

자동차 흡기계 해석에서의 평면파 이론 적용

이 장명, 임 학중**, 김 민진***, 정 병인***

An Application of the plane wave theory for the analysis of the automobile intake system

Chang-Myung Lee, Hak-Jong Lim, Min-Jin Kim, Byung-In Chung

Abstract

In the begining stage of development of a new automobile, decision of appropriate positions and room of resonators is important to NVH enigeers. To find optimized positions of resonators of an automotive intake system, numerical approach such as acoustic FEM or BEM and experimental work are possible. However, either method requires many efforts and time to prepare a numerical or a real model.

This research demonstrates easy way to design an adequate intake system.

1. 서론

오늘날 쾌적하고 조용한 생활 환경에 대한 요구의 증대 및 소음이 사람에게 미치는 영향 등으로 인해 정숙한 자동차의 필요성과 중요성이 급격히 대두됨으로 인해 흡기계의 소음은 점점 중요한 소음원이 되고 있다.

흡기 소음은 엔진 자체의 폭발 소음이 흡기계로 유입되어 발생하는 소음보다 흡기관내에서 관내부의 음향 공진(Resonance) 현상에 의하여 유발되는 소음이 주된 소음원이 되고 있다.

이러한 흡기 소음을 감소시키기 위하여 흡기관의 음향 공진 주파수에 해당하는 주파수의 공명기를

부착한다. 하지만 공명기는 엔진 룸내의 많은 공간을 차지할 뿐만 아니라 부착 위치 선정에 문제가 따르고 있다. 더군다나 흡기 소음의 문제 발생은 차량 시제품이 나온 후부터 파악이 가능하기 때문에 어떤 경우에는 흡기 소음의 원인이 규명이 되어도 엔진 룸내의 Layout상 공명기의 설치가 곤란한 경우가 있다. 또한 문제가 되는 주파수의 소음을 감소시키기 위하여 그 주파수에 해당하는 공명기를 설치한다고 하더라도 설치 위치에 따라서 소음 저감에 많은 영향을 미치고 있음은 익히 알려진 바이다.

따라서 초기 Layout 단계에서 흡기계의 소음을 예측하여 흡기계의 공명기의 Tuning 주파수 결정과 공명기의 위치 및 부피를 확보하여 두는 것은 대단히 중요하다. Layout 단계에서 흡기계 공명기

* 울산대학교 자동차공학과

** 울산대학교 자동차공학과 대학원

*** 현대자동차 진동소음 1팀

의 Tuning 주파수 및 공명기의 위치를 결정하기 위하여 수치해석적 방법(FEM 또는 BEM)의 사용이 보편적이었다.

하지만 흡기계 전체를 모델링하는데 필요한 많은 시간과 전문성 그리고 정확한 해석을 위한 경계 조건 결정의 어려움 등으로 인하여 개발 초기 단계의 다양한 경우에 대해 사용하기는 쉽지 않다.

그러므로 잘 알려진 평면파 이론을 적용하여 흡기계 공명 주파수 공명기의 최적 위치 결정 방법 등을 소개한다.

2. 건본용 흡기계에 대한 소음 해석

아래 그림은 흡기 다기관과 직선관 그리고 공기 청정기를 단순 확장관으로 대체한 건본용 흡기계를 나타낸 것이다.

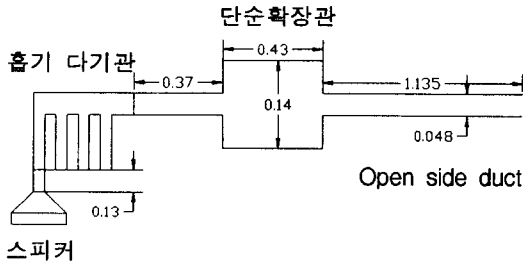


Fig 1. 건본용 흡기계의 개략도 (단위 m)

먼저 건본용 흡기계를 구성하는 음향 요소 중 흡기 다기관과 단순 확장관에 대해 3가지 방향에서, 4단자 정수법을 이용한 이론적인 방법과 SYSNOISE를 이용한 수치해석적인 방법 그리고 실험을 통한 검증, 이렇게 3가지 방향에서 소음 해석한 결과를 서로 비교하여 개발된 흡기 소음 예측 프로그램의 실차 적용 가능성에 대해 알아본다.

먼저 4단자 정수법이란 전기-음향 상사의 원리를 이용해 흡기계 전체 시스템을 음향 요소별로 나누

어 단순화시키고, 각 음향 요소 부분에 대한 이론해를 서로 연결시켜 전체 흡기 음향 시스템의 해를 구하는 방법이다.

그리고 투과 손실(Transmission Loss)이란 어떤 음향 구성 요소가 무한한 길이의 덕트에 연결되어 있다고 가정하고, 그 음향 구성 요소로 들어오는 음향 에너지와 빠져 나가는 음향 에너지의 차이를 dB 값으로 나타낸 것으로, 흡기계를 구성하는 각각의 음향 구성 요소만의 소음 제어 효과를 살펴볼 때 적절한 값이다.

그러나 흡기계 전체를 대상으로 했을 때는 Source impedance와 Radiation impedance로 인한 효과를 투과 손실로서는 표현할 수가 없기 때문에 이를 고려할 수 있는 삽입 손실(Insertion Loss)이라는 다른 성능 지수를 사용한다.

(1) 흡기 다기관(Intake Manifold)에 대한 해석

흡기 다기관에서는 아래 Fig 2와 같이 왼쪽의 다기관을 1번 다기관이라고 정하고, 차례로 오른쪽으로 2번, 3번, 4번이라 정하였다. 흡기계 내의 음파는 평면파로 진행한다고 가정할 수 있으므로 4단자 정수법을 사용할 때 다음과 같이 간단하게 모델링을 하였다. 실제 흡기 다기관은 약 90°가량 굽어져 있는데 이를 직선관으로 모델링하여 해석을 하는 것이 가능한지 알아보기 위해 수치해석적 방법을 이용하여 직선관, 45°굽은 관, 90°굽은 관, 180°굽은 관에 대해서 투과 손실 및 음향 모드를 계산한 결과 90° 정도 굽은 흡기 다기관을 직선관으로 모델링하여도 큰 차이가 없음을 확인하였다. 단 완전히 직각으로 꺾인 관은 주파수 이동과 투과 손실에 차이가 있다. 직선관, 45°굽은 관, 90°굽은 관, 및 직각으로 굽은 관의 치수를 길이 1m, 직경 0.06m로 정하였다.

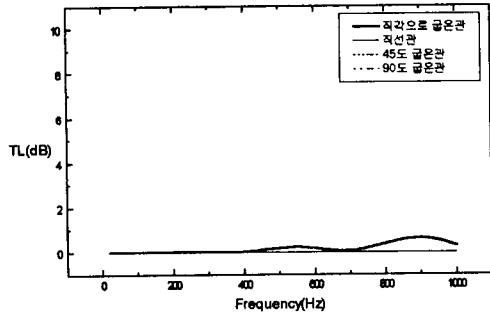


Fig 2. 굽은 정도에 따른 관의 투과 손실 비교

그리고 흡기 다기관은 경우에는 소음 해석을 1번 다기관에 적용하였다.

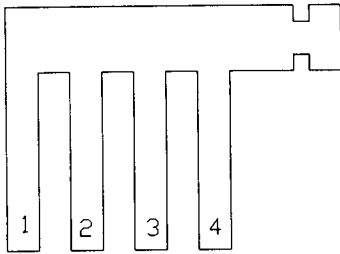


Fig 3. 흡기 다기관의 개략도

Fig 3에서 보면 여러 개의 다기관 중 2번, 3번, 4번 다기관은 1번 다기관이 작동 중에는 닫혀 있으므로 각각 측지 공명기로 작용할 것이라고 예측할 수 있다. 개발된 흡기 성능 예측 프로그램으로 흡기 다기관에 대해서 해석을 하였다. 아래 그림 4에서 보면 4단자 정수법과 유한 요소법에 의한 공명 주파수(Resonance frequency)는 일치하나 실험과 비교하면 약간의 주파수 이동 현상이 있다. 흡기 다기관의 내부 형상이 복잡하여 실제와 같은 상태로 모델링하는데 어려움이 있으므로 이에 따른 오차인 것으로 판단된다.

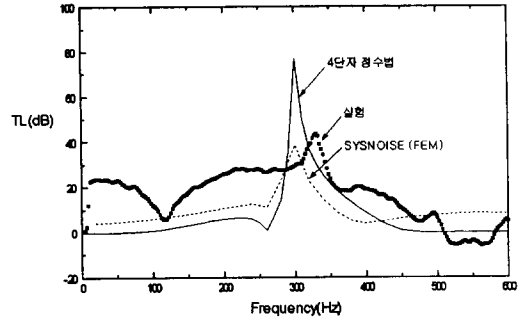


Fig 4. 흡기 다기관의 투과 손실 비교

(2) 단순 확장관에 대한 해석

Fig 6에서 보면 유한 요소법에 의한 해석 결과와 4단자 정수법에 의한 해석 결과는 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 하지만 실험에서 구한 투과 손실과 비교하면 저주파 영역에서 차이가 남을 볼 수 있는데 소음원으로 사용된 스피커의 Coherence가 60-70 Hz 이하에서 좋지 않음으로 인함이다. 하지만 투과 손실의 크기 및 골은 거의 일치함을 알 수 있다.

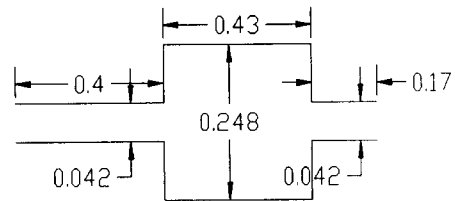


Fig 5. 단순 확장관의 개략도 (단위 : m)

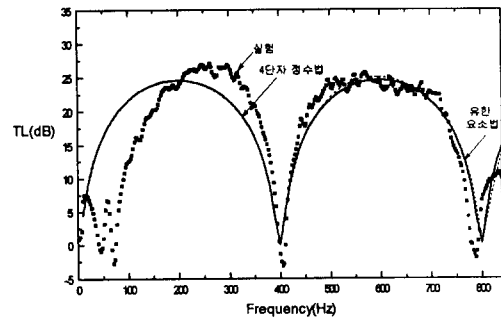


Fig 6. 단순 확장관에 대한 투과 손실 비교

(3) 건본용 흡기계에 대한 해석

Fig 1의 건본용 흡기계에 대해서 알아 보면, 이는 크게 세가지 음향 요소로 구성되어 있다. 흡기 다기관과 단순 확장관 그리고 직선관로 이루어져 있다. 앞에서 이미 설명했듯이 전체 흡기계에 대한 소음 저감 성능을 나타낼 수 있는 성능 지수로는 삽입 손실(Insertion Loss)을 선택한다. 그리고 삽입 손실과 SPL(Sound Pressure Level)을 비교하여 보면 SPL 그래프에서 문제시되는 주파수는 삽입 손실에서는 골에 해당하는 주파수인 관계가 있으므로 삽입손실을 이용하면 흡기계의 문제시되는 주파수를 결정할 수가 있다. 이론적인 삽입 손실을 계산하기 위해서는 Source impedance와 Radiation impedance가 필요하다. 따라서 음원으로 사용된 스피커의 Source impedance와 Radiation impedance를 실험적으로 구한 데이터를 가지고서 흡기계 성능 예측 프로그램을 이용하여 이론적인 삽입 손실을 구하였다. 그리고 이렇게 구한 이론적인 삽입손실은 실제 실험으로 구한 삽입손실과 서로 비교하여 보면 충분히 유사하므로 이론적인 삽입손실만으로 흡기계의 Tuning frequency를 결정할 수 있다. 이제 이론적인 삽입 손실을 고찰함으로써, 예측될 수 있는 건본용 흡기계의 문제점을 찾아내어 개선안을 제시한다.

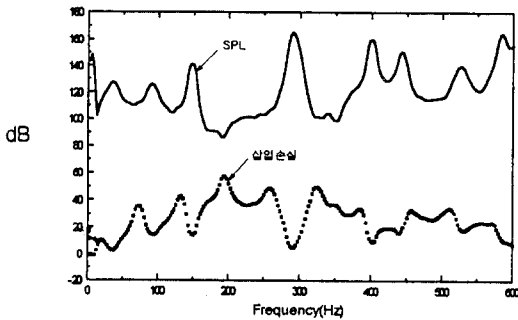


Fig 7. 건본용 흡기계에 대한 SPL과 삽입 손실의 비교

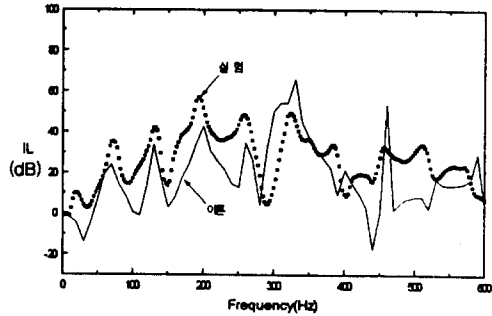


Fig 8. 건본용 흡기계에 삽입 손실 비교

Fig 8에서 보면 110 Hz, 150 Hz, 280 Hz 부근에서 삽입 손실이 좋지 못하다. 물론 400 Hz 이상에서도 삽입 손실이 좋지 못한 부분이 있지만 이는 공명기로는 제어하기가 쉽지 않다. 문제시되는 주파수 중에서 110 Hz을 Tuning frequency로 결정한다.

이제 Tuning frequency가 결정되었으므로 앞으로 결정해야 할 것은 공명기 위치 선정 문제이다. 이는 적절한 공명기 위치에 따라 흡기 소음 감소 성능에 적지 않은 차이가 있으므로 중요한 문제이다. 4단자 정수법으로 예측한 Resonator의 위치를 실험적으로 검증하고 수치해석적인 방법으로 음향 모드를 구해 비교한다.

Table 1. HR1의 사양

	HR1
체적	0.0005 m ³
Neck의 반경	0.005 m
Neck의 길이	0.03 m
Resonance Freq	110 Hz

공명기의 사양이 결정되었으므로 흡기계 성능 예측 프로그램을 이용하여 공명기의 최적 위치를 결정한다. Fig 1에서 보면 공명기를 부착할 위치가

단순 확장관의 끝부분부터 Open side duct의 끝까지인데 길이 1.135m 중 최대의 소음 감소를 가져올 수 있는 위치와 그렇지 못한 위치를 예측하였다.

공명기 HR1의 경우, 계산 결과 $L = 0.6$ m 지점에서 가장 좋은 결과를 보였고 $L = 0.2$ m 지점에서 가장 좋지 못한 결과를 보였다.

아래 Fig 9는 흡기계 성능 예측 프로그램을 이용하여 $L = 0.6$ m 지점에 공명기 HR1을 설치했을 때의 삽입 손실과 $L = 0.2$ m 지점에 공명기 HR1을 설치했을 때의 이론적인 삽입 손실의 차이를 보여준다.

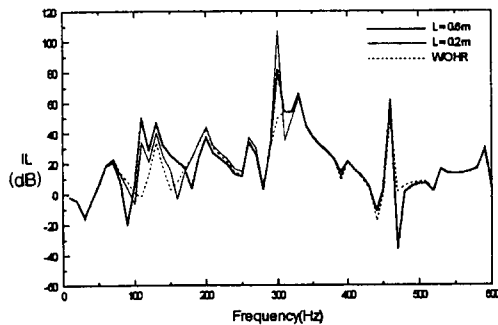


Fig 9. 건본용 흡기계에 공명기 HR1(110 Hz)을 설치한 후의 이론적인 삽입 손실 비교

실제로 이제 $L = 0.2$ m 지점과 $L = 0.6$ m 지점에서 공명기를 설치하여 삽입 손실을 구하여 비교하여 보면 예상한 대로 실험 결과가 나온다.

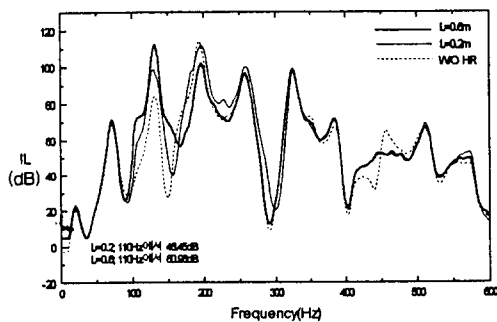


Fig 10. 공명기 위치에 따른 삽입 손실 비교 ($L=0.2$ m & $L=0.6$ m)

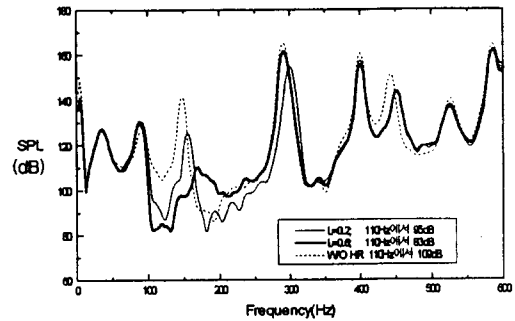


Fig 11. 공명기 위치에 따른 Sound Pressure Level 비교 ($L=0.2$ m & $L=0.6$ m)

Fig 10, Fig 11에서 보면 Resonance frequency 110 Hz인 공명기를 최적의 위치에 설치하므로써 보다 더 향상된 삽입 손실을 얻었다. Fig 11은 공명기의 위치 변화에 따른 흡기계 Sound Pressure Level이 적지않은 차이를 보여주고 있다. 그러므로 공명기의 적절한 설치 위치를 결정하는 것은 대단히 중요하다.

일반적으로 흡기계의 음향 모드 Anti-node 지점에 공명기를 설치할 경우 가장 좋은 소음 감소 효과를 가져온다. 따라서 수치해석적인 방법을 통하여 공명기의 위치를 결정할 경우 다른 방법에 비해 정확하다는 장점이 있는 반면, 그 대신 흡기계의 모델링에 걸리는 시간이 매우 커지며, 또한 모델의 변경이 상대적으로 매우 곤란하고, 계산 시간도 4단자 정수법에 비해 오래 소모된다는 단점을 가지고 있다.

그러므로 4단자 정수법과 수치해석적인 방법에서의 적절한 타협안이 필요하게 된다. 여기서는 4단자 정수법에 의하여 선정된 공명기의 위치를 FEM을 통한 수치해석적인 방법으로 검증한다. 즉, 4단자 정수법에 의한 공명기의 최적 위치가 흡기계의 음향 모드 해석결과에서의 Anti-node 지점에 해당 하는지 알아 볼 필요가 있다. 두 가지 방법의 결과

가 일치한다면 다음부터는 4단자 정수법으로만으로도 충분히 공명기의 위치를 결정할 수가 있다. 물론 4단자 정수법으로 정확한 공명기의 위치는 결정하기가 어렵지만 개발 초기단계에서 대략적인 공명기의 위치 결정과 공간을 확보하는데 무리가 없다고 본다.

수치해석적인 방법으로 음향 모드를 구하여 보면 4단자 정수법으로 추천된 위치에서 Anti-node가 발생함을 알 수 있다. 하지만 흡기 다기관 모델링시에 90°격어진 부분들의 영향으로 인하여 공진 주파수는 150 Hz로 많은 이동이 있다.

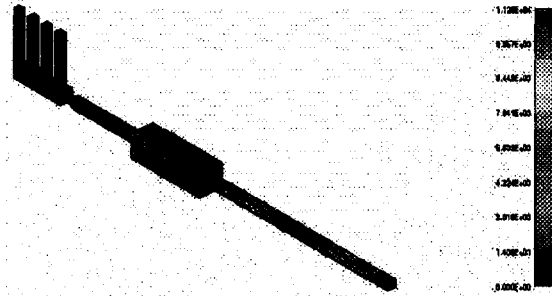


Fig 12. 견본용 흡기계의 음향 모드

4단자 정수법으로 선택한 공명기 위치와 FEM의 Acoustic mode 해석 결과 얻는 Pressure의 Anti-node의 위치는 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

따라서 4단자 정수법을 기반으로 개발된 흡기계 성능 예측 프로그램은 충분히 공명기의 적절한 위치를 결정할 수가 있다.

3. 결론

4단자 정수법을 기반으로 개발된 흡기계 성능 예측 프로그램으로 견본용 흡기계의 문제의 주파수

영역을 찾아내어서 그 주파수에 해당하는 공명기의 최적의 위치, 즉 음향 모드의 Anti-node 지점을 예측하고 이를 실험으로 확인하였다.

그러므로 개발된 흡기계 성능 예측 프로그램은 초기 Layout 단계에서의 흡기계의 문제점을 미리 예측하여 공명기의 위치와 부피를 미리 확보하는데 충분하다고 판단된다. 또한 여기서 개발된 프로그램은 메뉴 방식을 채택한 Windows 95용이므로 사용자가 편리하게 사용할 수 있고 실제 차량에 적용하여 좋은 결과를 얻었다.

참고 문헌

1. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppins, James V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics"
2. M. L. Munjal, "Acoustic Of Ducts And Mufflers ", A Wiley-Interscience Publication.
3. John D. Kostun and J.S. Lin "Effect of Resonator Location on Resonator Effectiveness Using NASTRAN Mode Shape Prediction Analysis and LAMPS Acoustic Model"
4. Robert D. Blevins Ph.D. "FORMULAS FOR NATURAL FREQUENCY AND MODE SHAPE"