

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

(Expert Knowledge-Based Fuzzy Auto-Tuning of PI Controllers
for a Drum-Type Boiler of Fossil Power Plant)

權 萬 俊*, 李 在 赫**, 黃 東 煥**, 卞 增 男**

(Mann Jun Kwon, Jae Hyeok Lee, Dong Hwan Hwang, and Zeungnam Bien)

要 約

발전소 플랜트는 장기간의 운전에 의해 또는 동작점을 달리함에 따라 특성이 변경될 수 있다. 따라서 운전자는 성능개선을 위해 제어기의 이득을 재조정해야 하며 현장의 숙련된 운전자는 동특성 시험이라는 운전을 통해서 얻은 데이터들을 이용하여 이득조정을 하고 있다. 그러나 동특성 시험은 많은 시간을 요구하므로 운전자에게 많은 부담을 주게된다.

본 논문에서는 전문가 지식을 이용하여 화력발전소 드럼형 보일러에 대해서 퍼지논리를 도입한 자동 동조기(auto-tuner)를 설계하였다. 설계된 자동 동조기의 성능은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 보였으며, 설계된 자동 동조기가 요구되는 성능을 만족시키는 결과를 보여주고 있다.

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.

I. 서 론

발전의 여러형태 중에서 수요 변동에 대한 변동부

하를 추종하도록 운전되고 있는 화력 발전에서 제어는 중요성이 최근에 들어 높게 인식되고 있다. 오래전부터 경제적, 기술적, 안정적 그리고 적용요구에 따라 가장 중요한 제어 대상인 보일러 제어기 구조는 다양하게 변화되어 왔으며,^[1] 동작조건에 따라또는 성능개선의 목적을 위하여 제어기 이득값의 적절한 설정이 요구되고 있다.

발전소 보일러 플랜트와 같은 산업 공정에서 제어

*正會員, 金星産業株式會社

(GoldStar Industrial System Co., Ltd.)

**正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日字: 1991年 9月 5日

기 설치시 또는 플랜트의 특성변화가 일어났을때, 제어기 기술자 또는 플랜트 운전자는 주어진 플랜트의 동작 조건 그리고 성능지수(performance index)를 만족시키는 제어기의 적절한 이득(gain) 값을 구해야만 한다. 이러한 작업을 일반적으로 동조(tuning)라고 하는데 동조에는 초기동조(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 정밀동조의 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 그림1에서 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 그림2와 같은 모눈종이에 기록된 데이터를 먼저 분석한다.

운전자가 데이터를 잘못 읽어 엉뚱한 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 제어동조를 수행하고자 할 때는 교육이 따로 필요하다.

이와 같이 운전자에게 주어지는 과중한 부담을 줄이고 보다 빨리 동조를 수행하여 휴지기간이 짧은

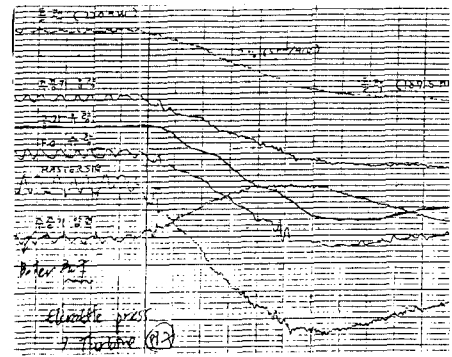


그림 2. 현장에서 기록된 데이터
Fig. 2. Recorded real data.

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 이루어질 수 있게 되었다.

먼저 기존 동조 알고리즘의 적용 가능성을 살펴보면 다음과 같다. Zeigler와 Nichols^[2] 방법과 Astrom과 Hagglund^[3] 방법은 공정의 지속적인 진동을 통해서 주기와 진폭으로부터 이득값을 계산하는 방법인데, 실제 공정에서 지속적인 진동을 일으키게 하는 것은 플랜트가 불안정한 영역에서 동작하여 큰 위험을 초래할 가능성이 있는 단점이 있으며, Cohen과 Coon^[4] 방법은 응답곡선(reaction curve)을 이용하여 지연시간과 최대 기울기를 통하여 이득값을 구하는데, 단순한 플랜트에 대해서는 적용이 용이하나 플랜트가 복잡해지면 1차 더하기 시간 지연요소의 표현만으로는 플랜트의 넓은 동작 범위에서의 특성을 모두 표현할 수가 없을 것이다. 비록 초기 동조에는 가능할 수 있어도 정밀 동조시에는 원하는 성능을 얻을 수 없다. 복잡한 플랜트에 대한 모델을 간단한 표현식을 이용하여 구하는 것이 결코 쉽지않다는 근거로 '부적합성의 논리(principle of incompatibility)'^[5]를 들 수 있는데, 이것에 의하면 시스템이 거대하게 되고 복잡하게 되면, 종래의 수식으로는 시스템의 모델화가 어렵게 된다. 즉, 수식을 이용하면 매개변수의 수가 막대하게 되며, 따라서 매개변수의 계측과 매개 변수의 계수 설정이 어렵게 되어 조작성이 풍부한 모델을 만들 수 없게 된다는 것이다. 적응제어

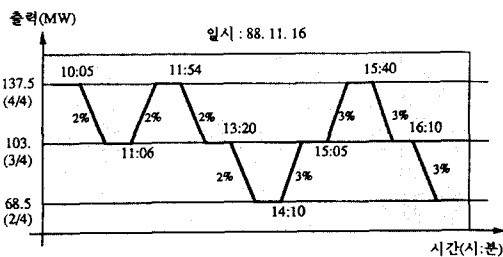


그림 1. 동특성 시험 계획
Fig. 1. Test schedule for dynamic characteristics

개념을 이용한 방법⁶⁾기들의 제어기는 현대 제어 이론을 바탕으로 하여 많은 제어 매개 변수를 포함하고 있어 제어 이론의 개념적 구조, 매개변수 값과 제어 시스템의 동작 특성간의 관계가 매우 복잡하다. 따라서 현장의 기술자들과 플랜트 조작자들에게 쉽게 응용되기가 매우 힘들다.

이와 같이 기존의 동조 알고리즘들이 단순한 플랜트에 대해서는 원하는 결과를 얻을 수 있으나, MIMO (multiinput multioutput) 시스템으로 신호의 상호간섭 (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 MIMO 시스템의 예로써 발전소 보일러 플랜트를 들 수 있는데, 이에 대해 적용할 수 있는 적절한 방법은 많지 않다. 한편 앞서 살펴본 듯이 수동 동조에 어려움은 많지만 숙련된 운전자는 과거의 여러번의 경험과 지식 그리고 매개변수 값이 제어기 동작 특성에 미치는 영향을 잘 이용하여 플랜트의 복잡성이나 비선형에 구애받지 않고 발전소 보일러 제어기의 동조를 수동으로 잘 수행하고 있는 것을 알 수 있다. 한편 퍼지 이론은 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 제어를 대상으로 퍼지 이론을 도입한 전문가의 지식을 근거로 한 자동 동조기 (auto-tuner)를 설계하고자 한다.

앞으로 제2절에서 동조 작업의 이해를 위한 드럼형 보일러와 그에 설치된 제어기를 서술하고, 제3절에서는 전문가의 동조 작업에 대해 살펴본 뒤 퍼지 이론을 이용한 자동 동조기 구현의 방법을 제시한다. 그리고 제4절에서 제시된 알고리즘의 타당성을 보이기 위한 실험 및 결과를 분석 검토하고, 마지막으로 제5절에서는 본 연구의 결론을 맺고 연구의 의의와 더 연구되어야 할 후속 과제를 제시한다.

II. 시스템 개요

발전소 (power plant)의 역할은 자연에서 이용 가

능한 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는데 있다. 이용하는 에너지원 또는 연료에 따라 크게 수력 (hydraulic), 원자력 (nuclear), 화력 (fossil) 발전소로 나누기도 한다. 한편 발전의 중간 매개체로 열 에너지 (thermal energy)를 포함하는 증기를 발생시킴으로써 전기적 에너지를 얻는 발전소를 특별히 증기 발전소 (steam power plant)라고 한다⁸⁾.

화력 발전소는 초기 단계에서 천연 에너지 (raw energy)를 열 에너지로 변경시키는데, 이 과정은 보일러 (boiler) 또는 증기 발생기 (steam generator)라 불리는 곳에서 이루어 진다. 보일러는 그림3과 같은 입출력 관계를 가지는데, 입력으로 연료량, 공기량, 급수 유량등을 가지며, 출력으로는 증기온도, 드럼수위, 주증기 압력등을 가지는데 대표적인 MIMO 시스템의 일종이다.

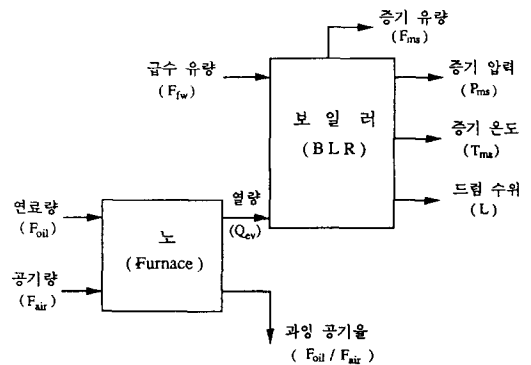


그림 3. 보일러 입출력 선 블록선도

Fig. 3. Input/output block diagram of the boiler.

보일러의 종류는 급수와 증기 흐름의 형태에 따라 크게 드럼 (drum)형 보일러와 관류 (once-through)형 보일러로 나눌 수 있는데, 관류형 보일러는 증기나 물의 흐름이 보일러를 통해서 한 방향성을 가지며, 드럼형 보일러는 이들 흐름이 증발기 (EV, evaporator)에서 순환이 일어난다. 드럼형 보일러는 급수 순환 방식에 따라 다시 자연 순환식과 강제 순환식으로 나눈다.

본 논문에서 구현된 자동 동조기의 성능을 평가할 대상 플랜트는 서울화력 4호기 발전소 보일러인데, 보일러 분류상 드럼형의 자연 순환식에 속한다. 실험에서 사용된 플랜트의 모델은 변수들 사이의 인과 관계를 기본적인 계단 응답의 결합체로 표현하는 신호 흐름도를 이용한 Klefenz의 보일러 모델⁸⁾을 기본으로 현장의 운전자에 의해 수시로 기록된 자료를

통해 각 블럭의 계수를 조정해 얻은 모델¹⁾을 이용하였다. 보일러 모델은 제어기에 맞추어 여러개의 부시스템으로 나누었고, 부 시스템 사이에 큰 영향을 미치지 않는 동특성은 가능한 무시하였다.

드림형 보일러는 큰 열에너지 및 유체량을 갖고 있는 드림이 완충작용을 함으로써 보일러와 터빈의 독립된 제어가 가능하다. 또한 보일러의 제어는 연소제어, 급수제어 및 증기 온도제어의 상호 간섭이 작아서 이러한 부시스템별로 제어계를 분리하여도 성능 관찰에 큰 무리가 없다.

보일러 제어기는 일정한 압력(P, pressure), 온도(T, temperature)의 증기를 공급하도록 하는데 그 목적이 있다. 따라서 제어기는 유출되는 증발량과 같은 급수량(F, flow)을 공급하여 보일러 내에서의 물의 증량의 평형을 가지게 하고, 외부로 유출되는 열량을 가해서 에너지 평형을 유지하게 하여야 한다. 한편, 제어기의 여러가지 기능 중 보일러에서 터빈으로 나가는 주증기 압력을 일정하게 하는것이 가장 중요하므로 이 기능을 담당하는 연소제어 부시스템에 대해서 자세히 살펴보자. 본 논문의 목적인 자동동조기의 구현도 이 부시스템을 대상으로 하였으며, 전문가에 의하면 이 부분의 동조가 이루어진다.

연소 제어(ACC, automatic combustion control)의 주 기능은 노(furnace) 내부에서 연소가 적절히 되도록 연료량과 공기량을 조절함으로써 증기 압력과 과잉 공기율을 제어하는데 있는데, 연소 제어는 세분하여 증기 압력 제어와 공기 과잉율(excess air ratio) 제어로 나눈다.

증기 압력 제어는 마스터(master) 제어라 불리워지기도 하는데 그림4에서 보는 바와 같이 증기 유량 변동을 선행 신호로 받아 연료량을 변화시키고 이에 대해 증기 압력의 변동을 억제하는 제어기로 구성되어 있다.

공기 과잉율 제어의 배기 가스(flow gas)의 열 손실 저하와 보일러 효율을 향상시키는데 있는데, 특히 증유를 사용하는 보일러에는 배기 가스의 O₂를 저하시킴으로써 SO₃의 생성이 감소되며, 보일러 저온부 금속의 부식을 억제하고, 공해 문제에 관한 NO_x 발생을 억제하는 기능이 있다¹⁰⁾ 제어기는 항상 공기량이 부족하지 않도록 저신호 선택기(LS, lower signal selector) 및 고신호 선택기(HS, high signal selector)를 두어, 부하 증가시에는 고신호 선택기에 의해 공기량의 증가를 선행시키고, 부하 감소시에는 저신호 선택기에 의해 역으로 연료량의 감소를 선행시킨 후 공기량을 감소시키는 동작이 이루어진다.

앞서 대상 플랜트와 제어기에 대하여 간단히 살펴

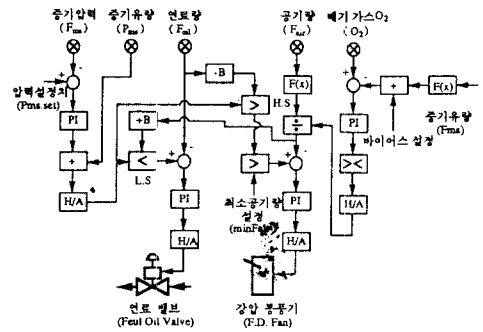


그림 4. 연소 제어기
Fig. 4. Combustion Controller.

보았는데 여러개의 제어 블럭 중 연료량과 공기량을 직접 제어하는 연료 제어블럭(cc8)과 공기 제어블럭(cc35)의 이득값의 자동 조정이 가장 중요한 것을 알 수 있다. 나머지 블럭의 이득도 같은 방법으로 쉽게 구현 가능하므로 여기서는 두가지 블럭의 이득 조정만을 수행하였다. 또한 위 블럭의 동조기 구현시 급수제어블럭의 이득값에 의해 보일러 증기 압력의 동특성이 크게 영향을 받지 않고 드림의 수위는 항상 일정하게 유지된다는 가정하에서 수행하였는데 현장의 전문가도 이와 같은 맥락에서 연료제어블럭과 공기제어블럭의 이득값 조정을 수행한다고 한다.

III. 보일러 제어기의 자동 동조

전 절에서는 플랜트의 특성과 제어기의 기능에 대해 간략히 살펴보았는데, 본 절에서는 운전자의 동조 내용을 살펴 본 뒤 이를 퍼지 논리를 이용하여 구현한 자동 동조 알고리즘을 제시한다.

1. 운전자에 의한 동조(tuning)

보일러가 장기간의 운동을 하는 동안 물속의 유해 물질이나 불완전 연소시의 그을음 등이 보일러 운전의 효율을 저하시키는 원인으로 작용하므로 운전자는 우선 이들 유해요소를 제거한다. 이 작업을 현장에서는 총점검(overhaul)이라고 말한다. 총점검이 끝난 후 운전자는 중앙 급전 사령실의 허락을 얻어 적절한 동특성 시험 계획을 준비한다. 계획된 곡선은 그림1에서 보듯이 보일러 최대출력의 4/4, 3/4, 2/4 부하의 정상상태를 유지하는 부분과 일정 비율을 가지고 증감발하는 부분으로 이루어져 있다. 계획곡선에서 알 수 있듯이 동특성 시험을 시행하기 전에는 항상 보일러의 출력이 편형(equilibrium) 상태에 있음을 보여주고 있다.

그림1에서와 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(Pwr, power), 주증기의 압력(기호 P_{ms} , main steam pressure), 마스터 신호(기호 M_{sig} , master signal) 등을 기록한다. 이들 기록된 신호 분석을 통해서 각 제어블럭의 이득값을 조정하는데 신호 분석과 이득값 조정의 자세한 내용을 살펴 보면 다음과 같다.

그림 5(a), (b)에 보여주는 동조 전후의 신호 경향을 살펴보고 운전자는 시간적으로 짧은 구간에서 소폭의 출력 신호 변화에 대한 같은 패턴의 마스터 신호(M_{sig})나 공기량 신호(F_{air}) 그리고 연료량 신호(F_{oil})를 관찰하였다. 이들의 같은 패턴에 대한 변화치를 보고, 마스터 신호의 변화폭에 대해 공기량의 변화폭이 같도록 공기량을 제어하는 제어블럭의 비례 이득을 구하고, 마찬가지로 마스터 신호에 대해 연료량의 변화폭이 같도록 연료량을 제어하는 제어블럭의 비례 이득값을 결정한다. 그리고 마스터 신호, 연료량 신호, 공기량 신호의 각 신호의 전체적인 기울기를 보고 연료량 제어블럭과 공기량 제어블럭

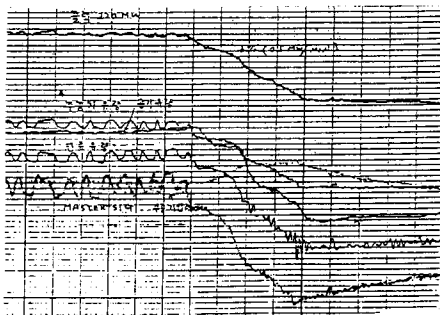
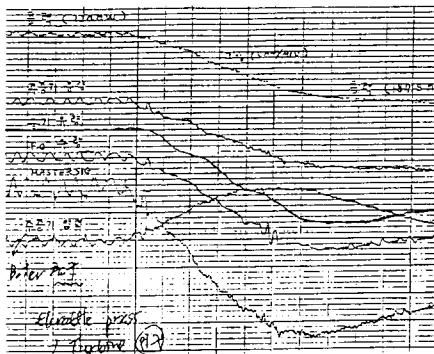


그림 5. 동조 전후의 신호경향
Fig. 5. Signal trends at before/after tuning.

의 적분 이득값을 조정한다. 이런 과정을 통하여 시간적인 소구간에서 변화폭이 같아지고, 전체의 기울기가 같아지며 그 결과 동특성 시험을 수행하는 장시간 동안의 주증기 압력의 변화폭(최대값과 최소값의 차이)이 작아진다. 전체 동조 전후의 특성을 정리하면 그림 5(a)의 동조 전에 기록된 신호들의 기울기가 상대적으로 다름으로 인하여 주증기 압력의 변화치가 큰 것을 알 수 있으며, 그림 5(b)와 같이 기울기가 같아짐으로 인하여 주증기 압력의 변화치가 줄어들게 된다. 이렇게 함으로써 보일러의 운전의 효율성 향상과 안정성 등이 높아지게 된다.

운전자가 어떠한 의미에서 소구간의 변화폭을 보고 각 제어블럭의 비례이득값을 조정하며 전체적인 기울기를 보고 적분 이득값을 조정하는지를 제어기의 구조를 통하여 살펴보자. 비례이득 조정 관점에서 보는 간략화된 블럭선도는 그림6과 같다.

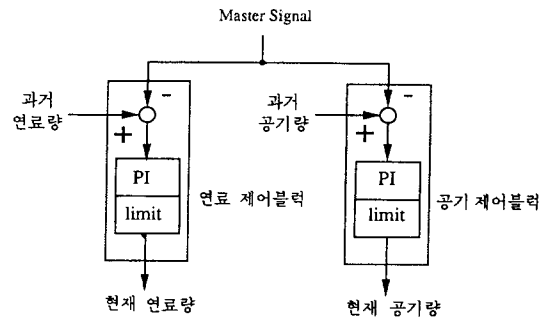


그림 6. 비례이득 조정을 위한 간략화된 블럭선도
Fig. 6. Simplified block diagram for proportional gain tuning.

마스터 신호는 앞장에서 설명한 연소제어기(그림 4)에서 보듯이 순간적인 출력변화에 대해 연료량과 공기량의 요구신호(demand signal)가 된다. 그러므로 마스터 신호가 '1'로 바뀌었다면 공기량과 연료량이 '1'만큼 변화되어 짐으로 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 증가시켜 주어야 한다. 그리고 마스터 신호의 변화치에 대한 공기량의 변화치를 보고 이 값이 클 경우는 비례이득값을 감소시켜야 한다. 연료제어기 블럭에 대해서도 같은 방법으로 비례이득을 조정

할 수 있다. 그런데 공기량과 연료량의 제한에 의해서 마스터 신호의 변화치와 연료량과 공기량의 변화치가 같게 되기는 힘들다. 마스터 신호에 대한 공기량의 변화치의 비와 마스터 신호의 변화치에 대한 연료량의 변화치의 비가 1이 되기를 원하면서 비례 이득값 조정을 하게 된다.

그리고 적분이득 조정 관점에서 본 간략화된 제어기의 블록선도는 그림7과 같다.

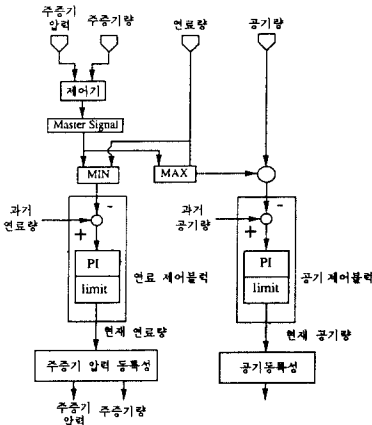


그림 7. 적분이득 조정을 위한 간략화된 블록선도
Fig. 7. Simplified block diagram for integral gain tuning.

적분 이득값에 따라 제어기는 순간적인 오차에 대응하기 보다는 주로 정상상태에서의 오차에 민감하게 반응하도록 작용을 하므로 적분 이득값의 변화는 신호의 전체적인 기울기를 변화시킨다. 제어기 및 플랜트 구조상 연료제어블럭의 적분 이득값이 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, 공기량 등의 기울기가 영향을 받게 된다. 또 공기제어블럭의 적분이득값이 변화하면 공기량의 전체적 기울기가 증가할 것이다. 그런데 구조상 공기량의 기울기 변화는 다른 신호에는 영향을 미치지 않는다. 이와 같이 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 가까워진다.

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

2. 퍼지 자동 동조기

지금까지 운전자가 어떤 관점에서 보일러 제어기의 이득값을 결정했는지에 대해서 살펴보았다. 이를 기본으로 하여 화력 발전소 드럼형 보일러의 퍼지 자동 동조기를 서술한다. 퍼지 자동 동조기의 구조는 그림8에서와 같이 일반적인 퍼지제어기와 유사한 형태이다.

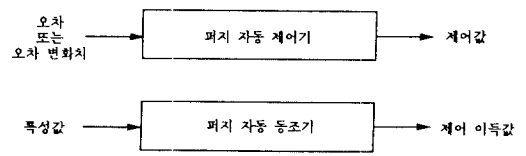


그림 8. 퍼지 자동 제어기와 퍼지 자동 동조기의 입출력 구조

Fig. 8. Input/output structure of fuzzy automatic controller and fuzzy automatic tuner.

그림을 보면 입출력의 물리량이 서로 다를 뿐이며, 입력이 들어가서 출력으로 나올 때까지 수행되는 과정은 똑같다. 따라서 퍼지 제어기의 구현시 이용되고 있는 여러가지 방법을 자동 동조기 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[11]에 따라 자동 동조기를 구현한다. 이처럼 상용화된 자동 동조기[12]에서와 같이 일반화된 자동 동조 절차에 의해 구현하므로 다른 공정 제어의 제어기에서도 동조할때도 이용 가능하다.

일반화된 자동 동조 절차는 다음과 같다.

- (1) 특정 시험 신호(test signal)에 대한 공정 응답 신호를 샘플링한다.
- (2) 공정의 특정값을 찾기위해 샘플링된 데이터를

처리한다.

(3) 제어기의 매개 변수값을 정한다.

그러면 일반화된 자동 동조 절차에 따라 각 단계 별로 퍼지 자동 동조기를 살펴보자.

1) 시험신호

세어기 이득동조를 위해서 보일러 동특성 시험시의 시험신호는 그림9에서와 같은 시험신호를 사용한다. 이 시험신호는 주증기가 터빈으로 나가는 양을 나타낸 것으로 시험 신호의 전체적인 기울기 (최대출력의 2-3%/min)는 자동 운전시에 급전 정지 사령실에 의해 증기 제어 밸브에 가해지는 값과 같다.

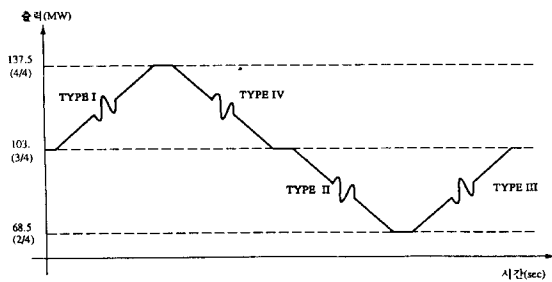


그림 9. 시험신호
Fig. 9. Test signals.

시험 신호의 특징은 부하별(최대 부하의 2/4, 3/4, 4/4 부하)로 운전하면서 긴 시간동안 일정한 비율로 증감을 하면서 순간적으로 요동(perturbation)을 일으키는 부분이 있다는 것이다. 이와같이 시간적 소 구간에서 요동은 운전자가 비례 이득값을 구할 때 부하 요구량의 순간적인 급격한 변화에 대해 마스터(M_{sig})와 연료량(F_{oil})과 공기량(F_{air})의 변화량을 관찰하기 위한 것으로 각 신호의 변화량을 쉽게 추출하기 위해서 삼각 함수 형태의 신호를 이용한다.

TYPE I, TYPE III에서는 역위상 사인함수를 가하고, TYPE II, TYPE IV에서는 정위상 사인함수를 가한다. 부하 요구량이 증가할 때 제어기의 구조상 고신호 선택기(H, S, high signal selector)에 의해 마스터 신호가 공기량을 증가시키는데 각 신호의 변화량을 역위상 사인함수가 감소-증가-감소-증가의 경향으로 변화할 때 첫번째의 증가 구간에서 구한다. 유사하게 부하 요구량이 감소할 때는 제어기 구조상 저신호 선택기(L, S, low signal selector)에 의해 마스터 신호가 연료량을 먼저 감소시키므로 정위상 사인 함수가 증가-감소-증가-감소의 경향으로 변화

할 때 첫번째의 감소 구간에서 구한다. 요동에서 삼각 함수가 3/2주기의 신호를 가한 이유는 요동이 일어나는 시간적인 소구간에서 각 신호의 변화량을 쉽게 추출할 수 있을 뿐만아니라 플랜트가 시간적인 지연 요소를 많이 포함하고 있을 때에도 제어기의 동작이 요동에 대해 충분히 반응할 수 있는 시간적 주기 위함이다.

위에서 설명한 바와 같이 시험 신호는 자동 운전시에 허용하는 비율로 증감하면서 시간적인 소구간에서 요동을 일으키는 특징을 가지고 있다.

2) 특성값 추출

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 정상 상태 과도오차(SSTE_{signal}, Steady-state Transient Error) 값을 구하게 된다.

3) 제어기 이득값 조정 알고리즘

동조기 구현시 가장 중요한 것은 동조 규칙(tuning rule)을 어떻게 알아내는가에 있다. 규칙은 앞서 1) 절에서 설명한 바와 같이 현장의 운전자와의 대화를 통한 언어적이고 정상적인 것을 얻을 수 있으며, 동소수행 보고서 및 운전자의 표현 그리고 시뮬레이션을 통해서 정량적인 수치를 얻을 수 있다.

A. 비례이득 조정

비례 이득값 조정에 필요한 기호들을 정의하기 위해 다음 그림10을 살펴보자.

그림10에서 δM_{sig} , δF_{air} , δF_{oil} 은 보일러가 최대 부하로 운전되고 있을때 각 신호의 정상 상태값에 대한 시간적 소구간에서 신호의 변화폭을 %값으로 나타낸 것이다.

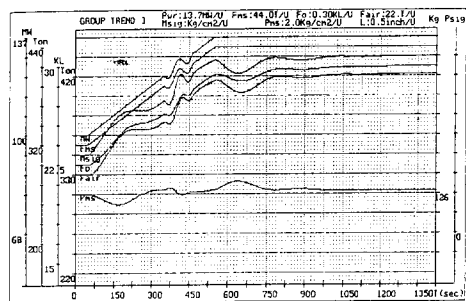


그림 10. 기록된 신호경향
Fig. 10. Recorded signal trends.

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

$$\begin{aligned} R_{air/Msig} &= \delta F_{air} / \delta M_{sig} \\ R_{oil/Msig} &= \delta F_{oil} / \sigma M_{sig} \end{aligned} \quad (1)$$

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

이와 같은 동작을 퍼지 논리를 도입하여 구현하기 위하여, 입력 공간을 그림11과 같이 5개의 소속 함수로 나누며, 출력공간 역시 그림12와 같이 5개의 소속 함수로 나눈다.

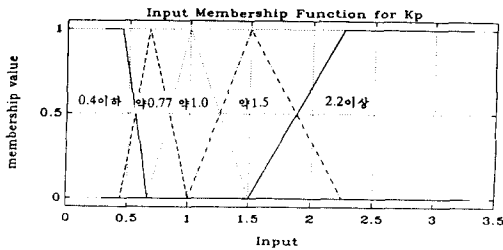


그림11. 비례 이득 조정의 입력공간 퍼지함수
Fig. 11. Input membership function of proportional gain tuning.

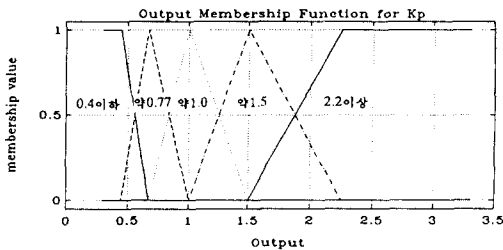
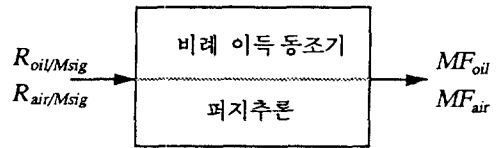


그림12. 비례 이득 조정의 출력공간 퍼지함수
Fig. 12. Output membership function of proportional gain tuning.

이러한 비례이득 조정을 위한 입력과 출력의 관계 다이어그램으로 표현하면 그림13과 같다.

중간 출력으로 나오는 값은 동조전의 비례 이득값과 곱해서 다음의 제어 동작에 영향을 미친다. 이때 곱해지는 값을 MF_{oil} , MF_{air} 라 표현한다. 그리고 입력 공간이나 출력 공간에 대한 비선형 양자화는 $(2/3)^{-3}$ 에서부터 등비로 $(3/2)^{-(QTNUM/3)}$ 의 계수를 가지도록 하였다. 따라서 1이하의 구간에서는 좁은 간격으로, 1이상의 구간에서는 넓은 간격으로 양자화된



$$Kp_{air}(\text{동조후}) = MF_{air} \cdot Kp_{air}(\text{동조전})$$

$$Kp_{oil}(\text{동조후}) = MF_{oil} \cdot Kp_{oil}(\text{동조전})$$

그림13. 비례이득조정 입출력 블록선도
Fig. 13. Input/output block diagram of proportional gain tuning.

다. 여기서 QTNUM은 입출력 전체 공간의 총 양자화 갯수를 나타낸다. 전술한 중 하나의 형식을 보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

IF $R_{air/Msig} = \text{about } 0.66,$

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

$$Ki_{air}(\text{동조후}) = MF_{air} \cdot Ki_{air}(\text{동조전}) \quad (2)$$

식(2)는 요구 신호의 순간적 변화(δM_{sig})에 대한 발생 신호의 변화량(δF_{air})의 비가 약 0.66일 때 공기 제어블럭의 비례 이득값을 이전의 이득값에 대해 약 1.5배의 이득값을 발생 시킨다는 의미이다. 이에 대한 결과로서 같은량의 요구 신호 변경에 대해 발생 신호의 순간적 변화량이 증가하게 되어 $R_{air/Msig}$ 의 값이 '1'에 가까워진다.

비례 이득을 동조 규칙은 표1에 정리하였다.

표 1. 비례이득 동조 규칙
Table 1. Tuning rule table for proportional gain.

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

B. 적분이득 조정

적분 이득 동조는 각 신호의 정상상태 과도오차가 '0'이 되도록 수행한다. $SSTE_{signal\ name}$ 를 정상상태 과도오차(Steady-State Transient Error)로 정의하며, 그림14와 같이 입력공간의 소속 함수는 간단히 3개로 구분한다.

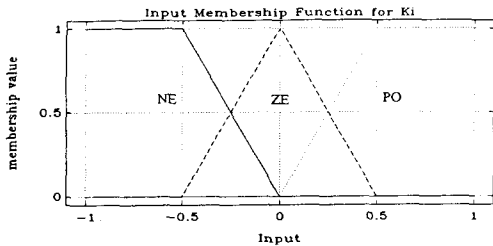


그림 14. 적분이득조정의 입력공간 퍼지함수
Fig. 14. Input membership function of integral gain tuning.

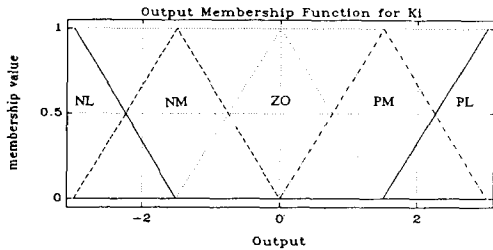


그림 15. 적분이득조정의 출력공간 퍼지함수
Fig. 15. Output membership function of integral gain tuning.

입력공간의 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 그림15와 같이 출력 공간의 소속함수는 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 그림16과 같이 연료 제어기의 적분이득 동조에는 입력으로 $SS-TE_{oil}$, $SSTE_{Msig}$ 를 가지며, 공기 제어기 적분이득 동

조시에는 입력으로 $SSTE_{oil}$, $SSTE_{Msig}$, 그리고 $SS-TE_{air}$ 를 가져야 함을 알 수 있다.

그림16의 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 블록의 비례 이득값이 작게 설정되었다는 뜻이며, 마스터 신호의 정상상태 과도오차가 음이란 것은 연료 제어블럭의 비례 이득값이 크게 설정되었다는 뜻이다. 이러한 경우 $SS-TE_{oil}$ 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 하는것이 더 중요하므로 식(5)의 결론부에서는 연료 제어블럭의 적분값을 조금 감소시켜야 한다고 하였다.

그리고, 연료 제어블럭의 적분이득 조정을 위한 전체 동조 규칙은 표2에 나타내었다.

또한 그림16에서 공기 제어블럭의 적분이득 조정을 위한 규칙을 보자.

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

식(6)이 나타내고 있는 의미는 다음과 같다. 마스터 신호의 정상상태 과도오차가 음이고, 연료량과 정상상태 과도오차가 양일때, 연료 제어블럭의 적분 이득 동조 규칙에 의해 연료 제어블럭의 적분 이득값이 감소하게 됨으로써 마스터 신호의 기울기가 증가

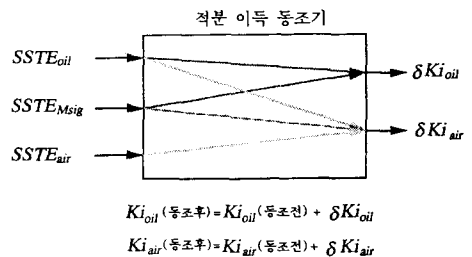


그림 16. 적분이득조정의 입출력 블럭선도
Fig. 16. Input/output block diagram of integral gain tuning.

표 2. 연료 제어블럭의 적분이득 동조 규칙
Table 2. Tuning rule table for integral gain of fuel control block.

구분	입 력		출 력
	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

SSTE_{MSIG} : Steady-State Transient Error of Master Signal
 SSTE_{OIL} : Steady-State Transient Error of Oil Flow
 δKi_{oil} : Increment of Integral Gain of Oil Controller Block

<u>Input Linguistic Variable</u>	<u>Output Linguistic Variable</u>
PO:POSitive	PL:Positive Large
NE:NEGative	PM:Positive Medium
ZE:ZERo	ZO:ZERo
	NM:Negative Medium
	NL:Negative Large

하고 이에 따라 공기의 기온기가 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 표3에 나타내었다.

IV. 실험결과 및 검토

본 절에서는 제안한 알고리즘의 효용성을 보이기 위한 실험 및 그 결과를 제시한다. 제안한 알고리즘의 효용성을 적절히 보이기 위해서는 실제 시스템에 적용을 하여야 하나 발전소 보일러 시스템을 직접 이용하기가 힘들고 위험하기 때문에 실험의 수행에 이용한 플랜트는 2절에서 설명한 서울화력 4호기 보일러 모델¹⁾이며 제안한 퍼지 자동 동조기의 전체적 흐름도(flow chart)는 그림17과 같다.

그림16을 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/cm²' 이하가 되면 만

표 3. 공기 제어블럭의 적분이득 조정 규칙
Fig. 3. Tuning rule table for intergeral gain of air control block.

구분	입 력			출 력
	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	NE	NE	PL
11	PO	NE	ZE	PM
12	PO	NE	PO	ZO
13	ZE	NE	NE	PM
14	ZE	NE	PO	NM

SSTE_{MSIG} : Steady-State Transient Error of Master Signal
 SSTE_{OIL} : Steady-State Transient Error of Oil Flow
 SSTE_{AIR} : Steady-State Transient Error of Air Flow
 δKi_{air} : Increment of Integral Gain of Oil Controller Block

<u>Input Linguistic Variable</u>	<u>Output Linguistic Variable</u>
PO:POSitive	PL:Positive Large
NE:NEGative	PM: Positive Medium
ZE:ZERo	ZO:ZERo
	NM:Negative Medium
	NL:Negative Large

족할 만한 결과를 얻은 것이므로 더 이상 동조를 수행하지 않는다. 이것은 운전자의 판단과 동일하다. 동특성 시험을 수행한 후의 제어 결과는 표4에 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

표 4. 동조 결과
Table 4. Result of tuning.

RESULT	delta	Ratio	SSTE
Foil	δF_{oil}	R _{oil/MSIG}	SSTE _{OIL}
Msig	δM_{sig}	*	SSTE _{AIR}
Foil	δF_{air}	R _{air/MSIG}	SSTE _{MSIG}
DIFF	***** δP_{ms} *****		

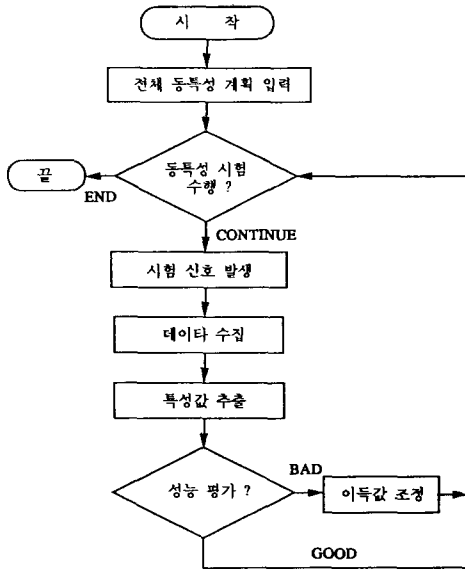


그림17. 실험 알고리즘
Fig. 17. Test algorithm.

수 있다. 그리고 $SSTE_{oil}$, $SSTE_{Msig}$, $SSTE_{air}$ 는 정상상태값에 대한 %값으로 표현한 것이다. 이들 값이 '0'에 가까우면 좋은 제어 결과를 얻은 것이다. 시뮬레이션 결과를 볼때 위와 같은 내용으로 관찰하면 동조 성능 평가를 적절히 파악할 수 있다.

1. 시험 I

그림18은 현장에서 사용되고 있는 하나의 제어 이득값에 의해서 동특성 시험을 수행한 결과를 보여주고 있으며, 이에 대해 구현된 자동 동조 알고리즘을 적용하여한 후 그림19에서와 같이 주증기 압력이 '1 Kg/cm²' 이하가 되는 것을 보여주고 있다.

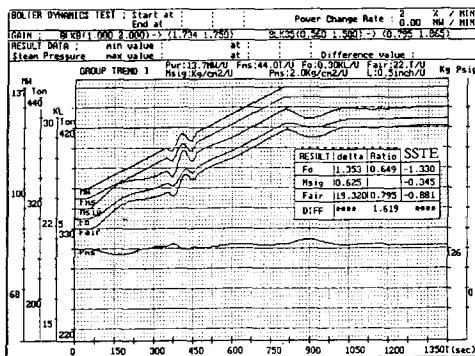


그림18. 시험 I의 동조전 신호경향
Fig. 18. Signal trends before tuning of test I.

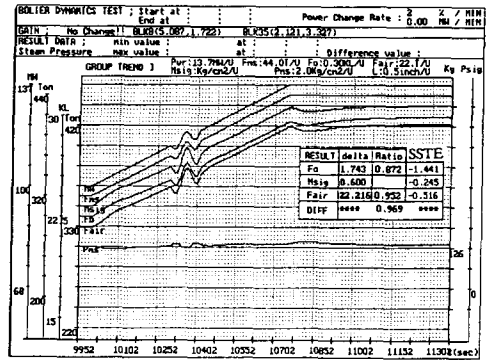


그림19. 시험 I의 동조후 신호경향
Fig. 19. Signal trends after tuning of test I.

2. 시험 II

그림20은 현장에서 사용되는 하나의 이득값으로 부하증가를 3%/min으로 동특성 시험을 하였을 때의 결과를 보여준다.

이때 주증기 압력의 변화폭이 2%/min일 때 보다 큼을 알 수 있다. 이것은 적절한 제어가 이루어지지 못하고 있음을 알 수 있다. 그림20의 좋지 않은 동조 결과에 대해 여러번의 동조를 수행한 후의 결과를 그림21에 나타냈는데 시간축에서 보듯이 많은 시간을 소요하며 여러번의 동조를 수행하였으나 주증기 압력의 변화폭이 '1Kg/cm²' 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/cm²' 이하를 얻지

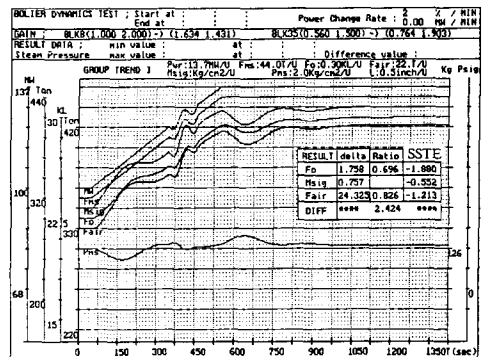


그림20. 시험 II의 동조전 신호경향
Fig. 20. Signal trends before tuning of test II.

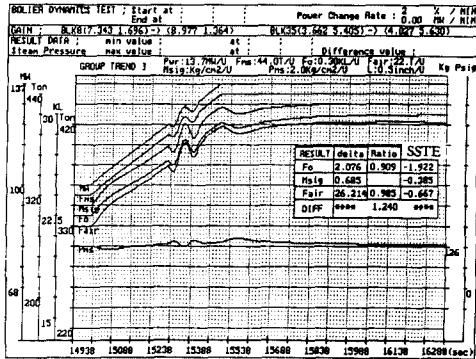


그림21. 시험 II 의 동조후 신호경향
Fig. 21. Signal trends after tuning of test II.

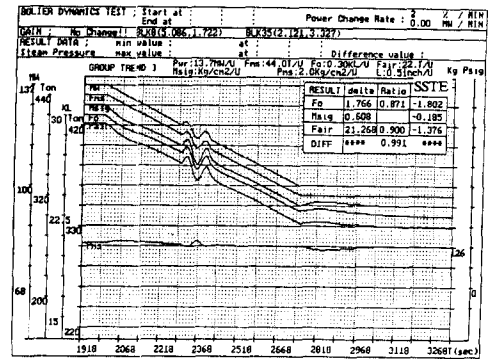


그림23. 시험 III-2
Fig. 23. test III-2.

못하는 경우가 있다. 주증기 압력 변화폭이 '1Kg/cm' 이하의 결과를 얻지는 못했지만 그림21에서 동조 알고리즘 수행에 따라 점차 개선되는 결과를 볼 수 있다.

3. 시험 III

플랜트의 특성 변경에도 불구하고 좋은 성능을 얻을 수 있는 새로운 이득값을 구하는 실험 결과를 살펴보자. 플랜트의 특성을 변경시켰을 때 구현한 퍼지 자동 동조기가 동작하여 새로운 이득값을 어떻게 구하는지 그림22, 23, 24, 25을 통해서 살펴보자.

그림22는 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 블럭의 적

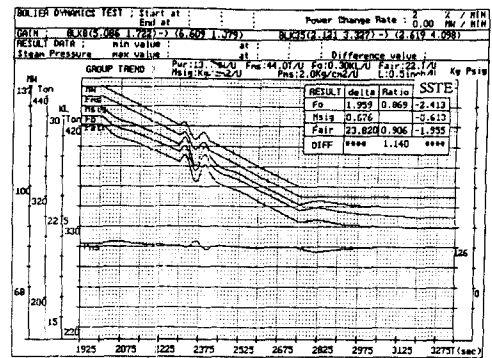


그림24. 시험 III-3
Fig. 24. test III-3.

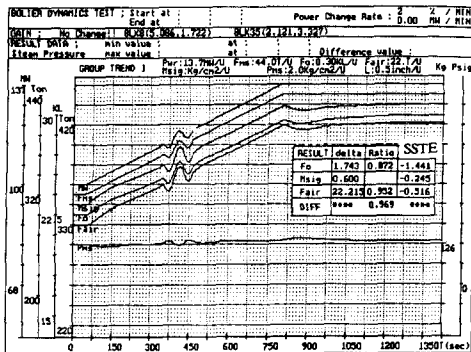


그림22. 시험 III-1
Fig. 22. test III-1.

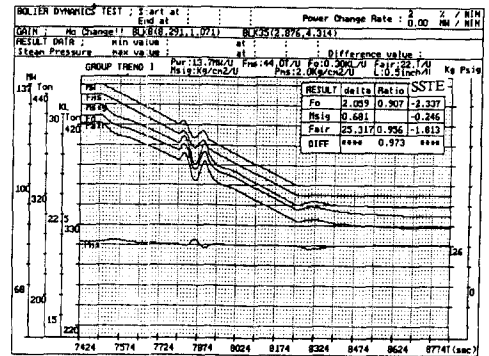


그림25. 시험 III-4.
Fig. 25. test III-4.

본 이득값을 변경하였다.

그림23은 시험 I 에 의해서 구해진 이득값으로 플랜트의 특성이 변하지 않을 때의 신호 경향을 나타내고 있으며, 그림24는 같은 이득값을 이용했을 경우, 플랜트의 특성이 변경된 상황하에서 동특성 시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 같은 형식의 요구 부하가 가해졌을 경우 그림24의 동조 결과표에 나타나 있는 연료의 변화량이나 공기 변화량이 그림23의 동조 결과표에 나온 값들보다 크게 나오고 있다. 동특성 시험결과를 개선하기 위해 퍼지 자동 동조기를 이용했을 경우, 그림25에서 주증기 압력의 변화폭이 '1Kg/cm²' 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.

V. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 운전자의 경험과 지식을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 PI 제어기에 대한 퍼지 자동 동조 알고리즘을 제안하였고, 시뮬레이터를 통해서 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 결과로 플랜트의 특성이 변경되어도 성능을 개선하는 새로운 이득값을 구하는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문을 통하여 발전소 보일러와 같이 복잡하고 상호 연결성(interconnection)이 심하며, 비선형적인 요소를 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 수행 하였으므로 제시된 방법은 드럼형 보일러에 의해 운전되는 발전소에 대해서 공통적으로 적용할 수 있다.

앞으로는 더 연구되어야 할 과제로는 첫째, 규칙으로 구현되지 못한 상황이 발생했을 경우를 대비하여 전문가가 직접 자동동조 과정을 관찰하며 전체 동조 작업을 수행하는 알고리즘의 연구가 요구된다. 둘째, 적분이득 동조 구현 알고리즘 구현시 신호의 기울기를 파악하는 방법으로 직관적으로 과도오차를 이행하였는데, 보다 보완된 규칙으로 구현하기 위해서는 시간적인 향이 고려되어 비례 이득값에 대한 진동의 영향을 포함시켜야 할 것으로 생각된다. 마지막으로

잡음(noise)을 고려하지 않았는데 이 경우 특성값 추출에 대한 방법이 더 연구 되어져야 할 것이다.

參 考 文 獻

- [1] "발전소 제어용 디지털 계장 제어 시스템 개발(최종 보고서)," 한국 과학기술원, Aug., 1991.
- [2] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimum Setting for Automatic Controller," *Trans. ASME*, vol. 65, pp. 433-444, 1943.
- [3] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators for Phase and Amplitude Margin Specification," *IFAC Workshop*, 1983.
- [4] G.H. Cohen and G.A. Coon, "Theoretical Investigation of Retard Control," *Trans. ASME*, vol. 75, pp. 827-1953.
- [5] 박민용, 최항식 역, "퍼지 시스템의 응용 입문," 대영사, 1990.
- [6] K.J. Astrom and B. Wittenmark, "On Self-tuning Regulators," *Automatica*, 1973.
- [7] R. Isermann, "On Advanced Method of Process Computer Control for Industrial Process," *Proc. IFAC Congress*, pp. 411-421, 1978.
- [8] Gunter Klefenz, *Automatic Control of Steam Power Plants*, Hartmann & Braun AG., Minden, Bibliographisches Institute, Zurich, 1986.
- [9] 김재선, "신호 흐름도 모델을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구," 한국과학기술원, 전기 및 전자공학과, 석사학위 논문, 1989.
- [10] "발전 제어 계통 정/동특성 및 GOV. FREE 운전 시험" 서울 화력 발전소, 한국전력공사, Nov., 1988.
- [11] 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.
- [12] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers," *Instrument Society of America*, 1988.
- [13] 권만준, "전문가 지식을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 PI제어기의 자동 동조에 관한 연구," 한국과학기술원, 전기 및 전자공학과, 석사학위논문, 1991.

著 者 紹 介

權 萬 俊 (正會員)

1965年 12月 7日生. 1989年 2月 부산대학교 전자공학과 졸업. 1991年 8月 한국과학기술원 전자공학과 석사학위 취득. 1991年 9月 금성산전 연구소 재직중. 주관심분야는 관리자어, 공정제어, 퍼지제어 등임.



李 在 赫 (正會員)

1963年 2月 12日生. 1986年 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1988年 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 고장진단 및 내고장제어, 공장 자동화, 지능제어 등임.

黃 東 煥 (正會員) 第28卷 B編 第3號 參照

현재 한국과학기술원 전기및 전자공학과 근무

卞 增 男 (正會員) 第28卷 B編 第6號 參照

현재 한국과학기술원 전기및 전자공학과 교수