



자유항주모형시험과 회귀분석을 통한 선체 동역학 모델의 개발

김기원¹·김호용¹·최성은¹·나기인²·이혁³·서정화^{1,†}
충남대학교 선박해양공학과¹
한국전자통신연구원²
한국기계연구원³

Development of Ship Dynamics Model by Free-Running Model Tests and Regression

Kiwon Kim¹·Hoyong Kim¹·Sungeun Choi¹·Ki-In Na²·Hyuk Lee³·Jeonghwa Seo^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Intelligent Robotics Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute²
Department of System Dynamics, Korea Institute of Machinery and Materials³

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.

The present study suggests a procedure of establishing a ship dynamics modeling by regression of free-running model test results. The hydrodynamic force and moment of the whole model ship is derived from the low-pass filtered acceleration in the turning circle and zigzag maneuver tests. Force and moment of the propeller and rudder are separated from that of the whole ship to acquire the hull force and moment terms, based on the principles of the component model. The low-pass filter frequency is verified in prior to dynamics modeling, to find the threshold frequency of 2.5 Hz. The dynamics modeling of the hull is compared with the component modeling by captive model tests. Because of strong correlation between sway velocity, yaw angular velocity, and heel angle, each maneuvering coefficient is not able to be validated, but the whole modeling shows good agreement with the captive model tests.

Keywords : Free running model test(자유항주모형시험), Mathematical maneuvering model(수학적 조종 모델), Regression(회귀 분석)

1. 서론

선박의 설계 단계에서 조종 성능을 추정하기 위해서 선박 동역학 모델을 이용한 조종 시뮬레이션을 수행한다. 조종 모델이라고도 하는 동역학 모델은 선박의 운동이나 제어 조건별로 발생하는 유체력의 추정식으로, 이를 조종 성능 시험 상황에 적용하여 선박 운동을 예측하고 주요 조종 성능 지표를 규정된 기준치와 비교한다 (Son, 1989).

조종 성능의 정확한 추정을 위해서 선박 동역학 모델을 실제 물리 현상을 잘 반영하도록 설계해야 한다. 하지만 선박 주위의 유동현상은 매우 복잡하기 때문에 모든 유체역학적 현상을 반영한 모델을 개발할 수는 없다. 따라서 입력(운동)에 대한 출력(유체력)의 관계를 간략화된 수식으로 나타내는 접근법을 사용

한다 (Yasukawa and Yoshimura, 2015). 일반적으로 추진기, 방향타에 대해서는 상당한 정확도를 갖는 유동 현상 모델링이 적용되나, 선체의 유체력 모델은 유동 현상에 대한 특별한 고려 없이 유한한 차수의 다항식으로 근사하여 각 항의 계수를 해석식이나 경험식, 구속모형시험 등의 방법으로 얻어내는 방식이 일반적이다 (Lee and Shin, 1998; Kim et al., 2009).

동역학 모델의 다항식을 구성하는 계수들은 유체력 미계수(hydrodynamic derivative)나 조종 계수(maneuvering coefficient)라고 불린다. 동역학 모델의 구성에서 조종 계수의 수를 조절하는 것은 매우 중요한데, 조종 계수의 수가 많아지면 조종 모델은 더 정확해지겠지만 이를 구하기 위한 구속모형시험의 분량이 증가하게 된다. 따라서 선박 조종 해석 시 운동의 자유도, 선박 운동의 좌우대칭 등을 고려하여 영향이 작을 것으로 판단되는 조종계수를 제거한다. 최근에는 수면상의 운동만 다루는

3자유도 운동모델에 더하여 횡동요의 영향을 고려한 4자유도 운동 모델이 적용되기도 하므로, 횡동요와 연계된 조종 계수의 식별에 대한 문제는 더 복잡해지는 실정이다 (Sohn and Kim, 2003; Kim et al., 2011; Yasukawa et al., 2019; Yun and Yeo, 2019).

조종 계수를 얻기 위해서는 다양한 실험적 기법이 활용된다. 가장 신뢰성 높은 방법인 구속모형시험은 자유도 향상, 제한수로와 같이 다양한 조건을 고려한 동역학 모델의 확장에 대응하는 데에는 실험 분량의 현실적인 한계가 있다. 구속모형시험의 한계를 극복하기 위해, 자유항주모형시험을 이용해 조종 성능을 직접 구하거나 조종 모델을 도출하는 연구가 수행되었다 (Shin and Kim, 2008; Araki et al., 2012; Yun et al., 2015; Yun et al., 2021). 자유항주모형시험은 모형선을 실제 선박과 동일하게 방향타와 추진기를 제어하며 조종 제어를 하는 시험으로, 구속모형시험에 비해 더 많은 운동 조건의 데이터를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

기존의 다항식 기반의 동역학 모델에 자유항주모형시험이나 실선 시운전의 결과를 적용할 때는 칼만 필터(Kalman filter)를 이용해 적절한 조종 계수를 추정하는 방식이 주로 사용된다 (Yoon and Rhee, 2003). Yoon and Son (2004)의 연구에서는 실선의 시운전 결과를 이용해 횡동요 운동 모델링을 추정하고 그 결과를 검증하였다. Araki et al. (2012)의 연구에서는 ONR Tumblehome (ONRT) 모형선에 대해 여러 경험식이나 해석식을 이용해 조종 계수의 초기값을 정하고 여기에 칼만 필터를 적용해 자유항주모형시험의 시계열 조종 결과와 가장 일치하는 계수를 찾아내었다. 이와 비슷한 연구로, Kim and Kim (2020)의 연구에서는 경험식으로 구한 유체력 계수를 자유항주시험을 통해 얻은 조종 성능 지수를 이용해 보정하는 방법을 제안하였다. 이외에도 자유항주모형시험으로부터 바로 조종 계수를 얻기 위한 연구가 수행되기도 하였다. Sutulo and Soares (2014)의 연구에서는 자유항주모형시험 결과로부터 동역학 모델의 계수를 얻어내기 위한 여러 알고리즘의 강건성을 비교하였다.

본 연구에서는 컴포넌트 모델(component model)에 기반하여 자유항주모형시험의 결과에 회귀분석을 적용, 선박의 정수 중 동역학 모델을 개발하는 과정을 제안한다. 이는 Sutulo and Soares (2014)의 연구에 기반한 것으로, 본 연구에서는 이렇게 구한 조종 모델의 검증에 초점을 맞춰 구속모형시험과 자유항주모형시험의 결과와 조종 모델을 이용한 시뮬레이션을 비교하여 본 연구에서 제안되는 모델링 기법의 유효성을 검토하였다.

2. 동역학 모델

2.1 좌표계

동역학 모델링을 통한 선박의 조종 시뮬레이션에서는 지구고정좌표계($O-\xi\eta\zeta$)와 선박고정좌표계($o-xyz$)의 두 가지 좌표계가 사용된다. Fig. 1은 실험에 사용된 좌표계의 구성이다.

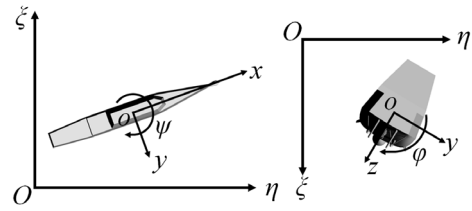


Fig. 1 Coordinate system

두 좌표계 모두 오른손 좌표계로, 지구고정좌표계의 원점은 조종 입력을 하였을 때의 선박 위치, ξ , η , ζ 축의 방향은 선박 초기 직진 상태를 기준으로 각각 선수 방향, 우현 방향, 수면 아래쪽으로 정하였다. 선박고정좌표계의 원점(o)은 선박의 무게중심으로, x , y , z 축의 방향은 선수, 우현, 아래쪽으로 정하였다.

선박고정좌표계에서 나타낸 4자유도 운동에서 선박의 속도 벡터 $\mathbf{v}$ 와 각속도벡터 $\mathbf{\Omega}$, 힘 $\mathbf{F}$, 모멘트 $\mathbf{M}$ 은 식(1) - (4)와 같이 나타냈다.

$$\mathbf{v} = u\hat{\mathbf{i}} + v\hat{\mathbf{j}} \quad (1)$$

$$\mathbf{\Omega} = p\hat{\mathbf{i}} + r\hat{\mathbf{k}} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = X\hat{\mathbf{i}} + Y\hat{\mathbf{j}} \quad (3)$$

$$\mathbf{M} = K\hat{\mathbf{i}} + N\hat{\mathbf{k}} \quad (4)$$

방향타각(δ)는 선체가 우선회(+)하는 타각 조건을 양수로 정의하였다. 횡동요각(ϕ)은 정수면에서 x 축 회전 방향, 즉 우현이 낮아지는 방향으로 선체가 횡동요한 정도로 정의된다.

2.2 유체력의 추정

Fig. 2는 본 연구에서 제안된 자유항주모형시험 결과에서 선박 동역학 모델을 구하는 과정이다. 자유항주모형시험의 결과에서 가속도 항을 이용해 선박 전체의 유체력(X , Y , K , N)을 구한다. 그리고 각 상황에서의 추진기, 방향타의 힘과 모멘트(X_R , Y_R , K_R , N_R)를 모델링을 통해 얻어내고, 선박 전체의 유체력에서 이 값을 빼서 선체의 유체력(X_H , Y_H , K_H , N_H)을 구한다. 이렇게 얻어진 운동 조건과 유체력의 데이터셋에 대해 회귀분석을 통해 선체 동역학 모델을 도출한다.

동역학 모델 개발의 상세한 과정은 다음과 같다. 우선 식 (5) - (8)에서 보인 바와 같이, 사전에 주어진 선체 질량(m), 관성 모멘트(I_{xx} , I_{zz})와 자유항주모형시험을 통해 얻은 속도 및 가속도 성분을 이용해 선체 전체의 유체력과 모멘트를 구한다.

$$m(\dot{u} - vr) = X \quad (5)$$

$$m(\dot{v} + ur) = Y \quad (6)$$

$$I_{xx}\dot{p} = K \quad (7)$$

$$I_{zz}\dot{r} = N \quad (8)$$

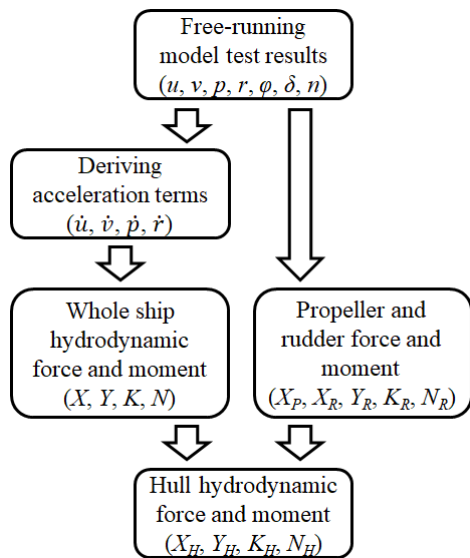


Fig. 2 Procedure for deriving hull dynamics modeling from free-running model test results

식(5) - (8)을 통해서선 모형선 전체에 대한 힘과 모멘트만 추정 가능한데, 이는 선박 동역학 모델 중 전선(Whole ship)모델의 조건에 대응된다. 하지만 실제 선박 조종의 해석에서는 컴포넌트 모델이 더욱 자주 사용된다. 이는 전체 힘과 모멘트로부터 선체 관련 항을 추진기, 방향타로 인한 항과 분리하는 방식으로, 선박의 설계 변경의 대응이나 실선 스케일의 조종 성능 추정에 이점이 있다. 만약 자유항주모형시험 중 방향타나 추진기의 힘을 계속한다면 이를 모델링에서 직접 사용할 수도 있겠으나, 추진기와 방향타의 유체력 모델링은 Araki et al.(2012)의 연구에서 사용된 것을 그대로 이용하였다.

선체 유체력 성분은 다항식으로 근사하였다. 각 방향의 운동 방정식은 식(9) - (12)와 같다.

$$X = -R - m_x \dot{u} + m_y vr + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{vr} vr + X_P + X_R \quad (9)$$

$$Y = -m_y \dot{v} - m_x ur + Y_v v + Y_r r + Y_\phi \phi + Y_{vv} v^3 + Y_{rr} r^3 + Y_{vr} v^2 r + Y_{rv} vr^2 + Y_R \quad (10)$$

$$K = -J_{xx} \dot{p} + m_x z_H \dot{u} r - mgGZ\phi + K_p p + K_\phi \phi + z_H (Y_r r + Y_v v + Y_{rr} r^3 + Y_{vr} vr^2 + Y_{vv} v^2 r + Y_{vv} v^3) + K_R \quad (11)$$

$$N = -J_{zz} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_\phi \phi + N_{vv} v^3 + N_{vr} v^2 r + N_{rr} vr^2 + N_{rrr} r^3 + N_R \quad (12)$$

4자유도 조종 모델을 구성하는 변수는 횡동요각(ϕ), x, y방향의 선형운동 속도(u, v), 가속도($\dot{u}, \dot{v}$), x, z방향의 회전운동 각 속도(p, r), 각가속도($\dot{p}, \dot{r}$), 방향타각(δ), 추진기 회전수(n)가 있다. 여기서 n, δ 는 추진기와 방향타에만 영향을 주는 것으로

가정하여, 선체의 유체력에서는 고려하지 않는다. 그리고 횡동요 운동에 대해서는 Y방향 힘으로 인한 모멘트가 주를 이룰 것으로 보아, 모멘트 암(Moment arm) z_H 를 고려해 횡동요 성분을 구했다. 따라서 K 모멘트에 대한 회귀분석을 통해 K_ϕ 와 K_p 만을 구하였다.

2.3 회귀분석을 위한 전처리

2.2장의 선체 유체력에는 부가질량으로 인한 관성력이나 복원력 항이 포함된다. 그 중 관성력 관련 항은 구속모형시험을 통해 구하는 것이 일반적이나, Araki et al. (2012)와 같이 스트립 기법(strip method)과 같은 수학적 해석을 통해 구하기도 한다. 본 연구에서는 조종 모델 개발을 위한 모형시험의 범위를 자유항주모형시험으로 한정하는데 초점을 맞추었으므로, 관성력 관련 항을 구속모형시험 대신 Araki et al. (2012)와 같은 방법으로 구해 적용하였다. 유사하게, 식 (11)의 복원력 항($-mgGZ\phi$) 역시 선체 형상에 대한 수정역학 해석을 통해 구할 수 있다. 선체 유체력의 회귀분석에 있어 이렇게 실험 외의 방법으로 구할 수 있는 항을 제외하면 회귀분석의 자유도를 낮춰 더 신뢰성있는 회귀분석 모델을 얻을 수 있다.

식 (9)의 X에 대한 전선 모델의 운동방정식을 예로 들어 유체력의 전처리 과정을 설명하겠다. 식(9)에서 이미 알고 있는 항은 직진 중 선체 저항(R), X_p, X_R 이 있다. 그리고 Araki et al.(2012)에서 제안된 바와 같이 부가질량(Added mass)을 스트립 이론(Strip theory)로 계산하여 알고 있다면, 식 (5)와 식 (9)를 결합하여 X_H 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X_H(v, r) = X - X_P - X_R + R + m_x \dot{u} - m_y vr = (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) vr - X_P - X_R + R \quad (13)$$

같은 방식으로 식 (10) - (12)을 정리해 Y_H, K_H, N_H 의 계산식을 얻는다. 우변의 모든 항은 값을 알고 있으므로 좌변의 선체 유체력을 구할 수 있다.

$$Y_H(v, r, \phi) = (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) ur - Y_R \quad (14)$$

$$K_H(v, r, \phi, p) = (I_{xx} + J_{xx}) \dot{p} - K_R - m_x z_H \dot{u} r + mgGZ\phi \quad (15)$$

$$N_H(v, r, \phi) = (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} - N_R \quad (16)$$

2.4 인공신경망을 이용한 회귀분석

최적의 회귀 분석값을 내는 조종 계수를 인공신경망을 이용하여 구하였다. 식 (14)을 이용해 구한 운동 성분대응되는 식 (10)의 각 항의 변수에 대한 계수는 파이썬 라이브러리 scikit-learn의 Linear-Regression모델을 사용하여 구하였다.

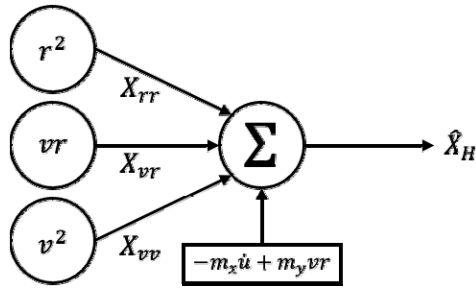


Fig. 3 Single perceptron model for X_H

식 (13), (15), (16)을 이용해 구한 운동 성분에 대응되는 선체 유체력쌍에 대해, 식 (9), (11), (12)의 각 항의 변수에 대한 최적의 계수를 활성 함수를 제외한 단층 퍼셉트론 모델을 활용하여 구하였다.

딥러닝을 통한 퍼셉트론 회귀분석의 배치 크기(batch size)는 1024로 설정하였고, 손실함수로서 MSE(Mean Squared Error) loss를 활용하여 Adam Optimization을 통해 학습률(learning rate) 0.001로 1000 epoch 동안 학습을 수행하였다.

3. 실험 구성

3.1 대상 선박

연구에 사용된 모형은 ONR Tumblehome으로, 연구목적으로 공개된 쌍축 수상함 형상이다. Fig. 4는 대상 선형의 형상이다. 해당 함정은 흘수선 위로 선체가 좁아지는 텀블홈(tumblehome) 형상을 갖췄다. 텀블홈 선형은 일반적인 선박에 비해 횡복원력이 약하고 GM이 작기 때문에 조종 중 횡동요가 크게 발생할 것으로 기대된다. 따라서 횡동요를 포함한 조종 모델의 개발이 의미가 있을 것으로 보아 본 연구의 대상으로 선정되었다.

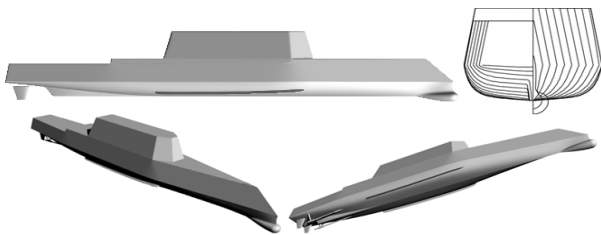


Fig. 4 Geometry of ONR Tumblehome

Table 1 Principal dimensions of the model ship

Item		Ship	Model
Scale ratio	λ	—	1/48.9
Length between perpendiculars (m)	LPP	154.0	3.15
Beam (m)	B	18.8	0.384
Draft (m)	T	5.49	0.112
Volumetric displacement (m^3)	∇	8507	0.0726
Propeller diameter (m)	D	5.22	0.107
Advance speed at $Fr = 0.2$	U	15.1 knots	1.11 m/s

Table 1에 실험 모형의 주요 치수를 기재하였다. 실험 모형의 축척비는 같은 선형의 조종 성능 관련 시험에 사용된 모형의 축척비를 따랐다 (Araki et al., 2012; Sanada et al., 2013).

3.2 자유항주모형시험

본 연구에서 사용된 옥외 자유항주모형시험의 상세 내용은 Park et al. (2020)의 연구에 기술되어 있다. Table 2에 자유항주모형시험의 조건을 정리하였다. 실험은 프루드 수(Froude number, $Fr = U/\sqrt{gL_{PP}}$) 0.2 조건을 직진 중 달성할 수 있는 추진기 회전수를 유지하면서 수행한 선회시험과 지그재그시험으로 구성된다. 모든 실험은 3회씩 반복하였다.

Table 2 Test conditions of free running model test

Test	Propeller revolution rate	Rudder angle	Number of test runs
Turning circle test	593	25°	3
		−25°	3
		35°	3
		−35°	3
Zigzag test		10°/−10°	3
		−10°/10°	3
		20°/−20°	3
		−20°/20°	3

자유항주모형시험에서 모형선의 운동은 20Hz로 기록되었다. 기록된 운동 데이터는 약 28,000개이다. 시험 데이터에서 가속도가 제공되지 않았기 때문에 가속도는 시계열 속도 데이터의 시간차분을 통해 구했다. 속도는 범지구 위성 항법 시스템의 위성신호의 도플러 효과를 이용해 계속하므로 위성과의 시간차와 삼변측량을 통해 구하는 위치 계측과는 그 원리가 다르며, 위치 오차가 속도 오차에 반영되지 않는 특성을 갖는다.

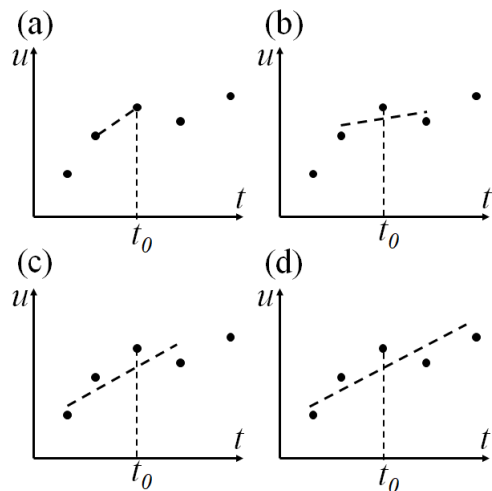


Fig. 5 Low-pass filtering with frequency variation (a): 20 Hz, (b): 10 Hz, (c) 6.67 Hz, (d) 5 Hz

Fig. 5에 보인 것과 같이, 본 연구에서는 저주파 필터(Low-pass filter)의 개념으로 연속된 속도 데이터의 선형 추세선의 기울기를 구해 가속도 성분으로 삼았다. 저주파 필터의 기준 주파수(f)는 추세선 계산에 사용된 연속된 데이터의 수(N)와 데이터의 계측 주파수(20Hz)를 이용해 식 (17)과 같이 정의하였다. f 는 1.25Hz에서 20Hz까지 적용되었다.

$$f = 20 / (N - 1) \quad (17)$$

3.3 비교검증 실험 데이터

본 연구에서는 선체 동역학 모델의 개발, 활용에 대해 세 가지 과정에 대한 검증을 수행한다. 우선 자유항주모형시험의 결과에서 유체력을 구하는 과정을 검증한다. 이를 위해, Araki et al. (2012)의 연구에서 사용된 선체의 동역학 모델에 본 연구의 자유항주시험 중의 운동값을 넣어 추정된 유체력을 가속도를 이용해 직접 추정된 유체력과 비교하였다.

그 다음, 회귀분석의 검증은 Seo et al. (2020)의 연구에서 제공된 구속모형시험 결과의 비교를 통해 수행했다. 본 연구에서 구한 선체 유체력의 회귀모델에 추진기, 방향타 유체력을 더한 전체 모형선의 유체력 모델을 만들어 이를 Seo et al. (2020)의 구속모형시험 조건에 대입해 선체 전체의 유체력을 구하고, 그 결과를 구속모형시험과 비교했다.

추가로, 선박 동역학 모델 전체의 신뢰성을 평가하기 위해 Araki et al. (2012)의 실내 자유항주시험 중 $\delta = 35^\circ$, $\psi_c = 90^\circ$ 의 지그재그 시험에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

4. 조종 모델의 검증과 비교

4.1 저주파 필터 주파수에 따른 데이터 유효성 검토

자유항주모형시험에서 가속도를 구할 때, 저주파 필터 주파수를 높게 설정하면 잡음이 유체력에 반영되므로 유체력의 산포가 커져 회귀분석에 어려움이 있게 된다. 반대로 저주파 필터 주파수를 낮추면 속도의 변화를 무시하여 가속도로 인한 유체력을 작게 추정하는 문제가 발생한다. 따라서 적절한 저주파 필터 주파수는 유체력이 일관된 경향을 보이는 영역에서 가장 높은 주파수를 택하는 것이 타당하다.

저주파 필터 기준 주파수 별로 얻어진 선체 유체력 모델링 결과를 Araki et al. (2012)에 의해 제안된 선체 유체력 모델링 적용 결과와 비교하였다. Fig. 6은 $f = 2.5\text{Hz}$ 의 비교 결과이다. 유체력인 X_H 와 Y_H 는 X_H , Y_H 를 각각 $0.5\rho V^2 L_{pp} T$ 로 무차원화한 값이다. 모멘트인 K_H , N_H 는 $0.5\rho V^2 L_{pp}^2 T$ 로 무차원화하여 K_H 와 N_H 를 구하였다.

실험 결과의 상호상관도의 선형 추세선의 기울기와 R^2 가 1에 가까울수록 본 연구의 유체력 추정값은 구속모형시험을 통해

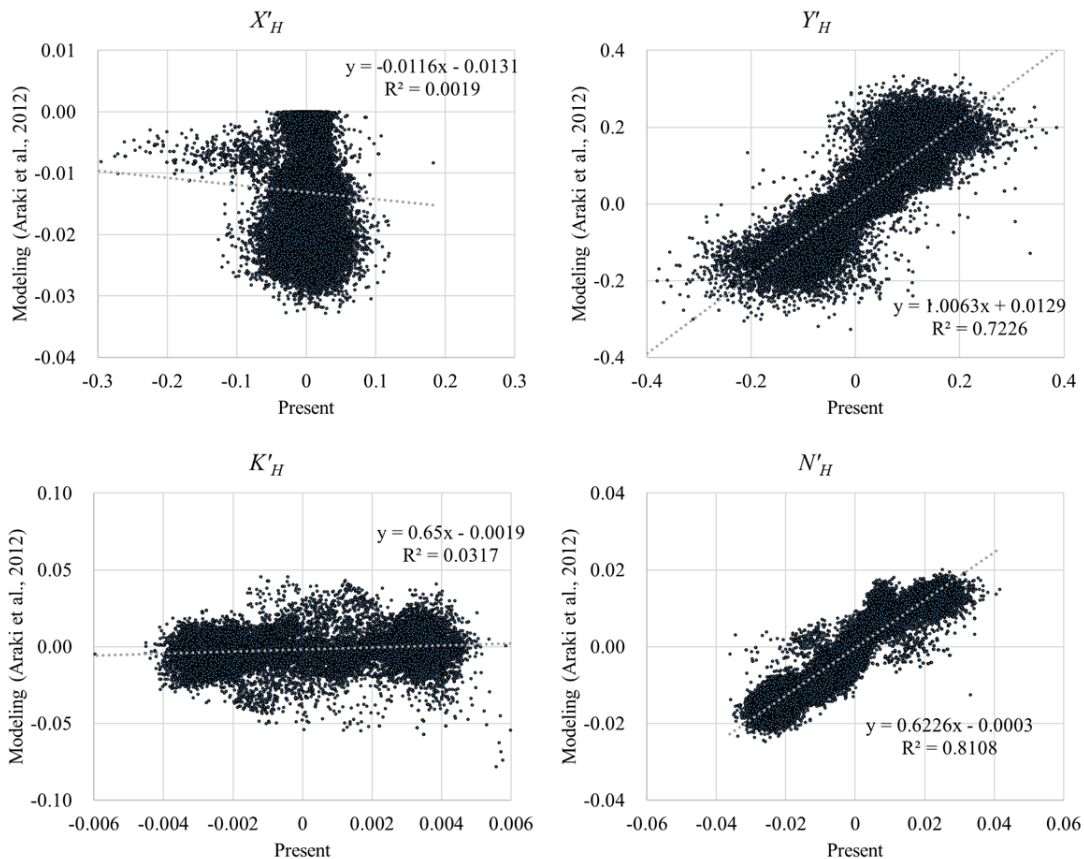


Fig. 6 Comparison of hull hydrodynamic force and moment at $f = 1.25\text{ Hz}$

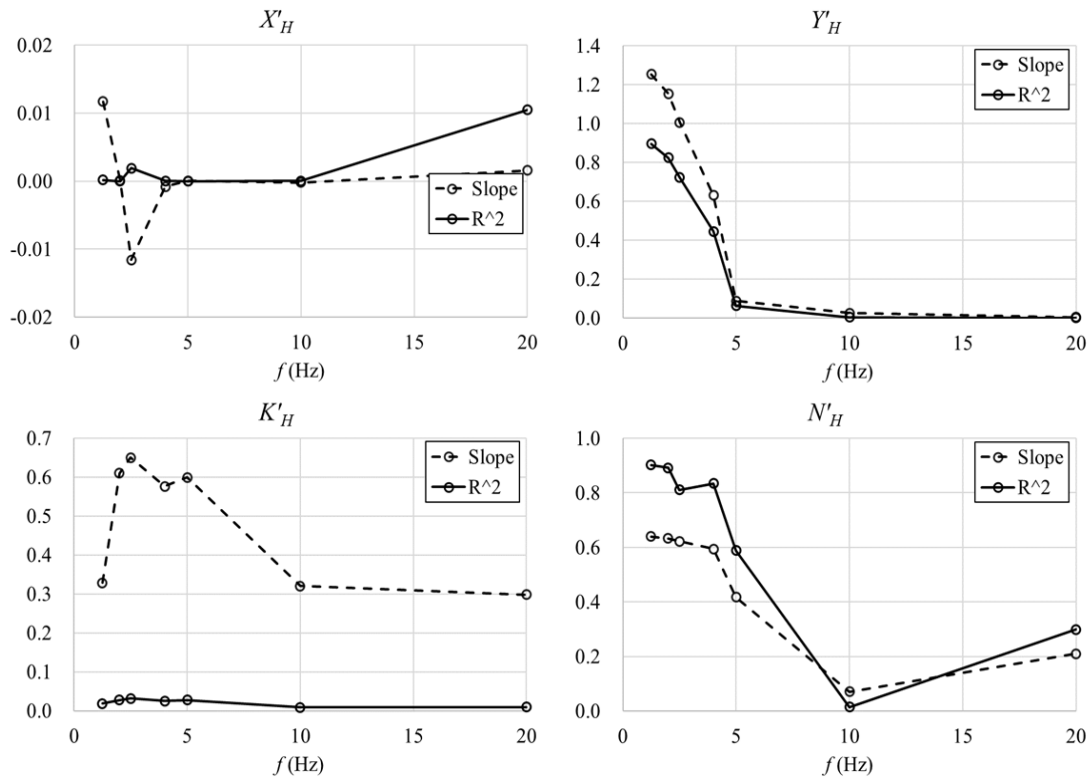


Fig. 7 Correlation of the hull hydrodynamic force and moment from free-running model test results and maneuvering modeling (Araki et al., 2012) with low-pass filtering frequency variation

구한 Araki et al. (2012)의 조종 계수와 유사함을 의미한다. 비교 대상의 조종 계수가 완전한 정답은 아니므로, 전체적인 경향성을 비교하는 수준에서 데이터의 유효성을 평가하였다.

Fig. 7은 전체 f 영역에 대한 비교 결과이다. 우선 유체력, 모멘트의 크기가 큰 Y'_H , N'_H 을 중심으로 저주파 필터의 적합성을 검토하였다. $5\text{ Hz} < f < 20\text{ Hz}$ 영역에서는 유의미한 상관관계가 얻어지지 않았지만, 5Hz보다 작은 f 에서는 f 가 감소할수록, 즉 필터 주파수가 낮아질수록 상관관계가 뚜렷해졌으므로 저주파 필터링이 유효한 것으로 볼 수 있다. 특히 R^2 값이 1에 가까워졌으므로 Araki et al. (2012)의 구속모형시험 결과로부터 구한 유체력 모델링과 본 연구의 가속도 기반 유체력의 계산이 같은 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 $f = 2.5\text{ Hz}$ 를 가속도의 저주파 필터링 값으로 정해 유체력 모델링을 진행했다.

다만 크기가 작은 X'_H 와 K'_H 는 모든 f 영역에서 Y'_H , N'_H 에 비해 상관관계가 덜한 것으로 나타났다. 그리고 회귀분석으로 구하려는 선박의 운동과 관련한 유체력 항보다 저항, 추력, 복원 모멘트와 같이 유체력의 전처리 과정에서 제외하는 항의 비중이 더 크기 때문에, 크기가 작은 운동 관련 유체력항에 가속도의 잡음 영향이 모두 반영되어 결과의 산포가 더욱 커지는 것으로 판단된다.

4.2 선체 유체력 모델

회귀분석을 통해 선체의 조종 계수를 구해 Araki et al. (2012)

의 연구에서 제안된 조종 계수와 비교하였다. Table 3에 그 결과를 정리하였다. 전반적으로 각 항들의 직접 비교는 어려웠으며 본 연구의 각 항들의 물리적 타당성을 설명할 수는 없었는데, 본 연구의 회귀분석에서 각 계수의 초기값이 없으므로 회귀분석 방향을 사용자가 제시할 수 없다는 점과, 4.3장에서 설명할 자유항주모형시험 중 얻어진 v 와 ϕ 의 강한 상관성 때문에 회귀분석에서는 두 변수의 영향을 분간할 수 없기 때문이 주된 원인으로 생각된다. 따라서 조종 모델의 검증은 각 계수의 비교보다는 전체 유체력의 비교, 조종 시뮬레이션의 결과 검토의 관점에서 이뤄져야 할 것으로 보인다.

4.3 구속모형시험과의 비교

본 연구에서 구한 선체 유체력 모델을 기존의 모델과 비교하기 전에 한가지 강조해야 할 점은, 본 연구의 모델은 자유항주 모형시험 중 얻어진 운동의 범위 내에서 유효하다는 점이다. 따라서 모형시험에서 발생하지 않은 운동에 대한 유체력 추정치 정확할 것이라 기대할 수는 없다.

따라서 자유항주모형시험에서 얻어진 운동의 범위를 확인하기 위해, Fig. 8에 본 연구에서 얻어진 v , r , ϕ 의 분포와 Seo et al. (2020)의 연구에서 수행된 구속모형시험 조건을 정리하여 나타냈다. v , r 는 각각 v , r 를 $\sqrt{u^2 + v^2}$, $\sqrt{u^2 + v^2}/L_{pp}$ 로 나눠 무차원화한 결과이다. ϕ 는 호도법으로 나타낸 각도 값이므로 무차원화하지 않았다.

Table 3 Comparison of maneuvering coefficients

Maneuvering coefficients	Present study	Araki et al. (2012)
X_{vv}	0.46295	-0.08577
X_{vr}	0.21406	0.052212
X_{rr}	0.01651	-0.02126
Y_v	-0.1806	-0.30015
Y_r	0.0864	-0.08316
Y_ϕ	-0.55198	-0.00051
Y_{vvv}	-3.3087	-1.77272
Y_{vvr}	-5.3844	0.261986
Y_{vrr}	-2.7676	-0.79966
Y_{rrr}	-0.0829	0.173916
K_v	-0.00549	-0.00912
K_r	0.00263	-0.00253
K_{vvv}	-0.10056	-0.05388
K_{vvr}	-0.16365	0.00796
K_{vrr}	-0.08411	-0.0243
K_{rrr}	-0.00252	0.00529
K_p	-0.0137	-0.2429
K_ϕ	-0.0165	0.000626
N_v	-0.0459	-0.09323
N_r	-0.0328	-0.05494
N_ϕ	-0.0264	-0.00511
N_{vvv}	-0.127	-0.53235
N_{vvr}	0.0729	-0.62895
N_{vrr}	0.196	-0.13897
N_{rrr}	-0.00135	-0.00446

자유항주모형시험의 결과에서는 v' , r' 이 아주 강한 음의 상관관계를 보였다. 그리고 v' , ϕ 는 강한 양의 상관관계를 보였는데, 이는 선박의 선회 중 선수는 선회 궤적의 안쪽을 향하고 선체는 바깥으로 쏠리는 것을 의미한다. 본 연구에서 얻어질 선체 동역학 모델은 이런 운동 조건에서 유효할 것으로 생각되나, Fig. 8에서 보인 바와 같이 구속모형시험은 앞서 서술된 운동 외의 조건을 포함하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 Y_ϕ , N_ϕ 항의 비중이 크게 추정되었기 때문에, 구속모형시험과 비교 시 ϕ 의 영향을 배제할 수 없다. 구속모형 시험 조건에서는 ϕ 가 0으로 강제되었지만 비교검증 시에는 Fig. 8을 따라 분포한 v , r , ϕ 조건에서의 구속모형시험과 회귀모델을 비교해야한다. 식(18)은 Fig. 8의 회귀분석을 통해 구한 v' 과 r' 에 대응되는 ϕ 의 관계식이다.

$$\phi = 0.170v' - 0.0679r' + 2.12v'^3 + 3.47v'^2r' + 1.32v'r'^2 + 0.287r'^3 \quad (18)$$

ϕ 를 고려해 Araki et al. (2012)의 연구에서 제안된 ϕ 관련 유

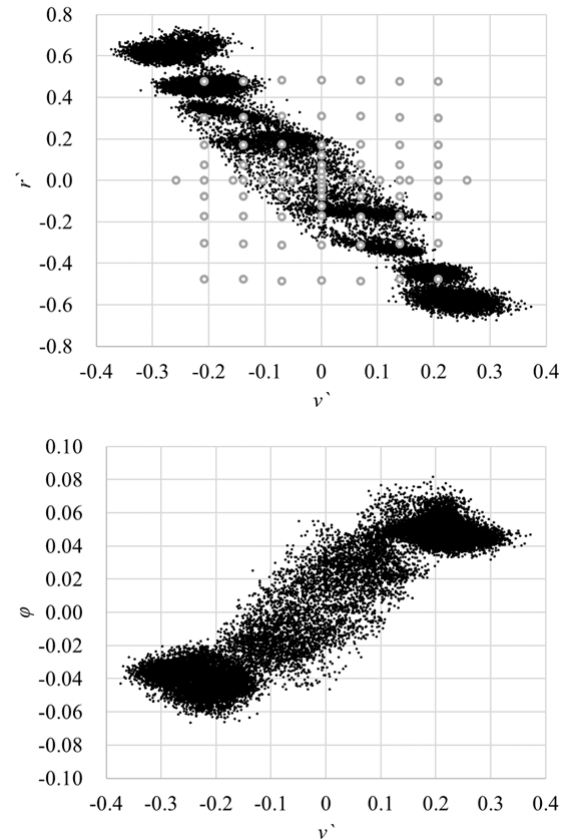


Fig. 8 Distribution of ship motion in free-running model tests of Park et al. (2020) (black symbols) and captive model test condition of Seo et al. (2020) (grey symbols): v' and r' (top) and v' and ϕ (bottom)

Table 4 Validation cases of captive model tests in Seo et al. (2020)

Test condition	v'	r'	ϕ
Drift test	-0.0523	0	-0.0092
	-0.0698		-0.0126
	-0.105		-0.0203
Pure yaw test	0	0.0198	-0.00134
		0.0437	-0.00294
		0.0762	-0.00505
		0.122	-0.00775
Combined test	-0.0698	0.0762	-0.0169
		0.171	-0.0226
	-0.139	0.0762	-0.0304
		0.171	-0.0334
		0.311	-0.0387
		0.483	-0.0402
	-0.208	0.0762	-0.0496
		0.171	-0.0469
		0.311	-0.0468
		0.483	-0.0464

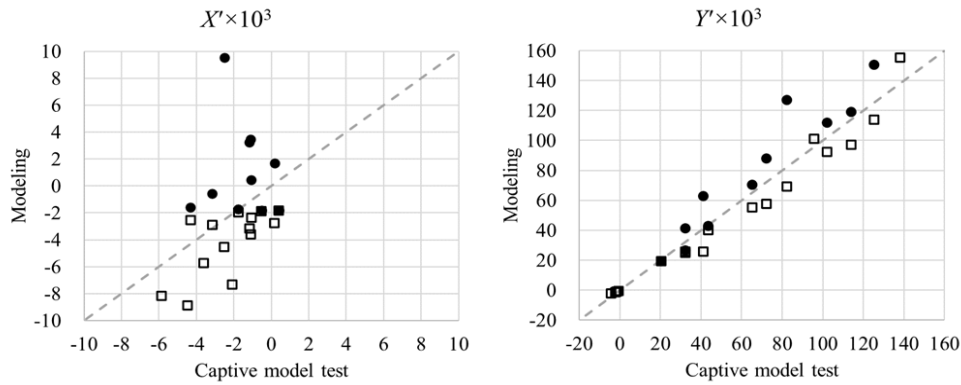


Fig. 9 Correlation of the captive model test of Seo et al. (2020) with hydrodynamic force modeling of Araki et al. (2012) (open symbols) and present study (solid symbols)

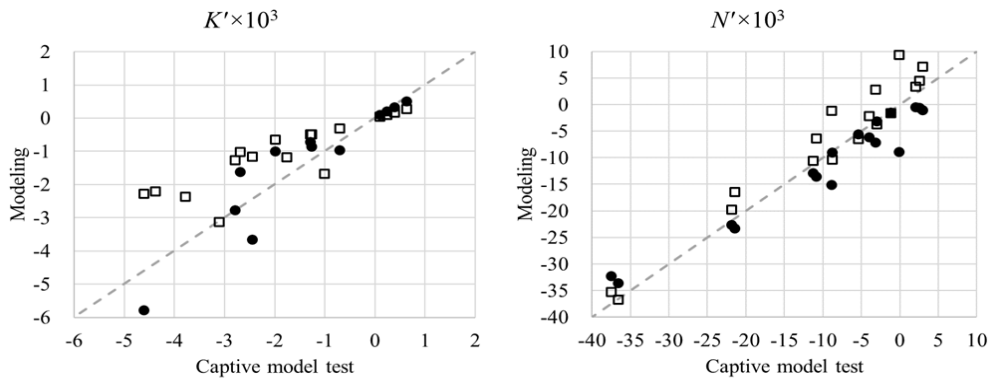


Fig. 10 Correlation of the captive model test of Seo et al. (2020) with hydrodynamic moment modeling of Araki et al. (2012) (open symbols) and present study (solid symbols)

체력 항(Y_ϕ , K_ϕ , $-mgGZ_\phi$, $K_R(\phi)$, N_ϕ)을 $\phi = 0$ 인 조건에서 수행된 Seo et al.(2020)의 구속모형시험 결과에 더했다. 이를 v , r , ϕ 조건의 유체력 비교검증을 위한 구속모형시험 결과값으로 사용하였다. Table 4에 Seo et al. (2020)의 연구에서 제공된 구속모형시험 중 본 연구의 비교가 가능한 조건을 정리하였다. v , r '는 실제 구속모형시험의 조건이고, ϕ 는 식 (18)을 통해 추가로 적용해준 값이다.

Fig. 9와 10은 Table 4 조건의 구속모형시험 결과와 유체력 모델의 추정 결과 비교이다. 가로축은 Seo et al. (2020)의 구속모형시험으로, 세로축은 Araki et al. (2012)의 모델과 본 연구의 모델링을 적용한 결과이다. Araki et al. (2012)의 모델을 적용한 결과는 전반적으로 유체력, 모멘트에 대한 구속모형시험 결과를 잘 추종하는 경향을 보였으나, K' 에 대해서는 값을 작게 추정하는 경향을 보였다.

본 연구의 동역학 모델 또한 전반적으로 구속모형시험을 잘 추종했으며, 특히 지배적인 운동 성분인 Y' , N' 은 구속모형시험과 잘 일치하였다. X' 은 일부 경향을 크게 벗어난 결과가 나타났으며, K' 에 대해서는 Araki et al. (2012)보다 데이터의 산포가 작게 얻어졌다. 따라서 본 연구에서 자유항주모형시험의 회귀분석을 통해 개발한 조종 모델의 신뢰성이 기존의 구속모형시험에서 개발한 조종 모델과 비교할만한 수준임을 확인하였다.

4.4 자유항주모형시험과의 비교

Araki et al.(2012)의 연구에서는 지그재그 조종 시험의 변형으로 $\delta = 35^\circ$, $\psi_c = 90^\circ$ 지그재그 시험을 실내에서 수행했다. 이는 δ 와 ψ 가 같아지면 δ 를 반대로 돌리는 일반 지그재그 시험과 달리 ψ 가 90° 가 될 때까지 타각을 유지하는 시험으로, 지그재그 조종시험의 중간에 선회시험을 결합한 조종 시나리오로 볼 수 있다. Fig. 11은 지그재그 조종시험에 대한 시뮬레이션과 자유항주모형시험의 궤적, 시계열 운동 비교 결과이다. 전체적으로 Araki et al. (2012)에서 제안된 조종 모델에 비해 자유항주모형시험의 결과와 더 유사한 경향을 보였으므로, 본 연구에서 제안된 조종모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

한 가지 특이한 점은 횡동요 속도 시계열의 유사성이다. 연구 과정 중에 횡동요 운동에 관련한 K 모델은 Fig. 6에서 보인 대로 데이터의 산포도가 커서 회귀분석에 어려운 점이 있었으며, 회귀분석을 통한 조종 모델 개발에서 주요한 문제가 될 것으로 예상했다. 하지만 Fig. 11의 r 결과는 본 연구의 조종 모델, Araki et al. (2012)의 자유항주모형시험과 조종 모델 모두 운동 중 최대값의 크기가 비슷하게 얻어졌다. 이는 횡동요 운동이 실제로는 복원력과 $Z_H Y_H$ 로 인한 성분이 주를 이루기 때문에 K 성분에 대한 회귀분석을 통해 구하는 조종 계수(K_ϕ , K_p)의 영향이 크지 않은 이유로 판단된다.

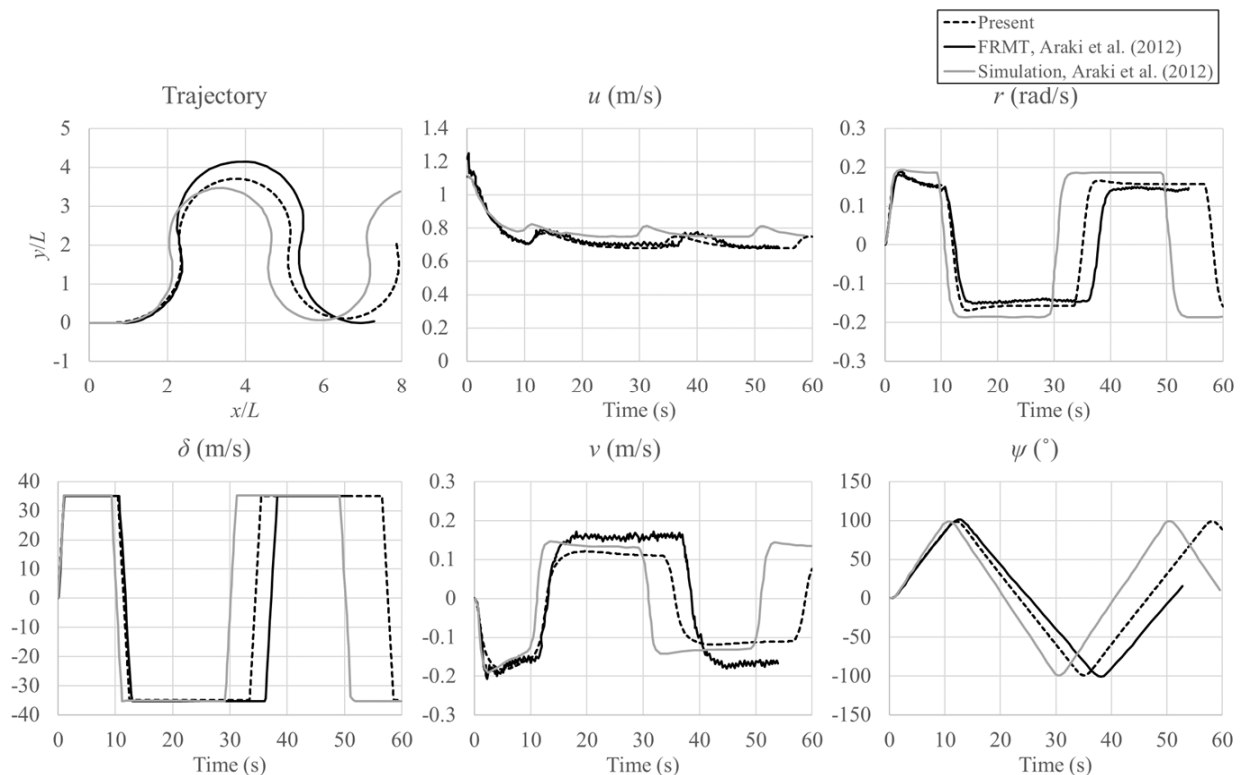


Fig. 11 Comparison of zigzag test results ($\delta = 35^\circ$, $\psi = 90^\circ$)

5. 결 론

자유항주모형시험을 통해 얻은 선박의 운동 결과로부터 선체의 유체력을 추정하는 방안을 제안하였다. 이를 ONR Tumblehome 모형에 적용하여 그 결과를 기존의 구속모형시험 기반 연구 결과와 비교하였고, 이로부터 다음 결론을 얻을 수 있었다.

- 시계열 운동에서 추정한 선체의 유체력은 Y, N 성분에 대해 기존의 다항식 기반 모델링의 추세와 잘 일치하여, 자유항주모형시험에서 가속도항으로부터 유체력을 구하는 방식이 유효한 것으로 확인하였다.
- 유체력의 회귀분석에 대해, 자유항주모형시험 중 발생하는 횡동요, 선수동요, 횡동요의 강한 상관관계 때문에 각 운동 성분에 대한 개별 조종 계수를 식별할 수는 없었다.
- 구속모형시험, 자유항주모형시험 결과와 본 연구의 조종 모델을 비교하여 기존의 조종 모델보다 나은 신뢰성을 가진 것을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 조종 모델 개발 방법의 개선을 위해, 향후 연구에서는 데이터의 잡음을 줄이거나, ONR Tumblehome 선형의 선미 배치인 스트럿(strut)지지 쌍축 추진기와 중앙 스케그(skeg)에 대응하는 추진기, 방향타 모델링을 개발하는 등의 접근을 수행할 수 있다. 그리고 인공지능망 기반의 회귀분석에서는 각 조종 계수의 식별이 어려운 것을 확인하였으므로, 다항식 기반의 유체력 모델링 대신 블랙박스(black box) 형식의 다층 인공지능망을 이용한 모델링을 적용하는 등의 개선을 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 방위사업청 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업(UM19304RD3), 한국연구재단 지원의 ‘우수신진연구(NRF-2021R1C1C1014206)’사업과 Office of Naval Research Global의 지원(N62909-20-1-2069)으로 수행된 연구임.

References

- Araki, M., Sadat-Hosseini, H., Sanada, Y., Tanimoto, K., Umeda, N. and Stern, F., 2012. Estimating maneuvering coefficients using system identification Methods with experimental, system-based, and CFD free-running trial data, *Ocean Engineering*, 51, pp.63–84.
- Kim, D.J. and Kim, Y.G., 2020. Tune of hydrodynamic coefficients based on empirical formula by using manoeuvring performance indices of a ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(6), pp.331–344.
- Kim, Y.G., Yeo, D.J., Kim, S.Y., Yun, K.H. and Oh, B.I., 2009. Prediction of maneuverability of KCS by CPMC captive model test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.553–561.
- Kim, Y.G., Yeo, D.J., Son, N.S., Kim, S.Y., Yun, K.H. and

- Oh, B.I., 2011. Prediction of maneuverability of KCS with 4 degrees of freedom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.267–274.
- Lee, H.Y. and Shin, S.S., 1998. Approximate technique for ship's manoeuvrability prediction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 35(4), pp.19–26.
- Park, J., Seo, J., Lee, T., Lee, D., Park, G., Yoon, H.K. and Rhee, S.H., 2020. Uncertainty assessment of outdoor free-running model tests for evaluating ship maneuverability. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(5), pp.262–270.
- Sanada, Y., Tanimoto, K., Takagi, K., Gui, L., Toda, Y. and Stern, F., 2013. Trajectories for ONR Tumblehome maneuvering in calm water and waves. *Ocean Engineering*, 72, pp.45–65.
- Seo, J., Kim, D.H., Ha, J., Rhee, S.H., Yoon, H.K., Park, J., Seok, W.C. and Rhee, K.P., 2020. Captive model tests for assessing maneuverability of a damaged surface combatant with initial heel angle. *Journal of Ship Research*, 64(4), pp.392–406.
- Shin, H. and Kim, M.S., 2008. Development of free running system for 2m-class ship models. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.247–257.
- Son, K.H., 1989. On the Mathematical model for estimating manoeuvring performance of ships. *Journal of Korean Institute of Navigation*, 13(2), pp.57–73.
- Sohn, K.H. and Kim, Y.M., 2003. A study on new mathematical model of ship manoeuvring motion taking coupling effect of roll into consideration. *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 27(5), pp.451–458.
- Sutulo, S. and Soares, C.G., 2014. An algorithm for offline identification of ship manoeuvring mathematical models from free-running tests. *Ocean Engineering*, 79, pp.10–25.
- Yasukawa, H. and Yoshimura, Y., 2015. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20, pp.37–52.
- Yasukawa, H., Sakuno, R. and Yoshimura, Y., 2019. Practical maneuvering simulation method of ships considering the roll-coupling effect. *Journal of Marine Science and Technology*, 24, pp.1280–1296.
- Yoon, H.K. and Rhee, K.P., 2003. Comparison of the estimation-before-modeling technique with the parameter estimation method using the extended Kalman filter in the estimation of manoeuvring derivatives of a ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(5), pp.43–52.
- Yoon, H.K. and Son, N.S., 2004. Estimation of roll related coefficients of a ship by using the system identification method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(4), pp.53–58.
- Yun, K., Yeo, D.J. and Park, B., 2015. A study on the manoeuvrability of KVLCC2 in shallow water by free running model test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.494–500.
- Yun, K. and Yeo, D.J., 2019. An experimental study on the manoeuvrability of a ship in heeled condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(3), pp.273–280.
- Yun, K., Choi, H. and Kim, D.J., 2021. An experimental study on the manoeuvrability of KCS with different scale ratios by free running model test. *Journal of the society of Naval Architects of Korea*, 58(6), pp.415–423.



김 기 원



김 호 웅



최 성 은



나 기 인



이 혁



서 정 화