

사건수 분석 기법을 이용한 필댐의 내부 침식 위험도에 대한 지반공학적 시스템 응답 확률 산정

노경륜* · 임정열** · 목영진*** · 정영훈****

Noh, Kyung-Lyun* · Lim, Jeong-Yeul** · Mok, Young-Jin*** · Jung, Young-Hoon****

Estimating Geotechnical System Response Probability of Internal Erosion Risk in Fill Dam using Event Tree Analysis

ABSTRACT

Recently frequent collapse of old fill dams has taken place, which increases social awareness in the safety of the infrastructure. Fill dams in Korea has been incautiously regarded as safe once the fill dam is considered to have a full capacity to retain a conservative design flood determined by government authorities. However, developed foreign countries has been managing their fill dams by introducing systematic risk assessment techniques over a long period of time. In this study, the system response probabilities of the deteriorated old fill dams in Korea were systematically evaluated and analyzed by using the internal erosion toolbox based on the event tree analysis technique. The probability of the existence of flaw and the magnitude of the hydraulic gradient through a potential crack can significantly influence the geotechnical system response probability. The results of this study show that the probability of the existence of flaw and the magnitude of the hydraulic gradient through a potential crack can significantly influence the geotechnical system response probability and the risk of the deteriorated fill dam can be quantitatively assessed.

Key words : Event tree analysis, Risk assessment, Fill dam, Internal erosion, Geotechnical failure, System response probability

초 록

최근 빈번하게 발생하는 노후 필댐의 붕괴 사고로 인해 안전관리에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 지금까지 국내에서는 설계 당시 보수적인 설계기준에 근거한 설계 홍수량을 기준으로 필댐의 안정성을 단순하게 평가하고 있다. 하지만 해외의 주요 국가에서는 사건수 분석 기법과 같은 체계적인 위험도 평가 기법을 도입하여 이미 오랜 기간 동안 필댐을 관리 운영하고 있다. 본 연구에서는 노후화된 국내 필댐의 체계적인 위험도 분석을 위해 사건수 분석 기법을 이용한 미공병단 내부 침식 평가 기법을 적용하여 필댐의 내부 침식에 대한 지반공학적 시스템 반응 확률을 분석하였다. 본 연구 결과는 지반공학적 시스템 반응 확률이 결함의 존재 확률과 동수경사의 크기에 가장 큰 영향을 받으며 노후된 필댐의 위험도를 정량적으로 평가할 수 있음을 보여준다.

검색어 : 사건수 분석, 위험도 평가, 필댐, 내부 침식, 지반공학적 파괴, 시스템 반응 확률

* 경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정 (Kyung Hee University · kyunglyun@khu.ac.kr)

** 한국수자원공사 K-water 연구원, 책임연구원 (K-water Institute · passion@kwater.or.kr)

*** 정회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수 (Kyung Hee University · yjmok@khu.ac.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 부교수 (Corresponding Author · Kyung Hee University · jyoungmoon@khu.ac.kr)

Received July 14, 2014/ revised August 19, 2014/ accepted October 30, 2014

1. 서론

최근 발생한 소규모 저수지 붕괴 사고와 같이 중소 규모 필댐(fill dam)의 노후화에 따른 손상 및 파괴 위험성과 이상기후 및 지진 발생의 증가로 인한 재난 및 재해 발생 가능성이 점차 높아지고 있어서 필댐의 안전관리에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 특히 이러한 필댐의 하류부에 인구밀집 지역이 분포되어 있거나 중요한 국가시설물이 위치하고 있는 경우에는 정량적 위험도 해석 기법이 시설물 유지보수를 위한 투자의 정확한 정책 판단을 위해서 요구된다.

필댐의 위험도 특성을 확률론적으로 분석하는 기법에 대한 연구는 미국 및 호주 등 해외 주요 국가가 선도하고 있다. 다양한 확률론적 위험도 분석 기법 중 필댐의 위험도 평가 분야에서 특히 심도 있게 다루어진 기법은 사건수 분석(Event Tree Analysis, ETA) 기법이다. 사건수 분석 기법은 일련의 사건을 시작부터 끝까지 시간 순서로 나열하고 시스템의 파괴 확률을 얻기 위해 문제를 작은 조각으로 나누어 분석하는 방법이다(Baecher and Christian, 2005). 국내에서는 원전 운영 중의 위험도에 대한 평가(An, 1991; An et al., 1994; Han et al., 1996; Kim et al., 1997)에서 선박의 화재 사고에 대한 위험도 분석(Jang et al., 2005) 등 다양한 분야에서 사건수 분석 기법이 적용되고 있으며, 건축-토목 분야에서도 초고층 건축물의 확률론적 피난 안정성 평가(Jeon et al., 2010) 및 위험도 기반의 건설 프로젝트 계획 및 설계 단계의 최적 의사결정 모형을 위한 접근방법(An, 2013)과 같은 세부 분야에서 폭넓게 활용되고 있다.

댐 및 저수지에 대한 확률론적 위험도 분석 방법 중 사건수 분석을 사용하는 해외 연구는 미국의 유타 주립 대학교(Utah State University)의 연구그룹을 중심으로 이루어지고 있다. Srivastava (2008), Srivastava et al. (2009) and Bowles et al. (2011)은 사건수 분석 기법을 이용한 댐의 확률론적 위험도 모델링 기법을 개발하였고 전 세계의 다양한 댐들에 대해 적용하고 있다. 미공병단(US Army Corps of Engineers, USACE)은 이러한 연구 결과를 바탕으로 필댐의 지반공학적 파괴 위험도를 평가할 수 있는 내부 침식 평가 도구(internal erosion toolbox, 이하 toolbox)를 개발하였다(USACE, 2009). 국내에서는 한국수자원공사를 중심으로 국내 주요 댐에 대한 확률론적 위험도 분석을 시도하고 있다.

특히 소규모 농업용 저수지의 경우 확률론적 위험도 평가에 대한 사회적 필요성이 대두되고 있다. 국내에서 농업기반시설물의 대부분을 차지하고 있는 농업용 댐은 대부분 필댐(fill dam)으로, 콘크리트 댐에 비하여 재료 자체의 공학적 성질이 불균질하여 그 거동을 예측하기가 어렵다. 농업용 필댐은 2011년 현재 전국에 17,531개소가 있는데, 이중 14,175개소는 시 또는 군(이하 지자체)

에서 관리하고 있고 나머지 3,356개소는 한국농어촌공사에서 관리하고 있다. 지자체에서 관리하는 필댐의 99%와 한국농어촌공사에서 관리하는 필댐의 75%는 저수량 500,000m³ 미만의 소규모 시설이다. 또한 전체 농업용 필댐의 94%에 해당하는 16,535개소의 필댐은 건설된 지 30년 이상 경과된 노후 시설물이다.

전통적으로 댐과 저수지의 안전 여부는 구조물에 작용하는 외적 하중에 대한 공학적 안정성 평가 기준에 의해서 판단되었다. 이러한 이유로 국내에서는 현재까지 설계 수문량과 같은 극한 하중 조건에 대비하여 댐의 수문학적 안정성을 평가하는데 주력하였다. 즉 가능 최대 홍수량(probable maximum flood, PMF)에 대한 댐의 안정성이 가장 중요한 사안이며, 단순히 이를 만족하지 못할 경우 댐의 기능이 저하될 것으로 평가하였다. 하지만 이러한 단순한 논리로 수천 개가 넘는 국내 저수지를 효율적으로 관리하고 유지-보수를 위한 자원을 효과적으로 분배하기에는 한계가 있다. 또한 전 세계 필댐에서 공용 중 붕괴 사례의 48.7%는 파이핑에 의해 일어난다는 점(Lim and Lim, 2008)은 국내 댐과 저수지의 관리에서도 지반공학적인 검토가 비중 있게 다루어져야 함을 시사한다.

본 연구에서는 확률론적 기법을 이용하여 국내 농업용 필댐의 내부 침식에 대한 지반공학적 위험도를 정량적으로 평가하기 위한 분석 절차를 정리하였다. 국내에서 대표적인 농업용 필댐 형식을 따르는 저수지 2개소에 대해 확률론적 평가 기법을 적용하여 내부 침식 사건에 대한 시스템 반응 확률(System Response Probability, SRP)을 평가하였다. 저수지 필댐의 지반공학적 시스템 반응 확률을 산정하기 위해서 미공병단 내부 침식 평가 도구에 근거한 사건수 분석 방법을 적용하였으며, 위험도 결과를 비교 분석하여 국내 소규모 필댐이 가지고 있는 지반공학적 문제점을 제시하고자 하였다.

2. 필댐의 확률론적 위험도 분석 기법

2.1 위험도 분석 기법

위험도 분석(risk analysis)은 시설의 안전성 평가, 취약부에 대한 평가 및 구조물에 적용되는 위험요인을 사전에 예측하고, 검증하기 위해 사건을 모델링하여 위험도를 추정하는 것을 말한다. 정성적인 위험도 분석 기법으로는 점검표로 확인하는 체크리스트(checklist)기법과 공정위험요소나 효율저하 원인의 위험 등급별 대응책을 결정하는 위험성 평가(Hazard Operability Method, HAZOP)기법이 있다. 댐에 자주 쓰는 기법으로는 파괴모드 영향 분석(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)기법과 파괴모드 치명도 영향 분석(Failure Mode and Effect Criticality Analysis, FMECA)이 있다. 정량적인 위험도 분석 기법으로는 인지 사고 시나리오를 최상위 사건(top event)으로 놓고 사고발생 영향 파괴 모드를 귀납적 트리(tree)로 작성하는 결함수 분석 기법(Fault Tree

Analysis, FTA)과 연역적 트리로 작성하는 사건수 분석 기법 (Event Tree Analysis, ETA)이 있다. ETA와 FTA는 도식적으로 사건 발생 시나리오를 쉽게 파악할 수 있다. 특히, ETA 기법은 정량적인 위험도 파악에 유리해 필댐의 위험도 분석에 폭넓게 사용되고 있다.

2.2 사건수 분석 기법

ETA 기법은 초기 사건과 하위 사건 간 상호 인과 관계를 정확하게 정의하며 시설물의 설계에서 가정된 초기 사건들로 야기되는 사건의 평가에 유용하다. ETA의 주요 목적은 초기 사건의 결과를 규명하고 모형화하는 것이다. 이 기법은 Beim and Hobbs (1997)가 원전의 위험도 분석을 위해 처음 사용하였고 점차 다른 분야로 확대 적용되고 있다.

Fig. 1과 같이 사건수는 발생 가능한 초기 사건(initiating event)에서 시스템 파괴(system failure)까지의 과정을 연결해 도식적으로 표현하며, 연결 사건수가 증가할수록 사건수는 나무 가지처럼 펼쳐진다. Fig. 1에서 하나의 사건 이후 두 개 이상의 연결 사건이 발생하는 경우, 연결 사건을 분기(branch) 또는 분기 사건(branch event)이라 하고 사건을 연결하는 점을 절점(node)이라고 한다. 사건수의 제일 마지막 절점을 리프(leaf)라고 한다. 각 리프는 사건 결말(consequence), 즉 일련의 사건들로 야기된 피해 비용(cost)과 연계된다.

각 분기 사건은 조건부 확률(conditional probability)을 가진다. 연속된 사건(chain of events)에 대한 결합 확률(joint probability)은 각 사건의 조건부 확률들을 모두 곱하여 구하고, 하나의 초기 사건에서 파생된 다수의 연속적인 사건들이 있다면 각각의 결합 확률을 모두 더하여 전체 파괴 확률(total probability of failure)을

구할 수 있다. 만약 여러 초기 사건이 있을 경우 각각의 초기 사건에 대한 전체 파괴 확률을 모두 더하여 시스템 파괴(system failure) 확률을 구할 수 있다.

2.3 필댐의 확률론적 위험도 평가 방법

위험도 분석에서 시스템 파괴는 대상구조물이 고유의 기능을 더 이상 수행하지 못함을 의미한다. 본 연구에서 필댐이 위험도 분석 대상 시스템이므로, 시스템 파괴는 필댐의 기능이 손실되어 더 이상 물을 저류하지 못하는 상태라고 정의할 수 있다.

저수지의 파괴를 유발하는 세 가지 하중 조건은 홍수(flood), 지진(earthquake), 그리고 심각한 외적 하중이 없는 정상 운영 상태이다. 각 하중에 의한 시스템 파괴는 수문학적 또는 지반공학적인 사건으로 발생할 수 있다. 수문학적 사건은 월류와 같이 수문학적 원인이 저수지 파괴에 보다 직접적인 사건을 의미하고, 지반공학적인 사건은 제체 내부의 침식(internal erosion) 또는 제체 변형으로 인한 댐마루의 침하(crest settlement) 등과 같은 지반공학적인 원인이 직접적인 사건을 의미한다.

시스템이 파괴되면, 즉 필댐이 더 이상 물을 저류하지 못하면 하류부에 인명 손실 또는 물질적 피해가 발생한다. 따라서 위험도(risk)를 주어진 기간(일반적으로 1년)에 발생할 예상 피해 규모라고 정의한다면, 주어진 하중 조건에 대한 위험도는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$Risk = P_e \times SRP \times C \tag{1}$$

여기서, P_e 는 연간 하중 발생 확률, SRP 는 주어진 하중 조건에 대한 시스템 반응 확률(System Response Probability)이며 C 는

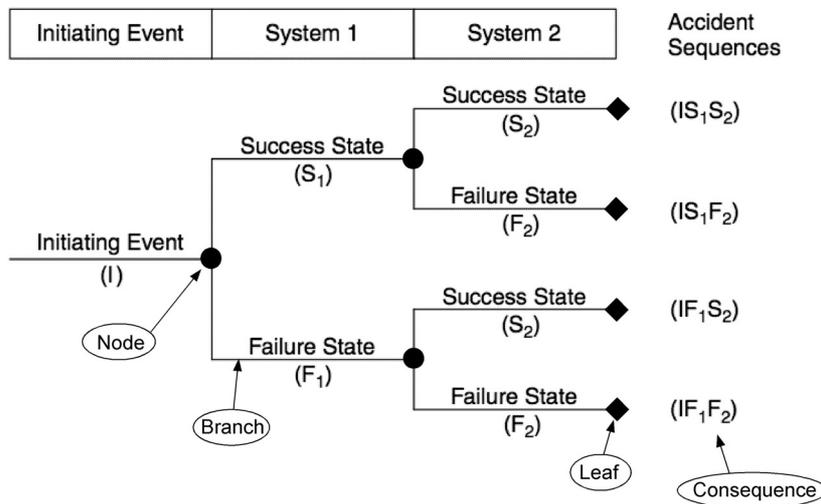


Fig. 1. A Simple, Generic Event Tree (US Nuclear Regulatory Commission, 1975)

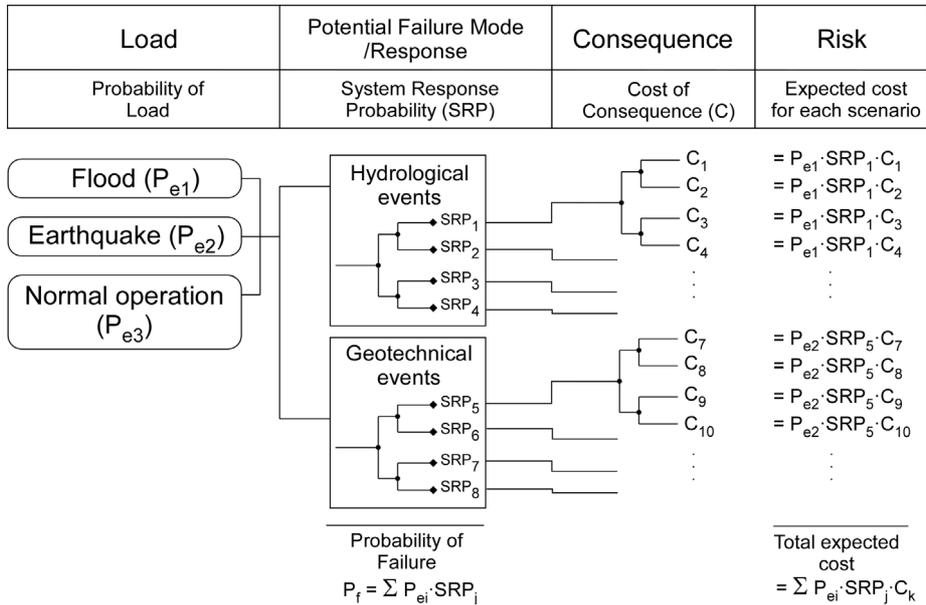


Fig. 2. An Event Tree for Dam Failure

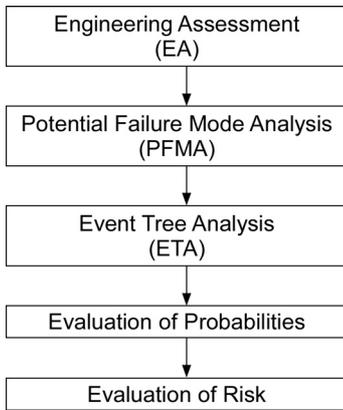


Fig. 3. Process of Risk Assessment

피해액(cost of consequence)이다. 주어진 기간에서 시스템 파괴 확률 P_f 는 다음식과 같다.

$$P_f = P_e \times SRP \quad (2)$$

본 연구에서 다루는 댐의 지반공학적 시스템 반응 확률(SRP)은 댐이 내부 침식에 의해 저류 기능이 손실될 확률을 의미하며, 지진 또는 홍수의 하중 발생 확률 P_e 를 계산된 SRP와 곱하여 댐의 시스템 파괴 확률 P_f 를 구할 수 있다.

Fig. 2는 3가지 하중조건에 대한 저수지 파괴의 사건수 구성과 위험도 평가 과정 예를 보여준다. 홍수, 지진, 그리고 정상 운영의

하중 발생 확률은 각각 P_e , P_{e2} , P_{e3} 로 주어진다. 수문 또는 지반공학 적 사건에 대해 각각 사건수를 구성하고 SRP를 평가한다. 각 사건수의 끝점에서 사건결말(consequence tree)에 대한 결과를 제시하고 피해액을 평가하면 Eq. (1)을 통해 시나리오 별 위험도(risk) 또는 예상 손실(expected cost)을 구할 수 있다. 이 때 시나리오 별 위험도를 모두 더하면 총 예상 손실 또는 시스템의 전체 위험도를 산정할 수 있다.

본 연구는 댐의 내부 침식 파괴에 대한 지반공학적 사건을 구성하고 이에 대한 SRP를 구하기 위해 미공병단의 Toolbox (USACE, 2009)를 적용했다. Toolbox에는 홍수 및 지진 하중 조건에서 제체 내부 침식에 의한 지반공학적 사건을 구성하고 SRP를 계산하기 위한 각종 자료가 정리되어 있다.

2.3.1 댐의 위험도 평가 절차

댐의 위험도 평가를 위해서는 몇 가지 절차를 거쳐야 한다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 위험도 평가 절차(Bowles et al., 2011)를 보여준다.

Fig. 3의 첫 번째 단계는 공학적 평가(Engineering Assessment, 또는 EA)로 체크리스트를 이용해 대상 댐의 문제점을 정성적으로 파악하는 단계이다. 두 번째는 잠재적 파괴모드 분석(potential failure mode analysis, 또는 PFMA) 단계로 EA의 평가 결과와 현장 조사 결과 및 관련자 인터뷰를 통해 얻은 정보를 종합하여 잠재적인 파괴 시나리오를 구성하는 단계이다. 세 번째 단계에서는 PFMA를 통해 얻은 다수의 시나리오 중 신뢰할 수 있고 중요한

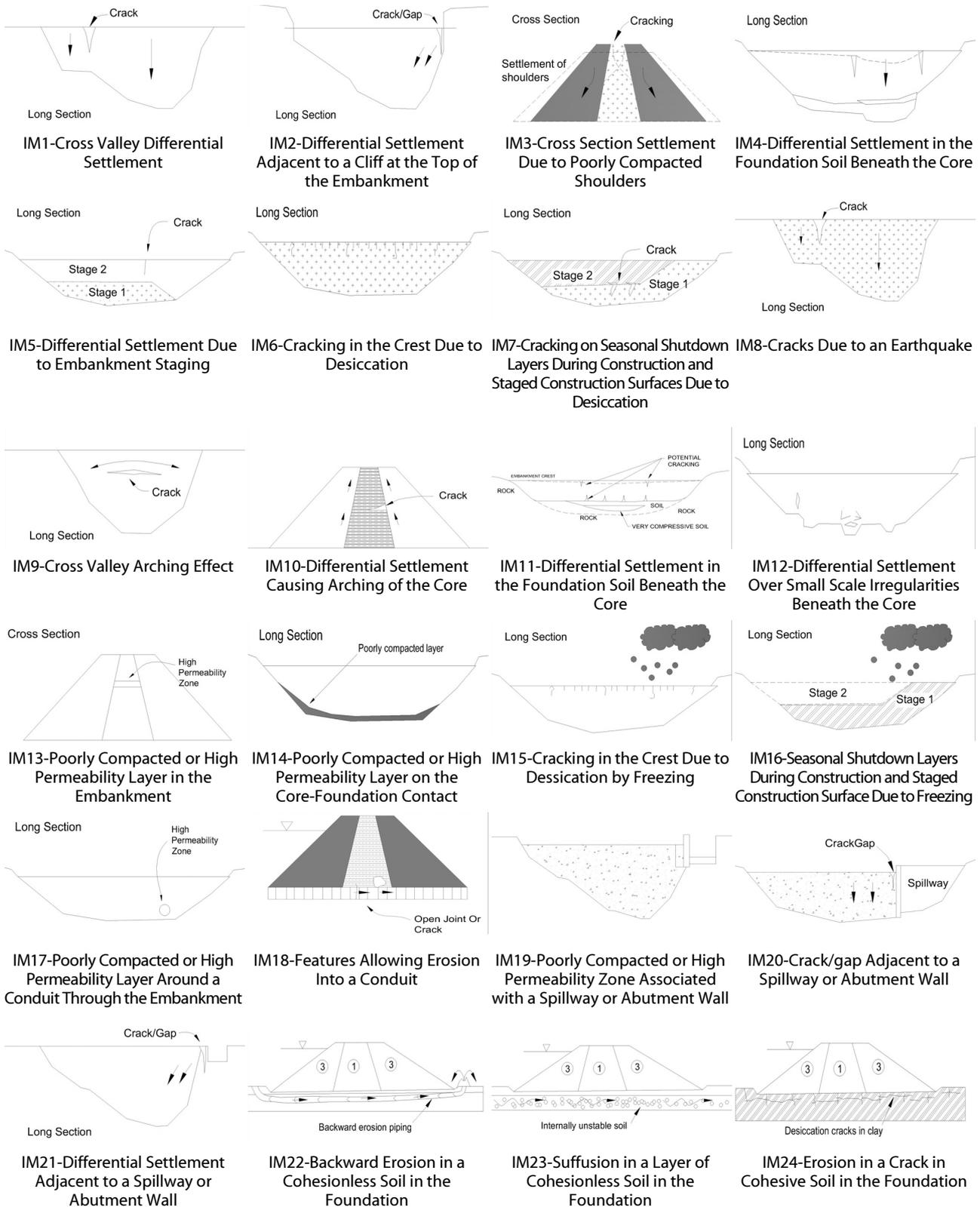


Fig. 4. Initial Mechanisms of Internal Erosion (Redrawn from USACE (2009))

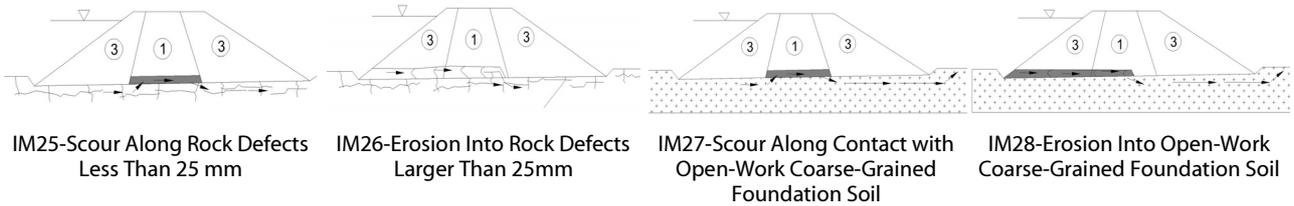


Fig. 4. Initial Mechanisms of Internal Erosion (Redrawn from USACE (2009)) (continue)

(credible and significant, C&S) 시나리오를 선택하고 이에 대한 사건수(event tree)를 작성하여 분석한다. 선택된 시나리오가 제체의 내부 침식과 관련되어 있으면 미공병단의 Toolbox를 이용하여 시스템 반응 확률(SRP)를 구할 수 있다. Eq. (1)을 이용하여 각 시나리오 별 위험도를 구하고 이를 모두 더하면 대상 필댐의 총 위험도(total risk)를 구할 수 있다.

2.3.2 공학적 평가(Engineering Assessment, EA)

공학적 평가는 여수로의 최대가능홍수량(probable maximum flood, PMF) 처리 가능 여부, 월류 발생 가능성 등의 수문학적 위험인자, 급격한 수위변동에 의한 제체의 변형과 파이핑 발생 가능성 등의 지반공학적 위험인자, 댐 부속물의 기계적 결합요소와 관련된 위험인자를 포함한 체크리스트를 정성적으로 평가하여 수행한다. 체크리스트에 포함된 각 항목을 다음의 등급 기준으로 평가한다.

- (1) “P” 또는 “AP”: P는 Pass, AP는 Apparent Pass를 의미한다. 현재 필댐의 안전기준을 만족시키기 위해 별도의 위험도 경감방안이 필요 없으면 P로, 필요 없을 것으로 예상되면 AP를 선택한다.
- (2) “NP” 또는 “ANP”: NP는 No Pass, ANP는 Apparent No Pass를 의미한다. 필댐의 안전기준을 만족시키기 위해 별도의 위험도 경감 방안이 필요하면 NP로, 필요할 것으로 예상되면 ANP를 선택한다.

홍수가 시스템 하중으로 발생하는 경우와 지진이 시스템 하중으로 발생하는 경우, 그리고 정상 운영 상태에서 파괴가 발생하는 경우에 대해 각각 EA가 가능하다. EA가 끝난 후 각 등급에 해당되는 항목의 개수를 해당 필댐의 전반적인 평가 등급으로 제시할 수 있다.

2.3.3 잠재적 파괴모드 분석(Potential Failure Mode Analysis, PFMA)

잠재적 파괴모드 분석을 위해서는 EA의 결과와 현장 조사 및 관련자 인터뷰 결과를 종합하여 잠재적인 파괴 시나리오를 구상해야 한다. 필댐의 파괴 시나리오가 지반공학적인 내부 침식과 관련된

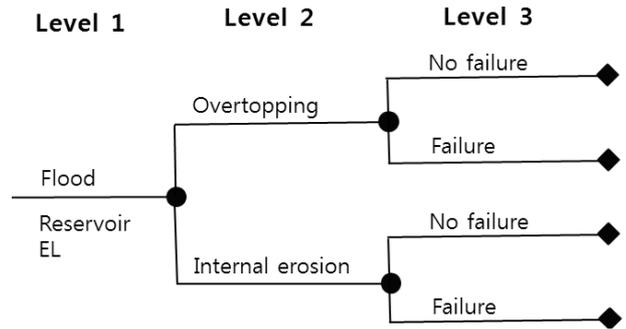


Fig. 5. An Example of the Event Tree for Flood Loading

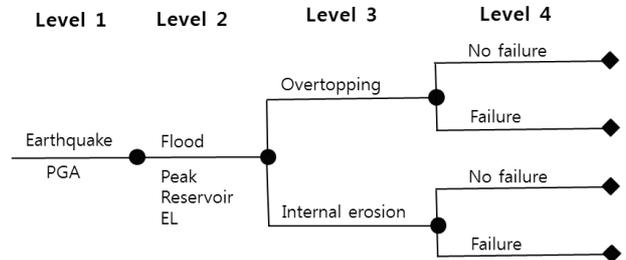


Fig. 6. An Example of the Event Tree for Earthquake Loading

어 있다면 Fig. 4의 미공병단 Toolbox에서 제시된 28개의 초기 사건(initial mechanism, IM) 중 하나를 선택하여 시나리오를 구상한다. 구상된 다수의 시나리오 중 신뢰할 수 있고 중요한 시나리오를 선택하여 최종적인 잠재적 파괴모드(Potential Failure Mode, PFM)를 결정한다.

2.3.4 사건수 모델(Event Tree Model)의 구성과 위험도의 산정

선정된 잠재적 파괴모드는 크게 홍수 하중에 대한 파괴모드와 지진 하중에 대한 파괴모드로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 정상 운영 중 파괴 시나리오는 고려하지 않았다.

홍수 하중(flood)과 관련된 사건수는 Fig. 5와 같이 ① 홍수로 인한 최대 저수위와 관련된 사건수준 1(level 1), ② 홍수 하중과 관련된 잠재적 파괴모드 시나리오와 관련된 사건수준 2(level 2), ③ 잠재적 파괴모드의 발생 시 시스템의 실제 파괴 여부와 관련된

사건수준 3(level 3)의 세 가지 사건 수준으로 구성된다. 지진 하중(earthquake)과 관련된 사건수는 Fig. 6과 같이 ① 지진 하중 발생 가능성과 관련된 사건수준 1, ② 지진 하중 발생 시 존재할 수 있는 홍수위의 확률과 관련된 사건수준 2, ③ 지진 하중과 관련된 잠재적 파괴모드 시나리오와 관련된 사건수준 3, ④ 잠재적 파괴모드의 발생 시 시스템의 실제 파괴 여부와 관련된 사건수준 4로 구성된다.

Figs. 5 and 6의 사건수는 하중의 발생 가능성과 이에 따른 시스템 파괴를 포함하는 큰 범주의 사건들로 이루어진 사건수이다. 하지만 이러한 큰 범위의 사건수에 포함된 분기 사건의 확률을 구하기 위해서 다시 세부적인 사건수 분석이 가능하다. 예를 들어 Fig. 5의 사건수준 2와 Fig. 6의 사건수준 3이 필댐의 내부침식과 관련된 파괴모드와 관련되어 있다면, 이 사건수준의 확률은 내부침식 사건에 대한 시스템 반응 확률(SRP)이며 이를 계산하기 위해서는 앞서 설명한 미공병단의 Toolbox를 이용하여 추가의 세부적인 사건수 분석을 실시해야 한다.

Figs. 5 and 6의 사건수 형태로 작성된 각 파괴 시나리오의 사건수에서 분기 확률을 모두 구하면 각 파괴 시나리오에 해당하는 파괴확률과 위험도를 구할 수 있고, 모든 시나리오의 파괴확률 또는 위험도를 더하면 전체 시스템의 파괴확률 또는 위험도를 산정할 수 있다.

2.4 내부 침식의 파괴 모드에 대한 지반공학적 시스템 반응 확률의 산정

앞서 설명한 바와 같이 잠재적 파괴 모드 시나리오가 지반공학적인 내부 침식과 관련되어 있다면 해당 사건 수준에서 SRP를 구하기 위해 미공병단의 Toolbox를 이용하여 세부적인 사건수 분석을 별도로 할 수 있다.

필댐에서 내부 침식으로 발생하는 제체의 파괴 과정은 Fig. 7에 도시된 바와 같이 ① 내부 침식의 시작(initiation) → ② 계속 진행(continuation) → ③ 급진전(progression) → ④ 브리칭 파괴(breach) → ⑤ 피해 결과(consequence)의 순차적인 단계로 진행된다. 첫 번째 내부 침식의 시작(initiation)은 제체에 존재하고 있던 잠재적인 결함(flaw)으로 인해 내부 침식이 시작되는 사건이다. 두 번째 사건은 앞서 시작된 내부 침식이 제체와 필터재의 입도분포에 의해 멈출 수 없는 상황이 발생하여 내부 침식이 계속 진행(continuation)하는 사건이다. 세 번째 사건은 침식된 흙에서 작용하는 전단응력이 누수가 발생하는 파이핑 경로를 확장시켜 내부 침식이 급진전(progression)하는 사건이다. 네 번째 사건은 마지막으로 싱크홀(sinkhole)이 유발될 정도로 큰 파이핑 경로의 확대, 하류 사면의 파괴, 또는 댐마루 침하로 인한 율류와 같이 필댐의 붕괴가 직접적으로 발생하는 브리칭 파괴(breach) 사건이

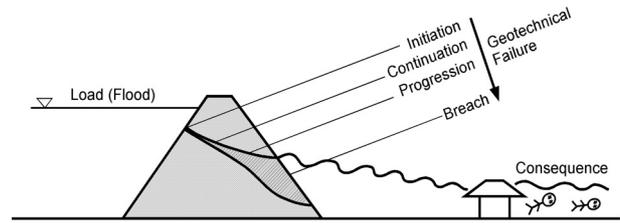


Fig. 7. Illustration of Geotechnical Internal Erosion Failure

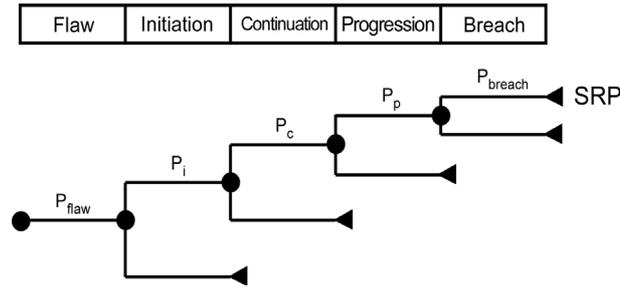


Fig. 8. Generic Event Tree for Geotechnical Events (Internal Erosion Failure)

다. 이후 필댐이 더 이상 고유의 기능을 할 수 없어 파괴(즉, 과도한 누수)가 발생하면 하류 지역의 침수로 인한 피해 손실(consequence)이 나타난다.

이와 같은 사건 단계를 Fig. 8과 같이 세부 사건수로 작성하면, ① 내부 침식이 발생될 수 있는 결함(flaw)의 존재 여부에 대한 사건수준, ② 내부 침식 시작 여부에 대한 사건수준, ③ 계속진행에 대한 사건수준, ④ 급진전에 대한 사건수준, ⑤ 브리칭 파괴 여부에 대한 사건수준 등 총 5단계의 사건수준으로 고려할 수 있다.

내부 침식에 대한 세부 사건수에서 각 사건수준의 분기확률, 즉 결함 존재 여부에 대한 확률(P_{flaw}), 내부 침식의 시작에 대한 확률(P_i), 내부 침식의 계속 진행 여부에 대한 확률(P_c), 내부 침식의 급진전 여부에 대한 확률(P_p), 브리칭 파괴 여부에 대한 확률(P_{breach})은 미공병단의 Toolbox를 사용하여 구할 수 있다. 즉 내부 침식의 파괴 모드에 대한 지반공학적 시스템 반응 확률은 세부 사건수 분석을 통해 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$SRP = P_{flaw} \times P_i \times P_c \times P_p \times P_{breach} \quad (3)$$

미공병단 Toolbox는 총 28개의 초기 사건에 대한 시나리오에 대해서 세부 사건수 분석이 가능하도록 작성되어 있으며, 선택된 시나리오의 종류에 따라 Eq. (3)에 포함된 분기확률을 구하는 방법이 각각 제시되어 있다. 시나리오에 따라 분기확률 평가 방법은 모두 다르지만, 개략적으로 다음과 같다. 내부 침식을 유발하는 결함에 영향을 주는 다양한 인자와 각 인자의 가중치를 선택하여



(a) Sudong Reservoir Attacked by Typhoon Maemi in 2003



(b) Saenggok Reservoir in 2006

Fig. 9. Examples of Erosion Failure Adjacent to Spillway Structure

영향 지수를 평가하고 도표 형태로 제시된 영향 지수와 발생 확률의 관계로부터 P_{flaw} 를 구할 수 있다. 내부 침식의 시작에 대해 결함의 위치에서 현재 저수위에 의해 발생하는 동수경사와 제체 토질 성분 등의 조건을 고려하여 영향지수를 평가하고 이에 대한 P_i 의 값을 구한다. 내부 침식의 계속 진행 여부에 대해서는 코어 재료와 필터재료에 대한 입도분포를 활용하여 P_e 를 평가한다. P_p 는 제체의 입도분포에 따라 결정되며, 댐 형식에 따라 발생가능한 브리칭 파괴의 종류를 선정하여 P_{breach} 를 계산하게 된다.

3. 국내 저수지 필댐의 지반공학적 SRP 평가

한국농어촌공사가 관리하는 3,356개소 저수지 중 94%는 준형 필댐(중심점토형) 형식을 따르고 있다. 최근 농업용 필댐의 위험도는 증가하는 추세인데, 일례로 2002년 태풍 루사에 의해 105개의 저수지가 심각한 손상을 입었고 이 중 절반에 가까운 50개의 저수지에서 Fig. 9와 같은 여수로 근처의 제체 유실이 발생되었다 (Hong et al., 2005). 본 연구에서는 농업용 필댐형식을 가진 대표적인 국내 저수지인 예당과 고삼 저수지를 연구 대상으로 선정하여 위험도 산정을 위한 지반공학적 SRP 평가를 실시하였다.

3.1 예당 저수지의 지반공학적 시스템 반응 확률

3.1.1 현황

예당 저수지는 충남 예산군에 위치하며 농업용수를 공급할 목적으로 1952년에서 1964년의 기간 동안 건설되었다. 필댐의 제체 높이는 13.3m, 길이는 314.5m, 유역면적은 373.67km², 저수총량은 4,710만m³, 유효 저수량은 4,607만m³이다. 댐마루 표고는 EL. 25.5m, 홍수위는 EL. 22.5m, 만수위는 EL. 22.5m이다. 시공

과정을 담은 오래된 영상 기록이 남아있으나 시공 당시의 다짐 관리 수준을 파악할 수 있는 구체적인 기록은 현재 소실된 상태이다. 최근 수행된 안전진단보고서(KISC, 2010)를 검토하여 제체 내부에 포화대가 존재하여 2회의 그라우팅이 실시되었고 제체 좌안에 위치한 산을 관통하는 복통은 누수가 심해 3회의 그라우팅 시공이 실시되었음을 파악하였다.

3.1.2 공학적 판단, 잠재적 파괴모드 분석과 사건수 모델 작성

예당 저수지에 대한 EA 분석 결과, 홍수 하중에 대한 수문학적 위험요소가 다수 존재함을 파악하였다. 파괴모드를 파악하기 위해 예당 저수지의 과거 시공 도면을 확인하여 필댐 하단의 암반 시공 절취선을 조사한 결과, 좌안 측에 상당한 폭의 소단(bench)이 존재함을 파악하였다. 이러한 소단의 존재는 제체의 두께가 소단 근처에서 서로 다를 수 있음을 의미하고 이로 인한 부등침하가 제체 상단에 횡단 균열(transverse crack)을 유발시킬 수 있다. 미공병단 Toolbox에서는 소단 근처의 지형 정보를 수집하여 Fig. 10과 같이

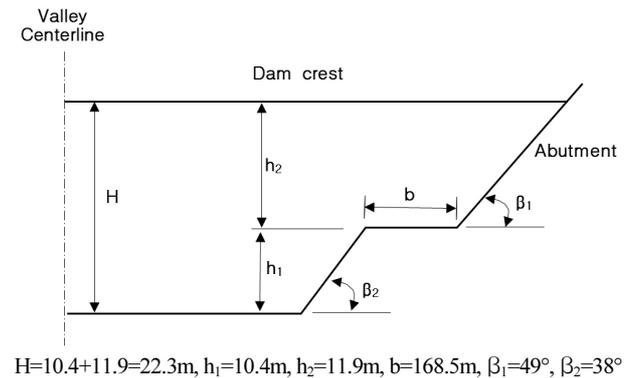


Fig. 10. Cross Valley Geometry of Yedang Reservoir (IM1)

Table 1. Potential Failure Modes (Yedang Reservoir)

Possible causes of internal erosion (Preliminary selection)			Selected IM after initial screening
Internal erosion through the embankment due to concentrated leaks in transverse cracks			IM1
			IM5
			IM8
			IM10
Internal erosion through the embankment due to poorly compacted or high permeability zones			IM13
			IM14
Final PFM#	Brief description of failure mode	Related IM	Note
PFM#1	Transverse cracking due to cross valley differential settlement break internal erosion(IM1), Transverse cracking during construction due to embankment staging break internal erosion(IM5)	IM1 & IM5	Abutment profile has a bench. Pause period during construction existed.
PFM#2	Crest settlement due to earthquake break hydraulic fracturing.	IM8	Regardless of dam type, earthquakes should be considered.
PFM#3	Transverse cracking due to earthquakes break internal erosion		
PFM#4	Differential settlement causing arching of the core onto the shoulders break hydraulic fracturing	IM10	Specific issue for the type of core-earth rockfill dam
PFM#5	Poorly compacted within embankment due to break internal erosion	IM13	Lack of documentation convincing compaction quality

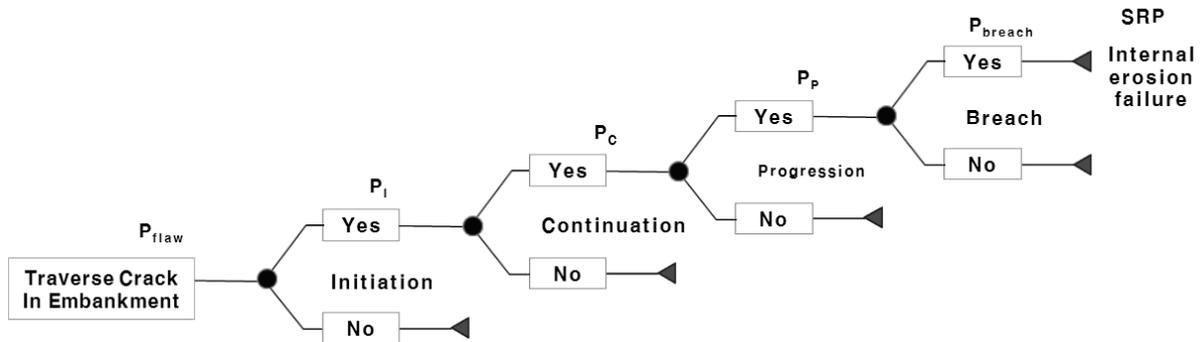


Fig. 11. Event Tree of the Failure Modes Due to Transverse Cracks

β_2 가 25도 이상이면 소단으로 인한 횡단균열의 가능성이 있다고 판단하므로, Fig. 4에 제시된 28개의 초기 사건(initial mechanism, IM) 시나리오 중 IM1을 선택할 수 있다. 또한 관련 문헌 검토 결과, 단계적 사공으로 인해 제체 내부에 불균질 층의 존재 가능성이 있어 IM5를, 심도 5~15m에 다짐 부족으로 인한 포화대가 의심되어 IM13과 IM14를 선택하였다. 현행 댐 설계기준을 충족하기 위해 지진 하중에 대한 평가 항목인 IM8을 선택하였다. 존형(중심점도형) 필댐의 코어부 아칭으로 인한 균열 가능성을 고려하기 위해 IM10이 선택되었다. 모든 파괴 가능성을 고려하여 1차적으로 선택된 파괴모드를 Table 1의 상단에 정리하였다. PFMA를 통해 이중 총 5개의 잠재적 파괴모드가 결정되었고 Table 1의 하단에 정리하였다. 기초 및 양안 접속부 다짐 부족이 준공 시 기초 처리로 해소되었다고 판단하여 PFMA 과정에서 IM14를 최종 파괴모드에

서 제외하였다. 자세한 PFMA과정은 Noh (2014)에 기술되어 있다.

결정된 각각의 잠재적 파괴모드에 대해 내부 침식에 의한 파괴 모드의 세부 사건수를 앞서 2.4절에서 설명한 미공병단 Toolbox의 방법을 사용하여 Fig. 11과 같은 형태로 작성하였다.

3.1.3 지반공학적 SRP 산정

Table 2는 Fig. 11에 제시된 IM5의 잠재적 파괴모드 PFM#1의 사건수에 대한 SRP 계산 과정을 보여준다. Table 2에서 알 수 있듯이 홍수 하중이 작용할 때 SRP는 저수위(reservoir elevation)에 따라 달라진다. SRP는 EL. 23.06m에서 댐마루 표고인 25.5m까지의 저수위 범위에서 산정되었는데, 저수위 EL. 23.06m는 해당 저수지의 POR (pool of record) 수위, 즉 현재까지의 기록 상

Table 2. Evaluation of System Response Probability for PFM#1(IM5)

(a) P_{flaw} and P_i

Reservoir EL (m)	Probability of transverse cracking	Max likely crack width (mm)	Max likely crack depth (m)	EL. of bottom of the crack (m)	Reservoir level stage (m)	Depth of mid-level flow from the crest (m)	Estimated likely crack width in core for reservoir stage being considered (mm)	Crack length at the mid-level of flow (m)	Average Hydraulic gradient	Probability of initiation
	P_{flaw}	C_{max}	D		d_p	x	C_{d1}	L_{d1}	i_{avg}	P_i
23.06	0.00018	50	5.09	20.41	2.440	3.77	13.02	17.67	0.150	0.473
23.5	0.00233	50	5.09	20.41	2.000	3.55	15.18	16.99	0.182	0.542
24.5	0.00233	50	5.09	20.41	1.000	3.05	20.09	15.44	0.265	0.731
25.5	0.00233	50	5.09	20.41	0.000	2.55	25.00	13.89	0.367	0.875

(b) P_C , P_p , P_{breach} and SRP

Reservoir EL (m)	Probability of continuation	Probability of Progression (Pp)			Probability of Breach (Pbreach)					System Response Probability (SRP)
		Hold a roof over a pipe	No crack filling action	No flow limiting	Gross enlargement	Instability of downstream slope	Sloughing or unraveling of downstream slope	Sinkhole development	Overall Probability of breach	
	P_C	P_{PR}	P_{PC}	P_{PL}	P_{ge}	P_{si}	P_{su}	P_{sd}	P_{breach}	SRP
23.06	1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	3.833.E-06
23.5	1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	5.684.E-05
24.5	1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.665.E-05
25.5	1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	9.181.E-05

발생했던 최대 수위이다. 미공병단 Toolbox에서는 저수위가 POR 보다 높은 경우 P_{flaw} 의 확률값이 크게 증가한다. P_i 는 결합 위치에서 작용하는 평균 동수 경사(average hydraulic gradient, i_{avg})에 따라 민감하게 변하며, Table 2(a)에 제시된 계산은 i_{avg} 를 구하기 위함이다. Table 2(b)에 제시된 P_C , P_p 와 P_b 는 저수위 및 동수경사의 크기에 따라 변하지 않으며, 코어 및 필터재를 포함한 제체 내부의 토질 재료 상태와 필댐의 축조 형태 등에 따라 주로 결정된다. 마지막으로 PFM#1 (IM5)의 SRP는 Eq. (3)을 이용하여 저수위에 따라 $3.83 \times 10^{-6} \sim 9.18 \times 10^{-5}$ 의 값으로 계산할 수 있다.

IM8과 관련된 PFM#2와 #3에 대한 SRP 산정을 위해서는 발생가능한 지진 하중의 크기와 이에 대한 발생 확률이 필요한데, 건설교통부(MCT, 1997)가 제시한 지진 위험 지도에서 해당 저수지가 위치한 지역의 재현주기 별 최대 지진 가속도(peak ground acceleration, PGA)와 연 초과확률(annual exceedance probability, AEP)을 추정하였다. PGA의 크기에 따른 댐마루의 침하량은 Swaisgood (2003)이 제안한 경험식을 사용하여 추정하였다. PFM#2는 홍수위가 댐마루 표고에 위치하고(즉, Table 3에서 저수위가 EL. 25.5m에 고정되어 있음) 이때 지진으로 인해 댐체의

침하가 발생하여 월류가 발생하는 시나리오이며, PFM#3는 댐마루 표고에 위치한 홍수위에 대해 지진에 의한 횡단 균열이 발생하고 이를 통해 내부 침식 파괴가 발생하는 시나리오이다. Table 3의 계산 과정을 통해 산정한 PFM#3의 SRP는 $7.63 \times 10^{-6} \sim 7.71 \times 10^{-6}$ 의 범위이다.

IM10과 관련된 PFM#4는 서로 다른 압축성을 가진 점성토의 코어재와 제체 성토재의 부등 침하와 코어재 내부의 아칭 현상으로 인해 수압 과쇄가 발생하여 내부 침식이 시작되는 시나리오이며 이에 대한 SRP는 저수위에 따라 $0 \sim 1.1252 \times 10^{-4}$ 로 평가되었다. PFM#5 (IM13)는 불량하게 다져진 코어 내부의 높은 함수층에서 내부 침식이 시작되는 시나리오이며 이에 대한 SRP는 저수위에 따라 $1.48 \times 10^{-5} \sim 2.26 \times 10^{-4}$ 로 평가되었는데, 이 값의 범위는 다른 PFM에 대한 SRP 값의 범위에 비해 상당히 큰 값이다.

3.2 고삼 저수지의 지반공학적 시스템 반응 확률

3.2.1 현황

고삼 저수지는 경기도 안성시 고삼면에 위치하며, 농업용수 공급을 목적으로 1956~1963년에 건설되었다. 필댐의 제체의 높이

Table 3. Evaluation of System Response Probability for PFM#3 (IM8)

Reservoir EL. (m)	PGA (g)	AEP	Vert. Disp. Caused by EQ. (m)	Deformed crest EL. (m)	Damage class by toolbox	$\sum(RFxLF)$ by toolbox	Probability of transverse cracking
							P_{flaw}
25.5	0.035	0.02	0.003	25.497	0	12	0.001
25.5	0.045	0.01	0.003	25.497	0	12	0.001
25.5	0.07	0.005	0.004	25.496	0	12	0.001
25.5	0.105	0.002	0.005	25.495	0	12	0.001
25.5	0.14	0.001	0.006	25.494	0	12	0.001
25.5	0.19	0.000417	0.008	25.492	0	12	0.001
25.5	0.23	0.000208	0.010	25.490	0	12	0.001
25.5	0.252	1.00E-04	0.012	25.488	0	12	0.001

(a) P_{flaw} and P_i

Max likely crack width (mm)	Max likely crack depth (m)	EL of bottom of the crack (m)	Reservoir level stage (m)	Depth of mid-level flow from the crest (m)	Estimated likely crack width in core for reservoir stage being considered (mm)	Crack length at the mid-level of flow (m)	Average Hydraulic gradient	Probability of initiation in a crack
C_{max}	D		dp	x	C_{d1}	L_{d1}	i_{avg}	P_i
5	1.14	24.36	-0.003	0.57	2.51	7.76	0.147	0.169
5	1.14	24.36	-0.003	0.57	2.51	7.76	0.147	0.169
5	1.14	24.36	-0.004	0.57	2.51	7.76	0.147	0.170
5	1.14	24.36	-0.005	0.57	2.51	7.76	0.148	0.170
5	1.14	24.35	-0.006	0.57	2.51	7.76	0.148	0.170
5	1.14	24.35	-0.008	0.57	2.52	7.75	0.148	0.170
5	1.14	24.35	-0.010	0.56	2.52	7.75	0.148	0.171
5	1.14	24.35	-0.012	0.56	2.53	7.75	0.149	0.171

(b) P_{CE} , P_p , P_{breach} and SRP

Probability of continuation	Probability of Progression (P_p)			Probability of Breach (P_{breach})					System Response Probability (SRP)
	Hold a roof over a pipe	No crack filling action	No flow limiting	Gross enlargement	Instability of downstream slope	Sloughing or unraveling of downstream slope	Sinkhole development	Overall Probability of breach	
P_C	P_{PR}	P_{PC}	P_{PL}	P_{ge}	P_{si}	P_{su}	P_{sd}	P_b	SRP
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.629.E-06
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.631.E-06
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.636.E-06
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.645.E-06
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.656.E-06
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.676.E-06
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.697.E-06
1	1	0.9	0.1	0	0	0.5	0.00066	0.500	7.711.E-06

는 16.6m, 길이는 209m이며, 유역면적은 71km², 저수 총량은 1,610만m³, 유효 저수량은 1,521만m³이다. 댐마루 표고는 EL. 55.97m, 홍수위는 EL. 53.3m, 만수위 EL. 52.4m, 최대 기록 수위(POR level)은 EL. 54.15m이다. 구체적인 시공 기록이 남아있지 않아 제체의 다짐 정도를 파악할 수 없다. 댐마루는 비포장 상태로 노출되어 있다. 현장 인터뷰 결과 제체 좌안의 접속부 사면에서 붕괴 이력이 있음을 파악하였다. 안전진단보고서(Samlim Eng., 2008)를 검토한 결과, 제체 내부에 포화대가 존재하여 그라우팅 시공 및 차수 옹벽을 설치하였음을 파악하였다. 또한 가능 최대 홍수량 변경에 따른 설계기준을 충족하기 위해 제체 높이를 2m 높였으며, 이와 함께 여방수로의 재시공 및 제체 하부 기초 지반의 그라우팅 보강을 실시하였다.

3.2.2 공학적 판단, 잠재적 파괴모드 분석과 사건수 모델 작성

고삼 저수지에 대한 EA 분석 결과, 홍수 하중에 대한 지반공학적 분야의 3개 항목(ANP 3개)에서 취약점을 파악하였다. 파괴모드 시나리오 선택에서 단계적 시공으로 인해 제체 내부에 불균질층이 존재할 가능성이 있어 IM5를, 댐마루의 비포장 상태를 고려하여 IM6을 Fig. 4에서 선택했다. 지진 하중에 대한 IM8과 중심코어형 필댐의 아칭을 고려하기 위해 IM10을 선택하였다. 또한 심도 5~20m에 제체 내부에 포화대의 존재가 확인되어 IM13와 14를, 제체를 관통하는 복통(conduit)이 있어 IM17을, 여수로 구조물이 제체 내부에 포함되어 있어 IM19와 20을 1차 파괴모드 시나리오로 선택하였다. PFMA를 통해 총 9개의 잠재적 파괴모드가 최종 결정되었고 이를 Table 4의 하단에 정리하였다. 자세한 PFMA과정은 Noh (2014)에 기술되어 있다.

Table 4. Potential Failure Modes (Gosam Reservoir)

Possible causes of internal erosion (Preliminary selection)		Selected IM after initial screening	
Internal erosion through the embankment due to concentrated leaks in transverse cracks		IM5	
		IM6	
		IM8	
		IM10	
Internal erosion through the embankment due to poorly compacted or high permeability zones		IM13	
		IM14	
		IM17	
		IM19	
		IM20	
Final PFM#	Brief description of failure mode	Related IM	Note
PFM#1	Transverse cracking during construction due to embankment staging break internal erosion(IM5)	IM5	Pause period during construction existed.
PFM#2	Transverse cracking due to desiccation at the embankment crest break internal erosion	IM6	The crest is not paved.
PFM#3	Crest settlement due to earthquake break hydraulic fracturing.	IM8	Regardless of dam type, earthquakes should be considered.
PFM#4	Transverse cracking due to earthquakes break internal erosion		
PFM#5	Differential settlement causing arching of the core onto the shoulders break hydraulic fracturing	IM10	Specific issue for the type of core-earth rockfill dam
PFM#6	Poorly compacted within embankment due to break internal erosion	IM13	Lack of documentation convincing compaction quality
PFM#7	Poorly compacted or high permeability zone adjacent to a conduit through the embankment break internal erosion	IM17	There are some records of leakage around the conduit and the repairs later.
PFM#8	Poorly compacted or high permeability zone associated with a spillway or abutment wall break internal erosion	IM19	There is a likely possible opening between spillway wall and embankment produced during remodeling work.
PFM#9	Crack or gap adjacent to a spillway or abutment wall due to break internal erosion	IM20	There is a likely possible opening between spillway wall and embankment produced during remodeling work.

3.2.3 지반공학적 SRP 산정

내부 침식의 지반공학적 SRP를 평가하기 위한 저수위는 최대 기록 수위(POR level)에서 댐마루 표고까지의 범위로 설정하였다. 고삼 저수지의 PFM#1 (IM5)에 대한 SRP는 $4.45 \times 10^{-7} \sim 1.65 \times 10^{-5}$ 로 산정되었다. PFM#1, #3, #4, #5에 대한 구체적인 SRP의 계산 과정은 앞서 예당 저수지의 사례와 유사하므로 생략하였다. PFM#2 (IM6)는 여름철 30°C 이상의 건조기간이 지속되어 비포장된 댐마루가 건조 수축하여 횡단 균열이 발생하는 시나리오이며, 이에 대한 SRP는 저수위에 따라 $4.33 \times 10^{-5} \sim 1.23 \times 10^{-4}$ 이다. 체체 내부의 포화대 존재로 인한 내부 침식 가능성과 관련된 PFM#6 (IM13)의 SRP는 $2.05 \times 10^{-5} \sim 2.55 \times 10^{-4}$ 의 범위이다. PFM#7 (IM17)은 보통 근처에서 예상되는 체체의 다짐 부족으로 인한 내부 침식의 시나리오이며, SRP는 $4.37 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-5}$ 로 평가됐다. PFM#8 (IM19)는 여수로의 측벽 근처에서 예상되는 체체의 다짐 부족으로 발생하는 내부 침식 시나리오인데, 이에 대한 SRP는 저수위에 따라 $1.89 \times 10^{-6} \sim 7.38 \times 10^{-5}$ 로 산정되어 다른 모드보다 다소 낮은 값으로 나타났다. PFM#9 (IM20)는 여수로 측벽 인접구간에서 발생하는 체체-구조물 간의 이격 균열에 의한 부등 침하 발생과 이로 인한 횡단 균열과 연관된다. PFM#9 (IM20)의 SRP는 저수위에 따라 $2.88 \times 10^{-5} \sim 1.07 \times 10^{-3}$ 의 범위로 나타나며, POR 이상의 저수위에서 급격한 SRP의 증가가 나타나서 타 PFM의 SRP 값보다 상대적으로 큰 값이 산정되었다. 고삼 저수지 필댐의 PFM에 대한 SRP의 자세한 계산 과정은 Noh (2014)를 참조하기 바란다. 고삼 저수지의 PFM#9 (IM20)에서 상대적으로 높은 SRP가 산정된 점은 타 파괴모드보다 여수로 구조물 근처의 이격 균열로 인한 파괴가 상대적으로 높은 가능성을 가진다고 볼 수 있다. 흥미로운 점은 앞서 언급한 바와 같이 실제 국내 저수지 필댐에서 Fig. 9와 같이 여수로 근처의 체체 파괴 사례가 많이 발생하였다는 사실이다.

3.3 예당 및 고삼 저수지의 지반공학적 SRP 비교

Fig. 12는 PGA로 표시된 지진 하중에 의해 내부 침식이 발생하는 파괴 시나리오(즉, 예당 저수지의 PFM#3과 고삼 저수지의 PFM#4)에서 예당과 고삼 저수지의 서로 다른 지반공학적 시스템 반응 확률 변화를 보여준다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 고삼 저수지의 SRP가 예당 저수지에 비해 약간 높으나, 두 경우 모두 SRP가 10^{-6} 의 매우 낮은 확률 범위에 놓여있어 유의미한 차이로 보기 어려우며, 두 저수지 모두 지진에 대해서는 상대적으로 안전하다고 볼 수 있다.

Fig. 13은 예당과 고삼 저수지에서 홍수 하중 발생 시 저수위에 따른 지반공학적 SRP의 변화를 보여준다. Fig. 13에는 두 저수지의 홍수위(flood water level), 최고 기록 수위(pool of record, POR

level), 댐마루 표고(crest elevation)가 함께 표시되어 있다. Fig. 13(a)의 예당 저수지 결과를 살펴보면 체체 내부의 다짐 불량과 관련된 PFM#5 (IM13)에서 가장 큰 SRP가 산정되었고, 유사한

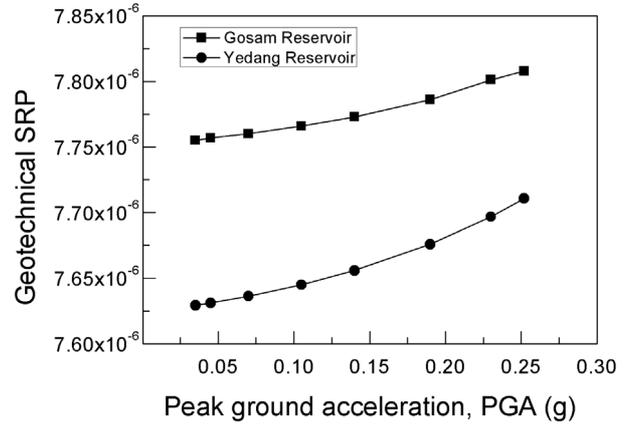


Fig. 12. System Response Probability Against Peak Ground Acceleration

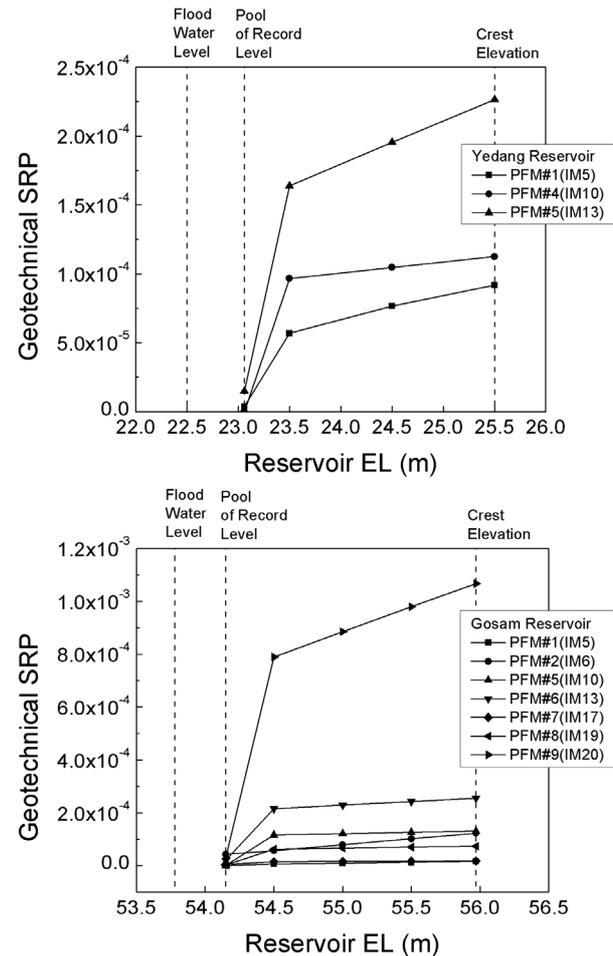


Fig. 13. Geotechnical SRP Plotted Against Reservoir Elevation: (a) Yedang Reservoir; (b) Gosam Reservoir

시나리오인 고삼 저수지의 PFM#6 (IM13)에서도 타 PFM보다 상대적으로 큰 SRP가 산정되었다. 예당 저수지와 달리 고삼 저수지에서는 여수로 근처의 이격에 의한 내부 침식과 관련된 PFM#9 (IM20)에서 다른 PFM보다 월등히 큰 SRP가 산정되었다. 예당 저수지의 PFM#1 (IM5)이 고삼 저수지의 PFM#1 (IM5)보다 큰 SRP를 가지는 이유는 예당 저수지 필댐의 체체 하부 암반 기초면에 존재하는 소단(bench)의 부정적인 영향이 SRP에 반영되었기 때문이다. 또한 IM10에 대한 PFM, 즉 예당 저수지의 PFM#4와 고삼 저수지의 PFM#5의 SRP 변화를 비교해보면 예당 저수지의 SRP가 고삼 저수지보다 낮은 값으로 평가되는데, 이는 예당 저수지 필댐의 침윤선 길이가 고삼 저수지의 값보다 12.2m 정도 더 길어서 평균 동수경사가 작기 때문이다. IM13과 관련된 예당 저수지의 PFM#5와 고삼 저수지의 PFM#6의 경우 체체 다짐 장비 및 다짐층의 두께 적정성, 현장 관리의 수준, 코어의 폭과 높이 비율이 거의 유사하지만 고삼 저수지의 SRP가 예당 저수지보다 약간 더 큰 값으로 평가 되었다. 이는 고삼 저수지의 체체 내 예상 결함 위치가 예당 저수지의 위치보다 댐마루 표고 기준으로 2.5m 더 깊은 위치에 있어서 평균 동수경사와 이로 인한 내부 침식의 시작 확률(P_i)이 예당 저수지의 값보다 크기 때문이다.

두 저수지의 결과를 종합해 볼 때, 유사한 초기 사건에 대한 지반공학적 SRP는 균열의 존재 확률과 내부 침식 경로의 평균 동수경사가 클수록 큰 값을 갖는다. 특히 고삼 저수지에서 여수로와 체체 이격에 의한 횡단 균열과 관련된 PFM#9 (IM20)의 SRP가 10^3 수준으로 타 파괴모드의 SRP 값보다 높고 이러한 파괴모드가 Fig. 9과 같은 실제 저수지 피해의 주요 원인과 일치한다는 사실은 본 연구의 사건수 분석 기법을 이용하여 저수지의 지반공학적 위험도를 정확하게 평가할 수 있음을 확인시켜 준다.

4. 결론

본 연구에서는 필댐의 내부 침식에 대한 지반공학적 위험도 평가를 위해 사건수 분석 기법을 이용한 시스템 반응 확률(SRP)의 평가 기법을 제시하였고 두 곳의 대표적인 국내 농업용 저수지의 필댐에 적용하였다. 필댐의 지반공학적 위험도 평가를 위해 진행되는 공학적 평가, 잠재적 파괴모드 분석, 각 파괴모드 시나리오에 대한 사건수 작성과 시스템 반응 확률 산정 방법을 각 절차 별로 설명하였다. 이러한 평가 기법을 예당과 고삼 저수지에 적용한 결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 공학적 평가와 잠재적 파괴모드 분석을 통해 예당 저수지에서는 총 5개의 잠재적 파괴모드, 고삼 저수지에서는 총 9개의 잠재적 파괴모드가 선정되었다. 예당 저수지의 5개 파괴모드는

고삼 저수지의 파괴모드에도 동일하게 포함되었다. 예당 저수지 분석에서는 포함되지 않은 고삼 저수지의 4개 파괴모드는 현장 및 자료 조사를 통해 필댐의 기하학적, 지형학적 특성을 반영하여 저수지 고유의 지반공학적 내부침식 파괴모드로 결정 하였다.

- (2) 두 저수지에서 공통적으로 선택된 파괴모드 시나리오에서 지반 공학적 SRP의 크기를 결정하는 주요 인자는 균열의 존재 확률과 내부 침식 경로에 작용하는 평균 동수경사이었다. 고삼 저수지의 경우 여수로와 체체의 이격으로 인한 횡단 균열과 관련된 파괴모드에서 다른 파괴모드보다 상당히 높은 SRP가 평가되었다. 이러한 사실은 과거 2002년 태풍 루사에 의해 유실된 저수지의 주 피해 원인이 여수로 근처의 체체 유실과 관계되었다는 점과 일치하여, 이는 본 연구의 사건수 분석 기법을 이용하여 저수지의 지반공학적 위험도를 효과적으로 평가할 수 있음을 확인시켜준다.
- (3) 본 연구 결과와 같이 정량적으로 평가된 SRP와 하중 발생 확률을 함께 고려하면 대상 시스템의 최종 파괴 확률을 구할 수 있다. 시스템의 파괴 확률을 파괴 이후 피해액과 함께 고려하면 시스템의 최종 위험도를 정량적으로 평가할 수 있으며, 이는 향후 대상 시스템의 유지 및 보수를 위한 비용 규모의 판단 기준으로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국수자원공사의 “댐 안전관리 의사결정 Tool D-SMART 연구개발” 과제의 일환으로 작성되었습니다. 예당 및 고삼 저수지의 공학적 위험도 분석을 위해 도움을 주신 한국농어촌 공사 담당자께 감사드립니다.

References

An, G. I. (1991). “Application of the fuzzy set theory to analysis of accident progression event trees with phenomenological uncertainty issues.” *J. of the Korean Nuclear. Soc.*, Vol. 23, No. 3, pp. 285-298 (in Korean).

An, G. I., Jin, Y. H., Kim, D. H. and Park, C. K. (1994). “For the containment event tree analysis methodology study.” *J. of the Korean Nuclear. Soc.*, Vol. 26, No. 4, pp. 611-626 (in Korean).

An, H. J. (2013). *New approach to optimal decision model for planning & design of construction projects based on risk-based utility value criterion*, Ph.D. Dissertation, University of Hanyang (in Korean).

Baecher, G. B. and Christian, J. T. (2005). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*, John Wiley & Sons, pp. 471-500.

Beim, G. K. and Hobbs, B. F. (1997). “Event tree analysis of lock

- closure risks.” *J. Water Resour. Plan Manag.*, ASCE, Vol. 123, pp. 137-198.
- Bowles, D., Rutherford, M. and Anderson, L. (2011). “Risk assessment of Success Dam, California: Evaluation of operating restrictions as an interim measure to mitigate earthquake risk.” *Proc. of GeoRisk*, ASCE, Atlanta, Georgia, pp. 586-599.
- Han, S. H., Kim, T. U. and Park, C. K. (1995) “An approach to develop a PSA Workstation in KAERI.” *Proc. of the 10th KAIF/KNS Annual Conference*, Korean Nuclear Society, Daejeon, pp. 610-615.
- Hong, B. M., Kim, H. T., Kang, B. Y. and Yoo, K. C. (2005). “Disaster reduction technique based on the case study on embankment failures.” *Proc. of 2005 Geotechnical Joint Workshop*, Korean Geotechnical Society, pp. 117-128 (in Korean).
- Jang, D. J., Lee, S. J., Lee, T. J., Oh, T. Y., Han, G. H. and Kim, H. B. (2005). “Quantitative analysis of submarine diving safety: Fire Event.” *Proc. of the Korean Naval Architect Society*, pp. 1163-1169 (in Korean).
- Jeon, E. M., Choi, J. H. and Hong, W. H. (2010). “Probabilistic evacuation safety assessment of high-rise building through event tree analysis.” *Proc. of Annual Conf. of the Architectural Institute of Korea*, pp. 399-401 (in Korean).
- Kim, D. H., Jeong, C. G. and Je, M. S. (1997). “DYLAM-3 appendix operation using a core part of the evaluation frequency of exposure incidents.” *Proc. ‘97 Fall Conf. of the Korean Nuclear Soc.*, pp. 444-449 (in Korean).
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISC) (2010). *Yedang reservoir agricultural infrastructure precise safety diagnostics report* (in Korean).
- Lim, S. S. and Lim, H. D. (2008). “Statistical analysis of the causes of the embankment dam incidents and the importance of piping.” *KSCE Magazine*, Vol. 56, No. 7, pp. 73-79 (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation (MCT) (1997). *A study on the seismic design code*, Korean Geotechnical Society (in Korean).
- Noh, K. L. (2014). *Risk assessment for geotechnical failure of reservoir using event tree analysis*, Ph.D. Dissertation, Kyung Hee University.
- Samlim Engineering (2008). *Go-Sam reservoir agricultural infrastructure precise safety diagnostics report* (in Korean).
- Srivastava, A. (2008). *Generalized event tree algorithm and software for dam safety risk assessment*, Master’s Thesis, Utah State university, Logan, Utah.
- Srivastava, A., Bowles, D. S. and Chauhan, S. S. (2009). “Improvements to DAMRAE: A Tool for Dam Safety Risk Analysis Modelling.” *Proc. ASDSO Conf. on Dams*, ASDSO, Hollywood, Florida.
- Swaigood, J. R. (2003). “Embankment dam deformations caused by earthquakes.” *Proc. 2003 Pacific conference on earthquake engineering*, pp.14-21.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2009). *Internal erosion toolbox*.
- US Nuclear Regulatory Commission (1975). *Reactor safety study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*, WASH-1400, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, U.S.