

論文

복합재 평판의 두께변화가 램파의 전파에 미치는 영향

한정호*, 김천곤**

The effects of the thickness variation on the propagation of Lamb waves in a composite plate

Jeongho Han* and Chun-Gon Kim**

ABSTRACT

This study experimentally investigates the characteristics of Lamb wave propagating in a composite plate of varied thickness. In practical aerospace structures, there are so many parts that have varied thickness. Therefore, in order to employ the Lamb wave in a structural health monitoring of those parts, it is necessary to understand correctly the characteristics of Lamb wave for the structure with thickness variation. Thin surface-bonded piezoelectric transducers, which have great potential in integrated monitoring systems for structural health, were used to generate and receive Lamb waves. The predicted propagation velocity under the assumptions of ideal mode conversions was compared with the experimentally measured one. The validity of the results was supported by the frequency analysis of the signals. Consequently, the results show that the transient region is occurred when Lamb waves propagate across the region that thickness variation over some gradient exists.

초 록

본 연구는 두께변화가 있는 복합소재 평판을 전파하는 램파의 전파특성을 실험을 통하여 살펴보았다. 상용 항공우주구조물에는 두께변화가 존재하는 부품이 많이 사용되고 있고 구조변화에 의해 두께가 변할 수도 있기 때문에 구조건전성 모니터링을 위하여 램파를 사용하고자 한다면, 이러한 구조물에 대한 램파의 특성을 면밀히 분석해 볼 필요가 있다. 본 연구는 얇은 두께의 PZT를 구조물 표면에 부착하여 실험을 수행하였다. 두께변화가 있는 전파경로를 선택하여 측정된 신호의 전파속도 및 주파수 분석 결과를 이상적 전파조건과 비교를 통하여 두께변화가 존재하는 영역에서 전파특성의 변화가 이루어지는 과정 중에 전이영역이 발생함을 제시하였다.

Key Words : Composite(복합재), Lamb wave(램파), Structural health monitoring(구조건전성 모니터링), Transient region(전이영역)

1. 서 론

항공우주 구조물에 대한 구조건전성 모니터링 시스템의 개발을 위한 연구는 20세기 후반부터 본격적으로 시도되기 시작하였다. 이는 항공기의 안전성을 높여주고 운용비용 및 유지보수비용의

† 2006년 3월 24일 접수 ~ 2006년 5월 24일 심사완료

* 정회원, (주)정우엔터프라이즈
연락처, E-mail : j-han@kaist.ac.kr

서울시 영등포구 양평동 3가 16

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과(항공우주전공)

절감을 실현할 수 있는 차세대 기술로서의 잠재력을 보여 주고 있기 때문이다[1]. 최근에는 복합재의 제조기술 및 주변기술의 발전으로 인하여 램파를 이용한 구조물의 건전성 진단방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[2-5].

램파는 두께가 얇은 구조물의 내부를 전파하는 유도 초음파로서 상대적으로 먼 거리를 전파하기 때문에 경제적이고, 구조물의 내부변화에 민감한 특성을 보이고 있다[6,7]. 또한 작고 가벼운 진동자 및 센서를 이용하여 램파의 발생 및 감지가 가능하여 구조물과 일체형으로 설계할 수 있는 장점을 지니고 있다[8,9]. 따라서 램파의 특성을 이용한 구조건전성 모니터링 시스템을 구현하기 위해서는 구조물의 형태에 따른 램파의 전파특성에 대한 이해가 충분히 수반되어야 한다. 즉, 구조물의 설계단계에서부터 구조건전성 모니터링 시스템에 대한 고려가 동시에 진행되어야 하기 때문에 진동자 및 센서의 종류, 크기 및 위치 등이 설계초기에 결정되어야 한다.

평판형태의 구조물은 두께가 일정한 것이 대부분이지만 필요에 따라서 두께를 변화시켜 제작할 수도 있고 기존 구조물에 보강재를 부착하게 되면 두께가 변할 수도 있으며, 사용 중에 외부요인에 의해서 두께가 변할 수도 있다. 이러한 두께변화가 있는 구조물의 내부변화에 대한 보다 정확한 정보를 추출하기 위해서는 두께가 변하는 판재에 대한 램파의 특성을 심도 있게 분석할 필요가 있다. 최근에 계단형 두께변화가 있는 복합재 평판에 대한 램파의 특성을 연구한 논문[10]은 같은 경로의 두 PZT에서 주고 받은 신호의 차(difference)와 전파모드의 분석을 통하여 두께 변화의 파악이 가능함을 제시하였으나, 전반적으로 이러한 형태의 구조물에 대한 과거의 연구 실적이 상당히 부족한 형편이어서 보다 많은 연구를 필요로 하고 있다.

본 연구는 두께의 변화가 있는 복합소재 평판의 내부를 전파하는 램파의 전파속도를 정확히 분석하고자 두께의 변화가 램파의 전파속도에 미치는 영향을 실험과 일련의 신호처리방법을 통하여 분석하였다.

II. 램파 전파시험

2.1 시편형상

전파방향 한쪽 끝단으로부터 300mm의 거리에서 두께 변화율이 일정하도록 준등방성 복합적층판을 제작하였다. 시편의 형상은 사각 형태로, 가

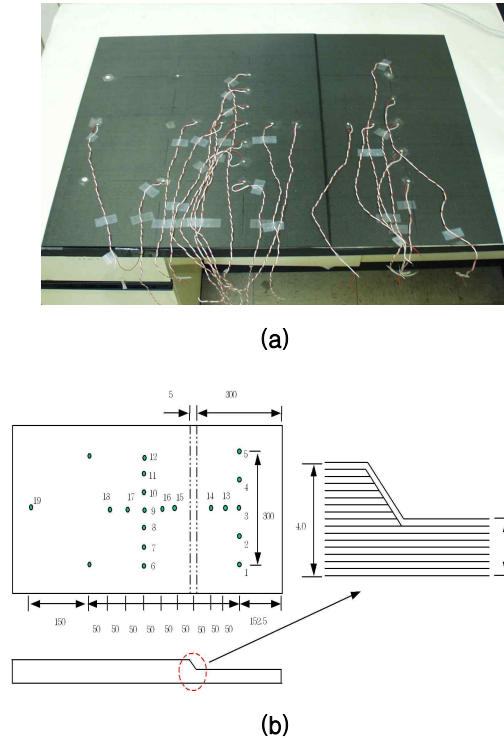


Fig. 1. (a) Test specimen and (b) Schematic configuration of PZT lay out

로 800mm, 세로 600mm이고, 얇은 층의 두께는 2mm이고, $[0_2/\pm 45_2/90_2]_S$ 의 적층형태이다. 두꺼운 층은 두께가 4mm이고, $[0_2/\pm 45_2/90_2]_{2S}$ 의 적층형태이다. 두께가 변하는 거리(s)는 5mm로서 두께의 변화거리 대비 두께차이($d=t_2-t_1$)는 1:2.5로 일정하다. 램파의 발생 및 측정을 위하여 층이 진 복합적층판의 양 영역의 표면에 직경 5mm, 두께 1mm의 원반형 PZT를 일정한 간격의 배열형태로 부착하였다[Fig. 1].

2.2 분산특성

램파는 가진 주파수와 두께의 곱에 따라 군속도가 달라지는 분산특성이 있어 일정한 주파수로 진동을 주었을 경우, 두께의 변화에 의하여 전파속도가 달라질 수 있다. 따라서 두께가 일정한 어느 한 영역에서 두께가 다른 영역으로 전파할 경우, 전파속도의 변화와 전파모드의 변화가 발생하리라는 사실을 예측할 수 있다. 두께가 일정한 영역에서 램파의 전파모드와 전파속도는 재료의 물성 값과 적층순서 및 두께 등으로부터 계산된 분산특성곡선에서 예측할 수 있다. 본 연구에 사용한 시편에 대한 기계적 물성치는 Table 1과 같으며, 분산특성곡선은 Fig. 2와 같다.

Table 1. Material property of CU125NS composite prepreg

Property	Value
Longitudinal Young's modulus, E_{11} (Gpa)	130
Transverse Young's modulus, E_{22} (Gpa)	10
Transverse Young's modulus, E_{33} (Gpa)	10
Longitudinal shear modulus, G_{12} (Gpa)	4.85
Longitudinal shear modulus, G_{13} (Gpa)	4.85
Transverse shear modulus, G_{23} (Gpa)	3.62
Poisson's ratio, ν_{12}	0.31
Poisson's ratio, ν_{13}	0.31
Poisson's ratio, ν_{23}	0.52
Ply thickness, t_{ply} (mm)	0.125
Density, (kg/m ³)	1,600

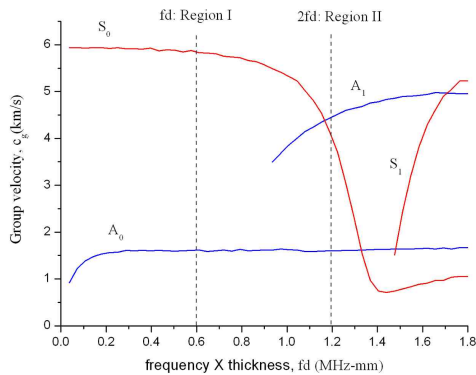


Fig. 2. Dispersion curves for group velocity

2.3 전 파 측정

PZT는 진동자와 센서의 두 기능을 동시에 수행할 수 있으므로 한 쌍의 PZT에서 서로 주고받은 신호를 사용하였다. 두께가 일정한 영역에서 한 쌍의 PZT가 같은 입력신호로 주고받은 출력 신호는 동일하므로[10] 두 신호를 비교하면, 시편의 상태와 센서의 접촉상태 등을 판단할 수 있다. 그러나 짧은 전파거리에 있는 두 PZT에서 측정된 전파속도는 정상적인 램파의 형성기간과 센서의 응답특성 등에 의해서 이론적인 전파속도의 측정이 어렵다. 따라서 이러한 현실적 오차요인을 감소시키기 위해서 배열형태로 측정된 전파속도를 선형화하여 전파속도를 구했으며, 이를 분산특성곡선으로부터 예측된 군속도와 비교할

수 있는 기준신호로 사용하였다. 입력파형은 진동에너지가 좁은 주파수밴드에 집중 되도록 함수 발생기(function generator)를 이용하여 6 cycle Hanning windowed sinusoidal tone burst 신호를 사용하였다. 2.5MS/s 속도로 센서에서 감지된 신호는 신호 대 잡음비(S/N ratio)를 높이기 위하여 64개 샘플의 평균을 취한 파형으로 oscilloscope에 출력되고, 출력된 신호는 GPIB(general purpose interface bus) 선을 통해 PC에 저장이 된다. 저장된 신호는 일단, MatLab[®]을 이용하여 Butterworth filter[11]로 재해석을 하여 해석이 용이하도록 한 후에 신호처리를 통한 분석을 수행하였다. 이 실험에서 두께변화 구역을 통과하는 램파는 두께변화 구역에서 전파모드의 변환이 이상적으로 이루어지는가를 검증할 필요가 있고, 두께변화에 의한 영향을 확인할 필요가 있다.

III. 실험결과 및 분석

3.1 전파속도 분석

3.1.1 이상적 전파분석

두께가 일정한 영역 내에서 전파하는 램파의 전파모드와 속도는 분산특성곡선으로부터 예측할 수가 있다. 따라서 Fig. 3에 있는 영역 I과 영역 II에서의 전파특성은 예상이 가능하나 영역 I (또는 II)에서 영역 II(또는 I)로 전파하는 경우, 전파모드와 속도가 변할 것으로 예상되지만 두께가 변하는 구역이 전파특성의 변화에 어떤 영향을 끼치는가에 대하여 정량적으로 연구된 논문은 아직 없는 실정이다.

두께변화구역이 전체 전파거리에 비하여 매우 짧고, 이 구역을 벗어나는 순간부터 두께가 일정한 다른 영역의 전파모드와 속도로 완벽하게 변화된다고 가정하면, 두께변화구역의 거리, s ,를 무시하고 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\frac{v}{v_1} = \frac{(1+l)V}{l+V} \tag{1}$$

여기서, v 는 전파속도, v_1 는 영역 I에서 군속도, $V(=v_2/v_1)$ 는 두 영역의 군속도 비, $l(=l_2/l_1)$ 은 두 영역에서 전파한 거리의 비를 나타낸다.

식 (1)에서, l 이 1일 경우, v 는 $v_1 \neq v_2$ 일 경우, 두 영역의 군속도 평균인 $(v_1 + v_2/2)$ 보다 항상 작아야 한다. 이는 두께변화구역을 무시하면 각 영역에서 전파거리가 같으면서 두께변화구역을 가로질러 전파하는 램파의 전파속도는 군속도



Fig. 3. Schematic drawing of a section of the plate

가 느린 영역에 가깝다고 해석할 수 있다. 이러한 해석을 실험결과와 비교하여 두께변화구역의 영향을 분석하였다.

3.1.2 전파속도 비교분석

앞 절에서 계산한 전파속도와 비교하기 위해서는 같은 전파조건으로 측정을 하여야 하기 때문에 램파가 두께변화구역을 가로질러 전파한 전체 전파거리는 두께가 다른 두 영역에서 전파한 거리가 1:1이 되도록 전파경로를 설정하였다. 이에 앞서 두께가 일정한 두 영역에서 측정된 각각의 군속도를 분산특성곡선에서 예상한 군속도와 비교하였다. 두께가 얇은 층에서는 PZT1을 가진 하여 75mm간격으로 부착되어 있는 PZT2~PZT5에서 각각 측정된 신호를 거리 대비 시간으로 선형화하여 계산한 결과, 군속도는 5.59km/s를 나타냈다. 두꺼운 층에서는 PZT6을 가진하여 50mm 간격으로 배열된 PZT8~PZT12에서 각각 측정하여 선형화한 결과, 군속도는 4.51km/s를 보였다. 이 두 결과는 분산특성곡선으로 예측한 속도와 거의 같게 나타났다[Fig. 4]. 반면, 두께변화가 있는 구역을 포함한 전파경로는 PZT3~PZT9, PZT13~PZT16와 PZT14~PZT15를 선택하였고, 측정된 세 신호를 선형화하여 계산한 램파의 전파속도는 5.14km/s로써 식 (1)을 이용하여 계산한 전파속도인 5.00 km/s보다 빠르게 나타났다[Fig. 5]. 더욱이, 이상적인 전파모드의 변환을 가정하였을 경우, 전파속도는 두 영역에서 전파한 속도의 산술적 평균인 5.05km/s보다 절대 클 수 없으나 실험으로 측정된 전파속도는 그 보다 더 빠른 속도를 보여 주고 있다. 이 결과는 두께가 변하는 구간을 램파가 전파하는 경우, 전파모드가 이상적으로 변환되지 않는다는 사실을 반증하고 있다고 할 수 있다. 이러한 사실을 주파수 분석을 통하여 분석하여 보았다.

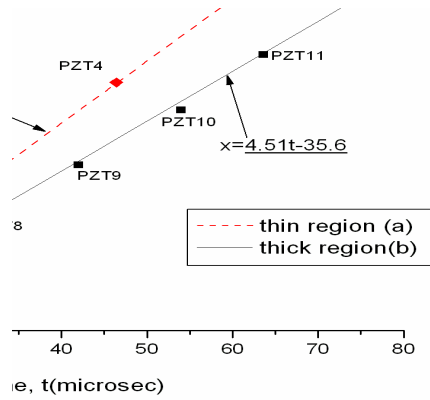


Fig. 4. Linearly fitted group velocity curves (a) in the thin region when PZT1 was actuated and (b) in the thick region when PZT6 was actuated

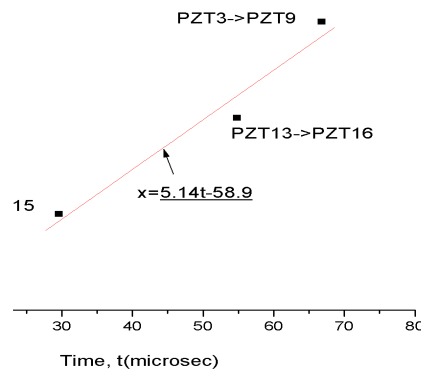


Fig. 5. Linearly fitted group velocity curve for the Lamb waves across the tapered thickness variation when the propagation distance ratio ($l_1:l_2$) was equal to 1

3.2 주파수 분석

주파수분석은 전파속도의 분석에 사용된 신호를 FFT(fast Fourier transform)와 STFT (short time Fourier transform)로 신호 처리하여 분석하였다. 입력신호의 중심 주파수는 분산특성곡선과 진동자 및 센서의 특성을 고려하여 300kHz를 사용하였다. 이 중심주파수의 입력신호로 진동자를 가진하였을 때, 얇은 층에서는 입력 중심 주파수와 거의 같은 307.6kHz의 중심 주파수를 갖는 신호가 측정되었으나[Fig. 6(a),6(c)], 두꺼운 층에서는 263.6kHz의 중심 주파수를 갖는 신호가 측정되었다[Fig. 6(b),6(c)].

반면, 두꺼운 층에서 전파하여 얇은 층으로 전

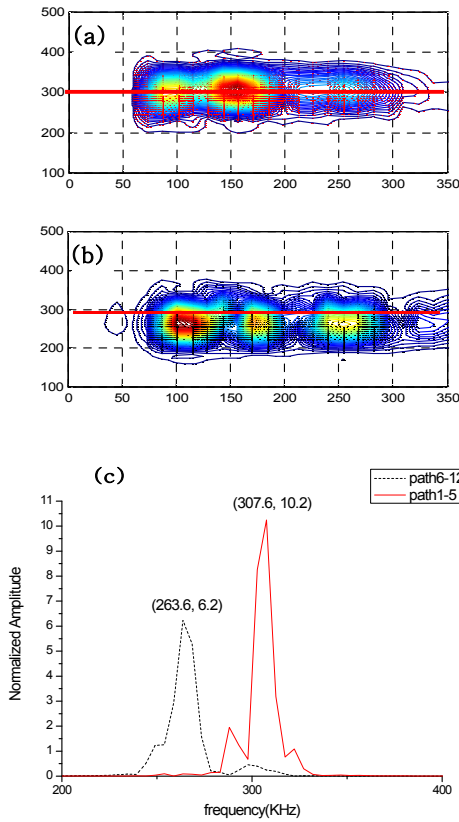


Fig. 6. Responses in pitch-catch paths; PZT1 -PZT5, PZT6-PZT12 corresponding to the uniform thickness regions, (a) STFT of signal for pitch-catch path, PZT1-PZT5 into time-frequency domain; (b) STFT of signal for pitch-catch path, PZT6-PZT12 into time-frequency domain; (c) Comparison of the signals in frequency domain

파한 신호의 중심 주파수는 302.7kHz로 분석 되었고[Fig. 7(b),7(c)], 같은 경로이지만 반대 방향으로 전파한 신호의 중심주파수는 283.2kHz로 측정되었다[Fig. 7(a),7(c)].

이 결과는 두꺼운 층에서 전파하여 얇은 층으로 전파하는 경우에는 두꺼운 층의 전파모드가 얇은 층의 전파모드로 변환이 거의 다 이루어진 반면, 반대 방향의 전파는 두꺼운 층의 전파모드로 변환이 덜 된 상태라고 해석이 된다. 따라서 두께의 변화가 있는 판재를 램파가 전파하는 경우, 전파속도가 빠른 얇은 층이 두꺼운 층에 비하여 상대적으로 영향이 커서 전파속도가 이상적인 완벽한 전파모드의 변환을 가정하고 계산한

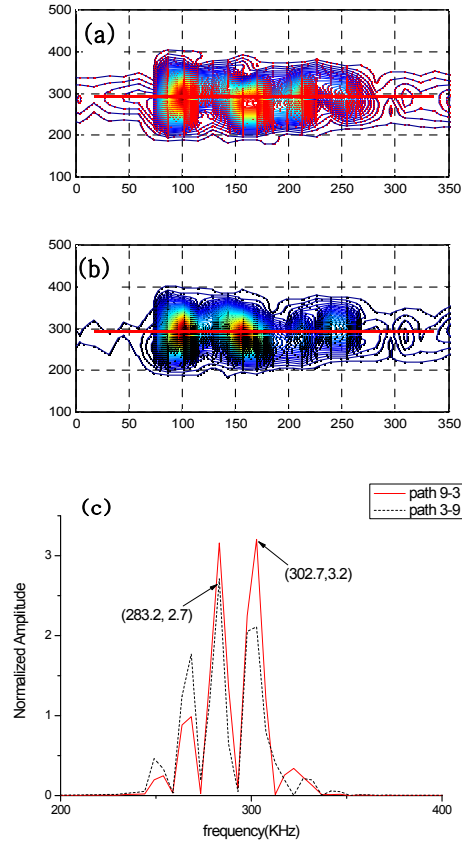


Fig. 7. Responses in pitch-catchpaths; PZT3 -PZT9, PZT9-PZT3 across the tapered thickness variation, (a) STFT of signal for pitch-catch path, PZT3-PZT9 into time-frequency domain; (b) STFT of signal for pitch-catch path, PZT9-PZT3 into time-frequency domain; (c) Comparison of the signals in frequency domain

전파속도 보다 더 빠르게 측정된 것으로 분석이 된다.

IV. 결 론

두께변화율이 일정 수준 이상 되는 구조물의 두께변화 구역에서 전파모드가 이상적으로 변환된다는 가정 하에 계산된 전파속도와 실험을 통하여 측정된 신호의 전파속도를 비교한 결과와 측정된 신호의 주파수를 분석한 결과로부터 램파는 구조물의 두께변화로 인하여 전파모드가 변환되는 경우, 한 영역에서 다른 전파영역의 모드로 변환되는 과정에서 전이영역(transient region)을

거치게 된다. 이 과정에서 램파는 군속도가 빠른 영역의 영향을 상대적으로 더 받게 된다는 결과를 보였다. 이런 영향을 두께변화율과 재질 등을 고려하여, 이론적인 전파속도를 기준으로 정량화시킨다면 두께변화가 존재하는 구조물의 전파속도를 예측할 수 있고, 역으로 두께의 변화가 구조물 내부에 존재하는 것을 예측할 수 있는 가능성을 제시하였다. 특히, 두께변화가 있는 구조물에 손상이 발생한 경우, 정확한 손상위치를 파악하기 위해서는 전파속도의 정확한 예측을 필요로 하고 있다.

후 기

본 실험을 위해 시편을 제공해 준 (주)한국화이바에 감사의 말을 전합니다.

참고문헌

- 1) Dalton R.P., Cawley P. and Lowe M.J.S., "The potential of guided waves for monitoring large area of metallic aircraft fuselage structure", J. Nondestructive Evaluation, Vol. 20, No. 1, 2001, pp. 29~46.
- 2) Paget C.A., "Contribution to active health monitoring of aerospace composite structures by embedded piezoceramic transducers", 2001 Ph.D. Report 0117, Valenciennes University.
- 3) Spillman Jr. W.B., Sirkis J.S. and Gardiner P.T., "Smart materials and structures; what are

they?", Smart Material and Structure, 1996, Vol. 5, No. 3, 1996, pp. 247~254.

- 4) Kessler S.S., Spearing S.M., "In-situ Sensor-Based Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring", AIAA Journal, Vol. 154, 2002.

- 5) Ye L. and Su Z., "A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers", J. Composite structures, Vol. 57, 2002, pp. 465~471.

- 6) Kessler S.S., Spearing S.M. and Soutis C., "Damage detection in composite materials using Lamb wave methods", Smart Material and Structure, Vol. 11, 2002, pp. 269~278.

- 7) Grondel S., Assaad J., Delebarre C. and Levin K., "Design of optimal configuration for generating A_0 Lamb mode in a composite plate using piezoceramic transducers", J. Acoustic Soc. Am., Vol. 112, No. 1, 2002, pp. 84~90.

- 8) Wilcox P.D., Lowe M.J.S. and Cawley P., "Mode and Transducer Selection for Long Range Lamb Wave Inspection", J. Intelligent Material Sys. and Structure, Vo.12, 2001, pp. 553~565.

- 9) Rose J., "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press; 1999.

- 10) 한정호, 김친곤, "두께변화가 있는 복합재 평판의 램파 전파특성", 복합재료학회지, Vol. 18, No. 2, Apl. 2005, pp. 41~51,

- 11) Signal processing toolbox user's guide, version 4. (Natick, MA, USA: The Math works, Inc., 1998)