

하이브리드용 가솔린엔진의 EGR을 통한 연비향상에 관한 연구

박 철 응 · 최 영 · 김 창 기*

한국기계연구원

Study on Fuel Consumption Improvement in SI Engine with EGR for Hybrid Electric Vehicle

Cheolwoong Park · Young Choi · Changgi Kim*

Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 12 July 2007 / Accepted 19 August 2007)

Abstract : EGR(exhaust gas recirculation) is considered as a most effective method to reduce the NOx emissions. But high EGR tolerance is always pursued not only for its advantages of the pumping loss reduction and fuel economy benefit in Gasoline-Hybrid engine. However, the occurrence of excessive cyclic variation with high EGR normally prevents substantial fuel economy improvements from being achieved in practice. Therefore, the optimum EGR rate should be carefully determined in order to achieve low fuel consumption and low exhaust emission. In this study, 2 liters gasoline engine with E-EGR system was used to investigate the effects of EGR on fuel efficiency, combustion stability, engine performance and exhaust emissions. With optimal EGR rates, the fuel consumption was improved by 4%. This improvement was achieved while a reduction in NOx emissions of 75% was accomplished. Increase of EGR gas temperature causes the charge air temperature to affect the knock phenomenon and moreover, the EGR valve lift changes for the same control signal.

Key words : Exhaust gas recirculation(배기가스재순환), Gasoline-hybrid engine(하이브리드용 가솔린엔진), Specific fuel consumption(연료소비율), Combustion stability(연소안정성), EGR gas temperature(EGR 가스 온도)

Nomenclature

BMEP	: brake mean effective pressure, bar
MBT	: minimum spark advance for best torque, degree
SFC	: specific fuel consumption, g/kWh
PMEP	: pumping mean effective pressure, bar
COVIMEP	: coefficient of variation of indicated mean effective pressure, %

Subscripts

IN	: intake
ATM	: atmosphere
EX	: exhaust

1. 서 론

국제 원유가 상승 및 친환경 자동차 개발요구에 의하여 지속적으로 강조되어지는 하이브리드 자동차의 연비향상을 위해서는 여러 가지 고려사항들이 있지만 크게 세 가지가 중요한 요인으로 구분된다. 첫 번째는 엔진, 전기모터, 그리고 동력전달계 등 각각의 구성요소 자체의 효율 향상을 통한 연비향상

*Corresponding author, E-mail: cgkim@kimm.re.kr

이다. 일본 Toyota, Honda 등의 하이브리드 승용차 양산 및 시판을 개시한 회사들도 각종 규제를 만족시키고 고효율화를 위해 차량의 경량화, 하이브리드용 고효율 엔진의 개발, 고효율 전동기의 개발에 집중을 하고 있다. 두 번째는 연비와 차량의 성능을 고려하여 최적 주행할 수 있도록 동력 및 운전영역을 분배할 수 있는 최적의 제어 방법이 연비 향상에 고려되어야 할 중요한 사항이다. 특히 엔진의 연료 소모량을 최소화하기 위하여 엔진은 자체의 고효율 영역만을 운전하고, 기타 영역은 전기 모터에 의해 구동되도록 하는 제어가 중요하다. 마지막으로 하이브리드화는 기존 차량에 전기모터에 의한 구동 장치 및 동력원을 추가하는 개념이므로 결과적으로 추가되어지는 장치에 의해 차량중량의 증가 요인이 발생하게 된다. 그러므로 연비향상을 위해서는 차량용도 및 특성에서 효율을 극대화 할 수 있도록 용량선정에서부터 동력분배가 최적의 상태를 이루어야 하고, 이를 근거로 엔진과 전기모터 및 축전지의 size가 결정되어져야 한다. 결과적으로 추가되어지는 동력만큼 엔진은 소형화가 이루어질 수 있을 것이다.

하이브리드 자동차는 높은 연료경제성을 그 기본적인 요구조건으로 하고 있기 때문에, 저연비의 엔진개발이 선행되어야 한다. 적극적인 배기가스 대책의 일환으로 NOx를 줄이는 가장 효과적인 방법으로 평가받고 있는 EGR(Exhaust Gas Recirculation)은 가솔린엔진에서의 경우 연비를 저감시킬 수 있는 방법 중의 하나로도 잘 알려져 있다.¹⁾

EGR을 적용할 경우에는 연소온도를 낮추어 NOx의 생성을 억제할 뿐 아니라 혼합기의 질량당 에너지를 낮춤으로써 노킹을 방지하고, 흡기 매니폴드 압력의 증가로 펌핑손실을 감소시켜 연비의 향상을 얻을 수 있다.²⁾ 그러나 자동차 제작업체에서는 가솔린 엔진에서 EGR을 적용할 때의 연소 불안정성 및 저응답성에 대한 우려와 기존의 EGR 시스템의 단점들 때문에 EGR의 적용을 꺼리고 있으며, 현재 일반 가솔린 자동차에서는 거의 사용되지 않고 있다.

최근 연비향상을 주목적으로 하이브리드용 가솔린엔진에 EGR을 적용하는 사례가 발표되면서 가솔린엔진에서의 EGR의 역할이 다시 부각되고 있다.

하이브리드 엔진의 경우 운전범위가 제한적이고 부하변동이 급격하지 않아 EGR 시스템이 가지고 있는 단점을 어느 정도 극복할 수 있다. 따라서 효율적으로 사용할 경우 연비뿐만 아니라 배기가스 저감에 있어서도 많은 효과를 볼 수 있을 것이라 예상된다.

본 연구에서는 하이브리드용 가솔린엔진에 EGR을 적용하였을 때, 운전성능이 보장되는 범위 내에서 연비향상 정도와 배기가스 배출 특성이 어떤 경향을 보이는지 확인하고자 하였다. 아울러 가솔린 전용 전자식 EGR 밸브 및 cooler 시스템을 엔진에 직접 적용함으로서, 하이브리드 가솔린엔진의 주요 운전영역에서 EGR 시스템의 적정용량을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 하이브리드용 가솔린에 적합한 EGR 시스템과 조건별 EGR을 적용방안을 실제 엔진을 통해 검토하기 위해서 2L 4기통 가솔린엔진을 설치하여 기본적인 성능 실험을 하였다.

2.1 실험장치

Fig. 1에 본 연구에 사용된 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 기존 2L CVVT 엔진을 기초로 하여 효율적인 EGR 가스 공급 및 제어를 위한 여러 시스템을 추가하였으며, 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다. EGR 라인은 스로틀과 흡기 매니폴드 사이에 어댑터를 장착하여 흡입공기와 EGR 가스의 원활한 혼합을 위해 흡기 매니폴드에서 약 100 mm 상류에서 공급되도록 구성하였다. 정밀한 제어와 신속한 작동이 가능한 E-EGR(전자제어방식 EGR) 밸브를 사용하여 Fig. 2와 같이 EGR 가스 라인중간에 설치하였고, 실린더 별로 EGR율을 측정할 수 있도록 각각의 흡기 매니폴드에 가스 추출라인(Gas Sampling Line) 설치하여 CO₂ 농도를 독립적으로 측정할 수 있도록 하였다.

컴퓨터에 의해 제어되는 ECS(Engine Control System)을 이용해 연료 분사량과 분사시기 및 점화시기를 임의로 조절이 가능하도록 하였다. EGR 가스의 온도를 제어하기 위해 배기 매니폴드와 EGR 밸브 사이에 열교환기를 설치하였고, 열교환기 내

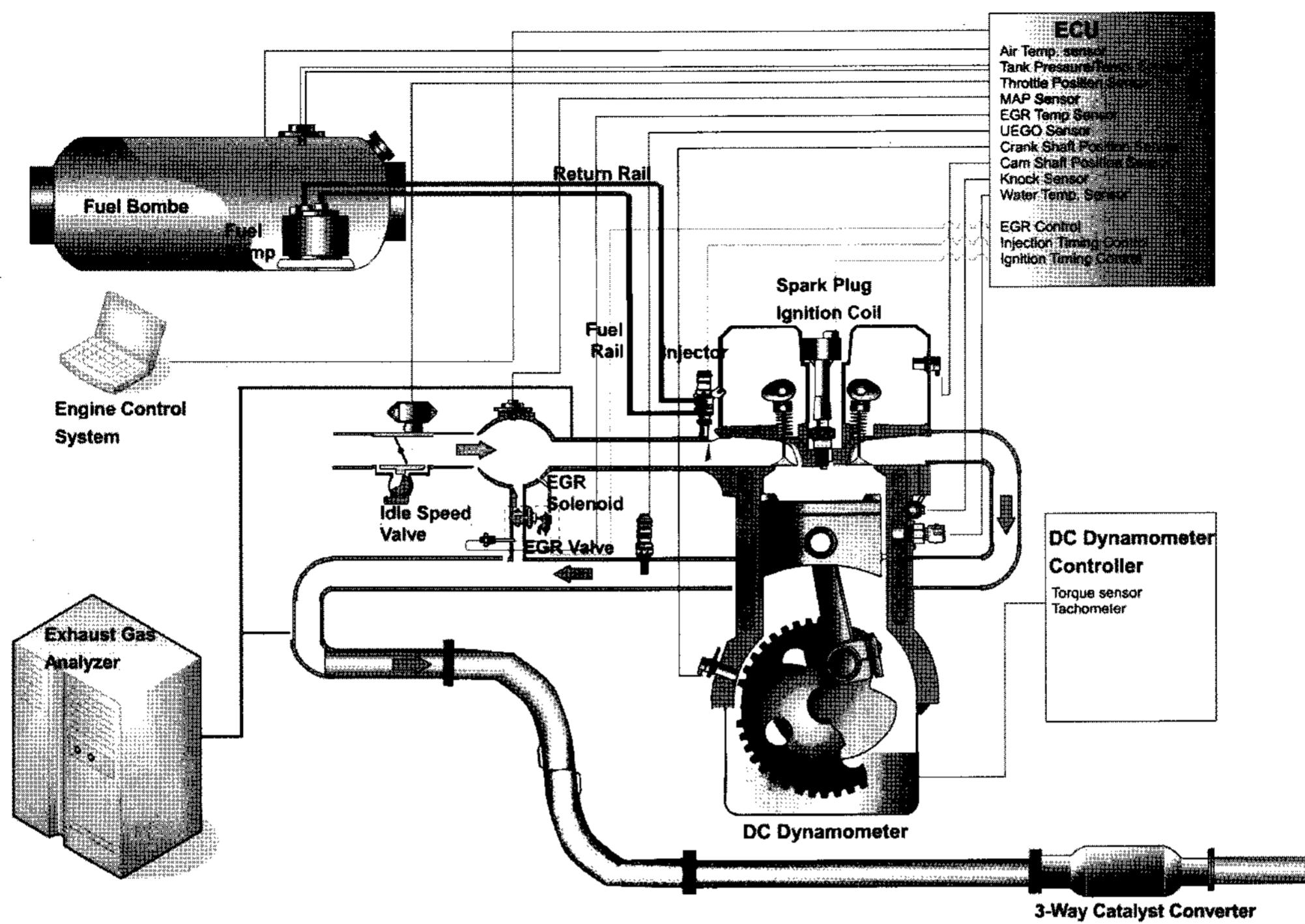


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

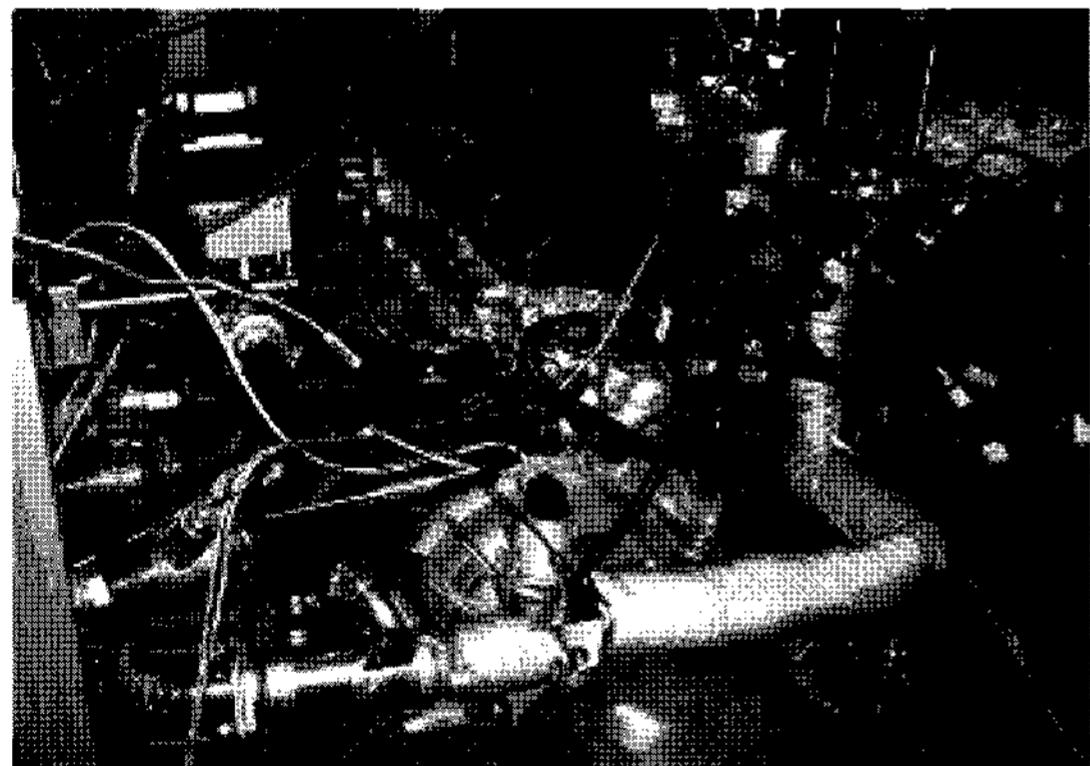


Fig. 2 2 liters CVVT engine with E-EGR system

Table 1 Test engine specifications

Item	Specifications
Bore	82 mm
Stroke	93.5 mm
Compression ratio	10.1
Idle speed	700 ± 100 rpm
Spark timing	BTDC 8 ± 5°
Intake timing	BTDC 9° / ABDC 43°
Exhaust timing	BBDC 50° / ATDC 10°
Valve overlap	15°

를 순환하는 냉각수의 유량은 MOV(Motor Operated Valve)를 사용하여 개도 변화에 따른 유량을 조절하였다. EGR 적용에 따른 연소특성 분석은 1번 실린더에 장착된 실린더 압력 센서와 연소분석기(AVL)를 통해 이루어졌다.

2.2 실험방법

본 연구의 대상이 되는 하이브리드 차량은 소프트 하이브리드 차량으로 분류될 수 있으며, 차량에 장착되는 엔진은 주로 저속 중고부하 영역에서 운전이 이루어진다. 따라서 시험 시 운전조건은 하이브리드 엔진의 주요 운전 영역인 1200rpm / BMEP 0.4 MPa, 1400rpm / BMEP 0.6 MPa로 설정하였다.

엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수 온도가 $82.5 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하고, 공연비는 전 실험 구간에서 $\lambda=1.0$ 을 유지하였다. 각각의 실험조건에 대해 점화시기를 변경하여 MBT를 찾았으며 EGR에 따른 연비, 배기ガ스 배출량, 연소안정성 등을 검토하였다.

전용 컨트롤러를 사용하여 전자제어식 EGR 밸브

의 개도를 제어하여 목표 EGR율을 결정하였으며, EGR율의 측정은 가스분석기를 사용하여 측정한 CO₂ 값을 이용하여 식(1)로부터 산출하였다.

$$EGRrate(\%) = \frac{[CO_2]_{IN} - [CO_2]_{ATM}}{[CO_2]_{EX} - [CO_2]_{ATM}} \quad (1)$$

여기서, [CO₂]_{IN} : 흡입공기 중의 CO₂ 농도

[CO₂]_{ATM} : 대기 중의 CO₂ 농도

[CO₂]_{EX} : 배기가스 중의 CO₂ 농도

EGR을 적용할 때, EGR율 조절 밸브의 개도는 엔진이 안정한 연소가 가능한 최대한도까지 변화시키며 시험하였고, 점화 시기는 낮은 부하에서는 MBT를 확인할 때까지, 높은 부하에서는 노킹이 발생하기 시작할 때까지 진각시키며 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 EGR 분배특성

다기통 엔진의 경우에는 EGR 가스의 실린더간 고른 분배가 요구되며, 실린더내로 공급되는 EGR 가스의 편차를 최소화함으로써 실린더의 연소안정성을 유지할 수 있다. 따라서 EGR을 충분히 활용하기 위해서 실린더간 고른 EGR 분배가 기본적으로 요구된다.^{3,4)} 본 연구에서는 실린더간 분배 편차에 따른 오차를 최소화하기 위해 흡기관에 이전 100 mm의 위치에서 흡입공기와 EGR 가스가 혼합되도록 하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에 운전조건에 따른 실린더간 EGR

율 변동성을 측정한 결과를 나타내었다. 엔진의 운전조건과 EGR율에 따라 실린더간 변동성은 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 낮은 부하인 1200rpm BMEP 0.4 MPa의 조건에서는 스로틀 밸브로부터 멀어지는 쪽인 3번과 4번 실린더에 상대적으로 적은 양의 EGR 가스가 유입되었으며, 높은 부하인 1400rpm BMEP 0.6 MPa의 경우에는 2번과 3번 실린더에 비해 1번과 4번 실린더에 보다 많은 양의 EGR 가스가 유입되었다. EGR율이 증가할수록 불균형이 증대되는 경향을 보이고 있으나 변동성은 최대 3% 이내로 그 편차가 작았다.

3.2 EGR율에 따른 배출가스 및 성능특성

EGR 적용시의 연료소비율은 부하와 연소안정성의 영향에 의하여 그 결과가 나타나는데 저회전수, 저부하 영역에서와 같이 연소 안정성이 좋지 않은 상태에서 EGR이 공급되면 사이클 변동성이 급격히 악화되어 EGR에 의한 연비개선 효과는 제한적이다.⁵⁾ 그러나 본 연구의 대상이 되는 저속 중고부하 영역에서는 보다 많은 양의 연료 분사로 인해 연소 안정성이 확보된 영역이기 때문에 EGR 공급에 따른 어느 정도의 연료 소비율의 감소가 가능하다.

Fig. 5와 Fig. 6의 EGR율 및 점화시기에 대한 연료소비율을 보면, MBT는 EGR율을 증가시킬수록 진각되고, 부하가 커질수록 노킹에 의해 점화진각의 범위가 작아진다. 그러나 EGR율이 높아질 경우 높은 부하에서는 노킹 경향이 감소하여 점화진각을 더 이룰 수 있었으며, 이는 연소 안정성이 확보된다.

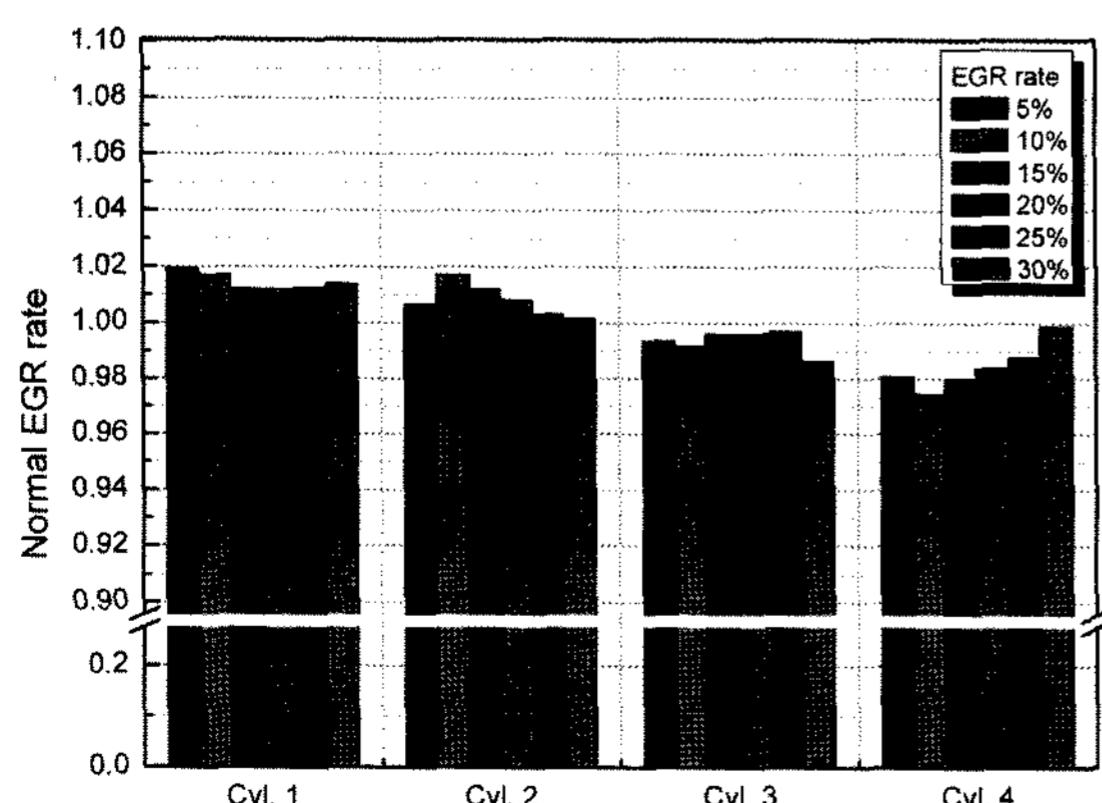


Fig. 3 Cylinder variation of EGR rate at 1200rpm BMEP 0.4 MPa test condition

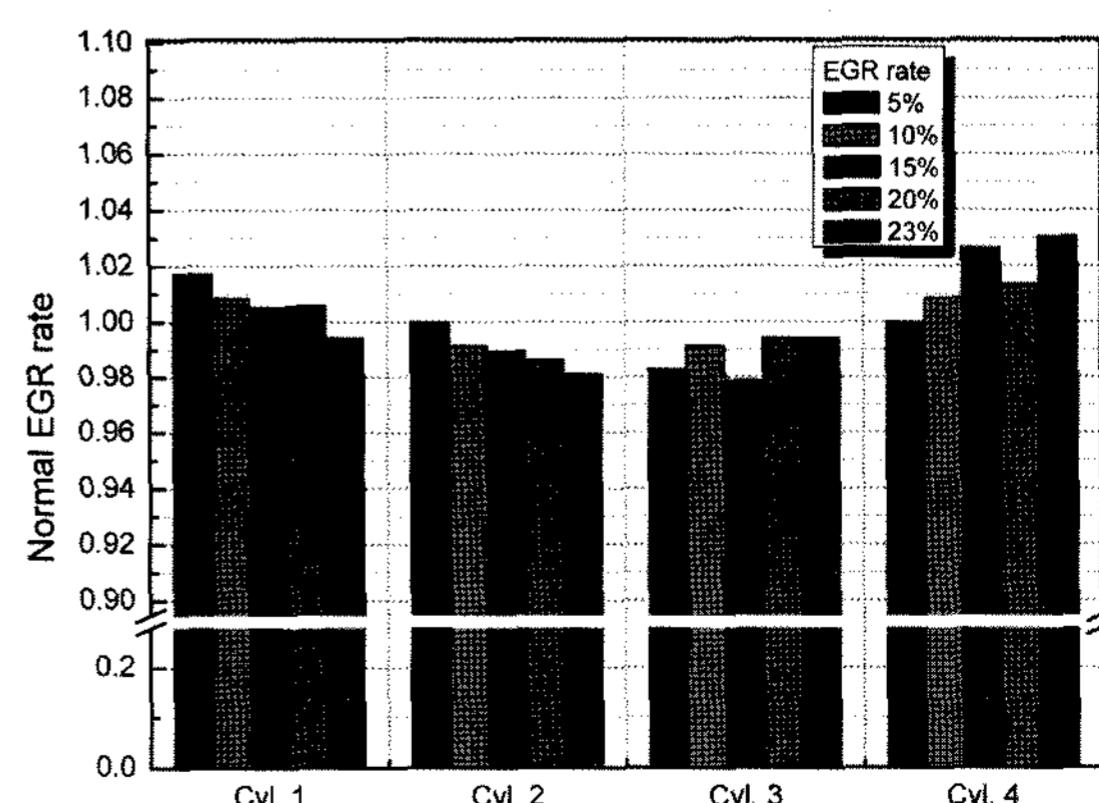


Fig. 4 Cylinder variation of EGR rate at 1400rpm BMEP 0.6 MPa test condition

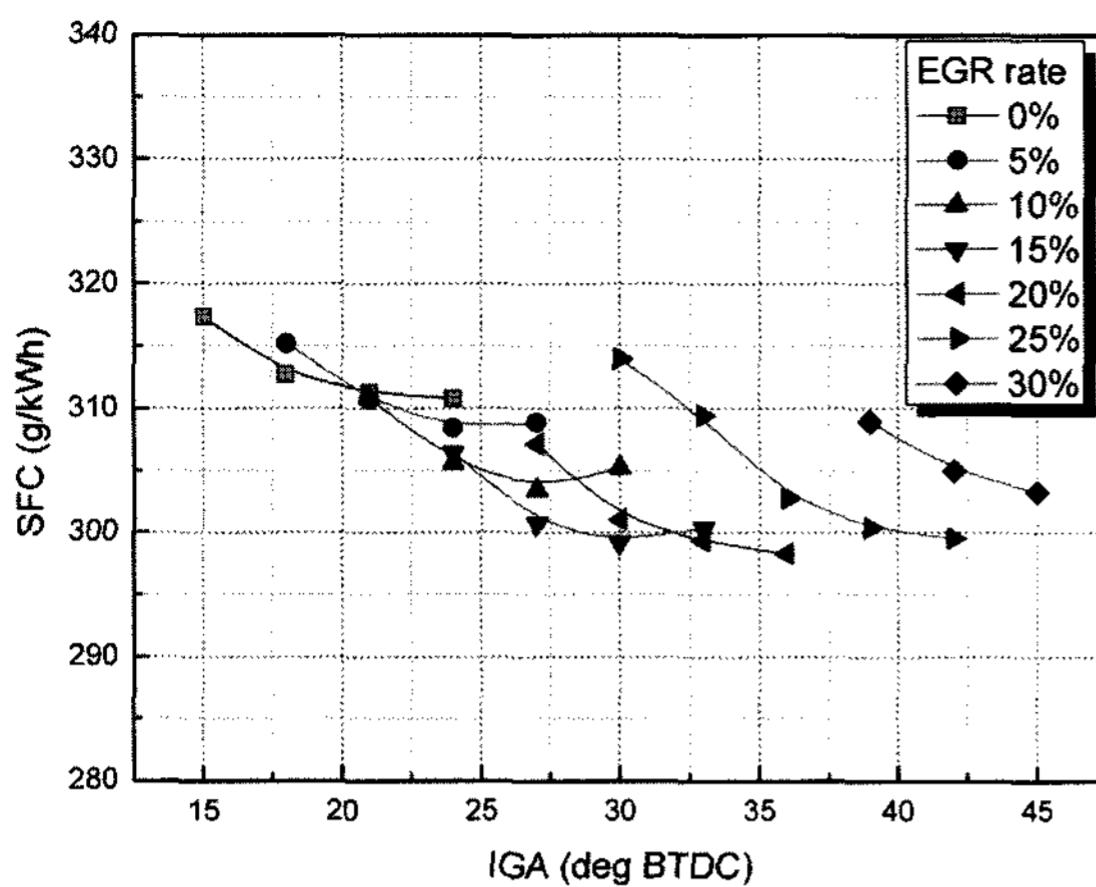


Fig. 5 Effect of EGR rate and ignition timing on fuel consumption at 1200rpm BMEP 0.4 MPa test condition

는 전제하에 높은 EGR율을 사용하여 고압축비화가 가능함을 나타낸다. 선정된 EGR 밸브를 이용하여 EGR을 공급한 결과, 부하가 낮은 조건에서는 EGR율이 과다하게 높을 경우 연소속도의 감소 및 사이클 사이의 출력 변동이 증가되어 연소가 불안정해져 30%이상 EGR율을 증가시키는 것은 의미가 없었고 높은 부하 조건인 1400rpm BMEP 0.6 MPa 조건에서는 적용된 EGR 밸브를 최대한 열더라도 최고 23%까지만 EGR 공급이 가능하였다. 만약, 더욱 높은 부하조건에서 EGR을 사용하여 연비를 개선시키고자 할 경우에는 EGR 밸브의 용량을 더 크게 할 필요가 있음을 알 수 있다.

MBT를 기준으로 EGR에 의한 연료소비율 개선

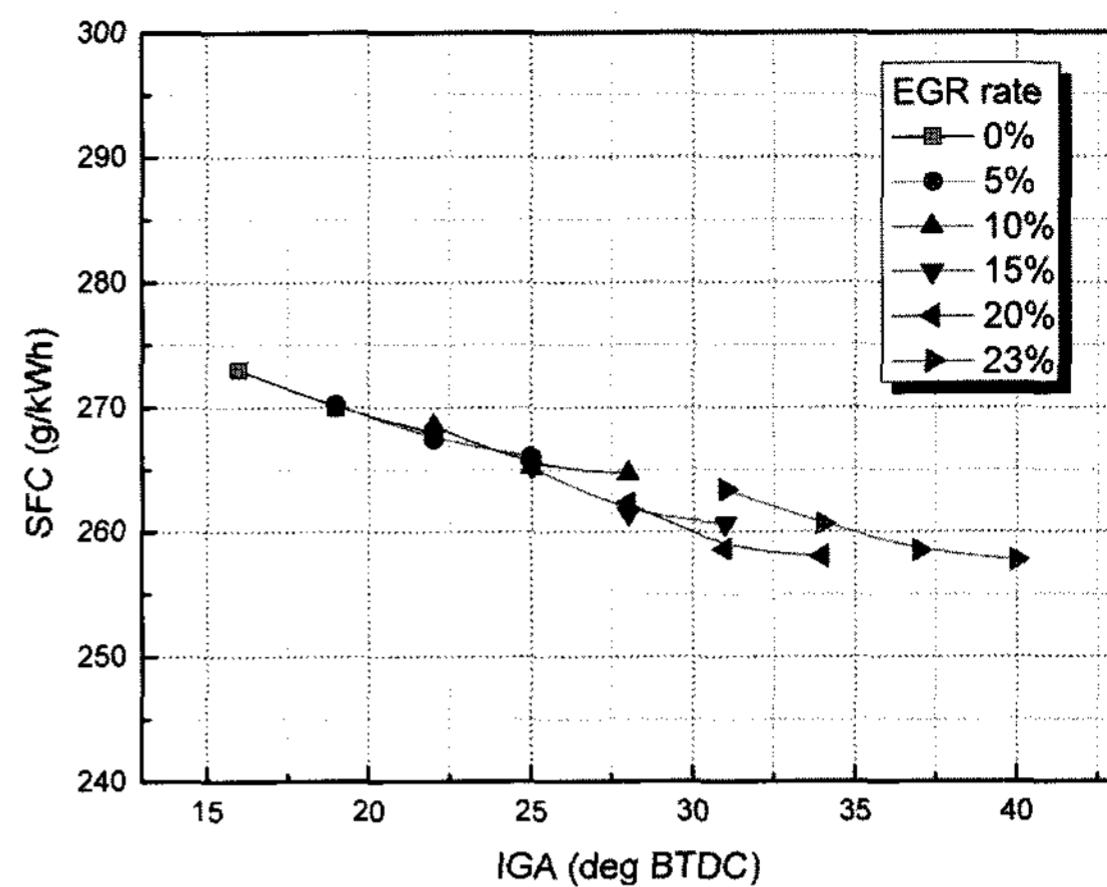


Fig. 6 Effect of EGR rate and ignition timing on fuel consumption at 1400rpm BMEP 0.6 MPa test condition

을 Fig. 7에 나타내었다. 연료소비율은 최적 EGR율에 도달하기까지는 EGR율을 증가시킬수록 감소되고 최적 EGR율을 넘어서면 증가하거나 개선되지 않는 경향을 보인다. 부하가 높은 조건일수록 최적 EGR율이 상승함을 알 수 있으며, BMEP 0.6 MPa 조건을 EGR이 적용되는 최대 부하조건으로 고려할 경우 시험에 사용된 EGR 밸브의 용량이 적절한 것으로 판정된다.

두 가지 조건에서 약 4% 전후의 연료개선효과가 나타나는데, 이는 흡입행정시의 펌핑 손실 감소 및 연소가스온도 감소로 인한 열손실 감소에 의한 것이 주요 원인으로 작용한다. 각각의 엔진 운전조건에 대한 흡기 압력의 변화를 나타낸 Fig. 8을 살펴보

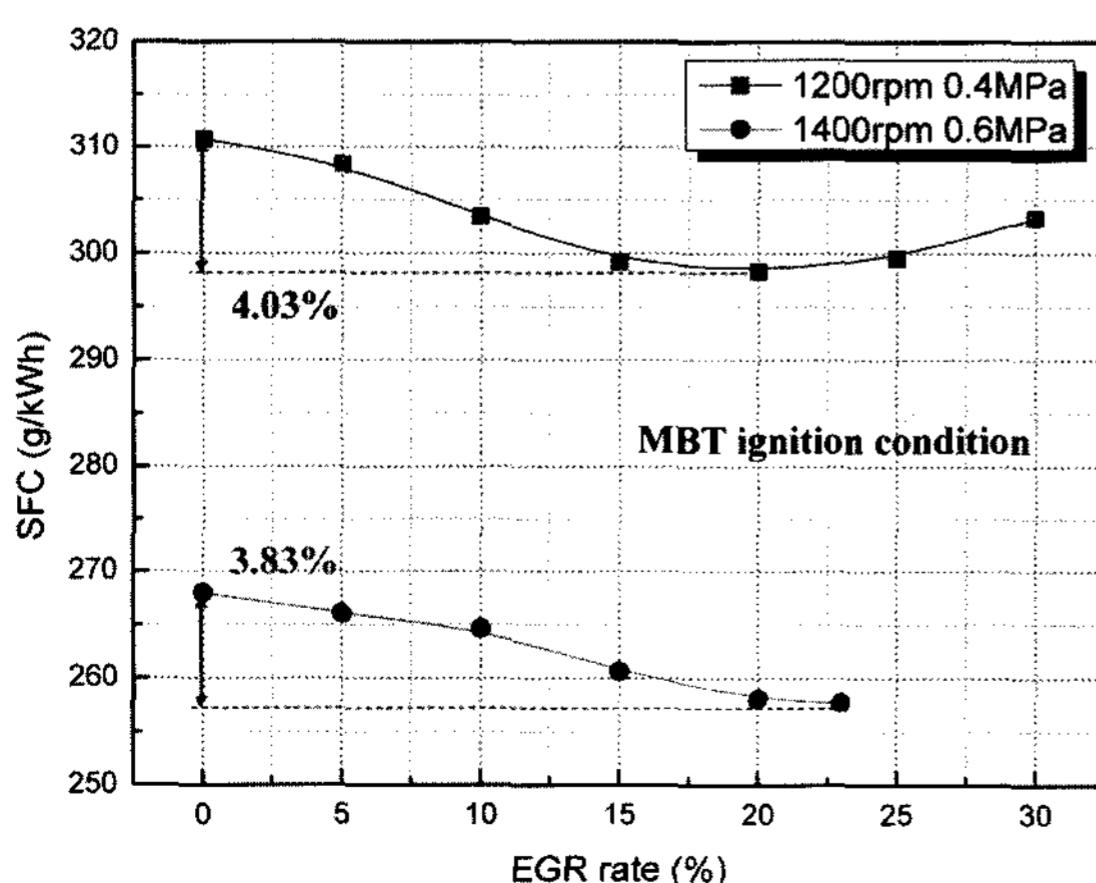


Fig. 7 Effect of EGR rate on fuel consumption

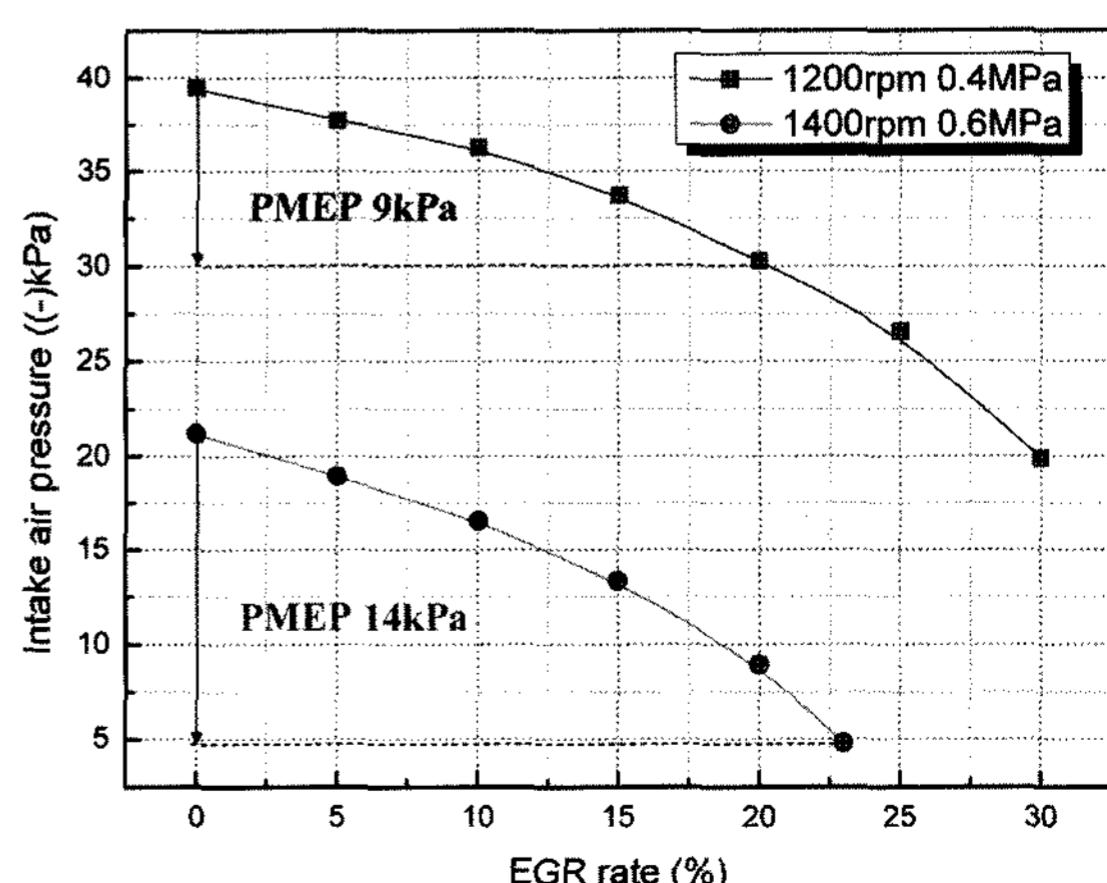


Fig. 8 Effect of EGR rate on intake pressure

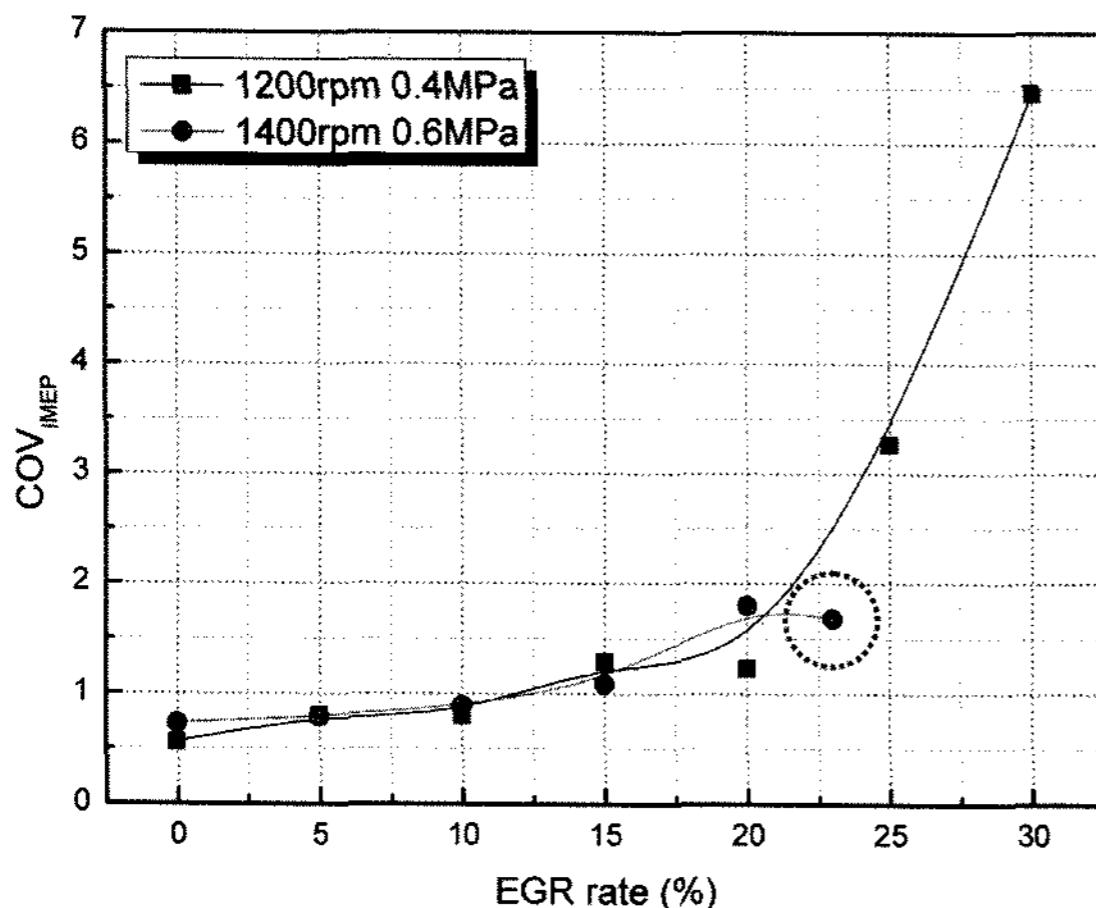


Fig. 9 Effect of EGR rate on combustion stability

면, EGR율의 증가에 따른 흡기부압의 감소가 연료 소비율의 개선에 큰 기여를 하고 있음을 확인할 수 있다. 측정된 PMEP를 기준으로 보면 각각의 BMEP의 약 2%에 해당하는 펌핑 손실을 개선하고 있음을 확인할 수 있으며, 이러한 펌핑 손실의 감소는 연비 개선에 직접적인 기여를 하게 된다.

그러나 최적 EGR율 이상으로 EGR율을 증가시키면, 연소가 불안해지기 때문에 연료소모율이 다시 증가하게 된다. 운전조건 및 EGR율에 따른 연소안정성의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 상대적으로 낮은 부하인 1200rpm BMEP 0.4 MPa의 조건에서는 높은 EGR율이 연소불안정을 야기하여 연비악화에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. BMEP 0.6 MPa의 경우 20% 이하의 EGR율에서는 노킹에 의해 점화 진각이 더 이루어지지 않았다. 그러나 23%의 EGR율에서는 MBT까지 점화 진각이 가능해 짐으로써 COV가 급격히 악화되는 경향을 나타내지 않았다.

적용된 EGR 밸브의 용량 상 BMEP 0.6 MPa 조건에서 더 많은 EGR 공급은 이루어지지 않았지만, 연비와 COV의 경향을 보았을 때 더 이상의 EGR 공급은 연비개선에 크게 도움이 되지 않을 것으로 판단된다. 일반적으로 EGR율이 어느 한계 이상이 되면 연소속도 저하로 인해 점화시기 조절만으로는 안정된 연소를 피할 수 없다. 따라서 연소실과 밸브, 포트 형상 등의 개선을 통해서 연소속도를 빠르게 할 경우 더 높은 EGR율의 공급이 가능해진다.

배기성능의 경우 일반적으로 EGR율을 증가시킬

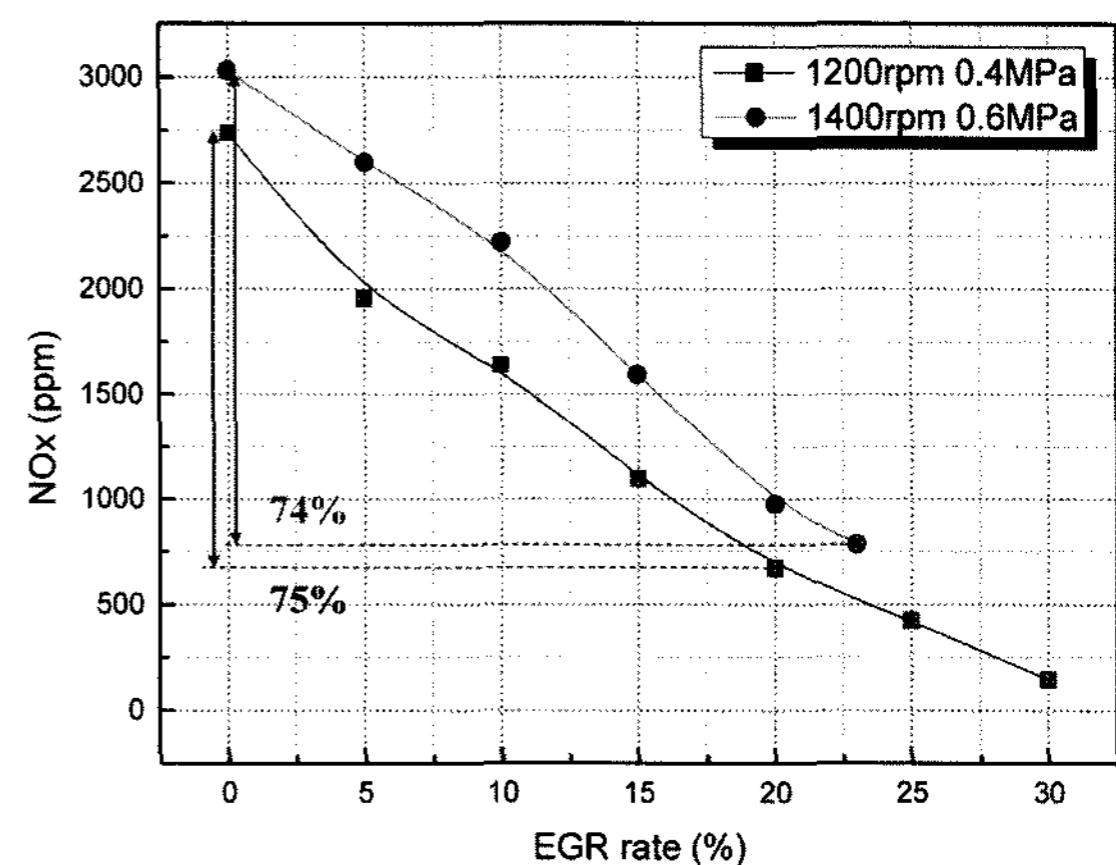


Fig. 10 Effect of EGR rate on NOx emissions

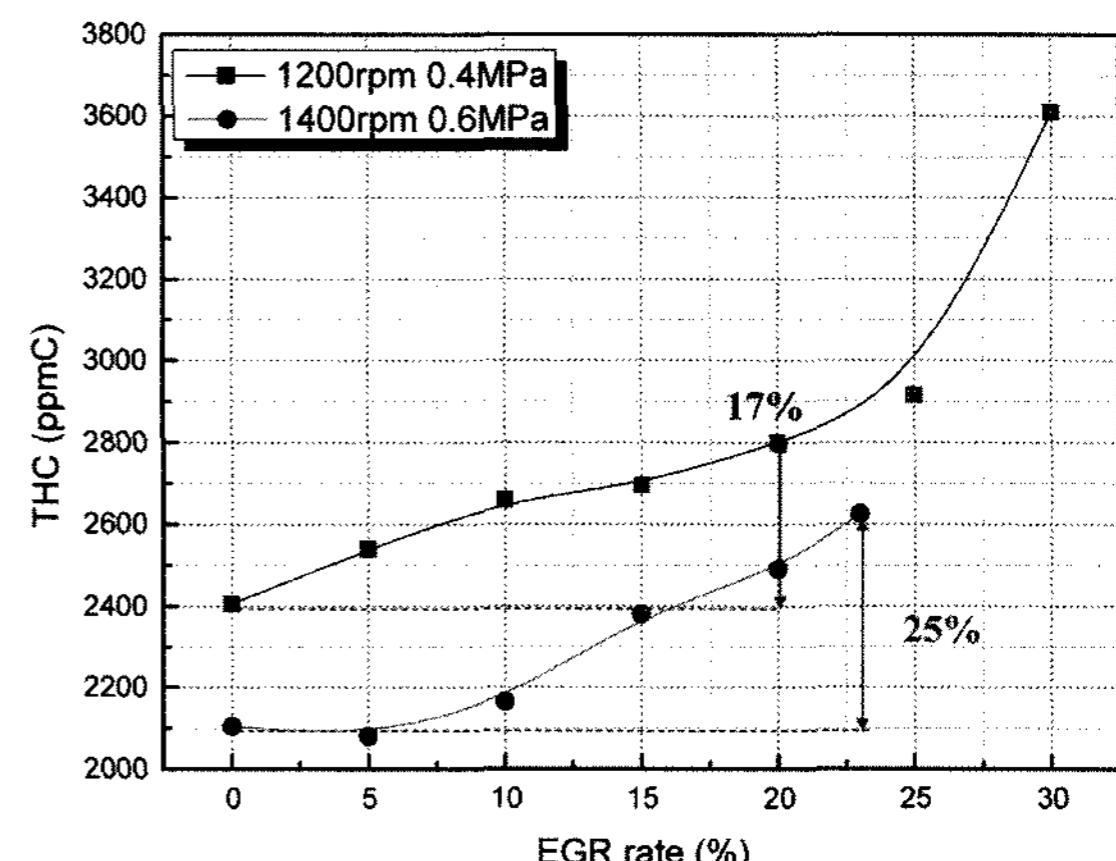


Fig. 11 Effect of EGR rate on THC emissions

수록, NOx의 배출은 감소되고 THC 배출은 증가한다.⁶⁻⁸⁾ Fig. 10과 Fig. 11에 운전조건에서 EGR율의 변화에 따른 NOx와 THC의 배기성능을 나타내었다. NOx는 두 부하조건에서 최적 EGR율의 EGR을 공급하여 75%까지 저감할 수 있었으나, THC는 낮은 부하와 높은 부하에서 각각 17%, 25% 증가하여 허용범위에 따라 NOx 및 연비에 대해 trade off가 필요할 것으로 생각된다. 가솔린 엔진의 경우 연소 특성상 EGR 가스가 연료혼합기와 균일하게 혼합되기 때문에 연소화염을 효율적으로 냉각시켜 NOx의 생성을 억제시킨다. 그러나 THC의 경우 낮은 부하 조건에서 최적 EGR율 이상으로 EGR을 공급하면 THC가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 EGR에 의해 연소속도가 느려지고 부분연소가 발생하여 출력이 감소하는 동시에 연료 중의 미연

탄화수소가 배출되기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 EGR 가스 온도에 따른 엔진 성능

Fig. 12는 EGR 온도에 대한 연료소비율을 나타낸 그래프이다. 일반적으로 고부하에서는 노킹과 출력 저하의 영향으로 cooled EGR을 사용하고, 저부하에서는 펌핑 로스 저감과 연소안정성을 위해 hot EGR을 사용하는 것으로 알려져 있다.^{9,10)} 본 연구에서는 cooled EGR만을 적용하였기 때문에 부하에 따른 EGR 온도 효과를 살펴보기 위해, EGR 가스 온도를 기존 실험조건의 EGR 가스온도에 비해 50°C 정도 상승시켜 적용하였지만, 연비에 대한 뚜렷한 변화는 나타나지 않았다.

BMEP 0.4 MPa 조건에서 50°C 높은 EGR 가스를 공급하였을 때 흡기온도는 약 10°C 정도 상승하였으나, 연비향상으로 이어지지 않은 것으로 보아 더욱 높은 온도에서의 연비 경향의 파악이 필요함을 알 수 있다. 부하가 높은 조건인 BMEP 0.6 MPa에서 는 높은 온도의 EGR 가스 공급으로 노킹 경향이 더 일찍 나타나 고부하 조건에서의 hot EGR 공급은 불리함을 알 수 있다.

EGR 가스온도에 의한 영향은 EGR 밸브의 양정에서도 나타난다. 실험에 사용된 EGR 밸브는 리니어 솔레노이드 타입의 전자제어식 EGR 밸브로서 밸브의 양정은 PWM 방식으로 제어된다. 인가전압 및 제어 Duty의 증가에 따라서 양정의 증가하여 유량이 증가하는 특성이 있으며, 일반적으로 인가된

구동주파수 및 전압에 따라 일정한 밸브 양정 변화를 보이는 것이 필수적이다. Fig. 13의 각각의 조건에서 EGR 가스의 온도가 다른 경우의 EGR 밸브 양정 변화를 나타낸 그림을 살펴보면, 기존 실험조건에 비해 EGR 가스 온도가 50°C 정도 높은 경우는 고온의 효과로 인해 초기 양정의 변화가 40% Duty에 도달해야 밸브의 개변이 일어났다. 즉, hot EGR을 사용하는 엔진에서는 EGR 가스온도에 의한 영향으로 동일한 양정에 대해서 보다 높은 Duty의 밸브 제어가 요구됨을 알 수 있다. 그러나 양정에 대한 Duty의 분포가 비교적 양호하기 때문에, 엔진 제어 유닛에서의 보정이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 하이브리드용 가솔린엔진을 대상으로 전자제어식 EGR 밸브를 장착하여 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) MBT는 EGR율을 증가시킬수록 진각되고, 부하가 커질수록 노킹에 의해 점화진각의 범위가 작아진다. 그러나 EGR율이 높아질 경우 높은 부하에서는 노킹 경향이 감소하여 점화진각을 더 이룰 수 있었으며, 이는 연소 안정성이 확보된다는 전제하에 높은 EGR율을 사용하여 고압축비화가 가능함을 나타낸다.
- 2) EGR율의 증가에 따른 흡기부압의 감소가 연료 소비율의 개선에 큰 기여를 하여 최적 EGR율 조건에서 약 4% 전후의 연료개선효과가 나타났다.

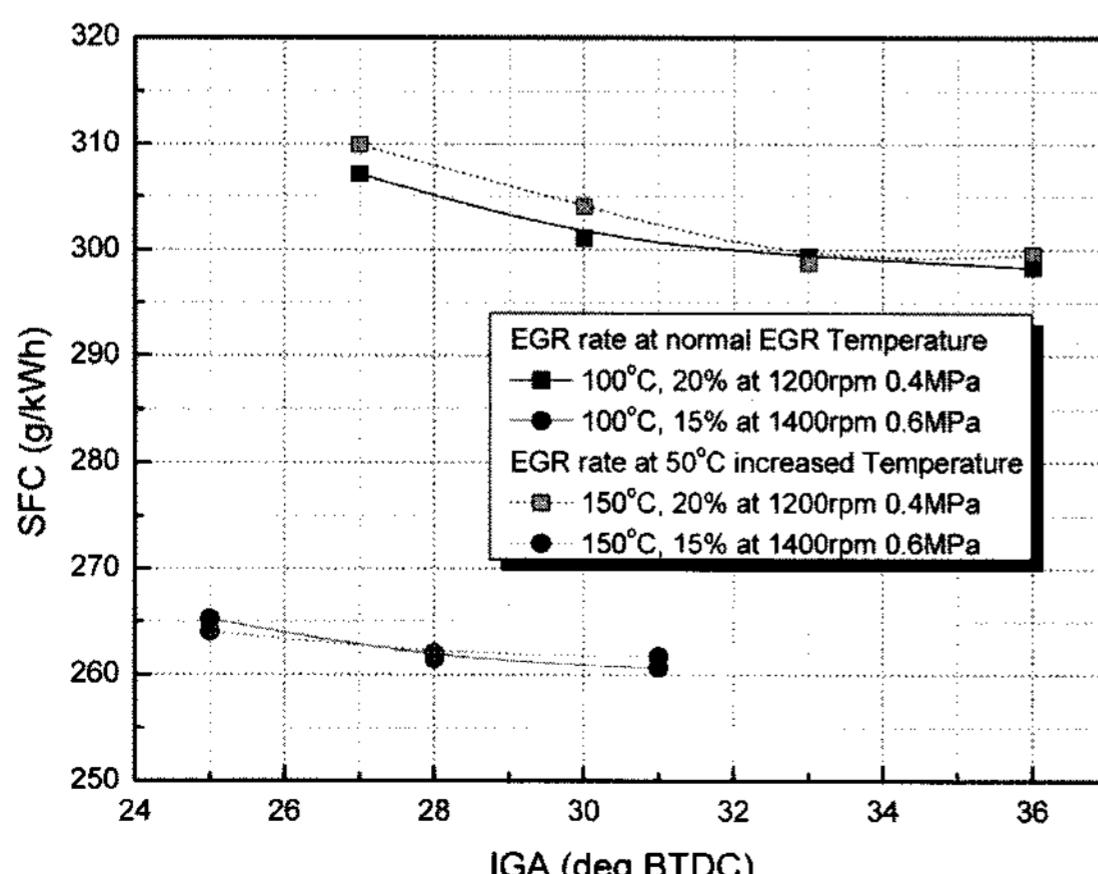


Fig. 12 Effect of EGR gas temperature on fuel consumption

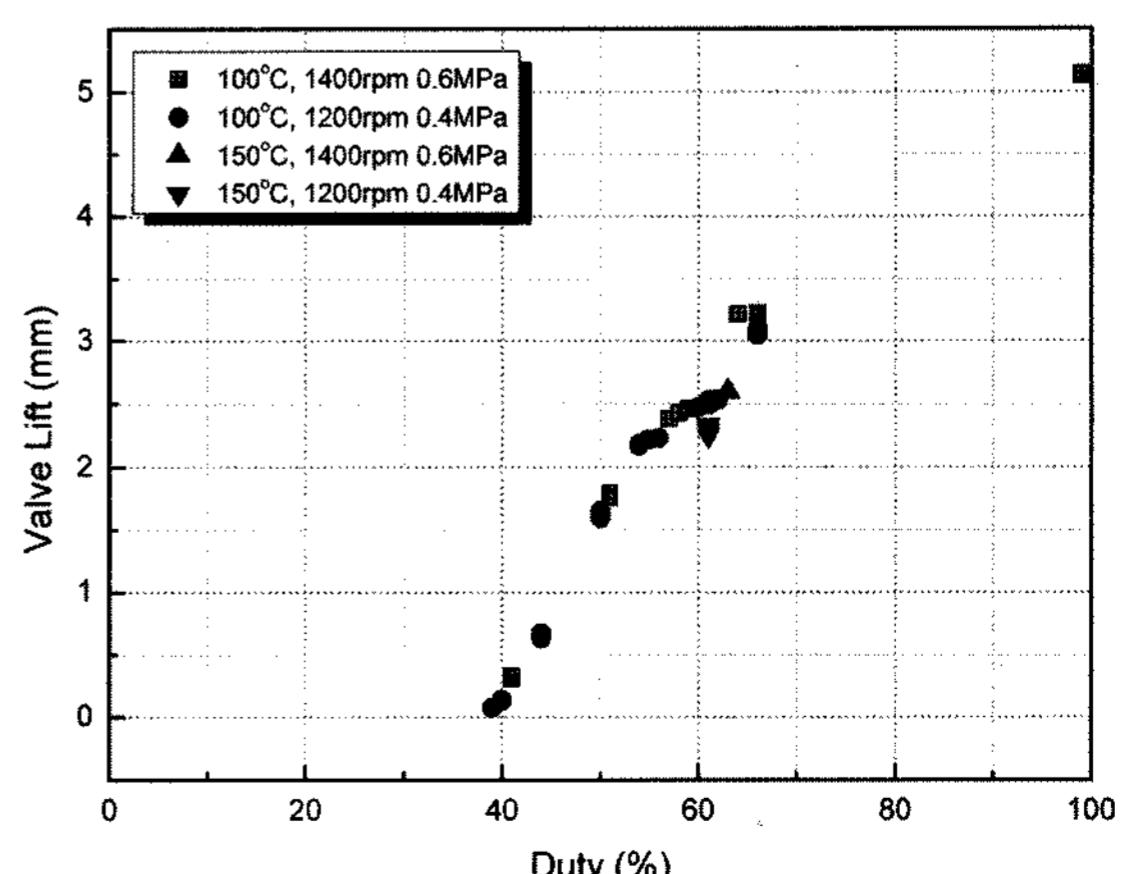


Fig. 13 Effect of EGR gas temperature on EGR valve lift

측정된 PMEP를 기준으로 비교해보면 각각의 BMEP의 약 2%에 해당하는 펌핑 손실을 개선하고 있음을 확인할 수 있다.

- 3) NOx는 두 가지의 부하조건에서 최적 EGR율의 EGR을 공급하여 75%까지 저감할 수 있었으나, THC는 낮은 부하와 높은 부하에서 각각 17%, 25% 증가하였다.
- 4) EGR 가스 온도를 기준 실험조건의 EGR 가스온도에 비해 50°C 정도 상승시켰을 때 연비에 대한 뚜렷한 변화는 나타나지 않으나 높은 부하에서는 노킹이 더 이른 점화시기에 나타났다. Hot EGR을 사용하는 엔진조건에서는 높은 EGR 가스온도에 의한 EGR 밸브 양정의 변화에 대한 보정이 요구된다.

References

- 1) G. R. Neame, D. P. Gardiner, R. W. Mallory, V. K. Rao, M. F. Bardon and V. Battista, "Improving the Fuel Economy of Stoichiometrically Fuelled S.I. Engines by Means of EGR and Enhanced Ignition a Comparison of Gasoline, Methanol and Natural Gas," SAE 952376, 1995.
- 2) S. Diana, V. Giglio, B. Iorio and G. Police, "A Strategy to Improve the Efficiency of Stoichiometric Spark-ignition Engines," SAE 961953, 1996.
- 3) C. S. Kim, J. H. Choi and B. K. Oh, "A Study for EGR Distribution of Gasoline Engine Using CFD," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.106-111, 2006.
- 4) J. H. Son, H. Y. Kim, J. T. Chung, W. T. Kim and W. G. Lee, "The Flow and Mixing Characteristics of the Fresh Air and EGR Gas for Mixer Configurations at Downstream of Throttle Valve," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.134-140, 2004.
- 5) J. Przastek, A. Dabkowski and A. Teodorczyk, "The Study of Exhaust Gas Recirculation on Efficiency and NOx Emission in Spark-ignition Engine," SAE 1999-01-3514, 1999.
- 6) M. Tabata, T. Yamamoto and T. Fukube, "Improving NOx and Fuel Economy for Mixture Injected SI Engine with EGR," SAE 950684, 1995.
- 7) S. S. Moon, J. J. Choi, E. Abo-Serie and C. S. Bae, "The Effects of Split-Injection and EGR on the Combustion Characteristics of a DISI Engine," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.144-152, 2006.
- 8) J. Y. Cha, J. H. Kwon, Y. J. Cho and S. S. Park, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion Stability, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Gasoline Engine," KSME International Journal, Vol.15, No.10, pp.1442-1450, 2001.
- 9) G. H. Abd-Alla, "Using Exhaust Gas Recirculation in Internal Combustion Engines: A Review," Energy Conversion and Management, pp.1027-1042, 2002.
- 10) K. T. Yeom, Y. M. Woo, J. Y. Jang, Y. K. Park and C. S. Bae, "Performance and Emission Characteristics of Liquid-Phase LPG Injection Engine with Different EGR Rate," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.7-14, 2003.