論文

두께변화가 있는 복합재 평판의 램파 전파특성

한정호*, 김천곤**+

The characteristics of Lamb waves in a composite plate with thickness variation

Jeongho Han*, Chun-Gon Kim**+

ABSTRACT

An active inspection system using Lamb waves for structural health monitoring was considered in this paper. In order to understand the characteristics of the Lamb waves propagating in a composite plate, the experiment was performed for a quasi-isotropic composite plate with thickness variation. Lamb waves were generated and received by the thin PZT transducers bonded on the surface. In this test, a simple new technique was tried for characterizing the Lamb waves propagating across the discontinuity due to the thickness variation. The results showed that Lamb waves were more sensitive to the thinner plate with faster group velocity and that the thickness change in composite plate was detectable. Consequently, the potential of applying this technique to structural health monitoring was verified.

초 록

본 논문은 램파(Lamb waves)를 이용한 능동검사시스템을 구조 건전성 모니터링 시스템에 적용하기 위하여 램파의 특성연구를 수행하였다. 연구는 보다 실제 구조물에 근접한 구조물을 고려하여 두께변화가 있는 준등방성 복합재 평판을 대상으로 PZT 탐촉자(transducer)를 표면에 부착하여 수행하였다. 본 연구에서는 두께변화로 인한 램파의 전파특성을 분석하기 위하여 간단하지만 새로운 기법을 적용하였다. 본 연구의 결과는 램파의 전파특성은 상대적으로 얇은 구조물에 민감하였고 두께변화가 램파의 전파에 미치는 영향을 보여 주었다. 또한 본 연구에 사용한 분석기법은 램파를 이용한 구조 건전성 모니터링에 적용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

Key Words: 구조건전성모니터링(Structural health monitoring), 램파(Lamb waves), 복합재료(Composite material), 능동검사시스템(Active inspection system)

1. 서 론

구조물의 건전성을 모니터링하기 위한 연구는 구조물의 안전성과 신뢰성을 높이고 구조물의 순기비용(life cycle cost)을 줄일 수 있는 수단으로 지속적인 관심을 받아오고 있다. 램파를 이용한 능동검사시스템도 그러한 연구 중에 한 분야이다. 램파는 평판과 같은 얇은 구조물의 내부를 전파하는 유도 초음파의 일종으로 다른 초음파와 비교하여 상대적으로 먼 거리를 전파하고 구조물 내부에 존재하는 손상과 반응하여 신호가 변하므로 넓은 면적을 경제적으로 검사하기에 적합한 수단으로 많은 연구가 진행되고 있고 있다[1-3].

* 한국과학기술원 항공우주공학과
**+ 한국과학기술원 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

최근에 복합재료의 소비량이 증가하고 적용분야가 항공우주구조물의 주 구조물까지 확대되고 있는 실정이어서 복합재 구조물에 대한 구조건전성모니터링에 관한 연구가 점차 증가하고 있는 추세이다. 복합재 구조물에 대한 램파의 연구는 1980년대 후반부터 본격적으로 다루기 시작하였으나 복합재료의 복잡한 특성으로 인하여 주로 두께가 일정한 평판을 대상으로 하였다. 그러나 실제 구조물은 두께의 변화가 있는 부품은 물론 보강재를 부착한 조립품, 두 판을 연결한 부품 등, 두께의 변화가 있는 구조물들이 많이 존재하고 있다. 따라서 복합재 구조물의 건전성 모니터링에 램파를 이용하기 위해서는 이러한 구조물을 대상으로 하는 보다 많은 램파의 연구가 필요하다. 또한 램파의 발생 및 취득 장치는 작고 전력소비가 적어야하며, 구조물의 수명이 다 할 때까지 부착되거나 삽입되어 있어야 하는 제약이 따르게 되므로 이에 적합한 방법을 선택하여야 한다[4]. 더욱이, 장치의 위치선정 및 형태, 수량 등이 구조물의 설계와 동시에 반영되어야 하므로 램파의 특성을 보다 깊이 이해할 필요가 있다. 비파괴검사에 사용되는 경사각 탐촉자 및 레이저와 같은 장비는 구조건전성모니터링 시스템에 적용할 수는 없지만 램파의 발생 및 취득이 용이하여 특성연구를 하기에는 적합한 면도 있다. 따라서 이런 장비를 이용한 비파괴검사 및 램파의 특성연구가 많이 수행되어 왔다[5,6]. 이러한 연구결과를 이용하여 얇은 PZT를 두께 변화가 있는 구조물에 부착하거나 삽입한 형태의 연구를 살펴보면, 복합재 평판의 보수(repair)를 위하여 패치(patch)를 입힌 부재에 대한 램파의 전파특성 연구[7], 두 평판이 랩 조인트(lab joint)되어 두께변화가 발생하는 부재에 대한 연구[8], 복합재로 성형된 항공기 날개박스(wing box)에 보강재가 붙어 있는 구조물에 대한 램파의 특성연구[9]가 있으나, 연구결과가 많이 부족한 실정이다.

본 논문에서는 두께가 일정한 지역에서 측정한 램파의 전파속도와 두께가 변하는 경로로 전파한 램파의 전파속도를 비교하여 두께변화가 램파의 전파속도에 미치는 영향을 분석하였고, 같은 경로를 서로 반대 방향으로 전파한 두 신호의 차를 이용하는 분석방법으로 두께변화에 대한 램파의 전파특성을 연구하였다. 이 분석방법은 간단하면서도 구조물 변화의 영향을 가시적으로 보여주어 구조건전성모니터링에 적용 가능성을 보여주었다.

2. 이론적 배경

2.1 램파의 원리

램파는 1917년 Horace Lamb에 의해 이론이 정립된 이후, 1960년대부터 본격적으로 비파괴검사를 위한 연구가 수행되었다. 램파는 벌크(bulk)파인 P파와 S파가 평판내부에 생성되어 진행하다가 평판의 윗면과 아랫면의 자유경계단에 의해 반사를 반복하며 조화를 이뤄 생성되는 유도파의 일종으로 전파형태에 따라 대칭파와 비대칭파로 분류가 된다. 각 전파형태는 주파수-두께의 곱에 따라 전파속도가 결정되며, 대부분 주파수-두께 곱의 변화에 따라 전파속도가 변하는 분산(dispersion)특성을 갖고 있다.

복합재 평판에 대한 램파의 분산특성곡선은 복합재료의 방향성에 의해 다소 복잡해진다.

Christoffel 운동방정식에 응력-변형률 관계식을 대입하면 식(1)과 같이 된다.

$$\nabla_{ip} C_{pq} \nabla_{qj} u_j = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \tag{1}$$

여기서, $i,j=1,2,3$ 그리고 $p,q=1,...,6$이며, ρ는 밀도, u_i는 변위, C_{pq}는 강성계수이다. 평면파가 전파하는 것으로 가정하였을 때, 변위는 식(2)과 같이 표현할 수 있다.

$$u_j = U_j \exp[i(\omega t - \xi I x_j)] \tag{2}$$

여기서, $I=(l_1 x_1, l_2 x_2, l_3 x_3)$으로 전파방향의 단위벡터이고 ξ는 파수(wave number), ω는 원주 주파수(circular frequency)를 나타낸다. 식(2)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(3)이 된다.

$$\xi^2 (l_{ip} C_{pq} l_{qj}) u_j = \rho \omega^2 u_i \tag{3}$$

여기서, l_{ip}는 아래와 같은 구배연산행렬(gradient operator matrix)이고 $l_{ip} = l_{pi}^T$ 이다.

$$l_{ip} = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & 0 & l_3 & l_2 \\ 0 & l_2 & 0 & l_3 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & l_3 & l_2 & l_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

이를 재배열하면 식(5)과 같이 된다.

$$\xi^2 \Gamma_{ij} u_j = \rho \omega^2 u_i \tag{5}$$

여기서, $\Gamma_{ij} = l_{ip} C_{pq} l_{qj}$ 이다. 따라서 식(5)이 물리적인 해(solution)를 갖기 위해서는 식(6)과 같은 고유치문제(eigen problem)가 된다.

$$(\Gamma_{ij} - \rho c^2 \delta_{ij}) u_j = 0 \tag{6}$$

여기서, $c=\omega/\xi$ 이며, 위상속도이다.

이때 평판은 유한한 두께를 갖고, 램파는 x_1방향으로 전파하는 평면파로 가정하면, 평판의 위, 아랫면이 자유경계단이라는 조건을 적용하여 위상속도를 구할 수 있게 된다. 램파 에너지의 전파속도인 군속도(group velocity)는 식(7)과 같은 군속도-위상속도 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kc)}{dk} = c + k\frac{dc}{dk} \tag{7}$$

2.2 분석기법

일정한 주파수를 갖는 입력신호에 대하여 측정하고자 하는 평판의 두께가 다를 경우, 두께가 일정한 각 평판에서 측정된 램파의 전파속도는 분산특성에 의해서 다르게 나타난다. 따라서 두께가 다른 두 지역에서 측정된 군속도와 두께변화로 인한 불연속(discontinuity)지역을 가로질러 전파한 램파의 전파속도를 비교하여 두께변화가 있는 복합재 평판에서 램파의 전파특성을 분석하였다. 이때 전파속도에 영향을 줄 수 있는 많은 매개변수(parameter)들이 있으나, 두께차이($\triangle d$)는 얇은 판의 두께와 같게 하고 두께차이 대 변화길이 비율을 고정시키고, 직선 전파경로의 전체 전파거리에서 두 지역이 차지하는 비율을 같게 하여 기하학적으로 두 지역의 영향이 같도록 하였다.

두께가 일정한 등방성 평판 또는 준등방성 복합재 평판의 경우, 같은 입력신호에 대하여 경계에서의 반사경로를 포함하여 신호를 주고받는 모든 경로가 같으면 전파경로 양 끝에서 동일한 탐촉자(transducer)로 취득된 출력신호는 같아야 한다. 따라서 두 출력신호의 차이는 없다. 그러나 전파 경로 상에 손상이나 불연속지점이 있고, 불규칙적인 경계면이 존재한다면, 주고받은 두 신호는 차이가 생길 것이다. 두께변화로 인한 불연속지점이 있는 경우, 분산특성 곡선으로부터 어느 정도 출력신호의 변화를 예측할 수가 있다. 이러한 원리를 이용하여, 두께변화로 인한 불연속지점을 가로 지르는 전파경로 양 끝에서 동일 입력신호에 대하여 취득한 두 출력신호의 비교를 통하여 두께변화에 대한 램파의 전파 특성을 분석하였다.

3. 실험 설명

3.1 시편설명

시편은 (주)한국화이바의 CU125NS 탄소/에폭시 일 방향 프리프레그(prepreg)를 적층하여 제작하였으며, 일 방향 적층시편에 대한 재료상수는 Table 1에 나타나 있다. 시편의 규격은 $340mm \times 335mm$이며, 얇은 층의 두께(d_1)는 $1.0mm$이고, 두꺼운 층의 두께(d_2)는 $2.0mm$이다[Fig. 1]. 따라서

Table 1 Mechanical properties of CU125NS unidirectional laminate

E_{11}(GPa)	E_{22}(GPa)	G_{12}(GPa)	G_{23}(GPa)
130	10	4.85	3.62
ν_{12}	$\rho(kg/m^3)$	t_{ply}(mm)	
0.31	1,600	0.125	

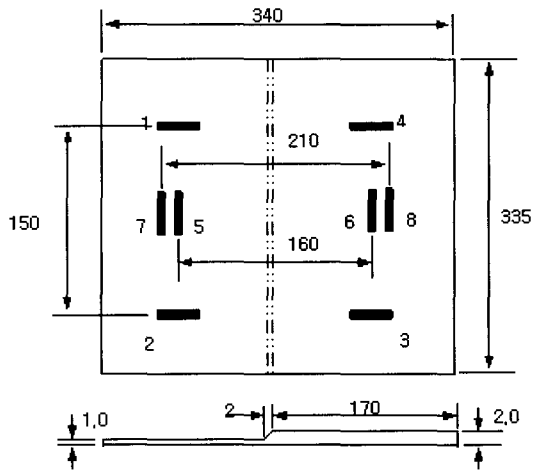

Fig. 1 Specimen configuration(unit:mm).

두께차이($\triangle d$)는 $1.0mm$이고, 두께변화 길이(s)는 $2mm$로서 두께변화 길이 대 두께차이의 비($s/\triangle d$)는 2.0으로 일정하다. 얇은 층의 적층순서는 $[0/\pm 45/90]_s$이고, 두꺼운 층의 적층순서는 $[0/\pm 45/90]_{2s}$이다.

3.2 실험장치 및 방법

능동검사시스템의 구조 건전성 모니터링 시스템에 적용을 고려하여 램파의 발생 및 신호취득 장치로서 동시에 두 가지 기능을 할 수 있는 얇은 두께의 PZT (C82, Fuji Ceramics Co.)를 선택하였다. 일 방향 전파에 가까운 파형을 구현하기 위하여 길이 40mm, 폭 5mm, 두께 0.4mm인 직사각형의 PZT를 순간접착제를 사용하여 표면에 부착하였다(Fig.1). 입력파형은 신호발생기(AFG-320, Sony)를 이용하여 6회 반복한 400kHz의 진폭 10V 사인곡선을 Hanning window로 변조하여 입력신호로 사용하였다. 400kHz는 C-82 PZT의 다른 방향 공진주파수 보다 폭 방향 공진주파수(resonance frequency)인 286kHz에 가까우므로, 폭 방향으로 최대 출력파형을 얻도록 하였다. 취득된 신호는 4채널 오실로스코프(TDS3014, Tektronix, Inc.)에 모아져서 GPIB 케이블을 통하여 PC에 저장되었다. 이 때, 초기시간을 정하기 위해 신호발생기에서 오실로스코프로 트리거(trigger) 신호를 동시에 보내게 된다(Fig. 2).

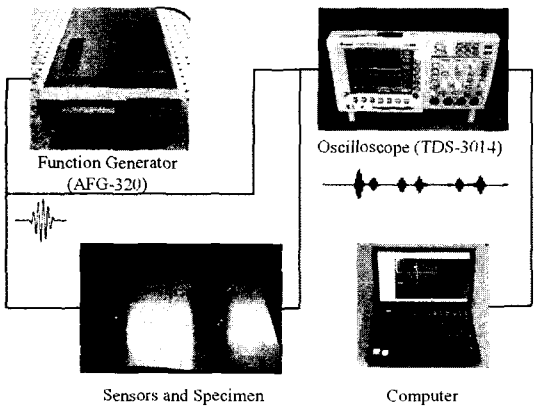

Fig. 2 Experimental setup for Lamb waves propagation.

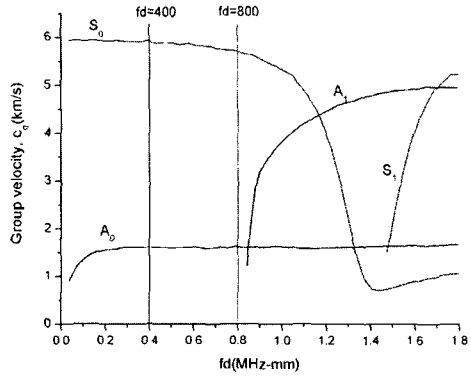

Fig. 3 Dispersion curves for group velocity in CU125NS quasi- isotropic composite plate.

출력신호는 신호 대 잡음비(S/N ratio)를 향상시키기 위하여 64회 샘플링한 데이터의 평균을 취하였으며, 분해능을 높이고자 5MS/s로 신호취득을 하였다. 전파경로 상에 부착되는 PZT로 인한 신호왜곡을 줄이기 위하여 두께가 일정한 영역에서 신호를 우선 취한 후, 다른 PZT를 부착하여 신호를 취득하였다. 전파속도의 측정은 전파거리를, 가장 먼저 측정된 신호 다발(packet)에서 첫 사이클의 정상지점에 해당하는 시간과 트리거신호를 이용한 기준시간과의 시간차이(time of flight)로 나누어 계산하였다. 모든 출력신호는 두 PZT간의 양 방향으로 전파시켜 취득한 후, 두 출력신호의 차이를 비교분석하였다.

4. 실험결과 및 토의

4.1 전파속도 비교

MatLab[C]을 이용하여 식(6)로부터 계산한 군속도 분산선도(group velocity dispersion curves)는 얇은 판에 해당하는 400kHz-mm와 두꺼운 판에 해당하는 800 kHz-mm가 모두 1차 cut-off 주파수 이내이고 각각 최 저차의 두 모드인 S_0, A_0만이 존재할 수 있음을 보여주고 있다(Fig. 3). 400kHz-mm에서 S_0 모드의 군속도는 5.92km/s이고, A_0 모드의 군속도는 1.60km/s이다. 800kHz-mm에서 S_0 모드의 군속도는 5.73km/s이고 A_0 모드의 군속도는 1.59km/s로서 어느 경우에도 S_0 모드의 군속도가 빠르다. 따라서 가장 먼저 취득되는 신호다발은 S_0 모드일 것이고, 시간차를 두고 A_0모드가 도착할 것으로 추정이 된다.

얇은 층에서 군속도는, PZT2에서 램파를 보내고 PZT1에서 취득한 신호의 도착시간을 측정하여 계산한 결과, 이론대비 약 6.1% 작은 5.56km/s를 나타냈고, 두꺼운 층에서는, PZT3에서 램파를 보내고 PZT4에서 신호를 측정하여 계산한 결과, 예상 대비 5.1% 낮은 5.44km/s의 군속도를 나타내었다. 계산과 실제의 차이점을 고려할 때, 비교적 계산으로 예상한 값과 잘 일치하는 결과를 보였다.

불연속지점을 가로 질러 전파하는 램파의 전파속도 측정에서는 PZT5-PZT6, PZT7-PZT8을 이용하여 양 방향으로 전파한 속도를 측정하였다(Table 2).

두 경로로 불연속지점을 가로 질러 전파한 램파의 전파속도는 각각 5.52km/s, 5.64km/s로서 두께가 일정한 영역 내에서 측정한 두 군속도의 평균값인 5.5km/s 보다 크므로 두 경우 모두 얇은 층에서 측정된 군속도에 가깝다. 따라서 두께변화로 인한 불연속지점을 통과하는 램파는 군속도가 상대적으로 빠른 얇은 층의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. 여기서 특기할 만한 사실은 양 방향에서 측정한 군속도가 같다는 것이다. 군속도는 에너지가 전파하는 속도로서 에너지의 전파는

Table. 2 Summary of group velocities

Region	Transmitter (PZT no.)	Receiver (PZT no.)	Distance (mm)	Group velocity (km/s)
Thin→Thick	5	6	160	5.52
	7	8	210	5.64
Thick→Thin	6	5	160	5.52
	8	7	210	5.64
Thick→Thick	3	4	150	5.44
Thin→Thin	2	1	150	5.56

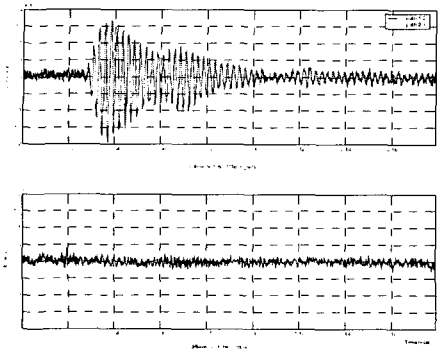

Fig. 4 Comparison of two signals received at PZT1 and PZT2 in the thin region when they each transmitted to the other: (a) time history (b) difference between two signals.

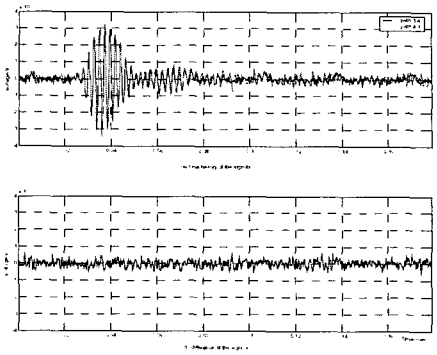

Fig. 5 Comparison of two signals received at PZT3 and PZT4 in the thick region when they each transmitted to the other: (a) time history (b) difference between two signals.

방향에 무관하겠지만 계산에서 고려하지 않은 댐핑특성과 같은 현실적인 요소 또한 방향에 무관하게 똑같은 영향을 끼치는 것으로 추정된다.

또한 전파거리가 상대적으로 먼 경우, 군속도가 계산한 값에 더 가깝게 측정되었는데, 이유는 거리가 멀어질수록 PZT 크기 및 측정오차로 인한 누적오차의 영향이 줄어들기 때문인 것으로 판단이 된다.

4.2 전파모드분석

Fig. 4는 얇은 층에 부착한 PZT1과 PZT2를 각각 송신자(transmitter)와 수신자(receiver)로 사용하여 취득한 양 방향 두 신호를 비교한 것이다. 예상과 같이 두 신호의 차이는 없었고 두꺼운 층에서 비교한 결과 역시 신호차가 없었다 (Fig. 5).

불연속지점을 통과한 램파의 경우, 일정한 두께에서 보인 결과와 달리 PZT5와 PZT6에서 각각 주고받은 두 신호의 차이가 존재하였고 (Fig. 6(b) 점선부분) PZT7과 PZT8에서 주고받은 신호 역시 감쇠로 인하여 신호의 크기는 조금 작아졌지만 두 신호의 차이를 보여주고 있다(Fig. 7(b) 점선부분). 이는 주파수-두께 곱한 수치가 다르면 전파모드는 같더라도 모드 형상(mode shape)이 다르기 때문에 두 지역에서 취득된 신호의 차이가 존재하게 된다는 것을 보여주고 있다. 그러나 본 연구에 사용된 시편의 경우, 그 차이가 작았고 더욱이, 양 지역에서 똑같은 모드가 발생하였기에 뚜렷한 신호차이가 발생하지 못 하였다. 불연속지점을 통과한 신호와 일정한 두께영역에서 측정한 신호를 비교해 보면, 두께가 일정한 지역에서 측정한 신호에 나타나지 않은 파형이 불연속지점을 통과한 신호에서 나타남을 볼 수 있다(Fig. 6(a), 7(a) 점선부분).

이 파형은 전파속도가 가장 빠른 S_0모드가 불연속 지점에서 같은 모드로 반사되어 생기는 현상으로 불연속지점의

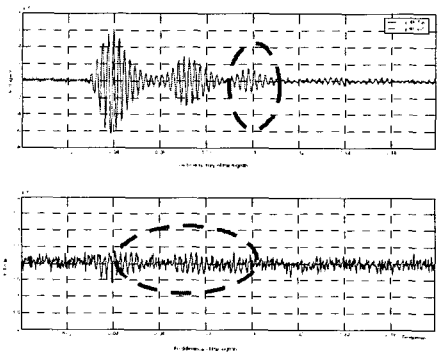

Fig. 6 Comparison of two signals received at PZT5 and PZT6 when they each transmitted to the other: (a) time history (b) difference between two signals.

존재를 확인할 수 있는 신호이다. 일반적으로 복합재료는 금속재료에 비하여 점성이 높아 램파의 신호감쇠가 금속재료에 비하여 커서 상대적으로 멀리 전파하지 못하며, 더욱이 반사되는 신호의 크기는 현저히 작아지는데, Fig. 6(a), 7(a)에 나타난 신호가 비교적 큰 이유를 전파속도와 경로의 거리를 근거로 분석하면 3가지 경로로 전파된 S_0모드의 램파가 서로 간섭을 일으켜 신호의 크기가 증가되었다고 보인다. 즉, 3가지 경로는 송신자-우측경계-좌측경계-수신자, 송신자-좌측경계-불연속면-수신자, 송신자-불연속면-우측경계-수신자로 분석이 된다. 일 방향으로 램파가 전파하는 경우, 분석할 수 있는 전파경로가 비교적 간단하여 가능하였지만, 일반적인 경우에는 사방에서 반사되어 측정되기 때문에 모든 경로를 예상하여 계산하기에는 한계가 있다. 따라서 일반적인 경우에도 적용할 수 있는 새로운 방법의 연구가 요구된다.

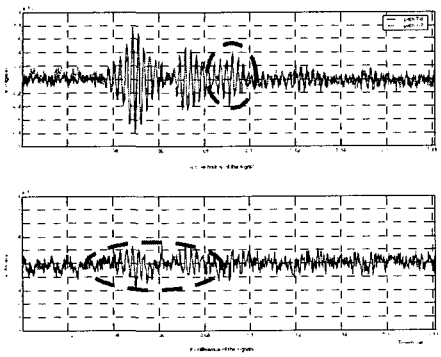

Fig. 7 Comparison of two signals received at PZT7 and PZT8 when they each transmitted to the other: (a) time history (b) difference between two signals.

5. 결 론

본 연구에서는 램파를 이용한 구조 건전성 모니터링을 위하여 두께변화가 있는 복합재 평판에 대한 램파의 특성을 분석하였다. 두께가 일정한 영역에서 측정한 램파 에너지의 전파속도인 군속도와 전파경로 상에 두께변화가 있는 경우의 측정 속도를 비교하여 램파는 군속도가 상대적으로 빠른, 두께가 얇은 구조물에 영향을 많이 받으며, 이러한 특성은 부식, 마멸, 침식 등에 의하여 구조물이 얇아지는 변화를 감지하기에 적당하다. 또한 한 쌍의 PZT에서 주고받은 신호를 이용한 분석기법으로 불연속지점이 전파경로 상에 있다 하여도 전파속도는 방향에 관계없이 서로 같음을 확인하였고, 두 신호의 차이로부터 불연속지점의 존재를 확인할 수 있었다. 결국, 이 방법은 주고받은 신호의 차이가 존재한다면 전파경로 상에 구조변화가 존재한다는 것을 의미하므로 빠르고 쉽게 구조물을 진단할 수 있는 진단방법으로서의 가능성을 보여주었다고 할 수 있다. 그러나 구조변화가 신호차이 및 신호 형상에 주는 영향에 대한 보다 많은 연구가 이뤄져야 할 것이다.

참고문헌

1) Gandhi, M.V., Thompson, B.S., "Smart Materials and Structures," Chapman & Hall, London, 1992.
2) Spillman Jr. WB, Sirkis JS, Gardiner PT., "Smart materials and structures; what are they?," *Smart Material and Structures*, Vol. 5, No. 3, 1996, pp. 247-254.
3) Kessler, S., Spearing, S., "In-Situ Sensor-Based Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring," AIAA-2002-1545.
4) P.D. Wilcox, M.J.S. Lowe and P. Cawley, "Mode and Transducer Selection for Long Range Lamb Wave Inspection," *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 12, 2001, pp. 553-565.
5) David N. Alleyne, Peter Cawlley, "The Interaction of Lamb Waves with Defects," *IEEE Transaction on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 39, No. 3, 1992, pp. 381-397.
6) N. Tiyama, J. Takatsubo, "Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004.
7) Y.L.Koh, W.K. Chiu, N.Rajic, "Integrity assessment of composite repair patch using propagating Lamb waves," *Composite Structures*, Vol. 58, 2002, pp. 363-371.
8) Francesco Lanza di Scalea, et. al., "Propagation of ultrasonic guided waves in lap-shear adhesive joints: Case of incident a0 Lamb wave," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 115, 2004, pp. 146-156.
9) S. Grondel, et. al., "Health monitoring of a composite wingbox structure," Ultrasonics, 2004, in process.
10) J. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press, 1999.