

쌍동형부유식소파제의 소파성능에 관한 연구

박 노 식* · 엄 병 섭**

(97년 12월 23일 접수)

A Study on the Performance of Twin Hull Floating Breakwater

Ro-Sik Park* · Byung-Seob Eom**

Key Words : Transmission(투과), Floating Breakwater(부유소파제), Performance(성능), Singularity Distribution Method(특이점분포법)

Abstract

This study is carried out the theoretical studies on wave transmission and motions in waves of twin hull type floating breakwaters with the vertical and horizontal plate.

The method of calculation is based on the three dimensional singularity distribution method.

The results show that wave transmission is affected by heave motion.

Twin hull type is designed by the use of the theoretical method and good performance of the developed floating breakwater is confirmed for longer wave period.

1. 서 론

소파구조물에는 크게 나누어 중력식과 부유식이 있으며¹⁾ 항만의 방파제는 대부분이 예외 없이 중력식이나, 중력식의 경우 수심이 크게 되면 수심의 자승에 비례하여 단면적이 크게 되어 건설비용 또한 증가한다. 특히, 중력식의 경우 파의 작용이 없고, 그 영향이 미치지 않는 해저에 가까울수록 막대한 물자투입을 필요로 하는 것에 반하여, 부유식은 수면부분에만 자재를 투입하는 유리한 잇점이 있다. 또한 수면부근만 생각하면 부유식이 더 합

리적 방법이라 할 수 있다.^{2)~5)}

최근 부유소파구조물은 Marina, 해양목장등의 대규모화로 수심이 깊게 되면 필연적으로 부유식을 채용하지 않으면 안되나, 아직까지 부유식의 완전한 성공사례는 별로 없는 것으로 생각된다.

부유소파제의 소파효과가 좋은 형상을 구하기 위하여 부유소파제의 동요특성과 소파성능과의 관계를 밝히는 것은 대단히 중요하다. 본 연구에서는 3차원특이점분포법을 이용하여 부유소파제의 상하동요 및 좌우동요와 투과효율과의 관계를 연구하였다. 이를 위하여 Seiya Yamashita⁶⁾의 단동구형

* 종신회원, 울산대학교 수송시스템공학부

** 정회원, 울산대학교 대학원 조선해양공학과

단면 모형에 대하여 동요 및 투과율을 계산, 본 계산 방법의 유효성을 확인하였고 공시모형으로 구형단면을 가진 단순쌍둥형소파구조물, 좌우동요를 제어하기 위하여 그것의 중앙에 수직판을 설치한 경우와 상하동요를 제어하기 위한 선저판을 취부한 경우, 그리고 두가지 제어판을 모두 설치한 경우의 4가지 상태에 대하여 투과율에 미치는 단면형상의 영향을 검토하였다.

2. 기초이론

유체는 비압축성 비점성의 완전유체이고, 비회전을 하며 자유표면의 파고 및 부체에 의한 유체 교란은 미소하다고 가정한다. 또한 유체영역은 무한이라한다. 좌표계는 Fig. 1에 표시한 것과 같은 $X-Y$ 평면을 정지수면으로 하고 연직상방을 Z 축의 정방향으로 하는 직교좌표계를 사용한다. 또한, 입사파는 원주기운동을 하며 X 축에 대하여 α 의 각도로 입사되고 있다고 생각한다. 유체력계산은 3차원특이점분포법⁷⁾을 이용하여 계산하며 이에 대하여 주요사항만 설명한다.

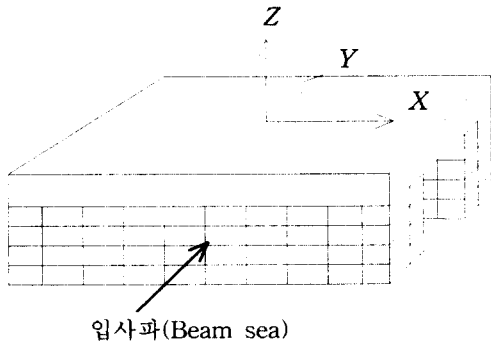


Fig. 1 Construction of floating body coordinate system

2.1 유체력 및 운동응답

Y 축의 정방향으로부터 입사하는 파에 의하여 부체가 동요원주파수 ω 로 정현운동하고 있을 경우 유동장은 속도 Potential로 나타낼 수 있으며 입사파의 속도 Potential을 Φ_0 , 산란파의 속도 Potential

을 Φ_7 , 방사파의 속도 Potential을 Φ_R 그리고 유장의 전체 속도 Potential을 Φ 라 하면

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_7 + \Phi_R \quad (1)$$

가된다. 또한 속도 Potential ϕ 는 자유표면조건, 수저조건 및 방사조건을 만족하는 Laplace 방정식의 해를 Green 함수 $G(x, y, z : x', y', z')$ 라 놓으면 속도 Potential $\phi(P)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\phi(P) = \int \int_S \sigma(Q) G(P, Q) dS(Q) \quad (2)$$

여기서 $P(x, y, z)$ 는 유체중의 임의의 점이며, $Q(x', y', z')$ 는 물체표면상 S 에 분포시킨 점이다. 또한 $\sigma(Q)$ 는 물체표면 S 상에 분포시킨 Source 세기이다.

윗식의 Source 세기 $\sigma(Q)$ 를 구하기 위하여 물체표면조건을 이용하면, 즉 (2)식에서 양변을 물체표면 S 의 법선방향으로 미분하고 점 P 를 물체표면 S 상의 점 Q 에 접근시키면 $\sigma(Q)$ 가 미지수인 다음의 적분방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial \phi(P)}{\partial n} = -2\pi\sigma(P) + \int \int_S \sigma(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) ds(Q) \quad (3)$$

(3)식에서 점 $P(x, y, z)$ 와 점 $Q(x', y', z')$ 는 물체표면 S 상의 점이다. 적분은 물체표면 S 에 대하여 적용된다. 따라서 (3)식에서 구한 $\sigma(Q)$ 를 (2)식에 대입하면 속도Potential $\phi(P)$ 가 구하여진다.

한편, Green 함수는 무한수심의 경우 다음과 같이 표시된다.

$$G(P, Q) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + 2K \int_0^\infty \frac{e^{K(z+z')} J_0(kR)}{k-K} dk + i 2\pi K e^{K(z+z')} J_0(KR) \quad (4)$$

부유체가 i Mode의 운동을 하고 있을 때 단위 진폭속도 Potential을 $\phi_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 라 하면 j 방향의 부가질량계수 A_{ij} 와 조파감쇠계수 B_{ij} 는 다음식으로 부터 구하여진다.

$$A_{ij} = -\rho \operatorname{Re} \left[\int \int_S \phi_i n_j ds \right] \quad (5)$$

$$B_{ij} = \rho \omega \operatorname{Im} \left[\int \int_s \psi_j n_j ds \right] \quad (6)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \mathbf{n} \quad , \quad \begin{bmatrix} n_4 \\ n_5 \\ n_6 \end{bmatrix} = \mathbf{r} \times \mathbf{n}$$

\mathbf{n} : 물체표면에서의 외향 단위법선벡터
 \mathbf{r} : 물체중심에서의 물체표면상의 임의의 점에 대한 위치벡터

규칙파중에서 부체가 고정되어 있을 때 반사파의 속도 Potential, 즉 산란파 속도 Potential을 ϕ_7 이라 하면 ϕ_7 은 물체표면조건으로 부터

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} = - \frac{\partial \phi_0}{\partial n}$$

과 같이 생각할 수 있으며, 입사파의 속도 Potential ϕ_0 는 다음식으로 표시된다.

$$\phi_0 e^{i\omega t} = - \frac{i\omega \zeta_a}{K} e^{Kz + iK(x \cos \alpha + y \sin \alpha) + i\omega t} \quad (7)$$

산란파 속도 Potential ϕ_7 이 구해지면 j 방향의 파강제력은

$$\begin{aligned} F_j &= i\omega \rho \int \int_s (\phi_0 + \phi_7) n_j ds \\ &= \rho g \zeta_a \int \int_s (\psi_0 + \psi_7) n_j ds \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, 6) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서

ψ_0 : 입사파의 단위진폭 속도 Potential
 ψ_7 : 산란파의 단위진폭 속도 Potential

또한, 방향의 j 파강제력은 Radiation Potential이 구하여지면 3차원 Kochin함수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_j &= \rho g \zeta_a H_j(K, \alpha) \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, 6) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} H_j(K, \alpha) &= \iint_s \left(\frac{\partial \psi_j}{\partial n} - \psi_j \frac{\partial}{\partial n} \right) e^{Kz + iK(x' \cos \alpha + y' \sin \alpha)} ds \\ &= \iint_s \left(\psi_0 \frac{\partial \psi_j}{\partial n} - \psi_j \frac{\partial \psi_0}{\partial n} \right) ds \end{aligned} \quad (10)$$

이상과 같이 구한 유체력을 다음의 선형운동방정식을 이용하여 운동응답진폭을 구한다.

$$\sum_{i=1}^6 [(M_{ij} + A_{ij}) \ddot{X}_j + N_{ij} \dot{X}_j + K_{ij} X_j] = F_j \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (11)$$

여기서

X_j : 부유체의 중심에 있어서 j 방향의 운동진폭

M_{ij} : 부유체의 질량

N_{ij} : 부유체의 부가질량

K_{ij} : 정적 복원력

F_j : j 방향의 파강제력

2.2 투과 계수 및 반사 계수

일반적으로 유체중의 부체에 입사하는 파는 부체에 의한 반사, 부체의 동요에 의한 에너지소모, 부체운동으로 발생하는 파의 영향 등의 여러 가지 원인에 의하여 소파가 된다. 소파제의 경우 길이(L)는 폭(B)에 비하여 상대적으로 큰 값을 나타내는 경우가 대부분이므로 3차원의 영향이 거의 없는 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 2차원 단면 쌍둥구조물을 공시모형으로 택하여, 입사파가 횡파(Beam sea : $\alpha = 90^\circ$)인 경우만을 생각한다면 유체중의 부체에 의한 반사파 및 투과파 즉, 산란파 속도 Potential ϕ_7 은

$$\phi_7^+ = \operatorname{Re}[\zeta_7 e^{Kz + iKy + i\omega t}] \quad (12)$$

으로 나타낼 수 있다.

부유구조물의 소파 및 반사문제는 먼저, 고정부체의 경우에 대하여 구하고, 동요에 의한 경우의 것을 중합하는 것으로 구할 수 있다.

먼저, 고정부체의 경우에 대한 산란문제의 Kochin함수 $H_7^+(K)$ 를 이용하여 반사파 및 투과파를 표시하여 보면, 반사파의 경우

$$\zeta_R = i \zeta_a H_7^+(K) \quad (13)$$

으로 표현될 수 있으며, 투과파의 경우 입사파에 산란파를 더하는 것으로 정의되므로

$$\zeta_T = \zeta_a(1 + iH_7^-(K)) \quad (14)$$

가 된다.

따라서 반사계수 R_1 , 투과계수 T_1 는

$$R_1 \equiv \frac{\zeta_R}{\zeta_a} = iH_7^+(K) \quad (15)$$

$$T_1 \equiv \frac{\zeta_T}{\zeta_a} = 1 + iH_7^-(K) \quad (16)$$

로 나타낼 수 있다.

또한, 동요부체의 경우 방사문제의 Kochin 함수 $H_j^+(K)$ 를 이용하여 반사파 및 투과파를 나타내면 반사파의 경우

$$\zeta_R = \zeta_j^+ = -iKX_jH_j^+(K) \quad (17)$$

이며, 투과파의 경우는

$$\zeta_T = \zeta_j^- = -iKX_jH_j^-(K) \quad (18)$$

이 된다.

따라서 반사계수 R_2 , 투과계수 T_2 는

$$R_2 \equiv \frac{\zeta_j^+}{\zeta_a} = -iK \sum_{j=1}^6 \frac{X_j}{\zeta_a} H_j^+(K) \quad (19)$$

$$T_2 \equiv \frac{\zeta_j^-}{\zeta_a} = -iK \sum_{j=1}^6 \frac{X_j}{\zeta_a} H_j^-(K) \quad (20)$$

로 나타낼 수 있다.

이상으로부터 부유구조물에 작용하는 투과계수 C_T 와 반사계수 C_R 을 나타낼 수 있다.

$$C_T = T_1 + T_2 \quad (21)$$

$$= 1 + iH_7^-(K) - iK \sum_{j=1}^6 \frac{X_j}{\zeta_a} H_j^-(K)$$

$$C_R = R_1 + R_2 \quad (22)$$

$$= iH_7^+(K) - iK \sum_{j=1}^6 \frac{X_j}{\zeta_a} H_j^+(K)$$

여기서, X_j 는 부체가 동요하는 경우에 운동방정식을 풀어 구한 동요의 복소진폭의 크기이다. 방사문제의 경우, 투과계수 및 반사계수는 부체동요 위상을 이용하여 구할 수 있다.

본 논문에서는 동요위상을 이용하여 투과계수 및 반사계수를 구하였다.

3. 공시모형

공시모형은 여러 가지 단면형상(삼각형, 원통형, 사각형)에 대한 유체력계산을 행하여 그 결과로부터 운동성능이 우수하다고 예상되는 사각단면형상의 쌍동형을 택하여 다음과 같이 변형하여 계산을 수행하였다.

- 1) s/b 의 값이 2인 Simple twin hull floating bodies(K-1)
- 2) Twin hull floating bodies with vertical plate(K-2)
- 3) Twin hull floating bodies with bottom plates(K-3)
- 4) Twin hull floating bodies with vertical plate and bottom plates(K-4)

본 논문은 이상의 4가지 기본형상에 대하여 계산을 수행하였다. 공시모형(K-1, K-2, K-3, K-4)에 대한 주요 제원과 형상은 Table 1와 Fig. 2에 각각 나타내었다. 또한, 기본형상 K-4의 경우에 있어서는 중앙수직소파판의 Depth를 1/2로 한 경우(K-5)와 1/2 수직소파판이 2개인 경우(K-6)로 나누어 계산하였으며 기본형상 K-3의 경우에 있어서는 선저수평소파판의 폭이 K-3의 2배인 경우(K-7)로 세분하여 계산을 수행하였다.

Table 1 Principal dimension of floating bodies used in the comparison calculations

단위 : m

	K-1	K-2	K-3	K-4
Length (L)	100	100	100	100
Breadth (B)	8	8	8	8
Draft (D)	3	3	3	3
Space (S)	4	3.8	2	2
Displacement(▽)	1200	1260	1240	1300
비 고		Vertical plate	Bottom plate	Vertical, Bottom plate

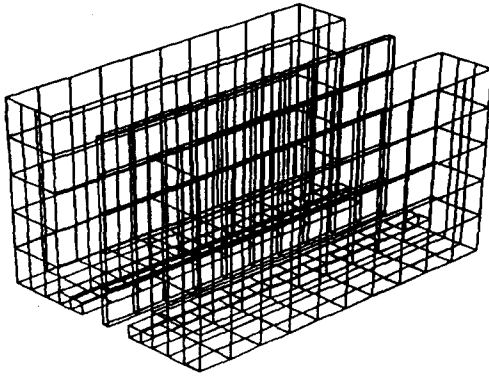


Fig. 2 Element of floating body

4. 수치계산 및 고찰

수치계산에 있어서는 단면형상이 삼각형, 사각형 및 사다리꼴형에 대하여 수행하였으며, 그 결과 공시모형은 쌍동형 사각단면형상을 택하여 유체력, 운동응답 및 투과효율을 계산하였다.

계산에 이용된 4가지 공시모형은 K-1의 경우 s/b 의 값이 2가 되도록 계획되었으며, 수치계산을 위하여 전체모형에 대하여 320개의 요소로 분할하였으며, K-2의 경우는 Sway 운동을 제어하기 위하여 공시모형(K-2)중앙부에 길이 100m, 깊이 3m의 얇은 수직소파판을 설치하였으며 전체모형에 대하여 440개의 요소로 분할하여 계산을 수행하였다. K-3의 경우 Heave 운동을 제어하기 위하여 폭 $b/2$, 길이 100m의 수평선저소파판을 Hull 각각에 부착하였다. 요소분할은 408개이다. 마지막으로 K-4는 공시모형 K-2와 K-3의 복합적인 형태로 590개의 요소로 분할하였다. 공시모델 K-1, K-2, K-3, K-4는 모두 Beam sea 상태의 $\lambda/B = 1 \sim 10$ 사이의 18가지의 조건에서 수치계산이 수행되었다.

Fig. 3은 본 계산방법의 유효성을 검토하기 위하여 Seiya Yamashita^[6]의 상자형부체에 대한 투과계수 결과와 본 계산결과를 나타내었다. 그림에서도 알 수 있듯이 단주기영역을 제외한 대부분의 영역에서는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 단주기 영역의 경우 입사파는 부유체에 의하여 전반사되어 투과계수 (C_T)값은 0으로 수렴하여야하나, 그

림에서도 알 수 있듯이 차이를 보이고 있다. 이것은 요소분할수 및 수치계산방법의 검토등, 금후의 수행되어야할 과제이다.

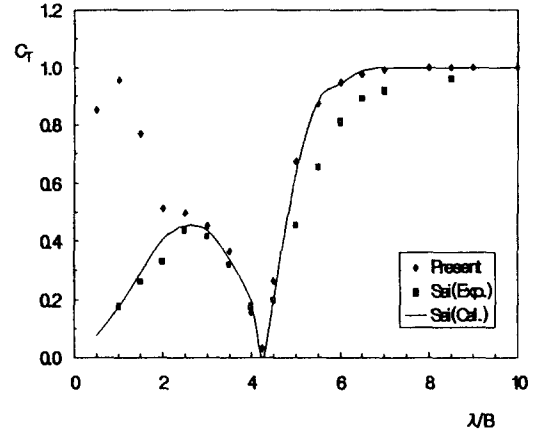


Fig. 3 Wave transmission coefficients by the square shaped floating body

공시모형에 대한 결과를 Fig. 4 - Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 4 - Fig. 5는 좌우동요 및 상하동요 파강제력 계산의 결과이며 좌우요 파강제력에는 중앙제어판의 영향이 거의 나타나지 않음을 알 수 있었으나 상하동요 파강제력은 선저에 수평소파판을 붙인 경우의 것이 작게됨을 알 수 있었다.

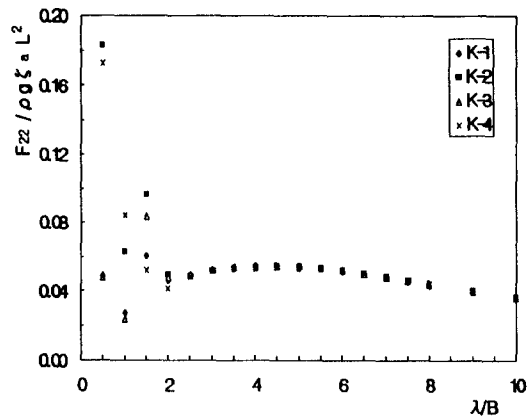


Fig. 4 Sway wave exciting forces acting on the floating bodies

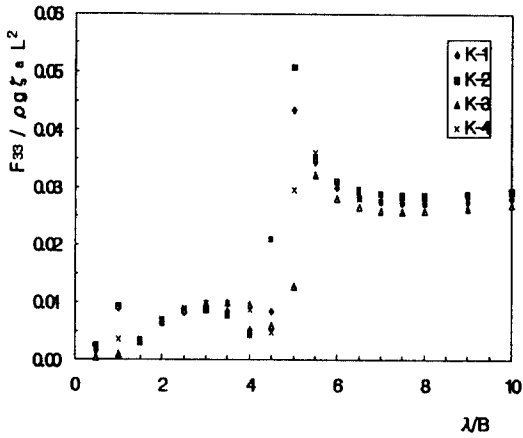


Fig. 5 Heave wave exciting forces acting on the floating bodies

Fig. 6 - Fig. 7은 좌우동요 및 상하동요 진폭비의 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 상하동요 진폭비는 선저에 수평소파판을 붙인 것이 효과가 있음을 알 수 있으며 소파판의 취부위치 및 면적비를 개선한다면 더 좋은 효과가 있을 것으로 기대된다.

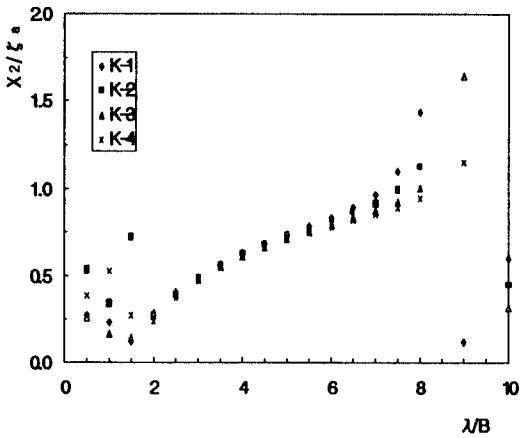


Fig. 6 Sway amplitude of the floating bodies

Fig. 8 - Fig. 9는 반사파계수와 투과파계수의 계산결과이다. 그림에서도 알 수 있듯이 단주기파에서는 매우 불규칙한 결과가 나타나 소파판의 효과에 대한 것은 알 수 없으나 λ/B 가 5 이상에서는 중앙에 소파판을 설치한 경우가 우수한 것으로 나타났다. 또한, 중앙수직소파판의 효과에 있어서

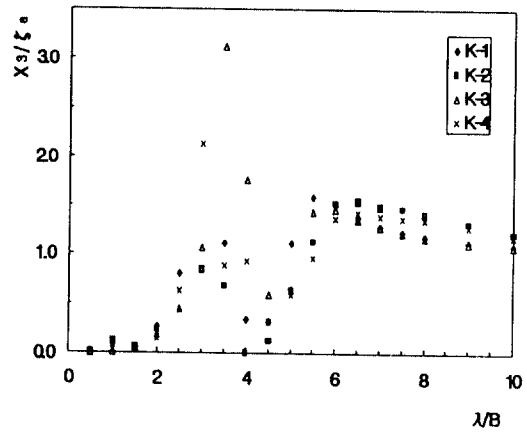


Fig. 7 Heave amplitude of the floating bodies

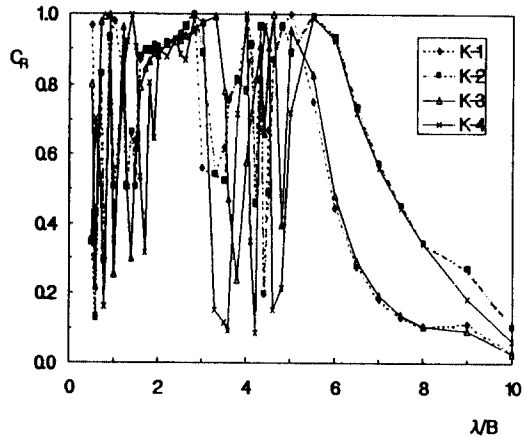


Fig. 8-(a) Wave reflection coefficients by the floating bodies

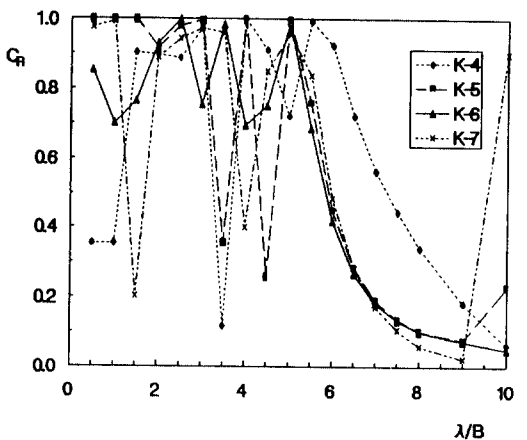


Fig. 8-(b) Wave reflection coefficients by the floating bodies

도 소파판의 크기에 따라 소파효율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, K-5의 경우(1/2 중앙수직 소파판 설치) 소파판이없는 K-1의 경우와 유사한 소파효율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 소파판을 어떻게 설치하는가에 의해 보다 성능 좋은 소파구조물을 설계할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

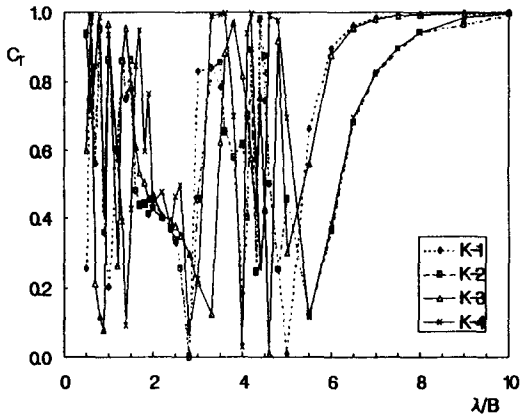


Fig. 9-(a) Wave transmission coefficients by the floating bodies

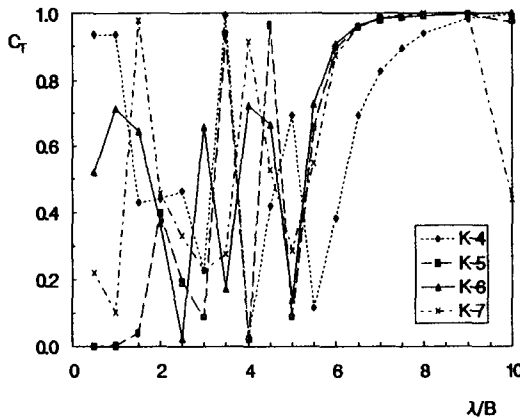


Fig. 9-(b) Wave transmission coefficients by the floating bodies

5. 결 론

부유식소파제의 성능에 관한 기초 연구로서 수직 및 수평 소파판을 부착한 쌍동형 부소파제에 대하여 유체력, 운동응답 및 소파성능에 관한 수치해

석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부체중앙에 수직소파판을 설치함으로써 소파성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었으며, 소파판의 크기에 따라 소파효율에도 영향이 있음을 알 수 있었다.
2. 선저수평소파판이 부착된 경우 소파판은 상하요 운동응답의 감요효과는 있으나, 소파성능에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.
3. 치수 및 형상변화에 대한 계통적 수치계산을 하여 소파효율이 좋은 소파구조물설계에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분들에게 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 近藤俊郎, 竹田英章 : “消波構造物”, 1983, pp.220-244
- 2) 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関する研究”, 日本造船學會論文集, 第169號
- 3) Richey E.P., Nece R.E. : “Floating breakwaters- State of art”, 1974 Floating Breakwaters Conference Papers, Kowalski, T. (Ed) Rhode Island Univ., 1974
- 4) 別所正利, 他 : 波の全反射について, 日本造船學會論文集, 第151號, 1982
- 5) 加藤重一 : “浮防波堤開發研究の經過成果”, 日本土木學會誌, 1982
- 6) 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
- 7) 朴魯植 : “초대형 부유식 해양구조물에 작용하는 유체력추정에 관한 근사계산법의 연구”, 韓國海洋工學會誌, 第214號, 1997