

가스연료엔진의 희박영역에서의 배출가스특성에 관한 연구

Emission Characteristics of a Gas Fueled SI Engine under Lean Burn Conditions

김 창 업*, 배 충 식**
Changup Kim, Choongsik Bae

ABSTRACT

For natural gas and LPG fuel, measurements on the concentrations of individual exhaust hydrocarbon species have been made as a function of air-fuel ratio in a 2-liter four-cylinder engine using a gas chromatography. NMHC in addition to the species of HC, other emissions such as CO₂, CO and NO_x were examined for natural gas and LPG at 1800rpm for two compression ratios (8.6 and 10.6). Fuel conversion efficiencies were also investigated together with emissions to study the effect of engine parameters on the combustion performances in gas engines especially under the lean burn conditions. It was found that CO₂ emission decreased with smaller C value of fuel, leaner mixture strength and the higher compression ratio. HC emissions from LPG engine consisted primarily of propane (larger 60%), ethylene and propylene, while main emissions from natural gas were methane (larger than 60%), ethane, ethylene and propane on the average. The natural gas was proved to give the less ozone formation than LPG fuel. This was accomplished by reducing the emissions of propylene, which has relatively high MIR factor, and propane that originally has large portion of LPG. In addition, natural gas shows a benefit in other emissions (i.e. NMHC, NO_x, CO₂ and CO), SR and BSR values except fuel conversion efficiency.

주요기술용어 : Maximum incremental reactivity(단위 질량당 오존 발생량), Specific reactivity(단위 탄화수소당 오존 생성량), Brake specific reactivity(단위 출력당 오존 생성량)

1. 서 론

도시환경문제해결에 대한 필요성의 증가는 자동차의 배출물인 HC, NO_x, CO, PM 등의 규제 대상물질들뿐만 아니라 대도시의 광화학 스모그를 일으키는 오존과 같은 비규제 물질에 대해서도 많은 연구를 하게 한다. 특히, 오존의 발생 원인중의 하나인 HC성분들이 광화학 스모그 반

응에서의 반응율이 성분마다 모두 다른 것이 알려짐에 따라 이에 대한 집중적인 연구가 진행중이다. 즉, 미국 캘리포니아주 대기 보전국(california air resource board)의 Carter 등은 HC 및 합산소 화합물 성분들의 광화학 반응에서 최대로 발생할 수 있는 오존의 양을 의미하는 MIR(maximum incremental reactivity)값을 발표하였다. 따라서 현재 HC 규제에 사용중인 NMHC(non-methane HC) 뿐만 아니라 MIR를 이용해서 구하는 단위 HC 질량당 발생하는 오존량인, SR(specific reactivity)

* 회원, 한국기계연구원 LP가스엔진연구사업단

** 회원, 한국과학기술원 기계공학부

값이 큰 의미를 가지게 되었다.¹⁾ 미국 AQIRP(Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program)는 1989년 이후 가솔린 차량의 HC에서 160여 가지의 성분을 분석할 수 있는 방법을 개발하고 이를 이용하여 휘발유의 여러 가지 성질의 영향에 대하여 연구하였다.^{2,3)} Kaiser 등은 단기통 엔진을 이용하여 각종 단일 탄소연료들에 대해서 THC와 HC 성분의 변화를 분석하였다. 그 결과 사용연료에 따라서 THC와 HC 성분의 값들이 변화하며,⁴⁾ 회박영역에서는 연소 생성물인 알켄 계열의 증가로 SR값이 증가한다고 하였다.⁵⁾ 그리고 한편으론 대체연료에 대한 HC 성분별 연구도 진행되어 Russell 등은 3D air-shed model로 대체연료에 대해서,⁶⁾ Weaver 등은 가솔린과 메탄올 차량의 HC 성분조사를 하였다.⁷⁾ Toshio 등은 FFV를 이용한 가솔린과 M85연료에 대한 실험을 진행하였고⁸⁾ Kaiser 등은 가솔린과 프로판, isoctane 등에 대해서,⁹⁾ Poulsen 등은 천연가스에 대한 연구를 진행하였다.¹⁰⁾

본 연구에서는 위와 같은 오존에 대한 연구방법을 대체정정연료로서 점차 그 사용량이 증가하고 있는 천연가스와 LPG연료에 대해 적용하여 그 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 배출가스성분 중 HC의 각 성분별 농도를 공연비에 따라서 2.0 L 4기통 엔진에서 조사하였으며 아울러 NMHC, CO₂, CO, NO_x 등의 주요 배출물과 연료전환효율 및 연소압력들도 같이 측정하여 종합적인 분석이 가능하도록 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 상용 LPG 엔진, 동력계, 공기 및 연료유량계, 배출가스 분석 시스템과 가스 크로마토그래피(GC)로 구성되어 있으며 전체적인 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 엔진의 자세한 재원은 Table 1에 나타내었다.

공연비를 측정하기 위해서 증류 유량계와 열식 질량 유량계를 사용하였다. 배출가스 분석은

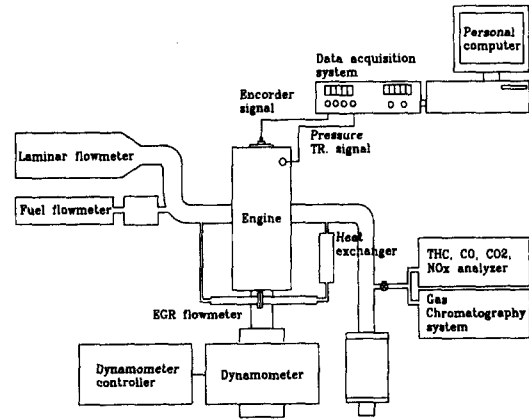


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

Table 1 Characteristics of the base engine

TYPE	in-line OHC
Number of cylinder	4
Bore × Stroke	85 × 88mm
Displacement volume	1997cc
Compression ratio	8.6
Fuel supply type	Mixer

엔진의 배기라인에서 샘플링하여 드라이한 상태의 가스를 측정하였다. 배출가스 HC의 각 성분은 GC의 HP-PLOT capillary column을 이용해서 분석하였다. 분석 성분은 메탄, 에탄, 에틸렌, 아세틸렌, 프로판, 프로필렌, 부탄류, 펜탄류 등으로 자세한 사항은 Table 2에 나타내었다. Table 3에는 본 연구에서 사용된 LPG와 천연가스 연료의 물성치를 나타내었다.

2.2 실험방법

본 연구는 엔진 회전수 1800 rpm에서 압축비를 베이스 상태의 8.6과 엔진헤드의 밀면을 절삭하여 10.6으로 올려서 두 가지로 실험을 하였다. 배출가스 중 HC의 경우는 단위 출력당 발생량 (brake specific NMHC)과 HC성분에 대해서 SR 식 (1)을 구하였다. MIR은 Table 2에 나타나 있으며 엔진의 성능변수로 사용하기 위해서 출력당 오존

Table 2 MIR of hydrocarbon species

Hydrocarbon species	Molecular weight	MIR (g O ₃ / g NMHC)
Methane	16.04	0.016
Ethane	30.07	0.325
Ethylene	28.05	8.323
Acetylene	26.04	0.365
Propane	44.10	0.568
Propylene	42.08	11.043
i-butane	58.12	1.299
n-butane	58.12	1.177
trans-2-butene	56.11	13.154
1-butene	56.11	10.597
i-butene	56.11	5.765
Cis-2-butene	56.11	12.627
i-pentane	72.15	1.705
n-pentane	72.15	1.462

Table 3 Specifications and composition of fuels

Specifications	LPG	NG	
Composition	Methane	0.040	90.437
	Ethane	2.319	7.286
	Propane	95.062	1.415
	i-butane	1.606	0.356
	n-butane	0.973	0.343
	Remnants*	-	0.163
Molecular Weight	44.123	17.760	
Q HV (MJ/kg)	46.397	49.516	
Stoichiometric A/F ratio	15.674	16.995	

Remnants* : i-C₅H₁₂ : 0.033, n-C₅H₁₂ : 0.032, N₂ : 0.058, CO₂ : 0.04

발생량으로 나타낸 BSR(brake specific reactivity)을 정의해 식 (2)를 사용하였다.⁴⁾

$$SR = \frac{\sum(NMHC_i \times MIR_i)}{\sum NMHC_i} = \frac{g O_3}{g NMHC} \quad (1)$$

$$BSR = SR \times BSNMHC = \frac{g O_3}{kWh} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 LPG와 천연가스 연료에 대해서 이론 공연비 조건에서의 HC성분에 대한 결과를 보여준다. LPG는 프로판이 주성분으로 에틸렌과 프로필렌이 그 나머지를 차지하며 천연가스의 경우, 메탄이 주성분이며 나머지는 주로 에탄, 에틸렌 및 프로판이 차지한다. 평균적으로 질량기준으로 천연가스는 60% 이상이, LPG의 2% 이하가 메탄 성분이었다.

Fig. 3은 BS-NMHC과 HC성분 중의 연료성분 비율, SR 및 BSR을 압축비 변경 전후의 측정된 값을 공연비 변화에 대해서 나타내었다. 압축비의 증가는 두 연료 모두 공연비 전 영역에 걸쳐서 NMHC의 증가를 보여주는데, 특히 LPG의 경우

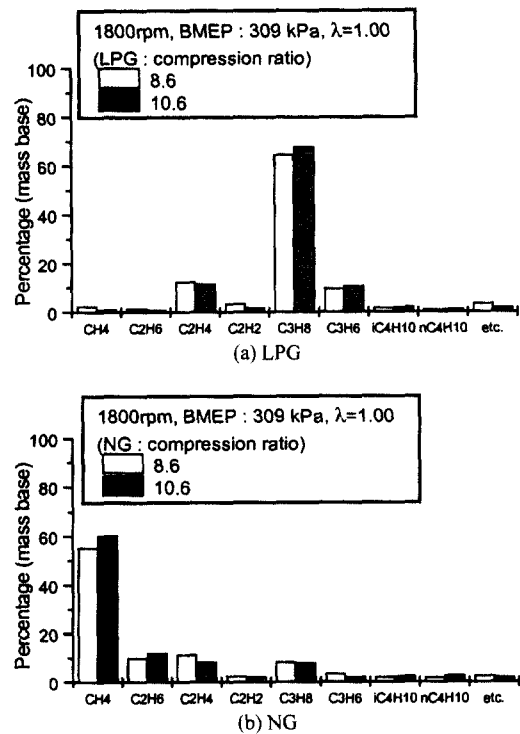


Fig. 2 Species of HC from LPG and natural gas under $\lambda = 1.00$ condition

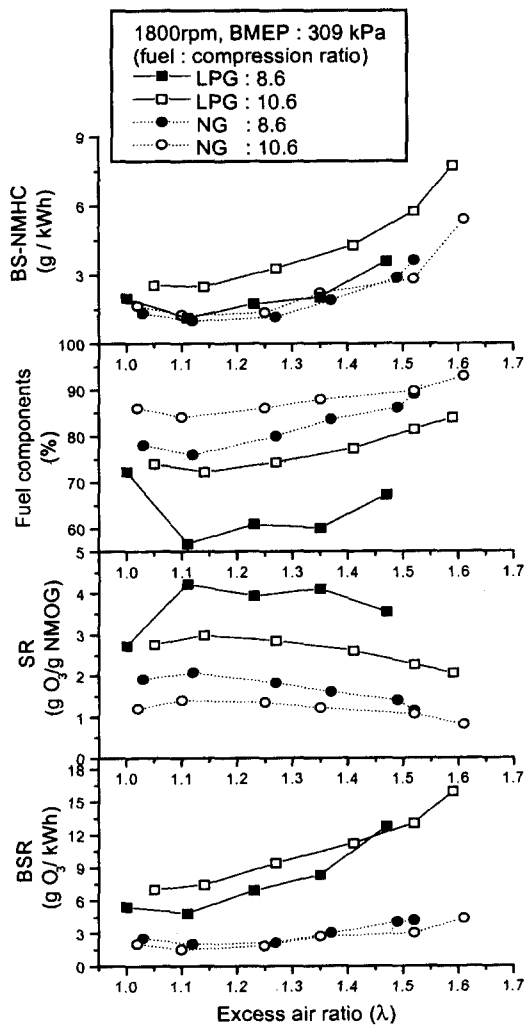


Fig. 3 NMHC, fuel components, SR and BSR with mixture strengths under lean burn conditions

는 2배 이상의 증가를 보여준다. 이는 압축비 증가로 높아진 연소압력으로 인해서 간극체적으로 들어가는 HC의 증가와 낮은 배출가스 온도로 배기부에서 일어나는 HC의 2차 산화반응이 감소되기 때문이다.¹¹⁾

이러한 NMHC의 증가이유는 Fig. 4의 배출가스 온도와 연소 최고압력선도에서 확인해 볼 수 있다. 배출가스 온도는 공연비가 희박하여 연소 온도 자체가 낮아진 경우와 압축비가 높아서 효율이 증가한 경우, 배출되는 온도가 감소하였다.

연소압력에서도 압축비의 증가에 따라서 최대 압력이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 천연가스의 경우, 증가한 HC의 대부분이 메탄성분으로(Fig. 2) NMHC의 증가는 상대적으로 LPG에 비해서 매우 적게 나타났다. HC성분 중의 연료성분이라 함은 연료성분에서 발견되는 알칸계열로 정의하며 Fig. 3의 연료성분선도에서 LPG보다 천연가스의 경우가 연료성분이 차지하는 비율이 높았다. 이는 비메탄 알칸연료성분이 배기부에서 진행되는 2차 산화작용에서 많은 부분이 산화되어 비연료성분으로 변하기 때문이다.¹¹⁾ 그리고 두 연료 모두 HC의 최소치가 나타나는 $\lambda=1.15$ 부근에서 연료성분도 가장 작게 나타나며, 이 이후는 연소의 불안정으로 차츰 증가한다. 압축비의 증가로 인한 연료성분의 증

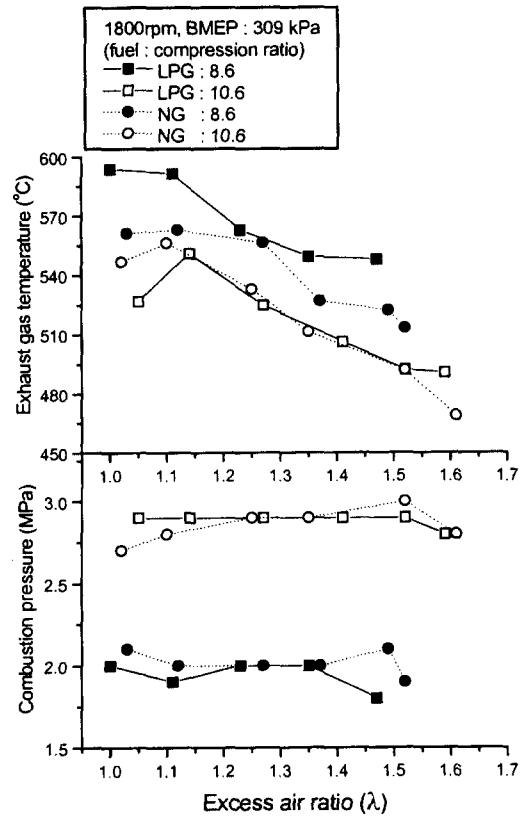


Fig. 4 Combustion maximum pressure and exhaust temperature as a function of mixture strengths

가는 앞에서의 NMHC의 증가와 같은 이유로 설명될 수 있을 것이다.

SR은 천연가스의 경우가 매우 낮은 값을 보인다. 특히, 압축비의 증가는 두 연료 모두 MIR값이 작은 연료성분이 많아지기 때문에 SR값도 더 낮아지게 된다. SR값은 $\lambda=1.25$ 까지는 연소의 활성화로 MIR이 높은 연소생성물인 알켄계열이 증가하기 때문에 같이 증가하지만 희박영역으로 갈수록 MIR값이 작은 연료성분이 증가하게 되고 따라서 SR이 낮아지게 된다.

SR과 BS-NMHC를 바탕으로 BSR을 구해보면 NMHC과는 달리 천연가스와 LPG의 값이 뚜렷하게 구별되며 큰 차이를 보이게 되는데 이는 앞서 설명한대로 LPG연료가 2차 산화반응에서 급

격한 반응을 보이며 비연료성분으로 바뀌게 되고 이 성분들의 MIR 값들이 매우 크기 때문이다. 본 연구에서는 BSR에 가장 큰 영향을 미치는 비연료 성분 중 대표적인 성분인 에틸렌, 아세틸렌, 프로필렌을 조사하여 그 결과를 Fig. 5에, 연료 성분 중 에탄, 프로판, 부탄류에 대해서 Fig. 6에 나타내었다. 이 밖의 큰 MIR을 갖는 C4계열의 알켄 성분들은 그 양이 매우 적어서 무시하였다. Fig. 5에서 에틸렌과 아세틸렌은 두 연료와 압축비 변화에 대해서 영향을 받지 않았지만 프로필렌의 경우는 BSR과 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 이 성분은 프로판으로부터 발생하는 성분으로,⁹⁾ 프로판이 주성분인 LPG쪽에서 많이 나타나고 있다.

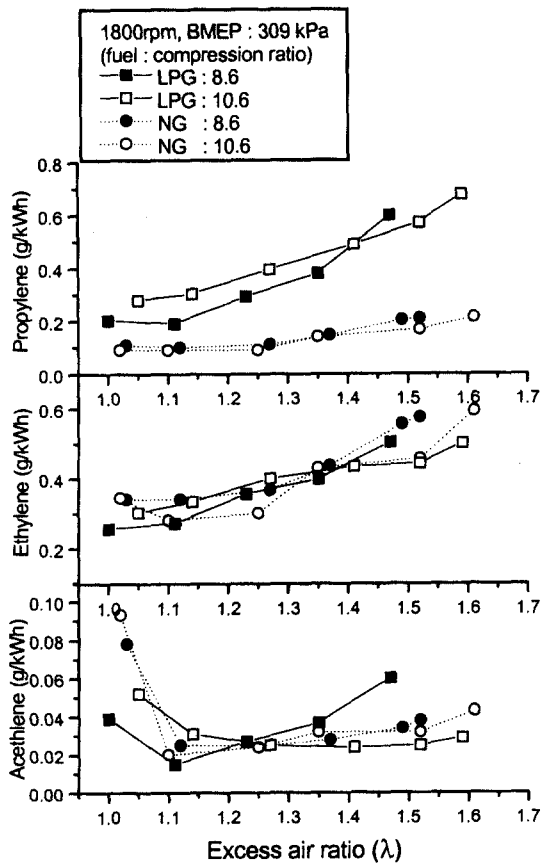


Fig. 5 Propylene, ethylene and acetylene emissions with mixture strengths

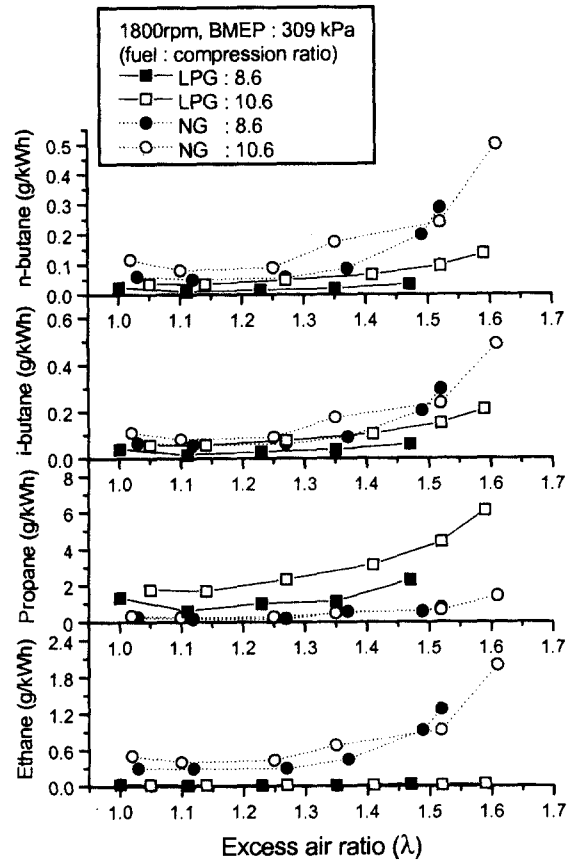


Fig. 6 Ethane, propane, i-butane and n-butane emissions with mixture strengths

그리고 Fig. 6에서는 에탄과 부탄류의 경우, 천연가스에서 많이 발생하거나(에탄), 비슷한 수치를 보여주며 그 발생량이 크지 않은 것을(부탄류) 볼 수 있다. 하지만 프로판의 경우는 MIR값은 0.568로 다른 알케네 계열의 MIR값 보다 매우 작지만 LPG에서의 발생량이 매우 크기 때문에 BSR과 유사한 특성을 보이고 있다. 따라서 천연가스와 LPG연료의 BSR의 차이의 주요 원인은 프로판과 프로필렌의 발생량 때문인 것으로 판단된다. 한편, 천연가스의 경우는 압축비의 증가로 인한 연료성분이 증가하고 앞서 설명한 프로판과 프로필렌 성분의 발생량이 작으면서 SR이 크게 낮아지고 이 때문에 BSR이 base 상태와 거의 차이가 발생하지 않는다.

Fig. 7은 단위 출력당 NOx, CO, CO₂에 대해서,

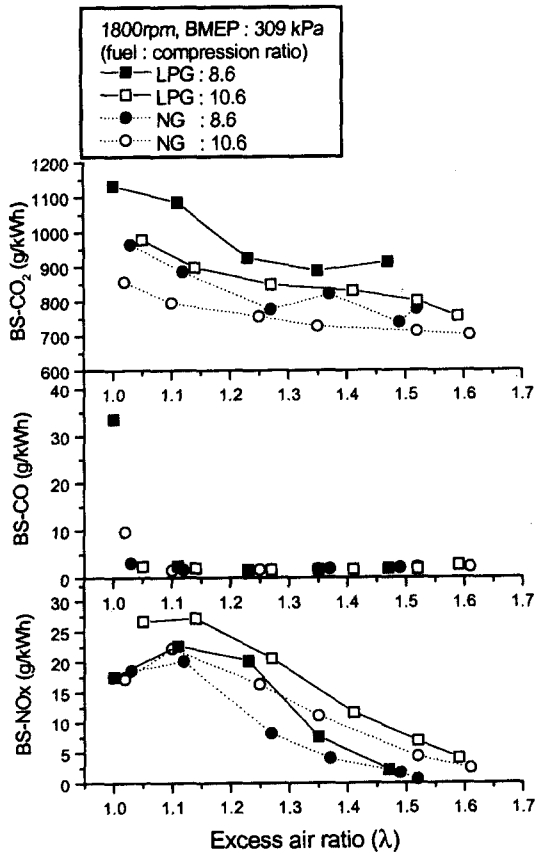


Fig. 7 NO_x, CO, CO₂ emissions with mixture strengths

Fig. 8은 연료전환효율과 COV-imep에 대해서 나타내고 있다. Fig. 7에서 CO₂의 경우, 연료 자체의 C값이 작은 천연가스의 경우 CO₂의 발생량에서 LPG보다 약 10% 정도 적었다. 두 연료 모두 희박연소와 압축비 증가에 의한 효율의 증가로 CO₂가 크게 줄어들었다. CO의 경우는 이론공연비 영역을 벗어나면서 급격히 감소하게 되어 큰 변화를 보이지 않았다. NO_x의 경우, 충분한 산소의 존재와 높은 연소온도 등으로 $\lambda=1.13$ 부근에서 NO_x가 최대치를 보이고, 그 이후의 희박영역에서의 연소온도의 감소로 크게 감소하였다. 또한 압축비 증가로 인한 연소온도의 증가는 같은 공연비 조건에서 더 많은 NO_x를 발생시켰다.

Fig. 8의 연료전환효율의 경우, LPG가 높은 값을 보이며 두 연료 모두 희박연소와 압축비 증가로 인한 효율의 증가가 나타나고 있다. 특히, 압

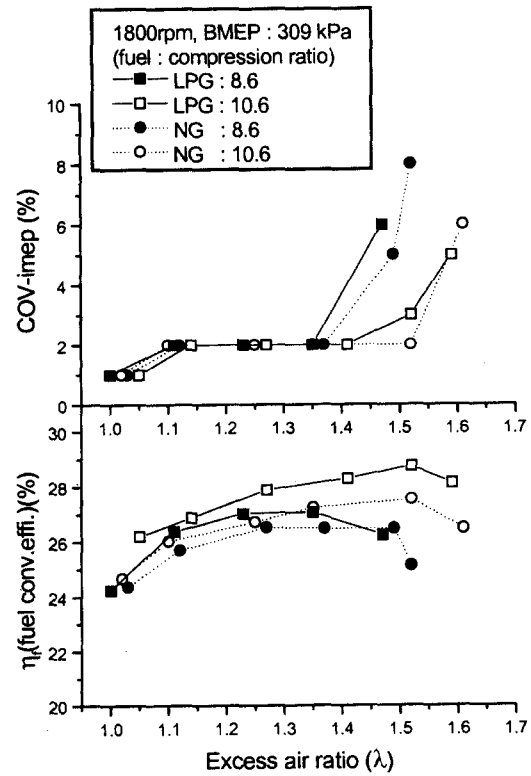


Fig. 8 Fuel conversion efficiency and COV-imep with mixture strengths

축비 증가는 $\lambda=1.35$ 이후의 희박영역에서 큰 효율증가 효과를 보이며 운전한계를 연장하였다. 이는 COV-imep에서도 확인할 수 있는데, $\lambda=1.35$ 이후 압축비를 높인 경우가 매우 안정된 연소를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이는 압축비 증가로 인한 연소압력 및 온도의 증가가 연소를 활성화하기 때문으로 보인다.

4. 결론

천연가스와 LPG의 가스연료를 사용하여 HC 성분과 연소성능을 여러 가지 공연비와 2가지 압축비에 대해서 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) NMHC는 LPG가 천연가스에 비해서 많이 발생하였는데, 이는 천연가스는 HC의 60% 이상, LPG는 HC의 2% 이하가 메탄이기 때문이다.
- 2) 압축비의 증가는 NMHC의 발생량을 증가시키지만, 천연가스의 경우는 그 주성분이 메탄이기 때문에 거의 영향이 없었다.
- 3) LPG연료의 HC 배출물 중 연료성분은 천연가스에 비해서 적었으며 이는 비메탄계열의 연료성분의 2차 산화작용이 쉽게 일어나기 때문이다.
- 4) 압축비의 증가로 SR이 감소하는데, 이는 HC 배출물 중에 연료성분이 증가하기 때문이다.
- 5) $\lambda=1.25$ 까지는 연소생성물인 알켄계열의 증가로 SR이 증가하지만 더 희박영역으로 가면 연료성분의 증가로 인해서 SR이 감소하였다.
- 6) 단위출력당 오존 발생량인 BSR은 LPG에 비해서 천연가스가 매우 적었으며 이는 천연가스가 MIR이 큰 프로필렌과 연료성분 중 프로판의 발생량이 LPG보다 적기 때문이었다.
- 7) 압축비의 증가와 희박연소는 효율의 증가와 NOx, CO₂의 감소에 매우 효과가 있었다. 특히, 천연가스는 C값이 적기 때문에 LPG에 비해서 CO₂의 발생량이 적었다.
- 8) 압축비의 증가는 연소압력의 증가, 연소 온도, 난류강도 등을 증가시킴으로써 안정된 연소를 이루며 이는 희박연소 한계를 연장하였다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 국가 지정연구실(NRL)의 지원으로 수행되어 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) E. W. Kaiser, W. O. Siegl, R. W. Anderson, "Fuel Structure and Nature of Engine-Out Emissions," SAE 941960, 1994.
- 2) E. W. Kaiser, W. O. Siegl, F. H. Trinker, D. F. Cotton, W. K. Cheng, K. Drobot, "Effect of Engine Operating Parameters on Hydrocarbon Oxidation in the Exhaust Port and Runner of a SI Engine," SAE 950159, 1995.
- 3) T. E. Jensen, W. O. Siegl, J. F. O. Richert, F. Lipari, J. F. Loo, A. Probst, J. E. Sigsby, "Advanced Emission Speciation Methodologies for the Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program-I. Hydrocarbons and Others," SAE 920320, 1992.
- 4) W. O. Siegl, J. F. O. Richert, T. E. Jensen, D. Schuetzle, S. J. Swarin, J. F. Loo, A. Probst, D. Nagy, A. M. Schlenker, "Improved Emissions Speciation Methodology for Phase II of the Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program-Hydrocarbons and Oxygenates," SAE 930142, 1993.
- 5) A. G. Russell, D. Stoierre, J. B. Milford, "Ozone Control and Methanol Fuel Use," Science, January, 1990.
- 6) C. S. Weaver, T. C. Austine, G. S. Rubenstein, "Ozone Benefits of Alternative Fuels; a Reevaluation Based on Actual Emissions Data and Updated Reactivity Factors," Sierra Research, 1990.
- 7) T. Hirita, K. Kojima, K. Yakushiji, T. Inoue, "Effects of Exhaust Emission Control Devices and Fuel Composition on Speciated Emissions of SI Engine," SAE 922180, 1992.
- 8) E. W. Kaiser, W. G. Rothschild, G. A. Lavoie, "The Effect of Fuel and Operating Variables on

- Hydrocarbon Species Distributions in the Exhaust from a Multi-Cylinder Engine”, *Combustion Science and Technology*, Vol.32, pp.245-265, 1983.
- 9) J. H. Poulsen, J. S. Wallace, “Operating Parameter Effects on the Speciated Hydrocarbon Emissions from a Natural Gas Fueled Engine,” SAE 942007, 1994.
- 10) K. A. Whitney, B. K. Bailey, “Determination of Combustion Products from Alternative Fuels-Part I : LPG and CNG Combustion Products,” SAE 941903, 1994.
- 11) S. G. Russ, E. W. Kaiser, W. O. Siegl, D. H. Podsiadlik, K. M. Barrett, “Compression Ratio and Coolant Temperature Effects on HC Emissions from a SI Engine,” SAE 950163, 1995.