

방음벽 성능 예측을 위한 시간영역 수치해석의 개발

임창우*, 정철웅*, 이수갑**

Development of Time Domain Numerical Computation for Predicting Noise Barrier Efficiency

Changwoo Lim, Cheolung Cheong and Soogab Lee

Keyword : Noise barriers; Computational Aeroacoustics(CAA); Time domain; Impedance boundary

ABSTRACT

In order to study noise barriers of complex shapes and to assess their efficiency, precise prediction model is required. For instance, geometrical approaches cannot deal with complex diffraction effects. So that in this paper, the time domain numerical computation method(Computational Aeroacoustics method) is applied to estimate noise reduction by diffraction and finite impedance condition. The CAA method can be used to calculate exactly the pressure of complex barrier shape with different impedance condition, such as T-shape, cylindrical edge and multi-edge noise barriers.

1. 서론

현대문명이 창출한 최대의 이기인 각종 교통수단은 피하기 힘든 여러 환경문제를 유발시키고 있다. 특히 자동차와 철도 등 육상 교통은 그것이 주는 혜택만큼이나 큰 대기 오염과 소음과 같은 환경 피해를 주고 있다. 그 중에서도 교통소음에 의한 공해는 점점 심해지고 있으며 소음 저감의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 소음저감 방법은 크게 능동소음제어와 수동소음제어로 나눌수 있는데 수동제어방법 중에서 가장 보편적인 것이 방음벽을 이용한 것이다.

지금까지 방음벽 성능 예측 위해 수많은 방법이 사용되고 있으며 이는 크게 3가지 범주로 분류할 수 있다. 첫번째는 실험(experiment)에 의한 방법으로 May and Osman[1]은 1/16 축소 모델을 이용하여 여러 가지 형상의 방음벽 성능을 실험에 의해 구하였다. 두번째 방법은 기하학적 음향학의 회절효과를 계산하는 이론적 접근 방법(Theoreti-

cal method)으로 Maekawa[2] Pierce[3], Kurze [4] 등의 논문에 잘 나타나 있다. 그러나 이 방법은 복잡한 회절효과를 유발하는 복잡한 형상의 방음벽에 대해서는 계산할 수 없는 한계를 가지고 있다. 세번째는 음파 방정식(wave equation)을 수치적으로 계산하는 방법(Numerical method)으로 방음벽의 성능을 보다 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있다. 이에 해당하는 대표적인 방법이 경계요소법(Boundary Element Method)으로 위의 방법들에 비해 탁월한 장점을 가지고 있어 현재 방음벽 성능을 예측하는데 많이 사용되고 있다. 그러나 소음원의 모델링과 광대역 특성을 갖는 문제의 적용에 일정한 한계를 가지고 있다.

본 논문의 목적은 위에서 언급한 세 가지 접근 방법의 단점을 보완할 수 있는 대안으로 방음벽의 성능해석, 즉 기하학적 모양에 의한 회절과 방음벽 자체의 재료 특성에 의한 임피던스 효과를 정확히 예측할 수 있는 임피던스 경계조건을 사용한 시간영역 수치해석 방법을 제시하고 적용하는데 있다.

이 방법은 유한한 임피던스를 갖는 복잡한 형상(T-shape, cylindrical edge and multi-edge) 방음

* 서울대학교 공력소음 및 소음제어 연구실

** 서울대학교 기계항공공학부

벽의 성능을 정확하게 예측할 수 있을 뿐만 아니라 복잡한 소음원에 의한 소음의 생성을 직접적으로 수치모사 할 수 있으며 광대역 소음(broadband noise) 문제를 보다 쉽게 접근 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

임피던스 경계조건을 이용한 시간영역 방법에 의해 구해진 결과를 검증하기 위해 범용 음향 소프트웨어인 Sysnoise 5.3을 사용하였다.

2. 지배방정식과 수치적 방법

음향파의 전파와 회절현상은 선형성을 만족하므로 선형화된 Euler방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

2차원 작은 진폭의 교란을 고려해보자. 이런 작은 진폭의 교란은 선형화된 Euler방정식에 의해 지배를 받으며 방정식은 다음과 같다.

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

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ v \\ p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho_0 u + \rho u_0 \\ u_0 u + p \\ \rho_0 \\ u_0 v \\ \rho_0 \\ u_0 p + \gamma p_0 v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho_0 v \\ 0 \\ p \\ \rho_0 \\ \gamma p_0 v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S \end{bmatrix}$$

식 (1)의 Q항은 비정상 음원항을 나타낸다.

직각 좌표계에서 선형화된 Euler방정식의 공간 차분법으로는 CAA에서 많이 사용하는 DRP 기법 [5]을 사용하였으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_i \approx \frac{1}{\Delta x} \sum_{j=-N}^N a_j f_{i+j} \quad j=-N, \dots, N \quad (2)$$

여기서 a_j 는 Taylor 전개에 의해서 4차의 정확도를 유지하기 위해 최적화된 계수 [5]이며 주파수 공간에서 $\hat{k}_c \Delta x = 1.163$ 의 특성을 갖는다.

시간 적분법으로는 3차의 정확도를 가지는 Adams-Bashford 방법 [5]을 기본으로 주파수 공간에서 최적화된 4단계 외재적(explicit) 적분법을 사용하였으며 다음 식과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$U_{i,m}^{n+1} \approx U_{i,m}^n + \Delta t \sum_{j=0}^3 b_j K_{i,m}^{n-j} \quad (3)$$

여기서

$$K_{i,m}^n = -\frac{1}{\Delta x} \sum_{j \leq -3} a_j E_{i+j,m}^n - \frac{1}{\Delta y} \sum_{j \leq -3} a_j F_{i,m+j}^n - \frac{L}{\Delta x} \frac{1}{Re_{\Delta x}} \sum_j d_j U_{i+j,m}^n - \frac{L}{\Delta y} \frac{1}{Re_{\Delta y}} \sum_j d_j U_{i,m+j}^n + Q_{i,m}^n$$

여기서 d_j 는 감쇄 계수이며 Re_{Δ} 는 격자 레이놀즈 수 ($Re_{\Delta} = c\Delta x/\nu_a$)이다.

3. 경계조건

3.1 방사경계조건(Radiation Boundary Condition)

수치계산에 있어 현실적으로 계산영역을 무한한 곳까지 확장할 수 없으며 비효율적이다. 따라서 원방(far field)에서 계산 영역으로 파의 반사가 없도록 모사할수 있는 경계조건이 필요하다. 따라서 이를위해 Tam과 Dong[6]이 제안한 경계조건을 적용하였다. 선형화된 Euler 방정식은 엔트로피파(Entropy Wave), 와류파(Vorticity Wave), 음향파(Acoustic Wave)의 세 가지 파를 지원한다. 엔트로피파는 밀도만의 변화를 수반한 것이며 자유류 흐름을 따라 전파된다. 와류파는 속도만의 변화를 수반한 것이며 엔트로피파와 마찬가지로 자유류 흐름을 따라 이동한다. 음향파는 밀도, 속도, 압력 등 모든 변수들의 변화를 수반한 것이며 음속으로 모든 방향으로 전파된다. 자유류가 계산 영역의 원방 경계를 빠져나가지 않는 영역에서는 세 가지 파 중에서 음향파만이 통과하게 되므로 그런 영역에서는 음향파에 대한 접근해를 이용하여 이 접근해가 만족시키는 편미분 방정식을 구하여 그 식을 방사경계조건(Radiation Boundary Condition)으로 사용했다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{V(\theta)} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} \right) \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ v \\ p \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

여기서 $V(\theta) = c_0 [M \cos \theta + (1 - M^2 \sin^2 \theta)^{1/2}]$
 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

3.2 임피던스를 고려한 벽면경계조건 (Wall Boundary Condition considering Impedance)

3.2.1 임피던스의 모델링

임피던스는 표면에 수직한 속도성분 v_n 과 음압 p 의 비로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$Z = p/v_n \quad (5)$$

임피던스는 복소수양($Z=R+iX$)으로 음향적으로 다루어지는 표면에 의해 음파가 반사될 때 음의 크기와 위상변화를 나타낸다.

1970년 Delany와 Bazley[7]는 isotropic fibrous material의 음향 임피던스를 무차원 매개변수 $\rho_0 f / \sigma$ (ρ_0 는 매질의 밀도, f 는 주파수, σ 는 물질의 flow resistivity)로 표현한 실험식을 발표하였다. 본 연구에서도 임피던스 계산을 위해 이 실험식을 이용했다. 그 식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\frac{Z_2}{\rho_0 c} = 1 + 0.0571 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.754} + i \cdot 0.0870 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.732} \quad (5)$$

[그림 1]은 식 (5)와 잔디밭에서 측정된 데이터[8]를 비교한 것으로 위의 식 (5)가 만족할 만한 정확성을 가지고 주파수에 따른 경향성을 잘 따라 감을 알 수 있다.

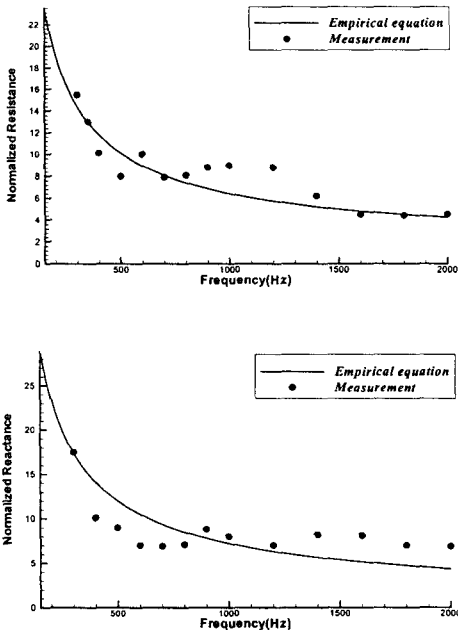


Fig.1 Comparison between measurement of the normalized surface impedance of law(Attenborough) and prediction of Eqs. (5) with $\sigma=506\text{KNs}/\text{m}^4$

3.2.2 임피던스 벽면경계조건

단일 주파수 $\omega(\omega>0)$ 로 구성된 음장을 고려해 보자. 음장과 속도장은 시간에 대해 종속적이고 그 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(x, t) = \text{Re}[\hat{P}(x)e^{i\omega t}], \quad v(x, t) = \text{Re}[\hat{v}(x)e^{i\omega t}]$$

공기의 특성 임피던스($\rho_0 c$)로 정상화한 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다. $Z/\rho_0 c = R + iX$

이는 주로 주파수 영역에서 계산되어 진다. 그러나 Tam 과 Auriault[9]는 임피던스를 갖는 벽면 경계에서 주파수 영역에서 계산되는 것과 동등한 시간 영역 임피던스 경계조건을 제한하였다.

양의 정상화된 임피던스의 감용저항(reactance) X 에 대해, 표면에서 단일 주파수의 시간 영역 경계 조건은 다음과 같다. ([그림 2] 참고)

$$p = -Rv - \frac{X}{\omega} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6)$$

여기서 v 는 표면에 수직인 속도 성분($v = -v_n$)

식 (6)에 무차원된 선형 모멘텀 방정식을 적용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\omega}{X} (p + Rv) \quad (7)$$

위 식을 사용하여 가상점(Ghost point)에 가상값을 이용하는 벽면경계조건을 적용하였다. 이는 벽면 격자 뒤에 가상의 격자를 두어 벽면에서 다음 시간의 속도를 경계조건에서 줄 때 그 값을 만족하도록 가상격자계에서 압력값을 구하여 사용하는 것이다.

4. 임피던스 벽면경계조건 검증

시간영역에서 임피던스 경계조건 식 (6)의 유효성을 검증하기 위해서 CAA를 이용한 수치적 해와 이론적 해를 비교하였다.

먼저 flow resistivity $\sigma=200\text{kNs}/\text{m}^4$ (grass covered surface와 등가)인 흡음표면(absorbing surface)위에서 단일 주파수로 방사하는 음압장을 고려해 보자. ([그림 2] 참고)

속도 v 와 음압 p 는 가상점(Ghost point)를 제외하고 식 (3)에 의해 다음 시간으로 갱신(update)되고 가상점은 식 (7)에 의해 계산된다.

[그림 3,4]는 시간영역에서의 임피던스 효과를 고려한 수치해석 결과와 주파수 영역에서의 이론적 해를 비교한 것이다. 이 두 결과를 통해 위의 임피던스 경계조건의 시간영역 해가 정확함을 알 수 있다.

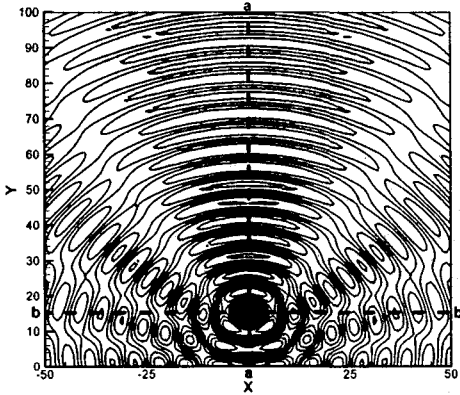


Fig. 2 Reflected sound field with absorbing surface defined by $\sigma = 200 \text{ kNs/m}^4$

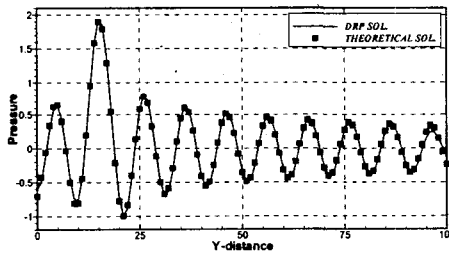


Fig. 3 Spatial pressure distribution of line a-a in fig. 2 ; —, Time domain solution by DRP scheme; ■—■, Frequency domain solution by theoretical theory

5. 계산결과

방음벽으로 인한 상대적 방음효과의 계산을 위해서 2차원의 모델이 고려되었으며 음원은 선음원이고, 지면은 완전 반사면으로 가정하였다. 또 임피던스 벽면 경계조건을 이용한 시간영역 수치해석 결과를 비교하기 위해 범용 음향소프트웨어인 Sysnoise 5.3의 BEM 계산을 이용하였다.

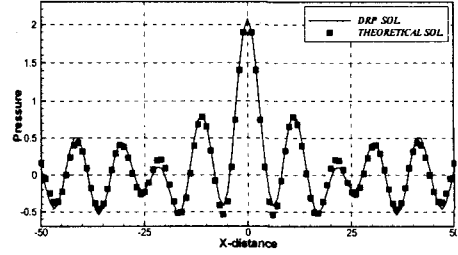


Fig. 4 Spatial pressure distribution of line a-a in fig. 2 ; —, Time domain solution by DRP scheme; ■—■, Frequency domain solution by theoretical theory

[그림 5,6]는 계산에서 고려한 방음벽의 모양과 치수, 음원과 수음점의 수평 위치를 나타내고 있다.

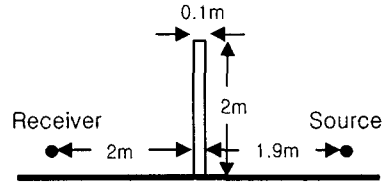


Fig. 5 Straight barrier geometry

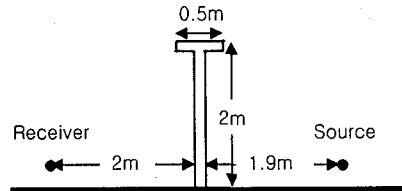


Fig. 6 T-shape barrier geometry

[그림 7,8]은 위의 [그림 5,6]에 고려되어진 형상을 가지는 방음벽에 대해서 소음원과 수음점이 각각 지면으로부터 0.5m인 경우에 대해서 과도감쇄 (Excess Attenuation)를 나타낸 것이다.

[그림 7,8]은 BEM과 시간영역 수치기법 해 간의 좋은 일치성을 보여주고 있다.

[그림 9]는 [그림 5]와 동일한 형상에 방음벽 벽면에 흡음효과를 줌으로써 방음벽에 의한 과도감쇄가 증대되는 것을 보여주고 있다. 과도감쇄는 주

파수가 증가할수록 커짐을 알 수 있다.

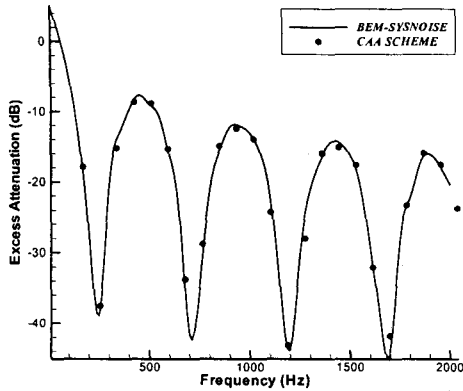


Fig. 7 Excess Attenuation. Straight barrier

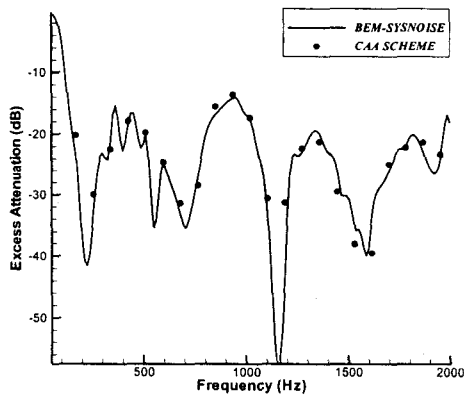


Fig. 8 Excess Attenuation. T-shape barrier

6. 결론

지금까지 방음벽의 성능해석을 위하여 주로 사용한 방법들의 대안으로 임피던스 경계조건을 이용한 시간영역 수치해석 방법을 제안하였다. 또한 정확성의 검증을 위하여 Sysnoise의 BEM 방법에 의한 결과를 비교하였다. 본 논문에서 제시한 시간영역 수치해석 방법의 여러 가지 장점을 고려해볼 때 임의의 흡음률을 가지는 복잡한 형상의 방음벽 성능을 해석할 수 있는 유망한 도구로써 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

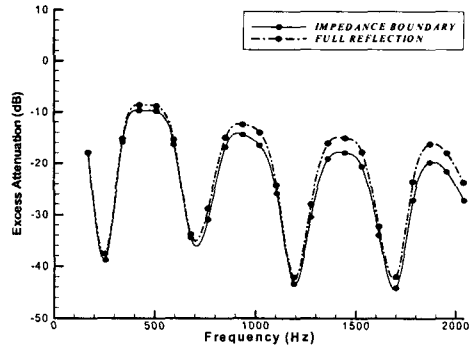


Fig. 9 Excess Attenuation for straight wall with surface admittance of zero($\sigma=\infty$) or an admittance defined by $\sigma=200kNs/m^4$

참고문헌

- [1] May, D. N. and Osman, M. 1980, "Highway noise barriers : New shapes", Journal of Sound and Vibration, Vol.71, pp73-101
- [2] Maekawa, Z. 1968, "Noise reduction by screens", Appl. Acoust, Vol.1, pp157-173
- [3] Pierce, A. D. 1974, "Diffraction of sound around corners and over wide barriers", Journal of the Acoustical Society of America, Vol.55, pp941-955
- [4] Kurze, U. J. 1974, "Noise reduction by barriers", Journal of the Acoustical Society of America, Vol.55, pp504-518
- [5] Tam, C. K. W. Webb, J. C. 1994, "Dispersion Relation Preserving Finite Difference Schemes in Computational Aeroacoustics", Thoret. Comput. Fluid Dynamics, Vol.6, pp. 303-322.
- [6] Tam, C.K.W. and Dong, T.Z., 1996, "Radiation and Outflow Boundary Conditions for Direct Computation of Acoustics and Flow Disturbance in a Nonuniform Mean Flow", J. Comput. Acoustics, Vol.4.
- [7] Delany, M. E. and Bazley, E. N. 1970, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", Applied Acoustics, Vol.3, pp105-116
- [8] Attenborough, K. 1985, "Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces", Journal of Sound and Vibration, Vol.99, pp521-544
- [9] Tam, C. K. W. and Auriault, L. 1996, "Time-domain impedance boundary conditions for computational aeroacoustics", AIAA, Vol.34, pp917-923