

## 제방붕괴 형상의 비대칭성에 따른 붕괴흐름의 영향 분석

김수영<sup>1</sup>, 최서혜<sup>1</sup>, 이승오<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, <sup>2</sup>홍익대학교 건설·도시공학부

### Analysis of Influence for Breach Flow According to Asymmetry of Breach Cross-section

Sooyoung Kim<sup>1</sup>, Seo-hye Choi<sup>2</sup>, Seung Oh Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>School of Urban and Civil Engineering, Hongik University

**요약** 지구온난화 및 이상기후의 영향으로 극한홍수의 발생확률 및 규모가 증가함에 따라 수공구조물의 붕괴위험도 함께 증가하고 있다. 대표적인 수공구조물인 제방의 붕괴 시 막대한 붕괴유량이 제내지로 유입되어 많은 침수피해를 발생시킨다. 이러한 피해를 예측하기 위해 붕괴유량을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 제방붕괴단면의 비대칭성에 따른 붕괴유량의 변화를 분석하였다. 수리실험결과를 통해 제방의 붕괴가 진행됨에 따라 붕괴단면의 비대칭성이 어떻게 변화하는지 BASD를 계산하여 분석하였다. 그 결과, 붕괴유량과 BASD의 관계를 도출할 수 있었다. 또한, 3차원 수치모의를 통해 동일한 조건하에서 붕괴단면의 비대칭성에 따른 붕괴유량의 차이를 비교하였다. 이는 기존에 침수면적을 예측하기 위해 사용한 붕괴단면의 직사각형 가정은 붕괴유량이 과다하게 산정됨을 알 수 있었고 붕괴단면의 BASD에 따라 붕괴부에서 간섭현상이 발생하여 붕괴유량이 감소하는 것으로 나타났다. 범람 수치모의 시 제방붕괴 단면의 BASD를 고려하여 보다 정확한 붕괴유량을 산정한다면 정확한 예상침수면적을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** The risk of collapse in hydraulic structures has become more elevated, due to the increased probability and scale of flooding caused by global warming and the resulting abnormal climatic conditions. When a levee, a typical hydraulic structure, breaks, an enormous breach flow pours into the floodplain and much flood damage then occurs. It is important to accurately calculate the breach discharge in order to predict this damage. In this study, the variation of the breach discharge with the asymmetry in the cross-section of the levee breach was analyzed. Through hydraulic experiments, the cross-section of the breach was analyzed during the collapse using the BASD (Bilateral ASymmetry Degree), which was developed to measure the degree of asymmetry. The relationship of the breach discharge was identified using the BASD. Additionally, the variation of the breach flow measured by the BASD was investigated through a 3-D numerical analysis under the same flow conditions as those in the experiment. It was found that the assumption of a rectangular breach cross-section, which is generally used for the estimation of the inundation area, can cause the breach discharge to be overestimated. According to the BASD, the breach flow is decreased by the interference effect in the breach section of the levee. If the breach flow is calculated while considering the BASD in the numerical analysis of the flooding, it is expected that the predicted inundation area can be estimated accurately.

**Keywords** : Asymmetry, BASD, Hydraulic Experiment, Levee breach, Numerical Simulation

---

이 논문은 2015학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

\*Corresponding Author : Seung Oh Lee(Hongik Univ.)

Tel: +82-70-7778-3046 email: seungoh.lee@hongik.ac.kr

Received February 1, 2016

Revised March 28, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

### 1. 서론

지구온난화 및 이상기후의 영향으로 극한홍수의 발생 확률 및 규모가 증가함에 따라 수공구조물의 붕괴위험도 함께 증가하고 있다. 수공구조물의 붕괴 중 70 %는 제방과 관련되어 있으며, 그 중 월류에 의한 붕괴가 40 %, 침식에 의한 붕괴는 40 %를 차지한다[1]. 도심지를 통과하는 제방의 경우 붕괴에 따른 피해 및 위험성은 기하급수적으로 증가한다. 따라서 제방붕괴에 의한 피해를 예측하기 위해 제내지로 유입되는 유량을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 제방붕괴는 댐 붕괴와는 달리 하도 흐름의 영향을 받으며 주하도의 흐름과 직각방향으로 붕괴흐름이 발생한다. 이러한 붕괴흐름은 수평적인 흐름뿐만 아니라 수직적인 흐름까지 발생하여 3차원적인 복잡한 흐름이 발생하므로 본 연구에서는 3차원 수치모형을 활용하여 붕괴흐름을 분석하였다.

기존 제방의 붕괴에 관한연구에서 하도의 흐름을 배제하여 댐 붕괴와 동일하게 가정하는 연구들이 주로 수행되었으며 하도 내 흐름이 존재하는 경우에 대한 연구는 수치모형의 검증을 위해 수치모의를 이용한 연구가 제한적으로 수행되어 다소 부족한 실정이다. Coleman 등[2]은 비점착성의 균일한 제방의 붕괴를 제방의 절반만 제작한 수리실험을 통해 발달양상을 측정하였다. Morris 등[3]은 댐 붕괴로 인한 붕괴형상 발달 예측 및 제체의 재질, 다짐도의 영향을 정성적으로 평가하였다. 그러나 이러한 붕괴는 하도의 흐름이 없고 제방의 붕괴가 대칭적으로 발달하는 것을 가정하고 있기 때문에 실제 제방이 붕괴되는 형상을 관찰하면 하도의 흐름방향으로 붕괴가 진행되며 이로 인해 붕괴단면이 비대칭인 것을 확인 할 수 있다[4].

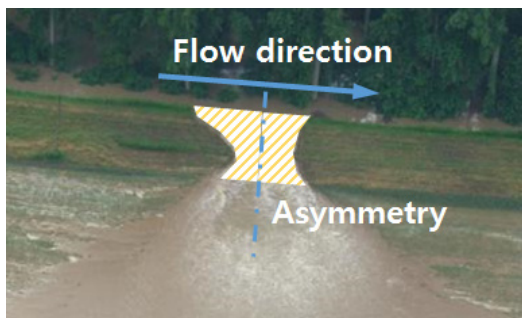


Fig. 1. Asymmetry of breach section[4]

이러한 하도의 흐름을 고려한 실험은 Shimada 등[5]에 의해 수행되었으며 다양한 유량에 대한 실험도 제방 붕괴실험을 통해 붕괴형상, 붕괴유량과 붕괴속도를 측정하여 붕괴단면의 비대칭성을 보였다. 또한 Kim[6]은 제방붕괴 실내실험을 통해 하도의 Froude 수에 따른 붕괴양상을 분석하였으며 시간에 따른 제방붕괴의 형상을 측정하였다. 하도의 흐름이 제방의 붕괴부 내에서 복잡한 3차원의 흐름을 유발해 붕괴양상에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

비대칭성을 분석하는 방법은 다양한 분야에서 수행되었다. O'Mara 등[7]은 한 지점에서의 이미지 값의 강도 (intensity)를 고려함으로써 2차원 이상의 대칭성을 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 고안하였다. 3차원 물체에서 이산화하여 평면에서 기하학적인 평균과 공분산을 사용하여 중심점과 주축을 결정하였다. Guo 등[8]은 행성의 대칭성을 측정하기 위해 반사대칭 후 일정각도로 회전시키는 방식으로 대칭축을 구하고 대칭성을 측정하였다. Mark Pinsky 등[9]은 분자구조의 구조적 특성(대칭성)과 전도특성간의 상관관계를 설정하는데 대칭도를 이용하였다(Table 1 참조).

Table 1. Overviews of quantitative estimation methodology for symmetry

Field	Method	
Medical Science	Author	David O'Mara et al.(1996)
	Formula	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degree of symmetry :</li> </ul> $S = 1 - \frac{\sum_{p \in object} f(\vec{p})}{\sum_{p \in object} \max diff}$ <p>where,</p> $f(\vec{p}) = \text{abs}(I(\vec{p}) - I(\vec{p}')), \text{ if } \vec{p}' \in obj.$ $= \max diff, \text{ if } \vec{p}' \notin obj.$ <p>maxdiff = 254=255-1 I(n) : density of the point n</p>
Earth Science	Author	Qi Guo et al.(2010)
	Formula	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bilateral central symmetry degree:</li> </ul> $BCSD(i) = \frac{A(M'_i \cap M''_i)}{A(M)}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>Bilateral symmetricity :</li> </ul> $\delta_B = \max \{ BCSD(i) \}$ <p>where, M: original shape M': shape after rotation operation M'': transformed shape from the shape M' after reflection</p>
Physical chemistry	Author	Mark Pinsky et al.(2010)
	Formula	<ul style="list-style-type: none"> <li>Continuous-symmetry measures (CSM)</li> </ul> $S(G) = 100 \times \frac{1}{nd^2} \sum_{k=1}^n  Q_k - \hat{Q}_k ^2$

본 연구에서는 제방의 비대칭성을 표현할 수 있는 방법을 제안하고 수리실험을 통해 도출된 제방붕괴 단면의 비대칭성을 분석하여 대표단면을 설정하였으며 3차원 수치모의를 통해 붕괴단면의 비대칭성과 붕괴흐름과의 관계를 분석하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1 대칭성 산정

대칭성은 일반적으로 대칭부분 또는 비대칭부분의 비로써 나타낸다(Eq. (1) 참조).

$$m_{symmetry}/m_{total} \quad (1)$$

여기서,  $m_{symmetry}$  은 대칭부분,  $m_{total}$  은 전체이다.

대칭성 또는 비대칭성 측정 방법은 식 (1)을 기반으로 측정할 대상에 맞게 중심축 설정방법, 계산과정 등에 차이가 있다. 본 연구는 비대칭성에 의한 붕괴유량의 변화를 측정하고자 하므로, 축을 기준으로 나뉜 두 단면의 면적 차이가 아닌 비대칭성의 정도에 따른 붕괴유량을 비교하기 위해 단면적을 동일하게 나누는 중심축을 설정하였다. 또한 붕괴단면의 발달방향이 주하도의 흐름방향과 일치하는 경향이 있어 대칭성을 나타낼 때 하도흐름의 방향이 반영되면 흐름방향을 알고 있는 것만으로도 비대칭의 방향을 알 수 있어 활용도가 커질 수 있다. 이에 따라 제방붕괴단면의 대칭성을 판단하기 위해 제방붕괴단면의 비대칭도(BASD : Bilateral ASymmetry Degree)를 Eq. (2)와 같이 제안하였다.

$$BASD = sign \cdot \frac{A(S'_D) - A(S'_U)}{A(S)} \quad (2)$$

여기서,  $S'_U$  는 단면중심축을 기준으로 상류측 단면,  $S'_D$  는 단면중심축을 기준으로 하류측 단면,  $S$  는 전체 단면을 나타내며,  $sign$  은 단면중심축 기준으로 계산된 1차모멘트 값의 부호이다.

비대칭도를 측정하기 위해 상류측 단면  $S'_U$ , 하류측 단면  $S'_D$  의 면적을 동일하게 나누는 축을 단면중심축으로 결정하였다(Fig. 2(a) 참조). Fig. 2(b)와 같이 양쪽 영역을 축을 기준으로 겹쳤을 때, 겹쳐지지 않는 부분의 총

면적  $A(S'_D) - A(S'_U)$  을 분모로 사용하며 단면의 총면적을 분모로 BASD를 산정한다. 따라서 BASD는 -1부터 1까지의 값을 나타내며 절대값이 증가할수록 비대칭도가 증가하고, 완전히 대칭이 되는 경우 0의 값을 갖는다. BASD의 부호(+/-)는 1차모멘트를 통해 Fig. 2(c)에서와 같이 더 큰 모멘트를 갖는 부호를 사용하여 결정한다. 하도의 흐름을 고려한 제방붕괴형상을 고려하는 것이 목적이므로 하도의 흐름방향을 +로, 반대방향을 -로 하였다. 이와 같이 BASD를 적용할 경우 부호만으로도 비대칭성의 방향을 알 수 있는 장점이 있다.

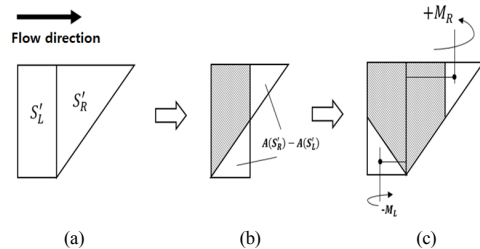


Fig. 2. Schematic of BASD calculation  
 (a) Establishment of central axis  
 (b) Calculation of asymmetry area  
 (c) Determination in direction of the asymmetry

### 2.2 수치모형의 지배방정식

제방붕괴 흐름의 특성을 분석하기 위한 수치모의에 3차원 유동해석 프로그램인 FLOW-3D를 사용하였으며 FLOW-3D는 연속방정식과 운동량 방정식을 따르며 그 식은 Eqs. (3)~(7)과 같다[10].

#### 2.2.1 연속방정식(Continuity Equation)

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (4)$$

여기서,  $A_x, A_y, A_z$  는 유체 흐름을 위한 비어있는 면적의 비(area fraction),  $V_f$  는 체적비(volume fraction),  $\rho$  는 유체의 밀도(density), RSOR는 질량 생성/소멸(mass source/sink) 항이다.

2.2.2 운동량방정식(Momentum Equations)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_f} u \tag{5}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_f} v \tag{6}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_f} w \tag{7}$$

여기서,  $u, v, w$ 는 각각  $x, y, z$  방향 유속성분,  $F$ 는 힘(중력, 비관성 가속도에 의한 힘 등),  $RSOR$ 은 유속이 0일 때 질량의 주입으로 인한 가속도항이다.

3. 제방붕괴 형상의 비대칭성 분석

본 연구에서는 Kim[6]이 수행한 제방붕괴 수리실험에서 도출된 제방붕괴 형상에 대해서 본 연구에서 제안한 BASD를 적용하여 제방붕괴단면의 대표적인 BASD 값을 도출하였다.

3.1 수리실험의 제원

실험수로의 저폭은 1.2 m, 제방고 0.3 m, 제방의 사면 경사는 1:2이다. 직선수로의 길이는 16.0 m이며, 이 중 이동상 제방은 4.0 m이다. 이동상 제방의 재질은 모래이다(Fig. 3 참조).

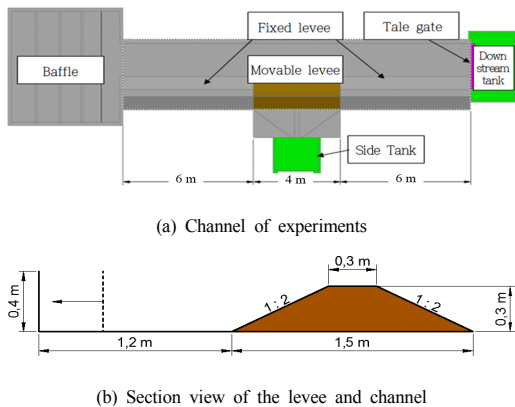


Fig. 3. Experimental channel and section view[4]

실험은 주하도의 Froude 수 0.20, 0.25, 0.30, 0.35인 경우에 대해 수행하였으며 각각의 경우에 대한 하도의 유량( $Q$ )은 표 2에 나타냈다.

Table 2. Conditions of discharge for Froude number (Kim, 2014)

Froude Number	0.20	0.25	0.30	0.35
Discharge( $Q$ ) (m <sup>3</sup> /s)	0.154	0.193	0.232	0.270

3.2 제방붕괴 양상

전체적으로 제방의 붕괴는 하도흐름방향으로 발달하였다. 붕괴 초기에 비대칭성이 크다가 시간이 지남에 따라 대칭성이 커지는 경향은 비슷하게 나타났다(Fig. 4 참조).

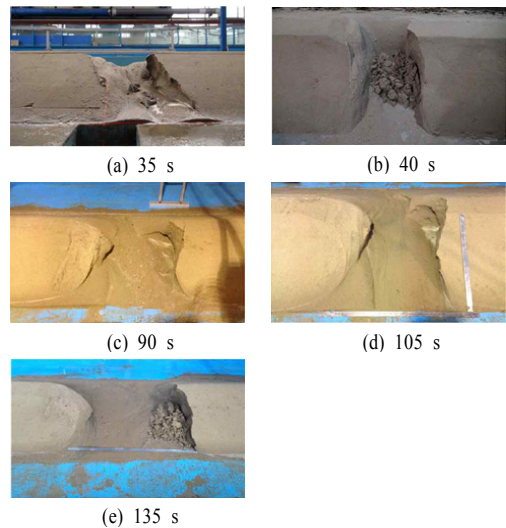


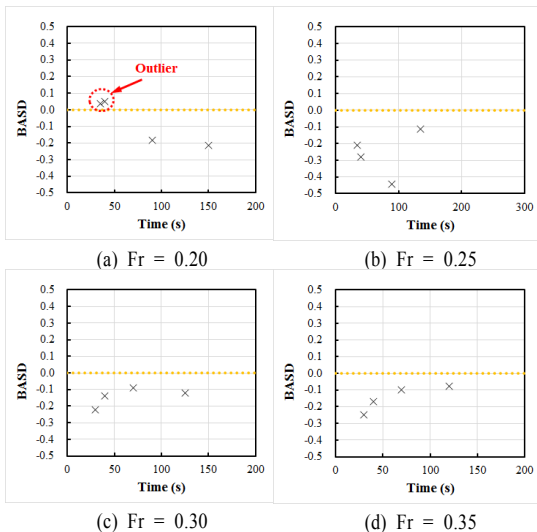
Fig. 4. Shapes of breach section for time(Fr = 0.25)

정량적인 대칭성 분석을 위해 각 케이스별 붕괴된 제방의 중앙단면을 이용하여 본 연구에서 제안한 BASD를 산정하였다(Table 3 참조). Froude 수가 0.2 이고 붕괴 경과시간이 35초, 40초인 경우는 붕괴유량이 작고 붕괴가 충분히 발달하지 못해 산정값의 정확도가 낮아 이상치로 판단하여 경향분석에서 제외하였다. Froude 수가 클수록 붕괴 초기의 비대칭성이 크게 나타나고 붕괴가 발달함에 따라 비대칭성이 작아지는 현상은 실험에서 관찰한 결과와 같게 나타났으며 Froude 수가 클수록 BASD 0.1

이하로 비대칭성이 작아지는데 소요되는 시간이 짧게 나타났다(Fig. 5 참조).

**Table 3.** Cross-section at center of levee according to elapsed time of breach

Time (s)	Fr = 0.20	Time (s)	Fr = 0.25
150		150	
	BASD = -0.214		BASD = -0.111
90		70	
	BASD = -0.182		BASD = -0.445
40		40	
	BASD = 0.052		BASD = -0.280
35		35	
	BASD = 0.039		BASD = -0.211
Time (s)	Fr = 0.30	Time (s)	Fr = 0.35
150		150	
	BASD = -0.122		BASD = -0.078
70		70	
	BASD = -0.089		BASD = -0.100
40		40	
	BASD = -0.140		BASD = -0.169
35		35	
	BASD = -0.222		BASD = -0.248



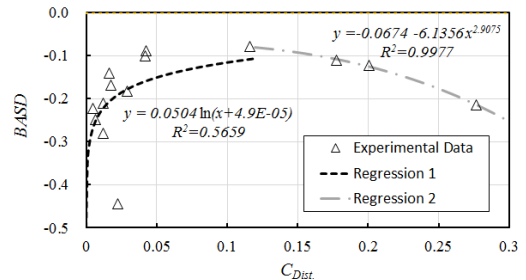
**Fig. 5.** Variation of BASD for breach time

붕괴단면의 비대칭성은 붕괴의 경과시간에 따라 변화하며 하도의 흐름과도 관계가 있다. 이러한 관계를 분석하기 위해 하도유량과 붕괴유량의 비를 나타내는 붕괴유량 분배계수( $C_{Dist.}$ )를 Eq. (8)과 같이 산정하였다.

$$C_{Dist.} = Q_{breach} / Q \quad (8)$$

여기서,  $Q_{breach}$  는 붕괴유량( $m^3/s$ )이다.

붕괴유량 분배계수와 비대칭성과의 관계를 도시한 결과  $C_{Dist.}$  가 약 0.12 일 때, 까지 비대칭성은 감소하였으며 그 이후에는 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 6 참조). 각각의 구간에 대해서 회귀식을 산정하였으며 Regression 1은 로그함수형태로 붕괴초기에 유량이 작고 흐름이 붕괴면에 반사되어 흐름이 불안정해 회귀식의  $R^2$ 가 0.5659로 낮게 나타났다. Regression 2는 멱함수의 형태로 붕괴가 어느 정도 발달 된 후에 흐름이 안정되면서 회귀식의  $R^2$ 는 0.9977로 높게 나타났다. 이러한 현상은 붕괴초기에 불규칙한 붕괴단면의 형성으로 비대칭성이 크며 시간이 경과함에 따라 비대칭성이 감소하나 붕괴가 제방의 하단까지 진행되면 하도흐름의 영향을 크게 받으면서 다시 비대칭성이 증가하는 것으로 판단된다.



**Fig. 6.** Variation of BASD for  $C_{Dist.}$

### 3.3 대표단면

수치모의를 통해 붕괴단면의 비대칭성에 의한 붕괴유량의 변화를 분석하기 위해 단면적이 동일하고 비대칭성이 다른 대표단면을 설정하였다. 붕괴단면은 앞 절에서 제방붕괴 모형실험을 통해 산정된 BASD의 범위인 0.039~0.445 내에서 예각, 직각, 둔각, 대칭 사다리꼴을 임의로 도출하였으며 BASD 부호의 변화에 따라 총 5개의 대표단면을 설정하였다. 5개의 대표단면은 실험을 통해 확인한 제방붕괴의 형상인 음의 대칭성을 가지도록

하였으며 제방붕괴실험의 붕괴단면을 바탕으로 붕괴단면의 높이가 제방의 높이인 0.3 m 까지 확장되었다고 가정하였을 때의 치수를 평균하여 대표단면의 상·하부폭 및 높이를 선정하였다. 각 BASD별 형상 및 치수는 Table 4와 Fig. 7에 나타났다. 모든 붕괴단면은 하도의 상부와 하부 폭이 동일하며, 높이가 같으므로 면적이 일정하다.

Table 4. Dimensions of typical cross-section

unit : m				
$b$	$b_r$	$H$	$B$	$A$
1.126	0.763	0.300	0.400	0.229

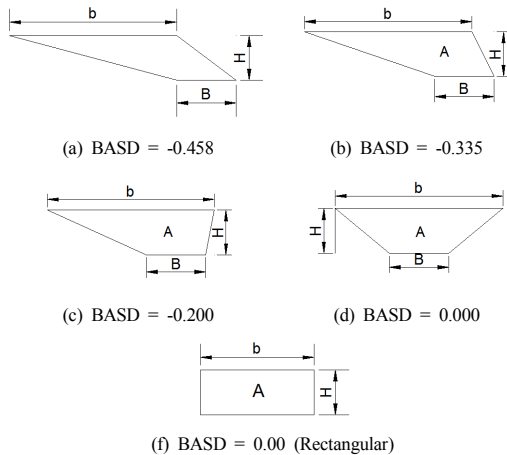


Fig. 7. Shapes of typical cross-sections

#### 4. 수치모의

##### 4.1 수치모의 조건

본 연구에서는 월류에 의한 제방붕괴 시 발생하는 붕괴단면의 기하학적 특성 변화에 따른 수리학적 특성을 수치모의를 통해 파악하였다. 이러한 기하학적 특성의 차이는 댐 붕괴와 제방붕괴의 붕괴특성을 설명하는 주요 인자로서 붕괴단면의 비대칭성에 따른 붕괴유량의 변화를 파악하였다. 수치모의는 수리모형실험과 동일한 하도 형상으로 설정하였으며 모의 조건은 Table 5에 제시하였다.

Table 5. Conditions of numerical simulations

Simulated time	260 sec (stable time : 60 sec, breaching time: 200 sec)		
Froude number of main channel	0.35		
Number of Mesh	621,744 ea		
Mesh size	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
	0.05	0.05	0.0125 ~ 0.025
Breach shape	Trapezoid or Rectangle		
case	Total 4 cases		

하도의 유량조건은 비대칭성에 따른 수리학적 특성의 변화가 가장 크게 나타날 것으로 판단되는 Froude 수 0.35로 설정하였다. 총 5개의 Mesh block으로 구분하여 붕괴부에서 조밀한 격자를 갖도록 설정하였으며 상류경계조건은 유량, 하류경계조건은 수위로 설정하였다. 붕괴부를 통해 유출되는 붕괴유량은 실험에서와 같이 평평한 제내지를 자연스럽게 흘러 나가도록 모형을 구축하였다(Fig. 8 참조).

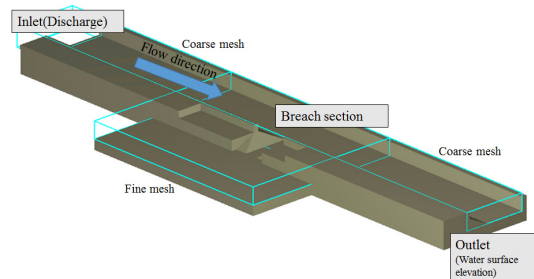


Fig. 8. Shapes of typical cross-sections

##### 4.2 수치모의 결과

붕괴단면의 비대칭성에 의한 붕괴유량의 변화를 수치모의한 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 사다리꼴의 경우 BASD가 0.2 일 때 붕괴유량이 최대로 나타났으며, 비대칭성이 커질수록 붕괴유량이 감소하는 것으로 나타났다. 붕괴단면이 대칭인 경우 사다리꼴에 비해 직사각형일 때 유량이 1.12배 크게 산정되었다. 이는 붕괴흐름이 전체적으로 단면의 하단부에 형성되어 하단부의 유속이 크게 발생되는데 사다리꼴에 비해 직사각형이 하단부의 폭이 크기 때문에 실제 통수단면이 증가하고 유속도 빠르기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 10 참조).

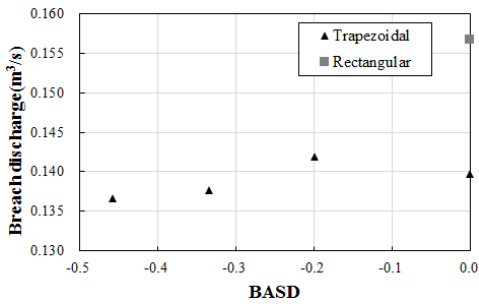


Fig. 9. Variation of breach discharge for BASD

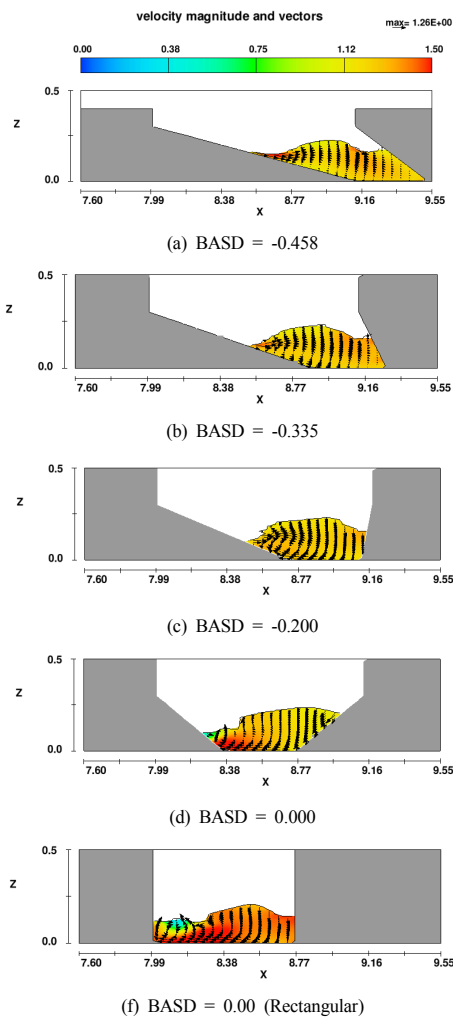


Fig. 10. Velocity distributions at breach sections

붕괴단면을 통과하는 흐름의 유선을 Fig.11에 나타냈다. 그 결과 비대칭성이 큰 경우 하도의 흐름방향의 영향

을 받아 흐름이 하류방향을 향하고 있다. 이러한 경우 하도의 흐름이 붕괴부로 유입되지 못하고 하도의 하류로 향하기 때문에 붕괴유량이 감소되는 것으로 판단된다. BASD가 -0.200인 경우에는 붕괴흐름이 하도흐름과 수직한 방향으로 형성되는 것으로 나타났고 이러한 흐름으로 인해 붕괴유량이 원활하게 유출되는 것으로 판단된다. BASD가 0.000인 경우 하도로부터 유입된 붕괴흐름이 붕괴단면에 부딪혀 상류방향으로 흐름이 형성되었으며 이러한 간섭현상이 붕괴유량을 감소시키는 것으로 판단된다. 동일하게 대칭단면인 경우에도 단면의 형상이 직사각형인 경우 BASD -0.200와 유사하게 하도흐름에 수직한 흐름이 나타났으며 이러한 흐름을 통해 하도흐름과 붕괴흐름의 방향이 수직이 되어야 간섭현상 없이 붕괴흐름이 원활하게 배출될 수 있다고 판단된다.

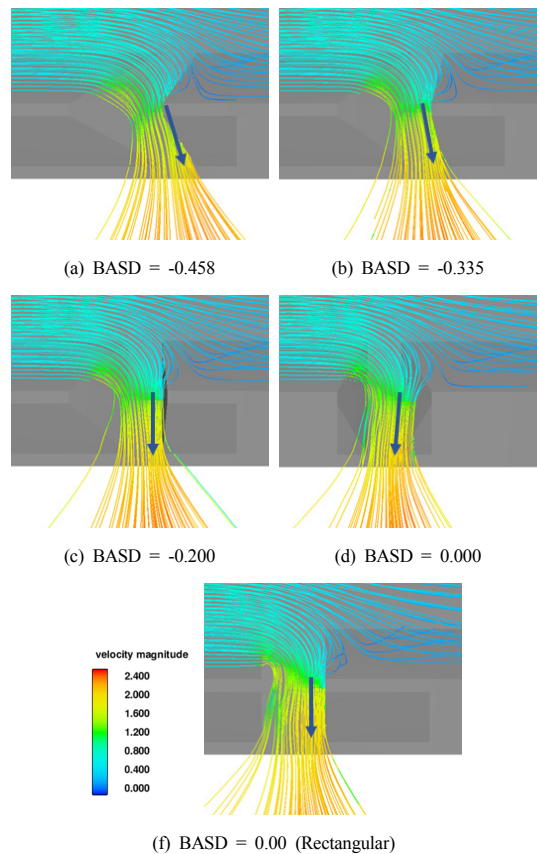


Fig. 11. Stream lines and main directions of breach flows(→)

## 5. 결론

본 연구에서는 제방의 월류에 의해 붕괴가 발생할 때 붕괴단면의 비대칭성에 따른 붕괴흐름을 수리실험과 3차원 수치모의를 이용하여 분석하였다. 분석을 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 붕괴단면의 비대칭성을 나타내기 위한 BASD를 제안함
- 2) 붕괴 초기 불규칙한 붕괴단면의 형성으로 인해 단면의 비대칭성이 크며 시간이 경과함에 따라 비대칭성이 감소함
- 3) 붕괴가 진행됨에 따라 붕괴가 제방의 하단까지 진행되면 붕괴단면의 형상이 하도흐름의 영향을 크게 받으면서 비대칭성이 다시 증가함
- 4) 수치모의에서의 붕괴단면은 직사각형 형태가 최대 붕괴유량을 나타냈으며 사다리꼴의 경우 실제 붕괴형상과 유사한 BASD가 -0.200인 경우에 대해서 최대 붕괴유량을 나타냄

본 연구의 결과를 통해 붕괴단면의 비대칭성에 따른 붕괴유량이 차이가 난다는 것을 알 수 있다. EAP 수립을 위해 제방붕괴에 의한 침수면적 산정 시 대부분의 수치모의에서 붕괴형상을 직사각형으로 가정하여 산정하거나 사다리꼴 형태로 가정을 하여도 대칭인 형태를 가정하는 경우가 대부분이다. 이러한 경우 실제의 붕괴유량을 정확하게 예측하기 어려우며 직사각형 가정의 경우 큰 붕괴유량으로 인해 예상침수면적이 과다 산정될 가능성이 있다. 범람 수치모의 시 제방붕괴 단면의 비대칭성을 고려하여 보다 정확한 붕괴유량을 산정한다면 정확한 예상침수면적을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

[1] J. H. Shim, Y.B. Kim, "The current state of the national addiction flood area and countermeasure", Disaster prevention research, Vol. 8, No. 1, 2006.

[2] S. E. Coleman, D. P. Andrews, M. Grant Webby, "Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 9, pp. 829-838, September, 2002.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:9\(829\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(829))

[3] M. W. Morris, M.A.A.M., Hassan and K.A.Vaskinn, "Conclusions and recommendations from the IMPACT project WP2: Breach formation", HR Wallingford, UK, pp. 1-21, 2005.

[4] NWS Internet Service Team, NWS Central Region Headquarters, NOAA, June, 2013, Available From: <http://www.crh.noaa.gov/>

[5] T. Shimada, H. Yokoyama, Y. Hirai, H. Miyake, "Experiment For the Destructive Mechanism of the Overflow Levee and Flooding Area at the Chiyoda Experimental Channel", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 67, No. 4, pp.841-846, 2012.

[6] Sooyoung Kim, "Hydrodynamic Characteristics of Gradual Levee Breach Flow Due to Lateral Overflow", Ph. D. dissertation, Hongik University, Korea, 2014.

[7] David O'Mara, Robyn Owens. "Measuring bilateral symmetry in digital images." TENCON'96. Proceedings., 1996 IEEE TENCON. Digital Signal Processing Applications. Vol. 1, pp. 151-156, 1996.

[8] Qi Guo, Falei Guo, Jiaqing Shao, "Irregular shape symmetry analysis: Theory and application to quantitative galaxy classification", Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp.1730-1743, 2010.

[9] Mark Pinsky, David Danovich, David Avnir, "Continuous Symmetry Measures of Density Maps", The Journal of Physical Chemistry, pp. 20342-20349, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp1021505>

[10] Flow Science, Inc. FLOW-3D Use's Manual, Los Alamos, New Mexico: Flow Science Inc., 2005.

김수영(Sooyoung Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학석사)
- 2014년 8월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학박사)
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험



---

최 서 혜(Seo-hye Choi)

[정회원]



- 2014년 2월 : 홍익대학교 건설도시공학부 (공학학사)
- 2016년 2월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학석사)

<관심분야>

토목/건축, 수리학

---

이 승 오(Seung Oh Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 5월 : Georgia Tech. 토목환경공학 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2007년 8월 : 한양대학교 토목공학과 연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 홍익대학교 건설도시공학부 부교수

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험