

FLOW-3D[®]를 이용한 항주파 수치모의 Numerical Simulation of Ship-induced Wave Using FLOW-3D[®]

강영승* · 김평중** · 현상권* · 성하근*

Young Seung Kang*, Pyeong Joong Kim**, Sang Kwon Hyun*, and Ha Keun Sung*

요 지 : 대표적인 상용 CFD 코드 중 하나인 FLOW-3D[®]에 포함된 강체에 대한 6-자유도 운동을 적용한 음해법의 GMO 방법을 이용하여 항주파의 재현 가능성을 살펴보았다. 모델에 의한 항주파의 형상 재현시 depth Froude number에 따른 수평 파형이 잘 재현되었으며, 선박의 직선항로 항행시 일정한 수심인 경우와 실제 수심인 경우를 비교함으로써 모델이 수심에 따른 파형의 변화를 잘 재현함을 알 수 있었다. 또한, 모델에 의해 실제 수심조건에서 두 척의 선박이 교차 진행할 경우와 선박이 곡선항로를 항행할 경우에 대한 항주파를 잘 재현할 수 있음을 보였다. 따라서, FLOW-3D[®]를 이용하여 항주파를 수치모의할 경우 관측을 통한 모델의 검·보정을 통해 항로와 항구에서의 항주파를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 항주파, flow-3d, cfd

Abstract : Using the commercial CFD code FLOW-3D[®] which has an implicit General Moving Object (GMO) method, the ship-induced wave has been simulated. In the implicit GMO method of the FLOW-3D[®], a rigid body's motion which is either user-prescribed (prescribed motion) or dynamically coupled to fluid flow (coupled motion) can be computed with six degrees of freedom (DOF). The simulated horizontal wave patterns are agree with the wave patterns represented by depth Froude number. The model has been well-simulated to generate the depth-dependent wave transformation in comparison of uniform depth case to complicated depth case. Additionally, it shows that ship-induced waves have been reasonably generated by two ships passing each other and by a ship moving in a curve. Therefore, it is suggested that the FLOW-3D[®] model calibrated with observed data should provide more accurate prediction for the ship-induced wave in a certain fairway or harbor.

Key words : ship-induced wave, flow-3d, cfd

1. 서 론

선박의 항행에 따라 발생하는 항주파는 선박의 항행 속도와 선박의 형태, 수심과 항행선으로부터 이격거리에 따라 파의 크기와 형태가 변화하는 특징을 가진다. 연안에서 발생하는 풍파나 너울과 비교할 때, 항주파는 특정지역에서 이례적인 크기로 발생할 수 있으며 해안선과의 상호작용에 의한 감쇄가 거의 없이 진행함으로써 항내 부진동을 일으킬 수도 있다. 이처럼 누적된 파랑에너지에 의한 파고의 증가는 항만 시설이나 구조물의 파손을 유발하고 정박중이거나 항행중인 선박에 피해를 줄 수도 있다(Wu et al.,

2001). 또한, 항만에서 하역한계파고를 초과하는 항주파가 발생할 경우 선적 및 하역 작업에 어려움을 주게 되며, 선박의 고속질주에 따라 반복적으로 발생하는 항주파로 인해 연안 침식이 가중되는 사례가 보고된 바도 있다(한, 2004).

지금까지의 항주파에 관한 연구는 대부분 조파저항이나 선박에 미치는 영향 등 주로 조선공학적인 측면에서 이루어졌기 때문에 일정한 수심 조건에 대한 실험적 또는 이론적인 연구가 주로 수행되었다. 그러나, 복잡한 수심과 경계를 가진 실제 해역을 대상으로 할 경우에는 이론적인 연구만으로는 실제적인 현상을 충분히 재현하기 어렵다. 또

*(주)한국해양과학기술 (Corresponding author : Young Seung Kang, Korea Ocean Science & Engineering Corp., Rm 503, Byucksan Digital Vally III Guro-dong, Guro-gu, Seoul 152-775, Korea, kys503@hanmail.net)

** (주)지오피디엠 (GeoPDM co. ltd., Rm 902, Woorim e-Biz center I, Guro-dong, Guro-gu, Seoul 152-050, Korea)

한, 수리모형으로 지형과 수로의 조건을 제작하여 항주파를 재현할 경우에는 많은 비용과 시간을 필요로 한다(신과 정, 2003).

항주파가 항만과 연안역 또는 좁은 수로 등에 미치는 영향이 크므로 기존의 선박공학분야의 연구와는 달리 정밀한 수치모델이 필요한데(강 등, 2007), 이러한 항주파의 수치모델 연구 중 국내 연구결과로는 3차원 파랑전파 모형에 의한 항주파 수치재현에 관한 연구(이 등, 2003)와 고정좌표계에서 Boussinesq 방정식을 토대로 수행된 수치모형 연구(신과 정, 2003) 등이 있고, 해외에서는 Boussinesq 방정식을 이용한 결과로 가변수심역에서 항주파의 재현 연구(Jiang et al., 2002)와 경사진 해안에서 선박의 진행에 따른 항주파의 특성 연구(Dam et al., 2006) 그리고 고속 페리에 의한 항주파의 재현 연구(Nwogu, 2007) 등이 있다.

본 연구에서는 대표적 CFD(Computational Fluid Dynamics) 코드 중의 하나인 FLOW-3D[®] 모델의 6-자유도(Degree of Freedom)를 적용한 음해법의 GMO(General Moving Object) 모듈을 이용하여 강제파 발생방법이 아닌 선박의 형상과 선속 및 지형 조건에 따른 항주파를 검토하였으며 선박이 직선 및 곡선으로 항행할 경우와 두 척의 선박이 교차 항행시에 발생하는 항주파를 재현하였다.

2. 수치모델

본 연구에서 항주파의 재현을 위하여 Flow Science사의 상업용 CFD 코드인 FLOW-3D[®] Version 9.2를 이용하여 수행하였다. FLOW-3D[®]는 1968년 Los Alamos 연구소에서 자유표면 연구를 시작으로 개발된 후 1980년에 설립된 Flow Science사에서 개발·유지되고 있는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 코드이다. FLOW-3D[®]는 VOF(Volume of Fluid) 방법과 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방법을 적용하여 자유수면과 정상-비정상 유동해석, 층류 및 난류해석, 뉴토니안 및 비뉴토니안 유체계산, 압축성 및 비압축성 유체계산, 열전달, 응고 등의 계산에 활용할 수 있는 범용적인 CFD 코드로 잘 알려져 있다.

FLOW-3D[®]는 3차원의 Navier-Stokes 방정식을 풀고, 유체와 유체 또는 유체와 물체간의 경계면 추적을 위해 VOF 방법을 사용하며, 유동을 포함하는 복잡한 경계를 표현하기 위하여 FAVOR 방법을 사용한다. FLOW-3D[®]의 자체 고유기술인 FAVOR 기술은 직교격자체계에서 체적 점유율(volume fraction)과 면적 점유율(area fraction)의 개념

을 이용하여 계산 영역내의 기하학적 모형(geometric object)을 묘사하는 기술(Hirt and Sicilian, 1985)로 직교 격자를 사용하면서도 경계면이 실제형상과 일치하는 장점을 가지며, 유동장 내에서 구조물의 방향과 위치변화, 해저면의 변화 등을 재현하는데 활용되고 있다.

또한, FLOW-3D[®]는 연안으로 전파되는 파의 일반적인 변형 특성을 계산할 수 있으며, 이에 관한 이론은 Richardson(1996), Hirt and Richardson(1999), Hirt(1999) 등에 자세히 기술되어 있다.

2.1 연속방정식

FLOW-3D[®]내의 비압축성 유체에 대한 연속방정식은 식 (1)과 같고, 압축성 유체에 대한 연속방정식은 식 (2)와 같다.

$$\nabla \cdot U = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{RSOR}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v\rho) + \frac{\partial}{\partial z}(w\rho) = RSOR + RDIF \quad (2)$$

여기서, $U = (u, v, w)$ 는 유속, ρ 는 밀도, $RSOR$ 은 물질의 생성/소멸항, $RDIF$ 는 밀도 확산항을 나타낸 것이다.

2.2 운동방정식

FLOW-3D[®]내의 압축성, 뉴토니안/비뉴토니안 유체에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_x - Ku - \frac{RSOR}{\rho} u - F_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_y - Kv - \frac{RSOR}{\rho} v - F_y \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_z - Kw - \frac{RSOR}{\rho} w - F_z \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, P 는 압력, \vec{G} 는 중력/비관성체 가속도, τ 는 점성 응력텐서, $K \cdot \vec{U}$ 는 항력(투과성 장애물, 장애물, *mushy zone*), \vec{U} 는 유속이 0인 경우의 질량분산가속도, \vec{F} 는 기

타 힘(표면장력, 전기력, 물질/운동량 공급원, 입자, 사용자 정의 외력)을 나타낸다.

2.3 FAVOR

FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation)

는 직교격자체계에서 체적점유율(volume fraction)과 면적 점유율(area fraction)의 개념을 이용하여 계산 영역내의 기하학적 모형(geometric object)을 묘사하는 기술(Hirt and Sicilian, 1985)로 직교격자를 사용하면서도 경계면이 실제 형상과 일치하는 장점을 가지며, 신속하고 정확한 곡면 표현을 위해 해석 영역을 작은 격자(cell)로 나누고 각 격자에 대한 비선형 방정식을 해석하여 유동 및 열전달 계산의 정확성을 확보할 수 있는 방법이다.

2.4 VOF

VOF(Volume Of Fluid)는 격자내의 유체점유율(fluid fraction)과 주위 격자와의 관계에 의해 자유표면을 정의하는 것과 자유표면에 일정한 압력과 표면장력을 경계조건으로 주는 것이 그 핵심으로, 비산이나 쇄파와 같은 복잡한 자유표면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지안(Lagrangian) 방법보다 고정 오일러리안(Eulerian) 격자를 사용하는 VOF 방법을 이용하여 보다 간단히 해석할 수 있다. FLOW-3D[®]에 사용되고 있는 VOF 방법은 다른 VOF 방법과는 달리 상이 경계면(sharp interface)에서 정확한 압력과 운동을 재현하기 위한 경계조건을 적용하고 있으며(Hirt and Nichols, 1981) 차분시에 상이 경계면의 번지는 현상(smearing)을 방지하기 위해 특별한 수치차분법을 사용하여 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유표면으로 가정함) 사이의 운동을 표현할 수 있는 수치해석 기법이 적용되었다.

2.5 GMO

FLOW-3D[®]에는 FAVOR 기술을 기초로 하여 일반적인 이동 물체를 재현하는 GMO(General Moving Object) 모듈이 적용되어 있다(Wei, 2005a; Wei, 2005b).

계산상의 편의를 위하여 시간이 0일 때 공간좌표계의 좌표축과 평행한 체고정기준체계(body-fixed reference system, 이하 body system)를 가정하고, 물체의 운동이 6-자유도(Degree Of Freedom)를 가지고, 체체계(body system)가 물체의 질량 중심(G)을 기점으로 설정된 것으로 가정하면, 공간체계(space system, (x, y, z))와 체체계(body system, (x', y', z')) 사이의 좌표를 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\vec{x}_s = [R] \cdot \vec{x}_b + \vec{x}_G \quad (6)$$

여기서, \vec{x}_s 는 공간체계에서 점의 위치벡터, \vec{x}_b 는 체체계에서 점의 위치벡터, \vec{x}_G 는 공간체계에서 질량중심의 위치벡터이며 $[R]$ 은 직교변환텐서로 다음과 같이 정의된다.

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $R_{ij}R_{jk} = \delta_{ik}$ 이고 이 때 δ_{ik} 는 Kronecker delta(δ) 심벌이다. 공간 벡터 \vec{A} 를 공간체계와 체체계의 관계로 변환하면

$$\vec{A}_s = [R] \cdot \vec{A}_b \quad (8)$$

로 표현할 수 있고, 여기서, \vec{A}_s 와 \vec{A}_b 는 공간체계와 체체계에서의 A 를 표현한 것이다. 이와 같은 관계로부터 $[R]$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{d[R]}{dt} = [\Omega] \cdot [R] \quad (9)$$

여기서, $[\Omega]$ 는

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이고, $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 은 각각 공간체계에서 x, y, z 방향의 각속도 성분이다.

강체(rigid body)의 운동은 일반적으로 회전운동(rotational motion)과 병진운동(translational motion)으로 구분할 수 있는데 임의의 지점에서 강체의 속도는 그 지점에서 물체의 속도와 기준점에서의 회전에 의해 발생된 속도의 합과 같다. 따라서 6-자유도 운동의 기준점으로 물체의 질량 중심을 선택함으로써 계산을 용이하게 할 수 있다. 물체상에서 임의의 점을 P 라고 정의할 때, 강체의 각속도 $\vec{\omega}$ 와 질량중심속도 \vec{V}_G 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{V}_P = \vec{V}_G + \vec{\omega} \times \vec{r}_{P/G} \quad (11)$$

여기서, $\vec{r}_{P/G}$ 는 질량중심(G)으로부터 P 까지의 거리벡터이다. 식 (11)의 첫 번째 항은 질량중심의 병진운동을, 두 번째 항은 회전운동을 각각 표현한 것이다. 6-자유도 움직임 상에서 물체의 운동은 다음의 두 운동방정식에 의

해 지배받게 된다(Goldstein et al., 2002).

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}_G}{dt} \quad (12)$$

$$\vec{T}_G = [J] \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \omega \times ([J] \cdot \vec{\omega}) \quad (13)$$

여기서, \vec{F} 는 총 힘, m 은 강체의 질량, $[J]$ 는 체체계에서 질량 중심(G)에 대한 관성텐서의 모멘트이고 \vec{T}_G 는 질량 중심(G)에 대한 총 토크이다. 이 때 $[J]$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서, $[J]$ 의 대각선원소는 관성모멘트이고, 나머지 원소는 관성곱을 나타내는 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_{11} = \int (y'^2 + z'^2) dm, J_{22} = \int (x'^2 + z'^2) dm, J_{33} = \int (x'^2 + y'^2) dm \quad (15)$$

$$J_{12} = J_{21} = -\int x'y' dm, J_{13} = J_{31} = -\int x'z' dm, J_{23} = J_{32} = -\int y'z' dm \quad (16)$$

만일, x', y', z' 이 물체의 기준축과 일치한다면, 관성곱은 제거할 수 있다. 이와 같은 관계로부터 체체계에서 x', y', z' 방향의 성분 방정식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$T_{G1} = J_{11}\bar{\omega}_1 + J_{12}\bar{\omega}_2 + J_{13}\bar{\omega}_3 + \omega_2(J_{31}\omega_1 + J_{32}\omega_2 + J_{33}\omega_3) - \omega_3(J_{21}\omega_1 + J_{22}\omega_2 + J_{23}\omega_3) \quad (17)$$

$$T_{G2} = J_{21}\bar{\omega}_1 + J_{22}\bar{\omega}_2 + J_{23}\bar{\omega}_3 + \omega_3(J_{11}\omega_1 + J_{12}\omega_2 + J_{13}\omega_3) - \omega_1(J_{31}\omega_1 + J_{32}\omega_2 + J_{33}\omega_3) \quad (18)$$

$$T_{G3} = J_{31}\bar{\omega}_1 + J_{32}\bar{\omega}_2 + J_{33}\bar{\omega}_3 + \omega_3(J_{21}\omega_1 + J_{22}\omega_2 + J_{23}\omega_3) - \omega_2(J_{11}\omega_1 + J_{12}\omega_2 + J_{13}\omega_3) \quad (19)$$

여기서, ω_i 와 $\bar{\omega}_i$ ($i=1,2,3$)는 체고정좌표축(body-fixed coordinate axis) x', y', z' 에 대한 각속도와 각가속도를 각각 나타낸다.

일반적으로, 총 힘은 다음과 같은 성분으로 분리하여 표현할 수 있다.

$$\vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_h + \vec{F}_c + \vec{F}_{ni} \quad (20)$$

여기서, \vec{F}_g 는 중력(gravitational force), \vec{F}_h 는 수리력(hydraulic force), \vec{F}_c 는 순제어력(net control force), \vec{F}_{ni} 는 비관성력(non-inertial force)을 나타내며, 이와 유사한 방법으로 질량중심에서 총 토크를 분리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{T}_G = \vec{T}_g + \vec{T}_h + \vec{T}_c + \vec{T}_{ni} \quad (21)$$

여기서, $\vec{T}_g, \vec{T}_h, \vec{T}_c, \vec{T}_{ni}$ 는 각각 중력 토크(gravitational torque), 수리 토크(hydraulic torque), 제어 토크(control torque), 비관성 토크(non-inertial torque)를 나타내며, 6-자유도 운동의 경우 \vec{T}_g 를 제거할 수 있다.

움직이는 물체의 경우 유체의 연속방정식과 운동방정식 및 VOF상의 수송방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{V_f \partial \rho}{\rho \partial t} + \frac{1}{\rho} \cdot (\rho \vec{u} A_f) = \frac{\partial V_f}{\partial t} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (\vec{u} A_f \cdot \nabla \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} [\nabla p + \nabla \cdot (\tau A_f)] + \vec{G} \quad (23)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \nabla \cdot (F \vec{u} A_f) = \frac{F \partial V_f}{V_f \partial t} \quad (24)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, \vec{u} 는 유체의 속도, V_f 는 체적점 유율, A_f 는 면적 점유율, p 는 압력, τ 는 점성응력텐서, \vec{G} 는 중력벡터, F 는 유체점유율을 나타낸다.

유체의 연속방정식과 수송방정식인 식 (22)와 식 (23)을 식 (22)의 우변의 원천항 $-\partial V_f / \partial t$ 에 대해 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$-\frac{\partial V_f}{\partial t} = \vec{U}_{obj} \cdot \vec{n} S_{obj} / V_{cell} \quad (25)$$

여기서, $S_{obj}, \vec{n}, \vec{U}_{obj}$ 는 각 격자상에서 표면적, 표층에서의 법선벡터, 움직이는 물체의 속도를 나타낸 것이고, V_{cell} 은 격자의 총체적을 나타낸 것이다.

양해법의 GMO 방법은 식 (12)와 식 (13)에 대해 이전 시간(n)에 계산된 수리력을 이용하여 현재시간($n+1$)의 질량중심속도와 각속도를 계산하게 되며, 이를 차별화하면 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{F}_h^n = \Sigma \vec{F}_i = m \left(\frac{\vec{V}_G^{n+1} - \vec{V}_G^n}{\Delta t} \right) \quad (\text{explicit GMO}) \quad (26)$$

$$\vec{T}_h^n = \Sigma \vec{T}_i = [J] \cdot \left(\frac{\vec{\omega}^{n+1} - \vec{\omega}^n}{\Delta t} \right) + \vec{\omega}^n \times ([J] \cdot \vec{\omega}^n) \quad (\text{explicit GMO}) \quad (27)$$

여기서, 위첨자는 시간간격을 나타낸 것이고 $\Sigma \vec{F}_i$, $\Sigma \vec{T}_i$ 는 각각 총 힘과 총 토크상에서 수리 성분을 제외한 힘과 토크 성분의 총합을 나타낸 것이다.

음해법의 GMO 방법은 식 (12)와 식 (13)을 다음과 같이 음해법으로 차분한다.

$$\vec{T}_h^{n+1} = \Sigma \vec{F}_i = m \left(\frac{\vec{V}_G^{n+1} - \vec{V}_G^n}{\Delta t} \right) \quad (\text{implicit GMO}) \quad (28)$$

$$\vec{T}_h^{n+1} = \Sigma \vec{T}_i = [J] \cdot \left(\frac{\vec{\omega}^{n+1} - \vec{\omega}^n}{\Delta t} \right) + \vec{\omega}^n \times ([J] \cdot \vec{\omega}^n) \quad (\text{implicit GMO}) \quad (29)$$

이 방법은 현재 시간($n+1$)에서의 수리력과 토크를 이용하여 계산한 것으로, 물체와 유체의 움직임을 분리하여 계산하는 양해법의 GMO 방법과는 달리 음해법의 GMO 방법은 반복법을 이용하여 물체와 유체의 움직임을 동시에 계산하게 된다.

3. 수치실험

CFD 코드인 FLOW-3D[®] 모델내의 x , y , z 방향의 움직임과 선체의 종동요(pitching), 횡동요(rolling), 선수동요(yawing)를 고려하는 6-자유도 운동을 적용한 음해법의 GMO 모듈에 의해 선박의 제원과 항속 및 수심조건하에서 계산되는 항주파의 형상에 대한 타당성을 검토하였으며, 일정수심과 실제수심에서 선박이 직선항로를 항행할 경우와 두 척의 선박이 교차 항행할 경우 그리고 곡선항로를 항행할 경우에 발생하는 항주파를 각각 재현하였다.

3.1 항주파 특성 검토

선박에 의해 발생하는 항주파는 일반적으로 제1파와 제2파로 구분된다. 제1파는 선박의 주위에서 유속 증가에 의한 수면의 침하와 선수파와 선미파에 의해 발생되며, 파장은 일반적으로 선박의 길이와 같은 크기(order)를 가진다. 한편, 제2파는 선체의 불연속성에서 기인하는 압력 패턴에 의해 발생하며, 발산파(diverging wave)와 횡파(transverse wave)의 형태로 나타난다. 천해역에서 항주파에 가장 큰 영향을 주는 것은 선속(V)과 수심(d)이며, 이 두 요소는 depth Froude number($Fr_d = V / \sqrt{gd}$)로 표현할 수 있다. Fr_d 가 1보다 작은 경우 선박은 천해파의 균속도보다 느리게 이동하는데 이를 sub-critical regime이라고 정의한다. 한편, Fr_d 가 1인 경우에 선박은 천해파의 균속도와 같은 속도로 이동하게 되며, 이때의 선속을 임계속도(critical speed)라

고 정의한다. 만일 Fr_d 가 1보다 큰 경우에 선박은 천해파의 균속도보다 빠르게 진행하게 되는데 이러한 경우를 super-critical regime이라고 정의한다(de Vries, 2007).

수심의 효과를 무시할 수 있는 심해조건인 한계수심으로 일본항만설계기준(運輸省港灣局, 1999)에서는 $Fr_d \leq 0.7$ 인 조건(sub-critical wash)을 제시하고 있다. 심해조건에서 항주파는 Kelvin wash 형상이 나타나는데, 이러한 Kelvin wash의 패턴은 선박의 항로 중심에서 $90^\circ \sim 35^\circ$ 의 각도로 전파되는 발산파와 $35^\circ \sim 0^\circ$ 로 전파되는 횡파로 구분되고, 첨두를 잇는 선상(cusp locus)의 약간 내측에서 서로 만나 파고가 최대가 되는 특징을 가지게 된다. Fr_d 가 1.0에 근접할 경우(critical wash)의 항주파는 형상이 급변하여 횡파의 형태는 거의 사라지고 선박의 전면에는 임계파(critical wave)가 발달하게 된다. 또한, Fr_d 가 더욱 커지면(super-critical wash), 첫 번째 파의 파봉은 직선으로 변하게 된다(신과 정, 2003).

모델에 의해 계산된 항주파 형상의 타당성을 검토하기 위해 수심과 선속을 변화시켜 가면서 Fr_d 가 각각 0.7, 1.0, 1.3인 경우에 대해 모델로 계산된 항주파의 형상을 비교하였다. 실험을 위하여 길이 19.0 m, 폭 6.0 m, 선체깊이 2.0 m, 무게 120 GT인 선박을 채택하였으며, 적용된 선박의 형태는 Fig. 1과 같다. 항주파의 형상 재현을 위한 실험은 길이 500 m, 폭 300 m의 개방해역에서 수평수직적으로 가변 격자를 적용하여 실시하였으며, 실험조건은 Table 1에 제시된 바와 같다. 실험시 선속은 0~10초까지는 가속되다가 10초 이후에는 주어진 선속이 유지되도록 설정하였으며, 모델 영역의 각 경계에서는 영역 내에서 발생한 파가 경계를 빠져나가도록 투과경계조건(outflow)을 적용함으로써 파의 반사효과를 배제하였다.

선박이 심해에서 sub-critical 속도로 항행할 경우 첨두선(cuspline) 내에 발산파와 횡파가 고립되는 고전적인 썸기(wedge) 형태의 Kelvin wash 형상이 나타난다. 이때 첨두선과 선박의 항행선이 이루는 썸기의 반각(wedge half-angle)은 Fr_d 가 0.4보다 작을 때 19.5° 로 최소값을 갖는다. 썸

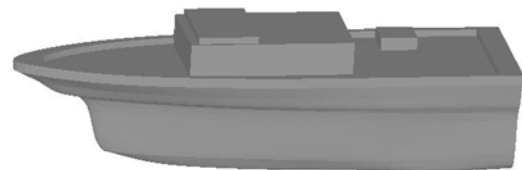
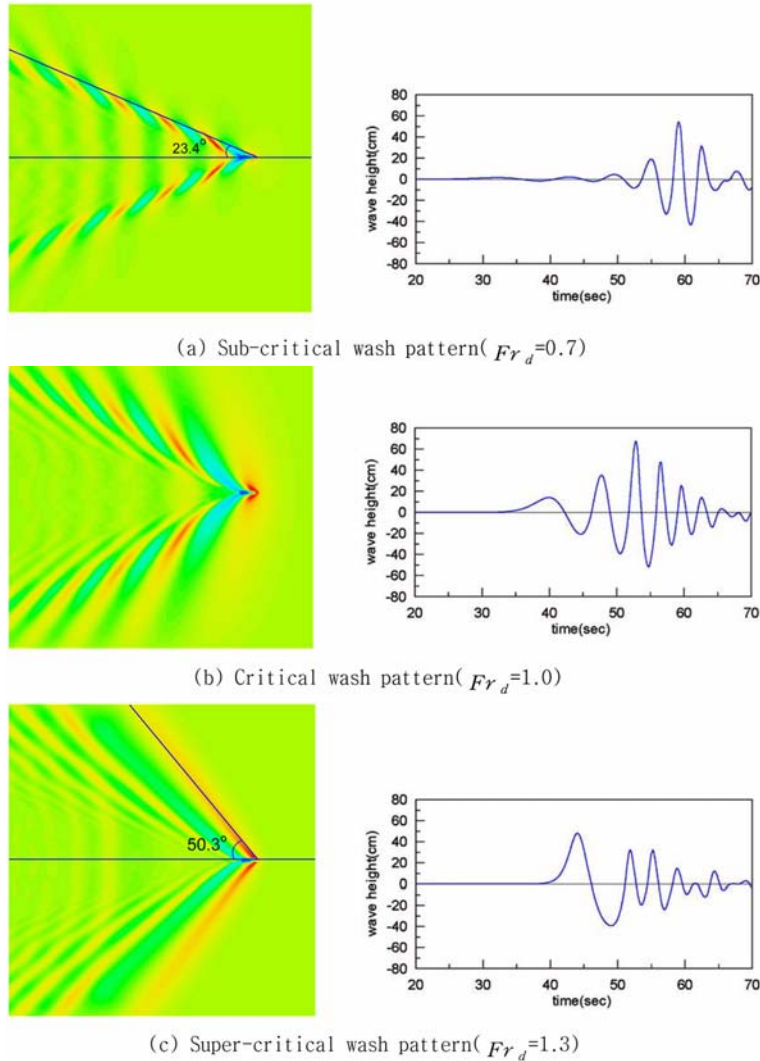


Fig. 1. The shape of the ship used in experiments.

Table 1. Experimental conditions for ship-induced wave evaluation

Ship speed (knot)	Depth (m)	Cell information									
		X			Y			Z			
		No.	Size(m)		No.	Size(m)		No.	Size(m)		
		Max	Min		Max	Min		Max	Min		
0.7	15.8	13.8	500	1.0	1.0	206	1.9	1.0	25	1.3	0.5
1.0	15.8	6.7	500	1.0	1.0	206	1.9	1.0	17	1.3	0.5
1.3	15.8	4.0	500	1.0	1.0	206	1.9	1.0	16	1.3	0.5

**Fig. 2.** Simulated ship-induced wave patterns and time series of wave height in three experiments: (a) sub-critical wash condition, (b) critical wash condition, and (c) super-critical wash condition.

기의 반각은 Fr_d 가 증가함에 따라 점차 증가하여 $Fr_d=1$ 에서 90° 가 되었다가 Fr_d 가 더 증가하게 되면 다시 감소하게 된다. Havelock(1908)은 이 썰기의 반각(β)과 Fr_d 사이의 관계식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\beta = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{8(1-n)}}{3-n}\right) & Fr_d < 1 \\ \sin^{-1}\left(\frac{1}{Fr_d}\right) & Fr_d \geq 1 \end{cases} \quad (30)$$

$$n = \frac{2}{Fr_d^2 \sinh(2/Fr_d^2)} \quad (31)$$

Fig. 2는 Fr_d 가 각각 0.7, 1.0, 1.3인 경우에 대해 모델에 의해 계산된 항주파의 수평형상과 선박의 출발점에서 250 m, 항로로부터 75 m 이격된 거리에서 항주파의 시계열을 제시한 것이다. 식 (30)으로 계산된 썰기의 반각은 Fr_d 가 0.7, 1.3일 때 각각 23.4°와 50.3°이며, Fig. 2에 제시된 바와 같이 모델에 의해 계산된 항주파의 수평파형 썰기의 반각은 식 (30)에 의해 계산된 반각의 크기와 잘 일치하였다. Fr_d 가 0.7인 sub-critical 속도의 경우 항주파는 전형적인 발산파와 횡파의 형태가 잘 나타나고 있으며, Fr_d 가 1.0인 임계 속도에서는 횡파가 거의 발생하지 않고 선수에서 발생하는 장주기의 임계파 및 발산파의 형태가 잘 재현되었다. Fr_d 가 1.3인 super-critical 속도의 경우는 발산파가 순차적으로 길게 형성되어 전파되며 선행파가 V자 형태로 직선화되고 항로에 가까이 위치할수록 파장이 감소하는 특징을 잘 재현하고 있다.

모델에 의해 계산된 항주파고의 특성을 검토하기 위해 동일한 수심에서 선속을 변화시켜 가면서 수치실험을 수행하였다. 실험을 위한 선박의 제원은 길이 1.13 m, 폭 0.30 m, 선체깊이 0.04 m, 무게 4.2 GT이며, 격자는 수평적으로는 0.05 m 간격의 등격자를 적용하였고 수직적으로는 해수면 부근에서 최소 0.02 m, 해수면으로부터 먼 곳에서 최대 0.07 m의 가변격자를 적용하였다. 선박 제원 및 실험 조건은 Table 2에 제시된 바와 같다.

Fig. 3은 항로로부터 0.6 m 이격된 위치에서 Fr_d 의 변화에 따라 계산된 항주파고와 그 추세선(fitting curve)을 나타낸 것이다. 실험 결과 임계속도 부근까지 파고가 급격히 증가하여 임계속도 부근에서 최대파고를 형성하고 이후 임계속도보다 선속이 빠른 구간에서는 파고가 감소하면서 일정하게 수렴하는 파고의 형태가 잘 재현되었으며, 이는 Johnson(1958)의 수리실험 결과의 선속에 따른 항주파고 분포 형태와 잘 일치하는 결과이다. 계산된 최적의 추세선 식은 다음과 같다.

$$Fr_d \leq 1.04: H = -0.0022 + 0.0014e^{3.3441Fr_d} \quad (32)$$

$$Fr_d \geq 1.04: H = 0.0273 + 553.4144e^{-10.2445Fr_d} \quad (33)$$

3.2 항주파 재현

여수구항 해역에서 FLOW-3D[®]를 이용하여 선박이 직선항로를 항행할 경우와 두 척의 선박이 교행할 경우 그리고 곡선항로를 항행할 경우에 발생하는 항주파를 각각 재현하였다. 선박이 직선항로를 항행할 경우는 항로의 평균 수심에 해당하는 수심을 전 영역에 동일하게 적용한 상황과 실제 수심을 반영한 상황에 대한 항주파를 각각 실험하여 수심 차이에 따른 파형의 변화를 검토하였으며, 교행시와 곡선항로 항행시는 실제 수심을 적용하여 항주파를 재현하였다.

실험을 위한 선박의 제원은 항주파의 파형 검토시와 동일한 선박에 대하여 실험하였으며 선박의 항행속도는 15 knot(7.72 m/s)를 유지하였다. 격자는 수평적으로 선박

Table 2. Experimental conditions for wave height as a depth Froude number

Ship dimension (m)			Ship weight (GT)	Ship speed (m/sec)	Water depth (m)	Cell information						
Length	Beam	Draft				X		Y		Z		
						No.	Size (m)	No.	Size (m)	No.	Size(m)	
											Max	Min
1.13	0.30	0.04	4.2	0.762~2.438	0.16	300	0.05	50	0.05	15	0.07	0.02

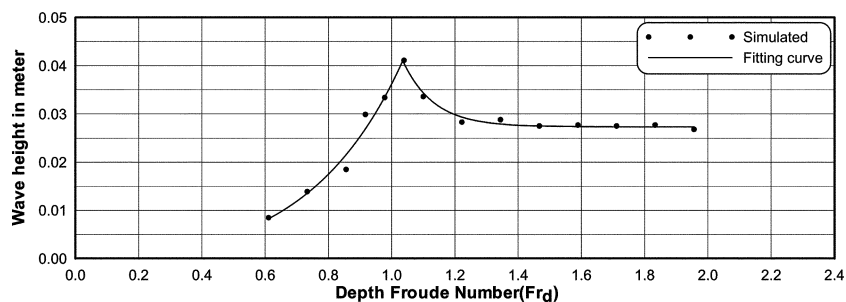


Fig. 3. Simulated wave height as a function of depth Froude number.

Table 3. Experimental condition for ship-induced wave application.

Case	Ship speed (knot)	Depth condition	Cell information									Remark
			X			Y			Z			
			No.	Size(m)		No.	Size(m)		No.	Size(m)		
		Max	Min		Max	Min		Max	Min			
A	15.0	constant (12.0 m)	550	5.1	1.0	210	15.9	1.0	19	4.8	0.5	one ship moving straight
B	15.0	real	550	5.1	1.0	210	15.9	1.0	19	4.8	0.5	one ship moving straight
C	15.0	real	550	5.1	1.0	210	15.9	1.0	19	4.8	0.5	two ships passing each other
D	15.0	real	550	1.6	1.6	330	5.5	1.5	19	4.8	0.5	one ship moving in a curve

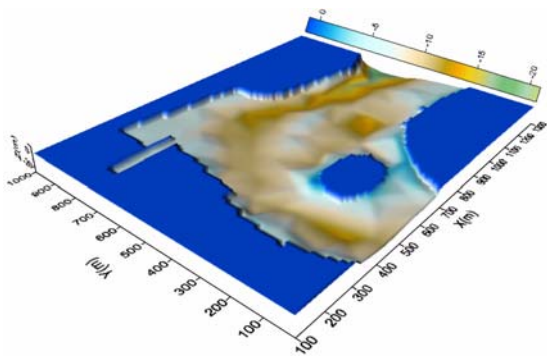


Fig. 4. The bathymetric map of Yeosu-Guhang.

이 진행되는 항로주변과 수직적으로 항주파가 형성되는 해수면 부근을 세밀하게 하고 항로에서 멀어질수록, 수심이 깊어질수록 상대적으로 넓게 구성함으로써 메모리 사용을 최소화하고 선박모양이 보다 정확하게 적용될 수 있도록 하였다. Table 3은 각 실험안에 대한 내용을 나타낸 것이고 Fig. 4는 실험을 위하여 구성된 여수구항 인근해역의 수심분포를 제시한 것이다. 모델에 입력된 수심은 국립해양조사원에서 최근에 간행된 해도를 이용한 것으로 여수항의 평균해면을 기준으로 입력한 수심이다.

3.2.1 직선항로 항행시

선박이 직선항로를 항행할 경우에 대한 실험은 계산영역 전체를 동일한 수심으로 입력한 상황(12 m, $Fr_d = 0.71$)과 실제 수심을 적용한 상황으로 구분하여 항주파의 형상을 비교, 검토하였다. Fig. 5는 실험시 고려된 직선항로의 위치와 항로상에서의 depth Froude number(Fr_d) 및 항주파의 파고 시계열 비교를 위한 위치를 제시한 것이다.

Fig. 6은 일정수심(Case A)과 실제수심(Case B)에 대하여 계산된 항주파의 수평파형을 비교한 것으로 선박이 출발한 후 40초가 경과한 후까지는 Case A와 Case B 모두 Fr_d 값이 비슷하므로 sub-critical wash 형태의 항주파가 생

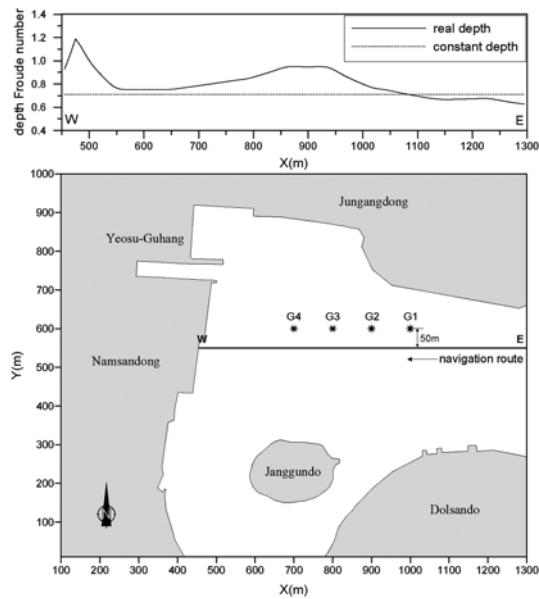


Fig. 5. The navigation route (bottom) and depth Froude number profile (top) on the route. Wave heights are compared at four points, G1, G2, G3, and G4.

성된다. 한편, 75초가 경과한 후에는 일정수심(Case A)인 경우는 초기 파형이 유지되는 반면 실제수심(Case B)인 경우는 수심이 낮아짐에 따라 Fr_d 가 증가하여 선수에서 입계파의 형태가 나타난다. 따라서 수심 차이에 따른 항주파의 수평적인 파형은 서로 다른 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 G1, G2, G3, G4 지점에서 수심조건에 따른 항주파의 시계열을 비교한 것으로, G1 지점에서는 일정수심인 경우(Case A)와 실제수심인 경우(Case B)를 비교할 때 수심에 따른 Fr_d 의 차이가 거의 없으므로 계산된 항주파의 파고 시계열이 서로 유사한 경향을 나타낸다. 한편, G2 지점의 경우는 일정수심에 비해 실제수심의 경우가 파의 진행속도가 느려짐을 알 수 있다. 또한, 실제수심의 경

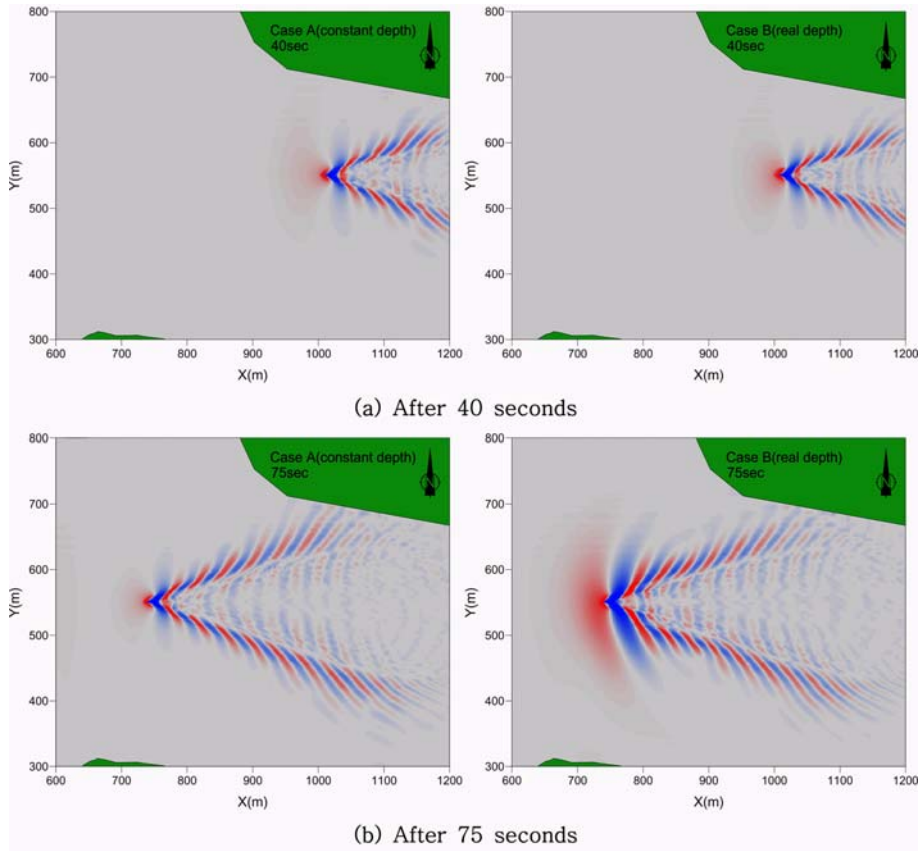


Fig. 6. Ship-induced wave patterns in two cases, using constant depth (Case A) and real depth (Case B).

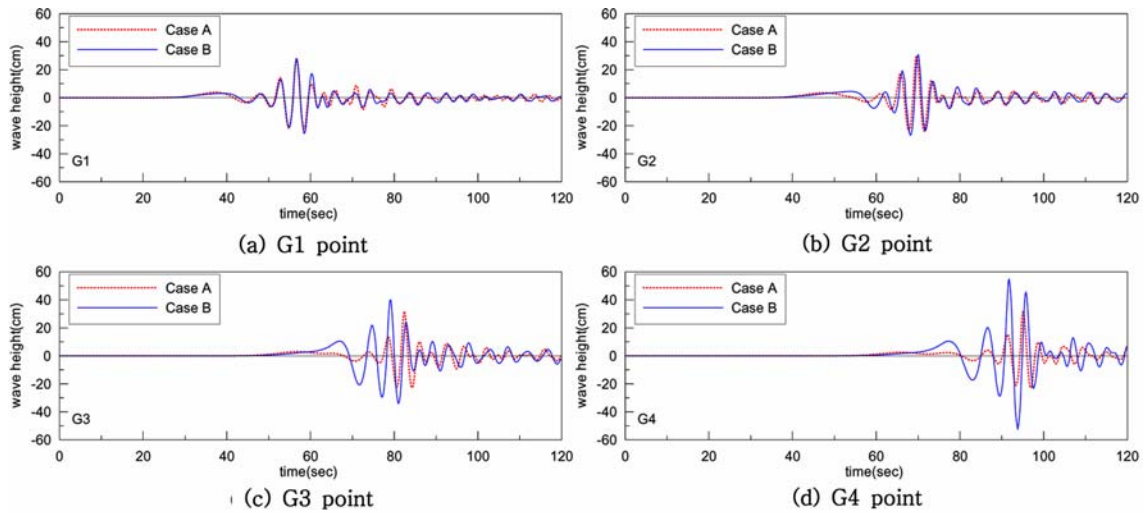


Fig. 7. Time series of ship-induced wave height at four points, (a) G1, (b) G2, (c) G3, and (d) G4, using constant depth (Case A, dot red line) and real depth (Case B, solid blue line).

우 G3 지점과 G4 지점에서 수심이 감소함에 따라 Fr_d 가 증가하여 선수에 임계파의 형태가 나타나고 파고도

증가하여 일정수심인 경우와 다른 형태의 파형을 나타낸다.

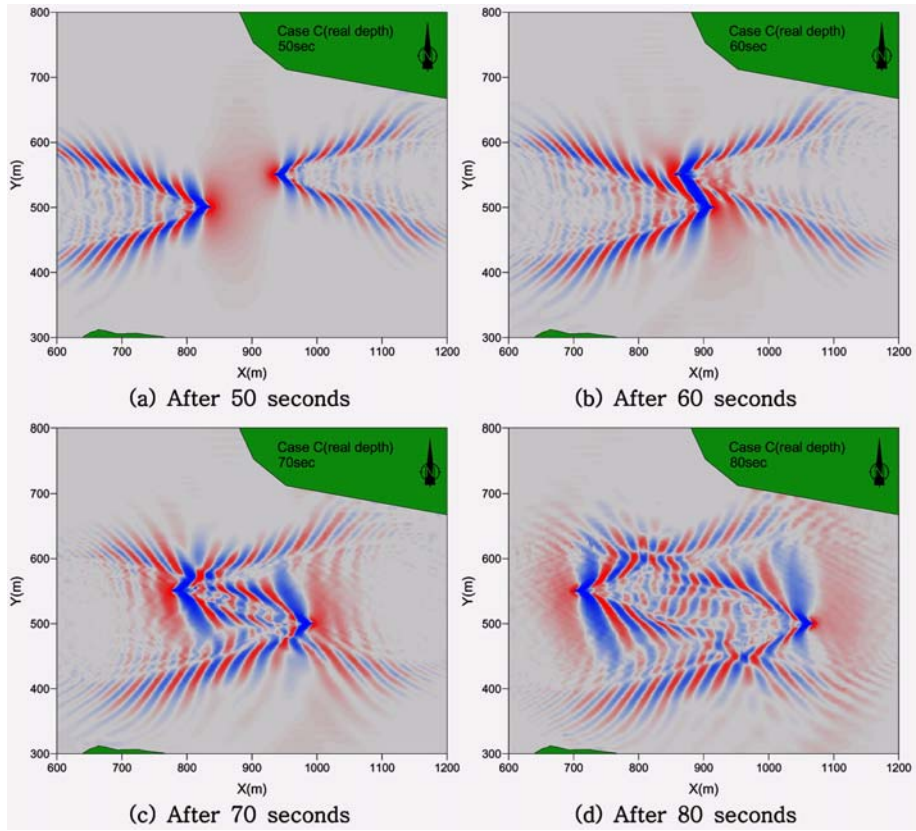


Fig. 8. Ship-induced wave patterns in case of two ships passing each other.

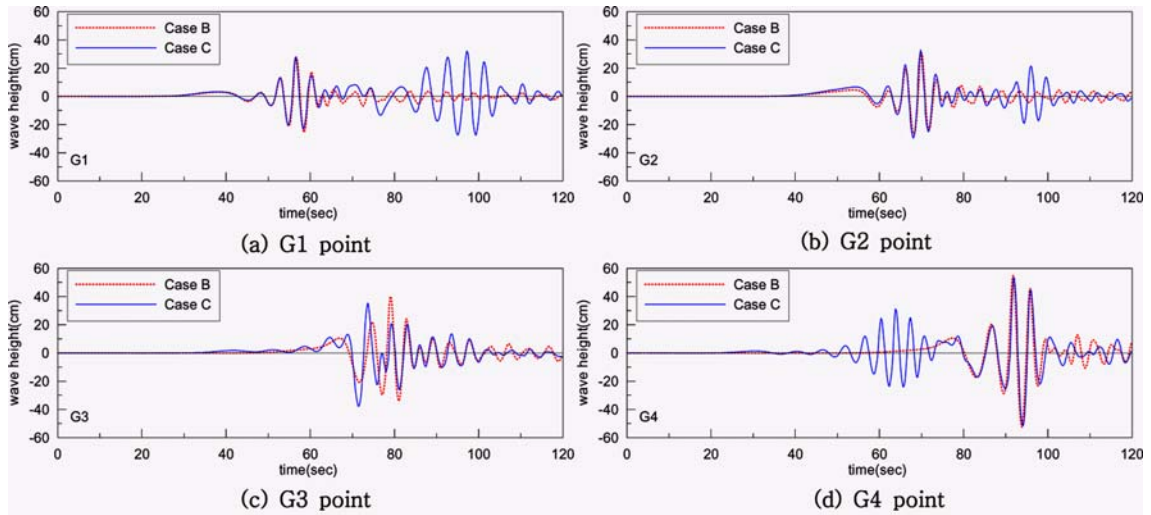


Fig. 9. Time series of ship-induced wave height at the points, (a) G1, (b) G2, (c) G3, and (d) G4, in two cases: one ship moving straight (Case B, dot red line) and two ships passing each other (Case C, solid blue line).

이러한 결과로부터 모델은 수심의 변화에 따른 항주파의 변화를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 교차 항행시

소형선박이 대형선박의 측면을 교차항행할 경우, 대형선

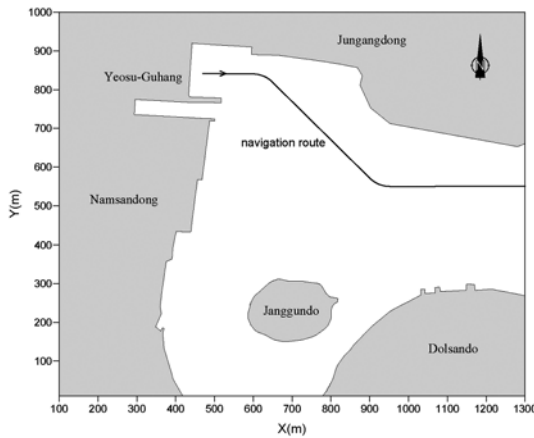


Fig. 10. The navigation route for ships moving in a curve.

박에 의해 발생하는 항주파에 의한 영향을 받을 수 있다. 따라서, 수치모델로 선박의 교차항행 상황을 재현하는 것은 선박의 안전 운항에 유용한 자료가 될 것으로 판단된다. 본 실험에서 교차항행 상황은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 동쪽에서 서쪽으로 항행하는 직선항로를 기준으로 하여 50 m 남쪽 지점에서 동쪽으로 항행하는 직선항로를 추가하여 두 척의 선박이 교차 진행하는 상황을 재현하였다. 실험은 실제수심 상황에 대하여 실시하였으며, 적용된 선박은 앞에서 실험한 동일한 선박을 적용하였다.

Fig. 8은 두 척의 선박이 교행할 경우 시간에 따른 항주파의 수평파형을 제시한 것으로 모델은 교차진행에 따른 항주파의 변화양상을 잘 재현하고 있다.

Fig. 9는 실제수심 조건에서 선박이 서쪽으로 단독 항행시(Case B)와 두척의 선박이 교행시(Case C)에 대하여 항주파의 파고를 시계열로 비교한 것이다. 항주파의 파고는 G1, G2, G4 지점에서는 서쪽에서 진행하는 선박과 동쪽에서 진행하는 선박에 의해 발생한 항주파는 서로 중첩되지 않으나, G3 지점에서는 항주파가 서로 중첩되는 파고 분포를 나타낸다. 특히 G3 지점은 파고가 서로 중첩되면서 파의 위상에 따라 증가 또는 감소되는 현상을 잘 나타내고 있다.

3.2.3 곡선항로 항행시

실제로 선박은 항내 또는 항로에서 직선뿐 아니라 곡선으로도 항행하므로 보다 실제적인 항주파를 재현하기 위해서는 선박의 항적에 따라 직진과 곡선항행 상황 모두를 고려할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 Fig. 10과 같은 임의의 직선 및 곡선항로를 따라 항행하는 선박에 의한 항

주파를 재현하였다. 항로는 연안에서 선박이 출발한 후 항로를 따라 우회전과 좌회전을 시도한 후 직선항로에 도달하도록 설정하였으며, 선속은 15 knot를 유지하도록 하였다. 선박의 출항시 속도의 가속은 10초간 이루어지도록 설정하였다. 실험시 선체의 회전은 회전 각속도를 입력하는 방법으로 재현하였으며 수심은 실제수심을 적용하였다. Fig. 11은 곡선항로 항행시 발생하는 항주파의 수평파형을 도시한 것으로 선박이 항로를 따라 진행하면서 발생하는 파랑의 변화양상을 잘 재현하고 있다.

4. 결과 및 토의

대표적인 상용 CFD 코드 중 하나인 FLOW-3D[®] 모델에서 6-자유도를 적용한 음해법의 GMO 모듈을 이용하여 항주파의 재현상황을 살펴보았다. 모델에 의한 항주파의 형상은 depth Froude number(Fr_d)에 따른 전형적인 수평 파형이 잘 재현됨을 알 수 있었다. 선박이 직선항로로 항행시에 동일한 수심과 실제 수심인 경우를 비교함으로써 모델이 수심 차이에 따른 항주파형의 변화를 잘 재현함을 확인하였으며, 실제수심 조건에서 두 척의 선박이 교행할 경우와 선박이 곡선항로를 진행할 경우에 대한 항주파도 각각 재현하였다.

FLOW-3D[®]를 이용한 항주파의 재현시 파의 특성은 입력되는 선박의 형태를 세밀하게 입력할수록, 즉 수평 및 수직격자가 작을수록 정밀한 결과를 도출할 수 있으나, 실제 지형의 적용시에는 컴퓨터의 계산시간 및 메모리의 한계로 인해 적절한 크기의 격자로 결정하였는데 이는 실제 선박에 의한 항주파와 모델에 의해 계산된 항주파 사이에 편차를 나타낼 수 있는 하나의 요인이 될 수 있을 것이다.

FLOW-3D[®]를 이용한 항주파의 수치모의시 가장 큰 제약점은 앞에서도 언급한 바와 같이 컴퓨터의 계산시간과 메모리의 한계를 들 수 있다. 그러나 물체와 유체의 움직임 동시에 고려하여 실제 발생하는 항주파를 실제상황과 가장 유사하게 재현할 수 있는 장점을 가지고 있으며 계산시간과 메모리의 한계에 대한 문제를 지속적으로 보완해 나가고 있다. 따라서, 이러한 한계를 개선한다면 지역적인 특성에 맞도록 모델을 설정하고 관측을 통한 모델의 검·보정을 수행함으로써 항주파의 특징을 보다 정확하게 파악하고 항내뿐 아니라 보다 넓은 범위의 항주파의 검토가 가능할 것으로 보인다.

또한, FLOW-3D[®]는 파의 전파 특성을 고려할 수 있으므로 너울과 항주파를 동시에 검토하거나 풍파와 항주파

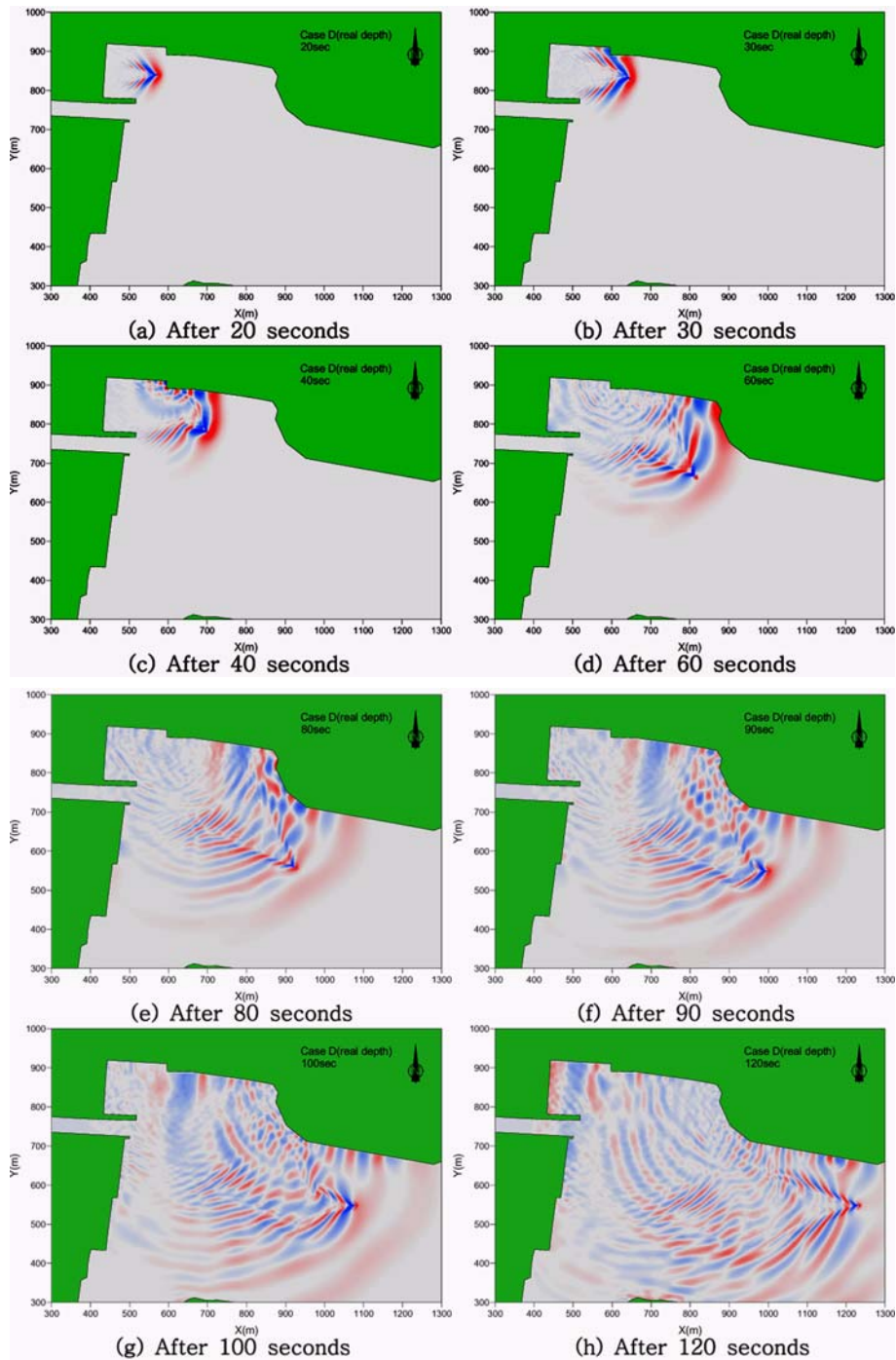


Fig. 11. Ship-induced wave patterns in case of ships moving in a curve.

를 동시에 검토하는 것이 가능할 것이다. 특히, 해수유동과 조간대의 고려가 가능하므로 서해안처럼 조차가 큰 해

역에서 수위변화에 따른 항주파의 특성 검토에도 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 강성진, 김선규, 손창배, 김종성, 홍정혁, 김창제(2007). 항주파의 특성에 관한 연구. 한국항해항만학회지, 제31권, 제5호, pp.339-344.
- 신승호, 정대득(2003). 비선형분산파랑모형을 이용한 항주파의 발생과 전파에 관한 수치예측모형 개발. 한국항해항만학회지, 제27권, 제5호, pp.527-537.
- 이화영, 권세영, 오병철, 전인식(2003). 항내 항주파 계산을 위한 수치모의. 한국해양안해양공학발표논문집, 제14권, pp.270-275.
- 한태영(2004). 선박운항에 따른 항주파 영향 및 저감 방법에 관한 연구. 연세대학교 공학대학원 석사학위논문. 運輸省港灣局監修(1999), 港灣の施設の技術上の基準·同解説(上·下). (社)日本港灣協會, pp.132-138.
- Dam, Khanh Toan, Katsutoshi Tanimoto, Ba Thuy Nguyen, Yoshiyuki Akagawa (2006). Numerical study of propagation of ship waves on a sloping coast. Ocean Engineering, vol. 33, pp.350-364.
- de Vries, S. (2007). On the Generation of Surfable Ship Waves in a Circular Pool, part II. Delft University of Technology, M.Sc. Thesis.
- Goldstein, H., Charles, P. and Safko, J. (2002). Classical Mechanics. Addison Wesley, Washington.
- 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, London, Series A, Vol. 81, No. 549, pp. 398-430.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comp. Physics, vol. 39, pp.201-225.
- Hirt, C.W. and Sicilian, J.M. (1985). A porosity technique for the definition obstacles in rectangular cell meshes. Flow Science, Inc., FloSci-Bib3-85.
- Hirt, C.W. and Richardson, J.E. (1999). The modelling of shallow flows. Flow Science, Inc., Technical Notes, FSI-99-TN48R.
- Hirt, C.W. (1999). Addition on wave transmitting boundary conditions to the FLOW-3D program. Flow Science, Inc., Technical Notes, FSI-99-TN49.
- Jiang, Tao, Rupert Henn, Som Deo Sharma (2002). Wash Waves Generated by Ships Moving on Fairways of Varying Topography. 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, JAPAN.
- Johnson, J.W. (1958). Ship Waves in Navigation Channels, Proceedings Sixth Conference on Coastal Engineering, Chap. 40, Berkely, California, pp. 666-690.
- Nwogu, Okey (2007). Numerical Modeling of Waves Generated by High-Speed Vessel in Shallow Water with a Coupled Boussinesq-Panel Method. 9th international Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Ann Arbor, Michigan.
- Richardson, J.E. (1996). Surf similarity. Flow Science, Inc., Technical Notes, FSI-96-00-TN44.
- Wei, Gengsheng (2005a). A fixed-mesh method for general moving objects. Flow Science, Inc., Technical Notes, FSI-05-TN73.
- Wei, Gengsheng (2005b). An implicit method to solve problems of rigid body motion coupled with fluid flow. Science, Inc., Technical Notes, FSI-05-TN76.

Received March 31, 2008

Accepted May 9, 2008