

포노닉 크리스털과 탄성 메타물질을 이용한 유도 초음파 테일러링

Ultrasonic Guided Wave Tailoring by Phononic Crystals and Elastic Metamaterials

김윤영† · 마평식* · 권영의*

Yoon Young Kim, Pyung Sik Ma and Young Eui Kwon

1. 서 론

파이프나 판재와 같은 웨이브가이드를 따라 전파하는 유도 초음파는 두께 방향으로 다양한 모드가 존재하며 주파수에 따른 전파 특성이 달라 복잡한 전파 양상을 보인다⁽¹⁾. 폭 30 mm의 알루미늄 웨이브가이드를 중심 주파수 200 kHz로 가진 할 경우 Fig. 1(b)와 같이 신호의 왜곡이 따르게 된다. 본 연구에서는 웨이브가이드에 탄성 메타물질을 적용하여 원하는 모드의 전파 특성을 조절하는 유도 초음파 테일러링을 수행하고자 한다.

메타물질은 음의 값을 갖는 밀도나 강성과 같이 자연상에 존재하지 않는 특성을 갖는 인공적인 물질로 최근 전자기파, 음파의 전파 특성을 조절하는 연구가 활발히 진행되고 있다⁽²⁾. 본 연구에서는 메타물질 기반의 웨이브가이드를 최적화 기법을 도입하여 설계하고, 메타물질 기반 웨이브가이드에 대한 수치적 검증을 수행하였다.

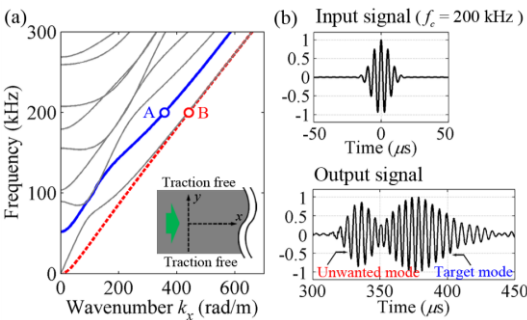


Fig. 1 (a) Dispersion curves of a nominal waveguide. (b) Time signals of inputted and transmitted waves.

† 교신저자; 정희원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yykim@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-7154, Fax : (02) 872-5431

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

2. 유도 초음파 테일러링

2.1 포노닉 크리스털 구조 설계

유도 초음파 모드의 전파 특성을 조절하기 위하여 폭 30mm 알루미늄 웨이브가이드에 탄성 메타물질의 한 종류인 포노닉 크리스털(phononic crystals) 구조를 Fig. 2(a)와 같이 삽입하였다. 포노닉 크리스털을 구성하는 원형 구멍의 크기와 단위 구조의 x 방향 주기를 적절히 설계함으로써 원하는 유도 초음파 모드(mode A)의 군속도(group velocity)를 일정하게 하여 분산을 최소화하고, 원하지 않는 모드(mode B)는 목표 주파수 범위에서 밴드 갭(band gap)을 가지도록 하여 전파를 차단하였다.

포노닉 크리스털 설계를 위하여 구배 기반 최적화 기법(gradient-based optimization scheme)을 도입하였으며, 다양한 개수의 원형 구멍을 갖는 포노닉 크리스털 구조를 설계하였다. Fig. 2(b)는 원형 구멍이 8개인 경우 설계된 포노닉 크리스털 구조의 분산 곡선을 나타낸 것으로 일반적인 웨이브가이드의 분산 곡선(Fig. 1(a))와 비교하여 원하는 모드의 분산이 최소화되었고, 원하지 않는 모드의 밴드 갭이 충분히 형성된 것을 확인할 수 있다.

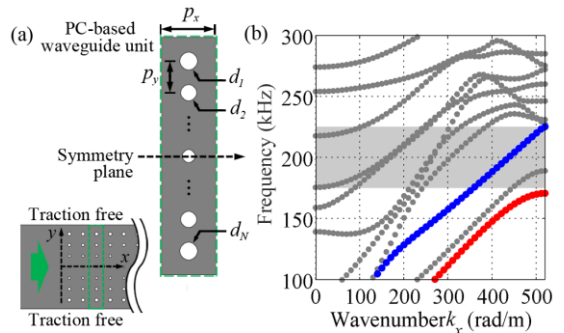


Fig. 2 (a) The considered waveguide unit cell. (b) Dispersion curves of designed PC-based waveguide.

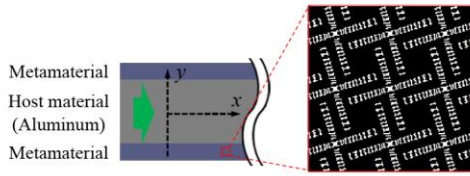


Fig. 3 Schematic of metamaterial-based waveguide and designed elastic metamaterial.

2.2 탄성 메타물질 웨이브가이드 설계

원하는 모드의 분산을 최소화하기 위하여 포노닉 크리스털보다 크기가 작은 탄성 메타물질에 대한 설계를 수행하였다. $\lambda/30$ 수준의 탄성 메타물질의 단위 미소 구조를 변경함으로써 원하는 파동 특성을 갖는 탄성 메타 물질을 설계하는 것이 가능하다. 알루미늄 웨이브가이드의 양끝단 5 mm 구간에 삽입된 메타물질의 물성치를 조절하여 원하는 유도 초음파 모드의 분산을 최소화할 수 있었다. 이를 위해 요구되는 파동 특성을 갖는 탄성 메타 물질의 미소구조 설계를 현재 진행 중이며, 탄성 메타물질의 후보 미소 구조는 Fig. 3과 같다.

2.3 설계된 웨이브가이드 검증

설계된 웨이브가이드의 유도 초음파 모드가 원하는 전파 특성을 갖는 것을 확인하기 위하여 여기에서는 포노닉 크리스털 웨이브가이드에 대한 과도 해석(time-transient analysis)를 수행하였다. 설계된 포노닉 크리스털 단위 구조를 750 mm 구간(약 50%)의 알루미늄 웨이브가이드에 삽입한 뒤 중심 주파수 200 kHz 면내 전단파(in-plane shear waves)를 가진하였다. 비교를 위하여 포노닉 크리스털이 삽입되지 않은 웨이브가이드에서도 같은 조건에서 수치해석을 수행하였다.

유도 초음파 신호의 측정은 포노닉 크리스털 구간을 통과한 지점에서 이루어졌다. Figure 4는 포노닉 크리스털 웨이브가이드의 해석 신호를 나타낸 것으로 일반적인 웨이브가이드의 신호와 비교하여 원하는 모드는 전파되지 않았으며, 원하는 모드의 분산 또한 성공적으로 억제된 것을 확인할 수 있었다. 화살표로 나타낸 원하는 모드의 반높이 너비(FWHM)는 포노닉 크리스털 웨이브가이드 22.2 μs 으로 일반적인 웨이브가이드에서의 52.0 μs 와 비교하여 전파 특성이 충분히 조절된 것을 확인할 수 있었다.

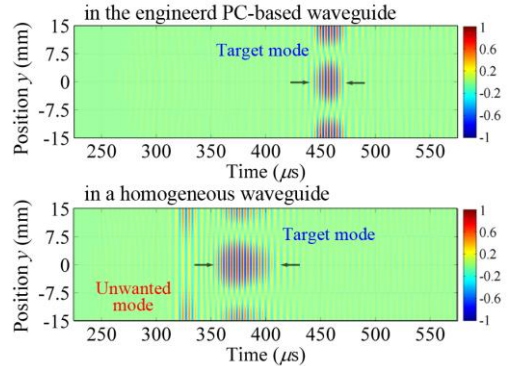


Fig. 4 The y-displacement fields in the PC-based waveguide (upper) and in a homogeneous waveguide. (lower)

3. 결 론

본 연구⁽³⁾에서는 웨이브가이드를 전파하는 초음파 모드를 포노닉 크리스털과 탄성 메타물질을 이용하여 그 전파 특성을 조절할 수 있는 가능성을 보였다. 유도 초음파 모드의 원하는 목적에 따라 포노닉 크리스털과 탄성 메타물질을 설계하였으며, 설계된 포노닉 크리스털 웨이브가이드의 수치적 검증을 수행하였다.

후 기

본 연구는 한국 연구재단의 중견 연구자 지원 사업(과제번호: 2013-035194)과 원자력 연구개발 사업(과제번호: 2013-043465)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, H. W., Kwon, Y. E., Joo, Y. S., Kim, J. B. and Kim, Y. Y., 2013, Synthetic Phase Tuning Technique for the Transduction of a Specific Ultrasonic Torsional Mode in a Pipe, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 249~257.
- (2) Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cumber, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F. and Smith, D. R., 2006, Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies, Science, Vol. 314, No. 5801, pp.977~980.
- (3) Ma, P. S., Kwon, Y. E. and Kim, Y. Y., 2013, Wave Dispersion Manipulation of a Waveguide Transducer by Phononic Crystals, to be submitted.