論文

터보제트엔진의 퍼지제어기 설계 및 다목적함수 만족기법을 통한
제어성능 향상에 관한 연구

한동주*

A Study on the Design of Fuzzy Controller
for a Turbojet Engine Model and its Performance Enhancement
through Satisfactory Multiple Objectives

Dong-Juh Han*

ABSTRACT

In the study of control technique for a turbojet engine model, the Takagi-Sugeno fuzzy logic controller has been designed based on the model identification by the well designed PI controlled system through T-S neuro-fuzzy inference system. To enhance this designed controller, those procedures are proposed that certainty factors are adopted to each rule of objective groups which are classified by the fuzzy C-Means algorithm and the satisfaction degrees are matched to meet the objectives. This proposed technique shows its feasibility by upgrading performances of the previously well-designed T-S fuzzy controller.

초 록

터보제트엔진 모델에 대한 제어에 있어서, 비교적 잘 설계된 PI 제어기 성능결과를 바탕으로 Takagi-Sugeno형 뉴로-퍼지 추론계를 통한 플랜트 모델의 제어 시스템을 규명함으로써, PI형 T-S 퍼지제어기를 설계하였다. 이렇게 설계된 제어기의 성능을 향상시키기 위하여, 각 퍼지규칙들을 퍼지 C-Means Algorithm으로부터 각각의 목적 함수군으로 분류한 후, 각 분류군에 대해 규칙간의 가중치가 각 목적함수의 만족도에 부합되도록 하는 기법을 제시하였고, 이를 잘 설계된 T-S형 퍼지제어기에 적용하여 성능을 향상시킴으로써 그 유용성을 보였다.

Key Words : Turbojet Engine(터보제트엔진), T-S Fuzzy Logic(T-S 퍼지논리), Satisfactory Multiple Objectives(다목적함수 만족)

1. 서 론

고성능 터보제트엔진은 명령하는 연료량 입력에 대해 신속한 추력특성을 나타내기 때문에 초

기 동적반응에 대한 규명 및 이에 대한 적절한 제어가 필요하다. 응답 초기의 온도, 압력 등의 과도특성이 제트엔진의 열역학적인 안정성에 위배될 경우 서지(Surge), 화염소실(Flame-out) 등으로 인한 운전 또는 열적 충격으로 인한 터빈 등의 부품 손상을 야기시키게 된다. 따라서 제트엔진의 열역학적 및 기계적인 상태변수(로타 회전수, 온도, 압력)를 정확히 감지하고 이를 열적 안정범위내에서 신속하게 작용하여 고성능의 추

† 2002년 11월 11일 접수 ~ 2003년 6월 2일 심사완료

* 정회원, (주)썬에어로시스 기술연구소

연락처, E-mail: djhan@sunaerosys.com

한국과학기술원 신기술창업관 5118호

대전시 유성구 구성동 373-1

력 동적반응특성을 갖도록 연료량 입력을 효과적으로 제어하는 것이 제트엔진 제어기설계의 관건이다. 실용적인 제트엔진의 제어는 일반적으로 PID 제어법칙을 이용하여 일부 측정 가능 상태변수(로타 회전수, 온도, 압력 등) 제환방식(Feedback)을 들 수 있는데, 제트엔진 시스템의 모델특성이 규명되면서[1, 2] 기준점 추적제어의 PI 제어방식이 일반화되었다. 이들 방식은 시스템 규명(Identification)을 통해서 잔여모드(Residual Mode)를 현격하게 무시한 1,2차 선형 모델을 이용함으로 인해 실제 제어 성능을 충분히 발휘하지 못하고 있다. 따라서 80년대부터 고성능 제트엔진의 출현은 효율적인 제어기의 필요성을 대두시켜 Athans[3, 4]에 의해 강인 최적제어이론에 근거한 LQG/LTR 기법의 제트엔진 제어기 설계가 주류를 이루었다[3~9]. 이들은 Geyser[2]의 선형모델에 근거한 최적제어에 통계적인 외란의 강인성을 가미하여 이론적으로 상당히 개선된 제어성능을 얻고 있으나 외란 모델의 불안정성이나 감지가능한 한정된 상태변수로 인해 실제적인 제어기 구현에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 제트엔진 제어기 설계에 대해 실제적인 PI 제어기와 같은 설계기법에 근거, 감지가능한 상태변수로부터 출발하여 퍼지추론방식을 이용한 제어기를 설계하고 주요상태변수의 목적성능들을 만족하도록 하는 기법의 개선된 퍼지제어기 설계에 대해 연구하고자 한다. 퍼지규칙을 이용한 제어기법은 특히 비선형 및 불확실한 시스템에 대한 탄력적인 적응성과 강인성을 갖는 장점에도 불구하고 논리법칙의 수, 퍼지변수, 경험법칙의 정확성, 안정성 등에 대한 일관적인 로직보완문제, 시스템처리시간의 과다 등으로 인해 일부 특징적인 시스템에만 효율적으로 사용되었으나, 연산처리기(CPU)의 고속화에 의한 실시간 제어처리 기능강화와 로직의 발전에 힘입어 그 우수성 및 적용성이 확대되고 있다. 특히 제트엔진의 경우는 퍼지추론과 신경망을 결합하여 운전중 결함탐지(Fault-diagnostic) 또는 손상허용(Fault-tolerance)기법에 유용하게 사용되고 있다.

제트엔진과 같은 비선형적인 제어특성에 잘 부합되기 위한 퍼지규칙의 효율성은 퍼지화(Fuzzification)/비퍼지화(Defuzzification), 퍼지추론 등의 변수 설정에 따라 좌우된다. 그간 퍼지추론방식의 제트엔진 제어기설계는 이들 퍼지변수들의 비교적 정확한 예측 부족으로 재래식 PI 제어기에 비해 그리 향상되지 못한 결과를 보이고 있다. 본 논문에서는 이러한 점을 개선하기

위해 비교적 잘 설계된 PI 제어 결과로부터 퍼지제어규칙을 규명하여 퍼지제어기를 설계하고, 원하는 성능척도(Performance Measure)들에 대한 다목적 함수(Multiple Objectives)를 일정수준 만족하는 척도로서의 만족도(Satisfaction Degree)[11]를 이용한 향상된 성능의 제트엔진 퍼지제어기 설계기법에 대해 논하고자 한다.

II. Takagi-Sugeno 형 퍼지 추론 방법을 이용한 퍼지제어기 설계

2.1 제어기 설계 대상 플랜트 모델

대상모델로는 항공기용 터보제트엔진 모델로서 제어기 설계의 목적은 연료량 입력에 대해서, 엔진의 열역학적인 변수들의 동안정적이면서 신속한 응답특성으로부터, 결국 제트엔진의 성능을 결정짓는 고성능, 고기동의 추력(Thrust) 특성을 얻는 것이다. 이 경우 각각의 기종에 대한 동적해석 모델을 정확히 도출하기는 곤란하다. 따라서 기존의 이론적인 제트엔진의 동적해석 모델로 사용하고 있는 항공기용 CF6(미, Boeing Co.)를 근간으로 하여 이를 각 기종의 특성에 맞게 축척(Scale Down/Up)된 수정모델을 사용하는 것이 일반적이다[2, 10]. 본 연구에서는, 기존의 모델(CF6)을 Scale Law[2, 7~10]에 근거하여 축척시켜 9개의 상태변수(식(4))를 출력변수로 하고 1개의 제어입력(연료량)을 갖는 다음 Fig. 1과 같은 수정된 모델을 사용하였다.

Fig. 1. Turbojet Engine Model for Controller Design

2.2 Plant의 Dynamic Modeling

제트엔진 모델의 동적지배방정식은 각 부품(압축기, 연소기, 터빈 등)에 대해 동력, 에너지, 유량 등의 평형관계식으로부터 동적 비정상(Unsteady) 열역학적 평형방정식을 얻을 수 있고, 이렇게 조합된 비선형 방정식은 부품간 결합된 순차해(Component Matching Program Solution)의 형태로서 기준 운용점(Operating Point)으로부터 쉽

동법(Perturbation)을 이용하여 선형화시키게 된다[2]. 이러한 시스템의 퍼드워드항(D matrix)을 생략한 모델은 비선형 방정식으로부터 직접 구한 응답특성 결과와 거의 일치하고 있고, 운용점 변경에 의한 영향이 미소하여, 특히 제트엔진 제어기 설계시 모델설정에 있어서 효율적으로 사용되고 있다[3~10].

완속운전(Idle Operation : 최대회전수의 70%) 상태의 운용점에서 선형화된 시스템의 상태방정식은 다음과 같다[2].

$$\dot{X} = A X + B U, \quad Y = C X \quad (4)$$

$$\text{여기서, } X = \begin{Bmatrix} \text{RPM (Rotor Speed)} \\ \text{TIT (Turbine Inlet Temperature)} \\ \text{CEP (Compressor Exit Pressure)} \\ \text{TET (Turbine Exit Temperature)} \\ \text{TEP (Turbine Exit Pressure)} \\ \text{TIP (Turbine Inlet Pressure)} \\ \text{CET (Compressor Exit Temperature)} \end{Bmatrix}$$

$$Y = \begin{Bmatrix} \text{RPM (Rotor Speed)} \\ \text{TIT (Turbine Inlet Temperature)} \\ \text{CEP (Compressor Exit Pressure)} \\ \text{TET (Turbine Exit Temperature)} \\ \text{TEP (Turbine Exit Pressure)} \\ \text{TIP (Turbine Inlet Pressure)} \\ \text{CET (Compressor Exit Temperature)} \\ \text{Thrust} \\ \text{Surge Margin} \end{Bmatrix}$$

U : Control Input of Fuel

$$A = \begin{bmatrix} 6.6344E+00 & 1.0588E+01 & 6.2294E-03 & 4.0893E-01 & 7.4777E-03 & 5.1635E+03 & 6.3695E-01 \\ 1.2791E-01 & 2.5038E-02 & 3.4975E-04 & 6.8999E-01 & 1.7241E-02 & 3.3246E-04 & 3.6198E-02 \\ 1.8191E-01 & 3.5832E-02 & 3.2788E-03 & 2.3904E-03 & 1.4402E-02 & 3.5045E-03 & 2.1197E-01 \\ 7.1226E-01 & 2.3532E-03 & 2.0619E-05 & 4.1367E-03 & 1.0039E-05 & 2.1114E-05 & 7.0792E-02 \\ 2.0705E-00 & 9.1961E-00 & 3.0833E-03 & 2.2094E-01 & 7.4743E-03 & 3.5502E-03 & 1.3428E-01 \\ 3.2869E-03 & 5.0645E-00 & 5.2233E-03 & 2.6338E-02 & 4.9661E-00 & 5.5286E-03 & 1.2840E-01 \\ 2.1577E-00 & 1.1439E-01 & 1.1000E-04 & 3.2273E-01 & 1.5382E-01 & 1.2124E-04 & 2.2768E-02 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -2.8470E-02 & 3.3664E+04 & -1.1108E+01 & 6.7053E-03 & -7.4690E-01 & 7.1418E-00 & 3.3276E-02 \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} \text{diag} (100.23 \ 48.0223 \ 2.31 \ 82.04 \ 19.3 \ 2.04 \ 35.32) \\ 5.1711E-01 & 3.9261E-01 & -1.0217E+03 & -3.7814E-01 & 6.6275E+03 & 1.0263E+03 & 1.5201E+00 \\ 3.4383E-03 & -5.3104E-04 & -2.9139E+01 & 2.8293E-03 & 2.9865E+01 & 2.9082E+01 & 8.4297E-02 \end{bmatrix}$$

$\Rightarrow$ 7 State Variables, 9 Output Variables

이러한 7개의 상태변수를 갖는 모델의 운동영역에서의 실제적인 지배적 동적거동은 몇개의 주요상태변수에 의해서 결정되므로 이러한 주요상태변수로 이루어진 축소모델을 이용하는 것이 제어기 설계에 효과적이다[8]. 특히 주요 제어변수를 결정하기 위해서는 시스템의 동적상태를 지배하는 제어입력을 결정하여야 하는데, 이러한 척도로서 Hankel Norm을 이용한다. 이는 제어 및 관측그래미안(Observation Gramian)의 평형화(Balanced Realization) 및 대각화를 통해서 얻은 특이값(Singular Value)으로서 출력/제어 에너지량의 상대적인 값이며 이들 제어입력에 대한 측정변수의 지배적인 동향으로부터 시스템의 동특성을 지배하는 주요 상태변수를 결정하게 된다.

Fig. 2. Determination and Influences of Prime State Variables for Plant Model Order Reduction

여기서는 이를 구하기 위해 Schur 방법을 이용하였다[12]. 이 결과 여기서는 터보제트엔진의 주요 운용변수로서 RPM, TIT, CEP를 설정하였다. Fig. 2를 보면 이들 주요 상태변수로 축소된 모델(Reduced Model)은 잔여모드로 인식되는 높은 주파수 영역에서도 비교적 축소전의 동특성을 잘 반영하고 있음을 보이고 있다.

따라서 축소모델을 통한 시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X}_R = A_R X_R + B_R U, \quad Y = C_R X_R \quad (5)$$

여기서, $X_R = \{ \text{RPM} \ \text{TIT} \ \text{CEP} \}^T$

$$A_R = \begin{bmatrix} 3.93834E+01 & 2.21491E+02 & -1.40665E+02 \\ -6.0560E+01 & -2.73401E+02 & 4.602E+01 \\ -1.27155E+02 & -5.44786E+02 & -2.4166E+01 \end{bmatrix}$$

$$B_R = \begin{bmatrix} -4.139E+03 & -3.521E+03 & -1.193E+03 \end{bmatrix}^T$$

$$C_R = \begin{bmatrix} -1.1464E+02 & 5.4725E+01 & 2.5118E+01 \\ -9.6600E+00 & 2.3844E+01 & -1.2168E+02 \\ -2.5500E-01 & -1.1370E+00 & 4.1000E-01 \\ 2.4070E+00 & 3.1430E+01 & -1.3638E+01 \\ -9.0000E-02 & -3.6900E-01 & 1.1800E-01 \\ -2.1200E-01 & -9.4800E-01 & 3.4700E-01 \\ -1.0907E+0 & -4.6933E+01 & 1.5644E+01 \\ -2.6358E+01 & -1.0314E+02 & 3.1033E+01 \\ 2.3000E-02 & 1.4100E+00 & -1.0500E-01 \end{bmatrix}$$

$\Rightarrow$ 3 State Variables, 9 Output Variables

2.3 제어기 설계기준

식(5)에 의거하여 연료량 입력에 대해 9개의 출력변수와 3개의 주요 상태변수(RPM, TIT, CEP)를 제어변수로 이용하였다. 그러나 실제로는 TIT의 경우 제트엔진과 같은 높은 온도범위(1000. C 내외)에 사용되는 온도센서로서는 열전대를 들 수 있는데, 이의 시정수로 인해(약 0.5 초) 본 모델과 같은 빠른 응답특성이 요구되는 시스템에 적용할 경우 위상지연으로 인한 불안정을 야기시킴으로 해서 제어변수로 사용할 수 없다. 따라서 실제 제어변수로는 TIT가 삭제된 RPM, CEP 등 2개가 된다. 이러한 기준으로부터 퍼지제어기를 이용하여 구현하고자 하는 시스템의 형상은 Fig.3과 같다.

그러나 성능척도로는 이들 3개의 주요 상태변수에 대해서 판단하게 되며, 이를 뺀 나머지 6

Fig. 3. Total Configuration of Plant Control System

개의 출력변수는 그에 따라 연관되어 결정되는 열역학적인 변수이므로 이들 3개 상태변수에 대한 성능을 목적함수로 설정하였다.

Fig. 11은 연료량 단계입력(Step Fuel Input)에 대한 제트엔진 시스템의 고유 응답특성을 보이고 있다. TIT의 경우 초기에 상당한 과도특성(Overshoot)이 있는데 이는 불안정한 연소 안정성을 유발시키거나 로타 및 블레이드에 열적충격으로 인한 손상을 주게 된다. CEP의 과도특성은 압축기의 손상 및 시스템 정지(System Fail or Shut Down)로 이어지는 실수를 야기시킨다. 따라서 제어기 설계의 기준은 이러한 CEP와 기본적인 주요변수인 RPM을 기준한 제어입력으로부터 3개의 상태변수가 과도특성 없이 신속하게 정상상태로 도달하게 하는 것이다.

2.4 Takagi-Sugeno형 퍼지제어기 설계

시스템의 개략적인 제어특성을 파악하고 있다면 이를 이용하여 시스템의 퍼지 제어법칙을 설정하기 위한 효과적인 방안의 하나로는 신경망을 이용하여 퍼지법칙의 변수들 즉, 전제부(Antecedent Part)의 소속함수 형상(Center Point, Width)과 결론부(Consequent Part)의 변수 등을 기준이 되는 학습자료(Target Data or Training Data)로부터 구하는 것이다. 이러한 퍼지제어규칙을 이용한 시스템의 규명을 위한 효과적인 수행방안의 하나로 Roger Jang(1993)[13]은 퍼지규칙의 변수들을 시스템 모델링을 위한 학습자료를 입력으로하는 신경망구조를 이용하여 구함에 있어, 퍼지화 모델로서 Takagi-Sugeno 형의 퍼지추론방식을 사용하였고, 신경망의 단점인 수렴부근 또는 국소점(Local Minimum)에서의 시간지연을 극복하기 위하여, 전방향 학습의 경우는 결론부의 퍼지변수를 최소자승법에 의해, 후방향 학습의 경우는 전제부 퍼지변수가 구배하강법(Gradient Descent)에 의해 각각 학습되는 조합된 알고리즘 형태의 적응 회로망형 퍼지시스템(ANFIS : Adaptive Network Fuzzy Inference System)을 제안함으로써 시스템의 제어특성 자료

로부터 시스템의 퍼지 제어규칙을 효과적으로 규명할 수 있게 하였다.

여기서 Takagi-Sugeno 형 퍼지추론계의 결론부는 다음과 같은 1차 함수의 수치적형태를 이용한다.

for i th Rule :

$$\text{If } X_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } X_2 \text{ is } A_{2i}, \\ \text{then } f_i \text{ is } r_i + p_i X_1 + q_i X_2 \quad (6)$$

A_{1i}, A_{2i} 는 소속함수로서 여기서는 각각 5개의 삼각형 퍼지화 변수(Linguistic Variables : NB, NS, ZO, PS, PB)를 사용하였고 입력(X_1, X_2)으로는 RPM, CEP의 오차(Error) 및 오차적분(Error Integration)을 사용하였다. 즉, PI 형 퍼지제어기 형태가 되는데, I 형 제어기의 사용은 제트엔진 모델은 일종의 기준점 추종형태의 제어형상이 요구되기 때문에 이 때의 정상상태오차를 제거하기 위한 것이다.

시스템을 규명하기 위한 학습자료 $T_{m,p}$ (m : Layer Node의 m th Component of p th Target Output Value)와 이에 대해 규명된 출력 $O_{m,p}^L$ (L : L th Layer)과의 차이를

$$E_p = \sum_{m=1}^M (T_{m,p} - O_{m,p}^L)^2 \quad (7)$$

라고 하면, 이를 최소화 하기 위한 알고리즘으로부터 $O_{m,p}^L$ 는 퍼지규칙의 전제부 및 결론부의 변수를 학습하기 위한 변수가 되며 출력노드 i 에 대해서 다음과 같이 매 단계(N th Time Step)마다 학습된다.

$$O_{i,p}^L(N+1) = O_{i,p}^L(N) + \Delta O_{i,p}^L \quad (8)$$

$$\Delta O_{i,p}^L = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} \quad (\eta : \text{Learning Rate}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} = -2(T_{i,p} - O_{i,p}^L) \quad (10)$$

여기서, 각 층에 대한 가중치를 각 노드에 대한 노드함수(Node or Adaptive Function)로 대체하게 되는데, 이는 기존 신경망에서 가중치 및 이를 학습시키기 위한 작동함수(Activation Function)를 적응 함수값에 대해서 학습시켜 시스템의 퍼지화 변수를 규명하기 위한 것이다.

이 때 각 층의 내부노드 k 에 대해서는 다음과 같다.

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} = \sum_{m=1}^{M(k+1)} \frac{\partial E_p}{\partial O_{m,p}^{k+1}} \frac{\partial O_{m,p}^{k+1}}{\partial O_{i,p}^L}, \quad (1 \leq k \leq L-1) \quad (11)$$

만일 결정하고자 하는 퍼지규칙의 변수를 α 라고 하면 이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{p=1} \frac{\partial E_p}{\partial \alpha} = \sum_{p=1} \sum_{O \in S} \frac{\partial E_p}{\partial O^*} \frac{\partial O^*}{\partial \alpha} \quad (12)$$

(단, $S(\alpha)$: Set of Nodes)

이 때 학습되는 $\Delta\alpha$ 및 학습률 η 는 다음과 같다.

$$\Delta\alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha}, \quad \eta = K / \sqrt{\sum_a \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right)^2} \quad (13)$$

(단 K : Step Size)

출력 퍼지값은 싱글톤 퍼지화(Singleton Fuzzification)를 사용하여 다음과 같은 곱추론(Product Inference) 방법으로부터 구하였다[11].

$$w_k = \sup_{e, ei \in U} [\mu_A^k(e) \cdot \mu_B^k(ei)] \quad (14)$$

(단 U : 전체영역(Universe of Discourse))

여기서, $\mu_A^k(e)$, $\mu_B^k(ei)$ 는 각각 e (error), $ei(\int e)$ 에 대한 k 번째 규칙의 퍼지화 변수 A, B 에 대한 소속 함수값이다.

이러한 퍼지추론계로부터 최종 출력값 f 는 다음과 같은 가중평균(Weighted Average) 방법으로부터 구한다.

$$f = \frac{\sum_{k=1}^{25} w_k f_k}{\sum_{k=1}^{25} w_k} \quad (15)$$

이들 적응 회로망을 통한 퍼지변수의 학습과 비퍼지화(Defuzzification)과정을 2개의 입력(x, y)과 2개의 소속함수(A_1, A_2, B_1, B_2)를 갖는 T-S형 퍼지추론계(Fuzzy Inference System)를 이용하여 도시하면 Fig. 4a, b와 같다. 여기서 Π, N 은 각각 추론연산자, 노드함수를 나타낸다.

본 연구에서 사용한 2개의 입력에 대한 각각 5개의 삼각형 소속함수에 대해, 퍼지변수들인 전

Fig. 4a. Configuration of Adaptive Network Fuzzy Inference System

Fig. 4b. Configuration of Defuzzification Reasoning

Fig. 5. Network Architecture for Identifying T-S Type Fuzzy Inferences with 2 Inputs and 25 Rules

Fig. 6. Error and Error Integration Trends of Proposed PI Controller

제부 소속함수들의 중심과 폭, 결론부의 p, q, r 을 규명하기 위한 신경망 구조는 Fig. 5와 같다.

여기서 시스템을 규명하기 위한 학습자료로는 비교적 잘 설계된 PI 제어기(제환계인은 RPM : 5×10^{-5} , CEP : 0.365, 제어기 계인은 P계인 : 0.025, I계인 : 0.8)로부터 구한 오차 및 오차적분 자료와 제어 출력자료를 사용하였는데, Fig. 6은 이러한 PI 제어기를 통한 시스템특성으로서, 오차적분항은 제어입력에 대해 선형적인 반면 오차항은 상당히 비선형적인 양상을 보이고 있어 오차항에 대한 퍼지화에는 비선형적인 소속함수의 분포가 요구된다. 이에 따라 Fig. 7을 보면 오차항에 대해 학습된 소속함수는 비선형적인 분포형상을 보이고 있다. 따라서 제트엔진 모델의 경우 일반적인 퍼지규칙을 설정할 때에는 이러한 비선형 특성을 잘 기술할 수 있는 소속함수의 형상 및 결론부의 추론이 요구된다.

Fig. 7. Shape Changes of Membership Function from Learning by T-S Neuro-Fuzzy Inference

Fig. 8. Control Output Results of T-S Fuzzy Inference

이들 Fig. 7과 같이 얻어진 2개의 입력(Error, Error Integration)에 대한 각각 5개의 퍼지추론 계로부터 식(14)를 적용함으로써 25개의 출력퍼지값을 얻고, 식(15)로부터 Fig. 8과 같은 퍼지규칙의 I/O 관계를 얻을 수 있다.

Fig. 9는 PI 제어입력결과로부터 학습되어 구현된 T-S 형 퍼지추론계 결과이다. 학습자료로 사용된 PI 제어입력결과와 잘 일치하고 있어 시스템이 잘 규명되었음을 보이고 있다.

이러한 퍼지화/비퍼지화 및 퍼지추론계로부터 설계된 PI 형 T-S 퍼지제어기/시스템의 Block Diagram은 Fig. 10과 같다. 여기서 오차 및 오차 적분, 퍼지출력값 등의 전체 퍼지화/비퍼지화 영역(Universe of Discourse)을 조정하기 위해 P, I 및 제어출력의 축척도(Scale Factor)를 각각 1, 0.85, 1로 정하였다[12].

Fig. 11은 MATLAB[18]을 이용하여 설계된 PI 형 T-S 퍼지제어기와 제어되지 않은 10%의 계단 연료량 입력시의 시스템 출력특성[2]과 비교한 것이다. 이 때 시스템 모델링상 연료발파 지연시간, 연료펌프의 시정수 등 기타 비선형적인 요소의 영향은 무시하기로 한다[7-10, 19]. 제어되지

Fig. 9. Trained Output Results of T-S Type Fuzzy Inference

Fig. 10. Overall Block Diagram of Designed PI Type T-S Fuzzy Controlled System

않은 계단연료량 입력시 TIT의 과도(Overshoot) 출력특성을 보이고 있어 열충격의 위험성을 유발시키고 있고, CEP의 경우 순간 과도서지의 위험성을 내포하고 있다. 이들을 제외한 기타 변수는 로타의 관성으로 인해 연료량 계단입력에 대해서도 완만하게 반응하는 고유특성을 갖는다. 여기에 설계된 T-S 퍼지제어기는, TIT의 경우 과도치가 제거되었고 CEP의 경우도 과도 특성 없이 신속한 수렴특성을 보이고 있다. 기타 변수들도 대개 0.4초 이내에서 정상치에 신속하게 수렴되는 잘 제어된 결과를 보이고 있어, 일단의 만족할만한 제어기 설계결과를 보이고 있다.

Fig. 11. Results of PI Type T-S Fuzzy Controller Compared with Uncontrolled Responses

III. 다목적 함수를 만족하는 기법을 이용한 설계된 Takagi-Sugeno 퍼지 제어기의 성능향상[11]

Fig. 11과 같은 성능을 갖는 설계된 T-S 퍼지 제어기를 후술할 3개의 목적함수(다목적 함수 : Multi-Objectives)에 부합하는 만족도로부터 각 목적함수에 기여하는 퍼지규칙을 조정함으로써 그 성능을 향상시키기로 한다. 이를 위한 여러 가지 방안이 강구될 수 있으나 본 논문에서는 각 퍼지규칙간의 긴밀도(Similarity)로부터 비일관도(Index of Inconsistency)[16]를 구하고 이들을 목적함수별로 긴밀성을 갖는 군(Group)으로 분류하여 각 퍼지규칙간의 확실도(Certainty Factor)로부터 각 목적함수에 기여하는 퍼지규칙에 대해 가중치를 조정함으로써 목적성능이 개선되도록 하는 다목적함수 만족기법을 적용하기로 한다

[11]. 여기서 확실도는 비일관도와 상반된 개념으로서(역수), 비일관도로부터 각 퍼지규칙간의 전체 퍼지추론계에 미치는 기여도를 의미한다.

구해진 확실도(ϵ_i)로부터 각 퍼지규칙의 가중치를 설정하면 다음과 같다.

For i th rule :

$$\text{If } e \text{ is } A_i \text{ and } ei \text{ is } B_i, \text{ then } u \text{ is } f_i \text{ with } \epsilon_i \quad (16)$$

이러한 일련의 과정을 요약하면 다음과 같다.

1) 각 퍼지규칙간의 비일관도를 구하고 퍼지 C-Means Algorithm을 이용하여 각 목적함수군으로 분류한다.

2) 각 목적함수군에 대한 구해진 확실도를 각 퍼지규칙들의 가중치로 조정한다.

3) 목적함수군의 최소 만족도가 전체 목적함수군과 부합되어 최대가 되도록 조정한다.

3.1 목적함수 및 만족도의 결정

시스템의 주요 성능변수인 RPM, TIT, CEP 등에 대해, 설계된 PI 형 Takagi-Sugeno 퍼지제어기는 과도특성 없이 비교적 신속한 성능을 보이고 있지만 이들 3개의 성능척도가 어느 시점에 대해서 좀더 신속한 성능을 갖도록 향상시키고자 한다. 여기서는 통상적으로 정상치의 80 %에 도달하는 시점을 향상시키기 위하여, 3개의 성능척도 Q_1 , Q_2 , Q_3 에 대한 목적함수와 다음과 같이 정의되는 만족도를 Fig. 12와 같이 설정하였다.

만족도

$$P_i = P_i[Q_i(u)] : i\text{th Satisfaction Degree for } i\text{th } Q \quad (17)$$

여기서 $Q_i(u) : i\text{th Performance Measure for input } u$

$$\text{Satisfactory if all } P_i[Q_i(u)] \geq \text{만족값} \quad (18)$$

목적함수 설정

- 목적함수 1 : Short Q_1 (Rise Time of RPM) within 80 % of Steady-State Value
- 목적함수 2 : Short Q_2 (Rise Time of TIT) within 80 % of Steady-State Value
- 목적함수 3 : Short Q_3 (Rise Time of CEP) within 80 % of Steady-State Value

Fig. 12. Shapes of Satisfaction Degree for Each Objective

3.2 비밀관도의 계산[17]

각 퍼지규칙간의 비밀관성(동일한 전제부에 대해 다른 결론을 갖는 정도)을 의미하는 바, 각 규칙의 소속함수 사이의 긴밀도(S)로부터 유도된다. 본 논문에서 사용한 비밀관도(C)에 대한 정의는 다음과 같다[11].

$$C_{i,k} = S(X_i, X_k) \cdot (1 - S(U_i, U_k)) \quad (19)$$

$$S(X_i, X_k) = \min[S(E_i, E_k), S(IE_i, IE_k)] \quad (20)$$

$$S(A_i, A_j) = 1 / [1 + D(A_i, A_j)] \quad (21)$$

여기서,

$S(X_i, X_k)$: 퍼지화 입력 I, k 간의 긴밀도($i, k=1\sim 5$)

$D(A_i, A_j)$: 두 퍼지세트(A_i, A_j)간의 중심거리($i, j=1\sim 5, 25$)

$S(E_i, E_k), S(IE_i, IE_k)$: 각각 오차, 오차적분의 퍼지화 세트 I, k 간의 긴밀도($i, k=1\sim 5$)

$S(U_i, U_k)$: 퍼지화 출력세트 I, k 간의 긴밀도($i, k=1\sim 25$)

이 때의 긴밀도를 구하면 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Similarities for E, EI, U Set

$S(E_i, E_k)$						$S(EI_i, EI_k)$					
	NB	NS	ZO	PS	PB		NB	NS	ZO	PS	PB
NB	1.00	.293	.166	.117	.091	NB	1.00	.996	.992	.988	.984
NS		1.00	.277	.164	.117	NS		1.00	.996	.992	.988
ZO			1.00	.286	.167	ZO			1.00	.996	.992
PS				1.00	.287	PS				1.00	.996
PB					1.00	PB					1.00

$S(U_i, U_k)$

25 output variables →

← 25 output variables

	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
1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

여기서 삼각형 소속함수로 설정된 전제부 퍼지세트간의 거리(D)는 각 중심간을 기준하였고,

T-S 형 퍼지추론계의 결론부는 그 자체가 1개의 소속함수를 갖는 퍼지세트로 취급되어 총 25개의 퍼지세트로 구성된다. 따라서 $S(U_i, U_k)$ 에 대한 퍼지세트간의 거리는 각 퍼지세트가 갖는 영역의 평균값에 대해서 계산하였다. 이로부터 비밀관도를 구하면 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Inconsistency Indices(C_{ik})

25 output variables →

← 25 output variables

	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
1	0.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016	0.027	0.024	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016	0.027	0.024	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016	0.027	0.024	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016	0.027	0.024	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016	0.027	0.024	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016	0.027	0.024
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016	0.027
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008	0.016
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039	0.008
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013	0.039
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009	0.013
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032	0.009
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004	0.032
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130	0.004
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084	0.130
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074	0.084
17	0.00																1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00	0.074
18	0.00																0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244	0.00
19	0.00																0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218	0.244
20	0.00																0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00	0.218
21	0.00																0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00	0.00
22	0.00																0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520	0.00
23	0.00																0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731	0.520
24	0.00																0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.731
25	0.00																0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Fig. 13. Certainty Factor Distribution for Each Classification

$$v_i = \sum_{k=1}^{25} \mu_{ik}^m C_k / \sum_{k=1}^{25} \mu_{ik}^m, \quad (i=1,2,3) \quad (23)$$

$$\text{단, 구속조건은 } \sum_{s \in I_k} \mu_{sk} = 1, \quad (k=1 \sim 25) \quad (24)$$

이로부터 Fuzzy C-means Algorithm은 다음과 같다.

1) for initial U_0 에 대해 v_{io} 를 계산

2) $U^{(l+1)}$ 를 계산,

단 $I_k = \{i \mid 1 \leq i \leq 3; d_{ik} = \|C_k - v_i\| = 0\}$

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^3 (d_{ik}/d_{jk})^{\frac{2}{m-1}}}, \quad \text{for } I_k = \Phi(\text{null})$$

만일 $I_k \neq \Phi$ 이면 $\mu_{ik} = 0 \quad \forall i \in (I - I_k) \quad (25)$

3) $E_l = \|U^{(l+1)} - U^{(l)}\| \leq \epsilon$ stop, otherwise $l = l+1$, goto step 1)

Fig. 13은 이러한 절차에 의해 분류된 3개의 목적함수군에 대해 각 규칙들의 확실도(ϵ_{ik} = Membership Degree(μ_{ik})) 분포를 구한 결과를 보이고 있다. 이를 보면 식(24)에 의해 각 군에 대한 일정한 퍼지규칙의 합은 1이 되어 각 목적함수군의 퍼지규칙간의 상대적인 기여도를 알 수 있다. 이로부터 각 목적함수군별 가중치 수정의 지배적인 퍼지규칙들을 살펴보면, 1군의 경우는 4, 5, 9, 10, 13, 14, 15 번째, 2군의 경우는 16~25 번째, 3군의 경우는 1, 2, 3, 6, 7, 8, 11, 12 번째로서, 각 군에 대해서 이들 퍼지규칙들의 가중치를 조정함으로써 만족도를 파악하게 된다.

3.4 각 목적함수군의 퍼지규칙조정 (Matching and Adjustment for Each Rule Group)

각 목적함수군별로 분류한 퍼지규칙들에 대해 확실도를 가중치로하여 조정 한 후 제어입력에 의한 만족도를 구하고 최소 만족도가 되는 목적함수군을 찾아내어 이 목적함수군에 대한 만족도가 전체 목적함수군과 부합하여 최대가 될 수 있도록, 즉 $\max_{\epsilon_{ik}} \min_{1 \leq i \leq 3} P_i[Q_i(u)]$ 이 목적하는 기준치 이상이 되도록 한다.

이러한 과정에 따라 수행된 결과를 보면 다음 Table 3과 같다.

Table 3. 1st Match and Adjustment

S.D. G.#	P ₁	P ₂	P ₃
1	0.500	0.471	0.333
2	0.500	0.412	0.333
3	0.700	0.706	0.667

⇒ maximize P₁

목적함수군 1,2에 대해서 최소만족도를 최대화 시키면 전체적으로 만족도는 다음 Table 4와 같다.

Table 4. 2nd Match and Adjustment(Final Run)

S.D. G.#	P ₁	P ₂	P ₃
1	0.700	0.588	0.667
2	0.700	0.706	0.667
3	0.700	0.706	0.667

⇒ Satisfactory for All Groups

이렇게 각 목적함수군별로 퍼지규칙의 확실도로부터 가중치를 조정하여 수정 설계한 T-S 형 퍼지제어기의 성능은 다음 Fig.14와 같다.

Fig. 14. Simulated Results Compared with Certainty Factors Applied to Each Objective Group

목적함수군 2, 3의 경우 확실도를 이용하여 가중치를 조정한 경우, 원 설계된 제어기에 비해 모두 상승성능이 향상되었음을 볼 수 있다. 그러나 1의 경우 원 제어기 성능과 비슷한 결과를 보이고 있어 최소만족도의 기준치는 0.7 이상임을 알 수 있다. 이들 목적함수군별 성능 양상을 보면 목적함수군 2, 3의 경우 거의 같은 성능향상 결과를 보이고 있으나 여기서는 2군의 경우로부터 최종적인 제어기의 성능향상을 도모하기로 한다.

3.5 다목적 함수 만족기법을 통한 제어기 설계 결과

다목적 함수를 만족시키는 기법(일명 Satisfactory Multi-Objective Control(MOC))로부터 최종 수정 설계된 T-S 형 퍼지제어기의 성능은 Fig.15와 같다.

여기서 서지마진은 터보제트엔진의 안정운용 상태를 결정짓는 척도로서, 안정적인 압축기의

실속운용한계(100 %)에 대한 상대값을 의미하는데[19], 설계된 제어기의 경우 과도상태 없이 모두 이 이내에서 안정적인 결과를 보여주고 있다. 기본적으로 설계된 T-S 퍼지제어기의 경우, 설계된 PI 제어기와 비교할 때 운용 및 상태변수들의 상승성능이 모두 향상되었음을 볼 수 있다. 따라서 일단 MOC 적용이 없는 기본적으로 설계된 T-S 퍼지제어기는 만족할 만하다 하겠다. 이렇게 잘 설계된 T-S 퍼지제어기에 본 MOC를 적용한 결과를 살펴보면, 상승성능들이 더욱 향상되었음을 알 수 있다. 특히 터보제트엔진의 대표적인 출력 성능으로 대변되는 추력의 경우, 기본적인 T-S 퍼지제어기에 비해 약 1% 정도 상승성능이 향상되었다. 이는 만족도의 최대 설정 알고리즘 개발을 통해 더욱 향상되리라 본다.

결과적으로 본 다목적함수 만족기법은 설계된 제어기의 성능을 더욱 향상시킴으로서 제어기 설계에 유용하게 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 선정된 제트엔진 모델에 대해 다목적 함수를 만족하는 PI 형 T-S 퍼지 제어기를 설계하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 터보제트엔진모델의 퍼지제어규칙을, 비교적 잘 설계된 PI 제어기로부터의 학습자료로부터 T-S 형 퍼지추론계로 규명하였고, 이로부터 PI 형 T-S 퍼지제어기를 효과적으로 설계하였다.

2. 기본적으로 잘 설계된 T-S 퍼지제어기의 성능을 다목적 함수를 만족시키는 기법을 적용하여 더욱 향상시켰다. 이 과정에서 각 목적함수의 성능을 만족하도록 각 퍼지규칙들의 비일관도로부터 각 목적함수군을 퍼지 C-Means 알고리즘을 이용하여 유사그룹으로 분류한 후 각 목적함수에 따른 만족도가 전체적으로 잘 부합되도록 구해진 확실도로부터 퍼지규칙의 가중치를 조정하는 체계적인 절차의 가중치 조정방법을 도입하였다. 이렇게 제안된 MOC는 설계된 터보제트엔진 제어기의 성능을 향상시킴으로서 그 기법의 유용성을 보여주고 있다.

향후 만족도의 최대설정 및 이에 부합되는 퍼지규칙들의 조정에 대한 체계적인 알고리즘 개발 등의 보완 연구가 요구된다.

참고문헌

1. Sellers, J. F. and Daniele, C. J., "DYGEN

Fig. 15. Results of T-S Fuzzy Controller with Satisfactory Multi-Objectives Compared with Other Controller

A Program for Calculating Steady-State and Transient Performance of Turbojet and Turbofan Engines," NASA TN D-7901, April 1975.

2. Geyser, L. C., "DYABCD A Program for Calculating Linear A,B,C,D Matrices from a Nonlinear Dynamic Engine Simulation," NASA TP-1295, 1978.

3. Athans, M., "LQG/LTR Method for the F-100 Engine," IEEE, J. of Guidance and Control, Vol.9, No.1, pp. 45-52, Feb., 1986.

4. William, H. P. and Athans, M., "Multi-variable Control of the GE T700 Engine Using LQR/LTR Design Methodology," NASA-CR-177080, June, 1986.

5. Garg, S., "Turbofan Engine Control System Design Using LQG/LTR Methodology," NASA-CR-182303, June, 1989.

6. Song, O., Wilkie, J. and Grimbale, M. J., "Robust Controller for Gas Turbines based upon LQG/LTR Design with Self-Tuning Features," J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 115, pp. 569-591, Sept., 1993.

7. 부준홍외 4인, "DYABCD를 이용한 터보제트 엔진 선형모델의 특성," 한국항공우주학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 81-90, 1993.

8. 부준홍외 3인, "터보제트 엔진의 제어를 위한 Reduced Model의 거동특성," 한국항공우주학회지, Vol. 25, No. 5, pp. 46-54, 1997.

9. 한문섭, 공창덕, "선형 시뮬레이터를 이용한

터보제트 엔진의 LQR 제어," 한국항공우주학회지, Vol. 23, No. 1, pp. 9-15, 1995.

10. 한동주, 남세규, 김병교, "제트엔진의 예견 퍼지슬라이딩 제어에 관한 연구," 한국자동제어 학술회의 논문집, pp. 1068-1071, 1993.

11. Lim, T. S. and Bien, Z. N., "FLC Design for Multi-Objective Systems," Appl. Math. and Comp. Sci., vol.6, No.3, pp. 565-580, 1996.

12. Fairman, F. W., "Liner Control Theory," Wiley, 1998.

13. Roger, J., "ANFIS : Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics, vol.23, No.3, May 1993.

14. Dimitter, D., Hans, H. and Michael, R., "An Introduction to Fuzzy Control, Springer-Verlag," 1993.

15. Kelvin, M. P. and Stephen, Y., "Fuzzy Control," Addison-Wesley, pp. 74-78, 1998.

16. Yu, W. and Bien, Z. N., "Design of Fuzzy Logic Controller with Inconsistent Rule Base," J. Intelligent and Fuzzy Systems, Vol.2, No.2, pp. 147-159, 1994.

17. Chen, C. J., "Fuzzy Logic and Neural Network Handbook," McGraw-Hill, 1996.

18. MATLAB User's Guide, Fuzzy Logic Toolbox, Ver.2, 2001.

19. 부준홍외 5인, "서지한계 설정을 이용한 터보제트 엔진의 연료유량 제어모사," 한국항공우주학회지, Vol. 25, No. 3, pp. 103-111, 1997.