

플라즈마 EGR 조합시스템 터보 인터쿨러 ECU 커먼레일 디젤기관의 성능 및 NO_x·THC 배출물 특성에 관한 연구

배명환¹⁾·구영진²⁾·이봉섭³⁾

경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구센터¹⁾·교통안전공단²⁾·경상대학교 대학원³⁾

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

Myung-whan Bae^{*1)}·Young-jin Ku²⁾·Bong-sub Lee³⁾

¹⁾Research Center for Aircraft Parts Technology, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 660-701, Korea

²⁾Korea Transportation Safety Authority, 523 Gojan-dong, Ansan-si, Gyeonggi 425-801, Korea

³⁾Graduate School, Gyeongsang National University, Gyeongnam 660-701, Korea

(Received 23 May 2005 / Accepted 28 February 2006)

Abstract : The aim in this study is to develop the combined EGR system with a non-thermal plasma reactor for reducing exhaust emissions and improving fuel economy in turbo intercooler ECU common-rail diesel engines. At the first step, in this paper, the characteristics of performance and NO_x·THC emissions under four kinds of engine loads are experimentally investigated by using a four-cycle, four-cylinder, direct injection type, water-cooled turbo intercooler ECU common-rail diesel engine with a combined plasma exhaust gas recirculation(EGR) system operating at three kinds of engine speeds. The EGR system is used to reduce NO_x emissions, and the non-thermal plasma reactor and turbo intercooler system are used to reduce THC emissions. The plasma system is a flat-to-flat type reactor operated by a plasma power supply. The fuel is sprayed by pilot and main injections at the variable injection timing between BTDC 15° and ATDC 1° according to experimental conditions. It is found that the specific fuel consumption rate with EGR is increased, but the fuel economy is better than that of mechanical injection type diesel engine as compared with the same output. Results show that NO_x emissions are decreased, but THC emissions are increased, as the EGR rate is elevated. NO_x and THC emissions are also slightly decreased as the applied electrical voltage of the non-thermal plasma reactor is elevated. Thus one can conclude that the influence of EGR in NO_x and THC emissions is larger than that of the non-thermal plasma reactor, but THC emissions are greatly influenced by the non-thermal plasma reactor as the EGR rate is elevated.

Key words : Combined plasma EGR system(플라즈마 EGR 조합시스템), Non-thermal plasma reactor(비열 플라즈마 반응기), Turbo intercooler ECU common-rail diesel engine(터보 인터쿨러 ECU 커먼레일 디젤기관), Fuel economy(연비), NO_x and THC emissions(NO_x 및 THC 배출물), Pilot and main injections(예비 및 주 분사)

1. 서론

디젤기관은 높은 열효율과 뛰어난 내구성 및 신뢰성 때문에, 자동차 등의 동력원으로 널리 활용되고 있다. 최근에는 연비향상에 따른 지구온난화 문

*Corresponding author. E-mail: mwbae@nongae.gsnu.ac.kr

제의 대책에도 유리한 것으로 알려져 유럽, 미국, 일본 등에서 소형 고속 디젤기관의 개발연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 배기 배출물, 그 중에서도 NO_x 및 매연은 다른 연소장치에 비해 배출량이 많기 때문에, 점차 강화되고 있는 배기 배출물에 대한 규제치의 준수는 물론이고, 그 미만으로 감소시키기 위해서는 처리기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.¹⁾

디젤기관의 NO_x 및 매연 배출물은 생성, 소멸 등의 과정에 있어서 서로 상반되는 현상 혹은 조건 때문에, 동시에 저감시키는 대책을 수립하기가 쉽지 않지만, 최근 다양한 후처리 기술, 연료조성 기술, 분위기가스 조성제어 등에 의해 상당히 진전된 저감방법이 나오고 있다.²⁾

이 중 분위기가스 조성제어 방법중의 하나로 NO_x 배출물을 저감시키기 위해 EGR이 폭 넓게 적용되어 왔다. 지금까지 디젤기관에 적용된 EGR의 연구가 국내·외에서 다양하게 수행되어 왔지만, 여러 가지 문제점의 돌출로 인해 실용화까지는 상당한 시간이 소용되었다. 현재, EGR 자체만의 적용에는 문제점이 없지만, 고부하에서는 NO_x 이외의 다른 배기가 많이 배출되기 때문에 이 둘을 동시에 저감시킬 수 있는 새로운 기술의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.³⁾

최근, DPF, 정전 응집기, 코로나 방전 등의 적용에 의해 매연 배출물을 저감시키고, DeNO_x 촉매법, 배리어 방전 플라즈마, 펄스 코로나, 플라즈마 촉매 하이브리드 등을 사용한 전기방전법의 적용에 의해 NO_x를 저감시키고 있다. 또한, 유화 연료유, 배기 배출물 제어장치, 코로나 방전 등의 적용에 의해 매연, NO_x 배출물 등을 동시에 저감시키려고 시도하고 있지만, 현재의 기술로서는 만족스럽게 동시저감을 시키지 못하고 있다.⁴⁾

Matsui 등⁵⁾은 디젤기관의 매연 및 NO_x 배출물을 동시에 저감시키기 위해 필터형과 필터형 충전형 비열플라즈마 반응기를 적용시켰는데, 펄스 고인가전압 필터형의 경우에는 매연이 약한 방전을 갖는 표면에 수집되어 방전에너지에 의해 97 ~ 98% 정도 CO₂로 산화되는 반면에, 필터형 충전형의 경우는 필터형 플라즈마 반응기보다 더 높은 효율로 매연이

CO₂로 산화되고, NO의 50%가 NO₂로 산화되었음을 보고하고 있다.

Thomas 등⁶⁾도 디젤기관의 매연 및 NO_x 배출물을 동시에 저감시키기 위해 충전형 비열 플라즈마 반응기를 적용시켜 정성적으로는 Matsui 등⁵⁾과 유사한 결과를 얻었음을 보고하고 있다.

본 연구실에서는 NO_x 및 매연 배출물을 동시에 저감시키기 위해 스크러버형 EGR 시스템³⁾ 및 플라즈마 EGR 조합시스템⁷⁾을 개발하여 디젤기관에 적용시킨 결과, 상당한 효과를 거두었지만, 점점 강화되는 배기규제에 따라 매연 배출물의 허용 기준치를 만족시키지 못하고 있을 뿐만 아니라, 기존의 디젤기관은 기계식 분사장치에 의해 제어되기 때문에, 배기 배출물 저감의 한계와 연비악화의 문제점이 대두되었다.

본 연구에서는 터보 인터쿨러 ECU 커먼레일 디젤기관에 저자들이 개발한 플라즈마 EGR 조합시스템을 적용하여 운전조건에 따른 연비, 연소 및 NO_x·THC 배출물의 특성을 조사하는 것이 목적이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 실험기관은 국내에서 생산된 자동차용의 수냉, 4기통, 직접분사식, 4행정 디젤기관으로 터보 인터쿨러와 ECU 커먼레일을 장착하여 사용하였고, 주요 제원은 Table 1에 나타내고 있다.

실험에 사용된 터보 인터쿨러 커먼레일 디젤기관은 압출력 센서에 의한 시스템이 ECU에 의해 제어되고, 신뢰성이 있는 외부 EGR 적용을 위해 내부 EGR을 제거시켰다. 터보과급의 목적은 기관에 유입되는 공기밀도를 크게 하여 출력을 증가시키기 위한 것이다. 압축기에 의해 압력을 증가시키면 공기의 밀도가 커지지만, 동시에 온도도 증가되어 밀도가 작아지기 때문에, 압축공기의 밀도를 크게 하기 위해서는 냉각을 시켜야 한다. 따라서 수냉식 라디에이터의 전후에 쿨링팬을 장착해 고온·고압의 공기를 냉각시켜 연소실로 공급되도록 하였다.

기관출력은 와류형 전기동력계에 의해 측정하였고, 기관회전속도는 동력계 본체에 부착되어 있는

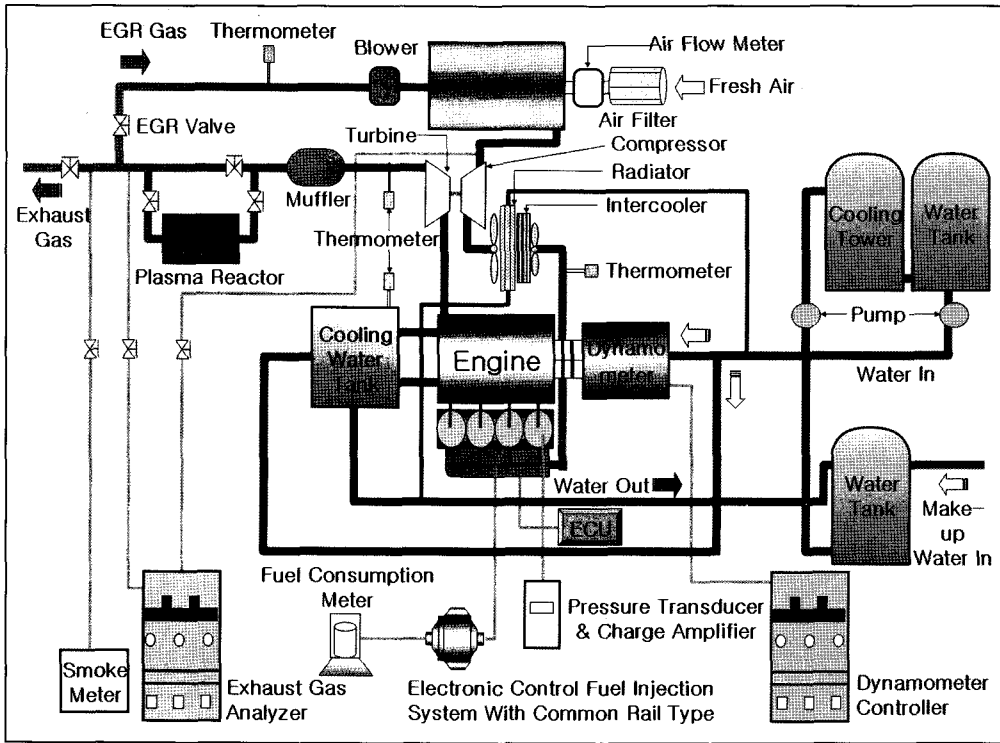


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Type	4 Cylinder, 4 Cycle, Water cooled, DI(Direct injection), Turbo intercooler
Piston displacement (cc)	2497
Bore (mm) × Stroke (mm)	91 × 96
Max. power (kW/rpm)	104.5/4000
Fuel injection type	Bosh common rail
Compression rate	17.5 : 1
Intake exhaust type	TCI
Fuel injection timing	BTDC 15° ~ ATDC 1°

60 P/R 기어에 비접촉식 마그네틱 RPM 센서를 설치하여 측정하였다.

연소실내 압력을 측정하기 위해 4번 실린더의 헤드부에 압전식 압력변환기(Kistler 6061B)를 설치하였으며, 압력변환기로부터의 신호는 증폭기에 의해 증폭되고, A/D 변환기에 의해 디지털 값으로 변환되어 컴퓨터로 전송한 다음 압력변화를 데이터화하였다.

연료소비율은 중량식 유량계(HF-2000GD)를 사용하여 단위시간에 소비되는 연료를 측정하여 환산하는 방법을 사용하였고, 흡입공기량은 총류 유량계에 의해 측정하였다. 한편, CO, CO₂ 배출물은 NDIR 배기 분석계(CGT-7000), O₂ 배출물은 지르코니아(Zirconia)법에 의한 O₂ 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.

기관 및 각 부위(배기관, 냉각수 입출구, 윤활유, 서지탱크)의 온도는 K형 열전대(ø 3 mm)에 의해 측정하여 기관의 작동 및 연소상태를 수시로 확인하였다. 또한, 기관에서 배출되는 재순환 배기의 적절한 공급을 위해 송풍기를 서지탱크의 입구에 설치하였고, 기관의 흡기측에는 서지탱크를 설치하여 신기와 재순환 가스의 혼합이 잘 이루어지도록 하였을 뿐만 아니라, 맥동현상을 줄일 수 있도록 하였다. 자동차용 에어필터를 총류 유량계 앞에 설치하여 신기 흡입시 실차 상태와 동일한 공기흡입이 가

능하게 하였으며, 흡입 혼합기(신기 + 재순환 배기)의 온도 및 습도를 계측할 수 있도록 디지털식 온·습도계를 설치하였다.

2.2 플라즈마 반응기

플라즈마 반응기의 형상은 평판 대 평판이고, 전극은 평판 대 평판의 전극이 다층으로 이루어져 있으며, 절연체인 운모판으로 만들어진 평판은 2 mm 간격으로 10개를 설치하였다. 전극의 크기는 가로 150 mm, 세로 80 mm이며, 운모판 양쪽에 50 μm의 구리판이 코팅 처리되어 있다.

플라즈마 반응을 발생시키기 위한 상압의 고전압 발생기 전원은 AC이며 0 ~ 15 kV rms(30 kV peak) 까지 인가가 가능하고, 출력 주파수는 12 ~ 35 kHz이며 실험에서는 20 kHz를 사용했으며 출력용량은 2 kW이다.

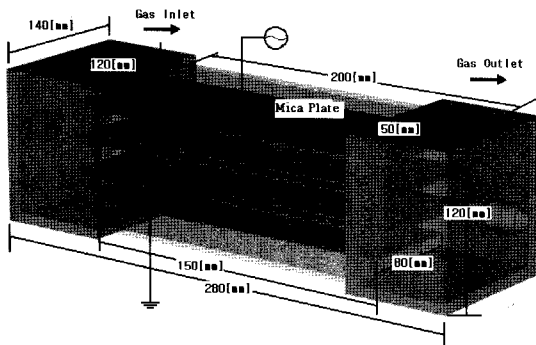


Fig. 2 Plasma reactor

Table 2 Specifications of plasma reactor

High voltage applied electrode	150 mm × 80 mm Mica plate coated by copper
Ground electrode	200 mm × 120 mm Mica plate coated by copper
Dielectric	Mica plate
Total surface area of flow path	2880 mm ²

2.3 실험방법

본 실험에서는 기관회전속도가 1500, 2100 및 2700 rpm의 경우에 대해서 기관부하를 100%까지 25%씩 증가시켰고, EGR률은 0, 10 및 20%로 하였다. 또한, 인가전압은 0, 8, 10, 12 kV로 변화시켰다.

기관회전속도, 기관부하, EGR률, 인가전압의 4개 파라미터 중 3개를 고정된 상태에서 하나의 조건만을 변화시키면서 실험을 하였다. 그런데 데이터수가 많고, 또한 기관회전속도를 변화시키는 경우에는 대체적으로 유사한 경향을 나타내고 있으므로, 연료소비율, 열발생률 및 NO_x·THC 배출물의 실험 결과에 대해 대표적으로 2100 rpm의 경우만을 고찰하여 나타내고 있다.

본 연구에서는 동일조건에서 실험이 이루어졌을 지라도 EGR를 변동률은 ± 1% 정도이고, 기관부하 변동률은 ± 5% 이하를 나타내고 있다. 실험중에는 수냉식 열교환기를 사용하여 냉각수와 윤활유 온도를 조절하도록 하였다. 측정조건을 변경할 경우에는 반드시 저회전속도, 저부하 상태에서 고회전속도, 고부하쪽으로 실험을 하였다. EGR률은 EGR 밸브에 의해 재순환 가스량을 조절하여 기관의 흡기 측과 배기측의 CO₂ 농도를 측정해 일반적으로 많이 사용되고 있는 아래의 식^{1,3,7)}을 사용하여 계산하였다.

$$\text{EGR Rate}(\%) = \frac{[\text{CO}_2]_{\text{EGR}} - [\text{CO}_2]_{\text{W/O EGR}}}{[\text{CO}_2]_{\text{EXH}}} \times 100$$

여기서, [CO₂]_{EGR}은 EGR시 흡기 중의 CO₂ 농도, [CO₂]_{w/o EGR}은 EGR을 하지 않을 경우 흡기내의 CO₂ 농도, [CO₂]_{EXH}는 EGR시 배기 중의 CO₂ 농도를 나타내고 있다.

본 연구의 실험에 있어서 연료분사 시기는 ECU 커먼레일에 의해 이루어지기 때문에, Table 1에서 보여 주는 것처럼 BTDC 15°에서 ATDC 1°사이의 연소상태에 따라 전자제어에 의해 파일럿 및 주 분사가 이루어졌다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연료소비율

본 연구의 기관회전속도 실험조건인 1500, 2100 및 2700 rpm에 대해 각 부하 및 EGR률의 변화에 따른 연료소비율을 측정된 결과 중에서 기관회전속도 2100 rpm인 경우를 대표적으로 나타낸 것이 Fig. 3이다.

이전 연구^{1,3,7)}의 기계식 분사장치의 경우에는 동

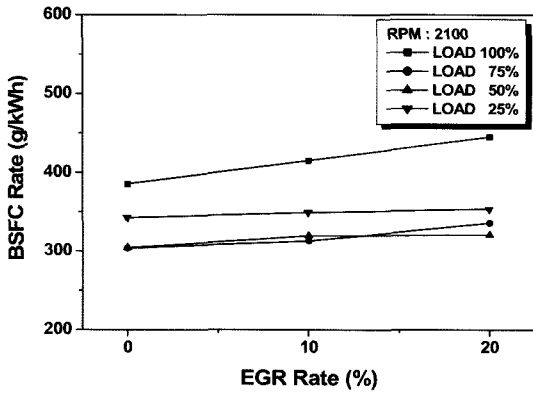


Fig. 3 Effect of EGR rate on brake specific fuel consumption rate as a parameter of engine load at an engine speed of 2100 rpm

일 기관회전속도와 부하에서 EGR를 20%까지는 EGR률의 증가에 따른 연료소비율의 증감의 폭이 크지 않았고, 그 변동폭은 평균 2 ~ 3% 이내로 미미하였다. 그러나 본 연구의 ECU 커먼레일 연료분사장치에서는 동일 기관회전속도와 부하에서 EGR률의 증가에 따라 연료소비율이 2 ~ 14% 정도로 증가하였는데, 특히 부하가 클수록 EGR를 증가에 따른 연료소비율 증가폭이 더 커지고 있다. 그 이유는 EGR률이 증가할수록 상대적인 흡입산소량의 부족과 ECU 커먼레일 분사장치에 의한 에너지 소비의 증가 때문에, 그에 해당되는 만큼 연료소비율이 증가한 것으로 예측된다.

본 실험의 디젤기관 출력은 이전 연구^{1,7)}에 적용한 디젤기관 출력에 비하여 거의 2배 정도 큼에도 불구하고, 연료소비량은 1.2 ~ 1.3배 정도밖에 증가

되지 않았다. 따라서 EGR를 증가에 따른 연료소비량은 절대량 값으로 더 증가한 것처럼 보이지만, 실제 상대량 값으로 비교하면 오히려 감소되어 연비는 개선되었음을 알 수 있다.

3.2 연소특성

본 ECU 커먼레일 디젤기관의 연소특성을 조사하기 위하여 본 연구의 실험조건인 기관회전속도 1500, 2100 및 2700 rpm에 있어서 각 부하의 EGR를 변화에 따른 실린더내의 연소압력을 측정하였다. Fig. 4는 측정된 연소압력에 의해 열발생률을 계산하여 대표적으로 기관회전속도 2100 rpm, 기관부하 25%, 100%에 대해 EGR를 0, 10, 20%인 경우의 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 기관부하 25%와 100%의 열발생률은 EGR를 증가에 따라 재순환 배기로 인해 흡기중의 산소농도가 감소되기 때문에 착화지연이 약간 증가되고 있다. 그러나 EGR률의 증가에 따라 착화지연은 발생할지라도, 재순환 배기에 의해 착화시 압축 공기온도가 상승되고, 파울릿 및 주 분사에 의해 적정한 연료가 분사되어 연소되기 때문에, 후반부의 열발생률은 거의 변화하지 않고 있다. 이러한 경향은 부하가 증가하여도 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Siozaki 등⁸⁾은 EGR에 의해 예혼합연소 부분의 변화가 크고, 확산연소 부분의 변화가 작은 이유로서 예혼합연소의 경우, 재순환된 연소가스가 연소속도에 영향을 미치는데 반하여, 확산연소의 경우, 재순

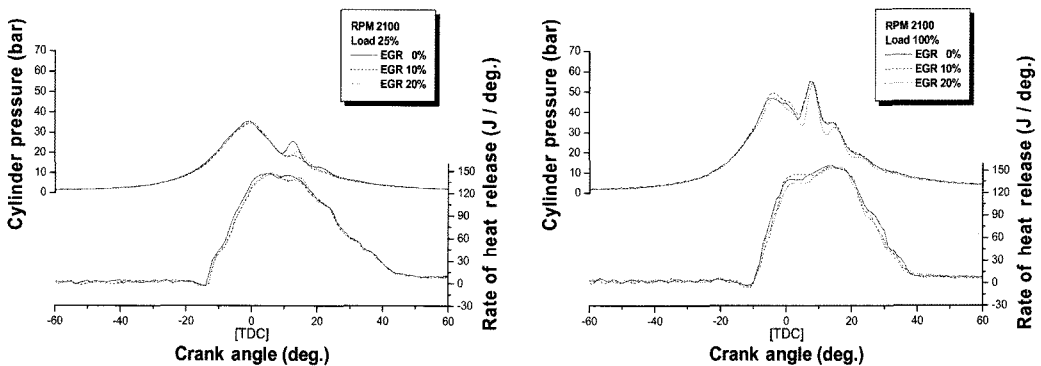


Fig. 4 Comparison of cylinder pressure and rate of heat release with EGR rate at an engine speed of 2100 rpm

환된 연소가스보다도 그 시점에서 발생하는 연소가스의 절대량이 훨씬 많기 때문에, 재순환 배기가 연소에 미치는 영향의 비율이 작기 때문이라고 했다. 본 연구의 경우에는 분사가 2번 이루어지기 때문에, 예혼합 및 확산 연소의 구분을 하기가 어렵지만, 분사후의 열발생률의 변화에 따라 유사하게 해석할 수 있을 것이다.

3.3 질소산화물(NO_x) 배출물

각 실험조건에 대한 NO_x 배출물 특성을 조사하기 위해 기관회전속도 1500, 2100, 2700 rpm에서 플라즈마 반응기 인가전압, 기관부하 및 EGR률 중 2개의 조건을 고정시키고, 1개의 조건만을 변화시켜 NO_x 배출물을 측정하였다.

Fig. 5에는 대표적으로 기관회전속도 2100 rpm인 경우에 대해 각 기관부하에서 EGR률 0, 10, 20%로 증가시키고, 인가전압을 0, 8, 10, 12 kV로 증가시켜 NO_x 배출물을 측정하여 비교한 결과를 나타낸 것이

다. EGR를 증가에 따른 NO_x 배출물 저감률을 파악하기 위해 Table 3, 4 및 5에는 기관회전속도 1500, 2100 및 2700 rpm에 있어서 실험조건 of 각 기관부하와 인가전압에 대해 EGR률 0%의 NO_x 배출물을 기준으로 하여 EGR률 10%, 20%인 경우의 NO_x 배출물 저감률을 나타내고 있다.

그림과 표로부터 동일 기관부하에서 EGR률이 증가할수록 NO_x 배출물은 현저히 감소하고 있는데, 특히 기관부하가 높을수록 EGR률 증가에 따른 NO_x 배출물이 더 많이 감소되고 있다.

또한, 인가전압을 8, 10, 12 kV로 증가시킨 경우, 인가전압 0 kV일 때 각 EGR률에 있어서의 NO_x 배출물을 기준으로 하여 실험조건 of 각 기관부하와 EGR률에서 NO_x 배출물의 저감률을 Table 6, 7 및 8에 나타내고 있다.

표에서 기관회전속도에 따른 영향은 거의 유사한 결과를 나타내고 있지만, Table 6에서 알 수 있는 것처럼 기관회전속도 1500 rpm에서는 EGR를 적용

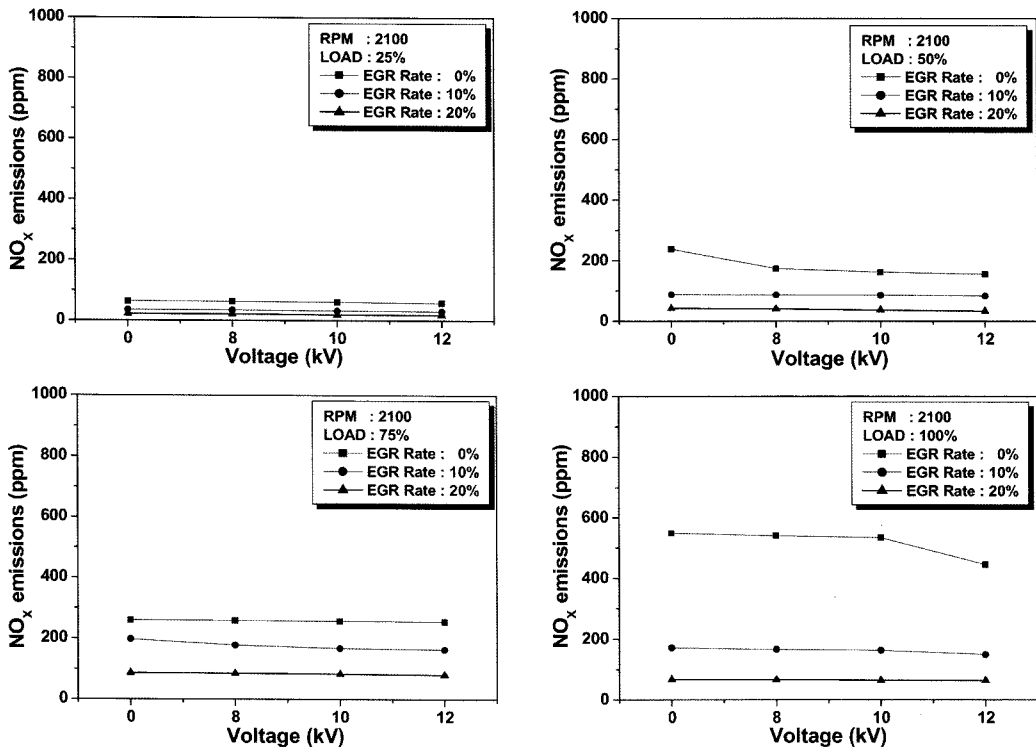


Fig. 5 Effect of the applied voltage on NO_x emissions for various engine loads as a parameter of EGR rate at an engine speed of 2100 rpm

Table 3 Reduction rate of NO_x emissions by increasing EGR rate at an engine speed of 1500 rpm

Engine load (%)	Applied electrical voltage(kV)	Reduction rate(%)		
		EGR 0%	EGR 10%	EGR 20%
100	0	0	58.6	82.0
	8	0	58.3	82.0
	10	0	56.7	81.1
	12	0	55.8	80.2
75	0	0	45.9	75.4
	8	0	42.6	74.0
	10	0	41.5	73.6
	12	0	43.0	74.2
50	0	0	38.5	63.3
	8	0	35.8	62.3
	10	0	36.0	64.0
	12	0	34.8	63.9
25	0	0	24.4	64.1
	8	0	22.2	63.5
	10	0	18.7	60.7
	12	0	19.8	62.2

Table 5 Reduction rate of NO_x emissions by increasing EGR rate at an engine speed of 2700 rpm

Engine load (%)	Applied electrical voltage(%)	Reduction rate(%)		
		EGR 0%	EGR 10%	EGR 20%
100	0	0	72.4	87.5
	8	0	72.9	87.5
	10	0	73.8	87.5
	12	0	74.5	88.4
75	0	0	27.3	39.8
	8	0	28.0	41.6
	10	0	27.8	41.5
	12	0	28.3	40.4
50	0	0	39.5	45.2
	8	0	36.5	42.1
	10	0	35.9	42.2
	12	0	37.6	42.9
25	0	0	11.8	27.6
	8	0	12.2	28.4
	10	0	12.3	28.8
	12	0	13.9	29.2

Table 4 Reduction rate of NO_x emissions by increasing EGR rate at an engine speed of 2100 rpm

Engine load (%)	Applied electrical voltage(kV)	Reduction rate(%)		
		EGR 0%	EGR 10%	EGR 20%
100	0	0	68.7	87.8
	8	0	69.1	87.8
	10	0	69.3	87.9
	12	0	66.4	85.7
75	0	0	23.6	66.8
	8	0	31.0	67.1
	10	0	34.4	67.6
	12	0	35.7	68.6
50	0	0	63.2	82.0
	8	0	50.0	76.4
	10	0	47.2	77.3
	12	0	46.2	78.2
25	0	0	45.3	65.6
	8	0	46.0	66.7
	10	0	47.5	68.9
	12	0	48.3	69.0

Table 6 Reduction rate of NO_x emissions by increasing the applied electrical voltage at an engine speed of 1500 rpm

Engine load (%)	EGR rate (%)	Reduction rate(%)			
		0 kV	8 kV	10 kV	12 kV
100	0	0	1.7	6.7	12.1
	10	0	1.1	2.6	6.3
	20	0	1.7	2.5	3.4
75	0	0	5.9	8.2	8.5
	10	0	0	0.7	3.6
	20	0	0.7	1.4	4.3
50	0	0	4.8	7.4	9.6
	10	0	0.6	3.6	4.2
	20	0	2.0	9.1	11.1
25	0	0	3.8	14.5	15.3
	10	0	1.0	8.0	10.1
	20	0	2.1	6.3	10.6

하지 않은 경우에 인가전압의 영향이 더 크게 나타났다. 동일한 EGR률과 부하에서는 어떤 기관회전 속도에서나 인가전압이 증가할수록 NO_x 배출물 저

감률이 더 크게 나타났지만, EGR률의 증가에 따른 인가전압의 영향에 대한 경향은 명확하지 않았다.

기관회전속도 1500 및 2700 rpm에 대해 Fig. 5와 같이 본 논문에는 나타내지는 않았지만, 동일한 기관부하, 인가전압 및 EGR률에서 기관회전속도에 의한 영향을 비교해 보면 본 연구의 실험조건에서

Table 7 Reduction rate of NO_x emissions by increasing the applied electrical voltage at an engine speed of 2100 rpm

Engine load (%)	EGR rate (%)	Reduction rate(%)			
		0 kV	8 kV	10 kV	12 kV
100	0	0	1.6	2.7	18.9
	10	0	2.9	4.7	12.8
	20	0	1.5	3.0	4.5
75	0	0	0.4	1.2	1.5
	10	0	10.1	15.2	17.2
	20	0	1.2	3.5	7.0
50	0	0	27.2	31.8	37.7
	10	0	1.1	3.4	4.6
	20	0	4.7	14.0	20.9
25	0	0	1.6	4.7	9.4
	10	0	2.9	8.6	14.3
	20	0	4.6	13.6	18.2

Table 8 Reduction rate of NO_x emissions by increasing the applied electrical voltage at an engine speed of 2700 rpm

Engine load (%)	EGR rate (%)	Reduction rate(%)			
		0 kV	8 kV	10 kV	12 kV
100	0	0	4.7	6.3	6.5
	10	0	6.1	10.8	13.5
	20	0	4.5	6.0	13.4
75	0	0	5.1	5.9	10.2
	10	0	5.9	6.5	11.3
	20	0	7.8	8.4	11.0
50	0	0	6.2	8.6	10.0
	10	0	1.6	3.1	7.1
	20	0	0.9	3.5	6.1
25	0	0	2.6	3.9	5.3
	10	0	3.0	4.5	7.5
	20	0	3.6	5.5	7.3

는 기관회전속도 2100 rpm에서 NO_x가 가장 적게 배출되었다. 이러한 이유를 파악하기 위해 본 연구에서는 전부하 특성곡선을 조사한 결과, 연료소비율은 기관회전속도 1500 rpm 부근에서 가장 적게 나타났고, 기관회전속도의 증가와 함께 2100 rpm까지 아주 미소하게 증가하다가 2700 rpm까지는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 토크는 기관회전속도 2100 rpm 부근에서 가장 컸는데, 이러한 본 실험기관의 특징 때문에, 3 개 조건의 기관회전속도 중, 상대적으로 연료소비량이 조금 많은 2100 rpm에서 NO_x 농도가 적게 배출되었을 것으로 예측된다.⁹⁾

플라즈마에 의해 NO_x 배출물이 저감되는 것에 대해서 Morimune 등¹⁰⁾은 NO로부터 변환된 NO₂와 가스중의 H₂O에 의한 OH 라디칼과 반응하여 질산이 생성되기 때문이고, NO로부터의 NO₂로의 변환은 인가전압과 산소농도가 클수록 쉽게 변환된다고 보고 했다.

본 연구에 있어서 플라즈마의 인가전압에 의한 NO_x 배출물 특성의 변화는 EGR률 증가에 따른 변화만큼 크지는 않았지만, 인가전압의 증가에 의해 NO_x 배출물은 감소되었다. 그 이유는 비열 플라즈마 반응기에 의한 전자와 N₂가 반응하여 높은 에너지 준위를 가진 전자와 N 라디칼이 생성되고, 배기중의 NO가 N 라디칼과 반응하여 N₂와 O로 환원반응을 일으키기 때문일 것으로 예측된다.

3.4 총탄화수소(THC) 배출물

NO_x 배출물 특성 조사의 경우와 동일한 실험조건에 대해 THC 배출물 특성에 미치는 기관회전속도, 플라즈마 반응기 인가전압, 기관부하 및 EGR률의 영향을 파악하기 위하여 THC 배출물을 측정하였다. Fig. 6에는 기관회전속도 2100 rpm인 경우에 대해 각 기관부하에서 EGR률 0, 10, 20%로 증가시키고, 인가전압을 0, 8, 10, 12 kV로 증가시켜 THC 배출물을 측정된 결과를 대표적으로 나타내고 있다. 또한, Table 9, 10 및 11에는 기관회전속도 1500, 2100 및 2700 rpm에 있어서 실험조건의 각 기관부하와 인가전압에 대해 EGR률 0%의 THC 배출물을 기준으로 하여 EGR률 10%, 20%인 경우의 THC 배출물 증가율을 나타내고 있다.

그림과 표로부터 동일 기관부하에서는 EGR률이 증가할수록 THC 배출물이 증가하고 있는데, 특히 기관부하가 클수록 EGR률 증가에 따른 THC 배출물의 증가량이 커지고 있다.

Table 12, 13 및 14에는 인가전압을 8, 10, 12 kV로 증가시킨 경우, 인가전압 0 kV일 때 각 EGR률에 있어서의 THC 배출물을 기준으로 하여 실험조건의 각 기관부하와 EGR률에서 THC 배출물의 저감률을 나타내고 있다.

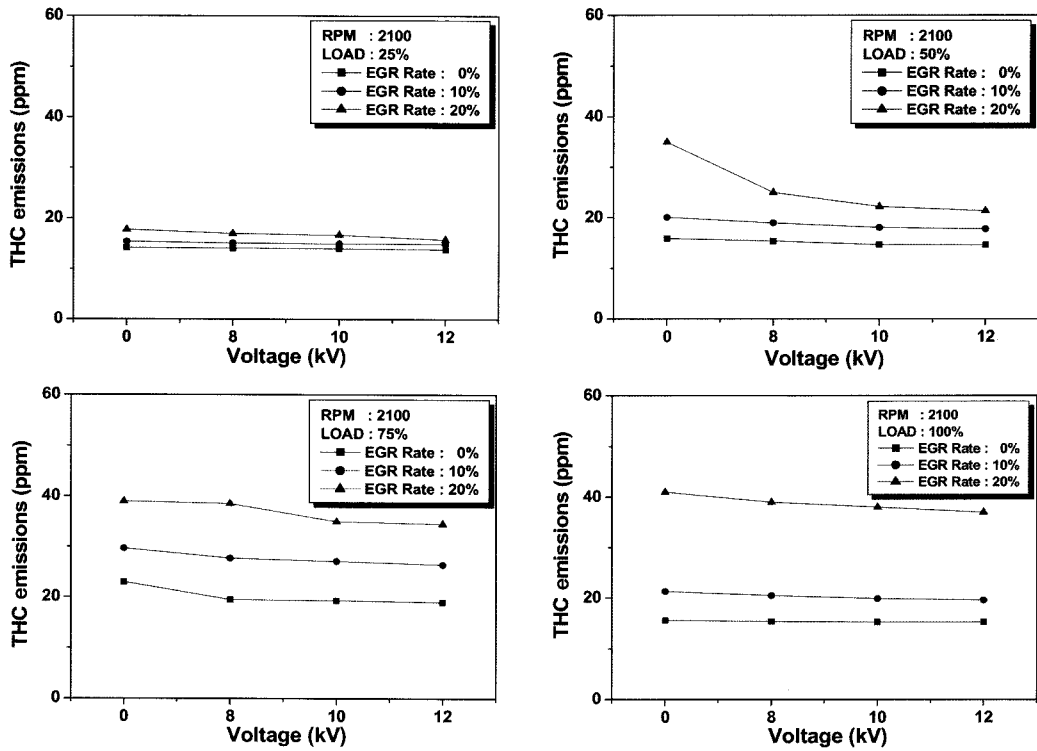


Fig. 6 Effect of the applied voltage on THC emissions for various engine loads as a parameter of EGR rate at an engine speed of 2100 rpm

Table 9 Increasing rate of THC emissions by rising EGR rate at an engine speed of 1500 rpm

Engine load (%)	Applied electrical voltage(kV)	Increasing rate(%)		
		EGR 0%	EGR 10%	EGR 20%
100	0	0	8.4	77.6
	8	0	9.4	58.5
	10	0	9.6	55.8
	12	0	8.8	54.9
75	0	0	13.2	15.1
	8	0	13.3	15.3
	10	0	21.9	26.3
	12	0	7.4	25.9
50	0	0	5.1	6.1
	8	0	5.1	7.1
	10	0	5.2	6.2
	12	0	4.1	4.1
25	0	0	4.4	6.7
	8	0	3.3	6.7
	10	0	2.2	4.4
	12	0	2.2	4.5

Table 10 Increasing rate of THC emissions by rising EGR rate at an engine speed of 2100 rpm

Engine load (%)	Applied electrical voltage(kV)	Increasing rate(%)		
		EGR 0%	EGR 10%	EGR 20%
100	0	0	36.5	162.8
	8	0	33.1	153.2
	10	0	30.1	148.4
	12	0	28.1	141.8
75	0	0	29.1	69.6
	8	0	42.1	97.4
	10	0	40.4	81.3
	12	0	38.9	81.6
50	0	0	26.4	120.1
	8	0	23.4	62.3
	10	0	23.1	51.0
	12	0	21.9	46.6
25	0	0	8.5	25.4
	8	0	7.1	20.6
	10	0	7.1	19.3
	12	0	8.0	14.5

Table 11 Increasing rate of THC emissions by rising EGR rate at an engine speed of 2700 rpm

Engine load (%)	Applied electrical voltage(kV)	Increasing rate(%)		
		EGR 0%	EGR 10%	EGR 20%
100	0	0	25.0	145.0
	8	0	10.7	87.2
	10	0	9.9	78.6
	12	0	46.2	139.2
75	0	0	51.2	130.7
	8	0	52.1	112.7
	10	0	53.4	98.8
	12	0	52.8	88.8
50	0	0	3.2	6.5
	8	0	5.1	10.2
	10	0	5.6	14.1
	12	0	7.9	15.1
25	0	0	4.8	15.0
	8	0	7.2	20.9
	10	0	7.9	20.5
	12	0	7.9	15.2

Table 12 Reduction rate of THC emissions by increasing the applied electrical voltage at an engine speed of 1500 rpm

Engine load (%)	EGR rate (%)	Reduction rate(%)			
		0 kV	8 kV	10 kV	12 kV
100	0	0	0.9	2.8	4.7
	10	0	0	1.7	4.3
	20	0	11.6	14.7	16.8
75	0	0	1.3	9.9	11.2
	10	0	1.2	2.9	15.7
	20	0	1.1	1.1	2.9
50	0	0	1.0	2.0	2.0
	10	0	1.0	1.9	2.9
	20	0	0	1.9	3.8
25	0	0	0	0	1.1
	10	0	1.1	2.1	3.2
	20	0	0	2.1	3.1

표로부터 THC 배출물에 미치는 인가전압의 영향은 크지 않았지만, EGR률이 증가할수록 인가전압의 영향이 약간 크게 나타났다. 기관회전속도의 영향에 대해서는 1500 rpm보다 더 큰 기관회전속도에서 THC 배출물이 많았고, 특히 2100 rpm에서 EGR률의 증가에 따른 THC 배출물의 증가폭과 인가전

Table 13 Reduction rate of THC emissions by increasing the applied electrical voltage at an engine speed of 2100 rpm

Engine load (%)	EGR rate (%)	Reduction rate(%)			
		0 kV	8 kV	10 kV	12 kV
100	0	0	1.3	1.9	1.9
	10	0	3.8	6.6	8.0
	20	0	4.9	7.3	9.8
75	0	0	15.2	16.1	17.4
	10	0	6.7	8.8	11.1
	20	0	1.3	10.3	11.5
50	0	0	3.1	7.5	8.2
	10	0	5.5	10.0	11.4
	20	0	28.6	36.6	38.9
25	0	0	0.7	1.4	2.8
	10	0	1.9	2.6	3.2
	20	0	4.5	6.2	11.2

Table 14 Reduction rate of THC emissions by increasing the applied electrical voltage at an engine speed of 2700 rpm

Engine load (%)	EGR rate (%)	Reduction rate(%)			
		0 kV	8 kV	10 kV	12 kV
100	0	0	6.5	9.0	35.0
	10	0	17.2	20.0	24.0
	20	0	28.6	33.7	36.5
75	0	0	0.6	1.8	3.0
	10	0	0	0.4	2.0
	20	0	12.7	23.5	31.5
50	0	0	4.8	8.4	10.3
	10	0	3.1	6.3	6.3
	20	0	1.5	1.8	3.0
25	0	0	8.4	9.6	9.6
	10	0	6.3	6.9	6.9
	20	0	3.6	5.2	9.4

압의 증가에 따른 THC 배출물의 감소폭이 더 큼을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 앞의 전부하 특성곡선에서 검토한 것과 같이 3 개 조건의 기관회전속도 중, 2100 rpm에서 연료소비량이 아주 미소하게 증가하였고, 토크가 가장 크게 나타났기 때문이며, 이러한 결과는 NO_x 배출물의 경우와는 상반되는 관계를 보여주고 있음을 알 수 있다.

Narusawa 등¹¹⁾은 직접분사식 대형 디젤기관에서

기관회전속도를 가속시킬 경우 EGR률의 증가에 따라 배출량의 증가속도가 생성농도의 증가속도에 비해 낮은 값으로 억제되기 때문에, THC 배출물이 많다고 했다.

Lim 등¹²⁾은 THC 배출물은 실화, 소염, 불량분사, 불균일 분사 등으로 인해 연료가 완전 연소되지 않고 배출되는 물질로 실린더내에 저온인 저부하시에 많이 발생되는데, EGR을 채용하는 경우에는 산소농도가 낮아지므로 국부적인 산소결핍 영역이 증가하여 불완전연소로 인한 THC의 연료분자가 많이 남기 때문에 THC 배출물이 증가한다고 하였다. 또한, 재순환 배기의 증가로 인해 연소가스의 열용량이 증가하여 화염온도가 낮아지므로 저온 운전상태에서 발생하기 쉬운 THC가 증가한다고 보고했다.

플라즈마 인가전압이 증가할수록 THC 배출물이 감소하는 이유는 비열 플라즈마에 의한 화학반응과정의 일부분으로 생성되는 라디칼에 의해 산화 연소되기 때문이라고 보고되고 있다.¹⁾

4. 결론

수냉, 4기통, 4행정, 직접분사식, ECU 커먼레일 디젤기관에 터보 인터쿨러 플라즈마 EGR 조합시스템을 적용하여 기관회전속도, 기관부하, EGR률 및 플라즈마 인가전압을 파라미터로 한 연비, 연소 및 NO_x, THC 배출물 특성을 비교하고 분석하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

- 1) 본 연구의 실험조건인 EGR률 20%의 범위 내에서는 동일한 기관회전속도와 부하에서 EGR률의 증가에 따라 연료소비율이 2 ~ 14% 정도로 증가되었다.
- 2) 본 실험에 있어서 ECU 커먼레일 디젤기관의 연료분사장치 출력은 동일한 기계식 연료분사장치에 비해 거의 2배 정도가 증가되었지만, 연료소비량은 1.2 ~ 1.3배 정도밖에 증가되지 않았다. 따라서 EGR률 증가에 따른 연료소비율은 절대량 값으로 증가된 것처럼 보이지만, 상대량 값으로 비교하면 ECU 커먼레일 분사장치 디젤기관의 연비가 상당히 개선되었다.
- 3) 열발생률은 EGR률의 증가에 따라 재순환 배기로 인해 흡기중의 산소농도가 감소되기 때문에,

착화지연이 약간 증가되었다. 또한, 과일릿 및 주 분사에 의해 연소가 이루어지기 때문에, 열발생률의 예혼합 및 확산 연소 구분이 확실하지 않았다.

- 4) 동일 기관부하에서 EGR률이 증가할수록 NO_x 배출물은 현저히 감소하였는데, 특히 기관부하가 높을수록 EGR률 증가에 따른 NO_x 배출물의 감소폭이 더 컸다. 인가전압은 EGR을 적용하는 경우에 NO_x 배출물에 거의 영향을 미치지 않았지만, EGR을 적용하지 않은 경우에는 인가전압의 증가에 따라 NO_x 배출물이 소폭으로 감소되었다.
- 5) 동일 기관부하에서 EGR률이 증가할수록 THC 배출물은 증가하였는데, 특히 기관부하가 높을수록 EGR률 증가에 따른 THC 배출물의 증가폭이 더 컸다. THC 배출물에 미치는 인가전압의 영향은 크지 않았지만, EGR률이 증가할수록 인가전압의 영향이 조금 더 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 경상대학교 공학연구원 주관의 제12차 및 제13차 산학연공동기술개발컨소시엄, 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00307-0), BK21 사업 및 2006년도 지방대학혁신역량강화사업의 지원에 의하여 수행된 것으로 도움을 준 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) M. W. Bae, T. Y. Ha, H. G. Kim, J. Y. Park and H. J. Ha, "Characteristics of Performance and Exhaust Emissions in Diesel Engines with a Combined Plasma EGR System," Spring Conference Proceedings, Vol.1, KSAE, pp.366-373, 2003.
- 2) H. T. C. Machacon, S. Shiga, T. Enosawa and T. Nakamura, "Effect on Diesel Combustion by High EGR Rate and Oxygen Addition (in Japanese)," Proceedings of the 33rd Symposium of Combustion, pp.629-631, 1995.
- 3) M. W. Bae, "A Study on the Effects of Recirculated Exhaust Gas on NO_x and Soot Emis-

- sions in Diesel Engines with Scrubber EGR System," SAE 1999-01-3266, pp.78-87, 1999.
- 4) K. Kinoshita, T. Morimune and S. Goto, "Study on Removal of PM and NO_x in Diesel Exhaust by Using DC Corona Discharge," SAE 2002-01-1660, pp.1-9, 2002.
 - 5) Y. Matsui, M. Hashimoto, A. Sakaguchi, K. Takashima and A. Mizuno, "Oxidation of Carbon Soot Later Using Pulsed Discharge Plasma," SAE 2001-01-3511, pp.1-5, 2001.
 - 6) S. E. Thomas, A. R. Martin, D. Raybone, J. T. Shawcross, L. N. Ka, P. Beech and J. C. Whitehead, "Non Thermal Plasma After-treatment of Particulates - Theoretical Limits and Impact on Reactor Design," SAE 2000-01-1926, pp.1-13, 2000.
 - 7) M. W. Bae and Y. Mochimaru, "Characteristics of Performance and Exhaust Emissions with a Combined Plasma EGR System in Diesel Engines," Proceeding of the FISITA 2004 World Automotive Congress, pp.1-19, 2004.
 - 8) T. Shiozaki and K. Tsuchihashi, "A Study of EGR Techniques in Diesel Engine(in Japanese)," Journal of the JSAE, Vol.51, No.9, pp.75-80, 1997.
 - 9) Y. J. Ku, "A Study on Characteristics of Performance and Exhaust Emissions in Diesel Engines with a Combined Plasma EGR and Turbo Intercooler System," Master Thesis of Graduate School of Gyeongsang National University, pp.1-90, 2004.
 - 10) T. Morimune, T. Osakabe and T. Tsukakoshi, "Reduction of NO_x Contained in Combustion Exhaust Gas by Using Corona Discharge Tube (in Japanese)," Transaction of the JSME(B), Vol.61, No.591, pp.403-408, 1995.
 - 11) K. Narusawa, M. Odaka, N. Koike, Y. Tsukamoto and K. Yoshida, "An EGR Control Method for Heavy-Duty Diesel Engines under Transient Operations," SAE 900444, pp.1-14, 1990.
 - 12) J. K. Lim, M. W. Bae and J. I. Kim, "An Experimental Study on Effects of EGR Rate upon Exhaust Emissions in Small High-speed Diesel Engines(in Korean)," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.28, No.5, pp.252-269, 1992.