

EGR 장착 스파크 점화 LPG 엔진의 성능 및 배기특성

Performance and Emission Characteristics in a Spark-Ignition LPG Engine with Exhaust Gas Recirculation

조 윤 호*, 구 준 모**, 장 진 영**, 배 충 식**
Yoonho Cho, Junemo Koo, Jinyoung Jang, Choongsik Bae

ABSTRACT

An experimental study was conducted to investigate the effects of EGR (Exhaust Gas Recirculation) variables on performance and emission characteristics in a 2-liter 4-cylinder spark-ignition LPG fuelled engine. The effects of EGR on the reduction of thermal loading at exhaust manifold were also investigated because the reduced gas temperature is desirable for the reliability of an engine in light of both thermal efficiency and material issue of exhaust manifold. The steady-state tests show that the brake thermal efficiency increased and the brake specific fuel consumption decreased with the increase of EGR rate in hot EGR and with the decrease of EGR temperature in case of cooled EGR, while the stable combustion was maintained. The increase of EGR rate or the decrease of EGR temperature results in the reduction of NO_x emission even in the increase of HC emission. Furthermore, decreasing EGR temperature by 180°C enabled the reduction of exhaust gas temperature by 15°C in cooled EGR test at 1600rpm/370kPa BMEP operation, and consequently the reduction of thermal load at exhaust. The optimization strategy of EGR application is to be discussed by the investigation on the effect of geometrical characteristics of EGR-supplying pipe line.

주요기술용어 : EGR(Exhaust Gas Recirculation, 배기가스 재순환), EGR rate(EGR율), EGR temperature (EGR온도), Hot EGR, Cooled EGR

Nomenclature

BMEP : brake mean effective pressure(kPa)
BSFC : brake specific fuel consumption(g/kWh)
PMEP : pumping mean effective pressure(kPa)
COV_{imep} : coefficient of variation of indicated mean effective pressure(%)
MBT : minimum advance for best torque(°BTDC)

* 회원, 현대자동차

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

1950년대부터 자동차의 배기가스에 대한 규제가 실시된 이후로, NO_x저감을 주목적으로 하는 EGR의 효과와 방법에 대한 많은 연구들이 보고되어 왔다.¹⁻³⁾

린번 시스템과 같은 최근의 엔진연소기술은 연료경제성을 향상시켜 온실가스의 주원인이 되는 CO₂를 저감할 수 있는 장점이 있으나, 산소가 농후한 배기가스를 배출하여 삼원촉매 변환

장치를 장착한 엔진의 경우 NO_x저감에 불리한 점으로 작용할 수 있다. 이에 비하여, EGR 시스템의 경우 엔진효율 향상뿐만 아니라 이론공연비에서의 작동으로 인한 NO_x저감에 큰 장점을 가질 수 있다.

LPG 연료는 기존의 가솔린이나 증유에 비하여 기화성이 뛰어나 냉시동시 흡기포트나 실린더벽에서의 연료점착 현상을 줄일 수 있고, H₂S와 같은 황화합물이 적어 자동차 연료로서 많은 장점이 있다.^{4,5)} 특히 흡기유동에서 연료와 공기의 혼합성이 매우 우수하여 결과적으로 사이클 변동을 감소시켜 EGR 적용을 유리하게 한다.^{6,7)}

수년 전에 네덜란드 TNO의 Baert⁸⁻¹⁰⁾ 등은 다기통 터보과급 대형 디젤엔진에서의 EGR 효과를 실험하여 전부하 조건에서 10%의 EGR율로 50%의 NO_x저감과 상당한 열부하 감소를 실현할 수 있음을 입증하였다. 그들은 가변익 터빈(Variable Geometry Turbine, VGT)과 벤츄리 믹서를 적용한 EGR 시스템을 사용하였고, 전부하에서 흡입 공기량을 EGR이 없는 상태로 유지하여, 출력의 저감없이 결과적으로 EGR을 추가적으로 공급할 수 있었다.

노킹 현상에 대한 EGR의 효과 또한 많은 연구자들에 의해 보고되었다. 연소온도를 낮추고 노킹을 방지하기 위하여, 전부하에서 연료를 과잉으로 공급하는 방법이 일반적으로 사용되어 왔지만, 이는 연료경제성에 좋지 않은 영향을 끼치고 연료가 농후한 운전영역에서는 삼원촉매변환장치(Three Way Catalyst)가 CO와 HC를 산화시킬 수 없기 때문에 배기가스문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 신기의 조성을 바꾸거나 압축비를 감소시키는 방법 등이 제안되어 왔는데, 전자는 EGR 등을 사용하여 신기를 dilution시키는 방법이고, 후자는 Miller 사이클과 같은 저압축 고폽창을 사용한 경우이다. 현재 흡기밸브의 타이밍을 변화시켜 압축비를 줄이는 LIVC(Late Intake Valve Closing) Miller 사이클¹¹⁻¹³⁾의 개념으로 EGR과 수증기 분사시스템(Steam Injection)을 모두 적용하는 정치용 천연가스엔진에 대한 많은 연구

가 일본에서 진행되고 있다.

본 논문에서는 Hot EGR과 Cooled EGR의 실험을 통하여 EGR율과 EGR온도가 스파크 점화 LPG 엔진의 성능과 배기특성에 미치는 영향을 파악하는 것을 주목적으로 하고 있다. 특히, 압축착화기관을 스파크점화기관으로 변환시 문제가 되는 배기 매니폴드에서의 열부하와 관련된 배기온도 저감에 대한 EGR의 영향을 살펴보았다.¹⁴⁻¹⁹⁾

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 엔진 시스템

본 연구는 4기통 자연흡기식 믹서타입의 LPG 엔진을 비롯하여 EC엔진동력계, 배기가스분석기, 층류유량계, 가스유량계 등으로 실험장치를 구성하였다. Table 1은 실험에 사용한 4기통, 행정체적 2리터인 LPG연료를 믹서타입 연료공급장치로 공급하는 엔진의 자세한 제원을 나타낸다. Fig. 1은 실험에 사용된 엔진의 전체적인 모습을 나타내는데 압력측정을 위해서 스톱 밸

Table 1 Engine specification

Type	Inline SI 4 stroke engine
Number of cylinder	4
Valve mechanism	SOHC, OHV
Fuel supply type	Mixer
Bore × Stroke	85 × 88 mm
Swept volume	1997cc
Compression ratio	10.6
Valve timing	IVO 19°BTDC
	IVC 49°ABDC
	EVO 53°BBDC
	EVC 15°ATDC
Combustion chamber	Pent-Roof
Intake charging	Naturally aspirated

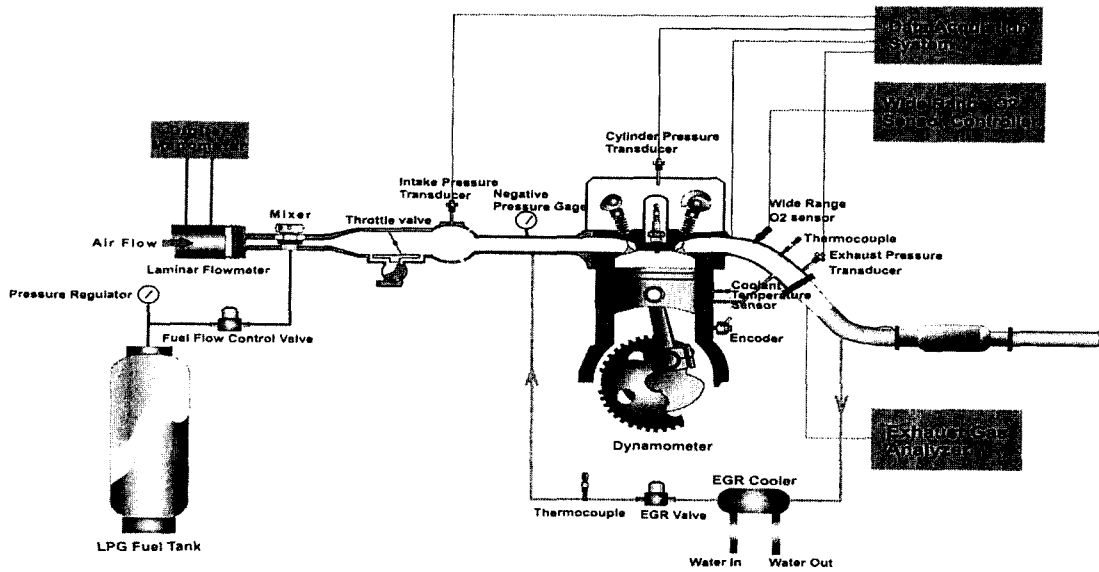


Fig. 1 Experimental layout of the tested engine with cooled EFR

브 뒤쪽, 실린더와 배기구쪽에 하나씩의 압력 센서를 설치하였다. 스로틀밸브 앞쪽에는 연료를 공급하는 믹서타입의 연료공급장치를 설치하였고, 배기구에는 광역산소센서와 열전대를 설치하여 산소농도와 온도를 측정할 수 있게 하였고, EGR을 얻기 위한 EGR라인을 설치하였다. Fig. 2는 cooled EGR을 위한 시스템을 나타내고 있다.

2.1.2 EGR 시스템

배기가스는 배기매니폴드와 배기파이프의 연결부위 하류 5cm의 지점에서 흡기쪽으로 피드백되었고, 흡기와 배기의 압력차가 EGR을 공급하는 압력으로서 작용하였다. Cooled EGR 시스템

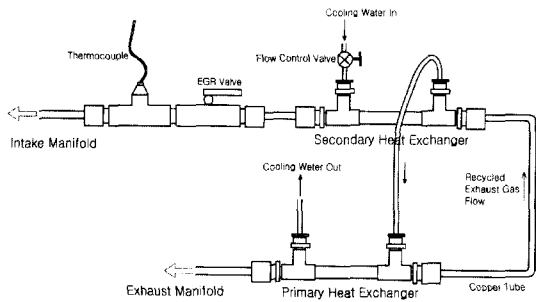


Fig. 2 A schematic of the cooled EGR system

의 경우, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 대향류타입의 열교환기가 순환된 배기가스를 냉각하는 EGR 냉각기로서 사용되었고, 냉각용량을 증가시키기 위해서 1차와 2차의 두개의 열교환기가 사용되었다.

2.2 실험 방법

본 연구는 크게 Hot EGR 실험과 Cooled EGR 실험으로 나뉘어 수행되었다. 엔진과 동력계의 냉각수 온도는 80°C로 유지하였고, EGR과 혼합되기 전까지의 신기온도는 30±2°C가 되도록 하였다.

EGR율은 흡기부와 배기부에서의 CO₂ 농도를 측정하여 Zhang¹⁰⁾ 등이 제시한 다음 식으로 계산되었다.

$$EGR\ rate = \frac{[CO_2]_{intake} - [CO_2]_{atm}}{[CO_2]_{exhaust} - ([CO_2]_{intake} - [CO_2]_{atm})} \times 100\ (%) \quad (1)$$

흡기 CO₂ 농도 측정의 경우, 흡입공기와 EGR의 균일한 혼합을 위해 plenum chamber에서 채집하였다.

모든 실험에서의 데이터를 300개의 연속 사이클로부터 구했고, 이로부터 도시평균유효압력

(IMEP)의 분산(COV_{imep})을 정확히 산출할 수 있었다. 연소안정성의 기준은 COV_{imep} 값이 5% 이 내일 때로 하였다.

2.2.1 Hot EGR 실험

재순환되는 배기가스를 냉각시키지 않는 Hot EGR 실험은 각각 1200rpm, 1600rpm, 2000rpm의 정속 운전조건하에서 이루어 졌고, 부하는 각 엔진 속도조건에 따라 3kgfm(186kPa BMEP, 저부하), 6kgfm(370kPa BMEP, 중부하), 9kgfm(556kPa BMEP, 고부하)의 조건하에서 실험하였다. 점화 타이밍은 MBT 점화 타이밍에 맞추었고, EGR율은 EGR 라인상에 있는 EGR 조절밸브로 제어를 하였다.

2.2.2 Cooled EGR 실험

Cooled EGR 실험에서 EGR율은 20%, MBT 점화 타이밍은 45°BTDC로 하였고, 엔진의 운전은 1600rpm 6kgfm의 속도/부하 조건하에서 수행되었다. EGR 냉각기를 사용하여 EGR 온도를 40°C -300°C 사이에서 변화도록 할 수 있었으며, 정상 상태의 EGR 온도는 ±2°C 내에서 유지되는 것으로 정의하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Hot EGR 실험

Fig. 3은 1200rpm에서 EGR 량과 부하조건을 변화시켜가면서 HC와 NOx량을 측정한 결과와 1600rpm과 2000rpm에서 부하조건을 변화시켜가면서 실험한 결과를 나타내는 그래프이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 실제적인 NOx농도에서의 저감은 10-30%의 EGR율에서 이루어졌고, 1200rpm운전의 경우 부하가 작을수록 EGR율이 클수록 NOx가 감소하였으나, 엔진속도가 증가할수록 그 농도가 증가하였다. 그러나, EGR율이 증가할수록 산소농도의 감소로 연료의 산화에 악영향을 끼쳐 HC농도는 급격하게 증가한다.

Fig. 4는 실험엔진의 속도와 부하조건에 따른 제동 열효율과 BSFC에 대한 EGR율 변화의 효과

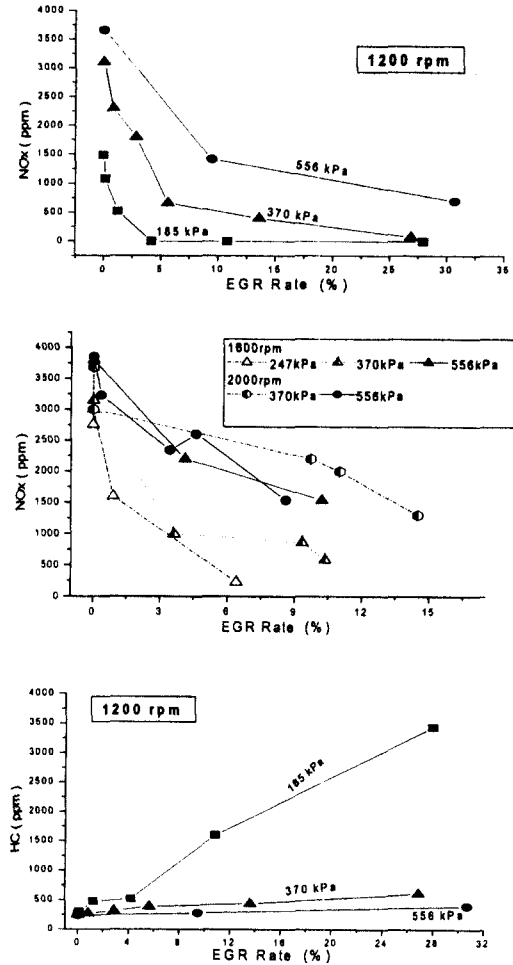


Fig. 3 Effect of EGR rate on exhaust gas emissions

를 나타낸 것이다. 제동열효율은 부하에 따라 증가하는 경향을 보였고, 중 고부하조건에서 엔진 속도변화에 대해 그 차이가 작으나 저부하에서는 7%의 차이를 보였다. 더욱이 중 고부하에서는 EGR율이 증가할수록 효율이 증가하나, 연소 불안정성으로 인해 저부하에서는 감소하는 경향이 있다. 엔진의 동력을 일정하게 유지하면서 고부하조건에서 EGR율을 증가시키면 제동열효율이 증가한다.

제동열효율이 증가하는 이유는 다음과 같다. 제동연료소비율(BSFC)에 대한 EGR효과는 본질적으로 제동열효율이 BSFC와 상관관계에 있기

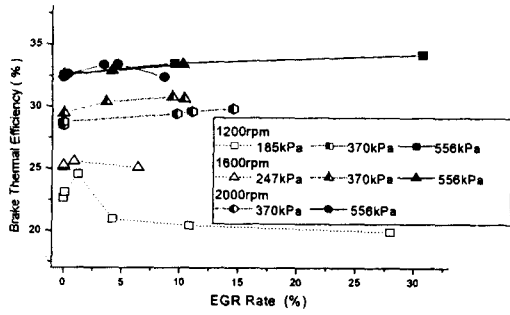


Fig. 4 Effect of EGR rate on brake thermal efficiency and brake specific fuel consumption

때문에¹¹⁾ Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 제동열효율과 반대되는 경향을 가진다. 저부하조건과는 달리 고부하에서 안정된 연소로 인하여 EGR율이 증가하면 연료경제성에 바람직한 영향을 끼치게 되고, EGR tolerance를 증가시키게 된다. EGR율이 증가함에 따라 BSFC를 감소시키는 몇가지 인자가 있다. 신기의 펌핑손실감소, 연소온도 저하로 인한 실린더 벽면으로의 열전달감소 그리고 열해리 손실의 감소 등이다. 특히 LPG 연료 운전의 경우, 가솔린엔진과는 달리 공기와 연료의 혼합이 우수하고, 펌핑손실이 적어 연료경제성면에서 유리하다고 할 수 있다.

Fig. 5는 펌핑평균유효압력(PMEP)의 EGR율에 대한 결과이고, 공연비와 엔진속도가 일정할 때(엔진의 동력이 일정할 때), EGR율이 증가함에 따라 흡기압력이 증가하고 EGR의 공급으로 신기의 부분압력이 저하되어 스로틀밸브에서의 압력손실이 감소하므로 펌핑손실은 감소하게 된다.

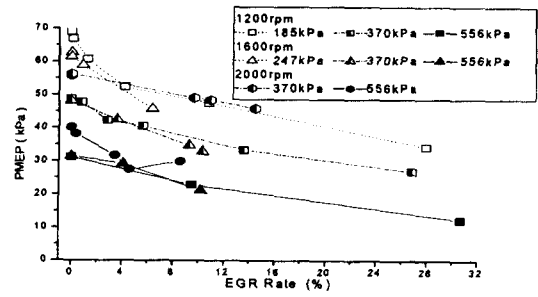


Fig. 5 Effect of EGR rate on pumping mean effective pressure

Fig. 6은 EGR율에 따른 COV_{imep} 값의 변화를 나타낸 것이다. 그래프의 COV_{imep} 결과로부터 알 수 있듯이 1200rpm, 저부하조건인 운전은 17%의 EGR율에서 17%의 COV_{imep} 를 초래한 반면에, 중고부하조건은 EGR율을 30%로 증가시켰음에도 불구하고 모두 3%의 범위내에 분포하였다. 1600 및 2000rpm의 운전속도에서는 모두 COV_{imep} 값이 3% 이내에 분포하였다. 이렇게 EGR율을 증가하였음에도 가스연료는 실린더내로 유입되면 거의 모두 기상으로 존재하게 되어 연소가 잘 일어나 COV_{imep} 값이 작은 것으로 생각된다.

Fig. 7는 EGR율과 부하조건에 따른 배기가스 온도의 변화이다. 그래프에서 보듯이 엔진속도와 부하를 증가시키면 연소온도의 상승으로 배기가스온도가 증가하였으나, EGR율에 따라 재순환된 배기가스의 dilution 효과로 인하여 연소온도와 후연소를 감소시켜 배기가스온도가 감소하였다. 2000rpm/370kPa BMEP의 조건에서 15% EGR율로 최대 50°C의 배기가스온도를 저하

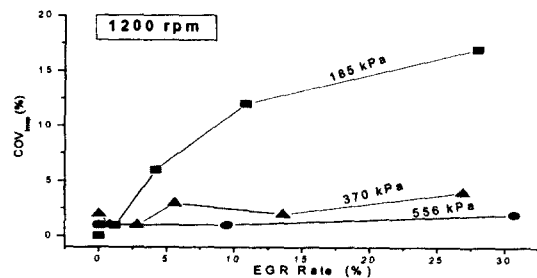


Fig. 6 Effect of EGR rate on cyclic variation

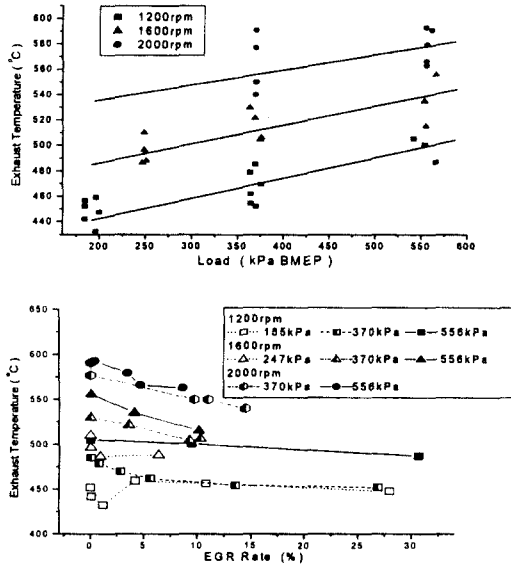


Fig.7 Effect of EGR rate on exhaust temperature

시킬 수 있었다.

3.2 Cooled EGR

Cooled EGR에서의 배기특성 역시, Hot EGR 실험에서의 EGR을 증가에 따른 효과처럼 EGR 온도저하에 따라 NO_x 배출은 감소하는 반면, HC는 증가하였다. Fig. 8은 EGR 온도에 따른 HC 배출량의 변화를 나타낸 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 180°C의 EGR 온도저하로 최대 약 80%의 NO_x 저감을 달성할 수 있었다.

Fig. 9과 10은 EGR 온도에 따른 제동열효율과 BSFC의 변화를 나타낸 것이다. 결과를 보면 EGR을 증가의 효과와 마찬가지로 EGR 온도가 감소

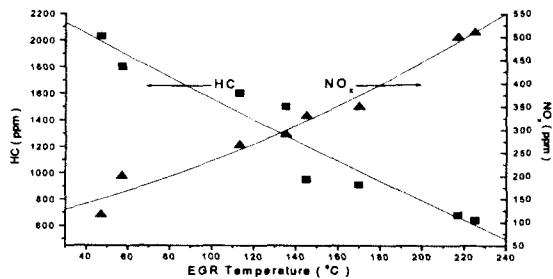


Fig. 8 Effect of EGR temperature on exhaust emissions

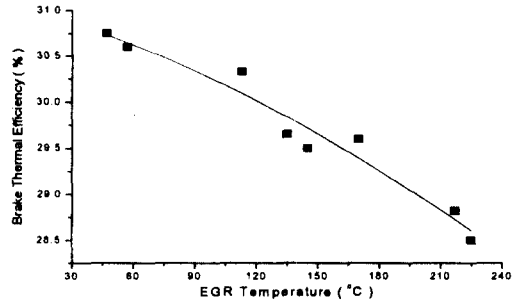


Fig. 9 Effect of EGR temperature on brake thermal Efficiency

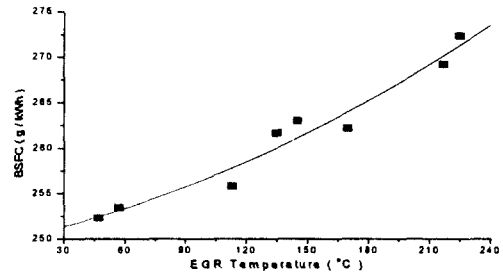


Fig.10 Effect of EGR temperature on BSFC

할수록 제동열효율은 증가하는 반면에 BSFC는 감소하였다. 180°C의 EGR 온도저하로 20%의 EGR 율에서 최대 7.9%의 제동열효율과 8.7%의 BSFC 향상을 가져왔다.

EGR 온도가 감소함에 따라 300연속사이클로부터 얻은 COV_{imep} 값들이 모두 3% 이내에 분포하였다. 이는 연료, 공기, 배기가스, 잔류가스 사이의 균일한 혼합이 EGR의 dilution 효과에 기인한 연소속도저하로 일어나는 사이클변동을 상당부분 감소시켜 안정된 연소가 되는데 기여했으리라 생각된다. 그리고 실린더 연소압력의 결과를 보면 EGR 온도가 감소함에 따라 최대연소압력이 저하되는데, 이것은 EGR 온도에 따른 실린더의 최고압력변화를 나타내는 Fig. 11에서와 같이 이는 Cooled EGR의 효과로 흡기온도와 압력이 저하하여 연소온도와 압력 역시 저하되었기 때문이다.

Fig. 12는 EGR 온도에 따른 배기온도변화를 나타내는 그래프이다. 그래프에서 보이듯이 EGR

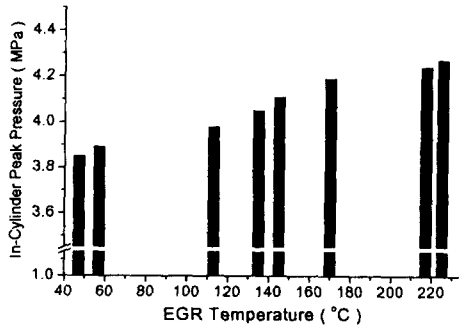


Fig. 11 Effect of EGR temperature on in-cylinder peak pressure

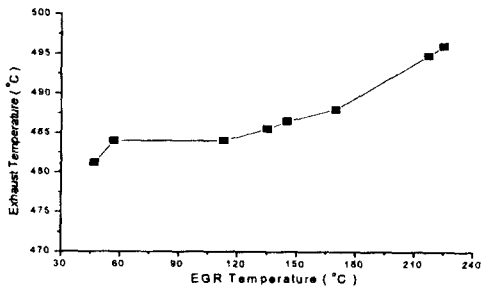


Fig. 12 Effect of EGR Temperature on Exhaust Temperature

온도가 감소함에 따라 배기가스온도가 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 180°C의 EGR온도 이하로 최대 15°C의 배기가스온도가 감소하였다. 이 역시 Hot EGR실험에서처럼 연소온도 저하에 기인한다고 볼 수 있는데, 화염온도에 매우 의존하는 NO_x가 저감된 사실로부터도 확인할 수 있다

4. 결론

소형 스파크 점화 LPG엔진에서 Hot EGR실험과 Cooled EGR실험을 통하여 성능 및 배기 특성을 살펴봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) EGR율을 증가시키고 EGR온도를 감소시킴에 따라서 NO_x배출은 감소하였으나 HC배출은 증가하였다. 실질적인 NO_x저감은 10-30%의 EGR율에서 얻어졌고, 180°C의 EGR온도 이하로 약 80%의 NO_x저감을 달성할 수 있었다.

2) EGR율을 증가시키고 EGR온도를 감소시킴에 따라서 제동열효율이 증가하고 BSFC는 감소하여 결과적으로 연료경제성의 향상을 가져왔다. 그리고 20%의 EGR율에서 180°C의 EGR온도 이하로 최대 7.9%의 제동열효율과 8.7%의 BSFC의 추가적인 향상이 가능하였다.

3) 중부하조건(1600rpm, 6kgfm)으로 운전시, Hot EGR실험과 Cooled EGR실험 모두에서 COV_{imep} 값이 3% 이내에 분포하여 사이클변동을 줄이고 연소안정성을 확보할 수 있었다.

4) EGR율을 증가시키고 EGR온도를 감소시킴에 따라서, EGR의 연소온도를 낮추고 후연소를 줄이는 효과에 의하여 배기가스온도를 저하시킬 수 있었다. 15%의 EGR율로 최대 50°C, 180°C의 EGR온도 이하로 최대 15°C를 저하시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 SK Gas/LG Gas가 후원하는 LP가스 엔진 연구 사업단과 과학재단의 우수연구센터(연소기술연구센터, ERC)의 지원 아래 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) 이성욱, 조영진, 박심수, "EGR을 적용한 가솔린엔진의 배기 특성," 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, Vol.1, pp.11-18, 2000.
- 2) 허행표, 김창일, 최규훈, "Cooled EGR이 대형 디젤엔진의 성능과 배기에 미치는 효과," 한국자동차공학회, 추계학술대회논문집, Vol. I, pp. 282-289, 2000.
- 3) 한영출, 오용석, 오상기, "Cooled-EGR대형 디젤기관의 성능 및 배기가스에 관한 실험적 연구," 한국자동차공학회논문집, 제9권 제5호, pp.1-9, 2001.
- 4) P. Wiederkehr, "Motor Vehicle Pollution : Reduction Strategies Beyond 2010," OECD, 1995.
- 5) B. Hollemans, "Clean Fuel of the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles," TNO-Paper VM9504, 1995.

- 6) A. Gerini, G. Monnier, R. Bonetto, "Ultra Low Emissions Vehicle Using LPG Engine Fuel," SAE 961079, 1996.
- 7) E. Higinbotham, "Effect of Selected LPG Fuel Components on Speciated Exhaust Emissions," SAE 961900, 1996.
- 8) R. S. G. Baert, D. E. Beckman, R. P. Verbeek, "New EGR Technology Retains HD Diesel Economy with 21st Century Emissions," TNO-Paper VM9603, 1996.
- 9) R. S. G. Baert, D. E. Beckman, A. Veen, "EGR Technology For Lowest Emissions," TNO-Paper VM 9607, 1996.
- 10) M. van der, Steen, "Gaseous Fuels : Past Experiences and Future Expectations," TNO-Paper VM 9608, 1996.
- 11) T. Sakonji, F. Shoji, "Study on Improvement of Natural Gas Fueled SI Engines Effect of EGR Utilization," SAE 971714, 1997.
- 12) K. Okamoto, F. R. Zhang, S. Shimogata, F. Shoji, "Development of a Late Intake-Valve Closing (LIVC) Miller Cycle for Stationary Natural Gas Engines Effect of EGR Utilization," SAE 972948, 1997.
- 13) F. R. Zhang, K. Okamoto, S. Morimoto, F. Shoji, "Methods of Increasing the BMEP(Power Output) for Natural Gas SI Engines," SAE 981385, 1998.
- 14) C. R. Ferguson, "Internal Combustion Engines - Applied Thermosciences," John Wiley & Sons, 1986.
- 15) F. Schafer, R. van Basshuysen, "Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines," Spinger-Verlag, 1995.
- 16) J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, 1988.
- 17) R. Stone, "Introduction to Internal Combustion Engines," Macmillan, 1992.
- 18) 조윤희, 구준모, 김정현, 김승규, 배충식, 오승묵, 강건용, "EGR 장착 스파크 점화 LPG 엔진의 성능 및 배기특성," 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, Vol.I, pp.211-216, 2000.
- 19) 이효조, 이은현, "배기 재순환(EGR)이 엔진 열부하와 방열에 미치는 영향," 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, Vol.I, pp.275-280, 1999.