

파동 회절한계 극복을 위한 초음파 극한 기술 Hyper Ultrasonic Technology for Overcoming the Wave Diffraction Limit

김윤영† · 이형진*
Yoon Young Kim and Hyung Jin Lee

1. 서 론

최근 파동 메타현상(meta phenomenon)을 이용한 파동의 제어 기술에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 메타현상이란 자연계에서 발견되지 않는, 인위적으로 구현한 시스템에서 관찰되는 특이 파동 현상을 통칭한다. 메타현상은 탄성과, 음파를 비롯한 모든 파동을 자유자재로 제어하는데 적용될 수 있는데, 파동의 조준(collimation), 집중(focusing), 은폐(cloaking) 및 특이 전달(extraordinary transmission) 등이 그 예이다.

이러한 파동 메타현상에 관한 다양한 연구 중에서, 회절한계(diffraction limit)를 극복하고자 하는 ‘초월렌즈(hyperlens)’에 대한 연구는 특히 많은 관심을 받고 있다. 파동을 기반으로 하는 영상화 시스템은 파동의 회절현상에 의해서 그 해상도가 기본적으로 제한되는데, 이는 높은 해상도를 전달하는 높은 파수벡터(wave vector) 성분들이 대상체에서 원거리까지 전파하지 못한 채 근거리에서 지수형으로 감쇠(exponentially decay)하기 때문이다. 즉 일반적인 매질 내에서의 높은 파수 벡터 성분의 상실은 해상도의 한계를 야기하게 된다.

자연계에서 불가피한 이와 같은 해상도의 한계를 초월하고자 하는 시도는 전자기 분야¹에서 처음 시도되었다. 그리고 최근에는 음향 분야²에서 소개된 바 있으나, 현재까지 탄성 분야에는 적용되지 못하고 있다. 본 연구는 극한 이방성(extreme anisotropy) 물질 내에서의 탄성과의 특이 전파 특성을 이용하여, 회절한계를 극복할 수 있는 초월렌즈를 구현한 최초의 연구이며, 실험을 통해서 그 실효성을 검증하였다.

2. 회절 한계를 극복한 고해상도 영상화

2.1 탄성 초월렌즈에서의 탄성과 전파 특성

(1) 극한 이방성(extreme anisotropy)

이방성 매질에서의 탄성과의 거동은 그 매질의 강성 행렬에 의해서 결정된다. 따라서 파장보다 매우 작은 크기의 두 가지 이상의 물질로 구성된 이방성 매질의 경우, 각각의 물질이 이루는 유효(effective) 강성행렬을 고려하면 매질 내에서의 파동의 특성을 파악할 수 있다. 역으로 파동의 거동을 이방성 매질의 설계를 통해서 제어할 수 있다.

초월렌즈는 기본적으로 이러한 매질의 이방성을 극대화하여 파동을 제어하는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 극한 이방성을 구현하기 위해서 강성의 차이가 큰 두 물질을 적층한 구조물을 제안하였고, 대상체의 확대 영상화를 위하여 원통형으로 설계하였다. 대략적인 형상은 Fig. 1과 같다. 그리고 설계된 구조물에서의 파동의 전파 특성을 파악하기 위하여 구조물의 유효 강성을 파악하였는데, 이 과정에서 균질화(homogenization) 방법을 적용하였다. 나아가 균질화된 유효 강성과 크리스토펬 수식(Christoffel equation)을 통하여 준종파(quasi-longitudinal) 모드 성분의 이차원 파수 벡터에 따른 전파 특성을 파악하였다.

(2) 탄성과의 전파 특성

동질 등방성(homogeneous isotropic) 매질에서 파동은 모든 방향으로 동일한 특성으로 전파하며, 높은 파수 벡터 성분들은 전파하지 못하고 지수 감쇠하는 성질을 보인다. 하지만 극한 이방성 매질 내에서 이러한 높은 파수 벡터 성분들은 전파할 수 있으며, 그 전파 방향이 반경 방향과 거의 일치한다. 이러한 극 이방성의 전파 특성은 크리스토펬 수식을 통해 계산된 파동의 파수 벡터 별 전파 속도를 통해서도 확인될 수 있다.

즉 초월렌즈는 높은 해상도를 구현하는데 요구되는 높은 파수 벡터 성분들을 렌즈 내에서 거의 반경

† 교신저자; 서울대학교 기계항공공학부
차세대 자동차 연구센터
E-mail : yykim@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7154, Fax : (02) 872-5431

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

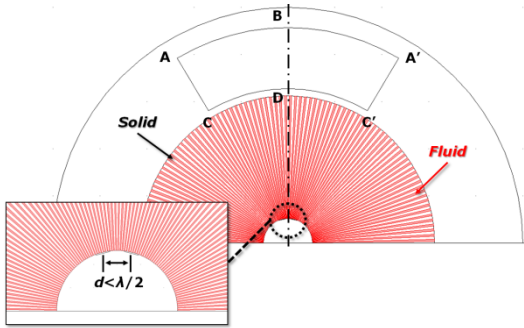


Fig.1 Schematic of the proposed hyperlens

방향으로만 전파하도록 파동 특성을 변환시킨다. 또한 파동이 렌즈 밖까지 전달되는 동안 파동의 각운동량(angular momentum)은 보존되기 때문에, 선형 탄젠셜 운동량(linear tangential momentum)은 압축되어 극한 이방성 매질이 아닌 동질의 등방성 매질에서 원거리까지 전파될 수 있게 된다. 이로써 회절한계 이내의 대상체를 영상화 시킬 수 있다.

2.2 유한요소해석 및 실험을 통한 검증

초월렌즈에 의한 파동의 거동 변화를 살펴보기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 회절한계 이내의 대상체를 구현하기 위해서 두 가진원을 모델링하였고, 두 가진원 사이의 거리는 반 파장 이내이다. 이를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 두 가진원이 회절한계 이내의 범위에 있기 때문에 동질의 등방성 매질에서 두 가진원은 구분되지 않는다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 높은 해상도를 갖는 높은 파수벡터 성분들이 원거리까지 전달되지 못하기 때문이다. 이러한 회절한계 이내의 대상체는 초월렌즈에 의해서 확연히 구분될 수 있다 (Fig. 2(b)). 앞에서 예상한 것처럼 두 가진원에서 발생한 파동은 반경 방향으로 전파하고, 렌즈 밖까지 그 형태를 유지한 채 확대되어 전달된다. 또한 렌즈를 벗어나 원거리까지 두 가진원은 뚜렷하게 구분되며 전파함을 확인하였다.

또한 초월렌즈의 형상에 대하여 균질화 방법을 통해 계산한 유효 강성행렬을 이용하여, 초월렌즈에 해당하는 영역이 극 이방성의 강성을 갖도록 모델링하였다 (Fig. 2(c)). 그 결과가 초월렌즈의 실제적인 모델링 통해서 얻은 결과와 일치함을 확인하였다. 이는 제안한 초월렌즈가 단순하게 파동 가이드(guide) 역할을 하는 것이 아니라, 극한의 이방성 매질을 통해 파동을 제어함을 의미한다.

위에서 언급한 파동의 극 이방성 거동을 실질적으로 검증하기 위해서 초월렌즈를 제작하여 실험하

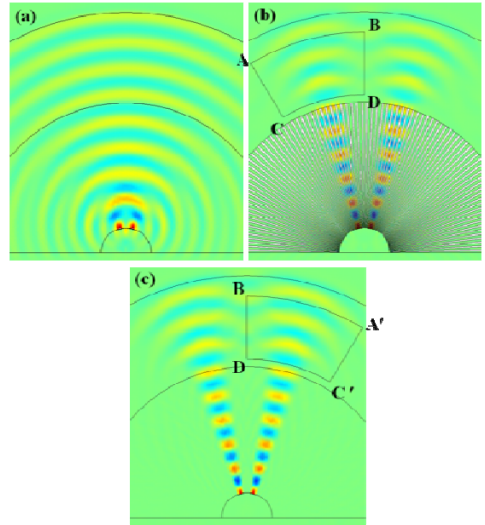


Fig.2 FEM simulation results of radial stress fields: (i) homogeneous isotropic medium, (ii) heterogeneous anisotropic medium, and (iii) homogeneous anisotropic medium

였다. 그 결과가 유한요소해석 결과와 흡사함을 확인하였다. 회절한계 이내의 두 가진원이 렌즈 밖에서 뚜렷이 구분되어 확대 측정되었고, 원거리까지 전파함을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 파장의 한계를 극복하여 초고해상도의 영상화를 가능케 하는 초월렌즈를 제안하였고, 이는 구조안전진단이나 의료용 진단 기술에 획기적으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업 (과제번호: 2010-0019241)과 WCU(과제번호: R31-2010-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Z. Liu, H. Lee, Y. Xiong, C. Sun, and X. Zhang, Science **315** (5819), 1686 (2007); Zubin Jacob, Leonid V. Alekseyev, and Evgenii Narimanov, Opt. Express **14** (18), 8247 (2006).
- Jensen Li, Lee Fok, Xiaobo Yin, Guy Bartal, and Xiang Zhang, Nature Materials **8** (12), 931 (2009).