

## 港灣內 繫留船舶의 水平運動 解析 On the Surge Motion of a Ship in Rectangular Harbor

최항순\*·조일형\*

Hang Shoon Choi\* and Il Hyung Cho\*

**要 旨** : 본 논문에서는 선형포텐셜 이론을 이용하여 항만에 계류된 선박의 운동해석을 수행하였다. 해양에서 입사되는 장파의 진동수와 항만의 고유진동수가 일치될 때 항만공진이 발생하며, 항만공진은 선박의 운동을 크게 야기시킨다. 해석 방법으로는 정합점근전개법(Matched Asymptotic Expansion)을 사용하였다. 이 방법을 적용하기 위하여 선박은 세장선으로 가정하였고, 항만입구의 폭이 좁은 직사각형 항만을 계산 모델로 삼았다. 대칭운동(Surge, Heave, Pitch)에 대하여 수치계산을 수행한 결과 항만내의 위치에 따라 야기되는 선박운동모드가 크게 차이남을 밝혔다.

**Abstract** □ Herein the surge-heave-pitch motion of a ship has been analyzed within the framework of linear potential theory. The ship is assumed slender weakly moored along the centerline of a rectangular harbor with constant depth and straight coastline. The method of matched asymptotic expansion is used to obtain the leading-order solution. The ship and harbor responses to incident long waves can be represented in terms of Green's function, which is the solution of the Helmholtz equation satisfying necessary boundary conditions. Numerical results clearly indicate the importance of the surge motion.

### 1. 서 론

세계 무역이 활발해짐에 따라 선박을 이용한 해상 물동량은 꾸준히 증가하였으나 부두시설의 확충이 뒤따르지 못하여 선박은 상당한 시간을 항만내에서 하역을 기다려야 한다. 이러한 경우에 해상이 거칠어지면 파장이 매우 긴 파들이 방파제를 통과하여 항만내에서 매우 높은 파로 변환되는 항만공진이 발생한다. 항만공진은 선박의 운동을 야기시켜 인접한 접안시설이나 이웃선박과 충돌케 함으로써 커다란 경제적 손실을 초래하기도 한다. 이러한 현상은 우리나라 항만에서도 빈번히 발생하고 있다.

항만내 파도 응답해석은 해안공학분야에서 오랫동안 이론적 및 실험적 연구가 수행되어 왔다. 그러나 항만안에 계류된 선박의 운동해석은 상술한 바와 같이 중요한 실제적인 문제이면서도 문제의 복잡성 때문에 아직까지 본격적으로 시도되지 못하였다.

본 논문에는 항만안에 계류된 선박의 운동해석에 대한 기초적인 연구결과를 수록하였다. 본 논문의

목적은 이 문제의 물리적 특성을 규명하고 항만과 방파제의 설계 자료를 제공하며, 또한 계류된 선박의 적절한 배치를 위한 자료를 제공하고자 함에 있다. 해석방법으로는 섭동법(perturbation method) 중의 하나인 정합점근전개법(matched asymptotic expansion method)을 사용하였다.

### 2. 항만내 파도응답

이론 전개를 위하여 아래와 같은 몇 가지 가정을 필요로 한다. 즉, 입사파의 파장은 수심과 파고에 비해 아주 길다고 가정한다. 또한 항만의 형상은 사각형으로 택하였고, 안벽은 수심에 따라 일정한 수직벽으로 전반사가 일어난다고 가정한다. 해안선과 방파제는 입사파에 수직이며 역시 전반사가 일어나고, 선박은 선형 일점 계류선에 계류된 세장선(slender body)이라 가정한다. 정수면에 원점을 두고 왼쪽방향을  $z$  축의 양으로 택한 우수 좌표계를 도입하였다. Fig. 1은 모델에 대한 기하학적 형상을

\* 서울대학교 조선공학과 (Department of Naval Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

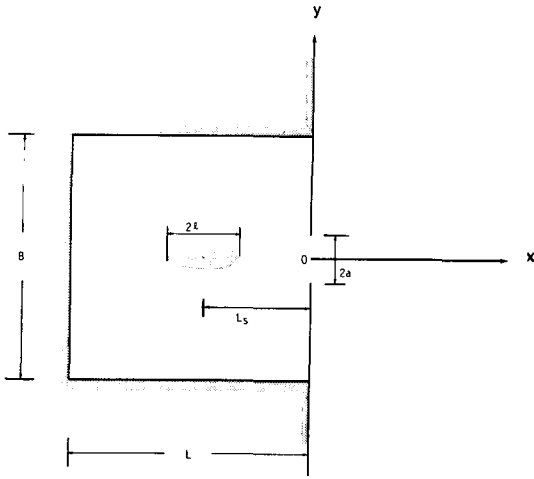


Fig. 1. Definition sketch.

보여주고 있다. 점성을 무시하고 비회전 유동을 가정하여 속도포텐셜을 도입한다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \{ \phi(x, y, z) e^{-i\omega t} \}, \quad (1)$$

$$\phi(x, y, z) = -\frac{i\omega}{g} \eta(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}, \quad (2)$$

여기서  $g$ 는 중력 가속도이며,  $h$ 는 수심을 나타낸다. 이 때 입사파의 주파수  $\omega$ 는 천수(shallow water) 해역에서 아래와 같이 선형 분산식(dis-persion-relation)을 만족한다.

$$\omega^2 = gk^2 h. \quad (3)$$

사각형 항만에 대한 파도응답은 Üntüata & Mei (1973)가 정합점근전개법을 이용하여 해석하였다. 즉, 유체영역을 해양과 항만으로 나누어 각 영역에서 문제를 풀고 항만입구에서 정합시켜 미지수를 구하였다. 본 연구에서는 부분적으로 그들의 결과를 이용하였다.

해양 영역에 대한 해는 입사파와 방파제에 의한 반사파 그리고 항만입구에서의 산란파로 구성되어 있다. 산란파는 항만입구에 소오스를 놓고 경계치 문제를 풀어 구한다.

$$\eta^0 = 2A \cos kx - \frac{i\omega}{g} Q_0 \{ i/2 H_0^{(1)}(kr) \}, \quad (4)$$

여기서  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이며,  $Q_0$ 는 항만입구에서 해양쪽으로 방사하는 유량을 나타낸다. 또한  $H_0^{(1)}$ 는 제 1

종 Hankel 함수이다. 나중에 수행할 정합을 위해서 해를  $r \rightarrow 0$ 로 내부 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}^0 \sim & 2A - \frac{i\omega}{g} Q_0 \left\{ -i/2 + \frac{1}{\pi} \ln \frac{\gamma k}{2} \right\} \\ & + \frac{i\omega}{g\pi} Q_0 \ln r, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\ln \gamma$ 는 Euler 상수이다( $=0.5772157$ ).

항만입구 영역에 대한 해는 등각사상을 통하여 2차원 수로 문제를 풀어 구할 수 있다. 외부 영역으로 전개시킨 해는 아래와 같다.

$$\tilde{\eta}^e \sim C \mp M \ln(a/2) \pm M \ln r \quad x \geq 0. \quad (6)$$

항만안에서의 파형은 항만입구로부터 들어오는 파와 선박의 운동에 의해 야기되는 파로 나눌 수 있다.

$$\eta^H = \eta_i + \eta_s. \quad (7)$$

항만입구로부터 입사하는 파  $\eta_i$ 는 Green 함수를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\eta_i = \frac{i\omega}{g} Q_H G(x, y), \quad (8)$$

여기서 Green 함수  $G(x, y)$ 는 Helmholtz 방정식과 경계조건을 만족하도록 Fourier 급수해로 표현된다(Mei, 1983).

$$\begin{aligned} G(x, y) = & - \left[ \frac{\cos k(x+L)}{kB \sin kL} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos k_n(x+L)}{k_n B \sin k_n L} \right. \\ & \left. \cos \frac{2n\pi}{B} y \right], \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $k_n [k^2 - (\frac{2n\pi}{B})^2]^{\frac{1}{2}}$ 이며  $Q_H$ 는 항만입구에서 항만안으로 들어오는 유량을 나타낸다.  $\eta_i$ 를  $r \rightarrow 0$ 에 대하여 내부전개시켜 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_i \sim & -\frac{i\omega}{g} Q_H \ln r - \frac{i\omega}{g} Q_H \left\{ \frac{1}{\pi} \ln(2\pi/B) + F \right\}, \\ F = & \frac{\cos kL}{kB \sin kL} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 2 \frac{\cos k_n L}{k_n B \sin k_n L} + \frac{1}{n\pi} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

### 3. 선박운동

선박운동은 대칭운동(surge, heave, pitch)과

비대칭운동(sway, roll, yaw)으로 대별된다. 본 연구에서는 선박을 세장선이라 가정하여 대칭운동만 다루기 때문에 선박의 운동은 선박의 중심선에 소오스를 분포시켜 나타낼 수 있다. 따라서 선박의 운동으로 야기된 파형은 아래와 같이 선적분 형태로 표현할 수 있다.

$$\eta_s = -\frac{i\omega}{g} \int Q_s(\xi) H(x, y, \xi, 0) d\xi. \quad (11)$$

이 때 Green 함수  $H(x, y, \xi, \eta)$ 는 다음과 같은 경계치 문제의 해가 된다(Morse & Feshbach, 1953).

$$\begin{cases} \nabla^2 H + k^2 H = \delta(x - \xi, y - \eta), \\ \frac{\partial H}{\partial y} = 0 & -L < x < 0 & y = \pm B/2, \\ \frac{\partial H}{\partial x} = 0 & x = 0, -L & |y| \leq B/2. \end{cases} \quad (12)$$

Fourier 급수 해석을 이용하여 위의 경계치 문제를 풀면 해는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} H(x, y, \xi, \eta) &= \frac{\cos kx \cos k(\xi + L)}{kB \sin kL} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos k_n x \cos k_n(\xi + L)}{k_n B \sin k_n L} \cdot \cos \frac{2n\pi}{B} y \cdot \cos \frac{2n\pi}{B} \eta \\ &\quad x > \xi, \\ H(x, y, \xi, \eta) &= \frac{\cos k\xi \cos k(x + L)}{kB \sin kL} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos k_n \xi \cos k_n(x + L)}{k_n B \sin k_n L} \cdot \cos \frac{2n\pi}{B} y \cdot \cos \frac{2n\pi}{B} \eta \\ &\quad x < \xi. \end{aligned} \quad (13)$$

식 (11)에서  $Q_s(x)$ 는 선박의 길이 방향에 따른 유량으로 단면  $H$ 에 대한 적분으로 얻어진다(Tuck, 1970).

$$Q_s(x) = 1/h \int \frac{\partial \phi}{\partial n} dl = -1/h \sum_H (i\omega \eta_j) A_j(x), \quad (j=1, 3, 5). \quad (14)$$

$A_j(x)$ 는 선박의 형상을 나타내는 함수들이다(Beck & Tuck, 1972).

$$A_1(x) = \int_H n_1 dl = S(x),$$

$$A_3(x) = \int_H n_3 dl = B(x),$$

$$A_5(x) = \int_H n_5 dl = -xB(x), \quad (15)$$

여기서  $S(x)$ 는 선체 길이 방향에 따른 단면적을 나타내며,  $B(x)$ 는 선폭을 표시한다. 식 (14)를 (11)에 대입하면 선박의 운동에 의해 야기된 파는 아래와 같이 얻어진다.

$$\eta_s = \frac{\omega^2}{gh} \sum_j \eta_j \int A_j(\xi) H(x, y; \xi, 0) d\xi \quad (16)$$

윗 식에서  $\eta_j$ 는 아래와 같은 운동방정식을 풀어 구해지는  $j$  방향 운동응답 함수이다.

$$\sum_j (-\omega^2 M_{ij} - T_{ij} + C_{ij}) \eta_j = F_i \quad (i, j=1, 3, 5), \quad (17)$$

여기서  $M_{ij}$ 는 질량을 나타내며 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$M_{ij} = \begin{vmatrix} M & 0 & Mz_c \\ 0 & M & -Mx_c \\ Mz_c & -Mx_c & I_{55} \end{vmatrix}. \quad (18)$$

$M$ 은 선박의 질량,  $(x_c, 0, z_c)$ 는 선박의 무게 중심 위치를 나타내며,  $I_{55}$ 는 종동요 방향의 관성 모우멘트이다.

$C_{ij}$ 는 복원력 계수를 나타내며, 영이 아닌 각 성분은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} C_{11} &= K_m \\ C_{33} &= \rho g A_w \\ C_{35} &= C_{53} = -\rho g X_F \\ C_{55} &= \rho g K_w^2 A_w \end{aligned}$$

여기서  $K_m$ 는 계류삭의 강성계수이며,  $A_w$ 는 수선면적을 뜻하며,  $X_F$ 는 부심을 나타낸다.  $K_w$ 는 수선면에 대한 관성반경(radius of gyration)이다.  $T_{ij}$ 는 동 유체력 계수로 아래 식과 같이 표현된다.

$$T_{ij} = -\frac{\rho \omega^2}{h} \iint dx d\xi A_i(x) A_j(\xi) H(x, y, \xi, 0). \quad (19)$$

운동을 일으키는 기진력  $F_i$ 는 Haskind 관계식을 이용하면

$$F_i = (T_{i0} - T_{oi}) Q_H = (T_{i0} + T_{i7}) Q_H. \quad (20)$$

와 같이 Froude-Krylov 성분과 산란성분으로 구성된다.

Froude-Krylov 힘은 선박에 입사하는 파의 포텐셜을 이용하여

$$T_{i0} = i\rho\omega \int A_i(x) G(x, y) dx \quad (21)$$

와 같이 표시되며, 산란에 의한 기진력  $T_{i7}$ 은 아래와 같다.

$$T_{i7} = \rho\omega i/h \iint d\xi dx A_i(x) A_7(\xi) H(x, y, \xi, 0), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} A_7(x) = & -S(x) \left\{ \frac{\sin k(x+L)}{B \sin kL} \right. \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin k_n(x+L)}{B \sin k_n L} \left. \right\} - S(x) \\ & \left\{ \frac{k \cos k(x+L)}{B \sin kL} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n \cos k_n(x+L)}{B \sin k_n L} \right\} \\ & + B(x) k^2 h \left\{ \frac{\cos k(x+L)}{kB \sin kL} \right. \\ & \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos k_n(x+L)}{k_n B \sin k_n L} \right\}. \quad (23) \end{aligned}$$

#### 4. 정합조건(Matching Condition)

수식 전개 of 마지막 단계로 각 영역에서의 해를 정합시켜 미지수  $Q_H$ ,  $Q_o$ ,  $C$ ,  $M$ 을 구한다. 항만 입구로 내부 전개된 해양 영역의 해가 해양쪽으로 외부 전개한 항만입구의 해가 같아야 하므로 아래의 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} 2A + \frac{i\omega}{g} Q_o \left( -\frac{i}{2} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{\gamma k}{2} \right) + \frac{i\omega}{g\pi} Q_o \ln r \\ = C - M \ln(a/2) + M \ln r. \quad (24) \end{aligned}$$

또한 항만내의 해를 항만입구로 내부 전개한 해는 항만입구 해를 항만내로 외부 전개한 해와 같다는 정합조건이 만족되어야 한다.

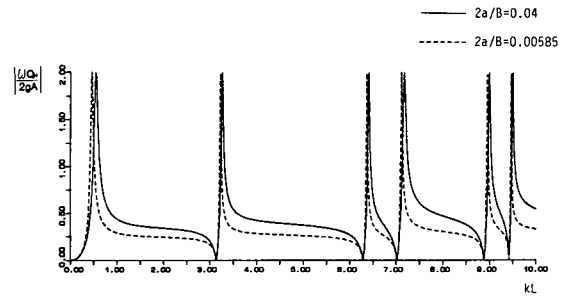
$$\frac{i\omega}{g\pi} Q_H \ln r - \frac{i\omega}{g} Q_H \left( \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{2\pi}{B} \right) + F \right)$$

**Table 1.** Particulars of S7-175 Container Ship

Ship Length (21)	175.00 (m)
Beam at Midship (B)	25.40 (m)
Draft at Midship (T)	9.50 (m)
Displacement	247.88 (tons)
Center of Gravity (KG)*	9.52 (m)
Center of Gravity (LCG)**	90.20 (m)
Center of Buoyancy (KB)*	5.19 (m)
Center of Floatation (LCF)**	94.31 (m)
Pitch Gyration ( $K_w$ )	42.00 (m)
Waterplane Area	3155 (m <sup>2</sup> )
Blockage Coefficient ( $C_b$ )	0.57
Design Ship Speed (V)	22.13 (knots)

\*Keel Reference

\*\*F.P. Reference



**Fig. 2.** Normalized flux intensity without ship.

$$\begin{aligned} + \frac{\omega^2}{gh} \sum_j \eta_j \int A_j(\xi) H(0, 0, \xi, 0) d\xi \\ = C + M \ln(a/2) - M \ln r. \quad (25) \end{aligned}$$

이상의 식으로부터 미지수  $Q_H$ ,  $Q_o$ ,  $C$ ,  $M$ 을 구함으로써 해는 완전해진다.

#### 5. 계산결과 및 고찰

항만내에 계류된 선박의 운동에 대한 계산 예로 항만의 길이를 2000 m로 잡고 항만의 길이와 폭은 같다고 가정한다. 계산 모델 선박으로 길이가 175 m인 S7-175 선형을 채택하였다. S7-175 모델은  $C_b$ 가 0.57인 컨테이너 선박으로 우리가 가정한 세장선에 적합한 선형이라 할 수 있다(Table 1 참조). 해양으로부터 항만으로 입사하는 입사파의 파고는 4 m 이고, 항만입구의 폭은 80 m로 잡아 계산하였다. 또한 계류계는 선형 일점 계류식으로 선수

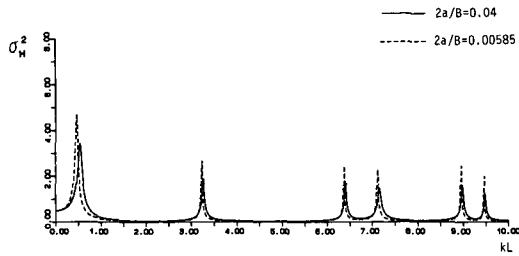


Fig. 3. Root mean square response without ship.

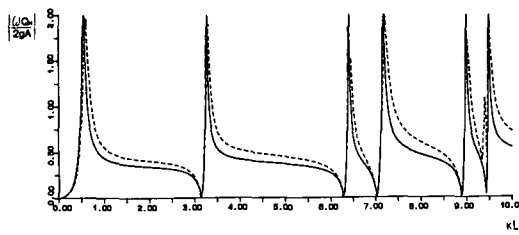


Fig. 4. Comparison between normalized flux intensity with and without ship.

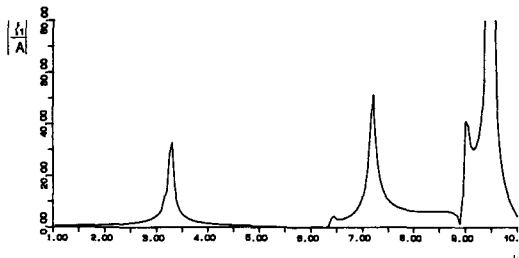


Fig. 5. Surge motion of a moored line.

에 설치되었다고 간주한다. 이 때 계류삭은 운동방정식안에 복원력 계수  $C_{ij}$ 에 들어가 특히 전후동요 운동에 큰 영향을 미친다.

Fig.2는 선박이 없는 경우에 x 축을 입사파의 파장과 항만의 길이비(kL)로 잡고 항만입구에서 항만 안으로 들어가는 유량을  $2a/B=0.04$ 인 경우와  $2a/B=0.00585$ 인 경우에 대한 결과를 보이고 있다. 이 그림에서 항만입구의 폭이 작은 경우에 공진의 폭이 좁아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig.3은 같은 경우에 대해 r.m.s 응답( $\sigma H^2$ )을 보여주고 있다. 여기서  $2a/B$ 가 작은 경우에 여전히 공진 폭이 작아지며,  $\sigma H^2$ 이 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 "Harbor Paradox"로 잘 알려져 있으며, 이는 비선형효과와 항만입구에서의 박리 그리고 바닥과 벽에서의 점성을 고려하지 않은

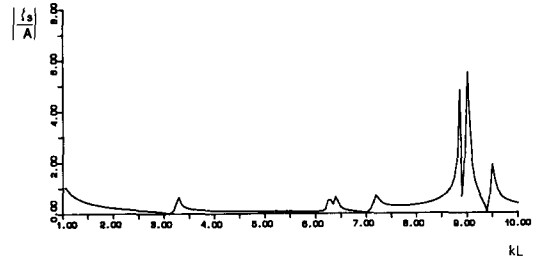


Fig. 6. Heave motion of a moored line.

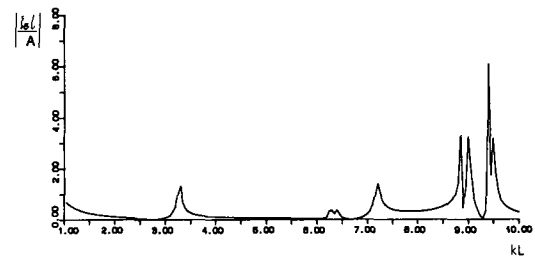


Fig. 7. Pitch motion of a moored line.

결과이다.

Fig.4는 선박이 있는 경우와 없는 경우에 대해 항만내로 들어가는 유량차이를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 거의 비슷한 경향을 보이지만  $kL=9.4$  근방에서 차이가 비교적 크다. 이 차이는 계류삭과 선박의 공진으로 전후동요가 커짐에 기인된다.

Fig.5-Fig.7은 x 축을 kL로 잡아 대칭운동인 전후동요, 수직동요, 종동요에 대한 결과를 보이고 있다. Fig.5에서  $kL=9.4$  근방에서 전후동요가 크게 나타난 것은 계류삭과 선박의 공진을 의미하며, Fig.6의  $kL=9.0$  근처에서 수직동요가 크게 나타나는 것과 Fig.7의  $kL=9.5$ 에서 종동요가 크게 나타나는 것은 선박에 작용하는 기진력이 크기 때문이다. 이는 항만내의 고유진동모드를 살펴봄으로 쉽사리 이해할 수 있다.

이상의 계산결과로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 항만내에 선박이 있는 경우 공진으로 인하여 선박의 운동이 크게 야기됨을 확인할 수 있었고, 이로 인하여 선박은 주위의 선박이나 안벽에 충돌할 수 있는 가능성을 밝혔다. 선박이 놓여진 위치에 따라 기진력 및 응답의 차이가 크다는 사실을 밝혔다. 이러한 계산결과를 토대로 공진시 선박의 운동이 최소가 되는 항만내에서의 위치를 찾을 수 있다.

2. 계류계의 설치는 장파의 경우 특히 전후동요 운동을 줄일 수 있지만, 계류사의 고유 진동수와 선박의 운동 주파수와 일치될 때 공진으로 인하여 전후동요 운동이 오히려 커져 계류사의 손상을 유발한다. 따라서 선박을 계류할 때 계류사의 강성을 적절히 선택해야 한다.

본 연구에서는 항만내 선박의 운동을 해석하는 기초적인 이론을 정립하고, 간단한 수치계산을 통하여 항만내 계류된 선박의 운동 특성과 이로인한 항만내 파도응답의 특성을 규명하였다. 앞으로는 좀 더 실제적인 수치모형에 대한 연구를 수행하여 항만설계와 선박배치에 대한 기본자료를 제공하고자 한다.

## 사 사

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행하였음을 밝히고 상기 재단에 심심한 사의를 표한다.

## 참고문헌

Beck, R.F. & Tuck, E.O., 1972. Computation of shallow

- water ship motion, *Proc. 9th Symp. Naval Hydrodyn.* : 1543-1586.
- Morse, P.M. & Feshbach, H., 1953. *Methods of theoretical physics*, McGraw-Hill.
- Hwang, L.S. & Tuck, E.O., 1970. On the oscillations of harbors of arbitrary shape, *JFM*, Vo. 43: 447-464.
- Lee, J.J., 1970. Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry, *JFM*, Vo. 43: 375-394.
- Lee, J.J. & Raichlen, F., 1972. Oscillations in harbors with connected basins, *J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div.*, ASCE, Aug. : 311-331.
- Le Mehaute, B., 1962. Harbor paradox, *J. Waterways and Harbors Div.*, ASCE, May: 173-195.
- Mei, C.C. & Üntüata, 1976. Resonant scattering by a harbor with two coupled basins, *J. Eng. Math*, Vo. 10, No. 4: 333-353.
- Mei, C.C., 1983. *The applied dynamics of ocean surface waves*, John Wiley & Sons.
- Miles, J. & Munk, W., 1961. Harbor paradox, *J. Waterways and Harbors Div.*, ASCE, Aug. : 111-130.
- Miles, J., 1971. Resonant response of harbors: An equivalent-circuit analysis, *JFM*, Vo. 46: 241-265.
- Tuck, E.O., 1970. Ship motions in shallow water, *J. Ship Res.*, 44: 317-328.