

편차 적응 퍼지 알고리즘을 이용한 자동 동조 PID 제어에 관한 연구

이양범 · 양명국
전기공학과

<요 약>

PID 제어는 각종 산업용 기기 제어 분야에서 우수한 기능을 제공하며, 광범위한 제어 시스템에 다양한 방법으로 적용되어, 그 응용 분야가 확장되고있다. 그러나 PID 제어기는 운전 중 발생하는 환경 변화에 적응 하기위하여 수행되는 새로운 동조 이득 값 산출 과정이 매우 난해할 뿐 아니라, 장 시간 동조작업을 요구하므로 현장 운전자에게 과중한 부담을 제공하고있다. 본 논문에서는 기존의 PID 제어기에 Fuzzy 자동 동조 기법을 이식하여 PID 제어기 동조 작업을 자동으로 수행하도록하는 편차 적응 퍼지 자동 동조 PID 제어를 설계 제안하고, 이의 성능을 실험으로 입증하였다. 제안된 퍼지 자동 동조기는 현장 운전자의 PID 제어기 동조 기법을 분석하여 제어계의 입 출력 제어 파라미터를 설정하고, 구체적인 동조 과정 및 다양한 경험적 요소를 기반으로 설계된 퍼지 Rule-base를 근간으로 개발되었다. 드럼 형 65톤 보일러의 수위 및 압력 제어계 PID 제어기에 본 연구에서 개발한 퍼지 자동 동조기를 탑재, 장시간 다양한 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안한 퍼지 자동 동조 PID 제어기는 시스템의 변동 부하 혹은 외란으로인한 급격한 특성 변화에도 신속하게 적응하는 온라인 대처 기능과 함께 시스템의 변경된 운전 환경에 따른 최적 이득 값을 산출하여 제어 대상 시스템이 적절한 출력 값을 생성, 유지 하도록하는 성능의 우수성을 보였다.

A Study on the PID Auto-Tuning Control Using Error Adaptive Fuzzy Algorithm

Lee, Yang-Bum · Yang, Myung-Kook
Electrical Engineering Department

<Abstract>

PID control is well-known and widely used technique in various areas of industrial plants due to its verified reliability and control performance. It, however, requires special knowledge and training with long experiences on plant control as well as the persistent effort to obtain a proper gain. In this paper, an Error Adaptive Fuzzy Auto-Tuning Algorithm where the fuzzy concept is implanted on the PID controllers to tune a PID controller automatically is designed and proposed. The proposed Fuzzy Algorithm is developed based on both the appropriate tuning rules that are investigated from the diverse know-how and experience of experts and the classical PID tuning techniques. The algorithm is simulated on the 65 ton Drum type boiler where the PID controllers are used to control water level and steam pressure of the drum. It has been shown that the proposed algorithm quickly find the optimal tuning point of the PID controller and provides satisfactory on-line transient behavior of the large plants.

I. 서론

PID 제어는 1940년대 Ziegler-Nichols[1]에 의하여 알려진 후, 제어기의 목표치 추적, 외란 효과 감쇄 등 제어계에서 요구하는 제반 특성면에서 우수한 기능을 제공하여, 광범위한 제어 시스템 영역으로 응용 분야가 확장되어왔다. 근래에 이르러 PID제어기는 고성능 마이크로 프로세서를 활용하여 그 성능과 제어 특성면에서 획기적인 개선을 이루어 다양한 생산 현장에서 융통성있게 사용되고있다. 그러나 PID 제어기는 공정 환경이 변화할 경우, 이에 따른 플랜트의 동작 조건과 성능 지수를 만족시키는 비례(P), 적분(I), 및 미분(D) 제어 이득 값을 계산하여 적용하는 동조(Tuning) 작업을 필요로 하게 되는데, 이들 제어 이득 값을 구하는 과정이 매우 복잡할 뿐 아니라 동조 작업 과정도 난해하고 많은 시간이 소요 되어 현장 운전자에게 과중한 부담을 제공한다. 특히 플랜트 운전 기술이 미숙한 초보 운전자의 경우 오랜 시간을 소모하여, 복잡하고 난해한 이득 조정 작업을 완료했다 할지라도 만족할만한 제어 성능을 얻는데 실패 하는 경우가 종종 발생한다. 따라서 이같이 수학적으로 복잡하고, 난해한 제어 공정이 요구되는 PID 제어기 동조 작업을 보다 쉽게 수행할 수 있는 방안이 다각도로 연구되고있다.

Ziegler와 Nichols[1]는 시스템을 폐 루프 비례제어 상태(P mode, $T_i = \infty$, and $T_d = 0$)로 초기화하고, PID제어기 비례 이득 값을 변경하여 임계 비례 이득값(Ultimate Gain, K_u)과 임계 진동 주기(Ultimate Frequency, P_u)를 구하며, 이로부터 제어기의 비례이득(K_c), 적분시간(T_i), 미분시간(T_d)를 계산하는 한계치 감도법을 제안하였다. Ziegler-Nichols의 한계치 감도법은 개념적으로 매우 간명한 기법이나, 제어 대상 시스템의 임계 비례 이득 값을 검출하기 위하여 Trial-and-Error 방식의 반복 실험을 거쳐야 하는 문제점이 내포되어있다. 대규모 실제 플랜트에 Trial-and-Error 방식의 반복 실험을 통하여 제어 계수 값을 얻어내는 방식은 사실상 불가능하다. 또한 한계치 감도 방식은 시스템 응답 특성 중 오직 2가지 변수(K_u , P_u)만을 고려하여 제어 계수 값을 산출하므로, 제어 대상 시스템의 독특한 특성이 또 다른 변수로서의 역할을 창출할 경우, 계산된 제어 이득 값이 만족할만한 결과를 제공하지 못하게된다. Åstrom과 Hagglund[2]는 임계 진동 주기(P_u)를 얻기 위하여 비례 이득 값을 조정하는 방법의 대안으로, 간단한 계전기를 이용하여 시스템의 출력 특성을 얻어내는 기법을 제안하였다. 그러나, 이들 기법은 실제 플랜트에 지속적인 진동을 유발시키는 공정을 필요로 하여, 동조 과정 중 자칫 시스템 전체를 불안정 영역으로 유도, 큰 위험에 처할 가능성이 있는 단점이 지적되고있다.

Hrone과 Reswick는 제어 대상 시스템을 모델링하고, 이로부터 전달 함수 파라미터를 산출하여, 제어기를 동조하는 기법을 제안하였다. Horne과 Reswick의 방식은 현대 제어이론을 PID제어기에 접목하여 제어 성능 및 시스템 안정도 유지면에서는 대단히 우수한 방식으로 알려져 있으나, 실제 플랜트 모델링의 난해 정도 및 전달 함수 파라미터 선정에 일관된 규칙을 제시할 수 없는 문제점 등이 표출되고있다. 또한 모델링에 설정된 파라미터와 실제 제어 대상 시스템과의 관계 이해 및 현대 제어 이론의 구조적 특성을 학습하여야 하는 어려움이 있어 현장 운전자들이 쉽게 이용할 수 있는 실용적인 면에서 상당한 제한이 있다. Cohen과 Coon[3-4]은 제어 대상 시스템을 개 회로 상태로 유지하고 단위 계단 입력을 인가하여, 출력 단의 응답 신호에 따라 플랜트를 1차 지연 시간의 전달 함수로 모델링하고, 해당 PID 이득 값을 모델의 지연 시간과 시 정수로부터 산출하는 방법을 제안하였다. 이 같은 접근 방식은 단순한 제어 대상 시스템의 경우 적용이 용이하고, 비교적 만족할만한 제어 효과를 얻을 수 있다. 그러나 복잡한 플랜트의 경우, 1차 지연 시간의 전달 함수만으로 시스템의 특성을 단정할 수 없게 되고, 결국 제어계에서 요구하는 정밀 동조 제어에 한계를 들어내게 된다.

Suyama[5]는, 앞서 나열한 동조 기법들이 제어 이론에 기본을 두고 개발되어 실제 현장에서 적용의 한계가 도출됨에 주목하고, 보다 실용적인 면에 초점을 맞춘 PID 자동 동조 기법을 연구, 제안하였다. 먼저 시험 입력 신호를 제어 대상 시스템에 부과하고, 각 입력 신호에 따라 얻어지는 출력신호 형태별 시스템의 특성을 도표화하고, 나아가서 이에 따른 PID 이득 값을 산출하게 된다. 따라서 현장 운전자는 정해진 순서에 따라 시스템을 조작하며 얻어지는 출력신호 형태를 감식하여 PID 이득 값을 부여하여 동조 작업을 수행할 수 있다.

본 논문에서는 복잡하고도 난해한 PID 제어기 동조 과정을 자동으로 수행하게 하기 위한 방법으로 기존의 PID 제어기에 퍼지 자동 동조 기법을 이식한 편차 적응 퍼지 자동 동조 PID 제어기를 제안하고, 이의 성능을 실험하였다. 퍼지 제어 기법은 제어 대상 시스템의 수학적 모델링이 난해하고, 제어 공정 과정이 애매모호한 경우 전문가의 제어 기술과 각종 Know-how를 그대로 제어 계통에 이식시키는 효율적인 방법으로 널리 알려져 있다. 따라서 발전소 등에서 가동하는 대형 보일러 시스템과 같이 복잡하고 비선형 특성이 강한 플랜트 제어를 위하여는 수학적 모델링에 근거한 제어방식보다는 숙련된 전문가의 운전 경험과 지식을 이용하는 퍼지 제어 방식이 효과적이다.[6-9] 본 연구에서는 먼저 대형 보일러 운전 현장의 숙달된 전문가로부터 PID 제어기 동조 기법 및 다양한 경험적 요소를 수집, 분석하여 PID 제어기 자동 동조 규칙을 작성하고, 이를 기반으로 개발된 퍼지 자동 동조기를 PID 제어기에 부착, 퍼지 자동 동조 PID

제어기를 설계, 개발하였다. 제안한 PID 자동 동조 퍼지 제어기는 65톤(ton) 산업용 드럼형 보일러 모형에 적용하여 성능의 우수성을 입증하였다.

II. 시스템 모델링

2-1. 기본 평형식

드럼내에서 유체의 상태 변환은 매우 빠른 열과 질량의 전달과정을 수반하기 때문에 일반적으로 열적포화 상태로 가정한다. 따라서, 보일러 드럼전체에 대한 에너지 평형식과 질량 평형식을 고려한 보일러 모델링에 관한 비선형 상태 방정식은 다음과 같이 표현된다. [10-11]

$$a_{11} \frac{dP_{dr}}{dt} = h_c \rho_s q_{fw} + (\rho_w - \rho_s) [Q_{mf} - (h_w - h_{fw}) q_{fw}] - h_c \rho_w q_s \quad (1)$$

$$a_{21} \frac{dP_{dr}}{dt} + a_{22} \frac{dV_w}{dt} + a_{23} \frac{dX_r}{dt} = q_{fw} - X_r q_r \quad (2)$$

$$a_{31} \frac{dP_{dr}}{dt} + a_{33} \frac{dX_r}{dt} = Q_{mf} - (h_w - h_{fw}) q_{fw} - h_c X_r q_r \quad (3)$$

$$a_{44} \frac{dq_s}{dt} = K_1 P_{cv} \sqrt{P_{dr}} + K_2 \sqrt{P_{dr}} - q_s \quad (4)$$

여기서,

$$a_{11} = V_{wt} (\rho_s^2 - \rho_w \rho_s) \frac{\partial h_w}{\partial P_{dr}} + V_{st} \left(h_c \rho_w + (\rho_s \rho_w - \rho_s^2) \frac{\partial h_s}{\partial P_{dr}} \right)$$

$$a_{21} = V_r a_m \frac{\partial \rho_s}{\partial P_{dr}} + V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial \alpha_m}{\partial P_{dr}}$$

$$a_{22} = \rho_w$$

$$a_{23} = -V_r (\rho_w \rho_s) \frac{\partial \alpha_m}{\partial X_r}$$

$$a_{31} = V_r h_c \left(a_m \frac{\partial \rho_s}{\partial P_{dr}} + \rho_s \frac{\partial \alpha_m}{\partial P_{dr}} \right) + V_{wt} \rho_w \frac{\partial h_m}{\partial P_{dr}} + V_{st} \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial P_{dr}}$$

$$a_{33} = V_r h_c \rho_s \frac{\partial \alpha_m}{\partial X_r}$$

$$a_{44} = MC$$

$$K = 0.7(0.5 < K_2 < 1), \quad P_{cv} = 100[\%], \quad K_1 = 14$$

위의 식에서 P_{dr}, V_w, X_r, q_s 는 상태변수로서 각각 드럼의 압력[MPa], 드럼내 물의 부피[m²], 상승관 내의 증기질, 그리고 드럼에서 빠져나가는 증기의 질량흐름을 [kg/sec]을 나타낸다. 또한, V_{dr}, V_w, V_r, V_{dc} 는 드럼의 부피, 드럼내의 물부피, 상승관 부피, 하강관의 부피이며 a_m 은 상승관 내의 증기 부피비를 의미한다. 제어압력으로는 열량 Q_{mf} [KJ/sec], 급수량 q_{fw} [kg/sec], 주증기 제어밸브가 적용되지 않기 때문에 P_{cv} [%]가 있으며, 본 연구 모델에서는 주증기 제어밸브가 적용되지 않기 때문에 P_{cv} 를 100[%]로 정하였다. 모델출력은 드럼내 물의 부피 V_{dc} [m²] 및 주증기 압력 P_{dr} [MPa]이며 주증기 압력과 드럼의 압력은 같은 값을 갖는 것으로 가정하였다.

2-2. 모델 선형화

제어기 설계를 위해서는 먼저 비선형 상태방정식을 선형화 시킬 필요가 있다. 비선형 상태방정식으로 부터 선형 모델을 얻기 위해서는 시스템의 입력과 상태 변수의 평형점에서의 테일러급수 전개가 필요하다 이 관계를 나타내면 다음과 같다. [12-14]

$$\text{비선형모델} : \begin{cases} A \dot{X} = b \\ \dot{X} = A^{-1}b = f(x, u) \end{cases}$$

$$\text{선형화모델} : \begin{cases} \delta \dot{X} = A' \delta X + B \delta U \\ A' = \frac{\partial f(x_0, u_0)}{\partial X} = -A^{-1} \frac{\partial A}{\partial X} A^{-1}b + A^{-1} \frac{\partial b}{\partial X} \\ B = \frac{\partial f(x_0, u_0)}{\partial U} = -A^{-1} \frac{\partial A}{\partial U} A^{-1}b + A^{-1} \frac{\partial b}{\partial U} \end{cases}$$

정상상태에서의 평형값은 모델 플랜트의 100% 부하에서의 평형값을 기준으로 하였으며, 모델의 계수를 고려한 선형화 된 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{P}_{dr} \\ \delta \dot{V}_w \\ \delta \dot{X}_r \\ \delta \dot{q}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.42381e-3 & 1.56188e-3 & -6.824964e-2 & -3.90533e-3 \\ -1.08469e-3 & -2.14079e-4 & -14.86299 & 2.98112e-2 \\ 1.39275e-5 & 9.17087e-6 & -3.44430e-1 & 6.81275e-4 \\ 1.96356e-4 & 0 & 0 & -7.00221e-5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta P_{dr} \\ \delta V_w \\ \delta X_r \\ \delta q_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.41506e-6 & -1.63242e-3 \\ -9.82734e-7 & 6.95569e-4 \\ -1.49543e-9 & -3.06704e-5 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Q_{mf} \\ \delta q_{fw} \end{bmatrix} \quad (5)$$

III. PID 자동 동조 펌지 제어기

3.1. 보일러 제어기 구조

본 연구에 적용될 보일러 제어 시스템의 구조를 간단히 도식화하면 그림 3.1 과 같다. 드럼형 보일러는 큰 열에너지 및 유체량을 갖고 있는 드럼이 완충 작용을 하므로, 터빈 등과 같은 관련 플랜트와 별도로 보일러만의 독립 제어가 가능하다. 또한 연소 제어와 급수 제어는 상호 간섭이 미세하여 그림 3.1에서와 같이 부 시스템별로 제어계를 분리하여 제어기 성능을 관찰하였다. 일반적으로 실제 보일러 플랜트의 경우 아래 그림과 같이 시스템 출력단의 압력과 수위에 대하여 부 시스템별로 각각 분리된 별개의 제어기를 사용하고 있다.

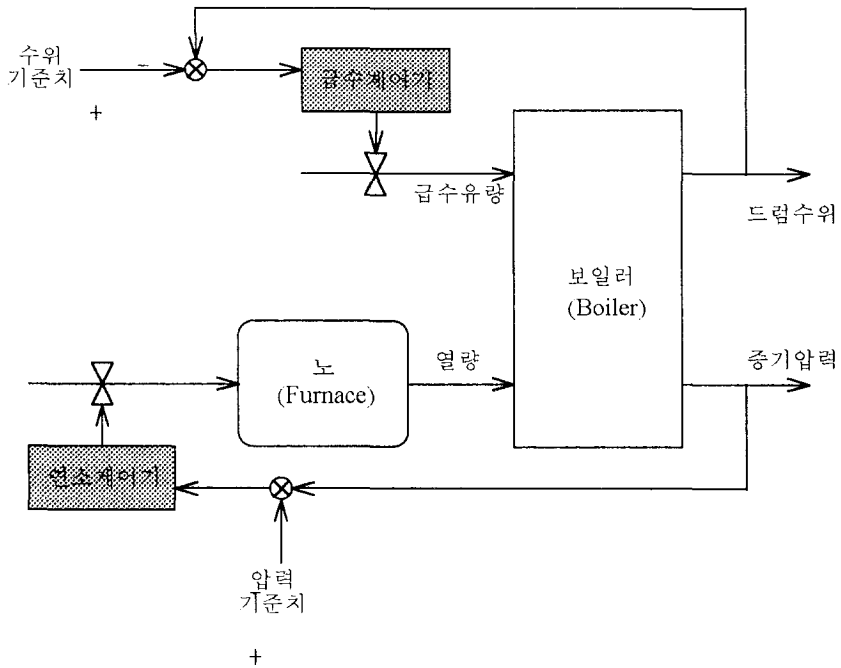


그림 3.1 보일러 제어기 모델

3.2. 보일러 펌지 제어

보일러 제어에 있어 가장 널리 알려진 PID제어기는 목표 치 추적, 외란 효과의 감쇄, 프로세스와 모델 계수의 불 일치에 대한 강인성 등 제어계에 요구되는 제반 특성면에서 우수한 기능을 제공하여 다양한 산업 현장에서 응용 분야를 확장하고 있다. PID 제어기는 이같이 우수한 성능을 보유한 반면, 운전 중 공정 환경이 변화할 경우 PID 제어 이득 값을 재조정하는 동조 작업 과정이 난해하고 많은 시간이 소요되어 현장 운전자에게 과중한 부담을 제공하는 단점을 가지고 있다. 특히 플랜트 운전 기술이 미숙한 초보 운전자에게 있어 긴 시간에 걸쳐 수행되는 복잡하고 난해한 이득 조정 동조 작업을 완료하고도 흔히 만족할 만한 제어 성능을 얻는데 실패하는 경우가 종종 발생한다. 따라서 수학적으로 복잡하고, 난해한 제어 공정을 요구하는 동조 작업을 보다 쉽게 수행할 수 있는 방안이 다각도로 연구되었다. 근래에 이르러 PID 동조 공정 관련, 숙달된 현장 전문가의 제어 기법 및 경험적 요소를 종합 분석, 제어계의 간단한 입출력 제어 파라미터를 설정하고, 이들을 조정하여 수행되는 작업 과정을 정리, 구체적인 동조 과정을 Rule-Base 화하여 자동 동조를 구현하는 퍼지제어 기법이 지목 받고 있다.

전문가의 경험적 요소를 종합하여 퍼지 지식 기반(knowledge-base)을 구성하고, 이를 근거로 개발되는 편차적응퍼지 자동 동조 PID 제어기의 개략적 모형은 그림 3.2와 같다. 편차적응 퍼지 자동 동조기는 퍼지화(fuzzification)부, 퍼지추론(decision making)부, 비퍼지화(defuzzification)부, 그리고 지식기반(knowledge-base)부로 구성된다.

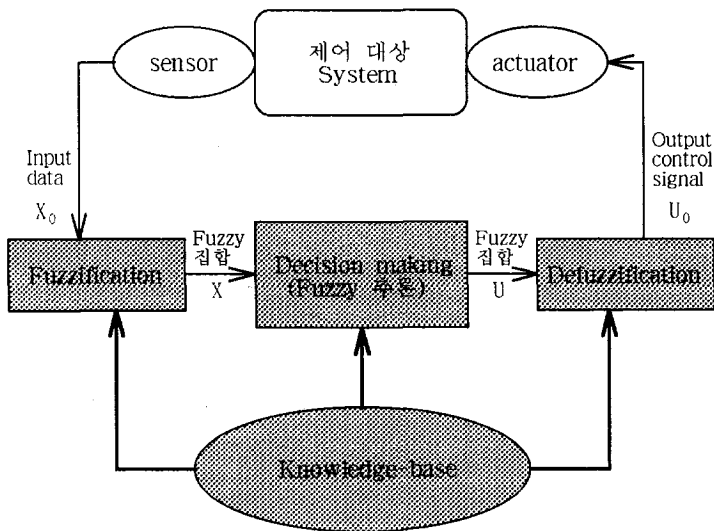


그림 3.2 퍼지 제어기 모형

3.3. PID 자동 동조 퍼지 논리

편차적응 퍼지 자동 동조 PID 제어기의 온라인 작동 시 모형은 그림 3.3(a)와 같다. 기존의 PID 제어기에 편차적응 퍼지 자동 동조기를 부착하여 보일러의 제어 대상 부 시스템(subsystem) 제어에 요구되는 PID 파라미터 값을 동조 조정 하도록 하였다. 퍼지 자동 동조 장치는 제어 대상 부 시스템의 희망 기준값과 보일러 출력단의 현 출력값(current operation value)을 검색 비교하는 파형 분석기로부터 입력을 받아 퍼지 프로세스를 수행하여 PID 동조값을 결정하고, 이를 PID 제어기에 제공한다. 퍼지 자동 동조기는 PID 제어 계수를 실시간 동조하여 제어 환경 변화에 따른 공정 변화에도 적응하도록 하였다. 그림 3.3(b)는 제안된 퍼지 자동 동조 PID 제어기의 작동 흐름을 보여주고있다.

3.3.1. 전문가 동조 기법

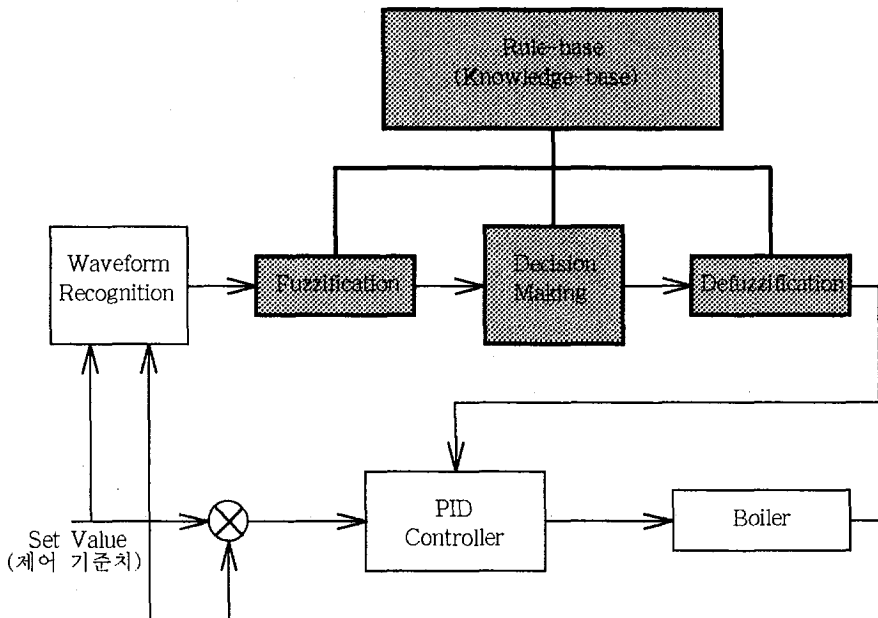
현장 전문가들은 시스템 출력 단의 응답 신호 파형을 검출하여 제어 기준치와 비교하고, 이를 통하여 현재 시스템의 상태를 진단하며, 이를 기준으로 안정된 응답 신호 파형을 얻기까지 PID 제어기의 제어 파라미터(비례 이득(Kp, P 파라미터), 적분 시간(Ti, I 파라미터), 미분 시간(Td, D 파라미터))를 조정한다. 수 차례에 거쳐 현장 운전자들의 자동 동조 과정 관찰하고 면밀히 분석한 결과, 현장 전문가들은 시스템 출력 단의 응답 신호 파형으로부터 두가지 응답 특성 지수(오버슈트(Overshoot, OS), 제동비(Damping Ratio, DR))를 산출하고, 이를 이용하여 현재 시스템의 상태를 진단하는 것으로 요약 되었다. 시스템 출력 단의 응답 신호 파형으로부터 얻어지는 오버슈트와 제동비는 그림 3.4에서와 같이 제어 대상 시스템의 제어 기준치를 단위 계단 형태로 변동시키고, 시스템 출력이 제어 기준치로 수렴해가는 과정의 일반적인 응답 신호 파형을 분석하여 얻을수있다. 그림 3.4와 같이 시스템 출력 단의 응답 신호 파형의 각 변곡점과 제어 기준치간의 오차 값(그림 3.4의 e1, e2, e3)으로부터 계산되는 응답 특성 지수 오버슈트(Overshoot, OS), 제동비(Damping Ratio, DR)는 식 (6)과 (7)과 같이 정의된다.

$$\text{오버슈트} = \text{OS} = \frac{e2}{e1} \quad (6)$$

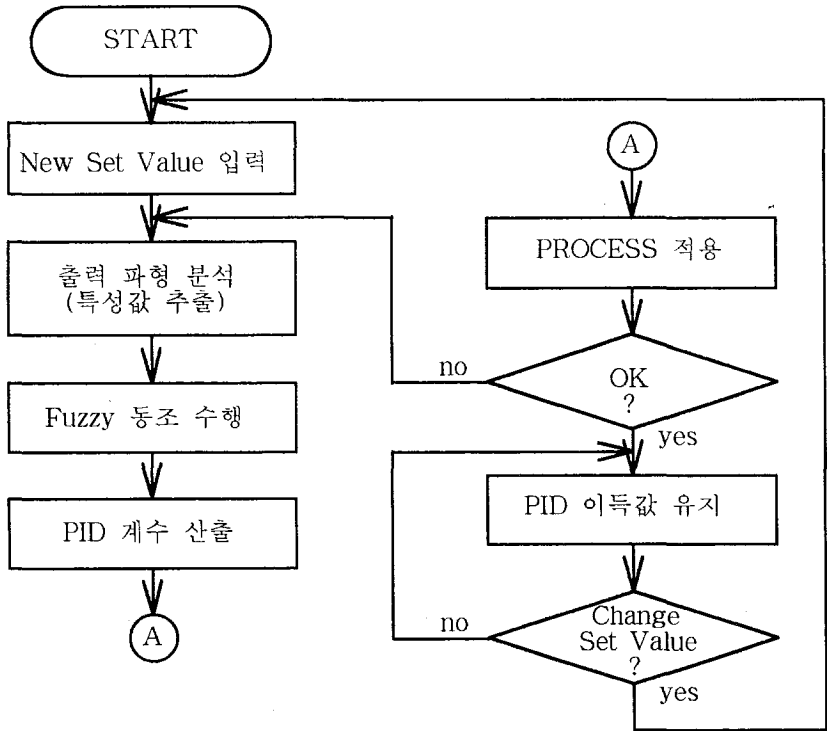
$$\text{제동비} = DR = \frac{e2 - e3}{e1 - e2} \quad (7)$$

현장 운전자들이 오버슈트(OS)와 제동비(DR)를 이용하여 시스템을 진단하고, 진단 결과에 따라 해당 PID 제어 파라미터들(비례 이득(Kp, P 파라미터), 적분 시간(Ti, I 파라미터), 미분 시간(Td, D 파라미터))을 조정하는 경험적 방식을 간략히 서술하면 다음과 같다.

- 1) 정상적인 PID 제어가 동조 상태에서 출력 단의 응답 신호 파형은 ¼ 감쇄 특성을 보이도록 PID 제어 파라미터들을 조정하여야 한다. 출력 응답 신호가 ¼ 감쇄 특성을 가질 경우 변곡점 오차 값은 다음과 같은 관계를 갖는다.



(a) 구조



(b) 제어 흐름도

그림 3.3 퍼지 자동 동조 PID 제어기

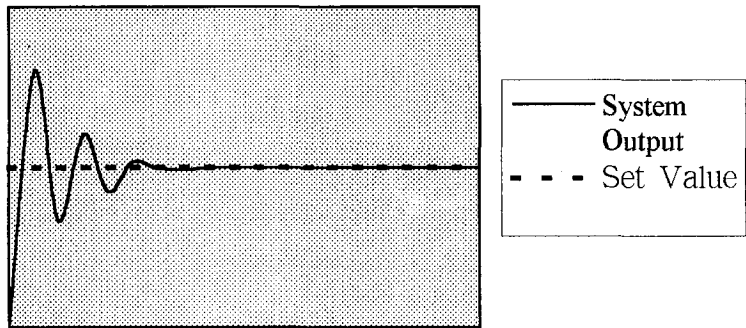


그림 3.4 단위 계단 제어 기준치 변동에 따른 응답 곡선

$$e2 = (e1) / 2,$$

$$e3 = (e2) / 2$$

따라서 ¼ 감쇄 특성을 가진 PID 동조 시 오버슈트 및 제동비는 각각 0.5가 되도록 PID 제어기 파라미터들을 조정하여야 한다.

- 2) 동조 작업 중 오버슈트가 0.5 이하로 관찰되면, 제어기 동조 상태가 ¼ 감쇄 특성보다 우수한 것으로 보고, 오버슈트 관련 동조 제어는 일단 종료한다.
- 3) 동조 작업 중 제동비가 0.5 이상으로 관찰되면, 제어기 동조 상태가 ¼ 감쇄 특성보다 우수한 것으로 보고, 제동비 관련 동조 제어는 일단 종료한다.
- 4) 오버슈트는 비례 이득(Kp) 및 적분 시간(Ti)을 조정하여 제어한다. 오버슈트가 필요 이상으로 큰 값을 가질 경우 시스템이 불안정 상태로 전이될 위험이 있으므로 비례 이득(Kp) 값을 하향 조정하여 우선 시스템 안정성을 확보하고 동시에 적분 시간(Ti)은 하향 조정하여 시스템출력이 제어 기준치에 신속히 수렴하도록 한다. 이때 필요에 따라 미분 시간(Td)를 하향 미세 조정하여 최대오버슈트를 둔화 시킴과 함께 적분 시간(Ti)의 하향 조정으로 인하여 발생할 수 있는 시스템 진동 주기 증가 현상을 억제할 수 있다.
- 5) 제동비는 주로 비례 이득(Kp) 값을 조정하여 제어한다. 제동비가 큰 값으로 나타나는 과 제동(Over Damping)의 경우 비례 이득(Kp) 값을 상향 조정하여 시스템 출력 신호의 진동을 유발한다. 반면에 부족 제동(Under Damping)의 경우 비례 이득(Kp) 값을 하향 조정하여 시스템 진동을 억제하고, 필요에 따라 적분 시간(Ti)를 상향 미세 조정하여 시스템의 민감한 외란 적응 성향을 둔화시킨다.

3.3.2. 퍼지화(Fuzzification)

퍼지화는 제어 대상 시스템의 응답 신호 파형과 제어 기준치를 비교 분석하는 파형 분석기로부터 산출된 입력 데이터를 받아들여, 이들 각각을 퍼지 집합 형태로 변환시키는

과정이다. 퍼지 집합은 해당 소속 퍼지 집합과 귀속도로 구성되며, 이들 2가지 요소로 퍼지화를 거친 입력 데이터는 제어기 내의 퍼지 추론 장치에서 사용할 수 있는 퍼지 데이터 형태를 가지게 된다. 퍼지화 된 퍼지 데이터를 X (퍼지 집합, 귀속도), 그리고 파형 분석기로부터 입력된 데이터를 X_0 라 하면, 이들간의 관계식은 식(8)과 같이 쓰여진다.

$$X(\text{퍼지 집합, 귀속도}) = \text{Fuzzification}(X_0) \quad (8)$$

퍼지화기법은 퍼지집합과 해당 퍼지 집합의 귀속도 분포에 따라 퍼지 싱글톤, Bell형 그리고 삼각형법 등 3가지 기법이 있다. 본 연구에서는 삼각형 법을 사용하여 파형 분석기로부터 연산, 입력되는 오버슈트와 제동비를 퍼지화하였다. 퍼지 제어기 입력 데이터 오버슈트에 대한 퍼지 집합 언어 변수(linguistic variables)는 제어 이론과 함께 현장 전문가의 경험적 요소를 종합하여 다음과 같이 3가지 언어 변수로 정의하였다.

PM(Positive Medium)	높음(오버슈트가 0.6 이상 일 경우)
PS(Positive Small)	약간 높음(오버슈트가 0.5 이상 0.7 이하 일 경우)
ZE(Zero)	정상(오버슈트가 0.5 이하 일 경우)

파형 분석기로부터 제공되는 오버슈트 입력 값은 그림 3.5에서와 같은 삼각형 법 퍼지화 을 거쳐 해당 퍼지 집합 영역 및 귀속도로 변환된다. 예를 들어 응답 곡선으로부터 관찰된 OS값이 0.54일 경우 퍼지화을 거치면 그림 3.5에서와 같이 해당 퍼지 집합은 ZE와 PS이고, 집합 귀속도는 각각 0.6과 0.4, 즉 ZE-0.6, PS-0.4가 된다.

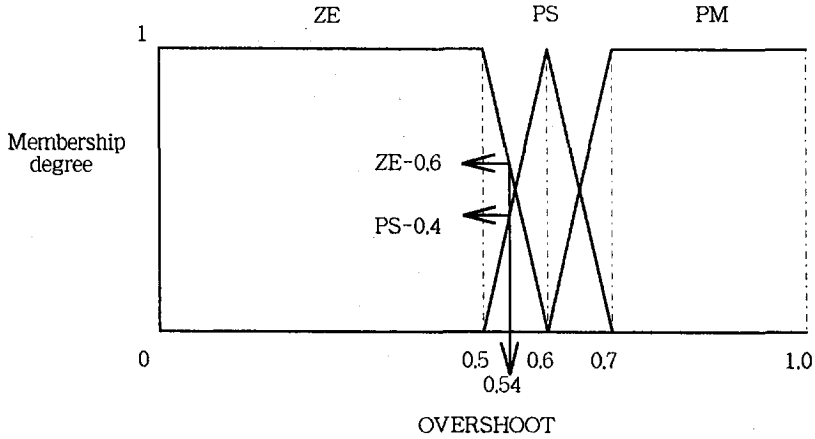


그림3.5 퍼지집합 귀속도 - 오버슈트(OS)

퍼지 제어기 입력 데이터 제동비에 대한 퍼지 집합 언어 변수는 다음과 같이 정의하였다.

ZE(Zero)	정상(제동비가 0.4 이상 일 경우)
NS(Negative Small)	약간 낮음(제동비가 0.35 이상 0.5 이하 일 경우)
NM(Negative Medium)	낮음(제동비가 0.4 이하 일 경우)

그림 3.6은 과형 분석기로부터 제공되는 제동비 입력 값을 삼각형 법 퍼지화 을 거쳐 해당 퍼지 집합 영역 및 귀속도를 구하는 과정을 보여주고 있다. 응답 곡선으로부터 관찰된 DR값이 0.466일 경우 퍼지화을 거치면 해당 퍼지 집합은 ZE와 NS이고, 집합 귀속도는 각각 0.66과 0.33, 즉 ZE-0.66, NS-0.33이 된다.

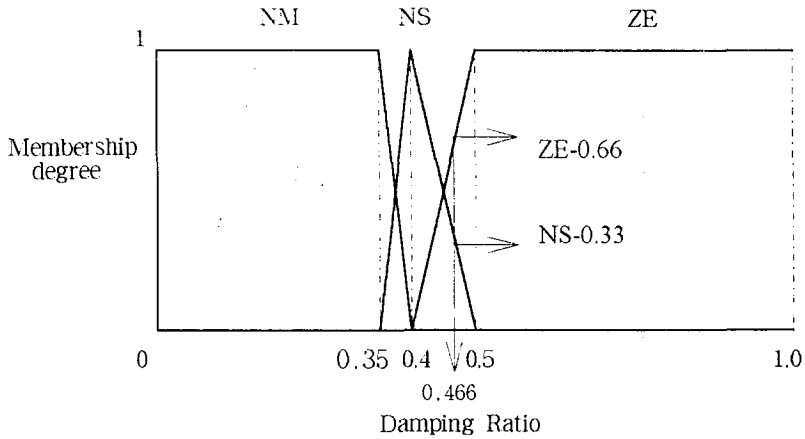


그림 3.6 퍼지집합 귀속도 - 제동비(DR)

3.3.3. 퍼지 제어 규칙(Fuzzy Control Knowledge Base)

퍼지 제어 규칙은 전문가의 제어 기법을 퍼지 제어 시스템에 이식 시키는 핵심적 부분으로, 이는 제어 시스템의 성능을 결정하는 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 제어 대상 보일러 시스템 관련 운전 전문가의 경험과 동조 수행 보고서, 그리고 다양한 제어 기법을 분석, 이를 토대로 제어 규칙을 수집, 정리하고, 이를 다시 IF~THEN 형식으로 규칙기반을 구축하였다.

조건절 IF 문구에는 퍼지화 된 입력 데이터(오버슈트, 제동비)를 나열하였고, 결과절 THEN 문구에는 전문가의 Know-How에 근거한 제어 기법을 기술하였다. 3.3.1절에 요약된 전문가 제어 기법은 파형 분석기가 산출하여 제공하는 시스템 출력 신호의 오버슈트와 제동비 값에 따라 적당량의 비례이득(Kc), 적분시간(Ti), 및 미분시간(Td) 등 제어 파라미터 값을 조정하게 된다. 이들 제어 파라미터의 조정 정도를 정량적으로 나타내기 위하여 각 파라미터 별 퍼지 집합 언어 변수를 다음과 같은 7개의 용어 집합으로 구분하고 각각의 퍼지 영역은 그림 3.7, 3.8 그리고 3.9와 같이 정의 하였다.

PB(Positive Big)	큰 폭 상향 조정
PM(Positive Medium)	상향 조정
PS(Positive Small)	소 폭 상향 조정
ZE(Zero)	정상

NM(Negative Medium) 소 폭 하향 조정

NS(Negative Small) 하향 조정

NB(Negative Big) 큰 폭 하향 조정

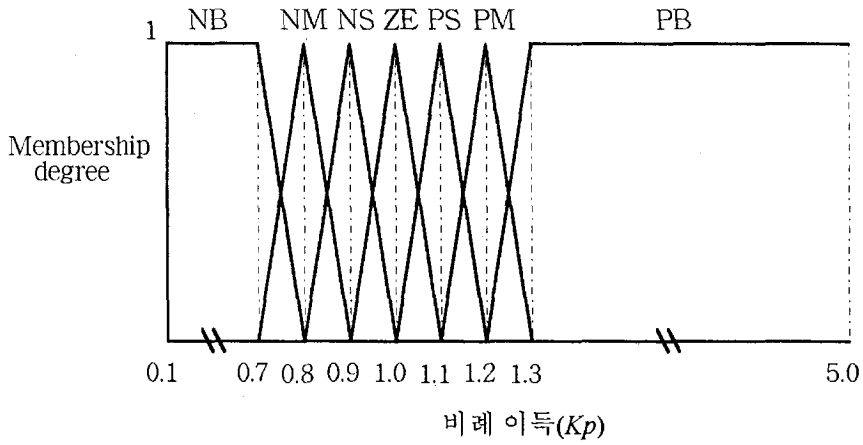


그림 3.7 PID 제어기의 비례 이득 퍼지 영역

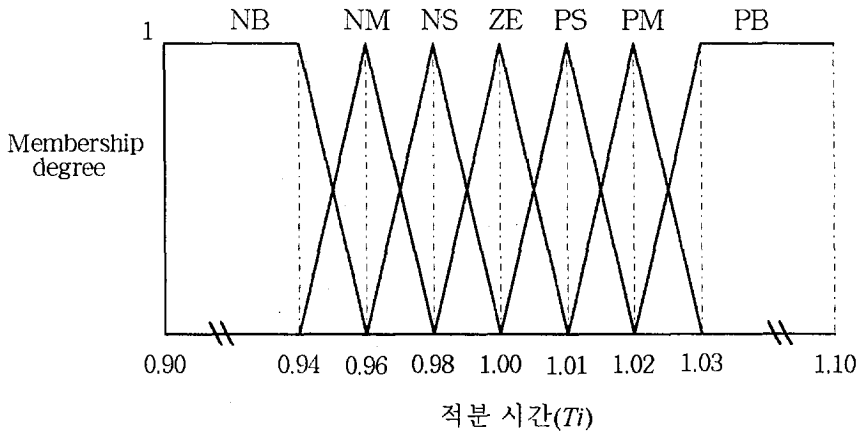


그림 3.8 PID 제어기의 적분 시간 퍼지 영역

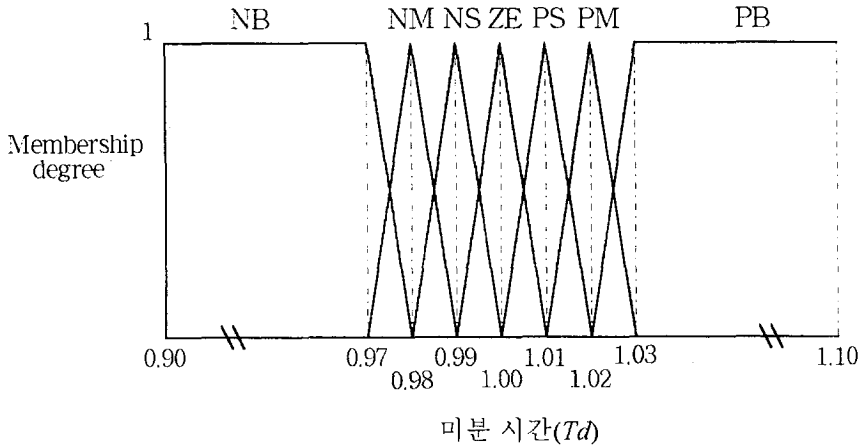


그림 3.9 PID 제어기의 미분 시간 퍼지 영역

과형 분석기로부터 입력된 오버슈트와 제동비를 해당 퍼지 집합 언어 변수로 변환하여 조건 IF절에 나열하고, 이에 따른 제어 파라미터 조정 방식을 3.3.1절의 내용에 입각하여 THEN절에 기술하여 작성한 퍼지 규칙-기반은 다음과 같다.

- [R1] IF Overshoot is **ZE** and Damping Ratio is **ZE**
THEN K is **ZE** and T_i is **ZE** and T_d is **ZE**
- [R2] IF Overshoot is **ZE** and Damping Ratio is **NS**
THEN K is **NS** and T_i is **PS** and T_d is **ZE**
- [R3] IF Overshoot is **ZE** and Damping Ratio is **NM**
THEN K is **NM** and T_i is **PS** and T_d is **ZE**
- [R4] IF Overshoot is **PS** and Damping Ratio is **ZE**
THEN K is **NS** and T_i is **NS** and T_d is **ZE**
- [R5] IF Overshoot is **PS** and Damping Ratio is **NS**
THEN K is **NS** and T_i is **ZE** and T_d is **NS**
- [R6] IF Overshoot is **PS** and Damping Ratio is **NM**
THEN K is **NM** and T_i is **PS** and T_d is **NS**

- [R7] IF Overshoot is **PM** and Damping Ratio is **ZE**
THEN K is **NM** and T_i is **ZE** and T_d is **ZE**
- [R8] IF Overshoot is **PM** and Damping Ratio is **NS**
THEN K is **NM** and T_i is **PS** and T_d is **NS**
- [R9] IF Overshoot is **PM** and Damping Ratio is **NM**
THEN K is **NB** and T_i is **PB** and T_d is **NS**

3.3.4. 퍼지 추론(Decision Making)

퍼지 추론 과정은 Decision Making과정이라 부르기도 한다. 이 과정을 지나며 제어기는 내장되어 있는 퍼지 제어 규칙 기반을 지속적으로 참조하며, 퍼지화 된 입력 값을 분석하고 이에 상응하는 다수의 출력 퍼지 집합들을 추론하여낸다. 이들 다수의 출력 퍼지 집합들은 하나의 제어 퍼지집합으로 병합되어 퍼지추론 장치의 출력 U 를 형성하게 된다. 퍼지 추론 및 추론의 합성 기법으로는 Min-Max방식과 Additive방식 등이 널리 알려져 있다. 본 연구에서는 Min-Max방식을 활용하여 출력 퍼지 집합의 추론 및 추론의 합성을 수행하였다.

3.3.5. 비퍼지화(Defuzzification)

퍼지 대표 값 U 와 비퍼지화를 거친 U_0 의 관계식은 식(9)와 같이 쓰여진다.

$$U_0 = \text{defuzzification}(U) \tag{9}$$

제어 퍼지 집합의 대표 값을 찾아내는 방법으로는 Centroid 기법, Maximum Height 기법, Average of the support set 기법, Center of Maximums 기법 등이 알려져있고, 이들 중 Centroid 기법과 Maximum Height 기법이 널리 활용되고 있다. Centroid 기법은 전체 출력 제어 퍼지 집합 영역의 무게중심 값을 대표 값으로 계산하는 방식으로, 계산이 용이하고, 대표 값 결정에 있어 비교적 공평한 산 법을 택하고 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에 적용된 Centroid방식은 먼저 Min-Max

방식 등 퍼지 추론을 통하여 얻은 출력 퍼지 집합 영역을 Δ 개로 분할하고, 분할에 따른 각 영역별 (n_i) 귀속도 $\mu(n_i)$ 을 구하여, 식(10)과 같은 방법으로 출력 퍼지 집합의 무게 중심 (Balance Point(BP_k))을 찾아내게 된다.

$$\sum_{i=0}^{bp} \frac{\phi_e - \phi_s}{\Delta} \times \mu_k(n_i) = \sum_{bp}^{\Delta} \frac{\phi_e - \phi_s}{\Delta} \times \mu_k(n_i) \quad (10)$$

이때 $bp = (BP_k - \phi_s) / \Delta$ 이다.

Centroid 방식에 의해 비퍼지화 된 출력 데이터 (비례 이득 출력(BP_k), 적분 시간 출력(BP_i), 미분 시간 출력(BP_d))는 PID제어기의 동조전 K_p , T_i , T_d 값에 곱해져서 각각의 동조 조정 값($K_p(+)$, $T_i(+)$, $T_d(+)$)를 식 (11), (12), 그리고 (13)과 같이 구하게 된다.

$$K_p(+) = K_p \times BP_k \quad (11)$$

$$T_i(+) = T_i \times BP_i \quad (12)$$

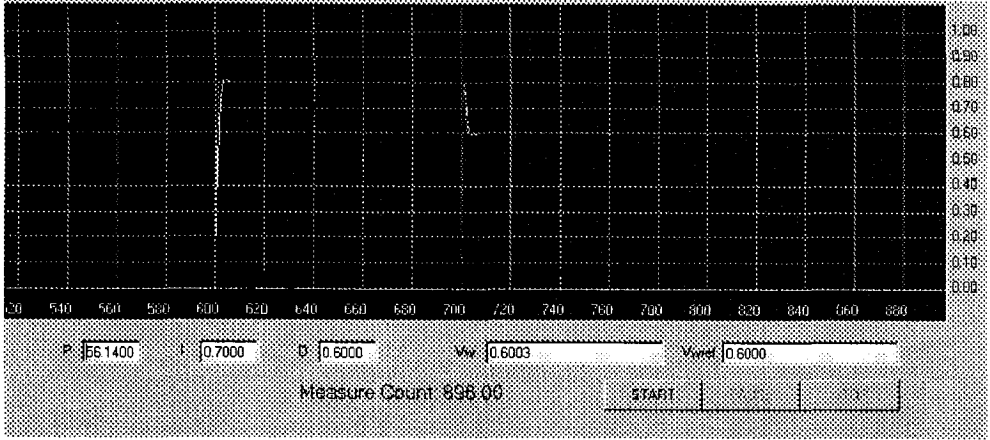
$$T_d(+) = T_d \times BP_d \quad (13)$$

이때 적분 포화(Wind-up) 현상을 방지 하기 위해 Ziegler와 Nichols의 동조 법칙을 적용, 적분 이득과 미분 이득이 주기의 $\frac{0.5}{0.85}$ 배 및 $\frac{0.12}{0.85}$ 배 이하일 경우 적분 및 미분 이득 조정 과정을 멈추도록 하였다.

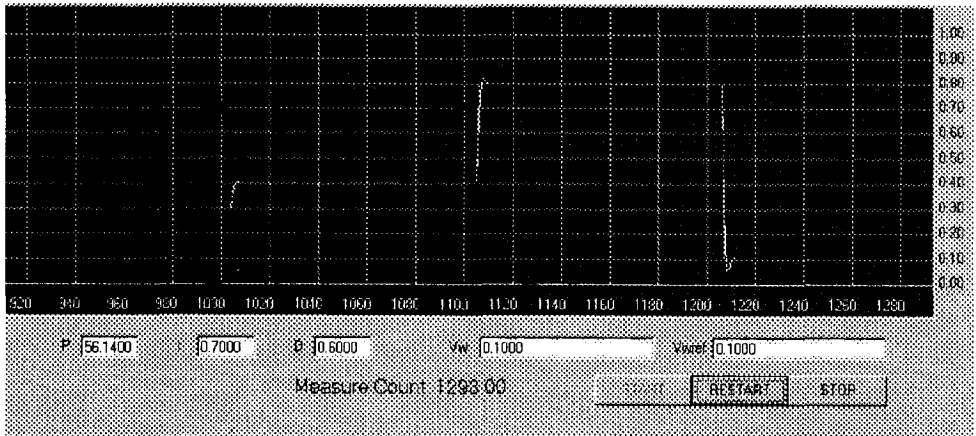
IV. 시뮬레이션 및 결과

그림 4.1과 4.2는 본 연구에서 개발한 GUI Display Window를 통하여 관찰된 PID 퍼지 자동 동조 제어기의 온라인 동조 기능을 보여주고있다. 제안된 PID 퍼지 자동 동조 제어기의 성능을 검증하기 위하여 동조 작업을 필요로하는 보일러 수위 제어 계와 압력 제어계 모델에 본 연구에서 개발한 퍼지 알고리즘을 각각 적용하였다. 또한 퍼지 자동 동조 제어기의 온라인 동조 기능을 살펴보기 위하여 제어 대상 시스템 모델의 제어 기준치가 10% ~ 100% 구간에서 무작위(random)로 변동하도록 환경을 설정 하였다.

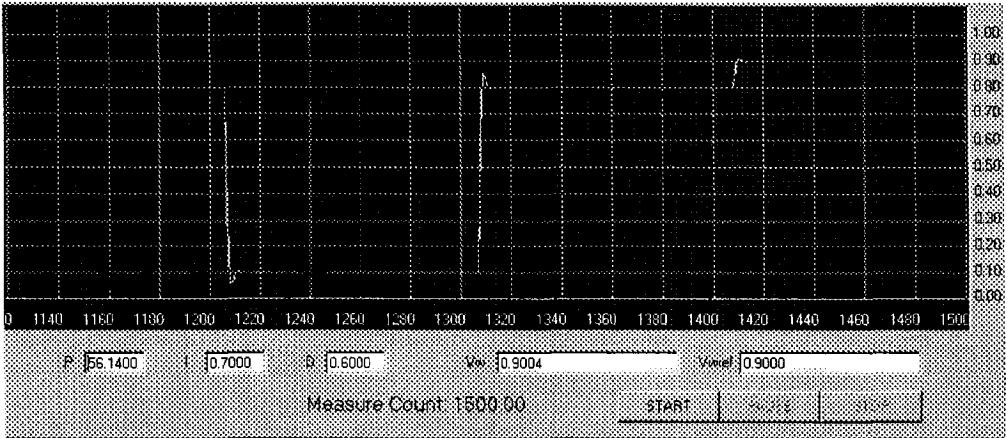
기존의 PID 제어기는 운전 중 부하 변동 혹은 제어 기준치 재설정 등 운전 환경 변화 시 시스템 최적 동작점을 찾기위한 제어기 동조 작업이 난해 할 뿐아니라 장시간에 걸쳐 복잡한 동조 작업을 수행하고도 만족 할만한 동조 결과를 얻지 못하는 경우가 자주 발생 하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 퍼지 자동 동조 알고리즘은 시스템의 최적 동작점을 복잡한 연산 과정 없이 실제 현장 전문가의 시스템 제어 기법에 따라 추적하게 되므로 시스템의 동작 조건에 동요없이 신속하게 새로운 PID 제어 파라미터 값을 찾아내어 동조를 수행 함으로서 시스템 전체의 제어기능 향상을 기대할 수 있다. 제안된 자동 동조 알고리즘은 무엇보다도 운전자에게 주어지는 부담을 줄여주고, 보다 체계적이고 빠른 계산에 의해 동조가 이루어지므로 변동 부하 혹은 외란 발생 시, 그림에 보인 바와같이 온라인 대처가 가능하게하며, 부하 변동율이 높을 때에도 신속, 정확한 제어 효과를 얻을 수 있게한다.



(a)

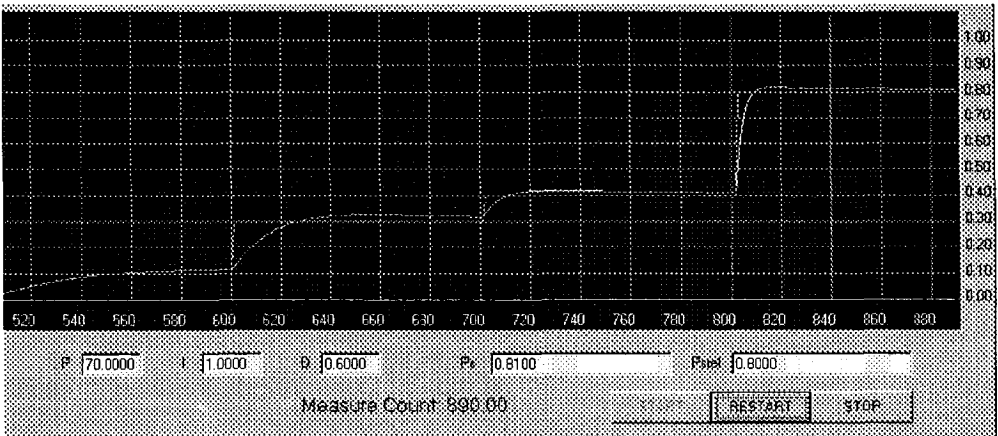


(b)

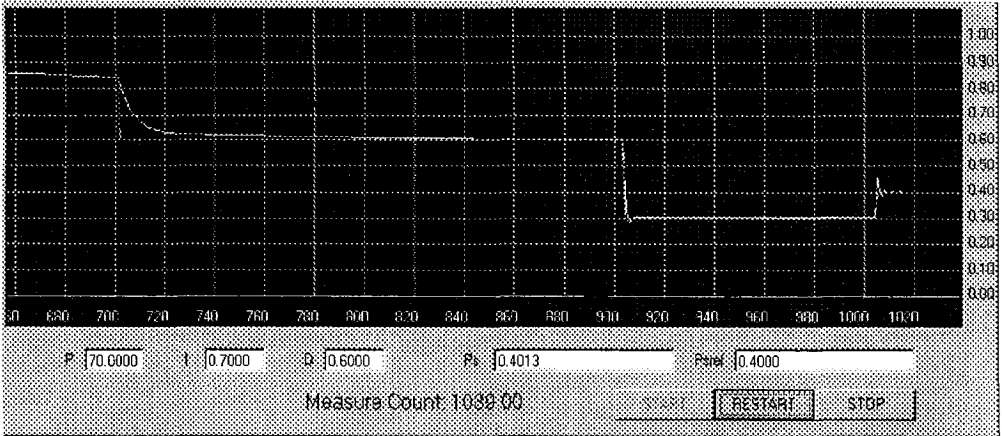


(c)

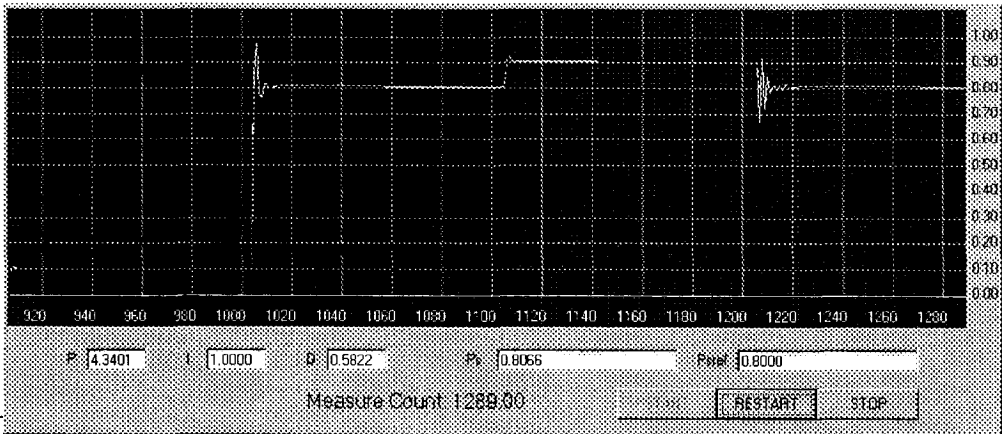
그림 4.1 수위 제어계 On-Line 퍼지 동조 결과



(a)



(b)



(c)

그림 4.2 압력 제어제 On-Line 퍼지 동조 결과

V. 결 론

본 연구에서는 현장 운전 전문가의 경험과 지식을 수집, 분석하여 드럼형 보일러를 위한 PID 제어기 동조 기법을 정리하고, 이를 토대로 자동 동조 퍼지 규칙기반을 작성하였다. 현장 전문가의 PID 동조 제어 기술에 근거하여 제안된 퍼지 규칙기반은 자동 동조 퍼지 알고리즘의 핵심 기반 기술로 향후 PID 정밀 동조기 설계 시 매우 유용한 자료로 평가 되고있다. 본 연구에서 제안한 온라인 퍼지 제어기 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 드럼 형 65 ton 보일러의 수위 및 압력 제어계 모델에 적용하여 장시간 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 제안한 퍼지 자동 동조 PID제어기는 시스템의 변동 부하 혹은 외란으로인한 급격한 특성 변화에도 신속하게 적응하는 온라인 대처 기능과 함께 시스템의 변경된 운전 환경에 따른 최적 이득 값을 산출하여 적절한 출력 값을 생성, 유지하는 성능의 우수성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Setting for Automatic Controllers", *Trans. of the AASME*, vol.65, pp.759-768, 1942
- [2] K. J. Åstrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", *Instrument Society of America*, 1988.
- [3] G. H. Cohen and G. E. Coon, "Theoretical Investigation of Retard Control", *Trans. ASME*, vol.75, pp.827, 1953.
- [4] G. E. Coon, "How to find controller setting from processor characteristics", *Control Eng*, pp66-76, 1956
- [5] K. Suyama, "A Practical Design Method for PID Control System", *SICE*, vol. 29, No. 2, pp.236-238, 1993
- [6] 김 재선, "신호 흐름도 모델을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", *한국 과학 기술원 석사 학위 논문*, 1989.
- [7] 권 만준, 이 재혁, 황 동환, 변 증남, "전문가 지식을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러

PI제어기의 퍼지 자동 동조에 관한 연구", *전자학회지* 28 권 B 편 11 호, 1991.

- [8] 이 창구, 김 성중, "규칙기반 자동 동조 PID제어기에 관한 연구", *Trans KIEE, Vol.40, No.11* Nov. 1991.
- [9] 최 한호, 이 정훈, 고 정호, 정 명진, "전문가 PID 제어 시스템의 설계", *전기학회지* 43 권 1 호 1994.
- [10] K.J. Astrom and R.D. Bell, "Simple Drum-boiler Model," *IFAC Symposium Power System Modeling and Control Applications*, 1988.
- [11] K.J. Astrom and K. Eklund, "A Simplified Non-Linear Model of a Drum Boiler-Turbine Unit,' *I.J.C.*, pp.145-169, 1972.
- [12] T. Yoshizawa et al. "JSME STEAM TABLES", *일본 기계 학회*, 1968.
- [13] Yashikazu Nishikawa, Nobuo Sannomiya, Tokuji Ohta, and Haruki Tanaka, "A Method for Auto-tuning of PID Control 파라미터", *Automatica*, vol. 20, No.3, pp.321-332, 1984.
- [14] R.L.Daugherty and J.B.Franzini, "Fluid Mechanics with Engineering Applications", *McGraw-Hill* 1985.