

시간 영역 음향 경계 요소법을 이용한 다중 반향 현상의 모사 및 가청화

Simulation and auralization of flutter echo phenomenon using the time-domain acoustic BEM

장해원* · 이정권†

Hae-Won Jang*, Jeong-Guon Ih†

1. 서 론

본 연구에서는 시간에 따른 과도적 음원 변동에 대한 음향 해석 방법 중 하나인 시간 영역 음향 경계 요소법 (time-domain acoustic BEM; TBEM)을 이용하여, ^(1,2) 두 개의 평행한 면 사이에 발생하는 다중 반향 (flutter echo) 현상을 모사하고자 하였다. 이는 음파가 반사를 되풀이하면서 발생하는 불규칙한 잔향음을 의미하며, 공간내의 음질을 떨어뜨리게 된다. 수치 모사는 강체 경계조건을 가진 정육면체 형상의 실내 공간에 형성된 음장에 대해 수행하였고, 다중 반향 소음을 가청화하였다. 또한 다중 반향 현상을 피하기 위해 흡음재를 부착시킨 실내 공간에서의 TBEM 계산 결과 및 무향 공간에서 녹음된 원음과 비교 분석하였다.

2. 기본 이론

2.1 지배 방정식

시간 영역 음향 경계 요소법은 아래와 같은 Kirchhoff 적분식을 기초한다⁽¹⁾:

$$c(\mathbf{r}_0)p(\mathbf{r}_0, t_0) = \frac{1}{4\pi} \int_{R_s} \left[\frac{1}{R_s^2} \frac{(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_s) \cdot \mathbf{n}}{R_s} \{ p(\mathbf{r}_s, t_{ret}) + \frac{R_s}{c_0} \frac{\partial p}{\partial t}(\mathbf{r}_s, t_{ret}) \} - \frac{1}{R_s} \frac{\partial p}{\partial n}(\mathbf{r}_s, t_{ret}) \right] dS. \quad (1)$$

† 교신저자; 이정권 (정회원), 한국 과학 기술원 소음 및 진동 제어 연구센터

E-mail : J.G.Ih@kaist.ac.kr

Tel : 042-350-8211, Fax : 042-350-8220

* 한국과학기술원 소음 및 진동 제어 연구센터

여기서, $c(\mathbf{r}_0)$ 는 입체각, $p(\mathbf{r}, t)$ 는 위치 벡터 \mathbf{r} 과 시간 t 에서의 음압, R_s 는 경계 표면 위의 지점인 \mathbf{r}_s 와 수음점 \mathbf{r}_0 간의 거리, t_0 는 현재 시간, t_{ret} 는 거리 R_s 에 대한 음향 전파의 지연 시간을 고려한 과거 시간 ($t_{ret} = t_0 - R_s/c$)을 나타낸다. c_0 는 음속, S 는 방사체 표면, \mathbf{n} 은 경계 표면에서 해석 영역 쪽으로 향하는 단위 법선 벡터, $(\partial/\partial n)$ 는 법선 방향으로의 공간 미분을 나타낸다.

수음점들을 모든 경계 표면의 절점들로 가정하는 경우, 기본적인 이산화 과정을 통해 식 (1)은 다음의 순환 계산 구조로 표현할 수 있다:

$$\sum_{i=0}^m \psi_i P_{k-i} = \sum_{j=0}^m \phi_j U_{k-i}. \quad (2)$$

여기서, P_{k-i} 와 U_{k-i} 는 $(k-i)\Delta t$ 에서의 경계 표면 절점들의 음압과 속도 벡터, ψ 와 ϕ 는 상수 행렬, $m\Delta t$ 는 TBEM 계산의 최대 지연 시간을 나타낸다. 혼합 경계 조건이 주어지는 일반적인 경우, 경계 표면 변수들은 경계 조건의 형태에 따라 재구성되지만 식 (2)의 순환 계산 구조에는 변함이 없다.⁽³⁾

3. 수치 예제

다중 반향 현상을 모사하기 위한 시험 예제로서, 그림 1과 같은 정육면체 형상의 실내 공간에 형성된 음장 변화를 계산하였다. $\lambda/4$ 기준에 의한 BE 모델의 고 주파수 한계는 0.86 kHz이며, 시간 간격 크기는 0.16ms이다. 가진 음원으로는 (0.4, 0.4, 0.4)m의 위치에 존재하는 점음원을 가정하였다. 또한 다중 반향을 피하기 위한 예로서 반사 계수가 0.3인 흡음재가 부착되었다고 가정한 실내 공간의 내부 음장 이력도 계산하였다.

그림 2에서는 각 경우들에 대해 TBEM 계산을 통해 얻은 내부 음압의 시간 이력을 비교하였으며, 이

들은 모두 가정되었다. 강제 경계 조건이 주어진 경우에는 다중 반향 현상으로 인해 무향 공간에서 녹음된 원음과 비교하여 전체적인 음압 크기와 피크들에서의 진폭이 커졌으며, 흡음재가 부착된 경우에는 다중 반향 현상이 크게 줄어들었다. 이는 해당 내부 공간의 명료도 (clarity, C80)⁽⁴⁾을 계산함으로써 검토할 수 있다. 점음원에 Dirac delta 함수가 주어지는 경우, 거울 상 음원법 (image source method)를 이용하여 충격 응답의 해석해를 얻을 수 있으며, 이를 통해 내부 공간의 명료도를 계산할 수 있다. 일반적인 C80의 허용한계는 -3dB 이상인데 반해 강제 조건의 경우에는 -34.7 dB로 매우 낮았다. 반면에 흡음재가 부착된 경우는 389 dB로 허용 범위를 충족하였다.

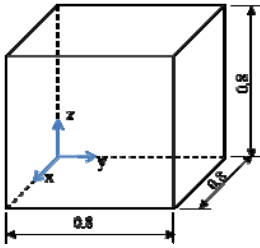


Fig. 1. Geometry of a cubic box, of which boundary element model is composed of 386 nodes and 768 linear triangular elements.

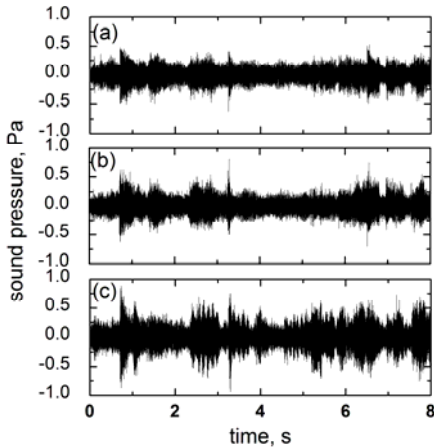


Fig. 2. A comparison of the interior field pressure at (0.60, 0.50, 0.55)m. (a) Original signal recorded in an anechoic room, (b) TBEM calculation for a lined room, (c) TBEM calculation for a rigid room.

4. 결 론

본 연구에서는 다중 반향 현상을 모사하기 위해 강제 조건의 정육면체 실내 공간에서 발생하는 다중 반향 현상을 모사하였다. 이는 흡음재를 부착시킨 실내 공간에서의 계산 결과 및 무향 공간에서 녹음된 원음과 비교 분석하였으며, 최종 결과를 가청화하였다.

후 기

본 논문은 BK21과 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2011-0018242).

참고문헌

- [1] P. H. L. Groenenboom, "Wave propagation phenomena," *Progress in Boundary Element Methods* **2**, Pentech Press, London, chap. 2 (1983).
- [2] W. J. Mansur and C. A. Brebbia, "Formulation of boundary element method for transient problems governed by the scalar wave equation," *Applied Mathematical Modelling* **6**, 307-311 (1982).
- [3] H.-W. Jang and J.-G. Ih, "Stabilization of time-domain acoustic boundary element method for the interior problem with impedance boundary conditions," *J. Acoust. Soc. Am.* accepted 30 Jan 2012.
- [4] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Spon Press, New-York, Chap. 7 (2000).