

철도 차량용 패널의 강도와 소음저감 특성 개선을 위한 최적 설계

Optimal Design to Improve the Strength and Noise Reduction of a Panel for Railway Vehicles

이진우[†]

Jin Woo Lee[†]

Abstract A topology optimization based design method is introduced to effectively design the internal configuration of an aluminum panel for railway vehicles. The panel is partially filled with aluminum for the weight reduction of the vehicle. For safety and noise reduction, the regions of void and solid must be optimized. To the end, this work employs acoustical and structural topology optimization to formulate an design problem for the optimal internal configuration of the panel. The finite element method is employed for acoustical and structural analyses, the transmission loss value at a target frequency is selected as an objective function, and static compliance is constrained. Using a gradient-based optimal algorithm, optimal topologies are obtained for several design conditions.

Keywords: High speed railway vehicles, optimal panel design, topology optimization, transmission loss

초 특 위상 최적화 기법을 사용하여 철도 차량용 알루미늄 패널의 내부 구조를 효과적으로 설계하는 방법을 소개한다. 고속철 차량의 외부를 둘러싸는 패널의 내부는 경량화를 위해 부분적으로 알루미늄이 채워져 있다. 차량 전복시의 안정성을 확보하고 외부 소음의 내부 유입을 줄이려면, 알루미늄이 채워지는 위치와 비워지는 위치를 최적화하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 음향 위상 최적화와 구조 위상 최적화 개념을 사용하여 패널 내부 최적 설계 문제를 정식화한다. 유한 요소법을 사용하여 해석 모델을 구성하고, 주요 주파수에서의 투과 손실 값을 목적 함수로, 패널의 정적 컴플라이언스를 제한 조건으로 사용한다. 구배 기반 최적화 알고리즘으로 사용하여 몇 가지 설계 조건에 대한 최적 위상을 구한다.

주요어: 고속 철도 차량, 패널 최적 설계, 위상 최적화, 투과 손실

1. 서 론

현재보다 더 높은 속도로 운행될 차세대 고속철도 개발을 위해서는, 경량화를 위해 벽면에 사용하는 알루미늄 패널(panel)의 강도(strength)와 차음(sound insulation) 성능 저하 문제가 해결되어야 한다. 일반적으로 고속 철도 차량에 사용되고 있는 다층 구조 패널은 금속과 다공성 물질로 구성되어 있다[1-3]. 최근에 위상 최적화 개념을 사용한 패널 구조 설

[†] 교신저자: 아주대학교 공과대학 기계공학과(jinwoolee@ajou.ac.kr)

계 연구[4, 5]가 소개 되었고, 패널을 통한 차음 성능 향상을 위한 해석 방법[6]들도 소개되고 있다. 그러나, 이 두 가지 성능을 모두 향상시키는 연구에서는 아직 괄목할만한 성과를 얻지 못하고 있다. 본 연구에서는 위상 최적 설계 기법을 사용하여 패널의 강성을 고려한 소음 차단 성능이 높은 패널 내부 구조 개발을 시도하고자 한다.

2. 위상최적화 문제 정식화

Fig. 1(a)와 같이, 고속 철도 차량의 옆면 패널은 알루미늄으로 채워진 영역과 부분적으로 비워 있는 영역으로 구성된 셀(cell)이 주기적으로 반복된다. 본 연구에서는 위상 최적화 기법을 사용하여 패널의 강도와 투과 소음 특성을 개선하기 위한 최적 설계 문제를 정식화한다. 정적 구조 해석과 음향 해석을 위해 각각 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)의 해석 모델을 사용한다. 식 (1)과 같이 목표 주파수(f_t)에서의 투과 손실 값(TL : transmission loss value)을 목적함수(objective function)로 설정하고, 식 (2)와 (3)에서와 같이 설계 영역 내에 허용하는 알루미늄의 양과 정적 컴플라이언스(C : compliance)에 대한 제한 조건을 사용한다.

$$\min_{0 \leq \chi_e \leq 1} -TL(f_t) \quad (1)$$

$$\int_{S_d} \chi_e dS \leq S_a \quad (2)$$

$$C \geq 1.1 \cdot C_{ini} \quad (3)$$

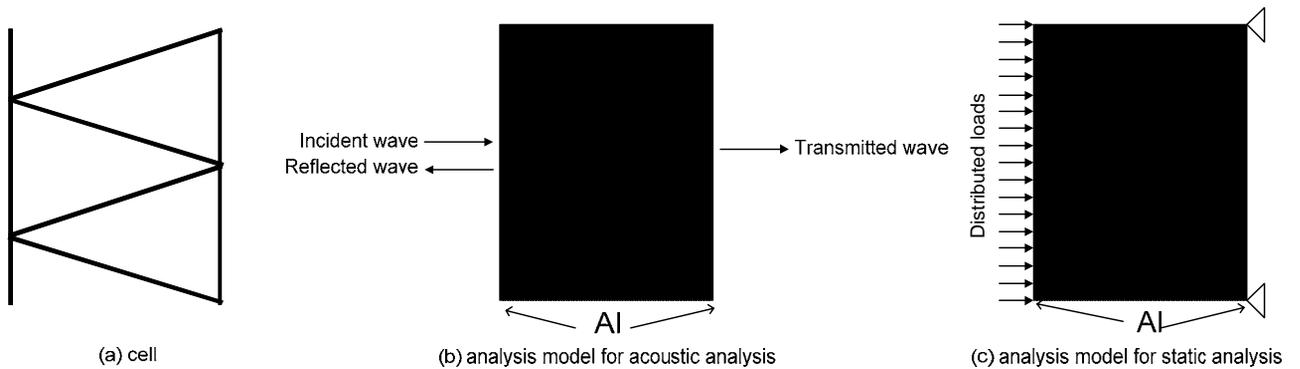


Fig. 1 Analysis models for panel optimal design

투과 손실 값과 정적 컴플라이언스를 계산하기 위해, 유한 요소 모델을 구성한다. 각 유한 요소에 부여된 설계 변수(χ_e)는 '0' 에서 '1' 사이 값을 갖게 되고, 이 값에 따라 해당 유한 요소의 상태가 결정된다. 설계 변수가 '1' 이 되었을 때, 해당 요소는 알루미늄으로 채워지게 되고, '0' 이 되면 해당 요소에는 비워지게 된다. 최적화를 진행하는 동안, 설계 변수는 '0' 과 '1' 사이 값을 가지다가 목적함수가 수렴할 때 '0' 또는 '1' 의

값을 갖도록 식 (4)와 (5)의 보간 함수를 사용한다.

$$E_e(\chi_e) = E_{\min} + \chi_e(E_{Al} - E_{\min}) \quad (4)$$

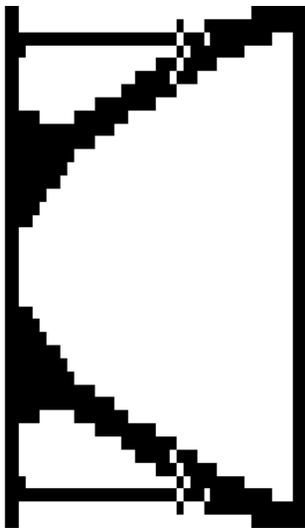
$$1/\rho_e(\chi_e) = 1/\rho_{air} + \chi_e(1/\rho_{Al} - 1/\rho_{air}) \quad (5a)$$

$$1/K_e(\chi_e) = 1/K_{air} + \chi_e(1/K_{Al} - 1/K_{air}) \quad (5b)$$

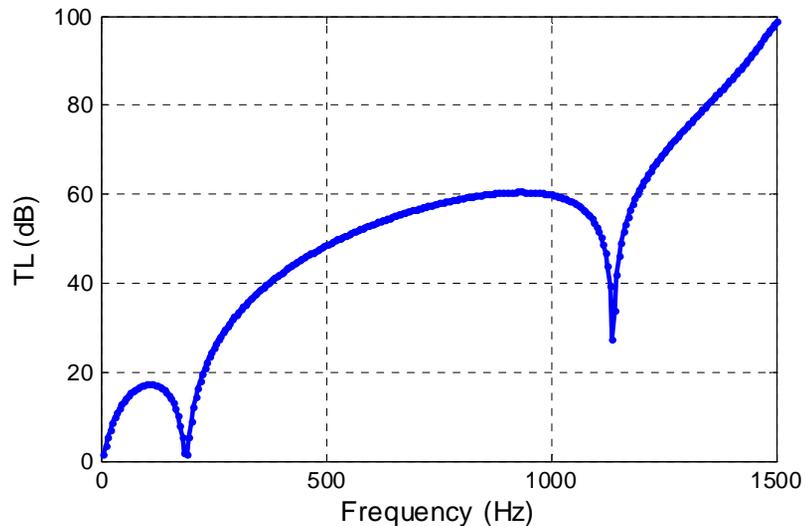
식 (4)에서 E 는 영 계수(Young's modulus)를 나타내고, 식 (5)에서의 ρ 와 K 는 각각 밀도와 벌규모듈러스를 나타낸다.

3. 수치 계산 결과

2장에서 정식화한 위상 최적화 문제를 목표 주파수 500Hz에 대해 최적해를 구하는 수치 계산을 수행하였다. 구배 기반 최적화 알고리즘인 MMA[7]를 사용하여 얻은 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 최적위상을 나타낸 것으로, 검정색 부분이 알루미늄이 채워지는 영역이고, 하얀 색 부분이 비워지는 영역을 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 얻어진 최적 위상의 투과 손실 곡선을 나타낸다. 목표 주파수 500 Hz에서 상당히 높은 투과 손실 값을 가짐을 알 수 있다.



(a) Optimal topology



(b) Transmission loss curve

Fig. 2 Optimal design results

3. 결론

본 연구에서는 패널의 강성을 고려한 투과 손실 값을 높일 수 있는 패널 구조 설계를 위해 위상 최적 설계 문제를 정식화 하고, 수치 예제를 통해 제안한 방법의 유효성을 살펴보

았다. 이 결과를 이용하여 형상 최적 설계를 수행하여, 실제 설계 가능한 패널 구조를 얻을 계획이다.

후 기

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

참고문헌

- [1] S.H. Kim, J.C. Park, J.N. Kim (2000) Sound transmission loss of aluminum extruded panels of railway vehicles, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 10(4), pp. 662~668.
- [2] S.H. Kim, H. Lee, J. Kim, J. Kim (2010) Sound insulation design of the corrugated steel panel considering local resonance, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 20(7), pp. 672~676.
- [3] T. Kim, J. Kim, J. Kim, S. Kim (2010) Numerical analysis of transmission loss prediction in high speed trains, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 20(8), pp. 703~709.
- [4] J.W. Lee (2011) Optimal Design to Improve the Transmission Characteristics of a Panel for Railway Vehicles, *Proceedings of the KSME Fall annual conference*, Daegu, November 1, 2011..
- [5] M.P. Bendsøe, O. Sigmund, (2003) *Topology optimization theory, methods and applications*, New York.
- [6] F.C. Lee, W.H. Chen (2003) On the Acoustic Absorption of Multi-layer Absorbers with Different Inner Structures, *Journal of Sound and Vibration*, 259(4), pp. 761~777.
- [7] K.Svanberg (1987) The method of moving asymptotes: a new model for structural optimization, *International Journal for Numerical Methods and Engineering*, 24(2), pp. 359~373.