

선박자동조타를 위한 RCGA기반 T-S 퍼지 PID 제어

이유수 · 황순규¹ · 안종갑^{2*}

원터투어 가스엔디젤 코리아 엔지니어, ¹대우조선해양 에너지시스템 연구개발부 책임연구원, ²경상국립대학교
실습선 운영관리센터 교수

T-S fuzzy PID control based on RCGAs for the automatic steering system of a ship

Yu-Soo LEE, Soon-Kyu HWANG¹ and Jong-Kap AHN^{2*}

Technical Expert, Global Customer Operation Experts, Winterthur Gas & Diesel Korea, Busan 46040, Korea

¹*Principal Researcher, Energy System R&D Department, DSME, Siheung 15011, Korea*

²*Professor, Training Ship Operation Center, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea*

In this study, the second-order Nomoto's nonlinear expansion model was implemented as a Tagaki-Sugeno fuzzy model based on the heading angular velocity to design the automatic steering system of a ship considering nonlinear elements. A Tagaki-Sugeno fuzzy PID controller was designed using the applied fuzzy membership functions from the Tagaki-Sugeno fuzzy model. The linear models and fuzzy membership functions of each operating point of a given nonlinear expansion model were simultaneously tuned using a genetic algorithm. It was confirmed that the implemented Tagaki-Sugeno fuzzy model could accurately describe the given nonlinear expansion model through the Zig-Zag experiment. The optimal parameters of the sub-PID controller for each operating point of the Tagaki-Sugeno fuzzy model were searched using a genetic algorithm. The evaluation function for searching the optimal parameters considered the route extension due to course deviation and the resistance component of the ship by steering. By adding a penalty function to the evaluation function, the performance of the automatic steering system of the ship could be evaluated to track the set course without overshooting when changing the course. It was confirmed that the sub-PID controller for each operating point followed the set course to minimize the evaluation function without overshoot when changing the course. The outputs of the tuned sub-PID controllers were combined in a weighted average method using the membership functions of the Tagaki-Sugeno fuzzy model. The proposed Tagaki-Sugeno fuzzy PID controller was applied to the second-order Nomoto's nonlinear expansion model. As a result of examining the transient response characteristics for the set course change, it was confirmed that the set course tracking was satisfactorily performed.

Keywords: Nomoto's nonlinear expansion model, Automatic steering system, Tagaki-Sugeno fuzzy model, Tagaki-Sugeno fuzzy PID controller, Genetic algorithm, Penalty function

Received 30 January 2023; Revised 11 February 2023; Accepted 20 February 2023

*Corresponding author: JongKap.Ahn@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-9042, Fax: +82-55-772-9039

Copyright © 2023 The Korean Society of Fisheries and Ocean Technology

서론

선박이 대형화, 자동화, 고속화되고, 특수목적의 선박들이 개발됨에 따라 선박 항해 당직자와 함께 자동으로 선박 운항이 가능하도록 하는 가이던스 시스템(guidance system)이 개발되고, 이를 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다. 가이던스 시스템은 항행을 위해 선속, 선수각, 선위 등을 결정하고, 운항 안전성을 위해 선체를 안정화시키거나 감속시키며, 선박의 외부 환경 외란 등에 의한 선박의 민감도를 감소시키기 위한 것이다(Kim, 2002; Yim and Youn, 2003; Lee, 2005).

이런 다양한 기능이 통합된 선박의 자동운항시스템 중 기존의 산업현장에서 사용되는 대표적인 선형제어기인 PID 제어기 기반 자동조타시스템의 경우, 선수각 유지 및 변침에 대한 성능이 우수하여 대부분 선박에 적용되고 있다. 그러나 이는 선형제어기의 한계로 비선형 보상 능력이 모자라게 된다. 따라서 정상상태 오차 없이 신속하고 정확한 제어성능을 보이는 비선형 자동조타시스템의 연구가 진행되었다(Hu et al., 2020; Chen et al., 2020; Xu et al., 2023; Gao and Guo, 2019; Zwierzewicz et al., 2022; Bhattacharyya and Gupta, 2014; Gupta et al., 2018).

본 연구에서는 비선형 자동조타시스템을 위해 Nomoto 2차 비선형 확장모델(Bech and Wanger, 1969)을 활용한 T-S 퍼지모델(Tagaki and Sugeno, 1985)을 기반으로 퍼지 PID 제어기를 설계하고자 한다. 이때, 퍼지모델의 멤버십함수와 PID 제어기 파라미터는 최적화 알고리즘의 일종인 RCGAs (Real Coded Genetic Algorithms) (Jin and Ju, 2000; Jin, 2004)를 이용하여 제약조건이 추가된 평가함수가 최소화되도록 구한다.

재료 및 방법

T-S 퍼지 선박자동조타 모델

선박의 정확한 수학모델을 얻기 위해서는 선박자동조타시스템의 많은 물리적 정보가 필요하게 된다. 이러한 관점에서 Nomoto (1960) 모델은 타와 선수각의 관계가 비교적 간단한 선형항들만으로 표시되므로 선박자동조타시스템에 적용하기 편리하다(Ahn et al., 2010). 선박의 비선형적인 조종특성을 고려하기 위해 Bech와 Wagner Smith (1969)는 비선형항을 포함하여 Nomoto 2차 모델의 비선형 확장모델을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + K H_B(r) &= K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \\ H_B(r) &= b_3 r^3 + b_2 r^2 + b_1 r + b_0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $H_B(r)$ 은 역나선궤적(reverse spiral maneuver)으로부터 구해지고, $b_i(i=0,1,2,3)$ 는 다항식의 계수이다(Bech, 1968).

식 (1)은 회두각속도 r 에 대한 2차 상미분 방정식으로 조타각 δ 의 관계로 표현한 것이다. 이처럼 선수각과 타각사이의 운동방정식을 도출한 것은 실제로 자동조타시스템을 구성할 때 선수각의 계측이 용이하며 이를 바탕으로 타각 명령을 제어하기 때문이다(Seo et al., 1996). 식 (1)의 유체력 미계수들과 관련된 파라미터인 T_1 , T_2 , T_3 는 침로안정에 관계된 시정수로서, T_1 과 T_2 는 추종 및 안정성 지수, T_3 는 추종성지수이다. K 는 선박의 선회 성능과 관계된 지수이다.

본 연구에서는 시스템의 복잡한 특성으로 인해 정량적인 해석이 어렵고 정성적이며 정확하지 못한 정보를 처리하는데 효과적인 퍼지이론을 이용하여 선박을 모델링한다(Wang, 1997; Lee and Oh, 1991; Jin et al., 2018). 퍼지이론 중 T-S 퍼지모델은 Takagi와 Sugeno(T-S) (1985) 등이 제안한 추론법의 확장으로써 시스템을 1차항의 결합으로 표현하고, 퍼지규칙의 개수가 적더라도 비선형함수를 잘 나타낼 수 있는 장점이 있다. T-S 퍼지모델의 조건부는 선형모델의 상태 중에 하나로 구성된다. 이것은 비선형시스템이 몇몇 동작점에서 얻어지는 선형모델의 퍼지결합으로 표시될 수 있음을 의미한다. 본 연구에서는 T-S 퍼지제어기를 설계하기 위해 먼저 비선형확장식인 $H_B(r)$ 을 식 (2)와 같이 회두각속도 r 이 변화되는 폭을 고려하여 퍼지 멤버십함수를 3개의 입력공간으로 분할하고, T-S 퍼지규칙들로 표현한다.

퍼지규칙 :

$$\begin{aligned} R_m^i : & \text{IF } r \text{ is } M^i \\ \text{THEN } & T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + K H_B^i(r) = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \\ & H_B^i(r) = c^i r + r, \text{ for } i=1,2,3 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, R_m^i 는 모델의 i 번째 규칙, M^i 는 조건부의 퍼지집합, c^i 는 결론부 파라미터를 나타낸다. $H_B^i(r)$ 은 규

칙 R_m^i 로부터의 출력이다.

식 (2)에서 입력으로 r 이 주어지면, 비선형항에 대한 규칙의 추론결과는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$H_B(r) = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho^i (c^i r + r)}{\sum_{i=1}^3 \rho^i} \quad (3)$$

여기서, ρ^i 는 퍼지집합 M^i 에서 r 의 기여도를 의미한다. 주어진 입력 r 에 대해 퍼지모델의 최종 출력은 $H_B^i(r)$ 를 가중평균하여 구할 수 있다. 결론부의 선형항 $c^i r + r$ 은 비선형시스템의 여러 동작점에서 선형화하여 얻어진다.

입력공간의 퍼지분할에 이용되는 퍼지집합은 선체 회두각속도 r 에 따른 사다리꼴 형태의 멤버십함수 식 (4)를 사용한다.

$$M^i = \begin{cases} 0 & , r \leq a_{ij} \\ \frac{r - a_{ij}}{b_{ij} - a_{ij}} & , a_{ij} \leq r \leq b_{ij} \\ 1 & , b_{ij} \leq r \leq c_{ij} \\ \frac{d_{ij} - r}{d_{ij} - c_{ij}} & , c_{ij} \leq r \leq d_{ij} \\ 0 & , d_{ij} \leq r \end{cases} \quad (4)$$

여기서, $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ ($i=1,2,3$)($j=1,2,3,4$)는 사다리

꼴 멤버십함수의 모서리 위치이다.

선박자동조타용 T-S 퍼지 PID 제어기

PID 제어기는 구조가 간단하여 현장에서 폭넓게 이용되고 있다(Åström and Hägglund, 1995). 퍼지 PID 제어를 설계하기 위해서 먼저 Nomoto 2차 비선형 확장모델로부터 퍼지모델을 구하고, 각 동작점의 서브시스템에 대해 각각의 sub-PIDⁱ 제어기($i=1,2,3$)를 Fig. 1과 같이 설계한다.

선박의 회두각속도 r 의 변화에 따라 sub-PIDⁱ 제어기 출력을 퍼지결합 한다(Lee, 2004). 따라서 이들도 “IF-THEN” 규칙으로 결합할 수 있고, 퍼지모델을 구하는 것과 같이 T-S 퍼지 PID 제어기 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

퍼지규칙 :

R_c^i : IF r is C^i

THEN $u^i(t) = K_P^i e(t) + K_I^i \int e(t)dt + K_D^i \frac{de(t)}{dt}$,

for $i=1,2,3$

(5)

여기서, R_c^i 는 제어기의 i 번째 규칙, C^i 는 조건부 퍼지 집합이다. $u^i(t)$ 는 sub-PIDⁱ 제어기의 출력이고, K_P^i, K_I^i, K_D^i 는 비례이득, 적분이득, 미분이득이다. i 는 규칙의 순서이다. 따라서 T-S 퍼지 PID 제어기의 출력에

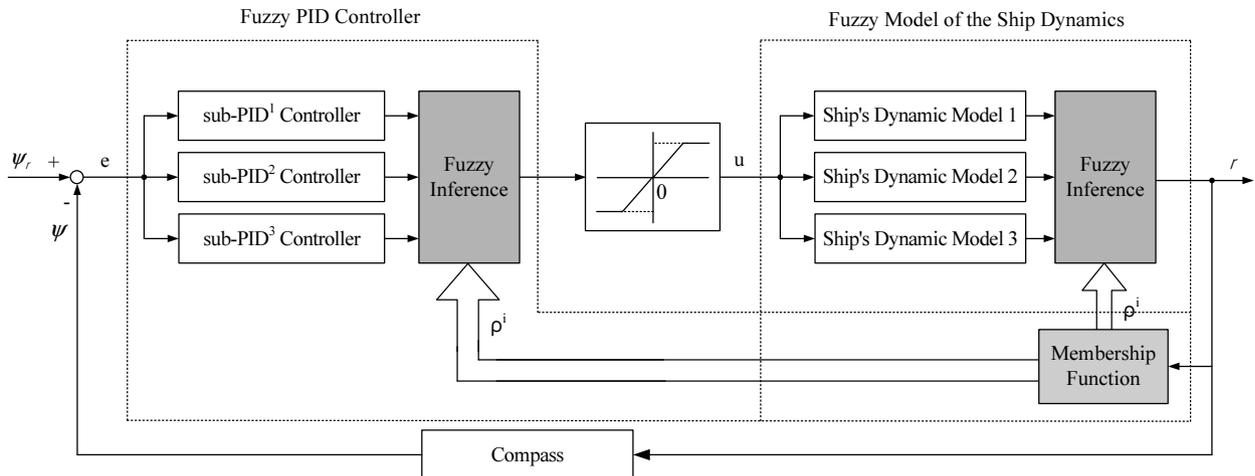


Fig. 1. Schematic diagram of the T-S fuzzy PID controller for ship's automatic steering system.

대한 추론결과는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho^i \left(K_P^i e(t) + K_I^i \int e(t) dt + K_D^i \frac{de(t)}{dt} \right)}{\sum_{i=1}^3 \rho^i} \quad (6)$$

여기서, $\rho^i (i=1,2,3)$ 는 식 (7)과 같이 계산되는 규칙의 기여도를 나타낸다.

$$\rho^i = C^i(r) \quad (7)$$

유전알고리즘 기반의 T-S 퍼지 모델 및 PID 제어기 동조

본 연구에서 Nomoto 2차 비선형 확장모델의 T-S 퍼지 모델은 Fig. 2와 같이 모델조정기법을 이용해 평가함수 식 (8)이 최소가 되도록 $H_B^i(r)$ 선형식과 사다리꼴 멤버십함수 M^i 의 파라미터들을 동시에 탐색하고자 한다. 그리고, sub-PIDⁱ 제어기의 파라미터들은 평가함수 식 (12)를 통해 주어진 조건에서 최적으로 탐색할 수 있도록 유전알고리즘(RCGAs)에 의해 동조된다. 본 연구에서 최적화 문제를 해결하기 위해 사용되는 RCGAs는 자연선택 원리와 유전학을 알고리즘화한 것이다. 다수 개체(염색체)로 구성되는 초기집단으로부터 시작하며 적합도 평가와 유전 연산자를 통해 집단이 새롭게 진화된다. 최적의 해를 구할 때까지 반복적인 진화가 수행된다. RCGAs의 유전 연산자로는 구배와 유사한 재생산, 수정단순 교배, 동적 돌연변이를 사용하였고, 탐색 성능을 향상시키기 위해 스케일링 윈도우법과 엘리트전략을 사용하였다(Lee et al., 2022).

본 연구에서는 Table 1과 같은 선박에 제안하는 T-S 퍼지 PID 제어기를 이용하여 자동조타시스템을 설계하고자 한다(Fossen, 1994).

Table 1. Coefficient of characteristics of model dynamics and performance index

Main Data	Value	Unit
Length overall	171.80	m
Length between perpendiculars	160.93	m
Maximum beam	23.17	m
Design draft	8.23	m
Design displacement	18541	m ³
Design speed	15	knots

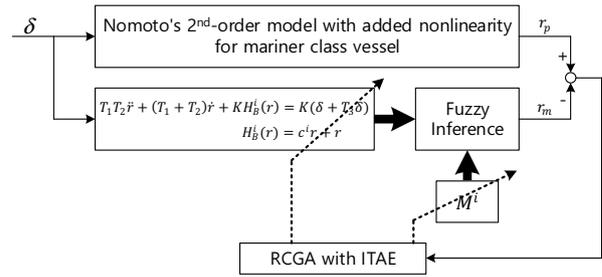


Fig. 2. Optimization of the T-S fuzzy model.

Table 1과 같은 선박의 Nomoto 2차 비선형 확장모델을 위한 침로 안정지수와 선회 성능지수는 각각 $T_1=118$, $T_2=7.8$, $T_3=18.5$, $K=0.185$ 이고, 비선형항의 계수 $b_1=b_3=1$, $b_0=b_2=0$ 이다(Fossen, 1994).

T-S 퍼지 선박자동조타 모델의 최적조정

선박 회두각속도 $-1.5 \leq r \leq 1.5$ 의 범위에서 평가함수 식 (8)이 최소가 되도록 RCGAs는 선형모델과 퍼지 멤버십함수의 파라미터를 탐색한다. 탐색 결과 식 (9)와 같은 서브시스템, 식 (10)과 같은 T-S 퍼지 멤버십함수를 추정하였다.

$$J(r) = \int_0^{t_f} t |r_p(t) - r_m(t)| dt \quad (8)$$

여기서, r_p 는 Nomoto 2차 비선형 확장모델의 회두각속도, r_m 은 T-S 퍼지 선박자동조타모델의 회두각속도이다. t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 시간이다.

서브시스템 :

$$\begin{aligned} R_m^1 &: \text{IF } r \text{ is } M^1 \\ &\text{THEN } T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + K(3.5830r+r) = K(T_3 \dot{\delta} + \delta) \\ R_m^2 &: \text{IF } r \text{ is } M^2 \\ &\text{THEN } T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} - K(0.5110r+r) = K(T_3 \dot{\delta} + \delta) \\ R_m^3 &: \text{IF } r \text{ is } M^3 \\ &\text{THEN } T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + K(3.5180r+r) = K(T_3 \dot{\delta} + \delta) \end{aligned} \quad (9)$$

T-S 퍼지 멤버십함수 :

$$\begin{aligned} M^1 &: [-4.6200 \quad -3.4100 \quad -1.8760 \quad -0.2330] \\ M^2 &: [-1.9130 \quad -0.7400 \quad 0.7270 \quad 1.9190] \\ M^3 &: [0.3590 \quad 1.7210 \quad 3.4820 \quad 4.5220] \end{aligned} \quad (10)$$

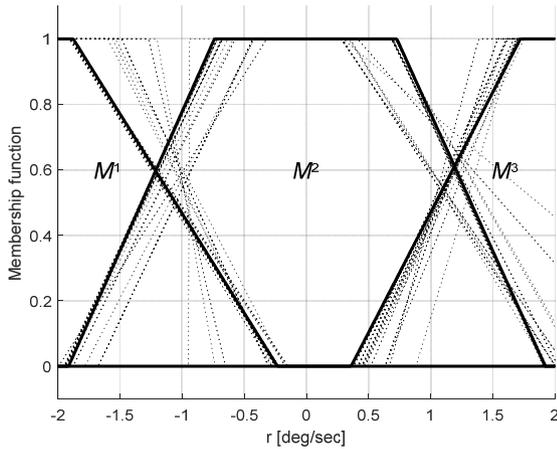


Fig. 3. Membership function after tuning with RCGA.

Fig. 3은 RCGAs을 이용해 멤버십함수를 최적으로 조정하고 있는 일례를 보인 것이다. 점선은 조정되고 있는 과정을 보이고 있으며, 굵은 실선은 조정 후 최적의 멤버십함수를 나타낸 것이다.

선박 자동조타용 sub-PID 제어기 동조

Fig. 4는 RCGAs를 이용하여 식 (9)의 서브시스템에 대한 sub-PID 제어기 동조과정을 나타낸다. 3개의 선형 선박자동조타모델에 동일한 선수각(ψ) 변침($0^\circ \rightarrow 10^\circ$)을 입력으로 설정하여 sub-PID¹, sub-PID², sub-PID³ 제어기의 파라미터들을 각각 구하였다. 이때 RCGAs는 식 (11)과 식 (12)를 각각 이용하여 평가함수가 최소가 되도록 PID 제어기 파라미터들을 주어진 영역에서 탐색한다.

$$J(\psi) = \int_0^{t_f} ((\psi_r(t) - \psi(t))^2 + \lambda_1 r(t)^2 + \lambda_2 \delta(t)^2) dt \quad (11)$$

여기서, λ_1 은 회두각속도에 의한 원심력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량, λ_2 는 조타에 의한 타직압력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다. 선박의 자동조타시스템이 적당히 안정하다면, 조타로 발생하는 선체 운동에 의한 저항 성분 ($\lambda_1 r^2$)은 무시($\lambda_1=0$)할 수 있다. 본 연구에서 λ_2 는 Koyama (1967)가 제안한 8을 사용한다.

식 (11)의 평가함수는 자동조타기의 성능을 좀 더 정확하게 평가하기 위한 것으로 자동조타기의 역할이 왜

침로편차를 줄이는 데 있는가를 생각해 보면, 목표지점을 향해 가능한 한 빨리 항행하기 위해서라고 생각할 수 있다. 선박이 일정한 속력으로 항행할 때 침로편차가 커져서 사행하면서 항행한다면, 결국 목표지점에 도착하는 데는 시간이 길어진다. 침로편차를 일종의 저항 증가라는 측면에서 침로편차에 의한 항로의 연장, 조타로 발생한 선체 운동에 의한 저항 성분, 조타에 의한 저항 성분을 고려하여 선박의 자동조타기의 성능은 평가되어야 한다(Sohn K, 2001).

이와 더불어, 가이드선 시스템은 선회항로에 대한 가이드선 없이 목표 변침점의 일정한 영역 안으로 선박이 진입하게 되면, 목표 변침점을 다음 변침점으로 전환하여 변침을 수행한다. 이러한 구성은 원양항해와 같이 장애물이 없거나 선회를 위한 충분한 공간이 있는 경우에는 큰 문제가 없지만, 근해나 장애물이 있는 경우 정확한 선회를 위한 가이드선이 효율적으로 이루어지기 힘들고, 선회를 위해 부가적으로 더 많은 변침점을 선택해야 하는 문제를 발생시키게 된다. 이러한 가이드선 시스템이 선박을 정확하게 유도하기 위해서는 정확하고 빠른 변침 능력을 갖추고 큰 회두각 변화에 오버슈트를 발생시키지 않는 자동조타시스템이 요구된다. 본 연구에서는 유전알고리즘이 자동조타기(PID 제어기) 파라미터를 탐색할 때 제약조건으로 큰 회두각 변화에도 오버슈트가 발생하지 않게 하려고 벌점함수를 사용하게 되었다. 유전알고리즘에서는 제약조건을 다루기 위해 거부, 복구, 보완, 벌점 등의 전략을 사용한다(Jin, 2004). 본 연구에서는 벌점전략 중 고정 벌점전략을 사용한다. 만약 유전알고리즘이 적절하지 못한 부분을 탐색하게 되면 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수 계산에 반영한다(Lee et al., 2007). 본 연구에서는 계단함수 형태의 설정침로 변경에서 최대오버슈트(M_p)가 발생하지 않도록

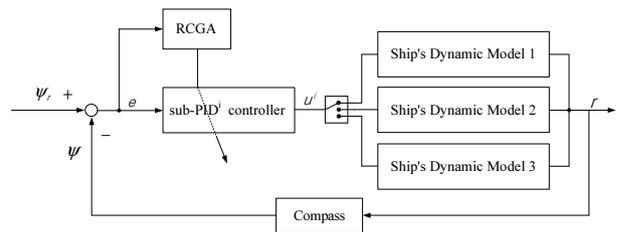


Fig. 4. Parameter tuning by RCGAs for sub-PID controller.

록 그 위반 정도에 따라 벌점함수($P(\psi) = wg^2$)를 추가한 식 (12)의 평가함수를 사용해 sub-PID 제어기 파라미터를 찾고자 한다.

$$J(\psi) = \int_0^{t_f} (|\psi_r(t) - \psi(t)| + \lambda_1|r(t)| + \lambda_2|\delta(t)| + P(\psi))dt \quad (12)$$

단, ψ 가 적합한 해일 경우 $P(\psi)=0$, 적합하지 못한 경우 $P(\psi)=\sum wg^2$ 이다. 여기서 w 는 제약조건에 대한 벌점상수($w=1 \times 10^{50}$)로서 설계자에 의해 적절하게 선정되는 변수이고, g 는 제약조건($g(\psi) = -M_p(\psi) \geq 0$)으로 본 연구에서 고려하는 최대오버슈트 M_p 가 발생하지 않도록 한다. 이렇게 함으로써 제약성 최적화 문제는 $J(\psi)$ 를 최소로 하는 비제약성 최적화 문제로 변환된다.

평가함수 식 (12)가 최소가 되도록 RCGAs에 의해 동조된 sub-PID 제어기는 식 (13)과 같다. 자동조타시스템은 적분기(자이로컴퍼스)가 포함된 시스템으로 본 연구에서는 이를 고려하여 PD 제어기만을 사용하였다. sub-PID 제어기의 멤버십 함수는 T-S 퍼지 멤버십 함수 식 (10)과 동일하다.

sub-PID 제어기 :

$$\begin{aligned}
 &\text{IF } r \text{ is } C^1, \text{ THEN} \\
 R_c^1 : &u^1(t) = 463.0179 \times e(t) + 7268.4160 \times \frac{de(t)}{dt} \\
 &\text{IF } r \text{ is } C^2, \text{ THEN} \\
 R_c^2 : &u^2(t) = 450.3060 \times e(t) + 7213.5260 \times \frac{de(t)}{dt} \\
 &\text{IF } r \text{ is } C^3, \text{ THEN} \\
 R_c^3 : &u^3(t) = 461.8417 \times e(t) + 7254.5224 \times \frac{de(t)}{dt} \quad (13)
 \end{aligned}$$

결과 및 고찰

Nomoto 2차 비선형 확장모델을 T-S 퍼지모델로 구현한 서브시스템 식 (9)를 기반으로 동조한 sub-PID 제어기 식 (13)의 출력을 T-S 퍼지 멤버십함수 식 (10)을 이용해 가중평균법으로 결합한 T-S 퍼지 PID 제어를 설계하고 유효성을 검증하기 위해 모의실험을 실시한다.

T-S 퍼지 선박자동조타 모델의 검증

Fig. 5는 식 (1)의 비선형형인 $H_B(r)$ 을 퍼지규칙 식

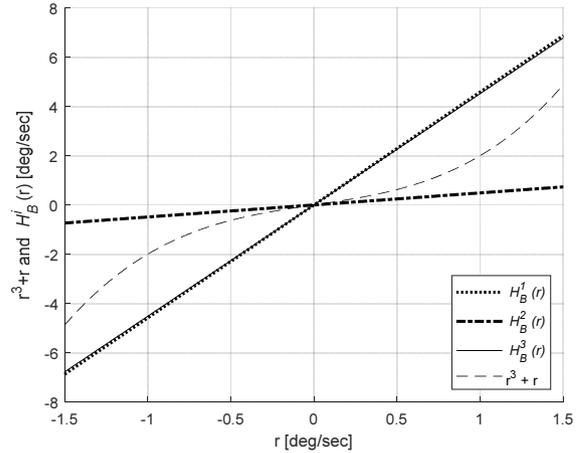


Fig. 5. Linear model for $H_B^i(r)$.

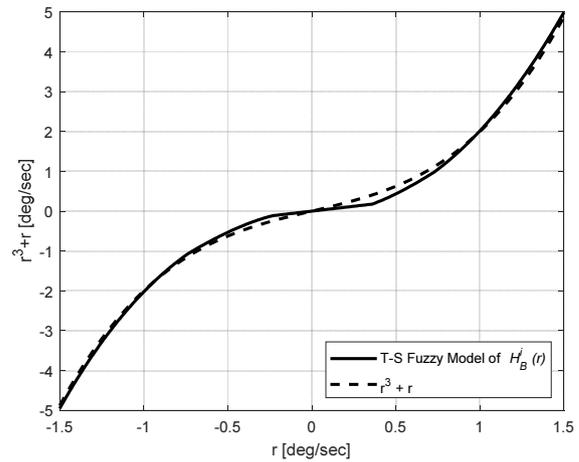


Fig. 6. Compared T-S Fuzzy model and nonlinear model.

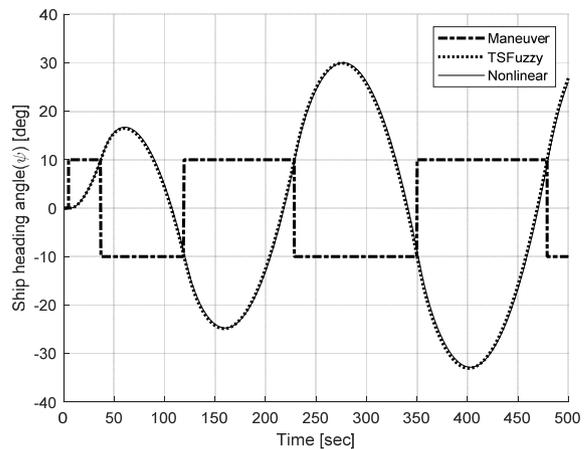


Fig. 7. Compared $\pm 10^\circ$ Zig-Zag test of T-S Fuzzy model and nonlinear model.

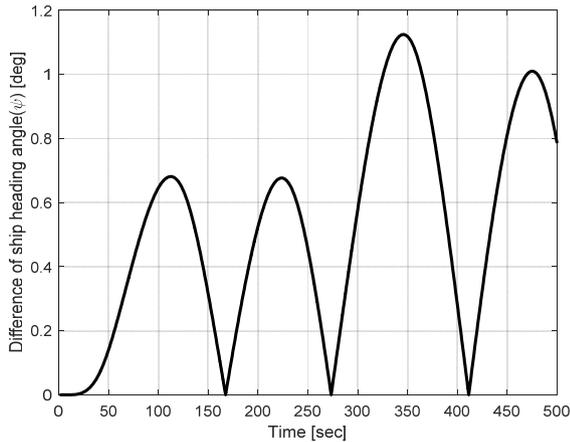


Fig. 8. Difference of the ship heading angle from $\pm 10^\circ$ Zig-Zag test of T-S Fuzzy model and nonlinear model.

(2)의 조건부를 나타내는 T-S 퍼지 멤버십함수 식 (10)에 따라 추정된 식 (2)의 결론부 $H_B^i(r)$ 3개의 선형식을 나타낸 것이다.

Fig. 6은 식 (2)의 결론부 $H_B^i(r)$ 3개의 선형식을 T-S 퍼지 멤버십함수 식 (10)을 통해 구현한 T-S 퍼지모델과 비선형항인 $H_B(r)$ 을 나타낸 것이다.

Fig. 7은 식 (9)의 서브시스템과 식 (10)의 T-S 퍼지 멤버십함수에 의해 구성된 T-S 퍼지모델과 Nomoto 2차 비선형 확장모델을 이용해 500초 동안 $\pm 10^\circ$ Zig-Zag 실험한 결과이다. Fig. 8에서 T-S 퍼지모델이 약 1.2° 이하의 차이로 비선형 확장모델을 근사하게 묘사하고 있다.

설정침로 변경에 대한 과도응답 특성

평가함수에 따른 PID 제어기의 과도응답

RCGAs를 이용해 변침시 오버슈트가 발생하지 않도록 벌점함수를 추가한 평가함수 식 (12)를 이용해 구한 sub-PID 제어기 파라미터는 식 (13)과 같다. 설정 침로 변경에 대한 과도응답 특성을 살펴보기 위해 sub-PID¹ 제어기

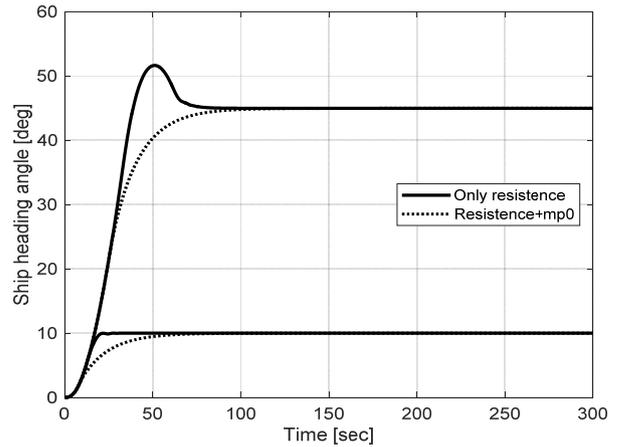


Fig. 9. Compared ship heading angle reference tracking responses.

의 파라미터를 탐색할 때 선박의 항해 저항 증가만을 고려한 평가함수 식 (11)을 이용해 구한 PID 제어기 파라미터 $K_P^{1(\text{only added resistance})} = 887.7990$, $K_D^{1(\text{only added resistance})} = 5345.8780$ 와 sub-PID 제어기 R_c^1 의 결론부 $u^1(t)$ 와 비교한다. Fig. 9는 설정침로를 $0^\circ \rightarrow 10^\circ$, $0^\circ \rightarrow 45^\circ$ 로 변경한 결과이다. Table 2의 정량적인 결과를 살펴보면, 벌점함수를 추가한 평가함수 식 (12)를 이용해 구한 PID 제어기는 오버슈트가 발생하지 않으면서 설정침로를 추종하고 있다. Table 2의 IAE값은 식 (11)을 이용해 에너지손실 측면에서 구한 값이다.

설정침로를 $0^\circ \rightarrow 10^\circ$ 로 변경한 시뮬레이션 결과에서 오버슈트가 발생하지 않도록 벌점함수를 추가한 평가함수 식 (12)를 이용해 구한 PID 제어기의 IAE값이 더 큰 이유는 설정 침로의 변경이 상대적으로 작은 경우, 오버슈트의 발생 크기가 작고 상승시간이 짧기 때문이다. 이는 설정 침로를 $0^\circ \rightarrow 45^\circ$ 로 변경한 시뮬레이션 결과에서 오버슈트가 발생하지 않도록 벌점함수를 추가한 평가함수 식 (12)를 이용해 구한 PID 제어기의 IAE값

Table 2. Performance of PID controller depending on objective function

Main Data	Yaw reference $0^\circ \rightarrow 10^\circ$		Yaw reference $0^\circ \rightarrow 45^\circ$	
	Only added resistance	Resistance with penalty	Only added resistance	Resistance with penalty
Overshoot [%]	0.04630	0	14.8331	0
Rise time [sec]	11.4130	34.2499	24.0665	38.9482
Settling time [sec]	19.7717	65.3535	68.0130	75.5480
Peak [°]	10.0046	10.0000	51.6749	45.0000
IAE	170.571	221.464	1814.90	1648.00

이 상대적으로 더 작게 되는데, 오버슈트의 발생차이가 상대적으로 커졌기 때문이다. 대부분의 경우 시스템 설계시 계단함수 입력에서 정의되는 최대오버슈트, 지연 시간, 상승시간, 정정시간, 제한된 입력 등의 요소를 고려하게 된다. 그럼에도, 최대오버슈트와 상승시간은 서로 상충한다. 다시 말하면, 최대오버슈트와 상승시간을 동시에 작게 할 수는 없다. 둘 중 하나가 작아지면 다른 하나는 반드시 커져야 한다(Ogata, 2003).

T-S 퍼지 PID 제어기의 과도응답

식 (11)을 이용해 구한 PID 제어기, 식 (13)의 sub-PID 제어기 그리고 식 (10)의 T-S 퍼지 멤버십함수를 이용한 T-S 퍼지 PID 제어기를 Nomoto 2차 비선형 확장 모델에 적용하여 설정 침로 변경에 대한 과도응답 특성을 살펴본다.

Fig. 10은 설정침로를 0[°]→45[°]로 변경한 결과이다. Table 3의 정량적인 결과를 살펴보면, 별점함수를 추가한 평가함수 식 (12)를 이용해 동조한 sub-PID¹ 제어기만으로 비선형 확장 모델을 제어한 시뮬레이션 결과는 약간의 오버슈트가 발생하고, T-S 퍼지 PID 제어기는 오버슈트가 발생하지 않으면서 설정침로를 추종하고 있다. Fig. 10의 아래쪽 그림은 60[sec]에서 160[sec] 사이에서 설정 침로에 정착해가는 것을 확대한 그림이다. 시뮬레이션 결과에서 T-S 퍼지 PID 제어기와 비교하여 sub-PID¹ 제어기만으로 비선형 확장 모델을 제어한 시뮬레이션 결과의 IAE값이 더 작은 이유는 오버슈트는 없지만 상대적으로 상승시간이 길어졌기 때문이다.

Fig. 11은 설정 침로를 초기 선수각 0[°]에서 시작하여, 선수각 60[°](우현 회두)로 변경하고, 다시 선수각 0[°](좌현 회두)로 복귀하도록 명령하였다. 다음, 선수각 -60(침로방위각 300)[°](좌현 회두)로 변경하고, 다시 선수각 -100(침로방위각 265)[°](좌현 회두)로 변경 설정하였다. 이후, 좀 더 큰 설정치 변경에 대한 과도응답

특성을 살펴보기 위해 선수각 -100(침로방위각 265)[°]에서 선수각 0[°](우현 회두)로 복귀하도록 명령하였다. 최종적으로는 선수각 60[°](우현 회두)로 침로를 설정하였다. T-S 퍼지 PID 제어시스템은 오버슈트없이 설정침로를 추종해 가는 것을 알 수 있다.

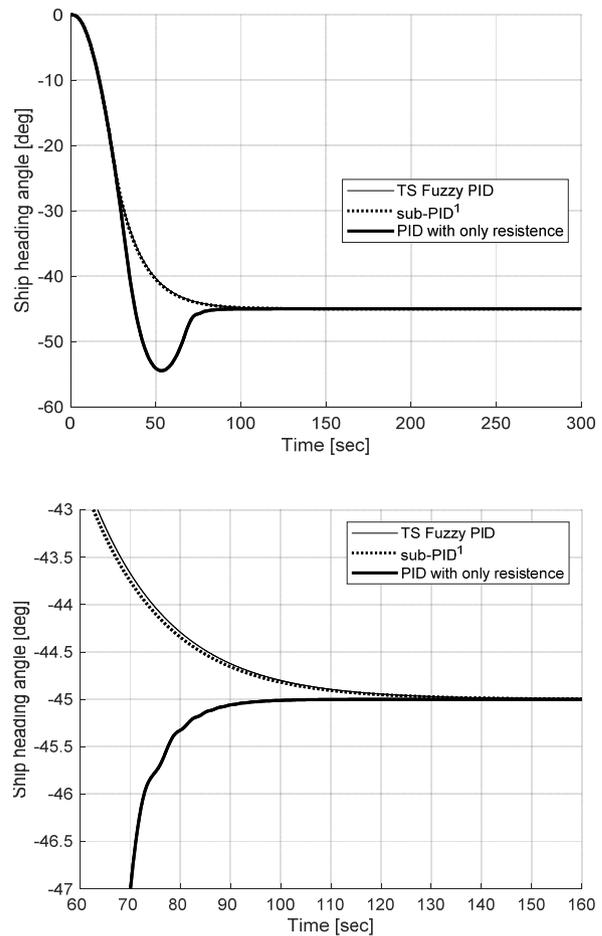


Fig. 10. Ship heading angle reference tracking responses for 2nd order Nomoto's nonlinear model with T-S fuzzy PID controller.

Table 3. Performance of T-S fuzzy PID controller

Main Data	Yaw reference 0° → -45°		
	PID with only resistance	sub-PID ¹	T-S Fuzzy PID
Overshoot [%]	21.0463	7.4485e-08	0
Rise time [sec]	23.3957	38.5417	39.1456
Settling time [sec]	73.3878	75.0764	76.1949
Peak [°]	54.4709	45.0000	45.0000
IAE	1.9562e+03	1.6420e+03	1.6469e+03

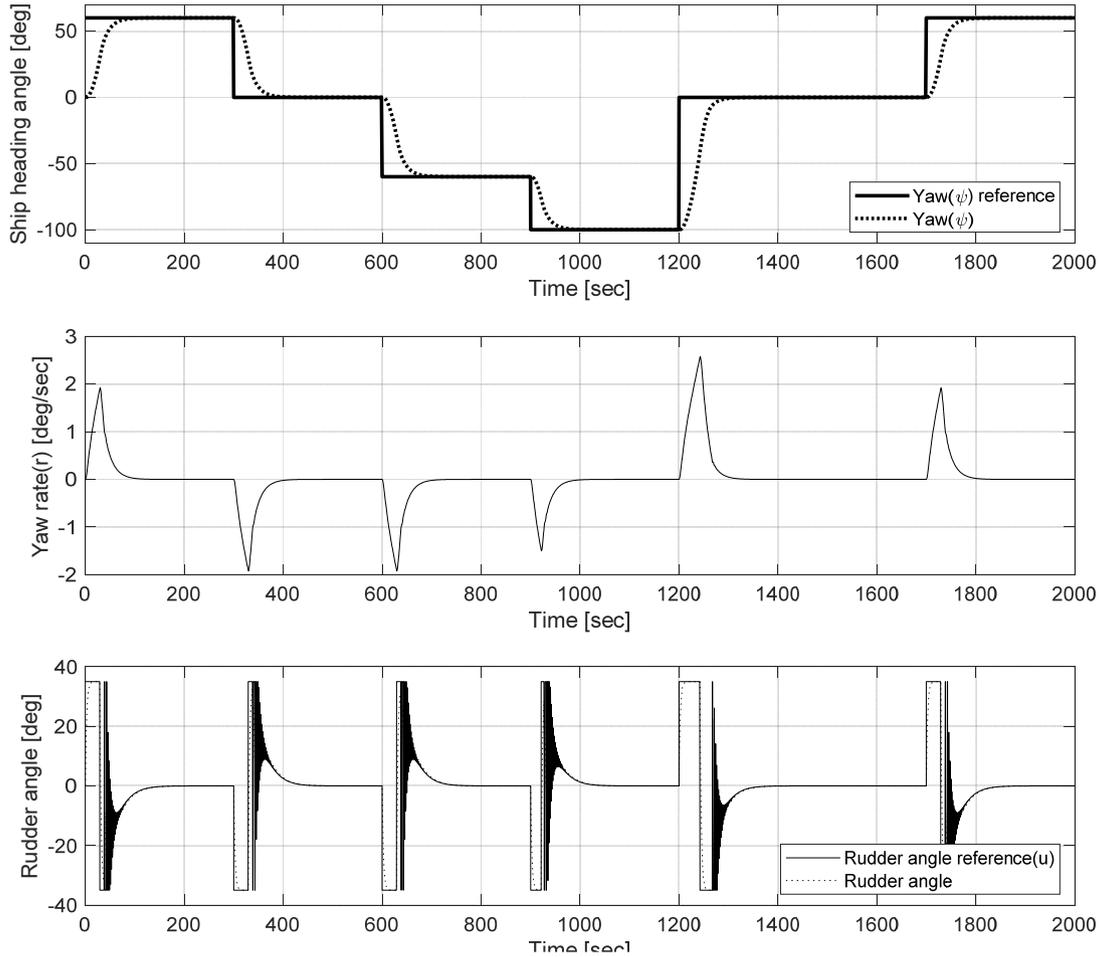


Fig. 11. Transient response, course changing $0 \rightarrow 60 \rightarrow 0 \rightarrow 60(300) \rightarrow 100(265) \rightarrow 0 \rightarrow 60[^\circ]$ on 2nd order Nomoto's nonlinear model with T-S fuzzy PID controller.

결론

본 연구에서는 Nomoto 2차 비선형 확장모델을 선수 각속도를 기준으로 T-S 퍼지모델로 구현하였으며, 이때 적용된 퍼지멤버십함수를 사용하여 T-S 퍼지 PID 제어시스템을 설계하였다.

주어진 비선형 확장모델의 각 동작점 별로 선형 모델과 퍼지 멤버십 함수들은 RCGAs를 사용해 동시에 탐색되었다. 이렇게 구현된 T-S 퍼지모델은 Zig-Zag 실험을 통해 주어진 비선형 확장모델을 근사하게 묘사할 수 있는 것을 확인하였다.

주어진 시스템의 T-S 퍼지모델에 동작점 별 sub-PID 제어기는 동일한 기준입력에 대해 RCGAs를 사용하여 최적으로 동조하였다. 최적 동조를 위한 평가함수는, 침

로편차를 일종의 저항증가라는 측면에서 침로편차에 의한 항로의 연장, 조타에 의한 저항성분을 고려하였으며, 변침시 오버슈트 없이 설정침로를 추종하도록 별점함수를 추가하여 선박자동조타기의 성능이 평가될 수 있도록 구성하였다. 각 동작점 별 sub-PID 제어기는 변침시 오버슈트 없이 평가함수가 최소가 되도록 설정침로를 추종해 가는 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 동조된 sub-PID 제어기의 출력은 T-S 퍼지 모델의 멤버십함수를 이용하여 가중평균법으로 결합하였다.

제안된 T-S 퍼지 PID 제어시스템을 Nomoto 2차 비선형 확장 모델에 적용하여 설정 침로 변경에 대한 과도응답 특성을 살펴본 결과 설정 침로 추종을 만족스럽게 수행하고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 RCGAs 기반의 T-S 퍼지 PID 제어기의 성능을 살펴보기 위해 Nomoto 2차 비선형 확장 모델을 사용하였다. Nomoto 2차 비선형 확장 모델은 선박의 동특성을 표현하기에는 많은 부분이 부족한 것이 사실이다. 따라서, 이후에는 선박의 6자유도 비선형 모델로부터 동작점 별 선형 상태방정식 모델과 퍼지멤버십함수로 이루어진 퍼지모델을 직접 구하고, 이를 이용해 퍼지상태관측기 및 퍼지최적제어기를 설계하는 연구를 수행하고자 한다. 특히, 모델링오차, 불확실성, 측정 센서 잡음, 환경적 외란 등에도 강인할 수 있도록 고려하고, LOS (Line Of Sight) 가이드선 시스템을 추가하여 계획된 항로로 선박이 운항되도록 유도하는 알고리즘을 추가하고자 한다.

References

- Ahn J, Lee C, Lee Y, Son J, Lee S and So M. 2010. Fuzzy modelling for design of ship's autopilot. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology* 34, 102-108. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2010.34.1.102>.
- Åström KJ and Häggglund T. 1995. *PID controllers: theory, design and tuning* (2nd Edition). ISA Press, 1-4.
- Bech MI. 1968. The reversed spiral test as applied to large ships. In: *Shipping world and shipbuilder*, 1753-1754.
- Bech MI and Wanger Smith L. 1969. Analogue simulation of ship maneuvers based on full scale Trials or free sailing model tests. Technical report Hy-14, Hydro- and Aerodynamics Laboratory, Lyngby Denmark, 1-24.
- Bhattacharyya SK and Gupta DK. 2014. Target Path Iteration method for trajectory control of ships. *Applied Ocean Research* 48, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.07.012>.
- Chen C, Lataire E and Delefortrie G. 2022. Experimental study of adaptive course controllers with nonlinear modulators for surface ships in shallow water. *ISA Transactions*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.08.005>.
- Fossen TI. 1994. *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Ltd., 1-480.
- Gao Z and Guo G. 2019. Adaptive heading tracking control of surface vehicles with unknown control directions and full state constraints. *Neurocomputing* 359, 517-525. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.06.091>.
- Gupta DK, Vasudev KL and Bhattacharyya SK. 2018. Genetic algorithm optimization based nonlinear ship maneuvering control. *Applied Ocean Research* 74, 142-153. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.03.001>.
- Hu X, Wei X, Han J and Zhang Q. 2020. Adaptive disturbance rejection for course tracking of marine vessels under actuator constraint. *ISA Transactions* 100, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.11.024>.
- Jin G. 2004. *Genetic algorithms and their applications*. KyoWooSa, Seoul, Korea, 1-377.
- Jin G and Joo S. 2000. A study on a real-coded genetic algorithm. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 6, 268-275.
- Jin G, Kim J, Lee H and Lee Y. 2018. *Intelligence system and its applications*. DaSom, 1-294.
- Kim S. 2002. *Understanding of Ship - Ch.4 Sec.4 Ship's maneuvering performance*. KORDI, 137-151.
- Koyama T. 1967. On the optimum automatic steering system of ships at sea. *Journal of the Japan Society of Shipbuilding*, Volume 1967, Issue 122, 18-35. https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1952.1967.122_18.
- Lee B. 2005. An optimal route decision and LOS guidance system for automatic navigation of ships. Ph.D. thesis, Korea Maritime & Ocean University, 1-136.
- Lee K and Oh K. 1991. *Fuzzy theory and their application*. Hongrung Publishing Company, 1.1-9.35.
- Lee S, Ahn J, Choi J, Son J, Lee Y and So M. 2007. Stabilization controller design of a container crane for high productivity in cargo handling using a RCGA. *J Navig Port Res* 31, 515-521.
- Lee Y. 2004. Robust speed control of marine gas turbine engines using Fuzzy-PID technique. Master's thesis, Korea Maritime & Ocean University, 1-53.
- Lee Y, Hwang S and Ahn J. 2022. Genetic algorithm-based design of nonlinear PID controller for the temperature control of load-following coolant systems. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 58, 359-366. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2022.58.4.359>.
- Nomoto K. 1960. Analysis of Kempf's standard maneuver test and proposed steering quality indices. *Proceedings of the 1st symposium on ship maneuverability*, David Taylor Model Basin, Washington DC, USA, Report 1461, 275-305.
- Ogata K. 2003. *Modern control engineering*, fourth edition.

- Pearson Education Korea and Scitech Media Inc., 229-235.
- Seo S, Kong I, Lee P, Kim Y, Park S, Park H, Son Y, Kin J and Son S. 1996. Development of advanced marine auto-pilot system. Korea Institute of Machinery and Materials, 1-87.
- Sohn K. 2001. Ship motion and maneuverability. Korea Maritime University, 1-280.
- Tagaki T and Sugeno M. 1985. Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-15, No. 1, 116-132. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>.
- Wang LX. 1996. A course in fuzzy systems and control. Prentice-Hall, 1-448.
- Xu P, Qin H, Ma J, Deng Z and Xue Y. 2023. Data-driven model predictive control for ships with gaussian process. Ocean Engineering 268, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113420>.
- Yim J and Youn M. 2003. Ship automation. OB, 1.1-6.20.
- Zwierzewicz Z, Dorobczyński L, Sosnowski M and Jaszczak S. 2022. Design of ship course-keeping system via adaptive control techniques. Procedia Computer Science 207, 936-945. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.149>.