

석탄화력발전소의 재열저감수 저감방안

김형덕, 고철균*, 문승재**†

한국서부발전, *(주)리우스, **한양대학교 기계공학부

Reduction of the Reheater Spray for Coal Fired Thermal Power Plant

Hyung-Deok Kim, Churl-Kyun Koh*, Seung-Jae Moon**†

Korea Western Power Co., Ltd., Seoul 135-984, Korea

*Lee Woos Co., Ltd., Seong-Nam, 462-721, Korea

**School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received May 13, 2013; revision received May 21, 2013)

초록 : 최근 발전회사들은 연료비 절감 방안으로 석탄화력발전소의 연료로 저열량탄 사용을 확대하고 있다. 하지만, 저열량탄 사용으로 비용절감이라는 장점을 가져오는 반면, 발열량이 낮은 탄종 연소 시 터빈에 공급되는 증기온도보다 높은 온도의 연소가스량 증가로 인한 대류열전달이 증가되어 재열기 온도 상승을 초래하게 되었다. 재열기 온도 상승은 재열기 튜브 피로증가와 발전소 효율 저하요인인 재열저감수 사용의 결과를 가져오게 된다. 따라서 재열기 출구온도와 관계된 운전변수들을 분석하여 재열기 출구온도를 적정하게 유지하여 재열저감수 사용량을 절감할 수 있는 방안에 관하여 논하였다.

ABSTRACT : When four operation parameters are adjusted, the temperature of reheater steam is around the designed operator temperature and the decrease of reheater spray flow rate is achieved. As a result, the decrease of thermal efficiency also can be prevented. To keep the reheater exit temperature on the designed value and decrease the use of reheater spray flow rate, the control of four operation parameters is considered and applied in the operation of a thermal power plant.

Key words : reheater(재열기), spray water(재열저감수), efficiency(효율), burner tilt(버너틸트)

- 기호설명 -

- H_f : 열소비율 [kcal/kWh]
- E_p : 발전기에서 생산되는 전력량 [kWh]
- q_c : 보일러 노내로 들어가는 연료연소열 [kcal]
- T_R : 재열증기 온도 [°C]
- Q_R : 재열저감수량 [ton/h]

1. 서론

발전회사에 의하면 올해 국내 석탄화력발전소의 저열량탄 사용량은 전체 유연탄 사용량 중 60%에 달할 것으로 전망하고 있다. 지난해 발전회사의 저열량탄 사용 비중은 50 ~ 55%, 구매량 비중은 50 ~ 55% 사이로 저열량탄 구매를 계속 늘리고 있는 상황이다.

하지만 이러한 저열량탄 사용으로 연료구매 비용절감이라는 장점을 가져오는 반면 부수적인 추가비용이 발생하게 되었다. 그 예로 회용점이 낮은 탄종 연소 시 보일러 내부 수냉벽의 슬래깅 발생으로 보일러 열전달이 불량해지고 또한 심한 압력 변동의 원인이 된다. 그리고, 발열량이

† Corresponding author
Tel. +82-2-2220-0450; Fax +82-2-2220-2299
E-mail address: smoon@hanyang.ac.kr

석탄화력발전소의 재열저감수 저감방안

낮은 탄중 연소 시 더 많은 양의 석탄이 투입되고 그에 따라 더 많은 연소공기량이 필요하게 된다. 이 연소공기량이 연소 후 증기온도보다 높은 온도의 연소가스 유량이 증가하여 대류열전달이 증가되고, 재열기 온도 상승을 초래하게 된다. 재열기 온도 상승은 재열기 튜브 열화로 인한 손상을 가져오고, 발전소 열효율 저하요인인 재열저감수 사용량의 결과를 가져오게 된다. 태안화력 제1 ~ 4호기 100% 정격출력 운전 시 재열저감수 공급량은 시간당 0톤으로 설계가 되어 있으나 현재 정상운전중 시간당 0 ~ 10톤 가량의 재열저감수가 공급되고 있어 발전소 효율저하를 가져오고 있다. 따라서, 재열기 출구온도와 관계된 운전변수들을 분석하여 재열기 출구온도를 적정하게 유지하여 재열저감수 사용량을 절감할 수 있는 방안이 필요하다.

2. 재열저감수 사용이 발전소에 미치는 영향

2.1 재열저감수 사용과 재열기와의 관계

재열증기 온도가 상승하는 요인으로는 최근 저열량탄 사용에 따른 연료공급량의 증가를 들 수 있다. 연료공급량이 증가하면 연소공기량이 따라 증가하게 되고 이것은 곧 보일러 내에서 연소 후 연소가스량 증가로 이어지게 된다. 연소가스량 증가에 따라 대류열전달이 활발히 이루어져 재열증기 온도의 상승을 초래하게 된다. Table 1은 재열증기 온도 증감이 터빈 효율과 발전소 전체 효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서, 재열증기 온도가 2℃ 상승하게 되면 터빈효율은 0.06% 상승하게 되고, 발전소 전체 효율 또한 0.06% 상승하게 되는 것을 나타내고 있다.

Table 1 Efficiency change due to reheated steam temperature change⁽¹⁾

Reheater temperature, T_r [°C]	-4	-2	0	+2	+4
Reheater efficiency, η_r [%]	-0.13	-0.06	0	+0.06	+0.13
Reheater efficiency, η_p [%]	-0.12	-0.06	0	+0.06	+0.12

재열기 출구의 증기온도를 가급적 높게 유지하면 할수록 효율이 상승되어 많은 전력을 생산할 수 있으나, 금속이 지나치게 높은 온도에서 견디지 못하므로 541℃ 증기온도를 유지하도록 설계되어 있다. 증기온도가 설계치를 초과하는 온도에서 운전하면 보일러 튜브의 열화를 촉진할 우려가 있고 반대로 온도가 너무 낮으면 효율저하는 물론, 저압터빈 마지막 단의 부식을 촉진할 뿐 아니라 심할 경우에는 터빈 진동을 유발할 수 있다. 따라서, 적정 온도로 유지하기 위하여 재열증기 온도 제어는 일차적으로 버너 킬트 즉, 버너 화염분사각도로써 제어되며 큰 외란에 따른 급격한 온도 변화에 대비하여 재열저감수 주입이 2차 보호용으로 사용된다.

태안 4호기에 설치되어 있는 버너 화염분사각도 조절은 보일러 각 4개의 코너에 설치되어 상·하 30°로 움직인다. 재열기 온도 증감에 따라 버너 화염분사각도 상·하 각도를 자동 조절한다. 재열기 온도 상승 시 재열저감수 주입에 선행하여 버너 화염분사각도를 하향 조정한다.

현재 재열증기 온도 539℃ 초과 시 버너 화염분사각도를 하향 조정하여 제어하고, 그럼에도 불구하고 재열증기 온도가 541℃를 초과하게 되면 재열저감수가 공급될 수 있으나 원칙적으로 시간당 0톤을 유지하는 것이 효율적이며 기본설계치 또한 시간당 0톤으로 설계되어졌다.⁽²⁾

2.2 재열저감수 사용과 효율과의 관계

재열저감수(spray water) 사용은 반환열의 증가를 가져와 열소비율이 증가하게 된다. 이것은 곧 열소비율의 역수 관계인 발전소 효율을 떨어뜨리는 영향을 가져오는 것이

Table 2 Efficiency change due to reheater spray flow⁽¹⁾

Reheater spray, Q_s , [ton/h]	0	0.5	1.0	1.5
Reheater efficiency, η_r [%]	0	-0.0025	-0.0049	-0.0074
Reheater efficiency, η_p [%]	0	-0.0022	-0.0044	-0.0066

다. Table 2는 재열저감수 사용량에 따른 터빈 효율과 발전소 전체 효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서, 재열저감수량 시간당 1.0톤 사용 시 터빈 효율은 0.0049% 감소하고 발전소 전체 효율은 0.0044% 감소하는 것을 나타낸다.

3. 운전변수 조절에 의한 재열저감수 사용량 변화

3.1 버너 팁의 동작속도 향상 후 사용량

재열기 출구온도 상승 시 버너 화염분사각도를 조절하기 위하여 가장 먼저 동작하게 되는 버너 팁의 운전설정치를 변경하는 경우를 분석해 보았다. 버너 상·하 각도는 재열기 온도증가에 따라 조정한다. 재열기 온도 상승 시 1차적으로 버너 화염분사각도를 조절하고 2차적으로 재열저감수를 주입하여 온도를 설정치 범위 이내로 제어할 수 있게 설계되어 있다. 따라서, 버너 팁의 동작속도 지연은 재열저감수 주입량의 증가원인으로 작용한다. 버너 화염분사각도의 조절 속도가 빠를수록 재열기 온도의 상승을 막고 재열저감수 사용량도 감소할 수 있다고 판단된다. 버너 화염분사각도 조절의 속응성 향상은, 재열저감수 감소효과는 있으나 과도한 동작은 오히려 온도 제어 불량과 노내 화염불안정을 유발할 수 있다는 판단하에 노내 화염 분포를 안정적으로 유지하면서 버너 화염분사각도의 조절 속

도를 증가시키기 위하여 화염분사각 동작속도의 비레이득 설정치를 0.9에서 1.3으로 변경하여 Fig. 1과 같은 데이터를 얻었다.

여기서 비레이득은 입력변화량에 대한 출력변화량으로서, 비레이득을 높여주면 그만큼 동작속도가 증가하게 된다. 비레이득을 0.9에서 1.3으로 높여 +30°에서 -30°까지 200초 만에 움직이던 설정치를 120초 만에 동작하도록 변경 후 약 30분간 운전데이터를 취득하였고, 변경 전, 같은 기간에 재열기 출구온도와 재열저감수 사용량을 비교하였다. 그 결과, 재열저감수 사용량은 평균 시간당 5.38톤에서 시간당 4.28톤으로 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 버너 화염분사각도의 조절 속도를 개선하였을 때 재열기 출구온도 안정에 효과가 있으며 재열저감수 사용량의 감소로 효율을 향상시킬 수 있다는 결과를 얻었다.

3.2 버너 팁의 동작 설정온도 강하 후 사용량

재열기 출구온도 상승 시 재열저감수 주입에 선행하여 버너 화염분사각도를 하향 30°로 조정하게 되어있다. 539℃ 초과 시 버너 화염분사각도를 하향 조정하고 그럼에도 불구하고 재열기 출구온도가 계속해서 상승 추세일 때 재열저감수를 주입하게 되어 있다. 따라서 버너 화염분사각이 동작하는 버너 팁의 동작온도 설정치를 낮추었을 때 재열기 출구온도 상승 시에 재열기 출구온도를 낮추는데 효과가 있을 것으로 판단하여 동작온도 설정치를 539℃에서 538.5℃로 낮추어 데이터를 분석하였다. 버너 화염분사각 하향 동작온도 설정치를 더 많이 낮출수록 재열기 온도를 낮추는데 더 효과가 있을 것으로 예상되지만 재열기 온도가 기준치에 훨씬 밀들게 되면 재열기 출구온도의 감소에 따른 효율감소가 우려되기 때문에 0.5℃만을 낮추어 운전하였다.

그 결과, Fig. 2를 보면 재열저감수 사용량은 평균 시간당 5.38톤에서 시간당 3.69톤으로 줄어드는 것으로 나타났다. 이것은 버너 화염분사각의 동작온도 설정치를 539℃에서 538.5℃로 낮추어 기존보다 선행하여 동작하도록 변경하였을 때 재열저감수 사용량은 약 시간당 1.75톤이 줄어들었음을 나타내는 것이다. 따라서 이 데이터 또한 재열기 출구온도 안정에 효과가 있으며 재열저감수 사용량의 감소로 효율을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

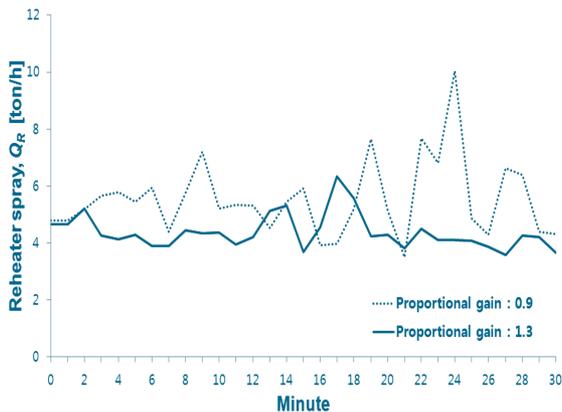


Fig. 1 Comparison of reheater spray flow after changing proportional gain

석탄화력발전소의 재열저감수 저감방안

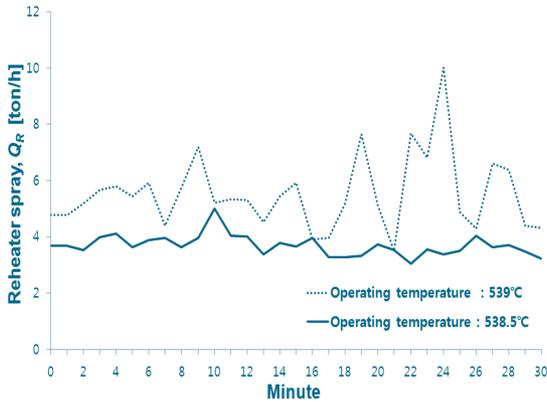


Fig. 2 Comparison of reheater spray flow after changing operating temperature of burner tilt

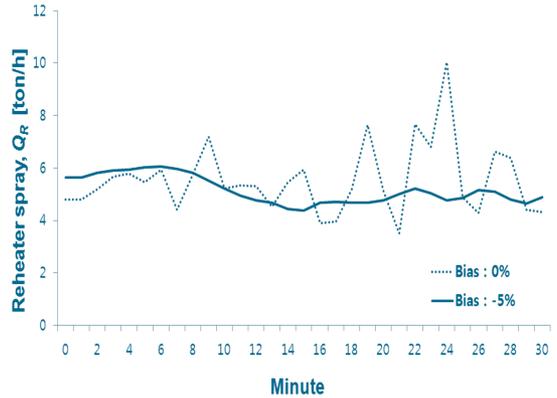


Fig. 3 Comparison of reheater spray flow after changing coal supply rate at the top pulverizer

3.3 미분기 상단버너의 연료공급량 감소 후 사용량

석탄화력보일러에서 연료공급은 6대의 미분기로 공급되어진다. 미분기는 석탄을 연소에 적합한 크기로 분쇄하는 설비로 연소실 동일 높이의 4개 코너에 설치되어진 버너에 연료를 공급하여 노내 중앙의 가상원(fire ball)에 대하여 원주 방향으로 분사시켜 화염이 노 전체에 큰 와류를 형성하면서 연료를 연소시킨다. 보통 버너는 3 ~ 6개 층에 걸쳐 설치되어지며, 6대의 미분기는 아래에서부터 A, B, C, D, E, F로 구성되어 있으며, 정상운전 시 5대의 미분기(A, B, C, D, E)가 균등한 양의 유연탄을 공급받아 보일러에 연료를 분쇄하여 공급하며 가장 상단에 있는 F번은 예비기기로 사용된다. 상층부로 갈수록 재열기와 근접하게 되어 재열기 근처에서 연소가 이루어지게 되고, 이것은 미연탄소 발생 및 재열기 출구온도 상승에 직접적인 영향으로 작용하게 된다. 따라서 운전 중인 미분기 5대 중에 상층부 미분기 운전부하가 최소가 되도록 바이어스(bias) 조정운전을 시행하여 운전데이터를 분석하여 보았다. 바이어스 조정운전이란 제어되는 운전값을 미세하게 조정하는 것이다. 정상운전 중 5대의 미분기는 탄종에 따라 다르지만 각각 평균 시간당 40톤, 총 시간당 200톤 가량을 공급하고 있다. 이 운전 상태를 가장 상층부에 있는 미분기 E번의 부하를 바이어스 조정하여 약 시간당 5톤의 양을 줄여 나머지 4개의 미분기에 동일하게 분산·운전되도록 하는 것이다.

Fig. 3을 보면 재열저감수 사용량은 평균 시간당 5.38톤에서 시간당 5.04톤으로 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 상층부 미분기 부하량을 바이어스 조정하여 보일러 상부에서 연소되는 양을 줄였을 때 재열저감수 사용량은 약 시간당 0.34톤이 줄어드는 것으로 나타났다.

3.4 연소공기량 감소 후 사용량

보일러 노내에 공급되는 실제 공기량은 완전연소를 위하여 이론 공기량보다 많은 공기를 공급한다. 이 여분으로 유입되는 공기량은 완전연소에는 도움이 되지만 그 양이 많으면 연소가스량이 늘어나게 되어 배기가스의 잠열 및 현열에 의한 열손실이 증가되기도 한다. 이 논문에서 다루고 있는 재열증기 온도와의 관계를 살펴보면 연소공기량이 증가함에 따라 연소가스량이 증가하게 되고 터빈에 공급되는 증기온도보다 높은 온도의 연소가스량이 증가함으로 대류열전달에 의한 보일러 노내 열전달이 과다하게 활발해져 재열증기 온도 상승을 초래하게 된다. 설계온도보다 높은 재열증기 온도 상승은 곧 재열저감수 사용량을 증가시켜 열손실을 가져오게 되는 것이다. 연소공기량을 과다하게 줄이게 되면 불완전연소에 의하여 미연탄소 손실이 증가하게 되어 열손실을 가져오므로 미연탄소분이 증가하지 않는 한도에서 연소공기량을 줄여볼 필요가 있다. O₂ 바이어스 조정은 보일러 노내에서 연소 후 배기되는 연소가스 중의 O₂의 함유량을 미세하게 조정하는 운전변수

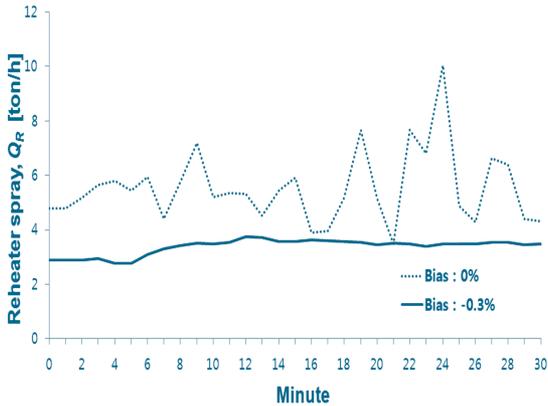


Fig. 4 Comparison of reheater spray flow after changing the combustion air flow rate

로써 배기가스 중의 O_2 바이어스를 줄여 O_2 함유량을 줄이게 되면 최초 유입되는 연소공기량을 줄여주는 역할을 하게 된다.

O_2 바이어스 조정운전을 0%에서 -0.3%로 조정하여 운전데이터를 분석한 결과 Fig. 4와 같이 재열저감수 사용량은 평균 시간당 5.38톤에서 시간당 3.43톤으로 줄어드는 것으로 나타났다. 이것은 배기가스 중의 O_2 함유량을 줄여주는 운전변수를 이용한 것으로, 재열저감수 사용량은 약 시간당 1.95톤이 줄어들었다. 이 데이터는 지금까지 운전변수를 조절한 후 얻은 결과 중에 가장 안정되고 가장 많은 양의 재열저감수량 또한 재열기 출구온도 안정에 효과가 있으며 재열저감수 사용량의 감소로 효율을 향상시킬 수 있다는 것을 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 재열기 출구온도 유지와 관계된 운전변수 중 4가지를 선택하여 그 설정값을 변경하여 재열저감수 사용량의 변화에 대하여 분석한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 4가지의 운전변수를 각각 조정하였을 때 재열증기 온도는 설계치인 $541^{\circ}C$ 에서 안정적으로 유지하고, 평균 시간당 1.28톤의 재열저감수 사용량을 줄여 열효율 저하를 막을 수 있었다.

둘째, 재열저감수 절감 효과는 연소공기량 조절이 가장 큰 양을 절감하였으며, 버너 화염분사각을 조절하는 버너 팁의 동작온도 설정치를 변경한 경우, 버너 팁의 동작 속도를 향상하였을 경우, 상부 미분기 부하를 조정하는 순으로 효과를 가져왔다. 따라서 향후 저열량탄 사용량 증가에 의한 재열저감수 과다 주입 시 열효율 저하를 막기 위하여 4가지의 운전변수 조절을 검토·적용하여야 한다.

참고문헌

1. 전력연구원, 2006, 터빈 성능분석 매뉴얼, pp. 210-238.
2. 한국중공업, 1995, 태안 1 ~ 4호기 보일러 공급계약서 II, p. 44, p. 321.
3. Kim, H. D, 2012, Reduction of the Reheater Spray for a Coal Fired Thermal Power Plant, MS thesis, Hanyang University, Seoul, Korea.