

SI 엔진 내부의 잔류가스 추정 기법에 관한 연구

김 성 철*, 이 상 진*, 김 득 상*, 엄 인 용*, 조 용 석**

A Study for Predictions of In-Cylinder Residual Gas Fraction in SI Engines

Sungcheol Kim*, SangJin Lee*, Duksang Kim*, Inyong Ohm*, Yong-Seok Cho**

Key Words : Residual Gas(잔류가스), Residual Gas Fraction(잔류가스율), Internal EGR(내부 EGR), External EGR(외부 EGR), Valve Overlap(밸브오버랩)

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 formulated. The effects of engine operating parameters on the residual gas were also investigated. 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 fraction was derived by comparing the total charging and fresh air. This results coincide with measured value very well.

기호설명

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)
 ρ : Intake Air Density(kg/m³)
 T : Intake Air Temperature(K)
 V_d : Displaced Volume(m³)
 N : Engine Speed(rpm)

1. 서 론

SI 엔진 내부의 잔류가스란 이전 사이클의 연소 생성물로서 배기과정동안 완전히 배출되지 못하고 다음 사이클까지 남아 신기와 혼합되는 기연가스(Burned Gas)를 말한다. 이와 같은 잔류가스는 상

사점일 때 실린더 내에 정채되는 가스(trapped gas)와 밸브오버랩에 의한 역유동 가스(back-flow gas)로 구분된다.¹⁾ 잔류가스는 흡·배기 과정동안 실린더내에 일정부분 항상 존재하게 되며, 온도 및 희석효과를 통해 성능 및 배기가스에 큰 영향을 미치게 된다.²⁾ 잔류가스는 화염 속도를 저하시켜 공회전 및 부분부하시 연소안정성을 악화시키는 주된 원인이 되기도 하지만 화염속도의 저하로 인해 연소온도가 저하되어 NOx의 생성율을 억제하는 역할을 하기도 한다. 이런 측면에서 잔류가스를 내부 EGR (Internal EGR)이라 부르기도 하며, 그 기능면에서 외부 EGR (External EGR)과 동일하게 취급될 수 있다.³⁾

4 행정 가솔린엔진의 매 사이클에서 점화직전의 실린더내에는 연료와 공기 뿐만 아니라 그 이전 사이클에서의 잔류가스가 포함되어 있으며, 이러한 잔류가스는 엔진의 설계 변수(흡·배기 밸브타이밍, 간극체적, 압축비) 및 엔진작동변수(회전속도, 부하, 점화시기, 공연비, EGR)와 매우 복잡한 함수관계에 있다. 잔류가스는 희석제로 작용하여 연소 온도 및 화염속도를 감소시키고, 연비 및

* 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원

** 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

NOx emission, 연소안정성에 큰 영향을 미친다.⁴⁾ 또한 연소 해석 시뮬레이션에서의 정확성은 흡기 밸브가 닫힌 이후 실린더 내의 초기조건의 정확도에 크게 영향을 받는다. 실린더 내의 잔류가스량은 이러한 초기조건의 정확도에 큰 영향을 미치는 인자로서 질량과 온도 및 희석효과를 통해 직·간접적으로 연소과정에 영향을 미치게 된다.⁵⁾ 이와 더불어 최근의 배기가스규제 추세를 보면 SFTP (Supplemental Federal Test Procedure) 사이클을 비롯하여 날로 강화되는 NOx 규제가 적용됨에 따라 EGR 이 적극 추천되고 있으며, 이로 인한 실린더 내 잔류가스의 분석이 요구되고 있다. 따라서, 정확한 잔류가스의 계산은 매우 중요하다. 그러나 실험적 기법을 통해 잔류가스의 양을 정확히 측정하는 것은 쉬운 일이 아니며, 또한 실린더내 전체 가스를 샘플링 할 수 없으므로 제한적인 측면이 있다. 해석기법 역시 잔류가스량을 결정하는 데 있어 아직은 많은 어려움과 오차를 수반하고 있으며, 일반적으로 잔류가스의 양을 결정할 수 있는 도구는 그리 많이 연구되어 있지 않은 실정이다.

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

2. 이론적 배경

실린더 내부의 잔류가스를 측정하는 기술로는 스파크 플러그를 가공하여 연소실 내부의 가스를 샘플링하여 고속 CO₂ 가스분석기를 이용해야 하는 어려움이 있지만, 본 논문에서는 전술한 바와 같이 MAP (Manifold Absolute Pressure)을 이용한 간단한 계산 알고리즘을 구현해 보고, 이의 타당성을 검증해 본다. 본 연구에서 제시한 실린더내 잔류가스 예측 기법은 총흡입공기량은 실제 흡입공기량과 총잔류가스량의 합으로 구성된다는 개념에서 출발하였다. 총흡기량은 MAP(Manifold Absolute Pressure)을 통해 계산되는 실린더내 charging 양이며, 총잔류가스량은 내부 EGR 량과 외부 EGR 량을 합한 것이다.

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

여기에서, 총흡기량 A_T 은 MAP 을 이용한 이상기체 상태식으로 계산될 수 있고, 흡입공기량 A_i 은 공연비와 연료소모량을 통해 역산하면 1% 이내 오차 범위내에서 예측할 수 있으므로⁶⁾ Internal EGR 또는 총잔류가스량을 구할 수 있다.

우선, 실린더로의 공기·연료 혼합기의 유동 및 엔진작동조건을 정상상태로 가정하면, 이 때의 유동은 실린더내의 잔류가스가 정체되어 있는 상태에서 공기·연료 혼합기만의 정상유동으로 볼 수 있다. 이 때 공기의 흡입 및 배출되는 양은 플레넘 챔버(plenum chamber)에서의 MAP 및 온도, 밀도에 의해 일정 체적으로 유입되는 것으로 볼 수 있고, 따라서 흡기다기관 및 밸브에서의 압력강하를 정량적으로 잘 모사하면, 이 때의 이론적인 공기의 흡입량을 구할 수 있다. 이것으로 실제 엔진으로 유입된 공기량을 나누면 잔류가스의 비율이 결정된다. Fig.1 은 이와 같은 알고리즘의 원리를 정리한 개략도이다.

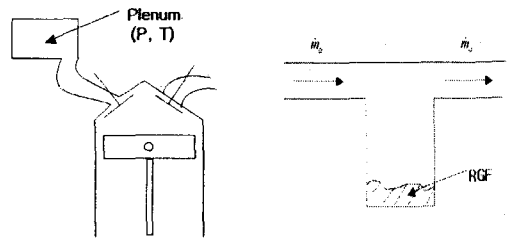


Fig. 1 Schematic diagram of intake system, cylinder, and flow pattern

Fig.2 는 흡기과정동안 플레넘과 실린더내의 압력을 측정한 결과이다. 실험결과를 살펴보면 부분부하에서는 흡기시스템 전체의 압력 변동이 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다.

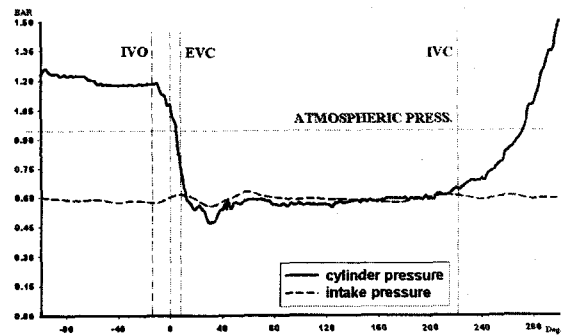


Fig. 2 Intake manifold and cylinder pressure as a function of crank angle at 1800rpm, 2.0bar

통상 부분부하에서는 스로틀 밸브에 의해 유동이

제한되므로 흡기시스템 전체의 압력변동이 매우 작게 유지 됨을 알 수 있다. 따라서 흡기압력과 실린더내 압력은 전체 밸브 열림기간에 걸쳐 거의 일치하고 변동도 무시할만 하므로 이를 통해 흡입 공기량을 결정하는 변수로서의 MAP 은 타당성을 갖는다고 판단된다.

3. 잔류가스 비율의 계산방법

엔진에서 실제로 흡입되는 공기량 \dot{m}_a 는 다음과 같다.

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

MAP 을 이용한 총흡기량의 계산을 위해 우선, 플레넘 챔버에서의 흡입공기의 밀도 ρ 는 이상기체 상태 가정을 통해 다음과 같이 된다.

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

이 때의 총흡입공기량 \dot{m}_{in} 은 다음과 같다.

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

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

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

여기에서, 정량적인 잔류가스율의 결정을 위해 고려해야 할 부분은 $V_d(m^3)$, 즉 체적을 어떤 값으로 선택하느냐 하는 문제이다. 행정체적으로 할 것인지, 아니면 흡기밸브의 닫히는 시점을 고려하여 그 만큼의 체적감소분을 전체적에서 빼준 값으로 할지는 결정해야 하는 변수이다. 본 논문에서는 i)행정체적-IVC 체적, ii)행정체적, iii)전체적-IVC 체적, iv)전체적, 이 네가지 경우에 대한 계산 결과를 모두 나타낸다. 그러나, 결과적으로는 각각 정량적인 차이만 있을 뿐 정성적으로 같은 경향을 나타냄을 알 수 있으며, 이는 추후 실험값과의 비교를 통해 결정할 수 있는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 엔진회전수, 부하, 공연비, 점화시기, 밸브타이밍, 외부 EGR 의 변화에 따른 실린더내 잔류가스의 영향을 살펴보았다. 이중 공연비는 실제로는 피드백 제어가 이뤄짐으로 이론공연비로 고정된다고 볼 수 있고, 점화시기역시 MBT (Minimum Spark Advance for Best Torque) 타이밍으로 고정된다고 볼 수 있다.

다양한 엔진 실험 결과를 통해 본 잔류가스비율을 계산하는 알고리즘의 타당성을 검증하였고, 잔

류가스에 영향을 미치는 인자들과 EGR 적용시 실제 실린더내로 투입되는 EGR 량을 예측할 수 있는 기법에 대해 분석해 보았다.

4. 결과 및 고찰

실험 데이터를 얻은 엔진은 상용의 2.0L DOHC 이며, 제원은 Table 1 에 나타내었다. 이 엔진으로부터 얻은 실험결과를 바탕으로 본 연구에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

Table 1 Specification of test Engine

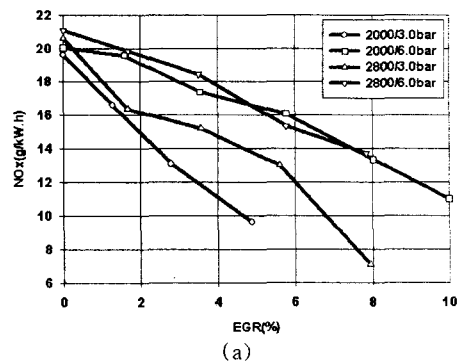
Engine Type	In-line 4cyl, 16valve
Displaced Volume(cc)	1975
Bore(mm)	82
Stroke(mm)	93.5
Compression Ratio	10.3
Valve Timing	8/40, 50/10

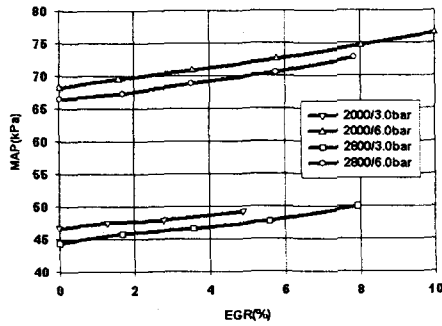
4.1 External EGR 영향

본 연구에서는 플레넘 챔버와 배기 매니폴드 사이를 외부 배관으로 연결하고 그 사이에 유량 조절 밸브를 사용하여 수동으로 EGR 율을 조절한 데이터를 사용하였으며, 여기서 EGR 율은 다음의 식에 의하여 결정 하였다.

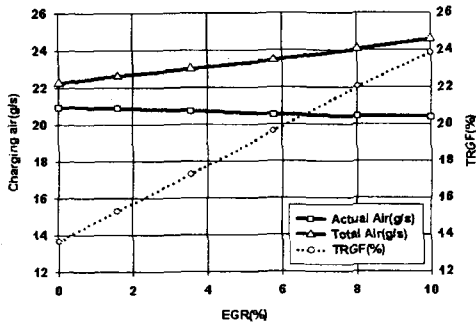
$$EGR\ ratio = \frac{(CO_2)_{PC} - (CO_2)_{AIR}}{(CO_2)_{EV} - (CO_2)_{AIR}} \times 100(\%) \quad (6)$$

여기서, $(CO_2)_{EX}$ 는 배기가스중의 CO_2 농도, $(CO_2)_{AIR}$ 는 0% EGR 시 Plenum Chamber 내의 CO_2 농도이며, $(CO_2)_{PC}$ 는 EGR 시 Plenum Chamber 내의 CO_2 농도를 나타낸다. 통상 EGR 을 적용하게 되면 연소안정성 및 연소속도가 저하되므로, 좀더 안정적인 연소를 위해서 점화시기는 진각되어야 한다. 점화시기를 진각시킴에 따라 엔진출력은 보상할 수 있지만, THC 및 NOx 배출은 증가하게 된다. 따라서, EGR 적용시에는 THC 배출량 및 연료 소비율 저감에 악영향을 주지 않는 범위내에서 EGR 율 및 점화시기가 결정되어야 한다.





(b)



(c)

Fig. 3 Effect of external EGR on NOx, MAP, and RGF

Fig.3 (a)는 각각의 엔진작동 조건에서 EGR 율의 증가에 따른 최적의 점화시기를 선택한 경우의 NOx의 선형적인 감소를 나타내고, (b)는 MAP의 증가를 나타낸다. Fig.3 (c)는 2000rpm/6.0bar 조건에서 EGR 율의 증가에 따른 실제 흡입공기량과 총 흡입공기량 및 행정체적 값으로 선택하여 계산한 잔류가스율을 나타낸다. 여기에서 보면 부분부하에서는 EGR 율의 증가에 따라 실제 흡입공기량 \dot{m}_a 은 크게 변화가 없으나, EGR 율의 상승은 MAP의 증가로 나타나고 이 MAP를 기준으로 계산한 실린더내 총잔류가스율 TRGF(Total Residual Gas Fraction)이 증가하는 것을 알 수 있다.

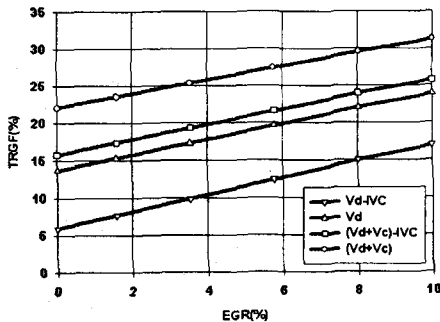


Fig. 4 Total residual gas fractions at different volume (2000rpm/6.0bar)

Fig.4는 체적선택값을 다르게 취했을 경우의 계산된 잔류가스율을 나타내며, 앞에서 언급한 바와 같이 총흡입공기량을 구할 때 체적의 선택은 단지 초기값의 차이만 발생시키는 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 차후의 잔류가스 실험값과 비교하여 체적값을 정량적으로 결정할 수 있을 것이다.

다음의 Fig.5는 계산된 잔류가스율과 신기 흡입량으로 EGR 율을 예측한 결과와 실제 측정된 결과를 함께 도시한 것이다.

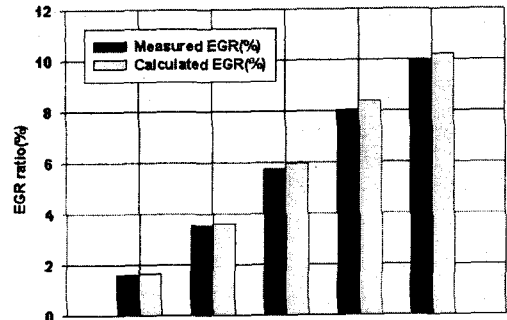


Fig. 5 Comparisons of measured EGR ratio and calculated EGR ratio(2000rpm/6.0bar)

그림에 나타난 바와 같이 EGR 율을 넣었을 경우의 잔류가스율에서 EGR 율을 넣지 않았을 경우의 잔류가스율을 빼주면 외부에서 유입된 EGR 양을 구할 수 있고 이 값은 실험 결과와 매우 근접하게 일치함을 알 수 있으며, 이를 통해 EGR 양의 예측이 가능함을 알 수 있다.

Table 2 Predictions of EGR ratio(%)

	EGR(%)	TRGF(%)	EGR 예측	오차(%)
2000rpm /3.0bar	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	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
2800rpm /3.0bar	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
2800rpm /6.0bar	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

Table 2 는 각각의 엔진작동 영역에서의 계산된 총잔류가스율과 이 때의 총잔류가스율을 가지고 EGR 을 적용하지 않았을 때의 잔류가스 계산값과 비교하여 외부에서 유입되는 EGR 율을 예측한 결과를 나타내고 있다. 표에서 보듯이 투입되는 EGR 양을 잘 예측하고 있음을 알 수 있으며, 이 때의 오차는 각 엔진작동 조건에서의 점화시기의 영향과 미세한 압력 변동, 그리고 흡기시스템과 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 실린더내 총잔류가스율을 구할 수 있고, EGR 을 피드백 제어 할 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 점화시기의 영향(MBT 타이밍까지)

MBT 타이밍까지 점화시기를 변경하였다. Fig.6 는 2000rpm/3bar 조건에서의 엔진실험결과 및 계산된 잔류가스율을 나타낸다. 우선, 엔진에 미치는 영향을 살펴보면 점화시기를 진각시키게 되면 엔진의 출력은 상승하고, 연료소비는 줄어드는 경향을 나타낸다. 배기가스 측면에서는 THC 와 NOx 가 증가하게 되고, 잔류가스 측면에서는 MAP 이 다소 감소하게 된다. 이로 인해 계산된 잔류가스율을 역시 다소 감소하는 경향으로 나타났으나 실제 흡입공기량 또한 감소하므로 상쇄효과로 인해 그 양은 미소하다. 계산된 잔류가스율의 증가는 최대 1% 정도로 나타났다.

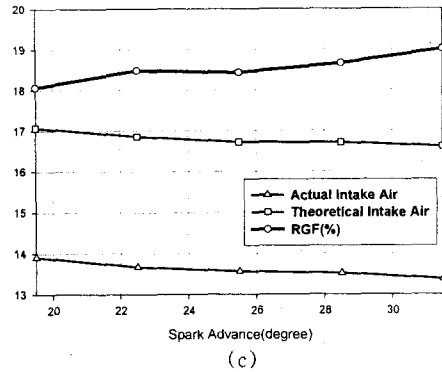
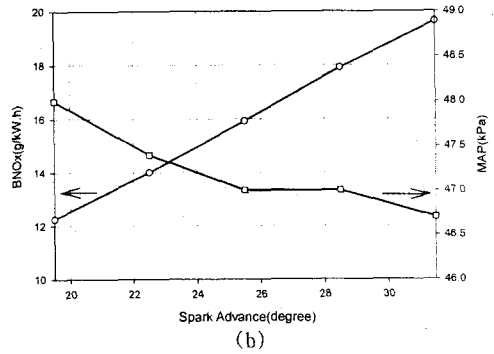
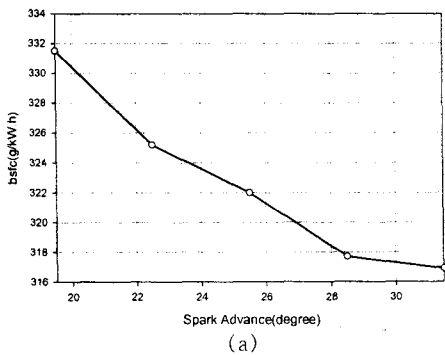


Fig. 6 Effect of Spark Timing at 2000rpm/3.0bar

4.3 밸브타이밍 영향

일반적으로 엔진에 흡입되는 공기량은 밸브타이밍에 지배적인 영향을 받게 되며, 특히 흡기밸브의 개폐시기가 실린더로 유입되는 공기량 및 잔류가스량에 매우 큰 영향을 주게 된다. 잔류가스는 밸브 오버랩시의 역유동에 의한 가스와 상사점일 때의 남아있는 가스로 구분할 수 있으며, 잔류가스의 증가는 흡기밸브가 닫혔을 때의 초기 온도의 상승효과 및 혼합기를 희석시키는 결과를 가져오게 되고, 이 두 가지는 NOx emission 에 상당한 영향을 미치게 된다. 본 실험에서는 캠 스프로킷의 설계변경을 통해 흡기밸브 타이밍을 진각시킴으로써 이로 인한 밸브 오버랩기간의 증가 영향을 살펴보았다.

Fig.7 은 2400rpm/2.5bar 조건에서 기존 흡기 타이밍(BTDC 8°/ABDC 40°)에서 흡기밸브 타이밍을 크랭크각으로 10 도씩 진각시킨 결과이다. 밸브오버랩 기간이 길어지게 되면 상대적으로 압력이 높은 배기포트측에서 실린더내로의 배기가스 역류 현상이 증가하여 잔류가스량이 증가하게 된다.

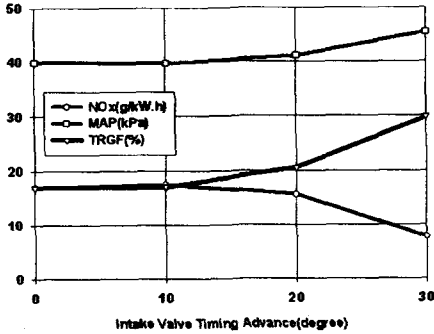


Fig. 7 Effect of Valve Timing at 2400rpm/2.5bar

4.4 RPM 및 부하의 영향

일반적으로 엔진회전수의 증가나 부하의 증가는 흡기압력을 상승시킴으로써 잔류가스량을 감소시킨다. 실험 및 계산결과 또한 이러한 경향을 잘 나타내고 있으며, 그 결과는 Fig.8 에서 보여진다. 엔진회전수의 증가는 밸브오버랩 시간을 줄이는 효과를 나타냄으로써 역유동에 의한 잔류가스의 양을 감소시키게 된다. 엔진 부하의 증가 또한, 흡기압력을 상승시킴으로써 잔류가스의 양은 감소하게 된다.

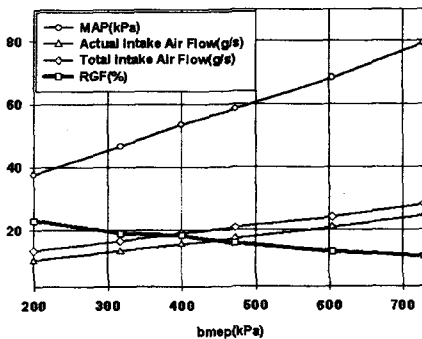


Fig. 8 Effect of engine load on residual gas fraction at 2000rpm

5. 결론

본 연구에서는 복잡한 해석이나, 어려운 실험대신 엔진작동변수 및 MAP data 를 이용한 간단한 잔류가스 계산식을 유도하였고, 다양한 엔진작동 조건에 대한 잔류가스의 정성적인 경향을 살펴본다. 기존의 잔류가스 측정에 관한 여러 실험 및 해석에 대한 연구 결과와 정성적으로 잘 일치함을 알 수 있었고, 계산식의 적용면에서도 어느 정도 타당성이 입증되었다고 보여진다. 또한, 이를 이용

해서 외부 EGR 양을 예측하는 기법을 소개함으로써, MAP 과 흡입공기의 온도만 알면 EGR 양의 예측이 가능함을 확인하였다. 이를 통해 외부 EGR 의 피드백 제어가 가능할 것으로 판단되었다.

앞으로의 연구에서는 정량적으로 좀 더 정확한 잔류가스량의 계산을 위한 체적 선택의 방법과 배기가스 데이터 및 밸브에서의 압력강하를 기존의 계산식에 추가하는 과정이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 밸브타이밍 변경을 통한 내부 EGR 의 성능 해석시에도 비슷한 방법을 통해 실린더내 잔류가스를 예측함으로써 내부 EGR 과 외부 EGR 의 성능을 비교 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) P. K. Senecal, J. Xin, and R. D. Reitz, "Predictions of Residual Gas Fraction in IC Engines", SAE Paper 962052, 1996
- (2) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp. 230-234, 582-585, 1988
- (3) J. D. Benson and R. F. Stebar, "Effects of Charge Dilution on Nitric Oxide Emission from a Single-Cylinder Engine", SAE Paper 710008, 1971
- (4) R. Miller, S. Russ, C. Weaver, E. Kaiser, "Comparison of Analytically and Experimentally Obtained Residual Gas Fractions and NOx Emissions in Spark-Ignited Engines", SAE Paper 982562, 1998
- (5) J. W. Fox, W. K. Cheng, and J. B. Heywood, "A Model for Predicting Residual Gas Fraction in Spark-Ignition Engines", SAE Paper 1993, 1993
- (6) 이 원 근, 엄 인 용, "가솔린 엔진에서 압축비 변경 방법이 성능에 미치는 영향", 자동차공학 회 논문집 제 9 권 제 4 호, pp. 27~33, 2001