

가스연료엔진에서 설계변수에 따른 HC 배출 특성

김창업* · 배충식*

HC Emissions from a Gaseous Fueled Engine with Various Design Parameters

Changup Kim, Choongsik Bae

Key Words: Maximum Incremental Reactivity(단위 질량당 오존 발생량), Specific Reactivity(단위 탄화수소당 오존 생성량), Brake Specific Reactivity(단위 출력당 오존 생성량)

Abstract

For two engine design parameters; compression ratio and intake swirl ratio, measurement of concentrations of hydrocarbon species has been made as a function of various air-fuel ratio in order to investigate the ozone formation of HC emissions from LPG fuel.

Higher compression ratio gave lower SR values due to larger alkan species and higher BSR values because of larger NMHC generation. Swirl ratio did not affect HC emissions and ozone formation. For $\lambda=1.1\sim 1.2$, higher SR values resulted from the species of alken which has higher MIRs were highly produced. Leaner mixture showed lower SR values due to the increase of the alkan which has a lower MIR.

1. 서 론

자동차의 배출가스 중 HC 배출물의 유해성은 자체의 독성뿐 만 아니라 광화학 스모그 생성에 많은 영향을 주기 때문인 것으로 알려져 있다. 특히, 배출된 HC 성분의 광화학 반응에 참여하는 기여도가 모두 다르다는 것이 미국 캘리포니아주 대기 보전국 CARB(california air

resource board)에 의해 밝혀짐에 따라 이에 대한 많은 연구가 진행중이다. 즉, CARB에 의해 발표된, 여러 HC 및 합산소 화합물 성분 각각이 광화학 반응에 참여하여 오존을 생성시키는 양을 표시한 MIR(maximum incremental reactivity)값과 이 값을 이용한 단위 HC당 발생하는 오존량인 SR(specific reactivity) 및 단위 출력당 발생하는 오존의 양을 표시한 BSR(brake SR)에 대한 관심이 높아지며 자동차 HC 배기가스연구에 새로운 방향을 제시하고 있다^(1,2). 이에 따라 미국

* 한국과학기술원 기계공학과

AQIRP (Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program)는 1989년 이후 HC 성분을 분석할 수 있는 방법을 개발하여 가솔린의 HC 성분에 대하여 연구하였다^(3,4). Kaiser 등은 단기통 엔진을 이용하여 각종 단일 연료들에 대해서 THC과 HC 성분을 분석하였다. 그 결과 사용 연료에 따라서 THC과 HC 성분의 값들이 변화하며, 희박영역에서는 연소 생성물의 증가로 SR이 증가한다고 발표하였다^(1,2).

본 연구에서는 우리 나라에서 이용되고 있는 대표적인 가스연료인 LPG에 대해서 배기 성분 중 HC의 각 성분별 농도를 설계변수조건을 변화시켜가며 측정하여, 오존 생성에 어떠한 영향을 미치는 가를 알아보고자 한다. 엔진 설계변수로는 압축비와 흡입선회각도를 택하여 바꾸었으며, 공연비 변화에 대해서 2.0L 4기통 엔진을 이용하여, 일정 엔진 회전수(1800 rpm)와 로드조건(bmep 309kPa)에서 실험이 이루어 졌다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 상용 LPG 엔진, 동력계, 공기, 연료유량계, 배기가스 분석 시스템과 가스 크로마토그래피(GC)로 구성되어 있으며 전체적인 개략도는 Fig.1에 나타내었다. 엔진의 자세한 재원은 Table 1에 나타내었다. 공연비를 측정하기 위해서 층류 유량계와 열식 질량 유량계를 사용하였다. 배기가스 분석은, 엔진의 배기라인에서 샘플링하여 드라이한 상태의 가스를 측정하였다. 배기 HC의 각 성분은 GC의 HP-PLOT column을 이용해서 분석하였다. 분석 성분은 메탄, 에탄, 에틸렌, 아세틸렌, 프로판, 프로필렌, 부탄류, 펜탄류 등으로 자세한 사항은 Table 2에

나타내었다. Table 3에는 본 연구에서 사용된 LPG 연료의 물성치를 나타내었다.

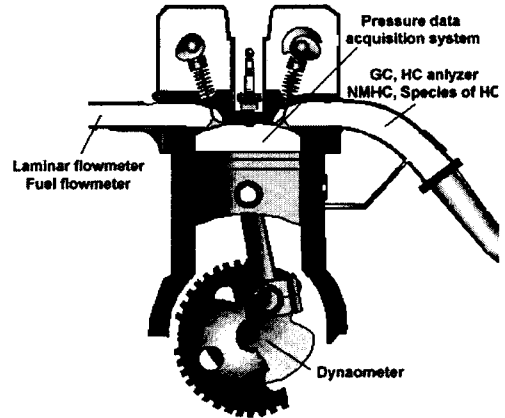


Fig.1 Schematic of the experimental setup.

Table 1. Characteristics of the test engine

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

2.2 실험방법

본 연구는 엔진 회전수 1800 rpm에서 압축비를 베이스 상태의 8.6과 엔진헤드의 밀면을 절삭하여 10.6으로 올려서 두 가지로 실험을 하였다. HC의 경우는 단위 출력당 발생량인 BS-NMHC (brake specific non-methane HC)과 HC 성분 분석을 통해서 SR (식1)을 구하였다. 이를 엔진의 성능변수로 사용하기 위해서 출력당 오존 발생량으로 나타낸 BSR (brake specific reactivity)를 식2와 같이 정의해 사용하였다⁽¹⁾.

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

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

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 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

그리고, 설계변수의 하나인 흡입선회강도를 변화시키기 위해서 선회날개를 제작하여 엔진의 흡기밸브의 밸브시트 부에 장착하였다. 선회날개에 대한 선회강도는 원주방향속도/축방향속도로 정의하였으며 식(3)으로 나타내었다. 설치될 선회날개는 날개수 10개, 각도 45도 날개

길이 1.0cm이며 paddle wheel를 이용한 정상유동실험을 거쳐서 선회날개의 장착 전후의 선회강도의 변화 및 흡입유량의 변화를 Fig.2에 나타내었다. 선회날개 장착후에 설치전과 비교하여 최대 선회비가 2.6배 증가하였다.

$$Swirl Ratio = \frac{V_{\theta}}{V_z} = \frac{\pi d N}{Q_a / A} \quad (3)$$

where d : paddle wheel 직경
 N : paddle wheel 회전수
 Q_a: 축방향 유량
 A : 축방향 단면적

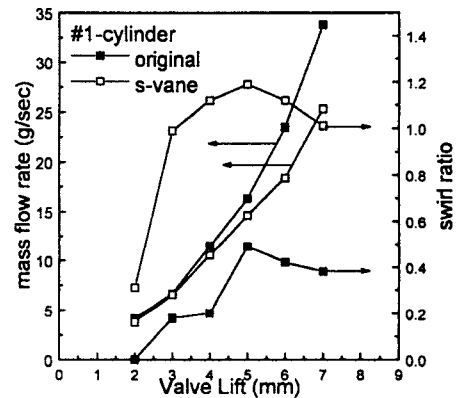


Figure 2. Comparison of swirl ratio and mass flow rate w and w/o swirl vane

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 NMHC, 연소압력 및 배기 가스온도를 압축비 변경 전후와 선회날개 장착전후에 대해서 측정하여 공연비 변화에 대해서 나타낸 것이다. 압축비의 증가는 공연비 전 영역에 걸쳐서 NMHC의 증가를 보여주는데 이는 압축비 증가로 높아진 연소압력으로 인해서 간극체적으로 들어가는 HC의 증가와 낮은 배기가스 온도로 배기부에서 일어나는 HC의 2차 산화반응이 덜 일어나기 때문인 것으로 알려져 있다⁽⁵⁾. 선회날개의 장착으로 강화된 흡입선회강도로 인해서 급속연소가 일

어나 높은 연소압력이 나타났다. 이로 인한 배기가스온도의 감소현상도 희박영역에서 보이고 있다. 이러한 높은 연소압력과 낮은 배기가스온도는 HC 발생을 증가시키는 원인이 되지만 NMHC의 값에서는 선회날개 장착전후에 거의 차이가 발생하지 않았다. 이는 HC 발생에 영향을 미치는 변화들이 일어나지만 NMHC 발생량에 차이를 나타내기에는 아직 역부족인 것으로 판단된다.

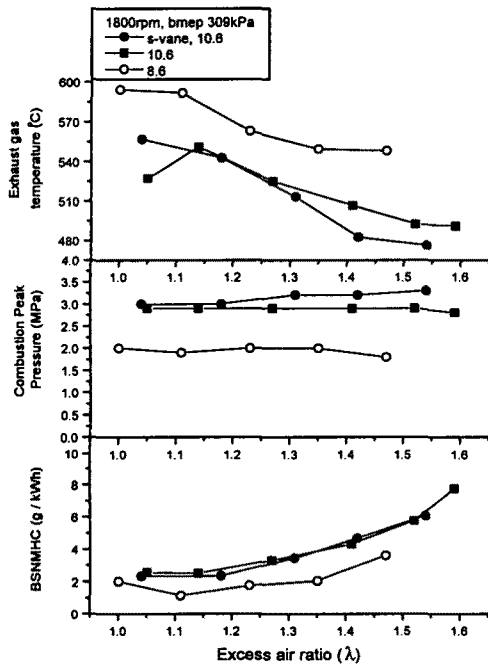


Figure 3. BSNMHC, combustion peak pressure and exhaust temperature as a function of mixture strengths

Figure 4는 이러한 NMHC를 중심으로 이를 GC로 각 성분을 분석하여 알칸계열의 HC의 발생량을 합한 연료성분과 식 (1)과 (2)를 이용해서 구한 SR 및 BSR을 공연비 변화에 따라서 보여준다. 앞에서 본 바와 같이 높은 압축비는 HC의 증가를 가져오며 이는 HC 중의 알칸성분을 증가시키게 된다. Table 2에서와 같이 알칸계열의 오존생성 능력은 다른 성분(알

켄이나 알킨계열)에 비해서 매우 낮기 때문에 이는 결과적으로 SR을 감소시킨다. 따라서 압축비의 증가는 전 공연비 영역에서 SR을 감소시키는 결과를 보여 주었다. 그리고 SR은 $\lambda=1.1\sim 1.2$ 부근의 희박영역에서 연소의 활성화로 MIR이 높은 알칸계열이 많이 생성되기 때문에 증가하지만^(1,2) 혼합기가 더 희박해지면 연소의 활성화도가 떨어져 알칸성분이 증가하게 되어 SR이 다시 낮은 값을 나타낸다. SR과 BS-NMHC를 바탕으로 BSR을 구해 보면 높은 압축비 경우가 SR값이 낮지만 높은 NMHC값으로 인해서 큰 BSR값을 보여준다. 한편, 전체적으로 선회날개에 의한 변화는 거의 나타나지 않았다.

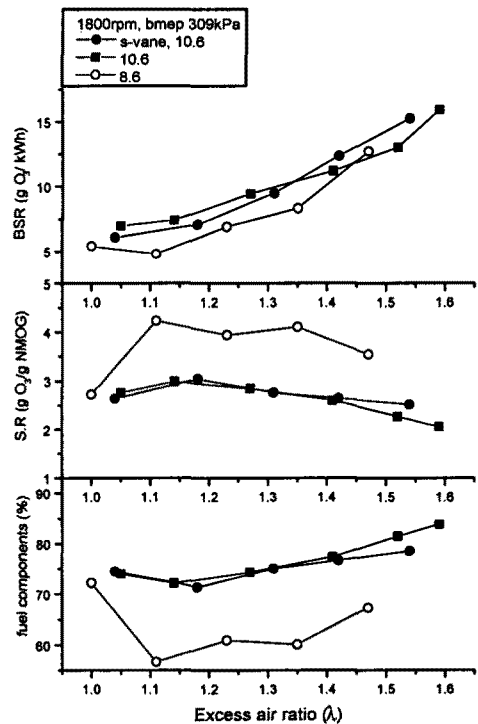


Figure 4. Fuel components, SR and BSR with mixture strengths

Figure 5는 각 경우에 대해서 연료전환 효율과 사이클 변동을 조사한 것을 나타낸다. 압축비의 증가는 효율의 증가를 가

저오며 특히, 희박영역에서의 효율 증가는 뚜렷하다. 이는 압축비 증가로 인한 연소의 활성화와 난류강도의 증가 등으로 급속연소가 일어나기 때문이며 이 같은 효과가 희박영역에서 더욱 잘 나타났다. 또 선회날개의 장착은 이 같은 압축비의 증가로 인한 효율 증가를 한층 안정화시키며 약간의 효율 증가를 가져온다. 운전 중의 연소압력을 측정하여 얻은 COV(coefficient of variation)-imep선도는 이 같은 현상을 잘 설명해 주는데, 압축비 증가에 의한 희박영역에서의 안정된 연소와 선회날개의 장착후에 더욱 안정된 연소특성이 나타나 있다.

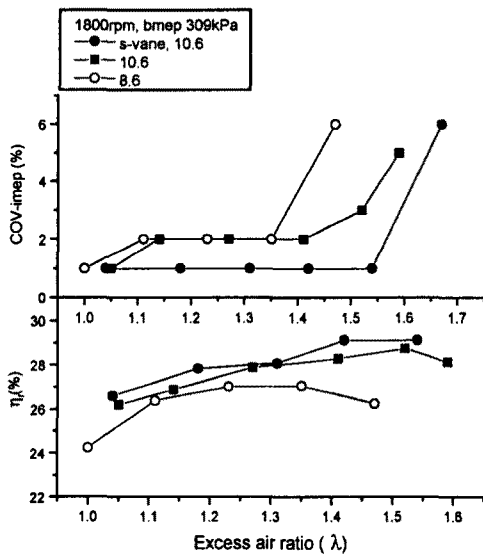


Figure 5. Fuel conversion efficiency and COV-imep with mixture strengths

GC를 이용해서 HC 각 성분을 분석해서 성분별 추이를 살펴보기 위해서 먼저, HC 배기가스의 주요 성분을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서도 알 수 있듯이 프로판이 주성분으로 65% 이상을 차지하며 나머지는 에틸렌, 프롤필렌이 차지한다. 이에 위의 3가지 주요 성분의 공연비 변화에 대한 결과를 Fig.7에 나타내었다.

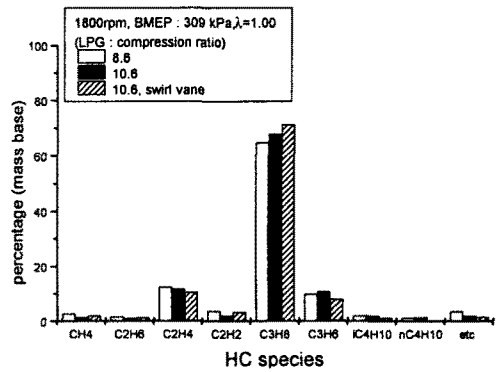


Figure 6. Species of HC from LPG under $\lambda=1.00$ condition

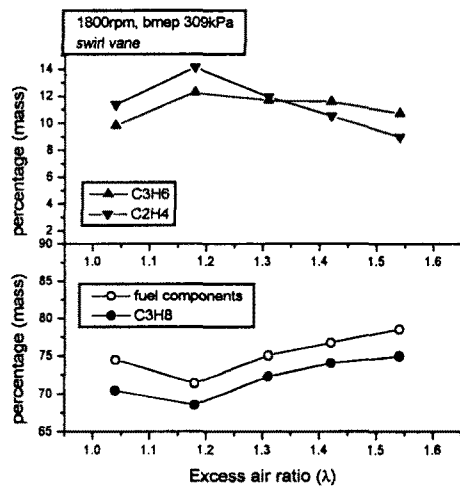


Figure 7. Fuel components, C_3H_8 , C_3H_6 and C_2H_4 emissions with mixture strengths under lean burn conditions

Figure 7에서 HC 배기가스 중의 알칸 성분의 합인 연료성분과 주성분인 프로판을 같이 나타내 보면 그 경향이 매우 흡사함을 볼 수 있다. 그리고 $\lambda=1.2$ 부근에서는 가장 왕성한 연소작용으로 연료성분과 프로판 성분이 줄어들며 이를 벗어나 희박영역으로 갈수록 배기가스 중에 알칸 성분들이 늘어남을 확인할 수 있다. 반대로 연소생성물인 알켄계열의 성분은 연소가 왕성한 $\lambda=1.2$ 부근에서 최대로 생성되며 희박영역에선 상대적으로 발생량이 줄어듦을 볼 수 있다.

4. 결론

LPG연료를 이용해서 압축비와 선회강도 등의 설계변수를 공연비에 대해서 변화시키며 HC 배출물을 중점적으로 측정해 보았다. 이 실험을 걸쳐 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. NMHC 배출물은 압축비의 증가로 공연비 전 영역에서 증가한다. 흡입선회강도의 증가는 연소압력의 증가, 배기가스 온도의 감소 등의 NMHC 증가 효과가 나타나지만 그 정도가 적어서 실질적인 HC의 변화가 측정되지 않았다.
2. SR은 $\lambda=1.1\sim 1.2$ 의 희박영역에서 연소생성물의 증가로 인해서 최대값을 나타내고 혼합기가 더 희박해지면 프로판 등의 알칸계열의 증가로 감소하게 된다.
3. 압축비의 증가로 인한 HC의 알칸계열의 증가는 SR값을 감소시키고 BSR을 증가시키지만 선회강도의 변화는 SR 및 BSR에 영향을 주지 않는다.
4. 압축비의 증가는 연료전환효율의 증가와 희박영역에서의 안정화를 이루며, 선회강도의 증가는 이를 더욱 향상시켰다.

참고 문헌

- (1) E.W.Kaiser, et al, "Fuel Structure and Nature of Engine-Out Emissions", SAE 941960, 1994.
- (2) E.W.Kaiser, et al, "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, et al, "Advanced Emission

Speciation Methodologies for the Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program-I. Hydrocarbons and others", SAE 920320, 1992.

- (4) W.O.Siegl, et al., "Improved Emissions Speciation Methodology for Phase II of the Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program-HC and Oxygenates", SAE 930142, 1993.
- (5) S.G.Russ, et al, "Compression Ratio and Coolant Temperature Effects on HC Emissions from a SI Engine", SAE 950163, 1995.