

자동조타기의 제어성능개선에 관한 연구

강 창 남

제주대학교 해양과학부

A study on the Improvement of control performance of Auto Steering System

Chang-Nam Kang

Faculty of Marine Science, C.N.U.

**Abstract** -Auto Steering System is the device for course keeping or course altering to ship's steering system. The purpose of automatic steering system is to keep the ship's course stable with the minimum course and rudder angle. Recently, modern control theories are being used widely in analyzing and designing the ship system. Though P.D type auto pilots are widely used in ships, the stability and the adjusting methods are not clarified. In this paper the authors proposed auto steering system with Fuzzy Logic Controller. In the fuzzy control the things that the actual operators of a steering wheel has acquired through their experience can be logically described by the Linguistic Control Rule. The characteristic of the control system were investigated through the computer simulation results. It was found that the fuzzy logic control was more efficient than the conventional system.

1. 서 론

선박에 있어서 자동조타장치는 조타기를 자동으로 제어하여 자동으로 변침시키거나 침로를 일정하게 유지하기 위한 장치이다. 자동조타장치는 1920년대에 Sperry Com.에서 최초로 제품화에 성공하였으며 그 후 1922년 Minorsky는 선박이나 항공기 등에 자동조종에 관한 연구 실험을 거쳐 당시에 사용되던 각속도 제어방식대신 미분비례제어방식의 필요성을 밝혔다 [1]. 1949년 Schiff는 선체운동의 해석에 있어서 비례 제어방식의 경우와 비례미분방식의 경우에 대한 연구를 행해진 후 선박의 침로 및 변침을 안정하게 하기 위하여 보상기를 도입한 제어계의 구성방식으로 PD 또는 PID제어기를 채택한 자동조타장치가 널리 이용하게 되었다[2]. 최근에는 최적제어이론에 의한 파라미터 최적화 또는 동적최적화가 연구 되고 있으며 여러 가지 평가함수에 대해서 모형 또는 실선 실험을 통하여 최적설계에 대한 연구와 AR(Auto Regressive)형의 자동조타장치 및 적응제어방식을 도입한 연구등도 많이 보고되었다[3]. 그러나 선박의 조타계는 비선형적인 성질을 지니며 제어파라미터는 선박의 처해진 상황에 따라 변화가 심하며 그때마다 제어방식 및 파라미터를 바꾸어 주어야 하는 등의 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 침로 변경 및 침로 유지 조타방식의 퍼지제어 알고리즘을 작성하고 퍼지 로직에 의한 자동 조타시스템을 작성하여 기존 PD제어방식과 시뮬레이션을 통하여 퍼지제어의 유효성을 확인하고 결과를 비교 분석 하는데 있다.

2. 본 론

선박의 자동조타로 항해할 경우 조타시스템을 구성하는 요소로서는 자동조타기, 타기, 엔진, 타 및 콤파스 등이 있다. 인간에 의한 조타의 경우에는 자동조타기 대신에 Quarter Master(Q/M)가 또한 본 논문에서 다루는 퍼지 로직 제어에 의한 경우는 Fuzzy Logic Controller가 대신한다. 조타의 목적은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 충돌 방지를 위한 침로 변경(Course Altering), 또 하나는 목적지 까지 직항 하기 위한 침로 보지(Course Keeping)이 있다. 이들을 변환 스위치를 이용하여 협수로 및 연안 항해 등 선박의 안정성을 중요시 하게 하는 항해에는 편각을 빨리 조절하여 정밀한 항로 유지가 가능하게 편각량만을 평가함수로 정하여 침로 변경 조타를, 원양 항해시는 안정된 항해 위주이므로 조타저항과 침로 편차에 대한 에너지 손실을 평가 함수로 두어, 침로보지 조타를 하게 한다.

따라서 침로 변경 조타에서는 조타시작에서 종료시 까지 시간  $\tau$ 를 최소로 하면 되므로 평가함수  $I$ 는 다음과 같다.

$$I = \int_0^{\tau} \theta^2 dt = \tau \rightarrow \min$$

침로 보지 조타에서는 항해시간 또는 연료소비를 평가함수로 잡으면 된다. 목표 침로보다  $\phi$ 의 오차가 발생되면 목표 방향의 속력 성분은  $V \cos \phi$ 로 되고 속력에 대한 손실은  $V - V \cos \phi \approx \frac{1}{2} V \phi^2$ 로 된다. 침로를 수정하기 위

한 타각  $\delta$ 를 나타내면  $V \lambda \delta^2$  ( $\lambda$ :정수)의 속력 손실이 있으며 따라서 평가함수  $I$ 는 다음과 같다.

$$I = \int_0^z \left( \frac{1}{2} \phi^2 + \lambda \delta^2 \right) dt \rightarrow \min$$

단  $z$ 는 도달전까지 거리를 속력  $V$ 로 나뉘어서 얻어진 시간이다. Fig.2는 이상에서 설명한 퍼지로직을 이용한 자동조타 시스템의 블록선도이다.

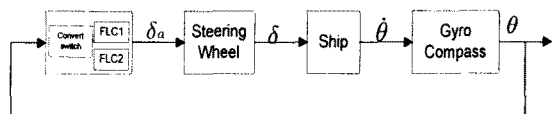


Fig.2 Block diagram of ship's steering system using fuzzy controller

선박의 운동 방정식은 다음과 같은 2계 선형 미방으로 표현 할 수 있다.

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\theta}{dt} + \theta + K(\dot{\theta})^3 = T_4 \delta + T_3 T_4 \frac{d\delta}{dt}$$

여기서  $T_1, T_2, T_3$  : 조종성능지수  $T_4$  : 조종이득정수  
 $\theta$  : 편각  $\delta$  : 타각  $\dot{\theta}$  : 편각속도  $\frac{d\delta}{dt}$  : 타각속도

$K(\theta)^3$  :비선형요소

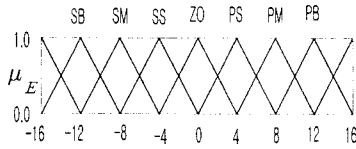


Fig.3 The representation of membership function of the deviation angle

변침 조타 방식인 경우에 퍼지 변수는 여러 가지 일상적인 경험에서 나오는 것을 종합하여 제어량인 편각으로는 PB, PM, PS, ZO, SS, SM, SB의 7개로 조작량인 타각으로는 편각의 반대개념인 PB, PH, PM, PI, PS, PJ, ZO, SJ, SS, SI, SM, SH, SB의 13개로 정하여 다양하게 사용가능하며, 퍼지 변수의 대집합은 [-16, 16]로 정하고 멤버십 함수를 결정한다. 멤버십 함수는 대집합에 대하여 규격화하여 일반적으로 많이 사용하는 삼각형의 함수 형태로 정의하였다. Fig3은 편각에 대한 함수식을 도식한 것이다. 멤버십 함수식을 대집합에 대하여 집합요소의 간격을 1로 하여 퍼지집합 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu_{SB} = (0.0/-16, 2.5/-15, 5.0/-14, 7.5/-13, 1.0/12, 7.5/11, \dots, 0.0/15.0, 0/16)$$

$$\mu_{SI} = (0.0/-16, 0.0/-15, 0.0/-14, 0.0/-13, 0.0/12.25/11, \dots, 0.1/15, 0.0/16)$$

$$\mu_{PB} = (0.0/-16, 0.0/-15, 0.0/-14, 0.0/-13, 0.0/12.0/11, \dots, 0.25/15.0/16)$$

사선의 좌변은 각각 Membership값을 우변은 대집합의 값이다. Fig.4은 조작량인 타각에 대한 규격화 함수식을 도식화 한 것이며 타각에 대해서는 우현타가 플러스로 좌현타가 마이너스로 표현 되어 있다.

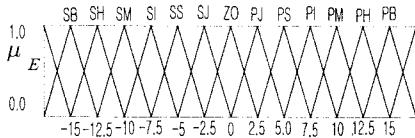


Fig.4 The graphic representation of membership function of the rudder angle

제어규칙은 Q/M의 경험에 의하여 편각을 빨리 제거하기 위하여 보다 큰 타각을 사용한다.

Table 1 Fuzzy logic control rule considering the deviation angle for FLC1

- $R^1$  : If D=SB then RA=PB or
- $R^2$  : If D=SM then RA=PH or
- $R^3$  : If D=SS then RA=PI or
- $R^4$  : If D=ZO then RA=ZO or
- $R^5$  : If D=PS then RA=SI or
- $R^6$  : If D=PM then RA=SH or
- $R^7$  : If D=PB then RA=SB

단 D=Deviation Angle RA=Rudder Angle  
 SB=Starboard Big SM=Starboard Medium  
 SS=Starboard Small ZO=Zero  
 PB=Port Big PM=Port Medium  
 PS=Port Small SH=Mean of SB and SM  
 SI=Mean of SM and SS SJ=Mean of SS and ZO  
 PH=Mean of PB and PM PI=Mean of PM and PS  
 PJ=mean of PS and ZO

다음은 퍼지관계의 min-max합성 규칙에 따른 추론과정이다[5]. 적합도는  $\omega_i = \mu_{Ai}(x_0) \wedge \mu_{Bi}(y_0)$ 에 의하여 구해지며 전건부 변수는 편각 1개이므로 Min과정을 거치지 않고 직접 구하며 추론결과

$\mu_{C_i}'(u) = \omega_i \wedge \mu_{C_i}$ 이고 전체적인 추론 결과는  $\mu_C'(u) = \mu_{C_1}'(u) \vee \mu_{C_2}'(u) \dots \vee \mu_{C_m}'(u)$ 으로 구해진다. 마지막으로 최종적인 퍼지집합 C'의 대표값  $u_0$ 을 구하는 조작을 비퍼지화라 부르고,  $u = \sum u_i \mu_C'(u_i) / \sum \mu_C'(u_i)$ 로 정의되는 무게중심법 (centroid of gravity method)을 이용하여 계산한다. 여기서 사용된 전건부 변수는  $x_1 * 3.0^\circ$ 로 가정하였다. 전건부 변수가  $3.0^\circ$ 로 입력된 경우 제어규칙 4, 5번을 제외하고는 제어규칙의 적합도가 0.0으로 되고  $R^4, R^5$ 는 각각 0.25, 0.75이다. 샘플링 간격  $\tau$ 는 선박의 경우  $f_{max}$  (Spectrum)의 최고 주파수가 약 0.5c/s 이므로,  $\tau$ 는 0.1(sec)정도이나 시정수가 크므로 실용상 0.2(sec)정도도 충분하다. 다음은 편각의 크기 뿐 만 아니라 편각의 변화량도 동시에 고려하여 조타한다. 이런 사항을 이용하여 제어 규칙을 구성한다. 편각과 타각에 대한 변수 외에 편각의 변화량에 대한 변수로서 BD,SD,ZO,SI,BI 5개를 사용한다. 퍼지 변수의 대집합은 편각에 대해서는 앞에 서술한 대로 이고 편각의 변화량에 대해서는 규격화 구간을 [-1.5 1.5]로 두었다. 멤버십함수는 편각과 타각인 경우는 서술한 대로 이고 편각의 변화량에 대해서는 Fig.5와 같다.

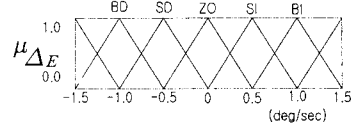


Fig.5 The graphic representation of triangle membership function of the deviation angle velocity

단 BD: Big Decrease SD: Small Decrease ZO : Zero SI : Small Increase BI : Big Increase

제어규칙은 Q/M의 경험에 의하여 편각을 빨리 제거하기 위하여 보다 큰 타각을 사용하여 Table 3(a)와 같이 구성하였다. if -then 형식대신 35개의 규칙을 축약한 상단 표기하였고 제어규칙은 행렬로 표현하여  $R^1(1,1), R^2(1,2), R^{34}(7,4), R^{35}(7,5)$ 순으로 되어 있다. 편각의 변화량에 대한 퍼지변수는 멤버십함수나 집합형태로 표현되어 추론과정은 전건부 변수가 2개 즉 편각과 편각변화량이라는 것을 알 수 있으며 min합성에 의하여 적합도를 구하게 된다.

Auto pilot에 의한 침로 유지의 경우 Steering engine을 통하여 타에 가해지면 편각속도가 발생하고 적분량인 편각을 제한시켜 침로를 조종한다. Q/M의 경우는 타각을 경험에 의하여 적절하게 조종함으로서 침로를 안전하게 제어한다. 반면에 퍼지제어는 Q/M의 축적된 경험과 이론적인 연구 결과로부터 제어 규칙을 작성하여 퍼지 관계를 구하고 퍼지 추론에 의하여 제어 입력인 타각을 결정하여 선박을 제어하게 된다. 침로 변경 조타 방식은 Q/M의 경험에 비추어 타각은 편각의 크기에 반대 방향으로 동일한 크기만큼을 줌으로서 제어가 가능하다는 논리를 이용하여 퍼지논리를 작성하고 제어를 실행하고자 한다. 전건부 변수나 후건부 변수에 대한 조건이 침로 변경조타 방식과 동일하며 단지 제어규칙만 Q/M의 경험과 조타로 인한 저항증가 선속 감소등의 사실을 고려하였으며, Table 2와 같다.

Table 2 Fuzzy Logic control rule considering the deviation angle for FLC2

- $R^1$  : If D=SB then RA=PM or
- $R^2$  : If D=SM then RA=PI or

- R<sup>3</sup> : If D=SS then RA=PJ or
- R<sup>4</sup> : If D=ZO then RA=ZO or
- R<sup>5</sup> : If D=PS then RA=SJ or
- R<sup>6</sup> : If D=PM then RA=SI or
- R<sup>7</sup> : If D=PB then RA=SM

편각 및 편각속도를 고려한 경우에도 모든 조건들이 침로 변경 조타방식과 같으며 제어규칙만 Table.3(b)과 같이 구성한다.

Table 3 Fuzzy logic control rule considering the deviation and deviation angle velocity for FLC2

D							D						
DV	SB	SM	SS	ZO	PS	PMPB	DV	SB	SM	SS	ZO	PS	PMPB
BD	PM	PS	PJ	SS	SB	SB	BD	PS	PJ	SJ	SS	SI	SI
SD	PH	PI	PS	SJ	SM	SH	SD	PI	PS	ZO	SJ	SS	SM
ZO	PB	PM	PI	ZO	SI	SM	ZO	PM	PI	PJ	ZC	SJ	SI
SI	PB	PH	PMP	PJ	SS	SI	SI	PB	PM	PS	PJ	ZO	SS
BI	PB	PB	PB	PS	SJ	SS	BI	PB	PH	PI	PS	PJ	SJ

(a) FLC1

(b) FLC2

D: Deviation angle DV: Deviation Velocity

편각 및 편각속도에 의한 퍼지제어 종래의 PD제어로 구분하였으며 선박의 운동방정식은  $T_1 T_2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\theta}{dt} + \theta + K(\theta)^3 = T_4 \delta + T_3 T_4 \frac{d\delta}{dt}$  와 같이 나타내고 이를 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$X = AX + B\delta + D(\dot{\theta})^3 \quad Y = CX$$

$$\text{단 } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -(T_1 + T_2)/T_1 T_2 & 1 \\ 0 & -1/T_1 T_2 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ T_3 T_4 / T_1 T_2 \\ T_4 / T_1 T_2 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{pmatrix} \quad X' = (\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad ({}^t = \text{transpose}), \quad C = (1, 0, 0)$$

### 3. 모의 실험 및 분석

편각 및 편각속도에 의한 퍼지제어 종래의 PD제어로 구분하였으며 선박의 운동방정식은  $T_1 T_2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\theta}{dt} + \theta + K(\theta)^3 = T_4 \delta + T_3 T_4 \frac{d\delta}{dt}$  와 같이 나타내고 이를 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

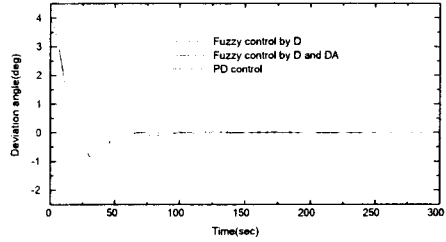
$$X = AX + B\delta + D(\dot{\theta})^3 \quad Y = CX$$

$$\text{단 } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -(T_1 + T_2)/T_1 T_2 & 1 \\ 0 & -1/T_1 T_2 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ T_3 T_4 / T_1 T_2 \\ T_4 / T_1 T_2 \end{pmatrix}$$

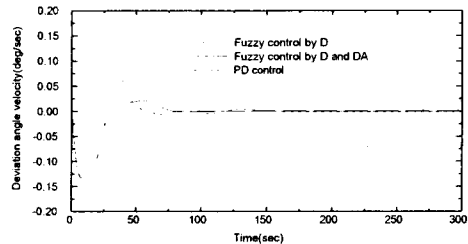
$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{pmatrix}$$

X'=(θ, θ̇, θ̈) ({}^t=transpose), C=(1,0,0)  
 시뮬레이션 시간은 300초로하고 초기조건과 외란을 달리하는 경우에 조타방식에 따라 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 사용한 선박은 전장 125m, 배수톤수 6000(k/t)인 만재화물선이고 조종성능지수는 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>는 각각 45, 6, 10이다. 조종이득정수 T<sub>4</sub>=0.08로 주어졌다. P D제어의 경우 입력타각은 δ<sub>a</sub>=-K<sub>p</sub>θ -K<sub>d</sub>θ̇로 하였다. 이 경

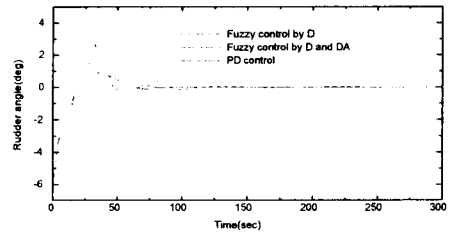
우 K<sub>p</sub>=1.0, K<sub>d</sub>=1.0으로 하였다. 또한 비선형 계수 K=0.1로 하였다. Fig.7은 침로 변경 조타인 경우에 초기 편각을 4.0(deg), 초기 편각속도를 0 (deg/sec)로 했을 경우에 모의 실험을 한 결과이다. 그림에서 보면 퍼지제어가 침로를 회귀하는데 걸린 시간에서는 각각 PD에는 62초, FLC에서는 64초, 57초로 나타나서 PD제어인 경우와 거의 비슷하게 나타났으며 평가함수에서는 퍼지제어가 PD제어에 비해 76.3%정도로 나타났다. 또한 타각을 보면 고도의 숙련자 와 유사한 조타가 됨을 알 수 있다.



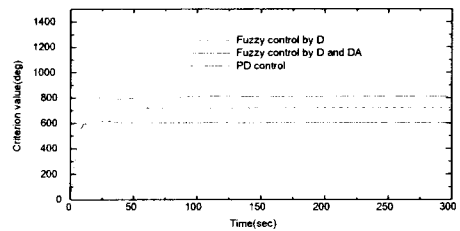
(a) in case of deviation angle(deg)



(b) in case of deviation angle velocity(deg/sec)



(c) in case of rudder angle(deg)

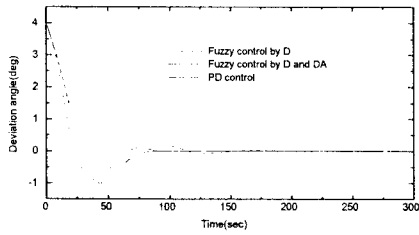


(d) in case of criterion value(deg)

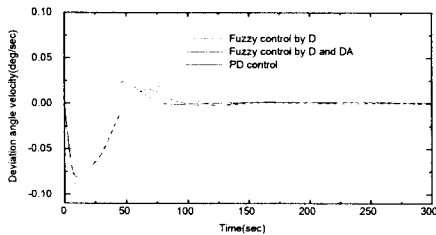
Fig.7 Simulation results in case of course altering method

Fig.8은 침로 유지 조타인 경우에 초기 편각을 4.0(deg), 초기 편각속도를 0 (deg/sec)로 했을 경우에 모의 실험을 한 결과이다. 퍼지제어인 경우는 PD제어에 비해

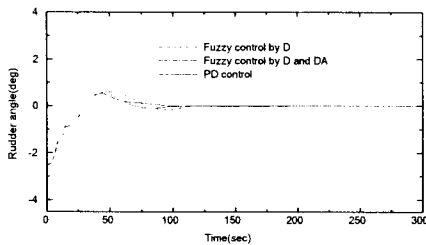
원 침로로 복귀하는 시간에서 80, 82초로 다소 느리지만 적절한 타 사용으로 평가 에너지 손실 면에서는 PD제어에 비해 67%정도로 양호한 결과치를 나타낸다. 또한 오버슈트면에서 편각 및 편각속도, 타각의 크기가 상당히 퍼지 제어를 한 경우가 억제됨을 알 수 있다.



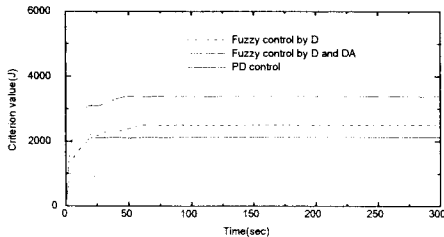
(a) in case of deviation angle(deg)



(b) in case of deviation angle velocity(deg/sec)



(c) in case of rudder angle(deg)



(d) in case of criterion value(J)

Fig.8 Simulation results in case of course keeping method

#### 4. 결 론

퍼지제어에 의한 선박의 자동조종시스템을 구상하여 모의 실험을 행하여서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원침로를 회귀하는 시간면에서 침로변경 조타방식에서는 퍼지제어가 우수하였으며 침로보지 조타방식에서는 PD제어가 우수하였다.
2. 평가함수면에서는 PD제어에 비해 퍼지제어가 변

침조타인 경우는 76.3%정도로 우수하고 침로보지 조타인 경우는 64%정도 우수하였다.

3. 오버슈트가 퍼지제어쪽이 상당히 억제되는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 퍼지제어를 채용하는 것이 충분히 우수하다는 결론을 도출해 냈으며 또한 논리 규칙의 변경을 통하여 여러 대상에 대한 제어가 실현 가능하고 상황에 적응이 최적인 제어를 고안하면 양호한 고효율의 선박 자동조타장치의 시스템 자동화가 실현 가능하리라 본다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 제주대학교 학술연구비의 지원에 의해 연구 되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] N.Minorsky, " Directional stability of automatically steered bodies", J. of ASNE.34. 1922.
- [2] 이철영, 김시화, 김환수, "P.I.D.형 자동조타장치에 관한 약간의 고찰", 한국항해학회지, 9(2), pp13-26, 1985.
- [3] K.J.Astrom, "Why use adaptive techniques for steering large tankers ", Int. J.Control, Vol.32, No. 4, pp.689-708, 1979
- [4] 菅野道夫, "フアジイ制御", 日本工業新聞社, pp.5-25, 1988.
- [5] 水本鶴青, "フアジイ制御向きの推論法", 計測と制御, Vol.28, pp. 17-21, 1989.
- [6] 채석, 오영석 " 퍼지 이론과 제어" 청문각, pp233-246. 1995.