

2차 정확도 VOF기법을 활용한 수중구조물에 의한 파랑변화 예측

Numerical Simulation of Wave Deformation due to a Submerged Structure with a Second-order VOF Method

하태민* · 조용식**

Ha, Taemin · Cho, Yong-Sik

Abstract

A three-dimensional numerical model is employed to investigate wave deformation due to a submerged structure. The three-dimensional numerical model solves the spatially averaged Navier-Stokes equations for two-phase flows. The LES(large-eddy-simulation) approach is adopted to model the turbulence effect by using the Smagorinsky SGS(sub-grid scale) closure model. The two-step projection method is employed in the numerical solutions, aided by the Bi-CGSTAB technique to solve the pressure Poisson equation for the filtered pressure field. The second-order accurate VOF(volume-of-fluid) method is used to track the distorted and broken free surface. A simple linear wave is generated on a constant depth and compared with analytical solutions. The model is then applied to study wave deformation due to a submerged structure and the predicted results are compared with available laboratory measurements.

Key words : Three-dimensional numerical model, Navier-Stokes equations, Wave-structure interaction, VOF method

요 지

수중구조물에 의한 파랑의 변형을 예측하기 위해 3차원 수치모형을 도입하여 수치모형 실험을 수행하였다. 본 수치모형은 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법을 이용하여 계산하는 동수압 모형으로서, 난류의 해석을 위해서 상대적으로 큰 에디(eddy)만을 고려하는 SANS(Spatially Averaged Navier-Stokes) 방정식의 해를 구하는 LES(large-eddy-simulation) 기반의 수치모형이다. 엇갈림 격자체계에서 유한차분법을 사용하여 지배방정식을 해석하는 모형으로서 수치기법으로 Two-step projection 기법을 사용하여 SANS 방정식을 계산하였으며, Bi-CGSTAB 기법을 이용하여 Poisson 방정식의 해를 구하고 압력장을 계산하였다. 또한, 자유수면의 추적을 위하여 2차 정확도의 VOF(volume-of-fluid) 기법을 사용하였다. 먼저 선형파를 일정 수심상에서 조파시켜 해석해와 비교한 후 수중구조물이 설치된 지형에 적용하여 파랑의 변형을 수치모의하여 수리모형 실험결과와 비교 및 분석하였다.

핵심용어 : 3차원 수치모형, Navier-Stokes 방정식, VOF 기법, 파랑-구조물 상호작용

1. 서 론

구조물에 의한 파랑의 변형에 관한 연구는 해안에 방파제 등과 같은 구조물을 설치할 때 구조물의 구조적인 안정과 구조물을 이용하는 시민의 생명을 지키는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로서 지난 세기동안 활발하게 연구되어 왔다. 특히, 최근 컴퓨터기술의 급속한 발전으로 인해 수리모형 실험에 비해 상대적으로 성과가 많지 않았던 3차원 수치모형에 대한 연구가 급속하게 늘어나고 있다. 3차원 수치모형을 이용할 경우 2차원 수치모형으로는 수행이 불가능했던 실제 현상들을 다양하게 적용할 수 있으며, 3차원 수리모형 실험과 달리 실험의 제원과 비용 등의 부분에서 제약이 많지 않기

때문에 매우 경제적이다.

기존의 3차원 수치모형을 이용한 연구는 대부분 정수압 모형을 통하여 이루어져 왔으나, 정수압 모형은 수심의 급격한 변화나 경계처리 등에서 한계를 드러내면서 개선이 요구되어 왔다(Mahadevan 등, 1996). 이에 따라 동수압 모형 도입의 필요성이 제기되었으며, 최근의 연구는 대부분 동수압 모형을 활용하여 광범위하게 진행되고 있다. 동수압 모형을 활용한 자유수면 흐름의 수치모형은 Casulli(1999) 이후 Chen(2003) 과 Lin 등(2002)에 의해 꾸준히 발전해왔으며, 최근 Liu(2007)는 엇갈림격자에서 유한차분법을 이용하는 3차원 동수압 모형을 개발하여 액체화물 슬로싱(Liquid Sloshing)과 환경사에서 고립파의 처오름 등을 수치모의하였다. 국내에서도 최근 3

* 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정(E-mail: kevin4324@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(교신저자)

차원 수치모형을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 허동수와 이우동(2007, 2008a, 2008b, 2008c)과 이우동 등(2009)은 잠제 주변의 3차원 흐름특성 및 잠제 설치로 인한 연안에서의 처오름 특성 등에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 또한, 이종욱 등(2008)은 연직방향으로 좌표변환된 3차원 동수압 모형에 정확한 동역학적 경계조건을 적용하는 방법을 검토하였다.

이 중 Liu(2007)가 개발한 수치모형은 2차 정확도의 VOF(volume-of-fluid) 기법을 활용하여 자유수면변위를 예측함으로써 기존의 1차 정확도의 VOF 기법에 의한 결과에 비해 탁월한 성과를 보였다(Liu 등, 2008 ; Liu 등, 2009). 따라서, 최근의 3차원 수치해석을 필요로 하는 해안공학의 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 사료되나, 아직까지 국내에 소개된 적이 없고 파랑의 전파 및 구조물에 의한 파랑 변형 등에 대해 적용된 사례가 드물어 이에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 Liu(2007)가 개발한 3차원 수치모형을 도입하여 해안공학 분야에 적용하기에 앞서, 모델의 타당성을 검증하기 위해 수중구조물에 의한 파랑의 변형을 수치모의하고자 한다. 이를 위하여, Beji 등(1993)이 수행한 수리모형 실험을 재현하고 수치모형 실험결과를 수리모형 실험결과와 비교한다. Beji 등(1993)의 수리모형 실험은 파랑이 구조물에 의해 변화하는 양상을 수치모형이 얼마나 잘 재현할 수 있는지 알아보기에 적합한 실험으로서 그동안 많은 연구에 사용되어왔다(Casualli, 1999 ; Yuan 등, 2004). 먼저 일정수심에서 선형파의 조파가 제대로 이루어지는지 해석해와 비교 및 검증한 후에 Beji 등의 수리모형 실험을 재현하고 그 결과를 관측치와 비교 및 분석하여 수치모형의 성능을 검증하고 추후 연구의 방향을 설정하고자 한다.

2. 수학적 정식화

2.1 Navier-Stokes 방정식

일반적으로 비압축성 유체의 거동은 다음의 Navier-Stokes 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, $i, j=1,2,3$, u_i 는 i -방향 유속벡터, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, g_i 는 i -방향 중력 가속도, τ_{ij} 는 내부응력을 각각 나타낸다. 뉴토니안 유체의 경우 내부응력은 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, ν 는 동점성계수를 나타낸다.

$$\tau_{ij} = 2\rho\nu\sigma_{ij} = \rho\nu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (3)$$

2.2 SANS(Spatially averaged Navier-Stokes) 방정식

Navier-Stokes 방정식을 직접 푸는 DNS(direct-numerical-simulation) 기반의 수치모형은 Reynolds 수가 큰 자연흐름을 해석하기 위해 격자를 매우 작게 하여 계산을 수행해야하기

때문에 막대한 계산시간이 요구되며, 계산을 진행하면서 발생하는 수치오차가 방정식의 해에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서, 이에 대한 대안으로 상대적으로 큰 에디(eddy) 만을 고려하는 SANS(Spatially Averaged Navier-Stokes) 방정식의 해를 구하는 LES(large-eddy-simulation) 기반의 수치모형을 사용하는 것이 일반적이다(Deardorff, 1970). LES 기법을 사용하기 위해 식 (1)과 (2)를 공간적으로 필터링하면 다음의 방정식을 구할 수 있다(Pope, 2000).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}^r}{\partial x_j} \quad (5)$$

여기서, \bar{u}_i 와 \bar{p} 는 필터링한 유속과 압력이고, $\bar{\tau}_{ij}^r$ 는 필터링한 유속장내의 내부응력을 나타낸다. 본 연구에서는 최근 널리 사용되고 있는 Smagorinsky LES 모형을 사용하며, SGS Reynolds 응력을 다음과 같이 나타낸다(Smagorinsky, 1963).

$$\bar{\tau}_{ij}^r = 2\mu_t \sigma_{ij} \quad (6)$$

식 (6)에서 μ_t 는 와동점성계수로 다음과 같이 표현한다.

$$\mu_t = \rho[(C_s W)^2 \sqrt{2\bar{\sigma}_{ij}\bar{\sigma}_{ij}}] \quad (7)$$

여기서, C_s 는 Smagorinsky 계수, W 는 필터폭을 의미하며 유한차분법을 사용할 경우 필터폭은 다음과 같이 정의된다.

$$W = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (8)$$

C_s 는 흐름에 따라 다른 값을 가지며 보통 0.1에서 0.2의 범위를 가진다. 본 연구에서는 Lin 등(2003)이 파랑과 구조물간의 상호작용시 적절한 값으로 제시한 0.15를 사용하여 수치모형 실험을 수행하였다. Smagorinsky LES 모형을 사용한 운동량 방정식을 정리하면 식 (9)와 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (9)$$

2.3 경계조건

일반적으로 고체의 경계에서는 no-slip 경계조건을 적용한다. 그런데 만약 경계부근의 격자가 충분히 작지 않으면 no-slip 경계조건을 사용할 경우 고체 경계에서 유속이 작게 계산되는 현상이 발생한다. 이러한 경우 고체 경계조건으로 free-slip 경계조건을 사용할 때 no-slip 경계조건을 사용한 것보다 고체 경계에서 유속을 좀 더 정확하게 해석할 수 있다(Lin 등, 2002). 파랑의 변화를 예측하는 대부분의 케이스에서 바닥부근의 격자크기는 상대적으로 크기 때문에 특별한 언급이 없는 한 free-slip 경계조건을 고체 경계조건으로 사용한다. 한편, Dean and Dalrymple(1991)은 해석해를 이용한 선형파의 조파시 net mass transport가 발생할 수 있음을 지적한 바 있다. 본 연구에서는 Dean and Dalrymple(1991)이

제한한 평균 질량흐름율을 통해 보정 유속을 계산하고 이를 제거하여 net mass transport를 0으로 제어하였다. 식 (10)과 (11)은 각각 평균 질량흐름율(M)과 보정 유속(u_c)을 나타낸다.

$$M = \frac{1}{8} \frac{\rho g H^2}{c_0} \quad (10)$$

$$u_c = \frac{M}{\rho h} \quad (11)$$

여기서, c 는 경계에서의 파속을 의미한다. 우측 경계에서는 파랑이 외부경계에서 수치구조 안으로 다시 반사되지 않도록 개방경계조건을 사용하였으며, 이를 수식으로 표현하면 다음의 식 (12)와 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c_o \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

여기서, C_o 는 경계에서의 파속을 나타내고 ϕ_o 는 경계에서 정의되는 유속, 자유수면변위 등의 변수들이다.

3. 수치모형

3.1 수치기법

본 연구의 수치모형은 엇갈림 격자체계에서 유한차분법을 사용하여 지배방정식을 해석하였다. 엇갈림 격자의 각각의 셀 중앙에서는 스칼라 값을 가진 압력과 VOF 값이 정의되고, 각각의 셀의 경계에서는 벡터값을 가진 유속과 중력가속도 등이 정의된다(그림 1). 지배방정식인 SANS 방정식의 해를 구하기 위해 Two-step projection 기법(Chorin, 1968 ; Chorin, 1969 ; Liu 등, 1998)을 사용하였다. Two-step projection 기법의 첫 번째 단계는 다음과 같다.

$$\frac{\tilde{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -u_j^n \frac{\partial u_j^n}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j} \quad (13)$$

식 (13)은 SANS 방정식의 운동량 방정식에서 압력항을 제외한 식으로, 여기서 \tilde{u} 는 해를 구하기 위한 중간유속으로

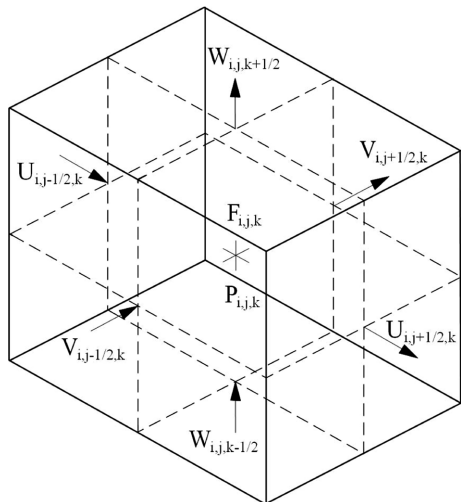


그림 1. 3차원 엇갈림 격자

연속방정식을 만족시키지 못한다. 두 번째 단계는 중간유속을 divergence-free 유속장으로 투영하여 실제 유속을 구하는 단계이다.

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i^{n+1}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} + g_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial u_i^{n+1}}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

식 (14)를 식 (15)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \tilde{u}_i^{n+1}}{\partial x_i} + \frac{\partial g_i}{\partial x_i} \quad (16)$$

식 (16)은 Poisson 방정식으로 적절한 경계조건을 적용하여 방정식의 해를 구하면 ($n+1$) 시간단계에서 압력장을 구할 수 있게 된다. 이렇게 새롭게 계산된 압력장을 이용하여 식 (14)를 계산하면 새로운 시간단계에서 유속장을 계산할 수 있다.

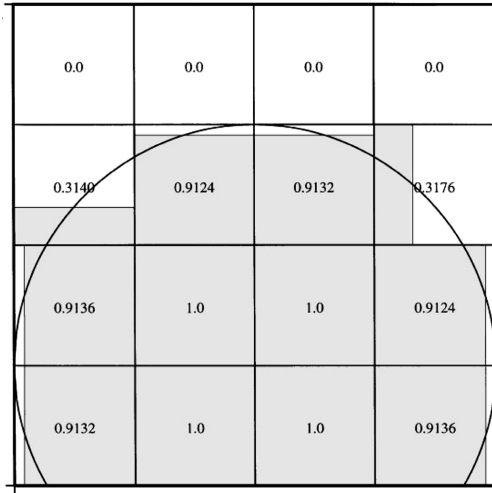
3.2 유한차분법

앞서 설명한대로 본 수치모형은 엇갈림 격자체계를 사용하며 각각의 셀 중앙에서 스칼라 값을 가진 압력과 VOF 값이 정의되고, 경계에서 벡터값을 가진 유속과 중력가속도 등이 정의된다. 그러나 유한차분법에서 사용하는 변수들의 위치가 본래 변수가 정의된 위치와 다를 수 있기 때문에 그러한 경우에는 선형보간법을 이용하여 변수를 정의한다. 먼저 지배방정식의 대류항과 확산항은 중앙차분법과 풍상차분법을 적절히 혼합하여 이산화하였다. x -방향 운동량 방정식의 대류항과 확산항은 격자의 양의 x -방향 경계면($i+1/2, j, k$)에서 정의하며, y -방향과 z -방향 운동량 방정식의 대류항과 확산항은 각각 격자의 양의 y -방향 및 z -방향 경계면($i, j+1/2, k$), ($i, j, k+1/2$)]에서 정의한다. 중앙차분법과 풍상차분법을 혼합할 때 가중치를 주는 변수로서 α 를 도입하였으며, 실제 수치모형 실험에서 $\alpha=0.3\sim 0.5$ 의 범위를 주었을 때 안정적이면서 정확한 해를 주게 된다(Liu, 2007). 본 연구에서는 $\alpha=0.5$ 의 값을 사용하였다.

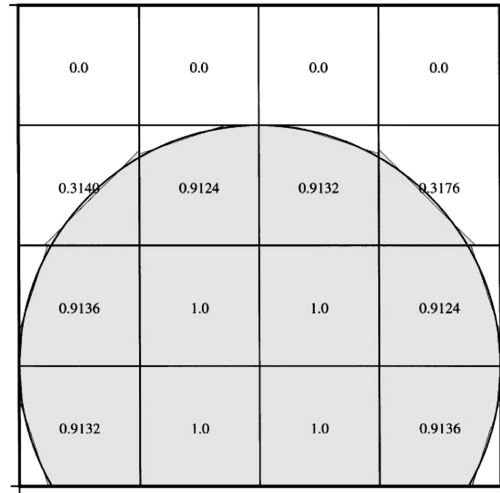
다음으로 압력장을 계산하기 위해 식 (13)의 Poisson 방정식의 해를 구한다. 압력은 격자의 중앙에서 정의되기 때문에, 중앙차분법을 이용하여 Poisson 방정식을 이산화하면 새로운 시간단계에서의 압력장에 대한 대수방정식을 구할 수 있다. 대수방정식을 매트릭스 형태로 만들어 매트릭스 솔버로 계산하면 새로운 시간단계에서의 압력장을 구할 수 있다. 본 연구에서는 Bi-CGSTAB 기법(Van der Vorst, 2003)을 이용하여 매트릭스를 계산하여 압력장을 구하였다. 이상의 수치기법에 대한 보다 자세한 설명은 Liu(2007)를 참조할 수 있다.

3.3 VOF (Volume of Fluid) 기법

본 연구에 사용한 수치모형에서는 수중구조물에 의한 파랑



(a) SLIC(single-line-interface-calculation)



(b) PLIC(piecewise-linear-interface-calculation)

그림 2. 1차 정확도 VOF 기법(a)과 2차 정확도 VOF 기법(b) 비교 (Rider 등, 1998)

의 변화를 예측하기 위해 2차 정확도의 VOF 기법을 사용하여 자유수면을 계산하였다.

$$F = \frac{\rho - \rho_a}{\rho_w - \rho_a} \quad (17)$$

자유수면을 계산하기 위해 식 (17)의 VOF 함수를 도입하면 식 (1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (18)$$

여기서, F 는 물과 공기의 부피비를 의미하는 함수로서 F 가 0이면 셀 전체가 공기를 의미하고 1이면 셀 전체가 물을 의미하게 된다. VOF 기법에서 격자안의 자유수면에 작용하는 법선벡터는 Young's least squares method(Rider 등, 1998)를 이용하여 계산한다. 다음 단계에서 자유수면은 유속에 의해 다시 계산되며, Gueyffier 등(1999)이 제안한 방법에 따라 각 방향에 대한 부피 플럭스를 계산하게 된다. 이렇게 갱신된 부피 플럭스를 통하여 다음 시간 단계의 VOF 함수를 계산할 수 있다. VOF 기법에 대한 자세한 설명은 Liu(2007)를 참조할 수 있으며, 본 논문에서는 2차 정확도 VOF 기법의 장점에 대해서만 간략히 설명한다.

그림 2는 1차 정확도 VOF 기법에서 자유수면 계산을 위해 사용한 SLIC(single-line-interface-calculation)에 의해 재현된 격자내의 경계와 본 연구에 사용한 2차 정확도 VOF 기법에서 사용한 PLIC (piecewise-linear-interface-calculation)에 의해 재현된 격자내의 경계를 비교하여 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 PLIC에 의한 결과가 SLIC에 의한 결과보다 실제 현상을 더욱 정확하게 재현할 수 있다. 다시 말하면, PLIC를 이용하여 자유수면을 계산하는 본 연구의 2차 정확도 VOF 기법은 격자내에서 자유수면을 계산할 때 1차 다항식을 사용하기 때문에, 단순 부피비로만 표현되는 1차 정확도 VOF 기법에 비해 더 정확하게 실제 현상을 재현할 수 있다.

4. 수치모형 실험

본 연구에서는 새롭게 개발된 3차원 수치모형이 파랑의 변형을 얼마나 잘 재현하는지 알아보려고 한다. 이를 위해서 그 동안 수치모형의 검증에 널리 사용되었던 Beji 등(1993)의 수치모형 실험을 도입하여 새로 개발된 수치모형에 의한 계산결과와 비교한다. 두 결과의 비교 및 분석을 통하여 새로 개발된 수치모형의 파랑변형에 대한 적용성을 검토해 볼 수 있다. 먼저 일정한 수심의 수조에서 선형파를 조파하여 해석해와 비교를 통해 수치모형을 검증한 후, Beji 등(1993)의 수치모형 실험 제원을 생성하여 수치모형 실험을 수행한다. 그림 3은 주기 $T_0=2.0$ sec, 파고 $H_0=0.02$ m의 선형파를 수치모형으로 조파시키고, 한 파장이 떨어진 지점에서 시간에 흐름에 따라 자유수면변위를 측정된 결과이다. 여기서, η 는 자유수면변위로서 그림의 y -축은 무차원화한 시간의 흐름에 따른 자유수면의 형상을 의미한다. 수치모형 실험결과와 해석해를 비교해보면 수치모형 실험결과가 해석해를 매우 정확하게 재현하고 있으며, 이를 통해 수치모형이 선형파의 조파에 문제가 없다는 것을 알 수 있다.

4.1 실험제원

수치 및 수치모형 실험에 사용한 제원은 그림 4와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 수심이 0.4 m로 일정한 수조에 사다

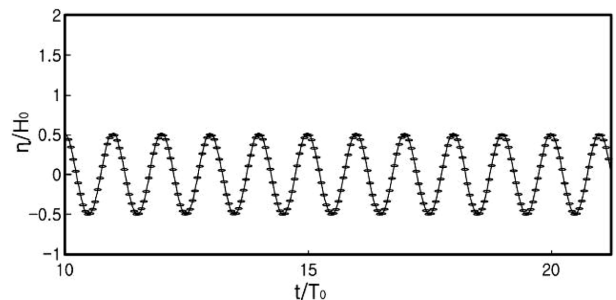


그림 3. 선형파 조파 (○ : 해석해, — : 수치모형 실험)

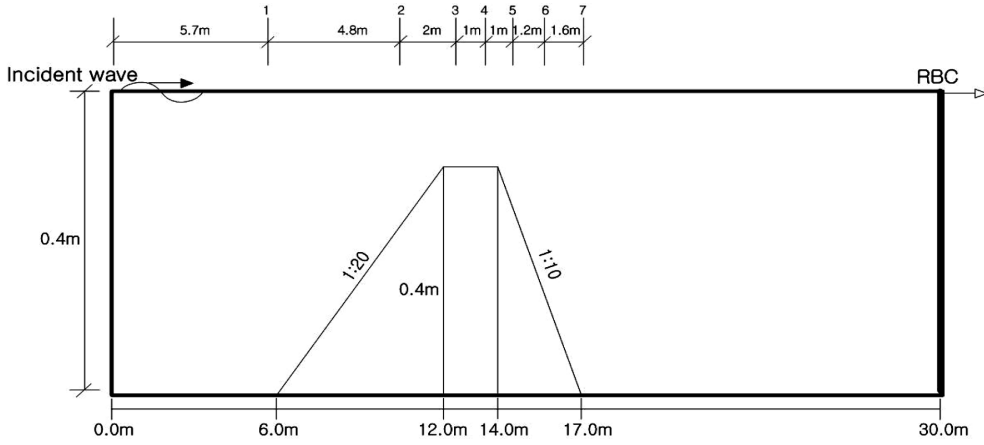


그림 4. 해저구조물을 통과하는 파랑의 전파 실험제원 (Beji 등, 1993)

리플 모양의 구조물을 설치하여, 해저구조물을 통과하면서 파랑이 어떠한 변화를 보이는지 파고계를 설치하여 수면변위를 측정하였다. 해저구조물의 최대높이는 0.3 m로 해저구조물을 통과하면서 수심이 0.1 m에서 0.4 m까지 변하게 된다. 파랑이 먼저 도달하는 구조물의 전면은 1:20의 경사를 이루고 있으며, 구조물의 후면은 1:10의 경사를 이루고 있다. 구조물에 의한 파랑의 변화양상을 분석하기 위해 구조물의 전면에서부터 7개의 지점에서 수면변위를 계산하였으며, 이를 Beji 등

(1993)의 수리모형 실험과 비교하였다.

4.2 수치모형 실험

수치모형 실험은 총 45초 동안 진행되었다. 왼쪽경계에서 주기 $T_0=2.0$ sec, 파고 $H_0=2.0$ m의 선형파를 조파시켰으며, 오른쪽 경계에서 방사경계조건을 사용하여 경계에서 파랑이 수조안으로 반사되어 들어가지 않도록 하였다. 구조물의 변화를 정확하게 표현하기 위해 x -방향으로는 0.03 m의 격자크기

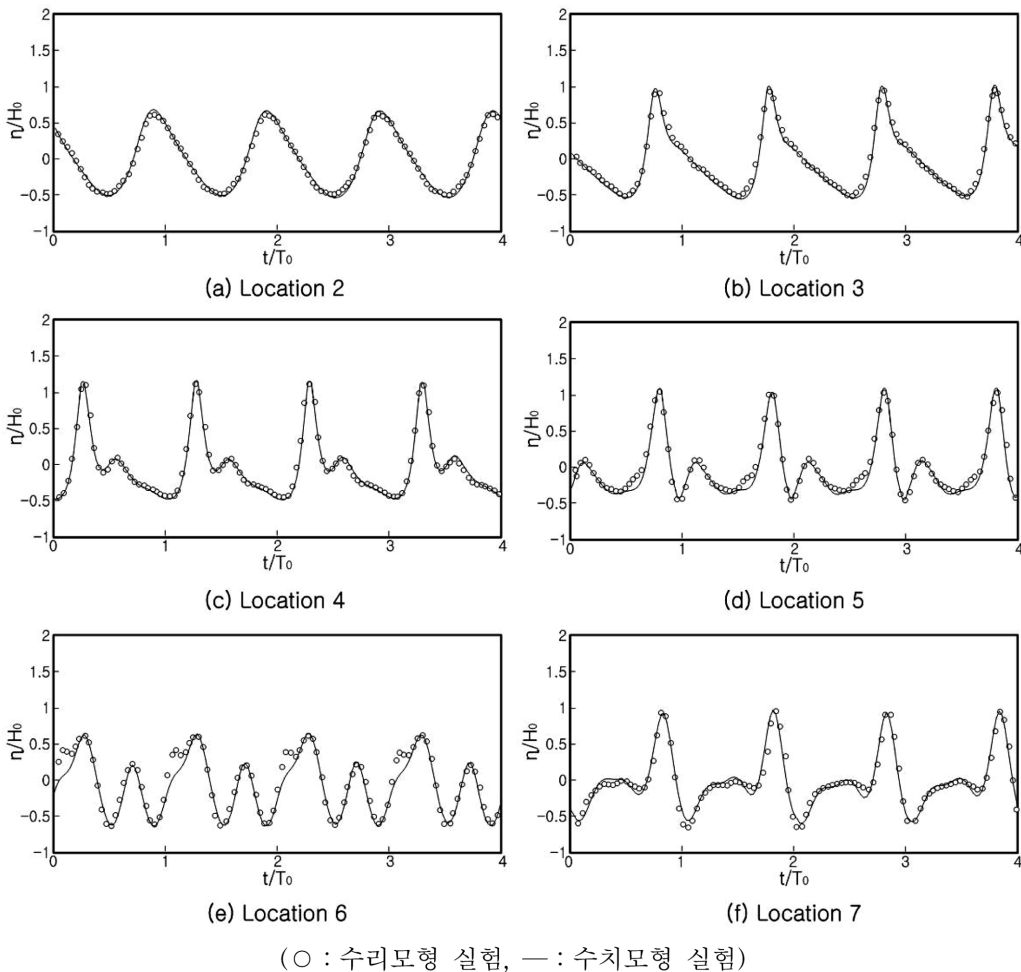


그림 5. Beji 등(1993)의 수리모형 실험과 수치모형 실험결과 비교 (○ : 수리모형 실험, — : 수치모형 실험)

를 사용하여 총 1000개의 격자로 구성하였으며, y -방향으로 0.004m부터 약 0.01m까지의 격자크기를 사용하여 총 55개의 격자로 구성하였다. 총 7개의 수치 파고계를 설치하여 시간의 흐름에 따라 수면변위를 기록하였으며, 각각의 파고계는 구조물에 의한 파랑의 변형을 적절히 분석할 수 있도록 배치되었다.

그림 5는 각 지점에서 계산된 수면변위를 Beji 등(1993)의 수리모형 실험과 비교한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 수치모형이 수리모형 실험결과를 비교적 정확하게 재현하고 있다. 좀 더 자세히 살펴보면 파랑이 좌측 경계에서 조파되어 진행하면서 수중구조물을 만나 변형을 일으킬 때 수중구조물의 전면부와 침투부에서는 거의 정확하게 수리모형 실험결과를 재현하고 있음을 알 수 있다. 그러나 수중구조물의 침투를 지난 후에는 수치모형과 수리모형 실험결과가 미세한 차이를 보이고 있으며, 6번 지점에서 계산된 결과는 수리모형 실험결과와 비교적 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 수심이 점점 작아지면서 천수효과가 강하게 작용하여 파랑이 변형을 일으킨 후 다시 수심이 깊어질 경우 파랑의 분산효과가 강하게 재현되기 때문인 것으로 판단된다. 그림에서 알 수 있듯이 수치모형 실험에서 침투부를 지난 5번 지점에서부터 파랑의 분산효과가 수리모형 실험보다 강하게 재현되어 파랑이 침투부로 점점 모이고 있으며, 이러한 오차가 중복되면서 6번 지점에서 수치모형이 수리모형 실험에서 나타난 파랑의 형태를 정확하게 재현하지 못한 것으로 판단된다. 또한 이로 인해 파랑의 위상에도 약간의 오차가 발생하여 7번 지점에서 수리모형 실험결과에 비해 수치모형 실험결과에서의 파랑의 전파속도가 미세하게 더 빠른 것을 확인할 수 있다. 그러나 전체적으로 수치모형 실험결과는 수리모형 실험결과를 비교적 정확하게 재현하고 있으며, 수치모형이 파랑의 변형을 예측하는데 특히 중요한 변형 후 최대값을 매우 정확하게 계산해낼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차 정확도 VOF 기법을 활용한 3차원 동수압 수치모형을 이용하여 수중구조물에 의한 파랑의 변형을 재현하여 수치모형의 적용성 및 발전방향을 검토하였다. 검토 결과 본 수치모형은 분산효과 재현과 파랑의 전파속도 등에서 수치오차가 발생하지만 파랑의 변형을 예측하는데 충분히 사용할 수 있는 수치모형으로 판단되며, 특히 최대값을 매우 정확하게 계산해낼 수 있기 때문에 앞으로 해안구조물에 의한 파랑의 변형에 관한 연구나 지진해일 등의 해양재해에 의한 피해예측을 위한 기초연구에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 기존에 널리 사용되는 2차원 수치모형에 비해 계산시간이 매우 길게 소요되는 단점이 있으며, 본 연구에서 사용한 수리모형실험과 같은 단순지형에서도 수치오차가 작지 않은 점을 고려할 때 좀 더 복잡한 2차원 지형에 대한 연구와 3차원 수리모형실험과의 비교 등 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 구조물에 의한 변형을 예측하는데 필요한 구조물과 유체의 상호작용에 대한 고려가

상대적으로 부족하기 때문에 이에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단항만건설기술개발사업(과제명: 항만권역 태풍 및 지진해일 재해대응체계 구축)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 이우동, 허동수, 박종배, 안성욱 (2009) 해빈경사에 따른 잠제 개구부의 3차원적인 흐름특성에 관한 연구, **한국해양공학회지**, 제23권, 제1호, pp. 7-15.
- 이종욱, 이진우, 조용식 (2008) 동수압 모형의 동역학적 경계조건, **대한토목학회논문집**, 제28권, 제6B호, pp. 691-696.
- 허동수, 이우동 (2007) 잠제 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART -해빈이 없을 경우, **대한토목학회논문집**, 제27권, 제6B호, pp. 689-701.
- 허동수, 이우동 (2008a) 잠제 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PART -해빈이 있을 경우, **대한토목학회논문집**, 제28권, 제1B호, pp. 115-123.
- 허동수, 이우동 (2008b) 잠제 설치 연안의 처오름 높이 특성; PART -잠제의 평면배치에 의한 영향, **대한토목학회논문집**, 제28권, 제3B호, pp. 345-354.
- 허동수, 이우동 (2008c) 잠제 설치 연안의 처오름 높이 특성; PART -잠제의 제원에 의한 영향, **대한토목학회논문집**, 제28권, 제4B호, pp. 429-439.
- Beji, S. and Battjes, J.A. (1993) Experimental investigation of wave propagation over a bar. *Coastal Engrg.*, Vol. 19, pp. 151-162.
- Casulli, V. (1999) A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free-surface flows. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 30, pp. 425-440.
- Chen, X. (2003) A fully hydrodynamic model for three-dimensional, free-surface flows. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 42, No. 9, pp. 929-952.
- Chorin, A.J. (1968) Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Math. Comput.*, Vol. 22, pp. 745-762.
- Chorin, A.J. (1969) On the convergence of discrete approximations of the Navier-Stokes equations. *Math. Comput.*, Vol. 23, pp. 341-353.
- Deardorff, J.W. (1970) A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.*, Vol. 41, pp. 453-480.
- Gueyffier, D., Li, J., Nadim, A., Scardovelli, R. and Zaleski, S. (1999) Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows. *J. Comput. Phys.*, Vol. 152, pp. 423-456.
- Lin, P. and Li, C.W. (2002) A sigma-coordinate three-dimensional numerical model for surface wave propagation. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 38, pp. 1045-1068.
- Lin, P. and Li, C.W. (2003) Wave-current interaction with a vertical square cylinder. *Ocean Eng.*, Vol. 30, pp. 855-876.
- Lin, P. and Liu, P.L.-F. (1998) A numerical study of breaking waves in the surf zone. *J. Fluid Mech.*, Vol. 359, pp. 239-264.
- Liu, D. (2007) *Numerical modeling of three-dimensional water waves and their interaction with structures*, Ph.D. Dissertation, National University of Singapore, Singapore.
- Liu, D. and Lin, P. (2008) A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks. *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, No. 8, pp.

- 3921-3939.
- Liu, D. and Lin, P. (2009) Three-dimensional liquid sloshing in a tank with baffles. *Ocean Eng.*, Vol. 36, pp. 202-212.
- Mahadevan, A., Oliger, J. and Street, R. (1996) A non-hydrostatic mesoscale ocean model. Part 1: well posedness and acaling. *J. Phy. Oceanogr.*, Vol. 26, pp. 1868-1880.
- Pope, S.B. (2000) *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, New York, USA.
- Rider, W.J. and Kothe, D.B. (1998) Reconstructing volume tracking. *J. Comput. Phys.*, Vol. 141, pp. 112-152.
- Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic equations. *Mon. Weather Rev.*, Vol. 91, pp. 99-164.
- Van der Vorst HA. (2003) *Iterative Krylov Methods for Large Linear Systems*. Cambridge University Press, New York, USA.
- Yuan, H. and Wu, C.H., (2004) An implicit three-dimensional fully non-hydrostatic model for free-surface flows. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 46, pp. 709-733.

© 논문접수일 : 09년 11월 25일
 © 심사의뢰일 : 09년 11월 30일
 © 심사완료일 : 09년 01월 05일