

반사 음장을 고려한 음향 확산 구조의 위상최적설계 Topology optimization of an acoustic diffuser considering reflected field

양지은† · 김윤재* · 김윤영**

Jieun Yang, Yoon Jae Kim and Yoon Young Kim

1. 서 론

음향시스템의 차음, 흡음 성능을 향상시키거나 물리적 현상을 파악하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근 들어 이러한 음향시스템의 해석 연구뿐만 아니라 각종 최적화 기술을 이용하여 음향시스템의 구조를 최적화하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 콘서트 홀 또는 다목적 홀 내 음향 공간의 음장 균일성 향상을 위한 음향 확산기의 최적 설계 문제는 그 동안 강도 있게 다루어지지 않았다.

본 연구에서는 음향 확산기(Acoustic Diffuser)의 최적설계를 위한 기초연구로써 음향 확산기 구조물을 강체로 가정하고 해당 음향 확산기 구조물의 위상 최적화 방법을 제안한다. 해당 방법을 통해 설계한 음향 확산기와 일반 강체 평면의 확산 성능을 비교함으로써 제안한 방법의 실제 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 확산 구조에 의한 반사 음장

입의 음향 공간 내에서 \mathbf{x}_s 에 위치한 소음원의 가진에 의해 발생하는 음장은 다음과 같이 헬름홀츠 방정식(Helmholtz equation)을 이용하여 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot (\rho^{-1} \nabla p) + \omega^2 \kappa^{-1} p = -\delta(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s) \frac{\partial q}{\partial t}. \quad (1)$$

여기서 ρ , κ 와 ω 는 각각 매질의 밀도, 체적탄성 계수, 각진동수를 의미하며 ρ 와 κ 는 소리의 전파 속도 c 와 $\kappa = \rho c^2$ 의 관계를 갖는다. 소음원의 특성은 식 (1)의 우항과 같이 소음원의 체적 속도 q 와

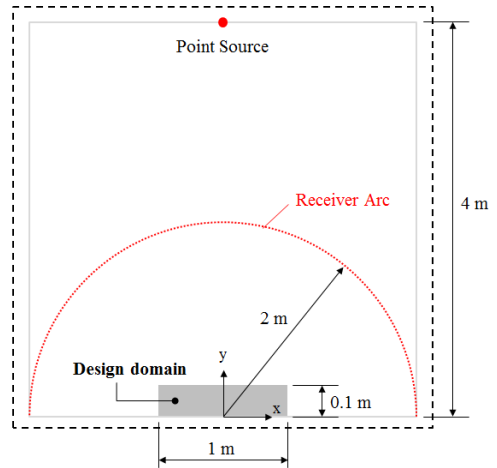


Figure 1 Schematic diagram for an acoustic diffuser optimization

Dirac Delta 함수 δ 를 이용하여 표현된다. 식 (1)을 유한요소법을 이용하여 표현하면 Figure 1과 같은 음향 공간의 이산화 가능하다.

$$[\mathbf{M} - \omega^2 \mathbf{K} + j\omega \mathbf{B}^{out}] \mathbf{p} = \mathbf{f}. \quad (2)$$

식 (2)에서 \mathbf{M} 과 \mathbf{K} 는 시스템의 질량 행렬과 강성 행렬을 의미하며 \mathbf{B}^{out} 은 해석 모델의 경계 조건에 의해 발생한다. \mathbf{p} 와 \mathbf{f} 는 각각 음압 벡터와 외력 벡터를 의미한다. 음향 확산기의 확산 성능 해석을 위하여 일반적으로 상반원리에 기반한 경계요소법이나 FDTD 방법이 주로 이용되지만 본 연구에서 다루는 위상최적화 문제의 경우 음향 확산기의 표면 형상이 최적화 과정에서 지속적으로 변화하므로 계산 효율 증대를 위하여 조화해석으로 얻어진 음압과 다음의 관계식을 이용하여 확산 음압을 도출하였다.

$$p = p_{incident} + p_{scattered} \quad (3)$$

3. 음향 확산기 설계를 위한 위상최적화 기법

음향 확산기의 위상최적화를 위하여 식 (1)의 헬

† 서울대학교 기계항공공학부 WCU 멀티스케일 기계설계
E-mail : yzieun@snu.ac.kr

Tel : +82-2-880-1689, Fax : +82-2-872-5431

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

** 서울대학교 기계항공공학부, WCU, 교수

름홀쯔 방정식에 나타나는 물성들을 다음과 같이 이산화된 각 요소에 부여한 설계변수 χ_e 의 종속함수로 물질 보간하였다.

$$\rho^{-1}(\chi_e) = \rho_{air}^{-1} + \chi_e^q (\rho_{solid}^{-1} - \rho_{air}^{-1}), \quad (4a)$$

$$\kappa^{-1}(\chi_e) = \kappa_{air}^{-1} + \chi_e^q (\kappa_{solid}^{-1} - \kappa_{air}^{-1}). \quad (4b)$$

여기서, 상첨자 q 는 벌칙인자(penalty exponent)이다. 설계변수 χ_e 다음과 같이 0과 1사이의 양의 실수 값을 가진다.

$$0 \leq \chi_e \leq 1. \quad (5)$$

식 (4) 및 (5)의 관계에 의해 식 (2)의 과정에서 이산화된 요소들은 설계변수의 값에 따라 해당 요소의 상태가 결정된다. 즉, $\chi_e = 0$ 인 경우 해당 요소는 공기를 나타내며, $\chi_e = 1$ 일 때 등가 강체(Rigid body) 요소가 된다. 음향 확산기의 확산 성능을 최대화 시키기 위하여 다음과 같이 목적함수를 정의하였다.

$$\min_{\chi_e} L = n \sum_{i=1}^n (|p(\theta_i)|^2)^2 - \left(\sum_{i=1}^n |p(\theta_i)|^2 \right)^2. \quad (6)$$

식 (6)에 정의된 목적함수가 최소화될 경우 Figure 1의 수음곡선 상의 측정점 n 개 사이의 음향 에너지 편차가 최소화된다. 최적화 알고리즘으로 MMA (Method of Moving Asymptotes)를 사용하였으며 보조변수법(Adjoint Variable Method)을 사용하여 목적함수의 민감도를 도출하였다.

식 (4)와 (6)에 정의된 물질 보간 기법과 목적함수를 이용하여 민감도 기반 최적설계를 수행하였다. Figure 2는 목적 주파수 1.0, 2.0 kHz에서 얻어진 최적형상이다. Figure 3과 같이 위상 최적화로 얻은 음향 확산기가 일반 평면 구조에 비하여 보다 균일한 음장 분포를 보임을 확인하였다.

따라서, 본 연구를 통하여 위상최적화 기법에 기초한 음향 확산기의 설계 가능성을 확인하였다.

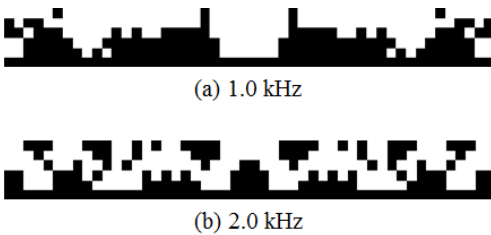


Figure 2 Optimized acoustic diffusers at (a) 1.0 kHz, (b) 2.0 kHz.

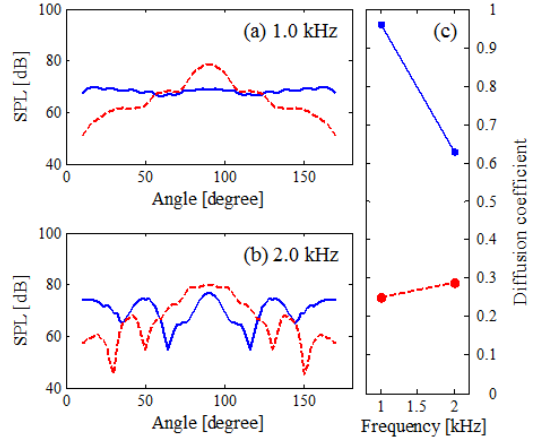


Figure 3 Pressure fields of optimized diffusers (solid line) and plane surface (dashed line) at (a) 1.0 kHz, (b) 2.0 kHz. (c) Diffusion coefficients of the optimized diffusers (solid line) are compared with those of plane surface (dashed line).

향후 보다 다양한 조건 하에서 제안한 방법을 적용하고, 여타 상용 음향 확산기와 그 성능을 비교, 검토하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 위상최적화 기법에 기초한 강제 음향 확산기 설계 기법을 제안하였다. 다양한 목적 주파수에 따라 최적화를 수행하여 제안한 최적화 방법을 검토하고 일반 평면과 음향 확산 성능을 비교하였다. 이를 통하여 위상최적화 기법에 기반한 음향 확산기 설계의 가능성을 확인하였다. 향후 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 슈뢰더 확산기(Schroeder Diffuser)와 같은 상용 음향 확산기와 성능을 비교, 제안된 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견 연구자 지원 사업(과제번호: 2011-0017445)과 교육과학기술부 첨단비파괴 검사기술 사업(과제번호: 2011-0030113) 및 WCU(과제번호: R31-2010-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.