

Bragg 반사에 의한 비선형파의 공간적 파형변조해석

최가람* · 구원철*

*울산대학교 조선해양공학부

Spatial Modulation of Nonlinear Waves due to Bragg Reflection

Ka-Ram Choi* and Weon-Cheol Koo*

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

KEY WORDS: Numerical wave tank 수치 파동 수조, Fully nonlinear 완전 비선형, Bragg reflection Bragg 반사, Boundary element method 경계요소법, Nonlinear waves 비선형파, Spatial modulation 공간적 변조

ABSTRACT: Bragg reflection of nonlinear waves is simulated by a 2D fully nonlinear numerical wave tank (NWT). The developed NWT was based on the Boundary Element Method (BEM) with potential theory and the mixed Eulerian-Lagrangian (MEL) time marching scheme with Runge-Kutta 4th-order time integration. A spatial variation of wave elevations and their Fourier amplitudes of each component are compared to investigate the effect of sea bottom ripples and their relative heights. The incident waves over an undulated sea bottom are partially reflected and changed to partial standing waves due to Bragg reflection. The present results are verified with linear calculations and experimental data. It is found that the 1st-order wave component is mainly affected by Bragg reflection and its spatial modulation is significant in front of the bottom ripples.

1. 서 론

해상에서 관측되는 비선형파는 경사가 급한 높은 파봉과 완만하고 낮은 파미를 가지고 있으며 심해에서 천해로 진행할 때 수심이 얇아짐에 따라 파 입자의 운동 변화로 인해 파고는 증가하고 파장은 감소한다. 천해에서의 해저지형 변화는 진행파를 부분 반사시키는데 이런 현상을 Bragg reflection(Bragg 반사)라고 한다. 이런 반사는 수심이 얇고 해저면 굴곡의 높이가 상대적으로 클 때 증가한다. 특히 해저면 구조물이 일정간격의 굴곡을 형성하고 있는 경우, 진행파의 파장이 구조물 간격의 두 배가 될 때 공진이 일어나 최대 반사가 일어난다(Sorensen, 1993; Mei et al, 2005).

최근 들어 천해에서 해저 구조물의 설치와 운용이 증가함에 따라 보다 효과적인 구조물 설계를 위한 해저 지형과 파의 상호작용에 대한 해양 공학적 연구들이 진행되어 왔다. 특히 Bragg 반사에 대한 해양파의 물리적 특성을 파악하기 위해서 Davies and Heathershaw(1984)는 파의 성분과 해저지형의 상호관계에 대한 이론적인 연구와 함께 단일 정현형(Sinusoidal) 해저구조물에 대한 실험을 수행하였다. Kirby and Anton (1990)은 섭동법을 이용하여 기존 이론을 확장하였고, Guazzelli et al.(1992)은 복합 정현형 해저구조물을 이용한 고차항의 Bragg 반사에 대한 연구를 수행하였다. Rey et al.(1992)은 사각형의 해저구조물을 이용한 실험을 수행하였고, Dalrymple and

Kirby(1986)는 경계적분방정식(Boundary integral equation method, BIEM)을 이용하여 경사 입사파(Oblique incident waves)의 해저구조물에 대한 반사율 계산하였으며 Tang and Huang(2008)은 같은 방법을 사용하여 다양한 해저구조물의 형태에 대한 반사효과를 나타내었다.

하지만, Bragg 반사에 대한 여러 연구에도 불구하고, 아직까지 해양 공학적 관점에서 구조물과 해양파간의 상호작용으로 인한 해양파의 물리적 특성 변화 등에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 천해에서 해저 구조물의 설계 및 운용을 위해서는 비선형 입사파의 각 성분별 파형 변화 등 물리적 특성과 이의 분석을 통한 구조물 주변의 해상 환경 변화 등을 체계적으로 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 비점성, 비압축성, 비회전성의 유체를 가정한 속도 포텐셜 이론과 경계요소법(Boundary element method)을 바탕으로 한 2차원의 완전 비선형 수치 파동 수조를 이용하여 해저면 구조물(혹은 굴곡)에 의한 Bragg 반사를 재현하고 이를 통해 구조물의 상대 높이 및 입사파고의 변화에 따른 구조물 주변 해양파의 공간적 파형 변조를 분석하였다. 본 연구는 기존의 수치 파동 수조 기법을 이용한 Bragg 반사해석(Tang and Huang, 2008)에서 다루지 않은 해저 구조물 주위의 파형 변화와 구조물의 상대 높이에 따른 파 성분의 공간적 변화등을 연구하였고, 선형 계산 및 비선형 계산의 차이를 비교하였다. 이를 통해 Bragg 반사의 보다 정확한 물리적 의미를 해석하였

교신저자 구원철: 울산광역시 남구 대학로 93번지, 052-259-2767, wckoo@ulsan.ac.kr

본 논문은 2010년 6월 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문의 주된 내용을 발췌하였음을 밝힙니다.

고 비선형 시간영역 계산의 유효성을 고찰하였다.

수치 파동 수조에서 자유표면의 비선형 변화를 시간 영역에서 계산하기 위해 Longuet-Higgins and Cokelet(1976)이 제안한 혼합 오일러-라그랑지안(Mixed eulerian-lagrangian, MEL)법을 사용하였다. 이 방법은 고정된 오일러 좌표계에서 지배 방정식을 계산하고, 움직이는 경계점(노드)과 그 점에서 계산된 값들을 라그랑지안 방법으로 매 시간 계산 스텝마다 수정 대입함으로써 완전 비선형 파체 상호작용 등의 문제에 많이 이용되어 왔다. 자유표면 변위와 속도 포텐셜의 시계열 계산을 위해 비선형 문제에서 수치적 안정성이 뛰어난 Runge-Kutta 4차항법을 사용하여 시간 적분을 수행하였다. 현재 다양한 종류의 수치 파동 수조가 연구 개발되었는데, 이에 대한 자세한 검토는 Kim et al.(1999), Koo and Kim(2004) 등에서 찾을 수 있다.

비선형 수치 파동 수조에서 발생시킨 입사파가 해저 구조물에 반사되어 입사파 경계면에서 재반사되는 것을 최소화 하기 위해 입사 경계면 근처에 인공 감쇠영역을 설치하여 구조물에 반사되는 되돌아오는 반사파만을 선별적으로 제거하여 일정한 입사 파고를 유지하였다. 또한 계산 영역 끝의 자유 표면에 수치해안(Numerical beach) 이라고 일컫는 인공 파감쇠 영역을 설치하여 구조물을 통과한 파가 흡수되도록 하였다.

얕은 수심에서 조파기에 의해 생성된 해양파는 조파기의 선형운동과 조파기 주위 유체 입자의 비선형 운동과의 불일치로 인해 2차항의 자유파(Free wave)가 발생 한다(Goda, 1998; Koo and Kim, 2001). 이로 인해 공간적 파형 변조(Spatial modulation)가 일어나고, 이러한 현상은 수심이 얕을수록 파변조 폭이 증가한다. 수평 해저면에서 수심에 따른 공간적 파형 변조에 대한 연구는 Koo and Choi(2009)에서 찾을 수 있다. 본 연구에서는 이를 확장하여 굴곡이 있는 해저면에서 Bragg 반사를 재현하고 구조물에 의한 진행파의 공간적 파형 변조를 조사하였다. Bragg 반사에 대한 본 연구의 계산 결과는 Davies and Heathershaw (1984)의 실험 결과와 비교하여 검증하였고, 연속한 단일 반원형(Half cylindrical) 해저 구조물에 의한 해양파의 공간적 파형 변조와 구조물의 상대 높이에 따른 파성분의 물리적 특성을 조사하고, 이를 수평 해저면의 결과와 비교하였다.

2. 수학적 공식화

2.1 혼합 경계값 문제

Fig. 1에 도식화 되어있는 수치 파동 수조의 계산 영역은 포텐셜 이론을 바탕으로 비점성, 비압축성, 비회전성의 유체를 가정하였다. 좌측 입사 경계면과 정수면의 교점을 원점으로 하여 직교 좌표계를 사용 하였으며, 수평 방향은 우측으로 수직방향은 위쪽으로 증가 한다. 유체 계산 영역에서의 지배방정식은 속도 포텐셜의 정의와 유체의 연속 방정식을 조합하여 라플라스 방정식으로 표현된다.

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

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

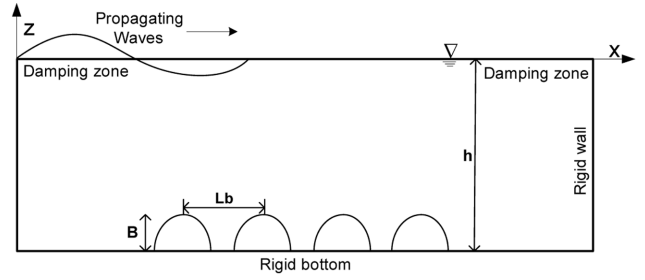


Fig. 1 Overview of computational domain

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 변위, g 는 중력 가속도, ρ 는 유체 밀도, P_a 는 자유표면의 대기압력으로 0으로 가정하였다.

해저면과 해저구조물, 그리고 계산 영역 우측 경계면에는 식 (4)과 같이 불투과성 경계조건이 적용되었다.

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

여기서, n 은 법선방향 벡터이다.

입사파가 유입되는 좌측 경계면에는 선형 파입자 속도(식 (5)) 또는 Stokes 2차항 파속도(식 (6))를 경계조건으로 대입할 수 있다.

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

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{gak}{w} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(kx - wt) - \frac{3}{4} a^2 w k \frac{\cosh 2k(z+h)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - wt) \quad (6)$$

여기서, a 는 파의 진폭, k 는 파수(Wave number), w 는 입사주파수, h 는 수심이다.

지배방정식인 라플라스 방정식을 풀기 위해서 그린 함수(G)를 사용하여 지배 방정식을 경계 적분 방정식(식 (7))으로 변환하고 앞에서 기술한 경계 조건을 대입하여 적분 방정식을 풀 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, 2차원 그린 함수 $G(x, z, x_i, z_i) = -(1/2\pi) \ln R$, α 는 Solid angle(경계면에서 0.5), R 은 경계면에 위치한 각 소스(Source)점과 필드(Field)점 사이의 거리이다.

2.2 시간 적분

본 연구에 적용한 비선형 수치 파동 수조 기법은 매 시간 변하는 자유표면을 시간 영역에서 재현할 수 있기 때문에 실험 수조와 매우 유사한 계산 조건을 구현할 수 있다. MEL법을 사

용하여 매 시간 계산 스텝마다 변하는 자유표면의 속도 포텐셜과 자유표면 변위를 계산하였다. 이 방법은 고정된 오일러 좌표계에서 지배 방정식을 계산하고, 자유표면 노드점의 위치와 계산 값을 라그랑지안 방법으로 매 시간 스텝마다 갱신하여 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 변형 시킨 후, 자유표면의 노드(Node) 속도(\vec{v})가 파입자 속도($\nabla\phi$)와 동일($\vec{v} = \nabla\phi$)하다고 가정하면 아래의 식과 같은 자유 표면 경계 조건이 생성된다.

$$\frac{\vec{\delta x}}{\delta t} = \nabla\phi \quad (8)$$

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

여기서, $\nabla\phi$ 는 파입자 속도이고 \vec{x} 는 노드의 위치(x, z)이다. 식 (8)과 (9)를 Runge-Kutta 4차항법을 이용하여 시간 적분을 하면 노드의 위치(자유표면의 변위)와 그 점에서의 속도 포텐셜을 계산할 수 있다.

2.3 파감쇠 영역

진행파가 불투과성 경계면에 반사하여 계산영역에 유입되는 것을 방지하여 정상상태의 계산을 지속적으로 수행하기 위해 계산 영역 우측 자유표면 경계면에 인위적 파감쇠 영역을 두고, 인공 감쇠 계수를 자유표면 경계 조건에 삽입하여 반사파를 억제하고 파 에너지를 흡수 하였다. 일반적으로 천해에서 비선형 파의 감쇠는 보다 긴 감쇠영역을 필요로 한다. $\phi_n - \eta$ 방식을 사용하여 자유표면 경계조건에 감쇠항을 추가하였다.

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = -g\eta + \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 + \mu_1 \frac{\partial\phi}{\partial n} \quad (10)$$

$$\frac{\delta\eta}{\delta t} = \frac{\partial\phi}{\partial z} + \mu_2\eta \quad (11)$$

여기서 $\mu_1, \mu_2 = k\mu_1$ 는 파감쇠 계수이고 k 는 파수이다.

수조 실험에서 입사파가 진행하다가 구조물에 의한 반사가 일어나면 그 일부가 조파기 방향으로 진행하여 조파기에 의한 재반사가 일어날 수 있다. 이 경우, 조파기에 의한 입사파와 재반사에 의한 진행파가 혼합되어 일정한 입사파고를 유지할 수 없다. 따라서 이 같은 재반사파의 유입 이후의 수조 실험 결과는 신뢰성을 확보할 수 없다. 수조 실험과 매우 유사한 수치 파동 수조도 동일한 현상이 나타나기 때문에 이를 극복하기 위해 입사파 지역에 구조물에 의한 반사파만을 선별적으로 제거할 수 있는 인공 감쇠영역을 두어 일정한 입사파고를 유지할 수 있도록 하였다. 인공 감쇠지역의 자유표면 경계식은 아래의 식과 같다.

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = -g\eta + \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 + \mu_{f1} \left(\frac{\partial\phi}{\partial n} - \left(\frac{\partial\phi}{\partial n} \right)^* \right) \quad (12)$$

$$\frac{\delta\eta}{\delta t} = \frac{\partial\phi}{\partial z} + \mu_{f2}(\eta - \eta^*) \quad (13)$$

여기서 $\mu_{f1}, \mu_{f2} = k\mu_{f1}$ 는 반사파감쇠 계수이고 k 는 파수이다. ($\partial/\partial n$)*, η^* 는 구조물이 없는 수평 해지면 조건에서 계산한 값을 나타낸다. 본 연구에서는 이 값들을 이론적으로 계산하여 대입하였다.

2.4 수치 계산 기법

본 연구에서 계산 결과의 수치적 안정성을 확보하기 위해 여러 가지 수치 계산 기법을 활용하였다. 계산영역내에 급격한 입사파의 유입으로 인한 수치적 불안정성을 방지하기 위해 입사파고를 점진적으로 증가시켜 계획된 값에 이르게 하기 위한 램프 함수(Ramp function)를 사용하였다(식 (14)).

$$r(t) = \begin{cases} 1 & t > 2T \\ \left\{ 1 - \cos\left(\pi \frac{t}{2T}\right) \right\} / 2 & t \leq 2T \end{cases} \quad (14)$$

여기서, 점진적 증가 시간은 보통 입사파 주기의 2배(2T)로 하였다.

진행파의 파체 상호작용으로 인한 파의 비선형성 증가와 경계면 이산화(Discretization) 기법 등으로 인한 자유 표면의 수치적 불안정성(노이즈)을 해결하기 위해 Chebyshev 5-points 평탄화(Smoothing)법을 매 5번째 시간 계산 스텝마다 자유 표면에 적용하였다. 평탄화법 사용으로 인한 고차항의 인위적 제거는, 본 기법의 경우, 진행파의 3차항까지 보존됨을 확인하였다. 일정한 간격의 노드점에 대한 평탄화법은 Longuet-Higgins and Cokelet(1976)에 의해 처음 제안되었고 Sung(1999)은 불규칙 간격의 노드점에 적용할 수 있도록 이를 수정하였다.

본 연구에서 사용된 2차원 완전 비선형 수치 파동 수조의 여러 수치적 방법은 Koo and Kim(2004), Koo et al.(2004) 등에서 자세한 내용을 찾을 수 있다.

3. 수치 결과 및 해석

3.1 진행파의 공간적 변조

본 연구에 사용된 수치 파동 수조(Fig. 1)의 주요 제원은 다음과 같다. 계산 영역 우측 끝에 위치한 파감쇠 영역과 좌측 조파영역 부분의 반사파 감쇠 영역은 각각 입사파장의 2배($2L_w$)이며 그 외 자유수면구간은 파장의 12배($12L_w$)이다. L_w 는 입사파장이다. Fig. 2에서는 본 계산에서 사용한 파 감쇠 영역(조파기 영역과 계산 영역 우측면)의 입사파 보존 및 파 감쇠 효과를 나타낸다. 위쪽 그림은 조파기 근처의 반사파 감쇠 영역이 해져 구조물에 의한 반사로 인해 조파기에서 재반사되는 것을 방지함으로써 입사파가 보존됨을 나타내고, 아래쪽 그림은 계산 영역 우측 끝부분에서 투과파의 효과적인 감쇠가 일어남을 보여준다. 따라서 본 계산에서는 조파영역 근처의 국부파(Local standing wave)의 영향이 거의 없다고 판단된다. 이는 입사파가 조파기 운동이 아닌, 파성분의 직접적인 대입(Wave profile input)으로 발생하기 때문에 상대적으로 국부파의 영향이 적다고 판단된다.

선형 파입자 속도(혹은 조파기 운동)를 입사파 경계 조건으로

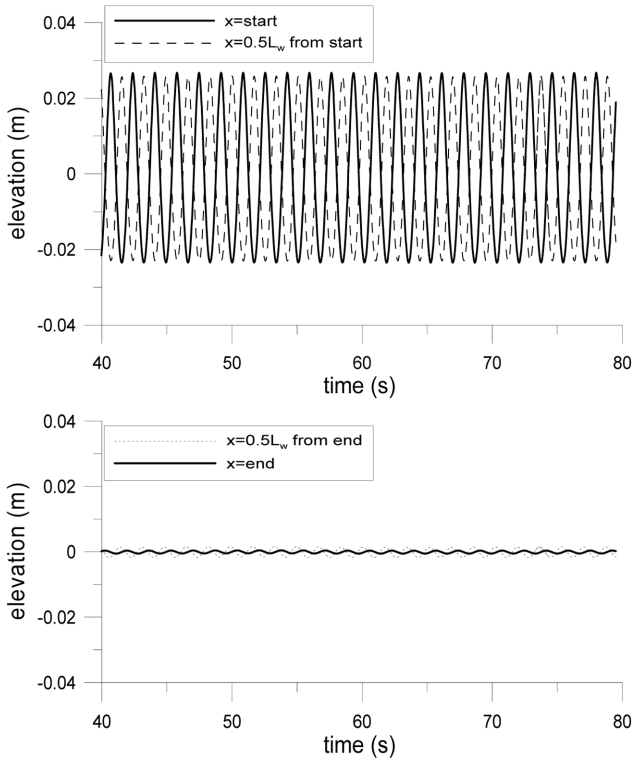


Fig. 2 The effect of damping zone, incident amplitude (a) = 0.025 m, water depth (h) = 0.5 m

대입하여 발생시킨 입사파에는 입사파 입자의 선형 운동과 조파기 주변 유체 입자의 비선형 운동과의 불일치로 인해 2차항의 자유파(Free wave)가 포함된다(Goda, 1998). 본 연구에 앞서 Koo and Choi(2009)에서 수심 변화에 따른 자유파의 상대적 영향을 고려하여 비선형 진행파의 공간적 파형 변화를 수치적으로 계산하여 Goda(1998)의 결과와 비교하였다. 이를 통해 수심이 깊어질수록 파형 변조 폭이 증가하는 것을 확인 하였다. 또한 2차항 자유파의 발생 원인을 증명하기 위해 입사 경계면에 고차항의 파입자 속도(Stokes 2nd-order wave input)을 대입한 결과, 조파기 주위 유체입자의 비선형 운동과의 변위차가 작기 때문에 공간적 파형 변화가 일어나지 않음을 확인하였다.

본 연구에서는 진행파의 파장이 해지면 구조물 간격의 두 배가 될 때 발생하는 Bragg 공진을 확인하기 위해, 단일 정현형(Sinusoidal) 해저 구조물이 있는 경우의 수치 결과와 수조 실험 결과(Davies and Heathershaw, 1984)를 비교하여 이 현상을 재현하였다(Fig. 3). 계산 조건은 수심(h) 0.15625m, 4개의 단일 정현형 해저 구조물의 개별 단위길이(A ripple interval, L_b) 1m, 그리고 구조물의 진폭(B) 0.05m이다. 입사진폭(a)은 0.015m이며 입사파장(L_w)은 2m으로서 Bragg 반사의 공진 조건을 만족시켰다. 수치 계산을 통해 얻은 반사계수(입사파고(H_i)에 대한 반사된 파고(H_R)의 비, $K_R = H_R/H_i$)를 실험과 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다. 실험을 통해 얻은 반사계수는 계측의 부정확성 등으로 인해 그 편차가 심하지만, 본 계산의 경우 조파영역 부분에 위치한 재반사파 감쇠 기법을 자유표면 경계조건에 적용(식 (12), (13))하여 입사파와 반사파가 혼합되는 것을 방지

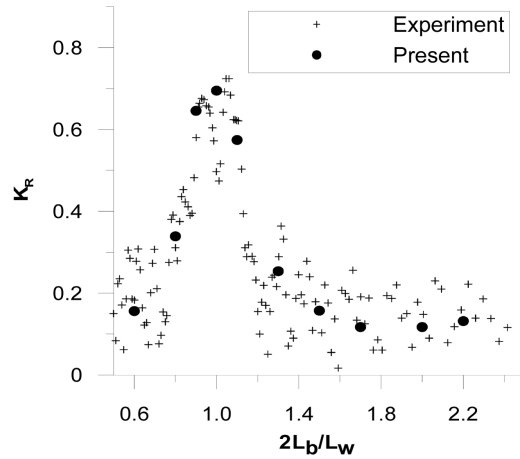


Fig. 3 Comparison of reflection coefficients of the present results for a sinusoidal bottom and experimental results by Davies and Heathershaw (1984), L_b and L_w denote a ripple interval and incident wave length, respectively

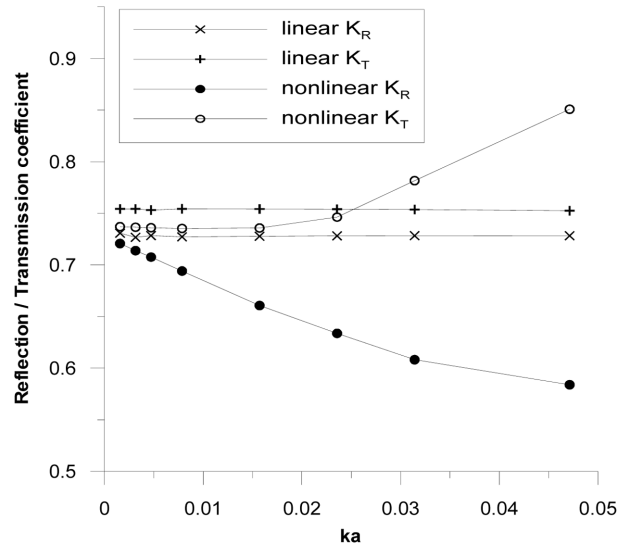


Fig. 4 Comparison of reflection and transmission coefficients for linear and nonlinear calculations, water depth (h) = 0.15625 m, $2L_b/L_w = 1$, $B/h = 0.32$

하여 반사계수를 효과적으로 산출할 수 있다.

Fig. 4에서는 입사파 진폭에 따른 반사계수와 투과계수(입사파고(H_i)에 대한 투과된 파고(H_T)의 비, $K_T = H_T/H_i$)의 선형 시간영역(Linear time domain)과 비선형 시간영역(Nonlinear time domain) 계산결과의 차이를 비교하였다. 선형 계산의 경우 입사파 진폭이 증가하더라도 반사계수와 투과계수는 일정하다. 이는 선형 계산의 경우 입사파고 증가에 따른 파의 비선형성이나 파상호작용이 계산되지 않기 때문이다. 하지만, 비선형 계산의 경우 입사파 진폭이 증가할수록 반사계수는 감소하고 투과계수는 증가함을 알 수 있다. 이는 비교적 얇은 수심($h/L_w = 0.078$)에서 파진폭이 증가할수록 비선형성의 증가와 함께 해저구조물의 반사효과가 상대적으로 감소하기 때문이다. 다시

말하면 파고 증가에 따른 단위 면적당 파에너지의 밀집도 증가로 인한 구조물의 방파능력이 약화되기 때문이다. 하지만 입사 파고가 작아지면 선형 계산에 근접하는 결과를 나타내는데, 이는 파고가 감소할수록 파의 비선형성이 감소하여 선형파 효과를 나타내기 때문이다. 본 계산 결과를 통해 이러한 현상을 확인할 수 있다.

입사파가 해저면 구조물을 통과하면서 부분적 반사가 일어나는데 이런 현상은 수심이 얕을수록 심화된다. Bragg 반사의 공진이 발생하는 조건(Table 1)에서 반원형(Hhalf cylindrical) 해저 구조물을 설치하여($X/L_w = 5.2 \sim 6.8$) 각 수심별로 계산을 수행하였고, 그에 따른 Fourier 진폭의 각 성분별 공간적 파형 변화를 편평한 해저면의 경우와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 이 계산에는 고차항의 파입자 속도(Stokes 2nd-order wave input)를 입사 경계면에 대입하였다. Fig. 5의 결과 일부는 Koo and Choi(2010)에서 인용하였다.

Fig. 5에서 입사파의 성분별 공간적 파형변화 결과 비교를 통해 해저 구조물이 설치된 지역의 앞쪽에서 Fourier 1차항 성분이 최대가 됨을 알 수 있다. 수심이 얇은 경우(a, b), 1차항의 변조폭은 약 66~70% 증가하였고 변조 주기는 입사파장의 1/2이 되었다. 또한 2, 3차항의 경우, 파 변조가 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 수심이 깊은 경우(c)는 평탄 해저면과 비교하여 1차항의 15%정도 증가하였고, 고차항은 거의 차이가 없었다. 구조물 설치 배후지역의 경우, 수심 변화에 따른 입사파 각 성분별 파진폭의 변화는 그리 크지 않았다. 1차항 성분의 경우 입사파

에 비해 약간 감소함을 알 수 있지만, 고차항의 경우는 거의 변화가 없다. 위의 비교를 통해 Bragg 반사는 입사파 에너지의 전 반적인 반사가 아닌 1차항 성분의 공간적 파진폭 변화를 나타내는 것임을 알 수 있고 이 같은 진폭의 변화는 수심이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 Bragg 반사로 인한 투과파의 감소는 그리 크지 않다.

여기서 M 은 반원형 해저 구조물의 수, a 는 입사파의 진폭, L_w 는 입사파장, L_b 는 해저구조물 간격, 그리고 B 는 해저 구조물의 높이이다.

Fig. 6는 수심에 대한 해저 구조물의 상대 높이에 따른 각 파형성분의 최대값 변화(a)와 투과파의 1차항 성분의 감소율 (b), 그리고 반사 및 투과계수(c)를 비교하였다. Fig. 6(a)에서 해저 구조물의 상대 높이가 증가할수록 Bragg 반사로 인한 입사파의 각 성분별 최대값은 증가하지만, 1차항의 경우 $B/h = 0.32$ 이상에서 대체로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 구조물의 상대 높이의 증가에 따라 진행파와 구조물간의 상호작용으로 파의 고차성분이 증가하여 비선형성이 커지는 것을 의미한다. Fig. 6(b)에서 구조물의 배후지역에서 측정된 1차항 성분의 입사파 대비 감소율은 $B/h = 0.32$ 에서 최대가 되며 이때 약 9% 정도이다. 다시 말해 입사파의 1차항 성분의 약 9%정도가 해저 구조물로 인해 반사되어 투과되지 못하였다는 것을 의미한다. 하지만 구조물의 상대높이(B/h)가 0.32보다 클 경우는 구조물에 의한 1차항의 반사효과가 오히려 감소한다. 이것은 구조물 상대높이에 따라 진행파가 구조물을 통과할 때 파의 비선형성이 증가하여 투과파에 그 효과가 반영되기 때문이다. 반사계수와 투과계수는 해저구조물의 상대 높이가 증가할수록 모두 완만히 증가하는 것을 Fig. 6(c)를 통해 알 수 있다. 반사계수는 $B/h = 0.24$ 이상에서 거의 수렴하거나 미세한 증가를 나타낸다. 또한 반사계수와 투과계수의 제곱의 합은 구조물 상대 높이의 증가에 따라 1

Table 1 Calculation conditions ($M=4, B/h=0.32$)

h [m]	a [m]	L_w [m]	L_b [m]	B [m]
0.25	0.025	2.5	1.25	0.08
0.50	0.025	2.5	1.25	0.16
1.25	0.025	2.5	1.25	0.40

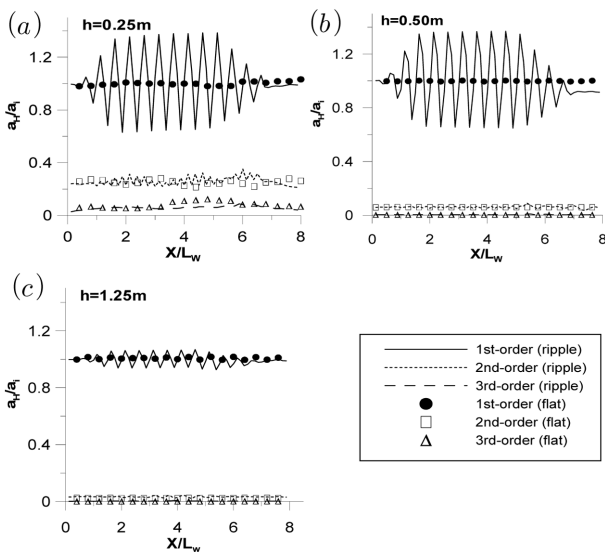


Fig. 5 Spatial variation of Fourier wave amplitudes for half-cylinder bottom (lines) and flat bottom (symbols)

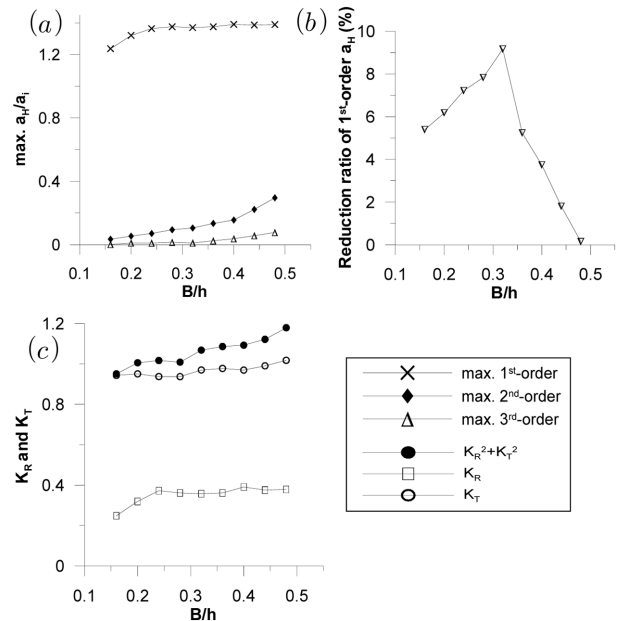


Fig. 6 Variation of wave characteristics with relative ripple height (B/h) ratios

이상이다. 일반적으로 선형계산인 경우는 1이 된다. 계수들의 제곱의 합이 1보다 크다는 것은 입사파가 상대적으로 높은 구조물을 통과하면서 구조물에 의한 반사 영향이 증가하지만, 동시에 파의 비선형적 특성이 증가하여 전체파고가 커지기 때문에 투과계수도 증가하게 된다.

4. 결 론

2차원의 완전 비선형 수치 파동 수조를 이용하여 해저면에 일정 간격으로 설치된 구조물을 통과하는 해양파의 Bragg 공진을 수치적으로 재현하고 파의 각 성분별 공간적 파형 변조를 조사하였다. 본 연구에 사용된 수치 파동 수조 기법은 포텐셜 이론을 바탕으로 경계요소법과 비선형 자유표면의 변화를 매 시간마다 재현하기 위한 MEL법 그리고 시간 적분을 수행하기 위한 Runge-Kutta 4차항법이 사용되었다. 계산 영역 우측 경계면(자유표면영역)에 파감쇠 영역을 두어 수직 경계면에서 발생하는 반사파를 흡수하고, 입사파 경계면 근처에 재반사파 감쇠 영역을 설치하여 해저 구조물에 의한 반사파만을 선별적으로 감쇠시켜 입사파의 일정성을 보장함으로써 지속적인 정상상태의 수치 계산을 수행할 수 있게 하였다. 또한 Bragg 공진에 대한 기존의 실험결과와 비교하여 본 수치 계산 결과의 유효성을 확인하였다.

입사파 진폭에 따른 반사계수와 투과계수의 비교를 통해 비선형 시간 영역 계산의 경우 단위 면적당 파에너지의 밀집도 증가로 인한 해저 구조물의 상대적 반사 효과 감소로 반사계수가 감소하였고 투과계수는 증가하였다. 또한 입사파 진폭이 작은 경우 선형 계산 결과와 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

입사파의 성분별 공간적 파형변화 결과 비교를 통해 반원형 해저 구조물이 설치된 지역의 앞쪽에서 1차항 성분이 급격히 증가함(약 70%)을 알 수 있었고 변조 주기는 입사파장의 1/2 이 되었다. 하지만 2, 3차항의 경우 공간적 파변조가 거의 일어나지 않았다. 또한 구조물 배후지역의 경우 각 성분별 감소비는 그리 크지 않았다. 이를 통해 Bragg 반사가 입사파 에너지의 전반적인 반사가 아닌 1차항 성분의 공간적 파진폭 변화를 나타내는 것임을 알 수 있었고 이 같은 진폭 변화는 수심이 증가할수록 감소하였다. 따라서 Bragg 반사로 인한 투과계수의 감소는 매우 제한적이었다.

해저 구조물의 상대 높이에 따른 각 파형성분의 최대값 변화와 반사 및 투과계수의 비교를 통해 구조물의 상대 높이가 증가할수록 Bragg 반사로 인한 입사파 각 성분의 최대값은 증가하지만, 1차항의 경우 $B/h=0.32$ 이상에서 대체로 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이는 구조물의 상대 높이의 증가에 따라 진행파와 구조물간의 상호작용으로 파의 고차성분이 증가하여 비선형성이 커지는 것을 의미한다. 구조물 배후지역에서 측정된 1차항 성분의 입사파 대비 감소율은 $B/h=0.32$ 에서 최대(약 9%)가 되었다. 또한 반사계수와 투과계수의 제곱의 합이 1보다 크다는 것은 확인하였는데 이는 입사파가 상대적으로 높은 구조물을 통과하면서 구조물에 의한 반사가 증가(반사계수 증가)하지만, 동시에 파의 고차 성분 증가로 인한 전체파고의 증가로 투과계

수도 증가하게 되었음을 의미한다.

후 기

이 논문은 2009년 울산대학교 연구비(과제번호: 2009-0102)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Dalrymple, R.A. and Kirby, J.T. (1986). "Water Waves over Ripples", *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol 112, pp 309-319.
- Davies, A.G. and Heathershaw, A.D. (1984). "Surface-wave Propagation over Sinusoidally Varying Topography", *J. Fluid Mech.*, Vol 144, pp 419-443.
- Goda, Y. (1998). "Perturbation Analysis of Nonlinear Wave Interactions in Relatively Shallow Water", *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Hydrodynamics*, pp 33-51.
- Guazzelli, E., Rey, V. and Belzons, M. (1992). "Higher-order Bragg Reflection of Gravity Surface Waves by Periodic Beds", *J. Fluid Mech.*, Vol 245, pp 301-317.
- Kim, C.H., Clement, A.H. and Tanizawa, K. (1999). "Recent Research and Development of Numerical Wave Tanks - A Review", *Int. J. of 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", *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. of Offshore and Polar Eng.*, Vol 14, pp 210-217.
- Koo, W.C. and Choi, K.R. (2009). "Spatial Modulation of Nonlinear Waves and Their Kinematics by a Numerical Wave Tank", *J. of Ocean Eng. and Tech.*, Vol 23, No 6, pp 12-16.
- Koo, W.C. and Choi, K.R. (2010). Bragg Reflection of Nonlinear Waves by a 2D Numerical Wave Tank, *Proc. 20th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.* (in press).
- Kirby, J.T. and Anton, J.P. (1990). "Bragg Reflection of Waves by Artificial Bars", *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp 757-768.
- 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.
- Mei, C.C., Stiassnie, M. and Yue, D.K.P. (2005). *Theory and Applications of Ocean Surface Waves*, World Scientific.
- Rey, V., Belzons, M. and Guazzelli, E. (1992), "Propagation of Surface Gravity Waves over a Rectangular Submerged Bar", *J. Fluid Mech.*, Vol 235, pp 453-479.
- Sorensen, R.M. (1993). *Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineering*, Wiley-Interscience.
- 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.
- Tang, H.J. and Huang, C.C. (2008). "Bragg Reflection in a Fully Nonlinear Numerical Wave Tank Based on Boundary Integral Equation Method", *Ocean Eng.*, Vol 35, pp 1800-1810.
-
- 2010년 8월 10일 원고 접수
2010년 12월 15일 심사 완료
2010년 12월 17일 게재 확정