

층간분리가 존재하는 복합재료 적층판의 마이크로 볼트 수리 후 좌굴하중에 관한 인자 연구

1. 서론

복합재료 구조물은 항공우주산업분야 뿐만 아니라 경량화가 필요한 자동차, 풍력, 스포츠 분야 등 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 과거 설계 및 제작기술의 부족으로 복합재료는 우수한 기계적 특성에도 불구하고 일부 군용 항공기나 상업용 항공기의 이차구조물에만 제한적으로 사용되었다. 그러나 최근에는 설계 및 제작기술의 발달과 함께 연비향상의 필요성이 대두되면서 일차구조물로의 적용이 활발히 이루어지고 있으며 대표적으로 Boeing 787은 항공기 전체 중량의 50%를 복합재료를 이용하여 제작되었다.

일반적으로 얇은 프리프레그를 적층하여 제작되는 복합재료 구조물의 특성상 두께 방향으로 보강섬유가 배치되지 않기 때문에 상대적으로 강도와 강성이 떨어지는 태생적 한계를 가지고 있다. 외부에서 탑승교 부착, 정비 중 공구낙하, 우박 등과 같은저속충격(Low-velocity impact)이 가해지면 외부결함은 보이지 않으나 적층판 내부에서 층과 층이 분리되는 층간분리가 쉽게 발생하게 된다. 따라서 복합재 적층구조물의 층간분리를 방지하고 수리하기 위한 방법은 많은 연구자들의 관심사항이 되어 왔다.

층간분리를 방지하기 위한 기술로는 두께방향으로 보강섬유를 삽입하는 Stitching, 두께방향으로 요철 핀 등을 삽입하여 보강하는 Z-pinning이 있으며, 프리프레그를 사용하지 않고 3차원 직조기술을 활용하여 층간분리를 방지하는 Braiding, Knitting, Weaving 등에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

그러나 어떠한 형태로 제작하였더라도 일단 층간분리가 발생하게 되면 해당 구조물은 반드시 수리되어야 한다. 복합재 구조물을 수리하는 방법은 크게 접착 수리법과 기계적 체결 수리법으로 구분할 수 있다. 접착제를 사용하여 수리할 경우 주로 복합재 스카프 패치로 손상영역을 대체하게 되는데 응력집중과 무게 증가를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 스카프-패치 수리법은 수리공정이 까다롭고, 스카프 각이 작을수록 높은 강도 회복률을 얻을 수 있는 수리법의 특성상 구조물의 두께가 두꺼울 수록 손상영역에 비하여 많은 모재를 제거해야하는 단점이 있다. 또한 많은 경우의 접착제가 진공과 더불어 고온, 고압에서 경화할 것을 권장하고 있다. 따라서 접착을 위한 가장 이상적인 조건은 오토클레이브 경화이지만 일체형으로 제작되는 복합재료 구조물의 특성상 큰 구조물을 오토클레이브를 이용하여 수리하는 것은 현실적인 어려움이 따른다.

기계적 체결법은 결함영역에 외부 패치를 볼트나 리벳으로 체결하는 방식으로 수리하는 방법을 의미한다. 일반적으로 기계적 체결 수리는 접착 수리에 비해 비교적 수리 공정이 간단한 장점이 있는 반면, 홀 가공 후 볼트나 리벳으로 체결하는 수리법의 특성상 반드시 구멍이 가공되어야 한다. 따라서 구멍에 의한 응력집중현상이 발생하고, 패치 및, 볼트와 리벳으로 인하여 무게가 증가하는 문제점이 있다. 최근 학계에 보고된 바에 따르면, 통상적인 기계적 체결재 대신 마이크로미터 수준의 직경을 가진 볼트를 사용하여 기계적 체결수리법이 가지는 통상적인 단점을 보완하면서 층간분리를 수리하는 방법에 대해 연구를 수행하였다. 0.6 mm 지름의 황동 마이크로 볼트를 이용하여 45 mm x 45 mm의 층간분리를 가지는 적층판을 수리한 후 압축시험을 수행하여 최대 90%까지 좌굴하중을 회복할 수 있음을 시험과 유한요소해석으로 보였다. 일반적으로 층간분리가 발생하게 되면 균열이 길어질수록 좌굴하중은 급감한다. 해당 연구에서 활용된 시편은 균열의 길이가 45 mm로 작아서 다양한 볼트 레이아웃의 효과를 보기가 어려웠다. 또한 두께 15.24 μm 의 테프론 필름을 사용하여 층간분리 균열을 만들었기 때문에 균열선단이 자연 균열선단 대비 날카롭지 않은 문제가 있었다. 균열선단의 곡률반경은 응력확대계수(stress intensity factor)에 직결되기 때문에 결과적으로 층간분리 균열 성장에 중요한 변수가 된다. 균열을 수리할 때 볼트에 인장이나 전단하중이 걸리게 되는데 볼트의 재질도 중요하다. 선행연구에서 사용한 황동의 경우 강성과 강도가 작아 쉽게 파손이 발생하는 문제점이 있었다.

따라서 1 mm 내외의 작은 지름의 볼트를 복합재 적층판의 층간분리 수리에 사용하기 위해서는 스틸 등과 같이 현장에서 사용되는 고강도 고강성의 볼트를 사용하여 광범위한 파라메트릭 연구(parametric study)를 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 층간분리가 존재하는 복합재 적층판을 다양한 형태의 마이크로 볼트 배치로 수리한 후 수리 후 좌굴거동의 변화를 관찰하였다. 선행연구 대비 층간분리를 60

mm로 확장하여 총 5가지 서로 다른 볼트 배치 및 지름에 대한 좌굴하중 회복률을 연구하였으며 볼트의 재질을 황동에서 스틸로 변경하여 좌굴하중 회복률에 대한 볼트 강성과 강도의 효과를 살펴보았다. 또한 스틸 볼트의 직경을 0.6, 1.0, 1.2 mm로 변경하면서 볼트 직경의 효과를 연구하였다. 선행연구에서는 두께 15.24 μm 의 테프론 필름을 사용하여 층간분리를 생성하였으나 본 연구에서는 시편 성형 후 균열을 성장시켜 균열선단을 자연 균열의 선단과 동일하게 만든 다음 압축시험을 수행하였다.

2. 시험 및 유한요소해석

시험에 사용된 시편은 SK Chemical사에서 제작한 일방향 프리프레그(unidirectional prepreg)인 USN-125B를 이용하여 제작되었고 적층순서는 $[45/0/-45/90]_{45}$ 이다. 시험에는 Instron 5582 정적 재료시험기를 사용하였고 0.5 mm/min의 속도로 하중을 가하였다. 형상별로 각각 5개의 시편을 제작하여 총 35개의 시편에 대한 시험을 수행하였으며 시편의 형상을 Fig. 1에 보였다.

본 연구에서는 균열의 길이, 볼트의 재질, 지름 및 배치, 볼트와 모재 사이의 틈(clearance)의 효과로 총 5가지 변수(parameter)를 이용하여 시험을 수행하였다. 0.6 mm 지름의 볼트는 손으로 움직이지 않을 때까지 토크를 가하여 시편에 설치하였고, 1.0, 1.2 mm 지름의 볼트의 설치를 위해서는 토크드라이버를 이용하여 각각 5.2, 10.5 N·cm의 토크를 가하였으며 수리에 사용된 볼트의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

시험 결과의 분석과 검증을 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 상용코드인 ABAQUS를 이용하여 비선형 해석을 수행하였다. Fig. 3에 보인 바와 같이 상, 하부 적층판을 3차원 요소인 C3D8R 요소를 사용하여 별도로 모델링 한 후 층간분리 영역을 제외한 나머지 부분에는 Tie constraint를 설정하여 상, 하부 적층판이 완전하게 접촉되어 움직이게 하였다. 또한 층간분리 영역의 상, 하부 적층판에 hard contact를 설정하여 상호 간섭이 발생하지 않도록 하였다. 볼트를 이용한 조인트 문제를 3차원 요소를 이용하여 해석하는 방법에는 볼트와 구멍을 모두 fully 3차원 요소로 모델링하는 방법과, 볼트를 등가의 강성을 갖는 Connector 요소를 이용하여 이상화하는 두 가지 방법이 있다. 본 연구에서는 해석방법을 정하기 전에 풀 3D 모델과 Connector 요소 모델을 이용한 해석을 모두 수행하여 그 차이를 비교하였다. Connector 요소 모델의 Fastener flexibility는 Grumman, Huth, Swift가 제시한 방정식을 바탕으로 계산하였다.

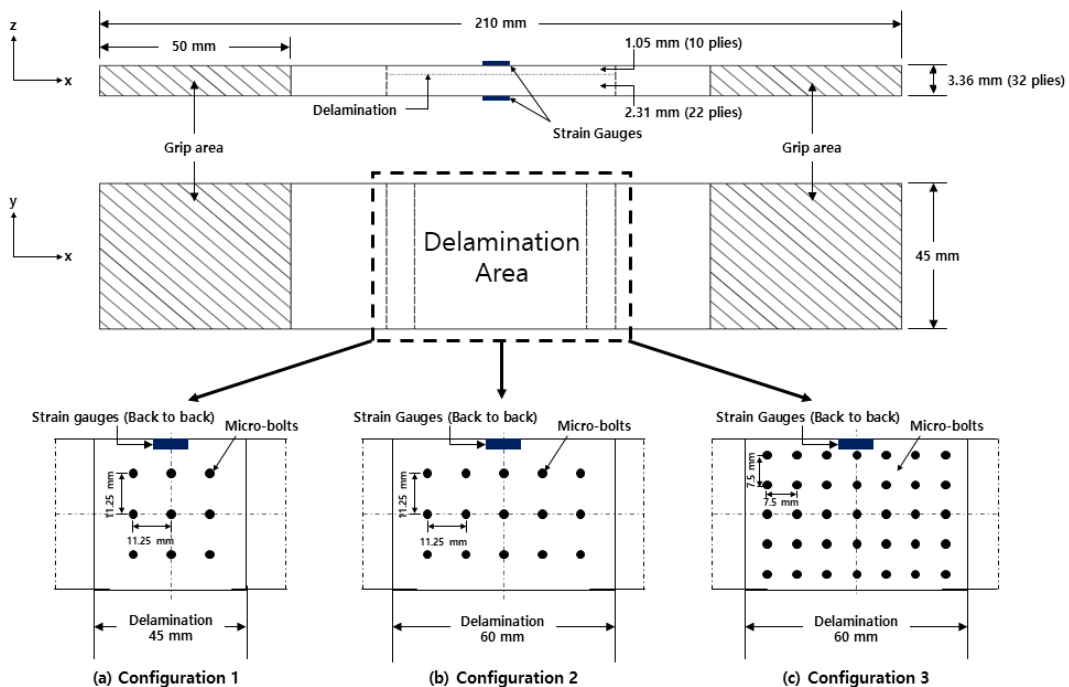


Fig. 1. Specimen configuration

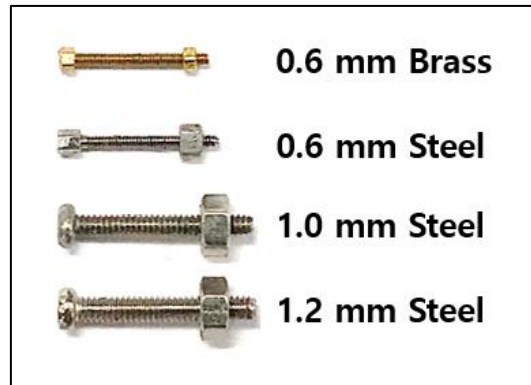


Fig. 2. Micro-bolts and nuts

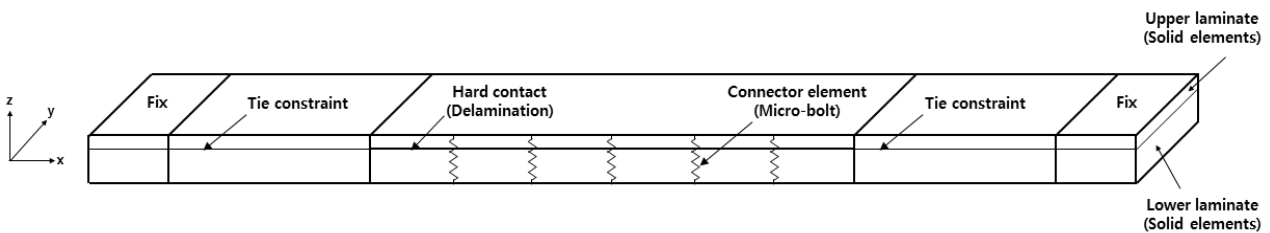


Fig. 3. Finite element idealization for bolt

3. 결론

본 연구에서는 층간분리가 발생한 복합재료 적층판을 마이크로 볼트로 수리할 때 층간분리의 크기, 볼트의 재질, 수 및 배치, 지름 등이 적층판의 좌굴하중에 미치는 영향을 실험과 유한요소해석을 이용하여 연구하였다. Fig. 4(a)는 수리되지 않은 시편의 시험 및 유한요소해석에 의한 좌굴모드, Fig. 4(b)는 마이크로 볼트를 이용하여 수리된 시편의 시험 및 유한요소해석에 의한 좌굴모드를 나타내었으며 수리된 시편의 경우 유한요소해석에서 connector요소로 이상화하여 해석한 좌굴모드와 Full 3D 모델을 이용하여 해석한 좌굴모드를 모두 나타내었다.

층간분리 크기의 효과를 연구하기 위해 크기가 45 mm와 60 mm인 층간분리를 가진 적층판을 동일한 재질과 크기를 가진 볼트로 수리한 후 시험을 수행하였다. 볼트 사이간격을 동일하게 하여 볼트개수를 증가시켰음에도 불구하고 좌굴하중 회복률은 90%(45 mm)와 75%(60 mm)로 층간분리의 크기에 따라 큰 차이를 나타냈다. 볼트 재질의 효과를 살펴보기 위해 60 mm 층간분리를 가진 적층판을 동일한 지름과 수의 두 종류(황동, 스틸) 볼트를 사용하여 수리한 후 좌굴시험을 수행한 결과 강성과 강도가 큰 스틸 볼트를 사용한 경우의 하중 회복률이 6.8% 가량 더 높게 나타났다. 그러나 스틸과 황동의 탄성계수 E가 각각 200 GPa와 50 GPa인 점을 고려하면 체결재의 강성이 수리 구조의 좌굴하중과 정비례하지는 않음을 알 수 있다. 또한 적절한 볼트 배치를 찾기 위해 스틸 볼트의 수(15, 20, 35, 88, 266개)와 배치를 달리하여 적층판의 좌굴하중을 유한요소해석으로 구하였다. 볼트의 수가 증가할수록 좌굴하중이 올라가지만 홀 가공 비용과 홀로 인한 유효단면적 감소를 고려할 때 볼트만으로 좌굴하중 회복률을 100%까지 올리는 것은 불가능함을 확인하였다. 볼트 직경이 좌굴하중에 미치는 효과를 살펴보기 위해 35개의 스틸 볼트의 직경을 0.6, 1.0, 1.2 mm로 변경하면서 시험과 해석을 수행하였다. 그러나 기대와 달리 0.6 mm 볼트를 사용한 경우와 1.2 mm 볼트를 사용하여 수리한 적층판의 좌굴하중 차이는 1.3 kN(0.6 mm 볼트수리 대비 6.8%)에 불과하였으며 이는 큰 지름의 볼트를 사용함으로써 발생하는 적층판의 유효단면적 감소효과와 볼트 체결을 위한 구멍을 가공하는 과정에서 의도하지 않게 발생한 가공오차로 인하여 좌굴하중이 증가하지 못하는 것으로 판단되어 유한요소해석을 통해 홀 가공 때 발생하는 볼트와 복합재 모재 사이의 틈으로 인하여 볼트 수리 적층판의 좌굴하중 회복률이 낮아지는 것을 확인하였다. 따라서 볼트로 복합재를 수리할 때에는 볼트 홀에 먼저 접착제를 채우고 볼트를 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 유한요소해석에서 볼트는 스프링 요소를 사용하여

이상화함으로써 정확한 결과를 얻을 수 있으나 볼트와 모재 사이의 틈(clearance) 효과를 모사하기 위해서는 고체요소를 이용한 3차원 접촉해석을 수행해야 함을 확인하였다

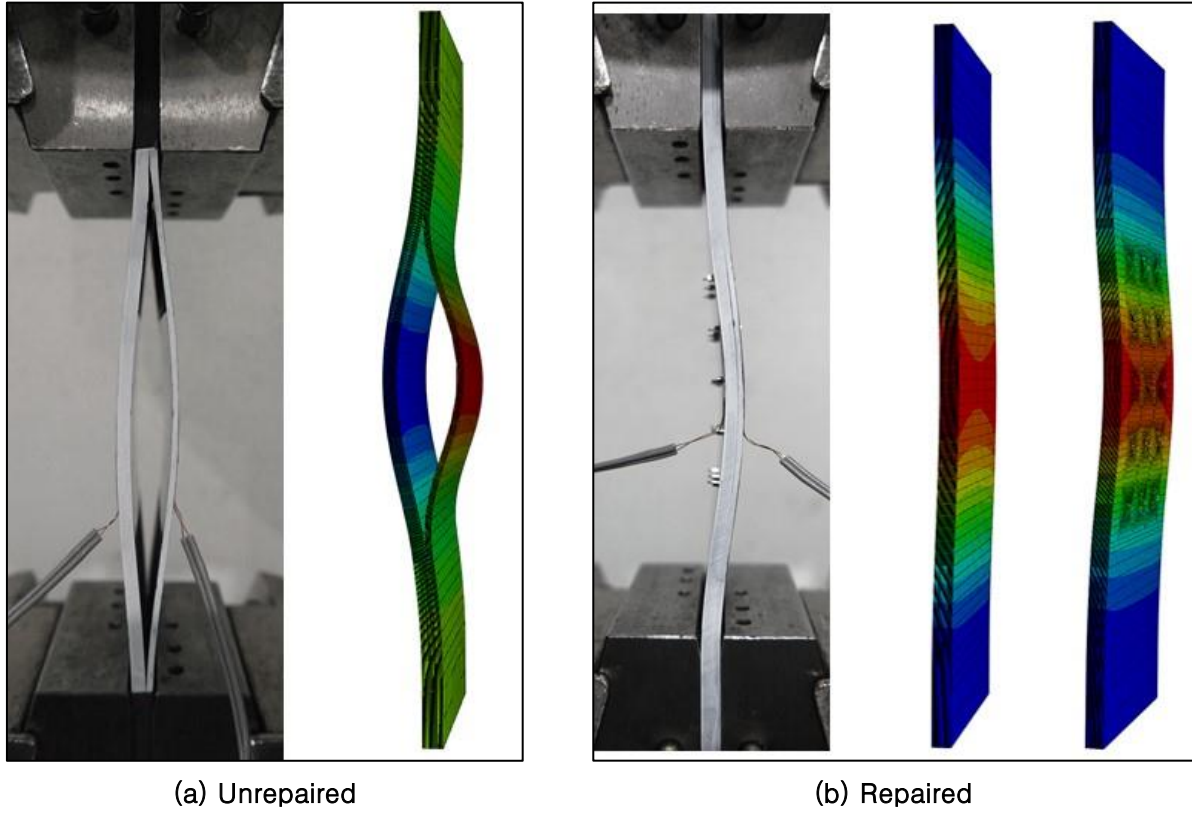


Fig. 4. Buckling modes