

## Spatial Mapping of Inundation Hazards in Reservoir Areas

Young Kyu Lee<sup>1#</sup>, Sungsu Lee<sup>2+</sup>, Hung Soo Kim<sup>3</sup>, Hee Jung Ham<sup>4</sup>, Jongwon Jung<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Risk Management Center, KFPA, KFPA Bldg, 38, Gukjekeumyung-ro 6-gil, Youngdeungpo-gu, Seoul, Korea

<sup>2</sup> School of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk, Korea

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, Inha University, Korea, 100, Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon, Korea

<sup>4</sup> Program of Architectural Engineering, Kangwon National University, 1, Ganwondaehakgil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea

### Abstract

The current approach to reservoir safety management in South Korea mainly focuses on reducing failure rates. This approach may help minimizing failure incidents, but fail to efficiently manage risk to life and property. To minimize the losses from potential incidents in reservoirs, the paradigm shift to the social risk management would be needed. For a more effective reservoir management from the perspective of social risk management, an accurate prediction and illustration of the consequences from the failures is critical, such as spatial mapping of inundation hazards due to reservoir failure. In this study, we developed the mapping tool illustrating dam-break inundation hazards using spatial data to support the new paradigm. The inundation hazard maps were found applicable in practice according to the comparison with the historic failures. Its practical effectiveness was also confirmed because it took only several hours to create hazard maps for hundreds of reservoirs.

**Key words:** reservoir, inundation, dam failure, consequence, risk, spatial data

### 1. 서론

WAMIS(국가수자원관리종합정보시스템)에 따르면 국내 전국에 분포된 저수지는 총 17,277개소(2016년 현황, WAMIS에서 한국농어촌공사 및 지자체 방문 조사 결과)이다. 이 중 3,381개소는 한국농어촌공사에서 관리하며 나머지 13,896개소는 지자체에서 관리하고 있다. 저수지는 이수 목적상 매우 유용한 시설이다.

하지만 저수지 하류에 위치한 주민과 재산상에 큰 위협 요인이 되기도 한다. 1961년 7월 11일 전북 남원시 이백면 효기리 소재의 180 ML(Mega Liters) 규모의 효기저수지 붕괴는 110명의 사망자와 가옥 190여 채 파손, 이재민 1,366명을 야기하는 피해를 초래했다. 2013년 여주시 옥촌저수지(55 ML), 이천시 대관저수지(51 ML), 경주시 산대저수지(194 ML) 붕괴사고, 2014년 영천시 괴연저수지(61 ML) 붕괴사고, 2018년 보성군

# The 1st author: Young Kyu Lee, Tel. +82-2-3780-0318, Fax. +82-2-3780-0320, e-mail. [youngQLee@kfpa.or.kr](mailto:youngQLee@kfpa.or.kr)

+ Corresponding author: Sungsu Lee, Tel. 82-43-261-3344, Fax. +82-43-275-2377, e-mail. [sungsulee@chungbuk.ac.kr](mailto:sungsulee@chungbuk.ac.kr)

모원저수지(9 ML) 등 저수지 붕괴사고는 최근까지도 지속해서 발생하고 있다(Lee, 2018).

현실적으로 저수지 안전관리에 할당된 자원이 한정되어 있다 보니, 저수지 붕괴와 이에 따른 피해를 완벽하게 방지하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 앞으로도 저수지 붕괴 등에 의한 피해 발생 가능성이 존재한다는 것을 인정하지 않을 수 없다.

현행 저수지 관리 전략은 사고율 관리 관점이라고 할 수 있다. 전국 저수지는 정기점검, 긴급점검, 정밀점검, 정밀안전진단을 통하여 구조부재의 결함 정도를 진단하여 A(우수), B(양호), C(보통), D(미흡), E(불량)의 안전등급을 책정한다.<sup>1)</sup> 이 중 사고율이 높은 D등급 또는 E등급 저수지를 재해위험저수지로 지정·고시하여 특별 관리하고 있다.

사고율 관리 관점 전략의 장점을 저수지 사고 건수를 최소화할 수 있다는 것이다. 하지만 저수지 사고는 안전등급 D 또는 E등급 저수지에서만 발생하지 않는다. 2018년에 붕괴한 전남 보성군 모원저수지의 안전등급은 B등급이었으며, 2014년에 붕괴한 부산 기장군 내덕저수지의 안전등급은 C등급, 2014년에 붕괴한 경북 영천시 괴연저수지의 안전등급은 B등급이었다(Lee, 2018).

사고율이 높지 않은 B등급 또는 C등급 저수지 사고시 큰 인명피해와 재산피해가 발생한다면, 이는 큰 사회적 문제가 아닐 수 없다. 이와 같은 사회적 문제를 최소화하기 위해서는 사회 리스크(societal risk) 관점에서 관리되는 것이 바람직하다.

국내에서는 재난에 의한 정량적 피해의 규모를 이용하여 리스크를 구분하거나 등급하는 것이 일반적으로 통용되는 리스크 관리인 데 반하여 미국을 비롯한 재난 관리 선진국에서는 발생확률(또는 발생 개연성)을 고려한 사회적 영향을 사회적 리스크로 정의하고 있다. 따라서 사회 리스크란 단일 사고에서 다수 사망자가 발생하여 사회적 문제 및 정치적 대립을 야기하며 사회

전체에 부정적 영향을 미치는 발생결과가 초래될 확률로 정의되고 있다(FEMA, 2015). 실무적으로는 연평균 인명손실을 사회 리스크 척도로 활용되고 있다.

저수지 시설물의 연평균인명손실은 저수지의 연간 사고확률과 사고시 인명피해의 곱으로 추정할 수 있다. 이때 해당 저수지에 추정된 연평균인명손실이 0.001명/년 이하일 때 해당 저수지가 안전하다고 일반적으로 평가한다(ANCOLD, 2003; NSWDC, 2006; USACE, 2009; USBR, 2011).

사회 리스크 관점에서 저수지를 관리하기 위해서는 리스크 평가가 요구되는 지역(일반적으로 지자체 단위) 내에 있는 많은 수의 저수지 붕괴에 따른 피해 규모 추정이 가능해야 한다. 피해규모 추정의 시작은 저수지 사고로 인한 범람위험지도 작성에서 출발한다. 전통적인 범람위험지도 작성은 HEC-GeoRAS와 같은 2차원 분포형 수리모형 등의 기술을 기반으로 한다. 하지만 이러한 모형은 수십 킬로미터에 달하는 하류부 범람영역을 모형화하는 데 상당한 시간이 소요될 뿐 아니라 계산 시간에도 상당한 시간이 소요된다. 이처럼 상당한 시간 비용을 요구하는 수리모형은 많은 수의 저수지 평가에 적합하지 않다.

약 17,000개소에 달하는 저수지 시설의 안전점검은 육안 중심의 정기점검으로 수행되고 선별된 저수지만 장비 중심의 정밀안전진단을 수행한다.

저수지의 범람위험지도 작성 또한 안전점검과 유사한 방식이 필요하다. 저수지 범람위험지도 작성은 단순한 방식으로 수행하고 선별된 저수지만 2차원 수리모형 또는 3차원 전산유체역학 모형으로 수행한다면 사회 리스크 관점에서 저수지를 보다 효율적으로 관리하는 것이 가능해진다.

본 연구목표는 효과적으로 많은 수의 저수지 범람위험지도 작성이 가능한 방법을 개발하는 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 공간정보를 활용한 범람위험지도 작성기법을 개발한다.

1) 안전점검의 유형은 「농업생산기반시설 관리규정」에서 인용하였으며, 안전등급 구분은 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령」 별표8(시설물의 안전등급 기준)을 인용하였다.

## II. 범람위험지도 작성기법 개발

1차원 전산유체해석 모형을 이용한 범람위험지도 작성 절차는 ① 유출량이 흘러갈 하도 연장 범위를 설정 후, 하도 일정 구간별 단면 형상을 정의한 후, ② 침두유출량을 산정하여 하도 구간별 단면 형상에 따른 홍수위를 산정 후 ③ 하도 버퍼링 기법을 이용하여 범람영역을 추정한다.

본 연구에서 개발한 공간정보분석 기반의 범람위험지도 작성 절차 또한 상기 절차와 유사하다. 단, 침두유출량 대신 침두단면이라는 개념을 사용한다. 침두유출량은 침두단면에 평균유속을 곱하여 산정할 수 있다. 하지만 본 연구에서 개발한 공간정보분석 기반의 범람위험지도 작성기법은 하도 전 구간의 평균유속이 일정하다고 가정한다. 이런 경우 단면만의 변수로 단순화할 수 있다. 더 상세한 내용은 2장에서 논한다.

### 1. 하도 모형 및 하도 연장 결정 모형

저수지에서 유출된 물이 흘러가는 하도 모형을 자동화하기 위하여 FDM(Flow Direction Model) 공간정보를 이용하였다. <Figure 1>에서 점으로 표현된 중앙셀은 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 또는 128의 값 중에서 가장 급한 경사도 방향을 나타내는 값을 할당받게 된다. 예를 들어, 중앙 셀 값에 1이 할당된다면, 그 의미는 중앙 셀에 위치하는 유출수는 1번 방향(동쪽)으로 흘러가도록 모형화된다는 것을 의미한다. 유사하게 중앙 셀에 값에 8이 할당된다면, 중앙 셀에 위치하는 유출수는 8번 방향(남서쪽)으로 흐르도록 모형화된다는 것을 의미한다.

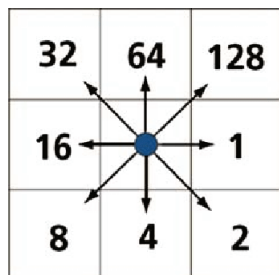
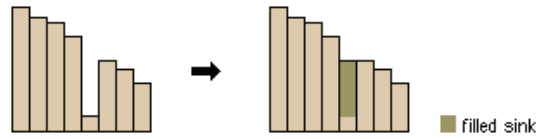
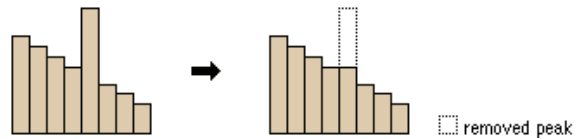


Figure 1. 8-directional flow model



※ Source: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/>

Figure 2. Profile view of a sink before and after running Fill



※ Source: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/>

Figure 3. Profile view of a peak before and after running Fill

FDM은 DEM(Digital Elevation Model) 공간정보를 바탕으로 생성된다. 하지만 이 단계를 진행하기 전에 DEM 사전 처리 과정이 필요하다. DEM에는 움푹셀(sinks)과 돌움셀(peaks)이 존재하는데, 이들 셀을 제거하지 않으면 저수지에서 바다까지 이어지는 연속된 하도를 얻을 수 없게 된다.

본 연구에서는 ArcGIS Pro 2.5.0의 Fill 도구를 이용하여 움푹셀과 돌움셀을 제거하였다. Fill 도구는 <Figure 2>의 움푹셀을 메우고, <Figure 3>의 돌움셀을 제거하는 작업을 수행한다. Fill 도구는 DEM에 존재하는 움푹셀과 돌움셀이 모두 사라질 때까지 반복적으로 작업을 수행한다. Fill 도구는 Tarboton, *et. al.* (1991)과 Planchon & Darboux(2002)의 알고리즘이 반영되어 있다.

Fill 도구로 DEM에 존재하는 움푹셀과 돌움셀을 모두 제거한 후 ArcGIS Pro 2.5.0의 Flow Direction 도구를 이용하여 FDM을 생성한다. <Figure 4>는 생성된 FDM 공간정보의 일부 지역을 보여준다. 5m 셀사이즈(cell size) DEM을 이용하여 FDM 또한 5m 셀사이즈를 갖도록 생성하였다. 각 셀은 <Figure 4> 범례에 보이는 8가지 값 중 하나를 갖는다. <Figure 5>는 <Figure 4> 영역의 FDM을 이용하여 재현된 하도(연속된 파란색 셀 집합)를 보여준다. 이와 같이 각 저수지의 하도는 FDM을 이용하여 자동으로 모형화된다.

저수지 사고로 인한 하류 범람 영향 범위를 정하는 하도 종점 결정은 쉽지 않은 과제이다. FEMA(2012)에

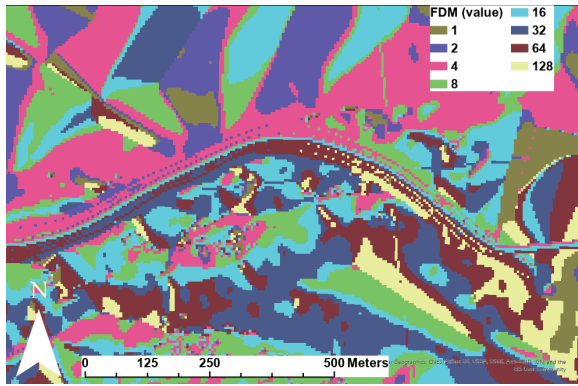


Figure 4. FDM (Flow Direction Model)



Figure 5. A stream represented by the FDM

따르면 댐 사고로 인한 범람 영향 범위는 저수량, 댐 사고 시나리오, 지형, 유출량 등에 따라 달라진다고 하고 한다. 호주 Queensland State(2018)는 수력댐 사고영향평가 지침에서 대략적인 댐 사고 영향 거리를 <Table 1>과 같이 제시하고 있다. 본 연구에서는 Queensland State(2018) 지침을 준용하여 하도 종점 결정 과정을 모형화하였다.

Table 1. Indicative dam failure impact zone distance

Storage (ML, Mega-Liters)	Indicative total distance downstream from dam
20,000	Up to 60km
2,000	Up to 20km
200	Up to 5km

※ Source: Queensland State(2018).

2. 침투단면 모형

본 연구에서는 침투단면이라는 개념을 사용한다. 침투단면이란 붕괴부 최대침수심이 발생하는 지점의

하도단면을 의미한다. 침투단면 추정에 <Figure 6>에 보이는 평탄 표면에서의 1차원 중력과 모형의 해석해 (Liu, et. al., 2018)를 활용하였다.

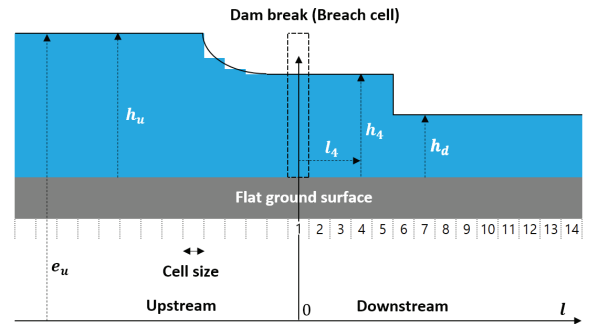


Figure 6. 1-dimensional gravity wave model on the flat ground

모든 계산은 셀사이즈 해상도가 5m인 DEM 공간정보 상에서 이루어진다. <Figure 6>은 1차원 DEM 상에서 저수지 댐 상류 수위  $h_u$ 와 댐 하류 수위  $h_d$ 를 형성하도록 셀 번호 1 위치에 있던 댐이 순간적으로 사라진 이후의 수면 형상을 보여준다. 이런 경우  $i$ 번째 셀에서의 중력과 수위  $e(i)$ 는 식 (1)과 같이 산출된다.

$$e(i) = e_u - c_{ud}(h_u - h_d) \tag{1}$$

식 (1)에서  $c_{ud}$ 는 상수(0.38)이다. 식 (1)에서 하류 수심  $h_d$ 가 상류 수심  $h_u$ 에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하고,  $i$ 번째 셀에서의 마찰손실수두  $h_f(i)$ 를 고려하면 식 (1)은 다음 식과 같이 변형된다.

$$e(i) = e_u - c_{ud}h_u - h_f(i) \tag{2}$$

<Figure 7>은 하도 셀에서의 마찰손실수두 모형을 보여준다. <Figure 7>에서 노란색의 1번 셀은 댐 사고로 인한 유출지점을 나타내며, 유출지점부터 형성된 파란색 셀 집합은 FDM으로 형성된 하도 모형을 나타낸다. 하도  $i$ 번째 셀에서의 마찰손실수두  $h_f(i)$ 를 다음과 같이 모형화하였다.

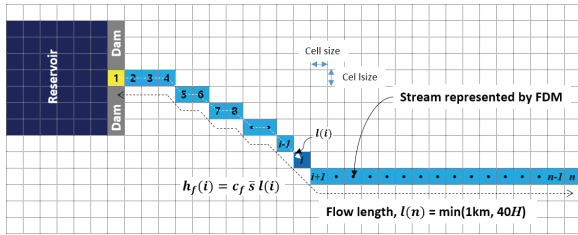


Figure 7. The friction loss head model on the stream cells

$$h_f(i) = c_f \bar{s} l(i) \quad (3)$$

식 (3)에서  $c_f$ 는 마찰계수,  $\bar{s}$ 는 붕괴부의 평균경사도,  $l(i)$ 는 유출지점에서 하도를 따라  $i$ 번째 셀까지의 흐름 거리를 나타낸다.

붕괴부의 평균경사도( $\bar{s}$ )를 결정하기 위해서는 붕괴부의 범위를 정의해야 한다. 이와 관련된 선행연구는 확인하지 못한 상태이다. 본 연구에서는 사례 연구를 통하여 붕괴부 연장,  $l(n)$ 을 유출점에서 시작하여 하도를 따라 제방높이( $H$ )의 40배와 1km 중 작은 거리까지의 영역으로 정의하였다. 마찰계수( $c_f$ )는 경험적으로 결정되는데, 침수흔적이 존재하는 과거 저수지 사고 사례 연구를 통하여 경험적으로 1.3의 값을 사용하였다.

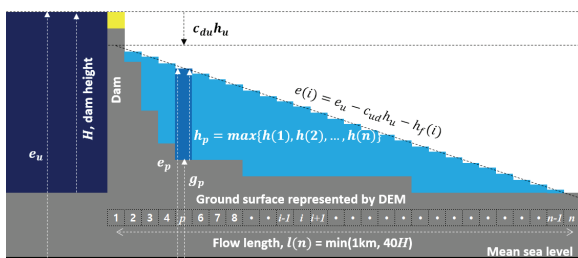


Figure 8. The peak depth on the stream cells in the breach

<Figure 8>은 붕괴부 하도 셀에서의 침두수심( $h_p$ )를 결정하는 모식도이다. 하도 셀에서의 수위는 식 (2)로 결정이 되며, 각 셀에서의 DEM 값(지표고도)을 적용하여 각각의 하도 셀에서의 수심을 구할 수 있다. 붕괴부 내 하도 셀에서의 수심 가운데 최대가 침두수심으로 결정된다.

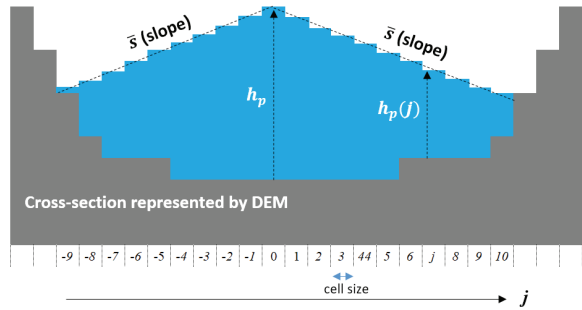


Figure 9. The peak section at which the peak depth occurs

<Figure 9>는 본 연구에서 사용하는 침두단면의 정의를 보여준다. 침두단면이란 앞에서 언급한 데로, 붕괴부에서 최대수심이 발생하는 지점의 하도 단면을 말한다. 하도 바닥면 형상은 DEM으로 정의되며, 하도 중심부 수위는 침두수심( $h_p$ )에 지표고도를 합한 것이 되며, 하도 직각 방향의 수위 경사는 붕괴부 평균경사도,  $\bar{s}$ 를 갖는 것으로 정의하였다. 이를 통하여 침두단면을 결정할 수 있다.

### 3. 범람영역 모형

본 연구에서 하도를 구성하는 모든 셀에서의 유속은 일정하다고 단순화하였다. 이 가정을 통해서 모든 하도 셀에서의 하도 단면은 침두단면을 만족해야 한다.

하도 임의 셀에서의 직교하는 단면은 <Figure 10>에 보이는 바와 같이 상류로 흐름 거리 100m 되는 지점과의 흐름 방향과 하류로 흐름 거리 100m 되는 지점과의 흐름 방향의 평균 흐름 방향에 직교하는 방향을 하도 직교 방향으로 정의하였다. 하도 단면의 바닥 형상은 DEM으로 정의되며, 하도 직교 방향의 수위 경사도는  $i$ 번째 셀에서 하류 방향으로 제방높이의 40배 또는 1km 중 작은 하도 구간의 평균경사도로 정의하였다. <Figure 8>과 <Figure 9>에서 하도 직교 방향으로 수위 경사도를 설정하고 있는데, 이는 계산 안정성을 높이기 위한 목적이 있다. 본 연구에서 5m 해상도의 DEM을 이용하고 있는데, DEM에서 지형이 제대로 재현되지 못하거나 경사가 전혀 없는 평탄 지형의 경우에서 수위 기울기를 적용하지 않는 경우 침두단면

을 만족하지 못하여 계산과정이 발산하는 경우를 차단하기 위한 목적이 있다.

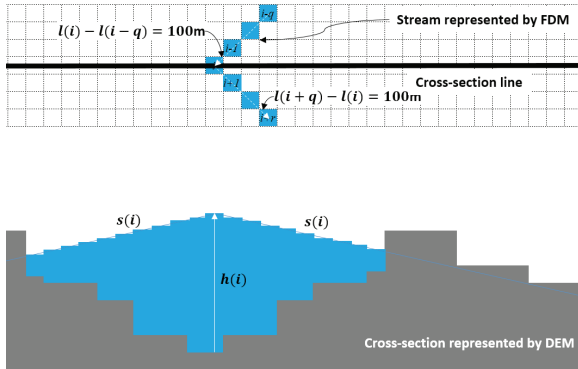


Figure 10. The cross-section model at the i-th cell on the stream

본 연구에서는 셀 1칸 간격(5m 또는  $5\sqrt{2}m$ )의 하도 구간 지점마다 하도 흐름단면 분석을 실시하여 범람 영역을 모의하였다. 임의 하도 셀에서 침투단면을 만족하는 단면을 얻기 위해서 반복법(iterative method)을 사용했으며, 계산 속도를 높이기 위해서 침투단면의  $\pm 10\%$  이내로 만족하는 경우 해를 얻은 것으로 간주하였다. 반복법에서  $i$ 번째 하도 셀에서의 초기 수심  $h(i, t = 0)$ 의 값을 설정 후 단면을 계산한다. 이때 단면을  $A(i, t = 0)$ 로 명명한다.  $A(i, t = 0)$ 가 침투단면의  $\pm 10\%$  이내로 만족하면 반복 계산은 종료된다. 그렇지 않은 경우에는  $i$ 번째 하도 셀에서의 수정 수심  $h(i, t = 1)$ 를 다음과 같이 갱신한다.

$$h(i, t = 1) = h(i, t = 0) \times \sqrt{\frac{S_p}{A(i, t = 0)}} \quad (4)$$

식 (4)에서  $S_p$ 는 침투단면을 의미하며, 침투단면과 시도단면 비의 제곱근으로 갱신하는 이유는 변동폭을 줄여 계산 안정성을 높이기 위함이다. <Figure 11>과 같이 하도를 가로지르는 고가도로가 DEM에 표현되어 있는 경우, 침투단면을 만족하지 못하고 발산하는 경우가 존재한다. 이런 경우 반복법의 시도 횟수를 30으로 제한하였으며, 30회 시도 중 침투단면을 초과하

지 않은 시도단면 중 최적 단면을 해로 가정하여 발산 지점을 보완하였다.

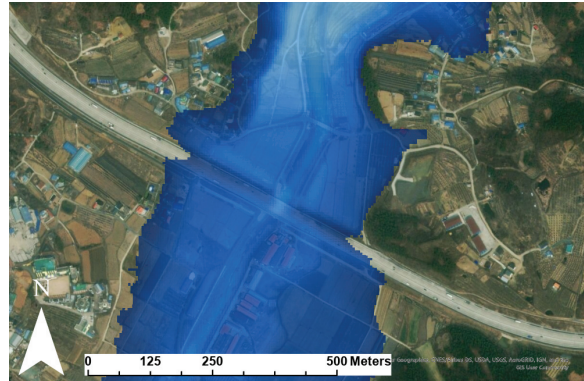


Figure 11. Cross-section determination at elevated roads across the stream

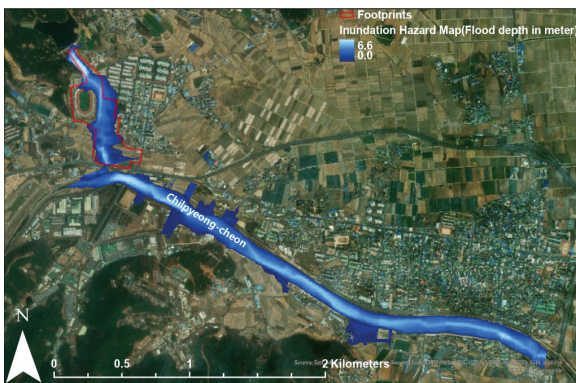
하도를 직교하는 방향으로 5m 간격 단위로 수위와 수심 정보를 저장한다. 수위 정보 집합을 선형보간하여 수위면을 생성한 후 DEM으로 재현되는 지표면의 고도를 제외하여 수심이 0 이상인 셀들을 1차로 범람 위험지도를 작성한다. 이렇게 작성된 범람위험지도에는 불연속한 범람영역이 존재하게 된다.

수심 정보 집합을 선형보간하여 2차로 범람위험지도를 작성한다. 이렇게 작업한 범람영역에는 주변이 침수심으로 둘러싸인 돌출셀이 범람영역으로 나타나는 현상이 발생한다. 불연속한 범람영역과 침수지역으로 표현되는 돌출셀을 제거하기 위해서 1차와 2차에서 생성된 범람위험지도 모두에서 범람영역으로 설정되는 영역만을 범람위험지도로 작성한다.

지금까지 언급한 모형과 절차를 바탕으로 모든 저수지의 범람위험지도 작성을 자동화하는 알고리즘을 MATLAB R2016b에서 프로그램으로 구현하였다. 범람위험지도 작성에 필요한 입력 자료는 제체 높이, 제체 고도, 유출점 좌표가 필요하다. 제체 높이는 지자체와 한국농어촌공사에 저수지 제원 정보를 요청하여 수집하였으며, 제체 고도는 DEM에서 얻었다. 유출점 좌표는 FDM으로 재현되는 하도와 제방이 교차하는 지점의 좌표로 정하였다.

### III. 범람위험지도 모형 검증

저수지 사고로 인한 범람위험지도 작성 모형 검증은 침수흔적도가 있는 과거 붕괴 저수지 사례와 비교를 통해 수행하였다. 2013년에 붕괴사고가 있었던 경북 경주시 산대저수지, 2014년 부산 기장군 내덕저수지, 2002년 강원 강릉시 동시 붕괴가 일어난 장현저수지와 동막저수지를 선정하였다.



※ Source: Go, et. al.(2015). for the footprints.  
Figure 12. Inundation hazard map and footprints for Sandae reservoir, Gyeongju-si

경북 경주시 산대저수지의 저수량은 194ML이며, 저수지 범람위험지도 작성에 사용된 저수지 제원으로는 제체 높이 12m, 제체 해발고도 55.6m이며, 저수지 수심은 제체 높이로 가정하였다. <Figure 12>는 본 연구에서 작성한 범람위험지도(하늘색 음영 지역)와 침수흔적(빨간색 다각형)(Go, et. al., 2015)을 보여준다. 저수량이 200ML 이하로, 범람위험지도를 작성하는 하도 연장은 5km로 설정되었다. 산대저수지에서 유출된 유량은 칠평천으로 흘러 들어간다. 침수흔적에는 칠평천 주변의 범람이 없는 것으로 나타나 있지만, 범람위험지도에는 일부에서 범람이 발생하는 것으로 나타나 있다. 이런 지역은 잠재적 범람 가능성을 갖는 곳일 수도 있지만 5m 해상도 DEM이 하천 제방 또는 하천 바닥 형상을 제대로 재현하지 못하여 발생하는 현상일 수도 있다. 칠평천 유입 전의 범람위험지도는 침수흔적과 유사한 범람영역을 재현하고 있음을 볼 수 있다.

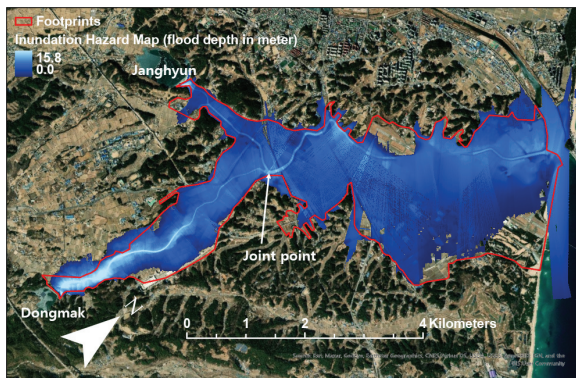


※ Source: LX(2019). for the footprints.  
Figure 13. Inundation hazard map and footprints for Naedeok reservoir, GiJang-gun

부산 기장군 내덕저수지의 저수량은 45ML이며, 제체 높이 11m, 제체 해발고도 96.6m이며, 저수지 수심은 제체 높이와 동일하게 가정하여 모의에 사용하였다. <Figure 13>은 내덕저수지의 범람위험지도와 침수흔적(LX, 2019)을 보여준다. 내덕저수지에서 유출된 유량은 덕선천을 따라 흐르다가 좌광천으로 유입된다. 당시 침수흔적을 보면 덕선천과 좌광천 주변 많은 곳에서 범람했음을 알 수 있다. 사고 당시 인근 관측소에서는 한시간최다강수량 130mm가 관측되었다. 이와 같은 호우 속에서 저수지 사고가 일어나면서 많은 곳이 범람하였다. 내덕저수지의 저수량 200ML이하로 하도 연장은 5km까지 계산되었다. 전체적인 범람위험지도 형상이 침수흔적과 일치하는 모습을 보인다.

2002년 태풍 루사 당시 한시간최다강수량 100.5mm(강릉 기상대 관측 이래 최대), 최다일수량 870.5mm(강릉 기상대 관측 이래 최대)를 기록하며 <Figure 14>에 나타난 장현저수지(총저수량 2,176ML)와 동막저수지(902ML)가 동시에 붕괴되는 사고가 발생하였다. 장현저수지 붕괴 모의에는 제체 높이 16m, 제체 해발고도 25m가 적용되었으며 저수지 수심은 제체 높이로 적용하였다. 침투단면은 1,163㎡로 추정되었다. 동막저수지 붕괴 모의에서는 제체 높이 24.2m, 제체 해발고도 87.3m가 적용되었으며 저수지 수심은 제체 높이로 가정하였다. 침투단면은 3,417㎡로 추정되었다. 저수지 동시 붕괴 모의는 두 하도가 만나는 지점부터 종점까지의 하도단면을 두 침투단면의 합을 적용하여

수행되었다. <Figure 14>는 장현·동막 저수지 동시 사고에 대한 범람위험지도와 침수흔적(Kim, 2004)을 보여준다. 범람위험지도 형상이 전체적으로 침수흔적과 유사함을 볼 수 있다.



※ Source: Kim(2004). for the footprints.

Figure 14. Inundation hazard map and footprints for Janghyun and Dongmak reservoirs, Gangneung-si

지금까지 침수흔적을 알 수 있는 3건의 과거 저수지 사고에 대해서 침수흔적과 범람위험지도의 비교를 통하여 본 연구에서 개발한 범람위험지도 작성기법이 전수 저수지 피해규모 추정에 기초가 되는 범람위험지도 작성 실무에 활용될 수 있음을 보였다.

경북 영천시에는 826개소의 저수지가 위치하고 있으며, 본 연구에서 개발한 범람위험지도 작성기법을 통하여 전수 저수지에 대한 범람위험지도를 작성하는데 소요된 시간은 9시간 45분이었다. 경북 경주시에는 382개소의 저수지가 있으며, 6시간 27분이 전수 저수지 범람위험지도 작성에 소요되었다. 이 정도의 소요 시간은 저수지 관리주체 단위가 되는 시군구 단위의 전수 저수지의 적용이 가능할 것이다.

#### IV. 결론

2014년 세월호 침몰 사고로 299명의 사망자가 발생하면서 사회·정치적으로 갈등과 대립이 고조되면서 큰 내홍을 겪었다. 올해 2020년 이천 물류센터 화재로 38명이 사망하면서 또한 큰 사회적 문제가 되었다. 저

수지 사고로 인한 대규모 인명피해는 1961년 효기저수지 사고 이후 다행히도 발생하지 않고 있지만, 가능성은 여전히 현존하고 있다.

앞에서 언급했듯이 현행 저수지 안전관리는 사고을 관리 관점에서 진행되고 있다. 하지만 사회적 갈등을 최소화할 뿐 아니라 인명 안전을 강화하기 위해서는 사회 리스크 관리 관점에서의 패러다임 전환이 필요하다. 이런 뉴패러다임을 실무에 적용하기 위해서는 전수 저수지의 피해규모 추정이 가능토록 뒷받침이 필요하며, 본 연구는 이 점에 이바지하고자 진행되었다.

공간정보분석 기반의 범람위험지도 작성기법은 전통적인 전산유체해석 기반의 범람위험지도 작성기법에 비해 혁신적으로 빠른 해석력을 보여주며 전수 저수지 적용을 가능케 한다. 또한, 본 연구에서 개발한 범람위험지도가 과거 저수지 사고의 침수흔적을 상당히 잘 재현하는 것으로 나타나 실무적 사용가능성을 보일 수 있었다.

향후 연구로는 본 연구의 범람위험지도를 기반으로 범람위험지도 내에 속한 인명과 재산의 피해를 추정하는 과정이 진행될 예정이며, 이를 통해 전수 저수지의 피해규모 추정을 완수할 수 있도록 연구를 완성하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술 개발사업의 연구비지원(2018-MOIS31-009)에 의해 수행되었음.

#### References

ANCOLD. 2003. *Guidelines on Risk Assessment*.  
 FEMA. 2012. *Assessing the Consequences of Dam Failure*.  
 FEMA. 2015. *Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management*, FEMA P-1025.

- Go, D. H., K. H. Lee, J. M. Kim, and S. W. Kim. 2015. FLO-2D Simulation of the Flood Inundation Zone in the Case of Failure of the Sandae Reservoir Gyeongju, Gyeongbuk. *Journal of Engineering Geology*. 25(4): 449-458.
- Kim, Byung Hyun. 2004. Flood Inundation Analysis in Janghyun and Domgmak Reservoir due to Typhoon Rusa. Master Degree. Kyungpook National University.
- Lee, Young Kyu. 2018. Risk Analysis for Reservoir Collapse by a Multi-hazard Approach. *Crisisonomy*. 14(11): 123-134.
- Liu, Wenjun, Bo Wang, Yunliang Chen, Chao Wu, and Xin Liu. 2018. Assessing the Analytical Solution of One-dimensional Gravity Wave Model Equations Using Dam-break Experimental Measurements. *Water*. 10(1261): 1-16.
- LX. 2019. Flood Footprints Information. Public Data Portal. data.go.kr
- NSWDSC. 2006. Risk Management Policy Framework for Dam Safety. New South Wales Government Dams Safety Committee.
- Planchon, O. and F. Darboux. 2002. A Fast, Simple and Versatile Algorithm to Fill the Depressions of Digital Elevation Models. *Catena*. 46(2): 159-176.
- State of Queensland. 2018. *Guidelines for Failure Impact Assessment of Water Dams*.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*. 5(1): 81-100.
- USACE. 2009. *Interim Tolerable Risk Guidelines for US Army Corps of Engineers Dams*.
- USBR. 2011. *Dam Safety Public Protection Guidelines: A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-making*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Korean References Translated from the English*
- 고대홍, 이길하, 김진만, 김성욱. 2015. 댐붕괴 모형과 FLO-2D를 연동한 산대저수지 붕괴 침수 모의. *지질공학*. 25(4): 449-458.
- 김병현. 2004. 태풍 루시시 장현 · 동막저수지 붕괴에 따른 홍수 범람해석. 석사학위논문. 경북대학교.
- 이영규. 2018. 복합재난접근법에 의한 저수지 붕괴 리스크 분석. *Crisisonomy*. 14(11): 123-134.
- 한국국토정보공사. 2019. 침수흔적 정보. 공공데이터포털. data.go.kr

---

Received: Jun. 24, 2020 / Revised: Jul. 27, 2020 / Accepted: Jul. 27, 2020

## 공간정보를 활용한 저수지 사고 범람위험지도 작성기법 개발

**국문초록**    현행 저수지 안전관리 관점은 사고율 관리에 방점이 찍혀 있다. 이런 관점은 저수지 사고를 최소화할 수 있다는 장점을 가지나 인명과 재산 피해를 효율적으로 관리할 수 없다는 약점을 갖는다. 저수지 사고로 인한 인명과 재산 피해를 최소화하기 위해서는 사회 리스크 관리 관점으로 패러다임 전환이 필요하다. 사회 리스크 관리 관점에서 전수 저수지를 관리하기 위해서는 전수 저수지의 피해규모 추정이 가능토록 기술이 뒷받침해줘야 한다. 특히 전수 저수지에 적용가능한 범람위험지도 작성기법이 뒷받침해줄 수 있어야 한다. 본 연구에서는 전수 저수지의 범람위험지도 작성을 지원하기 위해서 공간정보를 활용한 범람위험지도 작성기법을 개발했다. 본 연구의 작성기법을 적용한 범람위험지도는 과거 저수지 사고시 침수흔적이 있는 사례와 비교를 통하여 사용가능성을 검증하였다. 또한 경북 경주시 382 개소 전수 저수지의 범람위험지도 작성에 6시간 27분이 소요되었으며, 경북 영천시 826개소 전수 저수지에 9시간 45분이 소요되는 것을 보여, 본 연구 성과가 실무에 적용가능함을 보였다.

주제어 : 저수지, 범람위험지도, 붕괴, 피해규모, 리스크, 공간정보

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

**Sungsu Lee** : He received his B.A. and M.S. from Seoul National University, South Korea, and Ph.D. from Colorado State University, USA in 1997. He has been a professor in School of Civil Engineering, Chungbuk National University since 2000. His research mainly focuses on risk assessment and management, quantification of natural and societal hazard and disasters(sungulee@chungbuk.ac.kr).

**Hung Soo Kim** : He received his B.A and M.S degree in Korea University, and Ph.D from Colorado State University in USA. He is a professor of Inha University, Korea and his interesting subjects and areas of research are climate change, natural hazards, chaos, wetland(sookim@inha.ac.kr).

**Hee Jung Ham** : He earned his B.S from Konkuk University. He received his M.S and Ph.D. degrees from the State University of New York at Buffalo and Colorado State University, respectively. He is a professor of Kangwon National University, Korea. His interesting subjects and areas of research are wind engineering, natural hazard mitigation, natural hazards risk assessment, and structural analysis(heejham@kangwon.ac.kr).

**Jongwon Jung** : He received his B.A and M.S degree in Korea University, and Ph.D from Georgia Institute of Technology in USA. He had worked at Louisiana State University in USA during 2012-2017 as an assistant professor. Since 2017, he has worked at Chungbuk National University in KOREA as an associate professor. His interesting subjects and areas of research are energy geotechnology, soil improvement, and soil dynamic(jjung@chungbuk.ac.kr).