

체적효율을 고려한 가변밸브 개폐시기의 조정에 의한 실린더내 잔류가스량에 관한 연구

A Study on the Residual Gas Fraction in Cylinder by the Adjustment of Variable Valve Timing with Volumetric Efficiency

남 정 길*
Jeonggil Nam

ABSTRACT

The EGR is needed for one of various strategies to reduce NOx emission. But to get the proper EGR rate, the intake and exhaust system become complicated. That is a reason why we consider using the internal EGR system. The internal EGR is a system which reduces NOx by controlling the residual gas fraction in cylinder by changing valve timing and valve lift of intake and exhaust.

In this paper, characteristics of volumetric efficiency and residual gas fraction in cylinder were investigated for various engine speeds by changing valve timing and valve lift of intake and exhaust in the 4 stroke-cycle diesel engine. Volumetric efficiency and residual gas fraction were calculated by the method of characteristics. As the results, residual gas fraction and volumetric efficiency in cylinder by variable valve timing were visualized.

주요기술용어 : Internal EGR(내부 배기가스재순환장치), Volumetric efficiency(체적효율), Method of characteristics(특성곡선법), Residual gas fraction(잔류가스량)

1. 서 론

디젤기관은 많은 발전을 거듭하여 연료소비율면에서는 다른 동력기관에 비하여 우수한 성능을 나타내고 있다. 그러나 환경오염물질의 주된 배출원으로 지목되고 있는 가운데, 날로 엄격해져가는 배기 규제에 대응하기 위하여 전처리 및 후처리 방법이 필요하게 되어 흡배기계는 매우 복잡한 형태를 취하고 있다.¹⁻⁷⁾ 후처

리 방법에는 배기계통에 산화 촉매장치를 설치하여 주로 배기중의 미립자를 제거할 목적으로 이용되고 있으며, 전처리 방법으로는 NOx를 저감시키기 위하여 여러 가지 방법(EGR, 물분사, 유화유, 연료분사시기 지연, 연소실형상 개조 등)이 연구되고 있으나 현재 자동차에서는 EGR법이 그리고 선박에서는 SCR(Selective catalytic reduction)법이 가장 효과적인 것으로 판단되어 주로 이용되고 있다. 또한, 최근에 일본에서는 EGR법을 응용하여 흡기행정 동안에 서브배기

* 회원, 목포해양대학교 기관공학부

밸브를 열어서 배기압력의 맥동을 이용하여 배기가스를 실린더내로 되돌리는 방식인 내부 EGR 시스템이 개발되어 상용화 되고 있다.⁸⁾ NOx는 일반적으로 대기의 질소와 산소가 화학반응을 통하여 연소과정동안 생성되며 생성요인에 따라 열에 의한 열적(Thermal) NOx, 연료자체에 질소가 함유되어 있을 때 생성되는 연료(Fuel) NOx와 연료로부터 생겨난 라디칼(Radical)과 질소의 반응에 의해 생성되는 신속(Prompt) NOx로 분류되고 있다. 이러한 NOx 중에 열적 NOx가 대부분을 차지하며 열적 NOx 중에서도 NO가 95% 정도로 대부분을 차지한다.⁹⁾

NOx 저감을 위해서 현재 사용하고 있는 EGR 시스템은 흡 배기 매니폴드에 장착되기 때문에 흡 배기 매니폴드 설계시 고려되어야 한다. 또한, 기존 EGR 시스템은 기관 설치공간 측면에서 최외각에 위치하기 때문에 기관 치수에 영향을 미치며, 각 실린더별로 EGR 량을 일정하게 공급하기 위해서는 흡기 매니폴드 입구부에 EGR 파이프를 연결시켜야 하기 때문에 설치공간이 극히 제한되어 있어서 작업성 정비성이 매우 불리하게 되어 있다.

따라서, 본 연구에서는 체적효율을 고려한 가변 흡 배기 밸브의 콤팩트하면서도 각 실린더내에 잔류가스량을 일정하게 남게하여 EGR 효과를 볼 수 있는 내부 EGR 방법에 관하여 연구하고자 하였다.

연구방법으로는 참고문헌¹⁰⁾에서 실험 및 계산결과가 정성적으로는 물론 정량적으로 비교적 잘 일치함을 확인했으므로 동일기관(직경×행정 : 94mm×100mm, 압축비 : 21.0, 최대출력 : 63kW/4,000rpm)을 모델로 흡 배기밸브만의 효과를 분명히 하기 위해서 흡 배기 매니폴드가 없는 단기통 기관의 경우와 흡 배기 매니폴드가 있는 4기통 기관의 경우에 대하여 흡 배기 밸브의 타이밍 및 리프트량의 변화에 의한 기관속도별 체적효율 및 잔류가스량의 변화를 연구 분석하였다.

2. 기존 EGR시스템의 문제점 및 내부 EGR시스템의 개념

배기가스 규제치는 각 기관의 배기량, 연소 방식(DI, IDI), 탑재차량(Bus, Truck) 및 수출지역에 따라서 조금씩 차이가 있다. 또한 배기가스 성분은 기관의 종류에 따라 그리고 기관의 운전조건에 따라 각기 다르다. 본 연구에서 모델로 하고 있는 기관은 2.8 리터급 직접분사식 내연기관으로 부실식에 비하여 NOx 배출량이 많기 때문에 EGR율을 40% 수준까지 높여야 할 필요성이 있으나 기관회전속도와 부하에 따라 필요 EGR율이 다르기 때문에 엔진성능의 저하를 최소화 하고, NOx를 제외한 다른 배출물(HC, CO, PM, SOOT 등)의 증가를 최소화 할 수 있는 범위내에서 EGR율을 정해야 한다.

물론 날이 갈수록 엄격해져가는 에미션 규제에 대응하기 위해서 부실식 기관에서도 EGR 시스템을 채택하고 있는 실정이지만 훨씬 많은 량의 EGR율을 요구하는 직접분사식 기관에 있어서는 흡 배기 차압(ΔP)만으로는 요구 EGR율을 만족할 수 없기 때문에, ΔP 를 크게 할 수 있는 부대장치가 동원되지 않으면 안되는 실정이다. 부대장치로는 플랩(Flap) 밸브를 설치하여 ΔP 를 강제적으로 크게 해주는 방법과 EGR 밸브 2개를 동시에 설치해주는 방법이 있으나 현실적으로는 효과가 큰 플랩 밸브 설치식을 채용하고 있다.

EGR율에 영향을 미치는 인자로는 ΔP , EGR 밸브 열림시간, EGR 밸브 및 EGR 파이프 단면적이며, EGR 파이프의 길이 및 형상에도 영향을 받는다. 또한 EGR을 분기시키는 배기 매니폴드의 위치에 따라서도 영향을 받는다.

그리고 EGR 시스템의 기본적인 구성품으로는 ECU, EGR 밸브, EGR 파이프, 솔레노이드 밸브, 진공 파이프, 각종 센서(rpm, 수온, 드로틀개도) 등이 있으며 특히, 직접분사식 기관에 있어서 NOx 규제치를 만족하기 위해서는 ΔP 를 크게 하기 위한 부대장치(엑츄에이터, 드로틀밸브, 진공용 호스 등)가 필요하므로 EGR 시

스텝이 구성되어야 할 만큼 구조가 복잡해져서 가격 및 연비 상승의 요인이 된다.

또한 드로틀 밸브 사용시 밸브개도가 기관 성능에 민감하게 작용하기 때문에 정확하게 작동할 수 있도록 하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 구동 부분의 내구성 확보에도 어려움이 많다. 더불어 흡 배기 매니폴드를 연결하는 EGR 파이프는 조립시 공차에 의한 초기 비틀림 응력과 진동 때문에 내구성 확보에 어려움이 많다.

따라서, 실린더내 잔류가스량은 EGR 효과가 있으므로 NOx를 줄일 수 있는 방법중의 하나이므로, 이러한 종래 EGR시스템의 설치공간상의 문제점을 보완하여 좀더 콤팩트하면서도 펌핑 손실을 줄이고, 각 실린더별로 일정한 잔류가스량을 남게 할 수 있는 내부 EGR 방법에 관해서 연구하고자 하였다.

내부 EGR 시스템이란 흡 배기 밸브의 타이밍 변경 및 흡 배기 밸브 리프트의 가감만으로 기관 본체의 변경 없이도 EGR 효과를 볼 수 있는 장치로서 종래의 EGR 시스템과 구별하여 내부 EGR 시스템이라 할 수 있다.

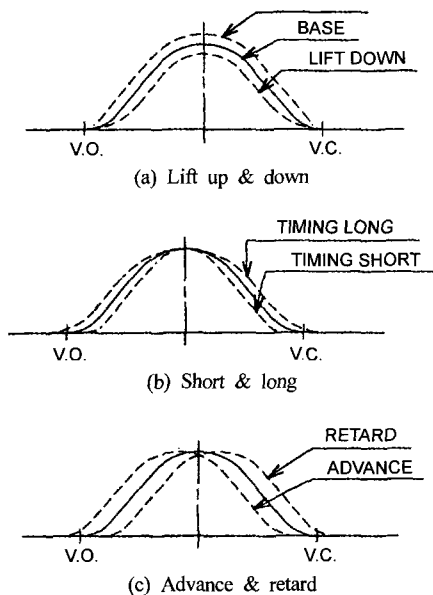


Fig. 1 Changed profile for timing and lift of intake and exhaust valve

Fig. 1에는 흡 배기 밸브의 타이밍 변경 및 리프트 가감의 형태를 나타내고 있다.

3. 단기통 기관의 흡 배기밸브에 의한 영향

3.1 흡 배기밸브 리프트의 영향

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 모델 기관을 기준으로 하여 흡 배기 밸브의 리프트를 변경하면 리프트 증가시에는 체적효율이 3,000 rpm 이하의 저속구간으로 갈수록 감소량이 증가하여 최대 약 2% 정도 감소하고 그 이상의 고속구간에서는 약 1% 정도 증가한다. 또한, 리프트 감소시에는 3,000rpm 이하의 저속구간으로 갈수록 증가량이 커져서 최대 약 3% 정도 증가하고 그 이상의 고속구간에서는 최대 약 2% 정도 감소한다. 그리고 흡기 밸브의 리프트 변경시가 배기 밸브의 리프트 변경시보다 체적효율에 미치는 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 3,000rpm을 경계로 다른 경향을 나타내는 이유는 대상기관의 실린더 직경, 행정 및 밸브로 구성되는 가스유동계의 특성에 의한 것으로 판단된다.

실린더내 잔류가스량은 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 체적효율 곡선과 정반대 현상을 나타내고 있다. 그림으로부터 잔류가스량을 증가시키기 위하여 3,000rpm 이하의 저속구간에

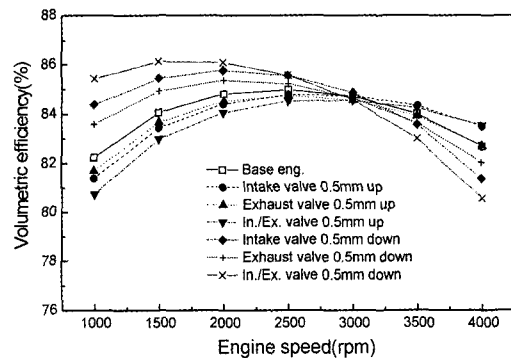


Fig. 2 Calculated results of volumetric efficiency by intake & exhaust valve lift

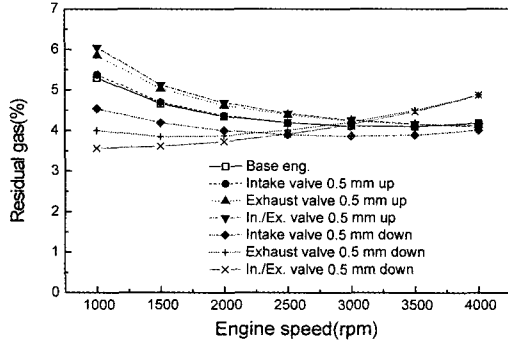


Fig. 3 Calculated results of residual gas fraction by intake & exhaust valve lift

서는 흡 배기 밸브의 리프트를 증가시키는 것이 바람직하며 3,000rpm 이상 고속구간에서는 흡 배기 밸브의 리프트를 감소시키는 것이 바람직함을 알 수 있다.

3.2 흡기밸브 개폐시기의 영향

Fig. 4는 흡기밸브의 개폐시기를 변경하였을 때 체적효율의 계산결과를 나타낸 것으로 비교적 영향이 큰 경우만을 나타내었다. 흡기밸브의 개폐시기를 각각 10°씩 짧게 하거나 길게 하였을 경우는 모델 기관과 비교하여 큰 차이가 없었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모델 기관을 기준으로 하여 흡기밸브 개폐시기를 전진시키면 3,000rpm 이하 구간에서는 체적효율이 약간 증가하고, 3,000rpm 이상 구간에서는

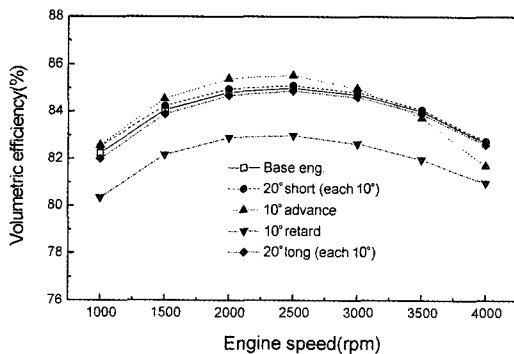


Fig. 4 Calculated results of volumetric efficiency by intake valve timing

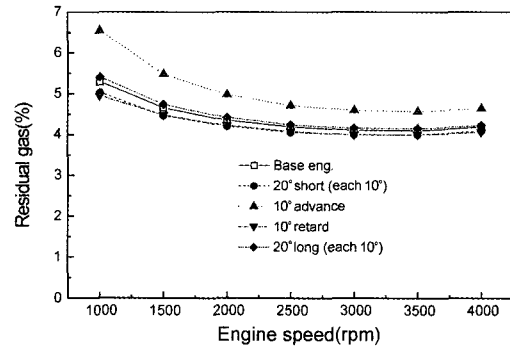


Fig. 5 Calculated results of residual gas fraction by intake valve timing

약간 감소하나, 잔류가스량은 Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 전 rpm 구간에서 증가하므로 내장형 EGR 개발에 있어서 이상적인 밸브 조절이라 할 수 있다. 또한 흡기 밸브를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율이 약 2.0% 정도 감소함에도 불구하고 잔류가스량은 모델 엔진과 동등 수준이므로 지양해야 할 밸브조절 방법이다. 흡기밸브 개폐시기의 전후진에 있어서 전진시켰을 때 체적효율이 좋은 이유는 배기행정 종료시에는 실린더내 압력이 낮은 상태에 있기 때문으로 흡기밸브의 열림시기가 빠를수록 좋음을 알 수 있다.

그리고 흡기밸브 열림시기와 닫힘시기를 10°씩 빠르게 하거나 느리게 하면 체적효율이나 잔류가스량은 모델 엔진과 거의 동등 수준이므로 NOx를 줄이기 위한 방법으로는 지양해야 할 밸브조절 방법임을 알 수 있다.

3.3 배기밸브 개폐시기의 영향

Fig. 6은 배기밸브의 개폐시기를 변경하였을 때 체적효율의 계산결과를 나타낸 것으로 비교적 영향이 큰 경우만을 나타내었다. 배기밸브의 개폐시기를 각각 10°씩 짧게 하거나 길게 하였을 경우는 모델 기관과 비교하여 큰 차이가 없었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모델 기관을 기준으로 배기밸브의 개폐시기를 전진시키면 2,000rpm을 경계로 하여 그 이하 구

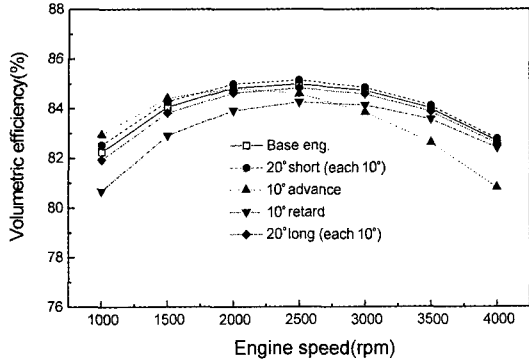


Fig. 6 Calculated results of volumetric efficiency by exhaust valve timing

간에서는 체적효율이 약간 증가하고, 2,000rpm 이상 구간에서는 고속구간으로 갈수록 점점 감소량이 증가하여 4,000rpm에서는 최대 약 2% 정도 감소한다. 배기밸브의 개폐시기를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율이 감소하며 저속구간으로 갈수록 더욱더 감소량이 증가하여 최대 약 2% 정도 감소한다. 그리고 배기밸브 열림시기와 닫힘시기를 10°씩 빠르게 하거나 느리게 하면 모델 엔진과 비교하여 체적효율 및 잔류가스량의 증감은 거의 없다.

실린더내 잔류가스량은 Fig. 7에서와 같이 체적효율 곡선과 정반대 현상을 나타내고 있다. 특히, 배기 밸브를 후진시키면 저속구간에서 잔류가스량이 증가하고, 전진시키면 고속구간

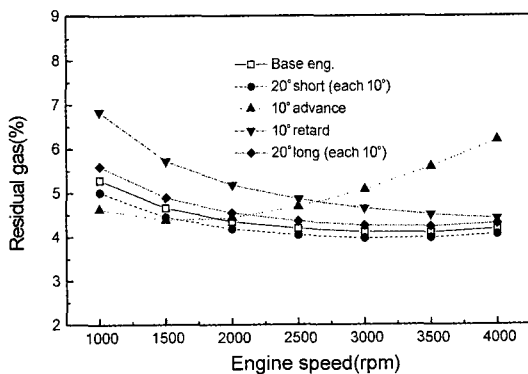


Fig. 7 Calculated results of residual gas fraction by exhaust valve timing

에서 잔류가스량이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이것은, 특히 저속구간에서 배기밸브의 닫힘시기가 늦어질수록 흡기밸브의 열림시기와 오버랩 기간이 길어지면서 배기의 반사파가 실린더내로 유입되기 때문이다.

3.4 흡 배기밸브 리프트 및 개폐시기에 의한 영향

이상의 검토결과로 부터 밸브 리프트 및 개폐시기를 적절히 선택하면 실린더내 잔류가스량을 필요한 속도영역에서 극대화시킬 수 있음을 알았다. Fig. 8은 모델 기관을 기준으로 하여 흡 배기밸브의 리프트를 증가시키고 동시에 10° 전진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율이 약 1% 정도 증가한다. 그리고 흡 배기밸브의 리프트를 증가시키고 동시에 10° 후진시키면 체적효율이 전 rpm 구간에서 감소한다. 또한, 흡기밸브 개폐시기를 전진시키고 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율이 감소하며, 저속구간으로 갈수록 감소폭이 증가한다. 그리고 흡기밸브 개폐시기를 후진시키고 배기밸브 개폐시기를 전진시키어도 전 rpm 구간에서 체적효율이 감소한다.

실린더내 잔류가스량은 Fig. 9에서와 같이 체적효율곡선과 정반대 현상을 나타내고 있으며 흡기밸브 개폐시기를 전진시키고 배기밸브 개폐시기를 후진키시면 저속구간에서 약 6% 정

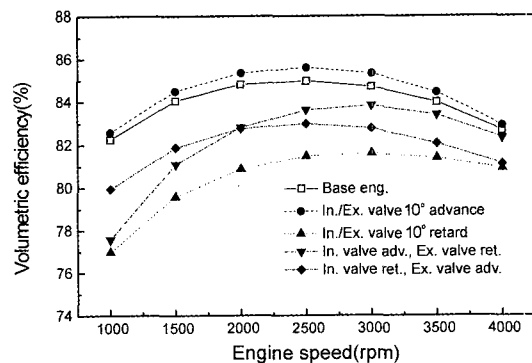


Fig. 8 Calculated results of volumetric efficiency by intake & exhaust valve timing

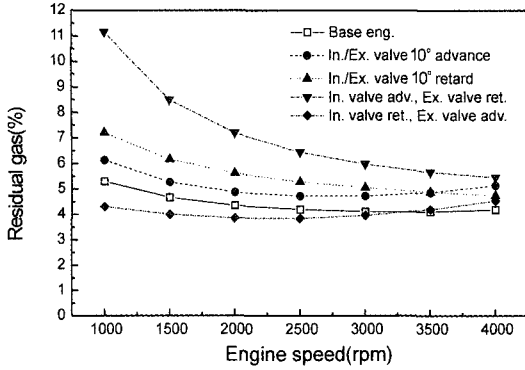


Fig. 9 Calculated results of residual gas fraction by intake & exhaust valve timing

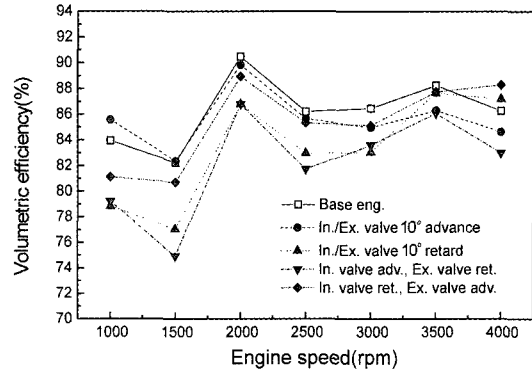


Fig. 10 Calculated results of volumetric efficiency by intake & exhaust valve timing

도 잔류가스량을 많이 남게 할 수 있다. 이는 저속구간에서 요구되는 EGR율의 증가를 고려하면, 내장형 EGR시스템을 적용하는 것이 가능하다고 판단된다. 또한, 흡 배기밸브 개폐시기를 후진시켜도 전 rpm 구간에서 잔류가스량을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 4기통 기관에의 적용

흡 배기 매니폴드가 있는 4기통 기관에 있어서도 흡 배기밸브 개폐시기에 의한 전체적인 체적효율 곡선 및 실린더내 잔류가스량은 흡 배기 매니폴드가 없는 단기통 기관과 동일한 경향을 보이거나 흡 배기 매니폴드 및 흡 배기의 간섭에 의한 관성 및 맥동효과가 포함되어 나타난다.

Fig. 10에서와 같이 모델 엔진 기준하여 흡 배기 밸브의 리프트를 0.5mm 증가시킨 후 흡 배기밸브 개폐시기를 10° 전진시키면 1,500rpm 이상구간에서는 체적효율이 감소하고 그 이하 구간에서는 증가한다. 그리고 흡 배기밸브의 리프트를 0.5mm 증가시킨 후 흡 배기밸브 개폐시기를 10° 후진시키면 3,600rpm 이하 구간에서는 체적효율의 감소량이 증가하여 최대 약 4.0% 정도 감소한다. 흡기밸브 개폐시기를 전진시키고 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율의 감소량이 증가하여

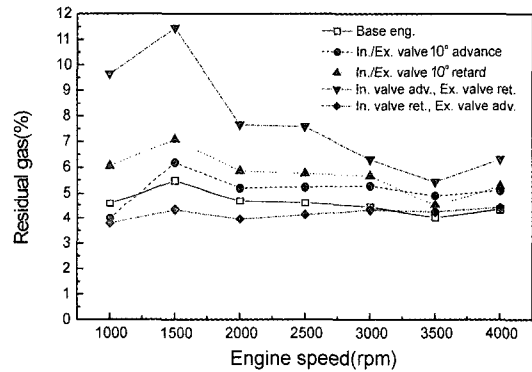


Fig. 11 Calculated results of residual gas fraction by intake & exhaust valve timing

최대 약 6.0% 정도 감소하고 잔류가스량은 Fig. 11에서와 같이 저속으로 갈수록 점점 증가량이 커져서 최대 약 6% 정도 증가한다. 또한, 흡기 밸브 개폐시기를 후진시키고 배기밸브 개폐시기를 전진시키면 3,500rpm 이하의 저속구간에서는 체적효율이 저속으로 갈수록 감소량이 증가하여 약 2.5% 정도 감소하나 그 이상 구간에서는 약간씩 증가하였다. 그리고 잔류가스량은 3,500rpm 부근을 제외한 전 rpm 구간에서 감소하였다.

따라서 단기통 기관에서와 마찬가지로 흡기 밸브 개폐시기를 전진시키고, 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 잔류가스량이 증가하며, 저속 구간에서 더욱 그 정도가 커짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 흡 배기계를 단순화 하면서 EGR율을 확보하기 위한 방법으로 체적효율을 고려한 가변밸브 개폐시기에 의한 실린더내 잔류가스량의 변화에 관하여 연구 분석하였다. 즉, 흡 배기밸브의 타이밍 및 리프트 변화에 의한 기관속도별 체적효율 및 잔류가스량의 변화에 관하여 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배기밸브를 이용하면 잔류가스량은 극대화시킬 수 있으나 체적효율의 저하를 초래한다.
- 2) 흡기밸브를 이용하면 체적효율의 저하를 적게 하면서 잔류가스량을 증가시킬 수 있다. 그러나 잔류가스량의 증가는 배기밸브를 이용한 경우에 비하여 적게 된다.
- 3) 저속구간에서는 흡기밸브 개폐시기를 전진시키고, 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 잔류 가스량을 증가시킬 수 있으며, 동시에 흡 배기밸브의 리프트를 증가시키면 잔류가스량을 극대화시킬 수 있음을 알았다.
- 4) 고속구간에서는 배기밸브 개폐시기를 전진시키고 동시에 흡 배기밸브의 리프트를 감소시키면 잔류가스량을 극대화시킬 수 있음을 알았다.
- 5) 본 연구 실험대상인 엔진에서는 흡기밸브 개폐시기를 전진시키면 고속구간을 제외한 전 rpm 구간에서 체적효율이 좋으면서도 잔류 가스량도 전 rpm 구간에서 많아지므로 가장 이상적인 밸브조절이라 할 수 있다. 또한, 흡기밸브 개폐시기를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율이 떨어짐에도 불구하고 잔류가스량의 변화가 거의 없으므로 가장 지양해야 할 밸브조절 방법임을 알 수 있었다.

특히, 자동차 엔진에 있어서 NOx를 저감시

키는 기술로는 지금까지 냉각식 EGR, 플랩밸브가 설치된 EGR 및 AGR(Air Gas Recirculation) 시스템이 적용되고 있으나 앞으로 더욱더 엄격해질 환경 규제치를 만족시키기 위해서는 현 EGR 시스템에 흡 배기밸브 조절에 의하여 실린더내에 잔류가스를 남길 수 있는 내부 EGR 시스템을 병행하는 방법도 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 嶋本 讓, “吸·排氣管의 利用(上)”, 內燃機關 Vol.10, No.108, pp.93-100, 1971.
- 2) 嶋本 讓, “吸·排氣管의 利用(下)”, 內燃機關 Vol.10, No.111, pp.89-95, 1971.
- 3) 嶋本 讓, “吸氣管效果による 四サイクルディーゼル機關體積效率の 平たん化”, 日本機械學會論文集 第 478号 編, 1987. 6.
- 4) R. S. Benson, “A Comprehensive Digital Computer Program to Simulated a Compression Ignition Engine Including Intake and Exhaust System”, SAE 710173, 1971.
- 5) R. S. Benson, “The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engine”, Vol.1. 1982.
- 6) T. G. Adams, “Effect of Exhaust System Design on Engine Performance”, SAE 800319, 1980.
- 7) R. J. Tabaczynski. “Effects of Inlet and Exhaust System Design on Engine performance”, SAE Paper No. 821577, 1982.
- 8) Masajikumo 外 3人, “Development of New EGR System”, 自動車技術, Vol.54, No.9, pp. 86-93, 2000.
- 9) 최재성, “EGR 시스템을 갖춘 디젤기관의 성능예측 프로그램 개발”, 한국기계연구원 연구 보고서, 1996.
- 10) 조규철 외 3인, “4실린더 디젤기관 흡기계의 최적설계 방법에 관한 연구” 한국자동차공학회논문집, 제5권 제5호, pp.104-113, 1997.