한국해안·해양공학회 학술발표논문집 (2009)
2009년 11월 5일-11월 6일
제18권, pp. 49-52

RANS 방정식 모형의 내부조파를 이용한 3차원 수치실험
Three-dimensional Numerical Simulation using Internal Wave Generation applied to the RANS Equation Model

최준우[1], 노 민[2], 윤성범[3]
Junwoo Choi[1], Min Roh[2] and Sung Bum Yoon[3]

1. 서 론

RANS 방정식 모형을 이용한 파랑수치실험을 위해 실험영역내 재반사 문제를 해결할 수 있는 내부조파기법과 흡수층 기법이 개발되었고, 다양한 수치실험이 시도되어 그 가능성이 확인되고 있다. 그러나 아직 RANS 방정식 모형의 내부조파를 이용한 3차원 파랑실험은 그 계산용량의 문제점 때문에 많이 시도되고 있지 않다.

본 연구에서는 VOF기법을 도입한 RANS 방정식 모형으로 평면 파랑수치실험을 할 수 있도록 대표적인 CFD 코드인 FLUENT에 내부조파와 흡수층 기능 그리고 자유수면 변위와 시간평균 물리량을 계산할 수 있도록 부프로그램을 삽입하였다. Choi and Yoon (2009)를 기반으로 일정수심에서 다양한 방향조파를 모의하여 그 결과를 해석해와 비교하므로 방향조파를 통한 목표 파형의 재현능력을 확인하였다. 그리고 일정 경사면에 방향조파를 이용한 수치실험을 수행하여 비선형 파랑굴절에 의해 발달하는 연안류의 유속분포를 제시하였다. 나아가 Vincent and Briggs (1989)의 수중 천퇴상 쇄파유도류의 발생을 수치모의하였다. 이 수치모의 결과로 자유수면변위와 파고분포는 물론 수심방향 분포를 갖는 유동 및 시간평균유동을 제시할 수 있었다.

2. 수치모형 setup

FLUENT는 압축성 및 비압축성 유체에 대해 기본적으로 Navier-Stokes 방정식을 푸는 3차원 전산유체해석프로그램으로 난류흐름을 모의하기 위해 선택적으로 난류모형을 사용하여 RANS 방정식을 풀거나 LES(Large Eddy Simulation)기법을 사용할 수 있다. FLUENT는 상용 3차원 전산유체해석코드 가운데서 가장 널리 쓰이고 유명하므로 일반적인 소개와 자세한 세부모형들의 설명은 매뉴얼(FLUENT Inc., 2003)로 대신한다. 파랑의 조파 및 흡수층 그리고 자유수면변위를 산정하는 부프로그램을 FLUENT에 삽입하기 위해 사용자 정의함수(user-defined functions) 기능을 활용하였다. 운동량 원천항을 이용한 내부조파와 소파기법을 위해 Choi and Yoon (2009)을 사용하였다. 본 연구의 수치실험을 위해 Lin and Liu(1998)의 제안에 따라 난류모형 계수들의 초기값들을 입력하였으며, 수치소산오차를 줄이기 위해 부정류 VOF 모형에서 Courant 수, Cr=0.3을 사용하였다. 조파영역은 대략 반파장($L/2$)으로 하였고 흡수층 영역은 대략 한 파장 L으로 계산영역 양 끝단에 설정하여 격자를 구성하였다. 자유수면변위 산정은 시간격자보다 큰 0.05초마다 계산하였다. 벽 경계조건은 점착(no-slip)경계조건으로 벽함수를 사용하였으며 계산영역 상부경계를 압력유출경계로 설정하여 공기

1 발표자: 한양대학교 토목공학과 박사후 연구원
2 한양대학교 토목공학과 석사과정
3 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수

의 유출입이 자유롭게 하였다. 격자크기는 $\triangle x = \triangle y = L/20 \sim L/50$, 그리고 수심방향 격자크기는 $\triangle z = a/5 \sim h/10$로 수치실험의 파랑제원에 따라 고정 혹은 변동격자를 사용하였다. 심한 자유수면변동이 예상되는 영역의 격자를 대체로 작게 설정하였다. 시간격자는 주기(T)에 따라 $\triangle t = T/100$을 사용하였다.

3. 수치모의

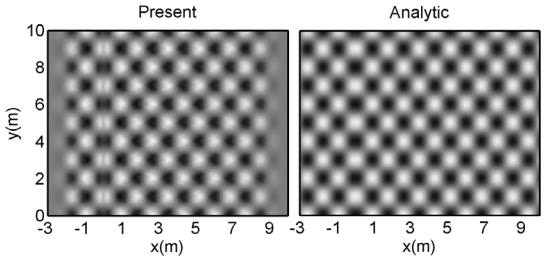

Fig. 1. Computed free surface displacement (sponge boundaries in the x-directional ends and periodic boundaries in the y-directional ends) and analytical linear solution (A=1.0 cm, T=1.1 sec, θ=40 deg plus θ=-40 deg) on 20 cm-constant water depth.

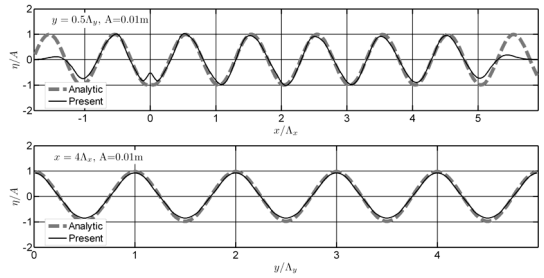

Fig. 2. Computed free surface displacement (——) and analytical linear solution (▪ ▪ ▪) (A=1.0 cm, T=1.1 sec, θ=40 deg plus θ=-40 deg) on 20 cm-constant water depth.

Choi and Yoon (2009)의 조파기법은 방향조파가 가능하도록 유도되어있다. 일정수심에서 2개방향의 조파에 대해 수치모의하고 그 결과를 선형 해석해와 비교하였다. 조파영역으로 평행한 x방향 양끝 영역에 흡수층 경계를 장착하였으며 y방향 양끝경계는 반복경계조건을 사용하여 수치모의하였다. Figs. 1과 2에 A=0.5 cm, T=1.1 sec인 파랑을 h=20 cm인 일정수심에서 θ=-40 deg와 +40 deg로 동시에 조파하는 경우의 3차원 수치해석 결과를 선형파 해석해와 함께 도시하였다. y방향으로 중복파가 잘 발달하고 있음을 알 수 있으며 해석해와도 잘 일치하고 있다.

40 deg의 방향조파를 하여 일정경사면에서 굴절되는 파랑의 쇄파와 그로 인하여 발생되는 연안류를 3차원 수치해석하고 그 결과를 이용하여 연안류의 수심방향 유속분포를 제시하므로 RANS 방정식 모형을 이용한 3차원 파랑수치해석연구의 가능성을 검증하였다. 조파영역의 일정수심 h_0=0.33m으로부터 얼마간 떨어진 지점에 1:34.26로 일정한 경사사면을 격자구성하고 A=2.5 cm, T=1.2 sec인 파랑을 조파하므로 수치실험을 수행하였다. 조파영역으로 평행한 x방향 양 끝 영역에 흡수층 경계를 장착하였으며 y방향 양 끝경계는 반복경계조건을 사용하여 수치해석하였다. Fig. 3에 음영평면 그림을 이용하여 x=5 m에서 시작되는 일정 경사면에 의해 굴절되고 천수화되며 쇄파되는 파랑의 자유수면을 나타내었다. 천수화에 의해 비선형성을 갖게 된 파랑의 전파속도가 선형파의 전파속도보다 커지므로 선형파의 굴절과는 다르게 완만한 굴절양상을 보이다가 수심이 더 작아지면서 급격하게 굴절하였다. 따라서 이러한 특성으로 인하여 y방향 양끝의 반복경계조건을 통한 수치실험이 유효하게 되었다.

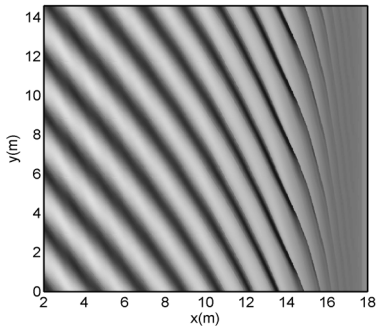

Fig. 3. Computed free surface displacement (A=1.0 cm, T=1.1 sec, θ0=40 deg) on a plane beach of slope 1:34.26 with h0= 33 cm (sponge boundaries in the x-directional ends and periodic boundaries in the y-directional ends).

Fig. 4에 수심방향으로 평균한 유속분포 즉 연안류 분포를 도시하였다. 조파시점으로부터 총 41개의 파랑이 조파되는 시점까지 즉 약 50초동안을 수

치해석하였다. 그 결과가운데 후반부의 28개 파랑의 전파동안의 결과를 이용하여 나타낸 연안류가 완전히 발달했다고 말하기는 힘들지만, 파랑의 운동량 유량의 변화에 의해 발생되고 분자점성과 난류점성에 의해 흐름분포가 형성되는 것으로 알려진 연안류의 형상을 잘 재현하고 있다고 판단된다.

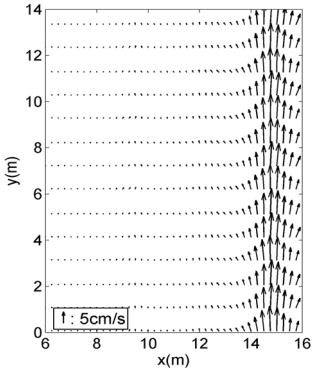

Fig. 4. Velocity vectors of the depth-averaged mean current x- and y-velocity.

Vincent and Briggss (1989)의 실험 가운데 규칙파의 쇄파에 따른 파랑유도류가 발생되는 경우를 3차원 수치모의하고 그 결과를 비교하였다.

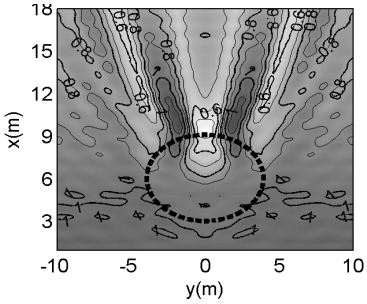

Fig. 5. Normalized wave height distributions.

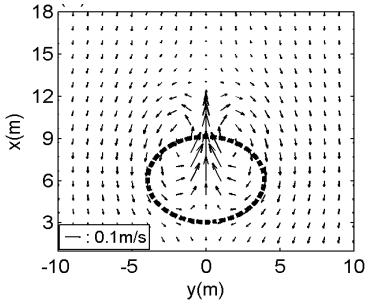

Fig. 6. Vector plots of time-averaged current (evaluated at z=-0.53 h).

Vincent and Brigg의 천퇴상에서 파랑의 변형으로 쇄파유도류가 발생하고 이로 인하여 파랑이 다시 변형하는 파랑과 흐름의 상호작용이라는 역학적 배경은 Choi et al. (2009)에서 다양한 평면 2차원 흐름모형과 결합한 파랑모형등을 이용한 수치모의 결과로부터 잘 설명하고 있다.

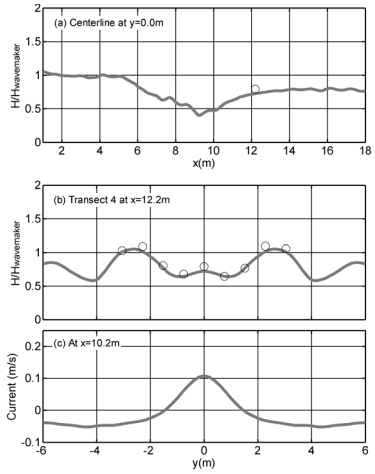

Fig. 7. Normalized wave height distributions along (a) the centerline and (b)transect 4 and mean current profile of computation(▬) and Vincent and Briggs (1989) (○).

Fig. 5에 모형으로부터 계산된 파고분포를 나타내었다. 파고 분포는 천퇴에 의한 굴절과 천퇴상 쇄파로부터 발생된 쇄파유도류에 의한 굴절이 동시에 존재함을 보여주고 있으며 천퇴후면의 파고가 급격히 낮은 분포를 보여주고 있음은 이전의 결과들과 동일하며 특히 Boussinesq 방정식 모형의 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 6에 각 모형으로부터 계산된 시간평균 쇄파유도류를 나타내었다. 그림에서 나타낸 쇄파유도류는 유사제트류의 형태를 가지고 발달하고 있음을 나타내고 있다. 파고분포 실험결과와 수치결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었으며, 그 결과들이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Figs. 8과 9에 28주기의 데이터들을 평균한 시간평균유동을 나타내므로 쇄파유도류의 수심방향을 포함한 3차원 분포를 볼 수 있게 하였다. Fig. 8(top)은 y=4.0m 단면의 평균유속을 나타내고 있으며 조파된 파의 비선형성에 의해 수면근처에서의 Lagrangian 질량이동과 질량보존에 따른 undertow

의 유속분포를 확인할 수 있다. Fig. 8(middle)은 y=2.0m 단면의 평균유속을 나타내고 있으며 쇄파에 의한 강한 잉여모멘틈의 발생으로 쇄파유도류가 발생되는 영역을 향해 유동이 이동하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 18(bottom)은 중심선 y=0.0m인 단면의 평균유속을 나타내고 있으며 천퇴상에 전수심에 걸쳐 쇄파유도류가 발달하고 있음을 확인 할 수 있다. 이것은 수심 2차원 천퇴의 경우에 나타나는 천퇴상 undertow 유동이 존재하는 것과는 달리 3차원 타원형 천퇴의 경우, 천퇴의 좌우로 질량이동이 가능하기 때문이다. 이것은 Fig. 9에 나타낸 y-z 단면 시간평균유동의 분포로 부터도 확인할 수 있으며 쇄파유도류가 가장 강한 지점은 평균수면근처보다는 평균수면보다 아래에 존재하는 것을 확인할 수 있다.

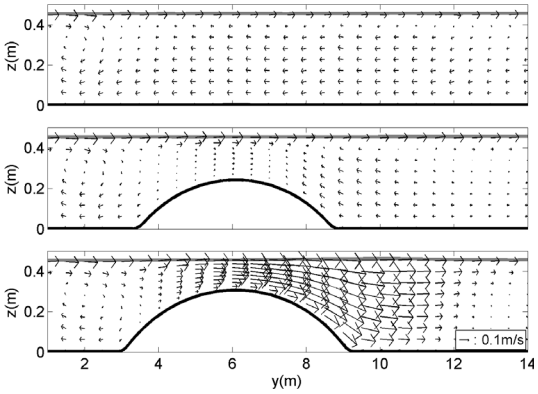

Fig. 8. Mean velocity vector ($\bar{u}$, $\bar{w}$) using 28 waves at y=4.0mv (top), y=2.0m (middle) and y=0.0m (bottom).

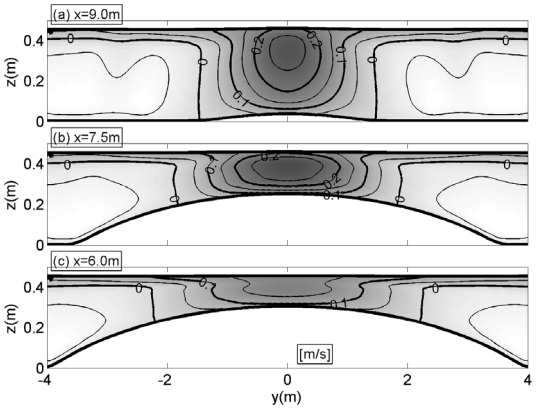

Fig. 9. Mean velocity distribution ($\bar{u}$) using 28 waves at (a) x=9.0m, (b) x=7.5m and (c) x=6.0m.

4. 결　　론

일정수심에서 방향조파를 모의하여 그 결과를 해석해와 비교하므로 방향조파를 통한 목표 파형의 재현능력을 확인하였다. 그리고 일정 경사면에 방향조파를 이용한 수치실험을 수행하여 비선형 파랑 굴절에 의해 발달하는 연안류의 유속분포를 제시하였다. 나아가 수중 천퇴상에서 나타나는 규칙파에 의한 쇄파유도류의 발생을 수치모의하였다. 수치결과는 존재하는 실험결과와 잘 일치하였으며 평균된 유속분포는 쇄파유도류를 잘 재현하였다. 수심방향으로 쇄파유도류는 평균수면으로부터 바닥에 걸쳐 발달하고, 쇄파유도류가 가장 강한 지점은 평균수면근처보다는 평균수면보다 아래에 존재하는 것을 확인할 수 있다.

RANS 방정식 모형을 이용한 3차원 수치모의 결과로부터 자유수면변위와 파고분포는 물론 수심방향 분포를 갖는 유동 및 시간평균유동을 제시할 수 있었다. 비록 아직까지 상대적으로 매우 큰 계산비용의 문제점이 있으나 본 연구로부터 3차원 수치해석의 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Choi, J., Lim, C.H., Lee, J.I., Yoon, S.B. (2009). Evolution of waves and currents over a submerged laboratory shoal. Coastal Engineering. 56, 297-312.

Choi, J. and Yoon, S.B. (2009). Numerical Simulations using Momentum Source Wave-Maker Applied to RANS Equation Model. Coastal Engineering, 56, 1043-1060.

FLUENT Inc. (2003). FLUENT 6.1 User's Guide.

Lin, P. and Liu, P.L.-F. (1998). A numerical study of breaking waves in the surf zone. Journal of Fluid Mechanics, 359, 239-264.

Vincent, C.L., Briggs, M.J. (1989). Refraction -diffraction of irregular waves over a mound. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 115(2), pp. 269-284