

전문가 지식을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 PI 제어기의 자동 동조에 관한 연구

권 만준, 황 동환, 변 중남

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Expert Knowledge-based Auto-tuning of PI Controllers for a Drum-type Boiler of Fossil Power Plant

Mann Jun Kwon, Dong-Hwan Hwang and Zeungnam Bien

Dept. of E.E., KAIST

ABSTRACT

The characteristics of a power plant changes as it operates for a long time and/or for different operating points. As a result, operators must retune gains of the controllers for better performance. In fact, skilled operators can retune the gains in reference to recorded data obtained by a test called dynamic test. The dynamic test, however, requires much time, and can be heavy burden for operators.

In this paper, an expert knowledge-based auto-tuner is designed for drum-type boiler controllers of a fossil power plant using fuzzy logic. The performance of the proposed auto-tuner is shown via computer simulation and the simulation results show that the proposed auto-tuner is satisfactory for the desired performance.

1. 서론

발전소 보일러 플랜트와 같은 산업 공정에서 제어기 설치시 또는 플랜트의 특성변화가 일어났을때, 제어기 기술자 또는 플랜트 운전자는 주어진 플랜트의 동작 조건 그리고 성능 지수(performance index)를 만족시키는 제어기의 적절한 이득(gain)값을 구해야만 한다. 이러한 작업을 일반적으로 동조(tuning)라고 하는데 동조에는 초기 동조(initial tuning 또는 rough tuning)와 정밀 동조(fine tuning)로 나누어 생각할 수 있다. 초기 동조는 주어진 플랜트의 특성을 한번 파악하여 주어진 조건에 따라 대략적인 이득값을 정하는 것을 말하며, 정밀 동조는 초기 동조에 의해 구해진 이득값을 기본으로 하여 성능을 보다 개선하는 새로운 제어값을 구하는 작업을 말한다.

그러면, 발전소 보일러 제어기에 대해서 숙련된 운전자의 정밀동조를 과정을 살펴보자. 우선 총점검(overhaul) 기간을 두어 유해 요소를 제거하고 계획된 절차에 의해 동특성 시험이라 불리워지는 운전을 수행하고, 이 과정을 통해 얻어진 다양한 데이터를 이용하여 여러 제어 블록의 이득값을 조정한다. 운전자는 동특성 시험을 수행할 때 그림 1.1에서 보듯이 짧게는 10여분, 길게는 4-5시간이 걸리는 수동 작업을 수행하므로 많은 부담을 가지게 된다. 특히 기록되는 데이터의 경향을 보면서 수동 작업을 수행하여야 하므로 잠시라도 시선을 딴곳으로 둘 수가 없다. 이때 운전자는 여러개의 제어기 이득값을 결정하는데 정밀 계기를 통해 그림 1.2와 같은 모눈종이에 기록된 데이터를 먼저 분석한다. 운전자가 데이터를 잘못 읽어 영동한 이득값을 발생시킨다면 위험한

일이 일어날 수 있으며, 수동으로 동조 작업을 행하기 때문에 기본적으로 많은 시간이 소요된다. 뿐만 아니라 제어기를 5-6년이상 다루어본 전문화된 운전자만이 가능하므로 초심자가 제어 동조를 수행하고자 할 때는 교육이 따로 필요하다.

이와 같이 운전자에게 주어지는 과중한 부담을 줄이고 보다 빨리 동조를 수행하여 휴지기간이 짧은 때에도 성능을 쉽게 향상시킬 수 있도록 자동 동조 작업이 필요함을 알 수 있다. 과거의 제어기 동조에서는 모든 제어블록의 조정레버를 수동으로 조작하여야 했으나 최근에는 DCS(distributed control system)의 발전에 힘입어 온라인으로 매개 변수의 값을 변경시킴으로써 비교적 간단하게 조정할 수 있기 때문에 자동 동조알고리즘이 개발될 경우, 동조 작업이 쉽게 이루어 질 수 있게 되었다.

한편, 기존의 동조 알고리즘[1][2][3]이 단순한 플랜트에 대해서는 원하는 결과를 얻을 수 있으나, MIMO(multiinput multioutput) 시스템으로 신호의 상호 간섭(interaction)과 심한 비선형(highly nonlinear)의 특성을 가지는 플랜트에 대해서는 적용하기 어려움을 알 수 있다. 특히 구조적으로 복잡하며 부시스템간의 상호 연결성(interconnection)이 강하며 비선형 특성이 많이 포함된 MIMO시스템의 예로써 발전소 보일러 플랜트를 들 수 있는데, 이에 대해 적용할 수 있는 적절한 방법은 많지 않다. 한편 퍼지 이론이 인간의 전문적 지식을 획득하여 표현하거나, 플랜트의 수학적 모델을 이용하기 힘든 복잡한 공정 및 불확실성이 많은 공정의 정보를 다루는 효율적인 방법으로 널리 알려져 있다. 이러한 사실에 주목하여 보면 복잡하고 비선형 특성이 큰 발전소 보일러 제어기에 대해 숙련된 운전자에 의해서 획득된 경험과 지식을 이용하면 제어기 매개 변수 조정 작업의 자동화를 이룩하려고 할 때 퍼지 이론은 유용한 도구가 될 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 화력 발전소 드럼형 보일러 제어기를 대상으로 퍼지 이론을 도입한 전문가의 지식을 근거로 한 자동 동조기(auto-tuner)를 설계하고자 한다.

2. 보일러 제어기의 자동 동조

본절에서는 운전자의 동조 내용을 살펴본 뒤 이를 퍼지 논리를 이용하여 구현한 자동 동조 알고리즘을 제시한다. 우선 다루고자하는 대상 플랜트는 서울화력 4호기 보일러의 운전중 기록된 데이터를 기초로 하여 구한 모델[4]이며, 자동 동조를 수행하고자 하는 제어기는 현장에 설치된 공압식 제어기의 도면을 통하여 등가적으로 구한 디지털 PI제어기이다.

2.1. 운전자에 의한 동조(tuning)

보일러가 장기간의 운전을 하는 동안 물속의 유해물질이나 불완전 연소 시의 그을음등이 보일러 운전의 효율을 저하시키는 원인으로 작용하므로 운전자는 우선 이들 유해요소를 제거한다. 이 작업을 현장에서는 '총점검'이라 말한다. 총점검이 끝난 후 운전자는 중앙 급전 사령실의 허락을 얻어 적절한 동특성 시험 계획을 준비한다. 계획된 곡선은 그림 1.1에서 보듯이 보일러 최대출력의 4/4, 3/4, 2/4부하의 정상상태를 유지하는 부분과 일정 비율을 가지고 증감발하는 부분으로 이루어져 있다. 계획곡선에서 알 수 있듯이 동특성 시험을 시행하기 전에는 항상 보일러의 출력이 평형(equilibrium) 상태에 있음을 보여주고 있다.

그림 1.1에서와 같은 출력 변화에 대해 공기의 흐름량(기호 F_{air} , air flow rate), 연료의 흐름량(기호 F_{oil} , oil flow rate), 주증기의 흐름량(기호 F_{ms} , main steam flow rate), 출력(기호 P_{wr} , power), 주증기의 압력(기호 P_{ms} , main steam pressure), 마스터 신호(기호 M_{sig} , master signal)등을 기록한다. 이들 기록된 신호분석을 통해서 각 제어블럭의 이득값을 조정하는데 신호 분석과 이득값 조정의 자세한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

우선 전체 동조 전후의 특성을 정리하면 다음과 같다. 그림 2.1(a)의 동조 전에 기록된 신호들의 기울기가 상대적으로 다름으로 인하여 주증기 압력의 변화치가 큰 것을 알 수 있으며, 그림 2.1(b)와 같이 기울기가 같아짐으로 인하여 주증기 압력의 변화치가 줄어들게 된다. 이렇게 함으로써 보일러의 운전의 효율성 향상과 안정성등이 높아지게 된다.

한편, 보일러의 다양한 기능중 주증기 압력을 일정하게 하는 것이 중요하게 여겨지고 있는데, 이 기능을 주로 담당하는 제어가 그림 2.2에 나타난 연소제어기이다. 이 제어를 기초로 하여 운전자가 어떠한 의미에서 소구간의 변화폭을 보고 각 제어블럭의 비례이득값을 조정하며 전체적인 기울기를 보고 적분이득값을 조정하는지를 살펴보자. 비례이득 조정 관점에서 보는 간략화된 블럭선도는 그림 2.3와 같다. 마스터 신호는 연소제어기에서 보듯이 순간적인 출력변화에 대해 연료량과 공기량의 요구신호(demand signal)가 된다. 그러므로 마스터 신호가 '1' 바뀌었다면 공기량과 연료량이 '1' 만큼 변화되어짐으로 인하여 변화된 주증기 압력을 보상해줄 수 있는 증기량을 발생시킬 수 있다는 것이다. 이러한 의미에서 마스터 신호의 변화치에 대해 공기량의 변화치가 작으면 공기량의 발생량을 증가시켜 주기 위하여 공기 제어블럭의 비례이득값을 증가시켜주어야 한다. 그리고 마스터 신호의 변화치에 대한 공기량의 변화치를 보고 이 값이 클 경우는 비례이득값을 감소시켜야 한다. 연료제어기 블럭에 대해서도 같은 방법으로 비례이득을 조정할 수 있다. 그런데 공기량과 연료량의 제환에 의해서 마스터 신호의 변화치와 연료량과 공기량의 변화치가 같게 되기는 힘드나 마스터신호에 대한 공기량의 변화치의 비와 마스터 신호의 변화치에 대한 연료량의 변화치의 비가 1이 되기를 원하면서 비례이득값 조정을 하게 된다.

그리고 적분이득 조정 관점에서 본 간략화된 제어기의 블럭선도는 그림 2.4와 같다. 적분이득값에 따라 제어기는 순간적인 오차에 대응하기 보다는 주로 정상상태에서의 오차에 민감하게 반응하도록 작용을 하므로 적분이득값의 변화는 신호의 전체적인 기울기를 변화시킨다. 제어기 및 플랜트 구조상 연료제어블럭의 적분이득값이 변화하면 연료량의 전체적인 기울기가 변화하면서 증기의 발생량이

변화한다. 그 결과 주증기의 압력이 변화하면서 마스터 신호의 전체적인 기울기가 변화하게 된다. 마스터 신호의 기울기 변화에 대해 공기량의 기울기가 역시 감소하게 된다. 즉, 연료제어블럭의 적분이득값 조정에 의해 연료량, 마스터 신호, 공기량등의 기울기가 영향을 받게 된다. 또 공기제어블럭의 적분이득값이 변화하면 공기량의 전체적 기울기가 증가할 것이다. 그런데 구조상 공기량의 기울기 변화는 다른 신호에는 영향을 않는다. 이와같이 적분이득값을 조정하여 기울기가 같아지고, 그 결과 주증기 압력의 변화폭이 줄어들게 된다. 각 신호의 기울기는 정상상태값에 대한 첫과도오차(이하 '정상상태 과도오차'라 한다)의 값으로 파악한다. 기울기가 급하면 정상상태 과도오차의 값이 양의 값으로 크게 되며, 기울기가 완만하면 정상상태 과도오차의 값이 음으로 크게되고 기준 출력신호와 같은 기울기가 되면 정상상태 과도오차의 값이 거의 '0'에 가깝게 된다.

이처럼 기록되는 신호들의 시간적 소구간에서의 신호의 변화폭을 통하여 비례이득값을, 신호의 정상상태 과도오차를 통하여 적분이득값을 구한다.

2.2. 퍼지 자동 동조기

지금까지 운전자가 어떤 관점에서 보일러 제어기의 이득값을 결정했는지에 대해서 살펴보았다. 이를 기본으로 하여 화력 발전소 드림형 보일러의 퍼지 자동 동조기를 서술한다. 퍼지 자동 동조기의 구조는 그림 2.5에서와 같이 일반적인 퍼지제어기와 유사한 형태이다. 그림을 보면 입출력의 물리량이 서로 다를 뿐이며, 입력이 들어가서 출력으로 나올때까지 수행되는 과정은 똑같다. 따라서 퍼지제어기의 구현시 이용되고 있는 여러가지 방법을 자동동조기 구현에도 그대로 이용할 수 있다. 입력에 대한 퍼지화는 삼각형법을 사용하였으며, 입출력의 전체 집합에 대한 양자화(quantization)는 필요에 따라 비선형법 또는 선형법을 사용하였고, 출력의 비퍼지화는 가장 널리 사용되는 무게중심법(center of gravity)을 이용하였다.

다음에는 일반적인 자동 동조의 절차[5]에 따라 자동 동조기를 구현한다. 이처럼 상용화된 자동 동조기[6]에서와 같이 일반화된 자동 동조 절차에 의해 구현하므로 다른 공정 제어의 제어기에서도 동조할 때도 이용 가능하다.

일반화된 자동 동조 절차는 다음과 같다.

- (1) 특정 시험 신호(test signal)에 대한 공명 응답 신호를 샘플링한다.
- (2) 공정의 특성값을 찾기 위해 샘플링된 데이터를 처리한다.
- (3) 제어기의 매개 변수 값을 정한다.

그러면 일반화된 자동 동조 절차에 따라 각 단계별로 퍼지 자동 동조기를 살펴보자.

첫째로 제어기 이득동조를 위해서 보일러 동특성 시험시의 시험신호는 그림 2.6에서와 같은 시험 신호를 사용한다. 시험 신호는 자동 운전시에 허용하는 비율로 증감하면서 시간적인 소구간에서 요동을 일으키는 특징을 가지고 있다.

둘째로 운전자는 비례 이득값을 구하기 위해 시간적 소구간에서 마스터 신호에 대한 공기량과 연료량의 각각의 비($R_{oil/Msig}$, $R_{air/Msig}$)를 구하고, 적분 이득값을 구하기 위해 각 신호의 정상 상태값에 대한 정상상태 과도오차($SSTE_{signal}$, Steady-state Transient Error)값을 구하게 된다.

셋째로 자동 동조기의 조정 알고리즘을 살펴보면 다음과

같다. 동조기 구현시 가장 중요한 것은 동조 규칙(tuning rule)을 어떻게 알아내는가에 있다. 규칙은 앞서 2.1절에서 설명한 바와 같은 현장의 운전자와의 대화를 통한 언어적이고 정성적인 것을 얻을 수 있으며, 동조 수행 보고서 및 운전자의 표현 그리고 시뮬레이션을 통해서 정량적인 수치를 얻을 수 있다.

A. 비례이득 조정

그림 2.6과 같은 시험신호가 가해질때 δM_{sig} , δF_{air} , δF_{oil} 은 보일러가 최대 부하로 운전되고 있을 때 각신호의 정상 상태값에 대한 시간적 소구간에서 신호의 변화폭을 %값으로 나타낸 것이다.

마스터 신호의 변화량에 대한 공기 변화량과 연료변화량의 비를 각각 다음과 같이 정의하자.

$$R_{air/Msig} = \delta F_{air} / \delta M_{sig} \quad (1)$$

$$R_{oil/Msig} = \delta F_{oil} / \delta M_{sig}$$

동조의 목표는 식 (1)에 정의된 값들이 '1'이 되도록 하는 것이다.

이와 같은 동작을 퍼지 논리를 도입하여 구현하기 위하여, 입력 공간은 5개의 소속 함수로 나누며, 출력공간 역시 5개의 소속함수로 나눈다. 그리고 입력 공간이나 출력공간에 대한 비선형 양자화는 $(2/3)^{-3}$ 에서 부터 등비로 $(3/2)^{(-QTNUM/3)}$ 의 계수를 가지도록 하였다. 따라서 1이하의 구간에서는 좁은 간격으로, 1이상의 구간에서는 넓은 간격으로 양자화된다. 여기서 QTNUM은 입출력 전체 공간의 총 양자화 갯수를 나타낸다. 전술한 중 하나의 형식을 보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{IF } R_{air/Msig} = \text{about } 0.66, \quad (2)$$

$$\text{THEN } MF_{air} = \text{about } \frac{3}{2}.$$

$$Ki_{air}(\text{동조후}) = MF_{air} * Ki_{air}(\text{동조전})$$

식 (2)는 요구 신호의 순간적 변화(δM_{sig})에 대한 발생 신호의 변화량(δF_{air})의 비가 약 0.66일때 공기 제어블럭의 비례 이득값을 이전의 이득값에 대해 약 1.5배의 이득값을 발생시킨다는 의미이다. 이에 대한 결과로써 같은량의 요구 신호 변경에 대해 발생 신호의 순간적 변화량이 증가하게 되어 $R_{air/Msig}$ 의 값이 '1'에 가까워진다. 비례 이득을 동조 규칙은 표 2.1에 정리하였다.

B. 적분이득 조정

$SSTE_{signal\ name}$ 를 정상상태 과도 오차(Steady-State Transient Error)로 정의하며, 입력 공간의 소속 함수는 간단히 3개로 구분한다.

입력 공간의 전체 집합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -2.0 &\leq SSTE_{Msig} \leq 2.0 \\ -4.0 &\leq SSTE_{air} \leq 4.0 \\ -4.0 &\leq SSTE_{oil} \leq 4.0 \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 출력 공간의 소속 함수는 5개로 구분하였으며, 출력 공간의 전체 집합 구간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -4.0 &\leq \delta Ki_{oil} \leq 4.0 \\ -3.0 &\leq \delta Ki_{air} \leq 3.0 \end{aligned} \quad (4)$$

전문가의 동조 알고리즘을 살펴보면 연료 제어기의 적분이득 동조에는 입력으로 $SSTE_{oil}$, $SSTE_{Msig}$ 를 가지며,

공기 제어기 적분이득 동조시에는 입력으로 $SSTE_{oil}$, $SSTE_{Msig}$, 그리고 $SSTE_{air}$ 를 가져야함을 알 수 있다. 이에 대해 연료 제어블럭의 적분이득 조정을 위한 규칙을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{IF } SSTE_{Msig} = NE \text{ AND } SSTE_{oil} = NE, \\ \text{THEN } \delta Ki_{oil} = NS. \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에 표현한 규칙의 조건부에서 연료량의 정상상태 과도오차가 음이고, 마스터 신호의 정상상태 과도오차가 음임을 주목해 보자. 연료량의 정상상태 과도오차가 음이면 연료 제어 블럭의 비례 이득값이 작게 설정되었다는 뜻이며, 마스터 신호의 정상상태 과도오차가 음이란 것은 연료 제어블럭의 비례 이득값이 크게 설정되었다는 뜻이다. 이러한 경우 $SSTE_{oil}$ 의 값을 '0'으로 하기 위해 Ki_{oil} 의 값을 증가시켜야 하며, $SSTE_{Msig}$ 의 값을 '0'으로 하기 위해 Ki_{oil} 의 값을 감소시켜야 한다. 그런데 제어기 기능상 $SSTE_{Msig}$ 가 '0'이 되도록 하는 것이 더 중요하므로 식 (5)의 결론부에서는 연료 제어 블럭의 적분값을 조금 감소시켜야 한다고 하였다. 그리고, 연료 제어블럭의 적분이득 조정을 위한 전체 동조 규칙은 표 2.2에 나타내었다.

또한 공기 제어블럭의 적분이득 조정을 위한 규칙을 보자.

$$\begin{aligned} \text{IF } SSTE_{Msig} = NE \text{ AND } SSTE_{oil} = NE \text{ AND } \\ SSTE_{air} = PO, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{THEN } \delta Ki_{air} = NL.$$

식 (6)이 나타내고 있는 의미는 다음과 같다. 마스터 신호의 정상상태 과도오차가 음이고, 연료량의 정상상태 과도오차가 양일때, 연료 제어블럭의 적분 이득 동조 규칙에 의해 연료 제어블럭의 적분 이득값이 감소하게 됨으로써 마스터 신호의 기울기가 증가하고 이에 따라 공기의 기울기가 전체적으로 증가하게 되는데, 동조전 공기의 정상상태 과도오차가 양이므로 공기 제어블럭의 적분값을 많이 감소시킨다. 이렇게 함으로써 연료 제어블럭의 적분이득 조정에 의한 효과를 줄일 수 있다. 그리고 공기 제어블럭의 적분이득 조정을 위한 전체 동조 규칙을 표 2.3에 나타내었다.

3. 실험결과 및 검토

본절에서는 제안한 알고리즘의 효용성을 보이기 위한 실험 및 그 결과를 제시한다. 제안한 퍼지 자동 동조기의 전체적 흐름도(flow chart)는 그림 3.1과 같다. 그림 3.1을 보듯이 앞장에서 살펴본 동조절차를 포함하여 자동 동조가 시작되면 동특성 시험을 위한 전체 계획을 입력하는 블럭을 첨가했으며, 새로운 이득값을 정하기 전에 과거의 동특성 시험에 의해 정해진 이득값의 성능 평가를 하는 블럭이 있다. 이때 주증기 압력의 변화폭이 $1Kg/cm^2$ 이하가 되면 만족할 만한 결과를 얻은 것이므로 더 이상 동조를 수행하지 않는다. 이것은 운전자의 판단과 동일하다. 동특성 시험을 수행한 후의 제어 결과는 표 3.1에 나타내었다. 동조 결과표에서 $R_{oil/Msig}$ 와 $R_{air/Msig}$ 은 마스터 신호의 변화폭에 대한 연료량과 공기량의 변화폭의 비를 표현한 것으로 이들 값이 '1'에 가까운 값을 가지면 설정된 비례 이득값은 적절히 동조되었다고 볼 수 있다. 그리고 $SSTE_{oil}$, $SSTE_{Msig}$, $SSTE_{air}$ 는 정상 상태값에 대한 %값으로 표현한 것이다. 이들 값이 '0'에 가까우면 좋은 제어 결과를 얻은 것이다. 시뮬레이션 결과를 볼 때 위와 같은 내용으로 관찰하면 동조 성능 평가를 적절히 파악할 수 있다.

3.1. 시험 I

그림 3.2은 현장에서 사용되고 있는 하나의 제어 이득값에 의해서 동특성 시험을 수행한 결과를 보여주고 있으며, 이에 대해 구현된 자동 동조 알고리즘을 적용하여 한 후 그림 3.3에서와 같이 주증기 압력이 $1Kg/cm^2$ 이하가 되는것을 보여주고 있다.

3.2. 시험 II

그림 3.4은 현장에서 사용되는 하나의 이득값으로 부하증가를 3%/min으로 동특성 시험을 하였을 때의 결과를 보여준다. 이때 주증기 압력의 변화폭이 2%/min일 때 보다 크음을 알 수 있다. 이것은 적절한 제어가 이루어지지 못하고 있음을 알 수 있다. 그림 3.4의 좋지 않은 동조 결과에 대해 여러 번의 동조를 수행한 후의 결과를 그림 3.5에 나타냈는데 시간축에서 보듯이 많은 시간을 소요하며 여러 번의 동조를 수행하였으나 주증기 압력의 변화폭이 $1Kg/cm^2$ 이하가 되지 못함을 알 수 있다. 퍼지 자동 동조기의 결함이 아니고 현재의 플랜트에 대한 제어기 구조의 한계라고 생각할 수 있다. 운전자가 동조해도 요구 부하 변동율이 3%/min으로 운전될 때에는 $1Kg/cm^2$ 이하를 얻지 못하는 경우가 있다. 주증기 압력 변화폭이 $1Kg/cm^2$ 이하의 결과를 얻지는 못했지만 그림 3.5에서 동조 알고리즘 수행에 따라 점차 개선되는 결과를 볼 수 있다.

3.3. 시험 III

플랜트의 특성 변경에도 불구하고 좋은 성능을 얻을 수 있는 새로운 이득값을 구하는 시험 결과를 살펴보자. 플랜트의 특성을 변경시켰을 때 구현한 퍼지 자동 동조기가 동작하여 새로운 이득값을 어떻게 구하는지는 그림 3.6,7,8,9를 통해서 살펴보자.

그림 3.6는 시험 I에 의해 구해진 이득값을 이용한 첫번째의 동특성 결과를 보여주고 있으며 동조 결과가 좋음을 알 수 있다. 플랜트의 장시간 운전에 의해 같은 부하량을 만족하기 위해 보다 많은 연료와 공기가 소모되는 특성으로 변경되었다고 하고 모델 중 관련된 블록의 적분 이득값을 변경하였다.

그림 3.7은 시험 I에 의해서 구해진 이득값으로 플랜트의 특성이 변하지 않을 때의 신호 경향을 나타내고 있으며, 그림 3.8는 같은 이득값을 이용했을 경우, 플랜트의 특성이 변경된 상황에서 동특성 시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 같은 형식의 요구 부하가 가해졌을 경우 그림 3.8의 동조 결과표에 나타나 있는 연료의 변화량이나 공기 변화량이 그림 3.7의 동조 결과표에 나온 값들 보다 크게 나오고 있다. 동특성 시험 결과를 개선하기 위해 퍼지 자동 동조기를 이용했을 경우, 그림 3.9에서 주증기 압력의 변화폭이 $1Kg/cm^2$ 이하가 되도록하는 새로운 이득값을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 플랜트의 특성 변경이 발생했을 경우에도 퍼지 자동 동조기는 원하는 제어기의 이득값을 구하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론 및 추후과제

본 논문을 통하여 발전소 보일러와 같이 복잡하고 상호연결성(interconnection)이 심하며, 비선형적인 요소들 많이 포함하는 플랜트에 대해 기존에 제시된 동조 알고리즘으로 불가능한 자동 동조기를 운전자의 경험과 지식을 이용하여 퍼지 자동 동조기로 구현하고 발전소에 직접 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

논문에서 제시한 퍼지 자동 동조기는 다음과 같은 장점이 있다. 운전자에게 주어지는 부담을 줄일 수 있으며,

범용성이 있다. 또한 드럼형 보일러의 일반적인 제어 구조에 대하여 연구를 수행하였으므로 제시된 방법은 드럼형 보일러에 의해 운전되는 발전소에 대해서 공통적으로 적용할 수 있다.

앞으로 더 연구되어야 할 과제로는 첫째, 규칙으로 구현되지 못한 상황이 발생했을 경우를 대비하여 전문가가 직접 자동동조 과정을 관찰하며 전체 동조작업을 수행하는 알고리즘의 연구가 요구된다. 둘째, 적분이득 동조 구현 알고리즘 구현시 신호의 기울기를 파악하는 방법으로 직관적으로 과도오차를 이용하였는데, 보다 보완된 규칙으로 구현하기 위해서는 시간적인 항이 고려되어 비례 이득값에 대한 진동의 영향을 포함시켜야 할 것으로 생각된다. 마지막으로 잡음(noise)을 고려하지 않았는데 이 경우 특성값 추출에 대한 방법이 더 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimum Setting for Automatic Controller," *Trans. ASME*, vol.65, pp.433-444, 1943.
- [2] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators for Phase and Amplitude Margin Specification," *IFAC Workshop*, 1983.
- [3] G.H. Cohen and G.A. Coon, "Theoretical Investigation of Retard Control," *Trans. ASME*, vol.75, pp.827, 1953.
- [4] 김 재선, "신호 흐름도 모델을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구," 한국 과학 기술원, 전기 및 전자공학과, 석사 학위 논문, 1989.
- [5] Yashikazu Nishikawa, Nobuo Sannomiya, Tokuji Ohta, and Haruki Tanaka, "A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters," *Automatica*, vol.20, no.3, pp.321-332, 1984.
- [6] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers," *Instrument Society of America*, 1988.
- [7] 권 만준, "전문가 지식을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 PI제어기의 자동 동조에 관한 연구," 한국 과학 기술원, 전기 및 전자공학과, 석사학위논문, 1991.

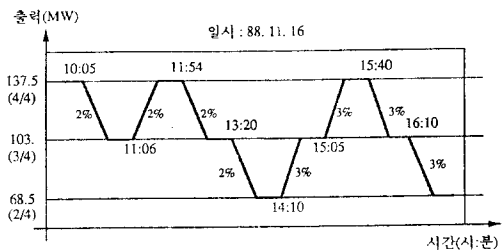


그림 1.1. 동특성 시험 계획

Fig. 1.1. Test Schedule for Dynamic Characteristics

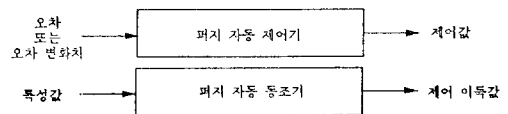


그림 2.5. 퍼지 자동 제어기와 퍼지 자동 동조기의 입출력 구조

Fig. 2.5. Input/Output Structure of Fuzzy Automatic Controller and Fuzzy Automatic Tuner

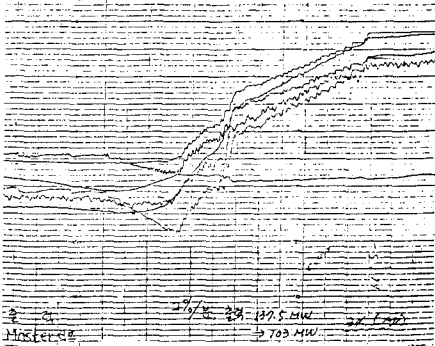


그림 1.2. 현장에서 기록된 데이터
Fig. 1.2. Recorded Real Data

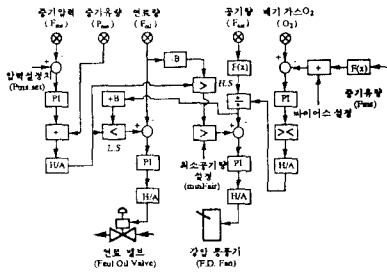


그림 2.1. 연소 제어기
Fig. 2.1. Combustion Controller

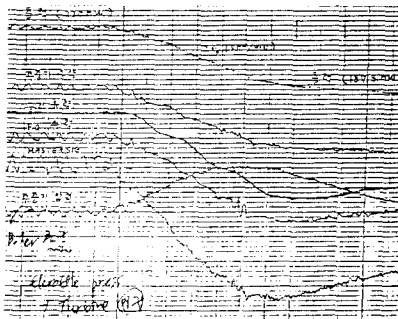


그림 2.2. 동조 전후의 신호경향
Fig. 2.2. Signal Trends at before/after Tuning

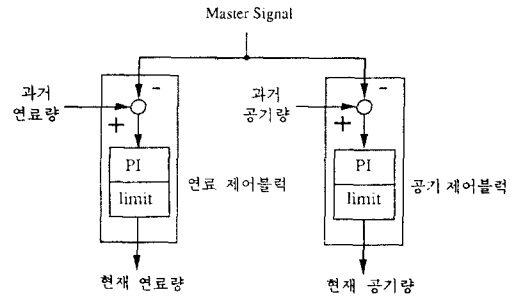
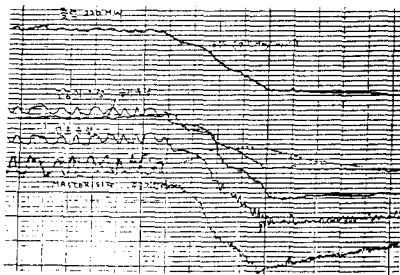


그림 2.3. 비례이득 조정을 위한 간략화된 블럭선도
Fig. 2.3. Simplified Block Diagram for Proportional Gain Tuning

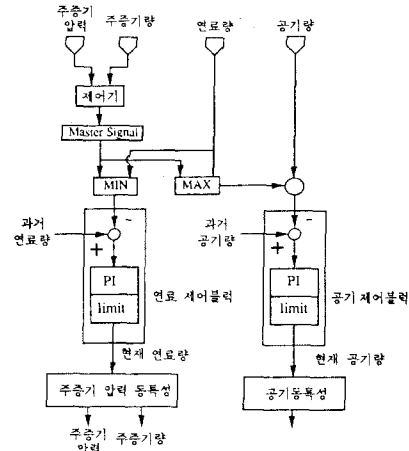


그림 2.4. 적분이득 조정을 위한 간략화된 블럭선도
Fig. 2.4. Simplified Block Diagram for Integral Gain Tuning

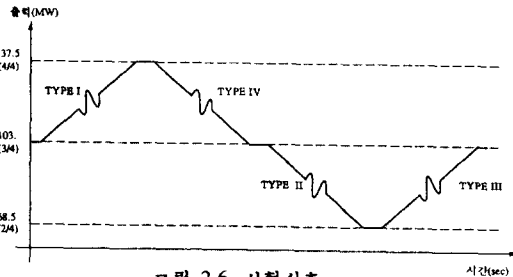


그림 2.6. 시험신호
Fig. 2.6. Test Signals

구분	입력		출력	
	$R_{oil/Msig}$	$R_{air/Msig}$	MF_{oil}	MF_{air}
1	less $(\frac{3}{2})^{-2}$		more $(\frac{3}{2})^2$	
2	about $(\frac{3}{2})^{-1}$		about $(\frac{3}{2})^1$	
3	about $(\frac{3}{2})^0$		about $(\frac{3}{2})^0$	
4	about $(\frac{3}{2})^1$		about $(\frac{3}{2})^{-1}$	
5	more $(\frac{3}{2})^2$		less $(\frac{3}{2})^{-2}$	

표 2.1. 비례이득 동조 규칙
Table 2.1. Tuning Rule Table for Proportional Gain

구분	입력		출력
	$SSTE_{Msig}$	$SSTE_{oil}$	δKi_{oil}
1	NE	ZE	NM
2	NE	PO	NL
3	PO	NE	PL
4	PO	ZE	PM
5	NE	NE	PM
6	PO	PO	NM
7	ZE	ZE	ZO

Input Linguistic Variable

PO : Positive
NE : NEgative
ZE : ZEro

Output Linguistic Variable

PL : Positive Large
PM : Positive Medium
ZO : ZerO
NM : Negative Medium
NL : Negative Large

표 2.2. 연료 제어블럭의 적분이득 동조 규칙

Table 2.2. Tuning Rule Table for Integral Gain of fuel Control Block

구분	입력			출력
	$SSTE_{Msig}$	$SSTE_{oil}$	$SSTE_{air}$	δKi_{air}
1	NE	ZE	NE	ZO
2	NE	ZE	ZE	PM
3	NE	ZE	PO	NM
4	NE	PO	NE	ZO
5	NE	PO	ZE	PL
6	NE	PO	PO	NL
7	PO	NE	NE	PL
8	PO	NE	ZE	PM
9	PO	NE	PO	ZO
10	PO	ZE	NE	PL
11	PO	ZE	ZE	PM
12	PO	ZE	PO	ZO
13	ZE	ZE	NE	PM
14	ZE	ZE	PO	NM

Input Linguistic Variable

PO : Positive
NE : NEgative
ZE : ZEro

Output Linguistic Variable

PL : Positive Large
PM : Positive Medium
ZO : ZerO
NM : Negative Medium
NL : Negative Large

표 2.3. 공기 제어블럭의 적분이득 조정 규칙

Table 2.3. Tuning Rule Table for Integral Gain of Air Control Block

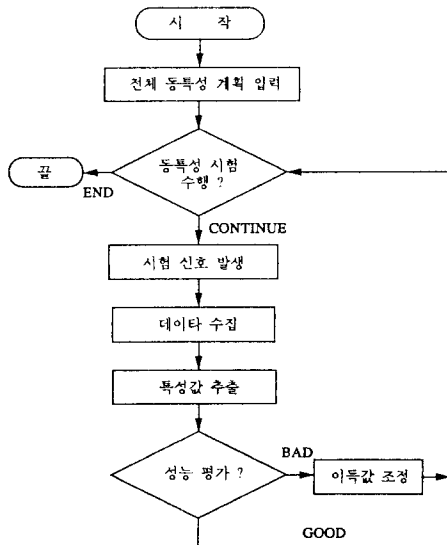


그림 3.1. 실험 알고리즘

Fig. 3.1. Test Algorithm

RESULT	delta	Ratio	SSTE
Foil	δF_{oil}	$R_{oil/Msig}$	$SSTE_{oil}$
Msig	$\delta Msig$	*	$SSTE_{air}$
Foil	δF_{air}	$R_{air/Msig}$	$SSTE_{Msig}$
DIFF	*****	δF_{ms}	*****

표 3.1. 동조 결과

Table 3.1. Result of Tuning

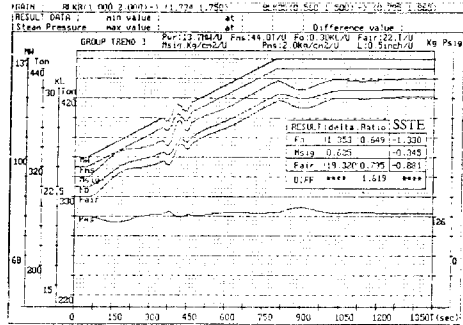


그림 3.2. 시험 I의 동조건 신호경향

Fig. 3.2. Signal Trends before Tuning of TEST I

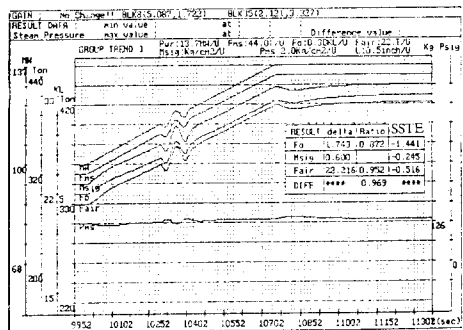


그림 3.3. 시험 I의 동조후 신호경향

Fig. 3.3. Signal Trends after Tuning of TEST I

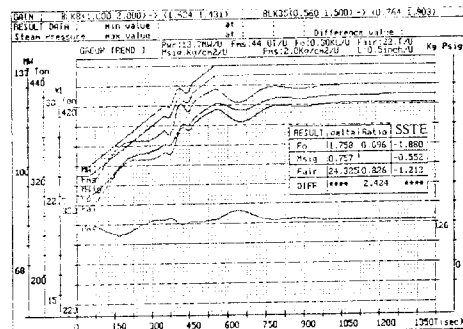


그림 3.4. 시험 II의 동조건 신호경향

Fig. 3.4. Signal Trends before Tuning of TEST II

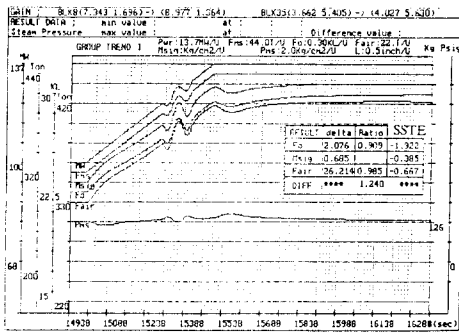


그림 3.5. 시험 II의 동조후 신호경향
Fig. 3.5. Signal Trends after Tuning of TEST II

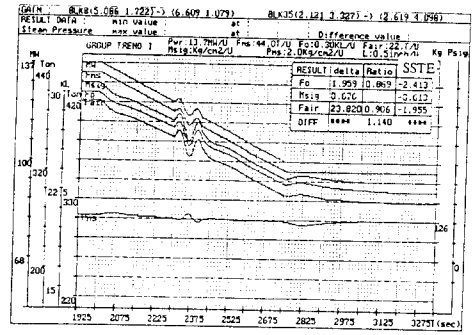


그림 3.8. 시험 III-3
Fig. 3.8. TEST III-3

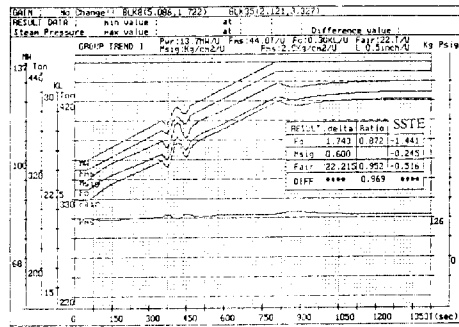


그림 3.6. 시험 III-1
Fig. 3.6. TEST III-1

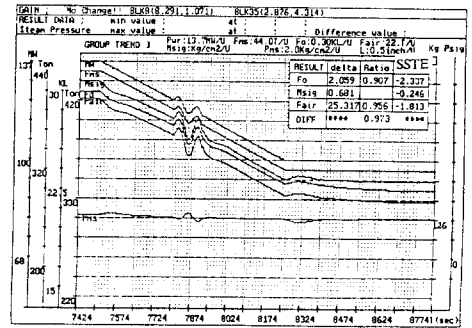


그림 3.9. 시험 III-4
Fig. 3.9. TEST III-4

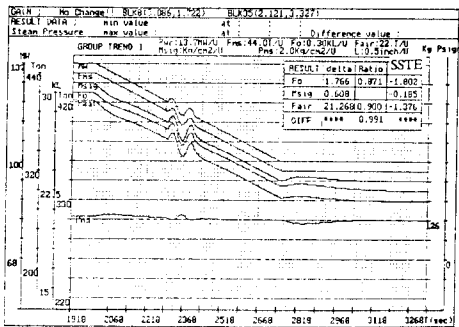


그림 3.7. 시험 III-2
Fig. 3.7. TEST III-2