



상선의 조종성능 파악을 위한 물리기반 선박 조종수학모델 적용에 관한 연구

주위화^{1,*}·배진근^{1,*}·김부기²·이성욱^{3,†}

국립한국해양대학교 조선해양시스템공학과^{1,*}

국립한국해양대학교 조선해양시스템공학과^{1,*}

경상국립대학교 기계공학부²

국립한국해양대학교 조선해양시스템공학부^{3,†}

A Study on the Application of Ship Manoeuvring Mathematical Model Based on the Physics

Zhu Weihwa^{1,*}·Jin Geun Bae^{1,*}·Boo Ki Kim²·Sung Wook Lee^{3,†}

Department of Naval Architecture and Ocean System Engineering, Korea Maritime and Ocean University¹

School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University²

Major of Naval Architecture and Ocean System Engineering, Korea Maritime and Ocean University³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study addresses the application of a physics-based manoeuvring mathematical model that can be used to assess ship maneuverability. In research related to ship maneuvering, this study focuses on the physics-based manoeuvring mathematical model proposed by Karasuno et al. (1991, 1992). Several series of analysis by using the computational fluid dynamics(CFD) were conducted for large drift manoeuvring motions, and the coefficients constituting the Karasuno model were obtained from the results. This study verifies whether the forces and moments reconstructed using these coefficients accurately represent the forces and moments acting on the ship hull during the large drift motions. Additionally, a key advantage of the Karasuno model is highlighted: it uses only the coefficients obtained from the forces and moments acting on the hull during the motions to estimate the forces and moments acting on the hull during the rotating motions with drift angle. This verification was conducted by comparing the forces and moments acting on the hull during the rotating motions with the drift angle, obtained from CFD analysis, with those estimated by the Karasuno model, confirming the model's applicability.

Keywords : Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학), Karasuno model(카라스노 모델), Manoeuvring motion(조종운동), Hydrodynamic derivatives(유체력 미계수)

1. 서론

최근 10년간 인공지능(Artificial Intelligent, 이하 시라 칭함)의 급속한 발달로 산업 전반에 있어서 시의 적용 가능성 및 고도화와 관련된 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 이들 연구 중 자동차, 선박 및 항공기 등과 같은 운송체 분야에서는 시를 활용한 무인 자율운항(또는 주행)을 위한 관련 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이고, 이를 위해서는 충분한 학습용 데이터의 확보가 중요한 요소로 작용한다. 자율운항을 위한 시의 학습용 데이터를

확보하기 위해서는 실제 운항(운전) 데이터를 활용하는 방법과 신뢰성이 확보된 시뮬레이션을 통한 데이터를 확보하는 방법 등이 고려될 수 있는데, 자동차 및 드론과 같이 비교적 소형의 운송체의 경우는 실제 운항(운전) 데이터의 확보가 용이함에 반해 선박 및 항공기와 같은 대형의 운송체에 대해서는 실제 운항 데이터의 확보가 용이하지 않다. 따라서, 이를 위해서는 시훈련을 위한 신뢰성이 확보된 시뮬레이션의 구축이 필요한 실정이다. 선박분야로 국한지어 고려한다면, 시뮬레이션의 구축을 위해 사용될 수 있는 방법으로는 선박의 운동역학을 모사할 수 있는 수학

모델기반 기법, 데이터 확보와 관련된 시나리오를 기반으로 한 모형시험(자유항주) 기법 및 전산유체역학 기반의 시뮬레이션 등의 세 가지로 분류할 수 있다고 사료된다. 상기에서 언급한 방법 중 모형시험(자유항주) 기법 및 전산유체역학 기반의 시뮬레이션 기법은 시학습용 데이터 확보에 적용하기에는 많은 시간과 비용이 소모된다. 따라서, 선박의 조종운동(운동역학)을 모사할 수 있는 수학모델을 개발하고 이를 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하는 것이다.

한편, 자율운항 선박 개발을 위해 활용될 수 있는 다른 방법은 제어이론을 기반으로 한 방법이다. 제어이론 기반 방법은 자율운항의 대상이 되는 선박의 조종운동 특성을 면밀히 분석하여 이를 수학모델을 이용하여 정식화하고 각종 필터(칼만필터, g-h필터, 입자필터 등)를 이용하여 예측단계(prediction step)와 보정단계(correction step)를 통해 대상 선박을 제어하는 방법이다.

상기에서 언급한 두 가지 방법 모두 적절한 수학모델의 개발 또는 확보가 필요하게 되는데, 일반적으로 선박의 조종운동을 다룰 때 선체, 추진기 및 방향타에 작용하는 외력(힘 및 모멘트)의 수학모델이 가장 중요한 요소가 된다. 조종운동 중인 선박에 작용하는 외력에 관한 모델은 Taylor 급수 전개 기반의 일체형(Abkowitz, 1964), 분리형(Kijima et al., 2003)인 MMG(Manoeuvring mathematical Modeling Group)모델과 세장체이론기반(Toxopeus, 2006; Hooft et al., 1996; Beukelman, 1998; Nonaka, 1997), 역학기반(Karasuno et al., 1991, 1992)의 수학모델로 나눌 수 있다. Taylor 급수 전개 기반의 Abkowitz 모델의 경우 방향타(rudder) 및 추진기(propeller)에 기인하는 유체력을 선체에 작용하는 유체력으로 표현하고 이 유체력을 선박의 운동변수, 추진기 및 방향타와 관련된 변수 등으로 구성된 다변수 함수로 가정하여 다변수 함수에 대한 Taylor 급수 전개를 수행한 후 조종유체력 미계수 형태로 구성한 모델이다. 이 모델의 경우 선체, 추진기 및 방향타를 하나의 수학모델로 구성하기 때문에 각 요소들 간의 상호 간섭력이 고차항(또는 연성항)으로 고려될 수 있어서 간섭력에 대한 자세한 정보 없이 간단하게 다룰 수 있다는 이점을 가지고 있으나 선체에 장착되는 추진기 및 방향타의 설계가 변경되면 이들에 대한 영향을 다시 고려하기 위해 모형시험 또는 계산을 다시 수행할 필요가 있다. 따라서, Abkowitz 모델과 같이 가지는 상기에서 언급한 단점을 해소하기 위해 분리형(또는 모듈형) 기반의 MMG형 수학모델이 제시되었으며 선체에 작용하는 유체력에 대해서는 Abkowitz형과 동일한 방식으로 유도되지만 추진기 및 방향타에 기인하는 유체력에 대해서는 각각의 이론에 기반하여 새로운 형태로 제시되고 선체-추진기 및 선체-방향타 간에 발생하는 간섭력은 별도의 항으로 구성하여 이들 간섭력을 구하기 위한 새로운 형태의 모형시험을 제시하고 있다. MMG형 수학모델은 여러 연구자들에 의해 연구되고 있으며 현재까지 널리 이용되고 있는 수학모델 중 하나이다.

한편, 물리기반의 수학모델 중 세장체 이론(Slender body theory, Beukelman, 1998) 기반 모델은 선체를 세장체로 가정하

고 N개로 분할한 후 분할된 선체가 운동을 할 때 발생하는 부가질량력의 분포가 선체에 작용하는 감쇠 유체력과 관련 있음을 보임으로써 조종운동 유체력 중 지배적이라고 판단되는 선형유체력을 부가질량력의 분포로부터 도출하는 기법이다. 또한, Hooft et al. (1996)은 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 선형(linear)항과 비선형(non-linear)항으로 분리하고 선형항은 세장체이론 기반 모델을 적용하고 비선형항은 cross-flow drag 모델을 적용한 기법을 제안한 바가 있다.

이와 더불어 Karasuno et al. (1991, 1992)은 대각도 조종운동을 하는 어선을 대상으로 항공역학에서 사용되는 유체역학적인 계수들(양력, 항력계수 등) 및 cross-flow drag 계수로 구성된 수학모델을 제안하였다. Karasuno et al. (1991, 1992)가 제안한 수학모델은 양력, 항력 및 cross-flow drag 계수를 사용하여 대각도 사향 및 선회운동을 하는 어선에 작용하는 힘과 모멘트를 표현하고 있다는 특징을 가지고 있으며 본질적으로는 Hooft (1994)가 제안한 수학모델과 동일하지만 그 외형은 다른 형태를 가지고 있다. 특히, 어선의 사향운동으로부터 획득된 유체역학적 계수를 이용하여 선회운동까지 추정할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이미 언급한 바와 같이 Karasuno 모델은 어선을 대상선으로 하여 개발된 수학모델인데, Choi et al. (2023)는 대각도 사향각 및 받음각으로 운동하는 잠수함 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 Karasuno 모델을 이용하여 추정하는 연구를 수행한 바 있다.

따라서, 본 연구는 Lee et al. (2024)에 의해 수행된 연구의 후속 연구로서 상선을 대상선으로 한 CFD 해석을 통해 대각도 사향운동을 하는 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 획득한다. 이들 힘과 모멘트로부터 양력, 항력 및 cross-flow drag 계수를 도출한 후 사향상태로 회전운동하는 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 추정한다. 이렇게 추정된 힘과 모멘트를 정확도 확인을 위한 추가 CFD 해석 결과와 비교하여 Karasuno 모델이 컨테이너 선박과 같은 일반 선박의 조종운동 수학모델에 적용 가능한지를 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 역학기반 조종운동 수학모델

2.1 조종운동방정식

선체를 강체 및 좌우대칭이라고 가정하고, 선체에 고정된 좌표계 $O-xyz$ 를 Fig. 1과 같이 취한 후 좌표원점 O 에 관한 합속도 벡터 \vec{U} , 각속도 벡터 $\vec{\Omega}$ 및 무게중심의 x, y, z 성분은 식 (1) ~ (3)과 같이 표시된다.

$$\vec{U} = (u, v, w) \quad (1)$$

$$\vec{\Omega} = (p, q, r) \quad (2)$$

$$\vec{r}_G = (x_G, 0, z_G) \quad (3)$$

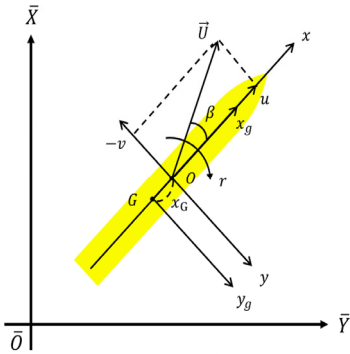


Fig.1 Coordinate systems

여기서, u, v, w 는 선체고정좌표의 각 축 방향으로의 속도, p, q, r 은 각 축 방향으로의 각속도, x_G 및 z_G 는 선체 중앙에서 선체 무게중심까지의 거리를 나타낸다.

한편, 힘과 모멘트에 관한 운동방정식은 식 (4), (5)와 같이 표현된다.

$$\vec{F}_G = \frac{d}{dt}(m \vec{U}_G) \quad (4)$$

$$\vec{M}_G = \frac{d}{dt}([I] \vec{\Omega}) \quad (5)$$

여기서, 첨자 G 는 무게중심에 관한 값을 나타내고 d/dt 는 시간에 대한 1차 도함수를 의미한다. 또한, m 은 선체의 질량, $[I]$ 는 선체의 무게중심을 지나고 x, y, z 축과 평행한 관성주축에 대한 질량관성모멘트 행렬을 의미한다. 식 (4), (5)에 대해 수학적인 전개를 통하면 식 (6), (7)로 표현되는 6자유도 조종운동방정식을 도출할 수 있다 (Abkowitz, 1964).

$$\begin{aligned} X &= m\{\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})\} \\ Y &= m\{\dot{v} + ru - pw + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})\} \\ Z &= m\{\dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q})\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr \\ &\quad - m\{z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G z_G(pq + \dot{r})\} \\ M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp \\ &\quad + m\{z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu) \\ &\quad + x_G z_G(p^2 - r^2)\} \\ N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq \\ &\quad + m\{x_G(\dot{v} + ru - pw) + z_G x_G(rq - \dot{p})\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, X, Y, Z 는 각각 선체에 작용하는 각축 방향의 힘의 성분, K, M, N 은 선체에 작용하는 각축 주위로의 모멘트의 성분을 나타낸다. 본 연구에서는 연구의 목적상 상기의 식 (6), (7)에서 수평면 조종운동에 국한해서 다루기로 한다. 따라서, 식 (6), (7)에서 수직면운동에 관련된 운동성분을 모두 무시하면 수평면 조종운동 방정식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= m\{\dot{u} - rv - x_G r^2\} \\ Y &= m\{\dot{v} + ru + x_G \dot{r}\} \\ N &= I_{zz}\dot{r} + m\{x_G(\dot{v} + ru)\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, I_{zz} 는 z 축 주위로의 질량관성모멘트를 의미한다. 식 (8)에서 비점성 무한유체 중에서 운동을 하는 물체에 작용하는 관성 유체력 또는 부가질량력(Newman, 1978)을 고려하면 수평면에서의 조종운동방정식은 최종적으로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr \\ Y &= (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur \\ N &= (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} + (m_y - m_x)uv \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, m_x, m_y 는 각각 x, y 축 방향으로의 부가질량을 나타낸다. 식 (9)에서 좌우동요(sway) 및 선수동요(yaw) 운동방정식에 나타나는 $(m_y - m_x)uv$ 항 및 $m_x u$ 항은 이상유체력 성분으로 기존의 조종운동 방정식에서는 관례에 따라 감쇠력항에 포함시켜 표현하지만 본 연구에서는 이 항을 감쇠력항에 포함시키지 않는다. 이제 본 연구에서 다루고자 하는 조종운동 방정식이 정식화 되었으며 식 (9)의 힘과 모멘트를 다루는 수학모델에 대해 살펴 보도록 한다.

2.2 Karasuno model

Fig. 2, 3은 수평면에서의 사향운동 및 선회운동을 하고 있는

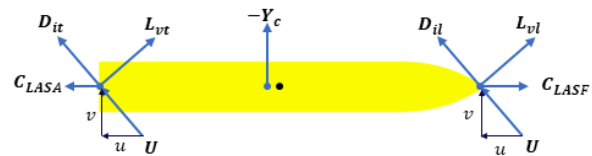


Fig. 2 Elemental components of hydrodynamic force at oblique motion

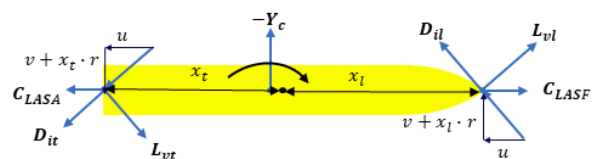


Fig. 3 Elemental components of hydrodynamic force at turning motion

선체에 작용하는 힘과 모멘트를 Karasuno et al. (1991, 1992)이 제안한 유체력 요소로 분리하여 나타내고 있다. Karasuno et al. (1991, 1992)은 Fig. 2, 3에 나타난 바와 같이 선체에 작용하는 유체력을 이상유체력(N_{Munk}), 점성양력(L_v), 유도항력(D_i), cross-flow drag(Y_c), cross-flow lift(X_{LAS}), 선체 마찰항력(X_F) 및 실속영향력($L_{ST} + D_{ST}$) 향으로 분리하였다. 이상유체력 성분은 선체의 운동 방향과 관련해서 발생하는 부가질량에 의한 힘과 모멘트를 의미하고, 점성양력 및 유도항력은 익이론(wing theory)에서 다루고 있는 양력 및 항력을 의미한다. 이들 두 요소 성분은 Taylor 3차 근사를 이용한 조종유체력 계수에서 선형 및 비선형항과 유사하지만 좀 더 비선형 효과를 고려할 수 있다. Cross-flow drag 및 cross-flow lift는 선박의 사향각이 커짐에 따라 발생하는 항력 및 양력을 의미하는데 Hooft (1994)는 cross-flow drag만을 고려하였지만 Karasuno et al. (1991, 1992)은 cross-flow lift를 고려하여 사향각의 증가에 따른 선체 길이 방향으로의 작용력 증가 영향을 고려하였다. 또한, 선체 마찰력은 유체점성에 의해 발생하는 힘을 의미한다. 끝으로 실속 영향력은 큰 사향각을 가진 선체의 경우 실속 현상이 발생하며 이에 대한 영향력이 선체 길이 방향으로 영향을 미치는 것으로 고려하였다. Table 1은 Karasuno et al. (1991, 1992)에서 제안한 사향운동 하는 선체에 작용하는 유체력 요소를 나타내고 있다.

Table 1 Detail information for each element of hydrodynamic force and moment from Karasuno's mathematical model

Component force and/or moment	Mathematical expression
1. Munk moment	$(m_x' - m_y')u'v'$
2. Lift	$L_v = \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^2 C_L' u'v'$
3. Drag	$D_i = \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^2 C_{Di}' u'^2 v'^2$
4. Cross-flow drag	$Y_c = \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^2 C_{D90}' m'_{0'} v'^3,$ $N_c = \frac{1}{2}\rho L_{pp}^2 dU^2 C_{D90}' m'_{1'} v'^3$
5. Cross-flow lift	$X_{LAS} = \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^2 C_{LAS}' v'^2$
6. Friction	$X_F = \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^2 C_F' u' u'$
7. Correction force for stall effect	$(L_{ST}' + D_{ST}')_x =$ $-\Delta C_L' u'v'^2 + \Delta C_{Di}' u'^3 v'^2$

상기 Table 1에서 C_L' , C_{Di}' , C_F' , C_{D90}' 및 C_{LAS}' 는 각각 양력 계수, 유도항력 계수, 마찰계수, cross-flow drag 계수 및 선수부의 cross-flow 양력계수 및 선미부의 cross-flow 양력계수로부터 도출된 계수를 나타낸다.

Karasuno et al. (1991, 1992)은 수평면운동을 하는 선체에 작용하는 유체력 요소들의 성분들 중에서 양력, 유도항력 및 cross-flow lift 요소가 선수부 및 선미부에서 각각 분리되어 작용하는 것으로 가정하고 이들 3요소에 대해서 사향운동과 회전운동 시로 구분하여 Fig. 2, 3과 같이 표현하였다.

Lee et al. (2024)은 Karasuno 모델을 6자유도 조종운동을 하는 잠수함을 대상으로 선정하여 수학모델의 타당함을 검증한 바가 있으며 본 연구에서 Lee et al. (2024)의 결과로부터 사향 및 회전운동을 포함하는 최종 결과만을 식 (10)~(12)에 나타내었다.

$$X' = m_y' v' r' + (C_L' - \Delta C_L') u' \frac{(v' + x_i' r')^2}{\{u'^2 + (v' + x_i' r')^2\}^{1/2}} - (C_{Di}' - \Delta C_{Di}') u'^3 \frac{(v' + x_i' r')^2}{\{(u'^2 + (v' + x_i' r')^2)\}^{3/2}} - C_F' |u'|u' - C_{LAS}' (v'^2 + \frac{1}{4}r'^2) + C_{LASAF}' v' r' \quad (10)$$

$$Y' = -m_x' u' r' - C_L' u'^2 \frac{(v' + C_{v0} x_i' r')}{\{u'^2 + (v' + x_i' r')^2\}^{1/2}} - C_{Di}' u'^2 \frac{(v' + C_{i0}^{1/3} x_i' r')^3}{\{(u'^2 + (v' + x_i' r')^2)\}^{3/2}} - \int C_{D90}' \frac{(v' + x' r')^3}{\{u'^2 + (v' + x' r')^2\}^{1/2}} \cdot \left\{1 + p \frac{u'^2}{u'^2 + (v' + x' r')^2}\right\} d' dx' \quad (11)$$

$$N' = (m_x' - m_y') u' v' - x_i' C_L' u'^2 \frac{(C_{v0} v' + x_i' r')}{\{u'^2 + (v' + x_i' r')^2\}^{1/2}} - x_i' C_{Di}' u'^2 \frac{(C_{i0}^{1/3} v' + x_i' r')^3}{\{(u'^2 + (v' + x_i' r')^2)\}^{3/2}} - \int C_{D90}' \frac{(v' + x' r')^3}{\{u'^2 + (v' + x' r')^2\}^{1/2}} \cdot \left\{1 + p \frac{u'^2}{u'^2 + (v' + x' r')^2}\right\} x' d' dx' \quad (12)$$

여기서, x_i' , x_i' 는 각각 선체 중심으로부터 양력 및 항력이 작용하는 작용점까지의 무차원 거리, d' 은 무차원 흘수, p 는 간섭계수, $C_{v0}' = (C_{L_i}' - C_{L_i}')/C_L'$, $C_{i0}' = (C_{D_i}' - C_{D_i}')/C_{D_i}'$ 이다.

상기의 식 (10)~(12)에서 주목할 점은 횡력 및 회두모멘트를 표현하는 식을 구성하고 있는 유체동역학적 힘은 양력, 항력 및 cross-flow drag이다. 이미 서론에서 언급한 바와 같이 이들 양력, 항력 및 cross-flow drag계수(C_{D90}') 등이 결정되면 임의의 운동 상태에서의 선체가 받는 횡력 및 회두모멘트를 추정할 수 있음을 나타낸다. 특히, 본 연구에서 주목하고 있는 것은 이들 양

력, 항력 및 cross-flow drag 계수는 선체의 사향운동 중 선체에 작용하는 힘과 모멘트로부터 획득될 수 있고 이들이 결정되면 선 회상태에서의 선체에 작용하는 횡력 및 회두모멘트도 추정할 수 있다는 점이다. 즉, 기존의 Taylor 전개 기반의 수학모델을 구성하는 유체력 미계수를 획득하기 위해서는 정적사향 운동($Y_v', Y_{vv}', N_v', N_{vv}'$ 등) 및 선회운동($Y_r', Y_{rr}', N_r', N_{rr}'$ 등)을 각각 수행해야 함에 비해 Karasuno 모델은 정적사향 운동만을 수행하면 수학모델을 구성하는 모든 유체동역학적 계수가 획득될 수 있음을 뜻한다.

순수 사향운동($r' = 0, v' \neq 0$)의 경우 식 (11)과 (12)로부터 $C_L', C_D', C_F', C_{D90}'$ 및 C_{LAS}' 등과 같은 계수들이 결정됨과 동시에 추가적으로 C_{i0} (식 (12)에 포함된 $C_{i0}v'$ 항) 및 C_{i0} (식 (12)에 포함된 $C_{i0}^{1/3}v'$ 항)가 결정되게 된다. 특히, C_{i0} 및 C_{i0} 는 회전운동을 표현하는 항(식 (11)의 $C_{i0}x_i'r'$ 및 $C_{i0}^{1/3}x_i'r'$)에도 포함되어 있으므로 선회운동시 선체에 작용하는 횡력 및 회두모멘트가 추정되게 된다.

3. 수치계산

3.1 해석 조건 및 기법

2절에서 역학기반의 수학모델인 Karasuno 모델에 대해 살펴보았다. 이미 언급한 바와 같이 본 연구에서는 상선을 대상선으로 하여 Karasuno 모델의 장점으로 판단되는 사향조건에서 획득되어진 유체동역학적 계수만을 사용하여 선회운동시 선체에 작용하는 횡력 및 모멘트 추정의 가능 여부를 확인하는 것과 Karasuno 모델의 유용함을 판단하는 것이 목적이다. 본 연구에서는 전산유체역학(이후 CFD, Computational Fluid Dynamics)를 사용하여 정적사향 해석을 수행하였으며 이들 해석으로부터 Karasuno 모델을 구성하고 있는 유체동역학적 계수들을 획득하였다. 또한, Karasuno 모델로부터 추정된 선회운동 시 선체에 작용하는 횡력 및 회두모멘트의 타당성을 확인할 목적으로 선회운동 해석을 추가 수행하였다. 본 연구에서 사용된 대상선은 KCS(KRISO Container Ship)이며 주요 목을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Principal dimensions of KCS

Main particulars	Symbols and units	Model values
Scale ratio	λ	37.89
Length of waterline	$L_{WL} [m]$	6.1363
Length between the perpendiculars	$L_{PP} [m]$	6.07
Beam pf waterline	$B [m]$	0.8498
Draft	$T [m]$	0.285
Speed	$U [m/s]$	2.005

Table 3 Conditions for CFD analysis

Analysis items	Range
Horizontal static drift	$\beta = 0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 6^\circ, \pm 9^\circ, \pm 12^\circ, \pm 15^\circ, \pm 18^\circ, \pm 21^\circ, \pm 30^\circ, \pm 40^\circ, \pm 50^\circ, \pm 60^\circ, \pm 70^\circ, \pm 80^\circ, \pm 90^\circ$
Horizontal rotation with static drift angle	$r' = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ at $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$

Table 4 Settings for CFD analysis

	Description
Tool	STAR-CCM+ ver.16.06
Free-surface treatment	V.O.F (Volume of Fluid)
Turbulence model	RSM (Reynolds Stress Turbulence Model)
Wall function	High y+ wall treatment
Grid system	Trimmer
Total number of Grid	1,942,071
Motion	3-DOF

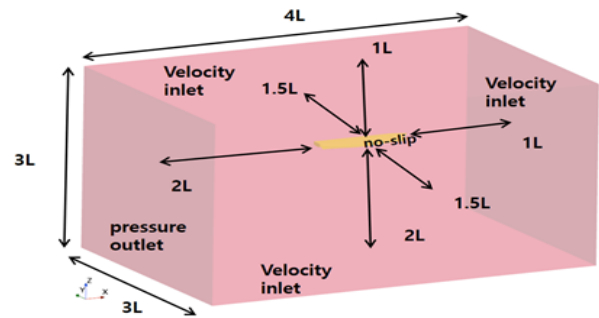
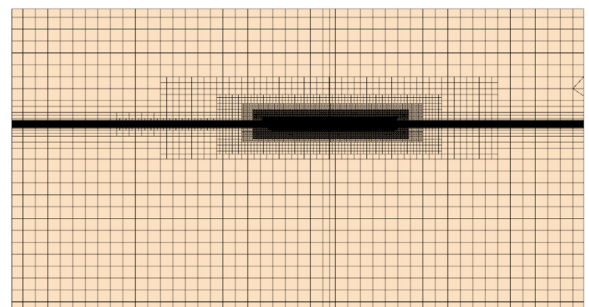
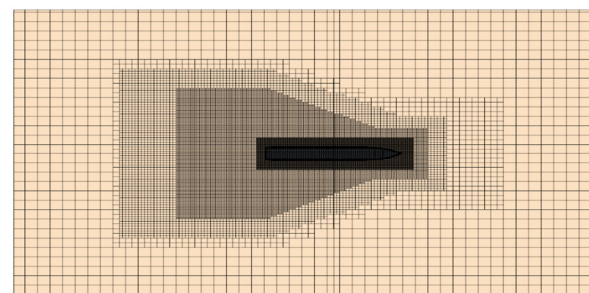


Fig. 4 Calculation domain for CFD analysis



(a) Side view



(b) Top view

Fig. 5 Grid systems for CFD analysis

한편, 본 연구에서 사용된 CFD 해석자는 상용 소프트웨어인 Star-CCM+이다. 계산을 위해 사용된 수치기법, 계산 조건 및 격자계를 Table 3, Table 4 및 Fig. 4와 5에 나타내었다.

본 연구의 목적은 계산의 정확도가 어느 정도 확보되었다고 가정된 모형시험 결과 또는 CFD 해석결과가 주어졌을 때 이들 결과로부터 Karasuno 모델에 포함된 각종 계수들을 결정하고 이 수학모델로부터 복원된 결과의 타당성을 검증하는 것이다. 따라서 계산에 사용된 격자계 및 수치기법의 경우 별도의 추가 검토 없이 일반적으로 널리 사용되는 값들을 사용하였다.

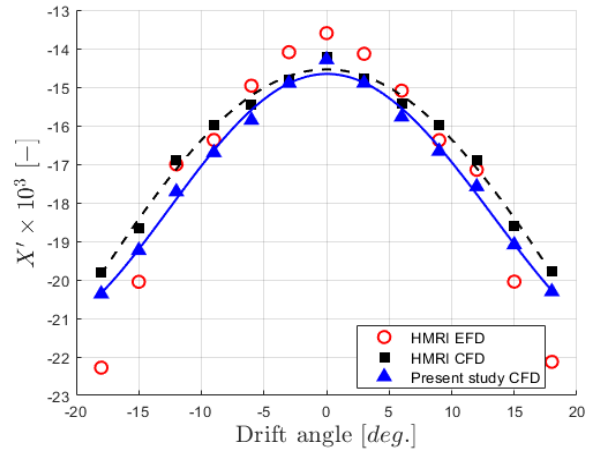
3.2 계산결과 및 계수획득

이미 언급한 바와 같이 식 (10)~(12)의 Karasuno 모델을 구성하고 있는 각종 유체동역학적 계수 등을 획득하기 위한 계산을 수행하기에 앞서 본 연구에서 수행한 CFD 계산의 타당성을 확인하기 위한 해석을 수행하였으며 Sung et al. (2015)의 모형시험 결과와 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

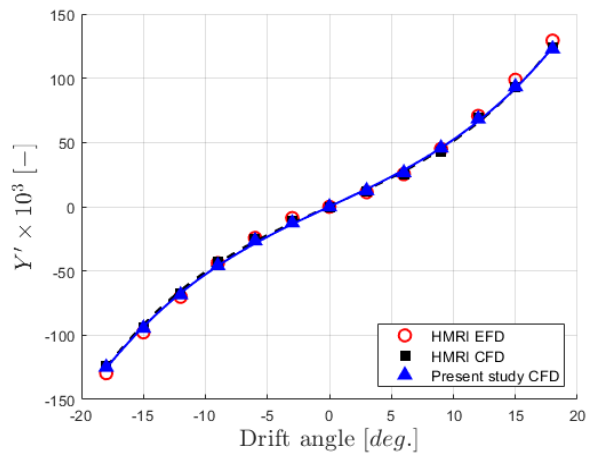
Fig. 6에 나타난 바와 같이 본 연구에서 수행한 CFD 계산 결과가 모형시험 결과와 비교적 잘 일치함을 보여주고 있는데, 전후력, 횡력 및 회두모멘트의 최대 차이는 각각 약 6.3%, 3.5% 및 4.4%이다. 한편, Karasuno 모델을 구성하고 있는 각종 계수들을 획득하기 위해서는 대각도 사항각에 대한 결과가 필요한데 Fig. 7은 대각도 사항각(-90°~90°) 범위에서의 CFD 해석결과를 나타내고 있다. Fig. 8~10는 Karasuno et al. (1991, 1992)이 제시하고 있는 해석법에 의해 획득된 각 성분 및 최종결과(각 그림에서 빨간색 실선)와 CFD 결과와의 비교를 나타내고 있다. Fig. 7~9에서 하첨자로 표시된 각 성분들은 Table 1에 나타난 힘의 성분을 선체에 작용하는 힘과 모멘트 성분으로 분리하여 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 대각도 범위까지 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

한편, Fig. 11 및 12는 대각도 사항운동 시 선체에 작용하는 횡력 및 모멘트에 대한 Taylor 급수 기반 수학모델과 Karasuno 수학모델과의 비교를 나타내고 있다. 이 그림들에서 알 수 있는 바와 같이 사항각 -24°~24°의 범위의 CFD 결과로부터 획득된 유체력 미계수를 사용하는 수학모델의 경우 소각도 범위(횡력 : 0°~30°, 모멘트 : 0°~30°)에서는 두 수학모델 모두 좋은 결과를 보여주고 있지만 그 이상의 사항각 범위에서는 Taylor 기반 수학모델의 한계를 보여주고 있다. 또한, 사항각 -90°~90°의 범위의 CFD 결과로부터 획득된 유체력 미계수를 사용하는 수학모델의 경우 횡력은 사항각 0°~50° 범위에서 CFD 결과와 잘 일치하지만 모멘트는 CFD 결과와 일치하는 범위가 없음을 보여준다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 Sohn (1992)이 제안한 푸리에 급수기반 수학모델의 사용이 고려될 수 있다고 판단된다.

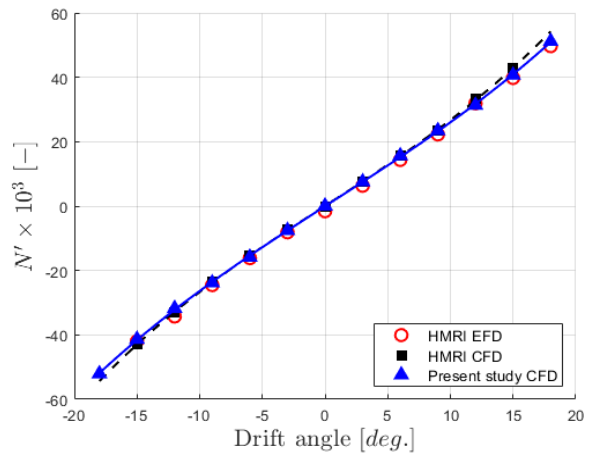
Table 5는 대각도 사항계산으로부터 Karasuno et al.에서 제안된 해석방법에 의해 도출된 동유체력계수 및 각종 계수를 나타내고 있다. 이 값들은 순수 사항운동($r' = 0, v' \neq 0$)으로부터 획득



(a) Surge force



(b) Sway force



(c) Yaw moment

Fig. 6 Comparison results between model test and CFD

될 수 있는데, 식 (11)과 (12)로부터 C_L' , C_D' , C_F' , C_{LAS}' 및 C_{DB0}' 등과 같은 계수들이 결정됨과 동시에 추가적으로 C_{v0} (식 (12)에 포함된 $C_{v0}v'$ 항) 및 C_{i0} (식 (12)에 포함된 $C_{i0}^{1/3}v'$ 항)가 결정되게 된다.

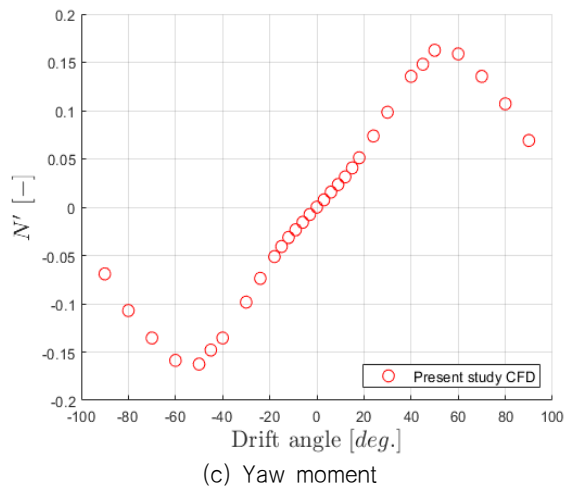
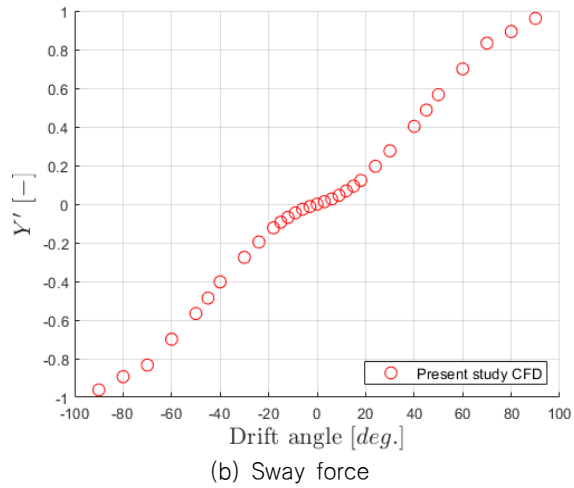
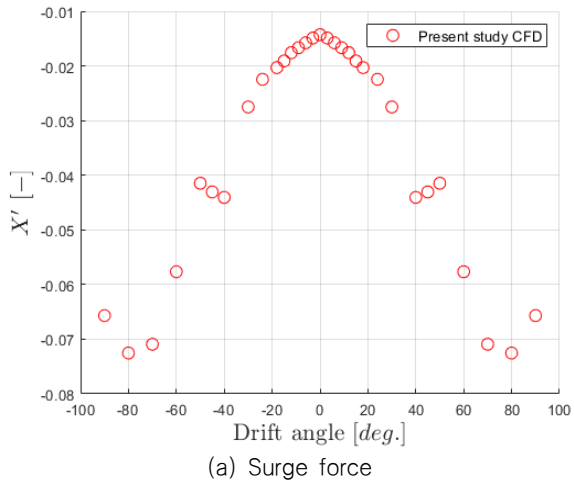


Fig. 7 Forces and moment at large drift angles ($-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$)

특히, 식 (12)에 포함되어 있는 $x'_i C'_L \cdot C_{v0}$ 항 및 $x'_i C'_{Di} \cdot C_{i0}^{1/3}$ 는 회두모멘트의 결과로부터 획득된 $x'_i C'_L \cdot C_{v0}$ 및 $x'_i C'_{Di} \cdot C_{i0}^{1/3}$ 로부터 횡력 계산 결과의 소각도 구간($-30^{\circ} \sim$

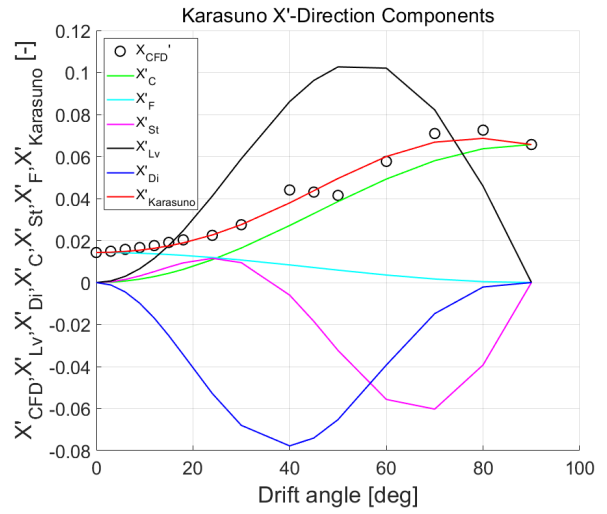


Fig. 8 Comparison result between CFD and Karasuno model for the surge force

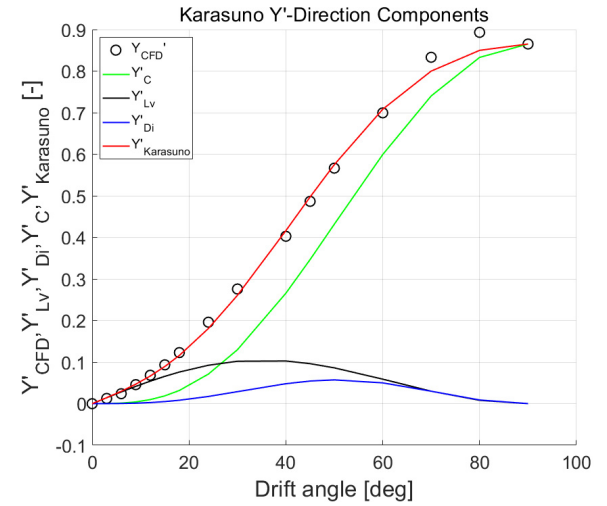


Fig. 9 Comparison result between CFD and Karasuno model for the sway force

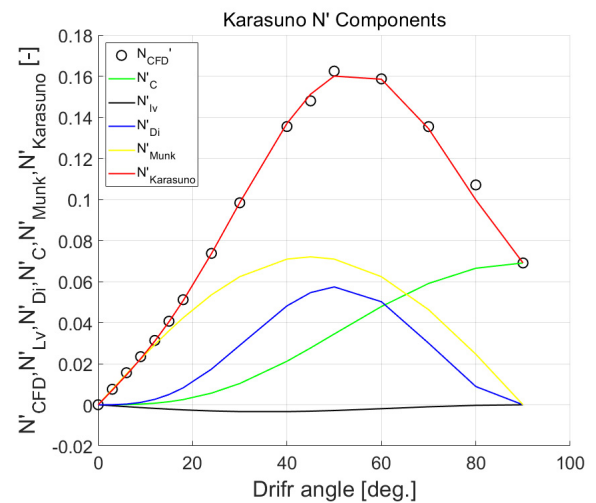


Fig. 10 Comparison result between CFD and Karasuno model for the yaw moment

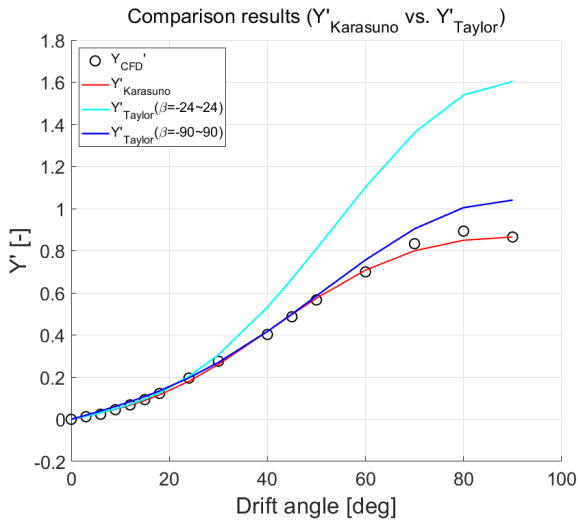


Fig. 11 Comparison results between Taylor based model and Karasuno model for the sway force in large drift angle

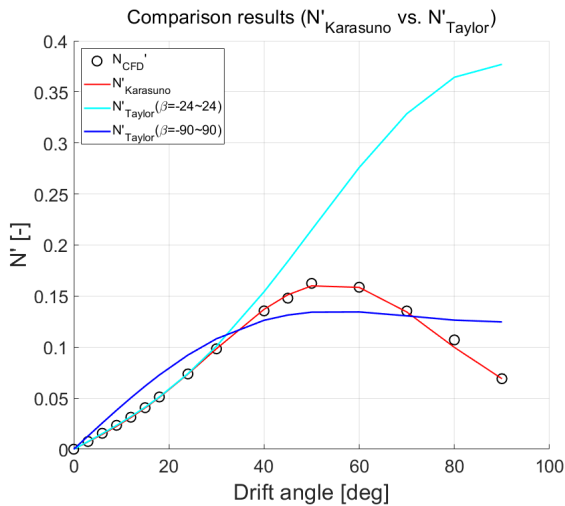


Fig. 12 Comparison results between Taylor based model and Karasuno model for the yaw moment in large drift angle

30° 해석에서 획득된 C'_L 및 C'_{Di} 를 고려하면 최종적으로 C'_{v0} 및 C'_{i0} 가 획득된다(이때, x'_t 및 x'_i 은 각각 -0.45, 0.45임).

3.3 선회운동 시 선체에 작용하는 유체력 추정

3.2절에 언급한 바와 같이 순수 사향운동($r' = 0, v' \neq 0$)으로부터 Karasuno 모델을 구성하는 모든 계수를 획득하였다. 본 절에서는 이들 수학모델로부터 선회운동하는 선체에 작용하는 횡력 및 선회모멘트를 추정된 결과를 검증하기 위해 회전팔(Rotating arm) CFD 해석을 수행한 후 CFD 결과와 Karasuno 모델로부터 추정된 결과를 비교함으로써 수학모델의 유용성을 검증한다. 계산조건, CFD 계산에 사용된 격자계 및 수치기법은 각각 Table 3,

Table 5 Hydrodynamic coefficients obtained by CFD

Coefficients	Values
C'_L	0.2721
C'_{Di}	0.3077
$\Delta C'_L$	0.2444
$\Delta C'_{Di}$	0.3842
C'_{LAS}	-0.0657
C'_F	-0.0143
C'_{D0}	1.236
C'_{v0}	0.0717
C'_{i0}	2.2317

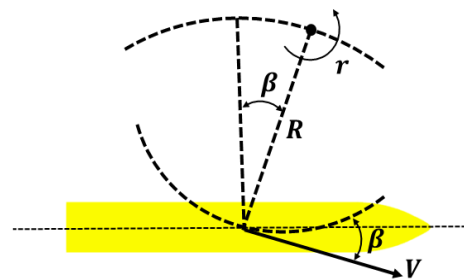


Fig. 13 Rotation motion for CFD analysis

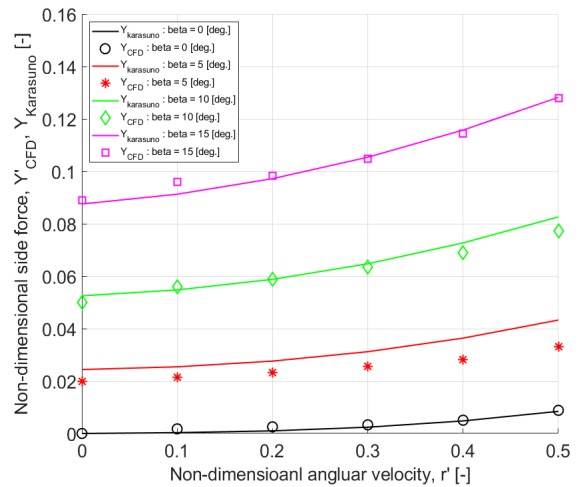


Fig. 14 Comparison results between CFD and estimation from Karasuno model for the lateral force

4 및 Fig. 4, 5에 나타난 바와 동일하다. 회전팔 해석의 경우 계산격자를 이동하는 방법(Moving grid 기법)과 격자를 고정하고 유체를 상대적으로 회전(Moving Reference Frame 기법, 이후 MRF기법)하도록 할 수 있는데, 본 연구에서는 유체를 상대적으로 회전해서 유입되는 방법(MRF기법)을 사용한다. 사향상태에서 회전하는 경우에 대한 설정을 위해서는 유체 회전의 중심을 계산해야 하는데 Fig. 13은 이에 대한 설명을 나타내고 있다. 유체 회전의 중심을 피벗(pivot) 시킴으로써 선박이 사향각을 가지면서 회전하는 상황을 설정할 수 있다.

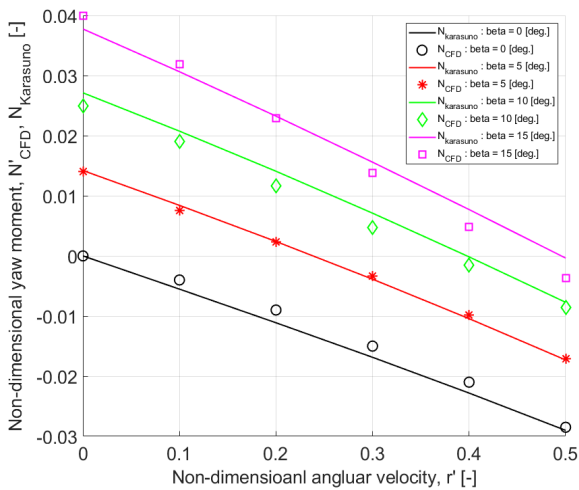


Fig. 15 Comparison results between CFD and estimation from Karasuno model for the yaw moment

Fig. 14 및 15는 회전팔 CFD 해석으로부터 획득된 결과와 Karasuno 모델로부터 추정된 결과와의 비교를 나타내고 있다.

Fig. 14 및 Fig. 15에서 실선은 Karasuno 모델로부터 추정된 선회시 선체에 작용하는 힘 및 모멘트를 나타내고, 심볼은 CFD 해석을 통해서 구해진 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 이들 결과에서 사향각 5도의 경우 수학모델로부터 추정된 힘과 모멘트가 CFD 결과보다 다소 과도함을 보이고 있는데 이는 사향상태에 대한 Karasuno 수학모델의 계산이 다소 과도한 결과를 추정함에 따른 경향이 반영된 것으로 판단된다. 이를 제외한 나머지 결과의 경우, 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 Karasuno 모델로부터 추정된 힘과 모멘트가 CFD 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 수학모델의 유용성이 확보되었다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 역학적 기반 조종운동 수학모델인 Karasuno 모델을 이용하여 일반 상선의 조종운동 시 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 추정하는 기법에 대해 살펴보았다. 특히, 순수 사향운동만을 이용하여 선체에 작용하는 동유체력과 관련된 각종 계수들을 해석하고 이들 계수들로 구성된 수학모델을 이용하여 선회시 선체에 작용하는 힘과 모멘트의 추정에 대한 가능성 검토 및 유용성을 파악하였다. 또한, 선박 조종운동 분야에서 전통적으로 사용되어 온 Taylor 전개 기반 수학모델을 대체할 수 있는 가능성에 대한 검토도 수행되었다.

한편, 본 연구에서는 KCS 선형에 대한 검토만 수행되어서 다양한 선형에 대한 적용 가능성에 대한 추가 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다. 끝으로 서언에서 언급한 바와 같이 시스템 식별 분야에서 사용될 수 있는 새로운 형태의 수학모델이 제시되었다고 사료되며 적용 가능성에 대한 추가 연구도 수행될 예정이다.

References

Abkowitz, M.A., 1964. *Lectures on ship hydrodynamics steering and maneuverability*. Report No HY-5. Hydro-Og Laboratorium (Lyngby, Denmark).

Beukelman, W., 1998. Manoeuvring coefficients for a wing-model in deep and shallow water:part II - calculations. *International Shipbuilding Progress*, 45(441), pp.5-50.

Choi, J.H., Lee, S.W. and Ahn, J.H., 2023. A study on the development of the manoeuvring mathematical model considering large motion of submarine. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 37(3), pp.81-88.

Hooft, J., 1994. The cross-flow drag on a manoeuvring ship. *Ocean Engineering*, 21, pp.329-342 (April).

Hooft, J.P. and Quadvlieg, F.H.H.A., 1996. Non-linear hydrodynamic hull forces derived from segmented model tests. *International Conference on marine simulation and ship manoeuvrability*, MARSIM 96, Copenhagen, Denmark, September, pp.399-409.

Karasuno, K., Matsuno, T.I. and Igarashi, K., 1991. The mathematical model of hydrodynamic forces acting on ship moving in an oblique direction with fluid-dynamic concepts (2nd Report). *Journal of the Kansai Society of naval architectures*, Japan, 216, pp.175-183.

Karasuno, K., Matsuno, T.I. and Igarashi, K., 1992. A new mathematical model of hydrodynamic forces and moment acting on a hull during maneuvering motion that occurs under conditions of slow speed and large turns (2nd report). *Journal of the Kansai Society of naval architects*, Japan, 217, pp.125-135.

Kijima, K. and Nakiri, Y., 2003. On the practical prediction method for ship manoeuvring characteristics. *Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects*, No 105, pp.21-31.

Lee, S.W. and Ahn, J.H., 2024. A study on a physical based manoeuvring mathematical model for submarines. *Ocean Engineering*, 311(2024), 118839.

Nonaka, K., Haraguchi, T., Numura, T., Ueno, M., Fujiwara, T., Makino, M., Kodama, Y. and Yoshino, Y., 1997. Research on flow field around a ship in manoeuvring motion. *Papers of Ship Research Institute*, 34(5), pp. 1-68.

Sohn, K.H., 1992. Hydrodynamic forces and maneuvering characteristics of ships at low advance speed. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 29(3), pp. 90-101.

Sung, Y.J. and Park, S.H., 2015. Prediction of ship manoeuvring performance based on virtual captive model tests. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 52(5), pp.407–417.

Toxopeus, S., 2006. Validation of slender-body method for prediction of linear manoeuvring coefficients using experiments and viscous-flow calculation. *Proceedings of the 7th international conference on hydrodynamics*, ICHD, University of Naples, Ischia, Italy, pp.589–598.

Authorship Contribution Statement

Zhu Weihwa: Writing-original draft; **Jin Geun Bae:** Writing-original draft; **Boo Ki Kim:** Methodology; **Sung Wook Lee:** Supervision, Writing-review & editing.



주 위 화



배 진 근



김 부 기



이 성 옥