⊙ 研究論文

퍼지 PI 제어기를 이용한 중속 디젤 기관의 속도제어에 관한 연구

김영일* · 천행춘* · 서인호* · 유영호**

A Study on the Speed Control of Medium Diesel Engine using a Fuzzy-PI Controller

Y. I. Kim* · H. C. Chun* · I. H. Ser* · Y. H. Yu**

Key words : 디지탈가바나(Digital Governor), 디젤기관의 속도제어(Speed Control of Diesel Engine), 퍼지－PI제어기(Fuzzy PI Controller)

Abstract

The speed control system of diesel engine is considerably nonlinear. Therefore, a countermeasure such as gain scheduling used to be incorporated to compensate this nonlinearity. On the other hand, it is said that fuzzy control is very robust against nonlinearity. But it is difficult to get a satisfactory response with only fuzzy control in real system. In this paper authors design a fuzzy-PI controller for the speed control of Medium diesel engine and carry out experiments with dedicate system implemented by Intel 80196KC to real diesel engine, Deawoo MAN 6Cyl., 1800 rpm driving 3ϕ 220V, 150KW generator . We confirm the effectiveness of proposed control system.

1. 서 론

근래의 대형 디젤기관은 저속화, 장행정화, 소수실린더화 추세로 됨에 따라 기존의 기계 유압식 조속기(Governor)로서는 저속에서의 회전수 헌팅방지와 고속에서의 속응성을 동시에 만족시키는 것이 매우 어렵게 되었다. 디지털 조속기는 다양한 운전조건과 운전형태에 부응할 수 있도록 제작하기 쉽고 저가이므로 대형 디젤기관뿐만 아니라 중소형에까지 급속도로 파급되고 있다. 최근 개발된 디지털 조속기의 속도제어알고리즘은 대체로 PID 제어기가 주종을 이루고 있으며, LQ최적제어, H_∞ 제어기법 등을 이용한 속도제어방법이 제안되고 있으나 실시간 제어를 위하여 구현과 가격경쟁 등의 문제로 상품화에 많은 어려움이 있다. 디젤기관은 그 운전 영역에 따라 시스템의 파라미터가 비선

* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과(원고접수일 : 2000년 3월)
** 한국해양대학교 기계정보공학부

형적으로 변하므로 하나의 PID 파라미터로서는 전 운전영역을 만족하게 제어할 수 없어 운전 영역을 다수의 부분으로 나누고 그 운전영역에 적합한 PID파라미터를 사용하는 게인스케쥴링(Gain Scheduling) 방법을 주로 채택하고 있다[1]. 그러나 디젤기관의 종류에 따라 각 운전영역별로 적합한 PID파라미터를 찾는다는 것은 실제적으로 많은 어려움이 있고 실제로 제어기를 구현하여 3ϕ 220V, 150KW 발전기를 구동하는 대우-MAN 6Cyl., 1800 rpm 디젤기관에 실험을 행한 결과 만족할 만한 성능을 얻을 수 없었다[1]. 따라서 본 논문에서는 이러한 PID제어기의 단점을 보완하고 디젤기관의 비선형 특성에도 우수한 제어성능을 가지는 이산형 퍼지-PI제어알고리즘을 이용한 디지털 조속기를 개발하고 동일한 디젤기관에 실 기관 시운전을 행하여 PID제어 알고리즘에 의한 디지털 조속기에 비하여 사용에 편리하고 우수한 제어성능을 가질 수 있음을 입증하고자 한다.

2. 시스템의 구성

그림 1은 개발된 디지털 조속기의 하드웨어의 구성도이고 그림 2는 소프트웨어의 구성도이다. 이들에 관하여서는 참고문헌 1에 자세한 보고가 되어있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 다만 샘플링 주기를 10 [msec]로 하고 제어를 위한 모든 프로그램의 수행시간이 샘플링 주기의 1/10 이하로 하기 위하여 모든 프로그램은 어셈블리 언어로 작성하였다.

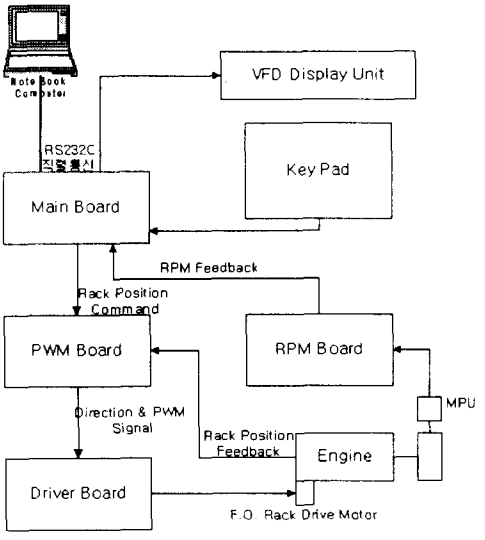


그림 1. 시스템 구성도
Fig. 1 Configuration of System

3. 제어 알고리즘

3. 1 퍼지 제어기

PID제어 알고리즘은 지금까지 산업사회에서 많이 사용되어져 오고 있다. 그러나 실제 기관의 경우 기관출력은 회전수의 3승에 비례하는 비선형 특성이 강하므로 하나의 고정된 PID제어기의 파라미터 만으로서는 회전수 변동이나 운전영역 또는 부하변동에 따라 만족스러운 제어 성능을 얻을 수가 없다.

뿐만 아니라 기관의 종류와 부하의 종류에 따라 제어기의 PID제어기의 파라미터를 선정하기 위하

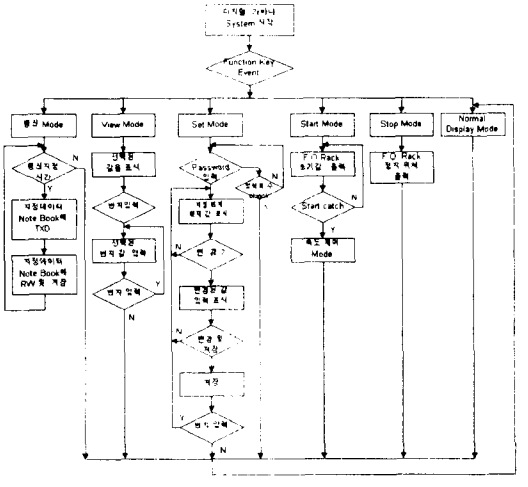


그림 2 S/W 구성도
Fig. 2 Configuration of S/W

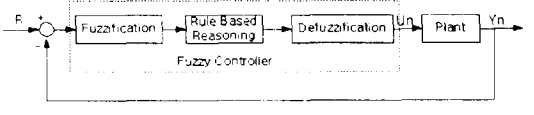


그림 3 퍼지제어기를 이용한 속도제어시스템
Fig. 3 Speed control system for diesel engine using fuzzy controller

여서는 많은 실험이 필요하고 경우에 따라서는 제어사양을 만족할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 실제로 실시간 제어가 가능하고 여러 가지 비선형 요소에 대해 원활한 제어가 가능하도록 우선 그림 3과 같이 퍼지 속도 제어기를 구성한다.

그림 3에서 시각 n에서의 오차와 오차의 변화분을 각각 E_n, ΔE_n이라 하면

$$\begin{aligned}\Delta E_n &= E_n - E_{n-1} \\ &= (R - Y_n) - (R - Y_{n-1}) \\ &= Y_{n-1} - Y_n \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta U_n = U_n - U_{n-1} \quad (2)$$

이 된다.

식 (1), (2)에서 E_n, ΔE_n은 전건부의 변수이고 ΔU_n는 후건부 변수로서 시각 n에서 조작량 U_n의 변화분을, Y_n은 시각 n에서의 출력을, 그리고 R은 기준입력을 나타낸다.

본 연구에서 사용하는 퍼지변수는 마이크로 프로세서에서 계산시간을 줄이기 위해 표 1과 같이 이산형 퍼지 변수를 사용하였고, 퍼지 입 · 출력 공간을 7개로 분할하고 표 2와 같은 제어 규칙을 사용한다. 추론방법은 직접추론법 중에서 Mamdani의 max-min 방법을 사용하였으며 비퍼지화(defuzzification)는 일반적으로 널리 사용되고 있는 무게중심법(COG)방식을 채택하였다.

표 2 제어 규칙표

ΔE / E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB				NB	NM		
NM				NM			
NS				NS			PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM			PS			
PM				PM			
PB			PM	PB			

단, NB : Negative Big　　NM : Negative Medium
NS : Negative Small　　ZO : Zero
PS : Positive Small　　PM : Positive Medium
PB : Positive Big

3.2 퍼지 제어기와 PI 제어기의 합성

일반적으로 퍼지제어기는 비선형 시스템에 대해 강인성을 보이며 선형제어기인 PID 제어기에 비해 큰 오차에 대한 처리기능이 뛰어나지만 오차가 작을 때는 오차에 둔감한 단점이 있다. 또 속도형 퍼지제어기를 채택하지 않는 경우에는 적분동작기능이 없으므로 정상상태성능이 떨어질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고 원활한 시동을 위하여 퍼지제어기와 PI 제어기를 합성한 Hybrid 형태의 구조로서 그림 4와 같은 퍼지－PI 제어기를 구성하였다.

그림에서 믹서는 오차의 크기에 따라 퍼지제어기와 P제어기를 선택적으로 사용하도록 하고 I제어기는 항시 사용함으로써 디젤기관의 연료래크 조정기구와 같이 리턴 스프링에 의해 위치를 영으로 복귀시키는 영위치복귀형(zero return fail safe type) 엑츄에이터에 사용할 수 있도록 하였다.

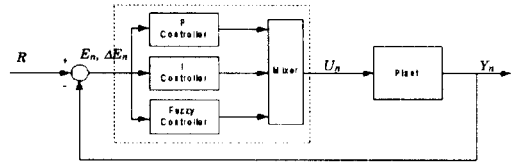


그림. 4 퍼지 제어기와 PI 제어기의 합성 블록도
Fig. 4 Block diagram for mixing of fuzzy and PI controller

표 1 이산 퍼지 변수

	−12	−11	−10	−9	−8	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	7	10
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	7	10	7	5	3	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	7	10	7	5	3	0	0	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	7	10	7	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0	0	0	3	5	7	10	7	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	3	5	7	10	7	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	10	7	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

4. 운전 실험

발전기를 구동하는 4사이클, 6기통, 정격회전수 1800[rpm], 250[kW]의 Daewoo-MAN 디젤기관을 실험 대상으로 하여 개발된 디지털 조속기와 디스크형 DC 모터(Disk Type DC Motor)를 장비한 엑튜에이터(독일 HEINZMANN CO. 의 E-6 기종)를 부착하고 시운전을 행하였다. 그림 5는 기관이 완전히 정지된 상태에서 100[%] 정격회전수를 목표회전수로 하여 시동시험을 한 것으로 최대 오버슈트는 4[%](72 [rpm])로 선급협회에서 요구하는 5[%] 범위 내에 있다.

그림 5에서 보는 바와 같이 시동스위치를 누르면 연료래크를 50[%]로 출력하고 시동모터에 의해 시동되어 회전수가 시동완료회전수 이상에 도달하였을 때 속도제어를 행하고 연료운전회전수 이하에서는 시동위치를 유지함으로서 확실한 시동을 보장할 수 있게 하였다. 이때 연료운전회전수는 정격회전수의 10[%]인 180[rpm]으로, 시동완료회전수를 188[rpm]으로 하였다. 그림 6은 무부하 운전시 연료래크에 강제로 외란를 인가했을 때 회전수 변화와 연료래크의 조정상태를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 연료래크의 강제 외란에도 빠르게 정격회전수를 회복하는 것으로 보아 견실하고 강인하게 제어되고 있음을 확인하였다.

그림 7은 목표회전수를 100[%] 정격에서 70[%]로, 70[%]에서 다시 100[%]로 변경하였을 때의 실험으로서 9[%]의 언더슈트가 발생하고 변화 초기에는 약간의 헌팅이 발생하였으나 약 26초이내에 안정되었다. 그림 8은 40[kW]의 부하를 인가하고

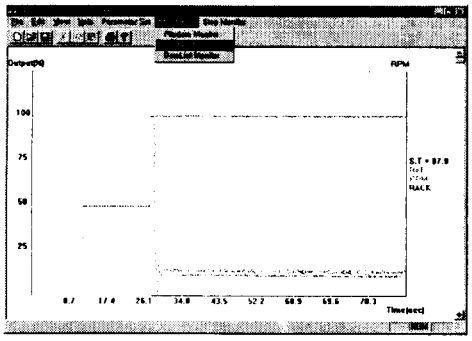


그림 5 무부하시 정격 RPM(1800[rpm]) 시동 실험
Fig. 5 Starting experiment to rate rpm with no load

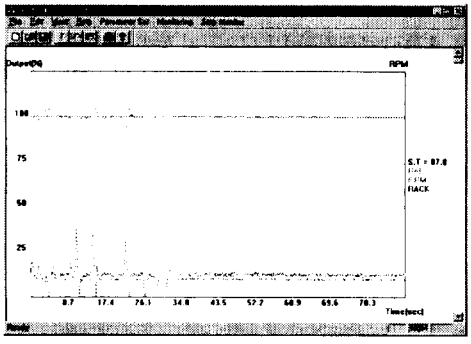


그림 6 무부하 운전상태에서 외란 인가 실험
Fig. 6 Running experiment of diesel engine when intentional disturbance is added in F.O. rack

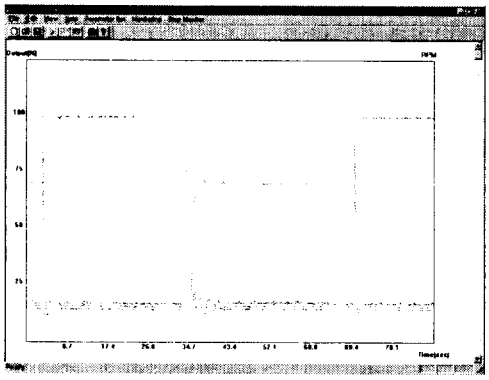


그림 7 목표회전수 변경 실험
Fig. 7 Running experiment of diesel engine when reference rpm is changed to 70% and 100% of rating

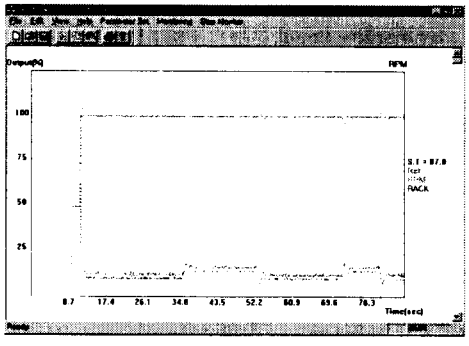


그림 8 부하 실험
Fig.8 Load on/off experiment of diesel engine

제거하였을 때의 실험으로 부하를 인가하였을 때 3[%]의 언더슈트와 부하를 제하였을 때 4[%]의 오버슈트가 발생하였다. 오버슈트 발생의 유형은 시동시와 같은 것으로 퍼지제어기의 룰에 기인하는 것으로 생각되므로 이들에 관한 특성은 오차 변화에 대한 퍼지규칙의 조정과 비퍼지화 단계의 스케일 펙터를 조정함으로써 특성을 개선할 수 있을 것으로 생각한다.

5. 결 론

이상으로 중속디젤기관의 속도제어를 위하여 퍼지 PI 제어기를 설계하여 실제 기관 운전 실험을 행하였다. 기존의 PID제어기는 디젤기관의 비선형성 때문에 원만한 속도제어를 위하여서는 운전영역에 따라 제어기의 파라미터의 선택이 불가피하고 또 적합한 제어파라미터를 구하기 위하여 많은 실험이 필요하였다. 또한 퍼지 제어기만으로는 엔진의 연소계통, 회전계통의 시정수와 데드타임 및 샘플링시간 등에 의해 기관 시동시와 정상운전 상태의 응답특성을 충분히 만족시킬 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 퍼지 제어기와 PI 제어기를 합성한 퍼지－PI 제어기를 사용하여 중속 디젤기관의 속도제어가 원만하게 이루어짐을 확인하였고 각종 외란과 부하실험에 대해서도 만족할 만한 응답특성을 얻을 수 있었다. 상용화된 외국 제품의 제어알고리즘은 모두 PID 제어기를 사용하고 있어 사용상에 많은 불편이 있고 환경이나 부하의 변화 또는 사용기관의 종류에 따라 제어기의 조정에 많은 실험을 요구하는 등 여러 가지 어려움이 있다. 그러나 본고에서 개발된 퍼지－PI 디지털 조속기는 이러한 문제를 해결할 것으로 기대하고 있으며 현재 다양한 환경과 다양한 종류의 디젤기관에서의 장시간 운전시험을 진행 중에 있다.

추 기

본 퍼지－PI디지탈 조속기는 국내특허와 국제특허에 출원중에 있습니다.

참고문헌

[1] 유영호, "중속 디젤기관용 디지털 조속기 개발에 관한 연구", 한국박용기관학회 논문지 23권 5호, pp. 85～91, 1999.9

[2] 유영호, "디젤기관의속도제어를 위한 최적회전수 측정에 관한 연구", 한국박용기관학회 논문지 21권 5호, pp. 117～121,1997.11

[3] 차영배, MICRO CONTROLLER 80196, 다다미디어, 1997.

[4] "StG－6 GOVERNOR", HEINZMANN GOVERNOR CO., 1995. pp. 281～327.

[5] 721 DIGITAL SPEED CONTROL FOR RECIPROCATING ENGINES, WOODWARD GOVERNOR CO., 1993.

[6] Charles L. Phillips, H. Troy Nagle, DIGITAL CONTROL SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, PRENTICE HALL, 1995.

[7] Gene F.Franklin, J.David Powell, Michael L. Workman, Digital Control of Dynamic Systems, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 1990.

[8] Dimiter Driankov · Rainer Palm, Advances in Fuzzy Control, A Springer-Verlag Company, 1997.

[9] 유영호, "박용 디젤기관의 속도제어에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 1990.

[10] 유영호, 하주식, "박용디젤기관의 디지털가바나의 구성과 속도제어 알고리즘에 관하여" 한국박용기관학회 논문지, 15권, 제1호, pp. 20～39, 1991.

[11] 유영호, 하주식, 외 12명, "선박용 디젤기관의 디지털가바나 및 주변기기 S/W 개발", 상공자원부, 1994.

[12] 유영호 "디젤기관의 속도제어를 위한 최적회전수 측정에 관한 연구", 한국박용기관학회, 제21권, 제5호 pp. 117～121, 1997.

[13] 천행춘, "중속대젤 기관의 디지털 가바나 설계를 위한 툴 개발에 관한 연구" 한국해양대학교 대학원, 1997.

[14] 하주식, 오세준, 유희한, 윤지근, "선박용 디젤기관의 지능적 인 속도제어시스템", 한국박용기관학회 논문지, 22권, 제3호, pp. 321～327, 1998.

[15] 青野道夫 퍼지 제어 시스템, 大英社, 1990.

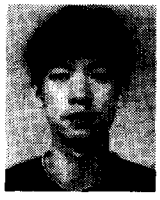
[16] 이광형, 오길록 퍼지 이론 및 응용 Ⅱ, 홍릉과학출판사, 1997.

[17] 변증남, 퍼지논리 제어, 홍릉과학출판사, 1997.

저 자 소 개

김영일(金英一)
1972년1월생, 1998. 2한국해양대학교 제어계측공학과 졸업, 2000. 2 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사), 현재 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정 재학중, 학생회원

천행춘(千幸春)
1958년 12월생, 1980. 2 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1997. 2한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사), 2000. 2 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정 수료현재 신일기공(주) 기술이사, 학생회원



서인호(徐寅豪)
1973년 3월생, 1999. 2 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 현재 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정재학중, 학생회원

유영호(劉永昊)
1951년 10월생. 1974년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1986년 한국해양대학교대학원제어계측공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원 졸업(공학박사), 1급기관사, 1997. 12－1998. 12 영국 University of Wales Cardiff Systems Engineering Division 연구교수 1983－1991 한국해양수산연수원 부교수, 1992－현재 한국해양대학교 자동화정보공학부 부교수, 당학회 연구이사, 종신회원