

## 복합재료 파괴특성

洪 昌 善 / 한국과학기술원(KAIST)  
항공우주공학과 교수

**고등복합** 재료(advanced composite material)는 비강성 및 비강도가 커서 항공기등 비행체 구조물의 경량화로 인한 성능향상을 기대할수 있기 때문에 사용범위가 계속 증대하고 있습니다.

특히 항공기 구조물의 경량화에 의한 성능향상을 최대로 하기 위해서는 복합재료의 사용을 2차구조물에서 1차구조물로 확대하여야 합니다.

높은 신뢰도를 가지고 복합재료를 항공기 구조물에 적용하기 위해서는 복합재료의 파괴특성 및 파괴역학이 완전히 규명되어야 하며, 이에 기초해 구조물의 설계 및 운용에 효율적인 손상허용(damage tolerance)개념이 적용되어야 합니다.

손상허용 설계를 위해서는 매우 방대한 양의 데이터가 필요하며 효율적인 손상평가 방법이 확립되어야 합니다. 복합재료 구조물의 손상허용 설계와 관련하여 복합재료 구조물의 충격에 의한 파괴특성을 살펴보면 다음과 같습니다.

복합재료 적층구조물이 항공기의 외부 구조물로서 사용될 때, 비행시나 이착륙시에 새나 우박 또는 작은 돌 등에 의해 충격을 받을수

있습니다.

또한 구조물의 제작과정이나 제작후 보수과정에서 작업자의 실수로 공구나 공구상자를 낙하시켜 복합재료 적층구조물에 충격을 가할수 있습니다.

그러므로 외부 물체로 인해 충격을 받을수 있는 구조물에 복합재료 적층구조물을 사용하는 경우, 충격으로 인한 손상을 고려해서 설계해야 하며, 이를 위해서는 충격손상을 평가하고 허용할수 있는 설계의 기준이 시급히 정립되어야 합니다.

저속충격으로 인한 손상허용설계의 기준을 정립하기 위해서는 저속충격 후의 손상형태 및 강도저하 예측, 저속충격 후의 하중이력에 따른 손상진전 등에 관한 연구가 수행되어야 합니다.

이번 연구에서는 복합재료 적층구조물의 손상허용설계에 관련된 기초자료를 제공하고, 특히 항공기 구조물의 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해 항공기 복합재료 구조물이 외부로부터 저속충격을 받았을 때 복합재료 적층구조물에 발생하는 문제에 관하여 연구하고자 합니다.

이를 위한 구체적인 연구내용은 저속충격시 복합재료 적층구조물에 발생하는 충격거동의 해석과, 충격손상의 해석 및 손상에 대한 평가, 그리고 충격후의 잔류 압축강도 등에 관하여 연구를 수행하였습니다.

또한 이러한 연구를 위해 중량낙하식 저속충격시험장치를 직접 설계해 제작하였습니다.

복합재료 적층구조물에 외부로부터 저속충격이 가해졌을 때, 야기되는 문제를 해석하기 위해서는 먼저 충격으로 인해 발생하는 적층구조물의 충격거동을 해석해야 합니다.

이를 위해서는 충격시 발생하는 충격하중을 결정해야 하며, 이 과정에서 충격하중과 압입과의 관계를 나타내는 적절한 압입법칙을 적용해야 합니다.

또한 충격시 발생하는 적층판의 처짐은 충격지점에서 국부적으로 대처짐 현상을 보이므로 이를 해석하기 위해서는 적층판에 대하여

대처짐이론을 적용해서 비선형해석을 해야 합니다.

충격시 적층판에 발생하는 손상은 적층판의 변형 모드 중에서 굽힘변형 모드와 전단 변형 모드에 의해 주로 발생합니다.

이번 연구에서는 적층판의 충격거동을 해석하고, 충격시 적층판의 내부에서 발생하는 응력의 해석을 위해 수정된 Hertz의 접촉법칙을 적용해서 먼저 충격하중을 결정하였습니다.

미지의 양인 충격하중을 결정하기 위해 매 시간증분 별로 반복수행기법을 적용해서 동적 해석을 수행하였습니다.

또한 적층판에 국부적으로 발생하는 대처짐 현상을 고려하기 위해 von-Karman의 대처짐 이론(large deflection theory)을 적용해서 비선형해석을 수행하였으며, 적층판의 내부에서 발생하는 횡전단변형도를 정확하게 평가하기 위해 고차횡전단변형을 고려한 판이론을 사용하였습니다.

충격거동에 대한 해석결과의 정확성을 살펴 보기 위해서 실험적으로 얻은 결과와 비교해 보았습니다. 충격실험은 연구과정에서 제작한 중량낙하식 충격시험기를 사용해 수행하였습니다.

실험결과와 비교한 결과를 살펴보면 대처짐을 고려해 비선형해석한 결과는 대처짐을 고려하지않고 선형해석한 결과에 비해 충격하중의 계산에 있어서 실험결과와 잘 일치하는 결과를 얻었습니다.

충격으로 인해 발생하는 여러 손상 모드 중에서 층간면에서 발생하는 층간분리는 특히 충격후의 강도저하에 영향을 미치는 것으로 알려져 있습니다.

따라서 충격후의 잔류강도를 해석적으로 평가하기 위해서는 먼저 충격시 발생하는 층간 분리영역을 해석적으로 정확하게 평가할수 있는 기법이 필요합니다.

그러나 층과 층사이에서 발생하는 층간분리를 해석적인 기법을 적용해 직접적으로 평가한다는 것은 계산과정에 있어서 매우 방대하고

복잡한 양태를 띠게 됩니다.

그런데 충격시 발생하는 적층판의 충격손상은 기지균열이 먼저 발생하며 이로부터 층간 분리가 유도되는 것으로 알려졌습니다.

따라서 이번 연구에서는 충격시 발생하는 층간분리영역을 평가하기 위해 층간분리의 발생 여부를 직접적으로 결정하지 않고 충격시 발생하는 기지균열을 먼저 평가하고자 하였습니다.

충격으로 발생하는 기지균열을 해석적으로 평가하기 위해서는 적절한 파손기준식을 적용해야 합니다. 그런데 복합적층판이 면내 인장하중을 받을때, 기지균열이 발생하는 인장강도는  $90^\circ$ 층의 두께에 따라서 변하는 것으로 밝혀졌습니다.

따라서 기지균열을 평가하기 위한 파손기준식으로  $90^\circ$ 층에 작용하는 여러 응력중에서 기지방향으로 작용하는 인장응력과 전단응력만을 고려하는 2차원적인 파손기준식을 적용하였으며, 적용된 인장강도는  $90^\circ$ 층의 두께에 따라 변하는 값을 사용하였습니다.

여기서 적용된  $90^\circ$ 층의 두께에 따라 변하는 인장강도는 균열의 발생이 시작되는 변형도를 유한요소법에 파괴역학적인 개념을 적용해서 해석적으로 구하였습니다. 또한 해석적으로 구하여진 crack onset strain을 실험결과와 비교하였으며 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었습니다.

충격손상이 잔류강도에 미치는 영향을 살펴 보기 위해 손상영역과 잔류압축강도와의 관계를 실험적으로 구하였습니다.

또한 C-scan등의 비파괴검사를 통한 2차원적 손상평가와 3차원적인 손상평가와의 차이를 규명하기 위해 탈층기법을 적용해서 실험적으로 3차원적인 손상평가를 시도하였습니다.

현재 평가된 잔류강도는 대개 2차원적으로 평가된 손상면적과의 관계를 연구하고 있는데, 실제 충격시 발생하는 손상은 3차원적인 분포를 나타내므로 층간분리를 2차원적인 방법과 3차원적인 방법으로 모델링해서 잔류강도와의 관계를 실험적으로 살펴보았습니다. \*