

투과손실 실험결과를 이용한 자동차용 소음기의 해석모델 개선

정진년*, 김원진**

Analytical Model Improvement of Automotive Muffler using the Experimental Results of Transmission Loss

Jin Nyon Jung*, Won Jin Kim**

ABSTRACT

The finite element model for automotive muffler analysis is improved by modifying the boundary condition of outlet and the mesh of finite element model. The model minimizes the difference between transmission loss from analysis and that from experiment. Four different boundary conditions and the four types of finite element model are tested to find out the best one of those. From the case study it is verified that the level of transmission loss can be changed by the variation of radiation impedance value. Also the resonance or anti-resonance frequencies of transmission loss can be shifted by the variation of finite element mesh. An improved finite element model of muffler is proposed in consideration with the accuracy and the computing time of analysis.

Key Words : FEM(유한요소법), Muffler(소음기), Radiation Impedance(방사임피던스), Transmission Loss(투과손실), SPM(음압법), WDM(음파분리법)

기호설명

Z_r = radiation impedance
 C = sound velocity, m/s
 k = wave number
 v = particle velocity, m/s
 a = area of outlet, m^2
 p = sound pressure, Pa
 ρ = density, kg/m^3
 f = frequency, Hz

Subscripts

0 = STP state
1,2,3= inlet, outlet and surface of muffler
n = normal direction

1. 서론

자동차의 배기계를 구성하는 요소로는 일반적으로 엔진과 배기 시스템을 연결해 주는 매니폴더와 배기가스가 포함하는 유해물질을 제거하기 위한

*** 2001년 4월 23일 접수

* 동원정공(주)

** 계명대학교

컨버터, 엔진에서 발생하는 진동을 흡수하기 위한 벨로우즈, 소음 감소를 위한 소음기, 각 요소들을 연결해 주는 파이프로 구성된다. 이들 중에서 소음기는 그 내부구조가 복잡하고 온도, 압력, 유속 등의 다양하고 복잡한 인자들을 포함하고 있기 때문에 이를 모두 고려하여 최적의 소음기를 설계하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 있다. 따라서 대부분의 소음기 제작사는 주로 경험과 실험에 의한 접근방법으로 설계를 하고 있다. 최근 들어 컴퓨터를 이용한 해석기술의 발달로 컴퓨터 해석을 통한 설계방법에 많은 관심이 집중됨에 따라 소음기 설계에 이러한 해석 기법을 도입하고 있다. 컴퓨터를 이용한 해석을 수행하기 위해서는 먼저 대상 소음기의 음향 특성을 잘 표현할 수 있는 모델을 구성해야 한다.

본 연구에서는 대상 소음기를 유한요소로 모델링하고, 수치해석에서 구한 투과손실 결과를 실험으로 검증한다. 그리고 수치해석에서 구해진 투과손실 곡선이 실험결과와 잘 일치되도록 유한요소모델 및 경계조건의 수정을 통하여 모델을 개선하고자 한다. 일반적으로 실제 소음기에 대한 음향 수치해석의 결과는 실험결과와 상당한 차이를 보이는데, 이는 대부분 적절하지 못한 경계조건 적용이나 해석모델의 잘못된 구성에서 비롯된다. 따라서 해석에 적용된 경계조건을 실험조건과 동일하게 적용하기 위해서는 실험에 적용된 조건을 파악하여 경계조건을 적용하는 것이 바람직하다. 또한 해석시간을 줄이기 위해서 유효한 해석결과를 도출하는 범위 내에서 요소의 수를 줄이는 방법을 사용하였다. 이러한 경계조건과 해석모델을 구성하는 방법은 해석을 수행하는 설계자에게 유익한 정보가 될 수 있을 것이다.

2. 수치해석 및 실험

2.1 수치해석

대상 소음기의 음향 특성을 해석하기 위해 Fig.1과 같은 유한요소모델을 구성하였다. 유한요소는 복잡한 형상을 표현하기 적합한 사면체요소(linear tetrahedron)¹⁾를 사용하여 대상 소음기를 모델링하였으며, 해석 대상 소음기의 형상이 중심부 YZ평면에 대해 대칭이므로 소음기의 반단부만 요소로 모델링한 후 대칭조건을 주었다.

유한요소모델의 음향 수치해석은 상용 소프트

웨어(SYNOISE)를 이용하였다. 그리고 수치해석에 사용된 가정은 다음과 같다²⁾.

- 소음기 내부기체의 성질은 균질, 무점성
- 소음기 내부기체는 이상기체
- 음압은 대기압에 비해 매우 작고 소음기 벽은 강체이다.
- 소음기 내부유체의 온도는 일정

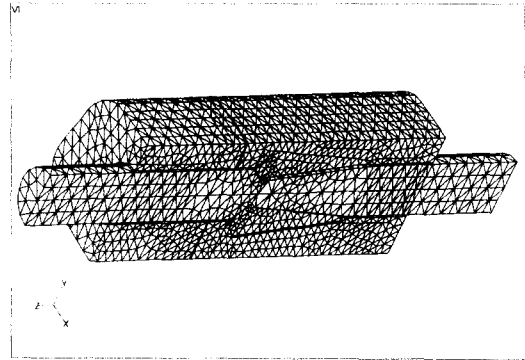
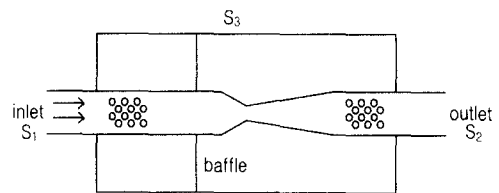


Fig. 1 Finite element model of muffler

이러한 가정에서 Fig.2와 같이 경계조건을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 입구단(S_1)에서는 단위크기(u)를 갖는 정현파 속도로 가진하였고, 출구단(S_2)에서는 식(1)를 이용하여 계산된 외부 방사 임피던스 값을 경계조건으로 적용하였다^{3, 4)}.

$$Z_r = \frac{p}{v_n} = [0.24(ka)^2 + j 0.56ka] \rho_0 c \quad (1)$$



$$v = u e^{j\omega t} \quad \text{on } S_1$$

$$\frac{p}{v_n} = Z \quad \text{or} \quad \frac{v_n}{p} = A \quad \text{on } S_2$$

$$v = 0 \quad \text{on } S_3$$

Fig. 2 Boundary condition of FE model

또한 입·출구단을 제외한 경계부분(S_3)에서는 속도를 영으로 두어 입·출구단은 개방되어 있고 나머지 부분의 경계는 강제입을 나타내었다.

소음기의 내부온도는 실험조건을 고려하여 27°C로 균일하다고 가정하고, 27°C에서의 밀도($\rho = 1.174 \text{ kg/m}^3$)와 음속($C = 347.83 \text{ m/s}$)을 입력하여 소음기 내부 기체의 성질을 정의하였다. 유한요소모델의 음향해석에 있어서 주파수 해석범위는 0~2000Hz이고 주파수 해상도는 2Hz로 하였다. 소음기의 소음저감 특성을 나타내는 투과손실은 해석 과정에서 입·출구단의 절점에서의 음압을 도출하여 다음 식으로 계산하였다⁹⁾.

$$TL = 20 \log \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (2)$$

2.2 실험

유한요소모델을 검증하고, 모델을 개선하기 위해 실험을 수행하였다. 실험장치의 구성도는 Fig.3에서와 같다. 함수발생기의 랜덤신호(random signal)를 이용하여 스피커를 가진하였다. 음압 신호는 네 개의 마이크로폰으로 동시에 감지되어 전단증폭기(pre-amplifier)를 거쳐 분석기로 수집되며 신호처리를 위한 자료가 컴퓨터로 전송된다.

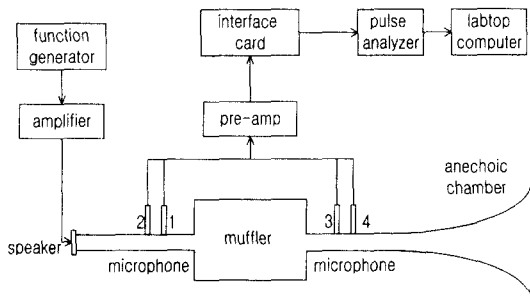


Fig. 3 Experimental apparatus

측정된 음압 신호의 반사음의 영향을 배제시키기 위해 끝단에 무반사단을 설치하고 각각 한 쌍의 마이크로폰에서 측정된 신호를 음파분리법(wave decomposition)^{6~8)}으로 신호처리하여 투과손실을 계산하였다.

2.3 수치해석 및 실험 결과 비교

Fig.4는 입·출구단의 음압 신호를 직접 이용하는 음압법으로 구한 투과손실과 음파분리법으로 신호처리하여 구한 투과손실을 나타낸 것이다. 투과손실 곡선을 보면 두 곡선이 대체로 비슷하지만 음파분리법을 이용한 경우에는 투과손실이 대부분의 영역에서 양의 값을 갖는다.

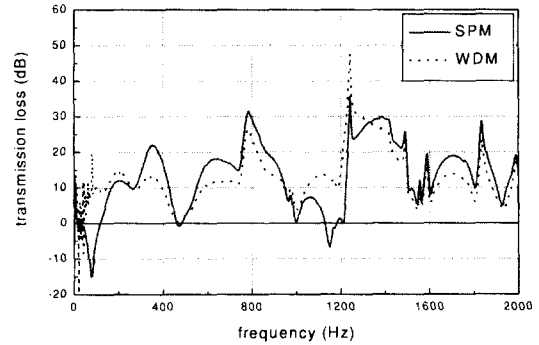


Fig. 4 Transmission loss from raw pressures and modified pressures by wave decomposition method

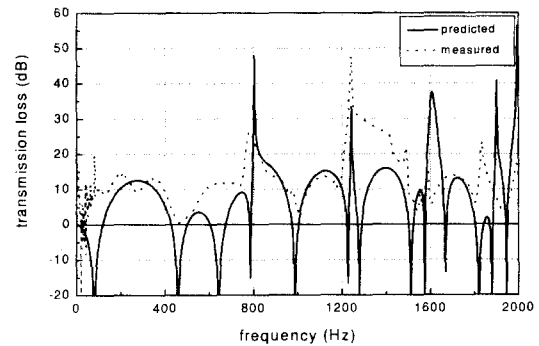


Fig. 5 Results of analysis of the unmodified FE model and experiment

수치해석과 실험에서 구해진 투과손실 곡선을 Fig.5에 나타내었다. 두 결과에서 얻어진 투과손실 값이 상당한 차이를 보이는 것은 해석모델, 해석 경계조건 및 실험오차 등에 의한 것으로 추정된다. 실험오차는 작다고 가정하고, 실험결과를 이용하여

유한요소모델 및 해석경계조건의 수정하는 방법으로 해석모델을 개선하고자 한다.

3. 해석모델의 개선

3.1 경계조건

실험에 있어서 끝단의 무반사단은 완전한 성능이 보장되지 못하므로 방사 임피던스는 실제 어떤 특정 값을 갖게 된다. 이러한 방사 임피던스 값을 수치해석에 고려하기 위해 식(1)을 이용하여 계산한 개방단에서의 방사 임피던스 크기 값을 실험과 수치해석 결과의 비교를 통하여 수정하였다. 유한요소모델의 수치해석 결과에서 방사 임피던스의 변화에 따른 투과손실 곡선은 Fig.6와 같다. Fig.6에서 나타난 것처럼 유한요소모델의 수치해석 결과에서 방사 임피던스의 변화가 투과손실에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 특히 방사 임피던스 값의 변화에 따라 투과손실 곡선은 공진 또는 역공진 주파수의 이동보다는 투과손실의 레벨의 조정효과가 있음을 알 수 있다.

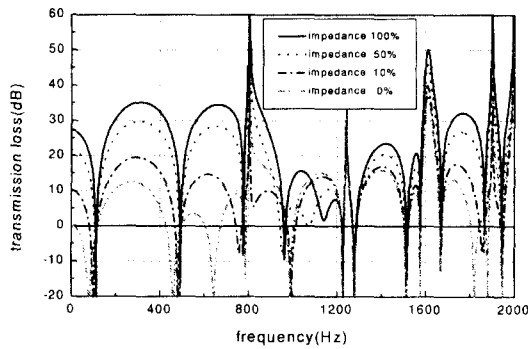


Fig. 6 Transmission loss with the variations of radiation impedance

방사 임피던스 변화에 따른 투과손실의 수치해석결과를 실험결과와 비교하여 오차가 가장 작은 방사 임피던스 값(10%)을 출구단의 경계조건으로 선정하였다.

Fig.7은 선정된 10% 방사 임피던스를 적용한 투과손실 값과 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

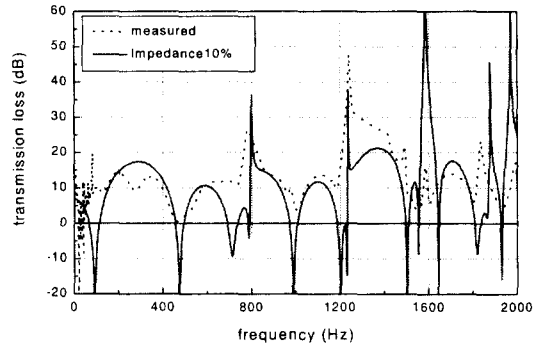


Fig. 7 Results of FE analysis using 10% radiation impedance and experiment

3.2 모델의 요소수 수정

유한요소모델의 수치해석에서 계산시간을 줄이면서 유효한 해석결과를 도출하기 위해 유한요소모델을 수정하였다. 여기서 사용된 네 개의 유한요소모델의 절점과 요소 수(node and element numbers)는 Table 1과 같다. 로마숫자 I, II, III, IV는 요소의 수의 변화에 따른 유한요소모델 번호로 숫자가 증가할수록 요소와 절점의 수는 많아진다.

Table 1 Comparison of model sizes and computing times of four FE models

model type	node number	element number	computing time(hr)
I	4033	12814	4
II	5804	20978	8
III	5830	21050	8
IV	7836	33653	24

Fig.8은 요소 수가 가장 작은 모델 I 과 가장 많은 모델 IV를 각각 이용하여 해석한 결과를 실험결과와 비교한 것으로 요소의 수가 증가할수록 실험결과와 일치하는 경향을 보였다. 그러나 요소의 수가 증가함에 따라 해석 시간이 길어지는 단점이 있어 해석시간을 줄이기 위해서는 요소의 수를 최적화 할 필요가 있다.

Table 1의 해석 대상 모델의 수치해석 결과를 Fig.9에 나타내었다. Fig.9의 결과에서 보면 1000Hz 이하에서는 요소의 수 변화에 따른 투과손실 곡선의 차이는 거의 없으나, 1000Hz이상의 영역에서는 투과손실 곡선이 전체적으로 저주파수 쪽으로 이동되는 경향을 보였다. 여기서 요소수의 변화에 따라 고주파 영역에서 투과손실 곡선의 공진 또는 역공진 주파수의 위치가 바뀔 수 있다.

이는 파장이 큰 저주파 영역에서는 요소의 크기가 파장보다 충분히 작으므로 수치해석에서 투과손실을 정확하게 계산할 수 있으나, 파장이 상대적으로 짧은 고주파 영역에서는 요소의 크기가 파장보다 작으면 투과손실 계산에 오차가 포함됨을 알 수 있다. 따라서 고주파 쪽의 투과손실 곡선을 보다 정확하게 계산하기 위해서는 대상 주파수 범위 및 계산시간을 고려한 적절한 요소 크기의 선정이 필요하다.

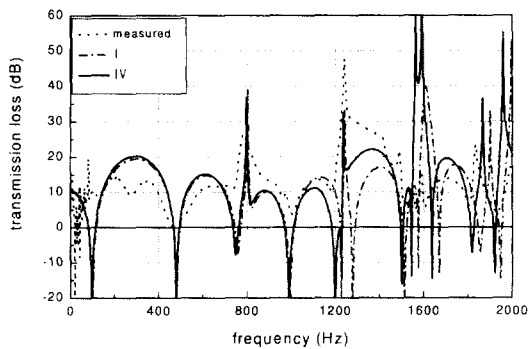


Fig. 8 Results of analysis of FE model I and IV and experiment

Table 1의 모델Ⅲ은 Fig.9의 해석 결과를 토대로 해석 시간과 정확도를 고려하여 모델 Ⅱ에서 내부관의 천공된 부분과 같이 수 백 개의 작은 구멍으로 이루어져 속도 포텐셜의 변화가 큰 부분은 요소 수를 증가시키고, 입출구단 및 공동과 같은 속도 포텐셜의 변화가 작은 부분은 요소 수를 감소시켜 보다 정확하고 빠른 해석을 위해 모델링한 개선된 모델이다. 개선된 모델Ⅲ을 이용한 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 Fig.10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 소음기의 설계에서 주요한 인자인 주파수 대역의 투과손실 레벨 및 역공진 주파수가 잘 일치되고 있다.

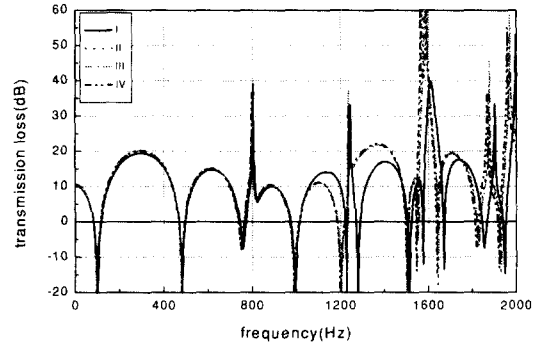


Fig. 9 Analysis results from four FE models

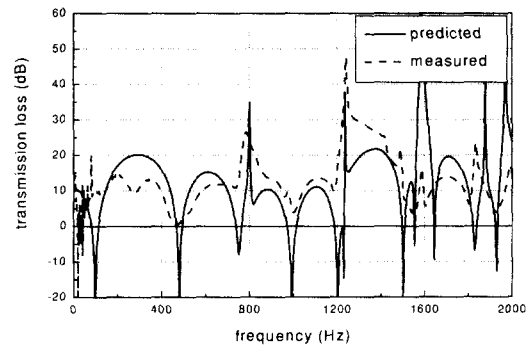


Fig. 10 Results of analysis of improved FE model and experiment

4. 결론

자동차 소음기의 설계에 유효한 음향해석 모델을 도출하기 위하여 유한요소모델의 음향해석 및 실험을 수행하였다. 실험에서는 소음기 입·출구단에서 측정된 음압을 음파분리법으로 신호처리하여 투과손실을 구하였고, 이 결과를 음향해석의 결과와 비교하였다. 그리고 음향해석에 있어서는 경계조건과 유한요소모델의 요소 수의 수정에 의해 개선된 유한요소모델을 도출하였다. 경계조건 즉 방사 임피던스 값을 변화시키므로 해석결과의 투과손실 값의 레벨을 조정할 수 있고, 유한요소모델의 요소 수를 변화시키므로 고주파 영역에서 투과손실

곡선의 공진 및 역공진 주파수를 이동시킬 수 있음을 알 수 있었다. 실험장치의 조건과 해석 시간 및 정확도를 고려하여 방사 임피던스 값과 유한요소모델의 요소 수를 수정하므로 음향해석 모델을 개선할 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. FEMAP ver 5.0 user guide, 1997.
2. 김양한, 최재웅, 김영, "복합형 반사형 소음기의 음향학적 특성과 설계방법," 한국소음진동공학회지, 제1권, 제1호, pp. 29-38, 1991.
3. SYSNOISE Rev 5.3 users manual
4. Lawrence E. Kinsler, et al., "Fundamentals of Acoustics," 3rd ed, Wiley. 1982.
5. Kwang Ha Suh, Hyeong Seok Kim., "Comparing Four Pole Parameter Method and Direct Approach," The Practical Application with SYSNOISE for Silencers, 1991.
6. 강성우, 김양한, "두개의 음향탐촉자를 이용한 소음기의 투과손실 측정과 오차해석," 한국소음진동공학회지, 제2권, 제3호, pp. 181-192, 1992.
7. A. F. Seybert, D.F. Ross., "Experimental Determination of Acoustic Properties Using A Two-mic. Random Excitation Technique.," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61, pp. 1362-1370, 1977.
8. M. L. Munjal, "Acoustics of Ducts and Mufflers," Jone Wiley & Sons, 1987.