

# 디젤기관의 내장형 EGR시스템 적용 가능성에 관한 연구

남 정 길\* · 최 재 성\*\*

## A Study on the Application of the Built-in EGR System for Diesel Engine

J. G. Nam\* · J. S. Choi\*\*

**Key words** : Built-in EGR(내장형 배기가스재순환장치), Volumetric Efficiency(체적효율), Method of Characteristics(특성곡선법), Residual Gas Fraction(잔류가스량)

### 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 built-in EGR system. The built-in 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, the possibility of using the built-in EGR system was confirmed.

### 1. 서 론

디젤기관은 많은 발전을 거듭하여 연료소비율 면에서는 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.<sup>1)~9)</sup> 후처리 방법에는 배기계통에 산화 촉매장치를 설치하여 주로 배기중의 미립자

를 제거할 목적으로 이용되고 있으며, 전처리 방법으로는 NOx를 저감시키기 위하여 여러가지 방법(EGR, 물분사, 유화유, 연료분사시기지연, 연소실형상개조 등)이 연구되고 있으나 현재로는 EGR법이 가장 효과적인 것으로 판단되어 주로 이용되고 있다. NOx는 일반적으로 대기의 질소와 산소가 화학반응을 통하여 연소과정동안 생성되며 생성요인에 따라 열에 의한 열적(Thermal) NOx, 연료 자체에 질소가 함유되어 있을때 생성되는 연료(Fuel) NOx와 연료로부터 생겨난 라디칼(Radi-

\* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 3월)

\*\* 한국해양대학교

cal)과 질소의 반응에 의해 생성되는 신속(Prompt) NOx로 분류되고 있다. 이러한 NOx중에서 열적 NOx가 대부분을 차지하며 열적 NOx중에서도 NO가 95%정도로 대부분을 차지한다.<sup>[10]</sup>

NOx 저감을 위해서 현재 사용하고 있는 외장형 EGR시스템은 흡 배기 매니폴드에 장착되기 때문에 흡 배기 매니폴드 설계시 고려되어야 한다. 그러나 현재 사용하고 있는 EGR시스템은 외장형으로써 기관 설치공간 측면에서 최외곽에 위치하기 때문에 기관 치수에 영향을 미치며, 각 기통별로 EGR량을 일정하게 공급하기 위해서는 흡기 매니폴드 입구부에 EGR파이프를 연결시켜야 하기 때문에 설치공간이 극히 제한되어 있어서 작업성 정비성이 매우 불리하게 되어 있다.

따라서, 본 연구에서는 콤팩트 하면서도 각 기통별로 EGR량을 일정하게 공급할 수 있는 내장형 EGR시스템의 가능성에 관하여 검토하고자 하였다.

연구방법으로는 전보<sup>[11]</sup>의 실험 및 계산 결과가 정성적으로는 물론 정량적으로 비교적 잘 일치함을 확인했으므로 동일기관(직경-행정 : 94 mm×100 mm, 압축비 : 21.0, 최대출력 : 63 kW/4,000 rpm)을 모델로 하여 흡 배기밸브만의 효과를 분명히 하기 위해서 흡 배기 매니폴드가 없는 단기통기관의 경우와 4기통기관의 경우에 대하여 흡 배기밸브의 타이밍 및 리프트량의 변화에 의한 기관 속도별 체적효율 및 잔류가스량의 변화를 연구 분석하였으며, 실제 4기통 4행정사이클 디젤기관에 적용해 보았다.

## 2. 기존 EGR시스템의 문제점 및 내장형 EGR시스템의 개념

배기 규제치는 각 기관의 배기량, 연소방식(DI, IDI), 탑재차량(Bus, Truck) 및 수출지역에 따라서 조금씩 차이가 있다. 또한 배기 성분은 기관의 종류에 따라 그리고 기관의 운전조건에 따라 다르다. 본 연구에서 모델로 하고 있는 기관은 2.8 리터급 직접분사식 디젤기관으로 부실식에 비하여 NOx 배출량이 많기 때문에 EGR율을 40% 수준까지 높여야 할 필요성이 있으나 기관회전속도와 부하에

따라 필요 EGR율이 다르기 때문에 기관성능의 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 배출물 규제에 대응하기 위해서 부실식 기관에서도 EGR 시스템을 채택하고 있는 실정이지만 훨씬 많은량의 EGR율을 요구하는 직접분사식 기관에 있어서는 흡 배기 차압( $\Delta P$ ) 만으로는 요구 EGR율을 만족할 수 없기 때문에,  $\Delta P$ 를 크게 할 수 있는 부대장치가 동원되지 않으면 안되는 실정이다. 부대장치로는 플랩(Flap) 밸브를 설치하여  $\Delta P$ 를 강제적으로 크게 해주는 방법과 EGR 밸브 2개를 동시에 설치해 주는 방법이 있으나 현실적으로는 효과가 큰 플랩 밸브 설치식을 채용하고 있다.

EGR율에 영향을 미치는 인자로는  $\Delta P$ , EGR밸브 열림시간, EGR밸브 및 EGR파이프 단면적이며, EGR파이프의 길이 및 형상에도 영향을 받는다. 또한 EGR을 분기시키는 배기 매니폴드의 위치에 따라서도 영향을 받는다.

그리고 EGR시스템의 기본적인 구성품으로는 EGR밸브, EGR파이프, 솔레노이드밸브, 진공파이프, 각종 센서(rpm, 수온, 스로틀개도) 등이 있으며 특히 직접분사식 기관에 있어서 NOx 규제치를 만족하기 위해서는  $\Delta P$ 를 크게 하기 위한 부대장치(액츄에이터, 스로틀밸브, 진공용 호스 등)가 필요하므로 EGR시스템이 구성되어야 할 만큼 구조가 복잡해져서 가격 및 연비 상승의 요인이 된다.

또한 스로틀밸브 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 EGR파이프는 조립시 공차에 의한 초기 비틀림 응력과 진동 때문에 내구성 확보에 어려움이 많다.

따라서 이러한 종래 외장형 EGR시스템의 설치 공간상의 문제점을 보완하여 좀더 콤팩트 하면서도 펌핑 손실을 줄이고, 각 기통별로 EGR량을 일정하게 공급할 수 있는 내장형 EGR시스템의 도입 가능성을 검토하고자 한다.

내장형 EGR시스템이란 흡 배기 밸브의 타이밍

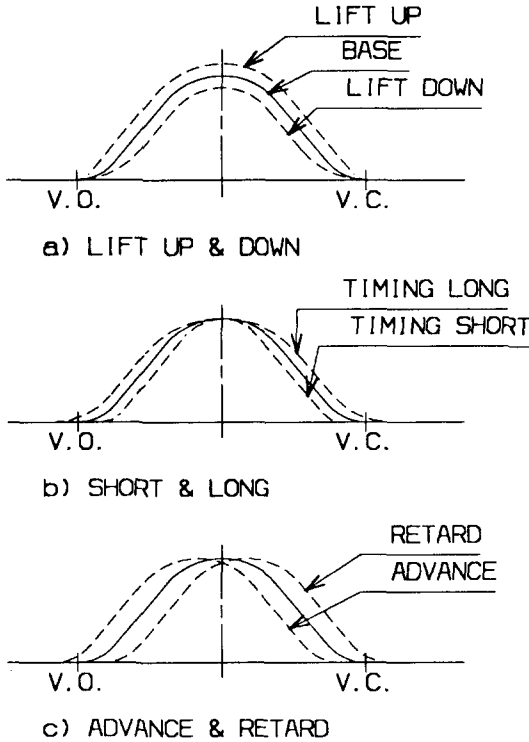


Fig. 1 Changed profile for timing and lift of intake and exhaust valve

변경 및 흡 배기 밸브 리프트의 가감만으로 실린더 내 잔류가스량을 조절하는 방법으로 기관 본체의 변경없이도 EGR효과를 볼 수 있는 장치로써 종래의 외장형 EGR시스템과 구별하여 내장형 EGR시스템이라 할 수 있다. Fig. 1에는 흡 배기 밸브의 타이밍 변경 및 리프트 가감의 형태를 나타내고 있다.

### 3. 흡 배기 밸브에 의한 영향

#### 3.1 흡 배기 밸브 리프트의 영향

Fig. 2 에서 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 최대 약 1% 정도 증가한다. 또한, 리프트 감소시에는

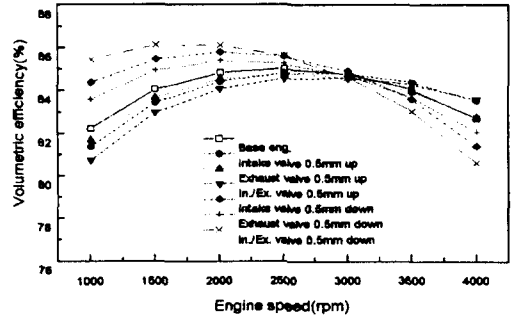


Fig. 2 Calculated results of volumetric efficiency by intake & exhaust valve lift

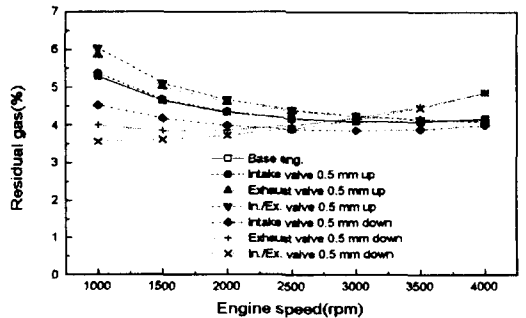


Fig. 3 Calculated results of residual gas by intake & exhaust valve lift

3,000 rpm 이하에서는 저속구간으로 갈수록 증가량이 커져서 최대 약 3% 정도 증가하고 그 이상의 고속구간에서는 최대 약 2% 정도 감소한다. 그리고 흡기 밸브의 리프트 변경시 배기 밸브의 리프트 변경시보다 체적효율에 미치는 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 3,000 rpm 을 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 위하여는 3,000 rpm 이하의 저속구간에서는 흡 배기 밸브의 리프트를 증가시키는 것이 바람직하며 3,000 rpm 이상 고속구간에서는 흡 배기 밸브의 리프트를 감소시키는 것이 바람직함을 알 수 있다.

#### 3.2 흡기밸브 개폐시기의 영향

Fig. 4는 흡기밸브의 개폐시기를 변경하였을때

체적효율의 계산결과를 나타낸 것으로 비교적 영향이 큰 경우만을 나타내었다. 흡기밸브의 개폐시기를 각각 10°씩 짧게 하였을 경우는 모델 기관과 비교하여 큰 차이가 없었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모델 기관을 기준으로 하여 흡기밸브 개폐시기를 전진시키면 3,000 rpm 이하 구간에서는 체적효율이 약간 증가하고, 3,000 rpm 이상 구간에서는 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 흡기밸브 개폐시기를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율이 약 2.0% 정도 감소함에도 불구하고 잔류가스량은 모델 기관과 동등 수준이므로 지양해야 할 밸브조절 방법이다. 흡기밸브 개폐시기의 전 후진에 있어서 전진시켰을 때 체적효율이 좋은 이유는 배기행정 종료 시에는 실린더내 압력이 낮은 상태에 있기 때문으로 흡기밸브의 열림시기가 빠를수록 좋음을 알 수

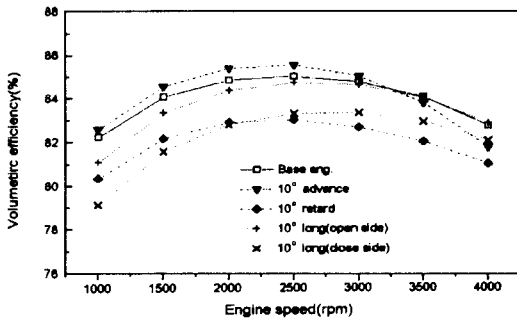


Fig. 4 Calculated results of volumetric efficiency by intake valve timing

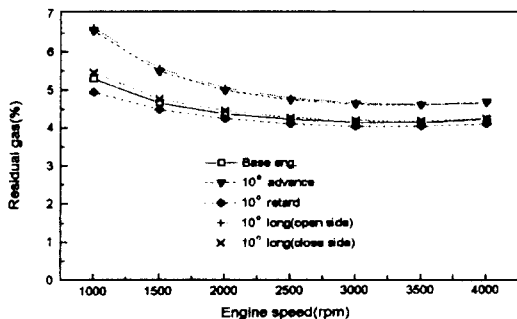


Fig. 5 Calculated results of residual gas by intake valve timing

있다.

그리고 흡기밸브 열림시기를 10° 빠르게 하면 저속구간에서 체적효율이 감소하지만 전 rpm 구간에서 잔류가스량이 증가함을 알 수 있다. 그러나 흡기밸브 닫힘시기를 10° 느리게 하면 전 rpm 구간에서 체적효율이 약 3.0% 정도 감소함에도 불구하고 잔류가스량은 모델 기관과 비교하여 거의 차이가 없으므로 지양해야 할 밸브 조절 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 하였을 경우는 모델 기관과 비교하여 큰 차이가 없었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모델 기관을 기준으로 배기밸브 개폐시기를 전진시키면 2,000 rpm을 경계로 하여 그 이하 구간에서는 체적효율이 약간 증가하고, 2,000 rpm 이상 구간에서는 고속구간으로 갈수록 점점 감소량이 증가하여 4,000 rpm 에서는 최대 약 2% 정도 감소한다. 또한 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율이 감소하며 저속구간으로 갈수록 더욱 더 감소량이 증가하여 최대 약 2% 정도 감소한다. 그리고 배기밸브 열림시기를 10° 빠르게 하면 모델 기관과 비교하여 체적효율 및 잔류가스량의 증감은 거의 없다. 그러나 배기밸브 닫힘시기를 10° 느리게 하면 전 rpm 구간에서 체적효율의 저하가 크지만 저속구간으

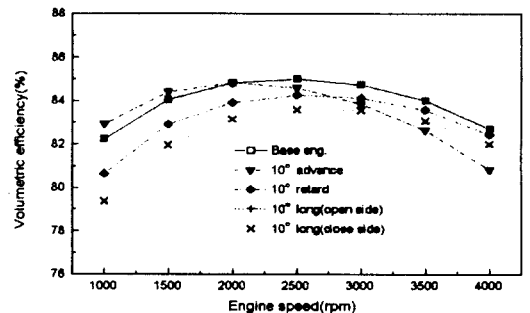


Fig. 6 Calculated results of volumetric efficiency by exhaust valve timing

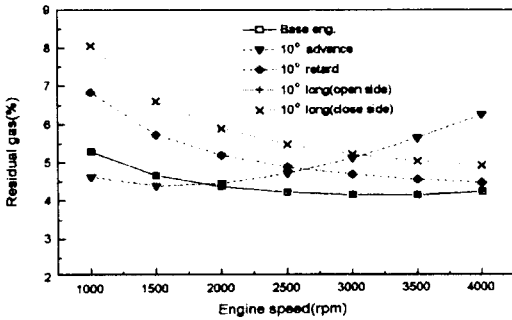


Fig. 7 Calculated results of residual gas by exhaust valve timing

로 갈수록 증가율이 커져서 최대 약 3% 정도 잔류 가스량이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 배기밸브의 닫힘시기가 늦어질수록 흡기밸브의 열림시기와 오버랩 기간이 길어지면서 배기의 반사파가 실린더내로 유입되기 때문이다.

실린더내 잔류가스량은 Fig. 7에서와 같이 체적 효율곡선과 정반대 현상을 나타내고 있다. 특히, 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 저속구간에서 잔류가스량이 증가하고, 전진시키면 고속구간에서 잔류가스량이 증가하는 현상을 볼 수 있으며, 배기밸브의 닫힘시기를 늦추면 저속구간에서 잔류 가스량을 극대화시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 3.4 흡·배기 밸브 리프트 및 개폐시기에 의한 영향

이상의 검토결과로부터 밸브 리프트 및 개폐시기를 적절히 선택하면 실린더내 잔류가스량을 필요한 회전속도 영역에서 극대화시킬 수 있음을 알았다. Fig. 8은 모델 기관을 기준으로 하여 흡 배기 밸브의 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 전진시켜도 전 rpm 구간에서 체적효율이 감소한다.

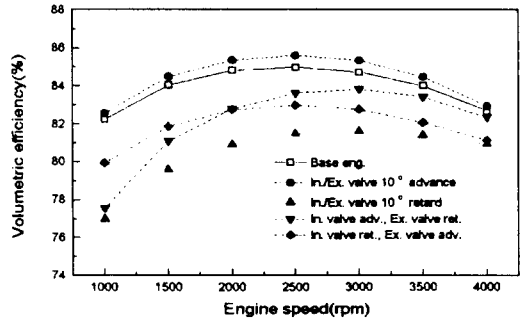


Fig. 8 Calculated results of volumetric efficiency by intake & exhaust valve timing

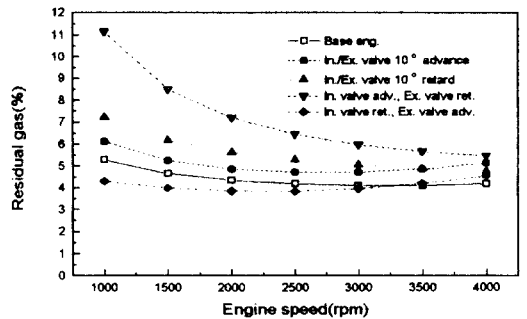


Fig. 9 Calculated results of residual gas by intake & exhaust valve timing

실린더내 잔류가스량은 Fig. 9에서와 같이 체적 효율곡선과 정반대 현상을 나타내고 있으며 흡기 밸브 개폐시기를 전진시키고 배기밸브개폐시기를 후진키시면 저속구간에서 약 6% 정도 잔류가스량을 많이 남게 할 수 있다. 이는 저속구간에서 요구되는 EGR율의 증가를 고려하면, 내장형 EGR 시스템을 적용하는 것이 가능하다고 생각된다. 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 체적 효율곡선 및 실린더내 잔류가스량은 흡 배기 매니폴드가 없는 단기통 기관과 동일한 경향을 보이나 흡 배기 매니폴드 및 흡 배기의 간섭에 의한 관성 및 맥동효과가 포함되어 나타난다.

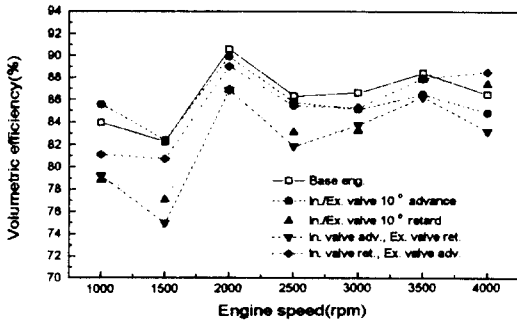


Fig. 10 Calculated results of volumetric efficiency by intake & exhaust valve timing

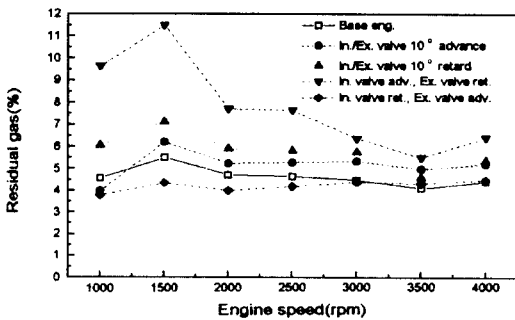


Fig. 11 Calculated results of residual gas by intake & exhaust valve timing

Fig. 10에서와 같이 모델 기관을 기준하여 흡 배기밸브의 리프트를 0.5 mm 증가시킨 후 흡 배기밸브 개폐시기를 10° 전진시키면 1,500 rpm 이상 구간에서는 체적효율이 감소하고 그 이하 구간에서는 증가한다. 그리고 흡 배기밸브의 리프트를 0.5 mm 증가시킨 후 흡 배기밸브 개폐시기를 10° 후진시키면 3,600 rpm 이하 구간에서는 체적효율의 감소량이 증가하여 최대 약 3.7% 정도 감소한다. 흡기밸브 개폐시기를 전진시키고 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 전 rpm 구간에서 체적효율의 감소량이 증가하여 최대 약 3.8% 정도 감소하고 잔류가스량은 Fig. 11에서와 같이 저속으로 갈수록 점점 증가량이 커져서 최대 약 6% 정도 증가한다. 또한 흡기밸브 개폐시기를 후진시키고 배기밸브 개폐시기를 전진시키면 3,500 rpm 이하의 저속구간에서는 체적효율이 저속으로 갈수록 감소량이 증가하여 최대 약 2.5% 정도 감소하나 그 이상 구간에서는 약간씩 증가하였다. 그리고 잔류가

스량은 3,500 rpm 부근을 제외한 전 rpm 구간에서 감소하였다.

따라서 단기통 기관에서와 마찬가지로 흡기밸브 개폐시기를 전진시키고, 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 잔류가스량이 증가하며, 저속구간에서 더욱 그 정도가 커짐을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 흡 배기계를 단순화 하면서 EGR율을 확보하기 위한 방법으로 내장형 EGR시스템에 관하여 그 가능성을 검토하였다. 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. 흡기밸브 개폐시기를 전진시키고 배기밸브 개폐시기를 후진시키면 저속구간에서 잔류가스를 증가시킬 수 있으며, 동시에 흡 배기밸브의 리프트를 증가시키면 저속구간에서 잔류가스량을 극대화시킬 수 있다. 또한 고속 구간에서는 배기밸브 개폐시기를 전진시키고 동시에 흡 배기밸브의 리프트를 감소시키면 잔류가스량을 극대화시킬 수 있음을 알았다.

NOx를 저감시키는 기술로는 지금까지 냉각식 EGR, 플랩밸브가 설치된 EGR시스템이 이용되고 있으나 앞으로 더욱더 엄격해질 에미션 규제치를 만족시키기 위해서는 현 EGR시스템에 내장형 EGR시스템을 병행하는 방법도 고려될 수 있을 것으로 판단 된다.

## 참고문헌

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. 鳴本 謙, "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 編, 1987. 6.
4. R.S. Benson, "A Comprehensive Digital Computer Program to Simulated a Compression Ignition Engine Including Intake and Exhaust System", SAE PaperNo. 710173, 1971.
5. R.S. Benson, "The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engine", Volume 1. 1982.
6. T.G. Adams, "Effect of Exhaust System Design on Engine Performance", SAE Paper No. 800319, 1980.
7. R.J. Tabaczynski. "Effects of Inlet and Exhaust system Design on Engine Performance", SAE Paper No. 821577, 1982.
8. 최재성, "디젤機關의 性能豫測-給·排氣管系 및 過給機系の 흐름 解析", 한국박용기관학회지 제12 권 제 3호, 1988. 8.
9. 최재성, "흡·배기계통을 포함한 4행정 디젤기관의 성능예측 시뮬레이션 프로그램의 개발", 한국박용 기관학회지, 제 13권 3호, 1989. 8.
10. 최재성, "EGR 시스템을 갖춘 디젤기관의 성능예측 프로그램개발", 한국기계연구원 연구 보고서, 1996. 10.
11. 조규철 외 3인, "4실린더 디젤기관 흡기계의 최적설 계 방법에 관한 연구" 한국자동차공학회지, 제 5권 5호, 1997. 9.

## 저 자 소 개



**남정길(南廷吉)**

1962년 7월생. 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1991년 동대학원 졸업(석사). 1999년 동대학원 졸업(박사). 1992년~현재 현대자동차(주) 선형연구소 디젤엔진설계2팀. 대리. 당학회 회원.



**최재성(崔在星)**

1952년 5월생. 1974년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1976년 동대학원 졸업(석사). 1986년 일본경도대학 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1974년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수. 당학회 총무이사.