

대형 석탄화력 발전소에서 통풍계통 안정화를 위한 과잉공기비 조정

박건우*, 유호선**†

*한국남동발전(주), **† 숭실대학교 기계공학과

Adjustment of the Excess Air Ratio for Stabilizing the Draft System in a Large Capacity Coal Fired Power Plant

Kun Woo Park*, Ho-Seon Yoo**†

* Korea South East Power Corp., Jinju 52852, Korea

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

Key words : Air Pre-Heater(공기에열기), Excess Air Ratio(과잉공기비), Pressure Drop(압력강하), Boiler Efficiency(보일러효율), Induced Draft Fan First Stall Margin(유인송풍기 1차 실속 여유)

ABSTRACT : In this study, I analyzed the effects on stabilizing the draft system, boiler efficiency when changing excess air ratio under 870 MW load limit operation condition in a large capacity coal fired power plant and decided optimum excess air ratio. It is positively necessary to choose adequate excess air ratio for stabilizing draft system because air pre-heater pressure drop and induced draft fan first stall margin are changing when adjusting excess air ratio. This study therefore, measured air pre-heater pressure drop, induced draft fan first stall margin, boiler efficiency, loss and has chosen adequate excess air ratio adjusting excess air ratio from 1,153 to 1,127. So it is recommended that the operation point needs to be changed to 1,127 that is not only to decrease air pre-heater pressure drop and to stabilize draft system and to secure stall margin but also to maintain boiler efficiency to equivalent level.

초 록 : 본 연구에서는 870 MW 대형 석탄화력 발전소에서 출력을 고정시키고 과잉공기비 조정만으로 통풍계통 안정 및 보일러 효율에 어떠한 변화가 있는지를 분석하였으며 이에 따른 적정 과잉공기비를 선정하였다. 과잉공기비 조정에 따라 공기에열기 압력강하, 유인송풍기 실속여유 등이 변하므로 통풍계통 안정화를 위해 적정 과잉공기비 선정은 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 과잉공기비를 통상 운전 값인 1,153에서 운전지침서상의 하한 값인 1,127까지 단계적으로 조정하여 공기에열기 압력강하, 유인송풍기 1차 실속여유, 보일러 효율, 각종 손실 등을 측정하였고 보일러 효율도 동등수준 이상으로 유지하면서 통풍계통도 위험수준에서 안전하게 이격시켜 안정화에 기여할 수 있는 적정 과잉공기비를 선정하였다. 적정 과잉공기비는 운전지침서 상의 하한 값인 1,127까지 낮추어 운전하는 것이 바람직하다고 판단된다.

- 기호설명 -

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| B : 부가적 입열 (kcal/kg) | L_g : 건 배기가스 손실 (kcal/kg(Fuel)) |
| C_u : 연료 1kg당의 미연탄소량 (kcal/kg) | ΔL : 열손실 보정 (kcal/kg) |
| H_f : 연료의 화학적 연소열 (kcal/kg) | L_{uc} : 미연탄소 손실 (kcal/kg(Fuel)) |
| k : 비열비 | m : 과잉공기비 |
| η_B : 보일러 효율 (%) | Y : 비에너지 (Nm/kg) |

† Corresponding Author, hsyoo@ssu.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

현재 우리나라에서 운영중인 석탄화력 발전소는 국내 전체 발전량의 39.1% (2014년도 기준)를 차지하고 있으며[8] 그 중에서 영흥화력 5호기는 2014년에 준공된 870 MW 급의 대항류 보일러 유연탄 전소 발전소로서 고위발열량 기준 5,400 kcal/kg으로 설계되었다.

하지만 영흥화력 5호기는 수도권 대기배출 총량제 지정사업소로서 대기환경보전법 기준 배출량 초과 시 발전소 조업 정지 및 발전설비 허가 취소, 부과금 발생 등의 문제점을 가지고 있고 국제연료시장의 수급 불균형과 발전원가 절감을 위한 저품질위탄 혼소가 불가피 하기 됨에 따라 설계대비 통풍계통 운전이 가혹한 환경에서 이루어지고 있는 실정이다.

또한 공기에열기 열 소자 사양도 열효율은 높지만 압력강하에는 취약한 사양으로 설계되어 있고 저품질위탄이 혼소되면서 NO_x 규제치 준수를 위해 암모니아를 과다하게 주입하는 경향이 나타나고 있다.

이에 따라 공기에열기 막힘현상 및 공기에열기 압력강하 문제가 필연적으로 발생하고 통풍계통 실속발생 때문에 출력까지도 2~3 MW 감소해서 운전하며 공기에열기 수 세정을 위해 발전소를 정지하는 상황까지 벌어지고 있다. 실제로 본 연구를 위한 시험을 하기전 공기에열기 막힘 및 압력강하 현상, 유인송풍기 실속 현상 등으로 발전기를 정지하고 공기에열기 수세를 한 사례가 존재한다.

과잉공기비를 조정하여 보일러 연소생성물에 어떠한 영향이 있는지는 기존에 많은 연구가 수행되었지만[1] 보일러 효율 및 안정운전도 유지하면서 과잉공기비를 조정하여 통풍계통 안정화의 목적을 이루는 이번 연구는 상당히 의미가 있다 할 수 있다.

1.2 연구 내용

2014년 8월에 준공된 영흥화력 5호기를 기준으로 공기에열기 압력강하 및 통풍계통 실속을 유발하는 많은 요인 중 과잉공기비를 통상 운전치에서 순차적으로 낮추어 조정하며 공기에열기 압력강하 감소 및 유인송풍기 실속에 어떠한 변화가 있는지를 분석하였다.

또한 과잉공기비 변경에 따른 건 배기가스 손실, 미연탄소 손실, 열 손실법을 이용한 보일러 효율을 측정 및 계산하여 보일러 안정운전 및 통풍계통 안정화, 발전소 운영의 효율성을 고려한 최적의 과잉공기비를 제시하고자 한다. 첫째, 과잉공기비를 조정하였을 때 공기에열기 압력강하 및 유인송풍기 1차실속에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 시험 출력은 870 MW로 선정 하였고 과잉공기비 조정은 통상 운전 값인 1.153에서부터 중간 값인 1.140, 운전 지침서 상의 하한 값인 1.127로 낮추며 2시간씩 진행 하였다. 둘째, 과잉공기비 조정을 통하여 건 배기가스 손실, 미연탄소 손실을 개별적으로 측정 및 계산하였다. 도출된 개별적 시험결과를 토대로 과잉공기비 조정이 건 배기가스 손실, 미연탄소 손실과 어떠한 관계가 있는지 이론적으로 연구 하였다. 셋째, 과잉공기비 조정을 했을 때 보일러 효율이 어떻게 변하는지 측정 및 계산하였다. 도출된 시험결과를 토대로 압력강하가 최소가 되며 보일러 안정운전에 저해가 안 되는 범위에서 보일러 효율도 처음의 상태와 동등수준으로 유지할 수 있는 최적의 과잉공기비를 선정하였다.

2. 과잉공기비의 영향

2.1 공기에열기 압력강하

공기에열기 가스 측 압력강하는 입구가스압력과 출구가스압력의 차이를 말하며 이론적으로 공기

예열기 내부 유체흐름의 압력강하는 공기에열기를 통과하는 유량의 제곱에 비례하여 변화[7] 한다. 연료를 완전연소 시키기 위해서는 이론공기량만으로 불가능하며 이보다 많은 공기가 필요한데 이를 과잉공기라 한다. 이론 공기량에 대한 실제 공기량의 비를 과잉공기비[4]라 하고 으로 나타내며 다음과 같이 표시한다.

$$m = \frac{A}{A_o} \quad (1)$$

2.2 유인송풍기 실속

석탄화력 발전소의 축류형 송풍기에서 실속 현상은 운전 중 입, 출구의 통로 장애로 유체 흐름이 원활하지 못하면 체적유량의 감소와 함께 비에너지가 증가하며 유체흐름에 맥동이 발생하여 송풍기가 진동하거나 송풍기의 날개에 손상을 일으킨다. 축류형 송풍기의 실속원인은 송풍기의 입구 또는 출구 댐퍼가 ash의 누적 등으로 막혀 송풍기 동익의 개도와 비교하여 유량의 흐름이 지나치게 적고 비에너지가 커지는 경우에 발생하며 통풍덕트 내부단면적 감소, 공기에열기 열소자 막힘, 배기가스 통로에 ash 누적 등으로 막힘 등의 원인에 의해 발생한다. 송풍기 실속 발생 시에 나타나는 현상은 모터 전류 변동, 송풍기 housing 진동 증가, 풍량, 풍압 불안정, 실속이 발생한 송풍기의 부하감소로 상대 송풍기의 pitch blade 증가[5] 등이 있다. 비에너지는 송풍기에 의해 기체에 가해진 엔탈피로서 송풍기에 의한 압력상승의 크기를 나타내는 것으로 송풍기 분야에서 흔히 사용하고 있다.[3] 유인송풍기의 비에너지는 다음과 같이 표시한다.

$$Y = \frac{k}{k-1} \times R \times T \times \left[\left(\frac{P_{t2}}{P_{t1}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ [Nm/kg]} \quad (2)$$

2.3 보일러 효율

보일러 효율은 통상적으로 열손실법을 사용하여

산정하고 식 (2-3)로 표시한다. 열손실법은 오차가 적고 신뢰성이 좋으며 비용이 적게 든다는 장점이 있다. 또한 정밀도가 높고 시험결과를 손실항목별로 설계 성능과 비교하기가 용이하다.[6] 보일러 효율은 다음과 같이 표시한다.

$$\eta_B = 1 - \frac{L \pm \Delta L}{H_f + B_e} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

보일러 열손실은 미연탄소 손실, 건 배기가스 손실, 연료중의 수분 손실, 연소공기중의 수분 손실, 연료중의 수소 연소에 의한 수분 손실, 미 측정 손실로 나타낼 수 있으며 본 논문에서는 과잉공기비 조정에 의해 영향을 받는 미연탄소 손실 및 건 배기가스 손실만 논하도록 하겠다.

2.3.1 미연탄소 손실

석탄에 함유된 탄소가 완전 연소를 하지 못하고 그 중 일부가 미연상태로 배출됨으로써 미연탄소만큼의 발열량만큼 유효열량이 감소되어 발생하는 보일러 손실[6]을 의미한다. 연료의 성상 및 연소설비, 과잉공기비 및 석탄의 미분도등이 미연탄소 손실에 영향을 주며 식 다음과 같이 표시한다.

$$L_{uc} = 8,056 \times C_u \text{ [kcal/kg(fuel)]} \quad (4)$$

2.3.2 건 배기가스 손실

보일러에서 배출되는 배기가스는 건 배기가스와 습분이 혼합된 습 배기가스로 구분 할 수 있는데 이중 습분을 제외한 건 배기가스에 의해 발생하는 손실로 감열에 의한 손실[6]이다. 과잉공기비, 공기에열기 누설, 배기가스 온도, 외기온도 등에 영향을 받고 다음과 같이 표시한다.

$$L_g = W_g \times C_p \times (T_{go} - T_{ra}) \text{ [kcal/kg(fuel)]} \quad (5)$$

3. 과잉공기비의 조정 시험결과 및 고찰

3.1 시험조건

시험 대상설비인 영흥화력 5호기는 수입 유연탄을 주 연료로 사용하며 자연순환형, 초초 임계압 관류형, 평형통풍, 미분탄 보일러와 직렬배열 4 Flow 재열 복수식 터빈으로 설계된 870 MW 급 발전설비이다.

주요 특성은 Table 3-1과 같다. 증발량은 터빈 최대 연속출력 기준 2,519.8 t/h이며 주 증기 압력은 254.13 kgf/cm², 주 증기 온도는 569 °C, 재열증기 압력은 44.233 kgf/cm²이다. 영흥화력 5호기 보일러 과잉공기비 조정시험은 2016년 1월 18일부터 1월21일까지 통상 운전 값인 1.153, 중간 값 1.140, 운전 지침서 상의 하한 값인 1.127로 조정하며 공기에열기 가스 측 압력강하, 보일러 효율, 유인송풍기 1차 실속여유 등을 측정하기 위해 총 3회에 걸쳐 시험하였다. 대상 보일러 통풍설비 개략도는 Fig. 3-1과 같다.

Fig. 3-1에서 PSH는 Platen Superheater, PRH는 Primary Reheater, FSH는 Final Superheater, FRH는 Final Reheater, ECO는 Economizer, SCR은 Selective Catalytic Reduction, FDF은 Forced Draft Fan, IDF은 Induced Draft Fan을 의미한다.

Table3-1 Thespecificationofboiler in Yeongheung unit 5

Item	Unit	Description
Boiler type	-	Ultra supercritical Counterflow firing Balanced draft
Evaporation	t/h	2,519.8 at TMCR*
Main steam pressure	kgf/cm ²	254.13 at TMCR
Main steam temperature	°C	569
Reheat steam pressure	kgf/cm ²	44.233 at TMCR

* TMCR : Turbine Maximum Continuous Rating

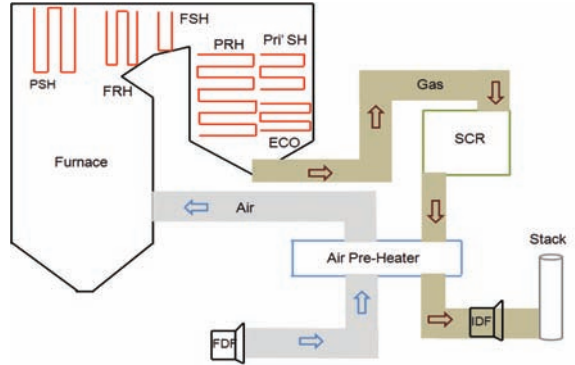


Fig. 3-1 The schematic drawing of draft system

3.2 과잉공기비 조정 및 시험결과

과잉공기비 조정은 발전단 기준 출력을 870 MW로 고정시킨 상태에서 과잉공기비를 통상 운전 값인 1.153에서 운전 지침서 상의 하한 값인 1.127까지 2시간 간격으로 3회에 걸쳐 조정 하면서 공기에열기 가스압력 강하 및 보일러 효율, 유인송풍기 1차 실속 여유를 분석하였다.

Fig. 3-2는 과잉공기비 조정에 의한 공기에열기 압력강하를 나타내는 차트이다. 차트의 가로축은 시간, 세로축은 과잉공기비 조정에 따른 공기에열기 가스 측 압력강하를 나타낸다. 시험결과 공기에열기 가스 측 압력강하는 과잉공기비를 1.153에서 1.127로 감소 조정 시 공기에열기 압력강하도 1.62 kPa에서 1.54 kPa로 저감되었다.

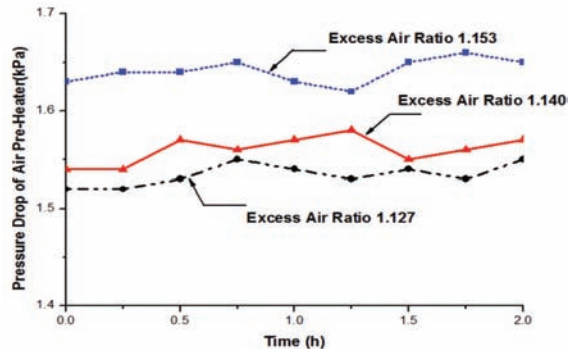


Fig. 3-2 Trend of air pre-heater pressure drop by changing excess air ratio

대형 석탄화력 발전소에서 통풍계통 안정화를 위한 과잉공기비 조정

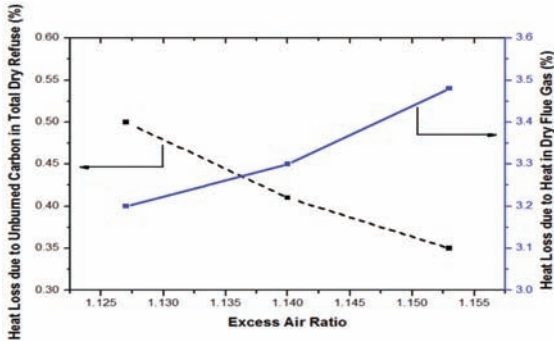


Fig. 3-3 Trend of unburned carbon loss and dry flue gas loss by changing excess air ratio

Fig. 3-3은 과잉공기비 조정에 의한 건 배기가스 손실, 미연탄소 손실을 나타내는 차트이다. 가로축은 과잉공기비, 세로축은 과잉공기비 조정에 따른 건 배기가스 손실, 미연탄소 손실을 나타낸다. 시험결과 건 배기가스 손실은 과잉공기비가 1.153일 때 3.48%로 가장 높음을 알 수 있었고 미연탄소 손실은 과잉공기비가 1.127일 때 0.5%로 가장 높음을 알 수 있었다.

Fig. 3-4는 과잉공기비 조정에 의한 보일러 효율을 나타내는 차트이다. 가로축은 과잉공기비, 세로축은 과잉공기비 조정에 따른 보일러 효율을 나타낸다. 시험결과 보일러 효율은 과잉공기비 조정에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 3-5는 과잉공기비 조정에 의한 유인송풍기 1차 실속여유를 나타내는 차트이다. 유인송풍

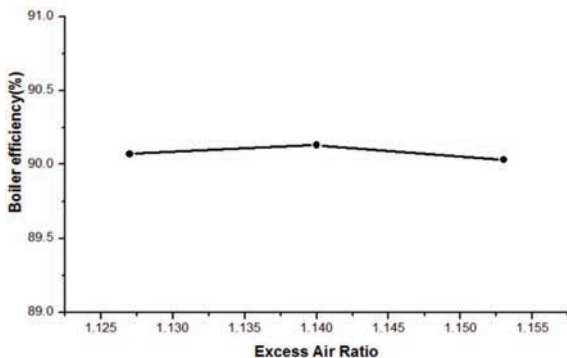


Fig. 3-4 Trend of boiler efficiency by changing excess air ratio

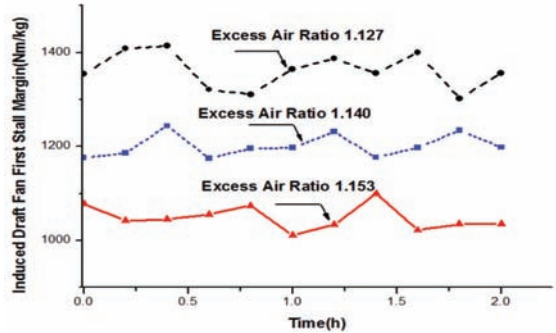


Fig. 3-5 Trend of induced draft fan first stall margin by changing excess air ratio

기 1차 실속여유는 과잉공기비가 1.153일 때 평균 1,036 Nm/kg으로 가장 낮음을 알 수 있었고 과잉공기비가 1.127일 때 1,356 Nm/kg로 가장 높음을 알 수 있었다. 이는 과잉공기비가 작을수록 공기에열기 압력강하가 작아지고 1차 실속여유를 확보하면서 통풍계통 안정화에 기여 한다고 볼 수 있다.

3.2 적정 과잉공기비 선정

과잉공기비를 통상 운전 값인 1.153에서 운전 지침서 상의 하한 값인 1.127까지 단계적으로 감소시킨 결과 공기에열기 가스 측 압력강하는 1.62 kPa에서 1.54 kPa로 저감되었다.

또한 보일러 효율은 중간 값인 과잉공기비 1.140일 때 90.13%로 가장 높지만 과잉공기비가 1.127일 때에도 과잉 공기비 1.153일 때의 보일러 효율 90.03% 보다 소폭 상승한 90.07%이기 때문에 공기에열기 압력강하의 목적 및 통풍계통 안전운전의 목적을 달성하고 보일러 효율도 전과 동등수준으로 유지하며 보일러 폭발을 방지하는 최저 하한선까지 고려한 최적의 과잉공기비는 운전지침서 상의 하한 값인 1.127이라고 판단된다.

Fig. 3-6은 과잉공기비 조정에 따른 유인송풍기 1차 실속 여유를 나타낸 실속곡선이다. 차트의 가로축은 가스유량, 세로축은 비에너지를 나타내

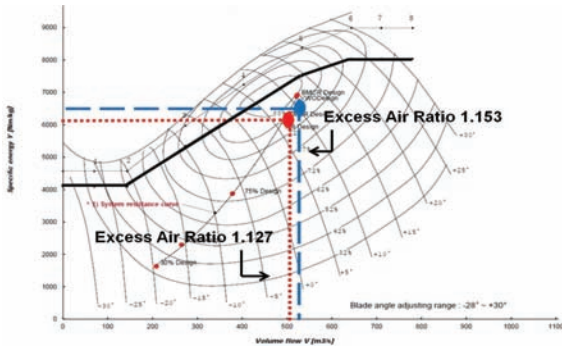


Fig. 3-6 The stall curve of induced draft fan by changing excess air ratio

며 과잉공기비가 1.153 일 때는 1차 실속여유가 1,036 Nm/kg이고 과잉공기비가 1.127 일 때는 1차 실속여유가 1,356Nm/kg이다. 이는 과잉공기비를 1.153에서 1.127로 낮추면 유인송풍기 1차 실속여유를 약 320Nm/kg을 확보함으로써 1차 실속조건과 더욱 멀어져 통풍계통 안정화에 기여함을 의미한다.

3. 결론

본 연구는 870 MW급 석탄화력 발전소를 대상으로 통풍계통 안정화를 위하여 일정한 출력조건에서 과잉공기비를 통상 운전 값인 1.153, 운전지침서 상의 하한 값 1.127, 중간 값인 1.140 3개 값으로 조정 하면서 공기에열기 압력강하, 보일러 효율, 보일러 주요 손실, 통풍계통 실속 등을 측정하였다. 과잉공기비 조정이 통풍계통에 미치는 영향을 종합적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 과잉공기비를 통상 운전 값에서 하한값으로 감소시켰을 때 공기에열기 압력강하는 공기에열기 수세조건인 2.4 kPa에서 더욱 멀어짐을 확인하였고 유인송풍기 실속여유도 확보됨으로써 보일러 통풍계통 안정화에 도움 되었다.
2. 보일러 효율은 과잉공기비를 통상 운전 값에서

하한 값으로 감소시켰을 때 동등수준으로 큰 차이를 보이지 않았고 공기에열기 압력강하는 수세조건에는 현저히 미달되었다. 또한 유인송풍기 실속 조건과도 안전하게 이격됨으로써 이를 종합적으로 고려했을 때 과잉공기비를 운전지침서 상의 하한 값인 1.127로 조정 하는 것이 타당하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Byungchang Son, 2014, Effects of variation in Excess Air Ratio on Combustion By-Products of Boiler to Coal Fire Power Plant, Master's Degree, Hanyang University, No. 1, pp. 1~7.
- (2) Minsoo Park, 2014, Reduction of Nitrogen Oxides Generation by Adjusting Combustion Conditions in a 350 MW Oil-Fired Power Plant, Master's Degree, Hanyang University, pp. 1~7.
- (3) Youngkyun Kim, 2012, Prediction of the Occuring Time of Stall for a Booster Fan in a Power Plant Combusting Low Quality Coal, Master's Degree, Hanyang University, pp. 5~6.
- (4) Jongdo Kim, 2007, Combustion Management, KPLI, pp. 34~44.
- (5) Jaekwon Kang, 2011, The Practice of Power Plant, KPLI, pp. 108~110.
- (6) Jongdo Kim, 2007, The Efficiency of Power Plant, KPLI, pp. 166~178.
- (7) Byungchul Park, 2016, The report of Performance Test in Yeongheung unit 5 KEPCO, pp. 2~7
- (8) Dongchul Lee, 2015, The Seventh Power Supply Master Plan, Ministry of Trade, Industry and Energy, pp. 1~4. 