

석탄화력발전소 연소계통의 해석을 위한 모델개발

정한주*, 박용섭**, 김성환*, 장영학*, 문채주*
*목포대학교 전기제어공학부, **송원대학

Development of Analysis Model for Combustion System of Coal Fired Power Plant

Jung Hwan-Joo*, Park Yong-Sub**, Chang Young-Hak*, Moon Chae-joo*
*Mokpo National University

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

모델 발전소의 운전특성을 반영한 동특성 해석을 수행하는 것이 편리하다. 따라서, 본 연구에서는 석탄화력발전소 연소계통의 주요 모듈에 대한 모델을 개발하여 특성을 검증하고자 한다.

1. 서 론

국내의 화력발전소는 원자력발전소 증설로 인해 운전 특성이 기저부하(Base Load)에서 주말 또는 일일기동정지로 변경되고 있으며, 심각해지는 환경 문제로 인하여 환경오염물질의 배출 기준이 강화됨에 따라 기존 발전소에 공해방지설비 즉, 분진을 제거하는 전기집진기나 유황성분을 제거하는 탈황설비 등이 새롭게 추가되고 있다. 기존 화력 발전소에 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 연소계통의 해석으로 최적 설계를 위한 사전검증을 하여야 하고 발전소 운전절차의 개정을 수반하게 되어 사전 분석작업이 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 경우에도 상업용 해석프로그램을 사용하여 설계자료에 대한 적정성 여부를 검증하고 있다[1]~[3]

한편, 상업용 해석프로그램은 각각의 기기를 모듈화하여 모델링하고 발전시스템 특성에 적합하게 각 모듈을 재구성하면 전체 시스템이 구성되고, 여기서 개별적인 시스템에 대한 동특성 요소들을 해석할 수 있다. 미국의 전기 연구소에서 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 석탄화력 발전소는 500[MW]급을 기준으로 건설되고 있어 현장자료는 이를 사용한다. 해석절차는 석탄화력발전소 구성 요소를 모듈화하여 각 기기별로 모델을 개발하고 전체 시스템으로 연계하여 정특성 해석을 하여야 한다. 이를 기준으로

2. 시스템 모델

2.1 연소계통

석탄화력발전소 연소계통은 그림 1과 같이 연소가 일어나는 보일러 본체와 부속설비로 이루어진다.

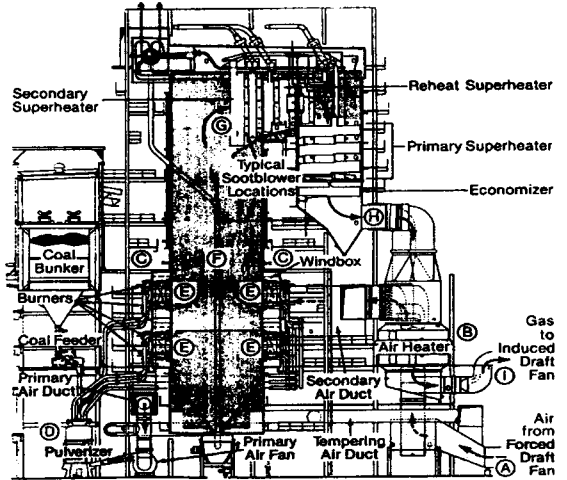


그림 1. 보일러 연소계통

FD(Forced Draft Fan)(A)에 의해 공급된 공기(2차 공기)는 연소를 돕고 손실되는 에너지를 회수하는 공기예열기(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. 공기예열기(B)를 거친 연소가스는 전기집진기를 지나 IDF(Induced Draft Fan)(I)를 통과하여 연돌을 거쳐서 대기로 방출된다.

2.1 팬 모델

팬은 PAF, FDF, IDF 등의 3개로 구성되면 형식은 원심형과 축류형으로 구분된다. 따라서, 원심형인 경우와

축류형인 경우의 2가지에 대한 모델을 개발하면 된다. 본 연구에서 참조한 발전소는 PAF만 원심형이고 FDF, IDF는 축류형이다.

(1) 원심형 팬 모델

가스에 대한 질량 보존식은 다음식과 같이 주어진다.

$$W_{gt} - W_{ge} + \frac{d}{dt}(\rho V) = 0 \quad (1)$$

원심형 팬의 하우징의 체적은 일정하므로 식(1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{(w_{ge} - w_{gt})}{V} \quad (2)$$

에너지 보존식은 다음과 같이 정리된다.

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

식(3)의 미분을 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{w_{gt} h_{gt} - w_{ge} h_{ge} - q_g}{V} + \rho \frac{dh_{gt}}{dt} + h_{gt} \frac{d\rho}{dt} - \frac{dP_{gt}}{dt} = 0 \quad (4)$$

식(4)에서 압력 미분식을 구하여야 하므로 이상기체 방정식은 식(5)로 주어지고, 양변을 미분하면 식(6)으로 정리된다.

$$P = \rho RT \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= R(\rho \frac{dT}{dt} + T \frac{d\rho}{dt}) \\ &= \frac{R}{C_p} \rho \frac{dh}{dt} + \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

온도에 대한 엔탈피와 정압 비열식은 $dT = dh/C_p$ 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.

$$\begin{aligned} \frac{dh_{gt}}{dt} &= \frac{(C_p/C_v)[w_{ge} h_{ge} - w_{gt} h_{gt} + A]}{(\rho V)} \\ A &= q_g - (h_{gt} - P_{gt}/\rho)(w_{ge} - w_{gt}) \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 식(2)와 (6)에서 입구 압력 미분식은 식(8)로 정리된다.

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

(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.

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

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

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.

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

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

또한, 공기측과 가스측의 에너지 보존식은 다음식과 같이 얻어진다.

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

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

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.

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{dP_{gt}}{dt} \\ \frac{dh_{gt}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

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

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

$$r_1 = \frac{P_{gl}}{\rho_{gl} V_c} \times$$

$$[w_{pe} + w_{se} + w_{re} + w_{fe}(1 - F_{ASH,fe}) - w_{gl}] \quad (17)$$

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

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

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

여기서, $A = (T_{fe} - 26.7)$ 이다.

반응열과 에너지 생성식은 DUKSYS 코드의 Wormely가 정의한 수식을 사용한다.

R_{CO}	$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$	화학 및 용융
R_{H_2O}	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	순시 및 완전연소
R_{CO_2}	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	평형, 준정상상태
R_{SO_2}	$SO + O_2 \rightarrow SO_2$	R_{CO} 에 비해

R_{CO} , R_{H_2O} , R_{SO_2} 의 반응열은 다음 식으로 얻어진다.

$$R_{CO} = \left(\frac{2.284 \times 10^{-2}}{r_p}\right) r_{CO} N_{O_2} N_C \quad (21)$$

$$R_{H_2O} = \frac{w_{fe} w_{H,fe}}{V_c M_{H_2}} \quad (22)$$

$$R_{SO_2} = R_{CO} \left[\left(\frac{F_{S,fe}}{M_S}\right) / \left(\frac{F_{S,fe}}{M_S}\right) \right] \quad (23)$$

단열화염 엔탈피는 다음 식으로 주어진다.

$$h_o = \frac{w_{pe}h_{pe} + w_{se}h_{se} + w_{re}h_{re} + w_{fe}[C_{p,f}(T_{fe} - 26.7) - A]}{w_{pe} + w_{se} + w_{re} + w_{fe}} \quad (24)$$

$$A = F_{H_2O,fe}h_{fg} + E_T$$

연료는 단열 연소가 되고, 완전연소가 된다고 가정하면 화학반응 온도는 다음 식으로 주어진다.

$$T_f = \frac{w_{pe}h_{pe} + w_{se}h_{se} + w_{re}h_{re} + w_{fe}A + Kh_{LV}}{C_{p,gl}(w_{pe} + w_{se} + w_{re} + w_{fe})} + 300.0 \quad (25)$$

$$A = [C_{p,f}(T_{fe} - 26.7) - F_{H_2O,fe}h_{fg}]$$

여기서, $K = W_{fe}$ if $W_{fe} < W_{O_2}$

$K = W_{O_2}$ if $W_{fe} > W_{O_2}$

이고, 그리고 w_{O_2} 는 다음 식으로 주어진다.

$$w_{O_2} = \left[\frac{w_{pe} F_{O_2,se} F_{O_2,se}}{\left(\frac{F_{C,fe}}{M_C} + \frac{F_{H,fe}}{2M_H} + \frac{F_{S,fe}}{M_S}\right) M_{O_2}} \right] \quad (26)$$

연료, 탄소 및 산소의 몰 농도가 반응식 계산에서 필요하다. 석탄 탄소에 대한 몰 평형은 다음 식으로 주어진다.

$$V_c \frac{dN_C}{dt} = \frac{[w_{fe} F_{C,fe} - (w_{gl} - w_{re}) F_{C,gl} K_{ff} - R_{CO} M_C V_c]}{M_C} \quad (27)$$

또한, 산소의 몰 평형은 다음 식으로 얻어진다.

$$V_c \frac{dN_{O_2}}{dt} = [w_{pe} F_{O_2,se} + w_{se} F_{O_2,se} + w_{pe} F_{O_2,fe} - (w_{gl} - w_{re}) \times F_{O_2,gl} - \frac{1}{2} M_{O_2} V_c (R_{CO} + R_{CO_2} + R_{H_2O} + 2R_{SO_2})] / M_{O_2} \quad (28)$$

마지막으로 수분에 대한 몰 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. 결 론

지금까지는 연소계통의 팬 모델, 공기예열기 모델 및 연소로와 버너 모델을 개발하였다. 현장에 적용을 위하여 적합하도록 개발되었으며, 시뮬레이션과 실증실험을 거칠 예정이다. 계속적으로 미분기에 대한 모델을 개발하면 석탄 화력발전소의 주요 기기에 대한 모델개발은 완료된다. 이 과정을 끝내면 개발된 모델 단위의 정상상태 실증실험을 거치고 연소계통을 하나의 시스템으로 통합하여 정상상태 실험을 거친다. 그리고 이 실험은 보일러 BMCR 조건에서 실행하며, 만족스러운 결과를 얻을 때까지 반복하여 교정한 다음 실제 발전소의 비상운전이나 특정 상황을 가정한 운전모드를 과도상태로 해석하게 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 남해곤, "전력플랜트 모델링", 대한전기학회지, 8권, 3호 pp. 4 ~ 11, 1989
- [2] 문채주, 남해곤, "화력발전소 공기/가스시스템의 성능 개선을 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