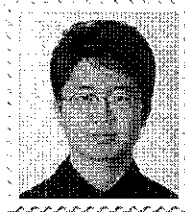


댐 구조물의 안전관리를 위한 계측시스템



남 순 성
(주)이제이텍
대표이사
ssram@ijeitech.net



손 창 범
(주)이제이텍
기술연구소 연구원
schangp@ijeitech.com

1. 머리말

최근 들어 댐과 같은 국가 주요 기반시설물의 건설이 급격히 증가되는 반면에 체계적이고 과학적인 유지관리 시스템의 활성화는 여전히 부족한 실정이다. 댐과 같은 지반 구조물의 건설시 이론적 해석방법과 경험적 방법에 의하여 가정한 물성치를 통해 설계가 이루어지므로 현장여건의 공학적 특성에 따른 구조물의 유지관리가 이루어져야 한다. 일반적으로 댐 계측은 기초기반과 구조물과의 실제거동을 파악하여 새로운 이론이나 제안에 대한 검증을 가능하게 하며, 계측결과를 분석하여 예상치 못했던 위험을 미리 감지하고 대책을 강구하도록 한다. 또한, 시공이 완료된 후에도 구조물의 장기적인 거동을 관측하여 안정을 유지 가능하도록 한다. 최근에는 IT산업의 발달로, 자동화 시스템을 구축하여 실시간 데이터 정보처리 및 전송이 가능하게 되었으며, 또한, 실시간 예·경보 시스템을

스마트폰과 연계하여 보다 효율적인 시스템을 구축하고 있다. 또한 광섬유 센서 및 멀티 안테나 GPS 등과 같은 최신 기술을 토목 건축용 현장에 접목시켜 보다 정밀하고 안정적인 유지관리를 위하여 노력하고 있다. 본 기사에서는 최근에 수행한 댐 계측 현장, 유지관리 시스템, 그리고 최근 댐 계측 기술동향에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

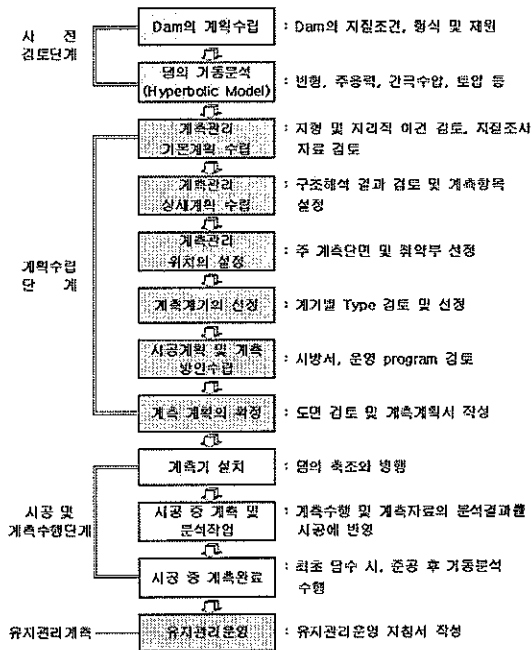
2. 댐 계측의 목적 및 필요성

댐 계측기기의 설치목적은 시공 중 관리에 필요한 자료를 수집하고 분석하여 안정된 시공을 유도하고, 구조물 완공 후의 거동을 관찰하여 댐의 생존에 관련되는 이상현상이 나타날 때 적절한 대책을 마련하여 인적, 재산 피해를 최대한 줄이고자 하는 것이다. 댐은 장기적으로 유지관리가 이루어지는 동안 지속적으로 안전이 보장되어야 하며, 계측 모니터링은 이러한 안전평가에 있어 매우 효과적인

수단이다. 댐 지역의 지형 및 지질, 제체의 예상거동 등을 고려한 계측수행을 통해, ①축조재료의 함수비, 시공속도, 포설높이의 조절을 위한 시공관리, ②담수시, 수위급상승시 또는 급하강시, 지진시 등의 안전관리, ③안전성 검토를 위한 기초자료 제공, ④향후 댐 설계 또는 시공시 기초자료를 제공하는 목적을 이룰 수 있다. 계측을 통하여, 설계시 가정한 불확실성을 확인하고, 새로운 이론 및 시공기술의 적합성을 검증할 수 있다. 또한 댐 사고의 특성을 규명할 수 있으며, 공사완료 후 장기적인 운영 및 유지관리가 가능하며 보수보강 전·후의 개선효과검증에 대한 수행이 가능하다.

3. 계측기기의 선정 및 유지관리

계측시스템은 댐의 형식, 재해등급, 가용한 비용, 그리고 관리 규정 등을 고려하여 선정하여야 한다.



〈그림-1〉 댐 계측기기 설치작업 순서도

계측기기를 작동원리에 따라 분류하면 기계적인 방법

과 전기적인 방법으로 나눌 수 있다. 기계적인 방법은 수동적으로 물리적인 변화량을 직접 계측하거나 계측빈도 및 계측기간이 짧은 경우에 유리하다. 전기적인 방법은 자동화를 이용한 원격계측이 가능하며 작업환경이 열악하거나 계측빈도가 높은 경우에 유리하다. 계측기기 선정시 ①기초지반, 지하수, 주변환경 등의 상황과 설계 및 시공 방법 등을 파악하여 선정하고, ②계측기와 계측시스템을 일치시키고 계측항목이 많은 경우에는 가능한 통일된 방식의 계기를 선정하며, ③계측방법, 설치방법 및 계측시스템에 따른 경제성을 검토하여 계측기기의 형식, 치수, 용량, 정밀도 및 신뢰성을 최종적으로 결정한다.

4. 댐 형식별 계측항목

4.1 필 댐

필 댐의 계측항목은 댐체의 변형, 응력, 간극수압, 침투량, 지진과 기초의 간극수압 측정을 원칙으로 한다. 계측기기는 변형측정을 위하여 측량점, 경사계, 층별침하계, 액상침하계, 수평변위계를 설치하고 토압계, 간극수압계, 침투량계, 지진계 등을 설치한다.

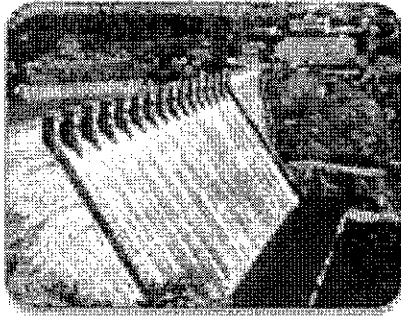


〈그림-2〉 필댐

4.2 콘크리트 댐

콘크리트 댐의 계측항목은 댐체의 온도, 변형, 응력, 침투량, 지진과 기초의 간극수압과 양압력 측정을 원칙으로 한다. 계측기기는 일반적으로 온도계, 개도계(Gate

Positioner), 응력계, 무응력계, 침투량계, 지진계, 간극수 압계, 양압력계 등을 설치한다.



〈그림-3〉 콘크리트 댐

4.3 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CRFD)

콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐의 계측항목은 댐체의 변형, 응력, 침투량, 지진과 차수벽의 변형, 응력 및 기초의 간극수압 측정을 원칙으로 한다. 계측기기는 변형측정을 위하여 측량점, 경사계, 층별침하계, 액상침하계, 수평변위계를 설치하고, 차수벽의 변형측정을 위한 변위계, 개도계 (Gate Positioner), 주변 이음부 변위계 (Perimetric Joint Meter)를 설치하며, 토압계, 침투량계, 지진계, 간극수압계, 응력계, 무응력계 등을 설치한다. 댐의 규모, 기초지반, 안정해석 결과 등에 따라 조정이 가능하다.



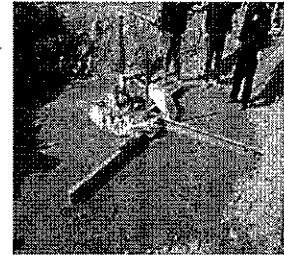
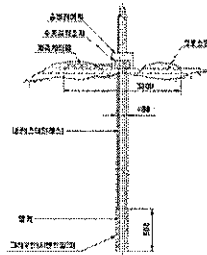
〈그림-4〉 콘크리트 차수벽형 석괴댐

5. 계측기기 설치방법

댐 계측을 위해 설치되는 계측기기는 댐 시공 중 및 준공 후 그리고 담수시에도 망실을 대비하여 효과적으로 댐의 안정성을 확인하여야 한다. 댐 거동 분석을 위해 설치되는 대표적인 계측기기는 다음과 같다.

5.1 층별침하계

층별침하계는 성토로 인한 설치 심도별 수직 침하량을 측정한다.

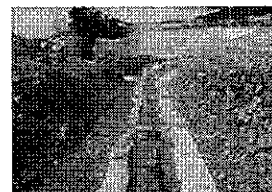
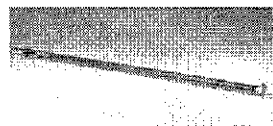


〈그림-5〉 층별침하계 설치

층별침하계는 일반적으로 성토 전, 댐 제체 원지반에 고정부를 설치하며, 성토 중에는 성토 높이에 따라 로드와 보호관을 연결한 후 센서 설치높이에 설치한다. 성토 중에는 수동으로 측정이 이루어지며, 성토가 완료된 후에는 자동기록계를 연결하여 측정된다.

5.2 수평변위계

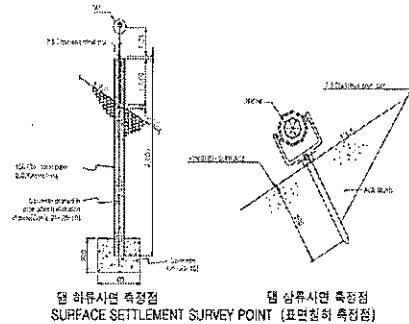
수평변위계는 댐 성토가 진행됨에 따라 댐 상·하류 방향의 수평 변위량을 측정한다. 일반적으로 설치 위치에 약 1m정도 성토가 진행된 후, 수평변위계가 설치된다.



〈그림-6〉 수평변위계 설치

5.3 표면침하계

표면침하계는 댐 상·하류 사면의 수평 및 수직 변위를 측정하며, 댐 시공 중이나 완공된 후, 표면침하 측정점을 설치한다.

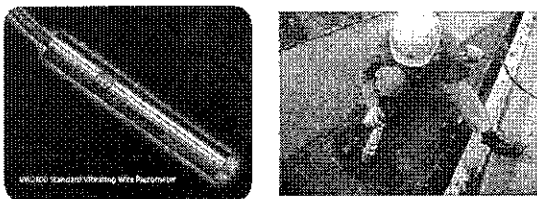


〈그림-7〉 표면침하계 설치

또한, 자동광파기로 변위를 측정한다. 표면침하계는 정부(Crest)침하계와 함께 외부변위계를 이루고 있으며, 댐의 상·하류 사면의 수평변위와 수직변위의 크기를 파악하여 안정화 과정의 거동상태를 파악할 수 있다.

5.4 간극수압계

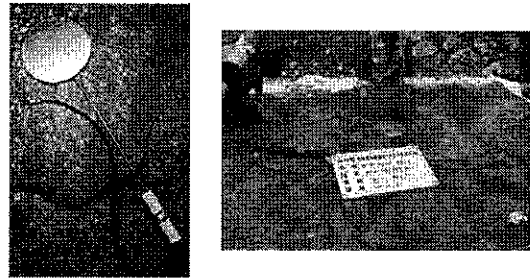
간극수압계를 사용하여 차수그라우팅 효과에 대한 확인이 가능하며, 댐 완공 후 제체아래 원지반의 침투수 확인이 가능하고 유선망 작도에 필요한 자료로 활용될 수 있다. 일반적으로 간극수압계는 차수그라우팅 및 압밀그라우팅 완료 후에 설치하며, 댐 제체 원지반에 대해서는 성토 전에 설치된다.



〈그림-8〉 간극수압계 설치

5.5 토압계

토압계를 사용하여 댐 성토진행에 따른 토압의 증가를 측정하며 주응력 방향을 추정한다.

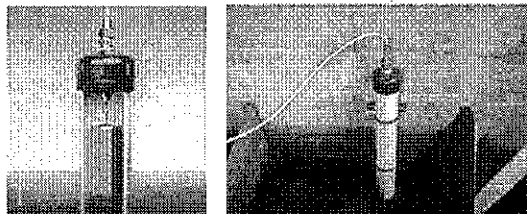


〈그림-9〉 토압계 설치

일반적으로 토압계는 설치위치에 약 1m 정도 성토가 이루어진 후 설치된다.

5.6 누수량 측정계

댐 담수 후 제체를 통과한 누수량을 측정하기 위한 도구로서, 시공중에는 정류관 및 V형 노치(V-Notch)가 설치되며, 누수시점에는 센서 설치의 세팅이 완료된다.



〈그림-10〉 누수량측정계 설치

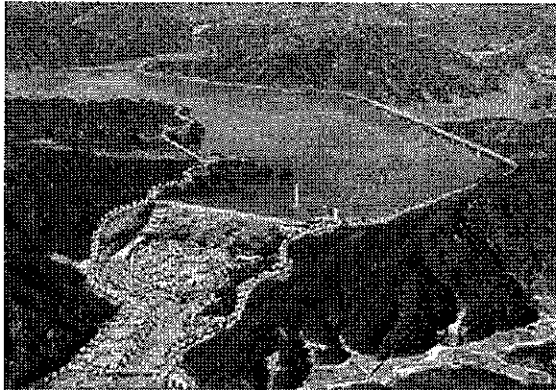
6. 댐 건설공사 계측사례

6.1 부항 다목적댐

가. 개요

부항 다목적 댐은 경상북도 김천시 00면 00리 일원에 위치하고 있다. 본댐의 축조량은 2,160,000m³으로써 높이

는 64m, 길이는 총 472m의 규모로 하상 사력재를 이용한 콘크리트 표면 차수벽형 석괴담(CRFD, Concrete Face Rockfill Dam) 형식으로 건설 중이다.



(그림-11) 부항 다목적댐 조감도

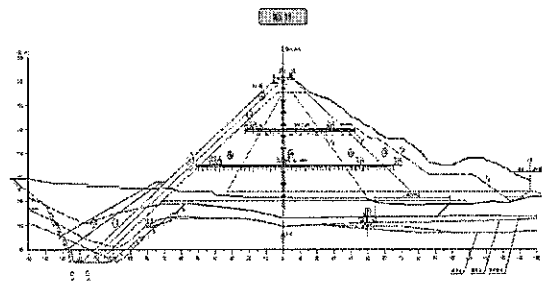
콘크리트 표면 차수벽형 석괴담은 제체의 최대단면에서 50% 이상의 압력을 사용한 석괴담 중 표면을 콘크리트로 포장한 것으로서, 댐 단면이 콘크리트 차수벽과 이 차수벽을 지지하는 차수벽 지지층 및 사력층으로 구성된 댐이다. 국내에는 부항댐 외에 부안댐, 밀양댐, 남강보강댐, 평화의댐 등이 콘크리트 표면 차수벽형 석괴담 형식으로 준공되었다. 일반적인 콘크리트 표면 차수벽형 석괴담은 주 축조재료로 다량의 사력재와 암석재를 필요로 하기 때문에 댐축조를 위한 석산 개발과 같은 환경파괴가 불가피하다는 단점을 지닌다. 하지만, 부항댐의 경우 댐 수몰지에 다량 분포하는 하상 사력재를 주 축조재료로 활용함으로써 환경 친화적이면서 경제성을 확보하였다. 또한 하상 사력재의 공학적 특성을 분석한 후 본 댐의 구조적 안정성을 확보하여 설계 시공하였다.

나. 부항댐 계측기기 설치 현황

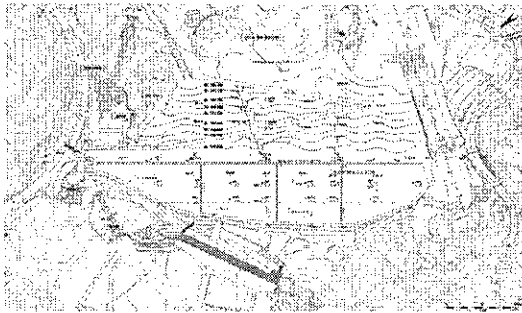
콘크리트 표면 차수벽형 석괴담 형식의 부항 다목적댐의 안정평가와 거동분석을 위해 표 1과 같이 매설계기를 설치하였다.

(표-1) 부항댐 매설계기 현황 및 설치목적

계측기명	개소	설치목적
경사면 변위측정계	3	담수에 따른 차수벽의 변형 거동 파악
수직이음부 수평변위측정계	14	댐체의 내부변형 상태 파악
변형을 측정계	14	차수벽 내부의 변형을 측정
정부(Crest)침하 측정점	5	댐마루의 수평 및 수직변위 측정
표면침하 측정점	17	상, 하류 사면의 수평 및 수직변위 측정
수직침하계	18	제체 내부 동일한 높이의 상류, 하류의 수직침하 측정
수평변위	2	제체 내부의 상·하류 수평방향 변위 측정
토압계	19	제체의 중량 및 응력전이, 담수에 의한 수직, 수평응력에 의한 주응력과 각도 측정
간극수압계	23	기초암반층의 침투류 발생 유무의 확인 및 차수그라우팅 효과 확인
지진계	3	댐에 전달된 지진을 측정하여 댐체에 미치는 영향 파악
누수량 측정장치	2	차수벽 및 기초지반을 통한 누수량 측정
수위측정기	2	댐 양안부의 지하수위 측정
기준점	2	정부 및 표면 침하측정을 위한 기준점
층별침하계 및 경사계	5	제체중양부 위치별 수직침하 측정
무응력 변형을 측정계	2	콘크리트 제체의 수화열, 주변의 대기 온도 등에 의해 발생하는 콘크리트 자체 응력 및 변형을 측정
주변이음부 변위측정계	6	차수벽과 주변이음 연결부의 변위 측정



(그림-12) 부항 다목적댐 댐체 매설계기 횡단면도



(그림-13) 부항 다목적댐 계측기 설치 평면도

다. 계측빈도

댐의 거동은 일일 축조량과 작업기계 및 기상 등에 영향을 받으므로 데이터의 변화속도와 안전과의 관련성을 충분히 고려하여 적절한 계측빈도로 설정해야 한다. 부항 다목적댐 건설현장에 매설되어 설치된 계측기는 표 2와 같은 빈도로 측정된다. 데이터의 변화속도는 계측시기, 측정위치, 계측항목 등에 따라 다르다. 데이터의 변화속도가 빠른 계측항목은 빈도를 높여야 하며 안전과의 직접적으로 관련된 가진 계측항목일수록 측정빈도를 높여야 한다. 또한, 계측항목은 상호 비교검토가 필요하므로 관련항목은 동일시기에 계측을 실시하며, 그 중 빈도가 높은 것은 별도로 측정한다. 측정주기를 변경하고자 할 경우, 계측자료 분석 등을 통하여 타당성을 확보한 후 변경하여야 한다.

[표-2] 부항댐 계측빈도

항 목	1단계	2단계	3단계	4단계
경사면 변위측정계	매일	주1회	매일	매일
수직이음부	매일	주1회	매일	매일
변형률 측정계	매일	주1회	매일	매일
정부(Cres)침하 측정점	매일	매일	매일	매일
표면침하 측정점	매일	매일	매일	매일
수직침하계	매일	주1회	매일	매일
수평변위계	매일	주1회	매일	매일
토 압 계	매일	주1회	매일	매일
간극수압계	매일	주1회	매일	매일

지진계	매일	매일	매일	매일
누수량 측정장치	매일	매일	매일	매일
수위측정기	매일	주1회	매일	매일
기준점	매일	주1회	매일	매일
층별침하계 및 경사계	매일	주1회	매일	매일
무응력 변형률 측정계	매일	주1회	매일	매일
주변이음부 변위측정계	매일	주1회	매일	매일

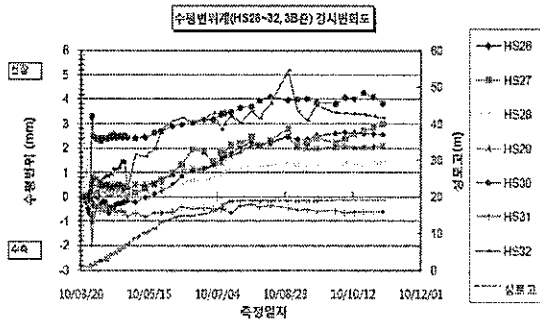
[표-3] 부항댐 시공중 측정기간

구 분	측 정 기 간
1단계	매설계기 설치 후 1개월간
2단계	매설계기 설치 1개월후부터 댐 완공시
3단계	측정치가 이상거동을 보이고 있는 경우로서 안전이 확인될 때까지
4단계	홍수조절 또는 지진발생 후 1주일간

라. 계측결과 분석

현재까지 부항 다목적 댐의 시공이력 및 매설계기 측정 결과를 분석하여 댐 체의 거동양상에 대한 특장을 도출시키며 이를 통해 잔여공정 진행의 적정성과 댐 축조에 따른 댐체의 안정성에 대한 검토의견을 제시하였다. 2010년 11월 3일까지의 층별침하계와 수평변위계, 2010년 9월 14일까지의 표면침하계 등의 변위관련 계측 결과는 다음과 같다.

1. 댐 축조시공시 특별한 댐체 이상거동은 나타나지 않는다.
2. 강우에 의한 일시적 침하 또는 변위증가 현상이 나타났지만, 현재 모두 안정적 변위수렴을 나타낸다. 향후 표면 차수벽(Face Slab)시공시 예상되는 추가 수평변위는 매우 작을 것으로 판단된다.

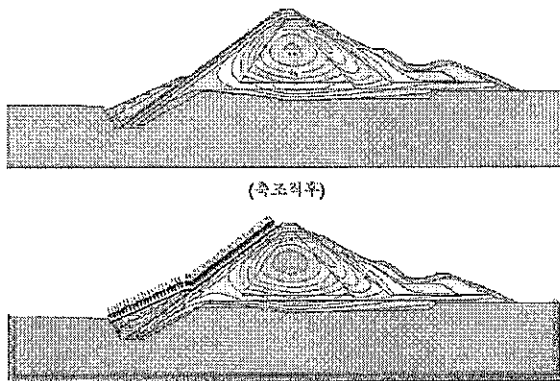


〈그림-14〉 축조과정에 따른 수평변위

마. 수치해석결과 분석

최근에는 매설계기를 이용한 계측분석 외에 부항댐의 거동분석을 더욱 세밀하게 조사하기 위하여, 캐나다의 Geo-Slope사에서 개발한 유한요소해석 프로그램 (SIGMA/W Ver.5.0)을 사용하여 부항 댐의 변형거동분석을 수행하였다.

수치해석결과 최대 침하량은 약 18.3cm로 예상되며, 위치로 댐 체 중앙부에서의 높이의 약 57%에 해당하는 EL. 176m부근으로 판단된다. 침하량 분포형상을 분석한 결과, 총별침하계는 정상적으로 작동을 하고 있으며 댐 체의 안정적인 거동을 잘 나타내고 있다고 판단된다.

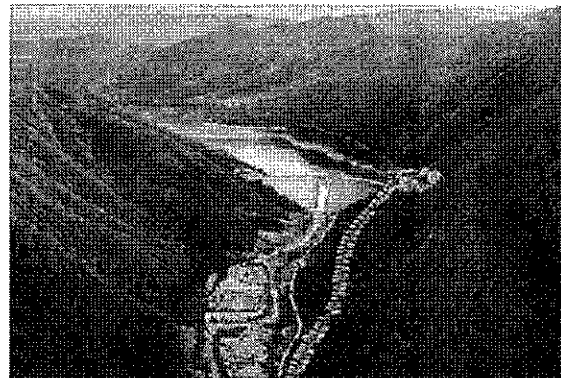


〈그림-15〉 축조직후 및 담수시의 침하량(단위:m)

6.2 보현산 다목적댐

가. 개요

보현산 다목적댐은 경상북도 영천시 00면 00리 일원에 위치하고 있다.

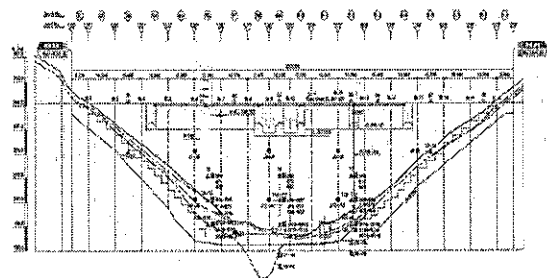


〈그림-16〉 보현산 다목적댐 조감도

본 댐의 총 저수용량은 2,200,000m³으로써 높이는 57m, 길이는 총 245m의 규모이며 콘크리트 중력 댐 형식으로 2010년에 준공을 시작하여 2014년에 완공될 예정이다. 콘크리트 중력식 댐은 댐체의 중량으로 저수 수압에 저항하는 댐이다.

나. 보현산 댐 계측기기 설치 현황

콘크리트 중력식 댐 형식의 보현산 다목적댐의 안정평가와 거동분석을 위해 표 4와 같이 매설계기를 설치하였다.



〈그림-17〉 보현산 다목적댐 댐체 매설계기 횡단면도

(표-4) 보현산 댐 매설계기 현황 및 설치목적

계측기명	개소	설치목적
FBG 온도계	22	콘크리트의 품질관리
FBG 신축이음계	13	저수위 변동 등에 시공이음부 상태파악
FBG 변형률계	18	저수위 변동 등에 따른 댐체의 응력분포 및 거동상태 파악
FBG 응력계	18	저수위 변동 등에 따른 댐체의 응력분포 및 거동상태 파악
FBG 무응력계	18	응력계 측정결과의 보정
FBG 간극수압계	8	커튼 그라우팅의 차수효과 파악
FBG 양압력계	8	댐체의 안정성 검토
FBG 누수량측정장치	2	누수량에 대한 제체의 안정성 파악
FBG 프렐라인 장치	1	담수시 및 준공완료 후 댐체체의 변위측정
침하점-멀티 안테나 GPS	8	댐체의 외부변형 상태파악
지진계	3	지진시 댐체의 거동특성 파악

다. 계측빈도

보현산 다목적댐 건설현장에 매설되어 설치된 계측기는 표 5에 제시된 빈도로 측정된다.

(표-5) 보현산 댐 계측빈도

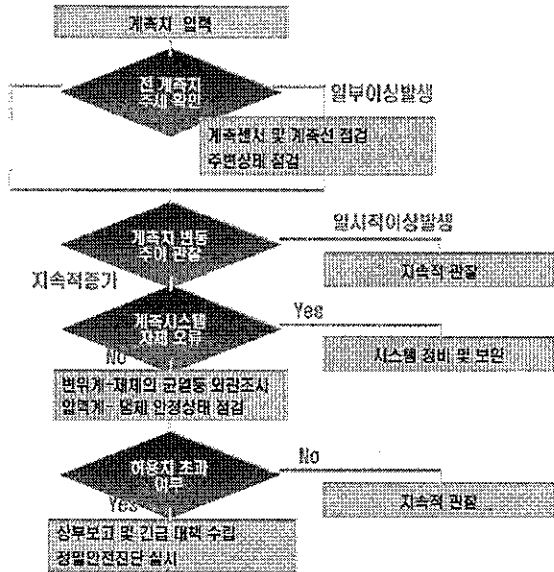
항목	1단계	2단계	3단계	4단계
FBG 온도계	매일	주1회	매일	매일
FBG 신축이음계	매일	주1회	매일	매일
FBG 변형률계	매일	주1회	매일	매일
FBG 응력계	매일	주1회	매일	매일
FBG 무응력계	매일	주1회	매일	매일
FBG 간극수압계	매일	주1회	매일	매일
FBG 양압력계	매일	주1회	매일	매일
FBG 누수량측정장치	매일	매일	매일	매일
FBG 프렐라인 장치	매일	주1회	매일	매일
침하점-멀티안테나 GPS	매일	주1회	매일	매일
지진계	매일	매일	매일	매일

(표-6) 보현산 댐 시공중 측정기간

항목	1단계	2단계	3단계	4단계
FBG 온도계	매일	주1회	매일	매일
FBG 신축이음계	매일	주1회	매일	매일
FBG 변형률계	매일	주1회	매일	매일
FBG 응력계	매일	주1회	매일	매일
FBG 무응력계	매일	주1회	매일	매일
FBG 간극수압계	매일	주1회	매일	매일
FBG 양압력계	매일	주1회	매일	매일
FBG 누수량측정장치	매일	매일	매일	매일
FBG 프렐라인 장치	매일	주1회	매일	매일
침하점-멀티안테나 GPS	매일	주1회	매일	매일
지진계	매일	매일	매일	매일

라. 계측관리

보현산 댐에 매설된 계측기기의 관리 기준은 시공단계 별로 구조계산서 및 설계도서를 참고하여 현장상황에 적합한 합리적인 기준을 선정하여 운영한다. 또한, 계측기기 설치 후, 데이터를 수집하고 분석하여 시공 중 및 시공 후 댐의 안전관리와 품질평가 자료에 유용하게 사용된다. 계측치 처리과정에 대한 흐름은 그림 18과 같다. 만약 이상 계측 값이 발생할 경우, 매설계기 혹은 장비의 정밀한 시험을 통해 고장 유무를 판단하고, 유사현장의 측정결과 비교를 통하여 계측데이터의 신뢰성 여부를 판단한다. 그림에도 불구하고 이상 관측 값으로 평가될 경우, 전문가에 의한 구조해석을 실시하며, 계측기기의 고장에 의한 오작 등으로 판정될 경우, 재설치되어 관리된다.



〈그림-18〉 보현산 댐 계측데이터 처리계획

7. 매설계기 및 케이블 보호방법

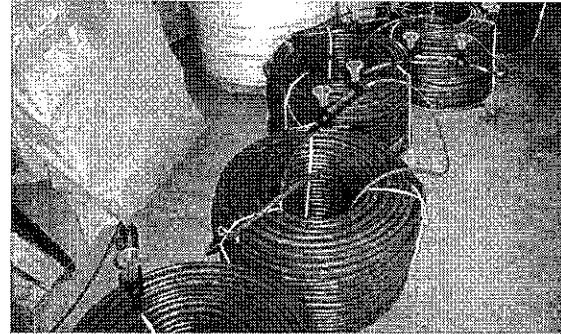
7.1 센서 보호방법

센서보호를 위하여 계측기기가 설치된 위치에 중장비를 이용한 대한 작업수행을 금지하며, 필요시 서행하도록 조치한다. 각 계측기의 위치, 심도 및 종류별로 일련번호를 부여하고 명찰을 각 계측기에 부착하여 관리한다. 또한 보호펜스, 주의 표시판, 야광판 등을 설치하여 주의를 요하며 작업 인부에 대한 교육을 실시한다.

7.2 케이블 보호방법

각종 케이블 및 보호관은 지반침하 및 전단변형에 의하여 단선되지 않도록 여유를 주고 설치하여야 한다. 긴급적 센서선과 유도선을 실링키트로 연결하여 방수성을 최대한으로 확보하여야 한다. 또한, 예상 침하량의 1.5배 이상과 케이블 길이를 확보하여 여유를 갖는다. 케이블 끝부분에는 매설계기의 종류와 번호를 표시하며 고무캡이나 테이프

등으로 방수처리를 한다. 케이블 부근에는 가급적 뾰족한 암석을 제거한 성토재로 시공하며, 소형장비로 다짐을 시행하고, 다짐할 때는 집중하중이 가해지지 않도록 주의하여야 한다.



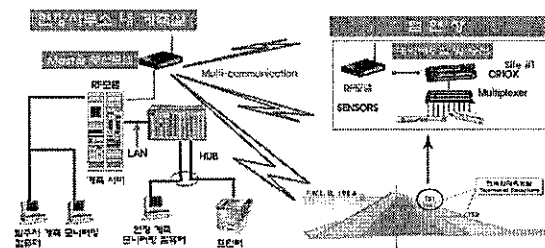
〈그림-19〉 실링키트로 연결한 센서케이블

8. 지속 가능한 유지관리방안

8.1 자동화 계측 시스템

댐 현장의 자동계측 시스템은 무선통신을 이용하여 현장 계측사무실에서 실시간 모니터링 확인이 가능하고 발주처에서 요구하는 데이터를 전송할 수 있는 자동계측 시스템 방식이다.

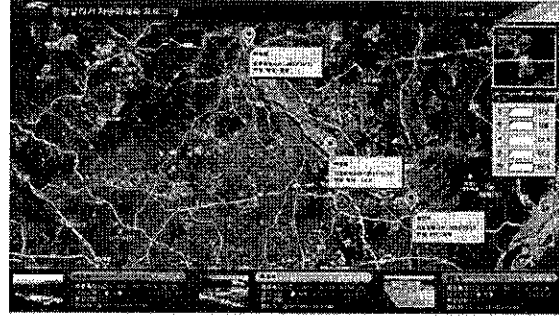
현장 여건에 따라 자동계측 시스템의 구성은 센서, 데이터로거(Data Logger), 컴퓨터, 프린터, 기타장치들이 조합되어 일련의 계측 데이터 획득이 가능하도록 하였다. 표 7에서는 부항 다목적 댐에 구축된 자동화 시스템 항목을 나타내며, 그 구성도가 그림 20에 나타난다.



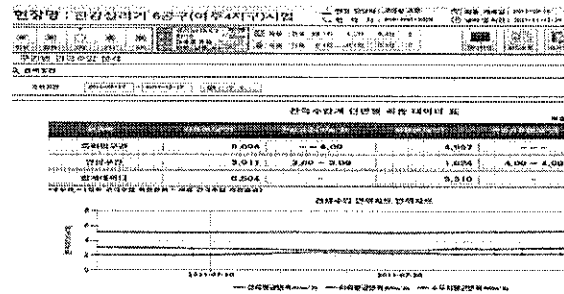
〈그림-20〉 자동화 계측 시스템 개념도

(표-7) 자동화 시스템 구성항목

구 성 항 목	수 량	매 설 계 기
Dala Logger (정적)	8 set	① 간극수압계 ② 토압계
지진계 Logger (동적)	1 set	③ 증별침하계 ④ 경사계
Mux 및 부수자재	14 set	⑤ 수평변위계
Server 컴퓨터 및 Rack	1 set	⑥ 수직침하계 ⑦ 변형률측정기
온도 자동 조절 히터	8 set	⑧ 무응력 변형률 측정계 ⑨ 수직이음부 수평변위계
태양열 전원장치	8 set	⑩ 주변이음부 변위측정계
UPS/AVR	1 set	⑪ 경사면 변위측정계
무선모뎀 및 안테나	9 set	⑫ 정부침하측정점
낙뢰 보호설비	1 식	⑬ 표면침하측정점
시스템 구축비	1 식	⑭ 누수량 측정장치
계측 시스템 프로그램	1 식	⑮ 수위측정기 ⑯ 지진계



(그림-21) 통합시스템 메인화면



(그림-22) 계측관리 프로그램 화면

8.2 실시간 계측관리 프로그램

댐에 설치된 계측 데이터를 자동으로 취합하는 데이터 프로그램(Data Acquisition Program)을 통해 계측간격을 조절하고 관리하며, 계측 데이터를 데이터베이스에 물리량으로 변환하고 저장한다. 또한, 프로그램 화면을 통해 시스템에서 데이터를 취합하는 과정을 지속적으로 확인할 수 있다. 물리적 보안 대책으로 컴퓨터 및 관련 장치들을 사고, 재해, 환경적 위험 요소들로부터 보호하기 위하여 별도의 계측실을 구축하고 보안구역으로 설정한다. 또한 프로그램의 보안기능으로서 외부 사용자 접근의 차단, 자료 유출의 방지 기능을 통해 계측관리시스템을 구현하고 사용자 등록 시 관리자의 인증을 통해 보안기능을 더욱 강화한다.

그림 21과 22는 현재 4대강 살리기 현장의 자동화계측 프로그램을 통해 수위정보를 실시간으로 확인 가능함을 보여준다. 또한, 프로그램의 사용으로 상류와 하류의 수두차를 실시간으로 확인하여 간극수압에 대한 분석이 용이하게 이루어지도록 하고 있다.

8.3 정보기능

경보발생 시, 관리기준치를 1, 2, 3단계로 지정하여 각 단계별로 경고조치가 이루어진다. 경보대상지정은 발주처와 시공사의 관리자를 지정하여 핸드폰을 통한 SMS 및 이메일을 통하여 실시간으로 경고사항과 상세경고내용을 보낸다.

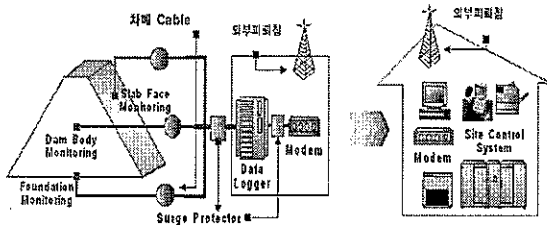


(그림-23) 스마트폰을 사용한 경보문자전송

또한, 경고이력을 저장하여 댐 건설시 관리사항을 재검토하고, 향후 댐 관리의 지표로 삼을 수 있도록 하였다.

최근에는 스마트폰의 대중화로 인해 실시간 경보 시스템을 스마트폰과 연계하여 보다 효율적인 구축망을 확보하는데 주력하고 있다.

8.4 낙뢰 보호설비



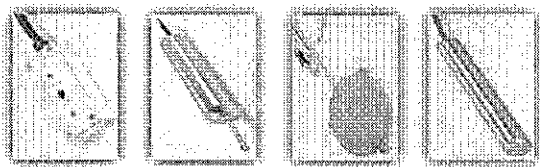
<그림-24> 낙뢰보호 시스템 개념도

댐에 매설된 계기는 대부분 전기 및 전자기기로 이루어진 민감한 계기들로서 낙뢰로 인한 파동(surge)발생과 전기적 과도현상으로 인해 계기 손상 및 오작동을 유발할 수 있으므로 신뢰성 있는 자료의 수집이 불가능할 수 있다. 따라서 운영 중 낙뢰와 같은 외부 환경적 요인으로부터 매설계기의 손상을 최소화하기 위해 접지 및 낙뢰보호시설을 설치하여 매설계기를 보호함으로써 신뢰성 있는 자료를 수집하여 댐을 안정적으로 유지하며 관리하게 된다.

9. 최신 댐 계측 기술동향

9.1 광섬유 센서(Fiber Bragg Grating)

토목 건축용 광섬유 센서는 그레이팅 길이 변화에 의해 파장이 변화하는 것을 기반으로 구조물의 여러 부위에서



<그림-25> 토목 건축용 광섬유센서

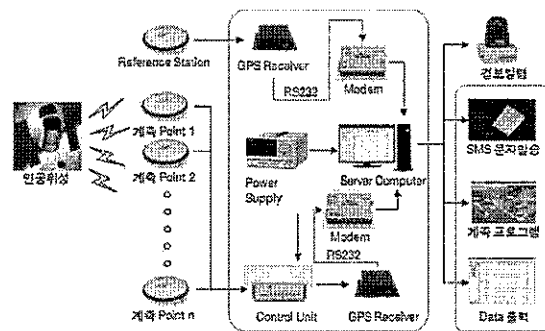
스트레인, 변위량, 압력, 온도 등의 다양한 물리량을 측정하는데 사용된다.

광섬유 센서의 사용으로 측정된 정보를 수집하고 처리할 수 있는 다중점 센서 또는 분포 센서의 구현이 가능하다. 또한, 전자기파에 간섭을 받지 않고, 분해능이 좋으며, 부식이 되지않아 내구성이 좋고, 낙뢰의 염려가 없다는 장점을 가지고 있다.

현재 보현산 다목적댐과 같은 콘크리트 중력식 댐의 댐체와 댐 기초에 광섬유센서를 적용한 온도계, 변형률계, 지진계, 간극수압계, 지중경사계, 토압계 등과 같은 매설계기들이 설치되었다.

9.2 멀티 안테나 GPS

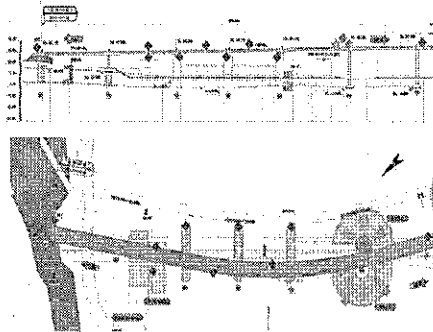
최근에는 댐 제체 정상을 관리하기 위하여 멀티 안테나 GPS(Multi-Antenna GPS)를 이용한 방법이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 멀티 안테나 GPS는 인공위성의 신호를 이용하여 기준국과 계측 포인트에 설치된 각각의 인공위성 신호 수신기와 연결하여 처리하는 시스템으로 광범위한 지역의 모니터링에 매우 적합한 시스템이다. 멀티 안테나 GPS는 계측기 주변 장애물에 영향을 받지 않으며 계절, 기압, 온도, 안개 등 외부환경에 영향을 받지 않는 장점이 있다. 또한, 1개의 수신기로 20개의 안테나를 동시에 운영할 수 있으며, 기존의 GPS시스템에 비해 경제적이며 정밀도가 ±1mm 이내로 나타나 유지관리 계측 방식에 적합하다.



<그림-26> 멀티 안테나 GPS 구성도

멀티 안테나 GPS는 그림 26과 같이 수신기, 안테나 컨트롤 장치, 안테나, 케이블, 전원장치, 서버, 소프트웨어로 구성된다. 무선 GPS 안테나를 사용할 경우에는 공사 중 계측기의 손실 및 망실을 최소화 시킬 수 있으며, 통신 시스템을 이용하여 사무실에서 실시간으로 계측 데이터의 관리가 가능하다. 계측 데이터의 이상 징후 발생 시에는 경보기능이 가동되며, 관리 담당자에게 경고 메시지가 발송된다. 멀티 안테나 GPS 계측 방식은 정확도가 높고 조작이 간편하기 때문에 댐 제체 관리 시스템으로 운용하기가 매우 용이한 장점이 있다.

현재 4대강살리기 현장에 9개의 멀티 안테나 GPS를 설치하여 현장의 이상거동유무를 확인하고 있으며, 실시간으로 이루어지는 데이터 처리 및 분석에 의해 현장유지관리가 이루어지고 있다.

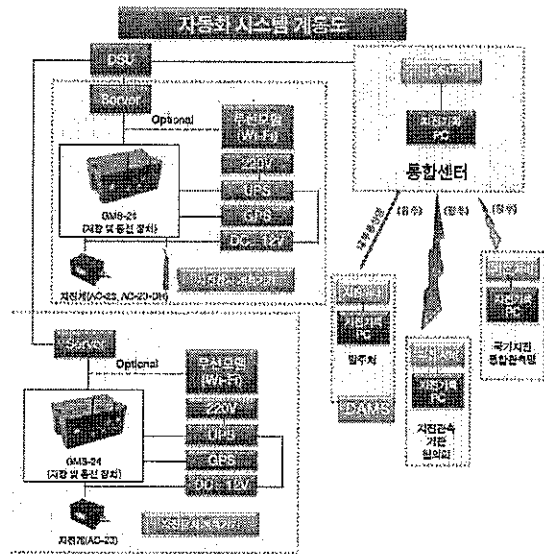


〈그림-27〉 4대강 현장 멀티 안테나 GPS 적용사례

9.3 지진 모니터링 시스템

지진 모니터링 시스템은 지진 발생시 주변구조물의 안정성을 확보하고 구조물의 동적거동 및 자료의 획득과 분석에 있어 매우 중요하게 활용된다.

그림 28과 같이 지진 모니터링 시스템은 소프트웨어 프로그램(GeoDas)의 사용으로 지진의 정보를 저장하고, 실시간으로 자료를 관리한다. 또한, 기록장비의 장애 발생시 기존에 저장된 자료를 보존하며, 지정된 크기이상의 이벤트 발생시 경보를 발생한다.



〈그림-28〉 지진 모니터링 시스템 구성도

10. 맺음말

본 기사에서는 최근의 댐 계측의 현황사례로 당사에서 수행한 부항 다목적 댐과 보현산 다목적 댐을 예로 소개하였다. 일반적으로 댐 계측기기의 설치목적은 시공 중 또는 완공 후 구조물의 거동을 관찰하여 이상현상이 나타날 때 적절한 대책을 마련하여 인적, 재산 피해를 최대한 줄이고자 하는 것이다. 또한, 계측수행을 통하여, 댐 사고의 특성을 규명할 수 있으며, 공사완료 후 장기적인 운영 및 유지관리가 가능하며 보수보강 전·후의 개선효과 검증에 대한 수행이 가능하다. 계측시스템은 댐의 형식, 재해등급, 가용한 비용, 그리고 관리 규정 등을 고려하여 선정하여야 한다.

부항 댐과 보현산 댐의 경우 안정적인 계측관리를 위하여 각각 총 16가지와 11가지의 계측기기를 설치하여 안정적인 관리를 수행하고 있으며, 다음과 같은 목적을 위하여 계측관리가 반드시 필요하다.

1. 시공관리적 측면

시공 중 계측수행을 통하여, 댐의 축조과정의 거동상태를 파악할 수 있으며, 설계시 가정하였던 불확실한 변수들을 확인하고 분석하며, 그에 따른 적절한 대책을 수립할 수 있다.

2. 안정관리적 측면

댐 완성 후, 토압계와 총별침하계 등 계측 수행결과를 통하여 댐체의 이상거동 및 변위상태를 파악할 수 있다.

3. 유지관리적 측면

댐 담수 후, 간극수압계, 변위계, 침하계 등을 이용한 계측수행은 댐의 이상거동 및 기준 초과시 댐체의 보강대책을 수립하기 위한 자료에 꼭 필요하며, 평가에도 중요한 자료로 사용될 수 있다.

4. 구조해석적 측면

매설계기의 측정결과분석을 바탕으로 댐 설계시 가정한 미지의 변수를 확인하여 설계조건을 개선할 수 있다. 또한, 댐체 및 차수벽에 관한 구조적 연구조사에도 중요한 자료로 사용된다.

부항 댐 및 보현산 댐과 같이 최근 댐 현장의 안정적인 시스템 유지관리는 신뢰성을 증대시키고 업무처리의 중단을 최소화하기 위해 무엇보다도 중요하다. 당사에서는 프로젝트 수행 중 자동계측시스템 구축팀에 의해 유지보수를 진행하며 프로젝트 완료 후에도 유지보수 조건에 따라 지속적인 관리를 수행한다. 계측기거나 통신기기는 연간 1~2회의 정기점검을 통하여 오류 발생시 수리 또는 교체가 이루어진다. 또한 데이터 관리의 효율적인 수행을 위하여 프로그램 기능확장 및 성능향상, 계측자료의 저장 및 백업체계와 같은 자동 계측시스템의 유지보수가 이루어진다.

참고문헌

1. 류대영, 조성한, "부항 다목적댐 설계 및 시공 사례," 한국토질 및 기초기술사회, (2009): 34-42.
2. "부항다목적댐 건설공사 댐 계측관리용역 사업수행계획서," (주)이제이텍, (2008): 1-191.
3. 우중태, 이래철 건설계측공학, 초판, 서울: 구미서관, 2008.
4. 한국남동발전(주), 댐 설치 및 운영관리지침, 2007
5. 한국수자원공사, 댐 계측기기 설치·운영관리지침, 2004
6. ASCE, Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance, ASCE, 2000.
7. Dunncliff, John, Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, 2nd ed, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
8. Karl, Terzaghi, Peck Ralph B., and Mesri Gholamreza, Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.