

전자기 초음파를 이용한 CFRP 복합적층판의 적층배향 특성평가에 관한 연구

임 광 희¹⁾ · 나 승 우^{*2)} · 김 지 훈³⁾ · 이 창 노¹⁾ · David K. Hsu⁴⁾ · 양 인 영³⁾

우석대학교 자동차공학과¹⁾ · 공주대학교 기계자동차공학부²⁾ · 조선대학교 기계설계공학과³⁾
아이와주립대학교 Center NDE⁴⁾

A Study on Characterization for Stacking Fault Evaluation of CFRP Composite Laminates Using an EMAT Ultrasonics

Kwanghee Im¹⁾ · Seungwoo Na^{*2)} · Jihoon Kim³⁾ · Changro Lee¹⁾ · David K. Hsu⁴⁾ · Inyoung Yang³⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Woosuk University, Jeonbuk 565-701, Korea

²⁾Division of Mechanical and Automotive Eng., Kongju University, Gongju 314-701, Korea

³⁾Division of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

⁴⁾Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University, Ames, IA 50011, U.S.A.

(Received 6 September 2004 / Accepted 9 December 2004)

Abstract : An electromagnetic acoustic transducer (EMAT) is a unique probe that does not require a couplant or gel and also can usually generate or detect an ultrasonic wave into specimens across a small gap. It, therefore can be applied in a noncontact mode with a high degree of reproducibility. Especially stiffness of composites depends on layup sequence of CFRP(carbon fiber reinforced plastics) laminates. 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. This shear wave for detecting the presence of the errors is very sensitive. A decomposition model has been used in the interpretation and prediction of test results. Test results have been compared with model data. It is found that the high probability shows between tests and the model utilized 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)

Nomenclature

N : CFRP 시험 편에서 적층된 플라이 수

I_T : 초음파를 발생시킨 탐촉자

O_R : 발생한 초음파를 수신할 수 있는 탐촉자

CI_{Pa} : 첫 번째 플라이의 초음파의 평행성분

SI_{Pe} : 첫 번째 플라이의 초음파의 수직성분

θ_r : 초음파 진단과의 기준축의 각

θ_i : 첫 번째 플라이의 배향각

$\Delta\theta$: 각 플라이 면에서의 배향각, ex) $\Delta\theta_i = \theta_r - \theta_i$

*To whom correspondence should be addressed.
raswoo@hanmail.net

- $I_{exp} - \gamma(tt)$: 접촉매질을 통과한 신호감쇠값
- $exp - \alpha l(hi)$: 첫 번째 플라이에서 섬유와 평행하게 나타난 파의 감쇠 값
- $exp - \beta l(hi)$: 첫 번째 플라이에서 섬유와 수직하게 나타난 파의 감쇠 값
- $f_{1.1}(\delta), f_{1.2}(\delta)$: 감쇠계수(빔확산, 계면손실)
- Δt : 각성분 신호의 시간의 변화
- V_α, V_β 및 V_γ : 수직, 수평으로 나타난 초음파가 접촉매질을 통과할 때의 전파속도

1. 서론

최근 항공기 우주기기 등 우주구조용 재료로서 가장 주목받고 있는 선진 복합재료중에서도 탄소섬유 강화복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 이하 CFRP 라고 한다.)는 선진복합재(Advanced Composite Materials: ACM)의 대표적인 재료로써 금속재료에 비해서 대략 20 ~ 50% 정도의 중량을 감소시킬 수 있다는 장점¹⁾이 있어 구조경량화가 요구되는 항공우주분야를 비롯하여 조선산업분야, 자동차 산업분야, 일반산업분야, 레저 스포츠, 의료기기 부품 및 에너지 관련분야 등의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다.

CFRP 복합적층판은 일방향성(unidirectional)의 프리프레그 시트 (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 섬유와 수지의 열 수축량의 차이로 뒤틀림 변형(warpage), 층간분리(delamination), 내부 잔류응력(residual stress)이 발생하며 표면에서는 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.²⁾ 특히, 복합재료는 금속과 달리 각 층 자체가 매우 얇은(5 ~ 15 μm) 섬유(fiber) 성분과 기지(matrix)성분의 조합으로 이루어져서 균일한 층 구조를 가지지 못하기 때문에 각층 내부에 상하를 접

쳐서 발생하는 평면 결합형태가 많이 발생한다. 따라서, 복합적층 판의 건전성을 평가하기 위해서는 평면형인 적층배향 특성평가가 절실히 요구된다.

현재까지 복합적층판의 적층배향특성을 평가하기 위해서 Holland 등³⁾은 초음파 탐촉자를 이용하여 35°로 입사된 초음파와 전단파가 준등방성 CFRP 적층판 내에서 시간변화에 따른 파형의 변화를 관찰하였고, Rokhlin⁴⁾은 준등방성 시험편에 초음파 탐촉자를 이용하여 피크값의 변화와 입사각을 변화시켜 가면서 가장 양호한 피크값의 변화가 나타나는 입사각을 찾고자 했다. Dokun 등⁵⁾은 FRP와 알루미늄 시험편을 이용하여 초음파 탐촉자의 중심주파수를 실험적 관점에서 비교 분석하여 동일종류의 시험편에서도 어떤 탐촉자가 가장 이상적인 파형을 나타내는지에 관해 고찰하였고, Omote 등⁶⁾은 GFRP 적층판에 초음파를 발생시키고 섬유방향에 따른 파형의 변화를 3D-FEM 해석을 통하여 실험결과와 비교하여 각 플라이를 통과하면서 시간변화에 따라 나타나는 감쇠현상을 해석하고자 하였다. 또한, Urabe 등⁷⁾은 35GHz 전단파를 이용하여 CFRP 적층판 5 플라이 중 잘못 적층된 1개 플라이에 의한 파형의 변화를 실험적 관점에서 평가하였고, Hsu⁸⁾는 준등방성 적층구성을 갖는 CFRP 적층판의 임의의 층에 인위적 결함을 주어 탐촉자와 C-스캔 이미지를 통하여 결함을 평가하고 B-스캔 이미지를 통하여 적층된 시험편 내부 섬유구성의 변화에 따른 파형의 변화 관계를 규명하고자 하였다. 한편 비접촉모드(noncontact mode) 방법인 전자기 초음파(EMAT ultrasonics)는 일반적인 접촉식모드(Contact mode)인 초음파 탐상법에 비하여 특별한 분야에 응용이 되고 있다. Cheong 등⁹⁾은 EMAT의 유동초음파 비틀림 모드를 이용한 가압중수로 피더관의 균열을 검출하는데 적용하였으며 Ahn 등¹⁰⁾은 비교적 두께가 얇은 배관의 결함검출을 위한 EMAT 시스템을 개발하였다.

이상과 같이 복합 적층판의 적층배향에 대하여 초음파 탐상에 의해 평가하려고 많은 연구가 행해지는 실정이며 특히 CFRP 적층판을 항공기 및 선박, 자동차의 강도부재로 사용할 경우 열악한 환경에 노출되어 반복하중을 받기 때문에 CFRP 복합적층판의 강성에 의존하는 적층배향평가는 대단히 중요

한 문제라 생각된다.

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 실험결과와의 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. 초음파 이론해석

2.1 기초이론

전자기 초음파(EMAT ultrasonics)가 적층CFRP 시험편 내부의 각 플라이를 통과하면서 나타나는 현상을 알기 위하여 벡터분해법⁸⁾을 이용하였다. 먼저 본 실험에서 이용된 CFRP 시험편의 섬유방향을 기준으로 0°축을 정의하였다. 또한, 초음파 탐촉자와 시험편의 중앙을 기준 축으로 하였고, 이동 각의 방향은 시계방향을 기준으로 설정하였다. Fig. 1과 같이 첫 번째 플라이에서 분해된 초음파 I_T 는 기준 축의 각 θ_T 에서 송신탐촉자에 의해 발생하고, 접촉매질을 통해서 입사된다. 입사된 초음파는 접촉매질의 신호감쇄로 인한 진폭 $I_T \exp - \gamma(tt)$ 를 가지며, 시간변화는 접촉매질을 통한 전파속도에 의해 나누어진 접촉 매질의 두께와 같다. 이 신호는 첫 번째 플라이에서 섬유와 평행하고, 수직인 방향으로 $\Delta\theta_1 = \theta_T - \theta_1$ 각을 통하여 2개의 성분으로 분해된다. 우선 첫 번째 플라이에서 나타난 초음파의 평행 성분 ($C1p_a$)는 다음과 같다.

$$I_T \exp - \gamma(tt) \exp - \alpha 1(h_1) f_{1,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1), \quad (1)$$

$$[\Delta t = (tt) / v_\gamma + (h_1) / v_a]$$

첫 번째 플라이에서 나타난 초음파의 수직 성분 ($S1p_e$)는 다음과 같다.

$$I_T \exp - \gamma(tt) \exp - \beta 1(h_1) f_{1,2}(\delta) \sin(\Delta\theta_1), \quad (2)$$

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

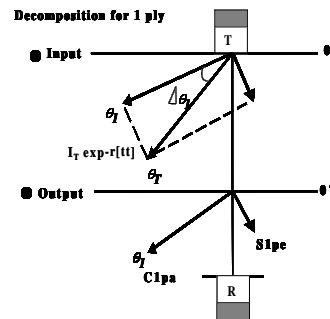


Fig. 1 Polarized shear wave propagation by vector through first ply

첫 번째 플라이를 통과한 초음파의 편광된 성분은 θ_2 로 이루어진 섬유와 더불어 두 번째 플라이에서 또 다시 두 개의 성분으로 분해가 되어 나타난다. 이산된 성분중의 하나는 평행한 성분으로 또 다른 하나는 수직인 성분으로 분해가 된다. Fig. 2는 분해된 두 성분의 형태를 나타낸 그림이다.

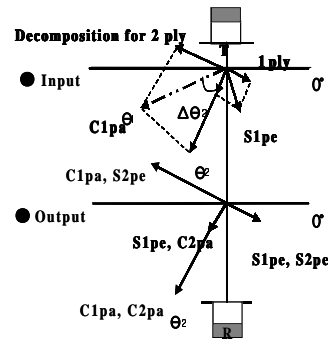


Fig. 2 Polarized shear wave propagation by vector decomposition through second ply

두 번째 플라이에서 나타난 초음파의 평행성분은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$I_T \exp - r(tt) \times \{ \exp - \alpha 1(h_1) \exp - \alpha 2(h_2) f_{1,1}(\delta) f_{2,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) + \exp - \beta 1(h_1) \exp - \beta 2(h_2) f_{1,2}(\delta) f_{2,4}(\delta) \sin(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\alpha} + (h_2)/v_{\alpha}] \\ [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\beta} + (h_2)/v_{\alpha}] \end{aligned}$$

두 번째 플라이에서 나타난 초음파의 수직성분은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$I_T \exp^{-\gamma(tt)} \times \{ \exp^{-\beta_1(h_1)} \exp^{-\beta_2(h_2)} f_{1,2}(\delta) f_{2,2}(\delta) \sin(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) - \exp^{-\alpha_1(h_1)} \exp^{-\beta_2(h_2)} f_{1,1}(\delta) f_{2,3}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\beta} + (h_2)/v_{\beta}] \\ [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\alpha} + (h_2)/v_{\beta}] \end{aligned}$$

Fig. 3과 같이 세 번째 플라이에서 분해된 성분의 각 벡터는 원래의 벡터가 변화하는 시간 IT에 스칼라 항목을 곱하고 새로운 벡터에 일치하는 Δt 를 변화하여 구하였다. 수신 탐촉자에 대한 초음파 성분은 식 (5)와 같으며, 플라이 대 플라이 벡터분해 모델은 일 방향 플라이를 구성하였다.

$$\begin{aligned} O_R = I_T \exp^{-\gamma(tt)} \exp^{-\gamma(tr)} \\ \times \{ \exp^{-\alpha_1(h_1)} \exp^{-\alpha_2(h_2)} f_{1,1}(\delta) f_{2,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) \cos(\Delta\theta_R) \\ + \exp^{-\beta_1(h_1)} \exp^{-\alpha_2(h_2)} f_{1,2}(\delta) f_{2,4}(\delta) \sin(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \cos(\Delta\theta_R) \\ - \exp^{-\alpha_1(h_1)} \exp^{-\beta_2(h_2)} f_{1,1}(\delta) f_{2,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \sin(\Delta\theta_R) \\ + \exp^{-\beta_1(h_1)} \exp^{-\beta_2(h_2)} f_{1,2}(\delta) f_{2,2}(\delta) \sin(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) \sin(\Delta\theta_R) \} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\alpha} + (h_2)/v_{\alpha} + (tr)/v_{\gamma}] \\ [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\beta} + (h_2)/v_{\alpha} + (tr)/v_{\gamma}] \\ [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\alpha} + (h_2)/v_{\beta} + (tr)/v_{\gamma}] \\ [\Delta t = (tt)/v_{\gamma} + (h_1)/v_{\beta} + (h_2)/v_{\beta} + (tr)/v_{\gamma}] \end{aligned}$$

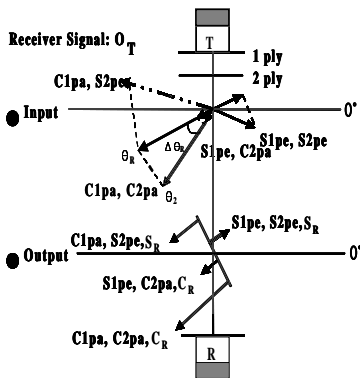


Fig. 3 Polarized shear wave propagation by vector decomposition reached onto the receiver

2.2 분해법구조

CFRP 복합적층판의 플라이 층으로 구성된 시험편 내부를 통과하여 나타나는 현상을 벡터분해 모델로 표현한다. 입사된 초음파는 첫 번째 플라이를 통과하면서 두개의 패턴으로 분해되고, 분해되어 나타난 파의 형태는 수직과 수평성분의 벡터분해 모델로 표현되어 첫 번째 플라이를 통과하여 두 번째 플라이로 전파되면서 시간에 따라 변화되는 벡터분해 모델로 나타낼 수 있다. 초음파가 적층된 시험편 각 플라이를 통과하면서 나타나는 현상은 Fig. 4와 같다. 그림에서 초음파 전단파는 I_T 로부터 발생되어 CFRP 시험편 내부의 각 플라이를 통과하여 마지막 O_R 까지 이동하는 경로는 다음과 같은 8가지 순서로 표현 할 수 있다.

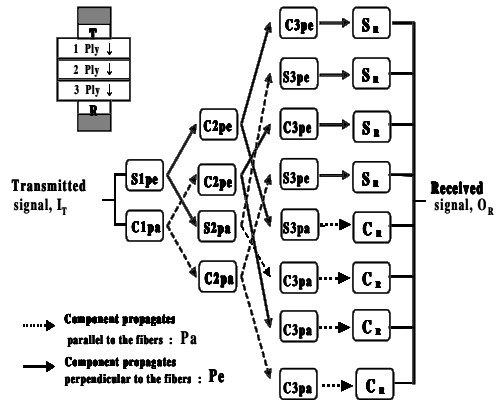


Fig. 4 Signal IT decomposed through three plies and a resultant signal O_R reached

1. $I_T \rightarrow C1pa \rightarrow C2pa \rightarrow C3pa \rightarrow C_R \rightarrow O_R$
2. $I_T \rightarrow C1pa \rightarrow C2pa \rightarrow S3pe \rightarrow S_R \rightarrow O_R$
3. $I_T \rightarrow C1pa \rightarrow S2pe \rightarrow C3pa \rightarrow C_R \rightarrow O_R$
4. $I_T \rightarrow C1pa \rightarrow S2pe \rightarrow S3pe \rightarrow S_R \rightarrow O_R$
5. $I_T \rightarrow S1pe \rightarrow C2pa \rightarrow C3pa \rightarrow C_R \rightarrow O_R$
6. $I_T \rightarrow S1pe \rightarrow C2pa \rightarrow S3pe \rightarrow S_R \rightarrow O_R$
7. $I_T \rightarrow S1pe \rightarrow S2pe \rightarrow C3pa \rightarrow C_R \rightarrow O_R$
8. $I_T \rightarrow S1pe \rightarrow S2pe \rightarrow S3pe \rightarrow S_R \rightarrow O_R$

여기에서 $C1pa = \cos\Delta\theta_i$ 이고, 첫 번째 플라이를 통하여 섬유에 평행하게 전파하고, $S1pe = \sin\Delta\theta_i$ 인 성분은 첫 번째 플라이를 통하여 섬유에 수직하게

전파한다. $C1p_a$ 에서 첨자 1은 첫 번째 플라이를 나타내고, p_a 는 수평을 의미한다. 또한 $S2p_e$ 에서 2는 두 번째 플라이를 나타내고, p_e 는 수직을 나타낸다.

3. 실험방법

3.1 시험편

본 연구에서는 한국화이버(주)에서 생산된 탄소 섬유/에폭시수지(CF/EPOXY)로 조합된 일방향 탄소 섬유 프리프레그 시트(Prepreg sheet)를 적층하여 오토클레이브(Autoclave)방법으로 제작된 직교이방성 CFRP 적층판을 시험편으로 사용하였다. CF/Epoxy 시험편의 기본물성을 Table 1에 시험편 배향에 따른 시험편의 종류를 Table 2에 나타냈으며, 시험편 제작 방법은 다음과 같다. 냉장 보관중인 프리프레그 시트를 초음파 진단과 측정이 가능한 치수인 110×110mm 크기로 절단하였다. 절단된 프리프레그 태잎은 핸드 레이업법을 사용하여 Table 2의 성형 조건에 따라 적층하였다.

성형전 시험편 내부 결함을 정량적으로 평가하기 위해서 적층도중에 시험편 임의의 층에 인위적인 결함을 주었다. 시험편 A는 16~18 플라이 사이에 0°, 5°, 15° 및 20°까지 4 종류의 인위적인 결함을 주어 제작하였다.

Table 1 Characteristics of CF/EPOXY specimen

Properties	Fiber Carbon T-700S	Prepreg	
		0°	90°
Maker	HanKuk Fiber Co.	CU12 5NS	CU12 5NS
Density [kg/m ³]	1.75×10 ³	-	-
Tensile strength [Gpa]	4.81	2.53	55.8
Tensile modulus [Gpa]	229	138	7.9
Breaking elongation (%)	2.1	1.7	1.5
Resin content [% Wt]		37	37
Curing temperature		130 °C ×90m in	130 °C ×90m in

Table 2 Prepreg sheet stacking sequences of specimen

Prepreg sheet stacking	Total prepreg sheet No.	Error ply No.
[(90 ₃ /0 ₃) ₂ , 90 ₃ , θ ₃ , 90 ₃ , (0 ₃ /90 ₃) ₂] θ=0°, 5°, 15°, 20°	33	θ=16~18

θ = defect angles of mid-plane specimen

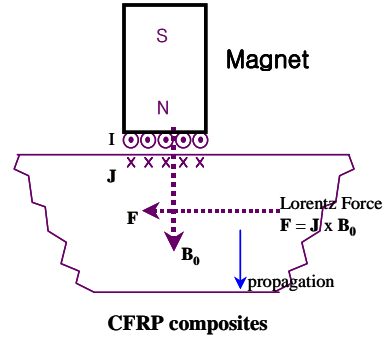


Fig. 5 Wave generation mechanism of an EMAT

3.2 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_0)을 가하면 시험편 표면의 입자들은 Fig. 5와 같이 Lorentz 힘(F)을 받는다.

$$F = J \times B_0 \tag{6}$$

여기에서 J는 와전류의 밀도, B_0 는 정자기장의 자속밀도, F는 Lorentz 힘이다.



Photo. 1 The EMAT system consisting of permanent-magnet EMAT probes, EMAT pulser/receiver electronic chassis, EMAT amplifier (max. range 1MHz), PC, etc.

Photo.1은 실험에 사용된 EMAT 시스템이다. 이 시스템은 EMAT 펄서/리시버, EMAT 증폭기(max, 1MHz), EMAT 및 PC로 이루어졌다. SH(Shear horizontal) 파를 발생시키기 위한 주기적인 항구자

적으로 구성하였다. Fig. 6은 수직입사용 전단파 EMAT 탐촉자의 제작설계도를 나타내며 평평한 경주트랙형태의 구리코일로 이루어졌다. 코일 바로 위에는 한쌍의 직사각형 NdFeB 영구자석이 배치되었고 크기는 8×15 mm(가로×세로)이다. 또한 자석은 아래 위 방향으로 자화되어 있어서 시험편 표면에 정자기장을 공급하며 이 코일은 동자기장을 공급하는데 이용된다. 자석의 극성(polarization)은 일정한 반면 코일을 흐르는 전류는 서로방향이 반대이므로 Lorentz 힘의 방향은 서로반대이다. 그러므로 전류의 극성에 따라 압축응력이 발생하게 되어 전단파가 진행된다. Photo. 2는 EMAT의 탐촉자를 이용한 실험방법을 나타냈다. 또한 CFRP 시험편 및 EMAT 탐촉자를 지지하기 위해 2개의 원기둥(25×30×50, outer dia.xinner dia.xlength(mm))인 Al합금을 이용하여 제작하였으며 Al합금에는 시험하는 도중에 두 개의 EMAT 탐촉자를 회전시키면서 측정할 수 있도록 Al합금 원형편을 삽입하였다.

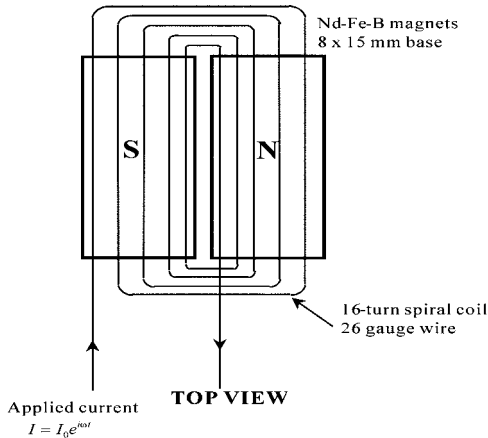


Fig. 6 The top view of an EMAT probe for generating and receiving normal-incidence shear waves

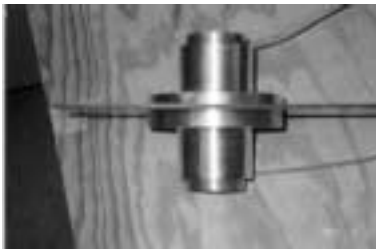


Photo. 2 EMAT probes

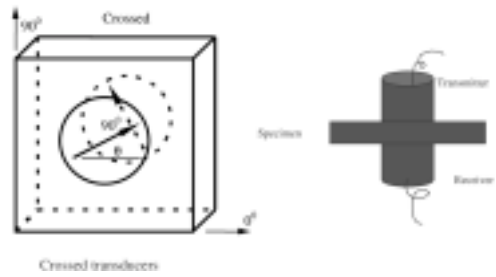


Fig. 7 Schematic of transducer contact position in through-transmission mode

그리고 2개의 EMAT 탐촉자를 극성을 맞추기 위해 Fig. 7처럼 정렬하였다. 이때 제작된 EMAT 송·수신 탐촉자는 500kHz이며 극성방향을 유지하면서 동시에 회전시키면서 데이터를 Photo. 3처럼 피크 대 피크 진폭(peak-to-peak amplitude)을 측정하였다. 그리고 전체적인 EMAT 탐촉자구성방법 및 초음파 시험방법을 Figs. 8 및 9에 나타냈다.

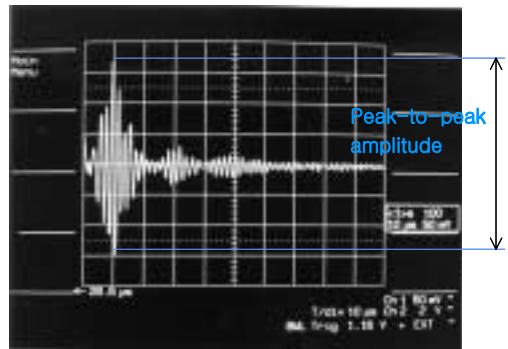


Photo. 3 The pear-to-peak amplitude method applied to CFRP laminates

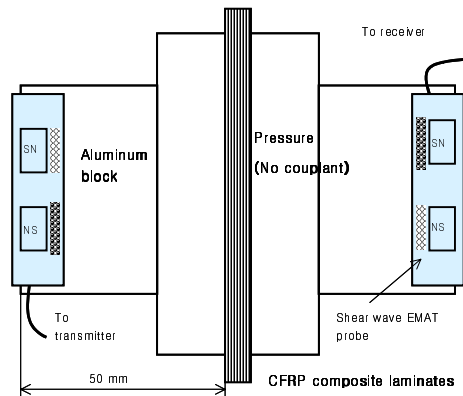


Fig. 8 Schematic of EMAT transducer setup

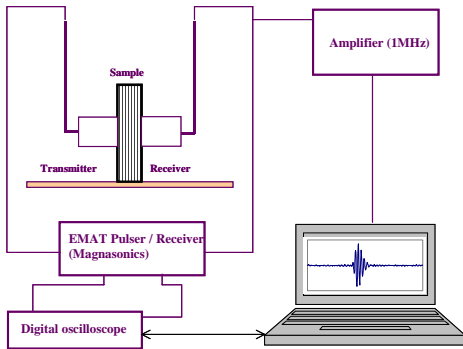


Fig. 9 Experimental setup for through-transmission scan mode (pitch-catch scan mode also used in this study)

3.3 손상영역 관찰방법

초음파 C-스캔 이미지는 품질관리와 신뢰성 등을 부여하기 위하여 재료의 결함을 평가하는데 유용한 비파괴검사기법이다. 초음파 측정방법은 펄스에코우 모드방법이 수침조내에서 모두 행해졌다. C-스캔장비는 시험편의 전면과 배면의 에코우 진폭을 이미지로 나타낼수 있다. 이때 진폭변화를 그레이상과 칼라상으로하여 비디오상에서 0에 250(색상농도)까지 나타낼 수 있다. 이때 복합적층판의 손상영역을 C-스캔으로 관찰하기 위하여 주파수가 50MHz 트랜스듀서가 사용되었다. 이 트랜스듀서는 시험편의 수조내에서 표면과 수직탐상 하였으며 모델명이 5052PR의 펄서/리시버가 이용이 되었다.

3.4 2-D FFT 주파수

본 절에서는 본 연구에서 초음파에서 A-스캔 탐상기법에서 CFRP 복합적층판의 적층배향을 평가하기 위하여 초음파 C-스캔 방법을 활용하였다. 시험편 내부에 적층배향을 검사하기 위하여 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 평가하기 위하여 2D-FFT (Two-dimensional fast Fourier transform) 처리 과정을 통하여 2D-FFT 공간 스펙트럼을 구하여 나타냈다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 복합 적층판의 결함평가

복합 적층판의 결함평가에 사용된 CFRP 시험편은 모두 33 플라이며 직교이방성으로 구성되었으며 적층구조는 $[(90_3/0_3)_2, 90_3, \theta, 90_3, (0_3/90_3)_2]$ 이다. 그리고, 시험편 내부에 포함된 적층결함(stacking faults)은 각 θ 로 표현하였다. 결함각 θ 는 $0^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ 및 20° 인 4종류로 적층하여 초음파 실험을 실시하였고, 벡터분해모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한 후 그 결과를 이론값으로 나타냈다.

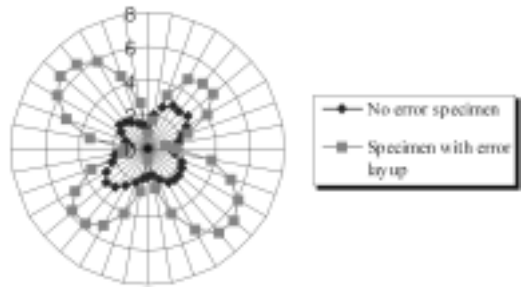


Fig. 10 Comparison of specimen $[(0/90)_{12}]_s$, with no error and specimen $[(0/90)_{12}]_s$, with ply error

우선 Fig. 10은 회전각과 진폭을 나타내었다. 여기에서 CFRP 복합적층판의 적층결함의 전자기의 초음파의 민감도를 평가하기 위하여 48플라이로 구성된 동일하게 적층하여 하나의 시험편에는 적층결함을 주지않고 또하나는 25번째 플라이 90° 플라이에 0° 로 대치하여 적층결함을 주었다. 이 2개의 시험편을 전자기 초음파를 이용해 투과법 모드방식으로 실험을 하였으며 이때 아주 민감하여 반응함을 알 수 있었다.

Figs. 11~14까지는 CFRP 시험편 내부에 4종류의 결함이 있는 직교이방성 시험편에서 결함의 유·무에 따른 주사각(피크 대 피크 진폭값의 변화)을 측정하여 극좌표 형태로 나타낸 그래프이다. 극좌표계에서 제일 상단부분을 0° 로 하여 시계방향으로 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 및 360° 로 하였다. 여기에서 0° 에서 90° 사이를 1사분면, 90° 에서 180° 사이를 2사분면, 180° 에서 270° 사이를 3사분면, 270° 에서 360° 사이를 4사분면으로 표현하였다. 또한, 한 그래프 내에

이론값을 표현하는 관계로 결과 값을 보다 더 쉽게 구분하고 판별할 수 있도록 다음과 같은 범례를 지정하여 사용하였고 여기에서 ●는 전자기 초음파 실험값, ○는 이론값을 의미하고, 주사각(scanning angle)은 결함이 있는 시험편 표면을 탐상하는 초음파 탐촉자의 위치 변화 각도를 의미한다. Fig. 11는 16~18 플라이 사이에 $\theta=0^\circ$ 결함이 있는 CFRP 시험편의 주사각과 벡터분해 모델을 이용한 이론값을 종합하여 극 좌표 형태의 원그래프로 나타냈다. 주사각의 변화를 나타낸 원그래프의 좌표계 중, 1사분면을 중심으로 비교 분석한 결과 이론값의 경우는 50° 에서 최대 진폭값의 변화가 나타났으며, 실험의 경우도 모두 50° 에서 최대 진폭값을 나타냈고, 60° 와 70° 에서는 점차 감소함을 알 수 있었다. 또한, 전자기 초음파실험의 경우는 실험결과에 비해 다소 낮은 대략 0.9에서 최대 피크를 나타냈다. 극좌표계의 2사분면에서는 140° , 3사분면에서는 220° 그리고 4사분면의 경우는 320° 부근에서 이론값과 성형 전·후 실험값이 거의 동일한 경향으로 최대 피크를 나타냈다. Fig. 11에 나타난 현상은 대체적으로 전자기 초음파실험값이 이론값에 비해 최대 피크 대 피크 진폭값의 변화는 약 10% 낮게 나타났다.

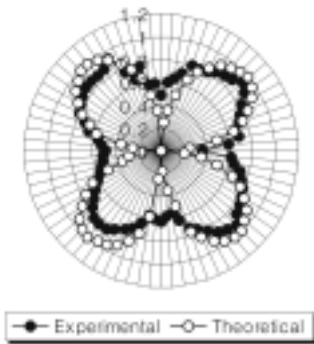


Fig. 11 Comparison of modeling and experimental solutions for 0° defect angle specimen

Fig. 12는 16~18 플라이 사이에 $\theta=5^\circ$ 결함이 있는 CFRP 시험편의 주사각과 벡터분해 모델을 이용한 이론값을 종합하여 극 좌표 형태의 원그래프로 나타냈다. 주사각의 변화를 나타낸 원그래프의 좌표계 중, 1사분면을 중심으로 비교 분석한 결과 이론값의 경우는 45° 에서 최대 진폭값의 변화가 나타났

다. 또한, 전자기 초음파 실험의 경우에 대해서 45° 에서 최대 진폭값을 나타냈고, 50° 와 60° 에서는 점차 감소함을 알 수 있었다. 극좌표계의 2사분면에서는 140° , 3사분면에서는 이론값은 220° , 실험값은 215° , 그리고 4사분면에서는 이론·실험값은 320° 에서 최대 피크값을 나타냈다. Fig. 12에 나타난 현상은 대체적으로 전자기 초음파 값이 이론값에 비해 최대 피크 대 피크 진폭값의 변화는 약 6% 낮게 나타났다.

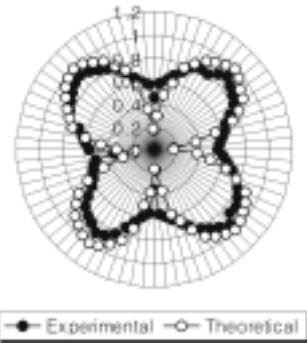


Fig. 12 Comparison of modeling and experimental solutions for 5° defect angle specimen

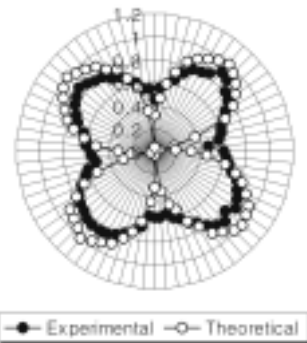


Fig. 13 Comparison of modeling and experimental solutions for 15° defect angle specimen

Figs. 13~14는 16~18 플라이 사이에 각각 $\theta=15^\circ$ 및 20° 결함이 있는 CFRP 시험편의 주사각과 벡터분해 모델을 이용한 이론값을 종합하여 극 좌표 형태의 원그래프로 나타냈다. 주사각의 변화를 나타낸 원그래프의 좌표계 중, 1사분면을 중심으로 비교 분석한 결과 이론값의 경우는 대략 40° 및 35° 에서 최대 진폭값의 변화가 나타났다.

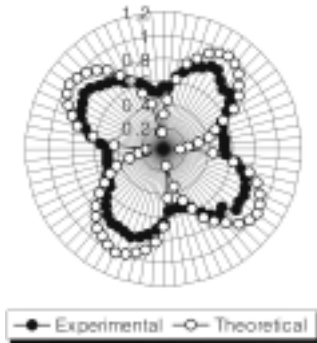


Fig. 14 Comparison of modeling and experimental solutions for 20° defect angle specimen

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 레진흐름으로 인해 섬유배향이 다소 이동되었다고 사료된다. 그리고, 이론값과 전자기 초음파 실험값의 변화를 발생시키는 요인은, 전자기 초음파 실험시 탐촉자 표면에 비접촉식으로 이루어지나 이 상태가 실험종료까지 균일한 거리와 압력을 유지하여야 한다. 하지만 서서히 회전하는 두 탐촉자의 위치 변화에 따라 접촉상태가 두 탐촉자의 미세한 차이가 발생한다. 이러한 현상에 의해 전자기 초음파 탐촉자와 시험편 사이의 거리 및 압력은 미소한 변화가 발생하고 전자기 초음파 전단파 감쇄값의 변화가 발생되는 요인이라 사료된다.

4.2 2D-FFT 주파수

Fig. 15(a)는 $[(90_3/0_3)_2, 90_3, \theta_3, 90_3, (0_3/90_3)_2]$ 의 적층구조를 갖는 직교이방성 33플라이 CFRP 복합 적층판 중앙에 16~18 번째 플라이의 결함각이 $\theta=20^\circ$ 인 시험편의 C-스캔 이미지를 나타냈고, Fig. 15(b)는 (a)에서 얻어진 C-스캔 이미지를 2-D FFT 처리하여 나타냈다. 나타난 이미지는 중앙을 기준으로 시계 반대방향은 (+) 방향이고, 시계방향은 (-) 방향으로 표시하였다. 시험편 내부에 적층된 섬유배향이 20° 이기 때문에 (b)에서는 대략 20° 부근에서 섬유 방향에 따라 밝은 선이 나타난다. 나타난 (b)의 이미지를 평가

하기 위해서 데이터로 얻어진 섬유 배향각 성분을 결함각과 주파수 비를 통하여 Fig. 15(c)에 나타냈다. 이때 x 축 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.

위와 같은 연구결과를 종합해보면, C-스캔 이미지를 통해서 얻어진 파형을 어떤 주기적인 시간 함수 $x(t)$ 와 0부터 시작된 주파수 Base frequency ($f_0 = 1/T$)의 정수배에 해당하는 주파수로 이루어진 sin과 cos 함수의 무한합을 이용하여 MATLAB 프로그램으로 분석하고 구해진 주파수비의 크기로부터 복합적층판의 적층결함평가가 가능하였다.

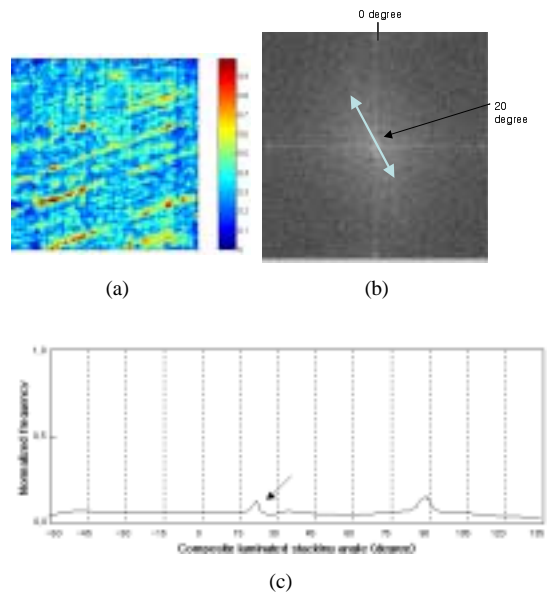


Fig. 15 Ultrasonic C-scan images for 20° defect angle specimen

4. 결론

본 연구에서는 CFRP 복합재 적층구조의 내부에 생기는 결함을 전자기(EMAT) 초음파를 이용하여 탐상기법을 제안하였다. 직교이방성 시험편을 이용하여 적층구조에 따라 전자기초음파실험을 실시하고 이론해석을 통하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CFRP 복합적층판의 적층배향에 EMAT 탐촉자에 발생하는 전단파가 매우 민감하여 유용함을 알 수 있었다.
- 2) CFRP 복합적층판의 적층결합평가에 전자기초 음파를 이용한 결과, 모델링과 실험결과가 다소의 오차가 발생하였다. 이것은 EMAT 탐촉자를 수동으로 회전하고 지그와 탐촉자 사이의 미소한 압력 변화, 시험편 내에서 발생한 감쇄, 빔확산, 반사굴절의 영향이라 사료된다.
- 3) 초음파 C-스캔 이미지를 통해서 얻은 2D-FFT 주파수 결합평가 방법은 CFRP 적층판의 적층 배향 정보를 통해 내부의 적층결합을 정량적으로 평가 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2004년도 산학협동재단 지원연구비에 의해 지원되었음.

References

- 1) K. H. Im, N. S. Park, Y. N. Kim and I. Y. Yang, "A Study on Impact Characteristics of the Stacking Sequences in CFRP Composites Subjected to Falling Weight Impact Loading," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.4, No.4, pp.203-211, 2003.
- 2) A. Rotem and H. G. Nelson, "Residual Strength of Composite Laminate Subjected to Tensile-Compressive Fatigue Loading," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol.12, No.2, pp.76-84, 1990.
- 3) R. E. Holland and J. W. Littles, Jr. "Ultrasonic Wave Propagation Characteristics of Environmentally damaged FRP Composites," *Review of Progress in QNDE*, Vol.20, pp.1066-1073, 2001.
- 4) S. I. Rokhlin, Q. Xie, Y. Liu. and L. Wang. "Ultrasonic Study of Quasi-isotropic Composites," *Review of Progress in QNDE*, Vol.18, pp.1249-1256, 1999.
- 5) O. D. Dokun, J. J. Laurence and M. H. Rami, "Ultrasonic Techniques to Quantify Material Degradation in FRP Composites," *Review of Progress in QNDE*, Vol.18, pp.1365-1371, 1999.
- 6) R. Omote, K. Ito and Kawashima, "3D-FEM Simulation and Visualization of Ultrasonic Wave Propagation in Anisotropic Solids," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.20, D. O. Thompson and D. E. Chimenti Editors, Plenum Press, New York, pp.718-723, 2001.
- 7) K. Urabe and S. Yomoda, "Nondestructive Testing Method of Fiber Orientation in Fiber Reinforced Composites by Microwave," *Bulletin of Industrial Products Research Institute*, No. 107, pp.11-21, 1987.
- 8) D. K. Hsu and B. A. Fische, "Application of Shear Waves for Composite Laminate Characterization," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.15, D. O. Thompson and D. E. Chimenti Editors, Plenum Press, New York, pp.1191-1198, 1996.
- 9) Y. M. Cheong, S. S. Kim, D. H. Lee and H. K. Jung, "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.
- 10) B. Y. Ahn, Y. J. Kim, Y. G. Kim and S. S. Lee, "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.