

## 4실린더 디젤기관 배기계의 최적설계에 관한 연구

남 정 길\* · 최 재 성\*\*

### A Study on the Optimum Design of Exhaust System for 4 Cylinder Diesel Engine

J. G. Nam \* · J. S. Choi \*\*

**Key words** : Volumetric Efficiency(체적효율), Method of Characteristics(특성곡선법), Dynamic Effect of Gas(가스의 동적효과), Multi-Cylinder Engine(다실린더기관)

#### Abstract

Dynamic effect of gas in exhaust manifold influences the volumetric efficiency of the engine. Especially in case of multi-cylinder engine, the shape of exhaust manifold is important for the optimum design of exhaust manifold complicated.

In this paper, the effects of exhaust manifold systems on volumetric efficiency were investigated for the 4 cylinder 4 stroke-cycle diesel engine. Volumetric efficiency was calculated by the method of characteristics. The calculation results coincided well with the test results. This study showed that the appropriate position and diameter of exhaust manifold branch are important factors in increasing volumetric efficiency and decreasing pumping loss.

#### 1. 서 론

4행정 디젤기관에서는 피스톤의 운동에 의하여 새로운 공기의 흡입과 연소가스의 배출이 되풀이 되기 때문에, 흡·배기관 내에 압력진동이 발생하며, 이러한 가스의 동적효과를 이용하여 흡기량을 증가시키거나 펌프손실을 감소시킬 수 있다. 이는 구동부분의 변경 없이 흡 배기계의 길이 및 형상을 변경시키는 것만으로 기관의 출력을 향상시킬 수

있다는 장점을 가지고 있다.<sup>[1][2]</sup> 흡·배기계의 형상 변화에 의한 엔진의 성능을 향상시키기 위한 이론 및 실험적 연구가 1970년대 초부터 진행되기 시작하였으며<sup>[3]~[7]</sup>, 국내에서는 80년대 후반부터 주로 학계에서 연구논문이 발표되기 시작했다.<sup>[8][9]</sup> 최근 가솔린 엔진에서는 배기간섭 효과가 약 2,000 rpm 이하의 저속영역에서 뚜렷하게 나타나고 있으나 배기관의 이음부를 변화시킴으로써 억제할 수 있다고 보고 되었다.<sup>[10]</sup>

\* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 3월)

\*\* 한국해양대학교

배기계 설계에 있어서 가장 중요한 것은 실린더 내 잔류가스를 최대한 줄여 체적효율을 향상시키는 것이다. 체적효율을 향상시키는 방법으로 배기 간섭을 억제하기 위해 실린더 사이의 배기관 길이를 길게 분리하는 방법을 생각할 수 있으나, 차량 설치공간 및 촉매장치의 작동 준비시간 지연으로 시동시 에미션에 나쁜 영향을 줄 수 있으므로 주의를 필요로 한다. 따라서 한정된 배기계의 설치공간 내에서 배기 간섭을 억제할 수 있는 방법으로는 배기계의 형상을 변화시켜 배기 관성을 이용하는 것으로 배기밸브열림시에 배출되는 가스로 말미암아 압축파가 배기관을 침투하여 이음부에서 반사되는 팽창파를 배기밸브닫힘 직전에 실린더에 도달시켜 소기를 돕도록 하는 방법이다.

또한 다기관에서는 다음 압축착화되는 실린더의 블로우다운에 의한 압축파가 이음부를 통하여 역류하여 밸브접침기간 중의 소기행정을 방해받지 않도록 배기관의 형상을 변화시키는 방법을 생각할 수 있다. 그러나 이와 같은 현상은 배기계의 형상 및 치수에 크게 영향을 받기 때문에 특히 다실린더 기관의 배기계를 설계하기는 간단하지 않으며 많은 시행착오를 겪고 있다. 따라서 시뮬레이션 계산에 의하여 최적 배기계를 설계함으로써 시간적·경제적 손실을 절감할 수 있다.

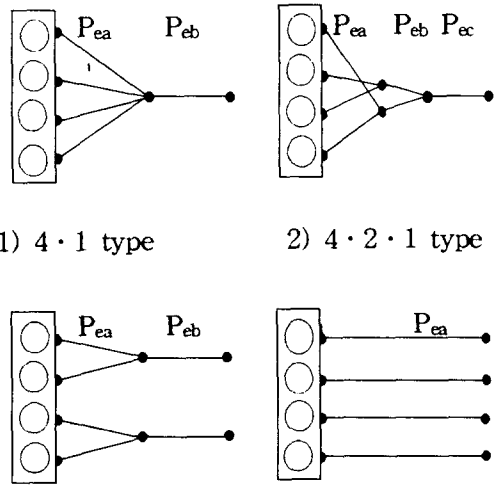
본 연구에서는 전보<sup>11)</sup>에서 연구 대상이었던 4실린더 직접분사식 디젤기관을 대상으로 배기계형상이 기관성능에 미치는 영향에 관하여 연구·분석하였다.

## 2. 기본계의 구성

본 연구에서는 4실린더 디젤기관에서 주로 사용하고 있는 4·1형에 비하여 배기 간섭을 줄이는 형상인 4·2·1형, 4·2·2형, 4·4형으로 모델링하여 배기관 형상의 변화에 의한 체적효율 특성 및 기관성능에 미치는 배기계의 형상 및 치수의 영향을 시뮬레이션을 통하여 연구 분석하였다.

모델링 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

여기에서 4·1형은 설치공간 측면에서 가장 유리하여 현재 4기통 디젤기관에서 주로 사용하고 있는 대표적인 형상이다.



1) 4·1 type

2) 4·2·1 type

3) 4·2·2 type

4) 4·4 type

Fig. 1 4 Models of exhaust manifold

4·2·1형은 가솔린기관에서는 이미 사용되고 있으나 디젤기관에서는 설치공간 측면에서 불리하여 아직 연구 단계에 있는 형상이다.

4·2·2형은 4·2·1형에 비하여 배기 간섭을 줄이고자 착안한 모델로 체적효율은 분명히 좋아지나 머플러가 2개 소요되는 형상으로 설치공간 및 가격면에서 불리하여 아직까지는 실무에서 배제하고 있는 형상이다. 그러나 배기관 효과를 극대화 하는 측면에서는 적극적으로 검토할 필요가 있는 형상이다.

4·4형은 배기 간섭을 완전히 배제할 수 있는 이상적인 배기계로 단기통 기관과 같은 배기관 효과를 얻을 수 있는 형상이며 경주용에서 주로 사용하고 있다.

본 연구에서는 실제기관에서 주로 이용되고 있는 4·1형과 4·2·1형에 대하여 각 브랜치 위치 및 직경이 체적효율에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

계산 대상 기관은 4실린더 4행정사이클 디젤기관(직경x행정 : 94 mm×100 mm, 압축비 : 21.0, 최대출력 : 63 kW/4,000 rpm)으로 계산결과와 신뢰성을 확인하기 위하여 Fig. 2에 실험결과와의 비교를 나타내고 있다. 그림으로부터 계산결과와 실험결과와 정성적으로는 물론 정량적으로도 비교

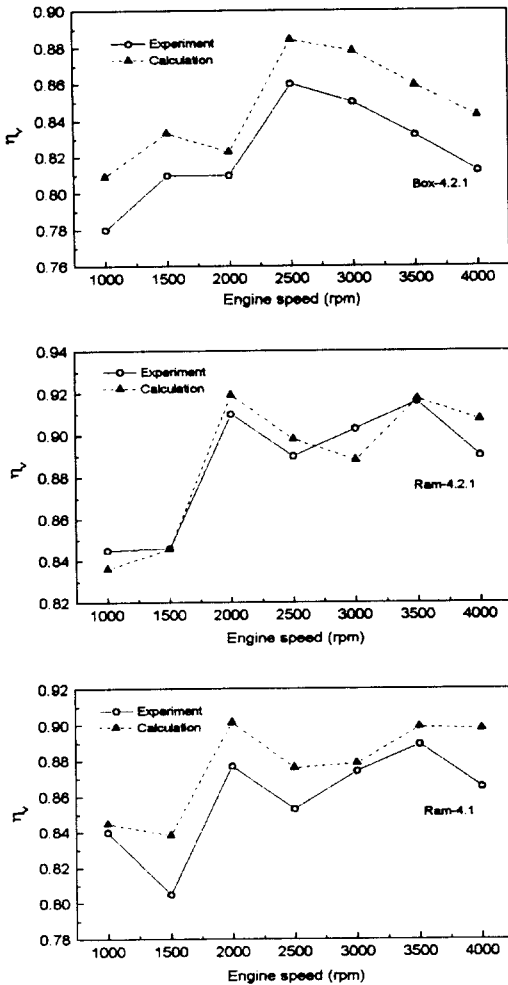


Fig. 2 Comparison of results between calculation and experiment

적 잘 일치하고 있음을 나타낸다.<sup>[11]</sup> 따라서, 배기계 구성에 의한 영향을 파악함에 있어서 계산시간을 단축하고 배기계만의 영향을 분명히 하기 위하여 이후의 계산 모델에서는 흡기계를 생략하였다.

### 3. 단실린더기관 배기 매니폴드

Fig. 3은 단실린더기관의 경우 배기관만의 영향을 조사한 것으로 배기관  $P_{ea}$ 의 길이가 체적효율에 미치는 영향을 기관회전속도에 대하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 관  $P_{ea}$ 의 길이 변화에 의하여 체적효율의 변화가 뚜렷함을 알 수 있다. 즉 배기

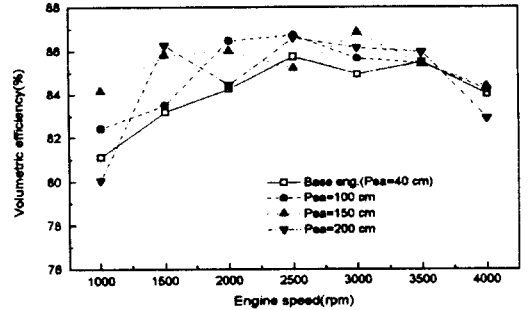


Fig. 3 Effect of  $P_{ea}$  on volumetric efficiency for single cylinder engine

관 길이가 길어지면 배기관 단에서 반사된 부압파가 배기밸브에 도달하는데 걸리는 시간이 늦게 되어 체적효율에 영향을 미치지 않기 때문에 배기관의 길이가 길어질수록 저속영역에서 체적효율이 향상된다.

## 4. 4·1형 배기 매니폴드

### 4.1 배기관 길이의 영향

#### 4.1.1 관 $P_{ea}$ 의 길이에 의한 영향

Fig. 4는 실린더마다 독립되어 실린더헤드에 부착되어 있는 관  $P_{ea}$ 의 길이 변화가 체적효율에 미치는 영향을 기관회전속도에 대하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 관  $P_{ea}$ 의 길이 변화에 의하여 저중속 영역에서 체적효율에 미치는 영향은 크게 나타나며, 고속영역에서는 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다. 이는 4·1형 모델에서 배기간섭은 주로 관  $P_{ea}$ 의 길이에 의하여 영향을 받기 때문이며 관  $P_{ea}$ 의 길이가 길수록 배기간섭의 영향이 적게 됨을 고려할때 관  $P_{ea}$ 를 짧게 할 경우 배기간섭 효과에 대한 적극적인 이용대책을 수립할 필요가 있음을 나타낸다.

#### 4.1.2 관 $P_{eb}$ 의 길이에 의한 영향

Fig. 5는 각 실린더로부터의 배기관이 집합되는 관  $P_{eb}$ 의 길이 변화가 체적효율에 미치는 영향을 기관회전속도에 대하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 관  $P_{eb}$ 의 영향은 배기 개방단으로부터 반사되는 배기 압력파가 관제하기 때문에, 전 속도 영역에 영향을 미치고 있으며,

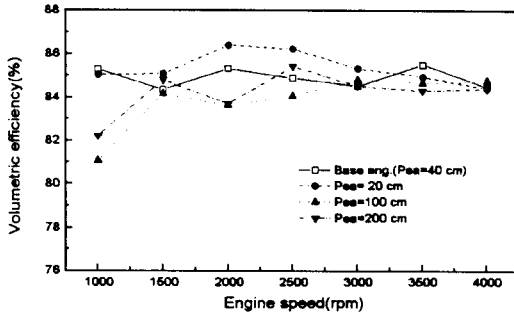


Fig. 4 Effect of  $P_{ea}$  on volumetric efficiency for 4 · 1 type

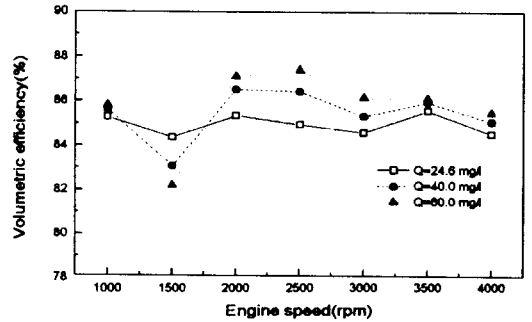


Fig. 6 Effect of load on volumetric efficiency for 4 · 1 type

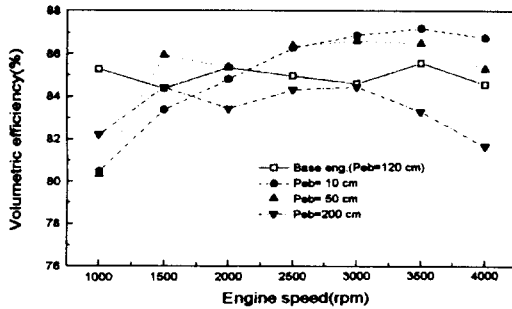


Fig. 5 Effect of  $P_{eb}$  on volumetric efficiency for 4 · 1 type

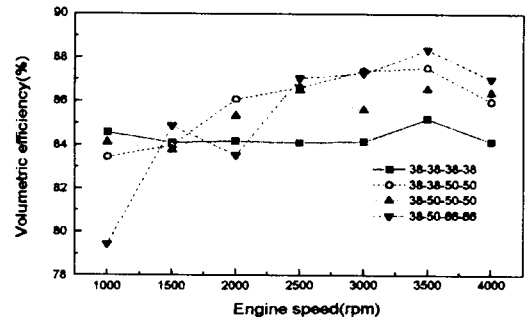


Fig. 7 Effect of diameter on volumetric efficiency for 4 · 2 · 1 type

따라서 관  $P_{eb}$ 의 길이에 따라 체적효율곡선의 형태가 달라짐을 알 수 있다. 즉 배기관  $P_{eb}$ 의 길이가 길면 고속측의 체적효율이 감소하고 짧으면 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 배기관내의 동적 효과에 의한 것으로 배기관의 길이를 적절하게 선택함으로써 요구되는 회전속도 영역에서 체적효율의 향상을 얻을 수 있음을 의미한다.

#### 4.2 부하에 의한 영향

Fig. 6은 부하의 변화가 체적효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 배기관내의 동적효과는 배기 블로우다운시의 맥동압력에 의하여 발생함으로 맥동압력 진폭은 동적효과에 영향을 미치게 된다.

따라서 배기 맥동압력 진폭은 고부하일수록 크게 되므로 부하가 증가할수록 영향이 크게 나타나게 됨을 그림으로부터 분명히 알 수 있다. 여기서 부하에 의한 영향은 공급연료량  $Q$ 로 표현하기로 하며, 공급 연료량의 단위는 mg/l로 행정용적 1 리터당 공급 연료량으로 나타냈다.

### 5. 4 · 2 · 1형 배기 매니폴드

#### 5.1 접속부 관직경에 의한 영향

관직경은 유동저항에 영향을 미치기 때문에 체적효율에도 영향을 미치게 된다. 따라서 복잡한 매니폴드의 경우 관직경의 선택도 매니폴드의 설계에 중요한 인자가 된다. 일반적으로 복잡한 매니폴드의 경우 관직경의 결정은 배기가스의 유동저항을 고려하여 급격한 단면적의 변화와 유속의 변화를 피할 수 있도록 설계한다. 따라서 관접합부에서의 출구측 관내경( $D_o$ )은 다음과 같은 방법으로 결정한다.

$$D_o = C\sqrt{k} \cdot D_i$$

여기서  $k$ 는 유입측 집합관수,  $C$ 는 경험계수 (0.93),  $D_i$ 는 입구측 관내경이다.

그러나 실제 기관에 이용하는 배기관은 이미 개발되어 있는 배기관을 이용하게 되기 때문에, 계산

결과에 가장 가까운 관직경을 선택하게 된다. Fig. 7에는 4·2·1형 배기 매니폴드에서 브랜치 접속부 내경 변화에 의한 기관속도별 체적효율을 나타내었다. 그림에는 각 관의 연결 부위의 관직경을 나타낸 것으로 예를 들면 38φ-38φ-50φ-50φmm의 경우 관 P<sub>ea</sub>의 입·출구 직경은 각각 38φmm인 직관, 관 P<sub>eb</sub>의 입·출구 직경은 각각 38φmm, 50φmm인 테이퍼관, 관 P<sub>ec</sub>는 입·출구 직경이 각각 50φmm인 직관을 의미한다. 그림으로부터 관요소별 직경의 선택도 체적효율에 영향이 있음을 알 수 있다. 또한 관 직경이 클수록 유동저항의 감소로 고속측에서의 체적효율 향상이 크게 나타나고 있으며, 4·2·1형 배기 매니폴드의 경우 전 회전속도 영역에서 38φ-38φ-50φ-50φmm의 형상이 가장 바람직한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

5.2 각 관요소의 길이 변화에 의한 영향

Fig. 8~10에는 4·2·1형 배기 매니폴드에서

각 관 요소의 길이 변화에 의한 기관속도별 체적효율을 특성을 각각 나타내었다.

각 관요소가 체적효율에 영향을 미치는 경향은 4·1형 배기 매니폴드에서 분석된 결과가 그대로 적용되는 것으로 판단된다. 즉 실린더 헤드에 가까운 관요소의 영향은 착화순서가 이웃하는 실린더의 배기과정에 영향을 미치게 되어, 배기간섭을 일으키게 한다. 또한 실린더 헤드로부터 멀리 떨어진 관요소는 동적효과에 의하여 전 회전속도 영역에서 영향을 미치게 됨을 확인할 수 있다.

6. 각 배기 매니폴드 형상에 의한 성능비교

Fig. 1에서 모델링한 4가지의 배기계 형상 변화에 따른 체적효율, 펌프손실을 Fig. 11과 12에 기관속도별로 비교하여 나타냈다.

그림들로부터 배기 매니폴드에 의하여 기관의

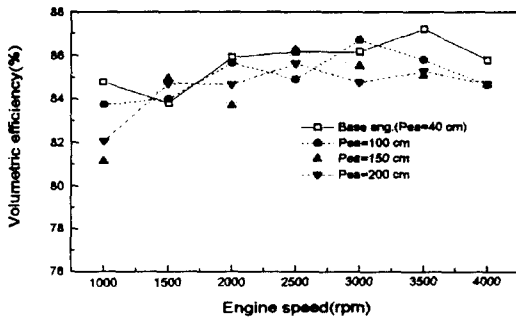


Fig. 8 Effect of P<sub>ea</sub> on volumetric efficiency for 4·2·1 type

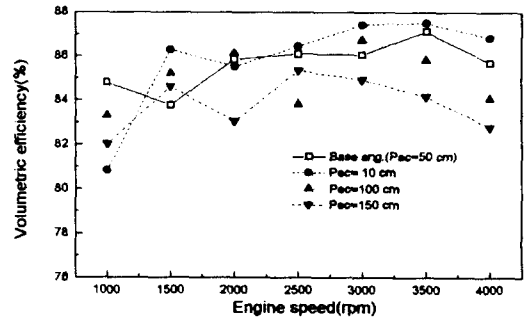


Fig. 10 Effect of P<sub>ec</sub> on volumetric efficiency for 4·2·1 type

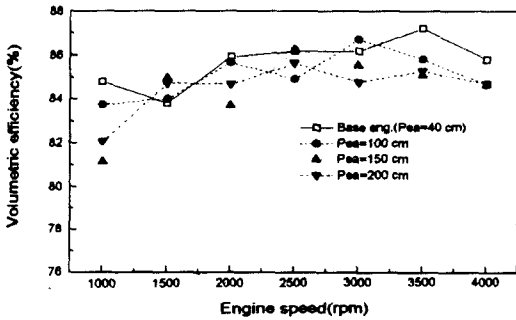


Fig. 9 Effect of P<sub>eb</sub> on volumetric efficiency for 4·2·1 type

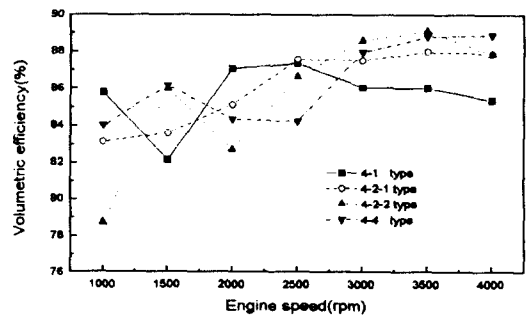


Fig. 11 Calculated results of volumetric efficiency for 4 models

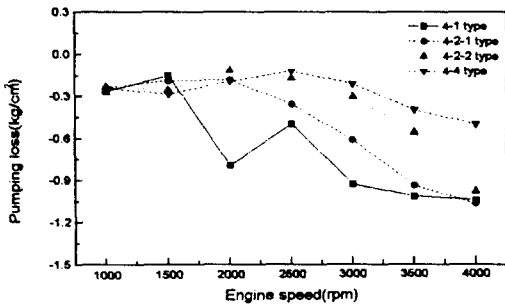


Fig. 12 Calculated results of pumping loss for 4 models

성능이 달라짐을 알 수 있으며 기관 회전속도 전 영역을 고려할때 4·2·1 형 배기 매니폴드가 바람직하다고 판단된다. 또한 일반적으로 체적효율의 증가는 펌프손실의 증가를 초래하게 되나, Fig. 11과 12를 비교하면 고속영역에서 체적효율을 향상시키면서 펌프손실을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 다실린더 기관의 경우 배기 매니폴드의 설계변수는 증가하지만, 최적의 배기 매니폴드를 설계할 수 있다고 생각된다.

### 7. 결 론

본 연구에서는 흡기 매니폴드에서와 마찬가지로 배기 매니폴드에 있어서도 동적효과가 존재하기 때문에 배기 매니폴드의 형상변경에 의한 체적효율 특성을 연구·분석하여 최적 배기계를 설계하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 4·1형에서는 관  $P_{eb}$ 의 길이 변화가, 그리고 4·2·1형에서는 관  $P_{ec}$ 의 길이 변화가 배기 개방단으로부터 반사되는 배기 압력과 관계되기 때문에 전 속도에서 체적효율곡선 형태에 영향을 미치므로 적절한 길이 선택을함으로써 설계 목적에 가까운 배기계를 설계 할 수 있다.
2. 4·2·1형 배기 매니폴드의 경우 관 집합부의 직경은 식  $Do = C\sqrt{k} \cdot Di$ 에 의하여 결정할 수 있으며, 이때 경험계수  $C$ 는 0.93 이 전 회전속도 영역에서 가장 바람직한 값을 확인했다.
3. 배기계 형상(4·1형, 4·2·1형, 4·2·2형, 4·4형)에 따라 기관성능이 달라짐을 알 수 있으며, 배기간섭이 없는 4·4형의 경우 고속으로

갈수록 체적효율이 향상되면서도 펌프 손실이 상대적으로 낮다.

4. 배기관내의 동적효과는 배기 블로우다운시의 맥동압력에 의하여 발생하므로 맥동압력 진폭은 동적효과에 영향을 미치게 되며, 배기 맥동압력 진폭은 고부하 일수록 크게 되므로 부하가 증가 할수록 영향이 크다.

### 참고문헌

1. G. CSER, "Double resonance system a new way to improve the low speed operation of super-charged engine", Proc. I. Mech. E., pp. 51~57.
2. 畑, 外2名, "2サイクルエンジンの吸気系改良について-YEISによる燃費, 性能改善", 内燃 機関, Vol. 20, No. 246, pp. 9~17, 1981.2.
3. 嶋本 讓, "吸·排氣管の 利用(上)", 内燃機関 Vol.10, No.108, pp.93~100, 1971.
4. 嶋本 讓, "吸·排氣管の 利用(下)", 内燃機関 Vol.10, No.111, pp. 89~95, 1971.
5. R.S. Benson, "A Comprehensive Digital Computer Program to Simulated a Compression Ignition Engine Including Intake and Exhaust System", SAE Paper No. 710173, 1971.
6. R.S. Benson, "The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engine", Volume 1. 1982.
7. R.J. Tabaczynski. "Effects of Inlet and Exhaust System Design on Engine Performance", SAE Paper No. 821577, 1982.
8. 최재성, "디젤기관의 性能豫測 -給·排氣管系 및 過給機系の 흐름 解析", 한국박용기관학회지 제 12 권 제 3호, 1988. 8.
9. 최재성, "흡·배기계통을 포함한 4행정 디젤기관의 성능예측 시뮬레이션 프로그램의 개발", 한국박용기관학회지, 제 13권 3호, 1989. 8.
10. 정수진 외 3인 "4 실린더 4 사이클 가솔린 기관에서 배기계의 형상이 기관성능에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회지, 제 18권, 제 3호, pp.751~767, 1994.
11. 조규철 외 3인, "4실린더 디젤기관 흡기계의 최적설계 방법에 관한 연구", 한국자동차공학회지, 제 5권 5호, pp. 104~113, 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.