

자동차 소음기의 소음성능 예측에 관한 연구

(Study on a Prediction of Noise Attenuation Performance of Automotive Mufflers)

양 기 영*(전남대 대학원), 황 원 길, 기 창 두(전남대)

K. Y. Yang(Graduate school), W. G. Hwang, C. D. Kee(Chonnam Nat. Univ.)

ABSTRACT

The lattice filter formed transfer function has the advantage of computer simulation in the analysis of muffler. The transfer function is derived by using z-transformation for perforated elements in through-flow, cross-flow and reverse-flow types. A computer program for the prediction of the performance of automotive mufflers is developed using the transfer functions for uniform tube, open termination, expansion element, perforated elements, etc. The analytical results are verified by comparing with the experimental results for the transmission loss of a muffler. The effect of geometric configuration change of the muffler was investigated in order to improve the performance of noise attenuation.

1. 서론

자동차 소음기에는 균일관, 개구단, 폐구단, 팽창부, 수축부, 둘출관 공명기, 격벽, 헬륨홀츠 공명기, 집중관 공명기 등 반사형 요소와 흡음재와 다공형 요소와 같은 흡음형 요소들로 구성되어 있다. 특히 다공관 요소는 흡음형 요소의 성질과 반사형 요소의 성질을 모두 지니고 있어 자생소음과 배압 그리고 소음성을 모두 충족시켜 주고 있어 자동차 소음기에 많이 삽입되어 사용되고 있다. 다공관 요소는 소리를 반사하는 특성뿐만 아니라 구멍에서 소리 에너지가 소산되는 흡음특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 다공관 요소에 대해 Jayaraman과 Yam이 제안한 분리적 접근법⁽¹⁾을 확장시켜 기류가 존재하지 않는 경우에 대해 엄밀해를 구하고, Wakita의 음향관 필터링 과정을 이용한 격자필터 형태의 전달함수법⁽²⁾을 이용해 관통형 요소, 연결형 요소, 역류형 요소에 대해 z 변환 형태의 전달함수를 구하였다. 이렇게 구한 z 변환된 격자형태의 전달함수와 균일관, 개구단, 폐구단, 팽창부, 수축부, 둘출관 공명기, 격벽, 헬륨홀츠 공명기, 집중관 공명기 등 반사형 요소의 전달함수를 이용해 소음기의 소음저감 성능을 예측할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 소음기의 구조에 따라 각 요소에 대한 전달함수를 구할 수 있는 함수를 순차적으로 호출하여 소음기의 전체 전달함수를 구하여

소음기의 소음저감 성능을 계산할 수 있도록 구현하였다.

차량에 실제 사용되는 소음기는 여러가지 요소들로 복잡하게 구성되어 있어 이를 엄밀히 해석하기는 힘들다. 따라서 1 차원으로 근사시켜 소음기의 해석을 행하였다. 그리고 자동차에 실제 사용되는 소음기를 통해 개발한 프로그램을 검증하였다. 이 소음기를 음파의 진행방향에 따라 각 요소를 분할하여 모델링하였고 개발한 프로그램을 이용해 소음저감 성능을 예측하였고 실험을 통해 유효성을 확인하였다. 또한 내부구조의 변경을 통한 소음기의 성능을 고찰하였다.

2. 주기 격자필터 알고리즘과 음향관의 전달함수

2.1 주기 격자필터 알고리즘

주기 격자필터 알고리즘은 시간과 차수에 대하여 회기하는 최소자승 파라미터 추정 알고리즘이다. 주기 격자필터에서 쓰이는 전진잔차오차(forward residual error) $e^n(k)$ 및 후진잔차오차(backward residual error) $r^n(k)$ 의 차수만복식은

$$e^{n+1}(k) = e^n(k) - K^{e,n}(k) r^n(k) \quad (1)$$

$$r^{n+1}(k) = r^n(k-1) - K^{r,n}(k) e^n(k-1) \quad (2)$$

이고 전진반사계수와 후진반사계수는

$$K^{e,n}(k) = \frac{\Delta^n(k)}{R^{r,n}(k)} \quad (3)$$

$$K^{r,n}(k) = \frac{\Delta^n(k-l)}{R^{e,n}(k-l)} \quad (4)$$

이다. 차수반복식과 시간반복식은 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R^{e,n+1}(k) = R^{e,n}(k) - K^{e,n}(k)\Delta^n(k) \quad (5)$$

$$R^{r,n+1}(k) = R^{r,n}(k-l) - K^{r,n}(k)\Delta^n(k-l) \quad (6)$$

$$G^{n+1}(k) = G^n(k) - \frac{r^n(k)}{R^{r,n}(k)} r^n(k)^T \quad (7)$$

$$\Delta^n(k) = \lambda\Delta^n(k-l) + [c^n(k)]^T [G^n(k)]^{-1} r^n(k) \quad (8)$$

2.2 소음기의 소음감소 특성

소음기의 특성을 해석하는데 전달함수를 사용하는 방법은 컴퓨터 시뮬레이션 등 여러면에서 유리한 장점을 가지고 있다. 음파의 이동경로에 따른 소음감소 특성을 파악하고, 소음기의 전체길이 ℓ 을 길이가 Δl 인 n개의 요소로 나누고, 각 요소의 격자필터 형태의 전달함수를 곱하면 전체의 전달함수를 다음과 같은 형태로 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_n^+(z) \\ P_n^-(z) \end{bmatrix} = z^{n/2} K \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ P_0^-(z) \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)과 같이 구한 전달함수를 이용해 소음기의 성능을 표시할 수 있는데 삽입손실(IL)은 필터가 없을 때와 있을 때의 방사음압의 비로 정의되므로, 압력원이 일정하다고 가정하면 개구단($\mu_0 \approx -1$)의 경우

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_n}{P_0} \right| \quad (10)$$

$$= 20 \log_{10} |(T_{12} + T_{22})|$$

을 얻을 수 있다.

소음기의 성능을 표현할 수 있는 투과손실(TL)은 소음기의 소음감소 효과를 표현하는 것으로 소음기에 입사된 음향파워레벨(PWL:Sound Power Level)에서 하류측에 전달된 PWL을 뺀 값이다. 식 (9)을 이용하여 투과손실을 계산하면

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_n^+}{P_0^+} \right| \quad (11)$$

$$= 20 \log_{10} |T_{11}|$$

이 된다.

2.3 소음기의 기본요소의 전달함수

소음기는 기본구조인 균일관, 개구단, 무반향단, 팽창부, 수축부, 돌출관공명기, 격벽, hole-cavity 공명기 및 다공관 요소 등 기본적인 기하학적 요소가 형상이 변형되고 서로 결합됨으로써 완성된다. 이와 같이 구성된 소음기의 성능을 해석하는데는 소음기의 구조를 기본요소로 분할하여 해석하는 방법이 여러가지 면에서 유리하다. 본 절에서는 소음기를 구성하는 기본요소에 대해 격자형태의 전달함수를 표 1로 정리하였다.

Table 1. Transfer Functions of Basic Elements of Muffler⁽³⁾

element	transfer function
균일관 (uniform tube)	$\begin{bmatrix} P_m^+(z) \\ P_m^-(z) \end{bmatrix} = z^{m/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & z^{-m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ P_0^-(z) \end{bmatrix}$
개구단 (open termination)	$\begin{bmatrix} P_m^+(z) \\ P_m^-(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{m/2}}{1+\mu_0} \begin{bmatrix} 1 & \mu_0 \\ \mu_0 z^{-m} & z^{-m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ P_0^-(z) \end{bmatrix}$
폐구단 (closed termination)	$\begin{bmatrix} P_m^+(z) \\ P_m^-(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{m/2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ z^{-m} & z^{-m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ P_0^-(z) \end{bmatrix}$
무반향단 (anechoic termination)	$\begin{bmatrix} P_m^+(z) \\ P_m^-(z) \end{bmatrix} = z^{m/2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & z^{-m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ 0 \end{bmatrix}$
팽창부와 수축부	$\begin{bmatrix} P_m^+(z) \\ P_m^-(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{m/2}}{1+\mu_0} \begin{bmatrix} 1 & \mu_0 \\ \mu_0 z^{-m} & z^{-m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ P_0^-(z) \end{bmatrix}$
돌출관 공명기	$\begin{bmatrix} P_1^+(z) \\ P_1^-(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{1/2}}{1+\mu_0} \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 \\ \mu_0 z^{-1} & \mu_2 z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ P_0^-(z) \end{bmatrix}$
격벽(Hole)	$\begin{bmatrix} P_1^+(z) \\ P_1^-(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{1/2}}{1+\mu} \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 \\ \mu_2 z^{-1} & \mu_3 z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^+(z) \\ P_0^-(z) \end{bmatrix}$
Helmholtz 공명기	$\begin{bmatrix} P_1(z) \\ P_1(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{1/2}}{1+\mu_0} \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 \\ -\mu_0 z^{-1} & \mu_2 z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0(z) \\ P_0(z) \end{bmatrix}$
Concentric hole -cavity resonator	$\begin{bmatrix} P_1(z) \\ P_1(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{1/2}}{1+\mu_0} \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 \\ -\mu_1 z^{-1} & \mu_2 z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0(z) \\ P_0(z) \end{bmatrix}$

3. 다공관 요소의 전달함수

3.1 다공관 요소의 일반해

그림 1은 일반적인 다공관 모형을 나타내고 있다. 다공관의 일반적인 모형은 균일하게 구멍이 뚫린 유동관과 이를 둘러싸는 공동으로 구성되는 2관 모형(two-duct

model)으로 하였다. 다공부분을 길이가 dx 인 m 개의 부분으로 나누고 그림 1과 같이 각 요소의 단면을 x_0, x_1, \dots, x_m 으로 구분하였다.

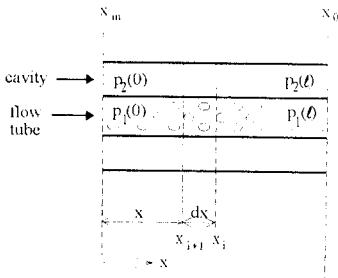


Fig. 1. The common two-duct perforated section

위와 같은 다공관의 요소를 모델링하기 위해 다음의 가정을 하였다.

- ① 1차원 평면파로 전파한다.
- ② 벽은 강체이다.
- ③ 다공관의 입피던스는 균일하다. 즉 반경방향의 유동 속도는 $w(x) = [p_1(x) - p_2(x)] / \rho_0 c \zeta$ 이다.
- ④ 동엔트로피 과정이다. $p_i(t, x) = \rho_i(t, x) c^2$, $i=1, 2$.

여기서 ρ_0 는 시간평균밀도, \bar{U}_1 과 \bar{U}_2 는 유동관과 공동의 축방향 유동속도의 시간평균이라 하고 u_1 과 u_2 는 유동관과 공동의 축방향 속도의 변화량, ρ_1 과 ρ_2 는 유동관과 공동의 축방향 밀도의 변화량, p_1 과 p_2 는 유동관과 공동의 축방향 압력의 변화량, w 는 반경방향의 질점속도의 변화량이다.

지름이 d_1 인 유동관에서의 연속 방정식과 운동량 보존 방정식⁽¹⁾은 다음과 같다.

$$\bar{U}_1 \frac{\partial p_1(t, x)}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial u_1(t, x)}{\partial x} + \frac{4}{d_1} \rho_0 w(t, x) = - \frac{\partial p_1(t, x)}{\partial t} \quad (12)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{U}_1 \frac{\partial}{\partial x} \right) u_1(t, x) = - \frac{\partial p_1(t, x)}{\partial x} \quad (13)$$

그리고 지름이 d_2 인 공동에서의 연속 방정식과 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\bar{U}_2 \frac{\partial p_2(t, x)}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial u_2(t, x)}{\partial x} - \frac{4d_1}{(d_2^2 - d_1^2)} \rho_0 w(t, x) = - \frac{\partial p_2(t, x)}{\partial t} \quad (14)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{U}_2 \frac{\partial}{\partial x} \right) u_2(t, x) = - \frac{\partial p_2(t, x)}{\partial x} \quad (15)$$

식 (12) ~ (15)을 t 와 x 에 관해 변수분리하여 t 에 관해 미분을 하면 x 에 관한 상미분 방정식을 얻고 식 (12) ~ (15)를 연립하면 압력에 관한 방정식을 얻을 수 있다. 압력에 관한 방정식을 분리적 접근법을 이용해 일반해를 구해 행렬로 나타내면 다공관의 일반해를 구할 수 있다. 다공관 전체의 전달행렬 관계를 구하기 위해서 $x = 0$ 에서의 일반해와 $x = \ell$ 에서의 일반해를 구해 두식을 연립하여 상수 항을 소거하면 다음과 같이 전체 전달함수(overall transfer function)의 일반해를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1(0) \\ \rho_0 c u_1(0) \\ p_2(0) \\ \rho_0 c u_2(0) \end{bmatrix} = |G| \begin{bmatrix} p_1(\ell) \\ \rho_0 c u_1(\ell) \\ p_2(\ell) \\ \rho_0 c u_2(\ell) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 $|G| = |A(0)| |A(\ell)|^{-1}$ 이고 행렬의 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{11} &= r^2 \cos k_a \ell + (1 - r^2) \cos k_r \ell, \\ G_{12} &= j(r^2 \sin k_a \ell + \frac{k_a}{k_r} (1 - r^2) \sin k_r \ell), \\ G_{13} &= (1 - r^2)(\cos k_a \ell - \cos k_r \ell), \\ G_{14} &= j(1 - r^2)(\sin k_a \ell - \frac{k_a}{k_r} \sin k_r \ell), \\ G_{21} &= j(r^2 \sin k_a \ell + \frac{k_r}{k_a} (1 - r^2) \sin k_r \ell), \\ G_{22} &= G_{11}, \\ G_{23} &= j(1 - r^2)(\sin k_a \ell - \frac{k_r}{k_a} \sin k_r \ell), \\ G_{24} &= G_{13}, \\ G_{31} &= r^2 (\cos k_a \ell - \cos k_r \ell), \\ G_{32} &= j r^2 (\sin k_a \ell - \frac{k_a}{k_r} \sin k_r \ell), \\ G_{33} &= (1 - r^2) \cos k_a \ell + r^2 \cos k_r \ell, \\ G_{34} &= j \{(1 - r^2) \sin k_a \ell + \frac{k_a}{k_r} r^2 \sin k_r \ell\}, \\ G_{41} &= j r^2 (\sin k_a \ell - \frac{k_r}{k_a} \sin k_r \ell), \\ G_{42} &= G_{31}, \\ G_{43} &= j \{(1 - r^2) \sin k_a \ell + \frac{k_r}{k_a} r^2 \sin k_r \ell\}, \\ G_{44} &= G_{33}. \end{aligned}$$

여기서 k_a 는 축방향의 파수(wave number), k_r 은 반경방향의 파수, r 은 다공관의 반경이고, ℓ 은 다공부분의 길이이다.

3.2 다공관 요소의 전달함수

본 절에서는 다공관 요소를 매체의 흐름에 따라 관통형 요소, 연결형 확장관 요소, 연결형 수축관 요소, 역류형 확장관 요소, 역류형 수축관 요소로 나누고 각 요소의 경계조건을 이용해 식 (16)으로 표현된 다공관 요소의 일반화를 입구부와 출구부에 대한 2×2 의 전달함수를 구하면 다음과 같다

$$\begin{bmatrix} p(0) \\ \rho_0 c u(0) \end{bmatrix} = [H] \begin{bmatrix} p(\ell) \\ \rho_0 c u(\ell) \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)의 압력성분과 속도성분을 압력의 전진성분과 후진성분으로 나누고 시간의 함수로 바꾸어 z 변환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_m^+(z) \\ p_m^-(z) \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} p_0^+(z) \\ p_0^-(z) \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 전달행렬 $[T]$ 는 식 (17)의 전달행렬 $[H]$ 로 구성되는데 $[T]$ 의 요소는 다음과 같다.

$$T_{11} = \frac{1}{2}(H_{11} + H_{12} + H_{21} + H_{22}),$$

$$T_{12} = \frac{1}{2}(H_{11} - H_{12} + H_{21} - H_{22}),$$

$$T_{21} = \frac{1}{2}(H_{11} + H_{12} - H_{21} - H_{22}),$$

$$T_{22} = \frac{1}{2}(H_{11} - H_{12} - H_{21} + H_{22}).$$

여기서 사용된 각 요소의 경계조건은 표 2로 나타내었다.

Table 2. Boundary Condition of Perforated Elements⁽⁴⁾.

element	boundary condition
관통형 요소	$Z_2(0) = \frac{p_2(0)}{-u_2(0)} = -jZ_0 \cot k_0 \ell_a$ $Z_2(\ell) = \frac{p_2(\ell)}{u_2(\ell)} = -jZ_0 \cot k_0 \ell_b$
연결형 확장관 요소	$Z_2(0) = \frac{p_2(0)}{-u_2(0)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_a$ $Z_1(\ell) = \frac{p_1(\ell)}{u_1(\ell)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_b$
연결형 수축관 요소	$Z_1(0) = \frac{p_1(0)}{-u_1(0)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_a$ $Z_2(\ell) = \frac{p_2(\ell)}{u_2(\ell)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_b$

Table 2. Boundary Condition of Perforated Elements (continued).

element	boundary condition
역류형 확장관 요소	$Z_1(\ell) = \frac{p_1(\ell)}{u_1(\ell)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_b$ $Z_2(\ell) = \frac{p_2(\ell)}{u_2(\ell)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_b$
역류형 수축관 요소	$Z_1(\ell) = \frac{p_1(\ell)}{u_1(\ell)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_b$ $Z_2(\ell) = \frac{p_2(\ell)}{u_2(\ell)} = -j\rho_0 c \cot k_0 \ell_b$

여기서 Z_1 은 유동관의 임피던스, Z_2 는 공동의 임피던스, k_0 는 파수, c 는 음속이다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 프로그래밍

그림 2는 소음기의 소음저감 성능을 예측할 수 있도록 개발한 프로그램의 흐름도를 보이고 있다.

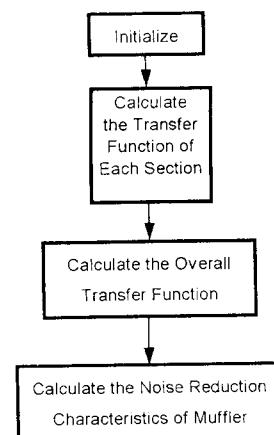


Fig. 2. Flow chart of program

위와 같이 구성된 프로그램은 각각의 요소에 대한 전달함수를 구하는 함수를 모듈화하여 소음기의 각 요소에 대한 제원과 요소의 갯수를 데이터로 입력하면 요소의 순서에 따라 각 모듈이 호출되어 전달함수를 구하고 각각의 전달함수를 곱하여 전체 전달함수(overall transfer function)를 구하게 되고 2.2 절에서와 같은 방법으로 전달손실(transmission loss)과 삽입손실(insertion loss)을 구하게 된다.

4.2 시뮬레이션

본 연구에서 사용한 소음기는 배기량이 800cc인 경상용 차에 부착되어 실제 사용되는 소음기로서 길이 350mm, 지름 186mm인 원통형이고 입구관과 출구관은 본체의 중심으로부터 각각 30mm씩 편심되어 있다. 소음기의 각 요소를 그림 3과 같이 15개의 요소로 구분하였다.

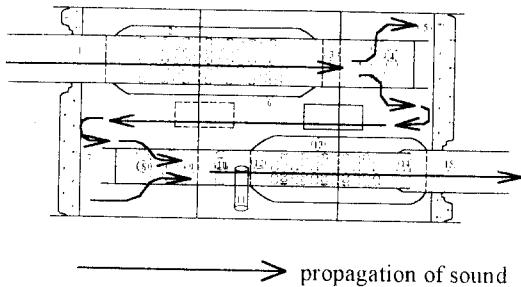


Fig. 3. Automotive exhaust muffler

소음기의 각 요소는 표 3과 같은 음향관 요소로 모델링하였다.

Table 3. Type of Sections.

Section	Type	Section	Type
1	균일관	9	균일관
2	관통형 요소	10	관통형 요소
3	균일관	11	헬름홀츠 공명기
4	연결형 확장관 요소	12	균일관
5	폐구단	13	관통형 요소
6	폐구단	14	확장관
7	균일관	15	개구단
8	연결형 수축관 요소		

이와 같이 모델링된 소음기의 성능 계산 결과는 그림 5에서 굵은 실선으로 보였다. 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 약 350 Hz, 900 Hz, 1400 Hz 및 1800 Hz 부근에서 꼴이 나타났다. 이 소음기는 500 Hz 이하의 주파수보다는 500 Hz 이상의 주파수에서 보다 좋은 소음저감 효과를 보임을 알 수 있으며 1500 Hz 이하에서는 피크에서 약 40 dB 정도 소음저감 특성을 보였다.

4.3 실험 및 고찰

- 소음기의 소음 성능을 측정하기 위한 실험장치의 개략도는 그림 4와 같다

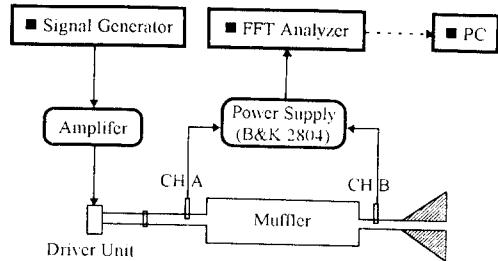


Fig. 4. Test setup and measuring system

신호 발생기에서 주파수 대역은 2kHz인 백색 잡음(white noise)을 발생시키고 소음기의 입구부와 출구부에 설치된 1/2" 폰덴서형 마이크로폰을 통해 측정된 신호는 증폭되어 SD390 FFT analyzer에서 주파수 분석되었다.

그림 5에서 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하였다. 300Hz 부근의 꼴의 위치는 조금 차이가 있으나 600Hz, 1000Hz, 1600Hz 등의 피크의 위치가 잘 일치하였고 특히 1kHz 이하에서 해석치와 실험치가 아주 잘 일치함을 보인다. 또한 1 kHz 이상의 주파수에서도 피크의 위치와 꼴의 위치가 대체적으로 잘 일치함을 볼 수 있다.

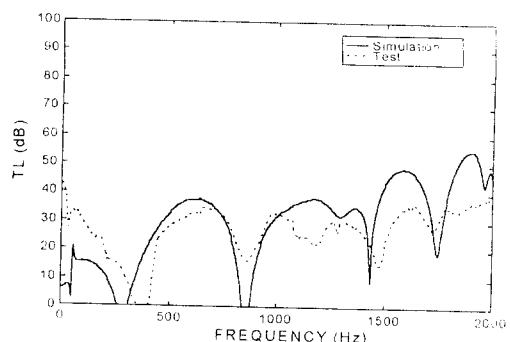


Fig. 5. Simulation and test result

4.4 음향관 요소의 구조변경에 따른 성능의 변화

본 연구에서 사용한 소음기는 재한된 체적으로 인해 헬름홀츠 공명기가 제대로 역할을 하지 못함에 따라 500Hz 이하의 주파수에서 좋지 않은 성능을 보이는 것으로 사료된다. 따라서 저주파수에 영향을 미치는 헬름홀츠 공명기의 폭의 길이를 60mm에서 5mm로 줄여서 공진 주파수를 높여 보았지만 만족할만한 전달손실의 변화를 볼 수 없었다. 따라서 중·고 주파수에서 영향을 미치는 다공관 요소의 구멍의 크기를 6mm에서 4mm로 줄이고, 다공율을 21.29%에서 7%로 낮추고, 다공부분의 길이를

9.75 cm에서 13.75cm로 변화시켜 공진주파수를 저주파수로 이동을 시켜 500Hz 이하의 저주파수에서의 깊은 골이 좁혀서 300Hz에서 15dB 정도의 성능이 향상되었다.

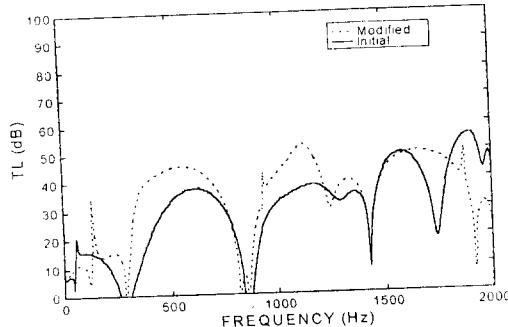


Fig. 6. Improvement in the lower frequency range.

5. 결 론

본 연구에서는 z변환 형태의 다공관 요소의 전달함수를 구하고 기본요소와 다공관 요소의 전달함수들을 각각 모듈화하여 간편하게 자동차 소음기의 성능을 해석할 수 있는 소음저감 성능을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였고 실차에 사용되는 소음기를 이용해 프로그램을 검증하였다. 연구를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개발한 소음기 해석 프로그램은 비교적 소음기의 소음저감 성능을 예측하는 것으로 판단되므로 1차원 해석으로도 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 실차에 사용되는 소음기를 프로그램을 통해 계산한 전달손실과 실험을 통한 전달손실을 비교하였다. 1kHz 이하의 주파수 대역에서는 300 ~ 400Hz, 800Hz에서 골의 위치가 일치함을 볼 수 있었다.

(3) 500Hz 이하에서 깊은 골이 생기는 좋지 않은 성능을 갖는 것으로 판단되어 헬륨홀츠 공명기를 삽입하고 다공관 요소의 다공율을 낮추고 길이를 줄여 공진주파수를 저주파수로 옮겨 300Hz에서 15dB 정도의 소음저감을 얻을 수 있었다.

(4) 예측치와 실험치의 오차는 비대칭성으로 인해 공진주파수의 오차가 생겼고, 관통형 요소와 폐구단으로 가정한 소음기의 관벽에 삽입된 흡음재를 고려하지 못하였고, 소음기의 도면과 실물사이의 제작오차 그리고 실험에서 기인한 것으로 사료된다.

따라서 흡음재 등의 비선형 요소에 대한 연구를 추가하면 보다 정확한 소음기의 성능예측을 할 수 있을 것이

고 소음기 설계에 있어 보다 간편하고 효율적인 방법을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- K. Jayaraman and K. Yam, "Decoupling Approach to Modeling Perforated Tube Muffler Components," *J. Acous.Soc.Am.*, 69(2), 390-396, 1981.
- H. Wakita, "Direct Estimation of the Vocal Tract Shape by Inverse Filter of Acoustic Speech Waveforms," *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics*, Vol AU-21, No. 5, 417 - 427, Oct. 1973.
- 황원걸, "격자필터에 의한 배기계의 소음특성 해석", 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 5, 126-135, 1995.
- M. L. Munjal, *Acoustics of Duct and Mufflers*, John Wiley & sons, 1987.
- J. W. Sullivan and M. J. Crocker, "Analysis of Concentric Tube Resonators Having Unpartitioned Cavities," *J. Acous.Soc.Am.*, 64, 207-215, 1978.
- J. W. Sullivan, "A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Components. I. Theory," *J. Acous.Soc.Am.*, 66(3), 772-778, 1979.
- J. W. Sullivan, "A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Components. II. Application," *J. Acous.Soc.Am.*, 66(3), 779-788, 1979.
- P. T. Thawani and K. Jayaraman, "Modeling and applications of straight-through resonators," *J. Acous.Soc.Am.*, 73(4), 1387-1389, 1983.
- K. Narayana Rao and M. L. Munjal, "A generalized decoupling method for analyzing perforated element mufflers," *Nelson Acoustic Conference*, Madition, 1984.