


## 경사진 방파제에 계류된 선체 운동응답에 관한 연구

조 일 형\* · 홍 사 영\* · 홍 석 원\*

### On the Study of the Motion Response of a Vessel Moored in the Region Sheltered by Inclined Breakwaters

*I. H. Cho · S. Y. Hong · S. W. Hong*

Key Word : Inclined Breakwaters(경사진 방파제), Long Wave Theory(장파이론), Ship Motion(선체운동), Moored Ship(계류선), Matched Asymptotic Expansion Technique(정합점근전개법), Image Method(상 방법), Integral Equation(적분방정식)



#### Abstract

In this paper, we investigate the motion response of a moored ship in the fluid region sheltered by inclined breakwaters. The matched asymptotic expansion technique is employed to analyze the wave fields scattered by the inclined breakwaters. Fluid domain is subdivided into the ocean, entrance and sheltered regions. Unknown coefficients contained in each region can be determined by matching at the intermediate zone between two neighboring regions. The wave field generated by the ship motion can be analyzed in terms of Green's function method. To obtain the velocity jump across the ship associated with the symmetric motion modes, the sheltered region is further divided into near field of the ship and the rest field.

The image method is introduced to consider the effect of the pier near the ship. The integral equation for the velocity jump is derived by the flux matching between the inner region and the outer region of a moored ship. Throughout the numerical calculation, it is found that the inclined angle, width of entrance of breakwaters as well as the location of moored vessel play an important role in the motion response of a moored ship.

#### 1. 서 론

최근 경제규모가 확산되면서 선박을 이용한 수출·입 물량이 급등하고 있지만, 도로와 항만의 정체나 지연등으로 수송에 따르는 경제적 손실이 크게 증가하고 있는 실정이다. 이에 대한 대책의

일환으로 기존의 항만의 확충은 물론 신항만 건설이 활발하게 추진되고 있다. 항만의 설치목적은 선박의 안전한 정박 및 원활한 하역작업이 가능하도록 하는 것이다. 항내의 수면교란이 심하면 선박의 하역능률이 저하될 뿐 아니라 하역불가시 항외에 장기간 정박해야 한다. 또한 항내 수면교

\* 正會員, 韓國海事技術研究所

란으로 인하여 이웃한 선박간에 충돌, 계류삭과 방충시설의 파손 등과 같은 문제점이 발생한다. 보통 항만은 항내 정온도를 유지하기 위하여 항외의 적절한 위치에 방파제를 설치한다. 따라서 효율적인 방파제의 배치는 항만건설 사업비를 절감하고 항내에 계류된 선박의 운동을 줄이는 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 종합적인 항만정온도 확보대책에 앞서 방파제의 배치가 선체운동에 미치는 영향을 분석하였다.

일직선 방파제에 의한 입사파의 회절문제는 방파제의 입구가 작을 때와 클 때 여러 학자들에 의하여 해석해가 구해졌다(Carr & Stelzriede, Morse & Rubenstein, Penny & Price). 이러한 결과들과 해석방법들은 많은 해안공학자들에게 유용하게 이용되고 있다. 한편 Smallman은 방파제가 임의의 각도로 경사되어 있는 경우의 회절문제를 정합점근전개법(Matched Aymptotic Expansion)을 사용하여 해석해를 유도하였다. 이때 정합점근전개법을 사용하기 위하여 파장에 비하여 방파제의 입구의 폭이 아주 작아야 한다는 장파이론을 가정한다. 이와같이 해석하는 많은 가정들이 필요하기 때문에 임의 형상의 방파제 형태에 적용하기란 불가능하다. 1960년 이후 대형 컴퓨터의 보급과 함께 많은 수치모델링 기법들이 개발되었다. 대표적인 방법으로 회절과 굴절문제를 동시에 풀 수 있는 환경사 방정식을 유한요소법을 사용하여 푸는 방법이 있다. 환경사방정식(Mild Slope Equation)은 Berkhoff가 제한한 이후 해안공학의 많은 수치모델에 이용되어 왔다. 이 방법은 2차원 평면문제만을 풀어도 수심변화를 고려할 수 있다는 장점을 지니고 있다. Mei와 Chen은 2차원 환경사 방정식을 유한요소법을 이용하여 뚝으로써 불규칙한 수심을 갖는 항내 파도응답을 해석할 수 있는 수치해법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 복잡한 유체영역에 적용하기에는 많은 계산시간과 컴퓨터 기억용량을 요구한다. 계산시간을 줄이는 방법들로 포물선근사식(Parabolic Approximation)을 이용하는 방법(Liu, 1988)과 파향선이론(Ray Theory)을 사용하는 해법들

이 있으나, 단주기파에 국한된 해법이라는 단점을 가지고 있다. 이 뿐만 아니라 수심이 일정한 해역에 Green 함수를 이용한 경계적분법이 있다(Smallman & Porter, 1985). 최근들어 해저면의 마찰과 측벽에서의 부분흡수를 고려한 수치모형들이 개발되고 있으며, 비선형항과 분산항이 평형을 이루는 Boussinesq 방정식 KDV(Korteweg-De-Vries) 방정식과 같은 비선형방정식을 수치적으로 푸는 방법들이 제안되고 있으며, 앞으로 이러한 방향으로 연구가 진행될 것으로 예측된다.

본 연구에서는 경사진 방파제에 의한 회절문제는 Smallman이 적용한 정합점근전개법을 사용하였다. 즉, 유체영역을 해양영역과 방파제 입구역 그리고 방파제 내부영역으로 나누어 각 영역에서 경계치문제를 독립적으로 푼 뒤, 인접한 영역의 해를 정합시켜 완전한 해를 구한다. 이때 방파제 입구는 파장에 비하여 작다고 가정하며, 방파제는 반무한 형태로 두께를 무시한다. 해석결과를 토대로 방파제 위치에 따른 방파제 내부영역에서의 파고분포를 살펴본다. 또한 방파제 안벽에 계류된 선박에 작용하는 기진력을 계산한다. 여기서 대상선박은 선체의 길이에 비하여 폭과 깊이가 아주 작은 세장선이며, 수심은 일정하다고 가정한다. 선체의 운동은 대칭운동과 비대칭운동으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 대칭운동만을 살펴보았다. 선체의 대칭운동에 의한 동유체력을 구하기 위하여 방파제 내부영역을 다시 선체 내부영역과 선체 외부영역으로 나눈다. 선체 외부영역에서 선체의 운동은 세장선의 중심선에 특이점을 분포시켜 계산하며, 안벽의 효과는 상(image)방법을 이용한다. 이때 선체의 먼쪽의 방파제 효과와 방파제 입구를 통하여 빠져나가는 감쇠효과는 무시한다. 한편 미지수로 나타나는 선체의 양측의 속도차이는 선체 내부영역과 유량이 같다는 조건으로부터 유도되는 적분방정식을 풀어 구한다. 선체운동응답은 전후동요-수직동요-종동요의 연성운동방정식을 정식화하여 그 해를 구한다. 한편 계류계는 선형 계류삭으로 이상화하였고, 특히 전후동요에 크게 영향을 준다.

## 2. 문제의 정식화

선형포텐셜유동이라는 가정하에서 속도포텐셜을 도입하고 유동은 시간에 따라 조화운동을 한다고 가정한다. 입사파는  $x$ 축과  $\alpha$ 의 각도로 입사하는 경우를 생각한다. 또한 점성과 박리에 따른 에너지 손실을 무시한다. 속도포텐셜과 자유표면식을 다음과 같다.

$$\Phi(x, y, t) = \text{Re}\left\{-\frac{ig}{\omega} \phi(x, y) e^{-i\omega t}\right\}, \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta(x, y) = \text{Re}\{\phi(x, y) e^{-i\omega t}\}, \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $(x, y)$ 는 정수면을 뜻하며,  $g$ 는 중력가속도이다. 주파수  $\omega$ 는 아래와 같은 천수역에서의 선형분산식을 만족한다.

$$\omega^2 = gk^2 h, \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $h$ 는 수심을 뜻한다. 수심에 비하여 파장이 길다는 장파이론을 따르면  $\phi$ 는 2차원 Helmholtz 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (4)$$

다음에는 윗식을 기본방정식으로 경사진 방파제에 의한 회절문제를 살펴보겠다.

### 2.1 경사진 방파제에 의한 회절문제

해양영역에서의 해는 입사파와 방파제에 의한 반사파 그리고 방파제 입구에서의 산란파로 구성되어 있다. 자세한 유도과정은 생략하고 결과만 인용하면 다음과 같다(Smallman, 1985).

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & \frac{2\pi A}{(\pi + 2\beta)} \sum_{m=0}^{\infty} \{\epsilon_m \cos \mu_m(\theta + \beta) \\ & \cos \mu_m(\alpha + \beta) J_{\mu_m}(kr) e^{-1/2\mu_m y}\} \\ & + \frac{M\pi}{(\pi + 2\beta)} H_0^{(1)}(kr), \\ & -\beta < \theta < \pi + \beta \\ & \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

여기서  $\alpha$ 는 입사각,  $\beta$ 는 방파제의 경사각을 나

타내며,  $A$ 는 입사파의 진폭을 뜻한다. 또한  $p = \pi + 2\beta$ ,  $\mu_m = m\pi / (\pi + 2\beta)$ 이며,  $H_0^{(1)}$ 는 제 1종 Hankel 함수이다.  $\epsilon_m$ 은  $m=0$ 일때 1이며,  $m$ 이 0보다 클때 2를 갖는 Jacobi수이다. 윗식을 방파제 입구의 해와 정합하기 위하여  $r \rightarrow 0$ 로 내부전개시킨 뒤 최저차항만 취하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) \approx & \frac{2\pi A}{(\pi + 2\beta)} + \frac{M\pi}{(\pi + 2\beta)} \left\{1 + \frac{2i}{\pi} \gamma + \frac{2i}{\pi} \log\left(\frac{kr}{2}\right)\right\}, \\ & \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

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

방파제입구가 파장에 비하여 작기 때문에 방파제 입구영역에서의 지배방정식은 2차원 Helmholtz에서 2차원 Laplace로 바뀐다. 실제의 평면에서 풀지 않고 등각사상을 수행하여 2차원 수로문제로 치환한다. 본 연구에서 필요한 것은 방파제 입구영역의 자세한 유동이 아니라 해양영역의 외력항과 방파제 내부영역의 해를 정합시키는 것이다. 따라서 방파제 입구영역에서의 외부전개한 식이 필요하다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) \approx & \frac{m\pi}{(\pi + 2\beta)} \log\left\{\frac{(p-bq)\pi b^{2\beta} r}{2\beta qa}\right\} + D, \\ & -\beta < \theta < \pi + \beta \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi(x, y) \approx & \frac{-m\pi}{(\pi - 2\beta)} \log\left\{\frac{(p-bq)\pi r}{b^q \pi 2\beta pa}\right\} + D, \\ & \pi + \beta < \theta < 2\pi - \beta \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\frac{a}{a'} = \frac{[bp - q]}{b^{2\beta} r [p - bq]}$$

여기서  $q = \pi - 2\beta$ 이며,  $a, a'$ 는 각각 방파제입구의 폭을 나타낸다.

방파제 내부영역의 해는 폭이 좁은 방파제 입구를 통하여 들어오는 파에 의하여 표현된다. 따라서 원점에 특이점을 놓아 구한다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & -\frac{M'\pi}{(\pi - 2\beta)} H_0^{(1)}(kr) \\ & \pi + \beta < \theta < 2\pi - \beta \\ & \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

같은 방법으로 방파제 입구영역의 해와 정합하기

Table 1. Particulats of S7-175 Container Ship

Ship Length( $2l$ )	175.00(m)
Beam at Midship( $b$ )	25.40(m)
Draft at Midship( $d$ )	9.50(m)
Displacement	24742(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( $K_n$ )	42.00(m)
Waterplane Area( $A_w$ )	3155(m <sup>2</sup> )
Block Coefficient( $C_b$ )	0.57
Mooring Stiffness( $K_m$ )	10000(N/m)

\* Keel Reference

\*\* F.P. Reference

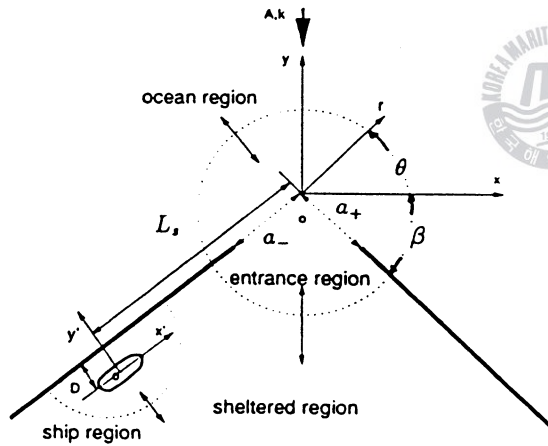


Fig. 1 Definition Sketch for a Vessel Moored at the Inclined Breakwaters

위하여 윗식을 방파제 입구영역으로 내부전개하면 다음과 같다.

$$\phi(x, y) \approx -\frac{M'\pi}{(\pi-2\beta)} \left\{ 1 + \frac{2i}{\pi}\gamma + \frac{2i}{\pi}\log\left(\frac{kr}{2}\right) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

식(6)과 식(7)이 같고, 식(8)과 식(10)이 같다는 정합조건식은 아래와 같다.

$$\frac{2\pi A}{(\pi+2\beta)} + \frac{M\pi}{(\pi+2\beta)} \left\{ 1 + \frac{2i}{\pi}\gamma + \frac{2i}{\pi}\log\left(\frac{kr}{2}\right) \right\} = \frac{m_e\pi}{(\pi+2\beta)} \log \left\{ \frac{(p-bq)\pi b^{2\beta} r}{2\beta qa} \right\} + D, \dots (11)$$

$$-\frac{M'\pi}{(\pi-2\beta)} \left\{ 1 + \frac{2i}{\pi}\gamma + \frac{2i}{\pi}\log\left(\frac{kr}{2}\right) \right\} = -\frac{m_e\pi}{(\pi-2\beta)} \log \left\{ \frac{(p-bq)\pi r}{b^{\pi-2\beta} a} \right\} + D \dots\dots\dots (12)$$

윗식에서 상수항과 특이항이 같다는 조건식으로부터 4개의 연립방정식을 구할 수 있으며, 이 식들을 풀어 4개의 미지수  $M, m_e, D, M'$ 를 구하여 각 영역에서의 완전한 해를 구한다. 방파제 내부 영역에서의 해는 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = QH_0^{(1)}(kr),$$

$$Q = A \left[ 1 + \frac{2i}{\pi}\gamma + \frac{2i}{\pi}\log \left\{ \frac{ka - \beta b^{q/2n} q^{q/2n} p^{p/2n}}{\pi(p-bq)} \right\} \right] \dots\dots\dots (13)$$

윗식이 방파제 내부영역의 임의의 위치에 계류된 선박에 작용하는 입사파가 된다.

### 2.2 안벽에 계류된 선체의 운동

방파제 안벽에 계류된 선체의 운동응답을 구하기 위하여 공간고정좌표계의 독립변수를 선체고정좌표계로 바꾸는 것이 편리하다(Fig. 2 참조). 그림에서  $\vec{x}$ 는  $oxy$  공간고정 좌표계의 위치벡터이며,  $\vec{x}'$ 는  $o'x'y'$  선체고정 좌표계의 위치벡터를 뜻한다.  $\vec{\xi}$ 는  $o$ 에서부터  $o'$ 까지의 위치벡터이며,  $\theta'$ 는  $o'x'y'$ 축의 회전각으로  $x'y'$ 평면에서 일어난다. 공간에 고정된 좌표계( $oxy$ )와 물체에 고정된 좌표계( $o'x'y'$ )사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\vec{x} = E(\vec{x}' - \vec{\xi}), \dots\dots\dots (14)$$

여기서  $E$ 는 두 좌표계 사이의 변환 행렬로 다음과 같이 정의 된다.

$$E = \begin{pmatrix} \cos\theta' & \sin\theta' \\ -\sin\theta' & \cos\theta' \end{pmatrix}$$

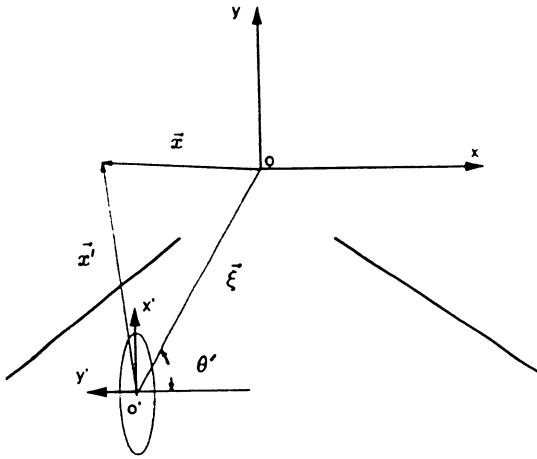


Fig. 2 Coordinate Transformation

선체는 입사파를 만날 때 주파수  $\omega$ 를 갖고 6자유도 조화운동을 한다. 방파제 내부영역에서의 해는 입사파와 산란파 그리고 선체운동에 의한 방사파로 구성된다. 속도포텐셜  $\phi$ 와 정규화된 포텐셜  $\phi_j$ 와의 관계식은 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = -i\omega \sum_{j=0}^7 \phi_j(x, y) \zeta_j \dots\dots\dots (15)$$

물체표면 경계조건을 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = n_j, \quad j=0, 1 \dots 7 \dots\dots\dots (16)$$

$$n_0 = -n_7 = \frac{\partial \phi_0}{\partial n}$$

여기서  $j=0$ 은 입사파를  $j=7$ 는 산란성분을 나타내며,  $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 은 선체의 전후, 좌우, 수직, 횡, 종, 선수동요에 의한 방사 포텐셜을 뜻한다. 여기서  $n_j$ 는 선체의 법선 벡터로 선체 바깥방향으로 잡았다. 정규화 속도 포텐셜  $\phi_j$ 를 구하면 Bernoulli 방정식을 이용하여 선체표면에 작용하는 동유체압력을 구할 수 있다.

$$p(x, y, t) = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$= i\omega \rho \phi e^{-i\omega t}$$

$$= \rho \omega^2 \sum_{j=1}^7 \phi_j \zeta_j e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (17)$$

동 유체압력을 선체표면에 걸쳐 적분하여 선체에 작용하는 동 유체력을 구한다.

$$F_i = - \int_S p n_i dS$$

$$= -\rho \omega^2 \sum_{j=0}^7 \zeta_j e^{-i\omega t} \int_S \phi_j n_i dS$$

$$= \sum_{j=0}^7 T_{ij} \zeta_j e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (18)$$

여기서 선체의 운동에 의해 유기되는 동 유체력 계수  $T_{ij}$ 는 선체표면 경계조건을 적용하면 아래식과 같이 표현된다.

$$T_{ij} = \omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij}$$

$$= -\rho \omega^2 \int_S n_i \phi_j dS$$

$$= -\rho \omega^2 \int_S \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \phi_i dS \dots\dots\dots (19)$$

여기서  $a_{ij}$ 와  $b_{ij}$ 는 각각 부가질량과 감쇠계수를 뜻한다. 선체운동을 일으키는 기진력  $F_i$ 는 Haskind 관계식을 이용하면

$$F_i = (T_{im} - T_{mi}) A \dots\dots\dots (20)$$

와 같이 Froude-Krylov 성분과 산란성분으로 구성된다. 앞에서 구한 방파제 입구를 통하여 안으로 들어오는 방파제 내부영역에서의 속도포텐셜을 물체 고정 좌표계로 바꿔 표현하면 다음과 같고, 이 식이 방파제 안벽에 계류된 선박에 입사하는 파를 나타낸다.

$$\phi_0(x, y) = \frac{g}{\omega^2} \left\{ 1 + \frac{2i}{\pi} \gamma + \frac{2i}{\pi} \log \left( \frac{ka - \beta b^{p/2n} q^{q/2n} p^{p/2n}}{\pi(p-bq)} \right) \right\}$$

$$\times H_0^{(1)} [k \{ (\cos\theta'x' - \sin\theta'y' + \xi_1)^2 + (\sin\theta'x' + \cos\theta'y' + \xi_2)^2 \}] \dots (21)$$

선체의 대칭운동에 대한 운동방정식은 아래와 같다.

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

$$\dots\dots\dots (22)$$

여기서  $j=1, 3, 5$ 는 각각 전후동요, 수직동요, 종동요를 의미한다. 위의 운동방정식에서  $M_{ij}$ 는 질량

을 나타내며 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M & 0 & Mz_G \\ 0 & M & -Mx_G \\ Mz_G & -Mx_G & Mk_s^2 \end{bmatrix}$$

$(x_G, z_G)$ 는 선체의 무게중심의 위치를 나타내며,  $k_s$ 는 종동요 방향의 관성모멘트이다.  $C_j$ 는 정 유체력과 계류삭에 의한 복원력 계수를 나타낸다.

다음장은 동 유체력을 구할 때 필요한 방사포텐셜을 구하는 과정을 소개하겠다.

### 2.3. 선체운동에 유기된 방사포텐셜

선체운동에 따른 방사포텐셜을 구하기 위하여 방파제 내부영역을 선체 주위 영역과 나머지 영역으로 나눈다. 앞서 가정한 세장체이론에 따라 선체 외부영역에서 본 선체의 운동은 선체의 중심선을 따라 분포된 특이점(소오스, 다이폴)으로 표현된다. 계류선박은 간격  $D$ 만큼 떨어져 안벽과 평행하게 놓여있다고 생각한다. 계류선박이 안벽에서 충분히 멀리 떨어져 있을때( $kD=O(1)$ ) 안벽의 효과는 선체외부영역에서 고려된다. 해석방법으로 안벽에 대칭되는 위치에 특이점(image)을 분포시킨다. 유체영역에 소오스를 놓았을 때, 지배방정식인 Helmholtz 방정식과 무한원방 조건을 만족하는 Green 함수는 Bessel 함수로 표현된다. 선체가 안벽과  $D$ 만큼 떨어져 평행하게 놓여 있을 때, Green 함수는 다음과 같다.

$$G(x', y', \xi, \eta) = -\frac{i}{4} [(H_0^{(1)}(kR) + H_0^{(1)}(kR'))] \\ R = \sqrt{(x' - \xi)^2 + (y' - \eta)^2} \\ R' = \sqrt{(x' - \xi)^2 + (y' - 2D - \eta)^2} \\ \dots \dots \dots (23)$$

정규화된 속도포텐셜과 위에서 구한 Green 함수를 이용하여 Green 정리를 적용하면 선체의 대칭운동으로 야기된 방사포텐셜은 아래와 같다.

$$\phi_i(x', y') = -\frac{i}{4} \int_{-l}^l \Delta v_j(\xi) [H_0^{(1)}(kR) + H_0^{(1)}(kR')] d\xi$$

$$\Delta v_j(x') = \frac{\partial \phi_i}{\partial y'}(x', 0^+) - \frac{\partial \phi_i}{\partial y'}(x', 0^-) \\ \dots \dots \dots (24)$$

여기서  $\Delta v_j$ 는 선체 양측의 속도의 차이를 나타낸다.

대칭운동에 관한 해를 선체 주위영역과 정합하기 위하여  $y' \rightarrow 0$ 로 내부 전개한 식은 아래와 같다.

$$\phi_i(x', y') \approx \phi_j(x', 0 \pm) + y' \frac{\partial}{\partial y'} \phi_i(x', 0 \pm) \\ \approx W_j(x') + y' \left[ \mp \frac{\Delta V_j(x')}{2} + V_j(x') \right] \\ \dots \dots \dots (25)$$

$$W_j(x') = -\frac{i}{4} \int_{-l}^l \Delta v_j(\xi) [H_0^{(1)}(k|x' - \xi|) + H_0^{(1)}(k\sqrt{(x' - \xi)^2 + (2D)^2})] d\xi \\ V_j(x') = -\frac{i}{4} \int_{-l}^l \Delta v_j(\xi) \frac{2kD}{\sqrt{(x' - \xi)^2 + (2D)^2}} H_1^{(1)}(k\sqrt{(x' - \xi)^2 + (2D)^2}) d\xi \\ \dots \dots \dots (26)$$

윗식에 미지수로 남아있는  $\Delta v_j$ 를 구하기 위하여 선체 주위영역의 해를 살펴보자. 선체 주위영역에서 최저차항만 고려하면 자유표면은 고정된 벽으로 대체된다. 따라서 선체 주위영역의 지배방정식은 2차원 Laplace 방정식이며 자유표면과 바닥에서의 벽면조건식을 만족하며 방사조건은 방파제 외부영역의 해를 선체주위로 내부전개시킨 식(25)와 같다. 선체외부영역에서의 미지수  $\Delta v_j$ 는 선체의 단면을 따라 발생한 유량은 무한방으로 빠져나가는 유량과 같다는 조건으로부터 구한다.

$$[\Delta v_j(x') + V_j(x')]h = \int_s \frac{\partial \phi_i}{\partial n} dl \\ = \int_s n_j dl = -A_j(x') \dots (27)$$

여기서  $A_j$ 는 선박의 형상을 나타내는 함수로 다음과 같다.



$$A_1(x') = dS(x')/dx'$$

$$A_3(x') = b(x')$$

$$A_5(x') = -b(x')x'$$

$S(x')$ 는 선체의 길이방향에 따르는 단면적을 나타내며,  $b(x')$ 는 선폭을 표시한다. 식(27)로 주어진 적분방정식은 선체를 길이방향에 따라 여러개의 선분으로 분할하고 각 단면에서  $\Delta v_i$ 가 일정하다고 가정하던 대수방정식으로 바뀐다. 수치적으로 구한  $\Delta v_i$ 를 식(24)에 대입하면 선체운동에 의하여 유기된 속도포텐셜을 구하며, 그 값을 이용하여 선체에 작용하는 동 유체력을 얻을 수 있다.

### 3. 계산결과 및 고찰

방파제에 계류된 선체운동을 살펴보기에 앞서 방파제에 의한 산란효과를 살펴보았다. 입사파가  $y$ 축의 음의 방향으로 들어올 때, 방파제의 임의 지점에서의 파고와 입사파의 파고의 비를 경사각도와 방파제입구 그리고 입사파의 주파수를 변화시키면서 고찰하였다. Fig. 3은 경사각도  $\beta$ 가  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  그리고  $60^\circ$ 에 대하여 증폭비 ( $|Q/A|$ )를

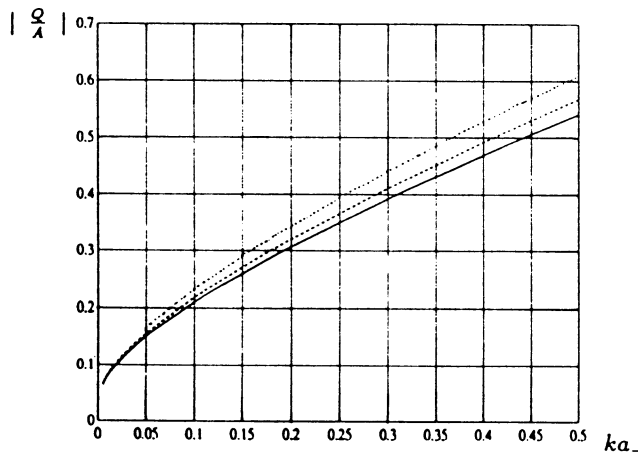


Fig. 3 Amplification Factor of Wave Response in a Region Sheltered by Inclined Breakwaters ( $-\beta = 30^\circ$ ,  $-\beta = 45^\circ$ ,  $-\beta = 60^\circ$ )

그렸다. 여기서  $x$ 축은 방파제입구의 폭을 파장으로 무차원시킨  $ka$ -이다.  $ka$ -값이 증가함에 따라 세가지 방파제 경사각도에 따른 증폭비는 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.  $ka$ -가 증가한다는 것은 고정된 방파제입구의 폭에 대하여 입사파의 파장이 짧아짐을 의미하며, 고정된 파장에 대하여 방파제 입구가 커짐을 뜻한다. 즉 방파제의 경사각도와 관계없이 증폭비는 입사파의 파장이 짧을수록 방파제 입구의 폭이 증가할수록 커진다. 이는 방파제를 통과하는 유량이 증가로 설명할 수 있다. 또한 경사각도가 작을 때 상대적으로 증폭비가 작아지는 경향을 보여주고 있으며,  $ka$ -값이 증가할수록 경사각도에 대한 효과가 더욱 커지는 것을 볼 수 있다.

방파제에 계류된 선박의 운동에 대한 수치계산 예로 길이가 175m인 S7-175 선형을 채택하였다. S7-175모델은  $C_b$ 가 0.57인 컨테이너 선박으로 본 논문에서 가정된 세장선에 비교적 적합한 선형이라 할 수 있다(Table 1 참조). 계류선은 선형 계류선으로 운동방정식안에 복원력 계수에 들어가 특히 전후동요에 영향을 미친다.

첫번째 계산예로 방파제의 경사각도변화에 따른 운동변위를 조사하였다. 여기서 수심은 일정하며( $h = 12m$ ), 방파제입구는 대칭이다( $a = a$ ). 입사파가  $y$ 축의 음의 방향으로 들어오는 경우를 살펴보았다. 방파제 입구의 폭( $a$ )은 40m이며, 계류선박은  $y$ 축상에 놓여있으며 선체중심과 원점과의 거리는 700m이다. 두개의 경사진 방파제는 선박의 계류된 위치에서 대칭으로 놓여있으므로 선체의 운동과 안벽사이의 상호작용은 무시할 수 있다. 방파제 경사각도는  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  세가지를 택했다. Fig. 4은 전후동요를 세가지 경사각도에 대해 그렸다. 여기서  $x$ 축은 선체의 길이와 입사파의 파장의 비( $2/\lambda$ )로 잡았고,  $y$ 축은 전후동요의 운동변위를 입사파의 진폭인  $A$ 로 나눈 무차원 값의 절대값을 취했다. 그림에서 실선은 경사각도가  $30^\circ$ 를 굵은 점선은  $45^\circ$ 를 가는 점선은  $60^\circ$ 를 나타낸다. 그림에서 저주파수 영역에서 전후동요가 크게 일어나는 것은 천수역 효과로 설명할 수 있다. 고주파수 영역에서 방파제 경사각도에 따른

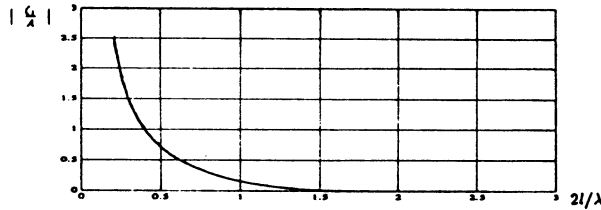


Fig. 4 Surge Amplitude Ratio of Moored Ship at  $\vec{\xi} = (-700\text{m}, 0\text{m})$  ( $-\beta = 30^\circ$ ,  $-\beta = 45^\circ$ ,  $-\beta = 60^\circ$ )

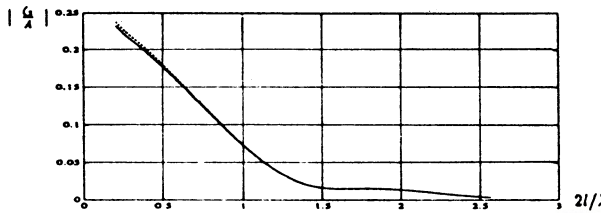


Fig. 5 Heave Amplitude Ratio of Moored Ship at  $\vec{\xi} = (-700\text{m}, 0\text{m})$  ( $-\beta = 30^\circ$ ,  $-\beta = 45^\circ$ ,  $-\beta = 60^\circ$ )

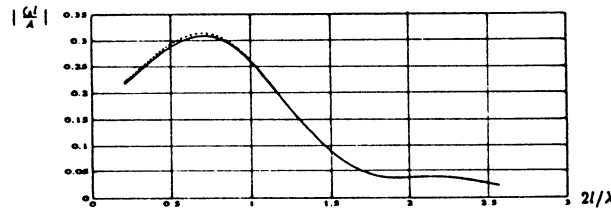


Fig. 6 Pitch Amplitude Ratio of Moored Ship at  $\vec{\xi} = (-700, 0\text{m})$  ( $-\beta = 30^\circ$ ,  $-\beta = 45^\circ$ ,  $-\beta = 60^\circ$ )

변화는 무시할 수 있지만 저주파수 영역에서는 경사각도가 클수록 전후동요가 약간 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 3에서 보여준 경사각도에 따른 증폭비의 결과와 동일하다.

Fig. 5는 수직동요를 보여주고 있다. 주파수 변화에 따른 수직운동의 경향은 방파제 안벽효과가 없기 때문에 무한유체영역의 계산결과와 유사하다. 또한 방파제 경사각도 효과는 저주파수 영역

에서 명확히 나타나며, 경사각도의 증가는 증폭비의 상승을 초래하여 수직운동을 증가시키는 것을 볼 수 있다. 종동요의 계산결과는 Fig. 6에 그렸다. 여기서  $\xi_0$ 의 차원은 radian이다. 그림에서 선박이  $2/\lambda = 0.7$ 이 되는 파장을 만날 때 종동요가 최대값을 갖는다는 사실을 볼 수 있다. 방파제 경사각도에 따른 종동요의 변화는 Fig. 5와 같다.

두번째 계산예로 고정된 방파제의 경사각도( $\beta = 45^\circ$ )에 대하여 방파제 입구의 폭을 변화시키면서 선체의 운동특성을 고찰하였다. 계류선박은 방파제 입구에서 700m 떨어진 거리 ( $L_0$ )에 방파제에 평행하게 놓여있으며, 안벽과의 수직거리 D는 100m이다. Fig. 7은 세가지 방파제 입구의 폭에 대한 전후방향의 운동변위를 보여주고 있다. 여기서 실선은  $a = 30\text{m}$ 를, 굵은 점선은  $a = 40\text{m}$ 이며 가는 점선은  $a = 50\text{m}$ 를 나타낸다. 저주파수 영역에서 전후동요가 크게 일어나는 것은 장파이론의 일반적인 특성이며, 계류상의 장력으로 조정될 수 있다. 저주파수 영역에서 방파제 입구의 폭이 넓을수록 운동변위가 더욱 커지는 것을 볼 수 있다.  $2/\lambda$ 가 1.0이상에서는 방파제 입구의 폭에 따르는 전후동요의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 8은 세가지 방파제 입구 폭에 대하여 수직동요를 주파수 변화에 따라 그렸다. 방파제 안벽의 효과가 없는 Fig. 5의 결과와는 다르게 독특한 곡선의 경향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 선박과 안벽사이에 유체동역학적공진(Oortmerssen, 1976)이 발생하여  $2/\lambda = 0.3, 0.8, 1.5$ 에서 운동응답이 크게 일어난다. 그림에서 저주파수 영역에서 방파제 입구의 폭이 증가할수록 수직방향의 운동변위가 상대적으로 커진다. 이는 Fig. 3에서 살펴 보았듯이 방파제 내부로 들어오는 유량의 변화로 설명할 수 있다. 그러나 고주파수 영역에서는 방파제 입구 폭에 따른 변화는 무시할 수 있다. 그러나 해석과정에서 가정한 장파이론으로 고주파수 영역에서의 정량적인 값은 실제와 약간의 차이가 있으리라 여겨진다. 주파수 변화에 따르는 종동요는 Fig. 9에 그렸다. 역시 앞에서 설명한 바와 같이 무한유체역역의 결과와는 다르게 공진



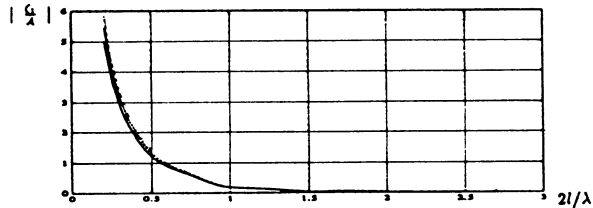


Fig. 7 Surge Amplitude Ratio of Moored Ship  
at  $L_s=700\text{m}$ ,  $D=100\text{m}$   
(—  $a=30\text{m}$ , ---  $a=40\text{m}$ , ...  $a=50\text{m}$ )

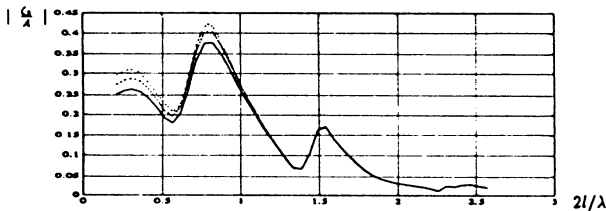


Fig. 8 Heave Amplitude Ratio of Moored Ship  
at  $L_s=700\text{m}$ ,  $D=100\text{m}$   
(—  $a=30\text{m}$ , ---  $a=40\text{m}$ , ...  $a=50\text{m}$ )

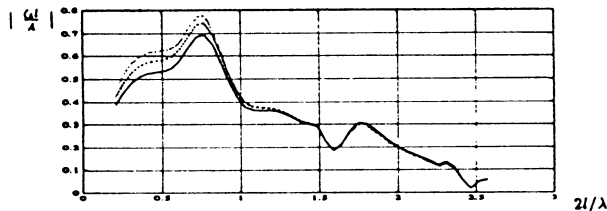


Fig. 9 Pitch Amplitude Ratio of Moored Ship  
at  $L_s=700\text{m}$ ,  $D=100\text{m}$   
(—  $a=30\text{m}$ , ---  $a=40\text{m}$ , ...  $a=50\text{m}$ )

점부근에서 종방향의 운동변위가 크게 증폭되는 것을 볼 수 있다. 방파제 입구가 변할 때 나타나는 경향은 Fig. 8과 비슷하다.

#### 4. 결 론

이상의 해석과 계산결과를 토대로 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

1) 방파제의 경사각도와 입구의 폭의 증가는 방파제내 임의의 지점에서의 증폭비를 상승시킨다. 이로 인하여 방파제내에 계류된 선체의 운동을 증가시킨다. 특히 저주파수 영역에서 이러한 현상은 뚜렷이 나타난다.

2) 방파제에 계류된 선체의 운동응답은 무한 유체영역에서의 해석결과와는 다른 독특한 경향들을 보여주는 것을 보았다. 즉, 안벽과 선체 사이에 동유체역학적 공진이 발생하여 공진점 부근에서 운동응답이 크게 일어난다. 또한 방파제의 경사각도와 입구의 폭 그리고 계류선박이 놓여진 위치에 따라 선체의 운동변위가 달라지는 것을 확인하였다.

3) 계산결과를 토대로 계류선박의 운동이 최소가 되도록 항만이나 방파제의 형상이나 위치를 설계할 수 있는 기초를 마련하였다. 또한 선체 운동이 최소가 되는 항만과 방파제내에서의 계류지점을 선정할 수 있으리라 사료된다.

#### 5. 참고문헌

- Beck, R.F. & Tuck, E.O., 1972. Computation of Shallow Water Ship Motions, Proc. 9th Symp. Naval Hydrodyn. Office of Naval Research 1543-1585
- Berkhoff, J.W.C., 1976. Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves. Wave Diffraction and Refraction, Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 163
- Car, J.H. & Stelzruiede M.E., 1952. Diffraction of Water Waves by Breakwaters US Nat Bur. Stds., Circ. No. 521, 109-125
- Mei, C. C., 1983. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley Sons
- Memos, C.D., 1980. Energy Transmission by Surface Waves through and Opening, JFM, Vol.97 : 557-569
- Morse, P.M. & Rubenstein, P.J., 1938. The Diffra-

- ction of Waves by Ribbon and Slits, Physics Review 54 895-898
- Oortmerssen, G. V., 1976. The Motion of a Moored Ship in Waves, NSMB Publication, No. 510.
- Penny, W.G. & Price, A.T., 1952. The Diffraction Theory of Sea Waves and the Shelter Afforded by Breakwaters, Phi. Trans. Roy. Soc. A244 236-253
- Smallman, J. V. 1986. Diffraction by a Gap between Two Breakwater : Solution for Long Waves by Matched Asymptotic Expansion, JFM, Vo. 172 : 143-155
- Tuck, E.O., 1970. Ship Motions in Shallow Water, J Ship Research 317-328
- 조일형, 1991. 항만내 과도응답과 계류선박의 운동해석, 서울대학교 박사학위논문

