

< 논문 >

FGR 시스템 보일러의 배기 배출물에 미치는 재순환 배기의 영향에 관한 연구

배명환[†] · 정광호^{*} · 조용수^{**}

(2006년 8월 5일 접수, 2007년 4월 4일 심사완료)

A Study on the Effect of Recirculated Exhaust Gas upon Exhaust Emissions of Boiler with a FGR System

Myung-whan Bae, Kwang-ho Jung and Yong-soo Cho

Key Words: Recirculated Exhaust Gas(재순환 배기), Exhaust Emissions(배기 배출물), Boiler(보일러), Flue Gas Recirculation(FGR) System(배기 재순환 시스템), Intake and Exhaust Oxygen Concentrations(흡입 및 배출 산소농도), Equivalence Ratio(당량비)

Abstract

The effects of recirculated exhaust gas on exhaust emissions under four kinds of nozzle tip with the different fuel consumption rates are experimentally investigated by using an once-through boiler with a FGR system. The purpose of this study is to develop the FGR control system for reducing NO_x emissions in boilers. Intake and exhaust oxygen concentrations, and equivalence ratio are considered to figure out the effect of FGR rate on exhaust emissions at various fuel consumption rates. It is found that NO_x emissions are markedly decreased, while soot emissions are increased owing to the drop of intake and exhaust oxygen concentrations, and the rise of equivalence ratio as FGR rates are elevated. One can also conclude that the reduction in NO_x emissions is more considerably influenced by the variation of equivalence ratio due to the FGR rate than the fuel consumption rate.

1. 서론

최근 보일러 등의 연소장치에서 배출되는 배기로 인한 대기오염 문제가 매우 심각하게 부각됨에 따라 이에 대한 해결대책에 많은 관심을 가져왔다. 이러한 대기오염원의 주된 인자는 아파트 난방설비 등에 설치되어 있는 보일러의 연소장치에서 배출되는 유해성분 물질인데, 대도시 혹은 그 주변에 있어서는 배기 배출물의 규제가 점점 강화되고 있고, 최근에는 열병합 발전소용, 건설기계용, 선박용 등의 보일러에서도 많은 대기오염물질을 배출시키고 있기 때문에, 배기 배출물의 규제가 엄격하게 시행되고 있다.^(1~4)

어떤 의미에 있어서는 경유 연소장치의 존립 자체가 문제시되고 있지만, 이 연소장치는 동력원으로서 효율성, 내구성, 신뢰성 등에서 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라, CO₂의 배출이 적기 때문에 에너지 절약 및 지구온난화 억제입장에서 바람직한 동력원임이 입증되어 왔다. 따라서 금후의 과제로서는 보일러 등의 연소장치에서 배출되는 배기를 단계적으로 저감시켜 장점을 최대한으로 살려 나아가야 하는 것이다.⁽⁵⁾

NO_x 배출물의 저감대책으로서는 연료분사시기 지연, 물분사, 물-경유 유상연료, 플라즈마 촉매, EGR(FGR), SCR 등을 포함하여 다양한 연소과정 중 처리, 후처리 등의 방법이 있는데, 이 들 중, 연소장치의 연소영역에 배기 일부분을 재순환시켜 혼합하는 EGR(FGR)의 방법이 가장 단순하게 배기 배출물 중의 NO_x 농도를 저감시키는 고효율적인 방법 중의 하나로 알려져 왔다.^(6,7)

그런데 대기오염의 주원인 연소장치에서 배출

[†] 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구센터

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

TEL : (055)751-6071 FAX : (055)762-0227

^{*} 경상대학교 대학원 기계설계학과

^{**} (주) Seen Tec

되는 NO_x 와 매연 배출물은 생성과정 등이 서로 다르기 때문에, 한 가지의 방법 만에 의해 동시에 여러 가지 배기 배출물을 저감시키는 것은 간단하지가 않다. 따라서 최근에는 전처리, 후처리, 연소개선 등의 기술을 조합시킨 방법을 채용하여 2 이상의 배기 배출물을 저감시키고 있다.^(8,9)

본 연구에서는 NO_x 배출물의 저감대책으로서 가장 효율적인 방법으로 알려진 FGR(Flue Gas Recirculation, 이하 FGR이라고 칭한다.)을 보일러에 적용하였을 경우, FGR률의 변화가 당량비를 파라미터로 한 배기 배출물에 미치는 영향을 구체적으로 파악하고, 이러한 현상론적 데이터를 가지고 이들에 미치는 영향을 흡입산소농도, 배출산소농도 및 당량비를 이용하여 고찰하고 그 실험결과를 분석하여 보일러 운전에 적합한 정밀하고도 응답성이 좋은 FGR률 제어시스템을 개발하기 위한 기초자료로서 활용하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 보일러는 국내에서 생산되는 스테인리스 관류 보일러이고, 주요 제원은 Table 1과 같다.

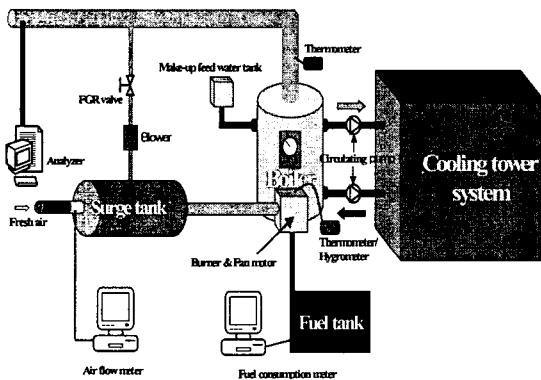


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Table 1 Specification of a stainless once-through boiler

Hot water output	58.1 kW (50,000 kcal/h)
Supply capacity of hot water	21 ℓ/min
Efficiency	88.5%
Fuel consumption rate	5.84 kg/h

실험에 사용된 보일러는 온수발생용으로 순환 펌프에 의하여 흡입한 물이 설정한 온도(본 연구의 경우 85℃)로 가열되면 보일러가 정지된다. 따라서 보일러를 연속적으로 운전시키기 위해서는 가열된 온수를 외부로 배출시키고, 다시 새로운 물을 흡입시켜야 하지만, 온수를 버리는 것은 낭비이기 때문에, 열교환기에 의해 냉각시켜 다시 사용할 수 있도록 냉각탑 시스템을 적용하여 연속적으로 보일러의 순환수가 공급되도록 하였다.

연료소비율은 중량식 유량계(HF-2000GD)를 사용하여 단위시간에 소비되는 연료를 측정하여 소비량을 계산하였고, 흡입공기량은 층류 유량계를 설치하여 측정하였다. 또한, CO 및 CO_2 배출물은 NDIR 배기 분석계(CGT-7000), O_2 배출물은 지르코니아(Zirconia)법에 의한 O_2 분석계, NO_x 배출물은 화학발광법 NO_x 분석계(Signal 4000VM), THC 배출물은 HFID THC 분석계(Signal 3000HM), 매연은 광반사식 디젤 매연측정기(DST 210)를 사용하여 측정하였다.

보일러의 흡기측에는 신기와 재순환 배기가 잘 혼합되도록 서지탱크를 설치하였는데, 보일러에 FGR률을 적용하는 경우에는 배출되는 배기의 적절한 공급을 위해 송풍기를 사용하여 서지탱크에 주입시켰다. 서지탱크의 신기 흡입구에는 흡입공기량을 측정하기 위하여 층류 유량계를 설치하였고, 신기 흡입시 이물질이 들어가지 않도록 에어 필터를 층류 유량계 앞에 부착시켰다. 또한, 연소용 흡입 혼합물(신기 + 재순환 배기)의 온도 및 습도를 측정할 수 있도록 디지털식 온-습도계를 설치하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

본 연구에서는 당량비와 FGR률을 파라미터로 하여 O_2 · CO_2 · CO · THC · NO_x · 매연 배출물에 미치는 영향을 조사하였다.

당량비는 연료량 혹은 공기량을 변화시켜 바꿀 수 있는데, 본 연구에서는 공기량을 일정하게 고정시켜 놓고 연료량을 변화시켜 당량비를 바꾸었다. 실험에 사용된 보일러에 가장 적절하게 설계된 노즐팁의 연료분사율은 5.84 kg/h(난방출력 58.1 kW, 온수출력 50000 kcal/h)인데, 본 연구의 고찰에 있어서는 이 노즐팁을 정상적인 연료분사율의 노즐팁으로 칭하기로 한다. 이 노즐팁 외에도 연료분사율이 다른 4 개의 노즐팁, 즉, 6.82

kg/h(116.2 kW, 100000 kcal/h), 6.30 kg/h(81.3 kW, 70000 kcal/h), 4.45 kg/h(40.6 kW, 35000 kcal/h), 3.31 kg/h(29.0 kW, 25000 kcal/h)를 사용했다. 그런데 노즐팁의 연료분사율이 6.82 kg/h인 경우에는 흡입공기유에 비해 연료분사율이 과다하여 본 실험에서 사용된 보일러에서는 연소가 잘 이루어지지 않았기 때문에, 이 노즐팁을 제외시킨 나머지 4 개의 노즐팁을 사용하여 연료분사율만을 변화시켜 당량비를 바꾸었다.

보일러를 가동시켜 1시간쯤 지난 후, 계측기를 사용하여 배기 배출물을 측정하였으며, 배기 재순환 실험의 경우에는 재순환되어 신기와 흡입하여 보일러의 연소실에 들어가는 시간을 고려하여 주어진 조건을 조정한 후 10분쯤 운전을 한 다음에 계측기의 값이 변화하지 않은 안정된 값을 측정하였다.

FGR률 계산은 FGR밸브를 사용하여 재순환 배기량을 조절한 후 기관의 흡기측과 배기측의 CO₂ 농도를 측정하여, 일반적으로 많이 사용되고 있는 아래 식을 사용하여 구하였다.⁽⁶⁾

$$\text{FGR Rate (\%)} = \frac{[\text{CO}_2]_{\text{FGR}} - [\text{CO}_2]_{\text{w/o FGR}}}{[\text{CO}_2]_{\text{EXH}}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, [CO₂]은 FGR시 흡기관내의 CO₂ 농도, [CO₂]_{w/o FGR}은 FGR을 하지 않았을 경우에 있어서 흡기관내의 CO₂ 농도, [CO₂]_{EXH}는 FGR시 배기관내의 CO₂ 농도를 나타낸다.

보일러의 연소에 적용될 수 있는 FGR률의 최대값은 실험에 의해 구할 수 있지만, 본 연구에서는 계속적으로 안정되게 연소가 가능한 25%까지 5%로 간격으로 실험을 하였다. 실험에 있어서는 배기온도를 수시로 측정하여 보일러의 연소상태를 점검하였고, 흡기 온도 및 습도를 측정하여 혼합 혼합물의 상태를 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 FGR률

관류 보일러를 사용하여 FGR률을 적용하는 경우에 배출되는 배기의 특성을 조사하기 위해 연료분사율을 파라미터로 하여 FGR률을 0에서 25%까지 5% 간격으로 실험한 결과를 나타낸 것이 Fig. 2이다.

배출산소(O₂)농도는 연소의 양부를 판단하는

중요한 요소이고, 확산화염과 같은 연소기에서 과잉공기가 많지 않을 경우에는 연료와의 혼합정도를 판단할 수 있는 인자가 될 수 있는 배출물이다. 당연한 결과이지만, 그림에서 정상적인 노즐팁보다 연료분사율이 적을수록 배출산소농도는 증가되고 있다. 또한, FGR률의 증가에 따라 배출산소농도도 적어짐을 알 수 있다. 그런데 정상적인 노즐팁보다 연료분사율이 많은 경우에 배출산소농도가 아주 높지만, FGR률의 증가에 따라 급격히 감소하고 있다. 이것은 연소가 정상적으로 이루어지고 있지 않음을 뒤에서 고찰하는 CO, THC 및 매연 배출물에서 알 수 있다.

이산화탄소(CO₂) 배출물은 지구온난화에 많은 영향을 주는 물질로 연비의 척도가 되는 값이다.^(10~12) 배출산소농도와는 반대의 경향을 나타내어 CO₂ 배출물은 연료분사율이 많을수록 많아지고, FGR률의 증가에 따라 많아짐을 알 수 있다. 그런데 과잉연료의 경우에는 연료중의 탄소성분 때문에 CO₂ 배출물도 많아지고 있다.

CO 배출물은 산소부족 혹은 혼합불량에 의해 발생되는데, 본 연구에서는 정상적인 노즐팁의 경우보다 약간 적은 연료분사율에서 가장 CO 배출물이 적었고, 정상적 노즐팁의 경우에는 10%를 초과하는 FGR률부터 FGR률의 증가에 따라 급격하게 증가되고 있음을 알 수 있다. 정상적인 노즐팁보다 연료분사율이 많은 경우에는 CO 배출물이 상당히 많이 증가되고 있다. 이러한 현상은 이전의 연구에서도 밝혔지만, 연료과잉의 경우에는 연료중의 탄소성분이 많기 때문에, CO₂와 CO 배출물이 동시에 증가됨을 알 수 있다.⁽¹³⁾

총탄화수소(THC)는 불완전연소에 의해 발생하는 배출물로서 정상적인 노즐팁의 경우에 가장 적게 나타났고, 이 보다 연료분사율이 적을수록 Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼 혼합기가 희박하게 되어 오히려 불완전연소 발생으로 인해 THC 배출물이 증가되고 있다. THC 배출물이 가장 적은 정상적인 노즐팁의 경우에는 FGR률의 증가에 따라 THC 배출물은 약간 증가되고 있고, 희박 혼합기의 경우에는 FGR률의 영향이 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 그러나 연료분사율이 정상적인 노즐팁보다 많은 경우의 노즐팁에 있어서는 THC 배출물이 현저하게 많고, FGR률의 증가에 따른 THC 배출물의 증가도 상당히 크게 나타나고 있다.

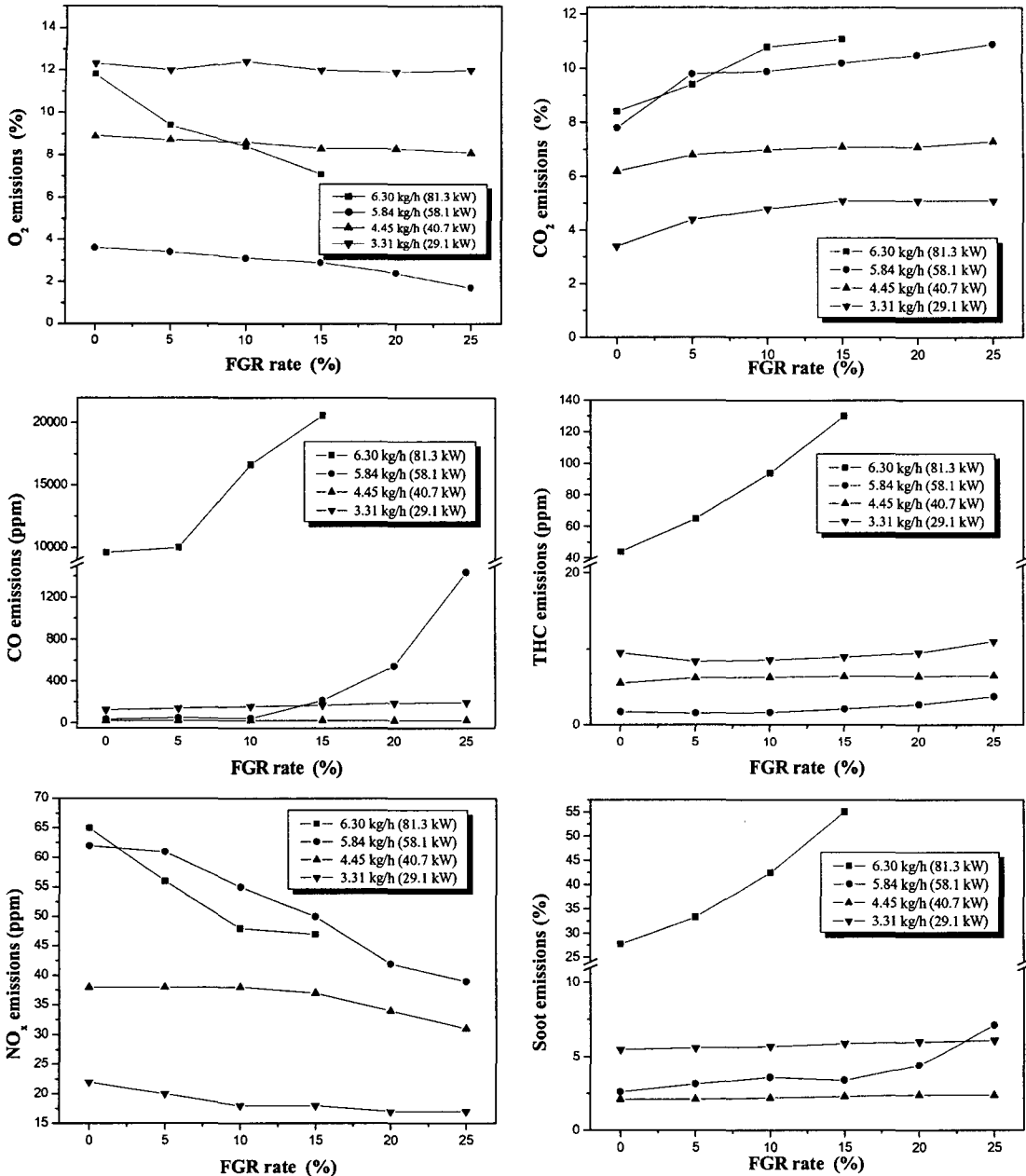


Fig. 2 Effect of FGR ratio on O₂, CO₂, CO, THC, NO_x and soot emissions as a parameter of fuel consumption rate

본 연구에서 사용된 보일러는 소형이고, 증기 발생률이 아닌 온수가열용이기 때문에, 연소실의 온도가 높지 않은데, 이것은 열적 NO_x(thermal NO_x)의 생성이 많지 않음을 의미하기도 한다. 따라서 근본적으로 생성되어 배출되는 NO_x 배출물의 양이 많지 않기 때문에, 연소가스온도의 영향

에 의한 정량적인 고찰은 할 수 없지만, 정성적인 고찰은 가능하다고 판단된다.

그림에서 연료분사율이 정상적인 노즐팁의 경우에 NO_x 배출물이 가장 많고, 연료분사율이 적어 희박 혼합기인 경우에는 NO_x 배출물이 적었다. 한편, FGR률을 증가시킬수록 같은 연료소비

울일지라도 NO_x 배출물이 감소됨을 알 수 있다. 그런데 연료소비율 6.30 kg/h에서는 본 관류 보일러의 특성상 FGR를 15%를 초과시키는 실험이 불가능하였다. FGR을 하지 않았을 경우에 NO_x 배출물이 가장 많았고, 실험범위 내에서는 FGR률이 증가할수록 NO_x 배출물의 감소폭이 상당히 큼을 알 수 있다.

일정한 연료소비율에 따른 NO_x 배출물의 감소율을 FGR률의 증가에 대하여 정리한 실험결과를 Table 2에 보여주고 있다. 표에 의하면 FGR률을 25%까지 증가시켰을 경우에 연료소비율 3.31 kg/h에서는 FGR을 하지 않았을 경우에 비하여 NO_x 배출물이 22.7%, 연료소비율 4.45 kg/h에서는 18.4%, 연료소비율 5.84 kg/h에서는 37.1% 정도 감소되었고, 연료소비율 6.30 kg/h에서는 FGR를 15%까지 증가시켰을 경우에 FGR을 하지 않았을 경우에 비하여 NO_x 배출물이 27.7% 정도 감소됨을 알 수 있었다. Fig. 2와 Table 2의 결과에 따르면 본 관류 보일러의 가장 적절한 연료소비율인 5.84 kg/h의 노즐팁에서 FGR률의 증가에 따른 NO_x 배출물의 저감률이 가장 높음을 알 수 있었다.

Table 3에서는 일정한 FGR률에 대하여 연료소비율을 증가시켰을 경우의 NO_x 배출물의 증가율을 보여주고 있다. Table 3에 의하면 FGR률 0%에서는 연료소비율을 3.31 kg/h에서 6.30 kg/h로 증가시켰을 경우에 NO_x 배출물이 2.95배, FGR률 5%에서는 2.80배, FGR률 10%에서는 2.67배, FGR률 15%에서는 2.61배 정도가 증가되었고, 연료소비율을 3.31 kg/h에서 5.84 kg/h로 증가시켰을 경우에 FGR률 20%에서는 NO_x 배출물이 2.47배, FGR률 25%에서는 2.29배 정도가 증가되었다. FGR률 20%, 25%에서는 연료소비율 6.30 kg/h의 실험을 할 수 없었기 때문에 데이터를 얻지는 못했지만, 이 표에 의하면 연료소비율 5.84 kg/h에서 NO_x 배출물이 가장 많이 배출되고 있음을 알 수 있다.

Table 2와 3을 종합하면 본 관류 보일러의 정상적 연료소비율인 5.84 kg/h의 노즐팁에서 NO_x 배출물이 가장 많이 배출되었고, 이 연료소비율 값에서 FGR률의 증가에 따라 NO_x 배출물의 감소율이 가장 많이 되고 있음을 알 수 있다. FGR률의 증가에 따라 NO_x 배출물이 감소하는 이유

Table 2 Comparison between reduction rates of NO_x emissions by elevating the FGR rate at various fuel consumption rates

Fuel consumption rate (kg/h)	FGR rate (%)					
	0	5	10	15	20	25
	Reduction rate (%) of NO _x emissions					
3.31	0	10.0	18.2	18.2	22.7	22.7
4.45	0	0.0	0.0	2.6	10.5	18.4
5.84	0	1.6	11.3	19.4	32.3	37.1
6.30	0	13.8	26.2	27.7		

Table 3 Comparison between increasing rates of NO_x emissions by elevating the fuel consumption rate at various FGR rates

FGR rate (%)	fuel consumption rate (kg/h)			
	3.31	4.45	5.84	6.30
	Increasing rate (%) of NO _x emissions			
0	100	173	282	295
5	100	190	305	280
10	100	211	305	267
15	100	206	278	261
20	100	200	247	
25	100	182	229	

로서는 불활성가스의 혼입에 따라 혼합기의 열용량이 증가하여 연소가스온도가 저하함과 동시에 흡입산소농도의 저하에 의하여 상대적으로 산화반응이 감소되기 때문이다.

매연 생성은 CO 생성과 마찬가지로 불완전 연소에 의해 많이 발생되는데, 연소가스온도, 시간, 공기량(당량비) 등에 의존된다.^(14,15) 즉, 연소가스온도가 낮거나, 기관의 배출속도가 빠르거나, 공기가 부족하면 매연 생성량이 증가한다. 그러나 어떤 조건이든지 적절한 값이 존재하는데, 특히 연소가스온도와와의 관계는 종(bell)모양의 최적생성온도가 존재한다.^(16,17) 본 연구에서는 연료소비율이 3.31 kg/h인 경우에는 흡입공기율의 과잉으로 오히려 매연 생성량은 증가되고, 연료소비율이 6.30 kg/h인 경우에는 흡입공기율의 과부족으로 매연 생성량이 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 흡입되는 공기량이 일정하기 때문에, 연료소비율의 증가는 당량비의 증가를 의미한다. Fig. 3에는 일정한 연료소비율에 있어서 당량비의 변화에 따른 각 배기 배출물을 나타내

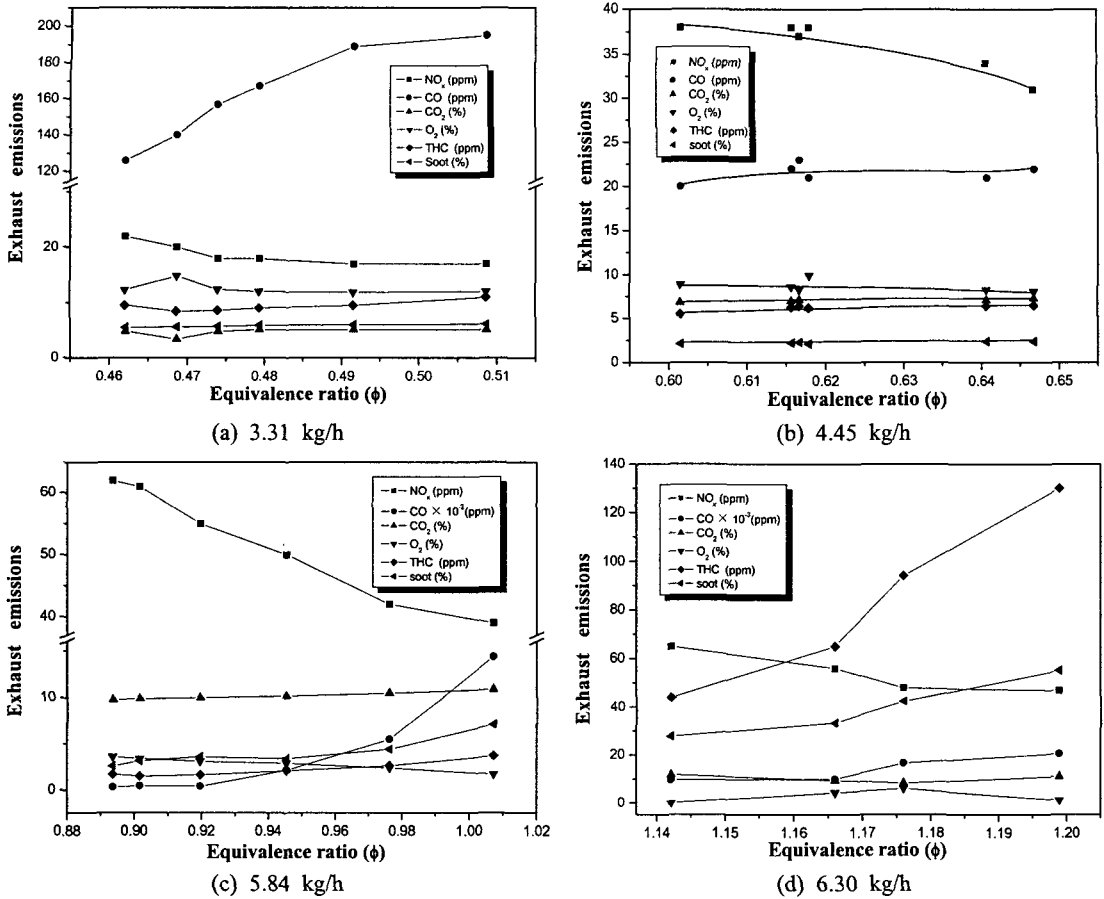


Fig. 3 Effect of equivalence ratio on exhaust emissions at the fuel consumption rate of 3.31 kg/h, 4.45 kg/h, 5.84 kg/h and 6.30 kg/h

고 있다. 일반적으로 연료소비율과 흡입공기율이 일정하면 당량비는 일정하지만, 본 연구에서는 재순환 배기를 혼입시키기 때문에, FGR률에 따라서 당량비가 달라진다.

그림에서 연료소비율이 6.30 kg/h인 경우를 제외하고는 같은 연료소비율에서 FGR률을 변화시켜 당량비가 조금 변화해도 O₂, CO₂, THC, 매연 배출물은 크게 변화되고 있지 않지만, NO_x, CO 배출물은 동일한 연료소비율에서 FGR률을 변화시켜 재순환 배기의 혼입에 따른 당량비 변화에 상당한 영향을 받아 변화가 큼을 알 수 있다. 특히 NO_x 배출물은 동일한 연료소비율에서 FGR률의 증가에 따라 감소되고 있음을 알 수 있다.

3.2 흡입산소농도

저자들^(18,19)은 디젤기관의 EGR연구에서 흡입산소농도는 기관회전속도 및 부하에 관계없이 EGR

률의 증가에 따라 직선적으로 감소하고 동EGR률인 경우에는 기관회전속도가 증가할수록, 또한 부하가 적을수록 크다는 점과, 배출산소농도도 EGR률의 증가에 따라 완만하게 감소하고, 부하, 기관회전속도 등의 기관성능과도 관계가 있음을 밝혔다.

보일러에 FGR를 적용한 경우에 있어서 산소농도에 따른 NO_x 및 매연 배출물의 특성을 조사하기 위하여 Fig. 4에는 FGR률의 증가에 따른 흡입 및 배출 산소농도에 대하여 연료소비율을 파라미터로 나타내고 있다. 그림에서 동일한 연료소비율의 경우에 FGR률이 증가할수록 흡입산소농도는 감소하고 있다. 또한, 연료소비율이 증가할수록 FGR률의 증가에 따라 흡입산소농도도 크게 감소되고 있음을 알 수 있다.

관류 보일러의 실험에서는 본 실험조건인 연료소비율이 가장 큰 경우를 제외하고는 디젤기관

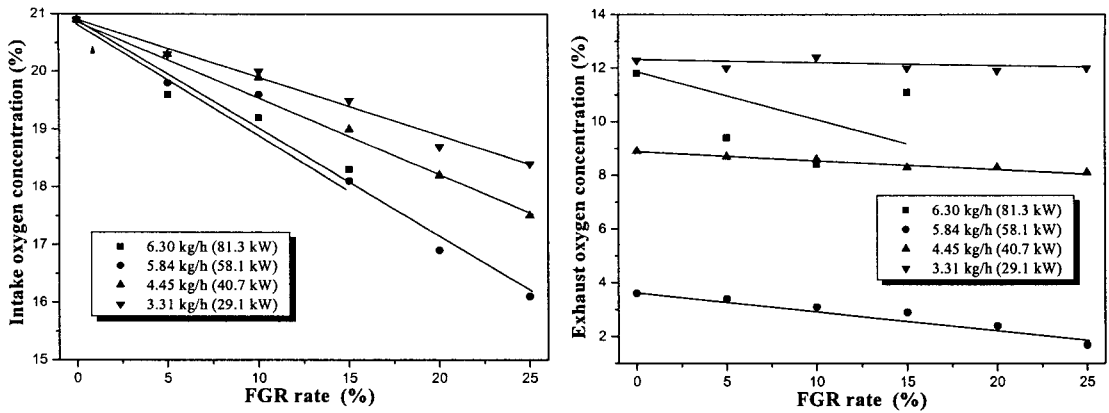


Fig. 4 Correlation between intake and exhaust oxygen concentrations, and FGR rate with fuel consumption rate as a parameter

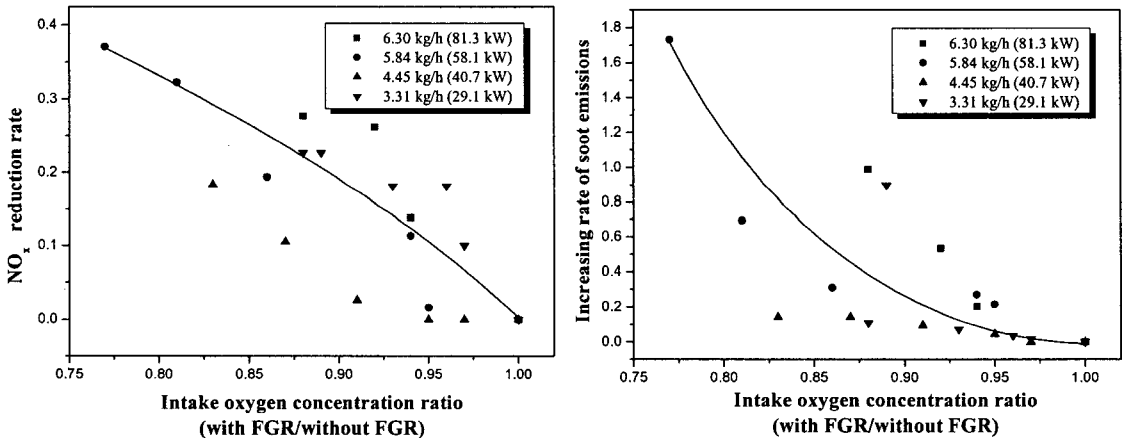


Fig. 5 Effect of intake oxygen concentration (with FGR/without FGR) on NO_x and soot emissions as a parameter of fuel consumption rate

연구에서와 마찬가지로 FGR률의 증가에 따라 배출산소농도가 완만하게 감소할 뿐만 아니라, 연료소비율의 영향이 크게 미치고, 연소시간이 길기 때문에, 디젤기관보다도 배출산소농도의 절대량이 적게 나타나고 있다. 특히, 본 보일러의 정상적인 연료소비율인 경우에는 배출산소농도가 가장 적게 나타나고, 이보다 연료소비율이 적을수록 배출산소농도는 많이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5의 좌측에는 FGR시와 비FGR시의 흡입산소농도비에 따른 NO_x 배출물의 감소율을 나타내고 있는데, 여기서 NO_x 감소율은 동일 조건에서 FGR률 0%일 경우의 NO_x 배출물과 각 FGR률에 있어서 NO_x 배출물을 비교하여 감소된 양의 비를 말한다.

그림에서 동일한 연료소비율일지라도 FGR률이

증가하면 흡입산소농도가 감소하여 NO_x 배출물이 저감되어 감소율은 증가되고 있을 알 수 있다. FGR률이 증가하면 흡입산소농도의 감소로 인하여 연료과농 영역이 증가하게 되는데, 그렇게 되면 NO_x 생성영역의 연소온도가 저하하고, 저온연소에서 반응이 일어나기 때문에, NO_x 생성이 감소되어 배출물도 감소하게 된다.

그런데 그림에서 동일한 연료소비율에서도 흡입산소농도가 변화하고 있는 것은 FGR률의 증가에 따라 새로운 흡입산소농도가 감소되고 있음을 의미한다. 따라서 일정한 연료소비율일지라도 FGR률이 증가하면 당량비는 증가하게 되어 흡입산소농도비는 감소하게 된다.

앞에서 검토한 것처럼 본 연구에서는 FGR를 적용하지 않는 경우에 단순한 당량비의 증가는

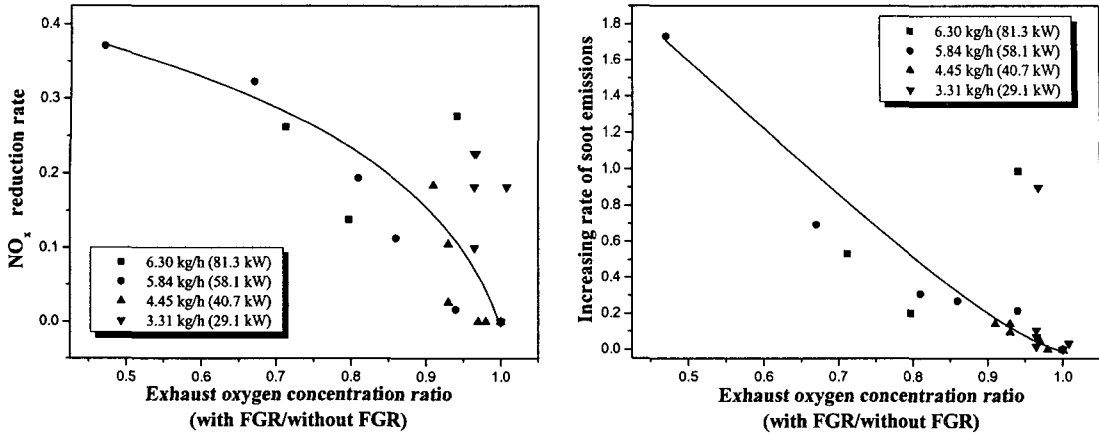


Fig. 6 Effect of exhaust oxygen concentration(with FGR/without FGR) on NO_x and soot emissions as a parameter of fuel consumption rate

연료량의 상대적인 증가를 의미하기 때문에 연료 NO_x(Fuel NO_x) 생성의 영향에 의해 NO_x 배출물이 증가되고 있음을 알 수 있다. 그러나 FGR을 적용하지 않을 경우와 FGR을 적용했을 경우의 흡입산소농도비로 NO_x 배출물 저감률을 나타내면 흡입산소농도의 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 같은 연료소비율일지라도 흡입산소농도비가 작으면, 즉 FGR률이 증가되면 당량비도 증가되고, NO_x 배출물의 저감률이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 5의 우측에는 FGR시와 비FGR시의 흡입산소농도비에 따른 매연 배출물의 증가율을 나타내고 있는데, 여기서 매연 증가율은 동일 조건에서 FGR률 0%일 경우의 매연 배출물과 각 FGR률에 있어서 매연 배출물을 비교하여 증가된 량의 비를 말한다.

FGR률이 높은 조건에 있어서의 5개 데이터를 제외하고는 FGR을 하지 않았을 경우보다 0.3배 정도 매연 배출물이 더 증가되고 있음을 알 수 있다. NO_x 배출물과는 저감대책에 있어서 동시에 만족시킬 수 없는 교환조건의 관계 때문에, FGR을 적용하는 경우에는 매연 배출물이 증가되어 동시에 저감대책을 강구하여야함을 알 수 있다.

FGR률이 증가하면 흡입산소농도가 줄어들어 연소가스온도가 저하되고, 상대적으로 혼합이 나빠지기 때문에 매연 배출물은 증가한다. 그러나 디젤기관보다는 연소시간이 길어지기 때문에 디젤기관에 EGR을 적용하는 경우보다는 매연이 적게 배출되었다.⁽¹⁹⁾

3.3 배출산소농도

Fig. 6의 좌측에는 FGR시와 비FGR시의 배출산소농도비에 따른 NO_x 배출물의 감소율을 나타내고 있는데, 그림에서 배출산소농도비의 감소에 따라 NO_x 배출물의 저감률이 증가하고 있다.

디젤기관 실험에서 검토한 것처럼 보일러에 있어서 배출산소농도는 FGR률, 효율 등의 영향에 의해 변화하리라 예상되는데, 본 관류 보일러의 실험에서는 연료소비율이 적을수록 배출산소농도비의 변화 폭이 적고, 배출산소농도비의 감소에 따른 NO_x 배출물의 저감률이 급격하게 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 6의 우측에는 동일한 조건의 매연 배출물에 대한 증가율을 나타내고 있다. 배출산소농도의 경우에서도 흡입산소농도의 경우와 마찬가지로 FGR률이 높은 조건에 있어서의 5개 데이터를 제외하고는 FGR을 하지 않았을 경우보다 0.3배 정도 매연 배출물이 더 증가되고 있다. 배출산소농도비가 높다는 의미는 FGR률이 낮은 경우로 연소에 필요한 산소농도가 상대적으로 많기 때문에, 산화반응에 참여하는 기회가 많고, 또한 배출되는 양도 상대적으로 많을 것으로 추측된다.

3.4 당량비

Fig. 7의 좌측에는 본 실험에서 얻은 모든 데이터에 대해 당량비와 NO_x 배출물과의 관계를 나타낸 것인데, 여기서 당량비는 보일러 연소실내에 흡입되는 산소량과 연료량에 의해 계산된 평균값이다. 이전 디젤기관 연구에서 EGR률이 증

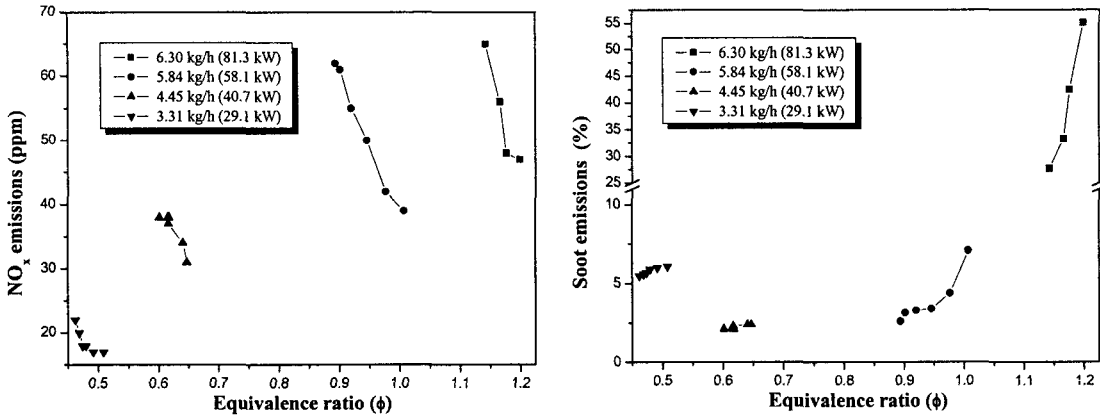


Fig. 7 Effect of equivalence ratio on NO_x and soot emissions as a parameter of fuel consumption rate

가할수록 당량비가 증가함을 보고했는데, 보일러에서도 FGR률이 증가할수록 당량비는 증가된다.

그림에서 연료소비율에 따라 데이터가 너무 흩어져 있어 당량비만으로는 정리할 수가 없기 때문에, 각 연료소비율을 파라미터로 데이터를 정리하였다. 그림에 의하면 FGR률이 증가할수록 당량비는 커지고, NO_x 배출물은 감소하고 있다. 또한, 연료소비율이 가장 큰 경우는 조금 다르지만, 정상적 연료소비율의 노즐팁에 가까울수록, 즉 연료소비율이 증가할수록 당량비 변화의 폭이 커지고, 당량비의 증가에 따라 NO_x 배출물이 감소됨을 알 수 있다.

저자들의 이론적인 계산^(20,21)에서도 알 수 있는 것처럼 어느 당량비를 중심으로 당량비의 증가에 따라 열적 NO_x의 생성은 감소된다. 이러한 임계 당량비는 FGR률이 증가함에 따라 희박한 쪽으로 이동되고 있다. 따라서 임계 당량비를 중심으로 그 보다 큰 경우에는 당량비의 증가에 따라 열적 NO_x의 생성이 감소되기 때문에, NO_x 배출물은 감소된다. 그러나 당량비의 증가는 연료량의 증가와 같기 때문에 연료 NO_x의 생성은 증가된다.

본 연구의 실험조건 범위에서는 앞에서 검토한 것처럼, 근본적으로 연소가스온도가 높지 않아 열적 NO_x의 생성이 많지 않다. 이에 비하여 연료 소비율의 증가에 의한 당량비 증가는 연료 NO_x의 생성이 증가되기 때문에, 전체적으로 당량비의 증가에 따라 NO_x 배출물은 증가되고 있다. 그러나 본 실험장치의 특수성 때문에 이 이상의 당량비 실험을 할 수 없었지만, 그림에서도 알 수 있는 것처럼 이보다 더 큰 당량비의 실험에서는 당량비의 증가에 따라 NO_x 배출물이 감소될 것

으로 보인다.

당량비는 연료소비율에 따라서도 변화하고, FGR률에 따라서도 변화하지만, 동일한 연료소비율일지라도 FGR률에 따라 당량비가 변화하기 때문에, 연료소비율에 따른 당량비 변화가 미치는 NO_x 배출물의 저감률보다는 FGR률에 따른 당량비 변화가 NO_x 배출물의 저감률에 미치는 영향이 더 현저함을 알 수 있다.

이러한 경향은 이론계산에 관한 이전 연구에서와 정성적으로 유사한데, FGR률이 증가하면 당량비가 증가하여 상대적으로 연료과농이 되기 때문에, 산소농도 부족으로 연소온도가 저하되어 NO_x 배출물이 감소된다.

Fig. 7의 우측에는 당량비에 따른 매연 배출물의 특성을 나타낸 것이다. 임계 당량비를 중심으로 당량비가 작아지거나 증가하는 경우에 연소가스온도가 낮아져 매연 배출물이 증가함을 알 수 있다. 이러한 정성적인 경향은 이전의 이론적인 계산결과와 잘 일치되고 있다. 연료소비율이 정상적인 경우보다 많은 경우에는 또한 같은 연료 소비율일지라도 FGR률의 증가에 따라 변화하는 당량비 증가의 영향이 커서 매연 배출물이 거의 수직적으로 증가하고 있다. 이러한 경향은 당량비가 1보다 큰 경우에 해당되고, 1보다 작은 경우에는 같은 연료소비율에서 당량비의 영향이 별로 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 NO_x 배출물의 저감대책으로 효과적 방법인 FGR을 관류 보일러에 적용하여 연

료소비율을 파라미터로 하여 배기 배출물을 측정하여 비교하고, 흡입산소농도, 배출산소농도 및 당량비와의 관계를 고찰하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

(1) 연료소비율이 동일한 경우에 FGR률의 증가에 따라 O₂ 및 NO_x 배출물은 감소되었고, CO₂, CO, THC 및 매연 배출물은 증가되었다.

(2) 정상적인 노즐팁보다 연료소비율이 많은 경우를 제외하고는 동일한 연료소비율에서 당량비의 증가에 따라 O₂, CO₂, THC 및 매연 배출물의 변화폭은 크지 않았지만, CO 및 NO_x 배출물은 변화폭이 상당히 컸다. 특히, 정상적인 노즐팁보다 연료소비율이 큰 6.30 kg/h에서는 당량비의 따라 THC, 매연, CO 및 NO_x 배출물의 증가 혹은 감소를 분명하게 구분할 수 있었다.

(3) 연료소비율에 관계없이 흡입 및 배출 산소농도가 증가할수록 NO_x 배출물은 증가하였고, 매연 배출물은 감소하였다.

(4) 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 현저하였다.

(5) 어떤 당량비 값을 중심으로 당량비가 작아지거나 증가하는 경우에 매연 배출물이 증가하였다. 당량비가 1보다 큰 경우에는 동일 연료소비율일지라도 FGR률의 증가에 따라 변화하는 당량비 증가의 영향이 커서 매연 배출물이 거의 수직적으로 증가하였다.

참고문헌

- (1) Moritsuka, H., 1995, "A Development of New Fossil Energy - For the Sake of a Global Environmental Problem," *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 98, No. 992, pp. 10~15.
- (2) Inoue, T., 1997, "Energy, Environment and Engines in 21st Century," *Proceedings of the International Forum 「Engines for the 21st Century」* of the Japan Society of Mechanical Engineers, pp. 1~7.
- (3) Shioji, M., 1998, "Technology for Emission Control in Internal Combustion Engines," *Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 52, No. 9, pp. 4~10.
- (4) Longwell, J. P., Rubin, E. S. and Wilson, J., 1995, "Coal: Energy for the Future," *Prog. Energy Combustion Science*, Vol. 21, pp. 269~360.
- (5) Kamimoto, T., 1999, "Automotive and Air Environment of the 12st Century," *Kuramae Journal*, No. 941, pp. 17~22.
- (6) Bae, M. W. and Ha, J. H., 2000, "A Study on the Effect of Recirculated Exhaust Gas with Scrubber EGR System upon Exhaust Emissions in Diesel Engines," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 9, pp. 1247~1254.
- (7) Khair, M., Lemaire, J. and Fischer, S., 2000, "Integration of Exhaust Gas Recirculation, Selective Catalytic Reduction, Diesel Particulate Filters, and Fuel-Borne Catalyst for NO_x/PM Reduction," SAE 2000-01-1933, pp. 1~7.
- (8) Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., and Aiyoshizawa, E., 2001, "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards," SAE 2001-01-0200, pp. 1~7.
- (9) Bae, M. W., Ku, Y. J. and Lee B. S., 2006, "A Study on Characteristics of Performance and NO_x/THC Emissions in Turbo Intercooler ECU Common-rail Diesel Engines with a Combined Plasma EGR System," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 10~21.
- (10) Zhou, W., 1998, "Overview of Energy and Environmental Technology in Japan by Comparing the Situation of Japan and China - Its Contribution to prevent the Global Warming," *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 101, No. 951, pp. 9~11.
- (11) Gis, W., and Bielaczyc, P., 1999, "Emission of CO₂ and Fuel Consumption for Automotive Vehicles," SAE 1999-01-1074, pp. 1~7.

- (12) Haines, M. R., Heidug, W. K., and Moore, J. B., 2002, "Progress with the Development of a CO₂ Capturing Solid Oxide Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, 4661, pp. 1~4.
- (13) Lee, H. D., 2002, "A Study on Exhaust Emissions Characteristics of High Temperature and High Pressure Combustor for Modeling Gas Turbine," Master's Thesis of Graduate School, Gyeongsang National University, pp. 1~48.
- (14) Bae, M. W., and Lee, S. K., 1999, "A Study on the Performance of a High Temperature and High Pressure Constant-Volume Combustion Chamber for Modeling of Soot Formation Processes in Combustion Engines," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 7, No. 1, pp. 20~30.
- (15) Bae, M. W., 2001, "A Study on Soot Formation of Turbulent Premixed Propane Flames in a Constant-Volume Combustor at High Temperatures and High Pressures," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 1~9.
- (16) Frenklach, M., and Clary, D. W., 1984, "Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene," 20th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 887~901.
- (17) 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.
- (18) Bae, M. W., and Lim, J. K., 1995, "A Study on Effect of EGR upon Fuel Consumption Rate and NO_x Emissions in Diesel Engines," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 3, No. 1, pp. 76~88.
- (19) Bae, M. W., 1999, "A Study on the Effects of Recirculated Exhaust Gas upon NO_x and Soot Emissions in Diesel Engines with Scrubber EGR System," SAE 1999-01-3266, pp. 78~87.
- (20) Kamimoto, T., and Bae, M. W., 1988, "High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines," SAE 880423, pp. 1~10.
- (21) Bae, M. W., 2003, "A Study on the Characteristics of Combustion Products and Adiabatic Flame Temperature by Theoretical Equilibrium Calculation," Research Report, Gyeongsang National University, pp. 1~75.