

연직판형 부소파제의 수리학적 특성과 동적거동

손병규* · 양용수 · 정성재 · 신종근 · 김도삼¹
국립수산과학원 수산공학팀, ¹한국해양대학교 건설환경공학부

Hydraulic Characteristics and Dynamic Behaviors of Floating Breakwater with Vertical Plates

Byung-Kyu SOHN*, Yong-Su YANG, Seong-Jae JEONG, Jong-Keon SHIN and Do-Sam KIM¹

Fisheries Engineering Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea

¹Division of Civil And Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

In order to develop a floating breakwater, which can efficiently control long period waves, vertical plates are attached in pontoon. Wave control and dynamic behaviors of the newly developed vertical plates type are verified from numerical analysis and hydraulic experiment. As a result, for the wave control and energy dissipation, the newly developed vertical plates type is more efficient than the conventional pontoon type. For the floating body motion, the wave transmission, depending on incident wave period, is decreased at the natural frequency. Dimensionless drift distance has similar trend of the reflection rate of wave transformation near natural frequency except maximum and minimum values. Dimensionless maximum tension is 17 percent of the weight of floating breakwater in case of the conventional pontoon type and 18 percent or 14 percent in case of the newly developed vertical plates type. Thus, it is shown that the wave control is improved by the vertical plates type. In addition, by adjusting the interval of the front and back vertical plate, we would control proper wave control.

Key words: Wave control, Floating breakwater, Dynamic behaviors, Natural frequency

서론

최근, 해양·해안이 갖는 무한한 공간의 확보 및 이용과 개발을 위한 인프라의 구축 등과 더불어 연안역의 보호를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히, 고파랑 및 해안침식 등과 같은 연안재해를 방지하는 대표적인 구조물로 중력식 방파제가 중요한 역할을 하고 있지만, 생활오수 및 수산업 관련작업에 의한 오·폐수의 항내유입, 어항내·외로의 흐름차단 및 폐어구의 수중방치 등에 의해 수질환경은 악화되고 있다. 또한, 좁은 어장내 양식어업권의 증가로 사료의 유실 및 생사료로 인해 연안어장환경이 황폐화되고 있다.

따라서, 항내수질문제를 개선·유지하며, 친환경 및 경제성을 갖춘 파랑제어구조물의 요구가 대두되고 있다. 이의 일례로 부유식 구조물을 들 수 있으며, 일본의 경우 양식장의 조성, 어장의 확장 등의 목적으로 어항내 또는 어장주변에 시공 사례를 많이 볼 수 있고, 국내에서도 마산시 원전어항에 부소파제를 처음으로 시공(MOMAF, 2002) 중에 있다.

기존 형식의 부유식 구조물에서 제어하기 어려운 장주기파랑을 효율적으로 제어할 수 있는 부소파제의 개발을 위해 폰툰 전후에 연직판을 부착하여 파랑제어기능 및 동적거동에 대한 수치해석과 수리모형실험으로부터 그 특성들을 비교·검토하였다.

재료 및 방법

부소파제의 개발에 있어서, 2차원적인 부소파제의 단면형상과 운동변위 및 계류라인의 장력 등은 중요한 요소이며, 이는 단면 2차원수치해석과 수리모형실험으로 산정될 수 있다. 특히, 부소파제의 효과적인 단면형상을 단면 2차원수치해석으로 결정하는 것은 비용과 시간의 절감면에서 중요하며, 예측하지 못한 영향인자를 파악하기 위하여 반드시 수리모형실험이 수행될 필요가 있다. 따라서, 특이점분포법(source distribution method; Kim et al., 2004)으로 파랑제어기능과 동적거동을 산정하였으며, 수리모형실험으로 수치해석법의 타당성을 검증하였다.

특이점분포법

특이점분포법은 파동장의 지배방정식과 구조물표면에서의 경계조건을 제외한 모든 경계조건을 만족하는 Green함수를 적용하여, 구조물표면에 분포시키는 파원강도 분포함수를 매개로 하는 경계적분방정식을 수치적으로 풀어 속도포텐셜을 산정하는 해석법으로 복잡한 형상의 구조물에도 쉽게 적용된다.

감쇠파이론

Fig. 1에 나타내는 바와 같이 부소파제의 주변파동장을 영역 I에서 영역 III까지 3영역으로 분할한다. 여기서, 수심은 각 영역에서 상이하여도 관계없다. 영역 I은 입사파와 반사파

*Corresponding author: bksohn@nfrdi.re.kr

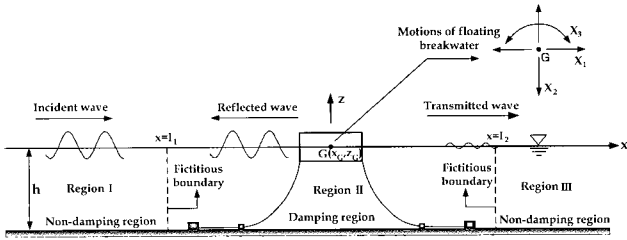


Fig. 1. Coordinate system for analysis.

가 공존하며, 영역 III은 전달파만이 존재하는 영역으로 각기 비감쇠영역으로 한다. 영역 II는 구조물에 의한 마찰, 흐름의 박리 및 와류 등으로부터 발생하는 에너지소산이 존재하므로 에너지소산을 근사적으로 고려하기 위해 감쇠파영역으로 설정된다(Kim et al., 2004).

감쇠파영역에는 유속에 비례하는 저항이 작용하는 가상적인 유체가 설정되어 있는 것으로 하면 그의 선형운동방정식은 다음의 식으로 표현된다(Sollitt and Cross, 1972).

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla (p + \rho g z) - f_c \sigma \mathbf{v} \quad (1)$$

여기서, \mathbf{v} 는 유속벡터, p 는 유체압력, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$, ρ 는 유체밀도, g 는 중력가속도, f_c 는 선형저항계수이다.

영역 I에서 입사파의 속도포텐셜 Φ_0 는 입사파가 x 축의 (+) 방향으로 진행한다고 가정하면 식(2)와 같이 주어진다.

$$\Phi_0(x, z, t) = -\frac{iQH}{2\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{i(kx - \sigma t)} \quad (2)$$

여기서, H 는 입사파고, σ 는 각주파수($=2\pi/T$, T 는 입사주기), k 는 비감쇠파의 진행파모드의 파수($=2\pi/L$, L ; 파장), $i = \sqrt{-1}$, h 는 일정수심이다.

지배방정식과 경계조건

유체를 비압축성의 비회전운동으로 가정하면 각 영역에서 속도포텐셜 Φ_j ($j = I, II, III$)를 정의할 수 있고, 지배방정식은 다음의 Laplace 방정식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0, \quad j = I, II, III \quad (3)$$

입사파가 직접적으로 존재하는 영역 I에서의 속도포텐셜은 입사파, 반사파 및 발산파의 속도포텐셜 Φ_0, Φ_{DI} 과 Φ_{RI} 의 선형합인 $\Phi_I = \Phi_0 + \Phi_{DI} + \Phi_{RI}$ 으로 표현되고, 영역 II, III에서의 속도포텐셜은 반사파와 발산파를 고려하여 $\Phi_{II,III} = \Phi_{DI,III} + \Phi_{RI,III}$ 로 표현된다.

부체가 유체영역 II에만 존재한다고 하면 속도포텐셜 Φ_j ($j = I, II, III$)에 관한 경계조건은 다음의 식들로 구성된다.

$$\frac{\partial \Phi_{DI}}{\partial n} = 0 \text{ on the structure, } j = II <\text{surface boundary condition on the fixed structure}> \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = -(1 + if_c) \left(\frac{1}{g} \right) \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2}, z = 0, j = II \\ \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = -\left(\frac{1}{g} \right) \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2}, z = 0, j = I, III \end{cases} <\text{free water surface boundary condition}> \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0, z = -h, j = I, II, III <\text{impermeable condition on sea bottom}> \quad (6)$$

여기서, n 은 수중부체표면에서의 외향법선이다.

부체표면상에서의 운동학적 경계조건

부체가 파의 작용에 의해 그 무게중심 $G(x_G, z_G)$ 를 중심으로 하여 Fig. 1에 나타내는 각 운동모드방향으로 식(7)과 같이 조화진동하는 경우를 고려한다.

$$X_m(t) = \hat{X}_m e^{-i\sigma t} \quad (7)$$

여기서, X_m, \hat{X}_m 는 각각 변위 및 그 복소진폭, 아랫첨자 m 은 각각 sway ($m = 1$), heave ($m = 2$), roll ($m = 3$)의 각 운동모드에 대응한다. 이 때, 영역 II에서 발산파의 속도포텐셜 Φ_{RII} 가 만족하여야 하는 운동학적 경계조건은 식(8)로 표현된다.

$$\frac{\partial \Phi_{RII}}{\partial \xi} = \frac{\partial X_1}{\partial t} \xi_1 + \frac{\partial X_2}{\partial t} \xi_2 + \frac{\partial X_3}{\partial t} \xi_3 \text{ on the structure} \quad (8)$$

여기서, $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 는 수중부체표면에서의 일반화된 단위법선벡터로 다음의 식으로 정의된다.

$$(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (n_x, n_z, \{n_x(z - z_G) - n_z(x - x_G)\}/R_B) \quad (9)$$

여기서, $n_x = dx/dn$, $n_z = dz/dn$, R_B 는 부체의 대표길이를 나타낸다.

또한, 발산파속도포텐셜 Φ_{RII} 는 선형경계치문제를 만족하고 있으므로 식(10)과 같이 각각의 동요모드로 분리하여 취급될 수 있다.

$$\Phi_{RII} = \sum_{m=1}^3 (\Phi_{RII})_m X_m \quad (10)$$

여기서, $(\Phi_{RII})_m$ ($m = 1, 2, 3$)은 각 운동모드에 의한 영역 II에서 발산파속도포텐셜이다.

접속조건

이 해석모델은 각 영역에서 포텐셜을 산정하고 있으므로 각 영역의 가상경계면에서 압력과 유속의 접속조건이 필요하게 된다. 영역 I과 영역 II의 접속경계점 $x = l_1$ 및 영역 II와 영역 III의 접속경계점 $x = l_2$ 에 있어서 접속조건을 나타내면 각각 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} \Phi_0 + \Phi_I = (1 + if_c)\Phi_{II}, & x = l_1 \\ \frac{\partial(\Phi_0 + \Phi_I)}{\partial n_I} = -\frac{\partial\Phi_{II}}{\partial n_{II}}, & x = l_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Phi_{III} = (1 + if_c)\Phi_{II}, & x = l_2 \\ \frac{\partial\Phi_{III}}{\partial n_{III}} = -\frac{\partial\Phi_{II}}{\partial n_{II}}, & x = l_2 \end{cases} \quad (12)$$

여기서, $\partial/\partial n_j$ 는 각 영역 $j = I, II, III$ 의 경계면에서 내향법선미분을 나타낸다.

부소파제의 운동방정식

부체의 동요변위를 구하기 위해서는 부체에 작용하는 동적 인 힘의 평형방정식이 필요하게 된다. 수중부체표면에 작용하는 변동압력 p 는 식(1)의 공간적인 적분을 고려하여 얻어지는 식(13)으로부터 산정될 수 있다.

$$p = -\rho \frac{\partial\Phi_{II}}{\partial t} - \rho f_c \sigma \Phi_{II} \quad (13)$$

동요부체에 작용하는 파랑외력은 압력 p 의 작용방향을 고려하여 표면적분함으로써 식(14)와 같이 구해진다.

$$F_\alpha = i\rho\sigma \int_{S_b} (1 + if_c)\Phi_{II}\xi_\alpha ds + \sum_{m=1}^3 \rho\sigma^2 X_m (1 + if_c) \int_{S_b} (\Phi_{Rm})_{II}\xi_\alpha ds, \quad \alpha = 1, 2, 3 \quad (14)$$

여기서, 아랫첨자 α 는 운동방향모드의 방향을 나타낸다. 그리고, 식(14)의 우변 제1항은 정적평형시의 부체에 작용하는 파강제력을, 제2항은 동유체력을 나타내며, 이를 각각 F_α^E 와 F_α^R 로 표기한다. 제2항의 실수부는 부가질량력, 허수부분은 조파감쇠력으로 각각 알려져 있으며, 이를 각각 μ_{am} 과 D_{am} 으로 나타낸다. 식(14)로부터 알 수 있는 바와 같이 파랑외력에는 선형저항이 관계하고 있고, 이 영향이 항력을 근사적으로 나타내는 것으로 된다. 따라서, 최종적으로 부체의 운동방정식은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$(M + \mu) \frac{d^2 X}{dt^2} + D \frac{dX}{dt} + (C + K)X = F^E \quad (15)$$

여기서, X 는 부체의 동요벡터, M 은 관성모멘트를 포함하는 질량매트릭스, D 는 조파감쇠매트릭스, C 는 정수역학적 인 복원력매트릭스, K 는 계류라인의 선형스프링 상수매트릭스, F^E 는 파강제력매트릭스를 각각 나타낸다.

특이점분포법에 의한 해석

미지포텐셜인 Φ_D, Φ_{Rm} 의 산정에는 식(16)과 같은 Green함수를 핵함수로 하는 특이점분포법을 적용한다.

$$\Phi(\eta, \zeta) = \int_{S_b} f(\eta, \zeta) G(x, z; \eta, \zeta) dS(\eta, \zeta) \quad (16)$$

여기서, (η, ζ) 는 물체표면 및 접속경계면의 좌표, $f(\eta, \zeta)$ 는 (η, ζ) 에 분포되는 특이점강도의 분포함수, G 는 Green함수, (x, z) 는 파랑포텐셜을 구하는 유체중의 일반점, S 는 각 영역에 포함되는 물체표면 및 접속경계면에서 구성되는 경계선영역이다. 여기서, G 는 식(17)과 같이 주어진다(John, 1950).

$$G(x, z; \eta, \zeta) = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i(u_n^2 - \lambda^2) \cosh u_n(h+z) \cosh u_n(h+\zeta) e^{iu_n x - n}}{u_n \{(u_n^2 - \lambda^2)h + \lambda\}} \quad (17)$$

여기서, $n = 0$ 의 경우에 $u_0 = k$, $n \geq 1$ 의 경우에 $u_n = ik_n$ 으로 주어지고, k_n 은 소멸파의 파수, λ 는 식(18)로 주어진다.

$$\lambda = \frac{\omega^2}{g} (1 + if_c) = u_n \tanh u_n h \quad (18)$$

따라서, 비감쇠영역인 영역 I 과 III 에서는 식(18)에서 $f_c = 0$ 으로 한 경우에 상응하는 Green함수를 적용할 수 있고, 이는 John (1950)에 의해 유도된 Green함수와 동일한 결과를 나타낸다. 구체적인 산정에서는 특이점강도의 분포함수 $f(\eta, \zeta)$ 가 미지수로 되며, 이는 식(4), (8)의 운동학적인 경계조건 및 식(11), (12)의 접속조건을 사용하여 결정될 수 있다. 또한, 이와 같은 해석법에 있어서 감쇠파영역의 크기 및 선형저항계수는 수리모형실험에 의해 설정된다. 또한, 감쇠파영역의 크기는 부체의 양측면으로부터 바다측과 해안측으로 입사파장의 1/8까지의 수역으로 설정되었다.

수리모형실험

파랑과 구조물과의 상호작용을 대상으로 하는 수리모형실험에서는 장주기파랑의 응답과 같은 점성감쇠력이 탁월한 경우도 있지만, 단주기파랑의 경우가 대부분이므로 점성력보다는 중력이 탁월하여, 이에 Froude 상사법칙을 적용하는 것이 일반적이다.

수리모형실험은 국립수산과학원에 설치되어 있는 단면 2차원조파시스템을 사용하였다. 조파수조는 길이 30m, 폭 1.0m, 높이 1.2m의 크기를 가지고, 조파기는 플러지형으로 규칙파 및 불규칙파를 재현할 수 있고, 파의 재반사를 막기 위한 소파시설도 구비되어 있다.

현지 수심이 15-20m, 폰툰(부력체)의 폭이 6-7m인 부소파제를 상징하여 모형을 1/20 크기로 구성하였다. 모형은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 바와 같이 (1) 폰툰형 부소파제, (2) 연직판형 부소파제이며, 폰툰내부 바닥에 ballast로 철관을 부착하여 홀수를 조정하였으며, 홀수는 부소파제 높이의 2/3 정도가 되도록 하였다. 또한, 부소파제에 적용된 연직판의 수평간격을 변화시켜 실험을 수행하고, 이에 따른 파랑변형과 동적응답특성을 산정하였으며, 계류체인은 단위길이당 수중중량이 2.1 g/cm인 것을 사용하였다.

부소파제를 수조의 중앙부분에 설치하고, 부소파제 전후에 각각 2개의 계류라인, 총 4개의 계류라인으로 부소파제를

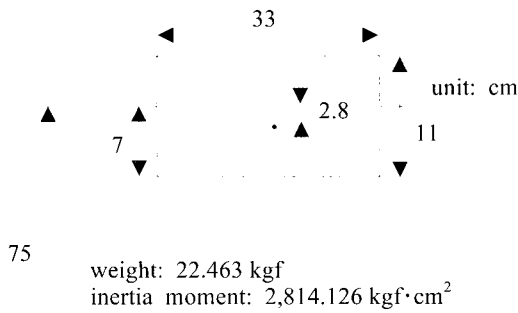


Fig. 2. Floating breakwater of pontoon type (FBPT).

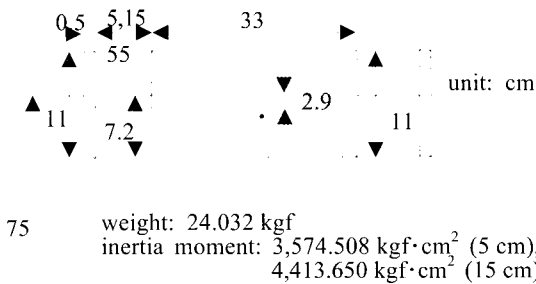


Fig. 3. Floating breakwater with vertical plates (FBVP).

해저에 고정된 4개의 앵커블록에 각각 계류시켰다. 부소파제의 측면운동을 줄이기 위하여 cross로 계류하였고, 계류라인의 장력을 감소시키기 위하여 catenary로 계류하였으며, catenary

가 끝나는 지점에 sinker (공기중의 중량 1.4 kgf)를 설치하였다. Fig. 4는 각 계측장비의 연결상황을 나타낸 것이다.

부체운동은 시간의 경과에 따라 sway, heave 및 roll의 운동 성분 및 표류거리가 동시에 측정되는 고속화상처리시스템으로 산정하였으며, 부소파제의 고유주기는 계류하지 않은 자유운동의 상태에서 가속도계(Kyowa-ASW-2AZ10)로 측정하였다. 또한, heave와 roll의 감쇠고유운동의 시간변화 데이터를 산출하여 고유주기를 측정하였으며, 실험 수심은 현지 수심을 고려하여 75 cm로 하고, Table 1과 같이 규칙파를 대상으로 하였다.

6대의 용량식파고계(Kenek, CHT-4-50)를 증폭기와 AD변환기(NI-BNC-2090)를 통하여 얻어진 데이터에 3점법에 의한 입·반사파분리법을 적용하여 입사파고 H_i 와 반사율 C_r 을 산정하였으며, 배후에 설치된 3개의 용량식파고계로부터 전달파고 H_t 와 전달율 C_t 를 산정하였다(Iwata and Seino, 1982).

계류라인에 작용하는 장력은 폰툰전면에서 폰툰과 좌우 계류라인의 연결지점 2개소에 각각 1개의 장력계(용량 50

Table 1. Experimental conditions

Case No.	Scale (1/20)			L/B
	Wave period (sec)	Wave height (cm)	Wave length (cm)	
A (10 cases)	0.6-1.5	3-7	56.15-316.84	1.70-9.60
B (6 cases)	1.0-1.5	9-11	155.25-316.84	4.70-9.60

*L is wave length, B is width of floating body.

kgf)를 부착하고, 이를 동적변위계(Unipulse-A14015)와 AD변환기(NI-BNC-2090)를 이용하여 측정치를 얻었다.

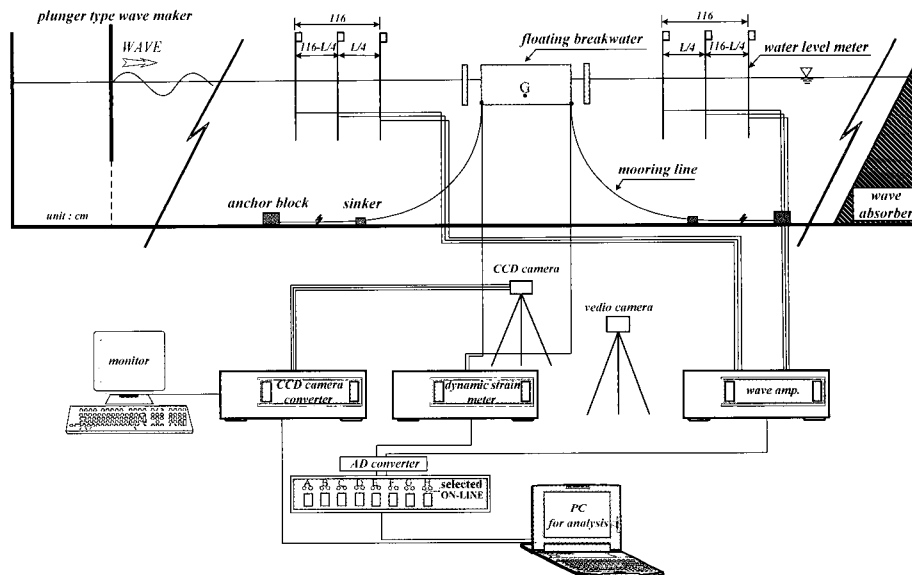


Fig. 4. Apparatus of equipment.

결과 및 고찰

고유주기

파랑제어방식으로 반사방식인 폰툰형의 고유주기를 측정 한 결과 roll 및 heave운동에서 동일하게 0.84 sec ($L/B \approx 3.2$)로 나타났으며, 연직판형 부소파제의 경우 연직판의 수평간격 5 cm 일 때 동일하게 0.95 sec ($L/B \approx 4.2$), 수평간격 15 cm 일 때 0.81 sec ($L/B \approx 3.1$)와 0.77 sec ($L/B \approx 2.8$)로 각각 나타났다. 이들 값으로부터 폰툰형은 주기 $T \approx 0.8$ sec ($L/B \approx 3.0$)에서, 연직판형은 주기 $T \approx 0.95$ sec ($L/B \approx 4.2$) 및 $T \approx 0.79$ sec ($L/B \approx 2.9$)에서 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 크고, 전달율이 낮아질 것으로 예상된다.

파랑제어

부체와 유체운동과의 마찰 및 우각부에서 발생하는 와 등에 의한 파랑에너지감쇠를 나타내는 감쇠율 f_c 의 값, $f_c=0.0, 0.05, 0.1$ 의 변화에 따른 파랑변형의 수치해석결과(Kim et al., 2004)와 수리실험결과를 비교하면 전체적으로 $f_c=0.1$ 의 수치해석 결과가 본 실험치에 가장 근접하여 직사각형상을 갖는 폰툰형 부소파제의 경우에는 $f_c=0.1$ 의 값을 적용하였다.

Fig. 5는 폰툰형과 연직판형 부소파제의 전달율을 비교한 것으로 폰툰형 및 수평간격 5 cm 보다는 수평간격 15 cm의 경우가 다소 향상된 결과를 나타낸다. 그리고, 단주기측에서는 전술한 수평간격 5 cm의 경우보다도 큰 전달율을 나타내고 있으므로 수평간격 15 cm의 효과는 장주기측의 파랑제어에 다소 좋은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

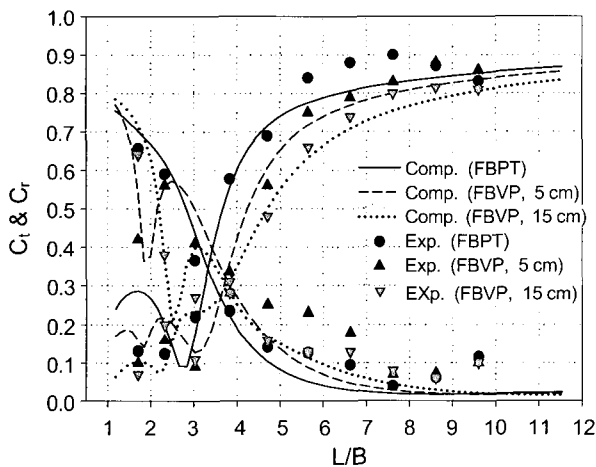


Fig. 5. Comparison of FBPT versus FBVP by wave transformation (C_t : transmission rate, C_r : reflection rate, f_c : energy dissipation rate).

에너지감쇠

Fig. 6은 폰툰형 및 연직판형 부소파제에 의한 파랑에너지의 감쇠를 나타낸 결과이다. 파랑에너지 감쇠율 E_L 은 다음 식으로 정의된다.

$$E_L = 1 - C_t^2 - C_r^2 \tag{19}$$

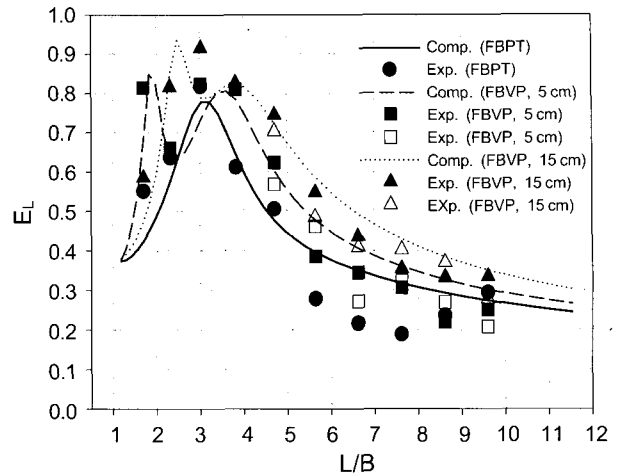


Fig. 6. Wave energy dissipation.

폰툰형의 경우 $L/B \approx 3.0$ 부근에서 최대에너지감쇠가 80%이며, 이후 주기가 증가함에 따라 에너지감쇠가 감소한다. 최대 에너지감쇠가 발생하는 주기대는 heave 및 roll의 고유주기에 상당하며, 이들 고유주기에서 부체의 운동이 커지고 우각부에서 형성된 와류로 인해 부유식 구조물과 파랑운동간에 큰 마찰이 발생하여 파랑에너지가 소산되는 것으로 판단된다. 연직판형 부소파제의 경우 수평간격이 5 cm 일 때 $L/B \approx 1.9$ 부근에서 최대에너지감쇠가 85%이며, $L/B \approx 2.6$ 에서 극소치, $L/B \approx 3.6$ 에서 극대치를 나타낸 다음 에너지감쇠가 감소한다. 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 에너지감쇠의 극대치가 발생하는 $L/B \approx 3.6$ 는 연직판형 부소파제의 heave 및 roll의 고유주기대에 상당한다.

수평간격이 15 cm 일 때 $L/B \approx 2.5$ 부근에서 최대에너지감쇠가 90%이며, $L/B \approx 3.1$ 에서 극소치, $L/B \approx 3.8$ 에서 극대치를 나타낸 후 에너지감쇠가 감소한다.

부체의 운동

폰툰형 부소파제에 대한 중심의 운동(sway, heave, roll운동)의 결과는 Fig. 7과 같다. Sway 운동의 경우 주기의 증가에 따라 수치해석결과와 실험치 모두 증가하는 경향을 나타내며, $L/B \approx 3.0$ 에서 변곡점이 발생하는 것은 sway와 roll 운동이 연성운동을 하기 때문이라고 판단된다. Heave 운동의 경우 $L/B \approx 3.8$ 까지 증가하는 경향을 나타내고, 이후 약간 감소하지만 거의 일정한 값을 나타내고 있다. Roll 운동의 경우 $L/B \approx 3.3$ 까지는 증가하는 경향을 나타내고, 이후 감소하는 경향을 볼 수 있다. 여기서, 최대무차원 roll 운동이 나타나는 $L/B \approx 3.3$ 는 roll 운동의 고유주기대에 상당한다.

부체의 heave 및 roll 운동은 파동장에서 발산파로 나타나고, 이는 입사파 및 전달파와 위상차를 가지므로 파랑이 제어된다. 따라서, 두 운동의 결과는 파랑변형에 직접적인 영향을 미치고, 두 운동의 고유주기대 근방에서 전달과가 작아지는 결과로 나타난다.

수평간격이 5 cm인 경우 연직판형 부소파제에 대한 중심의

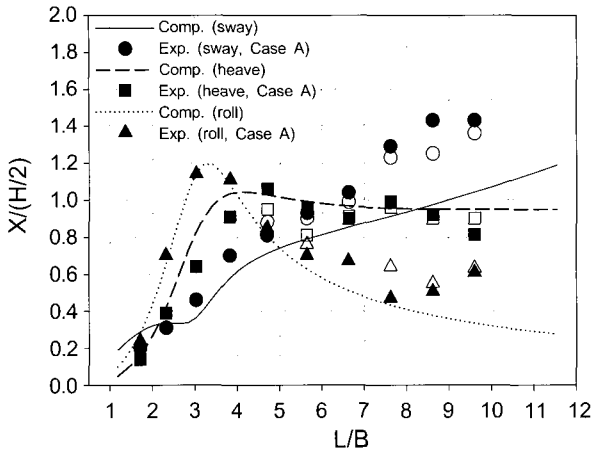


Fig. 7. Motions of FBPT (○, □, △: Case B).

운동(sway, heave, roll)을 나타낸 결과는 Fig. 8과 같다. Sway 운동의 경우 $L/B=1.8, 3.1$ 에서 약간의 변곡점이 나타나지만, 수치해석결과와 실험치 모두 증가하는 경향을 나타낸다. Heave 운동의 경우 $L/B=4.7$ 까지는 무차원 heave 운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후 약간 감소하지만 거의 일정한 값을 나타내고 있다. Roll 운동의 경우 $L/B=3.6$ 까지는 무차원 roll 운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후 감소하는 경향을 볼 수 있다. 여기서, 최대무차원 roll 운동이 나타나는 $L/B=3.6$ 는 roll 운동의 고유주기대에 대략 상당한다. 이와 같은 결과는 고유주기측정에는 비계류상태에서 측정되었고 수치계산 및 실험에서는 계류상태에서 초기계류장력이 고려되어 있기 때문에 두 고유주기의 결과에 차이가 존재하는 것으로 판단된다.

수평간격이 15cm인 경우 연직판형 부소파제에 대한 중심의 운동(sway, heave, roll)은 Fig. 9와 같다. $L/B=3.0$ 에서 약간의 변곡점이 나타나지만 주기의 증가에 따른 무차원 sway운동은 수치해석결과와 실험치 모두 증가하는 경향을 나타내며, 고유주기대에서 수치실험결과가 수치해석치보다 다소 큰 값

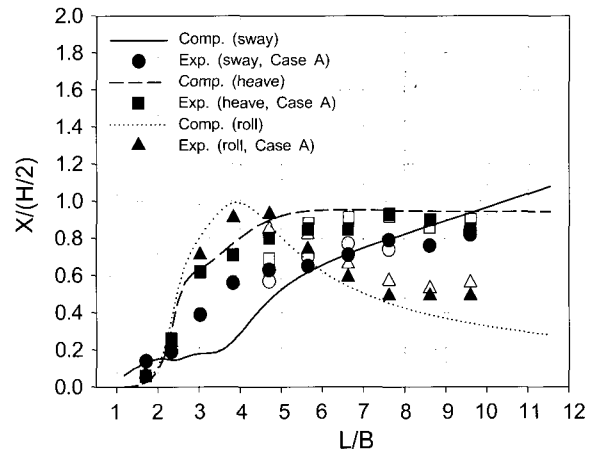


Fig. 9. Motions of FBVP (○, □, △: Case B; Horizontal interval: 15 cm).

을 나타내는 것을 제외하면 두 결과는 전체적으로는 잘 일치하고 있다.

Heave 운동의 경우 $L/B=5.5$ 까지는 무차원 heave 운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 여기서, Roll 운동의 경우 $L/B=3.9$ 까지는 무차원 roll 운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후 감소하는 경향을 볼 수 있다. 여기서, 최대무차원 roll 운동이 나타나는 $L/B=3.9$ 는 roll 운동의 고유주기대에 대략 상당한다. 따라서, roll 운동의 고유주기대 근방에서 최대의 roll 운동을 나타내고, 좌우의 주기대에서 운동량이 감소하는 경향은 전술한 폰툰형 부소파제 및 수평간격 5 cm인 연직판형 부소파제와 동일하다. 그리고, 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 실험결과와 수치해석결과는 잘 일치하고 있다.

표류거리

Fig. 10은 비선형파랑의 질량수송속도에 기인한 표류력으로 발생하는 부체의 표류거리 D_d 를 입사파장 L 로 무차원화하여 주기의 변화에 따라 무차원표류거리 D_d/L 를 나타낸 결과이

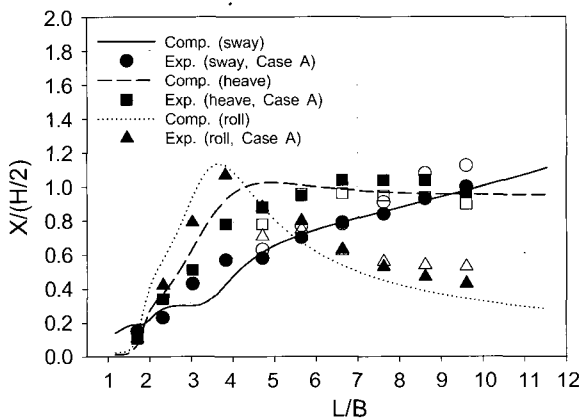


Fig. 8. Motions of FBVP (Horizontal interval: 5 cm; ○, □, △: Case B).

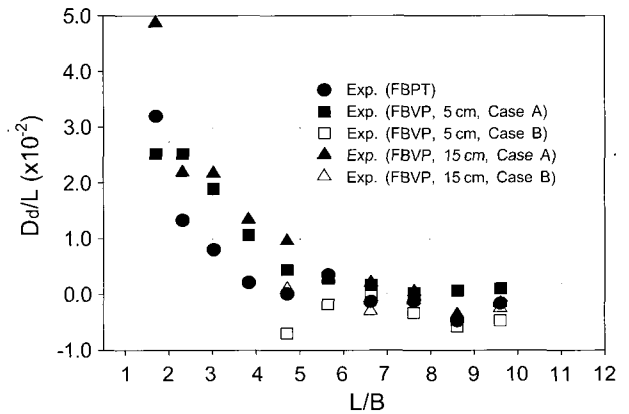


Fig. 10. Drift distance of floating breakwater with pontoon typed and vertical plates.

다. 일반적으로 부체의 단위길이당 표류력은 다음 식으로 표현된다.

$$D_F = \frac{\rho g H^2}{8} (1 - C_t^2) \quad (20)$$

윗식으로부터 파랑에너지가 보존되는 경우에는 $1 - C_t^2 = C_r^2$ 로 나타낼 수 있기 때문에 기본적으로 표류력 및 표류거리는 반사율의 함수로 주어진다.

폰툰형 및 연직판형 부소파계의 파랑변형(Fig. 5)의 반사율 변화와 수리실험에 의한 Fig. 10의 무차원 표류거리의 변화는 고유주기대 근방의 극소치와 극대치를 제외하면 주기의 변화에 따라 동일한 경향을 나타내고 있다. 그림에서 무차원 표류거리의 (-) 값은 이론적으로는 있을 수가 없지만, 수리실험에서 소파공에 의한 소파가 불완전하여 일부의 파랑에너지가 재반사되기 때문이라고 판단된다.

계류라인의 장력

Catenary계류되어 있는 경우 계류라인의 장력은 비선형성이 매우 강하게 나타나기 때문에 수치해석적으로 산정하는 것은 어려우므로 수리실험으로 산정하는 것이 일반적이다.

주기의 변화에 따른 무차원장력(T)은 계류장력, W 는 공기중에서 부소파계의 중량)은 Fig. 11과 같다. 폰툰형의 경우 최대 무차원장력은 0.17 정도이며, $L/B \approx 1.7, 2.3, 3.8$ 및 5.7의 경우에 계류라인의 장력은 계류삭에 인발되는 힘이 거의 작용하지 않는다.

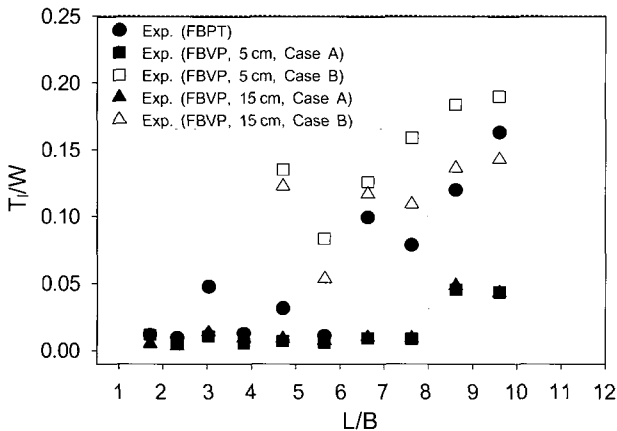


Fig. 11. Mooring tension of floating breakwater with pontoon typed and vertical plates.

수평간격이 5 cm인 경우 최대무차원장력은 0.18 정도이며, 입사파고의 작은 경우 $L/B \leq 7.6$ 에서 계류삭에 인발되는 힘이 거의 작용하지 않는 것을 알 수 있다.

수평간격이 15 cm인 경우 입사파고의 차이에 따라 무차원장력은 매우 상이한 값을 나타내고, 특히 입사파고가 클수록 큰 장력을 나타내는 것을 알 수 있다. 최대무차원장력은 0.14 정도이며, 입사파고의 작은 경우($L/B \leq 7.6$) 계류삭에 인발되는 힘이 거의 작용하지 않는 것을 알 수 있고, 이때의 장력은 catenary 계류라인의 길이의 시간변화에 따른 계류라인의 변동중량이 대부분을 차지하게 된다. 따라서, 장력의 특성은 입사파랑조건, sinker의 위치 및 중량과 계류라인의 총길이 등과 같이 설치조건에 민감하므로 수리실험으로 정확히 추산하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 기존의 폰툰형의 경우보다는 연직판형의 경우가 파랑제어기능이 향상되는 것으로 나타났으며, 차후 개선된 형식으로 파랑제어기능, 운동 및 장력 등을 검토하여 보다 효율적인 모델을 찾을 것이다.

참 고 문 헌

Iwata, K. and H. Seino. 1982. Separation estimated methods of incident/reflection irregular waves by using the wave records with 3 points, Proc. 38th Annual Conf., JSCE, pp. 343-344.

John, F. 1950. On the motions of floating bodies. II. Comm. Pure Appl. Math., 3, 45-101.

KIM, D.S., K.H. Lee, N.H. Choi and H.M. Yoon. 2004. A study of wave control by new type floating breakwater. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng., 16, 1-9.

KIM, D.S., N.H. Choi, H.M. Yoon and B.K. Sohn. 2004. Numerical analysis of three-dimensional wave transformation of floating breakwater moored by catenary. Pro. KCORE, pp. 241-248.

Masan Regional Maritime Affairs & Fisheries Office. 2002. Report on experiment of floating breakwater in Wonjeon port. MOMAF.

Sollitt, C.K. and R.H. Cross. 1972. Wave transmission through permeable breakwater, Proc. 13th Coast. Eng. Conf., ASCE, 3, pp. 1827-1846.

2005년 8월 10일 접수
2005년 10월 21일 수리