

석탄화력발전소 보일러 연소계통의 모델개발에 관한 연구

(A Study on Model Development of Boiler Combustion System
on Coal Fired Power Plant)

문채주* · 김용구 · 정환주

(Chae-Joo Moon · Yong-Gu Kim · Hwan-Joo Chung)

요 약

석탄화력발전소의 보일러계통은 구성기기 사이에 수많은 상호관계를 갖는 대규모, 비선형 계통이다. 이러한 복잡한 계통의 해석에서 동특성 모의는 대규모 상호관계를 지속적으로 추적하는 강력한 방법으로 인식되고 있다. 보일러계통은 공기/가스 시스템과 물/증기 시스템으로 구성된다. 보일러의 오염물질 배출에 관한 최근 환경규제의 강화와 보일러의 물성치에 대한 설계 검증 요건 때문에 상업용 프로그램이 보일러 계통의 해석에 사용된다. 이 논문에서는 모의 도구로써 EPRI(미국전기연구소)에서 개발한 MMS를 사용하여 모델개발을 논하였다. MMS에서 사용하여 개발된 모델은 한국표준석탄화력발전소의 보일러 연소계통에 대한 설계 및 현장데이터를 시험하였다. 개발된 모델은 정상상태 및 천이상태 조건에서 $\pm 5\%$ 이내로 연소계통이 잘 응답하는 것으로 결과에서 보여준다. 이 논문에서 연소계통의 해석에 대한 개발된 모델은 일반적이고, 어떤 형식의 석탄화력발전소에도 적용이 가능하다.

Abstract

The boiler systems of coal fired power plants are large, non-linear systems with numerous interactions between its component parts. In the analysis of such complex systems, dynamic simulation is recognized as a powerful method of keeping track of the myriad of interactions. The boiler system consists of air/gas system and water/steam system. Due to recent reinforcement of environmental regulation on pollutant discharge and requirements of design validation on properties of boiler, the commercial programs are used for the analysis of boiler system. This paper addressed to the development of model using MMS(Modular Modeling System) developed by EPRI(Electric Power Research Institute) as the simulation tool. The developed model using MMS is tested for the design and local data on boiler combustion system of Korea standard coal fired power plant boiler. The simulation results show that the developed model well reproduces responses of the combustion system with less than $\pm 5\%$ error under steady state and transient state conditions. The developed model for analysis of the combustion system in this paper is general and applicable to any type of coal fired power plant.

Key Words : Boiler Combustion System, Coal Fired Power Plant, Boiler Modeling

* 주저자 : 목포대학교 전기공학과 부교수, 공학박사

Tel : 061-450-2466, Fax : 061-450-6285

E-mail : cimoon@mokpo.ac.kr

접수일자 : 2003년 10월 2일

1차심사 : 2003년 10월 9일

심사완료 : 2003년 11월 12일

1. 서 론

70년대 에너지파동의 경험과 지속되는 석유공급의 불안으로 인하여 발전연료의 다변화가 일어나 석

유전소 발전소의 건설은 중단되고 석탄전소 발전소가 건설되고 있다. 석탄은 석유에 비해 공급국가가 다양하고 매장량도 풍부하며, 비교적 가격이 저렴하여 발전연료로 유용하게 사용되고 있다. 한편, 석탄은 석유보다는 여러 가지 문제점을 안고 있다.

탄종의 선정, 저장과 전처리, 연소기술 및 공해문제가 주요 문제점으로 등장하였다. 최근 들어 기술의 발달로 거의 모든 문제가 해결되고 있으나 공해문제는 연료의 특성 때문에 어려움이 많다. 공해문제는 분진 및 배출가스 처리가 가장 주요 과제로 분진제거는 전기집진기, 배출가스의 황산화물 및 질소산화물 제거는 탈황설비 및 배연탈질설비로 대처하고 있다.

공해문제를 규제하는 우리나라의 대기환경보전법은 환경보전법중의 일부가 분리 제정된 이후 1991년, 1995년 및 1999년에 단계적으로 세부배출 허용기준이 강화되어 석탄화력발전소의 전기집진기 및 탈황설비의 신설 또는 증설이 이루어지고 있다[1]~[4]. 국내에서 건설되는 석탄화력발전소는 용량의 대형화에 따라 설계자료에 대한 검증이 요구되고 있으며, 특히 운전모드를 결정하기 위하여 해석기술이 절실히 요구된다. 또한, 기존 발전소에 새로운 공해방지 설비를 추가하거나 설비변경을 하게 되면 배출가스의 흐름이 장애를 받아 압력손실이 발생하여 송압통풍기의 신설이나 유인통풍기의 용량증설이 요구되며, 보일러 노 압력을 조절하는 제어시스템에 대한 제어요소의 재조정 등 전면적인 재설계가 필요하게 된다.

지금까지 국내의 경우 해석절차가 정립되어 있지 않아 시스템의 동적 특성분석은 어려운 실정이며, 대신 정적인 특성분석에 근거하여 개조하고 있다 [2],[3].

발전소 해석을 위한 상업용 해석프로그램은 각각의 기기를 모듈화하여 모델링하고 발전시스템 특성에 적합하게 각 모듈을 재구성하면 전체 시스템이 구성되고, 여기서 개별적인 시스템에 대한 동적특성요소들을 해석할 수 있다. 미국의 전기연구소는 MMS(modular modeling system)를 개발하여 발전소에 대한 다양한 적용실적을 갖고 있다[5]~[8]. 국내에서도 이 프로그램을 이용하여 중유전소 화력발

전소에 대한 연소계통 해석이 이루어졌으나 석탄전소 화력발전소는 연료에 대한 연소자료의 부족과 계통의 복잡성으로 인하여 연구가 이루어지지 않고 있다[9]~[11].

본 연구에서는 모델개발 기간을 단축하고 신뢰성이 보장되는 MMS를 이용하여 500[MW]급 한국 표준 석탄 화력발전소를 기준으로 연소계통의 개별 구성기기에 대한 모델을 개발한다[12]~[14]. 여기서 사용되는 자료는 향후 개조를 대비하고 실증실험하기 위해 발전소의 실제 BMCR(boiler maximum continuous rating)조건의 설계값을 사용한다. 석탄 화력발전소의 연소계통을 구성하는 공기에열기, 1차 공기 송풍기, 압입 및 유인송풍기, 미분기, 관류형 보일러 등의 단위해석모듈을 설계하여 정특성 및 동특성을 해석한다. 실제 발전소의 설계값과 모의실험 결과 얻어진 측정값과의 오차를 계산하여 개발된 모델의 정확성을 확인하고자 한다.

2. 연소계통의 구성요소

2.1 연소계통의 구성

한국표준 석탄화력발전소 보일러는 공기와 연료를 공급받아 열을 발생시키고 연소가스를 배출시키는 연소계통과 발생한 열을 이용하여 물을 증기로 바꾸는 증기계통으로 이루어진다. 연소계통에서 사용되는 공기는 연료와 혼합되어 연소되는 1차 공기(약 20~30[%])와 보일러 효율을 높이기 위해 완전연소가 얻어지도록 공급되는 2차 공기(약 70~80[%])로 이루어진다.

통풍방식은 압입송풍기와 유인송풍기가 쌍으로 작용하는 평형통풍방식이다. 1차 공기와 2차 공기는 각각 독립으로 작용하며, 연소로에서 각각 분사된다. 압입송풍기는 연소에 필요한 공기의 양을 조절하고 유인송풍기는 연소로 내부의 압력을 부압으로 유지시킨다. 1차 공기는 1차 공기 송풍기의 출구에서 공기에열기를 거치는 고온공기와 석탄저장고에서 미분기까지 석탄을 이송시키는 저온공기로 나뉜다. 이후 1차 공기는 미분기에서 미분탄과 혼합되어 연소로에서 연소된다.

한편 압입송풍기를 통과한 2차 공기는 공기에열

기를 거쳐 보일러 공기함으로 공급된다. 연소 후 연소가스는 연소로 출구에 도달할 때까지 1차적으로 복사에 의해 냉각되고, 2차과열기, 재열기, 1차과열기 및 절탄기를 거쳐 공기에열기로 유입된다. 공기에열기에서 연소가스의 열이 1차공기와 2차공기로 회수되고, 이후 연소가스는 전기집진기를 지나 유인송풍기를 거쳐 대기로 방출된다.

2.2 공기에열기

모델개발은 이상기체방정식, 준평형상태(질량보존), 단열조건(에너지보존) 등을 가정하였으며, 검사체적내 누설방향은 공기와 연소가스의 압력차에 따라 압력이 높은 공기측에서 압력이 낮은 연소가스측이다. 유입된 연소가스에 원판을 회전시킬 때 공급된 전기에너지만큼의 열량이 첨가되고, 공기와 연소가스 각 영역에서의 원판의 온도와 열 전달계수가 주요 매개변수가 된다.

실제 석탄화력발전소의 경우 공기 측이 각각 독립된 1차공기와 2차공기, 그리고 연소가스 등 3영역으로 구성되어 있지만, 모듈이 공기와 연소가스 두 영역으로 구성되어 있으므로 1차공기와 연소가스, 2차공기와 연소가스로 이루어진 두 개의 공기에열기로 분리하여 설계한다. 검사체적은 면적이 아닌 단위시간당의 체적유량의 개념이며, 공기에열기내의 압력은 밀폐영역에서의 돌턴의 분압법칙과는 달리 유입된 공기와 연소가스 압력사이에 위치한다. 공기에열기 모델은 각각 1차공기와 연소가스, 2차공기와 연소가스로 각각 독립된 모델을 사용한다. 이때 두 공기에열기에서의 연소가스의 질량유량을 제외한 나머지 요인들은 일치하며 연소가스의 질량유량은 1차공기와 2차공기의 질량유량에 비율에 의한다. 준평형상태에서 질량보존식은 식(1), 식(2)와 같다.

$$W_{ai} = W_{ae} + \Omega V_i (\bar{\rho}_g - \bar{\rho}_a) - W_{LEAK} \quad (1)$$

$$W_{gi} = W_{ge} + \Omega V_i (\bar{\rho}_a - \bar{\rho}_g) - W_{LEAK} \quad (2)$$

또한, 공기측과 가스측 출구에서 에너지 보존식(엔탈피)은 식(3) 및 (4)으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} & \frac{dh_{ai}}{dt} \\ &= \frac{C_{pa}/C_{vpa}}{\rho V_a} \times [W_{ae} h_{ae} - W_{ae} h_{ai} \\ & - W_{LEAK} \bar{h}_a + q_a + \Omega V_i (\bar{\rho}_g \bar{h}_g - \bar{\rho}_a \bar{h}_a) \\ & - (h_{ai} - P_{ai}/\bar{\rho}_a) \times (W_{ae} - W_{ai} - W_{LEAK} \\ & + \Omega V_i (\bar{\rho}_g - \bar{\rho}_a))] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{dh_{gi}}{dt} \\ &= \frac{C_{pg}/C_{vpg}}{\rho_g V_g} \times [W_{ge} h_{ge} - W_{gi} h_{gi} \\ & + W_{LEAK} \bar{h}_a - q_g + J_{EP} + \Omega V_i (\bar{\rho}_a \bar{h}_a \\ & - \bar{\rho}_g \bar{h}_g) - (h_{gi} - P_{gi}/\bar{\rho}_g) \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 미분기

현장자료에서 보일러 1기당 미분기 5대가 기동중이고, 1대가 예비로 존재한다. 그러나 연소로에서 각 코너마다 탄젠셜버너(3층)를 사용하기 때문에 전체 질량유량을 3등분하여 미분기를 설치해야 하므로 질량유량은 전체 질량유량의 1/3을 설계한다. 엔탈피 미분계수는 압력변화에 비해 너무 작아서 무시하였으며, 입력측의 압력변화는 식(5), 출구측 공기유량은 식(6), 그리고 출구측 공기의 수분함유량은 식(7)로 나타낸다.

$$\frac{dP_{ae}}{dt} = \frac{R(T_{ai} + 273.15)(W_{ae} - W_{ai})}{V} \quad (5)$$

$$W_{ai} = \left[\frac{(P_{ae} - P_{ai}) - K_{P2} \{E\} \cdot \{W_{g2}\}}{(K_{P1}/K_{ae}^2)} \right]^{0.5} \quad (6)$$

∴ { }는 벡터를 의미하며 ·는 벡터곱(vector product)을 나타낸다.

$$F_{ai} = \frac{(W_{ae} F_{ae} + W_{ce} F_{ce} - W_{ci} F_{ci})}{W_{ai}} \quad (7)$$

출구측의 공기온도는 엔탈피와 수분비율로 식(8)과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{ai} = (3.7646 \times 10^{-7} - 1.78713 \times 10^{-7} F_{ai}) h_{ai}^3 \\ \times Q_1 + (-1.0344 \times 10^{-3} + 1.643 \times 10^{-4} F_{ai}) h_{ai}^2 \\ \times Q_2 + (4.16 - 3.0 F_{ai}) h_{ai} \times Q_3 + Q_0 \quad (8)$$

2.4 1차 공기 송풍기

1차 공기의 주된 역할은 연소로까지 미분탄을 알맞은 상태로 송풍하는데 있다. 연소로 내에서 연소에 적합한 공기와 석탄의 비율은 2:1인데 일반적으로 완전연소를 위해 여기에 20%의 과잉공기를 더 제공한다. 연소로 이전까지 공기와 석탄의 비율은 1.5:1이 적정하여 이 값을 사용하였다. 송풍기의 형식은 원심형이며, 송풍방향은 회전중심축에서 날개 끝으로 송풍하고, 송풍기 입구측에서 배인으로 제어하며 고압 저유량의 경우에 주로 사용한다. 송풍기에서 주된 함수는 입구와 출구에서의 질량 및 에너지 보존식으로 식(9), (10)과 같고, 입구압력 미분식은 식(11)과 같이 나타낸다.

$$W_{gl} - W_{ge} + \frac{d}{dt}(\rho V) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dh_{gl}}{dt} = \frac{(C_p/C_v) \times W_{ge} h_{ge} - W_{gl} h_{gl} + A}{(\rho V)} \\ \therefore A = J + (h_{gl} - P/\rho)(W_{gl} - W_{ge}) \quad (10)$$

$$\frac{dP_{ge}}{dt} = \frac{(T + 273.15)(W_{ge} - W_{gl})}{V} \\ + R \left(\frac{\rho}{C_p} \right) \frac{dh_{gl}}{dt} \quad (11)$$

2.5 압입 및 유인송풍기

압입 송풍기와 유인 송풍기는 서로 연동되어 동작하며, 형식은 축류형 송풍기이고 송풍방향은 팬의 축방향과 동일하다.

동익가변형의 날개각을 변화시켜 풍량을 제어하며, 저압 대유량용이다. 압입 송풍기는 연소로에서 완전연소에 필요한 양 만큼의 공기를 공급하고, 유인 송풍기는 보일러내의 압력이 미소한 부압이 유지되도록 압력을 조절하는 평형통풍방식을 사용한다. 축류형 송풍기의 경우 운전부하 15[%]이하에서 스

돌현상이 발생한다. 축류형 송풍기의 관계식은 원심형과 거의 유사하며, 송풍기의 엔탈피 미분식은 식(12), 입구 압력미분식은 식(13)으로 나타낸다.

$$\frac{dh_{gl}}{dt} = \frac{(C_p/C_v)[W_{ge} h_{ge} - W_{gl} h_{gl} + J + A]}{\rho V} \\ \therefore A = (h_{gl} - P_{gl}/\rho)(W_{gl} - W_{ge}) \quad (12)$$

$$\frac{dP_{ge}}{dt} = R \left[A + \frac{(T + 273.15)(W_{ge} - W_{gl})}{V} \right] \\ \therefore A = \left(\frac{\rho}{C_p} \right) \frac{dh_{gl}}{dt} \quad (13)$$

2.6 관류형 보일러

과열기, 재열기, 절탄기를 포함한 영역을 챔버체적으로 하였다. 공기와 연료비율은 1.9:1이며, 연료발열량은 HHV(higher heating value), LHV(lower heating value)를 사용하였다. 연소반응은 완전연소 반응으로 가정하였으며, 단열화염엔탈피는 식(14), 화학반응온도는 식(15) 그리고 탄소 물평형식은 식(16), 수소 물평형식은 식(17), 수분의 물평형식은 식(18)을 사용한다.

$$h_a = \frac{W_{pe} h_{pe} + W_{se} h_{se} + W_{re} h_{re} + (W_{fe} \times A)}{W_{pe} + W_{se} + W_{re} + W_{fe}} \\ \therefore A = C_{p,f}(T_{fe} - 26.7) - F_{k20,fe} h_{fg} + E_T \quad (14)$$

$$T_f = \frac{W_{pe} h_{pe} + W_{se} h_{se} + W_{re} h_{re} + W_{fe} A + K h_{LV}}{C_{p,g}(W_{pe} + W_{se} + W_{re} + W_{fe})} + 330.0 \\ \therefore A = [C_{p,f}(T_{fe} - 26.7) - F_{k20,fe} h_{fg}] \quad (15)$$

여기서, $K = W_{fe}$ if $W_{fe} < W_{O_2}$, $K = W_{O_2}$ if $W_{fe} > W_{O_2}$ 이고, W_{O_2} 는 다음과 같이 주어진다.

$$W_{O_2} = \left[\frac{W_{pe} F_{O_2,se} F_{O_2,se}}{\left(\frac{F_{C,fe}}{M_C} + \frac{F_{H,fe}}{2M_H} + \frac{F_{S,fe}}{M_S} \right) M_{O_2}} \right] \\ V_c \frac{dN_C}{dt} = \frac{[W_{fe} F_{C,fe} - A - R_{CO}] M_C V_c}{M_c} \\ \therefore A = (W_{gl} - W_{re}) F_{C,gl} K_{ff} \quad (16)$$

3. 정상상태 및 천이상태 모의실험

3.1 정상상태

비실시간으로 모의실험을 하였으며, 시간개념으로 이해하기 쉽게 수평축을 시간단위인 [s]를 사용한다. 각각의 모듈별로 BMCR(110[%] normal rating)조건에서의 실제 발전소 현장데이터를 입력하여 4000[s]동안 모의실험 후 각각의 모듈 출구에서의 물성치를 구하여 정상상태 특성을 확인 하였으며, 천이상태에서 정상상태 특성을 확인할 수 있으므로 물성치 특성그래프를 생략하였다.

3.2 천이상태

천이상태는 개발된 모듈의 성능을 검증하고 이상상태가 발생할 경우 이를 보정하기 위해 실시한다. BMCR조건에서 1500[s]후 VWO(valve wide open : 105% normal rating)조건으로 부하를 변동시켜 1500[s]~4000[s]까지 모의실험하였다. 공기에열기와 유인송풍기에서 압력을 제어변수로 처리하였으며, 미분기, 1차공기 송풍기, 압입송풍기, 관류형 보일러에서는 질량유량을 제어변수로 처리하였다. 각각의 물성치는 그래프 앞부분에서 상수값으로 일정하게 나타난 부분이 정상상태이고 천이상태에서 급변하여 다시 안정되는 것을 확인할 수 있다.

3.2.1 공기에열기

공기에열기의 목적은 1, 2차 공기를 예열하여 미분기와 버너로 보내며, 천이상태 모의는 BMCR과 VWO조건인 차이인 5% 부하 변동을 기준으로 실행시켜 1차 공기 및 2차 공기 입출구 압력을 모의실험하였다. 특성은 그림 1과 같이 1차공기 및 2차공기의 입구압력은 압력강하가 일어나며, 1차 공기 및 2차공기의 출구압력은 거의 변화가 일어나지 않았다.

3.2.2 미분기

미분기는 출구 공기유량이 제어되므로 PID 제어를 사용하였으며, 제어기 설정값은 질량유량을 사용하였다. 입구 공기의 질량유량을 BMCR 조건인 33.450[kg/s]에서 VWO 조건인 32.759[kg/s]로 변동시켜 모의실험하였다. 출구공기는 입구공기와 미분

탄이 혼합되어 나타나므로 압력과 유량을 그림 2에 나타냈다.

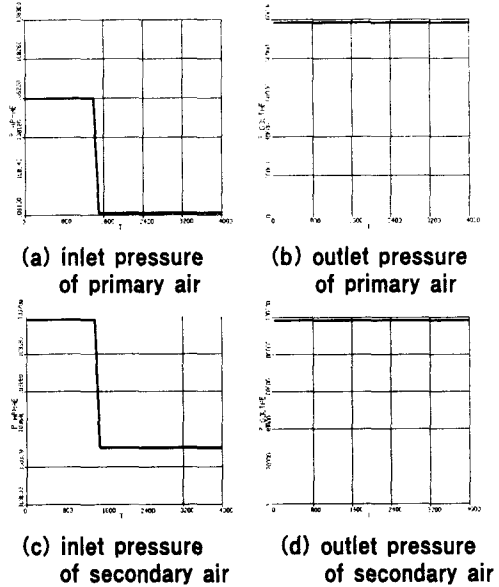


그림 1. 공기에열기의 천이특성
Fig. 1. Transient conditions of Air preheater

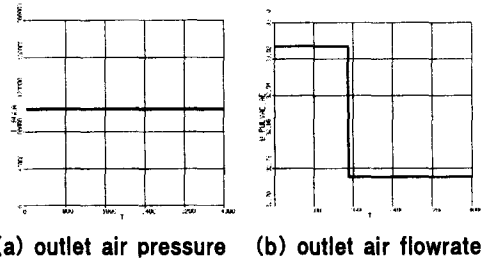


그림 2. 미분기의 천이특성
Fig. 2. Transient conditions of pulverizer

3.2.3 1차공기 송풍기

1차공기 송풍기의 제어설정값은 미분기를 거쳐서 버너로 들어가는 공기유량이 되므로 출구에서의 질량유량을 VWO 조건인 59.805[kg/s]로 변동시켜 모의실험하였다. 송풍기 출구에서 얻어지는 압력과 온도를 그림 3에 나타냈다.

3.2.4 압입 및 유인송풍기

압입송풍기 및 유인송풍기 특성은 유사하므로 압

입송풍기 모의실험 결과만 나타냈다. 압입송풍기의 제어는 입구베인에 의해 제어되므로 설정값은 VWO 조건인 206.486[kg/s]로 입구유량을 천이시켰다. 이 때 얻어지는 송풍기 출구압력과 온도를 그림 4에 나타냈다.

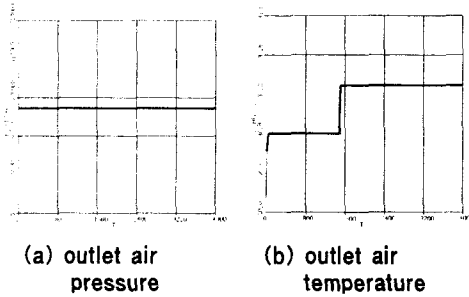


그림 3. 1차공기 송풍기 천이특성
Fig. 3. Transient conditions of primary air fan

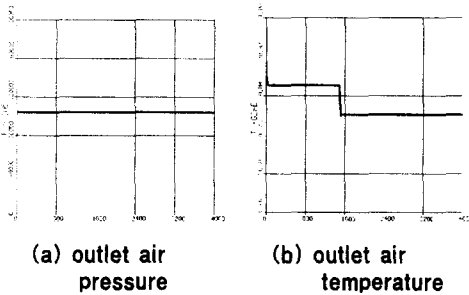


그림 4. 압입송풍기의 천이특성
Fig. 4. Transient conditions of forced draft fan

이 연소에 의해서 얻어지는 출구가스 유량과 온도를 그림 5에 나타냈다.

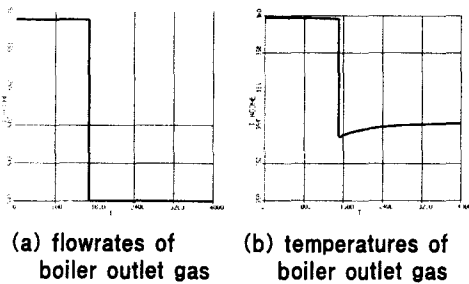


그림 5. 관류형 보일러의 천이특성
Fig. 5. Transient conditions of once-through boiler

4. 모의실험 결과검토

보일러 연소계통의 주요기에 대한 모의실험 결과를 설계값과 비교하였다. 공기에열기는 경계조건을 압력조건으로 하고 입구 및 출구압력을 모의실험한 결과를 표 1에 나타냈다. 여기서 오차는 설계값과 모의실험과의 차이이다.

표 1. 공기에열기의 입구 및 출구 압력
Table 1. Inlet and outlet pressure of air preheater

| 물성치 분류 | | 물성치 | 설계값 | 모의실험값 | 오차 | 오차율 (%) |
|--------|-------------|-----|-----------|-----------|--------|---------|
| 1차 공기 | 입구 공기압력[Pa] | | 107,856.4 | 107,925.1 | 68.7 | 0.06 |
| | 출구 가스압력[Pa] | | 98,530.0 | 98,074.0 | -45.6 | 0.46 |
| 2차 공기 | 입구 공기압력[Pa] | | 103,747.0 | 103,630.6 | -116.4 | 0.11 |
| | 출구 가스압력[Pa] | | 98,530.0 | 98,074.0 | -45.6 | 0.46 |

공기에열기의 공기통로는 독립된 1차공기와 2차공기로 구성되고 가스통로는 단일통로로 3개의 영역으로 구성되어 있지만, 실제 구현하는 모델을 공기와 연소가스 2개의 영역으로 구성하였으므로 1차공기와 연소가스, 2차공기와 연소가스로 이루어진 두개의 공기에열기로 설계되어 있다. 따라서, 2개의 공기에열기 가스통로의 출구압력은 표 1과 같이 동일한 값을 나타낼 것이고, 1차공기는 미분기로 이송되고 2차공기는 보일러로 보내지기 때문에 이송되는 유도에 의한 압력강하의 차이가 표 1과 같이 나타난 것을 알 수 있으며, 설계값과의 오차는 모두 1[%] 미만으로 나타났다.

미분기, 1차공기 송풍기, 압입송풍기는 출구 공기 유량이 제어되어야 하므로 PID 제어를 사용하였다. 한 개의 미분기는 입구 공기유량 변동에 의해 연료량이 결정되고 유량변동이 부하변동에 해당하므로 질량유량을 VWO 조건인 32.759[kg/s]로 변동시켜 모의실험하였다. 출구공기는 입구공기와 미분탄이 혼합되어 나타나므로 압력과 유량을 표 2에 나타냈다.

여기서 오차는 설계값과 모의실험과의 차이이다.

표 2. 미분기의 출구 압력과 온도

Table 2. Outlet press. and temp. of pulverizer

| 물성치 분류 \ 물성치 | 설계값 | 모의실험값 | 오차 | 오차율 (%) |
|--------------|-----------|-----------|------|---------|
| 압력[Pa] | 103,580.6 | 103,600.2 | 19.6 | 0.02 |
| 질량유량[°C] | 32.70 | 32.76 | 0.06 | 0.2 |

미분기의 출구는 보일러로 들어가는 미분탄과 공기의 혼합물이며, 연소상태를 결정하는 중요한 인자로서 모의실험 결과 설계값의 압력과 온도에 대한 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

1차 공기 송풍기의 출구공기는 공기예열기에서 가열된 이후 미분기로 이송되며, 습기를 함유한 미분탄의 건조 및 가열에 사용되고 압력을 이용하여 보일러로 이송된다. 부하변동은 질량유량의 변동을 나타내므로 질량유량을 변동시키는 모의실험하였으며, 압력과 온도를 표 3에 나타냈다. 여기서 오차는 설계값과 모의실험과의 차이이다.

표 3. 1차 공기 송풍기의 출구 압력과 온도

Table 3. Outlet press. and temp. of primary air fan

| 물성치 분류 \ 물성치 | 설계값 | 모의실험값 | 오차 | 오차율 (%) |
|--------------|-----------|-----------|-------|---------|
| 압력[Pa] | 108,199.6 | 108,317.3 | 117.7 | 0.11 |
| 온도[°C] | 30.2 | 31.3 | 1.1 | 3.6 |

압력은 무시할 수 있는 오차율을 보이고, 온도의 경우 사용되는 탄종의 습도 및 온도에 따라 온도변화에 영향을 주지만 표 3에서 보여준 약 3.6%의 상당한 온도 오차율을 보이고 있다.

압입송풍기의 출구(2차)공기는 공기예열기에서 가열된 이후 보일러로 이송되어 연소용으로 이용된다. 부하변동은 1차 공기 송풍기와 동일하게 질량유량의 변동을 나타내므로 질량유량을 변동시켜 모의실험하였으며, 압력과 온도를 표 4에 나타냈다. 여기서 오차는 설계값과 모의실험과의 차이이다.

표 4에 의하면 질량유량 천이에 따른 압력변화는

거의 없으나 온도는 3.0[%]의 오차율을 나타내고 있다.

표 4. 압입송풍기의 출구 압력과 온도

Table 4. Outlet press. and temp. of forced draft fan

| 물성치 분류 \ 물성치 | 설계값 | 모의실험값 | 오차 | 오차율 (%) |
|--------------|-----------|-----------|-------|---------|
| 압력[Pa] | 103,855.2 | 103,823.8 | -31.4 | -0.03 |
| 온도[°C] | 20.2 | 20.8 | 0.6 | 3.0 |

관류형 보일러는 보일러에 들어오는 1차공기 및 2차공기의, 질량유량의 변동 즉, 부하변동을 모의실험하였으며, 보일러의 출구 질량과 온도를 표 5에 나타냈다. 여기서 오차는 설계값과 모의실험과의 차이이다.

표 5. 관류형 보일러의 출구 질량과 온도

Table 5. Outlet press. and temp. of once-through boiler

| 물성치 분류 \ 물성치 | 설계값 | 모의실험값 | 오차 | 오차율 (%) |
|--------------|-------|-------|------|---------|
| 질량유량[kg/s] | 540.0 | 547.0 | 7 | 1.3 |
| 온도[°C] | 359 | 354.1 | -4.9 | 1.4 |

여기서 나타낸 유량 및 온도는 질탄기를 지나 보일러 출구 즉 공기예열기 전단의 물성치이며, 실제 보일러 내부의 온도는 약 1,200[°C]에 이르고 질량유량은 552[kg/s]이 된다. 오차율은 2[%] 이내로 모의실험결과가 매우 양호하게 나타났다.

5. 결 론

500[MW]급 한국 표준 석탄화력발전소의 BMCR조건의 설계값들을 사용하여 보일러 연소시스템의 단위기기에 대한 해석모듈을 개발하였다. 개발된 모듈은 공기예열기, 미분기, 1차공기팬, 압입 및 유인송풍기, 관류형 보일러 등이며 개발된 모듈의 성능을 검증하기 위해 정상상태에서 4000[s]동안 주요변수들에 대한 모의실험을 하였다. 천이상태를 해석하기 위하여 5%의 부하차이를 갖는 VWO 조건으로 변동시켜 단

위모듈을 모의하여 설계값과 비교하였다. 물성치에 대한 오차율은 공기에열기의 경우 0.5%이하, 미분기는 0.2%이하, 송풍기 압력은 0.2%이하, 관류형 보일러는 0.5% 등의 오차율로 매우 정밀한 특성을 나타내고 있으나 송풍기의 온도가 최대 3.6%의 오차율을 나타냈다. 따라서 발전소 모의 기준오차인 5%를 만족시켜 개발된 모델의 정확성을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 보일러 연소계통의 모듈을 이용하여 설계된 단위기기의 설계값을 입력하면 성능을 확인할 수 있다. 공해방지설비인 전기집진기의 용량증설, 탈황설비의 추가 또는 용량증설, 탈질설비의 추가 등으로 인한 연소계통의 설계성능을 미리 모의실험하거나 단위기기 변동에 따른 운전모드 개발에 필요한 모의실험을 손쉽게 수행하여 실증실험에 유용할 것으로 판단된다.

기 호 설명

| | | |
|----------|--|-------------|
| C_p | Specific heat of mixture at constant pressure | [J/kg-°C] |
| C_{pa} | Specific heat of combustion air mixture at constant pressure | [J/kg-°C] |
| C_{pg} | Specific heat of fluegas mixture at constant pressure | [J/kg-°C] |
| C_v | Specific heat of mixture at constant volume | [J/kg-°C] |
| C_{va} | Specific heat of combustion air mixture at constant volume | [J/kg-°C] |
| C_{vg} | Specific heat of flue gas mixture at constant volume | [J/kg-°C] |
| E | Row vector of unit element | |
| F_{ae} | Moisture fraction of entering air | [kg H2O/kg] |
| F_{al} | Moisture fraction of leaving air | [kg H2O/kg] |
| F_{ce} | Moisture fraction of entering coal | [kg H2O/kg] |
| F_{cl} | Moisture fraction of leaving coal | [kg H2O/kg] |
| h_a | Adiabatic flame enthalpy for fuel combustion | [J/kg] |
| h_{al} | Enthalpy of leaving air | [J/kg] |
| h_{ae} | Enthalpy of air entering | [J/kg] |
| h_{al} | Enthalpy of air leaving | [J/kg] |

| | | |
|------------------|---|-------------|
| h_{ge} | Enthalpy of gas entering | [J/kg] |
| h_{gl} | Enthalpy of gas leaving | [J/kg] |
| h_{pe} | Enthalpy of primary air entering | [J/kg] |
| h_{se} | Enthalpy of secondary air entering | [J/kg] |
| h_{re} | Enthalpy of gas entering | [J/kg] |
| $\overline{h_a}$ | Average enthalpy of air | [J/kg] |
| $\overline{h_g}$ | Average enthalpy of gas | [J/kg] |
| J_{EP} | Power input from electrostatic precipitator | [kW] |
| J | Input Power required | [W] |
| K_{ae} | 100% rated air flow | [kg/s] |
| K_{P1} | No load pressure drop parameter | |
| K_{P2} | Load pressure drop parameter | |
| P | Pressure of mixture | [Pa] |
| P_{ae} | Pressure of air entering | [Pa] |
| P_{al} | Pressure of air leaving | [Pa] |
| P_{ge} | Pressure of gas entering | [Pa] |
| P_{gl} | Pressure of gas leaving | [Pa] |
| P_{ae} | Pressure of air entering | [Pa] |
| P_{al} | Pressure of air leaving | [Pa] |
| Q_0 | 26.7 | [°C] |
| Q_1 | 1.4147×10^{-11} | [C/(J/kg)3] |
| Q_2 | 1.0269×10^{-7} | [C/(J/kg)3] |
| Q_3 | 2.3889×10^{-4} | [C/(J/kg)3] |
| $\overline{q_a}$ | Average heat transfer rate from rotor to combustion air | [W] |
| $\overline{q_g}$ | Average heat transfer rate from flue gas to rotor | [W] |
| R | Ideal gas constant for air mixture | [J/kg-K] |
| T | Temperature of mixture | [°C] |
| T_{al} | Temperature of leaving air | [°C] |
| V_a | Volume of air side | [m³] |
| V_g | Volume of gas side | [m³] |
| V_t | Non-metal volume (air + gas + seal sectors) | [m³] |

| | | |
|---------------------|--|----------------------|
| V | Volume of chamber | [m ³] |
| W_{ae} | Flowrate of air entering | [kg/s] |
| W_{al} | Flowrate of air leaving | [kg/s] |
| W_{ge} | Flowrate of gas entering | [kg/s] |
| W_{pe} | Flowrate of primary air entering | [kg/s] |
| \overline{W}_{pe} | Flowrate of secondary air entering | [kg/s] |
| W_{gl} | Flowrate of gas leaving | [kg/s] |
| W_{re} | Flowrate of recirculation gas entering | [kg/s] |
| W_{fe} | Flowrate of fuel entering | [kg/s] |
| W_{LEA} | Leakage flowrate air side to gas side | [kg/s] |
| W_{ae} | Flowrate of entering air | [kg/s] |
| W_{al} | Flowrate of leaving air | [kg/s] |
| W_{ce} | Flowrate of entering air | [kg/s] |
| W_{cl} | Flowrate of leaving air | [kg/s] |
| W_{gz} | Flowrate vector of coal to grinding zone | [kg/s] |
| ρ | Density | [kg/m ³] |
| $\overline{\rho}_a$ | Average density of air | [kg/m ³] |
| $\overline{\rho}_g$ | Average density of gas | [kg/m ³] |
| Ω | Rotational speed | [rad/s] |

본 논문은 2002학년도 목포대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- (1) I. S. Choi, "Trends and Problems of Coal Fired Power Plant", Chemical Industry and Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 209~217, 1984.
- (2) H. J. Park, "Experiences of Electrostatic Precipitator Application at Fossil Power Plant", The Society of air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 21, No. 1, pp. 40~47, 1992.
- (3) S. W. Cho, Y. H. Hwang, S. G. Jun, "Flue Gas Desulfurization system for Reducing SOx Emission in Thermal Power Plant", Proceedings of 29th Meeting of KOSAE, pp. 451~452, 1999.
- (4) E. D. Kim, "Solutions for Air Pollution Regulation of Thermal Power Plant", The Proceedings of 4th KSEEC Symposium, pp. 26~37, 2000.
- (5) Peter J. Clelland, Harry G. Kwatny., "Modeling and

- Simulation of Gas Dynamics in a Fossil Power Boiler", ISA Annual Conference and Exhibit, pp.1~10, 1973.
- (6) Wormley, D.N., et. al, "AIR/GAS System Dynamics of Fossil Fuel Power Plants", Vol.6, EPRI CS-144, RP 1651, Final Report, 1983.
- (7) Peter J. Clelland, Harry G. Kwatny, "Modelling and Simulation of Gas Dynamics in a Fossil Power Boiler", ISA Annual Conference and Exhibit, pp. 93 ~ 98, 1973.
- (8) James H. Daniels, "Design Considerations for Furnace Draft Control System", 20th Annual ISA Power Instrumentation Symposium, New Orleans, Louisiana, pp. 93 ~ 98, 1977.
- (9) C. J. Moon, Y. H. Chang, E. S. Kim, "A Study on Operation Mode Development for Construction of Flue Gas Desulfurization System in Thermal Power Plants" Energy Engineering J. Vol. 9, No. 1, pp. 10~18, 2000.
- (10) C. J. Moon, H. G. Nam, "A Study on Analysis of Furnace Pressure for Air/Gas System Retrofit in Fossil-Fired Power Plant" Energy Engineering J. Vol. 3, No. 2, pp. 207~217, 1994.
- (11) Y. P. Hong, et al, "A Study on Analysis of Dynamic Performance for Plant" Energy Engineering J. Vol. 2, No. 1, pp. 28~37, 1993.
- (12) Framatome Technologies, "MMS Theory and Worksheet Air/Gas Library", Framatome Technologies., 1993.
- (13) Framatome Technologies, "MMS Reference Manual", Framatome Technologies, 1993.
- (14) MGA Software, "ACSL Reference Manual Version 11", MGA Software, 1995.

◇ 저자소개 ◇

문채주 (文彩柱)

1959년 12월 26일 생. 1981년 전남대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1983년 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 전남 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~1997년 한국전력 기술주식회사 책임연구원. 1997~현재 목포대학교 전기공학과 부교수.

김용구 (金容求)

1969년 12월 29일 생. 1995년 전남대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1997년 전남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2000년 전남대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년~2003년 전남대학교 전기공학과 객원교수. 2004년 3월~2004년 목포기능대학 전기계측제어과 전임강사 재직중.

정환주 (鄭煥周)

1975년 11월 22일 생. 2001년 목포대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2003년 목포대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).