工學碩士 學位論文

퍼지 게인 스케쥴링을 이용한 선박 디젤기관의 속도 제어

Speed Control of Marine Diesel Engines Using Fuzzy Gain Scheduling

指導教授 陳 康 奎

2002 年 8月

韓國海洋大學校 大學院

制御計測工學科

朴 承 洙

本 論文을 朴承洙의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 工學博士　金鍾和　印

委　員 工學博士　劉永昊　印

委　員 工學博士　陳康奎　印

2002年 6月 22日

韓國海洋大學校 大學院

목　　차

Speed Control of Marine Diesel Engines Using Fuzzy Gain Scheduling

Seung-Soo, Park
Department of Control Instrumentation Engineering
Graduate School, Korea Maritime Univ.

Abstract

In marine transportation, one of the most important factors is the energy saving. In order to reduce the fuel oil consumption, ship's propulsion efficiency must be increased as much as possible. The Propulsion efficiency depends upon a combination of an engine and a propeller. This situation led the engine manufacturers to design the engine that has lower speed, longer stroke and a small number of cylinders. Consequently, the variations of rotational torque became larger than before because of the longer time delay in fuel oil injection process and increased output per cylinder. As these new trends the conventional mechanical hydraulic governors for engine speed control have been replaced by digital governors which adopt the PID control or the optimal control algorithm. And 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 overall operating points. At first, the local PID controller is designed at each speed mode, whose parameters are optimally adjusted using a genetic algorithm. Then, fuzzy “if-then” rules combine the local controllers as a consequence part. To demonstrate the effectiveness of the proposed fuzzy PID controller, a set of simulation works on a marine diesel engine are carried out.

제 1 장 서 론

최근까지 여러 제어 기법들이 제안되어 왔음에도 불구하고 아직도 산업현장에는 PID 제어기가 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 시스템이 요구되는 제어성능을 가지도록 이들을 적절히 결정하는 것을 동조(Tuning)라 한다. 동조에는 여러 방법이 적용될 수 있으나 대표적인 것으로는 Ziegler-Nichols 동조법[1], Cohen-Coon 동조법[2] 등이 있고 대부분의 경우 전문가의 경험에 의해서 시행 착오적으로 이루어지고 있다.

한편 PID 제어기는 계수가 고정되면 외란이나, 동작점 변경으로 시스템 파라미터의 변동이 클 경우에는 강인성을 보장할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이 점을 보완하기 위해 제어 환경의 변화가 일어날 경우에 제어기 계수를 자동동조(Autotuning)[3,4]하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 이 방법은 제어기 동조 후에 일정 시간동안 고정된 계수로 운전되기 때문에 그 사이에 운전환경이 변경될 때에는 만족스러운 성능을 기대하기 어렵다. 따라서 최근에는 전문가의 지식을 활용하는 지능형 제어기(Intelligent controller)[5]가 연구되고 있다. 대표적인 것으로 퍼지기법을 이용한 퍼지 제어기(Fuzzy controller)[5]를 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: FST)[7-10]

알고리즘도 연구되고 있으나, 범용으로 사용하기에는 추가적인 연구가 이뤄져야 할 것으로 보인다.

본 논문에서는 최근 여러 분야에서 주목받고 있는 퍼지와 유전알고리즘을 기존의 PID 제어기와 게인 스케쥴링 기법에 접목하여 선박용 디젤기관의 속도조절용 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 제안하는 제어기의 성능을 확인할 수 있도록 전 운전속도 구간에서 선박용 디젤기관의 동특성을 잘 나타내주는 모델을 얻는다. 선박용 기관은 주로 초저속, 저속, 중속, 전속 4가지 속도에서 운전되므로 이 부근에서 시스템의 입출력 관계를 기술해주는 지역모델을 얻고 이를 퍼지결합하여 비선형 퍼지모델을 얻는다. 다음 각 지역모델을 기반으로 지역 PID 제어기를 설계하고 전 운전 모드에서 만족스러운 성능을 갖도록 퍼지 게인 스케쥴링[7-10]을 도입한 퍼지 PID 제어기를 설계한다. 이 때 제어기의 계수는 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)를 이용하여 최적 동조된다[11-13]. 그리고 시뮬레이션을 통하여 제안하는 기법의 유효성을 살피고, Ziegler-Nichols 동조규칙과 내부 모델 제어(Internal model control: IMC)[6] 동조규칙으로 동조한 PID 제어기와 비교 검토한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제어대상 시스템인 선박기관의 운전 특성을 파악하고 각 동작구간에서 지역모델을 얻고 이를 퍼지결합하여 비선형 기관 시스템의 동특성을 나타내주는 퍼지모델을 정의하고, 3장에서는 지역모델을 기반으로 최적화 도구로 사용되는 RCGA를 이용하여 각각의 운전 모드에서 PID 제어기의 최적 계수를 찾고, 전 운전 모드에서 만족스러운 성능을 갖도록 퍼지 게인 스케쥴링 기법을 도입한 퍼지 PID 제어기를 설계한다. 4장에서는 B&W사의 4L80MC를 대상으로 제안한 기법의 우수성을 보이기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하고, 응답특성을 고찰하며, 다른 기법들과 비교한다. 5장에서는 결

론을 내린다.

제 2 장 선박 디젤기관의 모델링

이 장에서는 제어대상으로서의 선박용 디젤 주 기관으로부터 단일 동작점에서 수학적 방정식을 얻고, 이를 퍼지 결합하여 전 동작구간에서 동적 특성을 잘 나타내주는 퍼지모델을 얻는다.

2.1 선박 디젤기관의 모델링

선박용 디젤기관은 실린더, 연료분사장치, 과급기, 추진기 등이 결합된 복잡한 구조의 시스템이어서 다양한 비선형 요소들을 내포하고 있고 운전 중 그 파라미터들이 변동되므로 정확한 수학적 모델을 얻는 것은 대단히 어렵다[15-16]. 설사 근사 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. 단일 동작점에서 실린더 내 연료 분사량을 조절하는 엑츄에이터 시스템의 입력전압을 u로, 기관의 출력 회전수를 y로 정의하고 전체 시스템을 엑츄에이터 시스템과 래크를 조정하는 순간부터 증감된 연료가 분사될 때까지의 시간지연을 고려한 지연요소와 실린더 내로 분사된 연료가 착화 연소되어 기관축의 토크로 변환될 때까지의 연소계, 그리고 기관축의 토크에 의해 프로펠러가 회전하여 정상 회전속도에 도달할 때까지의 회전계로 구분하여 근사 모델을 얻으면 그림 2.1과 같은 블록선도로 표시할 수 있다.

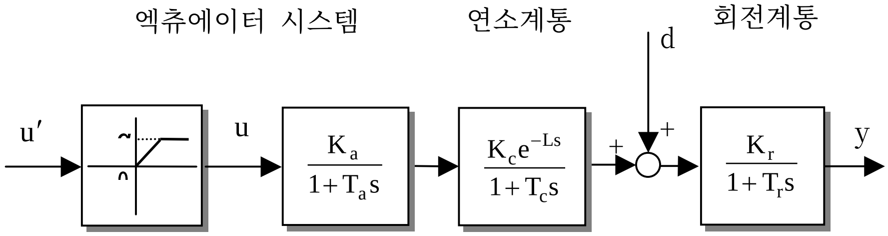

그림 2.1 선박 디젤기관의 블럭선도
Fig. 2.1 Block diagram of a marine diesel engine

포화 비선형성(Saturation nonlinearity) 이후의 블록선도를 전달함수로 표시하면 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{K_a K_c K_r e^{-Ls}}{(1+T_a s)(1+T_c s)(1+T_r s)} U(s) + \frac{K_r}{(1+T_r s)} D(s) \qquad (2.1)$$

여기서 u, y, d는 각각 입력, 출력 및 외란이고, K_a와 T_a는 각각 엑츄에이터 시스템의 이득과 시정수이며, K_c, T_c, L는 각각 연소계통의 이득, 시정수 및 시간지연이며, K_r와 T_r는 회전계통의 이득과 시정수이다. 특히 연소계통에서 일어나는 시간지연은 저속일수록 커지며 제어를 어렵게 하는 요소중의 하나이다. 몇몇 동작 회전수에서 위의 모델 파라미터 값을 얻는 방법은 몇 가지 방법으로 가능하다. 파라미터을 근사적으로 얻는 한 경험적인 방법은 문헌[15-16]에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서도 이를 적용하기로 하며, 경제적, 기술적인 관점에서 제어기는 기관의 회전수 만을 계측하여 사용하는 것으로 간주한다. 선형 동작구간에서의 입출력 관계를 미분방정식으로 표시하면 식 (2.2)와 같다.

$$\dddot{y} = -a_1\ddot{y} - a_2\dot{y} - a_3 y + b_0 u(t-L) \qquad (2.2)$$

단,

$$a_1 = \frac{T_a T_c + T_c T_r + T_r T_a}{T_a T_c T_r}$$

$$a_2 = \frac{T_a + T_c + T_r}{T_a T_c T_r}$$

$$a_3 = \frac{1}{T_a T_c T_r}$$

$$b_0 = \frac{K_a K_c K_r}{T_a T_c T_r}$$

상태벡터 $\mathbf{x}$를 $\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [y \quad \dot{y} \quad \ddot{y}]^T$ 로 정의하면 상태방정식과 출력방정식은 식 (2.3), (2.4)와 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + Bu(t-L) \qquad (2.3)$$

$$y = C\mathbf{x} \qquad (2.4)$$

단, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a_3 & a_2 & a_1 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix}$, $C = [1 \quad 0 \quad 0]$

2.2 선박 주기관의 운전특성

일반적으로 선박 주기관은 두 가지 모드, 즉 기동모드(Manuveuring mode)

와 항해모드(Navigation mode)에서 주로 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 장해물이 발견되지 않는 한 일정한 속도로(일반적으로 전속으로) 운전하는 모드이다.

기동모드에서는 선교와 기관 제어실과의 텔래그래프 신호에 따라 수시로 속도명령이 변경 하달된다. 일반적으로 네 가지 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 속도명령에 따라 설정치가 변경되면 조속기(Governor)는 기관회전수가 설정치에 가급적 빨리 도달되도록 조정해줄 필요가 있다.

항해모드에서 속도 지령은 일반적으로 전속에 설정된다. 기관은 조류, 바람, 파도 등으로 선체가 6자유도 운동을 함으로써 부하 외란을 받게 되고 이 때문에 운전 중 속도 변동이 일어나게 된다. 이 때 조속기는 속도가 설정치를 벗어날 때 마다 빨리 복귀하도록 조정해줄 필요가 있다.

특히 저속, 저기통 기관일수록 연소계통과 회전계통의 파라미터들은 운전 속도에 따라서 심하게 변동하는 특성을 가진다. 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.

2.3 퍼지 모델링

앞서 언급하였듯이 선박 디젤기관은 운전환경, 즉 운전속도에 따라

그 파라미터가 매우 다른 양상을 보이기 때문에 퍼지 게인 스케쥴링을 적용한 제어기를 설계하기 위해서는 전 동작구간에서 시스템의 동특성을 나타내주는 모델이 필요하다. 네 가지 동작점에서의 입출력 관계식을 퍼지결합하여 퍼지모델을 얻는다. 퍼지시스템의 입력신호는 출력 속도가 되며 관례에 따라 입력공간의 퍼지분할에 사용된 F^1, F^2, F^3, F^4는 각각 Dead slow speed, Slow speed, Half speed, Full speed의 의미를 가지며, 이를 정의하기 위해 가우스 함수를 사용하였다. 그 모양은 그림 2.2와 같다.

$$F^1(y) = \begin{cases} \exp\left(-\dfrac{(y - m^1)^2}{2(\sigma^1)^2}\right), & y \geq m^1 \\ 1, & y < m^1 \end{cases} \tag{2.5a}$$

$$F^i(y) = \frac{\exp(-(y - m^i)^2)}{2(\sigma^i)^2}, \quad i=2,3 \tag{2.5b}$$

$$F^4(y) = \begin{cases} \exp\left(-\dfrac{(y - m^4)^2}{2(\sigma^4)^2}\right), & y \leq m^4 \\ 1, & y > m^4 \end{cases} \tag{2.5c}$$

여기서 m^i,σ^i는 각 소속함수의 평균과 표준편차를 의미한다.

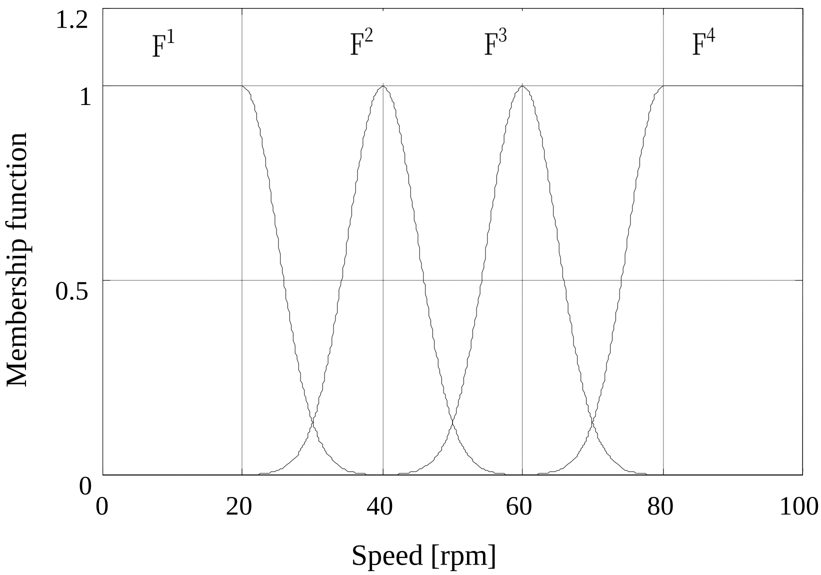

그림 2.2 입력공간의 퍼지분할

Fig. 2.2 Fuzzy partition of the input space

식 (2.3)의 상태방정식을 퍼지 결합하여 표시하면 다음과 같다.

$$\text{If } y \text{ is } F^1,\ \text{then } \dot{\mathbf{x}}(t) = A^1\mathbf{x}(t) + B^1u(t-L^1) \tag{2.6a}$$

$$\text{If } y \text{ is } F^2,\ \text{then } \dot{\mathbf{x}}(t) = A^2\mathbf{x}(t) + B^2u(t-L^2) \tag{2.6b}$$

$$\text{If } y \text{ is } F^3,\ \text{then } \dot{\mathbf{x}}(t) = A^3\mathbf{x}(t) + B^3u(t-L^3) \tag{2.6c}$$

$$\text{If } y \text{ is } F^4,\ \text{then } \dot{\mathbf{x}}(t) = A^4\mathbf{x}(t) + B^4u(t-L^4) \tag{2.6d}$$

여기서 A^1, A^2, A^3, A^4와 B^1, B^2, B^3, B^4는 각 동작점에서의 시스템의 행렬이고 L^1, L^2, L^3, L^4는 시간지연이다. 따라서, 퍼지시스템의 전체 출력은 다음 식 (2.7)를 통하여 추론된다.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{4} \rho^i [A^i x(t) + B^i u(t - L^i)]}{\sum_{i=1}^{4} \rho^i} \tag{2.7}$$

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

$$\rho^i = F^i(y) \tag{2.8}$$

여기서 $F^i(y)$ 는 y 에 대한 퍼지집합의 소속 정도이고, $\sum_{i=1}^{4} \rho^i > 0$ 인 것으로 가정한다.

제 3 장 PID 제어기의 퍼지 게인 스케쥴링

최근 선박용 대형 기관은 에너지, 유지 보수비의 절감 등의 목적으로 저속, 저기통, 장행정의 구조를 가지므로 저속에서는 연소지연이 발생하고 운전환경에 따라 파라미터들이 많이 변하기 때문에 고정된 파라미터를 가지고 전 속도 구간에서 운전하면 만족스러운 제어성능을 얻기가 어렵다. 따라서 몇몇 운전 모드에서 PID 제어기를 최적 설계하고 이를 퍼지기법으로 결합하여 속도변경 시 적절히 대처할 수 있는 퍼지 게인 스케쥴링 기법을 제안한다.

3.1 최적화 도구로서의 유전알고리즘

이 절에서는 PID 제어기 설계 시 발생되는 다변수 비선형 최적화 문제를 풀기 위하여 사용하는 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)에 대해 간단히 알아본다. 유전알고리즘은 1975년 J. H. Holland[18]에 의해서 개발된 확률적 탐색법으로서 각 세대에 새로운 자손을 생산하는 유전학과 다윈의 진화과정을 알고리즘 형태로 나타낸 것이다. 종의 육종과 선택을 구현하기 위하여 해가 될 가능성이 있는 집단을 유지하고 이를 개량하기 위해 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자를 사용한다. 유전 연산자를 통해 개체를 선택하고 이들간의 정보 형성과 교

환을 장려하여 집단을 개량함으로써 여러 방향으로의 탐색을 실행한다.

GA는 구배(Gradient)에 기초한 탐색 알고리즘과는 달리 연속성, 미분가능성, 단봉성과 같은 탐색공간에 대한 부가정보를 요구하지 않고 해집단을 이용하여 매우 크고 복잡한 탐색공간에서도 전역해에 수렴할 수 있는 장점 때문에 함수의 최적화, 신호 및 화상 처리, 시스템 식별 및 제어 등 다양한 분야[11] 에서 응용되고 있다.

3.1.1 동조 계수의 염색체 표현

GA에 채용되고 있는 코딩법은 이진코딩(Binary coding), 실수코딩(Real number coding), 기호코딩(Symbolic coding)[11]등이 있다. 그 중에 이진코딩이 가장 보편적으로 이용되고 있지만, 탐색영역을 확대하거나, 정밀도를 높이게 되면 염색체의 길이가 길어지게 되어 연산부담이 증가하는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 염색체(Chromosome)의 유전자(Gene)와 해 벡터 요소를 실수로 일대일 대응시킨 실수코딩을 채용한다. 이렇게 함으로써 염색체는 동조될 PID 계수의 조합으로 표시된다.

$$s = (K_p \quad T_i \quad T_d) \tag{3.1}$$

여기서 K_p, T_i, T_d는 PID 제어기의 정상이득, 적분시간, 미분시간을

뜻한다.

3.1.2 유전 연산자(Genetic operator)

GA는 식 (3.1)의 염색체로 구성되는 집단 안에서 모의진화를 일으키기 위해 재생산(Reproduction), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)와 같은 유전 연산자들을 사용한다. 본 논문에서는 실수코딩 유전알고즘(Real-coded genetic algorithm : RCGA)을 사용하기 때문에 실수 염색체를 다룰 수 있는 특수 유전 연산자에 대하여 고찰해 본다.

(1) 재생산 연산자

재생산은 자연계의 적자생존의 현상을 모방하여 각 개체의 적합도를 평가하고, 적합도에 따라 개체를 선택하여 새로운 집단을 형성하는 과정을 말한다. 재생산 연산자는 루울렛휠 선택에 기초한 재생산(Roulette wheel selection-based reproduction), 토너먼트 선택에 기초한 재생산(Tournament selection-based reproduction), 구배와 유사한 재생산(Gradient-like reproduction)등 여러 기법들이 있으나 본 논문에서는 Jin 등[5]에 의해 제안된 구배와 유사한 재생산을 사용하였다. 이 연산자에 의하면 집단내 개체들은 자신과 최적 개체와의 정규화된 적합도 차이와, 자신과 최적 개체와의 벡터 차의 상수 곱에 따라 변경

되어 새롭게 재생산되는데, 궁극적으로 집단내 모든 개체들을 현 세대의 최적 개체 쪽으로 끌어 모으려는 방향으로 연산한다.

(2) **교배연산자**

자연계 생물들의 개체 증식은 부모 세대의 성적결합 즉, 교배를 통해 이행되며 이를 통해 서로간의 유전자를 교환하게 된다. 유전 알고리즘에서도 개체간의 정보교환을 통해 새로운 점을 탐색하기 위하여 자연계의 교배현상을 모방한다. 교배 연산자로는 플랫교배(Flat crossover), 단순교배(Simple crossover), 산술적 교배(Arithmetical crossover)등이 있고, 본 논문에서는 단순교배와 산술적 교배를 결합한 수정단순교배[11]를 사용하였다.

따라서 교배점의 유전자는 일차결합(Linear combination) 형태를 취하게 되고 이후의 유전자는 서로 교환하게 된다.

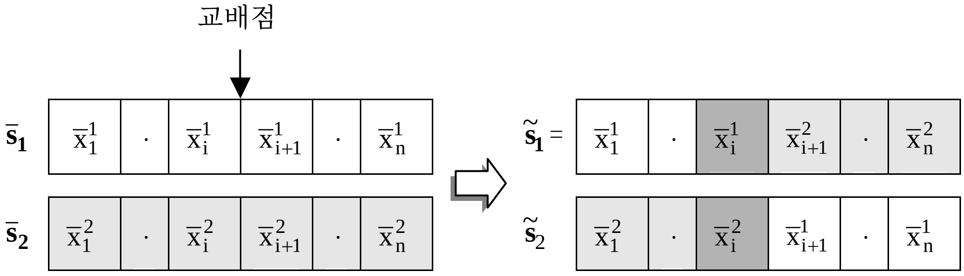

그림 3.1 수정단순교배
Fig. 3.1 Modified simple crossover

만약 교배점을 i라 하면 이점의 요소는 다음 식으로 계산된다.

$$\tilde{x}_i^1 = \lambda \bar{x}_i^1 + (1 - \lambda) \bar{x}_i^2 \quad (3.2a)$$

$$\tilde{x}_i^2 = \lambda \bar{x}_i^2 + (1 - \lambda) \bar{x}_i^1 \quad (1 \le i \le n) \quad (3.2b)$$

여기서 $\bar{x}_i^1$, $\bar{x}_i^2$ 는 교배급원에서 선택되어진 어버이 염색체의 유전자이고, $\tilde{x}_i^1$, $\tilde{x}_i^2$ 는 교배점 자손의 염색체 유전자이다. 그리고 λ는 고정되거나 아니면 각 요소마다 독립적으로 결정될 수 있는 난수이다.

(3) 돌연변이 연산자

GA가 지역해(Local solution)나 사점(Dead corner)을 벗어나기 위한 전략으로 염색체 내 임의의 요소를 확률적인 방법에 의해 변형시키는 것이 돌연변이이다. 실수 염색체에 적용할 수 있는 돌연변이 연산자로는 균등 돌연변이(Uniform mutation), 경계 돌연변이(Boundary mutation), 동적 돌연변이(Dynamic mutation)[11] 등이 있으며, 본 논문에서는 세대의 증가에 따라 전역탐색 영역을 좁혀가는 동적 돌연변이를 사용하였다. 돌연변이에 의해 임의의 k 세대는 다음의 진화과정을 거친

다.

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k,\ x_j^{(U)} - \tilde{x}_j),\ \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j - \Delta(k,\ \tilde{x}_j - x_j^{(L)}),\ \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

여기서 $\tilde{x}_j$ 는 교배 연산을 거친 염색체내에서 돌연변이 확률에 의해 선택되어진 j번째 요소이다. $x_j^{(L)}, x_j^{(U)}$ 는 j번째 염색체 요소의 하한값, 상한값이고, τ는 0 또는 1에서 둘 중 하나를 취하는 난수이다. 이때 $\Delta(k,\ y)$는 다음의 함수가 이용되었다.

$$\Delta(k,\ y) = y \cdot r \cdot (1-\frac{k}{T})^{v} \quad (3.4)$$

여기서 r은 0과 1사이의 실수 난수이고, T는 최대 세대수이며, v는 사용자에 의해 정의되는 매개변수이다. 이 연산자의 특징은 세대초기에는 전체 탐색공간에 대해 균등한 확률로 탐색을 하게 되지만, 세대수가 증가함에 따라 지역적으로 탐색하게 된다.

3.1.3 엘리트 전략

GA는 교배와 돌연변이 연산자의 확률적 속성 때문에 진화과정에 한

세대에서의 최적 개체가 소멸되는 경우가 발생할 수도 있고 최적 개체의 소멸은 탐색을 침체시키는 원인이 되기도 하다. 엘리트 전략(Elitist strategy)은 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있다가 현 세대에서 최적 개체가 소멸된 것이 확인되면, 현 세대의 가장 약한 개체 또는 임의로 선택된 개체를 저장된 최적 개체와 교환함으로써 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장한다.

3.1.4 적합도 평가

자연계에서 한 생물의 생존능력은 그 환경에 대한 적합도(Fitness)를 반영하게 된다. 마찬가지로 GA에서 최적 해로의 수렴정도는 개체의 적합도를 평가하는 과정을 통해 반영된다. 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 거쳐 새로운 집단이 완성될 때마다 개체들의 적합도는 목적함수에 의해 새롭게 평가되고 적합도의 크기에 따라 다음 세대에서 선택되어 재생산되는 비율이 조정되며 일반적으로 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받게 된다. 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 기술되고 음의 값을 가져서는 안 된다. 따라서 적합도 함수는 목적함수의 적절한 사상을 통해 얻어진다.

3.2 RCGA 기반의 PID 제어기 설계

현재까지 많은 고급 제어기법들이 제안되어 왔음에도 불구하고 선박기관의 조속기(Governor)는 아직도 현장 기술자에게 친숙하고, 단순하면서도 불확실성에 강인한 PID 제어 알고리즘으로 구현되고 있다. 앞서 밝혔듯이 기관 시스템은 운전조건이 바뀌면 조속기의 성능이 떨어지며, 최적의 성능을 얻기 위해서는 사용자가 제어기의 매개변수들을 적절히 조절해 주어야 한다. 실제로 선박기관은 대부분 항해모드에서 운전되기 때문에 이 운전모드에맞도록 제어기의 계수가 설정되면 저속운전에서 시간지연이 커져 지글링 현상이 일어나는 문제점들이 지적되고 있다. 제어기 설계를 위해 많이 사용 되어지고 있는 시행착오법이나 응답곡선 방법들은 지나치게 번거로운 결과로 얻어지고, 제어기의 성능 또한 우수하지 않다. 또한 기존의 방법들은 공정 확인을 하는데 있어 제한된 정보만을 이끌어내기 때문에 설계된 PID 제어기의 성능은 극히 제한적이며 또한 온라인 운전에는 부적합한 복잡성과 수치적인 난점들을 가지고 있다. 그래서 이런 기존 방법들의 단점을 근본적으로 극복할 수 있는 새로운 온라인 공정 확인 방법이 요구된다.

각 운전모드에서 PID 제어기의 파라미터 결정은 Ziegler-Nichols 동조법, 극-영점 배치법, IMC-PID 동조법 등 여러 방법으로 동조하는 것

이 가능하다.[1,4] 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, RCGA[11-13]을 이용한다. 그림 3.2는 RCGA를 이용하여 각 동작점에서의 모델을 기반으로 PID 제어기를 최적으로 동조하는 과정을 그림 3.2에서 보여준다. 이때 RCGA는 다음의 평가함수가 최소가 되도록 PID 제어기의 파라미터들을 조정한다.

$$J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \tag{3.5}$$

여기서 t_f는 이 시간 이후의 적분 값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 크게 설정한다.

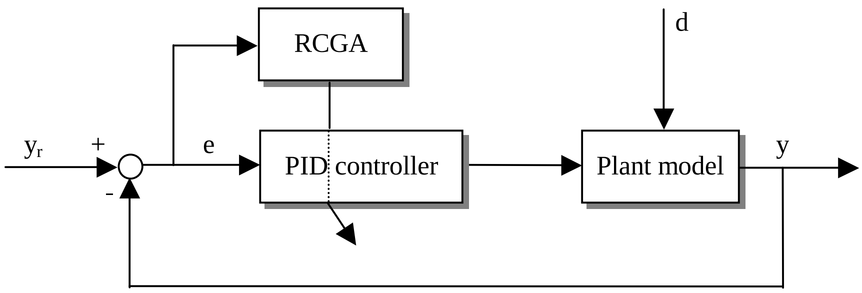

그림 3.2 RCGA를 이용한 PID제어기의 파라미터 동정

Fig. 3.2 Parameter tuning of the PID controller using a RCGA

최소화 문제의 형태로 기술되는 임의의 목적함수에 대해 적합도 함수

는 여러 가지 방법으로 계산될 수 있지만 다음 식 (3.6)과 같은 사상(Mapping)을 통해 얻을 수 있다.

$$f(\mathbf{s}(k)) = -F(\mathbf{x}(k)) - r \qquad (3.6)$$

여기서 $f(\mathbf{s}(k))$는 적합도 함수, $F(\mathbf{x}(k))$는 목적함수이고, r은 항상 $f(\mathbf{s}(k)) \geq 0$의 관계가 유지 되도록 선정되는 상수이다. r은 유전알고리즘의 성능에 직접적인 영향을 미치는 요소로서 부적절하게 선정되면 탐색의 효율이 떨어진다.

3.3 퍼지 게인 스케쥴링

게인 스케쥴링(Gain scheduling)이란 제어가 진행되는 동안 제어기의 계수를 미리 정한 방법대로 변경하는 기법으로서, 각 동작점에 적합한 제어기 계수를 테이블에 저장하고 있다가 시스템의 동작점이 변경되면 테이블로부터 찾아 제어기를 새롭게 재설정하는 것을 말한다. 이 기법은 그 동특성이 예측 가능한 시스템의 제어에 매우 유용한 방법으로서 초기에는 비행제어에 주로 사용되었으나, 디지털 장치의 개선과 더불어 선박의 자동운항 시스템과 차량의 연료연소 제어 등에도 성공적으로 응용되고 있다.

전통적으로 게인 스케쥴링 제어기의 설계는 다수의 동작점에서 비선형 시스템의 지역 입출력 관계(Local input_output relationship)를 나

타내는 지역모델을 얻음으로써 시작된다. 다음 각 지역모델을 기반으로 지역 제어기(Local controller) 가 설계되고, 보간법(Interpolation)이나 스케쥴링으로 전체 제어기(Overall controller)를 얻는다. 이때 스케쥴링은 현재 시스템의 동특성에 가장 영향을 많이 끼치는 변수들의 변경에 따라 이행되며, 이 변수를 계획변수(Scheduling variable)라 한다. 예로 비행제어 시스템에서는 동작점의 상황을 잘 감지할 수 있는 속도, 고도, 이륙각 등이고, 산업 공정 제어에서는 생산률 등이 계획변수가 될 수 있다.

본 논문에서 제어대상으로 하고 있는 선박 디젤기관은 기동모드에서는 선박의 운항 여건에 따라 초저속, 저속, 중속, 전속 4 가지 속도지령을 받아 운전되고, 운전 속도에 따라 시스템의 파라미터들의 변동이 크기 때문에 4가시 동작점에서의 지역모델을 얻고, 이를 기반으로 지역 PID 제어기를 설계하였다. 동작점이 변경될 때마다 이들은 변경하도록 게인 스케쥴링을 사용하며, 이때 계획변수로 속도를 사용 하였다. 그러나 실제 계획변수의 크기로 동작점을 구분한다는 것은 명확하지 않을 뿐더러 동작 부근에서 빈번하게 변경되기 때문에 퍼지기법을 이용하며, 여기서 도입되는 퍼지언어규칙과 추론기관은 게인 스케쥴링에 매우 유연하면서도 명확한 방법을 제공하게 된다.

따라서 이들을 "if-then" 규칙으로 결합하여 Takagi-Sugeno 모델 형태의 퍼지 제어기를 얻는다. 퍼지 제어기는 다음 식으로 표시된다.

If y(t) is F^1, then $u^1(t)=K_p^1 e(t)+K_i^1\int e(t)dt+K_d^1\frac{de(t)}{dt}$ (3.7a)

If y(t) is F^2, then $u^2(t)=K_p^2 e(t)+K_i^2\int e(t)dt+K_d^2\frac{de(t)}{dt}$ (3.7b)

If y(t) is F^3, then $u^3(t)=K_p^3 e(t)+K_i^3\int e(t)dt+K_d^3\frac{de(t)}{dt}$ (3.7c)

If y(t) is F^4, then $u^4(t)=K_p^4 e(t)+K_i^4\int e(t)dt+K_d^4\frac{de(t)}{dt}$ (3.7d)

여기서 y(t)는 계획변수이고, F^1,F^2,F^3,F^4는 입력공간의 퍼지분할에 사용 되어진 것과 같은 퍼지집합으로 사용되었고, $u^i(t)$는 i번째 규칙에 대한 PID 제어기의 출력이고, K_p^i, K_i^i, K_d^i는 해당 제어기의 비례이득, 적분이득 및 미분이득이다.

따라서, 퍼지 제어기의 전체 출력은 다음 식 (3.8)을 통하여 추론된다.

$$u(t)=\sum_{i=1}^{4}\rho^i u^i(t) \Big/ \sum_{i=1}^{4}\rho^i \tag{3.8}$$

여기서 ρ^i는 i번째 규칙의 기여도를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$\rho^i = F^i(y) \tag{3.9}$$

그림 3.3는 퍼지 제어기의 구조를 나타낸 것으로서 오차를 입력 받아 각 운전 모드에서의 제어입력을 구하고 이를 퍼지 결합하여 최종 출력 u(t)를 얻게 된다.

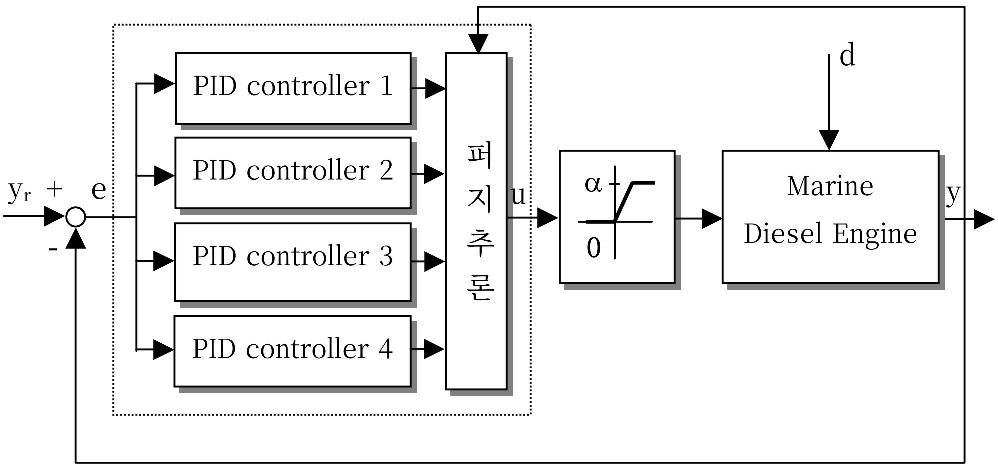

그림 3.3 Fuzzy PID 제어기의 구조

Fig. 3.3 Schematic diagram of the fuzzy PID Controller

제 4 장 모의실험

이 장에서는 제안한 방법의 성능을 확인하기 위해서 B&W사의 4L80MC 디젤기관[15-16,18]을 대상으로 모의실험을 실시하였다.

4.1 제어대상 시스템

B&W사의 4L80MC 디젤기관은 저속, 장행정 기관이기 때문에 탑재될 선박에 따라 약간의 차이는 있겠지만 동작점을 초저속(20rpm), 저속(40rpm), 중속(60rpm), 전속(80rpm)으로 정하였고, 이 때 추정된 파라미터의 근사값은 표 4.1[18]과 같다. 이때 포화 입력값 α는 10으로 하였다.

표 4.1 4동작점에서 4L80MC 디젤기관의 파라미터

Table 4.1 4L80MC Diesel engine parameters at 4 operating points

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

한편 제안된 제어기를 Ziegler-Nichlos법과 IMC법으로 동조된 PID제

어기와 비교하기 위하여 각 속도 구간에서의 고차 모델을 근사화하여 RCGA를 이용하여 시간지연 1차 모델을 구하면 표 4.2와 같다.

표 4.2 RCGA를 이용한 모델의 축소

Table 4.2 Model reduction using a RCGA

Model / Parameters	Dead slow	Slow	Half	Full
K	10.002	11.467	11.135	9.994
τ	3.648	3.307	2.386	1.788
L	1.68	0.89	0.624	0.51

4.2 제어대상의 퍼지모델

표 4.1에서도 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, 2장의 기법을 적용하여 퍼지모델을 얻었고, 각 동작구간의 퍼지모델이 실제 시스템의 지역 모델에 어느 정도 일치하는 지의 여부를 판단하기 위하여 응답실험을 실시하였다. 입력으로는 다음과 같이 Sinusoidal 신호를 사용하였다.

$$u_i(t) = u_{0i} + 0.4\sin(0.7\omega_i t) + 0.3\sin(\omega_i t) + 0.2\sin(1.7\omega_i t) \qquad (4.1)$$

i=1,2,3,4

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

그림 4.1은 퍼지모델과 초저속모델에 식 (4.1)의 입력을 가하고 응답을 그린 것이다. 그림으로부터 퍼지모델과 초저속모델은 20[rpm] 부근에서 서로 잘 일치함을 확인할 수 있다. 특히 속도가 높을수록 두 모델 사이에 약간의 오차가 발생하는 것은 동작점이 달라짐으로 인해 퍼지모델에는 인접한 지역모델(저속)의 동적특성이 일부 나타나기 때문이다.

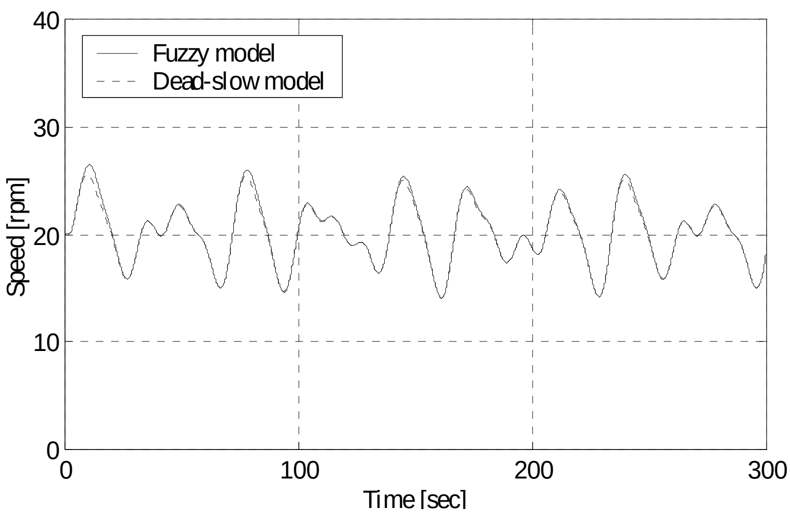

그림 4.1 퍼지모델과 초저속모델의 출력응답

Fig. 4.1 Responses of the fuzzy model and the dead-slow speed model

그림 4.2는 퍼지모델과 저속모델의 응답을 비교한 것이다. 기대하였듯이 40[rpm] 부근에서 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

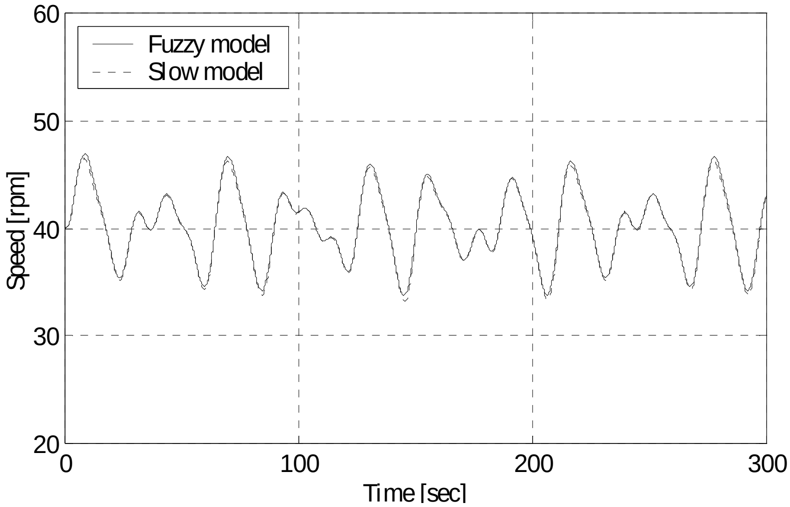

그림 4.2 퍼지모델과 저속모델의 출력응답

Fig. 4.2 Responses of the fuzzy model and the slow speed model

그림 4.3은 퍼지모델과 중속모델의 응답을 비교한 것이다. 60[rpm] 부근에서 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

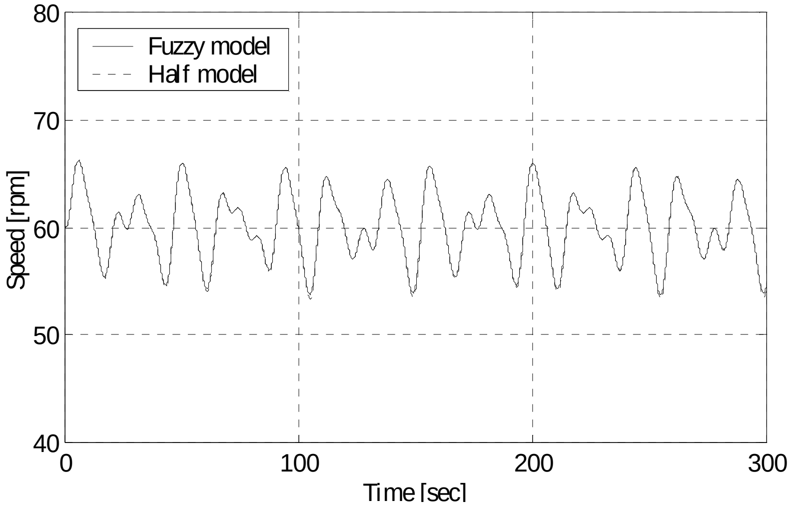

그림 4.3 퍼지모델과 중속모델의 출력응답

Fig. 4.3 Responses of the fuzzy model and the half speed model

그림 4.4는 퍼지모델과 전속모델의 응답을 비교한 것이다. 역시 80[rpm]의 속도 부근에서도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합하여 판단컨대 퍼지모델은 4가지 속도영역에서 비선형 엔진의 지역 입출력 관계를 가지는 모델의 특성을 골고루 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

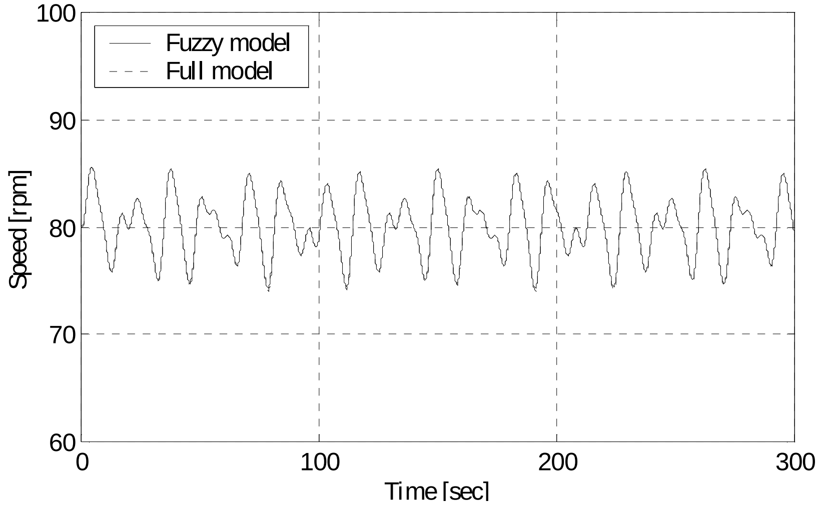

그림 4.4 퍼지모델과 전속모델의 출력응답

Fig. 4.4 Responses of the fuzzy model and the full speed model

4.3 PID 계수의 최적 동조

퍼지 PID 제어기를 구성하기에 앞서 각 동작점에서 구한 모델을 기반으로 PID 계수를 최적 동조하기 위해 RCGA 사용하였다. 이때 RCGA의 매개변수로 집단의 크기 $N= 30$, 재생산 계수 $\eta= 1.7$, 교배확률 $P_c= 0.8$, 돌연변이확률 $P_m= 0.1$를 사용하였다. 시뮬레이션을 실시한 결과 표 4.3과 같은 K_p, K_i, K_d를 계산할 수 있었고, 동시에 오우버슈트[%], 도달시간[sec], 5% 정정시간[sec]을 구하였다.

표 4.3 동조된 PID 계수와 성능

Table 4.3 Tuned PID parameters and performances

Parameters / Model	K_p	K_i	K_d	m_p	t_r	t_s
Dead slow	0.2191	0.0447	0.1420	5.6639	1.5691	10.120
Slow	0.2836	0.0465	0.1050	5.3657	0.8681	5.3999
Half	0.2711	0.0470	0.0578	3.1146	0.8208	3.4200
Full	0.2840	0.0541	0.0641	0.3746	1.5340	3.0600

그림 4.5-4.8은 이 때의 각 속도 구간의 응답을 그린 것이다.

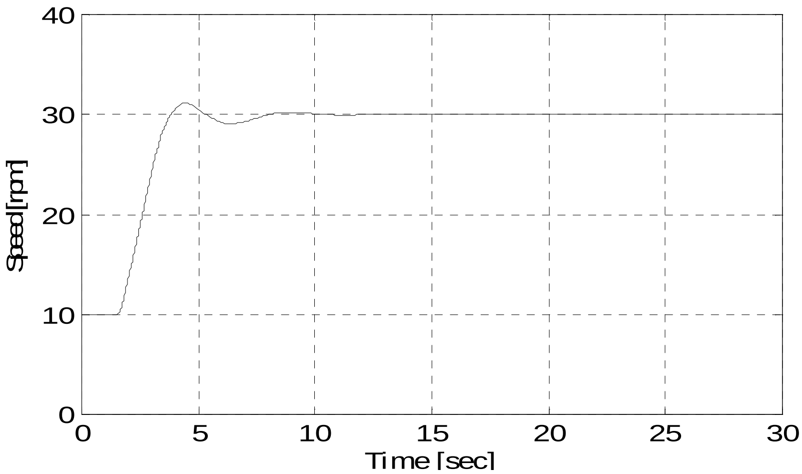

그림 4.5 초저속 모델에 대한 RCGA로 동조된 PID 제어시스템의 계단응답

Fig. 4.5 Step response of the RCGA-tuned PID control system for the dead-slow speed model

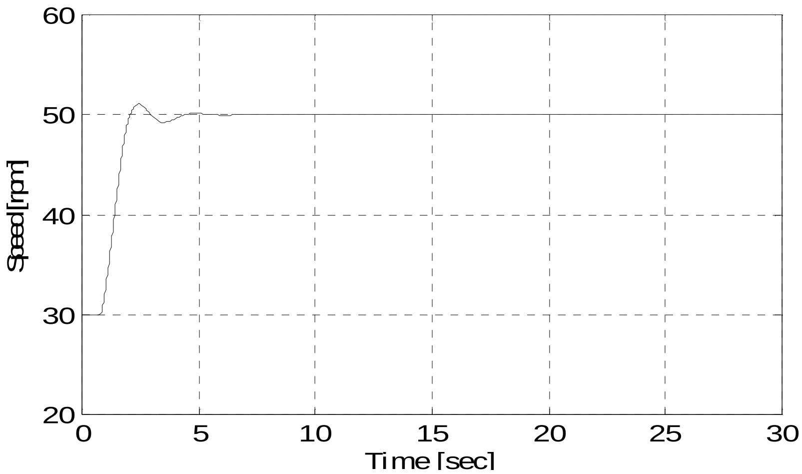

그림 4.6 저속 모델에 대한 RCGA로 동조된 PID 제어시스템의 계단응답

Fig. 4.6 Step response of the RCGA-tuned PID control system for the slow speed model

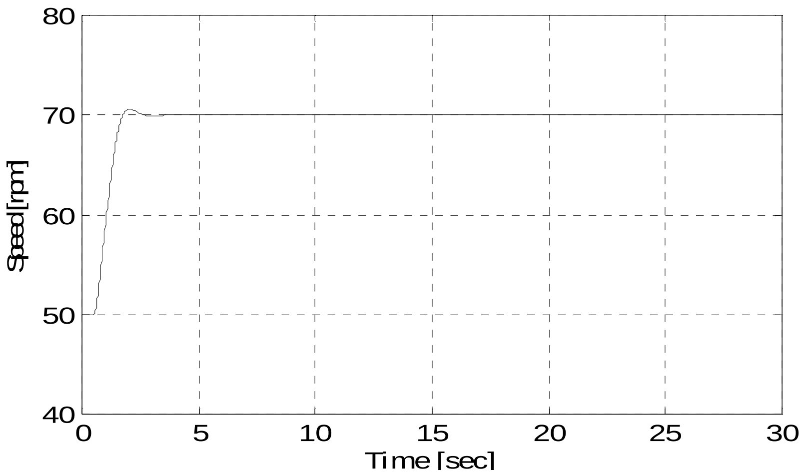

그림 4.7 중속 모델에 대한 RCGA로 동조된 PID 제어시스템의 계단응답

Fig. 4.7 Step response of the RCGA-tuned PID control system for the half speed model

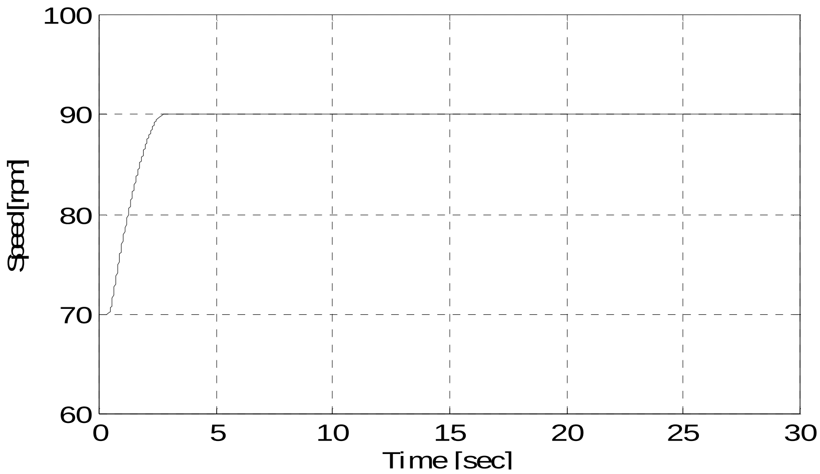

그림 4.8 전속 모델에 대한 RCGA로 동조된 PID 제어시스템의 계단응답

Fig. 4.8 Step response of the RCGA-tuned PID control system for the full speed model

4.4 설정치 변경에 대한 속도추종 실험

그림 4.9는 퍼지모델에서 속도를 변경을 하면서 제안된 방법의 추종 성능을 그린 것이다. 제안한 퍼지 제어기는 저속 구간에서 약간의 오우버슈트가 있고 정정시간이 약간 길지만 전체적으로 만족스러운 제어성능을 가지고 있었다.

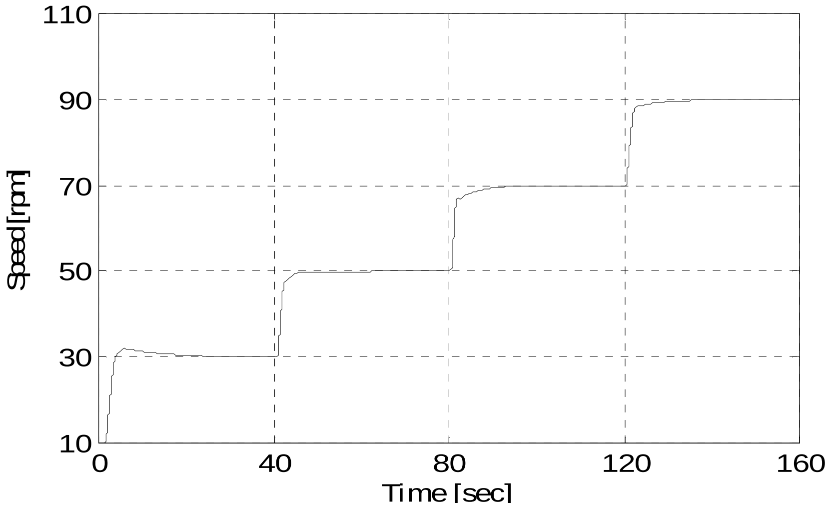

그림 4. 9 제안한 제어시스템의 계단응답

Fig. 4.9 Step response of the proposed control system

그림 4.10은 비교 목적으로 같은 퍼지모델에서 Z-N법으로 동조된 PID 제어 시스템의 추종 성능을 그린 것이다. 이때 PID 계수는 초저속 모델을 기반으로 동조된 것으로서, 저속 구간에서 오우버슈트크고 정정시간이 길며, 특히 고속에서 지글링 현상이 나타남을 확인할 수 있다.

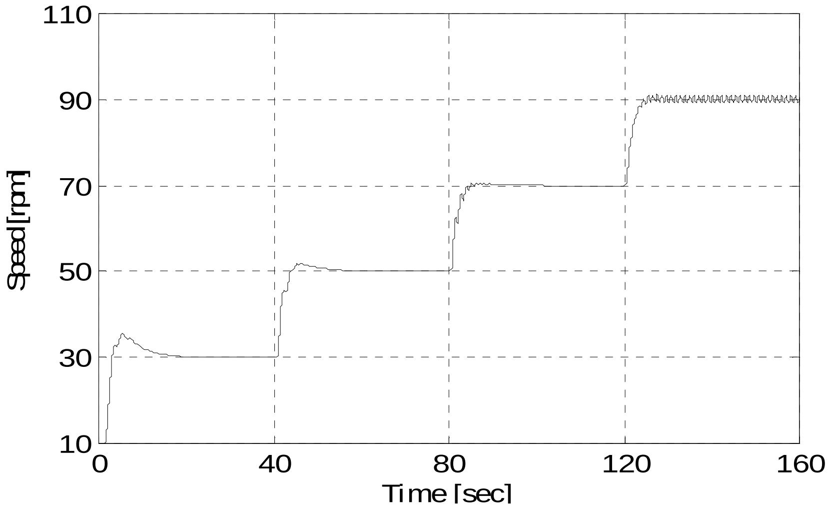

그림 4. 10 초저속모델에 대한 Z-N법으로 동조된 PID 제어시스템의 계단응답

Fig. 4.10 Step response of the Z-N tuned PID control system for the dead-slow speed model

다음 그림 4.11은 전속모델에 대한 Z-N법으로 동조된 PID 제어시스템의 추종 성능을 퍼지모델에서 얻은 것이다. 전 속도 구간에서 정치 변경 시 오우버슈트가 발생되고, 특히 저속에서 지글링 현상이 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과들은 고정 파라미터 PID 제어을 채용하고 있는 선박용 디지탈 가바나에서 자주 경험하는 현상이다.

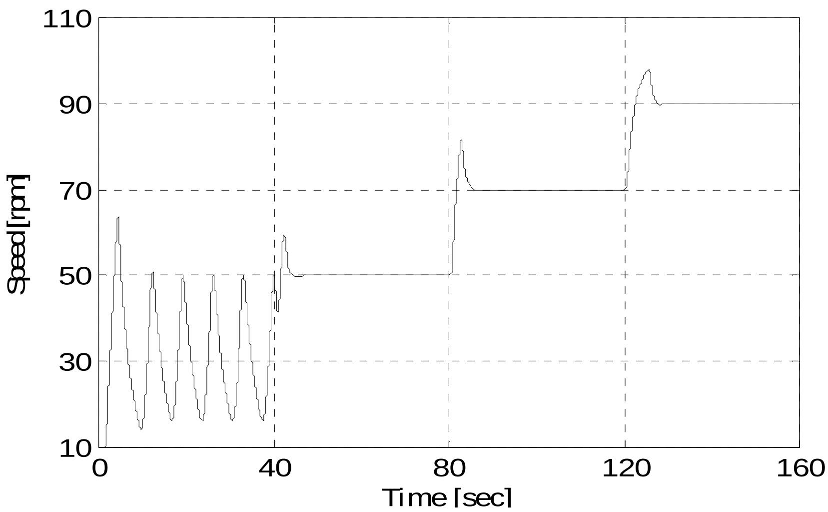

그림 4. 11 전속모델에 대한 Z-N법으로 동조된 PID 제어시스템의 계단 응답

Fig. 4.11 Step response of the Z-N tuned PID control system for the full speed model

그림 4.12는 같은 퍼지모델에서 IMC법으로 동조된 PID 제어 시스템의 추종 성능을 그린 것이다. 이때 PID 계수는 초저속 모델을 기반으로 동조된 것으로서 저속 구간에서 오우버슈트가 있고 정정시간이 긴 것을 알 수 있다.

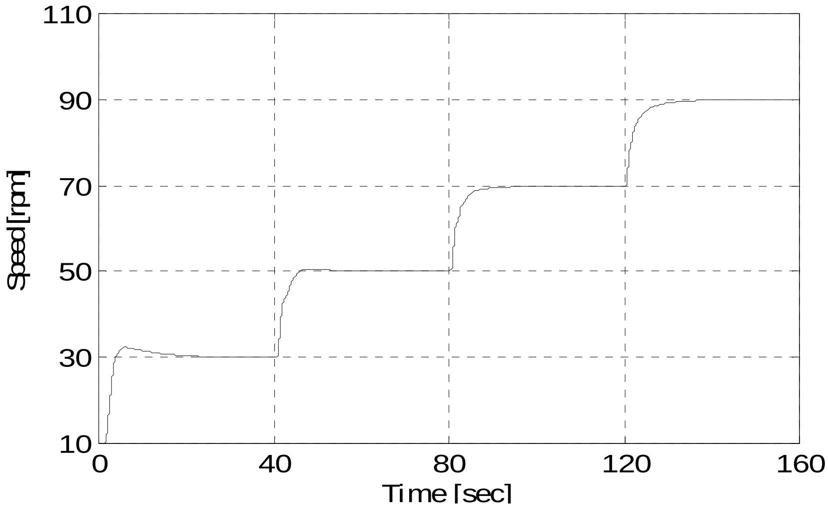

그림 4. 12 초저속모델에 대한 IMC법으로 동조된 PID 제어시스템의 계단응답

Fig. 4.12 Step response of the IMC tuned PID control system for the dead slow speed model

그림 4.13은 퍼지모델에서 전속 모델을 기반으로 IMC 동조법으로 PID 제어시스템의 추종 성능을 그린 것이다. 이때 설정치 변경 시 저속 구간에서 매우 큰 오우버슈트가 발생되는 것을 보인다.

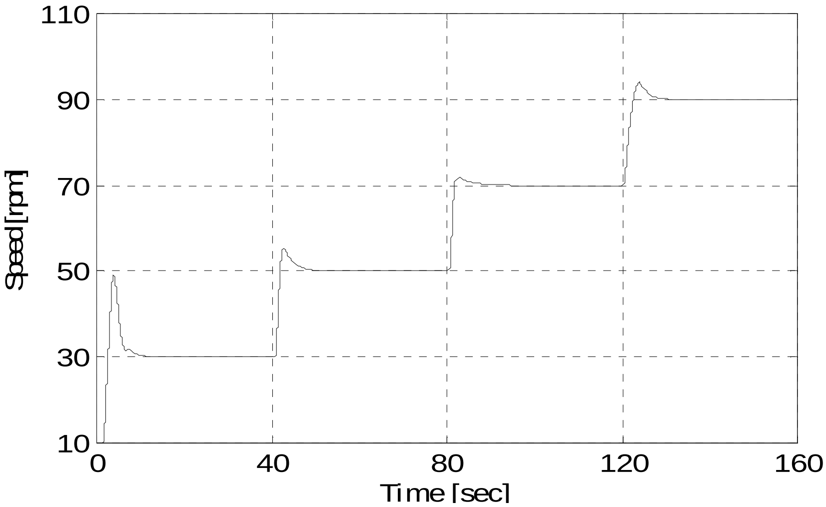

그림 4. 13 전속모델에 대한 IMC법으로 동조된 PID 제어시스템의 계단 응답

Fig. 4.13 Step response of the IMC tuned PID control system for the full speed model

4.5 외란에 대한 속도조절 성능 실험

선박은 정상 항해 중일 때는 대개 선교로부터 속도지령은 전속이 되고, 속도변경에 영향을 줄 수 있는 상황이 발생하지 않는한 고정된다. 그러나 해상여건의 악화로 선박이 심하게 피칭하기나 요잉하게 되면 기관의 부하에 급격한 변화를 일으키게 된다. 부하 변화 실험을 하기 위해 시스템이 전속모드에서 운전하고 있을 때 t= 80[sec]에서 식 (2.1)의 d 에 이 기관의 정격출력의 20%인 +3,000[BHP]의 계단상의 외란을 가하

였다. 그림 4.14는 퍼지 PID 제어시스템, 그림 4.15는 Z-N PID 제어시스템, 그림 4.16은 IMC 제어시스템의 외란 변화에 대한 속도조절 성능을 보이고 있다. 그림 4.15와 4.16은 둘 다 전속모델을 기반으로 동조된 결과이다. 제안된 방법과 더불어 두 방법 모두 외란에 대하여 만족스러운 성능을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

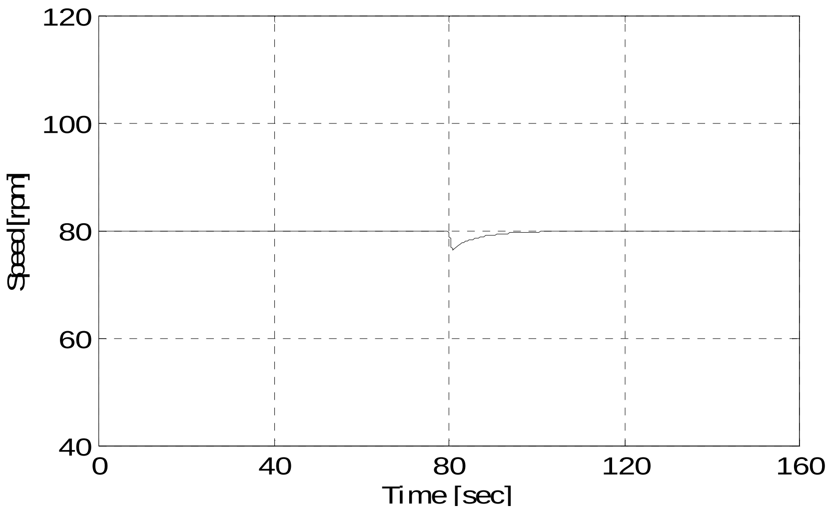

그림 4.14 퍼지 PID 제어기의 계단상의 외란에 대한 응답
Fig 4.14 Response of the Fuzzy PID control system to a step-type disturbance change

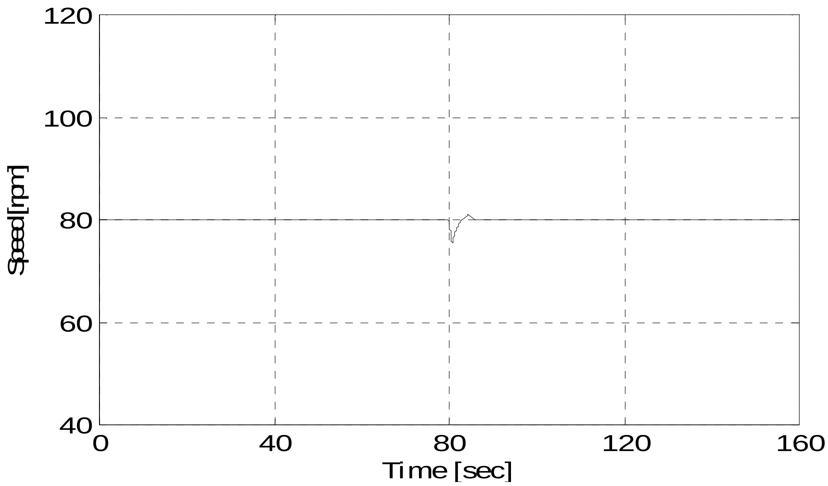

그림 4.15 Z-N PID 제어기의 계단상의 외란에 대한 응답

Fig 4. 15. Response of the Z-N PID control system to a step-type disturbance change

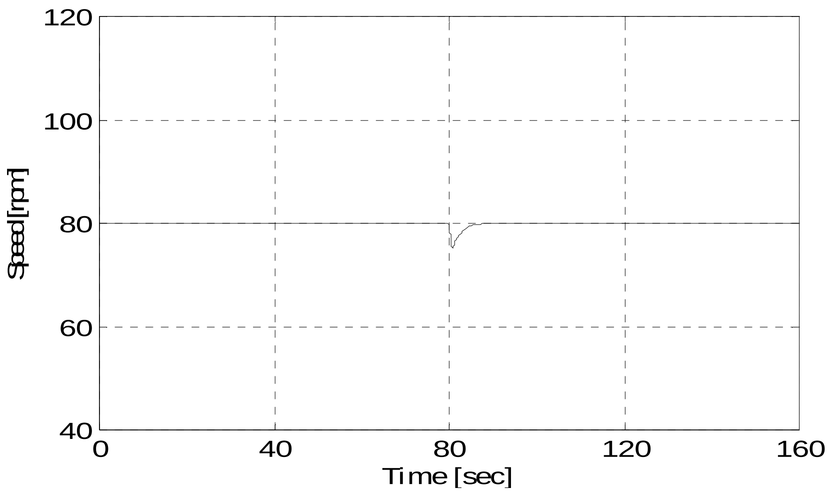

그림 4.16 IMC PID 제어기의 계단상의 외란에 대한 응답

Fig. 4.16 Response of the IMC PID control system to a step-type disturbance change

제 5 장 결 론

선박의 운항 상태에 따른 기관의 파라미터 변동 때문에 고정된 계수를 가지는 PID 제어기는 전 동작구간에서 좋은 응답특성을 충분히 만족시킬 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 기관의 파라미터 변동에 적절히 대체할 수 있는 선박용 디젤기관의 속도 제어를 위해서 운전 속도 영역을 몇 개의 구간으로 나누어 지역 모델을 얻고 RCGA를 이용하여 각각의 지역 PID 제어기 파라미터를 결정하였다. 그리고 이것을 퍼지 규칙으로 결합하여 전 운전 속도에서 만족스러운 성능을 갖도록 퍼지 PID 제어기를 설계하였다.

응답 시뮬레이션을 통하여 제안된 퍼지 PID 제어기가 기존의 PID 제어기에 비교하여 전 속도 구간에서 좋은 응답특성을 보인 것을 확인하였다. 또한 외란에 대해서도 안정된 응답을 보이고 있다. 추후 제안한 제어기를 실제 디젤기관에 적용하여 그 실용성을 확인하는 연구가 필요하다고 생각한다.

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] G. H. Cohen and G. A. Coon, “Theoretical Considerations of Retarded Control,” Trans. ASME, Vol.75, pp.827, 1953

[3] K. J. Astrom and T. Hagglund, “Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins,” Automatica, Vol. 20, pp. 645-651, 1984

[4] Su-Whan Sung and In-Beum Lee, PID Controllers and Automatic Tuning, A-JIN Company, Inc. 1999

[5] G. Jin, “Intelligent Fuzzy Logic Control of Processes with Time Delays,”Ph.D. Thesis, University of Wales Cardiff, United Kingdom, 1995

[6] 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

[7] King R. and A. Stathaki, “Fuzzy Gain-Scheduling Control of Nonlinear Processes,” Proc CSCC’99, Athens, 1999

[8] 向井淳,塚部智之, “PID게인을 자동조정하는 퍼지셀프튜닝 알고리즘,” 제어계측 8월호, pp. 169-172, 1994

[9] Zhen-Yu Zhao and Masayoshi Tomizuka, Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller, IEEE Trans. Sys, Man and Cyber, Vol.23, No 5, pp. 1392-1398, 1993

[10] 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
[11] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000
[12] 진강규, 주상래, “실수코딩 유전 알고리즘에 관한 연구,” 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 6권, 제 4호, pp. 268-275, 2000
[13] 이현식, “실수코딩 유전알고리즘을 이용한 비선형시스템의 모델기반 퍼지제어,” 한국해양대학교 대학원, 박사학위논문, 2001
[14] 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
[15] 유영호, “박용 디젤기관의 속도제어에 관한 연구,” 한국해양대학교 대학원, 박사학위 논문, 1990
[16] 유영호, 하주식 외12명, “선박용 디젤기관의 디지털 가바나 및 주변기기 S/W개발,” 상공자원부 연구보고서, 1994
[17] 이현식, 진강규, 김종화, 최형식, “모델에 기초한 비선형시스템의 퍼지제어,” 한국퍼지 및 지능시스템학회 논문지, 제 9권, 제 2호, pp. 170-178, 1999
[18] J. H. Holland, Adaptation in Natural Artificial Systems, The University of Michigan Press, Michigan, 1975

[19] K. A. De Jong, “An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptation Systems,” Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975