

수치 파동 수조를 이용한 비선형파의 파형변화와 속도분포 해석

구원철* · 최가람*

*울산대학교 조선해양공학부

Spatial Modulation of Nonlinear Waves and Their Kinematics using a Numerical Wave Tank

Weon-Cheol Koo* and Ka-Ram Choi*

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Korea

KEY WORDS: Numerical wave tank 수치 파동 수조, Fully nonlinear 완전 비선형, Boundary element method 경계요소법, Particle velocity 입자 속도, Nonlinear waves 비선형파, Wave modulation 파변조

ABSTRACT: In this study, the wave profiles and kinematics of highly nonlinear waves at various water depths were calculated using a 2D fully nonlinear Numerical Wave Tank (NWT). The NWT was developed based on the Boundary Element Method (BEM) with the potential theory and the mixed Eulerian-Lagrangian (MEL) time marching scheme by 4th-order Runge-Kutta time integration. The spatial variation of intermediate-depth waves along the direction of wave propagation was caused by the unintended generation of 2nd-order free waves, which were originally investigated both theoretically and experimentally by Goda (1998). These free waves were induced by the mismatch between the linear motion of wave maker and nonlinear displacement of water particles adjacent to the maker. When the 2nd-order wave maker motion was applied, the spatial modulation of the waves caused by the free waves was not observed. The respective magnitudes of the nonlinear wave components for various water depths were compared. It was found that the high-order wave components greatly increase as the water depth decreases. The wave kinematics at various locations were calculated and compared with the linear and the Stokes 2nd-order theories.

1. 서 론

해상에서 관찰되는 해양파는 대부분 경사가 급한 Wave crest 와 낮고 완만한 Wave trough를 가지고 있는 비선형파로서, 파고가 증가함에 따라 Crest와 Trough의 높이 차이가 커지는 것을 관찰할 수 있다. 특히 평균 해수면(Mean water level) 위에서 비선형파의 입자 속도는 Sine 곡선으로 표현되는 선형파와 현격한 차이를 보인다. 또한 비선형파에 의해 발생하는 정상유동의 평균 속도(Mean velocity)는 파입자 수송(Mass transport)의 중요한 인자가 된다. 따라서 해상의 자유표면에서의 비선형파와 해양 구조물간의 상호 작용을 이해하고 예측하는 것은 거친 파도에 효과적으로 대응할 수 있는 선박 및 해양 구조물을 설계하는데 매우 중요한 요소이다.

최근 들어, 해양 에너지를 이용하기 위한 해양 개발이 활발하게 이루어지고 있는데, 이는 주로 천해의 파력, 조력을 효과적으로 추출을 하는데 그 목적이 있다. 천해지역의 해양파는 심해에서 발생된 장파가 수심이 얇은 지역으로 전파되면서 파고의 증가와 파장의 단축 등 파의 비선형성이 증가하고 수심에 따른 공간적 파형 변화(Spatial variation)가 생긴다. 따라서 보다 효

율적인 파력 발전 구조물을 설계하기 위해서는 천해에서의 해양파 전개 및 파형 변화를 이해하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 2차원의 수치 파동 수조(Numerical wave tank) 기법을 이용하여 실험 수조에서 만들 수 있는 천해파를 재현하고, 수심 변화에 따른 파입자 운동과 파형 변화 등을 조사하였다. 얇은 수심에서 발생하여 진행되는 비선형파는 실험 수조 조파기의 선형운동과 조파기 주위 유체 입자의 비선형 운동과의 불일치로 인해 2차항의 자유파(Free wave)가 발생한다(Goda, 1998; Koo and Kim, 2001). 이 같은 자유파는 진행파의 공간적 파형 변화의 원인이 되며, 파의 고차성분 즉 2차항, 3차항의 증가에 영향을 준다. 본 연구는 조파기 선형 운동에 상응하는 선형 속도 포텐셜을 수치 파동 수조에 대입하여 입사파를 발생시킨 후, 비선형 자유표면 경계조건하에서 파의 전개를 재현하였다. 수조 바닥은 평평하다고 가정하였다. 수심 변화에 따른 파형 변화(고차항의 증가)는 Goda(1998)의 이론 및 실험값 등과 비교하여 계산의 정확성을 확인하였고, 파입자 속도 분포를 선형 이론식 등과 비교하여 그 차이를 나타내었다.

본 연구를 위해 개발된 2차원 완전 비선형 수치 파동 수조는 비점성, 비압축성, 비회전성의 유체를 가정한 속도 포텐셜 이론

교신저자 구원철: 울산광역시 남구 대학로 102번지, 052-259-2767, wckoo@ulsan.ac.kr

본 논문은 2009년 5월 창원에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문의 주된 내용을 발췌하였음을 밝힙니다.

을 바탕으로 경계요소법과, 자유표면의 비선형 변화를 실시간 재현하기 위해 Mixed eulerian-lagrangian(MEL)법을 사용하였다. 이 방법은 고정된 Euler 좌표계에서 지배 방정식을 풀 다음, 이동 경계점(노드)과 그 점에서 계산된 값들을 Lagrangian 방법으로 매 시간 스텝마다 수정 대입함으로써 완전 비선형 파체 상호작용 등의 문제에 많이 이용되어 왔다. 시계열계산을 위해 비선형 문제에서 수치적 안정성이 뛰어난 Runge-kutta 4차항법을 사용하여 시간 적분을 수행하였다.

현재까지 다양한 2차원 수치 파동 수조가 개발되었는데, 몇 가지 예로써 Dommermuth et al.(1987), Cointe et al.(1990), Clement(1996), Tanizawa(1996), Grilli and Horrillo(1998), Koo and Kim(2004) 등이 있다. 수치 파동 수조에 대한 자세한 검토는 Kim et al.(1999), Koo and Kim(2004) 등에서 찾아 볼 수 있다.

2. 수학적 공식화

2.1 경계값 문제

본 연구의 수치 파동 수조는 비점성, 비압축성, 비회전성의 유체를 가정한 포텐셜 이론을 바탕으로 개발 되었다. 계산 영역은 직교좌표계를 사용하며 좌측 경계면과 정수면의 교점을 원점으로 하고, 수평 방향은 우측으로 증가하고 수직방향은 위쪽으로 증가 한다. 유체 입자 속도는 속도 포텐셜의 미분으로 표현될 수 있으며, 유체의 연속 방정식이 계산 영역 내에서 만족하므로 유체 영역의 지배 방정식은 라플라스 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

자유표면 경계조건으로 완전 비선형 운동학적(Kinematic) 경계조건과 동역학적(Dynamic) 경계조건이 사용 되었고, 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla \phi \cdot \nabla \eta + \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla \phi|^2 - \frac{P_a}{\rho} \quad (3)$$

여기서, η 는 자유표면의 파고, g 는 중력 가속도, ρ 는 유체 밀도, P_a 는 자유표면의 대기압력으로서 0으로 가정한다.

해지면과 계산 영역 우측 경계면에는 불투과성 경계조건을 적용한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

여기서, n 은 법선방향 성분이다.

좌측 경계면, 즉 입사파가 유입되는 경계조건에는 선형과 입자 속도를 적용하는 방법(식 (5))과 Stokes 2차항 파입자 속도 성분(식 (6))을 대입하는 방법 두 가지로 구분하여 계산하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{gAk}{w} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(kx - wt) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial n} = & -\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{gAk}{w} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(kx - wt) \\ & -\frac{3}{4} A^2 wk \frac{\cosh 2k(z+h)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - wt) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, A 는 파의 진폭, k 는 파수(Wave number), w 는 입사파 주파수, h 는 수심이다.

앞에서 언급된 경계조건을 가지고 지배방정식인 라플라스 방정식을 풀기 위해서 Green 함수(G)를 사용하여 지배 방정식을 경계 적분 방정식으로 변환하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha \phi_i = \iint_{\Omega} (G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} - \phi_j \frac{\partial G_{ij}}{\partial n}) ds \quad (7)$$

여기서, $G(x, z, x_i, z_i) = -(1/2\pi) \ln R$, α 는 Solid angle(경계면에서 0.5), R 은 각 소스(Source)점과 필드(Field)점 사이의 거리이다.

2.2 시간 적분

수치 파동 수조는 시계열 계산을 수행하기 때문에 실험 수조와 동일한 조건의 계산 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 매 시간 변하는 자유표면상의 속도 포텐셜과 파고변화를 계산하기 위해 Longuet Higgins and Cokelet(1976) 이 처음으로 제안한 MEL법을 사용하였다. 이 방법은 고정된 Euler 좌표계에서 지배 방정식을 계산하고, 매 시간 변화하는 경계면과 계산 값을 Lagrangian 방법으로 매 시간스텝마다 수정함으로써, 움직이는 자유 표면을 효과적으로 재현할 수 있다. 전체 미분식($\delta/\delta t = \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \nabla$)을 사용하여 자유 표면 경계조건(식 (2)와 (3))을 Lagrangian 법으로 아래의 식과 같이 변환한다.

$$\frac{\delta \eta}{\delta t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} - (\nabla \phi - \vec{v}) \cdot \nabla \eta \quad (8)$$

$$\frac{\delta \phi}{\delta t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla \phi|^2 + \nabla \phi \cdot \vec{v} \quad (9)$$

여기서, $\nabla \phi$ 는 입자속도, \vec{v} 는 경계면에 위치한 각 노드(Node)의 속도이다. 본 연구에서는 자유표면의 노드가 수직 방향으로만 움직인다고 가정하였고 노드 속도 $\vec{v} = (0, \delta \eta / \delta t)$ 를 식 (8)과 (9)에 대입하여 Runge-Kutta 4차항법을 사용하여 시간 적분을 수행하였다.

2.3 수치 계산 방법

계산 결과의 수치적 안정성을 위해 입사파를 점진적으로 증가시켜 일정한 값에 이르게 하기 위해 Ramp 함수(식 (10))를 사용하였고, 정상상태의 계산을 지속적으로 수행하기 위해 계산 영역 우측 자유표면 경계면에 인위적 파감쇄 영역을 두어, 즉 감쇄 계수를 자유표면 경계 조건에 삽입하여 반사파를 억제하였다. 이는 실제 수조 실험과 동일한 조건을 구현한 것이다.

$$r(t) = \begin{cases} 1 & t > 2T \\ 1 - \cos(\pi \frac{t}{2T}) & 0 \leq t \leq 2T \end{cases} \quad (10)$$

여기서, 점진적 증가 구간은 식 (10)의 경우처럼 보통 입사파 주

기의 2배(2T)로 한다.

진행파의 비선형성 증가와 경계면 이산화(Discretization) 등으로 인한 자유 표면의 수치적 불안정성(노이즈)을 해결하기 위해 Chebyshev 5-points 평탄화(Smoothing)법을 매 5번째 시간 스텝마다 자유 표면에 적용하였다. 평탄화법으로 인한 고차항의 인위적 제거 문제는, 파의 3차항까지 보존됨을 확인할 수 있었다. 일정한 간격의 노드점에 대한 위의 평탄화법은 Longuet Higgins and Cokelet(1976)이 처음 제안하였고 Sung(1999)은 불규칙한 간격의 노드점에 적용할 수 있도록 이를 수정하였다.

본 연구에서 사용된 완전 비선형 수치 파동 구조의 여러 수치적 방법의 자세한 내용은 Koo and Kim(2004), Koo et al. (2004) 등에서 찾을 수 있다.

2.4 유체장내의 입자 속도 계산

유체장내의 입자 속도를 시간 영역에서 구하기 위해, 매 시간 경계 적분 방정식을 계산하여 경계면 각 노드점의 포텐셜 값을 구한 후, 구하고자 하는 유체장내의 점과 경계면의 모든 노드점을 사용하여 Green함수를 구하고, 이미 정의한 각 경계면의 경계조건을 대입하여 경계 적분 방정식(식 (7))을 다시 계산한다. 이를 통해 구하고자 하는 점에서의 시계열 속도 포텐셜을 구할 수 있다. 여기서 식 (7)의 Solid angle은 1이다. 유체장내에서 계산된 시계열 속도 포텐셜은 인접점의 속도 포텐셜과의 공간 미분을 통해 파입자 속도를 구할 수 있다. 본 연구에서는 완전 비선형 수치 파동 구조를 이용하여 수심에 따른 진행파의 입자 속도 변화를 조사하고, 선형 이론식 결과와 비교하였다.

3. 수치 결과 및 해석

3.1 파형의 공간적 변화

2차원 완전 비선형 수치 파동 구조를 사용하여 재현한 비선형파의 파형과 입자 속도 변화를 다양한 수심에 따라 조사하였다. 수치 결과의 정확성을 비교하기 위해 Goda(1998)의 이론값과 실험결과와 비교하였다(Fig. 1). 천해에서 진행되는 비선형파는 실험 수조 조파기의 선형 운동과 조파기 주변 유체 입자의 비선형 변위의 불일치로 인해 2차항의 자유파가 발생한다. Goda(1998)는 이 같은 현상을 2차원 실험 수조에서 관측하였고, 이는 진행파의 주성분파(1차항, Primary wave)와 2차항의 자유파간의 상호작용으로 인해 파의 1차항과 3차항이 공간적 파형 변화를 일으킨다는 것을 3차항 섭동법(3rd-order perturbation)을 사용하여 설명하였다. Fig. 1은 천해에서 진행되는 파의 각 성분별(크기 순서대로 1차, 2차, 3차항) 공간적 파형 변화를 Goda(1998)의 이론 및 실험값과 비교하여 일치됨을 보여 주고 있다. 진행파의 고차항이 최대가 되는 지점에서(3m, 8m), 1차항은 반대로 최소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 2는 각 수심에 따른 진행파의 각 성분별 크기의 공간적 변화를 보여 준다. 수심이 감소할수록, 진행파의 고차항(2차, 3차항) 성분이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 또한 고차항 성분의 증가는 1차항의 크기 감소와 비례함을 볼 수 있다. 또한 수심이 증가함에 따라 파 변조의 주기가 감소하며, 변조폭이 감소

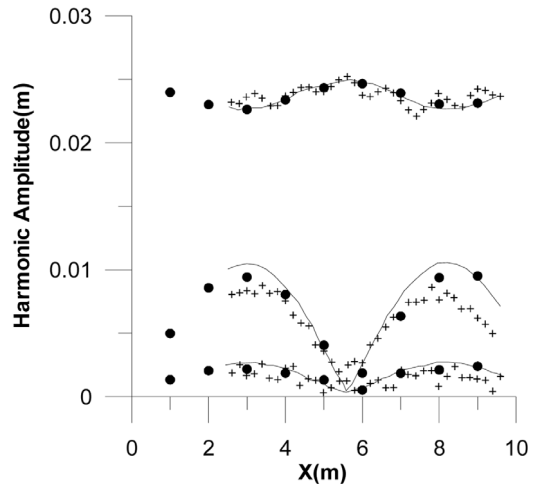


Fig. 1 Comparison of spatial variation of Fourier amplitudes with present results (black circle) and Goda's theoretical (solid line) and experimental (cross) results, water depth (h) = 0.25 m, period (T) = 1.696 sec, $dt = T/64$, input wave amplitude (A) = 0.025 m

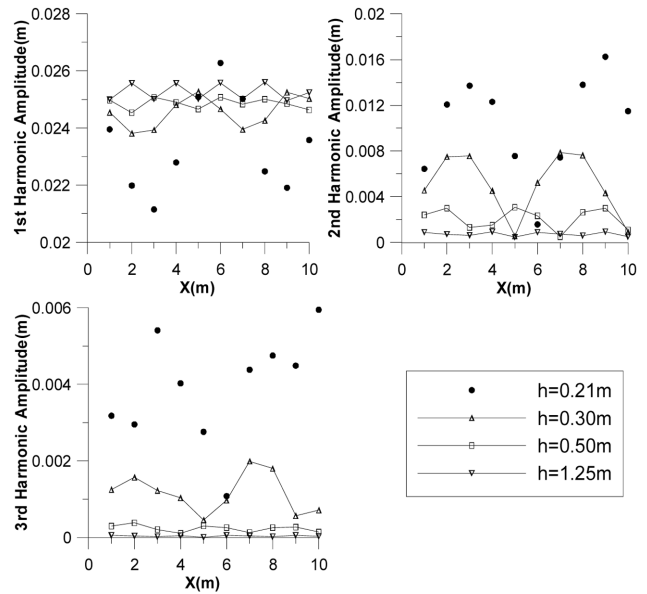


Fig. 2 Comparison of spatial variation of Fourier amplitudes with various water depths, period (T) = 1.696 sec, $dt = T/64$, $A = 0.025$ m

함을 알 수 있다. 이는 수심이 깊을수록 진행파에 대한 해저면의 영향이 감소하여 파간 상호작용의 감소로 인한 고차항 성분들의 크기가 감소하기 때문이다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 수심이 감소할수록, 즉 해저면의 영향이 클수록 입사 파고에 대한 고차항 성분의 최대값은 급격히 증가함을 알 수 있고 이에 비례하여 1차항 성분은 감소한다. 반면에 일정 수심 이상의 경우($kh > 1.2$)에는 고차항의 변화가 거의 없다. 이는 Fig. 2에서 설명한대로, 수심증가로 인한 진행파와 해저면간의 상대적 영향이 작아지기 때문이다. 본 연구에 이

용된 완전 비선형 수치 파동 수조 기법은 입사 파고에 대한 2차항 크기가 40% 이상, 3차항은 20%에 달하는 고차 비선형파도 재현이 가능하였다.

상대적 수심이 얇은 실험 수조의 진행파에서 발생하는 공간적 파형 변화는 조파기의 선형 운동과 조파기 주변 유체 입자의 비선형 변위의 불일치로 인해 의도하지 않게 발생하는 2차항의 자유파가 그 원인이다. 이를 확인하기 위해, 수치 파동 수조의 입사 경계면에 고차항의 조파기 운동(Stokes 2nd-order wave input)을 대입하여 이 같은 자유파의 발생 여부를 확인하였다. Fig. 4에서 Stokes 2차항 입사파의 경우는 조파기 주변 비선형 유동 입자와의 변위차가 작기 때문에 Fig. 4에 공간적 파형 변화가 일어나지 않음을 증명하였다.

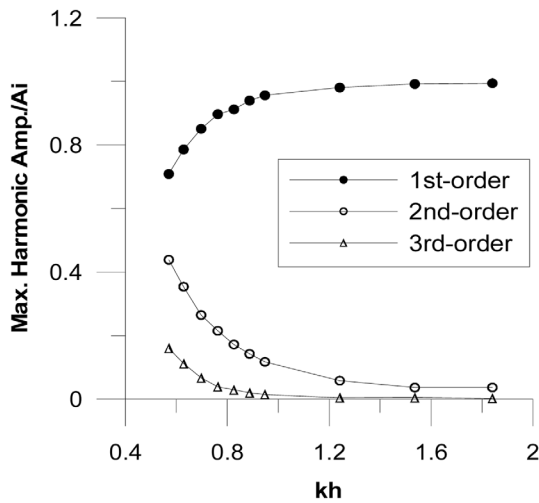


Fig. 3 Comparison of maximum Fourier amplitudes with various water depths, A_i = input wave amplitude (0.025 m), $T = 1.696$ sec

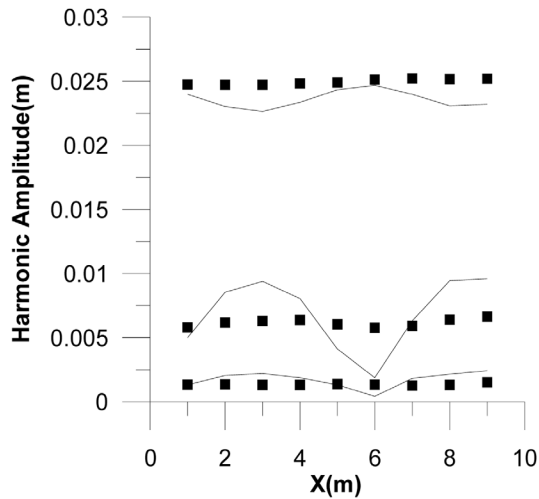


Fig. 4 Comparison of spatial variation of Fourier amplitudes with linear wave input (solid line) and Stokes 2nd-order wave input (black rectangle), $A = 0.025$ m, $T = 1.696$ sec, $h = 0.25$ m

3.2 파 입자의 속도 분포 변화

비선형파의 공간적 파형변화에 따른 파입자의 속도 분포를 조사하기 위해 고차성분이 최대가 되는 지점(Fig. 1에서 3m)과 최소지점(Fig. 1에서 6m)에서의 속도를 Fig. 5에 나타내었다. 고차항이 최대가 되는 지점의 입자 속도가 최소 지점의 속도나, 고차항이 존재하지 않는 선형 이론식보다 크을 알 수 있다. 또한 Stokes 2차항 입사파를 적용한 경우(Fig. 5 좌측그림에서 Cross)는 고차항 최대 지점 속도보다 작고 최소지점 속도 보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은, Fig. 4에서처럼 고차항 입사파의 경우, 고차 성분의 크기가 선형 입사파 경우의 최대값과 최소값 중간지점에 분포하는 것을 확인하였기 때문에, 수평 속도의 크기는 파의 고차성분의 크기와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 다시 말하면, 고차성분이 클수록 수평 입자 속도가 증가한다. 수직 속도 역시 고차성분의 영향을 받지만 선형 이론식을 제외한 다른 수치 결과들 간의 차이는 그리 크지 않다. Fig. 5에서 수평 속도가 수직 속도에 비해 2배 이상 큰 것을 알 수 있는데, 이는 천해에서의 파 입자는 수평방향의 변위가 절대적으로 크기 때문이다.

Fig. 6은 수심 변화에 따른 파입자 속도의 분포를 나타내었다. 수심이 깊을수록 속도가 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 입자 속도에 중대한 영향을 주는 파의 고차성분이 수심 증가에 따라 감소하기 때문이다. 특히 수심이 깊은 경우($h = 1.25$ m) 수직 속도에 대한 수평 속도의 비가 1에 가까워짐을 알 수 있는

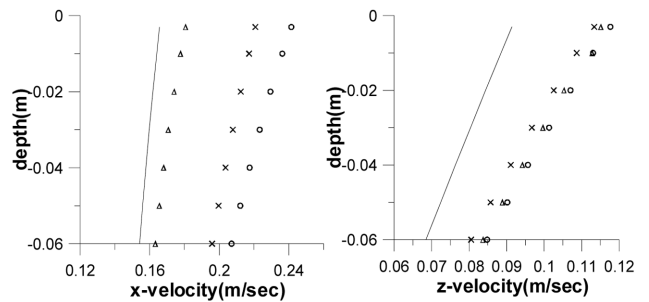


Fig. 5 Comparison of maximum velocities, circle = linear wave input at 3 m, triangle = linear wave input at 6 m, cross = Stokes 2nd-order wave input and solid line = linear theoretical value, $h = 0.25$ m, $A = 0.025$ m, $T = 1.696$ sec

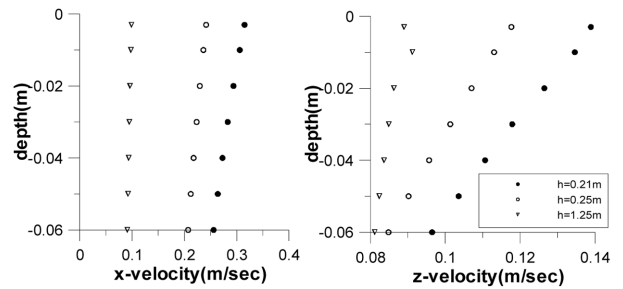


Fig. 6 Comparison of maximum velocities with various water depths, $h = 0.21$ m (black circle), 0.25 m (white circle), 1.25 m (inverse triangle), $A = 0.025$ m, $T = 1.696$ sec

데, 이를 통해 심해파인 경우 파 입자 운동이 원형에 가깝다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

2차원 수치 파동 수조를 이용하여 천해에서의 비선형파의 공간적 파형 변화와 입자 속도 분포 변화를 조사하였다. 개발된 수치 파동 수조는 포텐셜 이론을 바탕으로 경계요소법과 비선형 자유표면의 변화를 재현하기 위한 MEL법 그리고 시간 적분을 수행하기 위한 Runge-Kutta 4차항법을 사용하였다. 비선형파의 공간적 파형 변화를 일으키는 2차항 자유파를 실험 수조 조건과 동일하게 재현하여 기존 논문의 이론 및 실험값과 일치함을 확인하여 수치 결과의 정확성을 입증하였다.

수심에 따른 진행파의 각 성분별 크기의 공간적 변화는 수심이 감소할수록, 고차항 성분은 증가하고 1차항 성분은 비례적으로 감소함을 확인 할 수 있었다. 또한 수심 증가할수록 파 변조 주기와 변조 폭이 감소함을 알 수 있었다. 이는 수심이 깊을수록 진행파에 대한 해저면의 영향이 감소하여 파 상호작용의 감소로 인해 고차 성분들의 크기가 감소하기 때문이다.

2차항의 자유파가 조파기의 선형 운동과 조파기 주변 유체 입자의 비선형 변위의 불일치로 인해 발생하는 것을 증명하기 위해 수치 파동 수조의 입사 경계면에 고차항의 조파기 운동 (Stokes 2nd-order wave input)을 대입하여 자유파가 발생하지 않음을 보이고 이로 인해 공간적 파형 변화가 없음을 확인하였다.

진행파의 고차성분이 클수록 수평 입자 속도와 수직 입자 속도가 증가함을 알 수 있었고, 수평 입자 속도가 고차성분 크기에 더 민감한 것을 볼 수 있었다. 또한 수심이 깊을수록 수평 속도와 수직 속도의 비가 1에 가까워져 파입자의 원형 운동을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2008년 울산대학교 연구비(과제번호: 2008-0019)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Clement, A.H. (1996). "Coupling of Two Absorbing Boundary Conditions for 2-D Time-Domain Simulations of Free Surface Gravity Waves", *J. Comp. Phys.*, Vol 126, pp 139-151.
- Cointe, R., Geyer, P., King, B., Molin, B. and Tramoni, M. (1990). "Nonlinear and Linear Motions of a Rectangular Barge in a Perfect Fluid", *Proc. 18th Symp. on Naval Hydrodynamics*, pp 85-99.
- Dommermuth, D.G. and Yue, D.K.P. (1987). "Numerical Simulation of Nonlinear Axisymmetric Flows with a Free Surface", *J. Fluid Mech.*, Vol 178, pp 195-219.
- Goda, Y. (1998). "Perturbation Analysis of Nonlinear Wave Interactions in Relatively Shallow Water", *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Hydrodynamics*, pp 33-51.
- Grilli, S.T. and Horrillo, J. (1998). "Computation of Periodic Wave Shoaling over Barred-beaches in a Fully Nonlinear Numerical Wave Tank", *Proc. of the 8th Int. Offshore and Polar Eng. ISOPE, Montreal, Canada, Vol 3*, pp 294-300.
- Kim, C.H., Clement, A.H. and Tanizawa, K. (1999). "Recent Research and Development of Numerical Wave Tanks - a Review", *Int. J. Offshore and Polar Eng.*, Vol 9, No 4, pp 241-256.
- Koo, W.C. and Kim, M.H. (2001). "Fully Nonlinear Waves and Their Kinematics: NWT Simulation VS. Experiment", *Proc. of the 4th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES 2001, Vol 2. ASCE*, pp 1092-1101.
- Koo, W.C. and Kim, M.H. (2004). "Freely Floating-body Simulation by a 2D Fully Nonlinear Numerical Wave Tank", *Ocean Eng.*, Vol 31, pp 2011-2046.
- Koo, W.C., Kim, M.H. and Tavassoli, A. (2004). "Fully Nonlinear Wave-Body Interactions with Fully Submerged Dual Cylinders", *Int. J. Offshore and Polar Eng.*, Vol 14, pp 210-217.
- Longuet-Higgins, M.S. and Cokelet, E.D. (1976). "The Deformation of Steep Surface Waves on Water: I. A Numerical Method of Computation", *Proc. Royal Soc. London. A* 350, pp 1-26.
- Sung, H.G. (1999). *A Numerical Analysis of Nonlinear Diffraction Problem in Three Dimensions by Using Higher-Order Boundary Element Method*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Tanizawa, K. (1996). "Long Time Fully Nonlinear Simulation of Floating Body Motions with Artificial Damping Zone", *J. Soc. of Naval Architects of Japan*, Vol 180, pp 311-319.

2009년 7월 29일 원고 접수

2009년 11월 19일 심사 완료

2009년 12월 21일 게재 확정