

운하에서 파랑 · 흐름 · 항주파의 상호작용에 의한 처오름 특성

허동수* · 이우동** · 정광호***

*국립경상대학교 해양토목공학과(해양산업연구소)

**국립경상대학교 해양산업연구소

***부산대학교 조선해양공학과

Wave Run-up Characteristics of Ocean Wave, Current, and Kelvin Wave Interaction in the Canal

Dong-Soo Hur*, Woo-Dong Lee** and Kwang Hyo Jung***

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

**Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

***Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wave Run-up 처오름, Kelvin wave 항주파, Wave-current-Kelvin wave interaction 파랑-흐름-항주파의 상호작용, Revetment 호안, Canal 운하

ABSTRACT: The numerical simulation using LES-WASS-3D is developed to investigate the wave run-up on the revetment along the canal. Interaction of ocean wave, current, and Kelvin wave is investigated on 40 conditions varying the number of ship, cruising direction, and relative cruising location of ships, when a 650TEU container cruises in the canal. The mean wave run-up heights on the revetment are compared for every simulated conditions. The largest height of wave run-up is generated at the C-pair condition and the wave run-up generated at the canal entrance is larger than that at the inside canal. When Kelvin waves is interacted with the current, the mean wave run-up height is increased approximate 10% compared with no current condition.

1. 서 론

우리나라 최초의 운하로서 경인 아라뱃길이 2011년에 인천 서구 오류동(서해)과 서울 강서구 개화동(한강)을 잇는 총 18km 구간이 개통되었다. 여기에 김포터미널부터 여의도를 잇는 총 15km 구간의 서해뱃길 사업이 추진되었다가 현재 답보상태이지만, 이 두 사업이 완료되면 서해와 한강 잇는 총 33km의 뱃길이 조성되어 화물선, 크루즈선 등이 서해로부터 여의도까지 운항될 전망이다.

운하에서의 동수학적 특성은 운하의 흐름과 선박의 운항에 의해 발생하는 항주파의 상호간섭이 절대적이라고 할 수 있다. 그리고 운하의 출입구는 바다와 연결되어 있으므로 외해로부터의 풍파로부터 자유롭지 못하기 때문에 이곳은 운하의 흐름, 항주파 그리고 파랑과의 상호간섭이 발생하는 지역이다. 따라서 운하의 수로뿐만 아니라, 운하의 출입구의 동수학적 특성을 파악하기 위해서는 파랑-흐름-항주파와의 상호작용을 해석하는 것이 매우

중요하다고 할 수 있다.

항주파의 발생원리 및 전파양상에 관하여 예전부터 많은 연구자들에 의해서 다양한 연구들이 이루어졌다. 항주파의 물리적인 메커니즘에 대한 분석은 Kelvin(1887)에 의해 처음으로 시도되었으며, Kelvin(1887)과 Havelock(1908)는 항주파의 전파각에 대한 특성을 파악하였다. 또한 모형선박을 이용한 다양한 실험들(Johnson, 1968; Sorensen, 1969; Newman, 1977)과 실험을 통한 항주파산정식을 제안하였다(Sorensen and Weggel, 1984). 근래에 와서는 컴퓨터의 발달과 더불어 수치모델을 이용한 연구들을 수행하고 있으며, 이들 대부분의 연구는 환경사방적식이나, Boussinesq 방정식(Jiang et al., 2002; Shin and Jeong, 2003; Kim et al., 2008) 등과 같은 적분방정식을 이용하는 평면 2차원 모델을 이용하고 있다. 최근에는 상업용 3차원 수치모델인 FLOW-3D[®]의 툴을 이용한 항주파의 수치모델(Kang et al., 2008; Kim, 2009)가 이루어지기도 하며, 이상의 연구들은 항주

Received 17 June 2013, revised 23 July 2013, accepted 12 August 2013

Corresponding author Kwang Hyo Jung; +82-51-510-2343, kjung@pusan.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of CIVIL EXPO 2011.

파만을 대상으로 하고 있다. 최근에는 대형선박이 운항하는 하천에서 항주파에 의한 침식 및 구조물의 피해사례에 관한 현장 조사가 수행되기도 하였다(Althage, 2010).

하지만 실제 해역에서는 항주파와 파랑 그리고 운하에서는 항주파와 흐름이 공존한다. 게다가 운하의 입·출구에서는 항주파와 흐름 그리고 파랑이 공존하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 파랑-흐름-항주파가 공존하는 운하의 출입구를 대상 지역으로 새롭게 항주파의 조파방법을 개발 및 검증을 수행한 Lee and Hur (2011a)의 3차원 수치모델을 이용하여 운하의 호안에서 파랑-흐름-항주파의 비선형 상호작용에 의한 처오름 높이에 관하여 논의하는 것을 목적으로 한다.

2. 수치해석방법

본 연구에서는 운하에서 파랑-흐름-항주파의 비선형 상호작용을 해석하기 위하여 비압축성 점성유체를 고려하고 있는 기존의 3차원 동수학적 모델(Lee and Hur, 2007)을 개량하여 경사입사파(Lee and Hur, 2011b) 및 항주파(Lee and Hur, 2011a)의 재현이 가능한 수치모델에 일정한 흐름을 발생시킬 수 있는 흐름소스를 새롭게 적용한다.

2.1 LES-WASS-3D

LES-WASS-3D(Lee and Hur, 2011a)는 파랑, 항주파 및 흐름을 무반사로 발생시킬 수 있는 소스(Source)와 싱크(Sink)항이 포함된 연속방정식 식 (1)과 투과성 구조물에 의한 유체저항 항을 도입한 Navier-stokes 운동방정식 식 (2)~(4) 및 유체운동을 재현하기 위한 VOF(Volume of fluid)함수의 이류방정식 식 (5)로 구성된 강비선형의 3차원 N-S solver의 수치모델이다. 아울러 LES-WASS-3D는 3차원적 난류구조를 해석하기 위하여 LES의 SCS 모델(Sub-grid scale model; Smagorinsky, 1963)을 채택하고 있다. 투과성 매체의 유체저항으로서는 관성저항(Sakakiyama and Kajima, 1992), 난류저항(Ergun, 1952; van Gent, 1995) 그리고 층류저항(van Gent, 1995; Liu and Masliyah, 1999)을 고려한다.

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

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

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

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

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

$$q_x^* = q_{wx}^* + q_{sx}^* + q_{cx}^* \quad (6)$$

$$q_y^* = q_{wy}^* + q_{sy}^* + q_{cy}^* \quad (7)$$

$$q_{wx}^* = \begin{cases} q(y, z, t) \sin \theta / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (8)$$

$$q_{wy}^* = \begin{cases} q(x, z, t) \cos \theta / \Delta y_s & : y = y_s \\ 0 & : y \neq y_s \end{cases} \quad (9)$$

이상의 수식에서 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 파랑감쇠계수이다. 그리고 ν_t 는 유체의 동점성계수(ν)와 난류모델에 의해 산정된 와동점성계수(ν)의 합을 의미한다. 식 (5)의 F 는 일정한 값을 갖는 물리량 즉, 셀에서 유체의 체적율을 나타내고 1은 유체셀, 0은 기체셀 그리고 $0 < F < 1$ 은 자유수면 셀을 의미한다.

식 (1)~(5)에 포함되어 있는 q_x^* 와 q_y^* 는 x 와 y 방향으로 분리된 조파소스의 유량밀도로서 식 (6)~(7)와 같이 총합을 나타낸다. 여기서 파랑에 관한 유량밀도 식 (8)의 q_{wx}^* 와 식 (9)의 q_{wy}^* , 항주파에 관한 유량밀도 식 (24) q_{sx}^* 와 식 (25) q_{sy}^* 그리고 흐름에 관한 식 (26) q_{cx}^* 와 식 (27) q_{cy}^* 로 구분된다. 식 (6)~(7)에서 θ 는 입사파랑의 입사각을 의미한다. 또한 소스가 위치하지 않는 $x \neq x_s, y \neq y_s$ 에서는 유량밀도가 0으로 주어진다.

투과성구조물 내부의 유체저항으로서 M_x, M_y, M_z 는 관성저항, D_x, D_y, D_z 는 난류저항, E_x, E_y, E_z 는 층류저항을 나타낸다. 아울러 경계조건 및 안정조건 등에 관한 세부적인 수치해석기법에 대해서는 Lee and Hur(2007)을 참조할 수 있다.

2.2 항주파의 조파방법

2.2.1 항주파의 파장과 주기

본 연구에서 항주파의 파장과 주기는 일본항만설계기준에서 제시하는 산정방법을 이용하여 횡파(Transverse wave)의 파장(L_t)과 주기(T_t)를 식 (10)~(11)과 같이 산정한다.

$$\frac{g L_t}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L_t} = V_k^2 \quad (V_k < \sqrt{gh}) \quad (10)$$

$$T_t = \sqrt{\frac{2\pi}{g} L_t \coth \frac{2\pi h}{L_t}} \quad (11)$$

종파(Diverging wave)의 파장(L_d)과 주기(T_d)는 다음의 식

(12)~(13)와 같다.

$$L_d = L_t \cos^2 \alpha \quad (12)$$

$$T_d = T_t \cos \alpha \quad (13)$$

항주파의 최대 파향각(Cusp locus angle) α 는 Depth froude number(F_r) 식 (14)을 고려한 Weggel and Sorensen(1986)에 의해서 제안된 식 (15)을 이용한다.

$$F_r = \frac{V_k}{\sqrt{gh}} \quad (14)$$

$$\alpha = 35.27 \{1 - e^{-12(F_r - 1)}\} \quad (F_r \leq 1) \quad (15)$$

2.2.2 항주파의 파고

항주파고는 일본해난방지협회의 항주파 연구위원회에서 제안한 다음의 식 (16)~(22)을 이용하여 산정한다. 식 (14)~(20)에서 고려하고 있는 기호를 Table 1에 나타낸다.

$$H_0 = \left(\frac{L_s}{100}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{E_{HPW}}{2.2L_s V_K}} \quad (16)$$

$$E_{HPW} = E_{HP} - E_{HPF} \quad (17)$$

$$E_{HP} = 0.6 S_{HPm} \quad (18)$$

$$E_{HPF} = \frac{1}{1470} \rho S V_0^3 C_F \quad (19)$$

$$S \doteq 2.5 \sqrt{\nabla L_s} \quad (20)$$

$$C_F = \frac{0.075}{\left(\log \frac{V_0 L_s}{\nu} - 2\right)^2} \quad (21)$$

$$H_{\max} = H_0 \left(\frac{100}{S'}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{V_k}{V_K}\right) \quad (22)$$

2.3 항주파의 조파방법

항주파의 조파방법은 Lee and Hur(2011a)가 제안한 방법을 적용하며, Brorsen and Larsen(1987)이 제안된 조파방법은 양쪽 방향(x 의 +방향과 -방향)으로 파랑이 전파되기 때문에 좌우 대칭적인 항주파의 특성을 잘 재현할 수 있다.

항주파의 조파방법은 조파소스의 깊이는 자유수면부터 선박

의 흘수 깊이까지, 길이는 선박의 길이(L_s) 그리고 조파소스의 이동은 선박의 항해속도(V_k)와 동일하다. 여기서 선박의 운항방향 항주파의 위상차는 식 (12)에서 추정된 최대 파향각(Cusp locus angle) α 를 Takayama(1982)의 식 (23)에 대입하여 산정한다.

이상에서 산정된 최대 파향각(Cusp locus angle) α 를 식 (24)~(25)에 대입하고 식 (23)에 의한 격자간의 위상차 ϵ 를 선박운행 방향의 격자에 적용하여 항주파에 관한 각방향의 유량밀도를 계산한다. 여기서 식 (23)의 Δy_s 는 조파소스를 포함하고 있는 격자의 y 방향 격자크기, β 는 $90^\circ - \alpha/2$ 와 같다.

$$\epsilon = -\frac{2\pi}{L_i \sin \beta} \Delta y_s \cos \beta \quad (23)$$

$$q_{sx}^* = \begin{cases} q(y, z, t) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (24)$$

$$q_{sy}^* = \begin{cases} q(x, z, t) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) / \Delta y_s & : y = y_s \\ 0 & : y \neq y_s \end{cases} \quad (25)$$

2.4 흐름의 발생방법

흐름의 발생방법은 파랑 및 항주파의 조파방법과 유사하며, 일정한 유속 V_c 를 적용하여 식 (26)~(27)과 같이 흐름을 발생시킨다. 여기서 V_{cx} 과 V_{cy} 는 흐름의 각방향 유속성분을 나타낸다.

$$q_{cx}^* = \begin{cases} 2 V_{cx}(y, z, t) / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (26)$$

$$q_{cy}^* = \begin{cases} 2 V_{cy}(x, z, t) / \Delta y_s & : y = y_s \\ 0 & : y \neq y_s \end{cases} \quad (27)$$

2.5 수치수조 및 입사조건

본 연구에서는 파랑-흐름-항주파의 비선형 상호작용에 의한 호

Table 1 The symbols used in estimate of ship wave height

H_0	Ship wave height	L_s	Ship's length
V_K	Load cruising speed(kt)	E_{HPW}	Wave horsepower(W)
S_{HPm}	Maximum continuous rate(W)	ρ	Density
V_0	$0.5144 V_K$ (m/sec)	C_F	Coefficient of frictional resistance
∇	Load displacement.	H_{\max}	Maximum wave height
S'	Distance from track	V_k	Cruising speed(kt)
ν	Coefficient of kinematic viscosity		

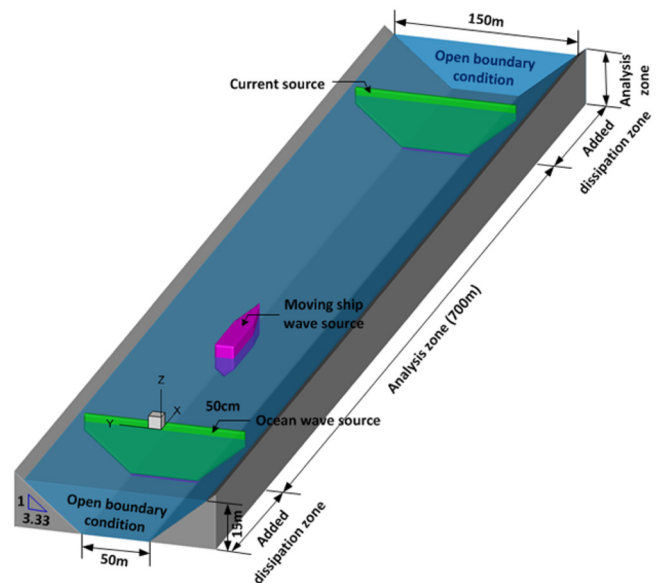


Fig. 1 Definition sketch of 3-D Numerical water tank including wave, current and ship wave

안에서의 처오름 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 1과 같은 3차원 수치수조를 적용한다. 해석영역의 운하 길이는 700m, 상부의 폭 150m, 하부의 폭 50m, 호안의 경사는 1:1.33이다. 또한 해석영역에는 총 3개의 소스를 포함하고 있으며, 파랑을 발생시키기 위한 조파소스, 흐름을 발생시키기 위한 흐름소스 그리고 항주파를 재현하기 위한 움직임은 조파소스로 나누어진다. 아울러 파랑과 흐름의 재반사를 방지하기 위하여 운하의 양끝에는 부가감쇠영역을 설치한다.

본 연구의 시뮬레이션에서 적용하는 선박은 경인 아라뱃길 굴포천 방수로 실시설계에 적용한 R/S II급 650TEU급 선박을 대상으로 하며 상세한 제원은 Table 1과 같다. 적용하는 선박에 의해 발생하는 항주파의 입사조건은 식 (11)~(22)에 의해 추정하여 Table 3에 나타낸다.

이상에서 얻어진 항주파의 입사조건과 파랑 그리고 흐름의 입사조건을 고려하여 시뮬레이션을 수행하며, 파랑-흐름-항주파의 상호작용에 관한 수치실험조건은 Table 4와 같다. 650TEU급의 컨테이너선이 10.7knots으로 운항하는 동안 호안에서의 처오름 높이를 측정하며, 이 때 하천의 흐름은 1.0m/sec이다. 선박의 운항방향은 운하로 들어오고, 바다로 나가는 조건과, 1척이 운항할 때와 2척이 운항할 때의 경우를 고려한다. 2척이 운항할 경우에 있어서 L-pair는 2척이 동일한 항로로 연이어 운항할 경우, C-pair는 교차 운항, P-pair는 평행하게 운항할 경우를 의미한다. 따라서 시뮬레이션은 파랑 및 흐름의 유입 그리고 선박의 운항 조건에 따라 파랑-흐름-항주파의 실험조건은 총 40경우이다.

Table 2 Principles of 650TEU container ship

Length(m)	135
Width(m)	21
Draft(m)	7.4
Displacement(m ³)	9720

Table 3 Kelvin wave and cruising conditions

Water depth	15.0m	
Cruising speed	10.7knots	
Transverse wave	Period(T_t)	3.52s
	Length(L_t)	19.38m
Diverging wave	Period(T_d)	3.32s
	Length(L_d)	17.27m
Height(H_0)	1.44m	

Table 4 Numerical simulation conditions

Ocean wave	Current	Kelvin waves			Cruising condition	
		H_{si}	T_{si}	L_{si}		
H_i	T_i	V_c	H_{si}	T_{si}	L_{si}	
(m)	(sec)	(m/sec)	(m)	(sec)	(m)	
1.5	5	1.0	1.44	3.22	17.27	solo inward L-pair outward C-pair P-pair

3. 해석결과

3.1 수면형의 분포특성

Fig. 2는 선박의 운항조건에 따른 운하에서의 수면형을 나타낸 것으로 Fig. 2 (a)는 1척의 선박이 운항, Fig. 2 (b)~(e)는 2척의 선박이 운항하는 경우이다. 여기서 Fig. 2 (a) solo와 Fig. 2 (b) L-pair는 운하의 중앙으로 Fig. 2 (a)는 1척이 입항할 경우, Fig. 2 (b)는 2척의 선박이 시간차이를 두고 입항할 경우이다. Fig. 2 (c) C-pair와 Fig. 2 (d)와 Fig. 2 (e)의 P-pair는 2척의 선박이 양측 호안으로부터 운하 폭의 1/3만큼 떨어진 지점을 각각 항로로서 이용하고 있으며, Fig. 2 (c)는 입항하는 1척의 선박과 출항하는 1척의 선박이 교차하는 경우, Fig. 2 (d)는 2척의 선박이 나란히 입항하는 경우, Fig. 2 (e)는 2척의 선박이 시간차를 두고 입항하는 경우이다.

Fig. 2로부터 운하에서 선박이 운항할 경우 항주파에 의해서 수면이 교란되는 것을 알 수 있을 뿐만 아니라 선박의 운항조건에 따라 상이한 수면형 분포를 나타낸다. 특히 1척의 선박이 운항하는 Fig. 2 (a) solo의 경우에 비하여 2척이 운항하는 Fig. 2 (b)~(d)의 경우가 항주파간의 상호작용에 의해서 더 복잡한 수면형을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 이와 같이 형성된 수면형은 호안의 처오름 특성에 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3.2 항주파에 의한 처오름 높이의 특성

$$\eta_{\max} = \frac{1}{5L_{si}} \int_{-2.5L_{si}}^{+2.5L_{si}} \max\{\eta(t)\} dx \quad (28)$$

Fig. 3은 운하의 호안 중심의 정선에서 $\pm 2.5L_{si}$ 구간의 평균 최대처오름 높이를 식 (28)을 이용하여 산정하며, 그래프는 선박의 운항조건에 따라 항주파의 입사파고로 무차원화하여 나타낸다. 여기서 solo는 1척의 선박이 운항하는 경우(Fig. 2 (a) 참조), L-pair는 동일한 항로로 2척의 선박이 입항하는 경우(Fig. 2 (b) 참조), C-pair는 2척의 선박이 운하의 가운데에서 교차하는 경우(Fig. 2 (c) 참조), P-pair1(at the same time)는 2척의 선박이 같은 시간에 평행한 항로로 진입하는 경우(Fig. 2 (d) 참조), P-pair2(with same lag) 2척의 선박이 시간차를 두고 평행하게 항로로 진입하는 경우(Fig. 2 (e) 참조)의 평균 최대수위를 나타낸다.

Fig. 3으로부터 항주파간의 상호 간섭으로 인하여 1척의 선박이 운항하는 Fig. 2 (a)의 경우보다 2척의 선박이 운항하는 Fig. 2 (b)~(e)의 경우가 호안에서의 처오름이 크게 나타낸다. 그리고 교차운항할 경우(C-pair)에서는 선박의 교차지점에서 상반되는 항주파간의 상호작용에 의해서 가장 높은 처오름 높이를 나타내는 반면에 같은 방향의 항주파간의 상호작용에서는 그 효과가 반감되어 선박이 교차하는 C-pair의 경우보다 낮은 처오름 높이를 보인다. 이와 같은 결과를 미루어 보아 운하에서 선박이 1척 운항할 때 보다 2척이 동시에 운항할 경우 연안의 처오름에 미치는 영향이 매우 커지는 것을 알 수 있다.

3.3 흐름-항주파의 상호작용에 의한 처오름 높이의 특성

Fig. 4는 운하의 흐름과 항주파의 상호작용에 의한 평균 최대

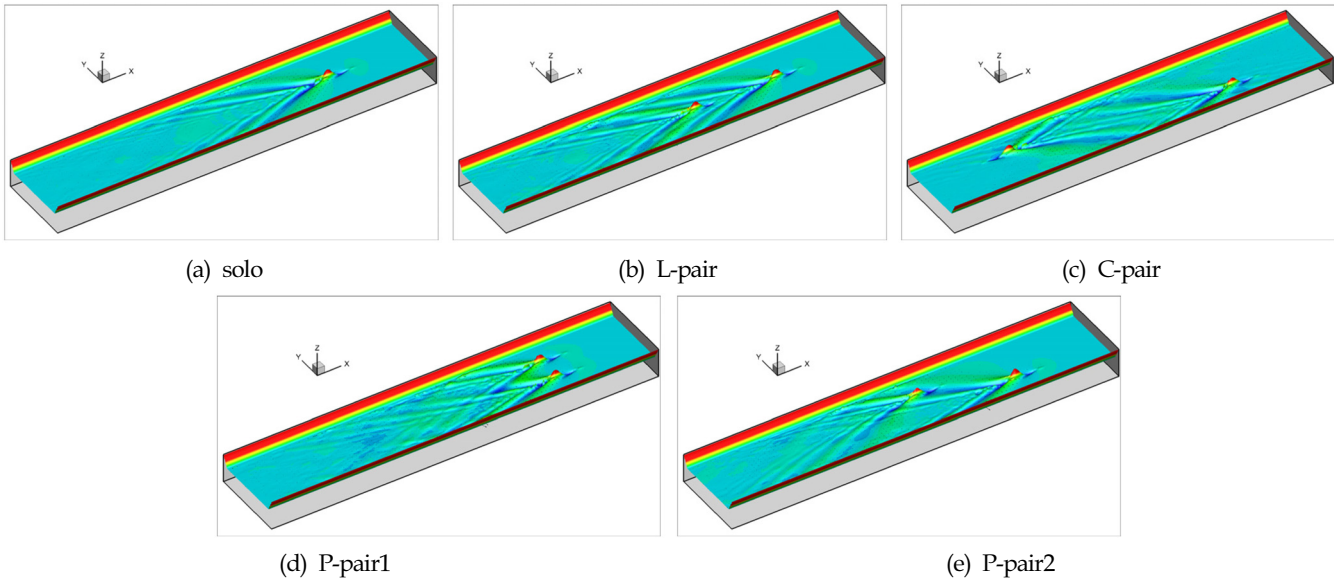


Fig. 2 Ship cruising conditions of numerical simulation

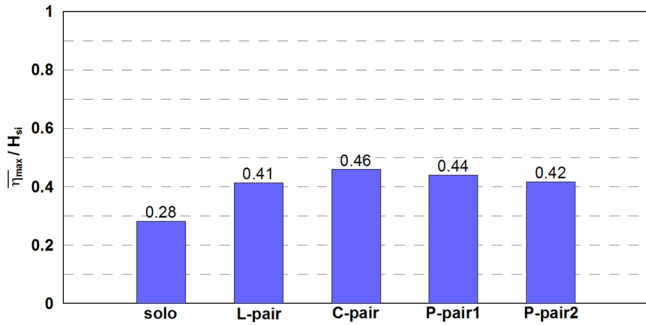


Fig. 3 Mean wave run-up heights due to Kelvin wave in the canal

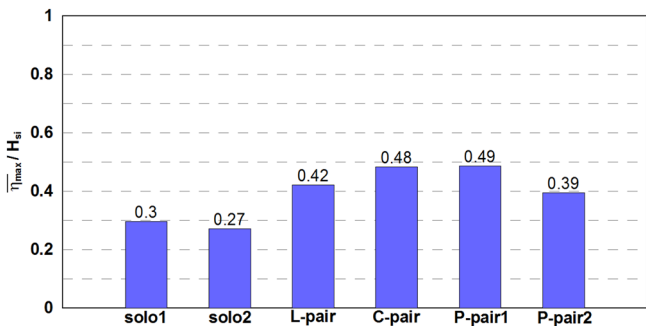


Fig. 4 Mean wave run-up heights of the current and Kelvin wave interaction in the canal

처오름 높이를 나타낸 것으로 그래프는 항주파의 입사파고로 무차원화하여 표현한다. 여기서 solo는 2가지 경우로 구분되며 solo 1은 선박이 운하로 입항하는 경우, solo 2는 선박이 외해로 출항하는 경우이다. 그리고 나머지 경우는 선박이 모두 운하로 입항하는 Fig. 3의 경우와 동일하다.

Fig. 4로부터 흐름과 항주파간의 상호작용에 의한 처오름 높이가 분포는 흐름이 없는 경우의 결과인 Fig. 3과 유사한 경향을

나타내고 있다. 그리고 흐름과 항주파의 작용방향에 따라 처오름 높이가 약간 차이를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 일반적으로 파랑과 흐름의 상호작용이 순방향(0°) 또는 역방향(180°)일 경우에는 이에 대한 동수학적 특성의 차이를 쉽게 찾을 수 있으나, 본 연구와 같이 해양으로부터의 파랑이 아닌 항주파일 경우에는 흐름에 대해 경사로 입사하는 경사입사파와 유사하게 취급하여야 하며, 경사입사파와 흐름과의 상호교차각에 따른 Lee et al.(2011)의 결과에 따르면 파랑과 흐름의 상호작용 하에서는 파랑의 흐름과의 교차각이 직각(90°)에 가까워질수록 흐름에 의한 파랑변형의 효과가 감소한다고 보고하고 있으며, 이것으로서 흐름과 항주파의 상호작용에 대한 Fig. 4의 특성을 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 파랑-항주파의 상호작용에 의한 처오름 높이의 특성

Fig. 5는 운하의 출입구에서 파랑-항주파의 상호작용에 의해 나타나는 평균 최대처오름 높이 분포로서 항주파의 입사파고로 무차원화하여 나타낸다. 여기서 외해에서 유입되는 파랑은 파고(H_i) 1.0m, 주기(T_i) 5.0sec이고, 선박의 운항조건은 전술한 Fig. 4와 동일하다.

Fig. 5로부터 운하의 출입구에서는 외해로부터 파랑이 운하로 유입됨에 따라 운하 내부의 호안 처오름특성을 논의하고 있는 Fig. 3와 Fig. 4의 경우에 비해 호안(운하 출입구 부근)에서 처오름이 크게 발생한다. 또한, 3.2절에서 전술한 것과 같이 1척의 선박이 운항할 경우에 비해 2척의 선박이 운항할 때 처오름이 커지며, 2척의 선박이 교차운항 할 경우에는 처오름 높이가 더욱 높아진다.

3.5 파랑·흐름·항주파의 상호작용에 의한 처오름 높이의 특성

Fig. 6은 운하의 출입구에서 해양의 파랑, 운하에서의 흐름 그리고 선박에 의해 발생하는 항주파와의 상호작용에 의해 나타나는 최대 평균 처오름 높이 분포이다. 여기서 처오름 높이는

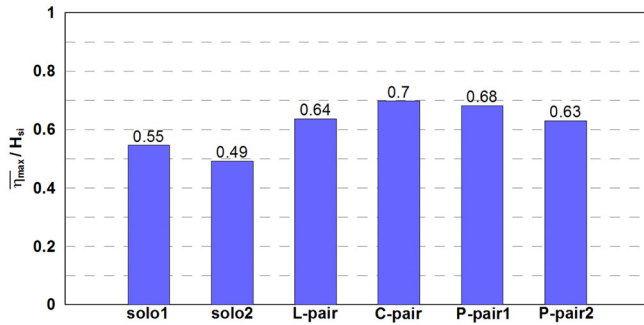


Fig. 5 Mean wave run-up heights due to the ocean wave and Kelvin wave interaction at the canal entrance

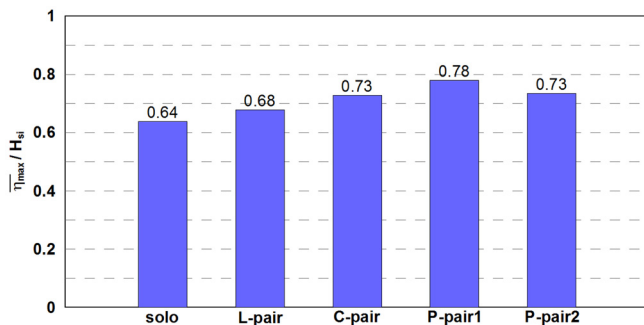


Fig. 6 Mean wave run-up heights due to the interaction of ocean wave, current, and Kelvin wave at the canal entrance

항주파의 입사파고로 무차원화하여 표현하고 있으며 흐름 및 파랑의 제원은 Table 4에 나타내고 있다.

Fig. 6으로부터 운하의 출입구에서는 파랑-흐름-항주파의 상호작용에 의한 초오름 높이가 Fig. 5의 파랑-항주파의 상호작용에 의한 결과에 비해 약 10% 전후로 상승하는 경향을 나타낸다. 이 결과는 Fig. 4의 흐름-항주파의 상호작용에 의한 결과와 Fig. 3의 항주파에 의한 결과와의 비교에서는 찾아볼 수 없는 결과(흐름에 의한 영향이 경미함)로서 Fig. 6의 경우에는 파랑, 흐름 및 항주파의 3가지 물리력이 비선형 상호작용에 의해 더욱 복잡한 유체 운동이 발생하여 나타나는 현상으로 판단되며, Fig. 3과 Fig. 4에서 흐름의 존재 유무에 따른 차이가 그다지 커지 않은 것을 감안하면 Fig. 5와 Fig. 6의 차이는 운하 출입구로 전파되는 파랑과 운하의 흐름과의 상호작용이 상당한 영향을 미친 것으로 판단된다.

이상의 해석결과를 근거로 Althage(2010)이 보고하고 있는 것과 같이 운하에서 호안 부근의 피해를 저감시키기 위해서는 선박의 운항 척수, 운항 간격, 항로 그리고 운하의 구역별 수리특성을 고려한 설계가 뒷받침 되어야 운하의 유지관리에 유리할 것으로 사료되며, 이러한 검토를 수행하기 위하여 본 연구에서 제안한 수치해석방법이 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 3차원 수치모델에서 항주파의 조파가 가능하게 개발된 수치모델(Lee and Hur, 2011a)를 기반으로 흐름을 발생시킬 수 있게 수치모델을 개량하였다. 개량한 수치모델을 이용

하여 파랑-흐름-항주파가 공존하는 운하의 출입구에서 이들 간의 비선형 상호작용에 의한 호안에서의 초오름 높이에 관하여 검토하였다. 그 주요한 결과를 기술하면 아래와 같다.

(1) 파랑, 흐름 그리고 항주파의 비선형 상호작용을 해석할 수 있는 수치모델을 제안하였다.

(2) 운하 내부호안의 초오름 높이에 대하여 선박의 운항조건(척수, 항로, 운항간격 등)에 따른 공간수면분포의 특성에 대해 수치적으로 검토하였으며, 선박 1척이 운항하는 것보다 2척의 선박이 운항할 경우 호안에서 초오름 높이가 높게 나타났다. 특히 두 선박이 나란히 운항 할때 호안에서 초오름 높이가 가장 높게 나타났다.

(3) 흐름과 항주파의 상호작용에 의한 운하 내부호안의 초오름 높이는 흐름이 존재하지 않는 경우와 큰 차이를 나타내지 않았다.

(4) 운하의 출입구 호안에서는 파랑의 유입으로 인하여 운하의 내부호안보다 상당히 높은 초오름 높이를 나타낼 뿐만 아니라, 흐름이 유입될 경우(파랑-흐름-항주파) 파랑과 흐름과의 상호간섭으로 인하여 그렇지 않은 경우(파랑-항주파)에 비하여 약 10% 전후로 초오름 높이가 상승하였다.

이상의 결과로부터 제한적인 결과이기는 하나 운하의 호안에서 항주파에 의한 초오름높이 특성을 흐름 및 파랑과 상관하여 검토하였으며, 항주파의 동수학적 특성 해석을 위한 토대가 마련되었다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단(또는 한국과학재단)의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0068310).

References

- Althage, J., 2010. Ship-Induced Waves and Sediment Transport in Göta River, Sweden. Master Thesis, Lund University, Sweden, 104.
- Brorsen, M., Larsen, J., 1987. Source Generation of Nonlinear Gravity Waves with Boundary Integral Equation Method. Coastal Eng., 11, 93-113.
- Ergun, S., 1952. Fluid Flow through Packed Columns, Chem. Eng., 48(2), 89-94.
- Havelock, T.H., 1908. The Propagation of Groups of Waves in Dispersive Media, with Application to Waves on Water Produced by a Travelling Disturbance. Proc. Royal Society of London, Series A., 398-430.
- Jiang, T., Henn, R., Sharma, S.D., 2002. Wash Waves Generated by Ship Moving on Fairways of Varying Topography. Proc. 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, 41-457.
- Johnson, J.W., 1968. Ship Waves in Shoaling Waters. Proc. 11th Conf. Ocean Eng. London, 1488-1498.

- Kang, Y.S., Kim, P.J., Hyun, S.K., Sung, H.K., 2008. Numerical Simulation of Ship-induced Wave Using FLOW-3D®. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(3), 255-267.
- Kelvin, L., 1887. On the Waves Produced by a Single Impulse in Water of Any Depth. *Proc. Royal Soc. London*, 42, 80-83.
- Kim, J.S., Kong, B.S. and Hong, N.S., 2008. Mooring Analysis due to Ship Wave at Gunzang New Port. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(5), 69-74.
- Kim, Y.J., 2009. Numerical Simulation of Ship Waves Using FLOW-3D. Master Thesis, Sejong Univ., 84.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2007. Three-Dimensional Flow Characteristics and Wave Height Distribution around Permeable Submerged Breakwaters; PART I - without Beach. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 27(6B), 689-701.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2011a. On Propagation of Ship Induced Waves in 3-D Numerical Wave Basin with Non-Reflected Wave Generation System. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(6), 23-28.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2011b. On Generation Methods of Oblique Incidence Waves in Three-Dimensional Numerical Wave Tank with Non-Reflected System. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(6), 401-406.
- Lee, W.D., Mizutani, N., Hur, D.S. 2011. Effect of Crossing Angle on Interaction between Wave and Current in the River Mouth. *J. Japan Society of Civil Eng., Ser. B3 (Ocean Eng.)*, 67, 256-261.
- Liu, S., Masliyah, J.H., 1999. Non-linear Flows in Porous media. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 86(1), 229-252.
- Newman, J.N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press.
- Sakakiyama, T., Kajima, R., 1992. Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interacting with Permeable Breakwater. *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE*, 1517-1530.
- Shin, S.H., Jeong, D.D., 2003. Numerical Prediction of Ship Induced Wave and its Propagation Using Nonlinear Dispersive Wave Model. *Journal of Navigation and Port Research*, 27(5), 527-537.
- Smagorinsky, J., 1963. General Circulation Experiments with the Primitive Equation. *Mon. Weath. Rev.*, 91(3), 99-164.
- Sorensen, R.M., 1969. Waves Generated by Model Ship Hull. *J. the Waterways and Harbors Division, ASCE*, 95(4) 513-538.
- Sorensen, R.M., Weggel J.R., 1984. Development of Ship Wave Design Information. *Proc. 19th Conf. Coastal Eng.*, 3227-3243.
- Takayama, T., 1982. Theoretical Properties Oblique Waves Generated by Serpent-Type Wavemakers. *Rep. the Port and Harbor Research Institute*, 21(2), 3-48.
- van Gent, M.R.A., 1995. Wave Interaction with Permeable Coastal Structures. Ph.D. Thesis, Delft University, The Netherlands.
- Weggel, J.R., Sorensen, R.M., 1986. Ship Wave Prediction for Port and Channel Design. *Proc. Ports '86 Conf., ASCE*.