

위상최적화기법을 이용한 흡음형 확장관 설계

Design of a Dissipative Expansion Chamber by the Topology Optimization Method

이중석† · 피터 요란손* · 김윤영**

Joong Seok Lee, Peter Göransson and Yoon Young Kim

1. 서 론

확장관(expansion chamber)은 소음을 감소시킬 목적으로 자동차의 배기관 및 각종 산업용 환기 배관 등에서 널리 사용되고 있다. 단순한 형상을 가진 텅 빈 확장관의 경우 파동전파방향 길이와 단면적에 따라 소음저감에 효과적인 주파수와 그 성능이 주로 결정된다. 따라서 보다 다양한 소음저감 성능의 달성을 위해서는 확장관의 크기를 변화시키거나 내부에 다양한 음향요소를 삽입하여야 한다⁽¹⁾. 특히, 확장관 내에 흡음재와 같은 에너지를 소산하는 물질을 삽입할 경우 음파의 반사와 투과 그리고 소산 등을 복합적으로 고려해야 한다. 이 연구에서는 단면방향 음향모드가 발생하지 않는 주파수 영역 내에서, 목적 주파수 대역에 대해 높은 전달 손실을 갖는 2 차원 흡음형 확장관을 위상최적화기법⁽²⁾ 이용하여 설계하였다. 성공적인 설계를 위해서 다양한 음향요소의 효과적인 해석과 최적화를 위해 개발된 통합다상모델링기법^(3,4) 적용하였다.

2. 흡음형 확장관 설계

2.1 확장관의 소음저감 메커니즘

확장관에 의한 소음 저감효과는 음파의 반사(reflection)와 에너지 소산(dissipation)이라는 두 가지 물리적 메커니즘에 의해 발생한다^(1,5). 에너지를 소산시키는 음향요소가 없는, Fig. 1(a)와 같이 공기만으로 채워진 단순한 형상의 확장관의 경우, 단면적의 급격한 증가와 감소로 인한 임피던스(impedance) 차이는 반사파를 발생시킨다. 단면적

의 변화가 클수록 입사하는 음파는 대부분 반사되어 전파하지 못하게 된다. 이에 따른 소음저감 효과는 Fig. 1(c)의 $D=0$ 의 경우와 같이 입사된 음파의 주파수에 따라 상이하게 나타난다.

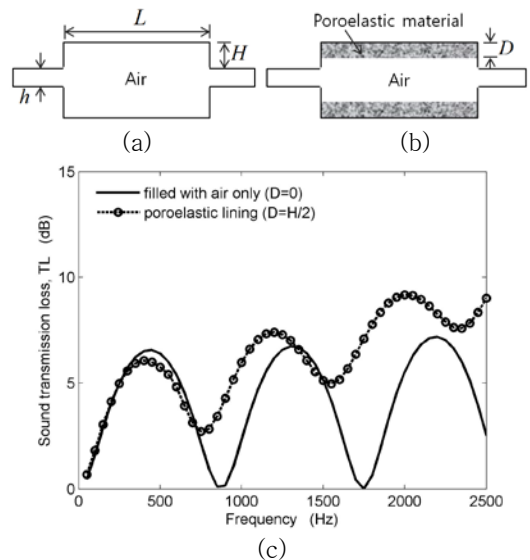


Fig. 1 Comparison of sound transmission loss, (a) a reflective expansion chamber filled with air ($L = 200$ mm, $H = 30$ mm, $h = 20$ mm), (b) a dissipative expansion chamber lined with a poroelastic material and (c) corresponding sound transmission loss.

음파에너지의 소산을 일으키는 탄성다공성(poroelastic) 물질이 Fig. 1(b)와 같이 확장관 내에 채워질 경우, Fig. 1(c)에 도시된 바와 같이 주파수 영역 전반에 걸쳐 전달손실의 증가를 가져온다⁽⁵⁾.

2.2 통합다상모델링기법과 위상최적화

흡음형 확장관 설계는 최근 개발된 통합다상모델링(unified multiphase modeling)기법^(3,4) 기반으

† 교신저자; 정희원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

E-mail : jsleesnu@snu.ac.kr

Tel : 02-880-1689, Fax : 02-872-5431

* KTH Royal Institute of Technology, Sweden

** 서울대학교 기계항공공학부

로 수행되었다. 소음진동 문제들에 대한 효과적인 해석과 효율적인 유한요소 기반의 최적화 문제로의 정식화를 위해 개발된 통합다상모델링기법은 여러 가지 음향요소, 특히 다종의 상(phase)을 가진 물질들을 포함하는 시스템의 위상최적화에 매우 적합하다. 다상으로 구성된 탄성다공성 물질의 물성치와 지배방정식으로 단상의 공기나 탄성 구조물의 동적 거동을 구현할 수 있기 때문이다. 이는 소음진동 문제의 위상최적화 과정에서 발생할 수밖에 없는 설계 영역에서의 물질의 변화와 그들간의 경계조건의 변화 및 생성을 특별한 수동적 조치 없이 다룰 수 있기 때문이다^(3,4).

x 축에 대칭인 2차원 확장관에 대해서 Fig. 2(a)와 같이 설계영역을 선정하고 목적 주파수 대역에서 전달손실을 최대화하도록 위상최적화를 수행하였다. 설계에 허용되는 흡음재의 분포양은 설계영역의 50% 이내로 제한하였고, 이때 설계영역의 나머지 부분은 공기로 채워진다. 설계된 흡음형 확장관은 아래의 Fig. 2(b)에 도시되어 있으며, 탄성다공성 물질을 단순히 분포시킨 경우($D=H/2$)에 비해서 에너지 소산뿐만 아니라 음파의 반사에도 상당한 영향을 끼친다. 그 결과 해당 목적 주파수 대역에서 높은 소음저감 성능을 보인다.

3. 결 론

이 연구에서는 확장관 내에서 단면방향 음향모드가 발생하지 않는 주파수 영역내의 대역에서 높은 소음저감 성능을 갖는 2차원 흡음형 확장관을 설계하였다. 탄성다공성 물질과 공기 등 다종의 상을 효과적으로 해석하고 유한요소 기반의 위상최적화로 정식화시키기 위해 통합다상모델링기법이 적용되었다. 통합다상모델링기법은 소음진동 문제의 위상최적화 과정에서 고려되어야 하는 여러 물질의 상변화와 그에 따른 상간의 경계의 변화 및 생성 등을 효과적으로 다룰 수 있게 하였다. 위상최적화 기법을 통해서 제한된 양의 흡음재를 설계영역 내에 효과적으로 분포시켰고, 이를 통해 단순한 분포의 경우에 비해 높은 전달 손실을 갖는 흡음형 확장관을 넓은 주파수 대역에서 설계하였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 도약연구지원사업(과제번호: 213035194)과 스웨덴 KTH Royal Institute of Technology 및 Swedish Institute Guest Scholarship Program의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Munjal, M. L., 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers: With Application to Exhaust and Ventilation System Design*, Wiley, New York.
- (2) Bendsoe, M. P. and Sigmund, O., 2003, *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, Springer, Germany.
- (3) Lee, J. S. 2009, *Unified Multi-phase Modeling and Topology Optimization for Complex Vibro-acoustic Systems consisting of Acoustic, Poroelastic and Elastic Media*, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- (4) Lee, J. S., Kang, Y. J. and Kim, Y. Y., 2012, *Unified Multiphase Modeling for Evolving, Acoustically Coupled Systems consisting of Acoustic, Elastic, Poroelastic Media and Septa*, *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 331, pp. 5518~5536.
- (5) Panigrahi, S. N. and Munjal, M. L., 2005, *Combination Mufflers – Theory and Parametric Study*, *Noise Control Engineering Journal*. Vol. 56, No. 6, pp. 247~255.

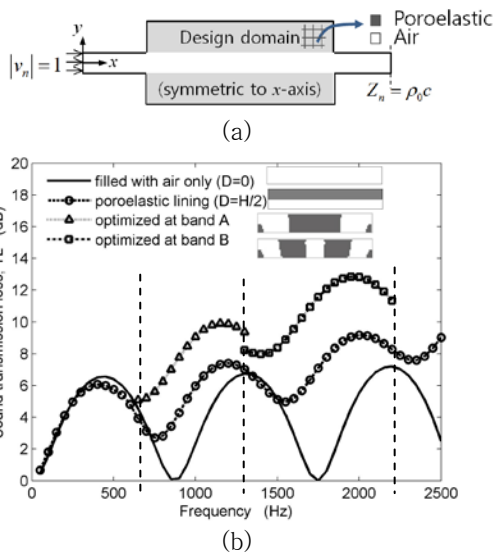


Fig. 2 Setting of a design domain and optimized configurations, (a) a design domain and (b) optimized distributions of a poroelastic material and the comparison of TL values at the target frequencies (band A: 650 Hz ~ 1,300 Hz, band B: 1,300 Hz ~ 2,200 Hz).