

# 온도 구배가 존재하는 머플러의 최적 위상

## Optimal topology of a muffler in the presence of a temperature gradient

이진우†  
Jin Woo Lee

### 1. 서 론

배관(pipe) 내부를 흐르는 유체의 유동 소음을 줄이기 위해 머플러(muffler)가 널리 사용되고 있다. 이런 머플러의 소음 저감 능력은 주파수 영역에서 그려지는 투과 손실 곡선(transmission loss curve)으로 나타낸다. 따라서, 머플러 장착 전에 소음이 큰 주파수 대역에서 높은 투과 손실 값을 갖도록 머플러 내부를 설계하는 것이 중요하다.

최근에 형상/위상 최적화를 이용한 머플러 설계 기법이 소개되어 관련 연구 발전에 크게 기여하고 있다. Barbieri<sup>(1-2)</sup>는 형상 최적화 기법(shape optimization method)을 이용하여, 문제 주파수의 투과 손실 값을 최대화 할 수 있도록 내부 격벽의 길이를 최적화 하였다. Lee<sup>(3-4)</sup>는 위상 최적화 기법(topology optimization method)을 머플러 설계에 적용하여 이전에 얻을 수 없었던 창의적인 내부 구조를 얻었다. Oh<sup>(5)</sup>는 형상/위상 최적화 기법을 흡입 머플러 설계에 순차적으로 적용하여 내부 격벽의 위치와 길이를 효율적으로 결정하였다. 그러나, 이런 연구에서는 배관을 흐르면서 발생할 수 있는 유체의 온도 변화를 고려하지 않았다.

머플러가 장착되는 배관은 배관 내부로 유체를 안내하는 역할도 하지만, 배관 내부와 외부의 열 교환이 발생하도록 설계되기도 한다. 이 경우 머플러의 입구를 통해 들어온 유체가 출구를 통과해 나갈 때, 온도 변화가 발생한다. 이 온도 변화는 유체의 물성치 변화를 초래하여 머플러내의 음향학적 특성이 공간적으로 변화하게 된다. 이를 고려하여 투과손실 곡선을 얻는 연구는 활발히 진행되고 있지만, 이런 연구가 머플러 최적 설계로는 아직 이어지고 있지 못하다.

본 연구에서는 온도 구배(temperature gradient)가 존재하는 배관의 소음을 줄이기 위해 장착되는 단순 확장방 머플러의 내부를 설계하는 문제를 다룬다. Lee와 Kim<sup>(6)</sup>의 위상 최적화 연구 내용을 확장하여, 온도가 입구에서 출구까지 선형적으로 변화하는 확장방 머플러의 최적 위상을 구한다.

### 2. 위상 최적화 문제 정식화

내부가 Fig. 1과 같이 설계 영역과 비설계 영역으로 나누어진, 입/출구의 중심이 확장방의 중심과 일치하는 2차원 확장방 머플러를 해석 모델로 정하였다. 식(1)와 같이 관심 주파수에서의 투과 손실을 목적함수(objective function)로 선정하였고, 내부에 존재하게 될 격벽(partition)의 부피를 식(2)와 같이 제한 하였다. 투과 손실을 계산하기 위해 유한 요소 모델을 사용하였고, 각 유한 요소에는 0과 1사이를 연속적으로 변하는 설계 변수( $x_e$ )를 한 개씩 부여한다. 각 유한요소의 밀도와 벌크 모듈러스(bulk modulus)는 식(3)과 같이 설계변수에 의해 결정된다.

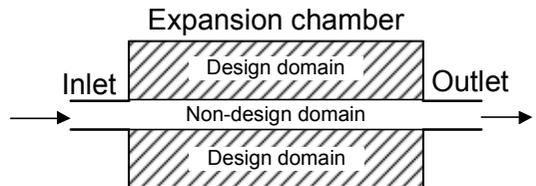


Fig. 1 Concentric expansion chamber muffler

$$\min_{0 \leq x_e \leq 1} -TL_{f_t} \tag{1}$$

$$\left( \int_V x_e dV \right) / V \leq V_r \tag{2}$$

$$\begin{aligned} 1/\rho_e(x_e) &= 1/\rho_{f_{\text{fluid}}} + x_e(1/\rho_{r_{\text{fluid}}} - 1/\rho_{f_{\text{fluid}}}) \\ 1/K_e(x_e) &= 1/K_{f_{\text{fluid}}} + x_e(1/K_{r_{\text{fluid}}} - 1/K_{f_{\text{fluid}}}) \end{aligned} \tag{3}$$

† 교신저자; 정희원, 아주대학교 기계공학과  
E-mail : jinwoolee@ajou.ac.kr  
Tel : (031) 219-3659

### 3. 위상 최적화 결과

배관을 흐르는 유체가 공기이고, 입구와 출구의 온도가 각각 80 °C와 40 °C라고 가정하였다. 정식화된 위상 최적 설계 문제의 해를 구하기 위해 구배 기반 최적화 알고리즘인 MMA (Method of Moving Asymptotes)<sup>(7)</sup>를 사용하였다. 목적 주파수가 621 Hz이고, 허용된 격벽의 부피 비율( $V_f$ )이 약 9%일 때 얻은 최적 위상을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3은 Fig. 2의 최적 위상과 내부에 격벽이 없는 단순 확장방 머플러(reference muffler)의 투과 손실 곡선을 비교한다. 목적 주파수에서 투과 손실 값이 크게 상승한 것을 알 수 있다.

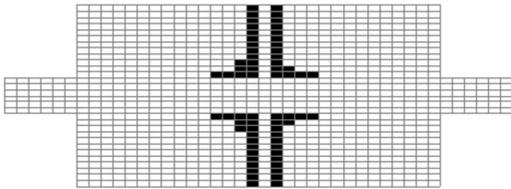


Fig. 2 Optimal topology

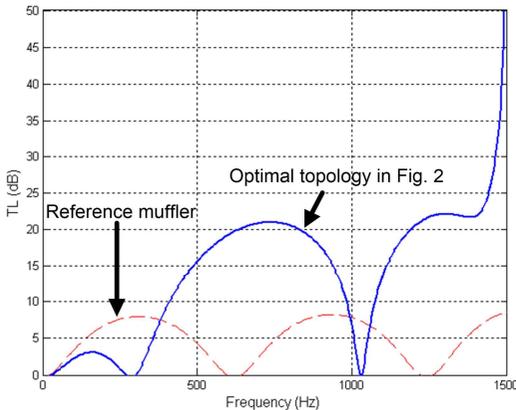


Fig. 3 Comparison of transmission loss curves of the optimal topologies in Fig. 2 and the reference muffler

### 4. 결 론

본 연구에서는 확장방 내부에 온도 구배가 존재하는 확장방 머플러를 설계 하기 위한 음향 위상 최적화 문제를 정식화하고, 목적 주파수에서 높은 투과 손실 값을 갖는 최적 위상을 얻었다. 본 접근법을 사용하면, 확장방 내의 다양한 온도 분포에 따른 최적 위상을 갖는 머플러를 설계 할 수 있을 것으로

예상한다.

### 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013R1A1A2010158)

### 참 고 문 헌

- (1) Barbieri, R. and Barbieri, N., 2005, "Finite Element Acoustic Simulation Based Shape Optimization of a Muffler," *Applied Acoustics*, Vol. 67, pp. 346-357.
- (2) Lima, K. F. d., Lenzi, A. and Barbieri, R., 2011, "The study of reactive silencers by shape and parametric optimization techniques," *Applied Acoustics*, Vol. 72, pp. 142-150.
- (3) Lee, J. W. and Jang, G. W., 2012, "Topology design of reactive mufflers for enhancing their acoustic attenuation performance and flow characteristics simultaneously," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 91, pp. 552-570.
- (4) Lee, J. W. and Jang, G. W., 2011, "Muffler Design to Achieve Target Values of Transmission Loss and Pressure Loss," *Proceedings of Autumn Conference of Korean Society of Noise and Vibration*, pp. 285-286.
- (5) Oh, K. S. and Lee, J. W., 2013, "Optimal Topology of a Suction Muffler," *Proceedings of Spring Conference of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, pp. 301-302.
- (6) Lee, J. W. and Kim, Y. Y., 2009, "Topology Optimization of Muffler Internal Partitions for Improving Acoustical Attenuation Performance," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.80, pp.455-477.
- (7) Svanberg, K., 1987, "The Method of Moving Asymptotes-A New Method for Structural Optimation," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.24, pp.359-373.