

노후저수지의 재해위험 강우 및 붕괴유출량 산정

Estimations of Hazard-Triggering Rainfall and Breach Discharge of Aging Reservoir

김동현* · 김종성** · 최창현*** · 왕원준**** · 유영훈***** · 김형수*****

Kim, Donghyun*, Kim, Jongsung**, Choi, Changhyun***, Wang Wonjoon****, You Younghoon*****, and Kim, Hung Soo*****

Abstract

In this study, because of its insufficient flood-control functions, the characteristics of an aging reservoir against hazard-triggering rainfall were identified. The DAMBRK model was used to estimate the amount of breach discharge from the aging reservoir. To identify the risks in the reservoir-storage rate, the water level-surface area relationship was derived to estimate the lowest and highest water levels as well as the inflow rate in the aging reservoir. The breach discharge from the aging reservoir was estimated using various rainfall scenarios and the data from the Association of State Dam Safety Officials. In addition, in terms of probable maximum precipitation rainfall, the breach-discharge amounts of the Neung-cheon, San-mak, Sin-gi, and Jeo-sa reservoirs were 697, 128, 96, and 71 m³/s, respectively. The results show that the level of the reservoir will approach or exceed the full water level when 225 mm of precipitation occurs, and the average reservoir water rate would remain at 60%. We therefore conclude that if the characteristics of the hazard-triggering rainfall are identified and the reservoir breach discharge is estimated, they can be used as essential data for the analysis of possible breaches in reservoirs similar to this study.

Key words : Aging Reservoir, Breach Discharge, Water Level-Surface Area, Hazard-Triggering Rainfall

요 지

본 연구에서는 홍수조절기능이 미흡한 농업용 노후저수지에 대하여 재해위험 강우 특성을 파악하고, DAMBRK 모형을 이용하여 노후저수지의 붕괴유출량을 산정하고자 하였다. 저수지 수위-수표면적 관계를 도출하여 노후저수지의 최저 및 최고 수위와 노후저수지로 유입되는 유입유량을 산정하여 저수지의 저수율에 따른 위험성을 파악하였다. 또한, 다양한 강우 시나리오 및 Association of State Dam Safety Officials (ASDSO) 에서 제안하고 있는 붕괴 지속기간 추정 방법론과 DAMBRK 모형을 이용하여 노후저수지의 붕괴유출량을 산정하였다. 산정 결과를 보면, 저수지에 따른 특성이 다르지만, 평균 저수율이 60%를 유지하면서 약 225 mm의 강우가 내리면 저수지의 수위가 만수위에 근접하거나 넘어서게 된다. 또한, PMP 강우가 내렸을 경우에 능천 저수지의 붕괴유출량은 697 m³/s, 산막 저수지는 128 m³/s, 신지 저수지는 96 m³/s, 저사 저수지는 71 m³/s로 산정되었다. 본 연구의 결과를 바탕으로 재해위험 강우 특성을 파악하고 저수지 붕괴유출량을 산정한다면, 본 연구와 비슷한 제원의 저수지에서 발생할 수 있는 붕괴에 대한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 노후저수지, 붕괴유출량, 수위-수표면적, 재해위험 강우

*정회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: yesdktpdi@naver.com)

Member, Doctor's Course, Department of Civil Engineering, Inha University

**정회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

Member, Doctor's Course, Department of Civil Engineering, Inha University

***정회원, 인하대학교 수자원시스템 연구소 박사후연구원

Member, Post-Doctoral Researcher, Institute of Water Resources System, Inha University

****정회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Inha University

*****정회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Inha University

*****교신저자, 정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 교수(Tel: +82-32-874-0069, Fax: +82-32-876-9787, E-mail: sookim@inha.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

1. 서론

국내 수리 시설물의 수는 총 71,982개소이고 면적은 707,000 ha이다. 용수를 공급하는 가장 중요한 수리 시설물인 저수지는 17,289개소(24.0%)이고 수리답 면적은 432,000 ha (61.1%) 이다. 그리고 농어촌공사에서 관리하는 저수지는 3,406개소에 수리답 면적은 337,172 ha이고 지자체에서 관리하는 저수지는 13,883개소에 수리답 면적은 102,723 ha이다. 또한, 준공된지 50년 이상 된 저수지는 13,079개소(75.7%)로 저수지가 노후화되어 본래의 기능을 발휘하지 못하는 시설물이 전국에 산재해 있다(KRC, 2017). 최근 기후변화에 따른 이상기후로 인하여 저수지 축조 당시의 설계홍수량을 상회하는 호우사상이 빈번하게 발생하여 저수지가 붕괴 되는 사례가 지속적으로 발생하고 있다.

국외에서 발생한 대표적인 저수지(댐) 붕괴 사례를 살펴보면 1975년 중국 Banqiao 댐 붕괴로 인한 피해로 171,000명이 사망하였으며, 1979년 인도의 Machhu II 댐 붕괴로 5,000여명 이상의 인명피해가 발생하였다. 1983년 스페인 Tous 댐 붕괴로 30여명 그리고 1985년 이탈리아의 Val de Stava 댐 붕괴로 268명의 사망자가 발생하였다(Kim and Han, 2016). 또한, 1999년 대만 최대의 용수공급원이었던 Shihkang 댐이 붕괴되었고 최근 2018년 라오스 Xe Pian-Xe Namnoy 댐이 붕괴 되면서 이재민 6000여 명을 포함해 1만 1000여 명이 피해를 입었다. 국내에서는 다목적 댐과 같은 대규모 댐이 붕괴된 경우는 없으나 1961년 효기리댐, 1996년 연천댐, 2002년 장현저수지 및 동막저수지, 2013 산대저수지, 2018년 모원저수지 붕괴 등과 같은 소규모이거나 농업용 저수지의 붕괴사례는 많은 실정이다. 농업용 저수지의 경우 홍수조절기능이 미흡하여 홍수기에 집중호우로 인한 피해에 취약한 실정이다.

저수지(댐)의 붕괴로 인한 인명피해 및 재산피해를 경감하기 위해서 국내·외에서 연구가 지속적으로 수행되고 있다. Brufau and Garcia-Navarro (2000)는 2차원 Navier-Stokes 방법을 활용하여 댐 붕괴시 댐 직하류의 흐름을 분석하였다. Kim (2003)은 유한체적 모형을 개발하고 이를 2차원 댐 붕괴과 해석에 적용하였다. Lencina (2007)는 댐 붕괴 해석에 있어 유한요소해석을 활용한 1차원 모형과 2차원 모형의 비교 및 분석을 하였다. Hydrologic Engineering Center (HEC, 2007)에서는 하와이 Kaphai 유역 상류부분의 댐 붕괴 해석을 위하여 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형을 연동하여 댐 붕괴 해석을 실시하였다. Hong et al. (2009)은 HEC-HMS 모형과 HEC-RAS 모형을 활용하여 소양강 댐에 가능최대강수량(PMP)이 발생하였을 때를 가정하여 소양강 댐의 붕괴유출량을 비교 및 분석하였다. Altinakar et al. (2010)은 정형격자를 활용한 2차원 유한체적모형의 결과와 1차원 수치모형의 결과를 비교하였다. Park et al. (2013)은 연속 댐 붕괴의 홍수과 해석을 위하여 연속 댐 붕괴모의기법을 적용하여 하류부

홍수과를 예측하였다. Lee et al. (2017)은 DAMBRK 모형을 활용하여 2014년 집중호우 및 노후화로 인하여 붕괴된 괴연저수지의 붕괴유출량을 추정하였다. Kim and Han (2016)은 DAMBRK 모형을 활용하여 장현 및 동막 저수지의 붕괴 당시의 상황을 재현하였다.

국내에서는 저수지나 댐을 효율적으로 관리하기 위하여 정밀안전진단 및 비상대처계획(Emergency Action Plan, EAP)을 수립하고 있으며, 비상대처계획에서는 저수지(댐) 하류부의 붕괴유출량을 산정하기 위하여 DAMBRK 모형을 추천하고 있다. 그러나 비상대처계획은 저수지(댐)의 총저수량이 30만 m^3 이상이거나, 다목적 댐, 발전용 댐 등에 대하여 적용하게 되어 있다. 대다수의 농업용 저수지에는 비상대처계획이 수립되어 있지 않으며, 홍수조절기능이 미흡하여 저수지(댐) 붕괴로 인한 피해는 사전에 대비하기가 어렵다. 또한, 농어촌공사에서 관리하고 있는 저수지의 경우 저수지의 저수율을 모니터링 하고 체계적으로 관리하고 있으나, 이에 비하여 지자체에서 관리하고 있는 소규모 농업용 저수지의 경우 관리가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 재해위험 강우 특성을 파악하여 저수지로 유입되는 홍수량을 산정하고, 저수율에 따른 위험성을 제안하는 것에 중점을 두었다. 또한, 저수지의 수위가 만수위보다 증가하는 경우 저수지 붕괴 시작되었다고 가정하고, 다양한 강우 시나리오 및 붕괴 시나리오를 구축하여 DAMBRK 모형에 의해 저수지 붕괴유출량을 산정하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 가능최대강수량 산정방법

가능최대강수량을 산정하는 방법에는 수문기상학적 방법(hydro-meteorological method)과 최대우량 포락곡선방법(maximum rainfall envelope curve method) 및 통계학적 방법(statistical method)의 세 가지가 있다(Hong et al., 2009). 본 연구에서는 가능최대강수량의 세 가지 산정 방법중에서 수문기상학적 방법을 사용하였다. 수문기상학적 방법은 실제 호우를 전이하는 방법과 가능최대강수량도를 이용하는 방법이 있는데, 실제 호우전이법의 경우 대상호우를 선정 한 후에 그 호우를 대상으로 전이비를 산정하여 호우 사상에 가중치를 적용함으로써 PMP-DAD를 산정하게 된다. 본 연구에서는 실제호우의 전이방법을 사용함으로써 특정 호우 사상을 사용하여 가능최대강수량을 산정하였다.

2.1.1 수문기상학적방법

2.1.1.1 기본방정식

수문최대화과 호우전이에 따라 조절된 강우량을 산정하는 방법은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$R_T = R_{IP} \times R_{HT} \times R_{VT} \times R_{CF} \times OP \quad (1)$$

여기서, R_{IP} 는 수분최대화비, R_{HT} 는 수평전이비, R_{VT} 수직전이비, R_{CF} 는 지형영향비, OP 는 관측강우량이다. 관측강우량은 어느 특정지점의 점 강우량이 아닌 면적강우량으로 강우깊이·면적·지속기간(DAD) 관계에서 도출되고, 대상유역에 영향을 미칠 수 있는 관측강우량을 수분최대화와 전이를 통하여 조절된 강우량을 지속기간별, 면적별로 포락하여 가능최대강수량을 결정한다.

2.1.1.2 수분최대화비

수분최대화비는 호우지대의 고도를 고려한 호우 발생일 약 15일 전후에서의 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량(mm)과 대표 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량(mm)의 비로 산정한다(Eq. (2)).

$$R_{IP} = \frac{W_{pm,si,sc}}{W_{ps,si,sc}} \quad (2)$$

여기서, $W_{pm,si,sc}$ 는 최대 12시간 지속 1,000 hpa 이슬점에 의한 가강수량(mm), $W_{ps,si,sc}$ 는 대표 12시간 지속 1,000 hpa 이슬점에 의한 가강수량(mm)을 나타낸다.

2.1.1.3 수평전이비

강수량의 수평변화는 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 기인된 수분의 차라고 가정하여 호우를 전이시킬 때 호우발생지대의 수평비는 두지대의 최대 12시간 지속 이슬점에 의한 가강수량의 비로 산정한다(Eq. (3)).

$$R_{HT} = \frac{W_{pm,ti,te}}{W_{pm,si,te}} \quad (3)$$

여기서, $W_{pm,ti,te}$ 는 호우지대의 고도를 고려한 전이지대의 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량, $W_{pm,si,te}$ 는 호우지대의 고도를 고려한 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량을 나타낸다.

2.1.1.4 수직전이비

호우 지대와 전이지대의 수직적 조절은 수분을 근거로 하며 이 비를 수직전이비라 한다(Eq. (4)).

$$R_{VT} = 0.5 + 0.5 \left(\frac{W_{pm,ti,te}}{W_{pm,ti,(sc \pm 300)}} \right) \quad (4)$$

여기서, $W_{pm,ti,(sc \pm 300)}$ 은 호우 지대와 전이지대의 고도차가 300 m 이상일 때 호우 지대의 고도에 대한 가강수량의 1/2을 고려하고, 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한

가강수량을 나타낸다.

2.1.1.5 지형영향비

지속기간 24시간 100년빈도 확률강우량의 비를 지형영향비로 사용한다(Eq. (5)).

$$R_{CF} = \frac{(100yr - 24hr)_{ti}}{(100yr - 24hr)_{si}} \quad (5)$$

여기서, $(100yr - 24hr)_{ti}$ 는 전이지대에서 호우 지대면적과 동등한 면적에 해당하는 평균 100년 빈도 24시간 확률강우량, $(100yr - 24hr)_{si}$ 는 호우 지대 평균 100년 빈도 24시간 확률강우량을 나타낸다.

2.1.1.6 포락

포락(envelopment)은 어떤 자료군에서 가능한 최대 값을 찾기 위한 과정이다. 세계기상기구(WMO)에서 소개하고 있는 절차는 최대화되고 전이된 강우량 값들을 그래프지에 도시한 후 최대값으로 매끄러운 곡선을 그리는 과정이다. 이 과정은 적용하는 사람의 판단으로 시행착오를 거치면서 적절하다고 판단될 때까지 계속적으로 반복하는 것이다.

2.2 가능최대강수량의 시간 및 공간 분포

2.2.1 가능최대강수량의 시간분포

강우의 시간분포는 국내에서는 주로 Huff 방법, Mononobe 방법, Yen-Cow 방법 등을 사용하고 있다. 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 사용하고 있는 Huff 방법을 사용하여 시간분포 하였다. Huff 방법은 수공구조물의 설계홍수량 산정에 필요한 설계우량주상도를 결정하기 위한 시간분포 모형이다. Huff 방법은 실제로 발생한 호우 기간 중의 누가우량곡선을 관찰하여 총 강우지속시간을 4개의 동일한 시간구간으로 나누었을 때 가장 큰 강우량이 어느 구간에서 발생하느냐에 따라 강우의 시간 분포 특성을 4가지로 구분하였다.

2.2.2 가능최대강수량의 공간분포

공간분포 방법의 경우는 주로 면적감소계수(areal reduction factor, ARF)를 산정하기 위해 이용되며, 주로 사용되고 있는 방법은 호우중심형(storm-centered)과 면적고정형(fixed-area) 방법이 있는데 본 연구에서는 호우 중심형 방법을 사용하였다. 호우 중심형 방법은 개개 호우 사상을 중심으로 하여 공간분포를 수행하는 방법으로 점 가능최대강수량을 면적 가능최대강수량으로 전환하는데 사용된다(Eq. (6)).

$$ARF = \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

여기서, R_1 은 특정 호우사상에서 주어진 유역 면적 및 지속시간에 대한 호우지대의 최대 면적우량이고, R_2 는 호우지대의 최대 점우량을 나타낸다.

2.3 설계홍수량 산정방법

미계측 유역에 대해서는 합성단위도 방법을 사용하고 있으며, 국내 실무에서 사용되고 있는 합성단위도 방법에는 Clark, Nakayasu, SCS, Snyder, 단위도법이 있다. 본 연구에서 활용한 Clark의 순간단위도 원리를 이용한 유역 추적방법은 유역의 도달시간과 유역의 저류능을 대표하는 저류상수 등 2개의 매개변수의 결정만으로 단위도를 합성할 수 있을 뿐 아니라 다른 3가지 방법과는 달리 지역성을 가지지 않는 비교적 객관적인 방법이라 할 수 있다.

자연하천유역의 도달시간(travel time) 산정에는 Kirpich, Rziha, Kraven I, Kraven II 등의 경험공식들을 주로 사용하고 있으며, 유속을 토대로 하는 Kraven II 공식이 가장 많이 사용되고 있다(Eq. (7)).

$$T_c = 16.667 \frac{L}{V} \quad (7)$$

여기서, T_c 는 도달시간(min), L 은 유로연장(km), S 는 평균경사(무차원), V 는 평균유속(m/s)이다.

유역저류상수 산정 방법에는 Russel, Sabol 경험공식이 있으며, 국내실무에서 가장 많이 사용하고 있는 Sabol 공식을 활용하였다(Eq. (8)).

$$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867 \frac{L^2}{A}} \quad (8)$$

여기서, K 는 저류상수(hr), T_c 는 도달시간(hr), L 은 유로연장(km), A 는 유역면적(km^2)이다.

2.4 DAMBRK 모형

DAMBRK 모형은 제방의 붕괴로 인한 유출수문곡선의 작성과 하류부의 홍수추적을 수리학적으로 해석하기 위하여 개발되었다. 댐이나 저수지의 붕괴로부터 유출수문곡선을 분석하고 하류부로 유출되는 홍수를 수리학적으로 추적하기 위해 사용된다(Lee et al., 2017). DAMBRK 모형에서 사용하는 지배방정식은 부정류에 관한 1차원 Saint-Venant 방정식으로서 하류구간에서의 급변류, 단면의 변화, 교량 등의 영향을 내부 경계조건으로 수용할 수 있도록 설계되었다(Jeong, 2013). DAMBRK 모형은 연속방정식(Eq. (9))과 운동방정식(Eq. (10))으로 구성된 Saint-Venant 식을 기초로 비선형 유한차분법으로 해석하게 된다(Fread, 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) + L = 0 \quad (10)$$

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

DAMBRK 모형은 댐 및 저수지 붕괴에 따른 유출수문곡선의 도출, 하류부 홍수추적을 위하여 미국 연방재난관리청(FEMA), 국제대담회(ICOLD), 유럽연합(EU) 등에서 댐 및 저수지 붕괴 모의모형으로 추천되고 있다. 또한, 국내의 댐 및 저수지 붕괴로 인한 EAP 수립에 많이 적용되었으며, 이를 통해 그 적용성이 입증된 모형이기도 하다(Kim and Han, 2016).

3. 대상유역 선정 및 재해위험 강우 특성 파악

3.1 대상유역 선정

본 연구의 대상유역은 경주시에 위치한 능천, 산막, 신지, 저사 저수지이다. 2017년 4월 「저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률」 제9조 및 같은 법 시행령 제9조의 규정에 따른 재해위험저수지로 지정되었다(Table 1). 능천, 산막, 신지 저수지의 준공년도는 1945년 이전으로 노후저수지이다. 저사 저수지의 경우 준공년도는 1983년으로 노후저수지로 볼 수 없지만, 하류부의 경사가 급하고 마을이 위치하고 있어 저수지 붕괴시 재산피해 및 인명피해가 발생할 가능성이 높다. 재해위험저수지 지정 사유는 저수지 정밀안전진단결과 여·방수로 등 주요부재가 D등급으로 판정되어서 재해위험성이 높고 인명피해 우려가 있어 재해위험 저수지로 지정·고시하고 체계적으로 정비 및 관리하여 자연재해를 사전에 예방하기 위함이다.

Table 1. Risk-Prone Reservoirs in Gyeong-ju

Classification	Location
Neung-cheon	829 Moryang-ri, Guncheon-eup
San-mak	936 Yangnam-myeon Gui-ri
Sin-gi	375-1 Mangseong-ri, Nam-myeon
Jeo-sa	966 Seomyeon Dogeori

3.2 저수지 수위-수표면적 관계 도출

수문학적 홍수추적을 위해서는 제방지점에서 홍수류의 시간적 변화에 따른 수문곡선을 예측해야 한다. 저수지

홍수추적의 경우, 저수지의 수면을 수평으로 보고 유입 수문곡선을 이용하여 유출수문곡선을 구하는 과정에서 저수지 수위-수표면적 관계가 필요하다(Lee et al., 2017). 그러나 능천, 산막, 신지, 저사 저수지와 같이 소규모의 저수지는 수위-수표면적 관계를 유도할 수 있는 측량성고가 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 평균단면적법(Average End Area Method) 및 Arc-View를 활용하여 각 저수지의 수위별 수표면적의 관계를 도출하였다. 고시된 능천 저수지의 만수면적은 2.3 ha, 유효저수량은 7,065 m³이다. 산막 저수지의 만수면적은 1.7 ha, 유효저수량은 5,410 m³이다. 신지 저수지의 만수면적은 2.7 ha, 유효저수량은 5,440 m³이다. 저사 저수지의 만수면적은 1.1 ha, 유효저수량은 5,500 m³이다. 능천, 산막, 신지, 저사 저수지의 저수지 내 최저수위, 만수위 때의

제체의 높이, 표고별 면적 등과 같은 기초자료가 부족하기 때문에 국토지리정보원에서 제공하는 정밀지형도를 이용하여 저수지 내 최저수위, 만수위 때의 제체의 높이, 표고별 면적 등을 추정하였다. 그러나 정밀지형도를 추정한 자료들은 과대추정되는 양상을 보이므로 다음과 같이 고시된 유효저수량을 기준으로 최고수위에 맞추어 수위-수표면적 관계를 도출하였다. 그 결과 능천 저수지의 최저수위는 108.6 EL.m, 만수위는 116.6 EL.m로 분석되었다. 산막 저수지의 최저수위는 109.7 EL.m, 만수위는 119.7 EL.m, 신지 저수지의 최저수위는 48.7 EL.m, 만수위는 53.4 EL.m, 저사 저수지의 최저수위는 88.6 EL.m, 만수위는 107.1 EL.m로 분석되었다. 각 수위별 면적과 저류용량은 Tables 2~5와 Figs. 1~4와 같다.

Table 2. Estimated Water Level, Surface Area and Storage Capacity (Neung-cheon)

Elevation (EL.m)	Storage Area (m ²)	Storage Capacity (m ³)
110	1.8	76.3
111	57.2	329.8
112	494.6	1,030.5
113	2,108.3	2,498.9
114	6,360.0	3,872.0
115	12,641.2	4,981.2
116	18,011.3	6,122.6
116.6	23,000.0	7,065.0
117.4	23,850.3	7,765.0

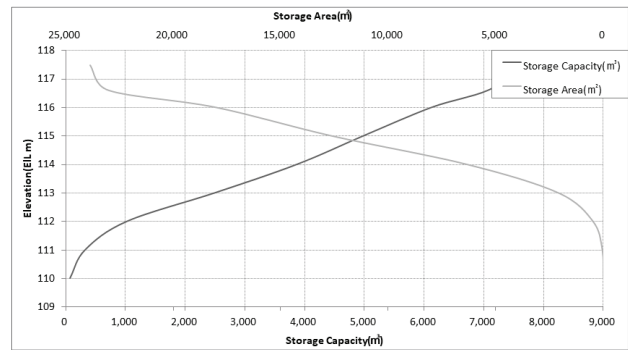


Fig. 1. Relationship Curves of Water Level, Surface Area and Storage Capacity (Neung-cheon)

Table 3. Estimated Water Level, Surface Area and Storage Capacity (San-mak)

Elevation (EL.m)	Storage Area (m ²)	Storage Capacity (m ³)
110	0.1	0.7
111	10.6	51.4
112	34.8	222.3
113	298.2	694.5
114	1,270.8	1,684.2
115	3,833.1	2,609.6
116	7,619.7	3,357.3
117	10,856.8	4,126.5
118	13,864.4	4,761.7
119	15,720.7	5,156.5
119.7	17,000.0	5,410.0
120.8	17,628.7	5,610.0

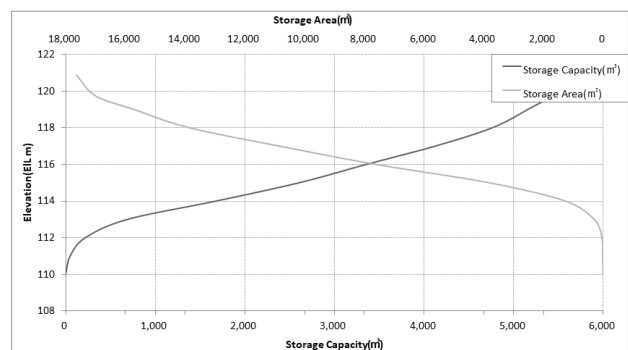


Fig. 2. Relationship Curves of Water Level, Surface Area and Storage Capacity (San-mak)

Table 4. Estimated Water Level, Surface Area and Storage Capacity (Sin-gi)

Elevation (EL.m)	Storage Area (m ²)	Storage Capacity (m ³)
50	98.4	259.8
51	3,186.5	1,123.6
52	13,584.1	3,510.9
53.4	27,000.0	5,440.0
54	27,998.2	5,522.2
55	29,357.1	5,699.7
55.9	33,061.8	5,980.0

Table 5. Estimated Water Level, Surface Area and Storage Capacity (Jeo-sa)

Elevation (EL.m)	Storage Area (m ²)	Storage Capacity (m ³)
∴	∴	∴
98	834.5	1,488.9
99	1,658.7	1,915.4
100	2,753.0	2,408.0
101	3,922.5	2,959.7
102	5,283.1	3,523.1
103	6,746.4	4,065.3
104	8,103.6	4,542.1
105	9,188.6	4,918.7
106	10,172.0	5,242.2
107.1	11,000.0	5,500.0
108.8	11,406.7	6,600.0

3.3 재해위험 강우 특성 파악

기상청은 중관기상관측장비(Automated Surface Observing System, ASOS)와 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)를 이용하여 기상관측을 실시하고 있다. ASOS는 전국에 102개소가 설치되어 있는 57가지 기상 요소를 관측하는 유인 관측소이며, 평균적으로 1960년부터 관측이 개시되어 30년 이상의 자료를 보유하고 있다. AWS는 전국에 510개소가 설치되어 비교적 조밀하게 분포하고 있지만, 평균적으로 2005년부터 관측을 시작하여 10년의 정도의 자료만을 보유하고 있다. 노후저수지 붕괴 시나리오에 따른 홍수량을 산정하기 위해선 30년 이상의 강우 자료가 필요하기 때문에 경주시에서 가장 가까운 영천 관측소(ASOS)의 강우 자료를 사용하였다.

재해위험 강우 특성을 파악하기 위하여 영천 관측소의 관측 개시일(1971-01-01)부터 2018년 12월 31일까지의 일강수량 자료를 수집하고 계급구간을 설정하여 히스토그램을 나타냈다(Fig. 5). 또한, 히스토그램으로부터 도출된 계급구간의 강우량을 활용하여 저수지로 유입되는 홍수량을 산정하였다.

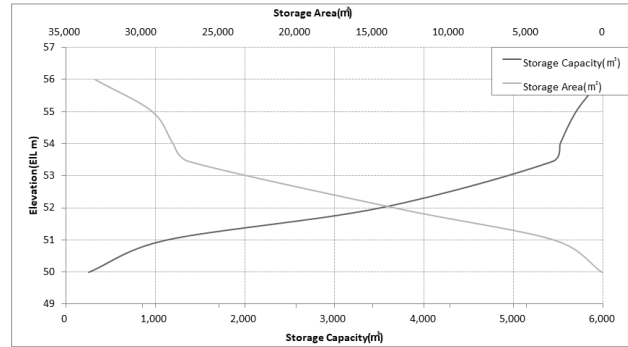


Fig. 3. Relationship Curves of Water Level, Surface Area and Storage Capacity (Sin-gi)

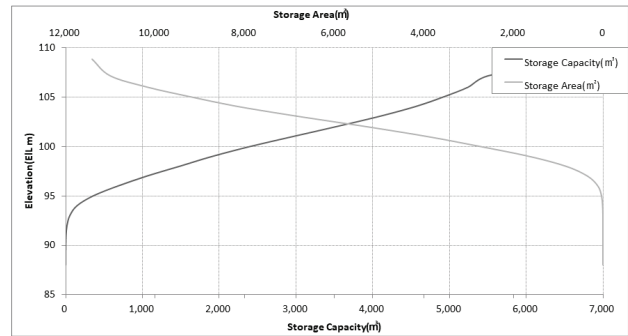


Fig. 4. Relationship Curves of Water Level, Surface Area and Storage Capacity (Jeo-sa)

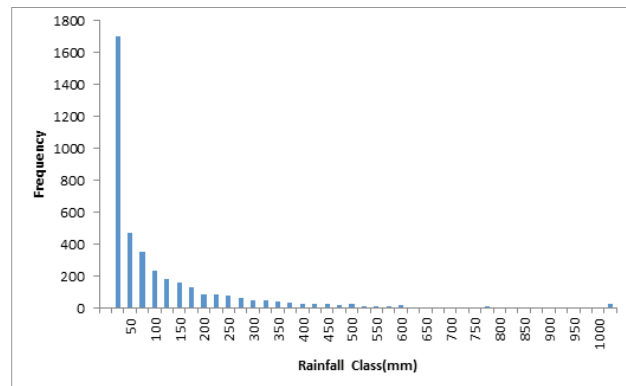


Fig. 5. Histogram of Rainfall Amount

농어촌 공사에서 관리하고 있는 저수지의 저수율은 농어촌 알리미에서 저수율을 모니터링 하며, 1991년부터 2016년까지의 전국 저수지의 평균 저수율은 65.7%이다. 그러나 지자체에서 관리하고 있는 저수지의 저수율이나 평균 저수율을 확인하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 저수지

의 저수율이 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%라고 가정하고, 저수지로 유입되는 홍수량을 산정하여 만수위보다 증가하는 강우량을 파악하여 재해위험 강우를 설정하였다.

능천 저수지의 저수율이 40% 일 때 250 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 능천 저수지에 만수위의 저류용량 보다 증가하게 된다. 또한, 저수율이 90% 일 때 125 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 만수위의 저류용량

보다 증가하게 된다. 산막 저수지의 저수율이 50%일 때 250 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 산막 저수지에 만수위의 저류용량 보다 증가하게 되고, 저수율이 90%일 때 150 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 만수위의 저류용량 보다 증가하게 된다. 신지, 저사 저수지는 저수율이 90% 일 때 150 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 만수위의 저류용량 보다 증가하게 된다(Tables 6~9).

Table 6. Hazard-triggering Rainfall in Reservoir Area (Neung-cheon)

Classification	Storage Capacity (m^3)					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%
	2,826	3,532	4,239	4,945	5,652	6,358
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
100 mm	3,096	3,803	4,509	5,216	5,922	6,629
125 mm	3,596	4,303	5,009	5,716	6,422	7,129
150 mm	4,124	4,830	5,537	6,243	6,950	7,656
175 mm	4,546	5,252	5,959	6,665	7,372	8,078
200 mm	5,593	6,299	7,006	7,713	8,421	9,128
225 mm	6,659	7,365	8,072	8,778	9,485	10,191
250 mm	7,741	8,448	9,154	9,861	10,567	11,274

Table 7. Hazard-triggering Rainfall in Reservoir Area (San-mak)

Classification	Storage Capacity (m^3)					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%
	2,164	2,705	3,246	3,787	4,328	4,869
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
100 mm	2,259	2,800	3,341	3,882	4,423	4,964
125 mm	2,639	3,180	3,721	4,262	4,803	5,344
150 mm	3,139	3,680	4,221	4,762	5,303	5,844
175 mm	3,630	4,171	4,712	5,253	5,794	6,335
200 mm	3,996	4,537	5,078	5,619	6,160	6,701
225 mm	4,464	5,005	5,546	6,087	6,628	7,169
250 mm	5,147	5,688	6,229	6,770	7,311	7,852

Table 8. Hazard-triggering Rainfall in Reservoir Area (Sin-gi)

Classification	Storage Capacity (m^3)					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%
	2,176	2,720	3,264	3,808	4,352	4,896
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
100 mm	2,624	3,168	3,712	4,256	4,800	5,344
125 mm	2,640	3,184	3,728	4,272	4,816	5,360
150 mm	3,027	3,571	4,115	4,659	5,203	5,747
175 mm	3,127	3,671	4,215	4,759	5,303	5,847
200 mm	3,154	3,698	4,242	4,786	5,330	5,874
225 mm	3,212	3,756	4,300	4,844	5,388	5,932
250 mm	3,279	3,823	4,367	4,911	5,455	5,999
275 mm	3,366	3,910	4,454	4,998	5,542	6,086

Table 9. Hazard-triggering Rainfall in Reservoir Area (Jeo-sa)

Classification	Storage Capacity (m^3)					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%
	2,200	2,750	3,300	3,850	4,400	4,950
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
100 mm	2,395	2,945	3,495	4,045	4,595	5,145
125 mm	2,597	3,147	3,697	4,247	4,797	5,347
150 mm	2,809	3,359	3,909	4,459	5,009	5,559
175 mm	3,028	3,578	4,128	4,678	5,228	5,778
200 mm	3,251	3,801	4,351	4,901	5,451	6,001
225 mm	3,479	4,029	4,579	5,129	5,679	6,229
250 mm	3,709	4,259	4,809	5,359	5,909	6,459
275 mm	3,942	4,492	5,042	5,592	6,142	6,692

4. 노후저수지 붕괴 해석

4.1 강우 시나리오 구성

농촌용수 저수지의 설계홍수량은 200년 확률홍수량, 기왕 최대홍수량, 지역최대홍수량 중 큰 값을 설계홍수량으로 하며, 필담에 대해서는 20%를 증가시킨 유량을 설계홍수량으로 설계하도록 되어있다. 또한, 유역면적 2,500 ha, 저수용량 500만 m^3 이상의 댐 붕괴시 인명과 재산에 피해가 클 것으로 예상되는 필담에서는 가능최대홍수량(PMF)을 설계홍수량으로 적용할 수 있도록 되어있다. 그러나 최근 2000년도 이후

붕괴된 저수지의 피해 현황을 보면 설계빈도 이하의 강우 또는 설계빈도를 초과하는 강우에 의하여 저수지가 붕괴되는 사례가 빈번해 지고 있다. 따라서 본 연구에서는 3절에서 파악한 개략적인 강우량 외 다양한 강우 시나리오에 따른 저수지 붕괴유출량을 파악하기 위하여 재현기간 50년, 80년, 100년, 150년, 200년, 기왕최대강우량, 가능최대강수량(PMP)을 기준으로 강우 시나리오를 구성하였다. 재현기간 50년, 80년, 100년, 150년, 200년에 대한 기준은 2004년 건설교통부에서 발간한 치수사업 경제성분석 방법연구를 참고하여 재현기간을 설정하였다(Figs. 6~9).

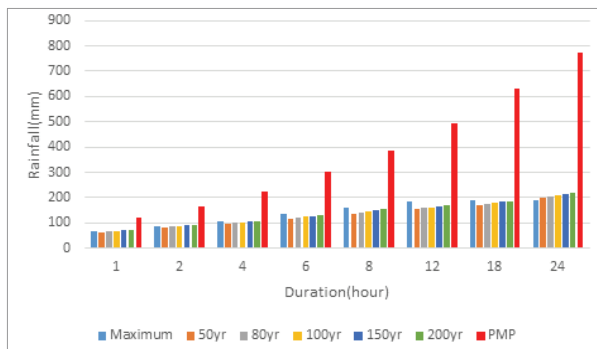


Fig. 6. Rainfall Scenario of Neung-cheon Reservoir

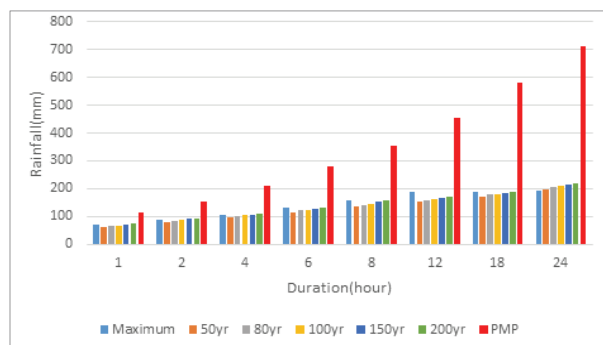


Fig. 7. Rainfall Scenario of San-mak Reservoir

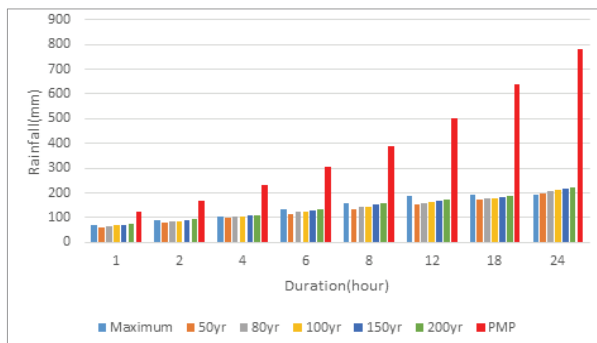


Fig. 8. Rainfall Scenario of Sin-gi Reservoir

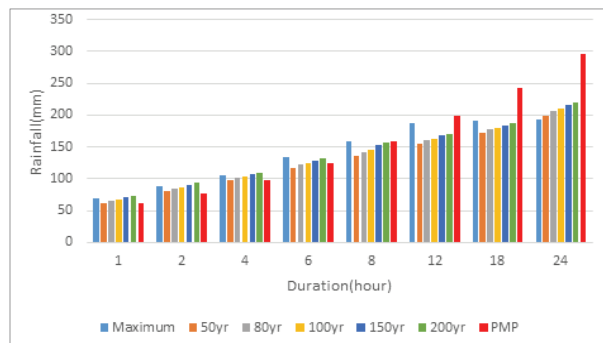


Fig. 9. Rainfall Scenario of Jeo-sa Reservoir

산정된 강우 시나리오를 시간분포 하기 위하여 Huff 방법을 사용하였고, 1분위~4분위중 3분위를 사용하였다. 공간분포 방법으로는 전국 PMP도 재작성 보고서에서 제시한 내용을 바탕으로 산정하였다. 또한, Clark 방법을 활용하여 저수지로 유입되는 홍수량을 산정하여 유입수문곡선을 작성하였다(Figs. 10~13).

4.2 DAMBRK 모형 구축 및 시나리오 구성

DAMBRK 모형을 구축하기 위해서는 저수지로 유입되는 유입수문곡선, 제체가 붕괴되는 높이, 붕괴 지속기간, 붕괴 형상, 붕괴 부분의 평균경사 등의 정보가 필요하다. 능천, 산막, 신지, 저사 저수지 관련하여 경주시에서 관리하고 있는 저수지 현황 자료를 수집하여 다음 Table 10과 같이 나타냈다. 또한, 저수지의 붕괴 지속시간을 결정하기 위하여 ASDSO (2005)에서 제시된 기준을 적용하였다. 능천, 산막, 신지, 저사 저수지는 필댐으로 ASDSO (2005)에서 제시한 필댐의 붕괴 지속기간 범위는 0.5 hr에서 3.0 hr (Fill-Well Constructed), 0.1 hr에서 0.5 hr (Fill) 이다. 그러나 저수지 붕괴가 발생하면서부터 완전히 붕괴되기까지 시간이 매우 짧다. 따라서 본 연구에서는 가장 단 기간의 붕괴의 형상을 고려하기 위하여 붕괴 지속시간을 0.1 hr으로 구성하였다. 또한, 저수지의 수위가 상시만수위(초기수위)에서 제체의 최고 높이에 도달시 월류에 의해 붕괴가 진행된다고 가정하

였다. 붕괴부 형상은 붕괴부 상단 폭 10.0 m, 붕괴부 측면면 경사를 1:1로 구성하였다(Table 11).

4.3 시나리오에 따른 노후저수지 붕괴 해석

본 연구에서는 능천, 산막, 신지, 저사 저수지에 기왕최대강우량, 재현기간 50년, 80년, 100년, 150년, 200년, PMP에 따른 강우 시나리오를 구축하였다.

또한, ASDSO (2005)에서 제안하고 있는 Fill의 붕괴 지속기간 및 저수지의 기본제원을 구축하여 DAMBRK 모형을 활용하여 붕괴유출량을 산정하였고, 다음 Tables 12~15와 같이 침투유출량을 나타냈다.

능천 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $116 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, 가능최대강우량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $697 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 산정되었다. 산막 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, 가능최대강우량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $128 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 산정되었다. 신지 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $55 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, 가능최대강우량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $96 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다. 저사 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $51 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, 가능최대강우량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 $71 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다.

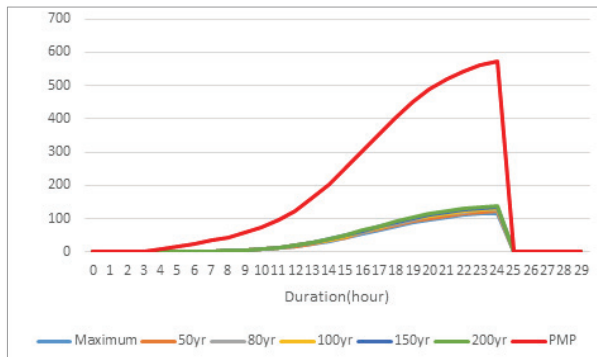


Fig. 10. Discharge-Duration Curve in Neung-cheon Reservoir

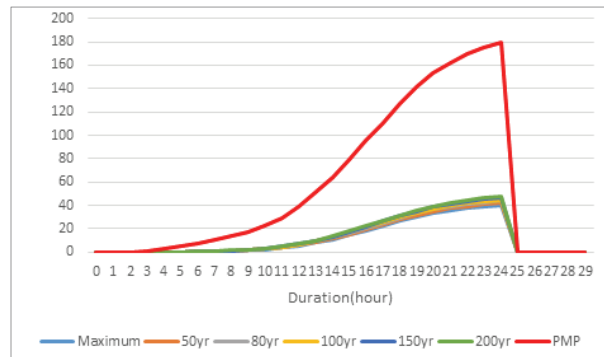


Fig. 11. Discharge-Duration Curve in San-mak Reservoir

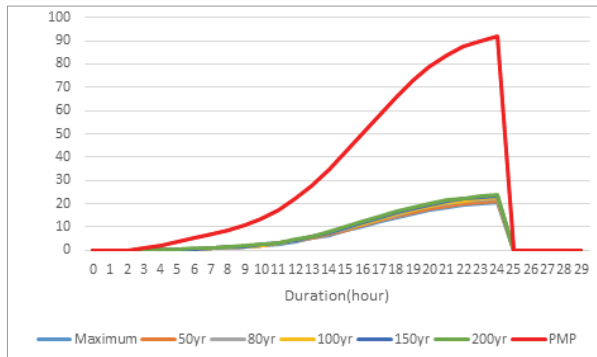


Fig. 12. Discharge-Duration Curve in Sin-gi Reservoir

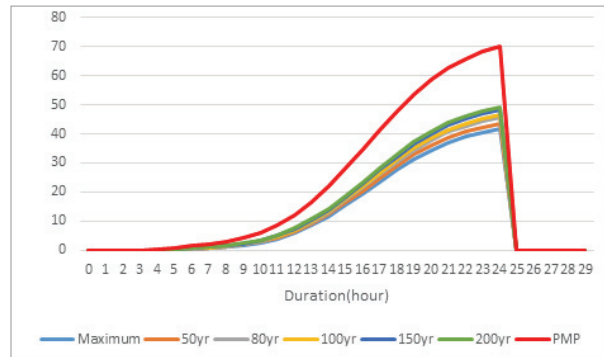


Fig. 13. Discharge-Duration Curve in Jeo-sa Reservoir

Table 10. Basic Information of Reservoir and Breach Characteristics

Classification	Breach			Dam Crest (El. m)	Storage Capacity (m^3)	Reservoir Length (m)	Drainage Area (ha)
	Height (m)	Width (m)	Slope				
Neung-cheon	5	10.0	1:1	116.6	7,065.0	122.0	40.0
San-mak	5	10.0	1:1	119.7	5,410.0	131.0	104.0
Sin-gi	5	10.0	1:1	53.4	5,440.0	278.0	32.0
Jeo-sa	5	10.0	1:1	107.1	5,500.0	71.0	62.3

Table 11. Characteristics of the Dam/Reservoir Failure (ASDSO, 2005)

Type of Dam	Average Width of Breach (\bar{b})	Time to Maximum Breach Size (<i>hrs</i>)
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)	$\bar{b} \leq 0.5W$	$T \leq 0.2$
Concrete (Arch)	$\bar{b} \geq 0.8W$	$T \leq 0.1$

Table 12. Peak Flow from Dam Break Scenarios of Neung-cheon Reservoir

Ranifall Scenarios (mm)	Breach Time (hr)	Peak Flow (m^3/s)
Maximum	0.1	116
50 year	0.1	119
80 year	0.1	125
100 year	0.1	129
150 year	0.1	130
200 year	0.1	131
PMP	0.1	697

Table 13. Peak Flow from Dam Break Scenarios of San-mak Reservoir

Ranifall Scenarios (mm)	Breach Time (hr)	Peak Flow (m^3/s)
Maximum	0.1	90
50 year	0.1	96
80 year	0.1	99
100 year	0.1	101
150 year	0.1	103
200 year	0.1	107
PMP	0.1	128

Table 14. Peak Flow from Dam Break Scenarios of Sin-gi Reservoir

Ranifall Scenarios (mm)	Breach Time (hr)	Peak Flow (m^3/s)
Maximum	0.1	55
50 year	0.1	59
80 year	0.1	64
100 year	0.1	68
150 year	0.1	70
200 year	0.1	76
PMP	0.1	96

Table 15. Peak Flow from Dam Break Scenarios of Jeo-sa Reservoir

Ranifall Scenarios (mm)	Breach Time (hr)	Peak Flow (m^3/s)
Maximum	0.1	51
50 year	0.1	53
80 year	0.1	55
100 year	0.1	56
150 year	0.1	57
200 year	0.1	59
PMP	0.1	71

5. 결론

본 연구에서는 홍수조절기능이 미흡한 농업용 노후저수지에 대하여 재해위험 강우 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 강우 시나리오 및 붕괴 시나리오를 설정하고 DAMBRK

모형을 활용하여 노후저수지의 붕괴유출량을 산정하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 농업용 노후저수지에 대하여 저수지 수위-수표면적 관계를 도출하여 노후저수지의 최저 및 최고 수위

등을 산정하였다. 능천 저수지의 최저수위는 108.6 EL.m, 만수위는 116.6 EL.m, 만수위 때의 저류용량은 7065.0 m^3 으로 분석되었다. 산막 저수지의 최저수위는 109.7 EL.m, 만수위는 119.7 EL.m, 만수위 때의 저류용량은 5410.0 m^3 으로 분석되었다. 신지 저수지의 최저수위는 48.7 EL.m, 만수위는 53.4 EL.m, 만수위 때의 저류용량은 5440.0 m^3 으로 분석되었다. 저사 저수지의 최저수위는 88.6 EL.m, 만수위는 107.1 EL.m, 만수위 때의 저류용량은 5500.0 m^3 으로 분석되었다. 저수지 수위-수표면적 관계를 활용한다면 실측 자료가 부족한 저수지의 제원을 산정할 수 있다고 판단된다.

- (2) 노후저수지의 재해위험 강우 특성을 파악하였다. 능천 저수지의 저수율이 90% 일 때 125 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 만수위의 저류용량 보다 증가하게 된다. 산막 저수지의 저수율이 90%일 때 150 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 만수위의 저류용량 보다 증가하게 된다. 신지, 저사 저수지는 저수율이 90% 일 때 150 mm의 강우가 저수지 유역으로 내린다면 만수위의 저류용량 보다 증가하게 된다. 저수율에 따른 저수지의 수위를 알 수 있다면, 저수지로 인한 홍수를 저감 할 수 있는 대책으로써 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) DAMBRK 모형을 활용하여 붕괴유출량(침두유출량)을 산정하였다. 능천 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 116 m^3/s 이고, 가능최대강수량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 697 m^3/s 으로 산정되었다. 산막 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 90 m^3/s 이고, 가능최대강수량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 128 m^3/s 으로 산정되었다. 신지 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 55 m^3/s 이고, 가능최대강수량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 96 m^3/s 로 산정되었다. 저사 저수지 유역에 기왕최대강우량이 내렸을 때의 붕괴유출량은 51 m^3/s 이고, 가능최대강수량(PMP)이 내렸을 때의 붕괴유출량은 71 m^3/s 로 산정되었다. 본 연구와 비슷한 제원의 저수지가 붕괴되었을 때, 붕괴유출량을 추정할 수 있다고 판단된다.

저수지 마다 가지고 있는 저류 용량 및 저수 면적 등 제원이 다르므로 같은 강우가 발생하더라도 저수지 저수율의 증가는 다르다. 그러나 홍수조절 기능이 없는 농업용 저수지의 경우 일정 저수율을 가지고 있으면서 집중호우가 발생한다면 저수지가 붕괴 되면서 저수지 하류부에는 예상치 못한 피해가 발생할 것이다. 따라서, 본 연구의 결과를 토대로 저수율에 따른 저수지의 수위를 알 수 있다면, 저수지로 인한 홍수를 저감 할 수 있는 대책으로써 활용 될 수

있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구와 비슷한 제원의 저수지에서 발생할 수 있는 붕괴에 대한 기초자료로 활용 할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

References

- Altinakar, M.S., McGrath, M.Z., Ramalingam, V.P., and Omari, H. (2010). 2D modeling of big bay dam failure in Mississippi: Comparison with field data and 1D model results. *River Flow 2010: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Braunschweig, Germany, pp. 547-554.
- Association of State Dam Safety Officials (ASDSO). (2005). *Dam failure analysis*. National Dam Safety Program, Columbus, Ohio, USA.
- Brufau, P., and Garcia-Navarro, P. (2000). Two-dimensional dam break flow simulation. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 33, No. 1, pp. 35-57.
- Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK Model: The theoretical background/ user documentation*. National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, MD, USA.
- Go, D.H., Lee, K.H., Kim, J.M., and Kim, S.W. (2015). FLO-2D simulation of the flood inundation zone in the case of failure of the Sandae Reservoir Gyeongju, Gyeongbuk. *Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, No. 4, pp. 449-458.
- Han, D.G., Choi, C.H., Kim, D.H., Jung, J.W., Kim, J.W., and Kim, S.J. (2016). Determination of flood reduction alternatives for responding to climate change in Gyeongan watershed. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 154-165.
- Hong, S.J., Kim, S.J., Kim, H.S., and Kyung, M.S. (2009). Dam break analysis with HEC-HMS and HEC-RAS. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 4B, pp. 347-356.
- Hydrologic Engineering Center (HEC). (2007). *Dam break analysis for upper Kapahi Reservoir (HI00013), Kaua'i Country, Hawai'i*. US Army Corps of Engineers.
- Jeong, Y.S. (2013). *A study on flooding of downstream areas*

- using DAMBRK model for reservoir collapse. Master's thesis, Yonsei University.
- 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.
- Kim, D.H., Hong, S.J., Han, D.G., Choi, C.H., and Kim, H.S. (2016). Analysis of future meteorological drought index considering climate change in Han-River basin. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 432-447.
- Kim, H.S. (2010). *Hydrologic*. Paju: Donghwa Technology Publishing Co.
- Kim, J.S. (2003). *Development of a 2D numerical model using the weighted average flux method*. Master's thesis, Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- Korea Rural Community Corporation (KRC). (2017). *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*. KRC.
- Kwak, J.W., Jin, H.S., and Kim, H.S. (2017). An assessment of flow characteristic and riverbed change by construction of hydraulic structure. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 542-550.
- Lee, J.Y., Park, D.H., Kim, S.J., and Kim, T.W. (2017). Estimation of break outflow from the Goeyeon Reservoir using DAMBRK model. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 459-466.
- Lencina, I.V. (2007). *Comparison between 1D and 2D models to analyze the dam break wave*. Master's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Park, S.G., Lee, K.H., Kyung, M.S., and Kim, H.S. (2006). Risk of flood damage potential and design frequency. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5B, pp. 489-499.
- Park, S.J., Han, K.Y., and Choi, H.G. (2013). Flood routing of sequential failure of dams by numerical model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1797-1807.

Received	October 2, 2019
Revised	October 7, 2019
Accepted	October 14, 2019