

## 잠제 설치 연안역의 파동장에 미치는 해안곡률의 영향

### Effect of Beach Curvature on Wave Fields in Coastal Area with Submerged Breakwaters

허동수\* · 이우동\*\* · 염경선\*\*\*

Hur, Dong-Soo · Lee, Woo-Dong · Yeom, Gyeong-Seon

#### Abstract

The aim of this study is to examine the effect of beach curvature on wave fields in coastal area with Submerged Breakwaters using the 3D numerical model that is able to simulate directly interaction of WAVE · STRUCTURE · SANDY BEACH (LES-WASS-3D). At first, the adopted model was validated through the comparison with an existing experimental data and showed fairly nice agreement. And then, the numerical simulations have been performed to investigate the effect of according to the variation of beach curvature. Based on the numerical results, the wave height, mean surface elevation, mean flow around submerged breakwaters and longshore distributions of run-up height have been discussed in relation to the variation of beach curvature.

**Keywords** : submerged breakwater, beach curvature, mean surface elevation, mean flow, run-up height

#### 요 지

본 연구에서는 잠제가 설치된 연안역에서 해안의 곡률반경이 잠제 주변 파동장에 미치는 영향을 파악하기 위하여 파·구조물·해빈/해저지반의 상호작용을 해석할 수 있는 3차원 수치모델 LES-WASS-3D를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 기존의 수리모형실험결과와 비교·검토를 통하여 타당성과 유효성을 확인하였으며, 수치실험을 통해 얻어진 수치해석결과로부터 잠제 주변의 파고분포, 평균수위분포, 상층흐름분포, 평균류분포 그리고 연안에서의 처오름 높이분포를 비롯한 잠제 주변의 3차원적 수리특성에 미치는 해안곡률의 영향에 관하여 고찰하였다.

**핵심용어** : 잠제, 해안의 곡률반경, 평균수위, 평균류, 처오름 높이

#### 1. 서 론

우리나라의 해안선은 국토면적에 비해 길이가 대단히 길다. 동해안은 태백산맥과 함경산맥(백두대간)의 영향으로 비교적 단조로운 해안선을 이루는데 비해 리아스식 해안이 발달한 서해안과 남해안은 해안선이 매우 복잡한 형태를 이루고 있다.

한편, 동해안을 비롯한 남동해안에서의 해안침식이 사회적 이슈로 대두되고 있는 가운데 해안침식방지를 위한 여러 가지 방지대책들이 개발되어 실효역에 적용되고 있다. 그 대표적인 예로서 국책사업인 연안정비사업의 일환으로서 2000~2006년에 걸쳐 부산시 송도해수욕장에 양빈 및 잠제가 건설되어 다년간 지속적인 파랑관측과 해빈변형에 관한 모니터링이 실시되었다(김용현, 2009).

이러한 잠제를 실효역 건설하기 위해서는 현장지형을 충분히 고려하여야 함에도 불구하고 잠제 주변의 수리특성을 해석하려는 대부분의 연구들은 단편적인 해안지형만을 고려할 수 있는 단면 2차원적인 수리수치모형실험을 대상으로 하고

있으며, 또한 현장지형을 고려한 경우에는 연직적분모델을 이용한 평면 2차원적인 연구들이 주로 이루어져 왔다.

국내에서는 주로 단면 2차원적인 연구들이 이루어져 왔다. 허동수와 김도삼(2003a, 2003b)은 2차원 VOF법에 기초한 PBM(Porous Body Model)을 이용하여 잠제 주변의 유속장과 와의 발생 및 잠제에 의한 불규칙파의 파랑에너지 변형 특성에 관하여 논의하였다. 조원철(2004, 2006)은 경계요소법을 이용하여 잠제의 폭 변화에 따른 파랑 차단 성능 및 성능 향상을 위한 다열 잠제의 최적간격에 관한 연구를 수행하였다. 이종인 등(2003)은 수리모형실험 및 고유함수 전개법을 사용하여 수중방파제의 형상에 따른 규칙파의 반사 특성에 관하여 논의하였다. 정재상 등(2004)은 고유함수 전개법, 황종길 등(2004)은 VOF법을 사용하여 다열 사각형 불투과성 수중방파제에서 불규칙파의 투과/반사를 산정하였다. 정재상 등(2007)은 방향 분포함수를 적용한 고유함수 전개법을 이용하여 다열 불투과성 수중방파제에서의 다방향불규칙파의 반사특성에 관한 연구를 수행하였다. 허동수와 최

\*정희원 · 국립경상대학교 토목환경공학부(해양산업연구소) 부교수 (E-mail : dshur@gsnu.ac.kr)

\*\*정희원 · 국립경상대학교 해양토목공학과 연구원 (E-mail : dong5345@gnu.ac.kr)

\*\*\*교신저자 · 일본나고야대학 공학연구과 사회기반공학전공 박사과정 (E-mail : yeom@civil.nagoya-u.ac.jp)

동석(2008)은 LES(Large Eddy Simulation)기법을 도입한 LES-WASS-2D를 개발하여 투과성 잠재의 경사면 변화가 주변 파동장에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

국외의 단면 2차원적인 연구로서 Losada *et al.*(1997)은 불/투과성 사각잠재에 의한 투과/반사 및 잠재 전후의 조화 분석을 통한 잠재 주변의 전반적인 수리특성에 관하여 논의하였다. Garcia *et al.*(2004)과 Lara *et al.*(2006)은 투과성 잠재 주변의 파랑변형 및 평균류 등에 대해 검토를 수행하였다. Hsu *et al.*(2004)은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)모델을 이용하여 2열 잠재 주변의 와도분포 등에 관하여 고찰하였다. Hur *et al.*(2008)은 파·잠재·해저지반의 동적응답해석을 통하여 파동장해석 및 해저지반 내에서의 흐름과 간극수압의 변동특성에 관한 연구를 수행하였다. 또한 평면 2차원적인 연구로서는 Drei and Lamberti(1999), Yamashiro *et al.*(1999), Kriezi *et al.*(1999) Gironella and Sanchez-Arcilla(1999)는 유속을 연직(수심방향)으로 평균한 평면 2차원 수치모델을 이용하여 잠재 주변의 흐름에 대하여 검토를 수행하였다.

근래에 와서 실험결과 유사한 3차원 수리모형실험(Hur, 2004; Kramer *et al.*, 2005)과 다양한 수치모델을 이용한 수치모형실험(Johnson *et al.*, 2005; Johnson, 2006) 및 범용모델(MAKE21)을 이용하여 실험역에 설치된 LCS(Low-Crested Structures) 주변의 해빈류 및 파랑변형에 관한 검토가 수행되고 있다(Zyserman *et al.*, 2005; Martinelli *et al.*, 2006; Zanuttigh *et al.*, 2007). 또한 Ranasinghe and Turner (2006)는 잠재에 관한 기존의 연구들을 통하여 잠재 주변의 흐름과 해안침식에 관한 패턴에 대하여 검토를 수행하였다. 하지만 이와 같은 대부분의 연구들은 직선해안이거나 해안 지형을 충분히 고려하지 않고 있다.

최근 허동수와 이우동(2007)은 3차원 수치해석기법 LES-WASS-3D를 개발한 후, 이를 이용하여 잠재 주변의 3차원적인 흐름특성(허동수와 이우동, 2008a) 및 잠재의 평면배치(허동수와 이우동, 2008b)와 제원(허동수와 이우동, 2008c)의 변화에 따른 연안의 처오름 높이특성, 아울러 잠재 설치 이후 이안류로 인한 쇄굴로 많은 문제점이 지적되고 있는 개구부에서 해빈경사에 따른 3차원적 흐름특성(이우동 등, 2009)에 대해 보고하고 있으나 이것 역시 직선해안에 국한되어 있으며, 실험역에서 자주 접할 수 있는 곡률을 가진 해안에 대해서는 거의 검토가 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 기존의 수리모형실험결과와의 비교·검토를 통해 타당성과 유효성이 검증된 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)를 이용하여 이미 검토되어 있는 직선해안에 설치된 잠재 주변의 흐름특성(허동수와 이우동, 2008a)에 대한 식견을 바탕으로 해안의 곡률반경 변화에 따른 잠재 주변의 3차원적 수리특성에 대해 논의하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 수치해석기법(LES-WASS-3D)의 개요

본 연구에서 이용하는 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)는 투과매체의 특성(입경, 공극, 형상 등)에 따른 유체 저항(관성(Sakakiyama and Kajima, 1992), 층류(Ergun, 1952;

van Gent, 1995), 난류(van Gent, 1995; Liu and Masliyah, 1999))을 고려할 수 있도록 수정된 Navier-Stokes운동방정식을 적용하여 개발된 강비선형의 3차원 수치모델이다. 또한 자유표면을 모의하기 위한 VOF함수(Hirt and Nichols, 1981)와 계산격자의 크기보다 작은 와류를 계산하기 위하여 LES(Large Eddy Simulation)기법으로 Smagorinsky sub-grid model(Smagorinsky, 1963)을 이용하였다.

한편, 유한차분법(FDM-Finite Difference Method)의 적용에 따른 직각격자체계에서의 계단식 경사면처리를 보완하기 위하여 허동수 등(2008)이 제안한 경사면처리기법을 적용하여 잠재와 해빈을 구성하였다.

### 2.1 기초방정식

기초방정식으로서 무반사조파를 위한 조파소스항이 포함된 연속방정식 (1)과 투과성구조물의 특성을 고려하기 위하여 유체저항을 도입한 수정된 Navier-Stokes운동방정식 (2)~(4)와 자유수면 모의를 위한 VOF함수의 이류방정식 (5)로 구성된 3차원 수치모델로서 파·구조물·해빈/해저지반의 상호작용을 직접 해석할 수 있다.

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\gamma_y u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\gamma_z u)}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_t \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \right] \\ - M_x - D_x - F_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\gamma_y v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\gamma_z v)}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_t \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_t \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \right] \\ - M_y - D_y - F_y - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\gamma_y w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_t \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_t \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \right] \\ - M_z - D_z - F_z - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \gamma_v g - \beta w \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y F v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (5)$$

여기서  $u, v, w$ 는  $x, y, z$ 방향의 속도성분,  $\gamma_v$ 는 체적공극율(volume porosity),  $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 는  $x, y, z$ 방향에 대한 면적투과율(surface permeability)을 나타내며  $t$ 는 시간,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $p$ 는 압력,  $\beta$ 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 파랑감쇠계수이다.  $\nu_t$ 는 동점성계수( $\nu$ )와 와동점성계수( $\nu_t$ )의 합을 나타내고,  $q^*$ 는 조파소스(조파원천)의 유량밀도를 나타낸다. 또한 식 (5)의 VOF함수  $F$ 는 각 셀에 대해 유체가 차지하고 있는 체적비율을 나타낸다.

투과성구조물의 특성에 따른 에너지소산을 고려하기 위하여 도입된 유체저항으로서  $M_x, M_y, M_z$ 는 관성저항식 (6)~

(8),  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$ 는 난류저항식 (9)~(11),  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ 는 층류저항식 (12)~(14)로 결정된다.

$$M_x = (1-\gamma_v)C_M \frac{D_u}{D_t} = (1-\gamma_v)C_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (6)$$

$$M_y = (1-\gamma_v)C_M \frac{D_v}{D_t} = (1-\gamma_v)C_M \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \quad (7)$$

$$M_z = (1-\gamma_v)C_M \frac{D_w}{D_t} = (1-\gamma_v)C_M \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad (8)$$

$$D_x = \frac{1}{2}C_D \frac{(1-\gamma_x)}{D_p \gamma_x} u \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_y v)^2 + (\gamma_z w)^2} \quad (9)$$

$$D_y = \frac{1}{2}C_D \frac{(1-\gamma_y)}{D_p \gamma_y} v \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_y v)^2 + (\gamma_z w)^2} \quad (10)$$

$$D_z = \frac{1}{2}C_D \frac{(1-\gamma_z)}{D_p \gamma_z} w \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_y v)^2 + (\gamma_z w)^2} \quad (11)$$

$$E_x = C_E \frac{v}{D_p^2} \frac{(1-\gamma_x)^2}{\gamma_x} u \quad (12)$$

$$E_y = C_E \frac{v}{D_p^2} \frac{(1-\gamma_y)^2}{\gamma_y} v \quad (13)$$

$$E_z = C_E \frac{v}{D_p^2} \frac{(1-\gamma_z)^2}{\gamma_z} w \quad (14)$$

여기서,  $C_M$ 은 관성력계수,  $C_D$ 는 난류저항계수,  $C_E$ 는 층류저항계수,  $D_p$ 는 투과체의 평균입경이며, 나머지 수치해석기법에 대한 세부적인 내용에 대해서는 허동수와 이우동(2007)을 참조하기 바란다.

## 2.2 LES-WASS-3D의 검증

곡률을 가진 해안에 대해서 본 연구에서 이용하는 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)의 검증을 수행하는 것이 바람직하나, 현재 저자들의 여건상 수리모형실험의 수행이 어려우며 기존연구를 조사하여 보았으나 지금까지 곡률을 가진 해안에 관련한 수리모형실험이 거의 수행되지 않았다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 유사연구 즉, 직선해안에 대한 Kramer *et al.*(2005)의 수리모형실험과의 비교를 통하여 잠제 주변 3차원 파동장에서의 파고 및 시간파형에 대하여 LES-WASS-3D의 타당성 및 유효성이 충분히 확인된 허동수와 이우동(2007)을 참고하는 것으로 검증을 대신하기로 한다. 아울러, Osanai and Minami(2003)의 수리모형실험에서 인공 Reef 개구부에서의 수평유속 및 시간파형에 대한 검증(이우동 등, 2009), Ma *et al.*(2004)의 수리모형실험에서 투과성 해빈내부에서의 지하수위에 대한 검증(허동수와 이우동, 2008b)도 본 연구에서 이용하는 LES-WASS-3D에 대한 타당성과 유효성을 확인하기 위한 참고문헌으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2.3 수치파동수조의 개요와 입사조건

본 연구에서는 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ ; 여기서,  $r$ 은 해안의 곡률반경,  $L_i$ 는 입사파의 파장) 따른 잠제 주변의 3차원적 수리특성을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 3차원

수치파동수조를 이용하였다. 파의 재반사를 방지하기 위해 offshore측에는 조파소스와 부가감쇠영역, 해석영역에는 해저경사 1:100의 불투과 해저지반을 기초로 하여 잠제 2기를 설치하였다. 잠제의 제원 및 평면배치는 허동수와 이우동(2008b, 2008c)에서 연안에서 치오름 높이가 저감에 효과적인 제원 및 평면배치를 고려하여 잠제의 제원은  $S=1:2$ ,  $R/H_i=0.33$ ,  $B/L_i=0.25$ ,  $L_r/L_i=1.0$ (여기서,  $S$ 는 잠제의 비탈면경사,  $R$ 은 천단수심,  $H_i$ 는 입사파고,  $B$ 는 잠제의 천단폭,  $L_r$ 은 잠제천단의 길이), 잠제의 평면배치는  $Y/L_i=1.5$ ,  $W/L_r=0.5$ (여기서,  $Y$ 는 잠제의 육측 천단에서 정선까지의 거리,  $W$ 는 잠제 천단간의 거리)로 구성하였다. 또한 잠제 파복의 평균입경( $D_p$ )은 4 cm, core는  $D_p=1$  cm, 해빈은 모래로 감안하여  $D_p=0.002$  cm로 구성하였다.

$y$ 축으로는 계산영역의 측면경계조건은 slip조건을 이용하였으며 경계조건의 영향을 최소화하기 위하여  $y$ 축 양단에  $0.5L_i$ 의 직선해안을 배치하였다.

이용된 수치해석조건에 대한 상세한 사항을 Table 1에 나타내었으며 입사파조건( $H_i=6$  cm,  $T_i=1.5$  sec)을 고정하고 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )의 변화에 따른 잠제 주변의 3차원적 수리특성에 대해 고찰하였다. 또한 참고를 위

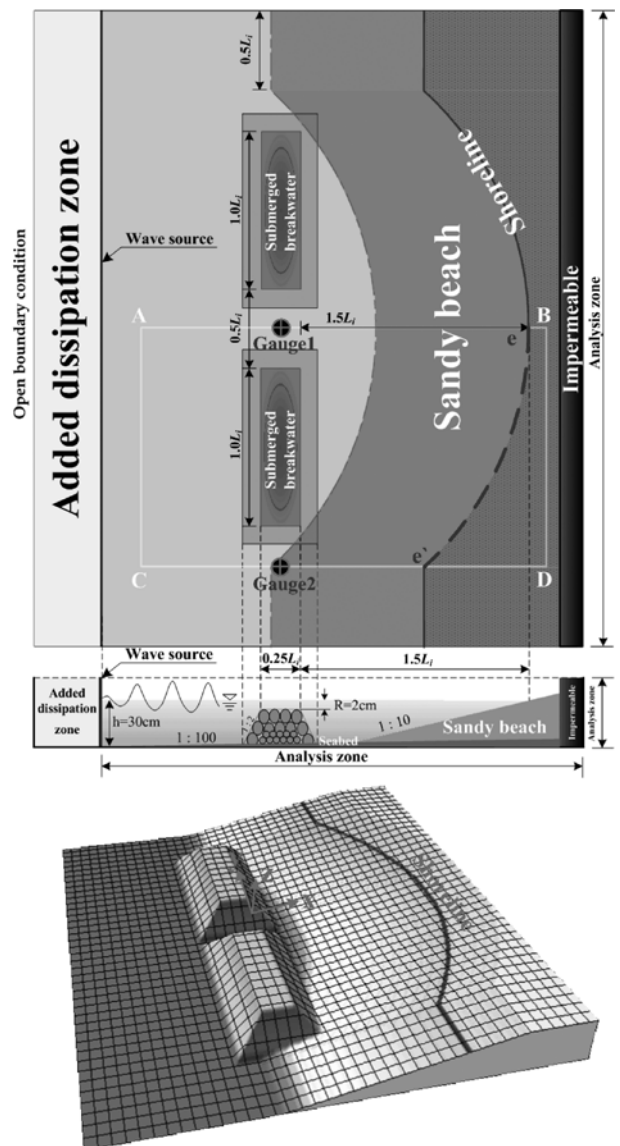


Fig. 1 Definition sketch of 3-D numerical wave channel

Table 1. Test conditions used in this study

| CASE | Breakwater | Radius of curvature (cm) | $r/L_i$ |
|------|------------|--------------------------|---------|
| 1-1  | ×          | ∞                        | ∞       |
| 1-2  |            | 1200                     | 5.0     |
| 1-3  |            | 1000                     | 4.2     |
| 1-4  |            | 800                      | 3.3     |
| 1-5  |            | 600                      | 2.5     |
| 2-1  | ○          | ∞                        | ∞       |
| 2-2  |            | 1200                     | 5.0     |
| 2-3  |            | 1000                     | 4.2     |
| 2-4  |            | 800                      | 3.3     |
| 2-5  |            | 600                      | 2.5     |

하여 실험역의 곡률반경에 대한 예를 들면, 현재 잠제가 설치되어 있는 부산송도해수욕장의 곡률반경은 약 400 m로서 1/50의 상사를 고려한다면 곡률반경이 800 cm가 되어 CASE2-4( $r/L_i=3.3$ )와 유사한 곡률반경을 가진다고 볼 수 있다.

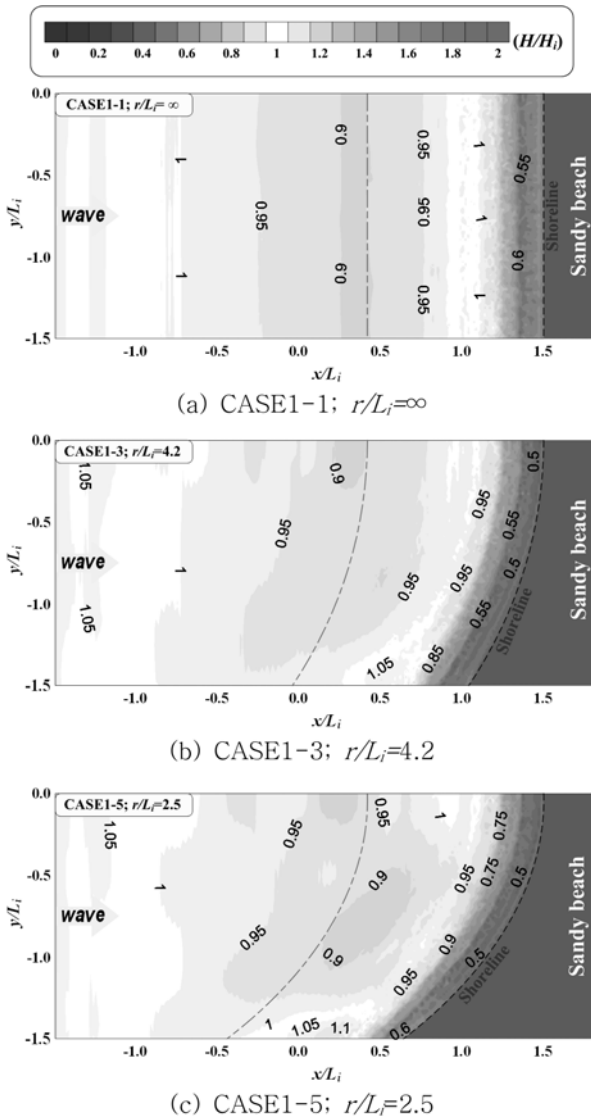


Fig. 2 Spatial distributions of non-dimensional wave heights due to the variation of beach curvature (without submerged breakwaters)

### 3. 해석결과

#### 3.1 잠제 주변의 파고분포

Fig. 2와 Fig. 3은 잠제가 없을 경우와 잠제가 설치된 경우에 대하여 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )에 따른 잠제 주변의 파고분포를 입사파고( $H_i=6$  cm)에 대해 무차원하여 나타낸 것으로 붉은색은 입사파고보다 높은 파고를 파란색은 입사파고보다 낮은 파고를 의미한다. 사각형 점선은 잠제의 저면, 실선은 잠제의 천단, 일점쇄선은 해변이 시작되는 저면을 의미한다. 또한 잠제와 해변은  $y/L_i=0.0$  기준으로 대칭적인 구조를 가짐에 따라 해석의 편의상 Fig. 1의 사각형 A-B-C-D내의 파고분포를 나타내었다. (a)는 곡률반경이 무한대인 직선해안의 경우(CASE1-1;  $r/L_i=\infty$ ), (b)와 (c)는 곡선해안으로서 (b)는 CASE1-3( $r/L_i=4.2$ ), (c)는 CASE1-5( $r/L_i=2.5$ )를 각각 나타낸다.

Fig. 2로부터 잠제가 없을 경우 일반적인 현상으로 알려진 것과 같이 해변경사에 의한 굴절의 영향으로 입사파가 정선으로 진행할수록 등파고선이 해안선과 평행하게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 곡선해안의 경우에는 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 곳(cape)에서는 굴절의 영향이 집

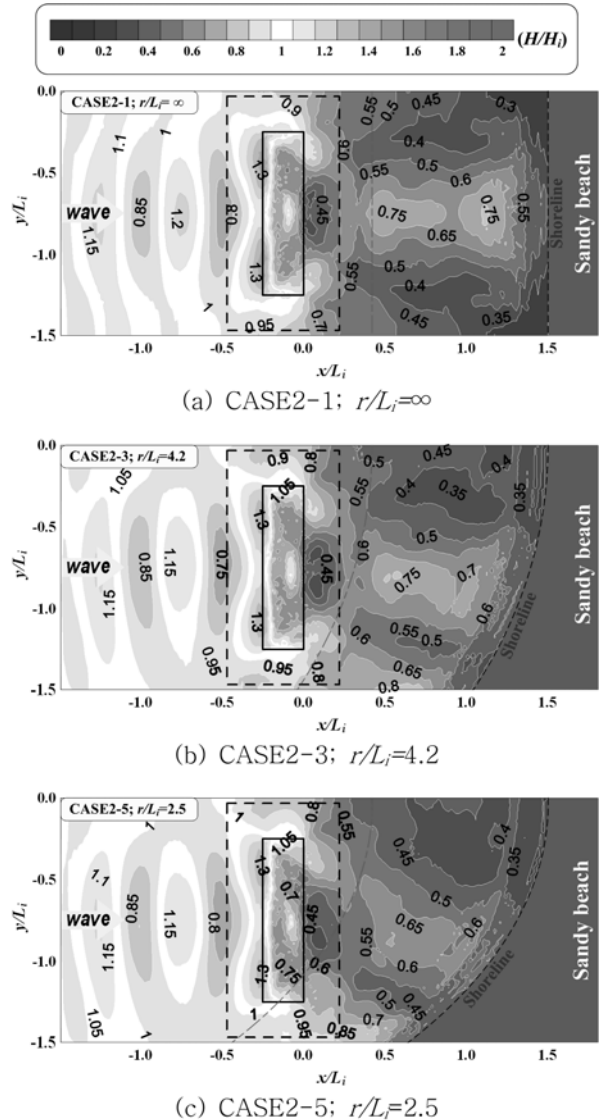


Fig. 3 Spatial distributions of non-dimensional wave heights due to the variation of beach curvature (with submerged breakwaters)

중되어 입사파고보다 높은 파고가 형성되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3으로부터 알 수 있는 것과 같이, Fig. 2와 같이 형성되는 파동장에 잠제를 설치할 경우 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 onshore측에서는 전체적으로 낮은 파고분포를 나타내고 있으나, 곳에서는 비교적 높은 파고분포를 보인다. 이러한 파고분포는 개구부로 유입되는 파랑이 해변경사에 의한 굴절과 잠제로 인한 굴절 및 회절의 영향을 받음으로서 발생한다. 즉, 곳측 개구부로 유입되는 파랑은 잠제에 의한 굴절의 영향과 해변경사에 의한 굴절의 영향을 동시에 받는다. 따라서 해안의 곡률반경이 작아질수록 잠제의 저면과 해변의 저면이 많이 교차하기 때문에 개구부 저면과 천단과의 수심차이가 작아져 잠제로 인한 굴절의 영향이 줄어들어 반면에 곳에서는 해변경사에 의한 굴절의 영향이 곡률반경이 큰 경우에 비해 더욱 집중되기 때문에 나타나는 현상이다. 아울러 잠제로 인한 굴절과 회절로 인하여 잠제 배후에서 발생하는 파랑의 중첩현상은 해변의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 곳측으로 이동하는 경향을 나타낸다. 이는 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 곳측 개구부에서는 잠제로 인한 굴절의 영향이 줄어들기 때문에 잠제 배후로 유입되는 파랑에너지가 감소하게 된다. 따라서 중앙 개구부에서 유입되는 파랑에너지와의 차이로 인하여 상대적으로 전달되는 파랑에너지가 약한 곳측으로 중첩지점이 이동하는 것으로 판단된다.

한편, 정선부근에서는 해변경사에 의한 굴절의 영향으로 등파고선이 해안선과 평행하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 잠제 주변의 평균수위분포

Fig. 4는 잠제가 설치된 경우에 대하여 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )에 따른 잠제 주변의 평균수위분포를 나타낸 것으로 정수면을 기준으로 붉은색은 평균수위의 상승, 파란색은 평균수위의 하강을 의미하며 (a)는 직선해안의 경우(CASE2-1;  $r/L_i = \infty$ ), (b)와 (c)는 곡선해안인 CASE2-3( $r/L_i = 4.2$ )과 CASE2-5( $r/L_i = 2.5$ )의 경우를 각각 나타내고 있다. 여기서 평균수위( $\bar{\eta}$ )는 식 (15)를 이용하여 계산하였으며  $t_i$ 는 데이터 취득 시점,  $T_i$ 는 입사파의 주기를 나타낸다.

$$\bar{\eta} = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \eta dt \quad (15)$$

Fig. 4로부터 외해에서 유입되는 파랑이 잠제를 통과하면서 쇄파, 투수성, 마찰 등의 원인으로 인하여 파고가 감소함에 따라 유속이 약해져 모든 경우에 있어서 천단상과 onshore측에서 평균수위가 상승한다. 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 on-offshore의 평균수위 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 해안의 곡률반경이 작아질수록 곳측 개구부가 협소해져 빠져나가는 흐름(이안류)이 원활하지 못하기 때문에 onshore측의 평균수위가 전체적으로 상승하는 것으로 판단된다. 아울러 곳측 개구부 배후의 평균수위는 파고분포에서 논의한 굴절 및 연파로 인하여 높은 파고가 형성됨에 따라 주변의 평균수위 상승보다 약한 경향을 나타낸다. 이와 같은 평균수위분포는 잠제 주변의 평균류에 큰 영향을 미치며 이에 대한 세부적인 설명은 후술하는 평균류분포에서 논의된다.

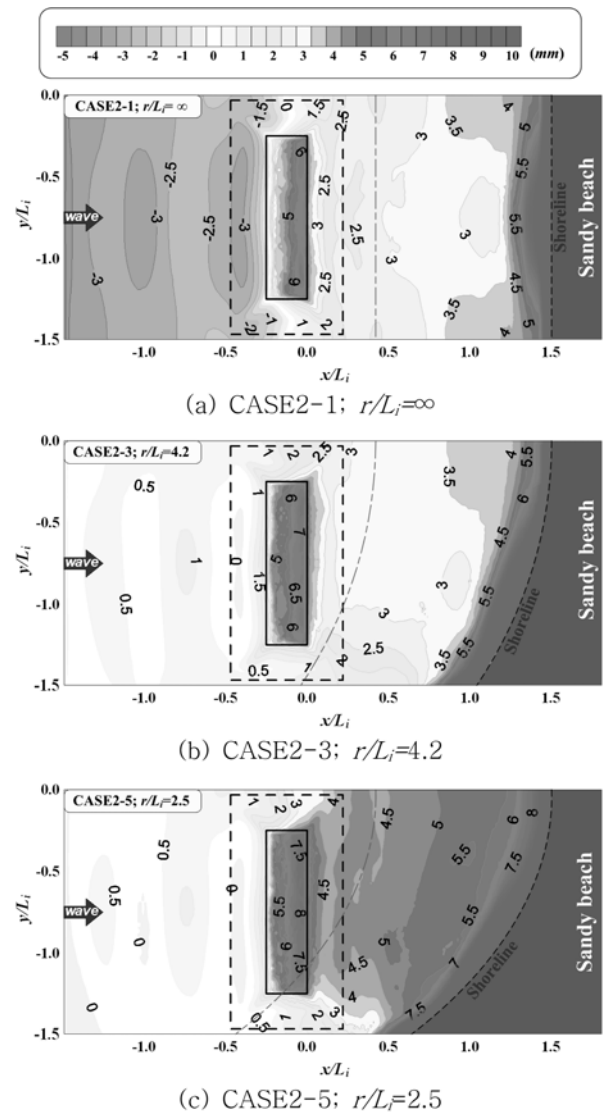


Fig. 4 Spatial distributions of mean surface elevation level according to beach curvature with submerged breakwaters

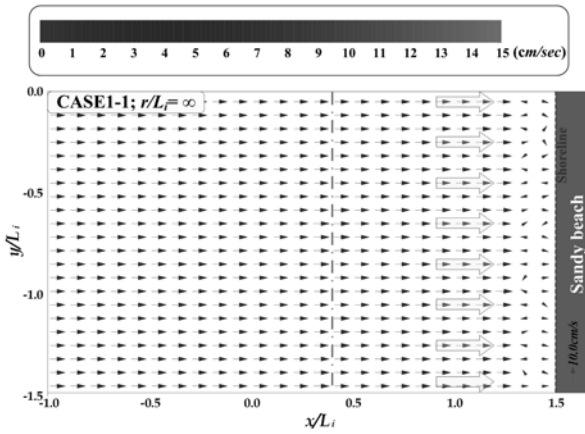
한편, (a)의 직선해안의 경우(CASE2-1;  $r/L_i = \infty$ )에서는 offshore측에서 평균수위가 정수면보다 하강하는 경향을 나타낸 것은 직선해안의 경우에는 잠제가 연속적으로 배치되어 있는데 반에 곡률해안의 경우에는 단내에 2기의 잠제만 존재하기 때문에 해변에 의한 영향으로 offshore측의 평균수위가 전반적으로 조금 상승하는 것으로 판단된다.

### 3.3 잠제 주변의 상층흐름분포

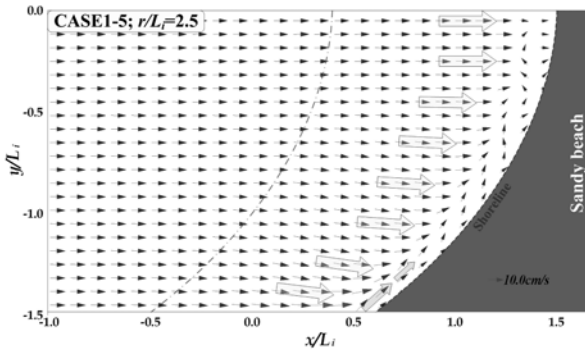
Fig. 5(잠제가 없을 경우)와 Fig. 6(잠제가 설치된 경우)은 잠제 주변의 상층흐름을 나타내고 있으며, 이용된 평균유속( $\overline{U_{xyz}}$ )은  $x$ - $y$ 평면상의 각 연직위치의 평균유속을 수심(연직) 방향으로 적분한 평균유속이고, 식 (16)을 이용하여 계산하였다. 이때 상층의 범위는 천단에서 자유수면까지 고려하였으며 해변내부의 유속은 적용하지 않았다.

$$\overline{U_{xyz}} = \frac{1}{3T_i} \int_R \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \sqrt{u^2 + v^2} dt dz \quad (16)$$

Fig. 5는 잠제가 존재하지 않을 경우에 잠제 주변의 상층흐름을 나타내고 있으며 (a)는 직선해안의 경우(CASE1-1;



(a) CASE1-1;  $r/L_i = \infty$

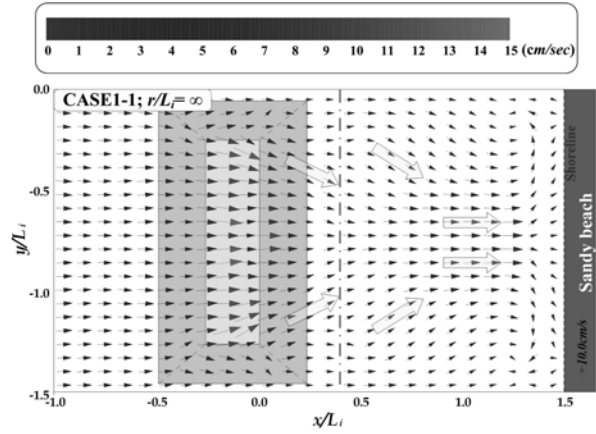


(b) CASE1-5;  $r/L_i = 2.5$

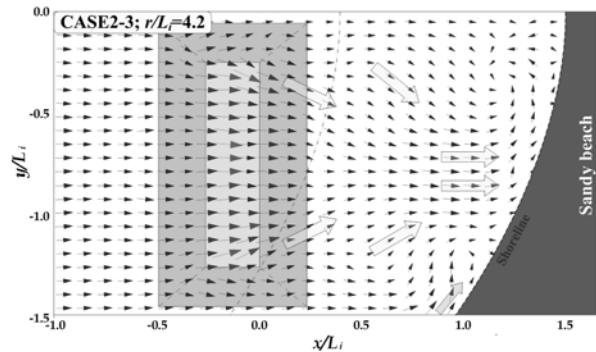
Fig. 5 Mean flow of upper layer over the crest of a submerged breakwater due to variation of beach curvature without submerged breakwaters

$r/L_i = \infty$ ), (b)는 곡선해안 중 곡률반경이 가장 작은 CASE1-5( $r/L_i = 2.5$ )의 경우를 대표적으로 나타낸다. (a)의 직선해안에서의 상층흐름분포는 입사파의 진행방향과 해변경사에 의한 굴절의 영향이 동일한 방향으로 작용함에 따라 일정한(정선의 법선) 방향을 가지고 정선으로 유입되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 곡선해안에서는 입사파가 일정한 방향으로 진행하다가 해변경사의 영향으로 해변상에서 정선의 법선방향으로 굴절이 발생함을 알 수 있다. 또한 곳에서 정선을 따라 중앙 해변으로 향하는 흐름이 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이는 해변경사에 의한 굴절의 영향으로 상대적으로 높은 파고가 형성되는 곳에서 파고가 낮은 해변 중앙으로 연안을 따라 발생하는 연파의 영향에 의해 발생하는 흐름으로 판단된다.

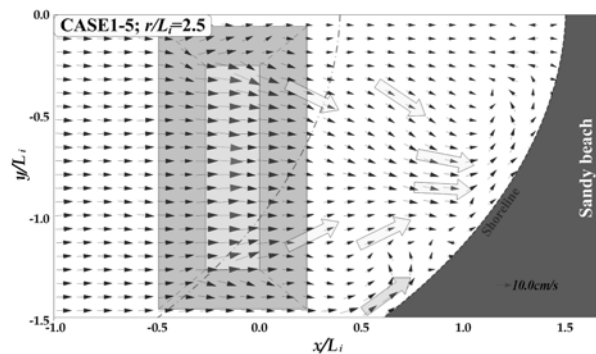
Fig. 6은 잠제가 설치된 경우의 잠제 주변의 상층흐름분포이며 (a)는 직선해안의 경우(CASE2-1;  $r/L_i = \infty$ ), (b)와 (c)는 곡선해안인 CASE2-3( $r/L_i = 4.2$ )과 CASE2-5( $r/L_i = 2.5$ )의 경우를 각각 나타낸다. Fig. 6으로부터 직선해안의 (a)의 CASE2-1( $r/L_i = \infty$ )은 양측 개구부의 천단에서 경사면의 영향으로 잠제 중앙배후로 흐름이 굴절되고 양쪽의 굴절정도가 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 반면에 곡선해안의 경우에서는 해안의 무치원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 파고 분포에서 논의한 바와 같이 곳측 개구부에서는 천단과 저면과의 수심차이가 작아질 뿐만 아니라, 해변경사에 의한 굴절의 영향을 동시에 받음으로서 잠제로 인한 굴절의 영향이 감소함과 동시에 상대적으로 약한 파랑에너지가 유입됨에 따



(a) CASE2-1;  $r/L_i = \infty$



(b) CASE2-3;  $r/L_i = 4.2$



(c) CASE2-5;  $r/L_i = 2.5$

Fig. 6 Mean flow of upper layer over the crest of a submerged breakwater due to variation of beach curvature with submerged breakwaters

라 양측 개구부로 유입되는 파랑에너지의 차이로 인하여 잠제 배후에서 회절의 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 곳 부근에서는 연파의 영향으로 해안을 따라 유입되는 흐름이 나타난다. 아울러, 잠제 배후의 중첩지점이 굴절 및 회절의 차이로 인하여 곳측 연안으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

한편, 곡선해안의 경우 잠제의 설치로 인하여 곳에서 연안을 따라 발생하는 연파와 잠제 배후에서 중첩된 파가 잠제 배후의 정선에서 교차하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.4 잠제 주변의 평균류분포

Fig. 7은 잠제 주변의 평균류분포를 나타내고 있으며, (a)는 직선해안(CASE2-1;  $r/L_i = \infty$ ), (b)와 (c)는 곡선해안인 CASE2-3( $r/L_i = 4.2$ )과 CASE2-5( $r/L_i = 2.5$ )의 경우를 각각 나타낸다. 평균류는 상층흐름에 이용된 식과 동일한 식 (16)으

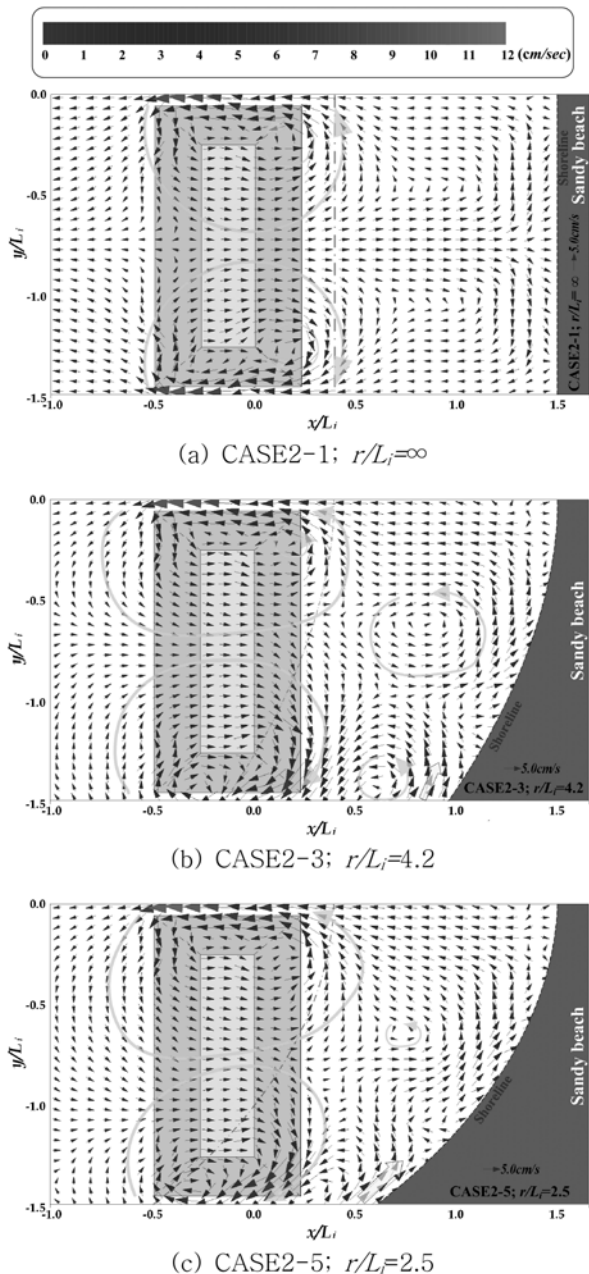


Fig. 7 Spatial distributions of depth-integrated mean flow according to beach curvature in coastal area with submerged breakwaters

로 계산하였으며 저면에서 자유수면까지 모든 유속을 고려하였다. 단, 해빈내부의 유속은 고려 대상에서 제외하였다.

Fig. 7로부터 전반적으로 해빈이 존재할 경우 잠제 단부를 중심으로 발생하는 특유의 순환류를 확인할 수 있다. (a)의 직선해안의 경우(CASE2-1;  $r/L_i = \infty$ ) 잠제의 중심( $y/L_i = -1.25$ )을 기준으로 대칭적인 평균수위분포가 나타남으로 인하여 양측 단부를 중심으로 발생하는 순환류 및 전체적인 흐름이 잠제 중심( $y/L_i = -1.25$ )을 기준으로 대칭적으로 발생한다. 반면, 비대칭적인 평균수위분포를 나타내는 곡선해안 (b) CASE2-3( $r/L_i = 4.2$ )과 (c) CASE2-5( $r/L_i = 2.5$ )에서는 두 순환류가 비대칭적으로 발생하고, 순환류의 교차하는 지점이 곳측으로 이동하는 경향을 나타낸다. 또한 곳측 개구부보다 중앙개구부를 통해 빠져나가는 이안류가 더 강한 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 곳측 개구부는 잠제저면과 해빈저면이 교차하여 개구부가 협소해짐과 동시에 연안을 따라 유입

되는 연파와의 간섭이 발생하는 반면, 상대적으로 흐름이 원활한 중앙개구부에서는 흐름이 집중됨에 따라 이안류의 흐름이 강해진다. 또한 중앙개구부를 통해 offshore측으로 빠져나온 흐름이 상대적으로 평균수위가 낮은 곳측 개구부로 향하기 때문에 중앙개구부의 단부를 중심으로 발생하는 순환류의 회전반경이 커짐에 따라 비대칭적인 순환류가 발생하며 교차지점이 곳측으로 이동하는 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 두드러지게 나타난다.

### 3.5 개구부에서의 흐름분포

Fig. 8은 CASE2-3( $r/L_i = 4.2$ )의 경우에 대하여  $x$ - $z$  단면의 평균유속( $\overline{U_{xz}}$ ) 및 평균와도( $\overline{\omega_{xz}}$ )의 공간분포를 나타낸 것으로  $x$ - $z$  평면상의 각 지점의 유속성분( $u, w$ )을 3주기 평균하여 산정하였다. 평균유속은 식 (17), 평균와도는 식 (18)을 이용하여 계산하였다. 여기서 시계방향( $\oplus$ )의 와도는 붉은색계열, 반시계방향( $\ominus$ )의 와도는 파란색계열로 나타내고 있으며 (a)는 중앙개구부측 단면(Fig. 1의 A-B단면;  $y/L_i = 0.0$ ), (b)는 곳측 개구부 단면(Fig. 1의 C-D단면;  $y/L_i = -1.5$ )을 각각 나타낸다.

$$\overline{U_{xz}} = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \sqrt{u^2 + w^2} dt \quad (17)$$

$$\overline{\omega_{xz}} = \frac{1}{3T_i} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) dt \quad (18)$$

Fig. 8로부터 전술한 평균류분포 검토한 바와 같이 (a)의 중앙개구부측 단면(A-B;  $y/L_i = 0.0$ )을 통해 외해로 빠져나가는 흐름이 (b)의 곳측 개구부 단면(C-D;  $y/L_i = -1.5$ )을 통해 외해로 빠져나가는 흐름보다 강한 것을 재차 확인할 수 있으며, 이에 대한 세부내용은 Fig. 9에서 검토하기로 한다. 정선부근에서는 곡선해안의 (a)의 중앙단면(A-B;  $y/L_i = 0.0$ )보다 (b)의 가장자리 단면(C-D;  $y/L_i = -1.5$ )인 곳에서 해빈 경사에 의한 굴절의 영향으로 파랑에너지가 집중됨으로 인하여 강한 평균유속( $\overline{U_{xz}}$ ) 및 평균와도( $\overline{\omega_{xz}}$ )가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이상과 같이 곡선해안에 다기의 잠제를 설치할 경우 중앙부에서는 개구부 저면의 세굴, 곳측에서는 해빈침식에 대한 신중한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 무차원 곡률반경의 변화에 따른 개구부에서의 이안류 연직분포를 검토하기 위하여 Fig. 1에 나타내고 있는 개구부 중심에 위치한 Gauge1과 Gauge2에서의  $x$ 방향 유속 성분( $u$ )의 시계열 데이터를 이용하여 3주기 동안 평균한 값을 나타낸 것으로 (a)와 (b)는 각각 Gauge1과 Gauge2에서의  $x$ 방향 평균유속성분( $\bar{u}$ )의 연직분포를 나타내고 있다. —는 직선해안의 경우(CASE2-1;  $r/L_i = \infty$ )를 —●—, —◆—, —■—, —▲—는 곡선해안의 경우로서 무차원 곡률반경이 작은 순으로 나타내었으며, CASE2-2( $r/L_i = 5.0$ ), CASE2-3( $r/L_i = 4.2$ ), CASE2-4( $r/L_i = 3.3$ ), CASE2-5( $r/L_i = 2.5$ )를 각각 의미한다.

Fig. 9로부터 전술한 평균류분포에서 확인한 바와 같이 직선해안의 경우(—)에서는 양측 개구부에서 거의 유사한 연직흐름분포를 나타내고 있으나, 곡선해안의 경우(—●—, —◆—, —■—, —▲—)에서는 상대적으로 소통이 원활한 중앙개구부로

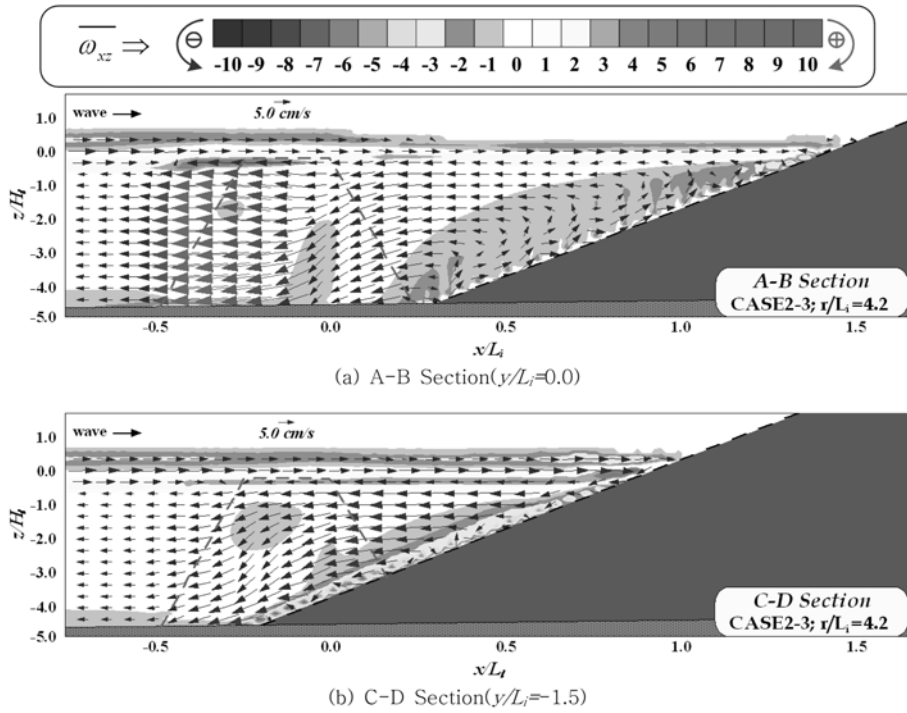


Fig. 8 Spatial distributions of mean flow at open inlet sections according to beach curvature in coastal area with submerged breakwaters for CASE2-3 ( $r/L_i=4.2$ )

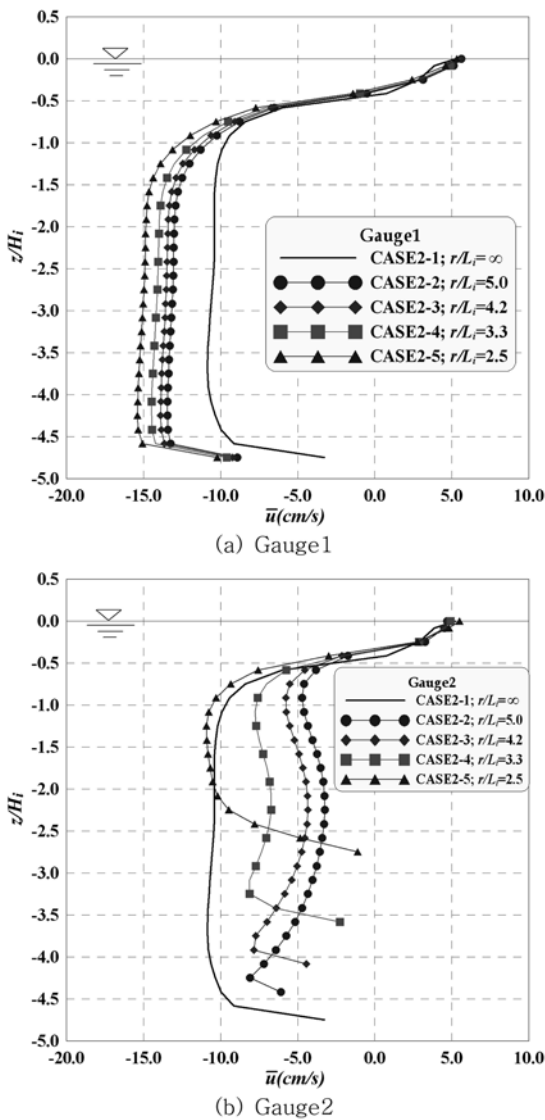


Fig. 9 Vertical mean flow at open inlet according to beach curvature in coastal area with submerged breakwaters

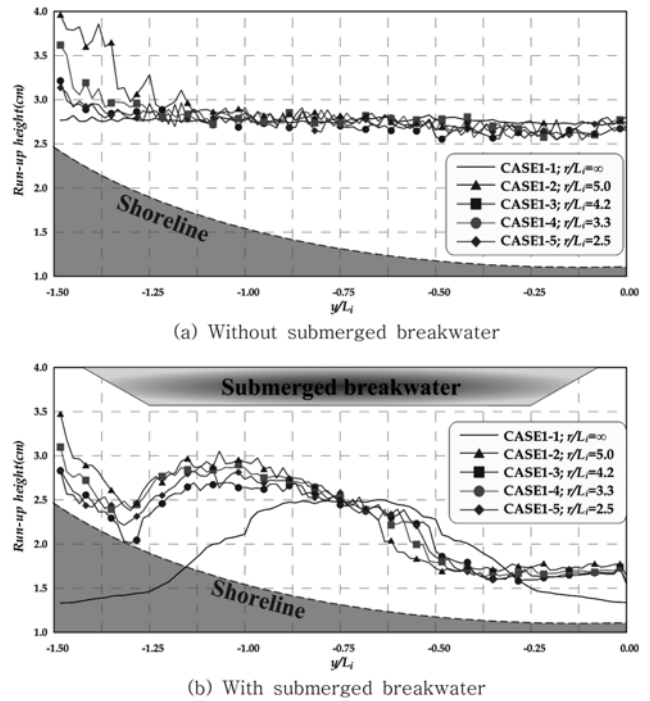


Fig. 10 Longshore distributions of run-up height due to the variation of beach curvature in coastal area with submerged breakwaters

흐름이 집중됨에 따라 중앙개구부인 (a)의 Gauge1 지점에서 곳측 개구부인 (b)의 Gauge2보다 전체적으로 강한 연직흐름 분포를 나타낸다. 또한 무차원 곡률반경이 작아질수록 양측 개구부에서 이안류의 연직분포는 점차 강해지는 것을 알 수 있는데, 이는 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 on-offshore측의 평균수위 차이가 커지기 때문이며 특히, (b)의 Gauge2지점(곳측 개구부에서는 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 가장 작은 CASE2-5( $r/L_i=2.5$ )의 경우 직선해안과 거의 유사한 흐름이 나타남을 확인할 수 있다.



### 3.6 연안에서의 처오름 높이분포

Fig. 10은 중앙개구부에서 곳측 개구부에 해당하는 연안에서의 처오름 높이를 나타낸 것이며 (a)는 잠제가 없을 경우, (b)는 잠제가 설치된 경우를 나타낸다.  $(r/L_i = \infty)$ 는 직선해안의 경우,  $\bullet$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$  ( $r/L_i=5.0$ ,  $r/L_i=4.2$ ,  $r/L_i=3.3$ ,  $r/L_i=2.5$ )는 곡선해안의 경우를 의미하고, 연안에서의 처오름 높이는 정선에서의 최대수위( $\eta_{max}$ )로 나타내었다.

Fig. 10(a)의 잠제가 존재하지 않는 경우에는 전술한 파고분포에서 나타낸 바와 같이 무차원 해안의 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 해변경사에 의한 굴절의 영향이 강해지며 이에 따른 높은 파고가 형성으로 인해 곳 부근 연안에서 높은 처오름 높이를 나타내지만, 해변중앙으로 갈수록 굴절의 영향이 약해져서 직선해안과 유사한 처오름 높이를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(b)로부터 잠제가 설치됨으로 인하여 연안에서 전반적으로 처오름 높이가 하강하는 경향을 보인다. 곡선해안의 경우( $\bullet$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$ )에 잠제가 존재하지 않는 (a)의 경우와 비교하면 곳 부근에서는 잠제로 인한 굴절의 영향이 해변경사에 의한 굴절의 영향과 반대방향으로 작용함에 따라 처오름 높이가 하강한다. 중앙개구부측 연안에서는 중앙개구부에서 잠제 배후로 유입되는 파랑에너지가 곳측 개구부에서 유입되는 파랑에너지보다 크기 때문에 곳측으로 파랑에너지의 이동이 발생하며 이에 따라 중앙개구부측 연안에서는 상대적으로 낮은 처오름 높이를 나타낸다. 또한 잠제 배후에서 파랑이 중첩되는 영역의 연안에서는 처오름 높이가 상승하는 경향을 보이며, 직선해안의 경우에 비해 무차원 곡률반경이 작아질수록 잠제 배후에서 발생하는 파랑의 중첩현상이 곳측으로 이동함에 따라 처오름 높이의 상승부분도 곳측으로 이동한다. 곡률반경에 따른 영향을 살펴보면, 무차원 곡률반경이 작아질수록 잠제 배후의 평균수위가 상승함에 따라 미소하지만 처오름 높이도 상승하는 경향을 나타낸다.

## 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )에 따른 잠제 주변의 3차원적 수리특성을 파악하기 위하여 파구조물해빈/해저지반의 상호작용을 직접 고려할 수 있는 3차원 모델 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 기술하면 아래와 같다.

1. 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 onshore측에서는 전반적으로 낮은 파고분포를 보이나, 곳에서는 해변경사에 의한 굴절의 영향으로 높은 파고를 나타낸다.
2. 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 곳측 개구부가 협소해짐으로 인하여 onshore측의 평균수위는 전체적으로 상승한다.
3. 연직 평균한 잠제 주변의 평균류는 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 중앙개구부 단부를 중심으로 발생하는 순환류의 회전반경이 커지고, 양측 개구부 주변의 순환류가 교차하는 지점이 곳측으로 이동하여 전체적으로 비대칭적인 평균류가 발생한다.

4. 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 on-offshore측의 평균수위 차이에 의해 외해로 빠져나가는 흐름(이안류)이 강해지며, 곳측 개구부에 비해 소용돌이 원형한 중앙개구부에서 이안류의 연직분포가 강하게 나타난다.

5. 곡선해안에서  $x-z$ 단면상의 평균유속( $\overline{U_{xz}}$ ) 및 평균와도( $\overline{\omega_{xz}}$ )는 중앙개구부측 단면에서는 외해로 빠져나가는 이안류가 발달하는 반면, 곳측 단면에서는 해변의 표면에서 강한 평균와도가 발생한다.

6. 연안에서의 처오름 높이는 잠제 설치로 인하여 전반적으로 하강하였으며, 직선해안에 비해 해안의 무차원 곡률반경( $r/L_i$ )이 작아질수록 잠제 배후에서 발생하는 파랑의 중첩현상이 곳측으로 이동함에 따라 처오름 높이의 상승부분도 곳측으로 이동한다. 또한 곡률반경에 따른 영향을 살펴보면, 무차원 곡률반경이 작아질수록 잠제 배후의 평균수위가 상승함에 따라 미소하지만 처오름 높이도 상승하는 경향을 나타낸다.

이상과 같은 배경에 근거하여 파랑제어 및 표시제어 목적으로 실해역에 잠제를 건설하기 위해서는 해안지형의 특성을 충분히 고려하여 적절한 잠제의 제원 및 평면배치가 결정되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(R01-2008-000-20442-0).

## 참고문헌

- 김용현(2009) 부산 송도해수욕장에서의 MONITORING을 통한 파랑변형 및 표시이동에 관한 연구. 석사학위논문, 인제대학교.
- 이우동, 허동수, 박종배, 안성욱(2009) 해변경사에 따른 잠제 개구부의 3차원적인 흐름특성에 관한 연구. 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제23권, 제1호, pp. 7-15.
- 이종인, 김영택, 조용식(2003) 수중방파제 형상에 따른 규칙파의 반사실험, 한국해안·해양공학회지, 한국해안·해양공학회, 제15권, 제3호, pp. 167-175.
- 조원철(2004) 폭 변화에 따른 잠제의 파랑 차단 성능, 한국해안·해양공학회지, 한국해안·해양공학회, 제16권, 제4호, pp. 206-212.
- 조원철(2006) 파랑 차단 성능 향상을 위한 다열 잠제 사이의 최적 간격에 관한 연구, 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제20권, 제6호, pp. 82-87.
- 정재상, 강규영, 조용식(2007) 다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 해석. 한국해안·해양공학회지, 한국해안·해양공학회, 제19권, 제1호, pp. 29-37.
- 허동수, 김도삼(2003a) VOF법에 의한 불규칙파동장에 있어서 불투과잠제에 의한 파랑에너지 변형특성. 한국해안·해양공학회지, 한국해안·해양공학회, 제15권, 제4호, pp. 207-213.
- 허동수, 김도삼(2003b) 경사수역에 설치된 잠제 주변의 유속장과의 발생에 대한 수치모의. 한국해안·해양공학회지, 한국해안·해양공학회, 제15권, 제3호, pp. 151-158.
- 허동수, 이우동(2007) 잠제주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART I-해빈이 없는 경우, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권, 제6B호, pp. 689-701.
- 허동수, 이우동(2008a) 잠제 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART II-해빈이 있을 경우, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제1B호, pp. 115-123.

- 허동수, 이우동(2008b) 잠제 설치 연안의 처오름 높이 특성; PART I-잠제의 평면배치에 의한 영향, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제3B호, pp. 345-354.
- 허동수, 이우동(2008c) 잠제 설치 연안의 처오름 높이 특성; PART II-잠제의 제원에 의한 영향, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제4B호, pp. 429-439.
- 허동수, 이우동, 배기성(2008) 사각격자체계 수치모델에서의 경사면 처리기법에 관하여, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제5B호, pp. 591-594.
- 허동수, 최동석(2008) 투과성 잠제의 비탈면경사가 주변 파동장에 미치는 영향, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 249-259.
- 황종길, 이승협, 조용식(2004) 사각형형상 수중방파제에 의한 불규칙파의 변형, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 949-958.
- Drei, E. and Lamberti, A. (1999) Wave pumping effect of a submerged barrier. Proc. *International Conference on Coastal Structures*, pp. 667-674.
- 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 breakwaters. *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp. 991-1020.
- Gironella, X. and Sanchez-Arcilla, A. (1999) Hydrodynamic behaviour of submerged breakwater. Some remarks based on experimental results. Proc. *International Conference on Coastal Structures*, pp. 891-896.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981) Volume of field (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Coastal Eng.*, Vol. 39, pp. 201-255.
- 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., Kim, C.H., Kim, D.S., and Yoon, J.S. (2008) Simulation of the nonlinear dynamic interactions between waves, a submerged breakwater and the seabed. *Ocean Eng.*, Vol. 35, pp. 511-522.
- 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.
- Johnson, H.K. (2006) Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters. *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 39-48.
- 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.
- Krieci, E.E., Karambas, Th. V., Prinos, P., Tilegrafos, A., Gironella, X., and Mosso, C. (1999) Reflection and transmission for submerged and rubble-mound breakwater. Proc. *International Conference on Coastal Structures*, pp. 689-696.
- Ma, H.H., Mizutani, N., Eguchi, S., and Hur, D.S. (2004) Study on beach profile change and wave induced velocity field in permeable beach. *Journal of Civil Engineering in the Ocean, JSCE*, Vol. 20, pp. 509-514 (in Japanese).
- Martinelli, L., Zanuttigh, B., and Lamberti, A. (2006) Hydrodynamic and morphodynamic response of isolated and multiple low crested structures: Experiments and simulations. *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 363-379.
- Lara, J.L., Garcia, N., and Losada, I.J. (2006) RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 395-417.
- Liu, S. and Masliyah, J.H. (1999) Non-linear flows in porous media. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 86, No. 1, pp. 229-252.
- Losada, I.J., Losada, M.A., and Martin, F.L. (1997) Harmonic generation past a submerged porous step. *Coastal Eng.*, Vol. 31, pp. 281-304.
- Osanaï, K. and Minami, M. (2003) Experimental study on vertical velocity distribution around the opening of artificial reefs. *Journal of Civil Engineering in the Ocean, JSCE*, Vol. 19, pp. 213-218(in Japanese).
- Ranasinghe, R. and Turner, I.L. (2006) Shoreline response to submerged structures: A review. *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 65-79.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992) Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater. Proc. 23rd Int. Conf. *Coastal Eng., ASCE*, pp. 1517-1530.
- Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equation. *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- van Gent, M.R.A. (1995) *Wave interaction with permeable coastal structures*. Ph.D. Thesis, Delft University The Netherlands.
- Yanashiro, M., Yoshida, A., and Irie, I. (1999) Experimental study on wave field behind a submerged breakwater. Proc., *International Conference on Coastal Structures*, pp. 675-682.
- 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., Johnsona, 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.

(접수일: 2009.4.6/심사일: 2009.6.10/심사완료일: 2009.6.10)