

탄성 초음파 회절한계 극복을 위한 하이퍼볼릭 탄성 메타물질의 설계와 구현

Design and realization of hyperbolic elastic metamaterial for ultrasonic sub-wavelength resolution

오주환[†] · 안영관* · 승홍민* · 김윤영*

Joo Hwan Oh, Young Kwan Ahn, Hong Min Seung and Yoon Young Kim

Key Words : Hyperbolic elastic metamaterial (탄성 하이퍼볼릭 메타물질), sub-wavelength resolution (회절한계 극복)

ABSTRACT

Hyperbolic metamaterials in which waves can only propagate through the radial direction have achieved much attention these days due to their capability of sub-wavelength resolution. In this work, the realization and optimization of hyperbolic elastic metamaterials are mainly studied. To obtain a new hyperbolic elastic metamaterial, a specially-engineered mass-spring system is introduced. Based on the mass-spring system, the hyperbolic elastic metamaterials are proposed and realized. In addition, the sub-wavelength resolution of the proposed hyperbolic elastic metamaterial is verified by ultrasonic elastic wave experiments. For the experiments, specially-designed magnetostrictive patch transducers are developed to realize two sub-wavelength elastic wave sources. Furthermore, the proposed hyperbolic elastic metamaterial is optimized to maximize its operating frequency ranges by the topology optimization method.

1. 서 론

탄성 초음파에 기반한 비파괴 검사 기술은 목표물에 대한 빠른 이미징을 얻을 수 있다는 장점으로 다양한 분야에 널리 응용되고 있다. 그러나 탄성 초음파 기반 비파괴 검사 기술은 회절 한계에 의한 고질적인 해상도의 문제가 있어왔으며, 이를 극복하기 위한 신호 후처리 기법 등 다양한 방법이 제안되고 있다. 그러나 기존의 빠른 이미징 속도를 크게 희생하지 않으면서 동시에 회절 한계 이상의 해상도를 얻을 수 있는 기술은 아직 요원한 실정이다.

최근 본 연구단은 그림 1 (a)와 같이 회절 한계를 극복할 수 있는 탄성 하이퍼볼릭 메타물질(hyperbolic elastic metamaterial)을 제안하였다⁽¹⁾. 제안된 탄성 메타물질 렌즈는 인위적으로 설계된 구조를 통하여 그림 1 (b)와 같이 원주 방향으로의 파동 전파가 불가능하게끔 설계되었으며, 이로 인하여 반파장 이하의 결합에서 발생한 신호가 서로 섞이지 않고 원거리서 구분하는 것이 가능하다. 이를 통해 빠른 이미징 속도를 유지하며 높은 해상도를 얻는 것이 가능할 것으로 기대한다.

본 발표에서는 이러한 하이퍼볼릭 탄성 메타물질의 구현과 최적화에 초점을 맞추고자 한다.

2. 하이퍼볼릭 탄성 메타물질

2.1 하이퍼볼릭 탄성 메타물질의 구현

[†] 교신저자; 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : ojh86@snu.ac.kr

Tel : 02-880-7130, Fax : 02-872-5431

* 서울대학교 기계항공공학부

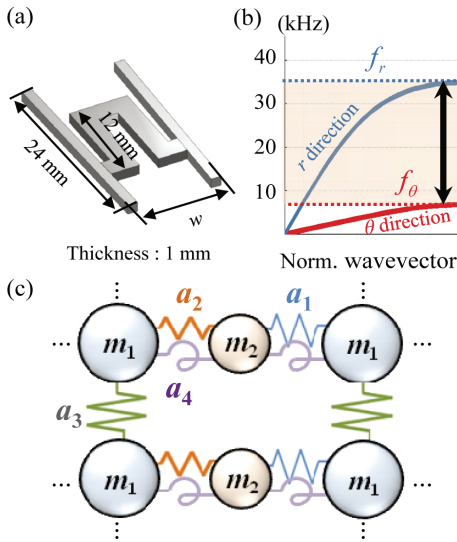


Figure 1 (a) Unit cell of the proposed hyperbolic elastic metamaterial, its (b) wave dispersion curve and (c) equivalent mass-spring system

하이퍼볼릭 탄성 메타물질의 구현을 위해서는 원주 방향으로의 탄성파의 전파가 불가능하지만 방사 방향으로의 탄성파가 투과할 수 있는 인위적인 구조가 요구된다. 이를 위해서 본 연구에서는 그림 1 (c)와 같은 질량-스프링 구조에 착안, 그림 1 (a)의 탄성 하이퍼볼릭 메타물질을 구현하였다. 그림 1 (c)와 같은 질량-스프링 구조에서는 주기적 특징과 내부의 공진 현상으로 인하여 특정 주파수 대역의 파동은 원주 방향으로 전파가 불가능하며 방사 방향으로만 전파가 가능하다. 제안된 탄성 하이퍼볼릭을 실제 알루미늄 판에서 구현, 탄성 초음파 실험을 통해 그 성능을 확인하였다. 초음파 실험에서는 특수 제작된 자기변형 트랜스듀서로 중심 간격이 파장의 0.48배인 두 가진원을 제작, 탄성파의 투과 양상을 실험적으로 측정하였다. 실험 결과 탄성 메타물질 렌즈가 없을 경우 회절 한계로 인하여 서로 구분이 불가능한 두 가진원을 제안된 메타물질 렌즈를 통하여 효과적으로 구분할 수 있음을 확인하였다.

2.2 하이퍼볼릭 탄성 메타물질의 최적화

비록 제안된 탄성 하이퍼볼릭 렌즈를 통해 회절 한계 이상의 해상도를 구현하는 것이 가능하나, 실제 비파괴 검사 분야의 응용을 위해서는 몇 가지 이슈를 추가로 해결해야만 한다. 가장 대표적인 문제

는 작동 주파수 대역을 넓히는 것이다. 실제로 기존의 탄성 하이퍼볼릭 물질이 회절 한계 이상의 높은 해상도를 구현할 수 있는 주파수 대역은 상당히 좁은 편이다. 이를 위하여 본 연구에서는 위상최적설계 기법⁽²⁾에 기반하여 하이퍼볼릭 탄성 메타물질의 성능 계선안을 도출하였다. 탄성 하이퍼볼릭 메타물질 내부 구조를 최적설계 설계 영역으로 설정한 후, 작동 주파수 대역을 최대화하게끔 목적함수를 설정하였다. 위상 최적설계 결과 작동 주파수가 60% 넘게 증가한 새로운 탄성 하이퍼볼릭 메타물질을 제안할 수 있었으며, 수치해석 기법을 통한 파동 해석 결과 실제로 개선된 탄성 하이퍼볼릭 메타물질은 보다 넓은 주파수 대역에서 높은 해상도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 비파괴 검사에 널리 사용되는 탄성 초음파 기반 이미징 기술의 해상도를 이론적 해상도 한계인 회절 한계 이상으로 높일 수 있는 새로운 탄성 하이퍼볼릭 메타물질을 제안하였다. 또한 위상최적설계 기술에 기반하여, 넓은 주파수 대역에서 사용 가능한 탄성 하이퍼볼릭 메타물질 설계 개선안을 제시하였다. 본 연구의 연구 결과는 향후 배관에서의 결함 검사와 같은 고해상도 비파괴 검사에 응용이 가능할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 한국 연구재단의 중견연구자 지원 사업 (과제번호: 2014-021950), 중점연구소 지원 사업 (과제번호: 2013-055323)과 글로벌프론티어 사업 (과제번호: 2014-063711)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Oh, J. H., Seung, H. M. and Kim, Y. Y., 2014, A truly hyperbolic elastic metamaterial lens, *Applied Physics Letters*, pp. 073503
- (2) Bendsoe, M. P. and Sigmund O., *Topology Optimization*, Springer, New York.