

자율운항선박의 항로추정성능 평가기법 개발에 관한 연구

김대정* · 이춘기** · † 임정빈

*한국해양대학교 해사산업연구소 산학연구교수, **한국해양대학교 항해융합학부 교수, † 한국해양대학교 해사인공지능·보안학부 교수

An Evaluation Technique for the Path-following Control Performance of Autonomous Surface Ships

Daejeong Kim · ChunKi Lee** · † Jeongbin Yim*

**Research Professor, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, Republic of Korea*

***Professor, Department of Navigation Convergence Studies, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, Republic of Korea*

† Professor, Department of Maritime AI and Cyber Security, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, Republic of Korea

요 약 : 최근 자율운항선박 개발을 위한 연구가 국내외에서 추진 중에 있다. 자율운항선박 개발에서 핵심기술 중 하나는 항로추종인데, 항로추종은 선박의 안전성 확보에 중요하기 때문에 자율운항선박 설계 시 사전평가 해야 한다. 본 연구의 목적은 자율운항선박 설계 시 항로추정성능의 시각적 및 정량적 평가기법을 개발하기 위한 것이다. 이 평가기법은 전산유체역학 기반의 자유 항주 모델과 LOS(Line-of-Sight) 알고리즘을 연계하여 개발하였다. 평가기법 중, 시각적 평가는 항로추종 중인 선박에 의해 생성되는 파계를 전산유체역학 소프트웨어를 이용하여 가시화하여 평가하고, 정량적 평가는 목표 선수방위각과 추정 선수방위각 사이의 차이 값과 계획항로와 추종항로 사이의 거리 차이 값을 이용하여 평가하였다. 항로추종성능 평가 결과, 항로추종 중 변침지점 부근에서 항로이탈편차가 크게 발생함을 알았고, 또한 선박 주위 유동의 시각화를 통해 선박 주위 유체 현상을 쉽게 파악할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 평가기법은 자율운항선박 설계 시 항로추정성능 평가에 관한 시각적 및 정량적 평가에 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 자율운항선박, 항로추종제어, 항로이탈편차, LOS 알고리즘, 전산유체역학

Abstract : A series of studies on the development of autonomous surface ships have been promoted in domestic and foreign countries. One of the main technologies for the development of autonomous ships is path-following control, which is closely related to securing the safety of ships at sea. In this regard, the path-following performance of an autonomous ship should be first evaluated at the design stage. The main aim of this study was to develop a visual and quantitative evaluation method for the path-following control performance of an autonomous ship at the design stage. This evaluation technique was developed using a computational fluid dynamics (CFD)-based path-following control model together with a line-of-sight (LOS) guidance algorithm. CFD software was utilized to visualize waves around the ship, performing path-following control for visual evaluation. In addition, a quantitative evaluation was carried out using the difference between the desired and estimated yaw angles, as well as the distance difference between the planned and estimated trajectories. The results demonstrated that the ship experienced large deviations from the planned path near the waypoints while changing its course. It was also found that the fluid phenomena around the ship could be easily identified by visualizing the flow generated by the ship. It is expected that the evaluation method proposed in this study will contribute to the visual and quantitative evaluation of the path-following performance of autonomous ships at the design stage.

Key words : autonomous surface ship, path-following control, cross-track error, LOS algorithm, computational fluid dynamics.

1. 서 론

최근 자율운항선박 개발을 위한 연구가 국내외에서 추진 중에 있다. 자율운항선박 개발에서 핵심기술 중 하나는 항로추종인데, 이러한 항로추종은 선박의 안전성 확보에 중요하기 때문에 자율운항선박 설계 시 사전평가 해야 한다.

본 연구의 목적은 자율운항선박의 항로추정성능을 시각적 및 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 개발하기 위한 것이다. 시각적 평가는 항로추종 중인 선박에 의해 생성되는 파계를 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 소프트웨어를 이용하여 켈빈파(Kelvin wave)를 구현하고 가시화하여 수행하였다. 그리고 정량적 평가는 두 가지의 변수를

† Corresponding author : 종신회원, jbyim@kmou.ac.kr 051)410-4246

* 정회원, kdj4907@kmou.ac.kr

** 종신회원, leeck@kmou.ac.kr 051)410-4270

이용하여 평가하였는데, 하나는 목표 선수방위각과 추정 선수방위각 사이의 차이 값이고, 다른 하나는 계획항로와 추종항로 사이의 거리 차이 값을 이용하여 수행하였다. 이러한 두 가지 변수는 항로추종에 주로 이용되는 가시선 가이드스 알고리즘(Line-of-Sight Guidance Algorithm, 이하 LOS 알고리즘)을 이용하여 계산하였다(Fossen, 2011).

기존 항로추종 성능 평가에 관한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

정량적 평가의 경우에는 LOS 알고리즘과 선박 수학 모델을 결합한 방법이 주로 제안되었는데(Fossen et al, 2003; Borhaug and Pettersen, 2005; Lekkas and Fossen, 2012; Sandeepkumar et al, 2022), 기존 연구에 사용된 선박 수학 모델은 단순히 유체력을 추정하여 선박의 거동을 계산하기 때문에 난류 유동과 켈빈파 등 선박 주위에 발생하는 유체역학적 현상은 가시화하지 못하는 한계가 있었다. 한편, CFD 소프트웨어는 운항 중인 선박 주위의 유동을 시각화함으로써 유체역학적 현상에 대해 명확한 해석을 제공할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

이에, 본 연구에서는 CFD 기반의 자유 항주 모델과 LOS 알고리즘을 결합한 항로추종 성능 평가방법을 개발하였다. 본 연구에서 제안한 자율운항선박의 항로추종 성능 평가기법은 정량적 평가뿐만 아니라 항로추종 중 발생하는 유체역학적 현상의 가시화를 통해 항로추종 결과의 명확한 해석이 가능할 것으로 기대된다.

2. 항로추종 평가 모델

2.1 항로추종 평가 모델

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 CFD 기반의 항로추종 평가 모델을 나타낸다. 이 평가 모델은 LOS 가이드스, 선수방위제어 오토파일럿(Heading autopilot), 그리고 CFD 기반의 자유 항주 선박모델(CFD-based free running ship model)로 구성된 것이다.

LOS 가이드스에서는 사전에 정한 계획항로에 선박이 최대한 가깝게 운항할 수 있는 선박위치에서의 목표 선수방위각을 출력하는데, 선박위치는 CFD 기반의 자유 항주 선박모델에서 출력한다.

이어서, 선수방위제어 오토파일럿에서는 목표 선수방위각과 선박모델에서 추정된 선수방위 각 그리고 선회각속도를 이용하여 선박의 타각을 출력한다.

그런 후, CFD 기반의 자유 항주 선박모델에서는 타각에 따른 선박의 6자유도 운동을 계산하고 항로추종에 필요한 운동변수를 출력한다. CFD 기반의 자유 항주 선박모델은 한국의 선박해양플랜트 연구소에서 공개한 KCS(KRISO Container Ship) 선형을 사용하였다. Table 1은 KCS의 주요 제원을 나타낸다.

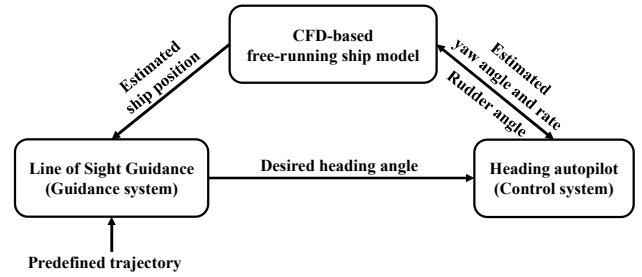


Fig. 1 Path-following control system architecture adopted in this study

Table 1 Main particulars of the KCS

Main particulars	Full scale
Length between perpendiculars(L _{BP}) (m)	230.0
Breadth(B) (m)	32.2
Draft (m)	10.8
Displacement (m ³)	52030
Block coefficient	0.651
LCB (%L _{PP}), fwd+	-1.48
Vertical Center of Gravity (m)	14.34
Metacentric height (m)	0.6
Radius of gyration(K _{xx}), K _{xx} /B	0.49
Radius of gyration(K _{yy}), K _{yy} /L _{BP}	0.25
Radius of gyration(K _{zz}), K _{zz} /L _{BP}	0.25
Propeller diameter (m)	7.9
Rudder turn rate (deg/s)	2.32

2.2 수치해석 기법

본 연구에서는 유한체적법을 수치해석 기법으로 이용하였다. 아울러, 항로추종 중 선박 주변의 유체를 비압축성 뉴턴 유체로 가정한 비정상 RANS 법을 이용하여 수치적으로 계산하였다. 유체의 연속 방정식은 다음 식(1)로 나타낼 수 있고, 운동량 방정식은 다음 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(U - U_g)U] = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + \nabla U \cdot \nabla \mu_{eff} + q_i \tag{2}$$

여기서, $\nabla \cdot (\cdot)$ 은 발산 연산자, $\nabla(\cdot)$ 은 구배 연산자, U 은 유체 속도, U_g 은 격자 속도, p 은 압력, ρ 은 유체 밀도, μ_{eff} 은 유효 역학 점도($=\rho(\nu + \nu_t)$), ν 은 동점도, ν_t 은 와점성(난류모델에서 결정), q_i 은 사용자 정의 소스텀(source term)을 나타낸다. 본 연구에서는 Menter의 Shear Stress Transport (SST) 난류 모델(Menter et al, 2003)을 이용하여 운항 중 발생하는 난류를 효과적으로 포착하였다. SST 난류 모델은 CFD 기반의 자유 항주 선박모델에서 가장 널리 사용되고 검증된 것으로 보고되어 있다(Kim et al., 2021a). 또한, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하여 난류의 압력과 속도 사이를 연계하여 계산하였다. Fig. 2은 본 연구에서 설정한 지구 좌표

계(관성 좌표계) 및 선박 이동 좌표계(비관성 좌표계)를 나타낸다. 선박 이동 좌표계의 중심은 선박의 무게중심에 위치한다. CFD 기반의 자유 항주 선박모델의 공간격자는 CFD 소프트웨어의 Trimmed Cell Mesher 기법을 적용하여 생성하였다. 선체와 타 표면의 격자는 Surface Remehser 기법을 이용하여 생성하였다. 표면 격자를 생성할 때 정밀한 계산을 위해 선박의 홀수 부근 및 하부 표면은 격자를 조밀하게 생성하였고, 그 외에는 성긴 격자로 생성하였다. 그리고 선체 표면에 의해 발생한 자유 수면을 정밀하게 표현하기 위해 선체 부근에는 조밀한 공간격자를 분포시켰고, 선체에서 멀어질수록 성긴 격자를 분포시켰다. 또한, 선체 표면 부근의 난류 경계층을 정확히 해석하기 위해 프리즘 레이어(Prism layer)기법을 사용하였으며, 레이어의 총 개수는 6개로 설정하였다. 선체의 6자유도 움직임과 오토파일럿에 의한 타의 회전을 구현하기 위해 중첩격자계법을 CFD 모델에 적용하였다. 아울러 본 연구에서는 정수 중 항로추종제어를 수행하는 선박모델을 구현하기 위해 Volume of Fluid(VOF) 방법을 고려하였다. CFD 자유항주 선박모델의 규칙파와 불규칙파, 조류, 그리고 천수조건 등 다양한 외부환경을 구현하기 위한 격자생성 및 경계조건은 기존에 보고된 연구결과를 이용할 수 있다(Kim, D., and Tezdogan, T, 2022; Kim et al, 2021b; Kim et al, 2021c).

2.3 항로추종제어 알고리즘

항로추종제어 알고리즘은 LOS 알고리즘을 CFD 기반의 자유 항주 선박모델에 결합시켜서 구현하였다. Fig. 3은 항로추종제어를 위한 LOS 가이드선 법칙을 나타낸다.

LOS 알고리즘에서 출력되는 목표 선수방위 각(ψ_d)은 다음 식(3)으로 계산할 수 있다.

$$\psi_d = \gamma_p + \arctan\left(\frac{-y_e}{\Delta_h}\right) - \beta \quad (3)$$

여기서, γ_p 은 다음 식(4)을 이용하여 계산한 수평경로 접선각도를 나타내고, y_e 은 다음 식(5)을 이용하여 계산한 항로이탈편차를 나타내며, Δ_h 은 조타를 위한 선회 매개변수를 나타내고, β 은 다음 식(6)을 이용하여 계산한 편류각을 나타낸다.

$$\gamma_p = \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k) \quad (4)$$

여기서, (x_k, y_k) 은 k번째 변침지점을 나타내고 (x, y) 은 선박의 무게중심 위치를 나타낸다.

$$y_e = -(x - x_k)\sin(\gamma_p) + (y - y_k)\cos(\gamma_p) \quad (5)$$

$$\beta = \text{atan2}(v, u) \quad (6)$$

여기서, v 와 u 는 선박의 x_s 축 방향의 속도와 y_s 축 방향의 속도를 각각 나타낸다.

한편, LOS 알고리즘의 목표는 항로추종제어 중 항로이탈편차(y_e)가 최소가 되도록 선박을 제어하는 것으로, 다음 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} y_e(t) = 0 \quad (7)$$

아울러, 항로추종 중 타의 움직임을 제어하기 위한 오토파일럿은 비례미분(Proportional and Differential, PD) 제어를 적용하는 것으로 가정한다.

3. 수치 시뮬레이션 및 결과

3.1 수치 시뮬레이션 방법

시뮬레이션은 기존 연구를 통해 신뢰성이 검증된 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 기반의 상용 프로그램인 STAR-CCM+를 이용하여 수행하였다(Kim et al., 2021a).

아울러, 본 연구에서 사용한 선박모델의 정수 중 6자유도 조종운동성능의 신뢰성은 항로추종 시뮬레이션을 수행하기 이전에 검토하였다. 이것은 항로추종성능 평가의 정확한 예측을 위한 것으로, 항로추종성능은 사용할 선박모델의 조종운동성능과 밀접한 관계가 있기 때문이다. 검토 결과, 본 연구에 사용한 CFD 기반의 선박모델은 높은 신뢰도를 갖고 정수 중 6자유도 항로추종성능을 평가할 수 있는 것으로 확인하였다(Kim et al., 2021a).

3.2 계획 항로 설정

Table 2는 시뮬레이션에 이용한 계획항로를 나타낸다. 계획항로는 총 5종의 변침지점의 위치(x, y)와 각 변침지점 사이의 진방위와 거리를 이용하여 구성하고, 직진, 좌현 변침 또는 우현 변침 등 간단히 항로추종성능을 평가할 수 있도록 구성하였다.

아울러 항로추종 시작 시, 선박 모델의 프로펠러 회전수는 93rpm(revolution per minutes)으로 고정하고, 속도는 9.5m/s (약 18.5kts)로 정하였다.

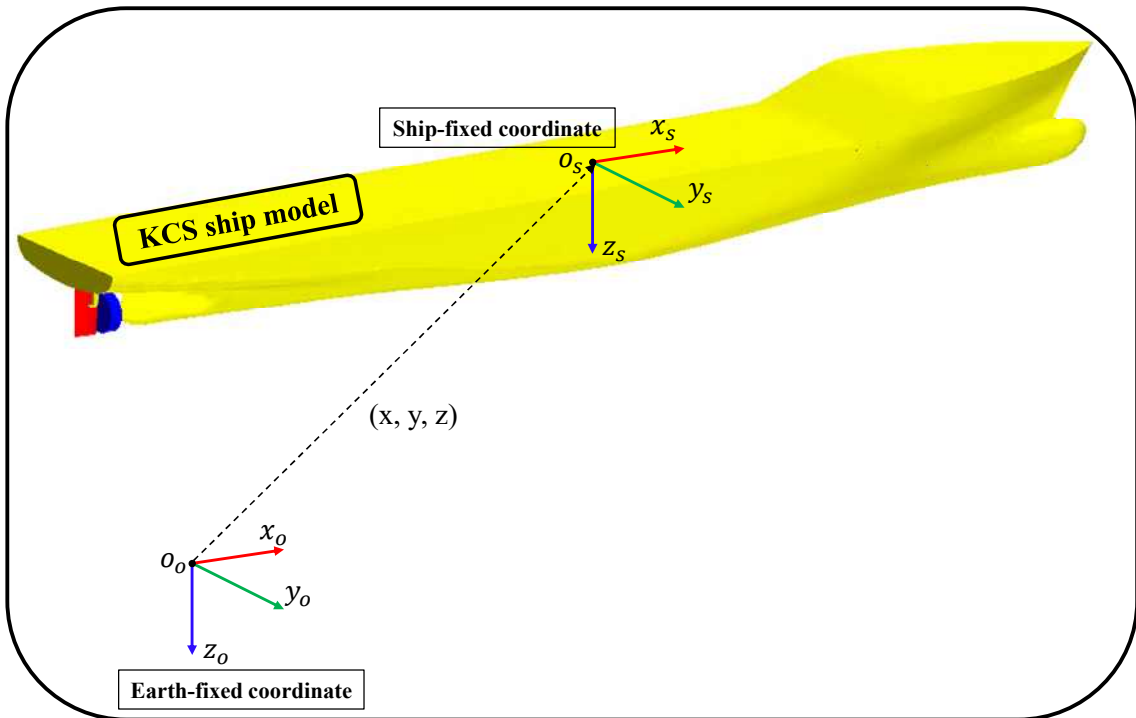


Fig. 2 The applied boundary conditions and the reference coordinate systems for the free-running CFD model

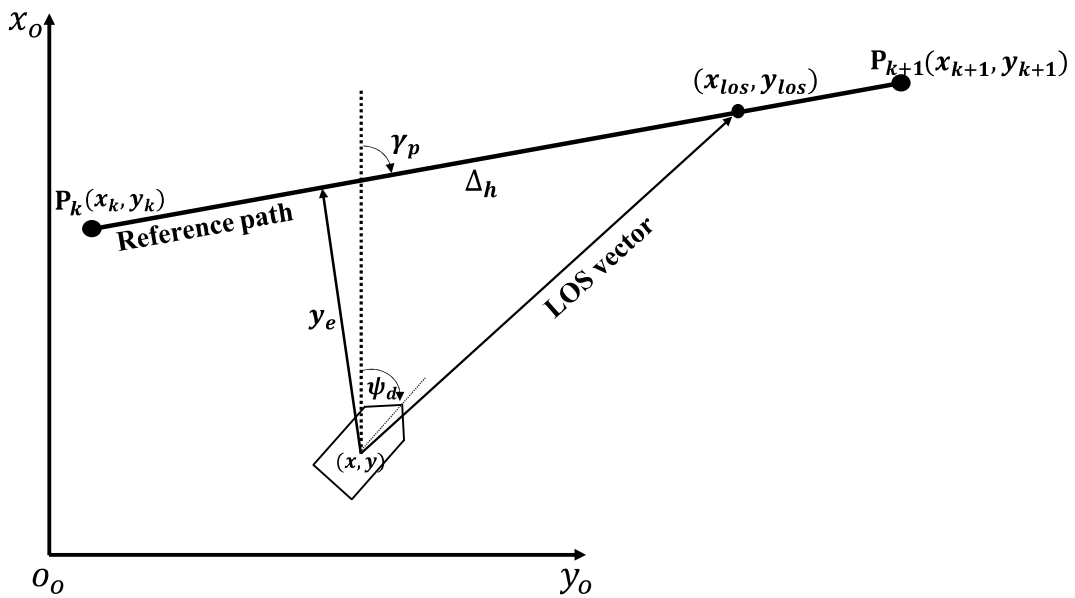


Fig. 3 Line-of-Sight guidance law for the path-following control

Table 2 Predefined path for the path-following task in this work

Way-point	Coordinate (x, y)	True course (degrees)	Distance (m)
P1	(0, 0)	000	5750(25L _{BP})
P2	(5748, 0)	045	5750(25L _{BP})
P3	(9811, 4063)	000	5750(25L _{BP})
P4	(1559, 4063)	315	5750(25L _{BP})
P5	(19622, 0)	-	-

3.3 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션 결과는 두 가지 방법을 이용하여 분석하였는데, 하나는 항로추종의 시각적 분석이고, 다른 하나는 항로추종 평가 변수의 정량적 분석이다.

3.3.1 시각적 분석

Fig. 4는 계획항로에 대한 항로추종의 가시화 결과를 나타낸 것으로, 그림을 설명하면 다음과 같다.

상단 그림은 항로추종 결과를 미터(m) 단위의 x-y 평면좌표에 나타낸 것으로, 적색의 긴 점선은 계획항로를 나타내고, 청색의 짧은 점선은 추종항로를 나타낸다. 5종의 위치(P1, P2, P3, P4, P5)는 계획항로의 변침지점을 나타낸 것으로 P1과 P5는 계획항로의 출발과 도착 위치를 각각 나타낸다. 아울러, 8종의 위치(a, b, c, d, e, f, g, h)는 항로추종 결과의 가시화 위치를 나타낸 것으로, a는 항로추종의 시작위치를 나타낸다. a의 위치는 P1에서 좌측으로 1,150m(5L_{BP}) 이격된 지점으로 정하였다. 이와 같이 항로추종을 P1이 아닌 a의 위치에서 시작한 이유는, 항로추종 초기 단계에서 계획항로를 벗어난 경우의 항로추종 현상을 분석하기 위한 것이다.

하단 그림은 상단 그림에 나타낸 8종 위치에서 예측한 선박 주위에 발생한 자유 수면에 대한 가시화 결과를 나타낸다. 선박의 좌현과 우현 측에 나타낸 물결 형상은 항로추종 중 발생한 켈빈파를 나타낸 것으로, 이러한 켈빈파는 선박의 흘수로부터 계산한 파고 높이에 따라 색깔로 구별된다. 컬러 막대는 켈빈파의 파고(m)를 나타낸다.

Fig. 4의 가시화 결과를 분석하면 다음과 같다.

1) 상단 그림에서, a의 위치에서 항로추종을 시작한 선박이 b와 c의 위치를 경유하여 점차 P1과 P2 사이의 직선 항로에 근접하고 있음을 볼 수 있다. 아울러 P2와 P5 사이의 계획항로에서도 항로추종에 성공함을 볼 수 있다.

2) 하단 그림에서, 8종의 각 위치에서 발생한 선박 주위의 자유 수면을 볼 수 있다. 초기 a의 위치에서 선박이 직진한 결과 켈빈파는 좌우 대칭으로 발생하고, b의 위치에서는 계획항로를 추종하기 위하여 우현 변침한 결과 켈빈파는 좌우 비대칭으로 발생하고, c의 위치에서는 다시 계획항로에 정침하기 위하여 좌현 변침한 결과 좌현 부분에 우현 부분보다 더 높은 파고의 켈빈파가 발생한다. 이어서 d의 위치에서는

계획항로를 직선으로 추종한 결과 켈빈파가 대칭으로 발생함을 볼 수 있다. 이후 e부터 h까지의 위치에서 발생하는 다양한 켈빈파의 형상을 볼 수 있다.

이와 같은 선박 주변의 자유 수면을 켈빈파를 이용하여 시각화함으로써 항로추종에 관한 유체역학적 현상을 쉽게 이해할 수 있음을 알 수 있다.

3.3.2 정량적 분석

Fig. 5와 Fig. 6은 항로추종 평가 변수의 정량화 결과를 시계열 그래프로 나타낸 것이다.

Fig 5는 항로추종 중 목표 선수방위각과 추정 선수방위각을 나타낸 것으로, x-축은 초(s) 단위의 시간을 나타내고, y-축은 방위각을 나타낸다. 적색 실선은 목표 선수방위각(ψ_d)를 나타내고, 검은 실선은 추정 선수방위각(ψ)를 나타낸다.

Fig. 5를 분석하면 다음과 같다.

1) 0초에서 약 100초 구간에서 목표 선수방위각과 추정 선수방위각에 큰 차이가 나타났다. 큰 차이가 발생한 이유는, 항로추종 시작 시 초기 선박위치를 계획항로의 출발지점인 P1에서 좌측으로 1,150m(5L_{BP}) 이격시켰고, 이로 인해 LOS 알고리즘에 의해 목표 선수 방위각이 상대적으로 큰 값(약 80도)을 출력했기 때문이다. 큰 차이가 발생한 이후에 추정 선수방위각이 점차 목표 선수방위각에 가까워짐을 볼 수 있다.

2) 약 100초에서 약 2700초의 구간에서는 세 번의 목표 선수방위각의 급격한 변화가 나타남을 볼 수 있다. 이러한 급격한 방위의 변화는 약 770초 부근의 45도에서 나타나고, 약 1400초 부근의 0도에서 나타나며, 약 2070초 부근의 -45도에서 나타난다. 이러한 세 번의 급격한 방위변화는 세 변침지점(P2, P3, P4) 부근에서 발생한 것인데, 선박이 각 변침지점에 도달한 뒤 다음 직진항로를 추종하기 위한 새로운 목표 선수방위각이 LOS 알고리즘에 의해 계산된 결과이기 때문이다.

3) 항로추종의 모든 구간을 보면, 추정된 선수방위각이 목표 선수방위각을 추종할 때 약간의 시간지연을 확인할 수 있는데, 이는 오토파일럿의 타각 명령에 의한 선박의 즉각적인 선회가 물리적으로 불가능하기 때문인 것으로 고려된다.

Fig. 6은 항로이탈 편차를 나타낸 것으로, x-축은 초(s) 단위의 시간을 나타내고, y-축은 항로이탈편차를 나타낸다. 검은 실선은 계획항로와 추종항로 사이의 항로이탈편차(y_e)를 나타낸 것으로, 음(-)의 항로이탈편차 값은 선박이 계획항로의 좌측에 위치함을 의미하고, 반대로 양(+)의 항로이탈 편차 값은 선박이 계획항로의 우측에 위치함을 의미한다.

Fig. 6을 분석하면 다음과 같다.

1) 0초에서, 항로이탈편차가 -1150m로 나타났는데, 그 이유는 항로추종 시작 시 선박위치가 계획항로의 출발지점인 P1에서 좌측 1,150m(5L_{BP})으로 이격시켰기 때문이다.

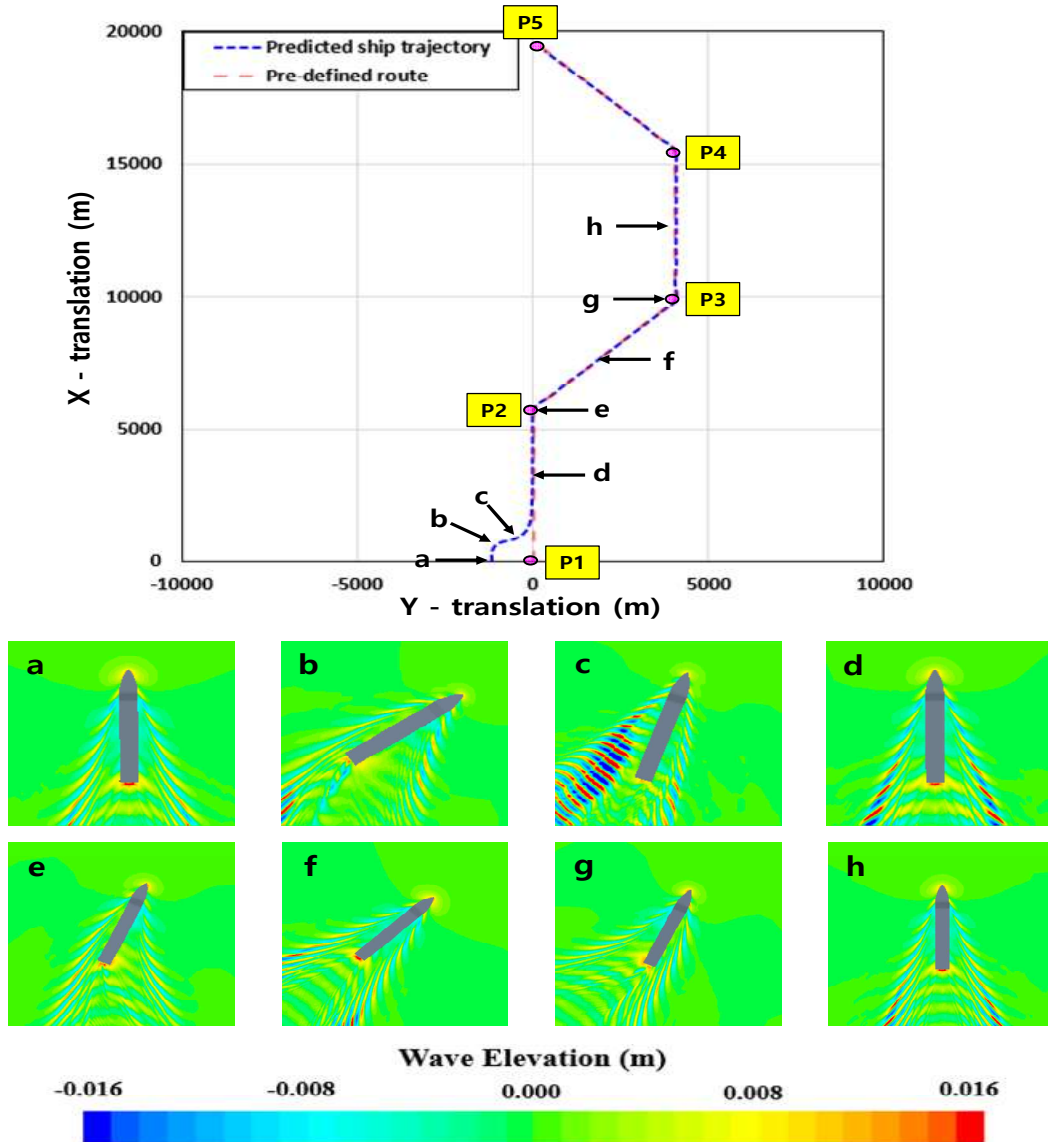


Fig. 4 xy-plot of the predefined and predicted ship trajectory and free surface elevation generated by the ship during the path-following task

2) 0초에서 약 400초의 구간을 보면, 항로이탈편차의 크기가 점차 감소하여 영(0)에 수렴함을 볼 수 있다. 이를 통해 선박이 LOS 알고리즘에 의해 생성된 목표 선수방위각을 추종하고 있음을 알 수 있다.

3) 약 400초 이후의 구간을 보면, 세 부분(약 770초, 약 1400초 그리고 약 2070초)에서 항로이탈편차가 급격히 약 270m까지 증가하다가 영(0)으로 수렴함을 볼 수 있다. 이러한 현상은 위의 Fig. 5에 나타낸 세 변침지점(P2, P3, P4) 부근에서 선박이 다음 직선 항로를 추종할 때 발생한 것으로, 이러한 항로이탈편차의 원인은 계획항로가 실제 선박의 선회 특성을 반영한 곡선 항로가 아니라 직선 항로의 조합으로 이

루어졌기 때문이다. 변침지점 부근에서 급격히 증가하는 항로이탈편차는 선박 안전을 저해하는 하나의 요인이 될 수 있다. 이러한 현상은 실제 선박의 선회 특성을 반영한 곡선 항로를 이용하면 해결 가능할 것으로 고려되고, 본 연구에서 이에 관해서는 추후 연구되어야 할 문제로 둔다.

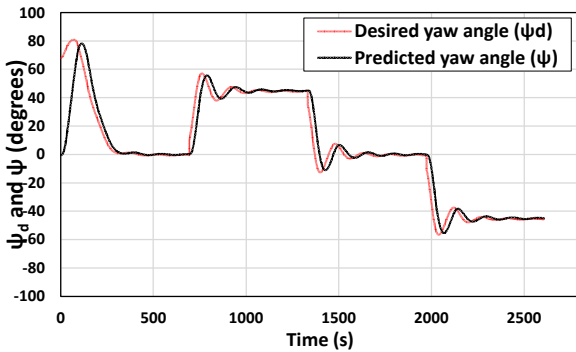


Fig. 5 Time history of the desired yaw angle and predicted yaw angle during the path-following task.

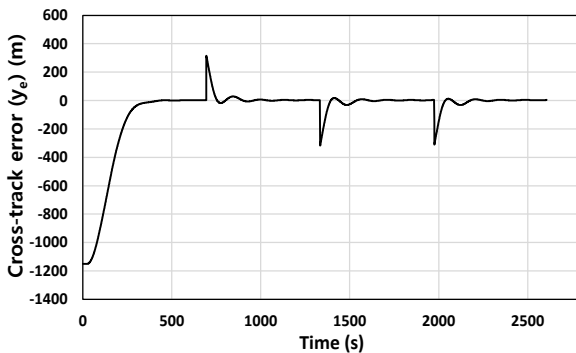


Fig. 6 Time history of the cross-track error experienced by the ship during the path-following task

4. 결 론

본 연구에서는 자율운항선박의 항로추정성능을 시각적 및 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, CFD 기반의 자유 항주 모델과 LOS 알고리즘을 연계하여 자율운항선박의 항로추정성능의 평가가 가능함을 알았다.

둘째, CFD 소프트웨어를 이용하여 선박에 의해 발생한 켈빈파를 가시화함으로써 항로추종 중 발생하는 선박 주위의 유동 현상을 시각적으로 볼 수 있음을 확인하였다.

셋째, 항로추종 중 변침지점 부근에서 항로이탈편차가 크게 발생함을 알았다.

항로추종 중 변침지점 부근에서 급격히 증가하는 항로이탈편차는 선박 안전에 영향을 주는 하나의 요인이 될 수 있다. 이에 관해서는 추후 연구할 예정이다.

본 연구에서 제안한 평가기법은 자율운항선박 설계 시 항로추정성능에 관한 시각적 및 정량적 평가에 적용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2023년도 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 '자율운항선박 기술개발사업 (20200615, 자율운항선박 육상제어 기술개발)'의 연구결과입니다.

References

- [1] Borhaug, E. and Pettersen, K. Y.(2005), "Cross-track control for underactuated autonomous vehicles.", Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 211-216.
- [2] Fossen, T. I.(2011), Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 257-266.
- [3] Fossen, T. I., Breivik, M. and Skjetne, R.(2003), "Line-of-sight path following of underactuated marine craft.", IFAC proceedings, Vol. 36, No. 21, pp. 211-216.
- [4] Hasanvand, A., Hajivand, A. and Ali, N. A.(2021), "Investigating the effect of rudder profile on 6DOF ship course-changing performance.", Applied Ocean Research, Vol. 117, pp. 102944.
- [5] Kim, D., Song, S. and Tezdogan, T.(2021a), "Free running CFD simulations to investigate ship manoeuvrability in waves.", Ocean Engineering, Vol. 236, p. 109567.
- [6] Kim, D. and Tezdogan, T.(2022), "CFD-based hydrodynamic analyses of ship course keeping control and turning performance in irregular waves.", Ocean Engineering, Vol. 248, p. 110808.
- [7] Kim, D., Tezdogan, T. and Incecik, A.(2022b), "A high-fidelity CFD-based model for the prediction of ship manoeuvrability in currents." Ocean Engineering, Vol. 256, p. 111492.
- [8] Kim, D., Tezdogan, T. and Incecik, A.(2022c), "Hydrodynamic analysis of ship manoeuvrability in shallow water using high-fidelity URANS computations." Applied Ocean Research, Vol. 123, p. 103176.
- [9] Lekkas, A. M. and Fossen, T. I.(2012), "A time-varying lookahead distance guidance law for path following.", IFAC proceedings, Vol. 45, No. 27, pp. 398-403.
- [10] Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R.(2003), "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model.", Turbulence, heat and mass

transfer, Vol. 4(1), pp. 625-632.

- [11] Sandeepkumar, R., Rajendran, S., Mohan, R. and Pascoal, A.(2022), "A unified ship manoeuvring model with a nonlinear model predictive controller for path following in regular waves.", *Ocean Engineering*, Vol. 243, p. 110165.
- [12] Wang, J. and Wan, D.(2018), "CFD investigations of ship maneuvering in waves using naoe-FOAM-SJTU Solver.", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 17, No. 3, pp. 443-458.
- [13] Yasukawa, H. and Yoshimura, Y.(2015), "Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions.", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 37-52.

Received 12 January 2023

Revised 28 January 2023

Accepted 28 January 2023