

경사식 방파제의 전사면 파압에 대한 파동장 해석 Analysis Wave Field on the Wave Pressure acting on the Frontal Slope of Rubble Mound Breakwater

성상봉¹ · 전인식¹ · 이달수²

Sang bong Seong¹, In sik Chun¹ and Dal soo Lee²

1. 서 론

지금까지 실무에서는 경사식 방파제 적정 단면 결정시 피복재 산정 및 설계파에 대한 파력을 산정하여 상치콘크리트 구조물의 안정성을 검토하는 것이 전부였다. 하지만 현장에서 발생하는 상황은 더 많은 변수들이 작용하는 것을 보여 주고 있다. 예를 들면 파에 의하여 발생하는 투과파 및 월파로 제체의 내부 및 배면 석재의 이탈이 발생하는 경우는 익히 보아 왔던 일이지만, 반대로 월파가 발생하지 않았는데도 불구하고 제체의 침하와 배면의 석재에 이탈 즉 세굴이 발생하는 경우도 있다. 접안시설에도 같은 경우가 발생하는 경우가 있는데, 즉, 안벽 구조물 배면에 포장구간의 구성물이 이탈되어 파손되는 경우이다. 이는 내부 제체에 발생하는 파동장이 그 원인이라 할 수 있다.

본 연구에서는 경사식 방파제에 안정성에 영향을 주는 요소중에서 방파제 제체에 작용하는 파력을 다루고자 한다. 파력 성분에는 수평성분과 연직 성분이 동시에 작용한다. 연직 성분은 제체의 침하에 영향을 주며, 수평성분은 수평 활동 파괴의 원인이 된다.

이전 연구에 박 등(2002)이 경사식 방파제의 내·외부 파동장을 해석하여 제체 내부에서의 간극수압을 계산할 수 있는 선형파 수치해석 기법을 제시하였으나, 실제 방파제 전사면에 발생하는 파랑의 변형이 비선형으로 나타나기 때문에 해석에

한계가 있었다. 이를 개선하기 위하여 전 등(2002)은 전사면 동수압(Fig. 1 참조)을 수치실험으로 결정하고 그 결과를 내부 파동장의 수치해석에 입력하는 방식을 채택하였다. 하지만, 본 방법에서는 수치실험과 수치해석을 연계하여 수행하여야 하기 때문에 실용적 측면에서 수치모델의 효용성이 반감되는 단점이 있다. 해안구조물의 파압에 대한 이론은 지금까지 다수의 연구가 이루어져 많은 경험식 및 이론이 제시되어 왔음에도 불구하고, 경사식 방파제의 전사면 파압에 대한 체계적 연구 결과는 거의 전무한 실정이다. 현재로서는 선형중복파 이론에 근거한 Goda의 간략식(항만 및 어항 설계기준, 1999)이 있지만 Goda 역시 그의 경험식이 정확하지 않다고 지적한 바 있다(Goda, 2000).

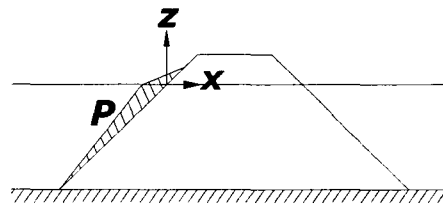


Fig. 1. 경사식 방파제의 전사면에 작용하는 동수압.

- 1 건국대학교 토목공학과 (Corresponding author: Sang Bong Seong, Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea. ssb914@chol.com)
- 2 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 책임 연구원(Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

상기와 같이 전사면에 대한 파압공식의 전무한 것은 전사면에 발생하는 쇄파 등을 포함하는 강 비선형 파랑변형의 이론적 예측이 매우 어렵다는 점에 기인한다. 본 연구에서는 방파제 전사면 파압을 계산할 수 있는 수치해석을 시도하였으며, 유체의 점성 및 난류특성을 포함하고 있는 Navier-Stokes 방정식을 그대로 해석하는 방식을 취하였다. 사용 수치모델은 최근 일본에서 개발된 CADMAS-SURF(일명, 수치파동수로, 沿岸開発技術研究センター, 2001) 프로그램을 사용하였다. 본 수치해석 기법은 수면 추적을 위하여 VOF (Volume Of Fluid) 알고리즘을 사용하고 있다.

2. 수치파동수조의 적용성 검토

2.1 이론적 배경

본 수치파동수로의 기초방정식은 2차원 비압축성 점성유체를 대상으로 한 연속방정식 식(1)과 Navier-Stokes 방정식에 공극 매체에서의 투과성 개념을 반영한 운동방정식 식(2)~식(3)으로 한다.

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

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = \\ - \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (2 \frac{\partial u}{\partial x})] \\ + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = \\ - \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} [\gamma_z \nu_e (2 \frac{\partial w}{\partial z})] \\ + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, γ_v 는 공극률, γ_x, γ_z 는 수평 및 연직 방향의 면적 투과율이다. D_x, D_z 는 에너지 감쇄 대를 위한 계수, S_p, S_u, S_w 는 조파 Source항이다.

와점성계수 ν_e 는 $K-\epsilon$ 모델에 의하여 결정된 난류운동에너지 K 와 난류에너지 소멸율 ϵ 값을 이용하여 식(4)와 같이 결정할 수 있다.

$$\nu_e = C_d \frac{K^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서, C_d 는 실험상수이다.

자유표면 해석모델은 복잡한 표면 형상의 해석 가능한 VOF (volume of fluid)법을 적용한다. 이는 계산 셀내에 유체 체적의 점유율을 표시하는 VOF 함수 F 가 적용된 것이며 F 에 대한 이송 방정식은 식(5)와 같다.

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

여기서, S_F 는 조파 Source에 대한 항이다.

계산방법은 식(1)~식(3)을 반복 계산하여 매 시간간격 Δt 마다 미지수인 u, w, p 를 결정하며 이들을 난류모델에 입력하여 와점성계수를 구한다. 그리고 u, w 를 F 의 이송방정식 식(5)에 입력하여 수면곡선을 추적한다. 와점성 계수는 식(2)과 식(3)에 입력하여 상기와 같은 계산을 반복 수행한다. 소정의 조파 Source를 입력하면 수치 수조내에 파동장은 상기와 같은 u, w, p, F 로 결정되며 소정의 계산종료 시간까지 반복계산을 계속한다.

2.2 적용성 검토

본 검토의 목적은 CADMAS-SURF 프로그램 모델의 정확성 검증을 위하여 기존 이론식과 비교 분석하고자 한다. 이에 쇄파 조건인 Goda (1985) 식으로 검증하였다. 실험 제원은 Table 1과 같으며, 실험 대상 구조물은 Fig. 2와 같이 혼성 방파제로 하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 CADMAS-SURF와 Goda식의 결과들은 서로 상당히 일치하는 경향을 보이고 있다. 적용 결과를 볼 때, 본 연구에 적용하고자 하는 CADMAS-SURF의 파압에 대한 정확도가 매우 양호한 것으로 판단할 수 있다.

Table 1. 수치실험 제원

구분	실험 제원
수심, h (m)	12.0
입사파고, H (m)	5.0
주기, T (sec)	10.0

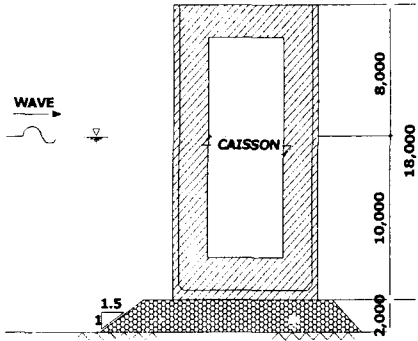


Fig. 2. 혼성방파제 형상.

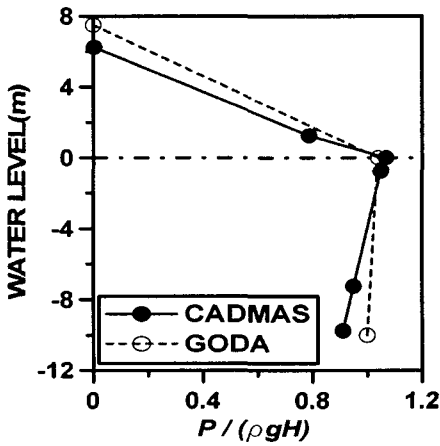


Fig. 3. CADMAS-SURF와 실험 결과 비교.

3. 경사식 방파제의 파압 검토

CADMAS-SURF를 이용하여 경사식 방파제의 전사면 파압을 계산하였으며, 전 등(2002)의 수리실험결과와 비교하였다.

3.1 계산조건

계산에 사용된 방파제는 전 등(2002)의 수리실험에서 사용하였던 방파제 모형과 동일하게 하였다(Fig. 4 참조). 전면경사와 후면경사는 각각 1:2와 1:1.5로 하였으며, 전사면에는 T.T.P.를 2층 난적(두께 9.3 cm)으로 피복하였다. 구조물 내부 체체 공극률은 49.8%로 하였다. 또한 수치입력의 저항계수 및 관성력계수의 적용은 T.T.P.에서 0.9, 1.5로 하였으며, 체체의 내부는 0.5, 1.5로 하였다.

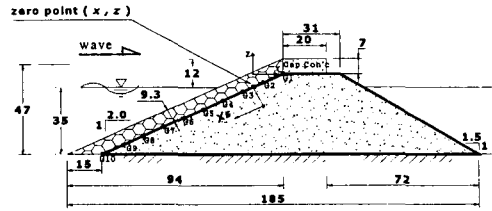


Fig. 4. 파압계의 계측 위치와 방파제 형상 (unit:cm).

수치해석에 이용된 파는 모두 규칙파로서 파고 H 를 8 cm, 12 cm 그리고 16 cm의 세가지로 변화시켰으며 파 주기는 $H = 8$ cm에 대해서는 주기가 1.2초와 1.6초, $H = 12$ cm에 대해서는 1.6초, 그리고 $H = 16$ cm에 대해서는 1.6초로 총 4조건을 시도하였다. 해석에 사용된 수심은 공히 0.35 m였다. 전사면 파압은 전사면 피복층 바로 밑에서 9 cm 간격으로 총 10점 (Fig. 4에서 $G_1 \sim G_{10}$)을 계산하였다.

Fig. 5는 계산에서 사용한 수치파동수조이며, 규모는 28 m (L) x 0.6 m (H)이다. 수치파동수조의 격자 구성은 $\Delta x = 4$ cm, $\Delta z = 2$ cm의 등간격으로 하였으며 계산시간 간격은 $\Delta t = 0.002$ sec로 하였다.

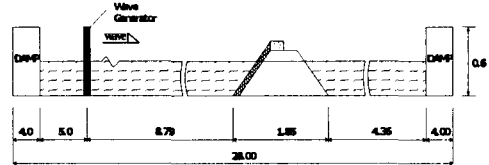


Fig. 5. 조파수조 모형과 방파제 배열(unit:cm).

3.2 결과 및 분석

Fig. 6은 수치해석에 의하여 계산된 전사면 및 체체내부에서의 순차적 파동장을 보여주고 있다. 그림에서 화살표 표시는 수립자의 운동방향(축척 비교례)을 보여준다. 사면에서의 쳐오름과 상치 콘크리트 너머로의 월파가 잘 재현됨을 볼 수 있다. Fig. 7의 분석결과는 파압 시그널의 진폭과 위상이다. 진폭은 파압시그널의 최대치와 최소치를 비교하여 분석구간내 평균값으로 결정하였으며, 위상은 동일 입사파 조건 하에서 전사면 파압시그널을 비교하여 전지부(Toe : G_{10})에서의 시그널을 기준으로 정하였다.

Fig. 7은 전 등(2002)의 수리실험 결과와 CADMAS-SURF의 적용결과를 이용하여 사면 거리 X_s (Fig. 4 참조)에 따른 파압의 진폭과 위상의 변화를 비교한 것이다. 위상에 대한 계산치가 실험치보다 작게 나온 Fig. 7(a)와 전반적으로 정수면 부근에서 파압진폭의 계산치가 실험치보다 다소 작게 나온 경우를 제외하고는 대체적으로 계산치와 실험치들이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 다소 부분적인 불일치는 수리실험에서 조파수조에 공통적으로 발생하는 장주기파의 영향, 그리고 정수면에 설치되는 스트레인저 게이지식 파압계가 공기에 간헐적으로 노출됨에 따른 실험 오차에 기인된 것으로 판단된다.

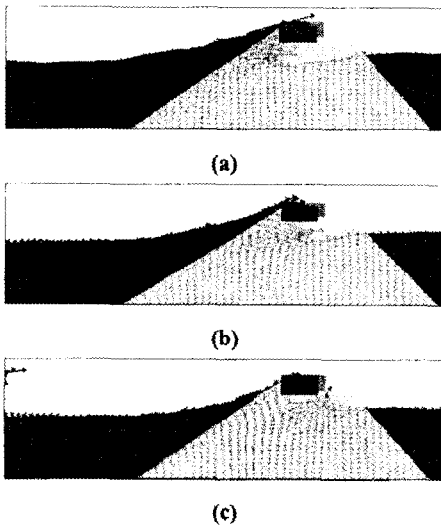
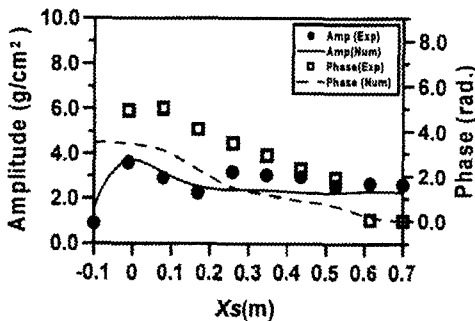
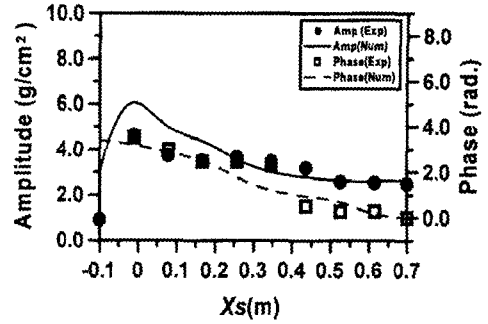


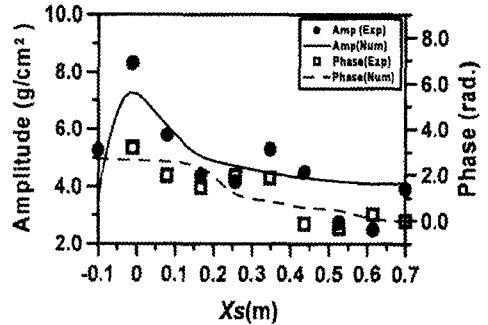
Fig. 6. CADMAS -SURF 프로그램으로 계산한 파동장.



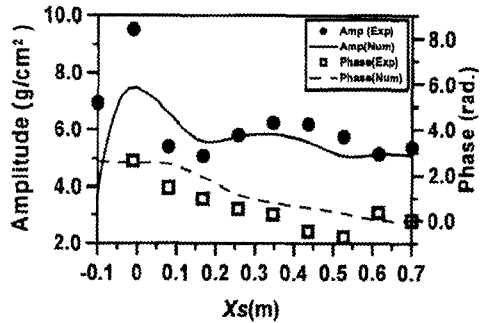
(a) $H=8\text{cm}$, $T=1.2\text{sec}$



(b) $H=8\text{cm}$, $T=1.6\text{sec}$



(c) $H=12\text{cm}$, $T=1.6\text{sec}$



(d) $H=16\text{cm}$, $T=1.6\text{sec}$

Fig. 7. 전사면 파압의 진폭과 위상의 변화.

4. 결 론

경사식 방파제의 전사면에서 발생하는 강비선형 파랑변형 및 전사면 동수압을 계산하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 직접 해석하며 VOF 기법을 이용하여 쇄파성 자유수면을 추적할 수 있는 수치해석 프로그램을 적용한 결과는 다음과 같다.

- 수치모델의 적용성을 검토하기 위하여 직립 구조물에 대한 중복파 조건과 쇄파조건을 각각 설정하여 수치해석을 수행한 결과, 기존의 이론식의 계산결과와 잘 일치하였다.
- 경사식 방파제의 전사면 상 파압진폭과 위상의 변화를 계산하여 기존의 수리실험결과와 비교한 결과, 부분적으로 다소의 차이는 있었으나 파압계측 수리실험의 오차범위 내에서 이들의 일치정도는 대체적으로 양호한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 건국대학교 교내 학술 진흥 연구비에 의하여 수행되었음을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 박현주, 전인식, 이달수, 2002. 경사식 방파제의 수리특성 결정을 위한 수치해석. 한국해안·해양공학회지, 14권(1):19-33.
- 전인식, 박현주, 이달수, 2002. 경사식 방파제의 간극수압 결정을 위한 수치해석. 한국해안·해양공학회지, 14권(2):128-135.
- 항만 및 어항 설계기준, 1999. 사단법인 한국항만협회.
- 沿岸開發技術研究センター, 2001. CADMAS-SURF 數値波動水路の研究・開發, pp.10-29.
- Goda, Y., 1985. Random Seas and Design of Maritime Structures, *University of Tokyo press, Japan*, pp.113-117.
- Goda, Y., 2000 土木講座 海岸 港灣(이의충역). 지양사, pp.284-286.