

여러 가지 운전조건에 따른 가스연료엔진 오존발생량 연구

김창업^{*1)} · 강건용¹⁾ · 배충식²⁾

한국기계연구원 LP가스엔진연구사업단¹⁾ · 한국과학기술원 기계공학과²⁾

The Characteristics of Ozone Formation from a Gaseous Fueled SI Engine with Various Operating Parameters

Changup Kim^{*1)} · Kernyong Kang¹⁾ · Choongsik Bae²⁾

¹⁾LP Gas Engine Task Force Team, Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM), Daejeon 305-343, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST), Daejeon 305-345, Korea

(Received 13 May 2003 / Accepted 5 August 2003)

Abstract : To analyze the characteristics of ozone formation, measurements of the concentrations of individual exhaust hydrocarbon species have been made under various engine operating parameters in a 2-liter 4-cylinder engine for natural gas and LPG. Tests were performed at constant engine speed, 1800 rpm for two compression ratios of 8.6 and 10.6, with various operating parameters, such as excess air ratio of 1.0~1.6, bmep of 250~800 kPa and spark timing of BTDC 10~55°. It was found that the natural gas gave the less ozone formation than LPG in various operating conditions. This was accomplished by reducing the emissions of propylene(C₃H₆), which has relatively high maximum incremental reactivity factor, and propane(C₃H₈) that originally has large portion of LPG. In addition, the natural gas show lower values in the specific reactivity and brake specific reactivity.

Higher compression ratio of the test engine showed higher non methane HC emissions. However, specific reactivity value decreased since fuel species of HC emissions increase. brake specific reactivity showed almost same values under high bmep, over 500kPa for both fuels. This means that the increase of non methane HC emissions and the decrease of specific reactivity with higher bmep affect each other simultaneously. With advanced spark timing, brake specific reactivity values of LPG were increased while those of natural gas showed almost constant values.

Key words : Maximum incremental reactivity(MIR, 단위 질량당 오존 발생량), Specific reactivity(SR, 단위 탄화수소당 오존생성량), Brake specific reactivity(BSR, 단위 출력당 오존생성량), LPG(Liquified petroleum gas 액화석유가스), NG(Natural gas 천연가스)

1. 서론

자동차의 배출가스 중 광화학 스모그에 영향을 미치는 HC 배출물에 대한 연구가 진행 중이며, 특히 HC 각 성분들이 광화학 반응에 참여하는 기여도가

모두 다르다는 것이 밝혀짐에 따라 이에 대한 집중적인 연구가 진행 중이다.

미국 캘리포니아주 대기보전국(california air resource board)의 Carter 등은 1991년 여러 가지 HC 및 합 산소 화합물 성분 각각이 광화학 반응에 참여하여 오존을 생성시키는 양을 표시한 MIR(maximum incremental reactivity)값을 발표하였다. 따라서 현재

*To whom correspondence should be addressed.
cukim@kimm.re.kr

HC 규제에 사용중인 NMHC(non methane HC)뿐만 아니라 MIR를 이용해서 구한 단위 HC 질량당 발생하는 오존량인 SR(specific reactivity)과 NMHC과 SR 값을 이용해서 구한 단위 출력당 발생하는 오존의 양을 표시한 BSR(brake SR)도 의미를 가지게 되었다.¹⁾

미국 AQIRP(Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program)는 1989년 이후 HC 성분을 분석할 수 있는 방법을 개발하여 가솔린의 여러 가지 영향에 대하여 연구하였다.^{2,3)} Kaiser 등은 단기통 엔진을 이용하여 각종 단일 연료들에 대해서 THC과 HC 성분을 분석하였다. 그 결과 사용 연료에 따라서 THC과 HC 성분의 값들이 변화하며,⁴⁾ 희박영역에서는 일반적으로 큰 MIR값을 갖는 연소생성물의 증가로 SR값이 증가한다고 발표하였다.⁵⁾ 그리고 한편으로 대체연료에 대한 HC 성분별 연구도 진행되어 Russell, Weaver, Poulsen, Russ 및 Kim 등의 많은 연구자들이 여러 가지 대체연료에 대한 연구를 진행하였다.⁶⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 우리나라에서 이용되고 있는 대표적인 대체연료인 천연가스와 LPG에 대해서 배출가스 중 HC의 각 성분별 농도를 2.0 L 4기통 엔진에서 여러 가지 운전변수에 대해서 조사하였다. 또한 엔진의 운전변수에 따른 LPG와 천연가스의 오존발생 정도를 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 상용 2.0리터급 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 증류 유량계와 열식 질량 유량계를 사용하였다. 배기가스 분석은, 엔진의 배기라인에서 샘플링하여 드라이한 상태의 가스를 측정하였다. HC의 각 성분은 GC의 HP-PLOT column을 이용해서 FID 검출기로 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.

Table 1 Characteristics of the original engine

| TYPE | in-line OHC |
|---------------------|-------------|
| Number of cylinder | 4 |
| Bore × Stroke | 85 × 88 mm |
| Displacement volume | 1997 cc |
| Compression ratio | 8.6, 10 |
| Fuel supply type | LPG Mixer |

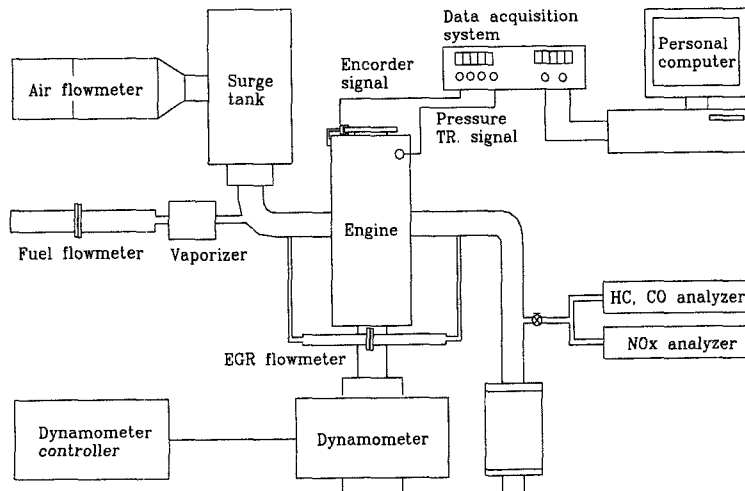


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

Table 2 MIR of hydrocarbon species^{1,4)}

| 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 | 90.437 |
| | Ethane | 7.286 |
| | Propane | 1.415 |
| | i-butane | 0.356 |
| | n-butane | 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

2.2 실험방법

본 연구는 엔진 회전수 1800 rpm에서 압축비를 베이스 상태의 8.6과 엔진헤드의 밀면을 절삭하여 10.6으로 올려서 두 가지로 실험을 하였다. SR값은 배출가스 중 단위 출력당 NMHC발생량(BSNMHC)과 MIR값을 이용해서 식 (1)과 같이 구하였으며 실험에 이용한 MIR값은 Table 2에 나타내었다. 엔진의 성능변수로 사용하기 위해서 엔진출력당 오존 발생량으로 나타낸 BSR(brake specific reactivity)값은 식 (2)와 같이 정의하여 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

3.1 공연비 변화

Fig. 2는 NMHC, 연소압력 및 배기가스온도를 압축비 변경 전후의 측정된 값을 공연비 변화에 대해서 나타내었다. 압축비의 증가는 NMHC의 증가를 보여주지만 메탄이 주성분인 천연가스는 거의 일정한 값을 나타내었다. LPG의 경우는 압축비의 증가로 2배 이상이 증가하였는데 이는 높아진 연소압력으로 인해서 간극체적으로 들어가는 HC의 증가와 낮은 배기가스 온도로 배기부에서 일어나는 HC의 2차 산화반응이 덜 일어나기 때문이다⁹⁾. LPG가 천연가스보다 HC중의 연료성분(알칸계열)이 차지하는 비율이 낮았는데 이는 비 메탄 알칸 연료성분이 배기부에서 진행되는 2차 산화작용에서 많은 부분이 산화되어 비 연료성분으로 변하기 때문이다.

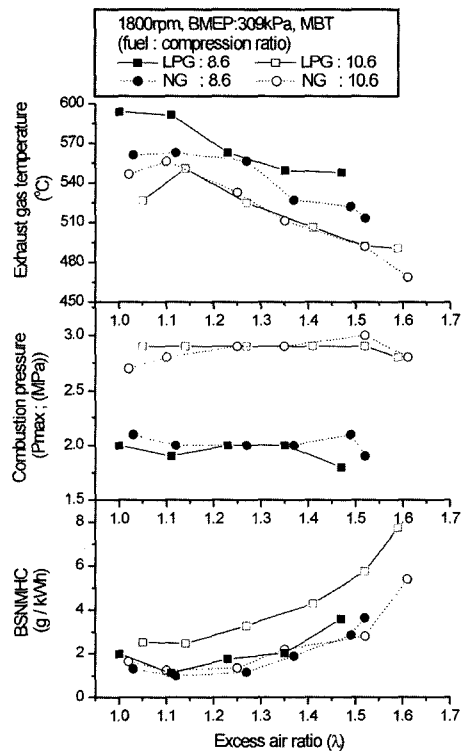


Fig. 2 NMHC, combustion pressure and exhaust temperature with mixture strengths under lean burn conditions

Fig. 3은 SR과 BSR를 나타내며, 천연가스의 경우가 매우 낮은 값을 보인다. 특히, 압축비의 증가는 두 연료 모두 HC중의 MIR값이 작은 연료성분이 많아지므로 SR도 낮아지게 된다. SR은 $\lambda=1.25$ 까지는 연소의 활성화로 MIR이 높은 연소생성물인 알켄계 열이 증가하기 때문에 같이 증가하지만 희박영역으로 갈수록 연소의 활성화가 떨어져 다시 연료성분이 증가하게 되어 SR이 낮은 값을 나타낸다. SR과

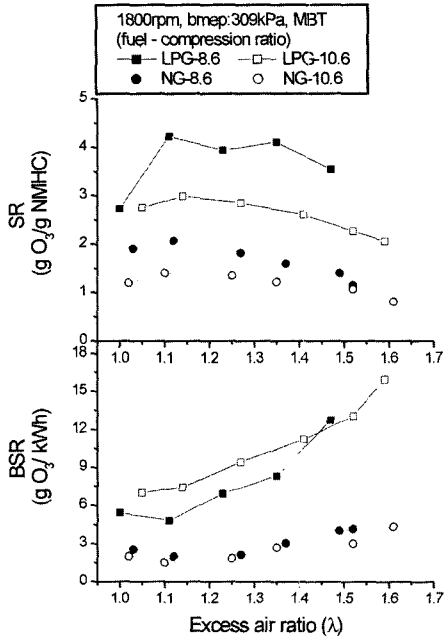


Fig. 3 SR and BSR as a function of mixture strengths

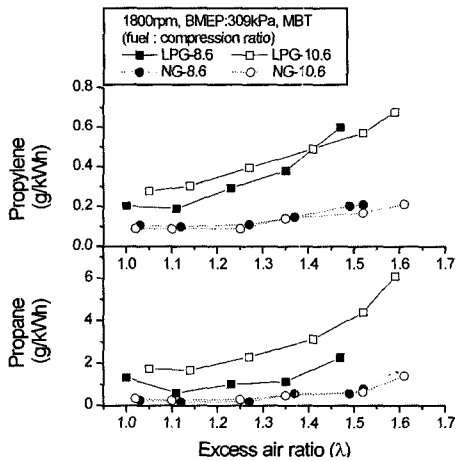


Fig. 4 Propane and propylene emissions with various mixture strengths

BSNMHC를 바탕으로 BSR을 구해 보면 천연가스와 LPG의 값이 뚜렷하게 구별되며 큰 차이를 보이게 되는데, 이는 앞서 설명한대로 LPG연료가 2차 산화반응에서 급격한 반응을 보이며 비 연료 성분으로 바뀌게 되고 이 성분들의 MIR 값들이 매우 크기 때문이다. 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.

본 연구에서는 BSR에 가장 큰 영향을 미치는 성분을 알아보기 위해서 대표적인 성분들을 조사한 결과, MIR값은 작지만 LPG연료에 많이 포함되어 있는 프로판 성분과 연소생성물로 발생한 MIR값이 큰 올레핀 계열인 프로필렌 성분이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었으며 이를 Fig. 4에 나타내었다.

3.2 엔진부하 변화

Fig. 5는 압축비 10.6의 상태에서 여러 가지 엔진 부하(bmep)에 따른 NMHC, 효율, 배기가스 온도 및 연소압력선도를 보여준다.

NMHC의 경우, bmep=500kPa의 부하에서 최소치를 보이다가 부하가 더 커지면서 약간 증가하였다. 이 이유는 Fig. 5의 다른 선도에서 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫째, 효율과 배기가스 온도의 증가다. 이는 부하증가에 따라 HC이 저감되는 원인이다. 둘째는 연소압력의 증가이다. 이는 간극체적으로 들어가는 혼합기의 양을 증가시켜 HC의 생성을 증가시키는 원인이다. 이 두 가지 요소가 상호작용함으로써 NMHC과 같은 결과를 보여준 것으로 판단된다.

Fig. 6은 연료성분과 SR, BSR 값을 부하변화에 따라서 보여준다. LPG 연료성분의 2차 산화작용이 천연가스보다 활발함으로 인해서 LPG연료의 HC 성분 중 연료성분이 천연가스보다 적게 나타나며, 천연가스의 배기성분의 주성분이 메탄임으로 SR 값을 계산해 보면 LPG가 천연가스의 2배 정도의 값을 보여준다. 오존발생량은 천연가스가 가장 작은 값을, 희박영역의 LPG 연료가 가장 큰 값을 보여

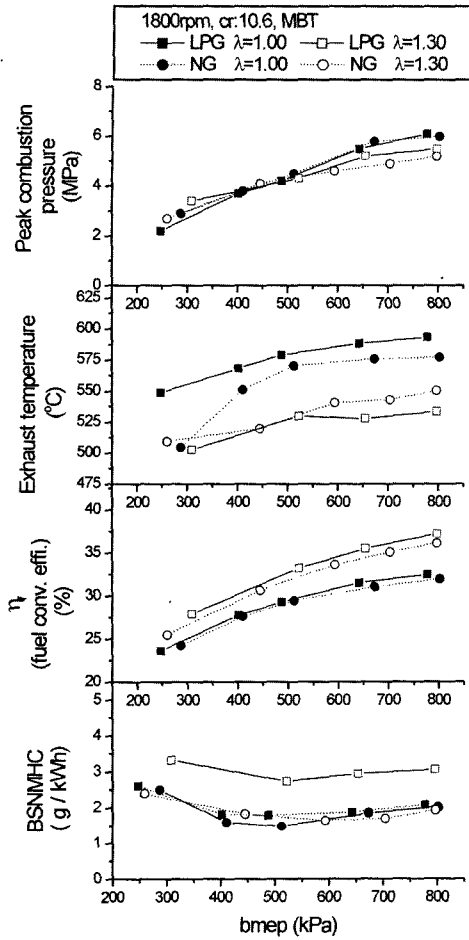


Fig. 5 NMHC, fuel conversion efficiency, exhaust gas temperature and combustion pressure with various bmeps

준다. 또 500kPa 이상의 높은 bmep 영역에선 BSR 값이 거의 일정한 값을 보여주는데, 이는 bmep가 증가에 따른 NMHC의 증가와 SR값의 감소가 나타났기 때문이다.

3.3 점화시기 변화

Fig. 7은 점화시기변화에 따른 NMHC, 배기가스 온도 및 연소압력을 보여준다. 점화시기의 진각은 NMHC의 급격한 증가를 가져오며 이는 일반적인 연소불안정 때문뿐만 아니라 배기가스의 온도저하와 연소압력의 증가 때문이다.

Fig. 8은 점화시기에 따른 연료성분과 SR 및 BSR 값을 보여준다. 연료성분은 진각됨에 따라 NMHC

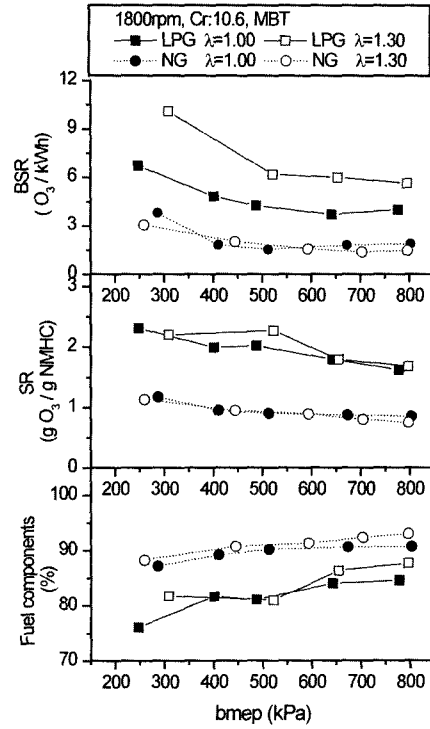


Fig. 6 Fuel components, SR and BSR with various bmeps

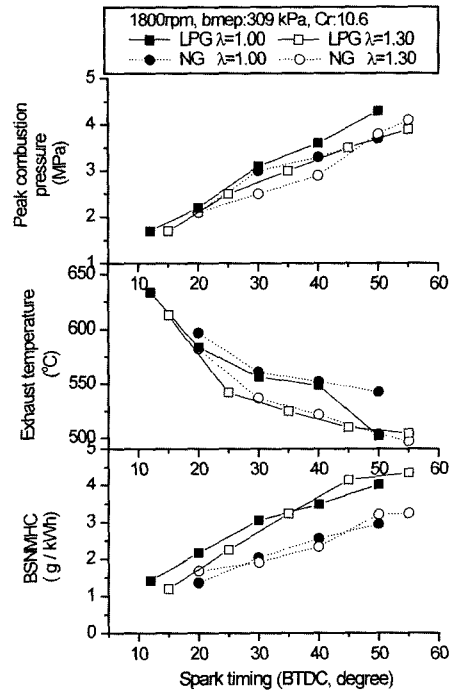


Fig. 7 NMHC, exhaust temperature and combustion pressures with various spark timings

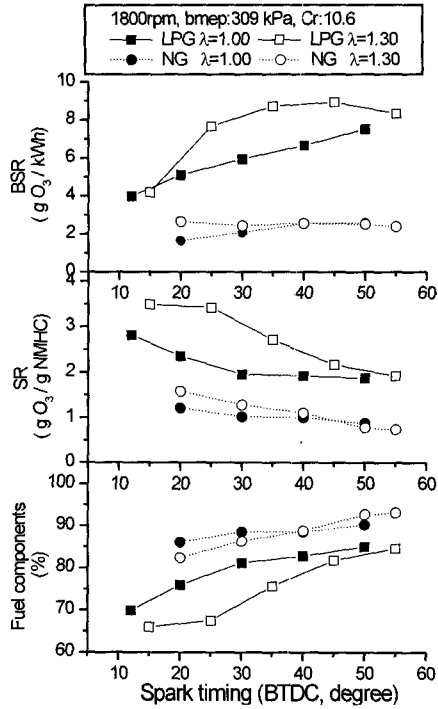


Fig. 8 Fuel components, SR and BSR with various spark timings

의 증가와 마찬가지로 같이 증가하며 따라서 SR값의 감소를 가져온다. LPG의 BSR은 천연가스에 비해서 2~4배 정도 증가하며, 천연가스는 거의 일정한 값을 보여준다. 이는 역시 천연가스의 주성분이 메탄이기 때문으로 판단되며 따라서 NMHC과 SR값이 거의 일정하게 유지되었다.

4. 결론

본 연구는 천연가스와 LPG에 대해서 배출가스 중 HC의 각 성분별 농도를 여러 가지 운전변수에 대해서 조사하여 오존생성특성을 파악하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 천연가스가 LPG연료에 비해서 같은 공연비, 압축비 조건에서 낮은 오존생성량을 보였으며 이는 메탄성분의 낮은 MIR값과 비 메탄 연료성분이 2차 산화반응에서 큰 MIR값을 갖는 올레핀으로 쉽게 변화되기 때문이며 가장 큰 NMHC 발생량 차이점은 propylene과 propane성분이었다.
- 2) 엔진의 압축비 증가는 HC발생량을 증가시키지

만 오존생성량은 감소시키는데 이는 증가하는 HC중에 MIR값이 작은 연료성분이 많이 포함되기 때문이다.

- 3) 공연비에 따른 SR값의 변화를 살펴보면 λ=1.25의 영역까지는 연소의 활성화로 인해서 MIR값이 큰 올레핀 성분이 증가하여 SR값이 커지며 더 희박한 영역에서의 운전은 연소의 불안정으로 MIR값이 작은 연료성분이 많아지기 때문에 SR값이 감소하였다.
- 4) 고부하 영역(bmep 500kPa이상)에서 오존발생량은 거의 일정한 값을 유지하며, 이는 고부하영역에서 NMHC의 증가하지만 SR값이 감소하기 때문이다.
- 5) 점화시기의 진각에 따라 LPG는 천연가스보다 2배 이상의 오존발생량을 보이지만 천연가스는 거의 일정한 값을 보여준다. 또한 적절한 점화시기(MBT나 혹은 약간 지각된 점화시기)의 사용은 오존발생량을 줄일 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 국가지정연구실(NRL)의 지원으로 수행되어 이에 감사 드립니다.

References

- 1) E. W. Kaiser, W. O. Siegl, R. W. Anderson, "Fuel Structure and Nature of Engine-Out Emissions," SAE 941960, 1994.
- 2) T. E. Jensen, W. O. Siegl, J. F. O. Richert, F. Lipari, J. F. Loo, A. Prostack, J. E. Sigsby, "Advanced Emission Speciation Methodologies for the Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program-I. Hydrocarbons and others," SAE 920320, 1992.
- 3) W. O. Siegl, J. F. O. Richert, T. E. Jensen, D. Schuetzle, S. J. Swarin, J. F. Loo, A. Prostack, D. Nagy, A. M. Schlenker, "Improved Emissions Speciation Methodology for Phase II of the Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program-HC and Oxygenates," SAE 930142, 1993.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) A. G. Russell, D. Stoierre, J. B. Milford, "Ozone Control and Methanol Fuel Use," Science, 1990.
- 7) C. S. Weaver, T. C. Austine, G. S. Rubenstein, "Ozone Benefits of Alternative Fuels; a Re-evaluation Based on Actual Emissions Data and Updated Reactivity Factors," Sierra Research, April 13, 1990.
- 8) J. H. Poulsen, J. S. Wallace, "Operating Parameter Effects on the Speciated Hydrocarbon Emissions from a Natural Gas Fueled Engine," SAE 942007, 1994.
- 9) 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.
- 10) C. U. Kim, C. S. Bae, "Emission Characteristics of a Gas Fueled Engine under Lean Burn Conditions," Transactions of KSAE, Vol.10, No.3, 2002.