

# 평판에서의 전단파 모드 분리 특이 현상 Meta Phenomenon of SH Wave Mode Splitting in a Plate

마평식† · 오주환† · 이일규† · 이민경† · 김윤영\*

Pyung Sik Ma, Joo Hwan Oh, Il Kyu Lee, Min Kyung Lee and Yoon Young Kim

## 1. 서 론

최근 전자기과의 파동 특이현상(Meta phenomena of waves)에 대한 활발한 논의<sup>(1)</sup>와 함께 탄성파에 대한 특이현상도 큰 관심을 받고 있다. 그 중 포노닉 크리스털(phononic crystal, Fig.1(a))은 특정 주파수 대역에서 파동의 전파가 이루어 지지 않는 밴드갭 현상(band gap)이나 음의 굴절 현상(negative refraction)<sup>(2)</sup>등의 파동 특이현상을 구현할 수 있는 것으로 알려져 왔다. 이러한 현상들은 등방성 물질에서 파동 전파 방향에 따라 동일했던 분산 특성(dispersion relation)이 포노닉 크리스털 내에서는 파동의 전파 방향에 따라 상이한 것에서 기인한다.

본 논문에서는 포노닉 크리스털을 갖는 평판(Fig.1(a))에서 전단파(Shear-Horizontal wave) 모드에 따라 전파 방향을 분리시키는 연구를 수행하였다. 결정 구조의 단위구조(unit cell)의 분산 특성을 통하여 SH0 모드(최저차의 전단파)와 SH1 모드(그 다음 차수의 전단파)의 전파 방향을 예측하고, 유한요소해석(Finite Element Analysis)를 통하여 모드 분리 현상을 해석적으로 규명하였다.

## 2. 분산 특성과 전단파 전파방향

### 2.1 유도 탄성파의 분산특성

일반적인 평판에서 전단파에는 두께 방향의 모드에 따라 비분산의 SH0 모드와 분산의 고차 SH1 모드가 존재한다(Fig.1(b)). 등방성 물질로 이루어진 평판에서의 주파수  $\omega$  와 파수 벡터(wave vector)  $\mathbf{k} (=k_x \mathbf{i} + k_y \mathbf{j})$ 의 관계로부터 각 모드의 위상속도

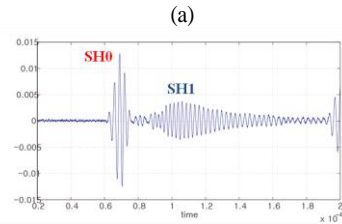
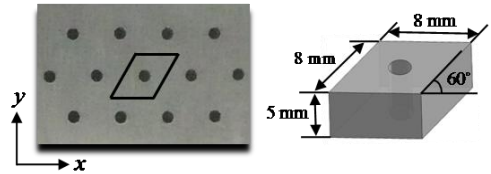


Fig.1 (a) photograph and unit cell of the phononic crystal plate, (b) time signal of 350kHz SH-wave at isotropic plate

(phase velocity:  $\omega/\mathbf{k}$ )와 군속도(group velocity:  $\partial\omega/\partial\mathbf{k}$ )를 계산할 수 있다.

등방성의 평판( $E = 69 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ )에서 위상속도와 군속도는 방향이 동일하며, 그 크기는 방향에 관계없이 일정하다. Fig.2(a)는 350kHz로 전파되는 전단파의 파수 벡터를 모든 방향에 따라 계산하여 나타낸 곡선으로 군속도의 방향은 그 정의에 의해서 곡선의 법선 방향임을 알 수 있다.<sup>(3)</sup>

### 2.2 포노닉 크리스털 평판의 분산특성

본 연구에서는 전단파 모드 분리를 위하여 원형 구멍이 삼각형 격자구조(triangular lattice)로 배열되어 있는 음향양자 결정을 고려하였다(Fig.1(a)). 물질 분포의 주기성으로 인하여 포노닉 크리스털 내의 분산 특성 또한 주기적으로 나타난다. 분산특성의 가장 작은 단위의 파수 벡터 공간인 브릴루앙 영역(Brillouin zone)의 350kHz 전단파의 파수 벡터를 Fig.2(b)와 같이 유한요소 해석(Finite Element Method)을 적용하여 계산하였다.

포노닉 크리스털 평판으로 유도 탄성파가 입사되

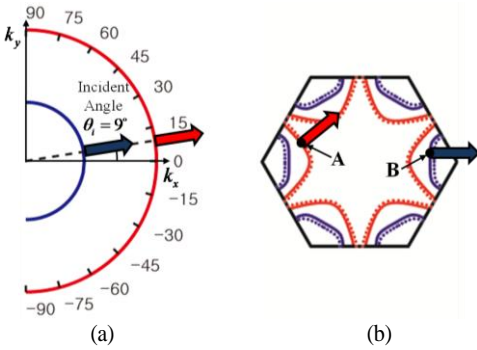
† 교신저자; 서울대학교 기계항공공학부 대학원

E-mail : maps@idealab.snu.ac.kr

Tel : (02) 880-1689, Fax : (02) 872-5431

\* 서울대학교 기계항공공학부

차세대 자동차 연구센터



**Fig.2** Equi-frequency Contours of (a) an isotropic plate and (b) a PC at 350kHz (red line: SH0 mode, blue line: SH1 mode)

계 되면 다음의 조건을 만족시키는 유도 탄성과 모드가 결정 구조 내부에 가진 된다.

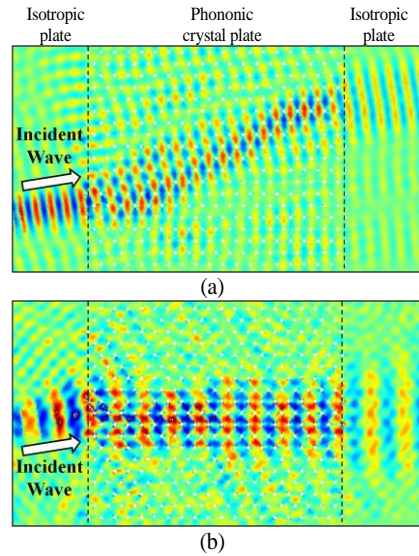
- I. 경계 방향 파수 벡터  $k_y$  가 보존
- II. 군속도의 법선 방향의 부호는 동일

결정 구조 외부에서 경계의 법선 방향과  $9^\circ$  를 이루며 입사되는 SH0와 SH1 모드의 탄성파에 대해서 위의 조건을 만족시키는 파수 벡터의 위치는 Fig.2(b)의 각각 A와 B로 나타내었다. 이 상황에서는 SH0 모드와 관계된 결정 구조 내 탄성파(A 지점)의 군속도 방향은  $38.8^\circ$  이며, SH1 모드의 방향은  $0^\circ$  으로(B 지점) 각각 다른 방향으로 분리될 수 있음을 본 연구를 통해 밝혔다.

### 3. 시뮬레이션 결과

단위구조의 분산 특성으로부터 얻은 포노닉 크리스탈 평판내의 전단파 분리 현상에 대한 검증을 위하여 유한요소법을 이용하여 전단파에 대한 조화 응답(harmonic response)를 계산하였다. 두께 5mm 의 알루미늄 평판에서 각 전단파 모드의 350kHz 에서의 파장은 SH0의 경우 8.94mm, SH1 모드는 19.97mm 으로 각 모드는 파장과 두께 방향 위상을 고려하여  $9^\circ$  방향으로 입사되도록 350kHz 로 조화 가진하였다.

SH0 모드에 대한 조화 응답은 Fig.3(a)와 같이 포노닉 크리스탈에 내에서 약  $30^\circ$  의 각도를 이루며 꺾여 전파되며, SH1 모드는 경계에 수직한 방향으로 진행하였다(Fig.3(b)). 이러한 조화 응답결과는 2장에서 살펴본 단위구조의 분산 특성에서 예측한 경향과 일치하는 것을 확인하였다.



**Fig.3** Simulated results of the shear stress field of a different 350kHz SH wave incident at an angle of  $9^\circ$  to the normal (a) SH0 wave, (b) SH1 wave

### 4. 결 론

본 연구에서는 포노닉 크리스탈 평판에서의 전단파 모드 분리 현상에 대하여 살펴보았다. 모드 분리 현상은 결정 구조의 주기적인 분산 특성에서 기인한다. 따라서 본 연구에서 제안한 포노닉 크리스탈을 선택하면 350kHz 로 입사되는 SH0와 SH1 모드의 전단파가 결정 구조를 지나면서 각각  $38.8^\circ$  와  $0^\circ$  로 전파 방향이 분리됨을 확인하였다.

### 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

- (1) Pendry, J. B., 2000, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 3966-3969
- (2) Lee, M. K., Ma, P. S., Lee, I. K., Kim, H. W. and Kim, Y. Y., 2002, "Negative refraction experiments with guided shear-horizontal waves in thin phononic crystal plates", *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 011909-1~3
- (3) Sukhovich, A., Jing, L., Page, J. H., 2008, "Negative refraction and focusing of ultrasound in two-dimensional phononic crystals," *Phys. Rev. B* **77**