Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 4, pp.143-150 (2008)

Copyright Ⓒ 2008 KSAE
1225-6382/2008/094-20

하이브리드용 가솔린 엔진에서 On/Off 방식 EGR적용 및 최적 EGR 율에 관한 연구

박 철 웅* · 최 영 · 김 창 기

한국기계연구원

A Study on Application of On/Off Type EGR and Optimal EGR Rate for Gasoline-Hybrid Engine

Cheolwoong Park* • Young Choi • Changgi Kim

Korea Institue of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 14 December 2007 / Accepted 19 February 2008)

Abstract : EGR(exhaust gas recirculation) is an attractive means of improving the fuel economy of spark ignition engines, as it offers the benefits of charge dilution (lower pumping and cooling losses) while allowing stoichiometric fuelling to be retained for applications using the three-way catalysts. 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 in Gasoline-Hybrid engine 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 economy, combustion stability, engine performance and exhaust emissions. EGR tolerance with load variation was found to be more sensitive than with rpm variation. With optimal EGR rates, the fuel consumption was improved by 5.5% while a combustion stability was guaranteed.

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

Nomenclature

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

Subscripts

IN	: intake
ATM	: atmosphere
EX	: exhaust

1. 서 론

전 세계적으로 자동차의 수요가 지속적으로 증가함에 따라 파생되어지는 여러 가지 문제점들 중, 특히 환경과 관련된 대기오염 문제는 이미 자연정화의 한계에 다다랐으며, 세계 각국의 배출가스구제는 강력하고도 지속적으로 강화되고 있다. 배출가

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

스 규제, CO_2 규제, 에너지 소비효율 향상 및 대체 연료개발이라는 시대적 요청을 한꺼번에 좇아야 하는 어려운 상황에 직면한 자동차 산업의 실정에서 하이브리드 자동차는 내연기관 차량과 전기자동차의 중간적 특성을 가지며, 환경적 측면에서 내연기관의 배출가스 및 연비를 개선하고, 전기자동차의 주행거리 및 동력성능 등을 상호 보완할 수 있는 기술이다.

관심의 대상이 되고 있는 저연비 및 저배기를 만족하는 하이브리드 자동차가 최적의 성능을 발휘하기 위해서는 하이브리드의 전기 장치만큼이나 엔진의 최적화가 중요한 요인이다. 특히, 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.[1,2)]

EGR을 적용할 경우에는 연소온도를 낮추어 NOx의 생성을 억제할 뿐 아니라 혼합기의 질량당 에너지를 낮춤으로써 노킹을 방지하고 흡기 매니폴드 압력의 증가로 펌핑 손실을 감소시켜 연비의 향상을 얻을 수 있다.[3)] 그러나 자동차 제작 업체에서는 가솔린 엔진에서 EGR을 적용할 때의 연소 불안정성 및 저 응답성에 대한 우려와 기존 EGR 시스템의 EGR에 의한 응답성 저하 및 피드백 컨트롤 불가와 같은 단점들[4)] 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 있기 때문에 효율적으로 사용할 경우 연비뿐만 아니라 배기가스 저감에 있어서도 많은 효과를 볼 수 있을 것이라 예상된다.

EGR을 적용할 경우 NOx의 저감 및 연비 향상에 효과가 있는 반면 혼합기의 착화성이 나빠지고 엔진의 출력이 감소하기 때문에 적정량의 배기가스가 운전영역에 따라 선택적으로 재순환되는 것이 중요하다. 운전조건에 따라 밸브의 개도가 적절하게 조절되는 전자제어식 EGR 밸브를 사용할 경우 엔진의 회전속도와 흡기통로의 진공도, 그리고 온도에 따라 제어되는 장점이 있다. 그러나 기존 기계식 EGR 밸브에 비해 단가가 높고, 낮은 유량의 배기가스 재순환시 밸브 내에 Soot가 퇴적되는 문제가 발생할 수 있기 때문에 밸브가 완전 열림 또는 완전 닫힘 방식으로만 제어되는 On/Off 방식의 EGR 밸브의 적용이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 하이브리드용 가솔린엔진에 전자식 EGR 밸브를 이용하여 On/Off 방식의 EGR 밸브 제어방법을 적용하였을 때의 유용성 및 엔진성능이 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 운전영역에 따른 엔진성능 및 EGR율의 변화를 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 하이브리드용 가솔린 엔진에 적합한 EGR 시스템과 운전 조건별 EGR 적용방안을 실제 엔진을 통해 검토하기 위해서 2000cc 4기통 가솔린엔진을 설치하여 기본적인 성능 실험을 하였다.

2.1 실험장치

Fig. 1에 본 연구에 사용된 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 기존 2000cc CVVT 엔진을 기초로 하여 효율적인 EGR 가스 공급 및 제어를 위한 여러 시스템을 추가하였으며, 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다. EGR 라인은 스로틀 밸브와 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 라인

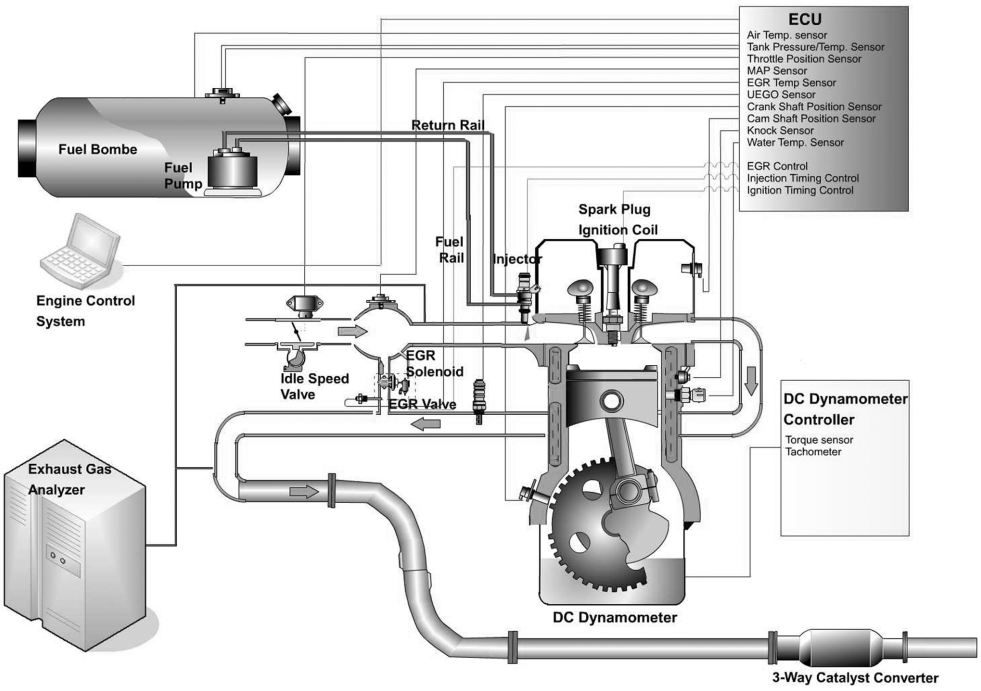


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

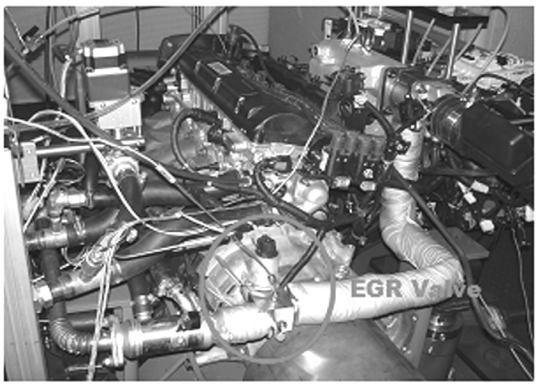


Fig. 2 2 liters CVVT engine with E-EGR system

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°

중간에 설치하였고, 실린더 별로 EGR율을 측정할 수 있도록 각각의 흡기 매니폴드에 가스 추출라인(Gas Sampling Line) 설치하여 CO_2 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 내를 순환하는 냉각수의 유량은 MOV(Motor Operated Valve)를 사용하여 개도 변화에 따른 유량를 조절하였다. EGR 적용에 따른 연소특성 분석은 1번 실린더에 장착된 실린더 압력 센서와 IMEP 및 열방출율의 계산이 가능한 연소분석기(AVL, Indiset 620)를 통해 이루어 졌다.

2.2 실험방법

본 연구의 대상이 되는 하이브리드 차량은 소프트 하이브리드 차량으로 분류될 수 있으며, 소프트 하이브리드 차량의 경우 가속 및 등판 성능이 필요

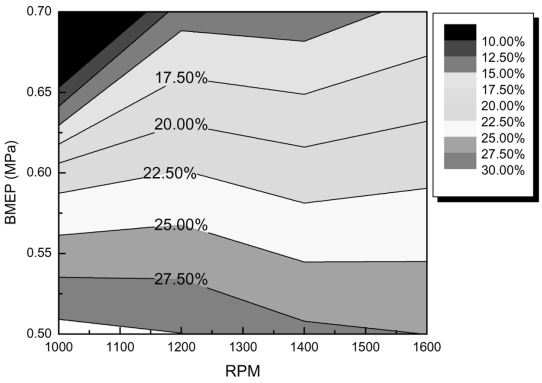


Fig. 3 Variation of maximum EGR rate in response to changes in engine load and speed condition

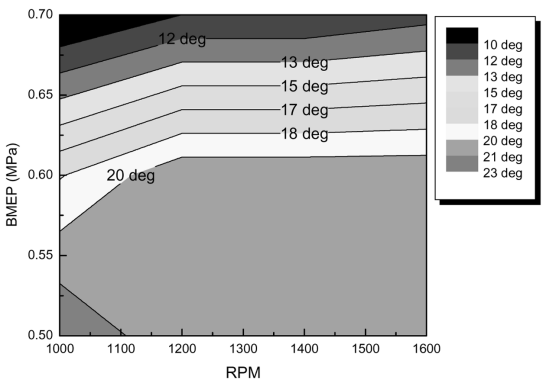


Fig. 4 Effect of EGR induced by On/Off EGR valve system on MBT IGA differences

할 때 외에는 엔진으로부터 동력을 얻기 때문에 차량에 장착되는 엔진은 주로 저속 중고부하 영역에서 운전이 이루어진다. 따라서 시험 시 운전조건을 1,000rpm~1,600 rpm의 속도 조건에서 부하를 BMEP 0.4 MPa에서 0.7MPa로 변화시키면서, 적용된 EGR 밸브의 개도를 최대로 하였을 때 적용 가능한 EGR 율을 살펴보았다.

엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수 온도가 82.5 ± 2.5°C에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하고, 공연비는 전 실험 구간에서 λ=1.0을 유지하였다. 각각의 실험조건에 대해 점화시기를 변경하여 MBT를 찾았으며 EGR에 따른 연비, 배기가스 배출량, 연소안정성 등을 검토하였다.

전용 컨트롤러를 사용하여 전자제어식 EGR 밸브의 개도를 완전 열림 또는 완전 닫힘 상태로 제어하여 EGR을 적용하였으며, EGR율의 측정은 가스 분석기를 사용하여 측정한 CO_2 값을 이용하여 식 (1)로부터 산출하였다.

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

여기서, $[CO_2]_{IN}$: 흡입공기 중의 CO_2 농도
$[CO_2]_{ATM}$: 대기 중의 CO_2 농도
$[CO_2]_{EX}$: 배기가스 중의 CO_2 농도

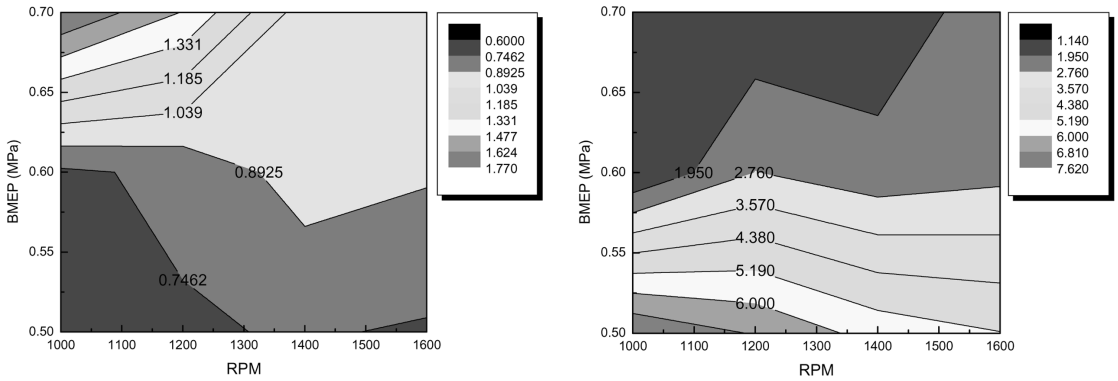
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 On/Off-type EGR 적용

가솔린엔진의 일반 연소 영역에서 EGR은 펌프손실과 냉각손실을 줄여주기 때문에 연비를 향상시킬 수 있으며, 연소온도를 저하시켜 NOx의 배출을 줄일 수 있다. 그러나 저속, 저부하 영역에서 EGR을 적용할 경우 연소안정성을 유지하는 것이 상대적으로 어렵게 된다. 하이브리드용 가솔린엔진은 엔진의 운전범위를 일반 자동차용 엔진과 달리 연비효율 및 연소안정성이 우수한 영역으로 제한할 수 있기 때문에, 연비, 동력, 배기가스를 고려한 하이브리드 전용 엔진기술 개발이 이루어질 경우 대용량의 EGR이 적용된 조건에서 연소안정성이 확보된 운전이 가능하게 된다.[5,6]

Fig. 3에는 다양한 운전조건에서 얻어지는 최대 EGR율을, Fig. 4에는 EGR을 적용하지 않았을 경우의 MBT 점화시기와 최대 EGR율로 EGR을 적용했을 때의 MBT 점화시기 차이를 측정한 결과를 나타내었다. 실험조건은 BMEP 0.4MPa 부하조건을 포함하였으나, EGR율의 급격한 증가에 의한 엔진의 연소 불안정성 증가로 신뢰성이 확보된 데이터의 취득이 불가능하였다. EGR 밸브의 개도가 최대양정 대비 절반정도인 조건에서 이미 30%의 EGR율에 도달하는데, 이는 저부하일수록 흡입부압이 높게 되어 압력차가 커지기 때문에 EGR율이 커지게 되어 나타나는 현상으로 판단된다.

최대 EGR율을 측정한 결과를 살펴보면, 회전속도 증가에 따라 EGR율의 큰 변화는 보이지 않으나 부하의 증가에 따라 실험 가능한 조건에서 선형적으로 감소하였다. EGR을 적용할 경우 당초의 실험조건 중의 하나인 1,000rpm 조건은 엔진의 출력이



(a) without EGR (b) with EGR

Fig. 5 Variation of combustion stability with/without EGR rate in response to changes in engine load and speed condition

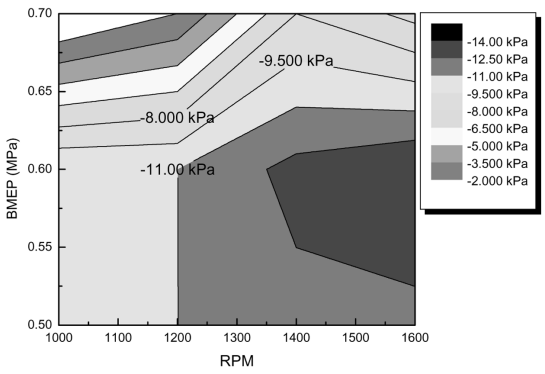


Fig. 6 Effect of EGR induced by On/Off EGR valve system on PMEP differences between without and with EGR

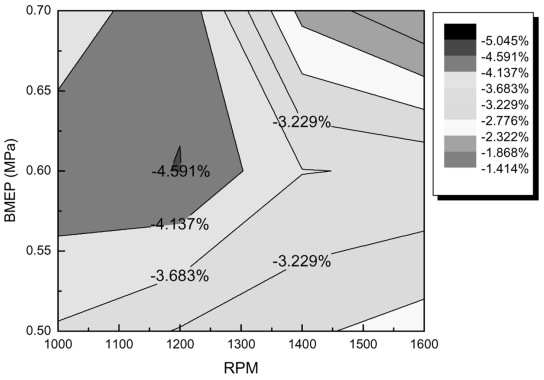


Fig. 7 Effect of EGR induced by On/Off EGR valve system on improvement of SFC

BMEP 0.7MPa에 도달하지 못하여 실험이 불가능 하여 제외시켰다.

운전영역에 따른 EGR을 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 MBT 점화시기의 차이 결과에서도 회전속도 변화에 따른 EGR율의 변화가 작아 영향이 거의 나타나지 않기 때문에, 최대 EGR율의 결과와 유사하게 회전속도 변화에 따른 MBT 점화시기의 차이는 크지 않았다. 그러나 부하가 증가할 경우 EGR율이 감소함에 따라 MBT 점화시기의 차이도 함께 감소하였다. 특히, BMEP 0.6MPa 이상의 부하조건에서 EGR을 적용하지 않았을 경우 노킹현상이 발생하였으나, EGR을 적용하여 희박혼합기가 되면 초기점화성의 약화와 연소 온도의 감소로 인하여 동일 운전 조건에서 노크가 발생하지 않았다.

운전조건 및 EGR의 적용에 따른 연소안정성의 변동을 Fig. 5에 나타내었다. EGR율의 특성과 유사하게 회전속도의 증가에 따라 COV값의 큰 변화는 나타나지 않았다. 부하조건이 BMEP 0.6MPa 이상일 경우는 안정적인 연소 특성을 보였으나, 그 이하에서는 연소안정성이 급격히 악화되었다. BMEP 0.55MPa 이하에서 EGR 밸브 개도를 최대로 조절하는 경우 최적 EGR율 이상으로 EGR 가스가 공급되어 연소에 영향을 미치기 때문에, 선정된 EGR 밸브를 이용하여 EGR을 공급할 때 EGR 밸브를 최대한 열더라도 안정적인 연소를 확보하기 위해서는 BMEP 0.55MPa 이상의 운전조건에서만 적용되어야 함을 알 수 있다.

Fig. 6은 EGR을 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 PMEP 차이를 운전조건에 따라 나타낸 결과이다. EGR을 적용할 때 연료개선효과는 흡입

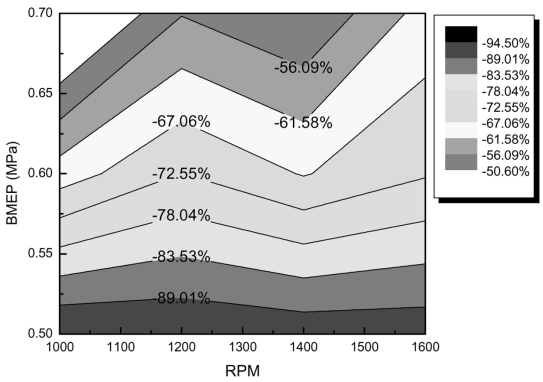


Fig. 8 Effect of EGR induced by On/Off EGR valve system on improvement of NOx emission

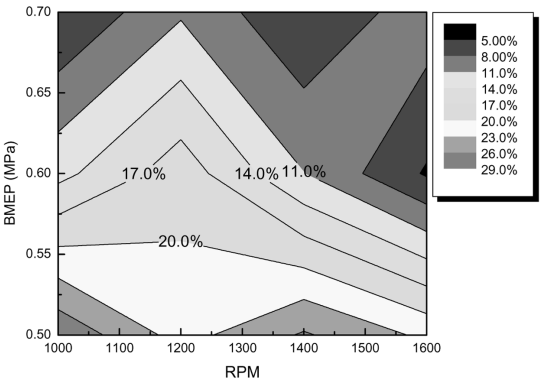


Fig. 9 Effect of EGR induced by On/Off EGR valve system on deterioration of THC emission

행정시의 펌핑 손실 감소 및 연소가스온도 감소로 인한 열손실 감소에 의한 것이 주요 원인[7]으로 작용하나, 회전속도 변화에 따른 PMEP의 차이가 거의 없는 것으로 보아 펌핑손실 감소에 의한 연비개선 효과의 크기에 회전속도의 영향은 작을 것으로 판단된다. 부하가 증가할 경우 EGR율의 감소에 비례하여 PMEP 차이도 감소하는 것으로 보아, 고부하 영역으로 갈수록 펌핑 손실 감소에 의한 연비개선 효과는 줄어듦을 알 수 있다.

Fig. 7은 최대 EGR율 적용 시 운전조건에 따른 연비개선 효과를 나타낸 그래프이다. 앞선 결과에서 회전속도 변화에 따른 EGR율의 변화는 작게 나타났으나 회전속도의 감소에 따라 연비개선이 이루어진 것은 EGR에 의한 열손실 감소에 의한 개선 효과가 저속에서 크게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 부하에 의한 영향을 살펴보면 고부하에서는 낮은 EGR율 조건에서 PMEP 차이의 감소에 의해 연비개선효과가 줄어들고, 저부하에서는 높은 EGR율이 연소불안정을 야기하여 연비악화에 영향을 주고 있다. 따라서 운전영역의 중앙부분에 해당하는 BMEP 0.6MPa 조건에서 연비개선효과가 가장 높게 나타났으며 최대 약 4.6%의 개선 효과를 보였다.

EGR 가스를 스로틀 바디에 유입시키면 과도상태에서 기존시스템보다 THC를 상당량 감소시킬 수 있고 정상상태에서는 기존시스템과 동일한 수준으로 NOx를 감소시킬 수 있다는 연구결과도 발표된 바 있으나, 일반적으로 EGR율을 증가시킬수록, NOx의 배출은 감소되고 THC 배출은 증가한다.[8,9] Fig. 8과 Fig. 9에 운전조건에서 EGR율의 변화에 따른 NOx와 THC의 배기성능을 나타내었다.

NOx의 경우 고부하에서는 회전속도 변화에 따라 NOx 배출이 증감을 반복하는데, 이것은 특정 회전속도에서 EGR을 공급하더라도 부하의 증가에 따라 NOx 배출의 개선 효과가 낮음을 나타낸다. 고부하 영역에서 EGR을 적용하는 경우 EGR율의 증가가 크지 않기 때문에, EGR에 의한 희석효과보다 전체 혼합기의 열용량과 비열 특성이 NOx 배출에 미치는 영향이 더 큰 것으로 생각된다. 개선은 나타나지 않았으나, 부하 감소 시에는 EGR율의 증가에 따라 NOx 배출이 감소되었다. 저부하에서는 90%이상 저감할 수 있었고, BMEP 0.6MPa 조건에서 70% 전후, BMEP 0.7MPa 조건에서 55% 전후의 저감율을 보였다.

회전속도 변화에 따른 EGR율의 변화가 작기 때문에 THC의 변동에도 영향이 크지 않았으나, 부하가 감소함에 따라 연소속도가 느려지고 부분연소가 발생하여 저부하인 BMEP 0.5MPa 조건에서 EGR을 적용하지 않았을 때와 비교하여 25%의 증가율을 보였다. 고부하 영역으로 갈수록 THC 증가율은 감소하나, NOx 및 연비를 고려하여 허용범위 내에서의 trade off가 필요할 것으로 생각된다.

3.2 최적 EGR율 적용

On/Off 방식의 EGR 밸브를 사용할 경우, 단가를 낮출 수 있고 밸브 내에 Soot가 퇴적되는 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 그러나 위의 결과에서와

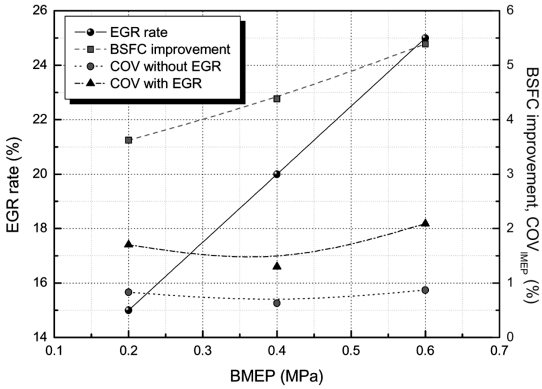


Fig. 10 Variation of EGR rate, COV and improvement of SFC with optimal EGR rate

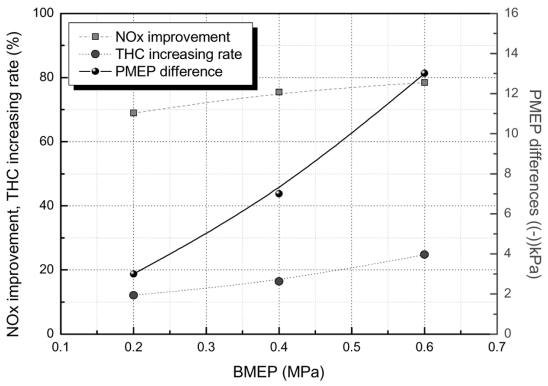


Fig. 11 Effect of EGR on PMEP differences and the variation of NOx and THC emission with optimal EGR rate

같이 COVIMEP의 증가 또는 THC 증가와 같은 악영향으로 인해 EGR 적용이 가능한 운전영역이 매우 좁은 영역으로 제한된다. 일정한 운전조건에서 최적 EGR율의 EGR을 적용했을 때의 EGR율과 연료소비율 개선 및 COVIMEP 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 전자제어식 EGR 밸브를 이용하여 앞선 실험과 같이 밸브의 개도를 완전 열림과 완전 닫힘 모드에서만 제어하지 않고, 엔진의 운전조건에 따라 적절한 개로를 제어하여 실험을 진행하였다. 이때 엔진의 회전속도는 1200rpm으로 고정하고, 연소안정성이 5%이하로 유지되는 조건에서 부하의 변화에 따라 연비개선의 효과가 가장 클 때의 EGR율을 최적 EGR율로 정의하였다. 엔진의 회전속도는 1200 rpm으로 고정된 상태에서 부하가 증가되면 최적 EGR율이 상승하고, 연비 개선율도 3.5%~5.5%로 증가하는 것을 알 수 있다. 이때 EGR 공급에 따른 COVIMEP의 증가량은 1% 수준으로서 절대치를 고려할 경우 3% 이내를 유지하여 안정적인 연소가 확보되는 조건으로 판단된다.

최적 EGR율에 따른 연비 개선율의 증가는 흡기압의 증가로 인한 PMEP 감소에 기인한 것으로 볼 수 있다. Fig. 11은 부하의 증가에 따른 PMEP 감소량과 NOx 배출 및 THC 배출 변화량을 나타낸 것이다. 최적 EGR율 조건에서 부하가 증가함에 따라 PMEP 저감량이 증가하고, IMEP 대비 PMEP 저감량이 차지하는 비율도 함께 증가하였다. NOx 저감율과 THC 증가율은 각각 75%, 20% 전후로 하여 부하에 따라 약간씩 상승하는 결과를 보였다.

4. 결 론

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

1) BMEP 0.4MPa 조건에서는 EGR율의 급격한 증가에 의한 엔진의 연소 불안정성 증가로 신뢰성이 확보된 데이터의 취득이 불가능하였고, 회전속도 증가에 따라 EGR율의 큰 변화는 보이지 않으나 부하의 증가에 따라 실험 가능한 조건에서 선형적으로 감소하였다.
2) 부하조건이 BMEP 0.6MPa 이상일 경우는 안정적인 연소 특성을 보였으나, 그 이하에서는 최대 EGR율을 적용할 경우 최적 EGR율 이상으로 EGR 가스가 공급되어 연소안정성이 급격히 악화되었다.
3) 연비개선효과는 PMEP, COVIMEP, 열손실 저감 등의 복합 형태로 영향을 받았으며, 최대 연비개선 효과는 4% 전후로서 저속, 중부하에서 나타났다.
4) NOx의 저감효과는 부하 감소 시 EGR율의 증가에 따라 NOx 배출이 감소하여 50~95%까지 저감할 수 있었고, THC의 경우는 고부하 영역으로 갈수록 증가율이 감소하여 5~30% 범위를 나타내었다.
5) 최적 EGR율의 EGR을 적용했을 경우, 부하의 증가에 따라 IMEP 대비 PMEP 저감량이 차지하는

비율의 증가로 인해 연비 개선율도 증가했고 COVIMEP는 3% 이내로 안정적인 연소가 확보되었다.

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. M. Han and W. K. Cheng, “Design and Demonstration of a Spark Ignition Engine Operating in a Stratified-EGR Mode,” SAE 980122, 1998.
3) S. Diana, V. Giglio, B. Iorio and G. Police, “A Strategy to Improve the Efficiency of Stoichiometric Spark-ignition Engines,” SAE 961953, 1996.
4) R. S. G, Baert, D. E. Beckman and A. Veen, “EGR Technology For Lowest Emissions,” TNO-Paper VM9607, 1996.
5) 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.
6) 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.
7) 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.
8) I. J. Berry and M. F. J. Brunt, “Improved Control of EGR during Speed/load Transients,” SAE 960068, 1996.
9) M. Tabata, T. Yamamoto and T. Fukube, “Improving NOx and Fuel Economy for Mixture Injected SI Engine with EGR,” SAE 950684, 1995.