

초음파 탐촉자의 분극성에 따른 CFRP 복합적층판 평가에 관한 연구

나승우[†] · 임광희* · 양인영**

조선대학교 대학원 기계설계공학과 · *우석대학교 자동차공학과 · **조선대학교 기계공학부
(2002. 1. 12. 접수 / 2002. 3. 15. 채택)

On Evaluation of CFRP Composite Laimates Using Ultrasonic Transducers with Polarization Direction

Seung-Woo Ra[†] · Kwang-Hee Im* · In-Young Yang**

Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University · *Automotive Engineering, Woosuk University

**Division of Mechaical Engineering, Chosun University

(Received January 12, 2002 / Accepted March 15, 2002)

Abstract : This paper shows error in the polarization direction on ultrasonic transducers how sensitive the shear ultrasonic waves are to a little misoriented plies according to the angle variation of shear ultrasonic waves 0°, 45° and 90°. Also, it is shown that shear waves, particularly the transmission mode with the transmitter and receiver perpendicular to each other, have high sensitivity for detecting anomalies in fiber orientation and ply layup sequence that may occur in the manufacturing of composite laminates. Experimental results are agreed with a modeling solutions which was based on decomposition of shear wave polarization vector as it propagates through the composite laminates. This wave appeared considerably to be sensitive to CFRP composites to the thickness direction along in-plane fibers.

Key Words : ultrasonic waves, polarization direction, composite materials

1. 서 론

탄소섬유 강화복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 이하 CFRP라고 한다.)는 경량화가 요구되는 항공우주분야를 비롯하여 자동차 산업분야, 조선산업분야, 일반산업분야, 레저스포츠, 의료기기 부품 및 에너지 관련분야 등의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다.

특히, 복합재료는 성형시 레진흐름에 의한 기공이나 미세 균열 등의 결함이 혼재될 수 있으며 섬유와 수지간의 열 수축량의 차이로 내부 잔여 응력이 생길 수 있다. 또한, 사용중의 충격으로 복합재료는 층간 파괴나 섬유파단을 유발할 수 있어 치명적인 구조 강도 저하나 수명저하의 요인이 될 수 있다. 이들 내부결함의 정량적인 평가 및 기계적 성질의 관련성을 규명하기 위하여 초음파를 이용한 연구가

진행되고 있다.¹⁾ 이방성 복합재료의 정량적인 평가를 위해서 David²⁾는 진동자 형태로 만들어진 초음파 탐촉자를 활용하였다. 그러나 지금까지 연구된 초음파 전단파의 분극방향의 평가는 횡파나 종파와는 달리 유한요소해석을 통한 접근방법이 대부분이었다.

따라서 본 연구에서는 적층수 및 매트릭스는 같고 적층 배열방향이 다른 CFRP 시험편에 탐촉자에서 발생된 초음파 전단파를 이용하였다. 이용된 초음파 전단파가 CFRP 시험편 내부를 통과할 때 각 ply층에서 나타난 분극(polarization)현상을 벡터분해 모델을 이용하여 해석하고 이론 값을 구하였고, C-스캔 기법을 이용하여 탐촉자의 극성을 평가하였다. 그 후 CFRP 시험편 내부 결함 검출에 활용하고자 별도 제작한 실험장치를 이용하였다. 내부 결함이 있는 CFRP 시험편에 초음파 전단파를 발생시키고 오실로스코프 화면상에 나타난 진폭값의 변화를 측정하면서 실험을 실시하였다. 그리고 본 연구의 신

[†]To whom correspondence should be addressed.
raswoo@hanmail.net

되성을 높이기 위해서 벡터분해모델의 이론 값과 실험 값의 변화를 비교 분석하여 변화가 크게 나타난 시험편 내부를 광학현미경을 이용하여 자세히 관찰하고 변화의 요인을 규명하고자 한다.

2. 이론해석

2.1. 초음파 전파특성

초음파 탐상 시험법은 비파괴 검사의 일종으로 음의 반사원리를 이용하여 어떠한 구조물 혹은 재료내의 결함을 찾아내는 것으로 파괴시험 또는 다른 비파괴 평가기술에 비해 간편한 측정, 높은 측정 정도, 시험결과 도출의 신속성, 검사비용 절감 등의 장점 때문에 현재 국내에서 많이 이용되고 있는 비파괴검사법이다. 초음파에 의한 비파괴 평가분야의 응용은 주로 내부에 존재하는 결함검출과 평가에 주로 이용되고 있다. 결함검출에 가장 중요한 변수는 사용하는 초음파의 파장 또는 주파수로서, 응용 분야에 따라 수 GHz(초음파 현미경)에서 수 kHz 또는 수 Hz에 이르기까지 매우 넓은 대역의 음파를 사용하고 있으며, 관찰하고자 하는 영역의 거리도 또한 수 mm부터 수백 km까지 분포한다. 평가에 이용되는 초음파의 주파수 범위는 대개 0.5~15MHz 정도이며,³⁾ 적용분야에 따라서 GHz 단위까지 높아지고 있다.

2.2. 벡터분해모델

다음은 초음파 전단파가 복합 적층된 CFRP 시험편 내부의 각 ply를 통과하면서 나타나는 현상을 가정하였다. 우선 3개 ply로 적층된 CFRP 시험편 내부를 통과하면서 나타나는 현상을 Fig. 1에서와 같이 벡터분해모델로 표현하였다. 그림에서 표현된 현상처럼 초음파 전단파는 ST로부터 발생되어 적층구성된 CFRP 시험편 내부의 각 ply를 통과하여 마지막 SR까지 도달하는 데는 다음 그림과 같이 8가지의 경로로 나타낼 수 있다.

여기에서 입사된 초음파 전단파는 첫 번째 ply 표면을 통과하면서 두개의 패턴으로 분해되어 나타난다. 본 연구에서는 벡터분해모델의 해석을 위해서 다음과 같이 정의하였다. N은 CFRP 시험편 ply수이다. θ_T 는 송신 탐촉자의 위치각이다. θ_1 는 첫 번째 ply의 적층 배향각이다. θ_R 는 수신 탐촉자의 위치각이다. $\Delta\theta_i$ 은 각 계면에서의 변화($\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_1$)이다. 초음파 전단파는 접촉매질의 신호감쇄로 인한

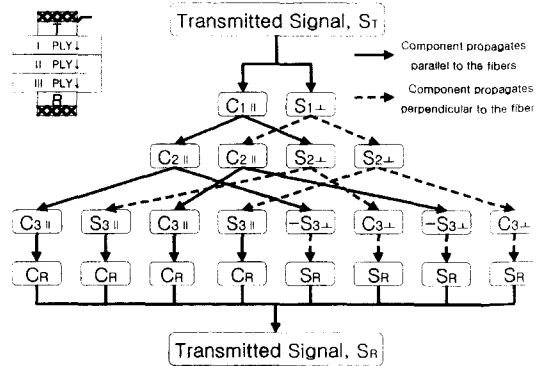


Fig. 1. Signal ST decomposed through three plies into synthesized signal SR

진폭 $S_{T-r}(t)$ 을 갖으며, 시간의 변화는 접촉매질을 통과한 전파속도에 의해서 나누어진 접촉매질의 두께와 같다. 이 신호는 첫 번째 ply면의 섬유 방향에서 $\Delta\theta_1 = \theta_T - \theta_1$ 두 각을 통하여 평행하고 수직한 두 개의 성분으로 분해되어 나타난다.

첫 번째 ply면에서 나타난 초음파 전단파의 평행 성분은 수식(1)과 같다.

$$S_T e^{-\gamma(t)} e^{-\alpha_1(h)} f_{1,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) \quad (1)$$

$$[\Delta t = (t)/v_r + (h_1)/v_a]$$

첫 번째 ply 면에서 나타난 초음파 전단파의 수직 성분은 수식(2)와 같다.

$$S_T e^{-\gamma(t)} e^{-\beta_1(h)} f_{1,2}(\delta) \sin(\Delta\theta_1), \quad (2)$$

$$[\Delta t = (t)/v_r + (h_1)/v_\beta]$$

$$S_R = S_T e^{-2\gamma'} e^{-2\gamma''} \cos(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) \cos(\Delta\theta_R) + S_T e^{-2\gamma'} e^{-\beta'} e^{-\alpha'} \sin(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \cos(\Delta\theta_R) - S_T e^{-2\gamma'} e^{-\alpha' e^{-\beta'}} \cos(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \sin(\Delta\theta_R) + S_T e^{-2\gamma'} e^{-2\beta'} \sin(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) \sin(\Delta\theta_R) \quad (3)$$

여기서,

$$h = h_1 \cdot \dots \cdot h_N,$$

$$\alpha' = \alpha_1(h_1) \cdot \dots \cdot \alpha_n(h_n),$$

$$\beta' = \beta_1(h_1) \cdot \dots \cdot \beta_n(h_n),$$

$$S_\alpha = 1/v_\alpha, \quad S_\beta = 1/v_\beta$$

이다.

3. 실험

3.1. 탐촉자의 극성평가

초음파 탐촉자의 선택은 본 연구에 사용된 시편이 얇은 판재이기 때문에 분해능이 좋은 높은 주파수(5~10MHz)의 탐촉자의 경우 예비 실험시 산란과 감쇄가 심해 통과율이 매우 낮아지기 때문에 Fig. 2와 같이 1MHz(Panametrics: V153)의 탐촉자를 선정하였다. 제작사에서 제시한 탐촉자의 표준사양은 ASTM E1065 규정에 의한 실험에서 얻어진 중심주파수(center frequency: 1.04MHz)와 피크값(peak frequency: 1.11MHz)이다. 따라서 본 연구에서는 탐촉자에서 발생된 초음파가 다층·다방향으로 구성된 CFRP 각 ply를 통과하면서 나타나는 진동패턴 및 분극방향의 정량적인 평가를 위해서는 탐촉자의 극성 평가가 필수적이다. 이를 위해서 David²⁾가 제시한(초음파 탐촉자의 분극방향은 케이블 연결지점이 되어야 한다.) 탐촉자의 정확한 극성방향 평가를 위

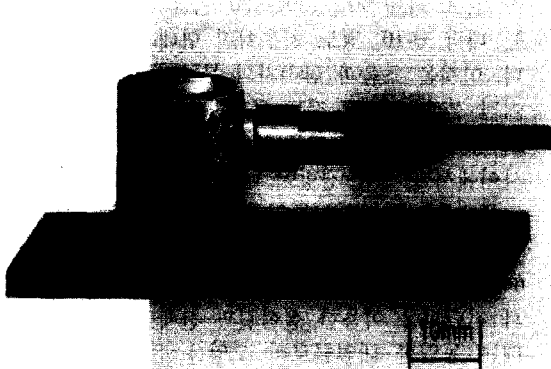


Fig. 2. Shear wave transducer

해서 C-스캔 방법을 이용하였고 시스템의 개략도는 Fig. 3에 나타냈다.

구성된 C-스캔 장치는 초음파 탐촉자가 송신 역할을 하고 종파 탐촉자가 수신 역할을 하면서 전단파 분극방향을 평가 할 수 있도록 하였다. 그 후 본 연구 활용할 초음파 탐촉자 1MHz를 수침조 상면에 위치시키고 하면에는 종파 탐촉자 1MHz를 배치하였다. 두 개의 탐촉자는 광대역 펄스를 발사하고 주파수 스펙트럼의 좋은 신호가 충분히 나타나도록 조절손잡이를 조정하면서 탐촉자의 극성을 평가하였다.

3.2. 실험장치 구성 및 실험방법

초음파 시험을 위한 실험장치는 파형을 디지털화하고 PC와 상호 호환이 오실로스코프(Lecroy 9310A)와 펄서/리시버(actex XU-2240)를 이용하였고, 송·수신 탐촉자에 일정한 하중과 위치 변동을 억제하기 위해서 두 개의 알루미늄 판(200×200×5)mm을 이용하여 고정구를 제작하였다. 2 탐촉자법을 이용하여 초음파 전단파를 수직으로 투과시켜 CFRP 시험편 내부에 나타난 결함을 검출하고자 하였다. 또한, 시험편과 탐촉자 사이에는 고 점성 전단파 전용 접촉매질(Panametrics: SWC)사용하고, 5kg의 하중을 10분간 부가하여 에코가 안정화된 후에 실험을 실시할 수 있도록 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였다.

이후 최적의 실험조건 선정을 위해서 송·수신 탐촉자의 위치각을 0°, 45° 및 90°로 조정해가면서 측정하였다. 초음파 탐상을 위한 위치 각의 변화는 오실로스코프 화면상에 나타난 피크 대 피크의 진폭 변화를 통해서 얻을 수 있었다.



Fig. 3. C-scan diagram



Fig. 4. Experimental method

3.3. 시험편

본 실험에 이용된 시험편은 고탄성계인 T300 섬유로 구성된 일방향 탄소섬유 프리프레그 시트(한국화이버(주), CUI25NS-carbon fiber unidirection 125 g/m², no scrim)를 110×110mm의 크기로 절단하였다. 절단된 프리프레그 시트의 적층 순서는 [2(90₂/0₂)90₂/θ₂/90₂/2(0₂/90²)]으로 하였으며, 적층 도중에 시험편의 각도 θ를 0°, 2°, 5°, 10°, 15°, 20°의 6종류의 임의적인 결합을 주어 제작하였다. 적층된 시험편은 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 경화온도 130°C, 경화시간은 90분으로 하여 성형하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 탐촉자의 극성평가 결과

초음파 C-스캔 방법을 이용하여 얻어진 이미지 화상은 0에서 250까지 켈리로 나타낼 수 있도록 하였고, 얻어진 결과는 Fig. 5와 같다.

나타난 이미지는 중앙 부근에서는 보라색상의 동진모양의 원형이 상·하로 나타났고, 주위는 노란색과 파란색으로 표현된 높은 신호 진폭을 갖는 두 개의 초승달 모양으로 나타났다. 이 패턴은 초승달 중앙을 지나는 라인을 통해 두 개의 대칭 형태를 나타내고 있다. 이것은 탐촉자에서 발생된 초음파 진단파의 극성방향과 일치하고 있으며, 전기 컨넥터(BNC 케이블)가 중앙부분(90°)에 위치하고 있는 화살표 방향에 나타난 것처럼 대략 10° 정도 좌측으로 치우친 에러를 나타내고 있다. 초음파 탐촉자의 분극방향은 탐촉자 중앙을 통과하는 BNC 케이블에 의해서 분극방향이 결정되고 있다는 사실을 알 수

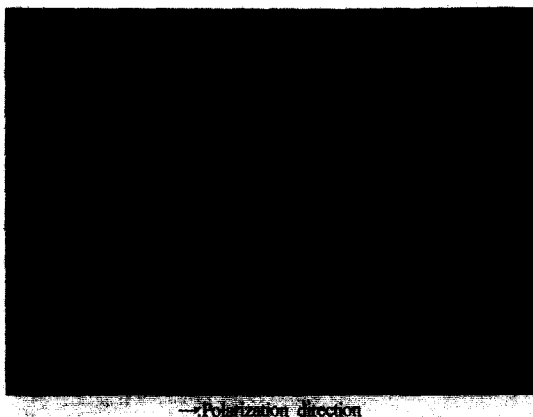


Fig. 5. Image of Polarization direction using C-scaner

있었다. 또한 본 연구에서 실험결과를 통하여 제시한 탐촉자의 극성평가법은 시판되는 초음파 탐촉자의 극성평가에 유용한 기법으로 활용이 가능하였다.

4.2. 벡터분해법의 실험결과

Komsky⁴⁾는 벡터분해법을 이용하여 Graphite/epoxy 3 ply와 4 ply를 적층한 후 초음파 속도변화를 해석한 예는 있으나 미소 변화가 있는 CFRP 시험편 내부에 인위적인 결합을 주어 벡터분해법의 이론해석과 실험결과는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 시험편 내부에 11 ply와 12 ply 사이에 0° 결합을 가지고 있는 시험편을 이용하여 초음파 진단파를 발생시키고 진폭값을 측정하였다. 점선은 실험결과를 나타내고 실선은 이론 값을 나타내고 있다.

Fig. 6에 나타난 결과 전체적인 파형의 형태는 네잎클로버 모양을 이루고 있으며, 0°~30°까지는 거의 일정한 경향을 보이고 있으나 40° 부근에서 서서히 편차가 발생하여 50°에서 진폭값은 0.1 정도 변화를 보이면서 감소하여 80°에서 최소값을 나타내고 있다. 특히 90°~130°, 180°~210°, 270°~310°까지는 대략 +/-10° 정도 치우쳐진 형태를 나타내고 있다. 이것은 초음파 탐촉자의 분극방향 평가에서 얻어진 결과처럼 10° 정도 치우친 에러에 의한 영향으로 생각된다. 특히 왼쪽 상단의 피크값은 310°~320° 사이에서 근사한 경향이 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 실험조건을 유지하면서 얻어진 결과를 종합하였다. 0°, 2°, 5°, 10°, 15°, 20°의 6종류의 결합을 가지고 있는 CFRP 시험편에 초음파 진단파를 이용한 실험결과 전체적인 윤곽의 형태는 동일한 네잎클로버 모양을 유지하고 있지만

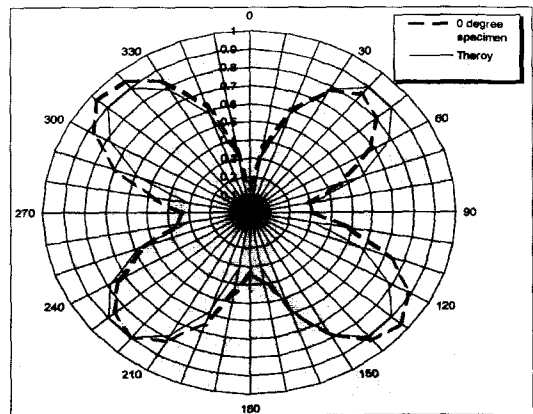


Fig. 6. CFRP composites with 0° misorientation

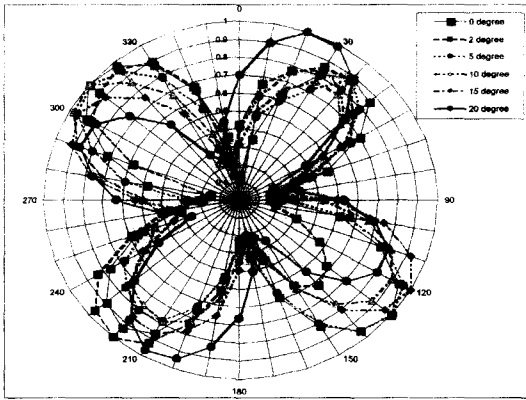


Fig. 7. Relations between misalignment angle and angle of normalized peak amplitude

피크점 부근에서는 다소 차이를 나타내고 있다. 그 원인은 시험편 표면과 초음파 탐촉자 사이에 있는 접촉매질의 상태가 초기 실험조건과 동일하게 유지되어야 하나 10° 간격으로 서서히 회전하는 송·수신 탐촉자의 영향으로 커플링상태의 변화에 따라 접촉매질의 점도와 두께가 낮아지는 현상과, 시험편 각Ply를 통과하는 초음파 전단파의 감쇄, 빔확산 및 반사굴절 등의 영향이 다소 미쳤다고 사려된다.

4.3. 광학현미경 관찰 결과

Fig. 7에서 나타난 현상을 비교하면 시험편의 적층배향 오차가 2°인 경우가 90°~180°, 270°~360° 사이에서 가장 큰 진폭값의 변화를 나타내고 있다. 이러한 현상을 명확히 규명하기 위해서 시험편을 다 이아몬드커터로 절단한 후 단면을 연마처리하여 광학현미경으로 관찰하였다. Fig. 8은 관찰한 결과를

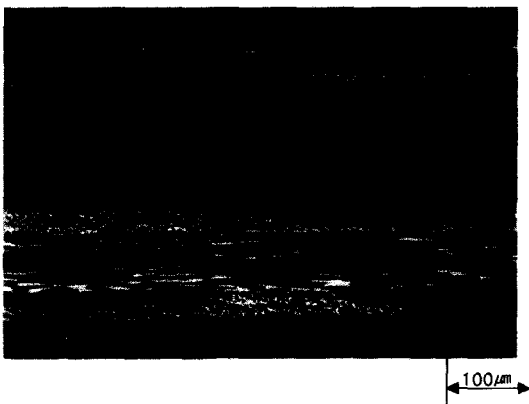


Fig. 8. CFRP composites microscopy photograph

나타내고 있다.

우측 상단부위에 나타난 검은색 띠는 CFRP 시험편이 경화과정에서 발생한 레진리치(resin rich)형상을 나타내고 있다. 따라서 탐촉자에서 발생된 초음파 전단파는 고여있는 레진리치의 코너부위를 통과하면서 나타나는 감쇄 현상으로 2° 시험편의 110°~160°, 280°~360° 사이에서 발생된 진폭값의 변화 요인으로 나타났다.

5. 결론

초음파 탐촉자의 분극방향 특성평가에 이용된 C-스캔 방법은 유용한 기법으로 활용이 가능하였고, 내부 결함을 가지고 있는 CFRP 시험편에 벡터분해 기법을 이용한 간이모델을 제시하고 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 탐촉자의 정확한 극성방향 평가를 위해서 C-스캔 방법을 이용한 결과 탐촉자 중앙을 통과하는 BNC 케이블에 의해서 분극방향이 결정된다는 사실과 얻어진 이미지 화상을 통하여 10° 정도 좌측으로 치우친 초음파 탐촉자의 분극방향을 정량적으로 평가 할 수 있었다.

2) 초음파 전단파는 복합적층된 시험편 각 ply 표면을 통과하면서 평행하고 수직한 두 개의 벡터 성분으로 분해되어 나타났고, 이러한 현상을 이용하여 벡터분해모델의 이론 값을 구하였다. 그 후 본 연구의 신뢰성 확보를 위해서 별도 제작한 실험장치를 통하여 실험 값을 구한 후 비교 분석한 결과 전체적인 파형은 네잎클로버 모양으로 잘 일치하였고, 특히 왼쪽 상단의 피크값은 310°~320° 사이에서 근사한 경향이 나타났다. 따라서 벡터분해모델은 초음파 전단파의 해석에 유용한 기법으로 적용 가능하였다.

3) 복합적층된 CFRP 시험편의 내부 결함검출을 위해서 초음파 전단파를 이용한 결과 적층 구조에 따른 파형의 변화를 예측할 수가 있었다. 또한 복합재료 성형시 발생된 기공이나 미세 균열 등의 결함에 의한 피크값의 변화를 간단한 실험방법을 통하여 내부 결함을 검출할 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과는 다른 비파괴 평가 기술에 비해 간편한 측정, 높은 측정정도, 시험결과 도출의 신속성, 검사비용 절감 등의 장점 때문에 여러 분야에서 활용이 가능하다고 생각된다.

4) 시험편 경화과정에서 발생된 레진리치는 초음파 전단파의 감쇄 현상과 진폭값의 변화에 영향을

주었다.

참고문헌

- 1) 김지훈, 정태훈, 이현, 양인영, 조규재, 심재기, “일방향 CFRP 적층판의 모드II 동적 층간파괴인성 평가,” 산업안전학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 1~7, 2000.
- 2) 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.
- 3) 이형준·국정환, “초음파 탐상 시험,” 도서출판 골드, pp. 5~10, 1999.
- 4) I. N. Komsky, I. M. Daniel and Y. -C. Lee, “Ultrasonic Determination of Layer Orientation in Multi-layer Multidirectional Composite Laminates,” Review of Progress in QNDE, Vol. 11, Plenum, pp. 1615~1622, 1992.