

음향 메타물질과 포노닉 크리스탈의 소개 및 이를 이용한 수중 음파 제어 기술

오일권*, 정진영, 정지훈, 나태원
(한국과학기술원)

1. 음향 메타물질과 포노닉 크리스탈의 개요 및 특성

음향 메타물질은 물질 내부에 국부적인 공명기(local resonator)를 지닌 물질로서, 이를 통과하는 음파를 제어하기 위해 인위적으로 만들어진 구조체이다. 원래 메타물질과 관련한 연구는 광학, 전자기학 등의 분야에서 이루어져 왔지만, 2004년 Chan 등이 등가적으로 음의 밀도와 음의 체적탄성률을 갖는 음향 메타물질에 대한 논문을 발표하면서 음향 메타물질로 개념이 확장되었다. 이 논문에서는 전자기파가 메타물질을 통과할 때 나타나는 밴드갭, 음의 굴절률과 같은 특이 파동 성질이 음향 메타물질에서도 나타남을 보였으며, 또한 단일 공명 구조로부터 음의 밀도와 체적탄성률을 유도하였다⁽¹⁾.

음향 메타물질은 입사되는 음파의 파장보다 작거나 비슷한 크기의 단위 구조체를 가지며, 이 물질을 구성하는 재료의 크기, 간격, 요소의 물성 등에 따라 다른 특성을 보인다. 음향 메타물질을 통과하는 음파는 물질 내부에서 간섭을 일으키며, 이는 벌크파(bulk wave)나 표면파(surface wave)의 진행 방향을 제어하는 목적으로 사용될 수 있다.

한편, 포노닉 크리스탈은 주기적인 구조체를 통해 이를 통과하는 음파의 산란 특성을 제어하

는 구조체를 말한다. 이는 1차원, 2차원, 3차원 구조체로 생각해볼 수 있는데, 1차원 구조에서 포노닉 크리스탈은 무한한 판이 교대로 겹쳐지는 형태로 구성할 수 있으며, 2차원 구조에서는 무한한 막대 모양이 규칙적으로 배열된 형태로 구성할 수 있다. 3차원 구조에서는 산란자가 불연속적으로 호스트 물질 안쪽에 분포되어 있는 형태가 된다. 이를 통해 포노닉 크리스탈은 내부를 통과하는 음파의 밴드갭⁽²⁾ 현상을 일으켜 특정 주파수를 갖는 음파의 통과를 막을 수 있으며, 이외에도 음굴절 현상, 터널링 등을 통해 음파를 제어하는데 이용된다.

현재 음향 메타물질에 관한 연구는 꾸준히 증가하고 있으며, 음의 체적 탄성률, 밀도, 밴드갭 등의 이론 연구와 음향 렌즈, 필터, 음향 은폐 등과 같은 응용 연구 등이 다양한 형태로 이루어지고 있다.

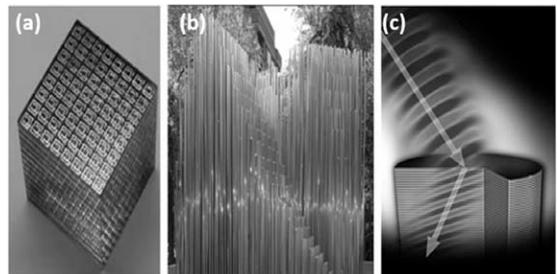


그림 1 (a) 메타물질⁽³⁾, (b) 포노닉 크리스탈⁽⁴⁾, (c) 음굴절⁽⁵⁾

* E-mail : ikoh@kaist.ac.kr / Tel : (042)350-1520

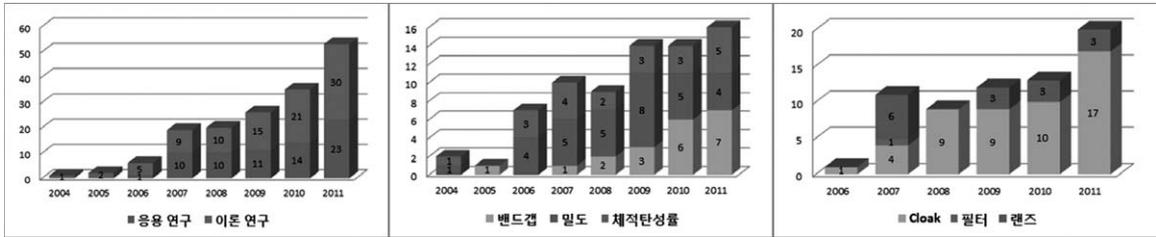


그림 2 음향 메타물질 관련 연구 현황 조사

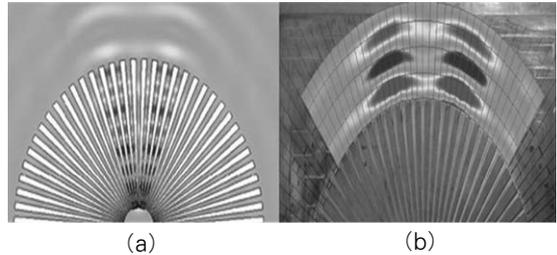
2. 국내·외 연구 현황

2.1 국내 연구 현황

국외에서 음향 메타물질에 관한 연구는 오랜 기간에 걸쳐 진행되어 왔으며, 이론과 응용 모두에 관한 연구가 진행되고 있다. 또한, 국외의 음향 메타물질에 관한 연구는 처음에는 파동현상에 관한 이론 중심의 연구가 중심이었지만 현재는 음향 메타물질을 이용한 응용연구 또한 진행되고 있다. 반면에 국내에서는 음향 메타물질에 관한 연구가 2007~2008년 무렵부터 시작되어 아직은 시작 단계에 있다고 할 수 있으며, 주로 음향 메타물질을 통해 나타나는 특성에 관한 이론 및 실험 연구에 관한 연구가 수행되고 있다.

연세대학교의 이삼현 교수팀은 1차원 튜브 내부에 매우 얇은 탄성막을 배치시켜 1차원의 음향 메타물질을 만들었다. 이 메타물질이 0~735 Hz에서 음의 밀도를 가지는 것을 실험적으로 증명하였으며⁽⁶⁾, 전자기학적인 메타물질의 특성과 비교하였다⁽⁷⁾. 또한, 이들은 제작된 메타물질 모델을 변형하여 튜브의 측면에 구멍을 추가하여 0~450 Hz 영역에서 음의 체적 탄성률을 갖는 구조를 만들고⁽⁸⁾, 음의 값을 갖는 속도(negative phase velocity)에 대한 실험을 하였다⁽⁹⁾.

한편, 서울대학교의 김윤영 교수팀은 주기적인 원형 구멍을 갖는 얇은 알루미늄 평판으로 포노닉 크리스탈을 구성하고 여기에 트랜스듀서를 이용하여 shear horizontal 초음파에 대한 실험을 수행하였다⁽¹⁰⁾. 이들은 이를 통해 포노닉 크리스탈 구조를 지나간 초음파가 음굴절 현상을 보이는 것을 관찰하였다.

그림 3 음향 렌즈 설계의 예⁽¹¹⁾ :

- (a) 음향 렌즈를 포함한 3차원 시뮬레이션,
- (b) 실험으로 음압을 측정된 결과

2.2 국외 연구 현황

Wu 등은 에폭시로 만든 사각 격자 구조체에 고체 실린더를 배열시켜 2차원의 포노닉 크리스탈을 만들었다. 이들은 파의 진행방향이 하이퍼볼릭 시컨트 함수 곡선을 따르도록 설계하였고, 이때의 굴절률이 실린더를 이루는 물질의 밀도와 탄성계수에 따라 조절할 수 있도록 하였다. 파의 진행은 수치적 방법을 통하여 예측되었으며, 해석적 방법을 통하여 구한 결과와 비교하였다.

Yang 등은 포노닉 크리스탈에서의 음파의 진행이 입사파의 주파수와 입사 방향에 크게 의존함에 착안하여, 비등방성을 이용하면 큰 음의 굴절을 이끌어낼 수 있고, 이를 통해 발산하는 음파를 초점에 수렴하게 할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다.

Vasseur 등은 2007년 능동 소자인 PZT5A 행렬을 이용한 포노닉 크리스탈을 제작하였다⁽¹²⁾. 이들은 실리콘 평판에 사각형 배열로 원통 구멍을 새겨서 포노닉 크리스탈을 만들고 배열 사이에 선형 결함을 만들어서 웨이브 가이드를 구현하

였다.

미국 일리노이대학의 Nicholas Fang 교수팀은 2009년 5월, 세계 최초로 수중에서 60 kHz(~2 cm 파장 길이)의 음파를 집중시키기 위한 초음파 메타물질 렌즈를 제작하였다. 보통의 음향 이미징 기법은 전파의 강도가 시간적으로 변동하는 페이딩 현상 때문에 초음파의 입사 파장 길이가 제한적이었고, 따라서 공간 분해능도 한계가 있었으나, 이 렌즈를 통해 고분해능 음향 이미지를 얻기 위한 새로운 방법을 제시하였다.

Maute 등은 2010년 압전재료를 적용시키고 극성변화를 패턴화하는 방법을 이용하여 2차원의 포노닉 크리스탈의 밴드 구조를 조절한 연구를 진행하였다⁽¹³⁾. 위상 최적화를 통해 압전재료의 극성을 변화시키는 패턴이 최적화 되었으며, 이를 통해서 필터, 웨이브가이드, 에너지 하베스터, 웨이브 액추에이터 같은 포노닉 디바이스로의 적용 가능성을 제시하였다.

3. 음향 메타물질과 포노닉 크리스탈의 응용

메타물질은 지금까지 불가능하였던 파동 제어를 가능케 함으로써 다양하고 새로운 분야에 응용이 가능하다. 이를 이용한 음향 렌즈는 최근에 활발한 연구가 진행되고 있는 분야이며, 포노닉 크리스탈의 음굴절(negative refraction) 현상을 이용하여 음굴절률을 가지는 렌즈의 제작이 가능하다. 이를 통해 다양한 주파수에 따라 렌즈의 중심 길이를 조정할 수 있으며, 렌즈를 통과하는 음파를 한 곳에 집중시킬 수 있다. 또한, 음향 영상화 장비의 분해능을 높임으로써 의료 초음파 영상, 수중 음향탐지기, 비파괴 검사 장비 등에 응용될 수 있다. 한편, 음파를 제어하여 경로상의 물체를 우회하거나, 물체에 반사되어 산란된 음파를 상호 간섭을 통해 소멸되도록 함으로써 수중 스텔스 기술에도 응용 가능하다. 그 밖에도 각종 소음을 차단시킬 수 있는 소음차단기 뿐만 아니라, 콘서트홀의 방음 장치에도 적용될 수 있다.

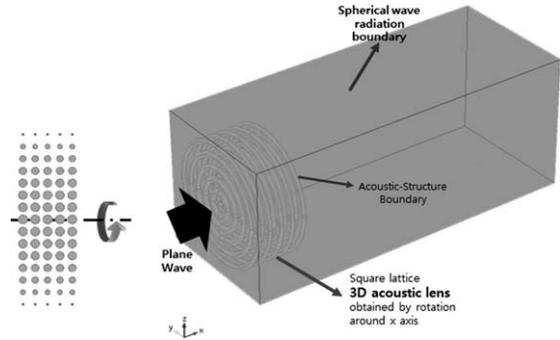


그림 4 축회전을 이용한 3차원 음향 렌즈

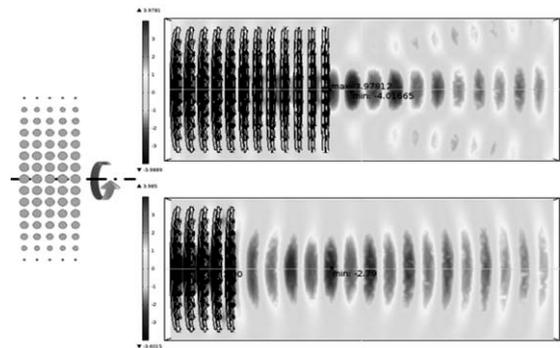


그림 5 3D 사각형 격자 구조 내에서의 음향 집중 현상

4. 우리 연구팀에서 진행한 연구

4.1 3차원 공간상에서 수중 음향 렌즈

3차원 음향 렌즈를 구현하기 위해서 그림 4와 같이 회전축을 설정하고 축회전을 통해서 3차원 형태로 구성하였다. 포노닉 크리스탈은 정사각형과 육각형의 격자를 사용하였고 크리스탈의 크기가 중앙으로 갈수록 증가하는 형상 변화(radius variation)를 적용하였다. 시뮬레이션 영역의 경계면은 음파가 자연스럽게 빠져나가도록 경계조건을 적용하였고, 1 Pa의 평면파가 3차원 음향렌즈를 지나갈 때 음향 집중 현상을 관찰하였다.

정사각형 격자를 가지는 3차원 음향 렌즈에서는 그림 5와 같이 정사각형 격자의 음향렌즈의 끝부분 근처에서 음향 집중 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이곳의 음압은 약 4.0 Pa로 입력 평면파의 약 4배 정도로 나타났다. 또한 정

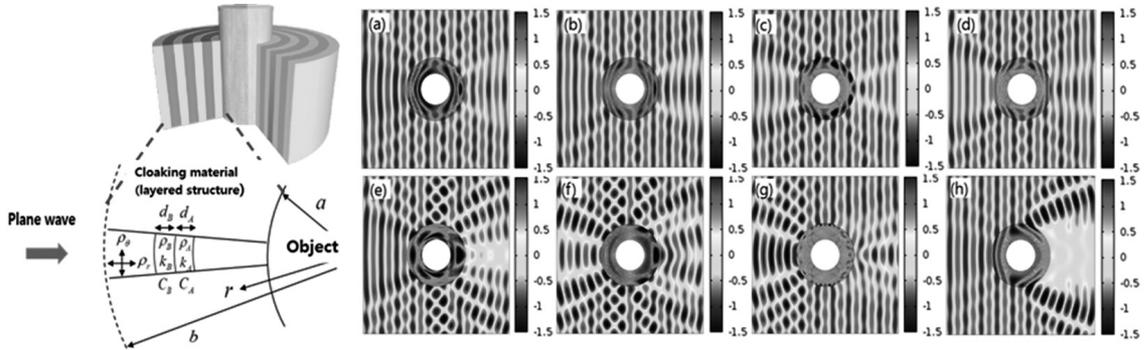


그림 6 다층형 구조와 불완전 음향 은폐: Cummer-Schurig 모델과 재료내 음파 진행 속도가 동일한 경우 (a)~(d), 음향 임피던스가 동일한 경우 (e)~(h)

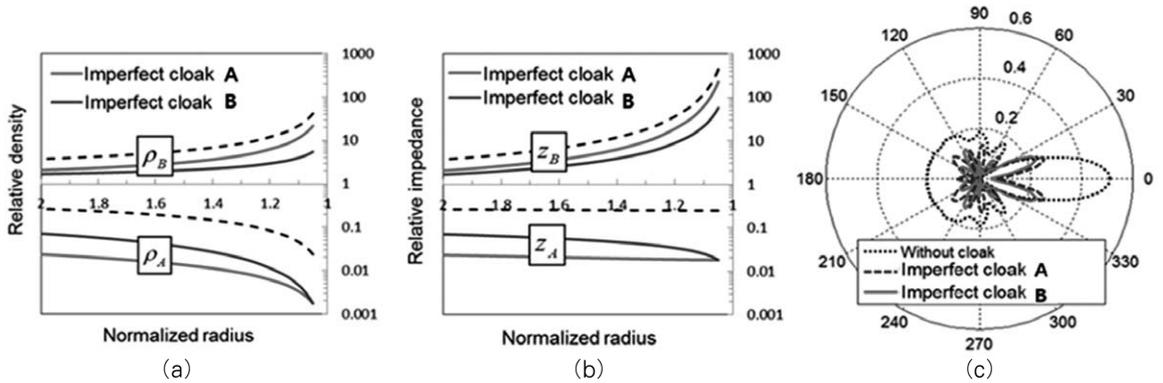


그림 7 불완전 음향 은폐 모델의 비교: (a) 밀도, (b) 음향 임피던스, (c) 산란된 음압(밀도와 음향 임피던스의 점곡선은 동일한 음향 은폐 정도를 갖는 Cummer-Schurig 모델에서의 물성)

사각형 격자를 사용하여 길이가 짧은 렌즈에서의 음파를 살펴보았는데, 첫 번째 경우에 비하여 길이가 짧음에도 불구하고 렌즈의 앞쪽을 기준으로 음향 집중 위치와 집중된 음압이 렌즈의 길이가 길 때와 비슷함을 확인하였다. 이를 통해 정사각형 격자의 축회전 3차원 음향 렌즈에서는 렌즈의 길이보다는 격자 간격과 형상 변화가 음향 집중 강도와 위치에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

또한 육각형 격자를 가지는 3차원 음향 렌즈의 시뮬레이션에서는 음향 집중 위치와 음압이 렌즈의 길이에 따라 현저한 차이를 보였는데, 렌즈의 길이가 길수록 음향이 집중되는 위치의 거리가 짧으며 집중 음압이 더 커짐을 확인하였다.

결과적으로 축회전을 통한 3차원 음향 렌즈에서 격자간격, 밀도와 음속의 gradient-index를 사

용할 수 있는 재료, 형상 변화, 격자모양을 변수로 하여 음압의 집중 위치와 강도를 조절할 수 있었으며 이를 기반으로 한 능동형 렌즈의 실현 가능성이 확인하였다.

4.2 다층형 구조를 이용한 수중 음향 은폐⁽¹⁴⁾

Cummer와 Schurig 등에 의해 제시된 기존의 음향 은폐 이론을 구현하기 위해서는 밀도가 매우 크거나 작아 현실적으로 존재하지 않는 물성을 지닌 재료가 필요하였다. 이를 극복하기 위한 방법으로서, 다층형 구조를 지닌 불완전 은폐(imperfect cloaking) 모델을 제안하였다. 이 때 은폐 재료의 임피던스나 재료내 음파의 진행 속도가 이상적인 은폐 모델의 경우의 값에서 의도적으로 약간 벗어나도록 설계하여, 존재 가능한 물성을 지닌 음향 은폐 구조를 구현하였다. 이상적

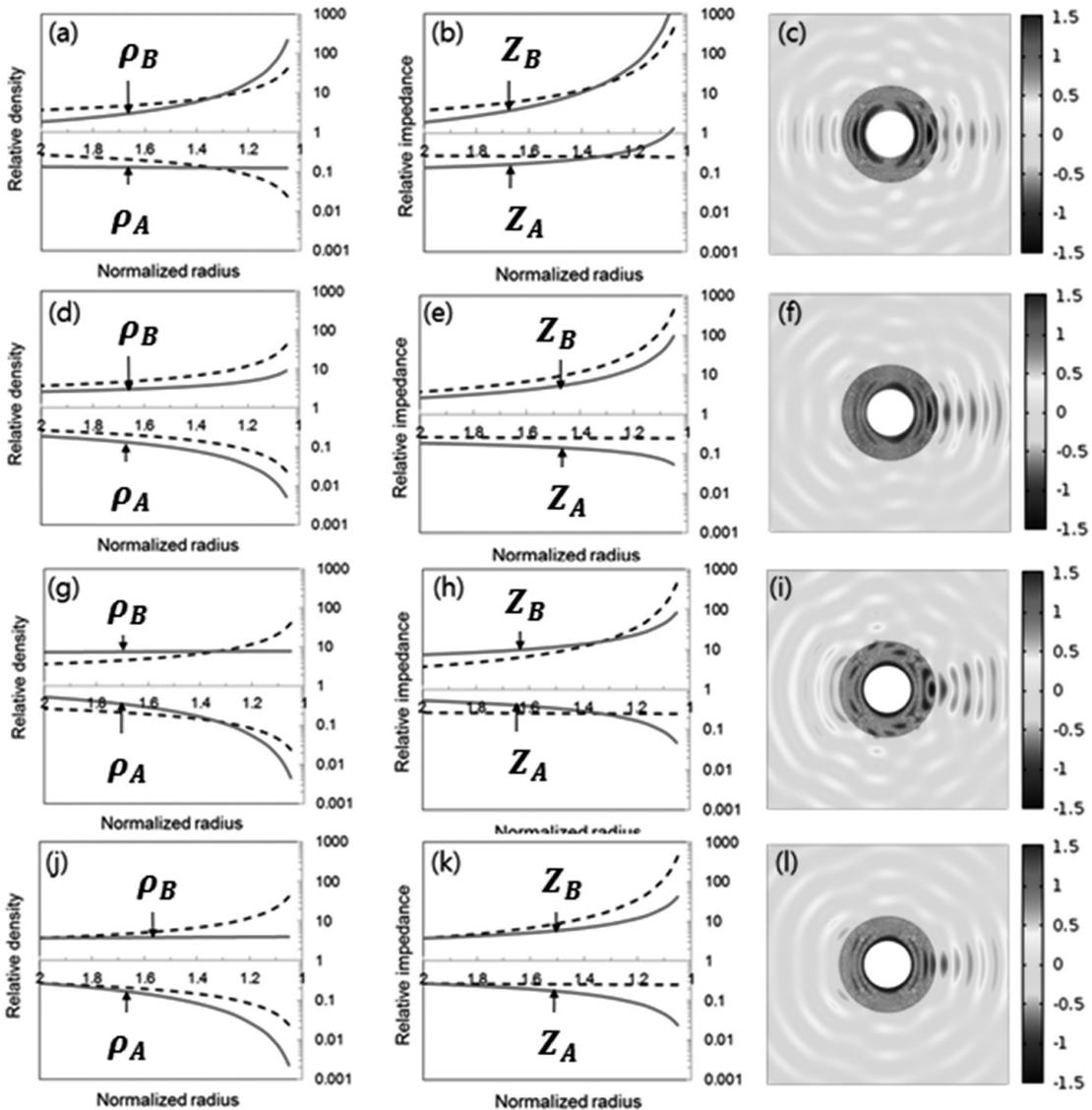


그림 8 Cummer-Schurig 모델과 물질내 음파 속도를 같게 모델의 밀도, 음향 임피던스, 산란된 음압(점곡선은 Cummer-Schurig 모델): (a)~(c) 모델 1, (d)~(f) 모델 2, (g)~(i) 모델 3, (j)~(l) 모델 4

인 음향 은폐 구조에서 은폐대상을 둘러싼 저밀도층과 고밀도층이 반복하여 나타나는데, 불완전 은폐 모델의 설계를 위해서 각 층의 두께, 밀도, 음파 진행 속도, 그리고 임피던스를 설계변수로 하여 이들의 다양한 조합에 대해 음향 은폐에 미치는 영향을 분석하였다.

그 결과 불완전 음향 은폐의 경우 이상적인 음향 은폐 구조와 비교하여 은폐 물질 내 음파 전달

속도를 일치시키지만 하더라도 어느 정도의 음향 은폐를 구현할 수 있었으며 음향 은폐의 관점에서 전반적으로 음파 속도를 일치시키는 것이 임피던스를 일치시키는 것보다 중요하다는 것을 확인하였다(그림 6). 한편 임피던스 일치를 통해 구조를 설계할 때에는 이상적인 음향 은폐의 경우와 적절한 오차를 허용하여 구조 전반에 있어서 임피던스를 일치시키는 것이 특정 위치에

서만 임피던스를 정확히 일치시키는 것에 비해서 더 우수한 음향 은폐 경향을 보였다(그림 8). 또한 고밀도층과 저밀도층의 두께에 대해서는 고밀도층의 두께를 저밀도층의 두께보다 클 때, 음향 은폐성이 개선되는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 Cummer-Schurig 모델을 수정한 불완전 음향 은폐 구조를 제안하였다.

그림 7과 같이 동등한 수준의 음향 은폐를 구현하기 위해서 Cummer-Schurig 모델은 고밀도층의 밀도가 은폐 주변 물질의 밀도보다 100배 정도 큰 값을 지녀야 한다. 그러나 이 연구에서 제안한 불완전 음향 은폐 구조를 적용할 경우 이 값이 5배에서 25배 정도에 불과하다.

따라서, 불완전 은폐 구조는 다양한 설계 변수를 고려한 최적화를 통해 기존의 이론과 비교하여 동등한 수준의 음향 은폐를 구현할 수 있다. 또한 고밀도층에서 자연계에 존재하는 물질을 적용할 수 있으므로, 공학적 관점에서 기존 이론에 비해 매우 실용적인 장점이 있다.

4.3 압전재료를 이용한 도파관에서의 음파 제어

압전 단결정인 PMN-PT와 알루미늄 헤드로 구성된 단위격자를 적용한 진동-음향 메타물질이 제안되었다⁽¹⁵⁾. 제안된 음향 메타물질은 헬름홀츠 공명기와 같이 국부적으로 공명을 일으킬 수 있으며, 이를 도파관에 주기적으로 배열함에 따라 음파 차단을 할 수 있는 음향 메타물질로 활용할 수 있다. 또한, 이 음향 메타물질은 압전 단결정에 셉트 회로를 연결함으로써 여러 개의 밴드갭을 구성할 수 있는 특성이 있다.

도파관에서 제안된 음향 메타물질의 밴드갭은 시뮬레이션 결과로 계산되는 전달 계수(transmission coefficient)를 통해서 평가하였다. 셉트 회로가 적용된 경우와 적용되지 않았을 때의 전달 계수를 비교할 때 구조체의 공진 주파수에서 급격하게 작아짐을 확인하였다. 즉, 단위 격자 구조체의 공진점 부근에서 밴드갭 현상이 발생하며, 이는 충분히 음파 차단 목적의 음향 메타물질로 사용할 수 있음을 의미한다.

단위격자 구조체는 압전재와 알루미늄 헤드로 구성된 기계적인 영역과 압전단결정에 연결되어 있는 셉트 회로인 전기적 영역으로 구분할 수 있다. 셉트 회로가 연결된 단위 격자 구조체로 구성된 진동-음향 메타물질은 공진 셉트 회로에 의해 음파를 차단할 수 있는 더 많은 밴드갭 주파수 영역을 갖게 되는데, 이는 압전 단결정과 연결된 공진 셉트 회로를 조절함에 따라서 가능하게 된다. 또한, 이의 변조를 통해 원하는 주파수 영역에서 밴드갭을 만들 수 있다.

한편, 직렬-병렬 공진 셉트회로에 일반적인 회로의 소자 대신 조절 가능한 회로를 추가하게 되면 실제 제작된 진동-음향 메타물질에서 밴드갭을 쉽게 조절할 수 있다. 합성 유도기(synthetic inductor)와 음의 저항(negative capacitor)를 통해 조절 가능한 회로를 구현할 수 있으며, 이를 통해 가변 밴드갭을 임의의 주파수 구간에서 만들 수 있다.

5. 맺음말

이 글에서는 현재까지의 음향 메타물질과 포노닉 크리스탈에 관하여 수행된 연구 동향 및 그 결과 등에 대하여 전반적으로 조사하고 요약하였다. 또한 응용의 관점에서 우리 연구실에서 진행해온 수중 음파 제어 기술에 대해 간략히 소개하였다. 이러한 물질에 관한 연구는 물리, 수학과 같은 기초과학 분야에서 주로 진행되어 왔고, 아직 기초연구 또는 이론정립 등의 수준에 머물러 있었다. 따라서 음향 메타물질 또는 포노닉 크리스탈의 실용화를 위해서는 더 많은 선행 연구가 진행되어야 한다.

최근 들어 공학 분야에서 이에 대한 관심과 연구가 확대되어, 이를 이용한 응용 연구가 증대될 것으로 보인다. 특히 음파의 이용이 가장 활발한 수중음향분야에서 이를 이용하려는 연구가 많이 수행될 것으로 예측된다. 향후에는 음향 렌즈, 음향 은폐, 음파 탐지 등에 대하여 이들 물질이 적극적으로 활용될 수 있을 것이다. **KSNVE**

참고 문헌

- (1) Li, J. and Chan, C. T., 2004, Double-negative Acoustic Metamaterial, *Phys Rev E* 70.
- (2) Kushwaha, M. S. and Halevi, P., 1994, Band-Gap Engineering in Periodic Elastic Composites. *Appl Phys Lett* 64, 1085~1087.
- (3) *Physics Today*, June 2004.
- (4) *Phycisworld*, December 2005.
- (5) *SPIE Professional*, January 2008.
- (6) Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G. and Kim, C. K., 2008, Negative Effective Density in an Acoustic Metamaterial, *ArXiv Preprint arXiv:0812.2954*.
- (7) Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G. and Kim, C. K., 2009, Acoustic Metamaterial with Negative Density, *Phys Lett A*, Vol. 373, pp. 4464~4469.
- (8) Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G. and Kim, C. K., 2009, Acoustic Metamaterial with Negative Modulus, *J Phys-Condens Mat* 21.
- (9) Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G. and Kim, C. K., 2010, Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus, *Phys Rev Lett* 104.
- (10) Lee, M. K., Ma, P. S., Lee, I. K., Kim, H. W. and Kim, Y. Y., 2011, Negative Refraction Experiments with Guided Shear-horizontal Waves in Thin Phononic Crystal Plates, *Appl Phys Lett* 98.
- (11) Li, J., Fok, L., Yin, X., Bartal, G. and Zhang, X., 2009, Experimental Demonstration of an Acoustic Magnifying Hyperlens, *Nature Materials* 8, pp. 931~934.
- (12) Vasseur, J. O. et al., 2007, Waveguiding in Two-dimensional Piezoelectric Phononic Crystal Plates, *J. Appl Phys*, Vol. 101.
- (13) Rupp, C. J., Dunn, M. L. and Maute, K., 2010, Switchable Phononic Wave Filtering, Guiding, Harvesting, and Actuating in Polarization-patterned Piezoelectric Solids, *Appl Phys Lett* 96.
- (14) Jo, C. H. and Oh, I. K., 2014, A Revisit to Imperfect Acoustic Cloak of Multi-layered Shell Structures Considering Sound Speed and Impedance Matching, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 19, pp. 4637~4652.
- (15) Kwon, B. J., Jo, K., Park, K. C. and Oh, I. K., 2013, Wave Propagation Characteristics of Acoustic Metamaterials with Helmholtz Resonators, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp.167~175.