한국소음진동공학회 2012년 추계학술대회논문집, pp. 530~531

음향자 결정구조 기반의 프리즘 구조를 통한 단방향 파동 전파 시스템

One-sided wave transmission with phononic crystal based prism structures

오주환† · 김회웅* · 마평식* · 승홍민* · 김윤영**

Joo Hwan Oh, Hoe Woong Kim, Pyung Sik Ma, Hong Min Seung and Yoon Young Kim

1. 서 론

음향자 결정구조(phononic crystal, PC)란 모체(matrix) 내에 주기적인 함유물(inclusion) 혹은 구멍이 배열된 구조를 의미한다. 이러한 구조 내에서는 그 주기성으로 인하여 음의 굴절 현상[(1)]이나 밴드갭(band-gap) 현상[(2)] 등 일반적인 물질에서는 관측되지 않는 파동 특이현상(meta phenomena of waves)이 구현될 수 있음이 밝혀져 있다. 이에 따라 최근 음향자 결정 구조에 대한 관심이 크게 증대되고 있으며 이를 응용한 다양한 파동 시스템이 제안되고 있다.

이와 같은 다양한 시스템 중에서도 특히 파동이 오직 한 방향으로만 통과가 가능하고 반대 방향으로는 통과할 수 없는 단방향 파동 전파 (one-sided wave transmission) 시스템은 가장 흥미로운 시스템 중 하나로 각광받고 있다. 단방향 파동 전파 시스템은 일반적으로 음향자 결정 구조에 회절(diffraction) 현상이나 비선형(nonlinearity) 현상을 접목하여 구현되어 왔으나, 최근 회절 현상이나 비선형 현상이 없이도 공학적으로 설계한 음향자 결정 구조 기반의 프리즘을 응용한다면 단방향 파동 전파 시스템을 구현할 수 있음이 제안된 바 있다[(3)]. 제안된 방식은 단방향 파동 전파 시스템을 구현할 수 있는 새로운 방식을 제안했을 뿐만 아니라 기존의 방식과는 달리 다른 기능성을 함께 보일 수 있을 것으로 기대되고 있다.

본 발표에서는 이와 같이 최근에 본 연구단이 제안한, 음향자 결정구조 기반의 프리즘 구조를 통한 단방향 파동 전파 시스템의 작동 원리와 물리적인 현상 연구에 초점을 맞추고자 한다.

† 교신저자; 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : ojh86@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-1689, Fax : (02) 872-5431
* 서울대학교 기계항공공학부
** 서울대학교 기계항공공학부, WCU, 교수

2. 프리즘 구조 기반의 단방향 파동 전파 시스템

2.1 기본 형상 및 작동 원리

본 연구에서 고려한 단방향 파동 전파 시스템은 fig. 1 에서 보듯이 알루미늄 판에 주기적인 구멍이 배열된 두 개의 프리즘 구조로 이루어져 있다. 이와 같이 주기적인 구조가 반복되어 음향자 결정 구조를 이루고 있을 경우, 해당 구조에서의 파동 특성은 주기적인 구멍에 의한 회절 현상에 의해 일반적인 알루미늄 판에서의 파동 특성과 달라지게 된다. 따라서 fig. 1 에서 구멍이 배열된 음향자 결정구조의 파동 특성은 외부 알루미늄 판에서의 파동 특성과 달라지며, 그 경계면에서 파동은 반사 및 투과(reflection and transmission) 현상을 보이게 된다.

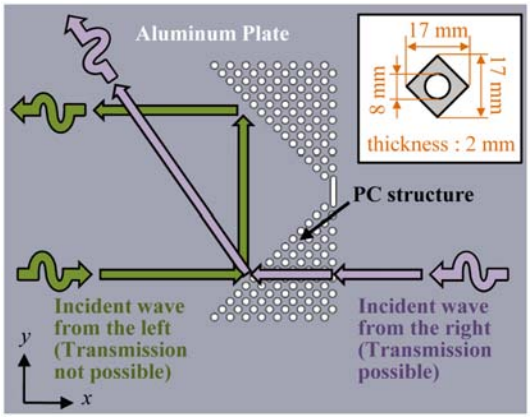

Fig. 1 Schematic illustration of the proposed PC structure and wave propagation in the structure.

제안된 시스템은 프리즘 구조를 이루고 있기에 우측과 좌측 경계면의 형상이 서로 상이하며, 이로 인해 우측에서 입사한 파동(fig. 1의 보라색 화살표)과 좌측에서 입사한 파동(fig. 1의 초록색 화살표)은 서로 다른 경계 조건을 만족하게 된다. 결과적으로 프리즘 구조를 이루는 음향자 결정구조의 단위 구조(unit cell)를 공학적으로 설계한다면 왼쪽에서 입사한 파동은 전반사(total reflection)되는 반면 오른쪽에서 입사한 파동은 투과할 수 있게끔 설계가 가능하다. 본 연구에서는 이러한 점에 착안, 음향자 결정구조 기반의 프리즘이 단방향 파동 전파 특성을 보이기 위한 조건을 선별, 음향자 결정구조의 설계를 수행하였다.

2.2 제안된 방식의 해석적, 실험적 검증

제안된 단방향 파동 전파 시스템을 검증하기 위하여 유한요소 해석과 실험적 접근을 수행하였다. 해석과 실험 모두 180 kHz의 최저차 전단파 (shear-horizontal wave, SH0)가 고려되었으며, 제안된 시스템의 양쪽에서 탄성파가 평면파 형태로 입사될 경우의 파동의 진행 양상에 초점을 맞추었다.

Fig. 2 는 제안된 시스템에 평면파가 우측과 좌측에서 각각 입사된 경우의 파동의 진행 양상을 유한요소 해석을 통하여 해석한 결과이다. 이를 통하여 제안된 시스템의 우측에서 입사한 평면파는 해당 구조를 투과, 굴절하여 반대편으로 진행해 나가지만 좌측에서 입사한 평면파는 전반사되여 반대편으로 진행하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 시스템에 대한 실험에서도 해석과 동일한 결과를 얻을 수 있었으며, 이를 통하여 제안된 단방향 파동 전파를 해석적, 실험적으로 검증할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 공학적으로 설계된 음향자 결정구조 기반의 프리즘 구조를 통하여 특정 주파수에서 단방향 파동 전파를 구현할 수 있음을 제안하였다. 제안된 방식은 탄성파의 입사 방향에 따라 파동 에너지의 전파를 조절할 수 있기 때문에 향후 이를 응용한 다양한 시스템이 개발될 수 있을 것으로 예상한다.

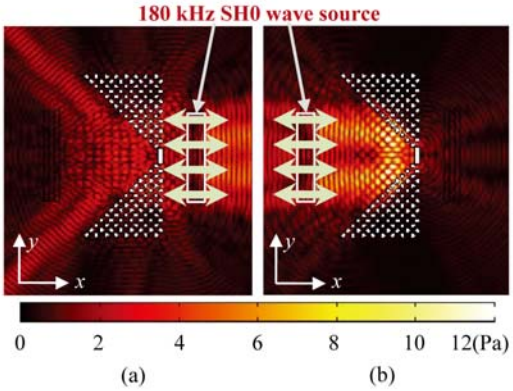

Fig. 2 The von Mises stress distribution obtained by the finite element analyses (a) for right incidence and (b) for left incidence case.

후 기

본 연구는 한국 연구재단의 중견 연구자 지원 사업 (과제번호: 20120005693)과 WCU (과제번호: R31-2008-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) 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, Applied Physics Letters, Vol. 98, 011901.

(2) Sigalas, M. and Economou, E. N., 1993, Band structure of elastic waves in two dimensional systems, Solid State Communications, Vol. 86, No. 3, pp. 141-143.

(3) Oh, J. H., Kim, H. W., Ma, P. S., Seung, H. M. and Kim, Y. Y., 2012, Inverted bi-prism phononic crystals for one-sided elastic wave transmission applications, Applied Physics Letters, Vol. 100, 213503.