

잠제 제원 및 평면배치에 따른 쇄파특성

이우동* · 허동수** · 허정원***

*나고야대학 공학연구과 사회기반공학전공

**국립경상대학교 해양과학대학 해양토목공학과(해양산업연구소)

***전남대학교 건설·환경공학부 해양토목공학전공

Wave Breaking Characteristics due to Shape and Plane Arrangement of the Submerged Breakwaters

Woo-Dong Lee*, Dong-Soo Hur** and Jung-Won Huh***

*Department of Civil Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan

**Department of Ocean Civil Engineering(Institute of Marine Industry), Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

***Department of Ocean Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Korea

KEY WORDS: Shape of submerged breakwater 잠제의 형상, Plane arrangement of submerged breakwater 잠제의 평면배치, Wave breaking point 쇄파점, 3-D flow 3차원 흐름, LES-WASS-3D 3차원수치해석기법

ABSTRACT: The aim of this study is to examine the effects of shape and plane arrangement of submerged breakwaters on 3-D wave breaking characteristics over them. First, the numerical model, which is able to consider the flow through a porous medium with inertial, laminar, and turbulent resistance terms, i.e. simulate directly WAve · Structure · Seabed/Sandy beach interaction, and can determine the eddy viscosity with a LES turbulent model in a 3-Dimensional wave field (LES-WASS-3D), has been validated by a comparison with Goda's equation for breaking wave heights. And then, using the numerical results, the wave breaking points over the crest of submerged breakwaters have been examined in relation to the shape and plane arrangement of submerged breakwaters. Moreover, the wave height distribution and upper flow around submerged breakwaters have been also discussed, as well as the distribution of the wave breaking points over the beach.

1. 서 론

잠제는 심해로부터 전파되는 풍파를 천단상에서 강제 쇄파시켜 파랑으로부터 해안선 및 해안구조물을 보호하는 것이 일반적이다. 이와 같은 잠제의 기능을 제대로 발휘하기 위해서는 잠제의 제원(천단수심, 천단폭, 사면경사, 제장 등)과 평면배치(이안거리, 개구율 등)를 고려한 3차원적인 구성이 매우 중요하다.

종래부터 잠제 천단상에서의 쇄파특성을 규명하기 위한 많은 연구들이 현재까지 수행되고 있다. Goda(1974)는 잠제의 천단수심과 입사파고의 비에 의한 쇄파조건식을 제안하였으며, 대부분의 실험적 연구(Grue, 1992; Yamashiro et al., 1999; Brossard and Chagdali, 2001)에서 잠제의 천단상에서의 쇄파는 파랑의 비선형성의 발달에 기인하여 발생한다고 보고하고 있다.

Takikawa et al.(1997)는 불투과성 잠제의 쇄파에 관한 수치적 연구를 통하여 사다리꼴 잠제에 의한 다양한 쇄파형태에 대하여 고찰하였으며, 또한 잠제의 천단상의 쇄파는 자연해빈상의 쇄파와 매우 다를 수 있다고 지적하였다. Kawasaki and Iwata

(2001)는 불투과성 사다리꼴 잠제에서 외해측 비탈면의 경사에 따른 다양한 쇄파형태를 고찰한 후 쇄파메커니즘에 관하여 논의하였다. 한편, 투과성 잠제의 쇄파에 관한 연구에 있어서 Hattori and Sakai(1994)가 사다리꼴 잠제의 투과성 효과에 관하여 고찰함과 더불어 실험식을 제안하였다. Calabrese et al. (2008)는 투과성 사다리꼴 잠제의 외해측 경사면 및 입사파고에 따른 다양한 쇄파형태에 관한 고찰과 쇄파메커니즘에 관하여 논의하였다. 하지만, 이와 같은 연구들은 단면 2차원적인 연구로서 실 현장에서와 같이 개구부가 존재하는 잠제의 천단상 쇄파에 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

최근 허동수와 이우동(2007)은 LES-WASS-3D를 개발하여 천단고 변화에 따른 잠제 주변의 흐름특성(허동수와 이우동, 2008a)과 해빈표면경사에 따른 개구부에서의 흐름특성(이우동 등, 2009)을 논의하기 위하여 잠제 주변의 쇄파점분포에 대하여 보고한 바 있으나, 검토 조건이 한정되어 있을 뿐만 아니라 잠제의 가장 중요한 기능 중의 하나인 쇄파특성에 대해서는 충분한 논의가 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 허동수와 이우동(2007)이 개발한 LES-WASS-3D를 이용하여 먼저

쇄파에 대한 검증은 실시한 후, 잠재의 제원 및 평면배치의 변화에 따른 잠재 주변의 쇄파특성에 대해 고찰하는 것을 목적으로 한다.

2. 수치해석기법

LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)는 조파소스(조파원천)항이 포함된 연속방정식과 투수성구조물내의 유체저항을 도입한 수정된 Navier-Stokes운동방정식 및 자유수면 모의를 위한 VOF함수의 이류방정식으로 구성된 3차원 수치해석기법으로서 파·구조물·해빈/해저지반의 상호작용의 영향을 직접 해석할 수 있을 뿐만 아니라, SGS모델(Sub-Grid Scale model; Smagorinsky, 1963)의 적용으로 격자크기 보다 작은 난류의 재현이 가능하다. 투수성구조물내의 유체저항으로서 관성저항(Sakakiyama and Kajima, 1992), 난류저항(Ergun, 1952; van Gent, 1995) 및 층류저항(van Gent, 1995; Liu and Masliyah, 1999)을 고려할 수 있도록 개발된 강비선형의 3차원 수치해석기법이다. 나머지 수치해석기법에 대한 세부적인 내용에 대해서는 허동수와 이우동(2007)을 참조하기 바란다.

또한, 유한차분법(FDM-Finite Difference Method)의 적용에 따른 직각격자체계에서의 계단식 경사면처리를 보완하기 위하여 허동수 등(2008)이 제안한 경사면처리기법을 이용하여 해빈과 잠재의 경사면을 설치하였다.

2.1 LES-WASS-3D의 개요

LES-WASS-3D의 기초방정식은 3차원 비압축성·점성유체의 무반사조파를 위한 조파소스(조파원천)항이 포함된 연속방정식 (1)과 투과성구조물을 적용하기 위하여 유체저항을 도입한 수정된 Navier-Stokes운동방정식 (2)~(4)와 자유수면모의를 위한 VOF함수의 이류방정식 (5)로 구성된다.

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

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

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

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

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \Big] - M_z - D_z - E_z \\ & - \frac{2w}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \gamma_v g - \beta w \end{aligned} \quad (4)$$

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

여기서 u, v, w 는 x, y, z 방향의 속도성분, γ_v 는 체적공극율 (Volume porosity), $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 는 x, y, z 방향에 대한 면적투과율 (Surface permeability), t 는 시간, g 는 중력가속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, β 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 과당감쇠계수이다. ν 는 동점성계수, ν_t 는 동점성계수(ν)와 와동점성계수(ν_t)의 합을 나타내고, q^* 는 조파소스의 유량밀도를 나타낸다. 또한, 식 (5)의 VOF함수 F 는 각 셀에 대해 유체가 차지하고 있는 체적비율을 나타낸다.

투과성구조물내의 유체저항으로서 M_x, M_y, M_z 관성저항은 식 (6)~(8) 및 D_x, D_y, D_z 난류저항은 식 (9)~(11) 그리고 E_x, E_y, E_z 층류저항은 식 (12)~(14)로서 결정된다. 여기서 C_M 은 관성력계수, C_D 는 난류저항계수, C_E 는 층류저항계수, D_p 는 투과매체의 평균입경이다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2 LES-WASS-3D Model의 검증

본 연구에서 이용하는 LES-WASS-3D의 쇄파조건 타당성 및 유효성을 확인하기 위하여 Fig. 1과 같은 3차원 수치파동수조 내에 1:10의 경사 해빈을 설치하여 LES-WASS-3D의 결과와 고다(1975)의 쇄파조건식 (15)에 의한 결과값을 비교하였다. 본

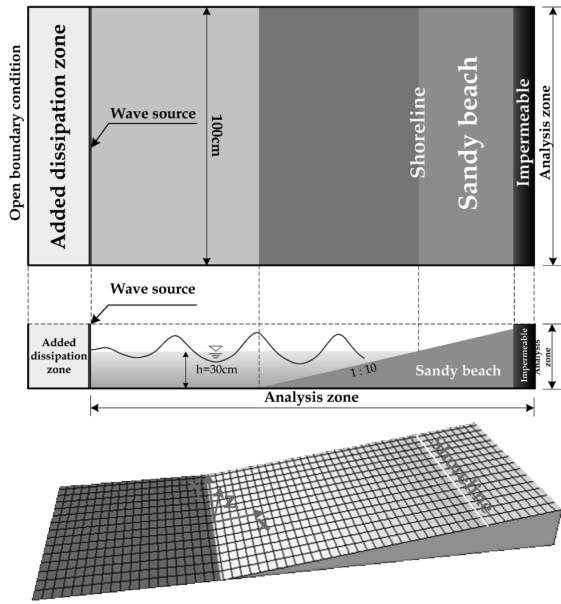


Fig. 1 Definition sketch of 3-D numerical wave basin used for verification of breaking wave heights

연구에서의 쇄파조건은 수립자의 속도가 파속보다 큰 경우이며, 식 (16)을 만족하는 경우를 쇄파로 정의하였다.

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[1 - \exp \left\{ -1.5\pi \left(\frac{h_b}{L_0} \right) \left(1 - 15 \tan^{4/3} \theta \right) \right\} \right] \quad (15)$$

Table 1 Test conditions used for verification of breaking wave heights (Unit: cm)

CASE	H_i	h_b	H_b (Cal.)	H_b (Goda, 1975)
1	4	3.4	4.32	4.37
2	6	6.0	7.11	7.39
3	8	8.4	9.35	9.95
4	10	9.2	10.03	10.74
5	12	10.4	11.01	12.11

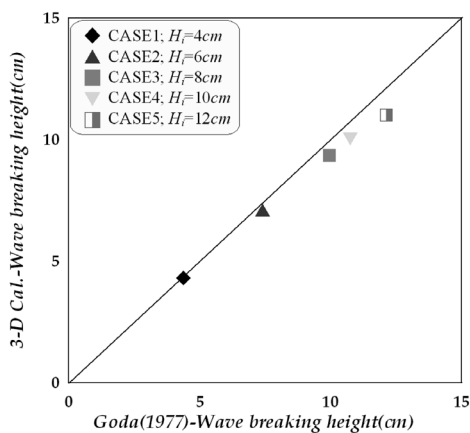


Fig. 2 Comparison between numerical and empirical breaking wave heights

$$C < \sqrt{u^2 + v^2} \quad (16)$$

Table 1과 Fig. 2는 수치시물레이션에서 식 (16)을 만족하는 쇄파점에서 얻어진 쇄파고($H_b(\text{Cal.})$)와 쇄파수심(h_b) 및 이러한 쇄파수심(h_b)을 고다(1975)의 쇄파조건식 (15)에 대입하여 얻어진 쇄파고($H_b(\text{Goda})$)를 나타내고 있다. 비교·검토한 결과 높은 입사파고(CASE5; $H_i = 12\text{cm}$)의 경우에서 본 계산의 쇄파고($H_b(\text{Cal.})$)가 고다의 쇄파조건식(1975)에 의한 쇄파고($H_b(\text{Goda}, 1975)$)보다 조금 작게 나타내고 있지만, 전반적으로 고다(1975)의 쇄파조건식에 의한 쇄파고와 아주 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이로서 한정적이기는 하나 LES-WASS-3D의 타당성과 유효성이 확보되었다고 판단된다.

2.3 수치파동수조 및 입사조건

본 연구에서는 잠제의 제원(천단수심(R/H_i), 천단폭(B/L_i), 비탈면경사(S), 제장(L_r/L_i)) 여기서, R 은 잠제의 천단수심, H_i 는 입사파고, B 는 잠제의 천단폭, L_r 는 입사파장, S 는 잠제의 비탈면경사, L_r 는 잠제의 길이 및 평면배치형상(이안거리(Y/L_i) 및 개구율(W/L_i), 여기서, Y 는 잠제의 육측 천단에서 정선까지의 거리, W 는 잠제천단간 거리)에 따라 잠제 주변의 쇄파특성을 파악하기 위하여 Fig. 3과 같은 3차원 수치파동수조를 이용하였다.

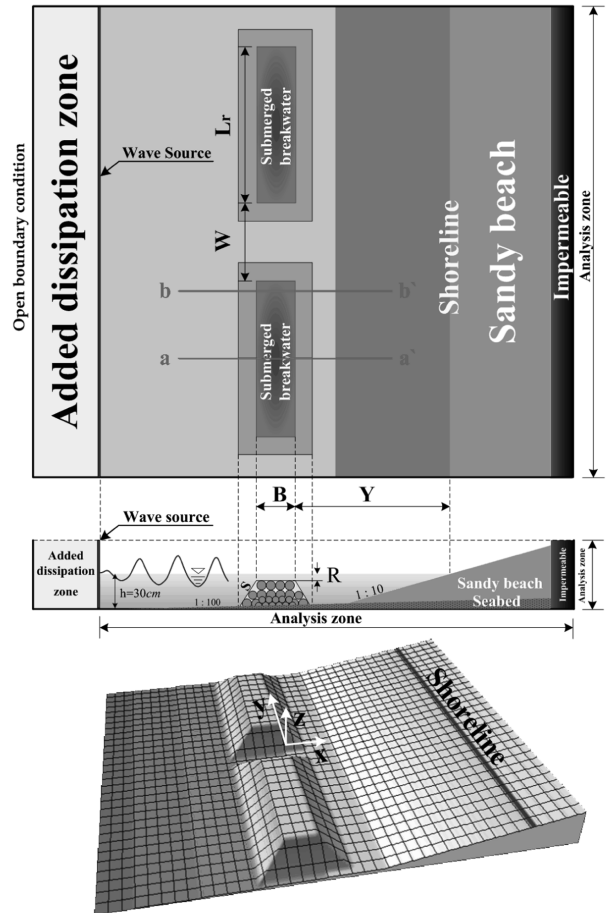


Fig. 3 Definition sketch of 3-D numerical wave basin used in this study

Table 2 Test conditions used in this study

CASE	Submerged breakwater					
	Shape			Arrangements		
	Crown depth ratio	Crown width ratio	Slope gradient	Crown length ratio	Detached distance	Opening ratio
	R/H_i	B/L_i	S	L_r/L_i	Y/L_i	W/L_r
1	0.33					
2	0.67					
3	1.00	0.250	1:2	1.0	1.50	0.50
4	1.33					
5	1.67					
6		0.125				
7	0.33	0.375	1:2	1.0	1.50	0.50
8		0.50				
9			∞			
10	0.33	0.250	1:1	1.0	1.50	0.50
11			1:3			
12				0.5		1.00
13	0.33	0.250	1:2	1.5	1.50	0.33
14				2.0		0.25
15					1.00	
16					1.25	
17	0.33	0.25	1:2	1.0	1.50	0.50
18					1.75	
19					2.00	
20						0.25
21	0.33	0.25	1:2	1.0	1.50	0.75
22						1.00

파의 재반사를 방지하기 위해 조파소스(조파원천) 및 Offshore측에는 부가감쇠영역을 설치하였으며, 해석영역에는 바다경사 1:100의 Seabed를 기초로 하여 기본 비탈면 경사 1:2인 잠제 2기와 비탈면경사 1:10인 해빈을 설치하였다. 잠제는 피복부분과 Core부분으로 나누어 피복석의 평균입경은 4cm, Core의 평균입경은 1cm로 하였으며, 해빈은 모래로 고려하여 0.002cm로 구성하였다.

y축의 양단의 경계조건 즉, 계산영역의 측면경계조건은 Slip 조건을 이용하였으며 잠제와 해빈의 직각방향으로 입사하는 파를 대상으로 하고 있기 때문에 y방향으로 무수한 잠제와 반무한 해빈이 설치되어 있는 것으로 가정할 수 있다. 이로 인하여 해석대상영역을 축소하여 계산상의 편의를 도모하였다.

이용된 수치해석조건에 대한 상세한 사항을 Table 2에 나타내었으며 입사파 조건($H_i = 6\text{cm}$, $T_i = 1.5\text{sec}$)을 고정하고, 잠제의 제원 및 평면배치형상에 따른 잠제 주변의 쇄파특성에 관하여 고찰하였다.

3. 잠제 천단상의 쇄파특성

3.1 잠제 천단상의 흐름분포특성

Fig. 4는 CASE1($Y/L_i = 1.5$)의 잠제 주변의 상층흐름을 나타낸

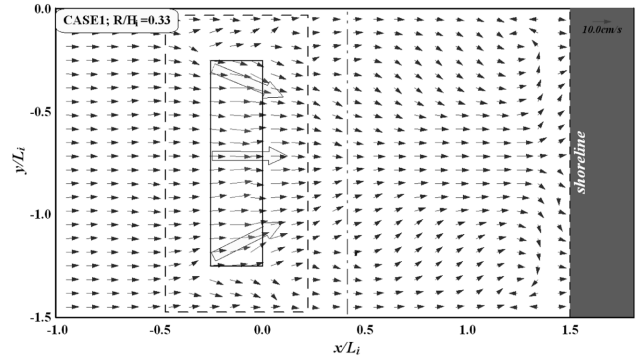


Fig. 4 Mean flow of upper layer around submerged breakwater in CASE1 ($R/H_i = 0.33$)

것으로 검토에 이용된 평균유속($\overline{U}_{xy,z}$)은 천단에서 자유수면까지 x-y평면상의 각 연직위치의 평균유속을 수심(연직)방향으로 적분한 평균유속으로서 식 (17)을 이용하여 계산하였다. 여기서 t_i 는 정상상태 이후의 데이터 취득 시점을 T_i 는 입사파의 주기를 나타낸다.

Fig. 4로부터 잠제의 천단상에서는 수심 감소에 의한 파랑의 비선형성이 강해짐에 따라 빠른 흐름이 나타남을 알 수 있다. 또한 제간부 천단상에서는 잠제의 범선방향 흐름이 우세하게 나타나는 반면에 제두부에서는 외해로부터 유입되는 파랑과 개구부측 비탈면에 의해 굴절된 파랑이 중첩되어 쇄파가 발생함에 따라 흐름이 잠제 배후로 약간 경사지게 향하는 것을 확인할 수 있다.

$$\overline{U}_{xy,z} = \frac{1}{3T_i} \int_{-R}^{\eta} \int_{t_i}^{t_i+3T_i} \sqrt{u^2 + v^2} dt dz \quad (17)$$

3.2 잠제 천단상의 자유수면형분포특성

Fig. 5는 CASE1($Y/L_i = 1.5$)의 x-z단면에서의 자유수면의 시공간분포를 나타낸 것으로 0.05sec의 등간격으로 1주기 동안 30개의 시간스텝을 이용하여 공간분포를 나타내고 있으며, (a)는 제간부측의 a-a' 단면($y/L_i = -0.75$), (b)는 제두부측의 b-b' 단면($y/L_i = -0.33$)을 나타낸다(Fig. 3 참조).

Fig. 5(a)로부터 잠제의 제간부의 x-z단면(a-a'; $y/L_i = -0.75$)에서는 잠제 비탈면에 의한 천수효과에 따른 비선형성의 발달과 더불어 천단 수심의 감소에 기인하여 천단상에서 쇄파가 발생한 후, 파랑에너지감쇠로 인한 유속감소로 인하여 수위가 상승하는 경향을 나타내고, 잠제 배후에서는 쇄파로 인한 파랑에너지감쇠의 영향으로 파고가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 (b)의 제두부측 x-z단면(b-b'; $y/L_i = -0.33$)에서는 잠제 외해측 비탈면에서의 천수변형과 개구부측 비탈면에 의한 굴절의 영향을 동시에 받음에 따라 잠제의 전면에서 파고가 상승하는 경향을 나타내며, 이로 인하여 파랑의 비선형성 발달과 천단수심의 감소로 인한 쇄파가 천단상에서 발생하지만, 상층흐름분포의 고찰에서 전술한 바와 같이 제두부 천단에서는 쇄파가 잠제 배후를 향하여 약간 경사지게 발생하며, 또한 쇄파발생 후 개구부측 비탈면을 통해 굴절된 파랑에너지가 지속적으로 유입되기 때문에 쇄

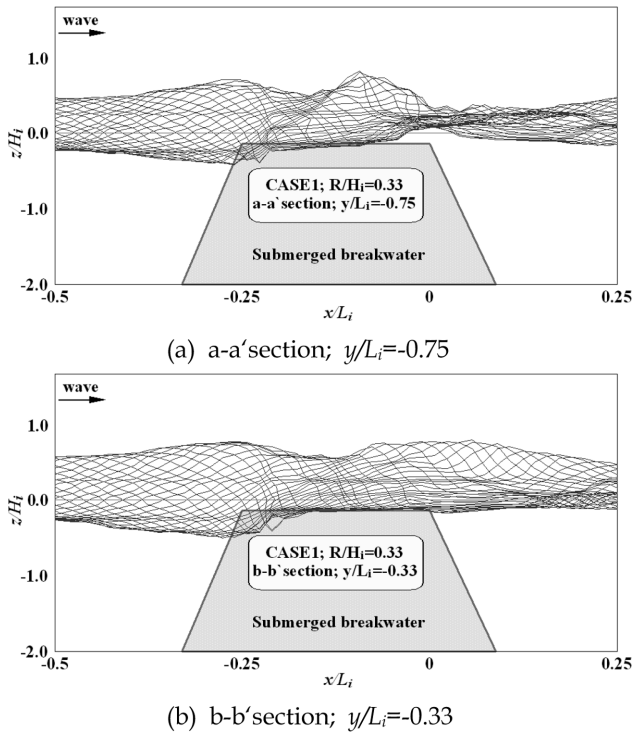


Fig. 5 Time-spatial distribution of free surface elevation in x - z plane for CASE1 ($R/H_i = 0.33$)

파 이후 진행파와 굴절된 파의 중첩현상으로 파고 감소의 경향은 제간부의 경우보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 이와 같이 잠제의 제두부와 제간부의 쇄파특성은 상이한 경향을 나타내며, 본 연구에서와 같이 잠제 천단상의 쇄파특성에 대한 3차원적인 검토가 필요한 이유를 여기서도 확인할 수 있다.

3.3 천단상의 쇄파점분포특성

Fig. 6은 CASE1($Y/L_i = 1.5$)의 경우에서 천단상 자유수면 부근의 격자점에서 식 (16)을 만족하는 격자점을 쇄파점(○)으로 정

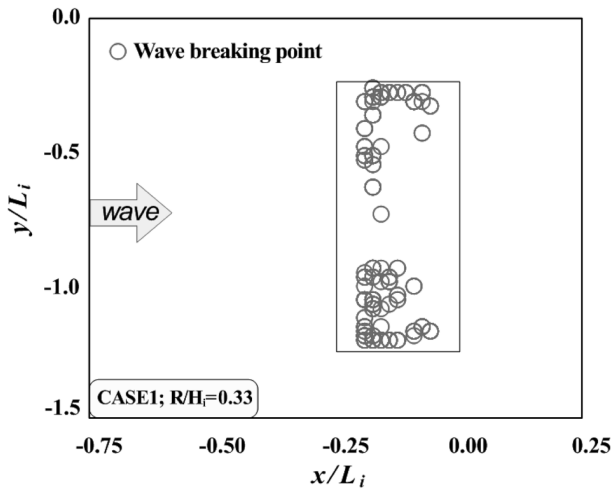


Fig. 6 Spatial distribution of wave breaking points over the crest of submerged breakwater in CASE1 ($R/H_i = 0.33$)

의하여 얻어진 모든 지점을 나타내고 있다.

Fig. 6으로부터 개구부측 비탈면에 의한 굴절의 영향으로 진행파와 굴절된 파가 중첩되는 제두부의 천단상이 제간부의 천단상보다 넓은 범위에 걸쳐 많은 쇄파점이 분포하는 것을 확인할 수 있다.

4. 잠제 주변의 쇄파점분포특성

4.1 잠제의 제원에 따른 쇄파점분포특성

Fig. 7은 잠제의 비탈면경사(S)에 따른 잠제 주변의 쇄파점을 나타내고 있다. 여기서 ◇는 직사각형 잠제($S = \infty$)의 경우에서의 쇄파점을 나타내고 □, ○, △은 비탈면경사가 각각 $S = 1:1$, $S = 1:2$, $S = 1:3$ 인 사다리꼴 잠제의 경우에서의 쇄파점을 의미한다. 그림으로부터 모든 경우에 있어서 천단상에서 쇄파점이 나타나고 있지만 비탈면경사가 완만해질수록 쇄파점수가 증가함과 동시에 개구부측 천단상에 집중적으로 분포하며, 아울러 비탈면경사가 급할수록 천단상에서의 쇄파점수가 급격히 감소할 뿐만 아니라, 직사각형 잠제인 CASE9($S = \infty$)에서는 정선부근에서도 쇄파가 발생한다. 이와 같은 현상은 잠제의 비탈면경사(S)가 급한 경우(전면의 파동장이 중복파동장에 가까움)에 비해 잠제 전면에서의 파동장이 진행파에 가까게 형성되므로 낮은 파고에서도 쇄파가 발생한다(허동수와 이우동, 2008c). 따라서 개구부측 비탈면에 의한 굴절된 파가 천단상으로 지속적으로 유입됨으로 인하여 천단상에서의 쇄파점수가 증가함과 동시에 개구부측 천단상에 집중되는 현상이 발생한다. 또한 잠제 표면의 마찰 및 투과성으로 인한 유체저항이 상대적으로 작은 직사각형 잠제 CASE9($S = \infty$)인 경우 높은 파랑에너지가 잠제 중앙 배후에서 중첩됨으로 인하여 정선부근에서도 쇄파가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

잠제의 천단폭과 파장과의 비(B/L_i)에 따른 쇄파점분포특성은 CASE1(Fig. 6참조)과 유사한 쇄파점분포 경향을 나타낸다. 잠제의 천단폭이 넓어질수록 제간부에서는 광폭의 천단수심 차이에 의한 천수효과로 인하여 쇄파점 수가 조금 증가하고, 제두부에서는 개구부측 비탈면에 의한 굴절의 영향으로 개구부측 천단상 가장자리 부근에 쇄파점의 수가 증가함과 더불어 천단상 가장자리의 전 영역에 걸쳐 쇄파점이 존재하게 된다. 또한 잠제의 제장과 파장과의 비(L_r/L_i)에 따른 쇄파점분포특성 역시 CASE1(Fig. 6참조)과 유사한 쇄파점분포 경향을 나타내고 있으며, 제

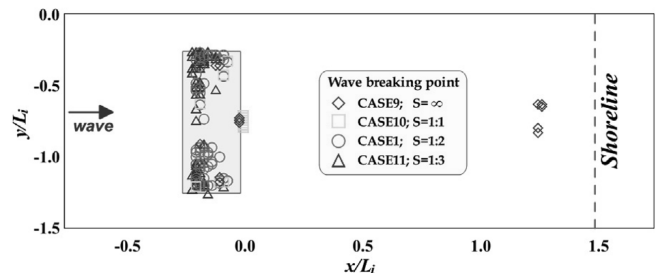


Fig. 7 Spatial distribution of wave breaking points due to variation of submerged breakwater's slope gradient

장파 파장과의 비(L_r/L_i)가 커질수록 전술한 제간부와 제두부에서 나타는 쇄파특성이 확연히 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 제장이 길어질수록 개구부의 영향이 제간부까지 미치지 못해 나타나는 현상으로 판단된다.

한편 잠제의 천단수심과 파고와의 비(R/H_i)에 따른 잠제 주변의 쇄파점특성은 허동수와 이우동(2008a)에서 고찰한 바 있으며, 간략히 설명하자면 천단상에서는 천단수심이 낮은 $R/H_i < 1$ 인 CASE1~2에만 쇄파점이 존재하는 반면, 잠제의 영향을 적게 받아 파랑에너지의 손실이 적은 $R/H_i \geq 1$ 인 CASE3~5에서는 잠제 중앙배후의 정선부근에서만 쇄파점이 존재한다.

4.2 잠제의 평면배치에 따른 쇄파점분포특성

Fig. 8은 잠제의 평면배치에 있어서 개구율(W/L_r)에 따른 잠제 주변의 쇄파점을 나타낸 것으로 \diamond 는 개구율이 가장 작은 CASE20($W/L_r=0.25$)의 경우, \triangle 는 개구율(W/L_r)이 0.75인 CASE21의 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 개구율(W/L_r)이 작아질수록 개구부측 천단상의 쇄파점이 급격히 감소하며, 이는 개구율이 가장 작은 CASE20($W/L_r=0.25$)의 경우 개구부측 사면이 맞닿아 있기 때문에 굴절의 영향이 작아짐과 함께 개구부폭이 좁아짐으로 인하여 많은 파랑에너지가 유입되지 못하기 때문에 천단상에서의 쇄파점수가 감소하는 것으로 판단된다. 이와 상반되게 개구율(W/L_r)이 커질수록 많은 파랑에너지가 개구부측 비탈면을 통하여 천단상으로 유입됨으로써 쇄파점수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편 허동수와 이우동(2008b)은 잠제의 개구율(W/L_r)이 커질수록 많은 파랑에너지가 개구부를 통하여 잠제 중앙배후에서 중첩되어 정선에서 처오름 높이가 상승한다고 보고하고 있으며, 이에 비추어 보면 개구율(W/L_r)이 커짐에 따라 많은 파랑에너지가 잠제 중앙배후로 유입되어 높은 파고가 형성되기 때문에 정선부근에서 쇄파점이 분포하는 것을 알 수 있다.

잠제의 평면배치에 따른 잠제 주변의 쇄파점분포특성은 개구율(W/L_r)에 따라 즉, 개구부를 통해 유입되는 파랑에너지의 차이에 의해 천단상 및 정선부근에서의 쇄파점분포가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 수심이 일정한 해역에서 잠제의 제원 및 개구율(W/L_r)이 동일할 경우 이안거리(Y/L_i)에 따른 잠제의 천단상 쇄파점분포는 거의 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 잠제의 제원 및 평면배치에 따른 잠제 주변의 쇄파특성에 대하여 논의하기 위하여 3차원 수치해석기법인 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)를 이용하였다. LES-WASS-3D의 검증을 위하여 쇄파조건식(고다, 1975)의 계산결과와 비교·검토하여 그 타당성을 확인한 후 수치시뮬레이션을 실시하였으며, 주요결과를 기술하면 다음과 같다.

(1) 잠제의 천단상에서는 수심 감소에 의한 파랑의 비선형성이 강해짐에 따라 빠른 흐름이 나타나며, 제간부 천단상에서는 잠제의 법선방향 흐름이 우세하게 나타나는 반면에 제두부에서는 외해로부터 유입되는 파랑과 개구부측 비탈면에 의해 굴절된 파랑이 중첩되어 쇄파가 발생함에 따라 흐름이 잠제 배후로 약간 경사지게 향하는 경향을 나타낸다.

(2) 잠제의 x-z단면에서의 자유수면형의 분포특성은 제간부($y/L_i = -0.75$)에서는 쇄파 및 투과성에 의한 에너지감쇠의 영향으로 파고 감소가 뚜렷이 나타나지만, 제두부측($y/L_i = -0.33$)에서는 개구부측 비탈면에 의한 굴절의 영향으로 인하여 파랑에너지가 지속적으로 유입됨에 따라 파고 감소가 완만한 경향을 나타낸다.

(3) 잠제 천단상에서의 쇄파점분포특성은 제간부에 비해 제두부에서 개구부측 비탈면에 의한 굴절된 파랑과 진행파가 중첩되어 연쇄적인 쇄파로 인하여 천단상의 폭 방향으로 넓은 범위에 걸쳐 많은 쇄파점이 분포한다.

(4) 잠제 제원에 따른 쇄파점분포특성은 잠제의 천단수심이 낮을수록, 천단폭이 넓을수록, 제장이 길수록, 비탈면경사가 완만할수록 잠제 상에서 많은 쇄파점이 존재한다.

(5) 잠제의 평면배치에 따른 잠제 주변의 쇄파점분포특성은 개구율(W/L_r)에 커질수록 개구부를 통해 천단상과 배후로 유입되는 파랑에너지가 증가함에 따라 천단상 및 정선부근에서 쇄파점수가 증가한다. 또한 이안거리(Y/L_i)에 따른 잠제 천단상에서의 쇄파점분포는 거의 유사하게 나타난다.

이상과 같은 결과에 근거하여 잠제의 제원 및 평면배치를 통한 천단상의 쇄파특성을 주의 깊게 파악한 후, 실 현장의 설계에 반영한다면 보다 효율적인 파랑제어 구조를 가지면서 주변 흐름의 제어가 가능한 잠제의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

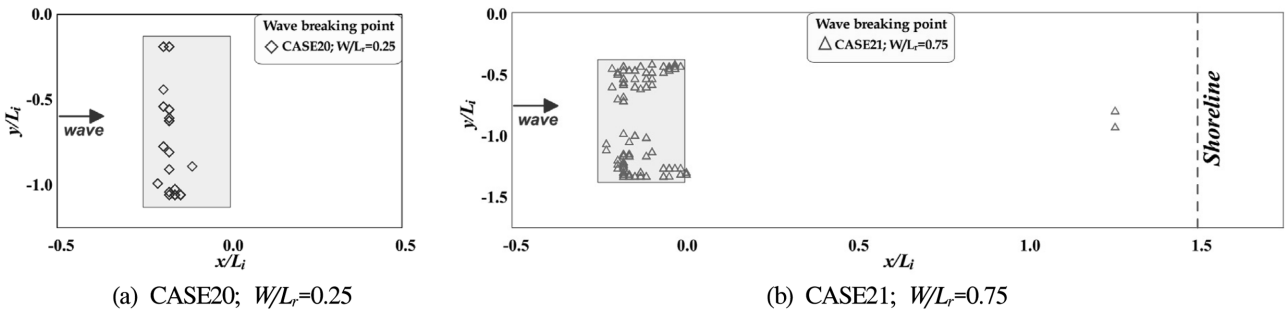


Fig. 8 Spatial distribution of wave breaking points due to variation of opening ratio

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(No. 2009-0083920).

참 고 문 헌

- 고다요시미 (1975). "천해역에 있어서 파랑의 쇠파변형", 일본항만기술연구소보고, 제14권, 제3호, pp 59-106.
- 이우동, 허동수, 박종배, 안성욱 (2009). "해빈경사에 따른 잠제 개구부의 3차원적인 흐름특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제23권, 제1호, pp 7-15.
- 허동수, 이우동 (2007). "잠제 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART I-해빈이 없을 경우", 대한토목학회논문집, 제27권, 제6B호, pp 689-701.
- 허동수, 이우동 (2008a). "잠제 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART II-해빈이 있을 경우", 대한토목학회논문집, 제28권, 제1B호, pp 115-123.
- 허동수, 이우동 (2008b). "잠제 설치 연안의 처오름 높이 특성; PART I-잠제의 평면배치에 의한 영향", 대한토목학회논문집, 제28권, 제3B호, pp 345-354.
- 허동수, 이우동 (2008c). "잠제 설치 연안의 처오름 높이 특성; PART II-잠제의 제원에 의한 영향", 대한토목학회논문집, 제28권, 제4B호, pp 429-439.
- 허동수, 이우동, 배기성 (2008). "사각격자체계 수치모델에서의 경사면 처리기법에 관하여", 대한토목학회논문집, 제28권, 제5B호, pp 591-594.
- Brossard, J. and Chagdali, M. (2001). "Experimental Investigation of the Harmonic Generation by Waves over a Submerged Plate", Coastal Eng., Vol 42, pp 277-290.
- Calabrese, M., Buccino, M. and Pasanisib, F. (2008). "Wave Breaking Macrofeatures on a Submerged Rubble Mound Breakwater", J. of Hydro-environment Res., Vol 1, pp 216-225.
- Ergun, S. (1952). "Fluid Flow Through Packed Columns", Chem Eng., Vol 48, No 2, pp 89-94.
- Goda, Y. (1974). "New Wave Pressure Formulae for Composite Breakwater", Proc. of the 14th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp 1702-1720.
- Grue, J. (1992). "Nonlinear Water Waves at a Submerged Obstacle or Bottom Topography", J. of Fluid Mech., Vol 244, pp 455-476 (Cambridge Univ. Press).
- Hattori, M. and Sakai, H. (1994). "Wave Breaking over Permeable Submerged Breakwaters", Proc. of the 24th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp 1101-1114.
- Kawasaki, K. and Iwata, K. (2001). "Wave Breaking-Induced Dynamic Pressure due to Submerged Breakwater", Proc. of the 11th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp 488-494.
- Liu, S. and Masliyah, J.H. (1999). "Non-linear Flows in Porous Media", J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol 86, pp 229-252.
- 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. Mon. Weath", Rev., Vol 91, No 3, pp 99-164.
- Takikawa, K., Yamada, Y. and Matsumoto, K. (1997). "Internal Characteristics of Breaking Waves over Submerged Breakwaters", Proc. of the 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp 192-199.
- van Gent, M.R.A. (1995). Wave Interaction with Permeable Coastal Structures, Ph.D. Thesis, Delft Univ., The Netherlands.
- Yamashiro, M., Yoshida, A. and Irie, I. (1999). "Experimental Study on Wave Field Behind a Submerged Breakwater", Proc. of the Coastal Structures '99, ASCE, pp 675-682.

2009년 8월 6일 원고 접수

2010년 2월 10일 심사 완료

2010년 2월 18일 게재 확정