순환 유동층 보일러 제어

김응석, 이찬주
전력연구원 시스템통신연구소 수화력제어그룹

A Circulating Fluidized Bed Boiler Control

Kim Eung-Seok, Lee Chan-Ju
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - One of the major concerns of our time is the need to use energy economically and rationally while at the same time, protecting the environment. Circulating Fluidized Bed(CFB) Boilers represent a proven, very attractive clean coal technology, with the added advantage of an unusual fuel flexibility. CFB boiler is the best available compromise between cost and environment for fossil fuel power plant. This paper briefly describes CFB process and 200MW CFB boiler for Tonghae power plant. Also, discussed are differences between the control process of fluidized bed and conventional boilers, and applied control process for Tonghae power plant.

1. 서 론

최근 석탄화력 발전소의 기술전망은 석탄 자원이 석유나 가스자원과 달리 지역적 편재성과 매장량 한계의 문제점이 없이 널리 분포되어 있어 전 세계적으로 석탄소비의 증가가 예상되며 1980년대 이후 환경규제가 강화됨에 따라 청정석탄기술(Clean Coal Technology, CCT)의 사용이 필수적으로 요구되고 있다. 청정석탄기술은 석탄연소에 있어 환경영향을 최소화하면서 보다 효율적이고 경제적인 연소기술로서 크게 급탄의 질을 높이고 급탄과정에서 유황, 회(Ash) 및 기타 불순물을 제거하는 연소전처리기술(Precombustion), 유동층 연소 또는 저 NOx 연소기술과 같은 첨단 연소기술(Advanced Combustion), 석탄 연소후 배출가스에 함유된 이산화황(SO_2) 또는 질소산화물(NOx)을 제거하는 연소가스처리기술(Post Combustion), 연소 전에 석탄을 청정가스나 액화연료로 전환하는 변환기술(Conversion)로 구분할 수 있다. 특히 화력 발전과 관련하여 유동층 연소기술이 적용된 순환 유동층(Circulating Fluidized Bed, CFB) 보일러는 다양한 연료의 적용성 및 환경오염물질의 배출 감소, 고효율 등의 장점으로 오늘날 경제적, 환경적 측면을 모두 만족시키는 가장 매력 있는 청정석탄기술로 입증되었다. 본 고에서는 순환 유동층 보일러의 프로세스 특징을 간략히 살펴보고 현재 국내 최초로 동해화력에 건설중인 대용량(200MW) 순환유동층 보일러 프로세스 제어 구현방식에 대해 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 Fluidization

유동화(Fluidization)란 미세한 고체입자들이 기체나 액체와의 접촉을 통해 유체와 같은 상태로 동작하는 것으로서 고체입자에 작용하는 중력이 유체 항력(drag force)에 의해 제거되어 고체입자들이 semi-suspended (반부유)상태로 되어지는 것을 의미한다. 유동층 연소는 이러한 유동화 현상을 이용하여 모래(sand)와 같은 매체에 하부로부터 공기를 분사하여 유동층을 형성한 후 그 층에 연료를 공급하여 연소시키는 기술로서, 공기 속도가 증가함에 따라 유동화 영역의 전이가 Fixed bed, Particulate fludization, Bubbling regime, Slug flow, Turbulent regime, Fast fluidization순으로 이루어지며, Bubbling, Slug flow, Turbulent 영역을 유동층이라 한다. 그림 1은 gas 속도에 따른 유동층 형태 및 보일러 형식별 gas-solid flow의 상태를 나타내었다.

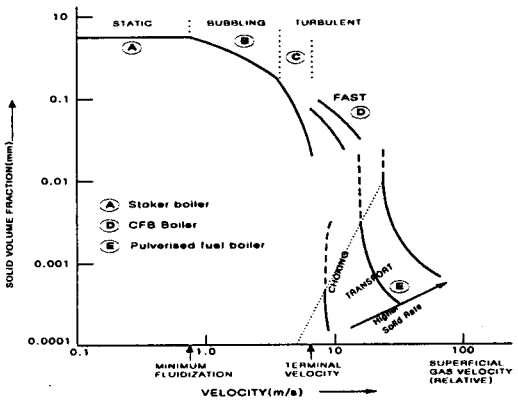

그림 1. Gas 속도에 따른 유동화상태

2.1.1 Circulating Fluidized Bed(CFB) Boiler

유동층 연소 보일러는 크게 운전압력 조건에 따라 상압식(AFBC)과 가압식(PFBC)으로 구분되며, 이들은 유동화 상태(속도)에 따라 기포상(Bubbling Bed) 보일러와 순환식(Circulating Bed)보일러로 구분되어진다. CFB 연소의 원리는 공기유속을 높게 하여 입자들의 격렬한 활동에 의해 연소가 연소로 전 범위에서 이루어지도록 하고 공기의 압력손실과 유속사이의 관계에 의해 연소로를 이탈, 이송된 고체입자들을 사이클론으로부터 연소로 내로 재 순환시켜 다시 반응하는 과정을 반복함으로서 완전연소가 가능하도록 하는 것이다.

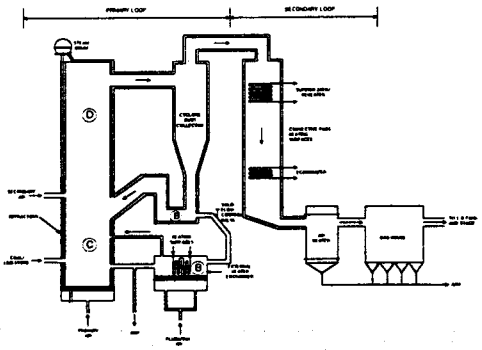

그림 2. 전형적인 CFB Boiler 개략도

2.2 Control in CFB Boiler

CFB 보일러의 연소 프로세스는 타 보일러와는 매우 다르기 때문에 제어시스템도 반드시 이러한 사실을 인식해야 한다. CFB 보일러와 타 보일러 제어시스템의 가장 중요한 차이점은 Air 공급 배열 및 Bed 온도제어에 있다. 또한, 증기 생성에 있어 FBHE(Fluidized Bed Heater Exchanger)의 설치여부에 따라 제어시스템에 많은 차이가 있다. FBHE는 plant 용량, 연료 그리고 운전모드(basic load or variable load)에 근거하여 설치여부가 결정되는데 보일러 프로세스와 관련된 combustion 제어, emissions 제어, low load operation stability, 부하제어, furnace 온도제어 등의 많은 기능을 수행하기 때문이다. 그림 3은 현재 시운전중인 동해화력 CFB 보일러의 개략도이다.

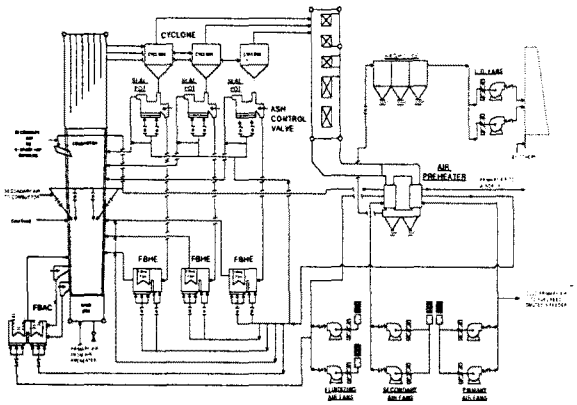

그림 3. 동해화력 CFB Boiler Flow Diagram

2.2.1 Air-Flow Control

유동층 보일러의 연소제어는 반드시 air가 유동화 공정(fluidization process) 자체를 위해 사용된다는 점을 고려해야만 한다. 특히, 저부하에서는 총 air량의 대부분이 유동화를 위해 사용되고 고부하에서는 비율이 점차적으로 줄어드므로 excess air는 plant의 전 운전범위에 걸쳐 변할 것이다. 그러므로 CFB 보일러의 air 제어루프는 이러한 특성을 고려하여 그림 4와 같이 전부하범위에 걸쳐 변하는 O_2 correction을 적용해야 한다. 또 한가지 고려할 사항은 순환 유동층의 설계특성이다. 예를 들어 동해화력의 경우처럼 좋은 NO_X 제어를 위해 유동층 하부에 공급되는 air량은 이론적 fuel/air ratio 아래로 유지되고 유동층 상부에 완전 연소를 위해 별도의 secondary air fan을 통해 air가 추가 공급되도록 설계되어 있으므로 air 제어루프는 추가 공급되는 air량이 부하별 연소개스 O_2 기준함유량에 부합되도록 제어해야만 한다.

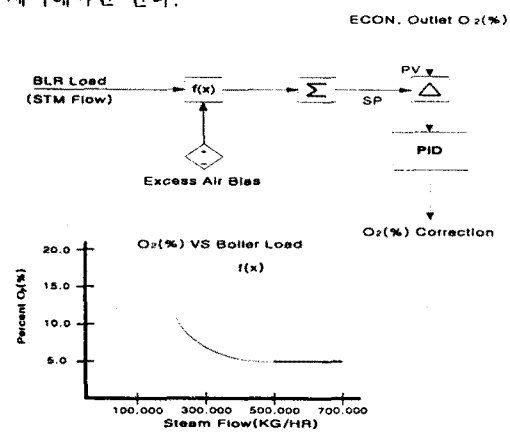

그림 4. O_2 Correction Logic(동해화력 기준)

2.2.2 Steam Temperature Control

증기온도제어는 타 보일러와 마찬가지로 spray water를 이용한 과열저감기에 의해 이루어지며 제어루프 또한 시간지연 보상을 위한 cascade 제어루프가 적용된다. 다만, 동해화력처럼 FBHE가 있는 경우 사이클론에 포집된 solids을 FBHE에 순환시켜 superheater/reheater bundle에서의 열흡수를 조정함으로서 병렬 온도제어가 가능하다. 그러나, recycle 프로세스의 매우 느린 응답특성 때문에 보일러가 steady한 상태에서만 효과적인 제어기능을 하므로 과도한 외란에 대해서는 spray water에 의한 온도 제어루프를 사용한다. 그러므로 FBHE와 과열저감기에 의해 온도제어가 병행될 경우에는 spray water controller의 setpoint를 solids flow controller 보다 높게 함으로서 solids flow controller에 priority를 주고 spray water의 소모를 최소화 시키도록 그림 5와 같이 제어루프를 구성한다.

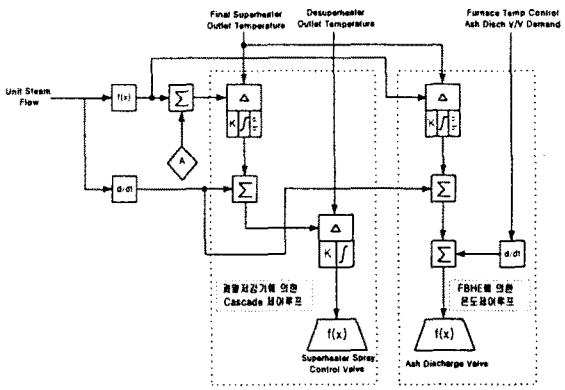

그림 5. Superheater Temp 제어로직 개략도

2.2.3 Furnace Temperature Control

전형적인 CFB 보일러의 furnace는 타 보일러와는 달리 약 850℃에서 동작하며 연소 온도는 아래와 같은 이유로 800-900℃ 범위에서 유지되어야 한다.

- Ash는 이 온도범위에서 용융되지 않는다.
- Sulfur 제거를 위한 화학반응 진행의 이상적인 온도범위가 843-877℃이다.
- 석탄의 알칼리 금속분이 이 온도범위에서는 기화되지 않기 때문에 보일러 튜브의 fouling 현상이 감소된다.
- 저온 연소에 의해 연소 air의 질소(N)분이 질소산화물(NOx)로 쉽게 변환되지 않는다.

CFB 보일러의 노내온도제어의 주목적은 연소개스의 오염물질 배출을 최소화하기 위해 노내 온도를 주어진 excess air하에서 오염물질들이 최소화되는 적정 온도(≒850℃)를 일정하게 유지하는데 있다. 즉, 부하 변동시 에너지 요구량(Boiler demand)과 공급량(Fuel feed rate)이 일시적으로 불균형이 되어 노내온도의 swing현상을 가져오는데 furnace temp 제어루프는 이러한 온도의 편차를 노내로 재 순환되는 solids의 온도를 조절함으로서 최소화한다.

Solids의 재순환에는 두가지 방법이 있는데 하나는 사이클론으로부터 seal pot의 overflow pipe를 통해 재순환하는 방법이고, 다른 방법은 superheater & reheater 온도제어와 마찬가지로 ash disch. v/v를 통해 FBHE을 통과하는 경로를 이용한 방법이다.(그림 7. 참조) FBHE을 통과하는 경우에는 내부의 evaporator, superheat, reheat surface들이 solids로 부터 많은 양의 열을 흡수하기 때문에 seal pot의 overflow pipe를 통한 solids의 온도보다 매우 낮다. 그러므로, furnace 온도는 두 경로로 재순환되는 비율을 조정함으로서 제어되는 것이다.

Furnace 온도 제어루프의 구성시 주의할 점은 제어대상이 증기온도가 아닌 연소개스 온도임을 인식해야 한

다. 즉, superheater/reheat 온도제어와는 정반대로 ash 제어밸브가 동작해야 하며 이를 위해서 PID 제어기의 pv값이 sp보다 크면 ash 제어밸브가 "close" 되지 말고 "open" 되도록 제어기의 출력을 역동작 모드로 해야만 한다.

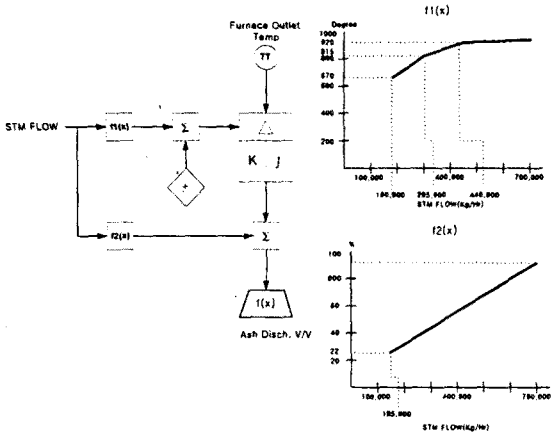

그림 6. Furnace Outlet Temp Control Log

동해화력 순환 유동층 보일러의 solids 재순환 원리를 이해하기 위해서는 solids의 수송 수단인 seal pot의 동작원리를 알아야만 한다. Seal pot는 그림 6의 b)와 같이 overflow pipe, 사이클론의 standpipe, bubbling fluidized bed로 구성된다. 동작원리는 Seal pot 하부에 fluidizing air를 공급하여 standpipe의 아랫부분에 bubbling 유동층을 형성함으로서 seal pot내의 압력이 증가하여 furnace air가 standpipe로 유입되는 것을 방지하고 seal pot를 통해 solids를 수송시키는데 필요한 hydrodynamic head와 seal pot간의 압력강하에 따라 standpipe내의 solids 높이가 조절됨으로서 solids가 노내로 재순환된다. 타 유동층 보일러에서는 seal pot 뿐만 아니라 Loop seal, L-valve, V-valve, J-valve, Reverse seal들이 사용되기도 한다.

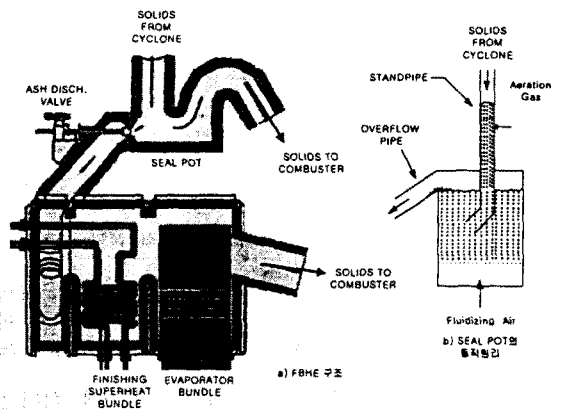

그림 7. Seal Pot, Ash Discharge Valve and Bed Heat Exchanger(FBHE)

2.2.4 Furnace ⊿P Control

Furnace 차압제어는 연소로 유동층내의 solid 질량을 적정수준으로 유지하고 solid의 크기 분배를 일정하게 유지하기 위한 목적으로 노내 하부로부터 bed material을 FBAC(Fluidized Bed Ash Cooler)로 방출하거나 bed material feed 시스템으로부터 공급받음으로서 조정된다. FBAC로 추출된 bed material중 거친 입자들은 bottom ash 시스템으로 보내지고 미세한 입자들은 fluidizing air에 의해 노내로 재순환된다.

연소로의 bed inventory가 증가하면 층(bed)압이 증가하여 seal pot로부터의 solids 재순환을 방해하므로 사이클론의 막힘을 초래할 뿐만 아니라 고르지 못한 온도분포에 의해 낮은 보일러 효율을 가져올 수도 있다.

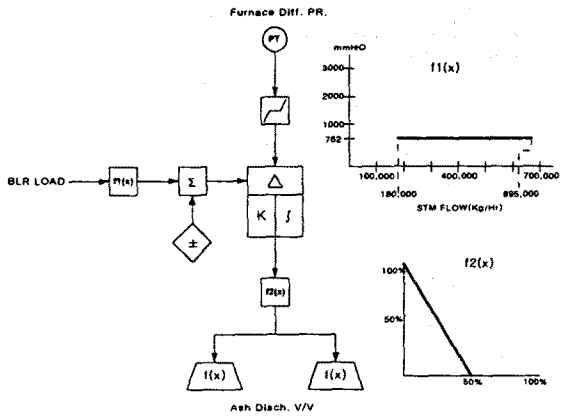

그림 8. Furnace ⊿P 제어로직

3. 결 론

본 고에서는 순환 유동층 보일러 제어시스템의 특성 및 국내 최초로 동해화력에 건설중인 대용량 순환 유동층 보일러 제어루프에 대해 고찰하였다. 순환 유동층 보일러 제어에 있어서 가장 중요한 점은 연소로내의 원활한 열전달과 층(Bed)온도의 유지를 위한 회재의 재순환 조정에 있다. 그러므로, 안정적인 재순환을 위해 층(Bed)압과 재순환부 입구 압력간의 평형상태를 유지하도록 연소로의 부하량(bed inventory)을 조정하는 것이 중요하다.

[참 고 문 헌]

[1] Prabir Basu & Scott A. Fraser, "Circulating Fluidized Bed Boilers", BH, 1st edition, pp.20-53, 112-122, 1991

[2] Richard S. Skowyra & Michael C. Tanca, "Circulating Bed Steam Generator Exoerience Overview", ABB Combustion Engineering Systems

[3] 김상돈, "유동층연소", 연소기술 워크샵, 전력연구원, pp.65-78, 1997

[4] J.R. Howard, "Fluidized Beds Combustion and Applications", Applied Science Publishers, 1st edition, pp.42-52, 1983

[5] P. Lucat & J-X. Morin & E. Guilleux, "Development of very large CFB boilers for Power stations", Stein Industrie, pp.1-7

[6] David Lindsley, "Boiler Control System", Mcgraw Hill, International edition, pp.73-78, 96-102, 1992