

## 퍼지 게인 스케줄링을 이용한 선박 디젤기관의 속도 제어

박 승 수\* · 이 현 식\*\* · 김 도 응\*\*\* · 진 강 규\*\*\*\*

### Speed Control of Marine Diesel Engines Using Fuzzy Gain Scheduling

S-S Park\* · H-S Lee\*\* · D-E Kim\*\*\* · G-G Jin\*\*\*\*

**Key words** : Speed control(속도 제어), Marine diesel engine(선박 디젤기관), Fuzzy gain scheduling(퍼지 게인 스케줄링), PID controller(PID 제어기)

#### Abstract

This paper presents a scheme for integrating PID control, gain scheduling and emerging techniques in the field of artificial intelligence, such as fuzzy logic and genetic algorithms for the speed control of a marine diesel engine. At first, local PID controllers are designed based on a local model obtained at each speed mode, whose parameters are optimally tuned using a real-coded genetic algorithm. Then, fuzzy "if-then" rules combine the local controllers as a consequence part to implement fuzzy gain scheduling. To demonstrate the performance of the proposed fuzzy PID controller on overall operating conditions, a set of simulation works on B&W's 4L80MC diesel engine are carried out.

#### 1. 서 론

최근까지 여러 제어 기법들이 제안되어 왔음에도 불구하고 아직도 산업현장에는 PID 제어가 광범위하게 이용되고 있는데, 그 이유는 구조가 간단하여 구현이 용이하고, 동조할 계수가 적어 편리하고, 동작범위가 다소 넓어도 견실한 성능을 주기 때문이다. PID 제어기의 성능은 세 계수, 즉 비례이득, 적분시간, 미분시간에 따라 좌우되므로 시스

템이 요구되는 제어성능을 가지도록 이들을 적절히 결정하는 것을 동조(Tuning)라 한다. 동조에는 여러 방법이 적용될 수 있으나 대표적인 것으로는 Ziegler-Nichols(N-Z) 동조법<sup>[1]</sup>, Cohen-Coon(C-C) 동조법<sup>[2]</sup>이 있고 주로 전문가의 경험에 의해서 시행 착오적으로 이루어지고 있다.

대부분의 제어기와 마찬가지로 PID 제어기도 계수가 고정되면 외란이나, 동작점 변경으로 시스템 파라미터의 변동이 클 경우에는 강인성이 보장

\* SonarTeck Co., Ltd.

\*\* Total Soft Bank Ltd.

\*\*\* Korea Maritime Univ, Graduate School

\*\*\*\* Korea Maritime University

되지 못한다. 이 점을 보완하기 위해 제어 환경의 변화가 일어날 경우에 제어기 계수를 자동동조하는 연구<sup>13),14)</sup>가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 이 방법은 제어기 동조 후에 일정 시간동안 고정된 계수로 운전되기 때문에 그 사이에 운전환경이 변경될 때에는 만족스러운 성능을 기대하기 어렵다. 최근에는 전문가의 지식을 활용하는 지능 제어가 연구<sup>15)</sup>되고 있다. 대표적인 것으로 퍼지기법을 이용한 퍼지 제어기를 들 수 있다. 퍼지 제어기는 불확실한 정보를 다룰 수 있고 전문가의 제어지식을 직접 언어규칙으로 표현할 수 있는 장점 때문에 복잡하고 불확실한 비선형 시스템의 제어에 많이 이용되고 있다. 이 밖에도 PID 제어기의 계수를 자동으로 조정하는 퍼지 자기동조(Fuzzy self-tuning) 알고리즘도 연구<sup>16)</sup>되고 있으나, 범용으로 사용하기에는 추가적인 연구가 이뤄져야 할 것으로 보인다.

특히 선박 주기관은 입출항, 협수로 통과 시에는 수시로 속도명령이 변경되고 저속, 저기동 일수록 파라미터 변동이 심해, 기존의 방법으로는 전 동작 속도에서 만족스러운 제어성능을 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 퍼지이론과 유전알고리즘을 PID 제어와 게인 스케줄링 기법에 접목하여 선박용 디젤기관의 속도조절용 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 전 운전속도 구간에서 선박용 디젤기관의 동특성을 잘 기술해주는 모델을 얻는다. 선박용 기관은 주로 초저속, 저속, 중속, 전속 4가지 속도에서 운전되므로 이 부근에서 시스템의 입출력 관계를 기술해주는 국부적 모델을 얻고 이를 퍼지결합하여 비선형 퍼지모델을 얻는다. 다음 각 국부적모델을 기반으로 국부적 PID 제어기를 설계하고 전 운전 모드에서 만족스러운 성능을 갖도록 퍼지 게인 스케줄링<sup>17),18)</sup>을 도입한 퍼지 PID 제어기를 설계한다. 이 때 제어기의 계수는 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)으로 최적 동조된다<sup>11), 13)</sup>. 제안하는 기법은 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 확인하고, Z-N법과 내부모델 제어(Internal model control: IMC)<sup>6)</sup> 법으로 동조한 PID 제어기와 비교 검토한다.

## 2. 선박 디젤기관의 모델링

### 2.1 선박 디젤기관의 모델링

선박 디젤기관은 실린더, 연료분사장치, 과급기, 추진기 등이 결합된 복잡한 구조의 시스템이어서 정확한 수학적 모델을 얻는 것은 대단히 어렵지만, 근사 모델<sup>19)</sup>을 얻는 것은 가능하다. 단일 동작점에서 실린더 내 연료 분사량을 조절하는 액츄에이터 시스템의 입력전압을  $u$ 로, 기관의 출력 회전수를  $y$ 로 정의하고 전체 시스템을 액츄에이터, 연료펌프 래크 움직임부터 연료가 분사될 때까지의 시간 지연과 연료가 연소되어 토크로 변환되는 연소계, 토크에 의해 프로펠러가 회전하는 회전계로 구분하여 근사 모델을 얻으면 Fig. 1과 같은 블록선도로 표시할 수 있다. 여기서 포화 비선형은 기관의 운전 특성 때문에 삽입되었고 래크는 정지 위치에서 최대허용 위치까지만 움직일 수 있으므로 액츄에이터 입력은  $\alpha$ 에 의해 제한된다.

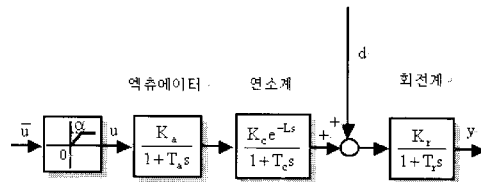


Fig. 1 Block diagram of a marine diesel engine.

포화 비선형성 이후의 블록선도로부터 입출력 관계를 표시하면 식 (1)과 같다.

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

여기서  $u, y, d$ 는 각각 입력, 출력 및 외란이고,  $K_a$ 와  $T_a$ 는 각각 액츄에이터의 이득과 시정수이며,  $K_c, T_c, L$ 는 각각 연소계의 이득, 시정수 및 시간지연이며,  $K_r$ 와  $T_r$ 는 회전계의 이득과 시정수이다.

상태벡터  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y \ \dot{y} \ \ddot{y}]^T$ 로 정의하면 국부적 입출력 관계를 상태공간 형태로 표시하면 식 (2), (3)과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}(t-L) \quad (2)$$

$$y = \mathbf{Cx} \quad (3)$$

$$\text{단, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a_3 & a_2 & a_1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0],$$

$$a_1 = \frac{T_a T_c + T_c T_r + T_r T_a}{T_a T_c T_r}, \quad a_2 = \frac{T_a + T_c + T_r}{T_a T_c T_r},$$

$$a_3 = \frac{1}{T_a T_c T_r}, \quad b_0 = \frac{K_a K_c K_r}{T_a T_c T_r}$$

### 2.2 선박 주기관의 운전특성

일반적으로 선박 주기관은 두 가지 모드, 즉 기동모드와 항해모드에서 운전된다. 기동모드는 선박이 부두에 접안 또는 출항하거나 또는 협수로 통과 시 선교의 지령에 따라 수시로 그 속도를 변경하는 모드이고, 항해모드는 항구를 벗어나 대양에 진입하면 어떤 장애물이 발견되지 않는 한 일정한 속도로(대개 전속) 운전하는 모드이다.

기동모드에서는 선교와 기관 제어실과의 Telegraph 신호에 따라 수시로 속도명령이 변경하달된다. 일반적으로 4가지 속도모드 즉, 초저속(Dead slow speed), 저속(Slow speed), 중속(Half speed), 전속(Full speed)으로 운전될 수 있도록 약속되어 있고 실제의 속도 설정치는 기관의 형태, 출력 등에 따라 약간씩 다르다. 선교의 지령에 따라 설정치가 변경되면 조속기는 기관 속도가 설정치에 가급적 빨리 도달되도록 조정해줄 필요가 있다.

항해모드에서 선교의 지령은 일반적으로 전속에 고정된다. 선체가 조류, 바람, 파도 등으로 6자유도 운동을 하게 되면 기관은 부하 외란을 받아 속도 변동이 일어나게 된다. 이 때 조속기는 속도가 설정치를 벗어날 때 마다 빨리 회복하도록 조정해줄 필요가 있다.

### 2.3 퍼지 모델링

선박 주기관은 저속, 저기통 기관일수록 연소계통과 회전계통의 파라미터들이 운전 속도에 따라

서 심하게 변동하는 특성을 가진다. 퍼지 케인 스케줄링을 적용한 제어기를 설계하기 위해서는 전속도 구간에서 연속적으로 변동하는, 즉 실제 시스템과 유사한 동특성을 갖는 제어대상이 필요하다. 따라서 4 가지 동작점에서 입출력 관계식을 퍼지 결합한 퍼지모델을 얻는다. 퍼지 시스템의 입력신호는 출력 속도이고 입력공간의 퍼지분할에는 4개의 퍼지집합  $F^1, F^2, F^3, F^4$ 이 사용되었다. 이들은 각각 초저속, 저속, 중속, 전속의 의미를 가지며, 이를 정의하기 위해 Fig. 2에서와 같이 가우스 함수를 사용하였다.

$$F^1(y) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(y-m^1)^2}{2(\sigma^1)^2}\right), & y \geq m^1 \\ 1, & y < m^1 \end{cases} \quad (4a)$$

$$F^i(y) = \left(-\frac{\exp\left(-\frac{(y-m^i)^2}{2(\sigma^i)^2}\right)}{2(\sigma^i)^2}\right), \quad i=2,3 \quad (4b)$$

$$F^4(y) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(y-m^4)^2}{2(\sigma^4)^2}\right), & y \geq m^4 \\ 1, & y < m^4 \end{cases} \quad (4c)$$

여기서  $m^i, (\sigma^i)$ 는 해당 소속함수의 평균과 표준편차를 의미한다.

따라서 퍼지 시스템은 "If-then" 규칙으로 기술되며, 이는 Takagi-Sugeno 형태로서 후건부는 제어대상의 국부적 입출력 관계를 나타내 주고 있다.

$$\mathbf{R} : \text{If } y(t) \text{ is } F^i, \text{ then } \mathbf{X}(t) = \mathbf{A}^i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^i u(t-L), \quad i \in [1,4] \quad (5)$$

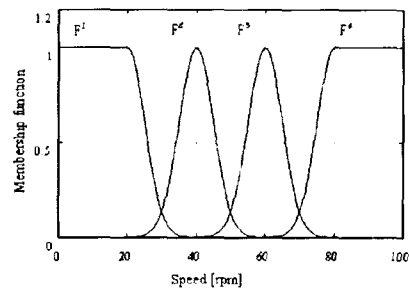


Fig. 2 Fuzzy partition of the input space

여기서  $A^i$ 와  $B^i$ 는 각 동작점에서의 시스템의 행렬이고  $L^i$ 는 시간지연을 의미한다. 퍼지 시스템의 출력은 식 (6)를 통하여 추론된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 \rho^i [A^i x(t) + B^i u(t - L^i)] / \sum_{i=1}^4 \rho^i \quad (6)$$

여기서  $\rho^i = F^i(y)$ 는  $i$ 번째 규칙의 기여도를 나타내며,  $F^i(y)$ 는  $y$ 에 대한 퍼지집합의 소속 정도이고,  $\sum_{i=1}^4 \rho^i > 0$ 의 관계가 항상 성립하는 것으로 가정한다.

### 3. PID 제어기의 퍼지 게인 스케줄링

최근의 선박 기관은 에너지, 유지 보수비의 절감 등의 이유로 저속, 저기통, 장행정 구조를 가지므로 저속에서는 연소지연이 발생하고 운전환경에 따라 파라미터들이 많이 변한다. 따라서 고정된 계수를 가지고 전 속도 구간에서 운전하면 만족스러운 제어성을 얻기가 어렵기 때문에 몇몇 운전 모드에서 PID 제어기를 설계하고 이를 퍼지 결합하여 속도변경 시 적절히 대처할 수 있는 퍼지 게인 스케줄링 기법을 제안한다.

#### 3.1 RCGA 기반의 PID 제어기 설계

여러 고급 제어기법들이 제안되어 왔음에도 불구하고 아직도 조속기는 현장 기술자에게 친숙하고, 단순하면서도 불확실성에 강인한 PID 제어 알고리즘으로 구현되고 있다. PID 계수 결정은 Z-N법, C-C법, 극-영점 배치법, IMC법으로 가능하다<sup>11,12</sup>. 그러나, 기존의 방법들은 체계적인 절차를 통하기 보다는 설계자의 직관과 경험에 의존하는 성향이 있는데, 유전알고리즘을 이용하면 주어진 사양을 만족하는 최적의 계수를 구할 수 있다. 따라서, RCGA<sup>11,13</sup>를 이용한다.

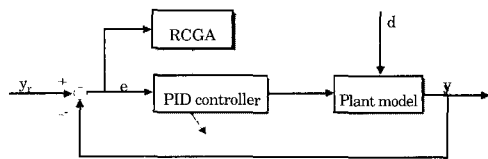


Fig. 3 Parameter tuning of the PID controller using a RCGA

Fig. 3은 RCGA와 모델을 기반으로 PID 계수를 최적으로 동조하는 과정을 보여준다. 이때 RCGA는 다음 목적함수가 최소가 되도록 계수를 조정한다.

$$J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (7)$$

여기서  $t_f$ 는 이 시간 이후의 적분 값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다.

#### 3.2 퍼지 게인 스케줄링

전통적으로 게인 스케줄링 제어기의 설계는 다수의 동작점에서 비선형 시스템의 국부적 입출력 관계를 나타내는 국부적 모델을 얻음으로써 시작된다. 그런 다음 모델을 기반으로 국부적 제어기 (Local controller)가 설계되고, 보간법이나 스케줄링으로 전체 제어기 (Overall controller)를 얻는다. 이때 스케줄링은 시스템의 동특성에 가장 영향을 많이 끼치는 계획변수 (Scheduling variable)들의 변경에 따라 이행된다.

선박 디젤기관은 기동모드에서는 초저속, 저속, 중속, 전속 지령을 받아 운전되고, 속도에 따라 시스템의 파라미터들의 변동이 크기 때문에 4가지 동작점에서의 국부적 모델을 얻고, 이를 기반으로 국부적 PID 제어기를 설계하였다. 동작점이 변하면 이들은 변경하도록 게인 스케줄링을 사용하며, 계획변수로 속도를 사용하였다. 그러나 실제 계획변수의 크기로 동작점을 구분한다는 것은 명확하지 않을 뿐더러 동작점 부근에서 빈번하게 변경되기 때문에 퍼지 기법을 이용하며 퍼지언어 규칙과 추론기관은 게인 스케줄링에 매우 유연하면서도 명확한 방법을 제공하게 된다.

이들을 "If-then" 규칙으로 결합하여 Takagi-Sugeno 모델 형태의 퍼지 제어기를 얻으면 식 (8)로 표시된다.

$$R: \text{If } y(t) \text{ is } F^i, \text{ then } \bar{u}^i(t) = K_p^i e(t) + K_i^i \int e(t) dt + K_d^i \frac{de(t)}{dt}, i \in [1, 4] \quad (8)$$

여기서  $y(t)$ 는 계획변수이고,  $F^i$ 는 입력공간의 퍼지 분할에 사용 되어진 것과 같은 퍼지 집합이고,

$\bar{u}(t)$ 는  $i$ 번째 규칙에 대한 PID 제어기의 출력이고,  $K_p^i, K_i^i, K_d^i$ 는 해당 제어기의 비례이득, 적분이득 및 미분이득이다.

따라서, 퍼지 제어기의 전체 출력은 다음 식을 통하여 추론된다.

$$\bar{u}(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 \rho^i \bar{u}^i(t)}{\sum_{i=1}^4 \rho^i} \quad (9)$$

여기서  $\rho^i = F^i(y)$ 는  $i$ 번째 규칙의 기여도를 나타낸다.

Fig. 4는 퍼지 제어기의 구조를 나타낸 것으로서 각 국부적 PID 제어기는 오차를 입력 받아 운전 모드에서의 제어입력을 구하고 이를 퍼지 추론하여 최종 출력을 얻게 된다.

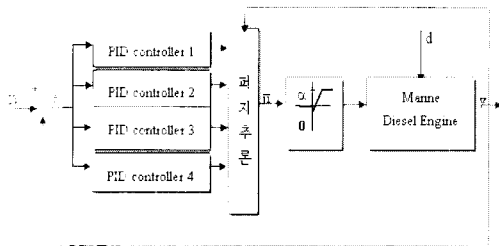


Fig. 4 Schematic diagram of the fuzzy PID Controller

#### 4. 모 의 실험

제안한 방법의 성능을 확인하기 위해서 B&W사의 4L80MC 디젤기관<sup>[15][16]</sup>을 대상으로 모의실험을 실시하며, Z-N법과 IMC법으로 동조된 PID 제어기의 결과와 비교한다.

##### 4.1 제어대상 시스템

B&W사의 4L80MC 디젤기관은 저속, 장행정 기관이기 때문에 동작점을 초저속(20rpm), 저속(40rpm), 중속(60rpm), 전속(80rpm)으로 정하였고, 국부적 모델의 파라미터 값은 몇 가지 방법으로 얻을 수 있으나 경험적인 한 방법은 문헌<sup>[16]</sup>에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서도 이 방법을 이용하며 그 결과는 Table 1과 같다. 이때 포화 입력값  $\alpha$ 는 10으로 하였다.

Table 1 4L80MC diesel engine parameters at 4 operating points

Model Parameters	Dead slow	Slow	Half	Full
L	1.50	0.75	0.50	0.38
$T_a$	0.1	0.1	0.1	0.1
$K_a$	13.6	13.6	13.6	13.6
$T_c$	0.075	0.037	0.025	0.019
$K_c$	16.345	42.16	81.87	122.47
$T_r$	3.65	3.308	2.382	1.787
$K_r$	0.045	0.020	0.010	0.006

#### 4.2 제어대상의 퍼지모델

Table 1의 국부적모델 파라미터들을 이용하여 실제 시스템과 유사한 통특성을 갖는 퍼지모델을 얻었고, 퍼지모델이 각 동작구간의 국부적모델과 잘 일치하는 지를 확인하기 위하여 응답실험을 실시하였다. 입력으로는 다음 Sinusoidal 신호를 사용하였다.

$$u_i(t) = u_{0i} + 0.4\sin(0.7\omega_i t) + 0.3\sin(\omega_i t) + 0.2\sin(1.7\omega_i t), i \in [1, 4]$$

(10)

여기서  $u_{0i}$ 는 각 동작점에서 정상상태 입력값이고,  $\omega_i$ 는 각 모델의 차단주파수(Cut-off frequency)의 근사값이다.

Fig. 5는 퍼지모델과 초저속모델에 같은 입력을 가하고 응답을 그린 것이다. 그림에서 두 모델은 20[rpm] 부근에서 서로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

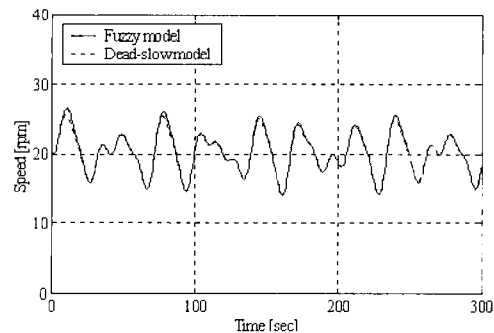


Fig. 5 Responses of the fuzzy model and the dead-slow speed model

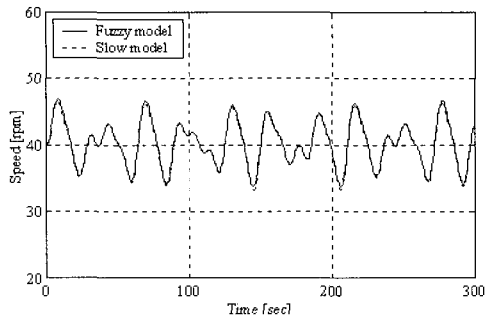


Fig. 6 Responses of the fuzzy model and the slow speed model

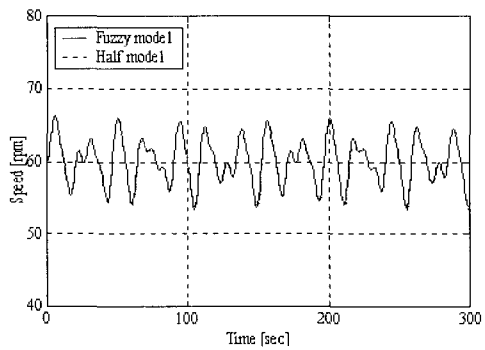


Fig. 7 Responses of the fuzzy model and the half speed model

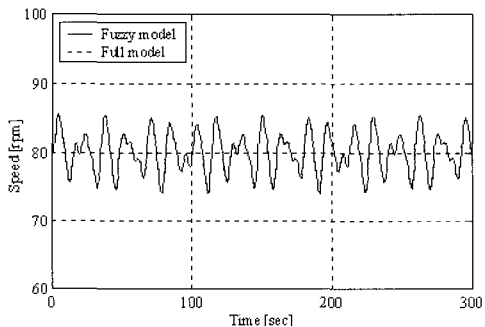


Fig. 8 Responses of the fuzzy model and the full speed model

Fig. 6은 40[rpm] 부근에서 퍼지모델과 저속모델의 응답을 비교한 것이다. 기대하였듯이 잘 일치되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 60[rpm] 부근에서, Fig. 8은 80[rpm]의 부근에서도 두 모델의 응답을 비교한 것이다. 역시 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 퍼지모델은 모든 속도 영역에서 비선형 시스템의 입출력 특성을 가짐을

확인할 수 있었다.

#### 4.3 PID 계수의 최적 동조

퍼지 PID 제어를 구성하기에 앞서 각 국부적 PID 제어기의 계수는 RCGA로 최적 동조하였고, 매개변수로 집단의 크기  $N=30$ , 재생산 계수  $\eta=$

Table 3 Tuned PID parameters

Parameters	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Model			
Dead Slow	0.2191	0.0447	0.1420
Slow	0.2836	0.0465	0.1050
Half	0.2711	0.0470	0.0578
Full	0.2840	0.0541	0.0641

1.7, 교배확률  $P_c=0.8$ , 돌연변이확률  $P_m=0.1$ 를 사용하였다. Table 3은 동조된 계수를 보여준다.

#### 4.4 설정치 변경에 대한 속도추종 실험

Fig. 9는 제안된 방법의 추종 성능을 확인하기 위하여 퍼지모델에서 시뮬레이션 응답으로서, 비교 목적으로 Z-N법과 IMC법으로 동조된 PID 제어기의 응답을 동시에 그렸다. 이 때 Z-N법과 IMC법은 초저속 모델을 기반으로 동조되었다. 계단상의 설정치 변경 실험에서 제안한 퍼지 제어기는 저속 구간에서 약간의 오버슈트가 발생하였지만 전체적으로 만족스러운 응답성능을 보인 반면에, Z-N법은 저속에서 오버슈트가 커지고, 특히 고속에서 지글링 현상이 나타남을 확인할 수 있

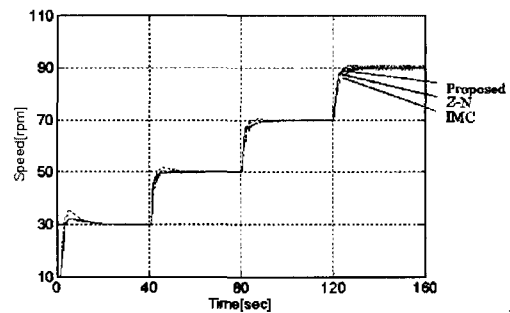


Fig. 9 Step tracking performances of the proposed, Z-N, and IMC controllers for the dead-slow speed model

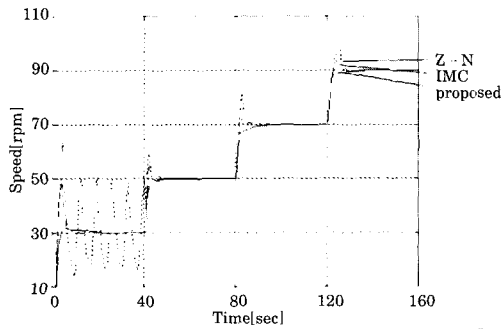


Fig. 10 Step tracking performances of the proposed, Z-N, and IMC controllers for the full speed model

다. 한편 IMC법은 제안한 방법의 것과 비슷한 결과를 보였다.

선박은 대부분 전속에서 운전되는 특수한 환경을 가지므로 조속기는 일반적으로 이 속도에서 성능이 좋도록 동조된다. Fig. 10은 이 점을 감안하여 전속모델을 기반으로 동조된 Z-N와 IMC PID 제어기의 추종 성능을 제안한 방법과 비교한 것이다. 두 방법 다 전 속도 구간에서 큰 오버슈트가 발생하였고, 특히 Z-N법의 경우에는 저속에서 과도한 지글링 현상이 나타났다. 이 결과는 고정 계수 PID 제어기를 채용하고 있는 상용 디지털 조속기에서 흔히 경험할 수 있는 현상과 유사하였다.

4.5 외란에 대한 속도조절 실험

선박은 정상 항해 중일 때는 대개 선교로부터 속도지령은 전속이 되고, 속도변경에 영향을 줄 수 있는 상황이 발생하지 않는 한 고정된다. 그러나 해상 여건의 악화로 선박이 심하게 피칭하거나 요잉하게

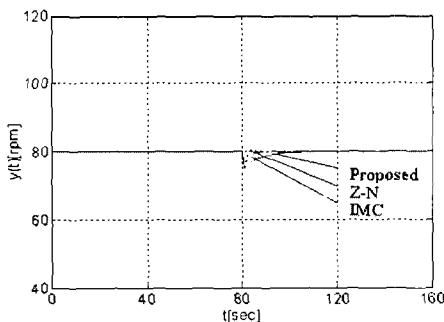


Fig. 11 Disturbance regulation performances of the proposed, Z-N, and IMC controllers

되면 기관의 부하에 급격한 변화를 일으키게 된다. 부하 변화 실험을 하기 위해 시스템이 전속모드에서 운전하고 있을 때  $t=80[\text{sec}]$ 에서 식 (1)의 d에 정격 출력의 20%에 해당하는  $+3,000[\text{BHP}]$ 의 외란을 계단형태로 80[sec]간 가하였다. Fig. 11은 제안한 방법, Z-N법, IMC법의 외란 변화에 대한 속도조절 성능을 보이고 있다.

Z-N와 IMC PID 제어기는 둘 다 전속모델을 기반으로 동조된 결과이다. 제안된 방법과 더불어 두 방법 모두 외란에 대하여 만족스러운 성능을 보이고 있는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 선박용 디젤기관의 파라미터 변동에 적절히 대처할 수 있도록 먼저 운전 속도 영역을 나누어 국부적모델을 얻고 모델과 RCGA를 기반으로 국부적 PID 제어를 동조하였다. 그리고 퍼지 규칙으로 결합하여 전 운전 속도에서 만족스러운 성능을 갖는 비선형 퍼지 PID 제어를 설계하였다.

응답 시뮬레이션을 통하여 제안된 퍼지 PID 제어기가 Z-N법과 IMC법으로 동조된 PID 제어기에 비교하여 전 속도 구간에서 좋은 응답특성을 보인 것을 확인하였다. 또한 외란에 대해서도 안정된 응답을 보였다.

본 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다.

후 기

참 고 문 헌

[1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," Trans. ASME, Vol.64, No.11, pp.759-768, 1942.  
 [2] G. H. Cohen and G. A. Coon, "Theoretical Considerations of Retarded Control," Trans. ASME, Vol.75, pp.827, 1953.  
 [3] C. E. Garcia and M. Morari, "Internal Model

- Control: A Unifying Review and Some New Results," Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 21, No. 2, pp. 308-323, 1982.
- [4] King R. and A. Stathaki, "Fuzzy Gain-Scheduling Control of Nonlinear Processes," Proc CSCC'99, Athens, 1999.
- [5] Z. Y. Zhao and M. Tomizuka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller", IEEE Trans. Sys, Man and Cyber, Vol.23, No 5, pp. 1392-1398, 1993.
- [6] P. Viljamaa and H. N. Koivo, "Fuzzy Logic in PID Gain Scheduling," Third European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies EUFIT'95, Aachen, Germany, 28-31, 1995.
- [7] T. Takagi and M. Sugeno "Fuzzy Identification of System and Its Application to Modeling and Control," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-15, pp. 116-132, 1985.
- [8] 유영호, 하주식 외12명, "선박용 디젤기관의 디지털 가바나 및 주변기기 S/W개발," 상공자원부 연구보고서, 1994.
- [9] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.
- [10] 이현식, 진강규, 김종화, 최형식, "모델에 기초한 비선형시스템의 퍼지제어," 한국퍼지 및 지능시스템 학회 논문지, 제9권, 제2호, pp. 170-178, 1999.

## 저 자 소개



### 박승수(朴承洙)

1968년 7월생. 1996년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 2002년 동대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 (주)소나테크 대표이사



### 이현식(李鉉植)

1974년 1월생. 1996년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 1998년 동대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2001년 동대학원 제어계측공학과 졸업(공학박사). 2000년 (주)토볼소프트뱅크 물류시스템 연구소 연구원. 현재 (주)바이오넥스 기술연구소 연구원.



### 김도응(金到應)

1975년 10월생. 2001년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 현재 한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정 재학중. 당학회 학생회원.



### 진강규(陳康奎)

1953년 10월생. 1977년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사). 1996년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과(박사). 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 정교수.