

화력 발전용 보일러의 미분탄 연소특성 전산해석

정재화 · 서석빈 · 김시문 · 안달홍 · 김종진
한전전력연구원

Numerical Analysis of Combustion Characteristics in a PC Fired Boiler for Power Generation

Jae Hwa Chung · Seok Bin Seo · Si Moon Kim · Dal Hong Ahn · Jong Jin Kim
Korea Electric Power Research Institute

1. 서론

미분탄을 사용하는 대형 보일러는 유류나 천연가스를 사용하는 발전설비에 비하여 발전 원가가 저렴하여 국내 발전산업에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 그러나 미분탄은 탄종이 다양하고 연소기내에서 미분탄과 공기의 공급 조건에 따라서 연소 상태가 달라져서 열효율이나 연소의 안정성, 배기가스 배출 특성 등에 민감한 영향을 미친다. 특히 연속 운전중인 대형 미분탄 보일러는 연소에 문제점이 발생해도 실험적으로 원인을 분석하는 데에는 한계가 있다. 이러한 경우에 전산해석 방법을 적용하여 보일러 내부에서의 유동 및 연소특성을 파악하면 보일러의 성능향상과 운전조건의 개선에 필요한 유용한 정보를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 대형 발전용 보일러 내부의 열유동 및 미분탄 연소과정을 상용 프로그램인 FLUENT code[1]로 삼차원으로 해석하여 보일러의 운전변수에 따른 연소특성을 제시하였다. 본 전산해석의 정밀도를 높이기 위하여 보일러 내부에서 열흡수를 위한 튜브군들인 주증기관(Super heater), 재열증기관(Reheater) 등의 복잡한 형상[2, 3]을 고려하였다. 보일러의 중요 운전변수인 미분탄 버너의 tilting 각도, 버너의 설치 위치 등을 해석의 변수로 사용하였으며, 보일러 내부에서 열흡수에 직접적인 영향을 미치는 온도분포를 이들 변수들의 변경에 따라 해석하였다. 또한 미분탄 입자의 거동을 분산상 모델을 사용하여 해석하여 미분탄이 버너에서 분사되어 보일러내에서 탈휘발화되고, 좌(char)의 표면연소가 진행되고 완료되는 과정을 파악하였다.

2. 전산해석 방법 및 해석조건

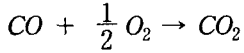
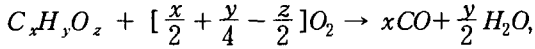
2-1. 지배방정식 및 수치해석 방법

본 전산해석에 사용한 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes 방정식으로 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을, 복사모델은 P-1 모델[4]을 사용하였으며, 복사열전달에 있어서 흡수계수는 회기체중합모델(WSGGM : Weighted Sum of Gray Gas Model)을 사용하였다. 가스상 반응에 대해서는 화학적 기구론에 의한 반응(finite rate reaction)과 난류 혼합에 의한 반응(eddy dissipation)[5, 6] 중 속도가 느린 반응에 의하여 연소 반응물이 결정되는 율속법칙을 적용하였다.

난류 유동장내에 존재하는 입자상 물질, 즉 미분탄이 연소로 내부를 진행하면서 연소반응이 진행되면 주변의 기체와 물질 및 열전달이 상호간에 일어나게 되므로 유동장에 커다란 영향을 미치게 된다. 따라서 난류 반응유동장내에서의 미분탄 입자의 진행 상태를 해석하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 미분탄 입자의 거동을 해석하기 위해 Eulerian-Lagrangian 해석에 기초한 분산상 모델(DPM : Dispersed Phase Model)을 이용하여 미분탄 입자의 거동을 해석하였다. 즉, Eulerian 좌표계상에서 해석되는 기체상 유동장에서 고체입자 거동을 Lagrangian 방정식으로 나타내어 해석을 수행하였다.

미분탄 입자는 연소로로 주입된 후 가열되고, 이후 입자에 포함된 휘발분이 배출되는 탈

휘발분화(devolatilization) 반응, 그리고 고정탄소분이 가스상 물질과 표면에서 반응하는 콰(char)의 산화반응(heterogeneous surface reaction) 및 연소가 완료된 후의 회재의 가열(또는 냉각) 과정으로 구분하였다. 수분량을 휘발분량에 포함하여 수분의 증발과 탈휘발분화 과정이 동시에 진행되는 것으로 모델링하여 계산을 수행하였는데, 휘발분(일부 수분 포함)의 연소반응은 다음과 같이 일반화된 연료의 2단 연소반응으로 모델링하였다.



2-2. 계산격자 및 해석조건

본 연구의 적용한 발전용 보일러는 높이가 39.712 m, 가로 15.416m, 세로 18.161m이다. 보일러의 4 코너에는 tilting tangential 버너들이 6층에 걸쳐 24개가 설치되어 있다. Coal 버너는 아래부터 위로 향해 A, B, C, D, E, F로 호칭된다.

보일러 수관벽의 경계조건은 수관내의 온도가 작동압력에 해당되는 포화온도로 일정하게 유지되므로, 수치해석의 경계가 되는 연소실의 내벽에서는 일반적으로 작동압력에서의 포화온도에 약 50°C를 더한 값인 350°C를 설정하였다. Fig. 1은 전산해석을 위하여 보일러의 외형 형상을 모델링한 그림이다. 본 계산에서 주증기관의 일부(S/H division pannel section: front 6개, rear 6개, S/H Pendant platen section: 23개)는 Fig. 1에서와 같이 박판(thin wall)으로 가정하여 계산하였고, 수량이 많아서 실제 형상을 묘사하기 어려운 주증기관의 나머지 및 재열증기관 및 절탄기는 열의 sink가 포함된 다공체로 가정하여 해석하였다. 해석을 위한 보일러 형상 계산격자를 만들기 위하여 GAMBIT code[7]를 사용하였으며, 총 124,062개의 비구조형 격자가 사용되었다. 해석에는 상업용 열유동해석 코드인 FLUENT 프로그램을 이용하였다.

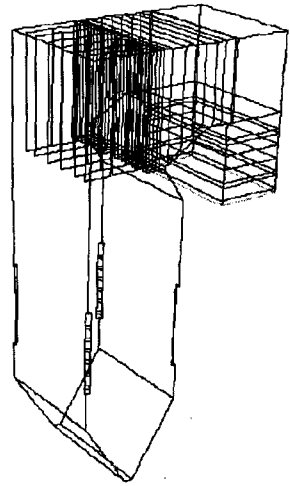


Fig. 1 보일러의 형상 모델

해석대상 보일러에서 연소되는 미분탄은 Kideco 탄을 가정하였으며, 수치해석에 활용한 Kideco 탄의 분석자료는 표 1에 나타내었다. 전산해석의 입력 자료로 사용한 공기 및 미분탄의 양은 표 2에 나타내었고, 실제 운전되는 발전용 보일러의 출력 560MW의 운전 자료가

표 1 미분탄(Kideco탄)의 공업분석 및 원소분석

Proximate Analysis(Wt. %) Air Dry Base	Moisture	2.53
	Volatile Matter	47.97
	Ash	1.55
	Fixed Carbon	47.95
Ultimate Analysis(%)	C	68.88
	H	5.15
	O	23.20
	N	1.01
	S	0.17
	Ash	1.59
Gross heating value(Kcal/kg)	6213	

다. 계산 변수로는 Coal 버너 노즐의 tilt 각도를 -27° , 0° , $+27^\circ$ 의 3가지로 변경시켰으며 Coal 버너노즐의 분사 위치도 변수로 선정하여 연소특성을 해석하였다.

표 2 미분탄 연소시의 입력 조건

Coal Feeding Rate (Ton/hr)	204
Coal Injection Velocity (m/sec)	27.432
Coal Mean Diameter(μm)	70
Combustion Air Flow Rate (Ton/hr)	
- Primary air	404
- Secondary air	1703
Combustion Air Temperature ($^\circ\text{C}$)	Primary 70 / Secondary 355

3. 해석결과 및 고찰

3-1. 유동분포 해석결과

Fig. 2와 Fig. 3은 미분탄 분사버너의 tilting 각도가 0° 인 경우의 연소시에 보일러 내부의 유동특성을 계산한 결과들을 보여주는 그림들이다. Fig. 2는 보일러 대칭면에서의 속도벡터를 보여준다. 미분탄의 연소를 포함한 해석결과에서는 Fig. 2에서와 같이 유속이 빠른 영역이 보일러의 중심부에 위치하고 있다. 또한 보일러의 노즈 부분을 통과하는 수평단면에서 유동속도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 보일러의 하부에서 상부로 가면서 횡단면에서의 속도분포를 계산한 결과를 보여주는 그림이다. 냉간유동의 계산결과와는 달리 Fig. 3에서는 1차 및 2차공기가 분사되는 위치에서 tangential firing의 특징인 회전유동의 형태가 관찰된다.

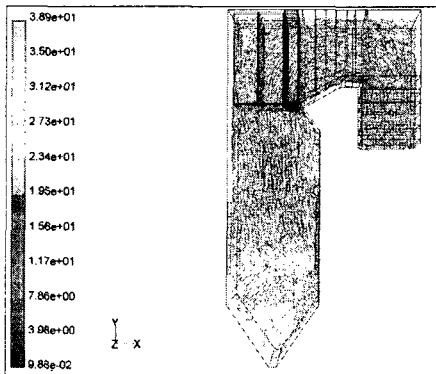


Fig. 2 보일러 대칭면의 속도벡터(m/sec)

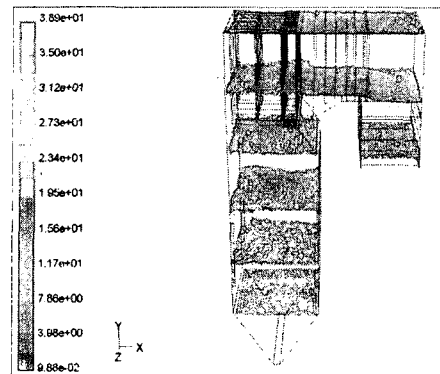


Fig. 3 보일러 횡단면의 속도벡터(m/sec)

3-1. 연소특성 해석결과 분석

Fig. 4는 온도분포를 보여주는 그림이다. 미분탄이 분사되면서 4개의 코너에서 조금 떨어진 위치에서 연소되기 시작하여 본 계산 결과는 유동에 의하여 미분탄이 중심부분에서 전반적으로 벽 쪽에 치우쳐서 고온부가 형성되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 대칭단면에서의 온도분포를 보여준다. 대칭단면에서 버너근처에서 연소가 일어나면서 보일러의 상부로 미분탄이 연소해 가면서 고온부가 생성되어 가는 과정을 관찰할 수 있다. 미분탄은 연소시에 회전하는 유동의 영향을 받으면서 연소하므로 회전 유동의 방향으로 고온부가 형성되는 것을 관찰할 수 있다.

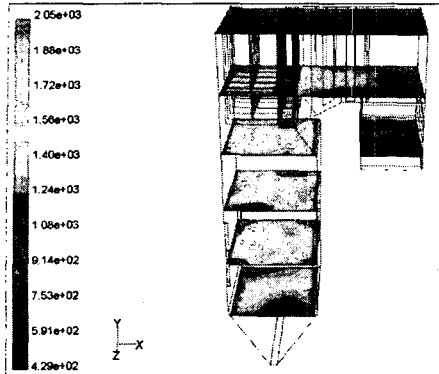


Fig. 4 보일러 횡단면의 온도분포

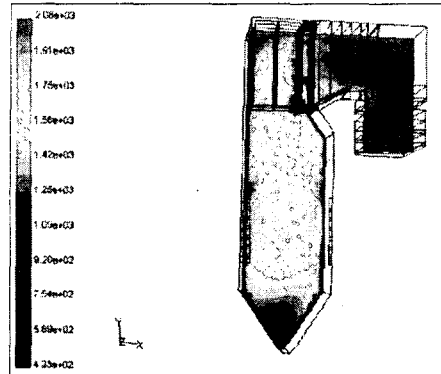


Fig. 5 보일러 대칭단면의 온도분포

Fig. 6은 물리/화학적 변화에 따라 미분탄이 연소하면서 진행되는 경로를 추적한 그림이다. 본 연구에서는 각 보일러의 각 코너별로 4개의 그룹으로 분리하고 각 그룹당 10개의 진행경로를 추적하였다. 즉, Fig. 6에는 총 40개의 궤적을 추적하여 도시하였다. 미분탄이 버너에서 분사되어 보일러내에서: 선회하면서 보일러 상부를 거쳐서 배출되는 과정까지를 볼 수 있다. 미분탄의 휘발분은 버너 근처에서 급속히 탈휘발분화 과정을 거쳐서, 확(char)의 표면연소가 진행되면서, 확의 표면연소가 완료되는 과정을 거친다.

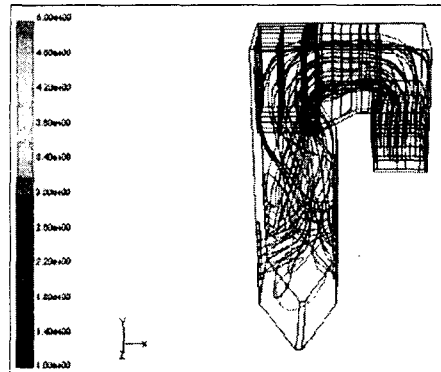


Fig. 6 연소시 미분탄 입자의 궤적

Fig. 7과 Fig. 8은 Coal 버너의 Tilting 각도를 변경한 경우의 보일러 내부의 온도 분포의 변화를 계산한 결과이다. Fig. 7은 coal 버너의 tilting 각도를 -27° 로 조절한 경우의 연소특성 해석 결과이다. 전반적인 온도분포는 coal 버너의 tilt 각도가 0° 인 Fig. 5와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 coal 버너의 tilting 각도를 상방향인 $+27^\circ$ 로 조절한 경우인 Fig. 8에서는 coal 버너의 tilt 각도가 0° 와 -27° 에 비하여 고온부 영역이 전반적으로 보일러 상부로 이동하였음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 coal 버너의 tilting 각도를 -27° 로 조절한 경우의 연소특성 해석 결과이다. 전반적인 온도분포는 coal 버너의 tilt 각도가 0° 인 Fig. 5와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 coal 버너의 tilting 각도를 상방향인 $+27^\circ$ 로 조절한 경우인 Fig. 8에서는 coal 버너의 tilt 각도가 0° 와 -27° 에 비하여 고온부 영역이 전반적으로 보일러 상부로 이동하였음을 볼 수 있다.

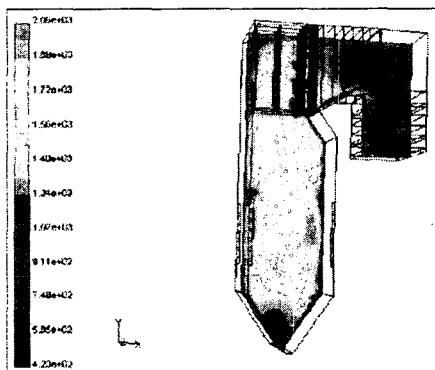


Fig. 7 보일러 대칭단면의 온도분포
(버너 tilt각도: -27°)

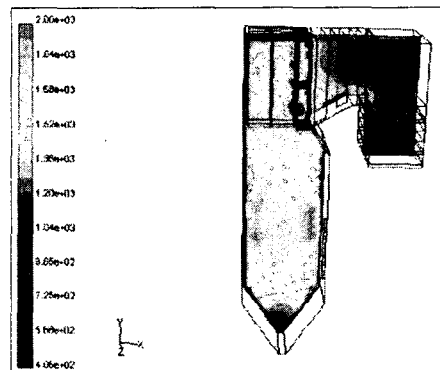


Fig. 8 보일러 대칭단면의 온도분포
(버너 tilt 각도: 27°)

Fig. 9는 Coal 버너의 tilting 각도를 -27° , 0° , $+27^\circ$ 의 3가지로 조정하였을 경우 보일러 하부에서의 높이에 따른 보일러 각 단면의 평균 온도분포를 계산한 결과이다. Tilting 각도가 -27° 와 0° 인 경우는 단면 평균온도의 변화는 거의 유사한 경향을 보이고 있지만 Coal 버너의 tilting 각도가 상방향으로 향한 $+27^\circ$ 의 3경우는 보일러 상부의 온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 전산해석 결과로부터 coal 버너의 tilting 각도를 상향 조정하면 보일러 상부의 온도를 증가시켜 보일러 수냉벽 상부와 S/H에서의 열 흡수를 증가시키는 효과가 있을 것으로 판단된다.

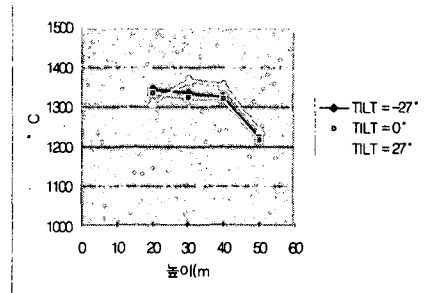


Fig. 9 버너 tilting 각도에 따른 보일러 단면별 평균온도

여기에서는 미분탄의 버너 분사 위치를 버너 A를 제외하고 B, C, D, E, F의 5개 Coal 버너를 통하여 분사한 경우를 앞에서 버너 F를 제외하고 아래에서부터 A, B, C, D, E의 5개 Coal 버너로 미분탄을 분사하여 계산한 경우와 연소특성을 비교하였다. Fig. 10은 B-F 까지의 5개 버너를 통하여 분사한 경우의 온도분포를 보여준다. 이 경우는 A-E의 5개 버너로 미분탄을 분사한 경우인 앞의 Fig. 8과 Fig. 9에 비하여 고온 부분이 상부로 이동하였음을 알 수 있다.

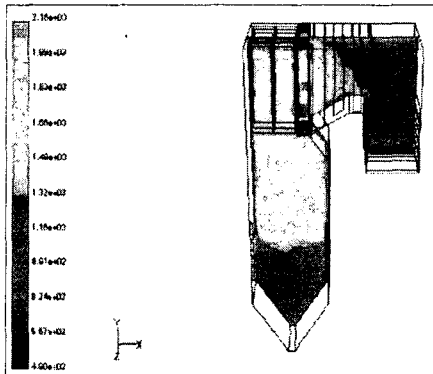


Fig. 10 보일러 대칭단면의 온도분포 (coal 버너 B-F 사용)

Fig. 11은 Coal 버너의 위치를 변경한 경우 보일러 하부에서의 높이에 따른 보일러 각 단면의 평균 온도분포를 계산한 결과이다. A-E의 5개 Coal 버너를 사용한 경우에 비하여 B-F 까지의 Coal 버너를 사용한 경우가 보일러 상부의 온도를 증가시키는 효과가 큰 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 8과 Fig. 10을 비교하면 Tilting 각도의 변경에 의한 온도 상승보다 상부의 5개 coal 버너 B-F를 사용하면 보일러 상부의 온도를 증대시키는 효과가 더 큰 것을 알 수 있다.

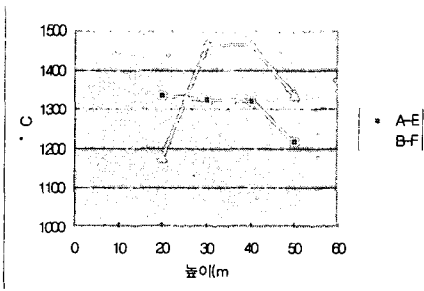


Fig. 11 버너 분사 위치에 따른 보일러 단면별 평균온도

4. 결 론

발전용 보일러를 대상으로 보일러 형상을 모델링하고 상용코드로 보일러 내부의 연소과정을 전산해석하여 보일러 내부의 유동, 온도 분포 및 미분탄 연소특성을 파악할 수 있었다. 본 연구에서 얻은 결론들을 항목별로 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구를 통하여 발전용 대형 미분탄보일러 내부의 유동, 온도 및 연소특성을 3차원으로 전산해석하는 기술을 확보하여 향후 발전소 현장에서 보일러내부의 세부 운전특성을 파악하는데 활용할 수 있도록 하였다.
2. 보일러 내의 연소과정 해석결과에서 tangential firing의 특징을 나타내는 회전유동의 형태를 보여주었으며, 원심력의 영향으로 속도가 높은 영역이 벽근처에 존재하였다.
3. 보일러 내부에서 연소과정을 해석하여 3차원 온도분포를 분석한 결과에서 Coal 버너의 tilting 각도를 0°에서 +27°로 조정한 경우가 -27°에서 0°로 조정한 경우 보다 보일러 상부의 온도 상승률을 증가시켜 S/H에서의 열흡수를 상승효과가 있음을 확인하였다.
4. Coal 버너의 분사위치를 A-E에서 B-F 위치로 상부로 변경한 경우에 보일러 상부 S/H 위치에서의 온도가 상승하였으며, 이는 coal 버너의 tilting 각도를 상향 조정한 경우보다 보일러 상부의 온도상승 효과가 높았다.

5. 참고문헌

- [1] FLUENT User's Guide, Volume 1~4, Fluent Inc., July (1998)
- [2] 화력발전소 보일러 운전지침서, 한국전력공사, 현대엔지니어링주식회사(1984)
- [3] 화력발전소 보일러 보수지침서 Vol I, 한국전력공사, 현대엔지니어링주식회사 (1984)
- [4] R. Siegel and J. R. Howell, "Thermal radiation Heat Transfer", Hemisphere Publishing Corporation, Washington D. C. (1992)
- [5] Magnussen, B.F., and Hjertager, B.H., "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th Symp. (Int'l) on Combustion, Cambridge, MA, Aug. 15-20 (1976)
- [6] Spalding, D.B., "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames", 13th Symp. (Int'l). on Combustion, The Combustion Inst., Salt Lake City, UT, Aug. 23-29 (1970)
- [7] GAMBIT User's Guide, Fluent Inc., May (1998)