

4실린더 디젤기관 흡기계의 최적설계방법에 관한 연구

조 규 철¹⁾, 崔 在 星²⁾

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

Gyu-Chul Jo, Jae-Sung 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.

1. 서 론

4행정 디젤기관에서는 피스톤의 운동에 의하여 새로운 공기의 흡입과 연소가스의 배출이 되풀이되기 때문에 흡·배기관 내에 압력진동이 발생하며, 이러한 가

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 주기관 전공

2) 한국해양대학교 기관공학부 교수

스의 동적효과를 이용하면 흡기량을 증가시키거나 펌프손실을 감소시킬 수 있다. 이는 구동부분의 변경 없이 흡기관의 길이를 변경시키는 것만으로 기관의 출력을 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.^{[1], [2], [3]} 그러나 다실린더기관의 경우 흡기매니폴드의 형상이 복잡하고, 흡기간섭이 발생하기 때문에 최적의 흡기계를 설계하기는 용이하지 않다. 최^[4], 강^[5] 등은 각각 단실린더 및 다실린더 기관에 있어서 흡기계의 기본적 특성을 연구 분석한 결과를 보고한 바 있다. 따라서, 본 논문에서는 실제기관 특히 4실린더 4행정 사이클 디젤기관의 흡기계를 설계함에 있어서 최적의 흡기계를 설계하기 위한 방법을 확립하고자 하였다. 연구방법으로는 정성적 해석방법과 정량적 해석방법을 이용하였다. 정성적 해석방법으로써 음향이론에 의하여 흡기계의 고유진동수를 구하고, 이로부터 체적효율의 극대화를 꾀할 수 있는 동조회전속도를 예측할 수 있다.^[6] 또한, 정량적 해석방법으로써 흡기계에 과도모델을 적용하고 특성격자법을 이용한 특성곡선법을 사용하여 계산함으로써 체적효율을 예측할 수 있다.^[7] 연구결과로써는 흡기관의 형상과 각부치수 및 길이가 체적효율에 미치는 영향을 분석하여 최적의 흡기매니폴드를 설계하기 위한 방법과 실제 모델엔진의 최적 흡기매니폴드를 제시하였으며, 실험결과를 통하여 이를 확인하였다.

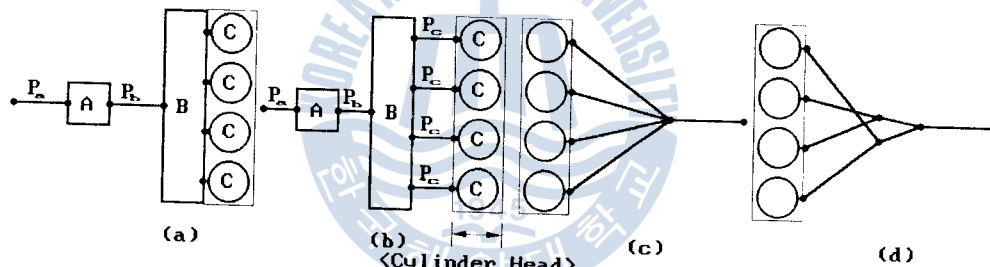
2. 실험기관 및 계산모델

연구 대상기관은 4실린더 4행정사이클 디젤기관(직경x행정: 94x100mm, 압축비: 21.0, 최대출력: 68PS/4000RPM)으로써, 흡·배기밸브 구성은 3-Valve형으로 직경이 다른 2개의 흡입 밸브와 1개의 배기밸브가 설치되어 있으며, 두 흡입밸브의 개폐시기는 동일하게 작동된다. 또한, 실린더헤드 내에는 Tangential Port와 Helical Port가 각각 분리되어 설치되어 있으며, 이는 흡입유동을 적극적으로 발생시키도록 설계 제작된 것이다. 이들 두 흡입포트는 압력파에 영향을 미치기보다는 흡입공기의 유입저항의 증가에 영향을 미치게 될 것이므로, 실린더 헤드 내의 흡입유로 형상을 적절히 설정하면 포트 내에서의 압력과 영향은 어느 정도 고려될 수 있다고 판단된다. 따라서, 계산모델을 결정함에 있어서는 본 연구의 목적이 흡기관내 가스의 압력진동을 적극적으로 이용하는데 있으므로 복잡한 실린더 헤드 내의 유로는 유동저항을 갖는 1개의 등가 유로로 단순화하여 모델링 하였다. 또한,

계산에 있어서 흡·배기싸지탱크의 압력은 실험시의 평균값을 이용하여 회전속도에 관계없이 일정하게 설정하였으며, 흡·배기관 및 연소실 벽면온도도 회전속도에 관계없이 각 위치에 따라서 일정하게 설정하였다.

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 흡기관의 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.



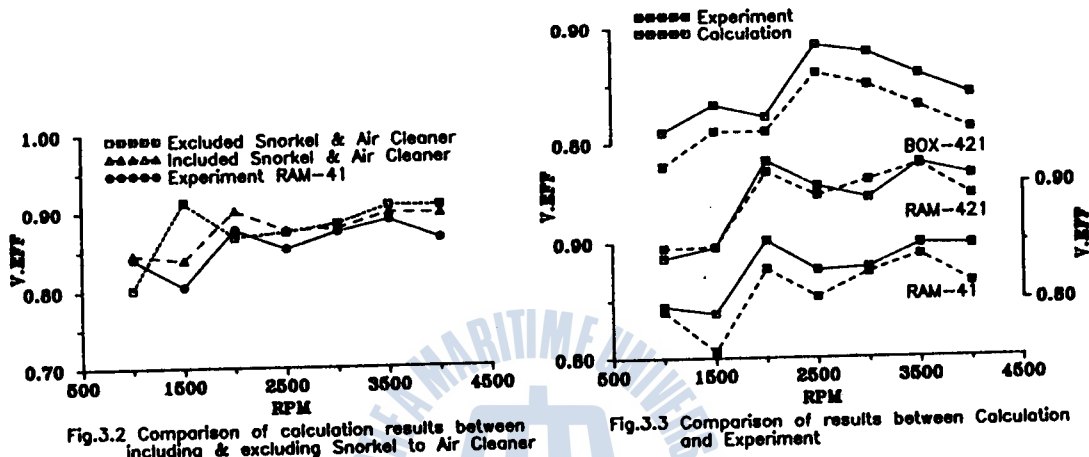
A : Air Cleaner(V_a), B : Plenum Chamber(V_p), C : Cylinder, $P_{a,b,c}$: Pipe

Fig.3.1 Models of each intake and exhaust system.

Fig. 3.2는 실험결과와 계산결과를 비교한 한 예로써 계산결과에는 싸지탱크에서부터 에어크리너까지의 흡기계를 생략한 경우와 이를 고려한 경우를 각각 나타낸다. 일반적으로 흡기계 입구에서부터 에어크리너까지의 흡기계는 에어크리너의 저항 때문에 흡기관 효과에 크게 영향을 미치지 않는다고 판단하여 모델링에서는 생략하고 있다. 그러나 실험기관의 경우 스노클을 포함한 에어크리너까지의 흡기계를 고려함으로써 실험결과와 계산결과가 더욱 좋은 일치를 보이므로 이 부분을 고려하여야 함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에 있어서는 스노클 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 전체적으로 약간 높은 값을

나타내고 있으나 모든 경우에서 정성적으로는 물론 정량적으로도 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 실험결과와 계산결과와의 차이는 유량계수, 써지탱크 압력 및 각 벽면에서의 정확한 온도 등을 실험치에 더욱 가까운 값을 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 면에서 유리한 장점을 가지고 있다. 또한 흡기관 효과를 적극적으로 이용하는 RAM형의 흡기계는 레이아웃 상의 어려움은 있으나 저속토포크의 개선 등, 토포크 특성을 개선할 수 있기 때문에 왕복동 디젤기관의 문제점 중의 하나인 저속토포크의 개선에 적극적으로 이용되고 있다. 본 연구에서는 Fig. 3.1에 나타낸 BOX형과 RAM형의 기본계를 구성하여 각 구성요소의 형상과 치수가 체적효율에 미치는 영향을 분석, 검토하였다. 기본계의 구성에 있어서 실린더 헤드 내의 흡·배기유로는 고려하였으나 배기계의 영향은 크지 않으므로 계산시간을 단축하고, 흡기계만의 영향을 분명히 파악하기 위하여 이후의 모델링에서는 배기계를 생략하였다. 흡기계 각부의 효과파악을 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_b 에 의한 영향

Fig. 4.1은 플리넘챔버의 용적 V_p 를 각각 1000, 2000cc로 하고, 흡기계의 동조회전속도가 2000rpm부근에 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_p 가 크면 압력진동 진폭의 감소로 그 효과가 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 4.2는 V_p 의 용적이 1000cc 일 때 P_b 의 길이를 각각 30, 50, 70, 90cm로 변경시킨 때의 체적효율곡선을 나타내고 있다. 그림에는 동조회전속도의 계산결과도 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 P_b 의 길이가 길어질수록 동조회전속도는 저속영역으로 이동하며 1차의 동조회전속도 만이 사용영역안에서 영향을 미치고 체적효율곡선도 이와 같은 경향을 보인다. 따라서 BOX형 흡기계는 P_b 의 길이변화에 따른 체적효율의 변화가 크며, 체적효율의 변화는 음향이론에 의한 예측결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

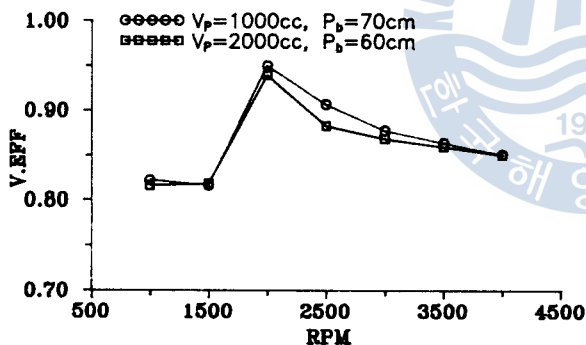


Fig.4.1 Comparison of Volumetric Efficiency for resonant Speed (Abt.2000rpm)

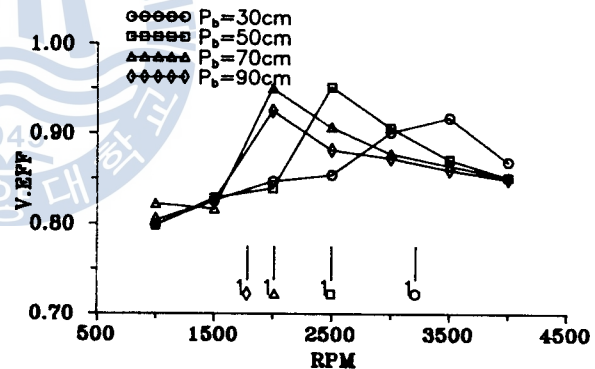


Fig.4.2 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for varied P_b ($V_p=1000cc$)

4.2.2 에어크리너(Air Cleaner)와 관 P_a 에 의한 영향

에어크리너와 스노클로 구성되는 기관 입구부분은 에어크리너의 영향 때문에 흡기관효과에 크게 영향을 미치지 않으며 따라서 모델링에 있어서도 이 부분은 제외하는 것이 일반적이다. 그러나 본 실험 대상기관의 경우 스노클 부분이 상당히 길기 때문에 이 부분의 영향 또한 무시할 수 없음이 실험결과와의 비교 과정에서 분명히 밝혀졌다. 특히, 체적효율의 예측결과는 이 부분의 영향으로 저속영역의 1500rpm 부근에서 다르게 나타남을 알았다. 따라서, 에어크리너와 관 P_a 로 구성되는 기관 입구부분의 영향을 파악하기 위하여 관 P_a 의 길이를 변화시켰다.

Fig. 4.3은 $V_P=1000\text{cc}$ 이고, $P_b=70\text{cm}$, $V_a=7000\text{cc}$ 일 때 P_a 의 길이를 각각 30, 40, 60, 90cm로 변경시킨 때의 체적효율곡선의 변화를 보여주며, 동조회전속도를 같이 나타내었다. 그림으로부터 P_a 의 길이가 길어짐에 따라 동조회전속도는 저속영역으로 이동하며 1차 및 2차 동조회전속도가 사용범위안에 있어 영향을 미치나 P_a 의 길이가 더욱 길어지면 1차 동조회전속도가 사용영역밖으로 밀려나게 되어 주로 2차 동조회전속도가 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 따라서, P_a 의 길이 변화는 2차 동조회전속도의 영향을 받은 체적효율의 정점부의 위치를 결정하게 되고 전체적인 체적효율의 변화에 영향을 미치며, BOX형의 흡기계가 체적효율에 미치는 영향의 특성을 결정하게 된다. 이상의 검토결과 BOX형 흡기계에서는 2차의 고유진동까지도 적극적으로 이용하여야 하며, 1·2차 동조회전속도가 사용회전속도 범위 내에서 적당한 간격으로 존재 할 때 체적효율이 전체적으로 향상됨을 알 수 있고, 그 회전속도를 벗어나는 영역에서는 체적효율이 저하하게 됨을 알 수 있다.

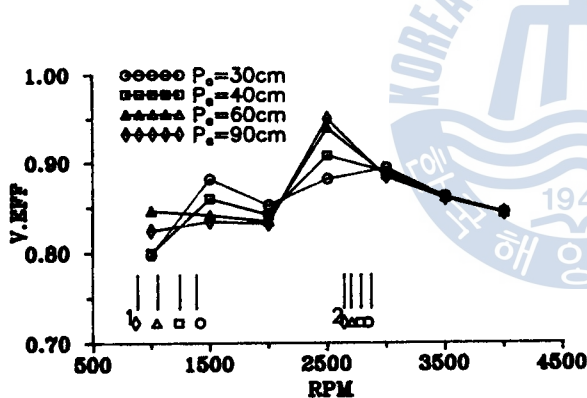


Fig.4.3 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for varied P_a ($V_P=1000\text{cc}$, $P_b=70\text{cm}$, $V_a=7000\text{cc}$)

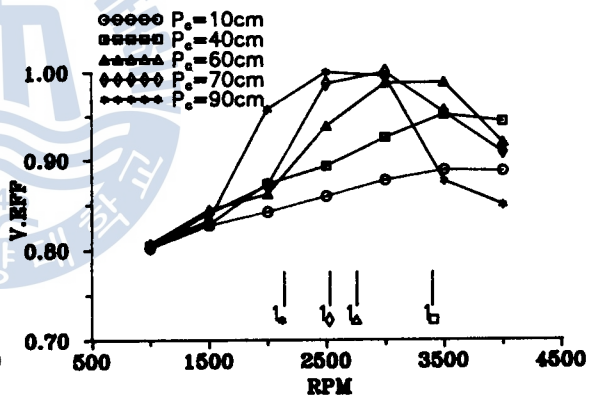


Fig.4.4 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for varied P_c

4.3 RAM형 흡기계의 체적효율 특성

4.3.1 관 P_c 의 길이변화에 의한 영향

Fig. 4.4는 흡기관 P_c 의 길이를 각각 10, 40, 60, 70, 90cm로 변경시킨 경우의 체적효율의 계산결과를 나타내고 동조회전속도를 병기하였다. 이 경우의 흡기계는 각 실린더가 독립된 단실린더의 경우와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 P_c 의 길이가 길어짐에 따라 동조회전속도는 저속영역으로 이동하고, 흡기관 P_c 만의

계의 모델링에서는 1차 동조회전속도만이 사용영역안에 있으면서 영향을 미친다. 따라서 흡기관 P_c 의 길이는 체적효율의 정점부가 나타나는 동조회전속도 영역을 결정하는데 가장 중요한 영향을 미치고 있다고 판단된다.

4.3.2 플리넘챔버(plenum chamber)와 관 P_b 에 의한 영향

Fig. 4.5는 흡기관 P_c 의 길이가 각각 40, 60, 90cm일 때 플리넘챔버의 용적, V_p 가 1000cc로 일정할 때의 체적효율곡선을 나타내며, 동조회전속도를 같이 나타내었다. 이 그래프는 앞의 단실린더의 경우(Fig. 4.4 참조)와는 달리 플리넘챔버가 결합된 형태로써 플리넘챔버의 결합은 체적효율에 정량적으로는 근소한 영향을 미친다. 그러나 P_c 의 길이가 길어지면 3·4차 동조회전속도들도 사용회전수 범위안에 존재하게 되며, 이는 정량적 해석의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4.6은 $P_c=60$ cm, $V_p=1000$ cc일 때 P_b 의 길이를 각각 30, 50, 60, 90cm로 변경시킨 경우의 체적효율곡선을 나타내고 있다. 그리고 동조회전속도를 같이 나타내었다. 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 동조회전속도가 거의 변화하지 않는 것과 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 흡기관 P_b 의 길이를 변화시킴으로써 1차 동조회전속도에 의해 저속영역에서의 체적효율을 향상시킴과 동시에 2차 동조회전속도에 의해 고속영역에서의 체적효율의 향상을 꾀할 수 있어서 결과적으로 넓은 범위에서 높은 체적효율을 나타냄을 알 수 있다.

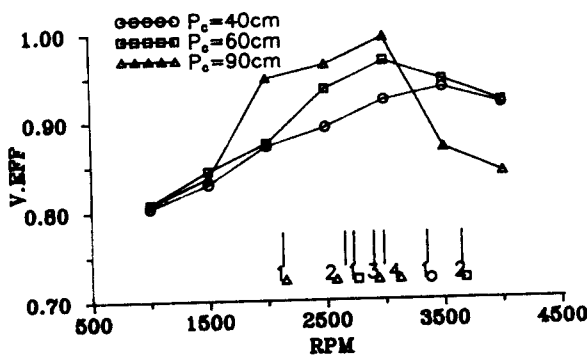


Fig. 4.5 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for Const. V_p and varied P_c ($V_p=1000$ cc)

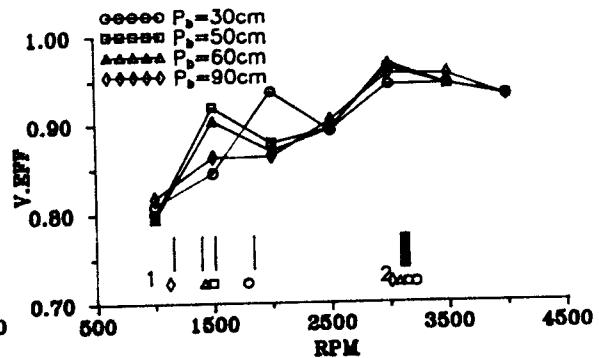


Fig. 4.6 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for varied P_b ($P_c=60$ cm, $V_p=1000$ cc)

4.3.3 에어크리너(Air Cleaner)와 관 P_a 에 의한 영향

에어크리너를 결합함으로써 해서 체적효율은 정량적으로 약간 영향을 미치나 V_a 의 변화에 따른 영향은 크지 않고 또한 고유진동수에 미치는 영향도 크지 않았다. 따라서 체적효율은 기본적으로 에어크리너와 관 P_a 에 의하여 영향을 받을 것으로 판단된다.

Fig.4.7은 $P_c=60\text{cm}$, $V_p=1000\text{cc}$, $P_b=50\text{cm}$, $V_a=9000\text{cc}$ 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 길이 변화는 2차 동조회전속도를 변화시켜서 저속영역에서의 체적효율변화에 영향을 미치고, 체적효율은 2·3차 동조회전속도가 사용영역안에 있으면서 적당한 간격을 가질 때 체적효율이 최대로 됨을 알 수 있다.

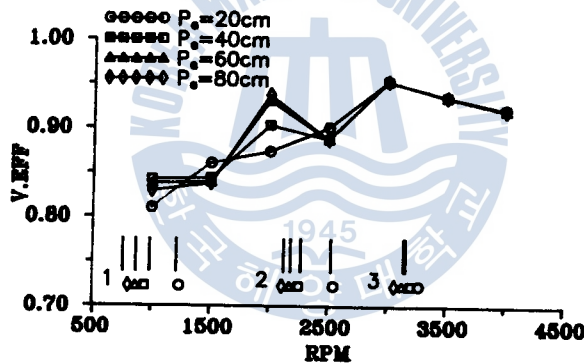


Fig.4.7 Volumetric Efficiency & Resonant Speed for varied P_a ($P_c=60\text{cm}$, $V_p=1000\text{cc}$, $P_b=50\text{cm}$, $V_a=9000\text{cc}$)

4.4 최적의 흡기계 설계 방법

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. RAM형 흡기계는 P_c 만을 이용한 단실린더기관의 경우에 비하여 고속측 성능의 희생을 감수하면 저속측의 성능을 향상시켜 비교적 평탄한 특성을 얻을 수 있으며, 어느 경우에도 BOX형 흡기계의 경우에 비하여 우수한 성능을 나타낸다. 그러나 흡기계 커짐으로 해서 레이아웃 상의 곤란한 문제가 대두될 수 있을 것이다. 또한 RAM형 흡기계는 사용회전수 범위 내에서 토크의 저하를 나타내기가 쉬우며 이에 대한 대책이 요구된다.

Fig. 4.9는 이미 앞에서 언급한 과정을 통하여 선택 설계된 최적의 흡기계를 레이아웃을 고려하여 흡기계 각 구성요소의 치수 및 길이를 일부 수정한 경우의 계산 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 RAM형의 흡기계는 BOX형의 흡기계와 비교하여 전체적으로 체적효율이 향상된 결과를 나타낸다. 특히, RAM-421형 흡기계의 경우는 저속영역에서 BOX-421형에 비하여 최대 약 10%정도 향상된을 나타내며, 고속영역에서 비교적 평탄한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

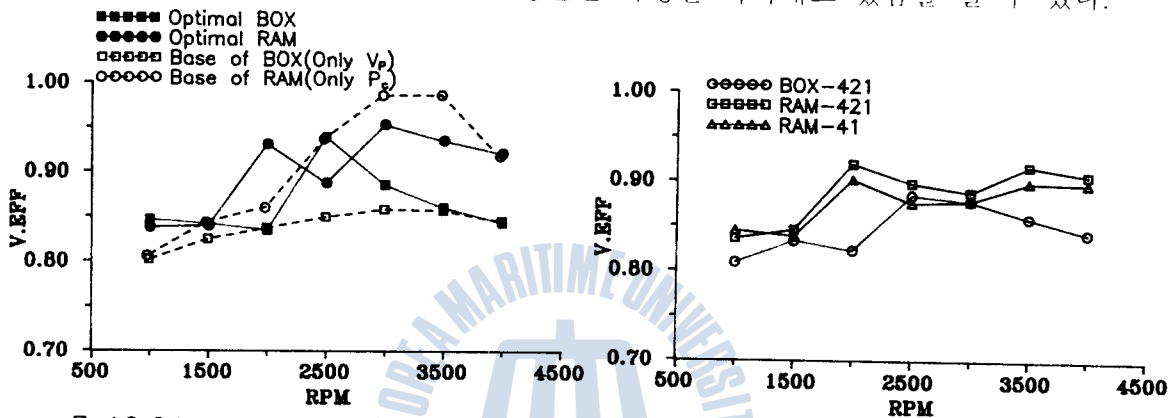


Fig.4.8 Calculated results of Optimal RAM and Optimal BOX

Fig.4.9 Comparison of calculation results for each Intake System

5. 결 론

실제 4행정사이클 4실린더 디젤엔진을 모델로하여 음향이론 프로그램과 성능예측 프로그램을 이용한 수치실험과 실제 실험을 통하여 흡기계의 형상과 각부 치수가 체적효율에 미치는 영향을 분석하였고, 흡기계의 최적설계 방법과 실제엔진의 최적 흡기계를 제시하였으며, 본 연구의 결과로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 음향이론에 의한 동조회전속도는 정량적 해석결과와 비교적 잘 일치한다. 따라서, 흡기계의 설계시 초기단계에서 음향이론에 의한 정성적 해석방법을 이용하면 최적의 흡기계를 효과적으로 예측할 수 있다.
2. 4실린더 기관과 같이 배니폴드가 복잡한 경우에 있어서는 2·3차 동조회전속도 까지도 적극적으로 이용하도록 할 필요가 있다.
3. 본 실험기관의 경우 대기에서 에어크리너까지의 흡기계를 고려함으로써 에어크리너의 저항에도 불구하고 계산결과와 실험결과가 좋은 일치를 나타냈다. 따라서 계산프로그램에 대기에서 에어크리너까지의 흡기계도 포함시켜 계산해야 함을 알았다.

4. 다실린더기관의 경우 흡기관 효과를 적극적으로 이용하면 넓은 회전속도범위에서 높은 체적효율을 얻을 수 있으며, 레이아웃 상의 어려움에도 불구하고 적극적으로 이용하는 것이 바람직하다고 생각된다.
5. 체적효율특성에 기본적으로 영향을 미치는 흡기계의 요소는 RAM형 흡기계의 경우는 관 P_c 이고, BOX형 흡기계의 경우는 관 P_a 와 관 P_b 이다.
6. 흡기계효과에 영향을 미치는 음향 진동계는 대기층의 관 요소와 여기에 결합되는 실린더층의 용기로 구성됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 이재순 외 2인, “공명기를 이용한 4기통 SI기관의 체적효율 향상에 관한 연구”, 한국자동차공학회논문집 제 4권, 제 3호, pp.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, “2사이클엔진의 吸氣系 改良について-YEISによる燃費, 性能改善”, 內燃機關, Vol. 20, NO. 246, pp. 9-17, 1981. 2.
- [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 윤활유부문 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.