



측벽으로 인하여 선박에 작용하는 유체력 특성에 관한 연구

이춘기 · 임태우[†]
(한국해양대학교)

A Study on the Hydrodynamic Forces Acting on a Vessel in the Vicinity of a Bank

Chun-Ki LEE · Tae-Woo LIM[†]
(Korea Maritime and Ocean University)

Abstract

The hydrodynamic forces and moments induced by the vicinity of a bank on a moving ship in confined waters are known as bank effect. In this study, a numerical calculation have been carried out to investigate bank effects induced by surface-piercing as well as submerged banks. Also, the characteristics of hydrodynamic forces acting on a large vessel in the vicinity of a bank are discussed, and the effects of depth and the lateral distance between vessel and bank are estimated.

Key words : Bank effect, Hydrodynamic force, Large vessel, Depth, Lateral distance

I. 서론

일반적으로 천수역 혹은 협수로와 같은 제한수역에서의 선박조종운동은 수심과 흘수 비에 따라 많은 변화가 있다. 또한, 항내 혹은 운하와 같은 제한수로에서 방파제나 측벽과 같은 장애물이 있고, 대형선박이 이와같은 측벽부근을 항행하는 경우, 측벽과 같은 장애물로 인하여 항행선박에 미치는 측벽의 영향은 대단히 크게 작용한다. 특히, 항해사 및 선박조종운동의 관점에서 보았을 때, 일정속력을 가지고 측벽부근을 항행하는 선박이 측벽으로부터 받는 유체력은 상당히 중요한 문제이다. 한편, 측벽으로 인하여 항행선박에 미치는 유체력의 특성변화와 관련하여, 주요 변수로 작용하는 것은 측벽의 형상, 항행선박의 속도, 항행선박의 흘수와 수심간의 비, 측벽과 항행선

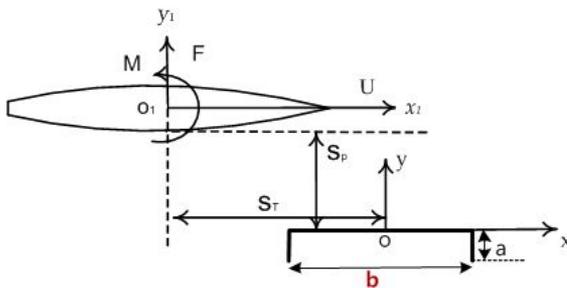
박간의 종방향 및 횡방향 거리 등을 고려할 수 있고, 이와 같은 변수로 인하여 선박에 작용하는 유체력의 특성은 급격하게 변하게 될 것이며, 결국 측벽영향(bank effect) 및 외력 등으로 인하여 항해사의 안전항행에 상당한 영향을 미칠 수 있는 문제점들이 발생할 수 있다. 따라서 임의의 선박이 방파제 혹은 측벽과 같은 구조물 부근을 지나가는 경우, 구조물의 종류에 따른 유체력의 정도를 수치계산하고 분석하는 것이 상당히 중요하다. 한편, 안전운항 관점에서 보았을 때, 선박이 측벽(bank)과 같은 구조물로 인하여 발생하는 간섭력의 계산방법 및 수치계산에 대해서는 많은 연구결과들이 있고 Yasukawa(2002); Yeung(1978); Davis(1986); Kijima et al.(1987, 1991); Yeung et al.(1980), 현재도 활발하게 연구를 진행하고 있으며, 간섭력에 대한 수치계산 결과들을 기초로 실

[†] Corresponding author: 051-410-4256, kyunlim@kmou.ac.kr

무에서도 활용하는 연구가 서서히 진행되고 있고, 본 연구에서도 협수로나 천수역 혹은 항내에서의 해난사고 방지 및 실무에 실질적인 도움이 되도록 측벽영향(bank effect)에 대한 연구를 행하고자 한다. 이 논문에서는 선박이 방파제와 같은 측벽 근방을 지나갈 때, 방파제의 종방향 길이에 따른 유체력의 특성에 대해서 분석하였다.

II. 이론적 배경

먼저 방파제와 같은 측벽형상을 하고 있는 측벽 근방을 항행하는 선박을 가정하였을 때, Fig.1에 나타낸 것과 같이, 공간고정좌표계 $o-x_1y_1$ 와 방파제와 같은 측벽 부근을 지나가는 대형선박의 중심을 원점으로 하는 선체고정좌표계 $o_1-x_1y_1$ 을 생각할 수 있다. Fig.1에서, 선박은 일정속력 U 로 방파제형상의 측벽부근을 직진하는 것으로 가정하고, 선체 측면으로부터 방파제형상의 측벽까지의 횡방향거리를 S_p , 선체중심점으로부터 방파제형상의 중심점까지의 종방향거리를 S_T 로 한다.



[Fig. 1] Coordinate system

여기서, 조파의 영향을 무시하고, 수면을 강체벽으로 가정하며, 선체를 double body로 생각하면, 선박운동에 따른 속도포텐셜 ϕ 는 식(1)의 연속조건을 만족해야 한다.

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

또한 속도포텐셜 ϕ 는 식(2)에서 식(5)의 경계조건 역시 만족해야 한다.

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \right]_C = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial z} \right]_{z=\pm h} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \right]_B = U(t)(n_x) \quad \dots\dots\dots (4)$$

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

여기서, B 는 항행선박의 선체 표면을 의미하고, h 는 수심을 의미하며, C 는 방파제형상의 측벽 표면을 의미하고 있다. 또한 \vec{n} 은 방파제형상을 하고 있는 측벽 표면에 대한 내측방향으로의 단위법선벡터를 의미하고 있고, n_x 는 항행하고 있는 선박의 선체표면에 대한 내측방향으로의 단위법선벡터 \vec{n} 의 x 축 방향성분을 의미하며, 식(5)는 무한원방에서의 유속이 제로인 조건을 나타내고 있다. 상기 경계조건을 만족하는 속도포텐셜 ϕ 를 구하기 위하여 본 연구에서는 항행선박 주위의 유동장을 두 개의 영역(내부영역과 외부영역)으로 나누어서 수치계산을 행하고자 한다. 한편, 선체를 세장체(slender body)로 가정하고, slenderness parameter ($\epsilon \ll 1$)을 이용하여, 선박의 길이 L 과 비교하여, 선폭 B , 흘수 d , 수심 h 는 slenderness parameter(ϵ)의 오더(order)로 하며, 선체로부터 방파제형상의 측벽까지의 횡방향거리 S_p 는 선박의 길이(L)와 같은 오더(order)로 가정하였을 때, 선체고정좌표계에 있어서 아래와 같이 order(오더)로 되는 영역을 선박의 내부영역(Inner region)으로 정의할 수 있고, 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

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

그리고 아래와 같이 order로 되는 영역을 외부영역(Outer region)으로 정의할 수 있고, 식 (7)과

같이 표현할 수 있다.

$$x_1 = y_1 = o(1) , \quad z_1 = o(\epsilon) \dots\dots\dots (7)$$

결국, 항행선박 주변의 유동장을 두 개의 영역 (내부영역과 외부영역)으로 나누고, 내부영역과 외부영역에 대한 경계조건을 만족하는 2차원 속도포텐셜을 구하여 문제를 해결할 수 있다. 또한 속도포텐셜과 관련하여 내부영역에서의 외부극한 (Outer limit)식과 외부영역에서의 내부극한 (Inner limit)식에 대해서 동일한 성질을 가지고 있는 항을 같게 두고, Matching의 조건으로 해서 정리하면, vortex의 강도를 의미하고 있는 γ 에 관한 기본적분방정식이 다음과 같이 얻어진다 Kijima et al.(1987, 1991).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{C(x_1)} \int_{x_1}^{\frac{L}{2}} \gamma(\xi, t) d\xi - \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\frac{L}{2}} \gamma(\xi, t) \left[\frac{1}{x_1 - \xi} + \frac{\partial H^{(\gamma)}}{\partial y_1} \right] d\xi \\ & = -\frac{U}{2\pi H} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} S'(\xi) \frac{\partial H^{(\sigma)}}{\partial y_1} d\xi \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

상기 식 (8)에서, $C(x_1)$ 은 blockage coefficient를 의미하고, $C(x_1)$ 은 Taylor(1973)에 의해 구해진 단형단면에 대한 근사식을 이용한다. 또한 $H^{(\sigma)}, H^{(\gamma)}$ 는 각각 방파제형상을 하고 있는 측벽의 존재로 인하여 부가되는 함수를 의미하고, γ 는 vortex의 강도를 나타내며, 이 적분방정식을 γ 에 대해서 풀면 된다. 단, γ 에 관해서는 다음의 조건을 만족할 필요가 있다.

$$\begin{aligned} \gamma(x_1, t) &= \gamma(x_1) \text{ for } x_1 < -\frac{L}{2}, \int_{-\infty}^{\frac{L}{2}} \gamma(\xi, t) d\xi = 0, \\ \gamma(x_1 = -\frac{L}{2}, t) &= -\frac{1}{U} \frac{d\Gamma}{dt} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

단, Γ 는 방파제형상의 측벽부근을 항행하는 선박주변의 순환을 나타낸다. 상기의 적분방정식을 해석하는 것으로부터 와류분포가 구해지면, 베르누이 정리로부터 선박의 중심선상에 대한 압력차(ΔP)가 구해지고, 식(10)으로부터 방파제형

상의 측벽부근을 지나가는 대형선박에 작용하는 횡력(F)과 대형선박에 영향을 주는 모멘트(M)를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} F(t) &= -h \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \Delta P(x_1, t) dx_1 \\ M(t) &= -h \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x_1 \Delta P(x_1, t) dx_1 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

그리고, 수치계산에 의해 구해진 방파제형상의 측벽으로 인하여 항행선박에 영향을 주는 힘과 모멘트는 다음 식으로 무차원화 된다.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho L d U^2}, \quad C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho L^2 d U^2} \dots\dots (11)$$

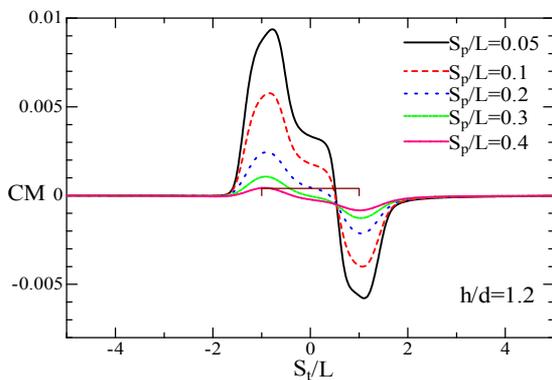
III. 결과 및 고찰

이 장에서는 방파제 형상을 하고 있는 측벽부근을 대형선박이 항행하는 경우, 방파제로 인한 대형선박에 작용하는 유체력을 계산하였다. 본 연구에서 수치계산에 적용하고 있는 대상 선박의 주요제원은 <Table 1>에 나타낸 것과 같이 VLCC로 하였고, 계산조건은 측벽의 길이(b)의 크기를 선박길이(L)를 기준으로 2.0L, 4.0L, 10.0L로 하였으며, 선속 U는 2knots로 하였다. 또한, 수심(h)과 대상선박의 흘수(d)의 비, h/d = 1.2 및 1.5로 계산하였고, 방파제형상을 하고 있는 측벽으로부터 선박간의 횡방향거리는 선체길이(L)를 기준으로 0.05L, 0.1L, 0.2L, 0.3L 및 0.4L로 하여 계산하였다.

<Table 1> Principal particulars

$L(m)$	325m
$B(m)$	53m
$d(m)$	22.05m
Block coef. C_B	0.831

[Fig. 2] 및 [Fig. 3]은 방파제형상을 하고 있는 측벽부근을 대형선박이 항행하는 경우, 측벽으로 인한 항행선박에 작용하는 유체력의 수치계산 결과를 보여주고 있다. 여기서, 수심(h)과 항행선박의 흘수(d)와의 비, $h/d=1.2$ 로 계산하였고, 방파제 길이(b)의 크기는 선체길이(L)를 기준으로 $2.0L$ 로 하였으며, 선박과 측벽과의 횡방향 거리는 선체길이(L)를 기준으로 $0.05L, 0.1L, 0.2L, 0.3L$ 및 $0.4L$ 로 계산하였다.

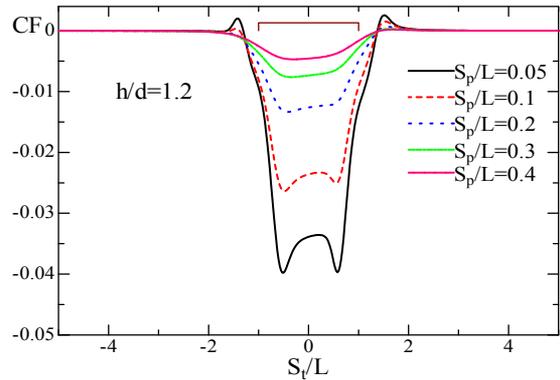


[Fig. 2] Calculated hydrodynamic forces acting on a vessel passing by the bank

[Fig. 2]에서 저속으로 항행하는 선박에 작용하는 횡방향 힘의 일반적인 경향은 다음과 같다. 방파제형상이 없는 곳에서는 유체력이 전혀 작용하지 않고 있으나, 방파제형상을 하고 있는 측벽부근에 접근할수록 측벽이 시작되는 끝단에서 미소한 반발력이 작용하다가 측벽 끝단을 지나면서 흡인력으로 변하여 선체에 작용하고 있음을 알 수 있고, 이 값은 또다시 측벽이 끝나는 끝단에서 미소한 반발력으로 작용함을 알 수 있다. 또한 측벽과 선박간의 횡방향거리에 따라 선체에 작용하는 유체력(흡인력)의 크기 및 특성이 달라짐을 알 수 있다.

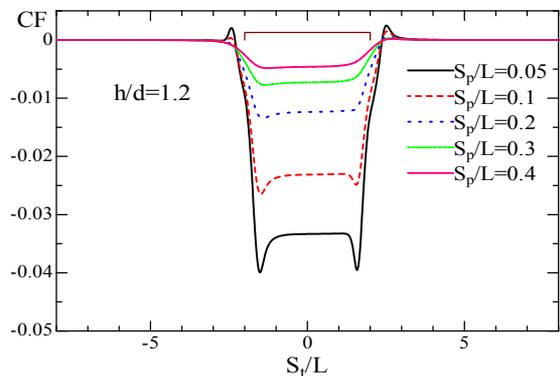
[Fig. 3]은 저속으로 항행하는 선박에 작용하는 선수동요 모멘트에 대한 경향을 보여주고 있다. [Fig. 3]의 경우, 방파제형상이 없는 곳에서는 모멘트가 전혀 작용하지 않고 있으나, 이 논문에서

의 조건하에서는 방파제형상을 하고 있는 측벽부근에서 선체에 작용하는 모멘트에 많은 변화가 있는 것을 확인 할 수 있다.



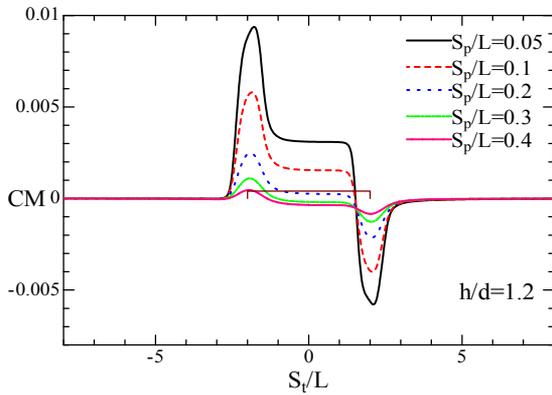
[Fig. 3] Calculated hydrodynamic moments acting on a vessel passing by the bank

[Fig. 4] 와 [Fig. 5]는 항행선박과 방파제형상의 측벽간의 횡방향거리 및 측벽의 종방향길이(b)와 h/d 를 파라메타로 하였을 때, 대형선박에 작용하는 유체력에 대한 수치계산 결과를 나타내고 있다. [Fig. 4]와 [Fig. 5]에서 선박과 측벽과의 횡방향거리(S_p)는 $0.05L, 0.1L, 0.2L, 0.3L$ 및 $0.4L$ 로 하였고, 측벽의 길이 b 는 $4.0L$ 로 하였으며, 수심(h)과 항행선박의 흘수(d)와의 비, $h/d=1.2$ 로 하였고, 선속(U) 은 $2knots$ 로 계산하였다.



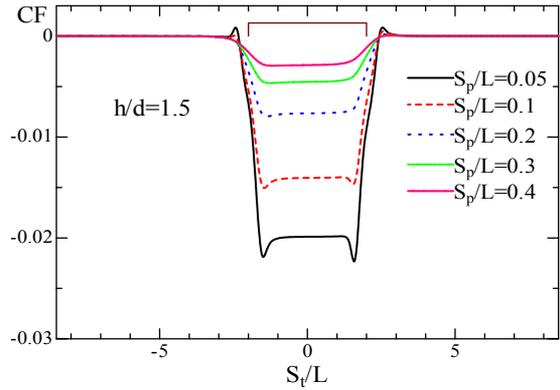
[Fig. 4] Calculated hydrodynamic forces acting on a vessel passing by the bank

[Fig. 4] 및 [Fig. 5]로부터 알 수 있듯이, 측벽 부근에서 선박에 작용하는 유체력의 특성은 앞에서 설명한 내용과 같은 경향을 나타내고 있다. 한편, 측벽의 길이 $b=2.0L$ 의 경우와 비교하여 측벽의 길이 $b=4.0L$ 의 경우, 측벽부근에서 선체에 작용하는 유체력이 일정한 값으로 작용하여 나타나는 것을 알 수 있다.

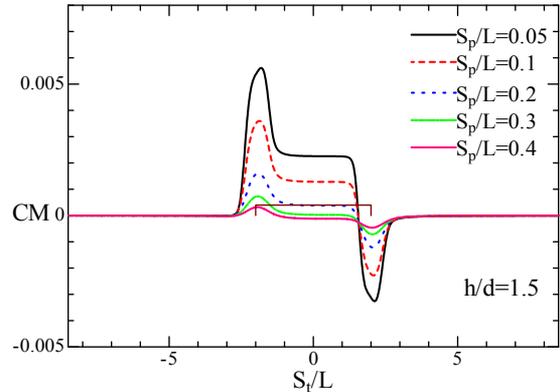


[Fig. 5] Calculated hydrodynamic moments acting on a vessel passing by the bank

[Fig. 6]과 [Fig. 7]은 선박과 방과제형상을 하고 있는 측벽과의 횡방향거리 및 측벽의 길이 b 와 h/d 를 변수로 하였을 때, 대형선박에 영향을 주는 간섭력에 대한 수치계산 결과를 나타내고 있다. [Fig. 6] 및 [Fig. 7]에서 선박과 측벽과의 횡방향거리(S_p)는 $0.05L$, $0.1L$, $0.2L$, $0.3L$ 및 $0.4L$ 로 하였고, 측벽의 종방향길이 b 는 $4.0L$ 로 하였으며, 수심(h)과 항행선박의 흘수(d)와의 비는 1.5 로 하였고, 선속(U)은 2knots 로 하였다. [Fig. 6]과 [Fig. 7]로부터 알 수 있듯이, 측벽부근에서 선박에 작용하는 유체력의 특성은 [Fig. 4] 및 [Fig. 5]와 같은 경향을 나타내고 있으나, 수심의 변화에 따라 선박에 작용하는 유체력의 특성은 정량적으로 많은 차이가 있음을 보여주고 있다.



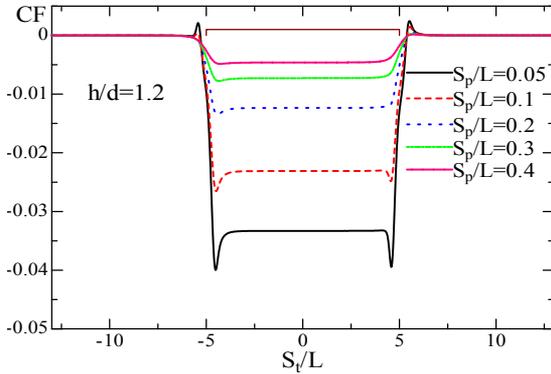
[Fig. 6] Calculated hydrodynamic forces acting on a vessel passing by the bank



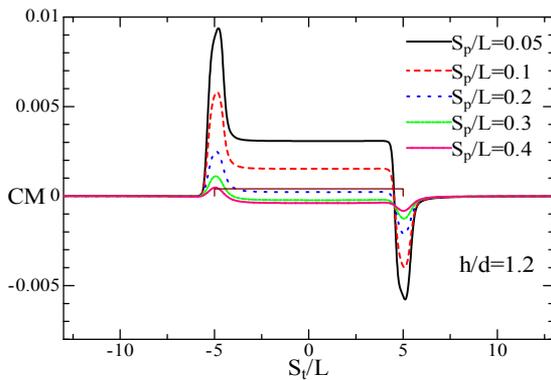
[Fig. 7] Calculated hydrodynamic moments acting on a vessel passing by the bank

[Fig. 8]과 [Fig. 9]는 선박과 방과제형상을 하고 있는 측벽과의 횡방향거리 및 측벽의 길이 b 와 h/d 를 변수로 하였을 때, 대형선박에 영향을 주는 간섭력에 대한 수치계산 결과를 나타내고 있다. [Fig. 8]과 [Fig. 9]에서 항행선박과 방과제형상의 측벽간의 횡방향거리(S_p)는 $0.05L$, $0.1L$, $0.2L$, $0.3L$ 및 $0.4L$ 로 하였고, 측벽의 종방향길이(b)는 $10.0L$ 로 가정하였으며, 수심(h)과 항행선박의 흘수(d)와의 비, $h/d=1.2$ 로 가정하였고, 선속(U)은 2knots 로 하였다. [Fig. 8] 및 [Fig. 9]로부터 알 수 있듯이, 측벽부근에서 선박에 작용하는 유체력의 특성은 앞에서 설명한 내용과 같은 경향을 나타

내고 있다. 한편, 측벽의 길이 $b=2.0L$ 및 $b=4.0L$ 의 경우와 비교하여 측벽의 길이 $b=10.0L$ 의 경우, 측벽부근에서 선체에 작용하는 유체력이 명확하게 일정한 값으로 작용하고 있음을 알 수 있다.



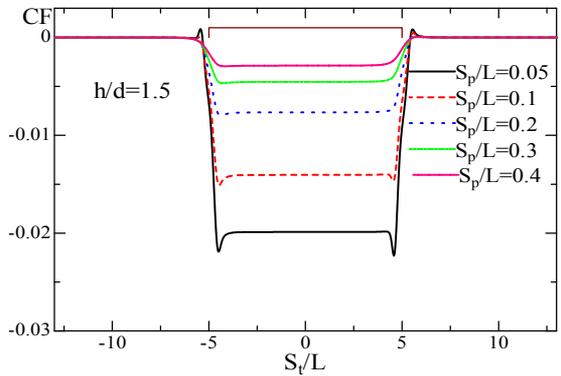
[Fig. 8] Calculated hydrodynamic forces acting on a vessel passing by the bank



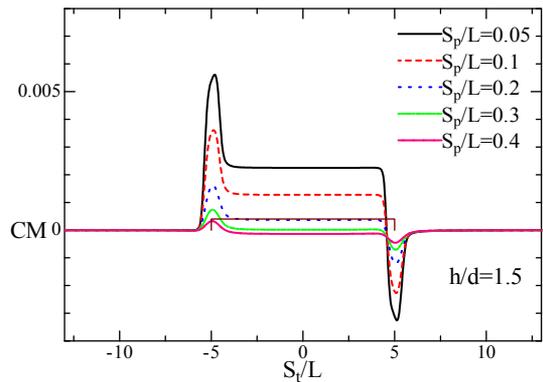
[Fig. 9] Calculated hydrodynamic moments acting on a vessel passing by the bank

[Fig. 10]과 [Fig. 11]은 선박과 방파제형상을 하고 있는 측벽과의 횡방향거리 및 측벽의 길이 b 와 h/d 를 변수로 하였을 때, 대형선박에 영향을 주는 간섭력에 대한 수치계산 결과를 나타내고 있다. [Fig. 10]과 [Fig. 11]에서 선박과 방파제형상의 측벽간의 횡방향거리(S_p)는 $0.05L$, $0.1L$, $0.2L$, $0.3L$ 및 $0.4L$ 로 하였고, 측벽의 종방향길이(b)는 $10.0L$ 로 하였으며, 수심(h)과 항행선박의 흘

수(d)와의 비, $h/d=1.5$ 로 가정하였고, 선속(U)은 $2knots$ 로 하였다. [Fig. 10]과 [Fig. 11]의 계산결과에서 보여 지듯이, 측벽부근에서 선박에 영향을 미치는 유체력의 특성은 [Fig. 8] 및 [Fig. 9]와 같은 경향을 나타내고 있으나, 수심의 변화에 따라 선박에 작용하는 유체력의 특성은 정량적으로 많은 차이가 있음을 보여주고 있다.



[Fig. 10] Calculated hydrodynamic forces acting on a vessel passing by the bank



[Fig. 11] Calculated hydrodynamic moments acting on a vessel passing by the bank

IV. 결론

이 논문에서는 저속($2knots$)으로 항행하는 대형선박이 방파제와 같은 측벽부근을 지나가는 경

우, 측벽으로 인하여 대형선박에 미치는 측벽영향(bank effect)을 파악하기 위하여 대형선박에 작용하는 간섭력(유체력)을 수치 계산하였다. 이 논문의 경우, 계산 조건으로는 방과제의 종방향길이(b), 수심(h)과 항행선박의 흘수(d)의 비(h/d) 및 항행선박과 측벽과의 횡방향 및 종방향거리를 변수로 하여 항행선박의 안전운항에 영향을 주는 측벽영향에 대하여 검토하였고, 본 연구의 계산 조건하에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 측벽의 종방향길이(b)가 길어지면 길어질수록 측벽부근에서의 선박에 작용하는 유체력(간섭력)이 일정한 값으로 작용하고 있음을 알았다.

둘째, 측벽 부근을 대형선박이 저속으로 지나갈 때, 측벽과의 횡방향거리(S_p)가 0.3L 정도 이상에서는 측벽영향 정도가 상당히 크게 약해지고 있는 것으로 수치계산 결과 나타나고 있고, 측벽과의 횡방향거리(S_p)가 0.1L 정도 이내에서는 측벽영향이 상당히 크게 나타나고 있음을 알았다.

셋째, 측벽 근방을 대형선박이 극히 낮은 속력으로 지나갈 때, 수심(h)과 항행선박의 흘수(d)와의 비가 작아지면 작아질수록 선박에 작용하는 유체력의 정량적인 변화가 급격하게 증가하고 있음을 알았다.

넷째, 측벽부근을 대형선박이 극히 낮은 속력으로 지나갈지라도 h/d의 값이 작아지면 작아질수록, 그리고 선박과 측벽과의 횡방향거리가 적어지면 적어질수록 측벽영향이 정량적으로 상당히 크게 증가하는 것을 알았다.

References

- 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. & 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.
- 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. 101~112.
- 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.
- Yasukawa, W.(2002). Ship Manoeuvring Motions in the Proximity of Bank. *Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects*. Vol.104. 41~52.
- Yeung, R. W. & Tan, W. T.(1980). Hydrodynamic Interactions of Ships with Fixed Obstacles. *Journal of Ship Research*. Vol. 24. 50~59.
- Yeung, R. W.(1978). On the Interactions of Slender Ships in Shallow Water. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 85. 143~159.

-
- Received : 14 September, 2017
 - Revised : 06 November, 2017
 - Accepted : 14 November, 2017