



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

모드매칭법을 기반으로 한 다층 원통형
소음기의 음향투과손실 계산

Mode matching method based transmission
loss calculation of multi-layered cylindrical
silencers

2023년 2월

서울대학교 공과대학

조선해양공학과

이 종 무

모드매칭법을 기반으로 한
다층 원통형 소음기의
음향투과손실 계산

지도교수 성 우 제

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023년 2월

서울대학교 대학원
조선해양공학과
이 종 무

이종무의 공학석사 학위논문을 인준함
2023년 2월

위 원 장 _____ 임 영 섭 _____ (인)

부위원장 _____ 성 우 제 _____ (인)

위 원 _____ 노 명 일 _____ (인)

국문초록

본 연구에서는 잠수함 등에서 쓰이는 배관 소음을 줄이기 위해 사용되는 다층 소음기 제작에 필요한 기초연구를 진행했다. 소음기의 흡음 성능을 예측하기 위해 기존 연구들을 살펴보고, 다층 다공탄성 소음기에 대한 해석을 진행했다. 다공질 탄성 매질 내부에 흐르는 파동을 Biot 모델을 이용해서 모델링했다. 공기와 다공질 탄성체 사이의 경계조건, 다공질 탄성체들 사이의 경계조건, 다공질 탄성체와 소음기의 벽 사이의 경계조건을 구체적으로 기술하고 행렬화 시켰으며, 행렬식이 0이 되도록 만드는 모드들을 수치적으로 찾아내어 매칭시켜서 소음기의 음향투과손실을 계산하는 방법을 소개했다. 이후 몇 가지 종류의 소음기들에 대해 음향투과손실을 구하고 특성을 살펴보았다. 마지막으로 본 연구에서 제시한 모드매칭법을 유한요소법과 비교하면서 유효성을 검증했다.

주요어 : 다공탄성, 투과손실, 다층 소음기, 머플러

학 번 : 2021-23176

목 차

초록	i
목차	ii
표 목차	iv
그림 목차	iv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 논문 구성	1
제 2 장 기존 소음기 모델	2
2.1 단순확장형 소음기	2
2.2 섬유계 소음기	3
2.3 다공탄성 소음기	3
제 3 장 다층 다공탄성 소음기	4
3.1 기초 이론	4
3.2 경계 조건	9
3.2.1 공기-다공탄성체	9

3.2.2 다공탄성체-다공탄성체	10
3.2.3 다공탄성체-벽	10
3.3 행렬화와 모드	11
3.4 모드 매칭	12
제 4 장 시뮬레이션 수행 및 결과	19
4.1 단순확장형 소음기	19
4.2 단층 다공탄성 소음기	21
4.3 다층 다공탄성 소음기	24
4.4 모드매칭법과 유한요소법	28
제 5 장 결론	37
부록	38
참고문헌	44
Abstract	46

표 목 차

[표 1]	19
[표 2]	21

그 립 목 차

[그림 1]	2
[그림 2]	4
[그림 3-1]	20
[그림 3-2]	20
[그림 3-3]	20
[그림 4]	21
[그림 5-1]	22
[그림 5-2]	23
[그림 5-3]	23
[그림 6-1]	25
[그림 6-2]	25
[그림 7-1]	26
[그림 7-2]	26
[그림 8-1]	27
[그림 8-2]	27
[그림 9-1]	29
[그림 9-2]	29
[그림 9-3]	30
[그림 9-4]	30
[그림 9-5]	31

[그림 9-6]	.....	31
[그림 9-7]	.....	32
[그림 9-8]	.....	32
[그림 9-9]	.....	33
[그림 9-10]	.....	33
[그림 9-11]	.....	34
[그림 9-12]	.....	34
[그림 9-13]	.....	35
[그림 10-1]	.....	36
[그림 10-2]	.....	36

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

2019년 7월 북한은 신형 잠수함의 시찰 사진을 공개했다. 그 안에는 3개의 SLBM 발사관으로 추정되는 부분이 모자이크 처리되어 있었다. 그 후에 수차례의 SLBM 시험 발사를 통한 시행착오를 거치며 미사일 기술을 점점 고도화시킨 북한은 2021년 1월 원자력 추진 잠수함 개발마저 선언했다.

이에 발맞춰서 2021년 9월 한국은 3000톤급 잠수함인 도산 안창호함에 SLBM 시험 발사 성공을 발표했다. 이렇게 미사일 경쟁이 본격화됨에 따라, 잠수함의 대형화 및 그에 따른 소음기의 개발이 요구된다.

본 연구는 잠수함에서 실제로 사용되는 다층 원통형 소음기의 해석에 대한 기초 연구이다.

1.2 논문 구성

1장에서는 연구 배경을 설명한다. 2장에서는 소음기의 종류를 단순확장형 소음기, 섬유계 소음기, 다공탄성 소음기로 나누고 기존 연구를 소개한다. 3장에서는 다층 다공탄성 소음기를 해석하는 방법에 대해서 설명한다. 3.1절에서 필요한 기초 이론들을 설명하고 3.2절에서 공기와 다공질탄성체와 소음기의 벽 사이의 경계조건들을 기술한다. 3.3절에서 경계조건들을 행렬화 시키고 모드를 찾는 과정에 대해 설명한다. 그 과정에서 행렬의 구체적인 성분은 부록에 표기했다. 4장에서는 다공탄성 소음기에 대한 시뮬레이션을 수행하고 소음기의 특성을 살펴본다. 5장에서는 본 연구의 결론을 설명한다.

제 2 장 기존 소음기 모델

2.1 단순확장형 소음기

단순확장형 소음기의 구조는 그림 1과 같다. 참고문헌[1]에 따르면, 소음기 내부에서 평면파만 있다고 가정하고 확장률을 m 이라고 할 때 음향 투과손실이 다음과 같음이 알려져 있다.

$$TL = 10\log\left(1 + \left(\frac{m-1}{2m}\sin(kl)\right)^2\right) \quad (1)$$

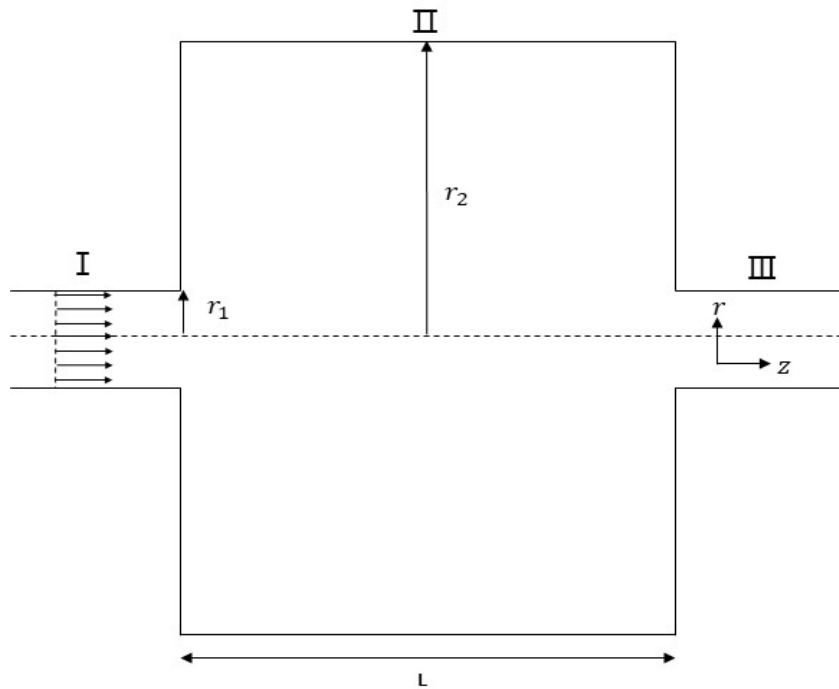


그림 1. 단순확장형 소음기의 개형

Sharkawy[2]는 덕트 내부의 모드를 매칭시켜서 단순확장형 소음기의 음

향투과 손실을 구하는 방법을 제시했다. 또 유한요소법(FEM)과 실험을 동시에 수행해서 모드매칭법의 유효성을 보였다.

2.2 섬유계 소음기

Delany & Bazley[3] 는 섬유계 흡음재의 물성치에 관한 논문에서 흐름 저항과 주파수에 의존하는 다공성 매질의 파수와 특성 임피던스의 반경험식을 제시했다. Xu[4] 등은 섬유계 흡음재가 채워진 단층 섬유계 소음기에 대한 음향투과손실을 구하는 모드매칭법을 제시했다. Selamet[5] 등은 다층 섬유계 소음기에 대한 음향투과손실을 구하는 방법을 제시했다.

2.3 다공탄성 소음기

Biot는 다공질 탄성 이론의 창시자로, 다공질 탄성체를 다룰 때는 많은 경우에 Biot 이론이 사용된다. 다공질 탄성체 내부에는 고체 상태의 물질과 유체 상태 물질이 공존한다. 고체 상태의 물질의 프레임이라고 하며, Panneton[6]은 프레임의 움직임이 없다고 가정하는 rigid frame porous model과 프레임이 외력에 저항하지 못한다고 가정하는 limp porous model과 같은 equivalent fluid model을 소개했다. Nennig[7] 등은 Biot 모델이 적용된 단층 다공질 탄성 흡음재가 채워진 소음기(다공탄성 소음기)의 음향투과손실을 구하는 모드매칭법을 제시했다. 본 연구에서는 탄성 효과를 보기위해 equivalent fluid model이 아닌 Biot 모델을 사용한다. 그리고 Nennig[7] 의 방법을 다층으로 확장시켜서 다층 다공탄성 소음기의 음향투과 손실을 구하는 모드매칭법을 보여주고 다층 다공탄성 소음기의 특성에 대해 연구했다.

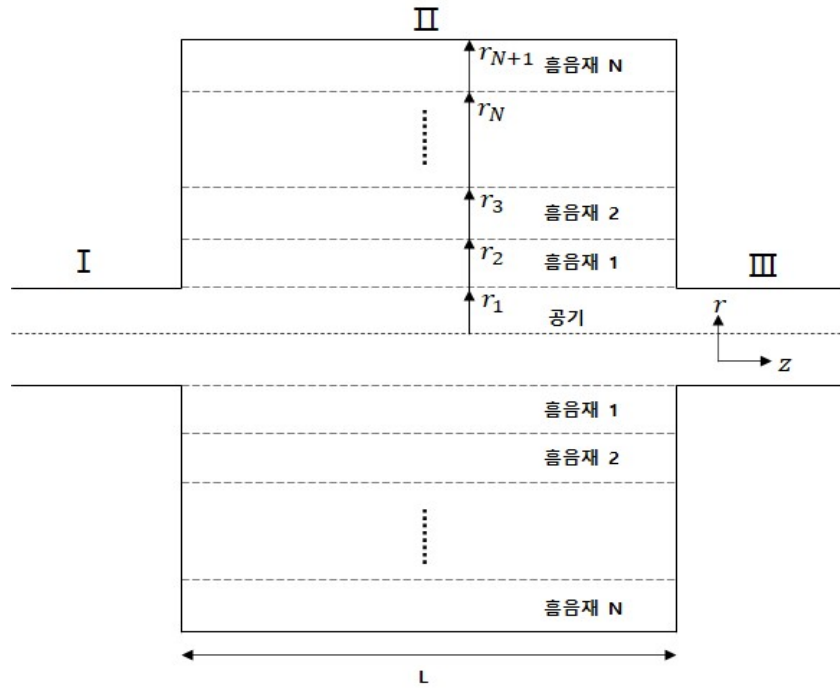


그림 2. 다층 원통형 소음기의 형상

제 3 장 다층 다공탄성 소음기

3.1 기초 이론

다층 다공탄성 소음기의 형태는 그림 2와 같다. N개의 다공탄성 흡음재가 길이가 L인 원통형 외벽으로 둘러싸여 있다. 중앙에 있는 공기의 유속은 없다고 가정한다.

공기가 흐르는 중앙부에서 압력을 p , 변위를 w , 변위 퍼텐셜을 ϕ_0 라고 하면 다음이 성립한다.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (2)$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\nabla p, \quad (3)$$

$$w = \nabla \phi_0. \quad (4)$$

식 (2)은 파동 방정식, 식 (3)는 오일러 방정식이다. c_0 는 공기에서 음속을, ρ_0 는 공기의 밀도다. 원통좌표계에서 파동방정식의 해는 베셀 함수이므로 변위 퍼텐셜 ϕ_0 는 아래와 같다.

$$\phi_0 = A_0 J_m(k_{0r} r) \cos(m\theta) e^{j(k_z z - \omega t)}, \quad (5)$$

$$k_{0r}^2 = k_0^2 - k_z^2. \quad (6)$$

여기서 k_0 는 공기의 파수, k_z 는 공기의 z 방향 파수, k_{0r} 은 공기의 r 방향 파수다. 이후 $e^{j(k_z z - \omega t)}$ 항은 생략해서 표기한다.

다음은 n 번째 다공질 탄성 매질($r_n < r < r_{n+1}$, $n=1,2,\dots,N$)을 Biot 이론으로 모델링 하겠다. 일단 다공질 탄성체 내부에는 유체와 고체 프레임이 공존한다. 유체부분의 변위를 U , 고체 프레임의 변위를 u 라고 하자. Biot[8]의 이론에 따르면 다공질 탄성 매질 내부에는 2개의 압력파와 1개의 전단파가 존재하기 때문에 다음이 성립한다.

$$u = \nabla \phi_1 + \nabla \phi_2 + \nabla \times \psi, \quad (7)$$

$$U = \mu_1 \nabla \phi_1 + \mu_2 \nabla \phi_2 + \mu_3 \nabla \times \psi. \quad (8)$$

여기서 ϕ_1 , ϕ_2 , ψ 는 변위 퍼텐셜을 의미한다. Gazis[9]는 원통형 덕트에서 변위 퍼텐셜이 다음과 같이 주어짐을 명시했다.

$$\phi_{1,n} = [A_{1,n} J_m(k_{1r,n} r) + B_{1,n} Y_m(k_{1r,n} r)] \cos(m\theta), \quad (9)$$

$$\phi_{2,n} = [A_{2,n} J_m(k_{2r,n} r) + B_{1,n} Y_m(k_{2r,n} r)] \cos(m\theta), \quad (10)$$

$$\psi_{r,n} = [A_{3,n} J_{m+1}(k_{3r,n} r) + B_{3,n} Y_{m+1}(k_{3r,n} r)] \sin(m\theta), \quad (11)$$

$$\psi_{\theta,n} = -[A_{3,n} J_{m+1}(k_{3r,n} r) + B_{3,n} Y_{m+1}(k_{3r,n} r)] \cos(m\theta), \quad (12)$$

$$\psi_{z,n} = [A'_{3,n} J_{m+1}(k_{3r,n} r) + B'_{3,n} Y_{m+1}(k_{3r,n} r)] \sin(m\theta), \quad (13)$$

$$k_{ir,n}^2 = k_{i,n}^2 - k_z^2, \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Biot 이론에서 고체 프레임의 응력 σ_{ij}^s 와 유체의 응력 σ_{ij}^f 는 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}^s = [(P-2N) \nabla \cdot u + Q \nabla \cdot U] \delta_{ij} + N \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (15)$$

$$\sigma_{ij}^f = (Q \nabla \cdot u + R \nabla \cdot U) \delta_{ij}. \quad (16)$$

여기서 $P-2N$ 은 Lamé의 제1 계수이고 N 은 프레임의 전단 탄성 계수, R 은 유체의 압력과 관계된 계수이고 Q 는 유체의 고체의 커플링과 관계 있는 계수이다. P, Q, R 은 고체 프레임을 이루는 물질의 체적 탄성 계수 K_s 가 매우 크다는 가정하에 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{4}{3} N + K_b + \frac{(1-\phi)^2}{\phi} K_f, \quad (17)$$

$$Q = K_f(1-\phi), \quad (18)$$

$$R = \phi K_f. \quad (19)$$

여기서 ϕ 는 공극률, K_b 는 프레임의 체적 탄성 계수, K_f 는 유체의 체적 탄성 계수이다. K_b , K_f 는 아래와 같이 표현된다.

$$K_b = \frac{2N(\nu+1)}{3(1-2\nu)}, \quad (20)$$

$$K_f = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) / [1 + j \frac{\phi \kappa}{k'_0 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{(1 - j \frac{4k'_0{}^2 C_p \rho_0 \omega}{\kappa \Lambda'^2 \phi^2})}]} \quad (21)$$

K_f 는 JCA(Johnson-Champoux-Allard) 모델[10]을 적용했다. 여기서 P_0 는 대기압. γ 는 비열비, κ 는 공기의 열전도율, C_p 는 정압 비열, Λ 는 점성 특성 길이, Λ' 은 열적 특성 길이이다. 정적 열 투과율 k'_0 는 simplified Lafarge 모델을 적용하면 아래와 같이 표현된다.

$$q'_0 = \frac{\phi \Lambda'^2}{8}. \quad (22)$$

Λ 는 점성 특성 길이, Λ' 은 열적 특성 길이이다. 정적 열 투과율 k'_0 는 아래와 같다.

다공질 탄성 매질 내부에는 압력과 2개와 전단파 1개, 총 3개의 파동이 존재한다. 그 3개의 파동의 각각의 파수는 아래와 같다.

$$k_1^2 = \frac{w^2}{2(PR - Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} + \sqrt{\Delta}], \quad (23)$$

$$k_2^2 = \frac{w^2}{2(PR - Q^2)} [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} - \sqrt{\Delta}], \quad (24)$$

$$k_3^2 = \frac{w^2}{N} \left(\frac{\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2}{\rho_{22}} \right), \quad (25)$$

$$\Delta = [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12}]^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{12} - \rho_{12}^2). \quad (26)$$

k_1 과 k_2 는 압력파의 파수이며, k_3 는 전단파의 파수를 의미한다. ρ_{11} , ρ_{12} , ρ_{22} 는 참고문헌에서 제시된 고체와 유체의 상호작용을 고려한 유효 밀도이며 아래와 같다.

$$\rho_{22} = \rho_f \phi, \quad (27)$$

$$\rho_{12} = (\rho_0 - \rho_f)\phi, \quad (28)$$

$$\rho_{11} = \rho_1 - \rho_{12}, \quad (29)$$

$$\rho_1 = (1 - \phi)\rho_s. \quad (30)$$

ρ_1 은 프레임의 밀도를 의미한다. 마지막으로 식 (8)의 μ_1 , μ_2 , μ_3 는 참고문헌[8]에서 아래와 같이 표현된다.

$$\mu_1 = \frac{Pk_1^2 - w^2\rho_{11}}{w^2\rho_{12} - Qk_1^2}, \quad (31)$$

$$\mu_2 = \frac{Pk_2^2 - w^2\rho_{11}}{w^2\rho_{12} - Qk_2^2}, \quad (32)$$

$$\mu_3 = -\frac{\rho_{12}}{\rho_{22}}. \quad (33)$$

3.2 경계조건

다공탄성 소음기에서는 크게 3가지 경계조건이 있다. 첫 번째는 공기와 다공질 탄성체 사이에서의 경계조건이고, 두 번째는 다공질 탄성체들 사이의 경계조건이다. 마지막으로 다공질 탄성체와 소음기의 벽 사이의 경계조건이 있다.

3.2.1 공기-다공탄성체

Nennig[7]는 단층 다공탄성 소음기에서 공기와 다공질 탄성체 사이의 경계조건을 아래와 같이 언급했다.

$$\sigma_{,1}^t \vec{n} = -p \vec{n}, \quad (34)$$

$$\phi_{,1} U_{,1} \cdot \vec{n} + (1 - \phi_{,1}) u_{,1} \cdot \vec{n} = w \cdot \vec{n}, \quad (35)$$

$$p_{p,1} = p. \quad (36)$$

여기서 응력 σ_{ij}^t 와 공극압 p_p 는 아래와 같다.

$$\sigma_{ij}^t = \sigma_{ij}^s + \sigma_{ij}^f, \quad (37)$$

$$p_p = \frac{-1}{3\phi} \text{tr}(\sigma^f). \quad (38)$$

식 (34)는 수직 방향 응력이 소음기 중앙부 공기의 압력과 같음을 의미한다. 식 (35)는 질량 유속의 보존을 의미한다. 식 (36)는 다공질 탄성체 내부의 공극압과 중앙부의 공기 압력이 같음을 의미한다.

3.2.2 다공 탄성체-다공 탄성체

Debergue[11]은 다공탄성체 사이의 경계 조건을 명시했다.

$$\sigma_{,n}^t \vec{n} = \sigma_{,n+1}^t \vec{n}, \quad (39)$$

$$u_{,n} = u_{,n+1}, \quad (40)$$

$$\phi_{,n}(U_{,n} \cdot \vec{n} - u_{,n} \cdot \vec{n}) = \phi_{,n+1}(U_{,n+1} \cdot \vec{n} - u_{,n+1} \cdot \vec{n}), \quad (41)$$

$$p_{p,n} = p_{p,n+1}. \quad (42)$$

첨자 n과 n+1 은 n번째와 n+1 번째 다공질 탄성체를 의미한다. 식 (39) 은 수직 방향 응력이 같다는 것을 의미한다. 식 (40) 는 프레임의 변위가 일치함을 의미한다. 식 (41)은 질량 유속의 연속성을 의미한다. 식 (42) 은 다공질 탄성체 내부의 공극압이 연속적임을 의미한다.

3.2.3 다공 탄성체-벽

다공질 탄성체와 소음기의 벽 사이의 경계조건은 아래와 같다.

$$u_{,N} \cdot \vec{n} = 0, \quad (43)$$

$$U_{,N} \cdot \vec{n} = 0. \quad (44)$$

식 (43)는 벽에서 프레임의 수직 방향 변위가 없음을 의미하고, 식 (44) 은 벽에서 유체의 수직 방향 변위가 없음을 의미한다.

3.3 행렬화와 모드

2.1절에서 2.3절까지 설명한 경계조건은 식 (9) ~ 식 (13)에서 언급한 계수들에 대한 선형 결합으로 나타난다.

$$X \equiv (A_{1,1}, B_{1,1}, A_{2,1}, B_{2,1}, A_{3,1}, B_{3,1}, A_{1,2}, B_{1,2}, \dots, A_{3,N}, B_{3,N}, A_0)^T. \quad (45)$$

X를 식 (45)처럼 정의하면 경계조건들은 아래와 같은 행렬 형태의 선형 방정식으로 표현 가능하다.

$$MX = 0. \quad (46)$$

여기서 M은 $6N+1 \times 6N+1$ 크기의 정사각행렬이며 z 방향 파수 k_z 에 관한 식이다. 구체적인 성분은 부록에 표시한다.

식 (46)은 $X=0$ 이라는 자명해를 가진다. 그러나 $X=0$ 물리적으로 의미가 없으므로 식 (46)이 비자명해를 가지기 위해서는 M의 행렬식이 0 이어야 한다. 따라서 식 (47)이 성립한다.

$$\det(M) = 0. \quad (47)$$

식 (47)은 k_z 에 관한 방정식이므로, 단일 변수 복소 함수의 해를 수치적으로 찾는 방법이 필요하다. Nennig[6]는 해를 빠짐없이 찾기 위해 편각 원리를 이용한 방법을 제시했지만, 뉴턴법이나 할선법 등의 널리 알려진 수치적인 방법을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 물러법을 사용했다.

해를 찾을 때 주의해야 할 점은 단연코 반올림 오차이다. 층이 많아지거나 소음기의 형상이 안 좋을수록 반올림 오차는 커진다. 모드매칭법은 유한요소법에 비해 속도면에서 장점을 가지고 있지만 반올림 오차의 영향을 예측하기 힘든 단점이 있다. 따라서 모드매칭법을 사용할 때는 반올림 오차에 매우 주의해야 한다.

3.4 모드 매칭

Nennig[8]의 방법을 다층으로 확장시켰다. 소음기 중앙부의 압력 p 는 아래와 같다.

$$p^i = \sum_{m=1}^K (e^{jk_{z,m}^+ z} \Phi_{p,m}^{i,+}(r) A_m^{i,+} + e^{jk_{z,m}^- z} \Phi_{p,m}^{i,-}(r) A_m^{i,-}). \quad (48)$$

여기서 $i = I, II, III$ 이며, 그림 2와 같이 I는 흡입구 영역을, II는 expansion chamber 영역을, III은 배출구 영역을 나타낸다. K 는 모드수이다. $k_{z,m}^+$ 는 양의 방향으로 진행하는 z 방향 파의 파수이며, i 영역의 모드 k_z 들 중 허수부의 절대값이 작은 순서로 정렬할 때 m 번째 원소이다. $\Phi_{p,m}^{i,\pm}$ 는 식 (5)와 같으며 압력 p 의 고유함수를 의미한다.

$$k_z^{i,\pm} = \pm \sqrt{k_0^2 - (k_{0r}^i)^2}. \quad (49)$$

흡입구와 배출구에서 식 (49)의 k_{0r} 은 $J_1(k_{0r} r_1) = 0$ 을 만족시키는 값을 찾으면 된다. 이제 식 (50), 식 (51)과 같이 표기법을 정의한다.

$$\Phi_p^{i,\pm} = [\Phi_{p,1}^{i,\pm}, \Phi_{p,2}^{i,\pm}, \dots, \Phi_{p,K}^{i,\pm}], \quad (50)$$

$$A^{i,\pm} = [A_1^{i,\pm}, A_2^{i,\pm}, \dots, A_K^{i,\pm}]^T. \quad (51)$$

그러면 $z=0$ 에서 식 (48) 은 아래와 같다.

$$p^I = \Phi_p^{I,+} A^{I,+} + \Phi_p^{I,-} A^{I,-}, \quad (52)$$

$$p^{II} = \Phi_p^{II,+} A^{II,+} + \Phi_p^{II,-} A^{II,-}. \quad (53)$$

$z=L$ 에서 식 (48)은 아래와 같다.

$$p^{II} = \Phi_p^{II,+} E^{II,+} A^{II,+} + \Phi_p^{II,-} E^{II,-} A^{II,-}, \quad (54)$$

$$p^{III} = \Phi_p^{III,+} E^{III,+} A^{III,+} + \Phi_p^{III,-} E^{III,-} A^{III,-}, \quad (55)$$

$$E^{i,\pm} = \text{diag}(e^{jk_z^{\pm}L}, \dots, e^{jk_z^{\pm}L}). \quad (56)$$

공기의 변위 w , 다공질 탄성체 내부의 프레임과 유체의 변위 u , U 에 대해서도 식 (52), (53)와 유사하게 정의한다.

$$\Phi_{w_z}^{i,\pm} = [\Phi_{w_z,1}^{i,\pm}, \Phi_{w_z,2}^{i,\pm}, \dots, \Phi_{w_z,K}^{i,\pm}], \quad (57)$$

$$w_z^i = \Phi_{w_z}^{i,+} A^{i,+} + \Phi_{w_z}^{i,-} A^{i,-}, \quad (58)$$

$$\Phi_{U_z}^{i,\pm} = [\Phi_{U_z,1}^{i,\pm}, \Phi_{U_z,2}^{i,\pm}, \dots, \Phi_{U_z,K}^{i,\pm}], \quad (59)$$

$$U_{z,n}^i = \Phi_{U_{z,n}}^{i,+} A^{i,+} + \Phi_{U_{z,n}}^{i,-} A^{i,-}, \quad (60)$$

$$\Phi_{u_z}^{i,\pm} = [\Phi_{u_z,1}^{i,\pm}, \Phi_{u_z,2}^{i,\pm}, \dots, \Phi_{u_z,K}^{i,\pm}], \quad (61)$$

$$u_{z,n}^i = \Phi_{u_{z,n}}^{i,+} A^{i,+} + \Phi_{u_{z,n}}^{i,-} A^{i,-}, \quad (62)$$

$$\Phi_{u_r}^{i,\pm} = [\Phi_{u_r,1}^{i,\pm}, \Phi_{u_r,2}^{i,\pm}, \dots, \Phi_{u_r,K}^{i,\pm}], \quad (63)$$

$$u_{r,n}^i = \Phi_{u_{r,n}}^{i,+} A^{i,+} + \Phi_{u_{r,n}}^{i,-} A^{i,-}. \quad (64)$$

u_r 은 프레임의 r 방향 변위를, u_z 는 프레임의 z 방향 변위를 의미한다.

$z=0$ 에서의 z 방향 경계조건은 아래와 같다.

$$p^I = p^{II}, \quad (65)$$

$$w_z^I = w_z^{II}, \quad (66)$$

$$U_{z,n}^{II} = 0, \quad (67)$$

$$u_{z,n}^{II} = 0, \quad (68)$$

$$u_{r,n}^{II} = 0. \quad (69)$$

식 (65)는 압력의 연속성을, 식 (66)는 공기 변위의 연속성을, 식 (67)은 유체의 z 방향 변위가 없음을, 식 (68), (69)은 흡음재의 변위가 없음을 의미한다. 위의 경계조건들을 적분 형태로 바꾸면 아래와 같다.

$$\int_0^{r_1} p^I \overline{\Psi_{p,m}} r dr = \int_0^{r_1} p^{II} \overline{\Psi_{p,m}} r dr, \quad (70)$$

$$\int_0^{r_1} w_z^I \overline{\Psi_{w_z,m}} r dr = \int_0^{r_1} w_z^{II} \overline{\Psi_{w_z,m}} r dr, \quad (71)$$

$$\int_{r_n}^{r_{n+1}} U_{z,n}^{II} \overline{\Psi_{U_{z,n},m}} r dr = 0, \quad (72)$$

$$\int_{r_n}^{r_{n+1}} u_{z,n}^{II} \overline{\Psi_{u_{z,n},m}} r dr = 0, \quad (73)$$

$$\int_{r_n}^{r_{n+1}} u_{r,n}^{II} \overline{\Psi_{u_{r,n},m}} r dr = 0. \quad (74)$$

여기서 $\Psi_{p,m}$, $\Psi_{w_z,m}$, $\Psi_{U_z,m}$, $\Psi_{u_z,m}$, $\Psi_{u_r,m}$ 는 고유함수이다. 고유함수를 사용하면 적분시에 직교성 등으로 성능면에서 이득을 볼 수 있으므로 모드매칭법에서 통상적으로 사용한다.

$z=0$ 에서 사용한 고유함수는 아래와 같다.

$$\Psi_{p,m} = \Phi_{p,m}^{I,-} \quad (75)$$

$$\Psi_{z,m} = \Phi_{w_z,m}^{II,+} \quad (76)$$

$$\Psi_{U_z,m} = \Phi_{U_z,m}^{II,+} \quad (77)$$

$$\Psi_{u_z,m} = \Phi_{u_z,m}^{II,+} \quad (78)$$

$$\Psi_{u_r,m} = \Phi_{u_r,m}^{II,+} \quad (79)$$

$z=L$ 에서는 아래와 같다.

$$\Psi_{p,m} = \Phi_{p,m}^{III,+} \quad (80)$$

$$\Psi_{z,m} = \Phi_{z,m}^{II,-} \quad (81)$$

$$\Psi_{U_z,m} = \Phi_{U_z,m}^{II,-} \quad (82)$$

$$\Psi_{u_z,m} = \Phi_{u_z,m}^{II,-} \quad (83)$$

$$\Psi_{u_r,m} = \Phi_{u_r,m}^{II,-} \quad (84)$$

본 연구에서는 반올림 오차를 줄이기 위해 Nennig[8]와 마찬가지로, 경계조건 (81), (82), (83)을 더해서 사용했다. 이제 아래와 같은 표기법을 정의한다. 이제 표기법을 아래와 같이 정의하자.

$$\Psi_p = [\Psi_{p,1}, \Psi_{p,2}, \dots, \Psi_{p,K}], \quad (85)$$

$$\Psi_{w_z} = [\Psi_{w_z,1}, \Psi_{w_z,2}, \dots, \Psi_{w_z,K}], \quad (86)$$

$$\Psi_{U_{z,n}} = [\Psi_{U_{z,n},1}, \Psi_{U_{z,n},2}, \dots, \Psi_{U_{z,n},K}], \quad (87)$$

$$\Psi_{u_{z,n}} = [\Psi_{u_{z,n},1}, \Psi_{u_{z,n},2}, \dots, \Psi_{u_{z,n},K}], \quad (88)$$

$$\Psi_{u_{r,n}} = [\Psi_{u_{r,n},1}, \Psi_{u_{r,n},2}, \dots, \Psi_{u_{r,n},K}]. \quad (89)$$

$$P^{i,\pm} = \int_0^{r_1} (\Psi_p)^* \Phi_p^{i,\pm} r dr, \quad (90)$$

$$W^{i,\pm} = \int_0^{r_1} (\Psi_{w_z})^* \Phi_{w_z}^{i,\pm} r dr, \quad (91)$$

$$\widehat{W}_n^{II,\pm} = \int_{r_n}^{r_{n+1}} [(\Psi_{U_{z,n}})^* \Phi_{U_{z,n}}^{II,\pm} + (\Psi_{u_{z,n}})^* \Phi_{u_{z,n}}^{II,\pm} + (\Psi_{u_{r,n}})^* \Phi_{u_{r,n}}^{II,\pm}] r dr, \quad (92)$$

여기서 * 는 켈레 전치이다. 식 (85) ~ (92) 의 표기법을 이용하면 $z=0$ 에서 경계조건은 아래와 같게 된다.

$$P^{I,+} A^{I,+} + P^{I,-} A^{I,-} = P^{II,+} A^{II,+} + P^{II,-} A^{II,-}, \quad (93)$$

$$W^{I,+} A^{I,+} + W^{I,-} A^{I,-} = W^{II,+} A^{II,+} + W^{II,-} A^{II,-}, \quad (94)$$

$$\widehat{W}_n^{II,+} A^{II,+} + \widehat{W}_n^{II,-} A^{II,-} = 0. \quad (95)$$

경계조건 식 (93) 는 $z=0$ 에서 압력의 연속성을, 식 (94)는 z 방향 변위의 연속성을, 식 (95)는 n 번째 흡음재의 z 방향 변위가 없음을

의미한다. 마지막으로 행렬 표기법을 아래와 같이 정의한다.

$$X_1 = \begin{pmatrix} P^{I,-} & -P^{II,+} \\ W^{I,-} & -W^{II,+} \\ 0 & -\widehat{W}_1^{II,+} \\ 0 & -\widehat{W}_2^{II,+} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & -\widehat{W}_N^{II,+} \end{pmatrix}, \quad (96)$$

$$Y_1 = \begin{pmatrix} -P^{I,+} & P^{II,-} \\ -W^{I,+} & W^{II,-} \\ 0 & \widehat{W}_1^{II,-} \\ 0 & \widehat{W}_2^{II,-} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \widehat{W}_N^{II,-} \end{pmatrix}, \quad (97)$$

$$X_2 = \begin{pmatrix} P^{III,+} & -P^{II,-} \\ W^{III,+} & -W^{II,-} \\ 0 & -\widehat{W}_1^{II,-} \\ 0 & -\widehat{W}_2^{II,-} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & -\widehat{W}_N^{II,-} \end{pmatrix}, \quad (98)$$

$$Y_2 = \begin{pmatrix} -P^{III,-} & P^{II,+} \\ -W^{III,-} & W^{II,+} \\ 0 & \widehat{W}_1^{II,+} \\ 0 & \widehat{W}_2^{II,+} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \widehat{W}_N^{II,+} \end{pmatrix}. \quad (99)$$

$$E_X = \text{diag}(e^{jk_{z,1}^{III+L}}, \dots, e^{jk_{z,K}^{III+L}}, e^{jk_{z,1}^{II-L}}, \dots, e^{jk_{z,K}^{II-L}}), \quad (100)$$

$$E_Y = \text{diag}(e^{jk_{z,1}^{III-L}}, \dots, e^{jk_{z,K}^{III-L}}, e^{jk_{z,1}^{II+L}}, \dots, e^{jk_{z,K}^{II+L}}). \quad (101)$$

위의 표기법들을 이용하면, 경계조건 식 (93) ~ 식 (95) 는 아래와 같이 표기 가능하다.

$$X_1 \begin{pmatrix} A^{I,-} \\ A^{II,+} \end{pmatrix} = Y_1 \begin{pmatrix} A^{I,+} \\ A^{II,-} \end{pmatrix}. \quad (102)$$

$$X_2 E_X \begin{pmatrix} A^{III,+} \\ A^{II,-} \end{pmatrix} = Y_2 E_Y \begin{pmatrix} A^{III,-} \\ A^{II,+} \end{pmatrix}. \quad (103)$$

식 (102)는 $z=0$ 에서의 경계조건이며, 식 (103) 은 $z=L$ 에서의 경계 조건이다. 연립방정식 (102), (103)을 푸는 방법은 아래와 같다.

일단 $A^{I,-} = 0$, $A^{II,-} = 0$, $A^{I,+} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 을 가정하고 식 (102)를 풀어서 $A^{II,+}$ 를 구한다. 그리고 $A^{III,-} = 0$ 을 가정하고 식 (103)을 풀어서 $A^{II,-}$ 를 구한다. 그렇게 구한 $A^{II,-}$ 를 이용해서 다시 식 (102)를 풀어서 $A^{II,+}$ 를 구한다. 이 과정을 수렴할 때까지 반복한다.

연립방정식을 풀 때는 MATLAB 의 pinv 명령어를 이용하며, 변위에는 $(\rho_0 c_0 w)^2$ 를 곱해주어 크기를 맞춰준다. 반복 회수가 커질수록 반올림 오차가 줄어든다.

제 4 장 시뮬레이션 및 결과

4.1 단순확장형 소음기

시뮬레이션에 사용할 소음기는 표 1과 같다. 소음기 X, 소음기 Y, 소음기 Z 총 3 종류의 소음기에 대해서 시뮬레이션을 수행한다. 소음기들의 개형은 각각 그림 3-1, 그림 3-2, 그림 3-3 과 같다. 소음기 X, Y, Z는 모두 들어가는 흡음재의 양이 같게 설계되었다. 그렇게 설정한 이유는 같은 양의 흡음재를 사용했을 때, 소음기의 형상에 따라 어떤 변화가 있는지를 확인하기 위해서다.

소음기 Y는 소음기 X와 길이가 같고 흡음재의 양도 같지만 팽창률이 다르게 설계되었다. 소음기 Z는 소음기 X와 흡음재의 양과 팽창률이 같지만 소음기 Z의 길이는 소음기 X의 2배로 설계되었다.

그림 4에는 소음기 X, Y, Z 의 음향투과손실이 나타나 있다. 계산은 모드매칭법으로 수행했다. 소음기 X와 Y는 서로 길이가 같게 설계되었기 때문에 투과 손실(TL)이 0 이 되는 주파수가 같은 것을 알 수 있다. 또, 소음기 X의 팽창률이 소음기 Y보다 크기 때문에 소음기 X의 TL이 소음기 Y보다 크다. 하지만 소음기 Z의 경우 팽창률이 소음기 X와 같게 설계되었기 때문에 TL의 최대값이 같음을 알 수 있다. 그러나 소음기 Z의 경우 소음기 X보다 길이가 2배 길게 설계되었으므로 소음기 Z는 TL이 0 이 되는 최소주파수가 소음기 X의 1/2 배로 나타났다.

표 1. 소음기의 크기

단위 [m]	소음기 X	소음기 Y	소음기 Z
L	0.175	0.175	0.35
r_1	0.01	0.037	0.00707
r_2	0.05701	0.05701	0.04031
r_3	0.08	0.08888	0.05657

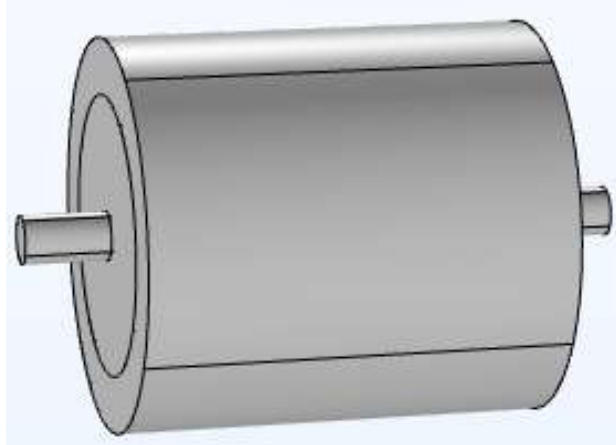


그림 3-1. 소음기 X의 개형

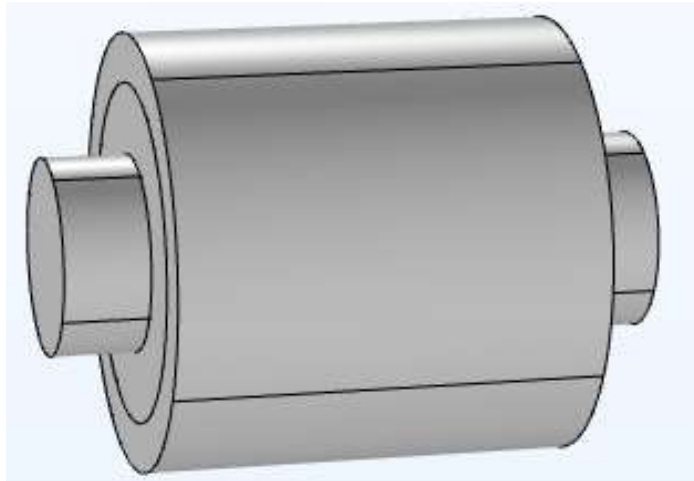


그림 3-2. 소음기 Y의 개형



그림 3-3. 소음기 Z의 개형

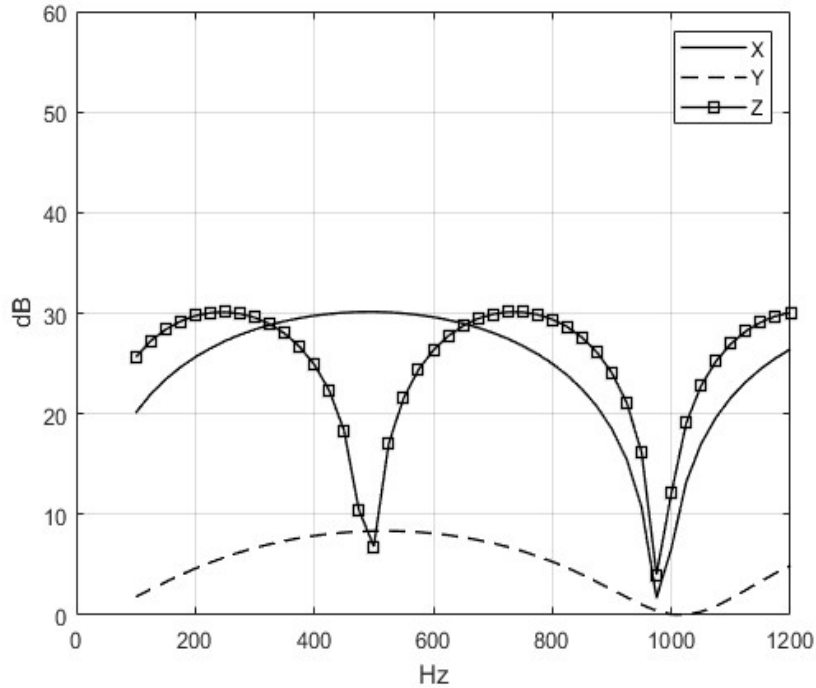


그림 4. 단순확장형 소음기 X, Y, Z 의 TL

4.2 단층 다공탄성 소음기

시뮬레이션에 사용할 흡음재는 3 종류로 물성치는 표 2와 같다. 흡음재의 물성치는 Panneton[12] 의 논문에서 가져왔다.

단층 다공탄성 소음기 내부에는 그림 2의 $r_1 \leq r \leq r_{N+1}$ 영역에 다공질 탄성 흡음재가 채워져 있다. 또 이후, 단층 소음기 X안에 흡음재 A를 채운 소음기를 이후로 소음기 X-A 라고 표기하겠다.

표 2. 흡음재 물성치[12]

흡음재	σ (kNs/m ⁴)	ϕ	α_∞	Λ (μ m)	Λ' (μ m)	ρ_1 (kg/m ³)	N (kPa)	ν
A	9	0.99	1	192	384	16.3	220(1-0.1j)	0
B	13.5	0.98	1.7	80	160	30	200(1-0.1j)	0.35
C	25	0.95	1.4	93.2	93.2	30	21(1-0.05j)	0

같은 개형의 소음기라도 흡음재의 종류에 따라 완전히 다른 음향투과손실을 가진다. 그림 5-1, 5-2, 5-3 에는 단층 소음기의 흡음재의 종류에 따른 TL의 개형이 나타나 있다. 당연하게도 흡음재를 채웠을 때의 TL이 아무것도 채우지 않았을 경우보다 대체적으로 높게 나왔다.

소음기 X-C, Z-C의 경우 200Hz 정도의 저주파수 구간에서 단순확장형 소음기보다 성능이 좋지 않은 영역이 있다. 이는 저주파수에서 에너지의 dissipation 효과가 크지 않은데 반해 흡음재를 채우면서 단순확장형 소음기에서 나타나던 파동의 상쇄 간섭 효과는 줄어들었기 때문이다.

또 다공탄성 소음기 X, Y, Z 는 들어간 흡음재의 부피가 같도록 설계되었는데, 성능을 보면 [소음기 Z > 소음기 X > 소음기 Y] 임을 알 수 있다. 소음기 Y의 성능이 소음기 X 보다 낮은 이유는 소음기 Y가 X 보다 팽창률이 낮게 설계되었기 때문이다. 그러나 단순확장형 소음기 Z와 X는 TL의 절대값이 같지만, 다공탄성 흡음재를 채우면 길이가 긴 소음기 Z 쪽이 X보다 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

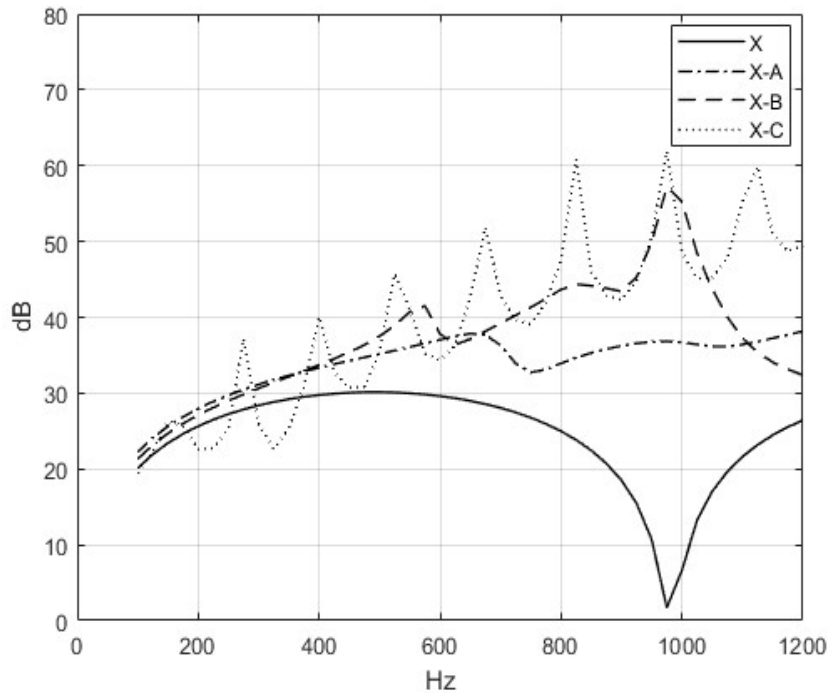


그림 5-1. 소음기 X, X-A, X-B, X-C 의 TL

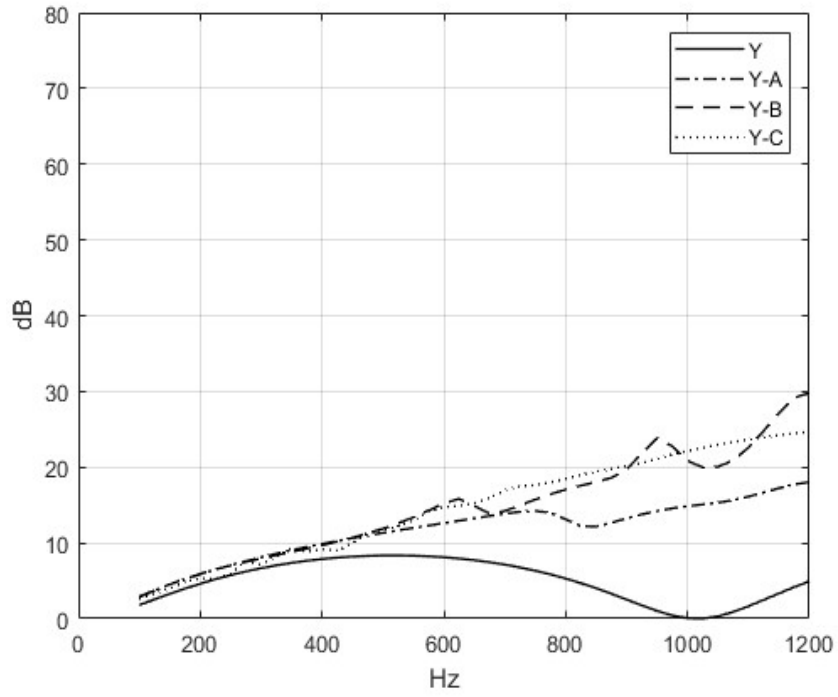


그림 5-2. 소음기 Y, Y-A, Y-B, Y-C 의 TL

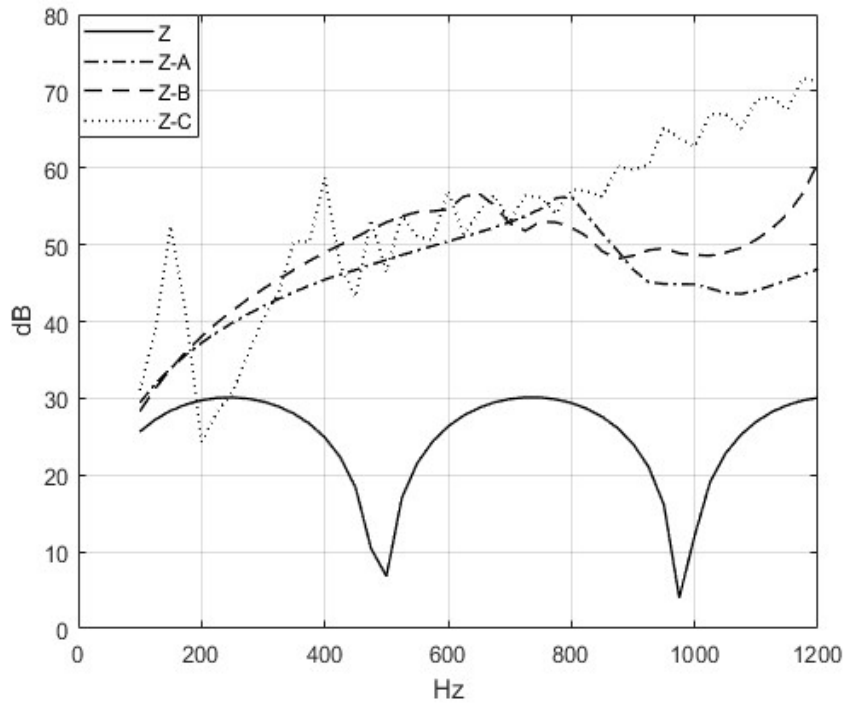


그림 5-3. 소음기 Z, Z-A, Z-B, Z-C 의 TL

4.3 다층 다공탄성 소음기

이번 절에서 사용할 다층 소음기는 앞 절에서 사용한 표 1 과 같고 흡음재 또한 앞 절과 동일하게 표2와 같다. 그림 2에서 소음기 X의 $r_1 \leq r \leq r_2$ 영역에 흡음재 A를 채우고, $r_2 \leq r \leq r_3$ 영역에 흡음재 B를 채운 소음기를 이후 소음기 X-AB 로 부르겠다.

이론상, 소음기의 두 층에 모두 같은 물질을 채운 경우는 단층 소음기와 다층 소음기의 TL이 일치해야 한다. 그림 6-1에는 다층 다공탄성 소음기 X에 동일한 흡음재 A를 2개 채운 소음기 X-AA가 단층 소음기 X-A의 경우의 TL과 같다는 것이 나타나 있다. 그림 6-2 에서 흡음재 A를 흡음재 B로 바꿔서 시뮬레이션을 수행해도 두 경우가 일치한다.

다음은 다층 소음기 X에서 흡음재의 순서를 바꾸면 어떤 현상이 일어나는지를 보겠다. 그림 7-1을 보면 소음기 X-AB 의 음향투과손실은 소음기 X-A와 개형이 비슷하고, 소음기 X-BA은 소음기 X-B 와 비슷함을 알 수 있다. 그림 7-2 도 마찬가지로 소음기 X-AC와 소음기 X-CA를 비교하면, 소음기 X-AC 는 소음기 X-A 와, 소음기 X-CA는 소음기 X-C 와 음향투과손실의 개형이 닮아있다. 이를 통해 소음기 X의 공명 주파수는 중심에서 가까운 쪽의 흡음재와 더 크게 연관이 있다는 것을 확인할 수 있다.

그러나 소음기 Z의 소음기 A와 차이를 보였다. 그림 8-2에서 소음기 Z-CA와 소음기 Z-C 는 비슷한 TL의 경향을 보이지만, 소음기 Z-AC의 경우는 Z-A와 비슷하다고 말하기 힘들다. 그림 8-1에서 소음기 Z-AB와 Z-BA 도 마찬가지로 단층 소음기와의 큰 연관성은 찾기 힘들었다.

소음기 Z-BA 같은 경우는 600Hz ~ 800Hz 사이의 주파수에서 공명 현상으로 상당히 큰 소음 감소 효과를 보여주었다. 이런 현상을 잘 이용하면 특정 주파수의 소음을 줄이는데 유용한 다층 소음기를 설계할 수 있을 것이다.

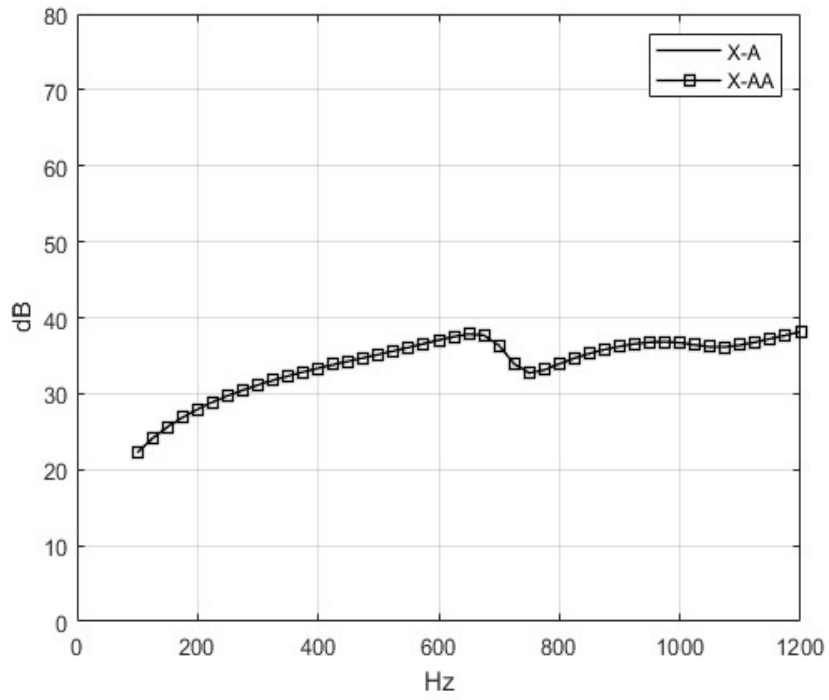


그림 6-1. 소음기 X-A 와 소음기 X-AA 의 TL 비교

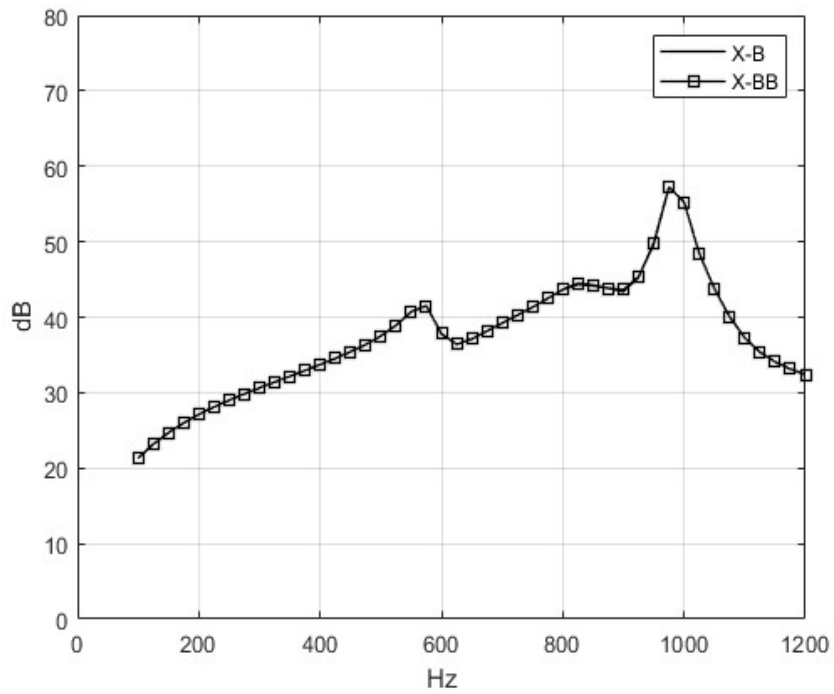


그림 6-2. 소음기 X-B 와 소음기 X-BB 의 TL 비교

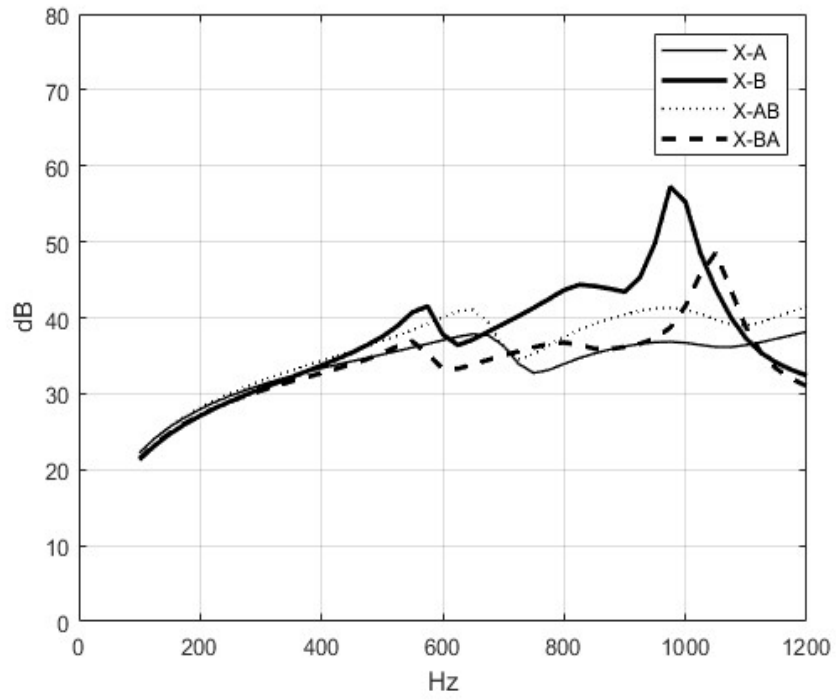


그림 7-1. 소음기 X-AB 와 소음기 X-BA 의 TL 비교

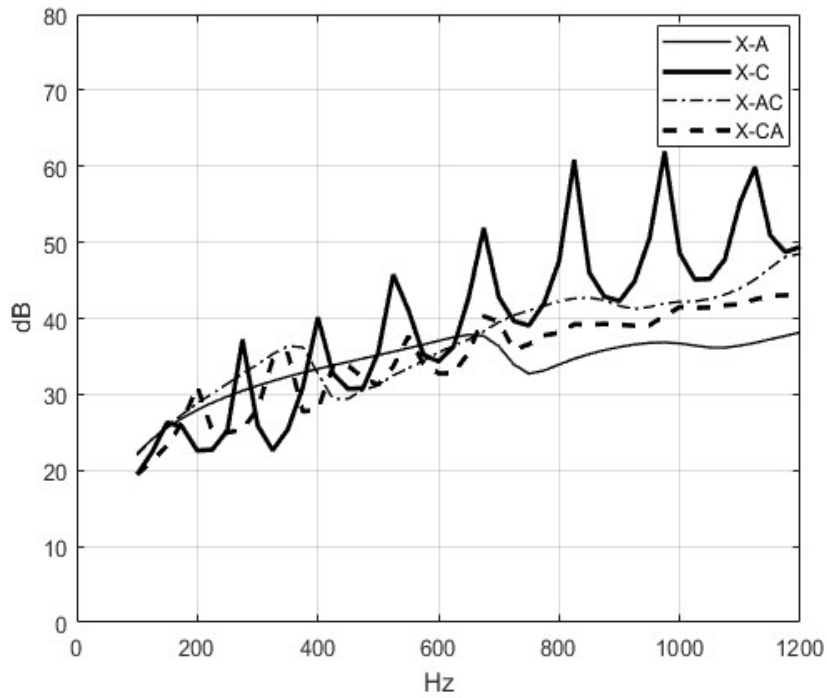


그림 7-2. 소음기 X-AC 와 소음기 X-CA 의 TL 비교

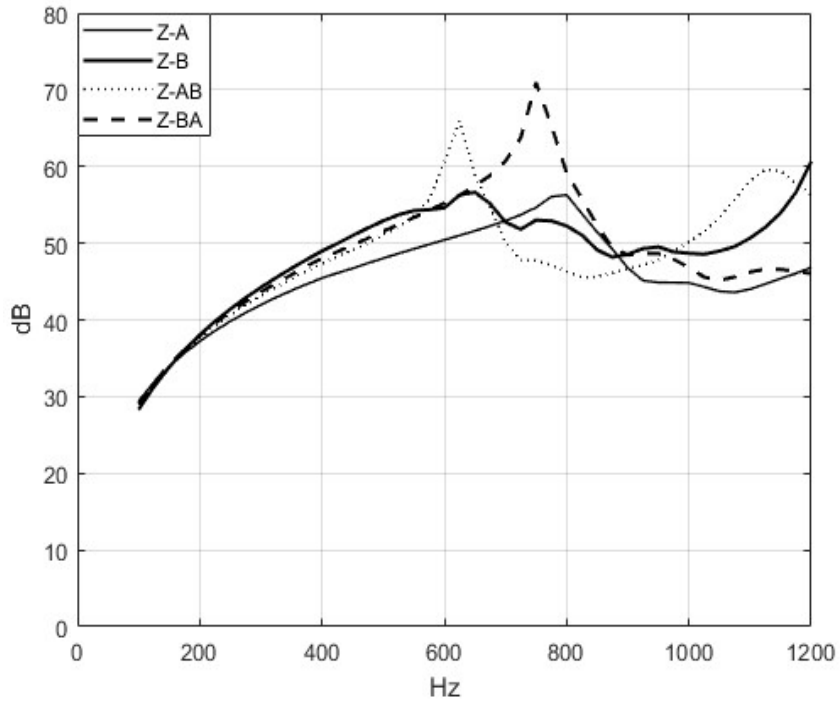


그림 8-1. 소음기 Z-AB 와 소음기 Z-BA 의 TL 비교

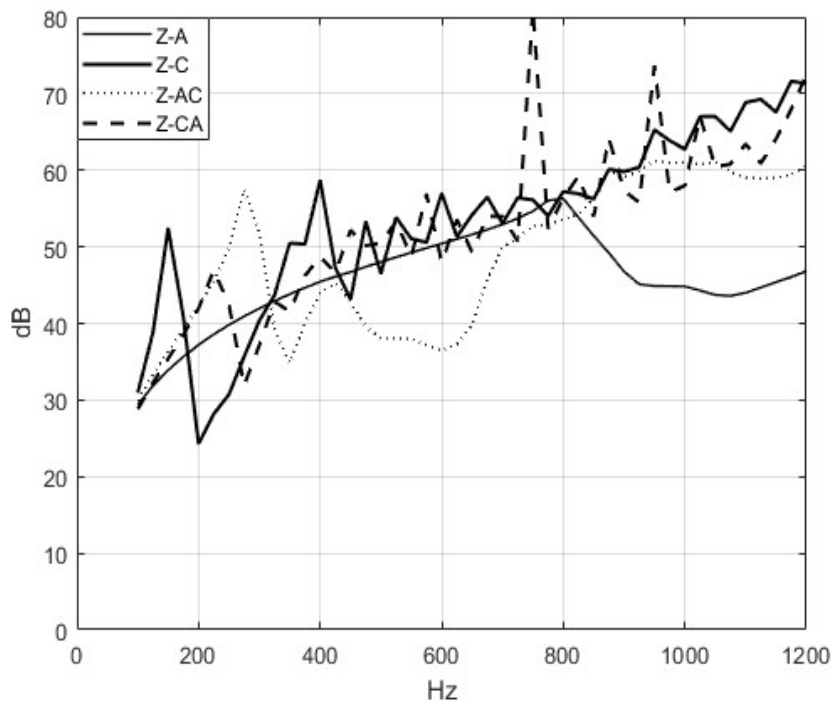


그림 8-2. 소음기 Z-AC 와 소음기 Z-CA 의 TL 비교

4.4 모드매칭법과 유한요소법

이번 절에서는 본 연구에서 제시한 모드매칭법(MMM)을 유한요소법(FEM)과 비교하겠다. 이를 통해 모드매칭법의 장점 및 유효성을 보여주고자 한다. 본 연구에서 사용한 유한요소법은 COMSOL Multiphysics 상용 소프트웨어를 사용했다. 또 시뮬레이션을 수행한 CPU는 Intel 사의 i7-12700KF를 사용했다.

El Sharkawy[2]는 단순확장형 소음기에 대해서 실험을 수행했으며, 해석적인 모드매칭법이 실제 실험 계측 결과와 거의 일치한다는 것을 보였다. Mehdizadeh[13]은 Delany-Bazley 모델이 적용된 다공성 물질이 채워진 소음기에 대해 유한요소법으로 음향투과손실을 구했고, 이것이 실험으로 측정된 음향투과손실과 일치함을 보여주었다. 본 연구에서는 실험을 실제로 하지는 않았지만, 위에 소개한 것처럼 유한요소법의 유효성은 이미 검증되어 있으므로 모드매칭법의 유효성을 검증하기 위한 수단으로 유한요소법을 사용한다.

유한요소법에서 메쉬를 잘게 나누면 정확도가 올라가는 대신 계산 시간이 많이 걸린다. 그러한 단점을 잘 보여주기 위해 소음기 X-C 를 선택했다. 유한요소법의 DoF 에 따른 소음기의 형상은 그림 9-1, 그림 9-3, 그림 9-5, 그림 9-7, 그림 9-9, 그림 9-11 과 같다. 그림 9-2, 그림 9-4, 그림 9-6, 그림 9-8, 그림 9-10, 그림 9-12 에는 이에 대응하는 음향투과손실이 나타나 있다. DoF 가 커질수록 점점 모드매칭법에서 구한 TL에 유한요소법의 결과가 수렴하는 것을 알 수 있다.

그림 9-13 에서 유한요소법의 DoF 에 따른 계산 시간을 모드매칭법의 계산 시간과 비교했다. 모드매칭법의 계산 시간은 136초가 걸렸는데, 유한요소법의 DoF 에 따라 계산 시간이 136초 보다 작을수도 있고 클 수도 있지만 그림 9-12의 결과처럼 제대로 된 음향투과손실을 얻기 위해서는 상당히 큰 DoF가 필요함을 알 수 있다. DoF=238254 인 경우, 계산 시간이 1시간 15분 이상이 걸린다. 이는 모드 매칭법의 계산시간 2분 16초보다 33배 이상 큰 시간이며, 모드매칭법의 장점이 드러나는 부분이다.

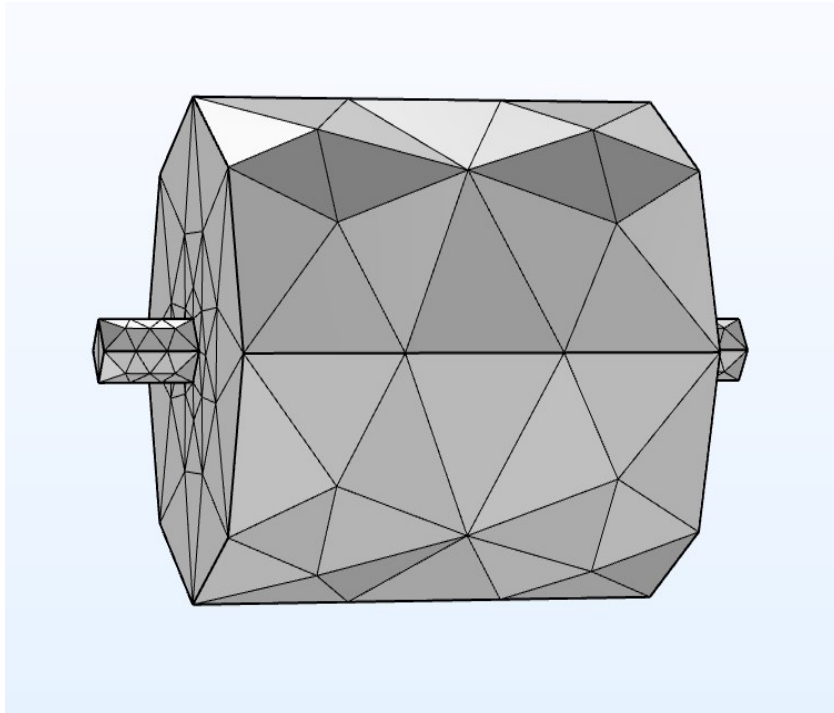


그림 9-1. 소음기 X-C 의 형상. DoF=10043.

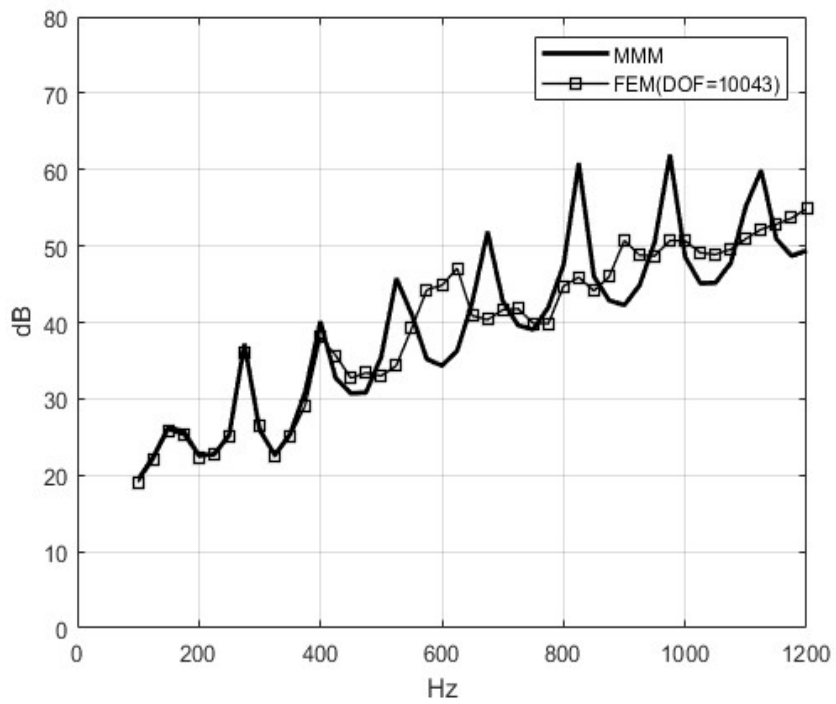


그림 9-2. 소음기 X-C 의 음향투과손실. DoF=10043.

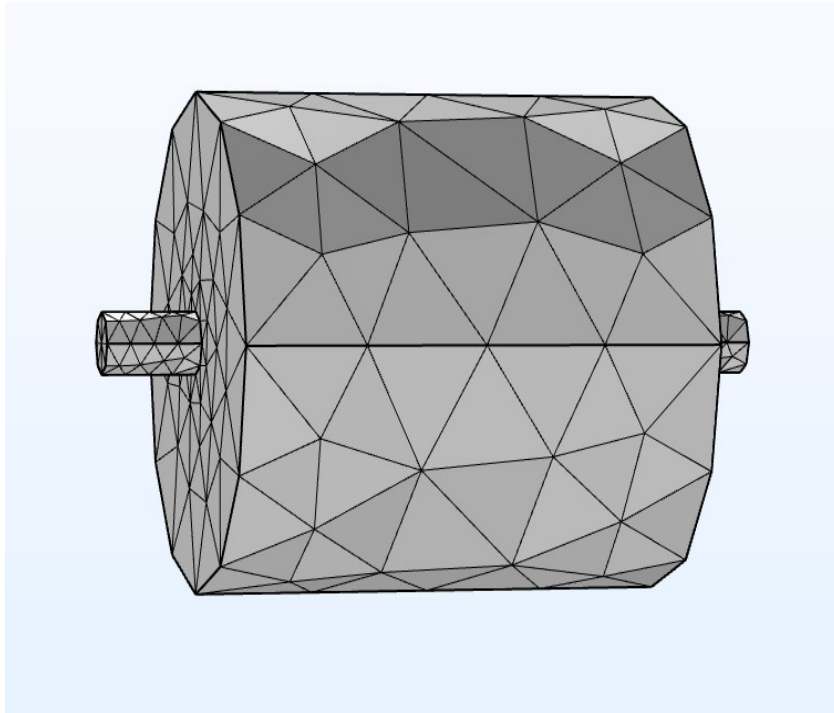


그림 9-3. 소음기 X-C 의 형상. DoF=18823.

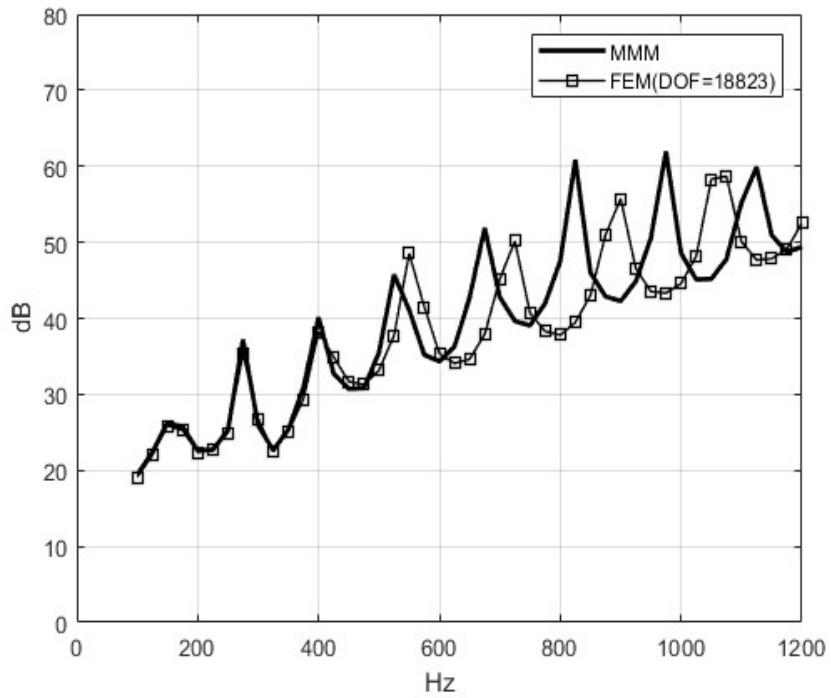


그림 9-4. 소음기 X-C 의 음향투과손실. DoF=18823.

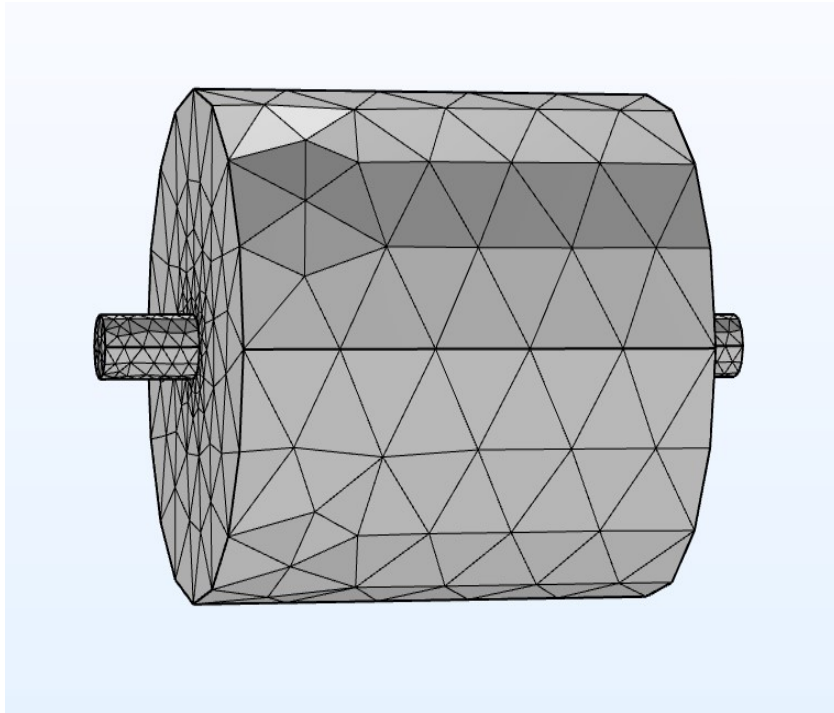


그림 9-5. 소음기 X-C 의 형상. DoF=41423.

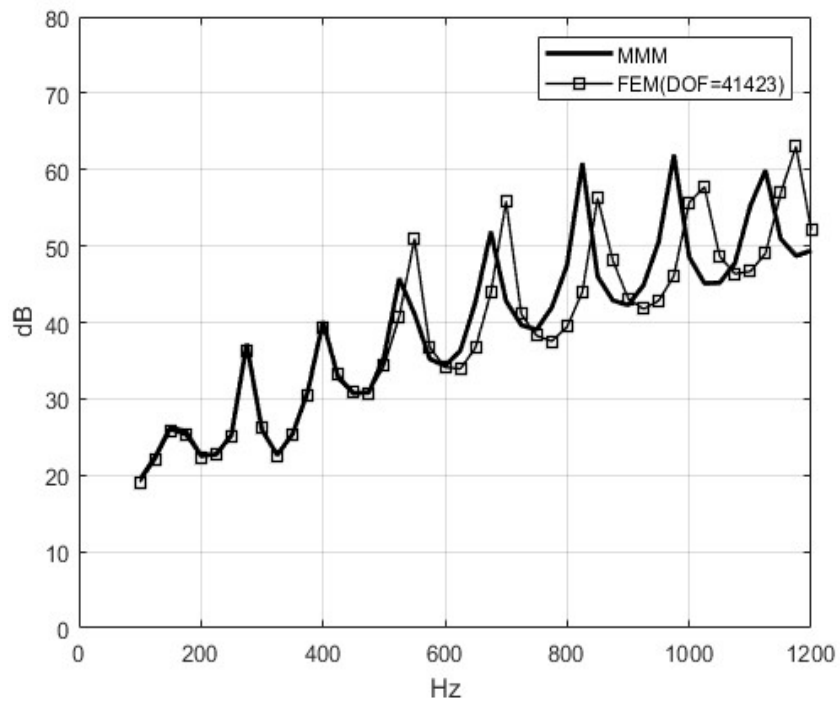


그림 9-6. 소음기 X-C 의 음향투과손실. DoF=41423.

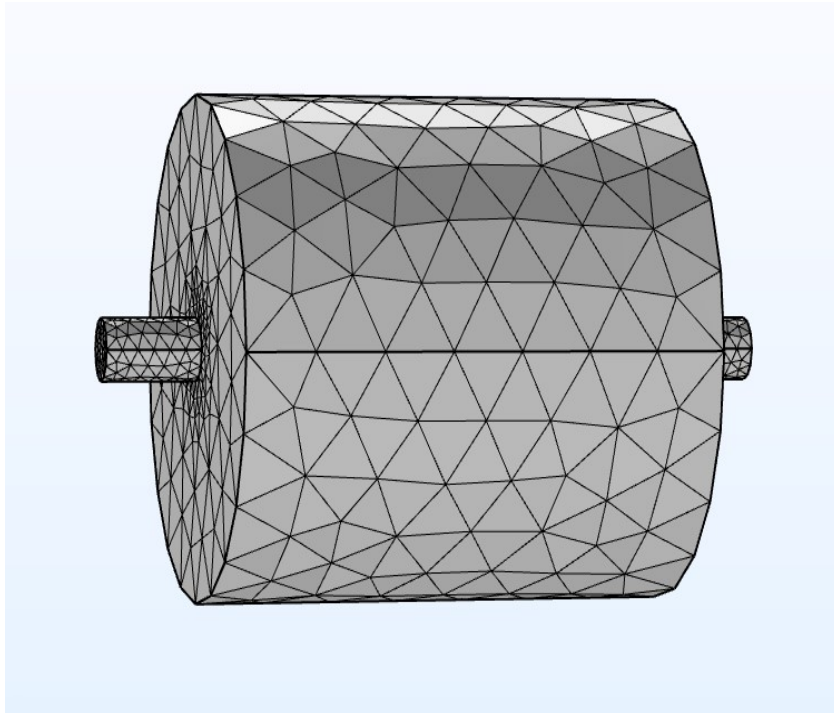


그림 9-7. 소음기 X-C 의 형상. DoF=68724.

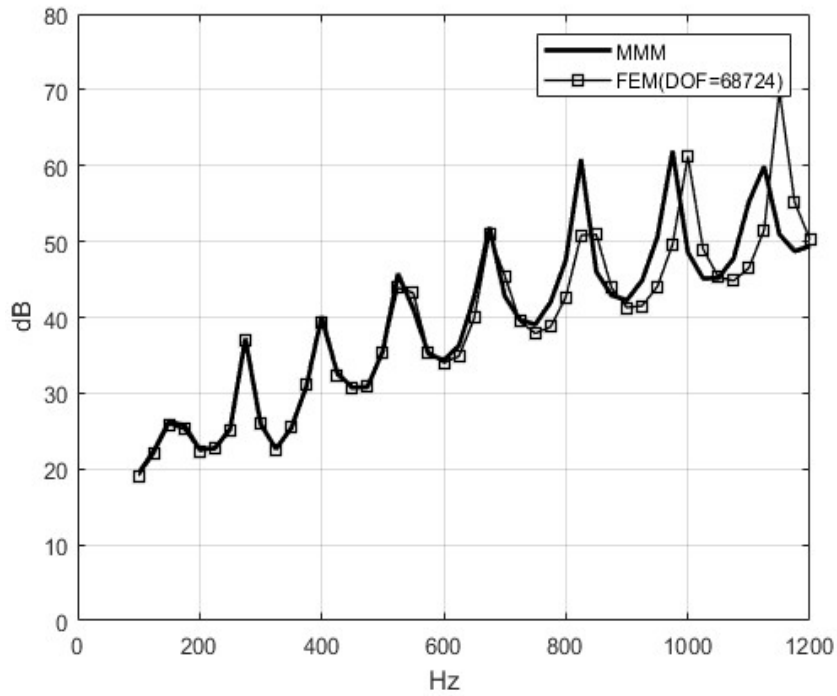


그림 9-8. 소음기 X-C 의 음향투과손실. DoF=68724.

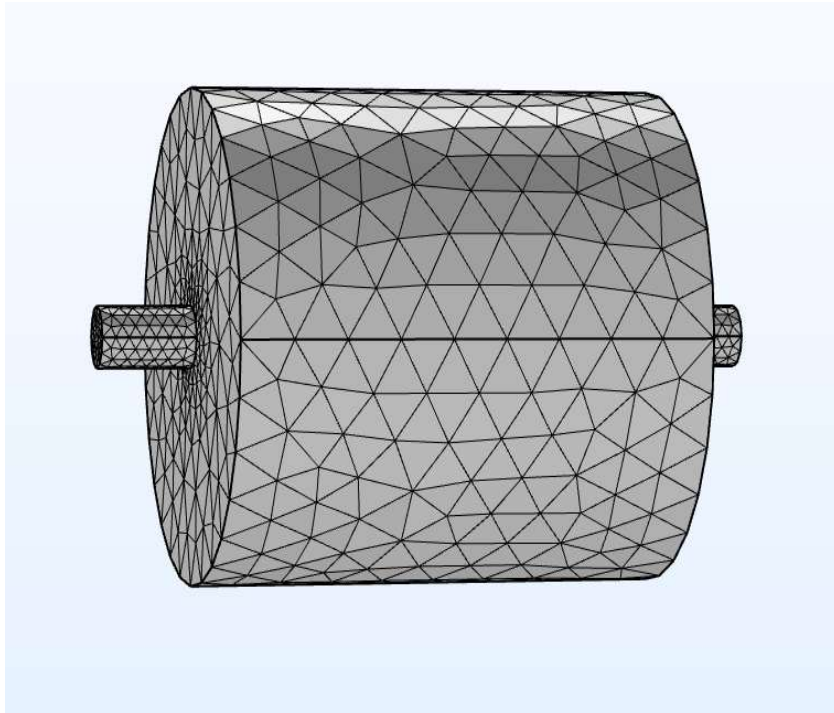


그림 9-9. 소음기 X-C 의 형상. DoF=115041.

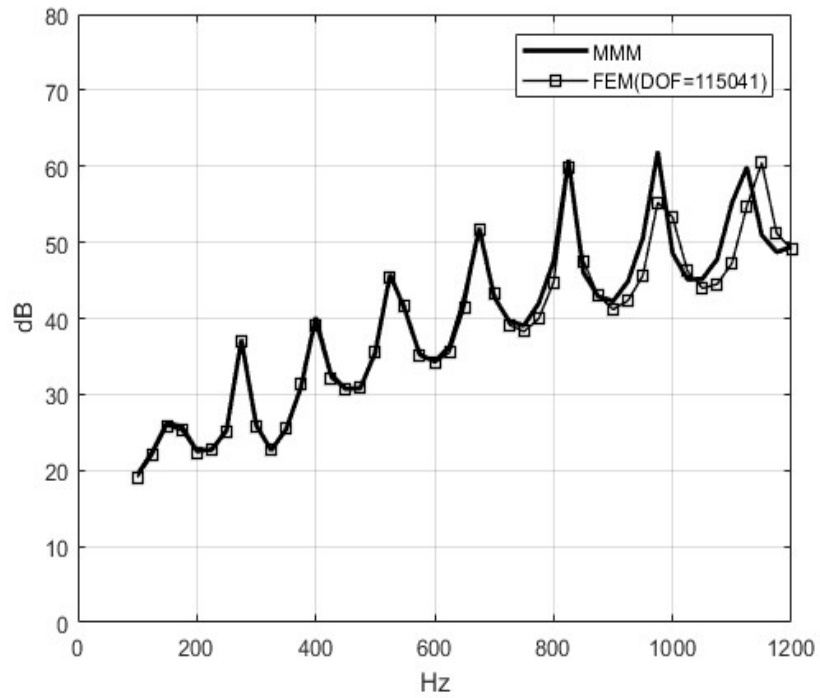


그림 9-10. 소음기 X-C 의 음향투과손실. DoF=115041.

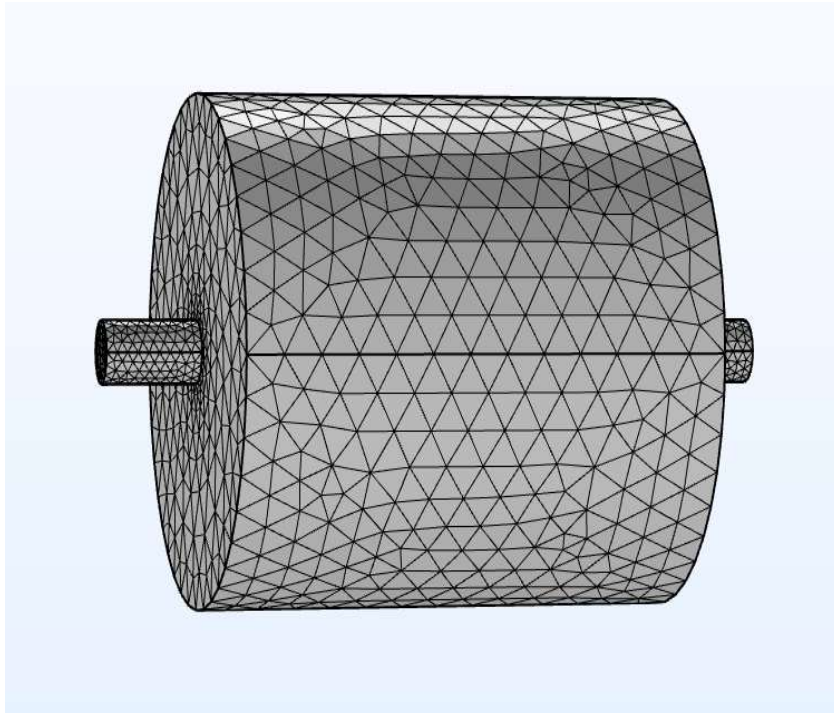


그림 9-11. 소음기 X-C 의 형상. DoF=238254.

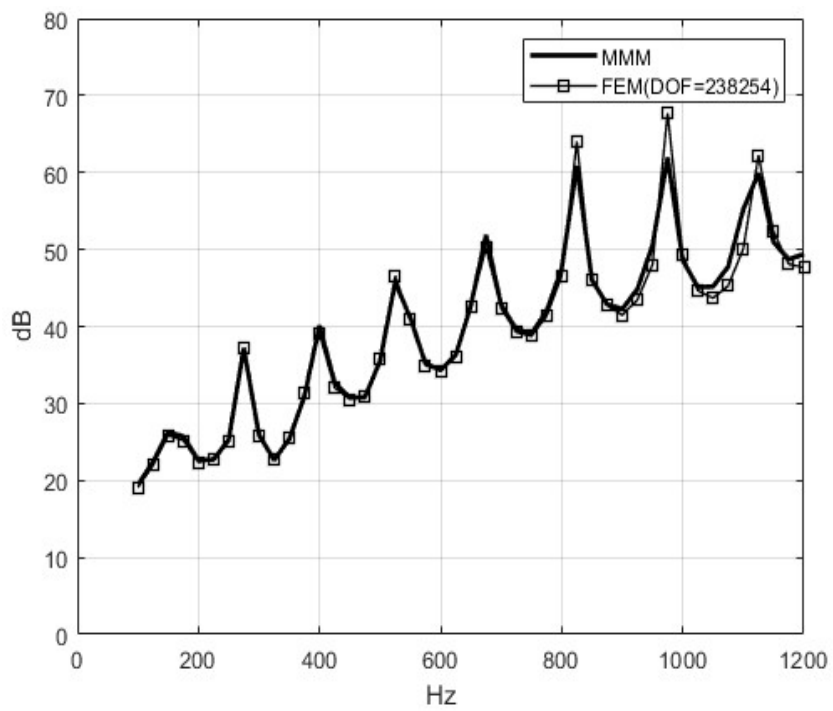


그림 9-12. 소음기 X-C 의 음향투과손실. DoF=238254.

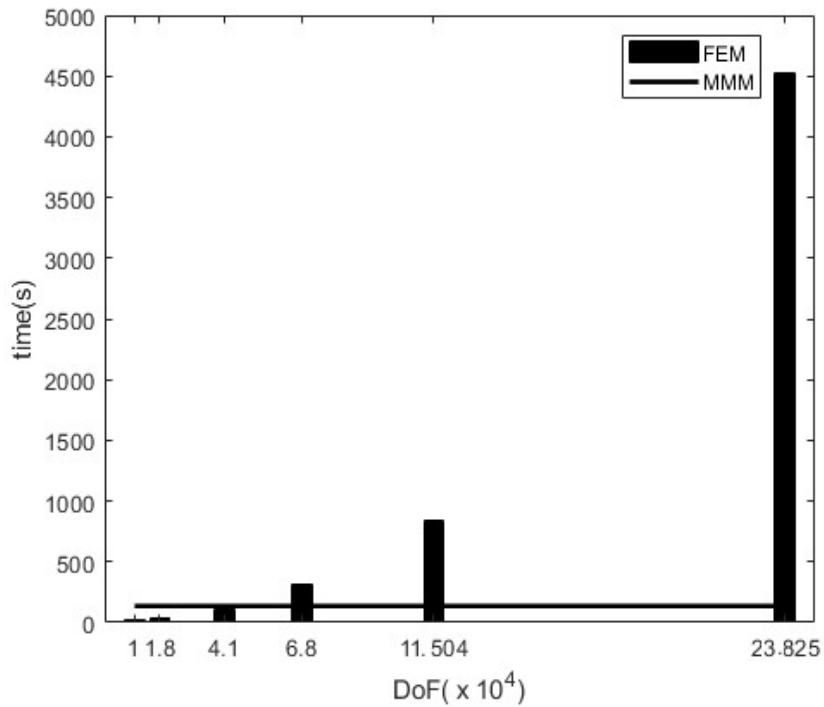


그림 9-13. DoF에 따른 FEM과 MMM의 계산 시간 비교.

그림 10-1에서는 다층 소음기 X-AB에 대한 음향투과손실을 모드매칭법과 유한요소법의 결과로 비교했다. X-AB의 경우 DoF가 작아도 유한요소법과 모드매칭법의 결과가 일치했다. 그러나 그림 10-2에서 다층 소음기 Z-CA의 경우 저주파수에서는 일치하다가 고주파수에서는 다르게 나왔는데 이는 그림 9-12에서처럼 유한요소법에서 메쉬를 더 조밀하게 짜면 해결되는 문제이다. 이로써 본 연구에서 제시한 모드매칭법의 유효성이 검증되었다.

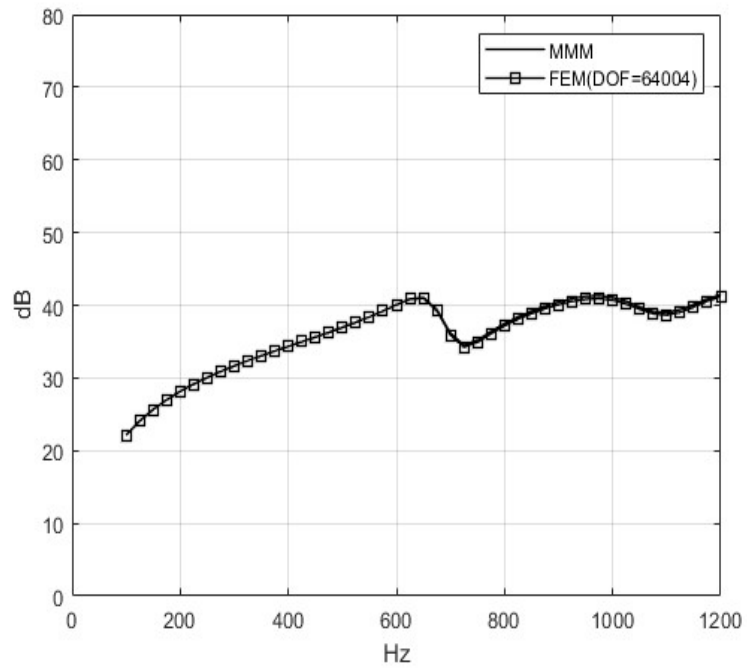


그림 10-1. 소음기 X-AB 의 음향투과손실. MMM과 FEM 비교.

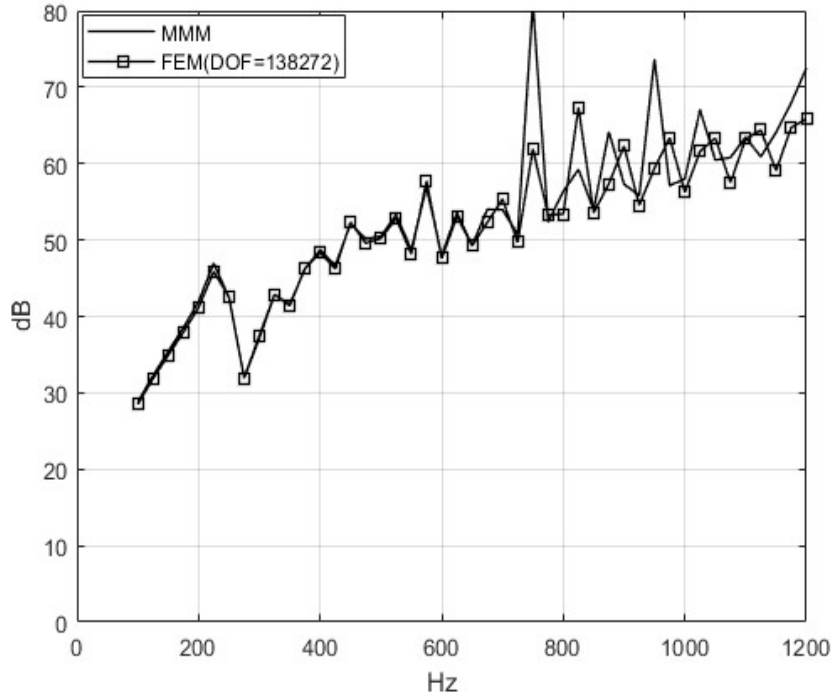


그림 10-2. 소음기 Z-CA 의 음향투과손실. MMM과 FEM 비교.

제 4 장 결론

본 연구는 소음기 제작에 필요한 기초 연구로, 소음기의 기존 모델에 대해서 다뤘고, 다층 다공탄성 소음기에 대한 해석 방법(모드매칭법)을 설명했다. 그 과정에서 Biot 모델을 이용해 흡음재를 모델링하고 경계조건들을 수식화했다. 그리고 여러 가지 소음기와 흡음재들에 대해서 수치적인 시뮬레이션을 수행했다.

단순확장형 소음기의 음향투과손실과 다공탄성 소음기의 음향투과손실이 비교되었다. 그것을 통해, 단순확장형 소음기의 음향투과손실의 최대값이 다층 다공탄성 소음기의 음향투과손실과 일정부분 양의 상관관계가 있음을 보였다.

다층 다공탄성 소음기의 특성에 대해서 연구되었다. 다층 소음기에 대해서 수치 시뮬레이션을 수행한 결과, 소음기의 중심에서 가까운 쪽에 채워진 흡음재가 다층 소음기의 전체 음향투과손실에 영향을 크게 주는 현상이 발견되었다. 그러나 길이가 긴 소음기에 대해서까지는 일반화 할 수 없었다.

소음기를 다층으로 만드는 것으로 공진 주파수를 바꿀 수 있음을 보여주는 것으로 추후 특정 주파수의 소음을 줄이는 소음기를 두 가지 흡음재를 조합해서 제작할 수 있는 가능성을 보였다.

유한요소법과 본 연구에서 소개한 모드매칭법을 비교했다. 모드매칭법이 유한요소법보다 33배 이상의 효율을 보여주는 사례를 통해 모드매칭법의 장점을 설명했다. 또 유한요소법을 통해 실제 실험 계측된 값을 예측할 수 있었던 기존 연구들을 소개했다. 그리고 다층 다공탄성 소음기에 대해서 모드매칭법과 유한요소법의 결과가 일치하는 것을 보여줌으로써 본 연구에서 소개한 모드매칭법이 유효함을 입증했다.

부록

식 (46)의 N 층 다공탄성 소음기의 경계조건에서 행렬 M의 성분은 아래와 같다. N 개의 흡음재 중에서 중심에서 n번째로 가까운 흡음재를 첨자 ,n으로 표기한다.

$$C_{1,1} = -H_{1,1}J_0(k_{1r,1}r_1) + \frac{2N_{,1}k_{1r,1}}{r_1}J_1(k_{1r,1}r_1) \quad (A1)$$

$$C_{1,2} = -H_{1,1}Y_0(k_{1r,1}r_1) + \frac{2N_{,1}k_{1r,1}}{r_1}Y_1(k_{1r,1}r_1) \quad (A2)$$

$$C_{1,3} = -H_{2,1}J_0(k_{2r,1}r_1) + \frac{2N_{,1}k_{2r,1}}{r_1}J_1(k_{2r,1}r_1) \quad (A3)$$

$$C_{1,4} = -H_{2,1}Y_0(k_{2r,1}r_1) + \frac{2N_{,1}k_{2r,1}}{r_1}Y_1(k_{2r,1}r_1) \quad (A4)$$

$$C_{1,5} = 2N_{,1}jk_z \left[-\frac{1}{r_1}J_1(k_{3r,1}r_1) + k_{3r,1}J_0(k_{3r,1}r_1) \right] \quad (A5)$$

$$C_{1,6} = 2N_{,1}jk_z \left[-\frac{1}{r_1}Y_1(k_{3r,1}r_1) + k_{3r,1}Y_0(k_{3r,1}r_1) \right] \quad (A6)$$

$$C_{1,6N+1} = \rho_0 c_0^2 k_0^2 J_0(k_{0r}r_1) \quad (A7)$$

$$C_{2,1} = -2jN_{,1}k_z J_1(k_{1r,1}r_1)k_{1r,1} \quad (B1)$$

$$C_{2,2} = -2jN_{,1}k_z Y_1(k_{1r,1}r_1)k_{1r,1} \quad (B2)$$

$$C_{2,3} = -2jN_{,1}k_z J_1(k_{2r,1}r_1)k_{2r,1} \quad (B3)$$

$$C_{2,4} = -2jN_{,1}k_z Y_1(k_{2r,1}r_1)k_{2r,1} \quad (B4)$$

$$C_{2,5} = N_{,1}J_1(k_{3r,1}r_1)(-k_z^2 + k_{3r,1}^2) \quad (B5)$$

$$C_{2,6} = N_{,1}Y_1(k_{3r,1}r_1)(-k_z^2 + k_{3r,1}^2) \quad (B6)$$

$$C_{3,1} = \frac{k_{1,1}^2}{\phi_{,1}}(Q_{,1} + R_{,1}\mu_{1,1})J_0(k_{1r,1}r_1) \quad (C1)$$

$$C_{3,2} = \frac{k_{1,1}^2}{\phi_{,1}}(Q_{,1} + R_{,1}\mu_{1,1})Y_0(k_{1r,1}r_1) \quad (C2)$$

$$C_{3,3} = \frac{k_{2,1}^2}{\phi_{,1}} (Q_{,1} + R_{,1}\mu_{2,1}) J_0(k_{2r,1}r_1) \quad (C3)$$

$$C_{3,4} = \frac{k_{2,1}^2}{\phi_{,1}} (Q_{,1} + R_{,1}\mu_{2,1}) Y_0(k_{2r,1}r_1) \quad (C4)$$

$$C_{3,6N+1} = -\rho_0 c_0^2 k_0^2 J_0(k_{0r}r_1) \quad (C5)$$

$$C_{4,1} = -k_{1r,1} (\phi_{,1}\mu_{1,1} - \phi_{,1} + 1) J_1(k_{1r,1}r_1) \quad (D1)$$

$$C_{4,2} = -k_{1r,1} (\phi_{,1}\mu_{1,1} - \phi_{,1} + 1) Y_1(k_{1r,1}r_1) \quad (D2)$$

$$C_{4,3} = -k_{2r,1} (\phi_{,1}\mu_{2,1} - \phi_{,1} + 1) J_1(k_{2r,1}r_1) \quad (D3)$$

$$C_{4,4} = -k_{2r,1} (\phi_{,1}\mu_{2,1} - \phi_{,1} + 1) Y_1(k_{2r,1}r_1) \quad (D4)$$

$$C_{4,5} = jk_z (\phi_{,1}\mu_{3,1} - \phi_{,1} + 1) J_1(k_{3r,1}r_1) \quad (D5)$$

$$C_{4,6} = jk_z (\phi_{,1}\mu_{3,1} - \phi_{,1} + 1) Y_1(k_{3r,1}r_1) \quad (D6)$$

$$C_{4,6N+1} = k_{0r} J_1(k_{0r}r_1) \quad (D7)$$

$$C_{5,6N-5} = -k_{1r,N} J_1(k_{1r,N}r_{N+1}) \quad (E1)$$

$$C_{5,6N-4} = -k_{1r,N} Y_1(k_{1r,N}r_{N+1}) \quad (E2)$$

$$C_{5,6N-3} = -k_{2r,N} J_1(k_{2r,N}r_{N+1}) \quad (E3)$$

$$C_{5,6N-2} = -k_{2r,N} Y_1(k_{2r,N}r_{N+1}) \quad (E4)$$

$$C_{5,6N-1} = jk_z J_1(k_{3r,N}r_{N+1}) \quad (E5)$$

$$C_{5,6N} = jk_z Y_1(k_{3r,N}r_{N+1}) \quad (E6)$$

$$C_{6,6N-5} = jk_z J_0(k_{1r,N}r_{N+1}) \quad (E7)$$

$$C_{6,6N-4} = jk_z Y_0(k_{1r,N}r_{N+1}) \quad (E8)$$

$$C_{6,6N-3} = jk_z J_0(k_{2r,N}r_{N+1}) \quad (E9)$$

$$C_{6,6N-2} = jk_z Y_0(k_{2r,N}r_{N+1}) \quad (E10)$$

$$C_{6,6N-1} = -k_{3r,N} J_0(k_{3r,N}r_{N+1}) \quad (E11)$$

$$C_{6,6N} = -k_{3r,N} Y_0(k_{3r,N}r_{N+1}) \quad (E12)$$

$$C_{7,6N-5} = -k_{1r,N}\mu_{1,N} J_1(k_{1r,N}r_{N+1}) \quad (F1)$$

$$C_{7,6N-4} = -k_{1r,N}\mu_{1,N} Y_1(k_{1r,N}r_{N+1}) \quad (F2)$$

$$C_{7,6N-3} = -k_{2r,N}\mu_{2,N} J_1(k_{2r,N}r_{N+1}) \quad (F3)$$

$$C_{7,6N-2} = -k_{2r,N}\mu_{2,N}Y_1(k_{2r,N}r_{N+1}) \quad (\text{F4})$$

$$C_{7,6N-1} = jk_z\mu_{3,N}J_1(k_{3r,N}r_{N+1}) \quad (\text{F5})$$

$$C_{7,6N} = jk_z\mu_{3,N}Y_1(k_{3r,N}r_{N+1}) \quad (\text{F6})$$

$$C_{6n+2,6n-5} = -H_{1,n}J_0(k_{1r,n}r_{n+1}) + \frac{2N_n k_{1r,n}}{r_{n+1}}J_1(k_{1r,n}r_{n+1}) \quad (\text{G1})$$

$$C_{6n+2,6n-4} = -H_{1,n}Y_0(k_{1r,n}r_{n+1}) + \frac{2N_n k_{1r,n}}{r_{n+1}}Y_1(k_{1r,n}r_{n+1}) \quad (\text{G2})$$

$$C_{6n+2,6n-3} = -H_{2,n}J_0(k_{2r,n}r_{n+1}) + \frac{2N_n k_{2r,n}}{r_{n+1}}J_1(k_{2r,n}r_{n+1}) \quad (\text{G3})$$

$$C_{6n+2,6n-2} = -H_{2,n}Y_0(k_{2r,n}r_{n+1}) + \frac{2N_n k_{2r,n}}{r_{n+1}}Y_1(k_{2r,n}r_{n+1}) \quad (\text{G4})$$

$$C_{6n+2,6n-1} = 2N_n jk_z \left[-\frac{J_1(k_{3r,n}r_{n+1})}{r_{n+1}} + k_{3r,n}J_0(k_{3r,n}r_{n+1}) \right] \quad (\text{G5})$$

$$C_{6n+2,6n} = 2N_n jk_z \left[-\frac{Y_1(k_{3r,n}r_{n+1})}{r_{n+1}} + k_{3r,n}Y_0(k_{3r,n}r_{n+1}) \right] \quad (\text{G6})$$

$$C_{6n+2,6n+1} = H_{1,n+1}J_0(k_{1r,n+1}r_{n+1}) - \frac{2N_{n+1}k_{1r,n+1}}{r_{n+1}}J_1(k_{1r,n+1}r_{n+1}) \quad (\text{G7})$$

$$C_{6n+2,6n+2} = H_{1,n+1}Y_0(k_{1r,n+1}r_{n+1}) - \frac{2N_{n+1}k_{1r,n+1}}{r_{n+1}}Y_1(k_{1r,n+1}r_{n+1}) \quad (\text{G8})$$

$$C_{6n+2,6n+3} = H_{2,n+1}J_0(k_{2r,n+1}r_{n+1}) - \frac{2N_{n+1}k_{2r,n+1}}{r_{n+1}}J_1(k_{2r,n+1}r_{n+1}) \quad (\text{G9})$$

$$C_{6n+2,6n+4} = H_{2,n+1}Y_0(k_{2r,n+1}r_{n+1}) - \frac{2N_{n+1}k_{2r,n+1}}{r_{n+1}}Y_1(k_{2r,n+1}r_{n+1}) \quad (\text{G10})$$

$$C_{6n+2,6n+5} = 2N_{n+1}jk_z \left[\frac{J_1(k_{3r,n+1}r_{n+1})}{r_{n+1}} - k_{3r,n+1}J_0(k_{3r,n+1}r_{n+1}) \right] \quad (\text{G11})$$

$$C_{6n+2,6n+6} = 2N_{n+1}jk_z \left[\frac{Y_1(k_{3r,n+1}r_{n+1})}{r_{n+1}} - k_{3r,n+1}Y_0(k_{3r,n+1}r_{n+1}) \right] \quad (\text{G12})$$

$$C_{6n+3,6n-5} = -2jN_n k_z J_1(k_{1r,n}r_{n+1})k_{1r,n} \quad (\text{H1})$$

$$C_{6n+3,6n-4} = -2jN_n k_z Y_1(k_{1r,n}r_{n+1})k_{1r,n} \quad (\text{H2})$$

$$C_{6n+3,6n-3} = -2jN_n k_z J_1(k_{2r,n} r_{n+1}) k_{2r,n} \quad (\text{H3})$$

$$C_{6n+3,6n-2} = -2jN_n k_z Y_1(k_{2r,n} r_{n+1}) k_{2r,n} \quad (\text{H4})$$

$$C_{6n+3,6n-1} = N_n J_1(k_{3r,n} r_{n+1}) (-k_z^2 + k_{3r,n}^2) \quad (\text{H5})$$

$$C_{6n+3,6n} = N_n Y_1(k_{3r,n} r_{n+1}) (-k_z^2 + k_{3r,n}^2) \quad (\text{H6})$$

$$C_{6n+3,6n+1} = 2jN_{n+1} k_z J_1(k_{1r,n+1} r_{n+1}) k_{1r,n+1} \quad (\text{H7})$$

$$C_{6n+3,6n+2} = 2jN_{n+1} k_z Y_1(k_{1r,n+1} r_{n+1}) k_{1r,n+1} \quad (\text{H8})$$

$$C_{6n+3,6n+3} = 2jN_{n+1} k_z J_1(k_{2r,n+1} r_{n+1}) k_{2r,n+1} \quad (\text{H9})$$

$$C_{6n+3,6n+4} = 2jN_{n+1} k_z Y_1(k_{2r,n+1} r_{n+1}) k_{2r,n+1} \quad (\text{H10})$$

$$C_{6n+3,6n+5} = N_{n+1} J_1(k_{3r,n+1} r_{n+1}) (k_z^2 - k_{3r,n+1}^2) \quad (\text{H11})$$

$$C_{6n+3,6n+6} = N_{n+1} Y_1(k_{3r,n+1} r_{n+1}) (k_z^2 - k_{3r,n+1}^2) \quad (\text{H12})$$

$$C_{6n+4,6n-5} = -k_{1r,n} J_1(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{I1})$$

$$C_{6n+4,6n-4} = -k_{1r,n} Y_1(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{I2})$$

$$C_{6n+4,6n-3} = -k_{2r,n} J_1(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{I3})$$

$$C_{6n+4,6n-2} = -k_{2r,n} Y_1(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{I4})$$

$$C_{6n+4,6n-1} = jk_z J_1(k_{3r,n} r_{n+1}) \quad (\text{I5})$$

$$C_{6n+4,6n} = jk_z Y_1(k_{3r,n} r_{n+1}) \quad (\text{I6})$$

$$C_{6n+4,6n+1} = k_{1r,n+1} J_1(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{I7})$$

$$C_{6n+4,6n+2} = k_{1r,n+1} Y_1(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{I8})$$

$$C_{6n+4,6n+3} = k_{2r,n+1} J_1(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{I9})$$

$$C_{6n+4,6n+4} = k_{2r,n+1} Y_1(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{I10})$$

$$C_{6n+4,6n+5} = -jk_z J_1(k_{3r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{I11})$$

$$C_{6n+4,6n+6} = -jk_z Y_1(k_{3r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{I12})$$

$$C_{6n+5,6n-5} = jk_z J_0(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{J1})$$

$$C_{6n+5,6n-4} = jk_z Y_0(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{J2})$$

$$C_{6n+5,6n-3} = jk_z J_0(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{J3})$$

$$C_{6n+5,6n-2} = jk_z Y_0(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{J4})$$

$$C_{6n+5,6n-1} = -k_{3r,n} J_0(k_{3r,n} r_{n+1}) \quad (\text{J5})$$

$$C_{6n+5,6n} = -k_{3r,n} Y_0(k_{3r,n} r_{n+1}) \quad (\text{J6})$$

$$C_{6n+5,6n+1} = -jk_z J_0(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{J7})$$

$$C_{6n+5,6n+2} = -jk_z Y_0(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{J8})$$

$$C_{6n+5,6n+3} = -jk_z J_0(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{J9})$$

$$C_{6n+5,6n+4} = -jk_z Y_0(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{J10})$$

$$C_{6n+5,6n+5} = k_{3r,n+1} J_0(k_{3r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{J11})$$

$$C_{6n+5,6n+6} = k_{3r,n+1} Y_0(k_{3r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{J12})$$

$$C_{6n+6,6n-5} = \frac{k_{1,n}^2}{\phi_n} (Q_n + R_n \mu_{1,n}) J_0(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{K1})$$

$$C_{6n+6,6n-4} = \frac{k_{1,n}^2}{\phi_n} (Q_n + R_n \mu_{1,n}) Y_0(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{K2})$$

$$C_{6n+6,6n-3} = \frac{k_{2,n}^2}{\phi_n} (Q_n + R_n \mu_{2,n}) J_0(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{K3})$$

$$C_{6n+6,6n-2} = \frac{k_{2,n}^2}{\phi_n} (Q_n + R_n \mu_{2,n}) Y_0(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{K4})$$

$$C_{6n+6,6n+1} = -\frac{k_{1,n+1}^2}{\phi_{n+1}} (Q_{n+1} + R_{n+1} \mu_{1,n+1}) J_0(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{K6})$$

$$C_{6n+6,6n+2} = -\frac{k_{1,n+1}^2}{\phi_{n+1}} (Q_{n+1} + R_{n+1} \mu_{1,n+1}) Y_0(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{K7})$$

$$C_{6n+6,6n+3} = -\frac{k_{2,n+1}^2}{\phi_{n+1}} (Q_{n+1} + R_{n+1} \mu_{2,n+1}) J_0(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{K8})$$

$$C_{6n+6,6n+4} = -\frac{k_{2,n+1}^2}{\phi_{n+1}} (Q_{n+1} + R_{n+1} \mu_{2,n+1}) Y_0(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{K9})$$

$$C_{6n+7,6n-5} = -k_{1r,n} \phi_n (\mu_{1,n} - 1) J_1(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{L1})$$

$$C_{6n+7,6n-4} = -k_{1r,n} \phi_n (\mu_{1,n} - 1) Y_1(k_{1r,n} r_{n+1}) \quad (\text{L2})$$

$$C_{6n+7,6n-3} = -k_{2r,n} \phi_n (\mu_{2,n} - 1) J_1(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{L3})$$

$$C_{6n+7,6n-2} = -k_{2r,n} \phi_n (\mu_{2,n} - 1) Y_1(k_{2r,n} r_{n+1}) \quad (\text{L4})$$

$$C_{6n+7,6n-1} = jk_z \phi_n (\mu_{3,n} - 1) J_1(k_{3r,n} r_{n+1}) \quad (\text{L5})$$

$$C_{6n+7,6n} = jk_z \phi_{,n} (\mu_{3,n} - 1) Y_1(k_{3r,n} r_{n+1}) \quad (\text{L6})$$

$$C_{6n+7,6n+1} = k_{1r,n+1} \phi_{,n+1} (\mu_{1,n+1} - 1) J_1(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{L7})$$

$$C_{6n+7,6n+2} = k_{1r,n+1} \phi_{,n+1} (\mu_{1,n+1} - 1) Y_1(k_{1r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{L8})$$

$$C_{6n+7,6n+3} = k_{2r,n+1} \phi_{,n+1} (\mu_{2,n+1} - 1) J_1(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{L9})$$

$$C_{6n+7,6n+4} = k_{2r,n+1} \phi_{,n+1} (\mu_{2,n+1} - 1) Y_1(k_{2r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{L10})$$

$$C_{6n+7,6n+5} = -jk_z \phi_{,n+1} (\mu_{3,n+1} - 1) J_1(k_{3r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{L11})$$

$$C_{6n+7,6n+6} = -jk_z \phi_{,n+1} (\mu_{3,n+1} - 1) Y_1(k_{3r,n+1} r_{n+1}) \quad (\text{L12})$$

여기서 $H_{i,n}$ 은 다음과 같다.

$$H_{i,n} = ((R_{,n} + Q_{,n})\mu_{i,n} + Q_{,n} + A_{,n})k_{i,n}^2 + 2N_{,n}k_{ir,n}^2 \quad (\text{M1})$$

참 고 문 헌

- [1] Munjal, Manchar Lal. Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design. John Wiley & Sons, 1987.
- [2] El Sharkawy, A. I., and Ali H. Nayfeh. "Effect of an expansion chamber on the propagation of sound in circular ducts." *The Journal of the Acoustical Society of America* 63.3 (1978): 667-674.
- [3] Delany, M. E., and E. N. Bazley. "Acoustical properties of fibrous absorbent materials." *Applied acoustics* 3.2 (1970): 105-116.
- [4] Xu, M. B., et al. "Sound attenuation in dissipative expansion chambers." *Journal of Sound and Vibration* 272.3-5 (2004): 1125-1133.
- [5] Selamet, A., et al. "Dissipative expansion chambers with two concentric layers of fibrous material." *International Journal of Vehicle Noise and Vibration* 1.3-4 (2005): 341-357.
- [6] Panneton, Raymond. "Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media." *The Journal of the Acoustical Society of America* 122.6 (2007): EL217-EL222.
- [7] Nennig, Benoit, Emmanuel Perrey-Debain, and Mabrouk Ben Tahar. "A mode matching method for modeling dissipative silencers lined with poroelastic materials and containing mean flow." *The Journal of the Acoustical Society of America* 128.6 (2010): 3308-3320.
- [8] Biot, M. A. (1956). *Theory of Propagation of Elastic Waves in a*

Fluid Saturated Porous Solid. I. Low Frequency Range. The Journal of the Acoustical Society of America, 28(2), 168-178.

[9] Gazis, D. C. (1959). Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation. The journal of the Acoustical Society of America, 31(5), 568-573

[10] Allard, J., & Atalla, N. (2009). Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials 2e. John Wiley & Sons, Chap. 6.

[11] Debergue, P., Panneton, R., & Atalla, N. (1999). Boundary conditions for the weak formulation of the mixed (u, p) poroelasticity problem. The Journal of the acoustical Society of america, 106(5), 2383-2390.

[12] Panneton, R. (1998). Modelisation numerique tridimensionnelle par elements finis des milieux poroelastiques: application au probleme couple elasto-poro-acoustique. National Library of Canada= Bibliothèquè nationale du Canada, Ottawa.

[13] Mehdizadeh, Omid Z., and Marius Paraschivoiu. "A three-dimensional finite element approach for predicting the transmission loss in mufflers and silencers with no mean flow." Applied acoustics 66.8 (2005): 902-918.

Abstract

Mode matching method based transmission loss calculation of multi-layered cylindrical silencers

Lee, Jongmoo

Naval Architecture and Ocean Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In this study, a fundamental research was conducted in order to design multi-layered silencers used to reduce pipe noise in submarines. Existing studies about predicting the performance of the silencer were reviewed and analysis of multi-layered silencers are conducted. Three waves in the poroelastic medium were modeled using the Biot theory. The boundary conditions between the air and the poroelastic medium, between two poroelastic mediums and between the poroelastic medium and the wall of the silencer were

described. The boundary conditions were expressed in matrix form and modes were founded numerically by searching roots that make the determinant of the matrix equal to zero. The sound transmission loss was calculated by matching those modes. After that, simulations were conducted for several cases of silencers and sound absorbing materials and the characteristics of sound transmission loss were observed. Finally, the mode matching method proposed in this study was validated by comparing the finite element analysis.

keywords : poroelastic, transmission loss, multi-layered silencer, muffler

Student Number : 2021-23176