



## Applicability of Permeable Submerged Breakwater for Discharged Flow Control

Hur, Dong-Soo<sup>a</sup> · Lee, Woo-Dong<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

<sup>b</sup>Senior Researcher, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

Paper number: 15-087

Received: 14 October 2015; Revised: 19 November 2015; Accepted: 19 November 2015

### Abstract

The purpose of this study is to examine the control function of discharged flow due to the shape and plane arrangement of permeable submerged breakwater. For the discussion on it in detail, 3-dimensional numerical model based on PBM (Porous Body Model), which is able to simulate directly interaction of Fluid · Permeable structure · Seabed has been used to simulate water discharge in a NWT (Numerical Water Tank). To verify the applicability, LES-WASS-3D is analyzed comparing to the experimental result about propagation characteristics of dam-break wave through a permeable structure. Using the results obtained from numerical simulation, the effects of the shape and plane arrangement of submerged breakwater on reducing velocity and flow induction have been discussed related to the mean flow distribution and vertical distributions of horizontal velocities around ones.

**Keywords:** permeable submerged breakwater, discharge, flow control, flow induction, LES-WASS-3D

## 방류 흐름제어를 위한 투과성 잠제의 적용성 분석

허동수<sup>a</sup> · 이우동<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>경상대학교 해양토목공학과, <sup>b</sup>경상대학교 해양산업연구소

### 요 지

본 연구에서는 투과성 잠제의 형상 및 평면배치에 따른 방류 흐름제어 기능을 분석하기 위하여 유체 · 투과성 구조물 · 해저지반의 비선형 상호간섭을 직접해석 할 수 있는 PBM (Porous Body Model) 기반의 3차원 수치파동수조(NWT; numerical water tank) LES-WASS-3D를 이용하였다. 먼저 이용하는 LES-WASS-3D의 타당성 및 유효성을 확보하기 위하여 투과성 구조물을 통과하는 댐 붕괴파의 전파특성에 관한 수리모형실험과 계산결과를 비교 · 분석하였다. 투과성 잠제를 고려한 방류시뮬레이션으로부터 투과성 잠제의 적절한 형상 및 평면배치는 방류유속을 저감하고 흐름을 유도하는 데 상당히 효과적인 것을 알 수 있었다. 또한 투과성 잠제의 형상 및 평면배치에 따른 흐름제어에 대한 적용성은 평균류분포, 연직유속분포를 통하여 확인할 수 있었다.

**핵심용어:** 투과성 잠제, 방류, 흐름제어, 흐름유도, 3차원 수치모델

### 1. 서 론

잠제는 수중에 건설되는 중력식 방파제로 마루가 수면아래에 건설되기 때문에 친환경/친환경 해안구조물로 최근에 국내에서 큰 관심을 받고 있다. 이 잠제는 외해로부터 유입되

는 풍파를 마루위에서 강제 쇄파시켜 해안으로 유입되는 파랑 에너지를 감쇠시켜는 역할을 한다. 그리고 실효역에 설치되는 잠제들은 소파블록이나, 쇄석 등으로 구성되는 투과성 잠제가 대부분이다. 투과성 잠제의 경우에는 마루에서의 강제 쇄파 및 제체의 투과성에 의한 유체저항으로 인하여 파랑에너지가 감쇠한다.

현재까지 잠제에 관한 대부분의 연구들은 파랑제어에 관한 것이다. 대표적인 예로서 Kim and Woo (2012)과 Cho

\*Corresponding Author. Tel: +82-55-641-3150  
E-mail: leewoodong@gnu.ac.kr (W.-D. Lee)

(2004)는 BEM (boundary element method), Cho and Jeong (2003)은 FEM (finite element method) 그리고 Garcia et al. (2004), Hsu et al. (2004), Hur et al. (2011)는 FDM (finite difference method)을 적용하여 잠재 형상에 따른 단면적 파동장 특성을 논의하였다. 그리고 Zyserman et al. (2005), Johnson (2006), Zanuttigh et al. (2007)은 평면 2차원 수치모델을 적용하여 잠재 주변의 평면적 파동장 및 유동장 특성을 수치적으로 조사하였다. 하지만 3차원 수치해석방법은 아직 까지도 많이 적용되고 있지 않으며, 몇몇 연구사례를 찾을 수 있을 뿐이다(Caceres et al., 2008; Johnson et al., 2005; Hur et al., 2012a; Sharifahmadian and Simons, 2014). 실험적 연구에서도 과거부터 2차원적 수리특성(Losada et al., 1997; Koraim et al., 2014)에 대한 다양한 분석이 이루어져 많은 연구 성과가 축적되어 있으나, 소수의 3차원 수리모형실험결과(Hur, 2004; Kramer et al., 2005)로부터 개구부가 존재하는 잠재 주변의 3차원적 수리특성을 논의하기에는 미흡한 점이 많다. 이에 최근에는 고정도의 VOF (volume of function)법 및 PBM (porous body model) 기반의 수치모델 LES-WASS-3D(Hur et al., 2012a; Hur et al., 2012b)가 개발되어 잠재 형상 및 평면배치에 따른 잠재 주변의 파동 및 유동장을 다각도에서 분석하고 있다(Lee et al., 2011; Hur et al., 2014). 그리고 이상의 3차원 파동장모델(LES-WASS-3D)과 3차원 지형변동모델을 결합하여 잠재 주변의 지형변동 예측에도 적용하고 있다(Lee and Hur, 2014a).

한편 화력/원자력발전소에서는 주변해역으로 방류하는 온수의 영향을 최소화하기 위하여 소파블록으로 구성된 구조물을 거쳐 해역으로 방류하고 있다. 이 투과성 구조물은 방류 유속 및 온수의 확산을 저감시키는 역할을 하고 있다. 이에 투과성 잠재를 방류수 제어의 목적으로 설치한다면, 투과성에 의한 유체저항으로 인하여 방류유속 저감에 효과적일 뿐만 아니라, 경관적인 측면에서도 매우 우수할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 투과성 구조물의 특성에 따른 에너지 소산을 수치적으로 고려할 수 있는 3차원 수치모델 LES-WASS-3D를 이용하여 3차원 방류모의를 수행한다. 나아가 잠재의 제원 및 평면배치에 따른 방류흐름 제어효과를 수치적으로 검토하여 투과성 잠재의 적용성을 분석한다.

## 2. 수치모형실험의 개요

본 연구에서는 방류수의 흐름제어를 위한 투과성 잠재의 적용성을 수치적으로 검토하기 위하여 기존의 3차원 파동장

모델 LES-WASS-3D Ver. 1.0 (Hur et al., 2012a)을 토대로 개량된 Ver. 2.0 (Lee and Hur, 2014b)를 적용한다. LES-WASS-3D는 PBM (porous body model) 기반의 3차원 N-S solver로서 투수매체에 유체저항(관성, 난류, 층류)을 직접 계산하여 투수매체의 특성(입경, 공극, 형상 등)에 따른 에너지소산을 고려할 수 있다. 그리고 Sub-grid 스케일의 난류현상까지 구현하기 위하여 LES (large eddy simulation; Smagorinsky, 1963) 기반의 동적 와동점성모델(Germano et al., 1991; Lilly, 1992)을 도입·적용하고 있다. 또한 CSF (continuum surface force)모델(Brackbill et al., 1992)을 도입하여 자유수면의 표면장력까지 수치적으로 계산하고 있다.

### 2.1 수치모델(LES-WASS-3D)의 개요

기초방정식은 3차원 비압축성 · 점성유체에서 무반사로 파랑과 흐름을 발생시키기 위한 소스항이 포함된 연속방정식 (1)과 투수매체 내부의 유체저항(관성/난류/층류) 항을 도입하여 수정된 Navier-Stokes 운동방정식 (2)로 구성된다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{x} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma_v v_i}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_a)}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_v g_i - D_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $v_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 유속,  $q^*$ 는 소스의 유량밀도,  $\gamma_v$ 는 체적 공극률,  $\gamma_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 면적 공극률,  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $p$ 는 압력,  $\nu_a$ 는 물의 동점성계수( $\nu$ )와 와동점성계수( $\nu_t$ )의 합을 의미한다.  $D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial v_j} + \frac{\partial v_j}{\partial v_i} \right)$ 는 변형률속도텐서,  $S_i$ 는 CSF (continuum surface force)모델을 기반으로 한 표면장력항,  $Q_i$ 는 파랑 또는 흐름의 소스항,  $R_i$ 는 투과성 매체에 의한 유체저항항,  $g_i$ 는 중력가속도항,  $D_i$ 는 에너지 감쇠항을 나타낸다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i \frac{\partial v_i F}{\partial x_i} = F q^* \quad (3)$$

VOF함수  $F$ 는 각 격자에서 유체가 차지하고 있는 체적 비율로서 연속방정식 (1)에 비압축성 유체에 대한 가정과 PBM (porous body model)에 기초한 VOF함수를 적용하여

유체의 보존형식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다.

투과성 구조물에 의한 유체저항( )은 Eq. (4)와 같으며, Eq. (5)와 같이 층류저항, 난류저항, 관성저항으로 구분된다. 층류저항은 Liu and Masliyah (1999), 난류저항은 Ergun (1952), 관성저항은 Sakakiyama and Kajima (1992)이 제안한 실험식을 고려한다.

$$R_i = a_p v_i + b_p v_i |v_i| + c_p \frac{\partial v_i}{\partial t} \tag{4}$$

$$a_p = C \frac{\nu}{D_{50}^2} (1 - \gamma_i)^2 \tag{5a}$$

$$b_p = C_T \frac{(1 - \gamma_i)}{D_{50} \gamma_i^2} \tag{5b}$$

$$c_p = \frac{1}{\gamma_i} \left\{ 1 + C_I \frac{(1 - \gamma_i)}{\gamma_i} \right\} \tag{5c}$$

여기서  $D_{50}$ 은 투과매체의 평균입경,  $C_L$ 는 층류저항계수,  $C_T$ 는 난류저항계수,  $C_M$ 은 관성저항계수를 의미한다.

나머지 상세한 수치해석방법은 Lee and Hur (2014b)를 참조하기 바란다.

### 2.2 LES-WASS-3D의 검증

본 연구에서는 적용하는 PBM 기반의 수치모델 LES-WASS-3D의 타당성 및 유효성을 확인하기 위하여 Liu et al. (1999)의 댐 붕괴(dam-break) 실험결과와 비교·검토한다.

투과매체(porous media)에 의한 자유수면 변화를 검토하기 위하여 Fig. 1과 같은  $89 \times 44 \times 58 \text{cm}^3$ 의 수치수조를 구

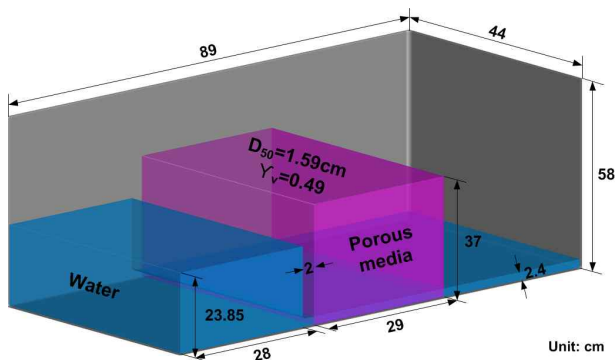


Fig. 1. Definition Sketch of Numerical Water Tank without Left and Front Wall for Verification of LES-WASS-3D

성하였으며, 이해도를 높이기 위해 수위가 높은 부분의 좌측과 전면의 벽을 나타내지 않는다. 수치수조 내에는 투과성 매체( $29 \times 44 \times 37 \text{cm}^3$ )로부터 좌측으로 2cm 떨어진 지점부터  $28 \times 44 \times 23.85 \text{cm}^3$ 의 수위가 있으며, 이것을 제외한 나머지 부분의 수심은 2.4cm이다. 그리고 투과매체의 평균입경( $D_{50}$ )은 1.59cm, 체적공극률( $\gamma_v$ )은 0.49이다. 여기서 검증을 위한 수치시뮬레이션은 Liu et al. (1999)의 수리모형실험과 동일한 조건 하에서 진행된다.

Fig. 2는 시간변화에 따라 자유수면 및 유속의 3차원 공간적 분포를 나타낸 것이며, 댐 붕괴에 따라 (a)는  $t = 0 \text{sec}$ , (b)는  $t = 0.4 \text{sec}$ , (c)는  $t = 0.8 \text{sec}$ , (d)는  $t = 1.2 \text{sec}$ , (e)는  $t = 1.6 \text{sec}$  그리고 (f)는  $t = 2.0 \text{sec}$ 일 때의 결과이다. 여기서 파란색은 수위, 카키색은 투과성 구조물, 백터는  $x, y, z$  방향 유속의 합력이다.

Fig. 2(a)와 (b)로부터 댐 붕괴와 동시에 정지해 있던 수위가 바닥 부근부터 가속되어 투과성 구조물 내로 침투하고, 투과성 구조물 부근에서 수위가 상승하는 것을 알 수 있다. (c)  $t = 0.8 \text{sec}$ 에서는 투과성 구조물의 유체저항에 의한 반사로 인하여 좌측 수조벽의 수위가 상승한다. (d)  $t = 1.2 \text{sec}$ 에서는 다시 투과성 구조물 부근에서 수위가 상승한다. 이것은 수조벽과 투과성 구조물의 유체저항에 의해 다중 반사에 의해 수위가 진동하기 때문에 나타나는 현상이다. 그리고 (e)와 (f)에서는 투과성 구조물 좌우의 동수경사가 작아짐에 따라 수위의 진동과 유속이 서서히 약해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 Liu et al. (1999)의 댐 붕괴 실험과 본 연구의 수치 계산에 의해 얻어진 수위분포를 중앙단면( $y = 0 \text{m}$ )에 대해 비교하여 나타낸 것이며, (a)는  $t = 0 \text{sec}$ , (b)는  $t = 0.4 \text{sec}$ , (c)는  $t = 0.8 \text{sec}$ , (d)는  $t = 1.2 \text{sec}$ , (e)는  $t = 1.6 \text{sec}$  그리고 (f)는  $t = 2.0 \text{sec}$ 일 때의 수위분포이다. 붉은 원(○)은 실험결과, 검정 실선(—)은 계산결과이고, 카키색은 투과성 구조물을 의미한다.

Fig. 3으로부터 LES-WASS-3D의 결과가 Fig. 2에서 전술한 댐 붕괴와 투과성 구조물의 상호작용에 의한 구조물 내외의 수위분포(Liu et al., 1999)를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 투과성 구조물 내의 유체저항(관성/난류/층류)을 수치적으로 타당성 있게 추정할 수 있기 때문에 얻을 수 있는 결과이다.

이상으로부터 본 연구에서 적용하는 PBM기반의 N-S Solver (LES-WASS-3D)가 방류 흐름제어를 위한 투과성 장애의 적용성을 검토하기 위한 적합한 수치해석방법인 것을 확인할 수 있다.

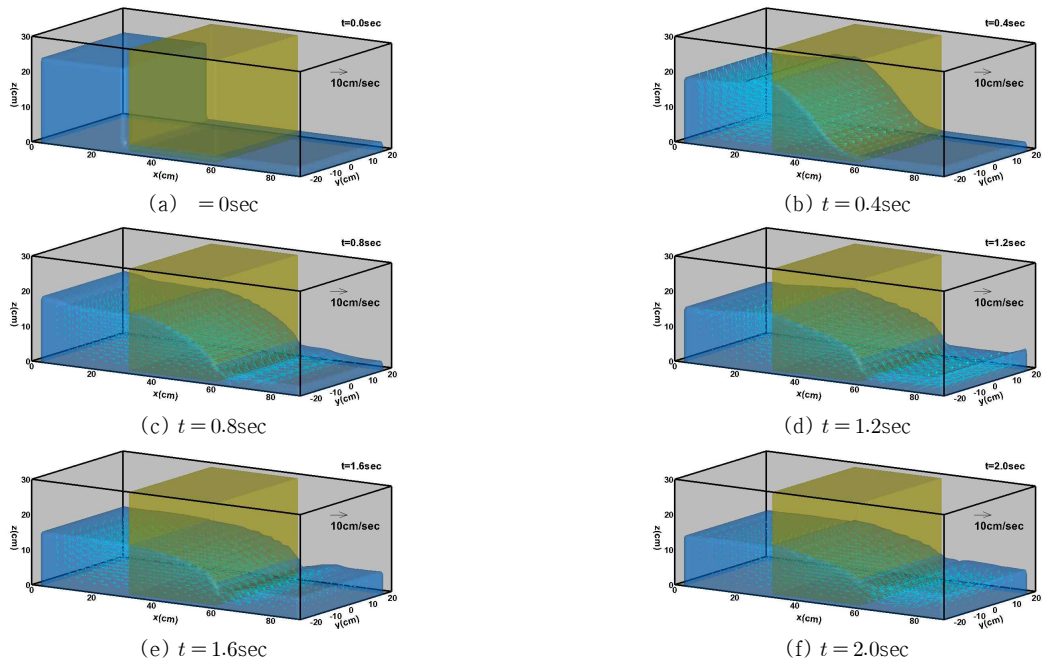


Fig. 2. Time-series of Free Surface and Flow Field due to Dam-break

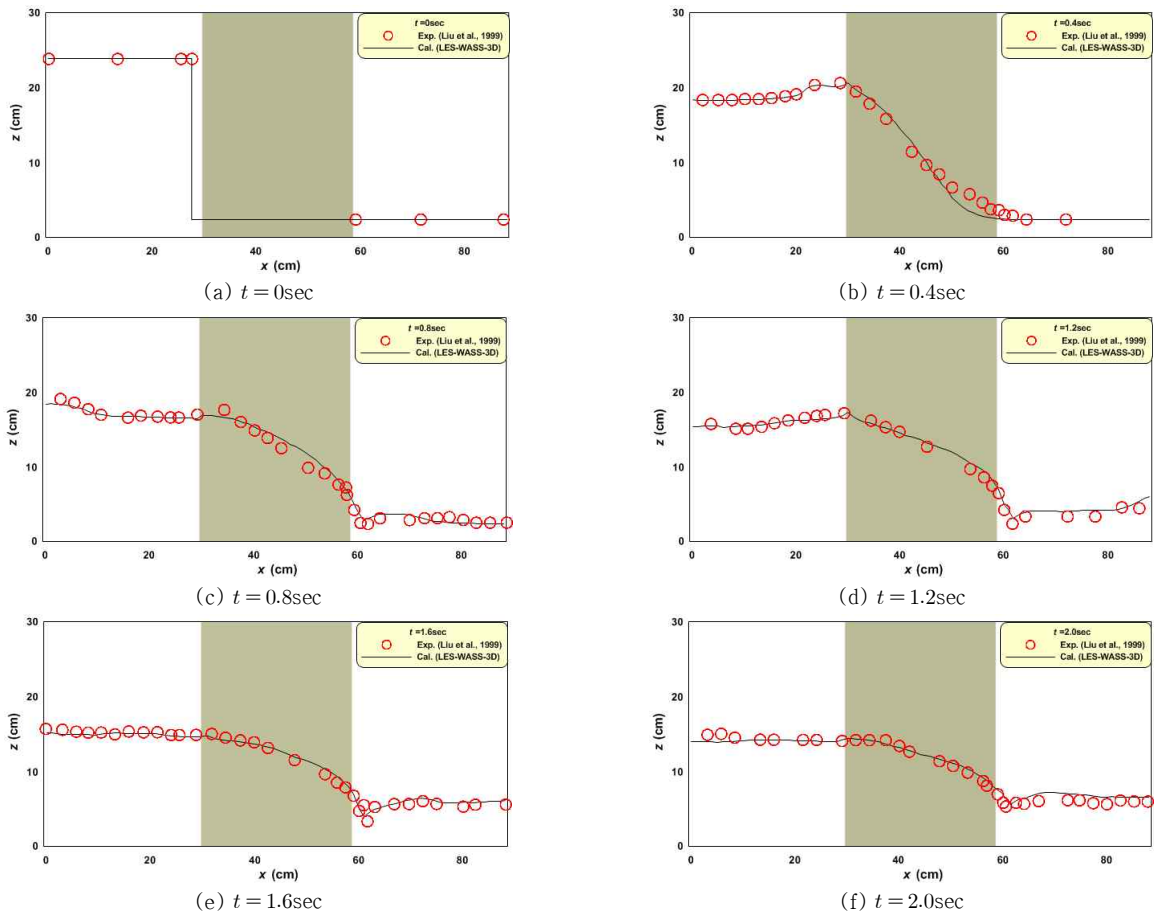


Fig. 3. Comparison between Measured (Liu et al., 1999) and Calculated (LES-WASS-3D) Free Surface Elevations

### 2.3 수치수조 및 입사조건

본 연구에서는 방류 흐름제어를 위한 투과성 잠재의 적용성을 검토하기 위해 Fig. 4와 같은 3차원 수치수조를 구성하였다. 수치수조(  $km \times 2km$ ) 경계에서의 반사를 제거하기 위하여  $x$ 축의 양단에는 개경계조건 그리고  $y$ 축의 양단에는 Slip조건(반복경계조건)을 두었다. 그리고 수심 5m의 해석영역에는 제장(  $r$ ) 400m, 사면경사( $S$ ) 1:2의 투과성 잠재를 설치하였으며, 투과성 잠재의 평균입경( $D_0$ )은 1m, 체적 공극율( $\gamma_w$ )은 0.45를 적용하였다. 그리고 방류시물레이션은 Table 1과 같이 마루수심( $R$ ), 마루폭( $B$ ), 배치각

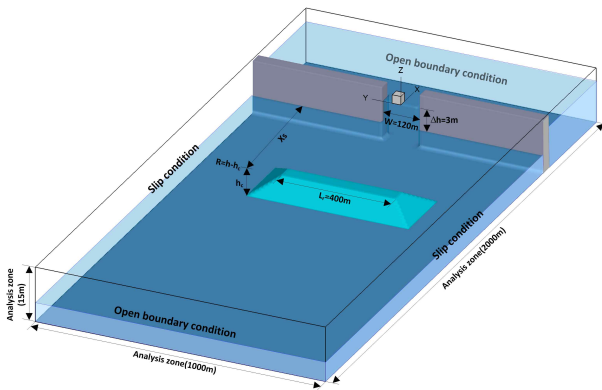


Fig. 4. Definition Sketch of 3-D Numerical Water Tank for Water Discharge Simulations

Table 1. Plane Arrangement and Shape Conditions of a Submerged Breakwater

CASE	Shape		Plane arrangement	
	Crown depth	Crown width	Alignment angle	Detached distance
	$m$	$B(m)$	$\alpha(^{\circ})$	$X_s(m)$
0				
1	0.5	50	0	400
2	0			
3	-0.5			
4	-1			
5	-1.5			
6		25		
7	-0.5	75		
8		100		
9				200
10	-0.5	50	0	600
11				800
12	-0.5	50	22.5	400
13			45	

( $\alpha$ ), 이격거리( $X_s$ )에 따른 총 10가지의 제원 및 평면배치를 고려하였다. 여기서 방류는 폭 120m의 수문으로부터 내외해의 수위차( $\Delta h$ ) 3m를 적용하여 흐름을 발생시키며, 조석에 따른 수위변화는 고려하지 않는다.

### 3. 수치해석결과

해석결과에서 3차원 유속분포는 Eq. (6)과 같이  $x, y, z$ 방향의 성분유속인  $u, v, w$ 의 합력을 이용하여 벡터로 표현된다. 그리고 평균류의 벡터는 Eq. (7)과 같이 각 수심 층의 수평유속( $u, v$ )을 연직 적분하여 나타내며, 색으로 표현되는 합력은 파란색에서 붉은색 계열로 갈수록 큰 유속값을 가진다. 또한 수평유속(연직최대수평유속 및 연직평균수평유속)의 지점별 분포는 수문( $x=0m$ )에서부터 200m 간격으로 -1600m까지 9지점에 대하여 나타내고 있다.

$$\vec{V} = u^2 + v^2 + w^2 \tag{6}$$

$$V_{xy}|_z = \int_{-h}^{\eta} \sqrt{u^2 + v^2} dz \tag{7}$$

#### 3.1 방류모의결과

Fig. 5는 내-외해의 수위차( $\Delta h$ ) 3m에 의한 방류시물레이션의 결과이며, (a)는 방류시의 3차원 유속, (b)는 평균류 그리고 (c)는 수평유속의 연직 최대유속과 평균유속을 지점별로 나타내고 있다. 여기서 (a)의 벡터는  $x, y, z$ 방향의 성분유속인  $u, v, w$ 의 합력으로 표현된다.

Fig. 5 (a)와 (b)로부터 수문( $x=0m$ )에서 방류된 흐름이 전파될수록 유속이 현저히 줄어들면서 확산되는 것을 확인할 수 있다. 또한 방류유속이 큰 수로의 양쪽에서 대칭적인 와류현상이 발생한다. 그리고 수평유속의 지점별 분포(c)로부터 알 수 있듯이 방류된 유속이 급격히 감소하여 수문으로부터 600m 떨어진 지점까지 약 1m/sec 정도의 연직 최대수평유속이 전파되는 것을 알 수 있다. 그리고 그 이상의 지점에서는 0.5m/sec 이상의 유속이 유지될 뿐만 아니라, 수문으로부터 떨어진 거리에 대한 유속의 변화가 크지 않다.

이상의 결과는 점성유체에서 방류 시에 나타나는 전형적인 유동구조이며, 방류모의에 대한 타당성 및 유효성을 입증하고 있다.

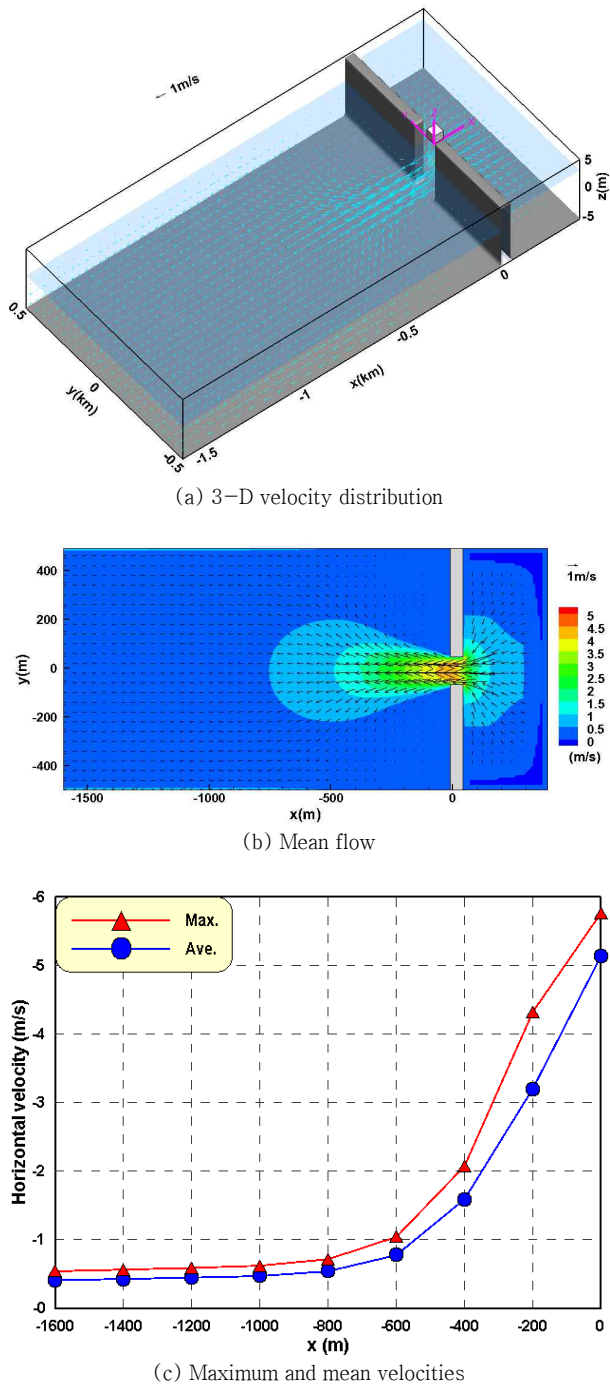


Fig. 5. Spatial Distributions of Velocities due to Water Discharge

### 3.2 잠제 형상에 따른 흐름제어 효과

Fig. 6은 내-외해의 수위차( $h$ ) 3m에 의한 방류모의에 의한 평균류 분포를 나타낸 것으로 (a)는 제체가 수면으로 돌출된 이안제( $R = 0.5m$ )의 경우, (b)는 마루높이가 정수면과 같은 경우( $R = 0m$ ) (c)는 마루수심( $R$ )이  $-0.5m$ 인 잠

제의 경우 그리고 (d)는  $R$ 이  $-1m$ 인 잠제의 경우이다. 여기서 마루폭( $B$ )은  $50m$ , 이격거리( $X_s$ )는  $400m$ , 배치각( $\alpha$ )는  $0^\circ$ 이다.

Fig. 6으로부터  $R$ 이 작아질수록(마루높이( $h$ )가 낮아질수록) 투과성 잠제에 의한 방류유속 저감효과가 작아져 잠제 배후의 유속이 커지는 경향을 나타낸다. 그리고  $R$ 이 커질수록( $h_c$ 가 높아질수록) 양쪽 개구부로 돌아가는 흐름이 크게 발달하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 투과성 잠제의 마루폭( $B$ ) 변화에 따른 평균류 분포이며, (a)에는  $B$ 가  $25m$ 인 CASE6의 결과 그리고 (b)에는  $B$ 가  $75m$ 인 CASE7의 결과를 대표적으로 나타낸다. 여기서 마루수심( $R$ )은  $-0.5m$ , 이격거리( $X_s$ )는  $400m$ , 배치각( $\alpha$ )는  $0^\circ$ 이다.

Fig. 7로부터  $B$ 가 커질수록 투과성 구조물에 의한 유체 저항이 증가하기 때문에 제체를 통과하는 유속이 감소하는 반면, 방류유량의 통과에 지장을 초래함에 따라 개구부로 돌아가는 유속은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 수문( $x = 0m$ )으로부터  $600m$  떨어진 지점에서  $y = 0m$ 의 수평유속의 연직분포를 나타낸 것이며, (a)는 마루수심( $R$ ) 변화 그리고 (b)는 마루폭( $B$ ) 변화에 따른 결과이다. 또한 투과성 잠제의 이격거리( $X_s$ )는  $400m$ , 배치각( $\alpha$ )는  $0^\circ$ 의 경우를 나타낸다.

Fig. 8로부터 알 수 있듯이 전술한 Fig. 5와 6의 평균류 분포 특성과 같이 투과성 잠제의  $R$ 이 커질수록( $h_c$ 가 높아질수록),  $B$ 가 증가할수록 투과성에 의한 유체저항의 증가로 인하여 유속감쇠 효과가 크게 나타난다. (a)에서는  $x = -600m$  지점의 연직최대수평유속이 이안제의 경우( $R = 0.5m$ )는 46%, CASE2 ( $R = 0m$ )는 42%, CASE3 ( $R = -0.5m$ )는 36%, CASE4 ( $R = -1m$ )는 29% 그리고 CASE5 ( $R = -1.5m$ )는 25% 감소하였다. 여기서 잠제의 경우( $R = -0.5 \sim 1.5m$ ), 마루수심( $R$ ) 변화에 따른 유속저감효과가 크지 않다. 이것은 마루 위로 통과하는 유량은 잠제에 의한 유체저항을 크게 받지 않기 때문에 나타는 현상으로 이해된다. (b)에서는 CASE6 ( $B = 25m$ )는 25%, CASE3 ( $B = 50m$ )는 36%, CASE7 ( $B = 75m$ )는 44%, CASE8 ( $B = 100m$ )는 46%의 연직최대수평유속이 감소하였다. 여기서 CASE7 ( $B = 75m$ )과 CASE8 ( $B = 100m$ )는 광폭임에도 불구하고, 유속감소효과가 크지 않다. 이것은 Fig. 7에서 전술한 것과 같이 개구부로 돌아가는 유속이 증가하기 때문이다.

이상의 결과에 근거하여 투과성 잠제를 방류흐름 제어 목적으로 적용할 경우, 방류유속 저감에는 상당히 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구와 같은 수치모형실험을 통

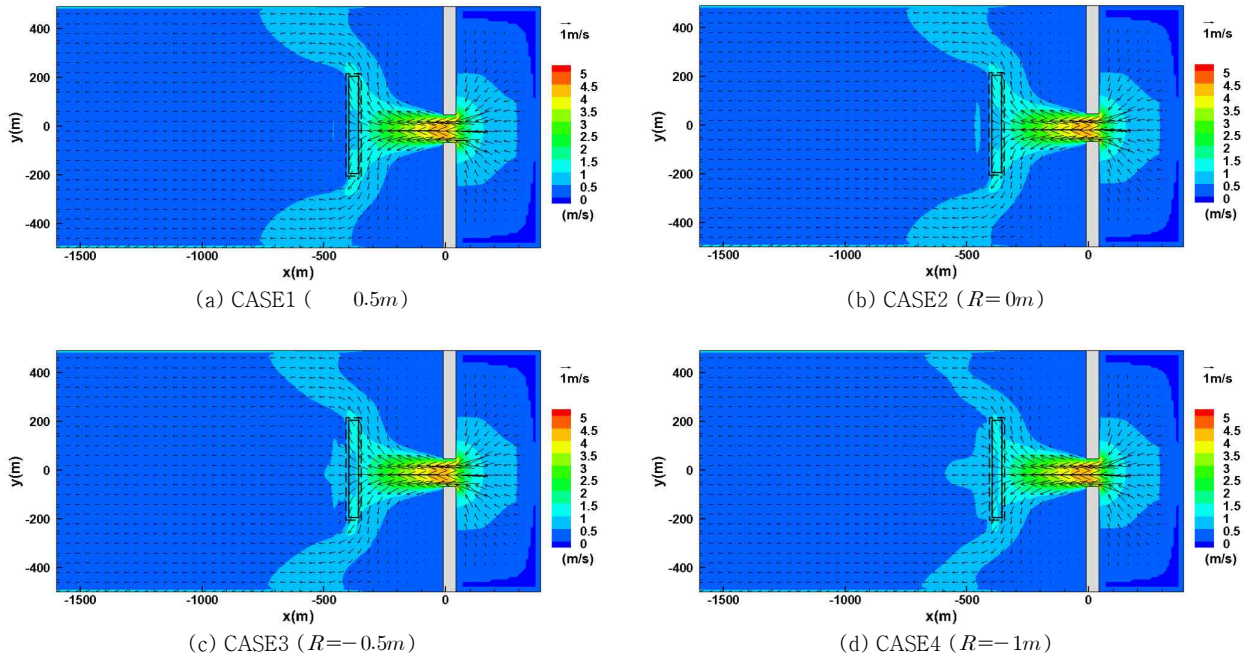


Fig. 6. Spatial Distributions of Mean Flow due to Crown Depth Variation of a Submerged Breakwaters ( $X_s = 400m$ )

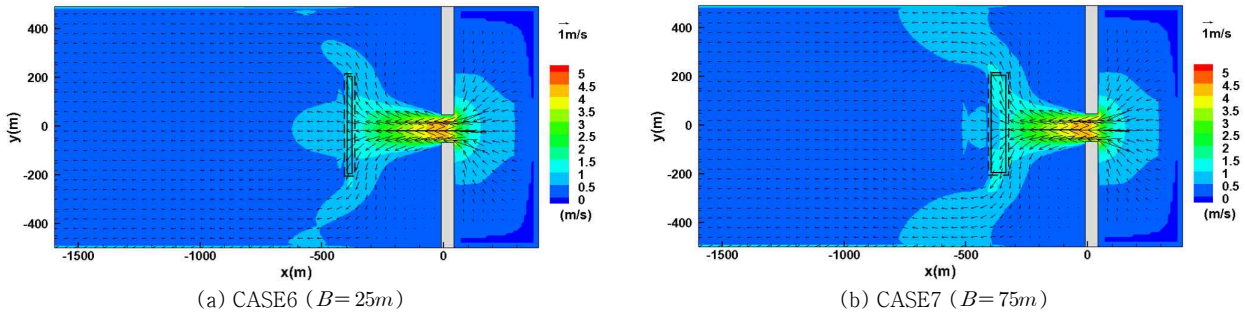


Fig. 7. Spatial Distributions of Mean Flow due to Crown Width Variation of a Submerged Breakwater ( $X_s = 400m$ )

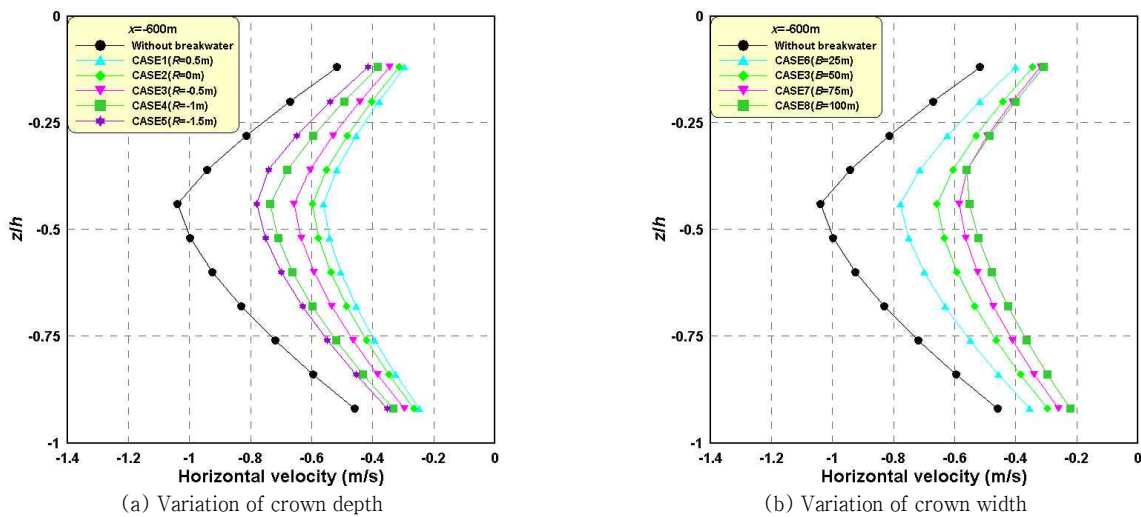


Fig. 8. Vertical Distributions of Horizontal Velocities due to Shape of Submerged Breakwaters at  $x = -600m$  ( $X_s = 400m$ )

하여 잠제의 동일한 체적 내에서 유속저감에 효과적인 적절한 제원을 산정할 수 있으며, 이것은 방류유속 저감시설 건설의 경제성에 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

**3.3 잠제의 평면배치에 따른 흐름제어 효과**

Fig. 9는 내-외해의 수위차(  $h$  ) 3m에 의한 방류모의에 의한 평균류 분포를 나타내며, (a)는 수문으로부터 이격거리(  $s$  )가 200m인 CASE9의 경우 그리고 (b)는  $X_s$ 가 600m인 CASE10의 경우이다. 여기서 투과성 잠제의 마루수심(  $R$  )은 -0.5m, 마루폭(  $B$  )은 50m, 배치각(  $\alpha$  )는 0°인 잠제의 경우이다.

여기서 구조물이 설치되어 있지 않은 경우 수문으로부터 200m 지점의 연직최대수평유속은 4.35m/sec, 연직평균수평유속은 3.1m/sec인 것과 600m 지점의 연직최대수평유속은 1.04m/sec, 연직평균수평유속은 0.72m/sec인 것을 감안하면(Fig. 5(c) 참조), 이격거리(  $X_s$  )를 200m로 하여 투과성 잠제를 설치한 Fig. 9 (a)의 경우에는 잠제를 통과한 방류유속이 급격히 감소하여  $x = -500m$  이상에서는 1m/sec 이하의 연직평균수평유속을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이격거리(  $X_s$  )를 600m로 하여 잠제를 설치한 Fig. 9(b)의 경우 잠제의 투과성에 의한 유속저감 효과로 인하여 배후의 연직평균수평유속은 0.5m/sec 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

이상으로부터 방류유속 저감의 목적으로 투과성 잠제를 설치할 경우에 수문 가까이 설치하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 하지만 수문 가까이 잠제를 설치하면 방류유량 확보에 지장을 초래할 뿐만 아니라 강한 방류유속으로 블록 또는 사석의 안정성을 확보하는 것이 어려움이 따를 것이므로 방류규모에 따른 적절한 이격거리의 검토가 필수적이다.

Fig. 10은 투과성 잠제의 배치각(  $\alpha$  )에 따른 평균류 분포이며, (a)는 CASE12의  $\alpha$ 가 22.5° 그리고 (b)는  $\alpha$ 가 45°인 경우이다. 여기서 배치각은 방류구의 직각방향에서 시계방향으로의 각도를 의미하며 투과성 잠제의 마루수심(  $R$  )은 -0.5m, 마루폭(  $B$  )은 50m, 이격거리(  $X_s$  )는 400m이다.

Fig. 10으로부터 투과성 잠제를 경사로 배치할 경우에 방류흐름을 원하는 방향으로 유도할 수 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 (b)의  $\alpha$ 가 45°인 CASE13의 경우가 (a)의  $\alpha = 22.5°$ 인 CASE12보다 방류흐름이 제체와 평행하게 유도되는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 잠제의 배치각에 따른 결과로부터 투과성 잠제를 방류구의 직각방향과 경사로 배치할 경우에 원하는 곳으로 방류흐름을 유도할 수 있는 것을 확인하였다. 이것은 투과성 잠제를 방류흐름의 직각방향과 경사로 배치할 경우 흐름이 통과하는 제체의 폭은 커지는 반면에 투영 면적이 작아져 제장이 줄어드는 결과와 같다. 따라서 방류흐름을 제어할 목적으로 잠제를 고려할 경우에는 다양한 측면에서 검토를 수행한

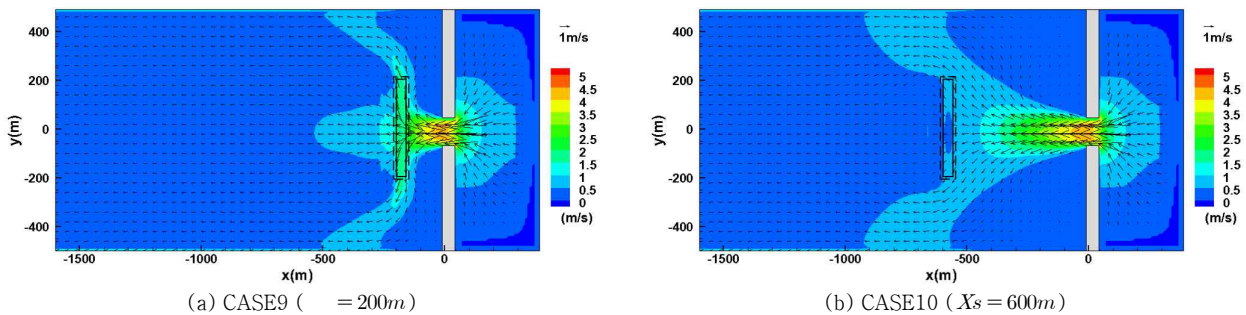


Fig. 9. Spatial Distributions of Mean Flow due to Variation of the Distance between a Submerged Breakwater and a Floodgate

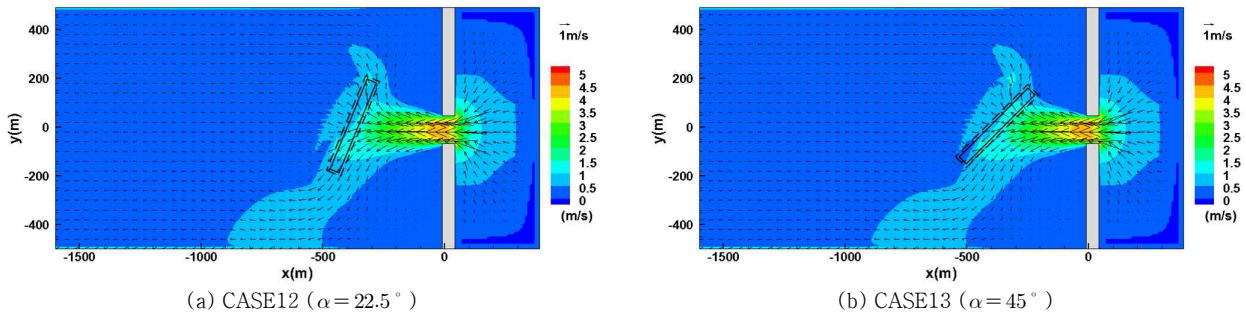


Fig. 10. Spatial Distributions of Mean Flow due to Variation of Alignment Angle of a Submerged Breakwater



후에 잠제의 평면배치를 결정하여야 할 것이다.

국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013-0549).

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 3차원 수치모델(Lee and Hur, 2014b)을 적용한 방류모의를 통하여 방류흐름 제어를 위한 투과성 잠제의 적용성 검토 및 잠제의 형상(마루수심( $R$ ), 마루폭( $B$ )과 평면배치(이격거리( $X$ ), 배치각( $\alpha$ ))에 따른 흐름제어 성능을 수치적으로 분석하였다. 그 결과 투과성 잠제의 적절한 형상 및 평면배치를 고려할 경우, 방류유속 저감 및 방류흐름 유도가 가능한 것을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결과를 기술하면 아래와 같다.

- (1) 방류모의에 적용하는 PBM기반의 수치모델(LES-WASS-3D)의 타당성 및 유효성을 기존의 댐 붕괴 실험결과(Liu et al., 1999)와 비교·검증하였다.
- (2) 투과성 잠제의 형상에 따른 유속저감효과는 투영 면적이 증가할수록 우수하며, 마루수심( $R$ ) 및 마루폭( $B$ )이 커질수록 통과유속의 저감효과는 우수하나 방류유량의 통과에 지장을 초래함에 따라 개구부로 돌아가는 유속은 증가하였다.
- (3) 투과성 잠제의 평면배치에 따른 유속저감 및 흐름유도를 확인할 수 있었다. 이격거리( $X_s$ )는 방류수문에 가까울수록 유속저감에는 효과적이거나, 제체의 안정성 확보가 우려되었다. 그리고 잠제의 배치각( $\alpha$ )에 따라 방류흐름을 원하는 곳으로 유도할 수 있는 것을 확인하였다.

이상의 결과는 내-외해 수위차( $\Delta h$ ) 3m에 의해 발생한 방류흐름에 의한 제한적인 수치실험결과이나, 수치수조 내에서 투과성 잠제에 의한 방류흐름의 유속저감 및 흐름 유도 성능을 분석하여 그 가능성 및 적용성을 확인하였다. 따라서 방류흐름 제어의 목적으로 투과성 잠제를 설치할 경우, 기본적인 수리모형실험과 본 연구에서 제안한 것과 같은 수치해석기법을 이용하여 다양한 검토가 선행된다면 경제성을 고려한 방류수 제어대책 마련에 크게 공헌할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한

#### References

- Brackbill, J.U., Kothe, D.B., and Zemach, C. (1992). "A continuum model for modeling surface tension." *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, pp. 335-354.
- Caceres, I., Stive, M.J.F., Sanchez-Arcilla, A., and Trung, L.H. (2008). "Quantification of changes in current intensities induced by wave overtopping around low crested structures." *Coastal Eng.*, Vol. 55, pp. 113-124.
- Cho, W.C. (2004). "Wave screening performance of the submerged breakwater with various crown widths." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 16, No. 4, pp. 206-212(in Korean).
- Cho, Y.S., and Jeong, W.C. (2003). "Analysis of bragg reflection of waves due to rectangular impermeable submerged breakwaters with two-dimensional finite element method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 3, pp. 447-454(in Korean).
- Ergun, S. (1952). "Fluid flow through packed columns." *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, No. 2, pp. 89-94.
- Garcia, N., Lara J.L., and Losada, I.J. (2004). "2-d numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable beakwater." *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp. 991-1020.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W.H. (1991). "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model." *Physics of Fluids*, Vol. 3, pp. 1760-1765.
- Hsu, T.W., Hsieh, C.M., and Hwang, R.R. (2004). "Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters." *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp. 557-579.
- Hur, D.S. (2004). "Deformation of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater installed on a sloping bed." *Ocean Eng.*, Vol. 31, pp. 1295-1311.
- Hur, D.S., Cho, W.C., Yoon, J.S., Kim, I.H., and Lee, W.D. (2014). "Control technologies in reducing rip currents around the open inlet between two submerged breakwaters." *Journal of Coastal Research: Special Issue 72 - The 3rd International Rip Current Symposium*, pp. 75-80.
- Hur, D.S., Lee, K.H., and Choi, D.S. (2011). "Effect of the slope gradient of submerged breakwaters on wave energy dissipation." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp. 83-98.
- Hur, D.S., Lee, W.D., and Cho, W.C. (2012a). "Three-dimensional flow characteristics around permeable submerged breakwaters with open inlet." *Ocean Eng.*, Vol. 44, pp. 100-116.
- Hur, D.S., Lee, W.D., and Cho, W.C. (2012b). "Characteristics of wave run-up height on a sandy beach behind dual-submerged breakwaters." *Ocean Eng.*, Vol. 45, pp. 38-55.

- Johnson, H.K. (2006). "Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters." *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 39-48.
- Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Maroco, D., and Caceres, I. (2005). "Modelling of waves and currents around submerged breakwaters." *Coastal Eng.*, Vol. 52, pp. 949-969.
- Kim, N.H., and Woo, S.M., (2012). "The boundary element analysis of waves coming with oblique angle to a submerged breakwater." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5B, pp. 295-300(in Korean).
- Koraim, A.S., Heikal, E.M. and Abo Zaid, A.A. (2014). "Hydrodynamic characteristics of porous seawall protected by submerged breakwater." *Applied Ocean Research*, Vol. 46, pp. 1-14.
- Kramer, M., Zanuttigh, B., van der Meer, J.W., Vidal, C. and Gironella, F.X. (2005). "Laboratory experiments on low-crested breakwaters." *Coastal. Eng.*, Vol. 52, pp. 867-885.
- Lee, W.D., and Hur, D.S. (2014a). "Development of a 3-d Coupled hydro-morphodynamic model between numerical wave tank and morphodynamic model under wave-current interaction." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 5, pp. 1463-1476(in Korean).
- Lee, W.D., and Hur, D.S. (2014b). "Development of 3-d hydrodynamical model for understanding numerical analysis of density current due to salinity and temperature and its verification." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 3, pp. 859-871(in Korean).
- Lee, W.D., Hur, D.S. and Suh, S.B. (2011). "A numerical simulation on three-dimensional hydrodynamic characteristics of wave height and flow around asymmetric submerged breakwaters." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 25, No. 3, pp. 19-27(in Korean).
- Lilly, D.K. (1992). "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method." *Physics of Fluids*, Vol. 4, pp. 633-635.
- Liu, L.-F., Lin, P., Chang, K.A., and Sakakiyama, T. (1999). "Numerical modeling of wave interaction with porous structures." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 322-330.
- Liu, S., and Masliyah, J.H. (1999). "Non-linear flows in porous media." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 86, pp. 229-252.
- Losada, I.J., Patterson, M.D., and Losada, M.A. (1997). "Harmonic generation past a submerged porous step." *Coastal Eng.*, Vol. 31, pp. 281-304.
- Sakakiyama, T., and Kajima, R. (1992). "Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater." *Proc. 22<sup>nd</sup> Intl. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp. 1517-1530.
- Sharifahmadian, A., and Simons, R.R. (2014). "A 3d numerical model of nearshore wave field behind submerged breakwaters." *Coastal Eng.*, Vol. 83, pp. 190-204.
- Smagorinsky, J. (1963). "General circulation experiments with the primitive equation." *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-164.
- Zanuttigh, B. (2007). "Numerical modelling of the morphological response induced by low-crested structures in Lido di Dante, Italy." *Coastal Eng.*, Vol. 54, pp. 31-47.
- Zysermana, J.A., Johnson, H.K., Zanuttigh, B. and Martinelli, L. (2005). "Analysis of far-field erosion induced by low-crested rubble-mound structures." *Coastal Eng.*, Vol. 52, pp. 977-994.