

가솔린 엔진에서 합성가스 첨가량에 따른 EGR 효과에 대한 연구

윤 영 준^{*1)} · 최 영²⁾ · 강 건 용²⁾

과학기술연합대학원대학교¹⁾ · 한국기계연구원²⁾

A Study on the Effects of EGR with Syngas Addition in a Gasoline Engine

Youngjun Yun^{*1)} · Young Choi²⁾ · Kernyong Kang²⁾

¹⁾Korea University of Science & Technology, Daejeon 305-333, Korea

²⁾Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 3 May 2007 / Accepted 15 June 2007)

Abstract : The purpose of this study is to reduce harmful emission gases in the range of stable combustion without loss of a thermal efficiency. Therefore, effects of both exhaust gas recirculation(EGR) and synthetic gas addition on engine performance and emission were investigated in a gasoline engine. Synthetic gas(syngas), which is in general prepared from reforming gasoline, was utilized in order to promote stable combustion. The major components of syngas are H₂, CO and N₂ gases. The percentage of syngas addition was changed from 0 to 30% in energy fraction and EGR rate was varied up to 30%. As a result, COV_{IMEP} as a parameter of combustion stability was decreased and THC/NO_x emissions were reduced with the increase of syngas addition. And COV_{IMEP} was increased with the increase of EGR but NO_x emission was greatly reduced. In addition, under the region where the EGR rate is around 20%, thermal efficiency was improved.

Key words : Exhaust gas recirculation(배기가스재순환), Synthetic gas(합성가스), Combustion stability(연소안정성), Thermal efficiency(열효율), NO_x(질소산화물)

Nomenclature

EGR	: exhaust gas recirculation
BTDC	: before top dead center
°CA	: crank angle degree
COV _{IMEP}	: coefficient of variation of IMEP
IMEP	: indicated mean effective pressure
MBT	: maximum brake torque timing
X _e	: energy fraction of synthetic gas in total fuel
λ	: air excess ratio
Syngas	: synthetic gas
LHV	: lower heating value

1. 서론

수소는 중량대비 높은 에너지 밀도, 빠른 연소속도, 낮은 점화 에너지 등 좋은 연소 특성과 함께 탄화수소를 배출하지 않는 청정한 에너지원으로 차세대 자동차 연료로서 각광을 받고 있다. 그래서 수소를 내연기관에 적용하고자 하는 연구도 많이 수행되어 왔다. 그러나 수소는 비등점이 매우 낮아 저장과 활용에 어려움이 있으며 위와 같은 수소의 연소 특성은 오히려 연소제어를 어렵게 만들어 연소소음이나 이상연소 등의 문제를 야기할 수 있다.¹⁾

그러나 수소 연료 저장의 문제는 연료 개질기(fuel reformer)를 이용하여 기존의 수송용 연료를 실시간으로 개질하여 수소공급이 가능함에 따라 해결

*Corresponding author, E-mail: yjergon@kimm.re.kr

될 수 있다. 또한 소량의 수소를 주 연료에 첨가하여 혼합연료 형태로 사용하게 됨에 따라 연료의 연소 특성을 향상시키게 되어 수소만을 사용하는 경우에 발생할 수 있는 기술적 문제의 해결이 가능하게 되었다.²⁾

가솔린으로부터 합성연료를 제조하기 위한 중간 단계로서 개질기술을 통해 합성가스(synthetic gas) (또는 개질가스, reformed gas)가 만들어지게 되는데 합성가스는 주로 H₂, CO, N₂와 같은 성분으로 이루어져 있으므로 이것을 직접 내연기관에 공급하게 된다.

개질장치를 직접 자동차에 적용하기 위해서는 시동시간의 단축, 부하변동에 대한 빠른 응답속도, 소형화, 그리고 내구성이 갖추어져야 하는데 최근에 개발되고 있는 마이크로 반응기, 플라즈마 반응기와 같은 실시간 수소제조 기술은 향후 실제 자동차에서 실용화 가능성을 높여가고 있다.^{3,4)}

한편, 수소를 기관에 첨가하였을 때 가장 해결하기 어려운 부분이 배출가스 중의 질소산화물(NO_x)이다. NO_x는 연소실온도가 높을수록 그 생성량이 증가하는데 수소는 단열화염온도가 높아 NO_x 배출량을 증가시킬 수 있다.⁵⁾ 이 질소산화물의 저감기술의 하나로, 열용량의 증대로 인한 연소 온도 감소와 급기 중의 산소농도 감소를 통한 질소산화물의 저감을 위하여 배기가스재순환(EGR) 기술을 사용하게 되었고 그에 대한 연구가 폭넓게 진행되어 왔다.^{6,7)} 특히 SI 엔진의 경우 EGR 적용 시 쓰로틀 개도(throttle position)가 증대되어 펌핑 손실이 감소하고 적정량의 EGR은 엔진효율 또한 향상시킬 수 있다.^{8,9)} 또한 일반 희박연소 시스템과는 달리 산소가 농후한 배기를 배출하지 않으므로 삼원촉매 변환장치를 그대로 적용할 수 있는 장점이 있다.

그러나 EGR만 단독으로 가솔린 엔진에 적용했을 경우에는 연소안정성 등의 연소특성이 나빠지고 이로 인해 질소산화물 이외의 배출가스 특성이 악화될 수 있는 문제가 있다.⁹⁾ 그래서 위에서 언급한대로 합성가스를 첨가하면서 EGR을 적용하여 이 두방안의 장점을 살리고 단점을 최소화하는 방법을 모색하고자 한다.

따라서 합성가스 첨가 비율에 따라 EGR량을 변

화시키면서 각각의 조건을 비교하여 최적점을 찾기 위해 이 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에는 승용차용 2000cc급 4실린더 엔진을 사용하였으며 실험엔진의 제원은 Table 1과 같다.

엔진에 공급되는 합성가스는 원활한 실험을 도모하고자 개질장치를 통해 생산되는 가스를 직접 사용하지 않고, H₂/CO/N₂의 성분비가 26.8/22.8/50.4 (Vol. %)인 가솔린 개질시 예상되는 합성가스의 성분비와 유사한 모사가스를 사용하였다. 실험엔진과 측정장치를 포함하는 전체적인 실험장치 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 엔진에 대한 전체적인 제어는 EMS tool (Motec M800)과 이와 연계된 컴퓨터 프로그램을 통해 연료 분사량과 점화시기를 결정하였고, rpm, 쓰로틀 개도 등을 모니터링 하였다. 엔진속도는 직류모터식 동력계(DC dynamometer)를 이용하여 제어하였고 엔진과 동력계는 변속기 없이 직접 연결하였다. 쓰로틀 개도는 Throttle actuator controller를 이용하여 제어하였다.

가솔린 연료량은 전자저울을 통해 측정하였고 합성가스 유량은 MFC(Mass flow controller, Bronkhorst)를 이용하여 제어, 측정하였다.

공연비 측정은 Lambda meter(ETAS LA4)를 이용하였고 연소해석을 위한 연소압력 측정은 연소해석기(Indiset 620, AVL)와 점화플러그형 압력센서(GU 12s)를 사용하여 실시간으로 연소압력 데이터를 획득하였다. 배출가스 CO, CO₂, THC, NO_x는 배기가스분석장치(Mexa-8120D, Horiba)를 사용하여 측정하였다.

이밖에 각 부위의 온도와 압력측정을 위해서 열전대(thermocouple)와 압력계를 설치하였고 모니터링하기 위해 각각의 indicator를 구성하였다.

Table 1 Engine Specifications

Engine type	In-line 4cyl., 16V DOHC
Displacement volume	1975cc
Bore	82 mm
Stroke	93.5 mm
Compression ratio	10.1

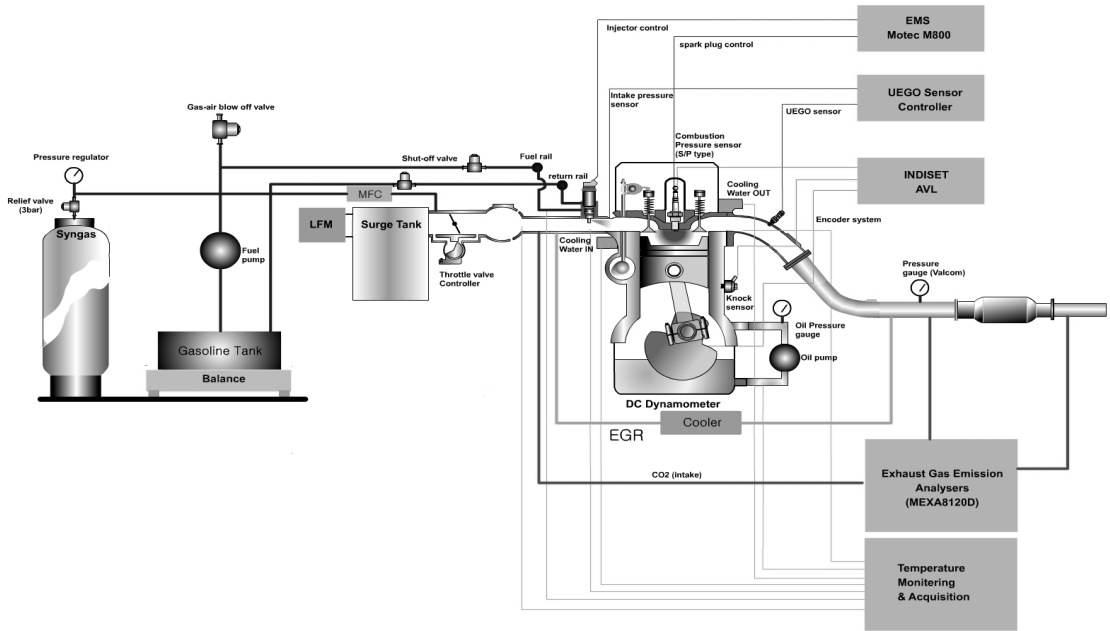


Fig. 1 Schematic apparatus for 4 cylinder engine test with syngas addition

2.2 실험방법

본 실험은 합성가스 첨가량에 따라 각 조건에서 데이터를 취득하였는데 이 합성가스 첨가량을 X_c 로 표시하였다. X_c 는 전체 연료의 발열량에 대한 합성가스의 발열량 비를 나타내며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X_c(\%) = \frac{\text{Energy of syngas}}{\text{Total energy of fuel}} \times 100$$

$$= \frac{\sum m_{sg,i} \cdot LHV_{sg,i}}{\sum m_{sg,i} \cdot LHV_{sg,i} + m_{gasoline} \cdot LHV_{gasoline}} \times 100$$

여기서 m_{sg} 와 $m_{gasoline}$ 은 각각 합성가스와 가솔린의 질량을, LHV_{sg} 와 $LHV_{gasoline}$ 은 각각 합성가스와 가솔린의 저위발열량(kJ/kg)을 나타낸다. 또한 여기서 합성가스의 에너지로는 가연성 가스인 H_2 , CO 가 사용된다.

본 실험에서는 $X_c = 0 \sim 30\%$ 범위에서 10% 간격으로 조건을 변화시켰다.

모든 실험조건에서 엔진회전수는 1500rpm으로 설정하였고 엔진부하는 쓰로틀 개도를 조절하여 지시평균유효압력(IMEP)이 5bar가 되도록 설정하였다. IMEP와 COV_{IMEP} 는 연소해석기에서 300사이클의 평균으로 구해졌으며 모든 데이터는 MBT 일 때의 점화시기에서 측정되었다.

합성가스는 가스분배에서 4bar의 압력으로 MFC로 전해진 뒤 쓰로틀 바디 전단에서 대기압으로 흡입공기와 섞인 후 흡기매니폴더로 공급되었다.

EGR량은 합성가스 첨가량과 상관없이 EGR 밸브의 개도를 일정하게 변화시키면서 조절 하였는데 EGR율은 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.⁹⁾

$$EGR \text{ rate}(\%) = \frac{\text{Recirculated gas}}{\text{Recirculated gas} + \text{intake gas}} \times 100$$

$$= \frac{[CO_2]_{intake} - [CO_2]_{ambient}}{[CO_2]_{exhaust} - [CO_2]_{ambient}} \times 100$$

여기서 $[CO_2]_{exhaust}$ 는 EGR 밸브를 열었을 때 배기 중의 CO_2 농도를, $[CO_2]_{intake}$ 는 흡기중의 CO_2 농도를 나타낸다.

EGR 밸브의 개도는 일정하게 하였지만 합성가스량에 따라 쓰로틀 개도가 달라지기 때문에 EGR rate는 약 2% 정도의 차이를 보였다. 이 실험에서 EGR rate는 그 효과를 충분히 볼 수 있는 15~30% 범위에서 이루어졌다.

3. 실험결과

합성가스와 EGR 첨가 실험에서 가장 먼저 고려되어야 할 것이 최적점화시기(MBT)이다. 실차엔진

에서 대부분 MBT에서 점화를 하기 때문에 먼저 MBT를 찾고 그 조건에서 다른 항목들을 실험하였다. Fig. 2는 합성가스 첨가량과 EGR율에 따른 MBT의 변화를 나타내고 있다. 이 그래프는 합성가스 첨가량(X_e)이 증가함에 따라 최적점화시기가 지각(retard)된다는 것을 보여주는데 이는 합성가스내의 수소의 연소속도가 가솔린의 연소속도 보다 빨라서 연소지속시간(combustion duration)이 짧기 때문이다. EGR율이 많아지면 반대로 MBT가 진각(advance)되는데 이는 혼합기가 희박해져서 연소지속시간이 길어지기 때문이다.

Fig. 3은 연소안정성을 나타내는 COV_{IMEP} 에 대한 그림이다. X_e 가 증가함에 따라 연소가 안정적으로 일어나는데 EGR율이 15% 이하에서는 그 차이가 미

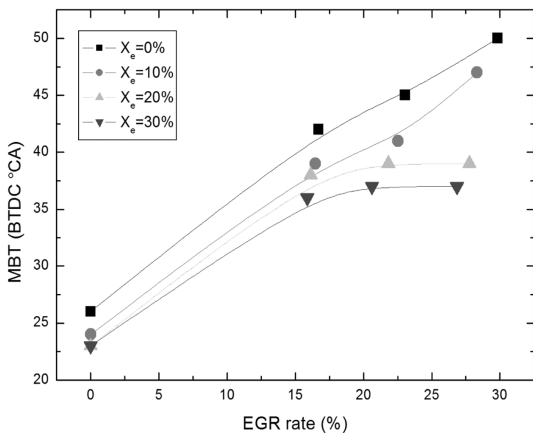


Fig. 2 MBT versus EGR rate

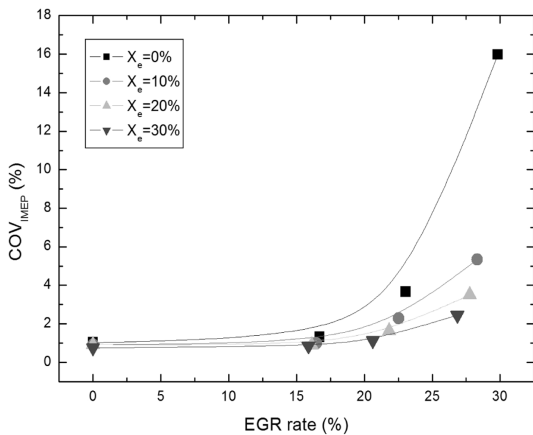


Fig. 3 COV_{IMEP} versus EGR rate

미하며 그 이상에서는 EGR율이 증가함에 따라 그 차이가 더 뚜렷해짐을 알 수 있다. EGR율이 증가할수록 연소가 불안정해지는 것은 새로운 공기가 흡입되는 대신 일정량의 배기가 들어가므로 연소실내에 비반응 가스(CO_2 , H_2O)가 많아져 열흡수를 증가시키고 활성라디칼의 생성을 저해하기 때문이다. 그러나 수소가 첨가되면 수소의 활발한 연소반응성이 이를 상쇄시켜 안정된 연소가 가능하게 해준 것으로 판단된다. EGR율이 15% 이하에서는 가솔린만 연소시켜도 COV_{IMEP} 가 2% 이하로 매우 안정적이어서 합성가스를 첨가하여도 효과가 적었지만, EGR율이 25% 이상에서는 가솔린만 연소시 매우 불안정했기 때문에 합성가스 첨가량이 10%만 되어도 연소가 크게 안정되는 효과를 볼 수 있었다.

Fig. 4는 총미연탄화수소(THC)의 배출량을 나타내는 그림으로 X_e 가 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 COV_{IMEP} 와 마찬가지로 합성가스내의 수소의 영향으로 연소가 더욱 촉진되어 THC배출량이 줄어든 것으로 판단된다. EGR율에 따른 변화는 가솔린 연료만을 사용하였을 경우 THC배출량이 증가하였다. 그러나 합성가스를 첨가하면 EGR율이 증가하여도 그 배출량은 거의 변화가 없었다. 일산화탄소(CO) 배출량은 Fig. 5에 나타내었다. X_e 가 증가하면서 그 배출량이 감소하는 듯 보이나 CO배출량은 $\lambda=1$ 조건에서 오차범위 내에서 변동하면서 뚜렷한 경향을 보이지 않는다.⁹⁾ 이는 합성가스량이 증가하면서 연소는 더 촉진되어 불완전연소에 의한 CO는 감소하나 연료자체

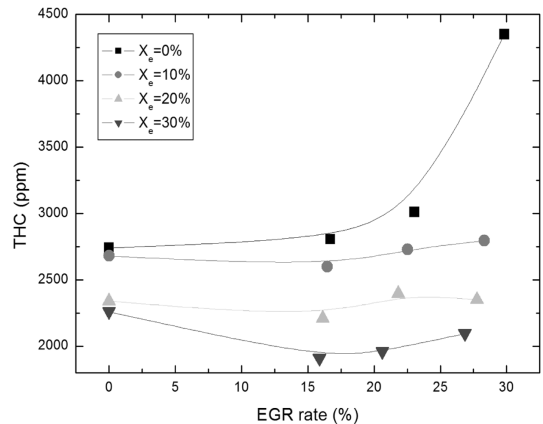


Fig. 4 THC versus EGR rate

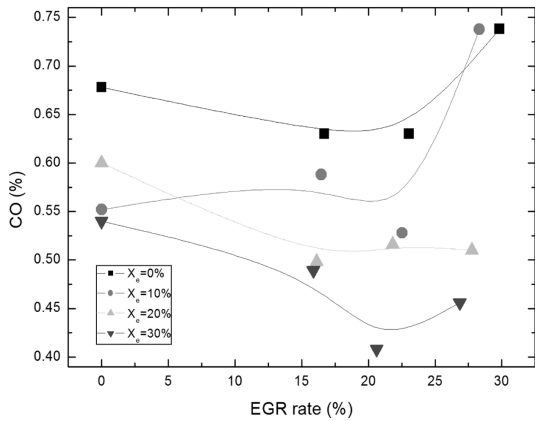


Fig. 5 CO versus EGR rate

에 CO가 포함되어 있기 때문에 그 효과가 상충되는 것으로 판단된다. EGR 량에 따른 변화도 오차범위 내에서 변하는 것으로 보여지며 다만 EGR 량이 20% 부근에서 감소하다 그 이후에 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 EGR 량이 너무 많아지면 불활성 가스의 비중이 커져서 연소의 진행을 억제하기 때문으로 판단된다.

질소산화물(NO_x)의 배출량은 Fig. 6에 나타내었다. NO_x 배출량은 조건에 따라 그 변화가 뚜렷하였는데, 먼저 EGR 량에 따른 변화를 보면 EGR 량이 증가함에 따라 배출량이 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 EGR 밸브를 통해 들어간 기연가스(burned gas)가 연소실내의 열용량(heat capacity)을 증가시켜 연소실의 온도를 낮춤으로서 thermal NO_x를 크게 감소시킨 것으로 판단된다. 또한 EGR 첨가에 비해 크지는 않지만 합성가스 첨가량을 증가시킬수록 NO_x 배출량도 줄어드는데 이는 합성가스내의 비연소가스(N₂)가 EGR과 같은 역할(열용량 증가)을 한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 합성가스 첨가량에 따른 열효율(thermal efficiency)을 나타낸 그래프이다. 여기서 열효율은 연료변환효율(fuel conversion efficiency)을 의미하며 마찰손실을 고려하지 않은 연소실내의 지시평균 유효압력(IMEP)을 용하여 구하였다. 그래프를 보면 X_s가 증가하여도 열효율은 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있으며 EGR 량이 증가하면 EGR 량이 20~23% 근처까지는 증가하다가 그 이후에는 다시 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 재순환되는 가스

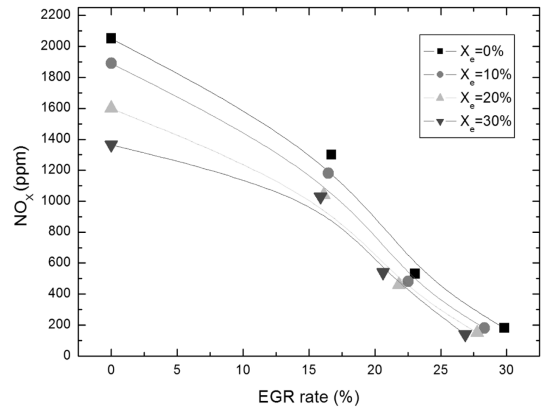


Fig. 6 NO_x versus EGR rate

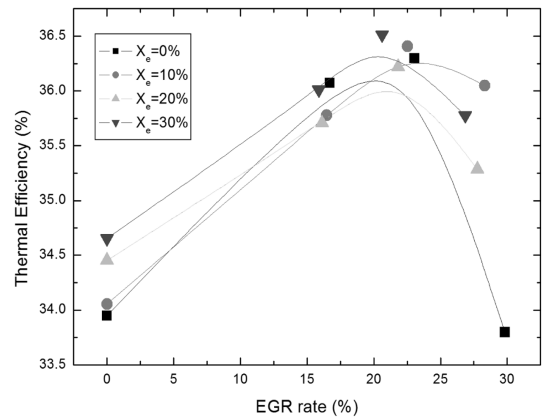


Fig. 7 Thermal Efficiency versus EGR rate

가 외기보다 고온 고압이기 때문에 압축손실과 열손실을 줄여주며 완전연소되지 못한 잔류가스가 한번 더 연소될 수 있어 전체적으로 효율이 높아진 것으로 판단된다. 그러나 과도한 양(23% 이상)이 들어갈 경우에는 연소가 불안정해져서 다량의 THC와 CO를 통한 에너지 손실에 의해 오히려 효율이 떨어질 수 있다는 것도 또한 보여주고 있다.

4. 결론

가솔린 연료를 사용하는 스파크점화엔진에서 합성가스를 첨가하는 동시에 배기가스 재순환을 적용하여 연소 및 배출가스 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) MBT는 합성가스 첨가량(X_s)이 증가하면 합성가

스의 빠른 연소속도로 인해 지각되었고 EGR 량이 증가하면 혼합기가 희박해지고 그에 따라 MBT는 진각되었다.

- 2) 연소안정성은 EGR 량이 증가함에 따라 나빠졌으나 합성가스를 첨가하면 좋아지는 것으로 나타났다. $X_e=10\%$ 이상만 되어도 COV_{IMEP} 의 증가 폭이 확연히 작아지고 $X_e=30\%$ 가 되면 EGR을 30% 이상 첨가하여도 안정된 연소가 가능한 것으로 판단된다.
- 3) 배출가스 특성에서 THC는 X_e 가 증가하면 그 배출량이 소량 감소하였으나 EGR에 대한 영향은 없었다. 그러나 NO_x 는 X_e 가 증가하면 그 배출량이 감소하였고 특히 EGR 량이 증가함에 따라 큰 폭으로 감소하여 이 둘을 조합하면 90% 이상 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- 4) 열효율은 EGR rate가 20~23% 정도일 때 가장 높았고 이보다 적거나 많을 때는 감소하는 것으로 나타났다.

References

- 1) J. T. Lee, "Current Status and Characteristics of Hydrogen Fueled Engine," Journal of KSAE, Vol.18, No.2, pp.29-52, 1996.
- 2) Y. Jamal and M. L. Wysznski, "On-board Generation of Hydrogen-rich Gaseous Fuels - A Review," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.19, No.7 pp.557-572, 1994.
- 3) J. S. MacDonald, "Evaluation of the Hydrogen-Supplemented Fuel Concept with an Experimental Multicylinder Engine," SAE 760101, 1976.
- 4) J. G. Finegold, "Hydrogen: Primary or Supplementary Fuel for Automotive Engines," SAE 760609, 1976.
- 5) S. R. Turns, An Introduction to Combustion, McGraw-Hill, International edns, Singapore, 2000.
- 6) Z. Ivanic, F. Ayala, J. Golwitz and J. B. Heywood, "Effects of Hydrogen Enhancement on Efficiency and NO_x Emissions of Lean and EGR-Diluted Mixtures in a SI Engine," SAE 2005-01-0253, 2005.
- 7) A. Cairns and H. Blaxill, "The Effects of Combined Internal and External Exhaust Gas Recirculation on Gasoline Controlled Auto-Ignition," SAE 2005-01-0133, 2005.
- 8) F. Schafer and R. van Basshuysen, Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines, Springer-Verlag, 1995.
- 9) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, International edns, Singapore, 1988.