

## 잔류가스 추정 기법을 이용한 EGR율의 예측

김 득 상<sup>\*1)</sup> · 김 성 철<sup>1)</sup> · 황 승 환<sup>1)</sup> · 조 용 석<sup>1)</sup> · 엄 인 용<sup>2)</sup>

국민대학교 자동차공학전문대학원<sup>1)</sup> · 서울산업대학교 기계공학과<sup>2)</sup>

## Estimation of Exhaust Gas Recirculation using In-Cylinder Residual Gas Fraction in an SI Engine

Duksang Kim<sup>\*1)</sup> · Sungcheol Kim<sup>1)</sup> · Seunghwan Hwang<sup>1)</sup> · Yongseok Cho<sup>1)</sup> · Inyong Ohm<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>GSAEK, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 9 January 2003 / Accepted 8 December 2003)

**Abstract** : Residual gas acts as a diluent which results in reducing the in-cylinder temperature as well as the flame speed, significantly affecting fuel economy, NOx emissions and combustion stability. Therefore it is important to determine the residual gas fraction as a function of the engine operating parameters accurately. However, the determination of the residual gas fraction is very sophisticated due to the unsteady state of induction and exhaust process. There has been little work toward the development of a generally applicable model for quantitative predictions of residual gas fraction. In this paper, a simple model for calculating the residual gas fraction in SI engines was suggested. The amount of fresh air was evaluated through AFR and fuel consumption. After this, from the intake temperature and pressure, the amount of total cylinder-charging gas was estimated. The residual gas fraction was derived by comparing the total charging and fresh air. This results coincide with measured EGR value very well.

**Key words** : Exhaust gas recirculation(EGR, 배기가스 재순환), Residual gas fraction(잔류가스율)

### Nomenclature

RGF : residual gas fraction(%)  
 MAP : manifold absolute pressure(kPa)  
 $\dot{m}_a$  : actual intake air mass flow rate(g/s)  
 $\dot{m}_{as}$  : total intake air mass flow rate(g/s)  
 bsfc : brake specific fuel consumption(g/kW · h)  
 A/F : air to fuel ratio  
 $P_b$  : brake power(kW)  
 $\rho$  : intake air density(kg/m<sup>3</sup>)  
 T : intake air temperature(K)

$V_d$  : displaced volume(m<sup>3</sup>)  
 N : engine speed(rpm)

### 1. 서론

SI엔진 내부의 잔류가스란 이전 사이클의 연소생성물로서 배기과정동안 완전히 배출되지 못하고 다음 사이클까지 남아 신기와 혼합되는 기연가스를 말한다. 이와 같은 잔류가스는 상사점일 때 실린더 내에 정체되는 가스(trapped gas)와 밸브오버랩에 의한 역유동 가스(back-flow gas)로 구분된다.<sup>1)</sup> 잔류가스는 흡·배기 과정동안 실린더 내에 일정부분 항상 존재하게 되며, 온도 및 희석효과를 통해 성능 및 배기가스에 큰 영향을 미치게 된다.<sup>2)</sup> 잔류가스는 화염

\*To whom correspondence should be addressed.  
lordduke@kookmin.ac.kr

속도를 저하시켜 공회전 및 부분부하시 연소안정성을 악화시키는 주된 원인이 되기도 하지만 화염속도의 저하로 인해 연소온도가 저하되어 NOx의 생성을 억제하는 역할을 하기도 한다.<sup>3)</sup>

자동차 엔진에서 배출되는 NOx를 줄이고 연비를 향상시키기 위하여 EGR을 적용하면 엔진의 출력이 감소하고 실린더 내의 연소안정성이 저해되는 것이 문제가 된다. 또한, EGR을 적용하면 흡기압력의 상승에 의해 펌핑손실이 감소하는 반면 THC나 CO의 배출량은 증가하게 된다.<sup>4)</sup>

최근의 배기가스규제 추세를 보면 SFTP (Supplemental Federal Test Procedure) 사이클을 비롯하여 날로 강화되는 NOx규제가 적용됨에 따라 EGR이 적극 추천되고 있으며, 이로 인해 실린더 내 잔류가스 및 EGR율의 분석이 요구되고 있다. 그러나 정확한 잔류가스의 계산이 매우 중요한 반면, 실차에서 잔류가스량의 결정은 매우 어려워 피드백 제어를 달성하기 어렵게 된다.<sup>5)</sup> 따라서 흡기압력 등의 기본 데이터를 통한 잔류가스율의 예측이 필요하며, 이를 통해 엔진 실험 및 개발과정, 해석 등의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 엔진의 작동 조건 및 성능, 배기가스 조성 등을 측정하여 이들 변수의 상관성 분석을 통해 연소실 내의 잔류가스량을 추정하는 기법을 구성하여 제시하고자 하며, 이러한 기법을 통해 전자제어 EGR의 컨트롤 로직 및 internal EGR 연구, 엔진해석 모델의 기초 자료로 쓰일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 실차량 주행시에 EGR양을 측정하는 것은 기술적으로 난이한 문제이고 현재까지 완벽한 해결책을 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 흡기매니폴드 압력과 온도를 이용, 간단한 방법을 통해 EGR양을 예측하는 기법을 제시하고자 한다.

## 2. 잔류가스율의 추정 원리

### 2.1 이론적 배경

본 연구에서 제시하고자 하는 실린더 내 잔류가스 예측 기법은, 총 흡입공기량은 실제 흡입공기량과 총 잔류가스량의 합으로 구성된다는 개념에서 출발하였다. 총 흡기량은 MAP(Manifold Absolute

Pressure)을 통해 계산되는 실린더 내 총 흡기량이며, 총 잔류가스량은 내부 EGR량( $EGR_i$ )과 외부 EGR량( $EGR_e$ )을 합한 것이다.

$$A_T = A_i + EGR_i + EGR_e \quad (1)$$

여기에서, 총흡기량  $A_T$ 는 MAP을 이용한 이상기체 상태식으로 계산될 수 있고, 흡입공기량  $A_i$ 는 공연비와 연료소모량을 통해 역산하면 1% 이내 오차 범위내에서 예측할 수 있으므로<sup>6)</sup> 내부 EGR 또는 총 잔류가스량을 구할 수 있다.

우선, 실린더로의 공기·연료 혼합기의 유동 및 엔진작동조건을 정상상태로 가정하면, 이 때의 유동은 정상적으로 실린더 내의 잔류가스가 정체되어 있는 상태에서 공기·연료 혼합기만이 정상유동 상태로 유출입되는 것으로 볼 수 있다. 이 때 흡입 및 배출되는 공기의 양은 플레넘 챔버(plenum chamber)에서의 MAP 및 온도, 밀도에 의해 일정 체적으로 유입되는 것으로 볼 수 있고, 이 값을 기준으로 이 때의 총 공기의 흡입량을 추정할 수 있게 된다. 이것으로 실제 엔진으로 유입된 공기량을 나누면 잔류가스의 비율이 결정된다. Fig. 1은 이와 같은 기법의 원리를 정리한 개략도이다.

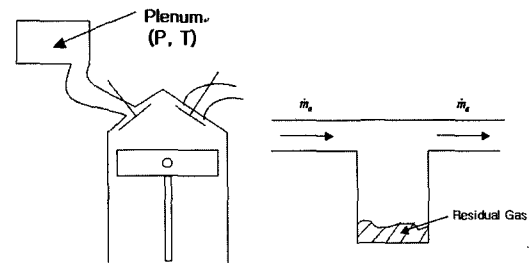


Fig. 1 Schematic diagram of intake system, cylinder and flow pattern

Fig. 2는 흡기과정동안 플레넘과 실린더내의 압력을 측정한 결과이다. 실험결과를 살펴보면 부분부하에서는 흡기시스템 전체의 압력 변동이 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다. 통상 EGR을 적용하는 범위는 부분부하이고, 이때는 스톱 밸브에 의해 유동이 제한되므로 흡기시스템 전체의 압력변동이 매우 작게 유지됨을 알 수 있다. 따라서 흡기압력과 실린더내 압력은 전체 밸브 열림기간에 걸쳐 거의

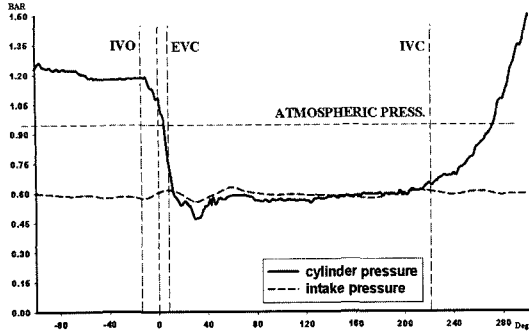


Fig. 2 Intake manifold and cylinder pressure as a function of crank angle at 1800rpm, 2.0bar BMEP

일치하고 변동도 무시할만 하므로 이를 통해 흡입 공기량을 결정하는 변수로서의 MAP는 타당성을 갖는다고 판단된다.

### 2.2 잔류가스 추정식

엔진에서 실제로 흡입되는 공기량  $\dot{m}_a$ 는 다음과 같다.

$$\dot{m}_a(g/s) = \frac{bsfc(g/kWh) \cdot A/F \cdot P_b(kW)}{3600} \quad (2)$$

MAP을 이용한 총 흡입공기의 계산을 위해 우선, 플레넘 챔버에서의 흡입공기의 밀도  $\rho$ 는 이상기체 상태 가정을 통해 다음과 같이 된다.

$$\rho(kg/m^3) = \frac{MAP(kPa)}{0.287 \times T(K)} \quad (3)$$

이 때의 총 흡입공기량  $\dot{m}_{as}$ 은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{as}(g/s) = \frac{V_d(m^3) \times \rho(kg/m^3) \times N(rpm)}{0.12} \quad (4)$$

결론적으로 총잔류가스를 RGF(Residual Gas Fraction)은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$RGF(\%) = \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{as}}\right) \times 100 \quad (5)$$

본 논문에서는 다양한 엔진 실험 결과를 통해 위의 식을 적용하여 잔류가스를 계산한 기법의 타당성을 검증하였고, 이를 이용하여 EGR 적용시 실제 실린더내로 투입되는 EGR량을 예측할 수 있는 기법에 대해 분석해 보았다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험장치

실험 데이터를 얻은 엔진은 상용의 2.0L DOHC이며, 제원은 Table 1에 나타내었다. 본 실험의 데이터는 엔진 성능 특성을 조사하기 위하여 다양한 실험 조건으로 수행한 실험들을 정규화하여 얻은 데이터 중에서 취합하여 얻은 자료를 이용하였다. EGR율의 조절은 플레넘 챔버와 배기 매니폴드 사이를 외부 배관으로 연결하고 그 사이에 유량 조절 밸브를 사용하였으며, 여기서 EGR율은 다음의 식에 의하여 결정하였다.

$$EGR(\%) = \frac{(CO_2)_{PC} - (CO_2)_{Air}}{(CO_2)_{Ex} - (CO_2)_{Air}} \times 100 \quad (6)$$

여기서,  $(CO_2)_{EX}$ 는 배기가스중의  $CO_2$ 농도,  $(CO_2)_{AIR}$ 는 0% EGR시 플레넘 챔버 내의  $CO_2$  농도이며,  $(CO_2)_{PC}$ 는 EGR시 플레넘 챔버 내의  $CO_2$  농도를 나타낸다. 엔진 시험조건 각 회전수에서 BMEP 일정 조건으로 처리하였으며 이때 연료-공기 혼합비는 이론공연비 상태로 설정하였다. 점화시기는 특별히 점화시기의 영향을 관찰하고자 하는 경우가 아닐 때에는 항상 MBT로 설정하였다. 실험 case는 2000 rpm, 2400rpm, 2800rpm, 3200rpm 각각의 회전수에 대해 3.0bar, 4.5bar, 6.0bar, 7.5bar BMEP로 설정하였다. 이 엔진으로부터 얻은 실험결과를 바탕으로 본 논문에서 제시한 잔류가스 계산 기법의 타당성을 검증하였다.

Table 1 Specification of test SI engine

Displaced volume(cc)	1975
Combustion-chamber shape	Semi-wedge type
Bore(mm)	82
Stroke(mm)	93.5
Compression ratio	10.3
Intake valve timing	BTDC8°/ABDC40°
Exhaust valve timing	BBDC50°/ATDC10°

### 3.2 EGR적용에 따른 NOx 및 MAP 선형성

Fig. 3은 각각의 엔진작동 조건에서 EGR율의 증가에 따른 NOx 배출량을 나타내고, Fig. 4는 이 때의 MAP을 나타낸다. 여기에서 동일 BMEP 값을 가지도록 하기 위해 스토폴 개도를 조절하였으며 모

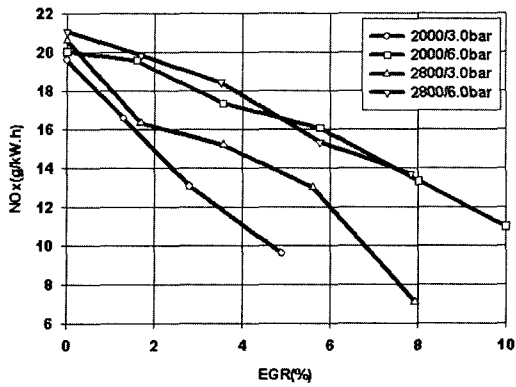


Fig. 3 Effects of EGR on NOx emission at MBT operation

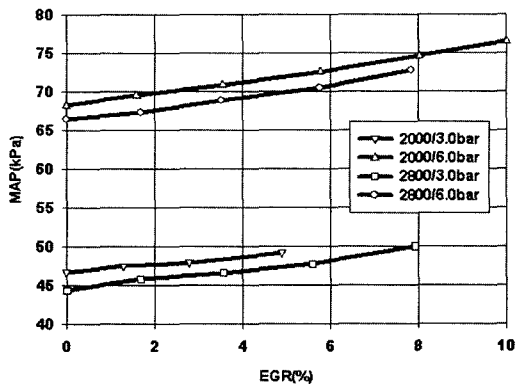


Fig. 4 Effects of EGR on manifold air pressure

든 경우에서 점화시기는 MBT를 선택하도록 조절하였다. 몇몇 실험조건, 즉 2000rpm/3.0bar BMEP와 같은 경우에는 EGR을 5% 이상 증가시킨 경우에는 연소의 불안정이 심해져서 더 이상의 데이터 확보가 무의미해지는 경우도 발생하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 EGR을 통한 연소실 내의 잔류가스를 증가는 NOx 감소에 선형적 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에서 보면, EGR율의 증가에 따라 상대적으로 고압으로 유입되는 배기가스에 의해 흡기압력이 상승함을 알 수 있다. 즉, THC 배출 및 연료소비율 증가를 고려한 상용의 엔진작동 영역에서 EGR을 증가에 따라 NOx 감소 및 MAP상승 효과가 선형적으로 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 EGR율의 예측

Fig. 4에서 보여진 바와 같이 EGR율을 증가시키

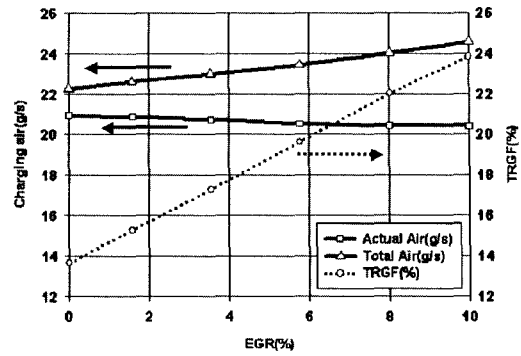


Fig. 5 Effects of external EGR on total residual gas fraction at 2000rpm/6.0bar BMEP

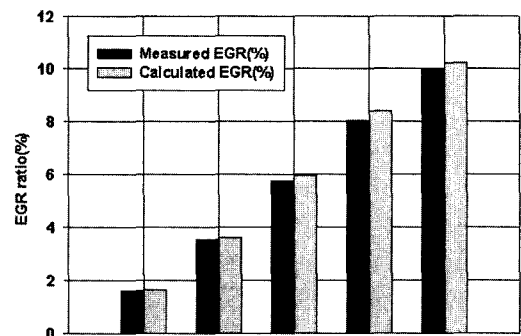


Fig. 6 Comparison of measured and calculated EGR ratio at 2000rpm/6.0bar BMEP

에 따라 MAP은 상승하게 되고 이 MAP을 기준으로 계산한 총흡기량이 증가하게 됨을 알 수 있다. EGR율을 증가시키기에 따라 흡기온도 역시 상승하는 효과를 갖게 되지만, 그 상승율은 MAP의 증가율에 비해 작은값을 갖게 되고 결론적으로 총흡기량은 증가하게 된다.

Fig. 5는 2000 rpm/6.0bar BMEP 조건에서 EGR율의 증가에 따른 실제 흡입공기량과 총흡입공기량 및 계산된 잔류가스를 나타낸다. EGR율의 증가에 따라 실제 흡입공기량은 다소 감소하게 되나, EGR율의 상승은 MAP의 증가로 나타나고 이 MAP를 기준으로 계산한 실린더내 총잔류가스를 TRGF (Total Residual Gas Fraction)이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 계산된 잔류가스와 신기 흡입량으로 EGR율을 예측한 결과와 실제 측정된 결과를 함께 도시한 것이다.

그림에 나타난 calculated EGR이란 EGR을 넣었

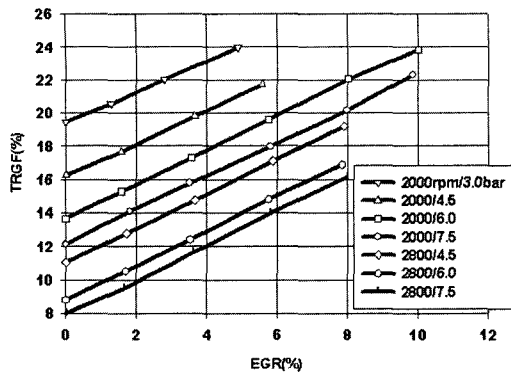


Fig. 7 Effects of EGR on calculated total residual gas fraction

을 경우의 잔류가스율에서 EGR을 넣지 않았을 경우의 잔류가스율을 뺀 값으로 잔류가스율의 변화가 크지 않다면 이를 통해 외부에서 유입된 EGR율을 구할 수 있다 또한 그림과 같이 이 값은 실험 결과와 매우 근접하게 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 EGR의 예측이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 7은 2000rpm과 2800rpm에서 EGR율의 증가에 따른 총 잔류가스율 값의 선형적인 증가를 나타낸다. Fig. 6에서 보여진 결과처럼 EGR율과 계산된 총 잔류가스율의 선형적인 비례관계를 통해 EGR율을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 다만 각 조건에 따른 TRGF의 초기값, 즉 EGR을 넣지 않았을 때의 값은 매우 심한 차이를 나타내고 있는데, 체적효율이 정확히 고려되지 않은 계산 결과이기 때문인 것으로 생각된다. 하지만 각 경우에서 EGR을 추가하였을 때에 발생하는 TRGF의 변화는 일정한 기울기를 나타내고 있으며 이것을 통해 이 계산기법을 통한 EGR의 추정은 신뢰성을 가진다고 할 수 있다.

Table 2는 각각의 엔진작동 영역에서의 계산된 총 잔류가스율과 이 때의 잔류가스율을 가지고 EGR을 적용하지 않았을 때의 잔류가스 계산값과 비교하여 외부에서 유입되는 EGR율을 예측한 결과를 나타내고 있다.

표에서 보듯이 MAP과 공연비 그리고, 연료소모율을 기준으로 계산하여도 EGR율을 잘 예측하고 있음을 알 수 있으며, 따라서 EGR율을 장비 등을 통해 측정하지 않아도 EGR율에 따른 NOx감소의 선형성과 MAP과 EGR율과의 선형적 관계로부터

Table 2 Predictions of EGR ratio

	EGR(%)	TRGF(%)	EGR(est.)	Error(%)
2000rpm/ 3.0bar BMEP	0.00	19.47		
	1.29	20.56	1.09	15.42
	2.79	22.04	2.57	7.86
	4.89	23.98	4.51	7.77
2000rpm/ 6.0bar BMEP	0.00	13.66		
	1.59	15.28	1.63	2.33
	3.55	17.28	3.62	2.11
	5.77	19.62	5.97	3.41
	8.02	22.05	8.39	4.62
2900rpm/ 3.0bar BMEP	0.00	13.59		
	1.68	15.33	1.74	3.63
	3.57	17.41	3.83	7.18
	5.60	19.31	5.72	2.16
2900rpm/ 6.0bar BMEP	0.00	8.80		
	1.69	10.51	1.71	1.20
	3.52	12.39	3.59	2.06
	5.76	14.82	6.02	4.50
	7.83	16.88	8.08	3.23

EGR율을 예측할 수 있다. 이 때의 오차는 각 엔진작동 조건에서의 점화시기의 영향과 미세한 압력 변동, 그리고 흡기 시스템과 실린더내의 온도차이에서 기인한다고 판단된다. 흡기온도의 경우, 본 논문에서는 플래넘 챔버에서의 온도를 측정하였으나 실제로는 상대적으로 뜨거운 EGR 가스와 혼합과정을 거치는 혼합가스의 온도와는 차이가 발생할 것이므로 여기에서 수반되는 복합적인 오차라고 판단된다. 따라서 흡기압력과 온도를 좀더 정확히 측정할 수 있다면 보다 정확하게 실린더 내 총잔류가스율을 구할 수 있고, EGR을 피드백 제어 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 복잡한 해석이나, 어려운 실험대신 엔진작동변수 및 MAP 센서의 측정값을 이용한 간단한 잔류가스 계산식을 유도하였고, 이를 이용하여 외부 EGR을 예측하는 기법을 소개하였다. 본 논문에서는 MAP과 흡입공기의 온도를 이용하여 EGR율의 예측이 가능함을 확인하였고, 이를 통해

외부 EGR의 피드백 제어가 가능할 것으로 판단되었다. 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부분부하에서는 흡기 시스템 전체의 압력변동이 매우 작으므로 흡기압력의 측정을 통해 총흡기량을 계산할 수 있다.
- 2) 엔진 작동 조건 및 성능의 변수들의 측정을 통해 간단한 식으로 잔류가스율을 추정할 수 있다.
- 3) 통상의 EGR적용영역에서 EGR율의 증가에 따라 NO<sub>x</sub>는 선형적으로 감소하고 MAP도 선형적으로 증가하게 되므로, EGR율을 모르더라도 흡기압력과 온도를 통해 EGR율의 정성적인 예측이 가능함을 알 수 있다.

앞으로의 연구에서는 정량적으로 좀 더 정확한 잔류가스율의 계산을 위한 방안과 배기가스 데이터 및 밸브에서의 압력강하 등을 기존의 계산식에 추가하는 과정이 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 논문에서는 EGR적용시의 총 잔류가스율의 개념을 정의하였으나, 밸브타이밍 변경을 통한 내부 EGR의 성능 해석시에도 비슷한 방법을 통해 실린더내 잔류가스를 예측함으로써 내부 EGR과 외부 EGR의 성능을 비교 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- 1) P. K. Senecal, J. Xin, R. D. Reitz, "Predictions of Residual Gas Fraction in IC Engines," SAE 962052, 1996.
- 2) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Company, pp.230-234, 582-585, 1988.
- 3) J. D. Benson, R. F. Stebar, "Effects of Charge Dilution on Nitric Oxide Emission from a Single-Cylinder Engine," SAE 710008, 1971.
- 4) R. Miller, S. Russ, C. Weaver, E. Kaiser, "Comparison of Analytically and Experimentally Obtained Residual Gas Fractions and NO<sub>x</sub> Emissions in Spark-Ignited Engines," SAE 982562, 1998.
- 5) J. W. Fox, W. K. Cheng, J. B. Heywood, "A Model for Predicting Residual Gas Fraction in Spark-Ignition Engines," SAE 931025, 1993.
- 6) W. G. Lee, I. Y. Ohm, "Effects of the Method of Changing Compression Ratio on Engine Performance in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.9, No.4, pp.27-33, 2001.