

연속호우사상기반의 댐 붕괴 시나리오에 따른 최적대피소 선정에 관한 연구

김경훈^{ID*} · 임종훈^{ID**} · 김형수^{ID***} · 신성철^{ID****}

Kim, Kyunghun^{ID*}, Lim, Jonghun^{ID**}, Kim, Hung Soo^{ID***}, Shin, Soeng Cheol^{ID****}

A Study on Selection of Optimal Shelters according to Dam Break Scenario Based on Continuous Rainfall Event

ABSTRACT

There is a growing demand for the stability of existing dams due to abnormal climate and the aging of dams. Emergency Action Plans (EAPs) for reservoir or dam failure only consider a single rainfall event. Therefore, this study simulates dam failure caused by continuous rainfall events, and proposes the establishment of EAP by selecting the optimal shelters. We define a mega rainfall event scenario caused by continuous rainfall events with 500-year frequency in the Chungju Dam watershed and estimate the mega flood. The mega flood event scenario is divided into two cases: scenario A represents the flooding case caused by discharge release from a dam, while scenario B is the case of a dam break. As a result of flood inundation analysis, the flooded damage area by the scenario A is 50.06 km² and the area by the scenario B is 6.1 times of scenario A (307.45 km²). We select optimal shelters for each administrative region in the city of Chungju, which has the highest inundation rate in the urban area. Seven shelter evaluation indicators from domestic and foreign shelter selection criteria are chosen, and Analytical Hierarchy Process (AHP) method is used to evaluate the alternatives. As a result of the optimal shelter selection, the six shelters are selected and five are schools. This study considers continuous rainfall events for inundation analysis and selection of optimal shelters. Also, the results of this study could be used as a reference for establishment of the EAP.

Keywords : Emergency Action Plan (EAP), Continuous rainfalls, Dam break, Optimal shelter

초록

이상기후와 댐 시설의 노후화로 인해 댐에 대한 위험관리 요구가 증대되고 있다. 하지만 저수지·댐 등의 붕괴에 따른 비상대처계획에서는 단일 호우사상에 의해 댐 붕괴가 발생한 경우만을 다루고 있다. 이에 본 연구에서는 연속호우사상으로 인한 댐 하류부의 피해 발생 상황을 모의하고, 각각의 상황에 대한 최적 대피소를 선정하여 저수지·댐 등의 붕괴에 따른 비상대처계획 수립 방안을 제시하였다. 충주댐 유역을 대상으로 500년 빈도의 확률강우량이 연속적으로 발생하는 거대강우 시나리오를 정의하고, 이로 인해서 발생하는 거대홍수량을 산정하였다. 거대강우 시나리오가 충주댐에 발생하였을 때 무피해방류량 이상의 방류로 인해서 하류부에 침수피해가 발생하는 경우 (시나리오 A)와 댐 붕괴가 발생하는 경우 (시나리오 B)로 나누어 하류부에 발생하는 피해를 분석하였다. 2개의 시나리오에 따른 침수피해를 분석한 결과, 시나리오 A에서의 침수면적은 50.06 km²이며, 시나리오 B에서의 침수면적은 약 6.1배 큰 307.45 km²로 나타났다. 침수피해가 발생한 하류부 지역 중 시가화 지역의

* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (INHA University · tgb611@naver.com)

** 김포시청 주무관 (GIMPO City Hall · ljh9252@naver.com)

*** 중신회원 · 인하대학교 토목공학과 정교수 (INHA University · sookim@inha.ac.kr)

**** 교신저자 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (Corresponding Author · INHA University · fe982@hanmail.net)

Received June 9, 2023/ revised June 23, 2023/ accepted July 1, 2023

비율이 높은 충주시를 대상으로 행정구역별 최적 대피소를 선정하였다. 국내의 대피소 선정기준들을 이용하여 7가지 대피소 평가지표들을 설정하였으며, 계층화(Analytic Hierarchy Process, AHP) 기법을 활용하여 대피소 대안들을 평가하였다. 각 시나리오별로 최적 대피소를 선정한 결과, 선정된 6개의 최적 대피소 중에서 5곳이 학교로 선정되었다. 본 연구에서는 기존의 비상대처계획에서 고려되지 않았던 연속호우 사상에 의한 상황을 추가적으로 고려하였으며, 본 연구의 결과는 추후 비상대처계획 수립 시 참고 자료로 활용될 수 있을 것이라고 판단된다.

검색어 : 비상대처계획, 연속호우사상, 댐 붕괴, 최적 대피소

1. 서론

이상기후로 인해 극한강우사상의 발생빈도가 전 세계적으로 증가하고 있다. 2022년 이상기후 보고서(Korea Meteorological Administration, 2023)에 따르면, 파키스탄에서는 역사상 가장 심각한 대홍수가 발생하여 1,739명 사망, 12,867명 부상 등의 인명 피해와 15억 달러 이상의 경제적 피해가 발생하였다. 또한 중국에서는 중·남부지역에 극한강우가 발생하여 도시 곳곳이 침수되고 산사태가 발생하여 약 200만명의 이재민이 발생하였다. 우리나라에서도 2022년 8월 초에 서울 남부지역을 중심으로 시간당 100 mm가 넘는 극한강우사상이 발생하였고, 하천 범람으로 인해 지하철역과 도로 등이 침수되어 많은 재산 및 인명 피해가 발생하였다. 이러한 전세계적인 극한강우사상의 증가는 국내의 댐 노후화 문제와 합쳐져 댐의 안전성에 대한 우려를 증가시키고 있다. 국토안전관리원에서 발간한 2021 시설물 통계연보(Kim, 2022)에 따르면, 준공 된지 30년 이상 된 댐은 389개소로 전체 댐의 60% 이상을 차지하고 있으며, 시설물 안전도 등급에서 오직 10개 댐만이 A등급을 받았다. 실제 2002년 태풍 루사가 상륙하였을 때, 극한강우사상에 의해서 장원저수지와 동막저수지가 붕괴되었으며, 2014년에는 괴연저수지, 2018년에는 모원저수지가 집중호우에 의해서 붕괴되었다. 따라서 붕괴 가능성이 있는 댐에 대한 위험관리 및 비상대처계획(Emergency Action Plan, EAP) 수립의 중요성이 커지고 있다.

현재 국내에서는 「저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률 제3조(저수지·댐 관리자의 책무)」, 「자연재해대책법 제37조(각종 시설물 등의 비상대처계획 수립)」 등에 근거하여 저수지·댐 붕괴 등에 대한 EAP를 수립하고 있다. EAP에서는 설계빈도 이상의 극한강우 조건에서 발생한 강우 또는 지진에 의하여 저수지·댐 등이 붕괴되는 경우에 대해서만 계획이 수립되고 있다. 그러나 최근 단일 호우사상에 인한 침수 피해뿐만 아니라 연속호우사상으로 인한 침수피해가 증가하고 있다. 국내에 막대한 침수피해를 발생시킨 연속호우 사례로는 2019년 태풍 ‘링링’, ‘타파’, ‘미탁’, 2020년 태풍 ‘미이삭’, ‘하이선’ 등이 있다. 연속호우사상에서 선행 호우는 토양의 수분함량을 증가시켜 이어서 발생하는 호우사상의

유효우량을 증가시킨다. 유효우량의 증가는 직접유출량의 증가로 이어져 무강우기간 이후에 내리는 단일 집중호우보다 더 큰 피해를 초래할 수 있다. 특히 수문이 없어 인위적으로 방류량을 조절할 수 없는 자연유통형댐이나 방류능력이 부족한 댐에 연속호우사상이 발생할 경우, 초기 호우로 인해 수위가 상당히 높아진 상태에서 연이어 발생하는 호우사상으로 인해 댐 월류가 발생하게 되어 댐 붕괴 위험성이 증가된다. 홍수조절이 가능한 댐의 경우에도 무피해방류량(댐하류 지점에서 피해가 발생하지 않도록 계획홍수량보다 낮게 댐에서 방류하는 물의 양)(Kwon and Shim, 1997)이상의 방류를 통해 하류부에 침수피해를 발생시킬 수 있다. 2022년 합천댐에 발생한 연속호우사상에 의해서 합천댐의 방류량이 급격하게 증가되었고, 이로 인해 합천군 울곡면, 쌍책면 등에 침수피해가 발생하였다. EAP 내 대피소 선정 시에 대상지역의 과거 재난이력(최근 10년간 이재민수, 재해발생빈도, 침수흔적 상황)을 검토하여 학교, 관공서 등의 공공기관을 우선적으로 대피소로 선정하고 있다. 그러나 대피소 선정 시에 해당 공간의 입지나 규모 등의 여러 특성들을 고려하지 않고 있으며, 행동요령 관련 법규 등이 불확실한 실정이다(Kwon et al., 2015). 즉, 대피소의 여러 특성을 반영하면서 누구나 동일한 결과를 도출할 수 있는 정량적인 대피소 선정 방법론이 부재한 상황이다.

댐 붕괴와 관련된 연구는 Fread(1988) 이후 여러 연구자들(Wetmore and Fread, 1981; Bozkus and Kasap, 1998; Zhou et al., 2004; Shakibaenia and Yee, 2011; Marsooli and Wu, 2014; Munoz and Constantinescu, 2020)에 의해서 댐 붕괴를 모의할 수 있는 모형 개발과 관련된 연구가 꾸준히 수행되고 있으며, 이를 통해 DAMBRK, BREACH, SMPDBK, FLDWAV 등 여러 댐 붕괴 모의 모형들이 개발되었다. 이외에도 댐 붕괴 규모 및 붕괴시간을 예측(MacDonald and Langridge-Monopolis, 1984; Bathurst and Ashiq, 1998; Fagherazzi et al., 2004; LaRocque et al., 2013; Li et al., 2020)하거나, 댐 붕괴로 인해서 하류부에 발생하는 피해 양상을 분석(Lodhi and Agrawal, 2012; Soleymani et al., 2015; Day, 2016; Azeez et al., 2020; Bilali et al., 2022)하는 연구 등이 진행되었다. 재난에 대한 대피소 연구로는 대피소 선정을 위한 세부지표 선정 및 각 지표간의 관계를 분석하는 연구

(Choi et al., 2012; Nappi and Souza, 2015; Trivedi, 2018; Han, 2019), 선정된 평가지표들을 이용하여 최적의 대피소를 선정하는 모형을 개발하는 연구(Nappi et al., 2019; Ma et al., 2019; Song et al., 2019; Kim et al., 2020a; Senik and Uzun, 2021; Lee et al., 2022), 기존 연구에서 고려하지 않았던 이동속도, 도로망, 대피시간 등을 고려하여 대피소 선정에 관한 연구(Sanyal and Lu, 2009; Chang and Kim, 2014; Choi et al., 2019; Alam et al., 2021)가 진행되었다. 하지만 이전 연구들에서도 연속호우사상에 의한 댐 붕괴 및 대피소 선정에 관한 연구는 진행되지 않았다.

이에 본 연구에서는 연속호우사상에 의해 발생할 수 있는 댐 붕괴 및 무피해방류량 이상의 방류에 의해 하류부에 침수피해가 발생하는 상황들을 모의하였다. 이를 위해 연속호우기반의 거대강우 시나리오를 정의하고, 시간단위 연속호우기반의 강우-유출 모형을 이용하여 거대홍수량을 산정하였다. 산정된 거대홍수량과 방류 기준곡선을 통해 댐 붕괴시의 최대수위 및 침투방류량을 산정하였고, 댐 붕괴 및 방류에 의한 침수피해 시나리오들을 정의하였다. 각 시나리오에 따른 하류부의 침수피해를 행정구역별로 산정하였으며, 토지피복도에 따른 피해면적을 분류하여 비교·분석하였다. 각 시나리오에 따른 행정구역별 최적 대피소를 선정하기 위해 국내·외에서 활용하고 있는 대피소 평가지표들을 조사하였고, 공통적으로 활용하고 있는 지표들을 대피소 세부평가지표로 선정하였다. 선정된 평가지표와 계층화 분석 방법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 활용하여 대피소 대안들을 평가하여 최적 대피소를 선정하였다.

2. 연구방법

2.1 연속호우사상 기반 거대강우 시나리오 및 거대홍수량

거대강우사상은 확률적으로 발생할 가능성이 매우 낮으나, 물리적으로는 발생할 수도 있는 초대형 강우사상을 의미한다. 이러한 거대강우사상으로 인해 발생하는 유출량을 거대홍수량이라고 한다(Kim et al., 2020b). 기후변화 대비 수자원적응기술 개발연구단(Climate Change Adaptation for Water resources, CCAW)에서는 3가지 종류의 거대강우 시나리오를 제시하였으며, 그 중에 하나가 연속호우사상 발생에 의한 경우이다. 연속호우사상 발생에 의한 거대강우 시나리오는 대상지역의 확률강우량을 최소무강우시간(Inter-Event Time based Definition, IETD) 간격을 사이에 두고 연속적으로 발생시킴으로서 생성할 수 있다. 확률강우량은 2019년 환경부에서 발간한 「홍수량 산정 표준지침(Bae et al., 2019)」에서 제시한 절차를 통해서 산정할 수 있으며, 최소무강우시간은 여러 IETD 산정 방법론 중에서 변동계수분석(Coefficient of Variation analysis, CV analysis)을 활용하여 산정할 수 있다.

CV분석은 강우사상 사이의 무강우기간들이 지수(Exponential) 분포를 따른다는 가정하에 변동계수가 1이 되는 지체시간을 IETD로 결정 한다(Bedient and Huber, 1988). CV분석 이외에 IETD를 산정하기 위해서 많이 활용되는 자기상관분석 및 연평균 강우발생 개수분석에 경우에는 연구자 개인의 판단에 크게 영향을 받으며, 사용된 강우사상의 수나 기간에 따라 산정된 IETD가 상이하게 나타나는 경우가 빈번하다(Joo et al., 2007; Lee and Chung, 2017).

연속호우사상 기반의 거대강우 시나리오에 의해 발생하는 거대홍수량을 산정하기 위해서는 연속호우 사상을 모의할 수 있는 강우-유출 모형이 필요하다. 본 연구에서는 Kim(2018)이 개발한 연속호우사상 기반의 시간단위 강우-유출 모형인 Consecutive Storm Event Based(ConSEB) 모형을 이용하여 거대홍수량을 산정하였다. ConSEB 모형은 기존 강우-유출 모형들이 가지는 문제점을 해결하고자 IETD와 시간단위 증발산량을 활용하였으며, 이를 통해 연속호우 사상에 의한 유출량을 산정하는데 있어서 우수한 결과를 보여주었다(Kim, 2018). 하지만 도달시간(Time of Concentration, T_c)과 저류상수(Storage coefficient, K)를 산정하기 위해서 ConSEB 모형에서 활용하고 있는 Sabol 공식은 형상인자(Shape factor)가 작아질수록 T_c/K 가 매우 작아지는 경향이 있으며, 홍수량이 매우 작게 산정되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 Jeong(2006)은 형상인자가 0.2이하인 경우에도 활용될 수 있는 수정된 Sabol 공식을 제시하였다(Eq. (1)).

$$\frac{T_c}{K} = \frac{97.28}{\left(\frac{L^2}{A}\right)^{2.88} + 128.19} + 0.59 \quad (1)$$

여기서 K 는 저류상수(hr), T_c 는 도달시간(hr), L 은 유로연장(km), A 는 유역면적(km²), $\frac{L^2}{A}$ 는 형상인자의 역수이다.

본 연구에서 지정한 대상유역의 경우, 세 개의 중권역 모두 형상인자가 0.2보다 작으며, 중권역에 속한 12개 소유역의 형상인자가 0.2보다 작기 때문에 수정된 Sabol 공식을 사용하여 ConSEB 모형을 수정하였다.

2.2 Simplified Dam Break 모형을 이용한 댐 붕괴 모의

과거부터 현재까지 댐 붕괴 상황을 모의하기 위해서 다양한 모형들이 개발되었다. 댐 붕괴 모형으로는 Fread(1984)가 제시한 Dam Break(DAMBRK) 모형부터, BREACH 모형, FLDWAV 모형, Simplified Dam Break(SMPDBK) 모형 등 다양하게 존재하며, Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System(HEC-HMS)의 저수지의 Outflow structure 추적방법 그리고 River Analysis System(HEC-RAS)의 Inline Structure

Item	Value	Units
Dam name:		
River name:		
Dam type:	Earth dam	
Elevation of water when dam breaches:	100.0	ft-msl
Elevation of breach bottom:	0.0	ft-msl
Volume of the reservoir:	1000.0	ac-ft
Surface area of the reservoir at dam crest:	100.0	acres
Width of rectangular breach:	250.0	ft
Time for breach to develop:	120.0	minutes
Non-breach flow (includes outlet, spillway, and overtopping):	10000.0	cfs
Dead storage equivalent Manning's N:	0.5	
Number of cross sections:	0	
Distance to primary point of interest:	20.0	miles
Define maximum cross section depth:	<input type="checkbox"/> Define	
Maximum cross section depth:	200.0	ft

Fig. 1. Input Parameters of SMPDBK Model

editor 등을 이용하여 댐 붕괴를 모의할 수 있다. 이 중에서 SMPDBK 모형은 1981년 Wetmore에 의해서 개발된 댐 붕괴 모형으로 댐 붕괴와 관련된 다양한 수식들과 무차원 그래프를 이용하여 짧은 시간 안에 댐 붕괴시의 침투홍수파의 수위 및 홍수량과 도달시간을 산정할 수 있다. SMPDBK 모형은 하천중심선 및 단면도, 댐제원, 댐 붕괴부 너비, 붕괴부형태, 붕괴시간 등의 기본적인 자료들만으로 댐 붕괴 모의가 가능하며, 이는 다른 모형들에 비해서 적은 양의 입력 자료를 필요로 한다는 장점을 가지고 있다. SMPDBK 모형의 댐 붕괴 모의 과정은 3단계로 구성되어 있다. 첫 번째 단계는 댐 하류의 하천 수로를 균일 수로(Prismatic channel)로 정의하는 것이다. 두 번째는 댐의 용량과 붕괴의 시간적, 기하학적 특성을 고려한 댐 붕괴 시에 발생하는 유출량을 산정하는 것이고, 마지막으로 무차원 추적그래프(Routing curve)의 매개변수들을 추정하고 이를 기반으로 하류부의 침투홍수량과 침투홍수량 발생시간을 산정한다. 이를 통해서 적은 양의 입력자료(댐 제원, 하류부 하천단면도, 붕괴 평균폭, 붕괴지속시간, 최종 바닥부 바닥 높이 등)와 짧은 시간안에 댐 붕괴를 모의할 수 있으며(Fig. 1) 다른 댐 붕괴 모형과의 모의 결과 비교에 있어서도 유사한 값을 주고 있다(Wetmore and Fread, 1981). 이러한 장점을 가지고 있는 SMPDBK 모형은 여러 연구자들에 의해서 댐 붕괴를 모의하기 위해서 활용되고 있다(Paquier and Robin, 1997; Han et al., 1998; Reed and Halgre, 2011; Shahraki et al., 2012; Mahmoud et al., 2022). 본 연구에서는 댐 붕괴 모의를 위한 기본적인 자료(댐 제원 및 하류부 하천단면도 등)만 수집이 가능하였기 때문에 이들 자료만으로도 댐 붕괴 모의가 가능한 SMPDBK 모형을 활용하였다.

2.3 인명 피해를 막기 위한 최적 대피소 선정

각 국가에서는 재난에 의한 인명피해를 최소화하기 위해서 대피소를 선정하고 있다. 국내 풍수해 대피소 선정은 재해구호법 제4조 제1항에 근거하여 시장, 군수, 구청장에 의해 이루어지고 있다.

구체적인 대피소 선정 기준은 재해구호계획 수립 지침과 재해지도 작성 기준 등에 관한 지침에서 제시한 기준(Disaster Relief division, 2021)을 바탕으로 하고 있다. 지침들에서는 대피지역 내 도로로 이동 가능한 장소들을 대피소로 선정하는 것을 원칙으로 하며, 침수구역, 침수위, 이용가능면적, 등을 고려하여 대피소를 선정한다. 미국은 American Red Cross에서 제시한 Standards for Hurricane Evacuation Shelter Selection; ARC4496, American Red Cross(2002)를 대피소 선정 기준으로서 활용하고 있다. 홍수 대피소의 경우, 100년 빈도 홍수예상지역 외측에 대피소를 선정하며 500년 빈도 홍수예상지역내에 대피소를 선정하는 것을 피할 것을 권고하고 있다. 또한 침수지점과 대피소와의 거리를 고려하여 침수로 고립될 가능성이 있는 지역은 대피소 선정에서 제외시킨다. 일본은 재해대책기본법에서 나온 대피소 및 운영 지침(Tokyo Metropolitan Government, 2013)에서 제시한 기준을 바탕으로 대피소를 선정하고 있다. 일본은 대피하는 사람 및 각 시설의 특성에 따라 1차부터 3차까지 대피소를 분류하고 있으며, 각 대피소별로 다른 선정 기준을 가지고 있다(Sakai and Lukner, 2013). 마지막으로 영국에서는 Evacuation and Shelter Guidance(HM Government, 2014)를 통해 대피소를 선정하고 있다. 영국은 단기대피의 경우 특정 건물을 지정하지 않고 현재장소에서의 고층, 고가도로 등의 안전지역으로 이동할 것을 권장하고 있으며, 중-장기간 대피의 경우는 대피자의 원거주시설과 가까운 곳을 대피소로 선정하도록 하고 있다(Weame, 2007). 여러 국가의 대피소 선정 기준을 살펴본 결과, 세부적인 선정 기준에서 다소 차이를 보이고 있으나 결국 대피소의 수용규모, 대피소의 입지조건을 고려하여 되도록 공공시설물을 대피소로 선정하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 각 국의 대피소 선정 기준들을 통해서 대피소 대안들을 평가하기 위한 3개의 대분류평가지표와 7개의 세부평가지표를 선정하였다(Table 1).

대피소 대안들을 정량적으로 평가하기 위하여 각 대안들의 평가지표 데이터를 구축하여야 한다. 하지만 평가지표의 데이터 값의 경우 각각의 통계단위가 달라 직접적인 비교분석이 불가능하

Table 1. Optimal Shelter Evaluation Indicators

General	Specific Evaluation Indicators
Scale accommodation	Adequate accommodation of evacuees
	Height of shelter building
Geographical conditions	Ease of access from evacuation route
	Distance of shelter from stream/river
	Time taken to evacuate to shelter
Type	Public building
	Private institutions

다. 이를 위하여 단위가 없는 무차원 값으로 표준화하여 상대적인 크기를 비교할 필요가 있으며, 평가지표들을 표준화하는 방법은 여러 종류가 있다. 그 중에서 스케일 재조정(re-scaling) 방법은 지표의 최댓값과 최솟값을 이용하는 방법으로 어떤 변수에서 한 값인 X가 있을 때 X에서 변수의 최솟값을 빼고 이를 다시 변수내의 최대값에 최솟값을 뺀 값으로 나누어 산정하는 방법이다 (Eq. (2)). 스케일 재조정 방법은 음수 값이 발생하지 않고, 해당 값의 수준을 직관적으로 파악하기에 용이하다. 따라서 본 연구에서는 세부평가지표 데이터를 표준화하기 위해 스케일 재조정 방법을 적용하였다.

$$\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

여기서 x 는 평가지표의 값이며, x_{\min} 과 x_{\max} 는 평가지표의 최솟값 및 최댓값을 의미한다.

각 세부평가 지표별로 표준화된 점수들을 하나의 점수로 만들기 위해서는 가중치 산정이 필요하다. 본 연구에서는 계층화(Analytic Hierarchy Process, AHP) 분석방법을 이용하여 각 세부평가 지표 별 가중치를 산정하고 각 대피소 대안들을 평가하였다. AHP 방법은 Satty(1987)에 의해 개발된 이후 다기준 의사결정에 널리 사용되는 분석기법으로 설문조사를 통해 계층적으로 구조화된 요소의 상대적 중요도(혹은 가중치)를 평가하는데 적합하다(Yoon et al., 2016) AHP 분석은 Fig. 2와 같이 4단계로 구성되어 있다.

첫 번째는 선정된 세부평가지표들을 동질적인 집합으로 군집화하여 배열하는 계층구조를 만드는 것이다(Cho et al., 2003). 앞서 선정한 7개의 세부평가지표에 대해서 대피소의 수용규모, 대피소의 입지조건, 대피소의 공공시설여부 등 3가지 대분류평가지표에 맞게 분류하여 Table 1과 같이 계층화된 구조를 만들 수 있다. 두 번째는

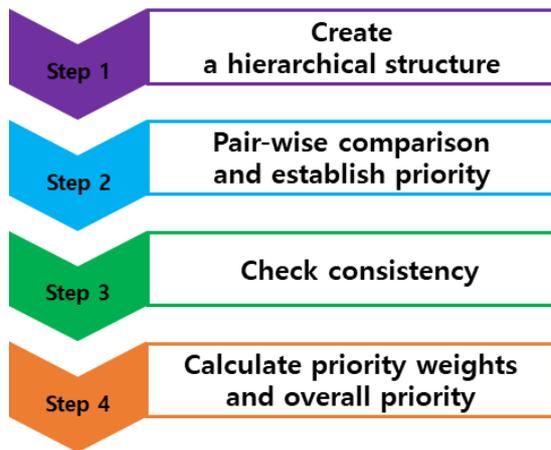


Fig. 2. Procedure of AHP Analysis

Table 2. AHP Pairwise Comparison Scale

Intensity of weight	Definition
1	Equal importance
3	Weak/moderate importance of one over another
5	Essential or strong importance
7	Very strong or demonstrated importance
9	Absolute importance
2, 4, 6, 8	Intermediate value between the two adjacent scale values

계층화된 요소들에 대해 설문조사를 통한 쌍대비교를 하여 상대적 중요도를 산정하는 것이다. 본 연구에서는 각 대분류 및 같은 대분류에 속한 세부평가지표끼리 쌍대비교에 관한 설문조사를 실시하였다. 쌍대비교를 위해 각 지표간의 상대적 중요도를 판단하는 척도로 Table 2와 같이 9점 척도를 사용하였으며, 쌍대비교를 하는 지표들 사이의 상대적 중요도가 비슷하고 판단되면 1점, 어느 한 지표가 다른 지표에 비해 극히 중요하다고 판단되면 9점을 부여한다(Table 2).

쌍대 비교 시에 의사결정자는 본인의 경험과 지식을 바탕으로 판단하기 때문에, 일관성 있게 지표가 평가되었는지에 대한 검토가 필요하다. 일관성 검증을 위해서 일관성 지수(Consistency Index, CI)와 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)을 활용할 수 있다. 일관성 지수와 일관성 비율은 아래 공식(Eqs. (3) and (4))을 이용하여 산정할 수 있으며, 일관성 검증에서 일관성 비율이 0.1보다 작고 0에 가까운 값을 가질수록, 논리적으로 타당하다고 판단할 수 있다.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

$$CR = CI / RI \quad (4)$$

여기서 λ_{\max} 는 쌍대비교 행렬의 가장 큰 고유치를 의미하고, n 은 비교되는 세부지표의 수를 의미한다. RI 는 무작위 지수(Random Index)로 1부터 9사이의 난수를 사용해서 구성된 쌍대비교 행렬의 일관성 지수의 평균값으로서, 경험적 자료로부터 얻은 행렬의 차원 별 평균무작위 지수를 의미한다.

수자원 관련 전문가들을 대상으로 설문 조사를 시행하였고, 일관성 지수와 일관성비율을 산정하여 논리적으로 타당하다고 판단되는 설문 조사 결과만을 이용하여 각 지표의 가중치를 산정하였다. 마지막으로 여러 대안에 대한 종합순위를 얻기 위하여 각 세부평가 지표별로 정규화된 값에 AHP를 통해서 도출된 가중치를 곱하여 하나의 평가 지수를 산정한다. 산정된 평가 지수를 기반으로 우선순위를 도출하고, 최적의 대안을 선정하였다.

3. 대상지역 및 데이터 수집

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상지역으로 선정하였다(Fig. 3). 충주댐 유역은 3개의 중권역(충주댐, 평창강, 남한강상류 유역)으로 구성되어 있으며, 총 면적은 6,648 km²이다. 충주댐유역 하류에 위치한 충주댐은 1986년에 완공되었으며, 연간 용수공급량 3,380백만m³, 홍수조절용량 616백만m³, 연간 844 Gwh의 전력을 생산, 공급하고 있다. 충주댐은 국내 최대 콘크리트 중력식 댐으로 2003년 4월 감사원 자연재해대비 실태감사에서 댐 안전성 확보가 미흡하다는 진단을 받았으며, 기후변화에 따른 극한홍수에 대한 댐의 안전성을 확보하고자 2013년 충주댐 치수능력 증대 기본계획을 수립하고, 2024년까지 터널식 보조여수로를 설치하는 것을 목표로 공사가 진행되고 있다.

연속호우기반의 거대강우 시나리오를 생성하기 위해서 충주댐 유역 내외에 위치한 기상청 관할 8개 관측소(대관령(100), 강릉(105), 원주(114), 충주(127), 태백(216), 제천(221), 봉화(271), 영주(272))를 선정하여 시단위 강우량 자료를 구축하였다. ConSEB 모형을 이용하여 거대홍수량을 산정하기 위해서 국토교통부에서 운영하고 있는 국가공간정보포털 오픈마켓에서 제공하는 충주댐 유역의 Digital Elevation Model(DEM), 토양도, 토지피복도 자료를 수집하였으며, 한강홍수통제소 및 K-Water에서 운영하고 있는 물정보포털에서 제공하는 영월군(팔괴교), 영월군(영월대교), 충주댐 유입량자료를 이용하여 산정된 매개변수의 적절성을 검증하였다. 마지막으로 충주댐의 붕괴를 모의하기 위한 SMPDBK의 입력자료를 구축하기 위하여, 물정보포털 및 충주댐 관련 보고서를 통해 충주댐 제원을 수집하였으며, 하천관리지리정보시스템(RIMGIS)에서 제공하는 충주댐 하류부의 하천단면도 자료를 수집하였다(Wonju Regional Environment Office, 2004). 또한 SMPDBK의 댐 붕괴와 관련된 매개변수를 위해서 미공병단

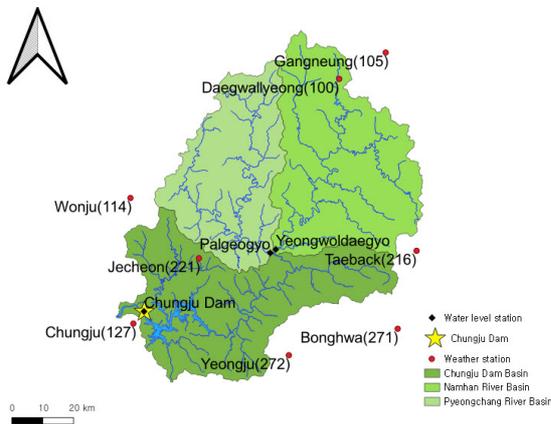


Fig. 3. Chungju Dam Watershed

(US Army Corps of Engineers, USACE), 연방 에너지 규제 위원회(Federal Energy Regulatory Commission, FERC), 미기상청(National Weather Service, NWS)에서 제시한 댐 붕괴 평균폭, 붕괴지속시간, 최종 붕괴부 바닥 높이에 관한 자료를 수집하였다.

4. 적용 및 분석

4.1 연속호우사상 기반 거대강우 생성 및 거대홍수량 산정

연속호우기반의 거대강우 시나리오 생성절차를 통해서 충주댐 유역의 500년 빈도 확률강우량이 연속적으로 발생하는 500년 빈도의 거대강우 시나리오를 생성하였다. 확률강우량 산정 시에 지속시간의 경우에는 48시간으로 설정하였다. 이는 기존 충주댐 관련 보고서들에서 충주댐의 홍수조절능력을 평가할 때, 임계지속시간을 고려한 지속시간을 48시간으로 설정하였기 때문이다(Lee et al., 2017; Wonju Regional Environment Office, 2004). 먼저 「홍수량 산정 표준지침」에서 제시한 확률강우량 산정방법을 이용하여 8개 관측소의 지속시간-빈도별 확률강우량을 산정하였다. 산정된 지점별 확률강우량 값에 대해서 Thiessen 방법과 면적우량환산계수(Areal Reduction Factor, ARF)를 적용하여 면적평균 확률강우량을 산정하였다(520.7 mm/48 hr). 다음으로 확률강우량 사이의 무강우 지속 기간을 설정하기 위해서 충주댐 유역의 IETD를 산정하였다. 8개 관측소의 시단위 강우량 자료를 기반으로 CV분석을 수행하여 각 관측소별 IETD를 산정하였다(대관령(100): 11 hr, 강릉(105): 11 hr, 원주(114): 13 hr, 충주(127): 15 hr, 태백(216): 12 hr, 제천(221): 15 hr, 봉화(271): 16 hr, 영주(272): 15 hr). 8개 관측소의 IETD 값 중에서 가장 작은 값인 11시간을 충주댐 유역의 IETD로 결정하였다. 산정된 면적평균 확률 강우량과 IETD를 기반으로 500년 빈도 면적평균 확률 강우량을 11시간 무강우 시간 간격을 두고 연속적으로 발생시켜 500년 빈도의 거대강우 시나리오를 생성하였다. 생성된 거대강우 시나리오의 비교치로 활용하기 위해서 「전국 PMP도 제작성 보고서(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2004)」에서 제시한 PMP 산정 절차를 통해서 충주댐 유역의 PMP를 산정하였다. PMP 산정할 때 지속시간은 동일하게 48시간으로 설정하였으며, PMP는 661.74 mm로 산정되었다. 산정된 PMP와 거대강우 시나리오의 누적강수량과 비교한 결과, 두 번째 확률강우량에서 누적강수량이 PMP보다 커지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4).

충주댐 유역에 대한 ConSEB 모형을 구축하기 위해서 Geographic Information System(GIS)를 이용하여 소유역을 분할하였으며, 각 소유별로 면적, 하도의 길이, 하도의 경사를 산정하였다. 또한 해당유역의 DEM, 토양도, 토지피복도 등을 이용하여 모형 입력자료 및 매개변수를 구축하였다. 구축한 모형의 매개변수

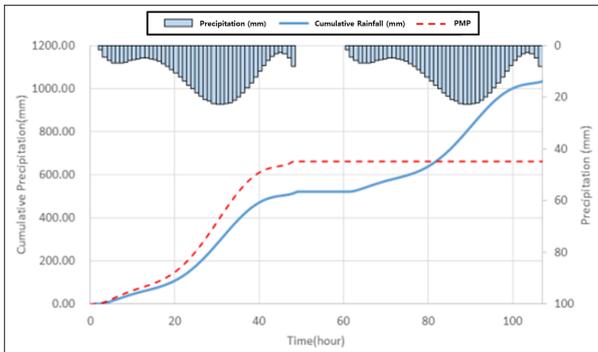


Fig. 4. 500-year Frequency Mega Rainfall Event Scenario of Chungju Dam Watershed

보정을 위해 2009년 07월 08일 00시부터 15일 23시에 해당하는 8개 기상관측소 강우자료를 활용하여 홍수량을 산정하였다. 산정된 홍수량을 Peak Difference(PDIFF), Percent Error in Peak(PEP), Normalized Root Mean Squared Error(NRMSE), Nash-Sutcliffe Efficiency(NSE) 등 4개의 통계지표를 이용하여 매개변수 보정 결과를 통계적으로 평가하였다. 매개변수가 보정된 ConSEB 모형을 검증하기 위해서 연속강우가 발생한 2011년 6월 21일 00시부터 27일 23시(검정사상 A)와 2016년 6월 30일부터 7월 8일 23시(검정사상 B)까지의 2개의 강우사상에 대해서 유출량을 산정하여 관측치와 비교·분석하였다. 우선 검정사상 A의 결과로서 팔괴교의 경우 실측 침투유출량과 모의침투유출량의 차이가 -11.4CMS로 가장 작았지만 Nash 계수가 영월대교 및 충주댐보다 낮은 0.817로 산정되었다. 충주댐에 대한 결과에서는 유출 발생시간 및 경향이 잘 맞았으며 Nash계수도 0.914로 높은 값이 산정되었다. 검정사상 B의 결과에서는 검정사상 A에 비해서 모형의 정확성이 다소 낮게 나타났다. 이렇게 나타난 이유는 검정사상 B에 경우 초기에 발생하였던 호우들이 모형에서는 유출로 나타났지만 실제로는 유출이 발생하지 않았기 때문이다. 하지만 유출구인 충주댐의 유입량과 비교한 결과에서는 Nash 계수가 0.827로서 유의미한 결과수준이 나타났으며, 침투값의 차이가 검정사상 A보다 작게 산정된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해서 모형이 유의미한 수준의 결과를 도출하는 것을 확인할 수 있었다(Table 3).

보정과 검증이 이루어진 ConSEB 모형에 500년 빈도 확률강우량, 500년 빈도의 거대강우 시나리오와 PMP를 강우자료로 입력하여 거대홍수량과 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, PMF)을 산정하였다(Table 4). 산정된 결과를 살펴보면, 500년 빈도 거대강우 시나리오에 의해서 발생한 침투홍수량이 PMP에 의해서 발생한 침투홍수량에 비해서 약 1.2배 더 크게 산정된 것을 볼 수 있다. 이 결과는 연속호우사상에 의해서 유출이 발생할 경우에 PMF보다 더 큰 침투홍수량이 발생할 수 있다는 가능성을

Table 3. Validation of the ConSEB Model

Validating Events		Validating observation site		
		Palgoogyo	Yeongwol daegyo	Chungju Dam
A	Observed peak discharge(CMS)	1719.8	2049.1	6017.9
	Simulated peak discharge(CMS)	1708.4	1991.0	5704.6
	PDIFF	-11.4	-58.1	-313.3
	PEP(%)	-0.661	-2.834	-5.206
	NRMSE(%)	13.993	10.369	8.704
	NSE	0.817	0.914	0.914
B	Observed peak discharge(CMS)	2600.9	2421.7	5329.2
	Simulated peak discharge(CMS)	2807.7	2503.9	5533.3
	PDIFF	206.7	82.2	204.1
	PEP(%)	7.949	3.393	3.830
	NRMSE(%)	14.939	16.556	10.712
	NSE	0.699	0.601	0.827

보여준다. 실제로 2002년 태풍 루사가 상륙하였을 때 강릉에 24시간 PMP보다 큰 일강수량이 관측되었으며, 장현저수지와 동막저수지가 붕괴되었다. 본 연구에서는 이러한 실제 사례를 기반으로 PMP보다 높은 침투홍수량을 발생시킨 500년 빈도의 거대강우 시나리오를 이용하여 댐 하류부에 피해를 발생시키는 2가지 가상 시나리오(무피해방류량 이상의 방류에 의한 시나리오/댐 붕괴에 의한 시나리오)를 정의하였다.

4.2 방류 및 댐 붕괴에 의한 시나리오 구성 및 침수범람도 해석

본 연구에서는 앞서 채택한 500년 빈도의 거대홍수로 인해 댐 붕괴는 발생하지 않지만 무피해방류량 이상의 지속적인 방류로 인하여 하류부의 침수피해를 유발하는 시나리오 A와 댐 붕괴가 일어나는 시나리오 B 등 2가지 가상 시나리오를 구성하였다. 구성한 가상 시나리오들의 적용 및 하류부의 침수해석을 위해서는 무피해방류량 이상의 방류량과 댐 붕괴 시 댐의 최고수위가 먼저 산정되어야 한다. 충주댐은 여수로 방류기준곡선(Spillway Rule Curve, SPC)에 의해서 방류량이 조절된다. 충주댐의 SPC는 Table 5와 같다. 홍수기시 댐으로부터의 방류는 평균 발전방류량을 포함하여 우선 200CMS로 제한하며, 댐 저수지 수위가 EL. 139.5 m에 도달하기 전까지 동일하게 유지된다. 댐 저수지 수위가 EL. 139.5 m를 초과하면 댐 수문의 부분 개방에 의하여 점차 방류량을 증가시키며, 수위가 EL. 144.5 m에 이르면 수문이 완전 개방된다. 댐의 초기

Table 4. Comparison of Peak Flood

Scenarios	Total precipitation (mm)	Peak discharge (cms)	Note
500yr	520.7	26245.85	
500yr-500yr	1041.4	31080.34	Select
PMF	661.7	29247.43	

수위는 제한수위인 EL. 138 m로 가장하였으며, 기상예보, 유입량 전망 등을 통해 수위를 미리 낮추는 운영은 고려하지 않았다. SPC를 이용하여 500년 빈도의 거대홍수량 발생 시 댐 유입량을 수위로 환산하였으며, 이를 그림으로 표현하면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 500년 빈도의 거대홍수량이 댐으로 유입되어 충주댐의 정상표고(EL. 147.5 m) 이상의 수위가 발생한 것으로 가정할 경우에 댐 월류가 발생하며, 월류를 고려한 침투방류량은 26,159.8 CMS로 산정되었다. 이때의 수위는 정상표고보다 약 2.5 m 높은 EL. 150 m에 도달하는 것으로 산정되었다. 거대홍수량에 따른 방류량과 수위를 산정한 결과는 Table 6과 같으며, 시나리오 A에서 사용되는 초기 댐의 침투방류값으로 26,159.8 CMS를 사용하였다. 이는 충주댐의 계획홍수위시 방류되는 양의 약 1.6배 이상에 해당한다.

본 연구에서는 시나리오 B에서 발생하는 댐 붕괴 상황을 모의하기 위해서 비교적 적은 매개변수를 통해 타당한 홍수량 산정이 가능한 SMPDBK 모형을 사용하였다. 시나리오 B에서 발생하는 댐 붕괴는 콘크리트 중력식 댐인 충주댐의 특성을 반영하여 노후화 및 연속호우사상에 의한 급격한 수위가 증가로 인한 댐체의 부분

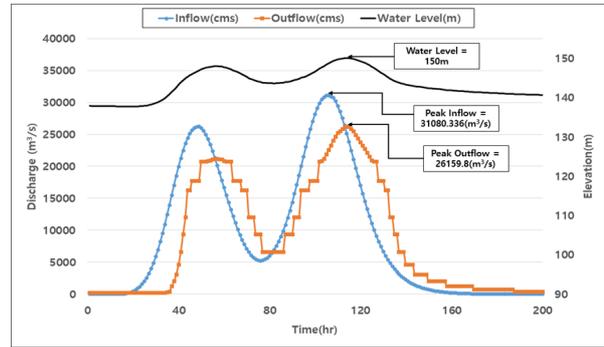


Fig. 5. Chungju Dam Water Level Curve according to Inflow and Outflow

콘크리트 블록이 미끄러져서 붕괴가 발생하는 것으로 설정하였다. 이러한 상황에 맞는 SMPDBK 모형의 매개변수를 설정하기 위해서 미공병단(USACE), 연방 에너지 규제 위원회(FERC), 미기상청(NWS)에서 제시한 매개변수를 참고하여 설정하였다(Table 7). 댐 붕괴 평균폭은 223.5 m(0.5×L), 붕괴지속시간은 10분, 댐붕괴 수위는 EL. 150 m, 최종 붕괴부 바닥높이는 EL. 50 m로 시나리오 B를 구성하였다.

각 시나리오에 따른 침수범람도 해석은 행정안전부에서 고시한 재해지도 작성 기준 등에 관한 지침에 제시한 홍수범람예상도 절차를 따라서 진행하였다(Fig. 6). 가장 먼저 적용 대상구간을 충주댐에서 북한강 합류전까지인 총 106.6 km 구간으로 설정하였다. 다음으로 수집된 하천단면도가 제내지까지 연결되어 있지 않기 때문에 GIS를 이용하여 제내지까지 하천단면을 확장하였다. SMPDBK의 결과로 나온 댐 붕괴 시 홍수량을 HEC-RAS에 적용

Table 5. Chungju Dam Discharge according to Water Level

Water level (EL.m)	Dam discharge (m³/s)	Remarks	Water level (EL.m)	Dam discharge (m³/s)	Remarks
138.0	200	Restricted water level	142.5	3,000	
139.0	200		143.0	4,600	
139.5	200		143.5	6,600	
140.0	250		144.0	9,300	
140.5	400		144.5	12,000	Full opening of dam gate
141.0	700	Normal high water level	145.0	16,200	Design flood level
141.5	1,200		146.0	17,700	
142.0	2,000		147.0	20,700	

※ Until water level reach to high water level (rainy season: EL. 138m, Non-rainy season: EL. 141m), there is no dam spillway discharge

Table 6. Inflow and Dam Discharge of Chungju Dam according to 500-year Frequency Mega Flood

Scenario	Duration (hr)	Total precipitation (mm)	Peak inflow (m³/s)	Peak flood (m³/s)	Maximum water level (EL.m)
500yr-500yr	48	1041.4	31080.336	26159.8	150.00

Table 7. Ranges of Possible Values for Breach Characteristics

Dam type	Average Breach Width	Horizontal Component of Breach Side Slope (H:V)	Failure Time (hours)	Agency
Earthen/Rockfill	$(0.52 \text{ to } 3.0) \times HD$	0 to 1.0	0.5 to 4.0	USACE 1980
	$(0.52 \text{ to } 3.0) \times HD$	0 to 1.0	0.1 to 1.0	FERC
	$(0.52 \text{ to } 3.0) \times HD$	0 to 1.0 (slightly larger)	0.1 to 1.0	NWS
	$(0.52 \text{ to } 3.0) \times HD$	0 to 1.0	0.1 to 4.0	USACE 2007
Concrete Gravity	Multiple Monoliths	Vertical	0.1 to 0.5	USACE 1980
	Usually $\leq 0.5L$	Vertical	0.1 to 0.3	FERC
	Usually $\leq 0.5L$	Vertical	0.1 to 0.2	NWS
	Multiple Monoliths	Vertical	0.1 to 0.5	USACE 2007
Concrete Arch	Entire Dam	Valley wall slope	≤ 0.1	USACE 1980
	Entire Dam	0 to Valley walls	≤ 0.1	FERC
	$(0.8 \times L)$ to L	0 to Valley walls	≤ 0.1	NWS
	$(0.8 \times L)$ to L	0 to Valley walls	≤ 0.1	USACE 2007
Slag/Refuse	$(0.8 \times L)$ to L	1.0 to 2.0	0.1 to 0.3	FERC
	$(0.8 \times L)$ to L		≤ 0.1	NWS

HD : Height of dam, L : Length of dam, FERC-Federal Energy Regulatory Commission, NWS-National Weather Service, USACE-United States Army Corps of Engineers

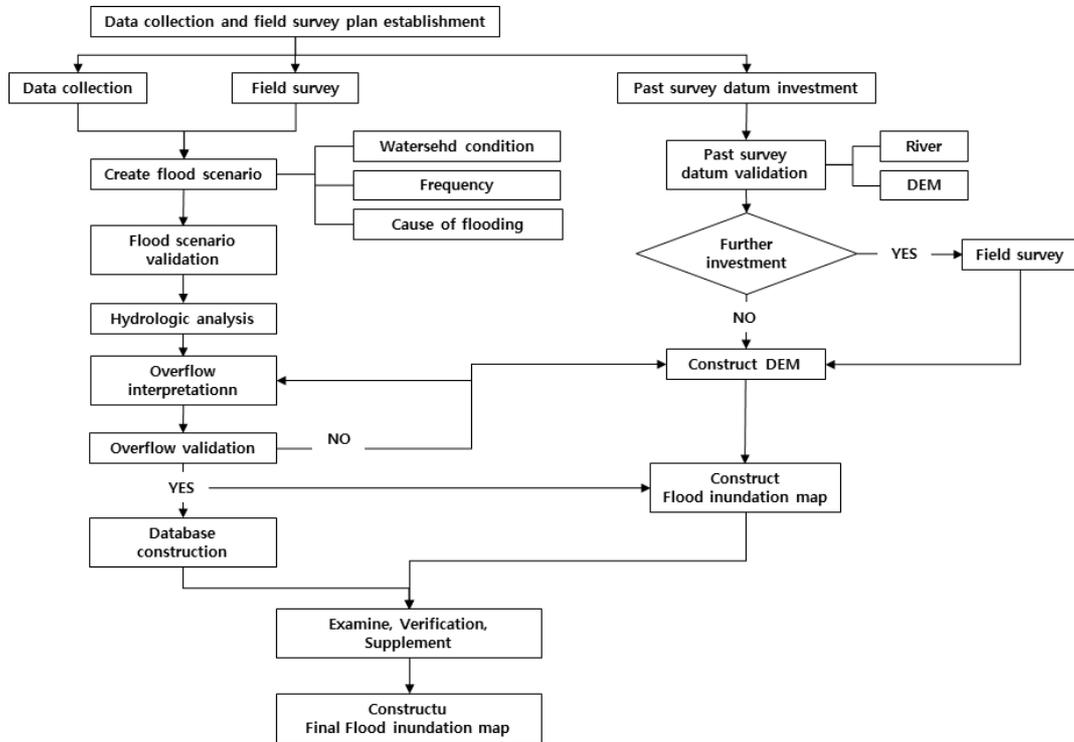


Fig. 6. Procedure of Flood Inundation Mapping (Ministry of the Interior and Safety, 2017)

하여 홍수위를 산정하고, 이를 DEM 위에 올려서 침수범람도를 작성하였다.

먼저 시나리오 A에 의해서 발생한 총 침수면적은 50.0636 km² 이었으며, 행정구역별로 살펴보면 충주시는 22.6219 km², 여주시

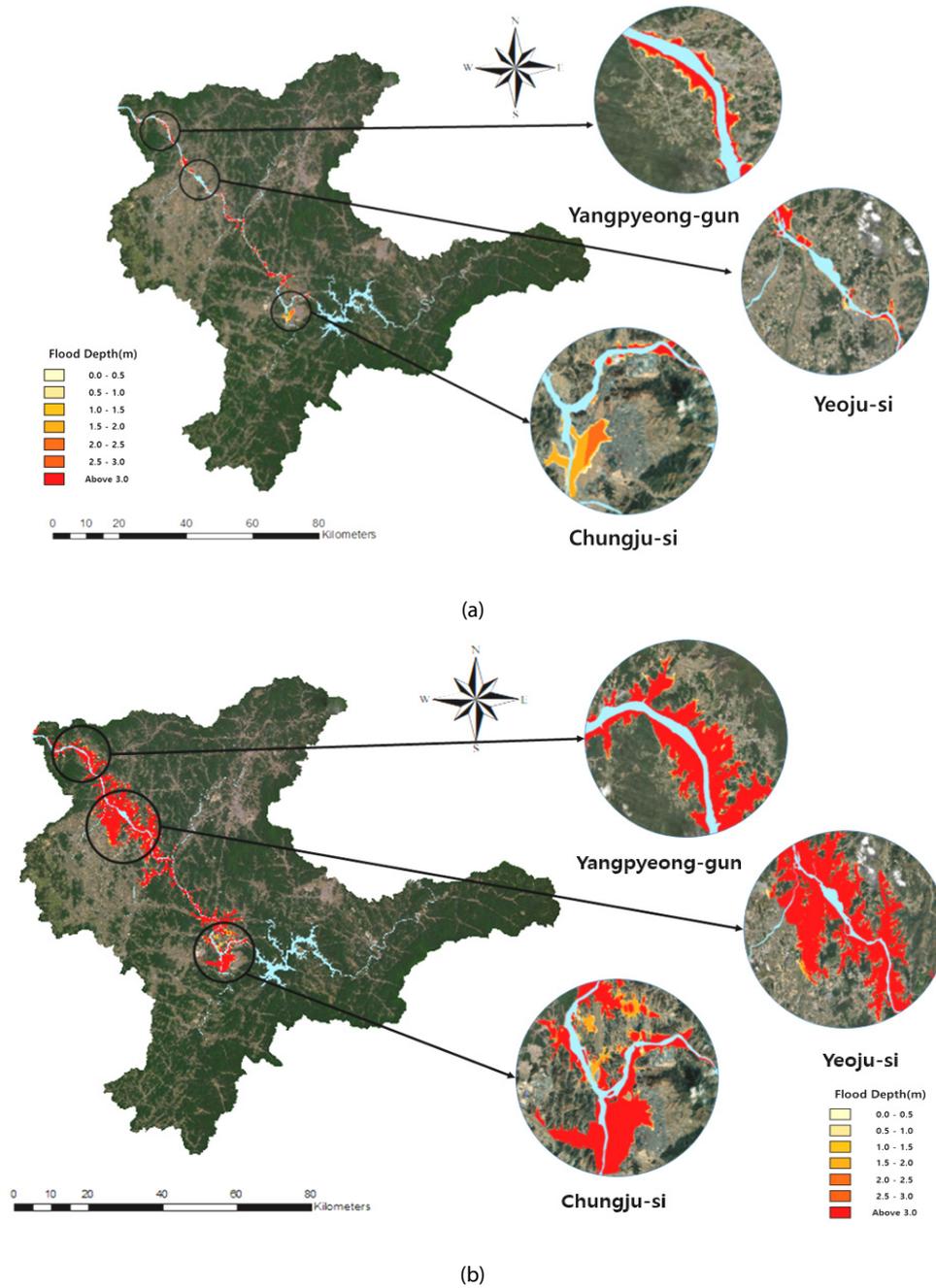


Fig. 7. Flood Damage Area due to Two Scenarios: (a) Scenario A, (b) Scenario B

는 20.1840 km², 양평군은 7.2577 km²의 침수피해가 발생하였다 (Fig. 7(a)).

시나리오 B에 의해서 발생한 총 침수면적은 307.4543 km²로 시나리오 A에 비해서 약 6.14배 큰 침수피해가 발생하였다(Fig. 7(b)). 행정구역별로 침수면적을 보게 되면, 충주시는 78.6774 km², 여주시는 182.9266 km², 양평은 45.8503 km²로 시나리오 A 대비 각각 약 6.317배, 9.063배, 3.478배 큰 침수구역이 발생하였

다. 시나리오 B의 경우 여주시에서 가장 큰 침수면적이 발생하였는데, 이는 여주시가 다른 지역들과 달리 주위에 경사가 완만한 평지로서 홍수위의 소폭 상승에도 침수면적이 급격하게 증가하기 때문이다. 반면에 충주시는 산지가 많은 지형으로서 고지대가 여주시에 비해 비교적 많이 홍수위가 증가했음에도 침수면적이 비교적 작게 증가하였다.

토지피복도의 대분류에 따른 각 행정구역 별 침수면적과 비율을

Table 8. Flood Damage Area according to Land Cover Type

Scenario	Total (km ²)	Flood damage area (km ²)						
		Urban	Agriculture	Forest	Meadow	Bare	Wetland	
A	Chungju	22.6219	2.8612	14.2620	1.6807	1.8527	1.9653	-
			12.65%	63.05%	7.43%	8.19%	8.69%	-
	Yeoju	20.1840	1.0760	10.2831	0.5338	3.5333	4.7579	-
			5.33%	50.95%	2.64%	17.51%	23.57%	-
	Yangpyeong	7.2577	0.9314	4.7239	0.8613	0.5091	0.2320	-
			12.83%	65.09%	11.87%	7.02%	3.20%	-
B	Chungju	78.6774	8.8979	49.3917	9.4449	6.5785	4.3645	-
			11.31%	62.78%	12.00%	8.36%	5.55%	-
	Yeoju	182.9266	6.9672	127.1900	18.5873	16.8780	13.3041	-
			3.81%	69.53%	10.16%	9.23%	7.27%	-
	Yangpyeong	45.8503	3.0065	32.8836	5.7699	3.6240	0.5657	0.0007
			6.56%	71.72%	12.58%	7.90%	1.23%	0.00%

살펴보면(Table 8), 시나리오 A와 B 모두 각 행정구역에서 농업지역의 침수면적이 50% 이상으로 대부분을 차지하고 있으며, 시나리오 A의 경우 충주시, 양평군은 농업지역 다음으로 시가지지역에서 침수가 많이 발생하였으며, 여주시의 경우 초지가 더 많이 침수되었다. 시나리오 B의 경우에서는 충주시, 여주시, 양평군 모두 농업지역 다음으로 산림지역이 많이 침수되었다. 시나리오 B의 시가지 지역의 침수면적비를 비교해보면, 충주시가 다른 행정구역보다 높다는 것을 알 수 있었다.

4.3 최적 대피소 선정

세 개의 행정구역 중 시가지 지역에 많은 침수피해가 발생한 충주시를 대상으로 동별로 최적 대피소를 선정하였다. 앞서 분석한 침수범람도를 기반으로 시나리오별 침수된 동들을 파악하였으며, 파악된 동들에 대해서 시·군·구 안전관리계획과 재해구호계획 수립

지침의 대피소 지정 기준을 참고하여 대피소 대안들을 선정하였다. 2.3절에서 선정한 3개 대분류 평가지표와 7개 세부평가지표를 이용하여 최적 대피소 선정을 위한 계층구조를 구축하였으며, 각 지표별 데이터를 수집하여 스케일 재조정 방법을 통해 표준화하였다. 합리적으로 대안들을 평가하기 위하여 AHP 기법을 이용하여 평가지표별 가중치를 도출하였다. 가중치 산정을 위해서 상대적 중요도 설문지를 만들어 수자원과 자연재난과 관련 전문가들을 대상으로 설문조사를 진행하였다. 정확한 가중치 산정을 위하여 전문가 설문 중 일관성이 떨어지는 설문 결과를 제외시켰습니다. 최종적으로 총 53분의 연구자분들께서 작성해주신 설문조사 결과를 이용하여 가중치를 산정하였다(Table 9). 사용한 53개의 설문지 조사 결과에 대해서 일관성 비율을 산정한 결과, 판단 기준인 10%보다 작은 5.53%로 산정되었기 때문에 쌍대비교 결과가 논리적으로 타당하고 판단하였다. 대분류 평가지표에 대하여 쌍대비교

Table 9. Weights of Shelter Evaluation Indicators

General	Weight	Specific Evaluation Indicators	Weight
Scale accommodation	0.19	Adequate accommodation of evacuees	0.17
		Height of shelter building	0.83
Geographical conditions	0.73	Ease of access from evacuation route	0.18
		Distance of shelter from stream/river	0.63
		Time taken to evacuate to shelter	0.19
Type	0.08	Public building	0.75
		Private institutions	0.25

Table 10. Optimal Shelter Selection according to the Scenario A

Administrative region	Alternatives		Evaluation	Priority
	Name	Type		
Chilgeum dong	CG1	Welfare center	0.58	2
	CG2	Church	0.41	3
	CG3	Welfare center	0.13	5
	CG4	School	0.78	1
	CG5	School	0.41	3
Bongbang dong	BB1	School	0.19	3
	BB2	School	0.96	1
	BB3	Church	0.57	2
Munhwa dong	MH1	Sanatorium	0.21	2
	MH2	School	0.79	1

Table 11. Optimal Shelter Selection according to the Scenario B

Administrative region	Alternatives		Evaluation	Priority
	Name	Type		
Yeonsu dong	YSu1	Church	0.11	5
	YSu2	Church	0.34	3
	YSu3	School	0.60	2
	YSu4	Church	0.77	1
	YSu5	Welfare center	0.27	4
Gyohyeon dong	GY1	School	0.68	1
	GY2	School	0.26	3
	GY3	Gym	0.17	4
	GY4	School	0.31	2
Anrim dong	AI	School	0.98	1
Yongsan dong	YSa1	School	0.22	2
	YSa2	School	0.82	1
Munhwa dong	MH1	Church	0.32	2
	MH2	School	0.68	1
Hoam dong	HA	Gym	0.85	1
Danwol dong	DW	Gym	0.81	1

를 통해 가중치를 산정한 결과 “입지조건”에 대한 평가항목이 0.73으로 가장 큰 가중치가 산정되었다. 세부평가지표에 대하여 쌍대 비교를 통해 가중치를 산정한 결과 “규모”의 세부평가지표들에서는 “대피소의 건물 높이”가 0.83으로 가장 높았으며, “입지조건”의 세부평가지표들에서는 “대피시설이 하천으로부터의 거리”가 0.63으로 가장 높았다. 마지막으로 “지정시설”의 세부평가지표는 “공공시설”이 0.75로 가장 높게 산정되었다. 이러한 결과는 하천으로부터의 거리가 멀고, 정부지원을 받는 고층의 공공시설이 가장 최적의 대피소라는 것을 나타낸다.

시나리오 A에 의한 침수 발생 시 인구가 밀집되는 지역을 중심으로 대안들을 선정하였다. 선정된 대피소 대안들은 칠금동 5개, 봉방동 3개로 선정하였으며, 달천동의 경우 대피소 선정 절차에 적합한 대피소가 없기 때문에 가까운 문화동으로 대피소 2개를 선정하였다. 대안들은 침수구역과 어느 정도 거리가 떨어져 있으며, 복지센터, 교회, 학교 등의 시설들이 선정되었다. 선정된 대안들에 대해서 각 세부평가지표별 데이터를 수집하고 표준화한 뒤, 산정한 가중치를 곱하여 평가점수를 산정하였다. 산정된 평가점수를 기반으로 각 동별 대안들 간의 우선순위를 선정하였다(Table 10).

시나리오 B의 경우도 이전과 동일한 방법으로 동별로 복지센터, 학교, 체육관, 교회를 중심으로 대안들을 선정하였다. 연수동 5개, 교현동 4개, 용산동과 문화동은 각 2개, 안림동, 호암동, 단월동에는 각 1개씩 대피소 대안들이 선정되었다. 동일한 방법으로 각 동별 대안들의 평가점수를 산정하여 우선순위를 매겼다(Table 11). 시나리오 A의 경우 침금동의 최적대피소는 칠금초등학교, 봉방동은 삼원초등학교, 문화동은 대림초등학교로 나타났다. 시나리오 B의 경우 연수동은 순복음만민교회, 교현동은 한림디자인고등학교, 용산동은 용산초등학교, 문화동은 남한강초등학교로 선정되었다. 선정된 6개의 최적대피소 중에서 5개가 학교로 선정되었다. 본 연구에서 제시한 최적 대피소는 수용인원 및 대피소거리 등 제시한 조건을 비교하였을 때 다른 대피소 대안들보다 최적의 조건을 갖춘 것을 의미하며, 선정된 최적 대소는 적절한 구조물품 구비 및 비상상황에 따른 내부적 대처계획이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 현 비상대처계획에서 고려하지 않는 연속호우사상에 의한 상황을 모의하고 이에 대한 비상대처계획으로서 최적 대피소를 선정하였다. 연속호우사상에 의한 거대강우 시나리오 생성 절차를 기반으로 500년 빈도의 거대강우 시나리오를 생성하고 연속호우사상 기반의 강우-유출 모델인 ConSEB 모델을 이용하여 거대홍수량을 산정하였다. PMP에 의해서 발생한 PMF와 거대홍수량을 비교한 결과, 연속호우사상에 의해서 PMF보다 큰 침투홍수량의 발생가능성을 확인할 수 있었다. 모의된 거대홍수량을 바탕으로 무피해방류량 이상의 댐 방류에 의하여 하류부에 피해가 발생하는 경우(시나리오 A)와 댐이 붕괴되는 경우(시나리오 B) 등 2가지 가상 시나리오를 생성하고 침수범람 분석을 수행하였다. 시나리오 A에서는 50.06 km²의 침수면적이 발생하였으며, 시나리오 B에서는 약 6.1배 큰 307.45 km²의 침수면적이 발생하였다. 침수피해가 발생한 하류부 지역 중에서 시가화 지역에 많은 침수피해가 발생한 충주시를 대상으로 동별 최적 대피소를 설정하였다. 선정된 최적 대피소를 살펴보면, 두 시나리오에서 선정된 6개의 최적 대피소 중에서 5개가 학교로 선정되었다. 본 연구에서는 기존의 비상대처 계획에서 고려하지 않은 연속호우 사상에 의한 상황을 추가적으로 고려하였으며 추후 비상대처계획 수립 시 참고 자료로 활용될 수 있을 것이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C2091773).

ORCID

Kyunghun Kim  <https://orcid.org/0000-0002-1844-502X>
 Jonghun Lim  <https://orcid.org/0000-0003-3025-4645>
 Hung Soo Kim  <https://orcid.org/0000-0001-8345-0610>
 Soeng Cheol Shin  <https://orcid.org/0009-0004-5272-2256>

References

- Alam, M. J., Habib, M. A. and Pothier, E. (2021). "Shelter locations in evacuation: A Multiple Criteria Evaluation combined with flood risk and traffic microsimulation modeling." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier, Vol. 53, 102016, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.102016>.
- American Red Cross (ARC). (2002). *Standards for Hurricane Evacuation Shelter Selection*, ARC, Washington, D.C., United States.
- Azzez, O., Elfeki, A., Kamis, A. S. and Chaabani, A. (2020). "Dam break analysis and flood disaster simulation in arid urban environment: The Um Al-Khair dam case study, Jeddah, Saudi Arabia." *Natural Hazards*, Springer, Vol. 100, pp. 995-1011, <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03836-5>.
- Bae, D. H., Heo, J. H. and Ahn, J. H. (2019). *Guidelines for estimating flood discharge*, Ministry of Environment, Sejoing-si (in Korean).
- Bathurst, J. C. and Ashiq, M. (1998). "Dambreak flood impact on mountain stream bedload transport after 13 years." *Earth Surface Processes and Landforms*, Wiley, Vol. 23, No. 7, pp. 643-649, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199807\)23:7<643::AI D-ESP889>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<643::AI D-ESP889>3.0.CO;2-3).
- Bedient, P. B. and Huber, W. C. (1998). *Hydrology and floodplain analysis*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Bilali, A. E., Taleb, I., Nafii, A. and Taleb, A. (2022). "A practical probabilistic approach for simulating life loss in an urban area associated with a dam-break flood." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier, Vol. 76, 103011, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103011>.
- Bozkus, Z. and Kasap, A. (1998). "Comparison of physical and numerical dam-break simulations." *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 22, No. 5, pp. 429-444.
- Chang, J. K. and Kim, S. G. (2014). "Proper location of disaster shelters according to evacuation time-focused on coastal areas in Hongseong Gun." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 14, No. 1, pp. 319-326, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.1.319> (in Korean).
- Cho, K. T., Kim, S. J., Kim, D. S., Cho, Y. W. and Lee, J. I. (2003). "Priority setting for future core technologies using the AHP - with major fields in rural development and resources." *Journal of Korean Society of Rural Planning*, KSRP, Vol. 9, No. 3, pp. 41-46 (in Korean).
- Choi, J. H., Kang, I. J. and King, S. S. (2012). "Study on the selection of the tsunami shelter using AHP and GIS analysis." *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy,*

- Photogrammetry and Cartography, KSGPC, Vol. 30, No. 6-1, pp. 503-509, <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2012.30.6-1.503> (in Korean).
- Choi, B. H., Kim, I. H., Hong, J. J., Jeong, E. J. and Won, D. H. (2019). "Emergency Shelters site selection for the operation of reservoir emergency action plan - selection of evacuation site according to elderly population movement condition in rural area." *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, KSGIS, Vol. 27, No. 3, pp. 3-13, <https://doi.org/10.7319/kogsis.2019.27.3.003> (in Korean).
- Day, C. A. (2016). "Modeling potential impacts of a breach for a high hazard dam, Elizabethtown, Kentucky, USA." *Applied Geography*, Elsevier, Vol. 71, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.04.002>.
- Disaster Relief Division (2021). *2022 Guidelines for Establishing Disaster Relief Plans*, Ministry of the Interior and Safety, Sejoing-si (in Korean).
- Fagherazzi, S., Rasetarina, P., Hussaini, M. Y. and Furbish, D. J. (2004). "Numerical solution of the dam-break problem with a discontinuous galerkin method." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 6, pp. 532-539, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:6\(532\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:6(532)).
- Fread, D. L. (1984). *A breach erosion model for earthen dams*. National Weather Service (NWS) Report, NOAA, Silver Spring, Maryland.
- Fread, D. L. (1988). *The NWS DAMBRK model: Theoretical background/user documentation*. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA.
- Han, D. (2019). *Economic Impacts of Flood Disaster by Climate Change on Industry and Selection of Structure Measures for Flood Prevention in the Basin Using Economic Analysis*, Ph.D. Dissertation, INHA University, Incheon, South Korea (in Korean).
- Han, K. Y., Lee, J. Y., Lee, E. R. and Song, J. W. (1998). "Applicability evaluations of dam breach flood wave models." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 31, No. 2, pp. 189-198 (in Korean).
- HM Government. (2014). *Evacuation and Shelter guidance*, HM Government, London, United Kingdom.
- Joo, J. G., Lee, J., Jo, D. J., Jun, H. D. and Kim, J. H. (2007). "Development of rainfall time distribution model for urban watersheds." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 8, pp. 655-663 (in Korean).
- Jeong, J. H. (2006). *A development of practical method for flood estimation*, Ph.D dissertation, Korea University, Seoul, South Korea (in Korean).
- Kim, D. (2018). *Development of Consecutive Storm Event Based Rainfall-Runoff model for Short Term Flood Runoff Simulation and Applicability of the Model under Climate Change*, Ph.D. Dissertation, INHA University, Incheon, South Korea (in Korean).
- Kim, Y. (2022). *Statistical Yearbook of 2021 Construction-Infrastructure Safety*, Korea Authority of Land and Infrastructure Safety Publication. No. MA-22-E6-001, Korea Authority of Land and Infrastructure Safety, Jinju, Gyeongsangnam-do (in Korean).
- Kim, N., Joo, J., Kim, M. and Park, K. (2020a). "Development of a Multi-Criteria Evaluation Framework and Its Application for Earthquake Shelter Selection." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 20, No. 2, pp. 197-205. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.2.197> (in Korean).
- Kim, H. S., Kim, D., Han, D. and Kim, K. (2020b). *Development and application of consecutive storm event based rainfall-runoff model for mega flood analysis*, CCAW-TR-11, ISBN 979-11-91160-01-7, Climate Change Adaptation for Water Resources. <https://doi.org/10.979.1191160/017> (in Korean).
- Kim, N., Won, Y. S., Lee, J. E., So, H. R., Yu, Y. S., Shin, H. S., Cha, H. S., Chun, B. S., Seo, G. D. and Jung, M. S. (2004). *Report of National PMP Map, Korea*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong-si, South Korea (in Korean).
- Korea Meteorological Administration. (2023). *2022 Abnormal Weather report*, Korea Meteorological Administration Publication. No. 11-136000-001109-10, Korea Meteorological Administration, Daejeon (in Korean).
- Kwon, O. I. and Shim, M. P. (1997). "A study on release determination scheme for a forecasted flood." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 3, pp. 257-268 (in Korean).
- Kwon, J., Yoon, D. and Koh, J. (2015). "Analysis of Shelters acceptable range according to evacuation speed during flood disaster by severe rain storm." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 15, No. 3, pp. 115-123, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.3.115> (in Korean).
- LaRocque, L. A., Imran, J. and Chaudhry, M. H. (2013). "Experimental and numerical investigations of two-dimensional dam-break flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 6, pp. 569-579, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000705](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000705).
- Lee, J. and Chung, G. (2017). "Estimation of interevent time definition using in urban areas." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 17, No. 4, pp. 287-294, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.4.287> (in Korean).
- Lee, O., Jo, D. J. and Kim, S. (2017). "Future PMP estimation of Chungjudam watershed under KMA climate change scenarios." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 17, No. 1, pp. 365-373, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.1.365> (in Korean).
- Lee, S., Kim, D. and Joo, H. (2022). "Optimal location identification for emergency evacuation shelters using the voronoi diagram." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 22, No. 1, pp. 209-217, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2022.22.1.209> (in Korean).
- Li, Y., Bao, T., Gong, J., Shou, X. and Jang, K. (2020). "The prediction of dam displacement time series using STL, extra trees, and stacked LSTM neural network." *IEEE Access*, IEEE, No. 8, pp. 9440-94452, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995592>.
- Lodhi, M. S. and Agrawal, D. K. (2012). "Dam-break flood simulation under various likely scenarios and mapping using GIS: Case of a proposed dam on River Yamuna, India." *Journal*

- of Mountain Science*, Springer, Vol. 9, No. 2, pp. 214-220, <https://doi.org/10.1007/s11629-012-2148-5>.
- Ma, Y., Xu, W., Qin, L. and Zhao, X. (2019). "Site selection models in natural disaster shelters: a review." *Sustainability*, MDPI, Vol. 11, No. 2, 399, <https://doi.org/10.3390/su11020399>.
- MacDonald, T. C. and Langridge-Monopolis, J. (1984). "Breaching characteristics of dam failures." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 5, pp. 567-586, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:5\(567\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567)).
- Mahmoud, M. R., Fahmy, H. and Garcia, L. A. (2022). "Potential impact of failure of the Grand Ethiopian Renaissance Dam on downstream countries." *Journal of Flood Risk Management*, Wiley, Vol. 15, No. 2, e12793, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12793>.
- Marssoli, R. and Wu, W. (2014). "3-D finite-volume model of dam-break flow over uneven beds based on VOF method". *Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 70, pp. 104-117, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.020>.
- Ministry of the Interior and Safety. (2017). *Guidelines on the criteria for disaster map*, Ministry of Interior and Safety Publication No. 2017-1, Ministry of Interior and Safety, Sejong-si, South Korea (in Korean).
- Munoz, D. H. and Constantinescu, G. (2020). "3-D dam break flow simulations in simplified and complex domains." *Advances in Water Resources*, Elsevier, No. 137, 103510, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103510>.
- Nappi, M. M. L., Nappi, V. and Souza, J. C. (2019). "Multi-criteria decision model for the selection and location of temporary shelters in disaster management." *Journal of International Humanitarian Action*, Springer, Vol. 4, No. 1, pp. 1-19, <https://doi.org/10.1186/s41018-019-0061-z>.
- Nappi, M. M. L. and Souza, J. C. (2015). "Disaster management hierarchical structuring criteria for selection and location of temporary shelters." *Natural Hazard*, Springer, Vol. 75, pp. 2421-2436, <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1437-4>.
- Paquier, A. and Robin, O. (1997). "CASTOR: Simplified dam-break wave model." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 8, pp. 724-727, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:8\(724\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:8(724)).
- Reed, S. and Halgre, J. (2011). "Validation of a new GIS tool to rapidly develop simplified dam break models." *Dam Safety 2011*, Washington, DC, USA.
- Sakai, A. and Lukner, K. (2013). "Japan's Crisis Management and growing Complexity: In Search of New Approaches." *Japanese Journal of Political Science*, Cambridge university press, Vol. 14, No. 2, pp. 155-176, <https://doi.org/10.1017/S1468109913000017>.
- Sanyal, J. and Lu, X. X. (2009). "Ideal location for flood shelter: a geographic information system approach." *Journal of Flood Risk Management*, Wiley, Vol. 2, No. 4, pp. 262-271, <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01043.x>.
- Satty, R. W. (1987). "The analytic hierarchy process-what it is and how it is used." *Mathematical Modelling*, Vol. 9, No. 3-5, pp. 161-176.
- Senik, B. and Uzun, O. (2021). "An assessment on size and site selection of emergency assembly points and temporary shelters area in Düzce." *Natural Hazards*, Springer, Vol. 105, pp. 1587-1602, <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04367-0>.
- Shahraki, A., Zadbar, A., Motevalli, M. and Aghajami, F. (2012). "Modeling of Earth Dam Break with SMPDBK Case Study: Bidekan Earth Dam." *World Applied Science Journal*, IDOSI, Vol. 19, No. 3, pp. 376-386, <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.19.03.1070>.
- Shakibaenia, A. and Yee, C. J. (2011). "A mesh-free particle model for simulation of mobile-bed dam break." *Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 34, No. 6, pp. 794-807, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.04.011>.
- Soleymani, S., Golkar, H., Yazd, H. and Tavousi, M. (2015). "Numerical modeling dam failure phenomenon using software and finite difference method." *Journal of Materials and Environmental Science*, JMES, Vol. 6, No. 11, pp. 3143-3158.
- Song, S., Zhou, H. and Song, W. (2019). "Sustainable shelter-site selection under uncertainty: A rough QUALIFLEX method." *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier, Vol. 128, pp. 371-386, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.053>.
- Tokyo Metropolitan Government. (2013). *Guidelines for Shelter Management Operations*, Tokyo Metropolitan Government, Tokyo, Japan (in Japan).
- Trivedi, A. (2018). "A multi-criteria decision approach based on DEMATEL to assess determinants of shelter site selection in disaster response." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier, Vol. 31, pp. 722-728, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.07.019>.
- Weame, S. H. (2007). "Managing recovery after widespread damage." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, ICE, Vol. 160, No. 4, pp. 209-212, <https://doi.org/10.1680/muen.2007.160.4.209>.
- Wetmore, J. N. and Fread, D. L. (1981). *The NWS simplified dam-break flood forecasting model*. National Weather Service, Silver Spring, Maryland, pp. 164-197.
- Wonju Regional Environment Office (2004). *River Master Plan for Downstream zone of Chungjum Dam: Environmental Impact Assessment report* (in Korean).
- Yoon, C., Oh, K., Kim, W. and Yang, D. (2016). "Priority ranking and design for development of coastal disaster management system functions using AHP method." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 16, No. 2, pp. 149-159, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.2.149> (in Korean).
- Zhou, R. D., Judge, D. G. and Donnelly, C. R. (2004). "Comparison of HEC-RAS with FLDWAV and DAMBRK models for dam break analysis." *Proceedings of Canadian Dam Association 2005 Annual Conference*, Calgary, Alberta, Canada, pp. 1-13, <https://doi.org/10.13140/2.1.2688.1606>.