

ENGINEERING

# Model experiments for the reinforcement method of agricultural reservoirs by overtopping

Young-Hak Lee<sup>1</sup>, Dal-Won Lee<sup>2\*</sup>, Joon Heo<sup>3</sup>, Jung-Hyun Ryu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>3</sup>Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 15634, Korea

\*Corresponding author: [dwlee@cnu.ac.kr](mailto:dwlee@cnu.ac.kr)

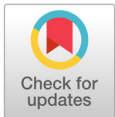
## Abstract

In this study, a large laboratory model experiment was conducted with the aim of developing an embankment reinforcement method to prevent overtopping, which is the main cause for the failure of agricultural reservoirs. The model experiment was carried out with concrete and asphalt as a permanent reinforcement method and with geomembrane as the emergency method at a deteriorated homogeneous reservoir. Under the non-reinforced conditions, the pattern of the failure appeared in several scour directions from the downstream slope as the overtopping began, and the width and depth of the erosion were magnified as it gradually moved to the dam crest. Under the conditions reinforced with asphalt and concrete, the overtopping was stabilized. In the case of the concrete reinforcement, it was found that the slope of the riprap boundary exhibited downward erosion by the current; thus, it was necessary to construct an extension up to the riprap joint of the upstream and downstream sides to prevent the expansion of the failure. Under the conditions reinforced with the geomembrane sheet, the overtopping was stabilized, and no seepage was found that required the emergency reinforcement method. Asphalt, concrete, and geomembrane sheet reinforcements have been shown to be capable of delaying failure for about 1 hour and 40 minutes compared to the non-reinforcement conditions. The reinforcement method is considered to be a very effective method to prevent disasters during overtopping. The pore water pressure can be used as useful data to predict the risk of failure at an embankment.

**Keywords:** agricultural reservoir, model experiment, overtopping, pore water pressure, reinforcement method

## Introduction

최근 기후 변화의 영향은 과거보다 집중되어 자연재해가 증가하고 있기 때문에 재해 예방에 대한 대책이 필요하고 이러한 자연환경의 변화는 침투에 취약한 농업용 저수지의 구조적 안정에 영향을 미치게 된다.



### OPEN ACCESS

**Citation:** Lee YH, Lee DW, Heo J, Ryu JH. 2020. Model experiments for the reinforcement method of agricultural reservoirs by overtopping. Korean Journal of Agricultural Science 47:163-171. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20200008>

**Received:** December 31, 2019

**Revised:** February 14, 2020

**Accepted:** February 26, 2020

**Copyright:** © 2020 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

필댐의 붕괴는 월류(35.9%)와 파이핑(30.5%)이 주된 원인으로 분석되고 있고(Foster et al., 2000), 월류는 집중호우 등의 기상조건에 의해 발생하는 반면, 파이핑은 시간경과에 따라 제체의 내구성이 저하하는 현상으로 발생하기 때문에 국내의 농업용저수지 제체의 노후화와 관련된 문제는 월류와 파이핑에 관한 문제를 중요하게 고려하여야 한다. 국내 농업용 저수지의 형식은 99%가 필댐으로 구성되어 있고, 축조된 지 50년이 경과된 저수지가 82%에 이르고 있기 때문에 월류, 파이핑 및 누수로 인한 재해위험도가 더욱 가중되고 있다(MAFRA, 2002; KRC, 2011). 농업용 저수지는 93%가 유효저수량이 30만 m<sup>3</sup> 미만으로 안전한 용수 공급이 어려울 뿐만 아니라 가뭄과 홍수의 양극화 현상이 심화되고, 최근의 강우 특성과 시설물의 사용 연한을 고려할 때 홍수 배제 능력 부족, 누수 등 재해위험도가 상대적으로 가중되고 있다.

노후화된 중소규모 저수지의 붕괴는 상류사면과 하류사면 붕괴 및 여수토 방수로 붕괴 등의 저수지 자체 붕괴와 이로 인한 하류지역의 인명과 재산 피해로 나타난다. 현재 저수지 리모델링 사업으로 설계 시공되는 저수지는 기존 제체내의 코어와 필터가 정상적인 상태로 판단하고 보수 보강하고 있지만 대부분의 저수지는 노후화되어 차수 및 배수 기능이 상실한 상태이므로 확인이 반드시 필요하고 기능 복구를 위해서는 설치 위치 및 방법을 변경한 후 안정성을 검토하여야 한다(Lee and Lee, 2018; Lee et al., 2018).

월류에 의한 제방 붕괴속도는 침투나 세굴에 의한 붕괴보다 훨씬 빠르고 계획홍수량 이상의 홍수량이 발생하거나 제체의 여유고가 작을 때 발생한다(Kim, 2001; Lee and Noh, 2014). 저수지 제방의 월류로 인한 붕괴는 다짐도, 축조재료, 둑마루 폭 및 사면 경사 등에 따라 다르게 나타나지만, 단기적 및 장기적으로 적합한 보강방법을 적용한다면 붕괴되는 시간을 지연할 수 있어 제체 안정성을 높일 수 있다(USBR, 2011, 2014, 2017).

월류에 의한 붕괴형태는 토립자의 세굴이 가속화되면서 여러 개의 세굴방향이 나타나고 폭과 깊이를 증가시키는 매우 불규칙한 형태의 점진적 붕괴 형태를 나타낸다(Lee et al., 2019a). 붕괴 지속시간은 재료와 침식 정도에 따라 좌우되지만 초기단계에서는 지속시간이 오래 걸리고 월류량이 급증하는 침투 월류단계에서는 급격히 붕괴되면서 지속시간이 매우 짧은 것으로 나타낸다(Lee and Noh, 2012).

기존 노후화된 저수지는 저수량의 증가에 따라 침투 수압이 증가로 인한 누수는 하류 사면을 포화시키고 과잉공극수압이 증가함에 따라 파이핑 발생 가능성을 높이게 된다(Lee and Lee, 2017).

이상 강우에 의해 노후화된 균일형 저수지가 월류될 경우에는 댐마루 보강에 의해 침투를 억제하는 공법으로 아스팔트, 콘크리트, 차수 시트, 보도블록, 쇄석 등이 있고, 하류사면침식을 억제하는 방법으로 geotextile, riprap, 식생피복공 등이 있다.

그 동안 파이핑에 대한 수치해석적인 연구와 실내모형실험이 진행되어 왔지만 이와는 다른 원인에 의하여 월류 및 파이핑이 발생하므로 이에 대한 위험성을 객관적으로 평가하기 위해서는 대형모형실험을 통하여 월류시 보호공법에 대한 침투특성을 비교분석하여 현장 적용성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다(Coleman et al., 2002; Kumar and Sreeja, 2012; Sun et al., 2012; Rotunno et al., 2017; Lee et al., 2018; Lee et al., 2019b).

따라서 본 연구에서는 농업용저수지의 주요 붕괴 원인인 월류를 방지하기 위한 제체보호공법 개발을 목적으로 대형실내모형실험을 실시하고 공법 적용에 따른 효과를 모니터링을 통해 비교·분석한 후 현장 실용화 방안을 마련하고자 한다.

## Materials and Methods

### 저수지 모형 축조

실내축소모형은 제체 재료의 입도분포와 다짐도 등에 많은 영향을 미치기 때문에 원형과 다른 거동을 나타나게 된다. 수리모형실험의 축척은 원형에서 구하고자 하는 거동에 따라서 축척 범위도 다르게 결정되지만 본 연구에서는 실내모형실험규모의 여건 등을 감안하여 1/30으로 결정하였다.

실내모형토조는 길이(L) 270 cm, 폭(W) 680 cm, 높이(H) 95 cm로 콘크리트와 철제 및 아크릴로 제작하였고, 토조 내부에는 실리콘 및 방수페인트로 처리하여 누수를 방지하였으며, 비탈면 경사는 1 : 2.0 (하류사면), 1 : 2.5 (상류사면)으로 축조하였다. 여수토는 모형의 뒤 쪽에 나무 합판을 이용하여 현장저수지 표고를 기준으로 1/30로 축소하고, 방수로 표고가 만수위에서 월류되도록 약 41 cm로 하였고, 방수로 폭은 20 cm로 설치하였다.

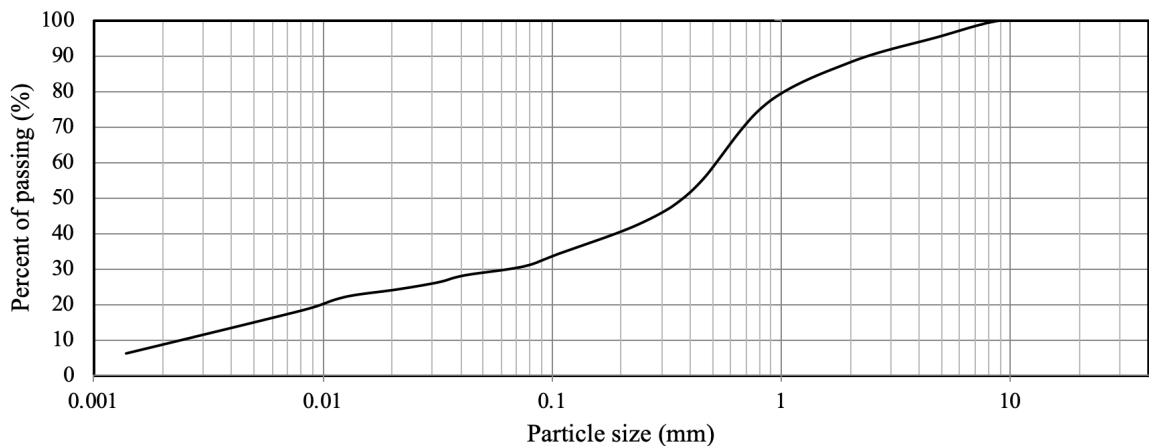
### 대상저수지 선정

실험대상저수지는 계룡저수지(Gongju, Korea)로 제체는 zoned fill-type이고 축조년수(1964년)는 50년 이상 경과되었다. 현재 노후화된 저수지가 전체저수지의 82% (50년 이상)정도이고, 이러한 저수지는 실제 제체의 코어와 필터는 너무 오랜 기간이 경과되어 본래의 기능을 할 수 없는 상태가 대부분이기 때문에 균일형 형식으로 볼 수밖에 없고 이와 같은 상태에서 이상강우에 의한 월류 및 파이핑 현상이 발생하였을 경우는 붕괴가능성이 매우 높을 것으로 판단된다. 따라서 균일형 형식의 저수지에 대한 붕괴거동을 파악하여 앞으로 노후화된 저수지의 효율적인 리모델링 방법과 현장실용화 방안을 제시하는데 적합하다고 판단하여 연구대상 저수지로 선정하였다. 실험에 사용된 시료는 성토재는 저수지 토취장에서 채취하였고, 사용된 시료의 물리적 성질, 역학적 성질 및 입도곡선은 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

**Table 1.** Geotechnical properties.

Sample	$G_s$	PI (%)	$k_v$ (m/s)	$W_{opt}$ (%)	$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	USCS
Embankment	2.65	9.2	2.37E - 07	8.6	17.75	16.7	24	SC

$G_s$ , specific gravity; PI, plastic index;  $k_v$ , coefficient of permeability;  $W_{opt}$ , optimum moist content;  $\gamma_{max}$ , maximum dry density; c, cohesion;  $\phi$ , internal friction angle; USCS, unified soil classification system; SC, clayey sand.



**Fig. 1.** Grain size distribution.

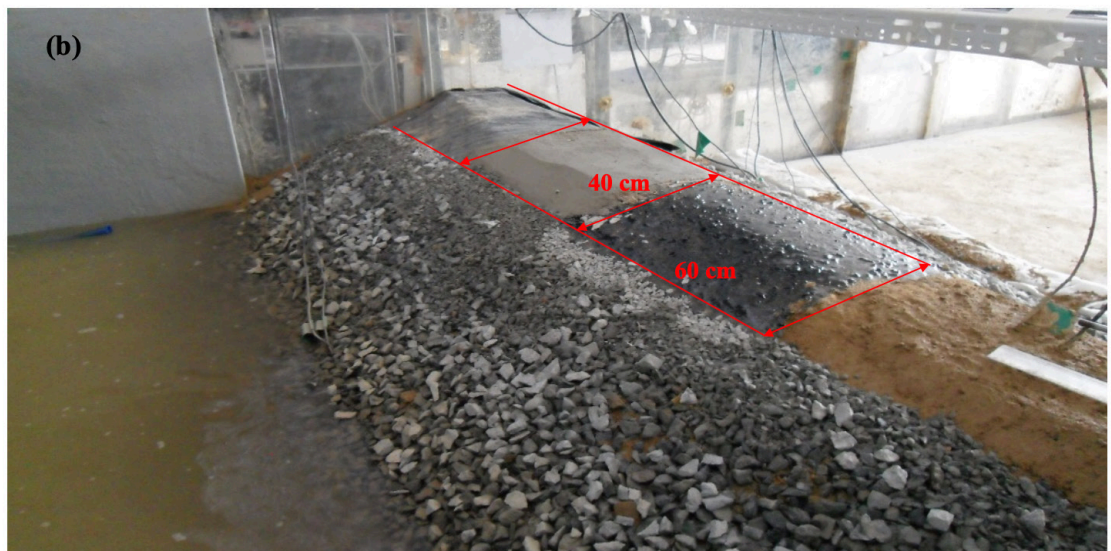
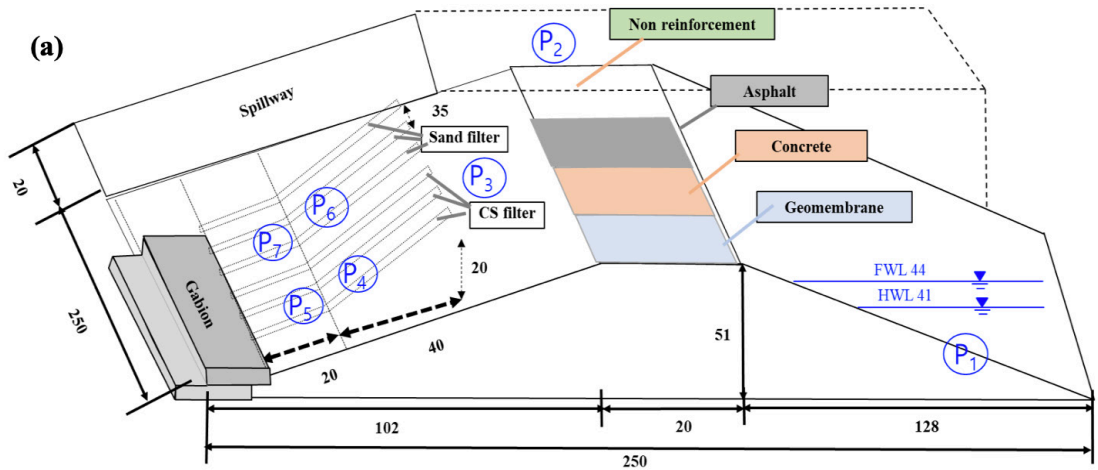
## Results and Discussion

### 월류에 의한 제체 보호공법

월류에 의한 저수지 붕괴 현상은 가장 취약한 댐마루 사면면부터 침식으로 붕괴가 시작되고, 월류가 진행됨에 따라 하류사면 표면으로 흐르던 물이 사면내부로 침투하여 침식을 확대시키면서 붕괴속도가 빠르고 점차로 커지는 점진적 붕괴 형태를 나타낸다.

실험은 이상강우에 의해 홍수량을 여수토에서 정상적으로 처리할 수 없어 댐마루로 월류되었을 경우를 모사하여 붕괴형태와 공극수압 변화를 분석하였다. 모형저수지는 현장저수지를 1/30로 축소하여 길이(L) 270 cm, 폭(W) 250 cm, 높이(H) 51 cm로 축조하였다. 이상강우에 의해 댐마루(51 cm)로 월류되는 월류량은 유량 공급조절장치를 통하여 월류심을 조절하였고, 나머지 유입량은 여수토 방수로를 통하여 하류부로 유출되도록 미리 토조에서의 유량검증을 통하여 조절하였다.

공극수압은 만수위(41 cm)와 홍수위(44 cm)를 기준으로 담수를 시작하여 제체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단되었을 때 상류사면, 댐마루 및 하류사면에서 측정하였다.



**Fig. 2.** (a) Cross section and locations of the monitoring system and (b) the reinforcement section of reservoir crest. P, piezometer; FWL, flood water level; HWL, high water level; CS, crushed stone.



이상강우에 의해 노후화된 균일형 저수지가 월류될 경우에 댐마루를 보호하기 위한 영구적인 공법으로 콘크리트 및 아스팔트를 사용하고, 응급적 방법으로 차수시트를 사용하였으며, 하류사면 비탈면에는 월류에 의한 사면선 보강을 위해 gabion 옹벽을 설치하여 붕괴형태와 붕괴역제 효과를 분석하였다.

제체를 구성하는 성토재 내부에 작용하는 공극수압을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 공극수압계(Ⓟ) 7개를 각각의 위치에 매설하였다. 공극수압계의 매설 위치는 제체의 상류사면(P1), 댐마루(P2), 하류사면 중앙(P3), 쇄석으로 포설된 수평 및 경사필터 경계부(P4), 모래로 포설된 수평 및 경사필터 경계부(P6), 쇄석으로 포설된 수평필터사이 성토존(P5), 모래로 포설된 수평필터사이 성토존(P7)에 매설하였다.

매설깊이는 상하류사면의 침윤선이 위치하는 지점을 고려하고 월류 시 공극수압 측정 시 비교가 용이하도록 제체 하부로부터 P1, P3: 20 cm, P2: 43 cm, P4, P5, P6, P7: 5 cm 떨어진 지점에 매설하였다. 계측기는 모형 토조내 적용할 수 있는 초소형 크기의 공극수압계(정격용량: 50 kPa)를 사용하였고, 각각의 측정값은 data logger와 computer에 의해 자동적으로 저장하도록 하였다. 댐마루 보강 단면은 각 단면별로 길이 60 cm, 폭 40 cm, 두께 2 cm 로 포설하였다.

저수지는 균일형 형식으로 제체 모형 축조에 사용된 시료는 균질한 상태로 포설하기 위하여 12 mm체를 통과한 시료만 사용하였다. 다짐은 최적 함수비 습윤축 2 - 4% 범위에서 조절하였고, 다짐 시 밀도를 균일하게 하기 위하여 먼저 1층을 약 5 - 10 cm 가량 포설한 후 최대건조밀도(17.75 kPa)의 90 - 95%로 다짐을 하였다.

### 월류시 제체사면의 붕괴형태

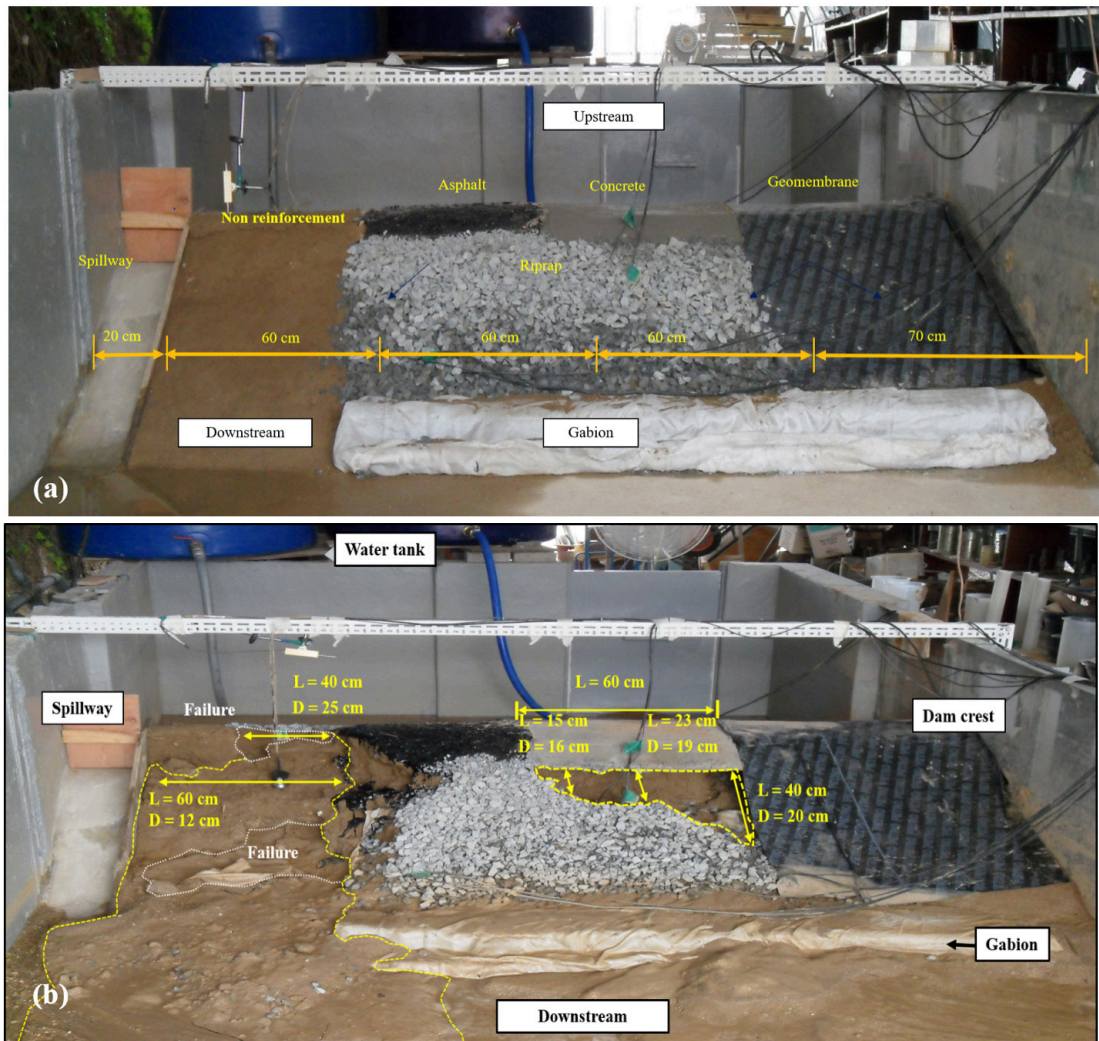
Fig. 3은 무보강, 아스팔트, 콘크리트 및 차수시트로 보강한 경우의 붕괴형태를 나타낸 것이다.

모형축조 완료 후 월류 초기단계에서는 유량공급장치를 통하여 홍수량을 0.69 L/s (월류수심: 0.5 cm)로 일정하게 공급하고 나머지는 여수토(0.28 L/s)로 방류하였다. 월류량 증가 단계에서는 월류량을 2.58 L/s (월류수심: 1.8 cm)로 증가하면서 붕괴 형태를 분석하였다.

무보강 조건에서는 월류가 시작되면서 하류사면에서 여러 개의 세굴방향이 나타났고 점차적으로 댐마루 부분으로 이동하면서 붕괴 폭과 깊이가 확대되었으며, 최종적으로 붕괴 폭은 40 - 60 cm, 깊이는 12 - 25 cm 로 크게 나타났다. 이러한 조건에서는 월류에 대한 저항성이 전혀 없고, 하류사면 비탈면에 gabion 옹벽이 설치하지 않았기 때문에 하류사면 비탈면이 완전히 붕괴되는 것으로 나타났다.

댐마루를 아스팔트로 보강한 조건에서는 월류에 대해 안정하였고, 무보강 성토존의 접촉부에서 약간 붕괴되었으며, 하류사면 선단에서는 gabion 옹벽의 영향으로 붕괴가 발생되지 않았다. 이와 같은 조건으로 댐마루에서 상류사면의 사석접속부까지 포설하고, 댐마루에서 하류사면의 사석접속부까지 시공한다면 사석존과의 접합효과로 월류 저항성을 더욱 더 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

댐마루를 콘크리트로 보강한 조건에서는 월류에 대해 안정하였고, 콘크리트 자체의 저항성은 크게 나타났으나 하류사면 사석과의 경계면에서 유속에 의한 세굴로 붕괴영역이 점차적으로 증가하였으며, 붕괴 폭은 15 - 40 cm, 깊이는 16 - 20 cm로 나타났다. 이와 같은 조건에서는 아스팔트 조건과 동일하게 댐마루에서 상류사면과 하류사면의 사석접속부까지 콘크리트를 연장하여 시공한다면 경계부 세굴로 인한 붕괴확대를 억제할 수 있을 것으로 판단된다.



**Fig. 3.** Failure pattern according to the reinforcement methods. (a) Before (t = 0) and (b) Final stage (t = 1 h 40 min).

댐마루를 차수시트로 보강한 조건에서는 월류에 대해 안정하였고, 하류사면에서도 세굴이 발생되지 않아 응급적인 보호공법으로 효과적인 것으로 나타났다.

월류가 진행되는 동안 붕괴억제시간은 아스팔트, 콘크리트 및 차수시트로 보강한 경우가 무처리 조건보다 약 1시간 40분정도 붕괴를 지연시킬 수 있는 것으로 나타나 월류시 재해를 예방하는데 매우 효과적인 방법으로 판단된다.

하류사면 선단에 설치한 gabion 옹벽은 월류시 세굴 및 침식에 의한 사면안정성을 증가시키는 것으로 나타났다, 만수위 또는 홍수위시에는 하류사면으로 누수되는 침투수를 빠르게 배출하여 침윤선을 저하시킴으로써 파이핑에 대한 안정성을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

### 월류시 공극수압의 변화

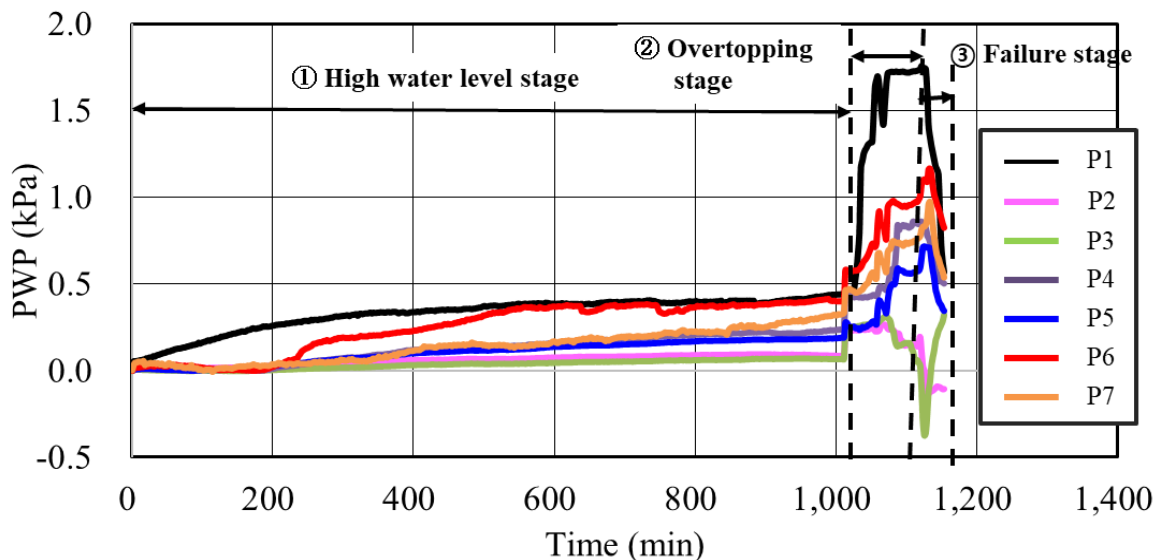
월류로 인한 저수지 제방의 붕괴는 축조형식과 노후화의 정도 등에 따라 다르게 나타나지만, 제체의 붕괴 형태와 붕괴속도 여부를 파악하고 제체내에서 어떠한 거동을 하는가를 공극수압을 통하여 안정성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 수위가 상승하면 성토재는 비압밀 비배수 상태가 되어 사면 안전율이 감소하게 되고, 월류가 발생되면 제방의 붕괴속도는 매우 빠르게 진행된다.

Fig. 4는 월류시 공극수압 변화를 나타낸 것으로, 만수위(41 cm)까지 담수하여 일정하게 유지시키고 약 1,030분 후에 월류를 시작하여 붕괴단계까지 약 130분 동안 각 위치에서의 변화를 측정하였다. 홍수량 조절은 유량공급장치를 통하여 일정하게 공급하고 나머지는 여수토로 방류되도록 하였다. 저수지 상류에서 유입되는 이상강우를 모사하여 점차적으로 홍수량을 증가시키면서 월류수심을 측정하고 붕괴에 이르도록 유도하였다.

만수위 상태에서는 상류사면에서의 공극수압(P1)이 가장 크고, 모래필터(P6, P7), 쇄석필터(P4, P5), 댐마루(P2), 하류사면 상부(P3) 순으로 나타났다.

월류 시작단계(약 105분 동안)에서는 P1, P4, P5, P6, P7에서 점차적으로 증가하였고, P2, P3는 댐마루와 하류사면 상부에 위치하기 때문에 월류 후에 약간 감소하였다. 월류 후 붕괴단계(약 25분)에서는 모든 위치에서 공극수압이 감소하는 것으로 나타났다.

공극수압의 변화는 매설위치마다 다르지만 성토재, 모래필터 및 쇄석필터의 침투특성으로 인하여 제체내에서의 거동을 매우 정확하게 알 수 있기 때문에 제체 위치별로 붕괴 가능성을 미리 판단하는데 유용한 자료로 이용할 수 있다.



**Fig. 4.** Variation of the pore water pressure. P1 - P7, locations of piezometer; PWP, pore water pressure.

## Conclusion

본 연구에서는 농업용저수지의 주요 붕괴 원인인 월류를 방지하기 위한 제체보호공법 개발을 목적으로 대형실내모형실험을 실시하고 공법적용에 따른 효과를 모니터링을 통해 현장 실용화 방안을 마련하고자 하였다. 이러한 조건을 바탕으로 이상강우에 의해 노후화된 균일형 저수지가 월류될 경우, 댐마루를 보호하기 위한 영구적인 공법으로 콘크리트와 아스팔트를 사용하고, 응급적인 방법으로 차수시트를 사용하여 모형실험을 수행하고 붕괴형태와 붕괴억제 효과를 비교 분석하였다.

댐마루가 월류되었을 경우에 무보강 조건에서는 월류가 시작되면서 하류사면에서 여러 개의 세굴방향이 나타났고, 점차적으로 댐마루 부분으로 이동하면서 붕괴 폭과 깊이가 확대되었다. 아스팔트와 콘크리트로 보강한 조건에서는 월류에 대해서는 안정하였지만, 콘크리트 보강의 경우에는 사석경계부가 유속에 의한 세굴 되기 때문에 현장 시공시에는 상류 및 하류사면의 사석 접속부까지 연장 시공하여 붕괴확대를 억제할 필요가 있는 것으로 나타났다. 차수시트로 보강한 조건에서는 월류에 대해 안정하였고, 하류사면에서도 세굴이 발생되지 않아 응급적인 보호공법으로 적합한 것으로 나타났지만 현장에서 장기간 노출시 재료 손상 가능성이 있어 유지관리에 어려움이 있을 것으로 판단된다.

붕괴억제시간은 아스팔트, 콘크리트 및 차수시트로 보강한 경우가 무보강 조건보다 전체적으로 약 1시간 40분정도 붕괴를 지연시킬 수 있는 것으로 나타나 월류시 재해를 예방하는데 매우 효과적인 방법으로 판단된다. 또한, 하류사면 선단에 설치한 gabion 옹벽은 월류시 세굴 및 침식에 의한 하류사면의 안정성을 높여줄 뿐만 아니라 하류사면으로 누수 되는 침투수를 빠르게 배출하여 침윤선을 저하시킴으로서 파이핑에 대한 안정성도 증가시키는 것으로 나타났다.

만수위 상태에서의 공극수압은 모든 위치에서 유사하게 나타났지만 월류단계에서는 모든 위치에서 점차적으로 증가하였고, 붕괴단계에서는 공극수압이 감소하는 것으로 나타났다. 공극수압의 변화는 매설위치마다 다르지만 월류 시 제체내로 침투한 공극수의 거동을 정확하게 파악할 수 있기 때문에 제체 위치별로 붕괴 위험 가능성을 미리 판단하는데 유용한 자료로 이용할 수 있다.

## Acknowledgements

이 연구는 충남대학교 학술연구비와 한국연구재단(과제번호: 2019R1I1A3A01058517 및 2019R1C1C1007100) 및 농림축산식품부의 재원으로 한국농어촌공사 농어촌연구원의 농촌기반기술연구사업비의 지원을 받아 연구되었음.

## Authors Information

Young-Hak Lee, <https://orcid.org/0000-0002-2691-3380>

Dal-Won Lee, <https://orcid.org/0000-0001-9750-1407>

Joon Heo, <https://orcid.org/0000-0003-4820-8786>

Jung-Hyun Ryu, <https://orcid.org/0000-0001-9737-1358>



## References

- Coleman SE, Andrews DP, Grant Webby MG. 2002. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments. *Journal of Hydraulic Engineering* 128:829-838.
- Foster MA, Fell R, Spannagle M. 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal* 37:1000-1024.
- Kim JH. 2001. Analysis on embankment failure due to overflow. *Korea Environmental Industry and Technology Institute* 12:97-107. [in Korean]
- KRC (Korea Rural Community Corporation). 2011. The project of raising embankment of agricultural reservoir. KRC, Naju, Korea. [in Korean]
- Kumar C, Sreeja P. 2012. Evaluation of selected equations for predicting scour at downstream of ski-jump spillway using laboratory and field data. *Engineering Geology* 129:98-103.
- Lee DW, Noh JJ. 2012. Behavior of failure of agricultural reservoirs embankment due to overtopping. *Korean Journal of Agricultural Science* 39:427-439. [in Korean]
- Lee DW, Noh JJ. 2014. Behavior of failure of agricultural reservoirs embankment reinforced by geotextile under overtopping condition. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 56:59-64. [in Korean]
- Lee YH, Lee DW. 2017. Effective method for remodeling of deteriorated agricultural reservoirs. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 59:43-52. [in Korean]
- Lee YH, Lee DW. 2018. Seepage characteristics of agricultural reservoir embankment considering filter interval. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 60:1-10. [in Korean]
- Lee YH, Lee TH, Lee DW. 2019. Overtopping model experiments and 3-D seepage characteristics of the embankment of deteriorated homogeneous reservoirs. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 61:13-23. [in Korean]
- Lee YH, Park JS, Fujisawa K, Murakami A, Lee DW. 2019b. Experimental study on seepage characteristics of reservoir embankment considering interval of horizontal filter. *Paddy and Water Environment* 17:273-280.
- Lee YH, Park SY, Tokida KI, Lee DW. 2018. Three-dimensional seepage characteristics of reservoir embankment considering interval of horizontal filter. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 28:80-86.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2002. Agricultural infrastructure fill dam design standards. MAFRA, Sejong, Korea. [in Korean].
- Rotunno AF, Callari C, Froio F. 2017. Computational modeling of backward erosion piping. *Models, Simulation, and Experimental Issues in Structural Mechanics* 8:225-234.
- Sun Y, Chang H, Miao Z, Zhong D. 2012. Solution method of overtopping risk model for earth dams. *Safety Science* 50:1906-1912.
- USBR (U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation). 2011. Embankment dams. Report No. DS-13(5)-9. pp. 1-172. USBR, Washington, D.C., USA.
- USBR (U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation). 2014. Embankment dams. Report No. DS-13(19)-1. pp. 1-71. USBR, Washington, D.C., USA.
- USBR (U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation). 2017. Evaluation of numerical models for simulating embankment dam erosion and breach processes. Report No. DSO-2017-02. pp. 1-91. USBR, Washington, D.C., USA.