

사각격자체계 수치모델에서의 경사면 처리기법에 관하여

On Reasonable Boundary Condition for Inclined Seabed/Structure in Case of the Numerical Model with Quadrilateral Mesh System

허동수* · 이우동** · 배기성***

Hur, Dong-Soo · Lee, Woo-Dong · Bae, Ki-Seong

Abstract

Present study aims at the development of a reasonable boundary condition for a structure over inclined seabed in case of the numerical model with quadrilateral mesh system. The technique for the inclined impermeable/permeable boundary in the quadrilateral mesh is newly proposed. The new technique and LES-WASS-3D model (Hur and Lee, 2007) have been used for the investigation of the dynamics of fluid field, and validated through the comparison with a typical stair-type boundary condition. 3-Dimensional numerical model with Large Eddy Simulation is called LES-WASS-3D, and is able to simulate directly interaction of Wave · Structure · Sea bed/Sandy beach.

Keywords : LES-WASS-3D, impermeable/permeable slope, new boundary condition, fluid resistance, flow field

요 지

본 연구에서는 사각격자체계를 이용하는 수치해석기법을 대상으로 격자내에 생성되는 경사면의 합리적인 처리 및 경계조건을 검토하기 위하여 사각격자내에 존재하는 불투과성 및 투과성구조물의 경사면에 대한 새로운 처리기법과 경계조건을 제안한 후, 파 · 구조물 · 해저지반/해빈의 상호간섭을 직접 해석할 수 있는 3D-수치모델(LES-WASS-3D; 허와 이, 2007)을 이용하여 수치계산을 실시하였다. 이로부터 얻어진 계산결과와 종래의 계단식 격자구성을 이용한 수치해석결과를 비교 · 검토하여 제안한 사각격자내의 경사면 처리기법에 대한 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 3차원 수치해석기법, 불투과성/투과성 경사면, 새로운 경계조건, 유체저항, 흐름장

1. 서 론

우리가 접하고 있는 연안역은 파랑, 조류, 해류 등으로부터 지속적인 물리작용을 받고 있다. 이러한 외력으로부터 연안을 보호하기 위한 목적으로 하는 연안구조물의 건설과 더불어 최근 여가활동시간의 증가로 인하여 Water-Front 및 Resort의 개발이 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 각종 연안구조물을 건설할 경우, 설계 및 시공단계 뿐만 아니라 완공 후의 연안구조물 주변해역의 수리특성을 파악하는 것이 매우 중요한 문제이다.

현재까지 연안구조물 주변의 수리특성을 파악을 파악하기 위하여 경험식(Morison *et al.*, 1950; Goda, 1974)이나 수리모형실험을 통한 방법으로 이루어져왔다. 경험식은 많은 실험의 결과에서 얻어진 일반화된 식으로서 다양한 상황에 적용하기에는 한계가 있다. 또한, 수리모형실험의 경우에는 실험시설의 막대한 건설비용 및 각 실험 시의 모형제작 비용 등으로 인한 경제적인 문제와 모형제작기간과 실험기간

그리고 실험에 얻어진 결과의 해석기간 등에 따른 시간적인 문제가 있다. 또한, 다양한 조건에 따른 구조물의 형상 수정이 어렵고 모든 지점의 측정결과를 얻기란 사실상 불가능하며, 모형을 제거한 후에는 동일한 실험의 재현이 불가능하다. 근래에 와서 컴퓨터 성능 발달의 영향으로 경제 · 시간적인 측면과 더불어 수리모형실험에서 파악하기 어려운 부분까지 구현이 가능한 수치해석기법의 개발 및 수치모형실험이 국내외적으로 많이 이루어지고 있다. 단, 검증을 통한 수치해석기법의 타당성 확보가 매우 중요하다.

수치해석기법은 이산화(Discretization)의 절차를 거치게 되며, 크게 유한차분법(FDM-Finite Difference Method), 유한체적법(FVM-Finite Volume Method), 유한요소법(FEM-Finite Element Method)과 같은 세가지 방법으로 분류될 수 있다. 이산화의 절차를 수행하기 위해서는 격자생성이 우선되어야 하며, 주어진 물리현상의 선행지식(Physical insight)과 수치해석의 안정성(Numerical stability) 그리고 정확도(Accuracy) 등에 따라 격자가 구성된다. 이와 같이 격자로

*정회원 · 교신처지 · 국립경상대학교 토목환경공학부(해양산업연구소) 부교수 (E-mail : dshur@gsnu.ac.kr)

**정회원 · 국립경상대학교 대학원 해양토목공학과 석사과정 (E-mail : dong5345@gnu.ac.kr)

***정회원 · 국립경상대학교 토목환경공학부(해양산업연구소) 교수 (E-mail : kiseong@gshp.gsnu.ac.kr)

구성되는 수치해석기법에서는 구조물을 격자로 처리하기 때문에 경사나 곡률을 가진 구조물을 정확하게 처리하는 것이 불가능하여, 지금까지는 계단식으로 처리하고 있는 것이 현실이다. 계단식으로 처리할 경우 형상에 따른 유체저항이 증가하여 구조물의 표면격자에서 실제현상과 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 이와 같은 문제점의 해결방안의 하나로 유한요소법을 이용한 삼각망(Engsig-Karup *et al.*, 2008)의 격자구성을 채택하는 수치해석기법도 개발되어 어느 정도의 보완은 가능하나 구조물의 완벽한 표현이 어렵고, 총 격자수의 증가 및 격자의 형상에 따른 계산시간이 증가될 우려가 있을 뿐만 아니라, 수증방파제, 이안제 등의 경사면 및 해빈경사와 같은 투과성 경사면의 처리에 대해서는 아직 불완전하다. 따라서 본 연구에서는 사각격자체계를 이용하는 유한차분법을 대상으로 경사를 가진 불투과성/투과성구조물을 사각격자 내에서 정확하고 합리적으로 처리하기 위한 경사면 처리기법을 제안한 후, 전통적인 계단식 처리기법과의 비교·검토를 통해 타당성을 확보함과 동시에 보다 고정도의 수치해석기법의 확립에 기여하는 것을 목적으로 한다.

2. 수치해석기법

본 연구에서는 경사를 가진 구조물을 정확하고 합리적으로 처리하는 기법을 개발하기 위하여 허와 이(2007)에 의해 개발된 3차원 수치해석모델 LES-WASS-3D를 이용하였다. 이 모델은 기존의 3차원 수치해석수법(Hur and Mizutani, 2003; Hur, 2004)을 토대로 SGS모델(Sub-Grid Scale model; Smagorinsky, 1963)을 도입한 수치해석기법(허 등, 2006)에 투과성구조물내의 유체저항으로서 관성저항(Sakakiyama and Kajima, 1992), 난류저항(Ergun, 1952; van Gent, 1995) 및 층류저항(van Gent, 1995; Liu and Masliyah, 1999)을 도입하여 개발된 3차원 수치해석기법이다. 나머지 수치해석기법에 대한 세부적인 내용에 대해서는 허와 이(2007)를 참조하기 바란다.

3. 경사면의 처리기법

3.1 수치구조의 개요 및 입사조건

본 연구에서는 사각격자체계를 이용하는 수치해석기법에서 격자내의 생성되는 경사면을 합리적으로 처리하는 기법을 개발하기 위하여 Fig. 1과 같은 3차원 수치구조를 이용하였으며 수치구조의 교란을 방지하기 위해 양단에 부가감쇠영역을 설치하였다. 해석영역내에는 복합경사를 가진 불투과성/투과성 해저지반을 설치하였고 경사는 1:3, 1:2, 1:1의 순으로 구성하였으며, 투과성 해저지반의 경우는 체적공극률(γ_p) 및 면적투과율($\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$)을 0.3, 평균입경(D_p)을 0.002 cm로 하였다. 계산영역의 측면(y축 양단) 경계조건은 slip조건을 이용하였으며, 입사조건으로서 해저에서 정수면까지 연직으로 일방향 흐름을 발생시켜 수치해석을 수행하였다.

3.2 불투과성 경사면의 경계조건

불투과성 경사면의 경계조건은 경사면을 포함한 불투과성

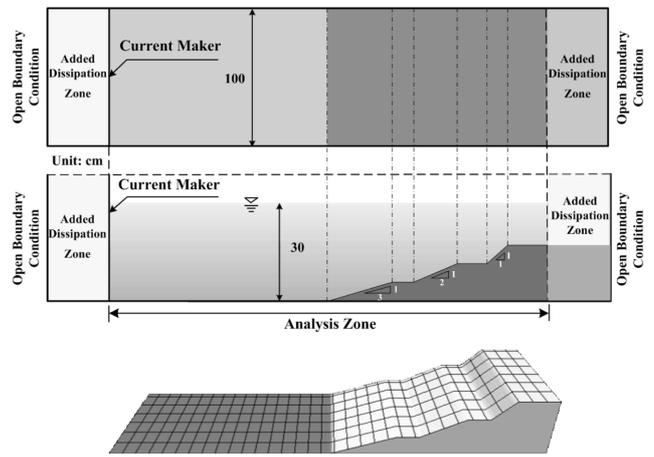


Fig. 1 Definition sketch of 3-D numerical basin

구조물 전체에 법선방향으로는 불투과조건(식 (1))을 적용하였고 접선방향으로는 slip조건(식 (2))을 채택하였으며, Petri *et al.*(1994)의 조건을 이용하여 계산을 수행하였다. 여기서, n_x 와 s_x 는 각각 불투과성구조물 표면의 법선방향과 접선방향을 나타낸다.

$$u_n = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에 unit vector 성분 n_x, n_z 를 이용하여 정리하면 식 (3)-(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$n_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - n_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - n_x n_z \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

$$n_x u + n_z w = 0 \quad (4)$$

Fig. 2에서 나타내고 있는 중간격자의 경사면상 ●에 대해서 접선방향으로 slip조건과 법선방향으로 불투과조건을 적용하여 계산을 수행하기 위해서는 그림 중에 표시된 유속성분이 필요하게 된다. 즉, 그림 중의 점선 화살표(↑, →)로 나타내고 있는 불투과성구조물 내부의 2개의 가상 속도성분이 미지이므로 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다. 또한, 격자내의 유체만 존재할 경우에는 유체저항이 필요하지 않으나 중간격자와 같이 격자내의 일정비율의 불투과성구조물이 생성될 경우 계산상 격자내의 유체저항 도입이 필요하므로 구조물이 차지하고 있는 체적비율(volume ratio)만큼의 관성저항만을 적용하였다. 즉, 관성저항 식에서 불투과성구조물이 차지하고 있는 체적비율을 대입하여 관성저항의 영향을 계산에 고려하였다.

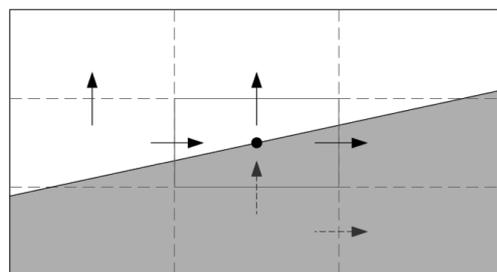


Fig. 2 Virtual velocity components in case of the mesh with inclined impermeable seabed/structure

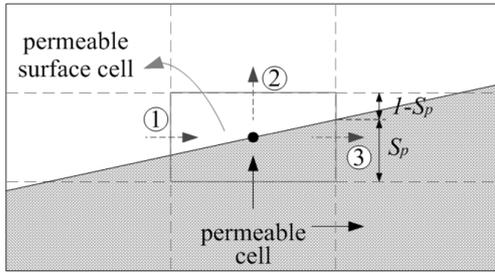


Fig. 3 Estimation of surface permeability in case of the mesh with inclined permeable seabed/structure

3.3 투과성 경사면의 처리기법

Fig. 3에서 나타내고 있는 투과성구조물 내부격자 경계의 유속성분(\uparrow, \rightarrow)은 각 유체저항 식에 주어진 면적투과율($\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$)의 영향을 고려하여 결정되어지지만, Fig. 3의 중간격자에서와 같이 격자내의 경사진 투과성구조물이 존재하는 경우 격자 좌우 경계(①; \rightarrow ; ③; \rightarrow)의 면적투과율은 주어진 값보다 작아지고, 위 경계의 유속성분(②; \uparrow)에 대한 면적투과율은 구조물이 존재하지 않으므로 1이 된다. 이러한 경우 격자 좌우 경계의 유속성분(①; \rightarrow ; ③; \rightarrow)은 다음의 식 (5)에 의해 결정된 x 방향의 면적투과율에 대한 유체저항 $\bar{\gamma}_x$ 을 이용하여 유속성분을 산출한다. 여기서, S_p 는 격자 경계에서 투과성구조물이 차지하고 있는 면적(지면의 직각방향으로 단위 폭 고려)비율을 나타낸다.

$$\bar{\gamma}_x = (1 - S_p) + \gamma_x S_p \quad (5)$$

4. 해석결과

4.1 불투과성 경사면 처리기법에 의한 계산결과

Fig. 4는 불투과성 경사 해저지반을 종래의 계단식으로 처리하여 얻어진 흐름분포도이고, Fig. 5는 불투과성 경사면의 처리기법을 적용(전술한 바와 같이 식 (3)과 식 (4)을 이용하여 접선방향으로 slip조건과 법선방향으로 불투과조건을 적용)하여 계산을 수행한 흐름분포도를 나타내고 있다. 즉, 경사가 존재하는 구조물의 표면격자에 대하여 관성저항을 고려한 결과이다.

계단식으로 불투과성 경사 해저지반을 처리할 경우에는 Fig. 4와 같이 불투과성 해저지반으로 인한 유향변화가 거의 나타나지 않는다. 이와 같은 현상은 유입되는 흐름이 불투과성 해저지반의 접선방향(계산식 경계처리에서 연직부분)에 대해 직각 입사하기 때문에 해저지반의 법선(계단식 경계처리에서 수평부분)에 대해 입사각과 반사각이 모두 0°가 됨으로

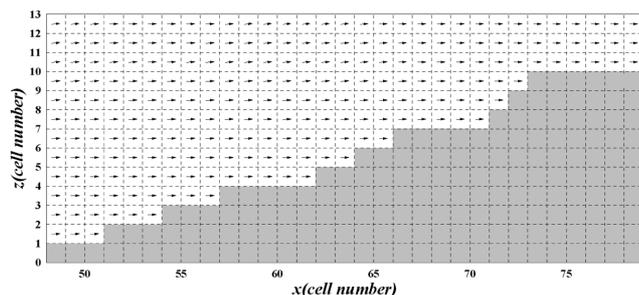


Fig. 4 Flow field in case of the application of typical stair-type technique to inclined impermeable seabed/structure

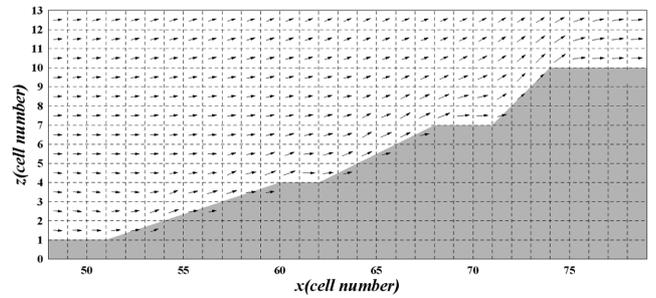


Fig. 5 Flow field in case of the application of newly proposed technique to inclined impermeable seabed/structure

유향의 변화가 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 또한, 반사로 인하여 유속이 일부분 상쇄되기 때문에 수심이 줄어들어도 불구하고 유속변화가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

반면, 본 연구에서 새롭게 제안한 경사면 처리기법으로 불투과성 해저지반을 처리한 Fig. 5의 경우에는 유입되는 흐름이 경사면을 따라 자연스럽게 흐르고, 수심이 알아질수록 유속이 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 불투과 해저지반을 경사면으로 처리함으로써 입사되는 흐름이 불투과 해저지반의 경사면과 평행하게 진행하며, 이와 같은 유향의 변화로 인하여 흐름이 진행할수록 수심이 알아지기 때문에 유속이 빨라지는 현상을 나타낸다.

4.2 투과성 경사면 처리기법에 의한 계산결과

Fig. 6은 투과성 경사 해저지반을 계단식으로 구성하여 얻어진 흐름분포도이고, Fig. 7은 격자내의 투과성 경사면 처리기법을 적용하여 계산한 흐름분포도를 나타내고 있다.

Fig. 6으로부터 경사가 상대적으로 완만한 1:3인 해저지반 저층부분에서는 계단식 격자처리로 인한 급격한 유체저항으로 인하여 계단식 해저지반의 단부부근에서 유향이 급격하

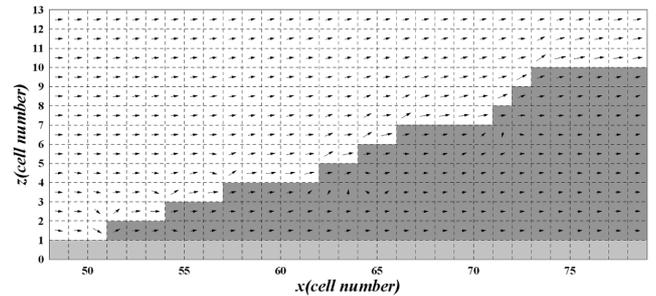


Fig. 6 Flow field in case of the application of typical stair-type technique to inclined permeable seabed/structure

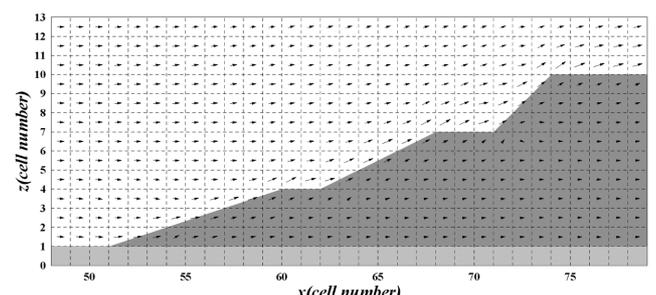


Fig. 7 Flow field in case of the application of newly proposed technique to inclined permeable seabed/structure

게 변하는 것을 확인할 수 있으나, 해저지반의 경사가 1:1인 지점에서는 비교적 원활한 흐름을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 투과성 해저지반의 경사가 완만할수록 실제 격자간의 유체저항 차이는 작지만 계단식으로 처리할 경우에는 긴 수평부분을 통해 생성된 비교적 안정된 흐름이 계단의 연직 부분에 의해 급격한 유체저항을 받음으로서 이와 같은 현상이 발생한다.

Fig. 7로부터 전반적으로 자연스러운 흐름이 발생함을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 투과성 해저지반이 차지하고 있는 체적비율 만큼의 유체저항을 적용함으로써 경사면의 표면격자간의 유연성을 가지게 됨으로 특히, 투과성 해저지반의 표면부근에서는 유입되는 흐름이 경사면을 따라 원활하게 흐르는 것을 확인할 수 있다. 또한, 투과성 구조물 내부의 흐름 역시 계단식으로 경사면을 처리하였을 경우보다 자연스러운 흐름이 나타나는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에 근거하여 사각격자체계의 수치모델을 이용함에 있어서 경사면을 가진 불투과성/투과성 구조물 주위의 흐름을 검토할 경우, 전통적인 계단식 처리기법 보다 본 연구에서 제안한 경사면 처리기법을 이용하는 것이 한층 더 고정도의 수치결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 고찰

시뮬레이션 결과에 의하면 불투과성 경사 구조물의 경우에는 본 연구에서 제안한 경사면 처리기법을 적용함으로써 실제 현상과 유사한 흐름이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 투과성 경사 구조물일 경우에는 격자 경계에서의 실제 면적 투과율을 적용함에 따라 경사면을 표현하고 있는 격자 경계간의 유연성 있는 유체저항을 적용함으로써 투과성 경사면의 안팎에서 계단식으로 처리할 경우보다 실제 현상에 가까운 흐름이 발생하였다.

이상과 같은 배경에 근거하여, 사각격자체계를 이용하는 수치모델에서 경사면을 취급할 경우, 본 연구에서 제안한 것과 같은 격자내의 경사면 처리기법을 적용하는 것이 보다 고정도의 계산결과를 도출하는데 효율적일 것으로 판단된다. 또한, 향후 본 연구의 경사면 처리기법을 이용하여 원주 구조물, 반과공 등과 같은 곡률을 가진 구조물에도 적용하여 더욱

폭넓은 검증을 실시할 예정이다.

참고문헌

- 허동수, 염경선, 배기성(2006) 혼성방과제에 작용하는 3차원 파압 구조에 미치는 위상차의 영향. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 563-572.
- 허동수, 이우동(2007) 잠제 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART I -해빈이 없을 경우. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제27권, 제6B호, pp. 689-701.
- Engsig-Karup, A.P., Hesthaven, J.S., Bingham, H.B., and Warburton, T. (2008) DG-FEM solution for nonlinear wave-structure interaction using Boussinesq-type equations. *Coastal Eng.*, Vol. 55, pp. 197-280.
- Ergun, S. (1952) Fluid flow through packed columns. *Chem Eng.*, Vol. 48, No. 2, pp. 89-94.
- Goda, Y. (1974) New wave pressure formulae for composite breakwaters. *Proceedings of the 14th Conference of Coastal Eng., ASCE*, pp. 1702-1720.
- Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003) Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater. *Coastal Eng.*, Vol. 47, pp. 329-345.
- Hur, D.S. (2004) Deformation of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater installed on a sloping bed. *Ocean Eng.*, Vol. 31, pp. 1295-1311.
- 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.
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., and Schaaf, S.A. (1950) The wave force exerted by surface wave on piles, *Petroleum Trans. AIME*, Vol. 189, pp. 149-157.
- Petit, H.A.H., Tonjes, P., van Gent, M.R.A., and van den Bosch, P. (1994) *Numerical simulation and validation of plunging with multiple free boundaries*. Report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, pp. 199.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992) Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater. *Proceedings of 23rd Intl. Conf. of Coastal Eng., ASCE*, pp. 1517-1530.
- Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equation. *Mon. Weath. Rev.* Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- van Gent, M.R.A. (1995) *Wave interaction with permeable coastal structures*. Ph.D. Thesis, Delft University The Netherlands.

(접수일: 2008.6.19/심사일: 2008.7.31/심사완료일: 2008.8.26)