

경사식 방파제의 제체 파압 결정을 위한 수치해석 Numerical Analysis on the Determination of the Wave Pressure Acting on Rubble Mound Breakwater

성상봉¹, 전인식²

Sang Bong Seong¹ and In Sik Chun²

1. 서 론

경사식 방파제의 안정성은 임의 활동면에서의 활동과 지반의 침하에 대하여 평가되어야 하며 이를 위해서는 제체에 작용하는 파력을 정확히 결정할 필요가 있다. 이에 대한 파력 성분을 결정하기 위해서는 각 수심의 파압에 대한 정확한 정보가 필요하다.

본 연구와 동일한 목적에 이전 연구에서 성 등 (2003, 2003(I), 2003(II))이 경사면에서 발생하는 비선형 파동장을 Navier-Stokes 방정식으로 해석하고 자유수면변화를 VOF 기법으로 처리하는 수치해석방법 이용하여 이에 대한 적용성 여부를 검토하여 기존의 이론식과 잘 일치함을 확인하였다. Goda(2000)가 선형 중복과 공식을 변형하여 방파제 전사면에 작용하는 파압을 계산하기 위하여 제시한 간략식과 비교한 바 있다. 이 연구는 Goda(2000)의 간략식과 동일한 가정인 불투과 사면 및 비쇄파 등을 포함하여 비교하였으며, 간략식의 계산 결과가 수치 해석한 결과보다 1.7배 크음을 보인 바 있다. 또한 한국 해양연구원(2002)에서 공극 $n=43\%$ 로 수행한 수리실험 결과와 수치해석 결과와 비교하였으며, 수리실험 결과가 다소 작게 나타났으며, 이에 대한 차이는 제체 내부 공극의 차이로서 결론을 내렸다. 그리고 정수면 무차원 최대파압($P_s/(\rho gH)$)과 ϵ 의 관계에 대하여 고찰한 결과, 이들 간에는 선형관계가 존재함을 알 수 있었다.

방파제에 대한 수평파력성분과 연직파력성분 그

리고 간극수압 등을 정확히 계산하기 위해서는 경사식 방파제를 투과체로 보고 제체내부에서의 파동장을 결정하여야 한다. 지금까지 내부파동장은 선형방정식에 의존하여 해석하였다. 이는 제체 내부에서의 수치해석으로 예측이 매우 어려운 전사면에서의 강 비선형 파랑변형에 크게 의존하기 때문에 방파제 전사면에서 발생하는 파압을 수리실험을 수행하여야 하는 불편이 따른다.

본 연구에서는 VOF 기법을 이용하여 경사식 방파제의 내부 파동장 및 제체파력을 구할 수 있으나 본 방법은 아직 쇄파 등의 비선형 파동 작용에 따른 제체내부의 난류성 흐름을 정확히 예측하는데 한계가 있으며, 또한 계산시간이 매우 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서, 실무에서의 사용편의를 위하여 VOF 방법을 적용하여 공극 전사면에서의 파압정보에 대한 실험식을 도출하고자 한다.

2. 이론적 전개

2.1 전사면 파압결정

여기서, 사용된 VOF기법의 수치해석 프로그램은 공극매체를 포함한 2차원 파동장을 해석하기 위하여 Navier-Stokes 방정식에 난류성 마찰저항을 가미하고 파동발생을 위하여 조파소오스항을 첨가한 다음과 같은 지배방정식을 사용하였다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_x w)}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

- 운동 방정식

1 건국대학교 토목공학과 박사과정

2 건국대학교 토목공학과 교수

$$\begin{aligned} & \lambda_\nu \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda_x u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda_z w u)}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (2 \frac{\partial u}{\partial x})] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} [\gamma_z \nu_e (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] \\ &- D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_\nu \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda_x u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda_z w w)}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} [\gamma_z \nu_e (2 \frac{\partial w}{\partial z})] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})] \\ &- D_z w + S_w - R_z - \gamma_\nu g \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, x, z 는 수평, 연직 좌표, u, w 는 유속의 수평 및 연직 성분, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν_e 는 동점성계수와 와점성계수의 합, g 는 중력가속도, γ_ν 는 공극률, γ_x, γ_z 는 수평 및 연직방향의 면적 투과율이다. D_x, D_z 는 에너지 감쇄대를 위한 계수, S_p, S_u, S_w 는 조파 source항이다.

와점성계수 ν_t 는 $k-\epsilon$ 모델에 의하여 결정된 난류운동에너지 k 와 난류에너지 소멸율 ϵ 값을 이용하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\nu_t = C_d \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서, C_d 는 실험상수이다. C_d 을 포함하여 $k-\epsilon$ 모델에서 사용되는 여러 실험상수 값들은 Lemos(1992)에 자세히 기술되어 있다.

자유표면 해석모델은 범용성이 높고, 복잡한 표면 형상의 해석이 가능한 VOF법을 적용한다. 이는 계산 격자 내에 유체 체적의 점유율을 표시하는 VOF 함수 F 가 적용된 것이며, F 에 대한 이송방정식은 다음 식과 같다.

$$\gamma_\nu \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x u F)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w F)}{\partial z} = S_F \quad (5)$$

여기서, S_F 는 조파 Source에 대한 항이다. 수면 변위는 F (Volume Fraction)함수의 추적을 통하여 결정하게 된다.

전사면 파압은 식 (5)에 의하여 자유수면을 연속적으로 추적하고 식 (1)~(3)을 해석하여 압력 p 을 구한 다음, 자유수면 이하 정수압 성분을 제거하여 결정하면 된다.

3. 수치해석 계산 조건

수치해석에 사용된 방파제 제원은 Fig. 1과 같다. 구조물 전면의 사면경사는 $\cot\theta = 1.5, 2.0$ 의 두 가지 경우로 검토하였다.

Fig. 2는 본 계산에 이용된 수치파동수조이며, 규모는 28m(L) x 0.6m(H)이다. 수조의 격자 구성은 $\Delta x = 4\text{cm}, \Delta z = 2\text{cm}$ 이며, 계측시간 간격은 $\Delta t = 0.002$ 초이다. 수치실험에 이용된 파는 규칙파로서 파고 0.08~0.16 cm, 주기 1.0 ~ 2.2초의 총 24조건을 시도하였다. 해석에 사용된 수심은 공히 0.35m 이다. 전사면 파압은 전사면 상에서 4~6cm 간격으로 총 9점 (Fig. 1에서 $G_1 \sim G_9$)을 계산하였다.

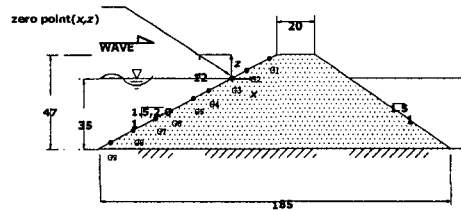


Fig. 1. Breakwater model used in the numerical analysis (unit : cm).

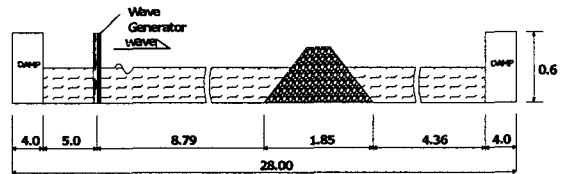


Fig. 2. Numerical wave flume (unit : cm).

4. 전사면 파압의 실험식 제시

Fig. 3은 VOF기법으로 해석한 파동장 형태를 보이고 있다.

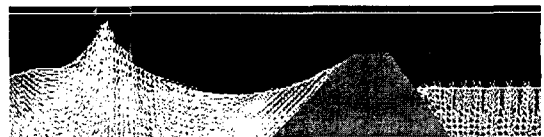


Fig. 3. Wave pattern by the VOF method.

경사면에서의 쇄파특성은 식 (6)에 의하여 주어진 쇄파지수 (surf similarity parameter) ξ 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다 (Sorensen, 1993).

$$\xi = \tan \theta / \sqrt{H_1 / L_0} \quad (6)$$

여기서, H_1 와 L_0 는 각각 경사면 기부에서의 입사파고와 심해파 파장을 의미한다.

수치해석을 통하여 무공극 제체과 유공극 제체에 대한 최대파압의 실험식을 각각 제시하였다. 여기서, 쇄파지수 범위는 2.5에서 6.5까지로 한다. Table 1의 쇄파조건 (Ahrens, et al., 1993)을 참조하면 본 쇄파지수 범위는 비쇄파 및 전이영역에 해당된다. 본 수치해석에서는 쇄파영역에서의 수치해석도 시도하였으나 파압의 분산이 매우 심한 것으로 나타났기 때문에 분석에서 제외하였다.

Table 1. Breaking wave criteria on sloped structure.

쇄파지수	쇄파 조건
$\xi \leq 2.5$	쇄 파
$2.5 \leq \xi \leq 4.0$	전 이 영 역
$\xi \geq 4.0$	비 쇄 파

4.1 무공극 제체의 전사면 파압 실험식

무공극 제체에 대한 각 수심에서의 무차원 최대 파압 ($P/\rho gH$), 수심비 (d'/d) 그리고 쇄파지수 ξ 와의 상관관계를 정수면 이상과 정수면 이하로 구분하여 식 (7)과 식 (8)으로 제시하였다. 여기에서, d' 은 바닥으로부터의 연직거리이다 (Fig. 4 참조).

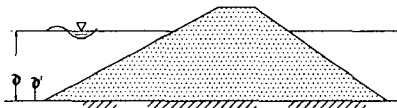


Fig. 4. Explanation of depth ratio (d'/d).

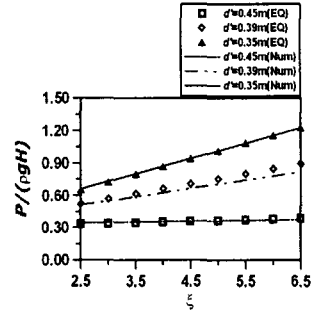
- 정수면 이상

$$P = [a \times (\xi - 2.5) + b] (\rho gH) \\ a = -0.460 \times (d'/d) + 0.605 \\ b = -1.108 \times (d'/d) + 1.759 \quad (7)$$

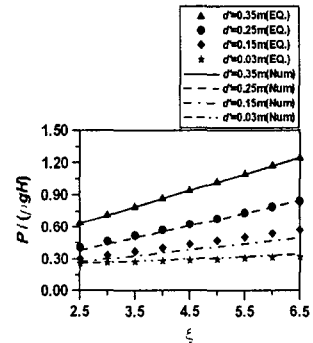
- 정수면 이하

$$P = [a \times (\xi - 2.5) + b] (\rho gH) \\ a = 0.148 \times (d'/d) + 0.004 \\ b = \exp[0.942 \times (d'/d)^2] \times 0.254 \quad (8)$$

Fig. 5는 식 (7)과 식 (8)의 파압 실험식의 결과 (EQ로 표시)와 각 수심에서의 수치해석 결과(Num으로 표시)를 비교 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 정수면 이상과 이하에서 수치해석 결과와 실험식 결과가 잘 일치하였다. 여기서, 정수면은 $d'=0.35m$ 이다.



(a) above SWL



(b) below SWL

Fig. 5. Comparison of experimental formula with numerical data.

4.2 유공극 제체의 전사면 파압 실험식

이전 연구인 성 등(2003(II))에서 보였던 바와 같이 정수면에서의 무공극 제체에 대한 수치해석의 계산파압은 유공극 제체에 대한 수리실험 결과 (해양연구원, 2002)를 상회하였다. 이에 수치해석에서의 공극률을 수리실험과 동일하게 $n=43\%$ 로 하여 정수면에서의 파압을 계산하고 이를 수리실험 결과와 비교한 결과, Fig. 6에서 보는 바와 같이 상당히 일치하였다.

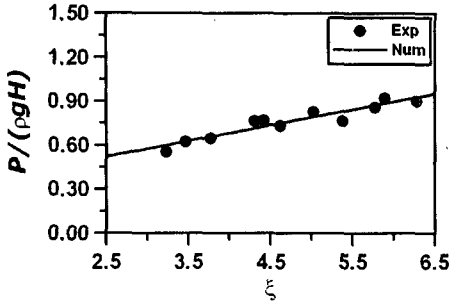


Fig. 6. Comparison of wave pressure at SWL for numerical analysis and hydraulic experiment (Porous breakwater).

상기 결과를 토대로 공극률 43%의 유공극 체체에 대한 실험식을 정수면 이상과 이하로 구분하여 식 (9)과 식 (10)으로 제시하였다.

- 정수면 이상

$$P = [a \times (\xi - 2.5) + b] (\rho g H)$$

$$a = -0.230 \times (d'/d) + 0.325$$

$$b = -1.595 \times (d'/d) + 2.125 \quad (9)$$

- 정수면 이하

$$P = [a \times (\xi - 2.5) + b] (\rho g H)$$

$$a = 0.088 \times (d'/d) + 0.012$$

$$b = \exp[0.691 \times (d'/d)^2] \times 0.267 \quad (10)$$

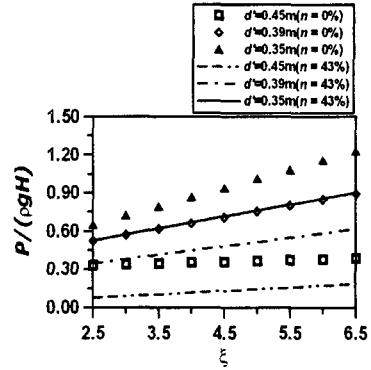
Fig. 7은 무공극 실험식의 결과와 유공극 실험식의 결과를 비교한 것이다. 무공극에 대한 파압이 유공극에 대한 파압보다 큰 것을 볼 수 있다.

5. 파압위상 실험식 제시

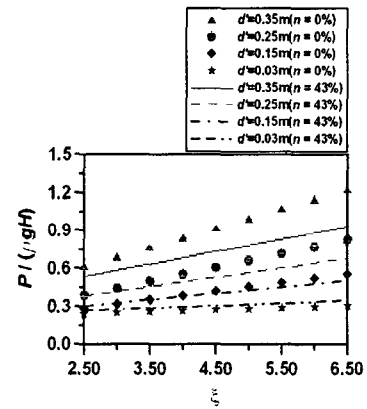
경사면상 수심지점에 따라 최대파압의 발생시간은 차이가 있다. 이에 지점 별 파압위상 변화의 실험식을 식 (11)으로 도출하였다. 파압위상은 방파제의 전지부 (toe)에서의 파압시그널을 기준으로 한 것이다. 본 파압위상의 실험식은 앞으로 수행할 연구에서의 선형파 내부파동장 수치해석 즉, 파력을 결정하기 위한 입력 데이터이다. 이에 입력력은 정수면 이하에서의 위상값만 필요로 하므로, 본 연구에서는 정수면 이하에 대해서만 실험식을 제시하였다.

그림 8은 정수면하 2개소, 즉, 정수면에서 8.6cm, 17.2cm인 곳에 대하여 실험식(EQ)의 적용 결과 (EQ로 표시)와 수리실험 (해양연구원, 2002)

결과(Exp로 표시)를 비교한 것이다. 이 두가지 결과가 서로 잘 일치함을 볼 수 있다.



(a) above SWL



(b) below SWL

Fig. 7. Comparison of porous and non-porous breakwater with respect to the peak wave pressures on frontal slope.

$$Phase(rad.) = a \times (\xi - 2.5) + b$$

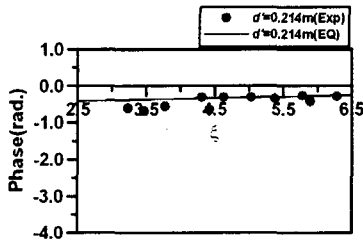
$$a = 2\pi[-0.030 \times (d'/d) + 0.029]$$

$$b = 2\pi[0.029 \times (d'/d) - 0.281] \quad (11)$$

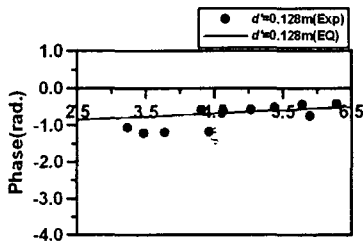
6. 결론 및 제안

경사식 방파제의 체제안정성을 분석하기 위해서는 방파제에 작용하는 파력을 결정하여야 한다. 파력 결정을 위해서는 각 수심에서의 정보가 필요하다. 본 연구에서는 전사면에서 발생하는 비선형 파랑변형을 수치해석을 통하여 결정하였으며, 대상 파랑조건은 일반적으로 경사면에서의 비쇄파 영역과 쇄파이전의 전이역에 해당되는 파랑조건을

고려하였다. 전사면 파압은 VOF 기법에 의하여 결정하였으며 이들을 기존의 간략식과 수리실험결과와 비교하였으며 세부 결론은 다음과 같다.



(a) $d'=0.214m$



(b) $d'=0.128m$

Fig. 8. Comparison of experimental formula and hydraulic experiment with respect to the phases of pressure signals.

- 정수면 파압의 최대값을 계산하고 이를 해당 쇄파지수(ξ)에 대하여 도시한 결과, 무차원 파압은 쇄파지수가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 발견하였으며 수리실험결과와 잘 일치하였다.
- 경사면 상 파압은 정수면에서 최대값을 보이고 상하로 감소함을 확인하였으며, 정수면 위와 아래로 구분하여 임의 깊이에서의 최대파압을 계산할 수 있는 무차원 관계식을 제시하였다.
- 전사면 파압의 지점별 위상변화도 쇄파지수와 선형관계를 보이며 수리실험결과와 잘 일치하였다. 임의 지점에서의 파압위상을 계산할 수 있는 무차원식을 제시하였다.

본 연구는 방파제 전사면에서 비쇄파 발생조건을 대상으로 한 것이다. 따라서, 본 연구에서 제시한 전사면 파압의 실험식은 비교적 온건한 파랑의 입사 시에 적용가능하다. 방파제의 설계 파에 해당되는 파랑이 내습할 시에는 경사면에서 상당히 격렬한 쇄파성 파압이 작용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2003년도에 수행된 “경사식 방파제의 안정성 결정을 위한 수치해석” 연구과제의 결과 중 일부를 발췌하여 수록한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

성상봉, 전인식, 이달수 (2003). 경사식 방파제의 전사면 파압에 대한 파동장 해석, 한국해양·해양공학발표논문집, 제 14권, pp.98-102.

성상봉, 전인식, 이달수 (2003(I)). 경사식 방파제의 전사면 파압에 대한 고찰(I. 수치파동수조의 적용), 大韓土木學會論文集, 대한토목학회, 제 23권, 제 6B호, pp. 575-579.

성상봉, 전인식, 이달수 (2003(II)). 경사식 방파제의 전사면 파압에 대한 고찰(II. 실험식의 제안), 大韓土木學會論文集, 대한토목학회, 제 23권, 제 6B호, pp. 581-585.

한국해양연구원 (2002). 경사식 방파제의 최적설계 기술개발(III), 해양수산부.

Ahren, J.P., Seelig, W.N., Ward, D.L., and Allsop, W. (1993). Wave Runup on and Wave Reflection from Coastal Structures, ASCE, proceedings, waves '93, pp. 489-501.

Goda, Y. (2000). 土木講座 海岸·港灣(이의충역). 지양사, pp.284-286.

Lemos, C.M. (1992). Lecture Notes in Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, U.S.A, pp.22-35.

Sorensen, R.M. (1993). Basic Wave Mechanics, John Wiley & Sons, Inc, pp.189-194.