

4실린더 디젤기관 공명 흡기계의 최적설계에 관한 연구

홍기운¹⁾, 최재성²⁾

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

K.Y. Hong, J.S. Choi

ABSTRACT

In this paper, effects of resonator within intake manifold system on volumetric efficiency were investigated in the 4-cylinder 4 stroke-cycle Diesel Engines. The effects of resonator within 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. As the results, good correlations among inlet pressure, natural frequency and volumetric efficiency for a complicated intake system with resonator, was confirmed. And the optimum design method of the resonant system which had the overall high and flat characteristic of volumetric efficiency was proposed.

1. 서론

4행정 사이클 디젤기관에서는 흡기계내에서 발생하는 압력의 맥동현상을 이용하여 체적효율의 향상을 적극적으로 꾀하고 있다. 그러나 이와 같은 동적효과를 이용하면 동조회전속도 영역에서는 체적효율이 향상되지만¹⁾, 그 이외의 영역에서는 같은 원리에 의하여 체적효율이 감소하기 때문에 회전속도의 넓은 영역에서

1) 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학부
2) 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

높은 체적효율특성을 갖는 흡기 메니폴드를 설계하기는 쉽지가 않다.

필자들은 4 실린더 디젤기관의 흡기계 설계에 관하여 이미 보고^{2,3)}한 바 있으며, 그 연구결과로 기존의 메니폴드(BOX type)에 비하여 높은 체적효율을 나타내는 흡기계(RAM type)의 설계 방법을 제시하였다.

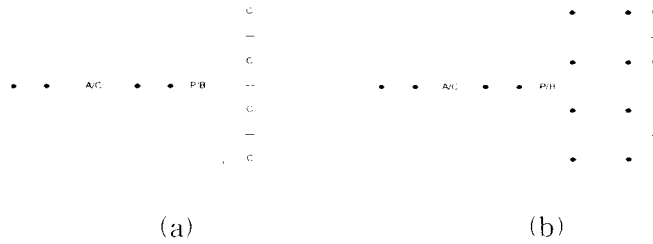
그러나 앞에서 언급한 바와 같이 Ram type 메니폴드의 특성상 상대적으로 체적효율이 저하하는 영역이 존재하게 되기 때문에 전 사용회전속도 영역에서 평탄하면서도 높은 체적효율특성을 얻기 위하여는 체적효율이 저하하는 회전속도 영역에서의 개선책이 필요하게 된다^{4~8)}.

본 연구에서는 Ram type 흡기계의 체적효율특성을 개선하기 위하여 공명기를 이용하는 방법에 관하여 연구하고자 하였다. 즉 공명기의 이용이 체적효율에 미치는 영향에 관하여 분석한 다음, 공명기의 각부치수 및 위치에 따른 체적효율특성의 변화를 파악하여 체적효율의 개선 가능성을 확인하고 최적 공명기 설계에 관한 연구결과를 보고한다.

연구방법으로는 앞의 연구에서와 마찬가지로 정성적 해석방법^{9,10)}과 정량적 해석방법¹¹⁾을 병용하였다.

2. 실험기관 및 계산결과 및 비교

연구대상기관은 4실린더 4행정사이클 디젤기관(직경×행정 : 94×100mm, 압축비 : 21.0, 최대출력 : 86PS/4,000RPM)으로서, 대상기관의 흡·배기밸브의 구성은 3-Valve형으로 직경이 다른 2개의 흡입밸브와 1개의 배기밸브가 설치되어 있으며, 두 개의 흡입밸브에 Tangential Port와 Helical Port가 각각 분리되어 설치되어 있다. 그리고 두 흡입밸브의 개폐시기는 동일하게 작동된다. 또한, 두 개의 흡입포트를 설치하여 흡입유동을 적극적으로 발생시키도록 설계 제작되어 있다. 이들 두 흡입포트는 압력파에 영향을 미치지 보다는 흡입공기의 유입저항의 증가에 영향을 미치게 될 것이므로, 전보에서와 같은 방법으로 실린더 헤드내의 흡입 유로 형상을 적절히 설정하여 1개의 등가유로로 치환하여 모델링하였다. 또한 계산에 있어서 흡·배기씨저탱크의 압력은 실험시의 평균값을 이용하여 회전속도에 관계없이 일정하게 설정하였으며, 흡·배기관 및 연소실 벽면온도도 회전속도에 관계없이 각 위치에 따라서 일정하게 설정하였다.



A/C : Air Cleaner, P/B : Plenum Chamber, C : Cylinder

Fig. 2.1 Models of each intake system

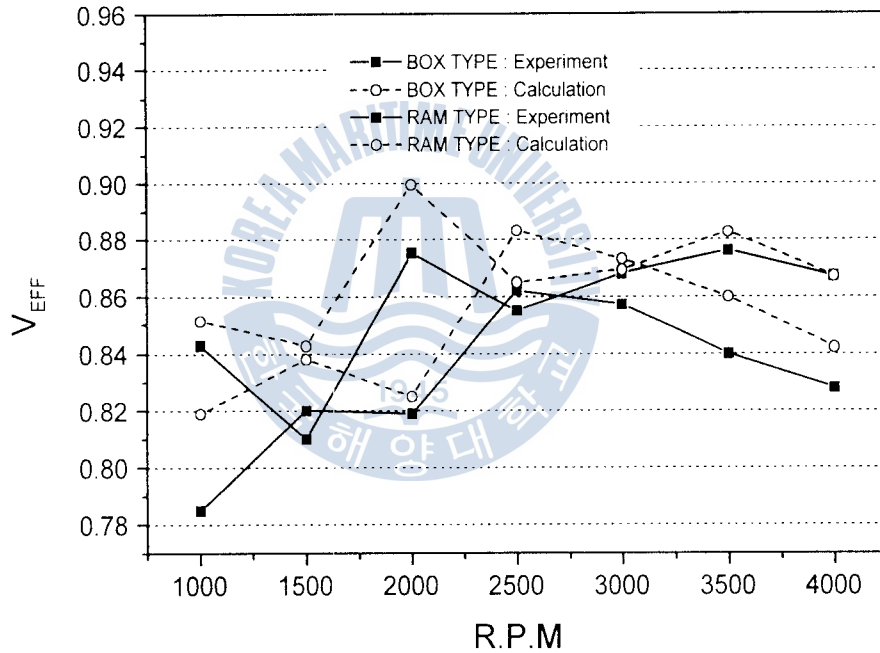


Fig. 2.2 Comparison of results between Calculation and Experiment

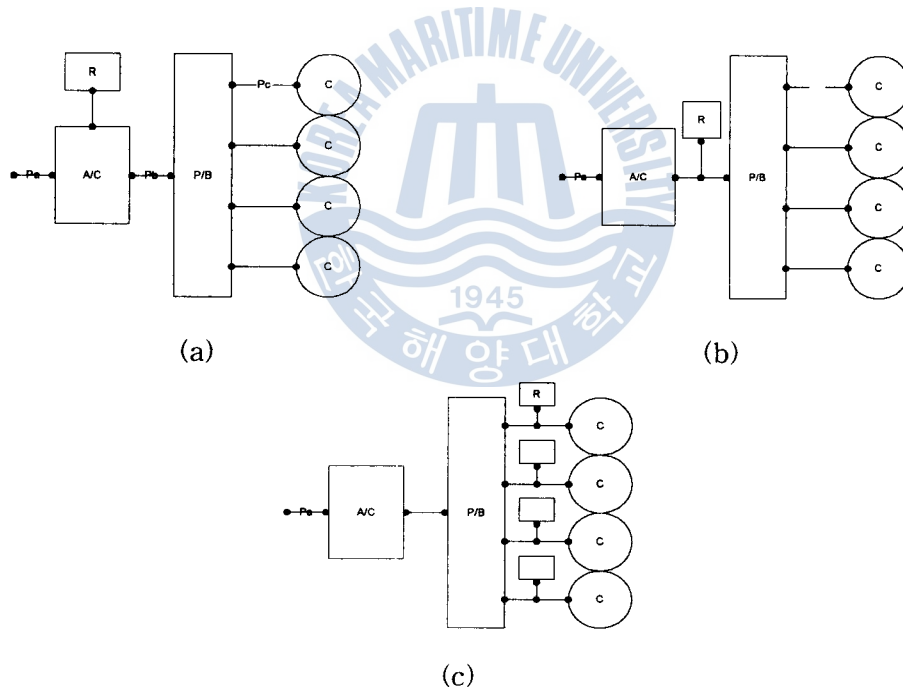
Fig. 2.1은 공명기가 없는 경우의 기본 흡기계의 계산모델을 보여주고 있다. 본 연구에서는 (a)와 같이 구성이 비교적 단순한 흡기계의 형태를 BOX형 흡기계라 하고, (b)와 같이 흡기관의 효과를 적극적으로 이용하기 위한 흡기계의 형태를 RAM형 흡기계라 부르기로 한다.

Fig. 2.2는 공명기를 취부하지 않은 경우의 BOX형과 RAM형 흡·배기계의 실험 결과와 계산결과를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 BOX형이나

RAM형이나 실험결과와 비교하여 전체적으로 높은 값을 나타내고 있으나 모든 경우에 정성적으로는 물론 정량적으로 비교적 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

BOX형의 체적효율 특성은 고속영역(2,500rpm이상)에서 체적효율이 높게 나타나고 있으나 저속영역에서는 체적효율이 아주 낮다. 반면에, RAM형의 체적효율 특성은 중·고속영역에서 체적효율이 높게 나타난다. 따라서 BOX형보다는 RAM형이 바람직하다고 판단된다. 그러나 RAM형의 경우는 1,500rpm영역과 2,500rpm영역에서 체적효율이 낮게 나타나고 있으며, 이에 대한 개선이 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 RAM형 흡기계에 공명기를 취부시켜 1,500rpm영역과 2,500rpm영역에서 저하하는 체적효율의 특성을 개선하고자 한다.

3. 공명기에 의한 RAM형 흡기계의 체적효율 특성



A/C : Air Cleaner, P/B : Plenum Chamber, C : Cylinder, R : Resonator

Fig. 3.1 Models of each intake system with resonator

흡기계의 체적효율특성에 미치는 공명기의 효과를 파악하기 위하여 Fig. 3.1에 나타낸 RAM형의 기본계를 구성하여 각 구성요소에 공명기를 취부하여 공명기의

형상과 치수 및 위치에 따른 체적효율곡선에 미치는 영향을 분석 검토하였다. 기본개 구성에 있어서 실린더 헤드내의 흡·배기유로를 고려하였으며, 흡기계 각 위치에서의 공명기의 영향을 파악하기 위한 검토는 Air Cleaner, P_t Pipe, P_c Pipe 순으로 각각 순차적으로 행하였다.

Fig. 3.1은 Ram형 기본 흡기계에 공명기가 설치된 경우의 흡기계의 계산 모형을 보여주고 있다. 공명기는 Fig. 3.1과 같이 관과 용기로 구성되며, 공명기의 고유진동수는 Helmholtz 공명기의 고유진동수(ν)를 구하는 식 (1)로부터 구할 수 있다. 또한 공명회진속도(n_R)는 공명기의 취부 위치에 따라 관계하는 실린더 수를 고려하여 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$\nu = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{f}{VL}} \quad (1)$$

$$n_R = \frac{120 \cdot \nu}{Z} \quad (2)$$

여기서, a: 음속, f: 공명관 단면적, V: 공명기 체적, L: 공명관 길이, Z: 실린더 수

3.1 에어크리너에 공명기를 취부한 경우

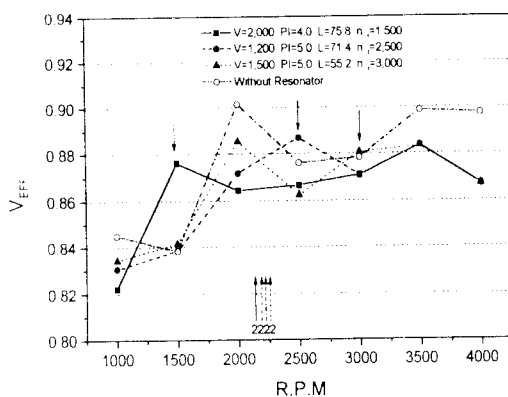


Fig. 3.2 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

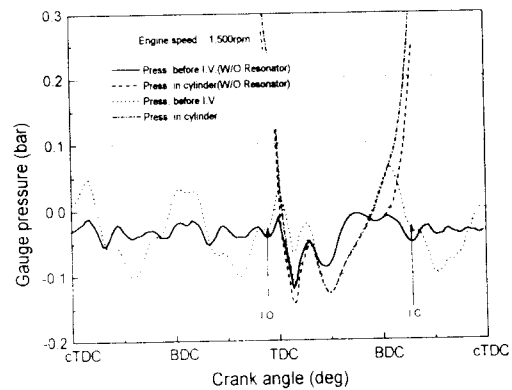


Fig. 3.3 Comparison of press. fluctuations for intake systems at 1,500rpm

Fig. 3.2는 에어크리너에 공명기를 취부하여 계산한 체적효율곡선이며, 흡기계의 동조회진속도도 함께 나타내고 있다. 또한 공명기를 취부하지 않았을 때의 체적효

율과 동조회전속도도 함께 나타내었다. 공명기는 공명회전속도가 1,500rpm, 2,500rpm 및 3,000rpm이 되도록 공명기의 용적, 관 직경 및 관 길이를 결정하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공명기를 이용하면 공명회전속도에서 체적효율이 증가하고 있으며, 특히 1,500rpm영역에서 공명기의 공명효과가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 3.3은 1,500rpm에서의 관내 압력변동을 비교하여 나타낸 것으로, 공명기가 없는 경우에 비하여 맥동폭이 증가하고 있는 것과 흡기 밸브 닫히기 직전의 시기에 실린더내 압력이 상승하고 있는 것으로부터 공명회전속도에서 공명효과가 나타남을 확인할 수 있다.

공명기는 관성효과에도 영향을 주며, 공명회전속도가 관성 동조회전속도에 근접하면 관성효과가 감소됨을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 공명기에 의한 공명효과는 고회전속도 영역으로 갈수록 적어지는 것으로 판단된다.

공명기를 이용하면 공명회전속도에서 체적효율을 향상시킬 수 있음을 알았다. 그러나 같은 공명회전속도를 갖는 공명기는 다수가 존재하기 때문에 최적의 공명기를 선택할 필요가 있다.

Fig. 3.4는 공명기 용적을 3,000cc로 일정히 하고, 공명기 직경을 3.0, 4.0, 5.0cm로 변경하여 공명기 공명회전속도가 1,500rpm이 되도록 공명기 관의 길이를 결정하여 에어크리너에 취부한 경우의 체적효율곡선을 보여주고 있다. 그림을 통하여 볼 수 있는 바와 같이 모든 경우에 있어서 공명기의 공명효과가 나타나 체적효율이 공명회전속도에서 크게 나타나는 것을 확연히 볼 수 있지만, 공명기의 직경값이 커질수록 공명기의 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 공명회전속도 이외의 회전속도에서는 본래의 흡기계 보다도 체적효율이 낮게 나타나고 있다.

이상의 검토결과로부터 공명기 취부에 따른 전 흡기계의 동조회전속도 영향보다, 공명기 공명효과에 따라서 체적효율이 증대하는 것을 알 수가 있었으며, 체적효율특성이 공명관의 직경에 따라서 크게 영향을 받는 것을 확인하였다.

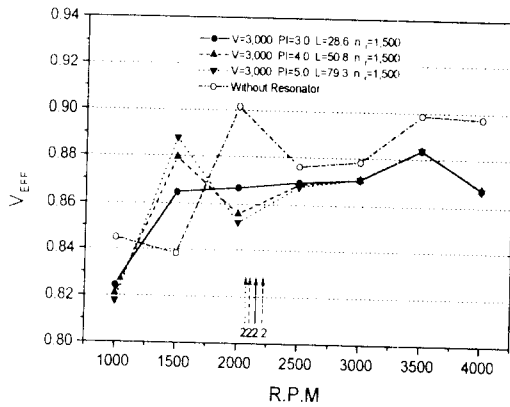


Fig. 3.4 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

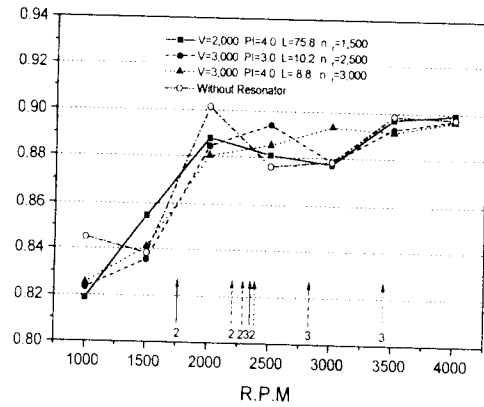


Fig. 3.5 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

3.2 관 P_t 에 공명기를 취부한 경우

Fig. 3.5는 관 P_t 에 공명기를 취부한 경우의 체적효율곡선이다. 기본 흡기계에 서 체적효율이 저하하는 1,500rpm, 2,500rpm, 3,000rpm에서 공명효과를 이용하기 위하여 각각의 공명회전속도를 갖는 공명기를 취부하였다. 그림에는 공명기의 공명회전속도와 흡기계 전체의 동조회전속도도 함께 도시하였다. 그림으로부터 관 P_t 에 공명기를 취부하면, 공명기의 공명회전속도에 따라 체적효율이 증가함을 볼 수가 있고 이는 에어크리너에 공명기를 취부한 경우와 같은 경향을 나타내었다. 특히 관에 공명기를 취부하면 기본 흡기계가 가지고 있는 동적효과를 충분히 이용하면서 공명기 공명효과를 이용할 수 있으므로 바람직한 흡기계를 구성할 수 있음을 알 수가 있다.

3.3 관 P_c 에 공명기를 취부한 경우

Fig. 3.6은 관 P_c 에 각각 4개의 공명기를 취부한 흡기계의 체적효율곡선이다. 공명기 공명회전속도와 동조회전속도도 함께 도시하였다. 각 실린더와 인접한 관 P_c 에 공명기를 취부한 경우에 있어서는 음향이론에 의한 동조회전속도보다 공명기에 의한 공명회전속도에 따라 체적효율의 증가가 확연히 나타남을 Fig. 3.6으로

부터 알 수 있다. 또한, 공명기 공명회전속도에서의 체적효율증가 뿐만아니라 공명기 취부에 따른 흡기계 전체의 4차 동조회전속도에서 흡기계 동적효과가 나타남을 볼 수 있다. 그러므로 실린더와 비교적 근 거리에 공명기를 취부함에 따라 공명기 공명효과가 크게 나타나나, 에어크리너와 관 P_b 에 공명기를 취부하는 경우보다 공명회전속도 이외의 회전속도에서는 체적효율이 크게 저하하며, 공명회전속도가 고속영역에 존재할수록 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 이 경우는 공명기의 크기가 상당히 크게 되고 각 실린더마다 공명기가 필요하기 때문에 Layout상의 문제가 발생할 수 있을 것으로 생각된다.

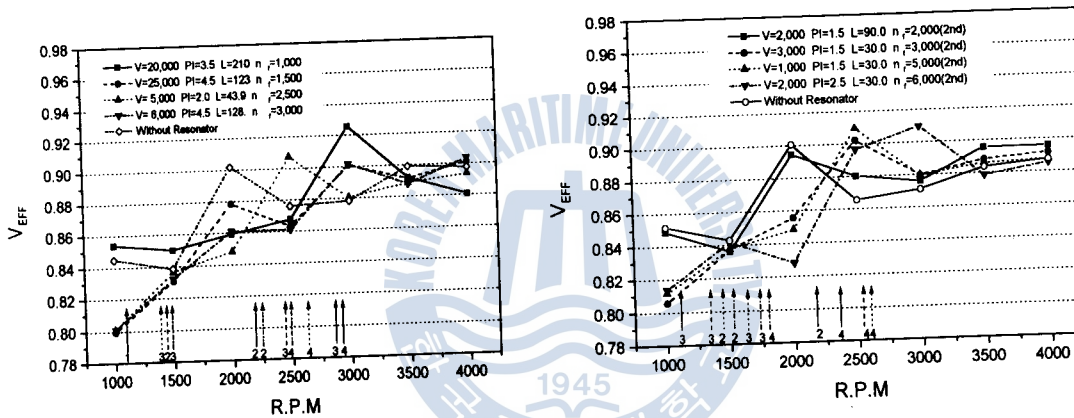


Fig. 3.6 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

Fig. 3.7 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

Fig. 3.7은 2차의 공명회전속도에서의 영향을 나타낸 것으로 앞에서 언급한 바와 같은 결과를 보여 주고 있다. 즉, 2차 공명회전속도에서도 공명효과를 이용할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 관 P_c 에 공명기를 취부하는 경우는 Layout상의 문제를 고려하여 2차 공명회전속도를 이용대상으로 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

이상의 검토결과로부터 공명기를 이용함으로써 동조회전속도와 공명회전속도에서 체적효율이 증가하는 것을 확인하였다. 특히 실린더와 가깝게 위치할수록 공명기 공명효과가 더 크게 작용하고, 공명기 공명회전속도이외의 회전속도에서는 공명기를 취부하지 않았을 경우보다 체적효율이 더 낮아지는 것을 알 수가 있었다. 또한, 공명회전속도 뿐만아니라 공명기를 포함한 전 흡기계의 동조회전속도에서도 체적효율의 증가가 확인되었다. 즉, 실린더와 매우 가까운 위치에 존재하는 관

P_e 에 공명기를 취부하면 공명회전속도에서 공명기 영향이 진 흡기계의 동조회전속도보다 더 크게 영향을 주어 공명회전속도에서 체적효율은 증가하고, 또한 동조회전속도가 존재하는 회전속도에서도 작지만 체적효율이 증가함을 볼 수 있었다. 난, 이 경우 Layout을 고려하여 공명기의 용기 선택에 주의 할 필요가 있다고 생각된다.

4. 공명기의 위치에 의한 영향

지금까지의 검토결과로부터 다사이클 다실린더 디젤기관에 있어서 공명기 공명효과를 이용하면 체적효율을 향상시킬 수 있으며, 특히 실린더와 근접하여 공명기를 취부하면 공명기 공명효과가 크게 나타남을 확인하였다. 또한 공명기를 흡기계 각 부위에 취부한 결과 에어크리니와 관 P_e 에 공명기를 취부하면 저속 및 중속 영역에서 공명효과가 크게 나타나 그 영역에서의 체적효율이 크게 향상됨을 확인하였다. 그러나 공명기를 흡기계에 취부함에 따라 진 흡기계 동조회전속도에 변화를 주어 이용대상이 되는 동조회전속도가 달라짐은 물론 체적효율곡선도 공명효과와의 관계에 의하여 달라지게 됨을 확인하였다. 따라서 지금까지 검토한 결과들 각각 Ram형 흡기계 각 부위에 공명기를 취부하여 Ram형 흡기계에서 체적효율이 저하하는 1,500rpm, 2,500rpm영역에서의 체적효율향상을 목표로 공명기 최적 취부 위치를 파악하고자 한다.

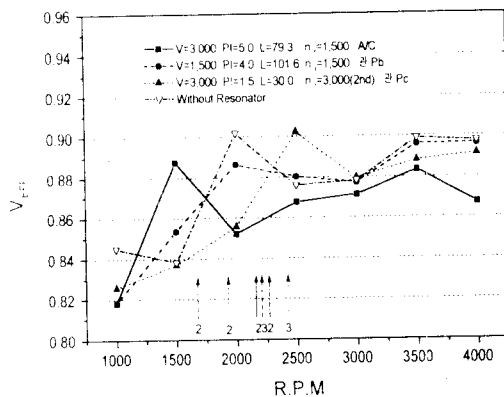


Fig. 11 Calculated results of volumetric efficiency for low speed

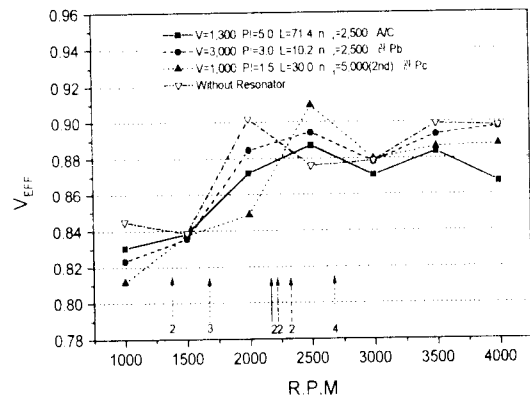


Fig. 12 Calculated results of volumetric efficiency for high speed

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 Ram형 흡기계의 각 부위(A/C, 관 P_b , 관 P_c)에 공명회전속도 1,500rpm, 2,500rpm의 공명기를 취부하여 계산한 체적효율곡선이다. 또한 공명기 취부에 따른 전 흡기계 동조회전속도도 함께 나타내고 있다. Fig. 4.1을 통하여 알 수 있는 바와 같이 에어크리너에 공명기를 취부하였을 때 공명효과가 크게 나타나고 있다. 그러나 공명회전속도 이외의 회전속도에서는 본래의 흡기계의 체적효율보다 낮아지게 됨을 볼 수 있다. 또한 관 P_c 의 경우에는 1차의 공명회전속도보다도 오히려 2차의 공명회전속도에서 공명효과가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러므로 실린더와 멀리하여 공명기를 취부할수록 공명효과가 저속영역에서 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 4.2의 모든 흡기계의 체적효율곡선은 공명기 공명회전속도 2,500rpm에서 공명효과가 나타나고 있으며, 특히 실린더와 근접한 관 P_c 의 경우가 가장 공명효과가 크게 나타나고 있다. 하지만 공명회전속도 이외의 회전속도에서는 에어크리너와 관 P_b 에 공명기를 취부한 경우 및 공명기를 취부하지 않았을 경우보다 체적효율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한 세 경우 모두 공명기 공명회전속도뿐만 아니라 동조회전속도에서 체적효율의 증가가 나타나고 있는 것을 볼 수가 있다.

이상의 검토결과로부터 4사이클 디젤기관에 공명기를 취부하여 공명효과에 의한 높은 체적효율특성을 얻기 위해서는 실린더와 인접한 관 P_c 에 공명기를 취부하여야 함을 알 수가 있었다. 또한, 전 사용속도 범위에서 높으면서 평탄한 체적효율특성을 얻기 위해서는 실린더와 멀리 떨어진 에어크리너 및 관 P_b 에 공명기를 취부하여 공명효과와 흡기계 동조회전속도 모두를 이용하여야 함을 알 수가 있었다.

그리고, 기본 흡기계의 특성에서 체적효율이 저하하는 영역만을 공명기를 이용하여 향상시키고자 할 경우에는 다음과 같이 공명기를 설치하는 것이 바람직하다고 생각된다. 즉, 저속영역의 특성을 개선시키고자 할 경우에는 에어크리너에 공명기를 취부하는 것이 바람직하며, 고속영역의 특성을 개선시키고자 할 경우에는 실린더와 인접한 관 P_c 에 취부하는 것이 바람직하다. 그러나 관 P_c 에 취부할 경우는 2차의 공명회전속도를 이용하는 것이 바람직하며, 공명기 설치에 따른 공간상의 제약에 유의할 필요가 있다.

5. 결 론

공명기를 이용한 4실린더 4행정사이클 디젤엔진을 모델로 하여 음향이론 프로그램과 성능예측 프로그램을 이용한 수치실험을 통하여 공명기의 크기에 따라서 체적효율특성에 미치는 영향을 분석하였고, 공명기를 이용한 흡기계의 최적설계 방법과 공명기 최적 취부 위치를 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 공명기를 흡기계에 취부하면, 체적효율은 공명기 공명회전속도에서 증가하며, 공명기의 공명회전속도와 전 흡기계 동조회전속도를 고려함으로써 바람직한 흡기계를 설계할 수 있음을 알았다.
2. 공명기를 이용한 흡기계에서 에어크리너와 관 P_6 에 공명기를 취부할 경우 공명기 공명회전속도 및 음향이론에 의한 동조회전속도는 체적효율곡선의 극대점들과 잘 일치한다. 따라서 공명기를 이용한 흡기계의 설계시 초기단계에서 음향이론에 의한 정성적 해석방법과 공명기 공명회전속도를 이용하면 공명기를 이용한 최적의 흡기계를 효과적으로 예측할 수 있다.
3. 4실린더 흡기계에 공명기를 이용할 경우 취부위치에 따른 공명효과를 요약하면 다음과 같다.
 - (1) 에어크리너에 공명기를 취부하면 저속영역 특성을 향상시킬 수 있다.
 - (2) 관 P_2 에 공명기를 취부하면 중속영역(2,500rpm ~ 3,000rpm) 특성을 향상시킬 수 있다.
 - (3) 실린더와 인접한 관 P_4 에 취부하면 중·고속영역 특성을 향상시킬 수 있다.
4. 실린더에 인접한 관 P_4 에 공명기를 취부할 경우는 2차의 공명회전속도를 이용하는 것이 바람직하다.

결론 실제 기관의 흡기계에 공명기를 취부하여 공명효과에 관한 본 연구의 결과를 확인하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 嶋木 讓, “吸·排氣管의 利用(上)” 内燃機關 Vol.10, No.108, 1971, pp.93~100

2. 최성규, “디젤기관 흡기 다기관 최적설계에 관한 기초연구” 한국박용기관 학회지, 제14권, 제4호, 1990, pp.72~80.
3. 조규철, “4실린더 디젤기관 흡기계의 최적설계방법에 관한 연구” 한국자동차공학회지, 제 5권 5호, 1997. 9.
4. 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 平坦化”, 日本機械學會論文集 第 478号 編, 1987. 6.
5. G. CSER, “Double resonance system - a new way to improve the lowspeed operation of supercharged engine”, Proc. I. Mech. E., C405/013, pp.51~57.
6. A.Ohata & Y. Ishida, “Dynamic Inlet Pressure and Volumetric Efficiency of Four Cycle Four Cylinder Engine” SAE Paper NO. 820407, 1983.
7. Y.Shimamoto, “An Attempt to Improve the Characteristics of Volumetric Efficiency by a Resonator in Four Cycle Diesel Engines” JSME vol 52, NO. 478, 1986.
8. 이재순, “공명기를 이용한 4기통 SI기관의 체적효율 향상에 관한 연구”, 한국자동차공학회논문집 제 4권 3호, 1996.
9. 최재성 외 2인, “흡기계의 정성적 이론해석” 한국자동차공학회 기관, 공해, 연료 및 윤활유부문 학술강연초록집, 1993, pp.5~10.
10. 大富 他, “吸氣系動的効果の 音響學的研究” 第 5回 內燃機關 合同 シンポジウム 講演論文集(日本), 1985.
11. 최재성, “흡·배기계통을 포함한 4행정 디젤기관의 성능예측 시뮬레이션 프로그램의 개발”. 한국박용기관 학회지 제 13권 3호, 1989. 8.