

## 측벽근방을 항해하는 대형선박에 미치는 측벽의 영향

이춘기\* · 박한일\*\*

\*한국해양대학교 해양개발공학부 신진연구원, \*\*한국해양대학교 교수

### The Interaction Effect Acting on a Ship Hull in the Proximity of Bank Wall

Chun-Ki Lee\* · Hain-Il Park\*\*

\*Dept. of Ocean Development Eng., Korea Maritime University

\*\*Professor, Dept. of Ocean Development Eng., Korea Maritime University

**요 약** : 측벽과 선박간의 상호 간섭력이 선박 조종 운동에 상당히 크게 작용하는 것은 잘 알려져 있다. 이 논문에서는 측벽 부근을 항해하는 선박에 미치는 측벽의 간섭 영향에 대해서 다루어지고, 선박과 측벽간의 간섭력 추정을 위해 세장체 이론을 토대로 한 계산 방법이 적용되며, 선박 조종 운동에 미치는 측벽의 영향을 파악하기 위하여 선박과 돌체(반원)형상을 하고 있는 측벽간의 간섭력을 수치 계산하였다. 이 논문에서 사용되어진 계산 방법은 제한수역에서의 충돌 회피를 위한 선박의 자동 제어 시스템과 해상 교통 제어 시스템 및 항만 건설등을 위한 초기 설계 단계에서 선박 조종성의 예측에 상당히 유용할 것이다.

**핵심용어** : 간섭력, 조종성, 세장체 이론, 측벽의 영향

**Abstract** : It is well known that the hydrodynamic interaction forces between ship and bank wall affect ship manoeuvring motion. This paper deals with the interaction effect acting on a ship navigating closely in the proximity of bank wall. In this paper, the calculation method based on the slender body theory for estimation of the hydrodynamic interaction forces between ship and bank wall is applied. The hydrodynamic interaction forces acting on a ship during passing through the proximity of the bank wall are predicted to evaluate an influence of these interaction forces on ship manoeuvrability. The calculation method used in this paper will be useful for prediction of ship manoeuvrability at the initial stage of design, for automatic control system of ship in confined waterways, for discussion of marine traffic control system and for construction of harbour.

**Key words** : Hydrodynamic Interaction forces, Manoeuvrability, Slender body theory, Bank wall

## 1. 서 론

최근 섬과 섬 혹은 해협에 있어서 거대한 교각이 건설되어지고 있으나, 이러한 해역은 일반적으로 선박의 주요 항로이고, 많은 선박들의 교통량이 폭주하는 폭주 해역이다. 이와 같은 해역에 측벽 혹은 교각과 같은 구조물이 존재하는 경우, 항행선박은 항행가능 수역에 상당히 제한을 받게 된다. 또한, 대형 선박이 측벽이나 교각과 같은 구조물 부근을 항행하는 경우, 측벽 혹은 교각에 의한 간섭력(유체력)의 영향을 생각할 수 있고, 이러한 간섭력이 선박 조종 운동에 미치는 영향을 고려하지 않을 수 없다. 따라서 이와 같은 해역에서는 여러 종류의 변수들이 작용하여 해양사고의 위험성이 높아지기 때문에 항행선박의 조종성능을 명확하게 추정할 필요가 있다. 이와 같은 제한수역에 있어서 선박통항의 안전성을 고려하는 경우, 선체 고유의 특성은 물론, 타 선박 혹은 측벽이나 교각에 의한 간섭력의 영향 등을 고려한 조종성능을 명확하게 추정하는 것이 중요하다. 또한 조종성능을 명확하게 추정하기 위해서는

선체에 작용하는 간섭력을 정확하게 추정하는 것이 필요하다. 한편, 지금까지 교각이나 측벽에 의한 간섭력의 추정에 대해서는 다수의 연구자에 의해 수행되어 왔고(Yeung et al., 1980, Davis, 1986, Kijima et al., 1987, 1991, Yasukawa, 1991) 실용화를 향한 연구가 조금씩 진전되고 있는 상황이다. 이러한 상황에서 안전 항해의 측면에서 보았을 때, 본 연구도 협수로에서의 해양사고 방지를 위한 움직임의 하나로 측벽과 대형선박간의 상관관계에 대해서 고찰 하려고 한다. 따라서 본 논문에서는 반원 형상을 하고 있는 측벽 근방을 항해하는 대형 선박에 작용하는 측벽과 선박간의 간섭력을 추정하여 협수로에서의 안전항해를 위한 선박과 측벽간의 안전거리를 파악하고자 한다.

## 2. 기본식

먼저 임의 형상의 측벽 부근을 항해하는 선박을 가정하자. Fig.1에 표시한 것처럼, 공간고정좌표계  $o-xy$ 와 측벽 근방을

\* 대표저자 : 이춘기(종신회원), leeck1520@hanmail.net 051)410-4937

\* hipark@hhu.ac.kr

향해하는 선박의 선체중심을 원점으로 하는 선체고정좌표계  $o_1-x_1y_1$ 을 생각할 수 있다. 그림 1 및 이 논문에서 사용되어진 아래 첨자 1은 선박 한척의 경우를 의미하고 있다. 선박은 선속  $U_1$ 으로 측벽 근방을 직진하는 것으로 가정하고, 선체 중심선과 측벽간의 측방거리를  $S_p$ 로 한다.

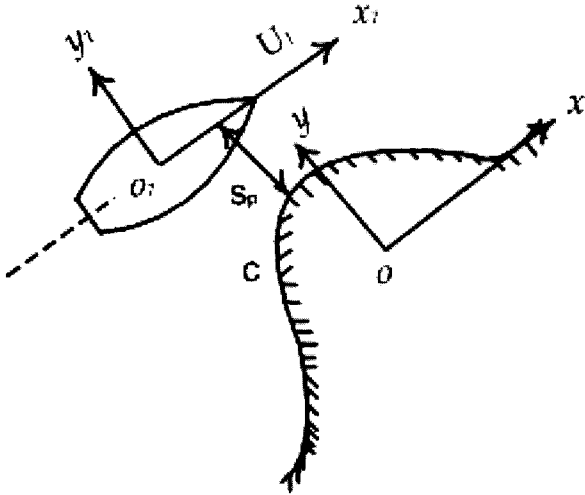


Fig. 1 Coordinate system

여기서, 자유표면을 고정벽으로 가정하고 선체를 double body로 생각하면, 선체의 운동에 의한 선체 속도포텐셜  $\phi$ 는 다음의 연속의 조건을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

또,  $\phi(x, y, z, t)$ 가 만족하여야 할 경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_C = 0 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=\pm h} = 0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n_1} \right|_{B_1} = U_1(t)(n_x)_1 \quad (4)$$

$$\phi \rightarrow 0 \text{ at } \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \rightarrow \infty \quad (5)$$

여기서,  $B_1$ 은 선체표면,  $h$ 는 수심,  $C$ 는 측벽 표면을 나타내고,  $(n_x)_1$ 은  $B_1$ 과  $C$ 에 대한 안쪽 방향으로의 단위법선벡터  $n_1$ 의  $x_1$ 방향성분을 나타낸다. 그리고 식(2),(3),(4),(5)는 각각 측벽, 수심 및 자유표면, 선체표면, 무한원방의 경계조건을 의미한다.

결국, 이상 기술한 경계조건을 만족하도록 속도포텐셜  $\phi$ 를 결정하면 좋으나, 완전하게 속도포텐셜을 구하기가 어렵기 때문에 선체주위의 유동장을 내부영역과 외부영역의 두개의 영역으로 나누어서 문제를 간단하게 하고자 한다. 따라서 선체

를 세장체로 가정하고, slenderness parameter  $\epsilon (\ll 1)$ 을 도입하고, 선체길이  $L_1$ 에 비해서, 선폭  $B_1$ , 홀수  $d_1$ , 수심  $h$ 는  $\epsilon$ 의 오더(order)로 하고, 선체중심선과 측벽과의 횡방향거리  $S_p$ 는 선체길이  $L_1$ 과 같은 오더(order)라고 가정한다.

### 2.1 내부영역문제

선체고정좌표계에 있어서, 아래의 차수로 되는 영역을 내부영역으로 정의한다.

$$x_1 = O(1), \quad y_1 = z_1 = O(\epsilon) \quad (6)$$

그리고, 내부영역에 관한 속도 포텐셜을  $\phi_1$ 이라고 하면,  $\phi_1$ 을 만족해야 할 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z_1^2} = 0 \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial N_1} \right|_{\Sigma_1(x_1)} = U_1(t)(n_x)_1 \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial z_1} \right|_{z_1=\pm h} = 0 \quad (9)$$

여기서,  $\Sigma_1(x_1)$ 은 선박의  $x_1$ 의 위치에 있어서 횡단면을 나타내고,  $N_1$ 은 선체횡단면에 있어서 법선벡터방향의 안쪽방향 2차원의 단위법선벡터이다. 결국, 내부영역에 대한 속도포텐셜  $\phi_1$ 을 구하는 문제는, 두개의 평행한 벽사이에 있는 물체의 2차원문제로 귀착하게 된다.

$$\lim_{|y_1| \gg \epsilon} \phi_1(y_1, z_1; x_1; t) = -\frac{U_1(t)S_1'(x_1)}{4h} |y_1| + V_1^*(x_1, t)\{y_1 \pm C_1(x_1)\} + f_1(x_1, t) \quad (10)$$

단, 제 1항은 직진운동에 의한 속도 포텐셜을 의미하고, 제 2항은 횡방향 흐름에 의한 속도 포텐셜을 의미하며,  $f_1(x_1, t)$ 는 무한원방의 조건이 만족되지 않기 때문에 나오는 정수항이다. 여기서,  $S_1'(x_1)$ 은 횡단면  $\Sigma_1(x_1)$ 에서의 횡단면적의  $x_1$  측방향의 변화율,  $V_1^*$ 은 cross flow의 속도를 의미한다. 또한,  $C_1(x_1)$ 은 blockage coefficient를 나타내며,  $C_1(x_1)$ 의 값은 (Taylor, 1973)에 의해 구해진 단형단면에 대한 근사식을 이용한다.

### 2.2 외부영역문제

선체고정좌표계에 있어서, 아래의 차수로 되는 영역을 외부영역으로 정의한다.

$$x_1 = y_1 = O(1), \quad z_1 = O(\epsilon) \quad (11)$$

그리고, 외부영역에 관한 속도 포텐셜을  $\phi_1$ 이라고 하고, 이것을  $z=0$ 에서 전개하여 연속방정식(1)을 적용하면, leading order term  $\phi_1$ 은 식(12)을 만족하게 된다.

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial y_1^2} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \lim_{|y_1| \ll 1} \phi_1(x_1, y_1; t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \sigma_1(\xi_1, t) G_1^{(o)}(x_0, y_0; \xi, \eta) d\xi \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) H_1^{(\gamma)}(x_0, y_0; \xi, \eta) d\xi \\ &\pm \frac{1}{2} \int_{x_1}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) d\xi + \frac{\sigma_1(x_1, t)}{2} |y_1| \\ &+ \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\sigma_1(\xi_1, t)}{\partial y_1} \frac{\partial H_1^{(o)}}{\partial y_1} G_1^{(o)}(x_0, y_0; \xi, \eta) d\xi \right. \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) \left[ \frac{1}{x_1 - \xi_1} \right. \\ &\left. + \frac{\partial H_1^{(\gamma)}}{\partial y_1}(x_0, y_0; \xi, \eta) \right] d\xi \left. \right\} y_1 \end{aligned} \quad (13)$$

결국, 외부영역에 의한 속도 포텐셜  $\phi_1$ 의 내부극한을 생각하면, 식(13)으로 표현될 수 있다.

단,  $(x_0, y_0)$ 는 선박의 선체고정좌표계  $o_1-x_1y_1$ 에 대한 점의 공간좌표계  $o-xy$ 에서의 좌표를 표시하고 있다. 그리고  $(\xi, \eta)$ 는 source 혹은 vortex가 존재하는 점(source point, vortex point)를 의미하고,  $G_1^{(o)}$ 는 source와 vortex에 관한 Green 함수,  $H_1^{(o)}, H_1^{(\gamma)}$ 는 각각 측벽의 존재로 인하여 부가되는 함수를 의미하며,  $\gamma_1$ 는 vortex의 강도를 의미한다.

### 2.3 기본적분방정식과 유체력

앞에서 기술한 것처럼 문제를 간단하게 하기 위하여 선체 주위의 유동장을 내부영역과 외부영역의 2영역으로 나누고, 각각의 영역에 있어서 경계조건을 만족하는 2차원 속도포텐셜을 구하였으며 내부영역에서의 속도포텐셜의 외부극한(Outer limit)식과 외부영역에서의 속도포텐셜의 내부극한(Inner limit)식에 대해서 같은 성질을 가지는 항을 같게 두고 Matching의 조건으로 해서 계산하면  $\gamma$ 에 관한 기본적분방정식이 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_1(x_1)} \int_{x_1}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) d\xi - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) \\ \left[ \frac{1}{x_1 - \xi_1} + \frac{\partial H_1^{(\gamma)}}{\partial y_1} \right] d\xi \\ = - \frac{U_1}{2\pi H_1} \int_{-L/2}^{L/2} S_1^{(o)}(\xi_1) \frac{\partial H_1^{(o)}}{\partial y_1} d\xi \end{aligned} \quad (14)$$

따라서, 이 적분방정식을  $\gamma$ 에 대해서 풀면 된다. 단,  $\gamma$ 에 관해서는 다음의 조건을 만족할 필요가 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_1(x_1, t) &= \gamma_1(x_1) \quad \text{for } x_1 < -\frac{L}{2} \\ \int_{-\infty}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) d\xi &= 0 \\ \gamma_1(x_1 = -\frac{L}{2}, t) &= -\frac{1}{U_1} \frac{d\Gamma_1}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

단,  $\Gamma_1$ 은 선체주위의 순환을 나타낸다.

이상의 적분방정식을 푸는 것으로부터 와류분포가 구해지면, 베르누이 정리로부터 선체중심선상에 대한 압력차  $\Delta P$ 가 얻어지고, 아래 식으로부터 선체에 작용하는 횡력  $F_1$ 과 중앙단면 주위의 선수동요 모멘트  $M_1$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_1(t) &= - \int_{-L/2}^{L/2} \Delta P(x_1, t) dx_1 \\ M_1(t) &= - \int_{-L/2}^{L/2} x_1 \Delta P(x_1, t) dx_1 \end{aligned} \quad (16)$$

### 3. 선체에 작용하는 간섭력의 수치계산 예

앞의 식을 기초로 하여 측벽 근방을 향해하는 선박에 작용하는 유체력을 구한다. 계산의 대상 선박은 Table 1에 표시한 일반 화물선으로 하였고, Fig.2와 같이 임의의 측벽에 대해서는 반원(r) 현상을 하고 있는 측벽으로 하였다. 계산조건은 외력이 없다고 가정하고, 반원 r의 크기를 각각 20m, 50m, 70m로 계산 하였으며, 그림 2에서  $S_T$ 는 선박과 측벽간의 종방향 거리를 의미하며, 계산에 의해 구해진 선체에 작용하는 유체력과 모멘트는 다음 식으로 무차원화 된다.

$$C_F = \frac{F_1}{\frac{1}{2} \rho U_1^2 L d}, \quad C_M = \frac{M_1}{\frac{1}{2} \rho U_1^2 L^2 d} \quad (17)$$

Table 1 Principal particulars

Length	$L_{pp}$	155.0m
Breadth	B	26.0m
Draft	d	8.7m
Block coef.	$C_B$	0.698

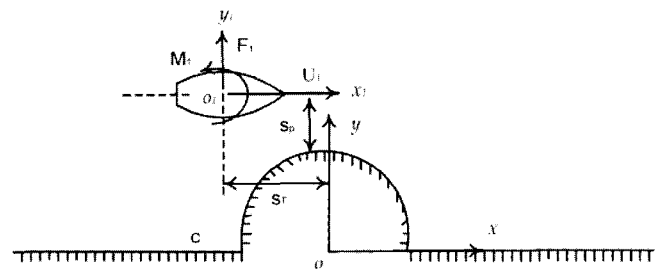


Fig. 2 Coordinate system for semi-circle bank wall

그림 2에서 힘과 모멘트에 대한 부호는 측벽에 대한 반발력

(Repulsive force)과 bow-outward moment를 +로 하였다.

먼저, Fig.3 과 Fig.4는 선박이 반원 형상을 하고 있는 측벽 근방을 항해하는 경우, 선체에 작용하는 간섭력(유체력)의 계산 결과를 나타내고 있다. 여기서 수심 h와 흘수 d와의 비,  $h/d=1.2$ 로 하였고, 반원 r의 크기는 각각 20m, 50m, 70m로 하였으며, 선속은 7kt로 계산 하였다. 또한 선체중심선과 측벽과의 측방거리와 선박길이의 비,  $S_p/L$ 은 0.1로 계산하였다.

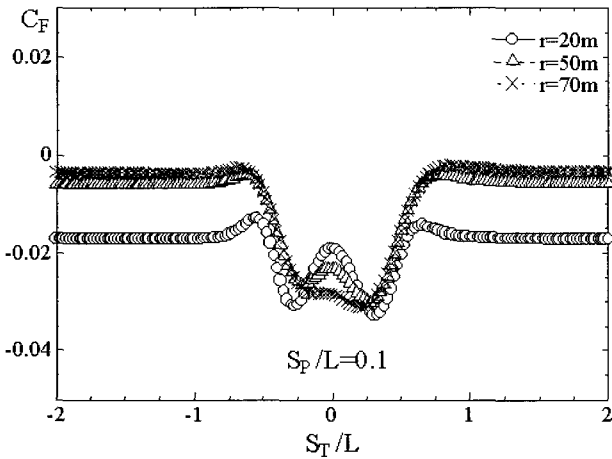


Fig. 3 The effect of r on lateral force

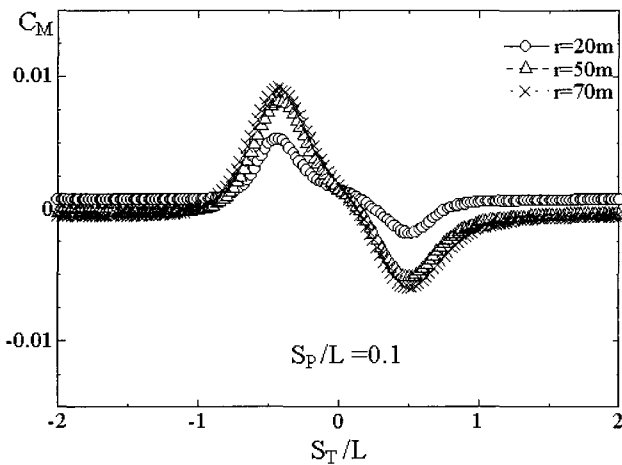


Fig. 4 The effect of r on yaw moment

Fig 3에서 선체에 작용하는 횡방향 힘의 일반적인 경향을 설명하면 다음과 같다.  $S_T/L < -1.0$ 의 부근에서는 측벽의 영향으로 인해서 측벽방향으로 흡인되는 흡인력이 작용하고 있다. 그리고 대략  $S_T/L = -0.8$  지점에서부터 돌체(반원)의 영향이 나타나기 시작하여 순간적으로 측벽과 반대 방향으로 반발력이 작용 하였다가 다시 측벽방향으로의 흡인력이 상당히 크게 작용을 하기 시작한다. 이 흡인력은 다시  $S_T/L = 0.8$  부근을 지나면서 돌체(반원)의 영향은 없어지기 시작하고 측벽과의 측방거리에 의한 영향만이 존재를 하게 된다.

Fig.4의 선수동요 모멘트에 대한 일반적인 경향은 다음과

같다. 먼저  $S_T/L < -1.0$ 의 부근에서는 측벽의 영향으로 인해서 미세하게 선수가 측벽 방향으로 회두하는 bow-inward moment로 작용을 하다가 대략  $S_T/L = -0.8$  지점을 지나면서 돌체(반원)의 영향이 나타나면서 선수가 측벽 방향으로부터 반발하는 bow-outward moment로 작용을 한다. 이 모멘트는 대략  $S_T/L = -0.5$  지점을 지나면서 bow-outward moment의 peak를 갖게 된다. 또한  $S_T/L = 0.5$  부근을 지나면서 측벽 방향으로 선수를 회두시키는 bow-inward moment의 peak가 작용을 하고,  $S_T/L = 1.0$  부근을 지나면서 돌체의 영향은 거의 없어지고, 다만 측벽과의 거리에 의한 미소한 값이 일정하게 작용을 하게 된다.

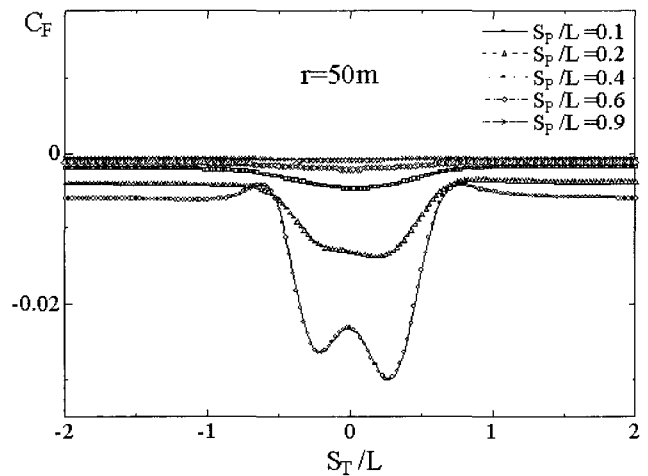


Fig. 5 The effect of  $S_p/L$  on lateral force

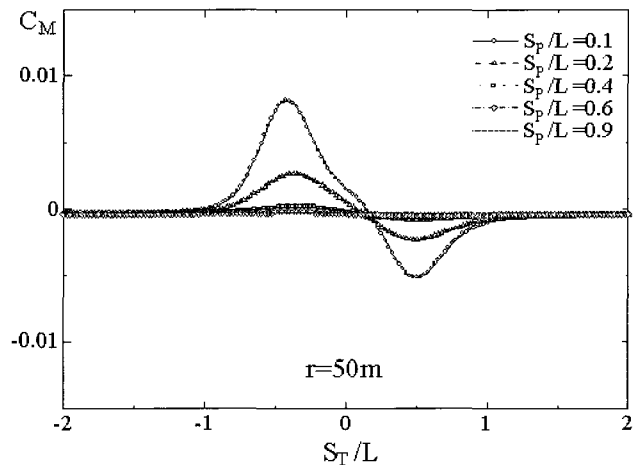


Fig. 6 The effect of  $S_p/L$  on yaw moment

Fig.5 와 Fig.6은 선박과 돌체(반원)과의 측방거리를 변수로 하여 선체에 작용하는 간섭력(유체력)의 계산 결과를 나타내고 있다. 여기서 측방거리  $S_p/L$ 은 각각 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.9로 하였고, 반경 r은 50m로 하였으며, 선속은 7kt로 계산하였다.

Fig.5 와 Fig.6에 나타난 일반적 경향은 다음과 같다. 측방

거리  $S_p/L=0.1$ 의 경우에는 돌제로 인한 선체에 작용하는 측벽의 영향이 상당히 크게 작용하여 간섭력에 대한 여러개의 peak가 나타나고 있으나  $S_p/L=0.2$ 를 지나면서 한개의 peak가 나타나는 것을 알 수 있고, 측방거리가  $S_p/L=0.6$  정도 되면 선체에 작용하는 측벽의 영향은 거의 없어지는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 돌제(반원)가 있는 측벽형상에 대해서 선체에 작용하는 간섭력을 비교한 결과, 돌제가 있는 부근에서 상당히 크게 측벽의 영향이 작용하는 것을 알 수 있고, 이러한 영향은 결국 선박 조종 운동에 상당히 크게 작용할 것이라고 생각되어진다. 그러나 반원 r의 크기에 상관없이 선체 중심선과 측벽과의 측방거리가 대략 선체 길이의 0.6배 정도 되면 측벽의 영향은 거의 없어지고, 대략 선체 길이의 1.0배 정도 되면 측벽의 영향은 완전히 없어질 것으로 생각되어진다. 따라서 대형 선박이 이러한 측벽과 같은 구조물 근방을 항해할 경우, 난파 사고 방지에 요구되어지는 안전조종 및 안전항해를 위해서 본 연구에서 계산되어진 결과를 토대로 하여 주의 깊게 항해를 해야 될 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 협수로와 같은 제한수역에서 항해중인 선박에 대해서, 평수중에 있어서 반원 형상을 하고 있는 측벽 근방을 항해하는 대형 선박에 작용하는 측벽과 선박간의 간섭력을 규정하여 협수로에서의 안전항해를 위한 선박과 측벽간의 안전거리를 파악하고자 돌제가 있는 측벽근방을 항해하는 선박에 미치는 측벽의 영향에 대해서 검토하였다. 검토 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 세장체 이론을 토대로 한 계산법을 이용하여 협수로 상에서의 불균일한 측벽의 근방을 항해하는 선체에 미치는 간섭력을 계산하였다.

둘째, 돌제(반원)가 있는 측벽과 선박간의 간섭력에 대해서는, 돌제의 전후 부분에서 상당한 변화가 발생하고, 이러한 영향은 결국 협수로에서의 안전 항해를 위한 선박 조종 운동에 상당히 중요한 변수로 작용할 것으로 보여진다.

셋째, 선체 중심선과 돌제와의 측방 거리가 선체길이에 비해서  $S_p/L=0.6$  정도 되면 측벽의 영향은 거의 없어지게 되고, 선체 길이의 1.0배 정도 되면 측벽의 영향은 완전히 없어질 것으로 판단된다.

결론적으로, 본 연구테마와 같은 상황에서 항행하는 선박의 경우, 안전항해의 측면에서 보았을 때 선속을 포함하여 선박과 측벽간의 종방향, 횡방향 거리 및 타각, 그리고 기타 환경요인(바람, 조류)등이 상당히 중요한 변수로 작용하게 된다. 따라서 본 논문에서 제안하고 있는 계산 방법 및 결과는 제한수역에서의 안전 항해 및 충돌 회피를 위한 선박의 자동 제어 시스템과 해상 교통 제어 시스템 및 항만 건설 등을 위한 초기 설계 단계에서 선박 조종성의 예측에 상당히 유용할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Davis, A.M.J.(1986), "Hydrodynamic Effects of Fixed Obstacles on Ships in Shallow Water", Journal of Ship Research, Vol.30.
- [2] Kijima, K. and Qing, H.(1987), "Manoeuvring Motion of a Ship in the Proximity of Bank Wall", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 162.
- [3] Kijima, K., Furukawa, Y. and Qing, H.(1991), "The Interaction Effects between Two Ships in the Proximity of Bank Wall", Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol.81.
- [4] Taylor, P.J.(1973) "The Blockage Coefficient for Flow about an Arbitrary Body Immersed in a Channel", Journal of Ship Research, Vol. 17.
- [5] Yasukawa, W.(1991), "Bank Effect on Ship Manoeuvrability in a Channel with Varying Width", Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol.81.
- [6] Yeung, R.W. and Tan, W.T.(1980), "Hydrodynamic Interactions of Ships with Fixed Obstacles", Journal of Ship Research, Vol. 24.

원고접수일 : 2004년 3월 29일

원고채택일 : 2004년 6월 16일