

3차원 수치파동수조에서 무반사 조파시스템을 이용한 항주파의 전파재현

이우동* · 허동수**

*나고야대학 공학연구과 사회기반공학전공

**국립경상대학교 해양과학대학 해양토목공학과(해양산업연구소)

On Propagation of Ship Induced Waves in 3-D Numerical Wave Basin with Non-Reflected Wave Generation System

Woo-Dong Lee* and Dong-Soo Hur**

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

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

KEY WORDS: Ship induced wave 항주파, Non-reflected wave generation system 무반사 조파시스템, LES-WASS-3D 3차원수치해석기법, Harbor tranquility 항내 정온도

ABSTRACT: In this paper, a new generation method for ship induced waves is proposed using the fully non-linear 3-D numerical model with non-reflected wave generation system (LES-WASS-3D). A ship induced wave generated by the newly proposed method is examined in comparison with that obtained by an empirical formula. It is then shown that there is a good agreement in free surface the elevation between them. As a result, it is revealed that a ship induced wave in a 3-D numerical wave field can be simulated well using LES-WASS-3D.

1. 서 론

항만의 주된 기능은 화물을 원활하게 증계하는 것이며, 항만 가동률은 선박에서 화물을 싣고 내리는 하역작업에 달려 있다. 하역작업의 효율성을 높이기 위해서는 접안선박의 동요를 줄이는 것이 우선되어야 한다. 그러기 위해서는 무엇보다 중요한 것이 항내 정온도를 확보하는 것이다. 항내 정온도는 악천후 시에는 파랑, 해류, 조류, 바람 등의 해양 물리적 환경의 영향을 받지만, 평상시에는 항내를 운항하는 선박에 의해 발생하는 항주파(Ship induced wave)의 영향을 더 크게 받게 된다.

선박의 항해로 인하여 발생하는 항주파는 외해에서는 전파되면서 파랑에너지가 감쇠되어 결국 소멸하기 때문에 연안에 큰 영향을 미치지 않는 경우가 대부분이지만, 항내처럼 면적이 좁은 수역, 항로/운하 등과 같은 협수로, 해안에 근접해 운항하는 경우 및 선박간의 항로가 교차 되는 경우 등에서는 항주파로 인한 피해가 종종 발생하고 있다.

이러한 항주파의 발생원리 및 전파양상에 관하여 예전부터 많은 연구자들에 의해서 다양한 연구들이 이루어져 왔다. 항주파의 물리적인 메커니즘에 대한 분석은 Kelvin(1887)에 의해 처음으로 시도되었으며, 이는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 횡파(Transverse wave)와 종파(Diverging wave)로의 조합으로 이루어지는 3차원적인 파랑으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 Depth froude number(Fr ; 식 (5) 참조)가 0.6보다 작을 경우 종파와 횡

파의 전파가 항적중심선을 기준으로 좌우 19.28°에서 교차하는 것으로 알려져 있다(Kelvin, 1887; Havelock, 1908). 또한 모형 선박을 이용한 다양한 실험들(Johnson, 1968; Sorensen, 1969; Newman, 1977)이 이루어졌으며, 아울러 일본해난방지협회(1971)과 Sorensen and Weggel(1969)는 다양한 실험결과를 분석하여 항주파고 산정을 위한 경험식을 제안하였다. 근래에 와서는 컴퓨터의 발달로 인하여 여러 연구자들이 수치모델을 이용한 연구들을 수행하고 있으며, 이들 대부분의 연구는 환경사방정식(모리타 등, 1995)이나, Boussinesq 방정식(Jiang et al., 2002; 신승호와 정대득, 2003; 김재수 등, 2008) 등과 같은 적분방정식을 이용하는 평면 2차원 모델을 이용하고 있다. 3차원 수치모델을 이용한 연구로서는 최근 상업용 3차원 수치모델인 FLOW-3D®의 툴을 이용하여 항주파의 수치모의가 이루어지기도 하였지만(강영승 등, 2008; 김용재, 2009), 아직 시작단계이며 항주파가 3차원적인 파랑인 것을 감안하면 이로 인한 연안에서의 피해를 줄이기 위해서는 항주파에 대한 3차원적인 분석이 필수불가결한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 먼저 어느 방향으로든 조파가 가능하도록 제안된 수치기법(허동수와 이우동, 2011)을 바탕으로 항주파의 조파를 위하여 부가적으로 새로운 기법을 도입/적용하여 항주파의 전파거리에 따른 전파양상(항주파고 및 최대파향각)을 검토한다. 그 후, 3차원적인 항주파의 조파방법에 대한 타당성 및 유효성에 관하여 논의하는 것을 목적으로 한다.

교신저자 허동수: 경남 통영시 인평동 445, 055-640-3150, dshur@gnu.ac.kr

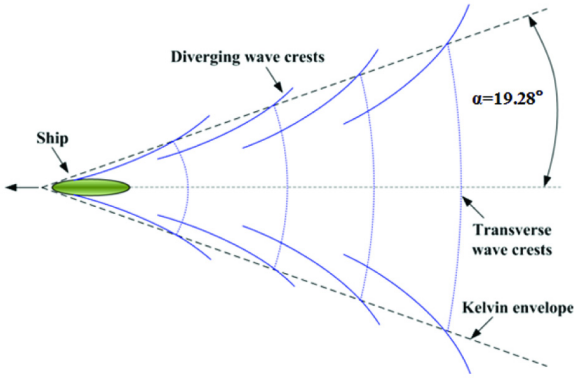


Fig. 1 Shape of ship induced waves (Kelvin, 1887)

2. 수치해석기법

2.1 3차원 수치파동수조; LES-WASS-3D

본 연구에서는 항주파를 재현하기 위하여 어느 방향으로든 조파가 가능한 허동수와 이우동(2011)의 3차원 수치해석기법(LES-WASS-3D)을 새롭게 개량하여 이용하였으며, 이 기법은 무반사 조파를 위한 조파원천항이 포함된 연속방정식 (1)과 수정된 Navier-stokes 운동방정식 (2)-(4) 및 자유수면을 표현하기 위한 VOF함수의 이류방정식 (5)로 구성된 강비선형의 3차원 수치해석방법이다.

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

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

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

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

또한 LES-WASS-3D는 3차원적인 난류구조를 해석하기 위하여 SCS모델(Sub-grid scale model; Smagorinsky, 1963)을 이용하는

LES기법을 도입하였다. 아울러 이 모델은 투수성매체도 고려할 수 있으며, 그 내부의 유체저항으로서 관성저항(Sakakiyama and Kajima, 1992), 난류저항(Ergun, 1952; van Gent, 1995) 그리고 층류저항(van Gent, 1995; Liu and Masliyah, 1999)을 도입하고 있는 3차원 수치해석기법이다.

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

$$q_x^* = \begin{cases} q_x(y, z, t) / \delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (6)$$

$$q_y^* = \begin{cases} q_y(x, z, t) / \delta y_s & : y = y_s \\ 0 & : y \neq y_s \end{cases} \quad (7)$$

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)을 나타낸다. 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_t)의 합을 의미한다. 식 (5)의 F 는 일정한 값을 갖는 물리량 즉, 유체의 체적율로 고려하면 식 (5)는 유체영역에서만 정의되는 식이 아닌 기체상태의 영역까지 포함하여 전 영역으로 적용이 가능한 식으로 된다. 또한 식 (1)-(7)에 포함되어 있는 q_x^* 와 q_y^* 는 기존의 모델(허동수와 이우동, 2007)에서 하나의 조파소스를 고려했던 것과는 달리 x 와 y 방향 각각의 조파소스로 분리하여 적용한 유량밀도로서 각 방향의 소스가 위치하지 않는 $x \neq x_s, y \neq y_s$ 의 위치에서는 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 허동수와 이우동(2007)을 참조하기 바란다.

2.2 항주파의 조파방법

2.2.1 항주파의 파장과 주기

본 연구에서 항주파의 파장과 주기는 일분항만설계기준에서 제시하는 산정방법을 이용하였다. 항주파에 있어서 횡파(Transverse wave)의 파장(L_t)과 주기(T_t)는 식 (8)과 (9)를 이용하여 산정하였다.

$$\frac{gL_t}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L_t} = V_k^2 \quad (V_k < \sqrt{gh}) \quad (8)$$

$$T_t = \sqrt{\frac{2\pi}{g} L_t \coth \frac{2\pi h}{L_t}} \quad (9)$$

종파(Diverging wave)의 파장(L_d)과 주기(T_d)는 각각 다음의 식 (10)과 (11)를 이용해 산정할 수 있다.

$$L_d = L_t \cos^2 \alpha \quad (10)$$

$$T_d = T_t \cos \alpha \quad (11)$$

$$F_r = \frac{V_k}{\sqrt{gh}} \quad (12)$$

$$\alpha = 35.27 \left\{ 1 - e^{-12(F_r - 1)} \right\} \quad (F_r \leq 1) \quad (13)$$

여기서, 항주파의 최대 파향각(Cusp locus angle) α 는 Depth froude number (F_r)를 고려한 Weggel and Sorensen(1986)에 의해서 제안된 식 (13)을 이용하여 산정하였다.

2.2.2 항주파의 파고

일본해난방지협회(1971)의 항주파 연구위원회에서는 항주파의 파고를 다음의 식 (14)-(20)을 이용하여 산정하고 있으며, 이들 식에 사용된 기호는 Table 1에 나타낸다.

2.3 항주파의 조파방법

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	$0.5144V_K$ (m/sec)	C_F	Coefficient of frictional resistance
∇	Load displacement.	H_{max}	Maximum wave height
S'	Distance from track	V_k	Cruising speed (k_i)
ν	Coefficient of kinematic viscosity		

Brosen and Larsen(1987)이 제안한 소스에 의한 조파방법은 조파를 시킬 때 양쪽방향(x의 +방향과 -방향)으로 파가 전달되는 특성을 이용하여 좌우 대칭적인 항주파를 조파하였다. 항주파의 조파방법은 허동수와 이우동(2011)이 제안한 경사입사파의 조파방법과 유사하나 가장 큰 차이점은 항주파의 조파에 있어서 조파소스의 깊이를 자유수면으로부터 선박의 흘수 깊이까지로 하였다. 또한 조파소스의 각 격자간의 위상차는 식 (13)에서 계산한 최대 파향각(Cusp locus angle) α 를 Takayama(1982)의 식 (21)에 대입하여 산정한 후, 선박의 길이(L_s)만큼의 조파소스를 항해속도(V_k)로 이동시키면서 조파하였다.

$$H_0 = \left(\frac{L_s}{100} \right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{E_{HPW}}{2.2L_s V_K}} \quad (14)$$

$$E_{HPW} = E_{HP} - E_{HPF} \quad (15)$$

$$E_{HP} = 0.6S_{HPm} \quad (16)$$

$$E_{HPF} = \frac{1}{1470} \rho S V_0^3 C_F \quad (17)$$

$$S \approx 2.5 \sqrt{\nabla L_s} \quad (18)$$

$$C_F = \frac{0.075}{\left(\log \frac{V_0 L_s}{\nu} - 2 \right)^2} \quad (19)$$

$$H_{max} = H_0 \left(\frac{100}{S'} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{V_k}{V_K} \right) \quad (20)$$

$$\epsilon = -\frac{2\pi}{L} \delta y_s \cos \theta = -k \delta y_s \cos \theta \quad \left(\theta = 90 - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (21)$$

3. 항주파의 시뮬레이션

3.1 수치수조의 개요 및 입사조건

본 연구에서는 항주파의 조파방법을 검토하기 위하여 Fig. 2와 같은 3차원 수치파동수조를 구성하였다. 정상상태의 수치파동수조에서 선박을 화살표로 나타낸 항적선(Track)을 따라 이동시켰으며, 파동장 교란을 막기 위해서 x방향 좌우와 y방향의 상단에는 파를 흡수할 수 있는 부가감쇠영역과 개경계(Open boundary)를 설치하였다

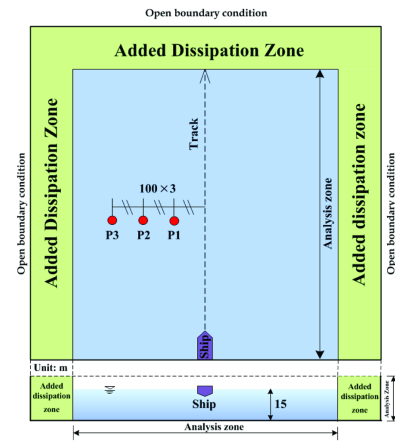


Fig. 2 Definition sketch of 3-D numerical wave basin for generation of ship induced waves

선박의 운항에 따른 항주파의 시뮬레이션은 길이(L_s) 135m, 폭 21m, 흘수 7.4m의 650TEU급의 컨테이너선을 대상으로 하였으며, 이 선박의 만재 배수량 $\nabla = 9,720\text{m}^3$, 만재 항해속도 $V_K = 10.7\text{kt}$ 이다. 부산항 항법 등에 관한 규칙(부산지방해양항만청, 2009)에 의하면 감천항로(남항, 북내항, 북외항, 다대포항, 감전항)에서 최고 항해속도는 7.0-12.0kt 이하이며, 본 연구에서 대상으로 하는 650TEU급 선박의 경우, 1,000ton급 이상임을 감안하면 북외항에서 이 선박의 최대항해속도는 7.0kt 이하이다. 따라서 본 연구에서 적용하는 650TEU급 컨테이너선이 항해속도 7.0kt로 운항할 경우 선박의 연속최대축마력은 $S_{HPm} \approx 620.2\text{HP}$ 이 된다.

일본해난방지협회(1971)의 항주파 연구위원회에서 제안한 식에 이상의 선박 제원과 항해속도를 적용하여 항주파고와 주기를 계산하면 아래의 Table 2와 같으며, 이를 항주파의 입사조건으로 이용하여 수치시뮬레이션을 실시하였다.

Table 2 Ship induced wave conditions used in this study

Depth (h)		15.0m
Cruising speed (V_k)		10.7kt
Ship induced wave	Transverse wave	Period (T_t) 3.52sec Length (L_t) 19.38m
	Diverging wave	Period (T_d) 3.32sec Length (L_d) 17.27m
Height (H_0)		1.44m

3.2 항주파의 검증

본 연구에서 제안하는 조파방법을 검증하기 위하여 일본해난방지협회(1971)의 항주파 연구위원회에서 제안한 항주파고 산정식 (20)의 결과와 항주파에 대한 본 연구의 수치계산 결과를 비교하였다.

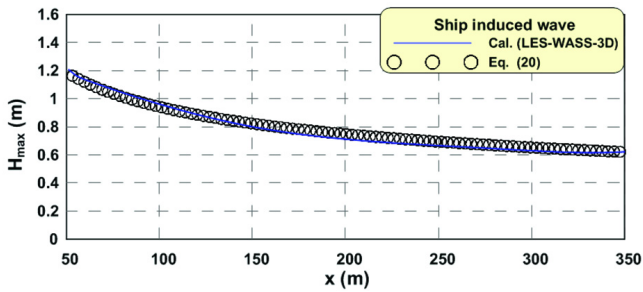


Fig. 3 Comparison between numerical and empirical ship induced wave heights according to propagation of ship induced wave

Fig. 3는 650TEU급의 컨테이너선이 수심 15m의 해역을 항해 속도(V_k) 7.0kt로 항해하여 발생한 항주파의 전파거리에 따른 파고를 나타낸 것으로 횡축은 항적선(Track)으로부터 떨어진 거리, 종축은 항주파의 파고를 의미한다. 그림에서 동그라미(○)는 경험식(일본해난방지협회, 1971)에 의한 항주파고(H_{max}), 실선(—)은 본 연구의 수치계산에 의해 얻어진 항주파고(H_{max})를 각각 나타낸다. 그림으로부터 본 연구의 수치시뮬레이션에 의해 얻어진 항주파고가 전파거리에 따른 경험식의 항주파고를 매우 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

이상에 근거하여 본 연구에서 새롭게 제안하고 있는 무반사 조파시스템을 이용한 항주파의 조파방법의 타당성과 유효성이 일부뿐이나마 확보된 것으로 판단된다.

3.3 항주파의 수면형분포

Fig. 4는 수심 15m의 해역을 650TEU급 컨테이너선이 10kt의 속도(V_k)로 항해하는 동안 발생하는 항주파의 수면형을 시간별로 나타낸 것이다. 그림으로부터 시간에 따른 항주파의 수면형이 썸기(Wedge)형태의 Kelvin wash(Kelvin, 1887)의 형상과 항주파의 최대 파향각(Cusp locus angle)을 3차원적으로 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

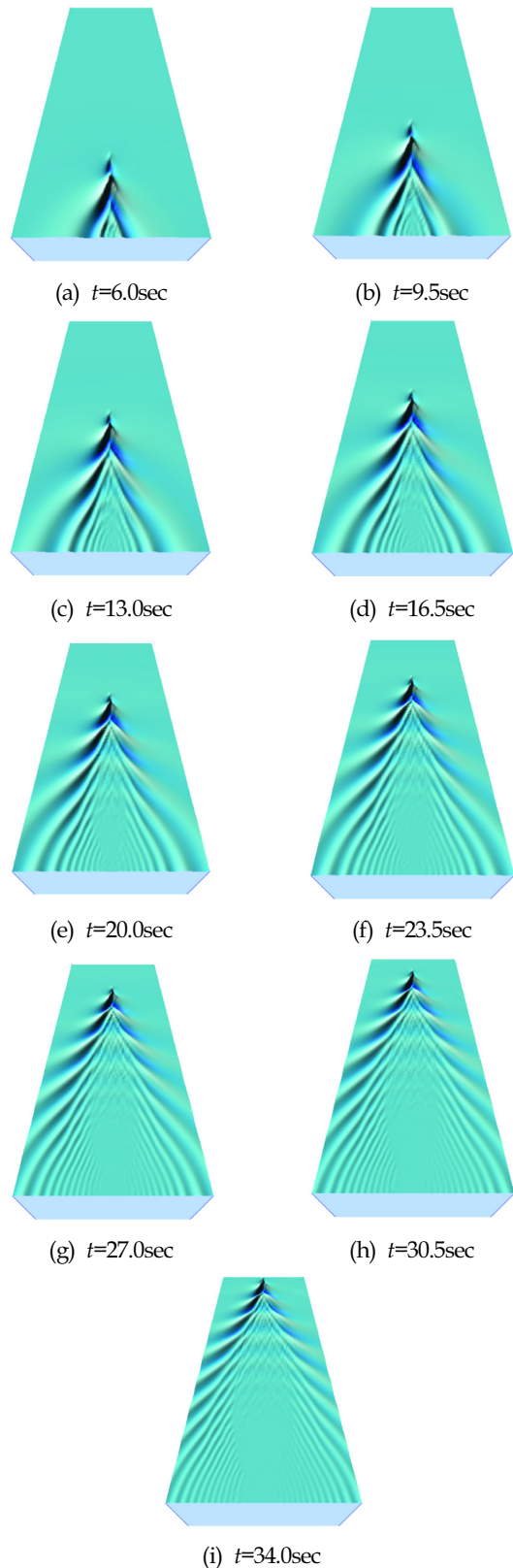


Fig. 4 Spatial distributions of free surfaces according to a ship sailing

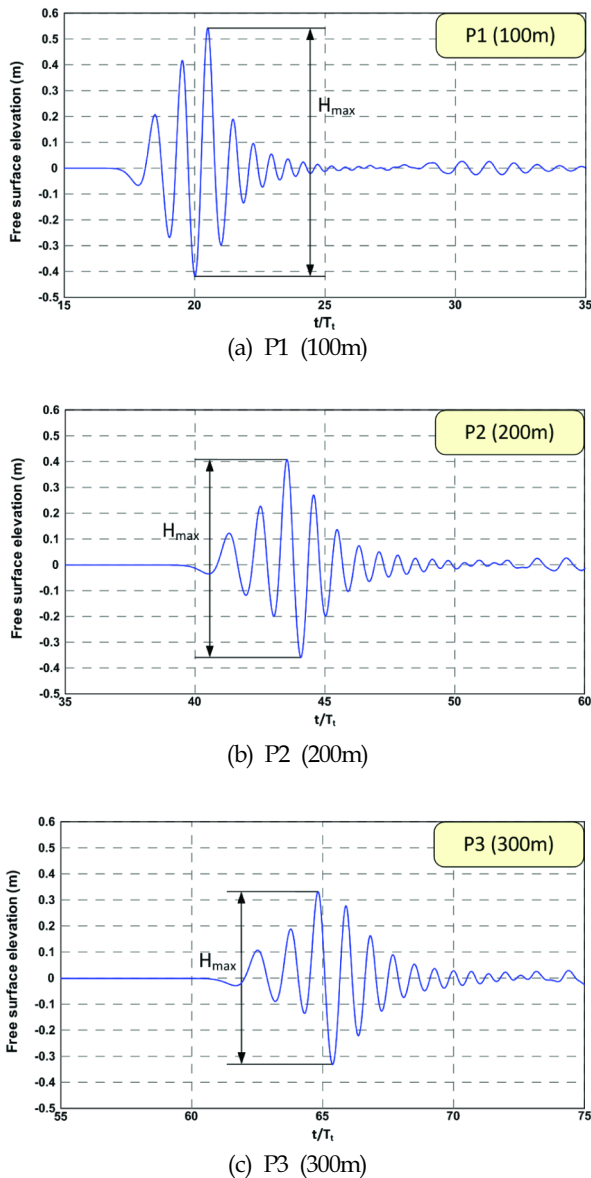


Fig. 5 Time-spatial distribution of free surface elevation at 100, 200, 300m from track of ship

Fig. 5는 650TEU급의 컨테이너선이 항해속도(V_k) 7.0kt로 수심 15m의 해역을 항해하는 동안 발생하는 항주파의 시간과형을 Fig. 2에 표시하고 있는 P1, P2, P3 지점에서 나타낸 것이며, (a) P1, (b) P2, (c) P3는 각각 항적선(Track)으로부터 100m, 200m, 300m떨어진 지점이다. Fig. 5로부터 전파거리가 증가함에 따라 항주파고(H_{max})가 감소하는 항주파의 전파양상을 확인할 수 있다. 이는 선박의 동력이 선체에 의해 파랑에너지로 전환됨으로 인하여 항적선에서는 흡수심 아래까지 전달되지 않는 반면, 선박에 의해 발생한 항주파가 항적선으로부터 외측으로 전파하면서 흡수심 아래까지 파랑에너지가 전달됨에 따라 이와 같이 항주파고(H_{max})가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 또한 항주파는 횡파(Transverse wave)와 종파(Diverging wave)의 조합에 의해 만들어지는 파랑이기 때문에 장주기파인 종파와 단주기파인 횡파와의 상호간섭에 의한 전파변형으로 인하여 파고가 한층 더

감소되는 것으로 판단된다.

이상의 결과에 근거하여 무반사 조파시스템을 갖춘 3차원 수치계산기법에 의해 새롭게 제안된 항주파의 조파방법에 의해 수치적으로 생성된 항주파는 전파거리에 따른 항주파고분포 뿐만 아니라 전파양상까지 실제항주파의 특성을 잘 나타내고 있는 것으로 사료된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 3차원 무반사 조파시스템을 갖춘 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)에 어느 방향으로든 조파가 가능한 허동수와 이우동(2011)을 적용하여 항주파의 조파방법에 관하여 검토를 수행하였다. 먼저 무반사 조파시스템을 이용한 항주파의 조파방법을 제안하고, 이로부터 얻어진 전파거리에 따른 항주파고와 경험식의 항주파고를 비교·검토를 통하여 항주파의 조파방법에 대하여 타당성 및 유효성을 확보하였다. 아울러 항주파의 전파양상에 있어서도 Kelvin wash(Kelvin, 1887)의 항주파 형상을 잘 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 3차원 수치파동수조에서 항주파의 조파를 무리 없이 수행할 수 있게 됨에 따라, 본 연구에서의 수치기법은 투과성 구조물 및 파랑 흐름 등의 검토가 가능한 것을 감안하면, 향후 항주파와 다른 해양외력(파랑, 흐름 등) 및 구조물과의 상호작용에 의해 발생하는 연안 피해에 대응하기 위한 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01) 초장대교량 사업단의 제1핵심과제를 통하여 지원되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강영승, 김평중, 현상권, 성하근 (2008). "FLOW-3D[®]를 이용한 항주파 수치모의", 한국해양·해양공학회논문집, 제20권, 제3호, pp 255~267.
- 김용재 (2009). FLOW-3D를 사용한 항주파 전파 수치실험, 세종대학교 대학원, 석사학위논문, p 84.
- 김재수, 공병승, 홍남식 (2008). "군장신항만의 항주파로 인한 계류안정성해석", 한국해양공학회지, 제22권, 제5호, pp 69-74.
- 모리타 수지와, 사오라기 토루, 테구치 이치로, 오쿠타 신지 (1995). "항내에 있어서 항주파의 간이해석방법", 일본해양개발논문집, Vol 11, pp 13-18.
- 부산지방해양항만청 (2009). 부산항 항법 등에 관한 규칙.
- 신승호, 정대득 (2003). "비선형분산파랑모형을 이용한 항주파의 발생과 전파에 관한 수치예측모형 개발", 한국항해항만학회지, 제27권, 제5호, pp 527-537.
- 일본해난방지협회 (1971). 해상교통안전에 관한 기초적 사항의

- 조사연구, 해안방지의 조사연구사업보고서, 완료보고서, No 83.
- 허동수, 이우동 (2007). "잠재 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART I -해빈이 없을 경우", 대한토목학회논문집, 제 27권, 제6B호, pp 689-701.
- 허동수, 이우동 (2011). "3차원 무반사 조파시스템을 이용한 경사입사파의 조파방법", 한국해안·해양공학학회논문집, 제23권, 제6호, pp 401-406.
- Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). "Source Generation of Nonlinear Gravity Waves with Boundary Integral Equation Method", Coastal Eng., Vol 11, pp 93-113.
- Ergun, S. (1952). "Fluid flow through packed columns", Chem Eng., Vol 48, No 2, pp 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., pp 398-430.
- Jiang, T., Henn, R. and Sharma, S.D. (2002). "Wash Waves Generated by Ship Moving on Fairways of Varying Topography", Proc 24th. Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, pp 441-457.
- Johnson, J.W. (1968). "Ship Waves in Shoaling Waters", Proc. 11th conf. Ocean Eng. London, pp 1488-1498.
- Kelvin, L. (1887). "On the Waves Produced by a Single Impulse in Water of Any Depth", Proc. Royal Soc. London, Vol 42, pp 80-83.
- 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.
- Newman, J.N. (1977). Marine Hydrodynamics, The MIT Press.
- Smagorinsky, J. (1963). "General Circulation Experiments with the Primitive Equation" Mon. Weath. Rev. Vol 91, No 3, pp 99-164.
- 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.
- Sorenson, R.M. (1969). "Waves Generated by Model Ship Hull", Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol 95, No 4, pp 513-538.
- Sorenson, R.M. and Weggel J.R. (1969). "Development of Ship Wave Design Information", Proc. 19th Conf. Coastal Eng., pp 3227-3243.
- Takayama, T. (1982). "Theoretical Properties Oblique Waves Generated by Serpent-Type Wavemakers", Rep. the Port and Harbor Research Institute, Vol 21. No 2, pp 3-48.
- van Gent, M.R.A. (1995). Wave interaction with permeable coastal structures, Ph.D. Thesis, Delft University The Netherlands.
- Weggel, J.R. and Sorensen, R.M. (1986). "Ship Wave Prediction for Port and Channel Design", Proc. Ports '86 Conf., ASCE.

2011년 8월 8일 원고 접수

2011년 12월 8일 심사 완료

2011년 12월 23일 게재 확정