

선박의 항로추종을 위한 LOS 가이드 시스템의 제안

A Proposal of an LOS Guidance System of a Ship for Path Following

이 병 결*, 김 종 화
(Byungkyul Lee and Jonghwa Kim)

Abstract : This paper proposes an LOS(line-of-sight) guidance system of a ship for path following. From the viewpoint of a control configuration, guidance is a special type of compensation algorithm that is placed in front of the controller to accomplish navigational objects. A guidance system generates a reference trajectory for trajectory tracking or path control and decides the desired velocity, position and heading angle. A control system executes commands based on a reliable guidance law during navigation. An LOS vector from the vessel to a point on the path between two way-points in straight-line navigation or a point among turning circle in turning navigation is selected, and then a heading angle is calculated to converge the desired path based on the LOS vector. The LOS guidance law is defined for the straight-line and the turning circle, respectively. The effectiveness of the suggested LOS guidance system is assured through computer simulation.

Keywords : LOS guidance system, way-point, path following, ship control

I. 서론

가이드 시스템은 선박이나 항공기 등의 항행 목적을 달성하기 위해 오토파일럿으로 불리는 제어시스템 앞쪽에 위치하는 보상 시스템 또는 계산 알고리즘이다. 선박의 가이드 시스템은 항로 추종제어에서 기준항로를 생성하는 역할을 수행하며, 이를 위해 첫째, 항행 목적을 달성하기 위해 요구되는 선박의 속도, 회두각, 위치 등을 결정하고, 둘째, 운항의 안전성을 위해 선체를 안정화하거나 감속하고, 셋째, 선체 주위의 파도, 바람, 해류 등의 외란에 대한 선박의 민감도를 감소시키는 기능을 수행한다.

Fossen은 변침점 정보를 데이터 베이스화하고 데이터 베이스의 정보를 활용하여 항로를 결정하는 변침점 가이드 시스템 시스템을 제안하였다[1,2,3]. 변침점 가이드 시스템은 직선항로와 선회항로를 선박의 물리적 제한을 반영한 시뮬레이터를 통해 경로를 생성하도록 구성되었다[3].

미사일의 목표물 추적 시스템에서 목표물까지의 가시선(line-of-sight)을 이용한 LOS 가이드 시스템, LOS 속도 가이드 시스템(LOS rate guidance), CLOS (Command-to-Line-of-Sight) 가이드 시스템 등이 연구되었다[4,5]. Brevik와 Fossen은 변침점 사이의 선박 운항에서 현재 선박의 위치에서 다음 변침점이나 변침점 사이의 임의의 어느 한 점으로의 가시선 벡터를 결정하고 이 가시선 벡터를 회두각 제어를 위해 사용하는 LOS 가이드 시스템을 제안하였다[3,6]. Brevik와 Fossen의 LOS 가이드 시스템은 선회항로에 대한 가이드 시스템 없이 목표 변침점의 일정한 영역(circle of acceptance) 안으로 선박이 진입하게 되면, 목표 변침점을 다음 변침점으로 전환하여 변침을 수행하도록 구성하였다[6]. 이러한 구성은 원양항해와 같이 장애물이 없거나 선회를 위한 충분한 공간이 있는 경우에는 적절하지만, 근해나 장애물이 있는 경우,

정확한 선회 제어를 위한 가이드 시스템이 효율적으로 이루어지기 힘들고, 선회를 위해 부가적으로 더 많은 변침점을 선택해야 하는 문제가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 직선항로와 선회항로에 대한 LOS벡터를 각각 정의하고 직선항로와 선회항로에 대한 LOS 가이드 시스템 규칙을 제안한다. 또한 제안한 LOS 가이드 시스템의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 고찰한다.

II. LOS 가이드 시스템

선박의 항로추종을 위한 LOS 가이드 시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 선박이 오토파일럿 시스템과 GPS 시스템을 장착하고 있다면, 제안하는 LOS 가이드 시스템이 생성하는 회두각 명령에 따라 오토파일럿 시스템이 회두각 유지제어를 수행함으로써 선박이 미리 정해진 항로를 추종하도록 제어하는 것이 가능하다.

1. 직선항로에 대한 LOS 가이드 시스템 규칙

가이드 시스템에서 사용하는 직선항로에 대한 LOS벡터는 그림 2와 같다[3].

현재 선박 위치에 대한 직선항로의 목표위치 (x_d, y_d) 와 수직 위치오차는 각각 (1), (2)와 같다[7,8,9].

$$x_d = x_2 + t_h(x_3 - x_2) \quad (1)$$

$$y_d = y_2 + t_h(y_3 - y_2)$$

$$P_e = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2} \quad (2)$$

여기서,

$$t_h = \frac{(x_3 - x_2)(x - x_2) + (y_3 - y_2)(y - y_2)}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \quad (3)$$

이다.

변침점 2에서 3으로의 회두각과 선박에서 변침점 3으로의 회두각은 (4), (5)와 같고,

* 책임저자 (Corresponding Author)

논문 접수 : 2004. 10. 1., 채택확정 : 2005. 1. 22.

이병결 : 한국해양대학교 제어계측공학과(ybk1124@hanmail.net)

김종화 : 한국해양대학교 IT공학부(kimjh@mail.hhu.ac.kr)

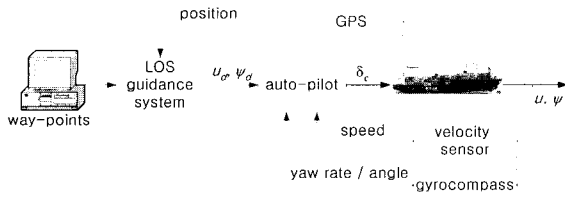


그림 1. LOS 가이드 시스템.
Fig. 1. An LOS guidance system.

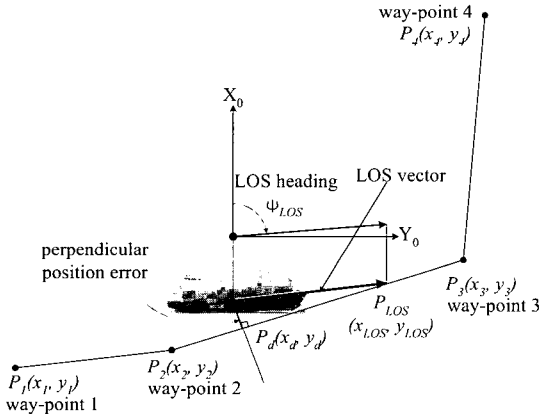


그림 2. 직선항로 LOS벡터의 정의.
Fig. 2. Definition of an LOS vector for a straight line.

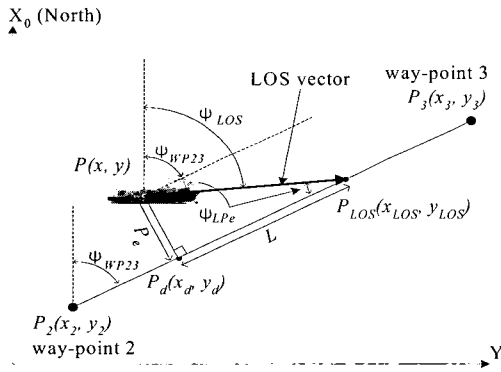


그림 3. 직선 항로에 대한 LOS 가이드 시스템.
Fig. 3. LOS guidance for a straight line.

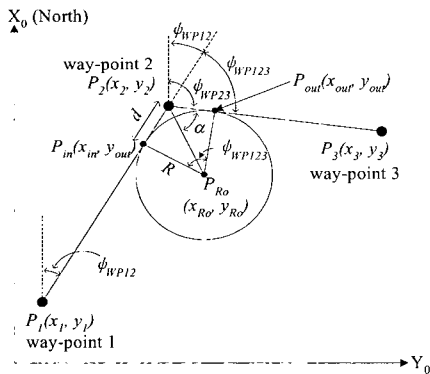


그림 4. 선회항로 묘사에 사용되는 변수들.
Fig. 4. Definition of turning variables.

$$\psi_{WP23} = \text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2) \quad (4)$$

$$\psi_{WP3} = \text{atan2}(y_3 - y, x_3 - x) \quad (5)$$

선박에서 LOS점으로의 회두각은 (6)과 같다.

$$\psi_{LOS} = \text{atan2}(y_{LOS} - y, x_{LOS} - x) \quad (6)$$

$$x_{LOS} = x_d + L \cdot \cos \psi_{WP23}$$

$$y_{LOS} = y_d + L \cdot \sin \psi_{WP23}$$

여기서, L 은 목표위치 P_d 로부터 LOS점까지의 거리이다.

직선항로와 LOS벡터의 만남각은 그림 3으로부터 L 과 P_e 에 대해 (7)과 같이 표현된다.

$$\tan(\psi_{LPe}) = \text{sgn}(P_e) \frac{P_e}{L} \quad (7)$$

여기서,

$$\text{sgn}(P_e) = \text{sgn}((x_d - x)(y_{LOS} - y_d) - (x_{LOS} - x_d)(y_d - y)) \quad (8)$$

이고, 선박이 직선항로에 대해 좌, 우측 어느 쪽에 위치하는지 판별하기 위해 사용된다. 양이면 선박은 직선항로의 좌측에 위치하고, 음이면 직선항로의 우측에 위치한다.

수직 위치오차 P_e 와 목표위치에서 LOS점까지의 거리 L 에 대해 LOS 가이드 시스템 규칙을 다음과 같이 제한한다.

$$\psi_d = \psi_{WP23} + \psi_{LPe} \quad (9)$$

$$\psi_{LPe} = \text{atan}\left(-\text{sgn}(P_e) \frac{K_1 \cdot P_e}{L}\right) \quad (10)$$

$$L = K_2 u \quad (11)$$

직선항로의 가이드 시스템 규칙을 수직 위치오차와 전진방향 속도의 함수로 나타냄으로써 수직 위치오차에 대해 보상할 수 있고, 전진 방향 속도에 대하여 적절하게 반응할 수 있다.

2. 선회항로에 대한 LOS 가이드 시스템 규칙

선회 항로에 대한 가이드 시스템에서 사용하는 각 중 변수들은 그림 4와 같다[1].

변침점 1, 2 구간과 변침점 2, 3 구간의 회두각은 (12)와 같고, ψ_{wp12} 에서 ψ_{wp23} 로의 변침각은 (13)과 같다.

$$\psi_{wp12} = \text{atan2}(y_2 - y_1, x_2 - x_1) \quad (12)$$

$$\psi_{wp23} = \text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2)$$

$$\psi_{wp123} = \psi_{wp23} - \psi_{wp12} \quad (13)$$

선회원 중심에서 변침점 2에서 변침점 3으로의 각 α 는

$$2\alpha = \pi - |\psi_{wp123}| = \pi - |\psi_{wp23} - \psi_{wp12}|$$

$$\alpha = 0.5 \times (\pi - |\psi_{wp23} - \psi_{wp12}|)$$

$$= \pi/2 - 0.5 |\psi_{wp23} - \psi_{wp12}| \quad (14)$$

이 되고, $\tan \alpha = \frac{R}{d}$ 이므로,

$$d = \frac{R}{\tan \alpha} = \frac{R}{\tan(\pi/2 + 0.5 \times (\psi_{wp12} - \psi_{wp23}))} \quad (15)$$

이 된다.

선회 원과 직선항로가 접하는 좌표는

$$\begin{aligned} x_{in} &= x_2 - d \cos \psi_{u\beta 12} \\ y_{in} &= y_2 - d \sin \psi_{u\beta 12} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} x_{out} &= x_2 + d \cos \psi_{u\beta 23} \\ y_{out} &= y_2 + d \sin \psi_{u\beta 23} \end{aligned} \quad (17)$$

이 때, d 를 이용하여 선회 원의 중심 좌표를 구하면

$$\begin{aligned} x_{R_c} &= x_{in} + d \cos \psi_{u\beta 23} \\ &= x_2 - d \cos \psi_{u\beta 12} + d \cos \psi_{u\beta 23} \\ &= x_2 + d(\cos \psi_{u\beta 23} - \cos \psi_{u\beta 12}) \\ y_{R_c} &= y_{in} + d \cos \psi_{u\beta 23} \\ &= y_2 - d \sin \psi_{u\beta 12} + d \sin \psi_{u\beta 23} \\ &= y_2 + d(\sin \psi_{u\beta 23} - \sin \psi_{u\beta 12}) \end{aligned} \quad (18)$$

이 된다.

선회중심에서 선회항로와 직선항로의 교차점에 대한 각도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_{Ro in} &= \text{atan2}(y_{in} - y_{R_c}, x_{in} - x_{R_c}) \\ \psi_{Ro out} &= \text{atan2}(y_{out} - y_{R_c}, x_{out} - x_{R_c}) \end{aligned} \quad (19)$$

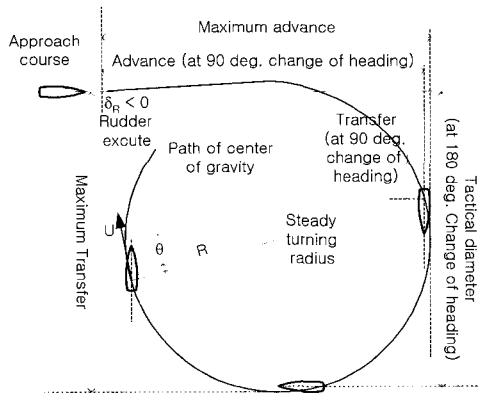


그림 5. 스텝조타 시 선회궤적.
Fig. 5. Turning circle for a constant rudder angle.

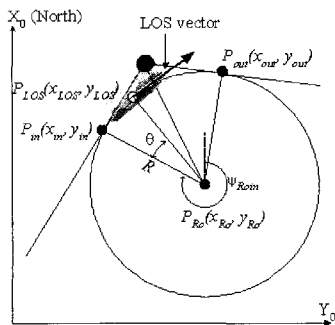


그림 6. 선회항로에 대한 LOS벡터.
Fig. 6. An LOS vector for turning circle.

이때, 선박의 회두각이 $\psi_{u\beta 12}$ 에서 $\psi_{u\beta 23}$ 로 변침하는 동안 선박 중심에 대해 선박은 $\psi_{Ro in}$ 에서 $\psi_{Ro out}$ 으로 회전하게 되어

$$\psi_{wp 123} = \psi_{wp 23} - \psi_{wp 12} = \psi_{Ro out} - \psi_{Ro in} \quad (20)$$

이 된다.

선박의 스텝조타 시 선회궤적은 그림 5와 같이 나타나므로, 선회시 선박의 선속도는 기하학적 관계에서

$$U = R \cdot \theta \quad (21)$$

이 되고, 선회 반경과 각속도는

$$R = \frac{U}{\theta} \quad (22)$$

$$\theta = \frac{U}{R} \quad (23)$$

이 된다.

LOS 가이드نس 시스템이 선회항로에서 사용하는 LOS벡터는 그림 6과 같이 선회원의 LOS점으로부터 접선벡터이다.

선회 항로 구간에서 LOS점은

$$\begin{aligned} x_{LOS} &= x_{R_c} + R \times \cos(\psi_{Ro in} + \theta) \\ y_{LOS} &= y_{R_c} + R \times \sin(\psi_{Ro in} + \theta) \end{aligned} \quad (24)$$

이 된다. 여기서,

$$\theta = \int_{T_0}^T \dot{\theta} dt = \int_{T_0}^T \frac{U}{R} dt = \frac{U}{R} (T - T_0) \quad (25)$$

이다.

θ : 선회 시작 후 $T - T_0$ 시간 동안 선회한 각도를 나타낸다. 선회항로에서 선회반경과 선회시 선박의 목표 속도를 결정함으로써 LOS점을 결정할 수 있다. P_m 의 접선벡터에서 P_{LOS} 의 접선벡터로의 각 변화는 회전 중심에 대한 회전각 θ 와 동일하다. 그러므로 선회 항로에 대한 LOS 가이드نس 규칙을 (26)과 같이 제안한다.

$$\psi_d = \psi_{u\beta 12} + \theta \quad (26)$$

직선항로와 선회항로에 대하여 LOS점은 선박이 추종해야 할 목표 위치들을 선행하도록 설계되었다. 직선항로에서 LOS 가이드نس 규칙은 수직 위치오차와 선속도에 대한 함수로 유도되었고, 선회항로에서 LOS 가이드نس 규칙은 선회 각속도에 대한 함수로 유도되었다.

III. 시뮬레이션 및 고찰

LOS 가이드نس 시스템의 성능을 확인하기 위해 선형 모델과 비선형 모델에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다.

1. 선형 모델에 대한 시뮬레이션

시뮬레이션은 (27)과 같은 Nomoto 2차 모델을 대상으로 하였고, 조타기는 (28)과 같은 1차 모델을 사용하였다.

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (27)$$

$$T_E \delta + \delta = \delta_c \quad (28)$$

(27)에서 T_1, T_2 는 추종 및 안정성 계수이고, T_3 는 타각에 미분제어 효과를 발휘하여 침로안정에 도움을 주는 계수이며, K 는 선회능력에 관련된 계수이다. (28)에서 δ_c 는 명령타각, δ 는 타각, T_E 는 조타기 시정수이다.

오토파일럿은 (29)와 같은 PD 제어기를 사용하였다. 제어기 파라미터는 $k_p=5, k_d=200$ 이고, 시뮬레이션에 사용한 선박 제원은 표 1과 같다[1,3].

$$\delta_c = k_p \psi_e + k_d \dot{\psi}_e \quad (29)$$

시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 항로추종 결과를 나타내고, 그림 7(b)는 생성된 LOS 가이드스 명령과 선박의 회두각을 나타내며 그림 7(c)는 조타각을 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 선박이 직선항로와 선회항로 모두를 정확하게 추종하고 있음을 보여준다. 그림 7(b)를 살펴보면, 직선항로 구간에서는 직선항로를 유지하기 위한 유도 명령을 생성하고 있고, 선회항로에서 일정한 각속도로 선회하도록 유도명령을 내리고 있음을 볼 수 있다. 선회가 종료될 때, 선회항로 가이드스에서 직선항로 가이드스로 전환되면서 오버슈트 없이 직선항로에 접근하도록 부드러운 유도명령을 내리고 있음을 볼 수 있다.

2. 비선형 모델에 대한 시뮬레이션

Chislett과 Strøm-Tejsen은 표 2와 같은 선박 제원을 갖는 Mariner Class 선박에 대해 PMM 테스트와 풀 스케일 조종성 및 기동 테스트를 통해 3차원 비선형 모델을 유도하였다 [10].

표 1. 카고쉽 선박 제원.

Table 1. Specification of a cargo ship.

	Dimensions	Value
Length between perpendiculars(L_{pp})	[m]	161
Displacement(∇)	[dwt]	16622
Speed	[m/s]	7.7
K	[1/s]	0.185
T_1	[s]	118.0
T_2	[s]	7.8
T_3	[s]	18.5

표 2. Mariner class 선박 제원.

Table 2. The specifications of mariner class vessel.

	Dimensions	Value
Length overall (L_{oa})	[m]	171.80
Length between perpendiculars (L_{pp})	[m]	160.93
Maximum beam (B)	[m]	23.17
Design draft (T)	[m]	8.23
Design displacement (∇)	[m ³]	18,541
Design speed	[knots]	15

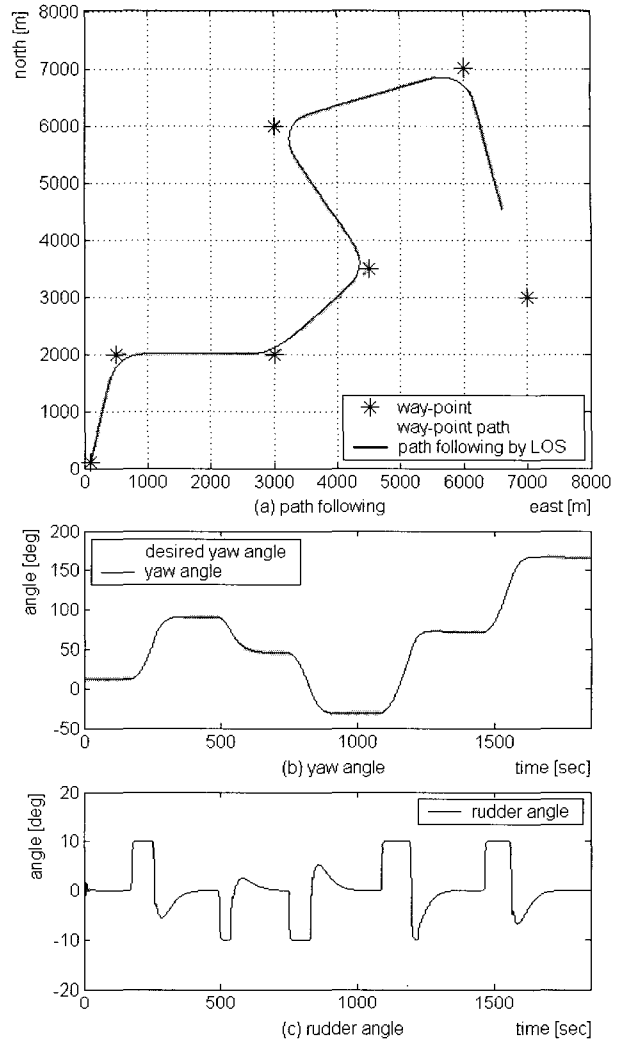


그림 7. 항로추종 시뮬레이션 결과(선형 모델).

Fig. 7. Simulation result for path following(linear ship model).

전진방향, 횡방향, 회두방향에 대한 선박의 운동방정식은

$$\begin{bmatrix} m' - x'_u & 0 & 0 \\ 0 & m' - Y'_v & m' x'_C - Y'_r \\ 0 & m' x'_C - N'_v & I'_z - N'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta N' \end{bmatrix} \quad (30)$$

이 되고, 수선간 길이 L_{pp} 와 선박의 전체속도 U 를 무차원 변수로 비선형 힘과 모멘트를 무차원화하면

$$\begin{aligned} \Delta X' &= X'_{uu} \Delta u + X'_{uuu} \Delta u^2 + X'_{uuu} \Delta u^3 + X'_{vv} \Delta r^2 + X'_{rr} \Delta r^2 \\ &\quad + X'_{rv} \Delta r \Delta v + X'_{\delta\delta} \Delta \delta^2 + X'_{u\delta\delta} \Delta u \Delta \delta^2 + X'_{v\delta} \Delta v \Delta \delta \\ &\quad + X'_{uv\delta} \Delta u \Delta v \Delta \delta \\ \Delta Y' &= Y'_v \Delta v + Y'_r \Delta r + Y'_{vvv} \Delta v^3 + Y'_{vvr} \Delta v^2 \Delta r + Y'_{vu} \Delta v \Delta u \\ &\quad + Y'_{ru} \Delta r \Delta u + Y'_\delta \Delta \delta + Y'_{\delta\delta\delta} \Delta \delta^3 + Y'_{u\delta} \Delta u \Delta \delta \\ &\quad + Y'_{uu\delta} \Delta u^2 \Delta \delta + Y'_{v\delta\delta} \Delta v \Delta \delta^2 + Y'_{v\delta} \Delta v \Delta \delta \\ &\quad + (Y_0 + Y_0 u \Delta u + Y_0 u \Delta u^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{N} = & \dot{N}_v \Delta v + \dot{N}_r \Delta r + \dot{N}_{vvv} \Delta v^3 + \dot{N}_{vvr} \Delta v^2 \Delta r + \dot{N}_{vu} \Delta v \Delta u \\ & + \dot{N}_{ru} \Delta r \Delta u + \dot{N}_\delta \Delta \delta + \dot{N}_{\delta\delta\delta} \Delta \delta^3 + \dot{N}_{u\delta} \Delta u \Delta \delta \\ & + \dot{N}_{uu\delta} \Delta u^2 \Delta \delta + \dot{N}_{v\delta} \Delta v \Delta \delta^2 + \dot{N}_{v\delta\delta} \Delta v^2 \Delta \delta \\ & + (N_0 + N_0_u \Delta u + N_0_{uu} \Delta u^2) \end{aligned} \quad (31)$$

이 된다.

무차원계수 $m' = 798 \cdot 10^{-5}$, $I_z = 39.2 \cdot 10^{-5}$, $x_G = -0.023$ 를 이용하여 무차원화한 유체력 미계수는 표 3과 같다.

오토파일럿은 선박의 비선형성을 보상하기 위해 (32), (33)과 같은 비선형 퍼지 PID제어기를 사용하였다[11]. 사용한 제어기 파라미터는 $L = \pi/3$, $GE = 2.75$, $GR = 50$, $GA = 500$, $GU = 1$ 이다.

$$\delta_c(nT) = d\delta_c(nT) + \delta_c(nT - T) \quad (32)$$

IF $GE \cdot |\phi_e| > L$ THEN $GE \cdot |\phi_d| = L$

IF $GR \cdot |\phi_r| > L$ THEN $GR \cdot |\phi_d| = L$

IF $GA \cdot |\phi_a| > L$ THEN $GA \cdot |\phi_d| = L$

$$d\delta_c(nT) = K_f(nT)\phi_e(nT) + K_p(nT)\phi_r(nT) + K_d(nT)\phi_a(nT)$$

$$\begin{aligned} = & \frac{0.5 \times L \times GU \times GE}{2L - \max(GE \cdot |\phi_e(nT)|, GR \cdot |\phi_r(nT)|)} \phi_e(nT) \\ & + \frac{0.5 \times L \times GU \times GA}{2L - \max(GE \cdot |\phi_e(nT)|, GR \cdot |\phi_r(nT)|)} \phi_r(nT) \\ & + \frac{0.25 \times L \times GU \times GA}{2L - \max(GR \cdot |\phi_r(nT)|, GA \cdot |\phi_a(nT)|)} \phi_a(nT) \end{aligned} \quad (33)$$

표 3. Mariner class 선박의 무차원 유체력 미계수.

Table 3. Non-dimensional hydrodynamic coefficients for the mariner class vessel.

X-equation	Y-equation	N-equation
$X'_u = -840 \cdot 10^{-5}$	$Y'_v = -1546 \cdot 10^{-5}$ $Y'_r = -9 \cdot 10^{-5}$	$N'_v = 23 \cdot 10^{-5}$ $N'_r = -83 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uu} = 184 \cdot 10^{-5}$ $X'_{uv} = -110 \cdot 10^{-5}$	$Y'_v = -1160 \cdot 10^{-5}$ $Y'_r = -499 \cdot 10^{-5}$	$N'_v = -264 \cdot 10^{-5}$ $N'_r = -166 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uuu} = -215 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{vvv} = -8078 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vvv} = 1636 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uvr} = -899 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{vvr} = 15356 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vvr} = -5483 \cdot 10^{-5}$
$X'_{rrr} = 18 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{vu} = -1160 \cdot 10^{-5}$	$N'_{vu} = -166 \cdot 10^{-5}$
$X'_{\delta\delta} = -95 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{ru} = -499 \cdot 10^{-5}$	$N'_\delta = -139 \cdot 10^{-5}$
$X'_{u\delta\delta} = -190 \cdot 10^{-5}$	$Y'_\delta = 278 \cdot 10^{-5}$	$N'_{\delta\delta\delta} = 45 \cdot 10^{-5}$
$X'_{rrr} = 798 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{\delta\delta\delta} = -90 \cdot 10^{-5}$	$N'_{u\delta} = -278 \cdot 10^{-5}$
$X'_{v\delta} = 93 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{u\delta} = 556 \cdot 10^{-5}$	$N'_{uv\delta} = -139 \cdot 10^{-5}$
$X'_{uv\delta} = 93 \cdot 10^{-5}$	$Y'_{uv\delta} = 278 \cdot 10^{-5}$ $Y'_{u\delta\delta} = 1190 \cdot 10^{-5}$	$N'_{v\delta} = 13 \cdot 10^{-5}$ $N'_{v\delta\delta} = -489 \cdot 10^{-5}$
	$Y_0 = -4 \cdot 10^{-5}$ $Y_0_u = -8 \cdot 10^{-5}$ $Y_0_{uu} = -4 \cdot 10^{-5}$	$N_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ $N_0_u = 6 \cdot 10^{-5}$ $N_0_{uu} = 3 \cdot 10^{-5}$

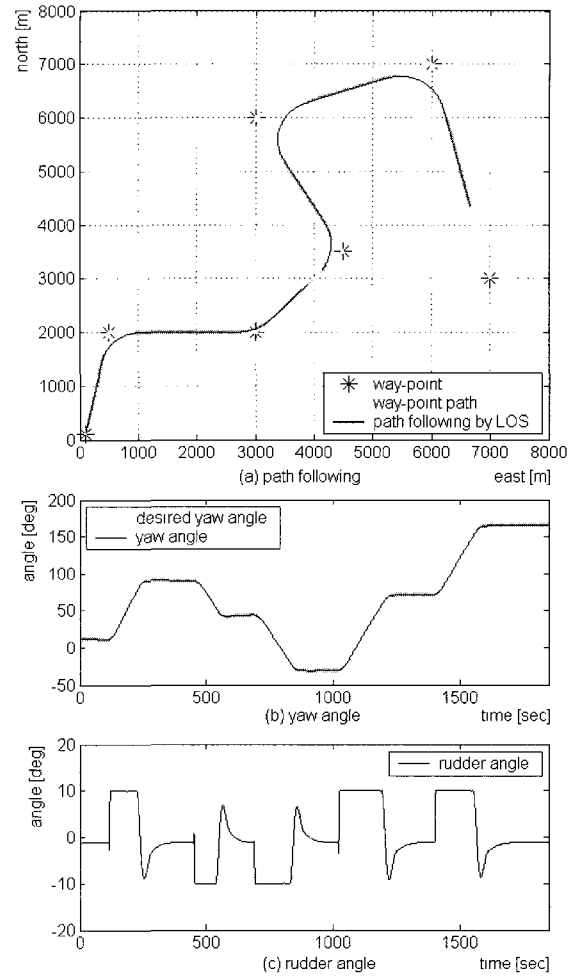


그림 8. 선박의 항로 추종 시뮬레이션 결과.

Fig. 8. Simulation result for path following.

여기서,

$$\begin{aligned} \phi_e(nT) &= \phi_d(nT) - \phi(nT) \\ \phi_r(nT) &= [\phi_e(nT) - \phi_e(nT - T)] / T \\ \phi_a(nT) &= [\phi_r(nT) - \phi_r(nT - T)] / T \end{aligned} \quad (34)$$

이고, T 는 샘플링 시간으로 0.02 [sec]를 사용하였다.

시뮬레이션 결과는 그림 8과 같다. 그림 8(a)는 항로추종 결과, 그림 8(b)는 가이던스 명령과 선박의 회두각, 그림 8(c)는 조타각을 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 비선형 선박이 직선항로와 선회항로 모두를 정확하게 추종하고 있음을 보여준다. 그림 8(b)는 직선항로와 선회항로에서 상황에 맞는 유도명령이 생성되고 있음을 보여준다. 선형 모델에서와 유사한 특성을 보이고 있다. 비선형 모델에도 불구하고 선회 각속도가 선형모델에 비해서 일정하게 나타나는 것은 퍼지 PID제어기의 퍼지 입력공간 분할에 의해 나타나는 현상이다.

이상의 시뮬레이션을 통해 제한한 LOS 가이던스 시스템이 선형 모델과 비선형 모델에 관계없이 적용 가능하고, 적절한 오토파일럿 시스템이 구성되고 선박의 위치를 알수 있는 GPS가 장착되어 있다면 제한한 가이던스 시스템이 생성

하는 회두각 명령에 따라 오토파일럿 시스템이 회두각 유지 제어를 수행함으로써 선박이 미리 정해진 항로를 추종하도록 제어하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

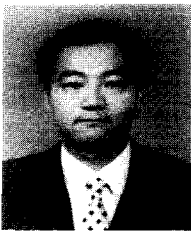
시뮬레이션은 선박의 긴급 사태에 대비하기 위해 조타기 명령각을 $\pm 10^\circ$ 로 제한하였다.

IV. 결론

본 논문은 선박의 항로 추종을 위한 LOS 가이드 시스템 제안을 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 LOS 가이드 시스템이 선형 모델과 비선형 모델에 관계없이 적용 가능하고, 직선항로 뿐만 아니라 선 회항로에서 항로 유지가 정확히 되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 기존 선박에 적절한 오토파일럿 시스템과 GPS 시스템을 장착함으로써 선박이 미리 정해진 항로를 추종하도록 제어하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

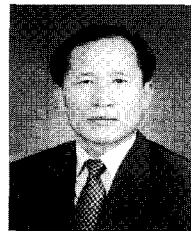
참고문헌

- [1] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [2] K. E. Husa and T. I. Fossen, "Backstepping designs for nonlinear way-point tracking of ships," *Proceedings of the 4th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, 1997.
- [3] T. I. Fossen, *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics, 2002.
- [4] C. L. Lin and H. W. Su, "Intelligent control theory in guidance and control system design : an overview," *Proceedings National Science Council ROC(A)*, vol. 24 no 1, pp 115~20, 2000.
- [5] I. Ha and S. Chong, "Design of a CLOS guidance law via feedback linearization," *IEEE Transactions on Aero-space and Electronic Systems*, vol. 28 no 1, pp. 51~63, 1992.
- [6] M. Breivik and T. I. Fossen, "Line-of-sight path following for marine surface vessels," *Proceedings of the IFAC*, 2004.
- [7] 이병걸, 정경열, 김종화, "선박 자동 항로 추종 제어 알고리즘에 관한 연구," *박용기관학회지*, 제22권 제6호, pp. 920~928, 1998.
- [8] 이병걸, 김종화, "적용 퍼지 방식을 이용한 선박 자동 항로 추적제어에 관한 연구," *Proceedings of the 14th Korea Automatic Control Conference*, 1999.
- [9] 이병걸, 김종화, "선박 자동항로 추적을 위한 회두각 명령의 생성과 적용 퍼지제어," *박용기관학회지*, vol. 25, no. 1, pp. 199~208, 2001.
- [10] M. S. Chislett and J. Strøm-Tejsen, "Plannar motion mechanism tests and full-scale steering and maneuvering predictions for a mariner class vessel," *Technical Report*, Lyngby Denmark, 1965.
- [11] 이병걸, 김종화, "고정 파라미터를 갖는 단순화된 퍼지 PID 제어기의 제안과 안정도 분석," *퍼지 및 지능시스템 학회 논문지*, vol. 14, no. 7, pp. 807~815, 2004.



이 병 걸

1971년 5월 1일생. 1993년 한국해양대학교 제어계측공학과(공학사). 1998년 한국해양대학교 제어계측공학과(공학석사). 2005년 한국해양대학교 제어계측공학과(공학박사). 관심분야는 적응 제어, 퍼지제어, 선박제어.



김 종 화

1958년 11월 14일생. 1981년 부산대학교 기계공학과(공학사). 1985년 부산대학교 기계공학과(공학석사). 1989년 부산대학교 기계공학과(공학박사). 1990년~현재 한국해양대학교 IT공학부 교수. 1996년~1997년 University of Wales, Cardiff 연구교수. 관심분야는 적응제어, 퍼지제어, 지능제어, 시스템 식별.