부유체하부의 3차원 흐름해석을 위한 Rigid lid 경계조건의 적용

홍남식

동아대학교 토목공학과

Application of Rigid Lid Boundary Condition for Three Dimensional Flow Analysis beneath Floating Structure

Nam-Seeg Hong

Department of Civil Engineering, Donga University, Busan, Korea

KEY WORDS: Rigid lid 경계조건, σ 좌표계, 부유체, 압축계수, 국부압력, 자유수면

ABSTRACT: In this paper, the rigid lid boundary condition is applied to simulate the influence of floating structures such as ships or pontoons, and the pressure term in both the momentum equations and continuity equation are modified. The pressure of a floating structure under the free surface is dependent on the draft of the structure, generally called a ship. If the free surface is covered by a floating structure, the free surface cannot move freely. The water level should be fixed, using a rigid lid boundary condition. This boundary condition is implemented by reducing the storage area of the grid cell with a factor between zero and one. The numerical model developed by Hong (2009) is verified through a comparison with experimental results, and the influence of the reduction factor is investigated using the verified numerical model.

1. 서 론

해상에 정박해 있는 선박과 같은 부유체는 조석에 의한 해수 유동을 간섭하게 된다. 특히, 선박이 항내 입구에 접안해 있는 경우에는 해수유동의 흐름을 변형시키게 된다. 이와 같은 흐름 장내에 수공구조(Hydraulic structure)가 존재할 경우의 해석은 현재까지 꾸준히 진행되어 왔다. 한 예로, 유연막체로 인한 파랑제어효과에 관해서는 Wang and Ren(1993)이 연구를 시작한 이후 다양한 연구(Yu and Chawang, 1994; 조일형, 1994; 조일형과 홍석원, 1995; Cho et al., 1997; 1998; Cho and Kim, 2000; 기성태, 2002)가 수행되어 왔다.

조석의 경우, Jager and Schijndel(2000)는 운동량방정식 내에 장애물의 영향을 표현하였다. 장애물을 운동량방정식의 에너지 손실로 고려하여, 운동량보존 법칙으로부터 장애물로 인한 에너지손실은 장애물 근처경계에서 압력수두차로 나타남으로 표현하였다. 즉, 에너지손실을 비선형 2차손실항으로 유속과 손실 계수로 표현하였다. 특히, 홍남식 등(2008)은 조석에 의한 흐름 장내에 설치된 오타방지막을 운동량방정식내의 비선형 2차 에너지손실항으로 표현하여 3차원 조석흐름 수치모형을 수행하였으며, 비선형 2차 손실항의 손실계수는 수조실험을 통하여 얻었다. 그러나, 선박과 같은 수공구조는 선박저면의 폭이 클 뿐만 아니라, 저면 형상이 일정하지 않아 단순히 에너지 손실로 표현하기에는 부적절하며, 부체구조에 의해 자유수면이 덮여있는

경우 자유수면은 움직이지 않고 고정되게 된다. 즉, 수면은 Rigid lid 경계조건처럼 공간에 고정된다.

Rigid lid 경계조건의 모델링은 Bryan(1969)이 Streaming Function에 적용한 후 Marchuk and Sarkysian(1986), Demin and Ibraev(1989)에 의해 고정형상을 유지하는 자유수면 압력항을 적용하여 수치 수식화를 수립하였으며, Dukowicz et al.(1993)에 의해 효율적으로 수정되었다. Klemp and Durran(1983)은 Rigid lid 경계조건을 파랑에 의한 방사경계조건(Radiation boundary condition)에도 적용하였으며, 이는 Kornilov and Kharitnov(1984)의 실험자료에 의해 검증되었고, DNS자료(Rai and Moin, 1993)에 의해서도 재검증되었다. 또한, 최근에는 Tseng et al.(2005)은 DieCAST모델에 적용하는등 꾸준히 근사모델로서 응용되어왔다. 최근에는 홍남식(2009)에 의해 선박과 같은 부유체의 저면을 운동량방정식과 연속방정식의 압력항을 Rigid lid 경계조건을 이용하여 수정한 후 3차원 유동해석을 수행함으로써 조석하에 있는 접안선박과 같은 부유체로 인한 유동장의 변화를 조사하였다. 그러나, 통과유량에 의해 모델 검증을 수행하여 Rigid lid 경계조건의 적용으로 인한 격자망(Grid cell)영역축소를 반영하지 않았다.

그러므로, 본 연구의 목적은 홍남식(2009)에 의해 개발된 모델을 실험결과와 비교하여 검증을 하였으며, 격자망 영역축소로 인한 임의 비율항계수의 특성을 조사하였다. 또한, 부산 신항 연결 잔교 접안의 경우에 적용하여 접안선박 하부의 조류속의

변화를 조사하였다.

검증결과, 제시한 수치모형은 수심 방향 유속 일부를 제외하고는 대부분 실험결과를 잘 나타내고 있는 것으로 판단되었다. 그리고, 임의 비율항 α 값의 영향은 수직방향의 유속에만 시작부와 종점부에서 영향을 미치고, α 값이 적을수록 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

2. 수학 모델

2.1 지배방정식

본 연구에서 취급할 모델영역의 수심이 수평방향 길이에 비해 상당히 작으므로 식 (1)의 σ 좌표계를 적용하였다. 그러므로, 천해역 가정(Shallow water assumption)이 타당성을 가지며 수심방향의 운동량방정식은 정수압(Hydrostatic pressure)의 관계로 간략화 된다.

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (1)$$

여기서, z 는 실제 연직좌표계, ζ 는 기준면($z=0$)상의 자유수면 변위, d 는 기준면하의 수심, 그리고 $H(=d+\zeta)$ 는 총 수심을 나타낸다.

σ 좌표계에서 수심평균 연속방정식은 식 (2)와 같으며 수평방향 ξ, η 방향의 운동량방정식은 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta) U \sqrt{J_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} \\ & + \frac{1}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta) V \sqrt{J_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $J_{\xi\xi}$ 와 $J_{\eta\eta}$ 는 수평좌표계(ξ, η)에서의 Jacobian을 U, V 는 수평방향의 수심평균유속을 나타내며 Q 는 단위면적당 유입, 용출량으로 식 (3)과 같다.

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{output} - q_{input}) d\sigma \quad (3)$$

여기서 q_{output}, q_{input} 은 단위체적당 국부적 발생 유입, 용출량 (Sink and source) 이다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{J_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\bar{w}}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ & + \frac{uv}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + S_{\xi} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{J_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\bar{w}}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ & - \frac{u^2}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + S_{\eta} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, f 는 Coriolis 상수, ν 는 와동점성계수를 나타내며 S_{ξ} 와 S_{η} 는 각각 ξ, η 방향의 운동량 Source나 Sink이다. 또한, u 와 v 는 각각 수평방향인 ξ, η 방향의 유속이고, $\bar{w}$ 는 연직 ζ 방향의 이동 σ -plane에 대한 상대유속으로 식 (6)의 연속방정식으로 부터 계산되며 고정좌표계에서의 실제 수심방향의 유속 w 는 식 (7)로부터 얻어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta) u \sqrt{J_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta) v \sqrt{J_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \\ & + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \sigma} = H(q_{input} - q_{output}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} w = \bar{w} + & \frac{1}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{J_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{J_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] \\ & + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

천해역의 경우 수심방향의 운동량방정식은 식 (8)에서와 같이 정수압으로 가정되어 표현된다. 즉, 부력영향과 수심의 급격한 변화로 인한 수심방향의 가속도는 무시된다고 보았다.

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (8)$$

여기서, ρ 와 g 는 각각 단위밀도와 중력가속도를 나타낸다.

2.2 경계조건 및 난류모델

불투과성(Impermeability) 가정에 의하여 자유수면($\sigma=0$)과 바닥($\sigma=-1$)에서의 연직 ζ 방향의 이동 σ -plane에 대한 상대유속 $\bar{w}$ 는 식 (9)와 같은 운동조건(Kinematic condition)으로 주어진다.

$$\bar{w}_{\sigma=-1} = 0, \quad \bar{w}_{\sigma=0} = 0 \quad (9)$$

그리고, 해저바닥과 자유수면에서의 운동량방정식에 대한 경계조건은 각각 식 (10), (11)과 같이 주어진다.

$$\frac{\nu}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho} \tau_{b\xi}, \quad \frac{\nu}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho} \tau_{b\eta} \quad (10)$$

$$\frac{\nu}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho} \tau_{s\xi}, \quad \frac{\nu}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho} \tau_{s\eta} \quad (11)$$

여기서 ν 는 와동점성계수, $\tau_{b\xi}, \tau_{b\eta}$ 는 각각 ξ, η 방향의 해저전단응력으로 해저바닥 바로 상층(Above layer)의 수평유속벡터 $\vec{u}_b$ 와 절대치 $|\vec{u}_b|$ 의 향으로 식 (12)와 같이 벡터로 표현되고, $\tau_{s\xi}, \tau_{s\eta}$ 는 각각 수표면 전단응력으로서 바람에 의해 발생하며 그 크기는 식 (13)과 같이 나타난다.

$$\vec{\tau}_b = \frac{\rho g u_b |\vec{u}_b|}{C_{3D}} \quad (12)$$

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (13)$$

식 (12)에서 C_{3D} 는 Chezy계수, 식 (13)에서 ρ_a 는 공기밀도, C_d 는 항력계수, 또한, U_{10} 은 자유수면 위 10m에서의 풍속이다.

난류모델은 $k-\varepsilon$ 모델을 적용하며 혼합길이(Mixing length)는 Kinetic energy k 와 Energy dissipation ε 로부터 다음 식 (14)로부터 결정된다.

$$L = C_D \frac{k \sqrt{k}}{\varepsilon} \quad (14)$$

적용 난류모델에서 에너지 소산(Dissipation)항이 가장 지배적이며, 수평방향의 길이 Scale이 수직에 비해 크다는 가정으로 이송방정식(Transport equation)이 비 보존(Non-conservation) 형태로 적용된다.

2.3 Rigid lid 경계조건

흐름장내의 선박이나 폰툰과 같은 부체구조의 영향을 시뮬레이션하기 위하여 운동량방정식과 연속방정식에서의 압력항이 수정되어 진다. 자유수면(Free surface)에서의 부체의 압력은 부체구조의 홀수(Draft)를 ds 라 하면 다음 식 (15)와 같다.

$$P_s = \rho g d_s \quad (15)$$

부체구조에 의해 자유수면이 덮여있는 경우 자유수면은 움직이지 않고 고정되게 된다. 즉, 수면은 Rigid lid 경계조건처럼 공간에 고정된다. 이러한 경계조건은 격자망(Grid cell)의 영역을 임의 비율항 α 로 줄임으로써 식(16)으로 표현된다. 즉, 식(16)은 압력항을 수정한 것으로 연속방정식(2)의 첫 번째 항을 대치하게 된다.

$$\alpha \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (16)$$

여기서, 흐름전파시의 수치부정확을 막기 위하여 $0 < \alpha \leq 1$ 을 유지하며 부체구조 아래의 전파속도는 다음 식(17)에서 보듯이 증가되게 된다.

$$\sqrt{\frac{gH}{\alpha}} \quad (17)$$

3. 수치 모형

3.1 수치 모형 개요

본 연구에서 사용한 격자체계는 Fig. 1에서 보듯이 꼭지좌표에 대한 Mapping에 의해 Physical cell을 Computational cell로 변환(식 (2)~식 (7)의 $J_{\xi\xi}, J_{\eta\eta}$ 참조)시킨 후 Computational cell의 중앙에서는 조위(Water level) η 또는 압력(Pressure) p 를, cell 각 면의 직각방향으로는 유속 u, v, w 를 위치하는 Staggered grid (Fig. 1, Fig. 2 참조)로서 3차원 지배방정식을 시간과 공간에 대하여 유한차분화 한다. 연직방향으로는 수심의 변화에 관계없이 수평방향의 전 영역에 걸쳐 동일한 층(Layer)의 개수를 갖는 σ 좌표격자를 적용한다. σ 격자에서는 각 층의 두께를 서로 다르게 줄 수 있어 국부적인 관심영역(예로 취송류 해석에서 수 표면 근처 층)의 해석에 유용하다.

ADI(Alternating direction integration) scheme(Leendertse and Gritton, 1971; Leendertse et al., 1973)이 시간이력 적분을 위하여 기본적으로 적용되며, 수평방향의 이류항에 대한 공간 이산화(Spatial discretization)를 위하여 ADI scheme을 개선한 방법(Stelling and Leendertse, 1991)이 적용되는데 이는 이류항 중에 $u \frac{\partial u}{\partial \xi}$ 와 같이 동일한 방향의 곱의 성분은 2차 중앙차분(Second order central difference)으로 $v \frac{\partial u}{\partial \eta}$ 와 같이 서로 다른 방향의 곱의 성분의 1계 미분항에 대하여 3차 역방향 유한차분(Upwind finite difference)화를 2개의 2차항으로 분리하여 이산화 하는 것으로 유속의 공간적인 요동(Oscillation)을 급격히 감소시킨다.

수직방향의 각 층간의 수평유속은 수직방향의 이류항과 점성항에 의해 서로 결합(Coupling)되어 해의 불안정성을 없애기 위해 수직방향의 상호 연결항에 대하여 Fully implicit time

Fig. 1 Transformation from physical cell to computational cell

Fig. 2 View of staggered grid system (3D and top view)

integration을 적용한다. 공간적으로 이류항은 아래 식 (18)과 같이 2차 중앙차분을 사용하고 점성항은 1차 중앙차분을 사용하여 이산화 한다.

$$\frac{\bar{w}}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{m,n,k} = \frac{\bar{w}}{H} \Big|_{m,n,k}^{\xi\sigma} \left[\frac{u_{m,n,k-1} - u_{m,n,k+1}}{\frac{1}{2} h_{m,n,k-1} + h_{m,n,k} + \frac{1}{2} h_{m,n,k+1}} \right] \quad (18)$$

여기서, $h_{m,n,k}$ 는 수직방향층격자두께로서 $h_{m,n,k} = \Delta\sigma_k H_{m,n}$ 로 정의된다. 또한, 이산화 방정식이 상호 결합된 비선형항(Non-linear term)을 가지고 있으므로 반복계산(Iteration)이 필요하며 본 연구에서는 이산화 운동량방정식에 수렴하는 인접수위 ($H+\zeta$)경사를 곱하여 비선형 항을 제거한 후, 각 반복단계에서 질량보존(Mass conservation)을 검토하였다.

난류모델에서 Eddy viscosity(ν_e)는 앞 반 시간단계(Previous half time step)의 값을 사용하며, k, ϵ 와 함께 해저바닥 및 수면에서의 경계조건을 정식화하기 위해 각 층의 경계에서 계산하며 수평방향으로는 계산격자의 중앙에서 계산하는 Staggered 격자체계로 구성하였다. 이류항에 대하여 1차 역방향 유한차분을 적용하여 항상 양해(Positive solution)를 갖도록 하였다.

3.2 Rigid lid 경계조건의 수치모형

본 연구의 수치모형에서는 선박에 의해 덮여있는 격자 또한 Staggered 격자체계를 적용하며, 선박주위에 발생하는 조위 및 유속의 급격한 수평방향 경사(Horizontal gradients)로 인해 선박주위에서 유속장의 동요현상이 발생하는 것과 같은 수치적 오류가 발생한다. 이를 막기 위해 이류항을 식 (19)와 같이 역방향 유한차분화 하여 공간이산화 한다.

$$[uu_x]_{m,n,k} = \begin{cases} \frac{u_{m,n,k}^2 - u_{m-1,n,k}^2}{2\Delta x}, & u_{m,n,k} > 0, \\ \frac{u_{m+1,n,k}^2 - u_{m,n,k}^2}{2\Delta x}, & u_{m,n,k} < 0. \end{cases} \quad (19)$$

4. 실험결과와의 비교를 통한 수치모형 검증

4.1 실험 조건

실험은 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에 있는 길이 15m, 폭 1.2m, 수심 2.0m의 current flume에서 수행하였으며, Fig. 3에서 보듯이 수조 중앙에 반경 0.4m(홀수 기준), 길이 1.2m의 반원형 구조물을 수조의 양 측벽에 고정시켰다. 또한, 상류로부터의 흐름에 의해 구조물이 움직이지 않도록 구조물 상부면 중앙을 외부 Frame을 사용하여 고정시켰다. 상류 유속은 10cm/sec부터 10cm/sec씩 증가하여 30cm/sec까지 증가시키면서 실험을 수행하였으며, 유속 관측은 Fig. 3에서 보듯이 구조물의 상류부 시작 지점(u_0, u_1, u_2), 중앙지점(c_0, c_1, c_2), 및 종점(d_0, d_1, d_2)에서 수평 및 연직유속을 측정하였다.

4.2 수치모형 실험 조건

실험결과와의 비교를 위해 수치모형을 구성하였으며 격자망은 Fig. 4와 같이 수평방향으로는 0.04m~0.01m 가변격자, 수심방향으로는 10층 등간격의 σ 격자를 사용하였다. 경계조건으로

Fig. 3 Configuration of current flume experiment

Fig. 4 Grid system of current flume regime

상단은 유속조건을 하단은 수위조건을 할당하였으며, 와동점성 계수의 초기치는 수평방향은 $10^6 \text{ m}^2/\text{sec}$, 수직방향은 $10^4 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 주었다. 상류 유속은 10cm/sec부터 10cm/sec씩 증가하여 30cm/sec까지 증가시키면서 하류 유량이 상류 유량과 동일하게 되도록 하류단 수위를 조절하였다.

4.3 수치모형 검증

수치모형 검증을 위하여 이미 언급한 것처럼 수조실험 측정 결과와 수치모형의 결과를 비교하여, 수평방향 유속은 Table 1에 수심방향 유속은 Table 2에 나타내었다. 수평방향 유속의 경우 모델결과와 측정결과가 최대 10%정도의 범위 내에서 일치하는 것으로 나타났다. 수심방향 유속의 경우는 측정치가 모델결과에 비하여 차이가 났으며 오차범위도 최대 30%정도 차이가 났으나, 그 차이가 중앙지점에서 보다 시작 지점 및 종점에서 나타나는 것으로 보아 Rigid lid 경계조건의 도입 때문이 아니라 난류모델 적요의 한계 때문인 것으로 판단되었다. 그러나 시작지점 보다 종점의 수직방향의 유속이 더 크게 나타나는 경향은 모델이나 실험이나 일치하고, 중앙지점에서의 유속은 별 차이가 없는

Table 1 Comparison of horizontal velocity (m/sec) between model result and measured value

current (m/sec)	0.1		0.2		0.3	
location	model	measure	model	measure	model	measure
u0	0.10	0.09	0.19	0.17	0.29	0.27
u1	0.10	0.10	0.20	0.21	0.30	0.32
u2	0.09	0.08	0.19	0.19	0.28	0.28
c0	0.13	0.12	0.24	0.22	0.38	0.35
c1	0.13	0.14	0.26	0.25	0.39	0.37
c2	0.12	0.12	0.24	0.23	0.37	0.32
d0	0.11	0.10	0.22	0.23	0.33	0.35
d1	0.11	0.11	0.22	0.24	0.32	0.36
d2	0.10	0.11	0.21	0.22	0.31	0.31

Table 2 Comparison of vertical velocity (m/sec) between model result and measured value

current (m/sec)	0.1		0.2		0.3	
location	model	measure	model	measure	model	measure
u0	0.09	0.12	0.15	0.19	0.26	0.31
u1	0.05	0.07	0.07	0.11	0.09	0.16
u2	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
c0	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
c1	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00
c2	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
d0	0.13	0.17	0.25	0.29	0.31	0.37
d1	0.11	0.14	0.19	0.22	0.22	0.25
d2	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02

것으로 나타났다.

그러므로, 본 연구에서 제시한 수치모형은 수심 방향 유속 일부를 제외하고는 대부분 실험결과를 잘 나타내고 있는 것으로 판단되었다.

5. 결과 분석 및 현장 적용

5.1 임의 비율항 α 의 특성 조사

본 연구에서는 Rigid lid 경계조건을 표현하기 위하여 식 (16)에서 보듯이 공간에 고정된 격자망(Grid cell)의 영역을 임의 비

Fig. 5 Vertical grid system of numerical experiment regime

Fig. 6 Comparison of flow vector according to the change of α

율항 α 로 줄임으로써 선박하부의 유속장을 조정하게 된다. 이런 임의 비율항 α 의 특성을 조사하기 위하여 Fig. 5에서 보듯이 수평방향으로는 0.04m부터 0.01m의 가변격자를, 수심 0.2m의 수직방향으로는 10층 등 간격을 사용하고, 최대 흡수심 0.05m의 원형(0.05m 반지름) 및 타원형(0.05m×0.16m) 부유체 구조물을 대하여 수치모형 실험을 수행하였다. 상류 유속은 0.10 m/sec이며 나머지 조건은 4.2절의 경우와 동일하게 하였다. 임의 비율항 α 의 값은 0.6, 0.8 및 1.0 세가지 경우를 적용하였다.

Fig. 6은 원형 부유체의 경우 $\alpha = 0.6, 0.8$ 및 1.0 세 가지 경우에 대하여 연직방향 흐름 벡터도를 나타낸 것으로 α 값이 증가함에 따라 시작지점 및 종점에서 수심방향으로의 유속이 증가하여 유속벡터 기울기가 증가함을 알 수 있다. 정량적으로 좀 더 조사하기 위하여 Fig. 7에 $\alpha = 0.6$ 및 1.0에 대하여 수평방향 및 수심방향의 유속분포를 원형 및 타원형 부유체에 대하여 각각 비교하여 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 수평방향 유속은 원형이나 타원형 모두 α 값에 관계없이 동일한 크기를 보였다. 반면, 수심방향의 유속은 α 값 1.0에 비해 0.6의 경우 시작부와 종점부에서 증가하는 경향을 보였으며, 원형의 경우가 타원형의 경우에 비하여 더 큰 증가를 보였다. 즉, 부유체 저면 윤곽곡선

Fig. 7 Comparison of horizontal and vertical velocity distributions according to the change of floating shape and α value : (a) $\alpha=0.6$, horizontal velocity, circle shape (b) $\alpha=1.0$, horizontal velocity, circle shape (c) $\alpha=0.6$, vertical velocity, circle shape (d) $\alpha=1.0$, vertical velocity, circle shape (e) $\alpha=0.6$, horizontal velocity, ellipse shape (f) $\alpha=1.0$, horizontal velocity, ellipse shape (g) $\alpha=0.6$, vertical velocity, ellipse shape (h) $\alpha=1.0$, vertical velocity, ellipse shape

의 변화율이 큰 곳에서 유속증가가 더 크게 나타났다. 그러나, 이 영향은 부유체 저면에서 멀어질수록 줄어들었다.

그러므로, 임의 비율항 α 값의 변화는 수직방향의 유속에만 영향을 미치고, α 값이 적을수록 더 영향을 받는 것으로 나타났으며, 부유체 저면 윤곽곡선의 변화율이 클수록 더 영향을 받는

Fig. 8 Location map of berthing facility

Fig. 9 Horizontal grid system (a) and the location of berthing ship (b)

Fig. 10 Vertical grid system: (a) section A-A, B-B without ship (b) section A-A with ship (c) section B-B with ship

Fig. 11 Comparison of flow vector in layer1: (a) without ship (b) with ship

Fig. 12 Comparison of flow vector in vertical direction: (a) section A-A, without ship (b) section A-A with ship (c) section B-B without ship (d) section B-B with ship

Fig. 13 Change of velocity in layer 2 at ship center according to time (24 hours): (a) 20,000 DWT (b) 1,000 G/T

것으로 나타났다. 즉, 시작부와 종점부에서 나타나며 저면에서 수심방향으로 멀어질수록 그 영향은 급격히 줄어든 것으로 나타났다.

5.2 현장 적용

본 연구에서 수립된 모델을 부산신항에 건설된 연결잔교(수로폭 300m)에 선박접안시 주변 흐름장의 변화를 조사하기 위해 적용하였다. Fig. 8은 접안시설 위치도를 나타낸 것으로 수로에 20,000 및 1,000톤급 2척이 나란히 접안함으로서 해수유통을 방해하고 있다. Fig. 9는 시뮬레이션 영역의 수평방향 격자도 및 접안선박 위치도(*로 표시)를 Fig. 10은 연직방향의 격자도를 나타낸다.

Set-up된 모델을 적용하여 2012년 3월20일부터 4월19일까지 1개월간의 해수유통 시뮬레이션을 선박의 유무에 따라 수행하되, 수심도는 연결잔교의 완공을 준설을 고려하여 수정하였다. Fig. 11은 시뮬레이션 영역의 일부분을 확대하여 선박의 유무에 따른 layer1의 유속벡터 도를 비교한 것으로 (b)의 경우 접안선박으로 인해 유동장이 변화되는 것을 볼 수 있다. Fig. 12는 Fig. 9(b)에 표시한 A-A, B-B단면에서의 임의의 시간에서의 수심방향의 유속벡터를 선박의 유무에 따라 비교한 것으로 선박으로 인해 선박아래의 유속이 증가하며 선폭이 상대적으로 넓은 B-B단면에서의 유속증가가 더 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 13은 선박중심아래 layer2의 일정지점에서의 시간변화(24시간)에 따른 동서방향(Velocity component1) 및 남북방향(Velocity)의 유속변화와 유속추적도(Velocity trajectory)를 선박유무에 따라 비교한 것으로 Fig. 12와 같은 패턴의 유속증가가 나타남을 알 수 있으며 특히, 선폭이 큰 B-B단면에서는 동서방향의 유속이 크고 남북방향의 유속은 거의 무시할 정도로 적음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 홍남식(2009)에 의해 개발된 모델을 실험결과와 비교하여 검증하였으며, 격자망 영역축소로 인한 임의의 비율항

계수의 특성을 조사하였다. 또한, 부산 신항 연결 잔교 접안의 경우에 현장 적용하여 접안선박 하부의 조류속의 변화를 조사하였다.

검증결과, 제시한 수치모형은 수심 방향 유속 일부를 제외하고는 대부분 실험결과를 잘 나타내고 있는 것으로 판단되었다. 임의의 비율항 α 값의 영향은 수직방향의 유속에만 시작부와 종점부에서 영향을 미치고, α 값이 적을수록 더 영향을 받는 것으로 나타났으며, 부유체 저면 윤곽곡선의 변화율이 큰 원형 부유체가 타원형 부유체에 비하여 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고, 부유체 저면에서 수심방향으로 멀어질수록 그 영향은 급격히 줄어들었다.

참 고 문 헌

- 기성태 (2002). "수중 유연막 방파제 I: 수평-수직 유연막으로 구성된 라멘형 시스템", 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 7-14.
- 조일형 (1994). "파랑중 막구조 방파제의 거동 특성", 한국항만학회지, 제8권, 제1호, pp 15-22.
- 조일형, 홍석원 (1995). "유연막 방파제에 의한 경사파의 산란", 한국해양·해양공학회지, 제7권, 제3호, pp 219-226.
- 홍남식, 김가야, 강운구 (2008). "오타방지막을 포함하는 3차원 흐름 수치모델", 한국해양공학회지, 제22권, 제3호, pp 1-7.
- 홍남식 (2009) "Rigid lid 경계조건을 이용한 부유체 포함 유동해석", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 5월, 창원, 한국.
- Bryan, K. (1969). "A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean". J. Comput. Phys., Vol 4, pp 347-376.
- Cho, I.H. and Kim, M.H. (2000). "Interactions of Horizontal Porous Flexible Membrane with Waves", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ASCE), Vol 126, No 5, pp 245-253.
- Cho, I.H., Kee, S.T. and Kim, M.H. (1997). "The Performance of Flexible Membrane Wave Barrier in Oblique Wave", Journal of Applied Ocean Research, Vol 19, No 3-4, pp 171-182.
- Cho, I.H., Kee, S.T. and Kim, M.H. (1998). "Performance of Dual Flexible Membrane Wave Barrier in Oblique Wave", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ASCE), Vol 124, No 1, pp 21-30.
- Demin, Y.L. and Ibraev, R.A. (1989). "A Numerical Method of Calculation of Currents and Sea Surface Topography in Multiply Conncted Domains of the Ocean". Sov. J. Numer. Anal. Math. Mode& 43): 211-225.
- Dukowicz, J.K., Smith, R.D. and Malone, R.C. (1993). "A Reformulation and Implementation of the Bryan-Cox-Semtner Ocean Model on the Connection Machine". J. Atmos. Oceanol. Techn., Vol 10, pp 195-208.
- Jager, B. and Schijndel, S.V. (2000). 3D Computations around

- Structures, Report Q2487, WL | Delft Hydraulics, Delft, Netherlands.
- Klemp, J.B., and Durran, D.R. (1983). "An Upper Boundary Condition Permitting Internal Gravity wave Radiation in Numerical Mesoscale Models". *Mon. Wea. Rev.*, Vol 111, pp 430-444.
- Kornilov, V.I. and Kharitonov, A.M. (1984). "Investigation of the Structure of Turbulent flows in Streamwise Asymmetric Corner Configurations", *Exp. Fluids*, Vol 2, pp 205-212.
- Leendertse, J.J. and Gritton, E.C. (1971). *A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: Vol II, Computation Procedures*, Report R-708-NYC, The Rand Corporation, Santa Monica.
- Leendertse, J.J., Alexander, R.C. and Liu, S.K. (1973). *A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: Vol I-IV*, Report R-1417, 1764, 1884, 2187-OWRT, The Rand Corporation, Santa Monica.
- Marchuk G.I. and Sarkisyan, A.S. (1986). "Mathematical Modelling of Ocean Circulation". Springer, Berlin, 292 pp. 00-00.
- Rai, M.M. and Moin, P. (1993). "Direct Numerical Simulation of Transition and Turbulence in a Spatially Evolving Boundary Layer", *J. Comp. Phys.*, Vol 109, pp 169-192.
- Stelling, G.S. and Leendertse, J.J. (1991). "Approximation of Convective Processes by Cyclic ACI Methods", *Proceedings of 2nd ASCE Conference on Estuarine and Coastal Modelling*, Tampa.
- Tseng, Y.H. and Ferziger, J.H. (2005). "Regional Circulation of the Monterey Bay Region: Hydrostatic Versus Non-hydrostatic Modeling", *Journal of Geophysical Research-ocean*, Vol 110, C09015, doi:10.1029/2003JC00215 3.
- Wang, K.H. and Ren, X. (1993). "Wave Motion Through Porous Structures", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol 120, No 5, pp 989-1008.
- Yu, X. and Chawang A.T. (1994). "Water Wave Above a Submerged Porous Plate", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol 121, No 5, pp 1270-1278.

2012년 8월 6일 원고 접수

2012년 8월 24일 심사 완료

2012년 10월 25일 게재 확정