

퍼지게인 스케줄링을 이용한 선박용 디젤기관의 속도제어

°박승수*, 유성호*, 유영호**, 진강규**

*한국해양대학교 대학원 제어계측공학과, **한국해양대학교 기계·정보공학부

Speed Control of Marine Diesel Engines Using Fuzzy Gain Scheduling

S.S. Park*, S.H. Yoo*, Y.H. Yoo**, G.G. Jin**

*Dept. of Control Instrumentation Eng., Graduate School, Korea Maritime Univ.

**Division of Mechanical and Information Eng., Korea Maritime Univ.

Abstract : The conventional PID controller has been extensively used to speed control of marine diesel engines. However, one of drawbacks is that its control performance can be degraded if the parameters are fixed on whole operating points. In this paper, a scheme for integrating PID control and the fuzzy technique is presented to control speed of a marine diesel engine on whole operating points. At first, the PID controller is designed at each speed mode, whose parameters are optimally adjusted using a genetic algorithm. Then, fuzzy "if-then" rules combine the controllers as a consequence part. To demonstrate the effectiveness of the proposed fuzzy controller, a set of simulation works on a marine diesel engine are carried out.

Keywords : Marine diesel engine, Speed control, Fuzzy gain scheduling

1. 서론

최근까지 여러 가지 제어 기법들이 제안되어 왔음에도 불구하고 아직도 산업현장에는 PID 제어가 광범위하게 이용되고 있다[1]. 그 이유는 구조가 간단하고, 효율적으로 제어성능을 유지하는 장점들이 설계자나 사용자의 관심을 끄며 또한 현장의 엔지니어들이 이에 익숙해져 있기 때문이다. PID 제어를 동조하는 방법으로는 극·영점 배치법, Ziegler-Nichols 동조규칙, IMC-PID 동조 등이 있다[2].

그러나 PID 제어기는 그 파라미터가 고정될 경우에 외란, 파라미터의 변동, 모델링 오차 등의 요인에 의한 변화에 대해 강인성을 보장할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 주변의 환경

변화가 발생할 경우에도 제어를 자동 동조하는 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 그러나 이러한 방법도 동조가 끝난 후 일정 시간동안 고정된 파라미터로 운전되기 때문에 그 사이에 운전환경이 변화되면 만족스러운 성능을 기대하기 어렵다.

한편, 퍼지제어는 불확실한 정보를 다룰 수 있고 전문가의 제어지식을 직접 언어규칙으로 표현할 수 있는 장점 때문에 복잡하고 불확실한 시스템의 제어에 많이 이용되고 있다.

본 논문에서 PID 제어기와 퍼지제어의 장점을 결합하여 선박용 디젤기관의 속도제어에 적용하도록 한다. 먼저 저속, 장행정, 소수실린더의 선박용 디젤기관을 제어대상으로 하여 속도변경에 따른 각 운전모드에서 PID 제어를 설계하고 제어기의 파라미터는 유전알고리즘을 이용하여 최적 동조한

다[5,6]. 그리고 이를 퍼지규칙으로 결합하여 전 운전 모드에서 만족스러운 성능을 갖도록 퍼지 게인 스케줄링 기법을 도입한 퍼지 제어기를 설계하는 기법을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 기법의 유효성을 보인다.

2. 디젤기관의 모델링

선박용 디젤기관은 연료분사장치, 과급기, 추진기 등이 결합되어 있어서 그 구조가 복잡하고 다양한 비선형 요소들을 내포하고 하고 있어서 정확한 수학적 모델을 얻는 것은 대단히 어렵다[3,4]. 설사 근사적인 모델을 얻는다 해도 시스템의 파라미터들이 운전여건에 따라 변동하기 때문에 모델의 실용성에 있어서 다소 문제점이 지적되기도 한다. 그럼에도 불구하고 아직도 대부분의 제어기들은 모델에 기초해서 설계되는 것을 볼 수 있다.

실린더 내 연료분사량을 조절하는 액츄에이터 시스템의 입력전압을 u 로, 기관의 출력 회전수를 y 로 정의하고 전체 시스템을 액츄에이터 시스템, 연소계통, 회전계통으로 구분하여 근사 모델을 얻으면 그림 1 과 같은 블록선도로 표시할 수 있다.

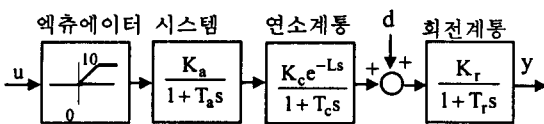


그림 1. 선박용 기관의 모델
Fig. 1. Model of a marine diesel engine

선형 동작구간에서의 입출력 관계를 전달함수로 표시하면 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{e^{-Ls} K_a K_c K_r}{(1 + T_a s)(1 + T_c s)(1 + T_r s)} U(s) + \frac{K_r}{(1 + T_r s)} D(s) \quad (1)$$

여기서 u , y , d 는 각각 입력, 출력 및 외란이고, K_a 와 T_a 는 각각 액츄에이터 시스템의 게인과 시정수이며, K_c , T_c , L 는 각각 연소계통의 게인, 시정수 및

시간지연이며, K_r 와 T_r 는 회전계통의 게인과 시정수이다. 특히 저속, 저기통 기관일수록 연소계통과 회전계통의 파라미터들은 운전 속도에 따라서 심하게 변동하는 특성을 가진다. 몇몇 동작 회전수에서의 파라미터값을 근사적으로 얻는 한 경험적인 방법은 문헌[4]에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서도 이와 같은 방법으로 파라미터를 구하기로 하며, 경제적, 기술적인 관점에서 제어기는 기관의 회전수만을 측정하여 사용하는 것으로 간주한다.

3. 퍼지 PID 제어기 설계

3.1 GA 기반의 PID 제어기

최근의 선박용 대형 기관은 에너지, 유지보수비의 절감 등의 목적으로 저속, 저기통, 장행정 구조를 가지기 때문에 저속에서는 연소지연이 발생하고 운전환경에 따라 파라미터들이 많이 변하기 때문에 고정된 파라미터를 가지고 전 속도 구간에서 운전하면 만족스러운 제어성을 얻기가 어렵다. 따라서 몇몇 운전 모드에서 PID 제어기를 설계하고 이를 퍼지기법으로 결합하여 속도변경 시 적절히 대처할 수 있는 제어기를 설계한다.

각 운전모드에서 PID 제어기의 파라미터 결정은 Ziegler-Nichols 동조법, 극-영점 배치법 등 여러 방법으로 동조하는 것이 가능하다[1,2]. 그러나, 기존의 방법들은 체계적인 절차를 통하기 보다는 설계자의 직관과 경험에 의존하는 성향이 강하다. 한편, 최적화 도구로서 주목을 받고 있는 유전알고리즘을 이용하면 평가함수를 이용하여 주어진 제어 사양을 만족하는 최적의 파라미터들을 구할 수 있다. 따라서, 여기서는 실수 염색체를 사용하는 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm : RCGA)[5,6]을 이용한다. 그림 2는 RCGA를 이용하여 PID 제어기의 파라미터를 동조하는 과정을 보여준다.

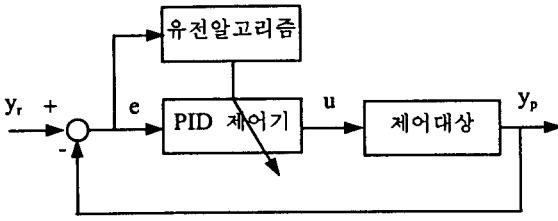


그림 2. RCGA 를 이용한 PID 제어기의 파라미터 동정
Fig. 2. Parameter tuning of the PID controller using a RCGA

이 때 RCGA 는 다음의 평가함수가 최소가 되도록 PID 제어기의 파라미터들을 조정한다.

$$J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (2)$$

여기서 t_f 는 이 시간 이후의 적분값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 크게 설정된다.

3.2 퍼지 게인 스케줄링

본 연구에서 제어대상으로 하고 있는 대형 디젤 기관은 운전 속도에 따라 시스템의 파라미터들의 변동이 크기 때문에 선박의 운항 여건에 따라 초저속(Dead-slow speed), 저속(Slow speed), 중속(Half speed), 전속(Full speed) 4 개로 나누어 선형화 모델을 얻고, 이를 기반으로 각각의 PID 제어기를 설계한다. 다음 이들을 "if-then" 규칙으로 결합하여 Takagi-Sugeno 모델 형태의 퍼지 제어기를 얻는다.

퍼지 제어기는 다음 식으로 표시된다.

$$\text{If } y \text{ is } F^1, \text{ then } u^1(t) = K_p^1 e(t) + K_I^1 \int e(t) dt + K_D^1 \frac{de(t)}{dt} \quad (3a)$$

$$\text{If } y \text{ is } F^2, \text{ then } u^2(t) = K_p^2 e(t) + K_I^2 \int e(t) dt + K_D^2 \frac{de(t)}{dt} \quad (3b)$$

$$\text{If } y \text{ is } F^3, \text{ then } u^3(t) = K_p^3 e(t) + K_I^3 \int e(t) dt + K_D^3 \frac{de(t)}{dt} \quad (3c)$$

$$\text{If } y \text{ is } F^4, \text{ then } u^4(t) = K_p^4 e(t) + K_I^4 \int e(t) dt + K_D^4 \frac{de(t)}{dt} \quad (3d)$$

여기서 u^i 는 i 번째 규칙에 대한 PID 제어기의 출력이고, K_p^i , K_I^i , K_D^i 는 비례상수, 적분상수 및 미분상수이다. 입력공간의 퍼지분할에 사용된 F^1 , F^2 ,

F^3 , F^4 는 각각 Dead-slow speed, Slow speed, Half speed, Full speed의 의미를 가지며 그 모양은 그림 3과 같다. 이를 정의하기 위해 사용된 함수는 시그모이드 함수와 가우스 함수이다.

$$F^i(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\mu^i(x - o^i))} \quad (4a)$$

$$F^i(x) = \exp(-(x - m^i)^2 / 2(\sigma^i)^2) \quad (4b)$$

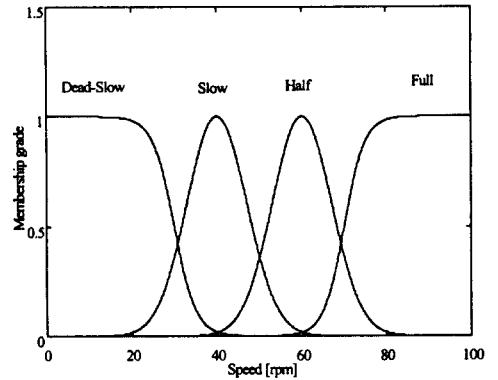


그림 3. 입력공간의 퍼지분할
Fig. 3. Fuzzy partition of the input space

따라서, 퍼지 제어기의 전체 출력은 다음 식을 통하여 추론된다.

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 \rho^i u^i(t)}{\sum_{i=1}^4 \rho^i} \quad (5)$$

여기서 ρ^i 는 i 번째 규칙의 기여도를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$\rho^i = F^i(y) \quad (6)$$

그림 4는 퍼지 제어기의 구조를 나타낸 것으로서 속도신호와 그 오차를 입력 받아 각 운전 모드에서의 제어입력을 구하고 이를 퍼지 결합하여 최종 출력 u 를 얻게 된다.

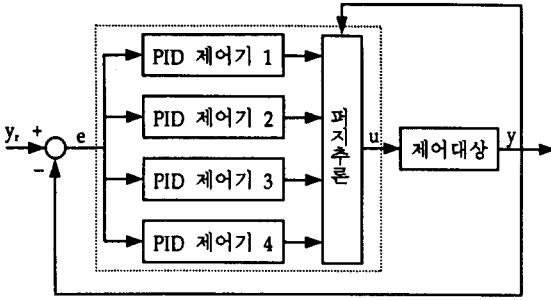


그림 4. 퍼지 PID 제어기의 구조
Fig. 4. Schematic diagram of the fuzzy PID Controller

4. 모의실험

4.1 동작점 선정 및 제어대상

제안한 제어기의 성능을 확인하기 위해서 B&W사의 4L80MC 디젤기관을 고려하여 모의실험을 실시하였다. 이 기관의 동작점은 운전환경에 따라 초저속(20rpm), 저속(40rpm), 중속(60rpm), 전속(80rpm)으로 정하였고, 이 때 추정된 계수들의 근사값은 표 1과 같다.

표 1. 제어대상의 파라미터
Table 1. Parameters of the plant

Parameters \ Mode	Dead slow	Slow	Half	Full
L [sec]	1.50	0.75	0.50	0.38
T_c [sec]	0.074	0.037	0.025	0.019
K_c [BHP/mm]	29.35	36.00	78.00	122.47
T_r [sec]	4.164	3.103	2.382	1.787
K_r [rpm/BHP]	0.027	0.022	0.010	0.0064

한편 엑츄에이터 시스템의 이득과 시정수는 각각 $K_v = 13.6$ [mm/V], $T_i = 0.1$ [sec]으로 하였다.

표 1에서도 확인할 수 있듯이 대상 시스템은 운전 속도에 따라 파라미터들이 변동하기 때문에 제안된 제어기의 성능을 확인하기 위해서는 전속도 구간에서 연속적으로 변동하는, 즉 실제 시스템과 유사한 통특성을 갖는 제어대상이 필요하다. 따라서, 각 속도구간 사이의 파라미터들은 속도에 비례해서 선형적으로 변하는 것으로 간주하였고 초저속 또는 전속을 벗어나는 경우에는 이들의 파라

미터를 고정하도록 하였다.

4.2 PID 제어기의 파라미터 동조

각 동작점에서의 모델을 기반으로 PID 제어기를 최적으로 동조하기 위해 사용되는 RCGA의 매개변수로는 집단의 크기 $N = 30$, 재생산 계수 $\eta = 1.7$, 교배확률 $P_c = 0.8$, 돌연변이확률 $P_m = 0.1$ 를 사용하였다. 그림 2와 같이 시뮬레이션을 실시한 결과, 표 2와 같은 K_p, K_i, K_D 를 구할 수 있었다.

표 2. 동조된 PID 제어기의 파라미터
Table 2. Tuned parameters of the PID controllers

Parameters \ Mode	Dead slow	Slow	Half	Full
K_p	0.2212	0.3066	0.2985	0.3280
K_i	0.0368	0.0706	0.0951	0.0978
K_D	0.1393	0.0977	0.0544	0.0549

4.2 운전조건 변화에 대한 속도추종 성능

제안한 제어기의 성능을 확인하기 전에 먼저 고정된 파라미터로 전 속도 구간을 제어할 시 일어나는 문제점을 알아보기 위하여 응답실험을 실시하였다. 그림 5은 표 2에서와 같이 전속도(Full Speed) 모드에 RCGA로 최적 동조된 PID 제어기로 전 구간에서 속도변경 명령에 대한 추종 성능을 보인 것이다. 기대하였듯이 저속에서 지글링 현상과 오버슈트가 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

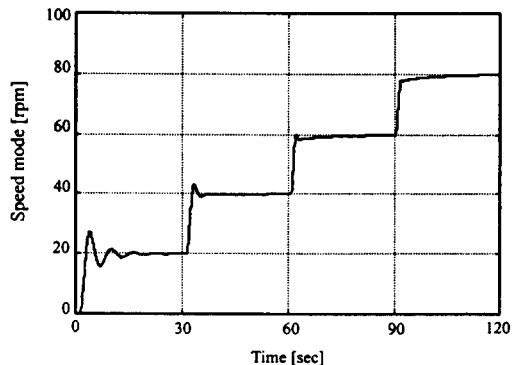


그림 5. 고정된 파라미터 PID 제어기의 응답
Fig. 5. Performance of the fixed-parameter PID controller

이는 고정 파라미터 PID 알고리즘을 채용하고 있는 선박용 디지털 가바나에서 자주 경험하는 현상이다. 그림 6은 제안된 퍼지 제어기와 Z-N PID 제어기의 속도 변경에 대한 추종 성능을 비교한 것이다. Z-N 동조는 전속도 모드에서의 모델을 대상으로 이행하였고 이 때 구한 세 파라미터는 $K_p=0.314$, $K_i=0.274$, $K_d=0.182$ 이다. 퍼지 제어기의 성능을 확인할 수 있다.

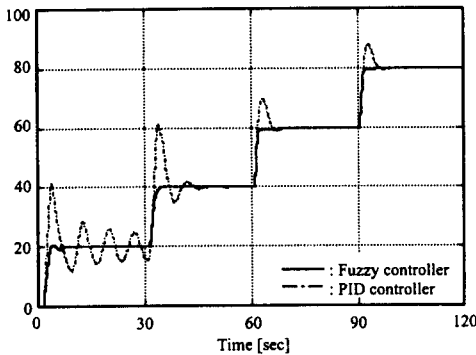


그림 6. 제안된 제어기와 PID 제어기의 응답 비교
Fig. 6 Response comparison of the GA-based FPID controller with the Z-N PID controller

4.3 외란 변화에 대한 속도조절 성능

선박은 정상 항해중일 때는 대개 속도지령이 고정되고, 속도변경에 영향을 줄 수 있는 상황은 해상의 여건이라 할 수 있다. 해상여건의 악화로 선박이 심하게 피칭하거나 요잉하게 되면 기관의 부하에 급격한 변화를 일으키게 된다.

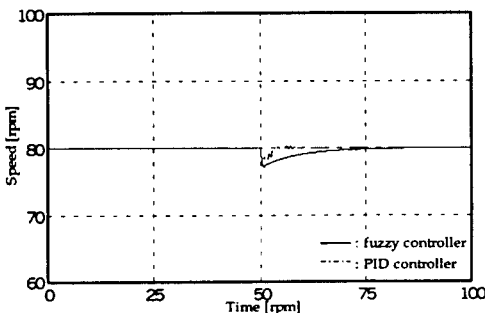


그림 7. Fuzzy PID 와 Z-N PID 의 외란에 대한 응답 비교
Fig. 7. Response comparison of the FPID controller with the Z-N PID controller to disturbance

그림 7은 퍼지 제어기와 Z-N PID 제어기의 외란 변화에 대한 성능을 보이고 있다. Z-N PID 제어기가 외란에 대해 빠른 응답을 보이지만 헛팅이 있고 제안된 제어기는 완만한 특성을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 PID 제어기와 퍼지 개인 스케줄링을 결합하여 퍼지 제어기를 설계하는 기법을 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 제안된 퍼지 제어기가 기존의 PID 제어기에 비하여 전속도 구간에서 좋은 응답특성을 보였고, 또한 외란에 대하여도 좋은 특성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Trans. ASME*, Vol.64, No.11, pp.759-768, 1942
- [2] Su-Whan Sung and In-Beum Lee, *PID Controllers and Automatic Tuning*, A-JIN Company, Inc. 1999
- [3] 유영호, "박용 디젤기관의 속도제어에 관한 연구," 한국해양대학교 대학원, 박사학위 논문, 1990
- [4] 유영호, 하주식 외 12 명, "선박용 디젤기관의 디지털가바나 및 주변기기 S/W 개발," 상공자원부 연구보고서, 1994
- [5] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, Vol. 4, No. 4, 2000
- [6] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2000