

(논문) SAE NO. 97370097

## 4실린더 디젤기관 흡기계의 최적설계에 관한 연구

### A Study on the Optimum Design of Intake System for 4 Cylinder Diesel Engines

조 규 철,\* 강 인 철,\* 남 정 길,\* 최 재 성\*\*  
G. C. Jo, I. C. Kang, J. G. Nam, J. S. Choi

#### ABSTRACT

In this paper, the effects of intake manifold systems on volumetric efficiency were investigated in the 4-cylinder 4-stroke cycle diesel engines. The effects of intake manifold system were analyzed on resonant speed and on volumetric efficiency. Resonant speed was calculated by acoustic theory and volumetric efficiency by the method of characteristics. The calculation results agreed well with test results. It was assured that between the resonant speed and the volumetric efficiency there exists good correlation in multi-cylinder engines. As the results, the prediction of resonant speed was useful to design the optimum intake system. It was assured that the intake manifold systems for BOX-type and RAM-type have different characteristics on the trend of volumetric efficiency. Also a procedure to design the desirable intake manifold system was proposed.

주요기술용어 : Volumetric Efficiency(체적효율), Intake Manifold(흡기매니폴드), Method of Characteristics(특성곡선법), Acoustic Theory(음향이론), Resonant Speed(동조회전속도)

#### 1. 서 론

4행정 디젤기관에서는 피스톤의 운동에 의하여 새로운 공기의 흡입과 연소가스의 배출이 되풀이 되기 때문에 흡·배기관 내에 압력진동이 발생하며, 이러한 가스의 동적효과를 이용하면 흡기량을 증가시키거나 펌프손실을 감소시킬 수 있다. 이는 구동부분의 변경없이 흡기관의 길이를 변경

시키는 것만으로 기관의 출력을 향상시킬 수 있기 때문에 적극적으로 응용, 이용되고 있다.<sup>1), 2), 3)</sup> 그러나 다실린더기관의 경우 흡기매니폴드의 형상이 복잡하고, 흡기간섭이 발생하기 때문에 최적의 흡기계를 설계하기는 용이하지 않다.

본 논문에서는 필자들의 지금까지의 연구결과<sup>4), 5)</sup>를 토대로하여, 실제기관 특히 4실린더 4행정사이클 디젤기관의 흡기계를 설계함에 있어서 최적의 흡기계를 설계하기 위한 방법을 확립하고자 하였다. 필자들은 흡기계의 최적설계에 필요한 정성적 해석방법<sup>6)</sup>과 정량적 해석방법<sup>7)</sup>에 관하여

\*한국해양대학교 대학원

\*\*정회원, 한국해양대학교 기관공학부

이미 연구 보고한 바 있다. 즉, 정성적해석은 흡기계의 고유진동수를 음향이론에 의하여 구하고, 이로부터 동조회전속도를 구하는 방법이며, 정량적해석은 흡기계에 파동모델을 적용하고 계산방법으로는 특성격자법을 이용한 특성곡선법을 사용하여 체적효율을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 이 연구결과들을 이용하였다.

연구결과로써 흡기관의 형상과 각부치수가 체적효율에 미치는 영향을 분석하여 최적의 흡기매니폴드를 설계하기 위한 방법을 제시 하였으며, 실제 모델엔진에 적용하여 실험결과를 통하여 이 방법의 유용성을 확인하였다.

## 2. 실험장치 및 계산조건

연구대상기관은 4실린더 4행정사이클 디젤기관으로 주요 제원은 Table 1과 같다. 대상기관의 흡·배기밸브의 구성은 실린더 헤드 내에 Fig. 2.1과 같이 3-Valve형으로 직경이 다른 2개의 흡입밸브와 1개의 배기밸브가 설치되어 있으며, 두개의 흡입밸브에 Tangential Port와 Helical Port가 각각 분리되어 설치되어있다. 그리고 두 흡입밸브의 개폐시기는 동일하게 작동된다.

Fig.2.2에는 실험장치의 개략도를 보인다. 흡입공기량은 흡기써지탱크의 용적을 200Liter로 하여 탱크내에서 압력의 변동이 거의 없도록 하고, 입구에 Garrett사의공기유량노즐을 설치하여 측정하였으며, 이로부터 체적효율을 계산하였다. 흡기관내 압력 및 온도는 각각 플리넨챔버(Plenum Chamber)의 입구 파이프와 배기매니폴드 출구 파이프의 입구로부터 15cm되는 위치에서

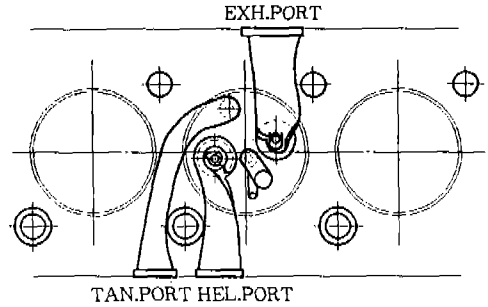
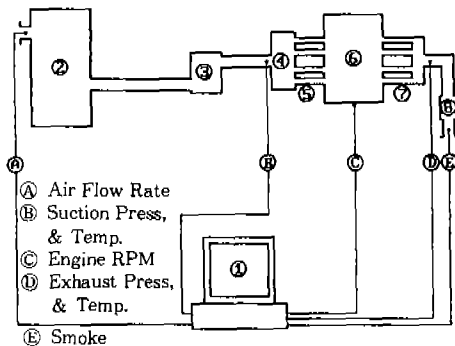


Fig.2.1 Cross-Sectional View of the Cylinder Head



- ① Monitor
- ② Intake Surge Tank
- ③ Air Cleaner
- ④ Plenum Chamber
- ⑤ Intake Manifold
- ⑥ Engine
- ⑦ Exhaust Manifold
- ⑧ Muffler

Fig.2.2 Schematic Diagram of Testing Apparatus

마노메터와 온도센서를 이용하여 평균값을 측정하였다.

본 연구의 대상기관은 두개의 흡입포트를 설치하여 흡입유동을 적극적으로 발생시키도록 설계 제작되어 있으며, 이들 두 흡입포트는 압력파에 영향을 미치기보다는 흡입공기의 유입저항의 증가에 영향을 미치게 될 것이다. 따라서, 계산모델을 결정함에 있어서는 복잡한 실린더 헤드내의 두 유로를 유동저항을 갖는 1개의 동가 유로로 단순화하여 모델링하였다. 즉, 실린더 헤드내의 유로 및 밸브면적은 두 개의 유로 및 밸브의 단면적과 동일한 단면적을 갖도록 설정하였으며, 유로의 길이는 압력파가 최단거리로 전파되는 점을 고려하여 두 유로 중 공기의 흡입 길이가 짧

Table 1 Specification of the Model Engine

Item	Specification
Engine Type	4-Cylinder 4-Cycle Diesel Engine
Max. Output	86/4000(PS/RPM)
Bore×Stroke	94×100(mm)
Compress. Ratio	21.0
Valve Timing	IO:20.5BTDC, IC:52.0ABDC
	EO:67.6BBDC, EC:31.0ATDC

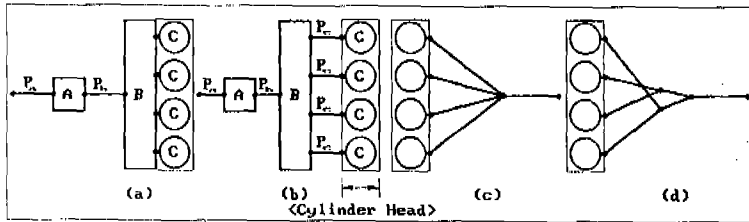
은 Helical Port측의 길이로 설정하고 유동저항을 고려하였다. 밸브의 유량계수는 유사기관의 평균유량계수를 이용하였다. 또한, 계산에 있어서 흡·배기싸지탱크의 압력은 실험시의 평균값을 이용하여 회전속도에 관계없이 일정하게 설정하였으며, 흡·배기관 및 연소실 벽면온도는 한 운전조건에서의 측정값을 이용하였다.

3. 계산결과와 실험결과의 비교분석

Fig.3.1은 흡기계와 배기계의 계산모델을 보여주고 있다. 모델링에 있어서는 각 구성요소를 관, 용기 및 이의 연결부(경계)로 구분한다. 본 연구에서는 (a)와 같이 구성이 비교적 단순한 흡기계의 형태를 BOX형이라 하고, (b)와 같이 흡기관

의 효과를 적극적으로 이용하기 위한 흡기계의 형태를 RAM형이라 부르기로 한다. 또한 (c)와 같이 4개의 실린더에서 하나로 합쳐져 배출되는 배기계의 형태를 4-1형이라 하고, (d)와 같은 배기계의 형태를 4-2-1형이라 한다.

Fig.3.2는 실험결과와 계산결과를 비교한 한 예로서 계산결과에는 싸지탱크(Surge Tank)에서부터 에어크리너(Air Cleaner)까지의 흡기계를 생략한 경우와 이를 고려한 경우를 각각 나타낸다. 일반적으로 흡기계 입구에서부터 에어크리너까지의 흡기계는 에어크리너의 저항 때문에 흡기관 효과에 크게 영향을 미치지 않으므로 모델링에서는 생략하고 있다. 그러나 실험기관의 경우 에어크리너까지의 흡기계가 저속영역에서 영향을 미치므로 이를 고려하여야 함을 알 수 있



A: Air Cleaner(V<sub>s</sub>) B: Plenum Chamber(V<sub>p</sub>) C: Cylinder, P<sub>s, a, c</sub>: Pipe

Fig.3.1 Models of Each Intake and Exhaust System

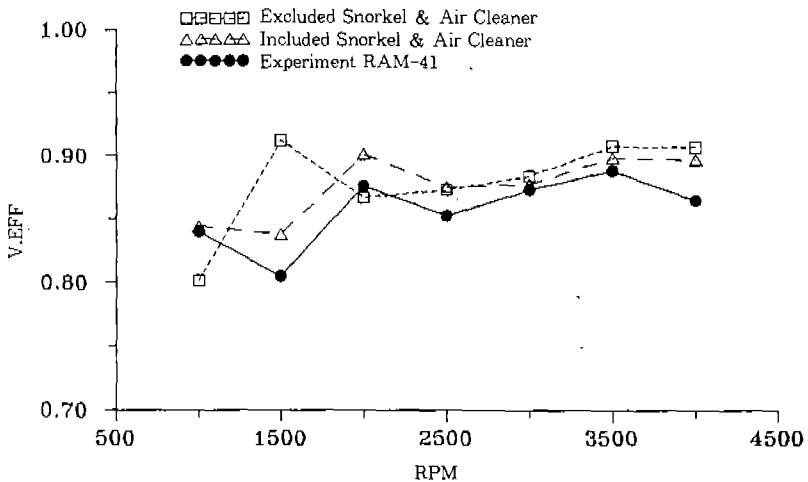


Fig.3.2 Comparison of Calculation Results Between Including & Excluding Snorkel to Air Cleaner

다. 따라서 본 연구에 있어서는 스노클에 해당하는 부분 및 에어크리너를 포함하여 모델링 하였고, 이에 의한 영향도 비교 분석하였다.

Fig.3.3은 BOX-421형과 RAM-421 및 RAM-41형 흡·배기계의 실험결과와 계산결과를 나타낸다. 계산결과는 실험결과와 비교하여 약간 높은 값을 나타내고 있으나 모든 경우에서 정성적으로는 물론 정량적으로도 비교적 잘 일치한다고 판단되며, 이 차이는 유량계수, 써지탱크 압력 및 각 벽면에서의 정확한 온도를 이용한다면 더욱 좁혀질 것으로 생각된다.

#### 4. 흡기계의 구성에 의한 영향

##### 4.1 기본계의 구성

일반적으로 BOX형 흡기계는 흡기관 효과를 이용하는 면에서는 불리하지만, 구조가 단순하기 때문에 레이아웃(Lay-Out) 면에서 유리한 장점을 가지고 있다. 또한 흡기관 효과를 적극적으로 이용하는 RAM형의 흡기계는 레이아웃 상의 어려움에도 불구하고 저속토크의 개선 등, 토오

크 특성의 개선을 위하여 적극적으로 이용하려는 추세에 있다. 본 연구에서는 Fig.3.1에 나타낸 BOX형과 RAM형의 기본계를 구성하여 각 구성 요소들에 의한 특성의 변화를 파악하고자 하였다. 기본계의 구성에 있어서 배기계의 영향은 크지 않으므로 계산시간을 단축하고, 흡기계만의 영향을 분명히 파악하기 위하여 이후의 모델링에서는 배기계를 생략하였다. 흡기계 각부의 효과 파악을 위한 검토는 흡기관효과의 영향이 크다고 판단되는 실린더에서 가까운 구성요소로부터 각각 순차적으로 행하였다.

#### 4.2 BOX형 흡기계의 체적효율특성

##### 4.2.1 플리넘챔버(Plenum Chamber)와 관 P<sub>0</sub>에 의한 영향

Fig.4.1은 플리넘챔버의 용적 V<sub>0</sub>를 각각 1000, 2000cc로 하고, 흡기계의 동조회전속도가 2000 rpm부근에 존재하도록 한 경우의 계산결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 동조회전속도를 갖는 흡기계는 여러 가지가 있을 수 있으나, 그 특성은 같은 경향을 나타낸다. 그러나 V<sub>0</sub>가 크면 압력진동 진폭의 감소로

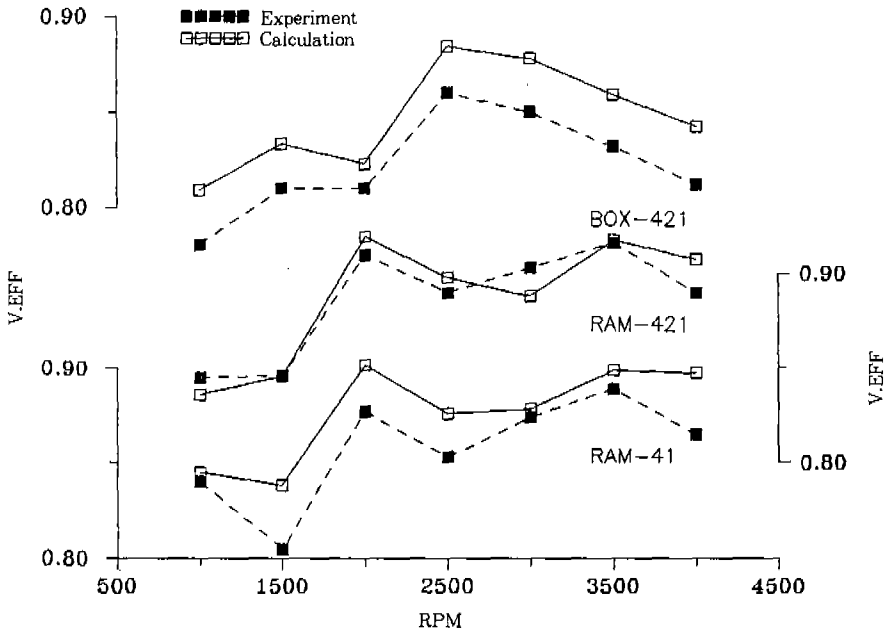


Fig.3.3 Comparison of Results Between Calculation and Experiment

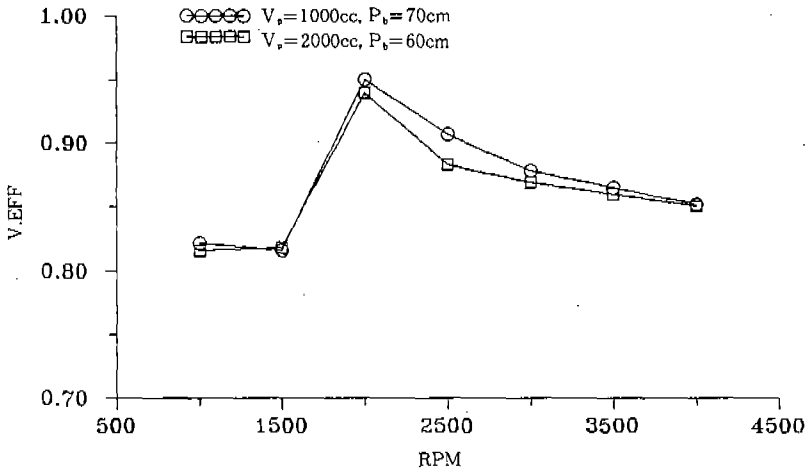


Fig.4.1 Comparison of Volumetric Efficiency for Resemblant Resonant Speed(Abt. 2000rpm)

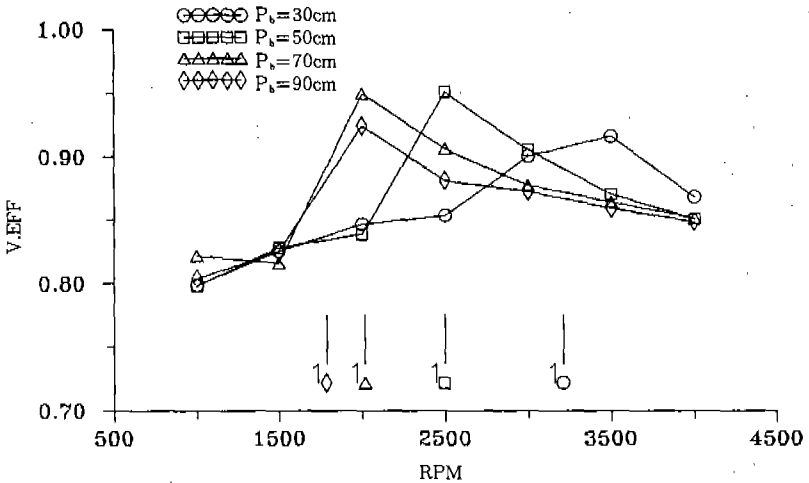


Fig.4.2 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for Varied Length of P<sub>b</sub>(V<sub>s</sub>= 1000cc)

그 효과가 감소됨을 알 수 있다.

Fig.4.2는 V<sub>s</sub>의 용적이 1000cc일 때 P<sub>b</sub>의 길이를 각각 30, 50, 70, 90cm로 변경시킨 때의 동조회전속도를 병기한 체적효율곡선을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 P<sub>b</sub>의 길이가 길어질수록 동조회전속도는 저속영역으로 이동하며 1차의 동조회전속도만이 사용영역안에서 영향을 미치고 체적효율곡선도 이와 같은 경향을

보인다. 따라서 BOX형 흡기계는 P<sub>b</sub>의 길이변화에 따른 체적효율의 변화가 크며, 체적효율의 변화는 음향이론에 의한 예측결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4.2.2 에어크리너(Air Cleaner)와 관 P<sub>s</sub>에 의한 영향

일반적으로 에어크리너와 스노클로로 구성되는 기관 입구부분은 에어크리너의 영향 때문에 흡기

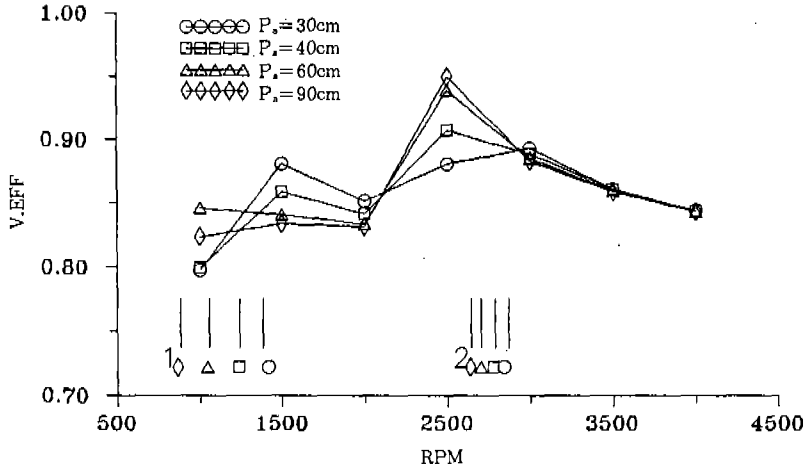


Fig.4.3 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for Varied Length of  $P_1$  ( $V_p=1000\text{cc}$ ,  $P_p=70\text{cm}$ ,  $V_s=7000\text{cc}$ )

관효과에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 실험대상 기관의 경우 스노클에 해당하는 부분이 상당히 길기 때문에 이 부분의 영향 또한 무시할 수 없음이 실험결과와의 비교 과정에서 분명히 밝혀졌다. 특히, 체적효율의 예측결과는 이 부분의 영향으로 저속영역의 1500rpm부근에서 다르게 나타남을 알았다. 따라서, 관  $P_1$ 의 길이를 변화시켜 에어크리너와 관  $P_2$ 로 구성되는 기관 입구부분의 영향을 조사 하였다.

Fig.4.3은  $V_p=1000\text{cc}$ 이고,  $P_p=70\text{cm}$ ,  $V_s=7000\text{cc}$ 일 때  $P_1$ 의 길이를 각각 30, 40, 60, 90cm로 변경시킨 때의 동조회전속도를 병기한 체적효율곡선의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이  $P_1$ 의 길이가 길어짐에 따라 동조회전속도는 저속영역으로 이동하며 1차 및 2차동조회전속도가 사용범위안에 있어 영향을 미치나  $P_1$ 의 길이가 더욱 길어지면 1차 동조회전속도가 사용영역밖으로 밀려나게 되어 주로 2차동조회전속도가 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 따라서,  $P_1$ 의 길이 변화는 2차동조회전속도의 영향을 받은 체적효율의 정점부의 위치를 결정하게 되고 전체적인 체적효율의 변화에 영향을 미치며, BOX형의 흡기계가 체적효율에 미치는 영향의 특성을 결정하게 된다고 판단된다.

이상의 검토결과 BOX형 흡기계에서는 2차의 고유진동까지도 적극적으로 이용하여야 하며, 1-2차 동조회전속도가 사용회전속도 범위 내에서 적당한 간격으로 존재 하도록 하여야 체적효율을 전체적으로 향상 시킬 수 있다고 생각된다.

### 4.3 RAM형 흡기계의 체적효율 특성

#### 4.3.1 관 $P_2$ 의 길이변화에 의한 영향

Fig.4.4는 흡기관  $P_2$ 의 길이를 각각 10, 40, 60, 70, 90cm로 변경시킨 경우의 체적효율의 계산결과를 나타내고 동조회전속도를 병기하였다. 이 경우의 흡기계는 각 실린더가 독립된 단실린더의 경우와 같으며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이  $P_2$ 의 길이가 길어짐에 따라 동조회전속도는 저속영역으로 이동하고, 흡기관  $P_2$ 만의 계의 모델링에서는 1차 동조회전속도만이 사용영역안에 있으면서 영향을 미친다. 따라서 흡기관  $P_2$ 의 길이는 체적효율의 정점부가 나타나는 동조회전속도 영역을 결정하는데 가장 중요한 영향을 미치고 있다고 판단된다.

#### 4.3.2 플리넘챔버(Plenum Chamber)와 관 $P_2$ 에 의한 영향

Fig.4.5는 플리넘챔버의 용적  $V_p$ 를 1000cc로 일정하게 하고 흡기관  $P_2$ 의 길이를 각각 40, 60, 90cm로 하였을 때의 동조회전속도를 병기한 체

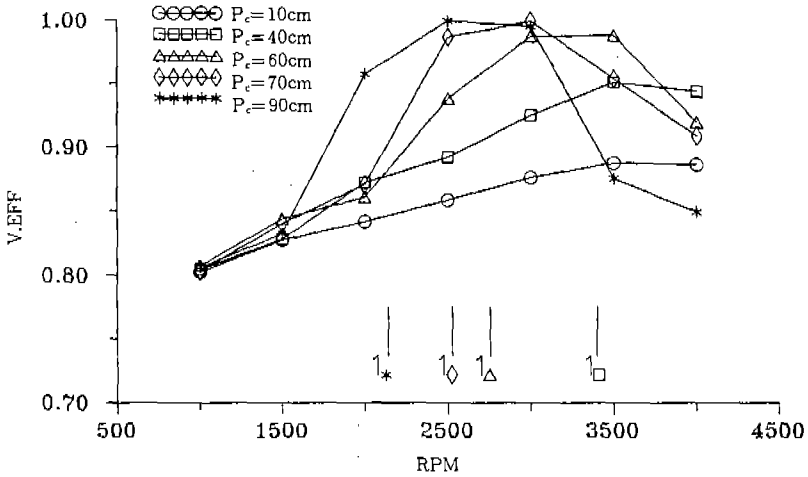


Fig.4.4 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for Varied Length of  $P_c$ .

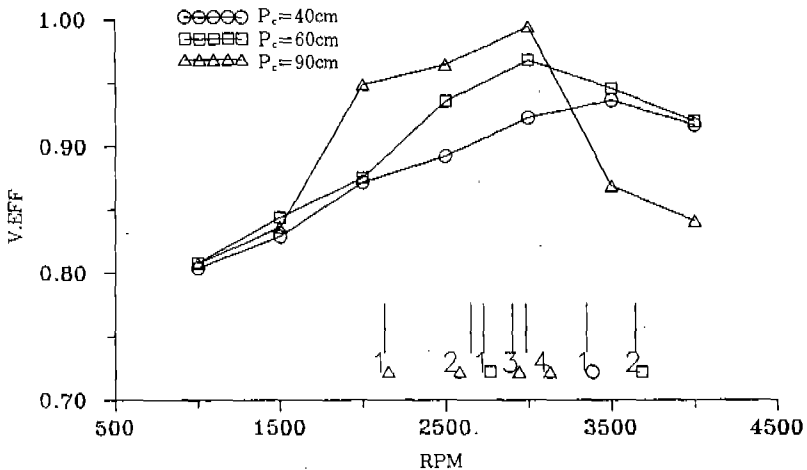


Fig.4.5 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for Varied Length of  $P_c$  ( $V_p = 1000\text{cc, const.}$ )

적효율곡선을 나타낸다. 단실린더의 경우의 계산 결과 Fig.4.4와의 비교에서 알 수 있는 바와 같이 플리넘챔버의 결합은 체적효율에 정량적으로 약간 영향을 미치지만 그 영향은 크지 않다. 또한  $P_c$ 의 길이가 길어지면 3·4차 동조회전속도들도 사용회전수 범위안에 존재하게 되며, 이는 정량적 해석의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig.4.6은  $P_c=60\text{cm}$ ,  $V_p=1000\text{cc}$ 일 때  $P_b$ 의

길이를 각각 30, 50, 60, 90cm로 변경시킨 경우의 동조회전속도를 병기한 체적효율곡선을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이  $P_b$ 의 길이가 길어짐에 따라서 저속영역에서의 체적효율 극대치가 저속영역으로 이동하며 이는 1차 동조회전속도가 저하하기 때문이다. 그리고 고속영역에 있어서 체적효율의 극대치를 나타내는 회전속도영역은 거의 변화하지 않으며, 이 또한 2차

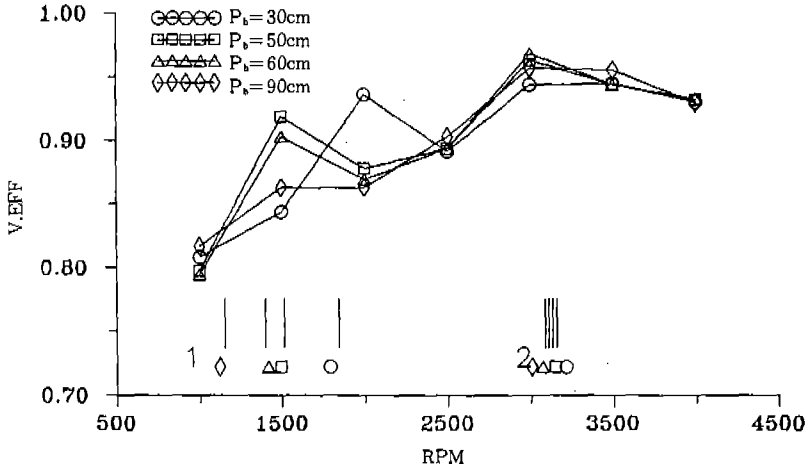


Fig.4.6 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for Varied Length of P<sub>b</sub>(P<sub>c</sub>= 60cm, V<sub>p</sub>= 1000cc)

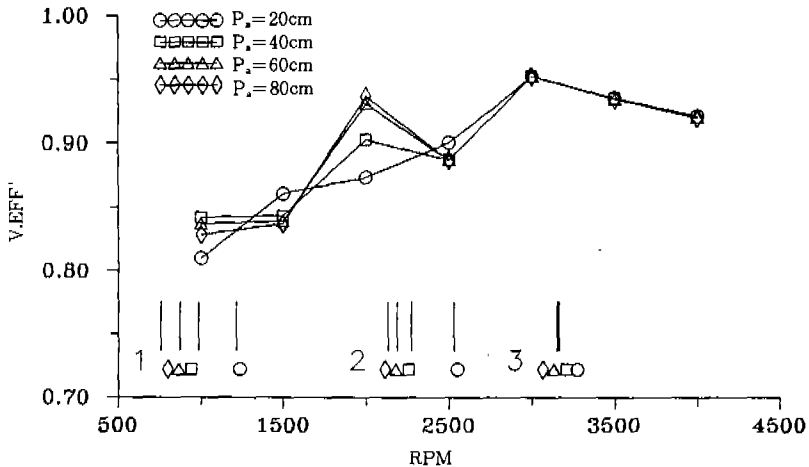


Fig.4.7 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for Varied Length of P<sub>b</sub>(P<sub>c</sub>= 60cm, V<sub>p</sub>= 1000cc, P<sub>s</sub>= 50cm, V<sub>s</sub>= 9000cc)

동조회전속도의 변화와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 흡기관 P<sub>b</sub>의 길이를 변화시킴으로써 1차동조회전속도에 의해 저속영역에서의 체적효율을 향상시킴과 동시에 2차동조회전속도에 의해 고속영역에서의 체적효율의 향상을 피할 수 있어서 결과적으로 넓은 범위에서 높은 체적효율을 나타냄을 알 수 있다.

#### 4.3.3 에어크리너(Air Cleaner)와 관 P<sub>s</sub>에 의한 영향

에어크리너를 결합함으로써 체적효율은 정량적으로 약간 영향을 미치나 에어크리너의 용적 V<sub>s</sub>의 변화에 따른 영향은 크지 않고 또한 고유진동수에 미치는 영향도 크지 않았다. 따라서 체적효율은 기본적으로 에어크리너와 관 P<sub>s</sub>로 구성되는 진동계에 의하여 영향을 받는 것으로 판단된다.



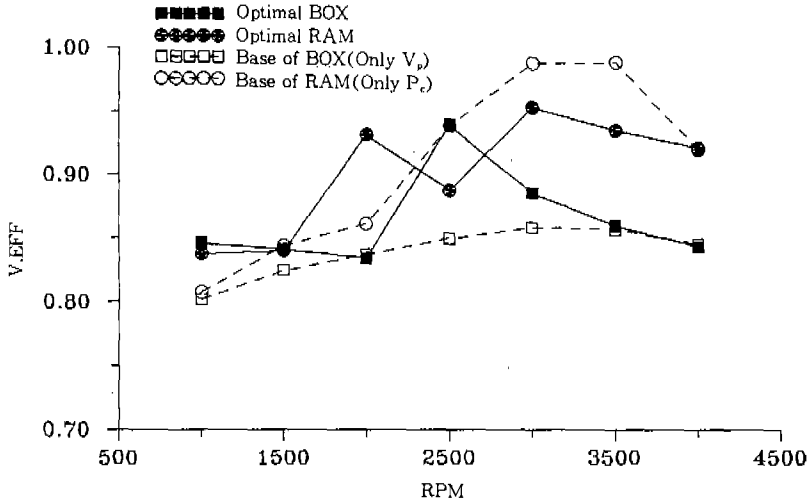


Fig.4.8 Comparison of Characteristic of Each Intake System

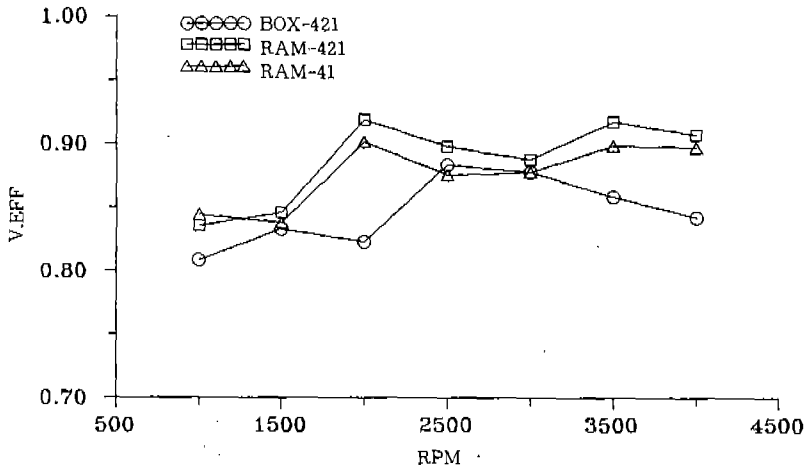


Fig.4.9 Comparison of Calculation Results for Each Intake System

Fig.4.7은  $P_c=60\text{cm}$ ,  $V_p=1000\text{cc}$ ,  $P_b=50\text{cm}$ ,  $V_b=9000\text{cc}$  이고  $P_a$ 의 길이가 각각 20, 40, 60, 80cm인 경우의 동조회전속도를 병기한 체적효율곡선을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동조회전속도는 1·2·3차 또는 2·3차 동조회전속도가 사용영역안에 있으며, 주로 2차 동조회전속도에 의하여 2000rpm 부근에서의 체적효율이 변화한다. 즉,  $P_a$ 의 길이변화는 2차 동조회전속도를 변화시켜, 저속영역에서의 체적효율변화에 영향을 미치고, 2·3차 동조회전

속도가 사용영역안에 있으면서 적당한 간격을 가질 때 체적효율이 최대로 됨을 알 수 있다.

#### 4.4 최적의 흡기계 설계

Fig.4.8은 BOX형과 RAM형의 최적설계 결과를 나타낸다. 그림으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 즉, BOX형 흡기계는 흡기관효과를 이용함으로써 해서 체적효율의 향상을 꾀할 수 있으며 레이아웃 상에도 유리한 장점이 있다. 그러나 RAM형에 비하여는 그 효과가 떨어진다.

RAM형 흡기계는 P<sub>c</sub>만을 이용한 단실린더기관의 경우에 비하여 고속측 성능의 회생율 감수하면 저속측의 성능을 향상시켜 비교적 평탄한 특성을 얻을 수 있으며, 어느 경우도 BOX형 흡기계의 경우에 비하여 우수한 성능을 나타낸다. 그러나 흡기계가 커짐으로 해서 레이아웃 상의 곤란한 문제가 대두될 수 있을 것이다. 또한 RAM형 흡기계는 사용회전수 범위 내에서 토오크의 저하를 나타내기가 쉬우며 이에 대한 대책이 요구된다.

Fig.4.9는 이미 앞에서 언급한 과정을 통하여 선택 설계된 최적의 흡기계를 레이아웃을 고려하여 일부 수정한 경우의 계산 결과이다. RAM형의 흡기계는 BOX형의 흡기계와 비교하여 전체적으로 체적효율이 향상된 결과를 나타낸다. 특히 RAM-421형 흡기계의 경우는 저속영역에서 최대 약 10% 정도 향상됨을 나타내며, 고속영역에서 비교적 평탄한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 계산결과의 신뢰성을 확인하기 위한 실험결과와의 비교는 Fig.3.3에 나타난 바와 같다.

## 5. 결 론

4행정 4실린더 디젤엔진을 모델로 흡기계의 효과를 고찰하고, 최적설계 방법에 관하여 수치 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 음향이론에 의한 동조회전속도는 정량적 해석결과와 비교적 잘 일치한다. 따라서 흡기계의 설계시 초기단계에서 정성적 해석방법과 정량적 해석방법을 동시에 이용하면 최적의 흡기계를 효과적으로 예측할 수 있다.
- 2) 4실린더 기관과 같이 매니폴드가 복잡한 경우에 있어서는 2·3차 동조회전속도 까지도 적극적으로 이용하도록 하여야 한다.
- 3) 본 실험기관의 경우 대기에서 에어크리너까지의 흡기계를 고려함으로써 계산결과와 실험결과가 좋은 일치를 나타냈다.

- 4) 다실린더기관의 경우 흡기관 효과를 적극적으로 이용하면 넓은 회전속도범위에서 높은 체적효율을 얻을 수 있으며, 레이아웃 상의 어려움에도 불구하고 적극적으로 이용할 수 있도록 하여야 할 것이다.
- 5) 본 연구 대상기관의 경우와 같이 흡입유동을 적극적으로 이용하기 위한 2-Valve형 흡기계의 경우라 하더라도 단순화된 적절한 계산모델에 의하여 흡기관 효과를 예측할 수 있음을 알았다.

## 참 고 문 헌

1. 이재순 외 2인, “공명기를 이용한 4기통 SI기관의 체적효율 향상에 관한 연구”, 한국자동차공학회논문집 제 4권, 제 3호, p.232~242, 1996.
2. K. Hatamura, et al, “Mazda’s New V-6 Gasoline Engine and It’s Innovative Induction System”, SAE Paper NO. 871977, pp. 994~1007, 1987.
3. 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.
4. 최성규 외 1인, “디젤기관 흡기 다기관의 최적설계에 관한 기초연구”, 한국박용기관학회지, 제 14권, 제 4호, pp.72~80, 1990.
5. 강인철, “4실린더 디젤기관 흡기 다기관의 최적 설계에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 공학석사 학위논문, 1994. 2.
6. 최재성 외 2인, “흡기계의 정성적 이론해석”, 한국자동차공학회 기관, 공해, 연료 및 윤활유 부문 학술강연초록집, pp.5~10, 1993.
7. 최재성, “흡·배기계통을 포함한 4행정 디젤기관의 성능예측 시뮬레이션 프로그램의 개발”, 한국박용기관학회지, 제 13권, 제 3호, pp.64~71, 1989. 8.