

음향 입사파를 고려한 수치적 임피던스 경계조건의 보정 Modifications of Numerical Impedance Boundary Conditions Considering Incident Acoustic Pressure.

김민우† · 박용환 · 김성태 · 이수갑*

Minwoo Kim, Yonghwan Park, Sungtae Kim and Soogab Lee

Key Words : Acoustic Liner (음향처리재), Impedance (임피던스), Computational Aeroacoustics (전산공력음향학).

ABSTRACT

The acoustic liner has been used for the suppression of noise. The impedance characteristics of the acoustic liner are increased by the incident pressure. For the estimation of the acoustic liner on the incident acoustic pressure effect, the modified impedance model is suggested on the basis of the GE impedance prediction model. The modified impedance model is originated from the 3 parameter impedance model, and extended to the incident pressure parameter. The modified model is applied on the simple duct analysis with variant source pressure. Through the computation, it is observed that the fore directivity patterns of the duct are varied by the incident SPL level.

	———— 기호설명 ————
Z	Impedance
C_D	Discharge Coefficient
σ	Porosity
$\rho_0 C_0$	Acoustic Impedance

1. 서 론

최근 증가하고 있는 소음 문제와 관련하여 저소음 관련 기술이 각광을 받고 있다. 이러한 저소음 기술 중 일반적으로 이용되는 접근 방법은 음향처리재(Acoustic Liner)를 이용한 흡음처리기법이다.

음향처리재는 다공면(perforated facesheet)과 벌집형 공동(honeycomb cell)과 이를 지지하는 지지면(rigid plate)으로 구성되어 있다. 이러한 음향처리재는 단일자유도의 특성을 가지고 있으며 다공면과 음향처리재 내부공간의 성질로 인해 임피던스의 특성을 가지게 된다.

일반적으로 임피던스의 표기법은 식 (1.1)과 같이 실수항과 허수항을 동시에 가지는 복소수 값으로 결정된다.

$$Z = R - iX \tag{1.1}$$

임피던스의 물리적의미는 음압과 음압속도의 비를 의미하며, 임피던스 복소수항의 실수성분은 저항(Resistance) 이라고 하며, 허수성분은 리액턴스(Reactance)라고 한다. 임피던스의 저항성분은 음

압의 크기에 영향을 미치며, 리액턴스성분은 음압의 위상차이를 발생시키게 된다.

음향처리재의 임피던스 특성을 바탕으로 한 흡음성능은 저소음기술로 응용되어 많은 분야에 적용되고 있으며, 이와 관련하여 주어진 조건에서의 음향처리재의 임피던스를 예측하는 기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.[1]

수치기법을 이용하여 소음원 및 경계조건에 의한 음장을 예측 및 평가하기 위해서 일반적으로 전산공력음향학(Computational Aero-Acoustics, CAA)이 이용되고 있다. 음향처리재의 경우, 실제 음향처리재의 구조를 단순화 한 임피던스의 경계조건을 구성하여 이용된다. 이러한 임피던스 경계조건의 경우 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 Mostinger et. al[2] 이 제시한 단일 자유도계 흡음재 실험결과와 NASA 에서 이용된 CT73 임피던스의 실험결과를 바탕으로 한 Tam et al.[3], Özyörük et al.[4], Fung et al.[5] 등의 연구자들에 제안된 임피던스 경계조건이 이용된다. 이러한 시간영역기반 임피던스 경계조건은 수학적 혹은 논리적으로 만족할 만한 특성을 보여주지만, 이를 음향처리재를 적용한 저소음 해석에 이용할 경우, 임피던스에 영향을 미치는 요인에 대한 고찰이 필요하다. 일반적으로 음향처리재는 단일 자유도의 계로 구성되어 있기 때문에 주파수 변동 및 입사압력량에 의해 임피던스의 물리량의 변동이 발생한다. 이는 입사압력을 대한 새로운 임피던스변수가 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 임피던스 예측식을 바탕으로 하여, 음향처리재의 특성을 고려한 임피던스 모델링을 제시하고 각 소음원의 크기 변화 및 주파수 변동에 의한 소음방사특성을 살펴보고자 한다.

† 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : aero0906@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-1902

* 서울대학교 기계항공공학부

2. 음향처리재의 임피던스 모델링

2.1 음향처리재 임피던스 예측식

단일자유도를 가지는 음향처리재에 대해서는 Hersh, GE, Crandall 의 예측식이 이용된다. 본 연구에서는 GE 예측식을 이용한 임피던스기법을 이용하여 접근하고자 한다.[6]

음향처리재의 구조가 <그림 1>과 같을 때, 음향 임피던스 예측식은 다음과 같다.

$$\frac{R}{\rho_0 c_0} = \frac{32\mu h}{\rho_0 c_0 (\sigma C_D) d^2} + \frac{1}{2c_0 (\sigma C_D)^2} v_a \quad (2.1.1)$$

$$\frac{X}{\rho_0 c_0} = \frac{k(t + \epsilon d)}{\sigma C_D} - \cot(kh) \quad (2.1.2)$$

이때, 끝단 보정값, ϵ , 은 유동 특성에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$\epsilon = \begin{cases} 0.85 & (v_a < 0.04 m/s) \\ 0.738 - 0.119 \ln(v_a) & (0.04 m/s \leq v_a \leq 4.93 m/s) \\ 0 & (v_a > 4.93 m/s) \end{cases} \quad (2.1.3)$$

<그림 2>는 임피던스 예측식을 이용하여 입사 압력에 의한 임피던스 변화량과 <참고문헌 2>에 의한 임피던스 실험결과를 비교하였다.

2.2 입사파 보정 임피던스 모델링

GE 임피던스 예측식을 바탕으로 임피던스 모델링을 유도하였다. 먼저 기존의 광대역 임피던스 모델링과 일치 시키기 위해서 입사압력량을 결정한 상태에서 임피던스 예측식을 전개한다. GE 임피던스 예측식에 의한 저항성분식 (2.1.1), 리액턴스성분식 (2.1.2)는 다음과 같이 변형이 가능하다.

먼저 저항식 (2.1.1)은 각 독립변수가 정해져 있으므로 상수값으로 정해진다.

$$\frac{R}{\rho_0 c_0} = R_0 \quad (2.2.1)$$

리액턴스식 (2.1.2)는 다음과 같이 전개한다.

$$\frac{X}{\rho_0 c_0} = X_1 k + X_{-1} / k \quad (2.2.2)$$

이때, 리액턴스의 변수의 X_1, X_{-1} 는 다음과 같

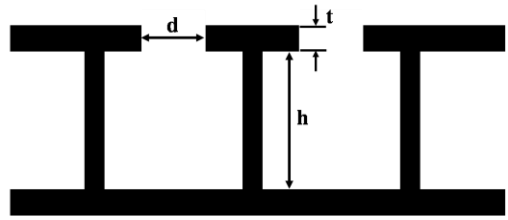
이 결정된다.

$$X_1 = \frac{t + \epsilon d}{\sigma C_D}, \quad X_{-1} = -\frac{1}{h} \frac{1}{(1 + (kh)^2 / 3)} \quad (2.2.3)$$

이제 주파수 영역에서 정리된 임피던스 모델링은 다음과 같다.

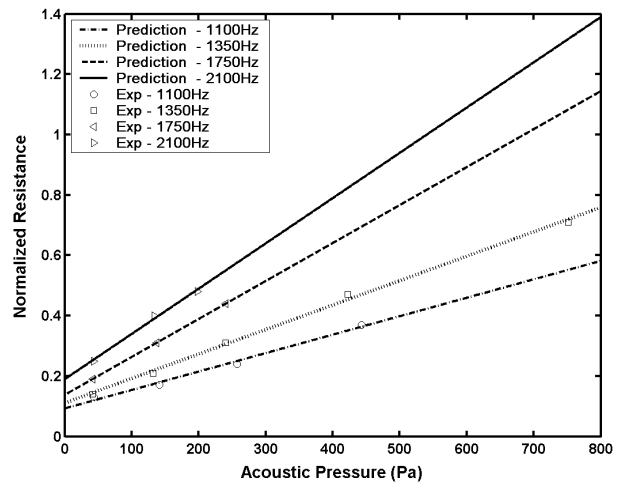
$$\frac{Z(k)}{\rho_0 c_0} = R_0 - i(kX_1 + X_{-1}/k) \quad (2.2.4)$$

<그림 1> 음향처리재의 기하학적 구조

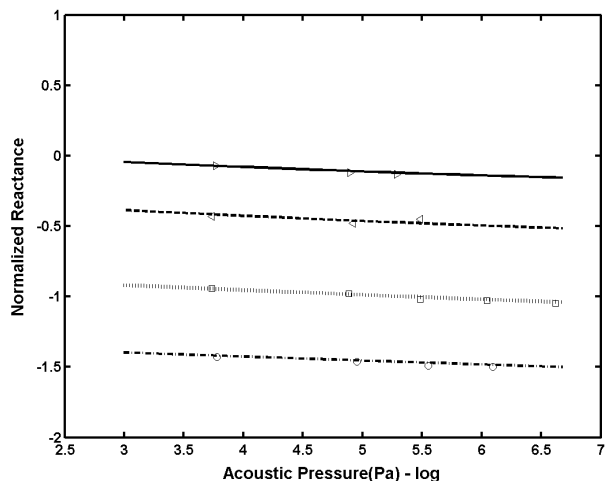


<그림 2> 입사압력 보정 임피던스량

(a) 저항



(b) 리액턴스



이는 전산공력음향학에서 제시된 3 변수를 가지는 임피던스의 모델링과 같은 형식을 가진다.[3]

음향입사파에 의한 임피던스의 변화량을 결정하기 위해서 음압속도와 음향파사이의 관계식을 통하여 결정한다. 임피던스 경계면에서의 음압속도는 음향 입사파의 크기와 임피던스의 함수값으로 얻을 수 있으며, 반복 수렴법에 의해서 결정된다.[2]

$$v_a = \frac{|p|}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.2.5)$$

이를 이용해서 얻게 되는 임피던스 모델링은 다음과 같다.

$$\frac{Z(k, |p|)}{\rho_0 c_0} = R_1 + R_2 |p| + i(kX_1 - X_{-1}/k) \quad (2.2.6)$$

이때, 저항변수 R_1 , R_2 는 식 (2.1.1)에 의해서 결정된다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

저소음설계에 있어서 음향처리재는 덕트 내부에 적용된다. 따라서 지배방정식으로 축대칭 Euler 방정식을 적용하였다.

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{1}{y} \mathbf{H} = 0 \quad (3.1.1)$$

이때 각 벡터 \mathbf{Q} , \mathbf{E} , \mathbf{F} , \mathbf{H} 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \end{bmatrix} \quad (3.1.2a), \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (\rho e_t + p)u \end{bmatrix} \quad (3.1.2b),$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (\rho e_t + p)v \end{bmatrix} \quad (3.1.2c), \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (\rho e_t + p)v \end{bmatrix} \quad (3.1.2d).$$

3.2 경계조건

3.2.1 원방경계조건

원방경계조건에서는 유동이 없을 때는 음향파만이 외부로 나가게 되므로 음향파의 점근해를 이용하여 원방경계조건을 결정한다.[7]

$$\left(\frac{1}{V(\theta)} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} \right) \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ v \\ p \end{bmatrix} = 0 + o(r^{-5/2}) \quad (3.2.1.1)$$

이때,

$$V(\theta) = a_0 \left[M \cos \theta + (1 - M^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \right], \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.2.1.2)$$

3.2.2 임피던스 경계조건

기본적으로는 Tam 과 Auriault 에 의해 제시된 3 변수 임피던스 모델링은 다음과 같다.[3]

$$Z = R_0 - i[X_{-1}/\omega + X_1\omega] \quad (3.2.2.1)$$

특성주파수($\Omega = \omega$) 를 가진 음원일 경우,

$$X < 0, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = R \frac{\partial v_n}{\partial t} - X \Omega v_n \quad (3.2.2.2a)$$

$$X \geq 0, \quad p = R v_n + \frac{X}{\Omega} \frac{\partial v_n}{\partial t} \quad (3.2.2.2b)$$

광대역 음원일 경우,

$$\frac{\partial p}{\partial t} = R_0 \frac{\partial v_n}{\partial t} - X_{-1} v_n + X_1 \frac{\partial^2 v_n}{\partial t^2} \quad (3.2.2.3)$$

위의 임피던스 경계조건을 이용하되 각 임피던스 계수(R_0 , X_1 , X_{-1})를 입사파 보정 임피던스 모델링을 적용하여 입사압력에 대한 임피던스량을 결정할 수 있다.

4. 결 과

4.1 경계조건 검증

개선된 임피던스 모델링을 검증하기 위하여 해석해와 비교하였다. 이때의 음원의 조건은 입사압력이 외부에서 127dB 로 수직으로 입사할 때로 가정하였다. 이때의 가진 주파수의 크기는 2100 Hz 이며, 전체 도메인의 길이는 1.8m 이다. <그림 3>에서 볼 수 있듯이 해석해와 잘 일치함을 알 수 있다.

4.2 입사파에 의한 방향성 특성

입사파의 영향에 의한 경계조건의 특성을 보기 위해서 간단히 덕트 내부에 홀극소음원을 위치시키고 소음원로부터 반경방향으로 0.5D 떨어진 위치에서의 길이가 D 인 덕트의 해석을 수행하였다. 이 계산영역의 자세한 정보는 <그림 4>에 표기하였다. 이 때, 주어진 계산 격자크기는 251×151 이며 격자간격은 $\Delta x = \Delta r = 0.02$ 이다. 주어진 홀극소음원의 크기는 다음과 같다.

$$S = |p| \times \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{(x^2 + y^2)}{16}\right) \cos(\omega t) \quad (4.2.1)$$

각 전체소음원의 크기를 127dB, 137dB, 147dB 의 결정하고 주파수에서의 방향성 변화를 살펴 보았다. 이때의 임피던스는 <표 1>에 제시하였다.

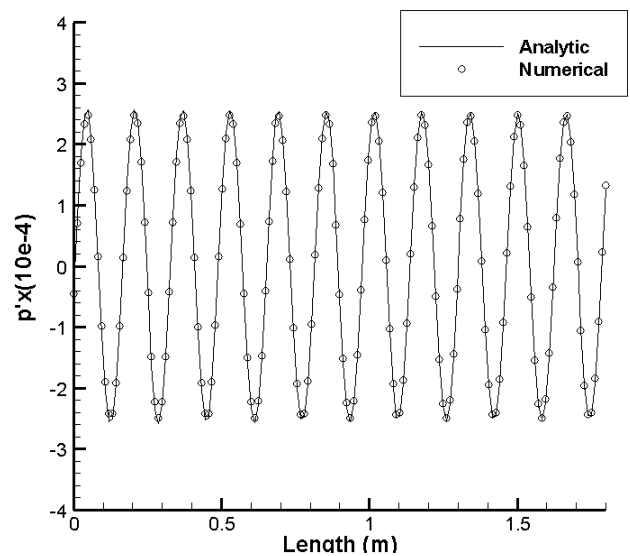
이때, 입사압력이 130dB~140dB 이상의 경우에는 임피던스의 비선형성이 증가한다고 알려져 있지만 본 해석에의 이용된 예측식의 결과와 실험치의 결과를 비교하였을 때, 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 선형적으로 적용하였다.[8]

먼저 <그림 5>에서 소음도의 변화량에 따른 방사량의 변화를 살펴보면, 소음도가 증가함에 따라서 임피던스량은 증가하게 되고 이는 결국 임피던스 경계면에 따른 흡음량의 감소로 이어진다. 이를 통해 소음도 증가에 비례하여 정규화된 방사량은 증가함을 확인할 수 있다. 또한 각도별 방사량을 살펴보면 방사량의 차이가 점차 각도가 증가함에 따라서 증가함을 확인할 수 있는데, 이 역시 임피던스 경계면에 의한 반사에 의한 영향으로 생각된다. 각 주파수 대역에서의 소음도에 따른 방사형태는 거의 변화가 발생하지 않고 크기만 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 소음도에 따른 리액턴스의 변화량이 저항의 변화량에 비해서 작은 값을 가지기 때문에 위상차이에 의한 큰 영향을 보이지 않음을 알 수 있다.

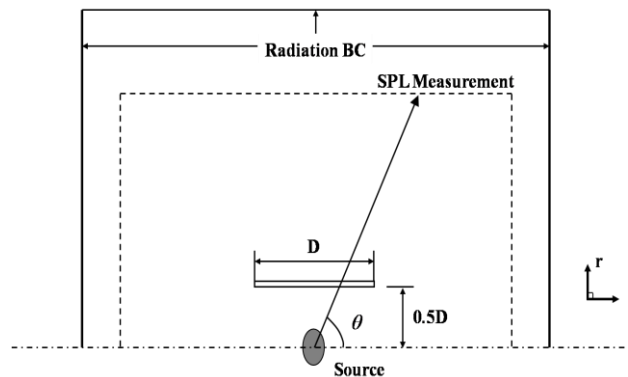
<표 1> 주파수 및 입사압력에 따른 임피던스

	1350Hz	2450Hz
127dB	0.14-i0.94	0.25+i0.21
137dB	0.21-i0.98	0.39+i0.14
147dB	0.47-i1.03	0.58+i0.10

<그림 3> 임피던스경계조건 검증

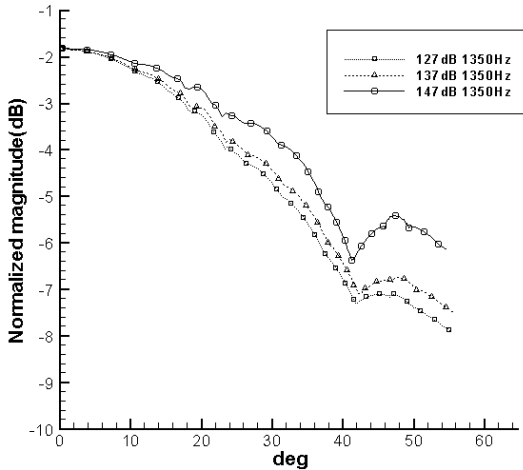


<그림 4> 계산영역

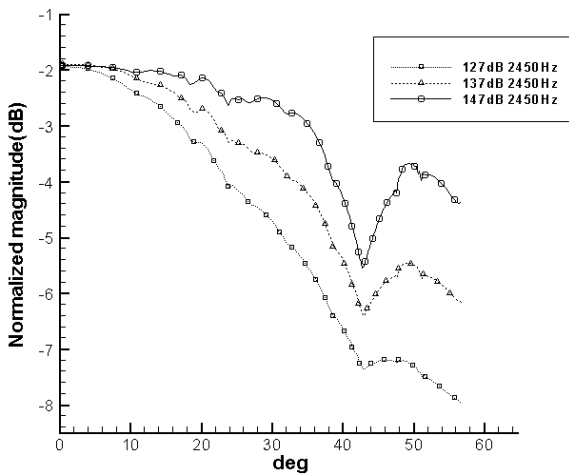


<그림 5> 소음원 크기에 따른 방향성 변화

(a) 1350 Hz, 소음 방사량 비교



(b) 2450 Hz, 소음 방사량 비교



5. 결론

저소음 기술에 적용되는 음향처리재의 수치해석을 위하여 전산공력음향학에서 이용되는 임피던스 경계조건을 고찰하였다. 일반적으로 전산공력음향학에서 적용되는 임피던스 모델링의 경우, 입사압력에 의한 영향을 고려하지 않는다. 따라서 실제 해석에 있어서 입사압력에 의한 영향을 고찰하기 위해서 임피던스 예측식을 기반으로 하는 개선된 임피던스 모델링을 제안하였다. 개선된 임피던스 경계조건을 적용하여 덕트 내부의 소음원에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과 덕트 전방에서

의 방향성은 각 소음원의 음압량의 변화에 의해서 발생하는 경계조건에 영향을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안된 개선임피던스 경계조건은 입사압력에 대한 영향을 고찰하고 있으며, 또한 실제 적용에 있어서 기존 경계조건에서 쉽게 확장이 가능하다는 점에서 활용성이 높다고 할 수 있다. 이를 통해 전산공력음향학을 이용한 저소음 설계 및 해석에 있어서 유용한 기법으로 이용될 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10301-0)지원으로 수행 되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chandrasekhran, V., Shelpak, M., Cattafesta, L., 2006, "Experimental Study of Acoustic Impedance of Mems-Based Micro Perforated Liners", AIAA Paper, 2006-2401
- (2) Mostinger, R.E., Kraft, R.E., 1994, "Design and Performance of Duct Acoustic Treatment", Aeroacoustics of flight vehicles, Chapter 14, AIP, New York
- (3) Tam, C.K.W., Auriault, L., 1996, "Time-domain Impedance Boundary Conditions for computational Aeroacoustics", AIAA J., (34), pp.917~923.
- (4) Özyörük, Y., Long, L.N., Jones, M.G., 1998, "Time-domain numerical simulation of a flow impedance tube." J. of Comp. Phys., (146), pp.29~57.
- (5) Fung, K.Y., Ju., H. B., 2001, "Broadband time-domain impedance model", AIAA J., (39), pp.1449~1454.
- (6) Kraft, R.E., Yu, J., Kwan H.W., 1996, "Acoustic Treatment Design Scaling Method," NAS3-26617.
- (7) Tam, C.K.W., 1995, "Computational Aeroacoustics : Issues and Method.", AIAA J., (33), pp.1788~1796
- (8) Ingard, U., Ising, H., 1967, "Acoustic nonlinearity of orifice," J. Acoust. Soc. Am., (42), pp.6~17