

자연 순환식보일러의 퍼지제어 모사기 개발에 관한 연구

김 광 선* · 김 삼 운**
(1999년 8월 31일 접수)

A Study on Fuzzy Control Simulator of Naturally Circulated Boiler

Kwang-sun Kim and Sam-Un Kim

Key Words: Naturally Circulated Boiler(자연순환식보일러), Simulator(모사기), Fuzzy Control(퍼지 제어), Heat Analysis(열해석), PID Control(PID제어), Control Performance(제어성능)

Abstract

The engineering equations, which have been used in many engineering companies, were employed for the dynamic modelling part in order to develop the naturally circulated boiler simulator. The fuzzy algorithm, which is similar to the algorithm of making decision by the human being, was developed for the boiler simulator controller and its simulated variables were compared with those of classical PID simulations to verify the stability and the effectiveness of fuzzy controller. The simulator is for the naturally circulated boiler and the main components are the furnace, the drum, the super heater, and the economizer. The combustion and thermal radiation dominant equations were used within the furnace and the mass conservation and the energy rate balance equations were employed for the drum part. The heat transfer rates were calculated using the logarithmic mean temperature differences both for the super heater and for the economizer. The simulations are very useful to understand the boiler operations and the engineering design of the main components. The main program was developed under the PC window condition by linking the fuzzy controller to the main boiler program using the Visual C++ language. The various operational conditions such as the abrupt changes of load, the changes of water supply pipes and the diameter of drum were simulated.

기호설명

A : 노내 전열면적, m^2

a : 원통드럼 반지름, m

F_b : 증기 발생량, kg/hr

F_d : 증기량 설정값, kg/hr

F_s : 드럼내 증발량, kg/hr

F_w : 급수량, kg/hr

h : 수위, m

h_b : 증기 엔탈피, J/kg

h_d : 수위 설정값, m

h_L : 드럼내 액체 엔탈피, J/kg

h_w : 급수 엔탈피, J/kg

m_L : 드럼내 액체질량, kg

m_v : 드럼내 증기질량, kg

Q_b : 증기발생 에너지, W

Q_d : 드럼으로의 열전달량, W

Q_{Fuel} : 연료에너지, W

Q_{in} : 노내연소에 의한 수관벽으로의 열전달량, W

* 회원, 한국기술교육대학교 기계공학과

E-mail : kskim@kut.ac.kr

TEL : (0417)560-1232 FAX : (0417)560-1369

** 대한상공회의소 인천직업훈련원

- Q_{Lat} : 잠열에너지, W
 Q_{out} : 노내배기가스에 의한 열손실량, W
 Q_{Sens} : 현열 에너지, W
 Q_{sh} : 과열기에로의 열전달량, W
 Q_t : 절탄기에로의 열전달량, W
 Q_w : 수관벽으로의 열전달량, W
 T_{af} : 단열화염 온도, K
 T_g : 노내가스 온도, K
 T_{go} : 배기가스 온도, K
 T_s : 수관벽 온도, K
 V_h : 드럼내 액체부피, m^3
 a_g : 가스 흡수계수
 σ : 스테판볼츠만상수,
 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
 ϵ_g : 가스방사계수
 ϵ_w : 수관벽 방사계수
 ρ : 드럼내 액체밀도, kg/m^3
 μ : 멤버쉽합수

1. 연구의 배경 및 필요성

여화력발전소용 보일러는 전력수요의 고정적 부분을 담당하고 있는 원자력 발전과 함께 전력의 수요변화에 의한 변동부하를 담당하는 역할이 증대되고 있다. 따라서 화력발전용 보일러는 특히 부하변동에 기민하게 대응하여야 하고 발전소 운전상태의 잦은 변화에 따른 효율감소를 극복하여야 한다. 따라서 직접보일러를 가동하기 이전에 시스템을 모사할수 있는 컴퓨터이용 모사기를 이용하면 운용능력 향상, 제어시스템 효율화, 에너지 효율증대가 가능하다.

그동안 발전소용 보일러의 동적모사를 하기 위하여 다양한 모델링 방법이 제시되어왔다. 그 중에서도 대표적인 것은 열역학식을 이용한 공학적 모델링 방법과 계수 추정모델링방법 그리고 실험식 모델링방법 등이 있다.

공학적 모델링은 보일러의 각 부위에 대한 열

역학법칙과 열전달식을 이용하고 이로부터 유도된 미분 방정식 및 대수 방정식을 동시에 풀어나가는 방법이다.

계수 추정 모델링방법은 보일러 모델을 집중시스템으로 가정하고 입출력 변수를 정하여 시스템 특성을 정하고 추정 알고리즘으로 매개 변수를 구하는 방법이다.

실험식 모델링방법은 입력변수와 공정변수의 관계를 실험을 통해 데이터를 얻고 이를 이용하여 실험식을 찾아내는 방법이다.

국내의 경우 김재선⁽¹⁾은 보일러모델을 집중시스템으로 간주하여 입출력 변수를 정의하고, 모델의 구조를 시스템 특성을 고려하여 정한 후 미지의 변수를 입출력 자료로 이용, 개발된 추정 알고리즘을 사용하여 추정해 내는 신호흐름도 방법을 채택하고 있다. 경험과 실험데이터 활용의 중간 방법이라 할 수 있다. 이기백⁽²⁾의 연구에서는 대상을 대규모 유틸리티에서 사용되는 드럼형 보일러와 고압헤더, 배관으로 구성된 시스템을 택하였으며 보일러는 드럼과 과열기로 구분시켜서 미국의 상용 동적모사기인 SPEED UP⁽³⁾을 사용하여 모사를 진행하였다. 특히 발생된 증기의 엔탈피를 구하기 위하여 근사식을 활용하였으며 근사식이 적용된 압력범위는 $60kg/cm^2$ 에서 $110kg/cm^2$ 의 고압으로 국한하고 있다.

국외의 경우 Fellow⁽⁴⁾가 드럼의 압력특성에 중점을 두어 드럼/과열기/상승관/하강관에 대한 시스템을 구성하여 드럼 출구의 밸브위치가 바뀌었을 때의 드럼 압력의 움직임을 예측한 연구결과를 발표하였다. Alatiqi⁽⁵⁾는 Ramirez⁽⁶⁾의 모델을 수정하여 수위의 역응답을 실제와 일치하게 나타내는 방법을 제시한바 있으나 많은 공정 데이터를 필요로 하는 약점을 안고 있다. 보일러는 고도의 안정성 때문에 제어 및 안정성 평가 등의 실제 실험을 현장에 설치되어 있는 보일러를 이용하여 진행한다는 것은 현실적으로 어렵다. 그래서 실제 보일러와 동가적 역할을 수행할 모사기를 개발하는 것은 중요하다. 그러나 그 동안 진행되어 온 모사기 개발이나 상업용 모사기를 이용한 컴퓨터이용 모사시 현장의 실험데이터를 활용하기 때문에 보일러가 달라질 때마다 동적모델링부분을 다시 구성하는 등 많은 변수를 실험식으로 고려하기가 매우 어렵다. 특히 국내의 경우 대상발전소가 외국의 기술을 바탕으로 건설된 경우가

많아 시공자료, 사용된 재료특성, 시운전 자료 등의 입수가 어려운 상황이다.

2. 목적 및 방법

본 연구에서는 공학적 모델링 방법을 이용함으로써 대상 보일러가 바뀌더라도 모사가 가능토록 하며 GUI(Graphic User Interface)를 포함한 모사기를 자체 개발을 함으로써 외국의 상업용 모사기를 활용했을 경우의 단점인 경직성을 배제하도록 한다. 김삼운⁽⁷⁾ 등이 발표한 자연순환식보일러를 택하며 외관으로서 적용되는 부하, 급수배관 및 드럼 반경의 변화에 따른 모사기의 안정성(드럼 수위, 노내온도)을 실험하고 퍼지제어기의 우수성을 입증하기 위하여 고전적인 PID 제어와 비교토록 한다. 포화증기표를 모사기에 직접 도입함으로써 드럼의 압력범위에 관계없이 엔탈피, 밀도 등의 물성치를 구할 수 있도록 하고 유도된 동적 모델링과 제어를 연계시키면서 모사를 가능케 한다. PC 윈도 환경하에서 급격한 발생증기량 변화에 따른 조작량(연료량, 급수량)과 제어량(드럼 내 수위, 증기발생량) 등의 변화와 더불어 드럼의 크기변경과 급수배관의 직경결정 등을 유도한다.

조현찬, 김광선⁽⁸⁾ 등은 섬유공장에서 사용되고 있는 염색기에 열공학적 동적 방정식을 유도하여 퍼지제어기와 연계시키므로써 DOS 환경에서의 운전 모사기를 개발하였다. 염색기를 현장에서 설치하여 운전해 볼 경우 소요되는 많은 비용과 위험부담을 줄이고 모사기 활용을 통한 제어시스템 효율성분석과 최적화에 활용될 수 있도록 하였다. 따라서 산업용보일러의 경우도 부하의 잦은 변화에 따른 시스템의 효율과 안정성을 확보하기 위하여 보일러의 주요사양을 이용하여 미리 시스템을 모사하여 봄으로써 최적의 시스템 구성에 미치는 인자 및 성능과악이 필요하다.

3. 시스템구성 및 데이터 흐름

보일러로부터 증기 소요량은 일반적으로 시간과 터빈의 부하에 따라서 변하며 요구되는 증기를 발생시키기 위하여 공기, 연료, 급수를 수시로 조절해야 한다. 그리고 보일러드럼내의 포화압력과 포화온도 및 수위는 일정값을 유지하도록 하

며 제어의 대상은 드럼 내 증기의 압력, 온도, 수위와 노내의 압력과 온도, 공기비 등이다. 이들을 제어량(controlled variable)이라 볼 수 있으며 이들을 제어하기 위한 조작량에는 연료량, 공기량, 급수량 등이고 이들에 대한 관계를 알아야 한다.

개발하고자하는 모사기에 적용될 자연순환식 보일러는 Fig. 1 개략도에 나타내고 있으며 실제 모델링부분에서는 터빈부분은 제외되었다.

Fig. 2는 모사기 전체의 수치데이터 흐름도를 나타내고 있으며 보일러 MASTER 부분은 드럼내의 압력을 설정하고 주증기의 압력을 제어한다. 이때 주증기의 압력 설정은 FUEL 부의 연료유량과 관계를 가지고 있으며 FUEL 부분은 연료유량을 설정하고 연료공급유량을 제어한다. 이 연료공급유량은 AIR 부에서 공급된 공기량과 관계하여 연소함으로써 열량을 발생하게 되어 있다.

이는 노내에서 열복사를 통해 발생된 열량이 드럼 및 노내벽을 통하여 공급되어 드럼에서 포화수와 포화 증기를 만들어 내고 포화 증기표를 이용하여 주증기 온도, 주증기 압력, 정격 증발량을 제어하는 과정을 나타내고 있다. AIR 부는 공기량을 설정하고 공급 공기량을 제어한다. 공기량 설정은 가스공급량에 관계되어 있고 공급 공기량은 예열을 통해 연소됨으로써 자연순환되고 있는 물에 필요한 열량을 공급하는 과정을 나타내고 있다. FURNACE 부는 설정된 노내의 압력을 유지하기 위하여 공기량을 조절하고 배기가스를 통해 일부열이 방출된다.

보일러 모사기를 구성하는 시스템을 개발된 컴퓨터 프로그램의 측면에서 보면 Fig. 3에서 보듯이 크게 3부분으로 구성되며 ENGINEERING 부분은 드럼내온도, 압력과 노내의 연소가스압력, 그리고 수증기 증발량등의 계산이 포함되어 있고 CONTROL 부분은 ENGINEERING 계산의 결과를 토대로 제어 형태를 결정하여 PID와 퍼지알고리즘을 이용 선별적으로 제어하도록 구성되어 있다. 따라서 부하의 변동에 따라 밸브의 개폐량, 연료와 공기량의 제어가 가능하도록 되어 있다. LIST 부분은 ENGINEERING과 CONTROL 부분에서 사용되어지는 보일러 크기 등 규격과 포화 수증기표 등 열적 상태량을 포함하고 있으며 윈도 우 환경하에서 모사가 가능하도록 화면구성 등 그래픽처리를 하는 부분이다.

ENGINEERING 부분의 내부 함수는 크게 다시

5가지로 나누어진다. 즉 calc_drum, calc_fuel, calc_air, calc_furnace 그리고 calc_steam의 주요 함수를 가지고 있다. calc_drum은 드럼의 수위를 계산하기 위해 사용되며 calc_fuel은 현재의 드럼 수위와 증기량을 계산하여 공급연료량을 계산하도록 하고 calc_furnace은 노내 가스의 온도 및 배기 가스의 온도를 계산한다. calc_steam은 드럼 내 온도와 노내 온도를 통하여 증기의 발생량을 계산한다.

CONTROL 부분은 PID와 퍼지 제어기로 구분되며 PID는 PID 상수값을 입력받고 오차와 오차의 차 그리고 합 등을 계산한다. 퍼지 제어는 퍼지 룰 베이스 값을 입력하는 filefuzzy.cpp와 멤버십 함수의 정의, 퍼지화 그리고 추론 등을 하는 fuzzy.cpp 로 구성되어 있으며. fuzzy.cpp 파일의

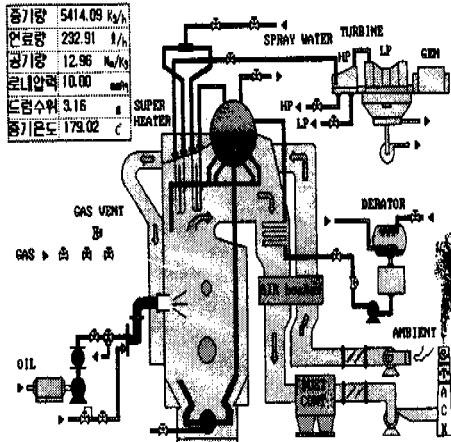


Fig. 1 Schematic diagram of boiler

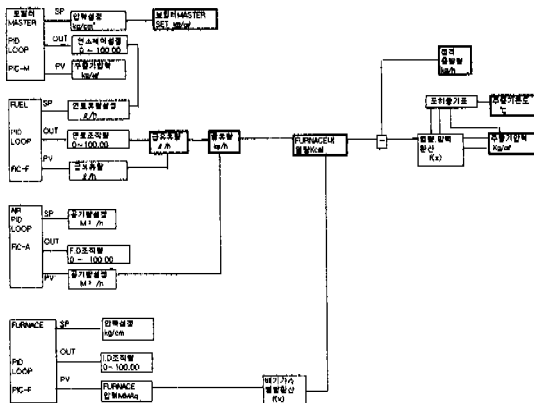


Fig. 2 Numerical data flow of simulator

주요 함수는 Fuzzy::membership(), Fuzzy::fuzzifier() , Fuzzy::inference() 그리고 Fuzzy::controller()로 구성 되어 진다.

LIST 부분은 보일러사양 등에 관련된filespec.cpp와 포화증기표에서 데이터를 가져오는 filesatu.cpp로 그리고 모사결과 제어량과 조작량들을 report.dat로 출력하는 filereport.cpp로 구성된다.

4. 동적 방정식

본 연구에서 채택한 자연순환식보일러는 급수 펌프에 의해 가압된 물이 절탄기에서 일차 가열된 후 드럼으로 들어가서 하강급수관을 통해 증발기에서 물과 증기의 혼합체가 되어 드럼으로 들어가게 되며 수증기는 드럼내부에서 분리되어 제1과열기, 제2과열기를 지나 고압터빈으로 들어간다. 공기는 강압 통풍기에 의해 보일러 노내로 들어가 고온의 연소가스가 되어 보일러를 통과하며 보일러 내벽을 통과하고 있는 물 및 수증기관과 과열기 및 드럼의 일부에 열을 전달한 후 유인통풍기에 의해 밖으로 빠져나온다. Fig.2의 모사시스템의 수치데이터흐름도에서 보듯이 조작량인 연료량, 공기량, 급수량 등을 적절히 조절하여 원하는 증기량과 드럼수위 및 드럼압력을 유지토록 한다. 따라서 본 연구에서 적용한 자연순환식 보일러의 동적 방정식은 다음에 도입되는 질량수지식, 에너지균형식, 연소식을 만족시키면서 제어 변수에 대한 모사가 이루어져야 한다.

드럼부분에서는 액상과 기상의 물질 수지방정식과 에너지 균형방정식을 통하여 발생증기량의 부하 변동에 따른 드럼 수위 및 포화증기온도,

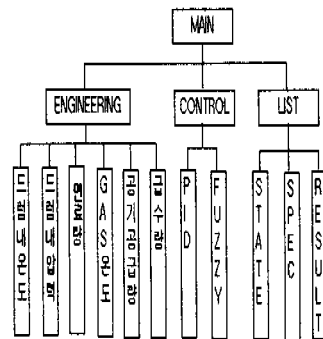


Fig. 3 Program configuration of simulator

압력을 제어하게 된다. 수관이 통과되고 있는 노 부분에서는 부하변동에 따른 조차량(연료량, 급수량, 공기량)의 변화와 함께 노내의 연소방정식과 복사열전달식에 의하여 제어변수(증기온도, 압력, 드럼수위, 연소가스성분, 연소압력)가 결정되면서 자연순환식보일러의 효율적인 제어가 가능토록 모사시스템을 구성한다. 드럼부분의 액상과 기상의 물질수지식은

$$\frac{d m_L}{dt} = F_w - F_b \quad (\text{액상}) \quad (1)$$

$$\frac{d m_V}{dt} = F_b - F_s \quad (\text{기상}) \quad (2)$$

이 되며 드럼의 수위에 영향을 미치는 보일러의 에너지 균형식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d(h_L m_L)}{dt} &= h_L \frac{d m_L}{dt} + m_L \frac{d h_L}{dt} \\ &= Q_d + Q_t + h_w F_w - h_b F_b - Q_{sh} \\ &= Q_d + Q_t + Q_w - Q_b - Q_{sh} \end{aligned} \quad (3)$$

노부분의 에너지 균형식은

$$Q_w = Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

이 되며 Q_{in} 은 노내 연소에 의하여 제공되는 열전달량이며 식은 다음과 같다.

$$Q_{in} = Q_{Sens} + Q_{Fuel} \quad (5)$$

Q_{out} 은 노내 배기가스에 의한 열손실량이며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Q_{out} = Q_{Sens} + Q_{Lat} \quad (6)$$

수관벽으로의 열전달량은 전도와 대류를 무시하고 복사에 의존한다고 가정한다. 따라서 Q_w 는

$$Q_w = \sigma \varepsilon_w A (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4) \quad (7)$$

으로되고 식 (4)를 만족시키는 조건과 단열화염 온도, 가스의 온도 그리고 배기가스의 온도를 연

관시켜 노내가스의 온도를 구할 수 있다.⁹⁾ 즉 노로부터 열전달이 없을 경우의 배기가스온도(단열 화염온도) T_{af} 와 실제배기가스온도 T_{go} 그리고 연소가스온도 T_g 간의 관계식은 다음과 같다.

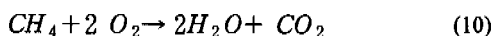
$$\frac{4}{3} (T_{af} - T_g) = T_{af} - T_{go} \quad (8)$$

위 식 (4) 와 (7)은 계산값이 같아야 한다. 따라서 식 (3)부터 식 (8)까지 유도된 식을 동시에 이용하고, 반복계산을 통하여 T_g 을 구하면서 에너지균형식을 만족시킨다.

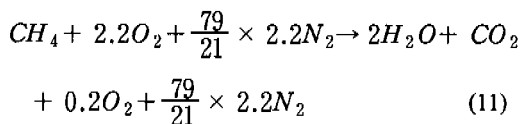
반지름 a 인 원통형드럼내 수위 h 와 액상질량 m_L 과의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_L &= \rho V_h = \pi \rho \int_0^h (2ay - y^2) dy \\ &= \pi \rho \left[ah^2 - \frac{h^3}{3} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

연소되는 연료는 연료발열량을 갖게되며 식 (4)를 충족하는 연료소모량을 구하고 연료로서 메탄을 사용할 경우 이상적으로 연소하기 위하여 다음의 식에 의하여 소요 공기량을 계산하게 된다.



즉 1몰의 연료가 완전연소하기 위하여 10%의 과잉 공기를 필요로 할 경우 다음의 식을 만족하여야하고 연료의 발열량을 같이 도입하면서 연료 연소에 의한 에너지 공급량 Q_{Fuel} 의 계산이 가능하다.



식 (11)에서 얻어진 연료발열량은 노내의 온도를 구하는데 활용되고 기체 상태식을 사용하여 압력과 노내의 온도를 연결하게된다. 질탄기와 과열기에서의 열전달량 Q_b , Q_{sh} 는 식 (12)의 대수 평균온도차 즉 LMTD(Logarithmic Mean Temperature Difference)를 이용하여 구한다.

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (12)$$

드럼내 증기는 포화상태를 가정하여 포화증기표를 데이터베이스화 함으로써 모사할 보일러가 고압 또는 저압의 어느 경우에도 활용이 가능하도록 하였다.

5. 제어기 설계 및 퍼지알고리즘

부하 변동에 따른 자연순환식 보일러의 연료량과 급수량제어는 그 특성이 매우 비선형적이기 때문에 고전적인 PID 제어기법에 의하여는 여러 가지 제한적인 요소가 많다. 특히 제어 환경이 변할 경우에는 PID 이득값을 변경시켜야 함으로 새로운 환경에서의 강건성에 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 퍼지논리와 퍼지추론의 장점을 갖는 퍼지제어를 도입한다. 퍼지제어는 퍼지이론의 응용분야로서 인간의 판단 등, 애매성을 포함한 제어알고리즘을 IF-THEN 형식으로 표현하고, 퍼지추론을 이용하여 제어량을 결정한다. 퍼지제어기는 인간의 사고방식을 바탕으로 하기 때문에 지능형 제어기라 할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 따라서 컴퓨터를 이용한 보일러 모사기개발에 있어서 모사대상인 보일러의 공학적 모델링인 동적방정식을 효율적으로 제어하기 위하여 퍼지알고리즘의 도입이 필요하다.

퍼지 제어기의 도입에 앞서 고전적인 PID제어기와와의 관계를 논의하며 그 구성은 Fig. 4와 같다.

PID 제어기에서 설정값 sp는 증기 발생량과 수위가 된다. 이는 보일러 운전 시작시 설정된다. 그리고 e는 수위의 오차, 증기 발생량의 오차를 의미한다.

여기서 Fig. 4의 제어기는 다입력 다출력 (Multi-Input, Multi-Output) 제어기로 설계되어 PID 제어기의 경우 내부에 PID 상수들이 행렬형태로 구성되어 있다. 따라서 비례, 적분, 미분의 세가지의 행렬이 존재한다. 그리고 각각의 행렬내의 수치는 시행착오에 의해서 조정되게 된다. PID제어기는 설정값 변화에 대한 정상상태오차가 작고 제어파라미터인 k_p 와 k_i 및 k_d 값을 적당히 선정하여 오버슈트와 설정시간 및 상승시간등을 만족

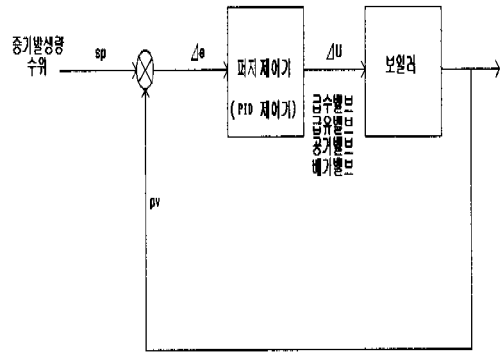


Fig. 4 Fuzzy and PID controller

시킨다.

퍼지 제어기에서는 PID 제어기에서와 같이 수학적 방법으로 설계하는 방식은 아직 설립되어 있지 않고 입출력 변수 제어를 위한 멤버십 함수를 이용한다. 퍼지제어기에서는 PI-형태의 퍼지룰 베이스를 이용한다.

퍼지 제어기 설계 단계는 다음과 같다.

[1단계] 퍼지 제어기 입출력 변수 결정

- 퍼지제어기의 증기량 제어를 위한 입력 변수 (전건부):

$$\text{증기량 오차 : } e_s = F_d - F_b$$

증기량 오차 변화 :

$$de_s = e_s(t+1) - e_s(t)$$

- 퍼지 제어기의 증기량 제어를 위한 출력 변수 (후건부):

$$\text{연료 밸브 조정량 [} \Delta V_f : 0 \sim 1 \text{]}$$

- 퍼지 제어기의 수위 제어를 위한 입력 변수 (전건부):

$$\text{수위 오차 : } e_h = h_d - h$$

수위 오차 변화 :

$$de_h = e_h(t+1) - e_h(t)$$

- 퍼지 제어기의 수위 제어를 위한 출력 변수 (후건부) :

$$\text{급수 밸브 조정량 [} \Delta V_w : 0 \sim 1 \text{]}$$

[2단계] 퍼지 멤버십함수 형태 결정 :

퍼지 규칙에서 전건부와 후건부의 언어적 변수는 퍼지 집합에 대응한다. 이 집합은 각각 전제 집합내에서 정의된 퍼지 집합을 나타낸다. 퍼지집합의 퍼지 변수는 다음과 같은 퍼지 값을 갖는다.

입력	N : Negative	출력	NB : Negative Big
	Z : Zero		NS : Negative Small
	P : Positive		ZO : Zero
			PS : Positive Small
			PB : Positive Big

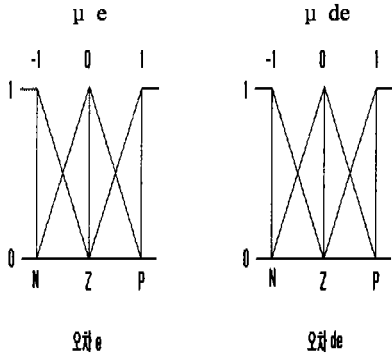


Fig. 5 Membership function of input fuzzy variables

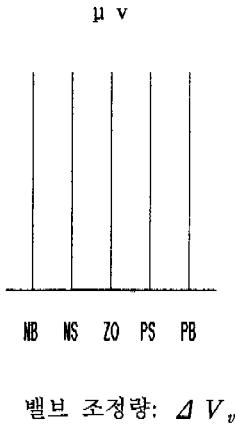


Fig. 6 Membership function of valve control

[3단계] IF~THEN ~에 의한 퍼지 규칙의 구성:

입력 퍼지 변수가 결정되고, 그 변수의 개수가 결정되면 입력 공간이 정의된다. 이 중에서 시스템의 특성을 고려해서 입력변수 영역을 나누어 그에 따라 제어규칙을 결정하게 된다. 일반적으로 퍼지 입출력 공간의 영역 분할을 하는 일정한 규칙이 있는 것은 없으며 최적의 선택규칙도 없다. 다만 시스템의 특성에 대한 지식을 응용하고, 확실적인면에서 가장 좋은 퍼지 영역을 분할하게

된다. 본 연구에서는 속도형 제어 규칙을 설정하였다. 속도형 제어규칙은 적은 제어 규칙으로 제어할 수 있는 장점을 갖는다.

[4단계] 추론 및 비퍼지화에 의한 제어 입력의 결정 :

퍼지제어에서 추론방식은 여러 가지가 있으나 이 연구에서는 단순 추론방식을 사용하였다. 즉, 퍼지집합을 실제 수치로 변환하여 조작량을 결정한다.

비퍼지화는 퍼지량을 보통의 숫자로 변환하는 과정으로 본 연구에서는 무게중심법을 활용하여 출력 u_0 를 다음 식에 의하여 구하였다.

$$u_0 = \frac{\sum \text{멤버쉽함수값} \cdot \text{멤버쉽함수값}}{\sum \text{멤버쉽함수값}} \quad (13)$$

6. 동적모사 및 제어기 평가

Fig. 1에 소개한 자연순환식 보일러를 모사할 대상으로 하였으며 모사기에서는 왼쪽상단부분에 순간 주요 제어량이 표시되도록 하였다. 본 연구에서 적용한 동적모델링은 고압터빈 앞부분까지이며 연료부분은 메탄(CH4)을 택하였고 부하 변동에 따른 증기발생량, 드럼수위, 급유밸브와 급수밸브, 드럼내 온도 및 압력, 그리고 노내 온도 제어 성능을 PC 윈도환경하에서 파악 할 수 있도록 Visual C++언어를 활용하여 GUI를 포함한 기본시스템을 개발하여 모사가 가능하도록 하였다.

본 실험에서는 드럼내의 증기의 물성치를 구하기 위하여 포화증기표를 도입함으로써 다양한 드럼압력범위에서도 모사가 가능토록 하였다.

Fig. 7은 모사기의 실험장면을 보여주고 있다. 제어량 즉 드럼수위와 증기발생량을 직접 관찰할 수 있고 또 온도,압력 그리고 급수량 등의 데이터를 추출하여 관찰할 수 있도록 하였다. 그리고 PID상수 및 퍼지규칙 값을 바꾸어 가며 실험할 수 있도록 구성하였다.

본 실험에서 사용한 보일러의 기본사양과 동작조건은 Table 1과 같다. 그리고 실험을 진행하는데 있어서 영향이 큰 주요 제어량의 PID 상수 값은 Table 2와 같고 퍼지 알고리즘을 이용한 수위제어와 증기발생량 제어의 퍼지규칙은 각각

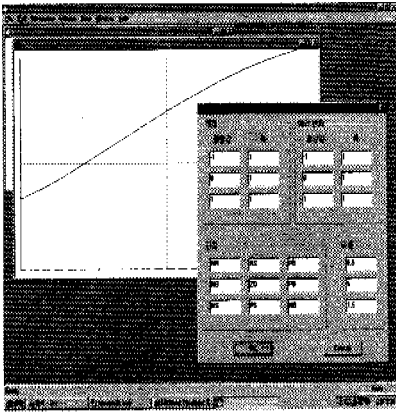


Fig. 7 Graphic user interface of simulator

Table 1 Specification and operational condition

운전조건	모사 보일러	주요사양	모사 보일러
중발량 (kg/hr)	3000~8500	수관반지름 (mm)	53.2
급수온도 (°C)	60	수관열관류율 (kcal/m ² hr°C)	59.4
송풍기입구 공기온도 (°C)	20	드럼 열관류율 (kcal/m ² hr°C)	10.7
최대급유량 (Liter/hr)	1000	드럼 노출율(%)	50
포화증기 건도(%)	95	드럼 반지름(m)	3
압력 (kg/cm ²)	20	노의 크기(m) (가로×세로×높이)	5×5×5
사용연료	메탄 가스	공기 덤퍼크기(m)	1.4

Table 2 P I D constants

제어밸브	PID계인		
	비례 계인	적분 계인	미분 계인
급수밸브	15	150	2
급유밸브	0.004	0.005	0.00002

Table 3 Fuzzy rule of drum water level

e(오차)	de(오차의변화)		
	N	Z	P
N	NB	NS	PB
Z	NB	ZO	PB
P	NS	PS	NB

Table 4 Fuzzy rule of steam generated

e(오차)	de(오차의변화)		
	N	Z	P
N	NB	NS	PB
Z	NB	ZO	PB
P	PS	PB	NB

Table 3과 Table 4에 나와 있다.

6.1 정상적인 상태에서의 운전

Fig. 8에서 Fig. 12까지는 운전도중 급격한 부하 변동이 없는 운전상태에서의 시간과 부하에 따른 제어량과 조작량의 변화를 보여주고 있다. Fig. 8은 드럼 수위의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 드럼 수위의 경우 초기에 불안정함을 보여주고 있으나 이는 초기에 급격한 부하증가(start-up)가 원인이라 할 수 있다. 800초에서 8500kg/hr까지 부하의 선형적 증가에 대해 퍼지의 경우 수위의 변동이 거의 없고 안정적인임을 알 수 있으며 1600초에서 4000kg/hr까지 부하의 감소에서도 퍼지에 의한 수위 변위는 PID제어기보다 더 안정적이고 성능이 좋음을 알 수 있다. Fig. 9의 증기발생량의 경우는 PID와 퍼지제어기가 둘다 비교적 제어가 잘되고 있는 것을 나타내고 있다. Fig. 10은 시간에 따른 현재급수량의 변화를 나타내고 있고 Fig. 11은 부하의 변동에 대한 노내온도의 변화를 나타내고 있다. Fig. 12은 급유 밸브의 시간과 부하의 변동에 따른 변화를 나타내고 있다. Fig. 11과 12의 경우 시스템사양이나 외부환경의 변화가 없을 때에는 퍼지나 PID 양쪽다 비교적 제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

6.2 급격한 부하의 증감이 있는 경우

보일러의 사양과 운전조건은 그대로 유지하고

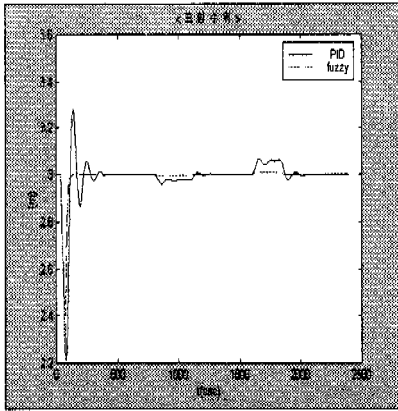


Fig. 8 Drum water level

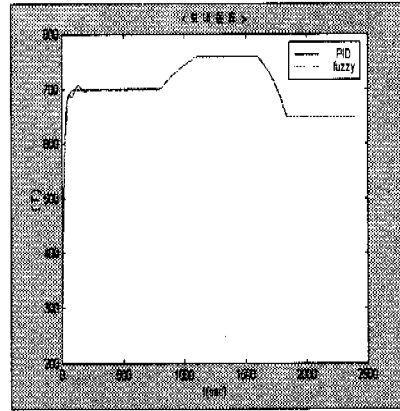


Fig. 11 Temperature of furnace

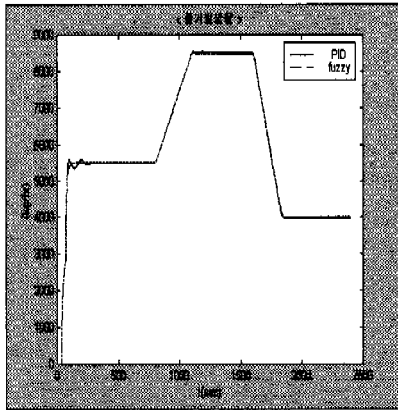


Fig. 9 Present amount of steam generated

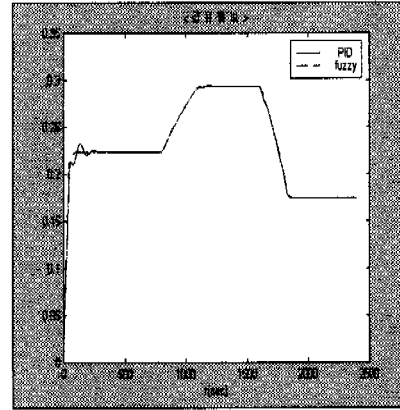


Fig. 12 Valve opening of Fuel

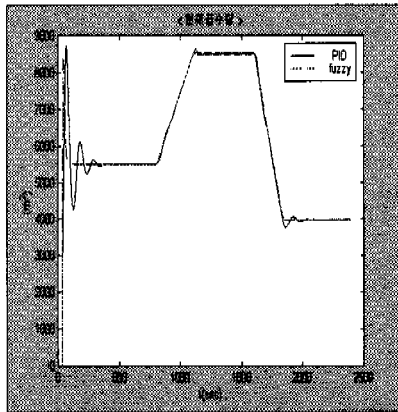


Fig. 10 Present amount of water supplied

PID 상수와 퍼지규칙도 그대로 유지한다.

5500kg/hr에서 운전중 부하를 800초에서 8500kg/hr로 급격하게 증가하게 하고 1600초에서 부하를 급격히 4000kg/hr까지 급격히 감소시키므로써 제어상황 변동에 따른 PID와 퍼지의 제어성능을 실험하였다. Fig. 13에서 Fig. 15까지는 시간에 따른 제어사항을 나타내고 있다. Fig. 13은 드럼수위의 변화를 나타내고 있다. 정상적인 운전상태의 드럼수위 Fig. 8과 비교하여 볼 때 시스템의 제어특성이 상당히 변했음을 알 수 있다. 퍼지제어는 부하의 변동에 크게 영향을 받지 않고 수위 제어가 안정적으로 잘되고 있음을 알 수 있다. 그러나 PID 제어의 경우는 급격한 부하변동에 대해 불안정성이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 14는 증기의 발생량을 나타내고 있다. 증기발생량 역

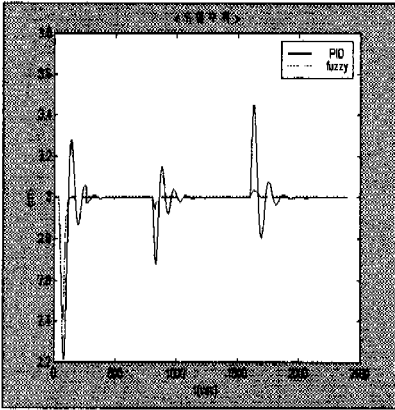


Fig. 13 Drum water level(abrupt change of load)

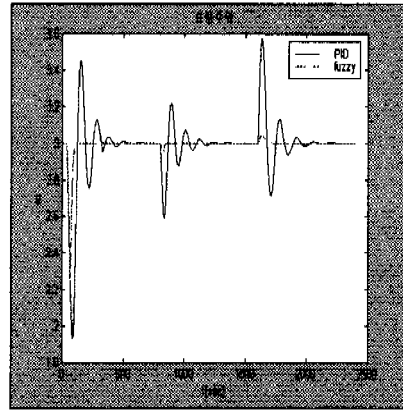


Fig. 16 Drum water level(water pipe radius: 38mm)

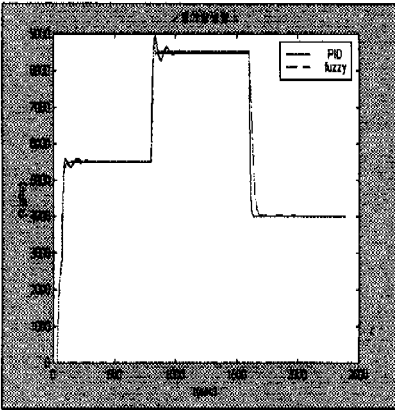


Fig. 14 Steam generated (abrupt change of load)

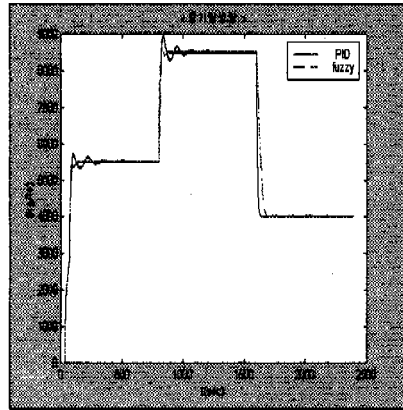


Fig. 17 Steam generated(water pipe radius: 38mm)

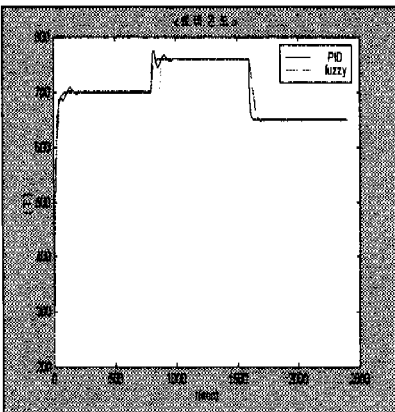


Fig. 15 Temperature of furnace(abrupt change of load)

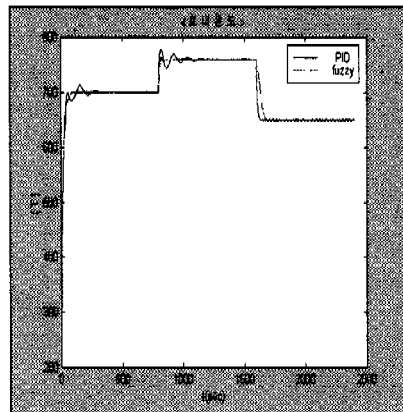


Fig. 18 Temperature of Furnace(Water Pipe Radius: 38mm)

시 PID 제어의 경우보다 퍼지제어기가 보다 빨리 설정치에 도달하고 오버슈트가 없이 안정적임을 볼 수 있다.

로내온도의 경우도 800초에서 부하의 급격한 증가에 대해 PID 제어기가 퍼지 제어기보다 오버슈트가 크고 증기 설정치에 도달하는 시간도 약 300초 정도 오래 걸리는 것을 Fig. 15에서 볼 수 있다.

즉 불안정성을 줄이기 위해 PID 상수값을 바꾸어야 함을 암시하고 있다.

6.3 급수관반경의 변화

본 실험에서는 수관 반경을 38mm와 33mm로 나누어 실험함으로써 제어성능을 평가하여 보았다.

Fig. 16에서 Fig. 18까지는 급수관 반경이 38mm일 때의 상황을 나타내고 있다. Fig. 16은 부하의 변화에 따른 드럼수위의 변화를 나타내고 있다. PID 제어와 퍼지제어를 비교하여 보면 퍼지제어기가 오버슈트도 작고 안정적으로 제어가 되고 있고 설정치에 도달하는 시간도 약 500초 정도 작음을 볼 수 있다. 증기발생량의 부하에 대한 변화는 Fig. 17에 나타나 있다. 부하가 800초에서 8500kg/hr로 급격히 증가할 경우 400초 정도 늦게 설정치에 도달하고 오버슈트가 50%정도 큰 것을 볼 수 가 있다. Fig. 18은 노내온도의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 19은 급수관파이프의 반경이 33mm일 때의 PID와 퍼지제어기의 제어상황을 나타내고 있다. Fig. 19는 드럼 수위의 부하에 대한 변동 상황을 나타내고 있다. PID 제어의 경우 부하의 변화에 대하여 제어가 전혀 이루어지고 있지 못함을 보여주고 있다.

그러나 퍼지제어기의 경우 부하의 변동에 잘 적응하고 있음을 보여 주고 있다.

6.4 드럼반경의 변화

이번 실험에서는 드럼의 반경을 2.4m로 하여 실험하였으며 Fig. 20과 21은 드럼수위와 노내온도 변화를 나타내고 있다.

드럼수위의 설정치는 반경과 같이 2.4m로 하였다. 드럼의 반경이 작아졌으므로 안정되게 제어가 되려면 급수배관직경도 작아져야 한다. 급수 배관을 그대로 두었을 때 PID 제어기의 경우 800초에서 부하의 증가에 대해 그림과 같이 수위가

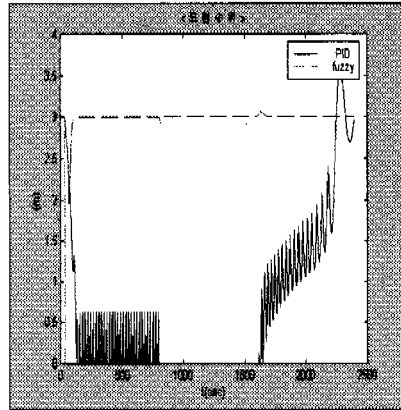


Fig. 19 Drum water level(water pipe radius: 33mm)

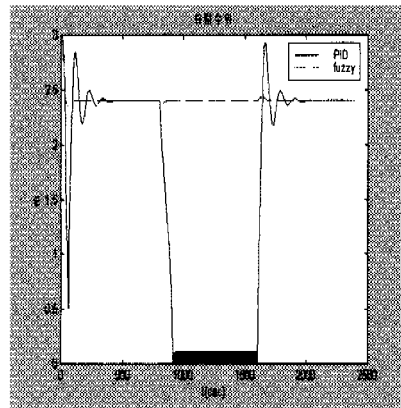


Fig. 20 Drum water level(drum radius: 2.4m)

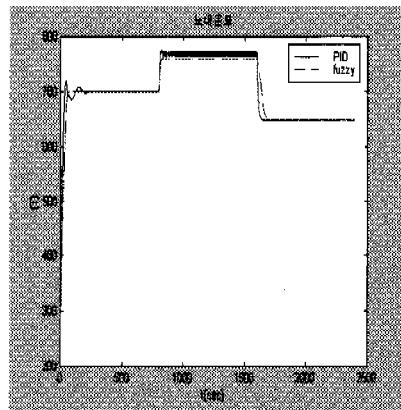


Fig. 21 Temperature of furnace(drum radius : 2.4m)

진동을 하면서 제어를 하지 못하고 있다. 반면 퍼지제어기는 변화가 거의 없이 제어가 잘되고

있는 것을 볼 수 있다. Fig. 21은 노내 온도를 나타내고 있는데 800초에서의 부하 증가에 대해 PID 제어기가 퍼지제어기보다 더 높은 노내 온도를 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 드림의 반경이 줄어 시간 당 증기발생량이 많아졌기 때문에 부하에 반응하기 위해 노의 온도가 높아졌음을 알 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 Visual C++언어를 사용하여 자연순환식 보일러를 효율적으로 설계하고 필요한 주요변수를 파악할 수 있도록 GUI를 포함한 공학적 동적방정식, 그리고 퍼지제어기모듈을 포함한 모사기(컴퓨터이용 모사기)를 개발하였다.

PC에서 모사기의 운영환경은 윈도기준으로 사용자 인터페이스를 쉽게 하였으며 프로그램은 크게 3부분으로 나누어 구성하였다.

ENGINEERING ,CONTROL 그리고 LIST 부분으로 나누어 ENGINEERING 부분은 열공학적 모델링을, CONTROL 부분은 제어기를, 그리고 LIST부분은 결과에 대한 출력, 사양 및 기타 데이터를 다루도록 구성하였다.

노 및 드림부분에서의 에너지균형식을 이용한 동적방정식으로서 엔지니어링 회사에서 보일러 설계를 위하여 사용되고 있는 열전달식과 연소식을 활용하였으며 제어모듈부분에서는 퍼지 알고리즘을 PID 제어 모듈과 같이 도입하였다. 개발된 모사기의 타당성을 검증하기 위하여 실제 산업용보일러와 유사한 사양을 택하여 물리적현상에 부합되는 가를 확인하였다. 부하의 증가 및 감소가 완만한 경우와 급격한 경우를 실험하였고 보일러 사양변경에 따른 모사 가능성을 확인하기

위하여 급수관반경과 드림의 직경에 변화를 주어 PID제어에 대한 퍼지 알고리즘의 강건성과 효율성도 입증하였다.

참 고 문 헌

- (1) 김재선, 1990, "신호흐름선도 모델을 이용한 화력발전소 드림형 보일러 모사기의 개발에 관한연구," 한국과학기술원 석사논문
- (2) 이기백, 1992, "화학공장 스팀보일러 시스템의 동적모델링 및 모사," 서울대학교 대학원 석사논문
- (3) 1991, SPEEDUP User Manual, Prosys Technology,
- (4) Fellow, F.P and DeMello, 1991 "Boiler Models for System Dynamic Performace Studies," *IEEE Transactions on Power Systems*. 6(1), 66
- (5) Alatiqi, I.M. and Meziou, A.M., 1992 "Simulation and Parameter Scheduling Operation of Waste Heat Steam Boiler," *Computers Chemical Engineering*, 16(1), 51.
- (6) Ramirez W.F., 1976, "Process Simulation," Lexington Books,
- (7) 김삼운, 김광선, 1998 "노내의 연소 및 열전달 해석을 이용한 자연순환식보일러의 퍼지제어 시뮬레이터에 관한 연구," 공기조화 냉동공학 학술대회
- (8) 조현찬, 김광선 등, 1993 "퍼지논리 알고리즘을 이용한 염색기 제어 모사기 개발," 한국퍼지시스템학회 논문지, 3(4), 48~69.
- (9) 1986, University of Kansas, ME755 Note Book(Black & Veatch)
- (10) Zadeh L.A., 1988 "Fuzzy Logic," *IEEE Computer Magazine*.