

직교이방성 복합적층판의 초음파 탐사에 관한연구

나승우*(조선대 대학원 기계설계공학과), 임광희(우석대 자동차공학과)
양인영(조선대 기계공학부)

A Study on the Inspection of Orthotropy Composite Laminate plates Using Ultrasonics

S. W. Ra(Mech. Eng. Dept., CSU), K. H. Im(Mech. Eng. Dept., USU), I. Y. Yang(Mech. Eng. Dept., CSU)

ABSTRACT

This work exhibits how susceptible 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 modeling solutions which were 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 :CFRP(carbon fiber reinforced plastics)탄소섬유강화 복합재,Ultrasonic wave(초음파),Shear wave(횡파) Each(에코),Transmitted pulse(송신펄스),Using Ultrasonic(초음파탐사)

1. 서론

최근 우주항공 구조용 재료로서 많이 이용되고 있는 선진 복합재료 중에서도 탄소섬유강화재(carbon fiber reinforced plastics: CFRP)는 비강성,비강도가 크며, 금속 재료에 비해서 중량을 20~50% 정도 감소시킬수 있다는 장점이 있기때문에 경량화가 요구되는 여러분야 즉,자동차의 Leaf spring,범퍼,원심분리기의 회전축,항공기 압축기의 동익,헬리콥터의 회전익등 항공우주산업을 비롯하여 여러분야에서 응용이 시도되고 있다 [1]. 그러나 복합재 제작시 섬유배열에 의한 이방성과 비균질 구조를 가질수 있으며, 복잡한 제조 공정 등으로 인하여 내부결함의 발생확률이 높은 단점이 있다 [2]. 또한 사용 중에도 예기치 않은 손상에 의해 그 성능이 설계기준 이하로 떨어질 수가 있다. 특히 CFRP 복합적층판의 제조과정은 적층재두께와 배향각도에 따라 제작하지만, 적층시 발생된 미끄럼이나 오차로 인하여 적층배향에 영향을 미칠 수 있다.

현재까지 복합재 적층판의 시험평가방법은 면내

물성치 및 섬유배향을 검사하기위해 Leaky 판파와 경사입사투과법 등을 이용한 기법이 개발되어 여러 가지 비파괴기법이 적용이 되고 있다 [3]. 그러나 이러한 방법은 후판의 경우 즉 다층으로 적층배향으로 이루어진 경우에 대하여 결과를 해석하는데 어려움이 있을 뿐만아니라 산란이 되고 경사 입사초음파형의 높은 감쇄로 인하여 면내적층에 적용하기 쉽지는 않다.

또한, 일방향재 CFRP의 섬유방향을 결정하기 위하여 Urabe 와 Yomoda [4]는 섬유방향에 따라 일방향재의 등방성 방향에 있어서 전기적인 이방성에 근거를 두었으며 또한 Komsky 등[5]은 두꺼운 복합적층판에 초음파 전단파의 상호작용에 관한 예는 있지만, 실제로 미소한 변화가 있는 CFRP적층판에 관한 초음파전단파를 이용해 전단파감도에 따른 정량적인 연구결과를 찾아보기 힘들다. CFRP 적층재에 있어서는 비교적 감쇄가 작은 전단파를 이용하면 복합적층판의 내부적층구성을 탐사하는데 우수하다.

따라서, 본 연구에서는 적층수 및 매트릭스는 같고 적층배향이 다른 CFRP시험편을 초음파 전단파를

이용하여 적층구성 배향오차 및 플라이구성을 검출하고자 하며, 또한 전단파가 시험편을 통과할 때 플라이 대 플라이인 전단파의 플로라이제이션(polarization) 벡터조합의 모델링을 개발하고자 한다.

2. 초음파 이론해석

일방향재 플라이로 구성된 CFRP 복합적층판의 적층배향오차를 구하기 위하여 초음파 전단파를 이용하는 적층배향오차 탐사모델링을 개발하였다. 여기에서 이용된 전단파는 시험편의 표면에 평행하고 서로 수직으로 이루어지며 일방향재 CFRP의 플라이는 직교방향으로 물성치를 가지고 있다. 이 경우에 전달되는 전단파는 섬유에 수직성분과 평형성분이 각 플라이를 통하여 전파되며 시간에 따라 변화되는 벡터로 모델링화할 수 있다. 플라이 대 플라이 벡터분해모델을 이용하면 전단파가 시험편 두께방향으로 전파되며 각 적층재를 통하여 각 이산성분을 시간변화진폭으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서 플로라이제이션(polarization)모양으로 모델링하기 위하여 전단파에 대해 범례를 CFRP 판에 대해 0° 방향으로 정의 되는 기준축을 먼저 정의 하며, 트랜스듀서와 플라이배향의 방향을 기준축으로 하며, 이동각은 시계방향으로 나타냈으며 범례는 다음과 같다. N은 적층판의 플라이의 수이다. θ_T 은 송신탐촉자의 위치각이다. θ_i 은 i번째 플라이의 적층배향각이다. θ_R 은 수신탐촉자의 위치각이다. $\Delta\theta_i$ 은 각계면에서 배향의 변화이다($\Delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_1$)

2.1 첫 번째 플라이 분해(decomposition)

초음파 전단파펄스 ST은 기준축의 각 θ_T 에서 송신탐촉자에 의해 발생하며 Fig. 1(a)와 같이 첫 번째 플라이면에서 접촉매질을 통해 전파한다.

이 전단파는 접촉매질의 신호감쇠로 인한 진폭 $ST e^{-\gamma}(t)$ 를 갖으며, 시간변화는 접촉매질을 통한 전파속도에 의해 나누어진 접촉매질 두께와 같다. 이 신호는 첫 번째플라이에서 섬유에 대한 평행과 수직인 방향에서 $\Delta\theta_1 = \theta_T - \theta_1$ 각을 통하여 2개의 성분으로 분해된다.

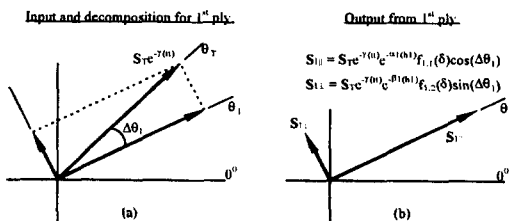


Fig.1 Polarized shear wave propagation using vector decomposition through the first ply

$$S_{Te^{-\gamma}(t)} e^{-\alpha_1(M)} f_{1,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) [\Delta t = (t)/v_r + (h_1)/v_a]$$

i번째 플라이의 플로라이제이션 형태인 전단파의 평행성분은 다음과 같다.

$$S_{Te^{-\gamma}(t)} e^{-\beta_1(M)} f_{1,2}(\delta) \sin(\Delta\theta_1) [\Delta t = (t)/v_r + (h_1)/v_\beta]$$

2.2 수신탐촉자의 투사

$$S_R = S_{Te^{-\gamma}(t)} e^{-\gamma}(t) \times (e^{-\alpha_1(M)} e^{-\beta_1(M)} f_{2,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) \cos(\Delta\theta_R) + e^{-\beta_1(M)} e^{-\alpha_1(M)} f_{2,2}(\delta) \sin(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \cos(\Delta\theta_R) - e^{-\alpha_1(M)} e^{-\beta_2(M)} f_{2,1}(\delta) \cos(\Delta\theta_1) \sin(\Delta\theta_2) \sin(\Delta\theta_R) + e^{-\beta_1(M)} e^{-\alpha_2(M)} f_{2,2}(\delta) \sin(\Delta\theta_1) \cos(\Delta\theta_2) \sin(\Delta\theta_R))$$

각 벡터는 원래의 벡터가 변화하는 시간 ST에 스카라항목을 곱하고 새로운벡터에 일치하는 Δt 를 변화시킴으로써 구성했다. 수신탐촉자에 대한 플로라이제이션 전단파의 평행한 성분은 eq.(3)과 같다.(Fig.2)

플라이 대 플라이 벡터분해모델은 일방향플라이로 구성하고 있는 복합재료의 초음파시험에 매우 유용하다. 이론방법을 적용에 있어서 플라이 대 플라이 벡터분해모델을 비파괴시험에 실용적으로 적용하기 위해서 몇가지 가정을 하여 수정모델을 제안하였다.

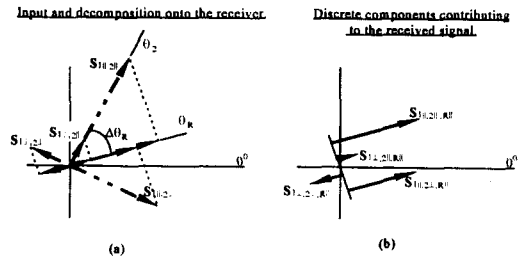


Fig.2 Polarized shear wave propagation using decomposed components projected onto receiver

2.3 수정모델

다층·다방향으로 구성된 CFRP 복합적층판을 이용한 벡터분해 기법을 모델링 하기 위해서는 매우 길고, 또한 계산이 복잡하다. 벡터 분해 모델링을 할 때 이산화된 성분의 수가 2N의 지수함수적으로 증가한다. 이론모델을 몇가지 가정과 간소화하여 수정하였다. 예를 들어 손실이 적은 계면과 빗박산을 무시하였다. 다음은 동일한 재료로 이루어져 있고 모든 플라이가 구속되어져 있어 h_i, α_i 및 β_i 는 각플라이에서 같다고 가정하면 다음과 같다.

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

여기에서

$$h = h_1 \cdots h_N, \quad \alpha' = \alpha_1(h_1) \cdots \\ \alpha_n(h_n), \quad \beta' = \beta_1(h_1) \cdots \beta_n(h_n), \quad S_\alpha \\ = 1/v_\alpha \text{ 및 } S_\beta = 1/v_\beta$$

3. 모델링 실험검증

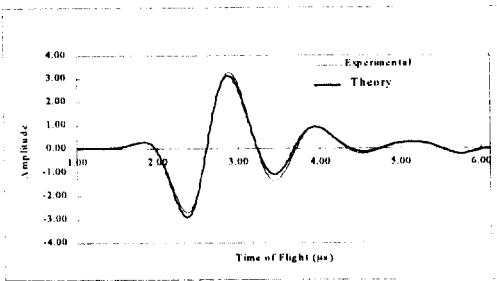


Fig. 3 Comparison of experimental and modeled shear wave transmission signals

본 실험에서 플라이 대 플라이 벡터분해모델의 타당성을 검증하기 위하여 33플라이인 CFRP 시험편을 이용하였으며 이 시험편에 전단파를 발생시켰다. 시험편의 적층구조는 $[2(90_3, 0_3), 90_3, \theta_3, 90_3, 2(0_3, 90_3)]$ 이다. Fig. 3는 송신 및 수신 트랜스듀서가 서로 수직이고 90° 각도로 CFRP 적층판을 회전할 때, 실험결과와 모델링 결과를 비교하였다. 여기에서 실선은 이론값을 나타내고 있으며, 점선은 실험값을 나타냈으며 잘 일치하였다.

4. 실험방법

4.1 CFRP 시편 제작

본 실험에서 사용한 재료는 일방향 Carbon fiber/epoxy 프리프레그 (한국화이버(주) CU 125NS) 로써 오토클레브(Auto-clave)를 이용하여 일방향으로 적층하여 제작하였다. 시험편의 적층순서는 $[2(90_3, 0_3), 90_3, \theta_3, 90_3, 2(0_3, 90_3)]$ 으로 하였으며 적층수는 33ply 으로하였다. 여기에서 각도 θ 를 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 및 90° 의 7종류의 CFRP 적층판을 임의적으로 제작하여, 일정한 섬유함유율과 시험편 치수의 변동을 억제하며 필요이상의 수지가 낭비되지 않도록 별도 제작한 금형(200mm×200mm)을 사용하여 복합재료판을 경화온도 130°C 까지 가열하였으며, 경화시간은 90분 으로 하였고, 온도측정은 열

전대에 의해 측정하였다.

또한, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1} Pa 까지 진공시킨후 컴프레서에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^{-5} Pa 정도 가압시켜 성형하였고, 성형후 다이아몬드 커터로 절단하여 시험편 모양으로 가공하였으며 시험편의 측면을 습식 연마지 #1000, 사상한후 $100 \times 120\text{mm}$ (폭×길이)이며 적층판의 두께는 4.45mm이다.

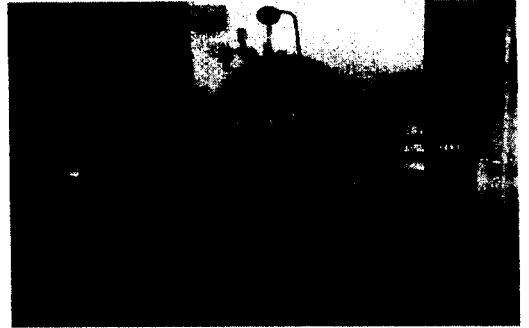


Fig.4 Auto-clave thermostet cure cycle

4.2 실험장치 및 구성

시험편 및 트랜스듀서를 지지하기위해 2개의 $200 \times 200 \times 6.35$ (폭×길이×두께)mm의 Al판을 이용하여 고정구를 제작하였다. Al판에는 시험하는 도중에 두 개의 트랜스듀서가 일치선이 되기 하기위해 중앙에 직경 18.00mm의 원공을 가공하였으며 판에 정렬을 시키기위하여 각 모서리에 직경 6.50mm의 구멍을 가공하였다

투과법인 수신·송신트랜스듀서가 일치되게 하기위하여 극그리이드를 각판의 외부에 부착한다.

이 극그리이드는 CFRP 복합적층판을 일치시키는 데 사용된다. 고정구는 송신트랜스듀서 면판위에 시험편 면을 먼저 설치하고 극그리이드의 0° 축과 일치시킨후에 조립한다. 4개 볼트중에 2개는 판의 반대 모서리를 통하여 삽입하고 수신 탐촉자 판을 CFRP 적층판쪽으로 향하게하고, 나비너트를 볼트에조인다. 나머지는 두개의 볼트를 삽입하고 이 고정구는 가볍게 움직인다.

점성이 높고 꾸로 구성된 (SWC, Panametrics) 접촉매질을 고정구내에 18.00mm 원공안으로 삽입될 트랜스듀서의 면에바른후 시험편을 고정시킨다. 그리고, 초음파 시험을 하기위한 장치는 파형을 디지털화하고 PC와 상호 호환이되는 디지털오실로스코프 (Lecroy 9310A)와 펄서/리시버 (Xactex XU-2240)를 이용하였다.

Panametrics 사에서 제작된 접촉매질을 이용해 CFRP적층재와 연결하여 전단파 트랜스듀서(V153)을

이용해 전단파를 발생하여 측정한다.

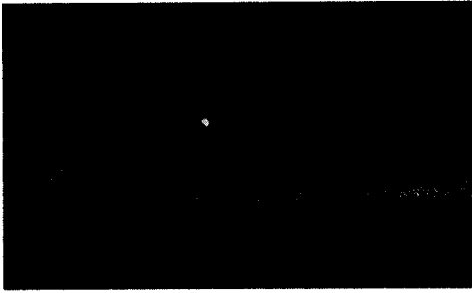


Fig.5 Experimental method using two shear wave transducers

5. 실험결과 및 고찰

5.1 CFRP 적층판의 벡터분해법결과

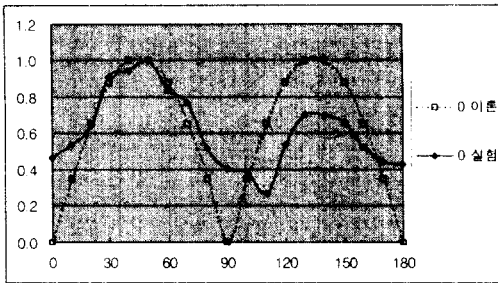


Fig. 6 CFRP composites with 0° misorientation

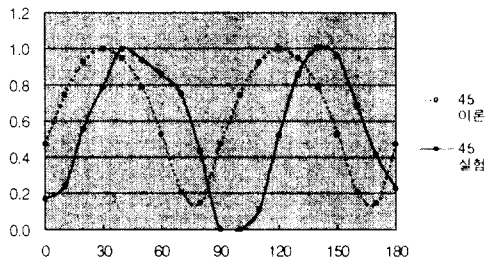


Fig. 7 CFRP composites with 45° misorientation

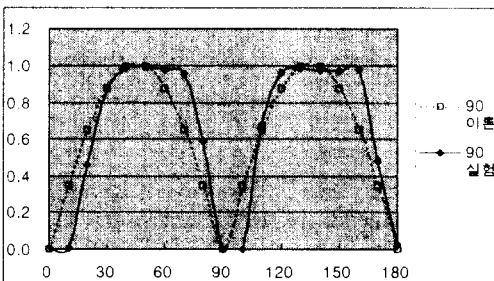


Fig. 8 CFRP composites with 90° misorientation

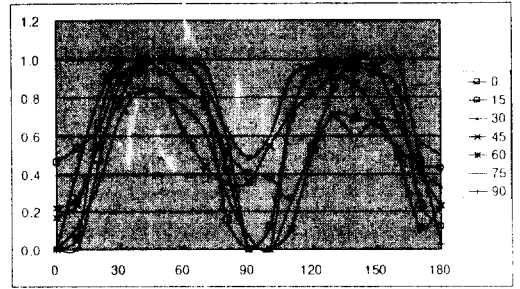


Fig.9 Angular sensitivity of experimental measured crossed shear wave transmission amplitude

본 연구에서 제시된 CFRP 적층판에 초음파 전단파의 상호작용의 모델링결과와 실험결과의 윤곽은 잘 일치하고 있지만 피크점 부근에서는 다소 차이가 나타났다. 이 원인은 겹촉매질의 상태, 송신·수신 트랜스듀서의 커플링상태뿐만 아니라 시험편에서의 감쇄, 빔확산 및 반사굴절 등의 영향이 다소 미쳤다고 사료된다.

4. 결론

적층배향오차가 있는 CFRP 복합적층판의 두께방향으로 전단파거동을 송신·수신 트랜스듀서를 이용하여 극좌표형식으로 스캔을 하고 그리고 플라이 대 플라이 벡터분해기법을 이용해 모델링화 하였다. 이 모델링의 신뢰성을 확보하기 위해서 실험값에 대하여 검증실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFRP 복합 적층판의 품질평가를 위하여 초음파 전단파를 이용하였으며, 전단파 발생을 위한 송신·수신 트랜스 듀서의 탐촉각은 90 인 경우가 가장 민감하게 나타남을 알수있었다.
2. 초음파 전단파는 CFRP 적층판의 섬유 배향에 따라 감도가 크게 나타남을 알수있었다.
3. 전단파 벡터 분해기법을 이용한 CFRP 복합 적층판의 품질평가 시스템을 구축하였다.

참고문헌

1. O. Ishai and A. Shragi, 1990, "Effect of Impact Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP Laminated Beams", Composite Struct., 14-4, pp. 319-337.
2. K. Urabe and S. Yomoda, 1982, "Non-Destructive Testing Method of Orientation and fiber Content in FRP Using Microwave", Progress in Science and Engineering of Composite, pp. 1543-1550.
3. 임광희, 정현조, 양인영, "탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 초음파 비파괴평가에 관한연구", 한국복합재료 학회지, 제 11권, 제 5호, pp.56~64, 1998