

가스터빈 시스템을 위한 퍼지-PI 제어기의 설계

Design of Fuzzy-PI Controllers for the Gas Turbine System

김 종 욱, 김 상 우
(Jong-Wook Kim and Sang Woo Kim)

Abstract : This paper suggests fuzzy-PI controllers for a heavy-duty gas turbine. The fuzzy-PI controllers are designed to regulate rotor speed and exhaust temperature of the gas turbine. The controller gains are tuned by genetic algorithm(GA). This paper also proposes a new fitness function of GA using a desired output response. The suggested controller is compared with previous controllers via simulations and it is shown that the rotor speed variation of our controller is smaller than those of previous ones.

Keywords: gas turbine, fuzzy-PI control, genetic algorithm, gain tuning, desired output response

I. 서론

가스터빈은 항공기 엔진에서부터 공장에서 펌프나 압축기를 구동하는 원동기, 전력회사의 발전기등 광범위하게 여러 용도로 사용되고 있고 근래에는 가스터빈에 배열회수 보일러(HRSG)와 증기터빈을 추가로 구성해서 전체 효율을 높인 복합발전소를 많이 건설하고 있다. 60Hz용 100~150MW와 50Hz용 150~200MW급 가스터빈은 단순 사이클 효율은 35% 밖에 되지 않지만 가스터빈의 연소가스를 활용한 복합 사이클 효율은 50%를 상회하기 때문에 [13] 국내에는 서인천, 일산 등지에 28기의 복합 발전소가 건립되었고 앞으로도 민간기업에서 여러 기를 건설할 예정이다.

가스터빈은 짧은 기동 시간과 신속한 부하적응이라는 특성과 부피가 적고 특별한 부수 시설이 필요 없기 때문에 예기치 못한 정전 시나 돌발적으로 발생하는 첨두 부하에 대응하여 비상 발전용으로 사용되어 왔다. 특히 전력 예비율이 낮은 우리 나라의 경우 높은 유연성에 상대적으로 건설비가 싼 가스터빈이 첨두 부하용으로 각광을 받고 있어 가스터빈 발전기 제어에 관심이 높아지고 있다.

발전소 가스터빈은 압축기, 연소기, 터빈부, 배기부, 발전기, 그리고 유향유나 냉각수 등과 같은 냉각장치 등으로 구성된다[12]. 압축기에서 공기를 압축하여 연소기로 보내면 연소기에서는 압축공기와 연료를 함께 연소하여 고온고압의 연소가스를 만든다. 고온고압의 연소가스는 터빈부에서 팽창되면서 터빈을 회전시키고, 터빈 축에 연결된 발전기의 회전자에 회전하면서 전기를 생산한다. 이와 같은 발전소 가스터빈의 제어대상은 크게 터빈의 속도와 배기가스의 온도로 나뉜다. 터빈의 속도는 터빈의 가속도와 속도, 배기가스의 온도를 참조하여 연소기에 주입되는 연료량을 조절하여 제어하고, 배기가스의 온도는 압축기에 들어가는 공기량을 조절하여 제어한다. 고온의 배기가스는 배열회수 보일러에 다시 사용되므로 일정하게 온도를 유

지해야 한다. 특히 터빈의 속도는 전원의 주파수에 영향을 미치므로 공급전원의 안정을 위하여 부하의 변동에 상관없이 터빈 속도를 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다.

발전소 가스터빈 제어를 위한 수학적 모델로 가장 먼저 제시된 것은 '83년의 Rowen의 모델이다[8]. 이 모델은 정격 회전자 속도의 95%에서 107%내의 범위에서 적용되며 연소가스의 회수가 없는, 단순 사이클의 간단한 모델이다. 그 후, Rowen은 풍량을 조절해서 배기가스의 온도를 제어하는 VIGV(Variable Inlet Guide Vane) 제어기를 자신의 모델에 추가함으로써 복합 사이클 가스터빈을 보다 근사화 한 모델을 '92년에 제시했다[9]. 이 논문에서 Rowen은 발전 용량이 19MW에서 80MW에 이르는 네 가지 모델의 가스터빈의 기본사양과 터빈 상수들을 소개했으며 속도 제어기와 온도, 가속도 제어기들은 전형적인 고정이득의 PI 제어기를 사용했다. Rowen의 단순 사이클 모델을 근거로 Hannett 등은 발전소의 데이터를 이용해서 체계적으로 가스터빈의 파라미터들을 계산하는 방법을 소개하고, 기존의 모델로 시뮬레이션 한 결과와 데이터로부터 얻은 결과를 비교함으로써 Rowen의 모델이 신뢰할만한 것임을 입증하였다[4]. 그러나 이들은 터빈속도와 배기가스 온도제어를 위하여 고정된 이득을 갖는 PI 제어기를 이용하였기 때문에 출력의 오버슈트와 정정시간(settling time)을 함께 줄이는 데에는 한계가 있다.

한편 Camporeale 등[1]과 Crosa 등[2]은 감결합(decoupling) 방식을 이용해서 복합 사이클 가스터빈의 속도와 배기 온도를 제어한 결과를 제시했다. 이들은 물리법칙에 기반한 비선형 수학적 모델을 만들고 제어되지 않은(uncontrolled) 가스터빈의 비선형 방정식을 정상상태(steady state)에서 선형화 시킨 후, 각 입력과 출력 쌍에 대한 전달함수를 구함으로써 제어기를 설계했다. 하지만 좋은 성능의 감결합 제어기를 구현하기 위해서는 가스터빈의 정밀한 수학적 모델이 필요하고, 보상 블록(compensator block)을 설계하고 계산할 때 터보가스(turbogas)의 정확한 전달함수를 알아야 하는 단점이 있다.

위에서 언급된 고정된 이득의 PI 제어와 감결합 제어의 단점들을 극복하기 위하여 본 논문에서는 퍼지-PI 제어기

접수일자 : 1999. 10. 28., 수정완료 : 2000. 6. 13.
김종욱, 김상우 : 포항공과대학교 전자·컴퓨터공학부
※ 본 논문은 한국전력공사(기초전력공학공동연구소 주관) 및 '99년도 POSCO 기술개발비 지원에 의하여 연구하였습니다.

법을 이용하여 제어를 설계한다. 퍼지-PI 제어기법을 이용할 경우 고정이득 PI 제어보다 좋은 응답성을 얻을 수 있으며 감결합 방식에서처럼 정확한 모델도 필요하지 않다.

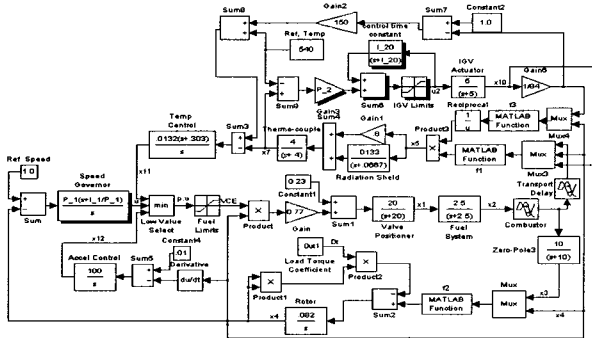


그림 1. 가스터빈 시스템의 블록 다이어그램.
Fig. 1. Block diagram of a gas turbine system.

본 논문에서는 Rowen의 모델[8][9]에 근거하여 홍종혁 [14]이 제안한 퍼지-PI 제어기법을 적용해서 속도 제어기와 IGV(Inlet Guide Vane) 제어기를 설계했다. 이 방법은 기존의 PI 제어기를 그대로 사용할 수 있고 잘 설계된 룩업(look-up) 테이블을 이용하기 때문에 실시간 제어에 유리하지만, 이득들이 너무 많아서 동조(tuning) 하기가 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 유전 알고리즘으로 퍼지-PI 제어기의 최적 이득들을 찾았다.

유전 알고리즘을 이용하여 이득을 동조할 때 가장 중요한 요소 중 하나가 적합도 함수(fitness function)이다. 본 논문에서는 바람직한 출력응답을 이용한 새로운 적합도 함수를 제시하고 이를 이용하여 제어이득을 동조한 경우가 일반적인 적합도 함수를 이용한 경우보다 우수한 제어 성능을 갖음을 시뮬레이션을 통하여 보인다. 또한 시뮬레이션을 통하여, 제안된 제어기가 기존의 PI 제어기나 감결합 제어기보다 좋은 터빈 속도제어 성능을 갖음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 발전소 가스터빈의 상태 방정식 모델과 동작 및 제어원리를 설명하고 3장에서 퍼지-PI 제어기에 대해 설명한다. 4장에서는 유전 알고리즘을 이용하여 제어기 변수들을 조정하고, 5장에서는 부하를 변동시켰을 때 출력 및 상태변수들의 변화를 시뮬레이션 함으로써 제어기의 성능을 고찰하고, 6장에서 결론을 서술한다.

II. 가스터빈 시스템

1. 가스터빈 모델 및 상태 방정식

본 논문에서는 발전소에서 많이 사용되는 General

표 1. 가스터빈의 사양.

Table 1. Specification of a gas turbine.

모델명	터빈 속도 (rpm)	정격 출력 (MW)	정격 배기 온도 (°C)	회전자 관성 (Kg-m ²)	출력 토크 (Kg-m)	회전자 시간상수 (초)
7001EA	3600	75.0	540	6,447	20,282	12.2

Electric사의 MS7001EA를 기본 모델로 설정했으며 IGV의 구동기(actuator)는 온도 제어 결과를 비교하기 위해 Crosa의 구동기 모델을 적용했다. 표 1은 가스터빈의 기본 사양이며 그림 1은 Rowen 모델의 전체적인 블록 다이어그램, 그림 2는 제어를 세부적으로 나타낸 간략화된 블록 다이어그램이다.

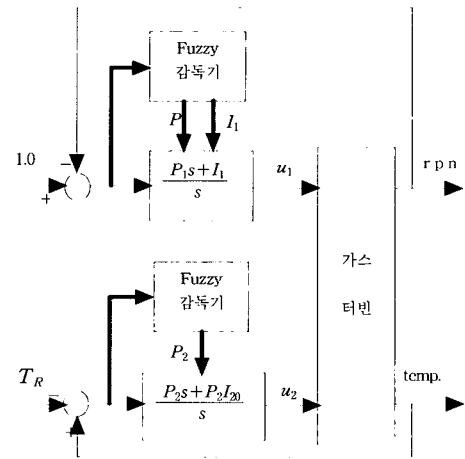


그림 2. 간략화된 블록 다이어그램.
Fig. 2. Simplified block diagram of the system.

이 시스템을 비선형 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = 20(0.77v_{CE}x_4 + 0.23) - 20x_1 \tag{1}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{\tau_F} x_1 - \frac{1}{\tau_F} x_2 \tag{2}$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{\tau_{CD}} x_2(t - \epsilon_{CR}) - \frac{1}{\tau_{CD}} x_3 \tag{3}$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{D_t}{\tau_t} x_4^2 + \frac{f_2(x_3, x_4)}{\tau_t} \tag{4}$$

$$x_5 = \frac{f_1(x_2, x_4, x_{10})}{f_3(x_4, x_{10})} \tag{5}$$

$$x_6 = \dot{x}_5 \tag{6}$$

$$x_7 = x_8 \tag{7}$$

$$\dot{x}_8 = 0.0267x_5 + 0.32x_6 - 0.0267x_7 - 0.4667x_8 \tag{8}$$

$$x_9 = u_2 \tag{9}$$

$$\dot{x}_{10} = \frac{1}{\tau_{IGV}} x_9 - \frac{1}{\tau_{IGV}} x_{10} \tag{10}$$

$$\dot{x}_{11} = -\frac{1}{\tau_T} x_7 - \frac{3.3}{\tau_T} x_8 - \frac{3.3 \times 150}{\tau_T \tau_{IGV} \max_{IGV}} x_9 \tag{11}$$

$$+ \frac{150(3.3 - \tau_{IGV})}{\tau_T \tau_{IGV} \max_{IGV}} x_{10} + \frac{150 + T_R}{\tau_T} \tag{11}$$

$$\dot{x}_{12} = \frac{100}{\tau_t} (D_t x_4^2 - f_2(x_3, x_4)) + 1.0 \tag{12}$$

$$f_1(x_2, x_4, x_{10}) = \left\{ \frac{1}{1 + 0.005(15 - T_a)} \right\} \{ [T_R - 453 \times (x_4^2 - 4.21x_4 + 4.42) \times 0.82(1 - x_2(t - \epsilon_{CR} - \epsilon_{TD}))] + 722(1 - x_4) + 1.94(\max_{IGV} - x_{10}) \} \quad (13)$$

$$f_2(x_3, x_4) = 1.3(x_3 - 0.23) + 0.5(1 - x_4) \quad (14)$$

$$f_3(x_4, x_{10}) = x_4 \frac{519}{T_a + 460} \left(\frac{x_{10}}{\max_{IGV}} \right)^{0.257} \quad (15)$$

$$u_1 = P_1(1 - x_4) + I_1 \int_0^t (1 - x_4) dt \quad (16)$$

$$\dot{u}_2 = I_{20}P_2(x_7 - T_R) + P_2x_8, \quad 25 \leq u_2 \leq 84 \quad (17)$$

$$vce = \min(u_1, x_{11}, x_{12}), \quad -0.1 \leq vce \leq 1.5 \quad (18)$$

$$y_1 = x_4, \quad y_2 = x_7 \quad (19)$$

x_1 에서 x_4 까지의 값들은 정규화된 값이며 D_i 는 정규화된 부하 토크로서 외란의 역할을 한다. 표 2와 표 3에 중요한 상태 변수들과 가스터빈의 특성값들을 정리했다.

표 2. 주요 변수들.

Table 2. Important variables.

종류	설 명	종류	설 명
x_1	연료밸브의 위치	x_2	연료량
x_4	터빈 회전자의 속도(y_1)	x_5	배기가스의 실제 온도
x_7	배기가스의 온도(y_2)	x_{10}	IGV 각도
x_{11}	온도 제어기 출력값	x_{12}	가속도 제어기 출력값

표 3. 가스터빈 특성값.

Table 3. Characteristics of a gas turbine plant.

종류	설 명	설정값	종류	설 명	설정값
τ_F	연료 시스템 시간상수	0.40	τ_{CD}	압축기 방출부피 시간상수	0.1
τ_I	터빈 회전자 시간상수	12.2	τ_{IGV}	IGV 구동기 시간상수	0.2
τ_T	온도 제어기 적분율	250	ϵ_{CR}	연소기 반응 지연 시간	0.01초
ϵ_{TD}	터빈-배기시스템 지연 시간	0.02초	\max_{IGV}	최대 IGV 각도	84° (최소: 25°)
T_R	터빈 정격 배기온도	540°C	T_a	대기 온도	18°C

속도제어기의 출력 u_1 은 (18)에서 연료 요구신호(vce)를 조절하고, IGV 제어기의 출력 u_2 는 (9)에서 IGV의 각도를 조절한다. (16)과 (17)의 P_1, P_2, I_1, I_{20} 는 본 논문에서 설계해야 할 퍼지-PI 제어기의 이득값들이며 P_1 과 I_1 은 터빈 회전자 속도제어를, P_2 와 I_{20} 는 IGV를 이용한 배기 온도 제어를 각각 수행한다. (19)는 가스터빈의 출력 방정식이다.

2. 동작 및 제어 원리

전력계통으로부터 요구부하가 감소하면 터빈에 연결된

발전기에 흐르는 전류가 감소하고 전기자 반작용 현상에 의해 터빈 회전자의 속도가 빨라지게 된다. 전체 계통의 전력 주파수와 관계 있는 터빈 회전자의 속도는 항상 일정해야 하므로 회전자의 속도가 빨라질 경우 연료량을 감소시켜 주어야 하며 이 영향으로 배기 온도가 감소한다.

복합발전 방식에서 터빈의 배기가스는 후단의 증기터빈 시스템의 열원으로 사용되므로 IGV를 제어함으로써 온도를 일정 값으로 유지시켜 주어야 한다. 이 때 IGV를 많이 열면 압축기에 들어가는 공기의 양이 많아져서 터빈의 배기 온도가 감소하고 반대로 IGV를 적게 열면 터빈의 배기 온도가 증가한다. 앞에서 기술한 원인에 의해 배기 온도가 감소하는 경우 IGV를 닫음으로써 배기 온도를 설정값으로 올릴 수 있다.

그림 1에서 연료 요구신호(vce)는 속도 제어기와 온도 제어기, 가속도 제어기의 출력값의 최소값으로 결정된다. 속도 제어에는 일반적으로 등시(isochronous) 제어와 드롭(droop) 제어가 있는데, 전자는 PI 제어이고 후자는 P 제어이며 정상상태에서의 터빈의 회전자 속도를 제어하는 데에는 등시 제어가 많이 쓰인다[8].

온도 제어기는 가스터빈의 배기 온도를 제한하는 역할을 하며 연소가스의 배기 온도가 설정된 온도를 넘을 경우 그림 1의 'Low Value Select' 부분에 음수를 입력함으로써 가스터빈에 주입되는 연료량이 감소하게 해서 온도를 낮춘다. 가속도 제어는 터빈을 시동할 때와 정지할 때, 그리고 터빈으로부터 발전기를 떼어낼 때 회전자의 가속도가 설정값 이상을 넘지 못하게 하는 역할을 한다. 결국 정상 상태에서 가장 중요한 제어기는 속도 제어기이며 나머지는 온도와 회전자 가속도의 상한(limit) 역할을 한다.

본 논문에서는 'Low Value Select' 부분을 간략화해서 속도 제어기의 출력값이 곧바로 연료 요구신호가 되도록 설계하고 시뮬레이션을 했다. 가스터빈의 상태변수들은 Euler 방법으로 적분해서 구했으며 시간 간격(time interval)은 0.01초로 설정했다.

III. 퍼지-PI 제어기

퍼지 논리를 기반으로 1974년 Mamdani와 Assilian은 퍼지 제어기(Fuzzy Logic Controller)의 기본구조를 만든 후 스티밍 엔진 제어에 도입함으로써 퍼지 제어기가 구현하기 쉬우며 좋은 제어 성능을 갖음을 보였다. 퍼지 제어기는 인간의 축적된 경험과 지식을 제어하고자 하는 대상에 적용한 것이며, 제어 규칙은 주로 전문가의 경험과 지식에 의해서 이루어진다. 특히, 퍼지 제어기는 비선형적인 특성을 가지고 있는 시스템이나 선형화된 모델이라 할지라도 프로세스의 제어변수가 많은 경우의 시스템에 대해 좋은 제어 성능을 보인다[11]. 그러나, 퍼지 제어기의 출력에는 항상 미세한 정상상태 오차가 존재하므로 일반적으로 퍼지 제어기 단독으로 사용하지는 않고 퍼지-PI 제어기, 퍼지-슬라이딩 모드 제어기, 뉴로-퍼지 제어기 등과 같이 기존에 사용하고 있는 제어기와 함께 구성해서 사용하고 있다. PID 제어기는 간단한 구조와 견실한 제어성능으로 인해 대부분의 산업현장에서 많이 사용되고 있는 제어기이다.

(20)은 PID 제어기의 출력을 표현한 것으로 $T_i (=K_p/K_i)$ 와 $T_d (=K_d/K_p)$ 는 각각 적분 시간상수, 미분 시간상수를 나타낸다.

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \dot{e}(t)] \quad (20)$$

PID 제어기의 성능을 높이기 위해 퍼지 제어와 PID 제어 알고리즘을 융합한 제어기에는 크게 자기동조 퍼지-PID 제어기, 병렬구조 PID 퍼지 제어기, 퍼지감독(fuzzy supervision) PID 제어기가 있다[6]. 자기동조 퍼지-PID 제어기법은 퍼지-PI 혹은 퍼지-PD 제어기에 대한 규칙과 제어기 출력의 증가분에 곱해지는 이득(increment gain)에 대한 규칙이 따로 있어서 구현하기가 복잡하며 외란에 대한 설정치(set point)의 추종성이 상대적으로 떨어지는 단점이 있다. (21)은 자기동조 퍼지-PI 제어기의 출력을 나타낸 것으로 $u(k+1)$ 은 제어 신호, $\Delta u(k+1)$ 은 제어 신호의 증가분, $g(k+1)$ 은 이득을 의미한다.

$$u(k+1) = u(k) + g(k+1) \times \Delta u(k+1) \quad (21)$$

병렬구조 PID 퍼지 제어기는 오차와 오차 변화량의 값에 따라서 퍼지 제어기와 PID 제어기를 교대로 사용하는 제어기로서 오차가 적을 때에는 PID를 쓰므로 기존의 PID 제어 결과와 큰 차이가 없다. 퍼지감독(fuzzy supervisor) PID 제어기는 제어기의 전체 구조를 (20)과 같이 두고 제어기의 이득들을 퍼지감독에 의해 증감시키는 제어기로서 현장에 설치되어 있는 PID 제어기에 쉽게 첨가할 수 있고 PID 제어기보다 설정치 추종성이 향상된 장점이 있다. 본 연구에서는 Tzafestas[10]가 제안하고 홍종혁[14]이 개선한 퍼지감독 PID 제어 알고리즘(이하 퍼지-PI 제어기)을 도입해서 터빈속도 제어기와 배기온도 제어기를 설계했다.

Tzafestas는 Macvicar-Whelan[7]의 논리를 이용하여 직접적인 퍼지제어 방식인 퍼지제어 행렬(퍼지 제어규칙들을 행렬형태로 구현한 것)을 PID 제어기의 이득들을 조절하는데 이용하였다. 즉, 오버슈트가 발생했을 때는 적분이득(integral gain)을 조금 줄이고 정상상태에서 미세한 진동이 발생했을 때는 미분이득(derivative gain)을 조금 증가시키며 오버슈트의 진폭이 클 때는 비례이득(proportional gain)을 감소시킴으로써 과도 상태(transient state)에서의 시스템 응답특성을 향상시킬 수 있음을 보였다. 그러나 하나의 퍼지 제어행렬로 세 개의 이득들을 변화시킴으로써 오버슈트(overshoot)가 일어나는 경우에 빨리 수렴할 수 없는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 홍종혁은 PI 제어기에서 적분이득과 미분이득의 퍼지제어 행렬을 다르게 설계하였다. 그림 3을 참고로 홍종혁이 설계한 미분이득 퍼지 제어행렬과 적분 이득 퍼지 제어행렬의 구성원리를 알아보면 다음과 같다.

플랜트의 응답이 I, V 영역에 해당되면 오차변화가 클 때는 미분이득과 적분이득을 함께 증가시키고 오차변화가 작을 때는 미분이득과 적분이득을 함께 감소시킨다. 그리고 오버슈트가 발생한 영역인 II, VI에서는 미분이득은 증가시키고 적분이득은 감소시킴으로써 출력이 빨리 수

렴할 수 있게 했다. 이렇게 구간에 따라 상승시간과 오버슈트 혹은 언더슈트를 함께 줄일수 있도록 설계된 퍼지 제어행렬들을 표 4에 나타냈다. 표에서 앞의 부호는 미분이득의 부호이고, 뒤의 부호는 적분이득의 부호로서 2사분면과 4사분면의 경우 부호만 반대이고 절대값은 같음을 알 수 있다.

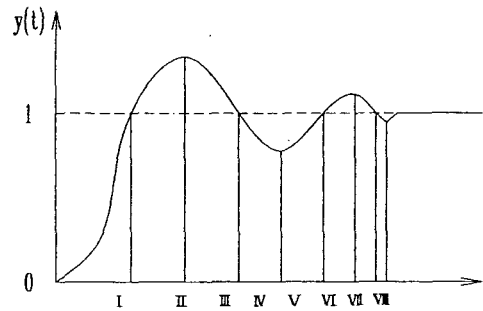


그림 3. 단위 응답 특성.

Fig. 3. Characteristic of step response.

표 4. 퍼지 제어행렬(각 요소의 부호는 미분, 적분이득의 부호순).

Table 4. Fuzzy control matrixes.

$e \setminus e'$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
6	+6	+6	+5	+5	+4	+4	+3	+3	+2	+2	+1	+1	0	0
-5	+6	+5	+5	+4	+4	+3	+3	+2	+2	+1	+1	0	0	-1
-4	+5	+5	+4	+4	+3	+3	+2	+2	+1	+1	0	0	-1	-2
3	+4	+4	+4	+3	+3	+2	+2	+1	+1	0	0	-1	-2	-3
-2	+4	+4	+3	+3	+2	+2	+1	+1	0	0	-1	-2	-3	-4
1	+3	+3	+3	+2	+2	+1	+1	0	0	-1	-2	-3	-4	-5
0	+3	+3	+2	+2	+1	+1	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
+0	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+3
-1	-5	-4	-3	-2	-1	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+3	+4
+2	-4	-3	-2	-1	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+3	+4	+4
+3	-3	-2	-1	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+3	+4	+4	+5
+4	-2	-1	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+3	+4	+4	+5	+5
+5	-1	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+3	+4	+4	+5	+5	+6
+6	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+3	+4	+4	+5	+5	+6	+6

퍼지 제어행렬은 효과적인 퍼지제어 알고리즘을 행렬로 구현한 것으로 퍼지 라벨(fuzzy label)과 소속함수를 필요로 하지 않는다. 일반적인 퍼지 제어기는 퍼지화, 추론, 비퍼지화의 과정을 거쳐 제어기의 입력에 대해 계산된 값을 출력하지만 전문가의 지식을 기반으로 작성된 퍼지 제어행렬은 각 순간의 오차와 오차 변화량에 대응되는 행렬의 원소를 제어기의 출력으로 삼음으로써 계산시간을 현저하게 줄이고 표 4에서처럼 -0과 +0 구간을 분리함으로써 미세한 오차 구간에서도 제어성능을 보장할 수 있는 장점이 있다.

퍼지-PI 제어기의 입력값의 양자화는 14단계로 하고 다음과 같이 이산집합(discrete set)으로 표현할 수 있다.

표 5. 제어기 입력값의 비선형 양자화.

Table 5. Nonlinear quantization of inputs.

양자화 단계	양자화 값에 대한 오차의 범위	양자화 값에 대한 오차변화량의 범위
-6	$e \leq -0.5$	$\dot{e} \leq -0.011$
-5	$-0.5 < e \leq -0.1$	$-0.011 < \dot{e} \leq -0.009$
-4	$-0.1 < e \leq -0.01$	$-0.009 < \dot{e} \leq -0.007$
-3	$-0.01 < e \leq -0.006$	$-0.007 < \dot{e} \leq -0.005$
-2	$-0.006 < e \leq -0.003$	$-0.005 < \dot{e} \leq -0.003$
-1	$-0.003 < e \leq -0.001$	$-0.003 < \dot{e} \leq -0.001$
-0	$-0.001 < e \leq 0.0$	$-0.001 < \dot{e} \leq 0.0$
+0	$0.0 < e \leq 0.001$	$0.0 < \dot{e} \leq 0.001$
+1	$0.001 < e \leq 0.003$	$0.001 < \dot{e} \leq 0.003$
+2	$0.003 < e \leq 0.006$	$0.003 < \dot{e} \leq 0.005$
+3	$0.006 < e \leq 0.01$	$0.005 < \dot{e} \leq 0.007$
+4	$0.01 < e \leq 0.1$	$0.007 < \dot{e} \leq 0.009$
+5	$0.1 < e \leq 0.5$	$0.009 < \dot{e} \leq 0.011$
+6	$0.5 \leq e$	$0.011 \leq \dot{e}$

$$E = \{e\} = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$$

$$CE = \{\dot{e}\} = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$$

본 논문의 모델인 가스터빈의 속도와 온도는 설정값을 정밀하게 추종해야하기 때문에 퍼지 제어기에 입력되는 온도와 속도의 오차(E)와 오차 변화량(CE)을 표 5에서처럼 특정한 구간에서 양자화 시켜야 한다. 그런데 그림 1에서처럼 온도와 속도의 설정값과 오차의 정의가 서로 다르기 때문에 (22), (23)에서와 같이 정규화 시켰다.

$$e_{speed} = \frac{1.0 - turbine\ speed}{1.0} \quad (22)$$

$$e_{temp.} = \frac{exhaust\ temp. - T_R}{T_R} \quad (23)$$

홍종혁은 PI 제어의 이득을 (24), (25)와 같이 구성하였고 (26)은 PI 제어기의 출력을 나타낸다. FLC_p 와 FLC_i 는 각각 미분이득과 적분이득에 대한 퍼지 제어행렬의 값이며 $e(t)$ 는 플랜트 출력의 오차, P_0, I_0, k_p, k_i 는 고정된 이득들이다.

$$P = P_0 + k_p FLC_p(e, \dot{e}) \quad (24)$$

$$I = I_0 + k_i FLC_i(e, \dot{e}) \quad (25)$$

$$u(t) = Pe(t) + I \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (26)$$

본 논문에서는 홍종혁의 퍼지-PI 제어기를 이용하여 가스터빈의 터빈속도 제어기와 IGV 제어기를 설계하였다.

IV. 유전 알고리즘을 이용한 이득조정

3장에서 설계된 퍼지-PI 제어기의 고정이득들을 결정하기 위하여 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하였다. 유

전 알고리즘에서 사용되는 기본적인 연산자는 재생산(reproduction), 교배(crossover)와 돌연변이(mutation) 연산자이며 이러한 연산에 의해 자식 개체들(offspring)을 생성하며 진화한다. 그리고 세대 교체시 최고의 적합도를 갖는 개체는 다음 세대에서 보존하는 엘리트 이론(elitism)을 적용하여 적합도 함수의 수렴을 보장한다[3].

유전 알고리즘의 성능은 교배율 및 돌연변이율에 크게 좌우되는데 본 논문에서는 Dejong의 값과 Grefenstette의 값을 참조했다. 교배율과 돌연변이율이 크면 최적해의 탐색(exploration) 기능은 향상되지만 개발(exploitation) 능력이 저하되어서 어느 정도 좋은 해를 찾은 후에 수렴하는데 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 반대로 교배율과 돌연변이율이 작으면 탐색 기능은 저하되고 개발 능력이 향상된다. 개체군의 크기(population size)가 크면 최적해에 도달할 확률은 높지만 많은 기억 용량과 계산시간을 필요로 하기 때문에 적당한 값으로 조절해야 한다.

본 논문에서는 표 6에서 나타냈듯이 개발과 탐색의 균형을 맞추기 위해 교배율은 Dejong의 값을 취했고 돌연변이율은 Grefenstette의 값을 취했으며 개체군의 크기는 80으로 잡았다.

표 6. 유전 알고리즘의 파라미터 값.

Table 6. Parameters of GA.

	개체군의 크기	교배율	돌연변이율
Dejong	50-100	0.6	0.001
Grefenstette	30	0.95	0.01
Ours	80	0.6	0.01

유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제의 변수값을 이진 스트링(binary string)으로 표현하기 때문에 변수가 실수값을 가질 경우 (27)에 의해 이진 스트링을 실수로 바꿀 수 있다.

$$x_{real} = x_{binary} \frac{\max - \min}{2^n - 1} + \min \quad (27)$$

(27)에서 max는 변수의 최대값, min은 최소값이며 n은 이진 스트링의 비트 수이다. 본 논문에서 유전 알고리즘으로 찾아야 하는 최적의 해는 (24), (25)의 P_0, I_0, k_p, k_i 이며 각각 15 비트씩의 유전자를 할당시켰다. 유전자의 길이가 길면 유전 알고리즘을 수행하는 시간이 비례해서 길어지기 때문에 몇 번의 시행 끝에 최적해가 존재하는 구간을 찾아내어 적당히 작은 분해도를 가질 수 있도록 유전자의 비트 수를 결정했다.

일반적인 제어기의 평가함수는 설정된 출력과 플랜트 출력의 평균 제공 오차로 구하며 (28)과 같이 나타낼 수 있다. (28)에서 $e(t)$ 는 오차값이며, T는 평가함수 계산 시간으로 본 논문에서는 20초로 잡았다.

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T \{e(t)\}^2 dt \quad (28)$$

유전 알고리즘에서는 적합도 함수를 최대화 시키도록

진화가 이루어지므로 최소화 문제를 최대화 문제로 변경하여야 한다. 이 경우, 간단히 평가함수 값의 역을 유전 알고리즘 상의 적합도 함수로 변환하여 평가함수의 최소화를 피할 수 있다[5]. 그런데 적합도 함수를 (28)의 역수로만 잡으면 오차를 최소화하는 이득만을 찾기 때문에 불안정한(unstable) 이득값들을 찾기 쉽고 가스터빈의 출력이 운전자가 요구하는 특성들을 만족시키기가 어렵다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 본 논문에서는 일반적인 적합도 함수 대신 바람직한 출력응답(desired output response) 식을 (29)와 같이 설계하여 이를 이용한 새로운 적합도 함수 (30)을 최대화하도록 제어기의 이득들을 동조하였다. (30)에서 $y(t)$ 는 플랜트의 출력이다.

$$y_d(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n(t+t_d)}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}(t+t_d) + \cos^{-1}\zeta), t \geq 0 \quad (29)$$

$$fitness = \frac{1}{\frac{1}{T} \int_0^T \{y_d(t) - y(t)\}^2 dt} \quad (30)$$

(29)에서 세 개의 변수값에 $\zeta=0.865$, $\omega_n=0.72$, $t_d=7.17$ 을 대입하면 그림 4와 같이 오버슈트가 약 1.005, 정정시간이 약 12초인 출력응답을 구할 수 있는데 이 값들은 부하 토크가 100%에서 70%로 순간 감소할 때의 회전자 속도의 이상적인 특성이다. 부하 토크는 순시적으로 큰 폭으로 변하지만 70%를 기준으로 삼은 이유는 전체 부하토크의 대략적인 중간값이고 Crosa 등의 시뮬레이션 결과와 비교할 수 있기 때문이다. 그림 5에서는 (29)의 세 개의 변수값에 $\zeta=0.83$, $\omega_n=0.7$, $t_d=6.52$ 를 대입함으로써 원하는 출력응답의 특성을 변화시킬 수 있음을 보였다.

바람직한 출력응답은 유전 알고리즘으로 퍼지-PI 제어기의 이득들을 동조할 때 사용하는 것으로 전체 블록 다이어그램의 회전자 속도의 설정값(reference speed)과는 관계가 없다. 이러한 적합도 함수의 장점으로서는 첫째, 설계자가 목표로 하는 시스템 출력사양에 근접하는 제어기의 이득을 찾을 수 있도록 하며 둘째, 안정된 출력응답을 추종하는 이득을 찾게 함으로써 제어기의 안정성을 보장할 수 있다는 점이다.

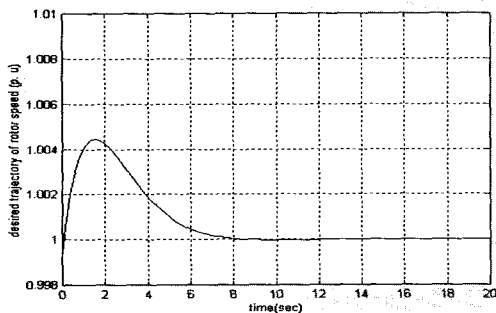


그림 4. 바람직한 출력응답.
Fig. 4. Desired output response of rotor speed.

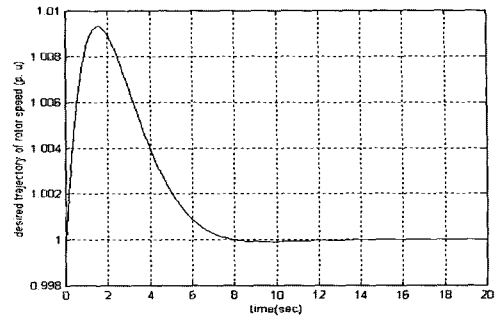


그림 5. 조정된 출력응답.
Fig. 5. Modified desired output response.

V. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 적합도 함수를 이용해서 유전 알고리즘으로 동조한 퍼지-PI 속도 제어기와 퍼지-PI IGV 제어기의 최적 이득들을 표 7에 나타냈으며 세대수에 따른 적합도 함수의 변화값을 그림 6에 나타냈다. (31)과 (32)는 퍼지-PI 속도 제어기의 미분이득과 적분이득의 구조이며 (33)은 퍼지-PI 속도 제어기의 출력을 나타낸다.

IGV 제어기는 Crosa의 IGV 제어기 구조에서 적분제어

표 7. 유전 알고리즘으로 동조된 이득들.
Table 7. Gains of controllers tuned by GA.

	이득 값
속도 제어기	$P_{10}=29.4810, I_{10}=10.7502$ $k_{1p}=5.0003, k_{1i}=1.1971$
IGV 제어기	$P_{20}=7.9784, I_{20}=0.4189$ $k_{2p}=0.5710$

$$P_1 = P_{10} + k_{1p}FLC_p(e_{speed}, \dot{e}_{speed}) \quad (31)$$

$$I_1 = I_{10} + k_{1i}FLC_i(e_{speed}, \dot{e}_{speed}) \quad (32)$$

$$u_1(t) = P_1 e_{speed}(t) + I_1 \int_{t_0}^t e_{speed}(\tau) d\tau \quad (33)$$

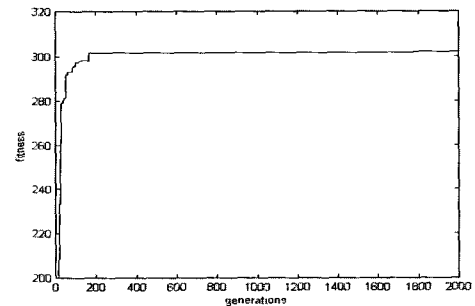


그림 6. 세대수에 따른 적합도의 수렴.
Fig. 6. Convergence of fitness function.

의 이득(I_{20})은 일정한 값으로 고정시키고 비례제어 이득

만 미분이득 퍼지 제어행렬의 값을 참조했는데 그 이유는 Crosa의 IGV 제어기는 (17)에서처럼 비레이득(P_2)과 적분이득(I_{20})이 서로 곱해져 있는 구조여서 퍼지-PI 제어의 장점을 살릴 수가 없기 때문이다. (34)는 퍼지-PI IGV 제어기의 미분이득의 구조이며 (35)는 퍼지-PI IGV 제어기의 출력을 나타낸다.

$$P_2 = P_{20} + k_{2p}FLC_p(e_{temp.}, \dot{e}_{temp.}) \quad (34)$$

$$u_2(t) = T_R P_2 e_{temp.}(t) + T_R P_2 I_{20} \int_0^t e_{temp.}(\tau) d\tau,$$

$$25 \leq u_2 \leq 84 \quad (35)$$

그림 7은 부하토크가 100%에서 70%로 감소했을 때 터빈 속도의 바람직한 출력 응답과 본 논문의 퍼지-PI 속도 제어기로 제어한 속도 응답을 비교한 것으로, 바람직한 출력응답의 이상적인 특성을 모사하여, 제어된 터빈 속도 또한 오버슈트가 작고 정정시간이 짧음을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 평가함수의 성능을 비교하기 위해 일반적인 평가함수 (28)을 사용해서 유전 알고리즘으로 이득을 동조한 제어기의 시뮬레이션 결과를 그림 8에 나타냈다. 이 때의 속도 제어기의 이득은 (31),(32)에서 $P_{10} = 1.5420$, $I_{10} = 2.8778$, $k_{1p} = 4.9454$, $k_{1i} = 0.7844$ 이다.

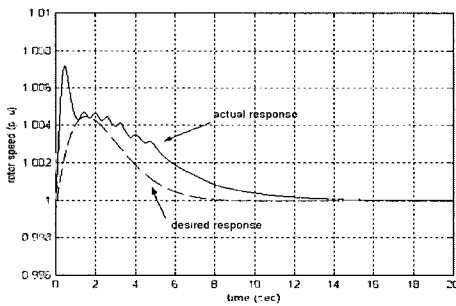


그림 7. 터빈 속도의 비교.
Fig. 7. Comparison of turbine speed.

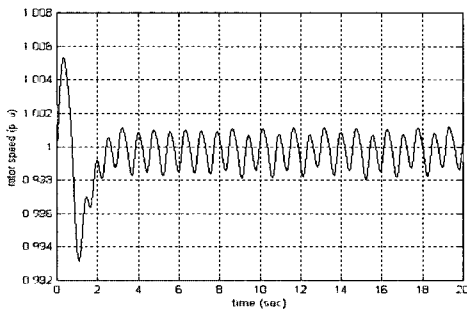


그림 8. 일반적인 적합도 함수로 찾은 이득들로 시뮬레이션한 터빈 속도.
Fig. 8. Simulation of turbine speed using different gains.

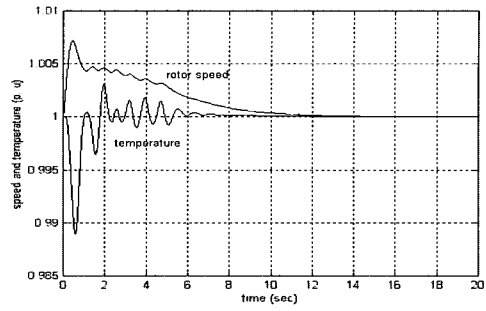


그림 9. 속도와 배기 온도의 변화.
Fig. 9. Speed and temperature.

그림 7과 그림 8을 비교해 보면 비록 절대오차의 최대값은 그림 8이 작지만 진동이 너무 심해서 제어기로 사용할 수 없음을 알 수 있다. 부하 토크가 100%에서 70%로 감소했을 때 회전자 속도와 배기 온도의 변화를 그림 9에 나타냈고 출력 토크가 부하 토크를 빠른 시간 안에 잘 추종함을 그림 10에서 나타냈다. 2.2절에서 설명했듯이 토크가 순간적으로 감소하면 회전자 속도의 오버슈트가 발생하고, 속도를 안정시키기 위해 속도 제어기에서 연료량을 감소시킨 결과로 배기온도는 감소한다. 이 때 감소한 배기온도를 설정온도로 올리기 위해 IGV 제어기에서 IGV를 73° 에서 49° 로 닫아 준다.

그림 9와 그림 11에서 온도와 IGV가 출력거리는 현

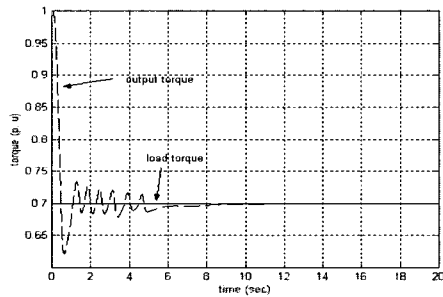


그림 10. 출력과 부하 토크의 변화.
Fig. 10. Output and load torque.

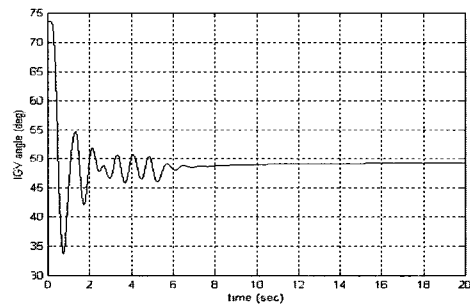


그림 11. IGV 각도의 변화.
Fig. 11. IGV angle.

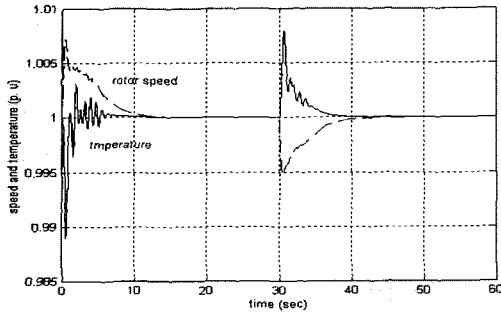


그림 12. 속도와 배기 온도의 변화.
Fig. 12. Speed and temperature.

상이 발생하는데 그 원인은 온도를 계산하는 (5)의 함수 f_1 에 있다. (13)을 보면 f_1 의 인수 중에는 터빈 속도 x_4 가 있다. 그런데 본 논문에서 간략화 된 모델을 사용해서 제어한 터빈 속도의 오버슈트는 실제 발전소의 터빈 속도의 오버슈트(최고 1.003)보다 크므로 발전소의 터빈 속도를 기준으로 계산한 온도 값에 비해 출력거림이 조금 심하다고 할 수 있다. 즉 온도를 결정하는 인수 중 터빈 속도 x_4 가 필요 이상으로 크게 온도에 영향을 미친 때문으로, 그림 9에서 터빈 속도와 온도가 출력거리의 주기가 같음을 보면 알 수 있다.

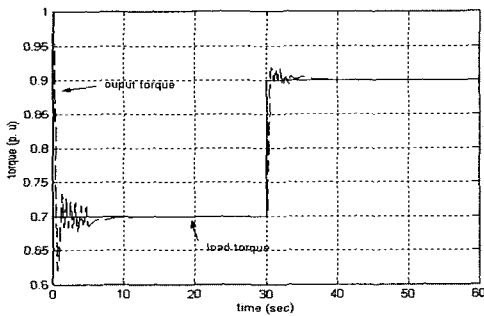


그림 13. 출력과 부하 토크의 변화.
Fig. 13. Output and load torque.

표 8. 제어 결과의 비교.

Table 8. Comparison of controlled results.

순서	출력 (MW)	속도 (rpm)	감소 정도	속도의 최고치	온도의 최저치	정정 시간(초)
Crosa's	60	6000	30%	1.026	0.994	20
Camporeale's	21.5	3000	20%	1.012	0.994	8
Ours	75	3600	30%	1.007	0.989	15
			20%	1.004	0.992	13

그림 12에서는 부하 토크가 100%에서 70%로 감소한 후, 30초 후에 20% 증가해서 90%로 되는 동안의 회전자 속도와 배기 온도의 변화를 나타냈다. 부하 토크가 70%에서 90%로 순간 증가한 경우 회전자 속도의 언더슈트가 발생

하고, 속도를 안정시키기 위해 속도 제어기에서 연료량을 증가시킨 결과 배기 온도 또한 증가하게 된다. 이 때 증가한 배기 온도를 설정온도로 낮추기 위해 IGV 제어기에서 IGV를 열어준다. 그림 13에서는 출력 토크와 부하 토크의 관계를 나타내었는데 출력 토크가 빠른 시간 안에 부하 토크를 잘 추종함을 알 수 있다.

표 8에서는 기존에 발표된 논문들의 결과와 본 논문의 결과를 비교해서 나타냈다. 표에서 '감소정도'는 부하 토크가 100%에서 계단함수 값으로 감소한 정도를 의미한다. 각각의 터빈의 정격 출력과 회전자의 속도가 다르기 때문에 공정한 비교는 될 수 없지만 본 논문의 가스터빈이 가장 큰 출력을 내면서도 회전자 속도의 오버슈트가 가장 작음을 알 수 있는데 그 값이 Crosa에 대해서는 26.92%, Camporeale에 대해서는 33.3%에 해당된다.

VI. 결론

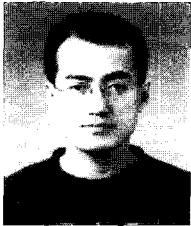
본 논문에서는 퍼지-PI 제어 방식으로 정상 상태에서 가스터빈의 속도와 배기가스의 IGV 제어를 설계했다. 퍼지-PI 제어 방식은 PI 제어시 발생하는 오버슈트와 정정시간을 개선할 수 있도록 현재 시스템 출력의 오차와 오차의 변화량을 참조로 해서 미분이득과 적분이득을 퍼지 제어 행렬에 의해 변화시키는 제어 방식이다. 그런데 퍼지-PI 제어기에는 네 개의 이득들이 있어서 다양한 출력을 만들어 낼 수 있는 반면 동조하기가 어려운 단점이 있으므로 본 논문에서는 현재 각광받고 있는 최적화 방법인 유전 알고리즘을 이용해서 이득들을 동조했다. 그리고 실제출력과 바람직한 출력응답과의 오차의 역수를 적합도 함수로 설정함으로써 출력의 오버슈트를 최소화시키면서 정정시간도 함께 줄일 수 있는 퍼지-PI 제어기의 이득들을 동조할 수 있었는데 본 논문의 터빈속도 제어결과는 Crosa 등과 Camporeale 등이 사용한 감결합 제어결과보다 성능이 크게 향상되었음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 Rowen이 제시한 블록 다이어그램과 함수들만을 이용해서 모의실험을 실시했기 때문에 그림 9에서처럼 다소 비현실적인 배기 온도의 파형을 얻을 수 있었는데 이것은 실제 현장에서 취득한 데이터로 모델링 하면 보다 현실적인 값으로 개선할 수 있을 것이다. 그리고 배기 온도의 경우 회전자 속도와 연료량, IGV 각이 영향을 미치기 때문에 다변수 제어를 한다면 더욱 좋은 제어결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] S. M. Camporeale, B. Fortunato, and A. Dumas, "Dynamic modeling and control of regenerative gas turbines," *ASME paper 98-GT-172*, June 2-5, 1998.
 [2] G. Crosa, G. Ferrari, and A. Trucco, "Modelling and recoupling the control loops in a heavy-duty gas turbine plant," *ASME paper 95-GT-61*, June 5-8, 1995.
 [3] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

- [4] L. N. Hannett and Afzal Khan, "Combustion turbine dynamic model validation from tests," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 152-158, 1993.
- [5] Y. H. Joo, H. S. Hwang, K. B. Kim, and K. B. Woo, "Fuzzy System Modeling by Fuzzy Partition and GA Hybrid Schemes," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 86, no. 3, pp. 279-288, 1997.
- [6] R. Ketata, D. De Geest, and A. Titli, "Fuzzy controller design, evaluation, parallel and hierarchical combination with a PID controller," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 71, pp. 113-129, 1995.
- [7] P. J. Macvicar-Whelan, "Fuzzy sets for the man-machine interaction," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 8, pp. 687-697, 1976.
- [8] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines," *Journal of Engineering for Power*, vol. 105, pp. 865-869, October, 1983.
- [9] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service," *Turbomachinery International*, pp. 26-32, July/August, 1992.
- [10] S. Tzafestas, "Incremental fuzzy expert PID control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 37, no. 5, October, 1990.
- [11] Li-Xin Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall, 1997.
- [12] 우주희, 김종안, 신윤오, "운전데이터에 의한 가스터빈 발전소의 연료제어 시스템 모델링", *Proceedings of the 13th KACC*, vol. 2, pp. 2019-2022, October, 1998.
- [13] 조병권, "신형 가스터빈, 복합싸이클," *전력기술*, 제 2권, 제4집, pp. 80-89, 1991. 12.
- [14] 홍종혁, "퍼지 PI 알고리즘을 이용한 산업용 로봇의 위치/힘 제어," *한양대학교 석사학위 논문*, 1991. 6.



김 종 욱

1970년 10월 24일생. 1997년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전자전기공학과 석사. 2000년~현재 동대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 지능제어 및 시스템 식별.



김 상 우

1983년, 1985년, 1990년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과에서 학사, 석사, 박사학위를 받음. 1991년 제어계측 신기술 연구센터 연구원. 1993년 호주 국립대학교 방문교수. 1992년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수. 주요 관심 분야는 강인제어, 촉차모델링, 공정자동화, 무인화 운행기법 등임.