곡면 슬릿 케이슨식 방파제의 연파 제어효과 수치해석

Numerical Analysis of Stem Wave Control Effect of a Curved Slit Caisson Breakwater

조용준

서울시립대학교 토목공학과

Yong Jun Cho

Department of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

Abstract

Curved slit caisson has been the preferred structural type of breakwater in South Korea, and effective control of stem waves is a crucial design factor significantly affecting the performance of a curved slit caisson breakwater. Most of the past studies on stem waves heavily relied on wave drivers like the cubic Schrödinger Eq. due to the intrinsic difficulties in analyzing stem waves. However, considering the perturbation method evoked in the derivation of cubic Schrödinger Eq., the wave driver mentioned above could give erroneous results in the rough sea due to the higher-order waves that appeared in the wave field by resonance wave-wave interaction. In this rationale, in this study, the numerical simulation was implemented to verify the stem wave control effect of curved slit caisson using the ihFoam, toolbox having its roots on OpenFoam. It was shown that curved slit caisson breakwater effectively alleviates the scope and height of stem waves.

Keywords : Stem Wave Control Effect: Curved Slit Caisson: ihFOAM: Cubic Schrödinger Eq.: Vertical type breakwater

1. 서론

15세기 중엽에 대항해 시대가 시작될 무렵 거친 해양환경으로부터 자유로운 정온한 해역을 얻으려는 인류의 노력도 함께 시작됐으며, 이러한 노력으로 자연에서 쉽게 얻을 수 있는 사석을 활용한 초기형태의 사석 방파제가 완성된다. 투석으로 조성된 사석 경사제는 파랑 에너지가 집중되는 평균해수면과 이웃한 사면에서 진행되는 쇄굴로 변형되며 중국에는 평균해수면 인근에 단이 형성된다. 이후 사석 경사제는 안정화 단계에 진입하여 상당 기간 추가적인 변형 없이 방파제로 기능하여 왔다. 이는 파랑에 대한 내구성이 수월한 방파제 단면 형태를 우리에게 시사하며 조성단계부터 평균해수면 인근에 단을 배치하는 berm breakwater는 같은 맥락으로 해석될 수 있다(Woo, 2016). 방파제는 조선 기술의 발전과 파랑에 대한 우리의 이해가 깊어짐에 따라 다양한 형태로 진화한다. 지금까지 제시된 여러 형태의 방파제 중 내습하는 파랑에너지의 소산이란 관점에서 보면 사석 경사제가 가장 효율적이나 석재를 얻기 위한 채석과정에서 발생하는 환경훼손으로 인해 최근 들어 대형 케이슨을 활용한 직립제가 주류를 이룬다. 해상을 통한 물동량의

증가와 이로 인한 선박의 대형화로 현재 직립제는 수심 20~25m인 수역에 조성되며, 사석 경사제와 견줄만한 에너지 소산효과를 얻기 위해 유수실, 슬릿 등이 순차적으로 도입되며 진화하였다. 그러나 전술한 유수실, 슬릿 등은 유수실에 포획된 공기층이 이완·압축되며 생성되는 파랑으로 인해 목적인 에너지 소산효과가 효과적으로 구현되지 못하는 경우도 상당하며 이 경우 상당한 반사가 진행될 수 있다(Woo, 2016). 파랑이 직립 방파제에 비스듬히 내습하는 경우 입사파, 반사파와 더불어 방파제를 따라 진행되는 연파가 생성되며, 이렇게 생성된 연파는 상당한 양의 월파를 초래할 수 있어 방파제를 따라 진행되는 연파의 효과적 제어는 슬릿 케이슨 방파제의 성능을 결정하는 중요한 설계 인자로 판단된다(Fig. 1, 2 참조)(Woo, 2016).

연파는 Perroud(1957), Chen(1961) 등이 천해역에서 장파를 대상으로 수행한 수리 모형실험에서 처음으로 관측되었으며 그 후 Wiegel(1964 a, b)은 직립제에 고립파가 비스듬히 입사하는 경우 연파가 형성되는 것을 관측한 바 있다. Wiegel(1964 a, b)에 따르면 입사각이 45°보다 작은 경우 입, 반사파 외에 연파가 출현하기 시작하며 입사각이 20°보다 작은 경우에는 반사파는 사라지고 연파만이 존재한다. 이

Fig. 1. Snapshot of wave field when stem waves are propagating along the revetment [from Internet].

후 Nielsen(1962), Berger와 Kohlhasse(1976)는 천이역에서 비스듬히 입사하는 규칙 파를 대상으로 수행된 수리모형실험에서도 고립파의 경우와 유사한 결과를 얻은 바 있다. Nielsen(1962), Berger와 Kohlhasse(1976) 등에 따르면 연파의 파고는 방파제를 따라 점근적으로 증가하다 일정한 값으로 수렴하며 연파의 파고는 입사각과 수심이 감소 됨에 따라 증가하며 방파제를 따라 연파가 생성되는 영역의 폭은 입사파의 주기가 증가할수록 확대된다. 또한 입사파 파고와 연파의 생성 특성에 미치는 영향에 대해서는 Stokes 파랑의 불안정성 등으로 실험에 따라 정도의 차이는 있으나 입사 파고가 증가할수록 연파 파고는 감소되며 연파 발생 영역의 폭은 증가한다.

이후 Melville(1980)은 비스듬히 입사되는 고립파에 의해 야기되는 연파를 대상으로 정교한 수리모형 실험을 수행하여 입사파고와 입사각도가 연파에 미치는 영향에 대해 규명한 바 있다. Melville(1980)에 의하면 파랑이 진행되면서 연파 폭은 증가하며 연파 파고는 입사파보다는 크나 입사 파고의 두 배를 상회하는 것은 아니며, 입사 각도가 작을수록 연파의 파고는 감소한다. 또한 이러한 경향은 입사 파랑의 파고 즉, 비선형성이 클수록 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이에 반해 Nielsen(1962), Berger와 Kohlhasse(1976) 등은 직립제에 비스듬히 입사되는 정현파의 경우에도 연파가 형성될 수 있음을 실험으로 입증하였다. 정현파에 의해 야기되는 연파파랑의 특성은 고립파에 대한 Melville의 관측치와 대체로 일치하나 입사 파고가 연파 파고에 미치는 영향은 관측하지 못하였다. 최근 Mase (2002)는 단순 직립제와 불규칙 파랑을 대상으로 수행된 수리모형실험을 활용하여 연파 해석을 불규칙 파동계로 확대하였다. Mase (2002)의 연구 성과에 따르면 불규칙 파동계에서도 선형 파동계와 유사한 성정의 연파가 관측되나, 연파가 생성되는 공간적 영역은 비선형 정도에 상관없이 균일하게 유지된다.

연파 해석을 위한 파랑 모형은 수심이 일정한 천이역의 경우 Yue and Mei(1980)에 의해 Stokes 파랑 이론과 WKB 근사법

에 기초하여 제시된 바 있다. 이 연구에서 Yue and Mei(1980)는 섭동법에서 도입된 고차 보정 항을 대상으로 한 비제차 미분 방정식의 특수해가 존재하기 위해 충족시켜야 하는 조건인 Solvability Condition으로부터 복소수 진폭을 기술하는 기본 방정식을 유도하였다. 또한 Yue and Mei(1980)는 포물형 근사를 적용하면 전술한 기본 방정식은 비선형 Schrödinger 방정식으로 전환되며 이 파랑 모형에 기초하면 전술한 Stokes 파랑에 대한 연파 생성 특성을 어느 정도 재현할 수 있음을 예증한 바 있다. 이후 Kirby and Dalrymple(1983)은 다차원 섭동법을 이용하여 Yue and Mei(1980)의 파랑 모형을 완전한 수심 변화가 존재하는 천이역에도 적용할 수 있도록 일반화하였다. 비선형 Schrödinger 방정식과 자연 하천에서의 도수 현상에 대한 지배 방정식 간의 유사성을 토대로 연파는 선형 이론의 단순 석경 반사에 해당하는 공액 상태로의 불연속적인 전이로 해석한 Peregrine(1983)의 연구 결과에 근거하면 연파는 입사파와 반사파 간의 공진성 상호작용에 따라 직립제 방향으로 진행되는 제4의 파랑 성분으로 파랑 에너지가 전이되는 현상으로 보인다.

전술한 연구에서 Yue and Mei(1980), Kirby and Dalrymple (1983)은 효율적인 수치 연산을 위해 포물형 근사를 적용하여 입사 각도에 다소 제약을 받는 단점이 있다. 천해역의 경우 최근 Kirby(1990)는 천해역에서의 대표적인 파랑 모형인 Boussinesq 방정식과 파랑이 시간과 주 진행 방향뿐만 아니라 연안 방향으로도 주기적인 거동을 보인다는 가정하에 무작위 파랑을 대상으로 해수면 변위와 유속을 Fourier 급수로 전개하여 스펙트럼 파랑 모형을 제시하였다. 스펙트럼 파랑 모형은 연안역에 Boussinesq 방정식을 직접 적용하는 경우 부과되는 많은 계산량으로 인해 비효율적이라는 점을 고려하면 적절한 대안으로 여겨진다. 이 연구에서 Kirby는 스펙트럼 파랑모형이 기존의 포물형 근사식보다 Cnoidal 파랑에 의한 직립제에서의 연파 생성과정을 정확하게 기술할 수 있음을 Hammack, Scheffner와 Segur (1989)의 실험 자료와의 비교를 통해 입증하였으나 측면 경계조건에 주기성을 부과해야만 하는 단점을 지닌다.

이처럼 현재 문헌에서 찾아볼 수 있는 연파 관련 연구의 대부분은 비선형 Schrödinger 방정식처럼 파랑의 여러 성정 중 진폭만을 다루는 에너지 계열의 파랑 모형에 기초한 수치해석으로 연파를 다루며 위상별 연파 생성과정을 다룬 연구는 찾기가 쉽지 않다. 그러나 비선형 Schrödinger 방정식의 유도과정에서 활용되는 섭동법을 상기하면 거친 해역에서 전술한 연구는 누락된 고차성분으로 인해 오류를 초래할 수 있다.

이상의 논의를 토대로 본 연구에서는 곡면 슬릿 케이슨 방파제의 연파 제어효과를 OpenFoam 기반 Tool Box인 ihFoam에 기초하여 수행된 수치모의를 통해 살펴보려 한다(Lara et al., 2011; Losada et al., 2008; Cho, 2019; Cho and Bae, 2019; Cho and Kang, 2017). 이 과정에서 수치반사는 개방경

계에 에너지 흡수층 [Energy Absorbing Layer]를 거치하여 최소화하였으며, 방파제 기초를 구성하는 사석층에서의 에너지 소산은 del Jesus et al. (2012)의 VARANS [Volume Averaged Reynolds Averaged Navier Stokes Eq.] 모형을 활용하여 기술된다.

2장에서는 논의를 전개하기 위해 Schrödinger 방정식에 기초한 수치모의와 연파의 일반적 성정을 다루며 3장에서는 본 연구에서 사용되는 ihFoam 수치모형과 VARANS 모형을 정리하였다. 4장, 5장에서는 곡면 슬릿 케이슨 방파제의 연파제어 효과를 확인하기 위해 수행된 수치모의와 수치결과를 정리하였다. 5장에서는 현재 가용한 방파제 양식 중 파랑 에너지 소산이 가장 효율적으로 이루어지는 사석 경사식 방파제에서의 연파 특성을 가늠하기 위한 수치모의도 함께 다루었다.

2. 연파 수리특성 - Cubic Schrödinger 방정식을 중심으로

연파의 일반적 성정에 관해 살펴보기 위해 비선형 Schrödinger 방정식을 수치해석 하였으며, 비선형 Schrödinger 방정식은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$2i\frac{\partial A}{\partial X} + \frac{\partial^2 A}{\partial Y^2} - K|A|^2 A = 0 \quad (1)$$

상기 식에서 K 는 입사 파랑의 파형 경사와 직립제와 입사파가 이루는 각도 ϵ [Fig. 2 참조]에 대한 상대 비율, A 는 무차원 진폭, X 와 Y 는 무차원 좌표계를 나타내며 각각 다음과 같이 기술될 수 있다.

Fig. 2. Definition sketch of stem waves.

$$K = \left(\frac{k_o A_o}{\epsilon} \right)^2 \frac{C_o}{C_{go}} \frac{\cosh 4k_o h + 8 - 2 \tanh^2 k_o h}{8 \sinh^4 k_o h} \quad (2)$$

$$A = \frac{\bar{A}}{A_o} \quad (2.1)$$

$$X = k_o \bar{X} = \epsilon^2 k_o x \quad (2.2)$$

$$Y = k_o \bar{Y} = \epsilon k_o y \quad (2.3)$$

Fig. 3에는 수치해석 결과를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯 K 가 커짐에 따라 연파 파고는 감소하나, 연파가 생성되는 영역의 폭은 증가하였다 [Fig. 4 참조]. 이러한 경향은 Melville (1980), Mase (2002)의 연구에서도 찾아볼 수 있으며, 유입되는 파랑 에너지는 제한되지만 입사 파고가 증가하면, 이에 비례하여 확대되는 연파 생성 폭과 균형을 이루기 위한 것으로 판단된다.

3. 수치모형

수치모의는 OpenFoam 기반 Tool box인 ihFoam을 사용하여 수행되며, ihFoam에서 파랑모형은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)와 질량 보존식으로 구성되며, 자유수면은 VOF(Volume Of Fraction) 법을 활용하여 추적된다.

3.1 파랑모형

ihFoam에서 차용하는 파랑모형인 RANS, 질량 보존식, VOF식을 기술하면 다음과 같으며

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{X} \nabla \rho + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{eff} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \alpha_1 + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha_1 (1 - \alpha_1) = 0 \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{U}$ 는 속도 벡터, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도, $\mu_{eff} = \mu + \rho \nu_{turb}$ 는 동점성계수, p^* 는 유사 동적압력, $\mathbf{X}$ 는 위치벡터, α_1 는 각각의 단위격자에서 해수가 점유하고 있는 체적을 의미하는 VOF 계수를 각각 나타낸다.

3.2 Porous media에서의 파랑모형

곡면 슬릿 케이슨 방파제의 기초는 사석 층으로 구성되

(a) K=0.1

(b) K=1

(c) K=3

Fig. 3. Contour plot of numerically simulated wave amplitude around the wave breaker.

며, 이 경우 다공성 매질에서 발생하는 형상항력과 관성 항력으로 인해 파랑 모형은 수정되어야 한다.

Darcy(1856)의 사질토 내부에서의 유체 흐름에 관한 연구

Fig. 4. Variation of $|A|_{MAX}$ as K is getting increased.

가 알려진 후, 다공성 매질에서의 유체 해석을 형상항력으로 기술하려는 흐름은 이후 다공성 매질에서의 유동 해석에 큰 흐름을 형성한다. 층류의 경우 선형 형상항력만으로도 해석할 수 있으나, Forcheimer(1901)는 큰 Reynolds 수에서도 적용할 수 있도록 이차 형상 항력 항을 추가하였으며, Polubarinova-Kochina(1962)는 1901년에 Forcheimer가 제시한 식을 비정상류로 확장하기 위해 관성력을 추가하였다.

본 논문에서는 del Jesus et al.(2012)에 의해 제시된 VARANS를 사용하였으며 이를 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_i}{n} \right) = 0 \quad (6)$$

$$(1+c) \frac{\partial}{\partial t} \frac{\rho u_i}{n} + \frac{u_j}{n} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\rho u_i}{n} = - \frac{\partial}{\partial x_i} p + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{u_i}{n} \right) - A \frac{u_i}{n} - B \frac{u_i}{n} \left| \frac{u_i}{n} \right| \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{u_i}{n} \alpha_1 = 0 \quad (8)$$

상기 식에서 u 는 평균유속 또는 Darcy속도, n 은 공극률, A 와 B 는 형상항력 계수, c 는 관성력 형상항력 계수로 물성에 종속한다.

다공성 매질에서 비어있는 공간에 존재하는 유체의 속도를 의미하는 실제 속도는 평균유속 또는 Darcy 속도를 나타내는 u 와 다음과 같은 관계식을 충족한다.

$$\mathbf{U} = \frac{u}{n} \quad (9)$$

선형 형상항력 계수 A , 비선형 형상항력 계수 B 는 다음과 같이 정의되며(Cho and Kang, 2017),

$$A = \alpha \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\mu}{D_{50}^2} \quad (10)$$

$$B = \beta \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-n}{n^2} \frac{\rho}{D_{50}} \quad (11)$$

여기서 D_{50} 은 다공성 물질의 중앙 직경, KC 는 Keulegan-Carpenter수를 각각 나타내며 KC 는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$KC = \frac{T_o u_M}{D_{50} n} \quad (12)$$

식 (12)에서 u_M 은 최대 진동 속도, T_o 는 진동주기를 나타내며, KC 는 vortex induced vibration으로 인한 추가적인 마찰을 고려하기 위해 도입되었다. 마찰 매개변수들과 연관되어 α 와 β 는 조정되며, 관성력 계수 c 값은 0.34로 유지된다.

4. 수치모의

대수심 해역에서 선호되는 곡면 슬릿 케이슨 방파제의 연파제어 효과를 확인하기 위해 수치모의를 수행하였으며, 비교를 위해 직립 방파제를 대상으로 한 수치모의도 함께 수행하였다[Fig. 5 참조]. Fig. 6에 도시한 계산 영역은 $350 \times 250 \times 40 = 3,500,000$ 개의 절점으로 이산화하였으며, Table 1에는 수치모의에 사용된 파랑 제원을 정리하였다.

방파제 기초는 직경 $D_{50} = 3\text{ cm}$ 인 사석으로 구성하였으며, 투수층에서의 유동은 Navier Stokes Eq.에 추가 항력을 도입하여 해석하였다. 입사파고, 주기, 수심은 각각 $H=3.5$, 5 , 6.5 m , $T=10\text{ 초}$, $h=26.25\text{ m}$, 파형은 연파 생성 가능성을 높이기 위해 Korteweg-de Vries식의 해석해로 정의되는 Cnoidal wave로 취하였으며, Cnoidal wave를 기술하면 다음과 같다.

$$\zeta = H \left[\frac{1}{m} \left(1 - \frac{E_m}{K_m} \right) - 1 + Cn^2 \left[2K_m \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \middle| m \right] \right] \quad (13)$$

$$\frac{c^2}{gh} = 1 + \frac{H}{mh} \left(2 - m - 3 \frac{E_m}{K_m} \right) \quad (14)$$

$$\frac{HL^2}{h^3} = \frac{16}{3} m K_m^2 \quad (15)$$

$$c = \frac{L}{T} \quad (16)$$

여기서 ζ 는 해수면 변위, H 는 파고, Cn 은 Jacobi elliptic function, c 는 파속, L 은 파장, T 는 주기, m 은 0과 1사이의 값을 지니는 elliptic parameter를 각각 나타낸다. K_m 은 제1종 타원적분, E_m 은 제2종 타원적분을 각각 나타내며, K_m 과

(a) Vertical breakwater

(b) Curved slit caisson breakwater

Fig. 5. Layout of vertical breakwater and curved slit caisson breakwater.

Fig. 6. Computational domain and the location of gauges for water surface displacement and impulsive hydrodynamic force.

Table 1. List of wave conditions used in the numerical simulations

Cases	$H[m]$	$T[s]$	$h_o[m]$	Breaker Type
RUN 1	3.0	10.5	15.0	Curved Slit Caisson
RUN 2	5.0	10.5	15.0	Curved Slit Caisson
RUN 3	6.5	10.5	15.0	Curved Slit Caisson
RUN 4	5.0	10.5	15.0	Vertical Type

E_m 은 m 값에 종속한다. Cnoidal wave 파형은 m 이 0에 수렴하면 Stokes I 파형에, m 이 1에 수렴하면 solitary wave 파형에 수렴하며, Cnoidal wave에서의 유속은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$u = c \frac{\eta}{h} - c \left(\frac{\eta^2}{h^2} + \frac{\bar{\eta}^2}{h^2} \right) + \frac{1}{2} ch \left(\frac{1}{3} - \frac{z^2}{h^2} \right) \eta_{xx} \quad (17)$$

$$w = -cz \left[\frac{\eta_x}{h} \left(1 - \frac{2\eta}{h} \right) + \frac{1}{6} h \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \eta_{xxx} \right] \quad (18)$$

식 (17), (18)에서 η_x , η_{xx} , η_{xxx} 는 x 에 대한 자유수면의 1차, 2차, 3차 미분연산자, $\bar{\cdot}$ 는 주기 평균 연산자를 나타낸다.

5. 수치결과

5.1 곡면 슬릿 케이스 방파제의 연파 제어효과

Fig. 7에는 RUN 2에서 관측된 자유수면 snapshot을 순차적으로 정리하였다. 연파가 생성되어 방파제를 따라 진행되는 것을 확인할 수 있다. 입사 파고가 연파 크기에 미치는 영향을 확인하기 위해 Fig. 8에는 RUN 1, 3, 4에서 연파 파고가 정점에 이른 순간에서의 자유수면 snapshot을 정리하였다. 쉽게 예상해 볼 수 있듯이 단순 직립제에서 가장 거친 연파가 생성되며[Fig. 8(c) 참조], 입사 파고가 가장 작은 RUN 1에서 연파 파고가 가장 작은 것을 확인할 수 있다[Fig. 9 참조].

또한 유수실에서 진행되는 에너지 소산과 이로 인한 반사를 감소로 방파제 전면해역에서 관측되는 정상파동계는 직립식 방파제의 경우보다 덜 명징하다[Fig. 7, 8 참조].

Fig. 10에는 방파제 양식이 연파에 미치는 영향을 확인하기 위해 RUN 2, 4에서 방파제 전면해역에 거치된 Wave Gauge [Fig. 6 참조]에서 관측된 자유수면 변위 시계열자료를 비교하였다. 곡면 슬릿 케이스 방파제의 경우 파고가 최대 2m까지, 줄어드는 것으로 모의 되어 곡면 슬릿 케이스 방파제는 연파제어 효과를 지니는 것으로 판단된다.

Fig. 11에는 방파제를 따라 진행되는 연파를 더욱 명징하게 드러내기 위해 방파제를 가로지르는 단면 A-A', B-B', C-C'에서의 연파가 정점에 이른 순간에서의 자유수면 snapshot을 정리하였다. 연파가 진행되며 연파 파고는 감소하나 규모는 증가하는 연파의 성정이 정확히 모의 되는 것을 확인할 수 있다[Fig. 12 참조].

Fig. 13, 14에는 방파제 전면해역에 거치된 wave gauge [Fig. 6 참조]에서 관측된 충격 해파압[impulsive hydrodynamic force]이 하나의 단위 주기에 걸쳐 변화하는 양상을 정리하였다. 위상별 변화를 모두 담아내기 위해 하나의 단위 주기는 모두 열 개의 frame으로 구성하였다. Goda(1985)가 이야기하는 사다리꼴 분포를 확인할 수 있으며[Fig. 15 참조], 곡면 슬릿 케이스의 경우에서 단순 직립제 보다 충격 해파

Fig. 7. Sequential snapshots of numerically simulated wave field around the curved slit caisson breaker RUN 2 [Unit:m/s].

압이 15% 내외로 경감되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 곡면슬릿 케이스의 개구부로 투과되는 유동으로 인해 운동량 이송률이 분산되어 발생하는 것으로 보인다. Fig. 16에는 연파 생성시 유속 벡터도를 차례대로 도시하였다. 곡면 슬

Fig. 8. Snapshots of numerically simulated wave field when stem waves reach their peak in RUN 1, 3, 4.

릿케이슨 방파제를 따라 진행되는 연파의 성정이 잘 드러난 것으로 판단된다.

5.2 사석식 방파제에서의 연파 특성

1장에서 다루었듯 내습하는 파랑 에너지의 소산은 사석 경사식 방파제에서 가장 효율적으로 강제된다. 본 절에서는 사석 경사식 방파제에서 강제하는 파랑 에너지 소산이 연파에 미치는 영향을 살펴보기 위해 혼성방파제에 비스듬히 입사하는 파랑의 전파과정을 수치모의 하였다.

혼성방파제는 현재 우리나라에서 대수심 방파제가 거치되는 해역의 해양환경을 고려하여 20m 높이의 사석 경사부에 높이가 5m인 직립제가 거치된 모양을 취하였다[Fig. 17 참조]. 계산 영역이 시작되고 끝나는 부분[relaxation zone 1, 3]과 방파제와 마주하는 계산영역 우측[relaxation zone 2]에는 sponge layer를 거치하여 방사 경계조건[radiation boundary condition]이 수치적 반사 없이 구현될 수 있도록 하였다.

Fig. 18에는 이해를 돕기 위해 수치모의 된 파동계 snapshot

Fig. 9. Sampled time series of numerically simulated water surface displacement measured at Wave Gauge [see Fig. 6] in RUN 1, 2, 3.

Fig. 10. Comparison of numerically simulated water surface displacement measured at Wave Gauge in RUN 2 with the one in RUN 4.

Fig. 11. Time series of numerically simulated free surface elevation along the section B-B [see Fig. 6].

을 순차적으로 정리하였다. 혼성방파제의 사석 경사부와 직립제에서 진행되는 물리적 반사파가 수치적 반사 없이 계산 영역을 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. 혼성방파제

Fig. 12. Sequential snapshots of numerically simulated stem waves propagating along the vertical breaker in RUN 4.

Fig. 13. Evolution of instantaneous impulsive hydrodynamic force for varying wave height.

Fig. 14. Comparison of instantaneous impulsive wave loading as wave height is getting increased.

Fig. 15. Schematic sketch of impulsive wave loading due to breaking waves suggested by Goda(1985).

를 구성하는 직립제에서 진행되는 월파[Fig. 18 (b), (c), (d), (e), (f) 참조]로 연파를 특징하는 경우, 직립제를 따라 진행되는 연파를 확연하게 확인할 수 있으나, 연파 생성영역과 증폭 비는 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 사석 경사부에서 강제되는 파랑 에너지 소산이 선형 형상항력과 비선형 형상항력으로 비교적 정확히 모의 되어 직립제에서 정점에 이른 후 시작되는 처내림 과정에서 backwash 흐름의 세기는 상당히 약화하여 반사파는 그리 크지 않다는 것을 알 수 있다[Fig. 18(i) 참조].

Fig. 16. Sequential vector plot of stem waves induced flow velocity as stem waves are propagating along the breaker.

(a) Computational domain

(b) Layout of hybrid wave breaker

Fig. 17. Computational domain for Hybrid wave breaker.

Fig. 18. Sequential snapshots at $t = n\Delta t$ of numerically simulated wave fields along the Hybrid wave breaker for $H=5m$.

6. 결론

현재 우리나라에서는 해상을 통한 물동량의 증가와 선박의 대형화로 직립제 형태의 방파제가 수심 20m 내외의 해역에 조성되고 있으며, 사석 경사제와 견줄만한 에너지 소산효과를 얻기 위해 유수실, 슬릿 등이 장착된 경우가 대부분이다. 그러나 유수실에 포획된 공기층의 이완압축으로 생성되는 방사파로 인해 직립제 형태의 방파제에서는 상당한 반사가 진행되며, 따라서 연파의 효과적 제어는 슬릿 케이스 방파제의 성능을 결정하는 중요한 설계 인자로 보인다(Woo, 2016). 연파에 관한 기존의 연구는 해석상의 어려움으로 비선형 Schrödinger 방정식처럼 파랑의 여러 성정 중 진폭만을 다루는 에너지 계열 파랑 모형에 기초한 수치해석이 주류를 이룬다. 그러나 비선형 Schrödinger 방정식 유도과정에서 차용되는 섭동법을 상기하면 거친 해역에서는 공진성 wave-wave interaction에 의해 파동계에 출현하는 고차 조화성분 파랑으로 인해 전술한 비선형 Schrödinger 방정식은 오류를 수반할 수 있다.

이러한 시각에서 본 논문에서는 Navier Stokes 식을 파랑

모형으로 하는 ihFoam을 사용하여 대수심 수역에서 흔히 차용되는 곡면 슬릿 케이스 방파제의 연파제어 효과를 확인하기 위해 수치모의를 수행하였다. 더욱 정확한 모의를 위해 방파제 기초는 지름 $D_{50} = 3cm$ 인 사석으로 구성하였으며, 투수층에서의 유동은 Navier Stokes Eq.에 추가 항력을 도입하여 해석하였다. 입사 파고와 주기는 각각 3m, 5m, 6.5m, 10.5초, 파형은 수심[$h=15m$]과 연파 생성 가능성을 높이기 위해 Korteweg-de Vries식의 해석해로 정의되는 Cnoidal wave로 취하였다. 본 논문에서 다룬 파랑 모형의 검증은 단순 직립제를 대상으로 비선형 Schrödinger Eq.에 기초하여 수행된 수치모의를 통해 정성적으로 이루어졌다.

검증 결과 Cubic Schrödinger 방정식에 기초한 수치모의가 최대 증폭 비를 다소 과소하게 평가하는 것으로 확인되었으며, 이러한 현상은 Cubic Schrödinger 방정식 유도과정에 사용된 섭동법이 지니는 한계에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 파형 경사의 켄기 각에 대한 상대 비율이 증가하는 경우 이미 보고된 연파 생성영역의 증가와 증폭 비 감소는 ihFoam에서도 동일하게 관측할 수 있었다.

이어 대 수심 수역에서 흔히 차용되는 곡면 슬릿 케이스

방파제의 연파 제어 효과를 확인하기 위한 수치모의가 수행되었으며, 모의 결과 우리의 예측대로 곡면 슬릿 케이슨의 연파 제어 효과로 직립식 방파제의 경우보다 연파 생성 영역은 축소되고, 연파고는 5% 내외로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 유수 실에서 진행되는 에너지 소산과 이로 인한 반사를 감소로 방파제 전면 수역에서 관측되는 정상 파동 계는 직립식 방파제의 경우보다 덜 명징하다. 충격 쇄파압의 경우, Goda에 의해 이미 보고된 사다리꼴 분포를 추종하는 것을 확인할 수 있었으며, 곡면 슬릿 케이슨의 경우에서 직립식 방파제의 경우보다 충격 쇄파압이 15% 내외로 경감되는 것으로 모의되었다. 이러한 현상은 곡면 슬릿 케이슨 방파제의 개구부로 투과되는 유동으로 인해 운동량 이송률[Momentum Flux]이 분산되어 발생하는 것으로 판단된다.

마지막으로, 현재 가용한 방파제 양식 중 파랑 에너지 소산이 가장 효율적으로 이루어지는 사석 경사식 방파제에서의 연파 특성을 가늠하기 위한 수치모의를 수행하였다. 사석 경사식 방파제의 형태는 현재 우리나라에서 대수심 방파제가 거처되는 해역의 해양환경을 고려하여 20m 높이의 사석 경사부에 높이가 5m인 직립체가 거처된 모양을 취하였다 [혼성식 방파제, hybrid breaker]. 모의 결과 혼성방파제를 구성하는 직립제에서 진행되는 월파로 연파를 특징하는 경우, 직립제를 따라 진행되는 연파를 확연하게 확인할 수 있었으나, 연파 생성영역과 증폭 비는 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

References

- Berger, U. and Kohlhasse, S. (1976). "Mach reflection as a diffraction problem." *Proc. 25th Conf. Coastal Engrg., A.S.C.E.*, Vol. 1, pp. 796-814.
- Chen, T. G. (1961). "Experimental Studies on solitary wave reflection along a straight sloped wall at oblique angle of incidence." *U.S. Beach Erosion Board Tech. Mem.* 124.
- Cho, Y. J. (2019). "Numerical analysis of the beach stabilization effect of an asymmetric ripple mat." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 4, pp. 28-39.
- Cho, Y. J. and Bae, J. H. (2019). "On the feasibility of freak wave formation within the harbor due to the presence of Infra-gravity waves of bound mode underlying the ever-present swells." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 1, pp. 17-27.
- Cho, Y. J. and Kang, Y. K. (2017). "The Effect of Skewness of Nonlinear Waves on the Transmission Rate through a Porous Wave Breaker." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 29, No. 6, pp. 369-381.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*.
- del Jesus, M., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2012). "Three-dimensional interaction of waves and porous structures. Part I: Numerical model formulation." *Coast. Eng.*, Vol. 64, pp. 57-72.
- Forcheimer, P. (1901). "Wasserbewegung durch Boden." *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, Vol. 45, pp. 1782-1788.
- Goda, Y. (1985). *"Random Seas and Design of Maritime Structures."* University of Tokyo Press.
- Hammack, J., Scheffner, N. and Segur, H. (1989). "Two-dimensional periodic waves in shallow water." *J. Fluid Mech.*, Vol. 209, No. 1989, pp. 567-589.
- Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A. (1983). "A parabolic equation for the combined refraction diffraction of Stokes waves by mildly varying topography." *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 453-466.
- Kirby, J. T. (1990). "Modelling shoaling directional wave spectra in shallow water." *Proc. 32th. Conf. Coastal Engrg., A.S.C.E.*, pp. 796-814.
- Lara, J. L., Garcia, N. and Losada, I. J. (2006). "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures." *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 395-417.
- Lara, J. L., Ruju, A. and Losada, I. J. (2011). "Reynolds Averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach." *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 467, pp. 1215-1242.
- Losada, I. J., Gonzalez-Ondina, J. M., Diaz, G. and Gonzalez, E. M. (2008). "Numerical simulation of transient nonlinear response of semi-enclosed water bodies: model description and experimental validation." *Coastal Engineering*, Vol. 55, No. 1, pp. 21-34.
- Hajime Mase H., Memita, T., Yuhi, M. and Kitano, T. (2002). "Stem waves along vertical wall due to random wave incidence." *Coastal Engineering*, Vol. 44, No. 4, pp. 339-350.
- Melville, W. K. (1980). "On the Mach reflection of solitary waves." *J. Fluid. Mech.*, Vol. 98, pp. 285-297.
- Nielsen, A. H. (1962). "Diffraction of periodic waves along a vertical breakwater for small angles of incidence." Univ. of California, Berkely, IRE Tech. Rep. HEL-1-2. 1962.
- Peregrine, D. H. (1983). "Wave jumps and caustics in the propagation of finite-amplitude water waves." *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 435-452.
- Perroud, P. H. (1957). "The solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence." Univ. of California, Berkeley, IRE Tech. Rep. 99-3.
- Polubarinova-Kochina, P. Ya. (1962). *"Theory of Ground Water Movement."* Princeton University Press.
- Schäffer, H. A. and Klopman, G. (2000). "Review of multidirectional active wave absorption methods." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, pp. 88-97.

- Torres-Freyermuth, A., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2010). "Numerical modelling of short- and long-wave transformation on a barred beach." *Coastal Engineering*, Vol. 57, pp. 317-330.
- Wiegel, R. L. (1964a). "*Oceanographical Engineering, Englewood Cliffs.*" New Jersey: Prentice Hall.
- Wiegel, R. L. (1964b). "*Water wave equivalent of Mach-reflection.*" *Proc. 9th. Conf. Coastal Engng. A.S.C.E.*, Vol. 6, pp. 82-102.
- Woo, J. H. (2016). "*Numerical analysis of stem wave control effect of curvy slit caisson using OpenFoam.*" Master's thesis, University of Seoul, seoul, Korea.
- Yue, D. K. P. and Mei, C. C. (1980). "Forward diffraction of Stokes waves by a thin wedge." *J. Fluid Mech.*, Vol. 99, part1, pp. 33-52.