

측벽부근을 항해하는 선박과 측벽간의 상호 간섭력에 관한 연구

이춘기[†] · 강일권^{*}

한국해양대학교, *부경대학교

A Study on the Hydrodynamic Interaction Forces between Ship and Bank Wall in the Proximity of Bank

Chun-Ki LEE[†] and Il-Kwon KANG^{*}

Korea Maritime University, *Pukyong National University

Abstract

It is well known that the hydrodynamic interaction forces between ship and bank wall affect ship manoeuvring motions. 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 investigated. The numerical simulations on hydrodynamic interaction force acting on a ship in the proximity of bank wall are carried out by using this theoretical method. The theoretical method used in this paper will be useful for practical prediction of ship manoeuvrability at the initial stage of design, for discussion of marine traffic control system and for automatic control system of ship in confined waterways.

Key words : interaction force(간섭력), slender body theory(세장체이론), bank effect(측벽영향)

서 론

1970년대 이후, 선박의 대형화 및 대형선박들의 척수 증가에 따른 선박 충돌 및 좌초사고는 대량 오염 유출사고를 유발하면서, 해양에서의 환경적으로뿐만 아니라 경제적으로도 심각한 문제로 이어지고 있고, 전 세계적으로 선박조종성능 향상을 위해 많은 노력을 기울여 오고 있다. 그러나 해난 사고를 줄이고, 안전항해의 향상을 위하여 선박조종성능 향상에 관한 많은 노력에도 불구하고, 여러 선박들의 충돌 및 좌초를 포함한 해난사고가 여전히 발생하고 있다. 현재 섬과 섬 혹은 해협에 있어서, 많은 교각을 건설하고 있으나, 이러한 수역은 일반적으로 많은 선박들의 교통량이 폭주하는 폭

주해역이고, 이와같은 해역에 측벽 혹은 교각과 같은 구조물이 존재하는 경우, 항행선박은 항행가능 수역에 상당히 제한을 받게 된다. 또한, 선박이 측벽이나 교각과 같은 구조물 가까이 항행하는 경우, 측벽 혹은 교각에 의한 간섭력의 영향을 생각할 수 있고, 근접해서 항해하는 선박이 있는 경우, 선박 상호간의 간섭력도 선체에 작용한다고 생각할 수 있다. 따라서, 이와 같은 해역에서는 여러 종류의 변수들이 작용하여 해난사고의 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

[†] Corresponding author : leeck1520@hanmail.net

추정하는 것이 중요하고, 조종성능을 명확하게 추정하기 위해서는 선체에 작용하는 간섭력을 정확하게 추정하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 측벽 근방을 향해하는 선박에 작용하는 측벽과 선박간의 상호 간섭력을 추정하여 협수로에서의 안전항해를 위한 최소한의 선박과 측벽간의 안전 거리를 파악하고자 한다.

기본식

Fig. 1에 표시한 것처럼, 공간고정좌표계 $o-xy$ 와 측벽근방을 향해하는 선박의 선체중심을 원점으로 하는 선체고정좌표계 $o_1-x_1y_1$ 을 생각할 수 있다. 선박은 선속 U_1 으로 측벽 근방을 직진하는 것으로 가정하고, 선체 중심선과 측벽간의 측방 거리를 S_{P1} , 측벽 중심에서 선체 중심까지의 종방향 거리를 S_{N1} 으로 한다.

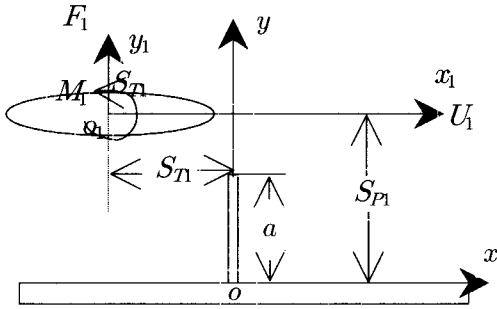


Fig. 1. Coordinate system

여기서, 자유표면을 고정벽으로 가정하고 선체를 double body로 생각하면, 선체의 운동에 의한 선체속도포텐셜은 다음의 연속의 조건을 만족해야 한다 Davis(1986), Kijima et. al(1987), Yeung et. al(1980).

$$\nabla^2 \phi(x, y, z; t) = 0 \tag{1}$$

또, $\phi(x, y, z; t)$ 를 만족해야할 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_c} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=\pm h} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_1} \Big|_B = U_1(t)(n_x)_1 \tag{4}$$

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

여기서, B_1 은 선체표면, h 는 수심, C 는 측벽표면을 나타내고, $(n_x)_1$ 은 B_1 과 C 에 대한 안쪽 방향으로의 단위법선벡터 n_1 의 x_1 방향성분을 나타낸다.

또한 선체를 세장체로 가정하고, slenderness parameter $\epsilon(\ll 1)$ 을 도입하고, 선장 L 에 비해서, 선폭 B , 홀수 d , 수심 h 는 ϵ 의 order로하고, 선체 주위의 유동장을 내부영역과 외부영역의 두개의 영역으로 나누어서 문제를 생각한다. 게다가, 선체 중심선과 측벽과의 횡방향거리 S_{P1} 은 선장 L 과 같은 order라고 가정한다.

1. 내부영역문제

선체고정좌표계에 있어서, 아래의 차수로 되는 영역을 내부영역으로 정의한다.

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

그리고, 내부영역에 관한 속도 포텐셜을 ϕ_1 이라고 하면, ϕ_1 을 만족해야 할 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z_1^2} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial N_1} \Big|_{\Sigma_1(x_1)} = U_1(t)(n_x)_1 \tag{8}$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=\pm h} = 0 \tag{9}$$

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 ϕ_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 속도포텐셜을 의미하고, 제 2항은 횡방향흐름에 의한 속도포텐셜을 의미한다. 여기서, $S_1'(x_1)$ 은 횡단면 $\Sigma_1(x_1)$ 에 대한 단면적의 변화율, V_1^* 은 cross flow의 속도를 의미한다. 또한, $C_1(x_1)$ 은 blockage coefficient를 나타낸다. $C_1(x_1)$ 의 값은 Taylor (1973)에 의해 구해진 단형단면에 대한 근사식을 이용한다.

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 ϕ_1 이라고 하고, 이것을 $z=0$ 에서 전개하여 연속방정식 (1)을 적용하면, leading order term ϕ_1 은 다음식을 만족하게 된다.

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

결국, 외부영역에 의한 속도포텐셜 ϕ_1 의 내부극한을 생각하면, 다음식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \lim_{|y_1| \ll 1} \phi_1(x, y; t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \sigma_1(\xi_1, t) G_1^{(\sigma)}(x_0, y_0; \xi, \eta) d\xi \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) H_1^{(\gamma)}(x_0, y_0; \xi, \eta) d\xi \\ &\pm \frac{1}{2} \int_{x_1}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) d\xi + \frac{\sigma_1(x_1, t)}{2} |y_1| \end{aligned}$$

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

단, (x_0, y_0) 는 선박의 선체고정좌표계 $o_1 - x_1 y_1$ 에 대한 점의 공간좌표계 $o - xy$ 에서의 좌표를 표시하고 있다.

3. 기본적인방정식과 유체력

이상의 내부영역과 외부영역에 관한 두개의 속도포텐셜은 그의 두개의 영역이 겹쳐지는 부분에 대해서 같지 않으면 안된다.

따라서 Matching의 조건으로 해서 γ 에 관한 기본적인방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{G_1(x_1)} \int_{x_1}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) d\xi - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{L/2} \gamma_1(\xi_1, t) \\ & \left[\frac{1}{x_1 - \xi_1} + \frac{\partial H_1^{(\gamma)}}{\partial y} \right] d\xi \\ &= -\frac{U_1}{2\pi H_1} \int_{-L/2}^{L/2} S_1'(\xi_1) \frac{\partial H_1^{(\sigma)}}{\partial y} d\xi \quad (14) \end{aligned}$$

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

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

단, Γ_1 은 선체주위의 순환을 나타낸다.

이상의 적분방정식을 푸는 것으로부터 외류분포가 구해지면, 베르누이 정리로부터 선체중심선상에 대한 압력차 ΔP 가 얻어지고, 아래 식으로부터 선

체에 작용하는 횡력 F_1 과 중앙단면 주위의 선수요 모멘트 M_1 을 구할 수 있다.

$$F_1(t) = - \int_{-L/2}^{L/2} \Delta P(x_1, t) dx_1$$

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

선체에 작용하는 간섭력의 수치계산 예

앞의 식을 기초로 하여 측벽 근방을 향해하는 선박에 작용하는 유체력을 구한다. 계산의 대상 선박은 Table 1에 표시한 일반 화물선으로 하였다. 계산조건은 외력이 없다고 가정하고, 계산에 의해 구해진 선체에 작용하는 유체력과 모멘트는 다음식으로 무차원화 된다.

$$CF_1 = \frac{F_1}{\frac{1}{2} \rho U_1^2 L d} \quad , \quad CM_1 = \frac{M_1}{\frac{1}{2} \rho U_1^2 L^2 d} \quad (17)$$

Table 1. Principal particulars

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

먼저, Fig. 2 와 Fig. 3은 선박이 돌체를 가지고 있는 측벽 근방을 향해하는 경우, 선체에 작용하는 유체력의 계산 결과를 나타내고 있다. 여기서 수심 h와 흘수 d와의 비, $h/d=1.2$ 로 하였고, 돌체의 길이는 선체길이의 0.34배로 하였으며, 선체중심선과 돌체와의 측벽거리와 선장의 비, S_{T1}/L 는 각각 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 계산하였다.

먼저, 그림 2에서 선체에 작용하는 횡방향 힘의 일반적인 경향은 다음과 같다. $S_{T1}/L < -1.0$ 의 부근에서는 측벽의 영향이 거의 없으나, $S_{T1}/L = -1.0$ 지점에서부터 측벽방향으로의 흡인력이 상당히 크게 작용을 하기 시작한다. 이 흡인력은 다시 $S_{T1}/L = -0.5$ 를 지나면서 측벽으로부터의 반발력으로 전환을 하고, $S_{T1}/L = 0.5$ 를 지나면서 또다시 측벽방향으로의 흡인력이 상당히 크게 작용하

기 시작한다. 이 흡인력은 $S_{T1}/L = 1.0$ 을 지나면서 측벽의 영향은 거의 없어지지만, 측벽과의 거리에 의한 미소한 값이 일정하게 존재를 하게 된다.

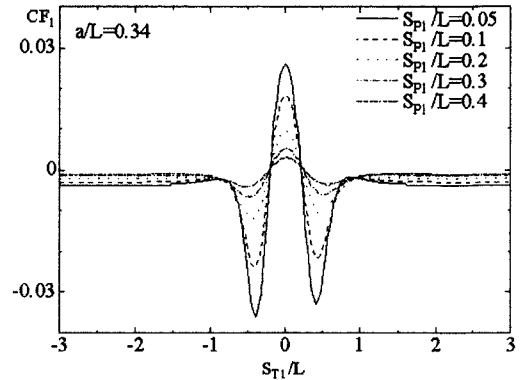


Fig. 2. Lateral force coefficients acting on ship

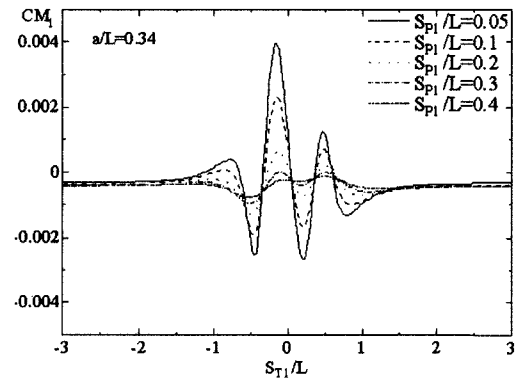


Fig. 3. Yaw moment coefficients acting on ship

Fig. 3의 선수요 모멘트에 대한 일반적인 경향은 다음과 같다. 먼저 $S_{T1}/L < -1.0$ 의 부근에서는 측벽의 영향이 거의 없으나, $S_{T1}/L = -1.0$ 지점에서 측벽방향으로부터 반발하는 미소한 bow-outward moment가 순간적으로 작용한후, 측벽방향으로의 bow-inward moment가 작용하기 시작한다. 이 모멘트는 $S_{T1}/L = -0.5$ 를 지나면서 bow-outward moment로 전환하기 시작하고, $S_{T1}/L = 0$ 인 지점에서 peak를 갖게 된다. 또한 $S_{T1}/L = 0.5$ 를 지나면서 또다시 측벽방향으로의 bow-inward moment가 작용을 하고, 이후 미소

한 값으로 증감을 하다가 $S_{T1}/L=1.5$ 부근을 지나면서 모멘트에 대한 측벽의 영향은 거의 없어지고, 다만 측벽과의 거리에 의한 미소한 값이 일정하게 작용을 하게 된다.

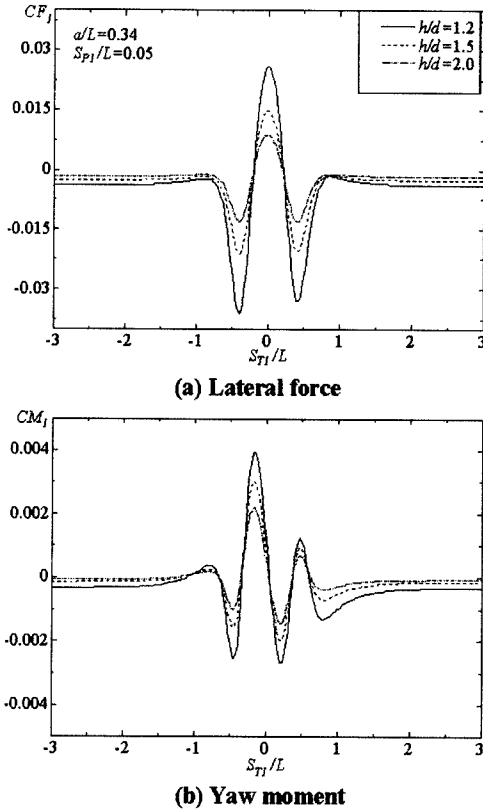


Fig. 4. Lateral force and yaw moment coefficients acting on ship with function of h/d

Fig. 4는 선박이 돌제를 가지고 있는 측벽 근방을 향해하는 경우, 수심에 대한 선체에 작용하는 유체력의 계산 결과를 나타내고 있다. 여기서 수심 h 와 흘수 d 와의 비를 각각 $h/d=1.2, 1.5, 2.0$ 으로 하였고, 선체중심선과 돌제와의 측방거리와 선장의 비, S_{T1}/L 은 0.05로 계산하였다. 그림 4에서 선체에 작용하는 측벽의 영향(lateral force, yaw moment)에 대한 일반적인 경향은 그림 2, 3에서 설명한 내용과 일치하고, 수심이 깊어질수록 측벽의 영향은 작아지는 것을 알 수 있다.

결론

협수로와 같은 제한수역에서 항해중인 선박에 대해서, 평수중에 있어서 돌제가 있는 측벽근방을 향해하는 선박에 미치는 측벽과 선박간의 상호간섭력에 대해서 검토하였다. 검토결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 협수로중을 항해하는 선박과 측벽간의 상호간섭력의 계산법을 이용하여, 불균일한 수직측벽의 근방을 향해하는 선체에 작용하는 유체력을 계산하였다.

둘째, 돌제가 있는 측벽과 선박간의 상호 간섭력에 대해서는, 돌제의 전후부분에서 상당한 변화가 발생하고, 이러한 변화는 결국 선체운동에 상당한 영향으로 작용할 것으로 보여진다.

셋째, 선체 중심선과 돌제와의 횡방향 거리가 선체길이에 비해서 대략 0.7배 정도 이면 측벽의 영향은 거의 없어지게 된다.

결론적으로, 본 논문에서 제안하고 있는 계산법은 설계 측면에서 뿐만 아니고, 자동운항 시스템 경우의 자동 조타의 설계, 안전운항의 관점에서 볼 때, 선속 제한등의 해상교통관제 혹은 항만이나 운하등의 설계측면에서 좋은 지침이 될 것으로 여겨진다.

참고문헌

- Davis, A.M.J.(1986) : "Hydrodynamic Effects of Fixed Obstacles on Ships in Shallow Water", Journal of Ship Research, Vol. 30, 94-102.
- 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, 125-132.
- Yeung, R. W. and Tan, W. T.(1980) : "Hydrodynamic Interactions of Ships with Fixed Obstacles", Journal of Ship Research, Vol. 24, 50-59.
- Taylor, P.J.(1973) : "The Blockage Coefficient for Flow about an Arbitrary Body Immersed in a Channel", Journal of Ship Research, Vol. 17, 97-105.

2003년 12월 3일 접수

2003년 12월 13일 수리