

CODF 개념을 이용한 CFRP 복합재료의 Fiber Orientation 측정기술연구

이 승 석* · 안 봉 영* · 이 재 락**

Fiber Orientation Determination of CFRP Composites using CODF Concept

S. S. Lee, B. Y. Ahn and J. R. Lee

Abstract The specific strength of the fiber reinforced composite material is closely related to the anisotropy of the material. For the quantitative characterization of the anisotropy in the composite material, applied was CODF concept which was extensively used in the metallic material. As the results, the anisotropy of the material could be quantitatively analysed from the measurement of the phase velocities of the angular dependent SH₀ waves.

1. 서 언

섬유강화 복합재료의 가장 우수한 특성인 높은 비강도(단위 중량당 강도)는 재료의 이방성(Anisotropy)과 불가분의 관계에 있다. 즉, 하중을 지탱하는 주요소인 섬유의 배열방향에 따라 복합재료 구조물의 최종 기계적 성질이 좌우된다. 따라서 실제 구조물의 이방성을 정확하게 측정할 수 있는 기술의 확립은 매우 중요하며, 섬유방향이 설계치로부터 벗어나는 정도에 따라 결함의 일종으로도 분류될 수 있다.

복합재료의 이방성을 연구하는 방법중의 하나는 복합재료가 거시적인 어떤 결정구조를 가지고 있다고 보는 관점이다. 일반적으로 Orthorhombic 구조를

가진다는 가정 아래에서 해석하면 오류가 없다. 따라서 각 방향에 따라 탄성계수가 달라지고 이에따라 각 방향에 따른 초음파 속도의 변화가 생긴다. 한편 금속 재료에서 요즈음에 많이 다루는 Crystallite Orientation Distribution Function(CODF)¹⁾ 개념을 복합재료 이방성 연구에 결부시켜 정량적으로 복합재료의 이방성을 고찰할 수 있다.

2. 이 론

다결정체에서 결정들의 선택적인 방향을 정량적으로 나타내어 주는 CODF 개념을 복합재료에 확대시키면 복합재료내에 존재하는 섬유의 방향성을 CODF

* 한국표준연구소, 비파괴시험연구소

** 한국화학연구소

접수 : 1990년 6월 28일

로 정량화시킬 수 있다. 여기서 CODF는 $W(\theta, \psi, \phi)$ 로 표시될 수 있으며 θ, ψ, ϕ 는 섬유가 복합재료 시편내에 어떤 방향으로 배열되고 있는지를 나타내는 Euler 각도이다. Roe^{2, 3)}가 Generalized Legendre Function(Z_{lmn})을 사용하여 CODF를 전개하였다.

$$W(\xi, \psi, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn}(\xi) e^{-im\psi} e^{-in\phi}$$

여기서 $\xi = \cos\theta$ 이고 W_{lmn} 은 ODC(Orientation Distribution Coefficient)라고 불린다.

요즈음 ODC의 초음파를 사용하여 결정하는 연구가 활발한데 그 기반이 되는 것은 ODC가 그재료의 탄성계수와 연관이 있다는 점이다. Cubic 단결정으로 구성된 Orthorhombic Symmetry 구조를 가지는 재료에 있어서는 W_{lmn} 중에서 $W_{400}, W_{420}, W_{440}$ 값만 알 수 있다면 결정체의 선택적인 방향이 초음파속도에 미치는 영향을 모두 결정할 수 있다.

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 복합재료에서는 Carbon이 Hexagonal 구조를 가지기 때문에 위의 $W_{400}, W_{420}, W_{440}$ 외에 W_{200} 과 W_{220} 이 더 필요하게 된다. 하지만 본 연구에 있어서는 절대적인 이방성 분석이 아니고 Fiber Orientation을 수치적으로 나타내어 줄 수 있는 방법으로써 ODC를 이용하기 때문에 ODC의 전 성분을 분석할 필요성이 없으며 실험관계상 쉽지도 않다. 따라서 Cubic 단결정으로 된 Aggregate에서 W_{440} 를 유도해내는 공식을 사용하여 섬유방향을 분석하는 것은 큰 무리가 따르지 않으리라고 본다.

Thompson 등이 Cubic 단결정으로 된 Orthorhombic 구조의 다결정체에서 섬유 방향으로 부터 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 방향으로 전파하는 SH_0 파의 속도를 측정하므로써 W_{440} 를 구하는 식을 유도했다.⁴⁾ 즉,

$$W_{440} = \frac{\sqrt{35} \rho}{16\pi^2 C} (V_{SH_0}^2(45^\circ) - V_{SH_0}^2(0^\circ))$$

여기서 SH_0 는 Fundamental Horizontally Polarized Shear Wave⁵⁾라고 하는 것인데, Plane Shear Wave와 속도가 같으며, 판파(Plate Wave)이다. 윗식에서 ρ 는 밀도, c 는 단결정의 탄성이방성을 나타내어 주는 탄성계수로써 Aggregate의 탄성계수를 계산하기 위하

여 적용된 평균 방법에 따라서 결정된다.

3. 실험 및 결과

실험에 사용된 시편은 세가지 종류의 CFRP 시편이다. 첫번째 시편은 8-ply 0° 의 Unidirectional Laminate 시편이고 두번째 시편은 9-ply로써 $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 의 Cross-ply Laminate 시편이고 세번째 시편은 9-ply로써 $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ$ 의 Quasi-isotropic Laminate 시편으로써 세 시편 모두 크기는 대략 가로 20cm, 세로 20cm, 두께 약 1mm 정도였다.

각 시편 공히 섬유는 일본 Toray사의 T-300 carbon을 사용하였으며 수지는 항공기용 수지인 MY 720+DDS를 사용하였으며 섬유 함량은 Unidirectional Laminate와 Cross-ply Laminate Quasi-isotropic Laminate 일 경우 동일하게 약 65% 였다.

SH_0 파를 발생시키기 위해서는 그림 1과 같은 System을 사용하였다. Transducer는 상용의 500kHz Shear Wave Transducer와 Lucite Wedge를 사용하여 최대한의 SH_0 파가 복합재료 내를 전파되고 수신되도록 하였다.

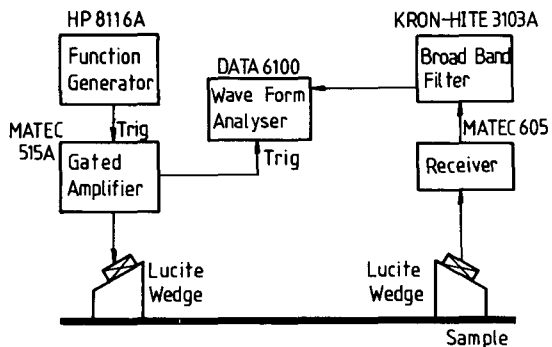


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up.

Function Generator에서 나온 500 kHz의 주파수를 가진 연속파가 Gated Amplifier를 동기시켜서 500 kHz의 Tone Burst가 발생하여 초음파변환기에 보내

진다. 복합재료 시편내에서 SH₀파로써 전파되어진 파는 다시 초음파변환기에서 수신되어 증폭되고 여파되어 100 MHz의 Waveform Analyser에서 분석되어진다. 각 시편공히 0° 방향으로 정해진 방향에서 전파길이를 변화시키면서 그때 나타나는 신호의 어떤 특정된 Cycle의 전파시간 차이를 측정함으로써 0° 방향의 속도를 알 수 있다. 그림 2에서는 한예로써 Quasi-isotropic Laminate에서 0° 방향으로 정해진 방향에서 전파 경로를 변화시켰을 때 나타나는 신호를 보여주고 있다. 이 그림에서 I7에서 I8, I9가 됨에 따라 전파길이가 길어지며, 이에따라 다소 파의 진폭이 줄어들고, 전파시간이 늘어나는 것을 알 수 있다. 진폭이 줄어드는 정도는 측정에 영향을 줄 정도로 심각하지는 않다. 그후 송신용 초음파변환기와 수신용 초음파변환기 사이를 일정거리 유지시킨 후 각 방향에 따른 전파시간의 차이를 측정하므로써 각 방향의 속도를 구할 수 있다. Unidirectional Laminate 시편에서는 0° 방향과 90° 방향이외의 각도에서는 이방성 재료에서 나타나는 Beam Deviation⁶⁾ 현상 때문에 거의 Signal을 확인할 수 없었다.

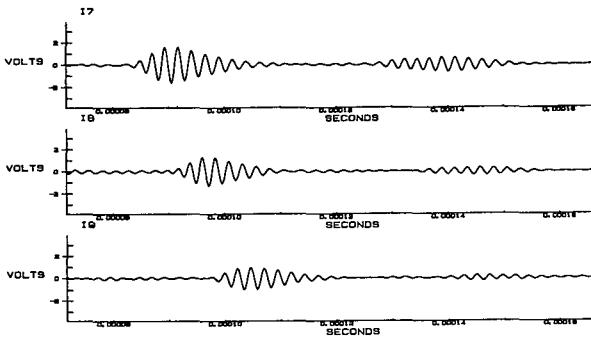


Fig. 2 Obtained wave signals as function of path length in quasi-isotropic laminate.

이 Beam Deviation 현상을 도시적으로 보여주고 있는 것이 그림 3⁷⁾이다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 등방성 재료내의 파의 전파는 에너지 전파 방향과 Wave Front 전파방향이 같다. 여기에 반해서 그림 3(b)와 같은 이방성 재료에서는 그재료의 대칭축 이외의 방향으로 파가 전파될 때 Energy 전파 방향과 Wave Front 전파 방향사이에서 θ 라는 각도 만큼 Deviation이 된다.

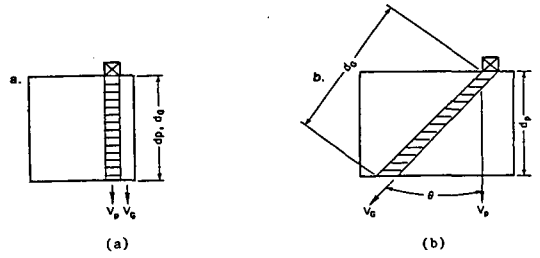


Fig. 3 (a) Wave propagation direction in an isotropic medium.
(b) Possible direction in anisotropic medium.

이 θ 는 그 재료가 가지고 있는 탄성 이방성과 전파 방향에 따라 결정된다. 본 실험에 사용된 Unidirectional Laminate 시편에서는 0° 방향과 90° 방향 이외에서는 분석이 가능한 신호를 얻지 못한 점으로 미루어 매우 큰 탄성 이방성을 가지고 있으리라고 추측된다. 정량적으로 Beam Deviation을 측정하기 위해서는 수신용 초음파변환기에서 어떤 정해진 위치에서 각도를 변화시키면서 수신하는, 우리가 사용한 방법보다 좀 더 개량된 수신용 초음파변환기가 필요하다. 하지만 0° 방향의 두 방향에서의 속도값이 0° 방향일 경우는 2.21×10^5 cm/sec이고 90° 방향일 경우는 2.20×10^5 cm/sec로서 거의 같다는 사실은 이 복합재료를 Orthorhombic Symmetry로 해석 가능하다는 것을 나타낸다. 왜냐하면 Orthorhombic Symmetry에서 전파방향과 분극방향이 서로 바뀐 두 횡파의 속도는 이론적으로 같기 때문이다. Cross-ply Laminate 시편에서는 Phase Velocity를 Polar Plot 시킨 그림 4에서 볼 수 있듯이 각 방향에서의 초음파 속도측정이 가능하였다. 예상했던 바와 같이 0° 방향과 90° 방향의 속도차이는 2.5% 정도로써 거의 비슷하다고 볼 수 있으며, 45°를 중심으로 대칭인 4-fold Symmetry를 보여 주었다. 상대속도를 이용하여 W_{440} 를 구하기 위한 식으로부터

$$W_{440} = 0.03746 \left(\frac{\rho}{C} \right) [V_{SH_0}^2(45^\circ) - V_{SH_0}^2(0^\circ)]$$

여기서 우리가 원하는 것은 절대적인 W_{440} 값을 구하고자 하는 것이 아니고, 같은 섬유를 같은 양만큼 사용하였을 때 섬유 배열방향의 이상을 W_{440} 라는 수

치로서 평가하고자 하는 목적이므로 π 와 C는 상수로 간주하여 $W_{440}(C/\pi)$ 값의 변화로써 섬유방향을 수치적으로 평가할 수 있다고 본다. 이때 $W_{440}(C/\pi)$ 단위는 cm^2/sec^2 이다. 따라서 본 실험에 사용된 Cross-ply Laminate의 $W_{440}(C/\pi) = 9.5668 \times 10^8$ 이다.

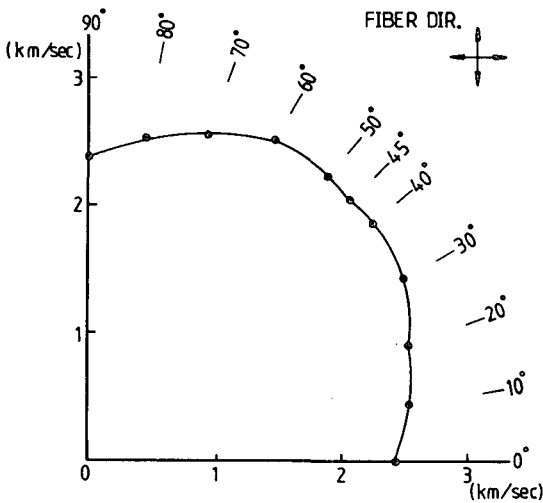


Fig. 4 Polar plot of the SH_0 wave velocities for the cross-ply laminate.

Quasi-isotropic Laminate에서 각 방향에 따른 Phase Velocity를 나타낸 Polar Plot를 그림 5에서 보였다. 시편은 Cross-ply Laminate에 비하여 좀더 Isotropic 하기 때문에 각 각도에 따른 초음파 속도 변화가 그림 5에서 볼 수 있듯이 크지 않았다. 신호 크기에 있어서도 Cross-ply Laminate에서는 30° 에서 70° 까지는 Signal Level이 줄어 들었는데 반해서 Quasi-isotropic Laminate 경우에 있어서는 각방향 모두 거의 일정한 Signal Level을 보였다. 0° 방향과 90° 방향에서 속도차이는 0.8% 정도였고, 최대로 속도차가 일어나는 지점은 20° 와 30° 부근에서 약 5% 정도 속도가 줄었다. Quasi-isotropic Laminate에서 $W_{440}(C/\rho)$ 를 구하면 -1.1284×10^8 이 된다.

Cross-ply Laminate의 $W_{440}(C/\rho)$ 의 값과 Quasi-isotropic Laminate의 $W_{440}(C/\rho)$ 값을 비교하여 보면 Quasi-isotropic Laminate의 경우 Cross-ply Laminate에 비해서 현격하게 작다는 것을 알 수 있다. 이

두 재료에서 같은 탄소섬유를 사용하였으며 섬유체 적비도 같으므로 (C/π) 는 같은 값을 가질 것이다.

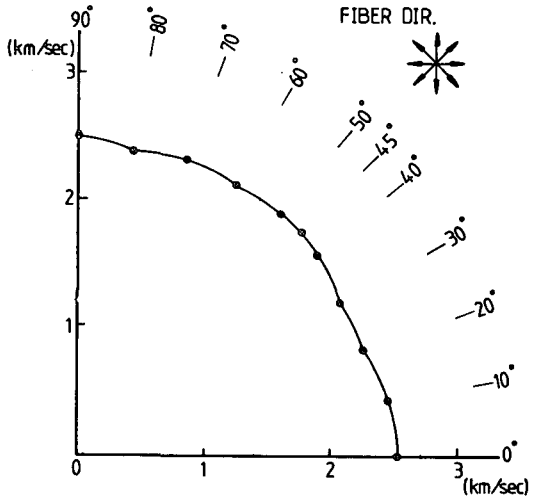


Fig. 5 Polar plot of the SH_0 wave velocities for the quasi-isotropic laminate.

따라서 어떤 복합재료에서 어떤 방향으로 섬유를 배열시키고자 할 때 그 재료에서의 $W_{440}(C/\rho)$ 를 측정함으로써 정량적으로 섬유 배열 상태를 평가할 수 있다.

4. 결 론

얇은 복합재료를 Orthorhombic Symmetry라고 가정할 때, 복합재료 판을 따라서 전파하는 SH_0 wave (Fundamental Horizontally Polarized Shear Wave)를 사용하여 각 방향에 따라서 변하는 Phase Velocity를 측정하여 복합 재료내에 존재하는 Fiber Orientation을 정량적으로 평가할 수 있다.

References

1. H. -J. Bunge., Texture Analysis in Materials Science, Butterworths, (1982).
2. R. -J. Roe., J. Appl. Phys, vol. 36(1965), pp. 20 24~2031.

3. R. -J. Roe., J. Appl. Phys vol. 37(1966), pp. 20
69~2072.
4. R. B. Thompson, J. F. Smith, S. S. Lee, and G.
C. Johnson., Met. Trans, vol. 20A(1989), pp. 24
31~2447.
5. C. F. Vasile and R. B. Thompson, J. Appl. Phys,
vol. 50(1979), pp. 2583~2588.
6. R. E. Green, JR., Treatise Materials Science and
Technology vol. 3, Academic Press, (1973).
7. W. R. Rose, S. I. Rokhlin, P. B. Nagy, and L.
Adler., Nondestructive Characterization of Mate-
rials II, Plenum Press(1986), pp. 61~68.