

## EGR을 변화에 대한 액상 LPG 분사 엔진의 운전 및 배출가스특성

염기태\* · 우영민 · 장진영 · 박용국 · 배충식

한국과학기술원 기계공학과

### Performance and Emission Characteristics of Liquid-Phase LPG Injection Engine with Different EGR Rate

Kitae Yeom\* · Youngmin Woo · Jinyoung Jang · Youngkug Park · Choongsik Bae

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea  
(Received 19 April 2003 / Accepted 5 August 2003)

**Abstract** : Exhaust Gas Recirculation (EGR) system is used to reduce NOx emission, to improve fuel economy, and to suppress knock since it offers the benefits of the inlet charge dilution. The effects of EGR was investigated on the performance and emission to reduce exhaust thermal load with a single cylinder liquid-phase LPG injection engine, in a wide range of EGR rate, engine conditions and LPG proportions. As EGR rate was increased, NOx was reduced while HC was increased. Pumping loss reduction by EGR improved bsfc and increased EGR lowered exhaust gas temperature. And, LPG proportions were made a difference on the performance and emission characteristics.

**Key words** : EGR(Exhaust Gas Recirculation; 배기가스 재순환), Liquid-phase LPG injection engine(액상 LPG분사 엔진)

#### Nomenclature

BSFC : brake specific fuel consumption, g/kWh  
COV<sub>IMEP</sub> : coefficient of variation of IMEP, %  
EGR : exhaust gas recirculation, %  
IMEP : net indicated mean effective pressure, MPa  
PMEP : pumping mean effective pressure, MPa  
RHR : rate of heat release  
 $\lambda$  : air excess ratio  
[CO<sub>2</sub>] : CO<sub>2</sub> concentration, ppm  
Fuel composition in LPG;  
R<sub>46</sub> : propane, butane = 40%, 60%  
R<sub>64</sub> : propane, butane = 60%, 40%

R<sub>82</sub> : propane, butane = 80%, 20%

#### Subscripts

int : intake  
exh : exhaust  
atm : atmosphere

#### 1. 서론

배기가스 재순환 (EGR; Exhaust Gas Recirculation)은 자동차 엔진의 배출가스 중 질소산화물 (NOx)저감을 위한 가장 효과적인 방법으로써 실용화되고 있다.<sup>1)</sup> 이는 배출가스를 신기와 혼합하여 흡기에 흡입시킴으로써 혼합기의 열용량을 증대하여 실린더 내부의 연소가스 온도상승을 억제하고 공연

\*To whom correspondence should be addressed.  
eriksson@kaist.ac.kr

비를 낮춤으로써 질소 산화물 생성을 억제하여 발생량을 줄이는 것이다. EGR은 부분부하 조건에서 펌핑손실(pumping loss)을 감소시키고 열효율(thermal efficiency)을 증가시키는 장점이 있지만 과도한 양의 EGR을 적용하는 경우에는 혼합기의 희석효과가 증대됨으로써 연소안정성에 나쁜 영향을 미침으로써 출력이 저하되고, 탄화수소(HC)의 배출이 증가된다. 따라서 엔진의 운전특성과 배출가스특성을 고려한 EGR을 결정이 반드시 필요하다.

액상 LPG 분사엔진(Liquid Phase LPG injection)은 대형 디젤엔진의 배출가스 성능을 개선하기 위해 액상의 LPG 연료를 인젝터를 이용하여 공급하는 방식을 채택하였다.

이러한 이유로 액상 LPG 분사엔진은 연료 공급을 위해 믹서(Mixer)와 기화기(Vaporizer)를 사용하는 대부분의 CNG엔진뿐만 아니라 기존 LPG 엔진에 비하여 공연비 제어 및 배출가스의 후처리가 용이하여 뛰어난 출력 특성과 배출가스 특성, 냉시동 특성을 향상시킬 수 있다.

본 연구의 대상인 액상 LPG 분사엔진은 일련의 연구 개발을 통하여<sup>2)</sup> 대형 상용 디젤엔진을 기본으로 재설계하였기 때문에 이론 공연비 근처에서 운

전되는 스파크 점화엔진의 특성상 배기가스의 온도가 상승됨으로써 열 부하 문제가 발생됨으로써 엔진의 내구성에 좋지 않는 영향을 미칠 수 있다고 판단되어 이에 대한 대책이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 대형 액상 분사 LPG 엔진에 대해 적용 EGR 범위를 분석하고, 연료조성과 공연비에 대한 엔진성능 및 배기 특성을 파악하며 아울러 엔진의 열 부하 특성을 파악함으로써 엔진 적용에 필요한 EGR 기본 자료를 얻고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

실험장치는 Fig.1에 표시한바와 같이 단기통 엔진과 액상의 LPG 연료를 공급하기 위한 연료 공급계, 흡·배기 서지탱크, EGR 시스템, 엔진 제어 시스템, 기타 계측시스템으로 나눌 수 있다.

실험에 사용된 엔진은 Table 1의 제원과 같이 대형 디젤엔진을 SI기관으로 개조한 것이다. 연료공급계는 LPG를 질소가스로 가압하여 액상으로 유지하는 시스템과 인젝터(Siemens Co.) 및 인젝터 부근에 적체되는 액상의 연료가 엔진의 운전열에 의해

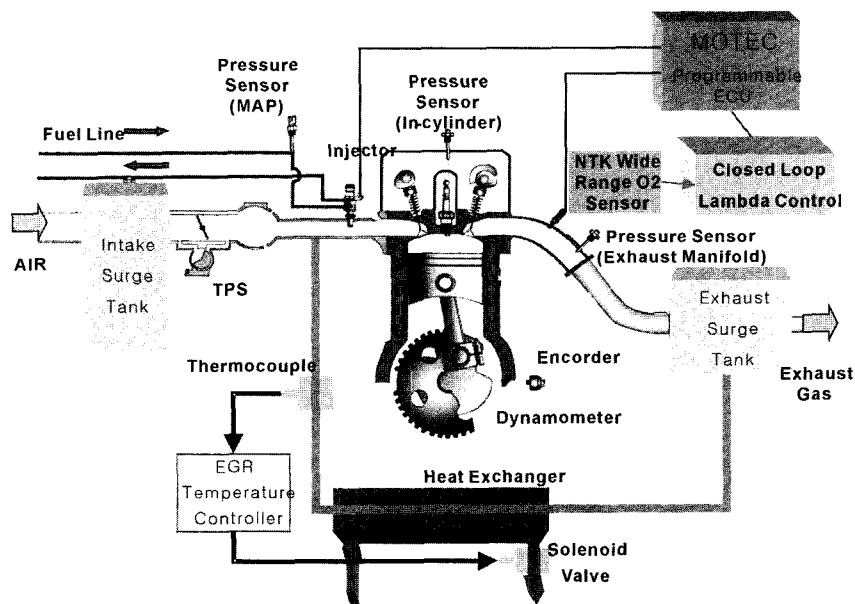


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Engine specifications

Type	Description	
Number of cylinder	1	
Bore (mm)	130	
Stroke (mm)	140	
Con-rod length (mm)	260	
Displacement volume (cc)	1858.2	
Compression ratio	10	
Valve timing	IVO	BTDC 18°
	IVC	ABDC 50°
	EVO	BBDC 50°
	EVC	ATDC 18°
Injection timing	BTDC 280°	
Ignition time	MBT	
Fuel injection pressure	1.5MPa	

서 기화되는 현상을 방지하기 위한 연료순환 펌프로 구성된다.

흡·배기 서지탱크는 관내 압력 맥동 현상을 저감시키고 안정된 EGR을 공급하기 위하여 설치하였으며, 각각의 부피는 1500, 640 Liter이다.

EGR 시스템은 배기측 서지탱크에서 충분히 냉각된 배기가스를 추출하여 흡기계 스로틀 밸브 후방에 공급할 수 있도록 동관(φ12mm)으로 연결하고, 흡·배기 측의 압력 차를 이용하여 공급하고 밸브를 장치하여 유량을 제어하는 방식을 채택하였다.

엔진제어시스템은 연료분사 시기 및 분사량, 점화시기 등을 제어하는 프로그래머블 ECU (Motec M8), 엔진냉각수 조절기(REX-F9, RKC Co.)로 구성된다. 연료는 BTDC 280°에서 개방밸브분사(Open valve injection)방식을 적용하였다.<sup>3)</sup> 그리고 공연비는 램다 메타(LA4, ETAS)를 사용하여 조정하였다.

계측 시스템은 엔진 동력계(Dynamatic Co.)와 실린더 압력(Kistler 6051), 흡·배기관의 압력 및 온도를 계측하기 위한 압력 변환기(Kistler 4045A5)와 열전대(K type) 및 배기가스 분석기(Mexa-1500D, Horiba Co.)로 구성된다.

## 2.2 실험 방법

실험조건은 Table 2와 같이 운전조건 및 연료조성에 대하여 EGR 변화율에 대한 엔진의 성능 및 배기 특성을 파악하였다. 그리고 40Nm와 80Nm는 각각 본 단기통 엔진에서 각각 저부하와 중부하 조건이다.

Table 2 Experimental conditions

Engine speed, rpm	800, 1000, 1300			
Load, Nm	40, 80			
Air excessive ratio, λ	0.9, 1.2			
EGR rate, %	0-42			
EGR temperature, K	311-346			
Fuel composition, %		R <sub>46</sub>	R <sub>64</sub>	R <sub>82</sub>
	Propane(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	40	60	80
	Butane(C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	60	40	20

배출가스는 엔진 실린더 헤드의 배기 밸브로부터 배기관 하류 약 10cm 지점에서 샘플링 하여 CO, CO<sub>2</sub>, HC 및 NO<sub>x</sub> 배출량을 측정하였다. 그리고 EGR 율은 흡기 및 배기관에서 CO<sub>2</sub> 농도를 각각 계측한 후, 아래 식을 이용하여 결정하였다.

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

CO<sub>2</sub>를 사용하는 이유는 CO<sub>2</sub>가 연소 생성물중 대표적인 것으로 측정하기 쉽고, 양이 많으며, 연소 중 큰 변화가 없기 때문이다.<sup>1,4)</sup>

한편 배출가스를 포함한 모든 계측 값들은 데이터 획득장치(Wavebook/512, Iotech Co.)를 이용하여 각 실험조건별로 80개의 연속 사이클을 각각 컴퓨터에 저장하여 처리하였다.

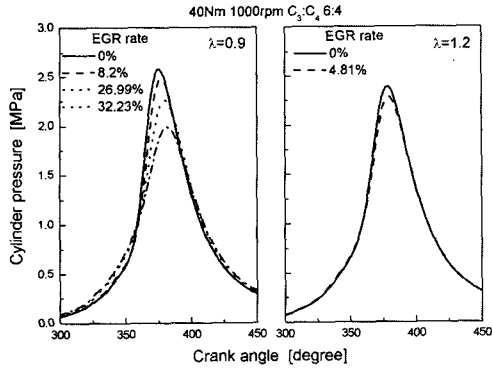
## 3. 실험 결과

### 3.1 운전 특성

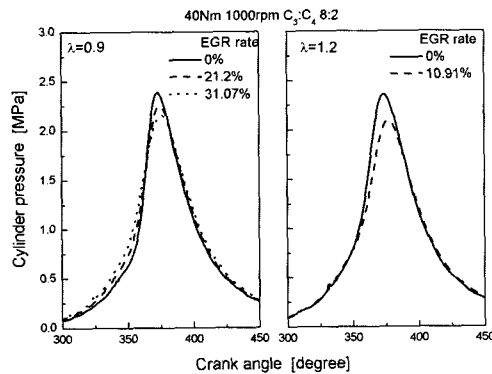
Fig. 2는 운전조건이 1000rpm, 40Nm의 조건일 때 EGR율, 공연비 및 연료조성에 대한 실린더 내부압력의 변화를 나타낸 것이다.

전체적으로 EGR율이 증가하면 연소 초기에 연소실의 압력은 높지만 연소 최대 압력이 감소되는 것을 알 수 있다. 연소 초기에 실린더의 압력이 높은 것은 EGR이 공급되면 흡기 효율이 향상되어 흡기 매니폴드의 압력이 증가하고, 흡기의 희석으로 인해 비열이 증가하기 때문이다.

공연비가 일정한 경우, 연료조성에 대한 영향을 살펴보면 프로판의 함량이 커질수록 연소실 최대압력은 10~13%정도 감소하고 있다. 이는 단위 중량당 저위 발열량은 프로판이 부탄보다 크지만 프로판의 밀도가 낮아 단위 부피당 발열량은 부탄이 더 크며, 프로판의 함량이 커질수록 연소 속도가 느려지기



(a) Fuel composition R<sub>64</sub>



(b) Fuel composition R<sub>82</sub>

Fig. 2 Cylinder pressure with respect to EGR ratio and lambda

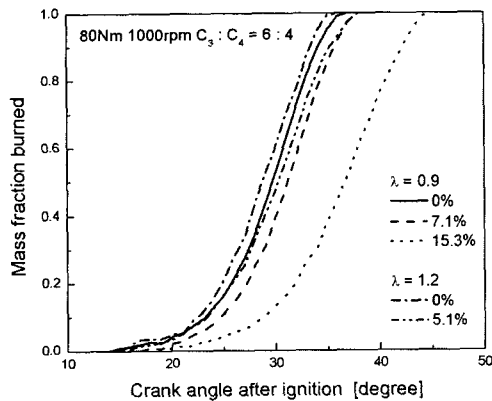
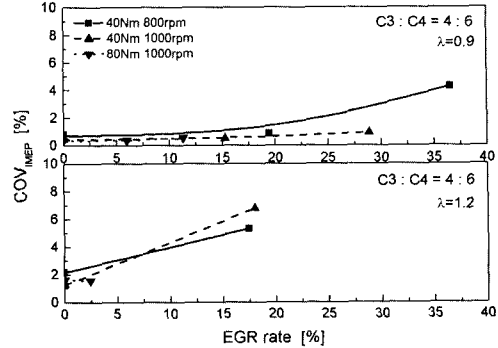


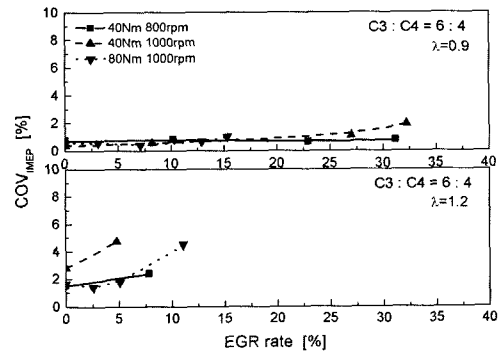
Fig. 3 Mass fraction burned with respect to EGR ratio and lambda

때문으로 판단된다.

실린더 압력으로부터 연소 상태를 파악하기 위해 Fig. 3은 질량 연소 분율을 나타내었다. 연소 과정은 연소가 시작되어 전체 질량의 10%가 연소 될 때까지



(a) Fuel composition R<sub>64</sub>



(b) Fuel composition R<sub>84</sub>

Fig. 4 COV<sub>IMEP</sub> with respect to EGR ratio and lambda

지의 시간을 나타내는 초기 화염 발달 기간과 연소가 진행되어 전체 질량의 10~90%가 연소하는 시간인 급속 연소 기간으로 정의할 수 있다. EGR율이 증가하면 초기 화염 발달 기간과 급속 연소 기간 모두 증가하게 되는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 배기가스가 혼합기를 희석시켜 비열이 증가되어 연소 속도가 저하되기 때문이다.

EGR의 공급으로 인한 연소 안정성을 살펴보기 위해 지시평균유효압력(IMEP)의 변동량(COV<sub>IMEP</sub>)을 Fig. 4와 같이 나타내었다. COV<sub>IMEP</sub>는 다음과 같이 결정하였다.<sup>1)</sup>

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{IMEP} * 100$$

EGR율이 증가됨에 따라 COV<sub>IMEP</sub>가 증가되며, 특히 엔진 부하가 낮고, 엔진회전수가 높을수록 증가 폭이 커지게 된다.

EGR이 증가함에 따라 COV<sub>IMEP</sub>가 증가하는 이유는 EGR이 공급됨에 따라 부분 연소나 실화가 증가

하기 때문에 안정적인 연소가 이루어지지 않기 때문이다.  $COV_{IMEP}$ 는 안정적인 연소를 판단하는 기준으로 보통  $COV_{IMEP}$ 가 5%를 넘지 않으면 안정적인 연소를 하고 있다고 판단할 수 있다.  $R_{46}$ 의 경우 공연비가 농후할 때 40Nm 800rpm에서 EGR율이 36.5%일 때 4.25%, 공연비가 희박할 때 40Nm 1000rpm에서 EGR율이 18%일 때 6.77% 증가하였고,  $R_{64}$ 의 경우 공연비가 희박한 경우에 40Nm 1000rpm에서 EGR율이 4.53%일 때 4.7%까지 증가하였다. 공연비가 희박한 조건에서는 적은 EGR양으로  $COV_{IMEP}$ 가 급격히 증가하므로 많은 양의 EGR을 공급할 수 없다. 따라서 연료 조성에 따른  $COV_{IMEP}$ 는 차이가 없다고 할 수 있으나 농후한 조건에서는 EGR 펌프를 이용하여 더 많은 양의 EGR을 공급하여도 연소 안정성의 측면에서는 문제는 없으나 공연비가 희박한 조건에서는 EGR율이 10% 내외가  $COV_{IMEP}$ 가 5%를 넘지 않는 수준에서 공급할 수 있는 최대 EGR양이라 판단된다.<sup>5)</sup>

Fig. 5는 비연료 소비율 (BSFC; Brake Specific Fuel Consumption)을 나타내었다. 일반적으로 EGR율이 증가하면 BSFC는 감소하는데 이는 크게 세 가지 이유로 설명할 수 있다. 1) 펌프손실 감소, 2) 연소 온도 저하로 인한 열 손실의 감소, 3) 연소 가스의 온도 저하로 인한 해리의 감소이다.<sup>1)</sup>

연료 조성의 영향을 보면 프로판의 단위 중량당 발열량이 부탄에 비해 더 많기 때문에 EGR이 적용되지 않으면  $R_{82}$ 가  $R_{46}$ 이나  $R_{64}$ 에 비해 적은 양의 연료로 같은 토크를 낼 수 있는 것으로 판단된다.

그러나 EGR이 적용된 경우를 살펴보면 부탄의 비율이 커짐에 따라 BSFC의 감소가 더 현저히 나타나는데 이는 부탄의 함량이 많을수록 더 안정된 연소를 이루기 때문으로 판단된다. 그리고 고부하의 BSFC의 감소량이 더 큰 것으로 보아 EGR 적용시 고부하에서 더 많은 연비 저감을 이룰 수 있을 것으로 판단되며, 같은 부하조건에서 회전수가 높을수록 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타난다.<sup>6)</sup> 이러한 경향은 충전 효율(Volumetric Efficiency)이 높아지며 부분 연소나 실화가 감소하기 때문이며 본 실험에서도 이러한 경향과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

BSFC의 감소량을 살펴보면 40Nm 1000rpm  $R_{46}$

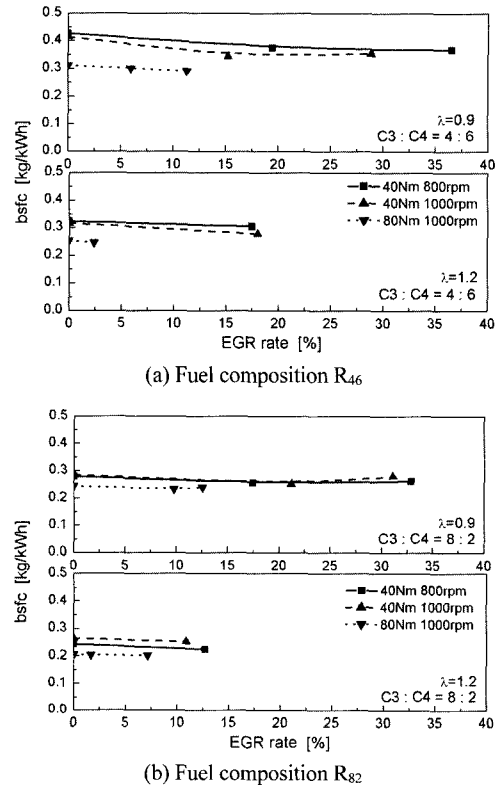


Fig. 5 BSFC with respect to EGR ratio and lambda

공연비가 농후한 조건에서 최대 14.2%까지 감소되어 EGR을 적용하여 연료 경제성을 높일 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2 배출가스 특성

탄화수소의 배출량과 EGR율에 따른 상관관계를 Fig. 6에 나타내었다. EGR율의 증가에 따른 탄화수소 총량 증가를 살펴보면  $R_{64}$ , 공연비가 농후한 경우 40Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 32.2%일 때 129.4%이고, 공연비가 희박한 경우 80Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 11.1%일 때 93.8% 증가하였다. 그리고  $R_{82}$ , 공연비가 농후한 경우 40Nm 800rpm의 조건에서 EGR율이 32.9%일 때 110.1%이고, 공연비가 희박한 경우 40Nm 800rpm의 조건에서 EGR율이 12.7%일 때 53.1% 증가하였다.

이는 EGR이 증가하면 배기가스에 의해 혼합기가 희석되면서 연소 속도가 감소하기 때문이며 또한  $COV_{IMEP}$ 가 증가하면서 부분 연소와 실화가 발생하

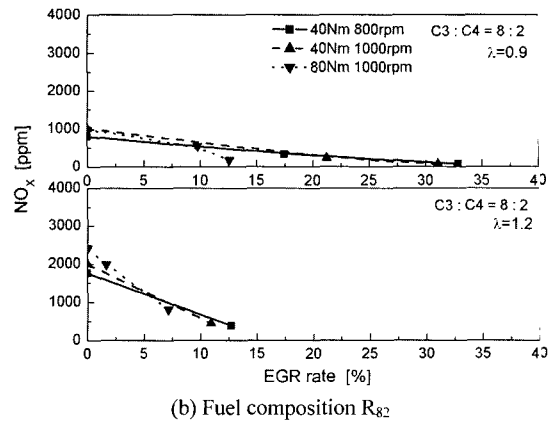
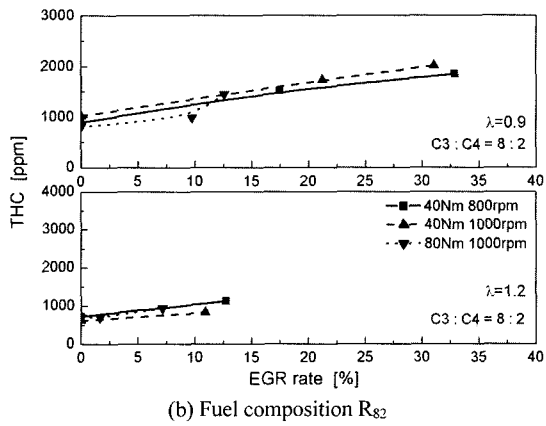
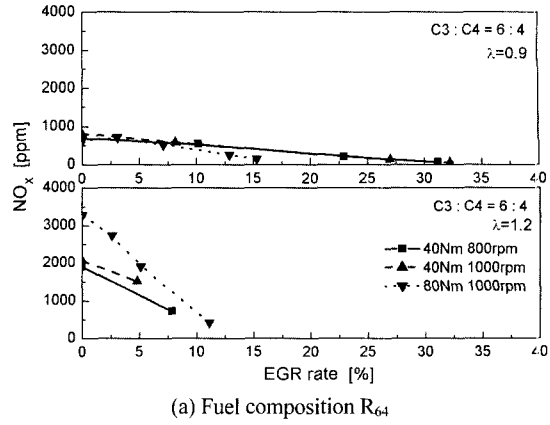
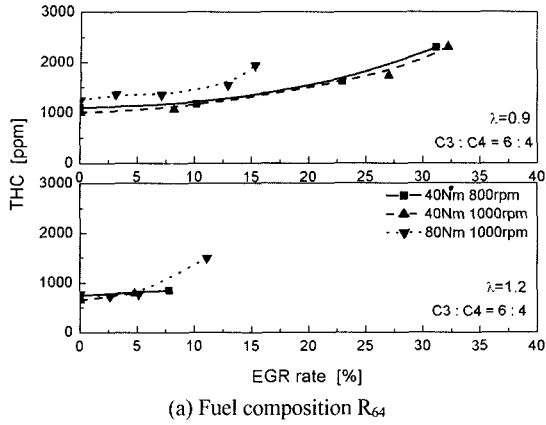


Fig. 6 THC with respect to EGR ratio and lambda

Fig. 7 NOx with respect to EGR ratio and lambda

며, 연소 온도가 떨어졌고 실린더 벽면에서의 소염 효과가 커졌기 때문으로 판단된다.

그리고 프로판의 함량이 많을수록 연료의 분사량이 적고 연료분자의 탄소수가 적기 때문에 COV<sub>IMEP</sub>가 증가해도 탄화수소 총량은 상대적으로 증가하는 양이 적은 것으로 판단된다. 엔진의 부하가 일정할 때 회전수가 증가하면 탄화수소 총량은 감소하는 경향을 보인다. 이는 회전수가 낮을 때 연소 온도가 증가하면서 탄화수소의 연소율이 증가하는 것이 저부하시의 배기가스 라인에서 산화되는 것보다 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다. 엔진의 부하가 큰 경우에 연료의 공급량이 많기 때문에 탄화수소 총량은 증가하며 희박한 조건에서는 연료의 공급량이 적은 이유로 탄화수소 총량이 농후한 조건보다 적다.

일반적으로 질소 산화물의 발생 원인은 대부분

높은 배기가스 온도로 인한 질소 산화물이기 때문에 배기가스 온도가 감소하면 질소 산화물의 배출량도 감소하는 것으로 알려져 있다.<sup>4, 6-7)</sup>

Fig. 7은 EGR율에 대한 질소 산화물의 배출특성을 나타낸 것이다. EGR이 증가함에 따라 질소 산화물이 뚜렷하게 감소하는 것을 알 수 있다. 질소 산화물의 배출량은 연소 온도가 증가하고 연소 속도가 늦어질수록 증가하는 경향이 있다. 엔진 부하가 큰 경우에 연소 최고 압력과 온도가 높기 때문에 질소 산화물의 배출량이 증가하며 같은 엔진 부하의 경우에는 엔진의 회전수가 감소할수록 질소 산화물이 생성되는 시간이 증가하므로 질소 산화물의 배출량이 증가한다.<sup>5)</sup>

EGR이 적용되지 않을 때 공연비가 농후한 조건에서는 프로판의 함량이 많을수록 질소 산화물의 배출량이 많음을 알 수 있다. 이는 연소 속도 때문에

배기가스 온도가 비슷해도 질소 산화물이 생성할 수 있는 시간적 여유가 많기 때문에 판단된다. 그러나 EGR이 적용되면 프로판의 비율이 높은 경우 질소 산화물의 감소량이 많기 때문에 연료 조성에 관련 없이 질소 산화물의 배출량은 비슷한 수준이 된다. 그러나 공연비가 희박한 경우에는 농후한 경우와 다르게 배기가스 온도가 프로판의 비율이 낮은 경우가 더 높기 때문에 연소 온도에 의해 질소 산화물의 배출 감소량을 살펴보면 R<sub>64</sub>, 공연비가 농후한 경우 40Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 32.2%일 때 94.4%이고, 공연비가 희박한 경우 80Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 11.1%일 때 87.1% 감소하였다. 그리고 R<sub>82</sub>, 공연비가 농후한 경우 40Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 31.1%일 때 93.4%이고, 공연비가 희박한 경우 40Nm 800rpm의 조건에서 EGR율이 12.7%일 때 78.6% 감소하였다.

### 3.3 열부하 특성

Fig. 8은 EGR율에 따른 열부하 특성을 파악하기 위하여 배기가스 온도를 측정할 결과이다.

EGR이 적용됨에 따라 배기가스 온도는 감소하는데 이는 연소 최고 압력과 온도가 낮아지기 때문이다. EGR율과 배기가스 온도의 상관관계를 보면 저부하보다 고부하에 배기가스 온도의 감소량이 더 큰 것을 알 수 있다.

그러나 연료 조성에 관련 없이 배기가스 온도가 비슷한 경향을 보이고 있으며 엔진의 부하가 증가하거나 회전수가 증가하면 배기가스 온도는 증가하며 EGR이 적용되면 배기가스가 혼합기를 희석함으로써 비열이 커져 배기가스 온도가 감소하게 된다. EGR이 적용되었을 때 배기가스 온도의 감소량을 살펴보면 R<sub>46</sub>, 공연비가 농후한 경우 40Nm 800rpm의 조건에서 EGR율이 36.5%일 때 11.2%이고, 공연비가 희박한 경우 40Nm 800rpm의 조건에서 EGR율이 17.5%일 때 5% 감소하였다. 또한 R<sub>64</sub>, 공연비가 농후한 경우 40Nm 800rpm의 조건에서 EGR율이 31.2%일 때 11.5%이고, 공연비가 희박한 경우 80Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 11.1%일 때 6.9% 감소하였다. 그리고 R<sub>82</sub>, 공연비가 농후한 경

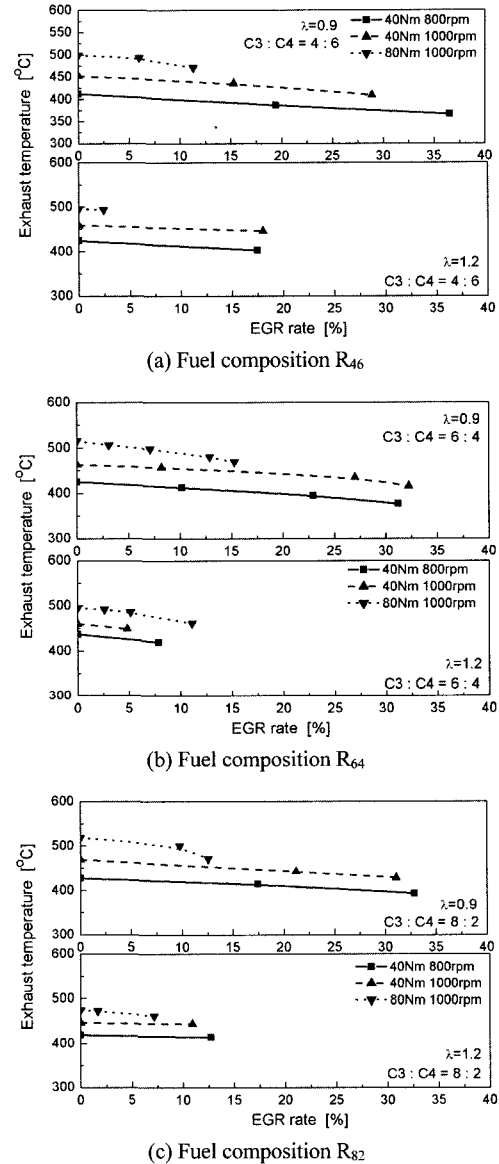


Fig. 8 Exhaust temperature with respect to EGR ratio and lambda

우 80Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 12.6%일 때 9.2%이고, 공연비가 희박한 경우 80Nm 1000rpm의 조건에서 EGR율이 7.1%일 때 2.7% 감소하였다. EGR을 적용했을 때 배기가스 온도의 감소되는 비율은 공연비에 관계없이 비슷하지만 희박한 경우가 연소가 불안정하므로 상대적으로 많은 양의 EGR 적용이 불가능해 농후한 경우가 배기가스 온도의

감소량은 더 큰 것으로 판단된다. 따라서 EGR이 디젤 개조 SI엔진인 LPLi엔진의 열부하 저감에 응용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

단기통 LPG 액상 분사 엔진에서 EGR을 적용하였을 때 엔진 운전 조건과 배기가스 특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) EGR율이 증가하고 공연비가 희박하면 연소율 50%에 도달하는 기간이 길어진다. 이는 배기가스의 혼합기 희석효과 때문이다.

2) EGR율이 증가하면  $COV_{IMEP}$ 는 증가하는데 특히 공연비가 희박한 경우 EGR이 증가하면  $COV_{IMEP}$ 가 급격히 증가한다.

3) BSFC는 EGR율이 증가하고 엔진 부하가 적고 회전수가 낮을수록 증가한다. 그리고 프로판의 혼합 비율이 높으면 BSFC는 감소한다.

4) EGR이 증가하면 부분 연소와 실화 그리고 연소온도 저하로 인한 소염 효과로 탄화수소 총량이 증가한다. 프로판의 혼합 비율이 높을 때 탄화수소 총량은 감소하는 경향을 보이며 공연비가 희박한 경우는 적은 EGR양으로도 탄화수소 총량은 급격하게 증가하였다.

5) 질소 산화물은 공연비가 희박할 때는 부탄의 비율이 높을 경우 배기가스 온도가 높아서 배출량이 많지만 농후할 때는 프로판의 비율이 높은 경우가 연소 속도가 빨라서 배출량이 많았다. 그러나 EGR이 적용되면 공연비가 농후할 때 프로판의 비율이 높은 경우가 질소 산화물의 저감량이 많아서 연료 조성에 따른 배출량의 차이는 거의 없었다.

6) 연료 조성과의 관련 없이 배기가스의 온도는 비슷한 수준이며 EGR이 적용되면 공연비에 상관없이 배기가스 온도의 감소량이 비슷하므로 공연비가 농후한 경우가 희박한 경우보다 배기가스 온도의 저감량이 더 많았다.

7) EGR이 디젤 개조 SI엔진인 LPLi엔진의 열부하

저감에 응용될 수 있는 결과를 얻었다.

#### 후 기

본 연구는 SK gas 및 LG gas와 과학재단의 우수연구센터(ERC)의 지원아래 연소 기술 연구 센터의 과제로써 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

#### References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, 1988.
- 2) C. Kim, S. Oh, K. Kang, "Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for Heavy-Duty Engine (I)," Transactions of KSAE, Vol.9, No.4, pp.85-91, 2001.
- 3) S. Kim, "Flame Propagation Characteristics in a Heavy Duty Liquid Phase LPG Injection SI Engine by Flame Visualization," MS Thesis KAIST, pp. 29-39, 2002.
- 4) K. Okamoto, F. R. Zhang, S. Shimogata, F. Shoji, "Development of a Late Intake-Valve Closing Miller Cycle for Stationary Natural Gas Engines-Effect of EGR Utilization," SAE 972948, 1997.
- 5) R. Stone, Internal Combustion Engines, Macmillan, 1992.
- 6) T. Sakonji, F. Shoji, "Study on Improvement of Natural Gas Fueled Spark Ignition Engines-Effect of EGR Utilization," SAE 971714, 1997.
- 7) B. Grandin, H. E. Angstrom, P. Stalhammar, E. Olofsson, "Knock Suppression in a Turbocharged SI Engine by Using Cooled EGR," SAE 982476, 1998.
- 8) Y. Cho, J. Koo, J. Jang, C. Bae, "Performance and Emission Characteristics in a Spark-Ignition LPG Engine with Exhaust Gas Recirculation," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.24-31, 2002.