

우드펠릿 보일러에서 2단 연소용 공기 공급방식이 질소산화물 및 일산화탄소 발생에 미치는 영향

정광성*, 유호선*†

*한국남동발전(주), *†승실대학교 기계공학과

The Effect of Supply Patterns of Overfire Air on Generation of NOx and CO in a Wood pellet Fired Boiler

Kwang-sung Jung*, Hoseon Yoo*†

*Korea South-East Power Co., LTD, Geongsangnam-do 52852, Korea

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

(Received June 8, 2018; Revised June 15, 2018)

ABSTRACT : In this study, we investigated the effect of the generation of NOx and CO by adjusting the overfire air supply position and ratio using the boiler that was converted from coal burning to wood pellet boiler. When the amount of the overfire air is relatively increased, the amount of NOx is slightly decreased but CO is sharply decreased when burning at low excess air ratio (1.10) that is due to a small fuel particle size. However, NOx slightly increased when burning at high excess air ratio (1.33) due to the large fuel size, but CO was hardly affected. Also, When the amount of overfire air was same, The more supply position was concentrated to upper portion of the main combustor, the more NOx and CO was lowered. And in case of the excess air ratio was high, the generation of NOx and CO I can see that it keeps the level irrelevant to the amount of air for the second stage combustion.

초 록 : 본 연구는 석탄 연소에서 우드펠릿 전소 보일러로 설비를 개조하여 실제 운영 중인 125 MW급 영동화력 1호기 보일러를 대상으로 2단 연소용 공기의 공급위치와 비율을 조정하여 NOx 및 CO발생에 미치는 영향을 시험하였다. 2단 연소용 공기량이 상대적으로 증가하면, 연료입도가 작아서 낮은 과잉 공기비(1.10)로 연소할 경우 NOx는 약간 감소하고 CO는 급격히 감소하지만, 연료 입도가 커서 높은 과잉공기비(1.33)로 연소할 경우 NOx는 약간 증가하지만 CO는 거의 영향을 받지 않았다. 또한 2단 연소용 공기량이 같아도 공급위치가 주연소기 상부로 편중될수록 NOx 및 CO 발생 농도는 낮게 나타났으며 과잉 공기비가 높은 경우 2단 연소용 공기량에 무관하게 NOx 및 CO의 발생은 매우 낮은 수준을 유지한다는 것을 알 수 있었다.

Key words : Wood pellet fired boiler(우드펠릿 보일러), Overfire air(2단 연소용 공기), NOx(질소산화물), CO(일산화탄소), Excess air ratio(과잉공기비)

- 기호설명 -

\dot{m} : 보일러에 공급되는 연소용 공기 총량(ton/hr)

\dot{m}_1, \dot{m}_2 : 1차 및 2차 연소용 공기량(ton/hr)

\dot{m}_0 : 2단 연소용 공기량(ton/hr)

δ : 2단 연소용 공기 비율

α, β, γ : 비례상수

χ : 2단 연소용 공기공급 댐퍼 개도 비율

† Corresponding Author
hsyoo@ssu.ac.kr

1. 서론

정부는 온실가스 저감 글로벌 트렌드에 대응 하기 위해 발전사업자의 신재생에너지 발전 의무이행(RPS) 확대를 추진하고(2030년도 기준 20%) 있다(1). 석탄 대비 대기오염물질의 배출량이 적다는 이 점 외에 목질계 바이오매스 발전이 RPS 이행 기 준인 REC를 확보할 수 있으며 화력 발전 설비 입에도 불구하고 신재생에너지 발전설비로 분류 되어 급전의 통제를 따르지 않고 독립 운영함에 따라 이용률을 최대화 할 수 있는 이점으로 투자가 확대되고 있는 실정이다.

그러나 대형 목질계 바이오매스 전소보일러 설비가 증가 함에도 불구하고 연소성과 대기오염 물질 발생에 대한 연구가 미흡한 실정임에 따라 본 논문은 목질계 바이오매스 전소 보일러에서 2단 연소용 공기량 공급 방식이 질소산화물 및 일산화탄소 발생에 미치는 영향에 대해 시험 하였다.

2. 연구대상

시험 설비는 정격 용량 125 MW의 영동화력 1호기 우드펠릿 보일러를 대상으로 시험하였다. 영동화력 1호기는 준공 이후 35년 이상 오래된 발전소로 무연탄을 연소하여 왔으나, 2009년 9월부터 유연탄과 무연탄을 혼소하는 방식으로 운영되었으며, 2017년 이후에는 REC 확보가 가능하고 경제성을 확보할 수 있는 우드펠릿 연소 보일러로 설비를 개조하였다(2).

Fig. 1은 기존 보일러 대비 개조된 신규 보일러를 비교한 그림이다. 연소실 상부 아치(Arch)부에 버너를 설치한 수직 연소방식에서 석탄대비 높은 연소 반응속도의 우드펠

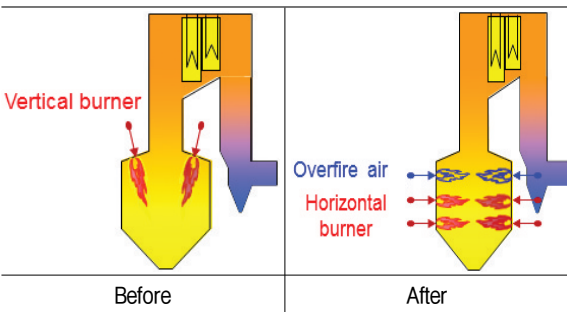


Fig. 1 Boiler retrofit for wood pellet combustion

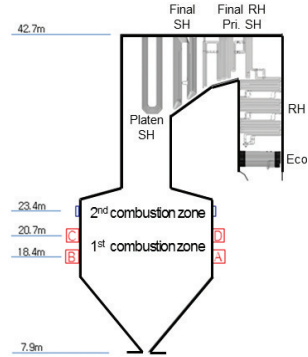


Fig. 2 Schematic diagram of the boiler

릿 특성을 감안하여 연소실 전·후면에 버너를 설치하는 수평 연소방식인 대향류 버너 방식으로 변경하였으며, 보일러 연소기 상부로 공기를 공급하는 장치(Over fire air nozzle)를 통해 2단 연소용 공기를 공급함으로써 주 연소구역의 온도를 저감하여 질소산화물(NOx)의 발생을 줄일 수 있게 하였다.

Fig. 2는 영동화력 1호기 우드펠릿 전소 보일러 개략도이다. 개조된 신규보일러는 증기계의 주증기 온도 541℃를 확보하기 위해 대류 전열면에 과열기(Platen Super Heater) 1면을 추가로 설치하였다. 영동화력 1호기는 질소산화물 절감을 위한 2단 연소방식 보일러로서 1차 연소구역과 2차 연소구역으로 구분되어 연소용 공기가 공급된다. 보일러 버너는 전,후면 각 2열이고 정격 용량으로 운전할 경우 3개열이 운전되고, 1개열은 예비기이다. 보일러는 최대 출력에서 과열기 출구 증기의 정격 유량 및 압력은 420 ton/hr, 12.85 MPa 이고 재열기 출구 증기 유량 및 압력은 367 ton/hr, 3.24 MPa 이다.

3. 우드펠릿 연소시험

3-1 시험조건

시험 대상 보일러는 전,후면 각 2열의 버너 열로 구성되고 각 열 당 4대 총 16대의 버너를 갖추고 있다. 시험은 버너 운전 열에 따라 2가지 방법으로 구분하여 시행하였다.

Fig. 3은 대상설비의 버너 운전 열에 따라 Test I과 Test II로 구분하여 시험한 개략도를 나타낸 것이다.

첫 번째 방법은 전면 상부 1열과 후면 상하 2열 버너를

우드펠릿 보일러에서 2단 연소용 공기 공급방식이 질소산화물 및 일산화탄소 발생에 미치는 영향

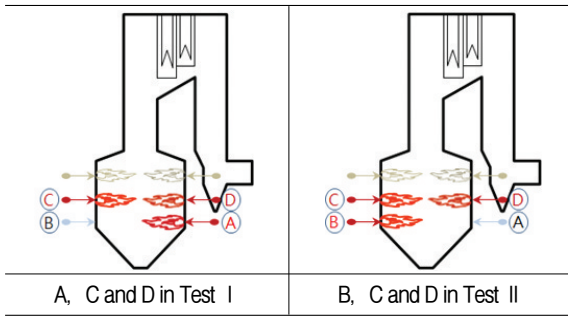


Fig. 2 Operation of Burners

운전하여 전면 버너 열의 열 부하를 적게 유지하고 상대적으로 낮은 과잉공기비 1.10으로 시험(이하 Test I)하였으며, 두 번째 방법은 전면 상하 2열과 후면 상부 1열 버너를 운전하여 후면 버너 열의 열부하가 적게 유지 되도록 서로 상반된 조건으로 상대적으로 높은 과잉공기비 1.33으로 시험(이하 Test II) 하였다.

연소용 공기계통에서 2차공기송풍기와 1차공기송풍기에 의해 보일러 노내에 공급되는 총 공기량은 472 ton/hr이다. 2차 공기 송풍기로부터 공급되는 연소용 공기는 주 연소구역과 2단 연소구역에 공급되고, 미분기로부터 분쇄된 우드펠릿을 이송하기 위한 1차 공기는 우드펠릿과 함께 보일러 버너에 공급된다. 영동화력 1호기 보일러의 2단 연소용 공기(Overfire air)량은 정격 운전 중 총 연소용 공기량의 24 %인 113 ton/hr가 공급되도록 설계되어 있다.

Test I 및 Test II의 시험조건은 Table 1과 같으며, 시험에 사용된 우드펠릿은 연료 저장소에서 20 rpm으로 회전하는 미분기(Mill)로 공급되어 미분기에서 미분화(1 mm 이하 85 %, 2 mm 이하 98 %, 4 mm 이하 100 %) 되고 1차 공기와 함께 약 70 °C(설계기준 85 °C 이하)로 노내

Table 1 Testing conditions

Description	Design	Test I	Test II
Capacity (MW)	125	108	102
Total moisture (%)	1.11	1.10	1.33
Excess air parameter	472	462	506
Total combustion air (ton/h)	74	69	65
Fuel Consumption (ton/h)	74	69	65
SNCR	Operation	stop	stop

Table 2 Wood pellet properties

Description	Design	Test I	Test II	
Calorific Value (kcal/kg)	4,100	4,306	4,288	
Total moisture (%)	6.4	8.3	7.8	
Ultimate Analysis (wt, %)	C	50.00	56.20	50.60
	H	6.17	6.20	6.54
	N	41.70	35.29	40.50
	O	0.25	0.28	0.24
	S	-	0.01	0.04
	Ash	1.88	2.02	2.08
Fineness (%)	Under 4mm	100	99.5	98.6
	Under 2mm	98	96.1	94.5
	Under 1mm	85	89.3	78.8

(Furnace)로 공급되어 연소된다. 연소시험에 사용된 우드펠릿 성상은 Table 2와 같다.

3-2 연소시험 방법

Test I 은 첫 번째 방법으로 전면 2단연소용 공기 공급 챔퍼 개도를 50 %로 유지하고 후면 2단 연소용 공기 공급 챔퍼 개도를 각각 10%, 50 %, 80 % 개방하여 2단 연소용 공기 공급량이 13.0 ton/hr, 25.4 ton/hr, 48.0 ton/hr 상태에서 데이터를 취득하였다. 두 번째 방법으로 전면 2단 연소용 공기 공급챔퍼 개도를 80 %로 유지 하고 후면의 2 단 연소용 공기 공급챔퍼 개도를 각각 10 %, 50 %, 80 % 개방하여 2단 연소용 공기 공급량이 36.5 ton/hr, 48.0 ton/hr, 70.6 ton/hr 상태에서 데이터를 취득하였다. 세 번째 방법은 2단 연소용 공기량이 동일한 상태에서의 변화를 알아보기 위하여 전면 챔퍼를 10 % 개방 하고 후 면 챔퍼를 50 % 개방하여 운전하는 경우와 전면 챔퍼를 50 % 개방하고 후면 챔퍼를 10 % 개방하여 운전하는 경우를 비교하였다. 데이터는 챔퍼 개도를 변경하고 20분 동안 연소 안정화 시간을 확보한 후 10분 데이터의 평균을 적용하였다.

Test II 는 전면의 2단 연소용 공기량을 후면 버너 열의 2 단 연소용 공기 공급량 대비 상대적으로 많이 유지하고 전면 및 후면의 2단 연소용 공기 공급량을 동시에 증가 시키면서 데이터를 취득하였다.

챔퍼 개도는 Test I 의 경우 질소산화물 배출 허용기준을 단시간 초과하는 것을 허용토록 환 경부와 사전협의 완

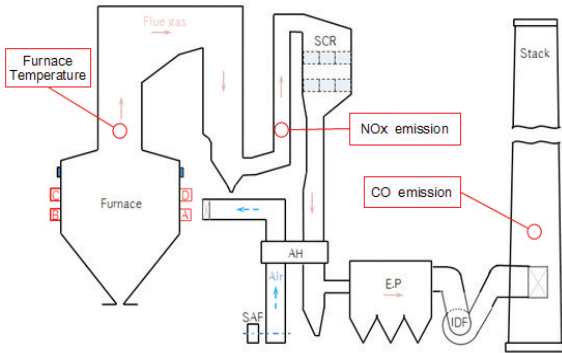


Fig. 4 Location of various measurements

료하고 시험함에 따라 실제 운전조건을 고려하여 중간 값 50%를 기준으로 30% 증가한 80 %와 40 %를 감소시킨 10 %를 선정하였으며, Test II에서는 연돌 출구에서 NOx 배출 환경기준치 90 ppm을 준수 해야하는 제약 조건과 NOx 측정기 설치 위치상 선택적 비촉매 환원법 탈질설비를 정지하여야 하는 제약 조건으로 인해 6 %부터 37 % 까지 임의 조정하여 측정하였다. Test I, II 모두 노내 NOx 발생 량의 정확한 측정을 위해 선택적 비촉매 환원법 탈질설비(SNCR)는 정지하고 시험하였다.

Fig. 4는 본 시험의 중요 측정 항목인 질소 산화물 발생 농도, 일산화탄소 발생농도, 노내 대표온도에 대한 측정 점을 나타낸 것이다.

질소산화물은 노 내에서 발생하는 농도를 측정하기위해 선택적 촉매환원법 탈질설비(SCR) 전단, 일산화탄소는 연돌 15 m에서 상부, 노내 대표 온도는 전면 2단 연소용 공기 주입구 8 m 상부에서 측정하였다.

2단 연소용 공기량과 비율은 계산을 통해 산출하였다. 연소용 공기량 대비 2단 연소용 공기량 비율산정을 위해 보일러에 공급되는 연소용 공기총량을 정의하면 총량은 식(3-1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_0 \quad (3-1)$$

여기서, \dot{m} 은 보일러에 공급되는 연소용 공기 총량이며 \dot{m}_1, \dot{m}_2 는 1차 및 2차 연소용 공기량, \dot{m}_0 는 2단 연소용 공기량을 의미하며 단위는 [ton/hr]이다.

2단 연소용 공기량 비율은 식(3-2)으로 정의 된다.

$$\delta = \frac{\dot{m}_0}{\dot{m}} \quad (3-2)$$

여기서, δ 은 2단 연소용 공기 비율을 의미한다. 2단 연소용 공기(Overfire air) 공급용 덕트는 전·후면에 각 1개씩 설치되어 있으며 버너열 상부에 4개의 포트(Port)를 가지고 있다. 2단 연소용 공기는 2차 공기 윈드 박스에서 공급되며, 2단 연소용 공기 덕트 양쪽에 설치된 댐퍼를 통해 공기량을 제어한다. 2단 연소용 공기 댐퍼 개도에 따른 공기량을 계산하기 위해 Fig. 2-5와 같이 2단 연소용 공기 댐퍼 개도에 따른 유량을 환산하여 적용하였다. 2단 연소용 공기량은 식(3-3)으로 정의된다.

$$\dot{m}_0 = \alpha \times x^2 + \beta \times x + \gamma \quad (3-3)$$

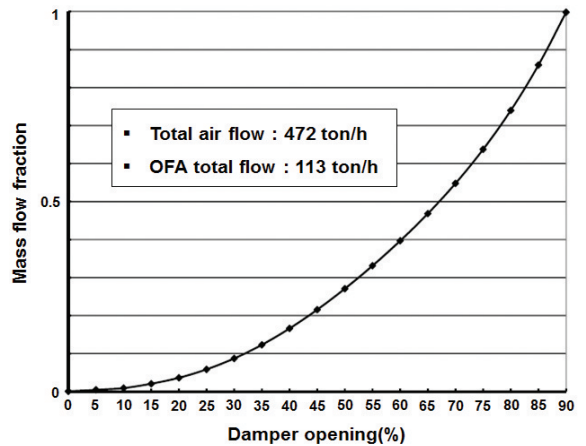


Fig. 5 Air flow rate vs damper opening

여기서 α, β, γ 는 상수이며, x 는 2단 연소용 공기공급 댐퍼 개도 비율이다.

식(3-3)의 2단 연소용 공기 댐퍼 개도 비율에 따른 2단 연소용 공기량은 기자재 제작사에서 제시한 Fig. 5 댐퍼 개도 비율에 따른 2단 공기량 관계 곡선을 이용하여 비례상수 α, β, γ 값을 구하여 적용하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4-1 시험결과 정리

과잉공기비를 1.10으로 낮게 유지 하면서 전면의 2단 연소용 공기 공급댐퍼 개도를 50 %로 유지하고 후면의 2단 연소용 공기 공급댐퍼 개도를 각각 10 %, 50 %, 80 % 개

우드펠릿 보일러에서 2단 연소용 공기 공급방식이 질소산화물 및 일산화탄소 발생에 미치는 영향

방하여 2단 연소용 공기 공급량이 13.0 ton/hr, 25.4 ton/hr, 48.0 ton/hr 상태에서 시험 데이터를 취득하였다. 다음은 전면 댐퍼 개도를 80%로 유지하고 후면 댐퍼 개도를 각각 10%, 50%, 80% 개방하여 2단 연소용 공기 공급량이 36.5 ton/hr, 48.0 ton/hr, 70.6 ton/hr 상태에서 시험 데이터를 취득하였다. 또한 2단 연소용 공기량이 동일한 상태에서 변화를 알아보기 위하여 전면 댐퍼 10%, 후면 댐퍼 50% 개방하여 운전하는 경우와 이와 반대로 운전하는 경우에 NOX 및 CO 발생량을 측정하였다. 측정결과는 Table 3와 같다.

과잉공기비가 1.33으로 높은 상태에서 전면 버너열의 2단 연소용 공기량을 후면 버너 열 보다 상대적으로 많게 유지하고 전면 및 후면의 2단 연소용 공기 공급량을 동시에 증가 시키면서 NOX 및 CO 농도, 노내 온도 변화를 측정하였다.

댐퍼 개도는 연돌 출구에서 NOX 배출 환경기 준치 90 ppm을 준수해야하는 제약 조건과 NOX 측정기 설치 위치

상 선택적 비촉매 환원법 탈질 설비를 정지하여야 하는 제약조건으로 인해 6% 부터 37% 까지 임의 조정하였다. 측정 결과는 Table 4에 정리하였다.

4-2 과잉공기비가 낮은 경우

Fig. 6은 열부하가 낮은 전면의 댐퍼 개도를 80%로 고정하고, 열부하가 높은 후면의 댐퍼 개도를 10%, 50%, 80%로 증가시키는 경우로서 NOX, 노내온도, CO변화를 비교한 그래프이다. 2단 연소용 공기량을 증가시킬 경우 질소산화물 발생량은 131.4 ppm에서 약간 감소하고, 일산화 탄소 발생량은 221.9 ppm에서 0.1 ppm으로 급격히 감소하였다.

Fig. 7은 동일한 2단 연소용 공기량이 공급되는 경우로서 열부하가 큰 쪽과 작은 쪽의 2단 연소용 공기량 변화에 따라 NOX 발생량을 비교한 것이다. I-A는 2단 연소용 공기 공급량이 13 ton/hr로서 전면과 후면 2단 연소용 공기 댐퍼개도를 각각 10%, 50% 개방상태이고 I-B는 이와 반대의 경우이다. I-D는 2단 연소용 공기 공급량이 48 ton/hr로서 전면과 후면댐퍼 개도를 각각 50%, 80% 개방 상태이고 I-F는 이와 반대의 경우를 비교하였다. 2단 연소용공기 공급량이 13 ton/hr인 경우 NOX 발생량 차이는 6.8 ppm이고 48 ton/hr인 경우 3.7 ppm으로 이 두 가지 경우 모두 미미하게 열부하가 큰 쪽의 2단 연소용 공기 공급량이 열부하가 적은 쪽의 2단 연소용 공기 공급량 보다 상대적으로 적을 수록 NOX 발생량은 상대적으로 높게 나타난다는 것을 알 수 있었다. 이는 열부하가 큰 쪽

Table 3 Summarized Results for Test (I)

Case	\dot{m}_o (ton/h)	δ (%)	NOX (ppm)	CO (ppm)	Furnace Temperature (°C)
I-A	13.0	2.81	126.8	149.9	1,055.7
I-B	13.0	2.81	133.6	408.1	1,055.3
I-C	25.4	5.51	125.7	7.8	1,046.1
I-D	48.0	10.40	123.0	0.1	1,029.8
I-E	35.6	7.70	131.4	221.9	1,048.2
I-F	48.0	10.40	126.7	21.4	1,043.5
I-G	70.6	15.29	124.4	0.1	1,026.5

Table 4 Summarized Results for Test (II)

Case	\dot{m}_o (ton/h)	δ (%)	NOX (ppm)	CO (ppm)	Furnace Temperature (°C)
II-A	3.2	0.64	83.9	3.6	869.1
II-B	3.5	0.69	87.3	7.2	875.8
II-C	4.2	0.83	99.0	17.5	902.5
II-D	5.2	1.03	113.5	17.0	914.7
II-E	6.6	1.30	114.3	-	925.5
II-F	7.0	1.38	117.6	-	928.7

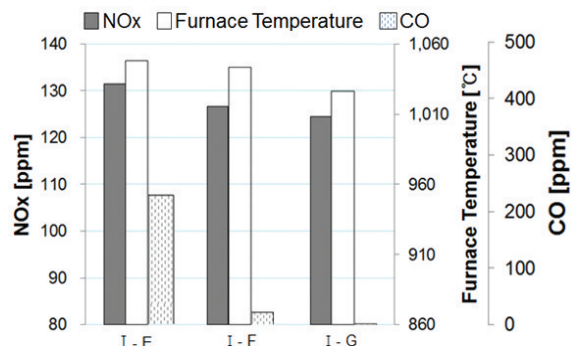


Fig. 6 Generation of NOX, maximum temperature and CO for damper opening of G 10%, 50% and 80% with F 80% of in Test I

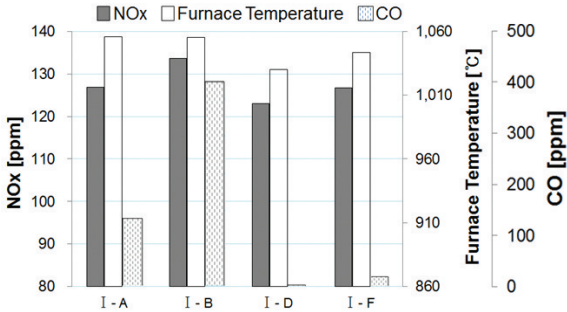


Fig. 7 Generation of NOx, maximum temperature and CO for damper opening of F 10% G 50%, F 50% G 10% and F 50% G 80%, F 80% G 50% of in Test I

에 적은 양의 공기가 공급됨으로서 2차 연소 구역의 온도를 낮게 유지하지 못한 결과라고 판단된다.

4.3 과잉공기비가 높은 경우

Fig. 8는 과잉공기비를 1.33으로 높게 유지하고 2단 연소용 공기량 변화에 따른 NOx, 노내 온도, CO변화를 비교한 그래프이다. 2단 연소용 공기 공급량을 3.2 ton/hr에서 7.0 ton/hr까지 6단계로 증가시킬 경우 NOx 발생량은 83.9 ppm에서 117.6 ppm으로 증가하였다. 이러한 현상은 낮은 과잉공기비(1.10) 연소 시험 결과와 반대의 결과를 보여주고 있다. 그러나 2단 연소용 공기량이 5.2 ton/hr이상으로 유지되는 전면 댐퍼 개도 33%, 후면 댐퍼 개도 10% 이상에서 질소산화물 발생량은 약 115 ppm 정도로 비교적 일정하게 유지되었다. 2단 연소용 공기량 증가는 일반적으로 NOx 발생량을 감소시키는 것으로 알려져 있으나 Test II에서는 반대 현상이 나타남에 따라 NOx 발생량을 증가시키는 원인을 분석하고자 공급연료의 미분도가

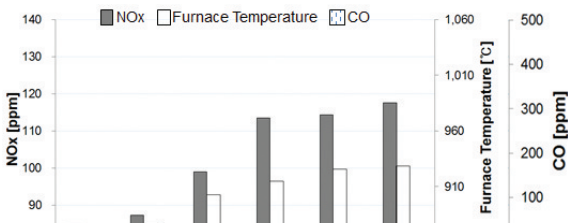


Fig. 8 Generation of NOx, maximum temperature and CO for all cases in Test II

NOx 발생에 미치는 영향을 분석하였다.

일반적으로 2단 연소용 공기(Overfire air)가 증가하면 질소산화물 발생량이 감소하나, 연료 입자의 크기(Fineness)가 큰 경우 완전연소에 소요되는 시간이 길어짐에 따라 2차 연소구역에서 재 연소 되어 노 내 온도는 상승하고 질소산화물 발생량은 증가(3),(4)한다. 따라서 우드펠릿 미분도에 대한 설계 값과 Test I 및 Test II의 경우를 비교하였다. 우드펠릿 미분도 측정결과는 Table 2와 같다. 결과적으로 Test II에서는 우드펠릿의 입자가 설계기준보다 큰 크기(낮은 미분도)로 공급되는 경우로서 2단 연소용 공기를 증가시키에 따라 2차 연소에 기인한 NOx 발생량이 증가하였다. 열부하가 많은 쪽의 2단 연소용 공기량을 열부하가 적은 쪽의 2단 연소용 공기량 보다 많이 공급하여 점진적으로 양측의 공급 공기량을 증가시키면 2단 연소용 공기량 6.6 ton/hr, 총 연소용 공기량 대비 2단 연소용 공기 비율 $\delta = 1.30\%$ 이상에서 CO는 발생하지 않았다. 이는 과잉공기비가 충분히 높기 때문으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 대항류 버너를 가진 125 MW 급 우드펠릿 보일러를 대상으로 연소용공기 총량은 일정하게 유지하면서 2단 연소용 공기의 공급 방식을 변경하였을 때 질소산화물 및 일산화 탄소 발생에 미치는 영향을 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

연료 입도가 작아서 과잉공기비 1.10으로 연소할 경우 2단 연소용 공기량이 상대적으로 증가하면 질소산화물은 최대 133.6 ppm에서 약간 감소하지만 일산화탄소는 408.1 ppm에서 0.1 ppm까지 급격히 감소하였다. 또한 2단 연소용 공기량이 같아도 공급위치가 주연소기 상부로 편중될수록 질소산화물 및 일산화탄소 발생 농도는 낮게 나타났다.

연료 입도가 커서 과잉공기비 1.33으로 연소할 경우 2단 연소용 공기량이 상대적으로 증가하면 질소산화물은 약간 증가하지만 일산화 탄소는 거의 영향을 받지 않았다. 다만 과잉 공기비가 높은 경우 2단 연소용 공기량에 무관 하게 질소산화물 및 일산화탄소의 발생은 매우 낮은 수준을 유지하였다.

시험조건 및 범위 내에서 2단 연소용 공기는 주연소기 상부 위치에 상대적으로 높은 비율로 공급할 때 질소산화물

은 후단의 탈질설비에서 배출허용기준(90 ppm) 이하로 처리할 수 있는 수준으로, 일산화탄소는 매우 낮은 농도로 발생을 조절할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, Report of Renewable Energy 3020 Implementation Plan, pp3
- (2) Korea Power Engineering Company, Inc. , 2016, Technical Support Services Report of

Environmental facilities Extension in Yeongdong Thermal Power Plant Unit 1,2, pp. 1-8

- (3) Juan Rianza, 2017, Ignition and combustion of single particles of coal and biomass, Fuel vol.202 pp.650-655
- (4) Noriyuki, 1991, The effects of coal particle size on reductions of NOX and unburnt carbon, American Flame research Committee, Paper NO.4 