

댐 제체 및 침투수 흐름의 지열학적 고찰

A Study on Geothermal Characteristics of Dam Body and Seepage Flow

박동순¹⁾, Dong-Soon Park, 정우성²⁾, Woo-Sung Jung, 김형수³⁾, Hyung-Soo Kim

- 1) 한국수자원공사 수자원연구원 토목4급, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation
- 2) 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation
- 3) 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원, Head Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

SYNOPSIS : In recent geotechnical engineering, geothermal approach has been on the horizon to deal with geoenvironmental issues, freezing and thawing problems, and seepage phenomenon in dams and embankments. In this study, geothermal characteristic through inner body of dams and its influence on the seepage flow were experimented by lab test and field instrumentation. Also, one of up-to-date temperature monitoring technique, called as multi-channel thermal line sensing, was evaluated its availability. As a result of lab test, it is found that the seepage flow has influence on the geothermal characteristic and a potential of finding phreatic line and seepage fluctuation could be possible by continuous temperature monitoring using thermal line sensing skills. These kind of geothermal information could be available to the modelling of water geo-structure interaction. Out of short-term field tests, clear water table and temperature distribution of a dam were easily found through temperature monitoring in holes located near a reservoir and holes within a depth of constant temperature layer. However, it is also found that the geothermal flow and finding seepage line could not be easily understandable through multi-channel temperature monitoring because of the existence of constant temperature field, thermal conductivity of soils and rocks, and unsaturated characteristics of geo-material. In this case, long-term geothermal monitoring is recommended to find sudden fluctuation of seepage line and amount of leakage.

Key words : Dam, Geothermal, Seepage, Thermal conductivity, Temperature monitoring, Thermal line sensor

1. 서론

1.1 연구배경

댐은 토목구조물 중에서도 대표적인 수리 시설물에 속하며, 상대적으로 매우 거대한(massive) 구조물에 속한다. 댐 문제를 다룸에 있어서 필수적인 배경지식으로 생각해야 할 점이 있다면, 댐체 재료의 대부분이 물의 침투를 허용하는 다공질 매체라는 점과, 댐 전면부에 호소수를 담고 있기 때문에 필연적으

로 차수에 대한 고려를 반영해야 한다는 점이다. 즉, 댐의 안정성을 거론함에 있어 가장 중요한 요소는 댐 체체의 재료적 특성 및 침투에 대한 문제로 볼 수 있다. 따라서 다양한 형식의 댐에 있어서, 댐의 침윤선을 파악하는 것은 대단히 중요한 의미를 가지며, 특히 지중의 물은 고정된 장소에 담겨 있는 것이 아니라, 끊임없이 흐르고 있기 때문에, 외적 요인에 의한 댐 체체 내를 통과하는 침투수의 수위 변동은 댐의 설계 및 시공, 유지관리에 있어 가장 중요한 사항 중의 하나이다. 그런데, 일반적으로 댐체의 누수나 투수는 온도 변화를 유발한다. 그러므로 종래에는 생각해보지 않았던 지열학적인 고찰과 더불어 댐 체체의 지중 온도 패턴 및 침투수 흐름 발생시 온도측정은 매우 중요한 항목이다. 그러나, 재래의 단일 온도 센서 측정 방법으로 상기 성과를 얻는다는 것은 거의 기대할 수 없다. 즉, 측정 개념 면에서 공간의 임의의 위치에서 온도 측정이 동시에 이루어져야 하는 것이다. 따라서 급변 연구에 도입한 기술은 멀티 채널 다중 온도센서(Multi-Channel Thermal Line Sensor) 모니터링 방식이다. 해외에서는 유럽을 중심으로 침투 모니터링에 대한 방법으로 온도를 측정하는 기술이 체체를 성토하여 쌓은 댐들에 있어 급격히 유용성을 입증받고 있다. 이러한 방법은 독일과 스웨덴 등에서 특히 성공적으로 적용되었다. 1987년 이래로 제한적인 모니터링과 조사, 혹은 장기 모니터링 목적으로, 약 30개의 스웨덴 댐들에 훌륭하게 활용되었다. 온도 계측에 대한 신뢰성은 미지의 침투수 위치를 찾는 데에 적용되었고, 이 방법은 스웨덴에서 댐 모니터링에 대한 지침서에 추천되기까지 이르렀다.

따라서 본 연구에서는 이러한 대표적인 구조물인 댐에 대하여 체체 및 침투수 문제를 거론함에 있어 지열학적인 접근 방법을 사용, 온도 모니터링을 통한 열적 흐름 특성 모델링의 기초자료를 제공하고자 한다.

1.2 열적 흐름특성 이론

댐 체체 내부의 온도 정상 및 침투 모니터링 기술은 모든 호소의 표면수에서 발생하는 계절에 따른 온도 변화가 댐을 침투하여 흐르는 침투수의 계절별 변화를 일으킨다는 원리를 이용한다. 이러한 계절별 온도변화의 크기는 댐에서 측정 가능하며 침투수의 흐름과 밀접히 관계된다.

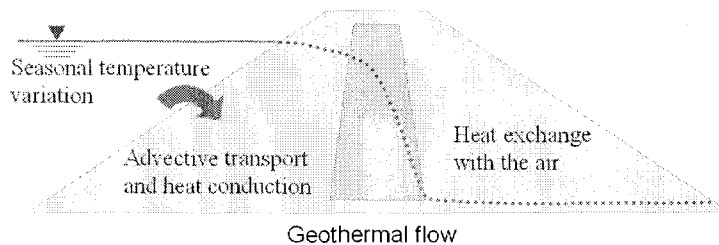


그림 1. 기본적인 댐체에서의 열전도 개념

물은 이 세상에 존재하는 물질 중에서 열을 가장 많이 저장·운반하는 물질이다. 단위 질량당 온도를 1℃ 상승시키는데 필요한 열에너지를 비열(specific heat)이라 하며, 물은 비열이 가장 높다. 대표적인 열적 흐름특성 인자인 열전도도(thermal conductivity, 열도율)란 단위 온도구배 하에서 지중매체의 단위면적을 통해 단위시간 동안에 유동하는 열량이다. 따라서 열유량(heat flux)은 공간적인 두 지점 사이의 온도차에 비례한다. 물의 흐름과 함께 지중에서 일어나는 열흐름 저항은 암석의 종류에 따라 좌우된다. 일반적인 토양과 암석의 열적특성은 대개 보편화된 값들이 존재하나, 그 값들은 일부 극단적인 값에 불과한데, 이는 점토와 모래는 함수비가 커짐에 따라 열전도도가 커지며, 토양/암석 가운데 점토와 모래의 함수비는 열전도도에 큰 영향을 미치기 때문이다. 특별히 지중온도의 열적흐름 특성을 이해하기 위해서는 다음과 같은 일반적으로 단순화시킨 1차원 수직 열전도모델의 지배방정식을 사용한다(한정상 외, 2005).

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

지중온도가 오래전부터 주기적으로 변동되고 있다고 가정하고, 지표면에서 심도가 z 되는 곳의 지중온도 T 를 Fourier 급수해를 이용하여 표현하면,

$$T_{(z,t)} = T_M + \sum_{n=0} A_n \cdot \exp\left\{-z\sqrt{\frac{\pi\omega}{2\alpha}}\right\} \cdot \sin\left\{n\omega t - \epsilon_n - z\sqrt{\frac{\pi\omega}{2\alpha}}\right\} \quad (2)$$

여기서, α : 지중열 확산계수 = $K/(C \cdot \rho)$, ρ : 지중매체의 밀도, A_n : 온도진폭,

T_M : 평균온도, $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{365}$: 각주기, ϵ_n : 위상, K : 열전도도, $T = 365$ 일, C : 비열

일반적으로 온도변화는 대상 심도가 증가할수록 감소하고, 지표하 0.5m 이하에서는 일간 온도변화가 거의 없어진다. 특별히 지표면하 특정심도 이하에서는 지중온도가 연중 거의 일정하며, 이 심도 또는 지층을 향온대 혹은 향온층이라 한다. 일반적으로 함수비가 큰 토양이나 암석은 향온층이 얇고, 반대로 함수비가 낮고 건조한 토양, 암석에서는 향온층이 깊다. 열에너지가 한 지점에서 다른 지점으로 순수한 열전도와 저유되어 있는 지중 물의 거동에 따른 열전달에 의해 이동하는 열평형식 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{에너지 유출량} - \text{에너지 유입량} &= \text{해당시간의 에너지 저유량 변화} \\ - \text{div H} &= \text{단위체적당 전체 에너지의 유출량} \\ - \text{div H} &= - \text{div} [-Ke \text{ grad } T + n C_w \rho_w TV] = \rho' C' \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3) \end{aligned}$$

2. 실내실험

2.1 실험 개요

댐체와 같은 다공질 매체(Porous Media)의 지중 온도변화 양상을 파악하고, 이에 더하여 침투수가 발생할 때, 지중 재료의 포화에 따른 온도 정보의 변화 양상, 그리고 수위의 변동(fluctuation)에 따른 온도 분포의 변화등을 파악하기 위해 토조를 이용한 실내 모형조 실험을 실시하였다. 수자원연구원 내에 있는 모형조의 규격은 224cm(L) × 135cm(W) × 92cm(H)이며, 내부는 주문진 표준사를 바닥으로부터 66.7cm 높이로 채웠다. 최초 시험시 조건은 포화되지 않은 건조한 표준사 조건이며, 실험용 수도를 통해 물을 유입구로부터 공급할 수 있도록 계획하였다. 유입량의 측정을 위해 계량기를 입구부에 설치하였으며, 수위변화 감지를 위해 육안 식별이 가능하도록 겉표면에 줄자를 부착하는 방법과 함께, 보다 정확한 지중의 수위선을 찾기 위해 정중앙부에 Dyber를 설치하여 시험 결과의 신뢰성을 제고하였다.

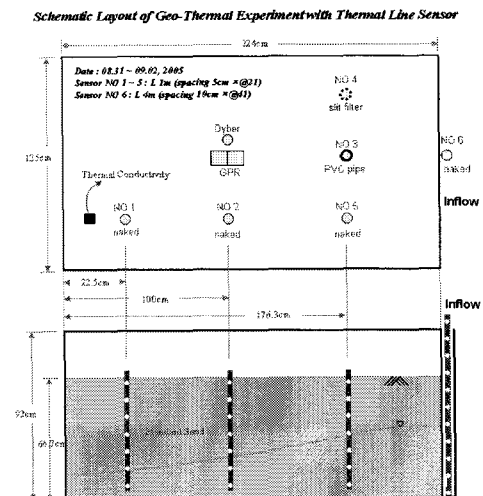
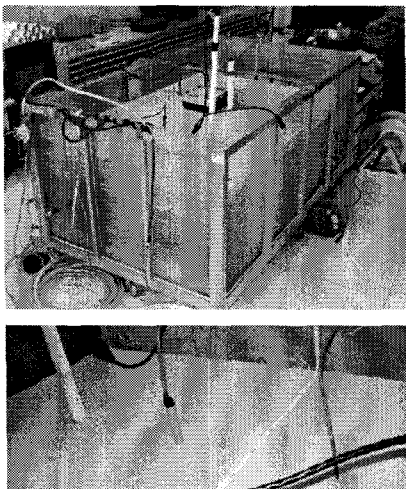


그림 2. 온도 모니터링 시스템 실내 실험 설치모습

또한 침투수 유입 및 수위변화에 따른 종합적인 열적 흐름 특성 파악을 위해 총 5개소에 1m 길이, 5cm 간격의 온도센서 케이블을 설치하였다. 입구부에는 온도센서를 둘러싸고 있는 보호 매질의 특성에 따른 온도변화 양상을 비교하기 위해 각기 다른 조건으로 세 라인을 매설하였다. 즉 모래지반에 별다른 보호 매질없이 직접 매설한 온도센서, 물의 통과를 허락하지 않는 PVC pipe를 보호 매질로 감싼 온도센서, 그리고 침투수가 통과해서 직접 케이블에 접촉이 가능한 유공관으로 감싼 온도센서 형태가 그것이다. 시간의 흐름 내지는 침투수의 유입과 수위 변동에 따른 지중 모래질 지반의 열전도 특성 변화를 파악하기 위해 출구부쪽에 일정 깊이만큼 열전도도 측정용 needle 프로브를 매설하였다. 수위조건은 이틀에 걸쳐 두 번 상승과 하강을 반복시켰고, 유량계를 통해 유량을 조절하였다. 실내실험 기간은 2005년 8월31일부터 9월2일까지 시행하였다.

2.2 결과 분석

총 5개소로 이루어진 온도측정 센서 케이블별 결과를 수위 육안관찰 및 Dyber 자동계측 자료와 취합하여 분석결과를 정리하면 다음 그래프와 같이 분류된다. 그래프상에 모든 심도 표현의 기준(datum)은 지표면을 0으로 정하고, 표면으로부터의 깊이로 하였다.

2.2.1 시간에 따른 심도별 온도변화

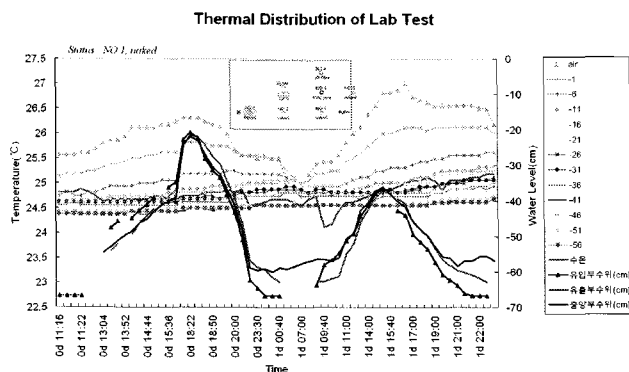


그림 3. 수위변동에 따른 온도분포 양상(NO 1)

시간에 따른 심도별 온도변화 분포를 보면, 지표하 11cm 정도까지는 외기의 영향을 매우 많이 받는 것으로 나타났다. 그러나 심도가 증가할수록 이 변동폭은 점점 줄어들며, 바닥에 가까운 51cm, 56cm 심도에서는 시간에 따른 온도변화가 거의 없다. 유입 수온의 변화는 비교적 일정한 형태를 보이나, 상대적으로 일부 낮은 구간도 존재한다. 심도 51cm, 56cm에서는 수온 변화가 발생하여도 관계없이 일정한 온도분포를 보인다. 침투수의 유입 및 수위변화 양상을 보면, 유입부보다 유출부 수위변화 곡선이 상대적으로 시간축에 대해 다소 오른쪽으로 이동(shift)된 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 육안관측 수위와 Dyber 계측 수위자료와는 상호 잘 일치하고 있다. 이상의 계측자료들을 토대로 대표적인 몇몇 심도별 센서 설치 위치에 따른 일치성 여부를 다음의 그래프와 같이 확인하였다.

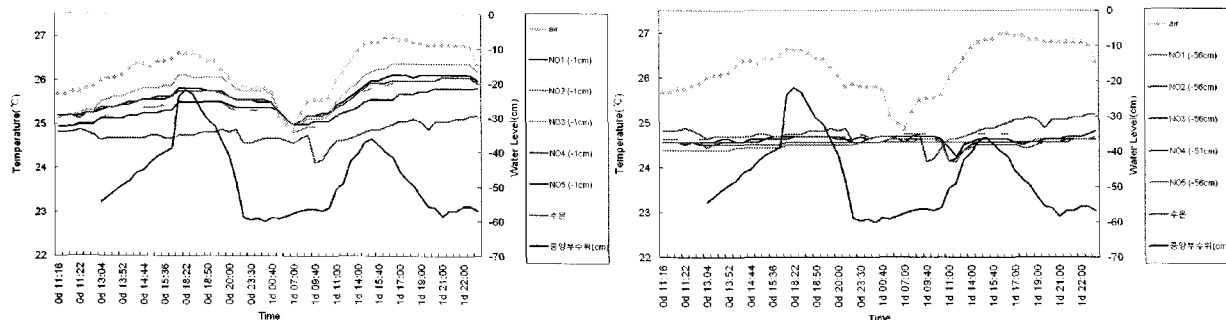


그림 4. 시간에 따른 온도변화 분포(좌 : 심도 -1cm, 우 : 심도 -51cm)

위 그래프는 토조 내 지표면에서 심도 1cm와 51cm에 위치한 온도센서에 대한 각 조건별, 위치별 온도센서의 온도 측정 분포 양상을 표현한 그래프이다.

1cm 심도는 수온의 영향을 거의 받지 않고, 외기와 인접하여 기온의 영향을 지배적으로 받기 때문에 유동성(fluctuation)이 비교적 크다고 볼 수 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 5개소의 온도센서들의 온도 분포는 대기의 온도와 수온의 온도분포 사이에서 분포함을 알 수 있다. 또한 상대적으로 NO1과 NO5, NO2의 온도분포는 매우 유사하게 나타났으며, 이 센서들은 모두 특별한 보호관없이 센서 케이블을 설치한 조건을 갖고 있다. 가장 온도가 크게 측정되는 센서는 물의 유입이 어렵고, PVC 재질로 보호되어 있는 온도케이블이었으며(NO3), 비교적 가장 낮게 측정되는 센서는 유공관으로 보호된 센서(NO4)였다.

보다 깊은 심도, 즉 바닥에서 가까운 심도(-51cm, 바닥심도 -66.7cm)에서의 온도분포는 수온의 영향을 직접적으로 받아 물의 유입과 유출에 따른 두차례의 수위변동조건 등에 큰 관계없이 물의 수온과 유사한 온도분포 경시변화를 나타내었고, 대기의 온도와는 거의 상관성이 없었다. 이는 열의 유동이 지표면에서 어느 일정 심도 아래로 내려가면, 거의 외기의 온도와는 상관없이 일정하게 되고, 내부의 침투수 등의 영향에 오히려 지배받는다는 사실을 보여준다 하겠다.

2.2.2 심도에 따른 시간대별 온도 분포

다음에 이어지는 일련의 자료들은 세로축을 심도로, 가로축을 측정온도로 나타낸 주요 time event별 온도변화 양상을 도시한 그래프이다. 녹색선은 그 해당 시각의 수온을 가리킨다.

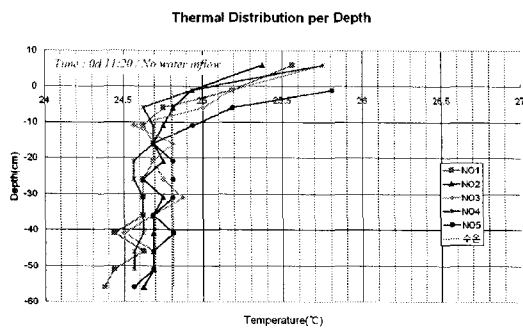


그림 5. 심도별 온도분포 양상(물의 유입 없음)

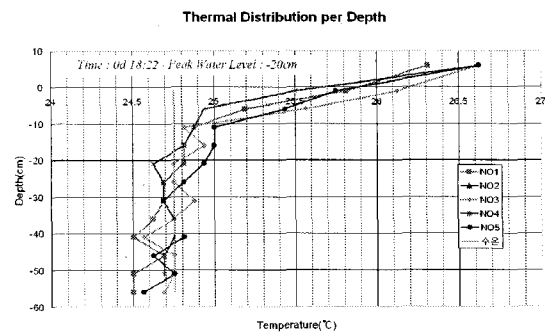


그림 6. 심도별 온도분포 양상(물의 유입, 최고수위 도달)

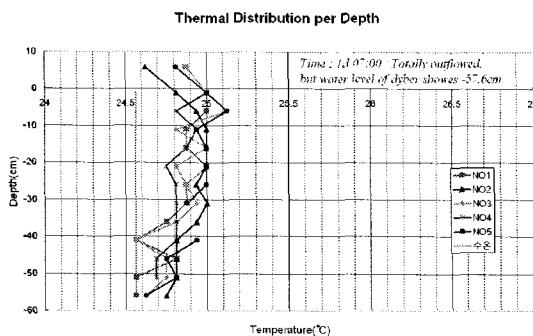


그림 7. 심도별 온도분포 양상(완전유출, 지반 불포화상태)

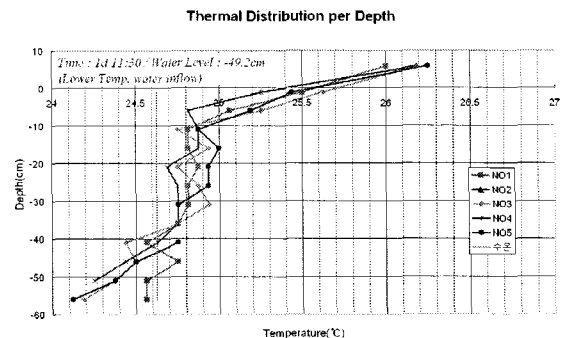


그림 8. 심도별 온도분포 양상(보다 차가운 물의 유입)

두 차례의 물의 유입과 유출을 통해 다공질 매체를 통과하여 흐르는 침투수를 인위적으로 발생시키고, 온도분포와의 상관성을 고찰하였다. 분석 결과, 침투수의 역할이 지중의 열적 특성에 매우 밀접한 영향을 끼친다는 사실을 알 수 있었다. 또한 약간 낮은 수온의 물을 유입시켰을 때, 일정한 패턴을 유지하던 심도별 온도분포가 수위선(49.2cm) 이하에서 급격히 흔들리는 모습을 관찰할 수 있다. 특히 시각적으로 차가운 수온의 물이 유입을 시작한 직후이기 때문에, 유입부에서 가까운 NO3, NO4, NO5의 하부심도 온도 계측값이 현저히 떨어졌음을 알 수 있으며, 아직 이 물이 지중을 통과하는 시간 간격이 있기 때문에, 유출부에서 가까운 NO1 센서에서는 통상적인 온도분포를 유지하고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 댐체와 같은 지중 구조물에서는 지표에서 약간만 심도가 내려가면, 대부분 외기의 온도 영향이 무의미해지며, 이러한 항온대에서는 다공질 매체를 침투하여 흐르는 침투수의 열적 특성, 그리고 수위 변화 등의 양상에 상당한 지배를 받는다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 지중에서의 열적 특성을 역으로 이용하면, 심도별 온도 모니터링 작업을 통해 침윤선의 위치나 침투수의 수위 변화를 간접적으로 쉽게 확인할 수 있다는 것을 알 수 있다는 사실도 유추 가능하다. 일반적으로 댐체의 지중에서 일어나는 현상을 눈으로 확인하기란 불가능하며, 통상적인 개념으로 볼 때, 댐의 본래 이용 목적상 전면부에 저수구역을 갖고 있기 때문에, 댐 체체 지중의 열적 특성을 지배하는 가장 큰 영향인자는 필연적으로 침투수의 흐름 특성이 될 수 밖에 없다. 따라서 호소에서의 심도별 온도 모니터링, 그리고 댐 체체의 기존 계측 목적용 공을 이용한 심도별 온도 모니터링을 통해 일차적으로는 침투수의 수위변동 상황 등의 유동기작을 감지해 낼 수 있으며, 이차적으로는 댐체와 수면이 만나서 발생하는 일련의 유체-지중구조물 상호작용의 해를 찾는 데에 이러한 열적 흐름 특성이 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다 하겠다.

2.2.3 열전도 변화 특성

수위변화에 따른 지중과 지표 열전도특성을 파악하기 위해 측정한 열전도도의 시간대별 분포 결과를 보면, 첫 번째 유입이 점진적으로 진행되면서 모래지반이 점점 포화되었고, 함수비가 커질수록 대체로 열전도도는 증가하는 것으로 나타났다. 온도 모니터링과 열전도 측정, 그리고 지중 함수비의 측정을 잘 조합한다면, 지중의 열적 흐름 특성을 규명하는 매우 좋은 도구가 될 것으로 사료된다.

3. 현장실험

실내 실험 성과를 바탕으로 온도 모니터링의 현장실험을 수행하였으며, 연구 대상 사이트는 우선 건 축공사를 위해 조성된 시추공 2개소에 대해 시범적으로 적용하였고, CFRD 형식 댐으로서 밀양댐과 용담댐을, ECRD 형식 댐으로서 운문댐을 각각 지정하여 현장 조사 및 실험을 실시하였다.

3.1 시추공 온도 모니터링

시추공은 테니스장을 대각선으로 가로질러 2곳에 위치하였고, BH-1에는 50m 연장, 2m 간격의 센서를, BH-2에서는 50m 연장, 0.5m 간격의 센서를 단일 레코더에 접속하여 계측하였다.

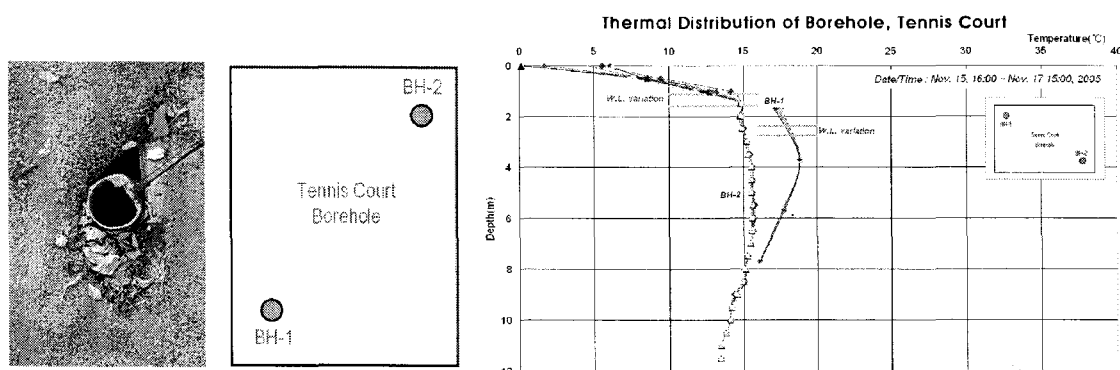


그림 9. 시추공 온도 모니터링 전경 및 결과

BH-2에서의 실험 결과, 확실히 수위의 존재여부에 따른 온도의 시간대별 변화 양상이 뚜렷하게 달라짐을 알 수 있었다. 수면 상부의 비포화 존에서는 지중의 온도가 비교적 외기와 가깝고, 따라서 온도의 유동 폭이 상대적으로 큰 편이며, 수면 아래의 온도분포는 시간이 지나도 거의 일정한 성질을 보여준다.

3.2 밀양댐 온도 모니터링

밀양댐은 높이 89m, 댐 연장 535m의 CFRD 형식 대댐이다. 연구목적에 부합하는 댐 체체의 심도별 연속적인 동시 온도 모니터링이 가능하기 위해서는 원하는 깊이와 방향으로 소정의 천공 홀을 가지고 있어야 하며, 밀양댐의 경우, 이 상류사면공과 댐 중앙부 연직공을 동시에 관측가능한 계측용 홀을 활용할 수 있으므로, 대단히 큰 장점을 갖는다. 따라서 댐 중앙부의 정상부에 설치된 상류사면 경사계공과 연직 지중경사계공에 다중 온도센서를 설치하여 동시에 계측하였다. 온도는 계절에 따른 영향을 받으므로, 이 점을 고려해야 하며, 밀양댐의 경우 9월 21일부터 30일까지와 10월 14일부터 16일까지 각각 두 차례 시험을 실시하였다. 온도모니터링을 위한 온도센서 설치시, 연직 공에는 지하수위계로 시간과 초기 수위를 측정하였고, 온도 모니터링 기간 동안 댐체 내부의 수위변화를 함께 파악하기 위하여 물의 압력과 기압과의 관계를 이용해 소정의 심도에서 수의변화를 알 수 있는 Dyber를 함께 설치하였다.

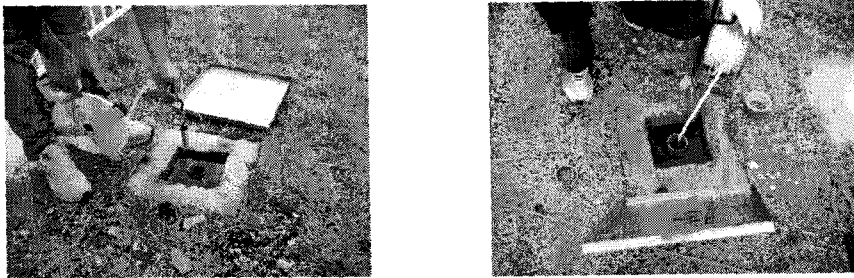


그림 10. 밀양댐 Dyber 설치 및 초기 수위 측정

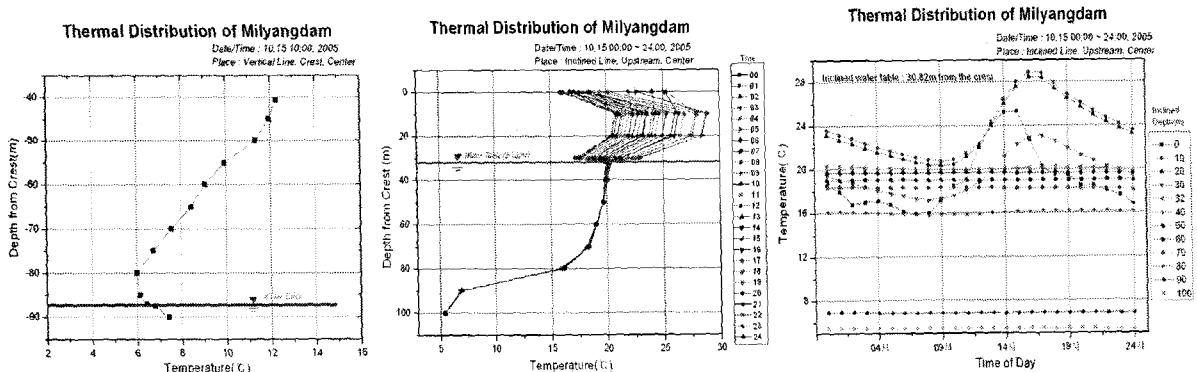


그림 11. 밀양댐 온도 모니터링 결과

밀양댐에 대한 온도모니터링 결과는 CFRD 댐체 내부에서의 지중 온도분포가 어떻게 변화하는지에 대한 통찰력을 제공해 준다. Dyber로 실측한 수위변화선은 동 기간동안 약 87.3m 를 기준으로 거의 일정하게 유지되었다. 단기 모니터링에 따른 제한성이 있지만, 본 밀양댐 계측에서 심도별 온도모니터링은 체체의 간극이 비교적 큰 CFRD 형식의 댐에서 침투수의 위치를 찾아내는 데에 비교적 좋은 도구가 될 수 있음을 보여주었다. 단지 온도 최저점 심도와 실측 수위 심도와 근소한 차이가 나는 것은 다양한 원인을 생각해 볼 수 있으나, 물을 만났을 때의 온도 거동을 고려하면, PVC 파이프 외측의 실제 침윤선과 내부 수위의 차이, 불포화 특성에 따른 차이 등이 영향 인자로 관여되었을 것으로 사료된다.

상류사면공에서의 결과를 보면, 외기 온도는 비교적 많은 흔들림을 보이며 다양한 변동폭을 갖는데 반해, 비슷한 패턴이 저수위 상부 센서들에게서 보이다가 점차적으로 시간에 따른 온도 변동폭이 줄어들면서, 저수위 하부에서는 모든 센서들이 시간의 변화에 상관없이 급격히 일정한 온도를 유지함을 알 수 있다. 특히 사면길이 80m와 90m 사이에는 급격한 온도 하강 구간이 존재함을 알 수 있으며, 이러한 온도변화 패턴을 연구하면, 다양한 댐체의 열역학적 거동을 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 용담댐 온도 모니터링

용담댐은 밀양댐과 동일한 기간에 준공된 CFRD 형식 대댐으로 댐 높이 70m에 댐연장 498m로서 금강 유역의 전북 진안군에 소재하고 있다. 용담댐은 정상부에 계측 목적으로 매설된 지중경사계 3공과 상류사면을 따라 설치된 사면경사계 2공이 있으며, 모양과 재질은 밀양댐의 경우와 동일하다. 케이싱은 PVC 재질로 되어 있으며, 측정하는 물리량이 온도라는 특성을 감안하면, 댐체의 천공이나 국부적 관입이 필요없이 기존의 공을 활용할 수 있다는 점이 잇점으로 작용한다. 시험에 사용된 공은 지중경사계 공 중 댐 정상부의 가장 중앙부에 위치한 MI-2와 다소 좌안측에 위치한 MI-1을 이용하였고, 사면경사계 공으로는 중앙부의 FI-1을 이용하였다. 시험은 다음의 4가지 유형으로 나누어 다양한 방법으로 시행하였다.

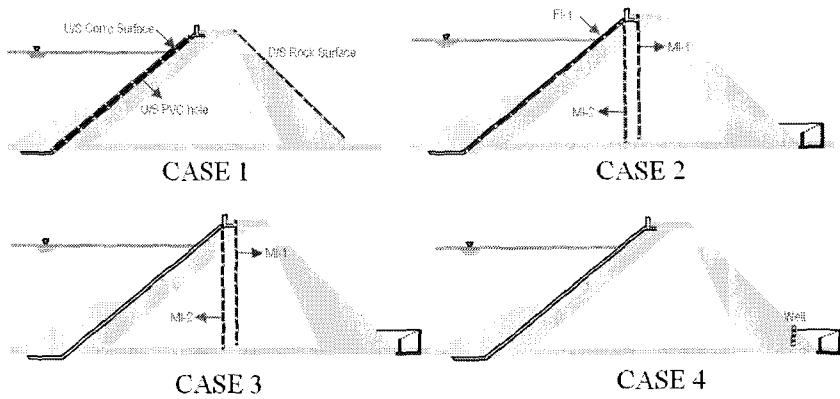


그림 12. 용담댐 온도 모니터링 시험 구분

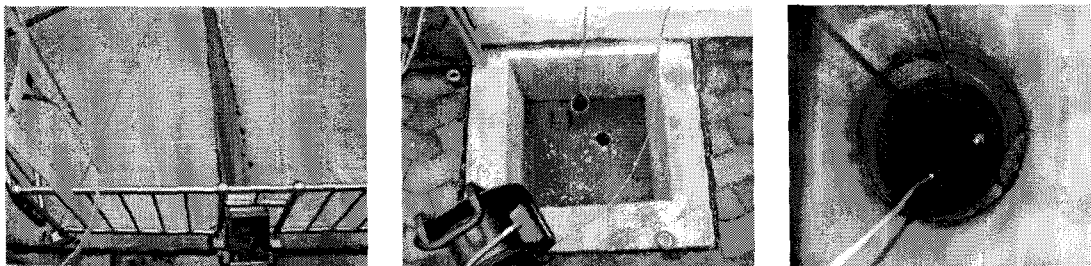


그림 13. 용담댐 온도센서 설치 전경

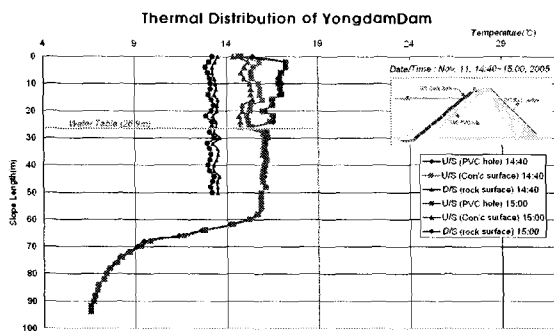


그림 14. 용담댐 CASE 1 온도 측정 결과

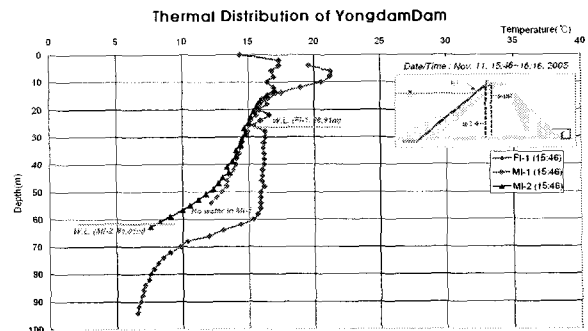


그림 15. 용담댐 CASE 2 온도 측정 결과

용담댐에서는 밀양댐의 경우와 동일하게 상류사면의 경우에는 수면의 존재 여부에 따라 온도 프로파일에 큰 차이가 있었다. 수면 아래에서는 보호 매질의 여부와 상관없이 일정한 온도로 수렴하고 있음을

알 수 있다. 물은 비열이 가장 큰 물질에 속하며, 일종의 보온병과 같은 역할을 수행하여, 온도의 항온성을 지니게 함을 확인할 수 있었다. 또한 콘크리트 페이스 슬래브 표면상에 설치된 센서보다는 PVC 파이프로 보호된 센서의 경우가 보다 약 2℃ 정도 높은 온도 양상을 보였으며, 보호되지 않은 센서의 경우 분산정도가 상대적으로 보호된 경우보다 심한 것으로 나타났다.

댐체의 전체적인 온도 성상을 파악할 목적으로 단회적인 계측을 시행한 댐체 중앙부 연직 관측공에서의 급변 계측결과로 침윤선을 직접 찾아내기는 어려웠다. 이는 센서의 설치 간격이나 수위 변동이 거의 없는 점, 그리고 모니터링 기간의 차이 등의 요인에 기인하는 것으로 추정된다. 결국 댐의 상류사면, 댐체 연직하 방향, 댐 배면 우물통에서의 온도측정 성과들을 종합하면, 댐체와 투수성에 대한 열역학적 성상 파악이 가능할 것으로 판단된다.

3.4 운문댐 온도 모니터링

운문댐은 금호강의 동창천 일대를 유역으로 하는 용수전용댐으로서, 댐 형식은 ECRD(Earth Cored Rockfill Dam)이다. 중심코어 불투수층을 가지고 있기 때문에 종래에 검토하였던 CFRD 형식 댐과는 다른 침투수 흐름 양상을 보인다. 운문댐의 높이는 55m, 댐 연장은 407m이며, 1985년 12월부터 1994년 9월까지 건설된 비교적 큰 댐에 속한다. 따라서 운문댐은 CFRD 형식 댐에서와의 댐체 내 지열학적 패턴이 비교적 다를 것으로 예측된 바 온도센서를 정상부 연직 지하수위공 2개소와 댐 배면부 중앙 지하수위공 1개소를 측정 대상으로 결정하였다. 각 관측공은 모두 침윤선을 직접 확인 가능하도록 물의 통과가 가능한 유공관으로 매설되어 있어 연구의 신뢰성을 한층 더 높일 수 있었다.

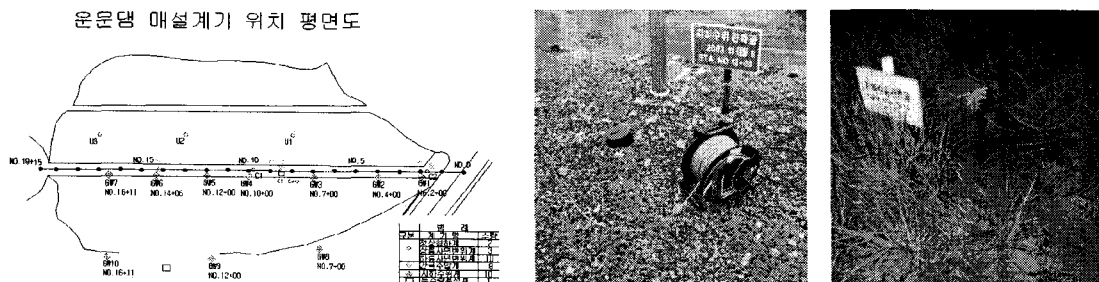


그림 16. 운문댐 매설계기 설치도(좌) 및 온도센서 설치 전경(우)

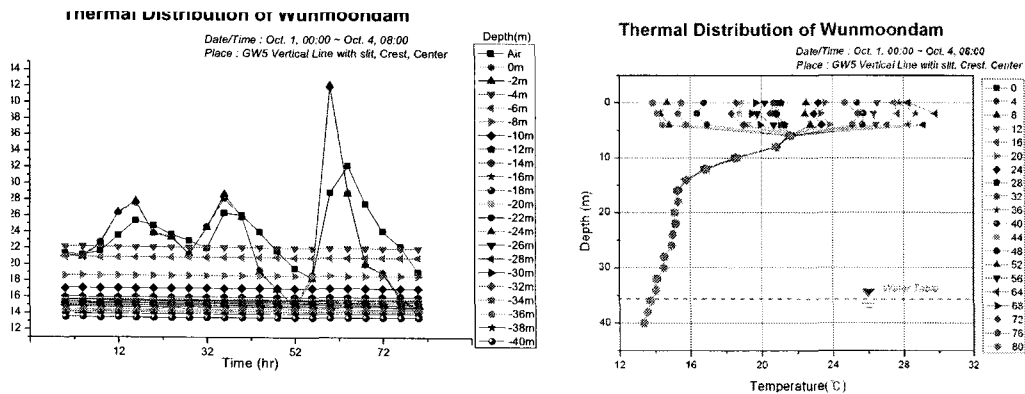


그림 17. 운문댐 정상부 연직관측공에서의 온도 모니터링

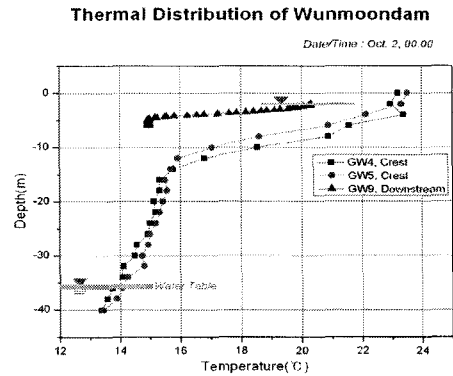
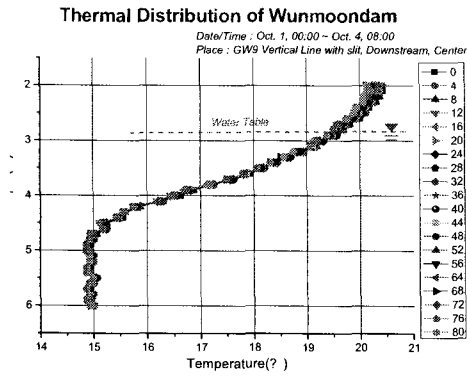


그림 18. 운문댐 배면 선단부 관측공(좌) 및 종합 온도 모니터링 그래프(우)

운문댐에 멀티채널 다중 온도 모니터링을 시행한 결과, 측정기간 동안 대기의 온도가 매우 다양한 패턴으로 유동하는 반면, 지표하 4~6m 이하에서는 모든 심도에서의 온도분포가 일기의 변화에 영향없이 일정함을 알 수 있다. 관측된 유공관 내 수위는 정상부로부터 약 36m 심도였으나, 예상과는 달리, 이 수위면을 경계로 구분가능한 온도 변화는 감지되지 않았다. 즉, 측정기간동안 수위변화가 거의 없었던 점을 미루어 볼 때, 눈에 띄만한 수위상승이나 하강이 없다면, 지중의 온도변화에는 거의 영향이 없는 것으로 판단된다.

댐 하류측 선단부 관측공에서의 결과도 수면을 만나면 그 이하심도에서는 시간에 따른 온도분포의 변동성이 거의 없어진다는 점이 관측되었다. 측정 기간이 짧았던 점을 고려하면 실측 수위에 따른 온도 모니터링에 가시적인 영향은 발견하지 못했으나, 장기적인 모니터링을 실시하지는 않았으므로 단정적으로 결론지을 수는 없을 것으로 사료된다. 위의 온도 모니터링 성과들을 종합하여 보면, 댐체 내부의 심도별 온도분포에 대한 경향성을 파악할 수 있을 것으로 기대되며, 특히 지열학적(Geothermal) 관점에서 댐체에 대한 열 흐름을 모델링할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 댐 제체와 침투수 흐름 현상을 온도라는 물리량으로 대표되는 지중 열적 흐름 특성으로 접근하여 최근 새로운 기술인 멀티 채널 다중 온도 모니터링 방식을 적용한 실내실험과 현장실험을 통해 고찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 멀티 채널 온도 모니터링을 통해 종래에 불가능했던 동시간적인 댐체 내외부 온도 측정 및 열적 흐름 특성 파악이 용이해졌다.
- 2) 실내 모형조내에서의 실험결과, 항온층에서 다공질 매체를 침투하여 흐르는 침투수의 열적 특성과 수위 변화 양상에 의해 정지되어 있는 지중 구조물의 온도 성상이 달라짐을 확인하였다. 또한 일정한 침투수의 흐름은 온도 분포 성상을 일정하게 유지시키며, 침투수의 온도에 변화가 생긴다면, 다중 온도 모니터링을 통해 쉽게 침투수의 열적 특성 변화를 찾아낼 수 있다. 따라서 실내실험 결과를 토대로 보면, 지속적인 심도별 온도 모니터링을 통해 침투수의 수위변동 상황 등의 유동기작을 감지해 낼 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 현장실험 결과, 댐 전면부 호소수와 맞닿은 상류사면 관측공과 심도가 깊지 않은 연직 관측공(항온층 이내)에서의 온도 모니터링을 통해 확인한 수위선 파악 및 지온분포 특성 이해가 가능하다.
- 4) 댐 현장에서 단회적인 댐 제체 중앙부 관측공에서의 온도 모니터링으로 댐의 침투선 자체를 파악하기는 어려우며, 항온층 이하에서의 지중 침투수의 흐름특성을 찾아내는 것 또한 적용성이 떨어진다. 그러나 침투수의 열적 특성 등에 변화 발생시, 혹은 급작스런 수위변동등의 현상은 장기적인 온도 모니터링을 통해 파악이 가능할 것으로 사료된다. 하지만, 이 경우에도 지중 매체의 불포화 특성, 관측공의 재질과 열전도도, 항온층의 존재등을 종합적으로 검토해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 에너지자원기술개발 사업의 일환으로 에너지관리공단에서 지원하고 한국지질자원연구원에서 주관한, “강변여과수(충적층 및 하상)열자원 활용기술”의 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 수자원연구원(2005), 수자원시설물 관리를 위한 온도 모니터링 기법의 활용방안 연구(1차년도) 보고서, 한국수자원공사 연구보고서
2. 한국수자원공사(2004), 댐 침투수 탐지를 위한 온도센서 모니터링 조사 용역 보고서
3. 한정상,한규상,한혁상,한 찬(2005), 지열펌프 냉난방 시스템, 도서출판 한림원
4. Geo-Slope Office(2002), *TEMP/W User's Guide*, Geo-Slope International Ltd.
5. VDI-Gesellschaft Energietechnik(2000), "*Thermal Use of the Underground Fundamentals, Approvals, Environmental Aspects*", VDI 4640, Part 1 ~ Part 4