



저수지 안전관리를 위한 위험도 해석의 필요성과 도입방안

Schematic Development of Risk Analysis for Dam Safety

허건^{*,†}

Heo, Gun

Abstract

Korea has 17,500 irrigation dams and facing variety of causes that jeopardize dam safety. With limited resources available to manage large inventory, a portfolio risk analysis application method for numerous irrigation dam safety is essential. The purpose of this study is to find an optimum way to adopt the risk analysis to the large number of irrigation dams in Korea and to propose the portfolio risk analysis process for irrigation dams. In this study, the necessity of the risk analysis for reservoirs safety has been suggested and a phased process using pre-screening and screening methodology has been proposed. This proposed procedure will help to effectively introduce the risk analysis for reservoirs safety in Korea.

Keywords: Risk; Portfolio Risk Analysis; Irrigation dams; Dam Safety

1. 서론

농업용 저수지는 국민의 주곡인 쌀 생산을 위한 농업용수의 제공과 휴식공간 창출 및 홍수조절 기능 등의 역할을 하면서도 동시에 태생적으로 위험한 구조물이다.

한국에는 약 17,500여개의 농업용 저수지가 있고 저수지의 안전을 위협하는 다양한 요소들에 직면해 있다. 저수지의 안전에 영향을 미칠 수 있는 여러 요인들을 살펴보면, 외부적 요인으로서 기후변화로 인한 수위하중의 증가와 하류지역의 개발로 인한 잠재위험의 증가 등이 있으며, 저수지 자체적으로는 시간의 경과로 발생하는 저수지의 노후화에 따른 파괴 확률의 증가를 들 수 있다. 안전관리에 취약할 수 있는 또 다른 요인으로 많은 수의 구조물이 전국에 흩어져 있고 이들 중 상당수는 접근성이 떨어지는 계곡에 설치되어 있어 구조적으로 안전관리에 불리한 점을 들 수 있다.

이와 같이 저수지의 안전을 위협하는 여러 요소들로 인하여 최근에는 경주의 산대저수지, 영천의 괴연저수지, 기장의 내덕저수지 등 저수지의 붕괴가 발생하고 있지만 저수지를 관리하기 위한 예산과 인력은 한정되어 있는 실정이다.

이에 여러 선진국의 저수지 관리 기관들에서는 한정된 자

원으로 많은 수의 시설들을 효율적으로 관리하고자 위험도 해석(Risk Analysis)을 활용한 저수지 안전관리 방법을 도입하고 있다. 대표적인 기관들로는 미국의 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA), 영국의 환경식품농촌부(Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra), 호주의 뉴사우스웨일즈 대학(The University of New South Wales, UNSW) 등이 있다.

미국의 연방재난관리청(FEMA)에서는 액셀 기반의 위험도 해석 도구를 제안하였다. 개별 저수지가 월류로 인하여 파괴될 확률, 내부침식으로 인하여 파괴될 확률, 지진으로 파괴될 확률들을 추정하고 이를 합산하여 전체 위험도를 차트에 도시한 후 개보수 필요 여부를 판단하는 기준 값과 비교하도록 하였으며, 개별 저수지에 대한 월류, 내부침식, 지진 등에 의한 각각의 파괴확률 값들을 비교함으로써 특정 댐을 파괴시킬 수 있는 가장 위험한 파괴형태를 파악하게 하였다(FEMA, 2008).

영국의 환경식품농촌부(Defra)에서는 영국 저수지들의 거동이력에 기반하여 최상의(Best) 상태와 최악의(Worst) 상태에 대한 파괴확률을 추정하여 고정점으로 설정하고, 두 고정점을 기준으로 최상의 상태와 최악의 상태 사이의 댐들에 대하여는 저수지의 현재 상태에 대응하는 파괴확률을 산정할 수 있게끔 하였다(Defra, 2013).

호주의 뉴사우스웨일즈 대학(UNSW)도 미국과 호주의 댐들의 사고 이력에 기반하여 위험도 해석의 우선순위 산정을 위한 내부침식으로 인한 저수지의 파괴확률 산정 방법을 제시하였다(Fell et al., 2008).

* Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

† Corresponding author

Tel.: +82-31-400-1750 Fax: +82-31-400-1744

E-mail: gun@ekr.or.kr

Received: December 30, 2015

Revised: February 25, 2016

Accepted: February 26, 2016

상기의 제안 방법들은 그 통계처리 대상이 영국, 미국, 호주 저수지들의 과거 사고사례에 기반하고 있어 국내 농업용 저수지에 바로 적용하기가 곤란하며, 미국의 연방재난관리청(FEMA)에서 제안한 방법은 각각의 파괴형태들로 인한 파괴확률을 평가자가 직접 입력 하계끔 구성되어 있어 저수지 안전관리에 위험도 해석 개념을 이제 막 도입하는 국내 실정에는 적용하기가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 한정된 예산과 인력으로 많은 수의 저수지를 안전관리하기 위한 방안으로 여러 선진국에서 활용되고 있는 위험도 해석을 한국의 농업용 저수지 안전관리에 도입하기 위한 필요성과 도입방안을 제시하였다.

II. 저수지 안전관리와 위험도 해석

1. 위험도 해석의 정의

위험도 (risk)의 개념은 다양한 형태로 나타낼 수 있지만, 저수지 안전 분야에서의 위험도 (risk)는 식(1)과 같이 저수지가 주어진 하중에 의하여 파괴될 확률과 그로 인한 피해의 곱으로 정의된다.

$$\text{Risk} = P(\text{Load}) \times P(\text{Failure})_{\text{given the load}} \times \text{Consequences}_{\text{given failure}} \quad (1)$$

여기서, P (Load)는 하중이 발생할 확률, P (Failure)_{given the load}는 주어진 하중조건에서의 파괴확률, Consequences_{given failure}는 주어진 파괴발생에 대한 피해로 정의된다.

2. 위험도 해석 도입의 필요성

‘농업생산기반정비사업 통계연보 (2012년)’에 따르면 우리나라 농업용 저수지 17,500여개의 약 88.5%가 1972년 이전의 시기에 만들어진 시설로서 10년 후에는 우리나라 저수지의 88.5%가 설치년수 50년을 넘을 정도로 노후화가 이루어지고 있다. 이에, 우리가 관리하는 많은 저수지 중에서 어느 저수지가 얼마나 위험하며, 만일 사고 발생 시 그 피해가 어느 정도 일 수 있는지에 대한 인식이 요구된다.

최근에는 2013년 4월 경주의 산대저수지 붕괴 외에도 다수의 저수지 붕괴 사고가 발생하였으며, 붕괴까지는 이르지 않았지만 농업용저수지에 대한 크고 작은 다양한 사고들을 경험하고 있다. 국내 농업용저수지의 효율적인 안전관리 방안에 대한 요구의 증대로 기존의 저수지 안전관리에 대한 보완으로 2013년에는 농업용저수지 1종 시설의 기준을 당초보다 완화하여 농업용저수지 안전관리강화를 꾀하고 있으나 하

류부 피해에 대한 고려는 부족하며 단지 저수지 시설의 상태만을 고려하는 실정으로 하류부의 인명피해 가능 유무와 상관없는 일관된 설계기준을 적용해오고 있다.

또한, 최근의 여러 붕괴된 저수지들의 안전등급을 살펴보면 개보수가 필요한 것으로 평가되는 D, E등급의 저수지들이 아닌, 비교적 안전한 것으로 평가되는 B, C등급의 저수지들이 붕괴되었음을 알 수 있다. 이는 현재의 안전등급 시스템은 저수지의 결함이 치명적임에도 불구하고 그 범위가 국부적인 경우에는 저수지의 실제 노후정도가 안전등급 결정에 충분히 반영되지 못할 수 있음을 보여준다. 하지만 저수지의 붕괴는 시설의 전체가 노후화된 경우에만 발생하는 것이 아니고 노후 부위가 부분적이지만 심각한 경우에는 붕괴를 맞이할 수 있다.

이와 같이, 많은 수의 저수지 중에서 ‘어느’ 저수지가 ‘얼마나’ 위험한지를 알 수 있고, 저수지의 상태와 더불어 저수지 하류부의 피해 규모를 동시에 고려할 수 있으며 저수지의 실제 노후 정도를 한정된 예산과 인력으로 효과적으로 관리하기 위한 방안으로 몇몇 선진국에서는 위험도 해석을 저수지 안전관리를 위한 주요 도구로 사용되고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 우리의 경우도 많은 저수지가 노후화되어가고 있고 저수지 하류부 개발로 잠재피해의 규모가 증가하는 실정이므로, 어떠한 요인이 저수지를 파괴시킬 수 있는 요인인지에 대한 더 나은 이해와 공학적 판단의 정량화, 개보수 필요의 우선순위 설정 등을 제공해 줄 수 있는 위험도 해석 (Risk Analysis) 방법을 저수지 안전 관리에 활용할 필요가 있다.

3. 위험도 해석의 종류와 절차

위험도 해석은 해석 수준별로 Tier 1 (정성적인 해석), Tier 2 (정량적인 해석), Tier 3 (세부적인 해석)으로 구분할 수 있다.

가. Tier 1 (Scoping, 정성적인 해석단계)

본 단계는 저수지의 잠재적인 취약성에 대한 기본적인 통찰력 (initial insight)을 제공해주는 위험도 해석의 가장 기초적인 단계이다. 이 단계에서는 해당 저수지의 파괴확률과 가능피해의 정도를 Fig. 1과 같이 낮음, 보통, 높음, 매우 높음 등의 정성적인 평가를 실시하여 위험도를 결정하게 된다.

주로 기본적인 데이터 수집과 위험도 평가의 연습을 위하여 사용되며 이 단계의 결과로서 높은 위험도가 인식될 시에는 더 높은 단계의 해석을 수행한다.

나. Tier 2 (Ranking, 정량적인 해석단계)

Tier 1에서 높은 위험이 인진된 경우에 대하여 Tier 2를 수

행하며 이 단계는 절대적인 위험도(risk) 값의 산출 보다 상대적인 위험도(risk)값의 산출을 목적으로 하여 저수지 위험도의 기본적인 정량적 추정치를 제공하고, 그 결과는 세부적인 평가를 위한 우선순위 선정에 주로 활용된다.

다. Tier 3 (Detailed, 세부적인 정량적 해석)

개별 저수지에 대하여 파괴형태별로 세부적이며 절대적인 위험도(risk) 산정 시 사용되며, 해석의 절차는 아래와 같다.

- 1) 잠재파괴형태 (PFMA)의 인지
- 2) 관련 하중 빈도 결정 및 파괴 확률 평가
- 3) 잠재 인명피해 추정

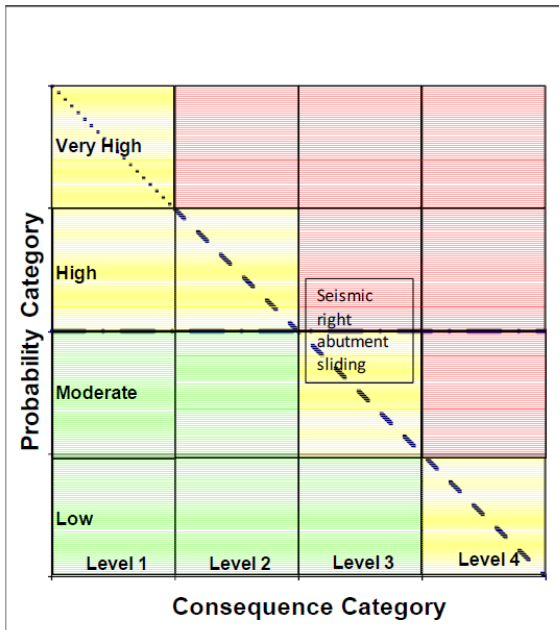


Fig. 1 Example of Qualitative Analysis (Scott, 2011)

- 4) 위험도 계산 및 불확실성 인지
- 5) 결론 검토, 논거 수렴 및 개선사항 도출

개별 저수지에 대한 파괴형태별 세부적 위험도(risk)를 산정하기 위해서는, 개별 저수지의 파괴확률과 그로 인한 피해의 정도를 각각 정량적으로 추정하여야 한다. 여기서 개별 저수지의 파괴확률 추정은 해당 저수지를 파괴시킬 수 있는 잠재파괴형태를 인지하여야 하며, 인지된 파괴형태에 대한 파괴확률의 추정을 위하여 파괴의 시작부터 붕괴까지의 시나리오를 하중 범위별로 세분하여 파괴확률을 산정하게 된다. Fig. 2는 파괴의 시작부터 붕괴까지의 시나리오를 도식적으로 묘사하여 파괴확률의 추정에 주로 사용 되는 이벤트 트리(Event Tree)의 예를 나타낸 것이다.

개별 저수지의 위험도 해석에 대한 세부적인 내용은 ‘위험도 해석을 활용한 댐 안전관리 기법’ (Heo, 2014)을 통하여 상세히 설명하였다.

4. 잠재파괴형태 해석 (PFMA)의 중요성

앞 절에서 언급한 개별 저수지가 가지고 있는 절대적인 위험도 값을 산정하기 위한 세부적인 위험도 해석(Tier 3)의 전체 절차 중 첫 번째 단계이면서 가장 중요한 단계는 잠재파괴형태 해석(Potential Failure Mode Analysis)으로서, 해당 저수지를 붕괴시킬 가능성이 있는 잠재적인 붕괴의 원인들을 찾아 붕괴 시나리오를 상세히 설명하는 것이다. 만일 이 첫 번째 단계가 충실하지 못하면 최종적으로 산출된 위험도 값의 신뢰를 갖지 못할 수도 있다(Scott, 2011).

Fig. 3은 잠재파괴형태해석 (PFMA)의 모식도를 나타낸 것으로, 해당 저수지의 올바른 잠재파괴 형태해석을 위한 방법으로, 먼저 ‘시설물 운영관리자’를 포함한 다양한 분야의 전문가들로 이루어진 ‘팀’을 구성하고, 두 번째로 저수지의 설계, 시공, 유지관리 이력 등을 시공사진, 도면 청문 등으로

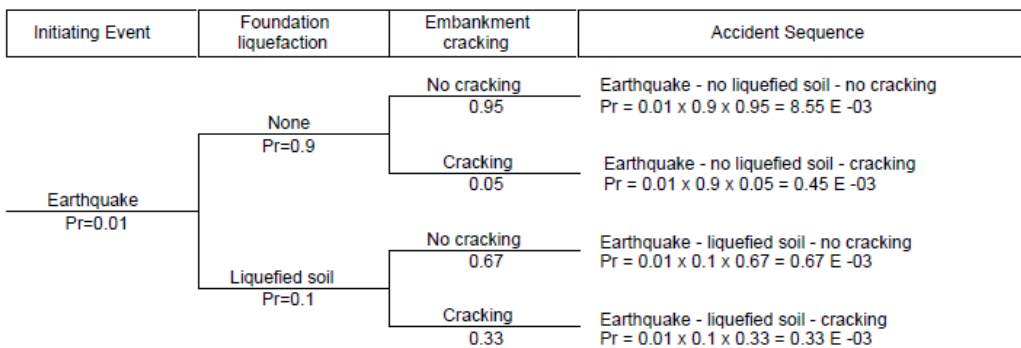


Fig. 2 Event Tree for Estimating Probability of Failure (USACE, 2010)

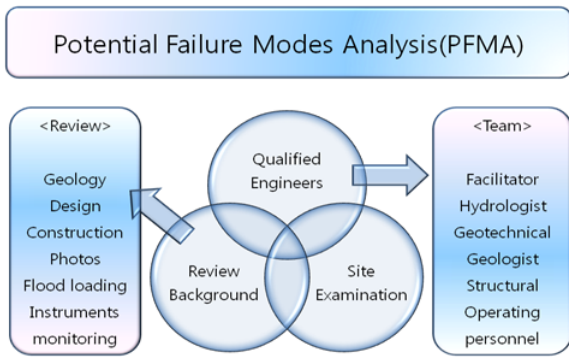


Fig. 3 Potential Failure Modes analysis (PFMA)

검토한 후, 마지막으로 현장을 방문, 확인하여 해당 저수지의 취약사항이 무엇인지에 대한 충분한 평가가 이루어지도록 하여야 한다.

5. 위험도 해석의 장점

이러한 위험도 해석의 장점으로는 첫째, 각각의 저수지에 대하여 이전에 인식되지 않은 높은 위험도(Risk)를 가진 파괴 형태를 인식함으로써 각각의 저수지의 잠재적인 파괴형태(Potential Failure Modes)들이 무엇인지 더 잘 이해할 수 있고, 이들을 정량화할 수 있다. 이러한 이해는 저수지 안전과 관련된 의사결정의 도구로서 활용되어 예산의 효율적 활용이 가능하다. 즉, 해당 저수지의 위험도를 높게 만드는 요인을 알고 이를 제거함으로써 저수지 안전관리를 용이하게끔 도와줄 수 있다. 두 번째로는 이러한 저수지의 파괴로 발생하는 인명, 재산 등의 피해 규모를 알 수 있고, 세 번째로는 이러한 각각의 저수지에 대한 분석뿐만 아니라 시설관리자가 관리하는 전체 저수지들에 대하여 어느 저수지가 가장 위험도가 높은지? 그리고 그 피해는 어느 정도 일 수 있는지? 를 파악함으로써 시설 관리자가 관리하는 전체 저수지들을 위험도의 크기에 따라 등급별로 구분할 수 있으며, 이러한 전체 저수지에 대한 위험도 등급별 관리는 시설관리자가 어느 시설에 안전관리의 노력을 집중해야 하는지를 알게 하여 주므로 차별화되고 집중화된 보다 효율적인 안전관리를 가능하게 도와준다.

그러나 많은 수의 저수지에 대한 위험도 산정을 일관되게 효과적으로 수행하기에는 기술적으로 많은 어려움이 따른다(Scott, 2011).

6. 스크리닝 위험도 해석의 필요성

위험도 해석을 안전관리 도구로 활용하고 있는 미국의 경우를 살펴보면, 하나의 저수지(댐)에 대하여 세부적인 위험도 해석을 수행하기 위하여 통상적으로 10명 내외의 분야별 전문

인력과 6개월 정도의 시간을 필요로 한다. 그러므로 한국 농업용저수지와 같이 저수지의 숫자가 많은 경우에는 Tier 3의 개별 저수지(댐)에 대한 세부적인 위험도 해석 수행은 현실적으로 불가능하다. 또한 미국에서 위험도 해석의 대상이 되는 시설의 규모는 보통 하류부에 막대한 영향을 줄 수 있는 시설물을 대상으로 하는 반면 한국 농업용 저수지들은 그 규모가 총저수량 기준으로 10,000 m³ 이하인 소규모부터 10,000,000 m³ 이상인 대규모까지 다양한 실정으로서 하류부에 미칠 수 있는 피해가 거의 없는 소규모의 시설에까지 위험도 해석을 실시하는 것은 비합리적일 것이다.

또한, 위험도 해석에서 가장 중요한 단계인 잠재파괴형태 분석(PFMA) 없이 Tier 2의 정량적인 해석 수행만으로는 실제 저수지의 위험도를 객관적인 값으로 정확히 평가할 수 없고 단지 상대적인 위험도 값의 크기만이 개략적으로 평가될 뿐이다. 이러한 상대적인 위험도 결과 값만으로는 실제적인 저수지 개보수의 필요여부에 대한 정확한 평가를 수행할 수 없어 위험도 해석을 활용한 저수지 안전관리가 제대로 수행되기 어렵다.

그러므로 하류피해가능 규모와 상대적인 위험도 값에 따라 스크리닝 절차를 실시한 후 세부적인 위험도 해석이 필요한 저수지들만을 대상으로 잠재파괴형태 분석이 반영된 위험도 해석의 수행이 필요하다.

III. 한국 농업용저수지 안전관리에 적절한 위험도 해석 도입방안 제안

위험도 해석이 저수지 안전관리를 위한 하나의 유용한 도구라 할지라도, 수많은 개별 저수지들에 대하여 위험도 해석을 수행하기에는 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 게다가 농업용 저수지의 저수용량이 상대적으로 크지 않은 개별 저수지에 대하여 위험도를 정량적으로 계산하기 위한 수고와 노력을 투입하는 것은 비효율적일 수도 있다. 한국농업용 저수지의 경우, 규모는 작지만 숫자는 많으므로 개별 저수지의 위험도를 산정하기에 앞서서 어느 저수지가 다른 저수지 보다 더 높은 위험도를 가지는가를 찾는 것이 우선이다. 저수지들의 위험도 순위를 정하고 그 결과에 따라 등급화 하여 위험도가 높은 등급에 속한 저수지부터 우선적으로 세부적인 위험도 해석을 수행하여 저수지의 안전관리를 하는 것이 한정된 자원(예산, 인력)으로 많은 수의 저수지를 효과적으로 관리하는 것을 도와 줄 것이다. Fig. 4는 한국 농업용저수지 안전관리에 적절한 위험도 해석의 도입 절차를 제안한 것이다.

한국 농업용 저수지 안전관리에 위험도 해석을 도입하기 위하여 여러 단계의 절차를 제시하는 이유는, 농업용 저수지

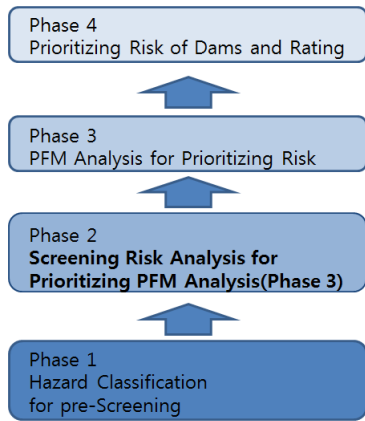


Fig. 4 Process for the Screening Portfolio Risk Analysis

의 숫자가 너무 많고 규모 또한 다양하기 때문이다. 첫 번째 단계는 위험도 해석을 수행하기 이전에 저수지 하류부의 잠재 위험 가능성에 따른 분류를 먼저 실시할 필요가 있다. 잠재 위험 가능성 분류 결과 저수지의 붕괴로 하류부에 피해가 미미하거나 없는 경우의 저수지에 대하여는 위험도 해석이 불필요하기 때문이다. 두 번째 단계는 위험도의 순위 산정을 위한 위험도 해석이 아닌 잠재파괴형태 해석(PFMA) 실시의 우선 순위 결정을 위한 간이 방식의 위험도 해석 수행 단계이다. 세 번째 단계는 간이 방식의 위험도 해석 수행 결과에 의하여 산출된 우선순위 결과를 바탕으로 개별 저수지에 대한 잠재파괴형태 해석 단계이다. 이 단계의 필요성은 위험도 해석에서 잠재파괴형태 해석 없이 정확한 위험도 산정이 어렵기 때문이다. 마지막으로 잠재파괴형태 해석의 결과를 근거로 실제 위험도 해석은 수행되고 저수지의 위험도의 크기에 따라 그룹화가 완성된다.

1. 잠재 위험 (Potential Hazard)에 따른 분류:Phase 1

전체 저수지의 위험도 우선순위 결정을 위한 첫 번째 단계로서 하류부의 잠재위험의 가능성에 따른 분류가 필요하다. 하류부의 잠재위험 가능성에 따른 분류는 Table 1과 같이 저수지의 붕괴로 발생가능한 가능 인명손실, 경제적 환경적 피해, 주요 기반시설의 파괴 등에 근거한다. 저수지 자체의 상태와는 무관하게 순전히 하류부에 대한 피해의 가능성만으로 ‘고 잠재 위험’, ‘보통 잠재위험’, ‘저 잠재위험’ 저수지로 분류된다.

‘고 잠재 위험 저수지’는 이들 저수지가 긴급한 보수의 필요성을 의미하는 것이 아니라라는 것이 반드시 인지되어야 하며 이들 ‘고 잠재위험 저수지’는 양호한 상태인 경우도 있고 불량한 상태에 있을 수도 있다. ‘고, 보통, 저’의 의미는 저수지 붕괴 시 하류부에 미칠 수 있는 피해에 대한 잠재 가능성의

Table 1 Hazard Potential Classification (FEMA, 2004)

Hazard Potential Classification	Loss of Human Life	Economic, Environmental, Lifeline Losses
Low	None expected	Low and generally limited to owner
Significant	None expected	Yes
High	Probable, One or more expected	Yes (but not necessary for this classification)

Table 2 Table for Collecting Data of Number of Residents at Risk

Name	Height	Volume	Residents at Risk			Downstream Type	
			<3 km	<5 km	<10 km	Valley	Plain

반영일 뿐이다 (FEMA, 2004).

최근까지 한국 농업용 저수지에 대한 안전관리는 저수지의 파괴확률과 그로인한 피해를 동시에 고려하지 않고 저수지의 상태에만 집중하여 왔다. 이는 저수지의 규모가 작은 경우가 대부분이고 저수지 설치 위치가 도심지와 떨어져 있었기 때문인 것으로 기인되나, 1970년대 이후로 하류부에 인명 피해를 입힐 수 있는 규모가 큰 저수지가 많이 설치되어지고 있으며, 하류부의 지속적인 개발로 인하여 붕괴에 따른 피해에 대한 고려가 필요한 경우가 많아지는 실정이다.

저수지 하류부의 피해정도에 대한 데이터를 수집하기 위하여 Table 2와 같이 저수지 붕괴 시 위험에 직면할 수 있는 거주민들에 대한 데이터 수집이 필요하다. 데이터 수집 시 반드시 고려되어야 할 사항 중 하나는 저수지가 위치한 지역이 계곡부인지, 평야부인지에 대한 사항이다. 잠재 위험에 따른 분류 결과, 저수지 붕괴에 따른 피해가 거의 없을 것으로 분류된 저 잠재위험 저수지는 제외하고, 고 잠재 위험과 보통 잠재위험 저수지에 대하여 잠재파괴형태 해석의 우선순위 설정을 위한 위험도 해석이 순차적으로 실행 될 것이다. 한국의 농업용저수지의 경우 이 단계 수행 이후에는 상당수의 저수지가 ‘저 잠재’ 위험 저수지로 분류되어 위험도 해석의 대상에서 제외 될 것이다.

2. 잠재파괴형태 (PFMA) 해석의 우선순위 설정을 위한 위험도 해석:Phase 2

잠재파괴형태 분석의 우선순위 설정을 위한 위험도 해석 과정에서 저수지의 위험도 (risk)를 평가하기 위하여 공학적 판단은 이루어진다. 하지만 그 방법은 세부적이지 않고 간단해야 한다.

‘고 잠재’ 및 ‘보통 잠재’ 저수지로 분류된 저수지들에 대하여 잠재파괴형태 해석의 우선순위 설정을 위한 위험도 해석에는 많은 시간이 소요되며 현장마다 다른 특성을 가지고 있는 저수지를 다수의 평가자에 의하여 해석이 이루어져야 하므로, 평가방법이 간편하며 여러 팀에 의하여 평가가 이루어지더라도 일관된 파괴확률을 얻을 수 있는 시스템이 필요하다. 일단 잠재파괴형태 해석수행의 우선순위 설정을 위한 위험도 해석이 완료되면, 개별 저수지에 대한 잠재파괴형태 해석은 순차적으로 수행 될 것이다.

3. 위험도 순위 결정을 위한 잠재파괴형태 해석 (PFMA): Phase 3

이 단계는 저수지의 위험도 (Risk)를 추정하는데 필요한 두 요소인 ‘파괴확률 (Probability of Failure)’과 그로 인한 ‘피해 (Consequences)’ 중, 저수지의 ‘파괴확률’을 산정하기 위한 필수적인 단계인 ‘개별 저수지의 잠재파괴형태 (Potential Failure Modes)를 찾고 그로 인한 파괴확률을 추정하는’ 단계이다.

일반적으로 많은 수의 댐이나 저수지를 관리하는 기관들은 위험도 해석을 이용한 안전관리의 도입 유무와 상관없이 잠재위험에 따른 분류 (Phase 1)를 실시하여 안전관리에 활용하고 있다. 그리고 위험도 해석을 도입 시에는 먼저, 전체 저수지 중에서 위험도가 높을 것으로 예상되는 시설을 찾아 세부 위험도 해석 수행의 우선순위를 결정 (Phase 2)한 후에 위험도가 높을 것으로 예상된 저수지부터 세부적인 위험도 해석을 실시 (Phase 4)하는 두 단계의 과정을 거친다.

하지만 본 논문에서는 위험도 결정을 위한 잠재파괴형태 해석 단계 (Phase 3)를 추가로 제안하였다. 이는 Phase 2의 결과로 산출된 위험도 값은 절대적인 값이 아니라 상대적인 위험도 값으로서, 저수지 개보수의 필요성 여부 등 예산 투입의

의사결정에 대한 기준 값으로는 활용하기 어렵고 위험도 해석을 저수지 안전관리에 활용하기 위해서는 잠재파괴형태 해석 단계가 필수적이기 때문이다.

그리고 개별 저수지의 붕괴로 발생할 수 있는 ‘피해 (Consequences)’의 규모를 산정하기 위해서는 예산, 인력 등의 많은 노력이 필요하지만 한국의 농업용저수지는 규모 (저수용량)가 크지 않아 저수지 붕괴로 인한 예상피해의 규모가 크지 않기 때문에, 개별 저수지의 위험도 산정에서 ‘피해 (Consequences)’ 부분보다 ‘파괴확률 (Probability of Failure)’ 부분에 집중할 필요가 있기 때문이기도 하다. 또한 Phase 2에서의 산출된 상대적인 위험도 값과 Phase 4에서 산출된 절대적인 위험도 값의 차이가 발생하는 경우가 발생하기도 함으로 실제로는 위험도가 크지 않은 저수지를 대상으로 위험도 해석을 실시함으로써 발생하는 불필요한 에너지의 낭비를 막을 수 있는 장점이 있다. 이러한 필요성과 장점으로 인하여 본 논문에서 제안하는 Phase 3 검토는 저수지의 수가 많은 경우에는 필수적인 단계가 될 것이다.

4. 위험도 순위 결정 및 등급화:Phase 4

Fig. 5는 미공병단 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE)에 의하여 수행되어진 위험도의 등급화에 대한 좋은 예를 보여준다. 이 그래프는 미공병단에서 관리하는 댐들의 위험도를 정량적으로 도시한 것으로서 세로축은 댐이 붕괴될 확률을 의미하고 가로축은 댐의 붕괴로 인하여 발생할 수 있는 피해의 규모를 표시한 것이다. 미공병단에서는 위험도의 크기에 따라 댐들을 차례로 DSAC I, DSAC II, DSAC III, DSAC IV 4개의 그룹으로 구분하고, 댐 붕괴 확률이 높으면서 그로 인한 피해가 클 것으로 예상되는 즉, 위험도가 높은 댐들을 DSAC I으로 분류하여 우선적으로 관리하고 있다.



Fig. 5 Classification Example by Risks (USACE, 2007)

이러한 위험도 우선순위 결정 및 등급화 결과는 저수지 관리자 및 예산집행의 의사결정권자들에게 우리의 예산과 관심이 어디에 집중되어야 할지를 말해주고, 추가적인 해석에 대한 우선순위에 위험 감소를 위한 개보수의 우선순위 결정에 사용될 것이다.

5. 도입타당성 검토

도입타당성 검토 단계에서는 본 연구에서 제안한 4단계의 단계별 도입방안의 적용성 검토를 위하여 사례연구를 실시하였다. 사례연구 대상 시설은 한국농어촌공사에서 관리하는 농업용 저수지 중 특정지사에서 6개 저수지를 무작위로 선정하였고, 붕괴경험이 있는 저수지 3개소, 그리고 세부적인 위험도 해석을 기수행한 경험이 있는 저수지 1개소 등 총 10개의 저수지를 대상으로 선정하였으며 세부 내역은 아래 Table 3과 같다.

A저수지는 세부적인 위험도 해석을 수행한 결과가 있는 경우이며, C, D, E 저수지는 붕괴 경험이 있는 저수지이고 나머지 6개의 저수지들은 본 연구의 타당성 검토를 위하여 무작위로 선택된 저수지들이다.

가. 검토방법

검토방법은 Phase 1부터 Phase 3까지의 해석을 실시하여 각 단계별 해석의 필요 여부를 확인하고 결과들을 비교하였다. Phase 1는 기존의 시설물별 안전점검표와 위성영상 자료를 활용하여 하류부의 피해 정도를 검토하였으며, Phase 2는 현재 한국의 농업용저수지에 적합한 해석 방법이 수립되어 있지 않아 미국의 연방재난관리청 (FEMA)에서 제시한 안전점검 결과를 활용하여 전문가의 주관적 판단을 파괴확률로 추정하는 방법을 사용하였다 (FEMA, 2008). 연방재난관리청에서 제안한 전문가의 주관적 판단을 파괴확률로 추정하는 방법은 Table 4와 같이 전문가의 주관적 믿음의 정도에 따라 각각의 상태에 대한 연간파괴확률 값을 제시한 것이다. 전문가의 주관적 판단에 대한 근거자료는 안전점검이나 정밀안전진단의 결과를 활용하였고, 이를 통하여 각각의 저수지의 연간파괴확률을 추정하였다.

일반적으로 저수지를 붕괴시키는 주요 요인들로는 월류, 내부침식, 지진, 사면불안정 등이 있지만 실제로 토사로 축조된 저수지 붕괴 원인의 90% 이상은 월류와 내부침식에 기인한다 (Foster et al., 2000). 특히 우리나라의 경우 지진으로 인하

Table 3 Data of Reservoirs for Validation

Name	Height (m)	Volume (1,000 m ³)	Residents at Risk (No.)			Downstream Type		Results of PA (Grade)	Remarks
			<3 km	<5 km	<10 km	Valley	Plain		
A	38	103,883	55	250	1,320	Plain		A	Detailed ETA Performed
B	11	131	–	23	–	Plain		C	
C	12	215	1,100	30,132	30,132	Plain		C	Collapsed
D	5.5	61	145	165	165	valley/Plain		B	Collapsed
E	12	45	5,010	10,590	10,590	Plain		C	Collapsed
F	5	15	–	–	–	Plain		C	
G	18	66	–	–	–	Valley		C	
H	4.7	24	–	–	–	Plain		C	
I	5	34	–	–	–	Plain		C	
J	4.8	10	–	–	5	Plain		C	

Table 4 Guidelines to Evaluate the Reasonableness of Subjective Probabilities, Barneich et Al. (1996)

Description of Condition or Event	Order of Magnitude of Probability Assigned
Occurrences of the condition or event are observed in the available database.	10 ⁻¹
The occurrence of the condition or event is not observed, or is observed in one isolated instance, in the available database; however, several potential failure scenarios can be identified.	10 ⁻²
The occurrence of the condition or event is not observed in the available database. It is difficult to think about any plausible failure scenario; however, a single scenario could be identified after considerable effort.	10 ⁻³
The condition or event has not been observed, and no plausible scenario could be identified, even after considerable effort.	10 ⁻⁴

여 저수지가 붕괴될 확률은 매우 낮아 전체 파괴확률에 미치는 영향이 미미하므로 본 논문에서는 월류와 내부침식으로 인한 파괴확률만을 산정하여 각 단계별 결과들과 비교하였다.

Phase 3는 기존의 세부적인 위험도 해석이 완료된 지구는 그 결과를 활용하였으며 붕괴 경험이 있는 저수지는 세부적인 위험도 해석을 수행하지 않았지만 저수지 붕괴상황에 해당하는 연간파괴확률 값을 일률적으로 적용하였다. 그리고 Phase 4에 대한 타당성은 기존의 많은 국가나 기관들에서 활용중인 표준방법인 ‘개별 저수지에 대한 위험도 해석방법’을 따를 것이므로 검토를 생략하였다.

나. 검토결과

Phase 1 검토에서는, 10개의 저수지 중 5개 저수지는 규모가 소규모이고 설치 위치가 도심지와 떨어져 있어 피해규모가 미약해 ‘저 잠재’ 위험 (Low Hazard Potential) 저수지로 구분되었고 (Fig. 6), 나머지 5개 저수지는 하류부에 공장, 민가, 철도 등이 있어 ‘보통 잠재’ 위험 (Significant Hazard Potential) 및 ‘고 잠재’ 위험 (High Hazard Potential) 저수지로 분류되어 2단계 해석을 수행하였다. 2단계 해석에서는 3단계 검토결과와 비교를 위하여 ‘피해’ 산정부분을 제외한 ‘파괴확률’ 부분만을 대상으로 2단계 해석을 수행하였다.

Phase 2 검토에서는, Phase 1 검토에서 ‘고 잠재’ 또는 ‘보통 잠재’ 위험 저수지로 분류된 총 5개 저수지 중에서 Phase 3 검토 결과와 비교가능한, 붕괴를 경험한 저수지 3개소, 세부 위험도 해석을 실시한 저수지 1개소만을 대상으로 2단계 해석을 실시하였다.

각 저수지들의 Phase 2 검토 결과를 살펴보면, A저수지는 안전점검 결과 A등급을 받은 저수지로서 저수지의 규모가 상당하여 가능최대 홍수량에 안전하게기름 설계 및 시공이 이루어졌으며 육안상으로 내부침식에 대한 징후가 전혀 발견되지 않아 월류 및 내부침식으로 붕괴될 확률이 낮을 것으로 판단되어 Table 4에 근거하여 연간파괴확률을 10^{-4} 으로 추정하였다.

C저수지는 붕괴발생 이전에 실시한 정민안전진단의 결과를 살펴보면 보통주변 및 하류부의 누수 발생으로 보통은 D등급, 종합 등급은 C등급을 받은 저수지이다. 월류에 대한 스

크리닝 단계의 연간파괴확률은 10^{-4} 으로 추정되었으며 이는 유역면적 크기가 작아 월류에 대한 가능성이 적은 것으로 판단되었기 때문이다. 또한 내부침식에 대한 스크리닝 단계의 연간파괴확률은 10^{-2} 으로 추정하였으며 이는 보통부 주변의 누수로 하류부 농경지에 물이 고일 정도로 누수량이 많은 것에 기인한 것이다. C저수지의 연간파괴확률은 누수와 내부침식으로 인한 연간파괴확률을 합산하여 10^{-2} 으로 추정하였다.

D저수지의 붕괴발생 이전에 실시한 안전점검 결과를 살펴보면 종합 등급은 B등급으로 비교적 안전한 것으로 판단된 저수지이다. 월류 및 누수에 대한 스크리닝 단계의 연간파괴확률은 10^{-4} 으로 추정되었으며 이는 유역면적 크기가 작아 월류에 대한 가능성이 적으며 최근 개보수 시행으로 전반적인 시설의 상태가 양호한 것으로 판단됨에 기인한 것이다.

E저수지의 붕괴발생 이전에 실시한 정민안전진단의 결과를 살펴보면 보통주변의 누수 및 토사유출 발생으로 보통은 D등급, 종합 등급은 C등급을 받은 저수지이다. 이에 대하여 월류에 대한 스크리닝 단계의 연간파괴확률은 10^{-1} 으로 추정되었으며 이는 유역면적 크기 (291 ha)에 비하여 저수용량 ($45,000 \text{ m}^3$)이 너무 작고, 물넘이 측벽고 높이가 계획홍수위보다 낮아 홍수 시 측벽옹벽 배면으로 침식이 우려되고 또한 계획홍수위에서 제정까지의 여유고가 2 m 이상으로 되어있는 현재의 설계기준에 비하여 여유고가 0.7m로 너무 낮아 월류 가능성이 높게 판단됨에 기인한 것이다. 또한 내부침식에 대한 스크리닝 단계의 연간파괴확률 또한 10^{-2} 으로 추정하였으며 이는 보통부의 누수 및 토사유출 발생에 기인한 것이다. E저수지의 연간파괴확률은 누수와 내부침식으로 인한 연간파괴확률을 합산하여 10^{-1} 으로 추정하였다.

Phase 3 검토에서, A저수지에 대한 연간파괴확률은 ‘정량적 위험도 평가기반 저수지 안정성 평가 툴 개발’ 연구 (Choi, 2015)에서 수행한 세부적인 위험도 해석의 결과인 5.3×10^{-5} 을 사용하였고, 붕괴를 경험한 저수지 2개소의 연간파괴확률 값은 $1 \sim 10^{-2}$ 의 값으로 가정하였다. 이는 붕괴 저수지의 연간파괴확률 값은 1에 가까워야 하는 것이 타당하며, 또한 Defra에서 제안한 최악의 상태 (저수지의 수위를 긴급히 낮추어야 하는)에 해당하는 연간파괴확률 값은 10^{-2} 근처의 값으로 제

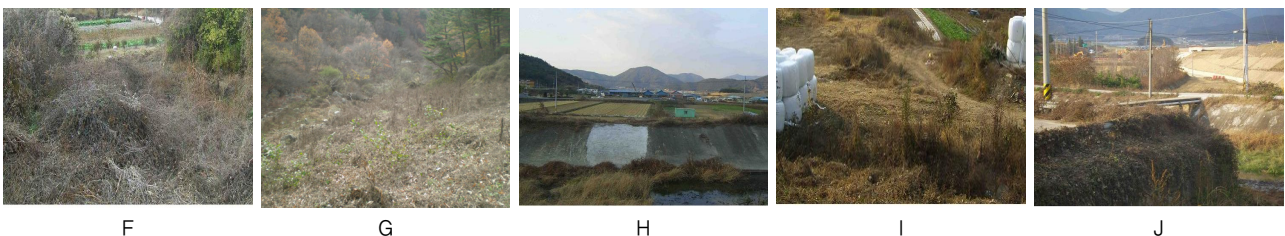


Fig. 6 Views of the Downstream

시험에 근거하였다 (Defra, 2013). Table 5에서는 각 단계의 결과를 나타내어 비교하였다.

Phase 2와 Phase 3 검토를 실시한 각 저수지들의 Phase 2 검토결과와 안전점검 (Periodic Assessment, PA) 결과를 비교해보면, A, D 저수지의 경우에는 안전점검 결과가 각각 A, B등급으로서 스크리닝 단계의 연간파괴확률 추정결과인 10^{-4} 와 일관된 결과를 보여 주지만, C, E 저수지의 경우에는 안전점검의 결과는 D, E 등급이 아닌 C 등급으로 비교적 안전한 것으로 나타났으나 스크리닝 단계의 연간파괴확률 값은 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 으로 높게 산정되는 경우를 보여주기도 한다. 이는 안전점검의 경우 각각의 부위별 등급을 가중평균하여 종합등급을 결정하고, 위험도 해석에서는 각 파괴형태별 연간파괴확률 값들을 합산하여 전체의 연간파괴확률 값을 결정하기 때문이다.

또한, Phase 2와 Phase 3의 검토결과를 각각 비교해보면 A, C, E 저수지들의 결과는 비교적 유사한 것으로 나타났으나 D 저수지에서는 Phase 3의 검토 결과와 Phase 2 검토 결과가 차이가 많이 나는 것으로 나타났다.

이는 본 논문에서 제안한 Phase 3의 절차를 거치지 않고 Phase 2 해석 결과에 따라 많은 저수지에 대하여 Phase 4 해석을 실시할 경우, 실제로 ‘파괴확률’이 높지 않은 저수지에 대하여도 Phase 4 해석을 수행함으로 ‘파괴확률’ 산정뿐만 아니라 ‘피해’의 규모 산정까지 많은 에너지가 투입되어야 하는 불합리한 경우가 발생하기도 하고, 실제로는 ‘파괴확률’이 높아 우선적으로 위험도를 낮출 필요가 있는 저수지에 대한 위험도 해석이 미루어지는 경우가 발생하기도 함을 보여준다.

본 연구에서는 도입방안의 타당성 검토를 위하여 10개의 저수지에 대해서만 단계별 검토를 실시하였지만, 17,500여 개의 저수지를 대상으로 위험도 해석을 도입할 경우에는 많

은 숫자의 저수지에 대하여 위험도 해석을 생략할 수 있는 Phase 1 검토의 도입과 해당 저수지의 연간파괴확률 값을 정확히 산출함으로 실제 위험도가 높은 시설부터 한정된 자원의 투입을 가능하게 도와주는 Phase 3 검토의 도입은 필수적일 것이다.

IV. 결 론

비교적 규모는 작고 그 숫자는 많은 한국의 농업용 저수지에 대하여 저수지 안전관리에 대한 효과적인 도구로서의 역할을 할 수 있는 위험도 해석의 적용을 위한 절차를 제안하였다. 많은 수의 저수지에 위험도 해석을 도입하기 위하여 위험도의 우선순위 설정은 반드시 필요하며 일관된 위험도 추정 은 전체 과정에서 필수적이다. 개별 댐에 대하여 위험도를 추정할 때, 주관적 판단에 의하여 추정된 잠재 파괴형태에 대한 확률 값의 입력은 쉽지 않다. 그럼에도 상대적인 위험도를 추정하는 위험도 우선순위 설정과 우선순위에 기초한 강화된 저수지 안전관리 프로그램은 많은 수의 시설을 가진 관리자에게 탁월한 도구로서의 역할을 할 수 있을 것이다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 많은 수의 저수지를 한정된 자원으로 효율적으로 안전관리 할 수 있고, 취약부위가 심각하지만 국부적인 경우 저수지의 위험한 정도를 간과하여 평가할 수 있는 기존의 등급시스템에 의한 안전관리 방법의 대안으로서 위험도 해석의 필요성을 제시하였다.
2. 하지만, 우리나라의 경우 저수지의 숫자가 많고 그 규모가 다양하므로 pre-screening (잠재위험에 따른 분류)과 screening (잠재위험형태 해석의 우선순위 선정을 위한 위험도 해석) 절차를 통한 위험도 해석 도입 방안을 제안하였다.
3. 또한 위험도 해석수행 전 (全) 과정에서 잠재파괴형태 해석 (Potential Failure Modes Analysis, PFMA)은 반드시 수행되어야 하는 가장 중요한 절차이며, 한국 농업용 저수지 안전관리에 위험도 해석을 효율적으로 도입하기 위해서는 잠재파괴형태 해석의 우선순위 설정을 위한 위험도의 정량화 방안 마련이 필수적이며 이는 향후 연구를 통해 보완할 예정이다.

Table 5 Comparison of Results of Phased Process

Name	Results of Phase 1 (Potential hazard)	Results of Phase 2 (Screening RA)	Results of Phase 3 (PFMA)	Results of PA (Grade)
A	High	10^{-4}	5.3×10^{-5}	A
B	Significant	-	-	C
C	High	10^{-2}	$1 \sim 10^{-2}$	C
D	High	10^{-4}	$1 \sim 10^{-2}$	B
E	Significant	10^{-1}	$1 \sim 10^{-2}$	C
F	Low	-	-	C
G	Low	-	-	B
H	Low	-	-	B
I	Low	-	-	C
J	Low	-	-	C

REFERENCES

1. Bureau of Reclamation (USBR) and Corps of Engineers (USACE),. 2012. Introduction of Best Practices in Dam and Levee Safety

- Risk Analysis, 8.
2. Choi, B. H., 2015. Development of Safety Evaluation Tool for Reservoirs Based Risk Assessment Models, 70-82.
 3. Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA)., 2013. Guide to risk assessment for reservoir safety management, 2: 72-73.
 4. Fell, R., M. Foster, R. Davidson, J. Cyganiewicz, G. Sills, and N. Vroman, 2008. A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping. URS Australia Pty Ltd. Sydney, Australia. [Prepared for the US Bureau of Reclamation]
 5. FEMA., 2004. Hazard Potential Classification System for Dams, 9.
 6. FEMA., 2008. Risk Prioritization Tool for Dams Users Manual, 3-3~3-16.
 7. Foster, M. A., R., Spannagle, M. Spannagle, 2000. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5): 1000-1024.
 8. Heo, G., 2014. Introduction of Dam Safety Management Using Risk Analysis, *Rural Community and Environment*, 122: 98-106.
 9. MAFRA., 2012. Statistical Yearbook of Land and Water development for Agriculture, 502-507.
 10. McClenathan, Jeffrey T., 2007. Update for screening portfolio risk analysis for U.S. Army Corps of engineers, 1355-1361.
 11. Scott, G. A., 2011. The Practical Application of Risk Assessment to Dam Safety, *Geo risk 2011*, 129-168.
 12. USACE., 2010. Event Tree Session of Risk Technology Workshop, 25.