

석탄화력발전소의 공기 및 가스시스템 모델에 관한 연구

정한주, 김태현, 유영재, 장영학, 문채주
 목포대학교 전기제어공학부

A Study on Air and Gas System of Coal Fired Power Plant

Jung Hwan-Joo, Kim Tae-Hyun, Ryoo Young-Jae, Chang Young-Hak, Moon Chae-Joo
 Mokpo National University, School Electrical and Control Engineering

Abstract -Boiler combustion systems 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. This paper shows and discusses the developed analysis model, such as the forced draft fan the primary air fan, the furnace and burner system, pulverizer, air preheater and induced draft fan, etc. in accordance with BMCR condition of boiler using the Modular Modeling System(MMS) software.

PAF(Primary Air Fan)를 통과한 1차공기는 차가운 공기(Tempering Air)와 공기예열기(B)를 거친 뜨거운 공기로 나뉘어 석탄을 건조시키고, 미분탄기(D)에서 석탄과 급속히 혼합되어 버너로 미분탄을 이송시켜 연소로(F) 속에서 연소된다. 한편 FDF(Forced Draft Fan)에 의해 공급된 2차공기는 공기예열기를 거쳐 보일러의 공기함을 통해 공급되어 연료의 연소효율을 높인다. 연소후 연소 가스는 연소로 출구(G)에 도달할 때까지 1차적으로 복사 에 의해 냉각되고 2차 과열기, 재열기, 1차 과열기 및 절탄기를 거친다. 공기예열기(B)를 거친 연소가스는 전기집진기를 지나 IDF(Induced Draft Fan)(I)를 통과하여 연도를 거쳐 대기로 방출된다.

1. 서 론

석탄화력발전소는 부하추종 운전이 주로 이루어진다. 부하변동이 발생하면 보일러의 운전조건이 먼저 바뀌어지고 급수 및 증기계통의 물성치가 변동한다. 일반적으로 부하 추종운전이 되면 급수 및 증기계통 보다는 연소계통인 공기 및 연소가스 계통의 고장이 빈번한 것으로 알려져 있다. 한편, 환경규제요건의 강화에 따라 공해방지설비가 추가 또는 변경이 이루어져야 한다. 이러한 설비변경은 공기 및 연소가스계통의 개선이 필요하게 된다. 연소계통의 설계 또는 계통의 변경 시에 각종 제어변수들의 사전 검증이 필요하다. 본 연구에서는 상업용해석모델인 MMS를 이용하여 화력발전소의 보일러, 미분기, 각종 팬, 등 연소계통을 모델하고 현장 자료와 설계자료를 근거로 실시스템에 대한 해석 모델을 개발한다. 여기서는 EPRI 모델을 사용하였으며, 각 계층은 모듈별 구성을 하고 전체 시스템을 구성하였다. 구성된 시스템에 대하여 정상상태(BMCR) 특성을 구현하였다.

2.2 Fan 모델

회전 중심축에서 날개끝으로 가속하는 원심형(압력이 크고 유량이 작은경우)과 회전축과 평행하고 가속시키는 축류형으로 구분한다. 팬입구측에서 속도제어하는 Vane방식이며, PAF는 원심형 FDF, IDF는 축류형이다. 축류형팬의 경우 운전 15%이하에서 Stall현상이 발생한다. 질량보존식과 팬입구압력미분식, 엔탈피미분식을 표기한다.

2.2.1 1차공기팬(PAF)

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

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

$$\therefore A = q_g - (h_{gl} - P_{gl}/\rho)(W_{ge} - W_{gl})$$

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

2.2.2 압입, 유인송풍기(FDF, IDF)

$$\frac{dh}{dt} = \frac{[W_{ge}h_{ge} - W_{gl}h_{gl} + J - (h_{gl} - P_{gl}/\rho) V dp/dt]}{\rho V (1 - R/C_p)}$$

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

$$\therefore A = (h_{gl} - P_{gl}/\rho)(W_{gl} - W_{ge})$$

$$\frac{dP_{ge}}{dt} = R \left[\left(\frac{\rho}{C_p} \right) \frac{dh_{gl}}{dt} + \frac{(T + 273.15)(W_{ge} - W_{gl})}{3600 V} \right]$$

2.3 공기예열기 모델

공기예열기 내부의 회전원판에 연소가스의 열이 회수되어 반대편의 공기에 열을 전달한다. 공기와 연소가스는 입력측과 출력측의 압력차이에 의해 정채 누설되며 공기에서 가스로 누설을 가정한다. 주요식은 각각의 출구에서 유량 및 엔탈피 변화이다.

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

$$\frac{dh_{al}}{dt} = \frac{C_{pa}/C_{va}}{\rho V_a} \times [W_{ae}h_{ae} - W_{ae}h_{al} - W_{LEAK}h_a + q_a + \Omega V_i(\bar{\rho}_g h_g - \bar{\rho}_a h_a) - (h_{al} - P_{al}/\rho_a)]$$

2. 이 론

2.1 연소계통

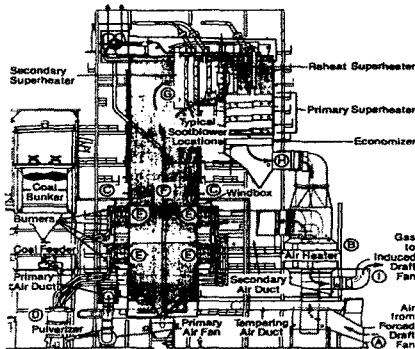


Fig. 1. Boiler System of Fossil Fired Power Plant.

$$\begin{aligned} & \times (W_{ae} - W_{al} - W_{LEAK} + \Omega V_i (\bar{\rho}_g - \bar{\rho}_a)) \\ \frac{dh_{gl}}{dt} = & \frac{C_{pe}/C_{vg}}{\rho_g V_g} \times [W_{ge} h_{ge} - W_{gl} h_{gl} + W_{LEAK} \bar{h}_a \\ & - q_g + J_{EP} + \Omega V_i (\bar{\rho}_a \bar{h}_a - \bar{\rho}_g \bar{h}_g) \\ & - (h_{gl} - P_{gl}/\bar{\rho}_g) \\ & \times (W_{ge} - W_{gl} + W_{LEAK} + \Omega V_i (\bar{\rho}_a - \bar{\rho}_g))] \end{aligned}$$

2.4 미분기 모델

엔탈피 미분계수는 압력변화에 비해 너무 작아서 무시하였으며, 입력측의 입구변화와 출구측 공기량, 입력측의 공기 및 연료의 수분함유율, 엔탈피와 수분비율로 계산되는 출구측 공기온도, 출구측의 수분함유율이 주요식이다.

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

$$W_{al} = \left[\frac{(P_{ae} - P_{al}) - K_{P2}\{E\} \cdot \{W_{ge}\}}{(K_{P1}/K_{ae}^2)} \right]^{0.5}, \quad W_e = 0.622 \left[\frac{P_e}{P_{al} - P_e} \right]$$

$$F_{ae} = \frac{\left[\frac{M_{air}}{M_{ae}} - 1 \right]}{\left[\frac{M_{air}}{M_{vap}} - 1 \right]}$$

$$\begin{aligned} T_{al} = & (3.7646 \times 10^{-7} - 1.78713 \times 10^{-7} F_{al}) h_{al}^3 \cdot Q_1 \\ & (-1.0344 \times 10^{-3} + 1.643 \times 10^{-4} F_{al}) h_{al}^2 \cdot Q_2 + \\ & (4.16 - 3.0 F_{al}) h_{al} \cdot Q_3 + Q_0 \end{aligned}$$

$$\frac{dF_{cl}}{dt} = \frac{[W_{ae} F_{ae} + W_{ce} F_{ce} - W_{al} W_{al} - W_{cl} F_{cl} - F_{cl} \sum \frac{dM_{cl}}{dt}]}{M_{coal}}$$

2.5 버너 및 연소로 모델

과열기, 재열기, 절탄기를 포함한 영역을 챔버체적으로 하였다. 공기와 연료비는 1.9:1 이며, 연료발열량은 HHV, LHV를 각각 입력하였다. 연소로 모델은 독립적으로 정특성을 분석할 수 없으며, 버너모델에서 단열화염엔탈피, 화학반응온도, 탄소, 수소, 수분의 물평형식을 참조한다.

$$h_a = \frac{W_{pe} h_{pe} + W_{se} h_{se} + W_{re} h_{re} + W_{fe} [C_{p,f} (T_{fe} - 26.7) - A]}{W_{pe} + W_{se} + W_{re} + W_{fe}}$$

$$\therefore A = F_{h20, fe} h_{fe} + E_T$$

$$T_f = \frac{W_{pe} h_{pe} + W_{se} h_{se} + W_{re} h_{re} + W_{fe} A + K h_{LV} + 300.0}{C_{p,g} (W_{pe} + W_{se} + W_{re} + W_{fe})}$$

$$\therefore A = [C_{p,f} (T_{fe} - 26.7) - F_{h20, fe} h_{fe}]$$

$$K = W_{fe} \text{ if } W_{fe} < W_{O_2}, \quad K = W_{O_2} \text{ if } W_{fe} > W_{O_2}$$

$$W_{O_2} = \left[\frac{W_{pe} F_{O_2, se} F_{O_2, se}}{\left(\frac{F_{C, fe}}{M_C} + \frac{F_{H, fe}}{2M_H} + \frac{F_{S, fe}}{M_S} \right) M_{O_2}} \right]$$

$$V_c \frac{dN_C}{dt} = \frac{[W_{fe} F_{C, fe} - (W_{gl} - W_{re}) F_{C, gl} K_{ff} - R_{CO} M_C V_c]}{M_C}$$

$$\begin{aligned} V_c \frac{dN_{O_2}}{dt} = & [W_{pe} F_{O_2, se} + W_{se} F_{O_2, se} + W_{pe} F_{O_2, fe} - (W_{gl} - W_{re}) \\ & \times F_{O_2, gl} - \frac{1}{2} M_{O_2} V_c (R_{CO} + R_{CO_2} + R_{H_2O} + 2R_{SO_2})] / M_{O_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{gl} V_c \frac{dF_{H_2O, gl}}{dt} = & W_{pe} (dF_{H_2O, pe} - dF_{H_2O, gl}) + W_{se} (dF_{H_2O, se} \\ & - dF_{H_2O, gl}) + W_{fe} [dF_{H_2O, pe} - dF_{H_2O, gl} (1 - F_{ASH, fe})] \\ & + M_{H_2O} V_c R_{H_2O} \end{aligned}$$

3. 시뮬레이션

설계 및 성능시험데이터를 기준으로 단위모델별로 출력단의 압력, 엔탈피, 유량, 온도 순으로 시뮬레이션하였다.

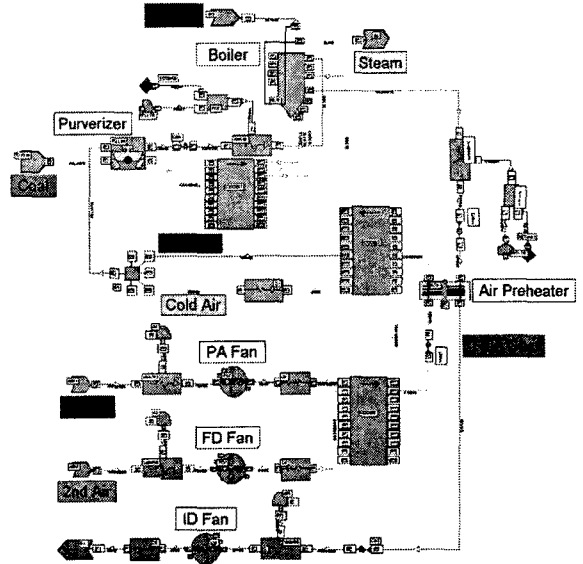
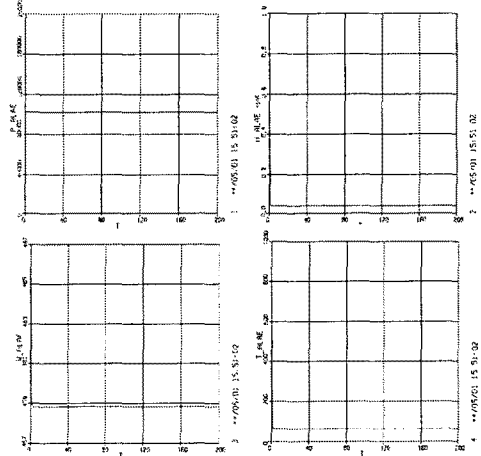
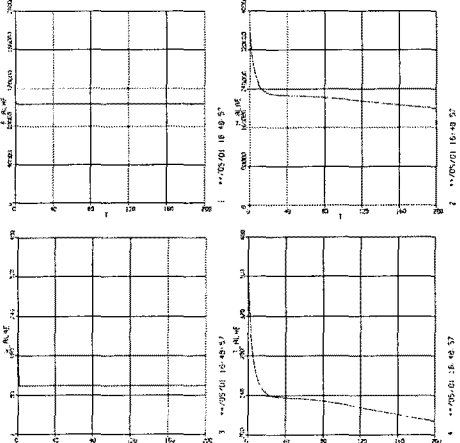


Fig. 2. Air and Gas System Model Structure.

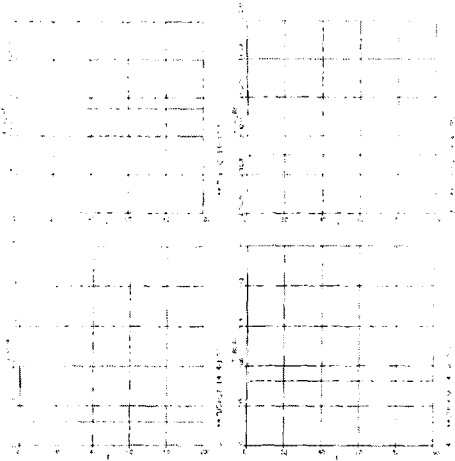
3.1 공기에열기(Regenerative Heat Exchanger)



3.2 미분기(Pulverizer)

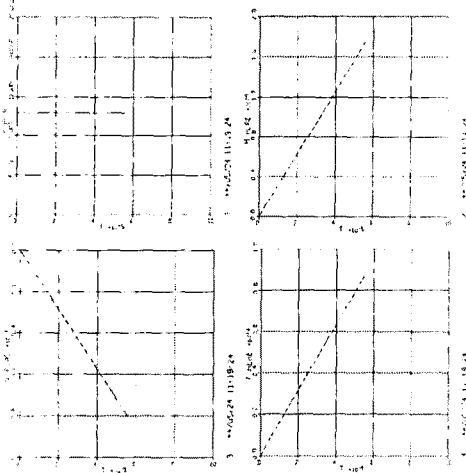


3.3 원심형 팬(Centrifugal Type - PAF)

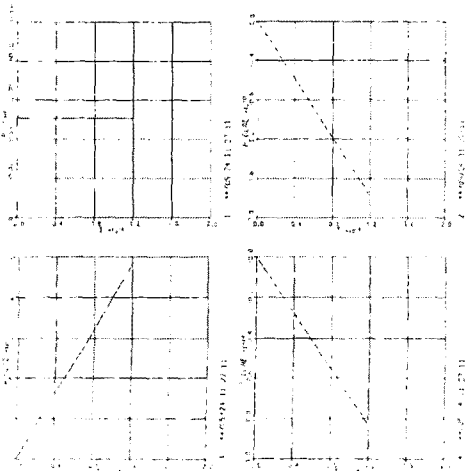


3.4 축류형 팬(Axial Type - FDF, IDF)

3.4.1 압입송풍기(FDF)



3.4.2 유인송풍기(IDF)



4. 결 론

연소계통의 팬 모델, 공기예열기 모델, 연소로 및 버너 모델, 미분기 모델에 대한 단위해석모듈을 개발하였다. 시뮬레이션 과정에서 축류형 팬의 곡선이 발산하는 것은 팬의 전단에 위치하는 베인의 정확한 전달계수를 구하지 못하여 나타난 것이다. 연소로 및 버너 모델은 보일러 출력단의 압력과 연소비를 일정값으로 각각 유지하기 위한 제어기 모듈이 아직 완성되지 않았기 때문이다. 따라서, 베인의 전달계수와 제어기 이득이 결정되면 전체 시스템이 완성된다. 이 시스템을 BMCR조건에서 정상상태 실험을 거치고, 만족스러운 결과를 얻을 때까지 반복하여 교정한 다음 실제 발전소 비상운전이나 특정상황을 가정한 운전모드를 과도상태로 해석하게 된다. 단위계통의 설계변경을 위한 해석에도 활용할 수 있으며, 기존 발전소의 성능분석에도 활용 가능하다. 또한, 석탄화력 발전소 전체시스템을 구성하기 위해서는 공기 및 가스시스템 외에 급수 및 증기시스템의 연구 또한 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국 수력 원자력(주), "원자력 발전 백서", 한수원(주), p28, 2001
- [2] 남해곤, "전력플랜트 모델링", 대한전기학회지, 8권, 3호 pp. 4 ~ 11, 1989
- [3] 문재주, 남해곤, "화력발전소 공기/가스시스템의 성능개선을 위한 노내압 해석에 관한 연구", 한국에너지공학회지, 제3권 2호, pp. 207 ~ 217, 1994
- [4] 장기성, 조현성, 박왕서, "축류형 Fan Stall Warning System 개발" 대한전기학회지 하계학술집 D권, pp. 2434~2436, 2001
- [5] Wormley, D.N., et. al, "AIR/GAS System Dynamics of Fossil Fuel Power Plants", Vol.6, EPRI CS-144, RP 1651, Final Report, 1983
- [6] Peter J. Clelland, Harry G. Kwanty, "Modelling and Simulation of Gas Dynamics in a Fossil Power Boiler", ISA Annual Conference and Exhibit, pp. 93 ~ 98, 1973
- [7] James H. Daniels, "Design Considerations for Furnace Draft Control System", 20th Annual ISA Power Instrumentation Symposium, New Orleans, Louisiana, pp. 93 ~ 98, 1977