

선박자동항로 추적을 위한 회두각 명령의 생성과 적응 퍼지제어

이 병 결* · 김 중 화**

Yaw Angle Command Generation and Adaptive Fuzzy Control for Automatic Route Tracking of Ships

B-K Lee*, J-H Kim**

Key words : Position Error(위치오차), Yaw Angle Command Generation(회두각 명령 생성), Autopilot(오토파일럿), Route Tracking Control(항로 추적제어), Adaptive Fuzzy Control(적응퍼지제어)

Abstract

In this paper, an automatic route tracking algorithm using the position variables and the yaw angle of a ship is suggested. Since most autopilot systems play only a role of course-keeping by integrating the gyrocompass output, they cannot cope with position errors between the desired route and real route of the ship resulted from a drifting and disturbances such as wave, wind and currents during navigation. In order for autopilot systems to track the desired route, a method which can reduce such position errors is required and some algorithms have been proposed[1,2]. While such algorithms were turned out effective methods, they have a shortage that the rudder control actions for reducing the position errors are occurred very frequently. In order to improve this problem it is necessary to convert the position error into the corresponding yaw angle and necessary to treat only yaw angle control problem. To do this, a command generation algorithm which converts the rudder angle command reducing the current position error into the yaw angle command is suggested. To control the ship under disturbances and nonlinearities of the ship dynamics, the adaptive fuzzy controller is developed. Finally, through computer simulations for two ship models, the effectiveness of the suggested method and the possibility of the automatic route tracking are assured.

* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정
 ** 한국해양대학교 공과대학 기계·정보공학부

1. 서 론

선박을 운항하기 위해 사용하는 정보에는 회두각 정보와 위치 정보가 있다. 회두각은 자이로콤파스의 출력을 적분한 것으로 진복에 대한 선박의 진행방향을 간단하게 표현하는 장점을 가지고 있다. 하지만 파도, 바람, 조류 등의 외란에 민감하고, 드리프팅으로 인한 위치 오차를 검출하지 못하는 단점을 가지고 있기 때문에 이를 개선하기 위하여 필터를 사용하거나 적분 요소를 첨가하는 연구가 진행되어 왔다³⁾.

최근에는 GPS 장비를 이용하여 현재 선박의 위치를 확인함으로써 자이로콤파스의 오차에 의한 항로의 이탈정도를 보정하고 있다. GPS를 통한 위치 정보는 드리프팅으로 인한 선박의 위치 오차를 검출할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면, 선박의 진행방향을 표현하기 어려운 단점을 가지고 있다.

연안에서 선박의 안전운항을 위해 국제 해사기구와 각국의 수로국을 중심으로 전자해도의 개발이 진행되고 있으며, 전자해도를 이용한 선박항해의 보조장비로 전자해도 표시정보시스템(ECDIS)에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. ECDIS 내에서는 항해사에 의한 선박의 예상항로를 오프라인으로 설정하고 자이로콤파스와 GPS에 의해 온라인으로 측정된 회두각과 위치 정보를 표시할 수 있는 기능을 부여하는 것이 충분히 가능하다. 또한 이와 같은 정보를 이용하여 설정된 항로를 정교하게 유지하도록 제어할 수 있는 선박제어 요소를 부가하는 것이 가능할 것으로 생각된다. 따라서 본 논문에서는 이에 중점을 두어 전자해도 상에서 선박의 회두각과 위치 정보를 활용하여 설정된 항로를 자동으로 추적하는 제어 알고리즘을 연구하고자 한다.

선박이 항해할 침로가 결정되면, 그 침로방향으로 선박을 직진시키고자 하는 것이 항해술의 기본적인 목표이다. 선박에 널리 활용되고 있는 자동조타장치(Autopilot)는 회두각을 일정하게 제어함으로써 선박의 진행방향을 일정하게 유지하고 있다. 이 때, 회두각 정보만을 궤환시킴으로써 드리프팅으로 인해서 항로를 벗어나는 것을 피할 수 없고, 파도, 바람, 조류 등 외란의 영향 또한 막을 수 없

다. 따라서, 회두각 정보뿐만 아니라 위치정보를 이용하여 침로뿐만 아니라 항로를 유지해주는 것이 필요하다.

선박은 일반적으로 타각(Rudder angle)을 제어하여 회두각을 조정하는데, 궤환된 회두각과 회두각유지 제어를 통하여 실제의 타각명령을 생성하고 제어함으로써 선박을 제어한다. 그러나 위치 정보는 직접 타각 명령을 생성하는 데 사용될 수 없기 때문에, 위치오차의 크기와 설정항로에 상대적인 선박의 위치를 이용한 알고리즘을 구현함으로써 위치오차를 줄이기 위한 타각명령을 생성하는 연구가 진행되어 왔다.¹⁾²⁾ 하지만 알고리즘이 복잡하여 계산량이 많고, 위치오차의 순간 변화에 따른 잦은 타각명령의 생성으로 실제 구현상의 문제와 선박 운동의 상대안정도를 저하시키는 단점을 가지고 있다.

이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 선박의 위치오차를 대응하는 회두각 오차로 변환시켜 위치오차를 줄이는 동시에 설정항로의 회두각을 유지할 수 있는 알고리즘을 제안함으로써, 선박의 항로를 추적하는 제어문제를 회두각을 유지하는 제어문제로 전환시키는 방법을 유도할 것이다.

또한 항해시 외란의 영향을 많이 받고 그 운동특성이 비선형인 선박을 제어하기 위하여, 비선형 제어특성을 가진 기준모델 적응 퍼지제어 알고리즘을 적용하고자 한다. 제안한 알고리즘의 유효성을 입증하기 위하여 조종성능이 안정한 선박모델과 불안정한 선박모델을 대상으로 시뮬레이션을 수행함으로써, 설정된 항로를 자동으로 추적하는 지를 검증하고자 한다.

2. 선박 모델링

일반적으로 선박의 조종운동방정식은 선체, 프로펠러, 타에 기인하는 유체력의 비선형성이나, 유체의 점성과 관성의 상호간섭에 의한 영향 등으로 비선형 방정식으로 묘사되지만 선형화시키거나 무시함으로써 얻어지는 선형 조종운동방정식을 많이 사용한다. 회두각속도가 타각입력 δ 만의 함수로 표현된 Nomoto의 이차계 선박 조종운동방정식은 다음과 같다⁴⁾.

$$T_1 T_2 \ddot{\gamma} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K\delta + KT_3 \delta \quad (1)$$

여기서, T_1, T_2 는 추종 및 안정성 계수이고, T_3 는 타각에 대해 미분제어 효과를 발휘하여 침로안정에 도움을 주는 계수이며, K 는 선회능력에 관련된 계수이다.

식 (1)에서 조종운동과 같은 비주기적 운동, 즉 저주파수 영역의 운동에서는 근사적으로 간략화한 Nomoto의 1차 응답모델을 사용할 수 있는데, 그 식은 다음과 같다.

$$\dot{r} = -\frac{1}{T}r + \frac{K}{T}\delta \quad (2)$$

여기서, r 은 회두각속도, δ 는 조타각, K 와 T 는 선박의 특성을 결정짓는 상수이다.

Fig. 1은 선박 운동에 관련된 좌표계와 변수를 나타낸 그림이다. OX_0Y_0 좌표계는 선박의 항로와 선박 운동을 묘사하는 고정 절대 좌표계이다. ψ 는 회두각으로 진북과 선박 진행 방향 사이의 각이며, u 와 v 는 각각 선박의 전진 방향과 횡방향 속도이고, U 는 전체 속도이다. x 와 y 는 선박의 위치 좌표이다.

Fig. 1로부터 직선항로 항해시 선박의 운동학적 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (3)$$

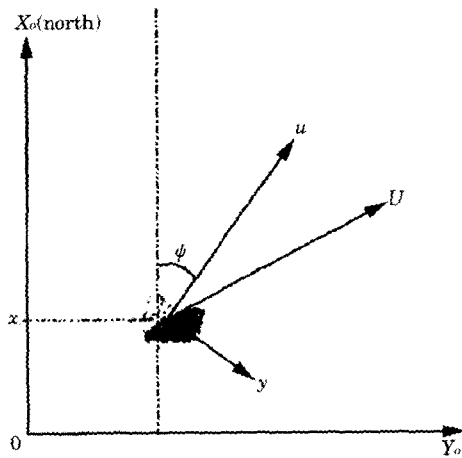


Fig. 1 Coordinate system used for ship motion control

직선 항로 항해시 전진방향 속도 $u \gg 0$ 이고, 횡방향 속도 $v \approx 0$ 이므로 $U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u$ 라고 할 수 있다. 그러므로 식 (2)와 식 (3)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi \\ \dot{\psi} &= r \\ \dot{r} &= ar + b\delta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $a = -1/T$ 이고, $b = K/T$ 이다.

3. 선박의 자동항로 추적

선박이 정해진 항로를 자동으로 추적하기 위해 구성한 제어알고리즘의 개념도는 Fig. 2와 같다. 항로가 결정되면 선박이 유지해야 할 항해방향(목표 회두각)과 선박이 있어야 할 위치(목표 위치)를 알 수 있다. 선박이 정해진 항로에서 이탈할 경우, GPS 장치를 통해 파악하는 현재 위치와 목표 위치 사이에 거리 오차가 발생한다. 이 거리 오차를 줄이면서 선박의 항해 방향을 견지할 수 있도록 회두각 명령 생성 알고리즘은 회두각 명령을 생성한다. 생성된 회두각 명령을 선박이 추종하도록 제어함으로써 선박이 정해진 항로를 자동으로 추종하도록 할 수 있다.

3.1 회두각 명령의 생성

3.1.1 위치 오차의 회두각 변환

직선 항로구간에서 항로상 목표 위치(P_d)와 선박의 현재위치(P) 사이의 위치 오차(P_e)를 다음과 같이 정의한다.

$$P_e = P_d - P = \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 위치 오차(P_e)를 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

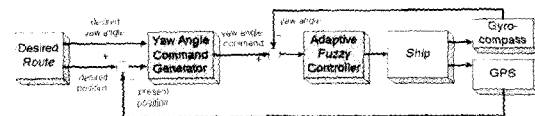


Fig. 2 Block diagram of an automatic route tracking control

$$\dot{P}_e = \dot{P}_d - \dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \dot{x} \\ \dot{y}_d - \dot{y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

위치 오차의 변화량을 식 (4)를 이용해 목표 위치를 향해하기 위한 목표 회두각 ψ_d 와 선박의 현재 회두각 ψ 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{P}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \dot{x} \\ \dot{y}_d - \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \psi_d - u \cos \psi \\ u \sin \psi_d - u \sin \psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

위치 오차 변화량의 제곱은 위 식에서,

$$\begin{aligned} \dot{P}_e^T \dot{P}_e &= (u \cos \psi_d - u \cos \psi)^2 + (u \sin \psi_d - u \sin \psi)^2 \\ &= u^2(2 - 2 \cos(\psi_d - \psi)) \end{aligned} \quad (8)$$

이 되고, ψ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\psi = \psi_d - \psi_{Pe} \quad (9)$$

여기서,

$$\psi_{Pe} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\dot{P}_e^T \dot{P}_e}{2u^2} \right) \quad (10)$$

이다. \dot{P}_e 는 위치 오차에 대한 도함수이고 속도의 함수이므로, ψ_{Pe} 는 $\dot{P}_e^T \dot{P}_e$ 만큼 위치 오차를 증가시키는 회두각을 나타내게 된다. 조류나 파도 등의 요인에 의해 목표 회두각에서 ψ_{Pe} 만큼의 오차가 발생하고, 이 회두각 오차에 의해 $\dot{P}_e^T \dot{P}_e$ 만큼 위치 오차가 증가하는 것이다. 위치 오차가 발생한 경우, 역으로 목표 회두각에 ψ_{Pe} 를 더 해줌으로써 위치 오차를 줄이고, 정해진 항로를 추적하도록 할 수 있다.

위치 오차를 감소시키는 회두각 명령을 생성할 때, 단순히 위치 오차에 비례하여 회두각 명령을 생성하면 목표 항로 주변에서 진동을 일으킬 수 있다^[2]. 진동을 억제하고 부드러운 궤적을 유도하기 위해 다음과 같은 PD 형태로 위치 오차에 대한 회두각 명령 생성을 제안한다.

$$\psi_{Pe} = -\text{sgn}(\text{pos})(K_p P_e^T P_e - K_d \dot{P}_e^T \dot{P}_e) \quad (11)$$

단, $\text{sgn}(\text{pos})$ 는 부호를 결정하는 기호로서 선박이 진행 방향의 우측에 위치하면 +, 좌측에 위치하면 -이다.

식 (10)에서 $0 \leq \dot{P}_e^T \dot{P}_e \leq u^2$ 이므로, ψ_{Pe} 가 선박의 향해 방향을 역으로 만들지 않는 범위는 $-\frac{\pi}{3} \leq \psi_{Pe}$

$\leq \frac{\pi}{3}$ 가 된다.

위치오차는 단순히 파도나 조류에 의한 회두각 오차에 기인하여 발생할 뿐만 아니라, drifting과 바람에 의해서도 발생한다. 이런 경우에도 위치오차를 고려하여 회두각 명령을 식 (11)과 같이 생성하여 정해진 항로를 추적하도록 할 수 있다.

3.1.2 회두각 명령 생성 알고리즘

본 논문에서 제안하는 회두각 명령 생성 알고리즘은 다음과 같다.

$$\psi_e = \psi_d + \psi_{Pe} \quad (12)$$

여기서, ψ_d 는 목표 회두각으로 직선행해시에는 일정하고, 선회시에는 시변이 된다. ψ_{Pe} 는 위치 오차 발생시 이를 감소시키는 위치 오차에 대한 회두각 명령이다. 식 (12)와 같이 회두각 명령을 생성함으로써 정해진 항로를 추적하는 문제를 회두각 명령을 추종하는 문제로 간략화 할 수 있다.

3.2 적응 퍼지 제어기 설계

3.2.1 적응 퍼지 제어기

적응 퍼지 제어기는 적응 알고리즘을 갖는 퍼지 제어기를 의미한다. 일반적인 퍼지 제어기는 소속함수의 중심값과 폭, 그리고 가중치가 고정되지만, 적응 퍼지 제어기는 시스템의 변화나 외란 등에 대하여 파라미터가 적응된다. 이러한 적응 퍼지 제어기는 적응 방법에 따라 직접과 간접 적응 퍼지 제어기로 분류할 수 있고, 적응되는 파라미터에 있어서 선형인가, 비선형인가에 따라 1형과 2형으로 분류할 수 있다.^[6] 본 논문에서는 멤버쉽 함수의 중심값과 폭은 고정하고 가중치만을 적응하는 1형 직접 적응 퍼지제어기를 설계할 것이다.

3.2.2 제어 목적

다음 조건을 만족하도록 파라미터 벡터를 조정하는 적응칙을 결정하므로써, 위치 오차와 회두각 오차를 최소화하는 제어입력 δ 를 결정하는 것이다.

- 1) 퍼지 규칙 시스템에 기초한다.
- 2) 모든 변수가 제한된다는 가정하에서 페루프 시스템이 안정해야 한다.

3.2.3 1형 직접 적응퍼지 제어기

선박을 제어하기 위해 사용한 적응 퍼지 제어기의 구조는 Fig. 3과 같다. 전자 해도 상에서 전문가(항해사)에 의해 설정된 변침점 좌표로부터 항해시 목표 회두각(ψ_d)이 결정되고, Fig. 2의 회두각 명령 생성기(Yaw angle command generator)는 선박의 현재 위치(x, y)와 설정 항로 사이의 위치 오차에 따라 PD 형태의 위치 오차에 따른 회두각 명령을 생성하고, 목표 회두각과 위치 오차에 따른 회두각 명령의 합으로 회두각 명령을 생성한다. 선박이 요구 조건에 맞게 선정된 기준 모델을 추종하도록 적응칙을 통해 적응 퍼지 제어기의 파라미터를 조정한다.

(1) 오차방정식

기준 모델을 2차 시스템으로 선정하고,

$$\ddot{\psi}_m = -\omega_n^2 \psi_m - 2\zeta \omega_n \dot{\psi}_m + \omega_n^2 \psi_c \quad (13)$$

선박 운동 방정식을 ψ 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\ddot{\psi} = a \dot{\psi} + b \delta \quad (14)$$

오차를 $\psi_e = \psi_m - \psi$ 로 정의하면 식 (13), (14)에서 다음을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\psi}_e = \ddot{\psi}_m - \ddot{\psi} = \ddot{\psi}_m - a \dot{\psi} - b \delta \quad (15)$$

제어 입력 δ 를 기본제어 $\delta_c(\psi|\theta)$ 와 ψ_e 와 $\dot{\psi}$ 를 제한하기 위한 감동제어 $\delta_s(\psi)$ 로 구성한다.

$$\delta = \delta_c(\psi|\theta) + \delta_s(\psi) \quad (16)$$

여기서, $\delta_c(\psi|\theta)$ 는 다음과 같은 퍼지 규칙 시스템이다.

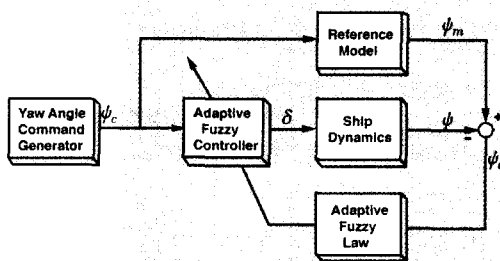


Fig. 3 1st-type direct adaptive fuzzy controller

$$\delta_c(\psi|\theta) = \sum_{i=1}^M \theta_i \xi_i(\psi) = \theta^T \xi(\psi) \quad (17)$$

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)^T$, $\xi(\psi) = (\xi_1(\psi), \xi_2(\psi), \dots, \xi_M(\psi))^T$ 이고, $\xi_i(\psi)$ 는 퍼지 베이스스 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\xi_i(\psi) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(\psi_j)}{\sum_{i=1}^M \prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(\psi_j)} \quad (18)$$

θ_i 는 조정 가능 변수이고, μ_{F_j} 는 소속함수이다.

선박 운동 방정식의 상수 a, b 를 안다면, 식(15)로부터 오차(ψ_e)가 0으로 수렴하도록 제어입력 δ^* 를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\delta^* = \frac{1}{b} [-a\dot{\psi} + \ddot{\psi}_m + k^T \psi_e] \quad (19)$$

단, $\psi_e = (\psi_e \ \dot{\psi}_e)^T$ 이고 $k = (k_2 \ k_1)^T$ 는 $s^2 + k_1s + k_2 = 0$ 의 모든 근이 s평면의 좌반면에 있도록 결정하는 상수이다.

선박운동 방정식의 양변에 $b\delta^*$ 을 더하고 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{\psi}_e = -k^T \psi_e + b(\delta^* - \delta_c(\psi|\theta) - \delta_s(\psi)) \quad (20-1)$$

또는

$$\dot{\psi}_e = A_c \psi_e + b_c(\delta^* - \delta_c(\psi|\theta) - \delta_s(\psi)) \quad (20-2)$$

여기서,

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix}, b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} \quad (21)$$

이다.

오차에 대한 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V_e = \frac{1}{2} \psi_e^T P \psi_e \quad (22)$$

단, P 는 대칭 양의 한정 행렬(Symmetric positive definite matrix)로 다음을 만족한다.

$$A_c^T P + P A_c = -Q, \quad Q > 0 \quad (23)$$

식 (22)를 미분하고 식 (23)과 오차 방정식 (20-2)를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$(203)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_e &= -\frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T Q \underline{\psi}_e + \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c [\delta^* - \delta_c(\psi|\theta) - \delta_s(\psi)] \\ &\leq -\frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T Q \underline{\psi}_e + \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c |(\delta^*) + \delta_c| - \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c \delta_s \end{aligned} \quad (24)$$

(2) 감독제어기 설계

$\dot{V}_e \leq 0$ 이 되도록 감독제어 δ_s 설계하기 위해 $|f(\psi)| \leq f^v(\psi)$ 와 $0 \leq b_L \leq b$ 가 되도록 하는 상수 b_L 과 함수 $f^v(\psi)$ 를 안다고 가정한다.

감독 제어 $\delta_s(\psi)$ 를 다음과 같이 구성한다.

$$\delta_s(\psi) = I_1^* \text{sgn}(\underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c) [|\delta_c| + \frac{1}{b_L} (f^v + |\dot{\psi}_m| + |k^T \underline{\psi}_e|)] \quad (25)$$

단, $I_1^* = 1$ if $V_e > \bar{V}$
 $I_1^* = 0$ if $V_e \leq \bar{V}$ (\bar{V} 는 설계자가 결정하는 상수)

$b > 0$ 이므로, $\text{sgn}(\underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c)$ 를 알 수 있다. 그러므로 모든 항들을 알 수 있고 식 (25)의 감독제어 δ_s 를 적용할 수 있다. 식 (19)와 (25)를 식 (24)에 대입하고, $I_1^* = 1$ 인 경우를 생각하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_e &\leq -\frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T Q \underline{\psi}_e + \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c [\frac{1}{b} (|a \dot{\psi}| + |\dot{\psi}_m| + |k^T \underline{\psi}_e|) \\ &\quad + |\delta_c| - |\delta_c| - \frac{1}{b_L} (f^v + |\dot{\psi}_m| + |k^T \underline{\psi}_e|)] \leq -\frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T Q \underline{\psi}_e \leq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

그러므로 식 (24)의 감독제어 δ_s 를 이용하여 $V_e \leq \bar{V}$ 가 되도록 할 수 있다. $P > 0$ 이므로 V_e 의 크기가 제한되고, 따라서 $\underline{\psi}_e$ 가 제한되고, ψ 도 제한된다.

(3) 적응칙의 유도

다음으로 $\delta_c(\psi|\theta)$ 의 조정 가능 파라미터 벡터 θ 를 조정하는 적응칙을 개발한다.

최적 파라미터 벡터를 다음과 같이 정의하고,

$$\theta^* \equiv \arg \min_{|\theta| \leq M_\theta} [\sup_{|\psi| \leq M_\psi} |\delta_c(\psi|\theta) - \delta^*|] \quad (27)$$

최소 근사 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$w \equiv \delta_c(\psi|\theta^*) - \delta^* \quad (28)$$

오차 방정식 (20-2)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\underline{\psi}}_e = A_c \underline{\psi}_e + \underline{b}_c [\delta_c(\psi|\theta^*) - \delta_c(\psi|\theta)] - \underline{b}_c \delta_s - \underline{b}_c w \quad (29)$$

$\delta_c(\psi|\theta)$ 를 식 (17)로 치환하면 식 (29)는 다음과 같다.

$$\dot{\underline{\psi}}_e = A_c \underline{\psi}_e + \underline{b}_c \phi^T \xi(\psi) - \underline{b}_c \delta_s - \underline{b}_c w \quad (30)$$

여기서, $\phi = \theta^* - \theta$ 이고, $\xi(\psi)$ 는 퍼지 베이스스 함수이다.

Lyapunov 후보 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T P \underline{\psi}_e + \frac{b}{2\gamma} \phi^T \phi \quad (31)$$

식 (23)과 식(30)을 이용하면,

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T Q \underline{\psi}_e + \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c (\phi^T \xi(\psi) - \delta_s - w) + \frac{b}{\gamma} \phi^T \dot{\phi} \quad (32)$$

p_n 을 P 행렬의 마지막 열이라 하면, 식 (21)로부터

$$\underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c = \underline{\psi}_e^T p_n b \quad (33)$$

이 된다. 식 (33)를 식 (32)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T Q \underline{\psi}_e + \frac{b}{\gamma} \phi^T (\gamma \underline{\psi}_e^T p_n \xi(\psi) + \dot{\phi}) \\ &\quad - \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c \delta_s - \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c w \end{aligned} \quad (34)$$

적응칙을 다음과 같이 선택하고

$$\dot{\theta} = \gamma \underline{\psi}_e^T p_n \xi(\psi) \quad (35)$$

식 (34)를 $\underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c \delta_s \geq 0$ 과 $\dot{\phi} = -\dot{\theta}$ 를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \underline{\psi}_e^T Q \underline{\psi}_e - \underline{\psi}_e^T P \underline{b}_c w \quad (36)$$

위 식에서 최소근사오차 w 를 포함한 마지막 항은 $\lim_{t \rightarrow \infty} w = 0$ 라면 0이 된다. 그러므로, $\dot{V} \leq 0$ 을 만족한다. $|\theta| \leq M_\theta$ 을 보장하기 위해 Projection 알고리즘^[6]을 사용하여 적응칙 식 (35)를 수정한다.

$$\dot{\theta} = \begin{cases} \gamma \underline{\psi}_e^T p_n \xi(\psi) & \text{if } (|\theta| < M_\theta) \\ \text{or } (|\theta| = M_\theta \text{ and } \underline{\psi}_e^T p_n \phi^T \xi(\psi) > 0) \\ P \{ \gamma \underline{\psi}_e^T p_n \xi(\psi) \} & \text{if } (|\theta| = M_\theta \text{ and } \underline{\psi}_e^T p_n \phi^T \xi(\psi) < 0) \end{cases} \quad (37)$$

단, $P\{\cdot\}$ 는 Projection 연산자로 다음과 같이 정의된다.

$$P\{\gamma \psi_e^T p_n \xi(\psi)\} = \gamma \psi_e^T p_n \xi(\psi) - \gamma \psi_e^T p_n \frac{\theta \theta^T \xi(\psi)}{|\theta|^2} \quad (38)$$

4. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션은 안정한 Cargo Ship과 불안정한 Oil Tanker에 대하여 실시하였다.

이 때 사용한 퍼지 소속 함수는 Fig. 4와 같다.

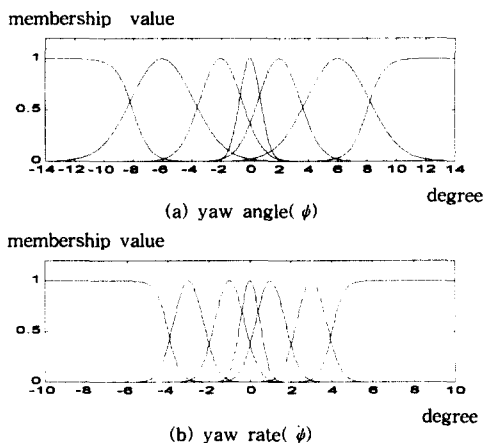


Fig. 4 Fuzzy membership functions used for the simulation

4.1 Cargo ship⁽⁶⁾

Cargo Ship에 대한 제원은 Table 1과 같다. 식 (2)를 통해 알 수 있듯이 극점이 s 영역의 좌반면에 위치하는 침로 안정 선박이다.

Table 1 Specification of a cargo ship

	Cargo Ship (mariner class)
L(m)	161
u (m/s)	7.7
▽(dwt)	16622
K (1/s)	0.185
T(s)	107.3

여기서, L은 선박의 길이, u는 전진방향속도, ▽(dwt)는 재화중량, K와 T는 선박의 특성을 결정짓는 상수이다.

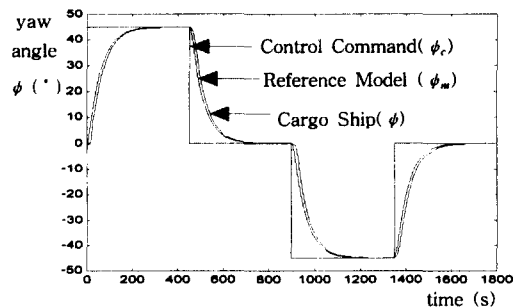


Fig. 5 simulation result of 1st-type direct adaptive fuzzy controller for cargo ship(ζ=1.0, ωn=0.05)

Cargo Ship에 대해 설계한 적응 퍼지 제어기의 성능을 확인하고 적응 퍼지 제어기의 파라미터를 학습하기 위해 실시한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다. 학습 초기에는 파라미터 조정에 따른 진동이 약간 발생하나 곧 모델을 추종하고 있음을 알 수 있다.

위치 오차를 회두각 명령으로 변환하는 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해 설정된 항로에서 벗어난 선박을 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 Cargo Ship에 대한 시뮬레이션 결과로 각각 항로 추적 결과(a), 항로 추적에 따른 회두각 명령 생성 및 회두각 추적 결과(b)와 이에 따른 타각 명령(c)을 나타낸 그림이다. 3.1절에서 언급하였듯이 선박의 진행 방향을 역으로 바꾸지 않는 ψPc의 범위는 -π/3에서 π/3이다.

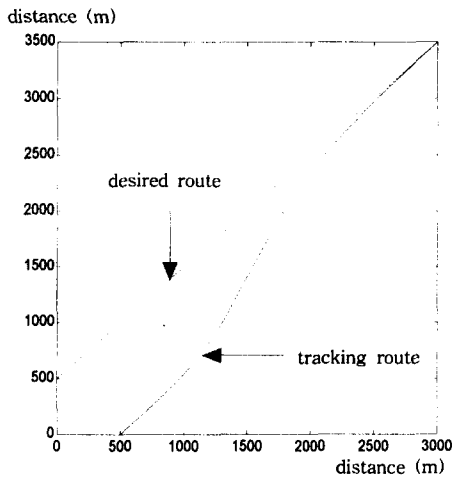
이 범위를 모두 사용하지 않고 Cargo Ship은 -π/6~π/6를 사용(Fig 6(b))하여 급격한 선박의 회두각 변화에 따른 제어 성능이 저하되는 것을 방지하고자 하였다.

4.2 Oil Tanker⁽⁶⁾

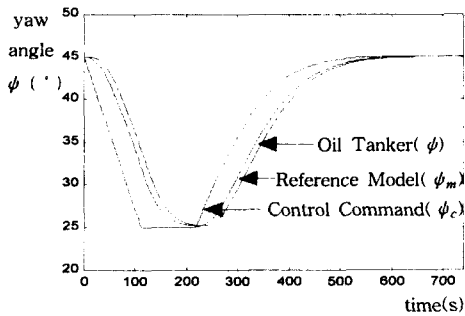
Oil Tanker에 대한 제원은 Table 2와 같다. 식 (2)를 통해 알 수 있듯이 극점이 s 영역의 우반면에 위치하는 침로 불안정 선박이다.

불안정한 Oil Tanker 경우의 1형 직접 적응 퍼지 제어기 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 같다.

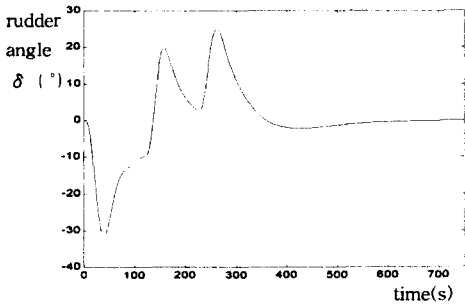
학습 초기에는 파라미터 조정으로 인해 출력이



(a) Result of route tracking



(b) Yaw angle command and tracking yaw angle



(c) Control input (rudder angle)

Fig. 6 Simulation results of route tracking control for a cargo ship with position error

Table 2 Specification of an oil tanker

	Oil Tanker (full loaded)
L(m)	350
u (m/s)	8.1
▽ (dwt)	389100
K (1/s)	-0.019
T(s)	-153.7

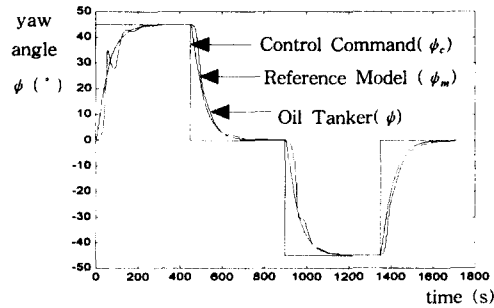


Fig. 7 Simulation result of 1st type direct adaptive fuzzy controller for oil tanker ($\zeta=1.0, w_n=0.05$)

진동하는 모습을 발견할 수 있으나 파라미터가 조정되어감에 따라 기준 모델을 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

Cargo Ship에서와 동일한 조건에서 위치 오차를 갖는 경우의 시뮬레이션 결과는 Fig. 8과 같다. (a), (b), (c)는 Oil tanker에 대한 항로 추적결과, 회두각 추적결과, 타각 명령을 나타낸 그림이다.

3.1절에서 언급하였듯이 선박의 진행 방향을 역으로 바꾸지 않는 ψ_{pc} 의 범위는 $-\pi/3$ 에서 $\pi/3$ 이다.

Oil Tanker의 경우에는 $-\pi/9 \sim \pi/9$ 로 하였다. 이는 불안정한 Oil Tanker의 경우 큰 회두각 변화는 불안정성을 더욱 증가시켜 이후 정해진 항로를 추종할 때 설정 항로 주변에서 진동할 우려가 있기 때문이다. Oil Tanker의 경우 ψ_{pc} 가 Cargo Ship에 비해 작고 전진방향 속도가 커 설정 항로로의 접근 경로가 길어지고 있다. Cargo Ship의 타각(Fig. 6(c))와 Oil Tanker의 타각(Fig. 8(c))를 비교해 보면, Oil Tanker의 타각에 매우 급한 변화가 있음을 알 수 있다. 이는 침로가 불안정한 선박의 경우 타각 입력이 0이 되어도 계속적으로 회두각 변화가 일어나므로 반대 타각을 주어 이를 상쇄해 주고 있

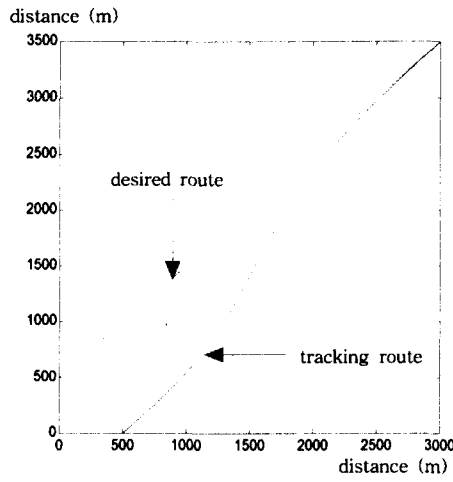
기 때문이다.

5. 결 론

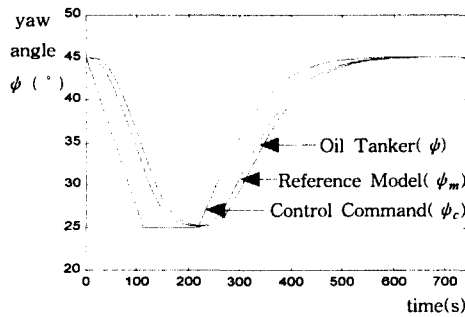
본 논문에서는 항로에 대한 위치 오차를 줄이면서 회두각 유지 제어를 동시에 행할 수 있는 선박 자동 항로 추적 방법을 제안하였다. 위치 오차를 회두각으로 변환하는 알고리즘을 제시하고, 변침점 사이의 직선 항로 구간에서 기준 회두각과 위치 오차에 의해 생성된 회두각의 합을 추적하는 제어를 설계함으로써 항로 추적이 가능하도록 하였다. 또한, 전문가의 항해 정보를 유용하게 활용할 수 있는 비선형 제어기인 적응 퍼지 제어기를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 제안한 회두각 명령 생성 알고리즘과 적응 퍼지 제어기의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

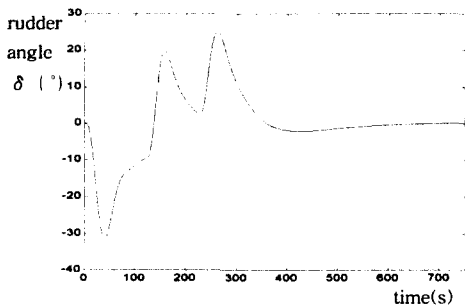
1. 류길수, 김종화, 조석제, 박석주, "ONEMAN BRIDGE INFOMATION SYSTEM," 지역 권소사업 보고서, 부산중소기업청, 1996.
2. 이병결, 정경열, 김종화, "선박 자동 항로 추종 제어 알고리즘에 관한 연구" 박용기관학회지, 제22권, 제6호, pp. 920~928, 1998.11
3. Trygve Laudval & Thor I. Fossen, "Robust Adaptive Ship Autopilot with Wave Filter and Integral Action," To appear in the Special Issue on Marine Systems Control, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 1998
4. Nomoto, K., T. Taguchi, K. Honda and S. Hirano, On the Steering Qualities of Ships. Technical Report. International Shipbuilding Progress, Vol 4. 1957.
5. Li-Xin Wang, Adaptive Fuzzy Systems And Control, Prentice-Hall International, Inc., 1994.
6. Thor I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
7. Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Addison-Wesley Longman, Inc., 1998.
8. Thor I. Fossen & Kunt Eilif Husa, "Backstepping Designs for Nonlinear Way-Point Tracking of



(a) Result of route tracking



(b) Yaw angle command and tracking yaw angle



(c) Control input (rudder angle)

Fig. 8 Simulation results of route tracking control for an oil tanker with position error

Ships," The 4th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft (MCMC' 97).

9. Trygve Laudval & Thor I. Fossen, "A Globally Stable Adaptive Ship Autopilot With Wave Filter Using Only Yaw Angle Measurements," Proceedings of the 3rd IFAC Workshop on Control Application in Marine Systems (CAMS '95), pp. 262~269, May 1995.
10. Trygve Laudval & Thor I. Fossen, "Nonlinear Rudder-Roll Damping of Non-Minimum Phase Ships Using Sliding Mode Control," Proceedings of the European Control Conference, 1997.
11. 이병걸, 김종화, "적응퍼지방식을 이용한 선박 자동 항로 추적제어에 관한 연구," Proceedings of the 14th Korea Automatic Control Conference, 1999.10.

저 자 소 개



이병걸(李丙結)

1993년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업. 1998년 동대학원 석사(제어계측공학). 한국해양대학교 제어계측공학과 박사과정. 관심분야는 적응제어, 퍼지제어, 선박 제어임.



김종화(金鍾和)

1981년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1985년 동 대학원 석사(제어공학). 1989년 동 대학원 박사(제어공학). 1990년~현재 한국해양대학교 기계 정보공학부 부교수. 1996년-1997년 University of Wales, Cardiff 연구교수. 관심분야는 적응제어, 퍼지제어, 지능제어 등임. 당학회 종신회원 및 평의원.