

4실린더 디젤기관 공명 흡기계의 최적설계에 관한 연구

홍기운* · 남정길* · 최재성**

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

K. Y. Hong, J. K. Nam, J. S. Choi

Key words : Diesel Engines(디젤기관), Volumetric Efficiency(체적효율), Intake Manifold(흡기매니폴드), Resonator(공명기)

Abstract

In this paper, effects of resonator within intake manifold system on volumetric efficiency were investigated in the 4 - cylinder and 4 stroke Diesel Engines. The effects of resonator 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. 서 론

4행정 디젤기관은 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 높은 체적효율특성을 갖는 흡기 매니폴드를 설계하기란 쉽지가 않다.

필자들은 4 실린더 디젤기관의 흡기계 설계에 관하여 이미 보고^{2,3)}한 바 있으며, 그 연구결과로 기존의 매니폴드(BOX형)에 비하여 높은 체적효율을 나타내는 흡기계(RAM형)의 설계 방법을 제시 하였다.

그러나 앞에서 언급한 바와 같이 Ram형 매니폴드의 특성상 상대적으로 체적효율이 저하하는 영역이 존재하게 되기 때문에 전반적인 사용회전속도 영역에서 평탄하면서도 높은 체적효율특성을 얻기 위하여는 체적효율이 저하하는 회전속도 영

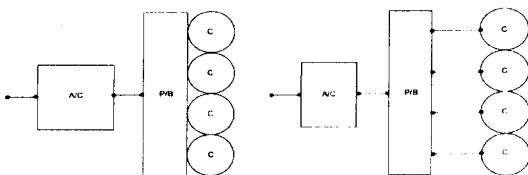
* 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학부(원고접수일 : 98년 6월)

** 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

역에서의 개선책이 필요하게 된다^{4~8)}. 본 연구에서는 Ram형 흡기계의 체적효율특성을 개선하기 위하여 공명기를 이용하는 방법에 관하여 연구하고자 하였다. 즉 공명기의 이용이 체적효율에 미치는 영향을 분석한 후, 공명기의 각부 치수 및 위치에 따른 체적효율특성의 변화를 파악하여 체적효율의 개선 가능성을 확인하고 최적 공명기 설계에 관한 연구결과를 보고하고자 한다. 또한, 연구방법으로는 앞의 연구에서와 마찬가지로 정성적 해석방법^{9,10)}과 정량적 해석방법¹¹⁾을 병용하였다.

2. 실험 및 계산결과의 비교

연구대상기관은 4실린더 4행정사이클 디젤기관 (직경×행정 : 94×100 mm, 압축비 : 21.0, 최대 출력 : 63 KW/4,000 rpm)으로서, 대상기관의 흡·배기밸브의 구성은 3-밸브형으로 직경이 다른 2개의 흡입밸브와 1개의 배기밸브가 설치되어 있으며, 두 개의 흡입밸브에 탄젠셜포트(Tangential Port)와 헬리컬포트(Helical Port)가 각각 분리되어 설치되어 흡입유동을 적극적으로 발생시키도록 설계 제작되어 있다. 그리고 두 흡입밸브의 개폐시기는 동일하게 작동된다. 이들 두 흡입포트는 압력파에 영향을 미치지 보다는 흡입공기가 유입하는 유동저항의 증가에 영향을 미치게 될 것이므로, 전보³⁾에서와 같은 방법으로 실린더 헤드내의 흡입 유로 형상을 적절히 설정하여 1개의 등가 유로로 치환하여 모델링하였다. 또한 계산에 있어서 흡·배기서지탱크의 압력은 실험시의 평균값을 이용하여 회전속도에 관계없이 일정하게 설정하였으며, 흡·배기관 및 연소실 벽면온도도 회전속도에 관계없이 각 위치에 따라서 일정하게 설정



(a) BOX type

(b) RAM type

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

Fig. 1 Models of each intake system

하였다.

Fig. 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. 2는 각 기관회전속도에 있어서 공명기를 취부하지 않은 경우의 BOX형과 RAM형 흡기계의 체적효율변화를 나타낸 것으로, 실험결과와 계산결과를 비교하고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 BOX형이나 RAM형이나 실험결과와 비교하여 계산결과가 전체적으로 높은 값을 나타내고 있으나 그 차는 최대 3%정도로 모든 경우에서 정성적으로는 물론 정량적으로 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 계산결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다. 또한, BOX형의 체적효율 특성은 고속영역(2,500 rpm 이상)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 1,500 rpm 영역과 2,500 rpm 영역에서 체적효율이 낮게 나타나고 있으며, 이에 대한 개선이 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 RAM형 흡기계에 공명기를 부착시켜 1,500 rpm 영역과 2,500 rpm 영역에서 저하하는 체적효율의 특성을 개선하고자 한다.

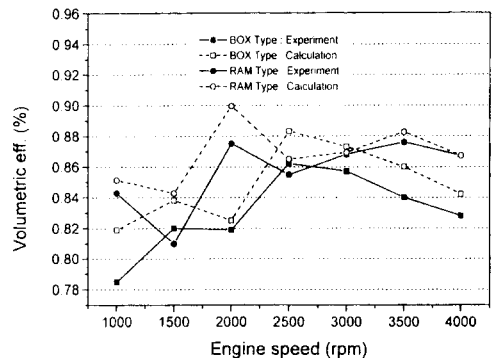


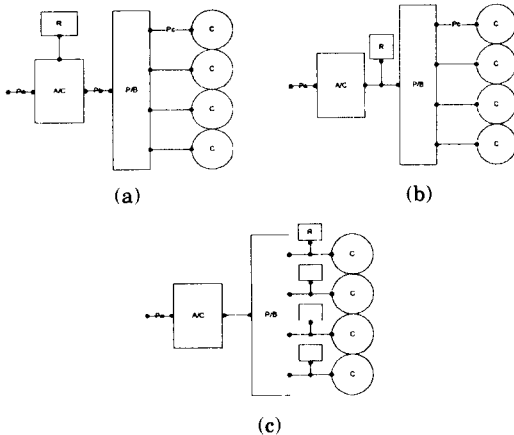
Fig. 2 Comparison of results between Calculation and Experiment

3. 공명기에 의한 RAM형 흡기계의 체적효율 특성

흡기계에서 체적효율특성에 미치는 공명기의 효과를 파악하기 위하여 Fig. 3에 RAM형의 기본계를 구성하여 나타냈으며, 각 구성요소 마다에 공명기를 부착하여 공명기의 형상과 치수 및 위치의 변화가 체적효율곡선에 미치는 영향을 분석 검토하였다. (a)의 경우는 공명기를 에어크리너에, (b)의 경우는 공명기를 에어크리너와 플레넘챔버 사이에, (c)의 경우는 플레넘챔버와 실린더사이에 각각 4개의 공명기를 부착한 흡기계이다. 기본계 구성에 있어서 실린더 헤드내의 흡·배기유로를 고려하였으며, 흡기계 각 위치에서의 공명기의 영향을 파악하기 위한 검토는 에어크리너, 관 P_b, 관 P_c 순으로 각각 순차적으로 행하였다.

공명기는 Fig. 3과 같이 관과 용기로 구성되며, 공명기의 고유진동수는 Helmholtz 공명기의 고유진동수(ν)를 구하는 식 (1)로부터 구할 수 있다. 또한 공명회전속도(n_R)는 공명기의 부착 위치에 따라 관계하는 실린더 수를 고려하여 식 (2)로부터 구할 수 있다.

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



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

Fig. 3 Models of each intake system with resonator

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

여기서, a: 음속, f: 공명관 단면적, V: 공명기 체적, L: 공명관 길이, Z: 실린더 수를 나타낸다.

3.1 에어크리너에 공명기를 부착한 경우

Fig. 4는 에어크리너에 공명기를 부착하여 계산한 체적효율곡선이며, 흡기계의 동조회전속도도 그림하부의 해당위치에 동조차수와 화살표로 함께 나타내었다. 또한 공명기를 부착하지 않았을 때의 체적효율과 동조회전속도도 함께 나타내었다. 공명기는 공명회전속도가 1,500 rpm, 2,500 rpm 및 3,000 rpm이 되도록 공명기의 용적, 관 직경 및 관 길이를 결정하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공명기를 이용하면 공명회전속도에서 체적효율이 증가하고 있으며, 특히 1,500 rpm영역에서 공명기의 공명효과가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 1,500 rpm에서의 관내 압력변동을 비교한 것으로, 공명기가 없는 경우에 비하여 맥동폭이 증가하고 있는 것과 흡기밸브가 닫히기 직전의 시기(I. C.)에 실린더내 압력이 상승하고 있기 때문에 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. 따라서, 공명기를 이용하면 공명회전속도에서 체

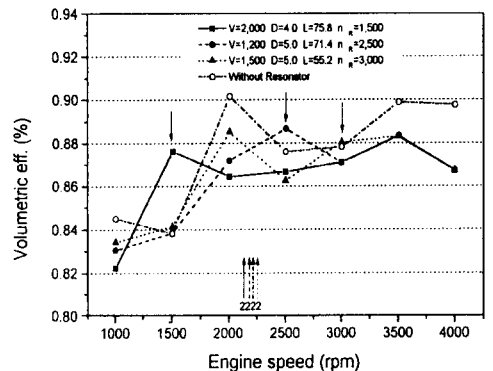


Fig. 4 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

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

Fig. 6은 공명기의 용적을 3,000 cc로 일정하게 하고, 공명기 직경을 3.0, 4.0, 5.0 cm로 변경하여 공명기 공명회전속도가 1,500 rpm이 되도록 공명기 관의 길이를 결정하여 에어크리너에 부착한 경우의 체적효율곡선을 보여주고 있다. 그림을 통하여 볼 수 있는 바와 같이 모든 경우에 있어서 공명기의 공명효과가 나타나서 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 보다 체적효율이 낮게 나타나고 있다.

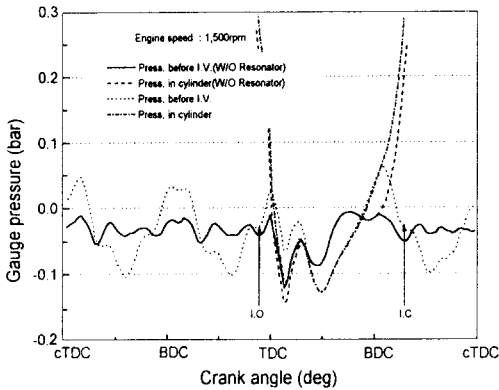


Fig. 5 Comparison of press. fluctuations for intake systems at 1,500rpm

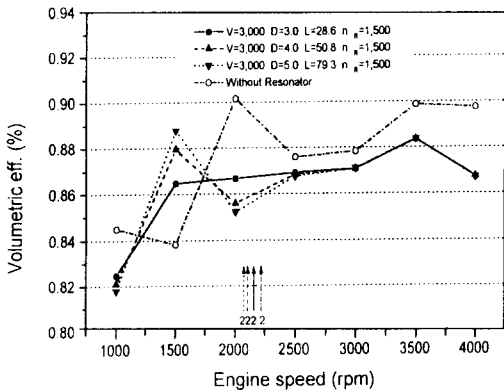


Fig. 6 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

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

3.2 관 P_b에 공명기를 부착한 경우

Fig. 7은 관 P_b에 공명기를 부착한 경우의 체적 효율곡선이다. 기본 흡기계에서 체적효율이 저하하는 1,500 rpm, 2,500 rpm, 3,000 rpm에서 공명 효과를 이용하기 위하여 각각의 공명회전속도를 갖는 공명기를 부착하였다. 그림에는 공명기의 공명회전속도와 흡기계 전체의 동조회전속도도 함께 도시하였다. 그림으로부터 관 P_b에 공명기를 부착하면, 공명기의 공명회전속도에 따라 체적효율이 증가함을 볼 수가 있고 이는 에어크리너에 공명기를 부착한 경우와 같은 경향을 나타내었다. 특히 관에 공명기를 부착하면 기본 흡기계가 가지고 있는 동적효과를 충분히 이용하면서 공명기의 공명 효과를 이용할 수 있으므로 바람직한 흡기계를 구성할 수 있음을 알 수가 있다.

3.3 관 P_c에 공명기를 부착한 경우

Fig. 8은 관 P_c에 각각 4개의 공명기를 부착한 흡기계의 체적효율곡선이다. 공명기 공명회전속도와 동조회전속도도 함께 도시하였다. 각 실린더와 인접한 관 P_c에 공명기를 부착한 경우에 있어서는 음향이론에 의한 동조회전속도보다 공명기에 의

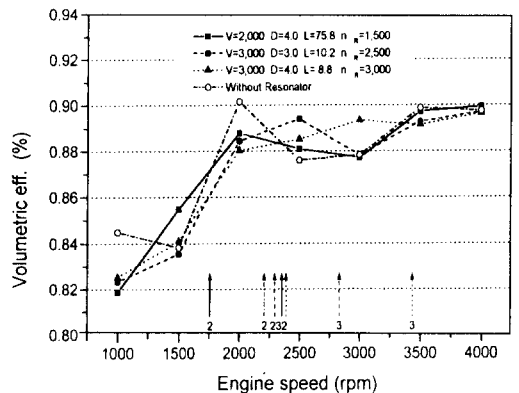


Fig. 7 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

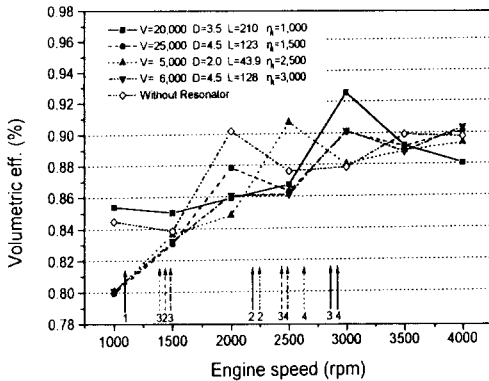


Fig. 8 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

한 공명회전속도에 따라 체적효율의 증가가 확연히 나타남을 Fig. 8로부터 알 수 있다. 또한, 공명기 공명회전속도에서의 체적효율증가 뿐만아니라 공명기 부착에 따른 흡기계 전체의 4차 동조회전속도에서 흡기계 동적효과가 나타남을 볼 수 있다. 그러므로 실린더와 비교적 근 거리에 공명기를 부착함에 따라 공명기 공명효과가 크게 나타나나, 에어크리너와 관 P_b에 공명기를 부착하는 경우보다 공명회전속도 이외의 회전속도에서는 체적효율이 크게 저하하며, 공명회전속도가 고속영역에 존재할수록 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 이 경우는 공명기가 상당히 크게 되고 각 실린더마다 공명기가 필요하기 때문에 설치공간상의 문제가 발생할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 9는 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_c에 공명기를 부착하는 경우는 설치공간상의 문제를 고려하여 2차 공명회전속도를 이용대상으로 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

이상의 검토결과로부터 공명기를 이용함으로써 동조회전속도와 공명회전속도에서 체적효율이 증가하는 것을 확인하였다. 특히 실린더와 가깝게 위치할수록 공명기의 공명효과가 더 크게 작용하고, 공명기 공명회전속도이외의 회전속도에서는 공명기를 부착하지 않았을 경우보다 체적효율이 더 낮아지는 것을 알 수가 있었다. 또한, 공명회전속도

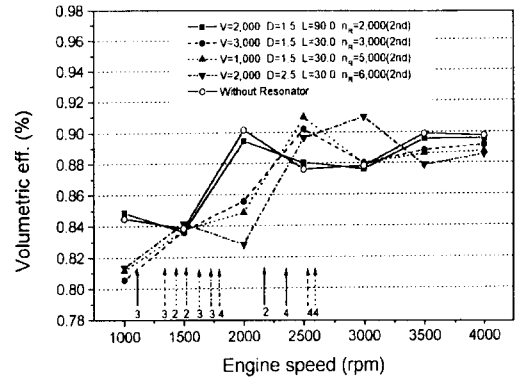


Fig. 9 Calculated results of volumetric efficiency by resonator

뿐만아니라 공명기를 포함한 전 흡기계의 동조회전속도에서도 체적효율의 증가가 확인되었다. 즉, 실린더와 매우 가까운 위치에 존재하는 관 P_c에 공명기를 부착하면 공명회전속도에서 공명기 영향이 전 흡기계의 동조회전속도보다 더 크게 영향을 주어 공명회전속도에서 체적효율은 증가하고, 또한 동조회전속도가 존재하는 회전속도에서도 작지만 체적효율이 증가함을 볼 수 있었다. 단, 이 경우 설치공간을 고려하여 공명기의 용기 선택에 주의 할 필요가 있다고 생각된다.

4. 공명기의 위치에 따른 영향

지금까지의 검토결과로부터 4사이클 다실린더 디젤기관에 있어서 공명기의 공명효과를 이용하면 체적효율을 향상시킬 수 있으며, 특히 실린더와 근접하여 공명기를 부착하면 공명기의 공명효과가 크게 나타남을 확인하였다. 또한 공명기를 흡기계 각 부위에 부착한 결과 에어크리너와 관 P_b에 공명기를 부착하면 저속 및 중속영역에서 공명효과가 크게 나타나 그 영역에서의 체적효율이 크게 향상됨을 확인하였다. 그러나 공명기를 흡기계에 부착함에 따라 전 흡기계 동조회전속도에 변화를 주어 이용대상이 되는 동조회전속도가 달라짐은 물론 체적효율곡선도 공명효과와의 관계에 의하여 달라지게 됨을 확인하였다. 따라서 지금까지 검토한 결과를 가지고 RAM형 흡기계 각 부위에 공명기를 부착하여 RAM형 흡기계에서 체적효율이

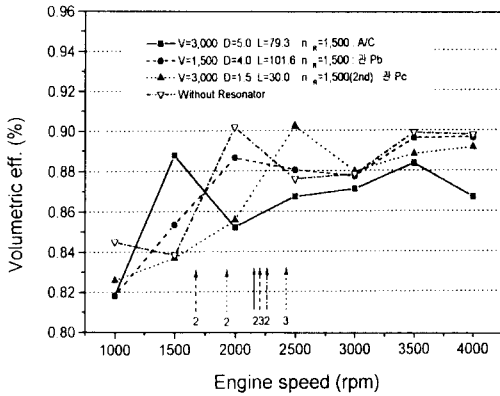


Fig. 10 Calculated results of volumetric efficiency for low speed

저하하는 1,500 rpm, 2,500 rpm 영역에서의 체적 효율향상을 목표로 공명기 최적 부착위치를 파악하고자 한다.

Fig. 10과 Fig. 11은 RAM형 흡기계의 각 부위(에어크리너, 관 Pb, 관 Pc)에 공명회전속도 1,500 rpm, 2,500 rpm의 공명기를 부착하여 계산한 체적효율곡선이다. 또한 공명기 부착에 따른 전 흡기계 동조회전속도도 함께 나타내고 있다. Fig. 10을 통하여 알 수 있는 바와 같이 에어크리너에 공명기를 부착하였을 때 공명효과가 크게 나타나고 있다. 그러나 공명회전속도 이외의 회전속도에서는 본래의 흡기계의 체적효율보다 낮아짐을 알 수 있다. 또한 관 Pc의 경우에는 1차의 공명회전속도보다도 오히려 2차의 공명회전속도에서 공명효과가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러므로 실린더와 멀게하여 공명기를 부착할수록 공명효과가 저속영역에서 크게 나타나고 있다. Fig. 11에서 모든 흡기계의 체적효율곡선은 공명기 공명회전속도 2,500 rpm에서 공명효과가 나타나고 있으며, 특히 실린더와 근접한 관 Pc의 경우 공명효과가 가장 크게 나타나고 있다. 그러나 공명회전속도 이외의 회전속도에서는 에어크리너와 관 Pb에의 공명기 부착에 관계 없이 체적효율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한 세 경우 모두 공명기 공명회전속도 뿐만 아니라 동조회전속도에서 체적효율의 증가가 나타나고 있는 것을 볼 수가 있다.

이상의 검토결과로부터 4행정 디젤기관에 공명

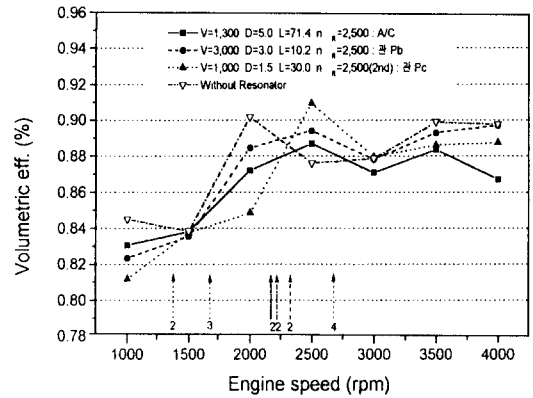


Fig. 11 Calculated results of volumetric efficiency for high speed

기를 부착하여 공명효과에 의한 높은 체적효율특성을 얻기 위해서는 실린더와 인접한 관 Pc에 공명기를 부착하여야 함을 알 수가 있었다. 또한, 전체의 사용속도 범위에서 높으면서 평탄한 체적효율특성을 얻기 위해서는 실린더와 멀리 떨어진 에어크리너 및 관 Pb에 공명기를 부착하여 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 부착하는 것이 바람직하며, 고속영역의 특성을 개선시키고자 할 경우에는 실린더와 인접한 관 Pc에 부착하는 것이 바람직하다. 그러나 관 Pc에 부착할 경우는 2차의 공명회전속도를 이용하는 것이 바람직하며, 공명기 설치에 따른 공간상의 제약에 유의할 필요가 있다.

5. 결 론

4실린더 4행정 디젤기관의 흡기계에서 공명기의 효과를 연구하기 위하여 음향이론 프로그램과 성능예측 프로그램을 이용한 수치실험을 통하여 공명기의 크기에 따라서 체적효율특성에 미치는 영향을 분석하였고, 공명기를 이용한 흡기계의 최

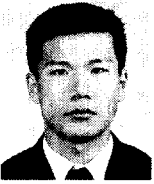
적설계 방법과 공명기 최적 부착위치를 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 디젤기관의 체적효율은 흡기계에 공명기를 부착하면, 공명기의 공명회전속도에서 증가하며, 공명기의 공명회전속도와 흡기계 전체의 동조회전속도를 고려함으로써 바람직한 흡기계를 설계할 수 있음을 알았다.
2. 공명기를 이용한 흡기계에서 에어크리너와 관 P_b에 공명기를 부착할 경우 공명기의 공명회전속도 및 음향이론에 의한 동조회전속도는 체적효율곡선의 극대점들과 잘 일치한다. 따라서 공명기를 이용한 흡기계의 설계시 초기단계에서 음향이론에 의한 정성적 해석방법과 공명기의 공명회전속도를 이용하면 최적의 흡기계를 효과적으로 예측할 수 있다.
3. 4실린더 흡기계에 공명기를 이용할 경우 부착위치에 따른 공명효과를 요약하면 다음과 같다.
 - (1) 에어크리너에 공명기를 부착하면 저속영역 특성을 향상시킬 수 있다.
 - (2) 관 P_b에 공명기를 부착하면 중속영역 (2,500 rpm~3,000 rpm) 특성을 향상시킬 수 있다.
 - (3) 실린더와 인접한 관 P_c에 부착하면 중·고속영역 특성을 향상시킬 수 있다.
4. 실린더에 인접한 관 P_c에 공명기를 부착할 경우는 2차의 공명회전속도를 이용하는 것이 바람직하다.
 급후 실제 기관의 흡기계에 공명기를 취부하여 공명효과에 관한 본 연구의 결과를 확인하고자 한다.

참고문헌

1. 嶋本 讓, “吸·排氣管の 利用(上)” 內燃機關 Vol.10, No.108, pp.93~100, 1971.
2. 최성규, “디젤기관 흡기 다기관 최적설계에 관한 기초연구” 한국박용기관 학회지, 제 14권, 제4호, pp.72~80, 1990.
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 平たん化”, 日本機械學會論文集 第 478 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 et al, “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, pp.5~10, 1993.
10. 大富 他, “吸氣系動的效果の 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 제3호, 1989. 8.

저 자 소 개



홍기운(洪起雲)

1970년 4월생. 1994년 한국해양대학교 기관공학과졸업. 1998. 한국해양대학교 대학원 기관공학과 석사과정수료. 1998. ~현재 미국선급협회



남정길(南廷吉)

1962년 7월생. 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1991. 한국해양대학교 대학원 기관공학과 석사과정수료. 1974. ~현재 한국해양대학원 기관공학과 박사과정



최재성(崔在星)

1952년 5월생. 1974년 한국해양대학원 기관공학과졸업. 1976. 한국해양대학교 대학원 기관공학과 석사과정수료. 1986. 일본 경도대학 대학원 기계공학과 박사과정수료. 1974. ~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수