

선박 조종성능지수를 활용한 경험식 기반 유체력 미계수의 보정

김동진[†]·김연규
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Tune of Hydrodynamic Coefficients Based on Empirical Formula by Using Manoeuvring Performance Indices of a Ship

Dong Jin Kim[†]·Yeon Gyu Kim
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

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.

Ship's hydrodynamic coefficients in manoeuvring equations are generally derived by captive model tests or numerical calculations. Empirical formulas have been also proposed in some previous researches, which were useful for practical predictions of hydrodynamic coefficients of a ship by using main dimensions only. In this study, ship's hydrodynamic coefficients based on empirical formulas were optimized by using its free running test data. Eight manoeuvring performance indices including steady turning radius, reach in zig-zag as well as well-known IMO criteria indices are selected in order to compare simulation results with free runs effectively. Sensitivities of hydrodynamic coefficients on manoeuvring performance indices are analyzed. And hydrodynamic coefficients are tuned within fixed bounds in order of sensitivity so that they are tuned as little as possible. Linear and nonlinear coefficients are successively tuned by using zig-zag and turning performance indices. Trajectories and velocity components by simulations with tuned hydrodynamic coefficients are in good agreements with free running tests. Tuned coefficients are also compared with coefficients by captive model tests or RANS calculations in other previous researches, and the magnitudes and signs of tunes are discussed.

Keywords : Hydrodynamic coefficient(유체력 미계수), Free running test(자유항주시험), Manoeuvring performance index(조종성능지수), Sensitivity analysis(민감도 해석), Optimization problem(최적화 문제)

1. 서론

선박의 설계 단계에서 조종성능을 추정하거나, 혹은 건조된 선박의 거동을 가상 환경 내에서 모사하기 위하여 조종운동 시뮬레이션에 대한 연구가 꾸준히 지속되어 왔다. 조종운동 수학 모델에서는 각 운동 자유도의 외력을 추진, 조타기의 제어 값과 선박의 상태 변수에 대한 함수로 표현한다. 각 항의 유체력 미계수들을 정확하게 추출하기 위하여 다양한 기관에서 구속모형 시험을 수행해 왔고, 최근에는 전산유체계산을 활용하는 사례들도 보고되고 있다 (Sung & Park, 2015; SIMMAN, 2020).

조종운동 시뮬레이션을 수행하려면 대상선의 유체력 미계수를 모형시험, 혹은 전산유체계산으로 추출하여야 하나, 상당한

준비 비용과 시간이 소요된다. 따라서 유체력 미계수를 선박의 주요 제원에 대하여 경험식화하는 연구들이 시도되었다 (Inoue et al., 1981; Clarke et al., 1982; Kijima et al., 1990a; Lee et al., 2003). 1970~90년대에 경험식 연구의 주요 목적은 선박의 초기 설계 단계에서의 조종성능 추정이었다. 선형과 조종 성능에 대한 자료가 많이 축적된 최근에는 상대적으로 정확도가 낮은 경험식을 설계에 직접 활용하기보다는, 가상 환경 내 선박들의 근사 시뮬레이션 등에 더 빈번하게 활용되고 있다.

한편 근래에 실선 운항 데이터를 기록, 공유하는 사례가 많아지면서 실선 데이터에 접근할 수 있는 기회도 증가하고 있다. 만약 사전에 구속모형시험이나 전산유체계산으로 수학모델이 정밀하게 준비되지 않은 실선을 대상으로 가상 환경 내에서 조

중시물레이션을 수행하는 경우, 수학모델 내 유체력 미계수의 초기 값은 경험식으로 추정하는 것이 효율적이다. 더불어 실선 시운전 결과가 확보된다면 이를 이용하여 수학모델의 정확도를 보다 향상시킬 수 있을 것이다. 예컨대 시스템 식별법(System identification)을 활용하여 시운전의 입출력 변수 이력에 대한 심층 분석이 가능하다.

본 연구에서는 대상선 시운전의 주요 조종성능지수만 주어진다 하는 가정 하에 경험식 기반 유체력 미계수의 산술적인 보정을 시도하였다. 최종적으로는 실선을 대상으로 실용적인 활용이 목적이거나, 대상 성능지수 이외에 궤적 및 속도 이력까지 확인하고 제안한 보정법을 상세 검증하기 위하여 충분한 시계열 정보가 공개된 자유항주모형시험 데이터를 사용하였다.

조종 궤적뿐만 아니라 속도, 소요 시간 등 다양한 특성을 비교하기 위하여 기존의 IMO 기준 조종성능지수 이외에 추가 지수들을 선별하고 최적화 문제를 정의하였다. 시뮬레이션의 조종 성능지수들이 자유항주모형시험에 가까워지는 방향으로 대상선의 유체력 미계수를 작은 한도 내에서 보정하였다. 선행 연구 (Hwang, 1980; Yeo & Rhee, 2005) 의 민감도 해석 방법을 참고하여, 각 조종성능지수에 대한 유체력 미계수 민감도를 추출하고 미계수 보정량이 최소가 되도록 오차가 큰 지수부터, 그리고 민감한 미계수부터 순차적으로 보정을 수행하였다. 보정된 유체력 미계수로 시뮬레이션할 경우 궤적뿐만 아니라 속도 성분들도 자유항주시험결과와 유사해짐을 확인하였다. 또한 보정된 미계수를 타 선행 연구의 구속시험 및 전산유체계산에 의한 결과와 비교하였다.

2. 유체력 미계수 경험식 관련 선행 연구

조종운동방정식 내 유체력 미계수를 선박의 주요 제원에 대한 경험식으로 근사하는 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 본격적인 연구가 수행된 1970년대 말 이후, 즉 15차 ITTC (1978) 조종성분과회의 이후 자료들에 주로 근거하여 주요 연구들을 요약하면 다음과 같다.

Inoue (1981)은 다양한 선박의 구속시험을 바탕으로 유체력 미계수의 경험식을 제안하였다. 대표적으로 선형 미계수 Y_{β}' , $N_{\dot{r}}'$ 의 경험식 근사 예는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 주요한 기저 변수 k 는 선체 종횡비로 흘수의 2배를 길이로 나눈 값이다. 세장체의 양력 계수가 종횡비에 비례한다는 low aspect ratio wing theory (Jones, 1946)에 기반하며, 선폽, 방형계수 등 제원이 추가로 포함된 경험식의 각 상수들이 통계적으로 결정되었다.

이에 앞선 Norrbin (1971)이나 이후 Clarke et al. (1982) 등에 의해 다양한 시험 데이터를 바탕으로 한 다변수 회귀분석이 수행되었다. Fig. 2는 Clarke et al. (1982) 에 의한 회귀분석 결과 Y_{β}' , $N_{\dot{r}}'$ 의 편차 분포 예이다. 경험식이 선박 길이, 폭, 흘수, 방형계수 등의 주요제원에 의한 함수로 표현되며, 특별히 분산이 큰 데이터를 제외한다면 Y_{β}' 는 $\pm 25\%$ 이내, $N_{\dot{r}}'$ 은

$\pm 10\%$ 이내 수준에서 추정이 가능한 것으로 판단된다.

Kijima et al. (1990a)은 Inoue (1981)의 연구에서 대상 선형을 더 추가하여 분석을 수행하고 선형 및 비선형 미계수의 경험식을 재정리하여 제안하였다. 여기에는 반류 및 정류 계수 등 추력, 타력과 관련된 미계수들도 포함된다. 또한 천수 영향을 고려하여 경험식을 확장하였다. Kijima et al. (1990b, 1993)의 연구에서는 유체력 미계수 경험식에 선박의 흘수, 트림과 같은 하중 조건을 고려하는 방법이 제안되었다. 이후 Kijima and Nakiri (2003)는 15척 선형, 48가지 하중조건에 대한 데이터 및 이론 계산을 바탕으로 선미 형상 영향을 반영할 수 있도록 경험식을 수정, 제안하였다. Aoki et al. (2006)은 12척의 실선 시운전 데이터를 바탕으로 정류 및 반류 계수 등을 추정하는 경험식을 추가 개선하였다.

Lee et al. (1998)은 12척 저속 비대선형 구속시험의 회귀분석을 수행하여 선미벌브를 갖는 최신 선형에 적용 가능하도록 경험식을 개선하고, 일부를 실선 시운전과 비교하여 그 정확도를 확인하였다. Lee et al. (2003)은 47척 선형의 구속시험 데이터를 바탕으로 선미 형상을 정량화한 계수를 경험식에 반영한 후, 시뮬레이션 결과를 다양한 실선 시운전과 비교, 검증하였다.

Oltmann (2003)은 HSVA의 160종 데이터를 주로 선미 형상에 초점을 두어 회귀분석을 수행하고, 선형 미계수들의 경험식을 제안한 바 있다. Yoshimura and Masumoto (2011)는 중고속 상선과 어선 11척의 유체력 미계수를 바탕으로 Kijima et al. (1990a)의 경험식을 수정하였다.

최근까지 경험식의 많은 개선이 이루어졌으나 기저 변수는 Fig. 1, 2에서 사용된 것과 크게 다르지 않으며, 주로 각 시대의 최신 선형들을 추가하여 정확도를 높이는 통계 분석들이 이루어졌다. 본 연구에서는 최근 경험식으로 추정된 유체력 미계수가 Fig. 1, 2 수준의 오차를 여전히 내재할 수 있다는 전제 하에, 유체력 미계수의 보정 최대 한도를 $\pm 15\%$ 로 고정하였다.

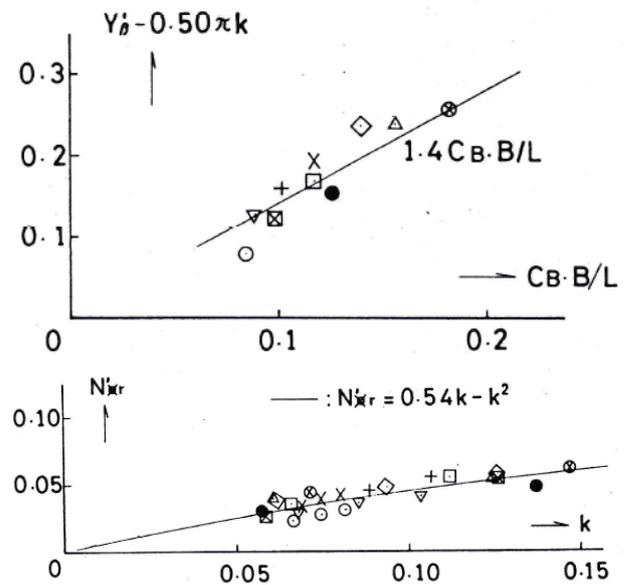


Fig. 1 Fittings of Y_{β}' and $N_{\dot{r}}'$ (Inoue et al., 1981)

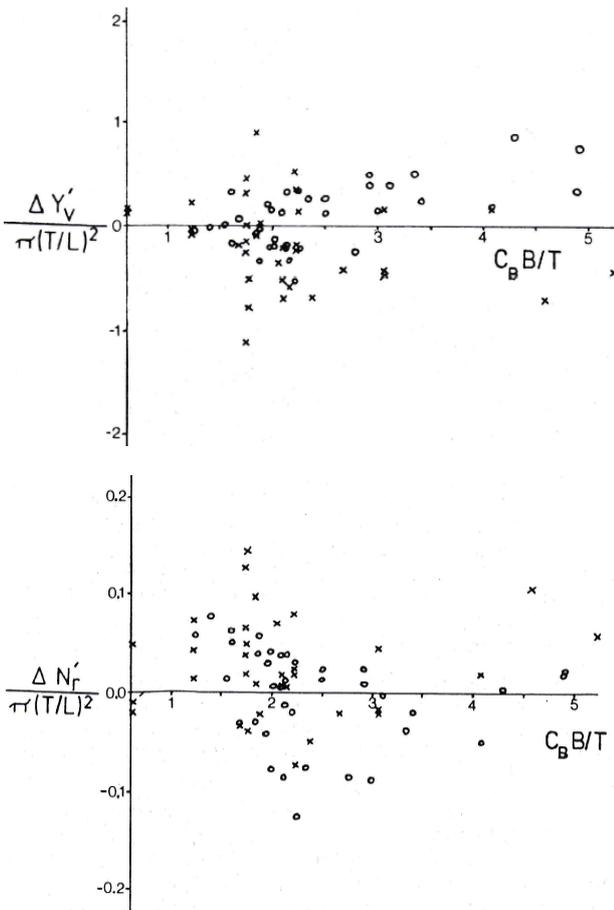


Fig. 2 Deviation of Y'_v and N'_r (Clarke et al., 1982)

3. 3자유도 조종 시뮬레이션

3.1 조종운동방정식

선박의 수평면 상 3자유도 조종운동을 표현하는 좌표계와 방정식은 각각 Fig. 3, 식 (1) 과 같다. Fig. 3에서 $O_0-X_0Y_0$ 는 지구 고정좌표계이며, $O-XY$ 는 원점을 선박의 midship과 centerline의 교점에 둔 선박고정좌표계이다.

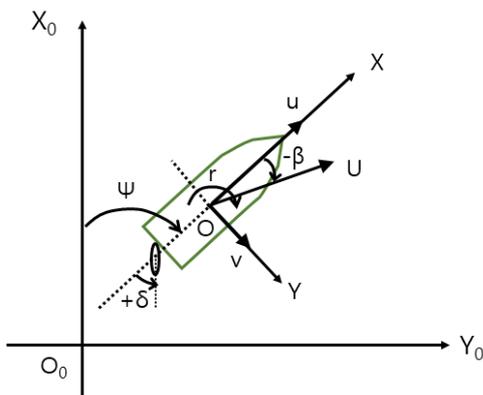


Fig. 3 Coordinates system

$$m(\dot{u} - vr - x_G \dot{r}^2) = X_H + X_P + X_R \tag{1}$$

$$m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y_H + Y_R$$

$$I_{ZZ} \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N_H + N_R$$

식 (1)의 우변은 외력이고 아래첨자 H, P, R은 각각 선체력, 추력, 타력을 의미한다. 본 연구에서는 선박 조종운동 시뮬레이션을 위하여 각 외력항을 식 (2)~(4)와 같이 기술한다.

$$X_H = X_u \dot{u} + X_{vv} v^2 + X_{vr} vr + X_{rr} r^2 + R \tag{2}$$

$$Y_H = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_{vv} v + Y_{rr} r + Y_{v|v|} |v| + Y_{r|r|} |r| + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vrr} vr^2$$

$$N_H = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_{vv} v + N_{rr} r + N_{v|v|} |v| + N_{r|r|} |r| + N_{vvr} v^2 r + N_{vrr} vr^2$$

$$\begin{cases} Y_{v|v|}, Y_{vvr}, N_{v|v|}, N_{vvr} = 0 & \text{when } |v| < 0.12 \\ Y_{r|r|}, Y_{vrr}, N_{r|r|}, N_{vrr} = 0 & \text{when } |r| < 0.28 \end{cases}$$

$$X_P = (1-t) \rho n^2 D^4 K_T (J_P) \tag{3}$$

$$J_P = \frac{(1-w_p) U}{nD}$$

$$X_R = -(1-t_R) F_N \sin \delta \tag{4}$$

$$Y_R = -(1+a_H) F_N \cos \delta$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta$$

$$F_N = 1/2 \rho A_R U_R^2 f_\alpha \sin \alpha_R$$

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}, \quad \alpha_R = \delta - \tan^{-1}(v_R/u_R)$$

$$u_R = \epsilon u_P \sqrt{\eta [1 + \kappa (\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_P^2}} - 1)]^2 + (1-\eta)}$$

$$v_R = \gamma_R (v + l_R r)$$

$$u_P = (1-w_p) u, \quad w_p = w_{R0} \exp(-C_p w_p'^2)$$

$$v_P = v + x_P r$$

식 (2)의 R은 대상선의 저항이다.

식 (3)에서 t는 추력감소계수, ρ는 유체 밀도, n과 D는 각각 프로펠러 회전수와 직경이다. K_T 는 추력계수이며 전진비 J_P 에 대한 함수이다. w_p 는 프로펠러 위치의 반류계수이다.

식 (4)에서 t_R 는 조타에 의한 저항감소, a_H, x_H 는 각각 선체 간섭에 의한 타 횡력 증가, 타 횡력의 작용점 위치 변화를 나타낸다. F_N 는 타직압력, A_R 는 타면적, f_α 는 타직압력계수, α_R 는 타 유입각이다. u_R 과 v_R 은 타에 유입되는 X, Y방향 속도이다. ϵ 는 프로펠러와 타 위치의 반류계수 비 ($= (1-w_R)/(1-w_p)$), κ 는 u_R 수식화를 위한 실험상수, η 는 프로펠러 직경의 타 스패에 대한 비이다. γ_R 는 선체에 의한 정류효과계수이다. l_R 은 타의 횡방향 유입속도 증 선체 선회의 영향을 나타내며, 대체로 $2x_R$ (x_R 은 타의 X좌표)로 근사한다. u_P, v_P 는 프로펠러에 유입되는 X, Y방향 속도이다. 조종 거동 중에 반류계수 w_p 의 변화는 직진 중 반류

계수 w_{p0} 에 지수함수가 곱해진 형태로 표현할 수 있으며, 지수 함수 내에 보정계수 C_p 가 포함된다. x_p 는 프로펠러의 X좌표이다.

실제 조종운동방정식을 풀 때 모든 미계수와 상태변수는 무차원화하여 다루며, 위 식 (1)~(4)에서는 편의상 무차원 표기 (')를 생략하였다. 무차원화 방법은 식 (5)와 같다.

$$Force' = \frac{Force}{1/2\rho L^2 U^2}, Moment' = \frac{Moment}{1/2\rho L^3 U^2} \quad (5)$$

3.2 대상선형

시뮬레이션 대상선형은 공시선형인 KVLCC2이며 SIMMAN 2020 Workshop 웹사이트(SIMMAN, 2020)에 구축 및 자유항주 모형시험 결과가 공개된 바 있다. Case 1.1, Case 1.2로 분류된 현대중공업(HMRI)의 구축시험, MARIN의 자유항주시험에서 사용된 대상선 제원은 Table 1과 같다.

실선과 각 모형선의 방형계수는 0.81, 길이방향 부력중심(LCB)는 midship에서 선수방향으로 수선간길이의 +3.48 %에 위치한다. 타각속도는 실선 기준 2.32 °/sec이다.

유체력 미계수 추정 및 조종 시뮬레이션을 수행할 때, 저항 시험 결과가 있다면 이를 활용하여 정확도를 개선할 수 있다. 현대중공업의 구축시험 중에 저항시험, 프로펠러 단독성능시험이 포함되므로 이후 본문에서는 6.893 m KVLCC2를 대상으로 조종시뮬레이션을 수행하였다. 한편 MARIN 자유항주시험의 모형선 길이는 7.0 m이다. 스케일이 다를 경우 Reynolds 수 차이에 의한 마찰저항계수 차이와 그로 인한 자항점 변화가 예상되지만, 두 모형선의 길이가 유사하여 자항점 변화에 의한 유동 차이는 미미할 것으로 판단된다. 실제로 설계속도를 위한 모형선 자항점은 6.893 m 모형선 시뮬레이션에서 10.13 RPS, 7.0 m 모형선의 자유항주시험에서 10.33 RPS 로 유사하였다. 따라서 7.0 m 모형선의 자유항주시험 결과를 축척비만 고려하여 6.893 m 모형선 결과로 축소한 후 시뮬레이션 검증에 활용하였다.

Table 1 Principal dimensions of KVLCC2

	Full-scale	Model (HMRI, PMM)	Model (MARIN, Free run)
Scale	1	46.426	45.714
Lpp [m]	320.0	6.893	7.000
Breadth [m]	58.0	1.249	1.269
Draft [m]	20.8	0.448	0.455
Propeller diameter, D [m]	9.86	0.212	0.216
Rudder lateral area, A_R [m ²]	136.7	0.063	0.065

3.3 경험식 기반 초기 시뮬레이션 결과

대상선의 주요 제원을 활용하여 자체 경험식 기반으로 Table 2와 같이 미계수를 추정된 후 조종시뮬레이션을 수행하였다. 경험식만으로 추정된 미계수이므로 구축시험 등에 의한 정밀 분석 결과와는 차이가 있을 수 있다. IMO 표준조종시험인 35° 우현 선회, 20°/20° 우현 지그재그의 시뮬레이션을 수행하고, MARIN 자유항주시험 결과와 비교하면 Table 3과 같다. 각 조종성능지수의 선별 과정은 다음 장에서 구체적으로 설명하기로 한다.

Table 2 Coefficients obtained by empirical formulas

Hull (x 10 ⁵)					
X'_u	-95	Y'_v	-1624	N'_v	-55
X'_{vv}	142	Y'_r	-139	N'_r	-88
$X'_{vr} + m$	3438	Y'_v	-1831	N'_v	-980
X'_{rr}	160	$Y'_r - m$	-1503	N'_r	-310
		Y'_{vv}	-3522	N'_{vv}	71
		Y'_{rr}	13	N'_{rr}	-33
		Y'_{vr}	2018	N'_{vr}	-1537
		Y'_{rr}	-2708	N'_{rr}	175
Propeller & rudder					
t_R	0.306	a_H	0.258	x_H	-0.332
ϵ	1.307	C_P^+ ($v_P > 0$)	8.171	γ_R^+, γ_R^-	0.605
κ	0.400	C_P^- ($v_P < 0$)	4.559	-	-

Table 3 Comparison of manoeuvring performance indices between simulation and free run

Index	Free run	Simulation	Error
20°/20° starboard zig-zag			
1st maximum yaw angle	33.70 °	33.87 °	+ 0.5 %
2nd maximum yaw angle	34.90 °	35.43 °	+ 1.5 %
Time to 1st maximum yaw	18.51 sec	20.80 sec	+ 12.4 %
Reach	35.68 sec	39.10 sec	+ 9.6 %
35° starboard turn			
Advance	3.25 L	2.91 L	- 10.4 %
Tactical diameter	3.34 L	2.71 L	- 19.0 %
Steady turning radius	1.23 L	1.00 L	- 19.0 %
Time to yaw of 180°	55.18 sec	48.10 sec	- 12.8 %

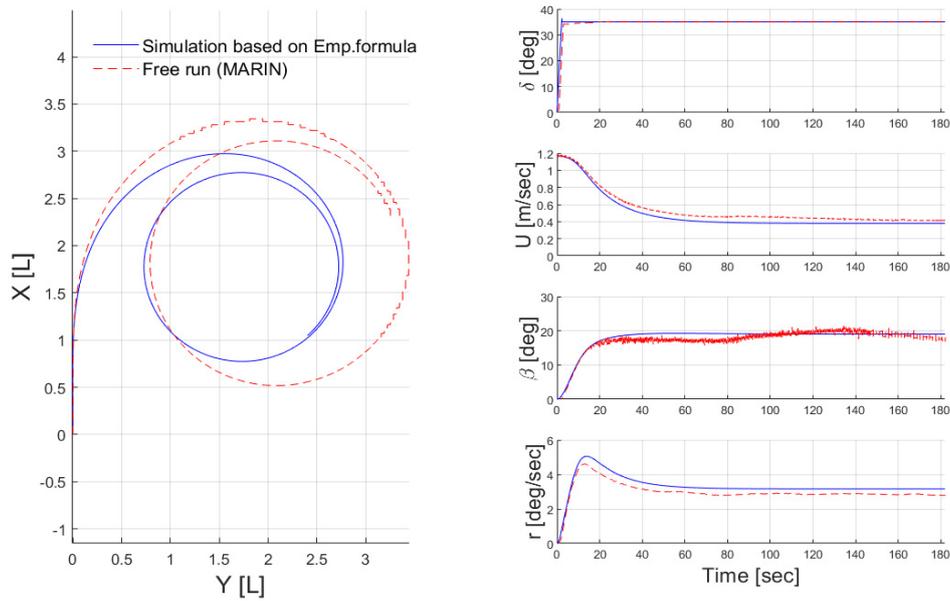


Fig. 4 35° starboard turn simulation based on empirical formula

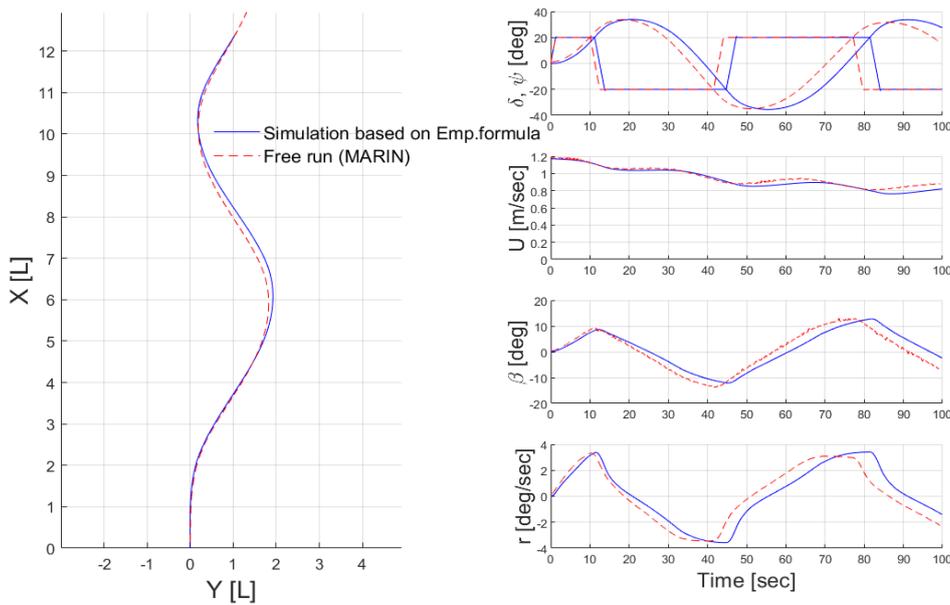


Fig. 5 20°/20° starboard zig-zag simulation based on empirical formula

Fig. 3과 Fig. 4에 선회, 지그재그 시뮬레이션 궤적 및 타각, 선속, 편류각, 선회를 시계열을 그래프로 나타내었다. 자유항주 시험에 비하여 경험식 기반 시뮬레이션의 선회직경이 작고, 지그재그 소요시간이 다소 긴 특성을 보인다.

4. 유체력 미계수 보정 방법

4.1 조종성능지수 선별

자유항주시험 궤적 및 속도의 모든 이력을 대상으로 시뮬레이션을 보정할 수도 있다. 하지만 실용적으로는 잘 알려진 몇

가지의 조종성능지수만을 대상으로 시뮬레이션과 자유항주시험을 비교하면서 시뮬레이션 내 유체력 미계수를 반복적으로 보정해 가는 것이 편리하다. IMO 조종성능기준에서는 선회시험의 전진거리와 전술직경, 지그재그시험의 1, 2차 오버슈트각에 대한 기준이 제시되어 있다. Table 4에 기존의 IMO 기준 지표, 본 연구에서 시뮬레이션과 자유항주시험의 비교를 위하여 새로 정의한 지수를 각각 정리하였다. 괄호 안은 각 지수의 기호이다. 선별된 지수를 Fig. 6, Fig. 7의 그래프 상에도 표기하였다.

Fig. 6에서와 같이 선회시험에서 전진거리, 전술직경 이외에 정상선회반경과 선수각 180° 시간을 추가하였다. 선수각 180° 시간은 시뮬레이션 선회 초반의 소요 시간이 자유항주시험과 유사한가 확인하는 의도이다. 정상선회반경은 선회 최종속도/최

종선회율과 같으며, 시뮬레이션 정상선회 중 속도와 선회율을 비를 검토하기 위하여 선정하였다.

Fig. 7처럼 지그재그시험에서는 IMO 기준 지표인 1차, 2차 오버슈트각 대신 1차, 2차 최대선수각을 지수로 삼았다. 오버슈트각은 일반적으로 10도 내외, 혹은 그 이하의 작은 값이므로 약간의 절대 각도 차이로도 오차율이 상당히 커질 수 있다. 따라서 소요시간 등 다른 지수들과 오차를 비교를 위하여 오버슈트각에 타각을 더한 최대선수각을 지수로 선정하였다. 그리고 소요시간의 확인을 위하여 1차 최대선수각 시간 및 반주기 시간(Reach)도 대상 지수로 추가하였다.

Table 4 Manoeuvring performance indices for comparison between simulation and free run

Test	IMO criteria index	Selected manoeuvring performance index
Turn	Advance Tactical diameter	Advance (X090)
		Tactical diameter (Y180) Steady turning radius (STR) Time to yaw of 180° (T180)
Zig-zag	1st overshoot angle (2nd overshoot angle)	1st maximum yaw angle (HA1) 2nd maximum yaw angle (HA2) Time to 1st maximum yaw (HA1T) Reach (RCH)

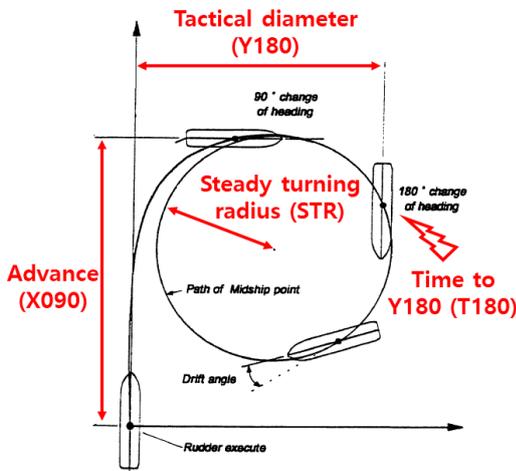


Fig. 6 Turning performance indices

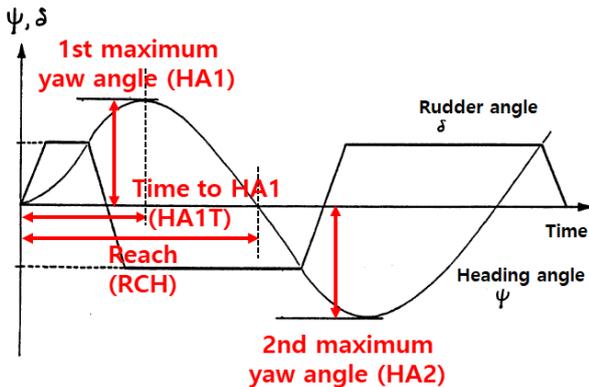


Fig. 7 Zig-zag performance indices

4.2 선형, 비선형 유체력 미계수의 순차적 보정

SIMMAN (2020) 등 공개된 구속시험에 의하면 대체로 사항 각 6~7도 이하에서는 v 에 대한 Y 힘이 선형적으로 분포한다. 작은 편류각 범위에서 $\beta = \sin(-v/U) \approx -v/U = -v'$ 이므로, 편류각 6~7도의 크기를 v' 로 표현하면 대략 0.12이다.

Fig. 4, Fig. 5의 35° 우현 선회, 20°/20° 우현 지그재그 시뮬레이션에서 무차원 횡속도(v'), 무차원 선회율(r') 시계열을 추출하면 Fig. 8, Fig. 9와 같다. 지그재그 시험에서는 20° 이하의 타각을 좌우 번갈아 사용하므로 횡속도(v), 선회율(r)이 대체로 작은 범위 내에서 동요한다. 반면 선회 시험은 35° 최대타각을 꾸준히 사용하므로 횡속도와 선회율이 큰 값으로 유지되며 각 상태변수의 비선형 성분 비중이 커진다.

Fig. 8의 20°/20° 지그재그 시뮬레이션 중 $|v'|$ 는 대부분 시험 구간에서 0.12 이하로 선형 범위이다. 이전의 여러 선형의 구속시험 및 시뮬레이션 경험에 기반하여 $|r'|$ 은 0.28 이하를 선형 구간으로 다룰 수 있으며, 역시 Fig. 8에서 $|r'|$ 은 대부분 0.28 이하의 선형 범위이다. 반면 Fig. 9의 35° 선회 시뮬레이션에서는 $|v'|$, $|r'|$ 이 대부분 0.12, 0.28을 초과한다. 즉, 비선형 항들의 비중이 크다.

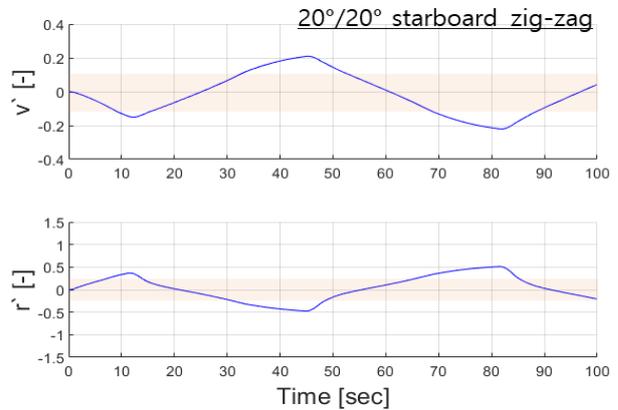


Fig. 8 Non-dimensional sway velocity and yaw rate during 20°/20° starboard zig-zag simulation

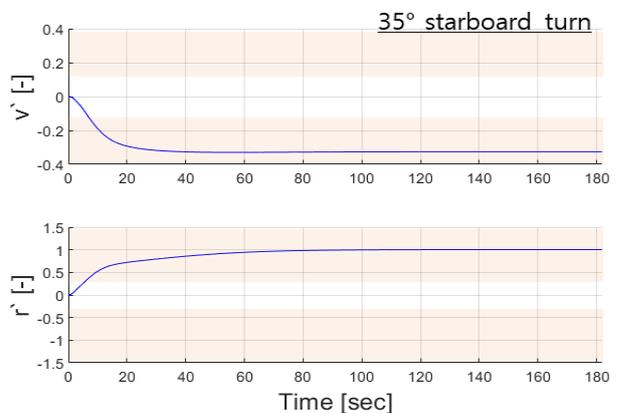


Fig. 9 Non-dimensional sway velocity and yaw rate during 35° starboard turn simulation

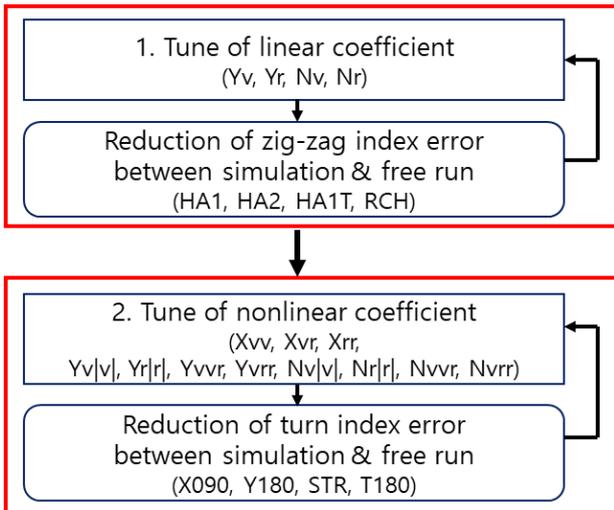


Fig. 10 Iteration procedure for tune of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients

따라서 본 연구에서는 유체력 미계수 보정을 Fig. 10과 같이 선형, 비선형 미계수에 대하여 순차적으로 진행하였다. 보정 대상은 선체의 가속도 관련 미계수와 추력, 타력 미계수를 제외한 선체의 속도 관련 선형, 비선형 미계수로 한정하였다.

4.3 유체력 미계수 보정에 대한 최적화 문제 정의

시뮬레이션 조종성능지수 오차를 줄이기 위한 유체력 미계수의 보정은 다양한 시나리오가 존재할 수 있으며, 결국 Fig. 11과 같은 최적화 문제로 귀결된다.

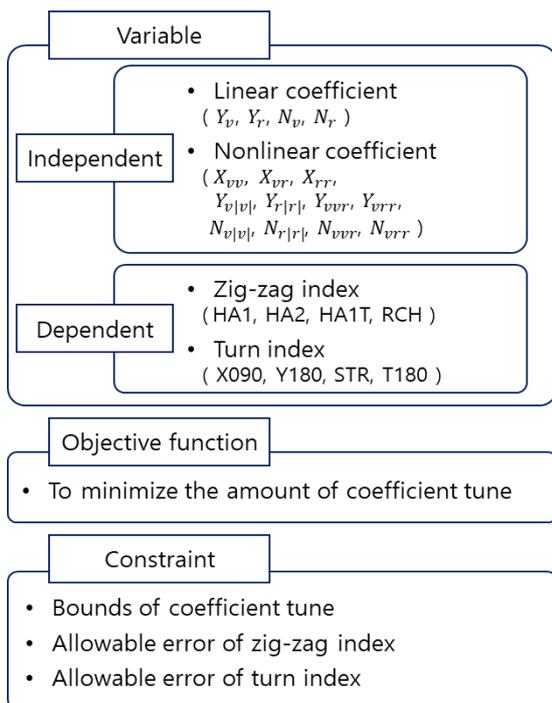


Fig. 11 Optimization problem for tune of hydrodynamic coefficients

경험식은 여러 선형들의 통계 분석을 바탕으로 도출된 것으로, 오차 가능성에도 불구하고 모험시험 등 타 자료가 없을 때는 유일한 신뢰성을 갖는다. 따라서 경험식으로 추정된 유체력 미계수들은 가능한 최소한의 보정만 이루어지는 것이 바람직하다. 각 조종성능지수에 대한 유체력 미계수의 민감도를 파악하고 해당 지수의 오차를 줄일 때 민감도가 높은 미계수부터 최소한의 보정을 실시하였다. 구체적인 내용은 5.1, 5.4절에 소개되어 있다.

Fig. 11의 제한조건에서 미계수 보정 한도, 지그재그 및 선회성능지수의 허용 오차에 대한 정량적 기준이 필요하다. 본 연구에서는 2장의 선행연구들을 참고하여 미계수 보정 한도는 $\pm 15\%$ 로 고정하였다. 조종성능지수 허용 오차는 시뮬레이션에 따라 유동적일 수 있으며, 본 대상선의 경우 지그재그, 선회 지수 허용 오차를 각각 $\pm 4.9\%$, $\pm 11.1\%$ 로 결정하였고, 그 과정을 5.2, 5.3절에 구체적으로 기술하였다.

유체력 미계수 최적화 문제를 풀기 위한 프로그램을 작성하였고, 전체 절차는 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 '지그재그에 의한 선형 미계수 보정'과 '선회에 의한 비선형 미계수 보정'의 반복계산(iteration)은 동일한 알고리즘이며, 한 예로 '지그재그에 의한 선형 미계수 보정'의 절차를 정리하면 Fig. 13과 같다. 오차가 큰 지수부터 미계수를 민감한 것부터 조금씩 줄여가면서 해당 지수의 오차가 정해진 허용 오차 이내가 되는지 확인한다. 모든 지수에 대하여 이를 반복한 후 모든 지수의 오차가 허용 오차 이내일 때, 혹은 정해진 유체력 보정 한도 내에서 모든 지수의 오차가 최소가 되면 계산을 종료한다.

5. 유체력 미계수 보정 상세 계산

5.1 유체력 미계수 보정 방향을 결정하기 위한 조종성능지수 별 미계수 민감도 분석

최소한의 유체력 미계수를 보정하려면 해당 조종성능지수에 민감한 영향을 주는 미계수부터 변경하는 것이 바람직하다. 즉, 유체력 미계수의 민감도 해석이 선행되어야 한다. 8가지 조종성능지수에 대하여 15가지 유체력 미계수의 민감도를 도출하여 Fig. 14에 나타내었다.

예를 들어 1차 최대선수각(HA1)에 대한 유체력 미계수 X_w 의 민감도 추출 방법은 식 (6)과 같다. 아래첨자 0%은 초기 시뮬레이션 내의 유체력 미계수와 그 결과로 얻은 조종성능지수이고, 아래첨자 10%는 유체력 미계수의 크기를 10% 증가시킨 후 시뮬레이션한 값을 의미한다.

$$\frac{[HA1_{10\%} - HA1_{0\%}]/HA1_{0\%}}{[X_{vv10\%} - X_{vv0\%}]/X_{vv0\%}} \tag{6}$$

where, $X_{vv10\%} = X_{vv0\%} + 0.1(X_{vv0\%})$

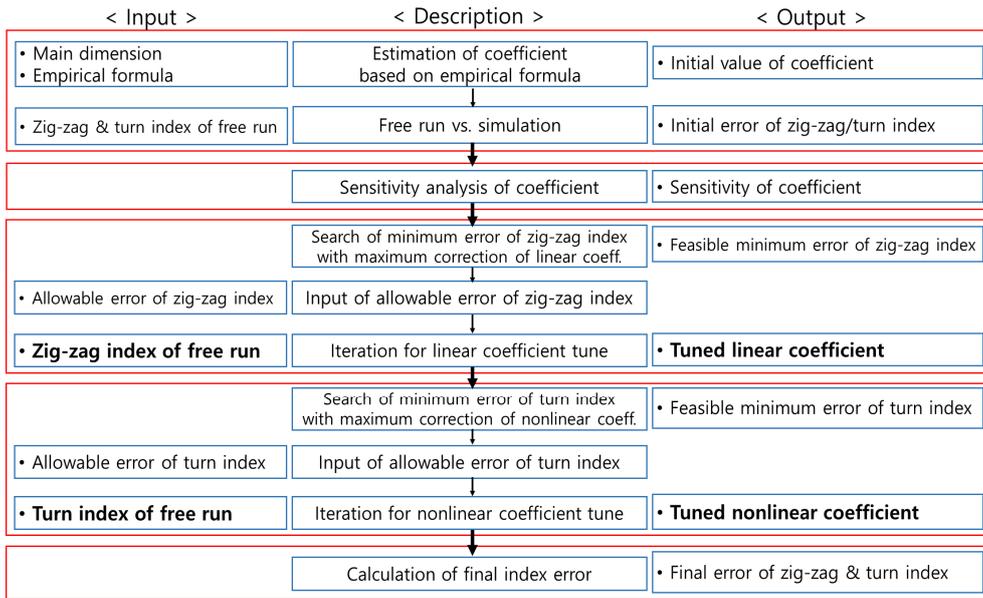


Fig. 12 Flow diagram for tune of hydrodynamic coefficients by using manoeuvring performance indices

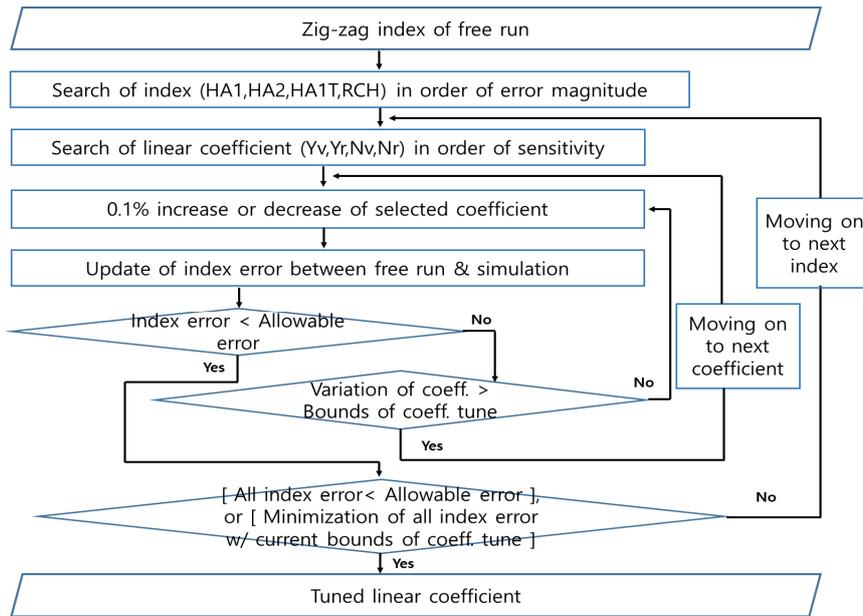


Fig. 13 Iteration procedure for tune of linear hydrodynamic coefficients with zig-zag indices of free run

Fig. 14에서와 같이 지그재그 성능지수에는 sway, yaw 관련 선형 미계수들이 민감한 영향을 미치며, 이외 비선형 미계수들의 영향은 미미하다. 선회 성능지수에도 선형 미계수 N_v , N_r 등의 영향은 크고, 더불어 N_{vr} 등 비선형 미계수의 영향도 큰 것을 확인할 수 있다.

5.2 유체력 미계수를 한도 내 최대 변경할 때 조종성능지수 별 가능한 최소 가능 오차 탐색

자유항주시험과 비교하여 시뮬레이션의 오차가 있더라도, 유체력 미계수의 보정 한도가 정해져 있으므로 보통 모든 지수의 오차를 0으로 완벽하게 보정하기는 어렵다. 선제적으로 시뮬레

이션 초반에 유체력 미계수를 보정 한도 내에서 최대한 변경하면서 각 조종성능지수의 가능한 최소 오차를 추출해보고, 이를 바탕으로 현실적인 허용 오차를 미리 선정한 후 반복 계산을 수행하는 것이 바람직하다.

앞 절에서 추출된 유체력 미계수의 민감도 정보를 활용하여 각 조종성능지수마다 가능한 최소 오차를 추출하였다. 예를 들어 3.3절의 Table 3처럼 지그재그 시뮬레이션의 HA1T는 자유항주 시험보다 10.7 % 더 크다. Fig. 14에서 N_v 의 HA1T에 대한 민감도 부호가 (+)이므로, N_v 의 절대값을 최대 보정 한도 -15 % 까지 줄이면 HA1T가 감소하고 자유항주시험에 가까워질 것이다. 이와 같은 방식으로 HA1T 한 지수에 대하여 모든 선형 미계수를 민감도 부호에 따라 보정 한도 +15 %, 혹은 -15 %로

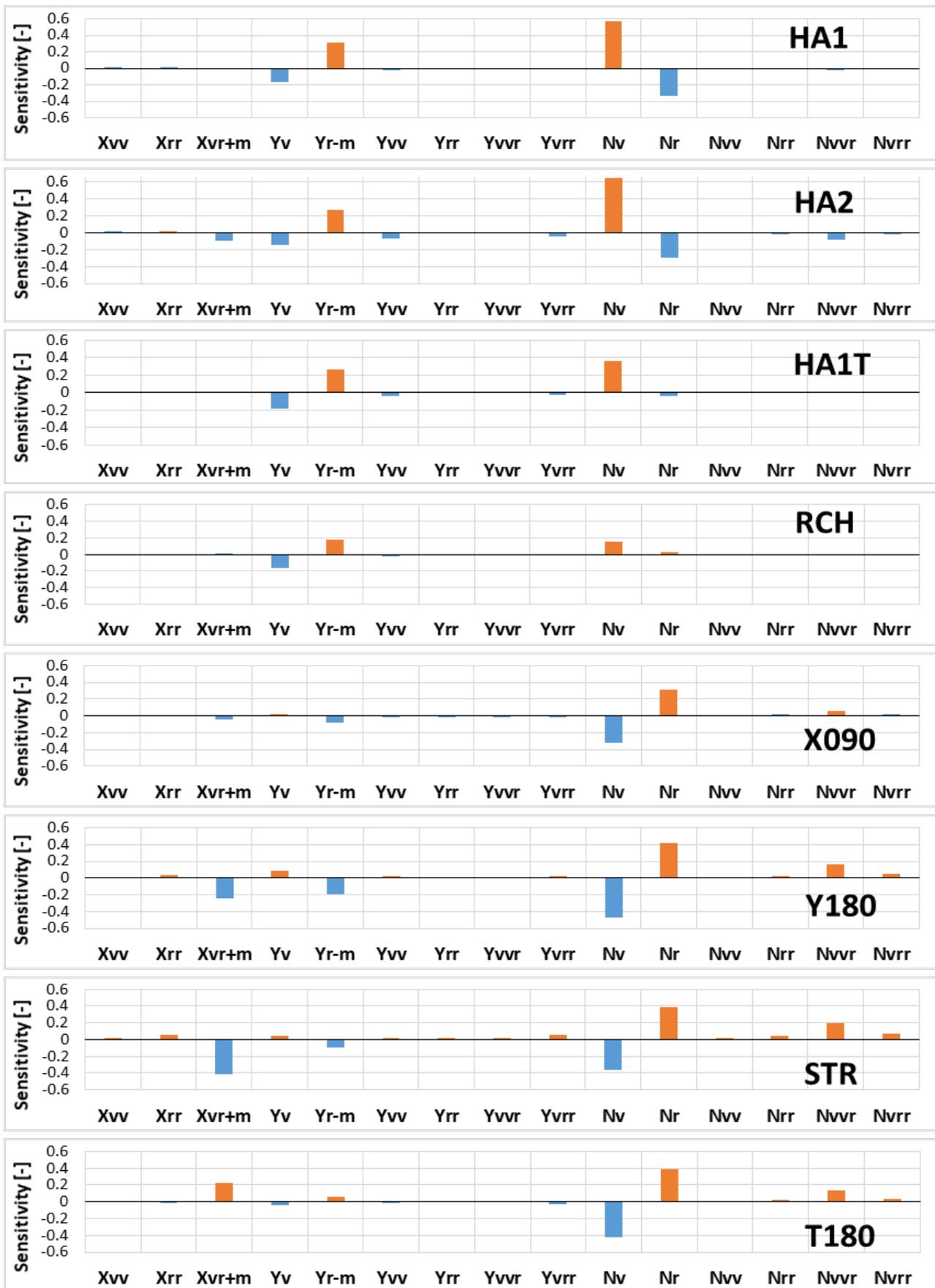


Fig. 14 Sensitivity of hydrodynamic coefficients on manoeuvring performance indices

Table 5 Feasible minimum errors of individual manoeuvring performance indices

Index	Error of simulation based on empirical formula	Minimum error with maximum correction of coefficient
20°/20° starboard zig-zag		
HA1	+ 0.5 %	0.0 %
HA2	+ 1.5 %	0.0 %
HA1T	+ 12.4 %	+ 3.7 %
RCH	+ 9.6 %	+ 2.3 %
35° starboard turn		
X090	- 10.4 %	- 6.3 %
Y180	- 19.0 %	- 6.9 %
STR	- 19.0 %	- 3.8 %
T180	- 12.8 %	- 5.9 %

변경한 후 HA1T의 가능한 최소 오차를 확인하였다. 각 조종성능지수들의 최소 가능 오차는 Table 5와 같다. 지그재그 성능지수의 경우 각각 선형 미계수 4개만 최대로 변경한 결과이다. 그리고 지그재그에서 최적 보정된 선형 미계수가 고정된 상태로, 비선형 미계수 11개를 최대 한도 내에서 변경하면서 선회 성능지수들의 최소 오차를 각각 탐색하였다.

5.3 조종성능지수 목표 허용 오차 결정

Table 5에서 각 시험 별 오차의 평균과 최대값을 표로 정리하면 Table 6과 같다.

Table 6 Mean and maximum errors of manoeuvring performance indices

Index	Error of simulation based on empirical formula	Minimum error with maximum correction of coefficient
20°/20° starboard zig-zag		
HA1, HA2, HA1T, RCH	Err_{meanI} (mean error) = + 6.0 %	Err_{meanF} = + 1.5 %
	Err_{maxI} (maximum error) = + 12.4 %	Err_{maxF} = + 3.7 %
35° starboard turn		
X090, Y180, STR, T180	Err_{meanI} = - 15.3 %	Err_{meanF} = - 5.7 %
	Err_{maxI} = - 19.0 %	Err_{maxF} = - 6.9 %

지그재그의 경우 초기 시뮬레이션의 성능지수 오차 평균은 6.0 % 이다. 만약 전체 허용 오차를 6.0 % 로 둔다면, HA1T와 같이 큰 오차를 6.0 % 근처로 줄이고, HA1, HA2의 작은 오차는 다소 늘리는 수준에서 유체력 미계수 최적화가 이루어질 것이다. 한편 허용 오차를 개별적으로 가능한 최소 오차 평균인 1.5 % 로 하는 것은 불가능하다. 최소 오차는 각 조종성능지수들에 대하여 개별적으로 탐색한 것이고, 이를 모두 동시에 만족시킬 수 없기 때문이다. 차선택으로 개별 최소 오차의 최대값인 3.7 % 를 목표 허용 오차로 삼을 수 있겠으나, 반복 계산에 의하면 이 값 역시 목표 허용 오차로 삼기에 대체로 작다.

적절한 목표 허용 오차는 초기 평균 오차 Err_{meanI} 와 개별 최소 오차의 최대값 Err_{maxF} 의 중간 정도에 위치한다. 결국 허용 오차 Err_{allow} 는 식 (7)과 같이 설정하는 것이 바람직하다.

$$Err_{allow} = mean(Err_{meanI}, Err_{maxF}) \quad (7)$$

본 대상선의 경우 지그재그와 선회 성능지수의 허용 오차는 Table 7과 같이 $\pm 4.9 \%$, $\pm 11.1 \%$ 로 결정되었다. 즉, 예를 들어 지그재그에서 HA1, HA2는 오차가 충분히 0.0 % 에 수렴할 수 있음에도 $\pm 4.9 \%$ 이내만 되면 유체력 미계수의 보정을 멈춘다. HA1, HA2의 오차가 0.0 % 에 가깝다면, HA1T의 오차를 4.9 % 이내로 줄이는 과정에서 혹 HA1, HA2의 오차가 증가되더라도 $\pm 4.9 \%$ 를 넘지 않는 선에서 이를 허용한다. 이와 같은 규칙에 따라 보정을 하면, 오차가 상대적으로 큰 조종성능지수에 집중해서 오차를 줄이는 방향으로 보정이 이루어진다.

Table 7 Allowable errors of manoeuvring performance indices

Index	Allowable error (Err_{allow})
20°/20° starboard zig-zag	
HA1, HA2, HA1T, RCH	$\pm 4.9 \%$
35° starboard turn	
X090, Y180, STR, T180	$\pm 11.1 \%$

5.4 유체력 미계수 보정 결과

대상선의 시뮬레이션 조종성능지수와 지그재그 자유항주시험 지수와 비교에 의한 반복 계산은 532회, 선회 자유항주시험 지수와 비교에 의한 반복 계산은 총 1492회 수행되었다. 계산 반복 횟수에 따른 지그재그 및 선회 성능 지수 오차의 변화를 Fig. 15, Fig. 16에 각각 나타내었다. 그리고 계산 종료 후 시뮬레이션 조종성능지수의 개선 정도를 Table 8, 9에 정리하였다.

Fig. 15에서 선형 미계수 보정 초반에는 오차가 큰 HA1T, RCH의 오차를 줄이는 쪽으로 미계수 보정이 이루어지며, 이 때 이미 오차가 0에 가까웠던 HA1, HA2는 오차가 오히려 음으로 증가한다. 이후 순차적으로 HA1, HA2까지 오차를 줄이고, 결국 모든 오차가 허용 오차 근처에서 최소가 될 때 계산을 종료한다.

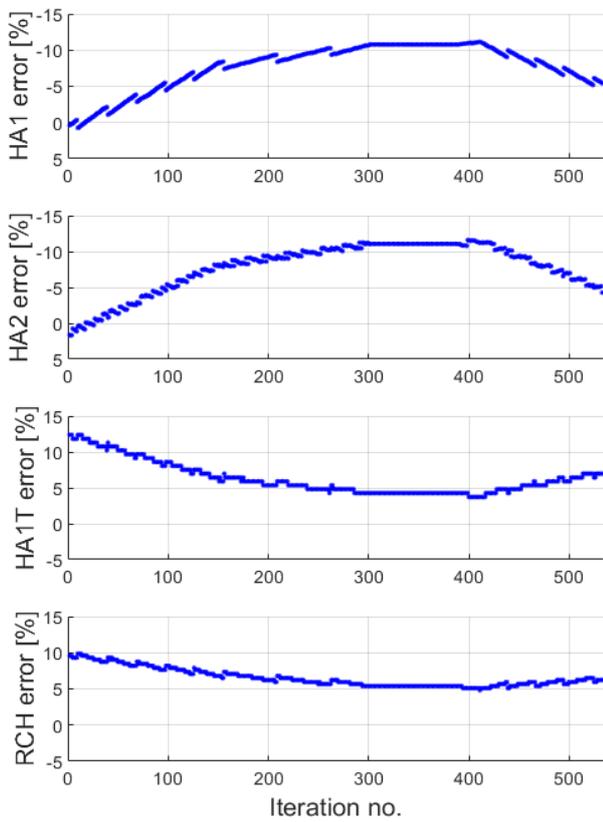


Fig. 15 Variations of errors of zig-zag performance indices on iterative calculation

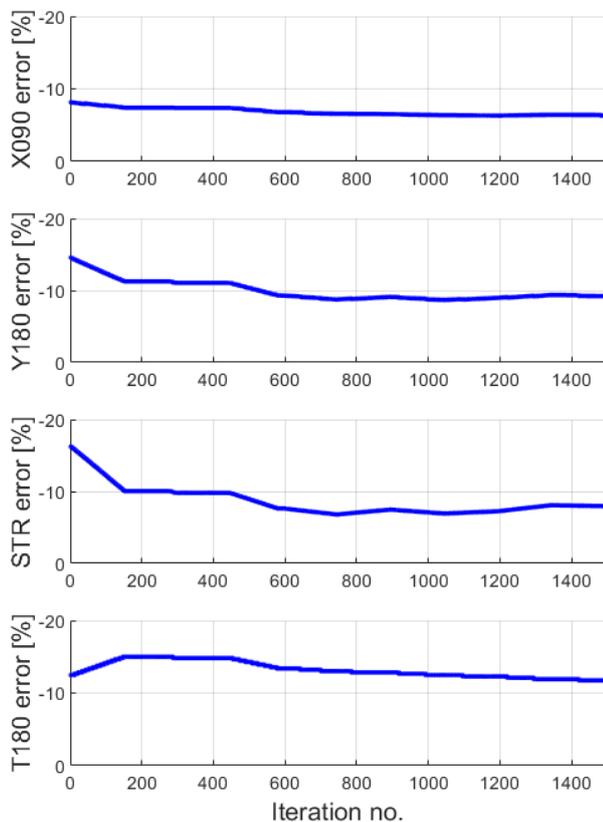


Fig. 16 Variations of errors of turning performance indices on iterative calculation

Fig. 16의 비선형 미계수 보정 초반에는 특히 오차가 큰 Y180, STR의 오차를 줄이는 쪽에 집중하며, 이후 모든 지수의 오차가 점차 최소값으로 수렴한다. 단, 선화의 초기 오차가 지그재그에 비하여 크기 때문에 보정하는 미계수의 개수가 많아 지고, 반복 계산 횟수가 상대적으로 증가하였다.

보정된 유체력 미계수를 사용한 선화, 지그재그 시뮬레이션 궤적 및 시계열은 Fig. 17, 18과 같다. 초기 시뮬레이션에 비하여 보정된 유체력 미계수에 의한 시뮬레이션은 자유항주시험 결과에 더 가깝다. 궤적뿐만 아니라 선속, 선회를 등의 실제 물리량 시계열도 자유항주시험과 상당히 유사함을 확인할 수 있다.

Table 8 Zig-zag performance indices by simulation with tuned coefficients

Zig-zag index	Free run	Simulation ↓ Simulation w/ tuned coeff.	Simulation error
1st maximum yaw angle (HA1)	33.70 °	33.87 ° ↓ 31.87 °	+ 0.5 % ↓ - 5.4 %
2nd maximum yaw angle (HA2)	34.90 °	35.43 ° ↓ 33.42 °	+ 1.5 % ↓ - 4.3 %
Time to 1st maximum yaw (HA1T)	18.51 sec	20.80 sec ↓ 19.80 sec	+ 12.4 % ↓ + 7.0 %
Reach (RCH)	35.68 sec	39.10 sec ↓ 37.90 sec	+ 9.6 % ↓ + 6.2 %

Table 9 Turning performance indices by simulation with tuned coefficients

Turn index	Free run	Simulation ↓ Simulation w/ tuned coeff.	Simulation error
Advance (X090)	3.25 L	2.91 L ↓ 3.04 L	- 10.4 % ↓ - 6.3 %
Tactical dia. (Y180)	3.34 L	2.71 L ↓ 3.03 L	- 19.0 % ↓ - 9.2 %
Steady turning radius (STR)	1.23 L	1.00 L ↓ 1.13 L	- 19.0 % ↓ - 7.9 %
Time to yaw of 180° (T180)	55.18 sec	48.10 sec ↓ 48.70 sec	- 12.8 % ↓ - 11.7 %

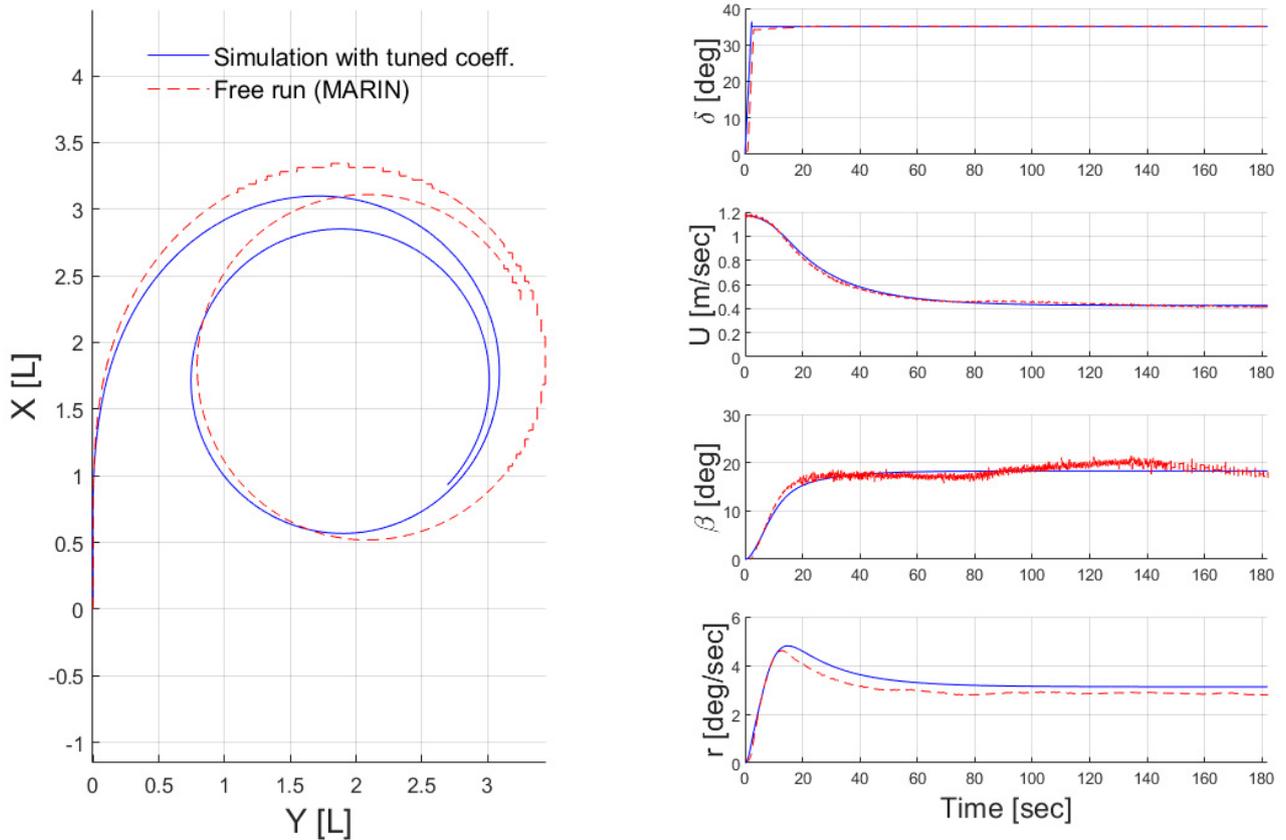


Fig. 17 35° starboard turn simulation with tuned coefficients

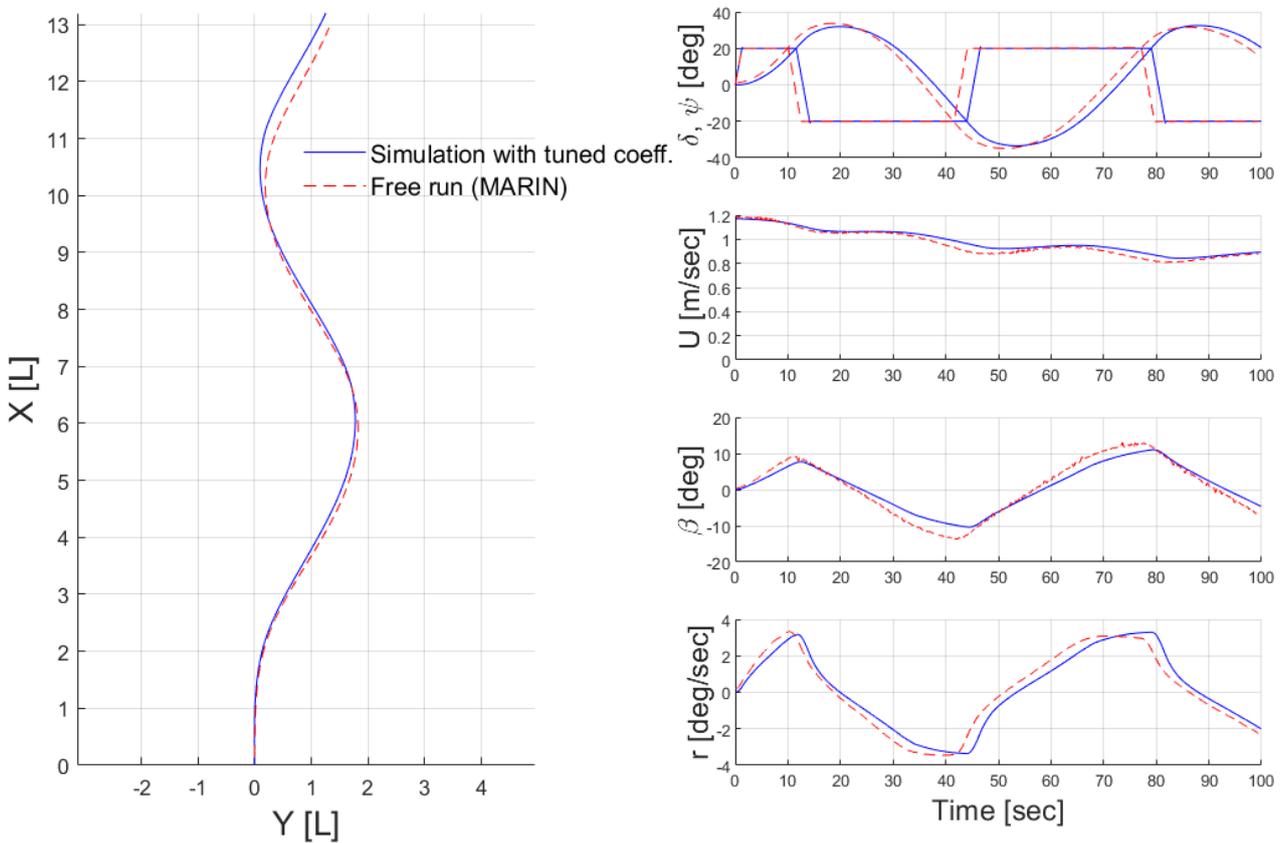


Fig. 18 20°/20° starboard zig-zag simulation with tuned coefficients

Table 10 Comparisons of tuned linear coefficients with PMM or CFD results (Sung & Park, 2015)

Coefficient (x 10 ⁵)	Sensitivity to HA1 (x 10 ⁵)	Based on empirical formula		PMM or CFD (Sung & Park, 2015)
		Initial	Tuned	
Y_v	-16290	-1831	-1869 (-2.1%)	-1948
$Y_r - m$	31371	-1503	-1276 (+15.0%)	-1583
N_v	56563	-980	-951 (+2.9%)	-881
N_r	-33882	-310	-310 (0.0%)	-285

특히 선회의 경우 유체력 미계수를 보정한 후 정상선회 선속과 선회율이 모두 개선되었다. 유체력 미계수 보정 전과 후의 정상선회 시뮬레이션 선속의 오차는 각각 -8.8 %, +2.4 %, 선회율 오차는 각각 +12.2 %, +10.9 % 로 각 물리량의 오차 크기가 감소하였다. 본 연구의 산술적인 최적화 방법은 개별 유체력 미계수들을 정확하게 보정하기에는 충분하지 않으나, 정상선회반경 등 적절한 지수를 목표로 삼는다면 최소한 전체 외력 합은 실제 현상을 재현하는 방향으로 보정이 이루어질 수 있다.

Table 10, Table 11에서 지그재그, 선회 시험으로 보정된 유체력 미계수를 동일 선형 구속시험 및 전산유체계산으로 추출된 타 연구(Sung et al., 2014; Sung & Park, 2015)의 유체력 미계수와 비교하였다. X_{vv} , X_r 만 Sung et al. (2014) 연구에서 발췌하였다. 선수동요 사항각 구속시험(Yaw with drift test)에 관계된 X_{vr} , Y_{vvr} , Y_{vr} , N_{vvr} , N_{vr} 은 전산유체계산 결과이며, 이외의 미계수는 구속시험 결과이다.

Table 10의 선형 미계수 중에는 N_v , $Y_r - m$ 등이 보정되었으며, Table 11의 비선형 미계수에서는 민감한 N_{vvr} , N_{vr} , $X_{vr} + m$, Y_{vvr} 등에 집중하여 보정되었다. 전체적으로 구속시험 및 전산유체계산 기반 미계수에 가까워지는 방향으로 보정이 이루어짐을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 대상선의 자유항주시험에서 추출된 조종성능 지수를 활용하여 경험식 기반 유체력 미계수를 보정하고, 시뮬레이션의 정확도를 개선하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 조종시험의 궤적뿐만 아니라 속도 등 물리량의 정확도를 검토하기 위하여 IMO 표준조종시험 기준 이외에 정상선회 반경, 반주기시간 등 지수를 추가 선별하였다.

Table 11 Comparisons of tuned nonlinear coefficients with PMM or CFD results (Sung & Park, 2015)

Coefficient (x 10 ⁵)	Sensitivity to Y180 (x 10 ⁵)	Based on empirical formula		PMM or CFD (Sung & Park, 2015)
		Initial	Tuned	
X_{vv}	540	142	142 (0.0%)	322
$X_{vr} + m$	3308	3438	2923 (-15.0%)	3212
X_{rr}	-2430	160	136 (-15.0%)	-107
$Y_{v v }$	2629	-3522	-3412 (-3.1 %)	/
(Y_{vvv})	/	/	/	-5320
$Y_{r r }$	88	13	13 (0.0 %)	/
(Y_{rrr})	/	/	/	-104
Y_{vvr}	1088	2018	2018 (0.0%)	4361
Y_{vrr}	2814	-2708	-2301 (+15.0%)	-1284
$N_{v v }$	1065	71	71 (0.0 %)	/
(N_{vvv})	/	/	/	596
$N_{r r }$	2822	-33	-38 (-15.0 %)	/
(N_{rrr})	/	/	/	77
N_{vvr}	16648	-1537	-1767 (-15.0%)	-2111
N_{vrr}	4703	175	201 (+15.0%)	1089

- 유체력 미계수의 보정정도, 지그재그 및 선회 성능지수의 허용 오차를 정량적으로 결정한 후, 조종성능지수의 오차를 줄이기 위한 유체력 미계수 최적화 문제를 정의하였다.
- 비선형 항들의 영향을 고려하여, 지그재그와 선회 시험을 순차적으로 활용하여 선형, 비선형 미계수를 보정하였다.
- 조종성능지수에 대한 각 유체력 미계수의 민감도를 활용하여 미계수의 보정이 최소한으로 이루어지도록 하였다.
- 보정된 유체력 미계수로 시뮬레이션을 수행할 경우 초기 시뮬레이션보다 자유항주시험의 궤적 및 속도에 더 가깝다.
- 유체력 미계수의 보정이 대체로 타 선형연구의 구속시험 및 전산유체계산 결과와 가까워지는 방향으로 이루어짐을 확인하였다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “첨단운송체의 항내 운항성능향상을 위한 축척효과를 고려한 운항제어원천 기술 개발(2/5)”에 의해 수행되었습니다 (PES3410). SIMMAN 2020 Workshop에 공식선형 KVLCC2의 모형시험 데이터를 제공해주신 현대중공업과 MARIN에 감사드립니다.

References

- Aoki, I., Kijima, K., Furukawa, Y. & Nakiri, Y., 2006. On the prediction method for maneuverability of a full scale ship. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 3, pp.157–165.
- Clarke, D., Gedling, P. & Hine, G., 1982. The application of manoeuvring criteria in hull design using linear theory. *The Royal Institution of Naval Architects*, pp.45–62.
- Hwang, W.Y., 1980. *Application of system identification to ship maneuvering*. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Inoue, S., Hirano, M. & Kijima, K., 1981. Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring. *International Shipbuilding Progress*, 28, pp.112–125.
- ITTC, 1978. Report of maneuverability committee. *Proceedings of 15th ITTC*.
- Jones, R.T., 1946. Properties of low-aspect-ratio pointed wings at speeds below and above the speed of sound. *National Advisory Committee for Aeronautics*, Technical Note No. 1032.
- Kijima, K., Nakiri, Y. & Furukawa, Y., 1990a. Prediction method of ship manoeuvrability in deep and shallow waters. *International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation(MARSIM) & ICSM 90*, Tokyo, Japan, 4–7 June 1990.
- Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y. & Furukawa, Y., 1990b. On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 168, pp.141–148.
- Kijima, K., Tanaka, S., Furukawa, Y. & Hori, T., 1993. On a prediction method of ship manoeuvring characteristics. *International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation(MARSIM)*, St. Johns, Newfoundland, Canada, 26 September – 2 October 1993.
- Kijima, K. & Nakiri, Y., 2003. On the practical prediction method for ship manoeuvring characteristics. *International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation(MARSIM)*, Kanazawa, Japan, 25–28 August 2003.
- Lee, H.Y., Shin, S.S. & Yum D.J., 1998. Improvement of prediction technique of the ship’s manoeuvrability at initial design stage. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 35(1), pp.46–53.
- Lee, T.I., Ahn, K.S., Lee, H.S. & Yum D.J., 2003. On an empirical prediction of hydrodynamic coefficients for modern ship hulls. *International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation(MARSIM)*, Kanazawa, Japan, 25–28 August 2003.
- Norrbjn, N.H., 1971. Theory and observations on the use of a mathematical model for ship manoeuvring in deep and confined water. *Meddelanden SSPA*, No. 68.
- Oltmann, P., 2003. Identification of hydrodynamic damping derivatives – a pragmatic approach. *International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation(MARSIM)*, Kanazawa, Japan, 25–28 August 2003.
- SIMMAN 2020 Workshop website <http://simman2020.kr> [Accessed 30 June 2020].
- Sung, Y.J., Park, S.H., Ahn, K.S., Chung S.H. & Shin, S.S., 2014. Evaluation on deep water manoeuvring performance of KVLCC2 based on PMM test and RANS simulation. *SIMMAN 2014 Workshop*, pp.C91–C96.
- Sung, Y.J. & Park, S.H., 2015. Prediction of ship manoeuvring performance based on virtual captive model tests. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(5), pp.407–417.
- Yeo, D.J. & Rhee, K.P., 2005. A study on the sensitivity analysis of submersibles’ manoeuvrability. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(5), pp.458–465.
- Yoshimura, Y. & Masumoto, Y., 2011. Hydrodynamic force database with medium high speed merchant ships including fishing vessels and investigation into a manoeuvring prediction method. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 14, pp.63–73.

