

Risk Analysis for Reservoir Collapse by a Multi-hazard Approach

Young Kyu Lee⁺

Disaster Management Research Team, FILK affiliated with KFPA, 1030 Gyeongchung-daero, Ganam-eup, Yeosu-si, Gyeonggi-do, Korea

Abstract

In the study, we infer the causes of the Mowon Reservoir Collapse which occurred in 2018. It was figured out that the Mowon Reservoir Collapse was induced by the hazards from changes in waterway, reservoir area, land cover, and rainfall. We analyzed the risk of collapse for 3,186 reservoirs managed by the Korean Rural Community Corporation (KRCC) through a multi-hazard approach. The consequences of the reservoir collapse were categorized to 5 classes, assuming that the losses by collapse are proportional to reservoir capacities. The likelihoods were rated for each class according to the scores determined by the hazards from reservoir inspection grade, rainfall change, earthquake magnitude change, land cover change, and fire area. The reservoir collapse risks were calculated by a risk matrix of likelihood and consequence. Naju, Yeongam and Gyeongju were identified as the most risky Si-gun-gu's according to the total sum risks.

Key words: reservoir, multi-hazard, risk, likelihood, consequence, collapse

1. 서론

저수지 붕괴 사고는 끊임없이 반복되고 있다(Shin & Lee, 2012; Kim, 2015; Kim, *et. al.*, 2018; Choi, *et. al.*, 2017). 1961년 7월 11일 전북 남원시 이백면 효기리 소재의 18만톤 규모의 효기저수지 붕괴는 110명의 사망자와, 가옥 190여 채 파손, 이재민 1,366명의 손해를 야기했다(Namwonnews, 2018). 1972년 9월 14일에는 220.9mm의 강수량을 기록한 부산 서구 대신동 소재의 구덕저수지가 붕괴되면서 사망 60명, 실종 15명, 부상 48명 등 큰 손해가 발생했다(Yim, 2015). 이후에도 지속적인 저수지 붕괴 사고가 일어나고 있지만

효기저수지 붕괴사고(1961)와 구덕저수지 붕괴사고(1972)와 같은 큰 인명 손해를 야기한 사고는 다행이도 발생하지 않고 있다.

반복되는 저수지 붕괴사고를 예방하기 위해서 저수지 시설에 대한 안전점검 정책이 도입되었다. 한국농어촌공사에서 실시하는 저수지 시설 안전점검 등급은 A(우수)·B(양호)·C(보통)·D(미흡)·E(불량) 5단계로 평가된다. 2013년에 여주시 옥촌저수지 붕괴사고, 이천시 대관저수지 붕괴사고, 경주시 산대저수지 붕괴사고가 발생하였다. 붕괴사고가 일어난 이들 3곳 저수지의 안전점검 등급은 모두 D 등급이었다. 이들 사고를 두고 언론에서는 붕괴사고 발생가능성이 크다는 것을

⁺ Corresponding author: Young Kyu Lee, Tel. +82-31-887-6718, Fax. +82-32-887-6720, e-mail. youngQLee@kfpa.or.kr

알면서도 사전 조치를 치하지 않아 발생한 인재라는 비판을 쏟아냈다(Yeojunews, 2013; Yonhapnews, 2013; Kyunghyang, 2013).

2014년 8월 21일 경북 영천 괴연저수지가 붕괴되면서 500여 명의 주민이 긴급 대피하고 20 여 채의 주택이 침수되고 10만여 제곱미터의 농경지가 침수되는 손해가 발생했다(OhmyNews, 2014). 괴연저수지는 안전 점검 등급이 B등급인 비교적 안전한 시설이었음에도 붕괴사고가 일어났다. 또한 붕괴사고 원인을 두고 주민과 영천시 간의 실랑이가 이어졌다. 영천시는 ‘저수지 붕괴는 자연재해’라는 입장을 주장하는 반면 주민들은 ‘수차례 저수지 보강 요청을 했지만 영천시가 제대로 들어주지 않았다’는 인재 가능성을 주장했다(OhmyNews, 2014).

올 해에도 저수지 붕괴사고가 있었다. 2018년 7월 1일 전남 보성 모원저수지가 붕괴되면서 농경지 3헥타르가 유실되거나 매몰되는 손해가 발생했다. 모원저수지는 2018년 6월 20일에 실시한 안전점검에서 B등급을 받았으며 두 달 전인 2018년 4월에 실시한 국가안전대진단에서도 B등급을 받은 비교적 안전한 시설이었다. 안전하다고 평가한 시설이 붕괴되면서 언론에서는 안전점검이 ‘엉터리’라는 비판을 쏟아내었다(News1, 2018).

지금까지 주요 저수지 붕괴사고 사례를 살펴보았다. 1960~2000년대까지 지속적으로 붕괴사고를 겪으면서 저수지 시설에 대한 안전관리 중요성이 대두되었다. 2009년에 「저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률」이 제정되면서 시설 안전점검을 통해서(구조결함 통제) 붕괴사고를 예방할 수 있다는 단순재난접근법(single-hazard approach)적 재난관리가 자리를 잡았다. 하지만 2004년과 2018년에 안전하다는 저수지 시설에서의 붕괴사고를 목도하면서 우리는 안전점검만으로 사고를 예방할 수 있다는 단순재난접근법의 한계를 인정할 수밖에 없었다.

지구상 생물체는 단순세포 생물체에서 인류와 같은

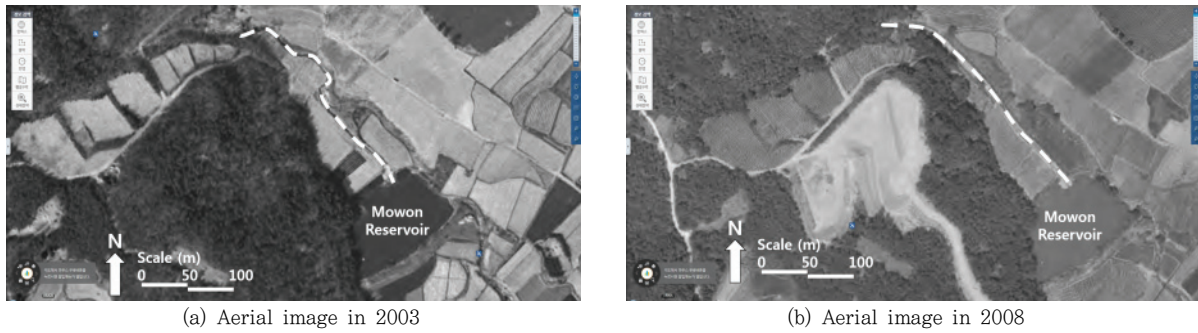
복합세포 생물체로 진화해왔다. 단순세포 생물체가 갖고 있는 한계를 뛰어넘기 위해서는 그보다 더 복잡한 생물체로 진화해야만 했을 것이다. 재난관리도 마찬가지다. 단순재난적 접근법으로 재난을 관리하는 데는 한계가 있다. 그 한계를 뛰어넘기 위해서는 보다 복잡한 관리 기법이 필요하다. 다각적인 면에서 야기될 수 있는 여러 위험(hazard)을 식별할 수 있어야 하고 위험간의 상호작용(hazard interaction)과 위험간의 연쇄작용(hazard cascade)을 고려하여 분석해야만 재난을 예방할 수 있다는 시각이 바로, 복합재난접근법(multi-hazard approach)이다(Gill & Malamud, 2016).

2장에서는 올해 발생한 모원저수지 붕괴사고(2018) 원인을 복합재난접근법으로 추정한다. 3장에서는 복합재난접근법을 통한 저수지 붕괴 리스크를 분석한다. 끝으로 4장에는 결론을 담았다.

II. 모원저수지 붕괴사고 원인 추정

대부분의 저수지 붕괴사고는 ① 월류(overtopping), ② 파이핑(piping), ③ 사태(sliding) 중 하나의 유형으로 귀결된다(Foster, *et. al.*, 2000). 1945년에 준공되었으며 80헥타르의 유역면적과 9,300톤의 저수용량을 갖는 전남 보성 모원저수지¹⁾ 붕괴사고(2018) 유형은 아직까지 확인된 바 없다. 월류, 파이핑, 사태 등 증상으로 나타는 사안을 붕괴사고의 원인이라고 단정하곤 한다(Choi, 2009; Song, *et. al.*, 2016). 하지만 미국 화학안전사고조사위(USCSB, 2017)는 현실적으로 나타난 증상이 무엇인지 조사하는 것에 역점을 두는 것이 아니라 그 증상을 유발한 근본적 원인을 조사하는데 중점을 둔다. 이와 같이 근본적 원인을 찾는 분석기법을 근원분석기법(root cause analysis)이라 한다. 본 연구에서는 복합재난의 발생가능성 분석기법으로 근원분석기법을 채용하였다. ISO 31010 (2009)에 따르면 근원분석기법은 정성적 분석기법으로 시나리오 분석기법의 일종으로 분류된다.

1) 모원저수지 시설제원 정보는 국가수자원관리종합정보시스템 (www.wamis.go.kr) 하천시설 → 저수지 시설제원에서 확인한 사항임



※ Source: Map.ngiii.go.kr

Figure 1. Comparison of the waterways upstream Mowon reservoir; white dashed lines indicate the waterways upstream

구조물의 붕괴는 구조물이 갖는 견고성(저항력)과 구조물에 작용하는 외력에 의해서 결정된다. 구조물에 작용하는 외력보다 구조물이 갖는 견고성이 크다면 붕괴는 일어나지 않으며, 구조물에 작용하는 외력이 구조물이 갖는 견고성보다 큰 경우 붕괴사고가 발생할 수 있다.

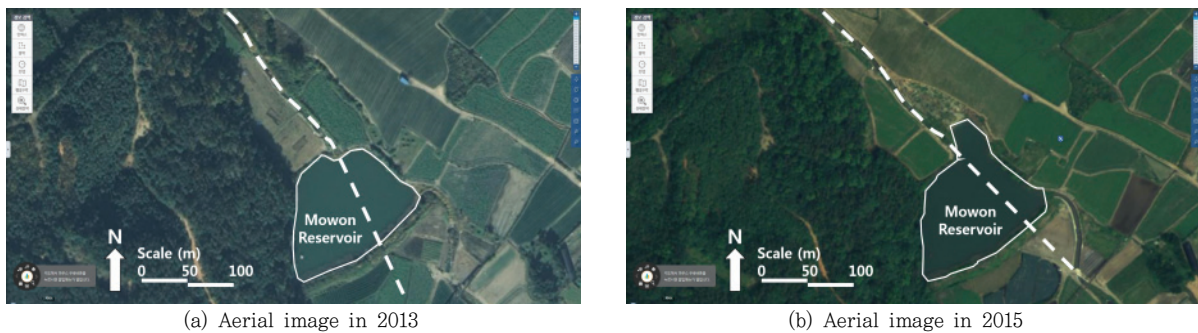
앞에서 언급했다시피 사고 이전 모원저수지의 안전점검 등급은 B등급으로 비교적 견고성이 우수한 시설이었다. 이는 시설의 견고성으로 인한 붕괴사고 발생 가능성이 상당히 낮다는 것을 의미한다. 이런 이유로 모원저수지 붕괴사고 원인을 구조물에 작용하는 외력을 중심으로 살펴보았다.

구조물에 작용하는 외력, 즉 모원저수지 제방에 가해지는 외력에 대해서 살펴보기 위해서는 저수지 내의 흐름 변화에 주목해야 한다. 저수지 내의 흐름이 변하기 위해서는 저수지 면적(또는 용량)이 변하거나 저수지로 유입 또는 유출되는 유량의 유속 또는 유향(flow

direction)의 변화가 있어야 한다.

〈Figure 1〉은 모원저수지 상류 쪽 하도(물길) 변화를 살펴보는 데 도움이 되는 항공사진이다. 항공사진은 국토정보플랫폼(map.ngii.go.kr)에서 수집하였다. 각각의 항공사진에는 백색의 점선이 모원저수지 상류 쪽 하도를 구별하게 해주고 있다. 2003년 항공사진에서는 상류 하도가 구불구불한 반면에 2008년 항공사진에서는 상류 하도가 반듯하다는 것을 확인할 수 있다. 이 지역 탐문 시 2004년에 하도 직선화를 행했다는 비석을 확인하였다. 하도 직선화는 저수지 유입 유량의 변화를 야기한다. 하도 직선화 공사 시, 유입 유량 변화에 따른 제방 안전성에 미치는 영향을 고려하였는지에 대해서는 자료를 확인할 수 없었다.

〈Figure 2〉는 모원저수지 저수면적의 변화를 살펴보기 위해서 삽입한 2013년과 2015년 항공사진이다. 그림에서 백색 실선은 저수면적 테두리를 나타내며 백색 점선은 저수지 유입 유량의 유향을 고려하여 상류



※ Source: Map.ngiii.go.kr

Figure 2. Comparison of the reservoir areas; white solid lines mean reservoir perimeters and dashed lines indicate the waterways projected to the embankment

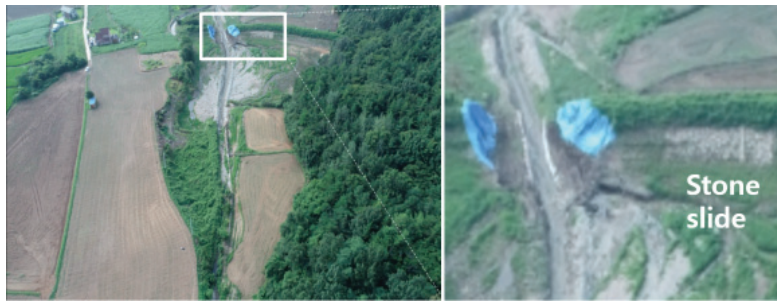


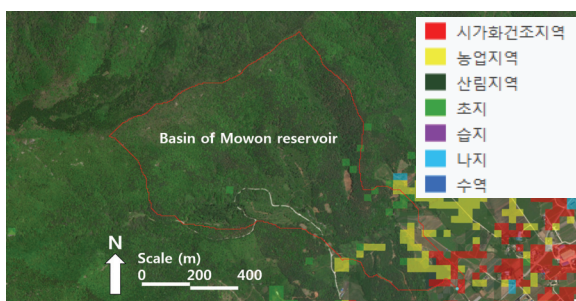
Figure 3. Collapsed Mowon reservoir; some slide being constructed with stone

하도를 저수지 제방까지 연장한 선을 보여준다. 이 그림을 통해서 대략적으로 2014년경에 저수면적 확장이 이루어졌음을 짐작할 수 있다. 또한 저수면적 확장 공사를 통해서 제방에 가해지는 최대수압 위치의 변화가 있었음을 유추할 수 있다. 또한 홍수시에는 저수지에 파고가 발생하는데 최대파고 위치는 최대수압 위치와 동일함으로 최대파고 위치 또한 변경되었다는 것을 추정할 수 있다.

최대수압 위치 또는 최대파고 위치가 변했다는 것은 모원저수지 붕괴사고(2018)에서 큰 의미를 갖는다. 제방 붕괴지점이 <Figure 2(b)>에서의 하도 연장선과 제방과의 교차점과 일치하기 때문이다. <Figure 3>은 붕괴된 제방의 사진을 보여주고 있다. 붕괴 지점을 확대해보면, 붕괴지점 오른쪽 제방사면은 석조사면으로 되어 있어서 다른 곳 사면(흙사면)보다 구조적 안정성이 보장되어 있었다는 것을 알 수 있다. 저수면적 확장 설계 시, 이와 같이 변화하는 저수지 내 흐름이 제방 안정성에 어떤 영향을 미치는지에 대한 고찰이 수반되었는지에 대해서는 확인하지 못하였다.

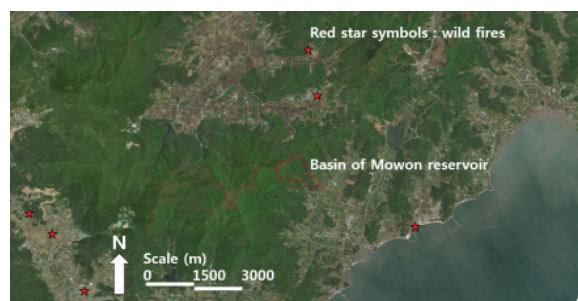
<Figure 4>는 모원저수지 유역에서의 토지피복변화(1980년대와 2000년대 간 비교, 출처: 환경공간정보서비스)와 산불발생 현황을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 유역 일부 지역에서의 토지피복 변화가 감지되고 있으며 해당 유역에서는 산불이력(2008~2017 출처: 소방청)이 없는 것으로 나타났다. 토지피복이 변화하거나 산불로 인해 임야가 소실되는 경우 저수지 내로 유입되는 유량의 변화가 발생할 수 있으며 이는 저수지 제방에 가해지는 외력의 변화를 야기할 수 있다.

모원저수지 인근에서 장기간 강우량을 계측하고 있는 기상관측소는 장흥기상관측소이며 모원저수지에서 서쪽으로 약 12km 떨어져 있다. <Figure 5>는 장흥기상관측소에서 계측한 연최대-일수량과 연최대-한시간강수량의 시계열을 보여준다. 적색 직사각형 테두리는 상류 하도 변화가 있었던 해와 저수면적 변화가 있었던 해를 표시한다. 올해 기록한 연최대-일강수량과 연최대-한시간강수량이 과거에 비해 큰 비가 아님에도 불구하고 붕괴사고가 발생했다는 것을 알 수 있다. 하지만 저수면적 변화가 있었던 2014년 이후 기간의 연최



※ Source: egis.me.go.kr

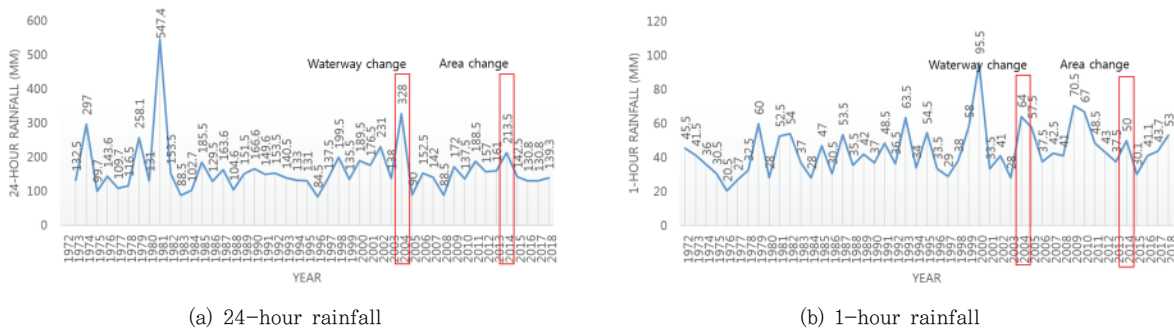
(a) Land cover changes



※ Source: www.nfa.go.kr

(b) Wild fire sites

Figure 4. Land cover changes and wild fire sites within the watershed of Mowon reservoir; red solid lines mean watershed perimeters



※ Source: Data.kma.go.kr(1972~2018)

Figure 5. Rainfalls history of Jangheung weather station near by Mowon reservoir

대-한시간강수량을 보면 올해 계속된 53mm가 최고치임을 알 수 있다. 저수지 시설제원 변화 이후 갱신된 최고치 강수량이 저수지 제방 안정성에 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

지금까지 모원저수지 제방에 가해지는 외력에 변화를 야기할 만한 사건(event)들을 살펴보았다. 앞에서 살펴본 것과 같이 이번 붕괴사고 이전에 하도 변화, 저수면적 변화, 토지피복 변화, 최고치 강수량 변화 등의 다양한 사건이 있었다. 이와 같은 사건이 발생할 때, 저수지 시설 안정성에 미치는 영향을 면밀히 분석하고 대비하였다면 이번 붕괴사고를 막을 수 있었을 수는 있지 않을까 생각해 본다. 본 연구자는 모원저수지 붕괴사고(2018)가 호우시 발생했지만 붕괴사고에 영향을 미친 위험(hazard)은 호우는 물론, 하도 변화와 토지피복 변화에 따른 위험(hazard), 저수면적 변화에 따른 위험(hazard) 등이 서로 상호작용과 연쇄작용을 일으켜 발생한 복합재난으로 추정한다. 이와 같은 재난의 재발방지를 위해서는 리스크를 복합재난접근법으로 분석하는 것이 필요하다. 이와 관련된 자세한 내용은 3장에서 이어진다.

III. 복합재난접근법에 의한 저수지 붕괴 리스크 분석

모원저수지 붕괴사고(2018)에서 언급하였듯이 재난(또는 사고)은 한 가지 위험(hazard)이 아닌 다양한 위

험(hazard)의 상호작용과 연쇄작용에 의해서 발생한다는 것이다. 이 장에서는 모원저수지 발생가능성 변동에 영향을 미쳤을 것으로 추정된 요인들을 바탕으로 다른 저수지의 붕괴사고 리스크를 추정하고 저수지 소재 시군구별로 리스크를 집계하여 저수지 붕괴사고 리스크가 가장 큰 시군구를 선정하기 위해서 수행하였다. 저수지별 붕괴사고 리스크 추정은 공간정보 기반으로 이루어진다. 국내 저수지는 지자체에서 관리하는 저수지와 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지로 구분되는데, 한국농어촌공사 저수지만이 안전점검 결과 등 다양한 저수지 속성을 공간정보로 제공하고 있다. 이에 본 연구에서는 한국농어촌공사에서 관리하는 전국에 분포된 저수지를 대상으로 복합재난접근법에 의한 저수지 붕괴 리스크를 분석한다.

리스크는 리스크 매트릭스(risk matrix)를 통해서 수치화되는데 리스크 매트릭스의 행과 열은 저수지 붕괴 사고 발생가능성(likelihood)과 발생결과(consequence)가 담당한다(ISO 31010: 2009).

발생결과는 저수지 붕괴로 인한 인명과 재산 손해를 말한다. 발생결과는 저수지의 저수율, 하류 지역의 인명 및 재산 분포, 사전경보를 통한 대피 유무 등 다양한 상황에 따라 달라진다. 발생결과를 추정하는 보다 상세하고 정량적인 분석은 향후 연구에서 진행될 예정이며, 본 논문에서는 발생결과를 정성적으로 분석한다. 일반적인 상식선에서 저수량이 많은 저수지 붕괴 시, 발생결과 또한 클 것이라고 전망할 수 있다. 발생결과는 정성적으로 5단계 등급으로 구분하였으며, 발생결과 등급

정의는 Table 1과 같이, 총 저수지 개소 중 해당 저수지의 총저수량 오름차순 순위를 가지고 평가하였다.

발생가능성에 영향을 미치는 사건(event) 후보군으로는 ① 저수지 안전점검 등급, ② 강수량 변화, ③ 지진규모 변화, ④ 토지피복 변화, ⑤ 산불면적, ⑥ 하도 변화, ⑦ 저수면적 변화를 구상했다. 하지만 전국에 분포되어 있는 3,186 개소의 하도 변화와 저수면적 변화에 대한 자료를 수집할 수 없어, 앞에서 언급한 5가지 요인만을 가지고 저수지 붕괴 발생가능성을 정성적으로 분석하였다.

연구에 활용한 3,186 개소 저수지의 2018 안전점검 등급별 현황은 Table 2와 같다. A(우수) 등급은 문제점이 전혀 없는 최상의 상태를 말하며 B(양호) 등급은 보조부재에 경미한 결함이 있는 상태를 말하며, C(보통) 등급은 주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 있는 상태를 말한다. D(미흡) 등급은 주요부재에 결함이 있는 상태를 말하며 E(불량) 등급은 주요부재에 심각한 결함이 있는 상태를 말한다. 보다 자세한 등급 설명은 농어촌알리미(www.alimi.or.kr)에서 확인할 수 있다.

서론에서도 언급했다시피 2012년 이후 일부 붕괴사고에 대해서는 시설의 안전점검 등급을 언론 기사를 통해서 확인할 수 있었으나 그 외 많은 저수지 붕괴사고에 대해서는 시설의 안전점검 등급에 대해서 자료를 확보할 수 없었다. 또한 한국농어촌공사에서는 안전점검 등급별 정량적 사고발생가능성에 대한 정보를 제공하고 있지 않는 것으로 파악되었다. 본 연구에서는 전문가집단 설문조사(델파이기법)를 통하여 안전점검 등급별 상대적 발생가능성을 수치화하였다. Table 3은 안전점검 A등급의 발생가능성을 1이라고 가정하였을 때, 타 등급의 발생가능성에 대해서 10인의 전문가가 제시한 의견의 평균으로 수치화한 것이다.

발생가능성에 영향을 미치는 두 번째 요인, 강수량 변화는 각각의 저수지 최인근 관측소에서 2000년 이전 기간(1973~1999)과 2000년 이후 기간(2000~2017)에서 계측된 한시간강수량최다 간의 차이를 척도로 사용

하였다. <Table 4>는 강수량 변화 등급을 보여준다. 강수량 변화 등급은 강수량 10 mm 구간을 기준으로 등급화하였다. 저수지의 절반 정도에서는 2000년 이전에 비해 2000년 이후에 강수량이 증가하지 않은 것으로 조사되었다. 또한 충남 태안군 소재 저수지는 2000년 이전 79 mm/hr에서 2000년 이후 200.5 mm/hr로 121.5 mm/hr의 증가가 조사되었다.

Table 1. Consequence criteria

Class	Criteria	Reservoirs
1	20% sort priority in ascending sort order by capacity	637
2	20~40% sort priority in ascending sort order by capacity	637
3	40~60% sort priority in ascending sort order by capacity	637
4	60~80% sort priority in ascending sort order by capacity	637
5	80~100% sort priority in ascending sort order by capacity	638

Table 2. Safety inspection grades for reservoirs

Grade	Reservoirs	Description
A	434	(Excellent) Best state having no problem
B	1,029	(Good) There are minor defects on secondary members.
C	1,647	(Fair) There is no safety problem but are minor defects on main members or extensive defects on secondary members.
D	76	(Poor) There are defects on main members.
E	0	(Very bad) There are fatal defects on main members.

* Source: www.alimi.or.kr (2018)

Table 3. Relative likelihood

Inspection Grades	Collapse likelihood
A (excellent)	1
B (good)	16
C (fair)	33
D (poor)	56
E (very bad)	183

Table 4. Rainfall change classes

Class	Criteria	Reservoir (portion)
0	change \leq 0 mm	1,453 (45.6%)
10	0 < change \leq 10 mm	530 (16.6%)
20	10 < change \leq 20 mm	701 (22.0%)
30	20 < change \leq 30 mm	154 (4.8%)
40	30 < change \leq 40 mm	246 (7.7%)
50	40 < change \leq 50 mm	60 (1.9%)
60	50 < change \leq 60 mm	21 (0.7%)
70	60 < change \leq 70 mm	10 (0.3%)
80	70 < change \leq 80 mm	6 (0.2%)
90	80 < change \leq 90 mm	0 (0.0%)
100	90 < change \leq 100 mm	0 (0.0%)
110	100 < change \leq 110 mm	0 (0.0%)
120	110 < change \leq 120 mm	0 (0.0%)
130	120 < change \leq 130 mm	5 (0.2%)

강수량 변화에 따른 발생가능성 변화를 수치화하기 위해서 전문가집단의 설문조사방식을 사용하였다. 극한 한시간강수량이 10 mm 씩 증가시 마다 발생가능성의 증가율 조사결과를 (Table 5)에 제시하였다.

Table 5. Likelihood-increased ratio by 10 mm increasement of extreme 1-hour rainfall

Inspection Grades	Collapse likelihood change
A (excellent)	1.1
B (good)	1.5
C (fair)	2.1
D (poor)	3.1
E (very bad)	9.9

발생가능성에 영향을 미치는 세 번째 요인, 지진규모 변화는 각각의 저수지 중심 반경 30 km 이내에서의 2000년 이전 기간(1978~1999)과 2000년 이후 기간(2000~2017)에서 계측된 지진규모(리히터 규모, MR)

간의 차이를 척도로 사용하였다. 단, 규모 3.0 이하인 경우에는 지진규모의 변화가 없는 것으로 간주하였다. 약 60%에 해당하는 저수지에서는 지진규모 변화가 없는 것으로 조사되었다. 또한 울산 울주군 소재 저수지는 2000년 이전 규모 3.0 MR에서 2000년 이후 규모 5.8 MR로 2.8 MR의 증가가 조사되었다.

우리나라에서는 지진으로 인한 저수지 붕괴사고가 파악되지 않고 있다. 다만 Newsis(2016)는 2016년 9월 12일 경주지진 시 경주 외동읍 소재의 사곡저수지와 토상저수지 제방 등에서 미세한 균열이 발생했다고 보도했으며 2017년 11월 15일 포항지진 시에는 포항시 북구 소재의 회화저수지, 둔각저수지, 삼정저수지, 지평이 저수지에서 균열이 발생했다고 Newsis(2017)가 보도하였다.

지진규모 변화에 따른 발생가능성 변화를 수치화하기 위해서 전문가집단의 설문조사방식을 사용하였다. 극한 지진규모가 1 MR 씩 증가시 마다 발생가능성의

Table 6. Earthquake magnitude change

Class	Criteria	Reservoirs (portion)
0	change \leq 0 MR	1,841 (57.8%)
1	0 < change \leq 1 MR	1,092 (34.3%)
2	1 < change \leq 2 MR	200 (6.3%)
3	2 < change \leq 3 MR	53 (1.7%)

증가율 조사결과를 <Table 7>에 제시하였다.

발생가능성에 영향을 미치는 네 번째 요인, 토지피복 변화는 환경공간정보서비스(egis.me.go.kr)에서 제공하는 80-00년대 토지피복 시계열 변화량 공간정보를 사용하였다. 해당 자료는 1980년대(87~89년 촬영)와 2000년대(08~10년 촬영)의 대분류 토지피복지도를 바탕으로 분석한 토지피복변화를 보여준다. 토지피복변화는 시가지화, 농경지화, 산림화, 초지화, 습지화, 나지화, 수역화로 분류되는데 본 연구에서는 분류에 관계 없이 각각의 저수지 유역 내에서 변화가 발생한 면적만을 파악하였다. 토지피복 변화는 <Table 8>과 같이 유역면적 대비 변화한 토지피복면적의 비를 기준으로 등급화하였다. 토지피복의 변화가 없는 저수지는 54개소로 매우 작은 부분을 차지하고 있다. 또한 유역이 매우 작은 저수지의 경우에는 유역 전체에서 토지피복변화가 감지된 곳도 있다.

Table 7. Likelihood-increased ratio by 1 MR increasement of extreme earthquake magnitude

Inspection Grades	Collapse likelihood change
A (excellent)	1.5
B (good)	1.8
C (fair)	2.3
D (poor)	5.2
E (very bad)	9.2

토지피복 변화는 저수지 내로 유입되는 유량의 증가를 야기할 수 있다. 전문가집단 설문조사를 통하여 유

Table 8. Land cover classes

Class	Criteria	Reservoir (portion)
0	change in watershed = 0	54 (1.7%)
10	change in watershed ≤ 10%	605 (19.0%)
20	change in watershed ≤ 20%	750 (23.5%)
30	change in watershed ≤ 30%	609 (19.1%)
40	change in watershed ≤ 40%	536 (16.8%)
50	change in watershed ≤ 50%	320 (10.0%)
60	change in watershed ≤ 60%	154 (4.8%)
70	change in watershed ≤ 70%	91 (2.9%)
80	change in watershed ≤ 80%	26 (0.8%)
90	change in watershed ≤ 90%	6 (0.2%)
100	change in watershed ≤ 100%	35 (1.1%)

Table 9. Likelihood-increased ratio by 10% increasement of land cover change in watershed

Inspection Grades	Collapse likelihood change
A (excellent)	1.3
B (good)	1.9
C (fair)	3.0
D (poor)	5.2
E (very bad)	10.5

역면적 대비 토지피복 변화율이 10% 씩 발생할 때마다 안전점검 등급별 붕괴 발생가능성 증가율을 수치화했으며 <Table 9>는 그 결과를 보여준다.

발생가능성에 영향을 미치는 마지막 요인, 산불면적은 2008~2017 기간의 임야화재 자료(소방청)를 바탕으로 저수지 유역별로 추정하였다. 임야화재 자료에는 화재로 인한 소실면적이 기록된 경우와 누락된 경우가 존재한다. 2008~2017 기간 소실면적이 기록된 화재의 평균소실면적은 2,040 제곱미터로 나타났다. 임야화재 자료에 적시된 주소를 바탕으로 저수지 유역별 임야화재 건수를 파악하고 평균소실면적(2,040 제곱미터)을 곱하여 유역면적 대비 누적산불소실면적으로 산불면적을 <Table 10>과 같이 등급화 하였다. 누적산불소실면적에 따른 붕괴 발생가능성의 변화하는 토지피복 변화에 따른 붕괴 발생가능성 변화와 동일하게 취급하였다.

앞에서 설명한 것과 같이 저수지 붕괴 발생가능성에 영향을 미치는 5가지 요인에 대한 영향력을 수치화하여 각각의 저수지별로 발생가능성을 분석하였다. 발생가능성은 각 요인별 발생가능성 계수를 곱하여 산정하였

Table 10. Wild fire area

Class	Criteria	Reservoirs (portion)
0	fire area = 0	2,673 (83,9%)
10	0 < fire area <= 10%	513 (16,1%)

다. 발생가능성의 범위는 1~244,095까지 매우 넓게 포진되었다. 그렇지만 <Figure 6>에서 확인할 수 있는 것과 같이 대부분의 저수지 붕괴 발생가능성은 1~10,000 범위 내에 존재하고 있다.

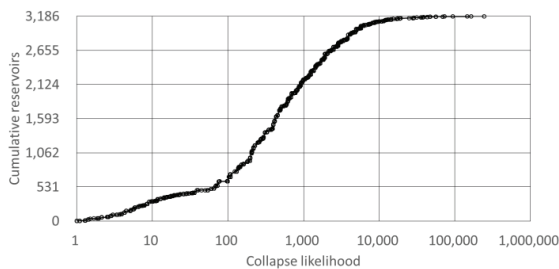


Figure 6. Cumulative reservoirs with regard to collapse likelihood

발생가능성의 등급 또한 발생결과 등급과 동일하게 으뜸차순 정렬 순위를 기준으로 20% 구간씩 구분하여 등급화 하였다.

앞에서 기술한 것과 같이 리스크는 발생가능성과 발생결과의 조합으로 분석된다. 본 연구에서는 Table 11과 같이 발생가능성과 발생결과의 곱으로 리스크를 산정하였다. <Table 11>에 제시된 리스크 매트릭스를 통하여 각각 저수지의 붕괴사고 리스크를 분석하였다.

Table 11. Risk matrix criteria

Consequence	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15
	2	2	4	6	8	10
	1	1	2	3	4	5
		1	2	3	4	5
		Likelihood				

<Table 12>는 시군구별 저수지 붕괴 리스크 분석 결과를 보여준다. 시군구별로 누계된 총합리스크(TSR)가 가장 큰 시군구로는 나주가 선정되었다. 나주는 시군구 단위 저수지가 161개로 가장 많다는 점이 1위로 선정되는데 가장 큰 기여를 했다. 2위는 영암이 차지했으며 3위는 경주가 차지하였다. 경주의 경우 저수지 개소로는 영천과 해남에 이어 5위지만 지진규모 변화의 영향으로 시군구별 총합리스크는 3위를 차지하였다. 저수지 개소 순위와 총합리스크 순위 간의 가장 큰 격차를 보이는 곳은 고흥과 장흥이다.

IV. 결론

저수지 시설의 붕괴사고는 지속적으로 반복되고 있

Table 12. Result of Collapse risk analysis

District	TSR	Reservoir	TSR rank	Rsv. rank
Naju	1,452	161	1	1
Yeongam	931	137	2	2
Gyeongju	820	75	3	5
Haenam	771	78	4	4
Goheung	688	46	5	18
Yeongcheon	576	83	6	3
Muan	514	50	7	10
Ulju	511	72	8	6
Pohang	507	54	9	9
Jangheung	486	32	10	37

TSR: Total Sum Risk; Rsv.: Reservoir

다. 올해도 보성군 모원저수지가 붕괴되었다. 2009년에 「저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률」이 제정되고, 저수지 안전점검을 통한 시설관리로 붕괴사고를 예방하는데 집중해왔다. 하지만 안전하다고 평가 받은 저수지 시설에서도 붕괴사고가 발생하면서 안전점검을 통한 붕괴사고 예방의 한계를 목도하였다. 하나의 위험(hazard)에만 집중하는 단순재난접근법에 의한 재난관리 한계를 넘어보자는 대안으로 나타난 재난관리 기법이 복합재난접근법이다. 복합재난접근법에서는 재난발생을 하나의 위험(hazard)에 의해서 발생하는 것이 아니라 여러 위험(hazard)의 상호작용과 연쇄작용 속에서 일어난다고 인식하고 관리하는 것을 지향한다.

본 연구에서는 올해 발생한 모원저수지 붕괴사고 원인을 복합재난접근법을 통하여 추정해 보았다. 이번 붕괴사고는 하도 변화, 저수면적 변화, 토지피복 변화, 강수량 변화에 따른 다양한 위험(hazard)에 의해 일어난 것으로 추정하였다. 붕괴사고 재발 방지를 위해서는 유역 내에서 일어나는 모든 사건(event)의 영향을 면밀히 분석하여 시설에 미칠 영향을 사전에 식별하고 대비하는 것이 필요하다.

저수지 붕괴 리스크 관리와 관련하여 향후 세부적이고 정량적인 연구의 대상지역이 될 시군구를 선정하기 위하여 복합재난접근법에 의한 시군구 단위의 저수지 붕괴 리스크를 분석하였다. 시군구 단위 저수지 붕괴 리스크 분석 결과를 바탕으로 이해관계자(연구진, 담당 공무원, 후보지 지자체)와의 협의를 통하여 최종 대상 지역을 선정할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발 사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, Byoung Han, Ji Hyeob Ryu, and Baeg Lee. 2017. A Study on the Monitoring Criteria for Early-warning System of Reservoir(Fill Dam) Based USN(Ubiquitous Sensing Network). *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*. 17(2): 145-153.
- Choi, Hyun Soo. Study Trend on Flood Analysis by Reservoir Failure. *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage*. 16(1): 30-33.
- Foster, M., R. Fell, and M. Spannagle. 2000. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. *Canadian Geotechnical Journal*. 37(5): 1000-1024.
- Gill, J. C. and B. D. Malamud. 2016. Hazard Interactions and Interaction Networks(Cascades) within Multi-hazard Methodologies. *Earth System Dynamics*. 7: 659-679.
- ISO 31000. 2009. *Risk Management – Risk Assessment Techniques*.
- Kim, Hyun Su. 2015. Small Agricultural Reservoir: It's Time to Take Care of Safety. *RRI Focus*. 45: 1-18.
- Kim, Jae Hwi, Song Sik Park, Hee Jin Kang, Kwon Seok Yang and Seong Jin Park 2018. Leakage Risk Analysis of Reservoir Embankment Using Unmanned Aerial Vehicle System, *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*. 18(1): 13-22.
- Kyunghyang Shinmun. 2013. Collapse of Reservoir Aged 49 Years, Commotion of Evacuation of 1,000 People.
- Namwonnews. 2018. Ibaekmyeon – Memorial Ceremony for Victims by Hyogi Reservoir Collapse.
- News1. 2018. Collapsed Boseong Reservoir with Safety Level 'B' – Inspection Nonsense.
- Newsis. 2016. Gyeongbuk-do: Focusing on Recovery of Heritage and Reservoirs Damaged by Gyeongju Earthquake.
- Newsis. 2017. 4 Reservoirs Cracked by Pohang Earthquake.
- Ohmynews. 2014. Yeongcheon-si, Having Ignoring Hazardous Signs.
- Shin, Eun Chul and Jong Keun Lee. 2012. Safety Management Improving Way of Small Agricultural Reservoir. *Journal of Korean Geosynthetic Society*. 11(3): 53-58.
- Song, Young Karb, Young Uk Kim, Kyoung Jun Kim, and Kyung Su Lee. 2016. Countermeasures on Safety Management of

- Decrepit Reservoir Based on the Comparative Analysis for Its Collapse Accidents. *Crisisonomy*. 12(7): 15-23.
- USCSB. 2017. Key Lessons from the ExxonMobil Baton Rouge Refinery Isobutane Release and Fire. *CSB Safety Bulletin*.
- Yeonjunews. 2013. Controversy over Collapse Causes of Okchon Reservoir.
- Yim, Byeong Yul 2015. Gudeok Reservoir Part: Learning History of Our Community, Seodaeshin4-dong. *Naver Blog*.
- Yonhapnews. 2013. Two Reservoirs' Breaching in Yeosu and Icheon - Not Enough Safety Measures.
- Korean References Translated from the English*
- 김재휘, 박성식, 강희진, 양권석, 박성진, 김용성. 2018. 무인항공사 시스템을 활용한 저수지 제체 누수위험 분석. 한국방재학회논문집. 18(1): 13-22.
- 김현수. 2015. 농업용 중소규모 저수지! 건전성 확보를 위한 세심한 관심이 필요한 때..., *RRI 포커스*. 45: 1-17.
- 송영갑, 김영욱, 김경준, 이경수. 2016. 노후 저수지 붕괴사례 분석을 통한 안전관리 방안. *Crisisonomy*. 12(7): 15-23.
- 신은철, 이종근. 2012. 소규모 농업용 저수지의 안전관리 개선 방향, 한국토목섬유학회논문집. 11(3): 53-58.
- 임병률. 2015. 서대신4동 우리동네 역사 알기 구덕수원지 [九德水源地] 편, 2015.9.6. 네이버 블로그.
- 최병한, 류지협, 이백. 2017. USN 기반 저수지(필댐) 붕괴 예보 기준 연구. 한국방재학회논문집. 17(2): 145-153.
- 최현수. 2009. 저수지 붕괴 시 홍수 분석에 관한 연구 동향. 한국관계배수. 16(1): 30-33.
- 경향신문. 2013. 49년 된 저수지 뚫 붕괴... 1000여명 대피소동. 2013.04.12.
- 남원뉴스. 2018. 이백면, 효기저수지 붕괴 희생자 추모 위령제. 2018.07.15.
- 뉴스1. 2018. 보성저수지 안전 'B급' 받고도 붕괴... 점검 '엇터리'. 2018.07.02.
- 뉴스시스. 2016. 경북도, 경주 강진 피해 문화재 및 저수지 복구 집중. 2016.09.16.
- 뉴스시스. 2017. 포항 '지진여파' 저수지 4곳 부분균열... 농어촌 공사 긴급복구 나서. 2017.11.18.
- 여주신문. 2013. 옥촌저수지 붕괴 원인 논란. 2013.08.12.
- 연합뉴스. 2013. 여주·이천 노후저수지 2곳 뚫 유실... "안전조치 미흡". 2013.07.23.
- 오마이뉴스. 2014. "위험하다" 지적 무시하던 영천시, 저수지 무너지자... 2014.10.02.

Received: Sep. 21, 2018 / Revised: Nov. 12, 2018 / Accepted: Nov. 14, 2018

복합재난접근법에 의한 저수지 붕괴 리스크 분석

국문초록 본 연구에서는 올해 일어난 모원저수지 붕괴사고(2018) 원인을 복합재난접근법을 통하여 추정하였다. 모원저수지 붕괴사고(2018)는 하도 변화, 저수면적 변화, 토지피복 변화, 강수량 변화에 따른 다양한 위험에 의한 것으로 추정되었다. 한국농어촌공사가 관리하는 전국 3,186개소 저수지에 대해서 복합재난접근법을 통하여 저수지 붕괴 리스크를 분석하였다. 저수지 붕괴로 인한 발생결과는 저수용량에 비례하는 것으로 가정하여 5단계로 등급화하였다. 저수지 붕괴 발생가능성은 저수지 안전점검 등급, 강수량 변화, 지진규모 변화, 토지피복 변화, 산불면적으로 인한 위험을 고려하여 점수 산정 후 5단계로 등급화하였다. 발생가능성과 발생결과로 이루어지는 리스크 매트릭스를 활용하여 리스크를 계산하였다. 시군구별로 저수지 붕괴 리스크를 집계하여 리스크가 큰 시군구를 식별하였다. 나주, 영암, 경주의 저수지 붕괴 리스크가 큰 것으로 나타났다.

주제어 : 저수지, 복합재난, 리스크, 발생가능성, 발생결과, 붕괴

Profiles **Young Kyu Lee** : He received his B.A., M.A., and Ph.D. from Chungbuk National University, Korea in 2010. He is a researcher of the FILK(Fire Insurers Laboratories of Korea) affiliated with KFPA(Korean Fire Protection Association). His interesting subjects and areas of research are natural hazard management, multi-hazard approach, and disaster insurance. Please contact him via e-mail(youngQLee@kfpa.or.kr).