

초음파 이미지를 이용한 CFRP 복합적층판의 적층결함 평가

임 광 희*, 나 승 우**, 심 재 기***, 양 인 영***

On Evaluation of Stacking Fault in CFRP Composite Plates of Using Ultrasonic Images

Kwang-Hee Im, Seung-Woo Ra, Jae-Ki Sim and In-Young Yang

Key Words: CFRP, Ultrasound wave, Ultrasonic inspection, 2-D FFT

Abstract

This paper shows shear wave behavior of CFRP(carbon fiber reinforced plastics) composite laminates as a polar grid form to evaluate vibration pattern of ultrasonic transducers, which gives measured modelling fundamental contents of nondestructive evaluation. This modelling decomposes the transmission of a linearly polarized wave into orthogonal components through each ply of a laminate. It is found that a high probability shows between the model and measurement system in characterizing lay up of CFRP composite laminates. Also evaluating quantitatively the defects in CFRP laminates who found to be possible of normalized frequency obtained from 2D-FFT technique based on C-scan method. Thus, the technique is proven to be one of the useful means to evaluate any internal defect in CFRP composite laminates.

1. 서 론

CFRP 복합 적층판은 일방향성(unidirectional)인 프리프레그 시트(prepreg sheet)를 적층순서(stacking sequence)와 배향각에 따라 제작하지만, 적층시 발생하는 미끄럼이나 적층불량에 의한 기공(void), 물집형 기포(blister), 미세 균열 등의 결함이 혼재 될 수 있다.¹⁻³⁾ 또한, 성형 과정에서 발생하는 섬유와 수지간의 열수축량의 차이로 내부 잔여응력이 발생하며, 이것은 표면에 거의 나타나지 않는 손상 즉, 기지재 균열(matrix crack), 섬유 파단(fiber fracture), 수지의 균

열, 섬유와 수지의 분리, 박리 등이 적층판 내부에 발생한다. 이것은 기지의 분자배열 및 화학적 성질이 변화되어 계면특성이 변화하는 것이 강도저하의 주된 원인으로 지적되고 있으며 기계적 물성치의 변화에 큰 영향을 나타낸다. 이들 내부결함의 탐상 및 기계적 성질과의 관련성 평가를 위하여 초음파를 이용한 연구가 진행되고 있다. 현재까지 복합 적층판의 시험평가 방법은 Leaky 관과 경사입사투과법⁴⁾ 등을 이용한 기법이 개발되어 적용되고있으며, 일방향 복합재의 섬유방향을 결정하기 위해 Urabe⁵⁾등은 섬유방향과 일치된 입사파가 시험편에 투사되어 수평 신호와 수직 신호로 분리된 차이점에 의해서 2 ply에서 8 ply까지 구성된 시험편의 섬유방향 평가에 이용하였다. 또한, David⁶⁾등은 진동자 형태로 만들어진 초음파 탐촉자를 이용하여 복합재료의 섬유배향 형태에 따른 특성평가를 하였다. 그러나, 초음파 탐촉자 분극방향에 따른 정량적인 특성평가 및 실험평가에 따른 CFRP 적층판에 적용한 연구

* 우석대학교 반도체전자자동차공학부

** 조선대학교 대학원

*** 조선대학교 기계공학부

결과는 찾아보기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 측정모델의 기초가 되는 초음파 탐촉자의 진동패턴 평가를 위해서 C-스캔 장비를 활용하여 초음파 탐촉자의 분극방향에 따라 탐촉자에서 발생된 초음파 전단파가 복합적층된 시험편 내부를 통과할때 각 ply에서 발생된 벡터 분해모델을 비파괴시험 방법에 실용적으로 적용하기 위한 간이모델을 제안하고, 제시된 간이모델의 타당성 검증을 위하여 별도로 제작한 실험장치를 이용하여 극좌표 형식으로 스캔하고 신뢰성 확보를 위해서 이론값과 실험값에 대한 검증을 하고자 하며 복합적층판의 개면을 C-스캔하여 결함을 2-D FFT로 이용하여 정량적으로 해석하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

시험편을 제작하기 위해서는 CFRP 프리프레그 시트를 110×110mm의 크기로 절단하였다. 절단된 프리프레그 시트의 적층 순서는 $[2(90_3 0_3) 90_3 \theta_3 90_3 2(0_3 90_3)]$ 로 하였으며, 적층 도중에 시험편의 각도 θ 를 $0^\circ, 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 의 9종류의 임의적인 결함을 주어 제작하였다. 적층된 시험편의 성형은 오토콜레이브(Autocalve)를 이용하여 제작하였다. 시험편의 성형조건은 한국화이버(주)에서 제시한 성형조건을 기준으로 하여 경화온도는 130°C , 경화시간은 90분으로 하였다. 시험편을 완전히 성형시킨 후 다이아몬드 커터를 이용하여 시험편 모양으로 가공하였으며 가공후 측면을 습식연마지 #1000으로 사상후 $100 \times 100\text{mm}$ 로 제작하였다.

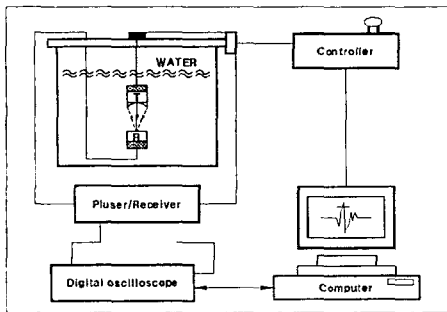


Fig. 1 C-scanner diagram

2.2 간이모델

이론모델을 몇 가지 가정하에 간소화 하였다. 동일한 재료로써 모든 ply가 구속된 h_i , α_i 및 β_i 는 각 ply에서 구속조건이 같다고 가정하면 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_R = S_T e^{-2r'} e^{-2r''} \cos(\Delta \theta_1) \cos(\Delta \theta_2) \cos(\Delta \theta_R) + S_T e^{-2r'} e^{-\beta'} e^{-\alpha'} \sin(\Delta \theta_1) \sin(\Delta \theta_2) \cos(\Delta \theta_R) - S_T e^{-2r'} e^{-\alpha' e''} \cos(\Delta \theta_1) \sin(\Delta \theta_2) \sin(\Delta \theta_R) + S_T e^{-2r'} e^{-2\beta'} \sin(\Delta \theta_1) \cos(\Delta \theta_2) \sin(\Delta \theta_R) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} h &= h_1 \cdot \dots \cdot h_N, \\ \alpha' &= \alpha_1(h_1) \cdot \dots \cdot \alpha_n(h_n), \quad \text{이다.} \\ \beta' &= \beta_1(h_1) \cdot \dots \cdot \beta_n(h_n), \\ S_a &= 1/v_a, \quad S_b = 1/v_b \end{aligned}$$

2.3 초음파 C-스캔 장치구성

상업용으로 생산되고 있는 탐촉자는 사용 용도에 따라서 대략 3,800종류가 있다. 본 연구에 이용된 초음파 탐촉자는 1MHz(Panametrics:V153)을 이용하였고, 제작사에서 제시한 탐촉자의 표준사양은 ASTM E1065 규격에 의한 실험조건에서 얻어진 중심주파수(center frequency: 0.97MHz)와 피크값(peek frequency : 0.85MHz)이다. 따라서 본 연구에서는 탐촉자에서 발생된 초음파가 다층·다방향으로 구성된 CFRP 각 ply를 통과하면서 나타나는 진동패턴 및 분극방향 평가를 위하여 초음파 C-스캔 방법에 이용된 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다.

2.4 2-D FFT 해석

내부에 결함이 있는 시험편을 C-스캔 수조에 넣어 고정시킨 후 C-스캔 게이트기법으로 집속 탐촉자를 이용하여 시험편의 내부를 C-스캔하여 이미지를 얻었다. 얻어진 C-스캔 이미지를 2D-FFT(fast fourier transform) 처리 과정을 통하여 2D-FFT 공간 스펙트럼을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모델링 검증

사용된 탐촉자는 펄서/리시버에서 발생되는 전기적인 신호를 받아 압전소자의 진동으로 펄스

를 발생시킨다. 펄스 에코 방법에서 초음파 탐촉자는 시편으로부터 반사된 신호를 수신하며 수신된 신호는 증폭되고, 최대 100MHz (또는 10ns)의 샘플링율로 DOS에서 디지털화 하였다. 송·수신 탐촉자의 탐사 각은 0° , 45° 및 90° 로 조성해가면서 탐사 각을 체크하였다. 0° 와 45° 에서는 DOS 화면상에 나타난 이미지 결과의 변화는 거의 나타나지 않았다. 그러나 45° 를 지나면서 부터는 진폭값(Amplitude)의 변화가 서서히 나타나기 시작하였고 계속해서 송·수신 탐촉자의 탐사 각을 조정하여 90° 부근에 이르자 가장 큰 진폭값의 변화를 나타냈다. 따라서 본 실험에서는 송·수신 탐촉자의 탐사 각을 90° 를 유지하면서 실험을 실시하였다.

3.2 벡터분해법의 실험 결과

Fig. 2은 16 ply부터 18 ply 사이에 0° 방향의 결함을 가지고 있는 시험편에 초음파를 발생시키고 진폭값을 측정하였다. 점선은 실험결과를 나타내고 실선은 이론 값을 나타내고있다. 전체적인 파형의 형태는 네잎클로버 모양을 이루고 있으며, $0^\circ \sim 30^\circ$ 까지는 실험값과 이론값의 변화는 거의 일정한 경향으로 나타나고 있으나 40° 부근에서부터 서서히 편차가 발생하여 50° 에서의 진폭값은 0.1정도 변화를 보이면서 감소하여 80° 에서 최소값을 나타내고 있다. 또한, $90^\circ \sim 130^\circ$, $180^\circ \sim 210^\circ$, $270^\circ \sim 310^\circ$ 까지는 대략 $\pm 10^\circ$ 정도 치우쳐진 형태가 나타났다. 특히, 왼쪽 상단의 피크값은 $310^\circ \sim 320^\circ$ 사이에서 급사하게 나타났다.

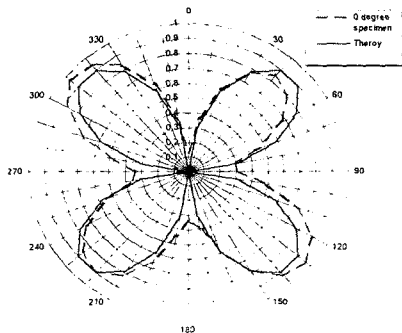


Fig. 2 CFRP composites with 0° misorientation

3.3 2-D FFT 결과

Fig. 3은 $[(90_3/0_3)_2, 90_3, \theta_3, 90_3, (0_3/90_3)_2]$ 의 적층 구조를 갖는 직교이방성 33플라이 CFRP 복합 적층판 중앙에 16~18 번째 프라이의 결함이 $\theta = 20^\circ$ 인 시험편의 C-스캔 이미지를 나타내고, Fig. 4는 Fig. 3에서 얻어진 C-스캔 이미지를 2-D FFT 처리하여 나타냈다. 나타난 이미지는 중앙을 기준으로 시계 반대방향은 (+) 방향이고, 시계방향은 (-)방향으로 표시하였다. 시험편 내부에 적층된 섬유방향이 20° 이기 때문에 Fig. 4에서는 대략 20° 부근에서 섬유 방향에 따라 밝은 선이 나타난다. 나타난 Fig. 4의 이미지를 평가하기 위해서 데이터로 얻어진 섬유 배향각 성분을 결함각과 주파수 비를 통하여 Fig. 5에 나타냈다. 이때 x축 적층판의 각도는 대략 20° 와 90° 부근에서 주파수비가 증가되어 나타난다. 이것은 20° 와 90° 에서 주파수비가 증가한 위치 즉, 결함을 갖는 복합적층판 내부의 적층구조가 20° 와 90° 로 이루어진 것과 일치하였다. Fig.6은 결함각에 따른 해석결과는 잘 일치하였다.

위와 같은 연구결과를 종합해보면, C-스캔 이미지를 통해서 얻어진 파형을 어떤 주기적인 시간 함수(x(t))와 0 부터 시작된 주파수 base frequency ($f_0=1/T$)의 정수배에 해당하는 주파수로 이루어진 sin 과 cos 함수의 무한합을 이용하여 MATLAB 프로그램으로 분석하고 구해진 주파수비의 크기로부터 복합적층판 내부의 결함의 위치를 찾아낼 수 있다.

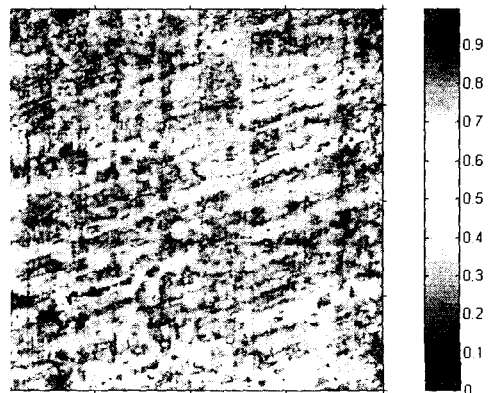


Fig.3 C-scan image

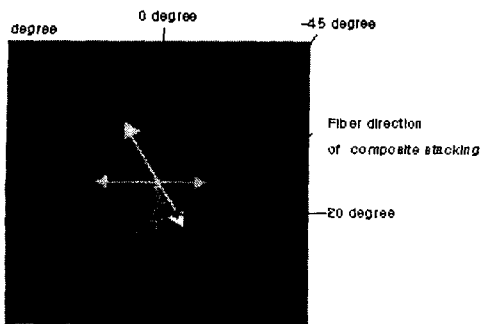


Fig.4 2-D FFT spatial spectrum of C scan image

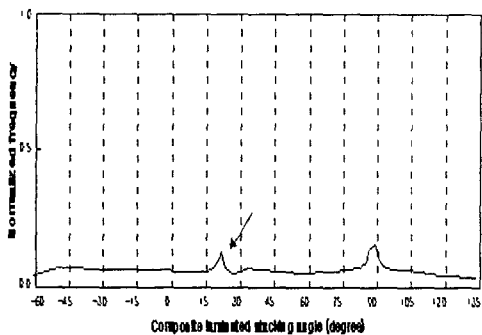


Fig. 5 Relation between composite laminated stacking angle and normalized frequency

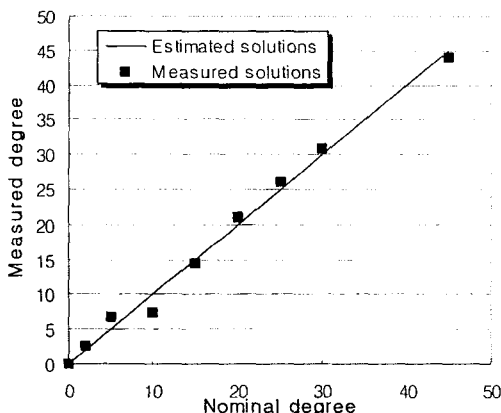


Fig. 6 comparison between measured and nominal center ply angles

4. 결론

1. CFRP 복합적층판의 적층구성 결함평가에 초음파를

이용한 결과, 초음파 탐상을 위한 송·수신 탐촉자의 탐상 각의 위치는 90° 교차형태가 가장 민감한 파형을 얻을 수 있었다.

2. C-스캔을 이용하여 얻은 계면의 이미지를 통해서 얻은 2D-FFT 주파수 결함평가 방법은 주파수비의 크기로부터 복합적층판 내부의 결함을 정량적으로 평가할 수 있었고, CFRP적층판 시험편 계면의 결함 평가에 적용한 결과 적층결함의 평가를 위한 하나의 유용한 수단임을 알 수 있었다.

3. CFRP 시험편에 초음파 진단파를 이용한 경우 모델링결과와 실험결과와 잘 근사하고 있지만 피크점 부근에서 다소 차이를 나타내고 있다. 그 원인은 접촉매질의 상태, 송·수신 탐촉자의 커플링상태 뿐만 아니라 시험편에서 감쇄, 빔확산 및 반사굴절 등의 영향이 다소 미쳤다고 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) R. F. Gibson, "Principles of composite material mechanics", McGraw-Hill, pp.13 -21, 1994.
- 2) 이대길, 정광섭, 최진호, "복합재료 역학 및 제조기술", 시그마프레스, pp.249-281, 1998.
- 3) 양인영, 임광희, "고온·고습하에서 직교이방성 CFRP 복합적층판이 잔류피로 굽힘강도에 미치는 영향에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 8, No. 6 pp. 247-253, 2000.
- 4) Y. Bar-Cohen and D.E. Chimenti, "Detection of Porosity in Composites Using Leaky Lamb Waves", Proceedings of the 11th World Conference on Nondestructive Testing. Vol. III, Taylor Publishing, Dallas, pp. 970-975, 1985.
- 5) K. Urabe and S. Yomoda, "Non-Destructive Testing Method of Orientation and fiber Content in FRP Using Microwave", Progress in Science and Engineering of Composite, pp. 1543-1550, 1982.
- 6) David K. Hsu, Vinay Daniel and Brent A Fischer, "Characterizing Shear Wave Contact Transducers by Immersion Scanning," Review of Progress in QNDE, Vol. 16, Plenum, pp. 905-909, 1997.