

석탄 화력발전소 연소공기량 제어 동특성 개선방안

(Dynamic Response Improvement Method for Combustion Air Flow Control in Coal Fired Power Plant)

유광명*

(Kwang-Myung Yu)

Abstract

When controlling combustion air flow in coal fired power plant the furnace safety must be considered first prior to plant efficiency. therefore it is very important to set air flow demand exactly for safe operation and maintenance. This paper analyze air flow control loop in power plant and introduce the method to improve dynamic response time. Simulation result shows this scheme is adoptable and provide better performance.

Key Words : Boiler Air Flow Control, Trim Logic, Power Plant Control, Boiler O_2 Control

1. 서 론

1.1 화력발전소 연소공기량 제어 개요

보일러 제어루프는 최 상부 유니트 마스터(Unit Master)에서 원하는 발전소 출력이 설정되고 그에 따른 보일러 출력 설정을 보일러 마스터(Boiler Master)에서 담당하여 급수(Feed Water), 연료(Fuel Master), 공기(Air Master)계통에 각각의 설정을 보내게 된다[1].

특히 공기 제어 계통에서는 그림 2와 같이 Boiler Master Demand 입력에 따른 $F(X)$ 블록의 Look Up Table 출력을 부하에 대한 연소공기량 설정 값 또는

요구량(Air Flow Demand)으로 선정한다[2-3].

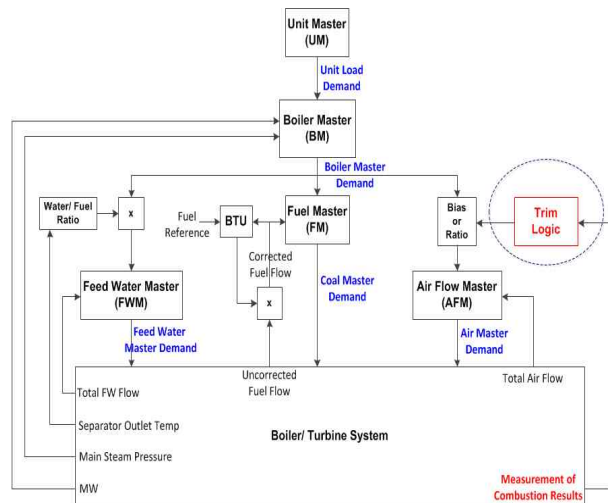


그림 1. 석탄 화력발전소 상위 제어루프 개념도
 Fig. 1. Unit master control loop in coal fired power plant

* 주저자 : 한전전력연구원 일반연구원
 Tel : 042-865-5656, Fax : 042-865-5609
 E-mail : kmyu@kepco.co.kr
 접수일자 : 2012년 6월 10일
 1차심사 : 2012년 6월 13일, 2차심사 : 2012년 6월 27일
 심사완료 : 2012년 7월 9일

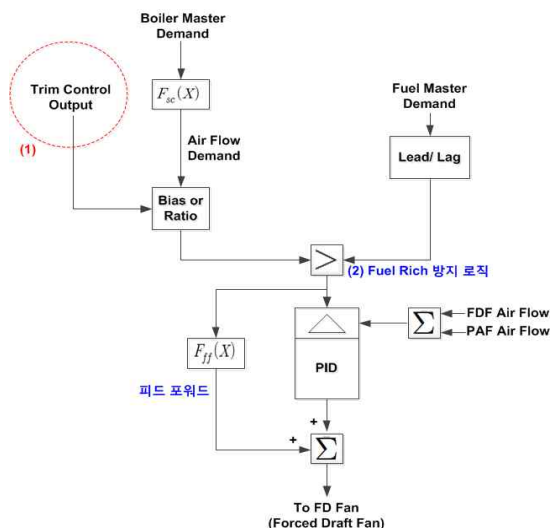


그림 2. 석탄 화력발전소 연소공기량 제어루프
Fig. 2. Air flow control loop for coal fired power plant

그림 2의 연소공기량 제어루프를 살펴보면 설정 값은 앞에서 언급한 바와 같이 Boiler Master Demand의 함수임을 알 수가 있다. 이 Boiler Master 출력을 위한 연료대비 요구되는 연소공기량 설정을 반영한 $F(X)$ 함수를 통과한 값이 Air Flow Demand가 된다. 이 값은 연소 반응의 결과를 관찰하여 공기량 설정 값을 보상하는 Trim 회로를 통과하여 최적의 공기량 설정 값을 가지도록 보완되며 부하가 증가하거나 감소하는 과도상태에서 공급 연료량이 연소에 필요한 공기량보다 일시적으로 많아져서 노 내 불안정을 초래하는 상태를 방지하기 위한 Fuel Rich 방지회로를 거친 후에 최종적으로 제어기의 설정 값으로 입력된다. 또한 일반적으로 제어출력 이외에 응답속도 개선을 위하여 선행제어(Feed Forward) 신호도 함께 사용된다. 이 값은 압입 송풍기(Forced Draft Fan, FDF) 블레이드 개도 조절 신호로 작용하여 연소공기량 조절을 수행한다[4].

1.2 Trim Control Logic

그림 2의 보일러 마스터 신호 대비 연소공기량 설정이 정확하게 반영된 경우에는 (1)번의 회로가 없어도

제어루프가 정상 동작이 가능할 것이다. 하지만 대표적인 고체연료인 석탄의 경우처럼 연료성분이 불균일한 경우, 특히 최근과 같이 혼소탄 연소가 빈번한 경우에는 연료 대비 적절한 연소공기 설정은 부정확해질 수밖에 없고 최적의 과잉공기 공급량 설정 또한 변동이 심해지게 된다. 따라서 이 경우에는 Total Air Flow SP(Set Point)에 바이어스 또는 비율(Ratio) 회로를 추가하여 최적의 과잉공기량이 공급되도록 하는데 이것을 Trim Logic이라고 한다.

Trim Logic에는 연소 반응 결과로 발생하는 물리적 현상 결과를 측정하여 공기량 보정 값을 결정하는데 Steam Flow/ Air Flow Trim, CO_2 Trim, O_2 Trim 방법이 주로 사용된다[5].

Steam Flow/ Air Flow Trim 방법은 연소를 통하여 발생된 보일러의 주 증기유량과 연소공기량의 비를 사용하는 방법이다. 보일러 성능분석을 통하여 연료 1[kg] 연소를 통해 생성되는 주 증기 유량은 예측가능하며 석탄 1[kg] 연소에 필요한 공기량 또한 예측가능하다.

$$\frac{Main\ Steam\ Flow\ (kg/h)}{Fuel\ Flow\ (kg/h)} = \alpha(const.) \tag{1}$$

$$\frac{Air\ Flow\ (kg/h)}{Fuel\ Flow\ (kg/h)} = \beta(const.)$$

이며, α/β 또한 상수(constant)이다. 따라서 주어진 연료, 보일러 효율, 과잉공기 등의 조건에서 일정한 증기/공기량 비를 설정 값으로 활용하여 그림 3과 같이 Trim Logic을 구성할 수 있다.

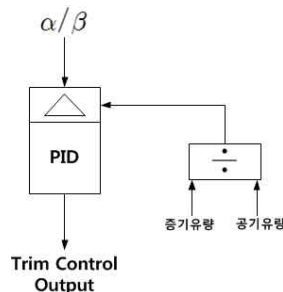


그림 3. 증기유량/ 공기량 비율 트림 로직
Fig. 3. Steam flow/ air flow ratio trim logic

CO₂ Trim 방식은 연소가스 내의 CO₂ 함량 측정을 통한 방식을 사용한다. 석탄의 성분을 안다면 완전연소 조건에서의 CO₂, H₂O 함량은 예측가능하다. 따라서 이 완전연소 가스의 성분을 안다면 현재 연소가스의 CO₂ 함량 측정을 통하여 과잉공기량을 계산가능하다. 다시 말해

$$\frac{CO_{2\% \text{ present}}}{CO_{2\% \text{ sc}}} \times 100 = AF_t\% \quad (2)$$

가 된다. 여기서

CO₂%_{present}: 현재 연소가스의 CO₂ %함량

CO₂%_{sc}: 완전 연소조건에서 CO₂ %함량

AF_t%: 완전 연소조건 대비 전체공기 %유량

예를 들어 어떤 발전소 연료의 성분 분석을 통해 완전연소 조건에서 CO₂ 함량이 13.6[%]로 확인되었고 과잉공기량을 화학적 공기량 대비 20[%] 추가하고자 하면 AF_t% = 100% + 20% = 120% 이고

$$CO_{2\% \text{ present}} = \frac{CO_{2\% \text{ sc}} \times AF_t\%}{100} \quad (3)$$

$$= \frac{13.6 \times 120}{100} = 16.3\%$$

따라서 20[%]의 과잉공기량을 확보하기 위해 연소가스 내에 16.3[%]의 CO₂가 포함되도록 Trim Logic을 구성한다.(그림 4)

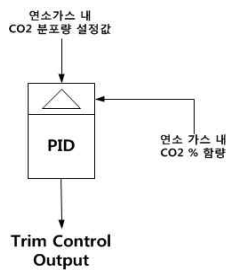


그림 4. CO₂ 트림 로직
Fig. 4. CO₂ trim logic

Steam Flow/Air Flow Ratio Trim과 CO₂ Trim은 연료분석을 통해서만 Trim Logic 파라미터 설정이 가능하다. 따라서 연소탄 성분의 변동이 심한 경우에는 매번 성분분석을 실시해야 하므로 사용이 어려운 단점이 있다. 따라서 연료의 성분에 독립적인 파라미터를 조절하는 과잉공기 제어 Trim Logic이 필요하다.

화학적 연소조건, 즉 완전연소 조건에서는 연소가스 성분에서 O₂는 존재하지 않는다. 연소가스에 O₂ 성분이 포함된다면 이는 과잉공기에 기인한 것이기 때문이다. O₂ Trim Logic은 이를 통해 과잉공기 제어에 활용하는 것이다.

앞에서도 언급한 바와 같이 연소공기 설정 값은 화학적 연소공기 요구량과 과잉공기량의 합으로 나타내므로 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$AF_t = AF_{sc} + AF_{excess} \quad (4)$$

$$AF_{\% \text{ excess}} = \frac{AF_{excess} \times 100}{AF_{sc}}$$

여기서

AF_t: 전체 연소공기 유량

AF_{sc}: 화학적 연소공기 유량

AF_{excess}: 과잉공기 유량

AF_{%excess}: 화학적 연소공기

유량 대비 과잉공기 %유량

표 1. 표준 건 공기 조성(6)
Table 1. Standard dry air composition[6]

| | 산소 | 질소 | 이산화탄소 | 아르곤 | 수소 |
|------|----------------|----------------|-----------------|---------|----------------|
| 분자식 | O ₂ | N ₂ | CO ₂ | Ar | H ₂ |
| 질량분율 | 23.2[%] | 75.47[%] | 0.046[%] | 1.28[%] | 0.011[%] |

표 1을 참고하면 과잉공기 내에 산소가 23.2[%]가 함유되어 있으므로 과잉공기 내 산소함량(O₂_{excess})은

$$O_{2\%excess} = 0.232 \times AF_t \tag{5}$$

이고 이를 전체공기량 대비 [%]로 나타내면

$$O_{2\%excess} = \frac{O_{2\%excess} \times 100}{AF_t} \tag{6}$$

이다. 그리고 전체 공기량을 과잉공기량에 대한 식으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$AF_t = \frac{AF_{excess} \times 100}{AF_{\%excess}} + AF_{excess} \tag{7}$$

$$= AF_{excess} \left(\frac{100}{AF_{\%excess}} + 1 \right)$$

그리고 표준 건 공기 조성을 참고하면

$$AF_{excess} = \frac{O_2}{0.232} \tag{8}$$

이것을 식 (7)에 반영하면 다음과 같다.

$$AF_t = \frac{O_2}{0.232} \left(\frac{100}{AF_{\%excess}} + 1 \right) \tag{9}$$

$$= \left(\frac{AF_t \times O_{2\%excess}}{23.2} \right) \left(\frac{100}{AF_{\%excess}} + 1 \right)$$

이제 AF_t 를 $O_{2\%excess}$ 로 표현하고 정리하면

$$AF_{\%excess} = \frac{100 \times O_{2\%excess}}{23.2 - O_{2\%excess}} \tag{10}$$

이다. 따라서 연료 특성 분석에 독립적으로 과잉 공기량 설정이 가능하고 Trim Logic 구현이 가능함을 알 수가 있다(그림 5).

일반적으로 연소가스 내 산소 성분은 저 부하에서 5[%]내외, 고 부하에서 3[%]내외가 되도록 설정한다.

1.3 연소공기량 제어 적용 사례분석

그림 6은 현재 운전 중인 태안화력발전소 1호기 연소공기량 제어로직의 일부를 나타낸 것이다.

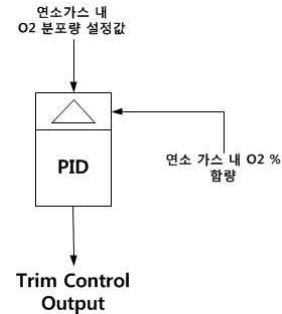


그림 5. O₂ 트림 로직
Fig. 5. O₂ trim logic

이 로직의 경우 과잉공기량 보상 설정 값을 보일러에서 생산하는 주 증기 유량 대비 연소가스 내 산소농도로 선정하는 O₂ Trim 로직을 사용하고 있다. 저 부하에서는 연소가스 내 산소농도가 5.3[%]가 되도록, 그리고 고 부하에서는 산소농도가 3.2[%]가 되도록 설정하였다. 이는 저 부하에서 연소공기와 미분탄의 연소반응이 원활하지 않아 완전연소를 위해 상대적으로 많은 양의 과잉공기량을 요구하기 때문이다[7-8].

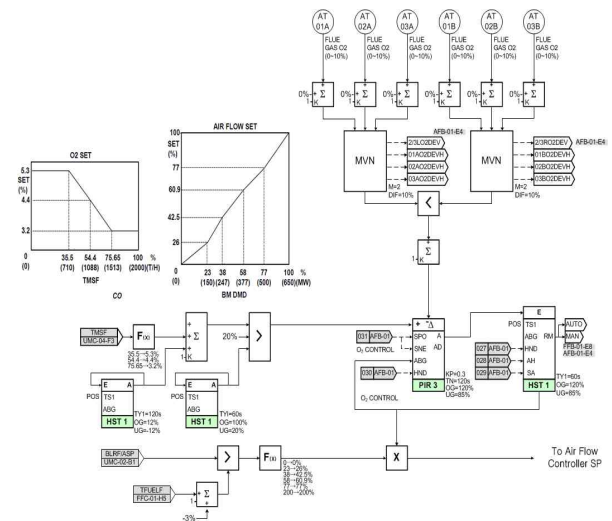


그림 6. 태안 1호기 O₂ 트림 로직[9]
Fig. 6. O₂ trim logic for Taean unit1[9]

O₂ Trim 제어기는 상하한 기능을 적용하여(UG, OG) 85~120[%] 범위의 공기량만 보상하도록 하였고 PID 조율값은 비례이득 0.3, 적분상수 120으로 하였다. O₂ Trim PID 제어기의 조절동작이 공기량 주제어기

에 비해서 빠르면 주제어기 측에 외란으로 동작할 수가 있으므로 적분상수 값을 상대적으로 크게 설정하여 제어동작이 천천히 동작하도록 하였음을 알 수가 있다.

이 경우 Trim 로직 회로가 과잉공기량을 조절하도록 설정되어 공기량제어 응답특성이 나빠지게 될 것이다.(Trim Logic 제어기가 과잉 공기량을 느리게 보상하도록 조율되어 있으므로) Trim Logic이 정밀하고 빠른 응답을 가지도록 PID 파라미터 값을 조율하면 후단의 공기량 주 제어기에서는 제어기 출력이 외란으로 동작할 우려가 있으므로 Trim 로직 제어기의 적분 계수(sec/reset)를 크게 설정하여 더딘 속도로 보상하도록 하기 때문이다. 응답 특성이 빠르도록 조율하면 후단의 주제어기 출력에 잦은 진동이 발생할 것이다. 따라서 지속적으로 변화하는 부하변화에 빠르게 대응하지 못하는 단점을 가진다.

2. 연소공기량 제어 동특성 개선

2.1 보일러 연소반응 분석

보일러의 노 내에 과잉공기량이 적으면 불완전 연소로 인한 미연 탄 성분 잔존손실이 발생하고 연료대비 과잉공기량이 지나치게 많으면 고온의 연소가스가 대량으로 대기로 빠져 나가므로 이로 인한 열손실이 커지게 된다.

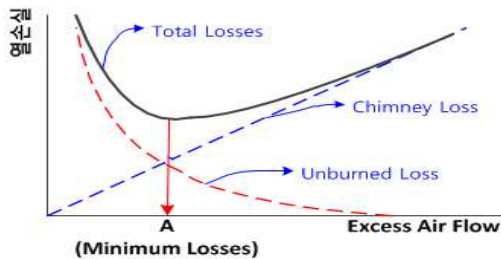


그림 7. 과잉공기 대비 열손실 곡선[6]
Fig. 7. Excess air vs heat loss curve[6]

따라서 연료의 성분분석을 통한 이론적인 산소요구량인 화학적 산소요구량(Stoichiometric Air Flow Demand)에 부하별 적정량의 과잉공기량(Desired

Excess Air Flow)을 가하여 연소 효율이 최적이 되는 지점을 찾는 것이 중요하다.

2.2 연소공기량 곡선 설정 방안

그림 6의 공기량 제어루프를 보면 연소공기량설정 곡선 $F(X)$ 를 통해 화학적 산소요구량만 설정되고 과잉공기량 조절은 O_2 Trim 회로에서 전담하는 것을 알 수가 있다. 하지만 부하별 요구되는 과잉공기량 설정 값을 알고 있다면 공기량 설정 곡선에 과잉공기량 설정도 함께 추가하고 공기량 조절 제어루프에 비해 상대적으로 응답특성이 느린 Trim 제어기는 오차 보상 기능만 담당하도록 하여 부하변동에 대한 제어루프 전체 응답 특성을 개선할 수가 있다.

화학적 연소공기량은 보일러 상위 루프에서 요구하는 출력에 대비하여 완전 연소에 필요한 이론적인 최소 연소공기량이다. 이 공기량 설정은 연료의 원소인 탄소, 수소의 구성비를 확인하여 구한다.

표 2. 원소별 완전연소에 필요한 이론 공기량[6]
Table 2. Theoretical air requirement for complete combustion[6]

| 원소 기호 | 원자량 | 연소에 필요한 이론 산소량 ([kg/kg]) | 연소에 필요한 이론 공기량 ([kg/kg]) |
|-------|-------|--------------------------|--------------------------|
| C | 12.01 | 2.67 | 11.49 |
| H | 1.01 | 7.94 | 34.21 |
| S | 32.06 | 1 | 4.3 |
| O | 16.00 | 0 | -4.3 |
| N | 14.01 | 0 | |

표 2의 각 원소의 원자량을 참고하면 탄소(C)의 연소 반응식은 다음과 같다.



따라서 탄소 1[kg] 연소에 필요한 산소량은

$$\frac{16 \times 2 \times 2}{12 \times 2} = 2.67 \text{ (kg/kg)} \quad (12)$$

가 된다.

하지만 실제 연소에는 공기가 사용되고 건공기에 산소량이 23.2[%] 정도 포함되어 있으므로 탄소 1[kg] 연소에 필요한 이론 공기량은 식 (13)과 같다.

$$\frac{2.67}{0.232} = 11.49(kg/kg) \quad (13)$$

c, h, s, o, n 을 연료 1[kg]내에 포함된 각원소의 질량이라고 가정하면 1[kg]의 연료 연소에 필요한 산소량은 같은 방법을 반복하여 다음과 같이 구해진다.

$$O_2 \text{ Required} \Rightarrow 2.67c + 7.94h + (s - o) \quad (14)$$

1[kg] 연료 연소에 필요한 공기량은 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Air Required} &\Rightarrow O_2 \text{ Required} / 0.232 \\ &\Rightarrow 11.49c + 34.2h + 4.31(s - o) \end{aligned} \quad (15)$$

석탄과 같은 고체연료를 사용하는 경우 이론적인 연료대비 공기량만을 공급할 경우 연소 반응 시 연료와 공기의 결합이 원활하게 이루어지지 않아 미연분이 많이 남게 되고 효율저하가 발생할 수가 있다. 하지만 지나치게 많은 양의 과잉공기의 공급은 Stack으로 방출되는 연소열의 증가를 초래하여 이 또한 효율 저하가 원인이 된다. 따라서 적절한 과잉공기의 공급은 원료의 완전 연소와 보일러 효율 개선에 매우 중요하다.

과잉공기량의 설정은 연료, 버너 및 보일러 디자인, 부하에 따라 다른데 화력발전소 시운전 단계에서 trial and error 방법에 의해 정확하게 설정된다. 하지만 일반적 화학적 산소요구량 대비 저부하에서 25~30[%], 고부하에서 15~20[%] 선으로 설정되며 미분탄 연소 보일러의 경우 일반적으로 50[%] 부하의 과잉공기가 100[%] 부하 과잉공기의 2배가 된다.

따라서 그림 6에 사용된 보일러 마스터 신호 크기에 선형특성을 나타내는 화학적 연소공기량 곡선에 과잉공기량 설정 곡선을 추가하여 선행제어 효과를 기대할 수 있도록 한다.

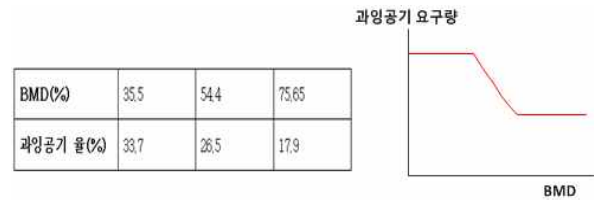


그림 8. 500(MW) 화력발전소 BMD 대비 과잉공기량 설정 예

Fig. 8. Excess air setting example based on BMD for 500(MW) power plant

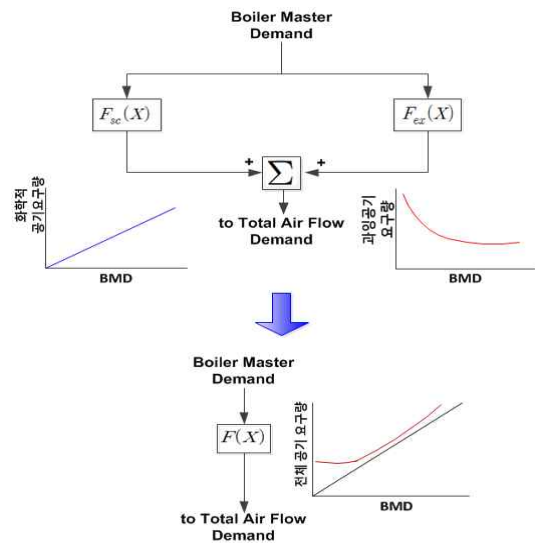


그림 9. 개선된 BMD 대비 공기량 설정 곡선

Fig. 9. Improved air flow set point curve

2.3 시뮬레이션 결과

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 개선된 방식의 성능이 기존 방법보다 우수함을 보이고자 한다.

시뮬레이션 소프트웨어는 매스웍스사의 매트랩 시뮬링크(Matlab Simulink)를 사용하여 수행하였으며 각종 파라미터는 태안1호기에 적용된 것과 동일한 값을 사용하였다.

시뮬레이션은 0.05초 주기로 500초 동안 실행하였으며 300초에 보일러 마스터 신호를 100에서 50으로 변경시켰을 때의 결과를 관찰하였다.

그림 11~13은 각각 보일러 마스터 신호 변동에 따른 O_2 측정치와 공기량 조절 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

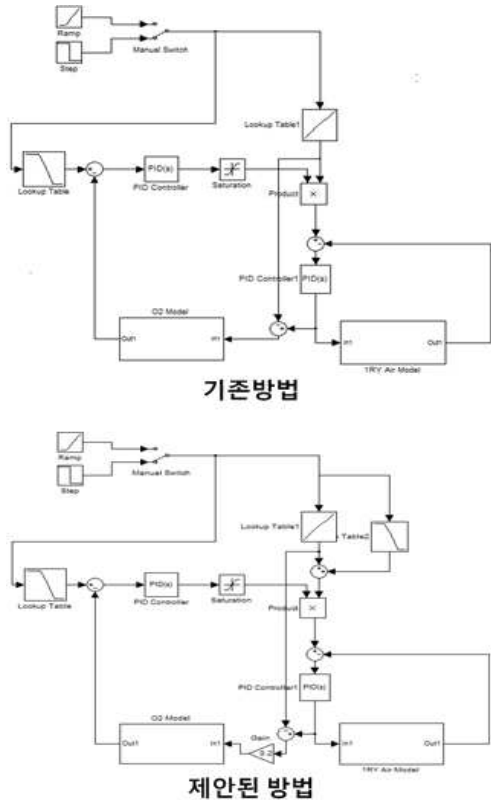


그림 10. 시뮬레이션 구현 모델
Fig. 10. Simulation model

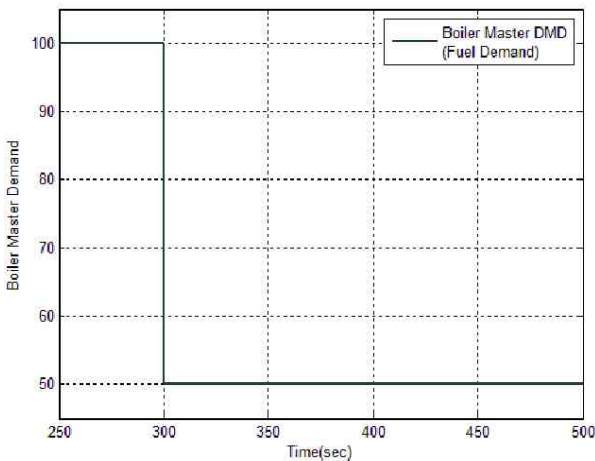


그림 11. 보일러 마스터 설정 값 변화
Fig. 11. Change Boiler Master Demand

시뮬레이션 결과에서 알 수가 있듯이 본 논문에서 제안한 방식이 두 경우 모두에서 응답특성이 개선되

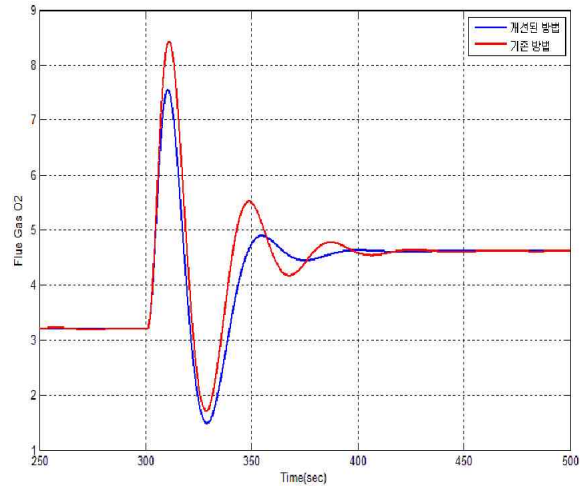


그림 12. 과잉공기량 조절 시뮬레이션 결과
Fig. 12. Simulation result for excess air control

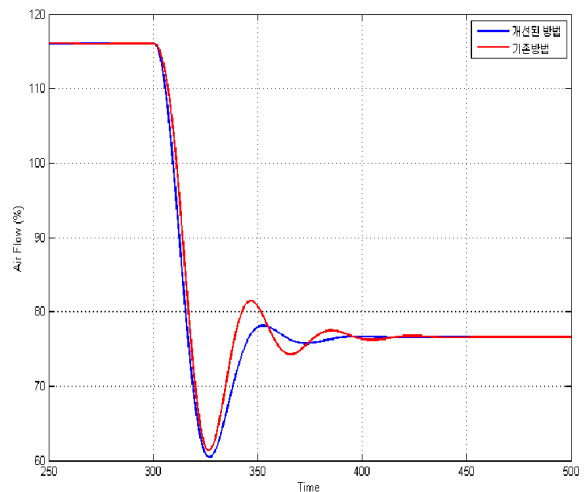


그림 13. 연소공기량 조절 시뮬레이션 결과
Fig. 13. Simulation result for combustion air control

고 오버슈트 또한 현저히 줄어들었음을 확인하였다. 이는 부하별 과잉공기량 설정을 추가함으로써 선행 제어 역할을 하여 동특성 개선에 기여한 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 논문에서는 석탄 화력발전소 연소공기량 제어

루프의 동특성 응답을 개선하는 방안을 제시하였다. 보일러 노 내에 석탄 연소 시 과잉공기량이 부족하면 불완전 연소로 인한 효율저하가 발생하며 공기량이 지나치게 많으면 연소가스 열이 대기로 방출되므로 이 또한 효율저하를 초래한다[10]. 따라서 적절한 연료량 대비 공기량을 설정하는 것은 발전소 성능유지를 위해 매우 중요하다. 또한 전 세계적인 연료부족으로 인해 석탄 화력분야에도 저 열량 탄이나 혼소탄의 사용이 불가피해진 상황에서 연속적으로 변하는 연료 성분변화나 부하변동에 대한 연소공기량을 적절히 설정하는 것은 기존 운전결과에 준하는 성능유지를 위해 필수적인 요소가 되었다. 따라서 제안하는 과잉공기량 설정 방법을 통해 다양한 부하조건에서도 빠르게 대응하여 성능유지에 큰 기여를 할 것으로 기대가 된다.

References

[1] Coal Fired Power Plant Tuning Manual, KEPRI, 2011.
 [2] D.Y. Park, I.H. Lim, H.Y. Kim, "Unit Master and Boiler Master Control Logic Analysis of ABB-P14 Control System", KIEE 42th Summer Conference, pp. 1826-1827, July 2011.
 [3] D.Y. Park, H.Y. Kim, "Master Control Logic Tuning for Boiler in Power Plant", ICROS Summer Conference II, pp. 971-972. July 2007.

[4] G.P. Lim, D.Y. Park, H.H. Lee, "Combustion Air Control Based on Main Steam Flow in Power Plant", KIEE Spring Conference, pp. 192-193. May 2011.
 [5] E.P. Smith, "Removing The Mystery of O_2/CO In Boiler Trim Systems", Instrument Society of America, VOL. 34, Issue 11, pp. 31-32, November 1987.
 [6] Combustion Engineering, Dong-Hwa, 2000.
 [7] S.W. Jang, Comparison of Boiler Combustion Results and Measurement in Power Plant, KEPRI, 2003.
 [8] Performance Control Manual in Power Plant, KEPRI, 1987.
 [9] Tae-An TPP, Operation Manual for Tae-An Thermal Power Plant Unit 5&6, 2003.
 [10] IMCS Control Logic Engineering Manual for Interfacing Combustion Optimizer, KEPRI, 2012.

◇ 저자소개 ◇



유광명 (劉光明)

1980년 5월 28일생. 2008년 한국과학기술원 졸업(석사). 2008~2010년 POSCO EnC 에너지사업본부 해외기술그룹 Assistant Engineer. 2010년~현재 한전전력연구원 일반연구원.

Tel : (042)865-5656

E-mail : kmyu@kepco.co.kr