

필댐 안전관리를 위한 계측기 중요도의 평가기법

Evaluation Technique of Importance of Monitoring Systems for Earth and Rockfill Dam Safety

이종욱¹⁾, Jong-WooK Lee, 김재홍²⁾, Jae-Hong Kim, 오병현³⁾, Byung-Hyun Oh

¹⁾ 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원, Senior Researcher, K-water Institute, Kwater

²⁾ 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원, Senior Researcher, K-water Institute, Kwater

³⁾ 한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원, Head Researcher, K-water Institute, Kwater

SYNOPSIS : Continuous monitoring of dam performance is essential to earth and rockfill dams safety because it has to be guaranteed for safety during construction period of course and from initial impounding to a long term maintenance period of dam. Among the 31 dams managed by Kwater at present, the proportion of dams being over 20 years after completion of construction is 42% and it is estimated that the loss rate of monitoring devices will be increase as times. Monitoring devices would be impossible to repair since those are mostly installed in the dam body and foundation. If repairing of monitoring devices is possible, the expenditure will be expensive. Therefore reasonable decision making for abandonment, repair and alternation for loss of monitoring devices would be needed through the establishment of key instrument for earth and rockfill dam safety. In this study the process of monitoring for safety were modeled by failure modes of dams, adverse conditions related to failure mode, indicators of adverse condition and monitoring devices The relationship between failure mode and monitoring devices were systematically analyzed and established and evaluation technique for qualifying the importance of monitoring devices were presented.

Keywords : Earth and Rockfill dam safety, Failure mode, Key instrument, Maintenance, Monitoring device

1. 서론

댐의 안전성 검토를 위해서는 신뢰성 있는 계측 데이터의 확보가 필수적이며, 장기간의 신뢰성을 확보하기 위해서는 계측기의 건전성 유지가 중요하기 때문에 한국수자원공사(2004)에서는 정기적으로 계측기에 대한 점검을 실시하여, 신뢰성이 없는 계측기는 고장처리 등의 적절한 조치를 취하도록 규정하고 있다. 일본의 토목연구소(1984)에서도 필댐 계측기에 대한 조사를 통해 댐의 경과년수가 증가하면서 계측기의 고장율이 증가를 확인하였으며, 완공 후 5년이 경과하면 댐의 거동을 분석하기 위해 계측기 이외의 다른 측정방법을 고려할 것을 권고하고 있다. 현재 한국수자원공사가 관리중인 31개 댐 중 경과년수가 20년 이상인 댐은 전체의 42%를 차지하며 댐의 경과년수가 늘어나면서 계측기의 고장율은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 필댐의 계측기는 대부분 제체와 기초암반에 매설하기 때문에 보수가 불가능한 경우가 대부분이며 만일 가능한 경우에도 비용이 많이 소요되므로, 필댐의 안전관리에 필요한 주요 계측기(key instrument)를 설정하여 고장 계측기에 대한 폐기, 보수, 대체방안 수립의 합리적인 의사결정이 필요하다.

이와 같은 배경으로 본 연구에서는 필댐의 안전관리를 위한 계측분석 과정을 댐의 파괴모드, 각 파괴모드와 관련된 결함, 각 결함의 발생가능성을 나타내는 지표, 각 지표를 평가하는 계측기로 모델링하고

이들의 관련성을 체계적으로 분석 및 설정하여, 계측기의 중요도를 정량적으로 산정하는 평가기법을 제안하고자 하였다.

2. 필댐 계측기의 현황

댐은 공사중은 물론 초기담수시 부터 장기간에 걸친 유지관리기간 동안 지속적으로 안전이 보장되어야 하므로 댐에서 계측은 필수적이다. 계측은 댐의 거동분석과 안전성 평가를 위해 필요한 정성적 자료 또는 이러한 안전확보의 효과적인 수단으로 이용될 정량적인 자료를 제공하며, 댐의 안전검사 및 감시 프로그램을 보완하고 댐 사고의 원인을 규명하는데 필요한 정보를 제공한다. 댐 계측은 관리목적에 따라 시공중 및 완공후의 안전관리를 목적으로 하는 경우와 설계기법과 구조해석기법의 발전 및 연구를 위한 자료취득을 목적으로 하는 경우로 분류할 수 있다(건설부, 1994). 댐설계기준(건교부, 2003)에서는 다목적댐과 높이가 높은 대형 필댐에는 간극수압계, 토압계, 층별침하계, 수평변위계, 누수량계, 지진계, 암반변위 측정계, 전단변위 측정계를 설치하도록 규정하고 있다. 한국수자원공사는 ‘다목적댐관리규정(2002.11)’과 ‘댐 매설계기 설치운영관리 지침(한국수자원공사, 2004)’에 따라 시공중 및 완공후의 안전관리와 연구자료의 취득을 목적으로 댐체의 변형, 응력, 간극수압, 침투수, 지진, 기초부의 간극수압 측정을 위한 여러 종류의 계측기를 표 2.1과 그림 2.1과 같이 시공중에 제체와 기초부에 매설하여 초기담수기간과 완공후 유지관리기간 동안 운영 및 유지관리를 하고 있다. 댐에서는 한 계측기가 여러 가지 목적으로 이용되고 제체 내에 매설되는 경우가 대부분이기 때문에 각 계측기의 관리기간의 설정과 고장 대책 방안 등의 관리기준 수립에 많은 불확실성과 어려움이 있다. 또한, 댐의 안전성에 영향을 주지 않지만, 계측기의 고장은 ‘시설물안전관리에 관한 특별법(2003.06.30)’에 의한 정밀안전진단 결과에 부정적인 영향을 주는 문제점도 있다.

표 2.1 필댐 계측기의 종류(한국수자원공사, 2004)

구분	기호	종류	비고
1	■	간극수압계	각 층에 간극수압 및 그라우팅 효과측정
2	○	토압계	토압 측정 및 아칭현상 탐지
3	⊗	수평변위계	동일 표고상에 상대적인 수평변위량 측정(수압식 계기 지양)
4	⊙	정상, 사면침하점	외부 변위 측정(측정의 정도 향상을 위하여 육안 측량 지양)
5	≡	층별침하계 경사계	제체내의 설치지점별 침하량 측정 제체의 좌·우·상·하 변위 측정
6	△	침투수량계	중요 구간별로 나누어 침투수량, 수온, 탁도 측정

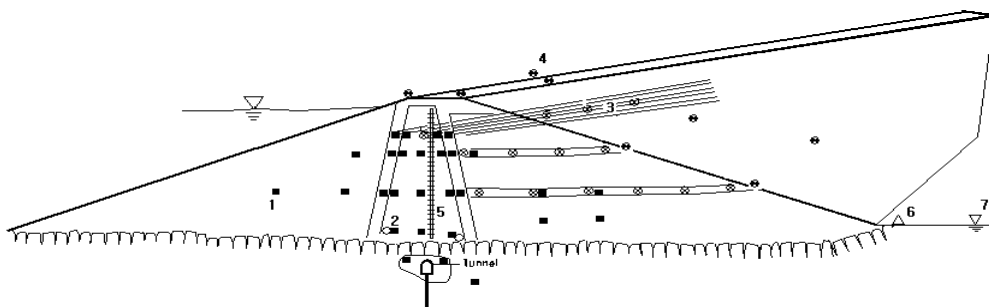


그림 2.1 필댐 계측기의 배치(한국수자원공사, 2004)

3. 계측기 중요도 평가기법

3.1 필댐의 파괴모드와 계측기의 상호관계

필댐의 안전관리를 위한 계측분석의 과정은 다음의 그림 3.1과 같이 모델링할 수 있다. 계측기는 결함의 발생을 암시하는 지표에 대한 정보를 제공하고, 관측된 결함의 지표는 한 가지 이상의 파괴모드로 댐의 파괴를 초래하는 결함의 발생 여부를 유추하는데 이용한다. 계측기의 중요도는 결함의 발생 가능성을 나타내는 지표를 정확히 측정할 수 있는 능력을 의미한다.

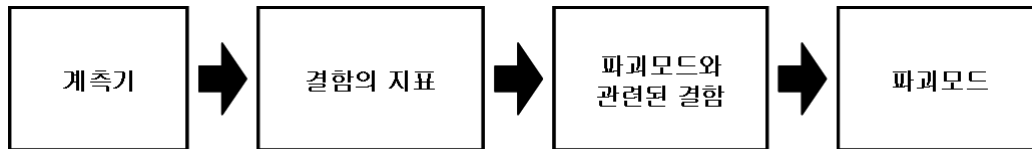


그림 3.1 필댐 안전관리를 위한 계측분석 과정

본 연구에서 파괴모드는 댐 파괴의 최초 원인을 의미하고, 계측기의 중요도는 파괴모드와 각 파괴모드에 관련된 결함의 확률예측, 결함의 발생을 암시하는 지표 및 이와 관련된 계측기의 상대적인 중요도 예측으로 평가한다. 각 단계에서의 조건부 확률과 상대적인 중요도의 예측은 전문가에 의한 공학적 판단으로 결정한다. 필댐의 파괴모드는 USCOLD(1988)의 필댐(81건) 파괴사례의 조사결과를 참고하여 표 3.1과 같이 월류, 파이핑, 표면침식, 사면활동의 4가지의 파괴모드를 고려하였다.

각 파괴모드에 관련하여 필댐에 발생 가능한 결함은 USCOLD(1988)의 조사결과와 건교부(2001)에서 제시한 필댐 제체 및 여수로의 결함의 종류를 참조하여 표 3.2와 같이 8개의 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 필댐의 제체, 여수로 및 부대시설물 점검시의 고려사항을 참조하여 표 3.3과 같은 결함의 지표를 고려하였다. 제시된 결함의 지표는 Andersen 등(1999)과 미공병단(1999)이 제시한 것과 거의 유사하며, Stateler 등(1995)이 제시한 ‘거동 파라미터(performance parameter)’와도 유사하다.

필댐의 안전관리는 제체 및 제체 인근 표면부에 대한 외관조사를 통해 댐의 거동을 감시하고, 제체에 매설된 여러 종류의 계측기로 계측데이터의 획득과 분석을 통해 외관조사 결과를 보완하는 것이 필수적이다. Stateler 등(1995), Fell 등(1992), Pate-Cornell과 Tagras(1986), Dunicliff(1988)은 모두 점검자에 의한 상시 외관조사의 중요성을 강조하였다. 본 연구에서 제안한 평가기법에서는 Andersen 등(1999)과 미공병단(USACE, 1999)의 기법과 같이 계측기를 정량적인 데이터를 제공하는 계측기기(간극수압계, 누수량계 등)와 표면부 외관조사와 같이 정성적인 데이터를 제공하는 관측대상 표면(상류사면, 여수로, 도류벽 등)으로 분류 및 정의하였다.

건설부(1994)에서는 필댐 완공후 침투수와 변형에 대한 안전관리를 목적으로 누수량계, 간극수압계, 지하수위계, 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 국토교통성(1986)에서는 필댐의 거동 및 상태를 감시하기 위해 외관조사, 누수량, 변형을 주요 계측항목으로 규정하고 있다. 필댐의 안전관리를 위한 계측기는 다음의 표 3.4와 같이 침투수에 대한 안전관리를 위한 간극수압계(지하수위계 포함), 침투수량계, 변형을 측정하는 표면 침하점, 사면 경사계, 제체와 여수로 및 방류설비의 외관조사를 위한 댐마루와 제각, 상류사면, 하류사면, 하류선단부, 표면부 및 경계부, 여수로 측벽의 관측대상 표면으로 제시하였다.

본 연구에서 필댐 계측기의 중요도 평가를 위해 분석 및 설정한 계측기와 파괴모드 사이의 관계는 그

림 3.2와 같다. 월류를 감시하기 위해서는 여수로의 기능유지를 위한 월류 웨어, 도수로, 바닥판, 도류벽 등 여수로 외관부, 댐마루와 제각의 육안감시와 표면 침하점에 의한 댐마루의 침하량 측정에 의한 여유고의 확인이 중요하다. 여수로 바닥부와 상·하류사면의 표면침식을 감시하기 위해서는 여수로 외관, 상류사면, 댐마루와 제각의 표면부 침식 및 세굴에 대한 육안감시가 중요하다. 파이핑은 하류사면, 하류사면 선단, 양안부의 침투수 발생, 형상의 변화, 물고임 현상 등의 육안감시와 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 경사계의 변위를 분석하여 감시하는 것이 중요하다.

표 3.1 파괴모드의 구분

파괴모드	정의
월류	저수지 수위상승을 조절하지 못하여 물이 댐마루를 넘쳐흐르는 현상.
표면침식	체체의 표면 또는 여수로를 손상시키고 댐의 결괴를 초래하는 모든 침식 메커니즘. 이 침식의 원인은 파랑의 작용, 여수로의 방류, 강우와 건조상태의 반복, 바람, 두더지 등 구멍을 파는 동물, 인간의 활동 등이다.
파이핑	체체 내부로부터 토립자가 이동하여 공극을 형성하는 작용. 이러한 내부 침식은 침투속도가 높거나 설계가 잘못된 필터가 원인이다.
사면활동	체체 및 기초지반 토괴가 활동면을 따라 활동하는 현상. 사면활동은 일반적으로 과잉간극수압의 상승이 원인이며 지진에 의한 액상화에 의해서도 발생할 수 있다.

표 3.2 파괴모드와 관련된 결함

결함	내용
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
체체 재료의 파이핑	동수경사 작용으로 체체 코어 또는 필터 재료의 물리적인 이동
기초 재료의 파이핑	동수경사 작용으로 기초부 재료의 물리적인 이동
체체를 통한 활동(정적 또는 지진시)	체체에만 국한된 체체의 활동과괴
기초부와 체체를 통한 활동(정적 또는 지진시)	체체와 기초부를 모두 통과하는 활동과괴

표 3.3 결함의 지표

지표	내용
기초부의 간극수두	동수경사 계산을 위한 간극수두 예측값 또는 유선망으로부터 추론된 값
체체의 간극수두	동수경사 계산을 위한 간극수두 예측값 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	체체 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	필댐과 주변부의 여러 곳에서의 표면 크랙
사석부 손상	파랑침식(beaching)에 대한 상류측 보호재의 현저한 손상
부등침하	체체에 위치한 부분과 기초부에 위치한 부분의 상대적인 변위의 육안 또는 측정된 증거
물고임(ponding)	예상치 못한 곳에서의 물고임 현상

표 3.4 필댐의 안전관리를 위한 계측기

계측기	내용
간극수압계	중요 위치의 그룹화된 모든 간극수압계는 중요도가 같다고 가정
표면 침하점	중요도가 유사한 그룹으로 세분 가능
사면 경사계	제체내의 내부변위 측정계기
침투수량계	비정상적인 침투수량 측정을 위한 댐과 아버트먼트에 설치한 위어
하류 선단부	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

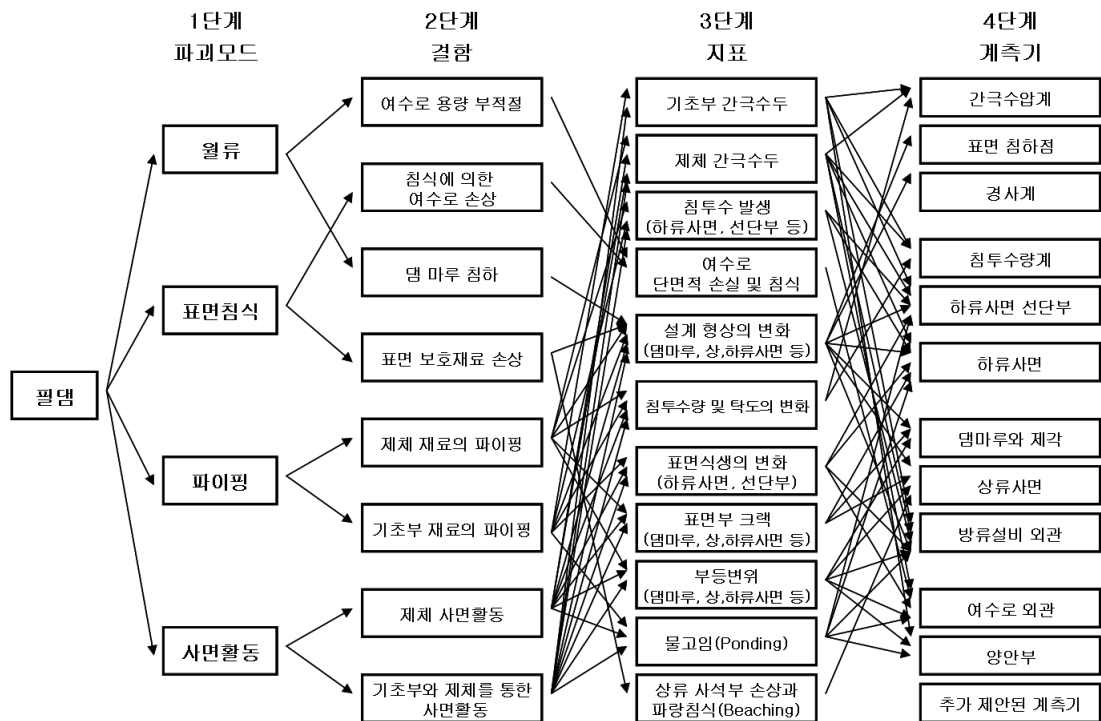


그림 3.2 계측기와 필댐 파괴모드 사이의 관계

3.2 계측기 중요도 평가

계측기의 중요도는 필댐에 설치된 모든 계측기에 대하여 0에서 1.0의 사이의 수치로 상대적으로 결정하며, 모든 계측기의 중요도의 합은 1.0 이다. 그림 3.2와 같이 분석된 계측기와 필댐 파괴모드 사이의 관계를 이용하여, 각 계측기의 중요도[$DV_{MD}(i)$]를 정량화 하기위해 Andersen 등(1999)이 제시한 다음의 식 (1)을 도입하였다.

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

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} = 대상 댐에 관련된 결함의 총수이다. $RDV_{MDi}(j)$ 는 지표(j)를 고려한 계측기(i)의 상대적인 진단상의 중요도이며 n_i = 지표의 총수이다. 식 (1)은 다음의 4단계로 산정한다.

- (1) 파괴모드의 조건부 확률의 예측, $P[M_i | F]$
- (2) 각 파괴모드에 관련된 결함의 조건부 확률 예측, $P[AC_k | M_i]$
- (3) 결함에 대한 지표의 상대적인 진단상의 중요도 예측, $RDV_j(k)$
- (4) 지표에 대한 계측기의 상대적인 진단상의 중요도 예측, $RDV_{MDi}(j)$

3.2.1 파괴모드의 조건부 확률 예측

본 연구에서 댐 파괴의 원인이 되는 특정 파괴모드의 상대적인 발생 가능성은 상호 배타적인 사건으로 가정한 특정 파괴모드가 댐 파괴의 최초 원인이 될 조건부 확률로 정의하고, 모든 파괴모드의 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. 주요한 댐의 특성으로는 댐의 형식(내부 존 구성), 기초의 종류, 기하형상, 경과년수, 과거의 거동, 축조재료 특성 등을 고려할 수 있다. 파괴모드를 시초하거나 원인이 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 전문가의 공학적 판단으로 조건부 확률을 결정한 결과는 상당히 일치하는 경우가 많았다고 밝혔다. 각 파괴모드의 조건부 확률 결정에는 표 3.5와 같은 USCOLD(1988)의 조사결과를 참조할 수 있다. USCOLD(1988)가 조사한 81건의 필댐 파괴사례에서 보고된 파괴의 49%는 월류, 32%는 파이프, 10%는 표면침식, 9%는 사면활동이 원인이었다.

표 3.5 필댐 파괴모드의 발생확률(USCOLD, 1988)

파괴모드	발생확률
월류	49
파이프	32
표면침식	10
사면활동	9

3.2.2 결함의 조건부 확률 예측

본 평가기법의 다음단계는 이러한 파괴모드가 영향을 미칠 수 있는 댐의 대상부를 더욱 명확히 하여, 파괴모드의 조건부 확률을 특정 위치에 관련된 결함으로 세분화하여 조건부 확률을 결정하는 것이다. 결함의 조건부 확률은 파괴모드를 고려하여 전문가에 의한 공학적 판단으로 결정한다. 이 단계는 그림 3.2와 표 3.2를 참조하여 각 파괴모드를 여러 개의 세분된 결함들과 연관시키는 과정이다. 표 3.6과 같은 상호작용 매트릭스에 전문가의 공학적 판단으로 결정된 0에서 100% 사이의 값으로 결함의 조건부 확률을 작성한다. 각 파괴모드에 대한 결함들의 조건부 확률의 합은 100%이다. 파괴모드와 관련된 결함의 조건부 확률($P[AC_k | M_i]$)은 식 (2)으로 계산하여 표 3.6의 맨 마지막 행에 기입한다.

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

여기서, $P[AC_k | M_i]$ 는 파괴모드에 대한 결함의 조건부 확률이며 $P[M_i | F]$ 는 파괴모드의 조건부 확률이고 N_{FM} 은 파괴모드의 총수를 나타낸다.

표 3.6 결함의 조건부 확률

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

3.2.3 지표의 상대적인 진단상의 중요도

본 평가기법의 다음단계는 각 결함의 조기 탐지에 이용할 수 있는 지표의 그룹을 규명하고, 이들의 상대적인 진단상의 중요도를 예측하는 것이다. 그림 3.2, 표 3.3을 참조하여 열에는 지표, 행에는 결함으로 구성된 표 3.7과 같은 상호작용 매트릭스에 각 결함을 고려한 지표의 상대적인 진단상의 중요도 $[RDV_j(k)]$ 를 전문가 토의에 의한 공학적 판단으로 정밀도 0.1의 0~1.0 사이의 값으로 결정하고, 각 행의 합계는 1.0으로 정규화 한다. 표 3.7에 결정된 지표의 상대적인 진단상의 중요도 $[RDV_j(k)]$ 를 이용하여 식 (2)에 따라 지표의 중요도를 계산하고 맨 마지막 행에 나타낸다.

표 3.7 지표의 상대적인 진단상의 중요도

지표	지표의 상대적인 진단상의 중요도, $RDV_j(k)$								지표의 중요도 $\sum_{k=1}^{n_{AC}} RDV_j(k) \cdot P[AC_k M_i]$ (0.01에서 반올림)
	AC 1	AC 2	AC 3	AC 4	AC 5	AC 6	AC 7	AC 8	
	결함의 조건부 확률, $P[AC_k M_i]$								
	0.32	0.15	0.08	0.15	0.20	0.00	0.10	0.00	
(1) 기초부에서의 간극수두									0.00
(2) 제체에서의 간극수두					0.2		0.4		0.08
(3) 침투수 발생(하류사면부)					0.2				0.04
(4) 침투수 발생(하류사면선단부)					0.2				0.04
(5) 여수로 단면적 손실 및 세굴	1.0	1.0							0.47
(6) 형상의 변화(댐마루)			0.8				0.2		0.08
(7) 형상의 변화(하류사면)				0.3	0.1		0.2		0.09
(8) 형상의 변화(상류사면)			0.2	0.7					0.12
(9) 형상의 변화(하류사면 선단부)									0.00
(10) 침투수량의 변화					0.2				0.04
(11) 표면 식생의 변화(하류사면)									0.00
(12) 표면 식생의 변화(하류사면 선단부)									0.00
(13) 형상의 변화(부등면위)					0.1		0.2		0.04
(14) 물고임(Ponding)									0.00
합계	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0		1.00

3.2.4 계측기의 상대적인 진단상의 중요도

본 평가기법의 다음단계는 각 계측기의 진단상의 중요도를 예측하는 것이다. 계측기는 형식과 기능에 따라 표 3.4와 같이 그룹화 한다. 예를 들면 여러 개의 간극수압계는 지표에 대한 진단상의 중요도가 같다면 하나의 그룹으로 고려할 수 있다.

그림 3.2, 표 3.4를 참조하여 열에는 지표, 행에는 결합으로 구성된 표 3.8과 같은 상호작용 매트릭스에 각 지표를 고려한 계측기의 상대적인 진단상의 중요도[RDV_{MDi}(j)]를 전문가 토의에 의한 공학적 판단으로 정밀도 0.1의 0 ~ 1.0 사이의 값으로 결정하고, 각 행의 합계는 1.0으로 정규화 한다. 표 3.9에 결정된 계측기의 상대적인 진단상의 중요도[RDV_{MDi}(j)]를 이용하여 식 (1)에 따라 계측기의 중요도 [DV_{MDi}(i)]를 계산하고 맨 마지막 행에 나타낸다.

그룹화된 계측기는 그 그룹에서 계측기의 수량에 비례한 개개의 중요도를 갖는다. 예를 들면, 필댐의 기초 토질재료에 10개의 간극수압계가 고려되었다면 이 중 하나의 간극수압계의 중요도는 0.063/10 = 0.006이다. 제안된 계측기는 표 3.8의 상호작용 매트릭스에 포함하여 필댐에 아직 설치되지 않는 않지만, 추가 설치하고자 하는 계측기의 진단상의 중요도를 예측할 수 있다.

표 3.8 계측기의 상대적인 진단상의 중요도

계측기	계측기의 상대적인 진단상의 중요도, RDV _{MDi} (j)														DV _{MD} (i) (0.001에서 반올림)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
	지표의 중요도, $\sum_{k=1}^{n_{AC}} RDV_j(k) \cdot P[AC_k M]$														
	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(기초부)										0.4					0.016
(1) 간극수압계(제체)		0.6								0.4					0.064
(2) 표면 침하점						0.3	0.3	0.3					0.4		0.103
(3) 사면 경사계						0.3	0.3	0.3							0.087
(4) 침투수량계(weir)		0.4								0.2					0.040
(5) 하류사면 선단부			0.1	0.6											0.028
(6) 하류사면부			0.9				0.3								0.063
(7) 댐머루와 제각						0.4	0.1	0.1							0.053
(8) 상류사면								0.3							0.036
(9) 방류설비 외관															0.000
(10) 여수로 외관				0.4	1.0								0.3		0.498
(11) 양안부 표면													0.3		0.012
(12) 추가 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

4. 결론

필댐의 파괴모드와 계측기의 사이의 관계를 고려하여 계측기의 중요도를 정량적으로 산정하는 평가기법을 제안하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 본 연구에서 제안한 평가기법에서 필댐의 안전관리를 위한 계측분석과정은 댐의 파괴모드, 각 파괴모드와 관련된 결합, 결합의 발생 지표, 각 지표를 평가하는 계측기로 모델링하고 이들의 상호관계를 분석 및 설정하였다. 계측기의 중요도는 전문가의 공학적 판단으로 결정한 파괴모드와 결합의 조건부 확률, 지표와 계측기의 상대적인 진단상의 중요도의 상호관계를 고려하여 Andersen 등(1999)이 제시한 수식으로 정량적으로 산정한다. 댐 파괴의 최초원인으로 정의한 파괴모드는 월류, 표면침식, 파이핑, 사면활동의 4가지를 고려하였다. 계측기는 정량적으로 데이터를 제공하는 계측기기와 표면부 외관조사와 같이 정성적인 데이터를 제공하는 관측대상 표면부로 구분하였다.

2. 필댐의 파괴 및 사고사례와 주요 계측기에 대한 기존의 조사 및 연구결과를 바탕으로 분석 및 설정된 파괴모드, 결함, 지표, 계측기 사이의 상호관계는 다음과 같이 요약할 수 있다. 월류는 여수로의 기능유지를 위한 월류 웨어, 도수로, 바닥판, 도류벽 등 여수로 외관부, 댐마루와 제각의 육안감시와 표면 침하점에 의한 댐마루의 침하량 계측에 의한 여유고의 확인으로 감시할 수 있다. 여수로 바닥부와 상·하류사면의 표면침식은 여수로 외관, 상류사면, 댐마루와 제각의 표면부 침식 및 세굴에 대한 육안감시가 중요하다. 파이핑은 하류사면, 하류사면 선단, 양안부의 침투수 발생, 형상의 변화, 물고임 현상에 대한 육안감시와 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 경사계의 변위를 분석하여 감시하는 것이 중요하다.
3. 본 연구에서 제안한 평가기법은 필댐의 장기적인 안전관리를 위한 계측기의 필요성을 체계적으로 설명할 수 있고, 계측기의 중요도를 정량적으로 산정할 수 있어 필댐의 정밀안전진단 및 정밀점검시에 본 평가기법을 적용하여 기존 계측기의 폐기, 보수 및 대체의 의사결정 과정에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001), 댐유지관리매뉴얼 필댐 및 부대시설 안전점검매뉴얼, 시설안전기술공단, pp.103-178
2. 건설교통부(2003), 댐설계기준, 한국수자원학회, pp.169~213
3. 건설부(1994), 댐 시설물 유지관리 기준, pp.52~153, 360~366, 422~426
4. 한국수자원공사(2004), 댐 매설계기 설치운영관리 지침, pp.1~10
5. 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
6. 國土交通省(1986), 댐의管理 例規集, 山海堂, pp.237~257
7. 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, 125(4) pp.247~259
8. Dunicliff, J.(1988), *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, Wiley, New York
9. Fell, R., MacGregor, P., and Stapledon, D.(1992), *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*, Balkema, Rotterdam, pp.607-646
10. Pate-Cornell, M. E. and Tagras, G.(1986), "Risk costs for new dams: Economic analysis and effects of monitoring", *Water Resources Research*, 22(1), pp.5-14
11. 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
12. 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
13. USCOLD Subcommittee on Dam Incidents and Accidents(1988), *Lessons from Dam Incidents. USA-II*, ASCE, New York.