

불연속면에서 램파의 반사와 투과에 대한 정량적 추정

Quantitative Estimation of Transmitted and Reflected Lamb Waves at Discontinuity

임형진*, 손 훈*†

Hyung Jim Lim* and Hoon Sohn*†

초 록 램파를 구조물 안전진단(structural health monitoring, 이하 SMH) 기법에 효과적으로 적용하기 위해 구조물의 손상과 램파간의 물리적 특성 및 상호관계를 정확히 이해하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 modal decomposition 방법을 이용하여 비대칭 불연속면에서 램파의 투과와 반사, 모드 변이를 모사하고, 그 진폭 비율을 불연속면의 깊이에 따라 예측하였다. 또한 이론적으로 예측된 결과를 압전센서(PZT)를 모사한 유한요소법(FEM) 모델과 실험을 통해 검증하였다. 그 결과, modal decomposition 방법을 이용한 이론적 예측이 압전센서를 이용한 유한요소 해석 및 실험 결과와 근접한 것을 확인하였으며, 불연속면의 깊이에 따른 램파의 반사와 투과, 모드 변이의 양을 이용하여 손상의 크기를 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제안하였다.

주요용어: 램파, 구조물 안전진단, 압전센서(PZT), 유한요소법, Modal Decomposition

Abstract For the application of Lamb wave to structural health monitoring(SHM), understanding its physical characteristic and interaction between Lamb wave and defect of the host structure is an important issue. In this study, reflected, transmitted and mode converted Lamb waves at discontinuity of a plate structure were simulated and the amplitude ratios are calculated theoretically using Modal decomposition method. The predicted results were verified comparing with finite element method(FEM) and experimental results simulating attached PZTs. The result shows that the theoretical prediction is close to the FEM and the experimental verification. Moreover, quantitative estimation method was suggested using amplitude ratio of Lamb wave at discontinuity.

Keywords: Lamb Wave, Structural Health Monitoring, PZT, Finite Element Method, Modal Decomposition

1. 서론

램파는 구조물의 표면 및 내부의 균열을 탐지할 수 있으며 탄성체의 경우 감쇠가 적어 파의 전파거리가 크기 때문에 넓은 영역의 손상을 감지할 수 있다는 장점을 가지고 있어 구조물 안전진단(structural health monitoring, SHM) 및 비파괴검사(non-destructive testing, NDT) 분야에서 유용하

게 이용되고 있다. 하지만 보다 효율적이고 폭넓게 SHM분야에 램파를 적용하기 위해서는 램파와 구조물간의 상호관계를 보다 정확히 이해하는 것이 중요하다.

평판(plate)은 다양한 구조물들을 구성하는 가장 기본적인 요소이므로 평판에서 램파와 손상과의 관계를 이해하는 연구가 기본적으로 필요하며 그 동안 많은 연구가 진행되어 왔다. B. Morvan은 평판

의 끝단에서 램파의 거동을 램파 방정식의 해를 이용하여 이론적으로 예측하고, 유한요소법(FEM)과 실험을 통하여 이를 검증하였다[1]. F. Benmeddour은 대칭 및 비대칭 불연속면에서 램파의 거동을 비대칭 불연속면에서 발생하는 모드 변이(mode conversion) 현상과 함께 이론적으로 모사하고, 이를 실험값과 비교하였다[2,3]. M. Castaings는 modal decomposition 방법을 이용하여 대칭과 비대칭에서 램파의 거동을 이론적으로 모사하고, 이를 실험값 및 FEM 결과와 비교 분석하였다[4].

최근의 SHM에서는 압전센서(PZT)가 램파의 가진 및 측정에 많이 이용되고 있다. 압전센서는 신호의 측정과 가진이 모두 가능하고, 다른 장비에 비하여 가볍고 민감하여 고주파의 측정에 용이하다는 장점이 있다. 하지만 기존의 논문들은 FEM결과만을 이용하여 이론적 예측을 검증한 것이 대부분이며, 실험을 통한 검증을 거친 논문들은 비부착형 변환기를 이용한 실험을 수행하였기 때문에 최근 SHM 분야에서 활발히 이용되고 있는 부착형 압전센서에 대한 영향에 대하여 고찰한 연구결과는 찾기 힘들다[5,6]. 게다가 이론적인 예측에 있어 해의 수렴기준 및 해석의 방법론에 대한 내용이 부족하다.

본 논문은 부착형 압전센서를 이용한 FEM 및 실험을 통하여 이론적인 예측과 함께 램파의 거동을 고찰하였다는데 의미가 있다. 또한 이론적으로 구한 해 중에서 물리적으로 의미가 있는 해를 선택하고 이를 이용하는 방법론에 대한 논의도 언급되었다. Modal decomposition 방법을 이용하여 알루미늄 평판의 불연속면에서 산란된 램파들의 진폭비를 이론적으로 예측하고, 압전센서를 이용한 실험 및 FEM 결과와 비교하여 압전센서로 가진되고 측정된 각각의 램파의 진폭비를 비교하여 램파와 불연속면의 상호관계를 고찰하였다. 또한 불연속면의 깊이에 따른 산란된 파의 진폭비를 이용하여 구조물의 손상을 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 이론적 배경

Modal decomposition 방법은 진행하는 램파가 불연속점을 지날 때, 불연속점을 기준으로 반사파와 투과파들로 나누어진다는 것에서 시작한다(Fig. 1). 산란된 각 파의 진폭들은 그 크기는 알 수 없지만, 식(1) - (2)와 같이 수식화 될 수 있다[1].

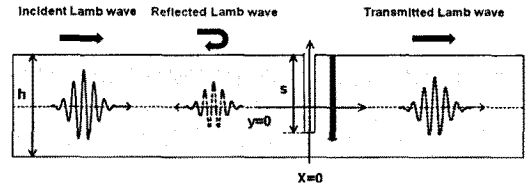


Fig. 1 Lamb wave transmission and reflection at a discontinuity

$$\vec{v} = \sum_n^{\infty} r^{(n)} \nu^{(n)} \quad (1)$$

$$\vec{\sigma} = \sum_n^{\infty} r^{(n)} \sigma^{(n)} \quad (2)$$

여기서, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 이고, +와 -는 각각 파의 진행방향과 그 반대방향을 나타낸다. 또한, \vec{v} 와 $\vec{\sigma}$ 는 각각 입자속도 벡터와 응력 tensor를, $r^{(n)}$ 는 미지의 진폭, $\nu^{(n)}$ 와 $\sigma^{(n)}$ 는 각각 n 번째 램파 모드의 입자속도와 응력을 나타낸다. n 번째 램파 모드의 입자속도와 응력은 식(3)과 (4)에 표시된 대칭모드(symmetric mode)와 비대칭모드(anti-symmetric mode) 방정식으로부터 파수(wave-number, k)를 Newton-Raphson방법을 사용하여 계산할 수 있다. 방정식의 해인 파수를 이용하여 램파의 입자속도와 응력을 구하는 자세한 수식은 참고문헌[7,8]에 자세히 설명되어 있다.

$$\frac{\tan(\beta 2d)}{\tan(\alpha h)} = -\frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \quad (3)$$

$$\frac{\tan(\beta 2d)}{\tan(\alpha h)} = -\frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4\alpha\beta k^2} \quad (4)$$

여기서, $\alpha = \sqrt{(\frac{\omega}{c_1})^2 - k^2}$, $\beta = \sqrt{(\frac{\omega}{c_2})^2 - k^2}$, $d = h/d$ 는 파가 진행하는 평판 두께의 절반, ω 는 파의 각 속도, c_1 과 c_2 는 각각 파가 진행하는 매질에서 종파와 횡파의 속도를 나타낸다[7,8].

3. Modal Decomposition 방법을 이용한 이론적 모델링

램파 방정식의 해는 파수로 나타나며, 해들은 유한개의 정수 및 허수, 무한개의 복소수로 구성되어

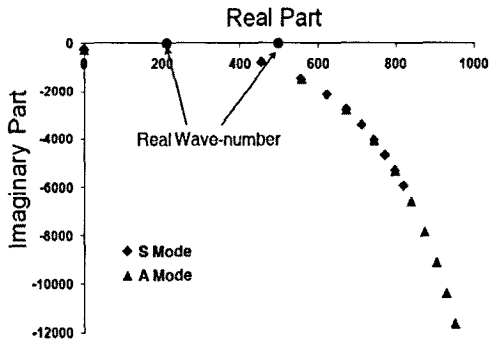


Fig. 2 Solutions of Lamb wave equations (wave-number)

있다(Fig. 2). 정수의 해는 실제 전파되는 파(propagation wave)를 의미하며, 허수 및 복소수의 해는 매우 빠른 속도로 소멸하는 파(evanescent wave)를 의미한다.

Modal Decomposition 방법을 이용하여 두께가 h 인 평판에 깊이가 s 인 불연속면에서 x 방향으로 진행하는 램파의 투과와 반사를 예측하기 위해, 다음과 같은 경계조건을 적용하였다(식(5-8)). 불연속면의 폭의 길이는 파의 파장에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였다. 또한 경계면 및 불연속면에서는 응력이 작용하지 않아야 하며, 에너지는 항상 보존되어야 한다. 파의 에너지는 파가 전파될 때 매질의 입자속도와 관계가 있으므로 각각의 경계에서 입자속도의 합(에너지 합)은 일정해야 한다. 각각의 경계조건을 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$0 = \vec{\sigma}^i + \vec{\sigma}^t \text{ where } x=0, y \in s \quad (5)$$

$$0 = \vec{\sigma}^t \text{ where } x=0, y \in s \quad (6)$$

$$0 = \vec{v}^i + \vec{v}^r + \vec{v}^t \text{ where } x=0, y \notin s \quad (7)$$

$$0 = \vec{\sigma}^i + \vec{\sigma}^r + \vec{\sigma}^t \text{ where } x=0, y \notin s \quad (8)$$

여기서, i, r, t 는 각각 가진 된 파(incident wave), 반사된 파(reflected wave) 투과된 파(transmitted wave)를 나타낸다. 위의 경계조건은 평판의 표면과 불연속면의 경계에서는 파로 인한 응력 및 입자속

도가 0이 됨을 의미한다(free end). 식(1, 2)를 대입하여 식(5)를 전개하면 다음과 같다.

$$0 = \begin{cases} \sigma_{xy}^i(x=x_{s-}) + \sum_n r^{(-n)} \sigma_{xy}^{(-n)}(x=x_{s-}) \\ \sigma_{xx}^i(x=x_{s-}) + \sum_n r^{(-n)} \sigma_{xx}^{(-n)}(x=x_{s-}) \end{cases} \quad (9)$$

where $x=0, y \in s$

여기서, 음의 부호는 반사되는 파, 양의 부호는 투과되는 파를 의미한다. 식(9)에서, 깊이 방향(y)을 Y 개의 점으로 나누었을 때, 각 점에서 경계조건을 적용하면 식(10-11)와 같이 표현 할 수 있고, 이를 간단히 하면 식(12-13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xy}^i(y(1)) \\ \sigma_{xy}^i(y(2)) \\ \vdots \\ \sigma_{xy}^i(y(Y)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{xy}^{(-1)}(y(1)) & \sigma_{xy}^{(-2)}(y(1)) & \dots & \sigma_{xy}^{(-n)}(y(1)) \\ \sigma_{xy}^{(-1)}(y(2)) & \sigma_{xy}^{(-2)}(y(2)) & \dots & \sigma_{xy}^{(-n)}(y(2)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{xy}^{(-1)}(y(Y)) & \sigma_{xy}^{(-2)}(y(Y)) & \dots & \sigma_{xy}^{(-n)}(y(Y)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r^{(-1)} \\ r^{(-2)} \\ \vdots \\ r^{(-n)} \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}^i(y(1)) \\ \sigma_{xx}^i(y(2)) \\ \vdots \\ \sigma_{xx}^i(y(Y)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^{(-1)}(y(1)) & \sigma_{xx}^{(-2)}(y(1)) & \dots & \sigma_{xx}^{(-n)}(y(1)) \\ \sigma_{xx}^{(-1)}(y(2)) & \sigma_{xx}^{(-2)}(y(2)) & \dots & \sigma_{xx}^{(-n)}(y(2)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{xx}^{(-1)}(y(Y)) & \sigma_{xx}^{(-2)}(y(Y)) & \dots & \sigma_{xx}^{(-n)}(y(Y)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r^{(-1)} \\ r^{(-2)} \\ \vdots \\ r^{(-n)} \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

$$\sum \sigma_{xy}^i + \sum \sigma_{xy}^{(-)} R^{(-)} = 0 \text{ where } x=0, y \in s \quad (12)$$

$$\sum \sigma_{xx}^i + \sum \sigma_{xx}^{(-)} R^{(-)} = 0 \text{ where } x=0, y \in s \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \sum \sigma_{xy}^i \\ \sum \sigma_{xx}^i \\ 0 \\ 0 \\ \sum v_y^i \\ \sum v_x^i \\ \sum \sigma_{yy}^i \\ \sum \sigma_{xy}^i \\ \sum \sigma_{xx}^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum \sigma_{xy}^{(-)}(y \in s) & 0 \\ \sum \sigma_{xx}^{(-)}(y \in s) & 0 \\ 0 & \sum \sigma_{xy}^{(+)}(y \in s) \\ 0 & \sum \sigma_{xx}^{(+)}(y \in s) \\ \sum v_y^{(-)}(y \in s) & \sum v_y^{(+)}(y \in s) \\ \sum v_x^{(-)}(y \in s) & \sum v_x^{(+)}(y \in s) \\ \sum \sigma_{yy}^{(-)}(y \in s) & \sum \sigma_{yy}^{(+)}(y \in s) \\ \sum \sigma_{xy}^{(-)}(y \in s) & \sum \sigma_{xy}^{(+)}(y \in s) \\ \sum \sigma_{xx}^{(-)}(y \in s) & \sum \sigma_{xx}^{(+)}(y \in s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^{(-)} \\ R^{(+)} \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

위의 과정을 모든 경계조건(식(6-8))에 적용하여 행렬로 나타내면 식(14)와 같은 행렬식을 얻을 수 있다. 위의 식을 간단히 하면 다음과 같다.

$$T + MR = 0 \quad (15)$$

여기서, R 은 산란된 파들의 진폭을 나타내는 미지수가 되며 $R^{(+)}$ 은 반사된 파, $R^{(-)}$ 은 투과된 파들의 진폭을 의미한다. 아래와 같이 간단히 계산할 수 있다. 여기서 첨자 T 와 -1 은 각각 행렬의 전치(transpose)와 역행렬(inverse)이다.

$$R = -(M^T M)^{-1} M^T T \quad (16)$$

본 연구에서는 알루미늄 평판에 A0모드의 램파를 가진하여, 불연속면에서 파의 투과와 반사, 모드변이를 이론적으로 예측하였으며, 매질의 물성치는 다음과 같다(Table 1). 가진 주파수는 알루미늄 평판의 두께와 물성치를 대입하여 계산된 분산선도를 이용하여 고차 모드가 발생하지 않는 주파수 및 모드를 선정하였다(Fig 3).

램파의 방정식을 풀어 구한 해는 Fig. 2에 표시된 바와 같이 유한개의 정수해와 무한개의 복소수해로 구성된다. 정수해는 그 크기가 작은 순서대로 A0, A1, A2모드의 파수가 된다. 본 연구에서는 A0

Table 1 Material and wave properties used for the modal decomposition method

가진 주파수(kHz) 및 모드	180, A0 모드
탄성계수(GPA)	70.38
두께(mm)	5
포아송 비	0.33
밀도(N/m ³)	2768

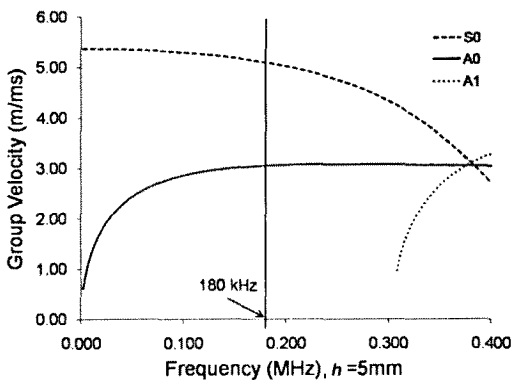


Fig. 3 Lamb wave dispersion curve for selecting excitation frequency

모드의 반사와 투과에 초점을 맞추었기 때문에, 가장 작은 정수의 파수를 이용하였다.

복소수의 경우, 허수부가 음수와 양수를 모두 가지게 되는데, 양수의 허수부를 가지는 해는 물리적으로 의미가 없기 때문에, 음수의 허수부를 가지는 해만을 이용하였다[8]. 평판의 경우 불연속면이 있을 경우 구조물의 대칭성이 깨어지며 이로 인해 모드변이(mode conversion) 현상이 발생한다[9]. 비대칭 불연속면에서의 모드변이 현상을 모사하기 위하여 본 연구에서는 S0모드에 해당하는 파수와 S모드 복소수 파수들을 고려하여 모드변이 현상을 모사하였다.

Modal decomposition 방법을 이용하여 해를 구할 경우, 평판을 두께방향으로 나눈 구간의 개수와 계산에 이용된 파수의 개수에 따라 해의 수렴 여부가 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 구간의 개수와 파수의 개수가 특정 범위를 벗어나게 되면, 물리적으로 의미 없는 결과가 얻어지거나, 해의 개수가 조금만 변하여도 그 결과의 변화폭이 매우 크게 된다. 기존의 연구들에서는 해의 수렴에 관한 기준 및 방법들을 찾아볼 수 없었다. 본 논문에서는 불연속면에서 산란된 파형을 모사하기 위하여 이론적으로 구한 해들의 모드 형상을 직접 확인하면서 물리적으로 의미가 있다고 판단되는 해들만을 추가하는 방법을 사용하였다. 파수의 개수의 경우, 10개에서 15개의 파수를 이용하였을 때 해가 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 고차의 모드들을 추가하며 해석을 수행한 결과, 특정 차수보다 고차의 해를 이용할 경우, 만족스럽지 못한 해석 결과를 얻었다. 더 많은 수의 파수를 이용할 경우 진행되는 파를 과소평가하게 되고, 더 적은 수의 파수를 이용할 경우 불연속면에서 소멸되는 파들을 제대로 반영하지 못하여 램파의 투과와 반사를 정확히 예측하지 못하였다.

본 연구에서는 5 mm 평판을 두께방향으로 5개의 구간으로 나누었을 때(1 mm 간격) 해가 수렴하였다. 파를 수치적으로 모사할 때는 파장의 1/10보다 작게 구간을 나누는 것이 일반적이다[10]. 본 연구에서 가진 주파수 180 kHz의 A0 모드가 알루미늄을 매질로 전파될 때 파장 길이는 약 2 cm 이다. 이는 파장의 1/20 정도로 파를 수치적으로 분석하기에 충분하다. 4개 구간의 경우 그 크기가 파장의 1/10보다 더 크기 때문에 결과를 정확히 반영하지 못했고(underestimated), 더 많이 나누었을 경우, 결과를 과하게 반영하였다(over fitting).

4. 유한요소법(FEM)을 이용한 검증

Modal decomposition 방법을 이용하여 이론적으로 예측한 결과를 검증하기 위해, FEM 이용하여 동일한 현상을 모사하고 그 결과를 비교하였다. FEM 프로그램은 상용 프로그램인 MD NASTRAN 을 이용하였고 FEM 모델은 Fig. 4과 같으며, 물성치는 Table 1과 동일하다. 두께 5mm인 알루미늄 평판을 12개의 요소로 나누어 FEM으로 램파를 충분히 모사할 수 있도록 하였다. 유한한 평판에 양 끝단이 고정되어 있으며 밖에는 다른 매질이 존재하지 않는 FEM 모델을 이용하였다.

특정 주파수를 가지는 램파를 모델에 가진 하고, 결과의 분석을 용이하게 하기 위하여 tone burst 신호를 이용하였다. Tone burst 신호는 사인파에 window를 씌워 한 묶음(packet)으로 만든 것으로 에너지가 특정 주파수에 집중될 수 있도록 한다. 또한 다른 신호에 비해 packet으로 되어 있어 측정된 신호를 분석하기가 용이하다는 장점을 가지고 있다. FEM 모델에서는 A0 모드만을 선택적으로 가진하였기 때문에 해당 모드의 속도와 센서간의 거리를 이용하여 쉽게 모드를 추출하고 분석할 수 있었다. 압전센서 영역의 양 끝부분에서 신호를 가하고 평판의 양면에서 비대칭으로 신호를 가해 A0 모드만이 발생할 수 있도록 하였다. 또한 해당 영역의 각 요소에서 측정된 신호를 평균하여 결과를 얻었으며 이를 분석하였다[7].

5. 실험을 이용한 검증

이론적으로 얻은 결과와 FEM을 이용한 결과를 실제 현상과 비교해 보기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 알루미늄의 두께와 물성치는 Table 1과 같으며 FEM 모델과 동일하게 센서 위치 및 시편을 결정하였다(Fig 5). 센서로 인한 실험 결과의 오차를 줄이기 위하여 동일한 시편을 이용하여 손상의 깊이를 점차 증가시키며 실험을 진행하였다. 또한 실험에 사용된 압전센서는 Piezo System사의 PSI-5A4E: Navy Type II 모델이다. 자세한 물성치 및 센서의 크기는 Table 2과 같다.

Modal decomposition 방법이나 FEM과 같이, 실험에서 압전센서를 이용하여 특정 모드의 램파만을 선택적으로 가진 하는 것은 매우 어렵다. 본 연

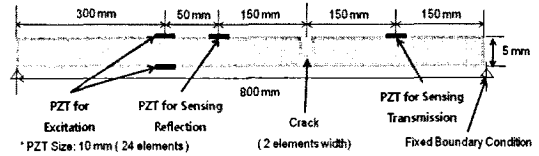
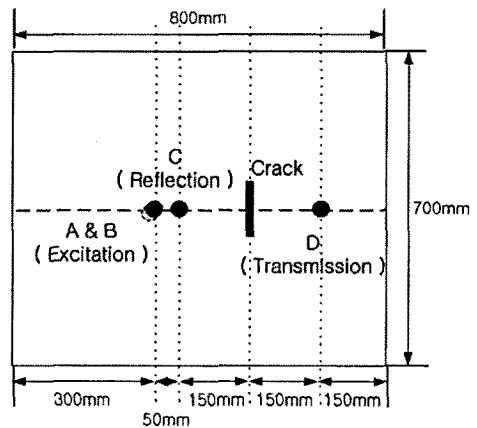


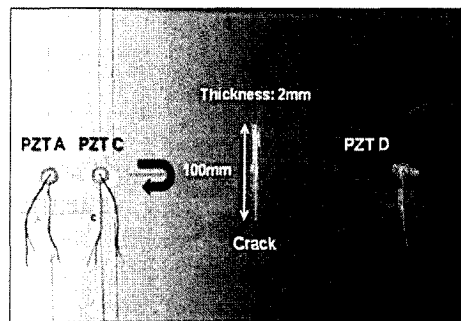
Fig. 4 Finite element model for verifying the modal decomposition method

Table 2 Dimension and material properties of PZT

크기 (mm)	Φ:18.0, h:0.4
밀도 ρ (kg/m ³)	7.80 × 10 ³
Piezoelectric coefficient d ₃₁ (m/V)	-190 × 10 ⁻¹²
Piezoelectric coefficient d ₃₃ (m/V)	390 × 10 ⁻¹²
유전상수 K ₃	2100
큐리온도 (°C)	350



(a)



(b)

Fig. 5 Dimension of the specimen and the location of PZT and crack, (a) Dimension of the specimen, (b) PZT sensors and crack

구에서는 실험 구성시, 해당 가진 주파수에서 분산 선도를 이용하여 램파의 속도를 구한 후 각 파들이 최대한 증첩되지 않도록 시편의 크기 및 센서간의 간격을 계산하여 실험을 수행하였다. 그럼에도 불구하고 서로 중첩된 A0 모드 또한 S0 모드는 PZT의 극성 및 각 모드의 특성을 이용하여 추출하였다 [11]. 센서의 부착상태에 따라서 해당 모드의 진폭에 영향을 미칠 수 있으나, 본 연구에서는 진폭 비를 이용하여 결과를 분석하였기 때문에 절대적인 진폭의 변화로 인한 영향은 미비하다고 판단된다.

6. 결과

Modal decomposition 방법 및 FEM, 실험에서 산란된 주요 파들의 진폭 비는 산란된 파들의 진폭을 처음 가진 된 A0 모드 램파의 진폭으로 나누어 그 비율을 구하였다(Fig. 6). Modal decomposition 방법을 이용하여 이론적으로 예측한 불연속면에서 램파의 거동이 부착형 압전센서를 이용한 실험 및 FEM 결과와 유사함을 확인하였다. FEM 해석의 경우, 이론 모델과 같이 2-D 모델이지만 실제 실험의

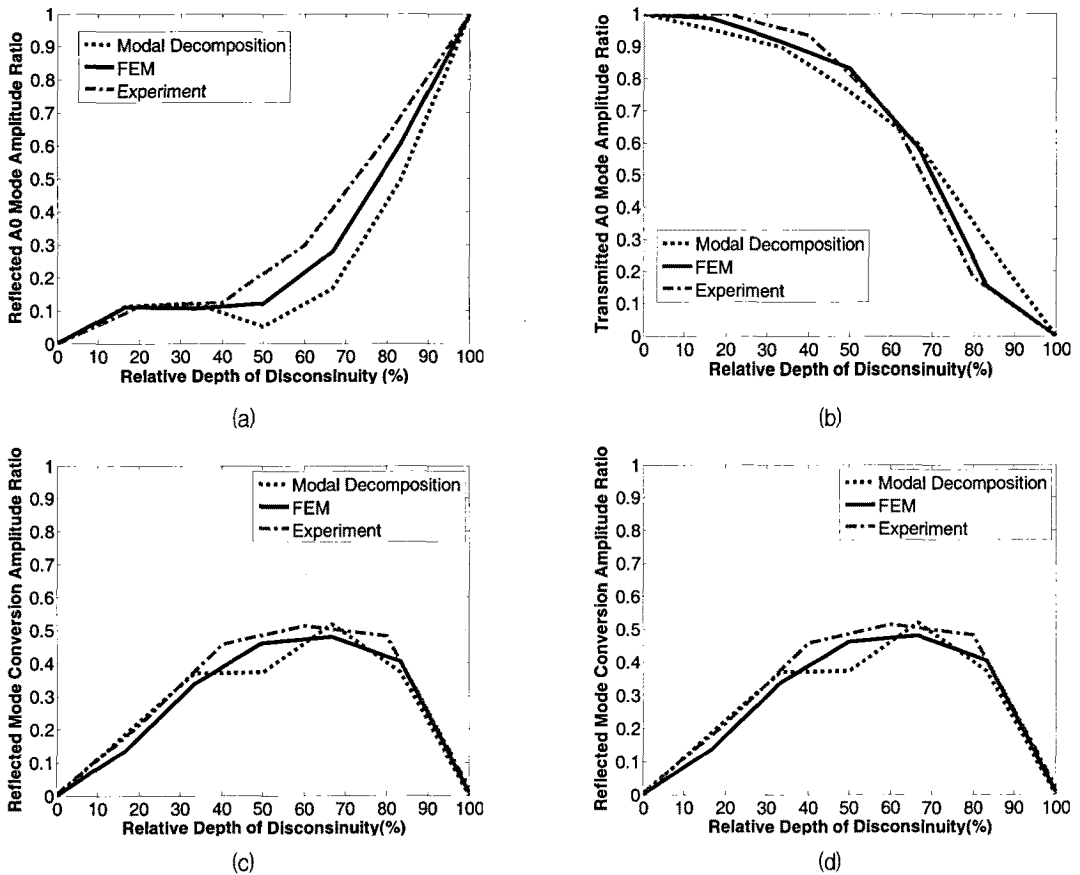


Fig. 6 Amplitude ratios of the reflected and transmitted waves normalized from incident A0 mode, (a) Reflected A0 mode amplitude ratio, (b) Transmitted A0 mode amplitude ratio, (c) Reflected mode conversion amplitude ratio, (d) Transmitted mode conversion amplitude ratio

Table 3 Quantitative comparison of results with modal decomposition method using RMSD (%)

	Reflected A0	Transmitted A0	Reflected Mode Conversion	Transmitted Mode Conversion
FEM	12.35	5.14	11.23	14.15
Experiment	13.60	5.89	15.35	12.38

경우 3-D이므로 2-D 이론 및 FEM 모델을 이용한 해석 결과와의 오차는 불가피 하다. 하지만 본 연구에서는 파가 손상에 직각으로 입사되었기 때문에 파의 진행 방향에서 고려된 파의 반사 및 투과에 관한 거동은 서로 유사할 것이라 판단된다. 실험값이 다른 결과값에 비하여 큰 것을 볼 수 있는데, 시편의 크기가 한정되어 있어 각 모드를 추출하였음에도 불구하고 경계에서 반사된 파들과 A0모드 외에 다른 모드들에 의한 신호의 중첩으로 인한 현상이다.

7. 결론

본 연구에서는 Modal decomposition 방법을 이용하여 불연속면을 통과한 A0 모드 램파로부터 산란된 파들의 진폭을 이론적으로 예측하였고, 압전 센서를 모사한 FEM과 이를 이용한 실험을 통해 얻은 결과값을 비교, 검증하였다. 그 결과 압전 센서를 이용한 FEM모델과 실험결과가 예측값과 근사한 것을 확인하였다. 이를 통해, 압전센서로부터 가진 되고 측정된 램파와 구조물과의 물리적인 상관 관계를 보다 정확히 이해할 수 있게 되었다. 동일한 방법을 사용하여 S0 모드 램파에 대한 거동 또한 쉽게 계산될 수 있으며 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구의 결과를 통하여 불연속면의 크기에 따른 파의 반사와 투과비율을 이용하여 구조물의 손상을 정량적으로 산정할 수 있는 기법을 개발할 수 있을 것이라 생각된다. Modal decomposition 방법은 FEM에 비하여 경계조건 외의 모델을 만들거나 요소를 나누어 줄 필요가 없어 계산이 간단하다. 하지만 해가 수렴하는 경우를 찾기 위하여 다양한 경우를 고려하여야 하고, 해가 수렴하는 기준이 명확하지 않아 결과값의 신뢰도가 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

향후 연구에서는 해가 수렴하는 기준을 명확히 하여야 하며, 물성치와 두께가 다른 구조물에 이를 적용하여 그 결과를 FEM과 실험 결과와 비교하여 그 신뢰도를 높이는 작업이 필요할 것으로 보인다. 또한 특정 가진 주파수만을 사용하여 램파와 불연속면의 상호작용을 분석하였기 때문에 가진 주파수에 따른 램파와 불연속면과의 상호 작용을 종합적으로 고찰하여야 할 필요가 있다.

후 기

본 논문의 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단(NRF, 구 한국과학재단)의 '원자력 연구사업'의 일환인 '고유강점기술육성사업' (코드: NRF(KOSEF) 2009-0083489)와 '원자력기술개발사업'의 일환인 '방사선기술개발사업' (코드: NRF(KOSEF) 2009-0082789)의 지원으로 수행되었다. 해당 기관의 연구관련 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. Morvan, N. Wilkie-Chancellier, H. Duflo, A. Tinel and J. Duclos, "Lamb wave reflection at the edge of a plate," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 113, No. 3, pp. 1417-1425 (2003)
- [2] F. Benmeddour, S. Grondel, J. Assaad and E. Moulin, "Study of fundamental Lamb modes interaction with symmetrical notches," NDT&E International, Vol. 41, pp. 1-9 (2008)
- [3] F. Benmeddour, S. Grondel, J. Assaad and E. Moulin, "Study of fundamental Lamb modes interaction with symmetrical notches," NDT&E International, Vol. 41, pp. 330-340 (2008)
- [4] M. Castaings, E. L. Clezio and B. Hosten, "Modal decomposition method for modeling the interaction of Lamb waves with cracks," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 112, No. 6, pp. 2567-2582 (2002)
- [5] H. J. Jeong, T. H. Kim, S. S. Lee and Y. G. Kim, "Finite element modeling of wall thinning defects: applications to Lamb wave generation and interaction," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 2, pp. 199-204 (2008)
- [6] H. J. Jeong and M. C. Park, "Finite element simulation of laser-generated ultrasound and interaction with surface breaking cracks," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 24, No. 3, pp. 259-267 (2004)

- [7] V. Giurgiutiu, *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensor*, Elsevier Inc. (2008)
- [8] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge Univ. Press (1999)
- [9] Y. Cho, "Estimation of ultrasonic guided wave mode conversion in a plate with thickness variation," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 591-603 (2000)
- [10] P. Kudela and W. Ostachowicz, "A multilayer composite beam and plate elements: Reflected of Lamb waves at delamination," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 16, No. 3, pp. 174-187 (2009)
- [11] S. B. Kim and H. Sohn, "Instantaneous reference-free crack detection based on polarization characteristics of piezoelectric materials," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, pp. 2375-2387 (2007)