

장주기파에 효율적인 부유식방파제 단면 형상에 대한 연구

안용호 · 류황진 · 김도영

홍익대학교 조선해양공학과

A Study on the Long-Wave Effective Cross Section of Floating Breakwater

Young-Ho An, Hwang-Jin Lew, Do Young Kim

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hong-Ik University

KEY WORDS: floating breakwater 부유식 방파제, wave transmission coefficient 투과계수

Abstract: In this paper some shapes of the FBW cross sections were examined to improve the performance of FBW for the long wave. Trapezoidal section and prominence section were examined. Linear potential theory is used and the boundary element method is use for numerical computation. Proper choice of the pontoon geometry may improve the transmission coefficient in the long wave range for a given wave period.

1. 서론

해안 및 해양에 설치되는 시설물들을 파도로부터 보호하기 위하여 방파제 또는 소파 구조물의 설치가 필요하다. 이러한 구조물은 지역적 특성, 작업의 종류 그리고 경제적 요인을 고려하여, 대상 해역에서 원하는 정온도(calmness)를 확보해야 한다.

방파제의 종류는 크게 착저식과 부유식으로 나눌 수 있다. 착저식 방파제는 방파성능이 우수하여 많이 사용되고 있다. 그러나 해수교환을 방해하여 환경에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 이에 따라 해수가 일부 교환되는 형태의 방파제의 개발이 시도되고 있으나, 큰 효과는 기대하기 힘든 실정이다.

전 세계적으로 환경 오염 방지, 환경 및 생태계의 보호에 대한 관심이 고조되고 있으며, 앞으로도 중요성이 더하여 갈 것이다. 부유식 방파제는 그 구조상 해수순환을 방해하지 않으므로, 설치 해역에서 발생한 오염물질이 자연적으로 정화되는 작용을 방해하지 않으며, 어

류들이 방파제 밑으로 통과할 수 있으므로 해양환경 식처에 최소의 영향을 준다. 이러한 점은 인간이 해양을 개발함과 동시에 해양환경을 보존하여 자연과 더불어 조화를 이루고자 하는 노력과 일치한다 (김도영, 1995). 해양개발이 본격화되면 수심이 깊은 곳도 개발의 대상으로 확대되어 갈 것이다. 기존의 방파제는 수심이 깊어짐에 따라 건설비용이 급격히 증가한다. 그러나 부유식 방파제는 계류가 가능한 수심까지 설치할 수 있으며, 수심의 증가에 따른 건설비용의 증가가 크지 않다 (Grinyer, 1995). 부유식방파제의 종류와 종류 별 특성에 대한 것은 McCartney(1985)에 잘 정리되어있다.

그러나 부유식방파제는 방파효율이 착저식에 비하여 떨어지기 때문에, 파후(wave climate)가 온순한 지역에 설치되고 있다. 그러나 부유식방파제는 앞에서 언급한 바와 같이 해양환경 및 생태계에 미치는 영향을 극소화할 수 있으며, 경제성, 수심의 제한, 제작기간 등으로 착저식 방파제의 시공이 어려운 경우에 이를 대신하여 사용할 수 있다. 부유식방파제를 실용화하기 위해서는 부유식방파제의 효율을 극대화하는 것이 중요하다. 특

히 파고가 높고 주기가 긴 장주기파에 대한 방파성능 향상이 가장 시급히 해결해야할 점으로 볼 수 있다.

부유식 방파제의 설계에서는 방파성능과 경제성이 가장 중요한 파라미터로 생각된다. 소파성능의 효율을 높이려면 낮은 투과계수의 값을 가져야 하며, 경제성이 있으려면 구조물의 크기가 적정 규모가 되어야 할 것이다. 이러한 두 가지 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 적은 치수의 구조물로 큰 방파 효율을 가져야 가능하다. 이것은 바로 장주기 파도에 대한 방파 효율을 개선함으로써 그 목적을 달성할 수 있다.

투과계수(transmission coefficient)는 방파제의 성능을 나타낸다. 투과파는 파고와 입사파의 파고의 비로 나타내며, 투과계수가 1이면 입사파가 모두 투과되어 방파효율이 0이고, 투과계수가 0이면 완전 방파를 의미한다. 일반적으로 부유식방파제를 사용하는 경우 투과계수의 허용치를 0.5로 잡고 있다. 본 연구에서는 투과계수가 최저치가 파장(L)/부유체의 폭(B)이 되도록 큰 곳에서 발생하는 형태의 단면을 개발하고자 한다. L/B가 큰 지점까지 투과계수가 0.5 이하가 된다는 것은 입사파의 파장에 비하여 방파구조물의 크기를 줄일 수 있으므로 보다 구조물의 제작이 경제적이 된다.

2. 이론

본 연구에서 대상으로 하고 있는 상자형 부유식 방파제는 간섭식 방파제라써, 이론 해석을 수행하기 위해서는 부유체에 작용하는 힘과 산란파 그리고 부유체의 운동과 이에 의한 발산파에 대한 해석이 이루어져야 한다. 이 논문에서는 선형포텐셜이론을 사용하여 산란문제(diffraction problem)와 발산문제(radiation problem)를 계산하였다. 산란문제는 구조물이 고정되어 있을 때 파도에 의해서 발생하는 외력을 계산하는 문제가 되며 발산문제는 동유체력계수를 구하는 문제가 된다. 수치계산 방법으로 경계요소법 사용하였으며 계산영역을 줄이기 위하여 유체를 내부 영역과 외부영역으로 나누어 정합면에서 정합조건을 사용하였다 (Liu & Abbaspour, 1982).

입사파는 주파수 ω 인 규칙파로 가정한다. 입사파의 파고가 충분히 작으면 선형이론을 사용할 수 있다. 유체는 비점성, 비압축성이라 가정한다. 유동이 비회전성이라 가정을 하면 속도포텐셜을 사용하여 경계치문제를 구성할 수 있다. 입사포텐셜과 산란포텐셜과 발산포텐셜을 중합하면, 2차원 문제의 전체포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = Re \left[(\Phi_I + \Phi_D + \sum_{j=1}^3 \xi_j \Phi_j) e^{-i\omega t} \right] \quad (1)$$

여기서 Φ_I 입사포텐셜, Φ_D 는 산란포텐셜, Φ_j 는 각 운동 모드별 속도포텐셜이고, ξ_j 는 복소운동진폭이다.

전체포텐셜을 얻기 위해서는 부유체의 운동응답을 계산해야 하는데, 이는 부유식방파제의 운동방정식의 해로부터 얻을 수 있다. 부유식방파제의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다 (Kim 등, 1998).

$$\sum_{j=1}^3 [(m_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j + \lambda_{ij} \dot{x}_j + (B_{ij} + K_{ij}) x_j] = F_i^e \quad (2)$$

여기서 x_i 는 각방향의 변위, m_{ij} 는 질량계수(mass matrix), μ_{ij} 는 부가질량계수(added mass matrix), λ_{ij} 는 조파감쇠계수(wave damping coefficient matrix), B_{ij} 는 정복원력계수(hydrostatic stiffness matrix), K_{ij} 는 계류계에 의한 강성계수(mooring stiffness matrix)이고 F_i^e 는 파강제력(wave exciting force)을 나타낸다. 파강제력은 다음 식으로 계산 할 수 있다.

$$F_i^e = Re \left\{ i\omega \rho \int_{S_0} (\Phi_I + \Phi_D) e^{-i\omega t} n_i ds \right\} \\ = Re \{ f_i e^{-i\omega t} \} \quad (3)$$

여기서 n_i 는 확장된 법선벡터이다.

동유체력계수인 부가질량계수 μ_{ij} , 조파감쇠계수 λ_{ij} 는 다음 식으로 계산 할 수 있다.

$$\mu_{ij} = -\frac{\rho}{\omega} \int_{S_0} Im[\Phi_j] n_i ds \quad (4)$$

$$\lambda_{ij} = \rho \int_{S_0} Re[\Phi_j] n_i ds \quad (5)$$

입사파를 규칙파로 가정을 하면 주파수영역에서 부유체의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_{j=1}^3 [(B_{ij} + K_{ij}) - \omega^2(m_{ij} + \mu_{ij}) - i\omega \lambda_{ij}] \xi_j = f_i \quad (6)$$

여기서 ξ_i 와 f_i 는 각각 복소 변위와 복소힘을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

방파제의 단면이 성능에 미치는 영향을 살펴보고 최적 효율을 가지는 단면을 구하기 위해서 먼저 부유체의 측면의 경사를 바꾸어 가면서 계산을 수행하였다. 이 경우 단면은 등변사다리꼴이 되는데 아래 면의 길이를 변화시켜 a_1 과 a_2 가 0.1, 0.2, 0.3인 경우를 직사각형 형태인 경우와 비교를 하였다.

$$a_1 = \frac{2b_1}{B}, \quad a_2 = \frac{2b_2}{B} \quad (7)$$

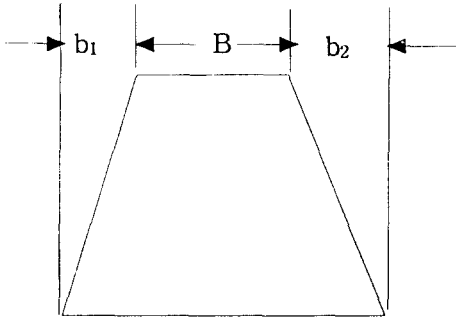


Fig. 1 Definition Sketch of a trapezoidal section.

Fig. 2에서는 등변사다리꼴 단면이고, B/D 가 4.0인 경우의 투과계수를 보여주고 있다. 경사면이 없는 경우와 비교해 보면 a_1 과 a_2 가 0.1, 0.2, 0.3로 커짐에 따라 국부 최소 투과계수가 나타나는 L/B 가 점점 오른쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 즉 최소 투과계수가 나타나는 지점의 L/B 의 값이 아래 면의 길이가 커질수록 커지는 경향을 볼 수 있으며 이때 국부 최소 투과계수는 매우 작은 값을 나타내고 있다. 그러나 투과계수의 국부 최대값은 0.5를 크게 넘어가고 있다.

Fig. 3에서는 등변사다리꼴 단면에 B/D 가 2.66인 경우의 결과를 보여주고 있다. 이 경우에도 a_1 과 a_2 가 0.1, 0.2, 0.3로 커짐에 따라 국부 최소 투과계수가 나타나는 L/B 가 점점 오른쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. $a_1 = a_2 = 0.3$ 일 때 $L/B = 5.5$ 에서 0.1보다 작은 투과계수를 보이고 있다.

이러한 경향은 경사면을 적절히 주면 장주기파에 대한 방파성능을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 동일한 경사면을 가진 경우에는 출수가 큰 경우가 장주기파에 보다 유리하다.

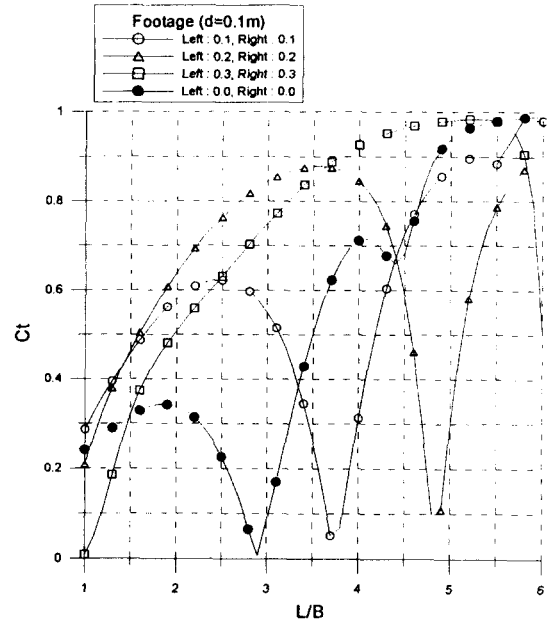


Fig. 2 Wave transmission coefficient for trapezoidal shape ($B/D = 4.0$)

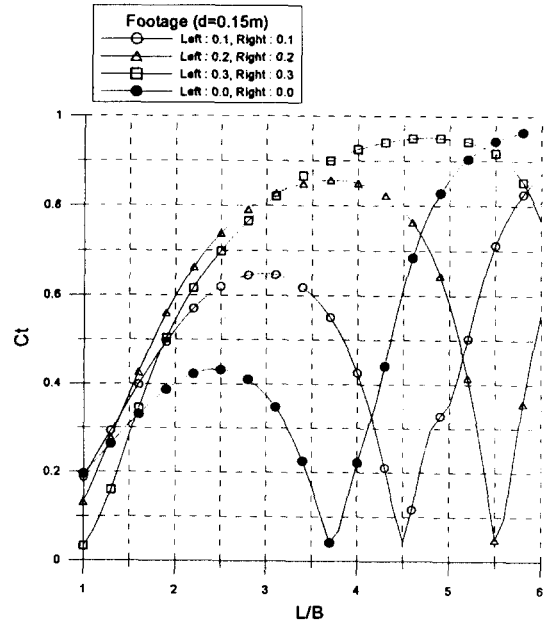


Fig. 3 Wave transmission coefficient for trapezoidal shape ($B/D = 2.66$)

Fig. 4에서는 부유체의 단면을 파도를 받는 쪽 한쪽 면만 경사시키고 반대쪽 면은 수직인 경우 즉 $a_2 = 0$ 인 경우에 대해서 살펴보았다. 이 경우에도 a_1 이 커짐에 따라 최소투과계수를 가지는 L/B 가 커지는 경향을 볼 수 있다. 그러나 $a_1 = 0.3$ 즉 왼쪽 바닥면이 30%가 커진 경우에는 최소투과계수의 값이 0.5에 가깝게 나타

나고 있고 전반적으로 방파성능이 떨어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 B/D 가 2.66인 경우를 보여주고 있다. Fig. 4에 비해서 방파 성능이 약간 좋아진 것을 볼 수 있으나 전반적으로는 B/D 가 4.0인 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다. 따라서 한쪽 면만 경사를 시키는 경우에는 투과계수의 성능에 큰 향상을 가지고 오지는 않는다. 그러나 방파제의 안쪽을 선박을 계류시킬 목적이 있는 경우에는 한쪽 면만 경사를 진 형태를 사용하는 것도 고려할 수 있다.

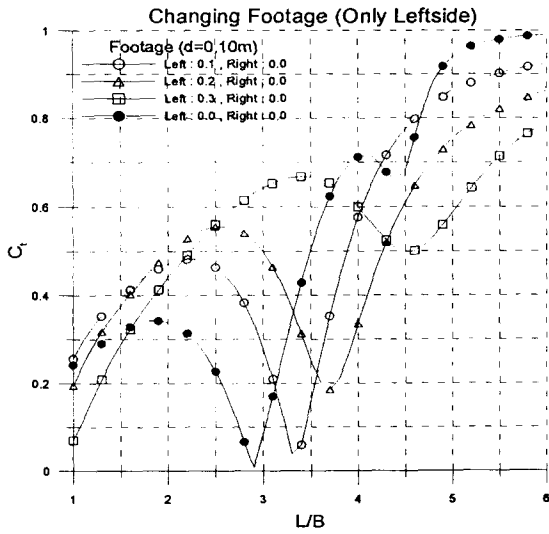


Fig. 4 Wave transmission coefficient for trapezoidal shape ($B/D = 4.0$)

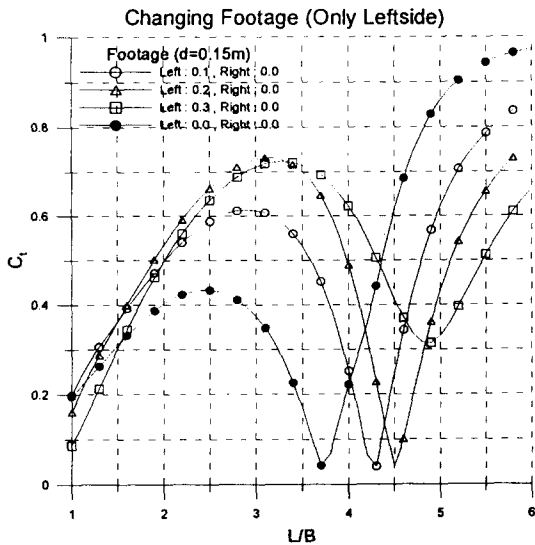


Fig. 5 Wave transmission coefficient for trapezoidal shape ($B/D = 4.0$)

이제 요철 모양의 단면에 대하여 살펴보기로 한다. 요철모양(실제로는 요철이 아니라 요입)의 단면에 대한 정의는 Fig. 6에 되어있다.

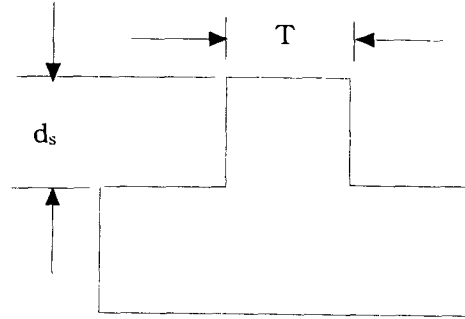


Fig. 6 Definition Sketch of a prominence section.

$$t_1 = \frac{T}{B}, \quad d_1 = \frac{d_s}{D} \quad (8)$$

먼저 요철 부분의 치수 변화에 따른 영향을 살펴보기로 한다. 요철 단면 모양은 Fig. 6에서 표시한 형태에서 볼 수 있는 것처럼, 단면의 윗부분의 길이인 T 와 옆부분의 길이 d_s 의 조합에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 먼저 T 의 변화에 따른 영향을 파악하기 위하여 d_s 를 흡수의 반인 경우를 선택하였다. 즉 $d_1 = 0.5$ 로 고정하고 T 의 값을 변화시켜 가면서 투과계수가 어떻게 변화하는가를 살펴보았다.

Fig. 7에 $B/D=4.0$ 인 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서는 t_1 의 값을 0.5에서 0.15 간격으로 0.95까지 변화시켰다. t_1 이 0.95인 경우는 예상한 바와 같이 직사각형 형태와 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 t_1 이 감소함에 따라 투과계수가 변하는 것을 볼 수 있다. 먼저 최소 투과계수가 나타나는 L/B 값이 커지고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 t_1 이 0.65 보다 작아지는 경우에는 전체적인 방파 성능이 현저하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 따라서 적절한 투과계수 값을 얻기 위해서는 T 를 너무 줄이는 것은 바람직하지 않다고 볼 수 있다.

Fig. 8에서는 Fig. 7와 같은 형태이나 전체 흡수가 큰 $B/D=2.66$ 인 경우에 대한 투과계수를 나타내고 있다. 전체적인 경향은 Fig. 7과 비슷하나 투과계수의 값이 전반적으로 향상되고 장파에 대한 방파 성능이 개선되는 것을 볼 수 있다. L/B 가 5보다 큰 지점에서 최소 투과계수 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

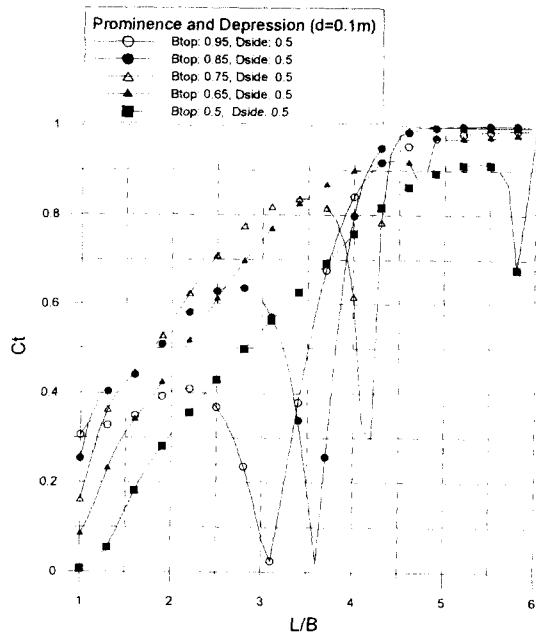


Fig. 7 Wave transmission coefficient of a prominence and depression shape (B/D=4.0)

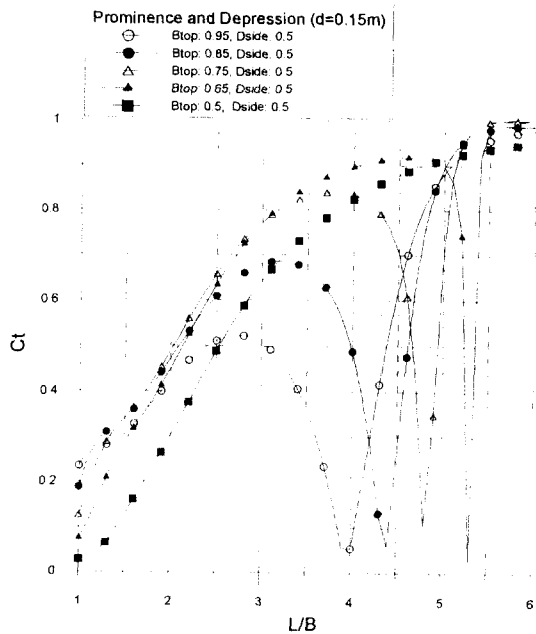


Fig. 8 Wave transmission coefficient of a prominence and depression shape (B/D=4.0)

이제 측면 길이 d_s 의 변화에 따른 영향을 살펴보기로 한다. 이를 위하여 앞에서 살펴본 경우의 중간 값 정도를 보이는 경우를 기준으로 하기 위하여, t_1 을 0.85로 고

정하고 d_t 의 값을 0.3에서 0.7까지 0.1 간격으로 변화시켰고 그 결과를 Fig. 9에 표시하였다. 이 경우에는 T 를 변화시킬 때와는 달리 급격한 성능변화를 보이지는 않았다. 따라서 요철 모양에서는 d_s 보다 T 가 투과계수에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

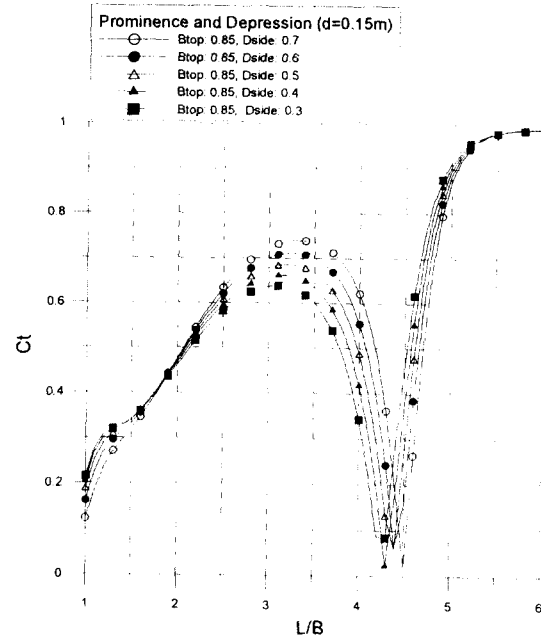


Fig. 9 Wave transmission coefficient of a prominence and depression shape (B/D=4.0)

부유식방파제의 설계 시 부유체의 폭과 흘수는 방파 성능을 결정하는 가장 중요한 파라미터이며, 설계지역과 조건이 주어진 경우에 최적설계를 통하여 방파효율을 극대화 할 수 있다. 이상의 결과에서 부유체의 단면 형상을 적절히 설계를 한다면 장주기파에 효율이 높은 부유식방파제의 단면을 설계할 수 있을 것을 보여준다.

부유식방파제의 설계점은 주어진 입사파에 대해서 국부 최소투과계수를 가질 수 있는 단면을 설계하는 것이다. 따라서 설치되는 지역의 파랑특성에 따라 최강 최다 빈도를 가지는 파에 대한 설계가 일차적으로 수행되어야 할 것이다. 그러나 입사파의 주파수가 달라지면 부유식방파제의 방파성능이 달라지게 된다. 이러한 경우에도 최적 효율을 가지는 부유식방파제를 설계하기 위해서는 흘수를 변화하는 방법(Kawarada 등, 1995)을 도입하는 것이 매우 유망하다고 할 수 있다. 흘수를 변화시켜서 주어진 입사파에 대해서 국부최소 투과계수를 가지게 한다면 국부최소값 이외의 지점에서는 방파성능이 저하되는 것을 방지할 수 있고 항상 방파효율을 유지할 수 있을 것으로 생각된다.

부유식 방파제의 단점 중의 하나로 지적되고 있는 것은 황천 시 계류계의 파손이 되면 오히려 주위 구조물에 대한 심각한 피해가 우려된다는 것이다. 이러한 비상 사태를 대비하기 위해서 다음 두 가지의 기본적인 대처 방법을 생각해보기로 한다.

먼저 황천 시에는 보통 파고가 높고 긴 주기의 파랑이 오게 되므로 부유식 방파제로는 이러한 파고를 충분히 방파하기에는 어려움이 따르게 된다. 따라서 이러한 때에는 부유체의 흘수를 줄이거나 잠수시켜서 부유식방파제 위로 파도가 넘어가도록 허용한다면 부유식방파제와 계류계에 걸리는 하중을 상당 부분 감소시킬 수 있을 것으로 보인다. 그리고 잠겨진 부유체 위로 파도가 진행하게 될 때 대부분의 파도는 국부 천수효과에 의해 대부분 쇄파가 되고 일부만이 후방으로 전파되어 갈 것이다. 이러한 황천 시에는 방파제의 후방에 설치되거나 대피한 선박들도 작업상태가 아닌 생존상태에 해당하기 때문에 어느 정도의 운동응답과 하중은 허용될 수 있다. 부유식방파제를 잠수시킴으로써 부유식방파제의 파손을 방지하고 후방을 황천 시 심각하게 파도의 위협에서 보호할 수 있을 것으로 생각된다. 물론 어느 정도의 파도에 대해서 어느 정도 잠수시킬 것인가 그리고 얼마나 쇄파가 일어나고 후방에 어느 정도 투과파가 발생하는가에 대한 파악은 앞으로 계속 연구되어야 할 과제 중 하나라고 생각된다.

다음은 계류계가 파손되는 비상 사태가 발생하는 경우 부유식 방파제를 완전히 바닥에 잠수시켜서 다른 구조물에 대한 피해를 방지할 수 있는 비상 잠수시스템을 장치하는 것이다. 이러한 비상 잠수시스템은 부유식방파제가 설치되는 지역이 천수심인 경우 앞에서 언급한 황천 시의 작동 시스템으로도 사용할 수 있다. 그리고 비상 잠수 시스템은 기본적으로 흘수를 조종할 수 있는 시스템이므로 부유식방파제의 흘수를 원하는 위치로 조종하여 평상 조건에서의 작동에서도 주어진 입사파의 조건에 따라 흘수를 능동적으로 변화시킨다면 보다 효율적인 방파제의 운영이 될 것으로 보인다.

4. 결 론

부유식방파제는 입사파의 주기에 따라 방파성능이 달라지며, 방파제의 형상 중 투과계수에 큰 영향을 미치는 것은 부유식방파제의 폭과 흘수이다. 본 연구에서는 상자형 단면의 측면 경사를 변화시켜가면서 투과계수에 미치는 영향을 살펴보았으며, 요철형태의 단면에서 형상비의 변화에 따른 투과계수의 변화를 살펴보았다.

부유체의 형상을 변화시킬 경우 상자형 단면보다 장

주기파의 방파에 효율이 개선되는 것을 발견하였다. 그러나 단주기파 영역에서는 오히려 성능이 저하되는 현상을 보이고 있다. 그러나 입사파의 주기에 따라 투과계수가 최소가 되는 점에 설계를 맞추고 부유체의 흘수를 변화시킨다면 효율적인 방파를 할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 KOSEF 981-1212-036-2 의 지원으로 수행되었으며, 동 재단의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 김도영, 이현엽, "부유식방파제에 대하여," 한국해양 공학회, 95추계학술논문 발표회, 1995
- [2] McCartney, B. L. "Floating Breakwater design," J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., vol 111, No. 2, March, 1985
- [3] Kawarada M. et. al "Development of variable-draft floating breakwater," 13th Symp. Ocean Engineering, 1995 July, Soc. Naval. Arch. Japan
- [4] Grinyer, A.W. "Fixed and floating breakwaters for small craft harbours: experience at Town Quay Southampton, Haslar Marina, Portsmouth and Parkstone Yacht Haven," Poole. 3rd Int. Conf. Planning Design and Operation Marina III, 1995
- [5] Jamieson, W.W., Mogridge, G.R. and Boudrias, P. "Improving the efficiency of rectangular caisson floating breakwaters," 3rd Int. Conf. Planning Design and Operation Marina III, 1995
- [6] Kim, D.Y., Sonf. M., Kim, Y.S "On the Performance of Floating Breakwaters", Proceedings of International Conference on Hydrodynamics, 1998
- [7] Liu, P. & Abbaspour, M., "An integral equation method for the diffraction of oblique waves by an infinite cylinder", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol.18, 1982.