



청수현상 추정을 위한 댐 붕괴 흐름의 유체동역학적 특성에 관한 실험적 연구

김형준·김종무·김재홍·정광호·이강남[†]
부산대학교 조선해양공학과

Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of Dam Break Flow for Estimation of Green Water Loading

Hyung Joon Kim·Jong Mu Kim·Jae Hong Kim·Kwang Hyo Jung·Gang Nam Lee[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, hydrodynamic characteristics of dam break flow were investigated by a series of experiments. The experiments were performed in a 2-D rectangular flume with obtaining instantaneous images of dam break flow to capture the free surface elevation, and pressure distributions on vertical wall and bottom of the flume. The initial water depth of the dam break flow was changed into 3 different heights, and the gate opening speed was changed during the experiments to study the effect of the gate speed in the dam break flow. Generation of dam break phenomena could be classified into three stages, i.e., very initial, relatively stable, and wall impact stages. The wall impact stage could be separated into 4 generation phases of wall impinge, run-up, overturning, and touchdown phases based on the deformation of the free surface. The free surface elevation were investigated with various initial water depth and compared with the analytic solutions by Ritter (1892). The pressures acting on the vertical wall and bottom were provided for the whole period of dam break flow varying the initial water depth and gate open speed. The measurement results of the dam break flow was compared with the hydrodynamic characteristics of green water phenomena, and it showed that the dam break flow could overestimate the green water loading based on the estimation suggested by Buchner (2002).

Keywords : Dam break phenomena(댐 붕괴 현상), Image processing technique(영상 처리 기법), Pressure measurement(압력 측정), Green water(청수현상)

1. 서 론

댐 붕괴(dam-break) 흐름은 저수지(reservoir) 내부에 갇혀있던 물이 댐(dam)의 갑작스러운 붕괴에 따라 하류로 쏟아지는 것을 말한다. 댐 붕괴 현상은 상대적으로 단순한 물리적 현상으로 이론적 접근이 용이하여 쓰나미(tsunami), 월파(overtopping)와 같은 연안 공학 및 선박 해양공학 등 다양한 분야에 널리 활용되고 있다. 특히, 댐 붕괴 흐름은 선박 및 해양구조물의 갑판 위로 흐르는 청수현상(green water)과 그 거동이 유사하다는 것이 보고되어왔으며, 복잡한 다상유동인 청수현상 예측에 많이 사용되고 있다.

공학적 현상에서의 댐 붕괴 흐름 활용을 위한 유체동역학적 특성 분석을 위해 지금까지 다양한 실험 및 수치해석, 이론적 연구가 수행되어오고 있다. 이론적 연구로, Ritter (1892)는 천수 방정식(shallow water equation)에 근거하여 난류 효과와 하류 바닥의 마찰 효과를 무시하는 가정을 통해 간단한 해석해를 제시하였다. Ritter (1892)의 해석해는 전면 유속이 일정한 특성을 가지는 등 실제 댐 붕괴 흐름과 다소 차이를 가지고 있으나, 비교적 간단한 식으로 공학적 활용이 용이하여 현재까지도 다양한 공학적 현상 예측 및 적용에 많이 사용되고 있다. 하지만 댐 붕괴 흐름은 여러 인자에 의해 영향을 받으며, 해석해의 한계인 바닥 마찰 효과를 이론적으로 반영하기 위하여 Dressler (1954)는 비

선형 천수 방정식에 마찰 효과를 고려한 해석해를 제시하였으며, 이를 통해 댐 붕괴 흐름의 유속이 마찰 효과를 고려하지 않은 Ritter (1892)에 비해 실험 결과와 더 유사함을 확인하였다. 또한, Whitham (1955)는 천수 방정식에서 Taylor 급수 전개를 통해 유동 전면부 경계층(boundary layer)을 적용하여 실험적으로 계측되었던 유동 전면부의 자유수면 형상이 마찰 효과로 굽어지는 현상을 이론적으로 구현하였다. Chanson (2009)은 Saint-venant equation에서 정수압과 바닥 마찰 계수와의 관계를 고려한 해석해를 제시하여 유동 전면부에 위치에 따라 변화하는 마찰 계수를 제시하여 시간에 따라 변화하는 댐 붕괴 흐름의 유속 특성을 반영해 Dressler (1954)의 실험과 더욱 일치하는 자유수면 형상을 보였다.

댐 붕괴 흐름은 타 유체 현상에 비해 비교적 단순한 특성을 가지고 있어, 수치적 모델링을 활용한 유체동역학적 특성 연구가 활발히 진행되고 있다. Park and Jung (2012)은 VOF(Volume of Fluid) 방법을 활용한 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 시뮬레이션을 통해 댐 붕괴 흐름을 수치적으로 모사하였으며, 댐 붕괴 흐름 중 발생하는 난류 강도(turbulence intensity)가 물의 흐름 속도에 미치는 영향을 고찰하여 실제 댐 붕괴 흐름은 다소 높은 난류 강도를 가지는 상태임을 확인하였다. Yang et al. (2018)은 RANS 방정식 기반의 시뮬레이션을 수행하였으며, 댐 붕괴 흐름의 속도장을 바탕으로 댐 붕괴 흐름의 발달과정을 수직 방향 속도가 지배적이고 불안정한 very initial stage 및 일정 시간이 지난 후 수평 방향 속도가 지배적으로 변하면서 속도장이 안정되는 relatively stable stage의 두 단계로 구분할 수 있음을 보였다. Khoshkonesh et al. (2019)은 RANS 및 LES(Large Eddies Simulation) 기반 난류 모델의 수치해석을 통해 댐 붕괴 현상의 유체동역학적 특성에 영향을 미치는 변수인 초기 물 높이(initial water depth), 저수지 너비(reservoir width), 저수지 길이(reservoir length)가 댐 붕괴 현상의 자유수면 및 압력 변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 해당 결과를 바탕으로 저수지 너비와 길이는 댐 붕괴 유동에 큰 영향을 미치지 않지만, 초기 물 높이는 지배적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이 외에도 댐 붕괴 특성을 연구하기 위한 다양한 수치적 연구가 지금까지도 진행되고 있으며 (Kocaman et al., 2020; Hien and Chien, 2021; Garoosi and Hooman, 2022), 댐 붕괴 흐름의 수치적 구현 및 해석해 활용의 용이함으로 인해 현재 다양한 수치해석 기법의 정확성을 검증하는 벤치마크(bench-mark) 모델로 널리 활용되고 있다.

하지만, 댐 붕괴 흐름에 대한 실험적 연구는 유동 특성에 대한 계측기법의 한계 및 댐 붕괴 현상에 대한 실험적 구현의 어려움으로 인해 제한적으로 수행되어오고 있다. Martin et al.(1952)는 2차원 사각형 수조에서 댐 붕괴 흐름을 실험적으로 구현 및 자유수면 형상을 이미지로 계측하였으며, Ritter (1892)의 해석해와 일치하는 결과를 보임과 함께 댐 붕괴 흐름의 전면 유속이 댐의 초기 물 높이(initial water depth)의 제곱근에 비례하는 것을 확인하였다. Zhou et al. (1999)은 2차원 댐 붕괴 흐름에 대한 실험연구를 통해 댐 붕괴 흐름의 물 높이 및 댐 붕괴로 인해 발생

하는 벽면 압력 특성을 실험적으로 계측 및 천수 방정식(shallow water equation) 기반의 비선형 수치해석 결과와 비교분석을 수행하였다. 위 실험 구성 및 계측 결과는 Buchner (2002) 및 Lee et al. (2002)에 의해서 더 자세하게 발표되었으며, 자유수면 높이 및 압력 결과는 수치해석 연구의 정확성 검증 대상으로 널리 활용되었다. 또한, Lobovsky et al. (2014)는 Zhou et al. (1999)의 실험을 1:2의 상사비로 재구현하여 실험을 수행하였으며, 현상에 대한 반복 실험을 통해 댐 붕괴 흐름 특성의 재현성을 검증하였다. 댐 붕괴 흐름은 갇혀있는 물이 수문에 의해 개방되어 하류로 쏟아지는 현상으로 수밀 및 계측장비와의 동기화에 어려움이 있어 댐 붕괴 흐름의 압력 특성을 분석한 연구는 드물게 수행되었다.

선박 및 해양구조물에 발생하는 청수현상은 물과 공기가 뒤섞이는 다상유동 현상 및 현상 자체의 비선형성으로 인해 예측이 어려워 비교적 단순하고 그 형상이 비슷한 댐 붕괴 흐름을 활용하여 청수현상의 하중을 추정하기 위한 연구가 계속해서 수행되어 오고 있다. Buchner (2002)는 다양한 선수 형상을 가지는 FPSO에 발생하는 청수현상에 대한 실험적 연구를 통해 갑판 위에서의 유동 특성과 상부 구조물에 작용하는 하중 특성을 분석하였으며 댐 붕괴 흐름의 이론적 해석해와 청수현상의 자유수면 형상에서 유사성을 바탕으로 청수현상의 유동 특성을 추정하는 방법을 제안하였다. Ryu et al. (2007)은 기포영상유속측정법(Bubble Image Velocimetry, BIV)을 이용하여 청수현상으로 갑판 위에 흐르는 유동의 기포 속도장을 계측하여 댐 붕괴 흐름의 이론적 해석해의 유속과 일치하도록 하는 초기 물 높이를 결정하여 청수현상을 추정하는 방법을 제안하였다. Greco et al. (2005)는 2차원 조파수조에서 모형시험을 통해 청수현상으로 발생하는 갑판 위 유동 특성 및 상부 구조물에 작용하는 하중 특성을 실험적으로 계측하여 갑판 위 발생하는 유동 형상이 돌진형 쇄파(plunging wave breaker)의 형태로 나타나고 이로 인해 발생한 갑판 위 기포가 상부 구조물에 작용하는 압력 특성에 영향을 줄 수 있음을 보였다. 하지만 지금까지 수행된 연구들은 모두 댐 붕괴 흐름 자체의 특성 혹은 해석해를 활용하여 청수현상과 비교되었으며, 실제 청수현상 및 댐 붕괴 흐름을 실험적으로 구현하여 그 유체동역학적 특성 및 하중을 비교하고, 그 유사성을 확인한 연구는 확인되지 않는다.

댐 붕괴 흐름은 수문이 개방되면서 시작되며, 수문의 유무 및 수문 개방 속도는 댐 붕괴 흐름의 특성에 매우 큰 영향을 줄 수 있다. 수치해석 방법을 통한 댐 붕괴 흐름 모사 연구는 대부분 수문을 고려하지 않으나, 실험적으로 댐 붕괴를 구현하기 위해서는 수문의 움직임이 필연적으로 유동에 영향을 주게 된다. Lauber and Hager (1998)는 갑작스러운 댐 붕괴 발생을 구현하기 위하여 수문 개방시간이 댐 내부 초기 물 높이 위치에서의 중력가속도로 인한 물체 낙하 시간(tor)보다 짧은 시간을 가지는 것을 제안하였으며, 그때의 수문 개방 속도는 식 (1)과 같다.

$$t_{cr} = \sqrt{2h_0/g} \quad (1)$$

여기서, h_0 는 초기 물 높이, g 는 중력가속도를 의미한다.

댐 붕괴 흐름에 대한 수문 속도 변화의 영향을 연구하기 위하여, Takagi and Furukawa (2021)는 댐 붕괴 실험을 통해 수동으로 수문을 290회 들어 올리는 반복실험을 통해 자유수면의 변화 및 바닥 압력 변화에 대한 계측을 수행하였다. 하지만, 실험적 계측기법의 한계로 인해 Takagi and Furukawa (2021)를 제외한 정량적인 수문 영향에 대한 계측은 수행되지 않은 것으로 확인되며, 댐 붕괴 흐름으로 인한 자유수면 및 압력 특성에 대한 정밀한 계측 결과 역시 제한적으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 선박 및 해양구조물에 발생하는 갑판 위 청수현상의 하중 추정을 위한 댐 붕괴 흐름 연구로, 2차원 수조를 활용하여 댐 붕괴 흐름에 대한 실험적 구현 및 댐 내부 초기 물 높이 변화에 따른 유체동역학적 특성에 대한 계측을 수행하였다. 초고속카메라를 활용하여 댐 붕괴 흐름의 시작부터 벽면 충격까지 전 흐름 영역에 대한 자유수면 변화를 계측 및 영상처리 기법을 통해 그 특성을 분석하였으며, 이때 댐 붕괴 유동으로 인해 발생하는 벽면 및 바닥에서의 충격압력을 실험적으로 계측 및 제시하였다. 또한, 댐 붕괴 흐름에 대한 수문 속도의 영향을 분석하기 위해 수문 속도 변화에 따른 댐 붕괴 흐름의 특성을 정량적으로 계측 및 분석하였으며, 실험적으로 계측된 댐 붕괴 흐름의 유체동역학적 특성을 기반으로 선박의 갑판에서 발생하는 청수현상과의 유동 및 하중 등의 유체동역학적 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험 조건 및 기법

2.1 실험 조건

댐 붕괴 실험은 Fig. 1과 같이 길이 2.0m, 폭 0.3m, 높이 0.5m의 크기를 가지는 2차원 투명 아크릴 수조에서 수행되었다. 수문은 10mm 두께의 아크릴로 제작되어 왼쪽 벽면으로부터 0.3m 떨어진 위치에 있으며, 수조 옆쪽에 설치된 서보 모터(servo motor)를 통해 수직으로 개방할 수 있도록 하였다. 수조의 전면에는 총 3대의 초고속 CMOS 카메라를 설치하였으며, 수조 하단에는 LED 램프를 설치하여 댐 붕괴 흐름에 대한 자유수

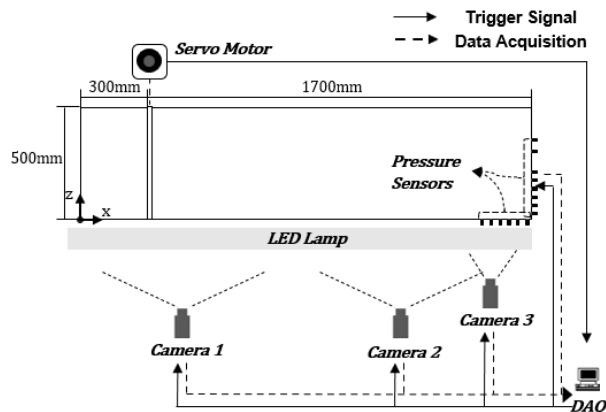


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

면 영상을 획득하였다. 또한, 댐 붕괴 유동이 부딪히는 수직 벽면 및 바닥에 압력센서를 설치하여 댐 붕괴 흐름으로 인해 발생하는 압력 특성을 계측하였다. 카메라 및 압력센서는 서보 모터에서 생성되는 트리거(trigger) 신호를 기준으로 모두 동기화(synchronize)하였다.

댐 붕괴 실험 결과와 청수현상의 유체동역학적 특성 비교 및 분석을 위하여, 수문이 개방되기 전 댐의 물 높이인 초기 물 높이(h_0)는 청수현상에 대한 실험연구 (Lee et al., 2020)를 참고하여 결정하였다. 이때, h_0 는 Buchner (2002)가 제안한 댐 붕괴 기반의 청수현상 추정 방법(식 (2))을 통해 청수현상의 갑판에서 자유수면의 가장 높은 위치까지 높이인 freeboard exceedance(h_f)를 활용하여 결정하였다 (Table 1).

$$h_0 = \frac{9}{4} h_f \quad (2)$$

2.2 수문 개방 방법

수문 개방 속도로 인한 댐 붕괴 흐름의 유동 특성 변화를 계측하기 위하여, 본 연구에서는 서보 모터의 운전 속도를 바꾸어 가며 댐 붕괴 흐름을 실험적으로 구현 및 유동 특성을 계측하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이, 서보 모터는 수문의 위쪽에 위치하여 수문을 수직 방향으로 당겨 개방하며, 댐의 수압으로 인한 수문 주변에서의 누수 방지 및 수문의 수평 방향 위치 고정을 위해 수조의 옆면에 깊이 5mm, 폭 10mm의 홈을 설치하였다 (Fig. 2).

본 연구에서 사용된 수문 개방 속도는 Lauber and Hager (1998)에서 제안한 t_{cr} 및 그때의 수문 속도인 V_{cr} (식 (3))을 기준으로 $\sqrt{2}$ 배 및 $1/\sqrt{2}$, $1/2$, $1/2\sqrt{2}$ 배의 총 5개의 수문 개방 속도를 선정 및 수문 속도 변화에 따른 댐 붕괴 흐름의 유동 특성 변화를 분석하였다(Table 2). 충분히 빠른 수문 개방을 위해 71.7 N·m의 최대 토크를 가지는 서보 모터(Higen FMA-KF50-AB10)를 활용하였다.

$$V_{cr} = h_0 / t_{cr} \quad (3)$$

Table 1 Initial water depth determination based on green water study (Lee et al., 2020)

Freeboard exceedance (h_f) (Lee et al., 2020)	Initial water depth (h_0) in present study
0.049m ($H_{1/3}$)	0.110m
0.069m ($H_{1/10}$)	0.160m
0.102m ($H_{1/100}$)	0.230m

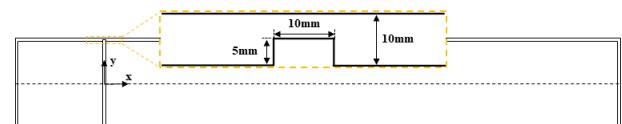


Fig. 2 Groove in the gate position of dam break model

Table 2 Gate speed variation

Speed variation	$V_{cr}/2$ $\sqrt{2}$	$V_{cr}/2$	$V_{cr}/\sqrt{2}$	V_{cr}	$\sqrt{2} V_{cr}$
Gate speed	0.37m/s	0.53m/s	0.75m/s	1.06m/s	1.50m/s

2.3 자유수면 영상 계측

댐 붕괴 흐름의 자유수면 변화를 공간적으로 계측하기 위하여 Fig. 3과 같이 총 3대의 초고속 CMOS 카메라를 병렬로 설치하여 댐 붕괴 흐름의 전면 영상을 측정하였다. Camera 1 및 2는 댐 붕괴 흐름의 전체적인 자유수면 영상을 측정하기 위한 것으로, Basler의 acA2000-340kc 및 12mm 광학렌즈(F-number 4.8)를 사용하였으며 영상은 초당 50장(50Hz)으로 1.10×0.61 m²의 측정장(Field of view)을 가진다. 또한, 벽면에 유동이 부딪히는 순간의 영상을 측정하기 위해 사용한 Camera 3은 수직 벽면 및 바닥면의 영상을 측정할 수 있도록 설치하여 충격하중 현상이 발생하는 지점의 영상을 더욱 정밀하게 측정하도록 하였으며, Redlake의 Y-5 및 18mm 광학렌즈(F-number 2.0)를 사용하여 영상은 300Hz로 0.27×0.20 m²의 측정장을 가진다. 구체적인 카메라 사양은 Table 3에 정리하였다.

Camera 1, 2로부터 계측 및 결합한 영상을 활용하여 영상 내

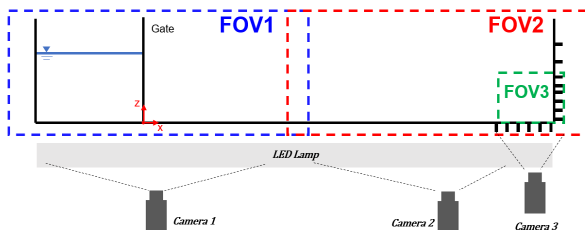


Fig. 3 Field of view for image processing

Table 3 Image acquisition specifications

	Camera 1, 2	Camera 3
Acquisition rate	50Hz	300Hz
Field of view	1.10×0.61 m ²	0.27×0.20 m ²
Pixel resolution	0.5392 mm/pixel	0.1148 mm/pixel
Focal length	12mm	18mm
F number	4.8	2.0

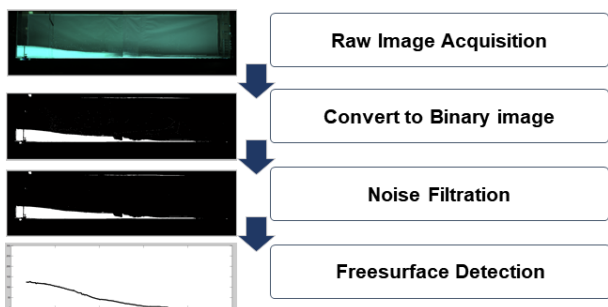


Fig. 4 Free surface detection method from raw image

명암(intensity)의 변화를 통해 자유수면 높이를 도출하였다. 계측된 영상은 수조 아래 설치된 LED로 인해 광원이 물에서 반사되어 주변에 비해 밝게 나타나며, 이를 binary 영상으로의 변환 및 잡음(noise)을 제거하는 방법을 활용해 자유수면을 픽셀(pixel) 단위로 분류하여 계측하였다(Fig. 4).

2.4 벽면 및 바닥 충격압력 계측

댐 붕괴로 인해 수조 벽면 및 바닥에 발생하는 충격압력을 계측하기 위하여, Fig. 5와 같이 댐 붕괴 유동이 처음 부딪히는 수직 벽면에 30mm와 90mm 간격으로 압력센서 8개 설치 및 바닥에 50mm 간격으로 압력센서 6개를 설치하였다.

충격압력은 0~2bar 범위의 정적 및 동적 압력을 측정할 수 있으며, 압력센서 표면의 영향을 받지 않는 (Kistler Group, 2022) piezo-resistive type 압력 센서(Kistler 4043A2)를 사용하여 계측하였다. 압력센서의 형상은 Fig. 6(a)에 나타나 있으며 정확한 압력 계측을 위해 센서의 압력 계측면이 수조면과 평평하게 설치하여 유동을 교란하지 않도록 하였다(Fig. 6(b)). 계측 속도(sampling rate)는 자체 수렴도 테스트를 통해 10kHz로 결정하였으며 동일한 초기 물 높이에 대하여 총 5회 반복 실험 및 계측을 수행하였다.

압력 계측 시 발생하는 배경 잡음(background noise)은 상대적으로 적은 위상/지연 왜곡이 발생하는 FIR(Finite Impulse Response) 저역 통과 필터를 사용하여 제거하였다 (McClellan and Parks, 1973). 저역 통과 필터의 차단 주파수(cut-off frequency)는 Fig. 7(a)에 나타난 것과 같이 배경 잡음의 주파수를 고려하여 450Hz로 결정하였다. 또한, FIR 필터의 차수(order)

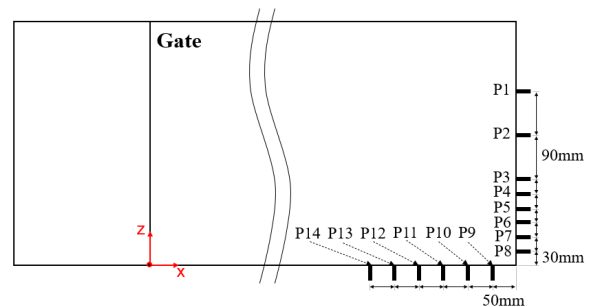


Fig. 5 Location of pressure measurements

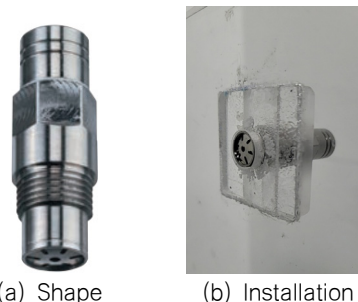
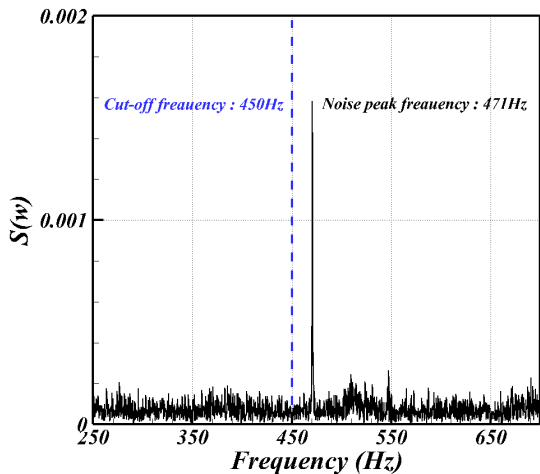
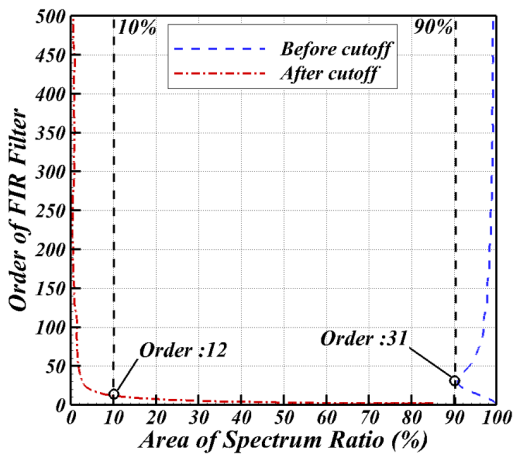


Fig. 6 Shape(a) and installation(b) of the pressure sensor (KISTLER 4043A2)



(a) cut-off frequency



(b) FIR order

Fig. 7 Determination of cut-off frequency(a) and FIR order (b) of FIR low pass filter

는 Lee et al. (2020)의 제안 방법을 따라 차단 주파수 이전과 이후 0차 모멘트 비율을 각각 90%, 10%로 유지할 수 있는 31차로 결정하였다(Fig. 7 (b)).

2.5 이론적 배경(Ritter 해석해)

본 연구에서 계측한 댐 붕괴 흐름의 유체동역학적 특성은 Ritter (1892)가 제안한 댐 붕괴 흐름 해석해와 비교하여 제시하였다. Ritter (1892)의 해석해는 마찰이 없는 정상각형 단면을 가지는 수로에 대하여 Saint-venant equation(식 (4) 및 (5))로부터 도출된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

여기서 h 는 물 높이, U 는 하류 방향으로의 수심 평균 유속, t 는 붕괴 시점을 0으로 하는 시간, x 는 붕괴지점을 0으로 하는 수평

방향 위치를 의미한다. Ritter (1892)는 댐 붕괴 후 상류의 무한한 확장 및 물 높이 h 까지의 동일한 하류 방향 속도분포 가정을 통해 (x/t) 좌표에 종속적으로 변화하는 댐 붕괴 흐름의 물 높이(식 (6))와 유속(식 (7))을 표현할 수 있는 해석해를 제시하였으며, 이때 유동 전면부의 진전 속도는 $2\sqrt{gh_0}$ 로 나타난다.

$$h(x,t) = \begin{cases} h_0 & \text{for } x/t \leq -\sqrt{gh_0} \\ \frac{1}{9g} (2\sqrt{gh_0} - \frac{x}{t})^2 & \text{for } -\sqrt{gh_0} < x/t < 2\sqrt{gh_0} \\ 0 & \text{for } x/t \geq 2\sqrt{gh_0} \end{cases} \quad (6)$$

$$U(x,t) = \frac{2}{3} (\sqrt{gh_0} + \frac{x}{t}) \quad \text{for } -\sqrt{gh_0} < x/t < 2\sqrt{gh_0} \quad (7)$$

Ritter (1892)의 해석해는 마찰을 무시하는 등 가정을 통해 도출되어 실제 현상과 차이를 보이나, 식 (6)과 (7)에 표현된 것과 같이 매우 간단하게 표현되어 공학적 현상에 대한 유체동역학적 특성을 추정하는 데에 활발히 활용되고 있다.

3. 실험 결과

3.1 댐 붕괴 흐름의 발생과정

Fig. 8은 본 연구에서 수행한 초기 물 높이 0.23m일 때의 댐 붕괴 흐름의 전체 발생과정 순간 영상을 나타내고 있다. 본 연구에서 댐 붕괴 흐름의 발생과정을 크게 수문 개방 직후 저수지에서 물이 쏟아지는 단계인 very initial stage(Fig. 8 (a)), 쏟아진 물이 하류면을 따라 흐르는 단계인 relatively stable stage(Fig. 8 (b)), 그리고 흐르는 댐 붕괴 유동이 수직 벽면에 부딪히며 충격을 가하는 wall impact stage(Fig. 8 (c))의 3가지 과정으로 구분하였다. Very initial stage에서는 댐 붕괴 직후 물이 하류면으로 쏟아지는 과정으로, 댐 내부에 갇혀있던 물이 중력에 의해 내려오면서 유동 전면부의 자유수면 형상이 위로 볼록한 형상을 나타낸다. 이때, 전체 유동 흐름은 수직 방향 속도 성분이 수평 방향에 비해 지배적이다 (Yang et al., 2018). Relatively stable stage는 very initial stage 직후 물이 하류 방향으로 흐르면서 자유수면이 점차 바닥면과 평평해지는 과정으로, 수직 방향에 비해 수평 방향 속도가 지배적으로 변화되면서 유속이 점차 안정화된다 (Khoshkonesh et al., 2019). 하류를 따라 흐르던 댐 붕괴 유동은 Wall impact stage에서 하류 방향의 수직 벽면에 부딪히며, 이때 유동은 벽면을 타고 올라갔다가 중력에 의해 다시 바닥으로 떨어지면서 물과 공기가 크게 뒤섞이면서 바닥에 충격을 주게 된다.

Fig. 9는 앞선 댐 붕괴 흐름의 발생과정 중 마지막 과정인 wall impact stage의 발생단계를 순간 영상으로 나타내고 있다. Wall impact stage는 특징적인 현상들을 기반으로 4개의 단계(wall impinge phase, run-up phase, overturning phase, touchdown phase)로 분류할 수 있었다. 먼저, 하류로 흘러온 댐 붕괴 유동이 벽면에 부딪히면서 충격을 주는 wall impinge 단계, 부딪힌 물이 벽면을 타고 올라가면서 유동의 운동에너지가 위치에너지로

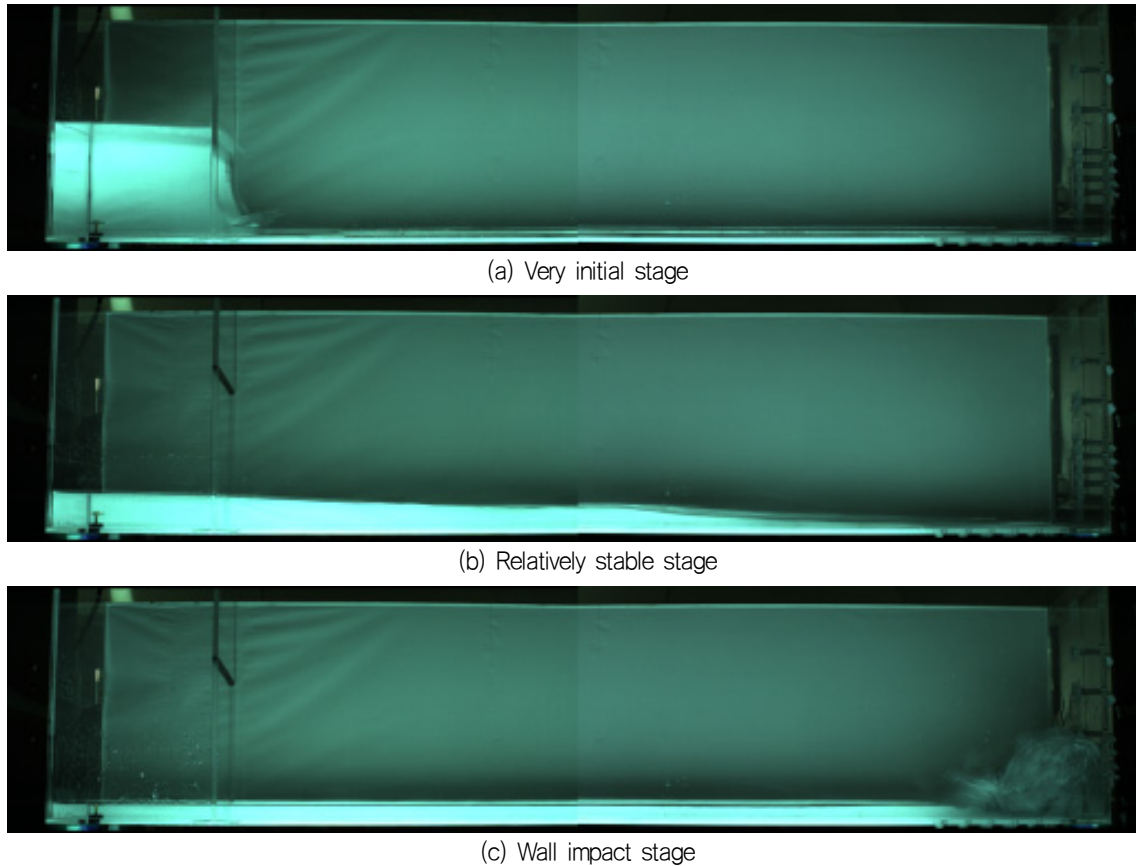


Fig. 8 Snapshots of generation stage of dam break flow ((a) Very Initial; (b) Relatively stable; (c) Wall impact)

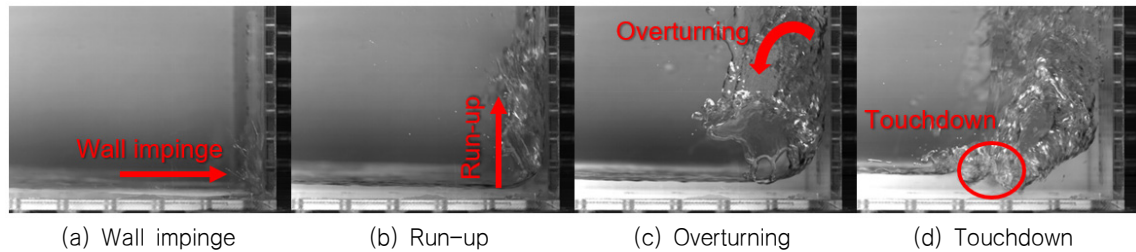


Fig. 9 Snapshots of generation phase in wall impact stage ((a) Wall impinge; (b) Run-up; (c) Overturning; (d) Touchdown)

변환되는 run-up 단계, 벽면을 타고 올라온 물이 중력에 의해 댐 붕괴 흐름 진행 방향의 반대로 뒤집어지는 overturning 단계, 그리고 물이 공기와 뒤섞이면서 바닥으로 떨어져 충격을 주는 touchdown 단계로 나누어진다.

3.2 자유수면 형상 특성

댐 붕괴 흐름은 수문 개방 직후인 very initial stage부터 벽면에 부딪히는 wall impact stage까지 자유수면 형상이 계속해서 변화하게 된다. 본 연구에서는 초고속 CMOS 카메라를 통한 댐 붕괴 흐름 전 영역에서의 자유수면 영상을 획득하였으며, 앞서 기술한 영상처리기법을 통해 각 순간 이미지에 대한 정량적인 자유수면 높이를 계측하였다.

Fig. 10은 초기 물 높이 0.23m일 때 실험에서 계측한 자유수

면 형상을 시간 흐름(수문 개방 직후 각 0.1s 당)에 따라 나타내고 있다. 이때, 댐 붕괴 흐름 진행 시간(t) 및 하류 방향 위치(x), 댐 붕괴 흐름의 자유수면 높이(h)는 아래와 같이 무차원화하여 표현하였다.

$$t^* = t / \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \quad (8)$$

$$x^* = x / h_0 \quad (9)$$

$$h^* = h / h_0 \quad (10)$$

Fig. 10에서 실험으로 계측된 댐 붕괴 흐름의 자유수면 형상은 파란색 실선으로 표시하였다. 자유수면 형상은 수문 개방 직후 아래에 위치한 물이 먼저 하류로 흐르기 시작하면서(Fig. 10

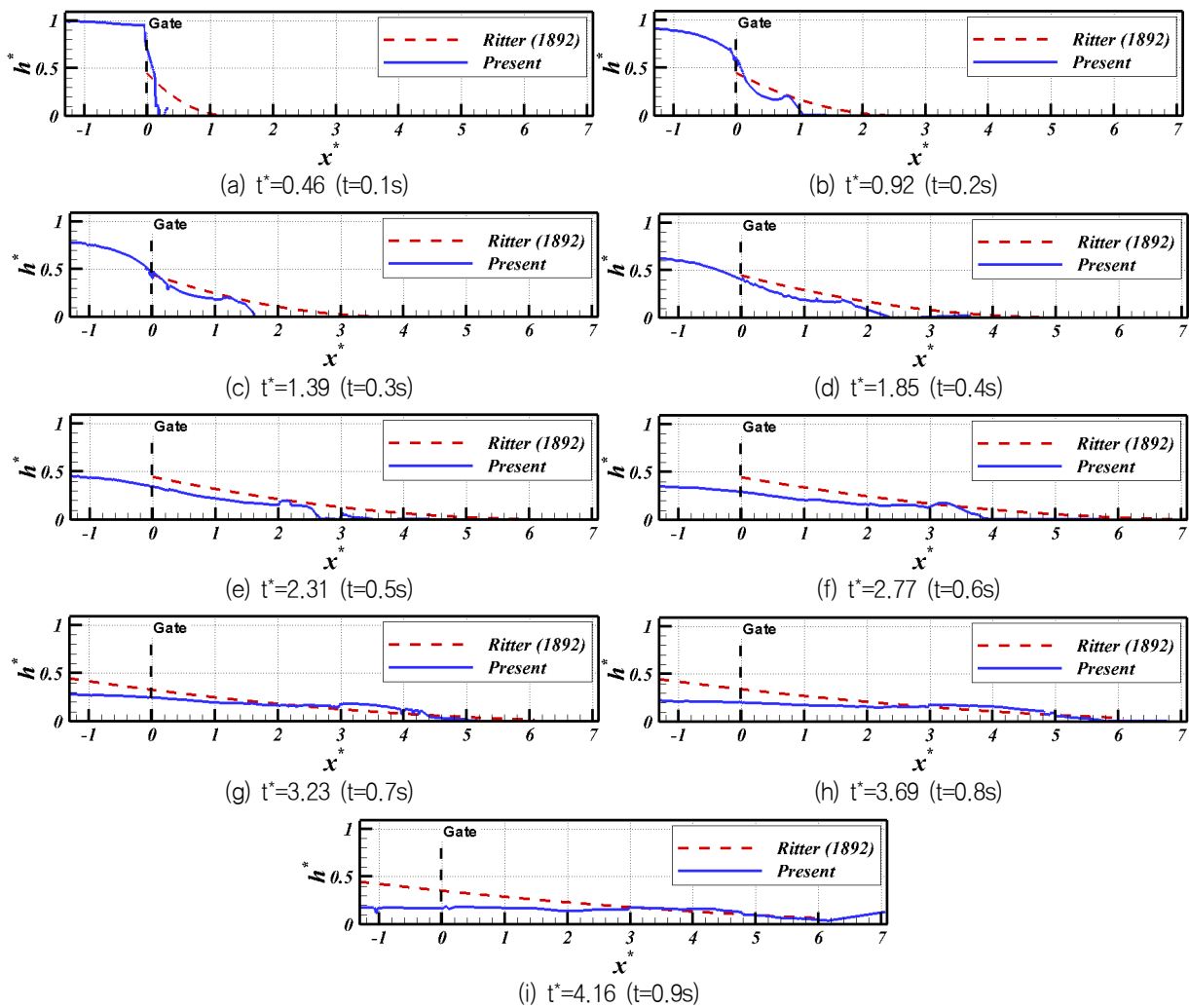


Fig. 10 Comparison of spatial free surface elevation with analytic solution(Ritter, 1892) at initial water depth of 0.23m

(a)), 바닥과의 마찰로 인해 유동 전면부가 위로 볼록한 형상을 띄게 된다(Fig. 10 (b)). 이후 댐 붕괴 흐름은 바닥을 따라 흐르면서 볼록한 형상이 서서히 사라지면서 점차 자유수면의 기울기가 완만해지며(Fig. 10 (c)–(h)), 자유수면이 바닥면과 거의 평행이 되었을 때 최종적으로 벽면에 부딪히게 된다(Fig. 10 (i)). Fig. 10의 빨간색 점선은 실험적으로 계측한 자유수면 형상과 이론적 해석해의 비교를 위해 Ritter (1892)의 해석해를 통해 얻은 자유수면 형상을 나타낸 것이다. Ritter (1892)의 해석해는 실험적으로 계측한 자유수면에 비해 유동 전면부가 대체로 더 빠르게 진행하며, 실험적으로 계측되었던 유동 전면부의 볼록한 형상이 나타나지 않았다. 이는 Ritter의 해석해가 바닥과의 마찰 효과를 무시하는 가정을 포함하고 있기 때문으로 판단된다. 또한, 시간이 지날수록 Ritter (1892)의 해석해로 얻는 자유수면 높이가 실험 계측 결과에 비해 더 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 실험에서 구현한 댐 붕괴 흐름의 경우 댐 내 물이 제한되어 있으나, Ritter의 해석해는 무한한 상류 확장을 가정하였기에 생기는 차이로 판단된다. 이러한 차이점을 제외하면, Ritter (1892)의 해석해는 실험으로 계측한 자유수면 형상을 대체로 잘 표현하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 초기 물 높이 변화에 따른 자유수면 형상을 실험적으로 계측한 결과를 보여주고 있다. 자유수면 높이 및 하류 방향 위치, 그리고 진행 시간은 Fig. 10과 같이 무차원화하여 나타내었다. Very initial stage 직후 유동 전면부가 바닥과의 마찰로 인해 위로 볼록해지는 형상은 초기 물 높이가 0.23m일 때에 가장 크게 나타났으며, 초기 물 높이가 낮아질수록 그 크기가 더 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 댐 붕괴 흐름의 유속이 초기 물 높이의 제곱근에 비례하는 특성 (Ritter, 1892)에 따라, 초기 물 높이가 낮을수록 유속이 낮아져 바닥과의 마찰력 역시 작아지면서 유동 전면부의 굴곡이 더 작게 발생하는 것으로 판단된다. 유동의 전면부를 제외한 나머지 자유수면 형상은 다양한 초기 물 높이에도 거의 비슷한 자유수면 높이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 자유수면 높이가 초기 물 높이에 비례하는 것을 의미하며, 식 (6)에 표현된 Ritter의 해석해와도 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 다양한 초기 물 높이에 대해 시간에 따른 유동 전면부의 위치 변화를 나타내고 있다. 초기 물 높이가 증가함에도 유동 전면부의 무차원 이동속도 x^*/t^* 는 2.36의 일정한 크기를 나타내며, 이는 Ritter (1892)의 해석해로 제시된 바와 같이 h_0 의 제곱근에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있으나, 그 크기는 해석

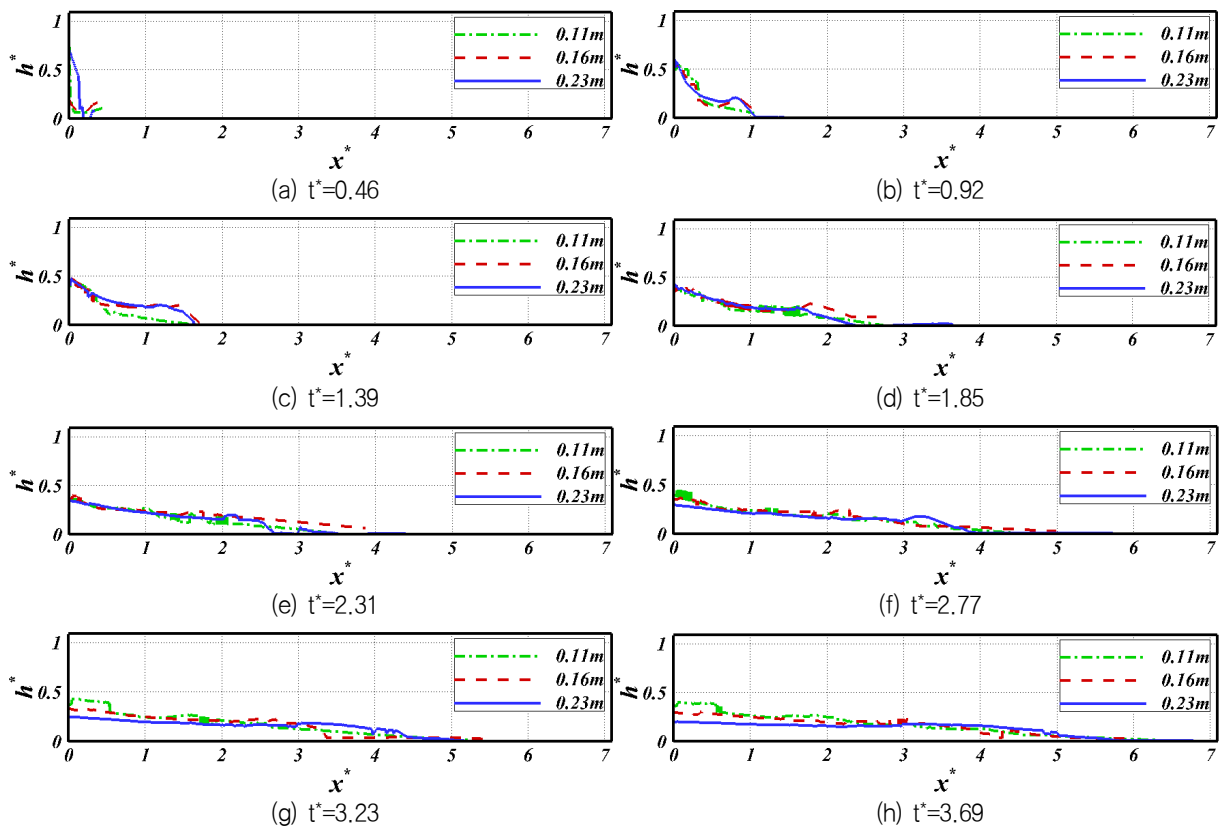


Fig. 11 Comparison of spatial free surface elevation varying initial water depth

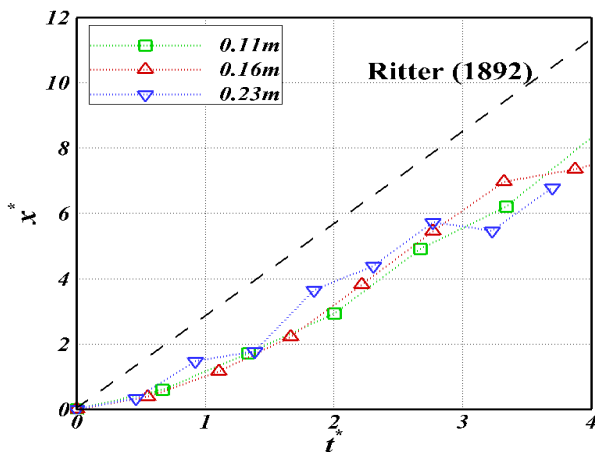


Fig. 12 Comparison of water front position varying initial water depth

해의 마찰을 무시하는 가정으로 인해 해석해 유동 이동속도 ($x^*/t^*=2\sqrt{2}$) 대비 실험 결과 대비 다소 작은 값을 보인다.

3.3 벽면 및 바닥에서의 충격압력 분포 특성

Fig. 13은 초기 물 높이 0.23m일 때 wall impact 과정에서 댐 붕괴 흐름으로 인해 발생한 벽면 및 바닥 압력 분포 예측 결과를 시계열로 나타낸 것이다. 예측된 압력 결과는 아래의 식 (11)을

통해 무차원화 하여 나타내었다.

$$P^* = P / 0.5 \rho u_{\max}^2 \quad (11)$$

계측된 벽면(Fig. 13 (a))에서의 압력은 댐 붕괴 유동이 벽면에 닿는 순간부터 상승하기 시작하며, 짧은 시간에 빠르게 정점까지 상승한 후 다시 서서히 떨어지게 된다. 가장 큰 충격압력은 벽면의 가장 아래부분인 P8에서 관측되었으며, 벽면에서의 압력 센서 위치가 높아질수록 압력의 크기 역시 작아지는 것을 확인할 수 있다. 벽면의 각 압력 센서에서 계측된 최대압력은 유동이 벽면을 치는 순간 P8에서 가장 먼저 발생하였으며 이후 벽면을 타고 올라간 유동이 뒤집어지며 바닥에 충격을 가하면서 P7과 P6에 최대압력이 계측되었다. 하지만 벽면 코너로부터 멀리 떨어진 압력 센서(P4, P3)의 경우 벽면에 부딪힐때와 바닥에 충격을 발생시킬 때의 충격이 전파되지 않아 오직 정수압으로 인한 압력 상승만을 보이며 이에 따라 P4, P3의 압력은 물이 뒤집어지기 전 가장 정수압이 높은 시점에 최대 압력이 발생하였다.

바닥에서의 압력(Fig. 13 (b))은 댐 붕괴 유동이 압력 센서 위치를 지나는 시점부터 압력이 상승하기 시작하며, 유동이 벽면에 부딪히고 Overturning 되는 순간까지 서서히 증가하다가 물이 바닥에 떨어지는 touchdown 단계에서 급격하게 상승하는 것을 보인다. 이때, 최대압력은 물이 바닥에 떨어지는 위치인 P11에서 관측 및 P11에서 멀어질수록 최대압력의 크기가 서서히 작아지는 것을 확인할 수 있으며, P11에서의 최대압력 크기는 벽면에

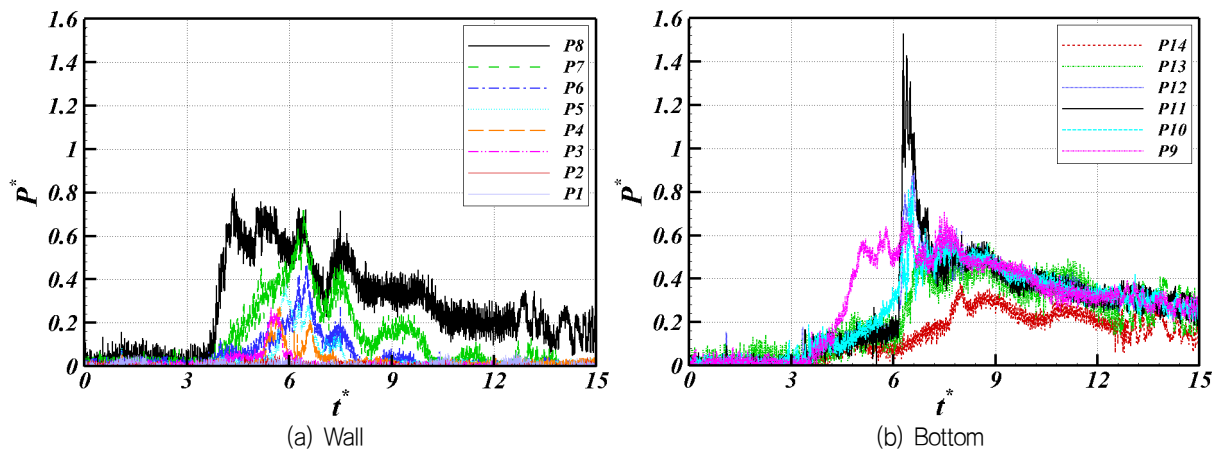


Fig. 13 Time histories of pressure distribution with initial water depth of 0.23m ((a) Wall, (b) Bottom)

서 예측된 최대압력보다 약 2배 가까이 더 큰 것을 볼 수 있다.

Fig. 14는 wall impact 과정에서 예측한 압력 중 가장 큰 압력이 예측된 벽면에서의 P8 및 바닥 P11의 압력을 wall impact 과정의 4단계(wall impinge, run-up, overturning, touchdown)와 함께 나타낸 것이다. 댐 붕괴 유동이 벽에 부딪히는 순간인 wall impinge 단계에서 벽면(P8)의 압력이 급격하게 상승 및 정점에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 이때 바닥(P11)의 압력은 서서히 상승하기 시작한다. Run-up 단계에서 물이 벽면을 타고 올라가면서 벽면에서의 압력은 유속으로 인해 압력이 소폭 감소하며, overturning 단계에서 다시 증가하게 된다. 상승한 물이 다시 바

닥으로 떨어지는 touchdown 단계에서 바닥(P11) 압력은 급격하게 상승하며, 이때 벽면 압력 역시 소폭 함께 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이후 전체 유동이 잠잠해지면서 압력 역시 서서히 감소하게 된다.

Fig. 15는 초기 물 높이 변화에 따른 각 압력 센서에서의 최대 압력 크기를 비교하여 나타내었다. 벽면의 경우(Fig. 15 (a)), 압력 센서의 위치가 높아질수록 댐 붕괴 유동으로 인한 정수압이 낮아지면서 압력의 크기가 서서히 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 초기 물 높이가 높을수록 빠른 댐 붕괴 흐름 유속으로 인해 벽면에서 전반적으로 더 큰 충격압력을 나타내었다. 바닥에서의

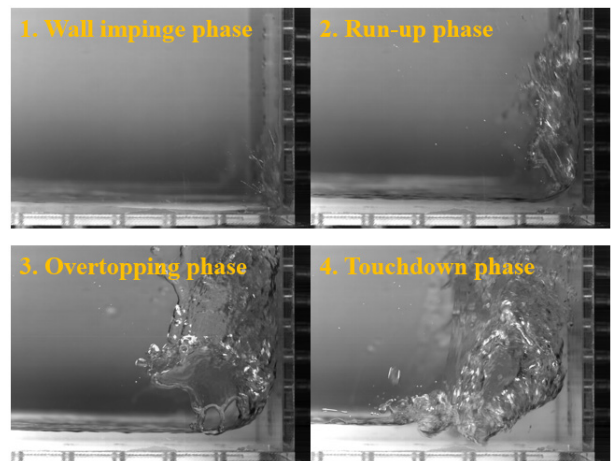
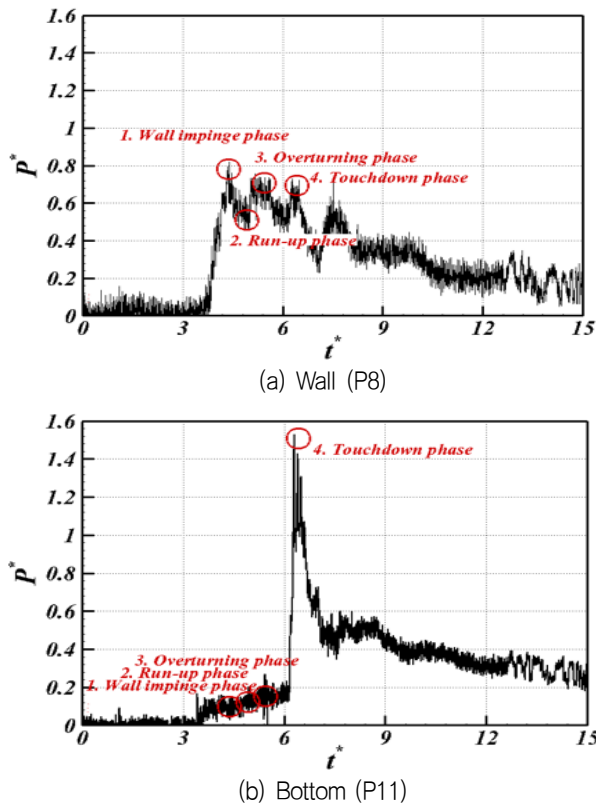


Fig. 14 Time histories of pressure distribution with snapshots of generation phases ((a) Wall (P8), (b) Bottom (P11))

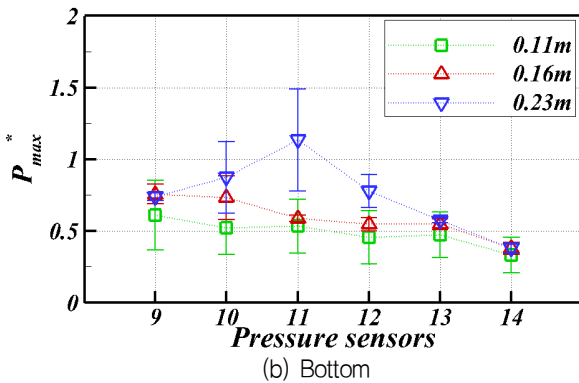
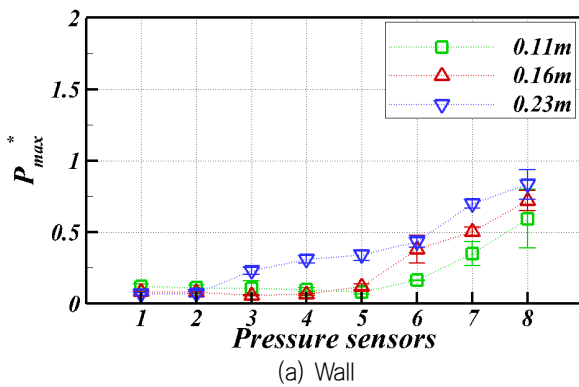


Fig. 15 Distribution of maximum pressure magnitude with various initial water depth ((a) Wall, (b) Bottom)

압력(Fig. 15 (b))은 전반적으로 벽면에 가까울수록 높은 압력을 보였으며, 벽면과 같이 초기 물 높이가 높을수록 더 큰 압력을 나타내었다. 또한, 초기 물 높이가 0.23m일 때 touchdown 단계에서 물이 떨어져 바닥에 충격을 주는 현상으로 P4에서 압력이 크게 계측된 것을 볼 수 있으나, 더 낮은 초기 물 높이에서는 run-up 단계에서 물이 높게 올라가지 못하면서 touchdown 단계가 명확히 발생하지 않아 바닥에서 발생하는 압력의 큰 상승이 계측되지 않았다.

3.4 수문 개방 속도에 따른 댐 붕괴 흐름 특성 변화

댐 붕괴 흐름에서 수문의 존재 및 개방 속도는 필연적으로 유동에 영향을 주게 되며, 이는 수문 개방 속도가 일정 속도(V_{cr}) 이상이 되면 그 영향을 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Lauber and Hager, 1998). 본 연구에서는, 수문의 개방 속도 변화가 댐 붕괴 흐름의 유체동역학적 특성에 어떠한 영향을 주는 지에 대하여 실험적으로 계측 및 분석하였다.

Fig. 16은 초기 물 높이 0.23m일 때 very initial stage에서 수문 근처에서의 수문 개방 속도 변화에 따른 자유수면 높이를 비교하여 보여주고 있다. 전반적으로 실험에서 계측된 모든 자유수면은 수문 위치($x^*=0$)에서 약 $0.65h^*$ 의 높이를 보이고 있는데, 이는 Ritter (1892)의 해석해에서 제안한 $4/9h^*$ 에 비해 약간 높은 위치인 것을 알 수 있다. 이는 Ritter (1892)의 해석해에 포함된

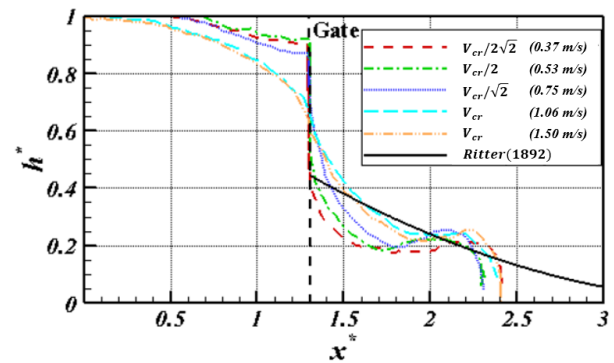


Fig. 16 Comparison of free surface at initial stage($t^*=0.92$) with various gate speed

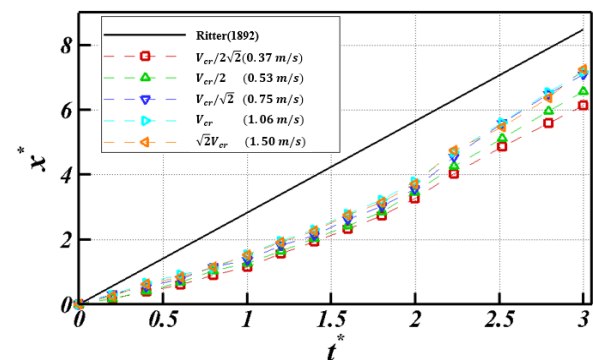


Fig. 17 Comparison of water front position with various gate speed

댐 상류의 무한 확장 및 바닥에서의 마찰을 무시하는 가정으로 인해 차이로 판단된다. 또한, 이러한 마찰 무시 가정으로 인해 거의 직선으로 나타난 해석해의 자유수면 형상에 비해 본 연구에서 계측한 자유수면 형상은 크게 굽어져 유동 전면부 위치가 해석해에 비해 늦게 이동하고 있음을 알 수 있다. Very initial stage에서 수문 개방 속도가 V_{cr} 및 $\sqrt{2}V_{cr}$ 일 때 수문 끝의 자유수면 위에 위치하여 수문 내 물이 하류로 자유롭게 흐를 수 있으나, 수문 개방 속도가 V_{cr} 보다 낮을 때에는 같은 시간에서 수문 끝의 자유수면 아래에 위치하여 댐 내부의 물이 일부 하류로 나오지 못하고 갇혀있는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 수문 개방 속도가 상대적으로 낮을 때 유동 전면부의 형상이 아래쪽으로 더 크게 휘어지며, 전반적인 자유수면의 기울기가 더 급격해지는 것을 볼 수 있다. 즉, very initial stage에서 수문 개방 속도가 V_{cr} 보다 느리게 되면 수문이 댐 붕괴 흐름을 막아 자유수면의 형상 변화와 함께 다음 단계에서의 유동 흐름에 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

수문 개방 속도의 변화에 따라 유동 전면부의 이동속도 또한 영향을 받으며, 이는 Fig. 17에 나타나 있다. Fig. 10에서 계측된 것과 같이 실험에서 계측된 유동 전면부 이동속도는 Ritter의 해석해에 비해 상대적으로 느린 것을 확인할 수 있으며, 수문의 영향을 받는 수문 개방 속도($V_{cr}2\sqrt{2}$, $V_{cr}/2$, $V_{cr}/\sqrt{2}$)에서의 유동 전면부 이동속도는 수문 개방 속도가 빠를 때에 비해 전반적으로 느린 것을 볼 수 있다.

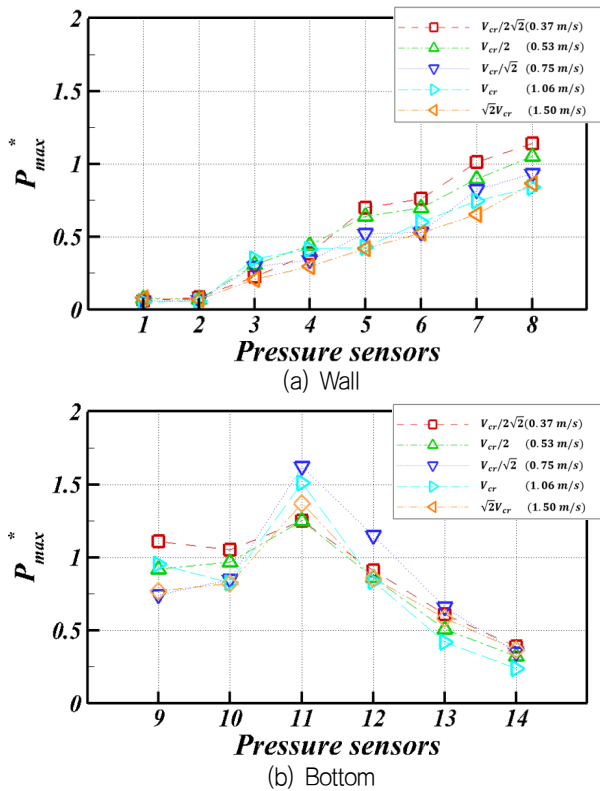
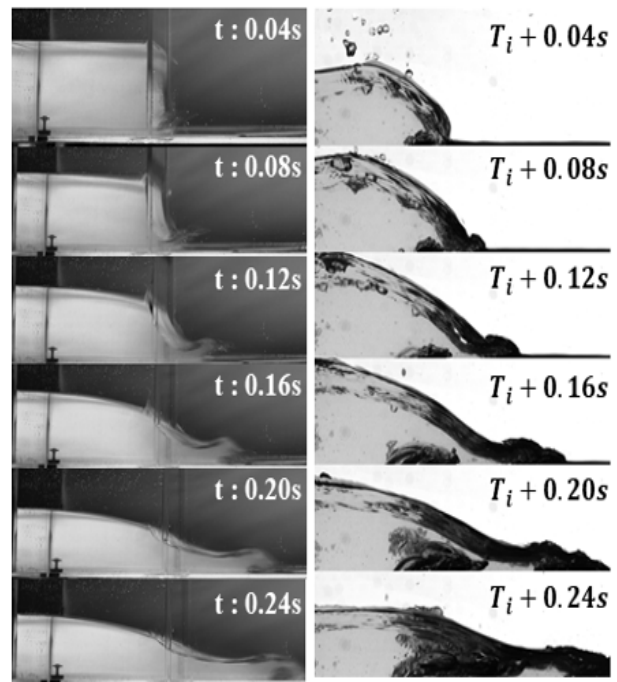


Fig. 18 Comparison of peak pressure magnitude varying gate speed ((a) Wall, (b) Bottom)

Fig. 18은 수문 개방 속도 변화에 따른 벽면 및 바닥에서 계측된 최대압력을 비교하여 나타난 것이다. 벽면(Fig. 18 (a))의 높은 위치(P1~P4)에서 계측된 압력은 그 크기의 차이가 뚜렷하지 않으나, 댐 붕괴 흐름의 유속으로 인해 동적 압력이 상대적으로 크게 발생하는 벽면 하부(P5~P8)에서는 수문 개방 속도로 인한 압력 크기 차이가 발생하며, 그 크기는 수문 개방 속도가 빠를수록 더 작은 것을 보였다. 또한, 벽면 하부에서는 수문 개방 속도가 증가함에 따라 압력 크기가 점차 감소하면서 V_{α} 를 기준으로 최대압력이 일정해지며, 이는 상대적으로 느린 수문 개방 속도에서 수문과 댐 붕괴 유동의 상호작용으로 인해 유동 전면부의 유량이 증가하며, 이는 벽면에 작용하는 압력의 증가로 이어진 것으로 판단된다. 또한, 바닥(Fig. 18 (b))에서는 벽면에 타고 올라온 물이 바닥에 충격을 주는 touchdown 단계에서 최대압력 크기가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이 단계에는 물과 공기가 크게 뒤섞이는 다상유동 현상 및 동적 압력의 증가로 인해 수문 개방 속도에 대한 압력 크기의 경향성이 관측되지 않았다.

3.5 댐 붕괴 흐름 및 갑판 위 청수현상 흐름의 유체동역학적 특성 비교

선박 및 해양구조물에 발생하는 청수현상은 복잡한 다상유동 및 갑판으로 인한 실험적 계측기법의 한계로 인해 갑판 위 유동 특성에 대한 실험적 연구가 어려우며 (Lee et al., 2020), 청수현상으로 인한 갑판 위 하중 및 유동 특성을 추정하기 위해 상대적으로

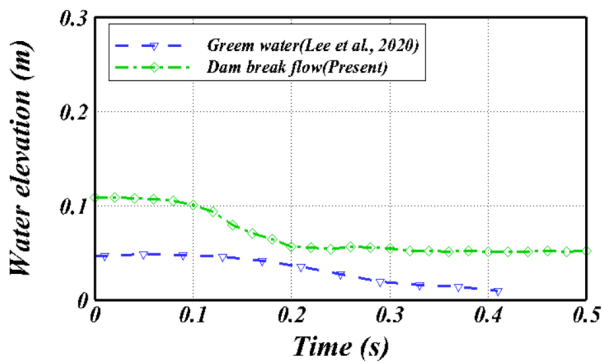


(a) Present (b) Lee et al. (2020)
Fig. 19 Comparison of generation stage with green water experiment(Lee et al., 2020) at initial water depth of 0.23m

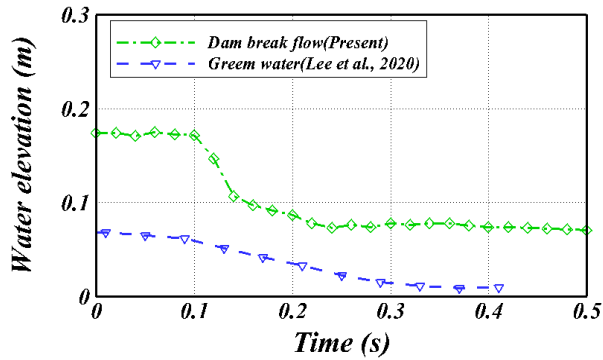
단순한 현상인 댐 붕괴 흐름을 주로 활용하고 있다 (Buchner, 2002; Ryu et al., 2007; Lee et al., 2020). 본 연구에서는 댐 붕괴 흐름과 청수현상의 유체동역학적 특성 비교를 위해 Buchner (2002)가 제안한 추정 방법(식 (2))을 활용하여 Lee et al. (2020)이 수행한 고정식 구조물에서 발생하는 갑판 위 청수현상의 유체동역학적 특성 계측 결과와 비교연구를 수행하였다.

Fig. 19는 Lee et al. (2020)이 계측한 갑판 위 청수현상의 자유수면 형상과 댐 붕괴 흐름의 자유수면 변화를 같은 시간에 대해서 비교하여 나타난 것이다. 두 실험에서 계측된 자유수면 형상은 청수현상에서 구조물로 입사된 파랑이 갑판 위로 올라오는 시간(T_i)과 댐 붕괴 흐름의 수문 개방 시간을 동일한 시점으로 놓고 비교하였다. 먼저, 댐 붕괴 흐름의 very initial stage에서 계측된 유동 전면부가 굽어지는 현상은 Lee et al. (2020)의 실험에서 계측된 파도가 갑판 위로 올라왔을 때의 자유수면 형상과 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 또한, 유동이 계속 진행하면서 유동 전면부뿐 아니라 댐 붕괴 흐름의 수문 안쪽 및 청수현상에서 구조물의 weather-side 영역까지 자유수면 형상이 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 댐 붕괴 흐름의 수문 개방 및 청수현상의 갑판 위로 물이 올라온 시점으로부터 약 0.2s 후 두 현상 모두 유동의 전면부가 흐름 방향으로 굽어지면서 바닥에 기포가 발생하는 것이 동시에 관측되었으며, 유동이 계속해서 흐르면서 두 현상의 전체적인 자유수면 형상이 점점 더 유사해지는 것을 볼 수 있다.

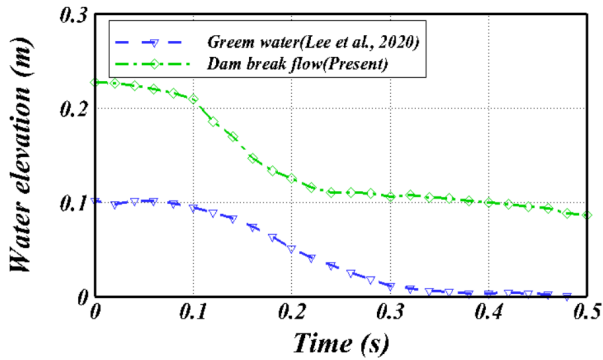
Fig. 20은 댐 붕괴 흐름에서의 수문 위치 및 청수현상에서의 구조물 끝부분에서 자유수면 높이 변화를 초기 물높이 및 freeboard exceedance 변화에 따라 비교하고 있다. 앞선 Fig. 19



(a) $h_0 : 0.11\text{m}$



(b) $h_0 : 0.16\text{m}$



(c) $h_0 : 0.23\text{m}$

Fig. 20 Comparison of water elevation with green water (Lee et al., 2020) varying initial water depth ((a) $h_0 : 0.11\text{m}$, (b) $h_0 : 0.16\text{m}$, (c) $h_0 : 0.23\text{m}$)

에서 본 것처럼 두 현상의 자유수면 형상은 정성적으로 매우 비슷하나, 초기 물 높이 0.11m(a), 0.16m(b), 0.23m(c)에서의 댐 붕괴 흐름에서 예측된 자유수면 높이는 모두 청수현상에 비해 약 2~2.5배 더 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 21에 나타난 유동 전면부의 이동속도 또한 댐 붕괴 흐름이 청수현상에 비해 모든 초기 물 높이에서 약 2~2.5배 더 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 Buchner (2002)가 제안한 댐 붕괴 기반 청수현상 추정 방법(식 (2))이 청수현상의 갑판 위 물 높이 및 속도를 과대평가할 수 있음을 의미한다.

댐 붕괴 흐름 및 청수현상으로 인해 발생하는 바닥에서의 압력 예측 결과를 Fig. 22와 비교하여 나타내었다. 전반적으로, 모든 초기 물 높이에 대해서 댐 붕괴 현상에서 예측된 압력이 청수

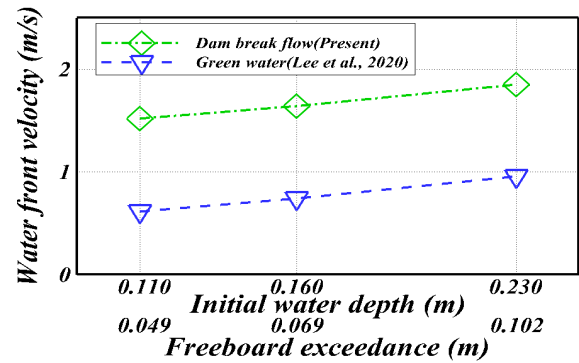
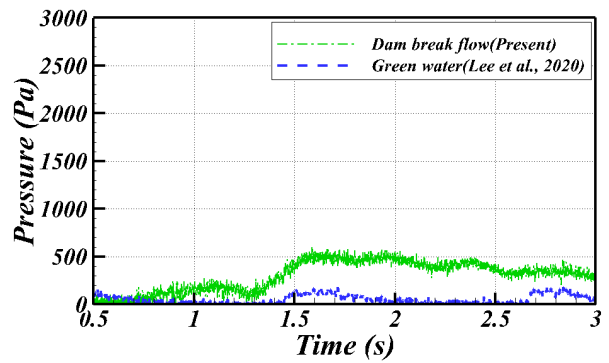
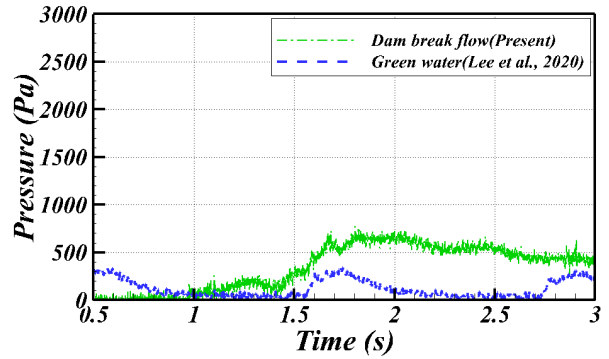


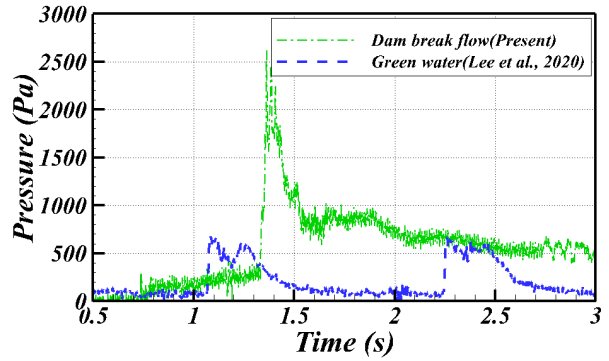
Fig. 21 Comparison of water front velocity with green water (Lee et al., 2020) varying initial water depth



(a) $h_0 : 0.11\text{m}$



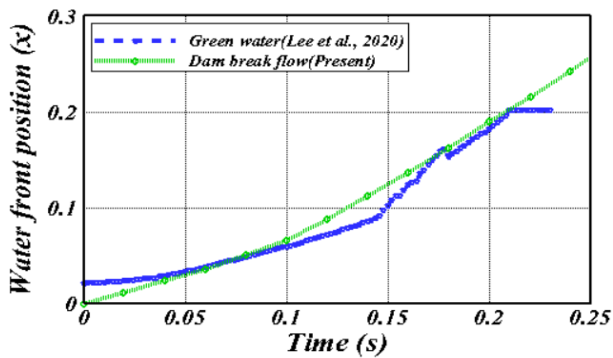
(b) $h_0 : 0.16\text{m}$



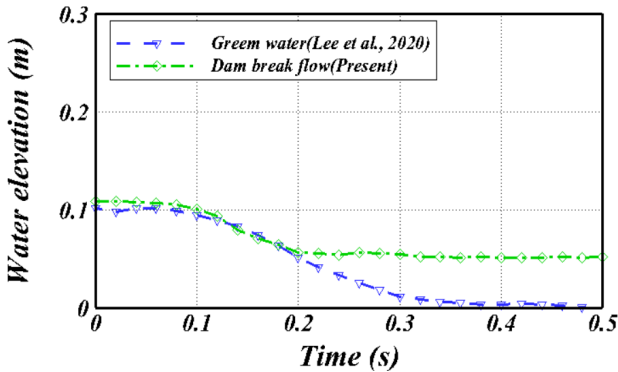
(c) $h_0 : 0.23\text{m}$

Fig. 22 Comparison of pressure time history with green water pressure on deck (Lee et al., 2020) varying initial water depth ((a) $h_0 : 0.11\text{m}$, (b) $h_0 : 0.16\text{m}$, (c) $h_0 : 0.23\text{m}$)

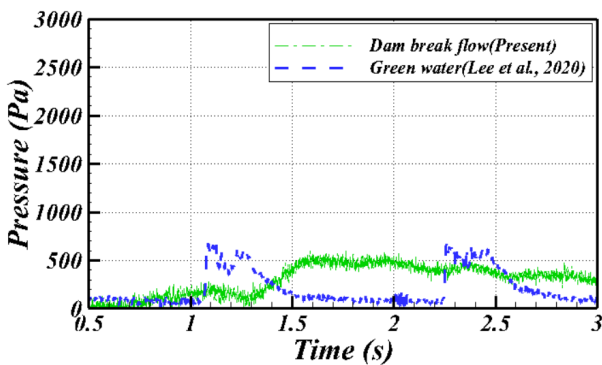
현상에 비해 약 4~10배 가까이 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 특히 초기 물 높이가 가장 높은 Fig. 22(c)에서 압력의 차이가 가장 크게 나타났는데, 이는 댐 붕괴 흐름에서의 유량이 더 많아 바닥에 작용하는 정수압이 더 크게 작용하며, 또한 청수현상에서는 고려되지 않은 댐 붕괴 실험에서의 벽면으로 인해 물이 하류 방향으로 진행되지 못하고 쌓이면서 압력이 더 크게 계측된 것으로 판단된다. 전반적으로, 댐 붕괴 흐름은 청수현상의 갑판 위 유동 흐름과 정성적으로 매우 비슷한 것을 볼 수 있으나, Buchner (2002)에서 제시한 댐 붕괴 흐름 기반 청수현상 추정 방법을 활용 시 정량적인 유동의 높이 및 이동속도, 이로 인한 바닥의 압력이 과대평가 될 수 있음을 의미한다.



(a) Water front position



(b) Water elevation



(c) Pressure time history

Fig. 23 Comparison of water front position(a), water elevation (b) and pressure time history(c) with green water (Lee et al., 2020)

청수현상으로 인한 하중의 정확한 추정을 위해 식 (12)와 같이 갑판 위로 올라온 물의 자유수면 최대 높이인 freeboard exceedance(h_f)와 유사한 댐 붕괴 흐름의 초기 물 높이(h_0)를 활용하여 각 현상의 유체동역학적 특성을 비교하였다.

$$h_0 \approx h_f \quad (12)$$

Fig. 23은 식 (12)에 따라 freeboard exceedance 0.102m에서의 청수현상과 초기 물 높이 0.11m에서의 댐 붕괴 흐름의 유동 전면 위치(a), 자유수면 높이(b) 및 압력 계측 결과(c)를 비교하여 나타내고 있다.

Fig. 23(a)에서 수문 개방 직후 댐 붕괴 흐름의 유동 전면 위치와 청수현상의 갑판 위를 흐르는 유동의 전면 위치는 매우 유사하게 나타나며 이를 통해 최대 약 2.5배 차이가 났던 기존 추정 방법에 비해 유속을 더욱 잘 추정하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 23(b)에서 댐 붕괴 흐름의 수문 위치 자유수면 높이와 청수현상에서 구조물 끝부분의 자유수면 높이는 약 0.2s까지 매우 유사한 것을 확인할 수 있으며 이후 시간이 흐름에 따라 댐 붕괴 흐름의 자유수면 높이가 청수현상에 비해 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 청수현상의 경우 갑판 위로 올라온 물이 갑판의 반대편으로 다시 떨어지나, 댐 붕괴 흐름은 간헐성기에 발생하는 차이로 판단된다. Fig. 23(c)는 청수현상의 freeboard exceedance 및 댐 붕괴 흐름의 초기 물 높이가 비슷할 때 압력을 비교하고 있으며, 청수현상의 압력 최대값이 댐 붕괴 흐름으로 인한 압력 최대값보다 약 1.2배 크게 나타나며 Buchner (2002)에서 제안한 식 (2)를 초기 물 높이로 사용하는 것에 비해 더욱 유사하게 추정하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 청수현상의 하중 추정을 위한 댐 붕괴 흐름의 유체동역학적 특성 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 2차원 수조에서 초기 물 높이 변화 및 수문 개방 속도에 따른 댐 붕괴 흐름의 특성 연구를 위한 자유수면 및 압력 분포를 실험적으로 계측하였으며, 댐 붕괴 유동의 자유수면 특성, 벽면 및 바닥에 작용하는 압력 특성에 대하여 정량적으로 분석 및 제시하였다. 또한, 댐 붕괴 흐름의 유체동역학적 특성을 기반으로 Lee et al. (2020)에서 수행한 청수현상 실험과의 비교분석을 통해 댐 붕괴 흐름 기반의 청수현상 추정 방법의 가능성 및 한계를 확인하였다.

댐 붕괴 흐름의 발생은 크게 3개의 과정(very initial stage, relatively stable stage, wall impact stage)을 거치며 발생하는 것을 확인하였으며, 그중 wall impact stage는 유동의 이동 방향에 따라 4개의 단계 (wall impinge phase, run-up phase, overturning phase, touchdown phase)로 구분될 수 있었다.

실험을 통해 계측된 댐 붕괴 흐름의 자유수면은 Ritter (1892)의 해석해에 비해 유동 전면부 이동속도가 느리고, 볼록한 형상이 나타나는 것을 관측하였으며, 이러한 차이는 Ritter (1892)의

해석해에서는 댐 바닥의 마찰을 무시하는 가정에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 유동 전면부의 굴곡부는 초기 물 높이 증가에 따라 더 커지는 것을 볼 수 있었으며, 유동 전면부를 제외하면 자유수면의 높이가 초기 물 높이에 비례함을 확인하였다. 또한, 유동 전면부의 이동속도 역시 초기 물 높이의 제곱근에 비례하는 것으로 계속되었으며, 이는 Ritter(1892)에 나타난 댐 붕괴 흐름의 유동 특성과 일치하였다.

댐 붕괴 유동으로 인해 발생하는 최대압력은 유동이 부딪히는 벽면이 아닌 run-up 후 떨어지는 touchdown 단계에서의 바닥에서, 벽면 최대압력에 비해 약 2배 크게 계속되었다. 이러한 바닥 충격 현상은 초기 물 높이가 상대적으로 작을 때 나타나지 않았으며, 벽면 및 다른 바닥에서의 압력은 초기 물 높이가 증가함에 따라 전반적으로 압력의 크기가 커지는 것을 확인하였다.

댐 붕괴 흐름 발생 시 수문 개방 속도가 느리면 발생과정 중 very initial stage에서 수문에 의해 유동에 방해를 받으며, 이는 자유수면의 기울기 및 전면부 이동속도에 영향을 주어 벽면에 작용하는 압력이 빠른 수문 개방 속도에 비해 더 높은 것을 실험적으로 계속 및 확인하였다. 전반적으로 댐 붕괴 흐름에서 수문의 영향을 무시할 수 있는 수문 개방 속도 V_{cr} 근처에서 느린 수문 개방 속도에 대비 일정한 유동 전면부 이동속도 및 압력 크기를 보였다.

댐 붕괴 흐름의 계속 결과에 대한 청수현상과의 비교를 통하여, 두 현상의 자유수면 특성은 매우 유사하나 그 높이는 청수현상에 비해 약 2~2.5배 높았으며, 유동 전면부의 이동속도 또한 댐 붕괴 흐름이 약 2~2.5배 빠른 것을 확인하였다. 또한, 댐 붕괴 흐름 및 청수현상으로 인해 발생하는 바닥에서의 압력 역시 각 초기 물 높이에서 청수현상 대비 약 4~10배 가까이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는, Buchner (2002)의 제안에 따른 댐 붕괴 흐름 기반 청수현상 추정 방법 활용 시 유동의 전면 유속, 유량 및 이로 인한 바닥의 압력이 크게 과대평가 될 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 또한, 본 연구에서는 기존에 활용되던 청수현상 추정 방법이 아닌 청수현상의 freeboard exceedance를 그대로 댐 붕괴 흐름의 초기 물 높이에 적용하여 두 현상의 자유수면 높이, 유동 전면부 이동속도 및 바닥에서의 압력 크기를 비교하였으며, 이때 청수현상과 댐 붕괴 흐름의 유체동역학적 특성이 정량적으로 가장 유사하였음을 보였다.

후 기

본 연구는 산업통상부의 재원으로 추진 중인 '친환경수소선박 R&D 플랫폼 구축(No. 20006636)' 및 '미래 해양플랜트 글로벌 전문인력양성사업(P0012646)', 그리고 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2021R111A1A01059563).

References

Buchner, B., 2002. *Green water on ship-type offshore structures*.

- Delft University of Technology Delft, The Netherlands.
- Chanson, H., 2009. Application of the method of characteristics to the dam break wave problem. *Journal of Hydraulic Research*, 47(1), pp. 41–49.
- Dressler, R., 1954. Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave. *Proc. Int. Assoc. Scientific Hydrology Assemblée Generale, Rome, Italy, 1954*, 3(38), pp. 319–328.
- Garoosi, F. and Hooman, K., 2022. Numerical simulation of multiphase flows using an enhanced Volume-of-Fluid (VOF) method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 215, pp. 106956.
- Greco, M., Faltinsen, O. and Landrini, M., 2005. Shipping of water on a two-dimensional structure. *Journal of Fluid Mechanics*, 525, pp. 309–332.
- Hien, L.T.T. and Van Chien, N., 2021. Investigate Impact Force of Dam-Break Flow against Structures by Both 2D and 3D Numerical Simulations. *Water*, 13(3), pp. 344.
- Khoshkonesh, A., Nsom, B., Gohari, S. and Banejad, H., 2019. A comprehensive study on dam-break flow over dry and wet beds. *Ocean Engineering*, 188, pp. 106279.
- Kistler Group, 2022. *Test and Measurement Pressure – Measurement equipment for demanding T&M applications*, Winterthur: Kistler Group.
- Kocaman, S., Güzel, H., Evangelista, S., Ozmen-Cagatay, H. and Viccione, G., 2020. Experimental and numerical analysis of a dam-break flow through different contraction geometries of the channel. *Water*, 12(4), pp. 1124.
- Lauber, G. and Hager, W. H., 1998. Experiments to dambreak wave: Horizontal channel. *Journal of Hydraulic research*, 36(3), pp. 291–307.
- Lee, G.N., Jung, K.H., Malenica, S., Chung, Y.S., Suh, S.B., Kim, M.S. and Choi, Y.H., 2020. Experimental study on flow kinematics and pressure distribution of green water on a rectangular structure. *Ocean Engineering*, 195, pp. 106649.
- Lee, T.h., Zhou, Z. and Cao, Y., 2002. Numerical simulations of hydraulic jumps in water sloshing and water impacting. *J. Fluids Eng.*, 124(1), pp. 215–226.
- Lobovský, L., Botia-Vera, E., Castellana, F., Mas-Soler, J. and Souto-Iglesias, A., 2014. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break. *Journal of Fluids and Structures*, 48, pp. 407–434.
- Martin, J.C., Moyce, W.J., Martin, J., Moyce, W., Penney, W.G., Price, A. and Thornhill, C., 1952. Part IV. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and*

- Physical Sciences*, 244(882), pp. 312–324.
- Park, I.R. and Jung, K.H. 2012. Study on the Effects of Surface Roughness and Turbulence Intensity on Dam-break Flows. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(3), pp. 247–253.
- Ritter, A., 1892. Die fortpflanzung der wasserwellen. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 36(33), pp. 947–954.
- Ryu, Y., Chang, K.A. and Mercier, R., 2007. Application of dam-break flow to green water prediction. *Applied Ocean Research*, 29(3), pp. 128–136.
- Takagi, H. and Furukawa, F., 2021. Stochastic Uncertainty in a Dam-Break Experiment with Varying Gate Speeds. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), pp. 67.
- Whitham, G.B., 1955. The effects of hydraulic resistance in the dam-break problem. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 227(1170), pp. 399–407.
- Yang, S., Yang, W., Qin, S., Li, Q. and Yang, B., 2018. Numerical study on characteristics of dam-break wave. *Ocean Engineering*, 159, pp. 358–371.

- Zhou, Z., De Kat, J. and Buchner, B., 1999. A nonlinear 3D approach to simulate green water dynamics on deck. *Proceedings of the seventh international conference on numerical ship hydrodynamics*, Nantes, FRANCE. pp. 1–15.



김 형 준



김 종 무



김 재 홍



정 광 호



이 강 남