

# 디젤기관의 배기가스 배출특성에 관한 실험적인 연구

정균식\* · 최재성\*\*

## An Experimental Study on Emission Characteristics of Exhaust Gas for Diesel Engines

*K. S. Jeoung · J. S. Choi*

〈목 차〉

- |                  |                 |
|------------------|-----------------|
| I. 서 론           | 3. 배기가스의 농도측정결과 |
| II. 실험장치 구성 및 방법 | 4. 냉각수온도의 영향    |
| III. 실험결과 및 고찰   | 5. 연료분사시기의 영향   |
| 1. TDC 검출        | IV. 결 론         |
| 2. 손실마력의 측정      | * 참고문헌          |

### Abstract

In this study, for the purpose of collecting data of combustion conditions, experimental apparatus was set up. Experimental devices consisted of pressure data acquisition system in cylinder, measuring system of specific fuel consumption and power, detection system of the crank angle and analysis system of exhaust gas, etc..

Influences of pressure data acquisition hole and speed of the revolution were investigated to detect TDC.

Pressure fluctuation rate, heat release rate, heat loss rate and variation of combustion gas temperature, etc.. from cylinder pressure data were calculated to analyze of combustion conditions. The characteristics on NO<sub>x</sub>, CO emission by variations of load Engine speed and cooling water temperature were investigated.

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

## I. 서론

최근들어 지구의 온난화 현상, 산성비, 오존층 파괴등의 환경문제로 인해 내연기관의 배기 배출물이 대기 환경의 주요한 오염원으로서 주목되기 시작했고, 환경오염이 날로 심각해짐에 따라 국제기구와 선진국을 중심으로 환경규제 강화, 환경 오염 방지를 위한 정책과 환경기술 개발 위주로 환경문제에 대한 인식과 관심이 급증되어가고 있는 가운데 IMO(International Maritime Organization - 국제해사기구) 산하의 MEPC (Marine Environmental Protection Committee - 해양환경보호 위원회)를 주축으로 하여 선박용 디젤기관으로부터 배출되는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 일산화탄소(CO), 그을음(Soot), 그리고 미연탄화수소(HC)등의 배기 배출물(Exhaust Gas Emission)에 대한 법적 규제가 MARPOL 73/78부속서 VI의 형태로 선박기관에 대하여도 발효될 전망이다.

이에 따라 디젤기관의 배기배출물 중에서 NOx등의 유해 물질을 저감시키기 위한 연구나 다양한 방법등이 연구 발표되었다.

황산화물(SOx)은 연료가 원인이므로 탈황처리로 제거할 수 있고, 일산화탄소(CO)는 완전연소나 희박연소방법으로 저감할 수 있다. 그리고 그을음(Soot)이나 미연탄화수소(HC)는 연소상태나 연소조건을 개선함으로써 저감할 수 있다. 그러나 질소산화물(NOx) 저감은 엔진 출력과 비용의 함수 관계에 있기 때문에 아직까지 확실한 저감대책이 없다. 따라서 본 논문은 현재 가장 심각한 문제로 대두되고 있는 NOx를 중심으로 연구하였다.

본 연구에서는 실린더 내 압력데이터 수집장치와 배기가스 농도 측정장치를 이용하여 크랭크 각도에 따른 압력변동을, 열발생율, 연소가스온도 등의 연소상태를 분석하고, 실측한 배기가스와 비교함으로써 디젤기관의 운전조건 변화에 따라 오염물질의 배출특성을 파악하며, 오염물질의 저감대책에 관한 기초자료 및 대상기관의 마찰손실에 관하여 검토 하였다.

## II. 실험장치 구성 및 방법

기관의 출력과 배기가스의 배출특성과의 상관 관계를 파악하기 위하여 디젤기관과 동력계로 구성되는 실험장치를 설치하였다.

실험장치의 구성은 실험기관, 데이터 수집장치, 부하 측정장치, 연료 계측장치, 배기가스 측정장치로 구성되어 있다.

Fig. 1에서 실험장치의 전체적인 개략도를 보여주고 있다.

본 실험에 사용된 엔진은 4사이클 6실린더 과급디젤기관으로 MAN에서 개발한 피스톤 헤드에 구형 연소실이 있고, 실린더 헤드와 와류통로가 있어 흡입공기는 실린더 길이 방향으로 강력한 회전운동을 일으키며, 단공 노즐에 의해 연소실 벽면에 분사된 연료를 연소실 전체표면에 분산 증발시켜 회전하는 공기와 혼합되면서 계속적으로 연소가 진행되도록 하는 M연소방식에 의해 작동된다.

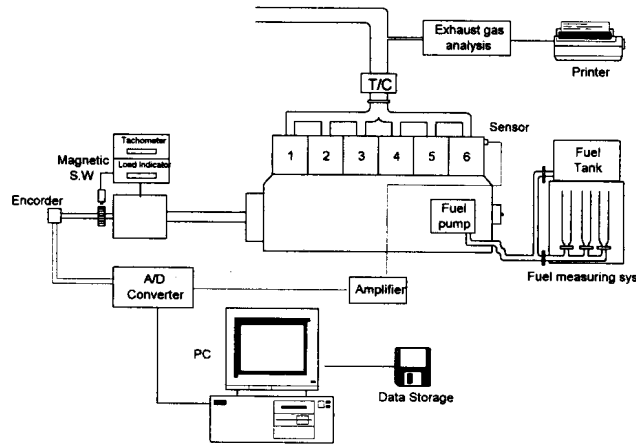


Fig. 1 Block diagram of engine data acquisition system

연구대상기관의 제원은 Table 1과 같다.

실험에 사용된 동력계는 수동력계로서 Table 2와 같다.

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Engine type	4-Cycle Turbocharged Diesel Engine
No. of Cylinder	6
Max. Output	281/2200 (HP/RPM)
Max. Torque	101/1400 (kg · m/RPM)
Bore × Stroke	121 × 150 (mm)
Compression Ratio	17.0
Piston Displacement	10,350 (cc)
Firing Order	1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4
Injection Timing	BTDC 23 ± 1°

Table 2 Specifications of dynamometer

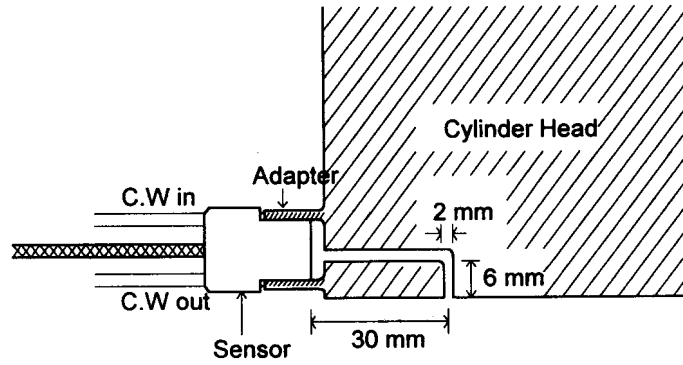
Item	Specification
Type	Hydrodynamometer
Model	P-1.8-LC Non-reversible Model
Max. braking horsepower	200 /3331 (PS/RPM)
Max. Speed	6000 (RPM)
Max. Torque	43 (kg · m)
Braking Control	Manual Control
Amount of Feed Water	Max. 3.6 m/Hr
Feed water pressure	1.0 ~1.5 kg/m <sup>2</sup>
Drain Temperature	Max. 70 °
Lubrication	Grease

### Ⅲ. 실험결과 및 고찰

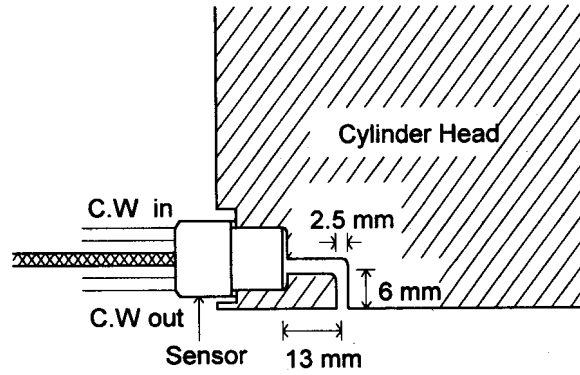
#### 1. TDC 검출

##### 1) 압력취출구 형상에 따른 영향

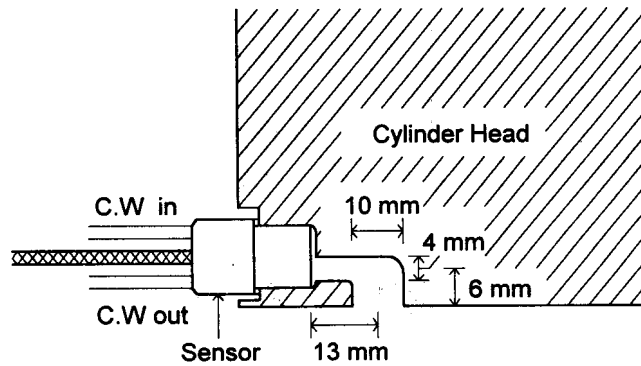
일반적으로 실린더내의 압력을 측정하기 위하여 실린더 헤드에 유로를 가공한 경우, 압력센서에서 검출된 실린더내 압력은 유로의 영향을 받기 때문에 이를 정확히 측정하기 위해서는 상당한 주의를 요한다.



(a) path 1



(b) path 2



(c) path 3

Fig 2. Passage of Pressure pick up

본 연구에서는 유로를 변경시켜가면서 그 때 마다 측정된 실린더내 압력을 비교하여, 유로의 영향을 검토하였다.

Fig. 2는 실린더 헤드내 유로변화의 상세도를 나타내고, Fig. 3은 2100rpm에서 각 유로에 따른 압력측정 결과를 나타낸 것으로 연료를 차단하여 압축압력만을 측정하였다. 그림으로부터 압력센서와 연소실의 거리에 따라 압력전파에 상당한 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 즉 센서와 연소실과의 거리가 가까울수록 압력전파가 빠르게 되어 시간지연이 짧아지기 때문으로 판단된다.

## 2) 회전속도의 영향

본실험에서는 TDC를 검출하기 위해서 엔코더를 이용하여 엔코더의 'Z'펄스 (1 pulse/rotation)를 센서가 있는 연소실의 TDC에 setting하여 시작 Trigger로 데이터를 수집하였다.

그러나 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 동적 TDC는 운전중 변하게 되기 때문에 압축압력으로부터 TDC를 구하는 것이 가장 정확할 것으로 판단된다. Fig. 4는 운전중 정적TDC로 부터 변화되는 경향을 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 유로의 향상에 관계 없이 TDC의 위치는 회전속도가 증가할 수록 늦어짐을 알 수 있다. 또한 측정 결과가 크랭크각 1℃씩으로 분해능을 고려하면 압력센서가 연소실에 가까울수록 늦어지는 정도가 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 운전조건에 따라 측정된 압력을 같은 회전속도의 압축압력에서 확인된 크랭크 각도 만큼 이동시켜 분석하였다. 즉 900rpm~2100rpm까지 rpm이 증가함에 따라 4~8deg. 늦어짐을 확인하여 압축압력 최고점을 TDC로 수정하였다.

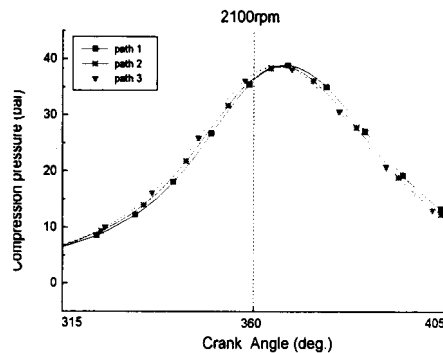


Fig. 3 Effect of pressure acquisition hole at Eng. speed 2100rpm

## 2. 손실마력의 측정

본 실험에서 엔진의 부하를 측정하기 위해 수동력계를 사용하였다.

실험에 사용된 동력계의 한계를(Max. Load : 60kg, 전부하의 약 50%) 전 부하에서 실험이 가능하게 하기 위하여 3 실린더의 연료를 차단(cut off)하고 운전하였다. Fig. 5는 3실린더와 6실린더 운전

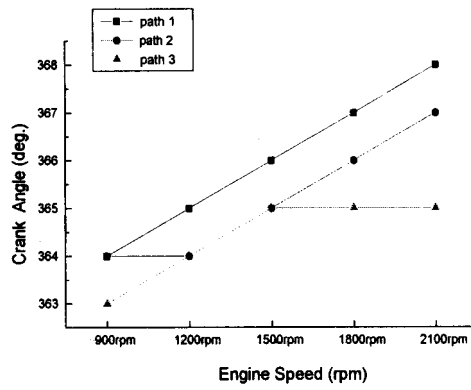


Fig. 4 Variation of Dynamic TDC by pressure passage

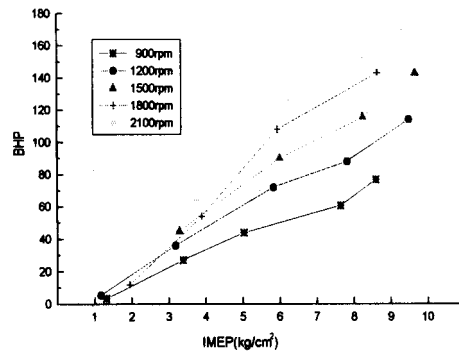


Fig. 5 BHP of associated 3 Cyl. and 6 Cyl. for Eng. speed(rpm)

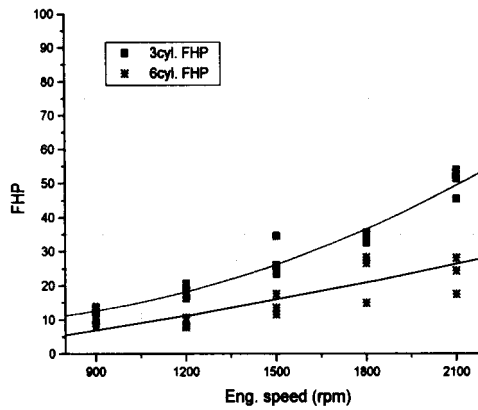


Fig. 6 FHP of 3 Cyl. and 6 Cyl. versus IMEP

시의 제동마력을 엔진회전속도(Engine speed)별로 각각 나타내고 있다. 횡축은 도시평균 유효압력으로 나타내었다. Fig. 6은 3 실린더 운전시와 6 실린더 운전시의 마찰마력(FHP)을 나타낸 것이다.

3 실린더 운전시 펌프손실의 증가를 무시하면 같은 회전속도에서 손실 마력은 거의 동일할 것이므로, 3 실린더 운전시의 제동마력은 동력계에 의하여 측정된 값에 양자의 차이를 더해 주어야 한다.

따라서 이후의 3 실린더 운전시의 제동마력은 이 부분을 보상하여 나타냈다.

### 3. 배기가스의 농도 측정 결과

#### 1) 공기과잉율, 산소농도 및 CO<sub>2</sub> 농도의 측정결과

배기가스 배출농도의 측정은 과급기의 터빈 출구에서 약 70cm떨어진 위치에서 측정하였다.

Fig. 7~Fig. 9는 배기가스 분석기로 측정한 공기과잉율(Xair), 산소(O<sub>2</sub>), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 농도를 도시평균유효압력의 변화에 따라 나타낸 것이다.

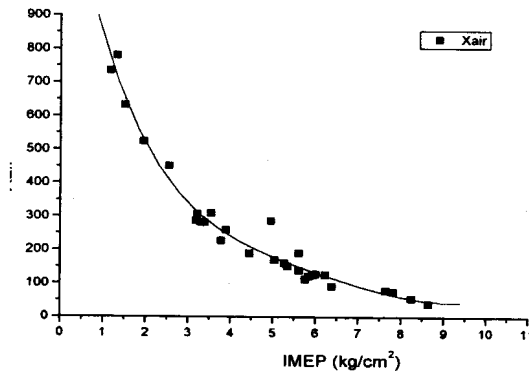


Fig. 7 Xair Concentration of associated 3 Cyl and 6 Cyl. versus IMEP

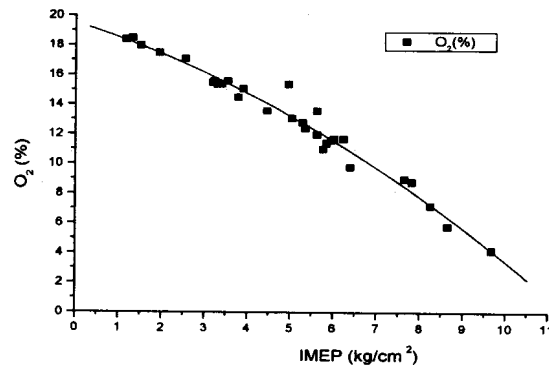


Fig. 8 O<sub>2</sub> Concentration of associated 3 Cyl and 6 Cyl. versus IMEP

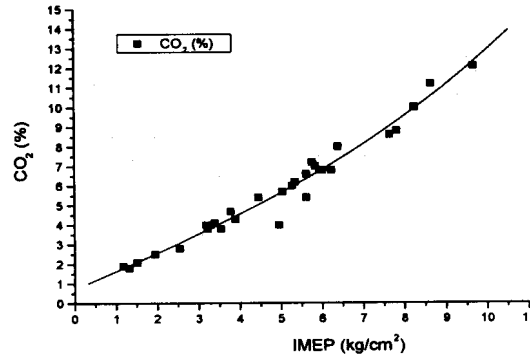


Fig. 9 CO2 Concentration of associated 3 Cyl and 6 Cyl. versus IMEP

3 실린더 운전시의 측정결과를 6 실린더 운전시의 결과와 함께 나타내기 위하여 측정결과를 수정하여 나타내었다. 즉 연료가 차단된 3 실린더로부터 연소하지 않은 순수한 공기가 그대로 배기관에 바이패스되므로 배기가스의 농도는 그만큼 희석 된다. 각 가스성분의 수정은 다음과 같은 방법으로 하였다.

$$X_{air}(\%) = Z / 2 - 50$$

$$O_2(\%) = 2 \cdot Z - 21$$

$$NO_x(\text{ppm}), CO(\text{ppm}), CO_2(\%) = 2 \cdot Z$$

여기서 Z는 3 실린더 운전시 공기압축기를 지난 혼합된 배기가스 각 성분의 측정치이다.

부하가 증가 할수록 과잉공기와 산소농도는 감소하고 이산화 탄소는 증가하는 경향을 잘 나타내고 있다.

## 2) CO 및 NOx의 측정결과

Fig. 10과 Fig. 11은 배기가스 분석기로 측정한 CO 배출농도와 NOx 배출농도를 나타내고 있다.

CO 배출농도는 부하증가에 따라 점진적으로 증가한다. 이는 공기과잉율의 경향과 관계가 있는 것으로 판단된다. NOx 배출농도는 부하에 따라 증가하며 일정부하 이상에서는 증가가 완만해짐을 보여주고 있다. 또한 실험기관의 경우 최대 배출농도는 전부하에서 1200ppm정도를 나타내고 있다.

6 실린더(cylinder) 운전시 회전수는 1200rpm~2100 rpm까지 300rpm씩 증가하고, 부하는 무부하에서 30kg씩 증가하면서 측정한 배기가스중 NOx 배기가스 배출농도를 ppm단위로 Fig.12에서 보여주고 있다. NOx는 부하와 회전수가 증가함에 따라 배출량이 증가함을 보여주고 있으며, 또한 Fig.13에서는 CO 배기가스 배출농도에 미치는 부하와 회전수의 영향을 나타내고 있다. 고속 회전속도 영역에서는 부하의 증가에 따라 CO 배출농도는 감소하고, 저속회전속도 영역에서는 반대경향을 나타내고 있다.

이는 실험기관이 과급기관이기 때문에 저속 회전속도에서는 배기에너지의 영향으로 부하증가에 따른 공기과잉율이 감소하고, 고속 회전속도에서는 증가하기 때문이며, 또한 본 실험기관은 M연소방식



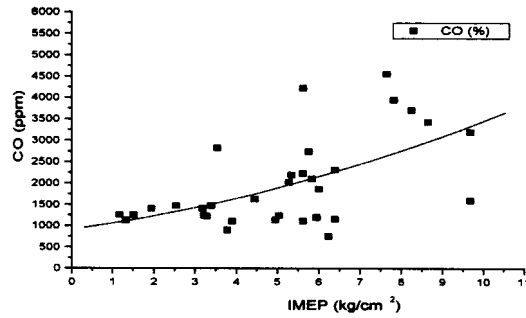


Fig. 10 CO Emission of associated 3 Cyl. and 6 Cyl. versus IMEP

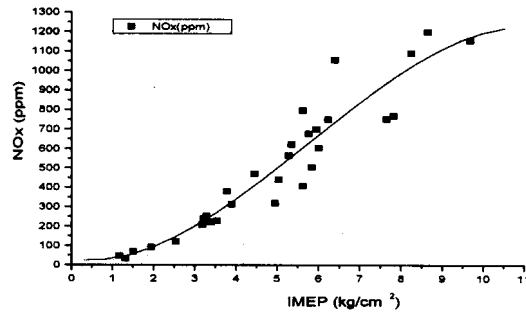


Fig. 11 NOx Emission of associated 3 Cyl. and 6 Cyl. versus IMEP

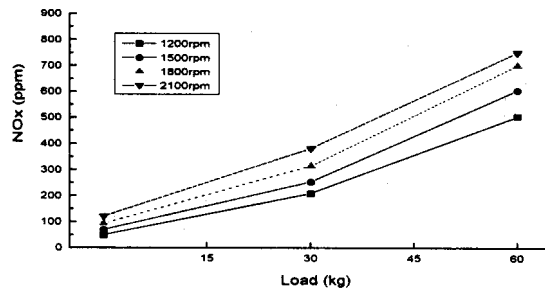


Fig. 12 NOx Emission results by Load for 6 Cyl. Eng. speed(rpm)

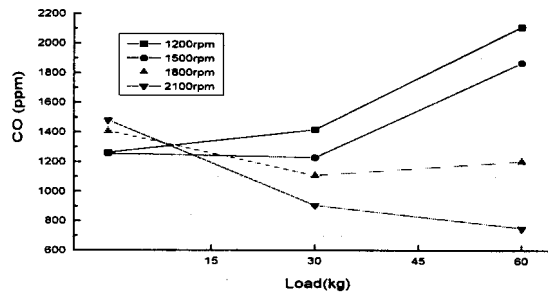


Fig. 13 CO Emission results by Load for 6 Cyl. Eng. speed(rpm)

[1]을 채용하고 있으므로 고속영역에서는 강한 유동이 적극적으로 이용되어 고속으로 갈수록 NOx는 증가하고, CO는 감소하는 일반적인 경향[2]을 나타내는 것으로 판단된다.

#### 4. 냉각수온도의 영향

Fig. 14, 15는 냉각수 출구 온도를 변수로 하여 50°C일때와 70°C일때의 배기가스를 분석한 그림을 나타내고 있다.

Fig. 14는 900rpm과 2100rpm에서 도시평균유효압력에 따른 CO 배기가스 배출농도를 보이고 있다. 여기서 온도가 높은 쪽이 CO 배기가스 배출농도가 적게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 15에서는 반대로 온도가 낮은 쪽이 NOx 배기가스 배출농도가 적게 나타남을 알 수 있다. 이것은 NOx나 CO 배기가스 배출농도는 냉각수 온도에 민감한 영향을 가지고 있으며, 냉각수 온도가 높으면 연소실 온도가 상승하여 연소속도가 빨라지기 때문으로 판단된다. 즉 NOx 생성은 연소초기 예혼합연소시에 주로 배출되기 때문이다.

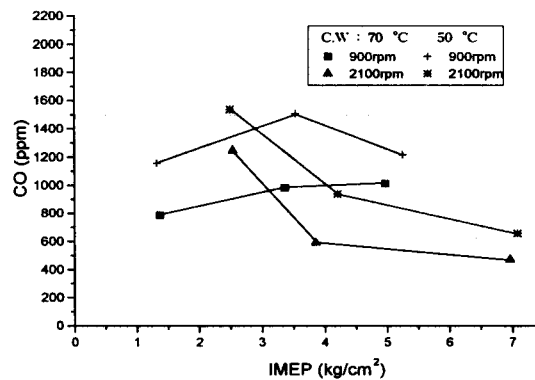


Fig. 14 CO Emission results by cooling water versus IMEP

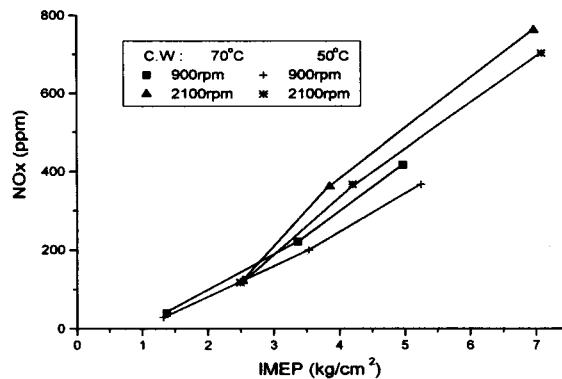


Fig. 15 NOx Emission results by cooling water versus IMEP

또한 CO 배기가스 배출농도에 미치는 냉각수 온도의 영향은 크나, NOx 배출 농도에 미치는 영향은 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다.

### 5. 연료분사시기의 영향

Fig. 16과 Fig. 17은 연료분사를 각각 0deg, 4deg, 8deg. 지연시켜 측정된 결과를 보여주고 있다. 횡축을 부하로 하여 부하가 증가함에 따라 NOx는 증가하고, 연료소비량도 증가하나 연료분사시기 변화에 따라 NOx는 감소하지만 연료소비량은 증가하는 경향을 잘 나타내고 있다. 이는 연료분사시기가 지연됨에 따라 연소기간이 짧아져 NOx는 감소하지만 같은 출력을 내기 위해 연료소비량의 증가를 피할 수 없는 결점을 잘 보여주고 있다.

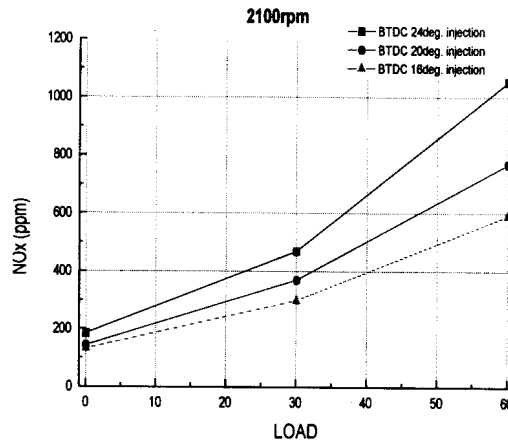


Fig. 16 NOx Emission effects on Fuel injection timing

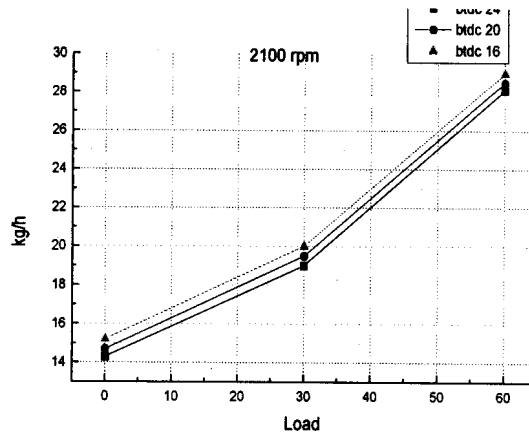


Fig.17 Amount of Fuel consumption variation on Fuel injection timing

Fig. 18에서 CO는 부하증가에 따라 감소하는 경향을 보여주며, 연료분사시기 변화에 따라 고 부하로 갈수록 불완전 연소로 인한 CO는 오히려 증가하고 있다.

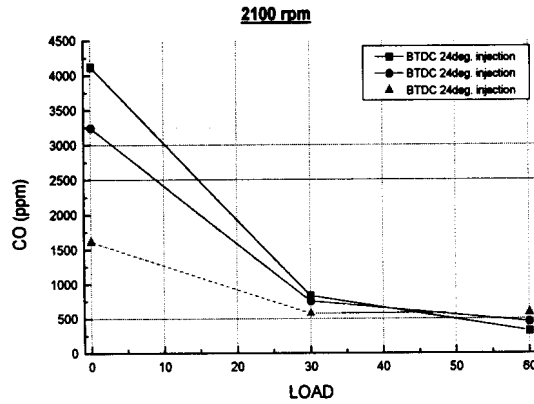


Fig. 18 CO Emission effects on Fuel Injection timing

#### IV. 결 론

이상에서와 같이 소형고속 디젤기관을 이용하여 부하와 회전속도에 따른 배기배출특성을 조사하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 압력검출시 센서와 연소실과의 거리에 따른 영향을 알 수 있었으며, 회전속도가 증가할수록 정적 TDC에서 압축최고점이 멀어짐을 알 수 있었다.
- (2) NOx는 부하가 증가할수록, 회전속도가 증가할수록 증가하였으나, 부하에 의한 영향이 상대적으로 크다.
- (3) CO는 저속영역에서 부하의 증가에 따라 공기과잉량의 감소로 증가한다. 그러나 고속영역에서는 공기유동의 적극적인 이용으로 감소하며, M연소방식의 정점을 확인할 수 있었다.
- (4) CO는 부하의 증가에 따라 공기과잉율의 감소로 증가하였으나, 회전속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈다.
- (5) NOx와 CO는 냉각수 온도에 민감한 경향을 나타내며, 특히 CO의 편이 더 영향을 받는다.
- (6) NOx는 연료분사시기가 지연됨에 따라 저감됨을 알 수 있으며, 반면에 연료소비량 증가를 피할 수 없다

#### 참고문헌

1. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp. 493~494, 1988.
2. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp. 866~869, 1988.