (W.L)를 나타낸 것이다. 측정시기별로 저수위는 변화 폭이 크지만 제체 내부의 간극수압은 변화가 없이 거

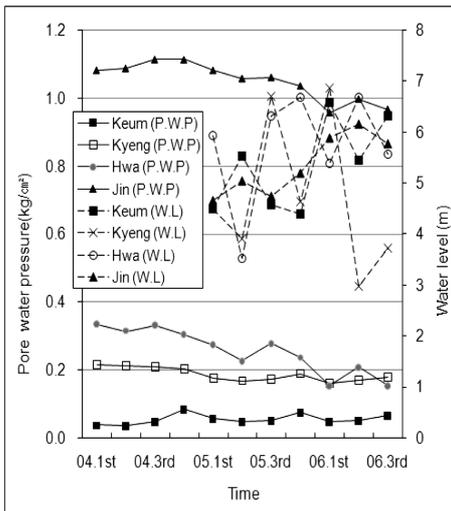


Fig. 3 Comparison of pore water pressure and water level

의 일정하게 나타났다.

측정한 간극수압은 금광 0.035~0.083 kg/cm², 경포 0.161~0.217 kg/cm², 화산 0.153~0.335 kg/cm², 진례 0.959~1.116 kg/cm²의 범위로 나타나 시간의 변화에 따른 간극수압의 변화량은 매우 작게 나타났지만, 진례저수지의 경우는 댐 높이가 다른 저수지 보다 높기 때문에 간극수압이 크게 나타났다.

이와 같이 각 저수지에서의 간극수압이 큰 변화량이 없는 원인은 연구대상인 저수지들은 준공된 지 20~40년이 경과되어 제체 내부의 간극수압의 소산이 완료되어 변화가 경미하고 안정된 상태인 것으로 분석되었다.

기타 저수지에서도 간극수압 변화량과 저수위는 큰 차이를 나타내지 않았다.

농업용 저수지의 정밀안전 진단시 매설되는 간극수압계는 저수지 제체 축조 중 또는 담수시에 매설되어 과잉공극수압 변화를 측정하여 저수지의 안정성을 초기에 판단하는데 많은 도움을 주고 있지만, 완공후에는 실질적으로 장기적인 계측관리가 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서 축조후 장기적인 안정성을 관측하거나 이상강우 등에 의한 제체 위험가능성을 실시간으로 관측하기 위해서는 계측시스템 구축이 필요하다. 그러나 연구대상 저수지는 상당기간 경과 후 재해예방 차원에서 정밀진단 실시를 위해 계측시스템을 구축하는 것이 목적이다. 따라서 측정기간 동안 간극수압의 변화는 거의 나타나지 않으므로 추후 계측시스템 구축 시 간극수압계보다는 수평변위, 지하수위계 및 전기비저항탐사 등의 다른 방법으로 제체내의 안정성을 평가하는 것이 합리적이라고 판단된다.

Fig. 4는 4개의 저수지중 금광저수지에서 유한요소 프로그램인 seep/w를 이용하여 구한 간극수압의 분포를 나타낸 것이다. Table 2는 4개 저수지의 침투류 해석결과를 나타낸 것이다.

저수지에서는 침투류에 의한 세굴로 파이핑을 유발할 수 있으며, 이와 같은 현상을 분석하기 위한 침투류 해석은 제체내

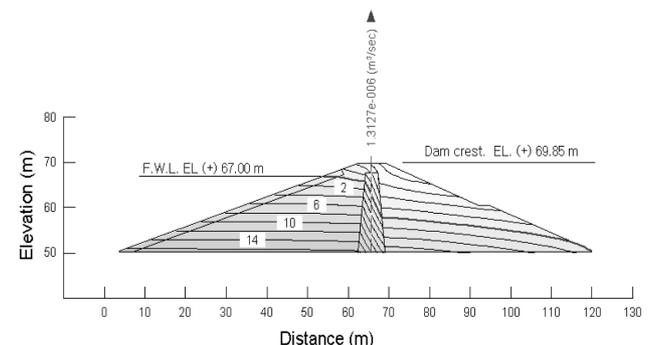


Fig. 4 Distribution of pore water pressure by the seepage analysis (Keum Kwang)

Table 2 Results of seepage analysis

Name	Critical hydraulic gradient	Safety factor (F.S)	Seepage quantity (m ³ /d)	Leakage quantity/100 m (ℓ/s)	Remarks
Keum Kwang	1.055	3.52	28.25	0.131	safety
Kyeong Po	1.081	4.32	14.36	0.124	safety
Hwa San	1.095	2.87	84.99	0.582	safety
Jin Rye	0.615	6.42	181.58	0.858	safety

의 수두, 침투유량, 침투수압 등을 구하기 위하여 수행되며 산정된 값들은 실제 계측된 결과와 비교하였다.

현장에서 실측한 간극수압은 0.035~0.083 kg/cm²의 범위이고, 수치해석 프로그램에 의한 공극수압은 0.074~0.078 kg/cm² 범위로 나타나 계측치와 유사한 경향을 나타냈다.

침투류 해석 결과 한계동수경사는 1.055, 안전율은 3.517로 파이핑에 대한 안전관리기준인 2.0 이상으로 안전한 것으로 판단된다. 또한 1일당 침투로 인한 침투수량은 28.25 m³/d로 총저수량에 대한 허용누수량 안전관리기준 (총저수량의 0.05%)인 5,295 m³/d 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 0.131 ℓ/s로 안전관리기준 (100m당 1 ℓ/s) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

경포저수지의 seep/w에 의한 간극수압은 현장 실측치는 0.161~0.217 kg/cm² 범위이고 수치해석 프로그램에 의한 공극수압은 0.064~0.077 kg/cm² 범위로 나타나 계측치보다 크게 나타났는데 이는 단면이 매우 불규칙한 형상을 가지고 있고, 제체 내의 토질분포가 상이하기 때문으로 판단된다.

침투류 해석 결과, 파이핑과 (기준: 2.0이상), 1일당 침투수량 (기준: 총저수량의 0.05%), 제체 100m당 누수량 (기준: 1 ℓ/s)은 안전관리기준 이내에 포함되어 안전한 것으로 판단되었다.

화산저수지의 실측 간극수압은 0.153~0.335 kg/cm² 범위이고 수치해석 프로그램에 의한 공극수압은 0.109~0.121 kg/cm² 범위로 나타나 계측치와 유사한 경향을 나타냈다. 침투류 해석 결과 파이핑과, 1일당 침투수량, 제체 100 m당 누수량은 안전관리기준 이내에 포함되어 안전한 것으로 판단되었다.

진례저수지의 실측 간극수압은 0.959~1.116 kg/cm² 범위이고 수치해석 프로그램에 의한 공극수압은 0.062~0.087 kg/cm² 범위로 나타나 계측치와 매우 큰 차이를 나타냈다. 이와 같은 원인은 진례저수지는 제체고가 36.0 m로 다른 저수지에 비해 제체고가 높으며 단면이 불규칙한 형상이고 간극수압을 매설한 위치와 수치해석을 위한 시료를 채취한 위치가 다르고 제체내의 토질분포가 매우 상이하기 때문으로 판단된다.

침투류 해석 결과, 파이핑, 1일당 침투수량 및 제체 100 m당 누수량은 안전관리기준 이내에 포함되어 안전한 것으로 판단되었다.

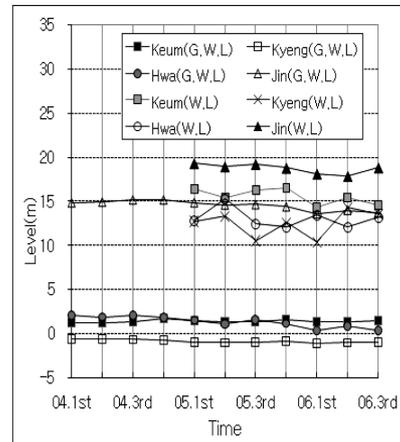


Fig. 5 Comparison of water level and ground water level

전체적으로 4개 저수지에서 파이핑에 대한 안전율은 2.87~6.42범위로 기준 안전율인 2.0 이상으로 나타나 안전한 것으로 판단되었다. 또한 1일당 침투로 인한 침투수량은 총저수량에 대한 허용누수량 안전관리기준인 총저수량의 0.05% 이내이고, 제체길이 100 m당 침투수량은 허용누수량 안전관리기준인 1 ℓ/s 이내로 만족하여 안전한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 대상저수지 4개소의 측정시기별 저수위 (Measured W.L.)와 제체 내부의 지하수위 (Ground W.L.)를 나타낸 것이다. 지하수위는 측정된 간극수압을 수두로 표시하였고, 저수위와 간극수압 모두 제체높이를 고려하여 나타낸 것이다.

‘04년부터 ‘06년까지의 계측자료를 비교한 결과, 저수위의 변화에 따라 지하수위는 큰 변화 없이 일정하게 나타났다.

진례저수지의 경우 단면형상이 불규칙하고, 제체 높이가 다른 저수지에 비해 높고 간극수압이 크기 때문에 지하수위가 크게 나타나 제체 내부의 공극 및 침투유로 등이 의심되었다. 그러나 현재 저수위의 변화량이 크지 않아 불안정성의 판단은 어려우므로 추후 측정횟수를 늘려 저수위와 지하수위를 정확하게 분석하고, 전기비저항탐사 방법 등과 비교하여 평가하여야 할 것으로 판단된다

2 수평변위에 의한 안정성 평가

Fig. 6은 경사계의 변위측정축 위치를 나타낸 것이다. 저수지의 경우 제체의 길이방향에 해당하는 B축보다는 이에 수직인 A축에서 주로 변위발생이 예상되므로 이에 맞추어 축을 설정하였다. 즉, 상류방향을 바라보며 상류사면측이 A₀, 하류사면측이 A₁₈₀, 오른쪽이 B₀, 왼쪽이 B₁₈₀이 된다. 이렇게 설정한 축에 의해 측정값은 양 (positive)과 음 (negative)으로 방향을 갖으며 측정된다. 일반적으로 변위는 저수에 따른 압력으로 하류사면 쪽으로 이동이 예상됨에 따라 A₁₈₀방향으로 변위가 발

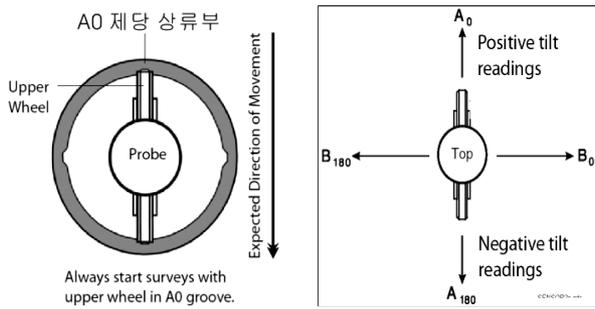
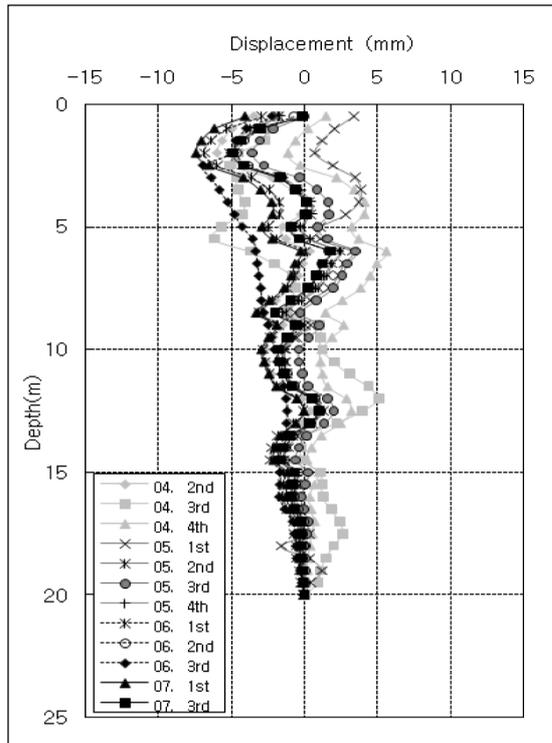


Fig. 6 Setting axes in a groove at inclinometer

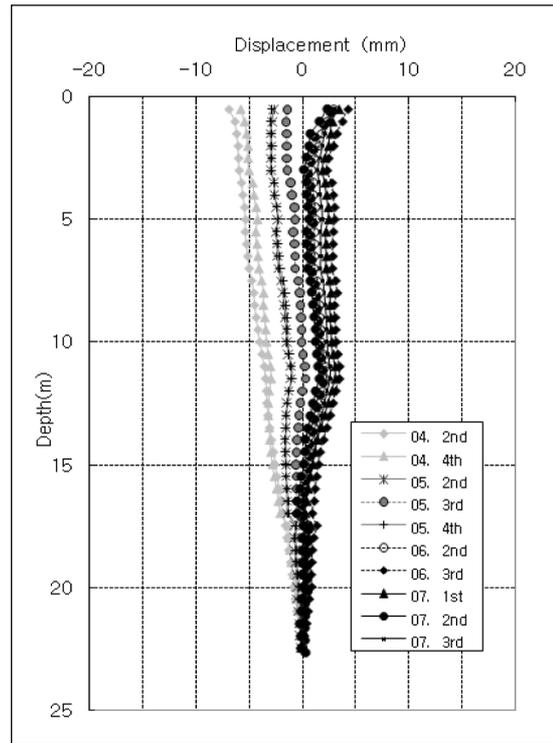
생하고 이는 음의 부호로 나타난다. 본 연구에서 심도에 따른 수평변위는 A축방향에 대해서만 수록하였고, 시간에 따른 최대수평변위는 A, B축 모두에 대해 분석하였다.

Fig. 7은 금광저수지와 경포저수지에서 측정한 심도별 수평 변위량, 시간에 따른 최대 수평변위량 및 변위방향을 나타낸 것이다.

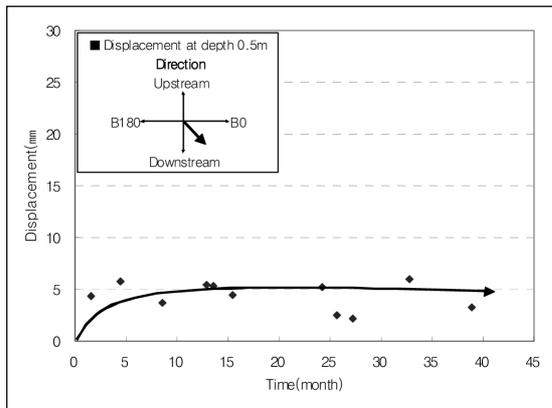
금광저수지의 A축 변위량 (a)은 -7.45~5.65 mm 범위로 (B축: -5.8-9.9 mm) 시간이 경과함에 따라 지표면에서 수평 변위가 크고, 상부 약 2.0-3.0m 심도에서 수평변위가 크게



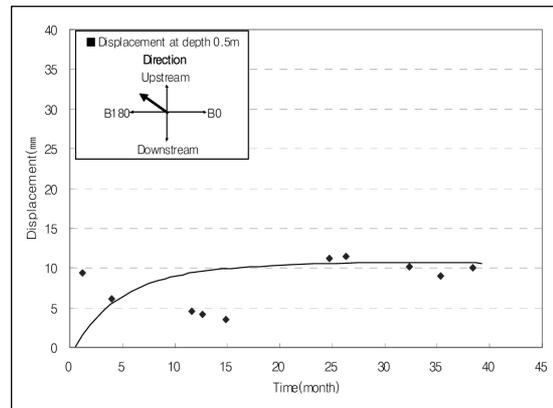
(a) Keum Kwang(A-axis)



(b) Kyeong Po(A-axis)

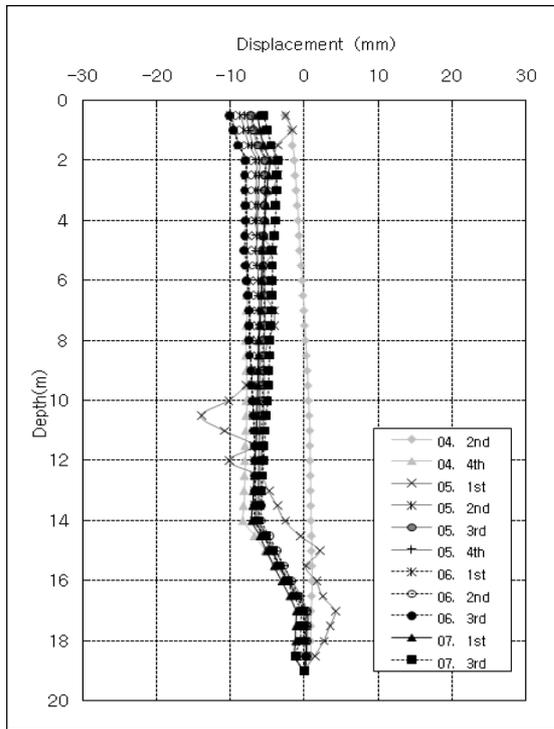


(c) Maximum displacement and direction (Keum Kwang)

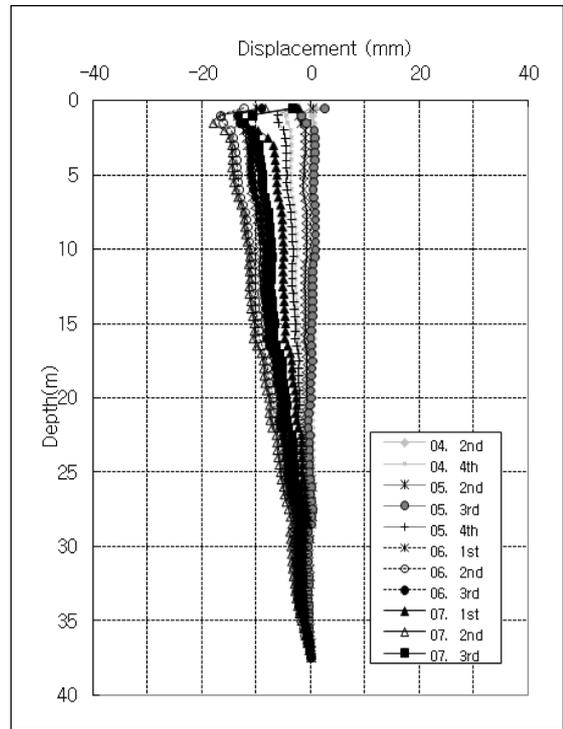


(d) Maximum displacement and direction (Kyeong Po)

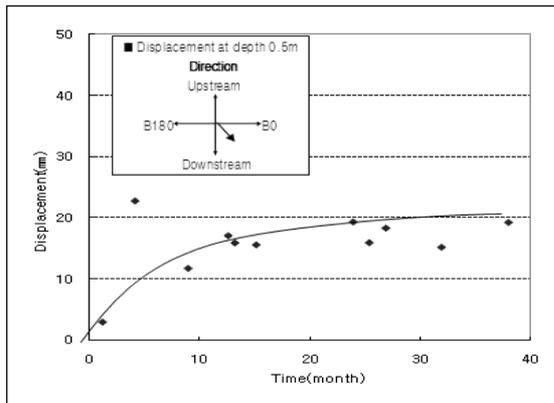
Fig. 7 Displacement and direction of inclinometer at Keum Kwang and Kyeong Po



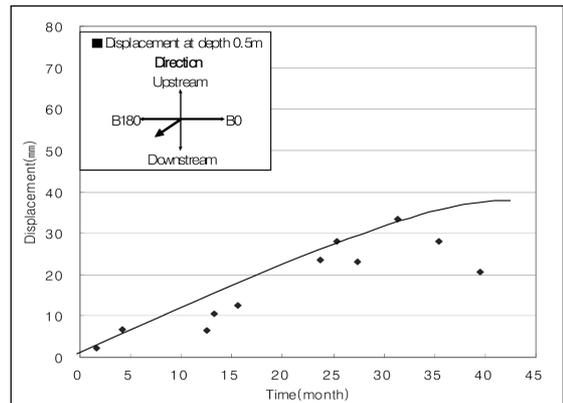
(a) Hwa San(A-axis)



(b) Jin Rye(A-axis)



(c) Maximum displacement and direction (Hwa San)



(d) Maximum displacement and direction (Jin Rye)

Fig. 8 Displacement and direction of inclinometer at Hwa San and Jin Rye

나타났다. 심도에 따라 매우 불규칙하게 나타났지만 측정횟수마다 계측자료의 형태가 일정하고 최대 변위량은 10 mm 이내로 이는 제체고 19.5 m의 0.05 %으로 큰 변화량은 없는 것으로 나타났다. A, B축 방향에서 시간에 따른 최대 수평 변위량 (c)은 약 10개월 후에 최대치에 도달한 후 일정하게 수렴하여 안정된 것으로 판단되었다.

정포저수지의 A축 변위량 (b)은 -6.89~4.32 mm이고 (B축: -11.6~0.2 mm) 상단으로 갈수록 수평변위가 크게 나타났고, A, B축 방향에서 최대 수평변위량 (d)은 12 mm이내로 이는 제체고의 0.07 %으로 큰 변화량은 없는 것으로 나타났다. 변

위량의 방향은 A0 (상류측), B180 (좌측) 방향으로 변위가 발생하였으며, 최대 수평 변위량은 약 15개월 후에 최대치에 도달한 후 일정하게 수렴하는 것으로 나타나 안정된 것으로 판단되었다.

Fig. 8은 화산저수지와 진레저수지에서 측정한 심도별 수평 변위량, 시간에 따른 최대 수평변위량 및 변위방향을 나타낸 것이다.

화산저수지의 A축 변위량 (a)은 -13.95~12.15 mm 범위로 (B축: -2.0~20.5 mm) 지표면에서는 일정한 변위를 나타내다가 깊은 심도에서 큰 변위가 발생되었다. A, B축 방향에서 최

대변위량은(c) 21 mm이내로 이는 화산저수지 제체고 18.8 m의 0.11 %로 다소 크게 나타나 향후 지속적인 관찰이 필요한 것으로 판단된다. 변위량의 방향은 A180 (하류측), B0 (우측) 방향이고 최대 수평 변위량은 약 30개월 후에 최대치에 도달한 후 일정하게 수렴하여 안정된 것으로 판단되었다.

진레저수지의 A축 변위량 (b)은 -17.97 ~ 2.65 mm (B축: -36.2 ~ -0.1 mm)으로, A축 방향에서 변위량은 -18 mm 이내로 작지만, B축 방향에서의 최대 수평변위량은 (d) 36 mm로 이는 제체고 36.0 m의 0.10 %로 다소 크게 나타났다. 또한 변위량의 방향은 A₁₈₀ (하류측), B₁₈₀ (좌측) 방향으로 변위가 발생하였으며, 최대 수평 변위는 다른 3개의 저수지와 달리 시간이 갈수록 변위량이 일정하지 않고 35개월까지 계속 증가하는 것으로 나타나 불안정한 상태로 판단되므로 향후 지속적인 계측과 분석이 요구된다.

3. 사면안정해석에 의한 안정성 평가

사면안정해석은 제체의 성토재 또는 저수조건 등에 의해 안정성이 감소되는 경우의 극한평형상태에 대한 안전율을 구하는 것으로 여러 가지 해석방법이 있으나 본 연구에서는 한계평형 해석법인 간이 Bishop, Spencer, 간이 Janbu 방법을 이용하였다.

Table 3 Soil parameters used in the analysis

Name	Embankment type	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction ϕ , (°)	Unit weight, γ_t (kN/m ³)	Coefficient of permeability (m/s)
Keum Kwang	Embankment	19.614	22	19.81	8.81E-7
	Core	24.518	20	20.57	5.4E-9
Kyeong Po	Embankment	58.842	32	19.80	1.26E-7
	Core	63.746	30	20.17	2.16E-8
Hwa San	Embankment	19.614	34	18.11	6.86E-6
	Core	35.305	8	17.64	8.65E-8
Jin Rye	Embankment	10.297	29	17.71	1.3E-7
	Core	23.537	7	17.99	2.7E-9

Table 4 Results of slope stability analysis

Site	Upstream slope		Downstream slope		Safety factor S.F.>1.2
	F.W.L.	Earthquake	F.W.L.	Earthquake	
Keum Kwang	3.733	1.937	1.797	1.181	N.G.
Kyeong Po	5.092	2.743	2.880	1.860	O.K.
Hwa San	5.791	3.322	2.285	1.674	O.K.
Jin Rye	2.454	1.200	1.798	1.200	O.K.

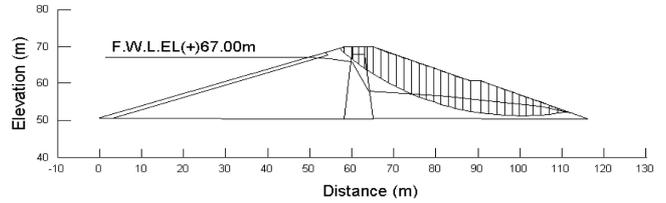


Fig. 9 Result of the slope/w analysis at Keum Kwang

사면안정해석은 slope/w를 사용하여 만수위시 (F.W.L) 상류 사면과 하류사면 (정상시, 지진시)에 대하여 검토하였으며 해석에서 적용한 지반정수와 사면안정해석결과는 Table 3 및 Table 4와 같다.

Fig. 9는 연구대상 4개 저수지 중 금광저수지에서 만수위시 하류사면의 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 지진시 최소 안전율은 1.181으로 나타나 안전관리기준인 1.2미만으로 분석되어 지진활동에 대한 내진 안정성이 미흡한 것으로 판단된다.

경포, 화산, 진레 저수지의 경우에도 Slope/W에 의한 사면안정해석 결과는 금강저수지와 유사한 분포형태를 나타냈고, 만수위시와 지진시 상류 및 하류사면에서 모든 사면에서 안전관리기준인 1.2를 만족하여 안정한 것으로 나타났다.

4. 전기비저항탐사에 의한 안정성 평가

전기비저항 탐사는 저수지 제체의 안전진단에 널리 사용되고 있는 물리탐사방법 중에 하나로 전기비저항 변화율을 이용하여 누수 위험 구간을 해석하는데 효과적인 비파괴 검사방법으로 알려져 있다. 저수지 안정성에 영향을 미치는 요인은 부분적인 구간에서 발생하는 파이핑 현상에 의한 누수이고 이러한 현상은 기상이변에 의한 집중호우시 붕괴로 인한 인명 및 재산피해를 일으키게 된다.

Archie의 경험식에 의하면 공극율이 증가할수록 전기전도도도 증가하므로, 누수 가능성이 높은 구간에서는 공극율이 상대적으로 높게 분석되고 제체의 안전도는 감소하게 된다.¹⁾

저수지 제체에서 구한 전기비저항 해석은 누수구간으로 판단되는 저비저항대를 파악할 수 있으나, 제체재료의 물리적 특성, 점도함량, 수위변화에 따른 함수비 변화, 기반암의 지질구조 등의 복잡한 원인으로 해석의 신뢰성이 문제시되기도 한다.

이러한 단점을 극복하기 위해 전기비저항값 자체보다는 시간에 따른 변화율을 해석하는 상시 관측 방법을 이용하면 정확도를 높일 수 있다. 즉 시간에 따른 전기비저항값이 급격히 감소하면 제체의 안전도는 감소하는 경향을 나타낸다.

전기비저항 자료를 안전도 지수로 변환하면 분포형상을 훨씬 단순하게 나타낼 수 있다. 안전도 지수 (SI)는 전기전도도의 변화가 없을 경우는 1에 근접하여 제체의 안전도가 높아지고, 전

기전도도가 증가할수록 0에 근접하여 안전도가 낮아지게 된다. Fig. 10 (a)는 금광저수지의 전기비저항 분포를 측정시기별로 나타낸 것이다.

상부단면에서는 100~300 ohm-m 정도의 비저항대가 분포하고, 하부지반 일부는 원지반대로 500~690 ohm-m 정도의 고비저항대가 분포하고 있으며, 2차 측정에 비하여 3차 측정에서는 약간의 전기비저항이 감소하였지만 누수가능성은 없는 것으로 나타났다. 제체의 평균적인 전기비저항 값은 190~690 ohm-m의 범위이고, 2차와 3차 측정 시기별 저항 값의 변화는 작게 나타났다.

Fig. 10 (b)는 Archie의 경험식으로부터 전기비저항값을 안전도 지수로 변환한 결과로 안전도 지수 (SI)는 0.8~1.0 범위로 안전관리 기준인 1.0에 근접하여 안전한 것으로 평가되었다.

Fig. 11 (a)는 경포저수지의 전기비저항 분포를 측정시기별

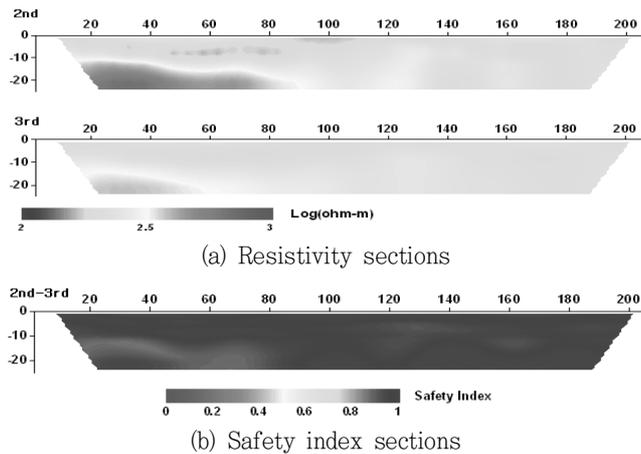


Fig. 10 Resistivity and safety index sections at Keum Kwang

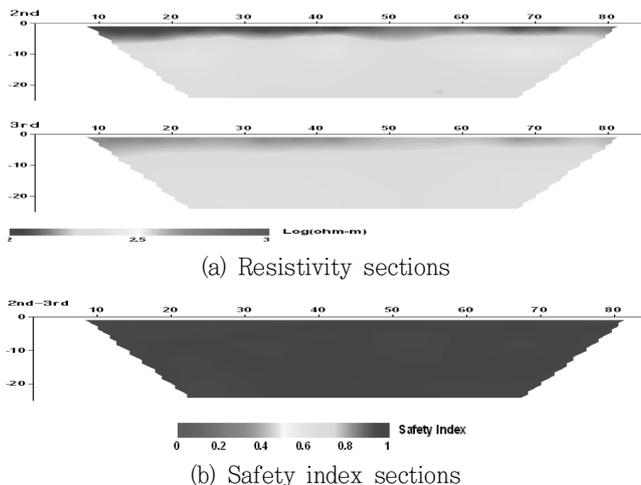


Fig. 11 Resistivity and safety index sections at Kyeong Po

로 나타낸 것이다. 상부단면에서 100 ohm-m 정도의 비저항대가 분포하고, 하부지반은 200~300 ohm-m 정도로 분포하고 있다. 제체의 평균적인 전기비저항 값은 100~300 ohm-m의 범위이고, 누수가능성은 없으며 측정 시기별 변화량은 작게 나타났다. Archie의 경험식으로부터 추정된 안전도 지수(b)는 1.0 범위의 값을 나타내어 안정된 상태로 평가되었다.

Fig. 12 (a)는 화산저수지의 전기비저항 분포를 측정시기별로 나타낸 것이다. 상부단면에서 1000~2000 ohm-m 정도의 고비저항대가 분포하고, 하부지반은 200~1000 ohm-m 정도로 넓게 분포하고 있다. 화산저수지의 평균 전기비저항 값은 200~2,000 ohm-m의 범위로 전반적으로 안정적인 비저항 분포를 보이고 있고 제체의 누수가능성은 작으며 측정시기별 전기비저항 변화량은 작게 나타났다. Archie의 경험식으로부터 나타난 안전도 지수는 (b) 0.9~1.0 범위로 안전관리 기준에 근

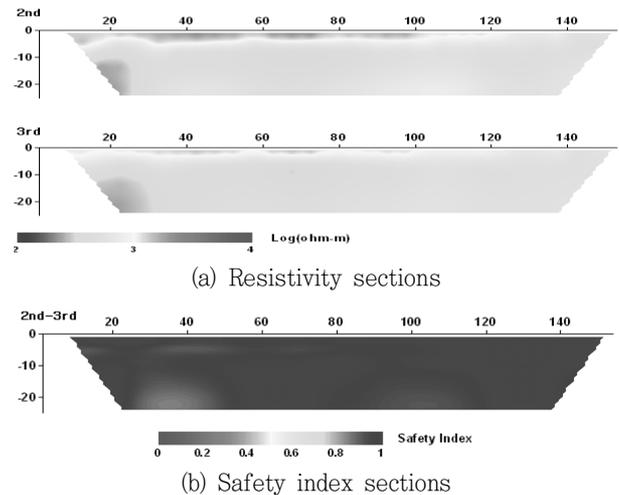


Fig. 12 Resistivity and safety index sections at Hwa San

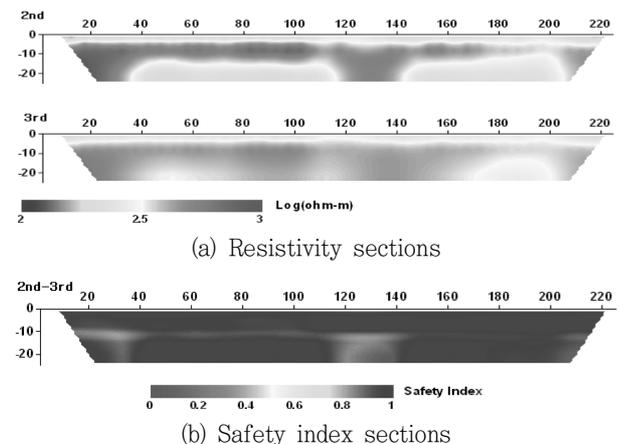


Fig. 13 Resistivity and safety index sections at Jin Rye

접하여 안전한 것으로 평가되었다.

Fig. 13 (a)는 진레저수지의 전기비저항 분포를 측정시기별로 나타낸 것이다. 전기비저항 평균값은 200~2,000 ohm-m의 범위로 전반적으로 안정적인 비저항 분포를 나타내고 있지만, 2차 측정치에 비하여 3차 측정치는 전기비저항 변화량이 뚜렷하게 감소하고 있어 일부 구간에서 누수 위험 가능성 있고 안전도 지수가 낮게 해석되었다.

안전도 지수 (b)는 전체적으로 0.7~1.0 범위로 안전관리 기준치에 근접하게 나타났지만, 누수가능성이 있는 20~40 m 구간의 심도 10 m와 120~140 m 구간의 심도 10~20 m 구간은 안전도 지수가 0.7정도로 낮게 나타나 비저항 이상대에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다.

이와 같이 저수지 제체 내부의 전기비저항 분포의 변화량을 이용하여 누수 위험 가능성이 있는 구간을 탐지할 수 있고, 전기비저항 자료로부터 산출된 안전도 지수는 저수지의 합리적인 안전진단 평가 방법으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 전기비저항 탐사시 댐마루 상류 하나의 측선을 이용하여 누수 취약구간을 판단하였으나 추후 하류사면에 대한 탐사를 병행하여 제체내의 상·하류사면의 연결성에 대해서도 파악하여야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 농업용 저수지의 재해예방을 위한 계측시스템을 구축하고 저수지 제체의 간극수압, 지하수위, 지중변위 및 전기비저항 탐사 등의 계측자료와 수치해석 결과를 비교 분석하여 안정성을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 저수지 제체 내부의 공극수압은 0.035~1.116 kg/cm² 범위로 계측 초기부터 큰 변화 없이 일정하게 나타나 안정된 것으로 판단되고, 파이핑과 누수량에 대한 침투류 해석 결과는 안전관리기준 내에 포함되어 안전한 것으로 평가되었다.
2. 저수지 제체내의 경사계 자료로부터 심도별 수평변위량과 방향성 및 시간에 따른 최대변위 분포형태가 일정하게 수렴하는지를 비교하여 안정성을 효과적으로 판단할 수 있었다. 시간에 따라 수평 변위량은 뚜렷한 방향성을 나타냈고 심도별 수평 변위량은 3개 저수지에서는 최대 20 mm 정도로 나타났지만 시간이 경과함에 따라 일정한 상태를 유지하여 안전한 것으로 평가되었다. 그러나 진레 저수지에서는 변위량이 계속 증가하여 불안정한 상태로 판단되므로 향후 지속적인 계측과 분석이 요구되었다.
3. 저수지 제체 내부의 전기비저항 분포의 변화량을 이용하여 누수 위험 가능성이 있는 구간을 탐지할 수 있고, 전기비저항 자료로부터 산출된 안전도 지수는 저수지의 합리적인 안전

진단 평가 방법으로 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

측정시기별 전기비저항 값의 변화는 큰 차이를 나타내지 않았고, 안전도 지수 (SI)를 분석한 결과, 일부 저수지 구간에서 누수가능성이 있어 안전도 지수가 낮게 나타나 지속적인 계측이 요구되었지만 전체적으로 모든 저수지에서 1.0에 근접하여 안전한 것으로 평가되었다.

4. 앞으로 합리적이고 경제적인 시설물의 유지관리 및 안전관리를 위하여 정확한 계측 계획과 계측자료의 데이터베이스를 구축이 필요하고, 계측시스템 구축시 수치해석결과를 반영하여 안정성 평가가 이루어져야 시설물의 거동을 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, 146: 54-62
2. Bishop, A. W., and P. R. Vaughan, 1961. Select reservoir: Design and performance of the embankment, *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, Vol. 21: 326-329.
3. Budhu, M., 2000. *Soil mechanics and foundations*, New York, John Wiley and Sons, 166~168.
4. Cho, I. K., H. J. Kang, B. H. Lee, and B. H. Kim, 2006. Safety index evaluation from resistivity monitoring data for a reservoir dyke, *Mulli-Tamsa*, 9(2):155-162
5. Eisenstein, Z., J. M. Duncan, and H. B. Seed, 1972. An analysis of the cracking at Duncan dam, *Proceedings of the ASCE Special Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures*. Purdue Univ., 1(1): 765-778.
6. Kim, Y. S., and D. W. Lee, 2004. Evaluation technique of seismic performance on agricultural infrastructure,- Based on dynamic numerical analysis, *J. of Korean Society of Agricultural Engineers*, 46(4): 75-84.
7. Korea Rural Community Corporation, 2003-2005. Report of monitoring system for disaster prevention of agricultural structure.
8. Korea Rural Community Corporation, 2005. Guidelines for precision safety inspections of dam.
9. Korean Water Resources Corporation, 2004. A study on safety management system of dam.
10. Lee, D. W., and B. H. Oh, 2003. Stability evaluation

- methods of agricultural reservoir by field monitoring, *J. of Agri. Sci. Chungnam Nat'l Univ.*, 30(2): 164-174.
11. Lee, D. W., and H. J. Yoon, 2005. Estimation of degree of consolidation in soft ground using field measurements and rheology model, *J. of Korean Society of Agricultural Engineers*, 47(2): 87-96.
 12. Minister of Land, Transport and Maritime Affairs, 2005. Guidelines for dam design.
 13. Min, H. G., and D. W. Lee, 2008. Prediction of excess pore water pressure of reservoir embankment on soft ground, *J. of Korean Society of Agricultural Engineers*, 50(2): 37-44
 14. Peck, R. B., 1969. Advantages and limitation of the observational method in applied soil mechanics, 9th. Rankine Lecture.
 15. Squier, L. R., 1970. Load transfer in earth and rock fill dams, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 96(SM1): 213-233.
 16. User's Guide of SEEP/W for finite element seepage analysis 2002. GEO-SLOPE International Ltd.,