

# 반투과성 부유 소파구조물의 소파 효율에 관한 연구

박노식 · 광석환

울산대학교 수송시스템공학부

## A Study on efficiency of Semi-permeability Floating Breakwater

Ro-Sik Park and Suk-Hwan Kwak

School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan

**KEY WORDS:** FPSO 부유식 석유시추 저장선, Turret Mooring System 터렛계류시스템, Slow Motion Maneuvering Equation 저속 조종 운동 방정식, Nonlinear Motion 비선형 운동, Direct Integration Method 직접적분법, Wind Spectrum 바람 스펙트럼

**ABSTRACT:** 양식장, 해양 레저, 항구 등에서 Calm Sea Area을 필요로 한다. 착저식은 소파효율은 좋으나 해수순환을 방해하여 환경에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 또한 설치비용이나 설치 해역의 한계가 있다. 따라서 이러한 한계들을 극복하기 위해서 부유식 소파구조물을 채택하였다.

본 논문에서는 몇 가지 소파공의 크기를 가지는 반 투과성 부유 소파구조물을 무한수심에서 유체역학적 특성과 소파효율을 계산하였다. 산란문제와 발산문제를 해결하기 위해 선형 포텐셜이론을 사용하여 구조물의 유체역학적 특성을 계산하였다. 적절한 소파공의 크기를 결정함에 따라 소파효율을 향상시킬 수 있다.

### 1. 서 론

해안 및 해양에 설치되는 시설물들은 파도로부터 보호하기 위하여 방파제 및 소파구조물의 설치가 필요하다. 이러한 구조물은 지역적 특성, 작업의 종류, 경제적인 요인을 고려하여 설치해야한다.

방파제의 종류는 크게 착저식 과 부유식으로 나눌 수 있다. 착저식은 방파성능은 우수하나 해수순환을 방해하여 환경에 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

전 세계적으로 환경 오염 방지, 환경 및 생태계의 보호에 대한 관심이 고조되고 있으며, 앞으로도 중요성이 더하여 갈 것이다. 부유식 방파제는 해수의 순환을 방해하지 않으므로 설치 해역에서 발생한 오염물질이 자연적으로 정화되는 작용을 방해하지 않는다. 또한 해양개발이 본격화되면서 수심이 깊은 곳도 개발함에 따라 기존의 방파제는 수심이 깊어짐에 따라 건설비용이 급격히 증가 한다는 단점을 안고 있다

있으며, 수심의증가에따른건설비용이크지않다

그러나 부유식 방파제는 착저식 방파제에 비해 방파효율이 떨어지기 때문에 비교적 온순한 곳에 설치되고 있다. 따라서 부유식 방파제를 실용화하기 위해서는 부유식 방파제의 효율을 극대화하는 것이 중요하다. 부유식 방파제의 설계에서는 방파 성능과 경제성이 가장 중요한 파라미터로 생각된다. 소파성능의 효율을 높이려면 낮은 투과계수의 값을 가져야 하며, 경제성이 있으려면 구조물의 크기가 적정 규모가 되어야한다. 이러한 두 가지 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 적은 구조물로 큰 방파 효율을 가져야 한다. 따라서 이러한 두 파라미터를 고려하기위해서 먼저 소파공이 있는 구조물에 대해서 소파성능의 효율을 계산하였다.

### 2. 이론

#### 2.1 좌표계 및 기본가정

좌표계는  $x-y$ 평면을 정지수면으로 하고 연직상방을  $z$ 축의 정(+)방향으로 하는 직교좌표계를 사용한다.

유체는 비압축성, 비점성 완전유체이고, 유체영역은 무한수심이다. 입사파는 원주기 운동을 하며  $x$ 축에 대하여  $\alpha$ 의 각도로 입사된다고 생각한다. 따라서 이론 해석을 수행하기 위해서는 부유

박노식 : 울산시 남구 무거2동 울산대학교 수송시스템공학부  
052-259-2155 rspark@mail.ulsan.ac.kr

그러나 부유식 방파제는 계류가 가능한 수심까지 설치 할 수

체에 작용하는 힘과 산란파에 대한 해석이 이루어져야 한다. 이 논문에서는 선형 포텐셜이론과 3차원 특이점 분포법을 사용하여 수치계산을 수행 하였다. 좌표계는 우수 좌표계를 사용 하였다.

## 2.2 유체력 추정

속도 포텐셜은 유체내부에서 Laplace 방정식과 경계치문제를 만족해야 한다. 이러한 조건을 만족하는 3차원문제에서의 전체포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \text{Re}[\Phi_0 + \Phi_7 + i\omega \sum_{j=1}^6 \xi_j \Phi_{j1}] \quad (1)$$

여기서  $\Phi_0$ 는 입사파포텐셜,  $\Phi_7$ 은 산란파포텐셜(diffraction potential),  $\Phi_j$ 는 각 운동 모드별 속도 포텐셜(radiation potential)

$\xi_j$ 는 복소 운동진폭이다. 전체포텐셜을 구하기 위해서는 부유체의 운동응답을 계산해야하는데, 이는 부유체의 운동방정식의 해로부터 구할 수 있다. 파랑중 부유체의 6자유도 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + m_{ij}) \ddot{X}_j + N_{ij} \dot{X}_j + K_{ij} X_j] = F_j \quad (2)$$

여기서  $X_j$ 는 부유체의 중심에 있어서 j방향의 운동진폭(변위),  $M_{ij}$ 는 질량계수(mass matrix),  $m_{ij}$ 는 부가질량계수(added mass matrix),  $N_{ij}$ 는 조파감쇠계수(wave damping coefficient matrix),  $K_{ij}$ 는 정복원력계수(hydrostatic stiffness matrix),  $F_j$ 는 파강제력(wave exciting force)을 나타낸다.

파강제력은 방사문제(radiation problem)와 산란문제(diffraction problem)에 관한 Haskind-Newman의 관계를 이용하여 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{7j} &= \text{Re}[i\omega\rho \int \int_S (\Phi_0 + \Phi_7) e^{-i\omega t} n_j ds] \\ &= \text{Re}[f_j e^{-i\omega t}] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $n_j$ 는 확장된 법선 벡터이다.

동유체력 계수인 부가 질량계수  $m_{ij}$ , 조파감쇠계수  $N_{ij}$ 는 다음 식으로 계산 할 수 있다.

$$m_{ij} = -\rho \text{Re}[\int \int_S \Phi_j n_i ds] \quad (4)$$

$$N_{ij} = \rho\omega \text{Im}[\int \int_S \Phi_j n_i ds] \quad (5)$$

입사파를 규칙파라고 가정 하면 주파수 영역에서 부유체의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_{j=1}^6 [-\omega^2(M_{ij} + m_{ij}) + i\omega N_{ij} + K_{ij}] \xi_j = f_j \quad (6)$$

여기서  $\xi_j$ 와  $f_j$ 는 각각 복소 변위와 복소 힘을 나타낸다.

## 2.3 투과계수 및 반사계수

x축에 대하여  $\alpha$ 의 각도로 파가 입사할 경우, 유체중의 부체에 의한 산란파 속도포텐셜은

$$\Phi_7 = \text{Re}[\zeta_7 e^{Kz \pm iK(x\cos\alpha + y\sin\alpha) + i\omega t}] \quad (7)$$

(7)식을 Kochin 함수를 이용하면 반사파와 투과파는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \zeta_R &= i\zeta_a H_7^+(K, \alpha) \\ \zeta_T &= \zeta_a + i\zeta_a H_7^-(K, \alpha) \\ &= \zeta_a (1 + iH_7^-(K, \alpha)) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서 보듯이 투과파는 입사파에 산란파를 더하는 것으로 정의된다.

따라서 반사계수 ( $R_1$ )와 투과계수 ( $T_1$ )는 입사파 진폭 ( $\zeta_a$ )으로 나누어 나타내면,

$$\begin{aligned} R_1 &\equiv \frac{\zeta_R}{\zeta_a} \\ &= \frac{i\zeta_a H_7^+(K, \alpha)}{\zeta_a} \\ &= iH_7^+(K, \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T_1 &\equiv \frac{\zeta_T}{\zeta_a} \\ &= \frac{\zeta_a [1 + iH_7^-(K, \alpha)]}{\zeta_a} \\ &= 1 + iH_7^-(K, \alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

가 된다.

또한, 파의 대칭성과 반대칭성의 성질을 도입하면 반사

파 및 투과파는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\zeta_R = \frac{1}{2} (\zeta_R + \zeta_T) + \frac{1}{2} (\zeta_R - \zeta_T) \quad (11)$$

$$\zeta_T = \frac{\zeta_a}{2} \left[ \frac{H_3^+}{H_3^+} - \frac{H_2^+}{H_2^+} \right] \quad (15)$$

$$\zeta_T = \frac{1}{2} (\zeta_R + \zeta_T) - \frac{1}{2} (\zeta_R - \zeta_T) \quad (12)$$

으로 나타내어질 수 있다.

따라서 입사파고로 무차원화한 반사계수 ( $C_R$ ) 및 투과

즉, 반사파는 대칭파성분과 반대칭파성분의 합으로부터, 투과파는 대칭파성분과 반대칭파성분의 차로부터 계산되고 있다. 이때 산란파에 대한 Kochin 함수  $H_7^\pm(K, \alpha)$ 는

계수 ( $C_T$ ) 는

$$C_R = \frac{\zeta_R}{\zeta_a}, \quad C_T = \frac{\zeta_T}{\zeta_a} \quad (16)$$

$$H_7^\pm = \frac{H_{3s}^+}{H_3^+} \pm \frac{H_{js}^+}{H_j^+}$$

이며,  $C_R$  과  $C_T$  사이에는 에너지보존법칙으로 다음과

$$(j = 2 \text{ or } 4) \quad (13)$$

같은 관계가 성립된다.

여기서  $\overline{H_j^+}$ 는  $H_j^+$ 의 공액함수를 의미한다.

$$|C_T|^2 + |C_R|^2 = 1 \quad (17)$$

### 3. 수치 계산

식(11), (12)으로부터 반사파, 투과파는

$$\zeta_R = \frac{\zeta_a}{2} \left[ \frac{H_3^+}{H_3^+} + \frac{H_2^+}{H_2^+} \right] \quad (14)$$

무한수심에서 방파제 소파공의 영향을 알아 보기 위해 소파공의 유무와 구멍크기를 변화 시켜가면서 계산을 수행하였다.

model A는 구멍이 없는 실린더 형태, model B는 구멍이 면적의 26%, model C는 36%, model D는 50%인 제원들을 사용하였다. 그들 model들의 제원은 Table 1. 과 같다.

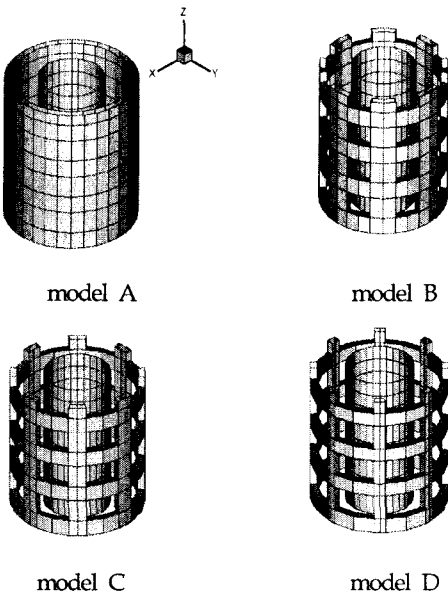
Table 1 principle dimension of a models (단위 : m)

	model A	model B	model C	model D
Diameter	20	20	20	20
draft	20	20	20	20
displacement	2764.6	2451.23	2539.77	2615.38
KG	11.9375	11.9375	11.9453	11.9508
waterarea	138.229	108.387	98.4355	90.4785

model들의 기본제원들은 Catia를 이용하여 구하였으며, 구조물은 Fig.1과 같이 총 880개의 패널로 분할하였고, 3차원 특이점 분포법을 사용하여 동유체력 계수를 계산하였다.

입사파각은 사파에 관하여 수행하였으며,  $\lambda/L=0.5\sim 10$ 사이의 20개 주파수 상태에서 계산하였다.

Fig. 1 Sharp of medels



#### 4. 결과 및 검토

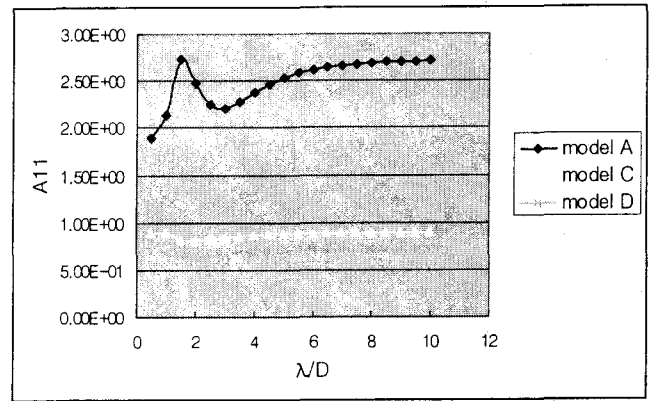


Fig. 2 Added mass (Surge) (Nondimensionalize by  $\rho \nabla$ )

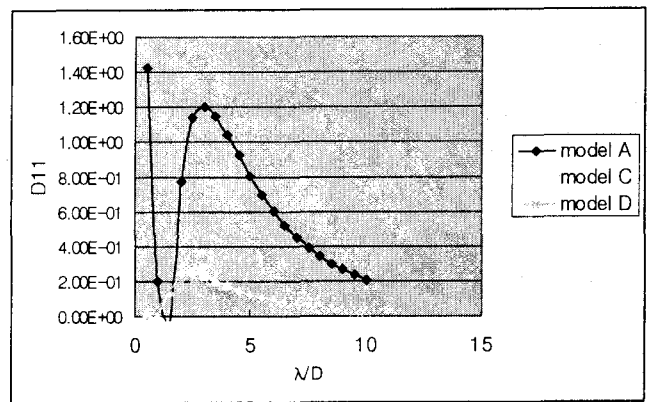


Fig. 3 damping coefficient (Surge)

(Nondimensionalize by  $\rho \nabla \sqrt{\frac{g}{D}}$ )

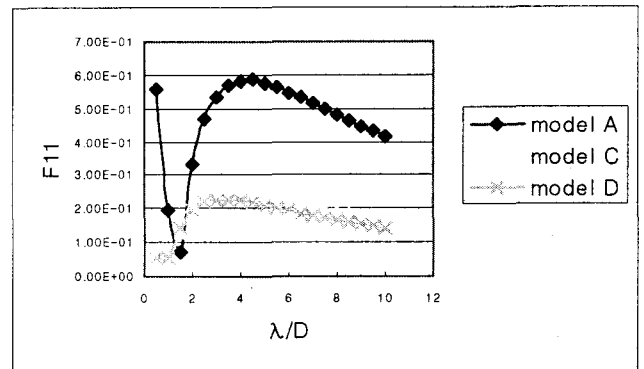


Fig. 4 wave exciting force (Surge)

(Nondimensionalize by  $\rho g B^2 \zeta$ )

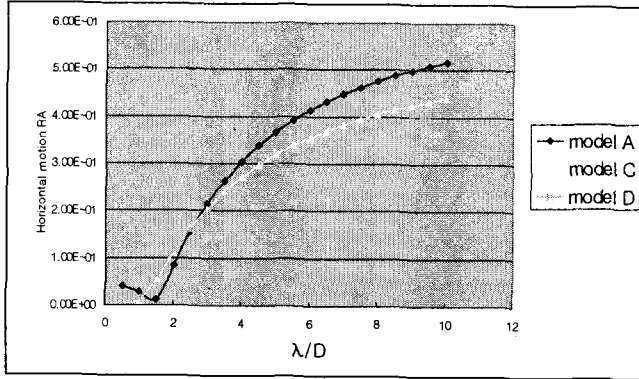


Fig. 5 Linear motion response (Surge)

(Nondimensionalize by  $\rho \nabla \sqrt{\frac{g}{D}}$ )

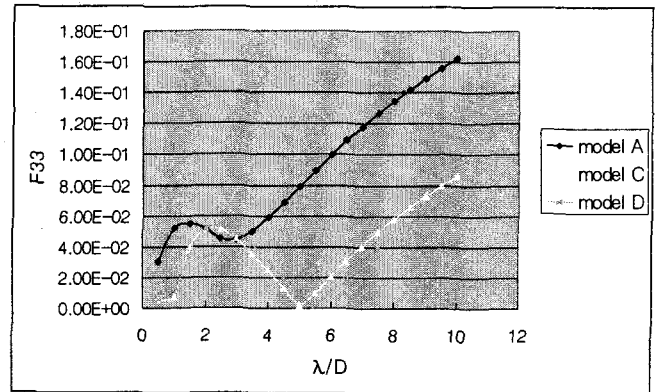


Fig. 8 wave exciting force(Heave)

(Nondimensionalize by  $\rho g B^2 \zeta$ )

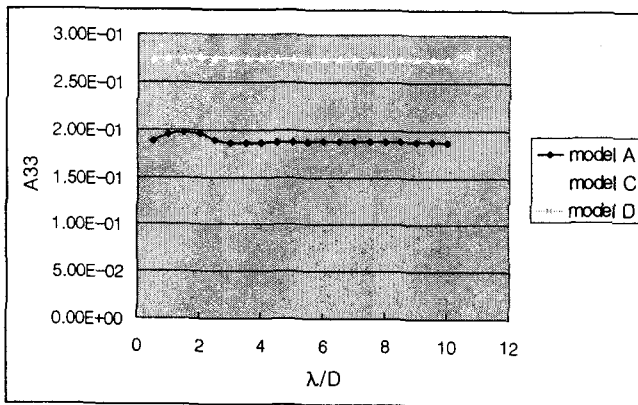


Fig. 6 Added mass (Heave)(Nondimensionalize by  $\rho \nabla$ )

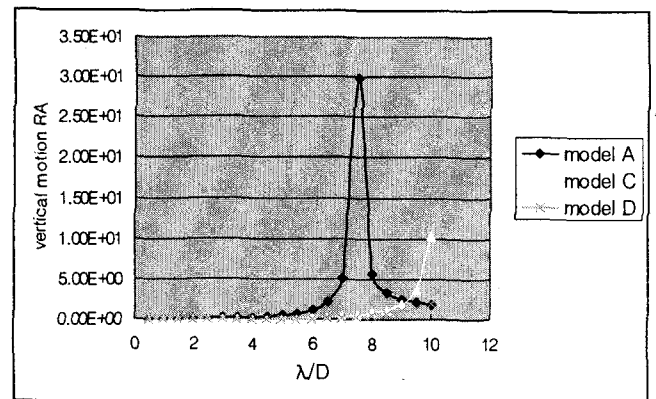


Fig. 9 Linear motion response(Heave)

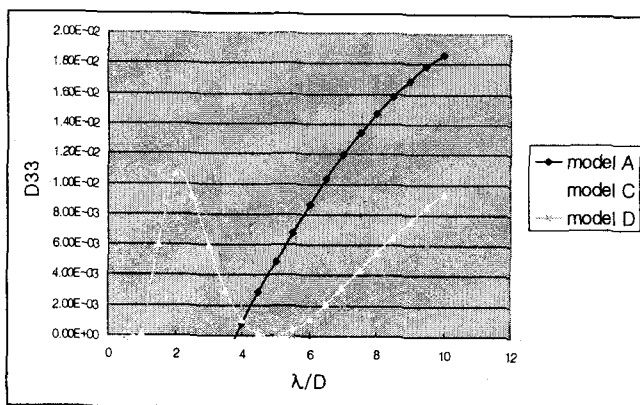


Fig. 7 Damping coefficient (Heave)