

가솔린 기관용 EGR밸브 개발에 관한 연구

Development of the Exhaust Gas Recirculation Valve for the Gasoline Engine

성 나 원* 정 용 일* · 박 신 현*
 Nak Won Sung · Young Il Jeong · Shin Hyun Park

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an exhaust gas recirculation valve for reduction of the NOx emission of the gasoline engine.

In this study the back pressure modulated (BPM) EGR system was developed and tested for the 1.6ℓ gasoline engine. By this system 50% of NOx emission was reduced at 7% EGR rate. Fuel consumption and CO emission were not affected by EGR but HC was increased up to the level of allowable limit. Overall operation was satisfactory. As a result of this study, the technics for developing EGR valve and adjusting the engine for EGR have been established.

略 語

BPM	: Back pressure modulated	NOx	: Nitric oxide (NO + NO ₂)
CO	: Carbon monoxide	PPM	: Part per million in volume
EGR	: Exhaust gas recirculation	rpm	: Revolution per minute
HC	: Total hydrocarbon	VM	: Vacuum modulated
MBT	: Minimum advance for best torque	VVM	: Venturi vacuum modulated

1. 서 론

1960년대 후반부터 시작된 자동차 排氣公害에 대한 일반의 인식과 이에 대한 행정당국의 규제로 排氣가스 감소에 대한 기술이 많이 발전하였고 70년대 초의 유류파동을 겪으면서 자동차 연료소비 절약을 위해 燃燒와 엔진조절 최적화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 결과로 선진국에서의 자동차 排氣가스는 1960년대에 비해 1/10 수준으로

낮추어졌고 연료소비율은 70년대초와 비교하여 50% 이상 향상되었으며 이 방면의 발전은 계속되고 있다.

우리나라에서는 1960년대에 조립으로 시작한 자동차 산업이 국산화율 90% 이상으로 성장하여 최근에는 자동차를 수출하기까지 발전되었으나 아직 機關開發 및 性能向上에 대한 技術부족으로 외국 자동차에 비해 성능이 뒤떨어지고 있다. 특히 排氣가스 감소기술은 선진국에 비해 나후되어 있고 최근의 국내 경제성

장으로 자동차 보급이 증가되어 일부 대도시에서는 자동차 排氣公害가 심각한 문제로 대두되고 있다.

자동차 배기가스중 인체에 해로운 성분은 탄화수소계 연료의 공기와의 불완전 연소에 의한 CO, 연소되지 않은 HC, 연소시 공기중의 질소가 산소와 반응하여 발생하는 NO_x (NO + NO₂) 및 연료와 윤활유에 첨가된 납과 유황 등이 있다. 이들 중 CO는 인체 혈액속의 헤모글로빈을 파괴하여 산소수송을 차단하며 납은 중금속 중독을 일으키고 유황과 함께 자연을 오염시키며 HC와 NO_x는 햇빛과 반응하여 光化學 스모그 현상을 일으켜 인체기관 중 대기에 노출된 눈이나 호흡기에 이상을 일으킨다. 이 스모그 현상이 발생하면 지역적으로 넓은 범위에 영향을 미쳐서 큰 피해를 주기 때문에 선진국에서는 이에대한 적극적인 대책으로 排氣규제를 엄격히 하고 있다.⁽¹⁾

CO 및 HC는 연료가 연소되지 않았거나 불완전 연소의 결과로 발생되므로 이의 감소를 위한 연소의 개선은 機關性能도 향상되는 결과를 가져오나 NO_x는 연소실 온도가 높아질수록 많이 생성되어 機關 성능과는 서로 반대의 경향을 보이므로 NO_x를 감소시키기 위해서는 機關성능의 희생을 다소 감수하여야 한다. 실제로 NO_x의 감소에는 연소 온도를 낮추는 방법이 효과적이어서⁽²⁾ 선진국에서는 배기가스를 흡기판으로 순환시키는 장치(EGR)를 많이 사용하고 있으며 더 엄격한 규제에 대해서는 후처리장치를 병용하고 있다.

본 연구에서는 가솔린機關에 적합한 EGR장치를 개발하여 NO_x를 감소시키는 것을 목적으로 EGR 장치의 설계, 시제품 제작 및 機關 실험과 EGR 양에 따라 변화하는 機關 성능의 최적화 방법을 찾는다.

2. 機關 實驗

2-1 실험장치 및 방법

EGR율을 변화시키면서 機關성능 및 배기가스의 성분을 측정하고 이때 EGR에 따른 연

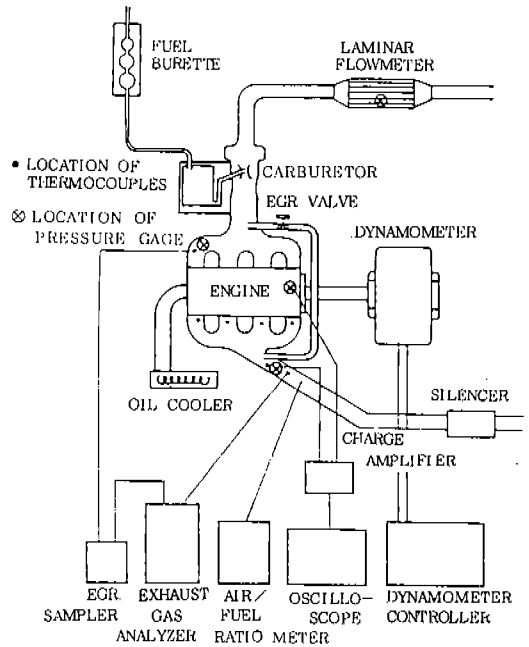


Fig. 1 실험장치의 概略圖

Table 1. 실험機關의 諸元

Item	Specification
Type	4-cylinder, in line, water cooled, 4-cycle overhead camshaft
Total Displacement	1597 cc
Bore × Stroke	76.9 × 86 (mm)
Connecting Rod	153.7 (mm)
Compression Ratio	8.5 : 1
Valve Timing	Inlet Valve open 20° BTDC close 48° ABDC Exhaust Valve open 51° BBDC close 17° ATDC
Carburetor	Stromberg type
Max. Torque	14(kg-m)/4000 rpm
Max. Power	100 ps/6300 rpm

소속도 지연에 의한 燃料消費率 증가와 출력 감소를 보완하기 위하여 점화시기를 進角시켜 최대출력인 점화시기(Minimum advance for Best Torque : MBT)를 사용한다. Fig.1은 실험장치의 개략도이며 Table 1은 실험에 사용한 機關의 주요 제원으로 현대 자동차의 1600 cc 4기통 機關이다. 성능은 機關 動力

計를 사용하여 출력을 측정하고 동시에 연료 소비율, 공기·연료 혼합비, 점화시기, 機關의 윤활유 온도, 냉각수 입출구 온도, 배기가스 온도, 흡기관 압력, 연소실 압력변화, 배기가스 성분을 측정하였으며 실험에 사용한 주요 장비들은 Table 2에 정리하였다.

機關실험은 機關속도와 토크를 고정하는 정속시험 방법으로 하였으며 공회전속도(700 rpm)로부터 5000 rpm까지 1000 rpm 간격의

속도와, 토크는 無負荷에서 全負荷까지 2 kg·m간격의 각 점에서 실험하였다. 機關 방열기에 공기대신 물을 사용하여 냉각수 출구온도가 95 °C이하로 되도록 조절하였고 윤활유 온도는 공회전시 90 °C에서 5000 rpm 전부까지 130 °C까지의 범위로 조절하였다. 그리고 내경 1 cm의 등관을 사용하여 배기관과 흡기관을 연결하고 수동 밸브를 사용하여 EGR율을 조절하였다.

Table 2. 주요 실험장비

Instrument	Measurement	Type, Spec	Maker
Dynamometer	Engine torque, rpm	Eddy current, 130kw	Schenck, W. Germany
Pressure Transducer	Pressure	Piezoelectric charge	AVL, Austria
Oscilloscope	Voltage	Digital, Memory	Nicolet, USA
Exhaust Gas Analyser	CO, CO ₂ NO _x HC	NDIR CLD FID	Horiba, Japan
Air-Fuel Ratio Analyser	O ₂ concentration (A/F Ratio)	Polarographic	Beckman, USA
Laminar Flowmeter	Air flow rate	Laminar Venturimeter	Meriam, USA
Thermocouples	Temperature	CA	우진계기, Korea

2-2 EGR의 영향

EGR율은 다음 식과 같이 전체 연소실 흡기에 대한 EGR 양으로 정의한다.⁽³⁾

$$EGR\ 율(\%) = \frac{EGR\ 양}{\text{흡기공기량} + EGR\ 양} \times 100$$

본 실험에서는 배기의 CO₂ 농도와 EGR된 흡기중의 CO₂ 농도를 비교하는 방법을 사용하였으며 다음과 같이 EGR율을 표시할 수 있다.

$$EGR\ 율(\%) = \frac{[CO_2](int.) - [CO_2](b)}{[CO_2](exh.) - [CO_2](b)} \times 100$$

여기서 [CO₂](b)는 대기중의 CO₂ 농도이다.

EGR율을 5%, 10%, 15%로 증가시키면서 MBT를 찾고 그 상태에서 배기가스와 연료소비율, 공연비 등을 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) NO_x

Fig. 2는 각 운전조건에서 EGR에 의한 NO_x의 감소 상태를 나타낸 것이며 EGR율 5%로 30%정도의 NO_x감소효과를 볼 수 있고 EGR율 10%에서는 NO_x 50%, EGR율 15%에서는 NO_x 70% 이상이 감소된다.

(2) HC

HC는 EGR에 의하여 전반적으로 증가하는 경향을 보이며 적은 량의 EGR에서는 완만한 증가를 보이나 어느 한계를 지나면 급속히 증가한다. 이 EGR율이 HC농도에 급격한 변화

를 일으키는 한계점은 일반적으로 같은 속도 일 경우 부하가 적을수록 낮아지며 반대로 부하가 클수록 EGR 한계점도 높아진다. Fig. 3 에서 2000 rpm의 경우 2.0 kg·m의 부하에서는 EGR 율이 5%일때 HC 농도가 급격히 증가하며 4.0 kg·m에서는 EGR 율 10%에서,

그리고 6.0 kg·m에서는 EGR 율 15%에서도 큰 변화가 없다. 3000 rpm의 경우도 마찬가지로 HC 농도가 급격히 증가하는 EGR 율을 발견할 수 있으며 이 값이 機關의 저부하 영역에서 최적 EGR 율을 결정하는 중요한 제한 요소가 된다.

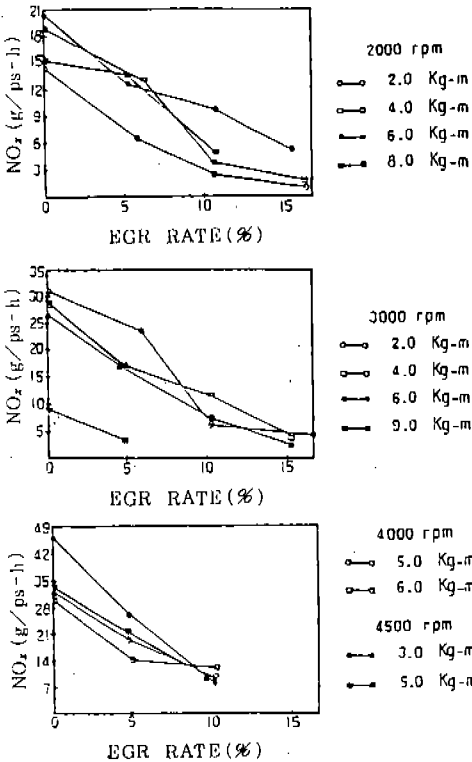


Fig. 2. EGR이 NO_x에 미치는 영향

(3) CO

EGR에 의한 CO의 증가는 저부하에서는 거의 문제되지 않지만 중부하 이상에서는 급격히 증가하는 점이 나타난다. Fig. 4에서 보듯이 2000 rpm, 8 kg·m 조건에서 EGR 율이 5% 이상일 경우 CO가 급격히 증가하며 3000 rpm, 6.0 kg·m 조건에서는 EGR 율 10%에서, 9.0 kg·m에서는 EGR 율 5% 이상일 때 CO 발생이 급격히 증가한다. CO의 급격한 증가점이 중부하 이상의 영역에서 機關의 최적 EGR 율을 결정하는 중요한 제한 요소가 된다.

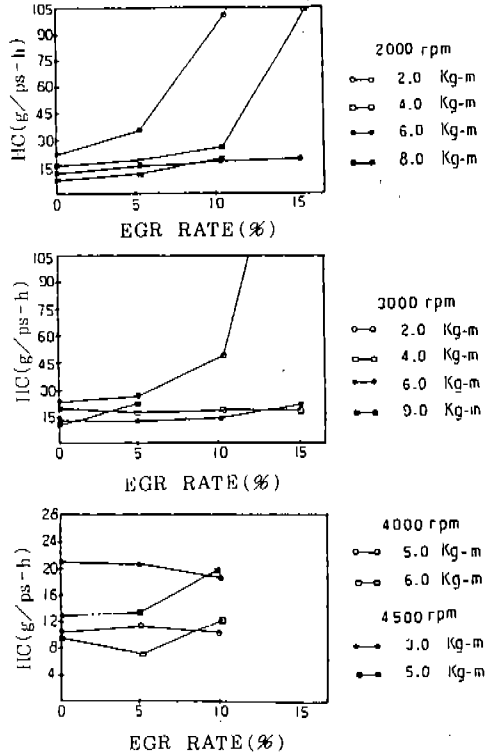


Fig. 3. EGR이 HC에 미치는 영향

(4) CO₂

Fig. 5에서는 EGR 율의 증가에 따른 CO₂의 발생량을 보여주고 있으며 機關의 전 운전 영역에서 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다.

(5) 연료 소비율

Fig. 6에서 보듯이 EGR이 있을 경우 어느 정도까지는 오히려 연료소비율이 좋아지나 일정량 이상에서는 나빠지게 된다. 적정 EGR 율을 결정하는데 있어서 연료소비율의 희생은 가장 중요한 제한 조건이 된다.

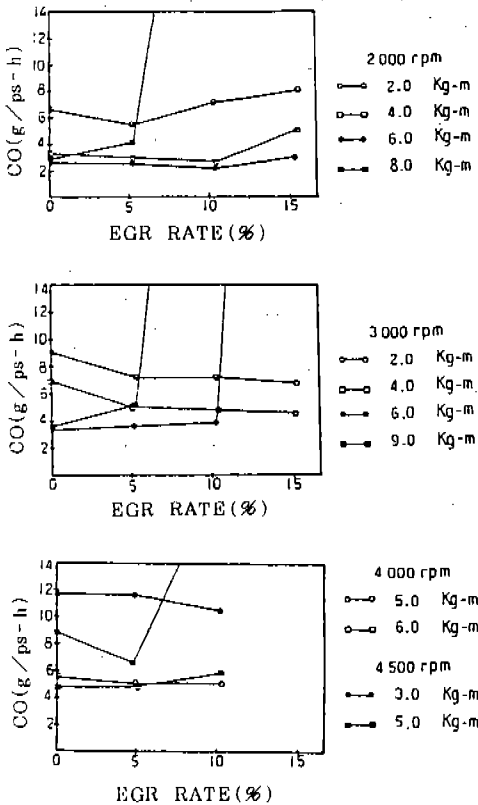


Fig. 4. EGR이 CO에 미치는 영향

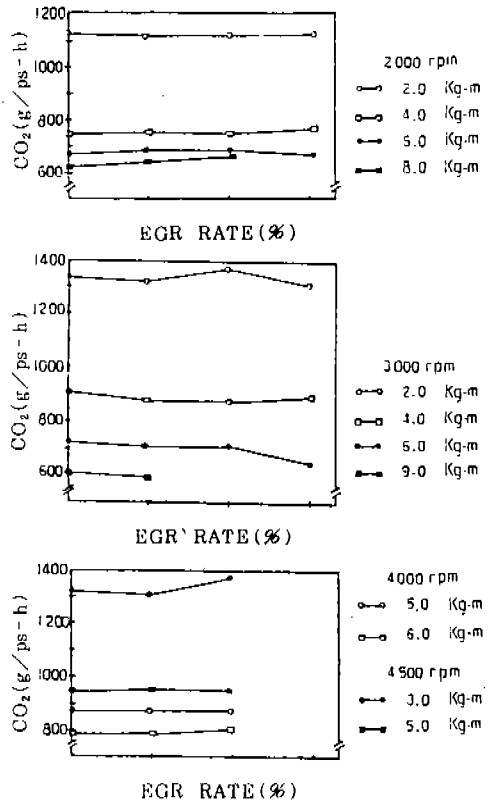


Fig. 5. EGR이 CO₂에 미치는 영향

(6) 점화시기

EGR은 연소실의 최고온도를 낮춤과 동시에 연소 속도를 느리게 하므로 機關 출력의 손실을 막기 위해서는 점화시기를 앞당겨야 한다. 즉 MBT 점이 앞당겨지며 Fig. 7에서 EGR이 MBT에 미치는 영향을 볼 수 있다. 저부하에서는 낮은 EGR율에서 EGR율의 변화에 따른 MBT의 이동이 많으며 고부하일수록 EGR율의 변화에 따른 MBT의 이동이 적다. 그리고 4000 rpm 이상에서는 MBT가 별로 전진하지 않는다.

(7) 흡기압

일정한 출력을 유지하기 위해서는 EGR 양에 무관하게 연료 혼합기의 공급은 일정해야 한다. EGR은 機關의 혼합기 흡입량을 줄이므로 機關이 일정출력을 유지하도록 하기 위

해서는 EGR 증가에 따라 throttle 밸브를 더 열어주어야 하므로 결국 흡기관의 진공도는 떨어진다. Fig. 8에서 흡기부압의 변화를 볼 수 있으며 고부하일 경우를 제외하고 일반적으로 기관 회전속도나 부하변화에 민감하지 않다. 대개 EGR을 5%에서 30 mmHg, EGR 10%에서 80 mmHg, EGR을 15%에서 200 mmHg 정도 감소한다.

(8) 연소실 압력

EGR을 시키면 연소현상이 바뀌게 되고 따라서 연소실의 압력변화가 달라진다. Fig. 9에서 EGR에 의한 연소실 압력이 바뀐 것을 볼 수 있다. 점화시기를 일정하게 하고 EGR율을 10%로 했을 때 최고 압력의 위치도 늦게 나타나는데 이를 보정하기 위해서는 점화시기를 앞당겨 주어야 한다.

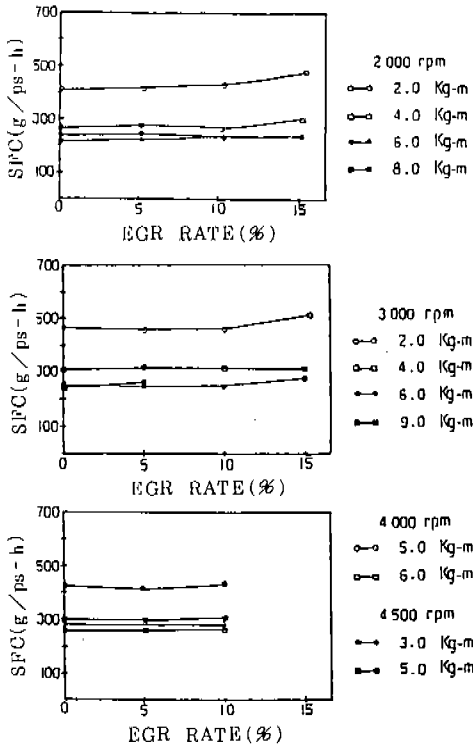


Fig. 6. EGR이 연료소비율에 미치는 영향

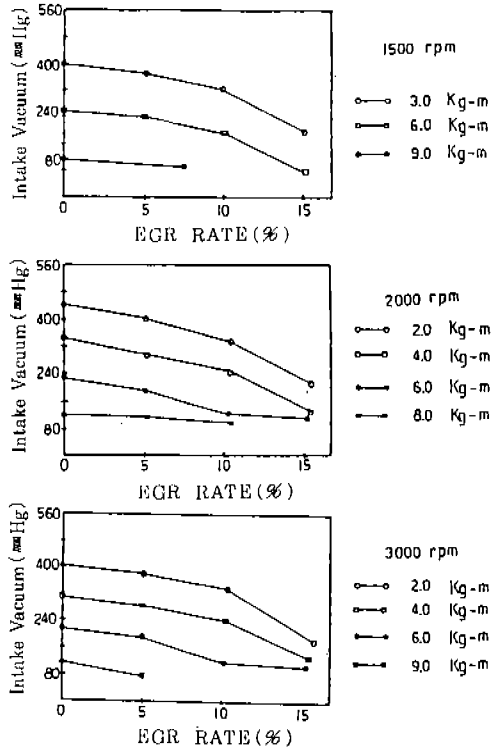


Fig. 8. EGR이 흡기부압에 미치는 영향

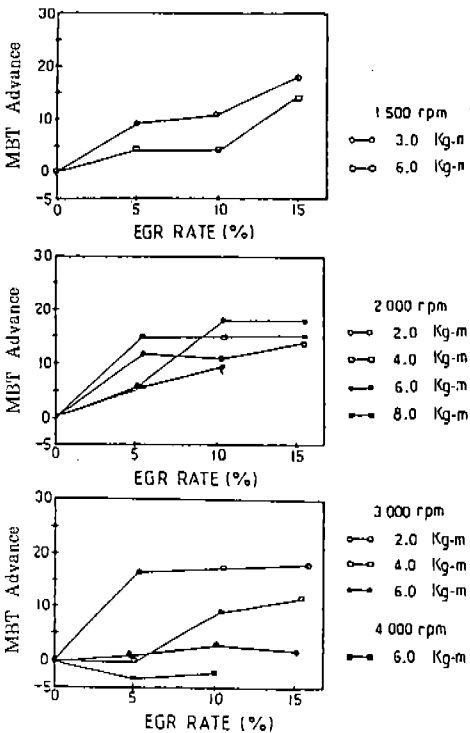


Fig. 7. EGR이 MBT 변화에 미치는 영향

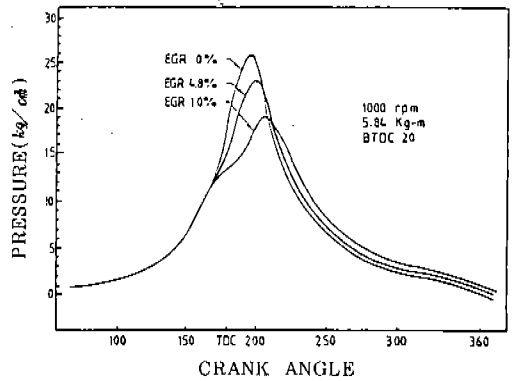


Fig. 9. EGR에 따른 연소압력의 변화

(9) 배기가스 온도

EGR을 시키면 연소 최고 온도가 낮아지고 따라서 배기가스 온도도 낮아진다. Fig. 10에서는 3000 rpm, 4.0 kg·m에서 각 연소실 직후의 배기관에서 측정된 배기온도를 보여주고 있으며 EGR을 15%에서 배기온도가 50℃정도 내려간 것을 알 수 있다.

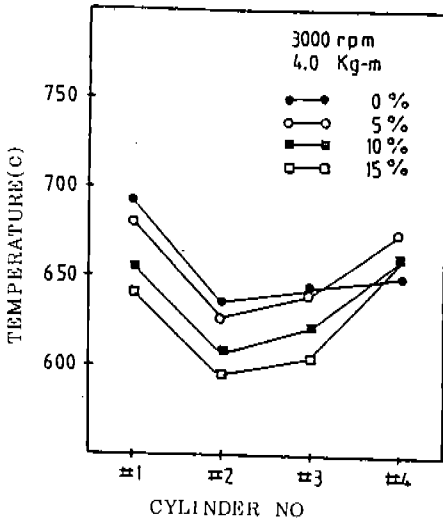


Fig. 10. EGR에 따른 배기온도 변화

2-3 최적 EGR율

지금까지 살펴본 바와 같이 EGR이 機關性能 및 배기가스 조성에 미치는 영향을 고려하여 다음의 기준으로 최적 EGR율을 결정하였다.

- ① 연료소비 증가 2% 以內
- ② HC 증가 50% 以內, 최대 허용농도 2000 ppmC
- ③ CO 증가 10% 以內, 최대 허용농도 3%

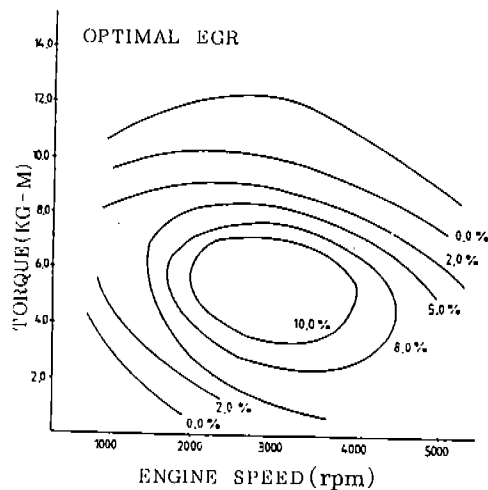


Fig. 11. 최적 EGR율

Fig. 11은 최적 EGR율을 나타낸 것으로서 2000 ~ 4000 rpm의 중부하 영역에서 EGR율 10%가 요구되며 10.0 kg·m 이상의 고부하 영역과 2000 rpm 이하의 저부하 영역에서는 EGR을 시키지 않아야 한다.

3. EGR장치 개발 및 실험

機關의 기본 실험에서 결정한 최적 EGR율을 제어할 수 있는 EGR밸브를 개발하기 위하여 다음의 몇가지 조건을 고려하였다.

1. 공회전시나 저속 무부하에서는 EGR율을 시키지 않는다. 이 상태의 EGR은 機關의 운전성을 나쁘게 하고 과도한 HC의 배출을 초래한다.

2. 최고출력 영역에서는 EGR을 시키지 않는다. 이때는 throttle 밸브가 全開되는 상태이므로 연소실에 공급되는 混合氣의 총 체적은 더 이상 증가될 수 없으며 따라서 EGR은 연료 混合氣의 양을 감소시키고 機關의 최고출력을 떨어뜨리게 되므로 EGR을 시키면 안 된다.

3. 機關이 충분히 가열된 후에 EGR이 가능하도록 한다.

4. 위의 영역을 제외한 전 영역에서는 Fig. 11과 같이 운전조건에 따라 적절히 EGR율을 조절한다.

현재 개발되어 사용되고 있는 EGR밸브는 유량제어 방식에 따라 VM (Vacuum Modulated EGR control) 방식, BPM (Back Pressure Modulated EGR control) 방식, BPM&VVM (Back Pressure and Venturi Vacuum Modulated EGR control) 방식 등이 있으며 Fig. 12에서 보듯이 BPM & VVM 방식의 제어특성이 가장 우수하여 최적 EGR율에 가장 접근하지만 구조와 설치가 어려워서 본 연구에서는 BPM 방식을 채택하였다. BPM 방식은 VM 방식보다 구조가 별로 복잡하지 않으면서 비교적 EGR 제어특성이 좋고 엔진과의 조정이 쉬우며 설치를 위한 설계변경도 비교적 간단하다. (4)(5)

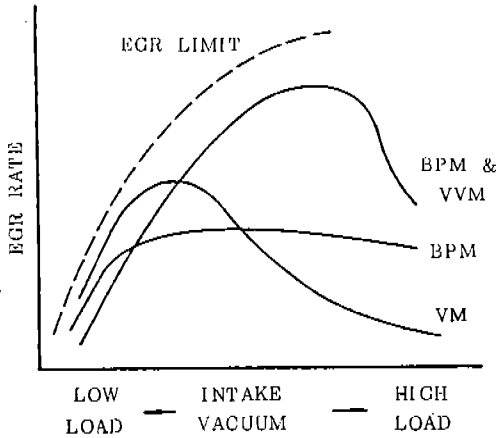


Fig. 12. EGR 유량제어 특성

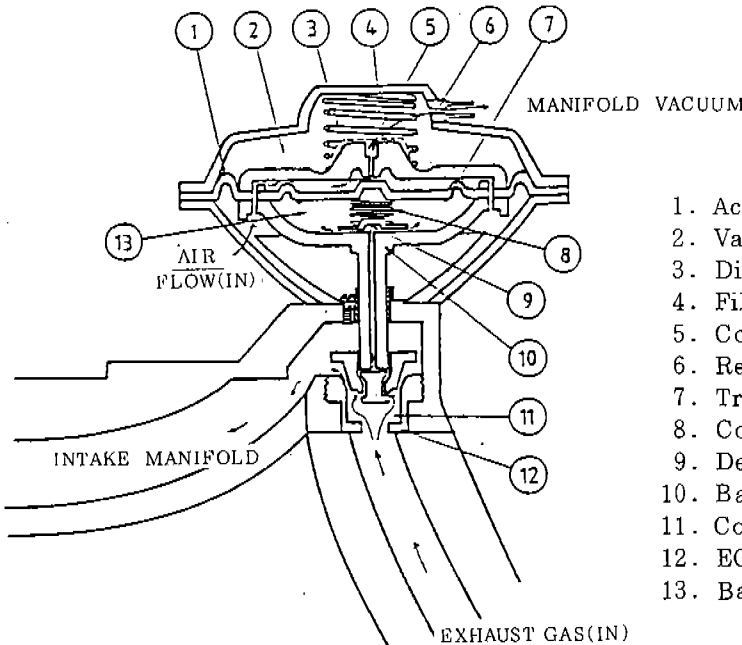
3-1 EGR 밸브 제작

Fig. 13은 본 연구에서 설계한 EGR 밸브의 구조이며 각 부분의 사양은 Table 3에 정리하였다. 이 BPM EGR 밸브는 흡기 負壓과 배기 背壓에 따라 플런저식 EGR 밸브의 상하운동으로 EGR 양을 결정한다. 이 BPM EGR 밸브에는 엔진의 throttle 밸브 근처의

負壓이 연결되어 작용하는 진공실과 그 아래에 排氣가스의 背壓이 작용하는 背壓室이 있는데 機關이 공회전 상태를 지나 진공실에 진공이 작용하면 진공실의 다이어프램 스프링의 장력을 이겨 背壓 sensor와 플런저가 위로 움직여 EGR이 된다. Fig. 14는 EGR 밸브를 엔진에 장착한 구조도이다. 기화기의 throttle 밸브 근처에서 발생하는 진공은 진공 port를 통해 EGR 밸브의 진공실로 연결되어 EGR 밸브를 여닫는 작용을 한다. 또 진공 port와 진공실 사이에는 온도 스위치가 장착되어 있어서 엔진의 냉각수 온도가 80 °C 이하일 경우는 EGR 밸브로 진공이 전달되지 않도록 하고 냉

Table 3.

다이어프램 스프링 상수	6.4 kg/cm
초기 다이어프램 스프링의 위치	4 mm
EGR 플런저 행정	8 mm
EGR 밸브 초기 열림 負壓	40 mmHg
EGR 밸브 최대 열림 負壓	120 mmHg
Actuating 다이어프램 직경	77.5 mmHg



1. Actuating Diaphragm
2. Vacuum Chamber
3. Diaphragm Spring
4. Filter Screen
5. Control Valve
6. Restriction
7. Transducer Diaphragm
8. Control Valve Spring
9. Deflector
10. Back Pressure Sensor
11. Constant Pressure Chamber
12. EGR Orifice
13. Back Pressure Chamber

Fig. 13. EGR 밸브의 구조

각수가 더워지면 진공이 작동하도록 한다.

진공 port는 throttle 밸브가 공회전 위치일때 대기압이 작용하고 throttle 밸브를 차츰 열어주면 진공 port는 throttle 밸브 아래쪽에 위치하게 되어 흡기관 압력과 같아진다. 흡기관 압력은 출력이 높아질수록 負壓이 떨어져서 대기압과 같게 되므로 진공 port에 걸리는 압력은 機關의 공회전시와 全負荷일때 대기압과 같게되어 EGR 밸브를 열 수 없게 되고 中負荷 영역에서는 負壓이 걸려서 EGR 밸브를 열게 된다. (6)(7)

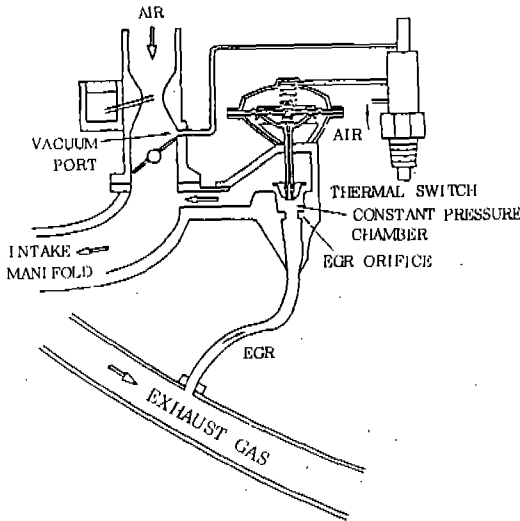


Fig. 14. EGR 장치구성

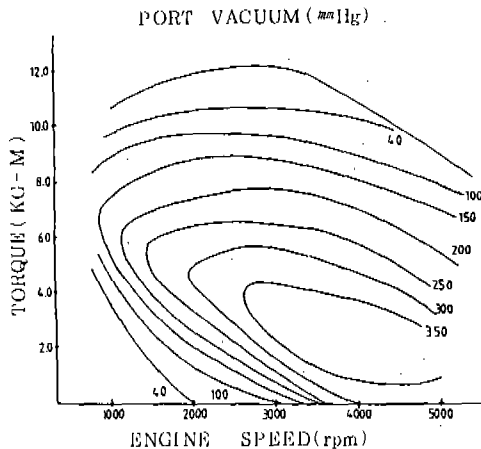


Fig. 15. 진공 Port의 압력특성

Fig. 15는 진공port의 위치를 機關이 1500 rpm과 3.0 kg·m 근방에서 負壓이 작용하기 시작하도록 위치를 결정했을 때 전 운전 영역의 진공 특성을 나타낸 것이다.

3-2 EGR 밸브 실험결과

설계된 EGR 밸브를 제작하고 실험 機關에 장착하여 機關의 全 출력 영역에서 EGR율과 機關의 성능, 배기가스 성분을 측정하였으며 점화시기는 MBT로 조정하였다.

Fig. 16은 2000 rpm 때의 EGR 밸브 실험 결과이며 6.0 kg·m에서 EGR을 7%로 NO_x가 48% 감소하였으며 HC는 14% 증가를 보인다. CO와 연료소비의 변화는 거의 없으며 점화시기는 MBT를 위하여 7° 앞당겨졌고 흡기 負壓은 70 mmHg 감소되었다.

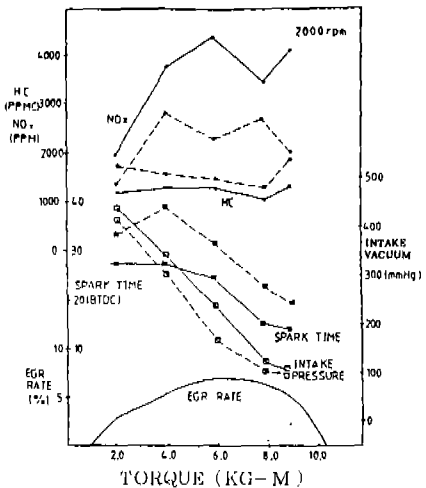


Fig. 16. 2000 rpm EGR 실험 결과

Fig. 17은 3000 rpm 때의 결과이며 6.0 kg·m에서 EGR율이 7%가 되고 NO_x는 44% 감소, HC는 10% 증가됨과 동시에 점화시기는 1°진각 및 흡기부압은 45 mmHg 감소되었다.

Fig. 18은 4500 rpm 때의 결과이며 5.0 kg·m EGR율 6%에서 NO_x는 45% 감소, HC는 20% 증가되었으며 점화시기는 3°진각되었고 흡기 負壓은 45 mmHg 감소되었다.

Fig. 19는 제작된 BPM EGR 밸브의 EGR

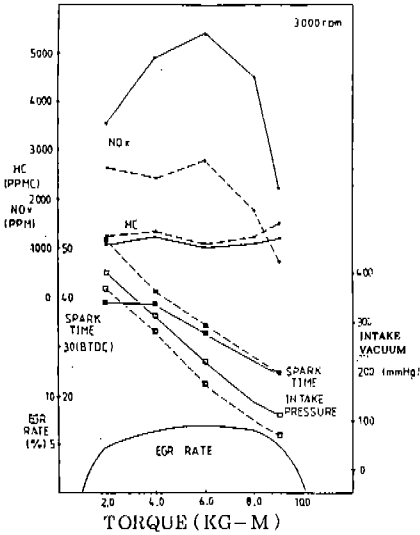


Fig. 17. 3000 rpm EGR 실험 결과

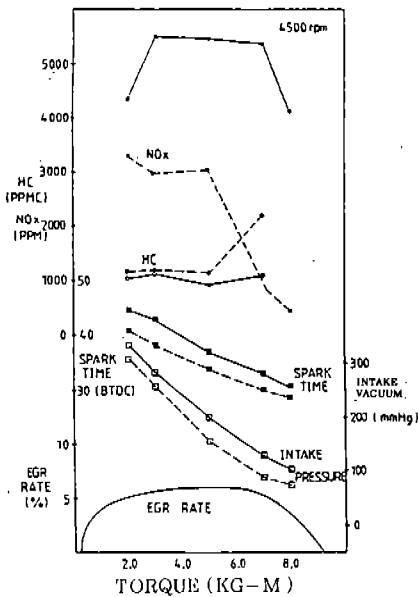


Fig. 18. 4500 rpm EGR 실험 결과

을 제어 특성곡선이며 1500 rpm ~ 4500 rpm, 中負荷 영역에서 EGR율이 6 ~ 7%가 되며 기본 실험에서 구한 최적 EGR율 10%에는 못미치나 실험결과에서 보듯이 NO_x의 감소가 최대 50%까지 가능하며 배출농도도 거의 전 영역에서 3000 rpm을 넘지 않아 EGR 장치

가 만족할만한 효과를 보이고 있음을 알 수 있다.

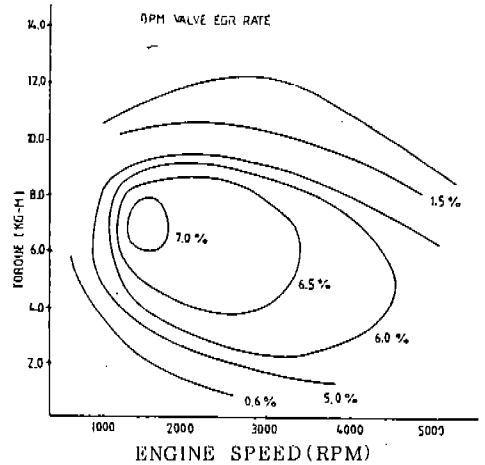


Fig. 19. EGR 밸브의 제어특성

HC가 약간 증가하지만 절대 농도가 2000 ppmC를 넘지않고 또 더욱 낮출 필요가 있을 경우 NO_x보다 처리가 쉬우므로 큰 문제가 되지 않는다. 실험과정에서 EGR율을 더욱 높이기 위해서 排氣관에서 EGR밸브까지의 EGR관의 손실을 줄여서 밸브전후의 압력차를 높여 주었다. 실제 EGR 流路는 機關 내부를 통하여 흡기관이 있는 쪽으로 연결하고 밸브의 가까운 곳에서 排氣를 채취하면 背壓이 매우 높게되고 실린더를 통과하는 공기량의 변화에 민감한 압력변화를 얻을 수가 있다.

4. 결 론

자동차 排氣가스중 NO_x를 감소시키는 방법으로 연소온도를 낮추는 EGR이 효과적이다. EGR을 위해서는 엔진 작동조건에 맞는 최적 EGR양을 결정하고 이를 조절할 수 있는 장치가 필요하며 EGR 시의 NO_x 감소와 더불어 변화하는 機關성능과 관련된 조정이 필요하다.

본 연구에서 개발한 EGR 장치의 機關실험을 통한 관찰에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. EGR을 10%시 NO_x 50%이상 감소 효과가 있으며 HC는 저부하 영역에서,

CO는 고부하 영역에서 급격한 농도상승을 일으키는 EGR 범위가 있으며 연료소비는 EGR 10% 이내에서는 큰 변화가 없다.

2. EGR에 의한 MBT의 변화는 저부하에서 많고 고부하에서 적으며 최대 약 15° 정도 변한다.
3. 실험을 위하여 개발한 BPM EGR 밸브의 EGR율 특성은 中速, 中負荷 영역에서 최대 7%이며 이때 NO_x의 감소효과는 최대 50%이고, HC는 약간 증가하나 절대 농도는 2000 ppmC 이하이다.

참 고 문 헌

1. D. J. Patterson, N. A. Henein, Emissions from Combustion engines and their control, Ann Arbor science, 1981.
2. 徐錫洪, 岩井信夫, EGR と機關性能および排氣成分, 自動車用機關の燃燒と排氣, pp. 128 ~ 137, 山海堂, 1973.
3. Gerhard Stump, Werner Banzhaf, An exhaust gas recirculation System for diesel engine, SAE No. 780222
4. 성낙원, 최진민, 박신현, 우세종, 자동차 배기공해 감소를 위한 기초 연구, 자동차 부품 시험검사 기술개발 보고서, KIMM, 1984.4.
5. William H, Crouse, Donald L. Anglin, Automotive emission control, McGraw hill, 1984.
6. Buick, Emission control Systems in 1983 chassis service manual
7. 林洋, 日本車の 53年 排出ガス 對策(2), (3), 內燃機關 Vol. 17 No. 209, No. 210.