

기존 필댐 장기간 안전관리를 위한 계측항목 유지보수 우선순위 산정

Assessment of The Priority Order of Monitoring Devices on Maintenance for The Long-Term Safety of Existing Fill Dam

이종욱[†] · 전제성¹⁾ · 임희대²⁾

Lee, Jongwook · Jeon, Jaesung · Lim, Heuidae

ABSTRACT : Although readjustment of monitoring system for existing fill dam maintenance is needed by the sustainable increasing of the abandonment rate of monitoring devices by malfunction through the life-cycle of dam, monitoring plans for long-term dam safety has relied on the experience and the opinion of minor expert group without systematic and quantitative analysis on the failure modes and the priority order of monitoring devices on maintenance. In this study the priority order of monitoring devices of existing 5 fill dams was evaluated quantitatively based on the preceding study (Andersen et al, 1999) and the result recommended the establishment of real-time monitoring system for seepage, pore pressure and crest settlement as the readjustment plan for existing fill dam monitoring system. This readjustment plan matches well with the recommendation of PWRI (1984), JCOLD (1986) and the results from Bagherzadeh-Khakkahali and Mirghasemi (2005).

Keywords : Fill Dam, Dam Safety, Monitoring Devices, Maintenance

요 지 : 댐의 경과년수에 따라 고장으로 폐기되는 매설계기의 지속적인 증가로 인해 기존 필댐의 유지관리를 위한 계측시스템의 재정립이 필요한 상황이지만 필댐의 파괴모드와 계측기의 중요도에 대한 체계적이고 정량적인 분석 없이 과거의 경험과 소수 전문가의 자문의견에만 의존하여 유지관리 계측계획을 수립하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 선행연구(Andersen 등, 1999)를 기초로 하여 5개 기존 필댐 계측항목의 중요도를 정량적으로 분석하여 우선순위를 산정한 결과로서 상세 외관조사와 함께 침투수량계, 표면 침하점, 간극수압계에 대한 상시 모니터링 체계의 구축을 기존 필댐 계측시스템의 재정립 방안으로 제시하였으며 이것은 일본 토목연구소(1984), 일본 대법회(국토교통성, 1986)의 권고사항과 Bagherzadeh-Khakkahali와 Mirghasemi(2005)의 분석결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다.

주요어 : 필댐, 댐 안전관리, 계측항목, 유지보수

1. 서 론

국내의 경우 현재까지 큰 사고는 없었지만 향후 댐을 안전하게 관리하기 위해서는 가능한 빨리 이상 징후를 포착하여 보수하고 관리하는 노력이 중요하다. 댐의 유지관리를 성공적으로 수행하고 있는 영국의 경우에는 500여개 댐중 50%는 80년 이상의 공용년수를 지니고 있으며, 1,200여개의 댐을 보유하고 있는 스페인의 경우 10개의 댐은 1,600년 동안 관리되어 오고 있다(안상로, 1998). 한국수자원공사는 댐 설계기준(한국수자원학회, 2003), 다목적댐관리규정(2002. 11.14) 및 댐 매설계기 설치운영관리 지침(한국수자원공사, 2004a)에 근거하여 필댐의 시공관리, 완공후의 유지관리와 연구자료의 수집을 목적으로 댐체의 변형, 응력, 간극수압, 침투수, 지진동과 기초부의 간극수압 측정을 위한 여러 종류

의 매설계기를 표 1과 그림 1과 같이 시공 중에 체체와 기초부에 매설하여 댐의 거동분석과 안전성 평가에 이용하고 있다.

댐의 유지관리 기간의 거동분석과 안전성 평가를 위해서는 장기간의 신뢰성 있는 계측 데이터의 확보가 필수적이기 때문에 계기의 건전성 유지가 중요하다. 계기는 일반적으로 설치 후 경과년수가 증가하면서 계기 자체의 내구성, 낙뢰,

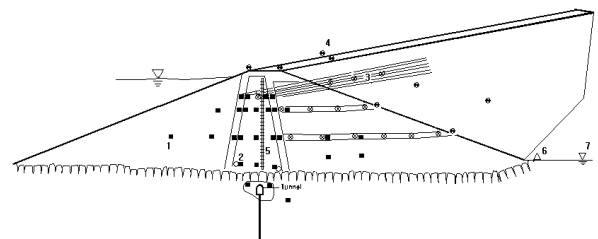


그림 1. 필댐 계측기의 배치(한국수자원공사, 2004a)

† 정희원, 한국수자원공사 K-water연구원 댐안전연구소 선임연구원(E-mail : geoljw@kwater.or.kr)

1) 정희원, 인덕대학 건설정보공학과 교수

2) 정희원, 충남대학교 공과대학 토목환경공학부 교수

표 1. 필댐 계측기의 종류(한국수자원공사, 2004a)

구분	기호	종류	권장형식	자동화	비 고
1	■	간극수압계	진동현식, 광센서형식	자동	각 존에 간극수압 및 그라우팅 효과측정
2	○	토압계	진동현식, 광센서형식	자동	토압 측정 및 아칭현상 탐지
3	⊗	수평변위계	진동현식, 광센서형식	자동	동일 표고상에 상대적인 수평변위량 측정
4	⊗	정상, 사면침하점	GPS, Total Station	자동 반자동	외부 변위 측정
5	≡	층별침하계 지중 경사계	Magnet/Reed Switch Servo Accelerometer electro-level	수동 반자동 자동	제체내의 설치지점별 침하량 측정 제체의 좌·우·상·하 변위 측정
6	△	침투수량계	초음파식, 진동현식	자동	중요 구간별로 나누어 침투수량, 수온, 탁도 측정

부식 등에 의해 건전성이 점차 훼손되어 신뢰성이 낮아진다. 일본의 토목연구소(1984)에서는 필댐 매설계기에 대한 조사를 통해 댐의 경과년수가 증가하면서 계기 고장율의 증가를 확인하였으며, 완공 후 5년이 경과하면 댐의 거동을 분석하기 위해 매설계기 이외의 다른 방법을 고려할 것을 권고하였다. 현재 한국수자원공사가 관리중인 31개 댐중 경과년수가 20년 이상인 댐은 전체의 42%를 차지하고 있다. 이와 같이 댐의 경과년수가 늘어나면서 고장으로 폐기되는 매설계기의 지속적인 증가로 인해 기존 필댐의 유지관리를 위한 계측시스템의 재정립이 필요한 상황이지만 필댐의 파괴모드와 계측기의 중요도에 대한 체계적이고 정량적인 분석 없이 과거의 경험과 소수 전문가의 자문의견에만 의존하여 유지관리 계측계획을 수립하고 있는 실정이다.

Pate-Cornell과 Tagras(1986)은 파괴 가능성에 대한 위험비용을 고려하여, 신규댐의 편익-비용분석을 개선하기 위한 방법론을 제시하였다. 이 방법론은 예상된 파괴비용에 대한 계측 시스템의 경제적인 효과를 고려하였다. 계측 시스템은 심각한 크랙의 육안관측, 분사현상의 육안관측, 극심한 폭우에 대한 기상예측의 3가지 전조 징후만을 고려한다. 이 방법론은 대상댐의 편익-비용 분석의 개선에는 이용할 수 있지만, 계측기의 중요도 평가에는 고려할 수 없다. Schewe(1987)는 계측기와 외관조사 모두에 대해 필댐의 계측계획에 대한 권고사항을 제시하였으나 중요도의 순서로 정리되지는 않았다. Dunicliff(1988)는 필댐에 적용할 수 있는 계측계획에 대한 일련의 권고사항을 제시하였고, 중요도에 따라 계측항목의 목록도 제시하였다. 목록의 최우선 순위는 외관조사였다. 계측기를 선정할 때 Dunicliff는 침투수량계, 우량계, 간극수압계, 지진계, 표면 침하점, 층별침하계, 침하계, 토압계의 순으로 제안하여 절대적인 개념으로 각 측정의 중요성에 대해서는 접근하지 못하였다. Staler 등(1995)은 각 댐에 대한 파괴모드의 발생여부 또는 가능성을 평가하기 위한 지표로 사용하는 ‘거동 파라미터(performance parameter)’를 결정하여 계측 시스템을 구성하도록 제안하였다. 각 댐은

댐안전 전문가에 의해 상세히 분석하고, 계측계획은 현재의 계측 필요성에 따라 결정한다. Andersen 등(1999)과 미공병단(USACE 1999)은 계측기의 상태평가와 중요도를 분석하여 필댐 계측기에 대한 유지보수 업무의 우선순위 평가기법을 제안하였다. Bagherzadeh-Khakkahali와 Mirghasemi(2005)는 Andersen 등(1999)과 미공병단(USACE, 1999)의 평가기법을 적용하여 이란의 5개 댐에 대해 평가한 결과 침투수량계와 간극수압계를 가장 중요한 계측항목으로 제시하였다. 계측기에 대한 유지보수 업무의 우선순위는 계측기의 상태평가와 계측기 중요도를 고려하여 우선순위를 결정한다. 계측기의 상태는 현장점검으로 평가하고, 계측기의 중요도는 댐 안전에 대한 계측기의 진단상의 중요도를 기초로 결정한다. 현재 이러한 방법론은 미공병단(USACE), Hydro-Quebec(캐나다), 미개척국(USBR), 미에너지규제위원회(FERC) 등에서 실무에 활발히 적용하고 있다.

본 연구에서는 선행연구(Andersen 등, 1999)를 기초로 하여 5개 기존 필댐(소양강댐, 안동댐, 주암댐, 주암조절지댐, 임하댐)의 계측시스템 재정립을 위한 계측기의 중요도를 정량적으로 분석하여 유지보수의 우선순위를 산정하였다. 계측기의 중요도는 댐 안전에 대한 계측기의 진단상의 중요도를 각 댐의 외관조사, 안전성 평가, 계측분석의 정밀안전진단 결과를 참고로 하여 전문가에 의한 공학적 판단으로 산정하였다.

2. 계측항목의 유지보수 우선순위 분석기법

2.1 필댐의 파괴모드와 계측항목의 상호관계

필댐의 안전관리를 위한 계측분석 과정은 다음의 그림 2와 같이 모델링할 수 있다. 파괴모드는 댐 파괴의 최초원인을 의미한다. 계측은 결함의 발생을 암시하는 지표에 대한 정보를 제공하고, 관측된 결함의 지표는 한 가지 이상의 파괴모드로 댐의 파괴를 초래하는 결함의 발생 여부를 유추하

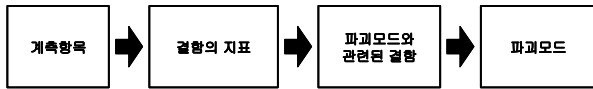


그림 2. 댐 안전관리를 위한 계측분석 과정

는데 이용한다. 이와 같이 결함의 발생 가능성을 나타내는 지표를 정확히 측정할 수 있는 능력을 나타내는 계측항목의 중요도는 파괴모드와 각 파괴모드에 관련된 결함의 조건부 확률예측, 결함의 발생을 암시하는 지표 및 이와 관련된 계측항목의 상대적인 중요도를 예측하여 평가한다. 각 단계에서의 조건부 확률과 상대적인 중요도의 예측은 전문가 그룹에 의해 합의된 공학적 판단으로 결정한다.

댐의 파괴모드는 USCOLD(1988)의 댐(81건) 파괴사례의 조사결과를 참고하여 월류, 파이핑, 표면침식, 사면활동의 4가지 파괴모드를 고려하였다. 각 파괴모드에 대한 댐에 발생 가능한 결함은 USCOLD(1988)의 조사결과와 건교부(2001)에서 제시한 댐 제체 및 여수로의 결함의 종류를 참조하여 표 2와 같이 8종류의 결함을 고려하였다. 이것은 Andersen 등(1999)과 미공병단(1999)에서 제시한 것과 유사하다. 결함의 발생 가능성 평가에 이용하는 지표는 일본 토목연구소(1984)에서 제시한 누수, 변형, 간극수압에 대한 댐 안전성 평가를 위한 데이터 분석과 건교부(2001)의 댐

의 제체, 여수로 및 부대시설물 점검시의 고려사항을 참조하여 표 3과 같은 결함의 지표를 고려하였다. 제시된 결함의 지표는 Stateler 등(1995)이 제시한 ‘거동 파라미터(performance parameter)’와 유사한 개념이다.

댐의 안전관리는 제체 및 제체 인근 표면에 대한 외관조사를 통해 댐의 거동을 감시하고, 제체에 매설된 여러 종류의 계측기로부터 계측데이터의 획득과 분석을 통해 외관조사 결과를 보완하는 것이 필수적이다. Stateler 등(1995), Fell 등(1992), Dunicliff(1988)은 모두 점검자에 의한 상시 외관조사의 중요성을 강조하였다. 본 분석기법에서는 계측항목을 정량적인 데이터를 제공하는 계측기(간극수압계, 누수량계 등)와 표면부 외관조사와 같이 정성적인 데이터를 제공하는 관측대상 표면(상류사면, 여수로, 도류벽 등)으로 분류 및 정의하였다. 건설부(1994)에서는 댐 완공 후 침투수와 변형에 대한 안전관리를 목적으로 누수량계, 간극수압계, 지하수위계, 지중 경사계, 표면 침하점을 설치하여 계측하도록 하고 있으며, 다목적댐관리규정(2002.11.14)에는 누수량, 간극수압, 침하량, 변형, 온도, 토압 등을 관측하도록 하고 있고, 일본 토목연구소(1984)와 일본 대담회(국토교통성 1986)에서는 댐의 거동 및 상태를 감시하기 위해 외관조사, 누수량, 변형을 주요 계측항목으로 규정하고 있다. 댐

표 2. 댐 파괴모드와 관련된 결함

결 합	내 용
여수로 용량 부족	설계 홍수량 초과
침식에 의한 여수로의 손상	운영중 여수로의 침식
댐마루 침하	설계표고 이하로 댐마루 침하
표면 보호재료의 손상	표면보호 재료의 침식과 손실
제체 재료의 파이핑	동수경사 작용으로 제체 코어 또는 필터 재료의 물리적인 이동
기초 재료의 파이핑	동수경사 작용으로 기초부 재료의 물리적인 이동
제체를 통한 활동(정적 또는 지진시)	제체에만 국한된 제체의 활동파괴
기초부와 제체를 통한 활동(정적 또는 지진시)	제체와 기초부를 모두 통과하는 활동파괴

표 3. 댐 결함의 지표

지 표	내 용
기초부 간극수두	동수경사 계산을 위한 간극수두 계측값 또는 유선망으로부터 추론된 값
제체 간극수두	동수경사 계산을 위한 간극수두 계측값 또는 유선망으로부터 추론된 값
침투수 발생	침투수량계가 설치되지 않은 위치(사면, 아버트먼트, 선단부)에서의 표면 침투수
침투수량 및 탁도	집수부(선단 배수공, 감압정 등)에서 측정된 침투수량과 침투수의 탁도
표면식생(vegetation)의 변화	제체 또는 하류사면 근접한 인근지역에서의 식생의 양 또는 채색의 육안변화
여수로 단면적 손실과 침식	암설, 수목 등으로 여수로 막힘 또는 여수로 침식으로 여수로 바닥면의 손상
설계형상과의 차이	설계 형상과 현재 상태 사이의 육안상 또는 측정상의 차이
표면부 크랙	댐과 주변부의 여러 곳에서의 표면 크랙
사석부 손상	파랑침식(beaching)에 대한 상류측 보호재의 현저한 손상
부동침하	제체에 위치한 부분과 기초부에 위치한 부분의 상대적인 변위의 육안 또는 측정된 증거
물고임(ponding)	예상치 못한 곳에서의 물고임 현상

댐의 안전관리를 위한 계측항목은 다음의 표 4와 같이 침투수에 대한 안전관리를 위한 간극수압계(지하수위계 포함), 침투수량계, 변형을 측정하는 표면 침하점, 지중 경사계, 제체와 여수로 및 방류설비의 외관조사를 위한 댐마루와 제각, 상류사면, 하류사면, 하류선단부, 표면부 및 경계부, 여수로 측벽의 관측대상 표면을 고려하였다. 토압계, 수평변위계, 층별침하계, 침하계는 주로 시공관리와 연구자료 수집이 목적이므로 분석대상에서 제외하였다.

본 분석기법에서 계측항목과 파괴모드 사이의 상호관계는 그림 3과 같이 분석하였다. 월류를 감시하기 위해서는 여수로의 기능유지를 위한 월류 웨어, 도수로, 바닥판, 도류벽 등 여수로 외관부, 댐마루와 제각의 육안감시와 표면 침하점에 의한 댐마루의 침하량 계측에 의한 여유고의 확인이 중요하다. 여수로 바닥부와 상·하류사면의 표면침식을 감시하

기 위해서는 여수로 외관, 상류사면, 댐마루와 제각의 표면부 침식 및 세굴에 대한 외관조사가 중요하다. 파이핑은 하류사면, 하류사면 선단, 양안부의 침투수 발생, 형상의 변화, 물고임 현상 등의 외관조사와 간극수압계에 의한 동수구배의 변화, 침투수량계에 의한 침투수량과 탁도의 변화를 측정하여 감시할 수 있다. 사면활동은 상·하류사면, 하류선단의 형상변화, 표면부 크랙 등에 대한 육안감시와 측정된 간극수압을 이용한 사면안정해석, 상·하류사면의 침하점과 지중 경사계의 변위를 분석하여 감시하는 것이 중요하다.

2.2 계측항목의 중요도 선정

계측항목의 중요도는 그림 3과 같이 분석된 계측항목과 필댐 파괴모드 사이의 관계를 이용하여 모든 계측항목에 대한 합계가 1.0이 되도록 0에서 1.0의 사이의 수치로 상대적

표 4. 필댐의 안전관리를 위한 계측항목

계측항목	내용
간극수압계	중요 위치의 그룹화된 모든 간극수압계는 중요도가 같다고 가정한다.
표면 침하점	중요도가 유사한 그룹으로 세분할 수 있다.
지중 경사계	제체내의 내부변위 측정기기
침투수량계	비정상적인 침투수량 측정을 위한 댐과 아버트먼트에 설치한 웨어
하류사면 비탈끝	유출 동수구배가 가장 높을 가능성 있는 선단부 하류의 관측대상 표면
하류사면	하류사면으로 형성된 관측대상 표면
댐마루와 제각	댐마루와 제각 표면으로 형성된 관측대상 표면
상류사면	댐마루에서 저수위까지의 상류 관측대상 표면
방류설비 외관	부등침하 또는 누수경로가 발생하기 쉬운 방류설비 인근의 관측대상 표면
여수로 외관	부등침하 또는 누수경로가 발생하기 쉬운 여수로 인근의 관측대상 표면
양안부	필댐 옆의 아버트먼트 지표면

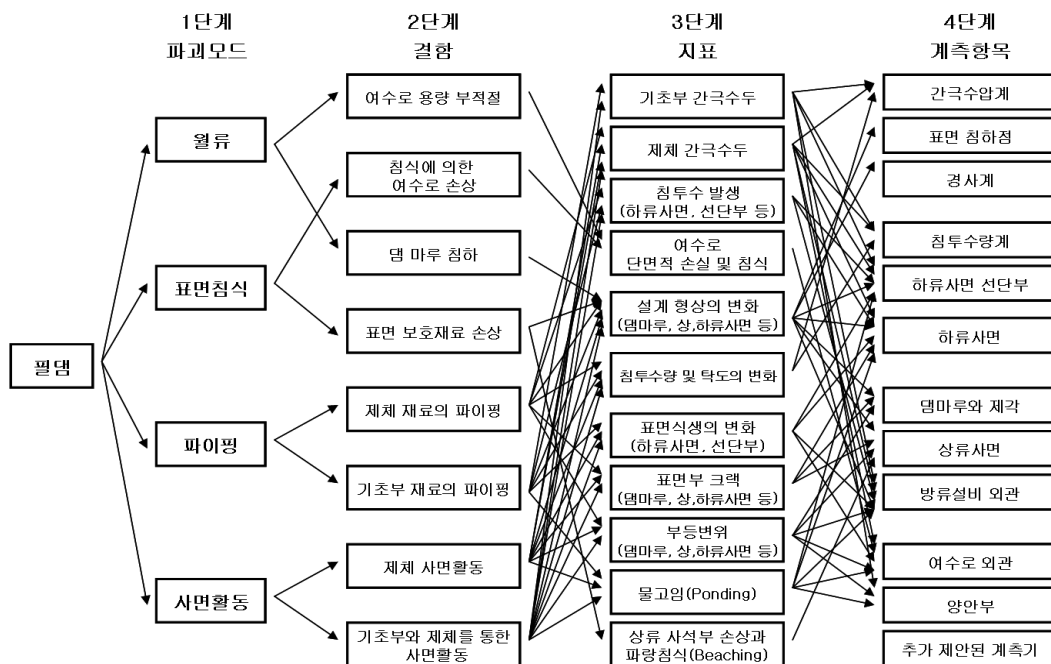


그림 3. 계측항목과 필댐 파괴모드의 관련성

으로 결정한다. 각 계측항목의 중요도[$DV_{MD}(i)$]를 정량화 하기 위해 Andersen 등(1999)이 제시한 다음의 식 (1)을 도입하였다.

$$DV_{MD}(i) = \sum_{j=1}^{n_I} RDV_{MD_i}(j) \cdot \left[\sum_{k=1}^{n_{AC}} RDV_j(k) \cdot P[AC_k|f] \right] \quad (1)$$

여기서, $P[AC_k | M_i]$ 는 각 파괴모드에 대한 결함(k)의 조건부 확률이며, $RDV_j(k)$ 는 지표(j)의 상대적인 진단상의 중요도이고, n_{AC} 는 대상 댐에 관련된 결함의 총수이다. $RDV_{MD_i}(j)$ 는 지표(j)를 고려한 계측기(i)의 상대적인 진단상의 중요도이며 n_I 는 지표의 총수이다. 식 (1)은 다음의 4단계로 전문가 그룹에 의해 합의된 공학적 판단으로 산정한다.

- (1) 파괴모드의 조건부 확률의 예측
- (2) 각 파괴모드에 관련된 결함의 조건부 확률 예측, $P[AC | f]$
- (3) 결함에 대한 지표의 상대적인 진단상의 중요도 예측, $RDV_j(k)$
- (4) 지표에 대한 계측항목의 상대적인 진단상의 중요도 예측, $RDV_{MD_i}(j)$

2.2.1 파괴모드의 조건부 확률 예측

댐 파괴의 원인이 되는 특정 파괴모드의 상대적인 발생 가능성은 상호 배타적인 사건으로 가정한 파괴모드가 댐 파괴의 최초 원인이 될 조건부 확률로 정의하고, 모든 파괴모

표 5. 필댐 파괴모드의 발생확률

파괴모드	발생확률(%)	
	USCOLD(1988)	Poster 등(1998)
월 류	49	35.9
파 이 핑	32	46.1
표면침식	10	12.5
사면활동	9	5.5

표 6. 결함의 조건부 확률

결 합	결함의 조건부 확률(%)				조건부 확률(%) $P[AC_k f]$
	월류 40%	표면침식 30%	파이핑 20%	사면활동 10%	
여수로 용량 부적절 (AC 1)	80				32(40%×80%)
침식에 의한 여수로의 세굴손상 (AC 2)		50			15(30%×50%)
댐마루 침하 (AC 3)	20				8(40%×20%)
제체 표면보호 재료의 손상 (AC 4)		50			15(30%×50%)
제체 내부의 파이핑 (AC 5)			100		20(20%×100%)
기초부 파이핑 (AC 6)			0		0
정적 및 지진시 제체를 통한 활동 (AC 7)				100	10(10%×100%)
정적 및 지진시 기초부와 제체를 통한 활동 (AC 8)				0	0
합계	100	100	100	100	100

드의 합은 100% 이다. 미공병단(1999)과 Andersen 등(1999)은 각 파괴모드의 조건부 확률의 결정에 전문가의 공학적 판단에 의한 주관적인 견해를 직접적으로 이용하였다. 파괴모드에 대한 조건부 확률은 댐의 특성, 환경적 조건, 운영 특성 및 거동기록에 따라 다르다. 댐의 주요특성으로는 댐의 형식, 기초의 종류, 기하형상, 경과년수, 과거의 거동, 축조재료 특성 등을 고려할 수 있다. 파괴모드의 발생원인이 되는 가장 일반적인 환경 요인으로는 홍수, 지진, 가뭄과 홍수의 반복, 파랑을 발생시키는 태풍 등이다. Andersen 등(1999)은 댐의 특성과 환경 요인에 대한 논의를 통해 파괴모드에 대한 전문가 그룹에 의해 합의된 공학적 판단으로 조건부 확률을 결정한 결과는 상당히 일치하는 경우가 많았다고 밝혔다. 각 파괴모드의 조건부 확률 결정에는 표 5와 같은 USCOLD(1988)와 Foster 등(1998)의 조사결과를 참조할 수 있다.

2.2.2 결함의 조건부 확률 예측

본 평가기법의 다음단계는 앞에서 설명한 파괴모드들이 영향을 미칠 수 있는 댐의 대상부를 더욱 명확히 하여, 파괴모드의 조건부 확률을 특정 위치에 관련된 결함으로 세분화하고 조건부 확률을 결정하는 것이다. 결함의 조건부 확률은 파괴모드를 고려하여 전문가에 의한 공학적 판단으로 결정한다. 이 단계는 그림 3과 표 2를 참조하여 각 파괴모드를 여러 개의 세분된 결함들과 연관시키는 과정이다. 표 6을 이용하여 전문가 그룹에 의한 공학적 판단으로 결정된 0에서 100% 사이의 값으로 결함의 발생 가능성에 대한 조건부 확률을 작성한다. 각 파괴모드에 대한 모든 결함의 조건부 확률의 합은 100%이다. 파괴모드와 관련된 결함의 조건부 확률($P[AC_k | f]$)은 식 (2)로 계산하여 표 6의 맨 마지막 열에 기입한다.

$$P[AC_k | f] = \sum_{i=1}^{N_{FM}} P[AC_k] \cdot P[f] \quad (2)$$

여기서, $P[AC_k]$ 는 파괴모드에 대한 결합의 조건부 확률이며 $P[f]$ 는 파괴모드의 조건부 확률이고 N_{FM} 은 파괴모드의 총수를 나타낸다.

2.2.3 지표의 상대적인 진단상의 중요도

다음단계는 각 결합의 조기 탐지에 이용할 수 있는 지표의 그룹을 구명하고, 이들의 상대적인 진단상의 중요도를 예측하는 것이다. 그림 3, 표 4를 참조하여 열에는 지표, 행에는 결합으로 구성된 표 7을 이용하여 각 결합을 고려한 지표의 상대적인 진단상의 중요도 $[RDV_j(k)]$ 를 전문가 그룹에 의해 합의된 공학적 판단으로 정밀도 0.1의 0~1.0 사이의 값으로 결정하고, 각 행의 합계는 1.0으로 정규화 한다. 표 7에 결정된 지표의 상대적인 진단상의 중요도 $[RDV_j(k)]$ 를 이용하여 식 2에 따라 지표의 중요도를 계산하고 맨 마지막 열에 기입한다.

2.2.4 계측항목의 상대적인 진단상의 중요도

계측기는 형식과 기능에 따라 표 4와 같이 그룹화 한다. 예를 들면 여러 개의 간극수압계는 지표에 대한 진단상의 중요도가 같다면 하나의 그룹으로 고려할 수 있다. 그림 3, 표 4를 참조하여 열에는 결합, 행에는 계측항목으로 구성된 표 8에 각 지표를 고려한 계측항목의 상대적인 진단상의 중요도 $[RDV_{MDi}(j)]$ 를 전문가 그룹에 의해 합의된 공학적 판단으로 정밀도 0.1의 0~1.0 사이의 값으로 결정하고, 각 행의 합계는 1.0으로 정규화 한다. 표 9에 결정된 계측항목의 상

대적인 진단상의 중요도 $[RDV_{MDi}(j)]$ 를 이용하여 식 (1)에 따라 계측항목의 중요도 $[DV_{MDi}(i)]$ 를 계산하고 맨 마지막 열에 나타낸다.

그룹화된 계측기는 그 그룹에서 계측기의 수량에 비례한 개개의 중요도를 갖는다. 예를 들면, 필댐의 기초 토질재료에 10개의 간극수압계가 고려되었다면 이중 하나의 간극수압계의 중요도는 $0.063/10 = 0.006$ 이다. 제안된 계측항목을 표 8에 포함시켜 추가 설치하고자 하는 계측항목의 진단상의 중요도를 예측할 수 있다.

3. 기존 필댐 계측시스템의 사례분석

3.1 대상댐의 제원 및 계측시스템의 구성

계측항목 중요도 평가를 위한 파괴모드 및 결합의 조건부 확률과 지표 및 계측항목의 상대적인 진단상의 중요도는 각 댐의 정밀안전진단으로 수행된 외관조사, 안전성 평가, 계측 분석의 결과를 분석하여 결정하였다. 대상댐의 제원은 다음의 표 9와 같다. 대상댐의 형식은 모두 중앙심벽형 사력댐이고 암반기초에 건설되었으며 정밀안전진단 결과 가능최대 홍수량(PMF)에 대한 홍수방어능력 평가에서 월류하거나 여유고가 충분하지 못한 것으로 나타나 여수로 방류능력을 증대하기 위한 여수로 보강공사가 진행중이다. 5개 대상댐은 준공후 15년~35년이 경과하였고 정밀안전진단에서 실시한 계측자료의 분석결과 댐의 거동은 모두 안정상태에 도달한

표 7. 지표의 진단상의 중요도

지 표	지표의 상대적 진단상의 중요도, $RDV_j(k)$								지표의 중요도 $\sum_{k=1}^{n_{AC}} RDV_j(k) \cdot P[AC_k f]$ (0.01에서 반올림)
	AC 1	AC 2	AC 3	AC 4	AC 5	AC 6	AC 7	AC 8	
	32	15	8	15	20	0	10	0	
(1) 기초부에서의 간극수두(Ind1)									0.00
(2) 체체에서의 간극수두(Ind2)					0.2		0.4		0.08(20%×0.2+10%×0.4)
(3) 침투수 발생(하류사면부)(Ind3)					0.2				0.04(20%×0.2)
(4) 침투수 발생(하류사면선단부)(Ind4)					0.2				0.04(20%×0.2)
(5) 여수로 단면적 손실 및 세굴(Ind5)	1.0	1.0							0.47(32%×1.0+15%×1.0)
(6) 형상의 변화(댐마루)(Ind6)			0.8				0.2		0.08(8%×0.8+10%×0.2)
(7) 형상의 변화(하류사면)(Ind7)				0.3	0.1		0.2		0.09(15%×0.3+20%×0.1+10%×0.2)
(8) 형상의 변화(상류사면)(Ind8)			0.2	0.7					0.12(8%×0.2+15%×0.7)
(9) 형상의 변화(하류사면 선단부)(Ind9)									0.00
(10) 침투수량의 변화(Ind10)					0.2				0.04(20%×0.2)
(11) 표면 식생의 변화(하류사면)(Ind11)									0.00
(12) 표면 식생의 변화(하류사면 선단부)(Ind12)									0.00
(13) 형상의 변화(부등변위)(Ind13)					0.1		0.2		0.04(20%×0.1+10%×0.2)
(14) 물고임(Ponding)(Ind14)									0.00
합계	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0		1.00

표 8. 계측항목의 진단상의 중요도

계측항목	계측기의 상대적 진단상의 중요도, RDV _{MD(i)}														DV _{MD(i)} (0.001에서 반올림)
	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind5	Ind6	Ind7	Ind8	Ind9	Ind10	Ind11	Ind12	Ind13	Ind14	
	0.00	0.08	0.04	0.04	0.47	0.08	0.09	0.12	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	
(1) 간극수압계(기초)										0.4					0.016(0.04×0.4)
(1) 간극수압계(제체)		0.6								0.4					0.064(0.08×0.6+0.04×0.4)
(2) 표면 침하점						0.3	0.3	0.3					0.4		0.103(0.08×0.3+0.09×0.3 +0.12×0.3+0.04×0.4)
(3) 지중 경사계						0.3	0.3	0.3							0.087(0.08×0.3+0.09×0.3 +0.12×0.3)
(4) 침투수량계		0.4								0.2					0.040(0.08×0.4+0.04×0.2)
(5) 하류사면 비탈끝			0.1	0.6											0.028(0.04×0.1+0.04×0.6)
(6) 하류사면			0.9				0.3								0.063(0.04×0.9+0.09×0.3)
(7) 댐마루와 제각						0.4	0.1	0.1							0.053(0.08×0.4+0.09×0.1 +0.12×0.1)
(8) 상류사면								0.3							0.036(0.12×0.3)
(9) 방류설비 외관															0.000
(10) 여수로 외관				0.4	1.0								0.3		0.498(0.04×0.4+0.47×1.0)
(11) 양안부													0.3		0.012(0.04×0.3)
(12) 제안된 계측기															0.000
정규화 합		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000

표 9. 대상댐의 제원

구분	댐명	소양강	안동댐	주암댐	주암조절지댐	임하댐
준공년도		1973	1977	1992	1992	1993
경과년수(년)		35	31	16	16	15
댐형식		사력	사력	사력	사력	사력
높이(m)		123.0	83.0	58.0	99.0	73.0
길이(m)		530.0	612.0	330.0	562.6	612.0
기초형식		압반	압반	압반	압반	압반
댐마루 표고		203.0	166.0	115.0	115.0	168.0
계획홍수위(200년빈도)		198.0	161.7	110.5	111.1	164.7
상시만수위		193.5	160.0	108.5	108.5	163.0
총저수용량(백만m ³)		2,900	1,248	457	250	595
여수로 방류능력		보강공사중	보강공사중	보강공사중	보강공사중	보강공사중

제3기(건설부, 1994; 일본 토목연구소, 1984)의 상태로 확인되었다.

5개 대상댐에는 표 10과 같이 시공 중 및 완공 후 유지관리 기간에 간극수압계, 토압계, 수평변위계, 침하점, 층별침하계, 침하계, 지중 경사계, 침투수량계, 지진계의 9종 839개의 계측계기를 설치하여 운영 중에 있다. 다만 안동댐에는 침투수량계가 설치되지 않았다. 소양강댐은 하류사면 제체에 3개의 간극수압계를 추가 설치하였다(한국수자원공사 2004b; 한국수자원공사 2006a; 한국수자원공사 2006b; 한국수자원공사 2007). 지진시 제체의 가속도 응답을 수집하는 지진계는 모두 준공후에 추가 설치되었고, 댐의 수명동안 유지관리의 필요성이 있다.

3.2 정밀안전진단 결과의 요약

3.2.1 소양강댐

소양강댐의 제2차 정밀안전진단(한국수자원공사, 2004b)에서 상세외관조사와 변위계측결과를 종합하면 최근에 큰 댐체변형은 발생하지 않았기 때문에 댐체의 변위는 안정화된 것으로 판단되었다. 전기저항식 계측기인 간극수압계와 토압계는 노후화 등으로 그 값의 신뢰도가 떨어져 측정값에 대한 평가분석에 한계가 있어 모두 폐기되었다. 제체를 통한 침투수량 변동폭은 크지 않고, 우안 하류사면 유출수의 경우 보수를 완료한 상태로 상세외관조사 및 각종 비파괴조사를 통해 이상 현상이 없는 것으로 나타났다. 가능최대홍수량(PMF)에 대한 저수지 홍수추적결과 기존 여수로만으로

표 10. 대상댐의 계측기 설치현황

구분 \ 댐명	소양강	안동댐	주암댐	주암조절지댐	임하댐
간극수압계(제체)	105(3 ^a)	24	24	28	40
간극수압계(기초)	-	2	8	8	11(7 ^a)
토압계	105	-	15	18	48
수평변위계	18(3개소)	7(1개소)	-	-	16(1개소)
정상 침하점	10	11	7	6	10
사면 침하점	9	24	32	32	25
층별침하계	33(1개소)	17(1개소)	38(2개소)	57(2개소)	24(2개소)
침하계	-	6	-	-	-
지중 경사계	-	-	-	-	2
침투수량계	1	-	1	1	1
지진계	3	3	3	3	3
계	284	94	128	153	180

a = 지하수위계의 수량

는 홍수방어능력이 부족하여 월류가 불가피하지만, 현재 치수능력증대사업으로 보조여수로 건설공사를 추진 중에 있으므로 이 사업이 완료될 때까지는 저수지 운영방식의 변경과 홍수기에 초기수위를 낮추는 방식을 통해 홍수방어능력을 확보할 수 있는 것으로 판단되었다. 제체에 대한 사면안정해석에서 지진시 최소안전율은 하류사면이 1.2, 수위급강하 상류사면이 1.31으로 나타나 댐설계기준의 최소안전율 1.2를 만족하였다. 내진해석결과 전반적으로 댐마루에서 최대변위가 발생하며, 허용변위량(댐높이의 1%) 이내의 값으로 내진성능을 만족하는 것으로 나타났다.

정밀안전진단 결과를 기초로 하여 소양강댐의 지속적인 안전관리를 위해 제시된 사항들은 다음과 같다. 진단결과 도출된 결함부위는 보수방안을 참고하여 보수하여야 하며, 보수 후에는 결함의 진행성 여부를 주기적 점검 등을 통한 주의 깊은 관찰이 필요하다. 소양강댐은 준공 후 현재까지 이상거동을 보이지 않았고 시간적으로도 안정된 상태에 있으므로 향후 변위측량과 침투수량 계측에 중점을 두는 계측유지관리방안을 제안한다. 우안부 하류의 유출로 인한 문제는 물리탐사 등의 결과를 통해 지반보강공사를 통해 해소된 것으로 판단되지만, 지속적인 댐 안전성을 확보하려면 유출지점에 대한 장기간의 모니터링이 필요한 것으로 판단되었다. 만약, 강우로 인한 계곡수 유출이 아닌 평상시에 유출수의 증가가 발견된다면 유출수량의 변화를 확인하고, 해당 저수위와 연관시켜 유출지점의 유량 관측을 제안하였다. 여수로 내 월류부와 급류부 연결부분과 고속의 유속이 발생하는 플립 버킷(flip bucket) 부분에서는 공동현상에 의한 콘크리트 손상이 불가피하므로, 향후 손상의 진행정도를 감안하여 공동현상에 대한 대책 마련의 필요성이 있다.

3.2.2 안동댐

안동댐의 제2차 정밀안전진단(한국수자원공사, 2006)에서 상세외관조사 결과, 상·하류사면의 일부 사석의 파쇄, 공극, 풍화, 사면경사 불규칙, 상류사면의 수위변동 구간에 소규모 사석 흘러내림이 조사되었고 변화는 없었다. 여수로로는 도수로 좌측옹벽의 경우 옹벽밀림 현상에 대하여 계측한 결과 더 이상의 진행은 없으나 누수나 습윤상태 등의 현상이 재 발생되고 있어 심한 부위는 보수가 필요하였다. 급류부 좌측옹벽의 경우 도로에 인접하여 노면수 유입이 크고 옹벽 배수구 기능 미흡으로 옹벽하단 결함부위에 국부적인 백태 및 누수 흔적이 발생하여 향후 관찰이 요망된다. 여수로 좌안 절토사면 일부에서 풍화가 심해져 표층붕괴 및 유실이 발생되고 있는 상태로 옹벽사면 배면에 토사가 쌓여있고, 일부는 옹벽을 넘어서 여수로 내로 유입된 상태로 향후 사면 붕괴에 의한 여수로 방류능력에 지장을 초래할 우려가 있으므로 보강공법이 필요한 것으로 나타났다.

변위측량으로 준공당시와 현재 댐마루 표고를 비교한 결과 전반적으로 설계표고보다 7~14cm 침하되었으나, 여성토고가 80cm 이므로 월류의 위험은 없다. 1차진단시와 댐마루 침하와 사면침하를 비교해보면 각각 7mm, 29mm의 범위를 나타내어 급격한 변형없이 오차범위내로 수렴하는 상태로 판단된다. 간극수압계는 코어존 상류측에서는 수위변동에 민감하며 하류측에서는 변동의 영향이 없는 정상적인 상태이다. 안동댐에 대한 진도법에 의한 지진시 사면안정해석 결과는 최소안전율 기준에 다소 미달하였으나, 동적해석법에 의한 결과는 안정한 것으로 나타났다. 가능최대홍수량(PMF)에 대한 저수지 홍수추적결과 기준 여수로만으로는 홍수방어능력이 부족하여 월류가 불가피하지만, 현재 치수

능력증대사업으로 보조여수로 건설공사를 추진 중에 있으므로 이 사업이 완료될 때까지는 저수지 운영방식의 변경과 홍수기에 초기수위를 낮추는 방식을 통해 홍수방어능력을 확보할 수 있는 것으로 판단되었다.

정밀안전진단 결과를 기초로 하여 안동댐의 지속적인 안전관리를 위해 다음과 같은 사항들이 제시되었다. 진단결과 도출된 결함부위는 보수방안을 참고하여 보수하여야 하며, 보수 후에는 결함의 진행성 여부를 주기적 점검 등을 통한 주의 깊은 관찰이 필요하다. 안동댐은 30년의 공용연수 경과로 댐체가 안정화 상태로 접어들어 급격한 외적요인이 없는 한 안정에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 안동댐의 현재 계측기 현황으로 볼 때 간극수압계와 변위에 대한 계측에 중점을 두는 유지관리방안이 타당할 것으로 판단된다. 계측데이터 분석결과 일부 노후화 등으로 신뢰성이 저하하고 평가분석에 한계가 있으며, 시간경과와 함께 안정된 상태로 향하는 반면 노후화에 대한 대비도 필요하므로 층별침하계와 침하계와 같이 신뢰성이 떨어지는 계측기에 대해서는 향후 추가적인 상태를 확인한 후 단계적인 용도폐기 등의 조치가 필요할 것으로 판단되었다.

3.2.3 주암댐과 주암조절지댐

주암댐과 주암조절지댐의 제1차 정밀안전진단(한국수자원공사, 2006)에서 주암댐과 주암조절지댐은 홍수방어능력 평가에서 가능최대홍수량(PMF) 유입시 월류하지 않지만 여유고를 확보하지 못하는 것으로 나타났으나, 현재 치수능력 증대사업으로 보조여수로 건설공사를 추진중에 있으므로 이 사업이 완료될 때까지는 저수지 운영방식의 변경과 홍수기에 초기수위를 낮추는 방식을 통해 홍수방어능력을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 댐마루와 사면의 침하점과 수평변위계의 계측결과와 기타 조사결과를 종합하면 댐체의 안전성에 문제를 나타내지는 않으나, 미세한 잔류변형은 계측을 통해 지속적으로 관리되어야 할 것으로 보인다. 주암댐과 주암조절지댐의 토압계는 저수지 수위에 영향을 받으며 시간 경과에 따라 계측값은 변동이 일정하므로 제체는 안정화된 것으로 판단된다. 3방향 1조로 구성되는 토압계의 특성상 1개 방향이라도 결측되면 토압에 대한 안정성 평가에 어려움이 있다. 주암댐과 주암조절지댐의 간극수압은 저수지 수위변동에 따라 변화하며, 시간의 경과에 따라 변동이 일정하므로 제체는 안정화 된 것으로 판단된다. 시공 중 발생된 과잉간극수압은 정수압과 거의 일치하므로 완전히 소산된 것으로 판단된다. 제체를 통한 침투수량은 변동폭이 크지 않고 탁도의 발생이 없어 침투수로 인한 파이핑 등의 문제는 없는 것으로 판단된다. 주암댐과 주암조절지댐의 계측

기의 신뢰성 평가에서 토압계에 대한 신뢰도는 낮으나, 간극수압계는 대체로 양호하였다. 주암댐과 주암조절지댐의 지진시의 사면안정해석은 동적해석의 결과에서는 안정하였으나 진도법에 의한 한계평형해석 결과에서 최소안전율 기준에 다소 미달하는 것으로 나타났다.

정밀안전진단결과를 기초로 하여 주암댐과 주암조절지댐의 지속적인 안전관리를 위해 다음과 같은 사항들이 제시되었다. 진단결과 도출된 결함부위는 보수방안을 참고하여 보수하여야 하며, 보수 후에는 결함의 진행성 여부를 주기적 점검 등을 통한 주의 깊은 관찰이 필요하다. 매설계기는 유지관리상 필수적인 변위계, 간극수압계 및 침투수량 측정계 등을 활용하여 본 댐에 대한 계측유지관리가 가능하지만, 간극수압계 및 토압계 중 일부 효용가치가 떨어지는 매설계기에 대해서는 유지보수를 위한 비용지출보다는 단계적인 용도폐기 등 추가적인 검토가 필요하다.

3.2.4 임하댐

임하댐의 제1차 정밀안전진단(한국수자원공사, 2007)에서 상류사면은 표면보호 사석에 경미한 풍화가 발생하였고, 하류사면은 부분적인 사면경사의 변화와 경미한 사석의 풍화가 발생하였으나 풍화진행정도가 미미하여 사면보호 및 안정에는 문제가 없다. 여수로의 접근수로 옹벽과 접한 사면 일부에 누수 발생과 접근수로 옹벽의 부분적인 백태가 조사되었다. 월류부 피어 상단에는 균열폭 0.4~1.2mm의 세로 균열이 일부 존재하지만 비활성 균열로 판단되었다. 여수로 콘크리트 내구성 조사에서 콘크리트 압축강도측면에는 문제가 없지만, 중성화시험결과는 다소 빠른 속도로 진행된 부위가 일부 나타나 향후 확인이 바람직하다.

계측기는 임하댐 준공후 15년이 경과하여 현재 10종 180개 계측기중 3개가 고장이고 177개가 가동되는 것으로 조사되었다. 계측분석 결과 변위는 점차 감소하여 수렴하고 있으며, 간극수압은 정상적인 값을 나타내고 있어 안정화된 상태이다. 토압은 전반적으로 저수지 수위변화에 따라 정상적인 반응을 보이고 있고, 국부적인 전단파괴의 위험은 없는 것으로 판단되었다. 침투수량은 안정적인 경시변화를 나타내고 있다. 사면안정해석에서는 상시만수위 조건에서 지진이 발생할 경우 하류사면의 안전율이 가장 작으며 최소안전율은 1.23으로 최소안전율 기준 1.2를 만족한다. 인공지진과 실지진기록을 이용하여 내진성능을 평가한 결과는 안전한 것으로 분석되었고, 댐마루 하류측에서 최대변위가 발생하였다. 가능최대홍수량(PMF)에 대한 홍수방어능력 평가에서 월류가 발생하는 것으로 나타났다. 현재 치수능력증대사업으로 보조여수로 건설공사를 추진중에 있으므로 이 사업이 완료

될 때까지는 저수지 운영방식의 변경과 홍수기에 초기수위를 낮추는 방식을 통해 홍수방어능력을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

정밀안전진단 결과를 기초로 하여 임하댐의 지속적인 안전관리를 위해 다음과 같은 사항들이 제시되었다. 매설계기 중 고장으로 판정된 계측기에 대해 관리항목에서 제외하고, 신뢰성이 낮은 계측기에 대해서는 향후 추가 검토가 필요하다. 초기치 오류가 있는 것으로 판단된 일부 간극수압계에 대해서는 금회 진단결과를 참고로 하여 초기치를 조정할 데이터로 관리하도록 제안하였다.

3.3 계측항목 유지보수 우선순위 산정

5개 대상댐의 계측항목 중요도는 3.2절의 각 댐의 정밀안전진단 결과에 의한 댐의 상태평가, 안전성 평가, 계측분석, 계측기의 성능 및 적정성을 고려하여 산정하였다. 5개 대상댐의 월류, 표면침식, 파이핑, 사면활동의 파괴모드에 대한 조건부 확률은 표 5를 참조하여 다음의 표 11과 같이 추정하였다. 5개댐 모두 보조여수로 공사를 추진 중에 있어 사업 완료시까지는 월류의 가능성이 있기 때문에 소양강댐과 안동댐은 40%, 주암댐, 주암조절지댐, 임하댐은 50%로 평가하였지만, 사업 완료 후에는 월류의 가능성은 감소할 것이다. 5개 대상댐은 대부분 준공 후 15년 이상이 경과하여 콘크리트 노후화와 방류로 인한 여수로 시설물의 손상이 다수 발생하였고, 보수완료 및 추가 보수가 필요한 상황이므로 여수로 구조물의 표면침식에 대한 조건부 확률을 모두 20%로 고려하였다. 안

동댐, 주암댐, 주암조절지댐은 지진시 사면안전율이 기준에 다소 미달하여 사면활동의 조건부 확률을 모두 10%로 고려하였으며, 소양강댐은 우안부 하류사면부에 유출수가 발생하여 보수한 사례가 있기 때문에 파이핑에 대한 조건부 확률을 타댐(20~30%)과 비교하여 40%로 높게 평가하였다(한국수자원공사, 2004b; 한국수자원공사, 2006a; 한국수자원공사, 2006b; 한국수자원공사, 2007). 파괴모드와 관련된 결합의 조건부 확률은 표 6과 식 (2)을 이용하여 표 12와 같이 결정하였다. 5개 대상댐은 모두 암반기초에 건설되어 있어 ‘기초부 파이핑’과 ‘정적 및 지진시 기초부와 제체를 통한 활동’은 발생 가능한 결합으로 고려하지 않았다. 5개 대상댐의 지표와 계측항목의 중요도는 3.2절의 정밀안전진단 결과를 기초로 결합의 발생 가능성을 탐지하는 지표와 이를 모니터링할 수 있는 계측항목의 상대적인 진단상의 중요도로 산정하였다. 지표의 중요도는 표 13과 같이 산정하였고, 계측항목의 중요도는 식 (1)을 이용하여 표 14와 같이 안동댐에는 침투수량계를 추가 설치하고 임하댐에만 설치되어 있는 지중 경사계를 다른 4개댐에 추가 설치하는 것을 가정하여 산정하였다.

3.4 결과분석

계측항목의 중요도 산정결과에 따라 5개 평가 대상댐 계측항목의 우선순위를 중요도순으로 나타내면 표 15와 같다. 5개 댐 모두 가능최대홍수량(PMF)에 대한 홍수방어능력이 부족하여 보조여수로를 건설 중 이므로 월류에 대한 가능성이 상대적으로 높으므로 여수로 외관이 가장 중요한 계측

표 11. 파괴모드의 조건부 확률 산정

댐명 \ 파괴모드	월류(%)	표면침식(%)	파이핑(%)	사면활동(%)
소양강댐	40	20	40	0
안동댐	40	20	30	10
주암댐	50	20	20	10
주암조절지댐	50	20	20	10
임하댐	50	20	30	0

표 12. 결합의 조건부 확률(%) 산정

결 합	소양강댐	안동댐	주암댐	주암조절지댐	임하댐
여수로 용량 부적절 (AC 1)	32	32	40	40	40
침식에 의한 여수로의 세굴손상 (AC 2)	10	14	16	16	16
댐마루 침하 (AC 3)	8	8	10	10	10
제체 표면보호 재료의 손상 (AC 4)	10	6	4	4	4
제체 내부의 파이핑 (AC 5)	40	30	20	20	30
기초부 파이핑 (AC 6)	0	0	0	0	0
정적 및 지진시 제체를 통한 활동 (AC 7)	0	10	10	10	0
정적 및 지진시 기초부와 제체를 통한 활동 (AC 8)	0	0	0	0	0
합계	100	100	100	100	100

표 13. 지표의 중요도 산정

지 표	소양강	안동댐	주압댐	주압조절지댐	임하댐
(1) 기초부에서의 간극수두(Ind1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(2) 제체에서의 간극수두(Ind2)	0.08	0.15	0.09	0.06	0.03
(3) 침투수 발생(하류사면부)(Ind3)	0.12	0.15	0.04	0.04	0.06
(4) 침투수 발생(하류사면선단부)(Ind4)	0.04	0.00	0.02	0.04	0.06
(5) 여수로 단면적 손실 및 세굴(Ind5)	0.42	0.46	0.56	0.56	0.56
(6) 형상의 변화(댐마루)(Ind6)	0.06	0.09	0.08	0.08	0.08
(7) 형상의 변화(하류사면)(Ind7)	0.03	0.09	0.06	0.07	0.00
(8) 형상의 변화(상류사면)(Ind8)	0.09	0.06	0.05	0.05	0.06
(9) 형상의 변화(하류사면 선단부)(Ind9)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(10) 침투수량의 변화(Ind10)	0.08	0.00	0.10	0.10	0.15
(11) 표면 식생의 변화(하류사면)(Ind11)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(12) 표면 식생의 변화(하류사면 선단부)(Ind12)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(13) 형상의 변화(부등변위)(Ind13)	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
(14) 물고임(Ponding)(Ind14)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
합계	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

표 14. 계측항목의 중요도 산정

계측항목	소양강	안동댐	주압댐	주압조절지댐	임하댐
(1) 간극수압계(기초)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
(1) 간극수압계(제체)	0.056	0.105	0.093	0.072	0.063
(2) 표면 침하점	0.104	0.096	0.076	0.080	0.056
(3) 지중 경사계	0.024	0.030	0.022	0.024	0.012
(4) 침투수량계	0.104	0.045	0.097	0.088	0.117
(5) 하류사면 비탈끝	0.052	0.015	0.024	0.044	0.066
(6) 하류사면	0.120	0.171	0.060	0.064	0.054
(7) 댐마루와 제각	0.036	0.054	0.048	0.048	0.048
(8) 상류사면	0.036	0.024	0.020	0.020	0.024
(9) 방류설비 외관	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
(10) 여수로 외관	0.420	0.460	0.560	0.560	0.560
(11) 양안부	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000
합계	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

대상으로 평가되었다. 우안부 하류사면에 유출수가 발생하여 보수한 사례가 있는 소양강댐과 하류사면 비탈끝이 하천에 바로 맞닿아 침투수량계가 설치되지 않은 안동댐에서는 제체의 파이핑에 의한 하류사면의 유출수 발생이 2순위로 나타났고, 나머지 댐들은 침투수량계에 의한 파이핑의 탐지가 2순위로 나타났다. 우안부 하류사면에 유출수가 발생하여 보수한 사례가 있는 소양강댐을 제외한 4개 댐에서 양안부에 대한 조사는 큰 의미가 없는 것으로 분석되었다. 코어존 하부 기초암반의 지수 그라우팅 효과의 검증용 목적으로 설치하는 기초부 간극수압계와 임하댐의 지중 경사계는 계측결과 분석을 통해 5개 댐의 거동이 안정화 상태로 확인되었기 때문에 중요도는 낮은 것으로 분석되었고 4개댐에 추가 설치를 고려한 지중 경사계와 안동댐의 침투수량계의 경우도 그 중요도는 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

산정된 계측항목의 우선순위와 정밀안전진단에서 제안한 유지관리 계측방안을 종합적으로 고려하여 기존 필댐의 월류, 표면침식, 파이핑, 사면안정의 파괴모드에 대한 안전관리를 위해서는 여수로 외관, 하류사면, 댐마루와 제각, 상류사면, 하류사면 비탈끝, 양안부 등의 관측대상 표면부에 대한 상세 외관조사를 정기적으로 수행하고, 침투수량계, 표면 침하점, 간극수압계에 대한 상시 모니터링 체계를 구축하는 방안이 최적의 방안으로 제시되었고 이것은 일본 토목연구소(1984), 일본 대매회(국토교통성, 1986)의 권고사항과 Bagherzadeh-Khakkahali와 Mirghasemi(2005)의 분석결과와도 잘 일치한다.

간극수압계와 토압계와 같은 전기식 매설계기는 시공 중 취급부주의, 센서의 불량, 케이블 단선, 낙뢰, 부식 등에 의해 그 수명은 한계가 있다. 간극수압계와 토압계 등의 전기식 매설계기와 수직 측정관을 지중에 설치하여 측정하는 지

표 15. 대상댐 계측항목 중요도의 우선순위 산정

우선 순위	소양강	안동댐	주암댐	주암조절지댐	임하댐
1	여수로 외관	여수로 외관	여수로 외관	여수로 외관	여수로 외관
	0.420	0.460	0.560	0.560	0.560
2	하류사면	하류사면	침투수량계	침투수량계	침투수량계
	0.120	0.171	0.097	0.088	0.117
3	침투수량계	간극수압계(제체)	간극수압계(제체)	표면 침하점	하류사면 비탈끝
	0.104	0.105	0.093	0.080	0.066
4	표면침하점	표면 침하점	표면 침하점	간극수압계(제체)	표면 침하점
	0.104	0.096	0.076	0.072	0.056
5	간극수압계(제체)	댐마루와 제각	하류사면	하류사면	간극수압계(제체)
	0.056	0.054	0.060	0.064	0.063
6	하류사면 비탈끝	침투수량계	댐마루와 제각	댐마루와 제각	하류사면
	0.052	0.045	0.048	0.048	0.054
7	양안부	지중 경사계	하류사면 비탈끝	하류사면 비탈끝	댐마루와 제각
	0.048	0.030	0.024	0.044	0.048
8	댐마루와 제각	상류사면	지중 경사계	지중 경사계	상류사면
	0.036	0.024	0.022	0.024	0.024
9	상류사면	하류사면 비탈끝	상류사면	상류사면	지중 경사계
	0.036	0.015	0.020	0.020	0.012
10	지중 경사계	-	-	-	-
	0.024	-	-	-	-

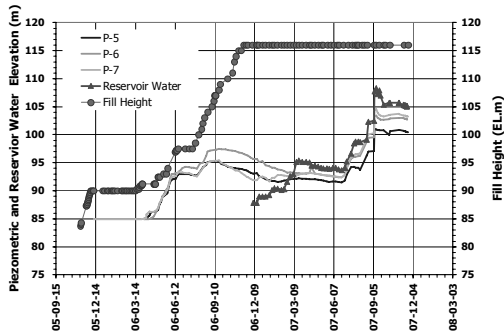


그림 4. 간극수압계에 의한 간극수압 측정결과와 댐수위의 시간변화

중 경사계는 그림 4, 그림 5, 그림 6과 같이 전문가에 의한 계측거동 분석과 정밀안전진단 결과로부터 댐 거동의 안정한 상태를 확인한 후에는 계측빈도를 낮추는 것이 가능하며 고장이 발생한 경우에는 댐체의 안전성 측면을 고려하여 댐체를 시추하여 복구 및 재설치하는 것보다는 그 상태로 폐기하는 것이 합리적이다.

그림 4는 댐의 축조중과 담수 이후의 코어존에서의 간극수압의 측정결과를 나타낸 것으로 축조중에 과잉간극수압이 발생하며 축조완료 이후 소산되는 경향을 나타내었고 담수 이후 댐수위 증가에 따라 다시 증가되고 댐수위에 따라 간극수압이 변화한다. 그림 5는 댐수위와 간극수압 측정결과와의 관계를 나타낸 것으로 대체적으로 선형관계를 나타내

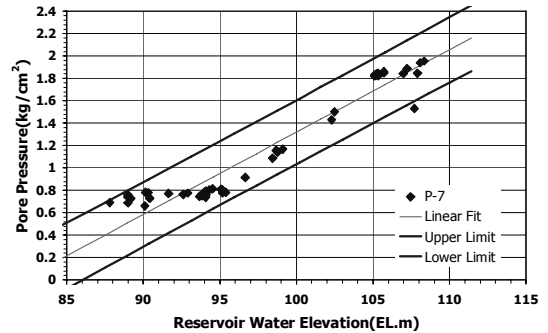


그림 5. 댐수위와 간극수압 측정결과와의 선형관계

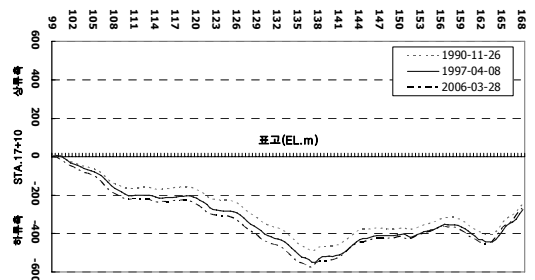


그림 6. 지중 경사계에 의한 코어존의 상하류방향으로의 수평면위 계측결과

어 댐 거동이 안정한 상태임을 확인 할 수 있다. 그림 6은 댐의 코어존에 수직관으로 설치된 경사계를 통해 측정된 코어존의 측방변형을 나타낸 것으로 시간이 경과하면서 변형

이 감소하는 댐 거동의 안정화 상태를 확인할 수 있다.

4. 결 론

5개 기존 필댐(소양강댐, 안동댐, 주암댐, 주암조절지댐, 임하댐)의 계측시스템의 재정립을 위해 계측항목의 중요도를 정량적으로 분석하여 유지보수의 우선순위를 산정한 결과는 다음과 같다.

- (1) 댐 계측항목에서 중요도의 우선순위는 다소 차이가 있지만, 관측대상 표면부는 여수로 외관, 하류사면, 댐마루와 제각, 상류사면, 하류사면 선단, 양안부의 순서이며 계측기는 침투수량계, 표면 침하점, 간극수압계(제체), 지중 경사계의 순서로 분석되었다. 5개 대상댐에서 월류에 대한 가능성이 상대적으로 높기 때문에 임하댐을 제외한 4개 댐에서 여수로 외관이 가장 중요한 계측 대상으로 평가되었다.
- (2) 우안 하류사면부에 유출수가 발생하여 보수한 사례가 있는 소양강댐을 제외한 4개 댐에서는 양안부에 대한 조사는 큰 의미가 없는 것으로 분석되었다. 코어존 기초부 간극수압계와 임하댐에만 설치되어 운영 중인 지중 경사계도 계측결과 분석을 통해 5개 댐의 거동이 안정화 상태로 확인되었기 때문에 중요도는 낮은 것으로 분석되었고, 추가 설치를 고려한 4개댐의 경사계와 안동댐의 침투수량계도 그 중요도는 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다.
- (3) 기존 필댐의 월류, 표면침식, 파이프, 사면안정의 파괴모드의 안전관리를 위한 계측시스템의 재정립 방안으로는 여수로 외관, 하류사면, 댐마루와 제각, 상류사면, 하류사면 선단, 양안부 등의 관측대상 표면부에대한 상세 외관 조사와 표면 침하점, 침투수량계, 간극수압계에 대한 상시모니터링 체계의 구축을 제시하였으며 이것은 일본 토목연구소(1984), 일본 대담회(국토교통성, 1986)의 권고 사항과 Bagherzadeh-Khalkhali와 Mirghasemi (2005)의 분석결과와도 잘 일치한다.
- (4) 간극수압계 등의 전기식 매설계기는 그 수명이 한계가 있으므로 계측거동 분석과 정밀안전진단결과로부터 댐 거동의 안정화를 확인한 후에는 계측빈도를 낮추는 것이 가능하며 고장이 발생한 경우에는 댐체의 안전성 측면을 고려하여 댐체를 시추하여 복구 및 재설치하는 것보다는 그 상태로 폐기하는 것이 합리적이다.

본 연구에서 제안한 분석기법은 필댐의 유지관리를 위한 계측기의 필요성을 댐의 파괴모드와 관련하여 체계적으로 설명할 수 있고, 그 중요도를 정량적으로 산정할 수 있기 때문에 기존 필댐에 설치된 계측시스템의 재정립을 위한 유지보

수의 우선순위 의사결정에 활용성이 높은 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1994), *댐 시설물 유지관리 기준*, pp. 52~153, 360~366, 422~426.
2. 건설교통부 (2001), *댐유지관리매뉴얼 필댐 및 부대시설 안전 점검매뉴얼*, 시설안전기술공단, HS-01-R5-015, pp. 103~178.
3. 안상로 (1998), 특집 구조물의 유지관리 및 계측-댐 유지관리 및 계측, *대한토목학회지*, Vol. 46, No. 11, pp. 35~42.
4. 한국수자원공사 (2002), *다목적댐관리규정 제21조 매설계기 관측*, pp. 8~11
5. 한국수자원학회 (2003), *댐설계기준*, 건설정보사, pp. 169~213.
6. 한국수자원공사 (2004a), *댐 매설계기 설치운영관리 지침*, pp. 1~10.
7. 한국수자원공사 (2004b), *소양강다목적댐 제2차 정밀안전진단 단보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 9~324.
8. 한국수자원공사 (2006a), *안동다목적댐 제2차 정밀안전진단 보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 11~253.
9. 한국수자원공사 (2006b), *주암다목적댐 정밀안전진단보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 11~257.
10. 한국수자원공사 (2007), *임하다목적댐 제1차 정밀안전진단보고서*, 한국시설안전기술공단, pp. 8~237.
11. 建設省 土木研究所 (1984), *フィルダムの舉動計測に關する調査*, 土木研究所資料, 第2070号, pp. 87~97.
12. 國土交通省 (1986), *ダムの管理 例規集*, 山海堂, pp. 237~257.
13. Andersen, G. R., Chouinard, L. E., Bouvier, C. and Back, W. E. (1999), Ranking Procedure on Maintenance Tasks for Monitoring of Embankment Dams, *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 247~259.
14. A. Bagherzadeh-Khalahali and A.A. Mirghasemi (2005), Evaluation of Monitoring Systems for Five Embankment Dams in Iran, *Proceedings Symposium Uncertainty Assessment in Dam Engineering*, 73rd Annual Meeting, Teheran, pp. 1~8.
15. Dunnycliff, J. (1988), *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley & Sons, New York, pp. 417~441.
16. Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. (1992), *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*, Balkema, Rotterdam, pp. 607~646.
17. Foster, M.A., Fell, R. and Spannagle, M. (1998), *Analysis of Embankment Dam Incidents*, UNICIV REPORT No. R-374, The University of New South Wales, Australia, pp. 35~39.
18. Pate-Cornell, M. E. and Tagras, G. (1986), Risk Costs for New Dams: Economic Analysis and Effects of Monitoring, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 1, pp. 5~14.
19. Schewe, L. D. (1987), A Monitoring Programme for Embankment Dams, *International Water Power and Dam Construction*, Vol. 39, No. 5, pp. 23~26.
20. Stateler, J., Von Thun, L., Scott, G. and Boernge, J. (1995), Development of Performance Parameters for Dams Safety Monitoring, *Annual Conf. of Assn. of State Dam Safety Officials*, Atlanta, pp. 523~532.
21. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories (1999), *Condition Rating Procedures for Earth and Rockfill Embankment Dams*, Technical Report, REMR-OM-25, pp. 36~52.
22. USCOLD Subcommittee on Dam Incidents and Accidents (1988), *Lessons from Dam Incidents. USA-II*, ASCE, New York, pp. 1~26.

(접수일: 2009. 7. 6 심사일: 2009. 7. 16 심사완료일: 2009. 11. 2)