

화력발전소 보일러 모델개발
전환주*, 김태현*, 유영재*, 장영학*, 문채주*
*목포대학교 전기제어공학부

Development of Boiler Model for Fossil Fired Power Plant
Jung Hwan-Joo*, Kim Tae-Hyun*, Ryoo Young-Jae*, Chang Young-Hak*,
Moon Chae-joo*
*Mokpo National University

1. 서 론

국내의 화력발전소는 원자력발전소 증설로 인하여 운전특성이 기저부하(Base Load)에서 주말 또는 일일기동정지로 변경되고 있으며, 환경오염물질의 배출기준이 강화됨에 따라 기존 발전소에 공해방지설비 즉, 분진을 제거하는 전기집진기나 유황성분을 제거하는 탈황설비 등이 새롭게 추가되고 있다. 기존 화력발전소에 전기집진기나 탈황설비를 추가하게 되면 배출되는 연소가스의 압력손실이 발생하게 되어 송압통풍기(Booster Draft Fan)의 신설이나 유인통풍기(Induced Draft Fan)의 용량증설이 요구되고, 제어시스템 제어기에 대한 제어요소의 재조정 등 전면적인 재설계가 필요하게 된다. 이러한 문제는 발전소 연소시스템의 해석으로 최적 설계를 위한 사전검증을 하여야 하고 발전소 운전절차의 개정을 수반하게 되어 사전분석작업이 중요한 문제로 등장하게 되었다. 특히, 신설되는 송압통풍기의 고장 또는 강제 정지되는 경우에 발전소를 안전하게 보호하기 위해 여러 가지 사고사례에 대한 보호회로가 요구된다. 그러나, 우리나라의 경우 이에 대한 모델개발 실적이 거의 없고 외국의 경우 상업용 해석프로그램을 사용하여 설계자료에 대한 적정성 여부를 검증하고 있다.[1]~[3]

한편, 상업용 해석프로그램은 각각의 기기를 모듈화하여 모델링하고 발전시스템 특성에 적합하게 각 모듈을 재구성, 전체시스템이 구성되고, 여기서 개별적인 시스템에 대한 동적특성 요소들을 해석할 수 있다. 미국의 전기연구소에서 MMS(Modular Modeling System)를 먼저 개발하여 화력발전소에 대한 다양한 적용실적을 갖고 있으며, 그 후에 개발된 TRAX는 원자력발전소와 화력발전소 모두에 적용되는 MMS와는 달리 화력발전소의 경우만 적용할 수 있다.[4],[5]

본 연구에서는 프로그램의 해석모델이 이미 검토된 바와 같이 신뢰성이 확보되어 있기 때문에 모델개발 기간을 단축하기 위해 MMS를 이용하였다. 한국의 표준 석탄화력발전소는 500[MW]급을 기준으로 건설되고 있어 현장자료는 성능시험 데이터를 사용한다. 해석절차는 석탄화력발전소 구성 요소를 모듈화하여 각 기기별로 모델을 개발하고 전체시스템으로 연계하여 정특성 해석을 하여야 한다. 또한 이를 기준으로 모델 발전소의 운전특성을 반영한 동특성 해석을 수행하는 것이 편리하다. 이러한 해석과정의 하나로 본 연구에서는 석탄화력발전소 보일러계통의 주요 모듈에 대한 모델을 개발하여 개발모델에 대한 특성을 검증하고자 한다.

2. 이론

석탄화력발전소 보일러는 연소가 일어나는 보일러 본체와 부속설비로 이루어진다.

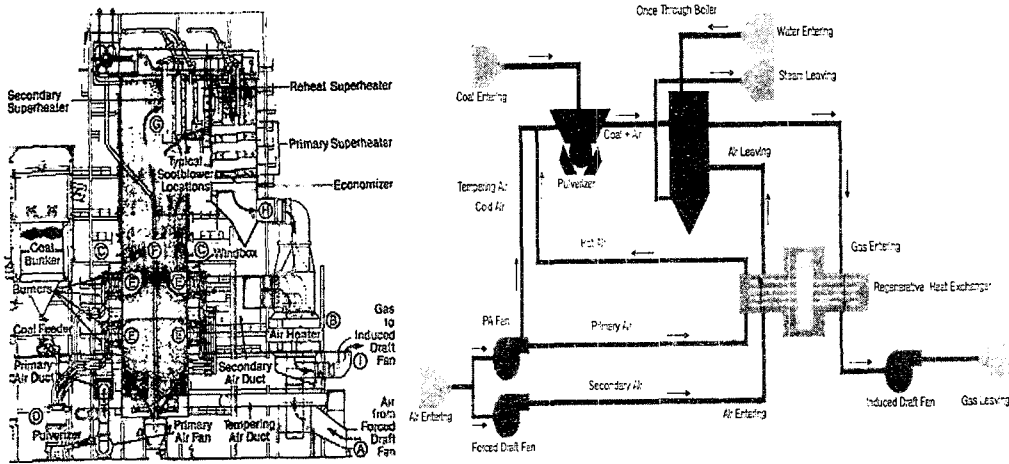


Fig. 1. Boiler System of Fossil Fired Power Plant.

FDF(Forced Draft Fan)(A)에 의해 공급된 공기(2차 공기)는 연소를 돕고 손실되는 에너지를 회수하는 공기에열기(B)를 거친다. 대부분의 고온공기(2차 공기로 약 70~80%)는 개별적인 버너로 연결되는 공기함(C)으로 바로 들어간다. 나머지 약 20~30%의 공기는 PAF(Primary Air Fan)에서 석탄을 건조시키고 분쇄하는 미분탄기(D)로 공급된다. 고온의 공기는 연소용의 2차 공기와 혼합되는 버너로 미분탄을 이송시킨다. 석탄과 공기는 급속하게 혼합되어 연소로(F) 속에서 연소되며, 여기서 생성된 연소가스는 연소로 출구(G)에 도달할 때까지 1차적으로 복사에 의해 냉각된다. 다음에 연소가스는 증기발생기 영역에서 벗어나기까지 2차 과열기, 재열기, 1차 과열기 및 절탄기를 거친다. 공기에열기(B)를 거친 연소가스는 전기집진기를 지나 IDF(Induced Draft Fan)(I)를 통과하여 대기로 방출된다.

2.1 팬 모델

팬은 PAF, FDF, IDF 등의 3개로 구성되며 형식은 원심형과 축류형으로 구분된다. 따라서, 원심형인 경우와 축류형인 경우의 2가지에 대한 모델을 개발하면 된다. 본 연구에서 참조한 발전소는 PAF만 원심형이고 쌍으로 작용하는 FDF, IDF는 축류형이다.

(1) 원심형 팬 모델

가스에 대한 질량 보존식은 다음식과 같이 주어진다. $W_{gt} - W_{ge} + \frac{d}{dt}(\rho V) = 0$ (1)

원심형 팬의 하우징의 체적은 일정하므로 $\frac{d\rho}{dt} = \frac{(w_{re} - w_{gl})}{V}$ (2)

에너지 보존식은 $w_{gt} h_{gt} - w_{ge} h_{ge} - q_R + \frac{d}{dt}[\rho V(h_{gt} - P_{gl}/\rho)] = 0$ (3)

식(3)의 미분을 정리하면 $\frac{w_{gt} h_{gt} - w_{ge} h_{ge} - q_R}{V} + \rho \frac{dh_{gt}}{dt} + h_{gt} \frac{d\rho}{dt} - \frac{dP_{gl}}{dt} = 0$ (4)

식(4)에서 압력 미분식을 구하여야 하므로 이상기체 방정식은 $P = \rho RT$ (5)

$$\text{양변을 미분하면} \quad \frac{dP}{dt} = R(\rho \frac{dT}{dt} + T \frac{d\rho}{dt}) = \frac{R}{C_p} \rho \frac{dh}{dt} + \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (6)$$

온도에 대한 엔탈피와 정압비열식은 $dT = dh/C_p$ 이고, 식(5)에서 $RT = P/\rho$, 그리고 $R = C_p - C_v$ 이므로 이를 식(6)에 대입하여 엔탈피 미분식이 식(7)과 같이 얻어진다.

$$\frac{dh_{gl}}{dt} = \frac{(C_p/C_v)[w_{ge} h_{ge} - w_{gl} h_{gl} + \dot{Q}_s]}{(\rho V)}, \quad A = q_g - (h_{gl} - P_{gl}/\rho)(w_{ge} - w_{gl}) \quad (7)$$

식(2)와 (6)에서 입구 압력 미분식은 식(8)로 정리된다.

$$\frac{dP_{ge}}{dt} = R \left(\frac{\rho}{C_p} \right) \frac{dh_{gl}}{dt} + \frac{(T+273.15)(w_{ge} - w_{gl})}{V} \quad (8)$$

(2) 축류형 팬 모델

축류형 팬 모델은 원심형과 유사하다. 일정한 하우징 체적을 갖는 축류형 팬은 시간에 대한 밀도 미분식을 구하고 원심형과 유사하게 식을 정리하면 엔탈피 미분식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{[W_{ge} h_{ge} - W_{gt} h_{gt} + J - (h_{gt} - P_{gt}/\rho) V \frac{d\rho}{dt}]}{\rho V \left(1 - \frac{R}{C_p}\right)} \quad (9)$$

또한, 출구 가스의 엔탈피 미분식과 입구압력 미분식은 다음식으로 주어진다.

$$\frac{dh_{gt}}{dt} = \frac{(C_p/C_v)[W_{ge} h_{ge} - W_{gt} h_{gt} + J - A]}{\rho V}, \quad A = (h_{gt} - P_{gt}/\rho)(W_{gt} - W_{ge}) \quad (10)$$

$$\frac{dP_{ge}}{dt} = R \left[\left(\frac{\rho}{C_p} \right) \frac{dh_{gt}}{dt} + \frac{(T+273.15)(W_{ge} - W_{gt})}{3600 V} \right] \quad (11)$$

2.2 공기 예열기 모델

공기 예열기 모델은 공기측과 가스측의 질량보존식은 준정상상태로 간주한다. 일부 공기는 밀봉영역에서 정체되고 가스측으로 누설된다. 비슷하게 가스도 다른 쪽의 밀봉영역에서 정체되고 공기측으로 누설된다. 따라서, 모델은 공기측에서 가스측으로 누설을 가정하고 열교환기에서 방출되는 유량은 다음식으로 얻어진다.

$$w_{al} = w_{ae} + \Omega V_t (\bar{\rho}_g - \bar{\rho}_a) - w_{LEAK} \quad (12)$$

$$w_{gt} = w_{ge} + \Omega V_t (\bar{\rho}_a - \bar{\rho}_g) - w_{LEAK} \quad (13)$$

또한, 공기측과 가스측의 에너지 보존식은 다음식과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{dh_{al}}{dt} = & \frac{C_{pa}/C_{va}}{\rho V_a} \times [w_{ae} h_{ae} - w_{al} h_{al} - w_{LEAK} \bar{h}_a + q_a \\ & + \Omega V_t (\bar{\rho}_g \bar{h}_g - \bar{\rho}_a \bar{h}_a) - (h_{al} - P_{al}/\bar{\rho}_a) \\ & \times (w_{ae} - w_{al} - w_{LEAK} + \Omega V_t (\bar{\rho}_g - \bar{\rho}_a))] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{dh_{gt}}{dt} = & \frac{C_{pg}/C_{vg}}{3600 \rho_g V_g} \times [w_{ge} h_{ge} - w_{gt} h_{gt} + w_{LEAK} \bar{h}_a \\ & - q_g + J_{EP} + \Omega V_t (\bar{\rho}_a \bar{h}_a - \bar{\rho}_g \bar{h}_g) - (g_{gt} - 6.66 \times 10^{-3} P_{gt}/\bar{\rho}_g) \\ & \times (w_{ge} - w_{gt} + w_{LEAK} + \Omega V_t (\bar{\rho}_a - \bar{\rho}_g))] \end{aligned} \quad (15)$$

2.3 버너 및 연소로 모델

버너 및 연소로 모델은 그림 1에서 표시된 (E), (F), (G)로 영역을 제어체적으로 간주한다. 그림에서 (E)는 버너영역, (F)는 연소로 영역을 나타낸 것이고, (G)는 연소로 출구로서 모델영역의 경계이다.

질량보존식과 이상기체 방정식에서 가스압력 미분식과 엔탈피 미분식을 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d p_{gl}}{dt} \\ \frac{d h_{gl}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Z_{11} = 1.0 \quad (15)$$

$$Z_{12} = - \left(\frac{R}{M C_p} \right) \rho_{gl} \quad (16)$$

$$r_1 = \frac{P_{gl}}{\rho_{gl} V_c} \times [w_{pe} + w_{se} + w_{re} + w_{fe}(1 - F_{ASH,fe}(F_{H_2O,fe})) - w_{gl}] \quad (17)$$

$$Z_{21} = -1.0 V_c \quad (18)$$

$$Z_{22} = \rho_{gl} V_c \quad (19)$$

$$r_2 = w_{pe}(h_{pe} - h_{gl}) + w_{se}(h_{se} - h_{gl}) + w_{re}(h_{re} - h_{gl}) + w_{fe}[C_{p,fe}A - F_{H_2O,fe}h_{fg} - (1 - F_{ASH,fe}(1 - F_{H_2O,fe}))h_{gl}] + \Sigma E_x - q_r - q_g \quad (20)$$

여기서, $A = (T_{fe} - 26.7)$ 이다.

수분에 대한 물 평형은 다음 식으로 주어진다.

$$\rho_{gl} V_c \frac{dF_{H_2O,gl}}{dt} = W_{pe}(dF_{H_2O,pe} - dF_{H_2O,gl}) + W_{se}(dF_{H_2O,se} - dF_{H_2O,gl}) + W_{fe}[dF_{H_2O,pe} - dF_{H_2O,gl}(1 - F_{ASH,fe})] + M_{H_2O} V_c R_{H_2O} \quad (29)$$

3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 한국표준 석탄화력발전소 설계 및 성능시험 데이터를 기준으로 수행하였다.

3.1 공기 예열기(Regenerative Heat Exchanger)

공기예열기를 해석하기 위한 모델은 그림 2와 같고, 이 모델에서 얻어지는 시뮬레이션 결과는 그림 3, 4, 5와 같다.

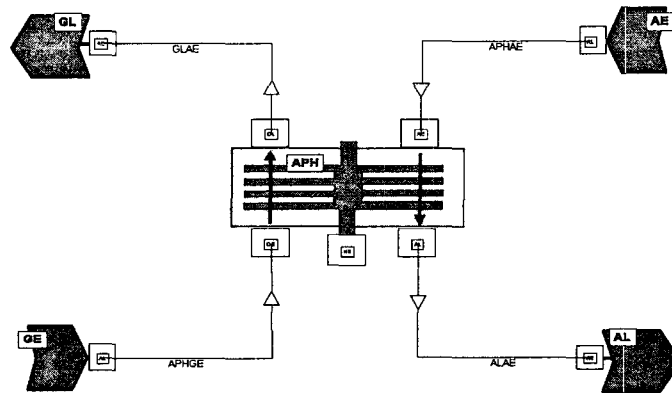


Fig. 2. Model Builder of Regenerative Heat Exchanger.

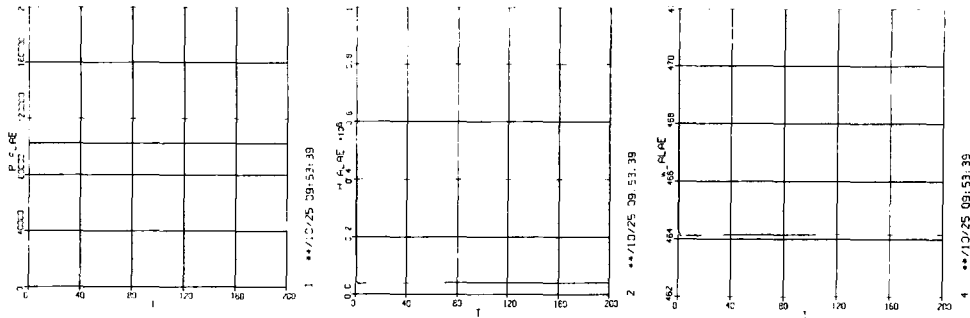


Fig. 3. Air Leaving Pressure. Fig. 4. Air Leaving Enthalpy. Fig. 5. Air Leaving Flow.

3.2 미분기(Pulverizer)

미분기 해석 모델은 그림 6과 같고, 이 모델에서 얻어지는 시뮬레이션 결과는 그림 7, 8, 9와 같다.

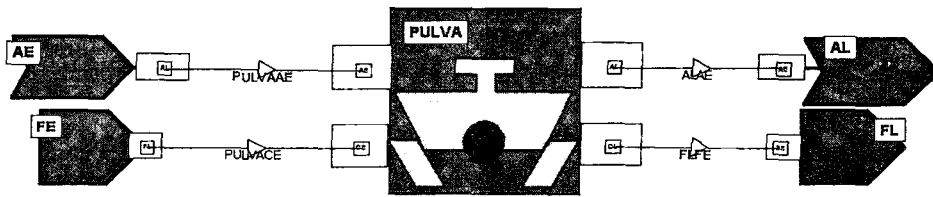


Fig. 6. Model Builder of Pulverizer.

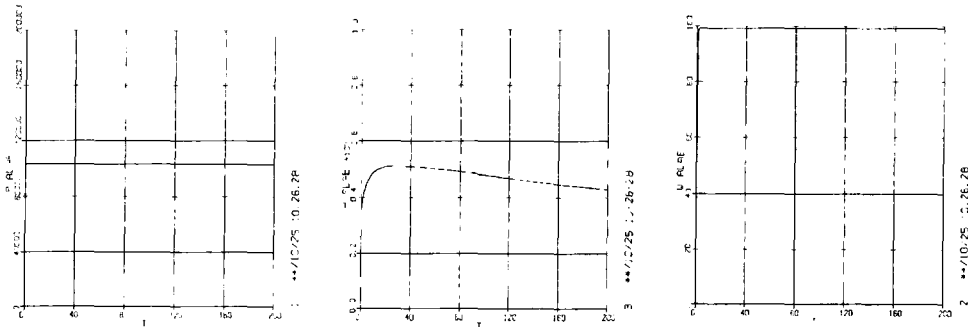


Fig. 7. Air Leaving Pressure. Fig. 8. Air Leaving Enthalpy. Fig. 9. Air Leaving Flow.

3.3 원심형 팬(Primary Air Fan - Centrifugal Type)

원심형 팬 해석 모델은 그림 10과 같고, 이 모델에서 얻어지는 시뮬레이션 결과는 그림 11, 12, 13과 같다.

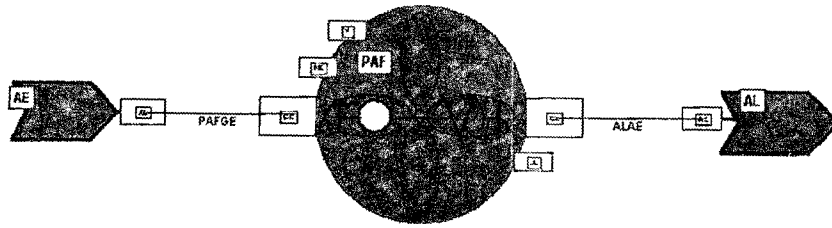


Fig. 10. Model Builder of Centrifugal Fan with Variable Inlet Vanes.

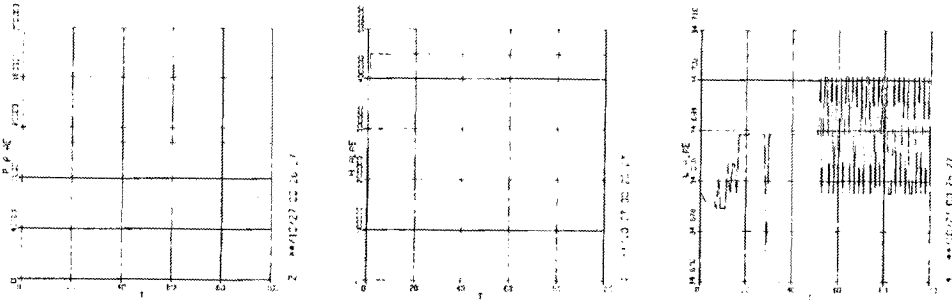


Fig. 11. Air Leaving Pressure. Fig. 12. Air Leaving Enthalpy. Fig. 13. Air Leaving Flow.

4. 결 론

연소시스템의 팬 모델, 공기 예열기 모델 및 연소로와 버너 모델, 미분기 모델에 대한 해석 모듈을 개발하였다. 발전소 설계 및 성능시험 데이터를 기초로 하여 현장에 적용 가능한 시뮬레이션 결과를 보면 단위기기에 대한 고유특성이 나타난다. 연소로와 버너모델은 제어기 모듈이 적용되지 않아 그 특성을 나타내지 못하였다. 원심형 팬 모델과 공기 예열기 모델, 미분기 모델을 시뮬레이션하였다. 계속적으로 축류형 팬 모델을 개발하면, 석탄화력발전소 연소시스템의 주요 기기에 대한 모델 개발이 완료되고, 이미 개발된 연소로와 버너모델(버너, 과열기, 재열기, 절탄기 포함)에 PID제어기와 함께 각각의 모듈들을 결합하여 보일러계를 하나의 시스템으로 통합, 정상상태 실험을 거친다. 이 실험은 보일러 BMCR 조건에서 실행하며, 만족스러운 결과를 얻을 때까지 반복하여 교정한 다음 실제 발전소 비상운전이나 특정상황을 가정한 운전모드를 과도상태로 해석하게 된다. 따라서, 보일러에 대한 전체계를 통합한 정상상태 및 과도상태 해석이 계속 연구되어야 한다.

5. 참고문헌

- [1] 남해곤, "전력플랜트 모델링", 대한전기학회지, 8권, 3호 pp. 4 ~11, 1989
- [2] 문채주, 남해곤, "화력발전소 공기/가스시스템의 성능개선을 위한 노내압 해석에 관한 연구", 한국에너지공학회지, 제3권 2호, pp. 207 ~217, 1994
- [3] Wormley, D.N., et. al, "AIR/GAS System Dynamics of Fossil Fuel Power Plants", Vol.6, EPRI CS-144, RP 1651, Final Report, 1983
- [4] 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
- [5] James H. Daniels, "Design Considerations for Furnace Draft Control System", 20th Annual ISA Power Instrumentation Symposium, New Orleans, Louisiana, pp. 93 ~ 98, 1977