

발전용 보일러 Retrofit을 위한 CFD 해석

김태형, 서상일, 김영주, 박호영, 심홍식*

한전 전력연구원 발전연구실

CFD Analysis for Retrofit of the Utility Boiler

Tae-Hyung Kim, Sang-Il Seo, Young-Ju Kim, Ho-Young Park, Hong-Shig Shim*

Power Generation Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

*Reaction Engineering International, Salt Lake City, UT, USA

1. 서론

화석연료 연소시 보일러 내에서 발생하는 질소산화물(NOx)은 대부분 NO와 NO₂이며, 일반적으로 NOx의 95% 이상은 NO 형태로 존재한다[1,2]. NO는 무색, 무취의 유독성 가스이고, NO₂는 부식성과 강한 악취를 가지며 광화학 반응을 일으키는 환경오염물질로서 황산화물(SOx)과 함께 산성비와 스모그의 주원인 물질로써 이를 저감하기 위한 많은 연구가 시도되었다[3-6].

NOx를 저감하기 위한 기술에는 연소전에 행하는 연료탈질 또는 연료교체 방법, 연소중에 행하는 연소개선 방법, 연소 후에 행하는 배연탈질 방법으로 크게 나눌 수 있으며, 현재 널리 이용되고 있는 기술은 연소중과 연소후 NOx 저감 기술로 개별적으로 적용되던 것이 NOx 배출량 규제치 강화에 따라 점점 두 기술을 동시에 적용하여 NOx 저감율을 높이고 있는 추세이다.

본 과제의 대상설비는 수십년 전에 건설되어 운영중인 발전용 보일러로 강화된 NOx 배출량 규제치를 준수하기 위해 분무노즐을 LNA(Low NOx Atomizer)로 개조하고 BOOS(Burner Out Of Service) 기술을 적용시켜 환경 규제치 이내로 유지할 수 있었던 반면에 보일러의 속용성 저하, 출력 변동률 감소, 과열기와 재열기의 온도상승, 노하부로의 화중점 이동에 따른 Hopper 과열과 하부 Slope Tube 손상, 보일러 열효율 감소 등 운전과 설비 측면에서 여러 가지 문제점을 유발시켰다. 이러한 문제점을 개선하고자 열 부하 분포 특성에서 보다 안정적인 NOx 저감 기술이 필요하게 되어 본 과제를 수행하였다.

2. CFD 해석조건

2-1 개요

전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)은 크게 구분하여 새로운 전산해석 알고리즘을 개발하고 물리적 모델을 세우는 코드 개발 분야(Algorithm Developing Part)와 전산코드를 이용하여 시뮬레이션을 한 후 그 특성을 분석하고 최적화를 예측하는 코드 응용 분야(Prediction and Control Part)로 나눌 수 있다. CFD의 장점은 경제성, 시간절감, 완전한 정보의 제공, 실제조건에 대한 해석, 이상조건에 대한 해석 등 기존의 실험으로 인한 해석보다 많은 장점을 가지고 있는 반면에 문제점도 있으므로 CFD를 사용하여 현상을 해석할 경우 해석결과에 대하여 합당성 유무를 항상 확인하여야 한다. 일반적으로 상용되고 있는 범용코드로는 FLUENT, STAR-CD, PHOENICS, CFX, FLOW-3D 등이 있으며, 해석하고자 하는 목적에 따라 전문적인 다수의 코드가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 과제의 목적을 달성하기 위해 사용된 해석 프로그램은 GLACIER이다. GLACIER는 화학적 설명능력, 화학/난류의 상호작용, 응축된 연료(고체/액체상)의 설명, 입증된 복사전열 설명능력이 뛰어나 다상(Multiple phase)에서의 반응 Flow를 다룰 때 적합한은 물론 본 과제와 유사한 실증 사례가 있어 GLACIER 프로그램을 사용하였다. 본 과제에 사용된 CFD 해석 조건은 기준조건(Baseline)인 Case 1을 포함하여 총 4가지 Case로 진행 하였다.

2-2 대상설비

본 과제는 전면연소(Front Firing) 방식의 300MW급 중유전소 발전용 보일러를 대상으로 하였고, Fig. 1과 Fig. 2에 대략적인 크기와 버너 배치를 도사하였다. 본 설비는 일반적인 중유보일러에 비해 하부 Hopper 길이가 짧아 Hopper의 기울기가 완만하고 Nose는 들출길이에 비해 높이가 짧은 특징을 가지고 있다.

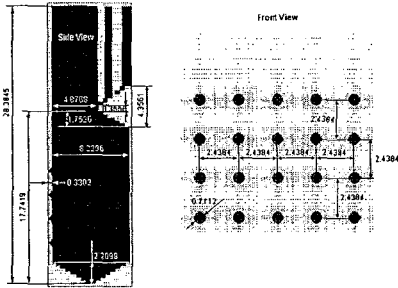


Fig. 1 보일러 측면도와 버너배치

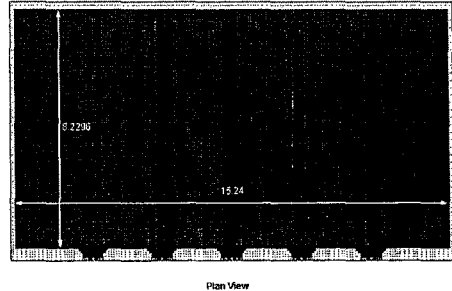


Fig. 2 보일러 평면도

2-3 입력조건

CFD 해석을 위해 사용된 버너 운전조건은 Table 1과 같고, 사용된 연료인 중유의 성상은 Table 2와 같다.

Table 1 버너 조건

항	목	단위	Case 1	Case 2~4
Oil	Temperature	℃	116	116
	Pressure	kg/cm ²	16.9	16.9
	Total flow rate	kg/s	18.867	18.867
Steam	Temperature	℃	355	355
	Pressure	kg/cm ²	7.5	10.0
	Total flow rate	kg/s	0.625	0.625
Air	Temperature	℃	325	325
	Total flow rate	kg/s	296.78	296.78

Table 2 연료성상

항목	단위	분석치
탄소	wt. %	85.50
수소		11.67
산소		0.122
질소		2.27
황		2.43
박나뭇		0.00759
비중		kg/m ³
고위발열량	kcal/kg	10,350

CFD 해석에 필요한 모든 조건을 실제 현상과 동일하게 입력할수록 그 결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있다. 그러나 현실적인 어려움으로 인해 일부 조건을 가정하여 사용하고 있으며, 가정조건의 정확성 유무에 따라 결과에 많은 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 가정조건을 사용할 때에는 많은 경험과 노하우가 필요함은 물론 적절하여야 한다. 본 해석을 위해서도 Case 1에서 닫힌 Air register 누설량 열린 Air register의 10%, 초기 Oil 분사속도 45.7m/s, 노즐 Hole에서의 분무각 15°cone, Oil 분무입자의 Sauter mean diameter(SMD) 163μm 등의 가정조건을 사용하였다.

2-3 계산조건

기준조건인 Case 1은 Fig. 1과 같이 BOOS 법을 적용하여 최 상단에 있는 5개 버너는 운전되지 않고 있으며, 운전되지 않는 5개의 버너 중에서 3개의 버너 Air register는 열려 있고 나머지 2개의 버너 Air register는 닫혀 있다.

Case 2는 Case 1의 BOOS를 사용하지 않고 모든 버너가 운전되도록 하였으며, 기존 분무노즐의 형상을 변경하고 모든 버너의 Swirler에 Air diverter를 부착하였다.

Case 3은 하단(1단) 버너들을 제외한 나머지는 Case 2와 동일한 Air diverter를 사용했다. 1 단 버너들의 Air diverter 제거 이유는 보일러 Hopper 부분의 Fuel-rich 현상을 줄이기 위한 것이다. Case 3에 추가된 내용은 보일러 Rear wall에 6개의 OFA(Over Fire Air)를 설치

한 것이며, OFA Port 한개의 크기는 0.15m(가로) × 0.62m(세로)이고 OFA에서 분출시키는 공기 속도는 50m/sec로 하였다.

Case4는 Case2부터 적용하였던 Air diverter를 2단과 3단 버너 전체와 4단 버너 2개에만 적용했다. 4단의 버너에 변화를 준 이유는 Air diverter를 쓰면서 생기는 CO 또는 연료과잉 조건을 줄이기 위한 것이다. OFA Port 크기는 Case 3보다 넓게 하여 Rear wall 쪽으로 올라가는 CO를 줄이고자 하였다. 왜냐하면 Case 3에서 OFA 공기가 연소에 적게 사용되고 곧바로 Front wall 쪽으로 진행함으로써 O₂의 효율성이 낮음을 알았기 때문이다. 따라서 OFA Port를 크게 하여 OFA에서 분사되는 O₂가 Rear wall 쪽의 연소를 촉진시켜 CO 발생량을 줄이고자 하였다.

3. CFD 해석 결과 및 고찰

3-1 분무입자 거동

Case 1에서는 10-hole 노즐과 8-hole 노즐이 혼합 사용되었는데 분무입자 거동을 비교한 결과 분무 패턴과 분무 궤적의 길이에 큰 차이는 없었다. 그러므로 2종류의 노즐을 사용하고 있더라도 노즐로 인한 화염 폭이나 화염 길이의 영향은 크지 않을 것이다.

기존 분무노즐의 분무궤적과 신규노즐의 분무궤적 특성은 Fig. 3과 Fig. 4를 비교함으로써 가능하며, 기존노즐에 비해 신규노즐의 분무궤적은 길이 편차가 적고 분무 폭이 약간 넓어지는 것으로 나타났다. Case 2는 Case 1보다 Swirling이 약간 증가하는 경향이 나타났으며, Air diverter가 swirling 되지 않는 공기를 바깥쪽으로 밀어냄으로서 Swirling 되고 있는 안쪽 공기를 보호하는 역할을 하기 때문이다. 따라서 Swirling이 즉시 상쇄되지 않고 어느 정도 유지될 하게 되지만 그 역할이 그렇게 크지는 않다.

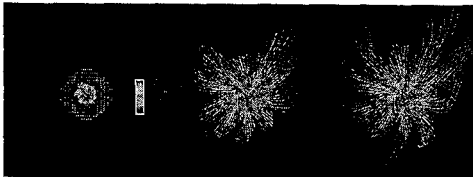


Fig. 3 Case 1 분무궤적과 산소농도

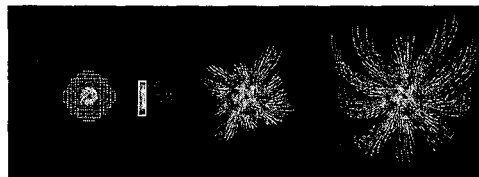


Fig. 4 Case 2 분무궤적과 산소농도

3-2 온도

CFD 해석 결과의 온도 분포는 Fig. 5~8과 같다. 각 plane에서의 가스 온도 분포를 보면 Case 1에 비해 Case 2의 화염이 넓어지고 길이가 짧아 졌다. 또한 혼합 지연으로 인해 온도가 낮아지는 결과를 보였다. Case 3과 Case 4의 가스 온도 분포를 보면 Air diverter를 쓰지 않는 버너 쪽의 온도가 높고 화염 길이도 길게 분포되는 것으로 나타났다.

각 Elevation에서 Mass-average된 온도 분포를 보면 각 Burner level에서의 온도가 Case 1에 비해 감소된 것을 알 수 있으며, 이는 혼합지연에 의한 영향으로 예상 할 수 있다. Case 2는 Case 3나 Case 4 가스 온도 분포와 약간 다른 Profile을 보였다. 하단의 경우에는 Burner stoichiometry와 Air diverter 사용유무에 따라 온도가 증가 하지만 4단으로 가면서 비슷해지고 OFA에서는 추가적인 연소용 공기가 주입되면서 온도가 감소한다. Case4의 경우 상단 버너 Level에서의 온도가 다른 조건에 비해 증가한 현상은 최 상단(4단)에 위치한 3개의 Burner에서 Air diverter를 사용하지 않아 온도가 증가한 것이다.

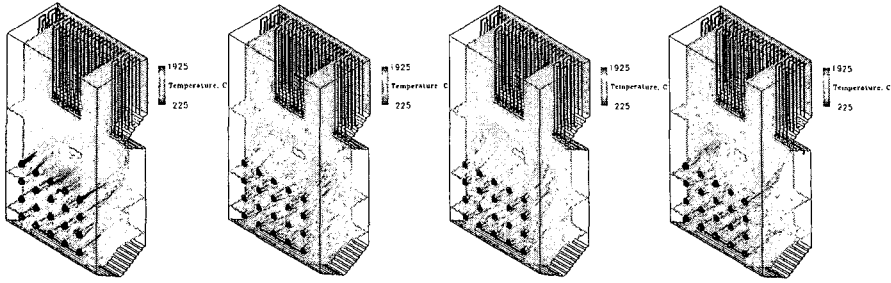


Fig. 5 Case 1 Fig. 6 Case 2 Fig. 7 Case 2 Fig. 8 Case 4

3-3 O₂

Case 1에서 1단과 3단 사이의 산소농도는 높지 않으나 4단에서 BOOS의 영향으로 매우 높은 산소 농도 영역이 발생되어 보일러 후단까지 넓게 분포되는 것을 볼 수 있다. Case 2에서는 버너와 버너 사이에서 높은 산소 농도 분포가 나타나고 Case 1과 달리 보일러의 Rear wall 쪽으로 산소가 가기보다는 보일러의 Front wall 쪽으로 몰린다. 이러한 현상은 Nose 부를 지난 이후에도 계속되고 있다. Case 3은 버너 영역에서 Case 2와 유사한 산소 농도 분포 패턴을 보이지만 OFA의 영향으로 Nose 부를 지나면서 높은 산소농도 영역이 다소 감소되고 Case 4에서 뚜렷하게 나타난다. 전체적인 버너 단별 산소농도 분포는 Air staging에 많은 영향을 보이고 있다.

3-4 CO

CO는 화염 또는 미연 성분을 포함하는 연소가스가 저온에 의해 냉각되거나, 연소에 필요한 산소농도 부족 및 반응에 필요한 충분한 체류시간이 확보되지 못한 경우 등의 원인으로 배기가스 중에 남게 되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 CO의 배출농도는 불완전연소에 의한 손실열 산출과 연소상태의 양부를 판단하는 기준으로 사용하는 보편적 요소중의 하나이다. CFD 해석 결과 버너 영역의 CO 분포는 Case 1이 매우 높고 Case가 진행됨에 따라 감소되는데 이러한 현상은 Air staging에 의한 영향이 지배적이다. Case 1에 보일러 좌측이 우측보다 CO가 높은 것은 버너의 Swirl 방향이 한 방향으로 되어 있기 때문으로 해석할 수 있다. Case 1에 비해 버너 Level의 CO는 Case2가 적지만 추가적인 Air injection이 없기에 많은 CO가 산화되지 않고 출구로 흘러감에 따라 보일러 출구의 CO가 높다. Case 2와 Case 3의 보일러 하부 CO 분포를 비교하여 보면 Case 3의 경우 낮는데 이는 Air diverter를 사용하지 않았기 때문이다. 그 이후의 각 Burner level에서는 Case 2 보다 높은 CO 값을 보이고 있는 것은 버너 Stoichiometry가 감소하여 생긴 현상으로 OFA 아래 Level까지는 Case 3의 CO가 높으나 OFA에 의한 공기가 공급되어 그 이후부터는 CO값이 낮게 나타난다.

Case 4의 경우 일부분 버너의 Air diverter를 제거함으로써 Case 3보다 최 상단(4단) 버너에서 CO 발생이 감소한다. 또한 OFA의 크기를 증가시켜 OFA의 침투깊이가 줄었음에도 불구하고 OFA level에서 후단에서 CO 값이 낮은 것은 Case 4의 OFA가 Case 3 OFA 보다 효과 측면에서 우수함을 보여 준다.

3-5 NO_x

CFD 해석 결과 Fig. 9~12에서 보듯이 NO_x 발생량은 Air diverter 설치 유무에 따라 가장 크게 차이를 보이고, 공기비도 중요한 영향을 끼치는 요소이다. 보일러 맨 하단(1단)의 Air diverter를 설치한 Case 2가 Air diverter를 제거한 Case 3보다 공기량이 많음에도 불구하고 NO_x 생성량이 거의 절반 수준으로 발생하는 것으로 미루어 Air diverter의 NO_x 저감 효과가 매우 우수함을 알 수 있다. 이는 Case 4의 4단 버너 Level에서 Air diverter를 사용한 버

너와 Air diverter를 제거한 버너를 비교함으로써 쉽게 확인이 가능하다. 그러므로 버너에 Air diverter를 사용하게 되면 NOx 저감에 매우 효과적임을 알 수 있다.

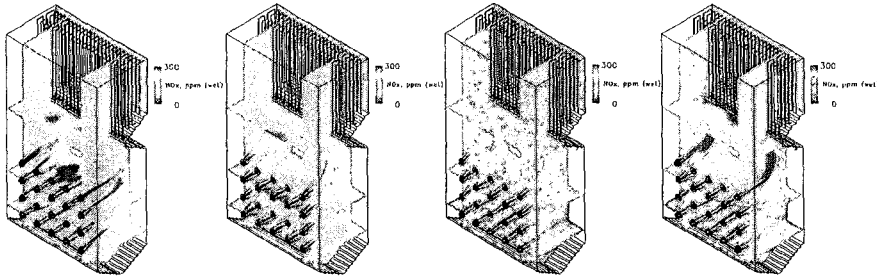


Fig. 9 Case 1 Fig. 10 Case 2 Fig. 11 Case 3 Fig. 12 Case 4

3-6 H₂S

보일러 튜브에서 발생하는 부식에는 튜브 내면에 발생하는 내면부식과 튜브의 외면에 발생하는 화염측 부식이 있다. 일반적으로 알려진 바에 따르면 유류에 의한 화염측 부식은 바나듐에 의한 것, 황(S)에 의한 것, 바나듐과 황의 혼합 작용에 의한 것이 주요 메커니즘으로 알려져 있다. 바나듐은 용융점이 낮은 Vanadate로 변환 후 보일러 튜브의 외면에 부착하여 보호 산화층을 녹임으로서 부식을 촉진시키고, 연소중 생성되는 SO₂ 가스를 부식성이 강한 SO₃로 변환되도록 하는 촉매 역할을 한다. 연료에 포함된 황은 연소중에 SO₂로 변환되지만 연료과잉(Fuel rich) 조건이 되면 부식성이 강한 H₂S로 된다. 이러한 H₂S는 Fig. 13-16에 나타난 바와 같이 Case 1과 Case 2의 경우 Hopper 부분에서 존재하고 Case 3에서는 그 양이 많이 감소되었다. Case 4에서는 Case 3와 마찬가지로 Hopper 부분의 H₂S가 많이 줄었고 Nose 윗부분의 H₂S도 상당히 줄었다. 따라서 보일러 튜브의 화염측 부식속도를 줄이기 위해서는 H₂S 발생을 저감시켜야 하나 NOx 발생량 증가에 주의하여야 한다.

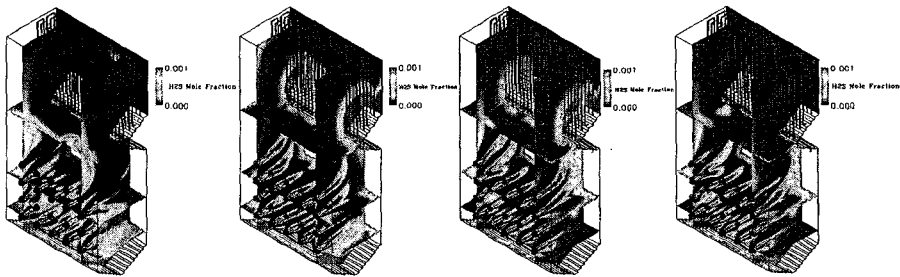


Fig. 13 Case 1 Fig. 14 Case 2 Fig. 15 Case 3 Fig. 16 Case 4

3-7 Heat Flux

기준조건인 Case 1 CFD 해석 결과 보일러 Front wall의 Local net heat flux는 최대 약 490kW/m²이고, Rear wall에서는 최대 약 560kW/m² 정도로 매우 높았다. Case 2는 Case 1보다 Front wall의 최대 Local net heat flux는 약 110kW/m² 감소되고, Rear wall에서는 약 160kW/m² 감소되었다. Case 1에 비해 그 이후의 Case에서 보일러 Front wall과 Rear wall의 Local net heat flux는 크게 줄었으나 Side wall 쪽의 Heat flux는 비슷한 값을 보였다. 보일러 Hopper 부분의 Heat flux는 Front보다 Rear 측에서 높으며, Case 1보다 그 이후의 Case에서 높은 Heat flux 영역이 감소됨을 알 수 있었다. 일반적으로 보일러 튜브의 수직 상승관에서 발생하는 비등은 쉽게 해소되지만, Hopper 부분과 같이 경사가 완만한 보일러

튜브에서 국부적인 비등이 생길 경우 인해 기포가 쉽게 깨지지 않게 되므로 그 부분의 열교환 능력을 현저히 저하시키게 되고 궁극적으로 보일러 튜브의 과열을 초래하게 된다. 그러므로 Hopper 부분의 경사가 완만할수록 높은 Heat flux 값을 보일러 튜브에 심각한 손상을 초래할 수 있다.

4. 결론

보일러 출구의 가스온도는 Case 1 보다 Case 2~4에서 6°C~18°C 정도 증가하였으나 이는 무시할 수 있을 정도의 미미한 것으로 최종 배출가스의 온도는 거의 유사할 것이다.

Case 2의 CO 양은 Case 1에 비해 상당히 증가하였다. 이는 Case 1보다 높은 버너 Stoichiometric ratio로 버너 Level의 CO 양은 줄었지만 BOOS 또는 OFA가 없기 때문에 연료와 공기의 혼합이 지연되면서 CO가 생성되고 각 버너 Level에서 생성된 CO들이 Rear wall 쪽으로 몰리면서 충분한 혼합 없이 Rear wall을 타고 보일러 출구로 흘러갔기 때문이다. Case 3에서 노출구 CO는 738ppm으로 Case 1보다는 증가하였고 Case 2보다는 감소하였다. Case 4에서 노출구의 CO는 28ppm으로 다른 Case에 비해 상당량 줄었다. Nose와 노출구의 CO값 차이에서 보는 것처럼 CO는 보일러 후단으로 갈수록 급격히 감소되므로 노출구의 CO 값이 지나치게 높지 않다면 최종적으로 배출될 때는 문제가 되지 않는다.

Case 2에서 NOx는 Case 1보다 14%정도 감소한 것은 Air diverter의 효과가 있다는 것을 증명한 것이다.

참고문헌

1. Cernansky, N. P. and Sawyer, R. F. : 15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, (1974).
2. Hayhurst, A. N. and Vince, I. M. : Progress in Energy and Combustion Science, 6 (1980).
3. R. Perman, Y. Ma and J. McGilvray : "Natural resource and environmental economics", Longman, London (1996).
4. Kramlish, J. and Linak, W. P. : Progress in Energy and Combustion Science, 20 (1994).
5. L. D. Snoot, S. C. Hill and H. Xu : Prog. Energy Combust. Sci., 24, 385 (1998)
6. R. Wilk and A. Szlek : Energy Convers. Mgmt, 39, 1957 (1998)