

FGR 시스템 동력 플레트 보일러의 성능 및 배기 배출물에 미치는 재순환 배기의 영향

배명환[†] · 정광호^{*} · 최승철^{*} · 조용수^{**} · 김이석^{**}

Effect of Recirculated Exhaust Gas upon Performance and Exhaust Emissions in Power Plant Boilers with FGR System

Myung-whan Bae, Kwong-ho Jung, Seung-chul Choi,
Yong-soo Cho and Yi-suk Kim

Key Words: Recirculated Exhaust Gas(재순환 배기), Performance(성능), Exhaust Emissions(배기 배출물), Power Plant Boiler(동력 플레트 보일러), Flue Gas Recirculation(FGR) System(배기 재순환 시스템), OFA(Over Fire Air) Damper Opening(2단 연소용 공기 댐퍼 개도)

Abstract

The effect of recirculated exhaust gas on performance and exhaust emissions with FGR rate are investigated by using a natural circulation, pressurized draft and water tube boiler with FGR system operating at several boiler loads and over fire air(OFA) damper openings. The purpose of this study is to apply the FGR system to a power plant boiler for reducing NO_x emissions. To activate the combustion, the suction damper of two stage combustion system installed in the upper side of wind box is opened by handling the lever between 0° and 90°, and the OFA with 0 to 20% into the flame is supplied, as the combustion air supplied to burner is reduced. It is found that the fuel consumption rate divided by evaporation rate does not show an obvious tendency to increase or decrease with rising the FGR rate, and NO_x emissions are decreased, at the same OFA damper opening, as FGR rates are elevated and boiler loads are dropped.

1. 서론

저자들은 파일릿 보일러에 FGR 시스템을 설치하여 실험한 결과, 연료소비율이 동일한 경우에 FGR률의 증가에 따라 O₂ 및 NO_x 배출물은 감소되었고 CO₂, CO, THC 및 매연 배출물은 증가되었다는 점, 연료소비율에 관계없이 흡입 및 배출 산소농도가 증가할수록 NO_x 배출물은 증가하였고 매연 배출물은 감소하였다는 점, 실험조건의 범위내에서 당량비 증가에 따라 NO_x 배출물은 증가하였지만, 동일한 연료소비율에서 FGR률의 증가에 따른 당량비 증가에 의한 NO_x 배출물은

현저하게 감소하여, 연료소비율에 따른 당량비 변화가 미치는 NO_x 배출물의 저감률보다는 FGR률에 따른 당량비 변화가 NO_x 배출물의 저감률에 미치는 영향이 더 현저하였음을 알았다.⁽¹⁾

본 연구에서는 동력플레트용 보일러에 FGR 시스템을 설치하여 보일러 부하, FGR률 및 OFA 댐퍼 개도를 파라미터로 해서 FGR률을 증가시켜 운전하는 경우, 증발률에 대한 연료소비율, NO_x · CO · 매연 배출물에 미치는 재순환 배기의 영향을 조사하여 보일러의 배기 배출물 및 성능 특성을 파악하는 것이 목적이다.

2. 운전 장치 및 방법

2.1 운전장치

본 연구에서는 열병합 발전소에 있는 160 t/hr 발전용 보일러의 NO_x 배출물을 저감시키기 위해

[†] 경상대학교 기계항공공학부

E-mail : mwbae@nongae.gsnu.ac.kr

TEL : (055)751-607 FAX : (055)762-0227

^{*} 경상대학교 대학원 기계설계학과

^{**} (주) Seen Tec

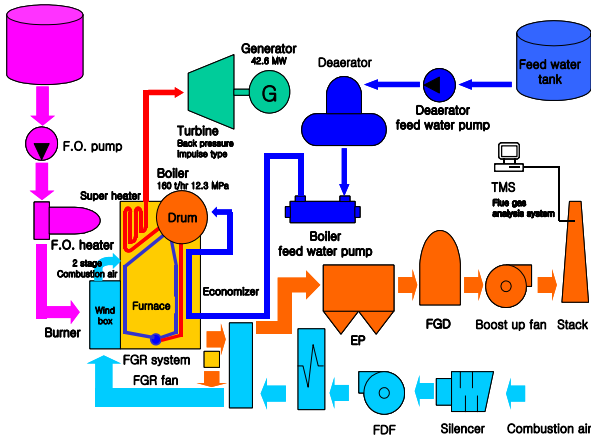


Fig. 1 Schematic diagram of operating system

FGR 시스템을 설계하여 설치한 후, 운전조건을 변화시켜 보일러 성능 및 배기 배출물 특성을 조사하였다. 본 열병합 발전소의 보일러는 지금까지 저NO_x 버너와 2단 연소법을 적용하여 NO_x 농도를 제어하여 왔지만, 연소효율 저하와 NO_x 농도 제어의 한계로 인해 FGR 시스템을 적용하여 성능 및 배기 배출물 특성을 조사하게 되었다.

Fig. 1에는 본 연구목적인 보일러 FGR 시스템 운전에 의한 배기 배출물 계측 및 분석을 수행하기 위한 운전장치의 구성도를 보여 주고 있다. 운전에 사용된 보일러는 일본 카와사키 중공업에서 설계된 R-160B 형식으로 옥외형 자연순환식 압입 송풍식 수관보일러이고, 주요 제원은 Table 1과 같다. 본 열병합 발전소는 증동식 배압터빈에 의해 동력을 발생시켜 1차적으로 발전소 내에서 소비를 하고, 여분의 전력은 한국전력주식회사 전력거래소에 판매를 한다. 폐증기는 공업단지 내 다른 회사에 열에너지로서 공급한다.

Table 1 Specification of Boiler

R - 160B type boiler	
Evaporation rate	160 ton/hr
Steam pressure	12.3 MPa
Steam temperature	538℃
Fuel oil	Bunker C oil /S 4%
Fuel consumption rate	11360 kg/hr
Efficiency	91.79%
Feed water temperature	169.5℃
Burner type	Steam jet type low-NO _x burner (6 sets)

Fig. 1의 공기상자(wind box) 상부에 설치된 TSC(two stage combustion) 시스템의 흡입댐퍼를 0° ~ 90°사이에서 조작하여 열면 버너로 공급되는 연소용 공기는 줄어들고, 연소를 활성화하기 위해 화염 내에 0 ~ 20%의 2단 연소용 공기(OFA ; over fire air)가 공급되게 된다.

보일러의 노내에서 연소반응이 일어난 후, 배기는 과열기와 절탄기를 거치고 보일러 배기 출구에서 FGR 팬 흡입댐퍼(fan suction damper)를 통해 일정량의 배기가 재순환되어 연소용 공기와 혼합되게 된다. 공기 예열기(air preheater)에서 열교환을 한 배기 배출물은 전기 집진기 EP (electrostatic precipitator, collecting efficiency 86.7%, LG 산전 (주))에서 매연이 포집되어 제거되고, FGD(flue gas desulfuration) 시스템에서 황산화물이 제거된다. FGD 시스템을 거친 배기는 부스터업 팬(booster up fan)에 의해 승압되어 굴뚝을 통하여 대기로 방출된다. 굴뚝에 설치된 배기 분석기에 의해 배기성분이 분석이 되고, 이 자료는 TMS(tele monitoring system)에 의해 보일러 제어반으로 전송되어 보일러 운전에 활용되고, 또한 환경관리공단 지역관제센터에도 전송되도록 되어있다. 본 운전에 사용된 주요한 계측장비는 Table 2와 같다.

2.2 운전 조건 및 방법

본 연구에서는 보일러 부하, FGR를 및 2단 연소용 공기량 개도를 파라미터로 하여 NO_x · CO · 매연 배출물 및 증발률에 대한 연료소비율을 조사하였다. 보일러 부하 100%, 87.5%, 75%, 62.5% 및 50%에서 각 부하별로 FRG를 0%, 5%, 10%

Table 2 Major measuring instruments

Flow rates of main steam, combustion air, recirculated flue gas and feed water	Differential pressure flow meter
Fuel oil flow meter	Oval flow meter
NO _x Emissions	Nondispersive Infrared Gas Analyzer (NDIR)
O ₂ Emissions	Zirconia method
Smoke Tester	Reflection Photometry-filter type

및 15%로 변화를 주었고, 2단 연소용 공기량은 TSC 흡입댐퍼의 개도를 0°, 10°, 20°, 30°로 조절하여 운전하였다. 댐퍼의 개도는 완전히 닫혔을 때가 0°이고, 완전히 열렸을 때가 90°이다. 공기과잉률은 보일러의 부하에 따라 최적 설계 연소조건을 적용하여 운전하였는데, 100%, 87.5%, 75%까지는 공기과잉률 1.1을 적용하였고, 62.5%, 50%에서는 공기과잉률 1.2를 적용하였다.

보일러의 급수는 강의 용수를 집수하여 전처리과정인 수처리 시스템(water treatment system)을 거친 후, 회수된 응축수와 혼합되어 탈기기에 공급된다. 혼합된 급수는 탈기기에서 용존가스를 제거하고 보일러 급수펌프에서 증압된 급수는 절탄기에서 배기와 열교환하여 가열된 급수가 보일러 드럼으로 공급된다. 보일러 드럼에서 급수는 강수관을 통해 노내의 수냉벽에 공급되어 가열되고, 물과 증기의 비중 차이에 의해 보일러 수는 상승관을 따라 보일러 드럼으로 순환된다.

보일러 드럼의 기수분리기에서 수분이 제거된 포화증기는 배기에 의해 과열기에서 과열증기로 가열시켜 이 과열증기가 증기터빈에 공급되어 동력을 발생시킨다. 증기터빈을 거친 폐증기는 배관망을 통해 산업공단에 열에너지로 공급되고, 최종적으로 응축수로 다시 회수되는데, 응축수의 회수율은 약 70%이다.

연료유는 유황성분이 4% 함유된 병커 C유를 사용했으며, 연료유 히터를 통해 110°C로 가열하여 버너에 공급하였고, 연료유량은 조절밸브를 사용하여 제어했다. 운전에서 사용된 연료유의 성분은 Table 3과 같다.

연속운전 중인 보일러에서 부하, FGR률 및 2단 연소용 공기량 댐퍼 개도의 운전조건을 변화시키는 경우, 부하에 있어서는 30분이 경과한 후 보일러가 정상에 도달한 상태에서, FGR률과 TSC 공기량 개도의 운전조건 변경시에는 10분이 경과

Table 3 Chemical and physical properties of fuel oil

Items	Values
C/H (wt%)	84.95/10.96
O/S (wt%)	0.05/ 3.67
N/Ash (wt%)	0.30/ 0.02
H ₂ O (wt%)	0.05
Lower calorific value (kJ/kg)	41353

한 후에 배기 배출물 및 성능을 계측하였다. 데이터 계측에 있어서 동일한 운전조건에 대하여 5분 간격으로 3회씩 측정하였다.

FGR률은 FGR팬의 댐퍼를 사용하여 배기 재순환량을 조절하여 변화시킬 수 있는데, FGR률은 동일조건인 흡입되는 연소용 공기량과 재순환 배기량을 측정하고 아래 식을 이용하여 구하였다.

$$\text{FRG Rate(\%)} = \frac{V_a - V_o}{V_o} \times 100$$

여기서 V_o 는 FGR을 하지 않았을 경우의 흡입된 연소용 공기량(m³/h), V_a 는 FGR시의 흡입된 새로운 연소용 공기량(m³/h)이다.

본 운전에서 배기 배출물은 굴뚝에 설치된 배기 분석기를 이용하여 측정하였고, 4% O₂를 기준으로 하여 환산하였다.

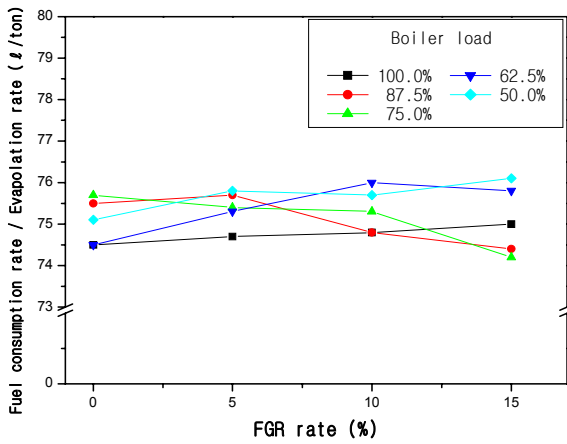
3. 운전 계측결과 및 고찰

3.1 성능 특성

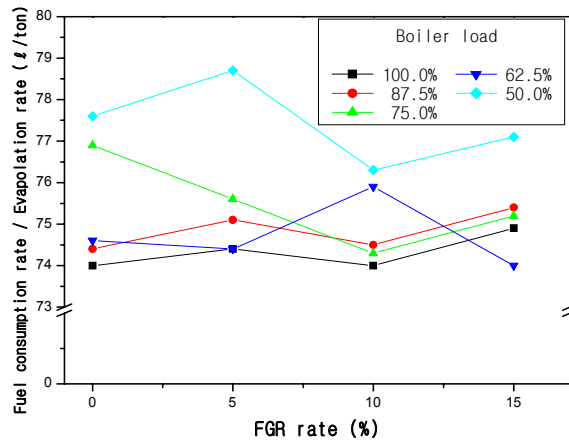
보일러의 증기발생률에 대한 연료소비율에 미치는 FGR률의 영향을 파악하기 위하여 2단 연소용 공기량 댐퍼 개도 0°, 10°, 20° 및 30°에서 보일러 부하를 파라미터로 하여 조사한 결과를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 그림에 따르면 동일한 부하와 공기량 댐퍼 개도에서 FGR률의 증가에 따른 증기발생률에 대한 연료소비율 증감의 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았고, 그 증가 및 감소의 폭이 최대 4.5 ℓ/ton으로 나타났다. 이러한 변동폭은 최대 6% 미만이고, 거의 1 ~ 2% 정도로 환경오염에 의한 영향의 심각성에 비하면 미미한 것으로 나타났다. 이것은 경유를 사용하는 디젤기관 등의 내연기관 연구에 있어서도 EGR률 40%까지는 흡입산소농도가 거의 부족하지 않기 때문에, 연료소비율의 변화폭이 크지 않은 것으로 보고되고 있다.^(2,3) 본 연구의 FGR률 범위내에서도 연소에 필요한 산소량이 부족하지 않기 때문에, 증기발생률에 대한 연료소비율에 미치는 재순환 배기의 영향이 크게 나타나지 않았다.

3.2 배기 배출물 특성

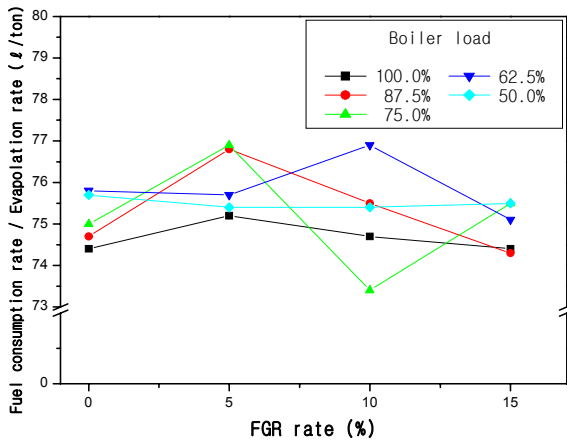
Fig. 3은 각 운전조건에 대한 NO_x 배출물 특성을 조사하기 위하여 본 연구에서는 2단 연소용



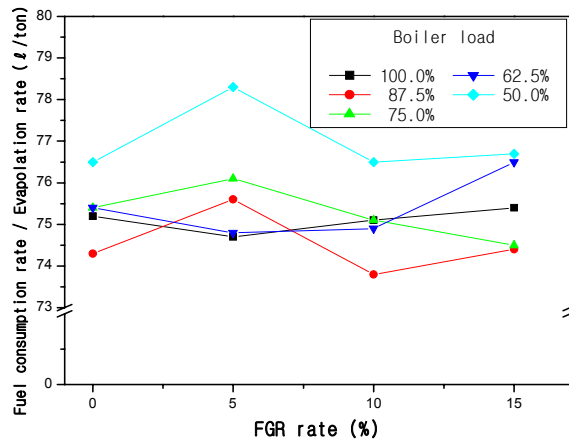
(a) OFA damper opening 0°



(b) OFA damper opening 10°



(c) OFA damper opening 20°



(d) OFA damper opening 30°

Fig. 2 Effect of FGR rate on fuel consumption rate divided by evaporation rate as a parameter of boiler load at OFA damper openings of 0°, 10°, 20° and 30°

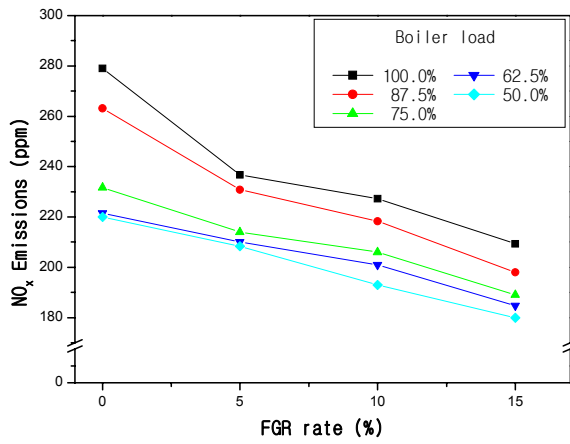
공기량 댐퍼 개도 0°, 10°, 20° 및 30°에서 보일러 부하 및 FGR률 중 1개의 조건을 고정시키고, 1개의 조건만을 변화시키면서 NO_x 배출물을 측정 한 결과를 나타낸 것이다.

그림으로부터 동일한 2단 연소용 공기량 댐퍼 개도와 FGR률에서는 보일러 부하가 클수록 NO_x 배출물이 증가하였고, 동일한 공기량 댐퍼 개도와 부하에서는 FGR률이 증가할수록 NO_x 배출물이 감소하였다. 특히, 부하가 클수록 FGR률이 증가에 따른 NO_x 배출물의 감소폭이 큼을 알 수 있었다. 그런데 부하가 75% 이하에서는 2단 연소용 공기량 댐퍼 개도의 영향이 나타났지만, 그 이상의 부하에서는 공기량 댐퍼의 영향은 크게 나타나지 않았다. 재순환 배기를 연소실에 순환시키는 FGR법은 연소실의 화염온도를 저하시키는 작용과 O₂ 분압을 저하시키는 양작용에 의해 NO_x 생성을 억제하는 것으로 알려져 있다. 본 연

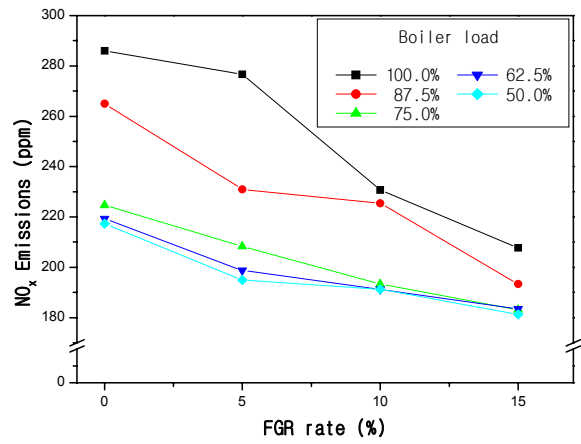
구에서 FGR률의 증가에 따라 NO_x 배출물 감소가 현저하게 나타나는 것은 재순환 배기중의 불활성 가스량의 증가에 따른 연소실의 화염온도 저하의 영향보다는 O₂ 농도의 저하에 의한 영향이 클 것으로 예측된다.

보일러의 발전용량이 100 MW 미만인 경우, 기존시설의 NO_x 배출허용 기준은 250 ppm(4% O₂ 농도) 이하이므로, 이 값을 본 연구의 Fig. 4에서 수행된 결과와 비교해 보면 보일러 부하 100%인 경우를 제외하면 FGR률 5%로 만족시킬 수 있고, 부하 100%인 경우에는 FGR률 10%를 적용시키면 만족시킬 수 있다. FGR률 10%를 적용하면 어느 운전조건에서도 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

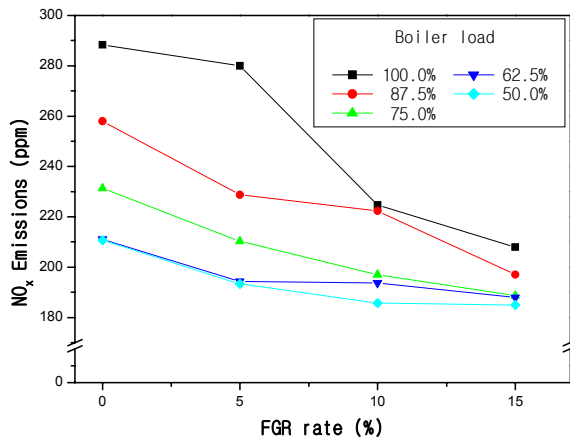
Fig. 3과 동일한 운전조건에서 측정된 매연 배출물을 나타낸 것이 Fig. 4이다. 매연은 불완전 연소에 의해 많이 생성되는데, 연소가스온도, 연소시간, 공기량 등에 의존된다. 즉, 연소가스온도



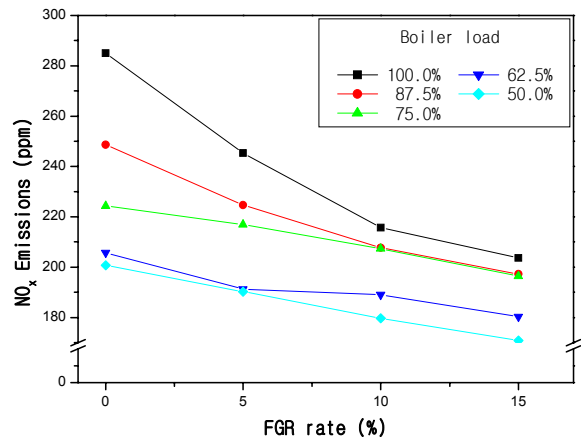
(a) OFA damper opening 0°



(b) OFA damper opening 10°



(c) OFA damper opening 20°



(d) OFA damper opening 30°

Fig. 3 Effect of FGR rate on NO_x emissions as a parameter of boiler load at OFA damper openings of 0°, 10°, 20° and 30°

가 낮거나, 연소실에서의 배출속도가 빠르거나, 공기가 부족하면 매연 생성량이 증가된다. 그러나 어떤 조건에서든지 적절한 값이 존재하는데, 특히 연소가스온도와의 관계는 종(bell)모양의 적절한 생성온도가 존재하는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

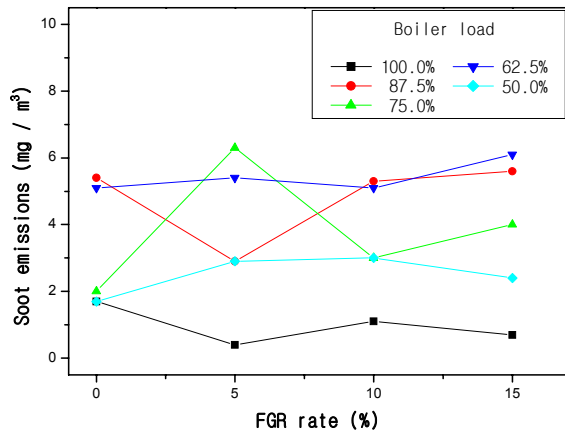
본 연구에서는 매연 배출물을 전체 체적배기량에 대한 배출 매연질량으로 나타내고 있는데, 앞에서 검토한 것처럼 본 열병합 발전소의 보일러에서는 최종굴뚝에서 배출되기 전에 전기 집진기에서 매연이 포집되어 효율 86.7% 정도로 제거되고 있기 때문에, 보일러 부하, 공기량 댐퍼 개도 및 FGR률의 운전조건에 관계없이 배출허용 기준 값 100 mg/m³(4% O₂ 농도)보다 훨씬 적은 극소량의 매연이 배출되고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

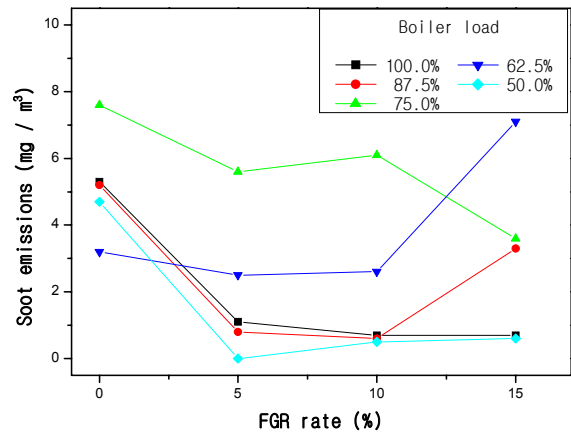
본 연구에서는 동력플랜트용 보일러에 FGR시스템을 설치하여 보일러 부하, FGR률 및 OFA댐퍼 개도를 파라미터로 해서 FGR률을 증가시키는 경우, 보일러 성능 및 배기 배출물 특성을 조사하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

1) 증기발생률에 대한 연료소비율은 FGR률의 증가에 따라 뚜렷한 경향을 나타내지 않았고, 그 증가 및 감소의 변동폭이 크지 않았다. 보일러 부하 및 공기량 댐퍼 개도에 따른 영향도 크게 나타나지 않았다.

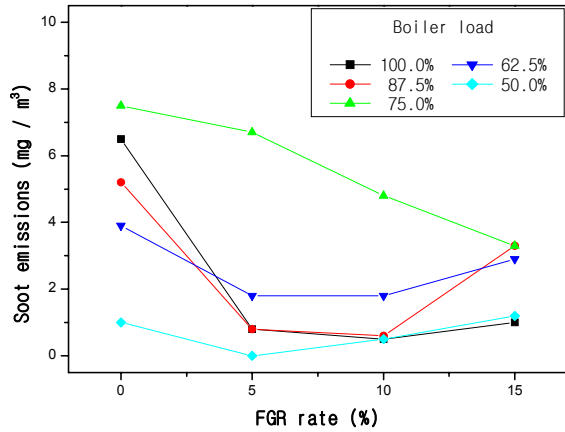
2) NO_x 배출물은 동일 2단 연소용 공기량 댐퍼 개도에서는 보일러 부하가 감소할수록, 또한 FGR률이 증가할수록 감소하였다. 동일 보일러 부하에서 FGR률이 증가할수록 NO_x 배출물이 감소하였고, 동일 FGR률에서는 보일러 부하가 클수록 NO_x 배출물이 증가하였다. 특히, 보일러 부



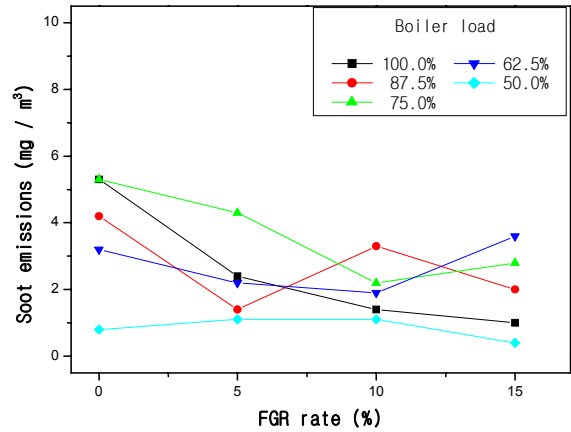
(a) OFA damper opening 0°



(b) OFA damper opening 10°



(c) OFA damper opening 20°



(d) OFA damper opening 30°

Fig. 4 Effect of FGR rate on soot emissions as a parameter of boiler load at OFA damper openings of 0°, 10°, 20° and 30°

하가 클수록 FGR를 증가에 따른 NO_x 배출물 감소폭이 컸지만, 2단 연소용 공기량 댐퍼 개도의 영향은 크게 나타나지 않았다.

3) 매연 배출물은 전기 집진기에서 매연이 포집되어 효율 86.7% 정도로 제거되었기 때문에, 보일러 부하, 공기량 댐퍼 개도 및 FGR률의 운전조건에 관계없이 극소량의 매연이 배출되었다.

후 기

본 연구는 경상대학교 공학연구원 주관의 제12차 산학공동 기술개발 컨소시엄사업, (주) 신텍 위탁과제연구, 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00307-0), NURI 사업 및 BK21 사업의 지원에 의해 수행된 것으로 도움을 준 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bae, M. W., Kim, J. M., Kim, Y. S., Cho, Y. S. and Choi, S. C., 2003, "Effect of Recirculated Exhaust Gas on Exhaust Emissions of Boiler with FGR System," Proceedings of the KSME 2003 Autumn Annual Meeting, pp. 390 ~ 395.
- (2) Bae, M. W., 1999, "A Study on the Effects of Recirculated Exhaust Gas on NO_x and Soot Emissions in Diesel Engines with Scrubber EGR System," SAE Paper No. 1999-01-3266, pp. 78 ~ 87.
- (3) Bae, M. W., 1989, "A Study on Soot Formation in Premixed Combustion at High Pressures," Doctoral Dissertation of Tokyo Institute of Technology, pp. 1 ~ 168.