

# 선박의 추진에너지를 고려한 PID형 자동조타기 설계

안중갑\* · 이창호\*\* · 이윤형\*\*\* · 최재준\*\*\*\* · 소명옥†

\*,\*\*\*,\*\*\*\* 한국항만연수원 교수, \*\* 동주대학 조선정보과 교수, † 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수

## Design of a PID-type Autopilot Concerned with Propulsive Energy of Ship

Jong-Kap Ahn\* · Chang-Ho Lee\*\* · Yun-Hyung Lee\*\*\* · Jae-Jun Choi\*\*\*\* · Myung-Ok So†

\*,\*\*\*,\*\*\*\* Korea Port Training Busan Institute, Busan 613-822, Korea

\*\* Department of Shipbuilding Information, Dongju College University, Busan 604-715, Korea

† Division of Mechatronics Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 대양 항행하는 거의 모든 선박에서 항해사를 지원하기 위해 선박의 회두각 유지 및 변침을 목적으로 사용되는 일반적인 자동조타기는 대부분 PID형 제어가 장착되어 있다. 선박 자동조타기의 제어기 계수는 운항 경제성 관점에서 선박의 추진 에너지 손실량(연료소비량)으로써 평가해야 한다. 본 논문에서는 선박 자동조타기의 정량적인 평가함수를 바탕으로 추진 에너지 손실량이 최소가 되도록 자동조타기의 제어이득을 구하고자 한다. 이 때 제약조건, 즉 설계사양을 고려한 RCGA를 이용하여 제어이득의 탐색을 실시하고, 시뮬레이션을 통해 제안한 방법을 검증한다.

**핵심용어** : 자동조타기, PID제어기, 에너지손실, 제약조건, 실수코딩유전알고리즘

**Abstract** : The PID controller type autopilot is applied to support shipmaneuvering for course-keeping and heading control. A control constants of autopilot system should be evaluated by promoting energy loss (fuel consumption) from the view point of economic efficiency of the ship. This paper is obtained control constants of autopilot system from the RCGA pursued the minimum energy loss. In addition, the controller which is designed involves a constrained optimization problem. The performance of the proposed method is demonstrated through a set of simulation.

**Key words** : autopilot, PID controller, energy loss, constraints condition, real-coded genetic algorithm(RCGA)

## 1. 서 론

현재까지 대양에서 항행하는 거의 모든 선박의 항로 결정과 항로의 추종 유도 작업은 주로 항해사들의 경험과 지식을 통하여 이루어져 왔다. 이런 항해사를 지원하기 위해 선박의 회두각 유지 및 변침을 목적으로 사용되는 자동조타기(Autopilot)는 대부분 PID형 제어가 장착되어 있으며, PID 제어기의 제어상수는 축적된 데이터와 항해사의 시행착오에 의해 적절하게 선정되고 있다. 그러나 선박 운항의 경제성 관점에서 살펴보면 시행착오(경험)를 통한 제어기는 적절하기 못하다. 왜냐하면 선박의 연료소비량 또는 추진 에너지 부분에서 큰 손실을 발생시키기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 손 등(1995)에 의해 도출된 평가함수를 자동조타기의 정량적인 평가에 사용하고, 제어기 설계 제약조건을 동시에 고려하여 운항의 경제성과 제어기 성능을 함께 만족시킬 수 있는 자동조타기를 설계하고자 한다.

한편, 일반적으로 제약조건이 고려되면 제어기 설계는 비선

형 최적화 문제로 간주할 수 있는데, 본 논문에서는 실수코딩유전알고리즘(RCGA:real-coded genetic algorithm)을 최적화 도구로 이용하기로 한다(이 외, 2007).

이와 같이 추진 에너지 손실과 제약조건을 고려한 자동조타기는 시뮬레이션을 통해 최종적으로 그 유효성을 입증한다.

## 2. 선박 자동조타 시스템의 수학적 모델 및 성능평가

### 2.1 자동조타 시스템의 구조

일반적으로 선박 자동조타 시스템은 Fig. 1과 같이 페루프 시스템으로 구성되어 있다.

조타기 작동에 의한 선체운동  $r$ 과 불규칙 외란에 의한 선체운동  $r_d$ 가 합성되어, 자이로컴퍼스를 경유하여 회두각  $\psi$ 가 되고 목표 침로각인  $\psi_r$ 과의 편차가 자동조타기로 피드백된다. 자

\* 대표저자 : 안중갑(중신회원), jjongabi@naver.com 051)621-0550

\*\* 정회원, chlee829@hanmail.net 051) 620-3752

\*\*\* 중신회원, domse54@daum.net 051) 410-4877

\*\*\*\* 정회원, floging@hanmail.net 051) 621-0550

† 교신저자 : 소명옥(중신회원), smo@hhu.ac.kr 051)410-4248

동조타기는 현재 침로  $\psi$ 와 목표 침로  $\psi_r$ 의 편차가 최소화되도록 파워유닛에 조타명령(명령타각)  $\delta^*$ 을 입력하게 되고, 파워유닛은 전기 신호인  $\delta^*$ 를 기계적인 변위인  $\delta$ 로 변환하여 조타기를 움직이게 된다.

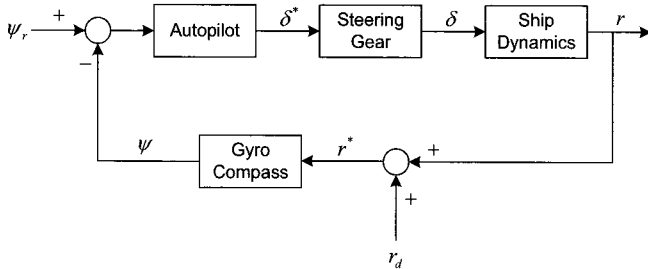


Fig. 1 Automatic steering system

## 2.2 선체운동

선체에 고정된 동좌표계를  $G-xyz$ 라 할 때, 동좌표계의 각 축을 관성주축이라 가정하면 부가질량을 고려한 조종운동 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$(m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr = X \quad (1)$$

$$(m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur = Y$$

$$(I_z + J_z)\dot{r} = N$$

식 (1)에서 조종운동이 미소하다고 가정하면 조종운동에 따른 선속 변화는 무시될 수 있고, 스웨이-요(Sway-yaw) 운동방정식으로 선형화하여 표시할 수 있다. 자동조타의 경우 선체운동(Ship dynamics)은 보침운동(Course-keeping)만을 다루기 때문에 타각에 대한 회두각속도의 선형 응답으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Nomoto, 1966).

$$T_1' T_2' \ddot{r} + (T_1' + T_2') \dot{r} + r' = K' \delta + K' T_3' \dot{\delta} \quad (2)$$

식 (3)과 같은 자이로컴퍼스(Gyrocompass)의 출력은 선박의 회두각( $\psi$ )이 된다.

$$\psi = \int_0^t r^* dt \quad \text{단, } r^* = r + r_d \quad (3)$$

여기서  $t$ 는 시간,  $r_d$ 는 바람과 파도에 의한 회두각속도로 환산한 불규칙 외란을 나타낸다.

조타기는 Nomoto(1973)가 제안한 수식을 사용한다.

## 2.3 자동조타기

자동조타기는 천해효과(Shallow water effect)와 같이 파라미터가 변화되는 환경조건에 대한 적응성을 가져야 하고, 정확하고 빠른 변침 능력을 가져야 하며, 회두각속도의 가속, 일정한 회두각속도, 회두각속도 감속의 과정을 통해 큰 회두각 변화에 대한 오버슈트를 회피하는 기능을 포함해야 한다(Fossen,

1999).

대부분의 선박에서 자동조타기로 구조가 간단하여 적용이 쉽고, 제어 성능이 우수하며 제어기 게인 조정이 비교적 쉬운 PID제어기를 사용한다.

그러나 본 논문에서 Fig. 1과 같은 시스템은 개루프 전달함수에 적분기가 1개 포함되어 있는 1형 시스템(원점에서 극 하나를 내포)이고, 또한 조타명령인 타각의 경우 단위계단입력으로 생각할 수 있으므로 최종값 정리에 의해 정상상태오차가 0이 된다는 사실을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 식 (4)와 같은 PD제어기를 사용한다.

$$\delta^* = -K_p(\psi - \psi_r) - K_D \dot{\psi} \quad (4)$$

## 2.4 선박 자동조타시스템의 성능평가

자동조타기의 주된 목적은 선박이 주어진 침로를 정확하게 유지하는 보침기능이다. 이런 자동조타기의 성능을 평가하기 위해 Hasegawa(1980)는 성능평가지수를 “자동 조타에 기인하는 파랑 중 항행시의 추진에 필요한 에너지의, 평수중 직진시의 추진 에너지로부터의 증가율”로 정의하고 이를 도출하였으며 그 결과 항로 연장, 조타 저항, 선회 원심력 저항에 의해 성능평가를 하였다. 손 등(1995)은 Hasegawa의 정의에 따라 선박의 조종운동을 나타내는 전후동요 운동방정식으로부터 추진 에너지 손실량의 관점에서 성능평가함수를 식 (5)와 같이 도출하였다.

$$J = \frac{1}{2} \overline{\psi^2} + \frac{a'_{rr}}{a'_{vv}} \overline{r'^2} + \frac{a'_{\delta\delta}}{a'_{vv}} \overline{\delta^2} \quad (5)$$

식 (5)의 각 항의 의미는 다음과 같다. 우변 제1항은 항로증가에 따른 에너지 손실량을 나타내고, 제2항은 회두각속도에 의한 원심력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다. 제3항은 조타에 의한 타각압력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다.

## 3. 제약조건과 에너지손실을 고려한 자동조타기 설계

### 3.1 유전알고리즘의 제약조건 취급

유전알고리즘은 1975년 J. H. Holland(1975)교수에 의해 처음 소개된 이후, Goldberg가 광범위하게 전파했으며, De Jong이 잠재적인 여러 탐색방향, GA의 성능에 영향을 미치는 동정 인자들의 영향력들을 요약하였다.

GA가 기존의 탐색법과 다른 점은 파라미터 자체를 사용하기 보다는 이를 기호로 표현하여 사용하며, 하나의 해를 다루기 보다는 해 집단을 취급한다. 그리고 연산자들이 확률에 기초하여 동작되므로 얻어지는 결과는 결정적이기 보다는 확률적이다. 다양한 최적화 문제를 해결하기 위하여 여러 종류의 유전알고리즘이 발표되었으나, 파라미터의 부호화, 초기 해 집단의 생성,

집단내 개체들의 적합도 평가, 기본 연산자의 사용과 같은 기본적인 메커니즘은 서로 유사하다(진, 2004).

유전알고리즘의 탐색 과정은 크게 집단의 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5단계로 구분된다.

본 논문에서는 변수(표현형)와 유전자(유전자형)간에 일대일 일치로 프로그래밍이 간편해지고 BCGA(Binary-coded genetic algorithm:이진코딩유전알고리즘)에서 요구되는 부호화, 복호화 프로세스가 필요 없게 되어 탐색속도를 높일 수 있는 실수코딩 염색체를 다루는 RCGA를 사용하기로 한다.

집단의 초기화에서는 탐색 공간상의 점들을 표현하는 방법이 결정되면 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들이 유전 연산자를 통해 모의진화가 수행될 초기 개체집단으로 형성된다.

적합도 평가는 식 (6)과 같은 최대화 형태를 사용한다.

$$f(s) = -F(\chi) - F_{\min} \quad (6)$$

여기서  $f(s)$ 는 적합도 함수,  $F(\chi)$ 는 목적함수,  $F_{\min}$ 은  $f(s) \geq 0$ 을 보장하는 상수이다.

또한, 본 논문에서 다루는 RCGA는 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 기본적인 유전 연산자로 채용하고 있다. 여기서 재생산은 구배와 유사한 재생산(Gradient-like reproduction), 교배는 수정단순교배(Modified simple crossover), 돌연변이는 동적 돌연변이(Dynamic mutation)를 사용하였다. 그리고 탐색성능을 높이기 위해 초기 세대에서는 우량 개체의 적합도 영향을 줄일 수 있도록 개체들의 적합도 값을 넓은 범위의 값 위로 분포시키고, 후기 세대에는 더 적합한 개체들이 더 많이 선택될 수 있도록 분포시키는 선형 스케일링(Linear scaling)과 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있다가 재생산-교배-돌연변이 연산을 거쳐 현 세대의 집단이 완성되면 최적 개체의 생존 유무를 확인하게 되고, 만일 최적 개체가 소멸되었으면 저장된 개체를 현 세대 집단 안에서 적합도가 가장 낮은 개체와 교환해 주는 엘리티즘(Elitism) 전략을 사용한다.

복잡한 최적화 문제에 유전알고리즘을 적용할 때 고려되어야 할 사항 중 하나는 제약조건을 어떻게 다룰 것인가 하는 것이다. 왜냐하면 주어진 문제에는 제약조건이 수반될 수 있고 또한 유전 연산자들이 염색체를 다루면서 부적합한 해를 생산할 수 있기 때문이다.

제약조건을 다루는 방법에는 크게 거부전략, 복구전략, 유전 연산자와의 보완 전략, 벌점전략으로 분류된다. 여기서는 본 논문에서 사용할 벌점전략 중 고정 벌점전략에 대해서 간단히 살펴보도록 한다.

흔히 제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해공간은 적합한 영역과 부적합한 영역으로 구성되기 때문에 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 될 때 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수 계산에 반영하면 제약조건이 따르는 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환할 수 있다.

대부분의 경우 제어 시스템은 다음과 같은 몇 가지 고려되어야 할 요소들을 가진다.

- 계단함수 입력에서 정의되는 최대오버슈트( $M_p$ )
- 지연시간( $t_d$ )
- 상승시간( $t_r$ )
- 정정시간( $t_s$ )
- 제한된 입력( $u$ ) 등

이외에도 제어 시스템 설계시 요구되는 사항들을 추가하여 고려되어야 할 요소로 선정할 수가 있다.

이러한 제약조건을 고려함으로써 제어기 설계문제는 복잡한 제약성 최적화 문제로 귀착되는데 그 해를 구하기 위해 유전알고리즘을 이용한다. 유전알고리즘이 자동조타기의 제어이득을 찾는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반(부적합한 영역을 탐색)할 때를 처리하기 위해 벌점전략을 채용하고, 그 위반 정도에 따라 벌점을 추가하도록 벌점함수  $P(\chi)$ 를 정의하였다.

$$F(\chi) = J(\chi) + P(\chi) \quad (7)$$

$$\text{단, } P(\chi) = \begin{cases} 0 & , \chi \text{가 적합한 해일 경우} \\ \sum_{j=1}^J w_j g_j^2 & , \chi \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases}$$

여기서  $w_j$ 는 각 제약조건에 대응되는 벌점상수로서 설계자에 의해 적절하게 선정되는 변수이며  $J(\chi)$ 는  $\chi$ 에 종속되는 목적함수 값이다.

이렇게 함으로써 제약성 최적화 문제는 시스템의 방정식을 만족하면서  $F(\chi)$ 를 최소로 하는 비제약성 최적화 문제로 변환된다.

### 3.2 자동조타기의 제약조건

대부분의 선박에서 사용하는 자동조타기용 PID 제어기는 사용 환경에 따라 설정치 추종(Set-point tracking)성능 또는 외란억제(Disturbance rejection)성능을 개선하도록 구분되어 동조된다. 지금까지 많은 동조규칙들이 제안되어 왔으나 대부분의 경우 경험과 실험을 바탕으로 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 설정치 추종 문제에 대해서 앞서 추진 에너지 손실량의 관점에서 살펴본 성능평가함수와 다음의 제약조건을 고려하여 자동조타기가 설계될 수 있도록 한다.

- (1) 선박의 변침시 오버슈트는 적절해야 한다.
- (2) 최단시간 내에 목표 침로각으로 선회해야 한다.
- (3) 목표 침로각에 정상편차 없이 도달하여야 한다.

위의 요소를 기본적으로 만족시키기 위하여 본 논문에서는 시스템의 계단 응답에 대한

$$\begin{aligned} \text{최대오버슈트}(M_p) & : g_1(\chi) = -M_p(\chi) \geq 0 \\ \text{상승시간}(t_r) & : g_2(\chi) = 100 - t_r(\chi) \geq 0 \\ \text{정정시간}(t_s) & : g_3(\chi) = 240 - t_s(\chi) \geq 0 \end{aligned}$$

과 같은 벌점함수를 선정한다.

### 3.3 제약조건과 에너지 손실을 고려한 평가함수

RCGA가 자동조타기의 제어이득을 탐색하기 위한 목적함수

로는 추진에너지 손실량을 고려한 성능평가함수인 식 (5)를 사용하고, 제약조건으로 취급되는 설계사양은 RCGA가 제어이득을 탐색시 위반 정도에 따라 벌점을 추가하도록 벌점함수  $P(\chi)$ 가 추가된 새로운 평가함수 식 (8)을 사용한다.

$$F(\chi) = \frac{1}{2}\bar{\psi}^2 + \frac{a'_{rr}}{a'_{VV}}\bar{r}^2 + \frac{a'_{\delta\delta}}{a'_{VV}}\bar{\delta}^2 + w_1g_1^2 + w_2g_2^2 + w_3g_3^2 \quad (8)$$

### 4. 시뮬레이션

#### 4.1 시뮬레이션 선박

시뮬레이션을 위한 선박은 대형 광석 운반선으로서 Table 1과 같으며, 추진에너지 손실을 고려하기 위한 평가함수의 유체력 계수, 조종성 지수 및 조타기는 Table 2와 같다. 그리고 조타기의 특성상수는 일반적으로 실선에서 채택되고 있는 수치를 사용하였다.

#### 4.2 RCGA를 이용한 자동조타기 제어이득 탐색

RCGA를 사용하여 자동조타기의 제어이득을 탐색하기 위한 목적함수는 식 (9)를 사용한다.

$$F(\chi) = \frac{1}{2}\bar{\psi}^2 + 29.35\bar{r}^2 + 4.66\bar{\delta}^2 + w_1g_1^2 + w_2g_2^2 + w_3g_3^2 \quad (9)$$

이때 사용된 RCGA의 제어변수로는 집단의 크기  $N=50$ , 재생산계수  $\eta=1.8$ , 교배확률  $P_c=0.95$ , 돌연변이 확률  $P_m=0.2$ 가 사용되었고, 각 제약조건에 대응되는 벌점상수는  $w_1(M_p$ 에 대한):  $1 \times 10^{50}$ ,  $w_2(t_r$ 에 대한):  $1 \times 10^{30}$ ,  $w_3(t_s$ 에 대한):  $1 \times 10^{30}$ 과 같이 설정하였다.

Table 1 Principal particulars of ore carrier ship

Items[Units]		Value
Hull		
Length B.P.	$L [m]$	247.0
Breadth	$B [m]$	40.6
Mean draft	$d [m]$	16.0
Trim	$\tau [m]$	0.0
Block coefficient	$C_B$	0.8243
Midship section coefficient	$C_M$	0.9975
Rudder		
Height	$H [m]$	9.94
Area ratio	$\frac{A_R}{Ld}$	$\frac{1}{60}$
Aspect ratio	$\lambda$	1.5
Propeller		
Diameter	$D [m]$	6.5
Pitch ratio	$\frac{P}{D}$	0.65

Table 2 Coefficient of characteristics of ship dynamics and steering gear

Items	Value[Unit]
$a'_{VV}$	0.0282
$a'_{rr}$	0.8290
$a'_{\delta\delta}$	0.1316
$T'_1$	6.86
$T'_2$	0.35
$T'_3$	0.78
$K'$	2.48
$T_E$	2.5 sec
$ \delta_{max} $	3.0 deg/sec
$2\delta_b$	1.0 deg
$\delta^*$	2.0 deg/sec

미지의 제어이득을 탐색하기 위한 구간의 경우  $0 \leq K_{PD} \leq 20000$ 으로 한다. 이때 선박의 초기 회두각은 0도이며, 목표 침로각을 30도로 하였을 경우 본 논문에서 제안한 방법에 의해 탐색된 PD제어기의 이득은 식 (10)과 같다.

$$K_P = 468.071843, K_D = 10506.530578 \quad (10)$$

Fig. 2는 RCGA가 제어이득을 찾는 하나의 예를 보여주고 있다.

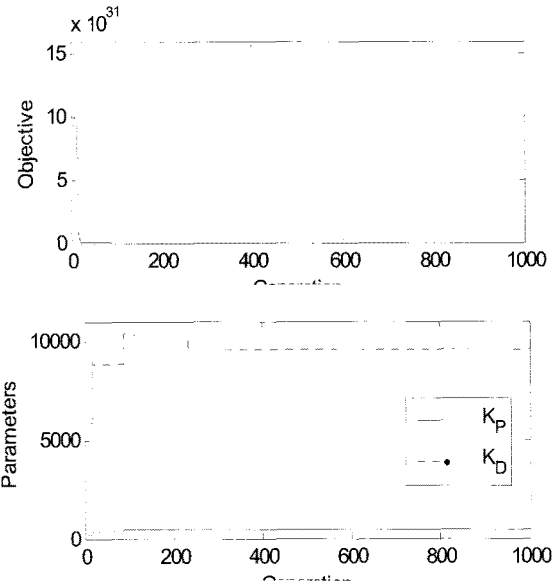


Fig. 2 Tuning process for PD controller concerned with energy loss and design specification

#### 4.3 자동조타기 시뮬레이션

Fig. 3은 현재 선수가 0도에서 30도로 변침하는 과정을 보여 준다. 단지 선수각의 오차만을 고려하여 선택된 자동조타기의 경우에는 오버슈트 2.03도, 상승시간 87.9초, 정착시간 207.55초, 정상상태오차 0, 추진에너지손실은 304343.9이고, 에너지손실과 설계사양을 모두 고려한 자동조타기의 경우에는 오버슈트 0도,

상승시간 93.79초, 정착시간 218.95초, 정상상태오차 0, 추진에너지손실은 288676.7이다. 따라서 추진에너지손실 측면에서 에너지손실과 설계사양을 모두 고려한 자동조타기가 설계사양을 만족시키면서 에너지손실이 적음을 알 수 있다.

을 고려했을 경우 그 목적을 이루지 못한 결과를 보여주고 있는 것이다. 따라서 추후 모든 변침에 대해서 설계사양을 만족할 수 있는 자동조타기의 설계가 필요할 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

침로오차만을 고려하여 설계된 자동조타기에 비해서 추진에너지와 설계사양을 고려한 자동조타기가 에너지 손실 측면에서도 양호한 모습을 보일 뿐만 아니라 자동조타기 설계시 제약조건으로 고려된 설계사양도 만족하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 다양한 변침각에 대한 선박의 운동을 살펴본 결과 30도이하의 변침각 명령에서는 설계사양을 만족하며 작동이 되었다. 이러한 결과에 의해 제안된 평가함수와 설계된 제어기가 본 논문에서 고려한 제어환경 내에서 추진에너지 손실을 최소화 할 수 있는 제어기 설계가 가능함을 확인하였다.

하지만 30도 이상인 50도[+20도 → -30도]에서는 실제 운항 환경에서는 무시될 수 있는 약간의 오버슈트(0.2도)를 하고 있음을 관찰할 수 있었는데, 앞으로의 연구는 이 부분을 해결할 수 있도록 각 명령 선수각에 따른 각각의 조건을 모두 만족시킬 수 있는 자동조타기에 대해서 연구하고, PID제어기에서 발생하는 와인드업(Windup)현상을 고려하여 안티와인드업(Anti-windup)을 할 수 있는 제어기를 연구하고자 한다.

### 후 기

본 연구는 2009년도 동명대학교 항만물류사업단의 지원을 받아 연구되었음에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 손경호, 이경우(1995), “선박 자동조타 시스템의 성능평가치수에 관한 고찰”, 대한조선학회지, 제32권 4호, pp.27-37.
- [2] 이수룡, 안종갑, 최재준, 손정기, 이윤형, 소명옥(2007), “실수코딩유전알고리즘을 이용한 하역생산성 향상용 컨테이너 크레인의 안정화 제어기 설계”, 한국항해항만학회지, 제31권 6호, pp.515-521.
- [3] 진강규(2004), 유전알고리즘과 그 응용, 교우사.
- [4] Fossen, T. I. (1999), “Recent Developments in Ship Control Systems Design”, World SuperYacht Review, Sterling Publication Limited, London pp.115-116
- [5] Hasegawa, K(1980), “On a Performance Criterion of Autopilot Navigation”, Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 178, pp.93-103.
- [6] Holland, J. H(1975), Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press, Michigan.
- [7] Nomoto, K. and Motoyama, T.(1966), “Loss of Propulsive Power Caused by Yawing with Particular Reference to

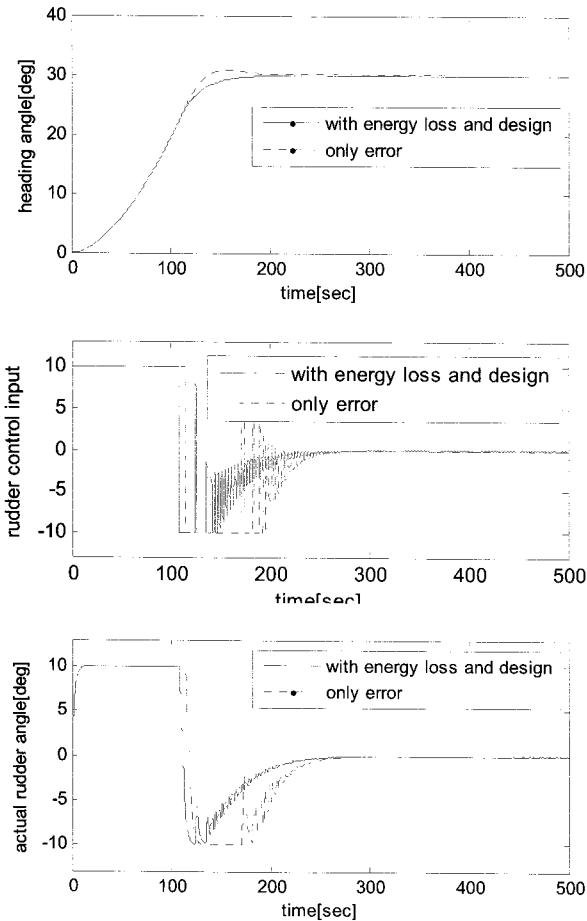


Fig. 3 Simulation of course change (0°→30°)

Fig. 4는 에너지손실과 설계사양을 모두 고려한 자동조타기인 식 (10)을 각각의 목표 침로각에 대해 시뮬레이션한 것이다. 주목할 부분은 30도로 침로유지 중 -20도로 변침 명령을 했을 때 약간의 오버슈트를 보인다는 것이다. 그 오차는 약 0.2도의 오버슈트를 보이고 있다. 선박을 운항함에 있어서 약 0.2도의 오버슈트는 무시될 수 있으나 제어의 관점에서는 설계사양을

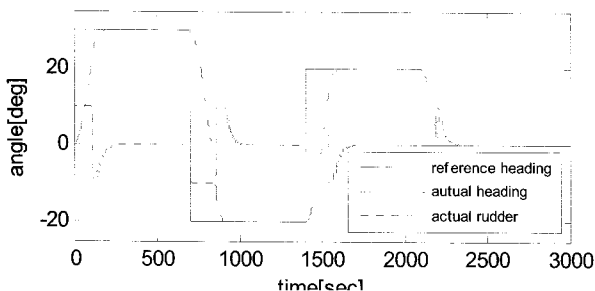


Fig. 4 Simulation of heading control system

Automatic Steering”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 120(in Japanese), pp.71-80.

- [8] Nomoto, K, Yoshimura, Y., and Kose, K.(1973), “A New Procedure of Analysing Zig-Zag Test”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 134(in Japanese), pp.183-192.

---

원고접수일 : 2009년 5월 21일

심사완료일 : 2009년 8월 17일

원고채택일 : 2009년 8월 26일