

有限要素法에 의한 消音器의 減音特性解析

Analysis of Sound Attenuation by Chambers in Duct Systems
by the Finite Element Method.

최 석 주 *
Seok-Joo Choi

1. 서론

각종 홀(음악홀, 극장, 사무실건물)의 공조 덕트계에는 미로형소음챔버가 설치되는 경우가 많다. 이러한 소음장치를 건물내부에 설치하는 경우에는 건물설계단계에서부터 소음 챔버로 인한 감음양(투과손실 : Transmission Loss)의 예측계산이 중요하다. 그렇지만, 일반적인 소음장치는 그 형상이나 내표면의 흡음조건이 아주 복잡하기 때문에, 현단계에 있는 간단한 이론식만으로 투과손실예측이 거의 불가능하다. 지금까지 이문제에 대해서 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용해 검토한 예(1, 2, 3)가 종종 소개되었으나, 대부분 소음챔버의 입구와 출구에서의 임의의 점에 대한 음압비를 투과손실로서 구하고 있다. 그러나, 소음기자체의 실질적인 투과손실특성을 알기 위해서는 소음기의 입력 파워에 대한 출력파워의 비로서 구하지 않으면 안된다.

따라서, 본 연구에서는 유한요소법에 의한 복소음향인텐시티(Complex sound intensity)의 수치계산법을 각종소음기(평창형, 미로형)의 투과손실해석에 적용하기 위하여 이론적인 면에서 고찰했으며, 프로그램도 개발하여 모델해석에 적용하였다. 또한, 위에서 언급된 수치해석법의 타당성의 검증을 위하여, 측정에 의한 투과손실예측방법으로서 크로스스펙트럼(Cross spectrum)법에 의한 음향인텐시티계측법의 이용에 대해서 이론적으로 고찰했으며, 그 이론을 기초로한 측정 모형실험을 병행하였다.

2. 수치계산 및 측정원리

2.1 수치계산원리(4)

定常音場(Steady-state sound field)의 Helmholtz 방정식을 유한요소법으로 풀면, 음장내 각요소절점에 대한 복소음압(Complex sound pressure)이 구해진다. 이하에, 구해진 각 요소의 절점음압을 이용하여 소음기의 투과손실을 계산하는 원리에 대해서 논한다.

먼저, 음장내 임의의 점 s에 대한 복소음압 p_s 와 입자속도의 x, y, z 방향성분인 u_{sx} , u_{sy} , u_{sz} 는 각 요소의 절점음압 p_i 와 요소의 형상함수 ϕ_i 를 이용하여 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_s = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \phi_i \quad (1)$$

단, n : 요소의 절점수

$$\left. \begin{aligned} u_{sx} &= -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial p_s}{\partial x} \\ u_{sy} &= -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial p_s}{\partial y} \\ u_{sz} &= -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial p_s}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

또한, 점 s에 대한 x, y, z 방향의 넷트 음향인텐시티(Net Sound Intensity) I_{sx} , I_{sy} , I_{sz} 는 식(1)과 식(2)를 이용하여, 다음식으로 표시할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} I_{sx} &= \frac{1}{2} p_s \cdot u_{sx} \\ I_{sy} &= \frac{1}{2} p_s \cdot u_{sy} \\ I_{sz} &= \frac{1}{2} p_s \cdot u_{sz} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

* 삼성중합건설 기술연구소, 공학박사

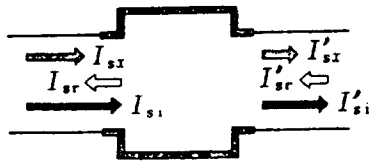


그림-1 계산원리

여기서 *는 공역복소(Complex conjugate)를 나타낸다. 그러나, 식(3)에 의해 구해지는 각방향의 네트웬스펙트럼인텐시티는 진행파와 후퇴파음향인텐시티가 합성된 것이기 때문에 이 값을 이용하여 소음기의 투과손실(여기서는 입력파워와 투과파워의 레벨차)을 구하는 경우에는 진행파와 후퇴파의 음향인텐시티를 분리하지 않으면 안된다. 이하, 그 분리방법에 대해서 논한다.

그림-1에 나타난 바와 같이 소음기내부가 x방향으로 1차원 음장조건을 만족하는 경우, 소음기내 임의의 점 s 에 대한 네트웬스펙트럼인텐시티 I_{sx} 는 진행파 및 후퇴파음향인텐시티 I_{si} , I_{sr} 사이에 다음과 같은 관계가 있다.

$$I_{sx} = I_{si} + I_{sr} = (1 - |\gamma|^2) I_{si} \quad (4)$$

여기서 γ 는 복소음압반사계수를 나타낸다. 즉, 점 s 에 대한 네트웬스펙트럼인텐시티 I_{sx} 와 복소음압반사계수를 구하면, 진행파와 후퇴파의 음향인텐시티가 분리 가능하다는 것을 식(4)로부터 알 수 있다. 따라서 유한요소법을 이용하여 계산하는 경우, 네트웬스펙트럼인텐시티 I_{sx} 는 식(3), 복소음압반사계수 γ 는 복소음압 p_s 와 입자속도 u_{sx} 의 관계로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\frac{p_s}{u_{sx}} - \rho c}{\frac{p_s}{u_{sx}} + \rho c} \quad (5)$$

단, ρc : 공기의 특성임피던스

결국, 유한요소법으로 점 s 에 대한 복소음압과 입자속도를 계산하면, 식(3), (4), (5)의 관계로부터 진행파와 후퇴파의 음향인텐시티가 분리 가능하게 된다.

2.2 측정원리⁶⁾

여기서는 크로스스펙트럼법에 의한 음향인텐시티계측법을 이용하여 소음기의 투과손실을 측정하는 방법에 대해서 논한다.

지금까지 설명한 수치해법과 동일하게 음향인텐시티를 측정하여 투과손실을 구하는 경우에도 점 s 에 대한 식(5)의 복소음압 반사계수를 구하지 않으면 안된다. 이 경우, 식(5)의 p_s/u_{sx} , 즉 점 s 에 대한 음향임피던스 Z는 근접한 마이크로폰 2점 음압의 Auto-spectrum G_{11} , G_{22} 및 Cross-spectrum G_{12} 로부터 다음식을 이용해 구할 수 있다⁶⁾.

$$Z = \frac{j\omega\Delta r G_{11} + G_{22} + 2 \operatorname{Re}\{G_{12}\}}{2 G_{11} - G_{22} - j2 \operatorname{Im}\{G_{12}\}} \quad (6)$$

단, Δr : 2개의 마이크로폰 간격

또한, 네트웬스펙트럼인텐시티 I_{sx} 는 크로스스펙트럼법에 의한 원리⁷⁾에 의해 다음식과 같이 된다.

$$I_{sx} = -\frac{\operatorname{Im}\{G_{12}\}}{\omega\Delta r} \quad (7)$$

즉, 2개 마이크로폰법에 기초를 둔 크로스스펙트럼법에 의해 G_{11} , G_{22} 및 G_{12} 를 측정하면 진행파와 후퇴파음향인텐시티를 분리할 수 있다.

이상의 원리를 적용하여 소음챔버입구에 있어서의 입사파워와 출구에 있어서의 투과파워를 계산하면, 다음식에 의해 투과손실을 구할 수 있다.

$$TL = -10 \cdot \log \frac{W_t}{W_i} \quad (8)$$

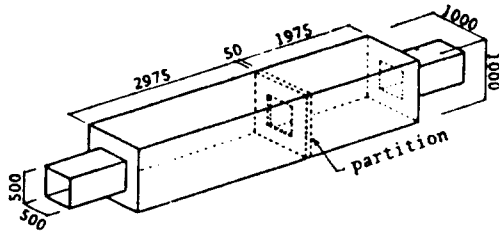
단, W_i : 입사파워 (watt)

W_t : 투과파워 (watt)

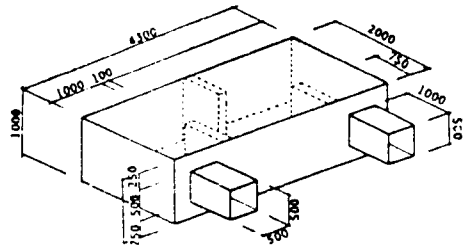
3. 수치해석에

3.1 수치해석모델 및 계산의 개요

그림-2와 같은 단순한 평창형 및 미도형 소음기를 모델로하여 투과손실에 대한 수치해석을 하였다. 구동음원으로서는 덕트입구의 선단면이 주파수에 관계없이 일정한 속도로 진동하는 조건으로 하였으며, 덕트의 출구는 공기의 특성임피던스로 처리한 無反射端조건으로 했다. 계산에는 20절점 6면체



평창형소음기
Model-1



미로형소음기
Model-2

그림-2 해석모델의 개요

Isoparametric 요소를 사용하였으며, 요소분할은 두모델 모두 대칭이기 때문에 음장영역의 반(1/2)만을 대상으로 하였다. 이 경우, 요소의 크기는 수치계산정도를 고려하여, 최고주파수파장의 1/4 이하가 되도록 하였으며, 계산주파수는 28Hz에서 소음기의 입구 혹은 출구가 일차원음장의 조건이 성립되는 340Hz(음속은 343 m/sec)까지 1Hz 간격으로 계산하였다. 모델별 소음기내부의 설정조건은 각각 다음과 같다.

- Model-1 (평창형소음기)
 - type-I : 완전반사성
 - type-II : 흡음성인 Glass Wool(96kg/m³, 15mm)의 실측음향임피던스적용
 - type-III : 완전반사성으로 소음기내부에 격벽을 넣은 상태(그림-2참조)
- Model-2 (미로형소음기)
 - type-A : 간막이판이 없는 경우
 - type-B : 간막이판의 길이 75cm인 경우
 - type-C : 간막이판의 길이 1m인 경우

3.2 모형의 개요 및 실험방법

상기 각 소음기모델에 대한 수치해석결과를 검증하기 위하여 수치계산모델의 1/5 축척모형(두께 10mm의 얇화비닐판제)을 제작해 각각 설정조건에 대한 실험을 하였다. 실험은 그림-3에 나타난 바와 같이 대상소음기의 양단에는 정방형단면(면적: 100mm², cut-off주파수: 1700Hz)을 갖는 길이 1m의 덕트를 접속시켰다. 음원으로서의 덕트쪽 선단에 스피커(혼형 드라이브유닛)를 장치해 광대역 noise를 방사시켰다. 또한, 출구쪽 덕트의 끝단에는 흡음재(배기형Glass wool)를 충전시켜 가능한 한 無反射端조건이 되도록 하였다.

측정시에는 입구덕트 및 출구덕트의 내부 단면에 확인을 겸한 6점의 측정점을 설정했으며, 근접한 2점에 대한 음압을 2마이크로폰형 probe(1/4in. 콘덴서형(B&K4178), Δr:12mm)를 사용하여 측정하였다. 또한 각 측정점 음압으로부터 FFT분석기(B&K2032)를 이용해 Auto-spectrum 및 Cross-spectrum을 구하고, 앞에서 설명된 계산원리에 의해

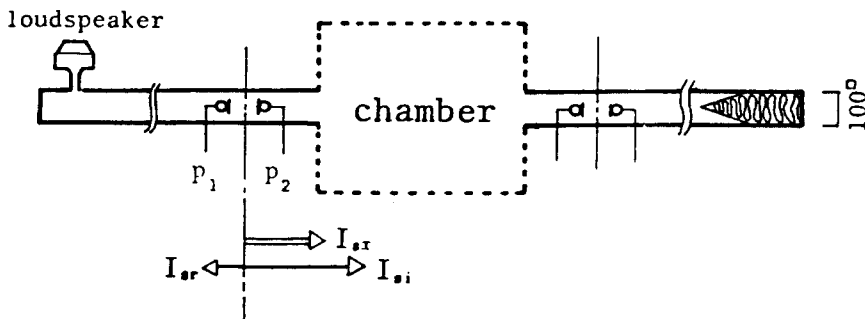


그림-3 측정시스템의 개요

각각의 단면을 통과하는 진행파 음향파워를 구해 투과손실을 산출하였다.

3.3 결과의 비교검토

평창형소음기인 Model-1 의 type-I 에 대한 소음기의 투과손실을 그림-4에 나타내었다. 그림에서 알수 있듯이 유한요소법에 의한 수치해석결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있으며, 이 조건에 있어서는 Davis의 이론식⁸⁾이 대상 소음기의 cut-off주파수(170Hz)까지 적용 가능하기 때문에 수치해석치와 비교한 결과, 단순한 모델이기는 하나 양자는 매우 잘 일치하였다.

그림-5는 Model-1의 소음기내부를 흡음성으로한 type-II에 있어서의 수치해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. 완전반사조건인 type-I의 경우보다는 수치적으로 다소의 불일치가 보이나, 전체적인 투과손실특성은 잘 파악된 것을 알수 있다.

그림-6은 Model-1 소음기내부에 격벽을 설치한 type-III에 대한 투과손실결과의 비교다. 주파수축에 있어서의 투과손실값이 다소의 차이를 나타내고 있으나, 두 결과 모두 격벽설치에 의한 실제현상을 잘 나타내고 있다. 결과적으로 그림-4와 그림-6으로부터 격벽의 유무에 대한 투과손실특성변화를 잘 알 수 있다.

다음은 미로형소음기인 Model-2 각각의 조건에 대한 수치해석결과를 실험치와 비교하여 그림-7에 나타내었다. 이들결과중 수치계산에서는 실물모형의 내포면 흡음을 고려해, 소음기내부의 벽면을 약간 흡음(임피던스 $Z=80000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sec}$)하는 조건으로 하였다. 수치해석결과와 실험치가 200Hz이상의 고주파수부분에서는 다소의 차이를 보이고 있으나, 간막이판의 유무 또는 그 판의 길이에 따른 투과손실경향은 잘 일치하고 있다. 참고로, Model-2의 type-C에 대한 투과손실결과를 1/3 Octave Band로 합성하여 그림-8에 나타낸다.

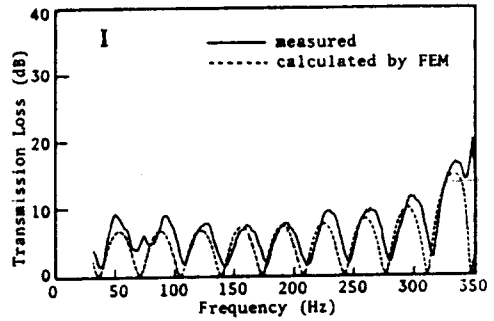


그림-4 반사성인 Type-I의 투과손실 (Model-1)

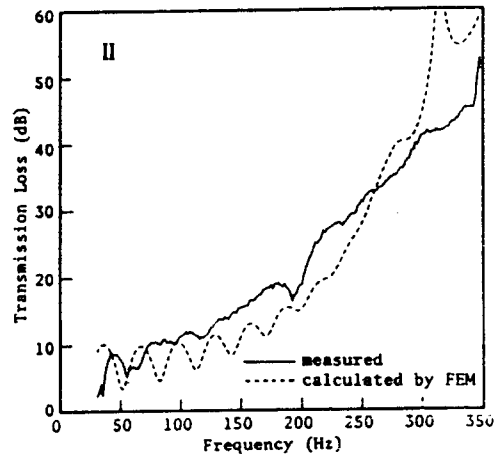


그림-5 흡음성인 Type-II의 투과손실 (Model-1)

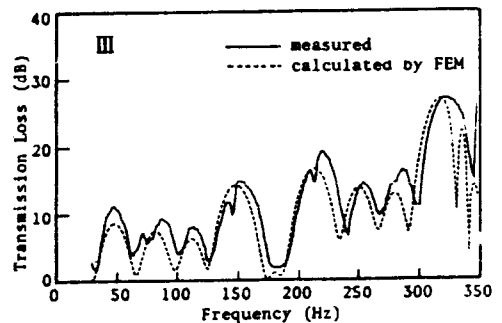


그림-6 격벽을 넣은 Type-III의 투과손실 (Model-1)

4. 결론

본 논문은 각종 소음기의 투과손실에측법으로서 유한요소법에 의한 복소음향인텐시티의 수치계산법을 응용하는 새로운 알고리즘을 개발하였고, 크로스스펙트럼법에 의한 음향인텐시티계측으로 소음기의 투과손실을 산출하는 방법에 대해 검토했다.

특히, 본 논문에서는 수치계산과 측정상에 있어서 음장의 진행파와 후퇴파의 음향인텐시티 분리법을 제시함으로써, 소음기 고유의 투과손실에측을 가능하게 하였으며, 두 방법의 타당성을 검증하기 위하여 단순한 평창형 및 미로형소음기를 모델로 선정, 수치해석 및 축적모형실험을 한 결과, 수치해석 결과는 기존이론치(Davis식) 및 실험치와 잘 일치되어 그 타당성이 입증되었다.

[참고문헌]

1. Y.Kagawa, T.Yamabuchi and A.Mori, "Finite element simulation of an axisymmetric acoustic transmission system with a sound absorbing wall," J.Sound and Vib. Vol.53(3), pp.357-374(1977).
2. J.F.Unruh and W.Eversman, "The utility of the Galerkin method for the acoustic transmission in an attenuating duct," J.Sound and Vib., Vol.23(2), pp.187-197 (1972).
3. R.J.Astley and W.Eversman, "A finite element formulation of the eigenvalue problem : an improved formulation using Hermitian elements and flow condensation," J.Sound and Vib., Vol.69(1), pp.13-25 (1980).
4. 최 석주 외3인, "유한요소법에 의한 소음기의 감음특성해석," 일본건축학회대회학술강연논문집, pp.385-386(1990).
5. 최석주 외3인, "미로형소음기의 감음특성," 일본음향학회강연논문집, pp.653-654(1990).
6. T.Lahti, 2nd International Congress on Acoustic Intensity, pp.519-526(1985).
7. F.J.Fahy, "SOUND INTENSITY", ELSEVIER APPLIED SCIENCE(1989).
8. D.D.Davis, Jr., "Acoustical Filters and Mufflers," in C.M.Harris, Handbook of Noise Control, chap.21, McGraw-Hill(1957).

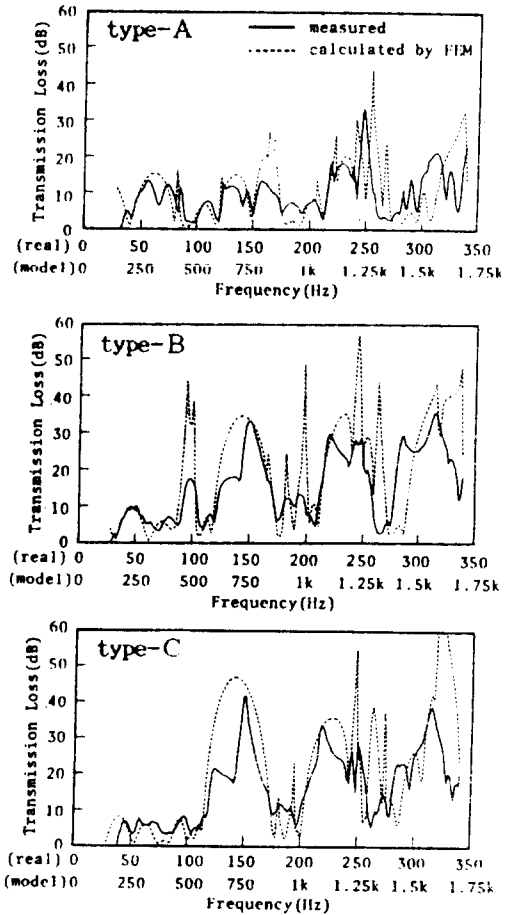


그림-7 Model-2의 type별 투과손실 (수치해석치와 실험치의 비교)

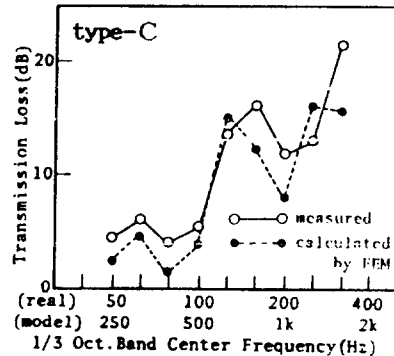


그림-8 Model-2의 옥타브(1/3)별 투과손실의 비교

