

낮은 수심을 통과하는 해양파의 변화에 대한 연구

석우찬* · 원윤상**†

* 부경대학교 조선해양시스템공학과 교수, ** 부경대학교 산학협력단 교수

Investigation on the Variation of Ocean Waves passing through Shallow Waters

Woochan Seok* · Younsang Won**†

* Professor, Department of Naval Architecture and Marine System Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

** Professor, Industry-University Cooperation Foundation of Pukyong National University, Busan 48547, Korea

요 약 : 낮은 수심에 있는 수중보를 통과하는 해양파 문제는 수심이 낮아지면서 발생하는 Shoaling 효과, 이로 인한 비선형파의 간섭효과, 그리고 수중보를 통과한 후 수심이 다시 깊어지면서 발생하는 파주기 별 분산효과 등을 복합적으로 포함하고 있다. 따라서, 이 문제는 해양파의 이론적 접근이나 CFD의 유효성을 검증하는 좋은 사례로 많이 활용되고 있는데, 주로 규칙파에 대해서 시간영역에서의 파형변화를 수조실험 결과와 비교하여 분석한다. 본고에서는 주파수 영역에서의 에너지 스펙트럼 변화를 분석하여, OpenFOAM 등의 CFD를 적용함에 있어서 초기위상조건 등 별다른 제약이 없는지, 비선형파의 간섭효과로 인한 배음 주파수 간의 에너지 교환이 나타나는지 등을 연구하였다.

핵심용어 : 수중보, 비선형간섭, Boussinesq방정식, 스펙트럼, OpenFOAM

Abstract : Ocean waves passing through the underwater bar at a shallow depth experience a shoaling effect caused by decreasing water depth, a nonlinear interaction therein owing to steepening wave slope, and a wave dispersion effect as the water depth increases again. Because this problem includes many complicated phenomena, it is used as a good example of validating a theoretical development or a CFD method for ocean wave applications. Validation is performed mainly for regular waves by comparing the wave elevation patterns in the time domain with the experimental results. In this study, the spectral evolution of wave spectrum is investigated in the frequency domain when a CFD method such as OpenFOAM is applied for this problem. In particular, the effects of initial phase conditions as well as the nonlinear interaction among harmonic waves are studied.

Key Words : Underwater Bar, Nonlinear Interaction, Boussinesq Equation, Spectrum, OpenFOAM

1. 서 론

1953년 1월 북해에서 폭풍으로 인한 파도가 네덜란드 해안에 접근하면서 해일을 일으켜, 해안지방의 제방이 무너지고 해수면보다 낮은 많은 지역들이 물에 잠기는 대재앙이 발생했다. 이 재해로 1,800여명의 주민과 20여만 마리의 가축이 희생되었는데, 이를 계기로 해안지방의 제방을 안전하게 만들기 위한 연구와 프로젝트들이 시행되었다. 그 중 하나로 본 논문의 주제인 해일이 해안으로 접근하여 제방을 넘을 때 발생하는 현상에 대해서도 많은 연구들이 있었다.

즉, 해양파가 낮은 수심으로 접근하면서 Shoaling 효과에 의해 파고가 높아지고, 낮은 수심을 통과하면서는 비선형적 간섭에 의해 파주기 간의 에너지 교환이 발생하게 되는데, 본 논문에서는 이러한 현상을 이론적으로 연구한 결과들과 현재 많은 분야에서 활용되고 있는 CFD 수치계산방법으로 계산한 결과들을 비교 분석하고자 한다.

해양파의 거동을 이론적으로 표현하기 위해 유체입자의 속도포텐셜 방정식을 세운 후, 파의 기울기가 매우 작다는 가정으로 선형화된 해를 구했고, 이는 대부분의 경우 만족할 만한 결과를 주었다. 그러나, 파가 낮은 수심으로 접근함에 따라, 파의 진행속도가 느려지면서 파의 기울기가 커지는 현상(weak nonlinearity)이 나타나게 된다. 이렇게 낮은 수심을 통과하면서 비선형성을 갖게 된 파가 다시 수심이 깊

* First Author : wseok@pknu.ac.kr, 051-629-6611

† Corresponding Author : ys.won@pknu.ac.kr, 051-629-6875

어지는 지형을 지나가게 될 경우, 자유표면이 있는 수면파의 고유한 특성인 분산현상(weak dispersion)이 발생하여 파주기 간의 에너지 스펙트럼이 변화하게 된다.

단독파(Solitary wave)를 기술하기 위해 도입된 Boussinesq 방정식이 이러한 비선형성(weak nonlinearity)과 분산성(weak dispersion)을 포함하고 있으며, 단일방향으로 진행되는 경우에 대해서는 Korteweg와 de Vries가 유사한 식(KdV equation)을 발표하였다. 이 방정식들은 일정한 수심에 대해서만 적용되기 때문에 수심이 변화하는 경우로 적용범위를 확장하고, 비선형성(weak nonlinearity)과 분산성(weak dispersion) 간의 균형을 맞추어 정확도를 높이려는 많은 노력들이 있었다. 본 저자는 Battjes and Beji(1991)의 실험결과를 Madsen and Soerensen(1993)이 제안한 수정된 Boussinesq 방정식을 사용하여 그 유효성을 확인한 바 있다.

최근에는 컴퓨터의 성능이 극적으로 발전됨에 따라 많은 유체역학 문제들을 Navier-Stokes 방정식을 사용한 CFD 수치 해석으로 접근하고 있다. 본 논문의 주제에 대해서도 Battjes and Beji(1991)의 실험과 같은 조건으로 Chenari(2014), Schmitt et al.(2020) 등이 OpenFOAM 프로그램을 사용하여 시간영역에서의 파형을 구한 바 있다. 확장된 Boussinesq 방정식에 의한 해석방법은 파의 기울기나 수심비가 작다는 조건과 해저 지형이 단순한 형상일 경우에만 적용될 수 있으므로, 파고가 크거나 해저지형이 복잡한 경우에는 응용범위가 제한적이다. 본 논문에서는 Battjes and Beji(1991)의 실험조건에 대해 CFD 수치해석을 수행하여 주파수영역, 즉 파주기 별 에너지 분포 관점에서도 만족스런 결과를 주는지를 검토함으로써, 향후 일반적 형상의 낮은 수심을 통과하는 해양파에 대해서도 CFD 적용가능성을 확인하고자 한다.

2. 지배 방정식

천수파 이론(Shallow water theory)의 운동방정식은 약한 비선형성(weak nonlinearity)과 약한 분산성(weak dispersion)을 포함하고 있는데, 이는 각각 파진폭과 수심의 비율($\epsilon=\zeta/h$), 수심과 파장의 비율($\mu=2\pi h/\lambda=kh$) 제곱값으로 대표된다. 이 두 가지 값의 크기가 대등할 때, Ursell 수($Ur=\epsilon/\mu^2$)가 1의 차수가 되고, 파형의 변화없이 진행되는 단독파(Solitary wave)를 기술할 수 있게 된다.

2.1 Boussinesq 방정식

Boussinesq 방정식은 일정한 수심의 천수파를 기술하는 운동방정식으로서, 유체입자의 수직방향 가속도가 무한히 작다고 가정하였는데, 단일방향의 경우 Whitham(1974)이 정리한 질량보존식과 운동량보존식은 다음과 같다.

$$\zeta_t + [(h+\zeta)u]_x = 0 \quad (1)$$

$$u_t + uu_x + g\zeta_x + 1/3 h(h+\zeta)_{xxx} = 0 \quad (2)$$

(ζ =자유표면 높이, h =수심, u =입자의 속도, g =중력가속도, 아래첨자는 편미분 표시)

Mei(1989)는 수평방향 유체입자의 속도를 자유표면에서 해저면까지의 평균속도(depth-averaged velocity)로 대체하여 2차원 양방향으로 확장된 운동방정식들을 도출하였다. 이를 무차원화한 후, 약한 비선형성(weak nonlinearity)과 약한 분산성(weak dispersion)으로 분리하여 나타내면,

$$\zeta_t + \nabla \cdot [(h+ \epsilon \zeta)u] = 0 \quad (3)$$

$$u_t + \nabla \zeta + \epsilon u \cdot \nabla u - \mu^2 1/3 h^2 \nabla (\nabla \cdot u_t) = 0 \quad (4)$$

(모든 변수는 무차원화된 값이며, $\epsilon=\zeta/h$, $\mu=2\pi h/\lambda=kh$, u 는 무차원화된 수심평균 속도벡터)

식(3)은 질량보존식인데, 비선형 자유표면조건으로부터 ϵ ($\epsilon=\zeta/h$)의 비선형항을 갖게 된다. 식(4)는 운동량보존식으로, 앞의 두 항은 분산성이 없다고 가정한 천수에서의 선형이론에 해당되고, $\epsilon(\epsilon=\zeta/h)$ 의 세번째항은 주파수가 다른 파성분 간의 비선형적 간섭을 나타내며, $\mu^2(\mu=2\pi h/\lambda=kh)$ 의 네번째항은 주파수에 따른 분산성의 영향을 나타낸다.

2.2 수심의 변화를 고려한 확장식

Boussinesq 방정식은 수심이 일정한 경우에 대해서만 유효하므로, 완만한 수심의 변화를 고려할 수 있는 확장식들이 소개되었다. Peregrine(1967)이 도입한 식을 (3), (4)와 같이 무차원화하여 표현하면,

$$\zeta_t + \nabla \cdot [(h+ \epsilon \zeta)u] = 0 \quad (3^*)$$

$$u_t + \nabla \zeta + \epsilon u \cdot \nabla u - \mu^2 \{ 1/2 h[\nabla(\nabla \cdot hu)]_t - 1/6 h^2[\nabla(\nabla \cdot u)]_t \} = 0 \quad (5)$$

(여기서, 모든 변수는 무차원화된 값이며, u 는 무차원화된 수심평균 속도벡터)

질량보존식(3^{*})은 일정수심의 경우인 식(3)과 동일하며, 운동량보존식(5)에서 분산효과(μ^2)의 첫번째 항이 수심의 변화에 따른 영향을 나타낸다.

3. 주파수 영역 해석

3.1 Fourier 변환식

파동의 특성을 분석하기 위해서는 시간 영역에서의 방정식을 주파수 영역으로 Fourier 변환하는 것이 효과적이다. 단일방향으로 진행하고 수심의 변화(h_x)가 작다고 가정한 후, 질량보존식(3)과 운동량보존식(5)을 각각 시간과 공간으로 편미분하면, 비선형항이 최소화된 식(6)으로 통합할 수 있다.

$$L = M + N_{xx} \quad (6)$$

$$L = \zeta_{tt} - gh\zeta_{xxx} + Bgh^3\zeta_{xxxx} - (B+1/3)h^2\zeta_{xxt} \quad (7)$$

$$M = h_x \{ g\zeta_x + (2B+1)h\zeta_{xt} - 5Bgh^2\zeta_{xxx} \} \quad (8)$$

$$N = 1/2 g\zeta^2 + u^2/(h+\zeta) \quad (9)$$

여기서 “L”은 선형항으로만 구성된 가장 낮은 차수의 전개식이며, “M”은 수심의 변화(h_x)를 일차항으로 포함하여 “L”과 함께 약한 분산성의 파동을 표현한다. “N”은 파의 진폭이나 입자의 속도를 제곱항으로 가지고 있는 비선형항이며, 주파수 영역으로 변환할 때 가장 까다로운 항목이다.

위의 식들을 주파수 영역으로 변환하기 위해 파진폭(ζ)과 입자의 속도(u)를 Fourier 급수로 전개해야 하는데, 질량보존 식(3)을 이용하여 파진폭(ζ) 한가지로 통합하였다.

$$\zeta = \sum_{p=-\infty}^{\infty} Ap(x) \exp[ip(\omega t - kx)] \quad (10)$$

식(10)을 식(6)에 대입하여 가장 낮은 차수로 전개하면, $L^{(0)} = 0$ 이 되는데, 이는 Boussinesq 확장식의 분산방정식이 된다. 다음 차수인 일차항으로 정리된 식은 다음과 같다.

$$L^{(1)} = M^{(0)} + N^{(0)}_{xx} \quad (11)$$

$$L^{(1)} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} [-ia \frac{dk(p)}{dx} A(p) - ib \frac{dA(p)}{dx}] \exp[ip(\omega t - kx)] \quad (12)$$

$$M^{(0)} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} ic \frac{dh}{dx} A(p) \exp[ip(\omega t - kx)] \quad (13)$$

$$N^{(0)}_{xx} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \exp[ip(\omega t - kx)] 2g \left[\sum_{m=1}^{p-1} \frac{1}{2} \alpha A(m) A(p-m) e^{-i\gamma} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2} \beta A(m) A(p+m) e^{-i\delta} \right] \quad (14)$$

ζ 에 대해 선형항인 $L^{(1)}$ 과 $M^{(0)}$ 는 쉽게 구할 수 있는데, ζ 에 대해 비선형인 $N^{(0)}_{xx}$ 항은 파진폭의 제곱값을 갖고 있으며, 이는 서로 다른 주기의 파동들 간에 비선형 상호작용으로 주파수 영역에서 에너지의 교환이 발생하는 것을 나타낸다.

최종적으로 식(11)은 아래와 같이 $A_p(x)$ 에 대한 일차 미분 방정식으로 정리되는데, 이 식(15)으로부터 각 주파수 별 진폭과 에너지 스펙트럼을 구할 수 있다.

$$\frac{dA(p)}{dx} = -\frac{c}{h} \frac{dh}{dx} A(p) - i2g \left[\sum_{m=1}^{p-1} \frac{1}{2} \alpha A(m) A(p-m) e^{-i\gamma} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2} \beta A(m) A(p+m) e^{-i\delta} \right] \quad (15)$$

3.2 실험값 비교

Battjes and Beji(1991)는 Fig. 1과 같이 낮은 수심에서 수중 보를 통과하는 정규파와 JONSWAP 스펙트럼파에 대해 실험

하였고, Won and Battjes(1992)은 Boussinesq 확장식을 주파수 스펙트럼으로 변환한 식(15)를 수치계산하여 Fig. 2, 3과 같이 실험결과와 비교하였다.

일반적으로 불규칙한 해양파는 파에너지 스펙트럼으로 표현되고, 각 주파수 별 파동의 위상차는 임의의 값을 가지므로 계산에 영향이 없을 것으로 생각되지만, 식(15)를 수치계산한 결과 초기 위상조건에 따라 의미있는 오차가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 무작위로 주어지는 초기 위상조건에 대해 반복적으로 계산한 후 평균값을 구하면, 실험치에 수렴한다는 것을 확인하였다.

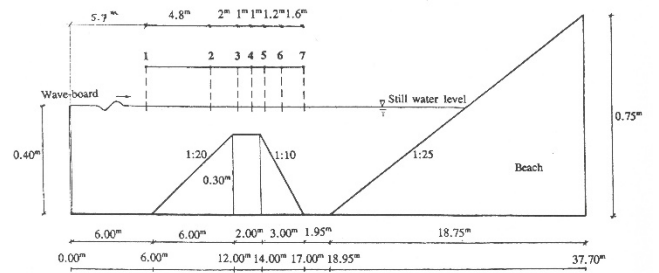


Fig. 1. Layout of Second Set Experiment.

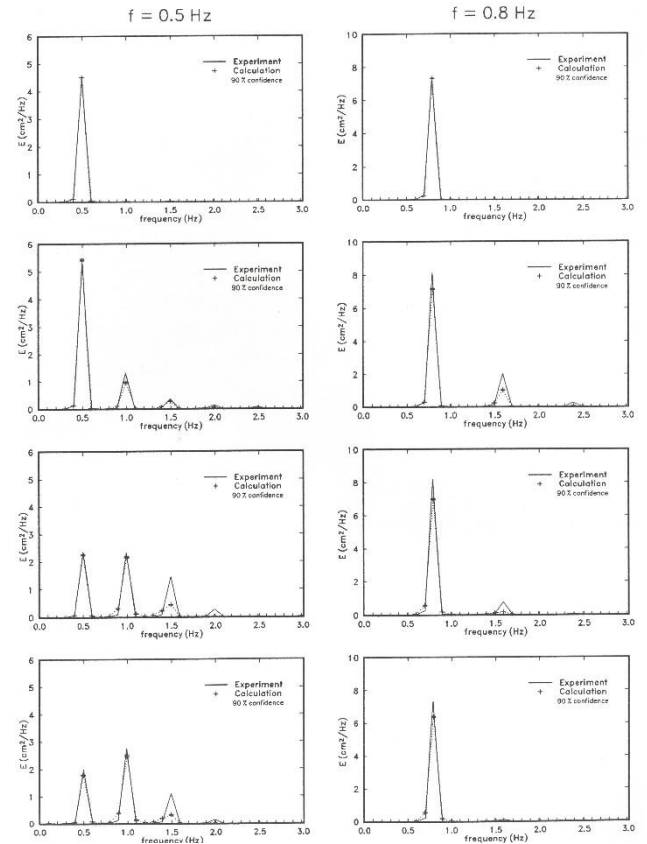


Fig. 2. Monochromatic Waves at Stations 1, 3, 5, 7.

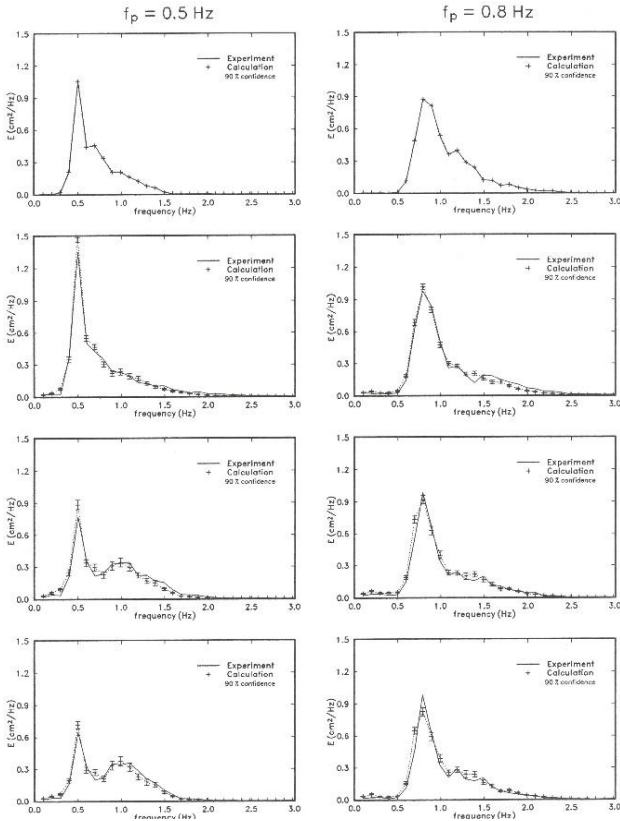


Fig. 3. JONSWAP Spectra at Stations 1, 3, 5, 7.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 0.5 Hz 또는 0.8 Hz의 규칙파가 수중보를 통과하기 전인 Station 1번에서는 해당 주파수에서 단일피크를 보이지만, 수심이 낮아짐에 따라 파의 기울기가 커지는 Shoaling 효과로 배음 주파수의 파가 발생하기 시작한다(Station 3). 낮은 수심의 평탄한 구간을 통과하는 과정에서 이러한 배음 주파수들 간의 비선형적 간섭(식9, 14)에 의해 에너지 교환이 이루어지고(Station 5), 다시 수심이 깊어지면서 주파수 별 분산성에 의해 새로운 에너지 스펙트럼(Station 7)이 형성된다. Fig. 3은 JONSWAP 스펙트럼이 수중보를 통과할 경우에 대해 실험값과 식(15) 계산값을 비교한 결과이다.

4. OpenFOAM을 이용한 CFD 해석

유체입자의 비선형적 운동과 자유수면에 의한 분산성까지 포함된 결과를 얻기 위해 OpenFOAM 프로그램을 사용하였다. 비압축성 층류 유동문제에 가정하여 CFD해석을 수행하였는데, 지배방정식은 질량보존식인 식(16) 연속방정식, 점성을 포함한 운동량보존식인 식(17) Navier-Stokes 방정식, 그리고 VOF(Volume of Fluid) 기법으로 공기-물의 경계면인 자유수면을 고려하기 위한 식(18)로 구성된다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha u_j) = 0 \quad (18)$$

여기서 u_i 는 축방향 속도($i=x,y,z$), p 는 압력, ν 는 유체의 동점성 계수를 나타낸다. 체적분율을 α 로 표기하며, $\alpha = 0$ 은 공기, $\alpha = 1$ 은 물을 의미한다.

CFD해석을 위한 계산 영역 및 경계조건은 Fig. 4와 같다. 속도 경계조건으로는 inlet과 wall은 Dirichlet 경계조건, outlet과 atmosphere에서는 Neumann 경계조건을 사용하였으며 압력 경계조건으로는 inlet, outlet과 wall에는 Neumann 경계조건, atmosphere에서는 Dirichlet 경계조건을 사용하였다. 또한, 2차원 해석이 가능하도록 frontBack은 empty 경계조건을 사용하였다.

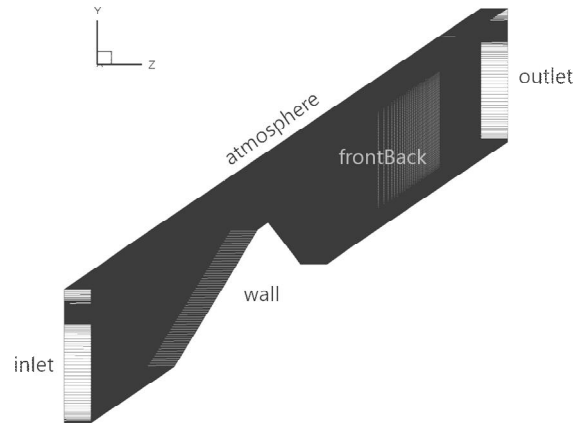


Fig. 4. Schematic Diagram of Computational Domain.

수면파를 정도 높게 모사하기 위해 자유수면 근처에 격자를 밀집시켰으며, 벽면의 영향을 정확히 고려하기 위해 wall 경계에 격자의 밀집도를 증가시켰다. 본 연구에서 사용된 격자 수는 154,000개이다.

시간에 대한 차분은 2차 정확도를 가지는 Crank-Nicolson 기법을 사용하였으며, 공간 차분은 중앙 차분법(central difference scheme)을 적용하였다. VOF 지배방정식의 이송항은 VanLeer의 TVD(total variation diminishing) 기법을 이용하여 이산화하였다. 수치 안정성을 위해 Courant 수가 1보다 작도록 계산 시간 간격을 설정하였으며, 속도-압력 연성으로는 PIMPLE 알고리즘을 사용하였다. PIMPLE 알고리즘은 Pressure Implicit with Splitting of Operator(PISO) 알고리즘과 Semi-Implicity Method for Pressure-Linked Equations(SIMPLE) 알고리즘을 조합

한 알고리즘으로, PISO 알고리즘의 압력 수정 방법을 사용한다.

Fig. 1과 같은 형상의 수중보를 통과하는 문제에 대해서도, 여러가지 CFD 프로그램을 사용하여 계산한 결과를 Beji and Battjes(1993)의 실험결과와 비교검증하는 연구들이 많이 이루어져 왔다. Chenari(2014)는 Waves2Foam 프로그램을 사용하여 Fig. 1의 수중보 문제를 포함한 여러가지 형상에 대해 시간영역에서 규칙파의 진행을 계산해 보았고, Schmitt et al.(2020)은 OpenFOAM 프로그램을 수중보 문제에 적용하기 위하여 자유표면조건이나 shallow water 방정식 등을 활용할 것을 제안하였다. 그러나, 대부분의 연구들은 시간영역에서 파형 위주로 분석을 하였고, 주파수 영역에서 분석한 CFD 연구는 본 저자가 아는 한도에서는 아직 이루어지지 않았다. Won and Battjes(1992)는 Boussinesq 확장식으로 주파수 영역 해석을 할 경우, 주파수 별 초기 위상조건이 계산결과에 영향을 주는 것으로 서술하였는데, 본고에서는 OpenFOAM과 같은 CFD 방법으로 계산할 경우, 입사파의 초기 위상조건이 계산결과에 영향을 주는지, 조화주파수 간의 에너지 교환이 안정적인지 등을 알아보려고 한다.

다음과 같은 세가지의 입사파 조건에 대해 CFD 계산을 수행하는데, Case(1)에서는 실험값과 비교하여 OpenFOAM을 이용한 계산의 유효성을 검증하고, Case(3)에서는 1)과 2) 두 가지 입사파 간의 비선형적 간섭에 의한 영향을 검토한다.

Case 1) 0.5 Hz, 파고 2 cm의 규칙파

Case 2) 0.75 Hz, 파고 2.5 cm의 규칙파

Case 3) 0.5 Hz, 파고 2 cm + 0.75 Hz, 파고 2.5 cm의 규칙파 조합 (위상차 0, $\pi/4$)

실험값이 존재하는 0.8 Hz 규칙파 대신 0.75 Hz 규칙파를 선택하여 계산한 이유는 0.5 Hz 규칙파와의 배음주파수 간섭 효과가 크게 나타날 것으로 예상되기 때문이다. 그리고, 단일규칙파에 대한 OpenFOAM 계산값과 실험값의 비교는 장주기파에서 낮은 수심의 영향이 더 잘 나타나므로 0.5 Hz 규칙파에서의 결과만을 비교하였다.

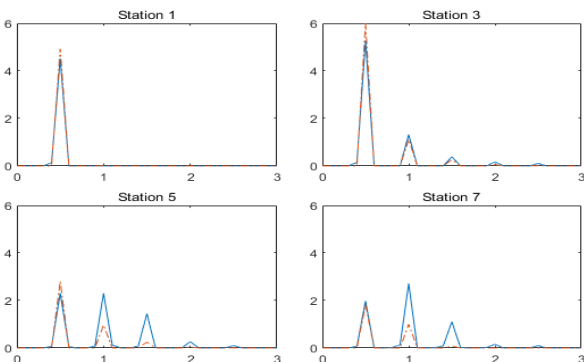


Fig. 5. 0.5 Hz Wave (Experiment --) vs (OpenFOAM --).

Fig. 5가 0.5 Hz 단일규칙파에 대한 Station 1,3,5,7에서의 비교인데, 실험결과는 실선으로, OpenFOAM 결과는 점선으로 표시하였다. 여기서 가로축은 주파수(Hz), 세로축은 에너지 스펙트럼(cm^2/Hz)을 나타낸다. Station 3번에서 Shoaling 효과에 의해 파고가 커지고 배음 주파수(1.0 Hz, 1.5 Hz)가 발생하는 현상을 잘 구현하고 있으나, 수중보를 지난 후인 Station 5,7번에서는 배음 주파수로의 에너지 전달이 실험값보다 작게 계산되고 있다. 이는 입사파의 생성과 소멸에 대한 경계 조건이나 자유수면에서의 경계조건을 면밀히 검토하여 개선할 수 있을 것인데, 추후 연구과제로 남긴다.

Fig. 6-9는 각 Case 별 OpenFOAM 계산결과인데, 좌측 그림은 시간영역에서의 파형을, 우측 그림은 주파수영역에서의 에너지 스펙트럼을 나타내고, 위로부터 각각 Station 1,3,5,7번에서의 결과를 보여준다. 좌측 파형그림의 가로축과 세로축은 시간(sec) 및 파고(cm)를, 우측 그림의 축은 주파수(Hz) 및 에너지 스펙트럼(cm^2/Hz)을 나타낸다.

Fig. 6은 Case(1) 0.5Hz 규칙파의 OpenFOAM 계산결과로서 Fig. 5와 같은 값들인데, 좌측 파형의 그림에서 알 수 있듯이 낮은 수심의 수중보를 통과하면서 배음주파수(higher harmonics)가 발생하고 파의 기울기가 커진다는 것을 나타내고 있다.

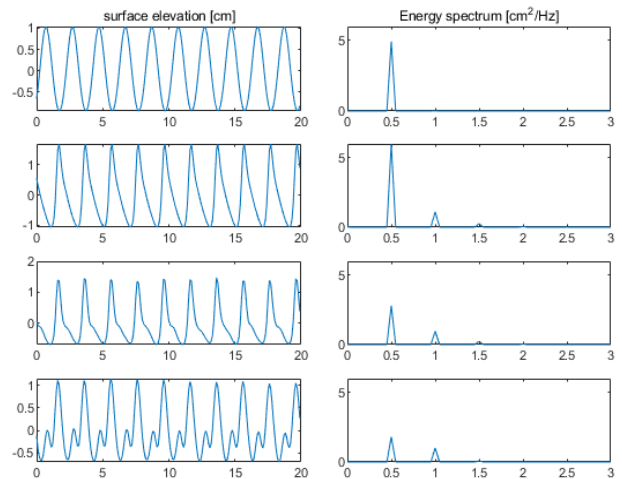


Fig. 6. 0.5 Hz Wave at Stations 1, 3, 5, 7.

Fig. 7은 Case(2) 0.75 Hz 규칙파에 대한 OpenFOAM 계산 결과인데, Case(1) 0.5 Hz에 비해 파장이 짧아서 수중보의 영향을 적게 받으므로 Fig. 6보다 파형의 변화나 배음주파수로의 에너지 전달이 뚜렷이 나타나지 않는다.

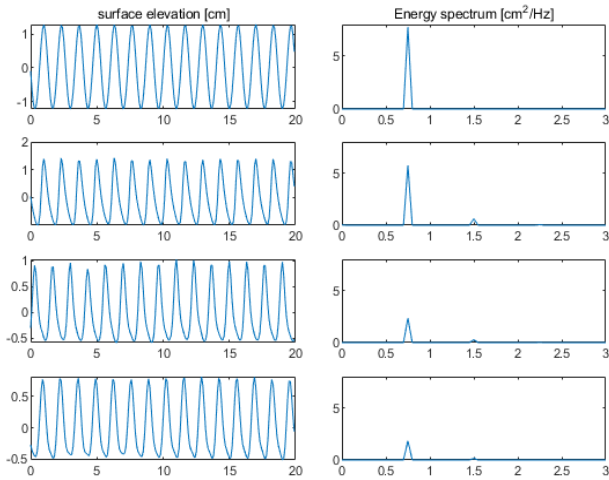


Fig. 7. 0.75 Hz Wave at Stations 1, 3, 5, 7.

Fig. 8, 9는 Case(3) 0.5 Hz + 0.75 Hz 두 개의 규칙파 조합의 결과인데, 두 입사파 간의 초기 위상차 조건을 Fig. 8은 0, Fig. 9는 $\pi/4$ radian만큼 다르게 설정하였다. Case(1)과 (2)를 함께 비교해 보면, Station 1번에서는 두 규칙파의 단순합에 가까우나, Shoaling이 발생하는 Station 3번부터는 주로 0.75 Hz 규칙파의 에너지가 다른 배음 주파수로 전달되는 것을 알 수 있다. 특히 차이주파수인 0.25 Hz로 에너지 전달이 나타나고, 수중보를 통과한 후에는 분산성이 강해져서 전체적인 에너지 값이 작아지게 된다.

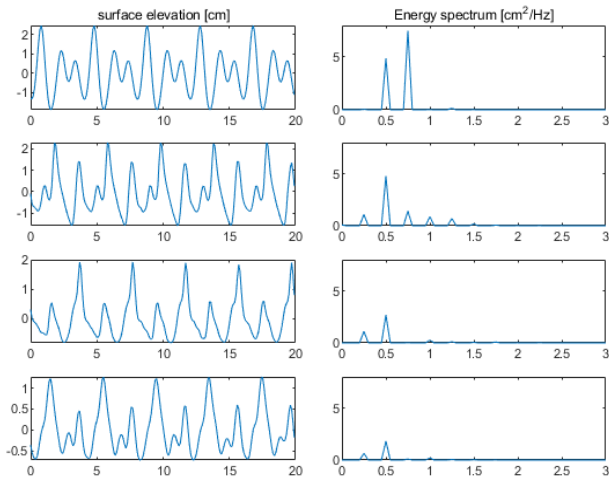


Fig. 8. 0.5 Hz + 0.75 Hz Waves (phase2 = 0).

Fig. 8과 Fig. 9를 비교하여 보면, 초기위상 차이에 따라 파형이 달라질 뿐만 아니라 배음주파수로의 에너지 전달도 같지 않다는 것을 알 수 있다. 이러한 위상차 문제는 주파수영역 해석에서와 같이, 임의의 초기위상을 갖는 입사파조건을

반복하는 앙상블(ensemble) 방법을 도입하여 해결가능할 것으로 예상된다.

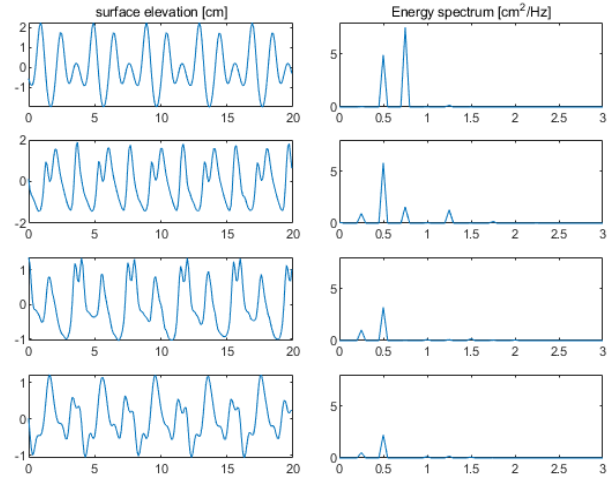


Fig. 9. 0.5 Hz + 0.75 Hz Waves (phase2 = $\pi/4$).

5. 결 론

단일 규칙파가 낮은 수심의 수중보를 통과하는 문제에 대해 OpenFOAM을 이용하여 CFD 해석을 수행한 결과, 파형이나 배음주파수가 발생하는 현상이 정성적으로 일치하고, 낮은 수심의 영향이 큰 장주기파(0.5 Hz)에서 단주기파(0.75 Hz)보다 배음주파수 발생이나 주파수 간 에너지의 교환이 뚜렷한 것도 실험결과와 일치한다. 그러나, 정량적으로는 CFD 해석에서 배음주파수 간의 에너지 교환이 실험값보다 작게 나타났고, 전체적인 에너지의 양도 낮은 수심을 지나면서 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

두 개의 규칙파를 조합하여 통과시킬 경우, CFD 해석방법도 주파수영역에서의 해석방법과 마찬가지로 두 개의 입사파 간 위상차이가 계산결과에 영향을 주는 확률적(stochastic) 문제가 되는 것을 확인하였고, 이는 앙상블(ensemble) 등 여러가지 통계학적 방법을 도입하여 해결할 수 있다. 또한, 배음주파수(higher harmonics)가 생기면서 발생하는 단주기파로의 에너지 전달은 실험결과와 일치하지만, CFD 해석에서는 실험결과와 다르게 차이주파수(lower harmonics), 즉 장주기파로의 에너지 전달이 발생하였다.

OpenFOAM을 이용한 CFD 계산에서 수중보를 통과하면서 전체적인 에너지의 양이 줄어드는 점과 차이주파수(lower harmonics)로의 에너지 전달이 발생하는 점에 대해서는 향후 과제로서 OpenFOAM 경계조건 등의 면밀한 검증과 추가적인 실험이나 이론적 검토도 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2020년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Battjes, J. A. and S. Beji(1991), An experimental investigation of breaking and nearly breaking waves travelling over a bar, internal report, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [2] Beji, S. and J. A. Battjes(1993), Experimental investigation of wave propagation over a bar, Coastal Engineering, Vol. 19, pp. 151-162.
- [3] Chenari, B.(2014), Numerical Modelling of Regular Wave Propagation using OpenFOAM, University of Coimbra, Portugal, Master Dissertation.
- [4] Madsen, P. A. and O. R. Soerensen(1993), Bound Waves and Triad Interactions in Shallow Water, Ocean Engineering, Vol. 20, pp. 359-369.
- [5] Mei, C. C.(1989), The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, World scientific publishing co.
- [6] Peregrine, D. H.(1967), Long waves on a beach, J. Fluid Mech., Vol. 27, pp. 815-827.
- [7] Schmitt, P., C. Windt, J. Davidson, J. V. Ringwood, and T. Whittaker(2020), Beyond VoF: alternative OpenFOAM solvers for numerical wave tanks, Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, Vol. 6, pp. 277-292.
- [8] Whitham, G. B.(1974), Linear and Nonlinear Waves, John Wiley & Sons.
- [9] Won, Y. S. and J. A. Battjes(1992), Spectral Boussinesq Modelling of Random Waves, internal report, 93-2, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Received : 2021. 12. 13.

Revised : 2022. 01. 11. (1st)

: 2022. 01. 19. (2nd)

Accepted : 2022. 02. 25.