한국해안 · 해양공학회논문집
제 21 권 제 2 호, pp. 196~208, 2009년 4월

부유 플랩형 고조방파제의 파랑응답 - 수치모의
Wave Responses of Buoyant Flap-typed Storm Surge Barriers - Numerical Simulation

정신택* · 고동휘* · 박우선**
Shin Taek Jeong*, Dong Hui Ko* and Woo Sun Park**

요 지 : 본 논문에서는 부유 플랩형 고조방파제의 응답특성에 대해서 연구하였다. 효율적인 연구를 위하여 파동장은 선형 포텐셜 이론을 적용하여 모형화하였으며, 구조물의 운동은 Newton의 운동 제2법칙을 사용하여 나타내었다. 유체 영역은 통상의 2차 보간함수를 갖는 등매개변수요소로 모형화하였으며, 방사경계조건에 접하는 외부영역은 무한요소로 처리하였다. 수리실험결과와의 비교를 통하여 수립된 수치모델의 타당성을 입증하였으며, 개발된 수치모델을 이용하여 마산만에 부유 플랩형 고조방파제 적용가능성에 대해서 살펴보았다.

핵심용어 : 고조, 부유 플랩형 고조방파제, 유한요소수치해석, 파랑응답

Abstract : In this paper, wave responses of buoyant flap-typed storm surge barriers was studied numerically. Wave motions were modeled by using a linear potential wave theory, and behaviors of structures were represented as a Newton's 2nd law of motion. The near field region of the fluid was discretized as conventional quadratic iso-parametric elements, while the far field was modeled as infinite elements. Comparisons with the results from hydraulic model tests show that the present model gives good results. By using the model, the applicability of a buoyant flap-typed storm surge barrier in Masan bay was investigated considering field environmental conditions.

Keywords : storm surge, buoyant flap-typed storm surge barrier, finite element numerical analysis, wave responses

1. 서 론

2003년 9월 12일 제14호 태풍 '매미'로 인해 발생한 폭풍해일은 마산시 해안지역에 방대한 침수피해를 야기하였으며, 이에 따른 인명, 재산 및 경제적인 손실이 막대하였다. 이후, 폭풍해일에 의한 재해 재발방지를 위한 노력이 진행되고 있으나(김용희, 2004; 이동영, 2006, 2007; 이종찬 등, 2008) 뚜렷한 성과는 아직 도출되고 있지 않은 상황이다.

일본의 항만공항기술연구소에서는 이러한 폭풍 및 지진 해일재해 방지를 위한 새로운 형식의 구조물 개발에 대한 연구를 수행한 바 있다. Shimosako et al.(2007)은 플랩식 구조물을 이용하여 파랑과 해일을 막는 연구를 실시하였으며, Arikawa et al.(2007)은 직립부상식 방파제를 이용하는 방안에 대한 연구를 실시한 바 있다. 직립부상식 방파제는 올해 와카야마(和歌山)항 부근에 시험시공될 예정으로 있다.

유럽 이태리에서는 바닷물 범람으로부터 베니스를 지키기 위하여 아드리아해와 베니스 석호사이의 관문역에 플랩식 구조물을 설치하기 위한 사업이 2003년도부터 진행되고 있다(Fig. 1과 2 참조). '모세 프로젝트'로 불리우는 이 사업은 길이 20 m, 높이 30 m, 무게 300톤의 대형 금속제 방벽 78개를 이어 붙여 바닷물의 범람을 막는 것이다. 평소에는 바다 밑바닥에 가라앉아 있는 이 구조물은

*원광대학교 토목환경공학과(School of Civil, Environmental and Urban Engineering, Wonkwang University, 344-2, Shinyong-dong, Iksan, 570-749, Korea. stjeong@wonkwang.ac.kr)
**한국해양연구원 연안개발에너지연구부(Corresponding author: Woo Sun Park, Coastal Engineering and Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Kyunggi 425-600, Korea, wspark@kordi.re.kr)

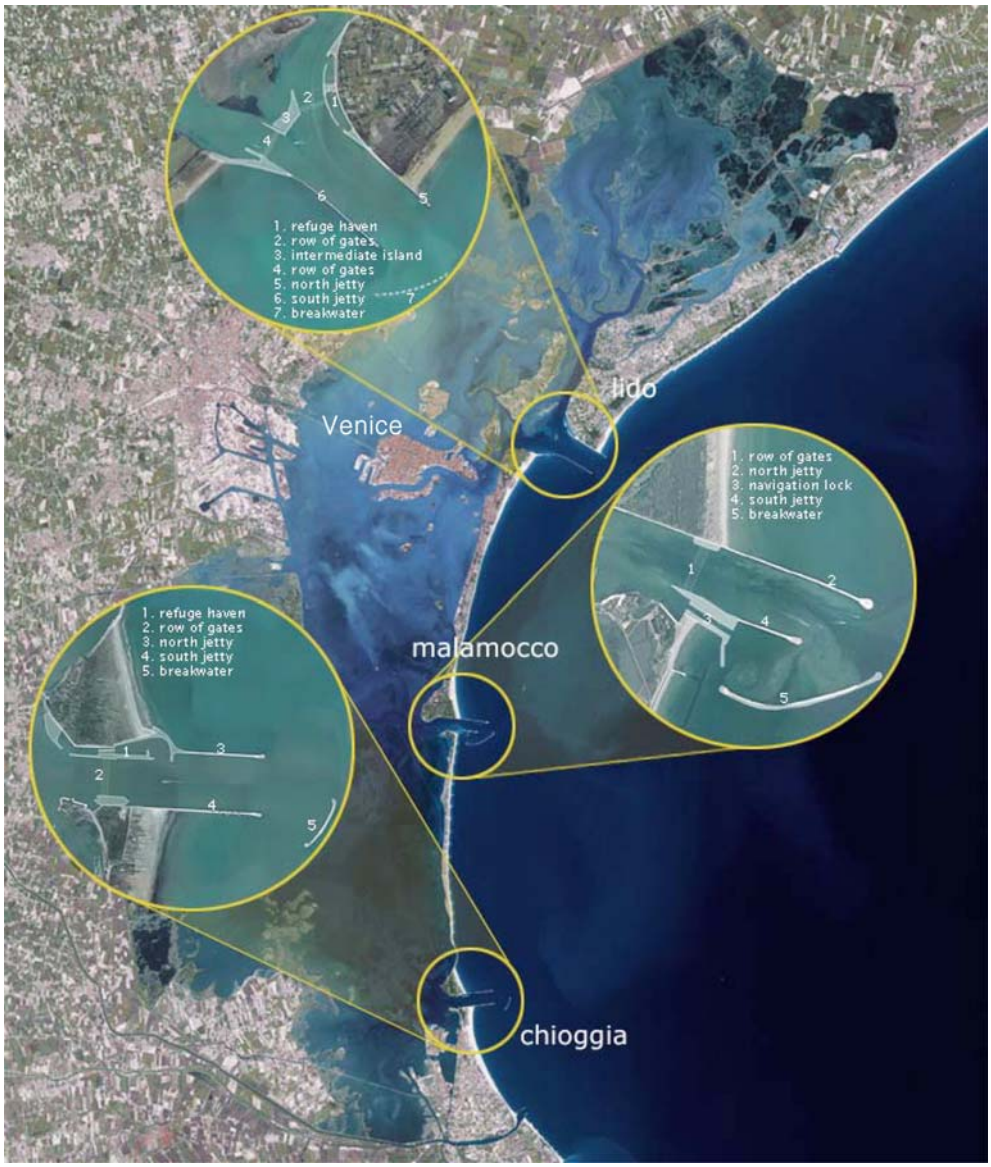


Fig. 1. Mose project in Italy.

침수 위기시 압축공기를 주입해 부력으로 일으켜 세워진다. 지구 온난화 등으로 인해 해마다 큰 홍수 피해를 입는 베니스를 구할 수 있는 유일한 방법이라 판단하고 방벽 건설을 추진하고 있다. 지난 2003년부터 추진된 '모세 프로젝트'는 2014년에 완공될 예정이다. 원래 2011년 완공될 예정이었으나, 환경 단체 등의 반대로 준공이 3년 늦춰졌다(http://www.salve.it/uk/default.htm; Eprim, 2005; Colamussi, 1992).

본 연구에서는 이태리 Mose project에 적용하고 있는 것과 같은 형식의 부유 플랩형 고조방파제를 대상으로 하였다(Fig. 3 참조). 정 등(2008)은 수리모형실험에 의한 사전 연구를 통하여, 부유 플랩형 고조방파제의 적용 가능성을 확인하였으며, 파랑 반사 및 전달특성도 검토한 바 있다.

본 논문에서는 부유 플랩형 고조방파제의 파랑에 대한 동적응답, 파랑 반사 및 전달 특성을 효율적으로 해석할 수 있는 수치모델에 대해서 연구하였다. 수리실험 결과와의 비교를 통하여 타당성을 검증하고, 고조방파제의 파랑

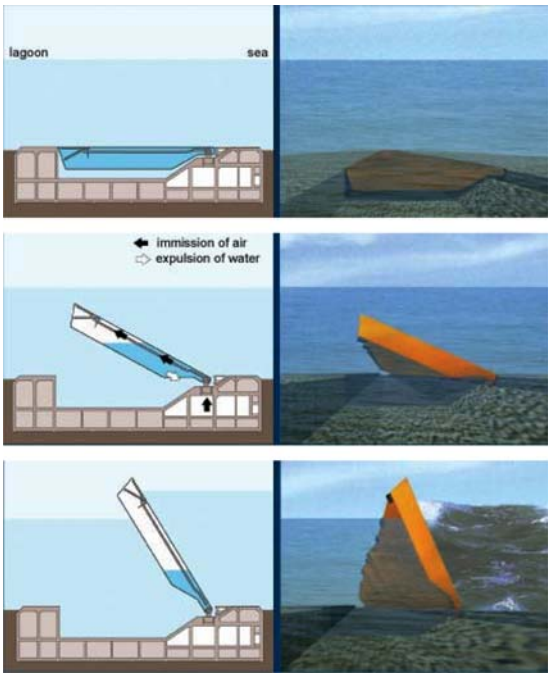


Fig. 2. Section and simulation of a floodgate in the three phases: at rest, intermediate, in action.

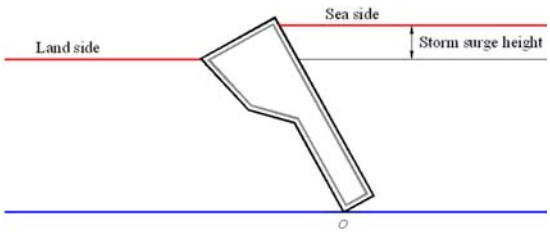


Fig. 3. Definition sketch of a buoyant flap-typed storm surge barrier.

반사 및 전달 특성을 살펴보았으며, 수립된 수치모델을 마산만 고조방파제에 적용하였다.

2. 수학적 모형

2.1 개요

단주기 파랑에 의한 부유 플랩형 고조방파제의 거동해석을 위해서는 항내외 수위차에 의한 수압차와 파랑과의 상호작용을 고려한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 연구의 효율을 높이기 위해 정적 평형상태를 먼저 구하고, 이 평형점을 중심으로 상부구조물과 파랑간의 상호작용 해석을 위한 수학적 모형을 구성하였다. 정적 평형위치는 구조물의 자중, 방파제 내외측에 작용되는 수압, 그리고 자중에 의한 회전모멘트가 서로 평형이 되는 조건에 의해 결정된다.

2.2 동적 해석

2.2.1 운동방정식

Fig. 3과 같이 외해의 수위가 높아진 상태에서 파랑이 입사할 때 부유 플랩형 고조방파제의 운동방정식은 회전중심 O에 대해 다음과 같이 Newton의 2차법칙에 의하여 2계 상미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$(I_\theta + I_\theta^a)\ddot{\theta} + (c_\theta + c_\theta^w)\dot{\theta} + k_\theta\theta = M_o \tag{1}$$

여기서,

$\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$ = 고조방파제 회전응답의 가속도, 속도, 변위

I_θ= 구조체의 질량관성모멘트

I_θ^a = 부가질량관성모멘트

c_θ= 회전방향 구조감쇠계수

c_θ^w = 회전방향 파랑감쇠계수

k_θ= 부력변화에 따른 회전강성계수

M_o = 전도모멘트

$I_\theta^a, c_\theta^w, M_o$ 는 파동장에 놓인 고조방파제에 대한 경계치 문제를 해석함으로써 결정할 수 있다.

2.2.2 파동장 해석

부유 플랩형 고조방파제가 설치된 파동장을 효율적으로 해석하기 위하여 유체를 비압축성, 비점성, 비회전류라는 가정을 하는 선형포텐셜이론을 사용하였다. 파고가 ζ_a, 진동수가 w인 규칙파가 수심 d인 해역에 설치된 부유 플랩형 고조방파제에 입사할 경우의 파동장은 다음과 같이 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜, Φ로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2\Phi(x,z) = 0 \quad \text{in } \Omega \tag{2}$$

여기서, $\nabla^2(\cdot) = \partial^2(\cdot)/\partial x^2 + \partial^2(\cdot)/\partial z^2$ 이다. 여기에 추가적으로 입사파고 및 구조물의 거동이 미소하다는 가정을 하면, Fig. 4에 보인 정수면(S_f) 및 유동장의 바닥면(S_d), 물체의 표면(S_s)에서의 경계조건은 아래와 같이 선형으로 나타내진다.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g}\Phi \quad \text{on } S_f \tag{3a}$$

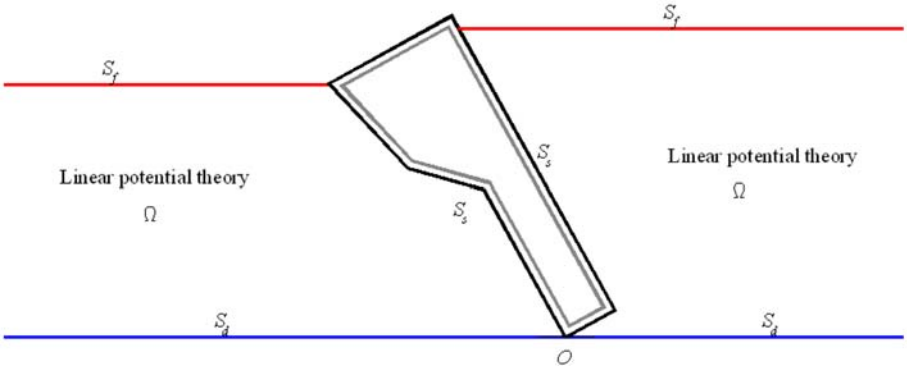


Fig. 4. Definition sketch for the boundary value problem.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \qquad \text{on } S_d \tag{3b}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_n \qquad \text{on } S_s \tag{3c}$$

여기서, $\partial^2(\cdot)/\partial n$ 은 물체표면에서 유체영역으로 향하는 외향 법선 방향에 대한 미분을 의미하며, g는 중력가속도를 나타낸다.

V_n은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = \mathrm{Re}[-i\omega n_1 \theta e^{-i\omega t}] \tag{4}$$

여기서, Re[·]는 괄호안 값의 실수부를 의미하며, n_1은 물체표면에서 유체영역으로 향하는 법선벡터의 각 방향 성분과 관련된 값으로, 법선벡터, $\vec{n}$을 물체표면으로부터 밖으로 나가도록 정의하면 n_1은 다음과 같이 표시된다.

$$n_1 = -(z-z_o)n_x + (x-x_o)n_z \tag{5}$$

여기서, n_x, n_z는 $\vec{n}$의 x 및 z 방향의 성분을 나타내며, (x_o, z_o)는 고조방파제의 회전중심, O의 좌표이다.

속도포텐셜, Φ는 아래와 같이 각 성분별 파랑의 포텐셜의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \mathrm{Re}[(\phi_0 + \phi_2 + \phi_1\theta)e^{-i\omega t}] \tag{6}$$

여기서, ϕ_0는 입사파에 의한 성분, ϕ_2는 반사파에 의한 성분, ϕ_1은 회전방향운동에 관련된 방사파에 의한 성분을 나타낸다. 이중, 반사파 및 방사파에 의한 포텐셜은 무한경계면(S_r)에서 다음의 방사 경계조건을 만족하여야 한다 (Sommerfeld, 1949).

$$\lim_{r\to\infty}\left(\frac{\partial \phi_l}{\partial r} - ik_0\phi_l\right) = 0 \quad \text{for} \quad l = 1,2 \tag{7}$$

여기서, k_0는 입사파의 파수를 의미하며, $r = |x|$, $i = \sqrt{-1}$이다.

선형이론에 의하면 식 (2), (3) 및 (7)로 주어진 경계치 문제는 ϕ_0와 ϕ_2가 관련된 회절문제와 ϕ_1이 관련된 방사문제로 분리하여 해석할 수 있다. 따라서, 식 (4)와 (6)을 식 (3c)에 대입한 후, 회절 문제와 방사 문제로 분리하면 물체 표면에서의 경계조건은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \phi_l}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_l & \text{for } l = 1 \\ -\dfrac{\partial \phi_0}{\partial x}n_x - \dfrac{\partial \phi_0}{\partial z}n_z & \text{for } l = 2 \end{cases} \tag{8}$$

여기서, ϕ_0는 입사파의 포텐셜로 다음과 같이 나타내진다.

$$\phi_0 = -i\frac{g\zeta_a}{\omega}\frac{\cosh[k_0(z+d)]}{\cosh(k_0 d)}e^{ik_0 x} \tag{9}$$

2.2.3 파랑강제력(M_o)과 부가질량계수(I_θ^a) 및 파랑감쇠계수(c_θ^w)

물체 표면 및 유체장 임의의 위치에서의 동압력, $p(x, z; t)$는 선형화된 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 구할 수 있으며,

$$p(x, z; t) = -\rho\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \mathrm{Re}[i\omega\rho(\phi_0 + \phi_2 + \phi_1\theta)e^{-i\omega t}] \tag{10}$$

구조물에 작용하는 전파력은 물체 표면에서의 압력을 적분함으로써 구할 수 있다. 전도모멘트, M_o는 다음과 같이 표시된다.

$$M_o = -\int_{S_s} p(x, z; t)n_1 S_b = \mathrm{Re}[(M_o^e + M_o^r)e^{-i\omega t}] \tag{11}$$

여기서, M_o^e는 $\phi_0 + \phi_2$에 관련된 파랑 강제력이며, M_o^r은 방사포텐셜 ϕ_1에 관련된 항으로 부가질량계수, I_θ^a와 파랑감쇠계수, c_θ^w로 나타낼 수 있다.

$$M_o^e = -i\omega\rho\int_{S_s}(\phi_0+\phi_s)n_1 dS_s \tag{12a}$$

$$M_o^r = -i\omega\rho\int_{S_s}\phi_1 n_1 dS_s = -\omega^2 I_\theta^a - i\omega c_\theta^w \tag{12b}$$

여기서, I_θ^a와 c_θ^w는 아래와 같이 나타내지며,

$$I_\theta^a = -\frac{1}{\omega^2}\mathrm{Re}(M_o^r) \tag{13a}$$

$$c_\theta^w = -\frac{1}{\omega^2}\mathrm{Im}(M_o^r) \tag{13b}$$

Re(·)와 Im(·)은 각각 괄호안 값의 실수부와 허수부를 의미한다.

3. Galerkin 기법을 이용한 파동장 해석

3.1 유체영역의 이산화

유한요소법을 사용하여, 식 (2), (3)과 (7)을 만족하는 속도 포텐셜을 구하기 위하여, 유체영역을 둘로 분리하여 고조방파제를 포함하는 영역은 통상의 유한요소로 모형화하였으며, 외부영역은 박 등(1991)이 개발한 무한요소로 모형화하였다(Fig. 5 참조).

유한요소법에 의해 유체영역을 모형화하기 위해서 분할된 각 요소내의 포텐셜, ϕ_l을 절점포텐셜 $\{\phi_l^e\}$와 형상함수 $\{N^e\}$로 보간하여 다음과 같이 나타낸 후,

$$\phi_l = \{N^e\}^T\{\phi_l^e\} \tag{14}$$

상기의 경계치 문제를 다음과 같이 Galerkin 기법을 적용하고

$$\sum_e\{R^e\} = \sum_e\int_{\Omega^e}\{N^e\}\nabla^2\phi_l d\Omega^e \tag{15}$$

이를 Green의 정리를 이용하여 정리하면 다음과 같은 선형 대수방정식을 얻게 된다.

$$\sum_e([K_l^e]\{\phi_l^e\}-\{P_l^e\}) = \{0\} \tag{16}$$

여기서, $[K_l^e]$는 각 요소의 시스템 행렬, $\{P_l^e\}$는 하중벡터로 다음과 같이 나타내진다.

$$[K_l^e] = \int_{\Omega^e}\left(\left\{\frac{\partial N^e}{\partial x}\right\}\left\{\frac{\partial N^e}{\partial x}\right\}^T+\left\{\frac{\partial N^e}{\partial z}\right\}\left\{\frac{\partial N^e}{\partial z}\right\}^T\right)d\Omega^e$$

$$-\int_{S_b^e}\frac{\omega^2}{g}\{N^e\}\{N^e\}^T dS_f^e \tag{17a}$$

$$\{P_l^e\} = -\int_{S_b^e}\frac{\partial\phi_l}{\partial n}\{N^e\}dS_b^e \tag{17b}$$

식 (16)은 선형 대수방정식이므로 Gauss 소거법 등의 기법을 사용하면 쉽게 풀 수 있다. 특히, 각 요소의 시스템 행렬이 조합된 전체 행렬이 대칭성을 지닌 띠 행렬로 구성되므로 컴퓨터의 기억용량 및 계산상의 효율면에 있어서 유리하게 된다.

3.2 유한 및 무한 요소영역

내부영역은 정수면 및 유체영역을 각각 2차 형상함수

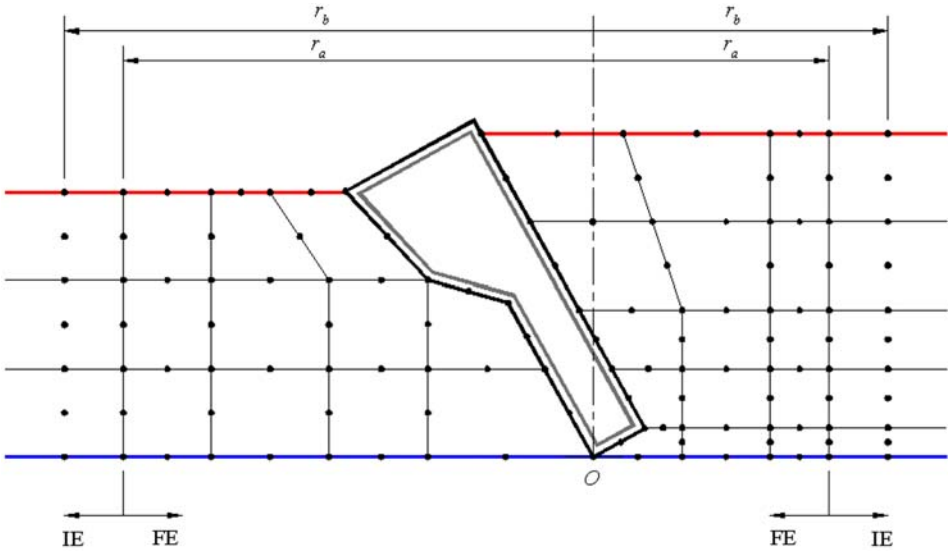


Fig. 5. Discretization of the fluid region.

를 갖는 3절점 및 8절점 등매개변수 요소(Isoparametric element)를 사용하여 모형화하고, 식 (17)의 각 요소 시스템 행렬은 Gauss 적분공식을 사용하여 구성하였다(Dhatt and Touzot, 1984).

무한원방의 방사조건을 포함하는 외부영역은 식 (7)의 방사 경계조건을 만족하는 형상함수를 갖는 6절점 및 2절점 무한요소로 모형화하였다. 본 연구에서 사용한 무한요소의 형상함수는 외부영역의 해를 고유함수의 급수해로 나타내었을 때 나타나는 진행파항과 첫번째 산란파항을 사용하여 결정한 것으로 아래와 같이 표시된다(박 등, 1991).

- 6절점 무한요소($0 \le \xi < \infty, -1 \le \eta \le 1$):

$$\{N^e\} = \begin{Bmatrix} M_a(\xi)\{\bar{N}(\eta)\} \\ M_b(\xi)\{\bar{N}(\eta)\} \end{Bmatrix} \tag{18}$$

- 2절점 무한요소($0 \le \xi < \infty$):

$$\{N^e\} = \begin{Bmatrix} M_a(\xi) \\ M_b(\xi) \end{Bmatrix} \tag{19}$$

여기서, $\{\bar{N}(\eta)\}$는 Lagrange 형상함수벡터로 다음과 같이 정의되며,

$$\{N^e\} = \begin{Bmatrix} -\eta(1-\eta)/2 \\ (1-\eta^2) \\ \eta(1+\eta)/2 \end{Bmatrix} \tag{20}$$

$M_a(\xi)$와 $M_b(\xi)$는 포텐셜의 수평방향 거동을 나타내는 함수로 진행파를 나타내는 $f_0(\xi)$와 첫 번째 산란파항을 나타내는 $f_1(\xi)$의 함수로 표시된다.

$$\begin{Bmatrix} M_a(\xi) \\ M_b(\xi) \end{Bmatrix} = [F]^T \begin{Bmatrix} f_0(\xi) \\ f_1(\xi) \end{Bmatrix} \tag{21}$$

여기서,

$$f_0(\xi) = e^{ik_0(\xi + r_a) - \varepsilon\xi} \tag{22a}$$

$$f_1(\xi) = e^{-k_1(\xi + r_a)} \tag{22b}$$

$$[F] = \begin{bmatrix} e^{ik_0 r_a} & e^{-k_1 r_a} \\ e^{ik_0 r_b} & e^{-k_1 r_b} \end{bmatrix} \tag{22c}$$

여기서, r_a, r_b는 각각 무한요소의 절점중 내부영역과 외부영역의 접합면에 있는 절점까지의 거리와 그 외부에 있는 절점까지의 거리이다. ε은 해석적으로 무한요소의 시스템 행렬을 구성할 때 발생하는 문제를 해결하기 위하여 도입한 것으로(이를 도입하지 않으면 ξ-방향의 적분치가 존재하지 않음), 양(+)의 아주 작은 실수값($\varepsilon \ll k_0$)을 갖게 되며, 최종적인 무한요소의 시스템 행렬에는 나타나지 않게 된다. k_0와 k_1은 각각 다음의 분산방정식으로 부터 구할 수 있는데,

$$k_0 \tanh(k_0 d) = \frac{\omega_2}{g} \tag{23a}$$

$$k_1 \tanh(k_1 d) = -\frac{\omega_2}{g} \tag{23b}$$

여기서, k_1은 식 (23b)의 첫번째(가장 작은) 근을 의미한다.

4. 수치해석

4.1 수치모델의 검증

4.1.1 개요

수립된 수치모형의 검증을 위하여 2차원 수로에서 수행한 부유 플랩형 고조방파제의 모형실험 결과(정 등, 2008)와의 비교를 실시하였다. 수리모형은 구조물 전후의 수심이 50 cm이고, 방파제 본체만 설치된 Case 1, 본체의 외해 쪽에 날개판이 설치된 Case 2, 본체의 내해쪽에 날개판이 설치된 Case 3 등 3종류에 대하여 실시하였으며, 각각의 형상은 Fig. 6과 같다.

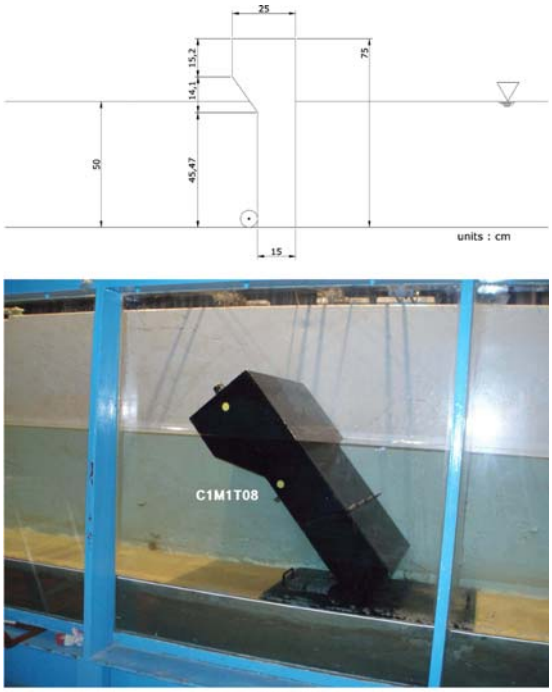
4.1.2 정적 평형위치

정적 평형위치는 구조물의 자중과 방파제 내외측 정수압에 의한 회전모멘트가 서로 평형을 이루는 조건에 의해서 결정된다. 이를 위해 임의 단면의 부유 플랩형 고조방파제의 정적 평형위치를 계산할 수 있는 프로그램(등록번호: 2007-01-121-005833)을 개발하였으며, 그 결과를 Table 1에 수리모형실험결과와 비교하여 나타내었다. Fig. 7에는 개발된 프로그램(MATLAB 사용)에서 자동 생성된 각 경우의 정적평형 위치도를 나타내었다.

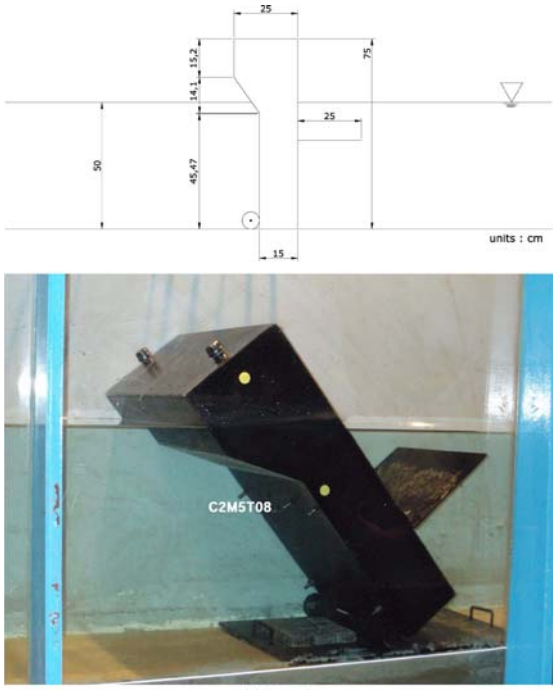
4.1.3 파랑응답특성 해석

1) 유한요소망도

개발된 수치모델의 검증과 부유 플랩형 고조방파제의 동적응답, 파랑의 반사 및 전달특성을 살펴보기 위한 수치해석을 위하여 Fig. 8에 보인 바와 같은 유한요소망을 구성하였다. Case 1은 총 15,311개의 절점, 4,827개의 8절점 등매개변수 요소, Case 2는 총 15,369개의 절점, 4,842개의 요소, 그리고 Case 3는 총 15,349개의 절점, 4,836개의 요소를 사용하여 유체영역을 모형화하였다.



(a) Case 1

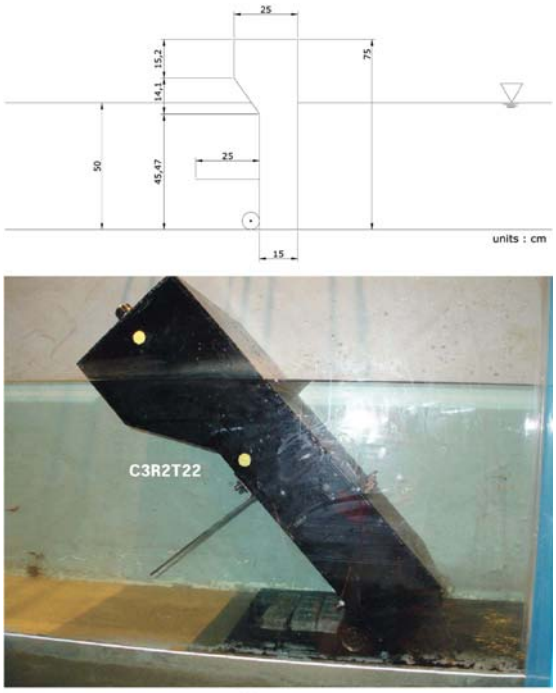


(b) Case 2

Fig. 6. Buoyant flap-typed storm surge barriers tested.

2) 파랑 반사 및 전달, 동적응답 특성

Fig. 9에 파고 5 cm의 규칙파에 대한 고조방파제 Case 1의



(c) Case 3

Fig. 6. Continued.

Table 1. Static equilibrium position of three different cases

경우	수심 (m)	회전각(도) 수리모형 결과	회전각(도) 수치실험 결과	비 고
Case 1	0.5	40.0	39.6	연직선에서 시계 방향으로 관측한 회전각
Case 2	0.5	37.5	39	
Case 3	0.5	41.5	41.4	

파랑 반사 및 전달 계수를 나타내었다. 수치실험결과와 수리실험결과가 비교적 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 두 결과의 차이는 고조방파제의 비선형 복원력, 파랑의 비선형성, 수리실험과 수치해석 모형의 차이, 이들을 포함한 여러 가지 요인에 의한 고조방파제 불안정 응답 등에 의해 발생한 것으로 생각할 수 있다.

외해측에 날개판을 부착한 Case 2와 Case 3의 결과를 비교하여 나타낸 Fig. 10과 11을 살펴보면, 날개판이 내해측에 부착된 Case 3는 날개판이 없는 Case 1과 같이 수치해석결과와 수리실험결과가 서로 유사한 결과를 보이는 반면, 날개판이 외해측에 부착된 Case 2의 경우는 서로 다른 특성을 보임을 알 수 있다. 이러한 차이는 본 연구를 통하여 수립된 수치모델에서는 고려하지 못한 날개판 자유단에서의 난류발생에 의한 에너지 소모현상 때문

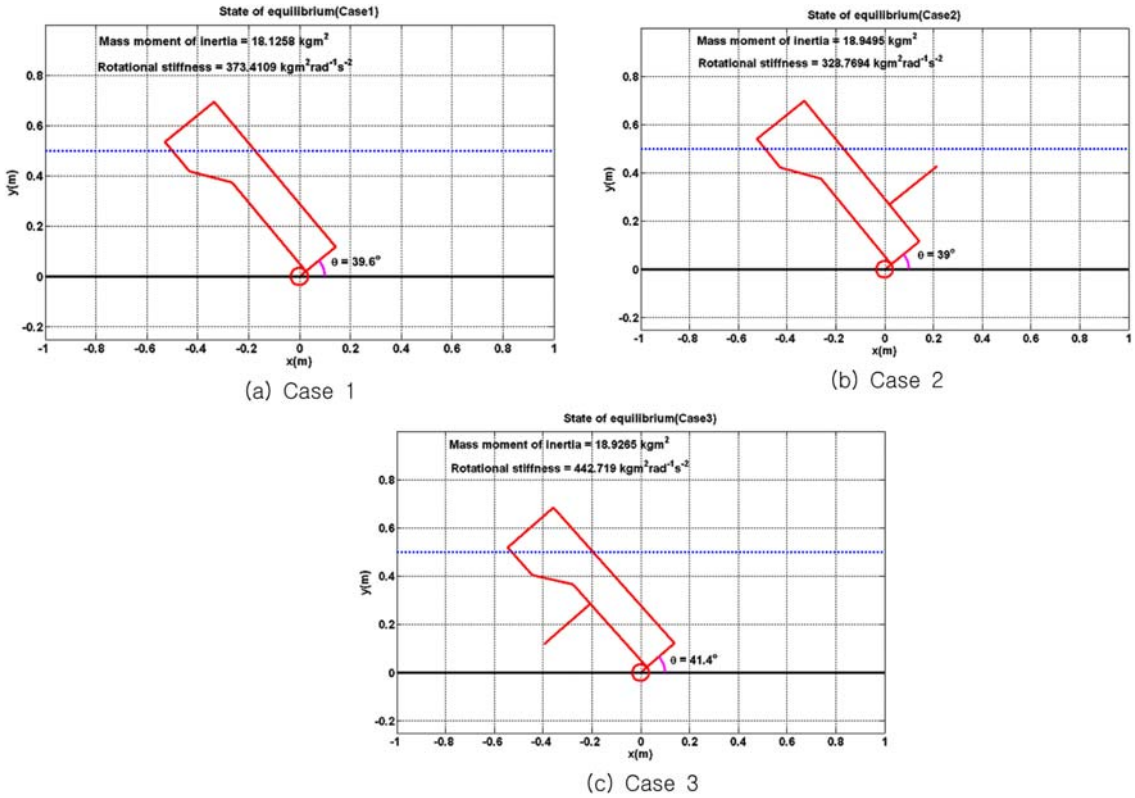


Fig. 7. Static equilibrium positions for three different cases.

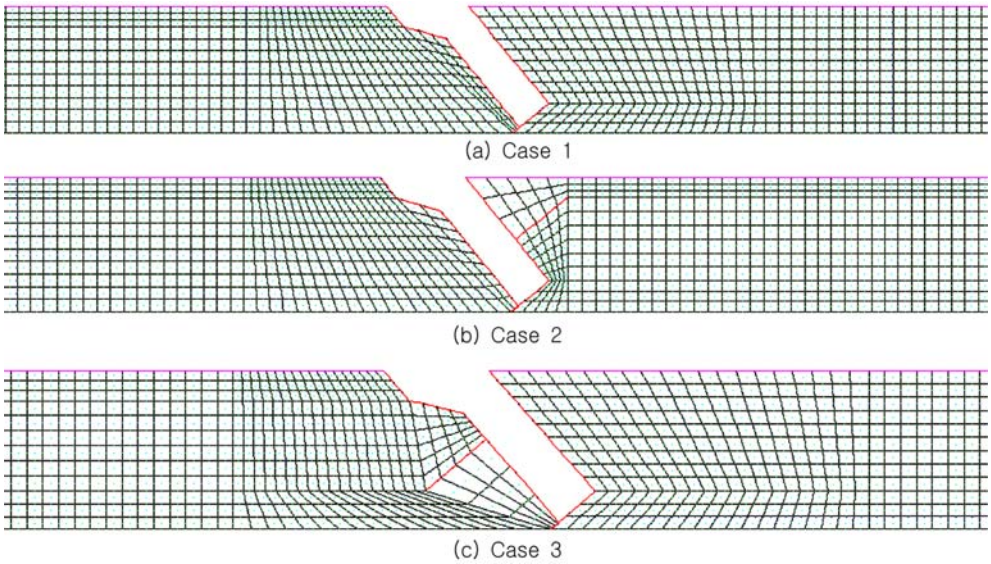


Fig. 8. Finite element meshes for three different cases.

에 발생한 것으로 추정된다. 이러한 가설은 같은 크기의 날개판을 부착하였는데도 불구하고 내해측에 붙인 Case 3은 큰 차이가 없고, 수입자의 운동이 활발하여 에너지 소모가 많을 것으로 추정되는 외해측 수면근처에 단부가 위

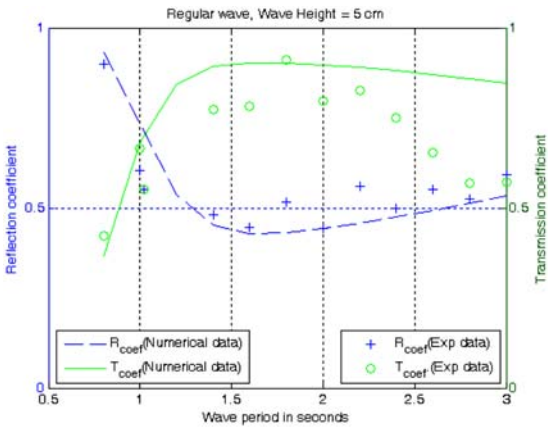


Fig. 9. Wave reflection and transmission coefficients for Case 1.

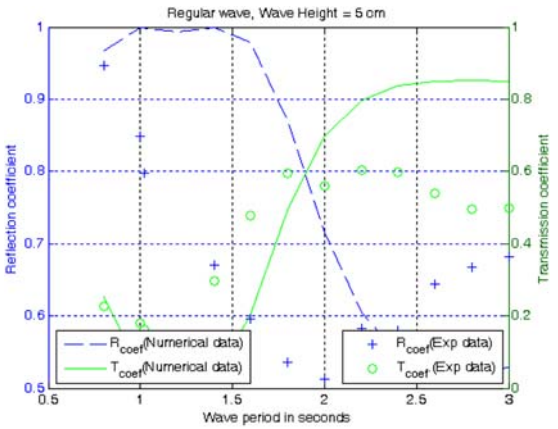


Fig. 10. Wave reflection and transmission coefficients for Case 2.

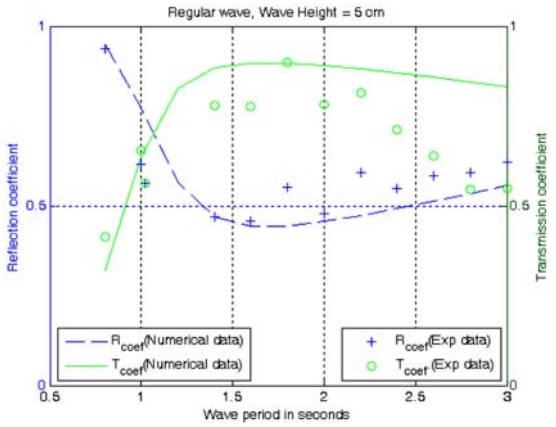


Fig. 11. Wave reflection and transmission coefficients for Case 3.

치하도록 설치된 Case 2의 경우는 큰 차이를 보이고 있는 것에 기초하고 있다. 유공방파제 유공벽에서의 파랑 에너지 손실 메카니즘, 방파제 등에 의해 좁아진 항입구에서의 파랑 에너지 소모 메카니즘과 거의 유사할 것으로 판단된다(Mei, 1989; Suh and Park, 1995; Park et al., 2000; Jeong et al., 1998).

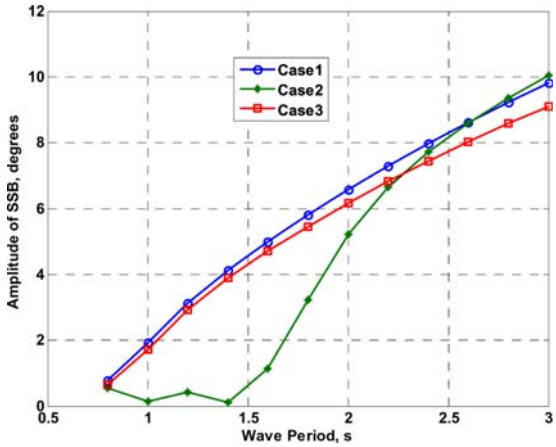


Fig. 12. Amplitudes of rotational angle for Case 1, 2, and 3.

Fig. 12에 나타낸 파랑에 의한 부유 플랩형 고조방파제(Case 1)의 응답특성을 살펴보면, 주기가 길어질수록 동적 응답이 거의 선형적으로 증가하며, 반사계수는 주기 1.5초(상대수심, $\frac{\omega^2 d}{g} = 0.894$)까지는 0.42까지 감소하고 그 이후는 천천히 증가하는 경향을 보였으며, 전달계수는 주기 1.5초(상대수심, $\frac{\omega^2 d}{g} = 0.894$)까지는 0.9까지 증가하다가 그 이후는 천천히 감소하는 경향을 보였다. 이러한 특성으로 볼 때 부유 플랩형 고조방파제도 일반적인 부유식 방파제와 같이 단주기 파랑차단 성능은 기대할 수 있지만, 장주기 파랑에는 취약한 것으로 평가할 수 있다.

고조방파제의 주기능이 해일발생시 항내 수위증가를 지연시키는 것인 만큼 어느 정도의 파랑에 의한 월파는 허용할 수 있다. 그러나 동적응답이 너무 커 물속에 잠기게 되면 수위증가 지연효과가 급속히 떨어질 것으로 예상되는바 허용 동적응답 범위를 최대응답 발생시 물속에 잠기지 않는 것으로 정하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 파랑응답을 감소시키는 방안에 대한 검토가 필요하다. 플랩형 고조방파제 정적 및 동적 응답을 줄이는 최적안은 부력에 의한 복원력을 증가시키는 것이라 할 수 있다. 파랑에 의한 공진현상이 발생하지 않는 범위내에서 최대 부력에 의한 복원력이 발생할 수 있도록 단면을 설계하는 것이 최적안인 것으로 판단된다.

4.2 마산만 고조방파제에의 적용

4.2.1 개요

개발된 수치모델을 마산만 입구 수심 20 m(DL 기준) 지역을 대상으로 설계된 부유 플랩형 고조방파제에 적용하여 수리특성 해석을 실시하였다. Fig. 13과 14에 설치 위치와 계획 고조방파제 표준단면도를 제시하였다.

4.2.2 정적 평형

해일고 변화에 따른 정적 평형 조건에 대한 계산 결과를 Table 2에 나타내었다. 최대 해일고는 태풍 매미 때

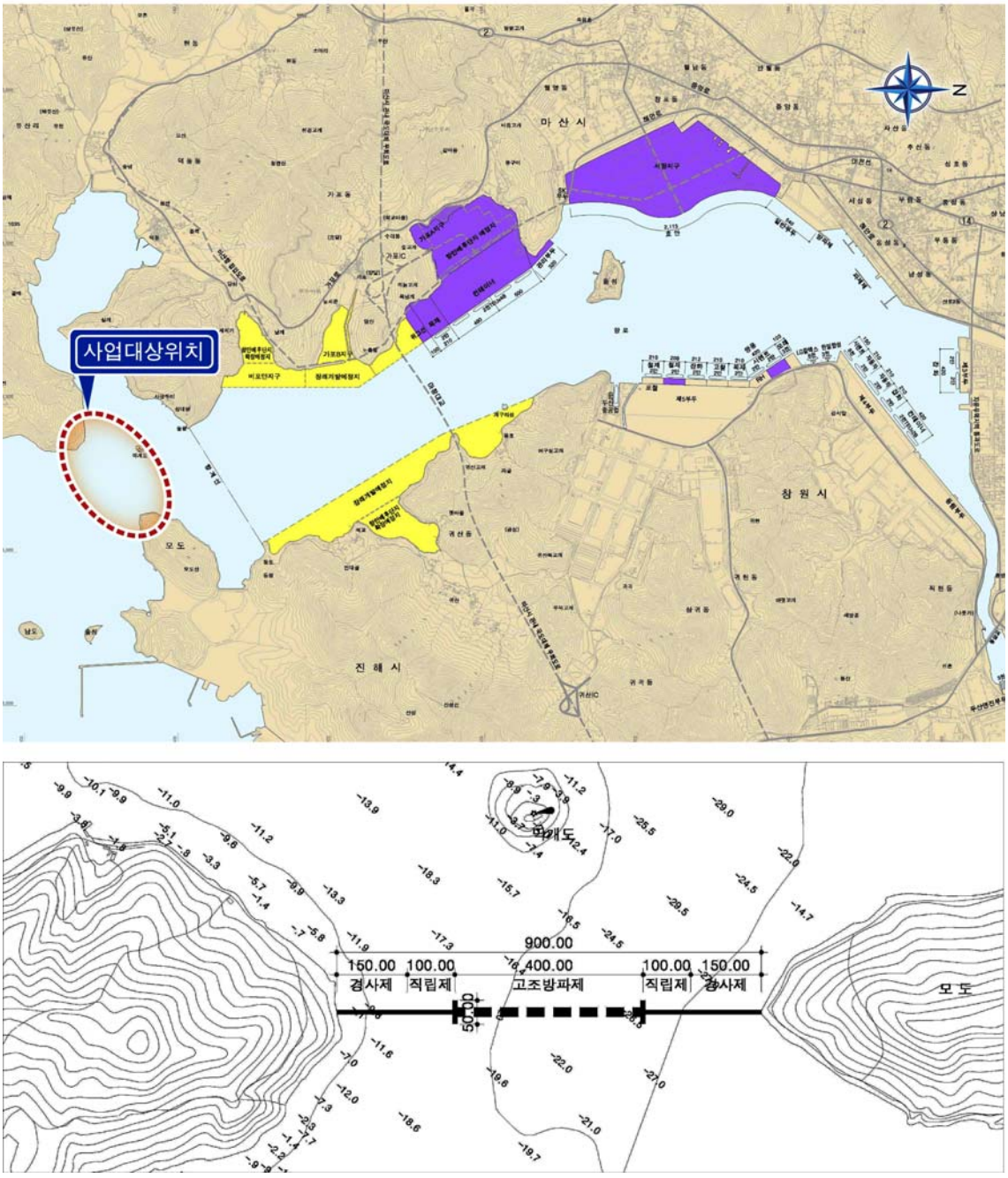


Fig. 13. Construction plan for a buoyant flap-typed storm surge barrier in Masan bay.

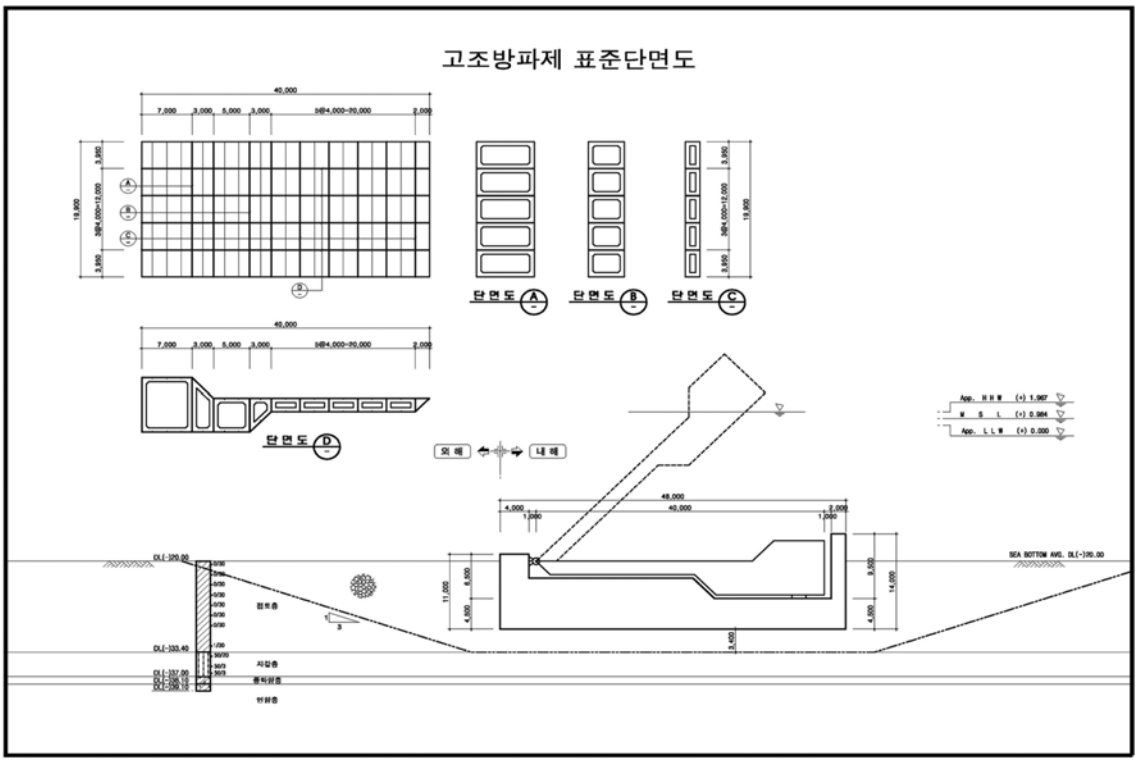


Fig. 14. Standard cross section of the buoyant flap-typed storm surge barrier in Masan bay.

Table 2. Static equilibrium position of the buoyant flap-typed storm surge barrier for Masan Bay

해일고 (m)	만내 수심(m)	회전각 (도)	비 고
0	21.967	22.5	연직선에서 시계 방향으로 관측한 회전각
2	21.967	45.0	

고조방파제 설치 위치에서 계산된 해일고 2 m로 설정하였다(김용희, 2004).

4.2.3 동적응답, 파랑 반사 및 전달 특성

해일이 발생하지 않은 경우와 2 m 발생한 경우에 대한 고조방파제 동적응답과 파랑 반사 및 전달계수 변화를 Fig. 15, 16, 17에 각각 나타내었다. 동적 응답에 대한 결과를 보면 고조가 발생되기 전이나 후 모두 입사파의 주기가 길어질수록 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 파랑 차단효과를 나타낸 반사율, 전달율 결과를 보면 고조가 발생하기 전이나 후 모두 주기 6초 이상이 되면 전달율이 90%이상으로 거의 외해 입사파가 항내측으로 전달되며, 장주기로 갈수록 파랑 차단효과가 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 15에 보인 바와 같이 고조가 발생

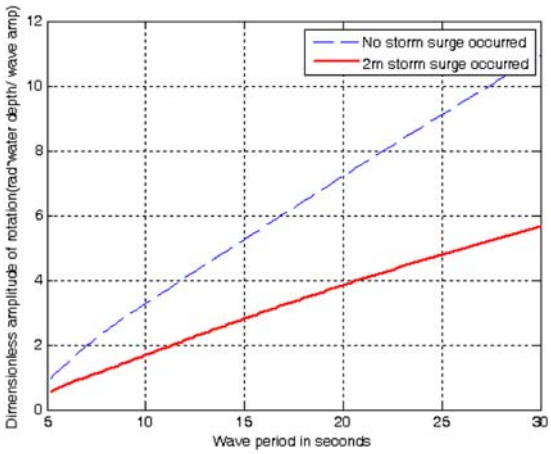


Fig. 15. Amplitudes of rotational angle of the buoyant flap-typed storm surge barrier installed in Masan Bay.

하면 동적응답이 줄어드는 현상이 발생하는데 이는 고조방파제가 고조 발생 전보다 눕게 되어(22.5° 에서 45.0°로) 부력에 의한 복원력이 증가하기 때문이다. 이외에 Fig. 18에 보인 바와 같이 고조가 발생하면 부가질량 변화가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 동적 특성들을 고

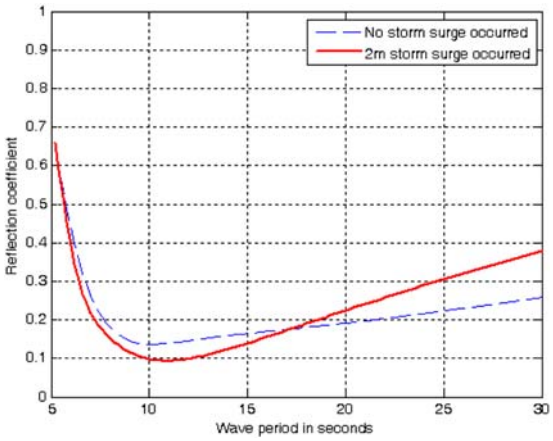


Fig. 16. Wave reflection coefficients of the buoyant flap-typed storm surge barrier installed in Masan Bay.

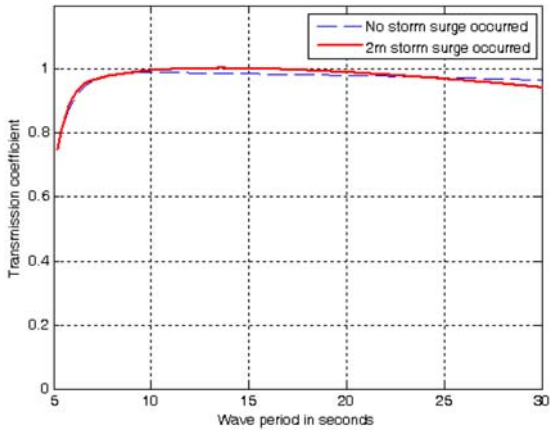


Fig. 17. Wave transmission coefficients of the buoyant flap-typed storm surge barrier installed in Masan Bay.

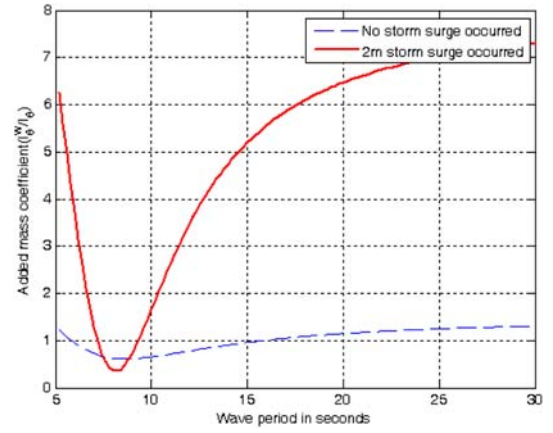


Fig. 18. Added mass coefficient of the buoyant flap-typed storm surge barrier installed in Masan Bay.

려하여 고조방파제 단면을 결정하면 효율적으로 고조발생과 폭풍파랑에 대응할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 계획한 고조방파제의 적용성을 태풍 매미 내습시의 환경 조건을 이용하여 개략적으로 살펴보았다. 즉, 김용희(2004)에 의해 추정된 최대 해일고가 약 2 m, 입사파 주기 14.9초, 파고 3.0 m 조건을 사용하여 고조방파제 상부구조의 수몰 가능성을 살펴봄으로써 그 적용성을 평가하였다. Table 2에 보인 바와 같이 고조 2 m 발생하게 되면 회전체가 연직축으로부터 약 45.0° 회전하여 눕게 되며, 이 상태에서 주기 14.9초 유의파고 3 m의 파랑이 작용하면 Fig. 15로부터 최대 4.2° 정도 진동하게 된다. 따라서, 고조방파제는 최대 49.2° 정도 회전하게 되며, 이때의 상부구조물의 끝단의 수면으로부터의 높이를 살펴보면 유의파고와 같은 2.2 m 정도로 이는 유의파고의 70%이상으로 통상적인 방파제 설계시 적용하는 60%보다 높아 월파가 많이 발생하지 않는 조건이다. 이 결과는 현재 계획한 고조방파제가 태풍 매미 내습시 조건에 대해서 고조 및 파랑제어에 있어서 충분히 제 기능을 다할 수 있다는 것을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

고조방파제의 운동을 억제하고 항내 전달율을 감소시키기 위한 또 다른 방안으로 앞에 제시한 수리실험결과에서 본 바와 같이 구조물 단부에서의 난류 발생을 유도하는 것을 생각할 수 있다. 즉, 외해측에 날개판을 부착하는 등의 방안을 도입하면 많은 입사파 에너지를 소모시킬 수 있고 결과적으로 고조방파제의 운동을 저감하는 한편 항내 전달파를 감소시킬 수 있다.

5. 결론 및 토의

부유 플랩형 고조방파제의 수리특성 해석을 위한 수치모델을 수립하고 수리실험결과와의 비교를 통하여 타당성을 입증하였으며, 마산만 현지 적용 구조물에 대한 해석을 통하여 도출된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 최대 동적응답은 입사파의 주기가 길어질수록 거의 선형적으로 증가한다.
- 파랑 차단 성능은 일반 부유식 방파제와 유사하게 단주기 조건에서는 효과를 보이나 장주기로 갈수록 미미하다.
- 동적응답과 파랑차단성능은 부력에 의한 복원력과 직접적으로 관련된다. 즉, 부력변화가 크게 발생할 수 있는 단면을 갖도록 설계하면 동적응답을 감소시킬 수 있으며, 파랑차단성능도 제고할 수 있다.
- 고조 발생 전보다 고조 발생 후의 동적응답이 작으며, 파

랑차단성능도 우수하다. 이러한 현상은 고조가 발생하면 구조체가 눕게 되어 부력에 의한 복원력 증대가 주요한 요인에 의한 것으로 판단되었다.

- 수심 20 m, 해일고 2 m인 마산만 입구 조건에 대해 길이 40 m, 두부폭 8 m의 부유 플랩형 고조방파제의 적용성 평가결과, 현장에서 예상되는 최대 파조건인 유의파고 3 m, 주기 14.9초에서도 고조 2 m를 제어할 수 있으며, 주기 6초 이하의 풍파 에너지는 30% 이상 차단이 가능하여 풍파에 대한 방파제로서의 역할은 어느 정도 할 수 있는 것으로 평가되었다.

본 연구를 통하여 수립된 수치모델은 단부에서 발생하는 난류에 의한 에너지 소모 현상을 모의할 수 없다. 이러한 현상을 고려할 수 있도록 수치모델 개선이 된다면 보다 우수한 성능을 보이는 새로운 형식의 고조방파제 개발도 가능할 것으로 판단된다. 아울러 입사 파고가 큰 경우, 고조방파제의 움직임이 크게 발생하여 비선형 현상이 강하게 발생할 것으로 예상되는 바, 보다 면밀한 성능평가를 위한 비선형 수치해석과 수리실험이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역특성화연구개발사업(C105E10-20001-06E020200210)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

http://www.salve.it/uk/default.htm.

김용희 (2004). 태풍 '매미'에 의한 해일피해 원인조사 및 재해방지대책. 대한토목학회 부산·울산·경남지회, 마산시.

박우선, 이달수, 오영민, 정원무 (1991). 연직 2차원 회절 및 방사문제 해석을 위한 무한요소. 한국해안해양공학회지, 3(4), 235-243.

서경덕, 지창환 (2007). 다열 커튼월 파일 방파제에 의한 규칙파의 반사 및 투과. 한국해안해양공학회지, 18(2), 97-111.

이동영 (2006). 해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산(I), 국토해양부, 한국해양연구원.

이동영 (2007). 해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산(II), 국토해양부, 한국해양연구원.

이종찬, 권재일, 박광순, 전기천 (2008). 해일고 산정 수치모의 실험, 태풍 매미. 한국해안해양공학회지, 20(1), 93-100.

정신택, 김정대, 고동휘, 박우선 (2008). 부유 플랩형 고조방파제의 파랑 반사 및 전달 - 수리실험. 한국해안해양공학회지, 20(2), 238-245.

조일형, 고혁준 (2007). 원형 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율. 한국해안해양공학회지, 19(1), 38-44.

Arikawa, T., Nakano, F., Nomura, H., Shimosako, K., Miyajima, S., Kobayashi, M., Toraishi, T., Arai, K. and Kihara, K. (2007). Hydraulic characteristics of buoyancy-driven vertical piling breakwater for tsunami and wind wave. Technical Note of The Port and Airport Research Institute, No.1156.

Bennett, G.S., Meiver, P. and Smallman, J.V. (1992). A Mathematical model of a slotted wavescreen breakwater. Coastal Engineering. 18, 231-249.

Colamussi, A. (1992). Venice high water barriers problem analysis ad design approach. Proc. of the short course on design and reliability of coastal structures, ICCE 1992.

Dhatt, G. and Touzot, G. (1984). The finite element method displayed. John Wiley and Sons, 509.

Eprim, Y. (2005). Venice mobile barriers project: Barrier caissons construction details. Flooding and Environmental Challenges for Venice and its Lagoon: State of Knowledge, Cambridge University Press.

Jeong, W-M., Park, W-S. and Lee K-S. (1998). Long-period wave responses in a harbor with narrow mouth, 26th ICCE, Denmark, pp. 1182-1195.

Mei, C.C. (1989). The applied dynamics of ocean surface waves, World Scientific.

Park, W-S. Kim, B-H., Suh, K-D. and Lee, K-S. (2000). Scattering of irregular waves by vertical cylinders, Coastal Engineering Journal, Vol. 42, No. 2.

Shimosako, K., Miyajima, Kiyomiya, O., Nakayasu, K., Ookubo, H. and Yui, T. (2007). Hydraulic characteristics of flap gate for storm surge and tsunami. Technical Note of The Port and Airport Research Institute, No.1155.

Sollitt, C.K., Chung-Pan, L., William, G.N. and Thomas, J.P. (1986). Mechanically Coupled Buoyant Flaps: Theory and Experiment. Coastal Engineering, 2445-2459.

Sommerfeld, A. (1949). Partial differential equations in physics. Academic Press, New York, 181-200.

Suh, K-D. and Park, W-S. (1995), Wave Reflection from Perforated-Wall Caisson Breakwaters, Coastal Engineering, Vol. 26.

Received April 1, 2009
Accepted April 27, 2009