

# 위상최적화를 이용한 굽음보 구조에서의 기계적 파동 필터 설계 Topology optimization of mechanical wave filters in curved beam structures

김상아† · 이일규\* · 김윤영\*\*

Kim Sang Ah, Lee Il Kyu and Kim Yoon Young

## 1. 서 론

굽음보(curved beam)는 배, 자동차, 비행기와 같이 다양한 기계를 구성하는 요소로 사용된다. 이와같은 기계들이 작동할 때 원치 않는 진동 에너지가 발생하기 때문에 이를 조절하기 위하여 굽음보에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔다<sup>(1)</sup>.

본 연구에서는 진동 에너지의 전달을 조절하고자 파동해석 관점에서 접근하였다. 굽음보에서 파동의 전파는 굽음 보를 구성하는 물질과 형상에 영향을 받는다. 특히 파동의 반사 및 투과는 서로 다른 종류의 보가 연결 되었을 때 그 경계면에서 발생하므로 이를 고려하여 파동을 제어하는 것이 필요하다.

기존 연구들은 동일물질로 구성된 일반적인 형상으로 파동의 투과를 제어하기 때문에 특정 주파수에서 파동의 투과를 제어하는데 한계가 있다. 이에 본 연구는 원하는 주파수에서 파동을 조절하는 굽음보의 설계를 2차원 위상 최적화(topology optimization) 문제로 설정 하였다. 두 수직보는 같은 물성치를 가지는 탄성체로 가정하고 두 수직보 및 그것들을 연결하는 굽음보는 곡률과 단면적이 같을 때 임의의 지점에서 임

피던스는 굽음보의 물성치에 의하여 결정된다. 따라서 굽음보의 설계 문제는 그것의 위상 설계 문제로 귀착된다.

굽음보에서 파동을 해석하기 위해서는 굽음보의 팽창, 굽힘 그리고 비틀림 변형의 영향을 모두 고려해야 한다. 이와 관련하여 다양한 접근 방법들이 있는데, 본 연구에서는 종파를 중심으로 고려하였기 때문에 Love 접근법을 이용하여 파동의 현상을 분석하였다.<sup>(2)</sup>

## 2. 굽음보에서 최적화 설계 문제

서로 같은 단면적을 가지는 2차원 수직보는 Figure 1 과 같이 배열되었으며 수직보를 연결하는 설계 영역은 다음과 같이 이산화 된다. 이산화 된 각 부분의 물질은 0과 1사이의 값을 갖는 설계변수( $\chi_e$ )의 함수로서 표현되며, 1과 0은 각각 철과 알루미늄을 의미한다.

본 연구의 목적은 파동이 전달되는 것을 차단 하는 것이기에 다음과 같이 최적화 문제를 설정 하였다.

$$\min \{T_{power}\}, \text{ s.t } 0 \leq \chi_e \leq 1.$$

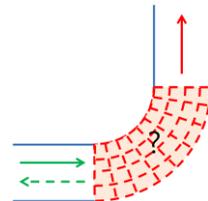


Fig. 1 Design domain for optimal curved beam structure connecting two perpendicular steel waveguides is discretized into elements.

† 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : sakim@snu.ac.kr

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

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, WCU, 교수

2차원 보에서 종파가 입사되었을 때 파동은 연결 굽음보에 의하여 일부는 반사되고 일부는 투과되는데 이산화된 굽음보에 입사되는 종파의 일률 (power,  $P_{ii}$ )과 투과되는 종파의 일률(power,  $P_{tt}$ )에 대한 절대값의 비를 아래의 식과 같이 전달일률계수(power transmission coefficient,  $T_{power}$ )로 정의한다.

$$T_{power} = \frac{|P_{tt}|}{|P_{ii}|} = \left( \frac{T_{tt} T_{tt}^* \rho_t C_{bt}}{I_{ii} I_{ii}^* \rho_i C_{bi}} \right) = |T|^2 \left( \frac{\rho_t C_{bt}}{\rho_i C_{bi}} \right)$$

전달일률계수는 전달계수(T)와 입사면과 투과면의 물성치에 대한 함수로 표현되는데, 본 연구에서는 두 수직보의 물질이 같기 때문에 전달일률계수는 전달계수의 함수만으로 표현된다. 전달계수를 구하기 위하여 이점법(two point method)을 사용하였고 최적화 알고리즘으로는 MMA를 사용하였다. 물질 보간 기법(material interpolation method)으로는 SIMP를 사용하였다.

### 3. 수치 예제

본 연구는 무한한 수직보 사이를 연결하는 굽음보를 설계하는 것을 목적으로 하기 때문에 무한한 수직보를 구현하기 위해서 PML을 수직보 양 끝 단에 연결하였다. 설계영역인 연결 굽음보는 가로 40개 세로 4개의 요소로 이산화되었으며 위상최적설계를 위한 초기위상은 중간물질 ( $\chi_e = 0.6$ )로 수행하였다. 목적 주파수는 2 kHz, 3 kHz로 각각 설정하였다.

결과를 살펴보면 같은 목적에 대한 최적 위상설계를 수행하였지만, Figure 2와 같이 목적 주파수에 따라서 전달일률 계수를 최소화 시키는 최적의 굽음보 위상은 서로 다르게 설계된 것을 확인할 수 있었다. 또한 Figure 3과 같이 목적 주파수가 다르더라도 모든 에너지가 전달된 철로 구성된 굽음보에 비해 전달일률계수가 크게 감소한

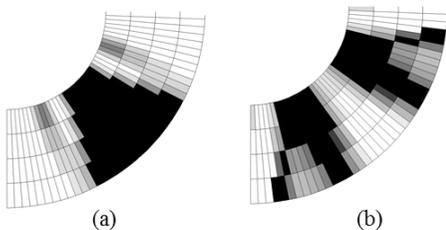


Fig. 2 Two topology optimized curved beam for different target frequencies((a) 2 kHz (b) 3 kHz).

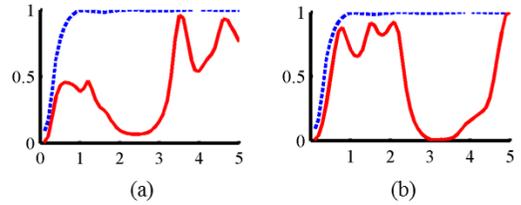


Fig. 3 Power transmission coefficient of optimized curved beam for (a)2 kHz and (b)3 kHz (blue dash line for steel curved beam and red line for optimized curved beam

것을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 전달 일률 계수 최소화를 위한 2차원 연결 굽음보의 위상설계를 수행하였다. 굽음보의 물성치만을 변수로 고려하여 서로 같은 단면적을 연결하는 굽음보의 최적형상을 설계하였다. 또한, 고려하는 목적 주파수에 따라 최적형상이 다름을 확인하고 제안한 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

### 5. 후 기

본 연구는 한국 연구재단의 중견 연구자 지원사업 (과제번호: 2012-0005693)과 WCU (과제번호: R31-2008-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

### 6. 참고 문헌

- (1) B. Kang, C.H. Riedel and C.A. Tan, 2003, "Free vibration analysis of planar curved beams by wave propagation," Journal of sound and vibration, Vol. 260, No. 1, pp.19-44
- (2) S.J. WALSH and R.G. WHITE, 2000, "Vibrational power transmission in curved beams," Journal of Sound and Vibration, Vol.233, No. 3, pp.455-488