

Catenary계류된 부방파제의 3차원파랑변형에 관한 수치해석

김도삼* · 최낙훈* · 윤희면* · 손병규**

*한국해양대학교 토목환경시스템공학부

**국립수산과학원

Numerical Analysis of Three-Dimensional Wave Transformation of Floating Breakwater Moored by Catenary

DO-SAM KIM*, NACK-HOON CHOI*, HEE-MYUN YOON* AND BYOUNG-KYU SON**

*Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**National Fisheries Research & Development Institute

KEY WORDS: Floating Breakwater 부방파제, Three-dimensional Wave Transformation 3차원파랑변형, Green Function Method Green 함수법, Eigenfunction Expansion Method 고유함수전개법

ABSTRACT: In general, the salient features of the floating breakwater have excellent regulation of sea-water keeping the marine always clean, up and down free movement with the incoming and outgoing tides, capable of being installed without considering the geological condition of sea-bed at any water depth, This study discusses the three dimensional wave transformation of the floating breakwater moored by catenary. Numerical method is based on the Green function method and eigenfunction expansion method. The validity of the present is confirmed by comparing it with the result of Ijima et al.(1975) for tensile moored floating breakwater. According to the numerical results, drift and width of the floating breakwater affect on the wave transformations greatly, and incident wave of long period is well transmitted to the rear of the floating breakwater.

1. 서 론

최근, 육지공간의 부족, 육상자원의 고갈 및 해양휴양시설의 개발에 따른 해역공간의 이용문제가 대두되면서 기존의 중력식 방파제에 비해 많은 이점을 가지는 부유식 방파제에 관한 연구가 국내·외적으로 널리 수행되고 있으며, 국내에서는 현재 마산시 원전어항에 부방파제를 처음으로 도입·시공 중에 있다(마산지방해양수산청, 2002 ; 포스코건설, 2003).

부방파제는 파랑에너지가 집중되어 있는 자유수면에서 수면하 20%정도에 부체를 띄워 고정시의 부체에 의한 회전산란파와 동요시의 발산파와의 위상차로 파랑을 제어하는 것이 일반적인 제어방식이다. 부방파제의 장점은 무엇보다 대수심해역에 적합하고, 해수흐름을 방해하지 않아 항내오염을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 지진의 피해를 최소화할 수 있고, 연약지반상에서도 쉽게 건설될 수 있다는 점이다.

이상의 부방파제에 의한 파랑제어기능과 동적거동을 검토함에 있어서 일반적으로 단면2차원 적인 결과를 3차원적으로 확대 해석하거나(마산지방해양수산청, 2002 ; 포스코건설, 2003), 1개의 부방파제에 대한 동적거동의 해석결과를 개구폭의 산정과

같은 평면배치문제로 적용하는 경우(Nakamura & Mizutani, 2001)가 대부분이다.

그러나, 실제 해안에 건설되는 부방파제는 多수로 건설되기 때문에 파랑변형과 동적거동이 간섭효과로 1개의 경우와는 상이할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Catenary계류된 2개의 부방파제에 의한 파랑변형을 입사파랑의 조건과 파향 및 흘수 등을 변화시켜 파랑변형을 주안점으로 검토한다.

본 연구를 수행하기 위하여 적용한 수치해석법은 고유함수전개법과 Green함수법을 병용한 기법이며, 본 연구결과에 타당성을 검증하기 위해 1개의 긴장계류에 대한 Ijima et al.(1975)의 해석결과와 비교하였다.

2. 이론 해석법

2.1 기본가정 및 경계조건

Fig. 1에 나타내는 바와 같이, 수심 h 의 해역에 Catenary계류된 직사각형의 2개의 부방파제(우측의 부방파제를 부방파제 I, 좌측의 부방파제를 부방파제 II로 칭한다)가 주파수 σ 의 입사파에 의해 주기적인 미소운동을 하는 것으로 하며, 이 때 부방파제 I과 부방파제 II사이의 연직중심축상에 원점 o 를 둔 Fig. 1과 같은 좌표계를 취하는 것으로 한다. 부방파제 I의 장축 및 단축

제1저자 김도삼 연락처: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지 051-410-4463 kimds@hanara.kmaritime.ac.kr

는 여현파로 한다.

$$\zeta = \zeta_0 \exp\{-i(kx \cos \theta + ky \sin \theta + \sigma t)\} \quad (4)$$

2.2 속도포텐셜의 전개

식(3)에서 자유표면경계조건과 해저경계조건을 만족하는 외역 I의 속도포텐셜 ϕ_1 은 다음의 식으로 표현된다.

$$\phi_1(x, y, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[\{f_0(x, y) + f_1(x, y)\} Z(kh) + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(x, y) Z(k_n h) \right] \quad (5)$$

여기서, g 는 중력가속도, $Z(kh) = \cosh k(h+z)/\cosh kh$, $Z(k_n h) = \cos k_n(h+z)/\cos k_n h$, k 및 k_n 은 다음의 식으로 주어지는 근이다.

$$kh \tanh kh = -k_n h \tan k_n h = -\frac{\sigma^2 h}{g} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

또한, $f_1(x, y)$ 는 진행회절산란파성분을, $f_2^{(n)}(x, y)$ 는 정지회절산란파성분을, $f_0(x, y)$ 는 식(4)의 입사파에 대응하는 다음의 식으로 주어질 수 있다.

$$f_0(x, y) = -i \exp\{-ik(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \quad (7)$$

식(3)에서 부방파제의 저면에서 경계조건과 해저경계조건을 만족하는 내역 II, III에서의 속도포텐셜 ϕ_n, ϕ_m 는 Fourier변환으로부터 다음의 식과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{II}(x, y, z) = & \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[\varphi_0(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x, y) \cos \bar{s}(z+qh) \right. \\ & + i v_m \left\{ \left(-\frac{\xi_1^*}{\xi_0} - \frac{\omega_{11}^* y}{\xi_0} + \frac{\omega_{12}^*(x-\bar{x}_1)}{\xi_0} \right) \left(1 + \frac{z}{h} \right)^2 \right. \\ & + \frac{1}{4} \left(\frac{2\xi_1^*}{\xi_0} + \frac{\omega_{11}^* y}{\xi_0} - \frac{\omega_{12}^*(x-\bar{x}_1)}{\xi_0} \right) \\ & \left. \left. \cdot \left(\frac{(x-\bar{x}_1)^2 + y^2}{h^2} \right) \right\} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_{III}(x, y, z) = & \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[\psi_0(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \psi_s(x, y) \cos \bar{v}(z+qh) \right. \\ & + i v_m \left\{ \left(-\frac{\xi_2^*}{\xi_0} - \frac{\omega_{21}^* y}{\xi_0} + \frac{\omega_{22}^*(x-\bar{x}_2)}{\xi_0} \right) \left(1 + \frac{z}{h} \right)^2 \right. \\ & + \frac{1}{4} \left(\frac{2\xi_2^*}{\xi_0} + \frac{\omega_{21}^* y}{\xi_0} - \frac{\omega_{22}^*(x-\bar{x}_2)}{\xi_0} \right) \end{aligned}$$

$$\left. \cdot \left(\frac{(x-\bar{x}_2)^2 + y^2}{h^2} \right) \right\} \right] \quad (9)$$

여기서, $\bar{s} = s\pi/\bar{q}h$, $\bar{v} = v\pi/\bar{q}h$, s, v 는 정수, $\bar{q} = 1 - q$, $v_m = \frac{1}{2q} \frac{\sigma^2 h}{g}$ 이다.

식(5), (8), (9)에서 $f_1(x, y), f_2^{(n)}(x, y); \varphi_0(x, y), \varphi_s(x, y); \psi_0(x, y), \psi_v(x, y)$ 는 각각의 속도포텐셜을 식(2)에 대입함으로써 다음의 Helmholtz방정식을 만족하는 미지함수로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \phi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial y^2} + p\phi_m = 0 \quad (10)$$

여기서, $\phi_m = f_1, f_2^{(n)}$ 의 경우에는 각각 $p = k^2, -k_n^2$; $\phi_m = \varphi_0, \varphi_s$ 의 경우에는 각각 $p = 0, -\bar{s}^2$; $\phi_m = \psi_0, \psi_v$ 의 경우에는 각각 $p = 0, -\bar{v}^2$ 으로 주어진다.

2.3 Green함수에 의한 $f_1, f_2^{(n)}; \varphi_0, \varphi_s; \psi_0, \psi_v$ 의 표시

외역 I과 내역 II, III의 임의점을 각각 (x, y) 로 나타내고, 각 경계선상과 영역상의 두 점간의 거리 $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$ 를 사용하여 $r \rightarrow 0$ 에서 $\log r$ 오더의 특이성을 갖고, $r \rightarrow \infty$ 에서 Sommerfeld의 Radiation Condition을 만족하는 식(10)의 특해로서의 Green함수는 $f_1, f_2^{(n)}; \varphi_0, \varphi_s; \psi_0, \psi_v$ 에 대해서 각각 $H_0^{(1)}(kr), K_0(k_n r); \log(1/kr_1), K_0(\bar{s}r_1); \log(1/kr_2), K_0(\bar{v}r_2)$ 로 주어진다. 여기서, $H_0^{(1)}$ 은 제1종Hankel함수, K_0 는 변형Bessel함수이다. 그리고, (x, y) 를 경계면상의 고정점 (ξ', η') 로 근접시키면 Green정리에 의하여 각각 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\phi_m(\xi', \eta') = \begin{cases} I \int_Q [\phi_m(\xi, \eta) \bar{G}(\xi, \eta; \xi', \eta')] \\ - kG(\xi, \eta; \xi', \eta') \bar{\phi}_m(\xi, \eta)] ds \end{cases} \quad (11)$$

여기서, $\bar{\phi}_m = \frac{\partial \phi_m}{k \partial \nu}$, $\bar{G} = \frac{\partial G}{\partial \nu}$ 이다.

2.4 부방파제의 운동방정식

부방파제 I ($i=1$ 에 해당)과 부방파제 II ($i=2$ 에 해당)의 질량을 각각 M_i , 부방파제 I, II의 x, y, z 축방향에 관한 관성모멘트를 각각 I_{i1}, I_{i2}, I_{i3} 로 하면 부방파제 I, II의 각 운동방정식

은 다음과 같이 주어진다.

$$M_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = P_{X_i} - K_{X_i} \quad (12)$$

$$M_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = P_{Y_i} - K_{Y_i} \quad (13)$$

$$M_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = P_{Z_i} + R_{Z_i} - K_{Z_i} \quad (14)$$

$$I_{i1} \frac{d^2 \delta_{i1}}{dt^2} = T_{X_i} + W_{X_i} - \bar{K}_{X_i} \quad (15)$$

$$I_{i2} \frac{d^2 \delta_{i2}}{dt^2} = T_{Y_i} + W_{Y_i} - \bar{K}_{Y_i} \quad (16)$$

$$I_{i3} \frac{d^2 \delta_{i3}}{dt^2} = T_{Z_i} - \bar{K}_{Z_i} \quad (17)$$

여기서, $P_{X_i}, P_{Y_i}, P_{Z_i}, T_{X_i}, T_{Y_i}, T_{Z_i}$ 는 부방파제에 작용하는 x, y, z 방향의 합력 및 중심무변의 모멘트, $K_{X_i}, K_{Y_i}, K_{Z_i}, \bar{K}_{X_i}, \bar{K}_{Y_i}, \bar{K}_{Z_i}$ 는 Catenary 계류에 의한 라인의 저항력, $R_{Z_i}, W_{X_i}, W_{Y_i}$ 는 정수압적인 복원력과 모멘트를 각각 나타낸다.

2.5 영역경계면에서의 연속조건

부체측면에서는 식(3)에 나타난 운동학적인 경계조건이 성립하고, 또한 외역 I 과 내역 II, III의 유체운동에 대해서는 경계에 있어서 동역학적인 연속성, 즉 질량프럭스와 에너지프럭스의 연속이 성립되어야 한다. 따라서, 다음의 조건식이 성립한다.

■ 부방파제 I에 대해서

$$-qh < z < 0;$$

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial \nu} = \begin{cases} -i\sigma [(\xi_1^* l + \eta_1^* m) - \omega_{11}^*(z - \bar{z}_1)m \\ + \omega_{12}^*(z - \bar{z}_1)l + \omega_{13}^*\{(x - \bar{x}_1)m - y\}] \end{cases} \quad (18)$$

$$-h < z < -qh;$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_I}{\partial \nu} = \frac{\partial \phi_{II}}{\partial \nu} \\ \phi_I = \phi_{II} \end{cases} \quad (19)$$

■ 부방파제 II에 대해서

$$-qh < z < 0;$$

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial \nu} = \begin{cases} -i\sigma [(\xi_2^* l + \eta_2^* m) - \omega_{21}^*(z - \bar{z}_2)m \\ + \omega_{22}^*(z - \bar{z}_2)l + \omega_{23}^*\{(x - \bar{x}_2)m - y\}] \end{cases} \quad (21)$$

$$-h < z < -qh;$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_I}{\partial \nu} = \frac{\partial \phi_{III}}{\partial \nu} \\ \phi_I = \phi_{III} \end{cases} \quad (22)$$

위의 관계식에 식(5), (8), (9)의 속도포텐셜 $\phi_I, \phi_{II}, \phi_{III}$ 를 대입하고 함수계 $\cosh k(z+qh), \cos k_n(z+h)$ 가 $-h \leq z \leq 0$ 에서 직교함수를 이루고, $\cos \bar{s}(z+qh), \cos \bar{v}(z+qh)$ 가 각각 $-h \leq z \leq -qh$ 에서 자기직교함수를 이룬다는 고유함수의 특성을 이용하여 접합조건식을 얻는다.

3. 수치해석의 결과

3.1 해석결과와 타당성 검토

본 연구의 타당성을 검토하기 위하여 1개의 긴장계류된 부방파제에 대한 Iijima et al.(1975)의 수치해석 결과와 비교하였다. Fig. 2(a)-(c)는 무차원 홀수심이 각각 $q=0.25, 0.5$ 인 경우에 있어서의 직각입사파랑에 대한 무차원주기의 변화에 따른 부방파제의 무차원운동량(Heaving, Swaying, Rolling)에 대한 수치해석결과를 나타낸다.

그림에서 나타난 바와 같이 전체적으로 결과들이 잘 일치하는 것으로 판단되므로 본 연구의 타당성을 검증할 수 있다.

3.2 홀수심의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 3(a)-(c)는 무차원 홀수심이 각각 $q=0.45, 0.35, 0.25$, 인 경우에 있어서 회절계수(무차원파고분포)의 공간분포를 나타낸 결과이다. 모든 그림에서 부방파제에 의한 입사파의 반사로 인한 부분중복파의 형성을 볼 수 있으며, 이는 부방파제의 바로 전면에서 가장 명확히 나타나고 부방파제에서 멀어질수록 파랑 에너지의 수평분산에 의해 좌우로 확산된다.

여기서, 홀수심이 깊을수록 개구부에서 파랑이 더욱 집중되는 현상을 볼 수 있으며, 이로부터 개구부를 통해 배후해역으로 보다 큰 파랑에너지가 전파된다. 이와 같은 현상은 홀수심이 깊을수록 부방파제 저면을 통한 에너지 전달이 작아지고, 상대적으로 개구부를 통한 에너지 전달이 많아지기 때문으로 판단된다. 그리고, 부방파제 배후역에서 정온도를 살펴보면, 정온도의 차이는 크게 발생하지 않지만, Fig. 3(a)의 경우가 본 계산의 범위 내에서는 가장 우수한 것으로 나타났다. 이로부터 일반적으로 홀수심이 깊은 경우에 부방파제의 저면을 통한 파랑에너지가 많이 차단되므로 정온도가 향상될 것으로 여겨지지만, 반대로 개구부를 통한 에너지전달이 상대적으로 커지기 때문에 오히려 정온도가 나빠지는 경우가 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 입사파향각의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 4(a), 4(b)는 입사파향각을 각각 $\theta=60^\circ, 45^\circ$ 로 변화시킨 경우에 있어서 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서, $\theta=90^\circ$ 인 Fig. 3(b)의 경우를 포함하여 검토하면, 직각으로 입사하는 경우에는 입사파향에 대해서 동일한 각도로 반사파가

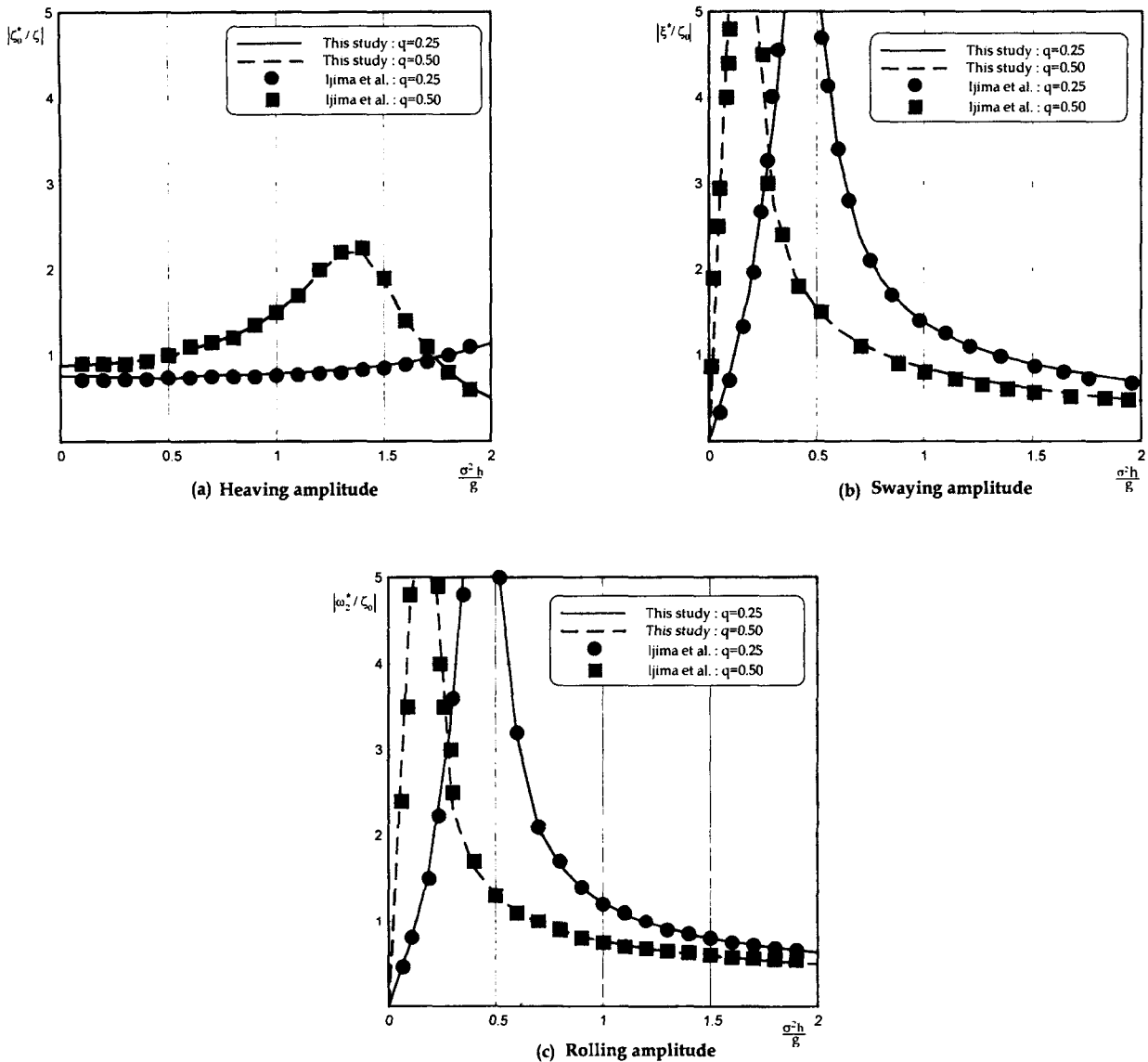


Fig. 2 Motions of floating breakwater.

형성되므로 무차원파고분포가 y 축에 대해서 좌우대칭으로 형성되지만, $\theta = 60^\circ, 45^\circ$ 의 경우에는 입사파랑이 우측상방에서 경사지게 입사하고 부방파제에서 반사파는 동일한 각도로 좌측상방으로 반사되므로 부방파제의 전면에서 나타나는 부분중복파가 좌측에 형성될 것이며, 이러한 현상은 입사파향각이 작을수록 보다 좌측으로 이동할 것이다. 따라서, Fig. 4(a)의 경우보다 Fig. 4(b)의 경우가 부분중복파의 형성이 좌측으로 쏠려있다는 것을 알 수 있다. 배후역의 파고분포를 살펴보면, 입사파향각이 작을수록 우측으로 유입되는 입사파랑에너지가 많기 때문에 상대적인 정온역이 보다 좌측으로 치우쳐있으며, 그의 범위는 좁아진다는 것을 알 수 있다.

3.4 입사주기의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5(a), 5(b)는 입사주기가 각각 $T = 1.2, 1.4$ sec 인 경우

에 대한 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서, $T = 1.0$ sec 인 Fig. 3(b)를 포함하여 검토하면 $T = 1.2$ sec 인 Fig. 5(a)가 정온도가 가장 좋은 것으로 나타난다. 일반적으로 부방파제는 주기가 긴 파랑에 대해서는 파랑제어효과가 떨어지는 것으로 나타나지만, 여기서 $T = 1.2$ sec의 경우가 가장 좋은 결과를 나타내는 것은 Nakamura & Ide(1997)의 2차원 수리실험결과에서 확인된 바와 같이 파장에 대한 부체폭의 비(L/B)가 3.2 정도에서 투과율이 극소를 나타내기 때문으로 판단된다. 또, 주기가 가장 짧은 $T = 1.0$ sec 인 Fig. 3(b)의 경우와 주기가 가장 긴 $T = 1.4$ sec 인 Fig. 5(b)를 비교하면 $T = 1.0$ sec의 경우가 개구부 배후해역에서는 약간 높은 파고치를 나타내지만, 부방파제의 배후에서는 Fig. 5(b)보다 좋은 결과를 나타낸다. 여기서, Fig. 5(b)가 개구부 배후해역에서 $T = 1.0$ sec 인 Fig. 3(b) 보다 나은 정온도를 나타내는 이유는 단주기파랑일수록 부

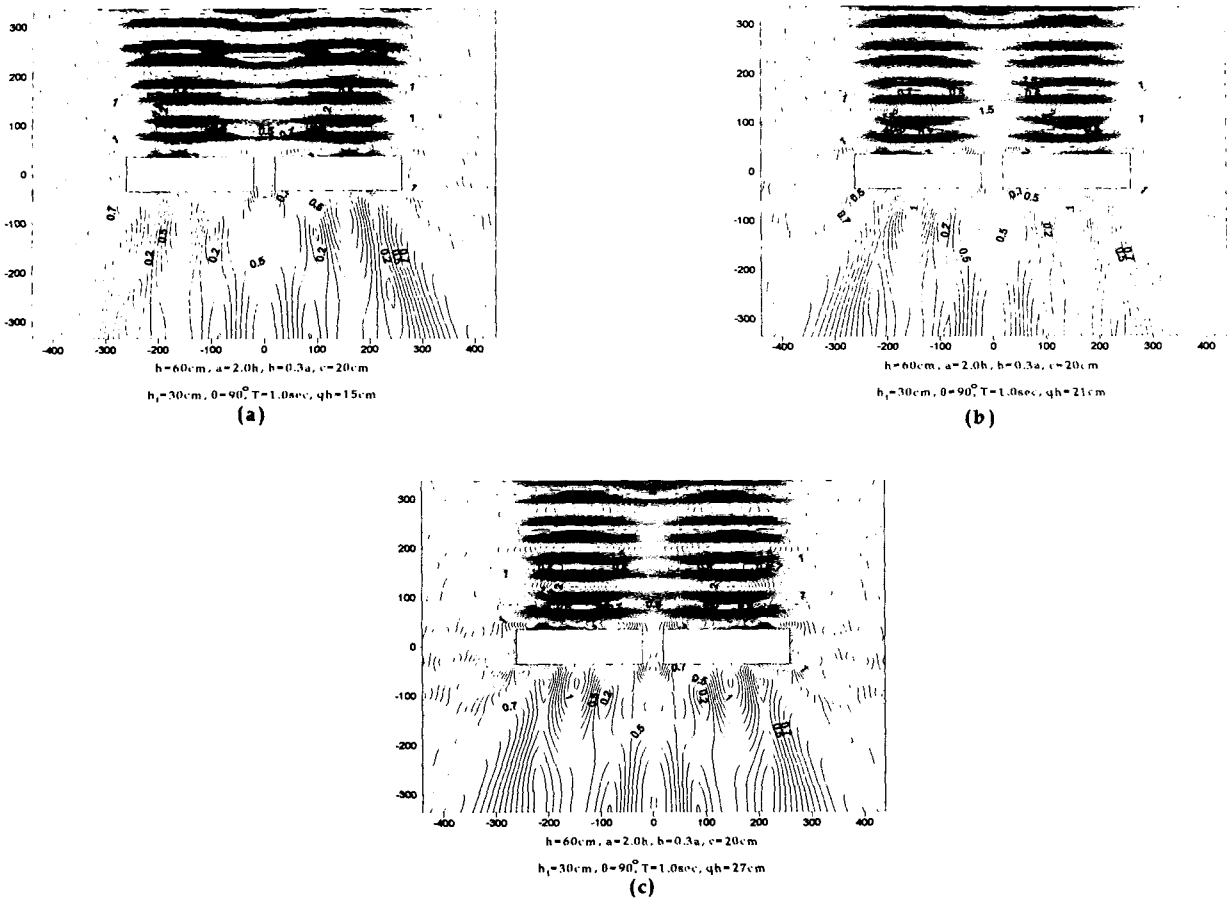


Fig. 3 Distributions of nondimensional wave height for the variations of draft.

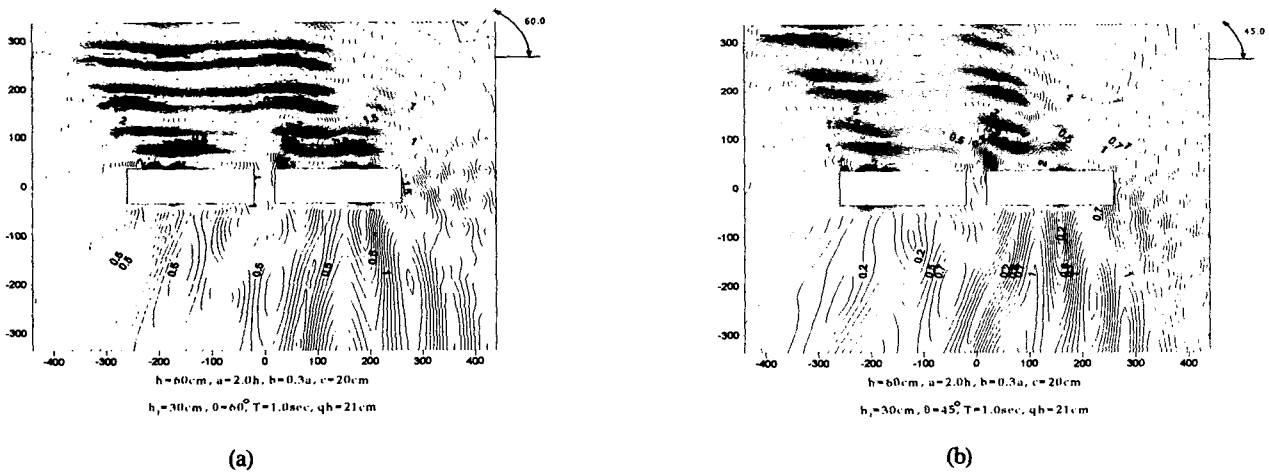


Fig. 4 Distributions of nondimensional wave height for the variations of wave direction.

체전면에서 반사파에 의한 부분중복파가 많이 형성되므로, 개구부를 통한 부분중복파의 유입이 작아지기 때문인 것으로 판단된다.

3.5 폭의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 6(a), 6(b)의 경우는 주기 $T=1.2\text{sec}$ 일때 부방파제의

폭을 각각 $b=0.2a$, $0.4a$ 로 변화시킨 경우의 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서, $b=0.3a$ 인 Fig. 5(a)를 포함하여 검토하면, 부체폭이 $0.3a$ 인 Fig. 5(a)의 경우가 가장 정온도가 좋은 것으로 나타난다. 이는 앞에서 설명했던 파장에 대한 부체폭의 비가 3.2정도일때 투과율이 최소가 되기 때문이다.

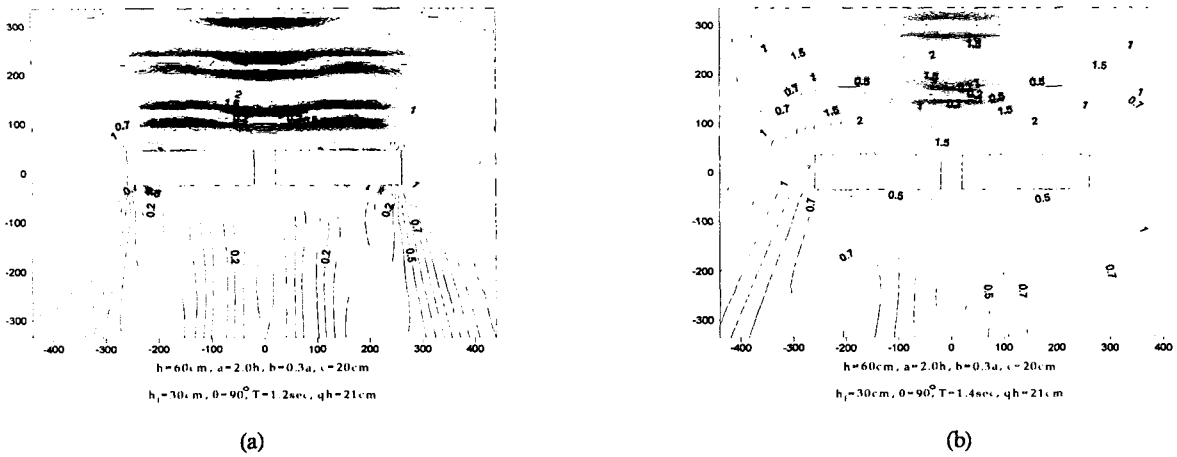


Fig. 6 Distributions of nondimensional wave height for the variations of incident wave period.

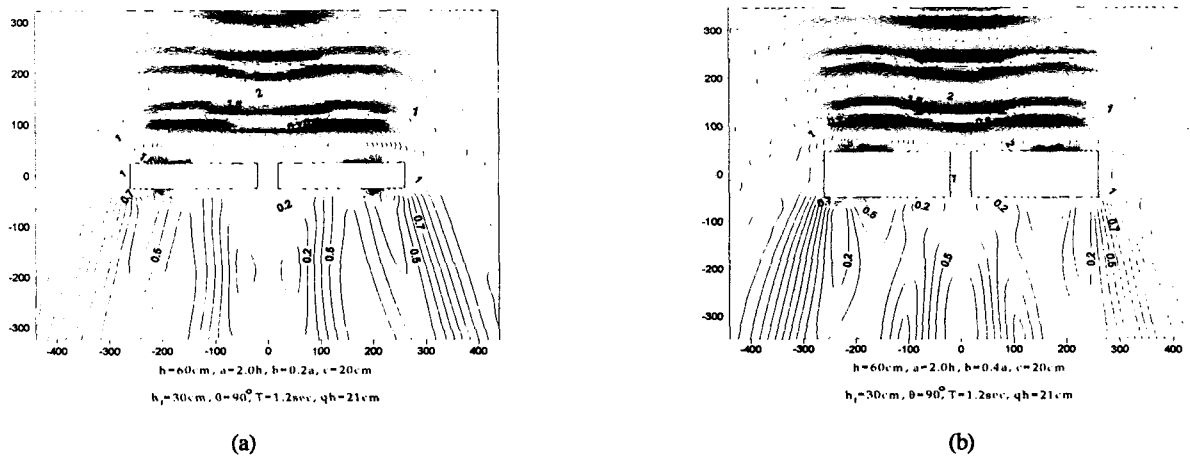


Fig. 6 Distributions of nondimensional wave height for the variations of the width of floating breakwater.

그리고, 폭이 $0.2a$ 인 Fig. 6(a)의 경우와 $b=0.4a$ 인 Fig. 6(c)의 경우를 비교하면 부방파제의 폭이 좁은경우가 개구부 배후에서 정온도는 좋은 값을 나타내지만, 부방파제 배후에서는 폭이 넓은 경우가 나은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그 이유는 부방파제의 폭의 변화에 의한 부분중복파의 영향으로 판단된다.

이와 같이 부방파제의 폭의 변화는 일반적으로 입사파랑의 파장과 밀접한 관계가 있으며, 폭이 넓을수록 파랑제어능력이 탁월하다고는 말할 수 없고, 현지의 파랑조건에 맞는 부방파제의 폭을 결정하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 파동장에 설치된 2개의 Catenary계류된 부방파제에 대해 고유함수전개법과 Green함수법을 적용하여 3차원적인 파랑제어기능을 입사파랑조건과 부방파제의 치수 등을 변화시켜 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 아래에 기술하여 본 연구의 결론으로 한다.

1) 부방파제의 흘수심이 깊을수록 반드시 파랑제어능력이 향상되

는 것이 아니고, 개구부를 통한 파랑에너지의 전달이 상대적으로 커져 배후역의 정온도가 악화되는 경우도 있으므로, 흘수심과 개구폭을 동시에 고려하여 판단할 필요가 있다. 2) 주기가 길어질수록 반사파가 작아지고, 그로부터 부방파제 전면에서 형성되는 부분중복파의 형성이 작아져 부방파제의 배후해역의 파고치가 상승하고, 반대로 보다 단주기파랑일수록 부분중복파의 영향으로 개구부 배후역에서의 파고치가 상승하는 결과를 볼 수 있다.

3) 부방파제의 폭의 변화는 일반적으로 입사파랑의 파장과 깊은 관련을 가지며, 폭이 넓을수록 파랑제어능력이 탁월하다고 말할 수 없다. 그리고 무엇보다 현지 파랑조건에 적합한 부방파제의 폭을 결정하는 것이 중요하다.

참고 문헌

김도삼, 이재석, 이봉재 (2001). "수면부근에 설치된 이열고정부 방파제에 의한 파랑제어의 해석", 한국해양공학학회지, 제15권, 제4호, pp 1-7.
 김도삼, 윤희면 (2002). "말뚝계류된 부방파제의 공간파랑제어

- 및 동적거동에 관한 연구”, 한국해안·해양공학회지, 제14권, 제3호, pp 183-191.
- 마산지방해양수산청 (2002). 원전어항건설공사 부방파제실험보고서.
- 포스코건설 (2003). 부소파제의 파랑제어 해석법과 기술개발사례 및 설치현장조사.
- Ijima, T., Yoshida, A. and Yumura, Y. (1975). “On The Motions of Elliptical or Rectangular Floating Body in Waves of Finite Water Depth”, Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No 244 pp 91-105.
- Nakamura and Ide (1997). “A Study on Application of Motion Theory of Floating Body in Damping Wave”, Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 44, No 2, pp 856-860.
- Nakamura and Mizutani (2001). “Resistive Design Method Against Wave Action and Tranquility in a Harbor by a Floating Breakwater”