

# DAMBRK 모형을 이용한 괴연저수지 붕괴유출량 추정

이진영\* · 박동혁\*\* · 김성준\*\*\* · 김태웅\*\*\*\*

Lee, Jin Young\*, Park, Dong Hyeok\*\*, Kim, Seong-Joon\*\*\*, Kim, Tae-Woong\*\*\*\*

## Estimation of Break Outflow from the Goyeon Reservoir Using DAMBRK Model

### ABSTRACT

Several reservoirs that were managed by local governments and the Korea Rural Community Corporation have recently collapsed. One of them is the Goyeon reservoir in Yeongcheon-si, Gyeongsangbuk-do that collapsed mainly around the spillway due to heavy rain at 9 O'clock, on 21 August 2014. The Goyeon reservoir was an aging agricultural reservoir over 70 years since it was built. In this study, the collapse situation of the reservoir was reproduced through the DAMBRK model. Flood inundation maps were reconstructed for the breach outflow of the dam analyzed by the DAMBRK model. We estimated the breach duration and outflow of the reservoir as compared with the inundation image taken by the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) at the time when the Goyeon reservoir collapsed. The results of this study are expected to be useful for predicting damage in the downstream inundation area when a reservoir collapses.

**Key words :** Goyeon reservoir, Dam failure, Breach outflow, UAV

### 초록

최근 지자체 및 한국농어촌공사가 관할하는 저수지의 붕괴가 빈번하게 발생하고 있다. 최근의 사례로, 축조된 지 70년 이상의 노후된 농업용 저수지인 경북 영천시 소재의 괴연저수지가 2014년 08월 21일 9시경 집중호우로 인하여 여수로를 중심으로 붕괴되었다. 본 연구에서는 괴연저수지의 붕괴상황을 DAMBRK 모형을 통하여 재현하였다. 그리고 DAMBRK 모형에서 분석된 댐붕괴 유출량으로 침수범람도를 작성하였다. 괴연저수지 붕괴 당시 무인항공기로 촬영한 침수사진과 비교하여 괴연저수지의 붕괴 지속시간과 붕괴유출량을 추정하였다. 본 연구 결과는 괴연저수지와 같이 저수지 붕괴가 발생할 경우, 하류 지역에 대한 침수피해 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**검색어 :** 괴연저수지, 댐 붕괴, 붕괴유출량, 무인항공기

## 1. 서론

2013년 현재 우리나라의 국토 중 논·밭의 면적은 약 908,194 ha이며, 논·밭의 관개를 위한 농업용 저수지는 약 17,427개이다. 이중 한국농어촌공사가 관리하는 저수지는 3,377개이고 지방자치단체가 관리하는 저수지는 14,050개이다(Korea Rural Community Corporation, 2014). 한국농어촌공사가 관할하는 저수지 중 50년 이상된 시설물이 약 67%에 달하며, 시설이 노후화되거나 파괴되어 본래 기능을 발휘하지 못하여 댐 붕괴의 우려가 있는 저수지가 전국에 산재해 있다. 또한, 최근의 이상기후로 인하여 저수지 축조 당시의 설계홍수량을 상회하는

\* 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Hanyang University · hydrojy@hanyang.ac.kr)

\*\* 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Hanyang University · smilehyuki@hanyang.ac.kr)

\*\*\* 중신회원 · 건국대학교 공과대학 사회환경플랜트공학과 교수 (Konkuk University · kimsj@konkuk.ac.kr)

\*\*\*\* 중신회원 · 교신저자 · 한양대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 교수

(Corresponding Author · Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received November 29, 2016/ revised December 25, 2016/ accepted February 3, 2017

호우사상이 발생하고 있고, 설계기준이 향상되고 영농 여건의 변화함에 따라 저수지의 기능이 저하된 시설에 대한 개보수 사업의 중요성이 대두되고 있다.

국내외에서 발생한 대표적인 댐/저수지 붕괴 사례를 살펴보면 다음과 같다. 미국에서는 1923년 세인트 프란시스(St. Francis) 댐 붕괴로 431명, 1963년 볼드윈 힐스(Baldwin Hills) 댐 붕괴로 5명, 1972년 버팔로 크릭(Buffalo Creek) 댐 붕괴로 125명, 1976년 테톤(Teton) 댐 붕괴로 11명의 인명피해가 발생하였다. 유럽에서는 1959년 프랑스 말파셋(Malpasset) 댐 붕괴로 423명의 인명피해가 발생하였고, 1963년 이탈리아의 바조트(Vajont) 댐 붕괴로 2,500여명이 사망하였으며, 1983년 스페인 토우스(Tous) 댐 붕괴로 30여명 그리고 1985년 이탈리아의 발데스타바(Val de Stava) 댐 붕괴로 268명의 사망자가 발생하였다. 아시아에서는 1975년 중국 반차오(Banqiao) 댐 붕괴로 인한 직간접적인 피해로 171,000명이 사망하였으며, 1979년 인도의 마츠후(Machhu) II 댐 붕괴로 5,000여명 이상의 인명피해가 발생하였다. 우리나라의 경우, 1961년 남원 효기리저수지의 붕괴로 인하여 155명의 사망자가 발생하였고, 1972년 부산 구덕저수지 붕괴로 75명의 인명피해가 발생하였으며, 한탄강유역에 위치한 연천댐은 1996년과 1999년에 2차례나 붕괴되었다. 그리고 강릉 남대천유역에 위치한 장현저수지와 동막저수지는 2002년 태풍 루사에 의해 26시간 동안 약 875 mm의 집중호우로 인해 연속으로 붕괴되었다. 2013년에는 경주 산대저수지가 붕괴되어 저수지 안전에 대한 사회적 관심을 불러일으키는 계기가 되기도 하였다(Kim and Han, 2016).

댐이나 저수지의 붕괴는 많은 인명피해와 재산피해를 야기하기 때문에 이와 관련된 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 예를 들어, Cristofano (1965)는 흙댐의 붕괴부 발달과정에 관한 연구를 최초로 수행하였으며, McDonald and Langridge-Monopolis (1984)는 붕괴단면의 형상, 붕괴 규모, 붕괴 발달시간, 침투 유출량에 대하여 연구하였다. Coleman et al. (2002)는 제체의 율류 흐름에 대한 붕괴 형상의 발달과정에 대하여 연구하였다. 우리나라의 경우, Han (2002)는 댐 붕괴 홍수해석 모형을 이용하여 댐 붕괴 모형의 구성요소, 모의과정 등 주요 특징을 비교 검토하였으며, Han et al. (1985)는 흙댐의 붕괴로 인한 유출수문곡선을 산정하고 댐 붕괴 높이와 붕괴 지속기간의 변화에 따른 침투유출량 및 수문곡선을 도출하는 공식을 제시하였다. Kim (2001)은 제방의 붕괴부 폭과 붕괴 지속기간에 대해 연구하였다. Kim and Han (2016)은 DAMBRK 모형을 이용하여 장현/동막저수지의 붕괴를 재현하고 Association of State Dam Safety Officials (ASDSO) (2005)에서 제시한 침투 붕괴유출량 산정방법을 이용하여 시나리오별 모형 결과와 가장 유사한 붕괴지속기간을 결정하였다. 또한, DAMBRK 모의결과와 실측홍수위를 비교함으로써 붕괴 유출량 산정공식의 타당성을 검증하였다.

최근 전 세계적으로 무인항공기(UAV)를 활용하여 재해 지역의 자료를 확보하는 사례가 늘어나고 있다. 예를 들어, 미국 항공우주국(NASA)은 UAV를 이용하여 허리케인의 중심부 자료를 수집하여 허리케인 대비에 활용하고 있다. 네팔은 2015년 4월 네팔 지진으로 인하여 건물이 붕괴되었을 때 수색구조 서포터로 UAV를 띄워 최적 진입로 탐색과 같은 수색작업에 활용하였다. 스위스는 재난 발생으로 실종자가 발생하였을 때, 실종자의 스마트폰 와이파이(Wi-Fi)를 감지하여 실종자를 찾을 수 있는 UAV를 개발하고 있다.

댐이나 저수지의 재원과 붕괴부의 형상은 하류에서 발생하는 피해의 가장 큰 변수가 된다. 댐이나 저수지 비상대처계획(Emergency Action Plan, EAP) 수립을 위해서는 DAMBRK 모형을 이용하여 댐이나 저수지의 붕괴 유출량을 산정하게 된다. 붕괴부의 형상은 ASDSO (2005)에서 제시한 기준에 따라 붕괴 지속기간, 붕괴부 경사, 붕괴부 폭을 변수로 시나리오를 구성하게 된다. 일반적으로 붕괴 유출량이 가장 크게 나오는 시나리오에 대하여 침수범람도와 EAP를 작성하여 하류에 대한 피해 범위를 결정하게 된다. 하지만, 실제 댐이나 저수지의 붕괴 사례가 많지 않고 댐이 붕괴되었을 때의 피해지역에 대한 정확한 정보가 없기 때문에 과거에 수집된 붕괴 특성 자료만을 참고하여 대책을 수립하고 있는 실정이다.

댐이나 저수지의 붕괴가 발생하게 되면 짧은 시간에 큰 피해를 야기하기 때문에 피해 지역에 대한 정보를 파악하는데 어려움이 있다. 댐이나 저수지의 붕괴는 붕괴부의 형상에 따라 유출량의 변화가 매우 크기 때문에 붕괴 유출량은 하류의 인명 및 재산피해에 있어서 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 하지만 UAV 영상이나 사진을 활용하게 되면 재해 피해 지역의 정보를 확보할 수 있다.

본 연구에서 DAMBRK 모형 구축에 필요한 수위-수표면적과 시나리오별 붕괴유출량을 추정하는 방법은 Kim and Han (2016)에서 적용한 방법과 유사하다. 그러나 Kim and Han (2016)은 DAMBRK 모형으로 도출된 수위와 하류지점의 실측 수위를 활용하여 붕괴 지속기간의 정확성을 검증하는 것에 중점을 둔 반면, 본 연구는 DAMBRK 모형으로 추정된 붕괴유출량을 바탕으로 시나리오별 침수범람도를 작성하고 저수지 붕괴 후 촬영된 UAV 사진과 비교·분석하여 추정된 붕괴유출량과 붕괴 지속기간의 실제 적용성을 검토하는 것에 중점을 두었다.

본 연구의 대상지역인 경북 영천시 소재의 괴연저수지는 2014년 8월 21일 오전 9시경 집중호우로 인하여 여수로로 중심으로 붕괴되었다. 붕괴 당시의 영천시 5일 누적강우량은 250.5 mm이었고, 저수지 붕괴로 인하여 하류 농경지 7.5 ha가 침수되고 주택의 침수피해가 발생하였다. 괴연저수지의 붕괴가 발생하기 이전의 자료는 정밀지형도로 활용가능하고 붕괴가 발생한 이후의 자료는 침수흔적으로 활용가능하다. 따라서, 괴연저수지 붕괴로 인한 침수 발생 전후의 UAV 촬영 사진을 Park and Park (2015)의 연구결과

에서 수집하고 UAV 촬영 사진을 이용하여 정밀지형도 및 침수흔적도로 활용하였다. 붕괴 당시 침수흔적도와 비교하고 모형의 결과로부터 괴연저수지 붕괴 지속기간과 붕괴 유출량을 추정하였다.

## 2. 연구방법

댐/저수지 붕괴가 발생하면 하류에 직접적으로 영향을 끼치는 인자는 붕괴 유출량이다. 붕괴 유출량은 저류량 및 유입량에 의해 영향을 받지만, 붕괴부의 형상을 결정하는 붕괴 지속기간, 붕괴부 경사, 붕괴부 폭에 의하여 결정된다. 괴연저수지 붕괴 당시의 언론 보도 및 발표자료를 이용하여 붕괴 지속기간을 제외한 저류량, 유입량, 붕괴부 경사, 붕괴부 폭을 결정하였다. 괴연저수지의 붕괴 유출량과 붕괴 지속기간을 추정하기 위하여 붕괴 지속기간에 따른 시나리오를 구성하고 HEC-GeoRAS를 이용하여 시나리오별 침수 범람도를 작성한 후, 괴연저수지 붕괴 당시에 촬영된 UAV 사진과 가장 유사한 침수범위를 가지는 침수범람도를 채택하여 괴연저수지의 붕괴 지속기간과 붕괴유출량을 추정하였다.

### 2.1 DAMBRK 모형

DAMBRK 모형은 제당의 붕괴로 인한 유출 수문곡선의 작성과 하류의 홍수추적을 수리학적으로 해석하기 위하여 개발되었다. DAMBRK 모형은 다른 모형에 비해 실제 저수지 붕괴 양상을 가장 잘 반영할 수 있는 모형이다. 댐이나 저수지의 붕괴로부터 유출 수문곡선을 분석하고 하류단으로 유출되는 홍수를 수리학적으로 추적하기 위해 사용된다. DAMBRK 모형은 저수지의 연속 붕괴모의와 동시 붕괴모의를 수행할 수 있으며, 저수지 붕괴에 따른 저수지 감수곡선을 모의할 수 있고, 전 세계적으로 많은 적용 사례를 가지고 있다.

DAMBRK 모형의 동역학적 홍수추적은 연속방정식(Eq. (1))과 운동량방정식(Eq. (2))으로 구성된 Saint-Venant 식을 비선형 유한 차분법으로 해석하게 된다(Fread, 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + qA \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_c \right) + L = 0 \quad (2)$$

여기서,  $x$ 는 하천의 흐름방향거리,  $t$ 는 시간,  $Q$ 는 유량,  $h$ 는 수위,  $A$ 는 유수단면적,  $A_0$ 는 저류단면적,  $S_f$ 는 마찰경사,  $S_c$ 는 단면변화에 따른 손실경사,  $q$ 는 측방유출입량,  $L$ 은 측방유출입량에 의한 운동량의 변화량이다.

DAMBRK 모형은 댐 붕괴에 따른 붕괴유출수문곡선의 도출, 댐

하류부 홍수추적을 위하여 미국 연방재난관리청(FEMA), 연방에너지규제위원회(FERC), 연방개척국(USBR), 국제대담회(ICOLD), 유럽연합(EU) 등에서 댐붕괴 모의모형으로 추천되고 있다. 실제로 DAMBRK 모형은 미국 및 우리나라의 댐/저수지 붕괴로 인한 EAP 수립에 많이 적용되었으며, 이를 통해 그 적용성이 입증된 모형이기도 하다(Kim and Han, 2016).

### 2.2 UAV 사진 활용

우리나라에서 축조한 저수지는 대부분 계곡에 위치하는 계곡형 저수지로 위성 및 항공 영상자료는 물론 실제 측량자료가 거의 없는 실정이다(Park and Park, 2015). UAV 촬영 영상이나 사진은 재해 발생 지역을 필요한 시기에 적시에 촬영하여 피해상황을 정확하게 파악하고 분석할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 Park and Park (2015)이 UAV 촬영 사진을 영상처리하여 작성한 것을 정밀지형도 및 침수흔적도로 활용하였다. 사진을 촬영한 무인항공기(UAV)는 프로펠러 8엽으로 구성된 것으로 크기는  $1,300 \times 1,300 \times 140$  mm이고 무게는 3.5 kg이다. 취득영상의 왜곡 방지를 위해 기준점 조사를 실시하고 GPS 측위시 발생하는 오차를 2대 이상의 GPS 수신기에서 동시 소거함으로써 수 mm의 정확도를 확보하였다. 영상해석은 Photo Scan 및 ArcGIS를 사용하여 영상 접합(모자이크), 2D 평면도 및 3D 지형도를 작성하였다(Park and Park, 2015). UAV 비행경로와 3D 지형도 및 2D 평면도를 작성하는 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

본 연구에서는 붕괴된 괴연저수지 유역에 대해 UAV로 촬영한 총 338장의 고해상도( $1 \times 1$  m) 사진을 활용하여 침수면적을 산출하였다. 또한, 2011년 다음지도를 이용하여 UAV 촬영 사진 수준으로 보간한 정밀지형도를 활용하였다. 괴연저수지 붕괴 이후에 저수지 내의 물이 전부 배제된 시점에서 촬영된 UAV 사진은 Park and Park (2015)에서 획득하였다. UAV 항공사진을 이용하여 촬영한 정밀지형도와 위성영상과 합성한 침수범위를 Fig. 2에 나타내었다. 이러한 자료들은 저수지 붕괴 전후의 상황을 비교분석하는데 활용되었다.

## 3. 괴연저수지 붕괴 모의

괴연저수지는 경상북도 영천시 소재의 지자체 관할 저수지로 1945년에 토언제중심점토형으로 축조되었다. 괴연저수지의 붕괴 원인은 노후화와 집중호우로 인한 여수로 주변의 침투현상이었다. 2014년 8월 17일부터 21일까지 250.5 mm의 집중호우에 의해 저수지내 수위가 급상승하면서 제방부분의 수압이 증가되었고 약해진 지반을 통해 균열이 발생하여 파이프 현상으로 붕괴가 진행되었다.

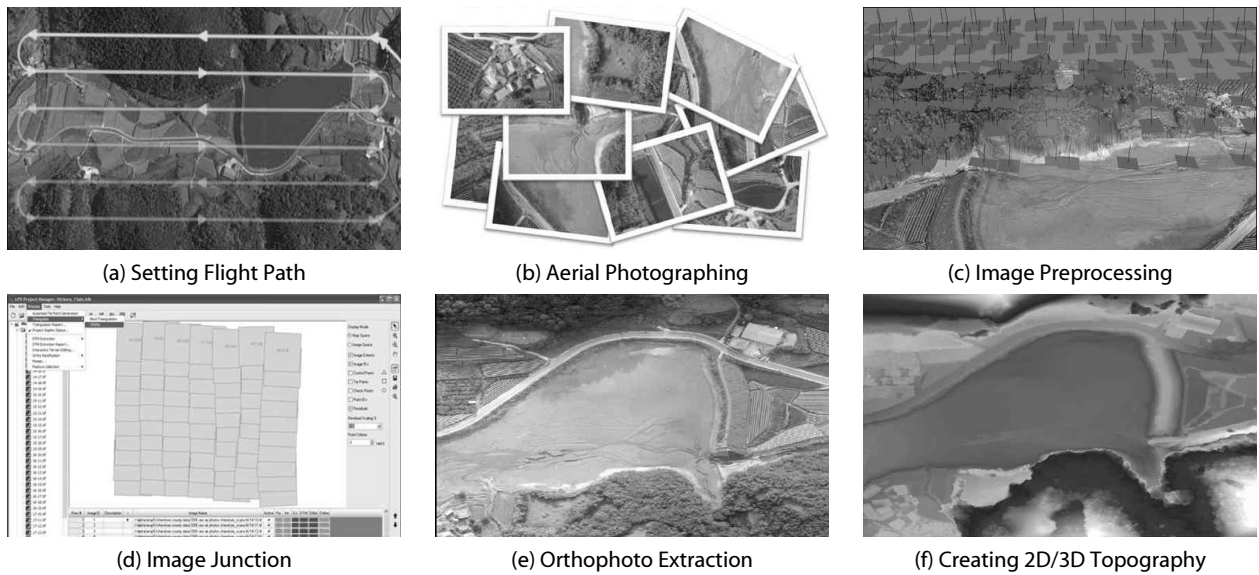


Fig. 1. Process of 2D/3D Topographical Mapping using UAV (Park and Park, 2015)

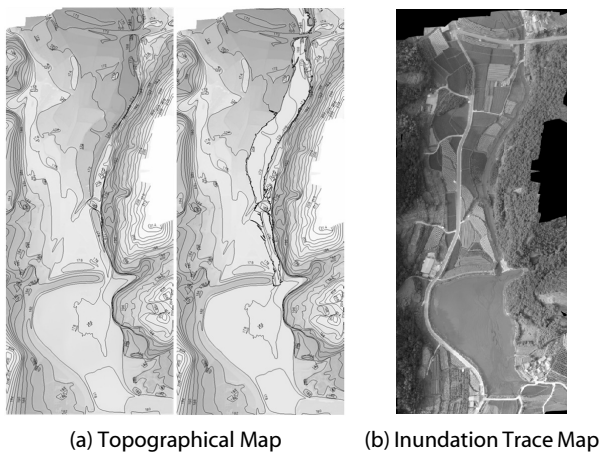


Fig. 2. Topographical Map and Inundation Trace Map using UAV (Park and Park, 2015)

### 3.1 저수지 수위수표면적 관계 도출

수문학적 홍수 추적을 위해서는 제당지점에서 홍수류의 시간적 변화에 따른 수문곡선을 예측해야 한다. 저수지 홍수 추적의 경우, 저수지의 수면을 수평으로 보고 유입 수문곡선을 이용하여 유출 수문곡선을 구하는 과정에서 저수지 수위-수표면적 관계가 필요하다. 하지만 괴연저수지와 같이 소규모의 지자체 관할 저수지는 수위-수표면적 관계를 유도할 수 있는 측량성과가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 괴연저수지 붕괴 이후 촬영한 고해상도 UAV 사진과 Arc-View를 활용하여 수위별 수표면적의 관계를 도출하였다. 고시된 괴연저수지의 관계면적은 125 ha이며, 유효저류용량은 61,000 m<sup>3</sup>이다. 괴연저수지의 댐 정고 및 저수지내 최저수위, 여수로 정고 등과 같은 기초자료가 부족하기 때문에, 정밀지형도를

Table 1. Estimated Water Level-Surface Area and Storage Capacity

Elevation (EL. m)	Storage Area (m <sup>2</sup> )	Storage Capacity (m <sup>3</sup> )
177.0	47.1	26.1
178.0	2,794.9	844.6
179.0	8,733.1	7,302.5
180.0	10,652.6	16,923.4
181.0	11,785.3	27,924.3
182.0	12,549.5	39,786.7
183.0	12,996.9	52,138.4
183.7	13,400.7	61,000.0
185.0	13,900.1	78,012.9

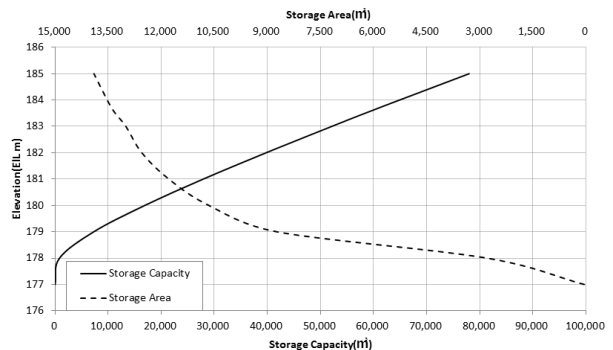


Fig. 3. Relationship Curves of Water Level-Surface Area and Storage Capacity

이용하여 댐 정고, 저수지내 수위, 여수로 정고를 추정하였다. 정밀지형도를 추정할 자료들은 과대추정되는 양상을 보이는데, 이를 보정하기 위하여, 본 연구에서는 고시된 유효저류용량인 61,000 m<sup>3</sup>을

최고수위에 맞추어 수위-수표면적 관계를 도출하였다. 그 결과, 괴연저수지의 최저수위는 EL. 175.77 m로 분석되었으며, 댐 정고는 EL. 183.7 m로 분석되었다. 각 수위별 면적과 저류용량은 Table 1과 Fig. 3과 같다.

### 3.2 DAMBRK 모형 구축 및 시나리오 구성

DAMBRK 모형을 구축하기 위해서는 붕괴부 폭, 붕괴 평균경사, 붕괴 지속기간에 대한 붕괴부 형상 및 붕괴 원인에 대한 정보와 유입수문곡선, 하류 횡단의 정보가 필요하다. 괴연저수지 붕괴 당시의 여러 매체를 통해 보도된 자료를 수집하여 붕괴부 폭과 평균경사를 추정하였으며, 괴연저수지에 대한 기본정보는 Table 2와 같다. 또한 댐/저수지의 붕괴 특성에 대한 기준은 Table 3과 같이 ASDSO (2005)에서 제시된 기준을 적용하였다.

또한, 기상청 영천관측소에 따르면 2014년 8월 17일 20시부터 8월 21일 07시까지의 누적 강우량은 250.5 mm로 붕괴시점인 8월 21일 09시 이전에 강우는 종료된 것으로 확인된다. 따라서 본 연구에서는 저수지 붕괴 시점에서의 저수지 수위는 만수위였고,

추가 유입량은 없는 것으로 가정하고 DAMBRK 모형에 적용하였다. Fig. 4는 영천관측소의 8월 17일부터 21일까지의 강우주상도이다.

괴연저수지는 필댐으로 ASDSO (2005)에서 제시한 필댐의 붕괴 지속기간 범위는 0.1 hr에서 3.0 hr이지만, 본 연구에서는 붕괴부 상단 폭 20.0 m, 붕괴부 측면 경사 1:1 고정하고 괴연저수지의 축조년도를 고려하여 붕괴 지속기간은 0.1 hr, 0.15 hr, 0.20 hr, 0.25 hr, 0.30 hr, 0.40 hr, 0.50 hr, 1.00 hr 의 8개 시나리오로 구성하였다.

## 4. 분석 결과

### 4.1 시나리오별 붕괴유출량 산정

댐이나 저수지는 붕괴가 발생하면서부터 완전히 붕괴되기까지 시간이 매우 짧기 때문에 이를 실측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 괴연저수지의 기본제원 및 붕괴관련 자료를 수집하여 붕괴 지속기간에 따른 붕괴 유출량을 산정하였다.

Table 2. Basic Information of Goyeon Reservoir and Breach Characteristics

Breach				Dam Crest (EL. m)	Storage Capacity (m <sup>3</sup> )	Reservoir Length (m)	Drainage Area (ha)
Height (m)	Width (m)	Slope	Type				
5.5	20.0	1:1	pipng	183.7	61,000	160.0	125.0

Table 3. Characteristics of the Dam/Reservoir Failure

Type of Dam	Average Width of Breach ( $\bar{b}$ )	Time to Maximum Breach Size (hrs)
Fill (Well Constructed)	$H_d \leq \bar{b} \leq 3H_d$	$0.5 \leq T \leq 3.0$
Fill	$H_d \leq \bar{b} \leq 3H_d$	$0.1 \leq T \leq 0.5$
Concrete (Gravity)	$\bar{b} \leq 0.5 W$	$T \leq 0.2$
Concrete (Arch)	$\bar{b} \geq 0.8 W$	$T \leq 0.1$

※  $H_d$ : Dam/Reservoir Height,  $W$ : Dam/Reservoir Width

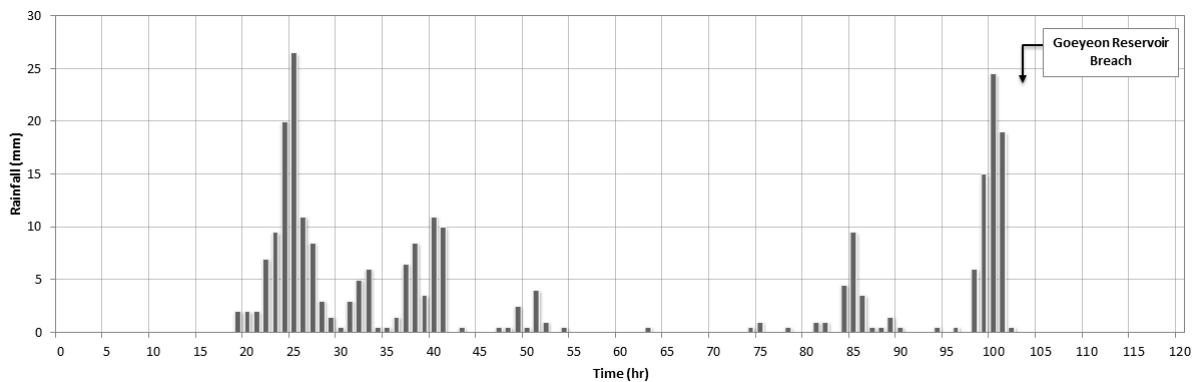


Fig. 4. Rainfall Hyetograph at Yeongcheon Station

DAMBRK 모형을 이용하여 도출된 붕괴유출량은 붕괴부 폭과 붕괴 평균경사가 동일할 경우, 붕괴 지속시간이 짧을수록 침투유출량이 크게 산정되는 경향이 있다. 괴연저수지는 소규모 농업용 저수지로 유효저류량이 작기 때문에 붕괴 지속시간 전에 침투유출량이 발생한다. Table 4에서 제시한 바와 같이, 붕괴 지속시간이 길어질수록 침투유출량 발생시간 간격이 줄어들며 각 붕괴 지속시간에 대하여 침투유출량은 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다. 괴연저수지 붕괴에 따른 유출수문곡선은 Fig. 5에 나타내었다.

Table 4. Peak Flow from Failure Scenarios of Goyeon Reservoir

Breach Time (hr)	Peak Flow Time (hr)	Peak Flow (m <sup>3</sup> /s)
0.10	0.095	116
0.15	0.104	97
0.20	0.133	86
0.25	0.163	78
0.30	0.184	72
0.40	0.235	62
0.50	0.275	56
1.00	0.482	37

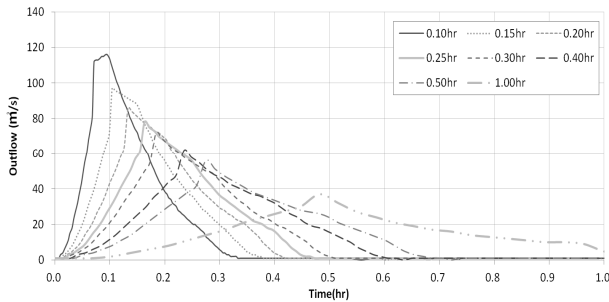


Fig. 5. Breach Outflow Hydrographs

Table 5. Results of Dam Failure Simulation

Breach Time (hr)	Flood Area (m <sup>2</sup> )	Simple Comparison		Lee Sallee Shape Index		
		$\frac{A \cap B}{A}$ (%)	$A - B$ (m <sup>2</sup> )	$A \cap B$ (m <sup>2</sup> )	$A \cup B$ (m <sup>2</sup> )	$\frac{A \cap B}{A \cup B}$
0.10	25,654	89.07	2,120	20,963	28,226	0.743
0.15	23,488	85.45	-46	20,110	26,912	0.747
0.20	22,052	82.24	-1,482	19,355	26,232	0.738
0.25	20,258	76.95	-3,276	18,109	25,683	0.705
0.30	19,289	74.23	-4,245	17,468	25,355	0.689
0.40	17,776	69.68	-5,758	16,398	24,913	0.658
0.50	16,348	64.52	-7,186	15,185	24,697	0.615
1.00	13,365	53.34	-10,169	12,552	24,347	0.516

※ A: Inundation Trace Map using UAV, B: Flood Inundation Maps by Scenarios

#### 4.2 침수범람도 작성

본 연구에서 침수범람도를 비교하기 위하여 HEC-GeoRAS를 이용하였다. HEC-GeoRAS는 HEC-RAS 모형의 지형자료를 처리하기 위해 미국의 솔루션 개발업체인 ESRI에서 개발한 Arc-View의 확장모듈로써, 전처리 과정과 HEC-RAS 실행, 후처리 과정을 통해 침수범람도를 도출할 수 있다. 일반적인 경우 수치지형도를 이용하여 하천의 형상에 대하여 정밀하게 작업하는 것이 필요하지만, 본 연구에서는 UAV 사진을 이용하여 정밀해상도(1 × 1 m)의 지형도를 구축하였다. DAMBRK 모형을 통해 도출된 시나리오별 침투유출량을 정류흐름 조건으로 HEC-RAS에 적용하여 침수범람 모의를 수행하였다.

HEC-RAS의 결과는 Arc-View에서 지형도와 계산된 횡단수위의 차를 이용하여 수심으로 변환하게 되며, 시나리오별 침수범람도에서 침수된 면적을 Table 5에 나타내었으며 시나리오별 침수범람도를 Fig. 6에 작성하였다.

#### 4.3 침수범람도 비교 및 붕괴유출량 추정

UAV를 활용하여 나타낸 침수범위는 실제 관측자료이므로 침수 혼적도로 볼 수 있다. 괴연저수지의 붕괴유출량에 따른 침수범람도를 평가하고 가장 적합한 침수범람도를 선정하기 위하여 두 가지 방법을 활용하였다. 첫 번째는 면적 비교에 의한 단순 비교이며, 두 번째는 Lee Sallee Shape Index (LSSI) 방법을 이용하여 UAV를 활용한 침수혼적도와 8개의 침수범람도를 비교하였다.

LSSI 방법은 기존 데이터와 측정 데이터를 중첩시켜 두 데이터가 교차되는 면적을 계산하여 두 데이터의 일치정도를 측정하는 방법이다(Clark et al., 1996). 즉, 두 자료 사이의 교집합 면적을 합집합 면적으로 나누어 일반화된 지수 형태로 값을 산출하여 두 자료 사이의 공간적인 위치 부합정도를 측정하는 지수이다. 본 연구에서 기존데이터는 침수혼적도이며 측정 데이터는 각 침수범람도이다.

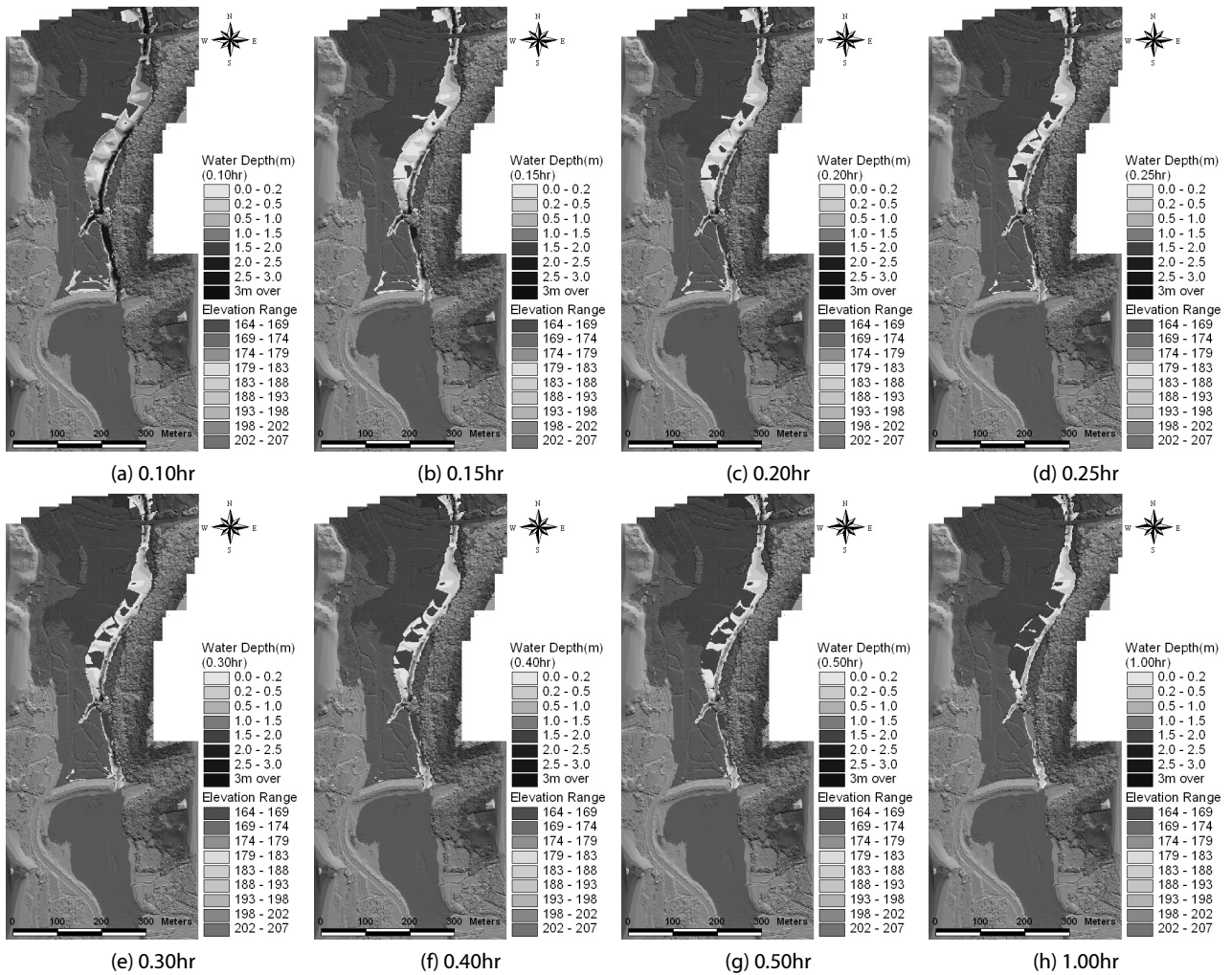


Fig. 6. Flood Inundation Maps by Scenarios

Table 5에서 A는 UAV 침수흔적도이며, B는 각각의 침수범람도이다. UAV를 활용한 침수흔적도의 침수면적은 23,534 m<sup>2</sup>이다. Table 5의 단순 비교에서는 침수흔적도와 대비해서 0.10 hr에서 가장 높은 적중률을 보이지만 침수흔적도의 면적과 2,120 m<sup>2</sup>의 차이가 발생한다. 침수면적에 대한 단순 비교에서 0.15 hr은 46 m<sup>2</sup>로 8개 시나리오 중 가장 작은 오차가 발생하는 것으로 분석되었다. LSSI 방법은 0.10 hr에서 0.743, 0.15 hr에서 0.747로 분석되어 괴연저수지의 붕괴 지속기간은 0.15 hr, 침투유출량은 97 m<sup>3</sup>/s인 것으로 분석되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 2014년 집중호우에 의하여 붕괴된 괴연저수지의 실제 붕괴 조건을 유추하기 위하여 시나리오별 붕괴유출량을 추정

하고 UAV를 활용한 침수흔적도와 비교하여 짧은 시간에 붕괴되는 괴연저수지의 붕괴유출량과 붕괴 지속기간을 추정하였다.

괴연저수지와 같이 축조된 지 오래된 수리시설물의 경우, 재해 완화를 위해서는 구조물적 대책뿐만 아니라 비구조물적 대책이 필요하다. 구조물적 대책은 시간 및 비용의 문제로 많은 저수지에 적용하기에는 불가능하므로 비구조물적 대책은 인명 및 재산피해의 저감을 위해 매우 유용한 방법이다.

최근 방재분야 및 다양한 분야에서 UAV를 활용한 사례가 늘고 있으며, 괴연저수지와 같은 측량성고가 전문한 소규모 저수지에 대하여 정확한 데이터가 구축된다면 저수지 붕괴에 따른 신속한 평가와 하류 인명 및 재산 피해 저감에 기여할 수 있을 것이다. 괴연저수지와 저류용량이 비슷한 소규모 저수지의 하류 영향평가에 본 연구의 결과가 비교자료로써 활용 가능할 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원[MPSS-자연-2015-79]을 받아 수행된 연구입니다.

## References

- ASDSO (Association of State Dam Safety Officials) (2005). *Dam Failure Analysis*, National Dam Safety Program, Columbus, Ohio, USA.
- Clarke, K. C., Hoppen, S. and Gaydos, L. J. (1996). "Method and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth." *Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modeling*, January 21-25th, Santa Fe, NM.
- Coleman, S. E., Andrews, D. P. and Webby, M. G. (2002). "Over-topping breaching of noncohesive homogeneous embankments." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, Issue 9, pp. 829-838.
- Cristofano, E. A. (1965). *Method of Computing Erosion Rate for Failure of Earthfill Dams*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- Fread, D. L. (1988). *The NWS DAMBRK Model: Theoretical Background/User Documentation*, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Spring, MD.
- Han, K. Y., Lee, J. T. and Lee, W. H. (1985). "An analysis of outflow hydrograph resulting from an earth Dam-Break." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 5, No. 2, pp. 41-50 (in Korean).
- Han, K. Y. (2002). "Study of dam break flood analysis model." *Magazine of Korea Water Resources Association, Water for Future*, Vol. 35, No. 1, pp. 64-72 (in Korean).
- Kim, J. H. (2001). "Analysis on embankment failure due to overflow." *Chung-Ang Journal of Environmental Science*, Institute of Environmental Science and Construction Chung-Ang University, Vol. 12, No. 2, pp. 97-107 (in Korean).
- Kim, B. H. and Han, K. Y. (2016). "Flood inundation analysis resulting from two parallel reservoirs' failure." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 49, No. 2, pp. 121-132 (in Korean).
- Korea Rural Community Corporation (2014). *Study on Deterioration Status and Repairing & Reinforcing Method on Facility of Reservoir ( I )*, KRC (in Korean).
- McDonald, T. and Langridge-Monopolis, J. (1984). "Breaching characteristics of dam failures." *Journal of Hydraulics Engineering*, Vol. 110, Issue 5, pp. 567-586.
- Park, J. K. and Park, J. H. (2015). "Reservoir failure monitoring and identified by the UAV aerial images." *Crisis and Emergency Management*, Vol. 11, No. 4, pp.155-167 (in Korean).