

수중타원형 천퇴를 통과하는 규칙파의 파랑쇄파류에 의한 변형

Numerical Simulation of Regular Wave Transformation due to Wave-induced Current over a Submerged Elliptic Shoal

최준우*, 윤성범**
Junwoo Choi, Sung Bum Yoon

요 지

수중천퇴가 있는 지형을 통과하며 변형하는 파랑을 실험한 Vincent 와 Briggs (1989)의 실험조건을 수치모의하여 파랑과 흐름의 상호작용 효과를 연구하였다. SHORECIRC 흐름모형을 결합한 파랑모형 REF/DIF 1과 SWAN, 그리고 파랑과 흐름을 동시에 수치모의 할 수 있는 FUNWAVE를 이용하여 수중천퇴상을 통과하며 변형하고 또 다시 수중천퇴상에서 발생한 쇄파에 의해 발생된 쇄파류에 의해 변형하는 규칙파를 수치모의하였다. 수중천퇴상에서 쇄파가 발생할 때 잉여파응력의 급격한 변화에 따른 강한 유사제트류가 발생하고, 이 흐름은 수중천퇴후면의 파집중현상을 방해하여 파랑을 천퇴중심축으로부터 바깥쪽으로 굴절시켜, 파고를 상대적으로 감소시키는 역할을 한다. 이러한 역학은 실험결과와 본 연구의 수치모의를 통해 확인할 수 있었고, 이는 파랑쇄파류의 파랑변형에 미치는 역할의 중요성을 확인시켜주는 것이다. 규칙파 모의에 한계가 있는 SWAN과 규칙파 특성상 강하게 나타나는 중복파의 잉여파응력 계산에 한계가 있는 REF/DIF 1과 달리 FUNWAVE를 이용한 수치모의는 실험결과와 완벽히 일치하였으며, 수중천퇴 후면에 발생하는 쇄파류와 쇄파류에 의한 쌍 vortex의 발달과정을 잘 보여 주었다.

핵심용어 : 수중타원형 천퇴, 파랑쇄파류, 파랑과 흐름의 상호작용, 규칙파

1. 서 론

쇄파 발생은 파랑에 의한 유동(momentum flux)의 기울기를 급격하게 변화시키고 이는 파랑에 대해 천천히 변화하는 장주기 과 혹은 흐름현상을 일으키는 원인이 된다. 해안에서 관찰되는 연안류, 이안류, setup등이 그 예가 될 수 있다. 이러한 파랑에 의한 momentum flux의 기울기 변화에 의해 발생되는 흐름 및 수면변화는 일반적으로 수심적분하고 파랑변화 시간에 대한 평균을 통해 유도된 흐름방정식을 이용하여 수치모의 될 수 있다. 이 때 흐름모형을 위한 파랑에 대한 정보를 얻기 위해 파랑모형을 사용하여 파랑에 의한 momentum flux를 계산하게 된다. 이 수심 적분되고 시간 평균된 파랑에 의한 momentum flux는 소위 잉여파응력 혹은 radiation stress라고 표현된다. 이 radiation stress는 일반적으로 선형진행파 가정을 통해 유도된 형태를 이용하여 산정된다. 따라서 이 radiation stress 산정의 정확성이 쇄파대 부근의 흐름을 수치모의 하는데 큰 영향을 주게 된다. 반면에 순간 유체흐름과 파랑을 동시에 계산할 수 있는 비선형 Boussinesq 방정식을 이용한 결과 값들을 시간 평균하게 되면, 파랑에 의한 momentum flux 변화로 발생된 평균흐름현상을 볼 수 있다.

* 정회원·한양대학교 토목공학과 박사과정·E-mail : wavechoi@hanyang.ac.kr
** 정회원·교신저자·한양대학교 토목환경공학과 교수·E-mail : sbyoon@hanyang.ac.kr

Yoon등 (2004)은 Kirby and Özkan (1994)의 불규칙파 과랑모형인 REF/DIF S와 천수방정식을 이용하여 쇄파가 발생하면 파의 잉여응력(radiation stress)의 기울기가 급격히 변화하여 강한 과랑쇄파류가 발생하고, 이 과랑쇄파류가 친퇴 후면부의 파굴절에 영향을 줌으로써 파의 집중화를 약화시켜 쇄파가 발생하지 않는 경우에 비해 파고를 크게 감소시킨다는 것을 보였다. Choi등 (2007)은 불규칙파 과랑모형인 네덜란드 텔프트 대학에서 개발한 SWAN과 위의 REF/DIF S를 각각 미 렐라웨어대학에서 개발한 흐름모형인 SHORECIRC와 결합하여 친퇴상에서 쇄파에 의해 발생하는 과랑쇄파류와 그에 따른 과랑변형을 수치모의 하였다. 이 두 과랑모형과 흐름모형의 결합을 통하여 Yoon등 (2004)에 의해 규명된 파의 잉여응력에 따른 과랑쇄파류가 친퇴배후의 파 집중현상을 방해함으로써 그 파형이 변함을 확인하였다.

본 연구에서는 잠재 친퇴상을 전파하는 규칙파의 쇄파발생에 따른 과랑쇄파류의 발생과 이에 따른 파의 변형특성을 수치모의하여 Vincent 와 Briggs (1989)의 관측값과 비교하고 고찰한다. 이를 위해 규칙파 과랑모형인 REF/DIF 1 (Kirby and Dalrymple, 1994)와 SHORECIRC를 결합하고, 위의 SWAN과 SHORECIRC의 결합을 이용하여 쇄파류가 발생하는 규칙파의 친퇴배후 변형을 수치 모의 하였다. SWAN은 파의 action 평형 방정식을 사용하는 원칙적으로 불규칙파 과랑변형 수치모형이지만 극단적 narrow spectrum을 이용하여 유사 규칙파를 수치모의 할 수 있다. 또한 텔라웨어 대학에서 개발한 순간 유체흐름과 과랑을 동시에 계산할 수 있는 비선형 Boussinesq 모형인 FUNWAVE를 이용하여 이를 수치모의 하였다.

2. 수치모형

본 연구에 사용된 수치모형인 FUNWAVE(Wei등, 1995, Kennedy등, 2000, Chen등, 2003), REF/DIF 1(Kirby and Dalrymple, 1994), SWAN(Booij등, 2004) 그리고 SHORECIRC(Svendsen등, 2002, Putrevu and Svendsen, 1999)는 각각 독립적으로 개발되어 그 결과들이 충분히 검증되어 많은 문헌에 개재되어 있다. 따라서 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다.

FUNWAVE를 제외한 두 과랑모형과 흐름모형의 결합을 통한 과랑과 흐름 상호작용을 수치모의하기 위해서는 과랑모형에서 과랑에 의한 잉여응력이 흐름모형을 위해 계산되어야 한다. 소위 radiation stress 라고 말하는 이 파의 잉여응력은 다음과 같이 나타내어진다.

$$S_{\alpha\beta} = \overline{\int_{h_0}^{\zeta} p\delta_{\alpha\beta} + \rho u_{w\alpha} u_{w\beta} dz} - \delta_{\alpha\beta} \frac{1}{2} \rho g h^2 \quad (1)$$

(Mei, 1989). 그리고 이 파의 잉여응력은 Longuet-Higgins 와 Stewart (1962, 1964)에 의해 다음과 같이 파장에 대한 파고의 비선형성 효과를 무시하여 다음과 같이 간략화 된다.

$$S_{\alpha\beta} = \int_{h_0}^{\zeta} \rho \overline{u_{w\alpha} u_{w\beta}} dz + \delta_{\alpha\beta} \left\{ \frac{\rho g \overline{\eta^2}}{2} + \int_{h_0}^{\zeta} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_z^{\zeta} \rho \overline{u_{w\alpha} w_w} dz' dz - \int_z^{\zeta} \rho \overline{w_w^2} dz \right\} \quad (2)$$

그들은 이 간략화된 잉여응력의 항을 radiation stress tensors 라고 부른다. 여기서 이 항의 RANS(Reynolds averaged Navier-Stoke equations)의 reynolds stress 항과의 유사성으로 stress라는 표현을 쓰지만 수식적분에 의해 이 항이 stress의 단위를 갖고 있지는 않다. 다시 radiation stress는 미소진폭과 이론의 선형 진행파의 해를 이용하여 다음과 같이 표현되며 과랑의 수치해를 이용하여 과랑쇄파류를 계산할 때 이 형태의 radiatiton stress를 사용하게 된다.

$$S_{\alpha\beta} = e_{\alpha\beta} S_m + \delta_{\alpha\beta} S_p$$

(3)

여기서

$$e_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_w & \sin \theta_w \cos \theta_w \\ \sin \theta_w \cos \theta_w & \sin^2 \theta_w \end{pmatrix}$$

(4)

$$S_m = \frac{\rho g}{2} A^2 \left(\frac{C_g}{C} \right), \quad S_p = \frac{\rho g}{4} A^2 \left(\frac{2C_g}{C} - 1 \right)$$

(5)

본 연구에서도 REF/DIF 1의 파랑 수치해를 이용하여 계산된 진행파의 radiations stress를 계산하여 SHORECIRC로부터 파랑쇄파류를 수치모의 한다. SWAN은 원칙적으로 불규칙파 모형임으로 다음과 같이 표현되며 본 연구에서는 방향주파수 스펙트럼의 유의파가 존재하는 극소부분에 에너지밀도 혹은 파동밀도를 국한시켜 수치모의하였다.

$$S_m(\sigma, \theta) = \sigma N(\sigma, \theta) \frac{C_g(\sigma, \theta)}{C(\sigma, \theta)}, \quad S_p(\sigma, \theta) = \frac{\sigma}{2} N(\sigma, \theta) \left(\frac{2C_g(\sigma, \theta)}{C(\sigma, \theta)} - 1 \right)$$

(6)

FUNWAVE는 Wei등(1995)에 소개된 비선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 하며, Chen등(2003)은 비회전성 가정으로 유도된 이 지배방정식의 운동방정식에 부분적 회전을 고려할 수 있도록 아래와 같은 추가항을 첨가하여 개선된 모형을 개발하였다.

$$\mathbf{V} = (-v_* \omega_l, u_* \omega_l)$$

(7)

여기서

$$\omega_l = z_{*,x} \{ \nabla \cdot (h \mathbf{u}_*) \}_y + z_{*,y} \{ \nabla \cdot (\mathbf{u}_*) \}_y - z_{*,y} \{ \nabla \cdot (h \mathbf{u}_*) \}_x + z_{*,x} \{ \nabla \cdot (\mathbf{u}_*) \}_x$$

(8)

여기서 η 는 자유수면변위, h 는 수심, \mathbf{u}_* 는 $z_* = -0.531h$ 에서 수평방향 유속, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 는 수평방향 장소에 대한 기울기를 나타낸다. 이 항은 수직방향 2차 비선형 효과를 포함한 vorticity를 나타낸다. FUNWAVE는 수치모의를 위한 바닥마찰, 쇄파, 내부조파 및 흡수층에 대한 부가적 모형들을 포함하고 있다.

3. 모형setup

Vincent and Briggs(1989)는 미공병단 CERC에서 다방향 조파기 (DSWG)를 이용하여 타원형 천퇴가 있는 지형을 통과하는 규칙 및 불규칙파의 변형을 수리실험하였다. 그 수심지형은 다음과 그림과 같다. 파의 진행방향인 x 방향을 19m, y 방향을 25m로하고, 천퇴를 x=6.1, y=12.5을 중심으로 위치시켰다.

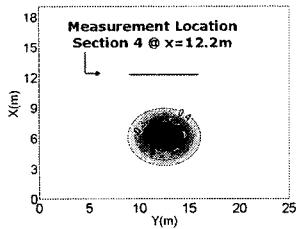


그림 1 Vincent and Briggs 실험 수심지형과 측점위치

이 수리실험은 규칙파와 불규칙파, 일방향 주파수 스펙트럼, 좁은 다방향 주파수 스펙트럼 그리고 넓은 다방향 주파수 스펙트럼 등이 고루 사용되었다. 또한 쇄파의 발생여부에 따른 조건으로도 실험이 수행되었다. 본 연구에서 규칙파의 쇄파에 따른 파랑쇄파류의 파랑에 대한 영향을 목적으로 함으로, 1.3초의 주기와 13.5cm의 파고를 가진 쇄파 발생하는 경우의 규칙파에 대해서만 그 결과를 제시한다. 규칙파 실험의 경우 수면변위를 36.4초 동안 50Hz로 그림 1에 나타난 섹션 4에서 측정하였다. 그리고 측정된 평균파고는 $x=3.75m$, $y=3.4m$ 에 위치한 측점의 파고로 무차원화 되어 제시되었다.

파랑과 흐름의 상호작용을 모의하기 위해 파랑모형과 흐름모형을 Sub-program으로 하는 주 program을 coding하여 파랑정보와 흐름정보의 입출력 feedback을 조절하게 하였다. 파고의 변화가 흐름변화에 비해 느리다는 가정 하에 10초동안의 흐름계산 후 파랑계산을 하는 형식을 취하였다. FUNWAVE와 SHORECIRC를 위한 수치모의 시간간격은 0.02초으로 하였다. 수치모의를 위한 수치모형의 물리적 혹은 경험적 상수들은 모형의 초기 설정치를 사용하고 경계는 FUNWAVE의 내부조파와 흡수층계를 제외하고 반사경계를 사용하였다.

4. 수치모의

파랑의 수중침퇴 통과 시 쇄파가 일어나면 쇄파는 쇄파류와 이로 인한 파랑의 변형을 발생시키는 원인이 된다. 이 파랑이 규칙파일 경우 이를 수치모의 하기 위해 사용된 두 파랑모형과 흐름모형의 결합에는 다음과 같은 한계가 있다. Yoon등(2004)과 Choi등(2007)이 제시한 수많은 파들의 합성으로 나타내어지는 불규칙파(spectral waves)의 경우와는 다르게 규칙파의 경우 친퇴 후면에서의 굴절 후 파랑진행의 직각방향으로 발생되는 중복파의 영향을 무시할 수 없게 된다. 따라서 중복파의 영향이 고려되지 않는 SWAN과 중복파 발생 시 오류가 있는 REF/DIF의 radiation stress 산정법은 중복파가 발생하는 규칙파의 파랑과 흐름의 상호작용을 수치모의 하는데 그 한계를 가지게 된다. 그와는 다르게 FUNWAVE의 경우 유체의 순간유동에 따른 파동변화를 계산 할 수 있음으로 radiation stress가 따로 산정되는 것이 아니라 그 지배방정식 안에서 파동에 따른 momentum flux가 직접 계산되어 작용함으로 위와 같은 중복파영향에 대한 한계를 갖지 않는다.

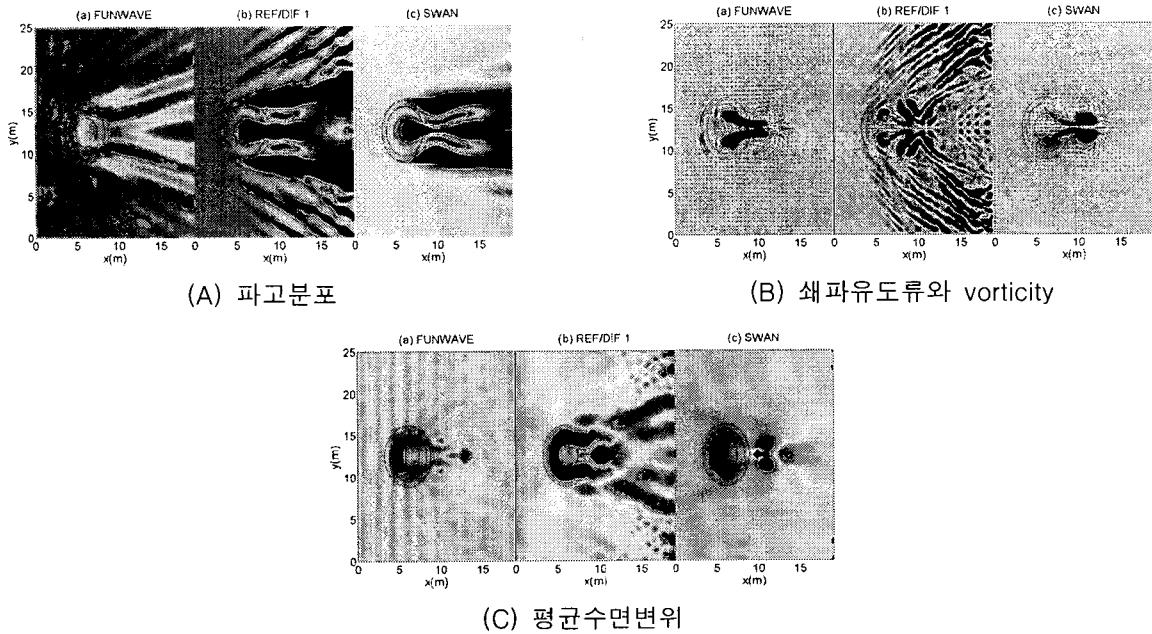


그림 2 수치모의시간 36.4초 동안 쇄파유도류 효과가 고려된 결과

다음은 두 결합모형과 FUNWAVE를 이용한 수치모의 결과이다. 그림 2에서 나타난 SWAN의 파고분포에서 중복파의 발생을 볼 수 없으며 따라서 중복파의 영향이 없는 쇄파유도류를 발생시킨다. 그러나 중복파를 포함한 계산결과를 갖는 REF/DIF의 경우 중복파에 한계가 있는 radiation stress 산정으로 인하여 그 흐름모형의 결과는 큰 오차들을 포함하게 된다. FUNWAVE의 결과는 중복파를 포함한 파고분포와 중복파에 큰 영향이 없는 쇄파유도류 분포를 보여 준다. 이 결과들을 실험관측결과와 비교하여 그림 3에 나타내었다. 결합모형의 결과는 그 오류에도 불구하고 흐름을 고려하지 않는 경우의 결과보다 흐름을 고려한 결과가 관측결과와 가까웠으며, FUNWAVE의 결과는 관측치와 완벽하게 일치하는 것을 보여준다. 그림 4에서 순간유동의 파랑과 짧은 시간평균으로 나타낸 FUNWAVE의 결과를 볼 수 있는데, 천퇴배후 흐름에 의한 굴절로 나타나는 파랑의 shadow영역과 shear 흐름으로 잘 발달된 쌍 vortex를 보이는 쇄파유도류가 잘 나타나 있다.

4 결론

천퇴후면부에서 파랑이 양 바깥쪽으로 굴절되는 것은 파랑쇄파류에 의한 굴절현상으로 수심에 의한 굴절과 흐름에 의한 굴절이 동시에 존재하며, 본 연구의 실험조건에서는 흐름에 의한 파랑의 굴절이 지배적 영향력을 갖는다. 파동모형과 흐름모형의 결합으로 수치모의된 파랑변형은 그 파랑모형과 파랑모형으로 산정되는 잉여용력의 한계성으로 인해 완전치 못한 결과를 얻었으나 그럼에도 그 결과가 흐름의 영향을 고려하지 않은 결과 보다 실험관측치에 가까웠다. 반면에 FUNWAVE를 이용한 계산 결과는 제트류 형태의 쌍 vortex를 보이는 흐름을 재현하였으며, 이에 영향을 받은 파고분포는 실험관측치와 완벽하게 일치하는 것을 볼 수 있었다.

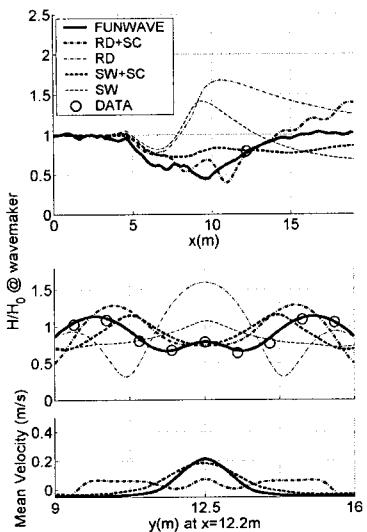


그림 3 쇄파유도류 효과를 고려/비고려된 파고변화
(RD= REF/DIF 1, RD+SC= REF/DIF 1 와 SHORCIRC,
SW= SWAN, SW+SC=SWAN 와 SHORCIRC)

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부의 Brain Korea 21 과제로 대림산업(주)으로부터 한양대학교에 지원된 연구비로 수행되었음에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Booij, N., Haagsma, I.J.G., Holthuijsen, L.H., Kieftenburg, A.T.M.M., Ris, R.C., van der Westhuysen, A.J., Zijlema, M., 2004. SWAN Cycle III version 40.41, User Manual. Delft University of Technology.
2. Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Shi, F., Thornton, E.B., 2003. Boussinesq modeling of longshore current. Journal of Geophysical Research, 108(C11), pp. 26-1-26-18.
3. Choi, J., Lim, C-H., Jeon, Y-J., Yoon, S.B., 2007. Numerical simulation of irregular wave transformation due to wave induced current. Journal of Hydro-environment Research.
4. Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 2000. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. I: 1D. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 126, pp. 39-47.
5. Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 1994. Combined refraction/diffraction model REF/DIF 1, version 2.5, User Manual. Technical Report CACR-94-22, University of Delaware.
6. Kirby, J.T., Özkan, H.T., 1994. Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions, REF/DIF S, version 1.1, User Manual. Technical Report CACR-94-04, University of Delaware.
7. Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B., Dalrymple, R.A., 1998. Fully nonlinear

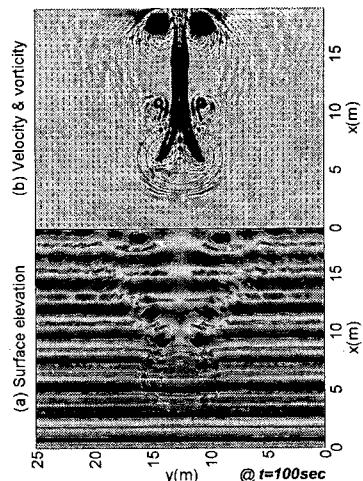


그림 4 수치모의시간 100초 후의
순간수면변위와 시간평균(10초)
흐름변화

- Boussinesq wave model, User Manual. Technical Report CACR-98-06, University of Delaware.
- 8. Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1962. Radiation stresses and mass transport in gravity waves with applications to surf-beats. *J. Fluid Mech.* 13. pp. 481–504.
 - 9. Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1964. Radiation stresses in water waves; a physical discussion with applications. *Deep-Sea Res.* 11. pp. 529–562.
 - 10. Mei, C.C., 1989. The applied dynamics of ocean surface waves. World Scientific.
 - Putrevu, U., Svendsen, I.A., 1999. Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced nearshore currents. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, pp. 409~427.
 - 11. Svendsen, I.A., Hass, K., Zhao, Q., 2002. Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC version 2.4, User Manual. Technical Report, University of Delaware.
 - 12. 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.
 - 13. Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T., Subramanya, R., 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1: Highly nonlinear unsteady wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, pp. 71–92.
 - 14. Yoon, S.B., Cho, Y-S., Lee, C., 2004. Effects of breaking-induced currents on refraction-diffraction of irregular waves over submerged shoal. *Ocean Engineering*, 31, pp. 633–652.