

## 연결형 부유구조물의 유체역학적 특성에 관한 연구

박노식 · 박상준  
수송시스템 공학부

### <요 약>

연결형 부유구조물의 경우, 구조물의 단면 형상과 배열에 따른 상하동요특성과 소파성능에 대하여 검토하였다. 본 연구 모델인 연결형 부유체에 대해 단주기 영역에서는 단면형상과 배열의 변화가 동요 및 소파성능에 현저하게 영향을 주고 있으나, 장주기 영역에서는 그다지 영향이 없음을 알 수 있었다. 즉 단주기 영역내에서는 단면 형상 및 배열 변화의 계통적 수치계산을 통하여 최적 연결형 부유 소파구조물을 계획할 수 있음을 확인하였다.

## A study on the hydrodynamic characteristics of joint type floating structures

Ro-Sik Park · Sang Jun Park  
School of Transportation Systems Engineering

### <Abstract>

This paper investigated how the joining of several floating structures influences heave characteristics and wavebreaking performance depending on the cross-sectional shape of each module and its arrangement. The result shows that the influences are remarkable in the range of short wave periods but negligible in the range of long wave periods.

Systematic calculations of the effects of cross-sectional shape of each module and its arrangement on wavebreaking efficiency are needed to design the optimum joint-type floating structure.

## 1. 서론

최근 해양개발의 필요성이 점차 증대됨에 따라 해양환경에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며 종래의 원유, 천연자원 등의 생산설비 및 연근해 항만시설에만 국한하지 않고 다양한 기능을 가진 구조물의 개발에 관심이 증대되고 있다. 이러한 구조물들은 설치해역의 해상조건, 지역적 특성 및 대상 해역에 적합한 기능을 수행하며 원하는 해수 정온화를 확보해야 한다.

건설되는 대부분의 해안 구조물들은 자연환경과 인간 친화적 구조물이기 보다는 경제적 이익만을 고려한 결과, 해양의 오염 및 지역주민의 민원을 초래하는 사회문제를 야기하고 있다.[1][2] 이를 위하여 설치되는 해양시설의 기능성 및 해양오염 예방, 해수교환 등의 여러 인자를 효율적으로 극대화하기 위하여 실현 가능한 해안 구조물로서 부유식 해양구조물에 관심이 모아지고 있다.

부유식 해양구조물은 구조물의 설치범위가 연근해에서 점차 심수로 옮겨감에 따라 해수 정온화에 어려움이 있고 소파효율이 낮아 구조물의 안정성과 정위치를 유지하기에 어려움이 있다. 따라서 주위의 파를 효과적으로 제어하며, 시설물을 파도로부터 보호하기 위한 소파구조물을 설치한다면 더욱 효과적일 것이다. [3]

부유식 소파제는 부유체의 형상, 재료, 소파원리 등을 기준으로 하여 다양하게 분류한다. 입사파의 에너지를 반사, 흡수 또는 이 양자의 작용에 의해 파를 감쇠시키는 양식의 구조물을 이용한 수동형 소파제와 입사파에 의해 에너지가 부여되어 새로이 동적 에너지를 생산시키는 장치로 입사파 에너지가 부유체의 운동에너지로 변환되어 전달파가 작아지는 능동형 소파제 등이 있다. [4]

본 연구에서는 해상작업시 파도로부터 보호되며 작업의 안정성을 높일 수 있고, 일시적인 철거와 시공이 용이한 다수 부체로 연결된 능동형 부유식 소파구조물을 계획하기 위하여 유한수심에서의 수심에 대한 영향, 부유체의 배열, 간격변화에 따른 파강제력 및 운동 응답, 소파 효율 등의 변화를 수치해석하여 수심의 영향, 각 부유체 사이의 유체역학적 상호작용의 영향 및 소파효율을 추정하여 보았다. 다중 연결된 부체의 투과율은 단일 부체인 경우에 비하여 소파효율은 좋은 반면에 장파장 영역에서는 소파효과가 거의 없었으며 장파장의 경우에는 별도의 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 2. 기초이론

좌표계는  $xy$ 평면을 정지수면으로 하고 연직상방을 정(+)방향으로 하는 직교좌표계를 사용한다.

유체는 비압축성, 비점성 완전유체이고, 유체영역은 유한수심이며 수심( $h$ )이 일정하다. 입사파는 원주기운동을 하며  $x$ 축에 대하여  $\alpha$ 의 각도로 입사된다고 생각한다.

### 2.1 유체력

$x$ 축의 정방향으로부터 입사하는 파에 의하여 부체가 동요원진동수  $\omega$ 로 조화운동을 한

다고 고려하면, 이때의 부체주위의 유동장은 속도 potential로 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re}[\phi(x, y, z)e^{i\omega t}] \quad (2.1)$$

$\phi$ 는 유체내부에서 Laplace방정식을 만족하며, 자유표면의 경계조건, radiation 조건, 물체표면의 경계조건 및 수저조건을 만족하고 있다.

이때의 속도 potential을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + \phi_7 + i\omega \sum_{j=1}^6 \xi_j \psi_j \quad (2.2)$$

여기서,

$$\phi_0 = \frac{g\zeta_a}{\omega} \frac{\cosh\{k(z+h)\}}{\cosh(kh)} e^{kz + ik(x\cos\alpha + y\sin\alpha)}$$

$\zeta_a$  : 파의 진폭

$k$  : 파수

$g$  : 중력가속도

$\xi_j$  : 부체의 운동진폭( $j=1, \dots, 6$ )

$\phi_0$  : 입사파 속도 potential

$\phi_7$  : diffraction 속도 potential

$\psi_j$  :  $j$  방향의 부체의 단위 진폭운동에 의한 radiation potential ( $j=1, \dots, 6$ )

또한, 각 경계조건을 만족하는 속도 potential  $\phi$ 는 Laplace 방정식의 해를 Green함수  $G(x, y, z; x', y', z')$ 라 놓으면 다음과 같이 표시된다.

$$\phi(P) = \iint_S \sigma(Q) G(P, Q) dS(Q) \quad (2.3)$$

여기서,  $P(x, y, z)$ 는 유체 중의 임의의 점,  $Q(x', y', z')$ 는 물체표면(S) 상에 분포시킨 Source의 위치,  $\sigma(Q)$ 는 점 Q의 위치에서 source의 강도,  $G(P, Q)$ 는 다음 식으로 표시되는 Green함수이다.

$$G(P, Q) = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + 2 \int_0^\infty \frac{(\mu + K)e^{-\mu h} \cosh \mu(z+h) \cosh \{\mu(z'+h)\} J_0(\mu r_1)}{\mu \sinh \mu h - K \cosh \mu h} d\mu + i \frac{2\pi(k^2 - K^2) \cosh \{k(z+h)\} \cosh \{k(z'+h)\} J_0(kr_1)}{(k^2 - K^2)h + K} \quad (2.4)$$

여기서,  $K = k \tanh(kh)$

$$R_1 = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

$$R_1' = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+2h+z')^2}$$

$$r_1 = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$$

$J_0$  : 제 1종 0차 Bessel 함수

(2.3)식의 Source 강도  $\sigma(Q)$ 를 구하기 위하여 물체표면조건을 이용하면, 즉 (2.3)식에서 양변을 물체표면 S의 법선방향으로 미분하고 점P를 물체표면(S) 상의 점Q에 접근시키면  $\sigma(Q)$ 가 미지수인 다음의 적분방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial \phi(P)}{\partial n} = -2\pi\sigma(P) + \int \int_s \sigma(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) ds(Q) \quad (2.5)$$

(2.5)식에서 점  $P(x', y', z')$ ,  $Q(x', y', z')$ 는 물체표면(S) 상의 점이다. 적분은 물체표면 S에 대하여 적용된다. 따라서 (2.5)식에서 구한  $\sigma(Q)$ 를 (2.3)식에 대입하면 속도 Potential  $\phi(P)$ 가 구하여진다.

## 2.2 다중연결부체의 경계조건[3]

연결부체의 경우 강체와 달리 각각의 부체의 운동은 여러부체의 중심주위에서 운동하는 동시에 인접하는 부체간의 유체역학적 상호간섭의 영향을 받는다. 따라서 n번째 부체의 i 방향 운동의 경계조건은 아래와 같이 표시할 수 있다고 생각한다.

$$\frac{\partial \phi^{(n)}}{\partial n} = n_i^{(n)} \quad \text{on } S_n, \quad \frac{\partial \phi_i^{(k)}}{\partial n} = n_i^{(n)} \quad \text{on } S_n \quad (k \neq n) \quad (2.6)$$

## 2.3 유체력 계수[3]

선형화된 비정상압력은 유체의 밀도를  $\rho$ 라 하면, 다음과 같이 표현된다.

$$p(x, y, z) = -\rho i\omega \phi(x, y, z) \quad (2.7)$$

(2.7)식의 비정상속도 potential을 알면, radiation potential(2.2)식의 제2항을 고려한 j 방향에 작용하는 유체력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F_j &= \int \int_{S_H} p(x, y, z) n_j dS \\ &= -(i\omega)^2 \sum_{i=1}^6 \psi_i \left[ M_{ij} + \frac{N_{ij}}{i\omega} \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

여기서  $M_{ij}$  와  $N_{ij}$ 는 부체가  $i$  Mode 운동을 하고 있을 때 각각  $i$  방향의 단위 진폭 운동에 대한  $j$  방향의 부가질량 및 조파 감쇠력계수를 표현하며 아래와 같다.

$$M_{ij} = -\rho \operatorname{Re} \left[ \int \int_S \phi_j n_i ds \right] \quad (2.9)$$

$$N_{ij} = \rho \omega \operatorname{Im} \left[ \int \int_S \phi_j n_i ds \right] \quad (2.10)$$

규칙파 중에서 부체가 고정되어 있을 때 반사파의 속도 Potential, 즉 산란파 속도포텐셜을  $\phi_1$ 이라 하면  $\phi_1$ 은 물체표면조건으로부터

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n}$$

의 해이다.

또한,  $j$  방향의 파강제력은 속도포텐셜  $\phi_1$ 이 구해지면 다음 식으로부터 구해진다.

$$F_{7j} = \rho g \zeta_a \int \int_S (\phi_0 + \phi_1) n_j ds \quad (2.11)$$

( $j = 1, 2, \dots, 6$ )

## 2.4 운동방정식

파랑중 부체의 6자유도 선형운동방정식은 일반적으로 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^6 [(m_{ij} + M_{ij}) \ddot{X}_j + N_{ij} \dot{X}_j + K_{ij} X_j] = F_j \quad (2.12)$$

( $j = 1, 2, \dots, 6$ )

여기서

$X_j$  : 부유체의 중심에 있어서  $j$ 방향의 운동진폭

$m_{ij}$  : 부유체의 질량 및 관성모멘트

$M_{ij}$  : 부유체의 부가질량 및 부가관성모멘트

$N_{ij}$  : 조파감쇠계수

$K_{ij}$  : 복원력계수

$F_j$  : 파 강제력

## 2.5 투과계수 및 반사계수 [7]

소파효율은 산란문제와 방사문제로 구분하여 생각할 수 있으며 유체중의 부체에 대한 반사파, 투과파는 부체고정의 경우와 부체동요의 경우 발생하는 반사파와 투과파를 합한 것과 같다.

반사계수  $C_R$  과 투과계수  $C_T$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_R &= R_1 + R_2 \\ &= iH_7^+(K, a) - iK \frac{X_j}{\xi_a} H_j^+(K, a) \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} C_T &= T_1 + T_2 \\ &= 1 + iH_7^-(K, a) - iK \frac{X_j}{\xi_a} H_j^-(K, a) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$R_1, R_2$  : 동체 1과 2의 반사 계수

$T_1, T_2$  : 동체 1과 2의 투과 계수

$H^\pm_j$  : 반사파의 Kochin 함수

## 3. 수치 계산

부유구조물의 단면형상, 갯수, 홀수, 폭, 소파판의 유무, 배열에 따른 유체역학적 상호간섭의 영향 및 수심 등에 따른 유체력을 검토하는 목적으로 제작이 용이하고 소파효율이 우수한 구조물을 계획하기 위하여 사각단면을 연결하는 공시모형을 Table 1과 Fig. 1에 나타낸 것처럼 1개의 부체를 각각  $1 \times 1 \times 1$ 로 연결한 구조물(A-type), 1열에 3개의 부체를 가지고  $3 \times 3 \times 3$ 가 연결된 구조물(B-type), 1열에 2개 또는 3개의 부체를 가지고  $3 \times 2 \times 3$ 가 연결된 구조물(C-type)을 택하여 계산을 행하였다.

수치계산에 있어서는 먼저 사각단면 형상을 가진 부유구조물에 대한 동요응답 및 투과계수를 계산하고 Yamashita[7]의 결과와 비교하여 본 계산 결과의 신뢰성을 확인하였으며, 연결형 부유체의 배열에 따른 계통적인 계산을 수행하기 위해서 이용된 3가지 공시모형 중 부체가 3개 연결된 경우 부체폭(b)과 부체사이의 간격( $S'$ ) 즉,  $b/S'$ 가 0.25, 0.5, 1.0일 때에 있어서 횡파에서의 유체력, 운동응답 및 소파효율을 계산하였다. 또한 3가지 모형 전체에 대한 비교계산에서의 전체 배열된 폭은 부체의 폭(b)과 부체사이의 간격( $S'$ )이 같도록 ( $b/S' = 1.0$ ) 하였으며, 전체모형에 대하여 435, 585, 520개의 요소로 각각 분할하였다.

## 4. 결과 및 고찰

부유식 소파구조물의 단면의 형상과 부체가 연결된 경우 부체의 배열에 따른 유체역학적 상호간섭의 영향, 유체력 계수 및 파강제력, 운동응답 및 소파성능에 대하여 계통적인 수치계산을 수행한 결과 중 본 논문에서는 소파효율에 가장 영향을 주는 상하방향에 대한 결과에 대하여 검토하였다.

Fig. 2, 3은 사각단면에 대한 상하 동요응답 및 투과계수에 대한 Yamashita의 결과와 비교한 것으로 그림에서 알 수 있듯이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4~7은 수심의 영향을 비교하기 위하여 수심이 ( $h=1, 5, 10$  m)일 때 A-type 부유 소파제의 유체력 계수 및 동요진폭을 계산한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 수심이 얇은 경우 수심의 영향이 단파장 영역에서는 크게 나타나고 있으나, 장파장 영역에서는 별 영향이 없음을 알 수 있다.

Fig. 8~10은 부체의 배열 및 부체사이의 간격변화에 따른 유체역학적 특성을 검토하기 위하여 부체와 폭 비( $b/S = 0.1, 0.5, 1.0$ )를 변화시키면서 유체력계수 및 운동응답을 계산한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 부체와 부체 사이의 비가 작은 경우 유체력 및 파강제력이 큰값을 나타내고 있으며, 동요진폭은 일부 단파영역을 제외한 모든 영역에서 별 차이가 없음을 알 수 있었다.

Fig. 11~15는 A, B, C-type 세가지 공시모형에 대한 유체력 계수, 파강제력, 운동응답 진폭 및 소파효율에 대한 계산결과와의 비교 결과이다. 다동체의 경우(C-type)가 상하부가질량 및 조파감쇠계수가 작게 나타나고 있으며 단파영역에서 동요진폭이 크게 나타나며, 반사계수는 증가하였다. 이는 중요한 부체의 소파효율은 상하요의 운동진폭과 관계가 있으며, 동요진폭이 클수록 부체의 운동에 기인한 에너지 소실로 인해 소파효율은 증대될 것으로 생각된다.

연결형 부유체의 경우 부체의 배열을 변화시킴으로써 단파장영역에서는 소파효율의 증대를 기대할 수 있으나,  $\lambda/L$ 이 5이상인 경우 소파효율은 거의 기대할 수 없음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

부유식 소파구조물의 소파효율을 향상시키기 위한 기초연구로서 여러개의 부유구조물로 연결되어 있는 소파제의 경우 부유체의 형상 및 배열에 따른 유체역학적 특성 및 소파효율에 대하여 검토하여 보았다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 연결형 부유소파제의 경우 단주기파 영역에서는 단동체보다 소파효율이 우수하며, 수심이 얇은 연안영역에서도 유효함을 알 수 있었다. 따라서 파의 진행 방향에 대한 효율적 배열과 부체사이의 상호간섭을 이용하여 소파효율을 증대시킬 수 있는 가능성이 있음을 확인하였다.
2. 부유체의 형상 및 배열에 대하여 계통적으로 연구를 수행한다면 장주기파 경우에서도

소파 효율에 좋은 구조물을 개발 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후기

본 연구는 대학연구비의 지원을 받아 수행한 연구결과로 관계자 분들의 감사를 드립니다.

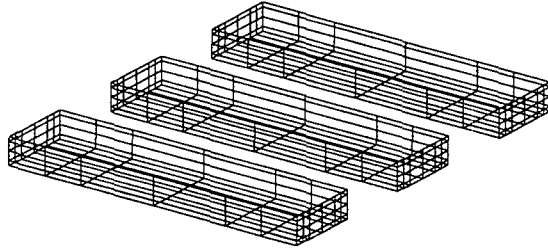
## 참고문헌

1. 김종현 외 5명 : “그물형 부유식 방파제의 가능성에 관한 실험적 연구” 한국해양공학회, 2000년도 춘계학술대회, pp. 215 ~ 219
2. 안용호 외 3명 : “장주기파에 효율적인 부유식방파제 단면 형상에 관한 연구”, 한국해양공학회, 2000년도 춘계학술대회, pp. 133 ~ 138
3. 高木建雄, 丹後義彦 : “多重連結浮體に働く波漂流力”, 제12회 해양공학회シンポジウム 1994, pp.129 ~ 136
4. 박노식, 엄병섭 : “쌍둥형 부유식 소파제의 소파성능에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제12권 제1호, 1998, pp.128 ~ 134
5. 朴魯植 : “초대형 부유식 해양구조물에 작용하는 유체력추정에 관한 근사계산법의 연구”, 韓國海洋工學會誌, 第214號, 1997, pp. 74~83
6. 大楠丹, 柏木正 : “内部自由水を利用する浮消波堤の浮消性能に關する研究”, 日本造船學會論文集, 第169號, 1991, pp. 215~222
7. Seiya Yamashita, Masaaki Sai : “A study on wave transmission and motions of pontoon type floating breakwaters”, Third symposium on ocean wave energy utilization, 1991, pp. 239~249

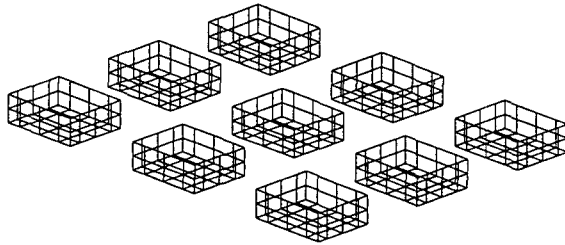


Table 1. Principal dimensions of joint type floating breakwaters  
unit [ m ]

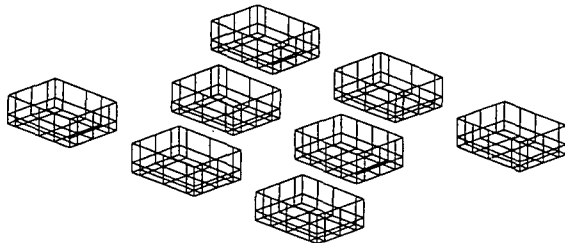
		Length (L)	Breadth (B)	Draft (D)	Space (S)	Displacement [m <sup>3</sup> ]	No. of floating body (EA)	Elements [EA]
A-type	A1	3.2	2.6	0.3	0.1	2.304	3	396
	A2	3.2	3.2	0.3	0.4	2.304	3	396
	A3	3.2	4.0	0.3	0.8	2.304	3	396
B-type		3.2	4.0	0.3	0.8	1.3824	9	432
C-type		3.2	4.0	0.3	0.8	1.2288	8	384



(a) A-type (No. of element = 435)



(b) B-type (No. of element = 585)



(c) C-type (No. of element = 520)

Fig. 1 Elements of joint type floating breakwaters

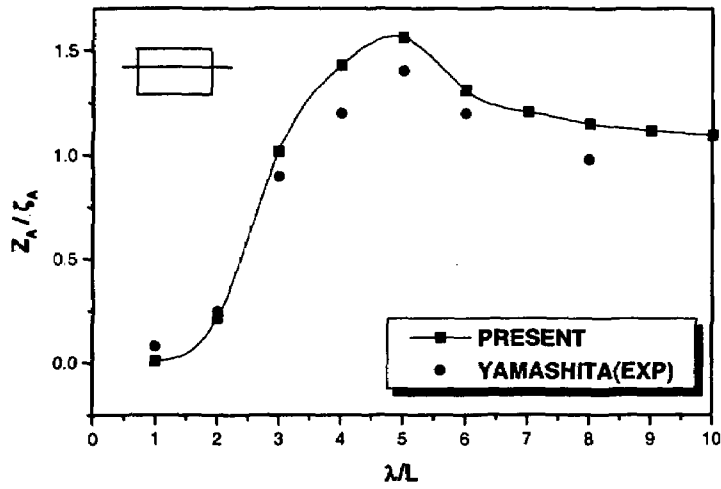


Fig. 2 Motion responses of the floating breakwaters

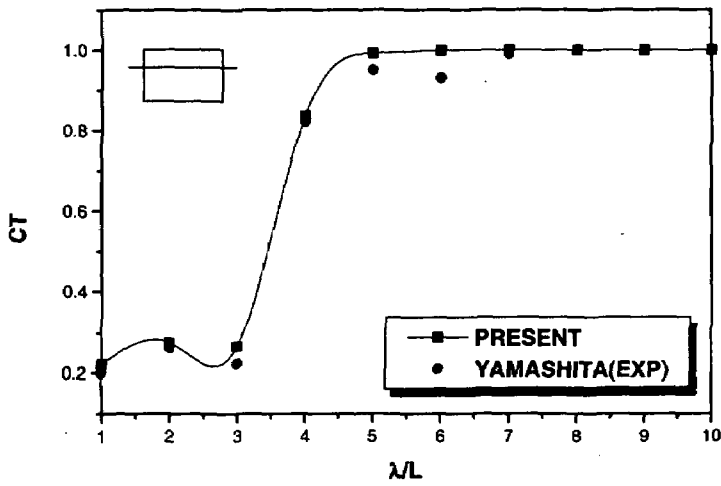


Fig. 3 Wave transmission coefficients of the floating breakwaters

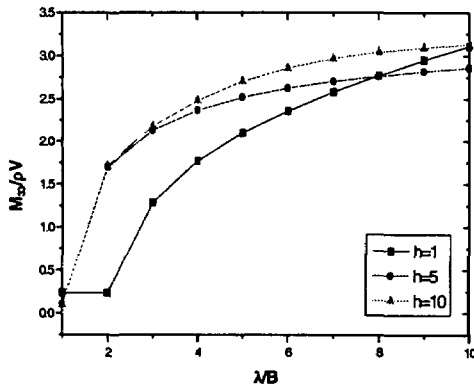


Fig. 4 Heave added masses of the A-type floating structures in the finite depths

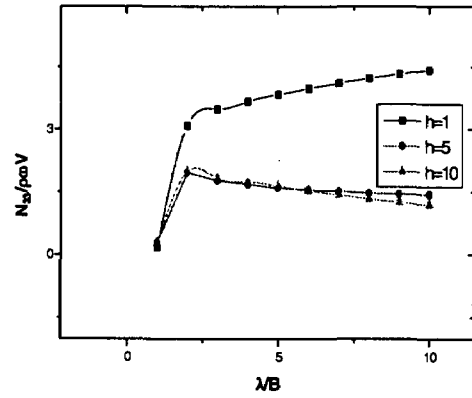


Fig. 5 Heave damping coefficients of the A-type floating structures in the finite depths

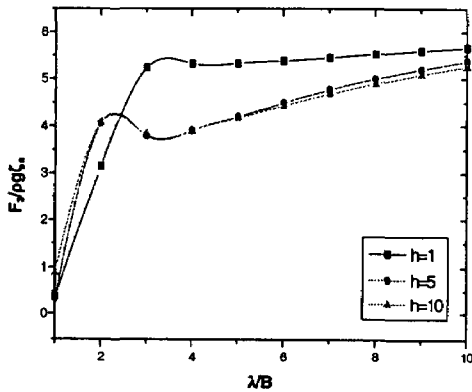


Fig. 6 Heave wave exciting forces of the A-type floating structures in the finite depths

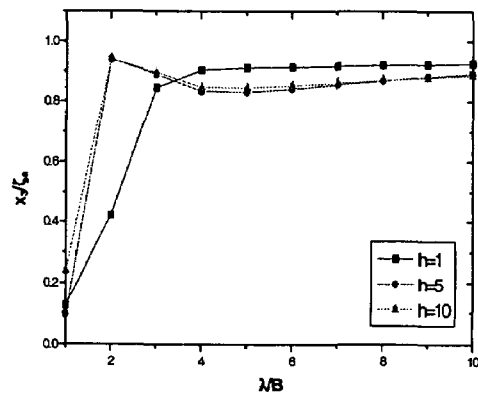


Fig. 7 Heave amplitudes of the A-type floating structures in the finite depths

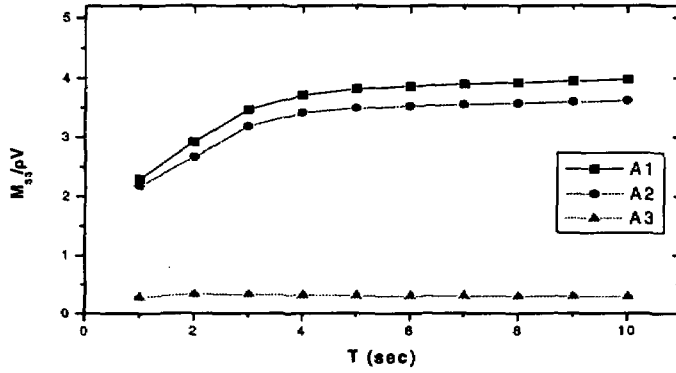


Fig. 8 Heave added masses of the A-type floating structures in the different spaces

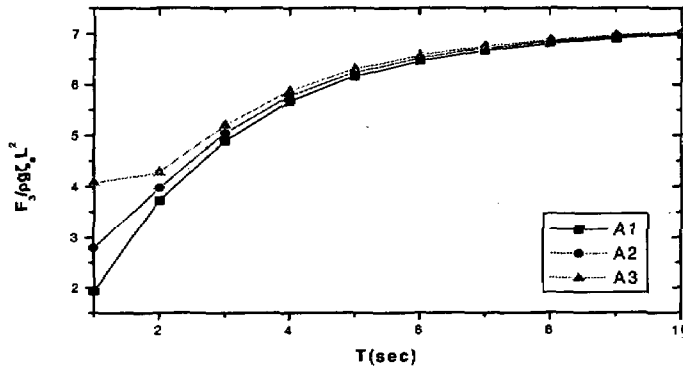


Fig. 9 Heave wave exciting forces of the A-type floating structures in the different spaces

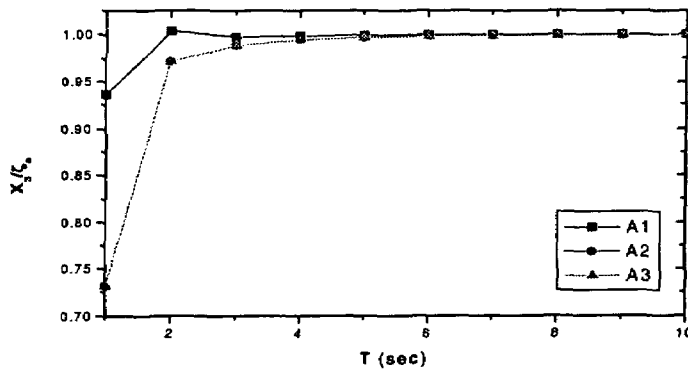


Fig. 10 Heave amplitudes of the A-type floating structures in the different spaces

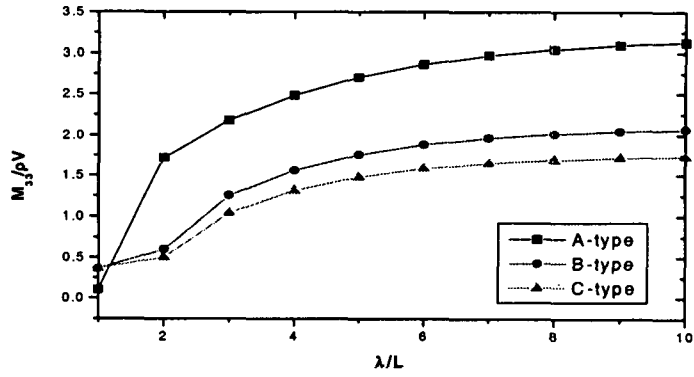


Fig. 11 Heave added masses of the floating structures

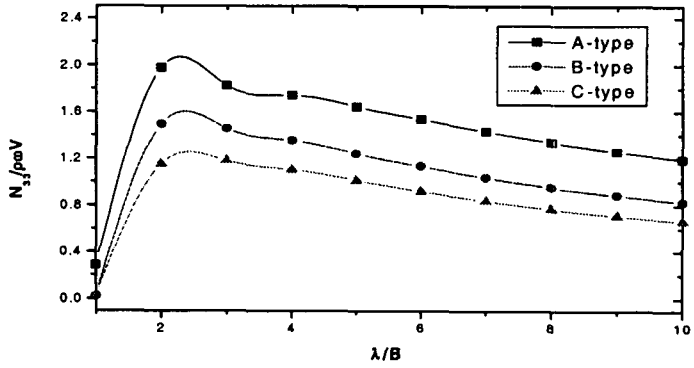


Fig. 12 Heave damping coefficients of the floating structures

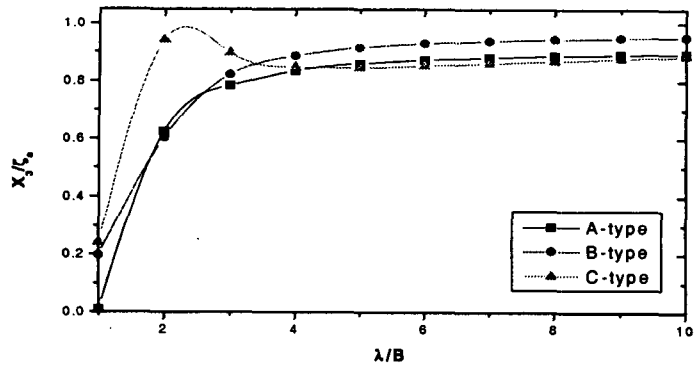


Fig. 13 Heave amplitudes of the floating structures

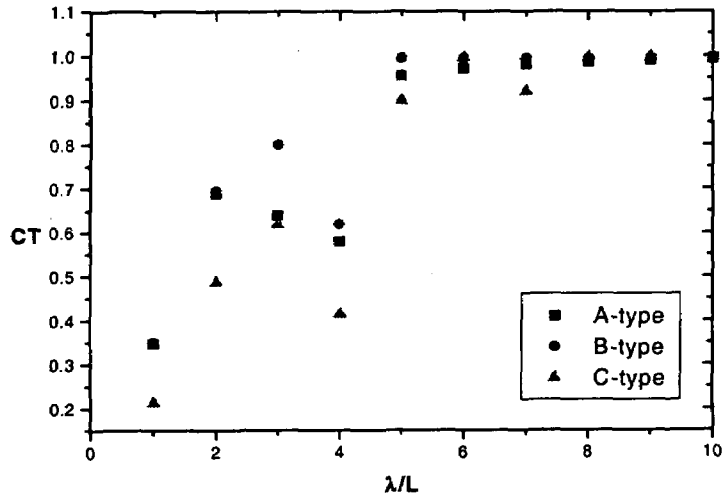


Fig. 14 Wave transmission coefficients of the floating structures

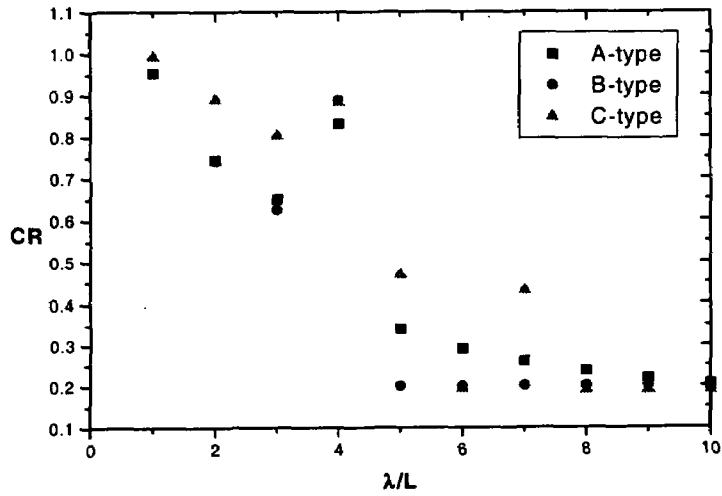


Fig. 15 Wave reflection coefficients of the floating structures