한국항해항만학회지 제38권 제1호
*J. Navig. Port Res.* Vol. 38, No. 1 : 19-27, February 2014 (ISSN:1598-5725(Print)/ISSN:2093-8470(Online))
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2014.38.1.19

# 천수 및 수로 운항 시 선박의 측벽효과

박동우* · † 최희종 · 백광준**

*동명대학교 조선해양공학과 교수, † 전남대학교 조선해양공학과 교수, **삼성중공업(주) 조선해양연구소

# Bank Effect of a Ship Operating in a Shallow Water and Channel

*Dong-Woo Park* · † Hee-Jong Choi · Kwang-Jun Paik***

** Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea*
*† Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea*
*** Samsung Ship Model Basin(SSMB), Samsung Heavy Industries, Daejeon, 305-739, Korea*

**요 약** : 선박이 천수 및 수로를 운항하는 경우, 바닥과 측벽의 영향으로 인해 선체침하 및 비대칭적인 힘이 선체 주위에 발생하여 바닥이나 다른 선박 혹은 수로의 벽에 충돌하는 현상이 발생한다. 특히, 수로가 많은 유럽이나 북미를 운항하는 해운회사와 항해사들은 선박의 충돌을 방지하기 위해서 중요한 문제로 다루고 있다. 본 연구에서는 선박의 안전한 항해를 위해 수치해석을 이용하여 선박과 수로의 벽 사이에 발생하는 유체역학적 힘인 횡력(Sway Force)과 선회 모멘트(Yaw Moment)를 정성적으로 추정하고자 하였다. 천수와 측벽효과(Bank Effect)를 해석할 수 있는 프로그램을 개발하여 크기가 다른 원유 운반선 2척에 대하여 선속, 수심 그리고 선박과 측벽 사이 거리의 변화에 따른 다양한 해석을 수행하였다. 계산된 결과는 시험 결과 및 기 발표된 수치해석 결과와 비교하였다.

**핵심용어** : 천수, 횡력, 횡 모멘트, 측벽효과

**Abstract** : *When a ship operates in a shallow water and channel, the hull sinkage and asymmetrical force generated around the ship by the influence of sea bottom and bank walls are caused collision with sea bottom, other ships or the bank itself. Especially, the shipping company and pilots navigating the area of Europe and North America with many channels are deal with it as a important matter to prevent collision. In this paper, hydrodynamic force generated between the ship and bank using the numerical analysis for the safe navigation of ship, that is, sway force and yaw moment should be presumed qualitatively. It makes a program for fluid analysis of the shallow water and bank effect. Analyses are carried out for three kind of parameter, that is, ship's speed, water depth and ship-bank distance for crude oil carriers. The numerical analysis results are compared with results of the experiments and the previous published papers.*

**Key words** : *Shallow water, Sway force, Yaw moment, Bank effect*

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 필요성

세계 무역 교역량의 증가로 인해 선박의 대형화가 되면서 대형선박이 항구에 접안하는 경우 또는 수로를 통과하는 경우가 많아지게 되었다. 이런 상황에서 선박을 조종할 때, 경험이 많은 선장이나 항해사들은 수로의 벽이 선박의 조종성능에 영향을 준다는 것을 잘 알고 있다. 만약, 이러한 현상을 정확하게 파악하지 못하면 항해 중에 다른 선박이나 수로의 벽에 부딪치는 충돌의 원인이 될 수 있다.

이와 같이 부두나 수로의 벽에 가깝게 붙어서 운항하는 경우, 선박과 수로의 벽 사이에는 유체역학적으로 상호 작용하는 힘이 발생되는데 이를 측벽효과라고 한다. 이러한 현상은 선박이 서로 근접하여 항해하는 경우에도 나타난다. 따라서, 선박의 안전한 항해를 위해 선박에 작용하는 유체역학적 힘인 횡력과 선회 모멘트를 파악한다면, 선박의 조종성 예측과 수로 설계 시 수로의 최적화 관점에서 그 이용 가치는 있다.

특히, 유럽이나 북미에서는 육상에서의 물동량 증가로 원료 또는 제품수송에 따르는 물류비용의 증가가 가속되고 있는 가운데, 보다 효율적이고 물류 비용의 절감을 위하여 연근해 및 수로를 통해 운항하는 선박의 이용이 점차 확대되고 있다. 그러나, 연근해 및 수로를 통해 운항하는 선박의 경우는 대양에서 항해하는 선박에 비하여 흘수 및 운항 속도 등 여러 가지 측벽에서 제한을 받게 된다. 게다가 최근에는 수로를 통한 선박의 통행량이 증가되고, 선박의 크기가 커짐으로 인해 수로의 벽과 선박 사이의 거리적 여유가 점점 줄어들고 있다.

† Corresponding author : 정회원, choihj@chonnam.ac.kr 061) 659-7154
* 정회원, dwpark@tu.ac.kr 051) 629-1654
** 정회원, k.j.paik@samsung.com, 042) 865-4329

### 1.2 연구 동향

천수 영역에서 선박의 특성들에 대하여 여러 연구가 수행되어 왔다. Tuck et al.(1970) 과 Tuck(1978)는 천수에서 얇은 배의 움직임에 관한 연구를 위하여 천수에서의 상하동요(heave), 종동요(pitch), 부가질량 및 댐핑(damping)계수 등을 계산하여 천수에서의 선박 자유운동에 관한 연구의 기초를 마련하였다. Millward(1984, 1989)는 다양한 모형선 실험을 바탕으로 수심에 따른 형상계수의 변화를 예측할 수 있는 수식을 제시하였다. Norrbin(1970, 1974)은 유체역학적 힘은 수로 벽의 존재에 따라 영향을 받는다는 것을 시험을 통해 보여주었다. 시험 결과는 선박이 수로의 벽 쪽으로 끌려가는 힘 즉, 흡인력(Suction force)과 선박의 선수가 수로 벽으로부터 멀어지는 Bow-away moment만 발생한다는 것을 보여 주었으며, 횡력과 선회 모멘트는 선속의 제곱에 비례한다고 결론을 내렸다.

Ch'ng(1991, 1993)은 선형(Hull form), 수심(Water depth), 선속(Ship speed), 선박과 수로 벽사이의 거리(Ship-bank distance), 수로 벽의 기울기(Bank slope) 그리고 프로펠러의 회전수가 변할 때, 선박의 조종 성능에 대해 조사 하였다.

Li et al.(2001)은 세 가지 종류의 선박에 대하여 극도로 얕은 물에서 수로 측벽의 영향과 수로 벽에 근접한 상황에서 수로 측벽의 영향에 대하여 모형시험을 수행하였다. 그 결과, 원유운반선선에 대해서는 h/T가 1.10 근처에서 횡력과 선회 모멘트가 선박과 측벽 간 흡인력에서 반발력(Repulsion force)으로 급격하게 변한다는 결론을 내렸다. 그리고, 이와 같은 상황에서 Bernoulli wave(Li et al., 2001)가 증가되고 지배적이라는 것을 발견하였다. Ohmori(1998)는 FVM(Finite Volume Method)을 사용하여 천수에서 Steady drift motion과 Turning motion을 ESSO OSAKA Tanker선에 적용하여 점성 유동을 계산하였다. Berth et al.(1998)은 선체를 Rectangular flat wing으로 대치하고 상용 프로그램인 FLUENT을 이용하여 점성 코드를 사용하여 천수 상황에서 ESSO OSAKA 원유운반선을 계산하였다.

Miao et al.(2003)은 Dawson's method(1977)를 기본으로 하여 선체 표면, 수로의 바닥 표면 그리고 수로 벽 표면에 란킨 소오스(Rankine source)를 분포하고, 자유표면은 선형화된 자유표면 조건을 부여하여 수치해석으로 유체역학적 힘을 계산하였다. 그리고 수치해석 계산 결과를 수조 시험과 비교하였는데, 시험에서는 수심과 흘수의 비(이하, h/T)와 선박의 중심선에서 수로 벽까지 거리와 선박 폭의 비(이하, y/B)의 조합에 따라 횡력이 흡인력과 반발력 모두 발생하지만, 계산 결과에서는 흡인력만 발생할 뿐 반발력은 발생하지 않았다. Miao et al.(2003)은 이러한 이유를 선형화된 자유표면 조건을 부여하였기 때문이라고 결론을 내렸다.

### 1.3 연구의 내용

선박은 프로펠러 회전에 의한 선미부 비대칭 흐름을 제외하고는 전반적으로 좌우 대칭인 유동장을 갖는다고 볼 수 있다. 이러한 선박이 물의 깊이와 폭에 제한이 없는 대양을 항해할 때, 선체는 횡 방향의 힘을 거의 받지 않는다. 하지만, 물의 깊이와 폭에 제한이 있는 운하, 수로, 항구 내 운항 또는 두 선박이 서로 근접하여 운항할 때에는 기하학적인 비대칭 유동으로 인해서 선체에 횡 방향의 힘과 선회 모멘트가 발생하게 된다.

본 연구에서는 천수와 측벽효과를 해석할 수 있는 프로그램을 개발하여 아프라막스 급 원유운반선과 VLCC 두 척에 대하여 수심, 선속 그리고 선박과 수로 벽사이의 거리 변화에 따른 횡력($C_{Fy}$)과 선회 모멘트($C_{Mz}$)를 계산하였다. 그 결과 선형, 수심, 선속 그리고 선박과 수로 벽사이의 거리 등의 변화에 따라 흡인력 뿐만 아니라 반발력도 함께 발생하는 현상을 알 수 있었다.

## 2. 문제의 정식화

### 2.1 기본 가정 및 지배 방정식

x-y평면은 정수면과 일치하고 x-z평면은 선박의 종 중심면과 일치하며 x축의 양의 방향이 선미, z축의 양의 방향이 수직 상방을 향하는 직교 좌표계를 사용하였다. 좌표계는 Fig. 1에 나타내었다.

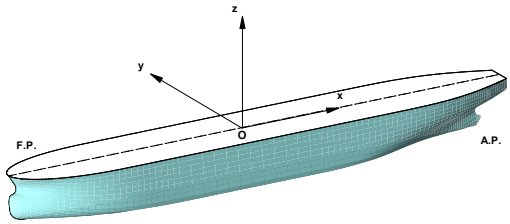


Fig. 1 Coordinate system

유체는 이상유체로서 비점성, 비압축성, 비회전 흐름으로 가정하였으며 표면장력 등의 영향은 무시하였다.

물체로 인하여 발생하는 교란을 교란포텐셜 $\phi(x,y,z)$ 라고 하면 전체속도 포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi(x,y,z) = U_{\infty}x + \phi(x,y,z) \tag{1}$$

여기서,$\Phi(x,y,z)$ 는 유체 내부에서 식(2)를 만족하며, 2.2절에서 소개한 경계조건을 만족하는 해이다.

전체속도 포텐셜 $\Phi(x,y,z)$ 는 전 유체영역에서 질량보존법칙이 성립하므로 지배방정식은 Laplace 방정식으로 된다.

$$\nabla^2\Phi = 0 \tag{2}$$

### 2.2 경계조건

#### 2.2.1 선체표면 경계조건

유체입자의 법선 방향 속도는 그 경계면의 법선 방향 속도와 같다는 조건을 적용하면 아래의 식으로 표현된다.

$$\nabla\Phi \cdot \vec{n} = 0 \tag{3}$$

여기서, $\vec{n}$은 선체표면에서 유체영역으로 향하는 단위 법선 벡터이다.

#### 2.2.2 자유표면 경계조건

(1) Dynamic free surface boundary condition

자유표면에서의 압력은 대기압($P_0$)과 같다는 의미를 가지며 자유표면 에서 파고를 $\zeta_W$ 라 하고, 선체근방에서와 선체에 의해서 교란되지 않은 선체 앞의 무한히 먼 곳에 대해서 Bernoulli 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 = P + \frac{1}{2}\rho(\nabla\Phi)^2 + \rho g\zeta_w \tag{4}$$

P=$P_0$=Constant이므로, 식(4)를 정리하면 파고 $\zeta_w$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\zeta_w(x,y) = \frac{1}{2g}[U_\infty^2 - (\nabla\Phi)^2] \tag{5}$$

식(5)를 선박의 길이에 대해 무차원화 시켜 표기하면 다음과 같다.

$$\zeta_w(x,y) = \frac{1}{2}F_n^2[1-(\Phi_x^2+\Phi_y^2+\Phi_z^2)] \tag{6}$$

여기서, Fn은 프루드 수를 의미한다.

(2) Kinematic free surface boundary condition

자유표면에서 유체입자의 법선방향 속도는 그 경계면의 법선방향 속도와 같다는 의미를 가지고 있으며, 자유표면을 나타내는 함수 $G(x,y,z)$ 는 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$G(x,y,z) = z - \zeta_W(x,y) = 0 \tag{7}$$

그리고, 자유수면에서의 법선방향 속도성분은 없어야 함으로 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla\Phi \cdot \vec{n} = [-\Phi_x\zeta_{wx} - \Phi_y\zeta_{wy} - \Phi_z] = 0 \tag{8}$$

자유표면에서의 경계조건은 식(6)과 식(8)로 표현되는데, 이는 $\Phi$ 에 관하여 비선형이므로 경계조건을 만족하는 해를 구하기 위해서는 반복 계산을 통해서 만족하게 된다. 수렴조건으로는 동역학적 및 운동학적 경계조건에서 이미 정해 놓은 작은 기준 값보다 작으면 반복계산을 중단하게 된다.

#### 2.2.3 수로의 바닥과 측벽 경계조건

수로의 바닥(Bottom)에서 속도 성분이 0 이고, 수로의 측벽(Bank)에서 직각방향 속도성분이 0 이다. 수로의 바닥과 측벽의 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\partial\Phi(x,y,z)/\partial n = 0 \tag{9}$$

#### 2.2.4 방사조건

배에 의해서 만들어진 파(wave)는 배의 하류에만 나타나며, 배에 의해서 발생되는 교란속도는 배로부터의 무한원방에서 0이 된다.

### 2.3 파고 및 유체역학적 힘의 계산

선체표면, 벽 표면, 바닥표면 및 자유표면에서의 소오스 강도가 정해지면 각 패널에서의 속도 성분은 계산된다. 각 방향의 속도 성분을 구하고 나면 압력, 유체역학적인 힘 그리고 파고 등은 다음과 같다.

#### 2.3.1 파고

동역학적 자유표면 경계조건으로부터 파고를 얻을 수 있다. 즉, 식(6)으로부터 파고의 높이는 다음과 같다.

$$\zeta_{wi} = \frac{1}{2}F_n^2[1-(\Phi_\xi^2+\Phi_{yi}^2+\Phi_{zi}^2)] \tag{10}$$

여기서, 첨자 i는 자유수면 패널(Panel)의 중심점이다.

#### 2.3.2 선체표면 압력 및 조파저항 계산

선체에 작용하는 힘은 선체 표면에서의 압력을 직접 적분하므로서 얻을 수 있다.

베르누이 방정식으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$P_a + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 + \rho g z_a = P_s + \frac{1}{2}\rho(\nabla\Phi)^2 + \rho g z_s \tag{11}$$

여기서, 아래첨자 a는 선체 앞의 무한히 먼 곳을 의미하고, s는 선체 근방을 의미한다.

$$\triangle P = P_s - P_a = \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 - \frac{1}{2}\rho(\nabla\Phi)^2 + \rho g(z_a - z_s) \tag{12}$$

$z_a = z_s$로 생각하면, 압력계수($C_P$)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_P = \frac{\triangle P}{0.5\rho U_\infty^2} = 1 - \frac{1}{U^2}[(\nabla\Phi)^2 + 2\nabla\Phi \cdot \nabla\phi + (\nabla\phi)^2] \quad (13)$$

식(13)에서 $\Phi = U \cdot x$를 대입하여 정리하면,

$$C_P = 1 - \frac{1}{U^2}[U^2 + 2U\phi_x + (\nabla\phi)^2] \quad (14)$$

조파저항은 압력계수($C_P$)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$C_w = -\frac{\int_s C_P n_x ds}{S} \quad (15)$$

여기서, S는 선체의 침수 표면적, $n_x$는 단위 법선 방향의 x 성분이다. 소스 강도가 정해지면, 식(14)는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{Pj} = 1 - (\Phi_{xj}^2 + \Phi_{yj}^2 + \Phi_{zj}^2) \quad (16)$$

여기서, 첨자 j는 선체표면 패널의 중심점이다.

2.3.3 유체역학적 힘의 계산

공간을 운동하는 물체의 자유도는 6이며, 3개의 직교하는 방향의 병진운동과 3개의 회전운동으로 나타내어진다. 보통 3개의 직교한 방향으로서는 물체의 관성주축, 좌표 원점으로서는 중심이 잡혀진다. 그러므로 배의 중심 o를 원점으로 하고 3개의 관성주축을 x, y, z축으로 하면, 선박의 6개 자유도에 대한 운동은 Fig. 2와 같다.

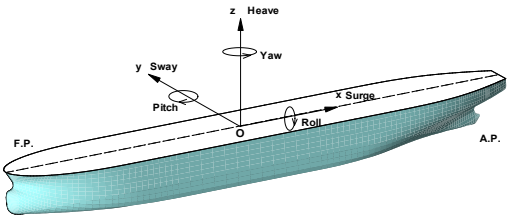


Fig. 2 6 DOF motion of a ship

선체에 작용하는 횡력과 선회 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

- 횡력 계수(Sway force coefficient)

$$C_{Fy} = -\frac{1}{L^2}\sum_{i=1}^{N} C_{Pj}\triangle S_j n_{yj} \quad (17)$$

- 선회 모멘트 계수(Yaw mement coefficient)

$$C_{Mz} = -\frac{1}{L^3}\sum_{i=1}^{N} C_{Pj}\triangle S_j (n_{yj} r_{xj} - n_{xj} r_{yj}) \quad (18)$$

j=1~N은 선체표면에서 선측 파고 아래의 패널 수 이며, $\triangle S_j$는 j번째 선체표면의 면적이다. $(r_{xj}, r_{yj}, r_{zj})$는 j번째 패널의 위치 벡터이고, $(n_{xj}, n_{yj}, n_{zj})$ 는 j번째 패널의 법선 벡터이다.

## 3. 천수 및 제한 수로 운항 시 측벽효과

본 연구에서는 아프라막스 급 원유운반선과 VLCC에 대하여 3가지 파라메터인 수심, 선속 그리고 선박과 수로 벽사이의 거리 변화에 따른 횡력($C_{Fy}$)과 선회 모멘트($C_{Mz}$)를 계산하였다. 상기 2척의 선박을 선정한 이유는 기 발표된 논문 중 Li et al.(2001)과 Miao et al.(2008)에서 수치해석 및 시험으로 사용되어진 선박과 주요 제원 측벽에서 유사하기 때문이다.

Table 1 Principal particulars of objective ships

| 주요치수 \ 선 종 | | 아프라막스 급 원유운반선 | VLCC |
|---|---|---|---|
| L | (m) | 238.0 | 324.0 |
| B | (m) | 43.0 | 60.0 |
| T | (m) | 13.6 | 20.5 |
| $C_b$ | | 0.8181 | 0.8382 |

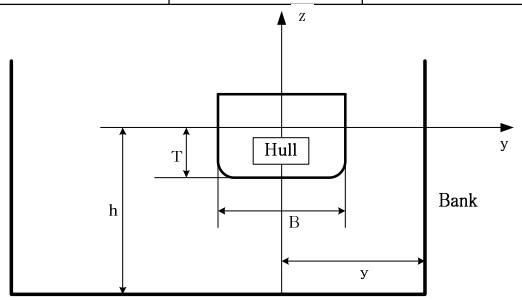


Fig. 3 Coordinate system of a shallow water and channel

대상 선박의 주요 제원은 Table 1에 나타내었고, 제한수로의 문제를 풀기 위한 좌표계는 Fig. 3에 나타내었다.

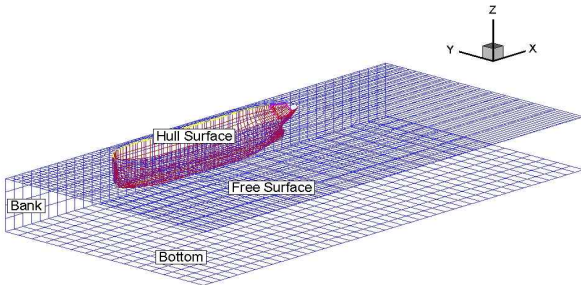


Fig. 4 Panel arrangement considering wall effects

계산 수행을 위해서 선체표면, 자유표면, 유한수심 바닥표면 및 수로의 벽 표면에 분포한 패널의 모습은 Fig. 4에 나타내었다. 그리고, Fig. 5는 비대칭 자유표면에 있는 패널의 배치를 나타내었다.

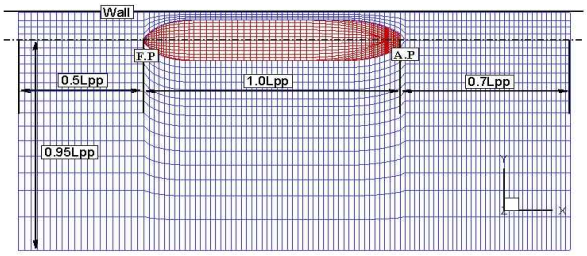


Fig. 5 Panel arrangement of free surface employed the calculations

### 3.1 횡력과 횡모텐트 비교

#### 3.1.1 아프라막스 급 원유운반선

Li et al.(2001)은 저속선박인 아프라막스 급 원유운반선을 포함하여 고속선박인 페리(Ferry)와 카타마란(Catamaran)에 대하여 h/T와 배와 측벽사이의 거리y/B의 변화에 따른 시험적 연구를 수행하였다.

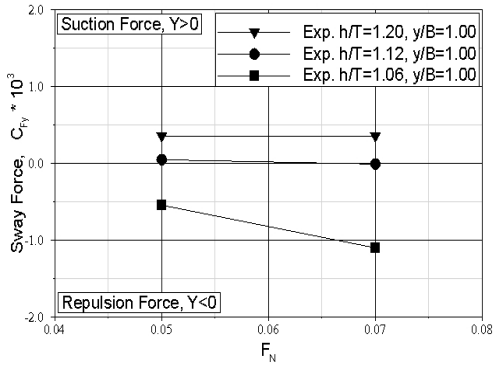


Fig. 6 Sway force by experiment(Li et al.(2001))

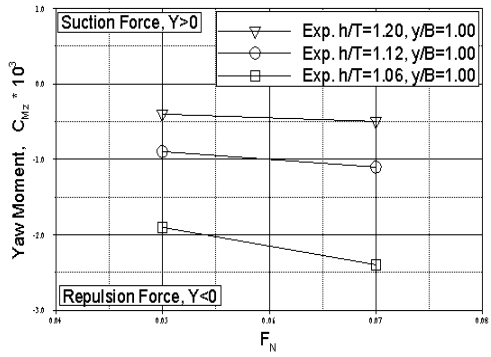


Fig. 7 Yaw moment by experiment(Li et al.(2001))

Fig. 6과 Fig. 7은 Li et al.(2001)의 시험 결과로 y/B=1.0일 때, h/T의 변화에 따른 횡력과 선회 모멘트를 보여주고 있다. Fig. 6을 보면, 상대적으로 수심이 깊은 h/T=1.20인 경우에는 벽이 선박을 끌어당기는 힘, 즉 흡인력이 작용을 하다가 h/T=1.12인 경우에는 횡력이 선박에 거의 작용하지 않았다. 그리고 수심이 얕은 경우인 h/T=1.06에서는 선박이 벽으로부터 밀리는 힘, 즉 반발력이 발생하는 것을 알 수 있으며, 속도가 증가함에 따라 힘도 급격하게 증가함을 알 수 있었다. h/T=1.06의 경우는 속도 변화에 따라 선체표면에 작용하는 압력, 측벽에 작용하는 압력 그리고 수심 바닥에 작용하는 압력이 급격히 변화는 임계점으로 판단된다. 수치해석 결과인 3.2절의 Fig. 14와 Fig. 15에서 각각의 선측파 즉, y<0에서의 선측파고와 y>0에서의 선측파고에서 속도변화에 따라 2배 이상 차이를 보임을 알 수 있다.

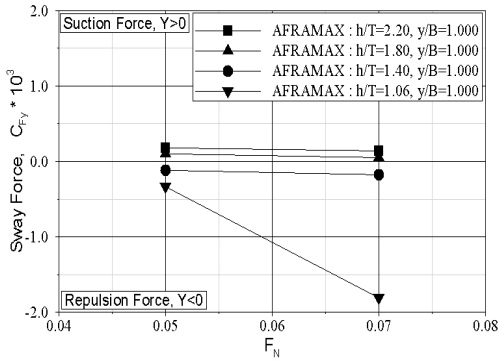


Fig. 8 Sway force for AFRAMAX class crude oil carrier by computational analysis

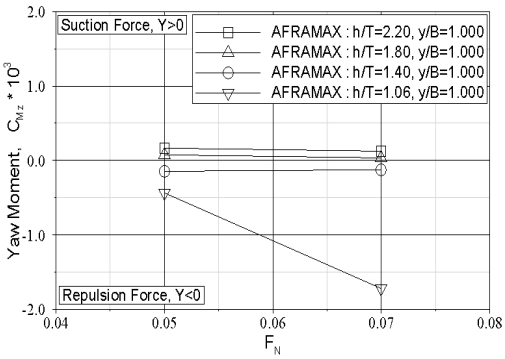


Fig. 9 Yaw moment for AFRAMAX class crude oil carrier by computational analysis

Fig. 8과 Fig. 9는 실적선인 아프라막스 급 원유운반선에 대하여 y/B= 1.0일 때, h/T를 1.06에서 2.20까지 변화해 가면서 Li et al.(2001)이 시험으로 수행한 경우와 유사한 수치해석을 수행하였다.

수치해석 결과를 살펴보면 h/T가 상대적으로 클 경우 즉, 수심이 상대적으로 깊을 때에는 흡인력이 발생하지만, 수심이 얕아짐에 따라 반발력으로 그 힘의 방향이 바뀐다는 것을 확인하였다. 이는 Li et al.(2001)의 시험결과와 정성적으로 일치함을 보여주고 있다.

또한, h/T=1.06인 경우, 선속이 증가함에 따라 횡력과 선회 모멘트도 급격하게 증가함을 보여 주었는데 이 역시 Li et al.(2001)의 시험결과와 정성적으로 일치함을 보여주었다. Fig. 6과 7의 h/T=1.12와 1.2 그리고 Fig. 8과 9의 h/T=1.4에서 흡인력과 반발력이 반대로 나오는 결과는 시험과 계산에 사용된 선형이 크기는 유사하지만, 선형측면에서 상이한 것이 가장 큰 원인으로 판단된다. 그리고 이 조건의 경우 힘 자체가 흡인

력과 반발력의 경계에 있기 때문에 포텐셜 이론을 바탕으로 한 수치해석 상의 오차도 원인일 수 있다.

3.1.2 VLCC

Miao et al.(2008)은 VLCC에 대하여 시험 및 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교·분석하였다. Miao et al.(2008)은 란킨 소오스(Rankine source)를 이용하였고 선형화된 경계조건을 만족하는 해석법을 사용하였다. 또한, Miao et al. (2008)은 y/B를 고정하고 h/T의 변화에 따른 연구를 수행하였는데, 시험 결과에서는 수심이 깊은 경우에는 흡인력만 작용하다가 수심이 얕아 짐에 따라 힘의 부호가 바뀌어 반발력이 발생한다는 것을 보여 주었다. 그러나, Miao et al.(2008)의 수치해석 결과에서는 h/T의 변화에 따라 힘의 부호가 바뀌지 않고 항상 흡인력만 발생한다는 것을 나타냈다. 이는 수치해석상에서 자유표면 문제를 선형화된 경계조건으로 사용한 것을 그 이유로 언급하였다.

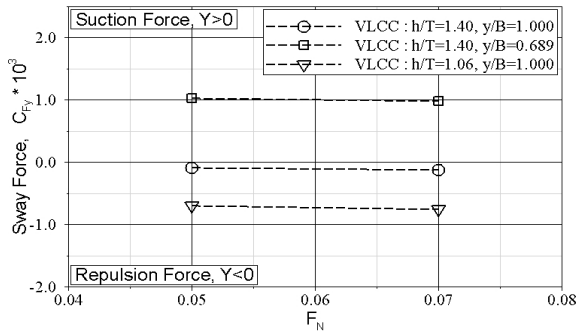


Fig. 10 Sway force for VLCC by computational analysis

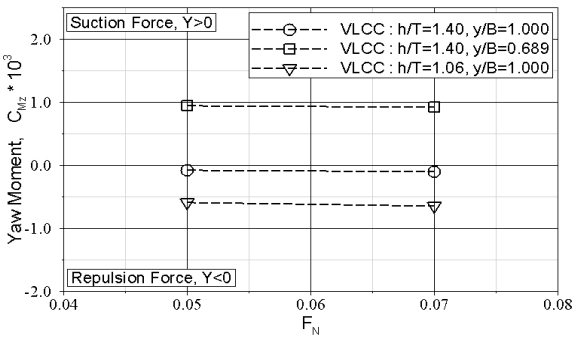


Fig. 11 Yaw moment for VLCC by computational analysis

Fig. 10과 Fig. 11은 실적선인 VLCC에 대하여 수치해석을 수행하였는데, 우선 y/B=1.0으로 고정하고 h/T가 1.06과 1.40에 대하여 수치해석을 수행하였다. 두 가지 경우 모두 반발력만 발생함을 보여주었다. 그리고, 선박과 벽사이의 거리변화에 따른 영향을 알아보기 위해 h/T=1.40으로 고정하고 y/B가 1.0과 0.689에 대하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과를 살펴보면, y/B=1.0에서 반발력만 발생하다가 y/B가 약 0.7로 줄어든 경우 흡인력으로 힘의 부호가 바뀔 뿐만 아니라 그 값 자체도 상당히 크게 증가함을 보여 주었다. 본 연구에서 아프라막스급 원유운반선과 VLCC에 대해 수행한 수치해석 결과를 살펴보면, 흡인력에서 반발력으로 바뀌는 영역은 h/T가 1.40 근처임을 알 수 있으나, Li et al.[13]의 시험 결과에 의하면 저속선의 횡력이 흡인력에서 반발력으로 바뀌는 영역은 h/T=1.10 근처라고 언급하였다. 하지만, 이 값은 수심의 영향과 선박과 벽사이의 거리뿐만 아니라 선박의 주요제원, 특히 선박의 형상 등 여러 가지 변수들에 영향을 받는다고 판단된다.

### 3.2 파형(Wave pattern) 비교

Fig. 12와 13은 h/T=2.20, y/B=1.0에서 Fn=0.05와 0.07에 대한 결과로서 흡인력만 발생된 경우의 파형 모습이다. Fig. 14와 15는 h/T=1.06, y/B=1.0에서 Fn=0.05와 0.07에 대한 결과로서 반발력이 발생된 경우의 파형 모습이다. 이러한 파형을 Bernoulli wave(Li et al. 2001)라고 한다. 두 가지 경우 모두 공통적인 현상은 선박의 우현(Starboard, 수로 벽에 가까운 쪽)에서 발생한 파고가 좌현(Port)보다 대체로 크게 나타난다는 것이다. 차이점은 흡인력이 발생된 경우보다 반발력이 작용한 경우가 선박의 좌현과 우현의 파고 차이가 더 큼을 알 수 있었다.

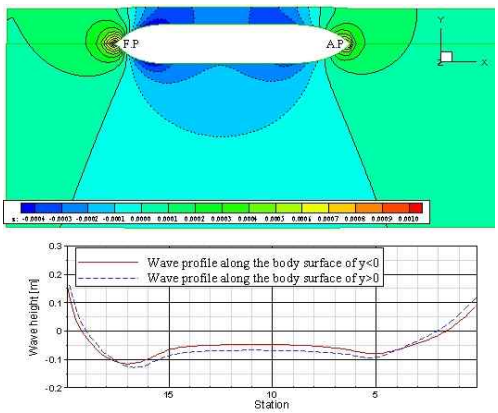


Fig. 12 Comparison of wave patterns for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=2.20, y/B=1.0, Fn=0.05)

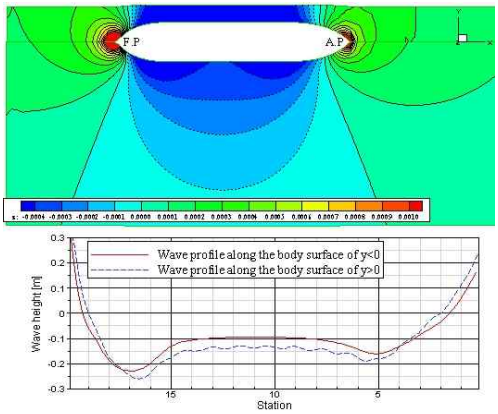


Fig. 13 The comparison of wave patterns for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=2.20, y/B=1.0, Fn=0.07)

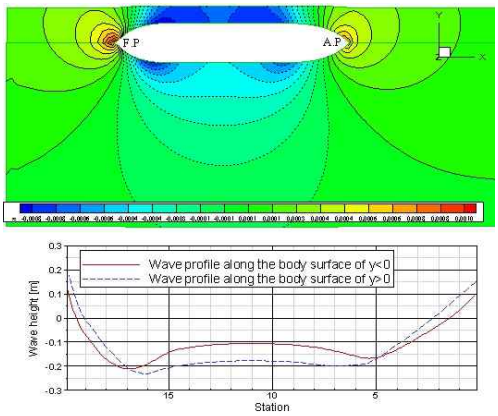


Fig. 14 Comparison of wave patterns for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=1.06, y/B=1.0, Fn=0.05)

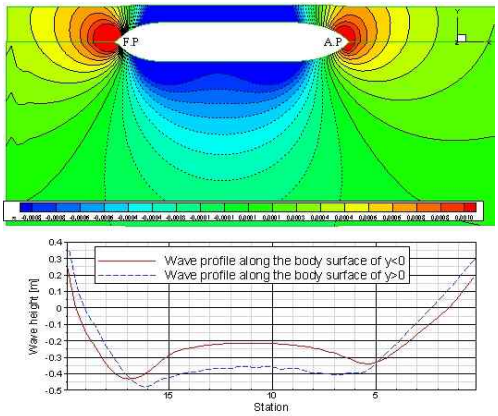


Fig. 15 Comparison of wave patterns for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=1.06, y/B=1.0, Fn=0.07)

### 3.3 압력분포 비교

Fig. 16과 17은 h/T=2.20, y/B=1.0에서 Fn=0.05와 0.07에 대한 결과로서 흡인력이 발생된 경우의 압력분포 모습이다.

Fig. 18와 19는 h/T=1.06, y/B=1.0에서 Fn=0.05와 0.07에 대한 결과로서 반발력이 발생된 경우의 압력분포 모습이다.

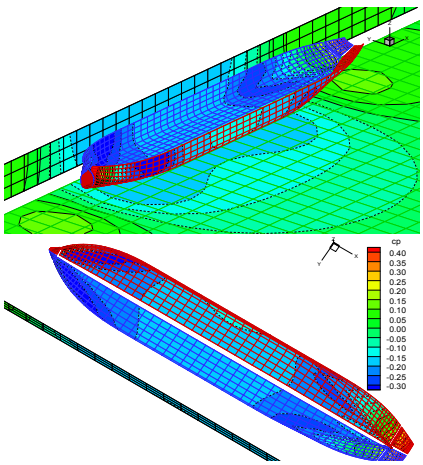


Fig. 16 Comparison of pressure distributions on the both sides for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=2.20, y/B=1.0, Fn=0.05)

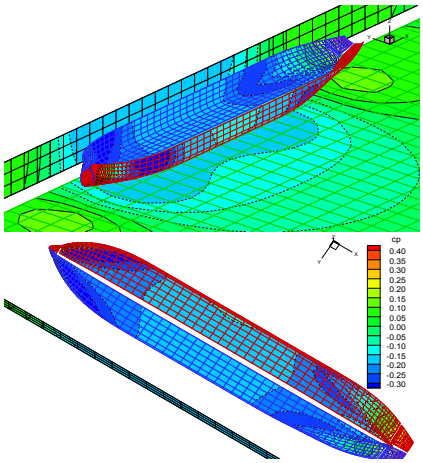


Fig. 17 Comparison of pressure distributions on the both sides for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=2.20, y/B=1.0, Fn=0.07)

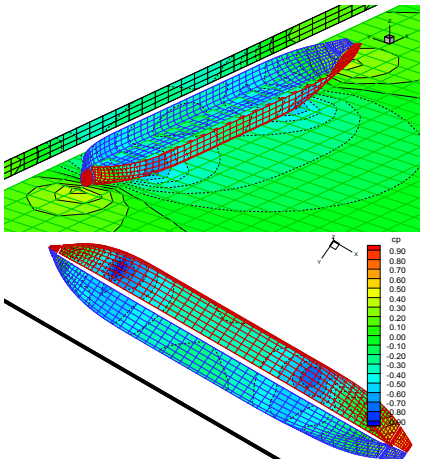


Fig. 18 Comparison of pressure distributions on the both sides for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=1.06, y/B=1.0, Fn=0.05)

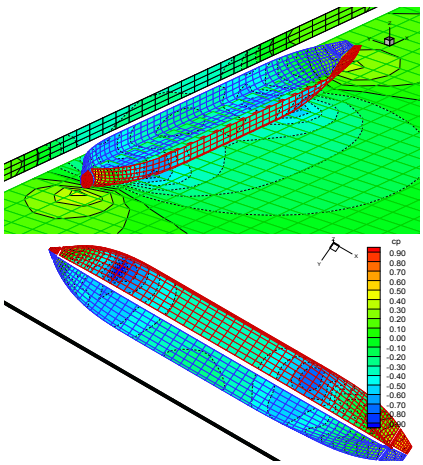


Fig. 19 Comparison of pressure distributions on the both sides for AFRAMAX class crude oil carrier(h/T=1.06, y/B=1.0, Fn=0.07)

그림에서 보는 바와 같이 비대칭 흐름으로 인해 압력 분포 역시 선박의 우현과 좌현에서 비대칭적인 압력 분포가 나타났다. 반발력이 발생된 Fig. 18과 19의 경우를 살펴보면 선·수미 어깨 부분에서 선박의 우현보다 좌현에서 음의 압력이 더 크게 나타나는 것을 보여준다. 반발력이 발생된 경우, 선수부(F.P.~Station10)의 폭 방향으로의 힘의 합이 선미부(Station10~A.P.)의 힘의 합보다 큼으로 인해 선박이 벽으로부터 밀려나가면서 선수부가 선미부보다 벽으로부터 더 멀어 지는 부호의 Yaw moment가 발생하였다.

## 4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 비 점성 유동해석 프로그램을 이용하여 선박이 천수와 제한수로를 운항하는 경우에 대해 수심 및 측벽 영향에 대한 조사를 수행하였다.

1) 본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 제한수로에서의 수심 및 측벽 영향에 따라 비대칭적으로 작용하는 유체역학적인 힘(Asymmetric hydrodynamic force)을 추정할 수 있었다.
2) 비대칭적으로 작용하는 힘은 측벽 영향으로 인해서 선박의 좌현과 우현의 유체흐름 및 압력분포가 달라짐으로 인해 발생하는 것임을 알 수 있었다.
3) Miao et al.[7]은 h/T와 y/B의 변화에 따라 시험에서는 흡인력과 반발력 모두 발생하는 결과를 얻었지만, 수치해석 결과에서는 흡인력만 추정하였다. 그러나, 본 연구의 수치해석 결과에서는 h/T와 y/B의 변화에 따라 흡인력과 반발력 모두 추정하였다.
4) 본 연구의 수치해석 결과로는 흡인력과 반발력이 h/T, y/B뿐만 아니라 선박의 주요제원과 특히, 선박의 형상에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.
5) 아프라막스 급의 h/T=1.06, y/B=1.0의 경우, 시험과 수치해석 결과가 정성적으로 잘 일치함을 보여주었다.
6) Fig. 6과 7의 h/T=1.12와 1.2 그리고 Fig. 8과 9의 h/T=1.4에서 흡인력과 반발력이 반대로 나오는 결과는 시험과 계산에 사용된 선형이 크기는 유사하지만, 선형 측면에서 상이한 것이 가장 큰 원인으로 판단된다. 그리고 이 조건의 경우 힘 자체가 흡인력과 반발력의 경계에 있기 때문에 포텐셜 이론을 바탕으로 한 수치해석 상의 오차도 한 가지 원인일 수 있다.
7) 아프라막스 급 원유운반선과 VLCC에 대하여 수행한 수치해석 결과를 살펴보면, 흡인력에서 반발력으로 바뀌는 영역은 h/T가 1.40 근처임을 알 수 있었다. 시험 결과와의 차이는 선박의 주요제원, 특히 선박의 형상 등 여러 가지 변수들에 영향을 받는다고 판단된다.
8) 본 연구의 성과는 시험이 아닌 수치해석 방법으로 선박에 작용하는 비대칭 유동에 대한 유체역학적인 힘을 정성적으로 추정할 수 있다는 것이다. 또한, 선박의 조종성 예측 및 수로 설계 시 정보를 제공을 할 수 있다는 관점에서 그 이용 가치가 있다고 판단된다.
9) 향후에는 벽의 기울기와 프로펠러 영향 등을 고려할 수 있도록 수정·보완이 필요하며, 컨테이너선과 같은 고속선박에 대해서도 추가 연구가 보충되어야 할 것이다.

## References


[1] Ch'ng, P. W.(1991) "An Investigation into the Influence of Bank Effect on Ship Manoeuvring and its Mathematical Modeling for a Ship-handling Simulator", Master of Engineering Thesis, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Australia.

[2] Ch'ng, P. W., Doctors, L. J. and Renilson, M. R.(1993), "A Method of Calculating the Ship-Bank Interaction Forces and Moments in Restricted Water", International Shipbuilding progress Vol. 40, No. 412, pp. 7-23.

[3] Dawson, C. W.(1977), "A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems", Proceedings of the Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, University of California, Berkeley, California, pp. 30-38.

[4] Li, D.-Q., Leer-Andersen, M., Ottosson, P. and Trägårdh, P.(2001), "Experimental Investigation of Bank Effects under Extreme Conditions", Proceeding of Practical Design of Ships and Other Floating Structures(PRADS), Shanghai, China.

[5] Millward, A.(1984) Effect of Hull Cross Sectionon the Theoretical Wave Resistance of a Fast Ship in Shallow Water", International Shipbuilding Progress Delft, Delft University Press, Vol. 31, No. 354 , pp. 28-33.

[6] Millward, A.(1989), "The Effect of Water Depth on Hull Form Factor", International Shipbuilding Progress Delft,DelftUniversityPress, Vol. 36, No. 407, pp. 283-302.

[7] Miao, Q. and Xia, J.(2003), "Numerical Study of Bank Effects on a Ship Traveling in a Channel", The 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea.

[8] Norrbin, N. H.(1970), "Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Deep and Confined Waters", Proceedings of 8th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena, Canada.

[9] Norrbin, N. H.(1974), "Bank effects on a ship moving through a short dredged channel", The 10th Symposium on Naval Hydrodynamics.

[10] Ohmori, T.(1998), “A Study on Hydrodynamic Characteristics of a Manoeuvring Ship in Shallow Water by a Finite Volume Method”, International Symposium and Workshop on Forces Acting on a Manoeuvering Vessel, Val de Reuil, France, pp. 15-20.

[11] Sohn, K. Y.(2006), “A Study of Hydrodynamic Forces Acting on a Ship Traveling in a Shallow Water and Channel”, Master’s Thesis, University of Ulsan.

[12] Sohn, K. Y. and Kwon, Y. J.(2006), “A Study of Hydrodynamic Forces Acting on a Ship Traveling in a Shallow Water and Channel”, Proceeding of the Annual Autumn Meeting, KSOE, p. 426.

[13] Tuck, E. O. and Taylor, P. J.(1970), “Shallow Water Problems in Ship Hydrodynamics”, Proceedings of 8th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena, Canada, pp. 627-659.

[14] Tuck, E. O.(1978), “Hydrodynamics Problems of Ship in Restricted Waters”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 10, pp. 33-46.

원고접수일 : 2013년 11월 7일
심사완료일 : 2014년 2월 19일
원고채택일 : 2014년 2월 24일