

300 MW 급 유동층보일러에서 적정 층 물질량 산정

김우용*, 유호선**†

*한국남동발전(주), **† 숭실대학교 기계공학과

Allowable Amount of Bed Inventory in a 300 MW Class Circulating Fluidized Bed Boiler

Woo-Yong Kim*, Ho-seon Yoo**†

* Korea South-East Power Co. Ltd, Yeosu Division 59613, Korea

**† Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

ABSTRACT : The CFB boilers technology is facing a number of challenges. Among them, boiler tube erosion, sintering by bed inventory overheating and high self consumed service power are major ones. This study was conducted to obtain allowable bed inventory with the Yeosu Power Plant, a 300 MW class CFB boiler. For the test, bed pressure was reduced from design pressure of 4.5 kPa to 2.5 kPa by reducing bed inventory, at fixed turbine output, coal consumption rate and air flow. Consequently, reducing the lower bed inventory is effective to decrease bed temperature but excessive reducing might increase bed temperature due to lack of circulating fluidized materials. Also, in case of the Yeosu Plant boiler using subbituminous coal as its primary fuel, its bed temperature change is highly affected by not only the amount of bed inventory, but also the boiler capacity and coal contents.

초 록 : 본 연구에서는 순환유동층보일러의 베드가 과열되어 층 물질의 소결이 발생하고 노 내 유동물질에 의해 보일러튜브가 마모 되는 것을 최소화하기 위하여, 노 하부 베드의 층 물질량 조절을 통한 베드 온도 변화를 실험적으로 연구하였다. 실험은 300MW급 순환유동층보일러인 여수화력 2호기를 대상으로 하였으며 터빈출력, 석탄소비량, 공기량 등을 고정한 상태에서 층 물질 양을 감소시켜 베드 압력을 설계값 4.5kPa에서 2.5kPa까지 감소시켰다. 결론적으로 층 물질 양을 적정하게 줄이면 베드 온도가 저하 되나, 지속적으로 저하되지 않는 것을 확인 하였으며, 베드 압력 3.0kPa, 즉 베드 물질량 110 톤을 변곡점으로 하여 베드 온도는 상승하기 시작하였다. 층 물질량이 충분히 많은 상태에서, 층 물질량이 감소되면 베드 온도는 저하되며, 층 물질량이 적정량 보다 적으면 노 내 유동물질의 순환량 감소로 베드 온도는 상승함을 알 수 있었다. 또한 유동층보일러에서 베드 온도 변화는 단순히 층 물질의 양 뿐만 아니라, 보일러 용량 및 연료의 성상 등에 따라 변화 추이가 매우 다양하게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

Key words : Circulating Fluidized Bed Combustion(순환유동층), Fluidized Material(유동물질), Bed Inventory(층 물질), Bed Temperature(베드 온도), Bed Pressure(베드 압력)

- 기호설명 -

W : 출력량 (MW)

T : 베드 온도 (°C)

P : 베드 압력 (kPa)

† Corresponding Author, hsyoo@ssu.ac.kr

1. 서론

순환유동층보일러는 전력생산에 있어 연료의 다양성, 미분탄 보일러 대비 낮은 연소온도로 인한 질소산화물 저감 등 상대적으로 적은 대기환경 오염물질을 배출하는 장점을 가지고 있다. 하지만 아직은 많은 기술적 문제에 직면해 있는데, 그 중에서 층 물질로 인한 노 내 전열면 튜브 마모는 특히 심각하여 보일러 이용률을 크게 저하 시키고 있다. (1) 발전 플랜트의 특성상 설비의 안정적이고 연속적인 운전이 반드시 수반되어야 하나, 튜브 보수작업을 위한 정지작업이 수반되어 이에 따른 경제적 비용 또한 발생하고 있어 튜브 마모 최소화를 위한 층 물질의 최소화는 반드시 필요하다. 이에 본 논문에서는 연소로 층 물질 (bed inventory)을 조절하여 베드 온도의 변화를 실험적으로 연구하여 300MW 급 유동층보일러의 적정한 층 물질량을 산정하였다.

2. 연구 대상

모델 발전소인 여수화력 2호기는 중유화력발전소에서 보일러 부분만 순환유동층 보일러로 개조한 것으로 2011년 9월에 준공되었으며, 순환유동층 연소, 평형통풍, 증기 드럼, 자연순환 방식을 사용하고 있다. 증기계통은 압력 17.0MPa, 주증기 540℃, 재열증기 540℃ 조건에서 운전하는 아임계압 발전 개념이며, 터빈정격출력 기준 328MW이다. 주 연료는 고수분, 고휘발분의 아역청탄으로 고위발열량 기준 4,910kcal/kg이며, 기동용 연료는 경유이다. Fig. 1에는 본 연구의 대상이 되는 여수화력 2호기 300MW 급 순환유동층보일러의 구성을 보여준다. 연소로는 폭이 8.1m, 너비가 34m, 높이 42m의 직육면체 구조이며, 분산관 위로부터 약 6m 지점에서 하단부로 18° 각도로 좁아지는 형태를 가지고 있으며, 연소실 하부는 상부 연소로의 절반의 면적을 가진 직사각형 구

조로 폭이 4.1m이며 너비는 34m이다. 연소실 하부 베드를 통하여 유동화에 필요한 공기, 석탄 및 석회석이 투입되며, 베드의 온도와 압력을 측정하기 위한 계측기 또한 이곳에 설치된다. 연소로의 벽은 수냉벽 (water cooled membrane wall)으로 제작되어 있으며 증발기 (evaporator), 날개 모양의 2차 및 최종과열기 등이 설치되어 있다. 일차공기 (primary air)는 노 하부에 위치한 윈드박스 (wind box)에서 약 5000개의 그리드 노즐을 통해 760ton/h로 노 내로 공급된다. 연소 가스는 노의 상부를 지나 원심분리기 (cyclone)로 유입되고 연소 가스에 포함된 아주 가벼운 고체입자는 최종재열기, 1차 과열기 등이 설치되어 있는 후부 대류전열면을 통과하며, 무거운 입자는 원심분리기 하부의 고체 재순환부 (loop seal)를 통하여 노 내로 재투입 된다. 노 하부에 설치되어 있는 건식저회냉각인출설비 (bed ash extraction system)는 노 바닥 드레인 배관으로부터 배출되

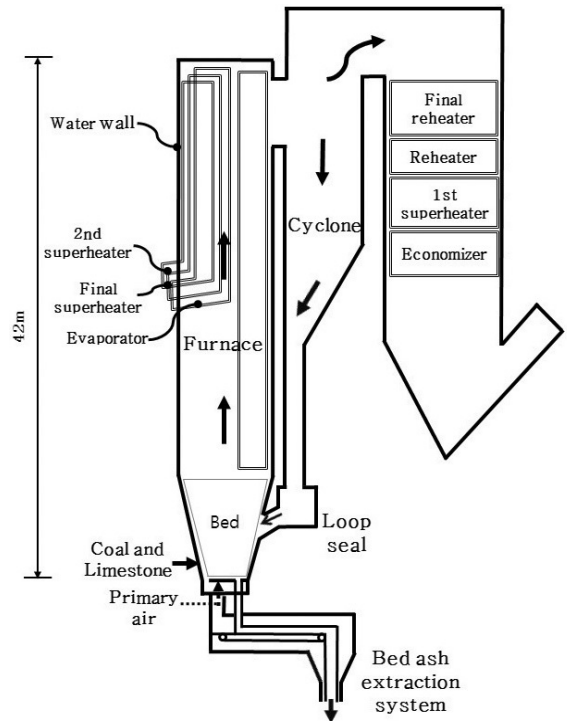


Fig. 1 Schematics of circulating fluidized bed boiler

는 베드 애쉬를 공기로 냉각하고, 컨베이어로 이송하는 역할을 하는데 주요 역할은 노 내 베드 물질의 질을 유지하고 적정량을 유지하는 것이다.

3. 실험

3.1 실험 조건

300MW 급 순환유동층보일러에 석탄분쇄기를 통과시킨 직경 10mm 이하의 아역청탄을 시간당 150ton, 직경 600mesh 이하의 석회석을 시간당 4ton으로 고정하여 투입한다. 터빈 출력은 정격보다 약간 낮은 320MW 로 유지 하였으며, 석탄의 주요 성상은 탄소 41%, 휘발분 40.5%, 애쉬 2.5% 등이다. 실험은 노 하부에 설치된 건식저회냉각인출설비(air cooled bed ash extraction system)를 사용하여 정상 운전에서의 노 하부 층 물질량인 140ton에서 10ton, 20ton, 30ton, 40ton 그리고 50ton을 감소시켜 이에 따른 베드 온도를 측정하였다.

3.2 실험 방법

1) 층 물질량의 조정

본 실험에서 베드란 노 바닥으로부터 상부 6m 까지 구간인 보일러 연소실 하부를 의미하며, 층 물질은 보일러 석탄 연소를 위하여 베드에 투입되는 석회석, 모래 및 애쉬 등을 말한다. 층 물질량은 초기 투입시 계량되는 층 물질 각각의 합을 계산하였으며, 층 물질량의 조정은 Fig. 2 와 같이 노 하부에 설치된 4 대의 건식저회냉각 인출설비를 이용하였다. 본 설비는 노 내 층 물질의 질을 유지하고, 노 내에 순환하는 층 물질이 과다한 경우 배출하여 정량을 유지토록 하는 설비로서 24 시간 연속 운전된다. 주요 설비 구성으로 스틸 컨베이어를 이용하며 레벨 및 속도 감지용 트랜스미트 등이 부착되어 있으며, 인출설비의 속도를

변경하여 층 물질 배출량을 2.8~5.5 ton/h 로 조정하였다. 운전원 제어실에서 배출량에 따른 베드 압력을 모니터링 하였으며, 운전 감시의 효율성을 기하기 위하여 층 물질량 조정은 베드 압력을 기준으로 진행하였다. 베드 압력 측정 지점은 노 바닥 기준 상부 0.25m 이며, 실험 압력은 4.5kPa 에서 시작하여 4.0, 3.5, 3.0 그리고 2.5kPa 로 감소시켜 진행하였다. 층 물질량과 베드 압력의 상관관계는 베드 압력 4.5kPa에 해당되는 층 물질량은 140ton이며, 층 물질을 10ton씩 감소시킬 때 베드 압력은 0.5kPa 만큼 저하되었다. 노 내 유동 물질의 원활한 유지를 위하여 분말 석회석은 4ton/h 공급되었고, 실험 기간 동안 공기 유량 및 기타 운전조건은 고정하였다. 터빈출력은 정격보다 약간 낮은 320MW 부하에서 시행하였다. Table 1은 소비탄의 연료 성상이다. 휘발분 40.5%, 애쉬는 2.5% 등이다. 인출되는 회는 외부에서 별도로 공급되는 공기(injection air)에 의해 열교환후 냉각되어 배출된다.

2) 베드 온도 측정

유동층보일러의 일반적 운전온도는 850~900℃이며 전 부하에서 실제 운전온도는 약 820~920℃의 범위에서 운전될 수 있으나, 기존의 미분탄 보일러 연소온도인 1000~1200℃ 대비 상당히 낮은 온도이다. 여수화력의 베드 온도는 노 바닥에 설치되어 있는 12개의 열전대를 이용하여 운전원 제어실에서 감시를 하고 있으며, 노 바닥

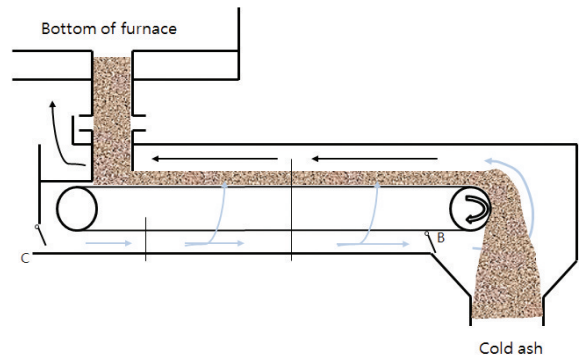


Fig. 2 Schematic of cooled air bed ash extraction system.

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of coal

proximate analysis		ultimate analysis	
component	weight(%)	component	weight(%)
moisture	15.3	C	69.8
ash	2.5	H	4.9
volatile matter	40.5	O	21.0
fixed carbon	41.7	N	1.0
HHV : 4,910 kcal/kg		S	0.3

으로 부터 상부 약 1000mm, 3000mm 를 포함한 각 부위에 노 내부 온도를 측정하기 위한 계측기가 설치되어 있다. 노 내 온도중 베드 온도가 가장 높은 것을 감안하여, 운전 중 베드 애쉬의 샘플링을 주기적으로 실시하여 소결(sintering) 현상이 발견되지 않으면, 베드가 과열되지 않은 것으로 판단할 수 있다. 베드온도가 경고치 이상으로 과도하게 상승하는 경우 기본적으로 제어시스템에서 자동으로 일차공기 유량을 증가시켜서 베드 온도를 낮추게 되며, 베드 온도 제어의 보조 수단으로 가스재순환 팬이 설치되어 있어 베드 온도가 과도하게 상승시, 가스재순환 팬이 운전된다. 인출 설비로 회를 배출한 후 모든 운전조건이 충분히 안정된 상태에서 베드 온도를 측정하였으며, 각 열전대에서 측정된 온도의 평균 온도를 베드 온도로 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1 실험 결과

베드 층 물질량 조절에 따른 베드 온도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 정상 운전조건에서의 층 물질량인 140ton에서 10ton을 저하시킨 130ton 일 때 베드 온도는 7℃만큼 낮아져서 893℃가 되었다. 추가적으로 10ton을 저하시키자 베드 온도는 점점 낮아지며 베드 압력이 3.0kPa, 즉 층 물질량 110ton 일 때 877℃로 가장 낮았다. 이처럼

층 물질량을 140ton에서 110ton으로 저하시킬 때 베드 온도가 낮아지는 경향을 보였으나 10ton을 더 감소시켜 100ton이 되자 베드 온도는 더 이상 낮아지지 않고 877℃에서 7℃ 상승하여 884℃가 되었다.

일반적으로 연료량과 총 공기량이 일정한 상태에서 층 물질량을 줄이면 유동 물질의 순환량 감소로 베드 온도는 상승할 수도 있으며, (2-3) Gao 등(4-5)의 연구 결과와 같이 층 물질량 감소에 무관하게 노 하부 베드로 유입되는 일차공기에 의해 베드 온도가 저하 될 수도 있다.

본 실험에서는 층 물질량을 140 ton에서 110ton으로 감소시킬 때, 일차공기 송풍기의 정압은 감소하고 송풍량이 증가함에 따라, 유동물질의 부상활동이 증가하고, 이에 따른 노 내 열교환량 증가로 베드 온도가 저하 되었으며, 층 물질량을 110ton에서 100ton으로 감소시킬 때에는 노 내 유동물질의 부족으로 인하여 베드에서 보일러

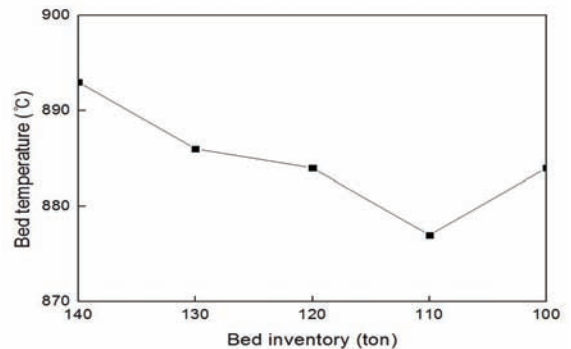


Fig. 3 Bed temperature profile with bed inventory

수냉벽 측으로 열교환량이 감소하면서 베드 온도가 상승됨을 알 수 있었다.

4-2 고찰

유동층보일러의 노 내 순환 유동물질에 의한 보일러 튜브 마모 저감을 위해서는 노 하부 층 물질량의 최소화가 반드시 필요하나, 층 물질의 지나친 감소는 일반적으로 유동물질의 순환량 감소를 초래하여 베드 온도가 상승될 수도 있으므로 적정 베드 물질량의 유지가 반드시 필요하다.(3) 300MW 급 여수화력 유동층 보일러의 적정 층 물질량 산정을 위하여 베드 압력을 설계값 4.5kPa에서 2.5kPa 까지 감소시켜, 베드 온도 변화를 조사한 결과 베드 압력 3.0kPa 에 해당되는 층 물질량 110ton에서 베드 온도가 877℃ 로 가장 낮았다.

그러나 추가적으로 베드 압력을 감소 시켜 2.5 kPa 에서 베드 온도는 더 이상 낮아지지 않고 오히려 상승함을 알 수 있었다. Yang 등(2) 의 연구에서는 베드 압력 감소 시 베드 온도가 서서히 증가하다, 일정 베드 압력 보다 낮아지면 베드 온도가 감소되는 특이한 결과를 나타내었다. 연구에 언급된 보일러 증발량은 75ton/h 으로 여수화력 보일러 증발량 970ton/h 대비 아주 소용량이며, 석탄의 성상도 아역청탄을 주 연료로 하는 여수화력과 매우 상이한, 회분은 무려 40%, 휘발분은 14% 에 불과한 역청탄 계열로서 실험 결과를 단순하게 여수화력 보일러 특성과 비교함은 적절치 않은 것으로 판단된다.

따라서 유동층 보일러에서 층 물질량 감소시 베드 온도는 상승 혹은 저하 될 수 있으나 그 변화가 항상 일정한 패턴으로 나타나는 것은 아니며, 석탄의 성상, 보일러 용량에 따른 전열면 배치 및 보일러 기동 초기 층 물질 주입량 등의 다양한 조건들에 의해 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다. 여수화력의 경우 석탄의 회분이 매우 적고, 휘발분은 매우 높아 상업운전 이후 적정한 층 물질량 확인 및 베드 온도 유지에 많은 어려움이 있었으나,

본 연구를 통하여 베드 압력 3.0kPa 에 해당되는 층 물질량 110톤이 여수화력 유동층 보일러 튜브 마모에 결정적인 역할을 하는 층 물질량의 최소 운전점을 확인할 수 있었다. 아울러, 본 연구는 현재 남동발전에서 시운전중인 여수화력 1호기 운전 참고자료로서 큰 활용도가 있을 것으로 기대되며, 아울러 향후 연구 과제로서 석탄의 발열량, 휘발분 및 입도 등이 베드 온도에 미치는 영향을 조사할 계획이다.

5. 결론

본 논문은 여수화력 2호기 아역청탄 전소 순환 유동층보일러를 대상으로 출력 320MW에서 베드애쉬인출설비를 이용하여 노 하부 층 물질량을 설계값 140ton에서 100ton까지 저하시켜, 베드 온도의 변화를 감안한 적정 층 물질량을 분석하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 층 물질량을 140ton에서 110ton으로 줄이면 일차송풍기에 의한 송풍량 증가 효과로 베드 온도가 저하되며, 층 물질량을 110ton에서 100ton으로 줄이면 노 내 유동물질의 부족으로 베드 온도는 상승 하였다.
- (2) 노 하부 베드 온도가 층 물질량 110ton(베드 압력 3.0kPa)에서 가장 낮은 점을 감안하여, 300MW급 여수화력 유동층보일러의 적정 층 물질량은 110ton 임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Xuemin liu, et al, 2015, Effect of furnace pressure drop on heat transfer in a 135 MW CFB boiler, Powder technology, vol 284, pp. 21-22
2. Hairui Yang, et al, 2009, Effect of bed

- prssure drop on performance of a CFB boiler, Energy & Fuels, Vol 23, pp. 2886–2890
3. Jun Su, et al, 2010, Design and Operation of CFB Boilers with Low Inventory, Proceeding of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion
 4. Gao Jian-qian, et al, 2005, Analysis on the Bed Temperature Characteristics of 450T/H Circulating Fluidized Bed Boiler, Proceeding of the 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion
 5. Prabir Basu, et al, 2016, A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers, Applied Thermal Engineering, vol 102, pp. 672–694
 6. Prabir Basu, 2006, Combustion and gasification in a fluidized beds, Taylor & Francis Group 