

FBG 센서를 이용한 UAV 복합재 날개 구조물의 구조 건전성 모니터링 기법 연구

장병욱, 이연관, 김천곤

초 록

복합재 구조물에서 발생하는 저속 충격에 의한 손상은 대부분 복합재의 내부나 충격을 받은 면의 반대 면에서 발생하기 때문에 검출이 쉽지 않아 시간이 지날수록 구조물이 위험에 처할 확률이 높아진다. 하지만 기존의 비파괴검사 방법은 일정한 주기에 따라 수행되기 때문에 즉각적으로 충격 손상을 감지할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 이러한 단점을 극복하고자 비파괴검사 장비를 구조물 내에 탑재하여 실시간으로 구조물의 건전성을 확인하는 개념인 구조 건전성 모니터링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중의 하나인 충격 모니터링 시스템은 운용 중에 발생한 충격 이벤트를 감지하고 그 위치 및 손상 정도에 대한 정보를 제공해 주어야 하는데, 이는 충격 정도를 대략 인지하고 대처할 수 있는 조종사가 없는 무인 항공기 분야에서 그 필요성이 클 것으로 판단된다. 운용 중 발생하는 충격 이벤트에 대해 그 위치를 예측하여 향후 효율적인 비파괴 검사를 위한 정보를 제공할 수 있고, 임무 수행 중 충돌에 의한 치명적인 손상을 입었을 경우 운용자에게 보고하여 구조물의 생존성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 이를 위한 첫 번째 단계로 복합재 평판 및 복잡한 복합재 시편 구조물에 FBG 센서를 부착하여 충격 위치 검출 시험을 수행하였고, 이를 통해 개발된 알고리즘을 실제 복합재 무인기 날개에 적용하여 실 구조물에 대한 활용성을 검증하였다. 또한 항공기의 주된 충격 원인 중 하나인 조류 충돌 모사 시험을 수행하여 조류 충돌 지점을 예측하는 연구를 수행하였다. 다음 단계로 복합재 시편에 대해 충격 파손 시험을 수행하여 손상 발생 유무를 예측하는 시험을 수행하였다. 저속 충격에 의해 발생하는 음향 파는 (주)파이버프로에서 개발한 고속 FBG interrogator를 사용하여 4 개의 다중화된 FBG 센서로부터 동시에 취득하였고, 신경회로망을 이용한 학습을 거쳐 충격 발생 위치를 검출하였다. 또한 충격 파손 시험으로부터 취득한 음향 파의 웨이블릿 변환을 통해 충격 손상의 발생 유무 예측 가능성을 확인하였다.

KEY WORDS: 충격 위치 검출 (impact location detection), 충격 손상 유무 검출 (damage occurrence detection), 복합재 날개 구조물 (composite wing structure), FBG 센서 (fiber Bragg grating sensor), 고속 FBG interrogator (high-speed FBG interrogator)

1. 서론

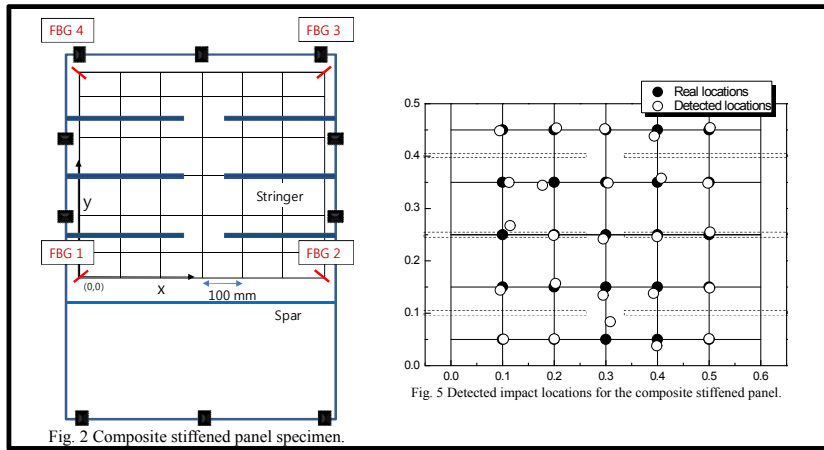
복합재료는 높은 비강성, 비강도 및 우수한 피로 특성 등을 가지고 있어 구조물의 경량화에 유리하기 때문에 무게 절감이 필수적인 항공우주구조물에 대한 적용이 활발히 진행되고 있다. 하지만 재료의 특성상 기계적, 열적, 물리적인 이방성(anisotropy)을 가지고 있어 원하는 물성을 가지도록 구조물을 설계할 수는 있으나, 설계에 따라 재료의 역학적 특성이 달라지고 파손 특성이 복잡해 진다는 단점이 있다. 그리고 제조 공정에 따른 물성치 편차도 발생할 수 있기 때문에 재료의 특성에 대한 완벽한 이해가 어렵다. 따라서 현재의 민간 항공기(commercial aircraft) 분야에서는 완전히 금속재료를 대체하지는 못하고 있으나, 상대적으로 인명 피해에 대한 위험이 적고, 임무 수행을 위한 효율성 및 신속성이 요구되는 무인 항공기(unmanned aerial vehicle, UAV) 분야에서 그 적용이 빠르게 이루어지고 있다.

하지만 복합재 항공기는 장기간의 운용 경험이 부족하여 구조물의 정비 및 유지 보수와 관련해서는 비효율적인 방법들이 사용되고 있다. 현재의 비 파괴 검사 방법들은 시간과 비용이 많이 소요되고 운용을 멈춘 상태에서 수행해야 하기 때문에 구조물을 효율적으로 운용할 수 없게 된다. 특히, 복합재의 경우는 손상을 발견하는 것이 어려워 의심이 가는 지역을 모두 검사해야 한다는 치명적인 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 구조 건전성 감시 기법(structural health monitoring, SHM)이 제안되었고, 이는 현재의 추세인 상태 기준 검사(condition-based inspection)를 위한 필수적인 기술로 주목 받고 있다. 또한, 개별적인 항공기에 대한 지속적인 상태 점검 및 효율적인 비 파괴 검사를 위한 자료를 제공할 수 있기 때문에 향후 부가 가치가 높은 분야로 판단된다.

본 논문에서는 이러한 구조 건전성 감시 기법의 일종인 충격 모니터링(impact monitoring)에 관한 연구를 다루고 있다. 복합재료의 경우 저속 충격에 의한 손상은 복합재 내부에 주로 발생하고, 그 정도가 심각하더라도 외부에는 거의 흔적을 남기지 않기 때문에 일정 시간 내에 발견하지 못할 경우 구조물에 치명적인 손상으로 진전될 수 있다. 유인 항공기의 경우는 외부의 충격을 조종사가 어느 정도 감지하여 대처할 수 있지만, 무인 항공기의 경우는 이가 불가능하기 때문에 실시간으로 충격 위치를 감지하고 손상 유무를 평가하는 시스템이 구축된다면 구조물의 생존성 향상은 물론 효율적인 유지 보수가 가능할 것으로 판단된다. 특히 본 연구에서 사용한 광섬유 센서는 외부의 전자기적 환경에 영향을 받지 않고, 넓은 영역에 분포하더라도 큰 부피를 차지하지 않기 때문에 기존의 전자식 센서에 비해 실제 적용 가능성이 높다는 장점을 가지고 있다.

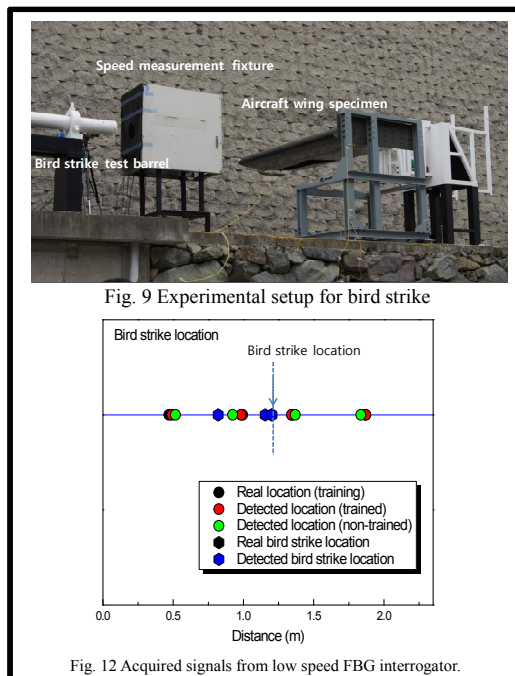
본 논문에서는 광섬유 센서 기반의 충격 신호 취득 시스템을 구축하고 이를 이용한 실제 크기의 무인기 복합재 날개에 대한 충격 위치 검출 시험, 조류 충돌 모사 시험 및 충격 파손 검출 시험을 통해 실 구조물에 대해 적용성이 높은 충격 모니터링 기법 연구를 제안하였다. 본 논문 요약 본에는 각 시험에 대한 주요 성과들을 간략하게 정리하고, 본 연구의 의의에 대해 간단히 기술하도록 하겠다.

2. 충격 위치 검출 연구



실 구조물에 위한 충격 위치 검출 알고리즘을 개발하기 위해 복합재 단순 평판, 복합재 보강 패널에 대한 충격 위치 검출 시험을 수행하였다. 기존의 연구에 비해 시스템 구성이 간단한 (주) 파이버 프로 상의 고속 FBG 시스템을 이용하여 $400 \times 400 \text{ mm}^2$ 의 영역에 대해 4 개의 FBG 센서가 있는 하나의 광섬유 라인을 통해 충격 신호를 취득하였으며 신경회로망 학습을 통해 성공적인 위치 검출을 수행하였다. 이 과정에서 개발된 충격 위치 검출 알고리즘을 실제 크기의 복합재 무인기 날개 윗 면에 적용하였고, rib과 stringer 등이 포함된 복잡한 영역임에도 불구하고 작은 오차 범위에서 충격 위치가 검출되는 것을 확인할 수 있었다.

3. 조류충돌 모사 시험



복합재 항공기, 특히 무인기에 대한 충격 모니터링 기법에는 조류충돌에 의한 충격 이벤트 감지도 포함되어야 한다. 조류충돌의 발생 빈도가 높은 날개 앞전(leading edge)에 충격 거동 FBG 센서를 부착하고 조류를 모사하기 위해 젤 타입의 충격체를 사용하여 조류충돌 모사 시험을 수행하였다. 총 3 번의 시험을 수행하였고, 광섬유 센서 라인의 파손 없이 조류충돌에 의한 신호 획득에 성공하였다. 획득된 신호를 이용하여 조류충돌이 발생한 지점을 근사한 오차로 예측할 수 있었다. 또한 앞전 스파에 부착된 정적 거동 FBG 센서를 통해서 취득한 신호를 통해서 주파수 대역에 따른 조류충돌 신호의 특성을 비교하였다.

4. 충격 파손 검출 연구

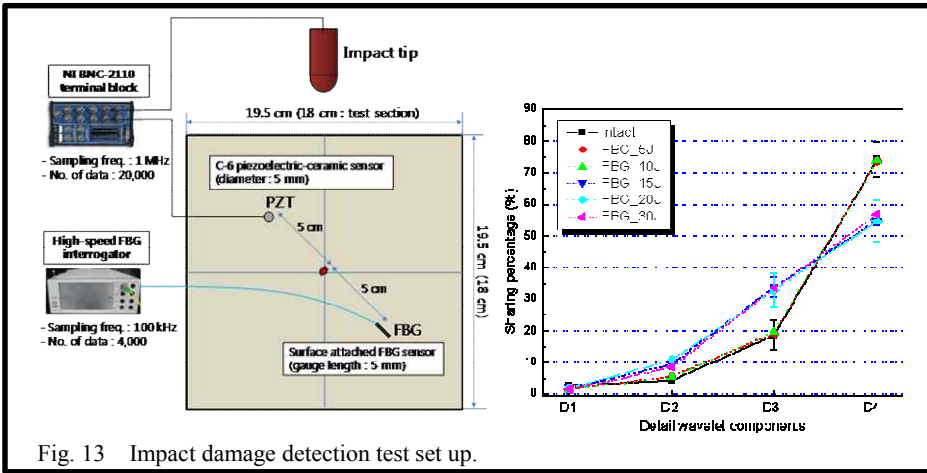


Fig. 13 Impact damage detection test set up.

충격 모니터링에
는 충격 이벤트에
대한 위치 검출도
중요하지만, 실시간
으로 충격에 대한
파손 여부를 예측하
여 사용자가 대비할
수 있게 해야 한다.
이를 위해 파손이
발생할 정도의 충격
을 가하고 앞서 구

성된 시스템을 이용하여 취득된 센서 신호로부터 파손을 검출할 수 있는지 확인해 보았다. 시간-주파수 분석 기법을 통해 파손 발생에 따른 주파수 성분 대역을 확인하였고, 각 주파수 성분비를 통해 파손 유무를 판단하는 기법을 제안하였다. 이는 비록 초기 단계이지만 본 연구에서 사용한 고속 FBG 센서 시스템으로부터 취득한 신호의 정량적인 분석을 통해 충격 파손 여부를 판단하는 것이 가능함을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 즉, 충격 위치 검출에 사용되는 센서 시스템을 활용하여 파손 유무를 검출할 수 있기 때문에 간단하면서도 적용성이 높은 충격 모니터링 시스템을 구축하였다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 복합재 구조물의 안전한 운용과 효율적인 유지/보수에 필수적인 충격 모니터링 기법의 실 적용 가능성을 높이기 위해 상용화된 고속 FBG 센서 시스템을 이용한 충격 위치 검출 및 파손 유무 판단 기법의 개발을 수행하였다. 기존에는 고주파 신호 취득에서는 다중화가 불리하였던 FBG 센서의 단점을 극복한 (주) 파이버프로의 시스템을 이용하여 스트링거가 포함된 복잡한 구조물에서의 충격 위치 검출에 성공하였고, 비교적 낮은 주파수 대역을 가진 신호로부터 파손 여부를 판단할 수 있는 신호 처리 기법을 제안하였다. 시편을 이용한 실험실 단위에서의 연구 검증 후 실 구조물로의 적용성을 검증하기 위해 앞서 검증한 충격 위치 검출 알고리즘을 실 UAV 날개 구조물에 적용하여 검증하는 실험을 성공적으로 수행하였다. 시스템 구성이 복잡했던 기존의 연구들에 비해서 매우 간단한 시스템 구성으로 수행 가능하기 때문에 향후 실 구조물로의 적용성이 높은 충격 모니터링 기법이라고 판단된다.

후기

본 연구는 국과연 응용연구(UC080019JD)에 의해 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.