

머플러의 열-음향 특성 개선을 위한 위상 최적화

Topology optimization to improve the thermal and acoustical characteristics of a muffler

이진우* · 오기승†

Jin Woo Lee and Kee Seung Oh

1. 서 론

차량 배기계(exhaust system)에 설치되는 머플러(muffler)는 소음을 줄이기 위해 설치되는 음향장치이다. 머플러의 소음 저감 특성은 주파수 영역에서 그려지는 투과손실 곡선으로 나타낼 수 있는데, 투과손실(Transmission loss) 값이 높을수록 소음이 잘 저감 되는 것을 의미한다. 따라서, 목표 주파수 영역에서 투과손실 값이 크도록 머플러의 내부 구조를 설계 해야 한다.

투과 손실 값은 유체의 밀도(density)와 체적계수(bulk modulus)가 포함된 음압(acoustic pressure) 지배방정식인 헬름홀츠 식의 해를 이용하여 구한다. 고온의 배기가스가 머플러를 통하여 상온의 대기로 배출되는 동안, 머플러 내에 온도 구배(temperature gradient)가 발생한다. 유체의 밀도와 체적계수는 모두 온도의 함수이므로 급격한 온도 구배에 의한 머플러 내의 온도 변화는 결국 투과손실 값에 영향을 준다.

온도 분포를 고려한 머플러의 음향학적 특성을 개선시키기 위한 연구는 오래 전부터 진행되어 왔다. Munjal⁽¹⁾은 온도와 유동을 고려하여 머플러 설계에 필요한 음향 특성을 정리 하였으며, Cummings⁽²⁾는 배관의 축방향 온도 구배가 존재할 때의 음향 근사해를 제시하였다. 그러나, 머플러 내부의 최적 설계 설계에 관한 연구는 아직 활발히 진행되지 않았다.

최근에 위상최적 설계 기법을 이용하여 기계시스템의 특성을 개선시킨 방법들이 제시되고 있다. Lee와 Kim⁽³⁾은 음향 위상 최적화 방법을 도입하

여 목표 주파수에서의 투과손실을 높이는 머플러 내부를 최적 설계하였다. Li⁽⁴⁾은 평판(plate)모델에 대하여 열전도 현상을 고려한 온도 최소화 위상 최적 설계를 수행하였다. Iga 등⁽⁵⁾은 대류와 전도 효과를 동시에 고려한 위상 최적화 방법을 도입하여 열 확산을 최대도 하는 시스템을 설계하였다. 그러나, 이러한 연구에서는 음향과 온도의 영향을 동시에 고려하지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 머플러의 온도 구배를 고려하여 관심 주파수 영역의 투과손실 값을 최대화시키는 머플러의 내부 구조를 설계하고자 한다. 먼저 유한 요소법을 사용하여 머플러의 투과 손실과 온도 분포를 계산한다. 그리고, 위상 최적화 기법을 기반으로 최적화 문제를 정식화하고, 주어진 설계 조건에 대해 최적의 머플러 내부 구조를 설계하는 방법을 제안한다.

2. 위상 최적 설계 문제 정식화

Fig. 1과 같이 설계영역과 비설계영역으로 분할된 2 차원 머플러는 Fig. 2와 같이 가로 방향으로 온도 구배가 존재하며, 세로 방향의 각 열의 온도는 동일하다고 가정한다. 최적화 과정 동안, 유한 요소의 물성치는 각 요소에 부여된 설계변수 x_e 에 따라 변하게 된다. 최적해가 구해졌을 때, 각 유한 요소가 유체 혹은 강체 요소(rigid body element)가 될 수 있도록 식(1)과 같은 보간 함수를 사용한다. 보간 함수 식의 ρ_{fluid} 와 K_{fluid} 는 해당 유한 요소의 온도의 의해 결정된다. 유한 요소는 $x_e = 1$ 일 때 강체 요소가 되며, $x_e = 0$ 일 때 유체로 채워진다.

$$\begin{aligned} 1/\rho_e(x_e) &= 1/\rho_{fluid} + x_e(1/\rho_{rigid} - 1/\rho_{fluid}) \\ 1/K_e(x_e) &= 1/K_{fluid} + x_e(1/K_{rigid} - 1/K_{fluid}) \end{aligned} \quad (1)$$

† 교신저자; 학생 회원, 아주대학교 기계공학과 대학원

E-mail: drone50@gmail.com

Tel : (031) 219-3659

* 아주대학교 기계공학과

목적함수(objective function)는 식(2)와 같이 목적 주파수에서의 투과손실 값이며, 식(3)은 설계영역에 존재하는 격벽의 부피 비율 제한조건(constraint)이다.

$$\max_{1 \leq x_e \leq 1} TL_{f_t} \quad (2)$$

$$\sum x_e / V \leq V_r \quad (3)$$

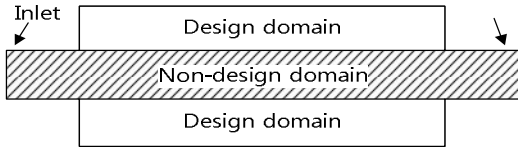


Fig. 1 Simple expansion muffler

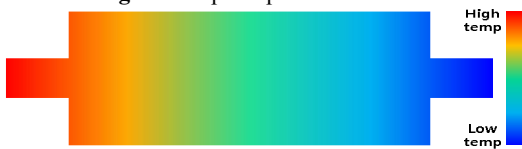


Fig. 2 Temperature gradient inside the muffler

3. 최적 설계 결과

목적 주파수 620 Hz, 볼륨 비율(V_r)이 0.1 일 때, 정식화된 문제의 최적 해를 구하였다. 이 때 최적화 알고리즘으로 MMA(Method of Moving Asymptotes)⁽⁶⁾를 사용하였다. Fig. 3 은 머플러의 최적 위상을 나타내며, Fig. 4 는 머플러 내부가 비어있는 경우와 최적 설계된 머플러의 투과손실 그래프를 비교한 그래프이다.

4. 결론

본 연구에서는 온도 분포를 고려한 위상 최적화 기법을 사용하여 목적 주파수에서 투과손실 값을 높이는 머플러 내부설계를 제시하였다. 허용되는 부피 비율 제한조건 하에서 머플러 중심부분에 격벽이 생성되어 투과손실 값이 크게 증가하는 결과를 확인 하였다.

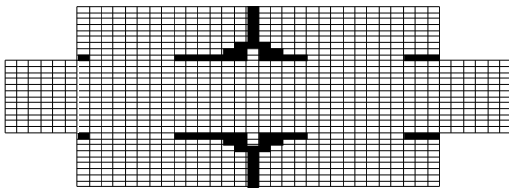


Fig. 3 Optimal topology at a target frequency of 620Hz

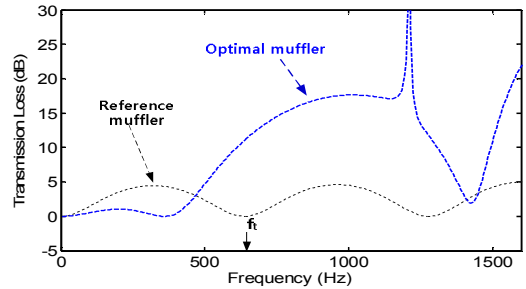


Fig. 4 Transmission loss curves of the optimal topology in Fig. 3 and the simple expansion chamber muffler.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, Wiley Publication.
- (2) Cummings, A., 1976, Ducts with Axial Temperature Gradient: an Approximation Solution for Sound Transmission and Generation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 51, pp. 55~67
- (3) Lee, J. W. and Kim, Y. Y., 2009, Topology optimization of Muffler Internal Partitions for Improving Acoustical Attenuation Performance, International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 80, pp. 455~477
- (4) Li, Q., Steven, G. P., Xie, Y. M., Querin, O. M., 2004, Evolutionary topology optimization for temperature reduction of heat conducting fields, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 5071~5083
- (5) Iga, A., Nishiwaki, S., Izui, K., Yoshimura, M., 2009, Topology Optimization for Thermal Conductors Considering Design-dependent Effects, Including Heat Conduction and Convection, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 2721~2732
- (6) Svanberg, K., 1987, The Method of Moving Asymptotes-A New Method for structural Optimization, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, pp. 359~373