

반원 형상의 측벽 부근을 항행하는 4,000톤급 어업실습선에 미치는 유체력에 관한 연구

이춘기 · 류경진¹ · 이유원² · 김수형^{1*}

한국해양대학교 항해융합학부 교수, ¹부경대학교 실습선 교수, ²부경대학교 해양생산시스템관리학부 교수

A study on the hydrodynamic forces acting on a GT 4,000 tonnage fishery training vessel in the proximity of semi-circle bank wall

Chun-Ki LEE, Kyung-Jin RYU¹, Yoo-Won LEE² and Su-Hyung KIM^{1*}

Professor, Div. of Navigation Convergence Studies, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

¹*Professor, Training ship, Pukyong National University, Busan 48547, Korea*

²*Professor, Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48547, Korea*

The aging fishery training vessels from the past have mostly been decommissioned, and many universities are introducing state-of-the-art large fishery training vessels. The purpose of these training vessels is to train marine professionals and above all, safety to prevent marine accidents should be of utmost priority as many students embark on the vessel. This study estimated the impact of the hydrodynamic interaction forces acting on the model vessel (fishery training vessel) from the bank when the vessel pass near the semi-circle bank wall in various conditions through the numerical calculation, especially concerning maneuvering motions of the vessel. For estimation, variables were mainly set as the size of the semi-circle shape, the lateral distance between the bank and the model vessel, and the depth near the bank. As a result, it was estimated that, in order for the model vessel to safely pass the semi-circle bank wall at a speed of 4 knots, the water depth to the vessel draft ratio should be 1.5 or more (approximately 8 m of water depth), and the lateral distance from the semi-circle bank wall should be 0.4 times the model vessel's length (L_{pp}) or more (a distance of 34 m or more). Under these conditions, it was expected that the model vessel would pass without significantly being affected by the bank wall.

Keywords: Hydrodynamic interaction forces, Semi-circle bank wall, Fishery training vessel, Numerical calculation

서론

일반적으로 협수로와 같이 수심이 얇고 좁은 해역에

서의 선박 조종 운동 특성은 수심이 충분히 깊고 넓은 해역에서의 운동 특성과는 확연한 차이가 있다. 특히,

선박과 선박 간 혹은 방파제와 같이 다양한 형상을 가진 측벽에 근접하여 항행할 때 발생하는 유체력은 선박의 조종 운동 형태를 갑작스럽게 변화시키는 원인으로 작용할 수 있다. 한편, 이러한 유체력으로부터 기인하는 선박의 조종 운동 특성들은 조타실에 구비된 본선의 조종 특성을 기록한 책자(manuevering booklet)에는 상세히 기재되지 않기 때문에 때때로 조종자들이 매우 곤란한 상황에 처해질 수 있다. 최근에는 길이 400 m, 총톤수 220,900 ton의 컨테이너 선박 Ever given호가 수에즈 운하를 통과하던 중 좌초되는 사고가 있었으며, Baric et al. (2021)은 이 사고에 측벽의 효과가 상당한 영향을 미쳤을 것으로 추정하였다.

상기한 선박 간 혹은 측벽에 근접하여 항행하는 경우 나타나는 선박의 조종 운동 특성 변화의 대표적인 원인은 근접 거리, 형상, 크기 등을 요인으로 하여 다양하게 변화하는 유체력에 기인한 간섭력(hydrodynamic interaction forces)과 수심과 선박 흘수와와의 비(이하 H/d 라 한다.)에 따라 발생하는 천수(shallow water)의 영향이 있다. 이러한 현상에 따른 유체력의 특성 분석은 선박 해양사고 발생을 예방하기 위한 대단히 중요한 과정이지만, 실선 실험 연구를 통하여 도출하기에는 많은 어려움이 따르기에 수치 계산을 통한 추정이 상당히 중요한 역할을 하고 있다.

현재까지 대형 선박이 협수로 혹은 얇은 수심 등의 제한된 수역을 항행하는 과정에서 발생하는 유체역학적 간섭력에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. Newman (1965;1969;1972)은 세장체 이론(slender body theory)을 발전시키고, 그것을 바탕으로 선박과 측벽 사이에서 발생하는 힘과 모멘트에 관한 연구를 수행하였고, Yeung and Tan (1980), Kijima et al. (1991), Yasukawa (2002a)는 선박이 측벽 근처를 항행할 때 발생하는 유체역학적 힘과 모멘트에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Kijima et al. (1991)과 Yasukawa (1991;2002b)는 선박과 선박 간 혹은 선박이 다양한 폭을 가진 수로를 항행할 때 발생하는 유체역학적 간섭력에 관한 연구를 수행하였다. 국내에서는 Lee and Kang (2003;2004)의 외력의 영향이 고려된 제한 수역에서 발생하는 선박 간의 유체역학적 간섭력을 수치 계산을 통하여 추정한 연구, Kim and Lee (2019)의 항내와 같은 얇은 수심에서 선박의 선회성능 특성을 수치 계산을 통하여 추정한 연구, Lee et al.

(2023)의 수심에 따라 달라지는 선박의 조종 성능 특성을 추정한 연구 등이 있다.

최근 각 수산계열 대학 및 관련 기관에서 건조한 어업 실습선들은 크기가 월등히 커지고, 길이가 길어졌다. 또한, 실습의 특성상 섬 부근 얇은 수심에서의 항행과 입·출항 횡수가 잦은 편이다(Lee et al., 2023). 따라서, 선박이 얇은 수심과 같은 제한 수역이나, 방파제와 같은 측벽 부근을 항행할 시 발생하는 유체역학적 힘과 모멘트의 영향을 확인하여, 최소 이안거리 및 그에 따른 조종 운동 특성을 파악할 필요가 있다.

이와 같은 배경으로부터 이 연구에서는 부경대학교 어업실습선(이하 실험선이라 한다.)이 반원 형상을 가진 측벽 부근을 항행할 때 발생하는 유체역학적 힘과 모멘트를 반원 형상의 크기별, 측벽과의 거리별, 측벽 부근의 수심별로 분류하였고, 각각에 대한 수치 계산을 통하여 추정 분석하였다.

재료 및 방법

수학적

실험선이 반원 형상을 가진 측벽 부근을 선속 U 로 측벽과 평행하게 직진한다고 가정하였을 때, 좌표계는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 이때, $o-xy$ 는 공간 고정 좌표계를, $o_1-x_1y_1$ 는 선체의 중심을 원점 o_1 에 고정시킨 선체 고정 좌표계를 나타내며, 선체 중심으로부터 반원 형상까지의 종방향 거리를 S_T , 선체의 현측으로부터 반원 형상까지의 횡방향 거리를 S_p 로 표현할 수 있다.

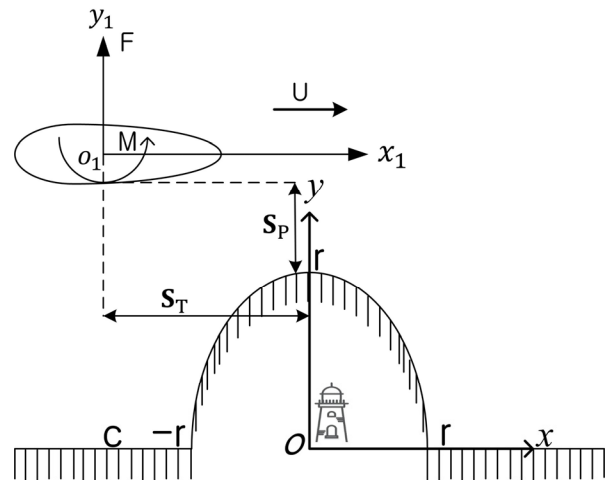


Fig. 1. Coordinate systems.

프루드 수(Froude number)가 충분히 작다고 가정하면, 조파의 영향을 무시할 수 있기 때문에 수면을 강체벽으로 가정할 수 있다. 이때, 선체를 double body로 가정하면, 선체 운동에 의한 속도포텐셜 $\phi(x, y, z; t)$ 는 식 (1)의 연속 조건을 만족할 수 있어야 한다(Lee et al., 2015).

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

또한, 속도포텐셜은 식 (2) ~ (5)의 경계 조건을 만족할 수 있어야 한다.

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

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

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

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

여기서, C 는 반원 형상의 측벽 표면, h 는 수심, B 는 선체 표면을 나타내고 있다. 그리고 \vec{n} 은 측벽 표면에 대한 내측 방향으로의 단위 법선 벡터를 나타내며, n_x 는 항행 중인 선박의 선체 표면에 대한 내측 방향으로의 단위 법선 벡터 \vec{n} 의 x 축 방향 성분을 나타낸다. 또한, 속도포텐셜 ϕ 가 무한원방에서 유속이 0 (zero)인 조건을 식 (5)에 나타내고 있다.

한편, 상기한 경계 조건을 만족시키는 속도포텐셜을 도출하는 것은 간단하지 않기 때문에 이 연구에서는 문제를 간단하게 하고자 선체 주변의 유동장을 내부 영역(inner region)과 외부 영역(outer region)으로 나누어 수치 계산을 수행하였다. 먼저, 선체를 세장체(slender body)로 가정하여, slenderness parameter($\epsilon, \ll 1$)를 이용하였다. 즉, 선체 길이 L 에 대한 선폭 B , 흘수 d , 수심 h 은 ϵ 의 차수(order), 선체의 현측으로부터 반원 형상의 측면까지 횡방향 거리를 S_P 를 선체 길이 L 과 같은 차수로 가정하였을 때, 선체 고정 좌표계에 있어 식 (6)에 나타난 차수로 되는 영역을 선체의 내부 영역, 식 (7)에 나타난 차수로 되는 영역을 외부 영역으로 정의할 수 있다.

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

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

이로써 각 영역에 있어 경계 조건을 만족하는 2차원 속도포텐셜을 구하여 문제를 보다 간단하게 해결할 수 있게 된다. 한편, 내부 영역과 외부 영역이 겹치는 부분에서의 속도포텐셜을 서로 같아야 한다. 따라서 내부 영역에서의 외부 극한(outer limit)식과 외부 영역에서의 내부 극한(inner limit) 식에 대해 서로 같은 성질을 가지는 항은 같다고 두고, matching의 조건으로 계산하면, 와류의 강도를 의미하는 γ 에 대한 기본 적분방정식을 식 (8)과 같이 구할 수 있다(Kijima et al., 1991).

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

여기서, $C(x_1)$ 은 blockage coefficient를 의미하며, Taylor (1973)에 의해 구해진 단형 단면에 대한 근사식을 이용한다. $H^{(\gamma)}$ 와 $H^{(\sigma)}$ 는 측벽의 존재로 인하여 부가되는 함수를 의미한다. 한편, γ 에 대해서는 식 (9)의 조건을 만족할 필요가 있다.

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

단, Γ 는 반원 형상의 측벽 부근을 항행하는 선박 주변의 순환을 나타낸다.

이와 같이 γ 에 대한 적분방정식을 해결하여 와류의 분포를 도출하면, 베르누이 정리를 이용하여 선체 중심선 상에 대한 압력의 차(ΔP)를 얻을 수 있으며, 식 (10)을 통하여 측벽 부근을 측벽과 나란하게 항행하는 실험선에 작용하는 횡력(F)과 모멘트(M)를 구할 수 있다.

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

이때, 횡력(F)과 모멘트(M)는 아래의 식 (11)을 이용하여 무차원화할 수 있다.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho L d U^2}$$

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

실험선

서론에서 기술한 바와 같이, 실험선은 부경대학교 4,000톤급 어업실습선이며, 주요한 요목과 정면도는 Table 1과 Fig. 2와 같다.

Table 1. Main particulars of model vessel

Name	Baek-Kyung	
Type	Stern trawler	
Displacement (∇ , m^3)	4,232	
Hull	Length (L_{pp} , m)	85.0
	Breadth (B , m)	15.4
	Depth (d , m)	5.3
	Block coefficient, C_b	0.592
Propeller	Rotation	Right
	No. of blades, ea	4
Rudder	Diameter, m	3.8
	Area, m^2	7.631
	Max. angle, $deg.$	45.0

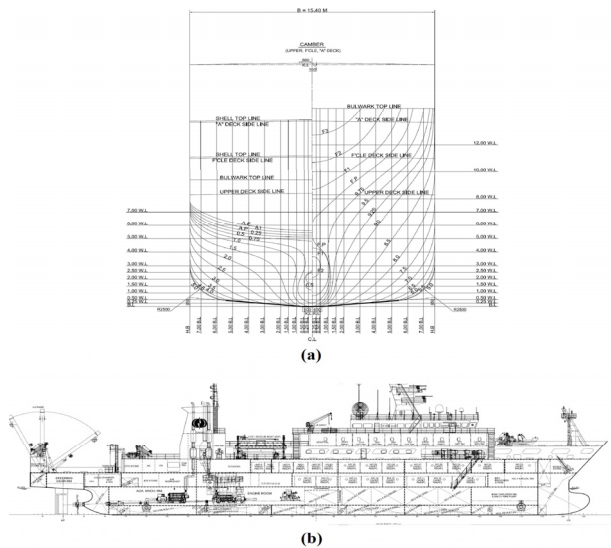


Fig. 2. Body plan (a) and general arrangement (b) of model vessel.

추정 조건 및 방법

이 연구에서는 실험선이 반원 형상의 측벽을 평행하

게 항행하는 상황을 가정하였으며, 측벽 부근의 수심, 반원 형상의 크기, 측벽과의 근접 거리 등 변화를 주어 실험선과 측벽 사이의 유체역학적 힘과 모멘트를 추정하였다. 이때, 선속은 4 knots, 항행 중 선수 동요는 없는 것(yaw rate = 0)으로 가정하였고, 거리는 선체 길이 L (L_{pp})로 표현하였다. 한편, 유체역학적 힘과 모멘트 계산은 프로그래밍 언어 중 하나인 ‘포트란 90 (Fortran Power Station 4.0)’을 이용하였다. 이는 수치 계산에 특화되어 있는 언어로 알려져 있으며, 복잡한 수치 계산을 원활하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 포트란 프로그램을 통하여 계산된 수치는 스프레드시트(Microsoft Excel 2019)에 옮겨 가시화하였고, 수치 계산된 결과와 비교하여 분석하였다.

결과 및 고찰

반원 형상의 크기에 따른 힘과 모멘트

실험선의 현측으로부터 반원 형상까지의 횡방향 거리를 0.1 L, H/d를 1.5로 고정하였고, 반원 형상의 반지름을 35 m, 50 m, 70 m로 변화시켰을 때 발생하는 유체역학적 힘과 모멘트의 크기를 계산하였다(Fig. 3~4).

Fig. 3은 실험선과 측벽 사이에서 발생하는 유체역학적 힘을 나타내고 있다. 실험선에 작용하는 유체역학적 힘은 반원 형상의 크기에 비례하여 미소하게 커지고 있으며, 힘의 정량적인 차이는 미소하게 있었으나, 정성적으로는 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 실험선이 반원 형상에 접근하기 $S_T/L = -2$ 부근에서는 측벽에 대한 미소한 흡인력만 작용하고 있었으나, $S_T/L = -1$ 이후부터 흡인력의 작용이 급격히 증가하는 형태를 보이고 있다. 이러한 흡인력의 작용은 실험선이 반원 형상의 정점($S_T/L = 0$)을 지나고 난 후에 최고치를 나타내며, 이후 급격히 감소하는 형태를 보이다가 다시 미소해지면서 측벽을 통과하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4는 실험선과 측벽 사이에서 발생하는 유체역학적 모멘트를 나타내고 있다. 유체역학적 힘과 마찬가지로 반원 형상의 크기에 비례하여 정량적 차이는 보였으나, 정성적으로는 유사한 경향을 나타내었다.

실험선이 $S_T/L = -2$ 부근에서는 측벽에 대한 유체역학적 모멘트가 거의 작용하지 않다가, $S_T/L = -1$ 부근에 접근하면서 반발 모멘트가 급격히 작용하기 시작하여, $S_T/L = -0.5$ 부근에서 최고치를 나타내고 있

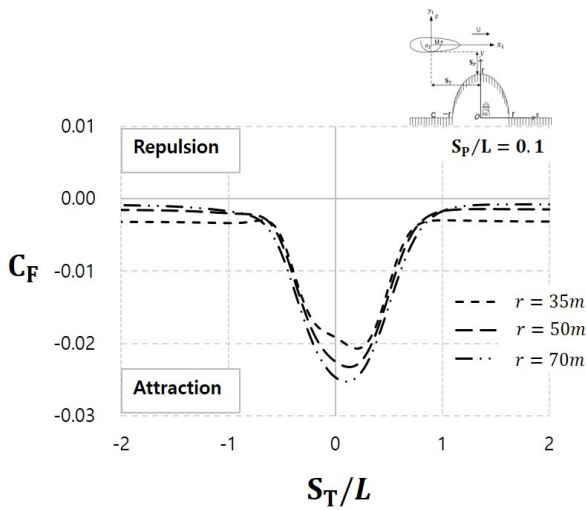


Fig. 3. Variation of hydrodynamic forces with semi-circle bank wall size.

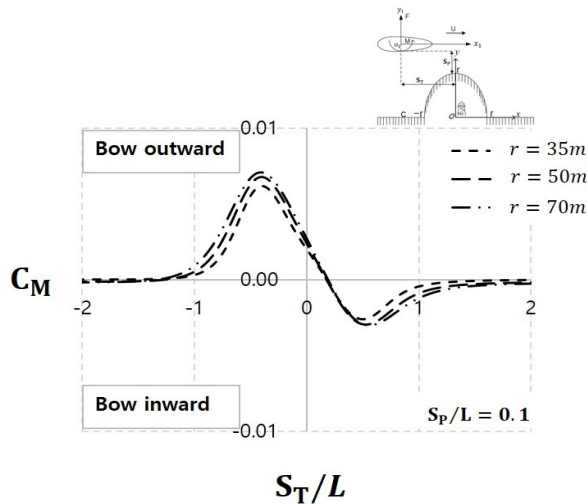


Fig. 4. Variation of hydrodynamic moments with semi-circle bank wall size.

음을 확인할 수 있다. 여기서, $S_T/L = 0.5$ 는 42.5 m이므로, 실험선은 반원 형상이 나타나기 전인 $S_T/L = -1$ 부근에서부터 유체역학적 반발 모멘트에 의하여 선수가 측벽의 바깥쪽으로 동요하기 시작하며, 반원 형상이 나타나는 지점 부근에서 반발 모멘트 작용이 최고치에 이르고 있음을 확인할 수 있다.

이후, 반발 모멘트의 작용은 줄어들기 시작하며, 반원 형상의 정점($S_T/L = 0$)을 지난 후에는 흡인 모멘트의 작용으로 인하여 선수가 측벽 방향으로 동요하기 시작하여 $S_T/L = -0.5$ 부근에서 최고치를 나타내다가,

실험선이 반원 형상으로부터 멀어짐에 따라 유체역학적 모멘트의 작용은 미소해짐을 확인할 수 있다.

측벽과의 횡방향 거리에 따른 간섭력 변화

반원 형상의 반지름을 50 m, H/d 를 1.5로 고정하였고, 실험선의 현측으로부터 반원 형상까지의 횡방향 거리 (S_P/L)를 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 변화시켰을 때 발생하는 유체역학적 힘과 모멘트의 크기를 계산하였다(Fig. 5~6).

Fig. 5은 실험선과 측벽 사이에서 발생하는 유체역학적 힘을 나타내고 있다. $S_P/L = 0.05$ 의 조건을 제외하고는, 전반적으로 실험선과 반원 형상까지의 횡방향 거리가 가까워짐에 따라 작용하는 유체역학적 힘은 비례하여 커지는 정량적인 차이는 보였으나, 정성적으로는 유사한 경향을 나타내고 있다. 실험선 $S_T/L = -2$ 부근에서부터 측벽에 의한 미소한 흡인력의 영향을 받고 있었으며, 반원 형상이 시작되는 $S_T/L = -0.5$ 에 접근하기 직전부터 흡인력의 작용은 급격히 증가하는 형태를 보이고 있다. 이러한 흡인력의 작용은 실험선이 반원 형상의 정점($S_T/L = 0$)을 지나고 난 후에 최고치를 나타내며, 이후 급격히 감소하는 형태를 보이다가 $S_T/L = 1$ 이후 다시 미소해지면서 측벽을 통과하는 경향을 나타내고 있다. $S_P/L = 0.4$ 에서는 측벽을 지날 때 작용하는 힘의 크기와 유사하게 나타나는 것으로 보아, 횡방향으로 이 거리보다 멀어지게 되면 유체역학적 힘은 거의 작용하지 않을 것으로 추정되었다.

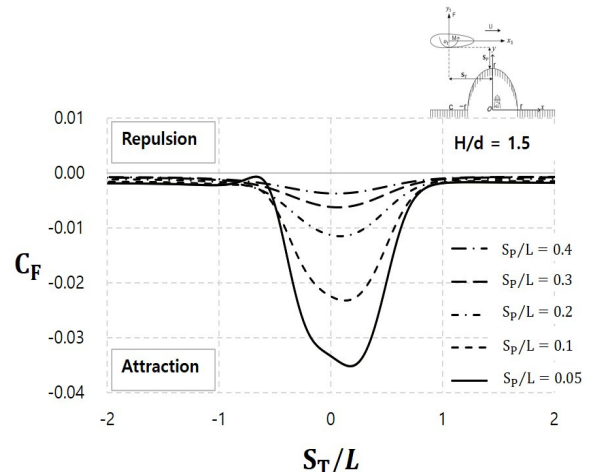


Fig. 5. Variation of hydrodynamic forces with distance between model vessel and semi-circle bank wall.

한편, $S_P/L = 0.05$ 의 경우, 다른 조건의 결과와는 정성적으로 미소한 차이를 보인다. 가령, $S_T/L = -0.5$ 부근 다른 조건들에서 확인되는 흡인력과 달리 미소한 반발력이 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 실험선은 반원 형상을 가진 측벽을 $S_P/L = 0.1$ 보다 가까운 거리로 항행하게 되면, 유체역학적 힘의 정성적 변화가 발생하여 조종 성능 특성이 달라질 수 있음을 고려하여 항행할 수 있다. 여기서, $S_P/L = 0.1$ 은 8.5 m이다.

Fig. 6은 실험선과 측벽 사이에서 발생하는 유체역학적 모멘트를 나타내고 있다. 유체역학적 힘과 마찬가지로 반원 형상과의 거리가 가까워짐에 따라 힘의 크기가 커졌으며, 정량적 차이는 있으나, 정성적으로는 유사한 경향을 나타내었다.

$S_T/L = -2$ 부근에서는 측벽에 대한 유체역학적 모멘트가 거의 작용하지 않다가, $S_T/L = -1$ 부근에 접근하면서 반발 모멘트가 급격히 작용하기 시작하여, $S_T/L = -0.5$ 부근에서 최고치를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이때, Fig. 4와 마찬가지로, 반원 형상이 나타나기 전인 $S_T/L = -1$ 부근에서부터 선수가 측벽의 바깥쪽으로 동요하기 시작하며, 반원 형상이 나타나는 지점 부근에서 반발 모멘트의 작용이 최고치에 이르고 있음을 확인할 수 있다.

이후, 반발 모멘트의 작용은 줄어들기 시작하며, 반원 형상의 정점($S_T/L = 0$)을 지난 후에는 흡인 모멘트의

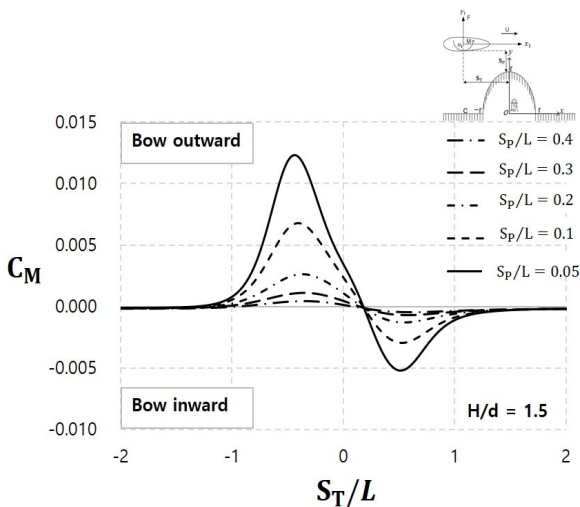


Fig. 6. Variation of hydrodynamic moments with distance between model vessel and semi-circle bank wall.

작용으로 인하여 선수가 측벽 방향으로 동요하기 시작하며 $S_T/L = 0.5$ 부근에서 최고치를 나타내다가, 실험선이 반원 형상으로부터 멀어짐에 따라 반발 모멘트의 작용은 미소해짐을 확인할 수 있다.

한편, 유체역학적 모멘트도 힘과 마찬가지로, $S_P/L = 0.4$ 에서는 거의 발생하지 않으며, 이러한 결과로부터 실험선이 반원 형상의 측벽을 지날 때, 이 거리보다 멀어지면 유체역학적 힘과 모멘트는 거의 작용하지 않는 것으로 추정할 수 있다.

측벽 주변 수심에 따른 간섭력 변화

반원 형상의 반지름을 50 m, 실험선의 현측으로부터 반원 형상까지의 $S_P/L = 0.1$ 로 고정하였고, H/d 를 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5로 변화시켰을 때 발생하는 유체역학적 힘과 모멘트의 크기를 계산하였다(Fig. 7~8).

Fig. 7은 실험선과 측벽 사이에서 발생하는 유체역학적 힘을 나타내고 있다. 측벽 부근의 수심이 얇아짐에 따라 그에 반비례하여 실험선에 작용하는 유체역학적 힘은 커지면서 정량적인 차이는 있었으나, 정성적으로는 유사한 경향을 나타내고 있다. $S_T/L = -2$ 부근에서부터 측벽의 존재로부터 발생하는 미소한 흡인력이 작용하고 있으며, 반원 형상이 시작되는 $S_T/L = -0.5$ 부근에 도달하자 흡인력의 크기는 급격히 증가하는 형태를 보이고 있다. 이러한 흡인력의 작용은 실험선이 반원 형상의 정점($S_T/L = 0$)을 지나고 난 후에 최고치를 나타내며, 이후 줄어들기 시작하여 반원 형상이 끝나

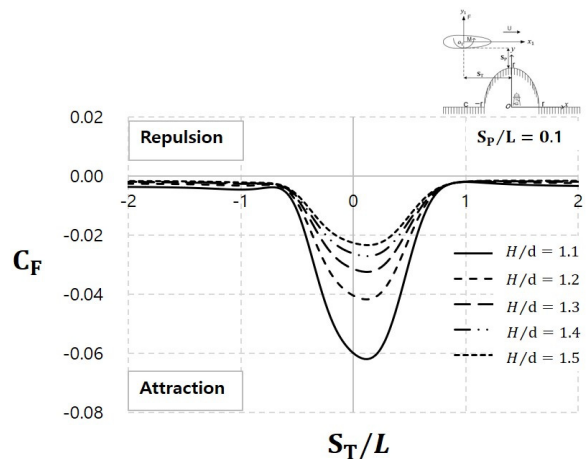


Fig. 7. Variation of hydrodynamic forces with water depth.

는 지점 부근인 $S_T/L = 0.5$ 이후부터는 측벽으로부터 발생하는 흡인력만 미소하게 작용하고 있다.

그러나, Fig. 3과 Fig. 5와 비교하였을 때, 모든 조건 (H/d 1.1~1.5)에서 발생하는 유체역학적 힘은 정량적으로 상당히 크게 나타났다. 이는 천수(얕은 수심)의 영향이 실험선에 상당히 크게 작용한다고 추정할 수 있다. 단, 천수는 H/d 가 1.5 미만인 경우를 말한다(ITTC, 2003).

이 결과로부터 실험선이 측벽을 지날 때, 충분한 수심을 확보하는 것이 측벽으로부터 작용하는 간섭력의 영향을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 실험선과 측벽 사이에서 발생하는 유체역학적 모멘트를 나타내고 있다. 유체역학적 힘과 마찬가지로 측벽 부근의 수심이 얕을수록 그에 반비례하여 힘의 크기는 커지는 정량적 차이는 있으나, 정성적으로는 유사한 경향을 나타내었다.

$S_T/L = -2$ 부근에서는 측벽에 대한 반발 모멘트가 미소하게 작용하다가, 반원 형상에 가까워지는 $S_T/L = -1$ 에 근접하면서 반발 모멘트의 작용이 급격히 커지기 시작하여, $S_T/L = -0.5$ 부근에서 최고치를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이 과정에서 실험선의 선수는 반발 모멘트에 의해 측벽의 바깥쪽으로 동요하기 시작하며, 반원 형상이 나타나는 지점 부근에서 반발 모멘트의 작용이 최고치에 이르고 있음을 확인할 수 있다.

이후, 반발 모멘트의 작용은 줄어들기 시작하여 흡인 모멘트로 변한다. 반원 형상의 정점($S_T/L = 0$)을 지난 후에는 흡인 모멘트의 크기가 점점 커지면서 선수가 측

벽 방향으로 동요하기 시작하며, $S_T/L = 0.5$ 부근에서 최고치를 나타낸다.

실험선이 반원 형상에서 멀어짐에 따라 반발 모멘트는 줄어드는 경향을 보이지만, $S_T/L = 1$ 이후에도 계속적으로 작용하며, $S_T/L = 2$ 이상 멀어졌을 때 비로소 미소해짐을 확인할 수 있다.

결론

이 연구는 선박 조종 운동과 관련하여, 어업실습선이 반원 형상의 측벽 부근을 지날 때 측벽으로부터 작용하는 간섭력이 선박에 미치는 영향을 여러 조건의 상황을 가정하고, 수치 계산을 통하여 추정하였다.

측벽과 실험선 사이에서 작용하는 유체역학적 간섭력을 추정된 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 반원 형상의 크기에 따른 추정 결과, 실험선에 작용하는 유체역학적 힘과 모멘트의 크기는 정량적으로는 차이를 보였으나, 정성적으로는 유사한 경향을 나타내었다. 한편, 정량적인 차이 또한 미소하였으며, 이는 제시하였던 반원 형상의 크기(35 m, 50 m, 70 m) 변화가 실험선에 있어 특별히 다른 유체역학적 간섭력의 경향 변화를 발생시키지 않은 것으로 판단된다. 즉, 방파제 형상이 이 연구에서 제시하였던 크기보다 훨씬 크거나 작지 않는 한 실험선에 작용하는 간섭력의 정성적 경향은 유사할 것으로 판단된다. 물론, 반원 형상의 크기를 충분히 작게 혹은 크게 설정할 수 있었으나, 이 연구는 실제 실험선의 항행 조건들을 가정하였기에 그러한 가정은 생략하였다.

둘째, 측벽과의 거리에 따른 추정 결과, 반원 형상과의 횡방향 거리 $S_P/L = 0.05$ 로 항과하는 경우는 나머지 조건의 결과와는 약간 다른 정성적 경향을 나타냈다. 가령, $S_T/L = 0.5$ 일 때, 다른 조건의 결과에서 흡인력이 작용하는 것으로 확인되지만, $S_P/L = 0.05$ 에서는 미소한 반발력이 발생하였다. 이러한 결과로부터 실험선이 측벽을 항과할 때, $S_P/L = 0.1$ 보다 가까워지면, 조종 성능 특성 변화가 발생할 수 있음을 참고할 수 있으며, 이는 선박 안전 운항에 도움이 될 것이다.

셋째, 측벽 부근의 수심에 따른 추정 결과, 실험선이 얕은 수심에서 측벽을 항과할 때 발생하는 유체역학적 간섭력은 측벽의 크기 혹은 측벽과의 거리보다 상당히

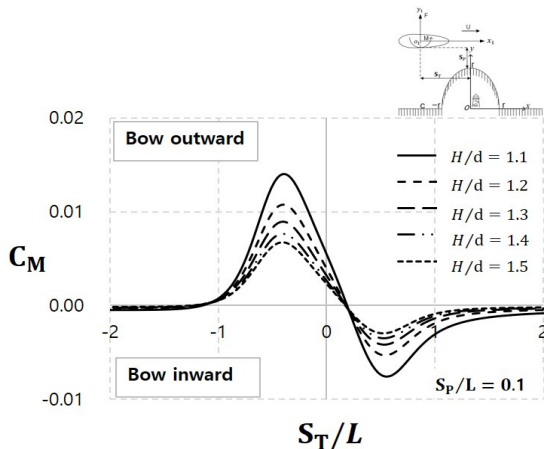


Fig. 8. Variation of hydrodynamic moments with water depth.

크게 작용함을 확인할 수 있었다. 이는 실험선이 천수의 영향을 많이 받는 것으로 판단할 수 있으며, 측벽으로부터 받는 간섭력을 줄이기 위해서는 충분한 수심을 확보하여 항행하는 것이 안전 운항에 도움이 될 것으로 사료된다.

결론적으로 실험선의 안전 운항을 선박 조종 운동의 관점에서 보았을 때, 실험선이 반원 형상의 방파제를 가진 측벽을 4 knots의 속력으로 안전하게 항과하기 위해서는 H/d 1.5(수심 약 8 m) 이상, 반원 형상의 방파제와의 횡방향 거리 $S_p/L = 0.4$ (거리 34 m) 이상이 되어야 측벽의 영향을 최소화하여 항행할 수 있을 것으로 추정된다.

향후 이 연구는 수조 실험을 통하여 신뢰성을 검증할 예정이다. 더불어 이 연구의 결과는 실험선의 안전 항해에 큰 도움이 될 것이며, 조선자들이 방파제 등을 통항할 때 참고할 수 있는 지표가 될 것으로 기대한다.

References

- Baric M, Mohovic R, Mohovic D and Pavic V. 2021. The simulation of sloped bank effect influence on container ship trajectory. *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 1283. <https://doi.org/10.3390/jmse9111283>.
- International Towing Tank Conference. 2003. Manoeuvring in shallow and confined water. *Proceedings 23rd ITTC* 1, 201-209.
- Kijima K. 1991. The interaction effects between two ships in the proximity of bank wall. *Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects*, 81.
- Kim SH and Lee CK. 2019. A study on the turning-motion of T/S SAEBADA in shallow water. *J. Korean Soc. Fish. Ocean Technol* 55, 273-283. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.3.273>.
- Lee CK and Kang IK. 2003. On the interaction effects between ships in confined water including the effect of wind and current. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 39, 112-119.
- Lee CK and Kang IK. 2004. A study on the hydrodynamic interaction forces between ship and bank wall in the proximity of bank. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 40, 73-77.
- Lee CK, Moon SB, Oh JS and Lee SM. 2015. Numerical analysis for hydrodynamic interaction effects between vessel and semi-circle bank wall. *Int J Nav Archit Ocean Eng* 7, 691-698. <https://doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0048>.
- Lee CK, Lee YW, Ryu KJ and Kim SH. 2023. Estimation of maneuvering characteristic of training ship Baek-Kyung according to water depth. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 59, 263-270. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2023.59.3.263>.
- Newman JN. 1965. The force and moment on a slender body of revolution moving near a wall (No. Report 2127). *David Taylor Model Basin*, 1-10.
- Newman JN. 1969. Lateral motion of a slender body between two parallel walls. *Journal of Fluid Mechanics* 39, 97-115. <https://doi.org/10.1017/S0022112069002060>.
- Newman JN. 1972. Paper 6. Some Theories for ship manoeuvring. *Journal of Mechanical Engineering Science* 14, 34-42. https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1972_014_061_02.
- Yeung RW and Tan WT. 1980. Hydrodynamic interactions of ships with fixed obstacles. *Journal of ship research* 24, 50-59.
- Yasukawa H. 1991. Bank effect on ship maneuverability in a channel with varying width. *Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects*, 81, 85-100. https://doi.org/10.14856/wjsna.81.0_85.
- Yasukawa H. 2002a. Ship Maneuvering motions in the proximity of bank. *Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects* 104, 41-52.
- Yasukawa H. 2002b. Yasukawa, ship manoeuvring motions between two ships navigating in the proximity. *Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects* 105, 43-54.