

파랑과 흐름의 상호간섭에 의한 파랑변형특성에 관하여

On Characteristics of Wave Deformation due to Wave-Current Interaction

허동수¹, 이우동²
 Dong Soo Hur¹ and Woo Dong Lee²

1. 서 론

우리가 접하고 있는 연안역은 해류, 조류, 연안류, 이안류, 등과 같은 흐름이 끊임없이 발생하고 있을 뿐만 아니라 하구에서는 육지로부터의 담수가 끊임없이 유입됨에 따라 항상 흐름이 존재하게 된다. 이들 흐름들은 파랑과 활발한 상호작용을 하게 되며, 이로 인하여 파랑변형, 평균수위 변화 등과 같은 수리적 특성을 나타내기도 하지만, 나아가 저질이동기구에도 영향을 미치게 된다. 이에 파랑-흐름의 상호작용에 관한 메커니즘을 파악하기 위해 많은 연구들이 수행되었다.

파랑-흐름의 상호작용에 관한 연구들은 대부분 2차원적인 수리모형실험(岩崎와 佐藤, 1971; Sakai and Saeki, 1984; 김경호 등, 2008) 및 2차원 수치모형실험(Chen et al., 1998; Mizutani et al., 2002; Mase et al., 2004)이 이루어져 왔다. 최근 들어 Lee(2006)는 3차원적인 수리모형실험 및 수치모형실험을 통하여 파랑-흐름의 상호작용에 관한 메커니즘에 대해 고찰하였다. 하지만 파랑-흐름의 상호작용에 관한 메커니즘을 명확히 하기에는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 LES-WASS-2D(허동수와 최동석, 2008)를 이용하여 2차원적인 파랑-흐름의 상호작용의 메커니즘을 명확히 한 후, LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)를 이용하여 파랑-흐름의 3차원적인 상호작용에 관한 메커니즘을 파악하는 것을 목적으로 한다.

2. 수치해석기법

본 연구에서 이용된 2차원 및 3차원 수치모델은 각각 LES-WASS-2D(허동수와 최동석, 2008), LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)를 이용하였고, 3차원 수치모델인 LES-WASS-3D의 기초방정식에 대한 상세한 내용은 지면의 제약 상 허동수와 이우동(2007)을 참조하기 바람이며 기초방정식에 대한 내용은 다음에 설명하는 2차원 수치모델인 LES-WASS-2D의 기초방정식을 3차원으로 확장한 형태를 취한다.

2차원 기초방정식은 무반사 조파를 위한 조파 원천항이 포함된 연속방정식 (1)과 투수성구조물 내에서의 유체저항을 도입한 수정된 Navier-Stokes 운동방정식 (2), (3) 및 자유표면을 모의하기 위한 VOF함수(Hirt and Nichols, 1981)의 이류방정식 (4)로 구성된다. 그리고 식 (5)의 q^* 는 조파소스의 유량밀도이다.

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

$$\gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + w \frac{\partial(\gamma_z u)}{\partial z} \quad (2)$$

$$= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_t \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \right]$$

$$- M_x - D_x - F_x$$

1 국립경상대학교 해양과학대학 해양토목공학과 부교수
 2 일본나고야대학 공학연구과 사회기반공학전공 박사과정

$$\gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x w)}{\partial x} + w \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} \quad (3)$$

$$= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_t \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \right]$$

$$-M_x - D_x - F_x - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \gamma_v g - \beta w$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z Fw)}{\partial z} = Fq^* \quad (4)$$

$$q^* = \begin{cases} q(z,t)/\Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (5)$$

여기서, u, w 는 x, z 방향의 속도성분, γ_v 는 체적공극율(Volume porosity), γ_x, γ_z 는 x, z 방향에 대한 면적투과율(Surface permeability)을 나타내며, β 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 파랑감쇠계수이다. 또한, ν_t 는 동점성계수와 와동점성계수의 합을 의미한다.

q^* 는 식 (5)로 표현되는 조파소스의 유량밀도로서 $x \neq x_s$ 의 위치에서는 0으로 주어지며, 안정적인 조파를 위해 계산시작 후 3주기 동안 점차적으로 증가시켜 3주기 이후부터는 일정하게 조파한다. 이러한 조파조건은 식 (6)에 나타낸 바와 같다.

$$q(z,t) = \begin{cases} \{1 - \exp(-2t/T_i)\} 2U_0(\eta_0 + h)/(\eta_s + h) & : t/T_i \leq 3 \\ 2U_0(\eta_0 + h)/(\eta_s + h) & : t/T_i > 3 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 t 는 계산시간, T_i 는 입사주기, h 는 초기수심, η_s 는 조파소스에서의 수위변동을 나타내며, U_0 와 η_0 는 각각 Stokes 3차 파에 의한 x 방향의 속도 및 수위의 시간변화를 의미한다.

또한, 식 (2), (3)에서 M_x, M_z 는 관성저항(Sakakiyama and Kajima, 1992), D_x, D_z 는 층류저항(Liu and Masliyah, 1999), F_x, F_z 는 난류저항(Ergun, 1952)을 의미한다.

3. 해석결과

3.1 수치파동수조 및 입사조건

본 연구에서는 파랑-흐름의 상호작용에 관한 메커니즘을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 2차원 수치파동수조 및 Fig. 2와 같은 3차원 수치파동수조를 이용하였다. 무반사조파 및 재반사를 방지하기 위해

조파소스(조파원천) 및 부가감쇠영역을 설치하였다. 수심 $h=40\text{cm}$ 해역에서 입사파랑조건으로 파고 $H_i=4, 8\text{cm}$, 주기 $T_i=1.0, 1.2, 1.5\text{sec}$ 의 규칙파를 조파하였고, 흐름은 $U_i=2, 5\text{cm/sec}$ 로 모든 수심에 대해서 일정한 흐름을 발생시켰다.

Table 1. Incident wave conditions

Wave		Current	CASE
Height	Period	Speed	
$H_i(\text{cm})$	$T_i(\text{sec})$	$U_i(\text{cm/sec})$	
4	1.0	-	1
	1.2		2
	1.5		3
-	-	2	4
			5
			6
4	1.0	2	7
	1.2		8
	1.5		9
8	1.0	2	10
	1.2		11
	1.5		12
4	1.0	5	13
	1.2		14
	1.5		15

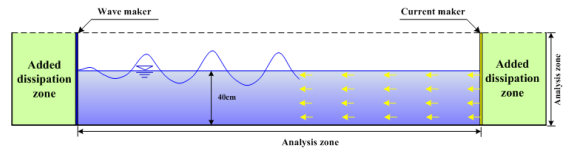


Fig. 1. Definition sketch of 2-D numerical wave basin

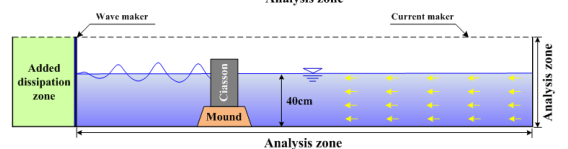
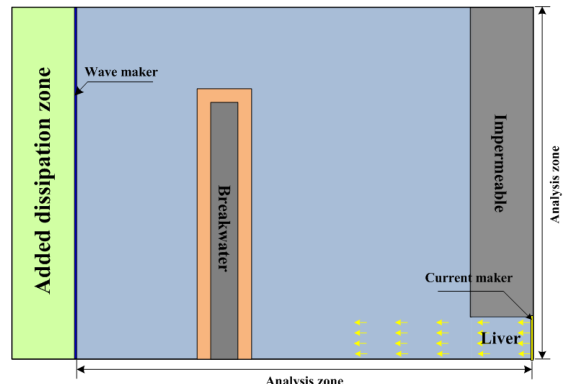


Fig. 2. Definition sketch of 3-D numerical wave basin

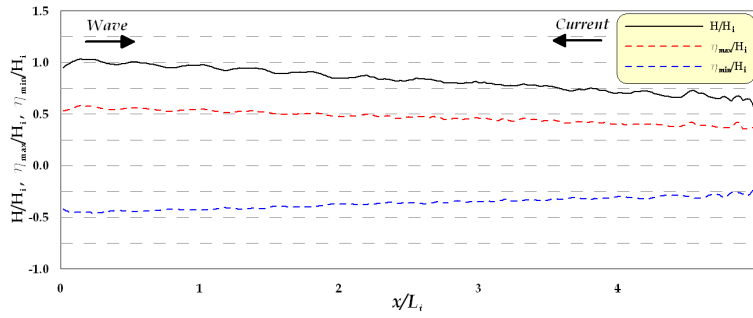


Fig. 3. Spatial distributions of wave height according to wave-current interaction(CASE14)

3.2 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고분포

Fig. 3은 $H_1=4\text{cm}$, $T_1=1.2\text{sec}$ 의 파랑조건에 $U_1=5\text{cm/sec}$ 의 흐름의 상호작용에 의한 파랑변형을 나타내고 있다. 여기서 —은 파고(H/H_1), - -는 최대수위(η_{\max}/H_1), - -는 최소수위(η_{\min}/H_1)를 각각 나타내고 있다.

Fig. 3으로부터 입사파랑이 진행함에 따라 파랑-흐름과의 상호간섭의 영향으로 파고가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 또한 최대수위는 하강하는 반면 최소수위는 상승하는 경향을 나타내고 있다. 이는 파랑-흐름과의 상호작용에 있어서 상대적으로 흐름이 강한 정수면 아래부분에서 파랑에너지의 감쇠가 많은 것을 알 수 있다.

3.3 파랑-흐름 상호작용에 의한 흐름분포

Fig. 4는 $H_1=4\text{cm}$, $T_1=1.2\text{sec}$ 의 파랑조건에 $U_1=2\text{cm/sec}$ 의 흐름의 상호작용에 의한 유속분포 및 자유수면형을 나타낸 것이다.

Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 파랑-흐름과의 상호작용에 의해서 파봉부분에서는 유속이 상쇄되는 경향을 나타내는 반면에 파곡부분에서는 유속이 증폭되는 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

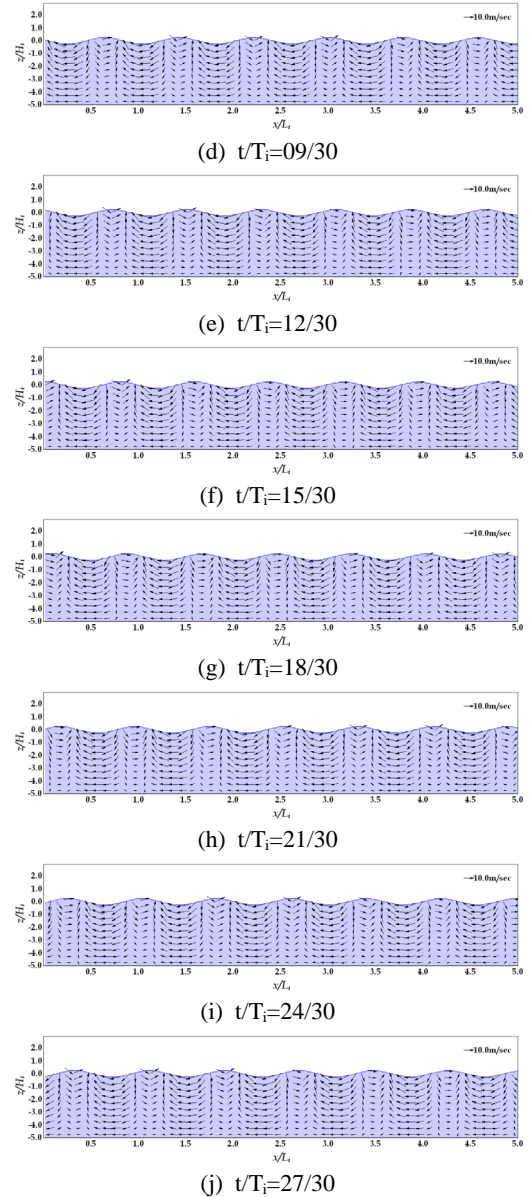
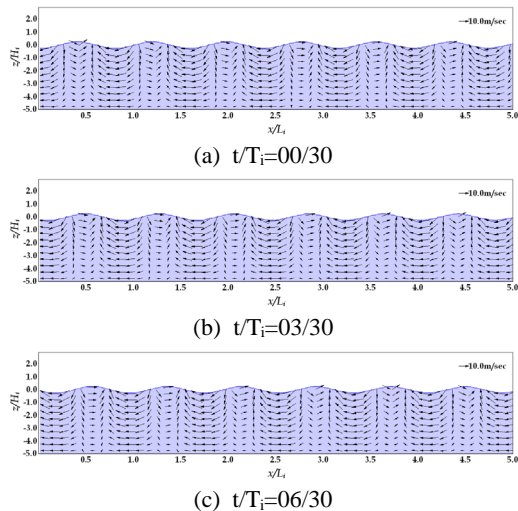


Fig. 4. Time-variation of velocity and free surface elevation according to wave-current interaction (CASE8)

지면의 제약상 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형특성에 대한 상세한 내용에 대해서는 학술대회에서 발표하기로 한다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형특성을 파악하기 위하여, 먼저 LES-WASS-2D(허동수와 최동석, 2008)를 이용하여 2차원적인 파랑-흐름의 상호작용에 대한 메커니즘을 명확히 한 후, LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)를 이용하여 파랑-흐름의 3차원적인 상호작용에 관한 메커니즘을 파악하였다.

그 결과 파랑이 진행함에 따라 파랑-흐름의 상호작용에 의해서 파고가 감소하였으며, 또한 파랑-흐름과의 상호작용에 의해서 파봉부분에서는 유속이 상쇄되는 경향을 나타내는 반면에 파곡부분에서는 유속이 증폭되는 현상이 나타난다.

참고문헌

김경호, 이호진, 김완식. (2008). 파랑과 정상흐름이 공존역에서 해저관로 주변의 국부세굴. 한국해양 · 해양공학학회논문집, 20(5), 510-521.

허동수, 이우동. (2007). 잠제 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART I-해빈이 없을 경우. 대한토목학회논문집, 27(6B), 689-701.

허동수, 최동석. (2008). 투과성 잠제의 비탈면경사가 주변 파동장에 미치는 영향. 대한토목학회 논문집, 28(2B), 249-259.

Chen, Q., Madsen, P.A., Schäffer, H.A. and Basco, D. R. (1998). Wave-current interaction based on an enhanced Boussinesq approach. Coastal Eng., 33, 11-39.

Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. Chem Eng., 48(2), 89-94.

Hirt, C.W. and Nichols B.D. (1981). Volume of field (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Coastal. Eng., 39, 201-255.

Lee, K.H. (2006). A study on time domain analysis of nonlinear dynamic interaction among waves, currents and bed materials. Ph.D. Thesis, Nagoya University The Japan.

Liu, S. and Masliyah, J.H. (1999). Non-linear flows in porous media. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 86(1), 229-252.

Mase, H., Yuhi, M., Amamori, H. and Takayama, T. (2004). Phase averaging wave prediction model with breaking and diffraction effects in wave-current coexisting field. Annual Journal of Coastal Eng., JSCE, 51, 6-10 (in Japanese).

Mizutani, N., Hur, D.S. and Maeda, Y. (2002). Numerical analysis of nonlinear wave-current interaction in side harbor. Proceedings of Coastal Eng, JSCE, 49, 51-55 (in Japanese).

Sakai, S. and Saeki, H. (1984). Effects of opposing current on wave transformation on slopping seabed. Proceedings of 19th International Conference on Coastal Eng., ASCE, 1219-1232.

Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater. Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, 1517-1530.

Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equation. Mon. Weath. Rev. 91(3), 99-164.

van Gent, M.R.A. (1995). Wave interaction with permeable coastal structures. Ph.D. Thesis, Delft University The Netherlands.