
광섬유 센서를 이용한 복합적층판의 층간분리좌굴 탐지

노희석* • 공철원 • 강현규 • 홍창선 • 김천곤(한국과학기술원) •
전승문(국방과학연구소)

1. 서 론

복합재료는 일반적으로 사용되는 금속재료에 비해 높은 비강도와 비강성을 가지므로 경량화가 요구되는 구조물, 특히 항공기 구조물에 많이 이용되고 있으며 적용범위 또한 넓어지고 있는 추세이다.

복합재료 적층구조물을 항공기의 날개, 동체의 외피구조 그리고 항공기용 엔진의 압축기 블레이드 등에 사용하는 경우에 항공기가 이륙하거나 비행할 때 작은 돌이나 새, 우박 등에 의해 외부로부터 충격을 받을 수 있다. 탄환이나 고속총돌에 비해 충격에너지 정도가 상대적으로 낮은 '저속충격'에 복합재 구조물이 노출되어 있을 경우 충격을 가한 표면에서는 육안으로 충격여부를 알 수 없는 경우가 많다. 탄성영역을 초과하는 충격에너지를 외부로부터 받을 때 소성변형을 함으로써 에너지를 흡수하는 금속재료와는 달리, 복합재료는 탄성 변형에너지를 초과하는 하중을 받게 되면 소성변형이 거의 없어 손상이 발생하게 되어 기계적 성질 저하가 초래된다. 저속충격에 의한 손상은 충격표면에서는 거의 발생하지 않으나 충격을 가한 면의 반대쪽이나 구조물 내부에 층간분리나 기지균열 등의 손상형태로 발생한다. 복합재구조의 손상 중 층간분리는 균열이 적층판을 이루는 단층들의 경계에서 발생하는 것으로, 층과 층 사이의 굽힘강성 불일치가 주된 원인이라고 알려져 있다. 실제 구조물에 가해지는 저속충격에 의해 구조물 내

에 발생한 다층 층간분리는 압축하중을 받는 경우 좌굴하중의 감소를 가져오므로 복합재 구조물 설계시에 이를 고려하여야 한다. 따라서 저속충격으로 발생하는 다층 층간분리의 좌굴거동을 실험적으로 관찰하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 광섬유 센서를 복합재 적층판에 삽입하여 충격에 의해 발생한 층간분리의 압축시 거동을 관찰하였다.

2. 광섬유 센서 시스템

빛의 간섭을 이용하여 센서를 구성하는 방법은 동일한 광원으로 부터 두 개의 서로 다른 경로를 만들어 두 빛의 경로차, 즉 위상차에 의해 간섭이 발생하는 원리를 이용한다. 본 연구에서 사용한 광섬유 센서는 EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer) 센서이며, 광원으로부터 입사된 빛이 EFPI 센서 감지부에 위치한 두 개의 거울면에서 반사하여 간섭을 발생시키도록 한 센서이다. 구조물에 적용된 EFPI 센서는 두 개의 거울면 사이의 거리가 구조물의 변형에 의해 변함으로써 빛의 간섭 무늬가 발생한다. 그리고 신호처리를 통하여 이 간섭 신호를 구조물의 변형을 측정할 수 있는 물리량으로 변환시킨다.

EFPI는 끝단을 수직으로 절단하여 유리관에 삽입하고 유리관의 반대쪽에도 역시 또 하나의 반사면 역할을 하도록 광섬유를 수직으로 잘라 삽입하여 제작한다. 따라서 변형에 의해 두 반사면 사이의 거리가 변하면 두번째 반사

면에서 반사된 빛의 세기가 달라지므로 인장을 받으면 반사된 빛의 세기가 감소하므로 간섭 무늬의 포락선(envelope)이 점차 감소하며, 압축을 받으면 반사된 빛의 세기가 증가하므로 간섭 무늬의 포락선이 점차 증가하는 현상을 한다. 따라서 간섭 무늬에 대한 포락선 크기의 증가/감소에 따라 구조물의 압축/인장을 감지할 수 있다.

본 연구를 위해 구성된 광섬유 센서 시스템은 두개의 EFPI 센서를 동시에 사용할 수 있도록 제작되었다. 광원인 레이저 다이오드(laser diode)는 파장이 1305nm이고 최대 출력이 0.25mW인 Lasertron사의 QLM35855 모델을 사용하였다. 광섬유의 단면에서 반사가 일어나 역방향으로 진행되는 빛이 레이저 다이오드에 재입사되는 경우 신호의 왜곡을 유발시키므로 재입사 방지를 위해 격리기(isolator)를 사용하였다. 광섬유 내부를 전파하는 빛을 분할하고 결합하는 장치인 2 × 2 광섬유 양방향 연계기(bidirectional coupler)가 사용되었으며 광검출기를 이용하여 광섬유 센서의 광신호를 받아 전기적 신호로 변환하였다. 또한 광섬유 센서 시스템 내부와 외부의 센서를 연결하기 위해 FC/APC형의 연결기를 사용하였다. 레이저 다이오드의 빛의 세기는 입력 전류에 의해 좌우되므로 전류의 안정적인 공급이 필수적이다. 그림 1은 충격과 정전기에 취약한 광학 장치들을 안전하고 다루기 쉽게 하기 위해 회로로 꾸미고 아크릴 상자로 광섬유 센서 시스템을 구성한 모습이다. 이 시스템 안에는 레이저 다이오드와 격리기, 두 개의 2 × 2 광섬유 양방향 연계기, 2개의 광검출기가 포함되어 있다.

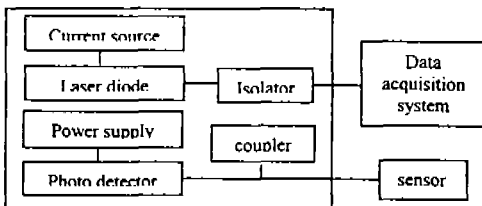


Fig. 1. Fiber optic sensor system

3. 실험

3-1. 재료

본 실험에 사용한 시편은 ㈜한국 카본에서 생산한 graphite/epoxy 프리프레그(pre-preg) 모델 CU-125NS를 사용하여 제작하였으며 재료상수는 Table 1과 같다. 프리프레그의 두께는 약 0.125 mm이며 실험에 사용된 적층판은 $[0_4/45_4/90_4/45_4/0_4]_T$ 이다.

Table 1. Material properties of HFG CU-125NS

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber dir.	E_1	130.0GPa
Elastic moduli in transverse dir.	E_2, E_3	10.0GPa
Shear modulus in 1-2 and 1-3	G_{12}, G_{13}	4.85GPa
Poisson's Ratios	ν_{12}, ν_{13}	0.31

3-2. 충격실험 및 C-scan

충격실험용 시편은 한 변이 길이가 10cm인 정사각형으로 뚫린 강철지지대에 볼트로 고정되어 고정지지 경계조건을 만족시키게 된다. 시편에는 광섬유 센서가 삽입되어 있는데 위치는 그림 2와 같다.

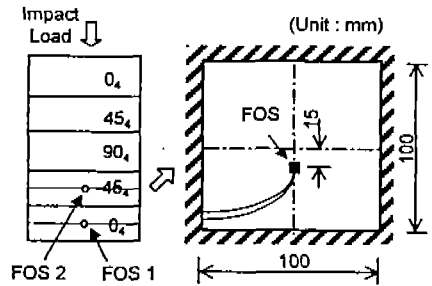


Fig. 2 Location of fiber optic sensors

충격시험기는 중량 낙하식(drop-weight)이며 시편에 충격을 가하는 충격체는 재질은 강철이며 끝단은 직경이 12.7mm인 반구형이다. 실험에서는 4.5J의 충격에너지를 시편에 가하였다.

충격하중에 의해 복합재 평판의 내부에는 충격손상이 발생하게 되는데 초음파 탐상법을 이용하여 층간분리(delamination)의 분포 및 면적을 검출하였다.

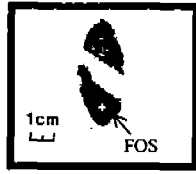


Fig. 3 Delamination area 45/0

그림3에는 복합재 평판의 두께방향으로 투영하여 광섬유 센서의 위치와 충격후면에서 가까운 45/0의 손상면적을 나타낸 것이다.

3-3. 압축실험

충격손상을 갖는 시편의 압축실험을 위하여 폭 102, 높이 160mm으로 충격후 시편을 연마하였다. 압축실험에 사용된 지그는 하중이 가해지는 면은 고정지지이며 하중이 가해지지 않는 면은 단순지지이다. 시편에는 광섬유 센서의 신호와 비교하기 위해서 시편표면에 변형률 게이지를 부착하였으며 그림4와 같다. 그림5에는 지그에 물린 시편의 형상을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 것처럼 지그의 윗면 고정단과 양 옆면의 단순 지지부 사이로 삽입된 광섬유를 보호하기 위해 튜브가 삽입되어 있음을 알 수 있다.

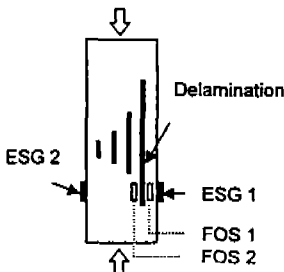


Fig. 4 Location of ESG and FOS

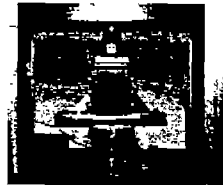


Fig. 5 Compression Test

충격하중에 의해 층간분리가 복합재 구조물 내에 발생된 시편에 압축하중을 가하여 층간분리 거동을 관찰하였다. 다음의 그림들은 압축실험시에 시편내에 삽입된 광섬유 센서와

시편표면에 부착된 변형률 게이지로부터의 신호를 나타내는 실험결과이다.

시편 FOIC-1의 결과인 그림 6에서 변형률 게이지 신호를 살펴보면 A점까지는 압축상태에 있으며 A점을 지나면서 좌굴이 발생하였음을 알 수 있다. 변형률 게이지1을 보면 A점에서 층간분리 좌굴이 발생하여 과도한 압축변형을 하였음을 알 수 있다. A점까지 압축변형을 하던 변형률 게이지2는 A점 이후 인장변형을 하고 있다. 위의 변형률 게이지1과 2로부터 좌굴이 발생한 지점이 A점이라는 것을 알 수는 있으나 어느 층의 층간분리가 좌굴을 일으켰는지에 대해서는 알 수 없다. 이것이 표면에 부착한 변형률 게이지의 한계이며 이를 극복하기 위하여 광섬유 센서를 복합재 적층판에 삽입하여 층간분리 좌굴을 관찰하였다. 광섬유 센서1의 신호에서 A점까지는 포락선(envelope)이 증가하고 있으므로 압축변형을 하고 있는 것이며, A점 이후로는 센서가 기능을 다하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이것의 원인은 A점 이후에 발생한 과도한 압축변형은 광섬유 센서1의 간극을 볼게 하여 제대로 된 신호검출을 불가능하게 하였기 때문이라 판단된다. 광섬유 센서2의 신호는 A점까지는 계속 압축변형을 하다가 A점 이후부터는 많은 정현파와 함께 포락선이 커짐을 볼 때 큰 압축변형률을 가짐을 알 수 있다. 그림 7은 위 센서들로부터의 신호를 해석한 뒤 좌굴거동을 그린 것이다. 층간분리에 의한 좌굴은 45°와 0° 층간면에서의 층간분리에 의한 것임을 알 수 있다.

시편FOIC-2의 결과인 그림 8에서 층간분리 면적이 가장 큰 층간면과 가까운 표면에 부착된 변형률 게이지1의 신호는 A지점에서 국부 좌굴이 발생한다. 광섬유 센서1은 A점까지는 압축변형을, 그 이후로는 인장변형을 하며 광섬유 센서2는 B점까지 압축변형을 하며 B점 이후부터는 인장변형을 보이고 있다. 위의 광섬유 센서의 신호를 분석하였을 때 층간분리에 의해 국부 좌굴이 A점에서 발생하였으며

압축하중을 지지하던 나머지 층들도 B점에서 좌굴이 발생하였음을 알 수 있다. 신호의 해석 결과, 예측되는 좌굴거동을 그림 9에서 나타내고 있다.

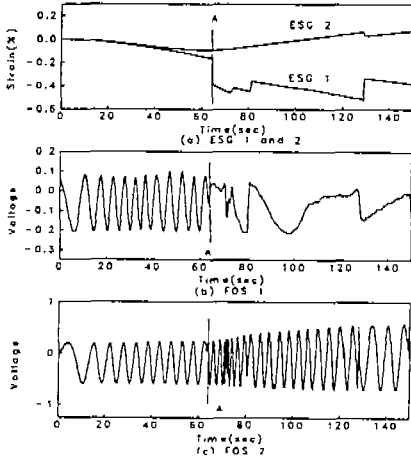


Fig. 6 Signals from FOIC-1

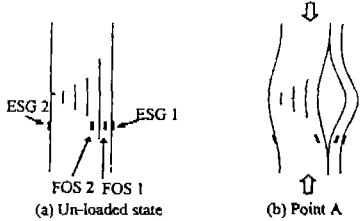


Fig. 7 Predicted buckling behavior of FOIC-1

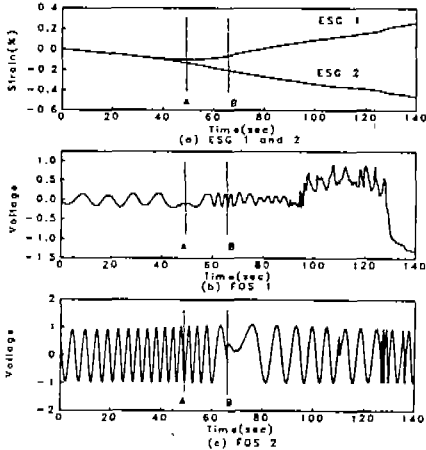


Fig. 8 Signals from FOIC-2

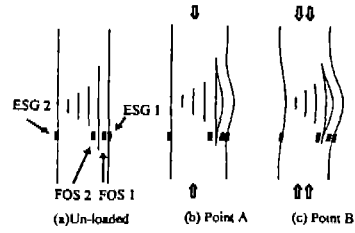


Fig. 9 Predicted buckling behavior of FOIC-2

4. 결론

충격하중에 의해서 복합재 구조물 내에는 다층 층간분리가 발생되며 이는 압축하중을 받을 때 층간분리 좌굴거동을 보인다. 광섬유 센서를 복합재 적층판 내부에 삽입하여 기존의 변형을 계이지로는 측정할 수 없었던 다층 층간분리 좌굴거동을 모니터링 하였으며 이를 통해 복합재 구조물의 실시간 층간분리 손상 탐지에 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 98 장기기초과제(과제번호:ADD-98-5-002)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 제위께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 권태훈, 공철원, 홍창선, 김천곤, "초음파 탐상법을 이용한 복합적층판의 저속충격손상 평가", 한국복합재료학회 추계학술발표회 논문집, pp.63-66, 서울대학교, 1997
2. 박중완, 경우민, 류치영, 강현규, 홍창선, 김천곤, 전승문, "복합재 보의 층간분리좌굴과 진전시 광섬유 센서의 신호특성에 관한 연구", 한국항공우주학회 제26권, 제1호, 1998