

# 전자기 초음파를 이용한 CF/Epoxy 복합적층판의 적층결합 특성평가

임 광 희<sup>\*</sup>, 나 승 우<sup>\*\*</sup>, David K. Hsu<sup>\*\*\*</sup>, 이 창 노<sup>\*</sup>, 박 제 웅<sup>\*\*\*\*</sup>, 심 재 기<sup>\*\*\*\*</sup>, 양 인 영<sup>\*\*\*\*</sup>

## On Characterization for Stacking Fault Evaluation of CF/Epoxy Composite Laminates Using an EMAT Ultrasonics

Kwanghee Im · Seungwoo Na · David K. Hsu · Changro Lee  
Jewoung Park · Jaeki Sim · Inyoung Yang

### Abstract

An electromagnetic acoustic transducers (EMAT) can usually generate or detect an ultrasonic wave into specimens across a small gap. Especially stiffness of composites depends on layup sequence of CFRP(carbon fiber reinforced plastics) laminates because the layup of composite laminates influences there properties. It is very important to evaluate the layup errors in prepreg laminates. A nondestructive technique can therefore serve as a useful measurement for detecting layup errors. It was shown experimentally that this shear waves for detecting the presence of the errors is very sensitive. It is found that high probability shows between tests and the model developed in characterizing cured layups of the laminates. Also a C-scan method was used for detecting layup of the laminates because of extracting fiber orientation information from the ultrasonic reflection caused by structural imperfections in the laminates. Therefore, it was found that interface C-scan images show the fiber orientation information by using two-dimensional fast Fourier transform(2-D FFT).

**Key Words:** Composite Laminates(복합적층재), EMAT Ultrasonics(전자기초음파), Stacking Sequences(적층구성), Noncontact Mode(비접촉모드), Two-dimensional fast Fourier transform(2-D FFT)

### 1. 서 론

CFRP 복합적층판은 일방향성(unidirectional)의 프리프레그 태입 (prepreg sheet)를 이용하여 원하는 적층순서와 배향각에 따라 제작하기 때문에 적층과정에서 발생하는 미끄럼이나 적층불량에 의한 기공(void), 기포(blister), 미세균열 등의 결함이 혼재될 수 있다. 또한, 성형과정에서 발생하는

되는 섬유와 수지간의 열수축량의 차이로 뒤틀림변형(warping), 층간분리(delamination), 내부 잔류응력(residual stress)이 발생하며 표면에서는 알 수 없는 내부손상 즉, 기지의 균열(matrix cracking), 섬유 Pull-out, 섬유와 수지의 분리, 층간박리 등이 적층판 내부에 발생하여 강도저하의 원인으로 지적되고 있어 CFRP 적층판의 성형과정에서 해결해야 할 중요한 문제점의 하나로 제기되고 있다.<sup>1)</sup> 특히, 복합재료는 금속과 달리 각 층 자체가 매우 얇고(5~15 $\mu$ m), 섬유(fiber)성분과 기지(matrix)성분의 조합으로 이루어져서 균일

<sup>\*</sup> 우석대학교 반도체전기자동차공학부  
<sup>\*\*</sup> 순천제일대학 차량기계과  
<sup>\*\*\*</sup> 아이오와 주립대학교 Center for NDE  
<sup>\*\*\*\*</sup> 조선대학교 공과대학

한 층 구조를 가지지 못하기 때문에 각층 내부에 상하를 겹쳐서 발생하는 평면 결함형태가 많이 발생한다. 따라서, 복합적층 판의 건전성을 평가하기 위해서는 평면형인 적층배향 특성평가가 절실히 요구된다.

현재까지 복합적층판의 적층배향특성을 평가하기 위해서 Holland등<sup>2)</sup>은 초음파 탐촉자를 이용하여 35°로 입사된 초음파 전단파가 의사등방성 CFRP 적층판 내에서 시간변화에 따른 파형의 변화를 관찰하였고, Rokhlin<sup>3)</sup>은 의사등방성 시험편에 초음파 탐촉자를 이용하여 피크값의 변화와 입사각을 변화시켜 가면서 가장 양호한 피크값의 변화가 나타나는 입사각을 찾고자 했다. 한편 비접촉식 방법인 전자기 초음파 (EMAT ultrasonics)는 일반적인 접촉식초음파 탐상법에 비하여 특별한 분야에 응용이 되고 있다. Cheong 등<sup>4)</sup>은 EMAT의 유동초음파 비틀림 모드를 이용한 가압중수로 피더관의 균열을 검출하는데 적용하였으며 Ahn 등<sup>5)</sup>은 비교적 두께가 얇은 배관의 결함검출을 위한 EMAT시스템을 개발하였다.

따라서, 본 연구에서는 전자기 초음파 (EMAT ultrasonics)를 이용하여 CFRP 복합적층판의 적층배향평가방법을 제안하고자 한다. 해석방법으로는 전자기초음파 탐촉자에서 발생된 초음파가 CFRP 복합적층판의 내부 각 플라이를 통과하면서 나타나는 현상을 벡터분해기법을 이용하고 실험결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교하여 CFRP 복합적층판에서 얻어진 실험결과의 차에 대한 원인을 규명한다. CFRP 복합적층판 성형 시에 발생하는 플라이의 방향성이 잘못되거나, 다르게 적층된 플라이를 평가하기 위하여 시험편 내부의 적층배향구성을 탐상하고 초음파 C-스캔 평가기법을 이용하여 2-D FFT(Two-dimensional fast-Fourier transform)를 활용하여 평가한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

시험편을 제작하기 위해서는 CFRP 프리프레그 시트를 110×110mm의 크기로 절단하였다. 절단된 프리프레그 시트의 적층 순서는 [2(90<sub>3</sub>0<sub>3</sub>)90<sub>3</sub>θ<sub>3</sub>90<sub>3</sub>2(0<sub>3</sub>90<sub>3</sub>)]으로 하였으며, 적층 도중에 시험편의 각도 θ를 0°, 2°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°,

30°, 45°의 9종류의 임의적인 결함을 주어 제작하였다. 적층된 시험편의 성형은 오토클레이브 (Autoclave)를 이용하여 제작하였다. 시험편의 성형조건은 한국화이버(주)에서 제시한 성형조건을 기준으로 하여 경화온도는 130℃, 경화시간은 90분으로 하였다. 시험편을 완전히 성형시킨 후 다이아몬드 커터를 이용하여 시험편 모양으로 가공하였으며 가공후 측면을 습식연마지 #1000으로 사상후 100×100mm로 제작하였다.

### 2.2 간이모델

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

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

$$\text{여기서, } \begin{aligned} h &= h_1 \cdot \dots \cdot h_n, \\ \alpha' &= \alpha_1(h_1) \cdot \dots \cdot \alpha_n(h_n), \\ \beta' &= \beta_1(h_1) \cdot \dots \cdot \beta_n(h_n), \\ S_\alpha &= 1/v_\alpha, \quad S_\beta = 1/v_\beta \end{aligned} \quad \text{이다.}$$

### 2.3 전자기초음파 원리 및 방법

전자기초음파(EMAT ultrasonics)의 원리는 Lorentz 힘을 이용하는 방법이다. 와전류(eddy current)를 발생시키기 위한 코일과 정자기장을 가하기 위한 자석으로 구성된다. 표면 근처에 놓인 코일에 교류전류를 가하면 시험편 표면에는 와전류(J)가 유도되며, 여기에 정자기장(B<sub>0</sub>)을 가하면 시험편 표면의 입자들은 Fig. 1과 같이 Lorentz힘(F)을 받는다.

$$F = J \times B_0 \quad (2)$$

여기에서 J는 와전류의 밀도, B<sub>0</sub>는 정자기장의 자속밀도, F는 Lorentz힘이다.

Fig.2는 수직입사용 전단파 EMAT 탐촉자의 제작 설계를 나타내며 평평한 경주트랙형태의 구리 코일로 이루어졌다. 코일 바로 위에는 한쌍의 직

사각형 NdFeB 영구자석이 배치되었고 크기는 8 × 15 mm(가로×세로)이다. 또한 자석은 아래 위

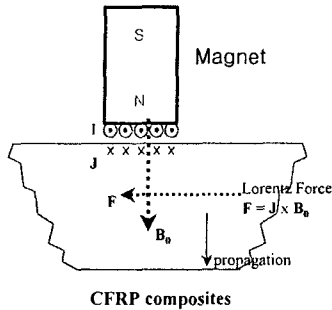


Fig. 1 Wave generation mechanism of an EMAT

방향으로 자화되어 있어서 시험편 표면에 정자기장을 공급하며 이 코일은 동자기장을 공급하는데 이용된다. 자석의 극성(polarization)은 일정한 반면 코일을 흐르는 전류는 서로방향이 반대이므로 Lorentz힘의 방향은 서로반대이다. 그러므로 전류의 극성에 따라 압축응력이 발생하게 되어 전단파가 진행된다. CFRP시험편 및 EMAT 탐촉자를 지지하기위해 2개의 원기둥 (25×30×50, outer dia.×inner dia.×length(mm))인 알루미늄을 이용하여 제작하였으며 알루미늄에는 시험하는 도중에 두 개의 EMAT탐촉자를 회전시키면서 측정 할 수 있도록 알루미늄 원형판을 삽입하였다. 그리고 2개의 EMAT탐촉자를 극성을 맞추었다. 이때 제작된 EMAT송·수신 탐촉자는 500kHz이며 극성방향을 유지하면서 동시에 회전시키면서 데이터를 피크대 피크 진폭(peak-to-peak amplitude)을 측정하

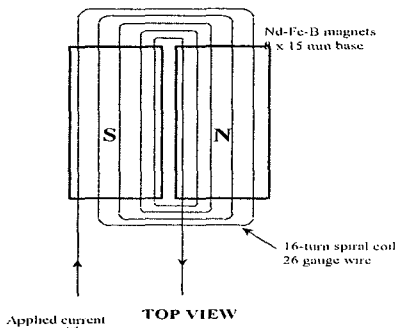


Fig. 2 The top view of an EMAT probe for generating and receiving normal-incidence shear waves.

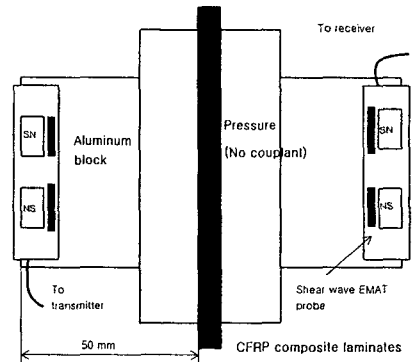


Fig. 3 Schematic of EMAT transducer setup

였다. 그리고 전체적인 EMAT 탐촉자구성방법 및 초음파시험방법을 Fig. 3 에 나타냈다.

### 2.4 2-D FFT 주파수

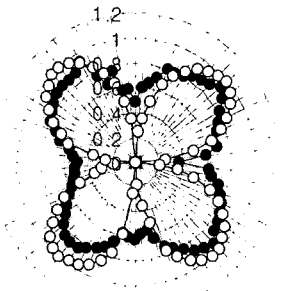
시험편 내부에 적층배향을 검사하기위하여 시험편을 C-스캔 수조에 넣어 고정시킨 후 A-스캔 초음파형에서 게이트기법을 활용하여 시험편의 내부를 C-스캔하여 이미지를 얻었다. 얻어진 C-스캔 이미지는 복합적층판의 적층배향의 정보를 가지고 있어 이때 적층배향을 정량적으로 평가하기위하여 2D-FFT (Two-dimensional fast Fourier transform) 처리 과정을 통하여 2D-FFT 공간 스펙트럼을 구하여 나타냈다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 복합 적층판의 결함평가

복합 적층판의 결함평가에 사용된 CFRP 시험편은 모두 33 플라이이며 적층구조는  $[(90_3/0_3)_2, 90_3, \theta_3, 90_3, (0_3/90_3)_2]$ 이다. 그리고, 시험편 내부에 포함된 적층결함(stacking faults)은 각  $\theta$ 로 표현하였다. 결함각  $\theta$ 는  $0^\circ, 5^\circ, 15^\circ$  및  $20^\circ$  인 4종류로 적층하여 초음파 실험을 실시하였고, 벡터분해모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한 후 그 결과를 이론값으로 나타냈다. Fig. 4는 16~18 플라이 사이에  $\theta=0^\circ$  결함이 있는 CFRP 시험편의 주사각과 벡터분해 모델을 이용한 이론값을 종합하여 극 좌표형태의 원그래프로 나타냈다. 주사각의 변화를 나타낸 원그래프의 좌표계 중, 1사분면을 중심으로 비교 분석한 결과 이론값의 경우는  $50^\circ$  에서 최대 진폭값의 변화가 나타났으며, 실험의 경우도 모두  $50^\circ$

에서 최대 진폭값을 나타냈고, 60° 와 70° 에서는 점차 감소함을 알 수 있었다. 또한, 전자기 초음파 실험의 경우는 실험결과에 비해 다소 낮은 대략 0.9에서 최대 피크를 나타냈다. 극좌표계의 2사분면에서는 140°, 3사분면에서는 220° 그리고 4사분면의 경우는 320° 부근에서 이론값과 성형전·후 실험값이 거의 동일한 경향으로 최대피크를 나타냈다. Fig. 4에 나타난 현상은 대체적으로 전자기 초음파 실험값이 이론값에 비해 최대 피크 대 피크 진폭값의 변화는 약 10% 낮게 나타났다.



● Experimental ○ Theoretical

Fig. 4 Comparison of modeling and experimental solutions for 0° defect angle specimen

이러한 전자기초음파 실험 결과의 차이를 발생시키는 요인을 살펴보면 시험편 적층시 각 플라이 사이에 유입된 공기층, 즉 기공의 영향에 의해서 초음파 전단파 감쇄값의 변화가 발생된 요인에 의해 오토클레이브를 이용해 성형시 시험편 내부에 유입된 공기층이 미세하게 남아있고 또한 레진 흐름으로 인해 섬유배향이 다소 이동되었다고 사료된다.

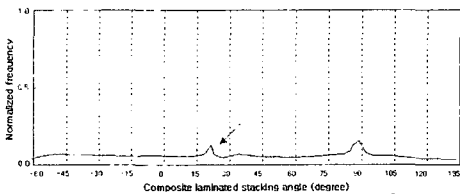


Fig. 5 Ultrasonic C-scan images for 20° defect angle specimen

### 3.2 2D-FFT 주파수

Fig. 5는  $[(90_3/0_3)_2, 90_3, \theta_3, 90_3, (0_3/90_3)_2]$ 의 적층구조를 갖는 직교이방성 33플라이 CFRP 복합 적층판 중앙에 16~18 번째 플라이의 결함이  $\theta = 20^\circ$  인 시험편의 C-스캔 이미지를 2-D FFT 처리하여 나타냈다.

결함을 갖는 복합적층판 내부의 적층구조가 20° 와 90° 로 이루어진 것과 일치하였다.

## 4. 결론

- 1) CFRP 복합적층판의 적층배향에 EMAT 탐촉자에 발생하는 전단파가 매우 민감하여 유용함 알 수 있었다.
- 2) CFRP 복합적층판의 적층결함평가에 전자기초음파 이용한 결과, 모델링과 실험결과가 다소의 오차가 발생하였다. 이것은 EMAT 탐촉자를 수동으로 회전하고 지그와 탐촉자 사이의 미소한 압력 변화, 시험편 내에서 발생된 감쇄, 빔확산, 반사굴절의 영향이라 사료된다.
- 3) 초음파 C-스캔 이미지를 통해서 얻은 2D-FFT 주파수 결함평가 방법은 CFRP 적층판의 적층 배향정보를 통해 내부의 적층결함을 정량적으로 평가할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 2004년도 산학협동재단 지원연구비에 의해 지원되었음

## References

- (1). Im K. H., Park N. S., Kim Y. N. and Yang I. Y., "A Study on Impact Characteristics of the Stacking Sequences in CFRP Composites Subjected to Falling Weight Impact Loading", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 4, pp.203-211, 2003.
- (2). Holland R.E., Littles, J. W. Jr., "Ultrasonic Wave Propagation Characteristics of Environmentally damaged FRP Composites", *Review of Progress in QNDE*, Vol. 20, pp. 1066~1073, 2001.
- (3). Rokhlin S.I., Xie Q., Liu Y. and Wang L., "Ultrasonic Study of Quasi-isotropic Composites", *Review of Progress in QNDE*, Vol. 18, pp. 1249~1256, 1999.
- (4). Cheong, Y.M., Kim S.S., Lee, D.H., and Jung, H.K., "Detection of Cracks in Feeder Pipes of Pressurized Heavy Water Reactor Using an EMAT Torsional Guided Wave," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 2, pp. 136~141, 2004.
- (5). Ahn, B. Y., Kim Y.J, Kim, Y. G., and Lee, S.S., "Development of an EMAT System for Detecting Flaws in Pipeline," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 1, pp. 15~21, 2004.