

발전소 변압기 밀폐구조의 음향해석

이준신*, 김연환**, 손석만*** (전력 연구원 기계공학 연구소)

An Acoustical Analysis on the Transformer Enclosure in Power Plants

Jun-Shin Lee, Yeon-Whan Kim, Seok-man Sohn

ABSTRACT

The enclosure with a small opened area is extensively used in power plants to reduce the propagating noise from transformers. The radiation impedance associated with the location and width of the opened area, and the geometric configurations of internal acoustic field is very important to determine the basic acoustic characteristics of this partial enclosure. In this study, two-dimensional rectangular chambers with opened areas are investigated to examine the acoustic properties of the enclosure. The mode expansions of the physical variables defined on boundary surfaces are introduced to derive a simple algebraic equation. The acoustic characteristics can be easily predicted by this analytical approach, and the results well agree with physical grounds. Physical concepts as results of this work will be helpful to use the partial enclosure as a noise control element.

1. 서론

밀폐 (partial enclosure)는 벽의 차음, 흡음 특성 등을 이용하여 기기로부터 유발되는 소음을 차단하는 구조로서, 완전한 밀폐로 인하여 기기의 온도 상승 및 환기 등이 문제가 될 때 밀폐 면적에 비하여 작은 열린 틈을 만들어 환기 및 냉각을 원활하게 한다. 크기에 상관없이 열린 틈이 존재하는 내-외부 연성 음장의 경우, 열린 틈의 음향학적 특성이 차음 및 흡음재의 성능보다 전체 음향계를 지배하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 부분 밀폐는 산업 전반적으로 많이 이용되며, 특히 환경 소음에 지대한 영향을 끼치는 도시 인근 발전소의 변압기는 소음 저감을 위해 부분 밀폐 구조를 대부분 적용하고 있어 이에 대한 특성 연구가 요구되고 있다.

부분 밀폐의 음향 특성은 음원의 방향과 관계되는 내부 공간의 기하학적 형상, 열린 틈의 위치 및 크기 등에 의해 설명될 수 있다. 이와 같이 공기로 직접 연결된 음장 내-외부 연성장에 대한 연구들은 수치 해석

적 관점과 물리적 특성 관찰 측면에서 진행되어 왔다. 수치 해석적 연구들은 주로 음장 해를 정확히 구하기 위해 처리 되어야 할 수학적인 사항들을 주로 다루고 있다. 내용 별로는 기하학적으로 왜곡된 음장의 처리, 얇은 물체를 모델링 하는 기법 및 내부 음장 공진점에서의 해의 비유일성 해결 등으로 분류된다. 최근에 Lee & Ih는 부분 밀폐 문제를 물리적인 관점에서 고찰하였으며, 음원의 방사 임피던스 변화를 밀폐 구조가 존재하지 않을 때와 비교하였다. 이 연구에서는 방사 효율이 내부 음장을 형성하는 기하학적 형상에 영향을 많이 받으며, 내부 공진점에서 최대가 됨을 보여준다. 특히, 전체 면적에 비해 열린 틈이 작아 내부 음장이 강하게 형성된 경우에 이런 현상이 두드러짐을 보여주었다. 반면, 내부 고유모드와 각 피크들의 크기 변화에 대한 상관성에 대한 언급 및 음원과 열린 틈의 방향성에 대한 검토는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 밀폐 구조에 온도 상승 방지 및 환기를 목적으로 하는 작은 열린 틈이 있을 때의 소음원

의 방사 효율을 고찰해 보고자 한다. 소음원의 방사 효율을 해석적으로 쉽게 살펴보기 위해 2차원 모델을 사용하였으며, 음원과 열린 틈의 방향에 대한 음원의 방사 효율에 대해서 고찰을 하였다. 해석 방법으로는, 경계면에서의 물리량을 음향 고유 모드로 전개하는 방법을 사용하였으며, 이를 이용하여 전체 음향계를 간단한 대수식으로 표현하였다. 음원의 방사 임피던스에 대한 해석 결과에서 열린 틈에 의한 음장의 특성 변화를 예측하며, 소음 제어용으로 사용 시 고려해야 할 중요한 물리적 사항을 도출하기로 한다.

2. 수학적 표현

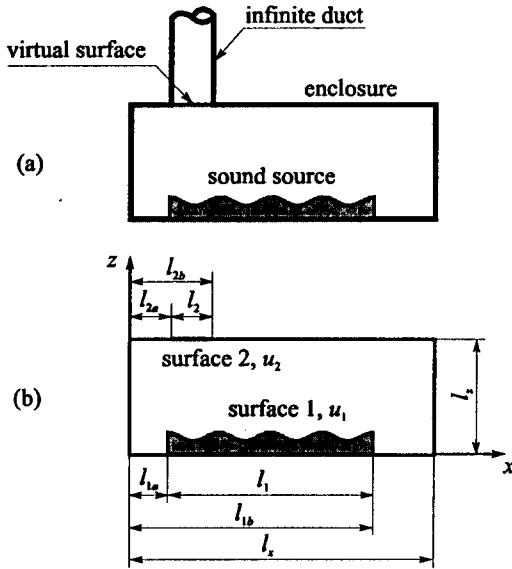


Fig. 1 열린틈이 존재하는 밀폐구조의 모식도

밀폐 구조에 열린 틈이 존재하는 형태의 물리적 특성을 개괄적으로 파악하기 위해 Fig. 1(a)와 같은 2차원 부분 밀폐 구조를 고찰해 보기로 한다. 음원과 열린 틈에 대한 기하학적 위치 및 크기의 정의는 Fig. 1(b)와 같으며, 열린 틈과 내부 벽면에는 문제를 쉽게 정의하는 차원에서 무한 덕트 및 강제 조건을 각각 설정하였다. 전체 음장은 가상 표면인 열린 틈을 경계로 내부와 덕

트부로 나뉘며, 가상 표면을 덕트 방향으로 2차 음원이 존재하는 것으로 모델링 한다. 가상 음원에 의해 모델링 된 2개의 음향장은 가상 표면에서의 음압과 입자속도의 연속 조건에 의해 하나의 수식으로 표현되게 된다.

Green의 함수 $G(r|r_b)$ 는 점음원이 공간좌표 r_b 에 있을 때 계측좌표 r 에서의 음장 해이다. 이때 Green의 함수가 Neumann 경계조건을 만족하면, 임의의 한 주파수 ω 에 대한 선형화된 파동 방정식은 다음과 같은 Rayleigh 방정식 형태가 된다:

$$p(r) = -ik\rho c \int_S G(r|r_b) u(r_b) dS_b. \quad (1)$$

여기서, p 는 음압, u 는 입자속도, c 는 음속, $k(=\omega/c)$ 는 파수(wavenumber), ρ 는 매질의 밀도, S 는 면적, 아래첨자 b 는 경계면 그리고 $\partial/\partial n_b$ 는 경계면에서 음장 내부 방향으로의 수직 편미분을 나타낸다.

각 경계면에서 정의된 음압과 입자속도를 모드 함수를 이용하여 표현하면 다음과 같다:

$$p(r_j) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{jn} \Phi_n(r_j), \quad u(r_j) = \sum_{n=0}^{\infty} u_{jn} \Phi_n(r_j). \quad (2)$$

여기서, $\Phi_n(r_j)$ 는 단위 직교성을 만족하며, 이 직교성을 이용하여 모드계수 p_{jm} 을 구하면 다음과 같다:

$$p_{jm} = \rho c \sum_{j=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} (T_{jj})_{nm} u_{jn}. \quad (3)$$

여기서

$$(T_{jj})_{nm} = -ik \int_{S_j} \int_{S_j} \Phi_m(r_j) \Phi_n(r_j) G(r_j|r_j) dS_j dS_j. \quad (4)$$

결과적으로 Eq. (3)을 행렬 방정식의 형태로 바꿔쓰면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다:

$$P_1 = \rho c T_{11} U_1 - \rho c T_{12} U_2, \quad (4a)$$

$$P_2 = \rho c T_{21} U_1 - \rho c T_{22} U_2. \quad (4b)$$

Fig. 1과 같은 한쪽면에 음원이 있는 무한 덕트에서는 음압과 입자속도는 선형 파동 가정하의 한 주파수 ω 에서 다음과 같은 간단한 관계를 갖는다:

$$p = \rho c e^{ik(x-l_1)} u. \quad (5)$$

이를 Eq. (4)을 구한 방법과 같이 행렬식으로 바꾸면 다음과 같다:

$$P_2 = \rho c \hat{T}_{22} U_2 = \rho c I U_2. \quad (6)$$

여기서, \wedge 는 내부 음장과 구별을 위한 표시이며, I 는 단위 행렬을 의미한다. 결과적으로 Eq. (4)과 (6)을 정리하면 가상음원의 입자속도 및 음원의 임피던스 행렬을 다음과 같이 구할 수 있다:

$$U_2 = -(\hat{T}_{22} + T_{22})^{-1} T_{21} U_1, \quad (7)$$

$$P_1 = \rho c Z_{11} U_1. \quad (8)$$

여기서, 음원의 방사 임피던스 행렬은

$$Z_{11} = T_{11} - T_{12} (\hat{T}_{22} + T_{22})^{-1} T_{21} \quad (9)$$

로서, 음압과 입자속도 모드가 같은 경우에만 방사 파워가 존재하게 된다. 따라서 행렬 Z_{11} 의 m, m 번째 값

$$Z_m = (Z_{11})_{mm} \quad (10)$$

를 음원의 m 번째 모드에 대한 방사 임피던스로 정의하기로 한다. 여기서, 임피던스 Z_m 의 실수 값은 덕트부를 통해 외부로 전파되는 에너지와 직접 상관이 있으나, 허수부는 전파되지 않는 지엽적인 값이 된다. 따라서 음원의 방사 임피던스의 실수 값의 크기가 방사효율을 나타낸다 할 수 있다.

Eq. (7)에 의해 가상음원의 크기가 정해지게 되면, 임의의 점에서의 음압은

$$p(r_a) = \rho c [T_{a1} U_1 - T_{a2} U_2] \quad (11)$$

와 같이 표현된다. 이때, 행렬 T_{aj} 는 열 벡터로서 이에 대한 임의의 한 요소는

$$(T_{aj})_n = -ik \int_{S_j} \Phi_n(r_j) G(r_a | r_j) dS_j \quad (12)$$

와 같으며, 이것은 음압과 j 번째 경계표면의 n 번째 입자속도 모드와의 관계가 된다.

Eq. (4) 의해 정의된 모드 계수들은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$(T_{jj})_{m_j m_j} = ik \sum_m \frac{\cos[s_m(l_z - z_j)] \cos(s_m z_j)}{s_m \sin(s_m l_z)} \times \int_{S_j} \Phi_{m_j}(r_j) \hat{\Phi}_m(r_j) dS_j \int_{S_j} \Phi_{m_j}(r_j) \hat{\Phi}_m(r_j) dS_j \quad (13)$$

여기서, 표면 1과 2에서의 모드함수는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\Phi_m(r_j) = \sqrt{\frac{\epsilon_m}{l_x}} \cos[m_j \pi(x - l_{jx}) / l_{xj}]. \quad (14)$$

만약, 이 고유함수를 x 축 전표면에 정의한다면, Eq. (14)은 다음과 같이 간략화가 된다:

$$\hat{\Phi}_m(r) = \sqrt{\frac{\epsilon_m}{l_x}} \cos(m\pi x / l_x), \quad (15)$$

여기서 \wedge 표시는 특별히 x 축 전표면에서 정의됨을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

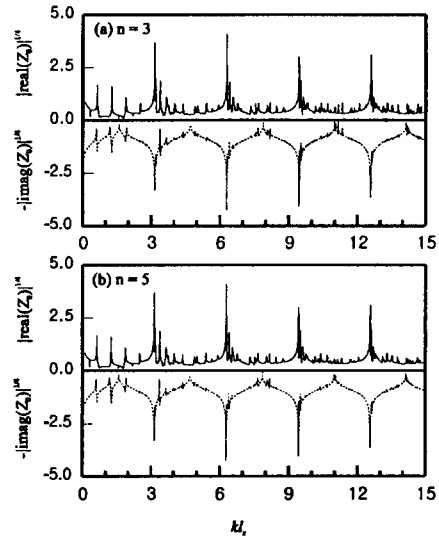


Fig. 2. 표면 모드수 n 에 따른 음원 방사 임피던스 변화 ($l_1/l_2 = 0.1$; $l_3/l_4 = 0.1$, $l_5/l_6 = 0.9$; $l_7/l_8 = 0.1$, $l_9/l_{10} = 0.2$).

Fig. 2은 개구부가 존재하며 음원이 피스톤 운동을

할 때의 음원 임피던스를 표면 1, 2의 모드 갯수를 변화시키면서 구한 결과로서 극한 상황을 예로 들기 위해 세장비 l_x/l_z 를 0.1로 잡았다. 여기서, 음원이 반사없이 단순 전파될 때의 음향 임피던스 ρc 와 비교하기 쉽게 하고, 이 값을 중심으로 변화되는 양을 쉽게 관찰할 수 있도록 임피던스 값에 1/4 계수를 취했다. 파수와 파고 갯수와의 관계를 생각해 보면, 길이 방향 파수가 $kl_x=15$ 일 때 폭방향 파수도 $kl_z=150$ 이 되어 어림잡아도 폭방향에 걸리는 음파의 파고 갯수가 20개 이상이 된다. 따라서, 음장을 표현하는 데 20개 이상의 모드 수가 필요하리라 생각할 수 있다. 하지만, Fig.2의 결과에 의하면 파수 $kl_x < 15$ 의 범위에서 모드 갯수가 3개 정도면 음향 임피던스를 정확히 구할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 음원에서 발생시키는 모드가 피스톤 형태이고 그 크기가 거의 전 표면에 위치하기 때문에 많은 모드 수가

필요하지 않음을 보여주는 것이다. Fig. 2의 결과에서 보면 내부 음장 공진점에 상당하는 많은 피크들이 나타나게 되는 데, 이들에 대해서는 기하학적 형상 변화에 따른 음원 임피던스 고찰에서 살펴보기로 한다.

Fig. 3은 음원에 의한 음의 세기 (acoustic intensity)의 방향을 그린 결과로서, 음원에서 발생하는 음파가 내부 음장을 통과하여 덕트부로 진입되는 현상을 잘 보여주고 있다. 이차원 사각 음장의 (m, n) 모드들 x 및 z 방향에 m 과 n 개의 영선이 존재하는 모드로 정의하면, Fig. 3(a)의 경우에는 $(1, 0)$ 모드 형태가 전체 음장을 지배하여 맴돌이 모양의 음선이 나타나야 된다. 하지만, 음원이 피스톤 모양이기 때문에 전체 음장이 $(0, 0)$ 모드에 의해 지배 된다. 반대로 (b)와 (c)는 좌우 대칭 모드인 $(4, 1)$ 또는 $(8, 2)$ 가 가진되며, 음장에 그림에서와 같이 2개 또는 8개의 맴돌이 음선을 나타나게 한다.

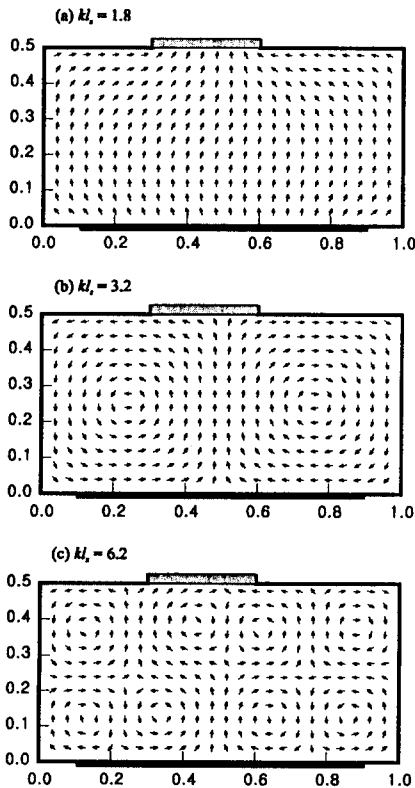


Fig. 3. 피스톤 음원에 의한 음의 전파 ($l_x/l_z=0.5$; $l_x/l_z=0.1$, $l_x/l_z=0.9$; $l_x/l_z=0.3$, $l_x/l_z=0.6$).

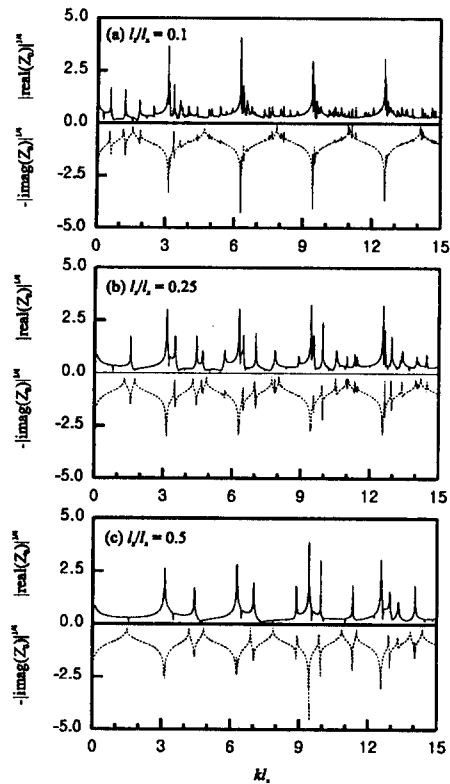


Fig. 4. 뿔구조의 높이 변화에 따른 음원 방사 임피던스 비교 ($l_x/l_z=0.1$, $l_x/l_z=0.9$; $l_x/l_z=0.1$, $l_x/l_z=0.2$).

Fig. 4는 세장비 변화에 대한 음원의 방사 임피던스를 구한 결과로서, 내부 음장의 공진점 근방에서 피크 값을 가지는 것을 알 수 있다. 각 피크의 크기는 세장비가 작을수록 높이 방향 공진점에서 특히 큰 값을 형성하게 되며, 세장비가 커지게 되면 각 피크들의 값이 점점 비슷해지게 되는 것을 관찰할 수 있다. 이런 현상들은 3가지 요소 (음원, 가진 모드의 모양과 열린 틈의 위치)에 설명할 수 있다. 높이 방향 공진점에서 특히 피크가 나타나는 이유는 3 요소들의 방향성이 일치하는 경우로서, 세장비가 작을수록 모드의 방향성이 확실하여 이런 현상이 두드러지게 나타나게 된다.

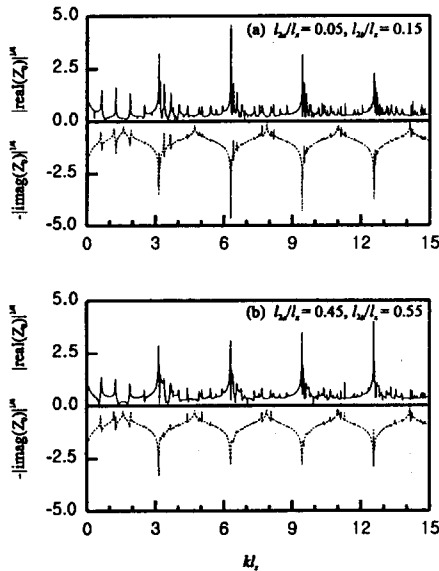


Fig. 5. 열린 틈의 위치에 따른 음원 방사 임피던스 변화 ($l_1/l_2=0.1$; $l_2/l_3=0.1$, $l_2/l_3=0.9$).

Fig. 5는 열린 틈의 위치를 변화시키면서 구한 음원 임피던스를 비교한 결과로서 열린 틈의 위치에 따라 높이 방향 피크의 크기가 변화함을 알 수 있다. 주파수가 높아지게 되면 음원에 의해 방출되는 음파의 직진성이 커지게 되어 음원 임피던스는 점점 커지게 된다. 따라서, 높이 방향 피크들은 주파수 변화에 따라 이런 경향을 따라간다. 반면, 상대적으로 주파수가 낮은 첫번째 피크의 경우는 음원의 중심부로 갈수록 커지게 되는데, 이는 음원이 길이 방향 전표면에 위치하지 않고 좌

우 대칭이기 때문으로 사료된다. 이와 같은 음원의 대칭 성질 때문에 앞에서 언급 한 바와 같이 좌우 대칭이 아닌 모드는 가진 되지 않아 음선과 음원 임피던스에 효과가 거의 나타나지 않게 된다. 이와 같은 현상은 Fig. 6의 결과에서 음원의 비대칭 가진에 의해 Fig. 6(a)에는 잘 나타나지 않았던 피크가 Fig. 6(b)에서 뚜렷히 나타남을 보고 쉽게 확인할 수 있다.

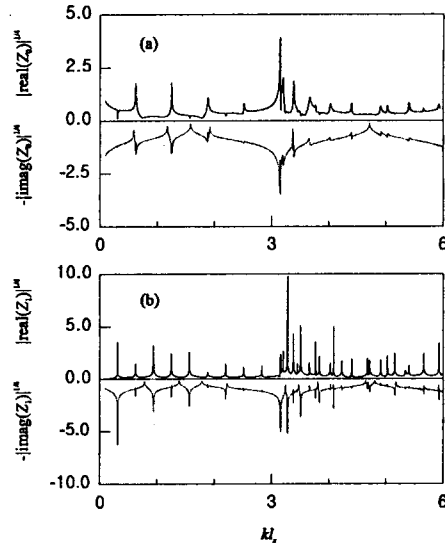


Fig. 6. 모드별 음원 방사 임피던스의 비교 ($l_1/l_2=0.1$; $l_2/l_3=0.1$, $l_1/l_2=0.9$; $l_2/l_3=0.1$, $l_2/l_3=0.2$).

IV. 결론

사각 형상의 밀폐구조에 작은 열린 틈이 있을 때의 음향학적 특성을 고찰하였으며, 이 구조가 소음제어 용도로 사용되었을 때 고려되어야 할 사항들을 도출하였다. 본 연구에서는 경계면에서의 변수를 모드 전개 방법을 이용하여 표현하고 이를이용 전체 음장을 표현하였으며, 각 결과들은 음향학적 상식과 잘 조화됨을 확인하였다. 결과들을 종합해 보면 열린틈이 존재할 때의 방사 임피던스는 내부음장의 고유진동수 근방에서 피크치를 가지며, 밀폐 구조가 음원에 밀착될수록 높이 방향으로의 방사 효율이 커짐을 알 수 있었다. 각 피크들의 크기는 음원, 가진 모드의 모양과 열린 틈의 위치등

에 따라 다르게 나타나게 됨을 관찰할 수 있었다. 특히 강조하고 싶은 내용은 소음제어 용도로 부분 밀폐구조를 사용할 경우에는 음원에 밀폐계가 밀착되어 있는 경우가 많으므로, 음원의 주파수가 높이 방향 공진점을 피하도록 하는 것이 설계시 중요한 사항으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Y. C. C. Sung and N. Lalor, 1988, "The Prediction of Engine Noise Reduction by Using Shields and Partial Enclosures and the Optimization of their Design," Proc. Institution of mechanical engineers on Advances in the Control and Refinement of Vehicle Noise, Paper C29, 117-122.
2. A. F. Seybert and C. Y. R. Cheng, 1987, "Application of the Boundary Element Method to Acoustic Cavity Response and Muffler Analysis," Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Vibration, Stress, and Reliability in Design. **109**, pp 15-21.
3. S. M. Kirkup, "The computational modeling of acoustic shields by the boundary and shell element method," Comput. Struct. **40**, 1177-1183 (1991).
4. T. W. Wu and G. C. Wan, 1992, "Numerical modeling of acoustic radiation and scattering from thin bodies using a Cauchy principal integral equation," Journal of the Acoustical Society of America, **92**, 2900-2906.
5. J.-S. Lee and J.-G. Ih, 1995, "On the Method for Estimating the Volume Velocity of an Acoustic Source in a Chamber," Journal of Sound and Vibration, **182**(4), 505-522.
6. J.-S. Lee and J.-G. Ih, 1995, "Reactive Characteristics of Partial Screens for a Sound Source Mounted in an Infinite Baffle," Journal of the Acoustical Society of America, **98**(2), pp 1008-1016.
7. E. H. Dowell, G. F. Gorman, III, and D. A. Smith, 1977, "Acoustoelasticity: General Theory, Acoustic Natural Modes and Forced Response to Sinusoidal Excitation, Including Comparison with Experiment," Journal of the Acoustical Society of America, **52**, pp 519-542.
8. P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1968, Chapter 7.
9. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley, New York, 1982), 3rd ed., Chapter 8.
10. A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications* (McGraw-Hill, New York, 1981), Chapter 5.
11. M. Abramowitz and I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover, New York, 1970, Chapters 9 and 11.