

〈논 문〉

자동차 흡기계 공명기 위치 결정을 위한 이론적 접근

Theoretical Approach for the Decision of an Car Resonator's Position

이 장 명* · 임 학 종**

Chang-Myung Lee and Hak-Jong Lim

(1997년 5월 22일 접수 ; 1997년 6월 7일 심사완료)

Key Words : 4-Pole Parameter(4단자 정수), Intake System(흡기계), Resonator's Position(공명기 위치), Acoustic mode(음향 모드)

ABSTRACT

Up to now, numerical methods such as Finite Element Method(FEM) or Boundary Element Method(BEM) have been widely used to find the optimized resonator's position during designing a car intake system. However, these methods are not useful at the first stage of car design since it is not easy to change a numerical model consist of a large mesh size. A software has been developed to cover the defects using 4-pole parameter method. The software is running at Windows 95 environment for a user's convenience. To show its usefulness, it is applied to a real automobile intake system

1. 서 론

오늘날 쾌적하고 조용한 생활 환경에 대한 요구의 증대 및 소음이 사람에게 미치는 나쁜 영향으로 인해 정숙한 자동차의 필요성과 중요성이 급격히 인식되고 있다. 자동차 실내 소음에 영향을 미치는 것으로서 여러 원인들이 있는데 그 중 가장 큰 원인 중 하나는 엔진과 관련된 소음이다. 이러한 엔진에 기인하는 소음원 또한 여러 가지로 분류가 가능하나, 이 중에서도 엔진 흡인력 및 폭발 소음에 의한 흡기계의 소음은 점점 중요한 소음원이 되고 있다.

흡기 소음은 엔진 자체의 폭발 소음이 흡기계로 유입되어 발생하는 소음보다 흡기관 내에서 관내부의 음향 공진(resonance) 현상으로 인한 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 레이아웃(layout)상 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^(1,2). 따라서 초기 레이아웃 단계에서 흡기계의 소음을 예측하여 흡기계 공명기의 튜닝(tuning) 주파수 결정과 공명기의 위치를 결정하는 것은 대단히 중요하다.

흡기 소음을 예측하여 공명기의 용량 및 위치를 설계하는데 있어서는 수치해석적인 방법(유한 요소법 또는 경계 요소법)⁽³⁾이 많이 이용되고 있다. 하지만 전체의 흡기계를 이러한 방법으로 모델링하는 데에는 상당히 많은 시간과 전문성이 필요하게 되고, 또한 컴퓨터의 하드웨어적인 성능의 제한을 받게 된

*정회원, 울산대학교 공과대학 자동차공학과

**울산대학교 대학원 자동차공학과

다. 뿐만 아니라 설계 변경시마다 다시 모델링을 해야만 하므로 개발 초기 단계의 다양한 경우에 대해 수치해석적인 방법을 적용하기는 쉽지 않다.

위의 수치해석적인 방법의 대안으로 제시될 수 있는 것이 잘 알려진 4단자 정수법(4-pole parameter method)^(4,5)이다. 이는 흡기계의 각 부분에 대한 이론적인 해를 서로 연결하여 전체의 해를 구하는 방법인데, 수치해석적인 방법과 비교해 볼 때, 흡기계 전체를 해석하는데 걸리는 시간이 굉장히 적으며, 평균 유속 및 열-점성 손실 등의 효과를 표현할 수 있고 특히 전체 흡기계 시스템의 구성을 변경시키는 것이 매우 용이하다는 장점을 가진다. 4단자 정수법은 그동안 배기계 해석에 널리 사용되어 왔으므로 전혀 새로운 방법은 아니다. 또한 배기계보다 더 간단한 음향 회로를 구성하고 있는 흡기계에 4단자 정수법의 적용은 당연히 가능한 것으로 알려져 왔다. 본 연구에서는 흡기계 해석에의 4단자 정수법의 적용 가능성을 알아볼 뿐만 아니라 공명기의 최적 위치 결정에도 이 방법의 사용이 가능하다는 것을 밝히는데 있다. 뿐만 아니라 음향학에 특별한 전문지식이 없는 사용자가 쉽게 접근하여 빠른 시간안에 결과를 얻을 수 있도록 그래픽 유저 인터페이스 방식(graphical user interface)을 채택하여 사용하는 소프트웨어를 개발한다.

2. 4단자 정수법

4단자 정수법은 흡기계를 음향 요소별로 나누어서 단순화시키고, 각 음향 요소에 대한 이론해를 서로 연결시켜서 전체 음향계의 해를 구하는 방법이다. 이 방법은 행렬의 곱셈 연산을 이용하므로 계산이 간단하고, 여러가지 형태의 음향 요소로 조합이 된 흡기계에도 적용될 수 있으므로 많이 이용되고 있다.

음압(acoustic pressure), p 와 질량 속도(mass velocity), v 를 두 개의 변수로 두고 임의의 r 번째 음향 요소에서 전달 행렬의 관계식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} p_r \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{r-1} \\ v_{r-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 $[p_r \ v_r]$ 는 윗부분 r 지점에서의 상태 변수이고, $[p_{r-1} \ v_{r-1}]$ 는 아랫부분 $r-1$ 지점에서의 상태 변수이다. 실제 흡기계에는 몇 가지 음향 요소의 조합으로 구성되므로, 각각의 음향 요소의 전달 행렬을 $[T]$ 로 두면 흡기계 전체의 전달 행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p_n \\ v_n \end{bmatrix} &= [T_n][T_{n-1}] \cdots [T_2] \begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \\ &= [T_{total}] \begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $[T_{total}]$ 은 흡기계 전체의 전달 행렬이다. 이와 같은 방법은 새로운 것이 아니고 익히 알려져 있는 방법이지만, 사용자가 편리하게 이용하여 쉽게 결과를 유도하도록 프로그래밍을 하였다. 또한 흡기계 해석을 위하여 많은 요소들이 필요하지 않다. 흡기계 해석에 활용될 음향 요소들을 소개하면 Fig. 1

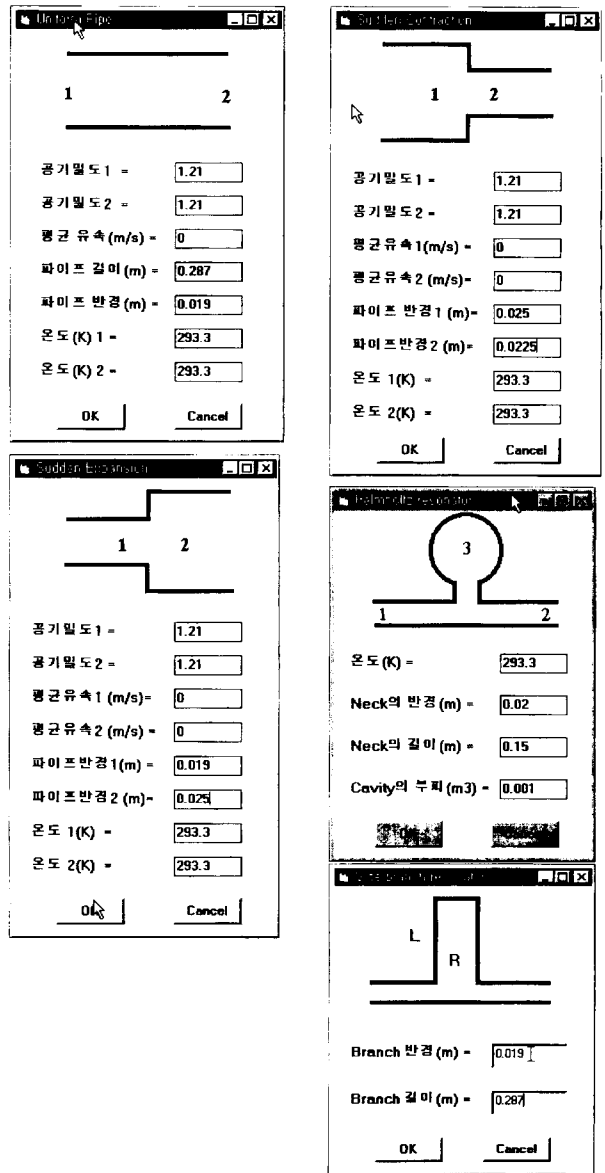


Fig. 1 Acoustic elements for the analysis of an intake noise

과 같다.

3. 실차용 흡기계에 대한 소음 해석

앞에서 개발된 소프트웨어를 이용하여 현재 양산 중인 실차에 적용하여 보기로 한다. 이를 위하여 H사의 A차종(1.5 L SOHC 엔진)을 선택하였다. Fig. 2는 A차종 흡기계, 즉 흡기 다기관으로부터 에어덕트까지의 실물을 나타내는 사진이다.

실제 흡기계를 구성하고 있는 음향 요소는 흡기 다기관과 공기 청정기와 에어덕트이다. 이 흡기계에 대한 대략적인 구성은 Fig. 3과 같다.

3.1 흡기 다기관에 대한 해석

문제시 되는 흡기 소음은 저주파 영역, 즉 평면파

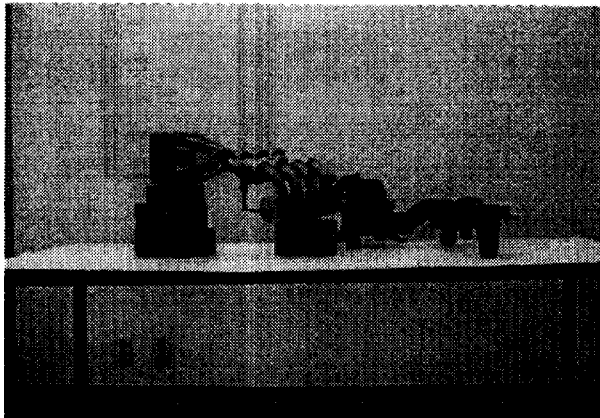


Fig. 2 Photograph of the intake system for experiment

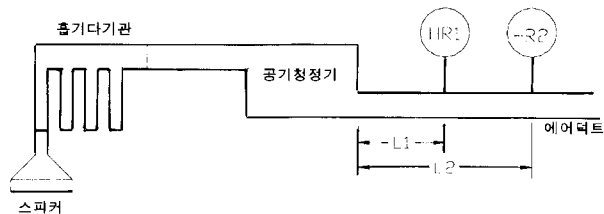


Fig. 3 Schematic diagram of the intake system

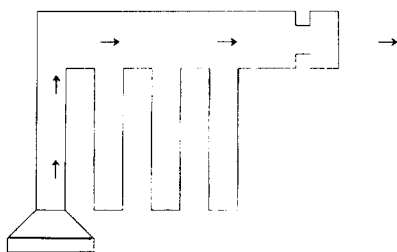


Fig. 4 Schematic diagram of the intake manifold

(plane wave) 이론이 성립되는 영역에서 발생하므로 4단자 정수법을 사용할 때 Fig. 4와 같이 단순화시켜 모델링을 하였다. 실제 흡기 다기관은 약 90°가량 굽어져 있는데 이를 직선관으로 모델링하여 해석을 하는 것이 가능한지 알아보기 위해 수치해석적 방법을 사용하여 직선관, 45° 굽은 관, 90° 굽은 관에 대해서 투과 손실 및 음향 모드⁽⁶⁾를 계산한 결과 90° 정도 굽은 흡기 다기관을 직선관으로 모델링하여도 큰 차이가 없음을 확인하였다. Figs. 5, 6을 보면 완전히 직각으로 꺾인 관의 경우에만 음향 모드와 투과 손실에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 직선관, 45° 굽은 관, 90° 굽은 관, 및 직각으로 굽은 관을 수치적으로 해석시에 길이 1m, 직경 0.06m로 정하였다.

Fig. 7에서 보면 4단자 정수법과 유한 요소법에 의한 공명 주파수는 일치하나, 실험치와 비교하면 약간의 주파수 이동 현상이 있다. 이는 흡기 다기관의 내부 형상이 복잡하여 실제와 같은 상태로 모델링하는데 어려움이 있으므로 이에 따른 오차인 것으로 판단된다.

3.2 실차 흡기계에 대한 소음 해석

앞의 Fig. 3에서 보듯이 현재 해석하고자 하는 흡기계에 부착되어 있는 공명기는 모두 2개가 있다. 스피커(음원)쪽에 가까운 공명기를 HR 1이라고 하고 에어덕트 쪽을 HR 2이라고 정한다. 먼저 이렇게 설치된 HR 1과 HR 2가 적절한 위치에 설치되고, 또 원하는 튜닝 주파수를 가지는지 알아볼 필요가 있다. 실제 흡기계에서는 4단자 정수법의 요소(element)로 표현이 힘든 필터가 포함되어 있다. 따라서 필터 유무에 따른 효과를 파악하여 볼 필요가 있다. 흡기계의 성능을 나타내는 지표로써 투과 손실(transmission loss)과 삽입 손실(insertion loss)을 사용할 수 있다. 이 중에서 삽입 손실의 사용이 실제 흡기 소음을 잘 재현할 수 있기 때문에 문제시되는 튜닝 주파수 결정에 삽입 손실을 사용한다⁽⁷⁾. 또한 삽입 손실을 이용하여 결정된 튜닝 주파수가 실차 소음 저감에 적절하게 사용될 수 있음을 실차를 이용하여 검증한다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이, 흡기계에서 공기 청정기의 필터(filter) 유무에 따른 삽입 손실 변화는 튜닝 주파수를 결정하는데는 거의 영향을 미치지 않으므로 4단자 정수법을 기반으로 공기 청정기를 해석하기 위해서 필터가 없다고 가정하고 해석을 한다.

Fig. 8에서 보면 이론적인 삽입손실이 문제가 되는

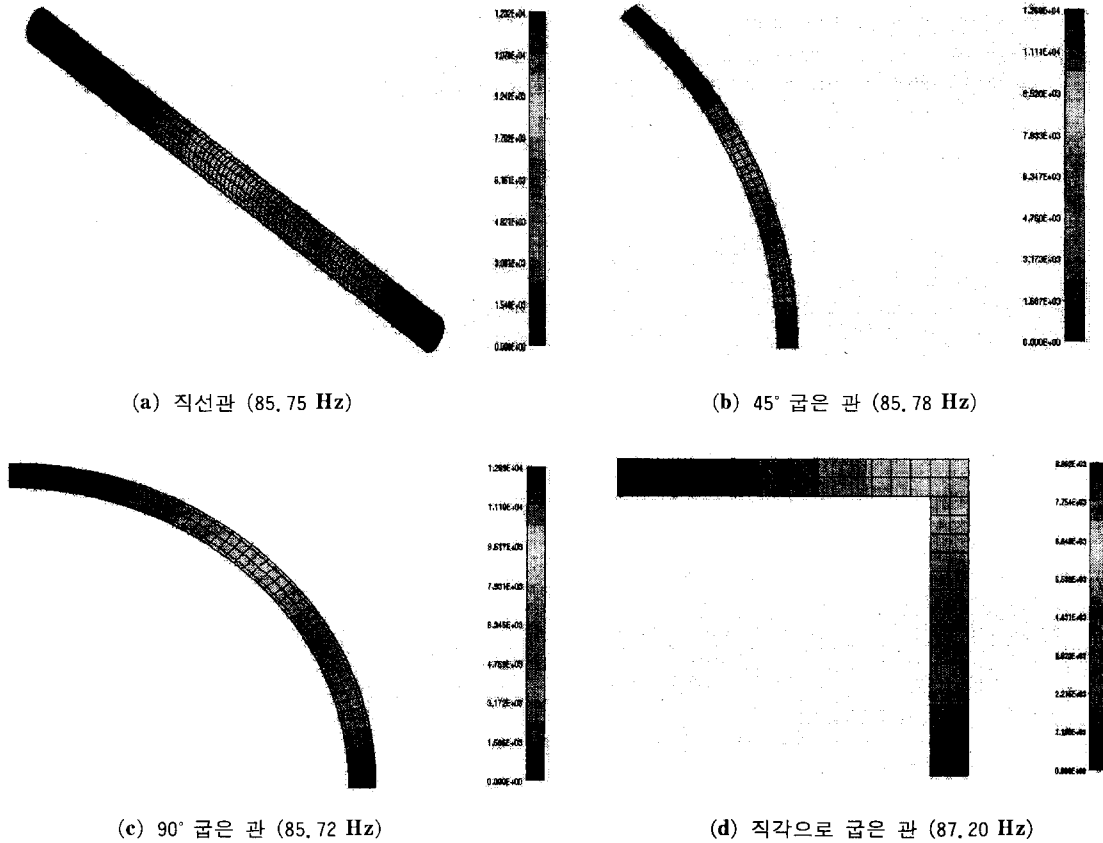


Fig. 5 Comparison of acoustic modes of curved pipes (1st mode)

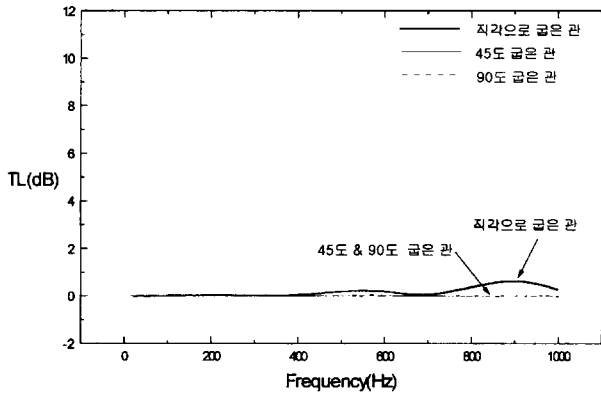


Fig. 6 Comparison of transmission loss of curved pipes

주파수는 40 Hz, 120 Hz, 210 Hz, 450 Hz이다. 40 Hz를 제어하기 위한 공명기는 체적을 많이 필요로 하여 실제 적용하기가 용이하지 않으므로 튜닝 주파수로는 120 Hz와 210 Hz 그리고 450 Hz를 선택할 수 있다. 그러나 120 Hz와 210 Hz 부근은 실험과 비교적 일치하나 450 Hz 부근은 실험과 비교하면 70

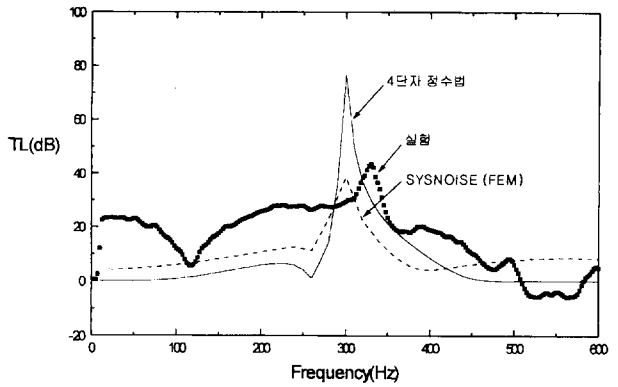


Fig. 7 Comparison of transmission losses of the intake manifold

Hz 정도의 주파수 이동이 발생하여 실험치는 375 Hz 부근에서 발생하고 있다. 450 Hz 부근에서 실험과 이론이 어느 정도 차이가 발생하는 것은 복잡한 흡기계 형상을 단순화시켜서 모델링한 결과인 것으로 생각된다. 그러므로 튜닝 주파수로 설정할 수 있는 주파수 영역은 120 Hz와 210 Hz 그리고 375 Hz

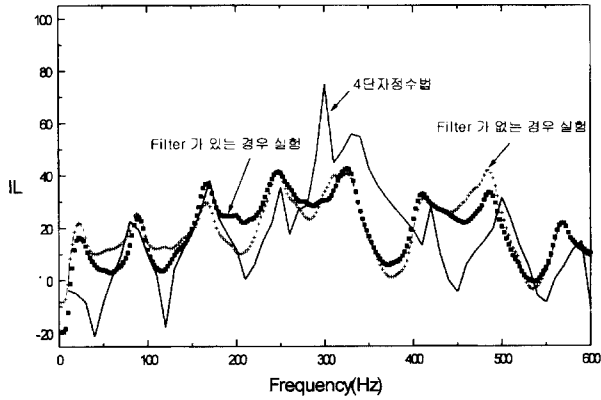


Fig. 8 Comparison of insertion loss of intake system (Without HR 1 & HR 2)

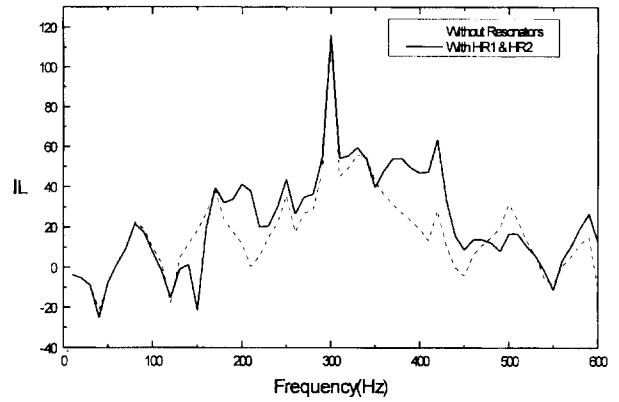


Fig. 9 Comparison of insertion loss of intake system (HR 1, HR 2 of table 1)

Table 1 Specification of HR 1 and HR 2 Resonators

	HR 1	HR 2
Volume	0.00062 m ³	0.00042 m ³
Neck's radius	0.009 m	0.01615 m
Neck's length	0.0139 m	0.01396 m
Resonance freq.	205 Hz	375 Hz

Table 2 Comparison of insertion loss due to locations of 205 Hz resonator (HR1)

Position of HR 1(m)	Insertion loss (dB)
L=0.1	37.17
L=0.2	44.22
L=0.3	48.78
L=0.4	49.53
L=0.5	47.72
L=0.6	42.71
L=0.7	31.27

부근으로 선택할 수 있다. 하지만 현재 분석하고 있는 흡기에 부착되어 있는 공명기는 205 Hz(HR 1)와 375 Hz(HR 2)용 2개이다. 따라서 120 Hz용 공명기가 빠져 있는 상태이다.

현재 분석중인 흡기에 장착되어 있는 공명기가 충분한 소음저감을 위한 본래의 역할을 하는지 알아볼 필요가 있다. 먼저 흡기에 장착되어 있는 공명기의 사양과 튜닝 주파수를 정리해 보면 Table 1과 같다.

Figs. 8, 9에서 보면 처음에 210 Hz 부근이 문제시 되는 주파수이었으나 205 Hz용 공명기 HR 1으로 인하여 상당히 많은 소음 저감 효과가 있다. 공명기 HR 2를 적용하였을 때 375 Hz 부근의 소음 저감 효과에 상당히 많은 기여를 하고 있다. 하지만 Fig. 9를 보면 120 Hz 부근의 소음이 여전히 문제가 되고 있다. 또한 120 Hz ~ 180 Hz 영역은 205 Hz의 공명기의 효과로 오히려 삽입 손실이 나빠졌다.

3.3 공명기의 최적 위치 결정

현재 개발중인 흡기계의 삽입 손실을 보면 문제가 되는 주파수는 120 Hz와 210 Hz 그리고 375 Hz 영역이다. 기존에 205 Hz, 375 Hz 공명기가 있으므로 이를 각각 HR 1, HR 2으로 하고 새로이 튜닝을 하

는 120 Hz 공명기를 HR 3라 한다. 그리고 HR 1, HR 2 공명기의 튜닝 주파수는 비교적 정확하므로 HR 3 공명기만을 추가한다. 이제 HR 1 공명기와 HR 2 공명기 그리고 HR 3 공명기의 최적의 위치를 결정하여 보다 향상된 소음 저감 효과를 가진 흡기계를 제안하는데 개발된 소프트웨어를 사용하고자 한다.

공명기 HR 1과 HR 2의 튜닝 주파수는 비교적 정확하므로, 각각의 공명기의 위치를 변화시켜서 최적의 위치를 결정하도록 한다. HR 1 공명기의 위치 변화는 공기 청정기로부터 에어덕트의 끝단까지의 길이 0.78 m 중에서 길이 L 1을 변화시키면서 개발된 소프트웨어를 이용해 삽입 손실의 변화를 살펴보면 Table 2, Fig. 10과 같다.

375 Hz용 공명기(HR 2)의 위치 변화는 공기 청정기로부터 에어덕트의 끝단까지의 길이 0.78 m 중에서 길이 L 2를 변화시켰다. 개발된 소프트웨어를 이용해 공명기의 위치 변화에 따른 삽입 손실의 변화

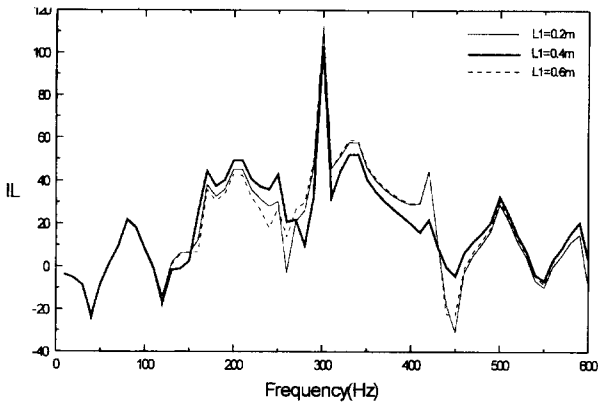


Fig. 10 Comparison of insertion loss due to locations of 205 Hz resonator (HR 1)

Table 3 Comparison of insertion loss due to locations of 375 Hz resonator (HR 2)

Position of HR 2 (m)	Insertion loss (dB)
L=0.1	58.18
L=0.2	57.26
L=0.3	40.03
L=0.4	35.10
L=0.5	53.92
L=0.6	58.94
L=0.7	53.60

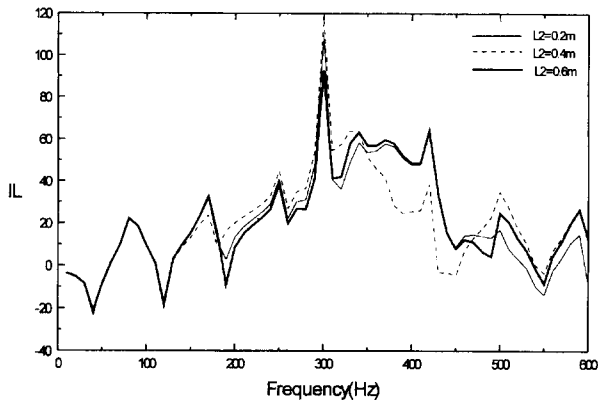


Fig. 11 Comparison of insertion loss due to locations of 375 Hz resonator (HR 2)

를 살펴 보면 Table 3, Fig. 11과 같다.

120 Hz용 공명기(HR 3)의 위치 변화는 공기 청정기로부터 에어덕트의 끝단까지의 길이 0.78 m 중에서 공기 청정기로부터의 길이를 변화시켰다. 개발된

Table 4 Comparison of insertion loss due to locations of 120 Hz resonator (HR 3)

Position of HR 3 (m)	Insertion loss (dB)
L=0.1	29.7
L=0.2	26.9
L=0.3	21.9
L=0.4	11.1
L=0.5	8.9
L=0.6	14.8
L=0.7	12.1

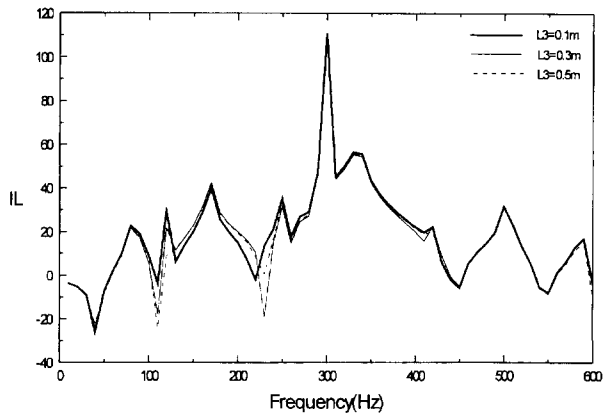


Fig. 12 Comparison of insertion loss due to locations of 120 Hz resonator (HR 3)

소프트웨어를 이용해 공명기의 위치 변화에 따른 삽입 손실의 변화를 살펴 보면 Table 4, Fig. 12와 같다.

Figs. 10, 11, 12와 Table 2, 3, 4으로부터 가장 좋은 소음 저감 성능을 가지도록 HR 1, HR 2, HR 3 공명기의 위치를 구해보면, HR 1은 공기 청정기로부터 0.4 m 떨어진 곳에 위치하고, 공명기 HR 2는 공기 청정기로부터 0.6 m 떨어진 곳에 위치한다. 그리고 공명기 HR 3는 공기 청정기로부터 0.1 m 떨어진 곳으로 할 수 있다. 추천된 최적의 위치에 HR 1, HR 2, HR 3를 다 적용한 후 개발된 소프트웨어를 이용하여 삽입 손실을 구하여 보면 Fig. 13과 같다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 공명기를 설치하였을 경우 문제시되는 주파수에서 삽입 손실이 좋아짐을 알 수 있다. 더군다나 최적화된 공명기의 위치에서는 기존의 공명기의 위치에서보다 삽입 손실이 더욱 향상됨을 알 수 있다. 여기서 보는 바와 같이 개발된 소프트웨어를 이용하면 최적의 공명기 위치를 결정할 수

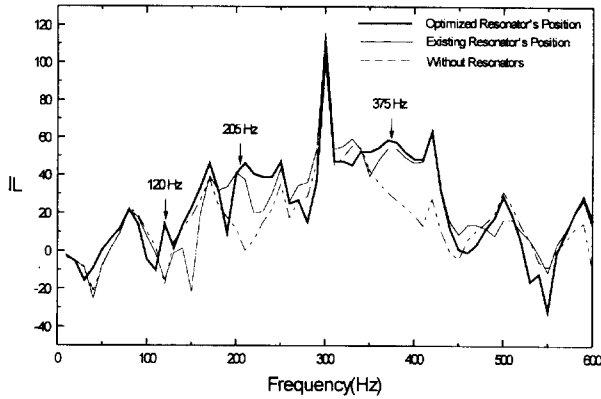


Fig. 13 Insertion loss of the intake system with optimized resonator's position (4-pole parameter method)

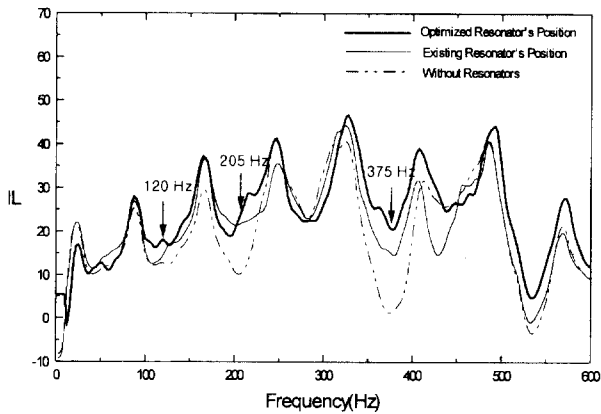


Fig. 14 Insertion loss of the intake system with optimized resonator's position (experimental results)

Table 5 Comparison of insertion loss of intake system

Insertion loss Position of resonators	120 Hz	205 Hz	375 Hz
Without resonators	12 dB	10 dB	1 dB
Existing	14 dB	21 dB	15 dB
Optimized	19 dB	23 dB	21 dB

있다. 이의 내용을 검정하기 위하여 실제 흡기계에 적용하여 실험으로 확인하면 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 14는 실험적으로 확인한 결과를 잘 나타내고 있다.

최종적으로 튜닝된 흡기계의 삽입 손실을 튜닝 주파수에서 실험적으로 구한 값을 정리하면 Table 5와 같다. Table 5에서 보는 바와 같이 공명기의 위치를 최적화함으로써 많은 소음 저감 효과를 얻을 수 있

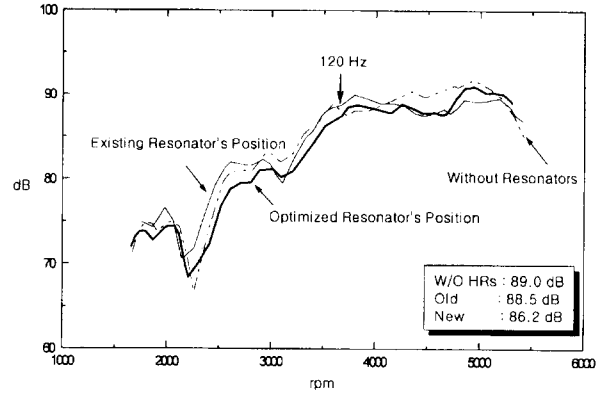


Fig. 15 Experimental results of the intake noise at the car (overall)

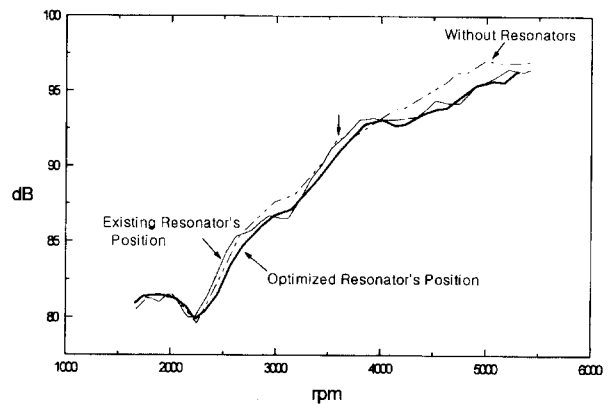


Fig. 16 Results of order tracking of the intake noise at the car (2nd order)

다.

지금까지는 스피커를 음원으로 하여 흡기계에 대해서 흡기 소음 분석을 하였다. 이 결과를 실차에서 적용할 수 있는가를 알아보기 위해서 실차 흡기 소음 실험을 하였다. Fig. 15에서 보듯이 공명기의 위치를 최적화시켰을 때 전 rpm 영역을 통하여 흡기 소음이 저감됨을 알 수 있다. 특히 튜닝 주파수에서 효과를 확인하기 위하여 차수 분석을 하였다.

Figs. 15, 16은 최종적으로 튜닝된 흡기계의 차수 분석 결과이다. 이 결과를 가지고 개선된 흡기계의 성능을 평가하는데 어려움이 있다. 205 Hz 공명기와 375 Hz 공명기의 효과를 2차 성분에서 살펴보기 위하여는 적어도 6000 rpm 이상까지 실험을 하여야 하므로 실험을 수행하기가 용이하지 않다. 따라서 HR 1의 효과만 차수분석을 통하여 알 수 있다. 공명기 HR 1의 효과는 2차 성분 차수 분석 결과에서 보듯

이, 3600 rpm에서 공명기를 전혀 설치하지 않은 상태에 비해 최적화된 위치에 공명기를 설치하였을 때 약 3dB 정도 감소됨을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 15에 나타난 바와 같이 전체 흡기 소음은 3600 rpm에서 약 2 dB 정도 감소됨을 알 수 있다.

따라서 개발된 소프트웨어를 이용하여 추천된 공명기의 최적 위치는 실차에 적용하여 확인하여도 좋은 결과가 나옴을 알 수 있다.

4. 결 론

4단자 정수법을 이용하여 흡기계의 공명기 설계 및 공명기 최적 위치 결정을 위한 소프트웨어가 개발되었다. 또한 수치해석적인 방법과 마찬가지로 4단자 정수법을 이용하여 공명기의 최적 위치를 결정할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어는 자동차 개발 초기 단계에서 그 활용성이 크며 실차에 적용시 만족할 만한 결과를 얻었다.

후 기

본 연구는 현대자동차(주)의 지원으로 “흡기계 공명기 위치 선정을 위한 해석적 방법 구현”의 산학협동 과제이다. 과제 수행동안 적극적인 도움을 아

끼지 않은 현대자동차(주)의 진동소음 실험 1팀 관계자들에게 감사 را 드린다.

참 고 문 헌

- (1) Osamu Kuroda, Tokio Kohama, 1991, “New Approach to Low-Noise Air Intake System Development,” SAE Paper No. 911042.
- (2) Kouichirou Kuratam Kazuyuki Miyake, 1993, “Experimental Acoustic Analysis of the Intake and Exhaust System to Predict Insertion Loss and Engine Performance,” SAE Paper No. 931903.
- (3) Kostun, J. D. Kostun and Lin, J. S., 1994, “Effect of Resonator Location on Resonator Effectiveness Using NASTRAN Mode Shape Prediction Analysis and LAMPS Acoustic Model,” SAE Paper No. 940614.
- (4) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppins, A. B. and Sanders, J. V., 1980, Fundamentals of Acoustics, Chap. 10.
- (5) Munjal, M. L., 1987, Acoustic Of Ducts And Mufflers, Chap. 1., Chap. 2.
- (6) Blevins, R. D., 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Chap. 13.