

# 내부 침식 평가 도구를 이용한 국내 땄댐의 지반공학적 시스템 응답 확률에 대한 비교 연구

김우용\* · 임정열\*\* · 목영진\*\*\* · 정영훈\*\*\*\*

Kim, Woo-Yong\*, Lim, Jeong-Yeul\*\*, Mok, Young-Jin\*\*\*, Jung, Young-Hoon\*\*\*\*

## A Comparative Study on Geotechnical System Response Probabilities of Fill Dams in Korea Using Internal Erosion Toolbox

### ABSTRACT

In this study the geotechnical system response probabilities (SRP) of the failure modes caused by the internal erosion in three dams with different histories of defects in Korea were analyzed via the internal erosion toolbox developed by USACE. The calculated values of SRP were compared with the values reported for other dams in worldwide and also the statistics on the past failures of dams and embankments in Korea. The calculated values of SRP related to the internal erosion adjacent to the conduits or spillway structures are as high as in the order of  $10^{-5}$  that is significantly greater than the SRP values related to other mechanisms of internal erosion. The statistical data showing that the internal erosion adjacent to the structure is the most frequent cause of the failure of the dam in Korea could be a collateral evidence of this finding. In contrast, the values of SRP related to the internal erosion through foundation, one of the major causes of dam failure in worldwide, are relatively as low as in the order of  $10^{-7}$ . This result could be comparable with the rareness of the failure cases of dam caused by the internal erosion through foundation in Korea.

**Key words :** Internal erosion, Geotechnical system response probability, Risk assessment, Fill dam, Dam failure

### 초 록

본 연구에서는 미 공병단의 내부 침식 평가 도구를 이용하여 서로 다른 결함 이력을 가진 국내 3개소의 땄댐에 대해 내부 침식에 의한 지반공학 적 파괴 시나리오의 시스템 응답 확률을 분석하였다. 분석된 확률을 국외 사례에서 조사된 시스템 응답 확률의 범위 및 국내 땄의 과거 사고 통계 와 비교 분석하였다. 연구 대상 땄에서 구조물 인접부의 내부 침식 파괴에 대한 시스템 응답 확률은 최대  $10^{-5}$  수준으로 다른 파괴 시나리오에 대 한 값보다 상대적으로 매우 높게 평가되었으며, 실제 국내에서도 구조물 인접부에서 가장 빈번하게 내부 침식 사고가 발생하였다. 하지만 국외 에서는 빈번하게 발생하는 기초 지반을 통한 내부 침식과 관련된 파괴 시나리오의 지반공학적 시스템 응답 확률은 상당히 낮은 수준의  $10^{-7}$ 으로 평가되었다. 이는 실제 국내에서 기초 지반을 통한 내부 침식으로 인해 발생한 땄 파괴 사례가 거의 전무하다는 사실과 유사한 결과이다.

**검색어 :** 내부 침식, 지반공학적 시스템 응답 확률, 위험도 평가, 땄댐, 땄 파괴

\* 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정 (Kyung Hee University · qwering@khu.ac.kr)

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

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

\*\*\*\* 중신회원 · 교신저자 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 부교수 (Corresponding Author · Kyung Hee University · jyounghoon@khu.ac.kr)

Received October 1, 2015/ revised November 27, 2015/ accepted March 3, 2016

## 1. 서론

댐의 붕괴는 월류, 내부 침식 및 침투, 사면 활동, 지진 등 다양한 원인에 의해 발생된다. 그 중에서도 내부 침식은 월류와 함께 발생 빈도가 높은 댐의 주요 붕괴 원인이다(Biswas and Chatterjee, 1971; Foster et al., 2000; Brown and Gosden, 2004). 국내의 경우 전국 17,500여개소의 댐 및 저수지에 대한 안전관리는 전반적인 상태를 A~E 등급으로 표시하는 정밀안전진단 결과에 의존하고 있지만, 이를 근거로 유지보수 예산을 효율적으로 분배하기는 어려운 실정이다. 일례로 전남 지역의 경우 D (미흡) 또는 E (불량) 등급의 댐 및 저수지가 해당 지역 저수지의 35%를 차지하고 있어(Yang et al., 2014), 이러한 등급을 기준으로 투자 우선 순위를 판단하기에는 무리가 있을 것이다. 특히 국내 소규모 저수지의 경우 노후화에 의한 위험도가 급격히 증가하고 있으나, 2015년 댐 유지보수를 위한 예산은 오히려 3,830억 원에서 3,752억 원으로 감소하였고 매년 줄어드는 추세이다(MOLIT, 2014). 이러한 상황에서 동일하게 불리한 안전 등급을 받은 댐 및 저수지의 유지보수를 위해 제한적인 예산 자원을 효율적으로 배분하는 것은 쉽지 않은 문제이다.

국외의 경우 이러한 문제점을 해결하기 위해 정량적인 위험도(risk) 평가 기법을 이용하고 있다(ANCOLD, 1994; Bowles et al., 1997; Brown and Gosden, 2004; DEFRA, 2002). 위험도는 주어진 기간 동안 발생할 수 있는 손실 확률로 정의된다. 미국 내 569개소의 댐을 관리하는 미 공병단(U.S. Army Corps of Engineers, 이하 USACE)에서는 댐 안정성 평가, 유지보수를 위한 재정투자 우선순위, 위험도 저감 계획 등을 수행하기 위해 확률론적인 위험도 분석기법을 사용하고 있다. USACE (2009)가 개발한 내부 침식 평가 도구(Internal Erosion Toolbox)는 특정 하중 조건에서 내부 침식에 의해 댐이 파괴될 확률, 즉 시스템 응답 확률(System Response Probability, 이하 SRP)을 산정할 수 있는 가이드라인을 제공하고 있다. 내부 침식 평가 도구는 홍수 및 지진 하중 조건에서 제체 내부 침식에 의한 지반공학적 사건을 구성하고 SRP를 계산하기 위한 각종 자료를 포함하고 있으며, 매뉴얼 형태로 작성되어 사건수(event tree)의 구성과 분기 사건(branch event)의 확률을 도표 등의 제시된 방법에 따라 평가할 수 있도록 구성되어 있다. 내부 침식 평가 도구를 이용하여 주어진 대상 댐의 SRP를 계산한 후 발생 가능한 하중(홍수 또는 지진) 발생의 연 초과 확률과 댐 붕괴로 인한 하류 지역의 피해 규모를 모두 고려하면 해당 댐의 정량적인 연간 위험도를 평가할 수 있다.

USACE의 내부 침식 평가 도구를 사용하여 댐의 안정성을 평가한 연구결과가 최근 발표되고 있다(Eddleston et al., 2012; Goodarzi et al., 2010; Donnelly et al., 2015; Noh, 2014). 하지만

Anderson et al. (2011)과 Noh et al. (2015)와 같이 시스템 응답 확률(SRP)이 정량적으로 평가한 연구가 일부 진행되었으나, 국내에서는 일반적이지 않은 균일형 댐에 대해 수행되었거나 중심 코어형 록필댐(Earth Core Rockfill Dam, ECRD)에서 필터 효과가 충분히 고려되지 못하는 등 현재까지 매우 제한적으로만 이루어진 실정이다. SRP의 평가는 가정된 하중 조건에 대한 토체의 지반공학 적 저항 능력을 확률적으로 표시하는 것이다. 따라서 안전률 위주로 성능을 평가하는 이전의 지반공학적 분석에서 벗어나 정량적 위험도 개념으로 성능을 평가하기 위해서는 국내 댐 및 저수지에 대한 SRP의 타당한 범위가 조사되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 미 공병단의 내부 침식 평가 도구를 사용하여 국내 3곳의 중심 코어형 록필댐(ECRD)의 내부 침식 사건에 대한 SRP를 평가하여 그 정량적인 범위를 제시하고자 하였다. 누수와 제체의 손상 이력을 가지고 있는 A댐, 누수가 발생하였던 B댐, 균열 및 누수가 발견되지 않았던 C댐에서 내부 침식으로 인해 발생가능한 파괴모드를 분석하였고 이에 따른 SRP의 범위를 산정하였다. 또한 그 범위의 타당성을 확인하기 위해서 실제 제체의 국내의 파괴 사례와 비교 분석하였다.

## 2. 댐의 내부 침식 평가 기법

본 연구는 미 공병단(USACE, 2009)에서 개발한 내부 침식 평가 도구(internal erosion toolbox)를 사용하여 댐의 위험도 분석을 실시하였다. 이 도구는 정량적 위험도 평가 기법인 사건수 분석 방법(Event Tree Analysis, ETA)을 기반으로 하여 내부 침식을 유발하는 특정 요인으로 인해 발생할 수 있는 댐 붕괴의 위험도를 확률적으로 평가하는 기법이다. 내부 침식 평가 도구에서는 높은 가능성을 가지고 댐이 특정 요인에 의해 내부 침식이 시작되어 붕괴에 이르는 일련의 시나리오를 잠재적 파괴모드(Potential Failure Mode)라고 부른다. 일반적인 내부 침식에 의한 잠재적 파괴 모드는 Fig. 1과 같이 (1) 제체를 통과하는 내부 침식, (2) 기초 지반을 통과하는 내부 침식, (3) 제체 내부를 관통하여 기초 또는 기초에서 다시 제체로 진행되는 내부 침식으로 분류할 수 있다. 잠재적 파괴모드에 대한 시나리오 구성은 USACE (2009)가 선행 연구를 통해 앞서 선정된 28개의 초기 사건(Initial Mechanism, IM) 중 하나를 선택하는 것으로 시작할 수 있다(Noh et al., 2015). IM의 선택을 위해 대상 댐의 결합 이력을 포함한 심층적인 현장 조사 및 자료 조사가 필요하다. 각 IM에 대한 자세한 사항은 부록 1에 제시하였다. 잠재적 파괴모드의 시나리오는 선택된 IM을 고려하여 Fig. 2의 사건수 형태로 구성된다. Fig. 2에서 보인 바와 같이 사건수는 일련의 분기 사건(branch event)으로 연결되며 일반적으로 ① 내부 침식을 유발시킬 수 있는 균열 혹은 결합(flaw)의

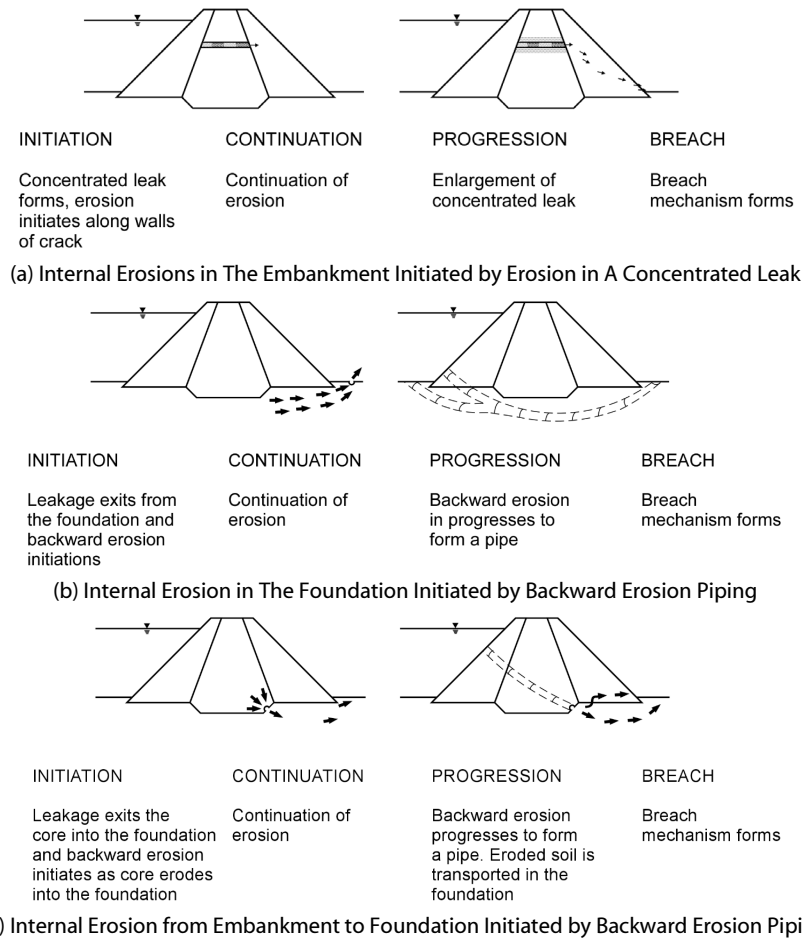


Fig. 1. Models for The Development of Failure by Internal Erosion (Redrawn from Foster and Fell (1999))

존재 가능성을 파악하는 것으로 시작된다. 결합이 존재한다면 ② 저류된 물이 균열로 흘러 들어 침식이 시작(initiation)될 수 있고, ③ 흐름의 방해가 없는 경우 지속해서 침식작용(continuation)이 일어날 수 있다. 침식이 지속되면 ④ 흐름의 경로는 더욱 크게 확장(progression)될 수 있으며, 이로 인해 ⑤ 싱크홀 혹은 댐 하류 경사면의 붕괴 등으로 댐의 붕괴(breach)가 발생할 수 있다. 특정 하중 조건에 대하여 앞서 보인 내부 침식의 사건수 과정을 따라 최종적으로 댐의 붕괴가 일어날 확률을 시스템 응답 확률(system response probability, SRP)이라 하며 Eq. (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$SRP = P_{flaw} \times P_I \times P_C \times P_{breach} \quad (1)$$

여기서  $P_{flaw}$ 는 균열 발생 확률,  $P_I$ 는 내부 침식이 시작(initiation)될 확률,  $P_C$ 는 침식이 지속(continuation)될 확률,  $P_p$ 는 침식이 확장(progression)될 확률,  $P_{breach}$ 는 일련의 과정을 통해 댐 붕괴

(breach)가 발생할 확률이다. 즉 SRP는 가정된 하중 조건이 실제 발생하였을 때 댐의 토체가 내부 침식에 의해 파괴에 도달하는 사건의 연간 발생 확률이다. USACE의 내부 침식 평가 도구를 사용하여 각 분기 사건에 대한 확률과 SRP를 산정하는 방법을 부록 2에 정리하였다. 계산된 SRP와 함께 Eq. (2)를 이용하여 내부 침식으로 인한 파괴를 유발하는 하중의 연간 발생 확률( $P_e$ )를 고려하면 대상 댐의 파괴 확률(probability of failure,  $P_f$ )을 구할 수 있다. 고려하는 하중이 홍수로 인해 발생한 위험한 높은 저수위(reservoir level)이라면  $P_e$ 는 홍수 시 특정 저수위가 발생할 연 초과 확률(annual exceedance probability, AEP)이다. 고려하는 하중이 지진이라면 상시만수위(평상시에 저수지의 수면이 유지될 수 있는 최고수위) 조건에서 지진으로 인해 특정 최대 지반 가속도(peak ground acceleration)가 발생할 연 초과 확률이  $P_e$ 가 된다 (MOLIT, 2011).

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

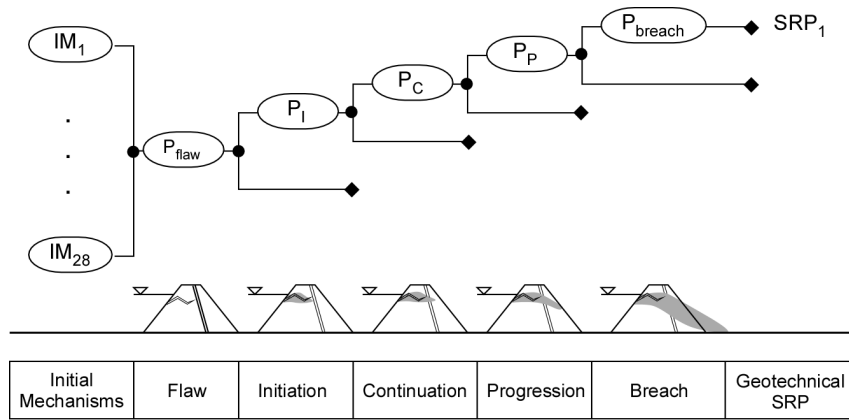


Fig. 2. Generic form of An Event Tree of Geotechnical Dam Failure by Internal Erosion (Redraw from Noh et al. (2015))

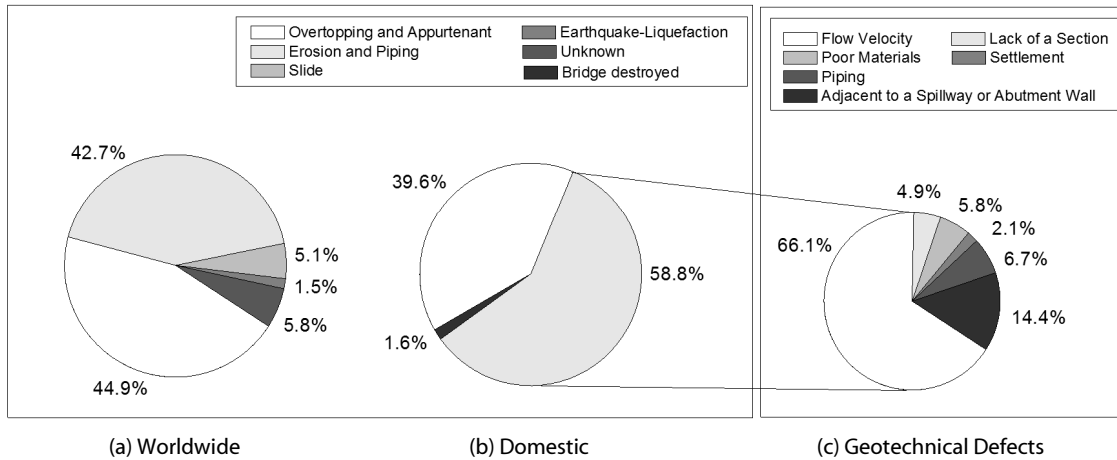


Fig. 3. Statistical Data on Failure Cases in Embankment Dams: (a) In Worldwide (Foster et al., 2000); (b) In Korea (KICT, 2003); (c) Geotechnical Defects Causing Erosion and Piping

### 3. 국내외 댐 피해 사례 및 연구대상 댐의 현황

#### 3.1 내부 침식으로 인한 국내외 댐의 피해 사례

Fig. 3은 국내외에서 조사된 댐 붕괴 사례에서 분석된 파괴 원인에 대한 통계를 보여준다. 1800년부터 1986년까지 붕괴된 국외 136개의 대댐(large dam)을 조사한 Foster et al. (2000)에 따르면 조사 대상의 44.9%가 월류에 의해 붕괴되었고 42.8%가 내부 침식으로 붕괴되었다. 여기서 대댐은 ICOLD (1974)의 정의에 따라 높이가 15m 이상이거나, 10m에서 15m의 사이의 댐 중 댐마루 길이가 500m 이상의 댐, 저수량이 100만 m<sup>3</sup> 이상의 댐을 의미한다. 또한 내부 침식으로 인한 댐 붕괴 사례 중 약 65%는 댐체 내부에서 발생한 침식이 원인이었다. 여기서 주목할 점은 댐체 내부의 침식 사례의 절반은 방류관과 옹벽 등 구조물과 제체 재료와의 경계면 접촉부에서 발생하였다는 점이다. Anderson et al. (2011)은 USACE의 내부 침식 평가 도구를 이용하여 미국

캘리포니아 주에 위치한 균일형 댐인 Success dam의 파괴모드를 분석하였다. Success dam에서 기초 지반의 균열로 인한 내부 침식 시나리오에 대한 SRP는 10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>의 범위로 비교적 높은 수준이지만, 우안 접속부의 코어 트랜치(core trench) 부근에 대한 내부 침식 시나리오의 SRP는 10<sup>-5</sup>, 제방을 통과하는 침식과 방류관 주변에서 발생하는 침식에 대한 시나리오의 SRP는 10<sup>-8</sup> 수준으로 비교적 낮게 평가되었다.

국내 하천 제방에 대해 조사한 KICT (2003)의 결과에 따르면 Fig. 3에 제시한 바와 같이 1987~2003년의 기간 동안 홍수에 의해 총 758건의 제방 파괴가 발생하였다. 그 중 월류 등의 수문학적 원인을 제외한다면 지반공학적인 관점에서 제방 파괴의 주요 원인은 구조물 인접부 결함(14.4%), 파이핑 현상(6.7%), 그리고 제체 재료의 다짐 불량 및 재료 불안정(5.6%)이다. Table 1에 정리한 바와 같이 최근 2013~2014년에 발생한 10건의 국내 저수지 붕괴 및 피해의 주요 원인은 여수로 붕괴, 복통 누수 붕괴, 다짐 불량으로

Table 1. Reported Cases of Failure of Reservoirs in Korea for 2013-2014 (Kim, 2016)

Name of reservoir	Year of construction completion	Year of breach failure	Reported cause of failure
Jiso	1991	2013	Internal erosion in the reservoir adjacent to spillway
Josan	1940	2013	
Goeyeon	1945	2014	
Sandae	1964	2013	Internal erosion in the reservoir adjacent to conduit
Bukgun	1971	2014	
Jangpung	1945	2014	
Hwabon	1958	2014	
Okcheon	1945	2013	Overtopping
Naedeok	1945	2014	
Gucheon	1987	2014	Sinkhole due to poorly compacted layer

Table 2. Present Conditions of Three Dams Studied

Dam	Years since construction (as of 2015)	Height (m)	Length (m)	Drainage area (km <sup>2</sup> )	Total (effective) storage (m <sup>3</sup> )	Crest level (m)	Flood water level (m)	Normal high water level (m)	Pool of record (POR) level (m)
A	19	55	407	301.34	13,534,000 (12,617,000)	155.1	152.6	150	150.51
B	25	53.5	326	29.4	874,000 (748,000)	117	114.25	112	113.96
C	35	42	300	235	9,640,000 (8,140,000)	162	159.3	156.8	158.72

인한 제체 상부의 함몰, 월류 등으로 보고되었다(Kim, 2016). 특히 여수로와 복통 주변의 누수로 인한 내부 침식이 원인인 경우가 10건 중 7건으로 가장 많았으며, 다짐 불량으로 인해 제체 상부가 함몰된 댐에서 만수위를 넘어가는 높은 저수위로 인해 붕괴가 발생한 사례도 보고되었다. Noh et al. (2015)은 국내 두 곳의 저수지에서 지반공학적 SRP를 평가하였으며 여수로 부근에서 발생하는 침식에 대한 SRP를 10<sup>3</sup>, 다짐 불량으로 인한 침식에 대한 SRP를 10<sup>4</sup>로 평가하여 댐 파괴의 주요 원인으로 제시하였다.

앞서 정리한 사례 조사 결과를 종합하면 국내외에서 모두 공통적으로 내부 침식이 댐 붕괴의 지반공학적인 주요 원인이다. 특히 여수로를 포함한 구조물 인접부에서 발생하는 내부 침식이 주요 원인이다. 국내의 경우 다짐 불량 및 재료 불안정을 내부 침식 사건을 유발하는 두 번째 주요 원인으로 선정할 수 있다. 국내와 달리 국외 사례에서는 기초 지반에서 발생한 내부 침식이 주요 원인으로 파악되었다. 국외 사례의 경우 제체를 통과하여 발생하는 내부 침식 파괴모드에 대한 SRP는 10<sup>-7</sup>~10<sup>-8</sup> 수준으로 상대적으로 낮은 값으로 평가되었다. 국외 사례의 주요 원인인 기초 지반에서 발생한 내부 침식은 국내에서는 주요한 원인으로 다루어지지 않았으며(Noh et al., 2015), 실제 이로 인해 댐 붕괴가 발생한 기록도 찾기 어렵다.

### 3.2 연구대상 댐의 현황 및 잠재적 파괴모드 선정

본 연구에서는 국내에서 중심 코어형 록필댐(Earth Core Rockfill Dam, ECRD) 형식에 속한 3개의 대댐(large dam)을 선택한 후 각 댐의 잠재적인 파괴모드를 분석하고 내부 침식으로 인한 댐 파괴 위험도 평가를 위한 지반공학적 SRP를 평가하였다.

Table 2는 분석된 연구대상 댐의 시설현황을 보여준다. 세 댐은 특징은 모두 용수공급용 댐으로 19년 이상된 댐이며, 높이가 42m 이상인 대댐이다. 분석된 댐은 준공 이후 최고 수위(Pool of Record Level, POR)가 홍수위보다 낮게 기록되었다. A댐의 정밀안전진단 보고서(Korea Infrastructure Safety Corporation, 이하 KISC, 2010)에 따르면 코어의 재료는 재료분리의 가능성이 존재하는 통일분류법 상 SC (점토질 모래)와 CL (압축성이 낮은 점토)로 분류되었다. 또한 A댐은 제체와 여수로 인접부에서 손상 이력을 가지고 있었는데 제체의 손상은 시공 중 다짐 불량에 기인하는 것으로 제시되었다. 이와 함께 제체 하부의 기초지반에서 누수대 또는 연약대가 존재하는 것으로 조사되었다. B와 C댐에 대한 코어 및 필터재의 재료 정보는 자료 조사를 통해서도 찾을 수 없었다. B댐의 정밀안전진단 보고서(KISC, 2012)는 B댐의 여수로 인접부에서 누수 발생이 발생한 이력이 있음을 제시하고 있다.

USACE의 내부 침식 평가 도구를 이용하여 SRP를 평가하기

위해서는 코어 및 필터재의 입도분포 정보가 필요하다. A댐의 경우 Kim (2011)이 시추로 얻은 코어재의 입도분포를 측정한 바 있으나 필터재의 입도분포는 보고된 바 없다. 따라서 A댐과 유사한 결함 이력이 있으며 입도분포 정보가 제시된 Rowallan dam의 코어재와 Songa dam의 필터재에 대한 입도분포(Fell et al., 2015)를 A 댐 재료의 입도분포로 가정하였다. B와 C댐의 경우, 현재까지 심각한 제체 내부의 침식 문제가 발생하지 않았으며 충분한 자료가 기록되어 있는 대표적인 국내 대댐인 소양강댐의 시공 당시 코어재와 필터재의 입도분포(Nippon Koei Corporation, 1974)를 B와 C댐 재료의 입도분포로 가정하였다.

연구 대상 댐의 잠재적 파괴모드는 현장 육안 조사 결과와 함께 기 보고된 댐 정밀안전진단 보고서의 각종 자료를 이용하여 결정하였고 최종 선정된 파괴모드를 Table 3에 정리하였다. A~C댐에서 대상 댐의 단면 조건 및 여수로 존재 여부 등의 기하학적 형상 정보를 고려하여 공통적으로 선택된 파괴모드는 Case 1 (코어부 아칭으로 발생한 내부 침식으로 인한 붕괴), Case 2 (지진에 의한 균열으로 발생한 내부 침식으로 인한 붕괴), Case 3 (여수로와 제체 접합부 균열로 발생한 내부 침식으로 인한 붕괴)이다. Case 1과 Case 3의 파괴모드는 USACE의 내부 침식 평가 도구에 제시된 IM10(재료 강성차이로 인한 아칭현상)과 IM21 (구조물과 제체의 부등침하에 의한 균열)의 초기 사건과 연관시킬 수 있다. 현행 댐 관리기준에 따라 지진 하중과 관련된 파괴모드는 반드시 고려되어야 하므로 내부 침식 평가 도구의 IM 8 (지진에 의한 균열)의 초기 사건 시나리오를 반영하여 Case 2를 모든 댐의 공통 파괴모드로 선정하였다.

B와 C댐과 달리 A댐의 경우 무시하기 어려운 제체 다짐 불량 및 제체 하부 기초의 결함 이력이 정밀진단보고서 상에 존재하였고 이를 고려하여 Case 4 (제체 다짐 불량 혹은 투수층 존재에 따른

내부 침식으로 인한 붕괴)와 Case 5 (제체 하부의 기초지반에 점착력이 없는 투수층의 내부 침식으로 인한 붕괴)를 선정하였다. Case 4와 5는 내부 침식 평가 도구의 IM13 (제체 다짐 불량)과 IM23 (제체 하부 투수층 존재)의 초기 사건과 연관시킬 수 있다. 참고로 부록 1에서는 USACE의 내부 침식 평가 도구에서 제시하는 28개의 초기 사건 시나리오(IM1~IM28)를 정리하였고, A~C댐의 잠재적 파괴모드에 해당되는 초기 사건을 표시하였다.

#### 4. 연구대상 댐의 지반공학적 시스템 응답 확률(SRP) 평가

##### 4.1 Case 1: 코어부 아칭으로 발생한 내부 침식으로 인해 붕괴에 이르는 시나리오

Case 1은 강성이 다른 코어재와 록필의 부등침하로 코어 내부에 아치가 생성되며 아치 하부에 작은 균열이 발생하기 시작한 후 수압파쇄(hydraulic fracture) 작용으로 인해 내부 침식이 댐 붕괴까지 진행되는 시나리오이다. 지반공학적 SRP 산정을 위해 홍수 하중으로 인한 저수위의 범위는 POR 아래 -3m 위치부터 댐마루 표고까지로 설정하였다. Table 4는 POR 위 또는 아래 두 곳에 저수위가 위치할 경우 각 댐에서 Case 1에 대한 SRP의 사건수 계산 과정을 보여준다. 각 분기사건의 확률은 USACE의 내부 침식 평가 도구를 이용하여 결정하였다. Table 4에서 보인 바와 같이 Case 1의 균열 발생 확률( $P_{flaw}$ )은 오직 저수위가 POR보다 높을 때만 존재하며, 따라서 저수위가 POR보다 낮으면 SRP는 0이다. 내부 침식이 시작될 확률( $P_i$ )은 코어재의 물성치와 균열의 크기, 그리고 균열에 작용하는 평균 동수 경사의 크기를 고려하여 결정해야 하므로 저수위에 따라 값이 달라진다. 이후 분기사건에 대한 확률, 즉  $P_C$ ,  $P_P$ ,  $P_{breach}$ 의 결정 과정에 대해서는 부록 2에 설명하였다.

Table 3. Potential Failure Modes

Dam	Case # of failure mode	Brief description of failure mode	Related IM according to USACE (2009)	Note
A, B, and C	Case 1	Hydraulic fracturing due to differential settlement causing arching of the core onto the embankment shoulders	IM 10	Considering the sectional properties and interfaces in the dam studied
	Case 2	Transverse cracking due to an earthquake	IM 8	
	Case 3	Transverse cracking due to differential settlement adjacent to a spillway or abutment wall	IM21	
A only	Case 4	Poorly compacted or high permeability zones within the core	IM13	Lack of documentation convincing proper compaction control during construction
	Case 5	Suffusion in a cohesionless layer in the foundation	IM23	Lack of documentation convincing proper control of grain size distribution of fill materials during construction

Table 4. Evaluation process of SRP for Case 1

Dam	Reservoir level (m)	Probability of flaw existence	Probability of initiation of erosion	Probability of continuation	Probability of progression	Probability of breach	System response probability
		$P_{flaw}$	$P_I$	$P_C$	$P_P$	$P_{breach}$	SRP
A (POR=50.84 m)	50 (< POR)	0	0.964	0.001	0.9	0.752	0
	55 (> POR)	0.00835	0.972	0.001	0.9	0.752	5.491E-06
B (POR=50.46 m)	49.5 (< POR)	0	0.917	0.0001	0.9	0.753	0
	53.5 (> POR)	0.00835	0.931	0.0001	0.9	0.753	5.268E-07
C (POR=38.72 m)	38 (< POR)	0	1	0.0001	0.9	0.82	0
	42 (> POR)	0.00835	1	0.0001	0.9	0.82	6.165E-07

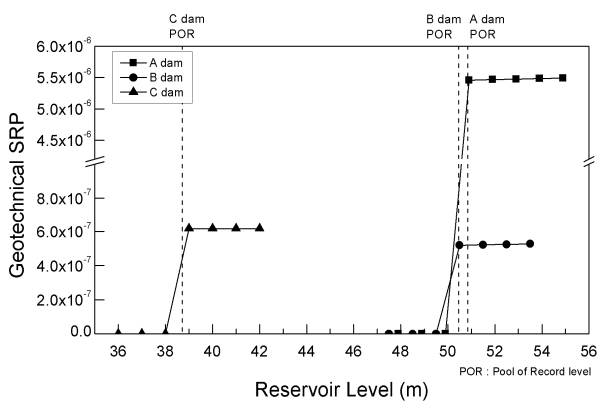


Fig. 4. Variations in Geotechnical SRP Plotted Against the Reservoir Level (Case 1)

Fig. 4는 홍수 하중 발생 시 저수위 높이에 따른 지반공학적 SRP의 변화를 보여준다. Case 1의 파괴모드에 대해서 A, B, C댐의 SRP는 각각 최대  $5.49 \times 10^{-6}$ ,  $5.27 \times 10^{-7}$ ,  $6.17 \times 10^{-7}$ 로 나타났다. 즉 특이 결합 이력이 발견되지 않은 B와 C 댐의 SRP는 대략  $10^{-7}$  수준으로 결합 이력이 있는 A댐의 SRP보다 약 10배 정도 낮다. 이러한 결과는 A댐의 사전수 계산 내역에서 코어재의 결합으로 내부 침식이 지속될 확률( $P_C$ )이 B와 C댐의  $P_C$ 에 비해 10배 정도 높게 평가되었기 때문이다. 즉 코어재의 결합 가능성은 최종적으로 SRP를 10배 이상 증가시킬 수 있음을 보여준다.

#### 4.2 Case 2: 지진에 의한 균열로 내부 침식이 진행되어 붕괴에 이르는 시나리오

지진에 의한 균열로 내부 침식이 진행되어 붕괴에 이르는 시나리

오는 지진에 의해 댐체에 부등 침하가 발생하고 이로 인해 제체 상부에 균열이 발생하고 이를 통해 내부 침식이 진행되어 최종 댐 붕괴에 이르는 시나리오이다. USACE의 내부 침식 평가 도구를 이용하면 PGA (Peak Ground Acceleration)으로 표시된 특정 지진 하중에 대해서 발생 가능한 균열의 크기와 심도를 결정할 수 있다. Table 5는 저수위가 상시 만수위 또는 댐마루 표고 수위에 있을 때 두 가지 경우의 지진 하중 크기에 대한 지반공학적 SRP의 계산과정을 보여준다. 상시 만수위(high water level)에서 SRP는 0으로 평가되었는데 이는 상시 만수위에 위치한 저수위가 지진으로 발생한 균열 하부 심도보다 낮기 때문에 내부 침식이 시작할 가능성이 없기 때문이다. Table 5에서 정리한 바와 같이 저수위가 댐마루 표고에 위치할 때 A 또는 B댐의 PI 값이 C댐의 값보다 높다. C댐의 경우 잠재적인 내부 침식 경로의 길이가 타 댐에서의 길이보다 길기 때문에 동수경사가 낮게 평가되었고 이로 인해 낮은 PI값을 가진다. A댐의 PI 값은 B댐의 값보다 낮는데, 이는 A댐의 코어재가 통일분류법 상 SC 또는 CL로 분류되어 B댐의 코어재(SC 또는 SM로 분류)보다 세립질이 많으므로 균열 내 흐름에 대한 흡의 전단 저항치인 한계 전단응력(critical shear stress)이 상대적으로 높기 때문이다(Wan and Fell, 2002). 하지만 Table 5에서 알 수 있듯이 동일 댐에서 지진하중 크기(PGA) 차이에 따른 지반공학 적 SRP의 차이는 크지 않다.

Fig. 5는 1만 년 재현주기의 지진 하중 조건에서 저수위 높이에 따른 지반공학적 SRP의 변화를 보여준다. 1만년 재현주기에 해당하는 지진 하중 크기는 A, B, C댐에서 각각 PGA = 0.25g, 0.219g, 0.248g이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 지진 하중과 관련된 Case 2의 파괴모드에 대한 SRP의 변화는 POR과 직접적인 관계는

Table 5. Evaluation Process of SRP for Case 2

Dam	Reservoir level (m)	Probability of flaw existence	Probability of initiation of erosion	Probability of continuation	Probability of progression	Probability of breach	System response probability
		$P_{flaw}$	$P_I$	$P_C$	$P_P$	$P_{breach}$	SRP
A	49.9 (High water level)	0.01	0	0.001	0.9	0.752	0
	55 (PGA=0.041 g)	0.01	0.904	0.001	0.9	0.752	5.509E-06
	55 (PGA=0.25 g)	0.01	0.905	0.001	0.9	0.752	5.511E-06
B	48.5 (High water level)	0.01	0	0.0001	0.9	0.753	0
	53.5 (PGA=0.019 g)	0.01	0.999	0.0001	0.9	0.753	6.091E-07
	53.5 (PGA=0.21 g)	0.01	0.999	0.0001	0.9	0.753	6.091E-07
C	35.8 (High water level)	0.01	0	0.0001	0.9	0.82	0
	41 (PGA=0.041 g)	0.01	0.887	0.0001	0.9	0.82	5.896E-07
	41 (PGA=0.248 g)	0.01	0.892	0.0001	0.9	0.82	5.926E-07

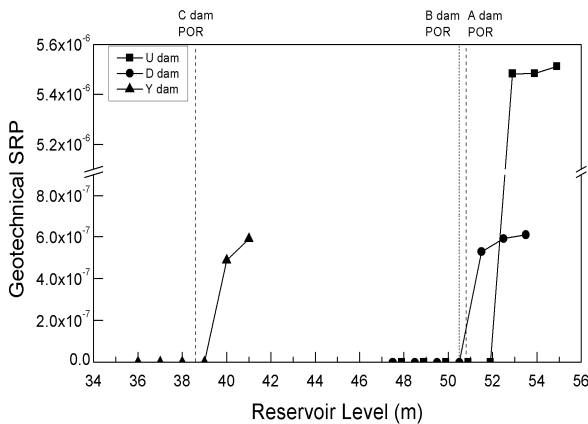


Fig. 5. Variations in Geotechnical SRP Plotted Against the Reservoir Level (Case 2)

없으며, 저수위가 균열 하부의 심도보다 낮으면  $P$ 는 0이 된다. Case 2의 파괴모드에 대해서 A, B, C댐의 SRP는 각각 최대  $5.51 \times 10^{-6}$ ,  $6.09 \times 10^{-7}$ ,  $5.90 \times 10^{-7}$ 로 나타났다. Case 1의 경우와 마찬가지로 A댐의 SRP가 B 또는 C댐의 SRP보다 10배 정도 큰 원인은 코어재 불안정성으로 인해 A 댐의  $P_C$ 값이 타 댐의  $P_C$ 보다 높기 때문이다.

### 4.3 Case 3 : 여수로와 제체 접속부 균열로 내부 침식이 진행되어 붕괴에 이르는 시나리오

Case 3은 서로 다른 강성을 가진 여수로와 제체 접속부에 균열이 발생하고 이를 통해 내부 침식이 진행되어 최종 댐의 붕괴가 일어나는 시나리오이다. Table 6은 댐 별 수위에 따른 지반공학적 SRP 평가 과정을 보여준다. Case 3에 대해 A 댐의 균열 발생 확률( $P_{flaw}$ )은 B댐보다 2.5배 더 크게 평가되었고 C댐보다 5배 더 크게 평가되었다. 이는 구조물 인접부에서 발생한 침하 이력 등을 고려하여 타 댐에 비해 높은 침하 및 균열 보정 계수를 A댐의  $P_{flaw}$  산정 과정에서 사용하였기 때문이다. Fig. 6은 A, B, C댐에서 수위에 따른 지반공학적 SRP의 변화를 보여준다. Case 3의 파괴모드에 대해서 A, B, C댐의 SRP는 각각 최대  $6.77 \times 10^{-5}$ ,  $2.71 \times 10^{-6}$ ,  $1.48 \times 10^{-6}$ 로 나타났다. 즉 A댐의 경우 댐체의 함몰과 코어재의 불안정 등의 결함 이력으로 인해 다른 두 댐에 비해 25배에서 45배 높은 SRP가 산정되었다.

### 4.4 Case 4와 Case 5: 제체 내부의 다짐불량 및 투수층의 존재로 내부 침식이 진행되어 붕괴에 이르는 A댐의 추가 시나리오

Case 4는 제체 내부의 다짐불량 및 투수층의 존재 가능성으로 인한 결함을 통해 내부 침식이 진행되고, Case 5는 제체 하부의



Table 6. Evaluation Process of SRP for Case 3

Dam	Reservoir level (m)	Probability of flaw existence	Probability of initiation of erosion	Probability of continuation	Probability of progression	Probability of breach	System response probability
		$P_{flaw}$	$P_I$	$P_C$	$P_P$	$P_{breach}$	SRP
A (POR=50.84 m)	50 (< POR)	0.01	0.866	0.001	0.9	0.752	0
	55 (> POR)	0.1	1	0.001	0.9	0.752	6.768E-05
B (POR=50.46 m)	49.5 (< POR)	0.004	1	0.0001	0.9	0.753	2.709E-07
	53.5 (> POR)	0.04	1	0.0001	0.9	0.753	2.709E-06
C (POR=38.72 m)	38 (< POR)	0.002	1	0.0001	0.9	0.82	1.477E-07
	42 (> POR)	0.02	1	0.0001	0.9	0.82	1.477E-06

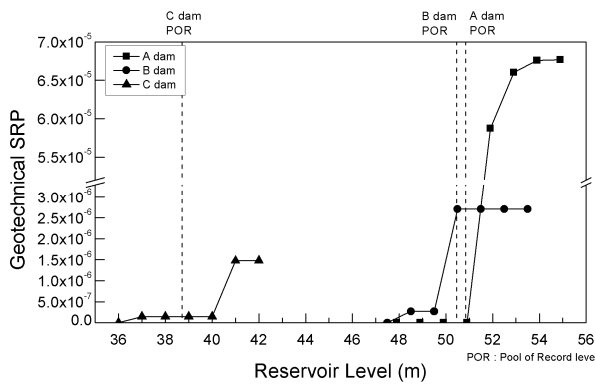


Fig. 6. Variations in Geotechnical SRP Plotted Against the Reservoir Level (Case 3)

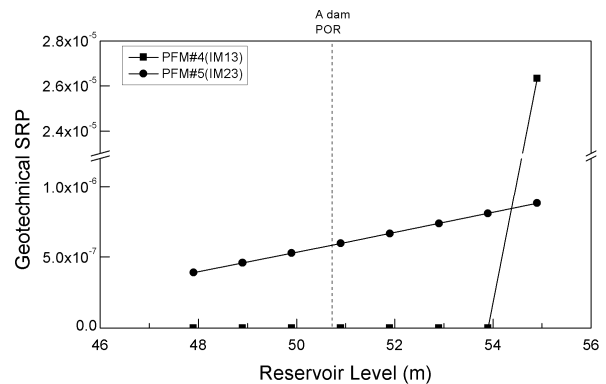


Fig. 7. Variations in Geotechnical SRP Plotted Against the Reservoir Level (Case 4 and 5)

기초지반에 접착력이 없는 투수층이 존재하여 내부 침식이 진행되어 최종 댐 붕괴가 일어나는 시나리오이다. 잠재적 파괴모드 분석을 통해 파악된 A댐의 결함 가능성을 고려하여 Case 4와 5는 A댐에서만 선택되었다. 부록 1에 정리한 바와 같이 Case 4는 USACE의 내부 침식 평가 도구 상 IM13과 연관되어 있으며 Case 5는 IM23과 연관되어 있다. USACE의 내부 침식 평가 도구를 사용하여 Case 4의 SRP를 산정하기 위해서는 다짐 장비, 다짐층 관리 두께 등의 현장 다짐 관리 정보와 토취장에서 운반된 성토재의 토질 정보가 필요하다. 하지만 A댐의 관련 기록이 부족하여 본 연구에서는 코어부의 다짐 시공은 습윤 측으로 함수비가 관리되었고 성토재는 양입도의 재료(well-graded soil)로 가정하였다.

Case 5의 SRP 산정을 위해 A댐의 기초 지반 내에 존재하는 연약대는 실트 섞인 모래자갈층으로 가정하였고 Lee et al. (2010) 이 제시한 입도분포 정보를 사용하였다. Fig. 7에서 보인 바와

같이 저수위에 따라 Case 4의 경우  $0 \sim 2.63 \times 10^{-5}$ , Case 5의 경우  $3.91 \sim 8.79 \times 10^{-7}$ 의 범위로 SRP가 산정되었다. Case 4에서 내부 침식이 진행될 수 있는 균열의 하단이 댐마루 표고에서 0.6 m에 위치하는 것으로 산정되었기 때문에 이 위치 이상의 저수위(Reservoir level = 54.3m) 범위에서만 SRP가 산정되었다. A댐에서 Case 5의 SRP는 앞서 제시한 Case 1~4의 SRP에 비해 상당히 낮은 값이며 최대 170배까지 낮은 값으로 나타났다.

#### 4.5 지반공학적 SRP의 종합적 비교 분석

Fig. 8은 앞서 분석된 A, B, C댐의 모든 파괴 시나리오에 대한 지반공학적 SRP의 변화를 비교한 그림이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 A댐의 Case 3에 대한 SRP는 상대적으로 손상이 적은 B와 C댐의 SRP에 비해 최대 45배 정도 높은 값이다. 각 댐에서 여수로 인접부 내부 침식과 관련된 Case 3의 SRP가 타 파괴모드의

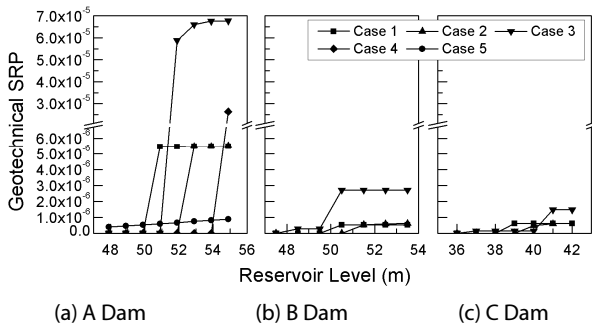


Fig. 8. Summary of SRPs: (a) A Dam; (b) B Dam; (c) C Dam

SRP보다 공통적으로 높게 평가되었다. Case 3에 대해 댐 별 SRP를 비교해 볼 때, 결합 존재 여부(즉, A댐의 결합 이력)에 따라  $P_{flaw}$ 의 상당한 차이가 발생하며 이로 인해 SRP가 최대 12배까지 차이날 수 있음을 알 수 있다. 모든 댐에서 Case 3의 SRP가 타 파괴모드의 값에 비해 큰 값이며 각 댐의 조건에 따라 Case 3의 SRP가 민감하게 반응한다는 점은 여수로 등의 구조물과 댐체 접촉부에서 발생할 수 있는 균열이 내부 침식으로 인한 댐의 파괴 가능성에 중요한 영향을 미치는 요인임을 의미한다. 이는 앞서 정리한 바와 같이 구조물 근처에서 발생하는 붕괴가 국내 댐 붕괴의 주요 원인이었고 내부 침식으로 발생한 국외 댐 붕괴의 약 50%가 방류관과 옹벽 인접부에서 발생한 문제로 야기되었다는 분석 결과와도 일치한다.

Case 3을 제외한다면 A댐에서 다짐 불량에 기인한 파괴모드 (Case 4)의 SRP가 타 파괴모드의 값보다 높게 산정되었다. 이는 2014년 구천 저수지에서 실제 발생한 댐 마루 상부의 붕괴가 제체의 다짐 불량과 관련되어 있었다는 점(Newsis, 2014)과 위험도 관리 측면에서 연관시켜 볼 수 있다. 본 연구에서 다짐 불량과 관련된 파괴모드의 지반공학적인 SRP는  $10^5$  수준이며, 이는 국외 사례에서 유사한 파괴모드의 SRP 수준에 비해 대략  $10^3$ 배 높은 값이다.

반면 A댐에서 기초 지반을 통한 내부 침식과 관련된 파괴모드 (Case 5)의 SRP는  $10^7$ 수준으로 타 파괴모드의 값보다 상당히 낮다. 하지만 국외 사례인 Success dam에서는 유사한 파괴모드의 SRP가  $10^2 \sim 10^3$  수준으로 산정되었고, 이는 A댐의 값보다 최대  $10^5$ 배 높은 값이다. 이러한 차이는 국외에서는 기초 지반을 통한 내부 침식이 댐 붕괴의 주요한 원인이 될 수 있지만 국내에서는 발생 가능성이 매우 적다는 것을 의미하며 대부분의 국내 댐이 견고한 화강편마암 위에 축조된다는 사실(Woo et al., 2004)과 연관시킬 수 있다.

Fig. 8에 제시된 SRP는 하중 발생 확률과 곱하여 파괴확률(probability of failure)로 표시되며, 파괴확률은 위험도의 허용가능 혹은 보수 및 보강의 필요 여부를 판단하기 위하여 사용될 수 있다. Baecher and Christian (2005)에 따르면 일반적으로

댐의 연간 파괴확률의 허용범위는 피해 인구수 1~1,000명에 대해  $10^{-3} \sim 10^{-6}$  수준이다. 본 연구에서 조사된 SRP의 범위는 정량적 위험도 평가를 통한 국내 댐의 보수보강 우선 순위의 객관적인 산정을 위해 중요한 자료로 활용될 수 있다. 또한 댐의 위험도 저감 계획 시 지불 용의 금액(willing to pay to prevent a statistical fatality, WTP)과 생명을 구하기 위한 필요 금액(cost to save a statistical life, CSSL) 사이에서 적절하고 실현 가능한 저감 대책을 찾을 때 확률론적인 비용 예측에 필요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 국내 3곳의 댐에 대해 내부 침식에 의한 댐 붕괴 시나리오의 지반공학적인 시스템 반응 확률(SRP)을 USACE의 내부 침식 평가 도구를 이용하여 평가하였고, 평가된 SRP의 범위를 상호 비교 분석하였다. 이와 함께 국내의에서 발생한 댐의 주요 붕괴 원인 및 기존 연구 사례를 조사하여 본 연구 결과의 범위와 비교하였다. 잠재적 파괴모드 분석을 통해 평가된 붕괴의 주요 원인과 SRP 범위의 비교를 통해 다음의 결론을 얻었다.

- (1) A댐에서 여수로와 제체 접촉부 균열로 인한 내부 침식에 대한 파괴모드의 지반공학적인 SRP는  $10^5$  수준으로 B댐 및 C댐의 동일 파괴모드에 대한 SRP보다 25배에서 45배 더 높은 값으로 산정되었다. 또한 A댐에서 제체 내부의 다짐불량으로 인한 결합으로 발생하는 파괴모드의 지반공학적인 SRP 역시  $10^5$  수준으로 B와 C댐의 모든 SRP보다 10배 이상 높게 산정되었고, 국외에서 조사된 유사한 파괴모드의 SRP 범위보다도 1000배 더 높은 확률이다.
- (2) A댐에서 기초 지반을 통한 내부 침식에 대한 파괴모드의 SRP는 결합 이력이 존재함에도 불구하고 상대적으로 낮은  $10^7$  수준으로 산정되었는데 이는 뚜렷한 결합 이력이 없는 B와 C댐의 SRP 수준과 유사한 수준이다. 하지만 이러한 SRP의 범위는 유사한 결합 이력 조건을 가진 국외 사례에서 SRP가  $10^2$  수준으로 조사된 것과 비교하면 상당히 낮은 값이다. 국내의 경우 대부분 견고한 화강편마암 지반이 댐 기초로 사용되므로 A댐의 경우와 같이 기초 지반에 일부 결합이 존재하여도 이로 인한 SRP 증가, 즉 내부 침식으로 인한 파괴 가능성의 증가는 크지 않을 수 있다.
- (3) 모든 연구대상 댐에서 구조물 인접부의 결합과 관련된 파괴모드의 SRP가 타 파괴모드의 SRP보다 높게 평가되었다는 점은 2013~2014년에 발생한 국내 댐 사고 사례의 70%가 구조물 인접부의 결합으로 유발되었다는 사실과 밀접하게 관련지을

수 있다. 이는 사건수 분석 기법을 통해 얻은 댐 파괴 사나리오가 이론적인 가설이 아닌 실제 국내 댐의 현황을 반영할 수 있음을 의미한다. 또한 기초 지반을 통한 내부 침식과 관련된 파괴모드의 SRP가 상대적으로 낮은 값이라는 점은 국내에서 동일한 이유로 실제 댐 사고 사례가 보고되지 않았다는 점과 일치하는 결과이다.

- (4) 본 연구에서 제시한 파괴모드 별 SRP의 범위는 국내 타 댐의 정량적 위험도 평가에서 산정된 SRP의 타당성을 확인하기 위한 기준으로 활용될 수 있다. 또한 댐의 위험도 저감 계획 시 확률론적인 비용 예측에 필요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(MPSS-자연-2015-78).

## References

- ANCOLD (1994). Guidelines on risk assessment, Australian National Committee on Large Dams, Sydney, New South Wales, Australia.
- Anderson, L., Ruthford, M., Perlea, V., Serafini, D., Montgomery, J. and Bowles, D. (2011). "Risk assessment of Success dam, California: Flood Related Potential Failure Modes." *Geo-risk 2011*, ASCE, pp. 902-909.
- Baecher, G. B. and Christian, J. T. (2005). Reliability and statistics in geotechnical engineering, John Wiley & Sons, New York.
- Biswas, A. K. and Chatterjee, S. (1971). "Dam disasters: An Assessment." *Journal Engineering Institute of Canada*, Vol. 54, No. 3, pp. 3-8.
- Bowles, D. S., Anderson, L. R. and Glover, T. F. (1997) "A role for risk assessment in dam safety management." *Proceedings of the 3rd International Conference Hydropower 97*, Trondheim, Norway.
- Bowles, D., Ruthford, M. and Anderson, L. (2011). "Risk assessment of Success dam, California: Evaluation of operating restrictions as an interim measure to mitigate earthquake risk." *Geo-Risk 2011*, ASCE, pp. 586-599.
- Brown, A. J. and Gosden, J. D. (2004). Interim guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs, Thomas Telford London.
- DEFRA (2002). Reservoir safety floods and reservoir safety integration, Department for Environment, Food & Rural Affairs, United Kingdom.
- Donnelly, C. R., Eng, P., Stephen, C. D., Jamieson, K., Perkins, S. and Hinchberger, S. A. (2015). "Description of the application of a new quantitative dam safety risk assessment tool for risk-informed decision Making." *2015 Hydrovision International Conference*, pp. 1-18.
- Eddleston, M., Reilly, N. and Rigby, P. (2013). "Application of the internal erosion toolbox to Rochdale canal dams. Part 1: Introduction and erosion initiation." *Dams and Reservoirs*, Vol. 23, No. 2, pp. 85-90.
- Engemoen, W. O. and Redlinger, C. G. (2009). "Internal erosion incidents at Bureau of Reclamation dams." *Proceeding of USSD Annual Conference*, Nashville Tennessee.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. and Foster, M. (2015). *Geotechnical engineering of dams (2nd ed.)*, CRC Press, Boca Raton.
- Foster, M. and Fell, R. (1999). *A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods*. UNICIV Report No. R-377, University of New South Wales, Australia.
- Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. (2000). "The statistics of embankment dam failures and accidents." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 1000-1024.
- Goodarzi, E., Shui, L. T., Ziaei, M. and Haghizadeh, A. (2010). "Estimating probability of failure due to internal erosion with event tree analysis." *European Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 935-948.
- Gruner, E. (1963) "Dam disasters." *Proceedings of the institution of civil engineers*, Vol. 24, No. 1, pp. 47-60.
- ICOLD (1974). Lessons from dam incidents. International Commission on Large Dams, Paris.
- Kim, J. H., Kim, T. H. and Kim, Y. S. (2015). "Stability analysis of overflow dam by probability precipitation." *2015 Spring Geosynthetics Conference*, pp. 80-83 (in Korean).
- Kim, S. I. (2011). Research on the characteristics of aging effect in dam core material and hydraulic fracturing in homogeneous dams by dismantling and investigating a real dam, Master's Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology (in Korean).
- Kim, W. Y. (2016). A Comparative Study on Geotechnical Risk of Fill Dams in Korea Using Internal Erosion Toolbox, Master's thesis, Kyung Hee University (in Korean).
- Kim, W. Y., Lim, J. Y. and Jung, Y. H. (2015). "A suggestion of fill dam safety assessment method using a computer program for geotechnical risk evaluation." *Proc. of KGS Spring National Conference 2015*, pp. 257-262 (in Korean).
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISC) (2009). Third precise safety diagnostics report for Youngcheon dam (in Korean).
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISC) (2010). Second precise safety diagnostics report for Unmun dam (in Korean).
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISC) (2012). Third Precise safety diagnostics report for regional water supply of Taebaek (in Korean).
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2004). Development of advanced technologies report for levee (in Korean).
- Lee, K. I., Gang, J. H., Lee, J. S. and Yoon, Y. G. (2010) "Comparative on permeability test of silty sand-gravel." *Proc. of 2010 KSCE Annual Conference & Civil Expo*, pp. 994-997 (in Korean).
- Lim, J. Y., Lee, J. W., Sin, D. H. and Jeon, J. S. (2006). "The estimation of domestic dam failure for analyzing to result of damage." *Proc. of 2006 KSCE Annual Conference & Civil Expo*, pp. 4112-4115 (in Korean).

- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2011). The criteria of dam design (in Korean).
- Newsis (2014). Collapse of the embankment in Gucheon reservoir, Completed emergency restoration, Available at [http://www.newsis.com/ar\\_detail/view.html?cID=&ar\\_id=NISX20140329\\_0012820566](http://www.newsis.com/ar_detail/view.html?cID=&ar_id=NISX20140329_0012820566), (Accessed: Nov. 4, 2015) (in Korean).
- Nippon Koei Corporation (1974). Final engineering report on construction works of Soyang gang multipurpose dam project.
- Noh, K. L. (2014). Risk assessment for geotechnical failure of reservoir using event tree analysis, Ph.D. dissertation, Kyung Hee University (in Korean).
- Noh, K. L., Lim, J. Y., Mok, Y. J. and Jung, Y. H. (2015). "Estimating geotechnical system response probability of internal erosion risk in fill dam using event tree analysis." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 6, pp. 1814-1829 (in Korean).
- Richards, K. S. and Reddy, K. R. (2007). "Critical appraisal of piping phenomena in earth dams." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 66, No. 4, pp. 381-402.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2009). Internal Erosion Toolbox: Best Practices Guidance Document.
- Wan, C. F. and Fell, R. (2002). Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test. UNICIV Report No. R-412, University of New South Wales, Australia.
- Woo, I., Park, Y. J., Song, W. K., Park, H. J. and You, K. H. (2004). "Weathering index of granitic rocks and granite gneiss in Korea." *Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics Fall Conference 2004*, pp. 167-172 (in Korean).
- Yang, G. C., Park, S. J., Ryu, J. S., Choi, N. C. and Park, C. Y. (2014). "A review of the precise safety diagnostics report for preventing disasters in Jeonnam." *Proceedings of KSEG 2014 Fall Conference*, pp. 57-58 (in Korean).

### Appendix 1. 초기 사건(Initial Mechanism, IM)의 선택

미 공병단(USACE, 2009)은 내부 침식에 의한 댐의 파괴를 유발하는 28개의 초기 사건(IM)을 제시하였다. Table A1는 28개의 IM에 대한 설명(description)을 기술하였고, 본 연구의 대상

댐에서 선택된 IM을 표시하였다. 대상 댐의 결함 이력과 상관없이 제체의 단면 형상 등을 고려하여 IM10과 IM21을 선택할 수 있다. 또한 국내 현행 댐 관리기준을 반영하여 지진 하중에 대한 IM 8을 선택할 수 있다. A 댐의 경우 제체 내부와 제체 하부 기초의 포화대 존재에 대한 결함 이력을 고려하여 IM 13과 23을 선택하였다.

Table A1. Selected Initial Mechanisms

IM	Description	Selected IM		Comments
		Regardless of historical defects	Considering historical defects	
IM1	Cross Valley Differential Settlement			
IM2	Differential Settlement Adjacent to a Cliff at the Top of the Embankment			
IM3	Cross Section Settlement Due to Poorly Compacted Shoulders			
IM4	Differential Settlement in the Foundation Soil Beneath the Core			
IM5	Differential Settlement Due to Embankment Staging			
IM6	Cracking in the Crest Due to Desiccation			
IM7	Cracking on Seasonal Shutdown Layers During Construction and Staged Construction Surfaces Due to Desiccation			
IM8	Cracks Due to an Earthquake	○		Required by the dam safety guideline in Korea
IM9	Cross Valley Arching Effect			
IM10	Differential Settlement Causing Arching of the Core	○		Considering the sectional properties of the dam (ECRD)
IM11	Differential Settlement in the Foundation Soil Beneath the Core			
IM12	Differential Settlement in the Foundation Soil Beneath the Core			
IM13	Poorly Compacted or High Permeability Layer in the Embankment		○	Saturated zone detected in the A dam previously
IM14	Poorly Compacted or High Permeability Layer on the Core-Foundation Contact			
IM15	Cracking in the Crest Due to Dessication by Freezing			
IM16	Seasonal Shutdown Layers During Construction and Staged Construction Surface Due to Freezing			
IM17	Poorly Compacted or High Permeability Layer Around a Conduit Through the Embankment			
IM18	Features Allowing Erosion Into a Conduit			
IM19	Poorly Compacted or High Permeability Zone Associated with a Spillway or Abutment Wall			
IM20	Crack/gap Adjacent to a Spillway or Abutment Wall			
IM21	Differential Settlement Adjacent to a Spillway or Abutment Wall	○		Considering the sectional properties of the dam (spillway structure)
IM22	Backward Erosion in a Cohesionless Soil in the Foundation			
IM23	Suffusion in a Layer of Cohesionless Soil in the Foundation		○	Saturated zone in the foundation detected in the A dam previously
IM24	Erosion in a Crack in Cohesive Soil in the Foundation			
IM25	Scour Along Rock Defects Less Than 25 mm			
IM26	Erosion Into Rock Defects Larger Than 25mm			
IM27	Scour Along Contact with Open-Work Coarse-Grained Foundation Soil			
IM28	Erosion Into Open-Work Coarse-Grained Foundation Soil			

## Appendix 2. USACE의 내부 침식 평가 도구를 이용한 SRP 산정 방법

미 공병단의 내부 침식 평가 도구(USACE, 2009)를 이용하여 특정 초기 사건에 대한 SRP를 Fig. A1에 제시한 계산 흐름에 따라 계산할 수 있다. 각 분기 사건에 영향을 미치는 요인(factor)들의 중요도에 대한 가중치(relative importance of factor)와 각 요인들의 발생 가능성에 대한 가중치(likelihood factor)를 곱한 후 합산한 값을 내부 침식 평가 도구에 제시되어 있는 확률 산정표와 대조하여 Fig. A1의 계산 과정 중 필요한 분기 확률(즉,  $P_{flaw}$ ,  $P_I$ ,  $P_C$ ,  $P_P$ ,  $P_{breach}$ )을 결정할 수 있다. 예를 들어  $P_I$ 는 코어의 재료 종류, 현재 저수위에 의해 균열에 작용하는 동수경사, 균열의 폭 등의 요인들이 고려되어 산정되는데, 내부 침식 평가 도구를 사용하면 균열 발생 조건에 따라 최대 균열의 폭을 개략적으로 결정할 수 있다. 또한  $P_C$ 는 제체 내 필터재에서 내부 침식 과정 중 자체 걸림 작용(self-filtering)이 발생할 가능성을 확률적으로 산정한 값이며, 내부 침식 평가 도구에서 코어재의 입도 분포 정보와 필터의 입도 분포 정보를 비교하여 확률값을 구할 수 있다. 분기 확률 산정에 대한 보다 구체적인 내용은 Fell et al. (2015)을 참조하기 바라며 본 논문에서 사용된 분기 확률 산정 과정은 Kim (2016)에서 확인할 수 있다. 상호 독립 사건(mutually exclusive event)인 분기사건의 확률을 모두 곱하면 최종적인 시스템 반응 확률(SRP)을 산정할 수 있다.

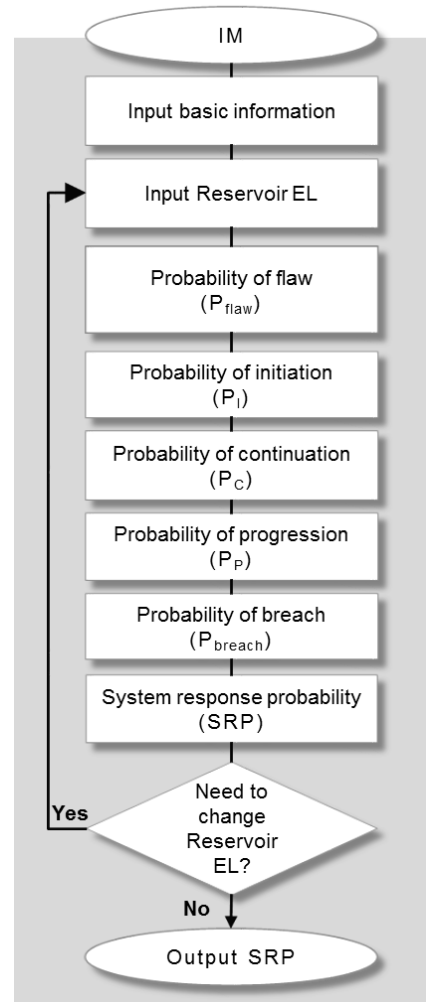


Fig. A1. Flow Chart for Calculating the SRP in the Event Tree Analysis