

압축착화 디젤기관의 흡기조성에 따른 연소 및 배기배출물 특성에 대한 연구

A Study on Combustion and exhaust Emission Characteristics with Air Charge in Compression Ignition Diesel Engine

김기복¹, 김치원², 윤창식², 한성현²

Gi-Bok Kim, Chi-Won Kim, Chang-Sik Yoon, Sung-Hyun Han

〈Abstract〉

Since the oil shock of 1970's there was a strong upward tendency for the use of the high viscosity and poorer quality fuels. Therefore the misfiring engine occurs due to the decrease of quantity injected for lean burn and emission control in CI diesel engine.

In this study, it is designed and used the test bed which is installed with turbocharger and intercooler. In addition to equipped using CRDI by controlling injection timing with mapping modulator, it has been tested and analyzed the engine performance, combustion characteristics, and emission as operating parameters.

Keywords : Specific fuel Consumption, CRDI(common rail direct injection), Combustion characteristics, Exhaust emission, Rate of pressure rise, Mass burned fraction, Fuel injection timing, Compression Ignition(CI), PM(Particulate Matters)

1. 정회원, 교신저자, 르노삼성자동차
E-mail : gibok.kim@renaultsamsungM.com

1. Corresponding Author, Renault Samsung Motors
Co., Ltd.

2. 정회원, 경남대학교 기계공학부 교수, 工博

2. Prof., School of Mechanical Engineering, Kyungnam
University, Ph. D.

1. 서 론

급속히 발전해 가는 산업화와 더불어 인류는 환경의 오염에 노출되고 있으며, 환경 오염방지에 대한 각별한 관심을 기울이고 있는 실정이다. 온실가스와 유해 연소가스의 규제가 강화되고 있으며, 환경오염의 규제가 심해지면서 최근 국내외에서 압축착화방식 디젤기관의 연소 및 배기특성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 선진국에서는 환경규제를 강화하고 있는데 1970년대부터의 대기, 토양의 오염 문제나 에너지 문제를 제기하였고, 1990년대에는 새로이 지구온난화 문제를 제기하기 시작하였다. 오염물질 저감과 저연비, 고효율을 위한 연소의 개선과 성능향상에 관한 연구가 지속적으로 필요하다. 피스톤 상부 크라운 부분의 형상을 개조하여 CCD(Combustion Chamber for Disturbance)분사를 이용하여 강한 난류를 형성함으로써 초기에 분사된 연료를 특정한 형상의 공간(cavity)에 가둠으로써 초기의 과농 연소를 진행시키고, 피스톤이 하강하는 폭발행정 동안 미연의 연료를 연소시킴으로써 희박연소를 진행하여, 완전연소를 도울 수 있도록 하였다.⁽¹⁾⁽²⁾ 그 결과 NO_x 발생량이 1/2 이하로 감소되는 결과를 얻었다. 하지만 매연과 제동연료소비율(BSFC)은 개선전의 피스톤 사용 시에 비해 높게 나타났다. 압축착화방식 디젤기관은 흡입 공기의 온도와 압력을 상승시켜 고압축으로 만든다.⁽³⁾ 그리고 연료를 고압축된 공기가 있는 연소실 안으로 인젝터를 통한 연료분사에 의해 연소시키는 열기관으로, 공기 중의 산소는 연소의 산화제 역할을 하게 된다. 즉, 흡입공기 내에 산소 분자가 많게 되면 상대적으로 연소 반응시 소요공기량이 적으므로 유해 배기가스량이 적게 배출된다. 따라서 압축착화방식

디젤기관에 흡입되는 공기 중에 산소와 오존을 첨가하여서 디젤기관 연소의 특성, 연소 변동성 및 배기배출물 가스 조성에 대하여 정량적, 정성적인 해석을 하는 것이 본 연구의 목적이다.

연소특성의 해석 인자로는 실린더 내 압력의 변화와 연소율 즉 열발생율과 질량연소율 등으로 해석하고, 또한 질량연소율에서 착화지연 및 연소기간의 변화를 이용하여 연소 속도의 영향을 파악하고자 한다.

2. 혼합기 조성과 산소체적분율 변화

기관의 출력은 실린더 내로 흡입된 공기량과 연료가 분사된 양에 비례한다. 실린더 내 연소실에 흡입된 공기량은 대기의 상태, 즉 대기압력, 온도 및 습도 등에 영향을 받는다. 이것은 대기의 상태에 따라 공기의 밀도가 변하기 때문이며, 따라서 이론적인 실린더 내 흡입된 공기의 체적과 실제로 흡입된 공기의 체적비인 체적효율(Volumetric efficiency)의 변화를 가져오기 때문이다. 내연기관의 연소과정은 공기 중의 산소를 산화제로 하여 연소 화학반응을 하므로 공기의 조성은 연소에 큰 영향을 미친다.

건공기의 조성을 보면 Table 1에 표시한 바와 같이 질소가 체적백분율로 78.09%, 산소가 20.95%, 나머지 0.96%가 기타 성분이며, 연소시 공기 중 산화제의 체적비(volume fraction)는 3.764(N₂/O₂)를 사용하였다.

실제의 내연기관뿐만 아니라 대부분의 연소과정은 공기 중의 산소(Oxygen)를 산화제로 하여 연소하므로 공기 중의 연소반응을 취급하고 있다. 따라서 공기의 조성은 연소에 큰 영향을 미친다.

Table 1. Composition of dry air

Components	Volume fraction (%)	Mass fraction (%)	Molecular weight	Relative weight
N ₂	78.09	75.52	28.0134	6.717
O ₂	20.95	23.15	31.9988	21.861
Ar	0.93	1.28	39.9480	0.376
CO ₂	0.03	0.046	44.0095	0.013
H ₂	0.01	0.001	200160	

공기 중 관심의 대상이 되는 것은 산소로서 연소과정과 그 외의 모든 과정은 산소 20.95 %를 기준으로 한 것인데, 본 연구에서는 연소의 산화제인 흡입 공기 중의 산소 외에 오존을 첨가하여서 그때 전반적인 연소에 관한 사항들이다.

우선 산소 체적비(O₂ volumetric fraction)를 ξ로 표시하고, 다음과 같이 정의한다.

$$\xi = \frac{O_2 \text{ volume in unit air volume}}{\text{unit air volume}} = \frac{V_{O_2}}{V}$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치의 설계 및 구성

Fig. 1은 실험 엔진으로부터 실린더내 압력 경과 및 크랭크 축 회전각도의 검출을 위하여 적외선 발광 다이오드(LED), 메탈 슬릿 디스크(Metal slit disk)와 포토 트랜지스터(Photo transistor)로 결합되어 있으며 LED의 광원이 메탈 슬릿을 통과하여 포토TR이 동작한다. 엔코더에서 검출된 펄스신호는 TR1의 반전회로에 인가된다.

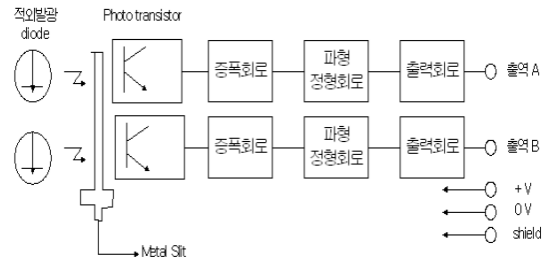


Fig. 1. Encoder diagram of detector.

엔진다이나모메타 시스템의 전체 구성은 Fig. 2와 같다. 제어부분(Controller part), 엔진동력계 부분(Engine dynamometer part), 인터페이스 부분(Interface part), 시스템 관리부분(System management)의 4부분으로 구성하였다.

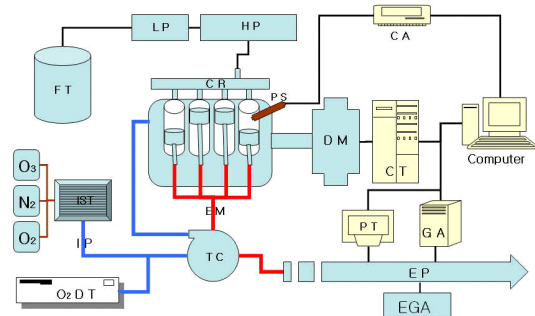


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental

- FT : Fuel tank
- HP : High pressure pump
- DM : Dynamometer
- CR : Common rail
- PT : P.M. tester
- TC : Turbo charger
- O₂DT : O₂ Detector
- IST : Inlet surge tank
- LP : L.P pump
- CA : Charge amplifier
- PS : Pressure sensor
- CT : Controller
- GA : Gas analyzer
- EP : Exhaust pipe
- AF : Air filter
- IP : Intake pipe
- EGA: Exhaust gas analyzer

실험에 사용된 기관은 직접분사식 압축착화 디젤기관으로 기관의 제원은 Table 2에 나타내었다.

냉각수는 공급식이 아닌 밀폐순환식으로 일정온도를 유지할 수 있도록 자동 온도조절기(Thermostat)와 냉각팬을 이용하였다. 여기에 오존을 생성시키기 위하여 오존 발생기를 장착하였다. 이들 장치들을 크게 분류하여 보면 지압선도 및 연소성능 해석장치, 연비 및 출력성능 측정장치, 배기가스 분석장치 등으로 구성하였다.

Table 2. Specification of tested engine

Item	Specification
Model	D4EA
Classification	four-stroke cycle SOHC water cooling CRDI engine
Number of cylinder	4 cylinders in line
Stroke	4
Bore × Stroke	83 × 92 mm
Displacement	1991cc
Compression ratio	18.4
Max. output	Power: 115/4000(ps / rpm) Torque: 26/2000 (kg·m/rpm)
Fuel system	Bosch Common Rail Direct Injection engine (controlled by ECU)
Injection nozzle	Pintle type
Valve position	Over head valve
Valve timing	BTDC 7°
I/O	ABDC 43°
I/V	BBDC 52°
E/V	ATDC 6°

3.2 실험방법

기관의 연소 및 배기배출물 특성에 대하여 실험적 연구를 수행하기 위하여 CRDI Diesel Engine을 실험기관으로 사용하였으며, 연료의 분사시기, 분사량 및 분사압을 제어할 수 있도록 설계 개조하였다. 실험방법으로는 엔진을 충분히 난기시킨 후 각 운전 조건에서 실험데이터를 취득하고 그에 따른 조건에서 오존의 유입량에 따른 연소특성 해석과 출력 및 연료공기비 및 배기배출물 가스를 분석하였고, 기관회전수 및 산소체적분율에 따른 운전 조건은 Table 3에 나타내었다. 연소특성 해석인자로는 연소압력특성, 열발생율, 질량연소율, 및 배기가스 조성을 각각 실험조건에서 비교분석하였다. 엔진동력계의 제어장치에서 기관회전수와 부하를 일정하게 유지한 상태에서 오존의 첨가 및 산소의 첨가량에 대한 영향을 파악하기 위하여 실험을 수행하였으며, 압축착화 디젤기관의 연소특성 해석을 위하여 실린더내 압력과 배기가스 조성 및 연속사이클 압력데이터를 측정하였다.

Table 3. Engine operating condition

Condition	Variation
Engine speed (RPM)	1000, 1500, 2000, 2500
오존 유입량(g/min)	0.28
산소체적분율(Vol %)	19, 20, 21, 23

배기배출물 가스첨가량에 대한 영향을 파악하기 위해서는 비분산형 적외선분석계(NDIR)로서 다원자분자는 어느 특정파장의 적외선 에너지를 흡수하는 특성을 가지고 있어서 그 흡수의 강도는 농도에 비례하는 원리를 이용한 것이다.

적외선을 전혀 흡수하지 않는 기준 셀측과 일부 흡수하는 시료가스를 흐르는 시료 셀측에 회전 부분으로 빛을 교대로 단속시킨다. 시료셀에는 적외선이 흡수되므로 검출기 내의 가스에 흡수되는 양자의 에너지가 다르며, 검출기에 밀봉된 가스의 팽창에 차이가 생겨 금속막이 진동한다. 이것을 전기신호로 바꾸어 내는데 진동의 세기가 농도에 비례하므로 탄화수소 성분의 농도가 측정된다. 질소산화물(NO_x) 가스는 화학발광분석계(CLA)로 NO 의 측정에 사용되었으며, 실험에서는 N_2 에 의해 균형이 이루어진 NO 의 표준가스를(Span gas)를 사용하여 연소가스 분석기와 동일한 방법으로 매 경우 분석계를 보정하였다. 보정에 사용된 가스는 N_2 밸런스된 466 ppm의 NO 가스이다. 저압(1 ~ 10 mmHg)으로 유지된 반응기에 시료가스와 O_2 를 함유한 산소를 도입하여 반응시키고, 그때의 발광량을 광전지증 배관으로 검출하여 일산화질소 농도를 측정한다.

이산화질소의 측정에는 NO_2 자체만으로는 측정이 되지 않으므로 시료를 질소산화물 변환기를 통해서 NO 로 환원시켜 측정한다. 배출가스 농도의 정확한 양을 검출하기 위하여 배출가스 채취 프로브에서 분석기까지 튜브관의 온도를 180°C 정도로 유지를 하였다. 디젤기관 차량의 입자상물질(PM)은 빛의 소멸 또는 감쇄량의 원리로 측정이 되어 진다.

감쇄된 빛의 양(%)은 배출에 의하여 전송된 입자상물질의 Opacity 값으로 정의한다. 투과된 빛의 양은 입자상물질 배출에 대한 투과도이다. 어떠한 빛도 감쇄시키지 않거나 빛을 떨어뜨리지 않는 연기는 볼 수 없거나 Opacity값이 0% ~ 1% 사이의 투과도를 가지고 있을 것이다. 모든 빛의 양을 감쇄시키는 연기는 100% 불투명 물체이며 그러한 연기는 100% Opacity 값을 가지며 빛 투과도는 0.0% 라 한다. 이 측정기기는 샘플에 의

해 차단된 빛의 양을 측정한다.

측정광은 스택 내부의 입자상물질(PM) 입자를 통과하여 반대편에 장착된 반사경(Reflector)에서 광량을 측정한다. 이 때 측정광은 배기관의 배기가스에 있는 입자상물질(PM)에 의해 약해지며 측정광과 기준광의 광도(Intensity)를 비교하여 입자상물질 농도를 계산할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 연소압력 및 연소특성에 관한 해석

본 연구의 결과로서 압축착화 디젤기관의 연소 특성을 해석하는 인자들은, 실린더 내의 압력변화, 흡입공기의 질량연소율로 대표되는 연소율, 실린더 내의 화염전파 과정과 연소의 변동성 등을 들 수 있다. 즉 연소반응은 실제로 다양한 요소반응(Elementary reaction)이 동시에, 또는 차례로 일어나는 연쇄반응(Chain reaction)으로 이루어진다.

실린더 내에서 연소 반응이 일어나는 화염면에서는 여러 활성종과 중간생성물이 생성되기도 하고, 소멸되기도 하는 상당히 복잡한 과정을 통하여 반응이 일어난다. 흡입공기 중의 산소 체적비가 변화하는 경우와 오존이 첨가된 경우 연소반응 자체의 명확한 규명은 어려우므로, 연소의 결과인 연소압력, 연소율 및 연소의 변동성 등을 해석하여 연소특성을 규명하기로 하였다. Fig. 3 ~ Fig. 5는 연소압력에 대한 실험결과이다. 흡기조성 중에 산소 체적비를 높이고, 오존을 첨가한 것인데, 산소는 체적백분율로서 23 Vol%를, 오존은 0.28 g/min의 유량으로 첨가하였다. x축은 크랭크 각도로, y축은 실린더 압력으로 두고 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm하에서 실험을 수행하였다.

산소 체적비를 높이고, 오존을 첨가하였을 때는 정상대기(Normal state)에서 얻을 수 있었던 압력보다 더 높은 압력이 나타나는 것을 알 수 있었는데, 산소체적비를 높였을 때는 3.4 %, 오존을 첨가하였을 때는 4.1 %의 압력상승을 가져왔다.

Fig. 6 ~ Fig. 8은 산소와 오존의 첨가에 따른 압력상승률 곡선을 나타낸 것이다. 이는 산소첨가, 및 오존첨가에 따른 열발생률 변화를 1사이클을 수행하는 동안 동력행정에서의 지압선도로부터 크랭크각도에 대한 압력변화($dP/d\theta$)로서 나타내었으며, 기술키가 급격하게 진행되었고 연소속도를 빠르게 하고 연소 촉진 효과를 보였다.

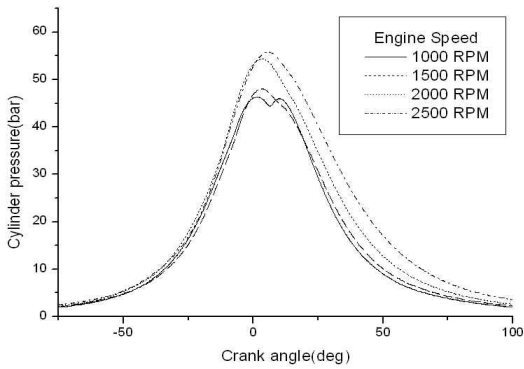


Fig 3. Cylinder pressure(P)-crank angle(θ) diagram for engine speed under normal state.

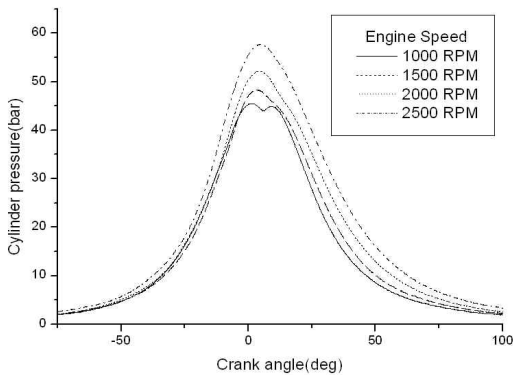


Fig 4. Cylinder pressure(P)-crank angle(θ) diagram for engine speed with adding oxygen(23 Vol%).

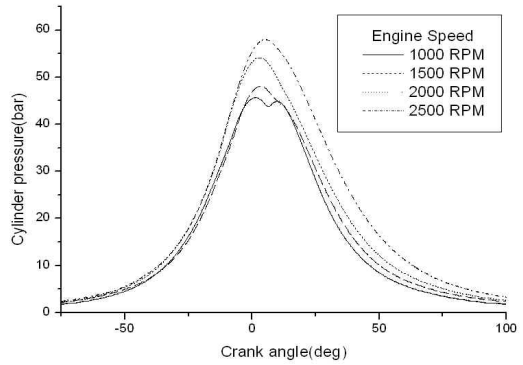


Fig 5. Cylinder pressure(P)-crank angle(θ) diagram for engine speed with adding ozone(0.28 g/min).

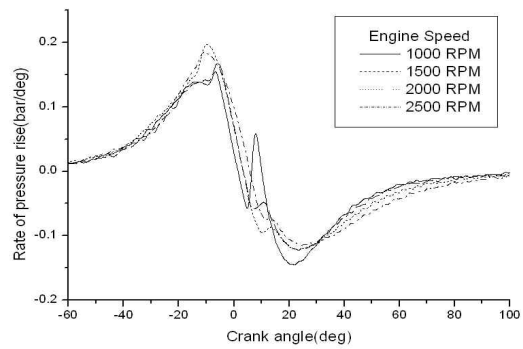


Fig 6. Rate of pressure rise($dP/d\theta$)-crank angle(θ) diagram for engine speed under normal state.

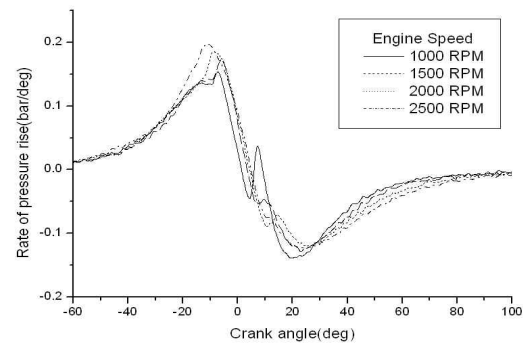


Fig 7. Rate of pressure rise($dP/d\theta$)-crank angle(θ) diagram for engine speed with adding oxygen (23 Vol%).

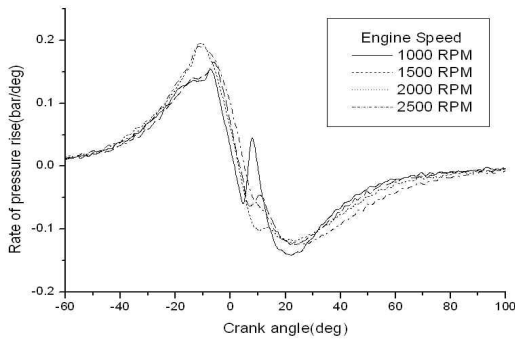


Fig. 8. Rate of pressure rise($dP/d\theta$)-crank angle(θ) diagram for engine speed with adding ozone (0.28 g/min).

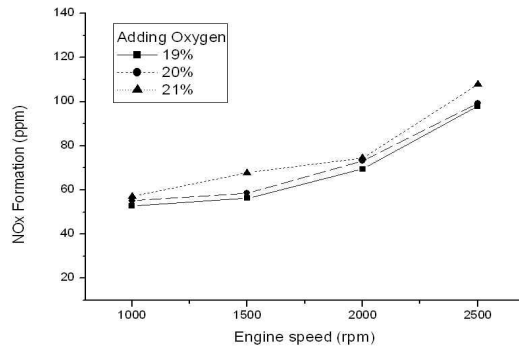


Fig. 9. Nitric Oxides formation according to engine speed adding low Oxygen.

4.2 배기 배출물 특성

Fig. 9는 기관회전수에 변화에 따른 배출가스 중의 NO_x 생성의 경향을 나타낸 것이다. 기관의 회전수가 증가함에 따라 NO_x 는 증가하였고, 기관회전수 2000 rpm에서 산소체적비(ξ)를 20%로 감소시키면 CO는 약 8% 정도 감소하고, 산소체적비(ξ)를 19%로 감소시키면 약 10% 정도 감소하였다. 산소 체적비가 감소함에 따라 연소속도가 떨어지게 되어, 연소가스 온도가 감소되므로, 질소 산화물의 발생도 감소하게 된다. Fig. 10에서는 기관회전수에 따른 배출가스 중의 PM 생성의 경향을 나타낸 것이다. 기관의 회전수가 증가함에 따라 PM은 감소하였고, 산소농도가 떨어짐에 따라 증가 하였다. 엔진회전수 2500 rpm에서 산소체적비(ξ)를 20%로 감소시키면 HC는 약 8% 정도 증가하고, 산소체적비(ξ)를 19%로 감소시키면 약 15% 정도 증가하였다.

디젤기관의 연소해석에서 질소산화물의 감소는 스모크의 증가를 가져오는 연소가스 생성의 결과로 확산화염온도를 낮추어 질소산화물의 생성이 낮아지면서 매연의 산화량은 증가된다. 그리고 연료

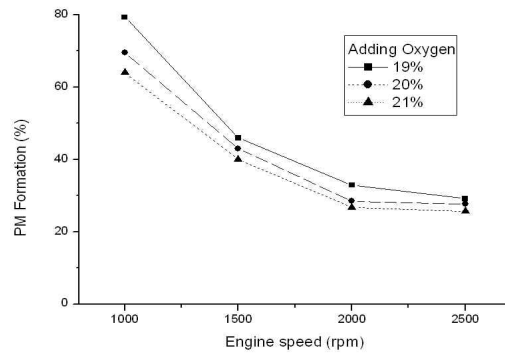


Fig. 10. Particulate Matter formation according to engine speed adding low Oxygen.

분사시기를 진각 하였을 때, NO_x 는 증가하지만 PM은 감소되어 2가지 배기가스의 생성정도는 trade off 된다.

Fig. 11은 기관운전인자의 rpm 변화시 NO_x 와 PM과의 trade off 경향을 나타낸 그래프이다. 부하조정으로 엔진의 작동을 고속으로 하였을 때 연료분사량이 증대 되면서 연소온도상승으로 질소산화물의 생성이 증가하였고, 또한 예연소기간 후반 및 확산연소 기간 동안 연소기간이 단축되어 입자상물질의 생성도 증가하는 결과를 알 수 있다.

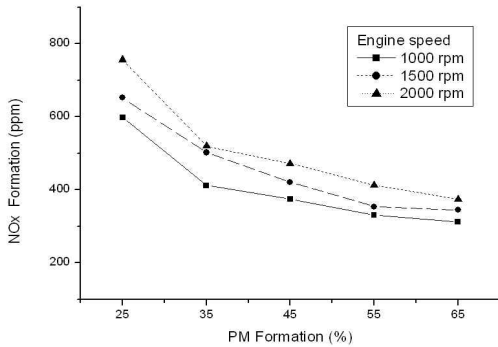


Fig. 11. correlation of Nitric Oxide and Particulate Matters for changing engine speed(rpm).

5. 결론

본 연구에서는 디젤기관의 연소실에 흡입되는 공기중의 산소 체적비(ξ)의 변화와 오존을 첨가하는 방법에 대한 실험해석을 수행하였다. 기관운전 시험을 통하여 각각의 운전조건에서 흡기조성의 변화가 연소 압력과 배기배출물에 미치는 영향을 비교한 결과 아래와 같다.

1. 산소 체적비를 높였을 때는 3.4 % 오존을 첨가하였을 때는 4.1 %의 최고압력 상승을 가져왔다. 그 상승분은 연소에 의한 체적팽창의 결과로 연소속도가 향상되어 최대압력 발생시기가 일반 엔진에 비해서 상사점 방향으로 이동하고 있는 것을 확인하였고, 압력상승률은 실린더 압력곡선에 의해서 나타나는데, 최고 압력상승률이 나타나는 시기가 상사점 방향으로 이동됨을 볼 수 있었고 최대 열발생률도 발생시기는 상사점으로부터 진각 되었다.

2. 기관의 회전수를 높였을 때 입자상물질의 생성은 감소하였고, 또한 산소가 첨가되었을 경우에는 약 28%의 저감효과가 있고, 오존이 첨가되었을 경우에는 약 32%의 저감효과를 보였다. 따라서 산소체적비가 증가 할수록 PM은 감소하였다.
3. 압축착화 디젤기관 연소 해석에서 질소산화물의 감소는 매연의 증가를 가져오는 연소가스 생성의 결과로 확산화염온도를 낮추어 질소산화물의 생성이 낮아지면 매연의 산화량은 증가된다. 그리고 연료 분사 시기를 진각시켰을 때, 질소산화물은 증가하지만 입자상물질은 감소되어 배기가스의 생성정도는 trade off 된다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Takemi Chikahisa and Takashi Arai, "In-Cylinder Control of Smoke and NOx by High Turbulent Two-Stage Combustion in Diesel Engines", SAE paper 962113, 1996.
- [2] B. P. Ramesh, H. B. John and P.C. Christopher, "The effects of oxygen-enriched intake air on FFV exhaust emissions using M85.", SAE 961171, 1996.
- [3] Colin R. Ferguson, "Internal Combustion Engines Applied Thermoscience", John Wiley & Sons, p. 80, 1986.
- [4] V. Ganesan, McGraw-Hill "Internal combustion Engine", 2009.
- [5] Y. B. Zeldovich, P.Y. Sadovnikov and D.A. Frank-Kamenetskii : "Oxidation of Nitrogen in Combustion", Academy of Sciences of USSR, 1947.

- [6] D.R. Lancaster and R.B. Krieger :
"Measurement and analysis of engine pressure
data", SAE
- [7] R. Borunan, "Combustion Engineering",
M.Grant, 2002.

(접수:2015.09.24., 수정:2015.10.23., 게재확정:2015.10.28.)