

퍼지 제어기법에 따른 선박용 유압조속기의 제어특성 및 성능개선에 관한 연구

강 창 남*

A Study on the Improvement of Control Characteristic and Performance
of the Marine Mechanical - Hydraulic Governor using Fuzzy Control Scheme

C. N. Kang

Key words : Fuzzy controller(퍼지제어기), Fuzzifier(퍼지화기), Control Rule Base(제어규칙
베이스), Inference Engine(추론엔진), Defuzzifier(비퍼지화기)

Abstract

The propulsion marine diesel engine has been widely applied with a mechanical-hydraulic governor to control the ship speed for long time. But it was recently very difficult for the mechanical-hydraulic governor to control the speed of engine under the condition of low speed and low load because of jiggling and hunting by rough fluctuation of rotating torque.

To solve these problems of control systems, the performance improvement of mechanical-hydraulic governor is required.

In this paper, In order to analyze the speed stability of control systems, the influence of parameters of the engine dead time, gain, damping ratio was discussed on the view of control engineering. The performance improvement of a conventional mechanical hydraulic governor is confirmed to be possible by fuzzy control scheme.

1. 서 론

선박 추진용 기관의 속도제어는 종래의 기계 유압식 조속기가 많이 사용되어 왔으나, 최근의 선박용 디젤기관은 경제적인 면에서 저속, 장행정화, 소수실린더화함으로서⁽¹⁾ 시간지연 및 토크변동으

로 인한 지글링 및 헌팅현상등이 발생하여 효율적으로 속도제어를 하기에는 매우 곤란하게 되어 디지털 조속기가 많이 사용되고 있는 실정이다.^(2,3)

그러나 고열, 염분 및 해상의 열악한 환경으로 인한 디지털조속기의 전자소자등에 고장이 발생할 가능성이 크고 그럴경우의 백업장치의 부재로 선

* 정회원, 제주대학교

박사고의 원인이 될수도 있다.

따라서 본 논문에서는 신뢰성이 높은 기계-유압식 조속기의 성능을 개선하기 위하여 선박제어 계통의 전달함수를 유도하고,⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 조속기의 최적의 파라메타 값을 찾아내어 분석하고^{(6)~(8)}, 퍼지제어 기법을 도입하여^{(9)~(11)} 본 시스템에 적용하면 종래의 기계-유압식 조속기도 제어성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하고자 한다

2. 선박속도제어 계통의 전달함수

선박 속도제어 계통은 조속기, 엔진, 회전계통등 크게 세부분으로 구성되며 블록선도는 Fig. 2.1과 같다.

여기서 $N_R(s)$, $N_E(s)$, $Z(s)$, $P_e(s)$, $P_s(s)$, $N(s)$, $N_G(s)$ 는 다음과 같다.

- $N_R(s)$: Preset speed (RPM)
- $N_E(s) : N_R(s) - N_G(s)$ (RPM)
- $Z(s)$: Displacement of power piston(inch)
- $P_e(s)$: Output power of engine(HP)
- $P_s(s)$: Disturbance power(HP)
- $N(s)$: Propeller speed (RPM)
- $N_G(s)$: Speeder spindle speed (RPM)

브릿지나 엔진 제어실에서 속도지령에 따라 회전수의 목표치가 주어지면 조속기의 레버를 통하여 엔진의 연료 분사 계통에 신호가 전달되어 엔진 출력의 증감으로 목표치 회전수에 전달된다.

2.1 조속기의 수학적 모델링 및 동특성방정식

Fig. 2.2는 선박추진엔진에 많이 사용되고 있는 Woodward사의 기계-유압식 조속기의 개략도이

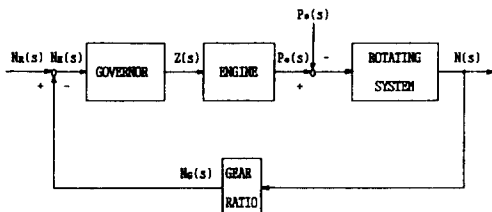


Fig. 2.1 Block Diagram of the Ship Propulsion Speed Control System

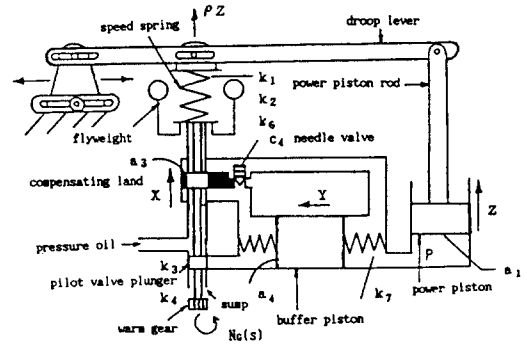


Fig. 2.2 Schematic Diagram of PG Governor

다. 이 조속기는 Fig. 2.2와 같이 용수철의 인장력을 받는 버퍼피스톤에 의하여 유압보상되고 있다. 유압보상장치는 과도상태에서 니들밸브의 개도를 조절하여 속도의 일시적인 드루프(Droop)를 조절한다. 상부 드루프레버를 통해 파워피스톤의 움직임이 스피드 스프링에 피드백 되어진다.

조속기에 영향을 미치는 각부분의 방정식을 정리하면 조속기의 동특성방정식은 식(2.1)과 같이 전형적인 2차계로 표현된다.⁽¹²⁾

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta N_E(s)} = \frac{\Delta Z(s)}{\Delta N_R(s) - \Delta N_G(s)} = \frac{a_2(S+a_3)}{S^2 + \beta_1 S + \beta_2} = \frac{a_2(S+a_3)}{S^2 + 2\zeta\omega_n(s) + \omega_n^2} \quad (2.1)$$

2.2 엔진 및 회전계통의 전달함수

2.2.1 엔진의 전달함수

엔진 출력은 근사적으로 조속기 파워피스톤의 변위에 비례하고 과도상태에서 시간지연이 L초라고 하면 연료액 동작후 L초후에 출력이 변하므로 엔진의 전달함수는 식(2.2)로 표현할 수 있다.⁽¹²⁾⁽¹³⁾

$$G_E(s) = \frac{\Delta P_E(s)}{\Delta Z(s)} = K_e e^{-Ls} \quad (2.2)$$

여기서, K_e : 엔진의 정상상태 이득

L : 엔진의 시간지연(s)

엔진의 지연시간은 e^{-Ls} 로 나타나는데 매트랩(MATLAB)에서 지원하는 PADE의 2차근사법을 택하여 식(2.3)로 한다.⁽¹⁴⁾

$$e^{-Ls} \approx \text{PADE}(L, 2) \quad (2.3)$$

2.2.2 회전계통의 전달함수

회전계통의 정상이득은 프로펠러 법칙곡선의 동작점에서 기올기이며 선박 시운전 결과로부터 구한 회전계통의 전달함수는 식(2.4)와 같다.⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

$$G_R(s) = \frac{\Delta N(s)}{\Delta P_e(s) - \Delta P_s(s)} = \frac{K_T}{\alpha_r + S} \quad (2.4)$$

또한 저속엔진과 고회전 조속기 스피드스핀들 사이에 있는 워엄기어(Worm Gear)의 치차수비를 K_f 라 하면 이들 속도비는 식(2.5)처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta N_G(s) = K_f \Delta N(s) \quad (2.5)$$

2.3 속도제어 시스템의 전달함수와 시스템의 파라미터

2.1.2.2 절에서 유도한 각 전달함수를 이용하여 선박의 주기관 회전수 제어 계통의 블록선도 및 전달함수는 Fig. 2.3과 같이 표시된다.

Fig. 2.3으로 부터 시스템의 전달함수 즉 엔진 속도에 대한 기준 입력과 출력사이의 전달함수를 구하면 식(2.6)과 같고 이때 개루프 전달함수는 식(2.7)과 같다. 단, 외란으로 작용하는 $\Delta P_s(s)$ 는 작용

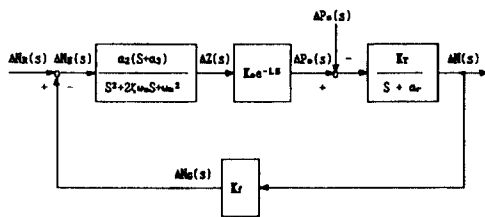


Fig. 2.3 Block Diagram of the Propulsion Speed Control System

하지 않는 것으로 간주한다.

$$G_N(s) = \frac{\Delta N(s)}{\Delta N_R(s)} = \frac{G(s)}{1 + K_f G(s)} \quad (2.6)$$

$$G(s) = \frac{\alpha_2(S + \alpha_3)}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} K_e e^{-Ls} \frac{K_T}{S + \alpha_r} \quad (2.7)$$

2.4 시스템의 파라미터

본 논문에서 적용된 엔진과 프로펠러에 대한 모델사양 및 파라미터 상수는 다음과 같다.

엔진사양

TYPE	: MAN - B&W 6L60MCE
NO. OF CYLINDER	: 6
STROKE × BORE	: 1,944mm × 600mm
M.C.R	: 10,800 BHP 111 RPM
Mean Effective Pressure	: 13.3Kg/cm ²
Total Moment of Inertia	: 5,816Kg - m - sec ²
F.O Consumption Rate	: 123g/BHP.Hr

프로펠러사양

Dia of Propeller	: 6,150mm
Material	: Ni - AL - Bronze
Moment of Inertia	: 3,975Kg - m - sec ²

위의 선택된 모델들에 대한 해상 시운전 결과 측정된 파라미터 상수는 Table 2.1과 같다.

여기서 K_e , K_l , K_r , T_r , K_t , α_r 의 파라미터는 계산 결과로 얻어지며 엔진의 시간지연(Time Delay) L 은 $15/N < D.T < 15/N + 60/N.n$ 로 계산 하였다.

(N : 엔진의 회전수, n : 회전에 착화 하는 실린더수)

Table 2.1

BHP	9671	7300	5395	3840	2606	1663	1975
RPM	110	100	90	80	70	60	50
Parameter							
K_e	29.26	29.26	29.26	29.26	29.26	29.26	29.26
K_l	248.6	237.1	190.5	155.5	123.4	94.3	68.8
K_r	0.004	0.005	0.006	0.008	0.010	0.015	0.020
T_r	6.3	7.2	7.3	8.7	10.1	11.9	14.5
K_t	0.0006	0.0007	0.0008	0.0008	0.0009	0.0010	0.0013
α_r	0.159	0.139	0.137	0.115	0.099	0.084	0.069
L(s)	0.22	0.25	0.28	0.31	0.36	0.41	0.50

3. 퍼지제어 기법

퍼지이론(Fuzzy Theory)이란 불분명한 수학적 정보를 다루는 수학적 기법의 일종으로서, 인간의 주관적 사고나 판단의 애매모호성을 다루기 위하여 미국의 Zadeh, L교수에 의해 1965년에 제안된 이론이다. 퍼지이론의 특징은 첫째 인간의 정확한 지식뿐만 아니라 애매한 지식을 언어변수로 이용할 수 있기 때문에 인간과 비슷한 판단을 내릴 수 있다는 것이고, 둘째는 비교적 인간의 간단한 지식을 사용하고 있기 때문에 쉽고 저렴하게 적용이 가능하며, 셋째로 복잡하고 모형화 하기 힘든 시스템에 적용하는데도 가능한 것으로 요약할 수 있다.

1965년 Zadeh가 퍼지집합을 소개한 이후 퍼지 집합과 퍼지논리에 대한 이론적 또는 실험적 연구 결과가 많이 발표 되었으며 1973년 Mamdani가 퍼지논리를 실험실에서 스팀 엔진제어에 처음으로 적용하였다.⁽¹⁷⁾ 네덜란드의 시멘트공장 제작회사인 F.L.Smith & Co는 1979년 세계에서 최초로 퍼지논리를 시스템의 자동화에 적용하였다.⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

Mamdani의 연구 결과는 퍼지논리를 시스템제어에 응용하는 촉진제 역할을 하였으며 이후 여러 방면에 걸쳐 퍼지논리가 적용되었고, 적용결과 퍼지논리제어시스템(FLCS)이 기존의 시스템보다 우수하다고 보고되었다. 1990년부터 퍼지논리를 이용한 세탁기, VCR, Camcorder, 공조기등이 상품화 되었다.

퍼지제어시스템에서 퍼지제어기는 퍼지화기(fuzzifier), 제어규칙베이스(control rule base), 추론엔진(inference engine), 비퍼지화기(defuzzifier)로 구성된다. 퍼지제어시스템의 블록 다이어그램은 Fig. 3.1과 같다.

GUI(Graphic User Interface)를 지원하여 뛰어난 인식성과 객제지향 개념의 도입으로 프로그램

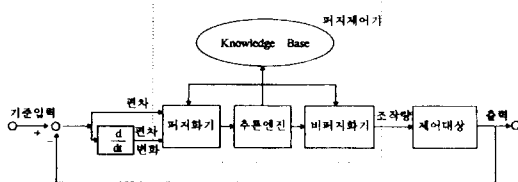


Fig. 3.1 Block Diagram of the Fuzzy Control System

의 인식성이 뛰어난 MATLAB-Simulink와 2절에서 기술한 파라미터값들을 이용하여 니콜슨 선도를 그린 결과, $\zeta=1.0$, $\alpha_3=5.24$, $\omega_n=10.47$ (rad/sec), 전체이득=26의 값이 주어질때 시스템은 안정한계에 다달으며, 그때 응답곡선은 선도의 원점을 통과하므로 이를 기준 파라미터로 하여 시뮬레이션을 행하였다. 퍼지제어기의 성능에 영향을 미치는 요소는 다음과 같다.

1) 입출력 변수의 종류

입출력 변수(E, CE, U)의 언어값과 그들의 소속함수는 각각 Fig. 3.2, Fig. 3.3, Fig.3.4와 같다. 입출력변수의 퍼지화 방법으로는 퍼지이등변 삼각형

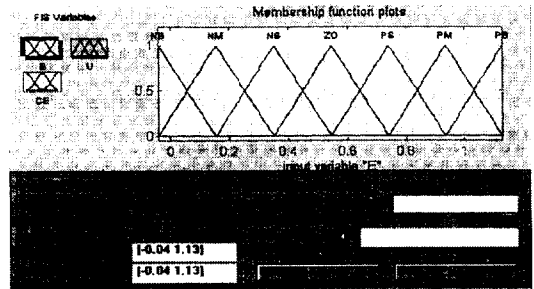


Fig. 3.2 Membership Function for Input Variable E

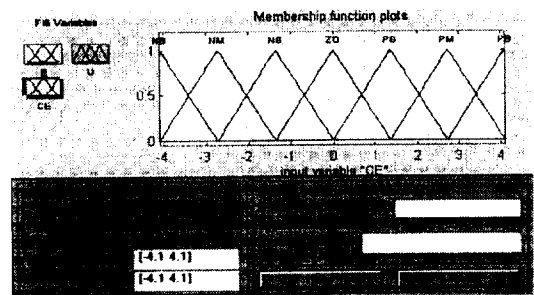


Fig. 3.3 Membership Function for Input Variable CE

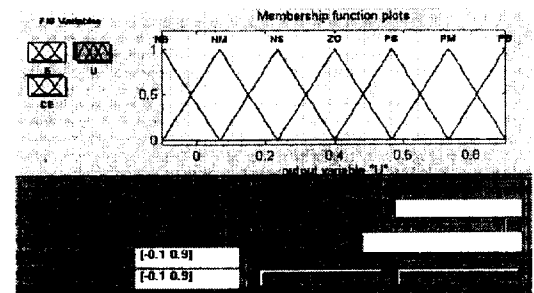


Fig. 3.4 Membership Function for Output Variable U

법을 사용하였다.

2) 제어규칙

본 제어시스템은 각각 13개 19개 49개의 제어규칙을 사용하여 비교 하였으며 ,이때 사용된 제어규칙은 Table 3.1, Table 3.2, Table 3.3과 같다. 가로는 입력 변수 E(Error), 세로는 입력변수 CE(Change of Error)이며 표안의 값은 출력 값이다.

Table 3.1

E \ CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB				NB			
NM				NM			
NS				NS			
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS				PS			
PM				PM			
PB				PB			

Table 3.2

E \ CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB				NB	NM		
NM				NM			
NS				NS	ZO		PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM		ZO	PS			
PM				PM			
PB			PM	PB			

Table 3.3

E \ CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

3) 추론법 및 비퍼지화방법

추론법으로는 Mamdani Method라 불리는 Max - Min 방법을 채택하였고 비퍼지화 방법으로는 멤버십 함수의 무게 중심이 되는곳을 제어값으로 취하게 되는 방법으로 무게중심법(Centroid)을 채택하였다.그리고이를 최대평균법(Middle Of Maximum : MOM), 최대극소법(Smallest Of Maximum : SOM)과 비교하였다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

2절에서 기술한 선박속도제어시스템에 대하여 GUI(Graphic User Interface)를 지원하여 뛰어난 인식성과 객체지향 개념의 도입으로 프로그램의 이식성이 뛰어난 매트랩시물링크(MATLAB - Simulink)를 사용하여 시뮬레이션을 행하였다.

Fig. 4.1은 2절에서 기술한 안정한계점인 기준 파라미터($\zeta=1.0$, $\alpha_3=5.24$, $\omega_n=10.47$, 전체이득 =26)에서 지연시간이 0.3(sec)인 경우에 종래 제

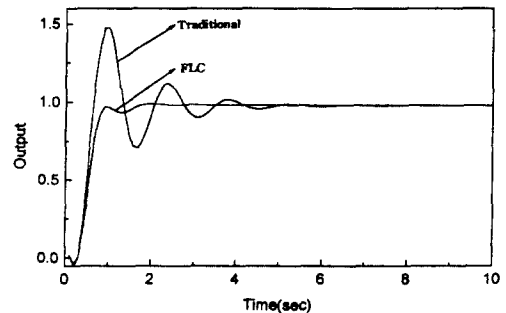


Fig. 4.1 Step Responses

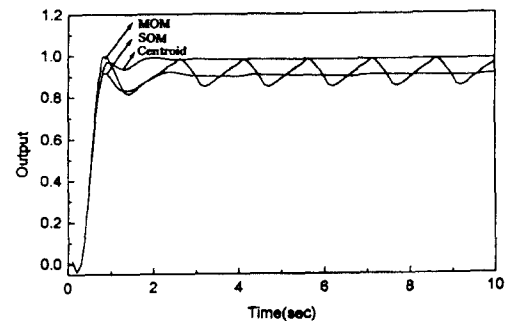


Fig. 4.2 Step Responses to the Defuzzification Methods

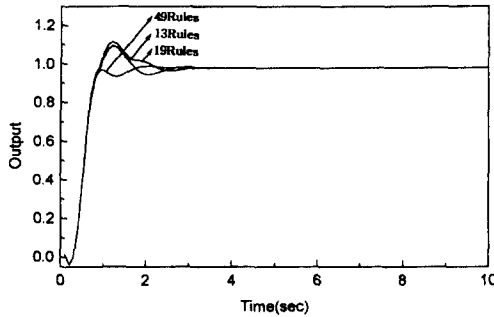


Fig. 4.3 Step Responses to the Fuzzy Control Rules

여기법(Traditional)과 퍼지제어기법(FLC)을 적용한 플랜트의 단위계단응답 곡선이다.

Fig. 4.2는 기준 파라미터에서 지연 시간이 0.3(sec)인 경우 비퍼지화방법들에 대한 비교를 하였으며 Fig. 4.3은 사용된 제어규칙에 대한 비교분석을 하였다.

5. 결 론

선박용 기계 - 유압식 조속기를 2차계로 모델링하고, 조속기의 최적 파라미터 값을 찾아내어 이를 기준 파라미터로 하여 퍼지로지 컨트롤러를 설계하고 매트랩 시뮬링크(MATLAB - Simulink)에서 시뮬레이션을 행하였다. 퍼지컨트롤러를 사용한 경우 상승시간은 비슷하나 오버슈트는 크게 감소하여 정상상태 응답특성 및 과도응답특성이 아주 양호한 특성을 나타냈으며, 비퍼지화 방법에 따른 경우는 면적 중심법을 사용한 경우가 최대 평균법 및 최대극소값 방법보다, 그리고 제어규칙을 세분하여 제어규칙이 많을수록 더 좋은 응답 특성을 나타내었으며, 종래의 기계 유압식 조속기도 성능이 개선될수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 1995학년도 교육부 학술연구조성비 지원에 의한 것이며 한국대학교육협의회의 뒷 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 韓國船舶機關學會 機關管理研究會, "船舶의 經濟的 運航管理", 태화출판사, pp. 222, 1984.
- 2) 田村直樹, "電子ガバナ制御パラメタ決定システムの開發" 日本船舶機關學會, 第24會,(昭和63年春季) 學術講演.
- 3) 林直司, 徳光洋文, "電子ガバナそ動向", 日本船舶機關學會, 第24卷, 第12號, pp. 5 - 15, 1989.
- 4) Woodward Governor(Japan), LTD. Document N. PMCC F - 7, 1989.
- 5) Wodward Governor, LTD. "The Control of Prime mover Speed", 1981.
- 6) Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice Hall Inc., 1991.
- 7) 하주식, "自動制御工學", 한국해양대학교해사도서출판부, pp. 146 - 151, 1983.
- 8) 천희영, 홍봉식, 박춘배, "自動制御解析과 制御機器", 청문각, pp. 228 - 239, 1990.
- 9) 菅野道夫, "フアジイ制御", 日間工業新聞社, 1988.
- 10) 채석, 오영석, "퍼지이론과 제어", 청문각, 1995.
- 11) Ned Gulley, J. - S. Roger Jang, "Fuzzy Logic TOOLBOX", Math Works Inc.,
- 12) 한봉주, 박진길, "機械油壓式 調速機를 가진 船舶용 디젤機關의 速度 安定性에 關한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1990.
- 13) 노창주, 하주식, "船舶에 있어서의 內燃機關 驅動發電機의 速度安定性에 關한 研究", 대한전기학회지, Vol. 24, No. 4, pp. 63 - 70, 1975.
- 14) Robert H. Bishop, "Modern Control Systems Analysis and Design Using MATLAB", Addison - Wesley Publishing Company, pp. 103 - 113, 1993.
- 15) B & W Engineering Educational Dept. E2885 /PRN/FCJ/790321.
- 16) 전효중, "船舶 動力 傳達裝置", 태화출판사, pp. 316, 1986.
- 17) E. H. Mamdani, "Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", Proc. IEE, Vol. 12, pp. 1585 - 1588, 1974.
- 18) I. G. Umbers and P. J. King, "An analysis of human - decision making in cement kiln control and the implication for automation", Int. J. Man - Machine studies, Vol. 12, No. 1, pp. 11 - 23, 1980.

19) R. E. King, "Fuzzy logic control of a cement kiln precalciner flash furnace", IEEE Conferences on

Applications of Adaptive and Multivariable Control, Hull, U. K. 1982.