

비대칭 경계조건을 가지는 체결부의 3차원 접촉응력해석

장기정*·박노희*·안현수*·권진희**·최진호**

Three-dimensional contact analysis of a composite joint with unsymmetric boundary condition

G. J. Jang, R. H. Park, H. S. Ahn, J. H. Kweon, J. H. Choi

Key Words: Composite, Pin-loaded joint, Three-dimensional, Contact analysis

Abstract

As a preliminary study for the three dimensional failure analysis of composite joints, the three dimensional stress analysis on a pin-loaded unidirectional-fabric hybrid composite joints are performed. The contact and frictions between composite plate and metal bush are considered in the finite element method by NASTRAN. Experiments are conducted to validate the accuracy and feasibility of the finite element technique for 25 specimens with 5 different geometries. The finite element and experimental results show the bush cap induces the unsymmetric deformation, stress distribution, and failure behavior through the thickness. The experiment also shows the failure loads are higher in the joint with bush cap than without it.

1. 서 론

큰 하중을 지지하는 주요 구조물에 복합재료를 사용할 경우, 구조물의 안전을 보장받기 위해서는 여전히 볼트나 핀 등을 사용한 기계적 체결 방식이 많이 사용되고 있다. 따라서 주 구조물로서의 복합재료의 사용이 증가됨에 따라 복합재 구조물의 기계적 체결부에 관한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나 복합재료 기계적 체결부는 체결재와 모재 사이에서의 상호 접촉하중으로 인해 복잡한 3차원 파손거동을 보이게 되어, 파손양상 및 강도의 평가가 쉽지 않다. 또한 체결부에서의 비대칭 경계조건은 국부적인 미소 굽힘을 발생시키게 되므로 체결부의 응력을 평면 응력상태로 가정한 기존의 2차원 응력해석으로서 는 기계적 특성을 정확히 평가하는데 한계가 있을 수밖에 없다.

지금까지의 대부분의 수치해석적 방법들은 체결부위에 대한 3차원 응력해석의 필요성에도 불구하고, 문제의 복잡성과 많은 양의 모델링 작업 및 컴퓨터 용량의 문제로 인해 주로 2차원 응력해석에 의존해 왔다[1, 2]. 이러한 방법은 비교적 두께가 얇고 상하 대칭조건을 갖는 체결부의 해석에서는 어느 정도 정확하다. 그러나 두께가 두꺼워지고 체결부의 형상이 상하대칭이 아닐 경우에는 2차원 해석으로는 파손양상 및 강도를 규명할 수 없다. 따라서 최근에는 적층판의 층간분리 현상과 비대칭 경계조건에 대한 영향을 고려한 3차원 응력해석을 도입하는 경향을 보이고 있다 [3-5].

Chen 등[3]은 볼트로 체결된 복합재 적층판에 대한 3차원 해석을 수행하였다. 해석결과의 타당성을 검증하기 위해 더블랩(Double-Lap) 형태의 볼트 체결부가 있는 얇은 유리/에폭시 적층판과 두꺼운 GRP 적층판에 대한 강도해석을 수행하였으며, 볼트하중과 체결토크(Clamping Torque)의 영향을 고려하였다. 또한, 볼트 체결부 주위의 마찰, 볼트의 탄성 및 적층순서 등의 영향을 연구

* 경상대학교 대학원 항공공학과

** 경상대학교 기계항공공학부·RRC

하여 접촉면에서의 두께방향 접촉응력 분포를 보였다.

Camanho와 Matthews[4]는 복합재 체결부를 접촉분재로 보고, 8절점 선형요소를 이용하여 강성 지하와 면외방향 응력성분을 고려한 3차원 체결부 해석 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 비대칭 경계조건을 가지는 체결부에 대한 3차원 접촉응력해석을 수행하였다. 실제와 유사한 하중전달 경로를 모사하기 위해 하중이 가해짐에 따라 접촉면에서의 경계조건이 변화하는 경계비선형 문제로 가정하고 핀과 부시, 부시와 모재 그리고, 부시헤드와 모재 사이의 접촉면을 3차원 접촉요소를 사용하여 이상화 하고, 비선형 해석을 수행하였다. 체결부에 대한 시험은 5가지의 형상을 가진 총 25개의 시편에 대해 수행하여 파손하중 및 파손양상을 살펴보았다.

2. 시험

2.1 시편 제작 및 시험

시편은 Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그와 평직(Fabric)을 사용하여 제작하였다. 적층순서는 $[(\pm 45)_3/90/(\pm 45)_2/0_4/90/0_4/(\pm 45)_2/90/(\pm 45)_3]$ 이고 $(\pm 45)_0$ 층은 평직이다. 시편은 오토클레이브에서, 적층판의 폭 및 원공과 끝단까지의 거리가 다른 5종류의 시편을 각각 5개씩, 총 25개를 제작하였다. 시편의 원공은 텅스텐 카바이드 드릴을 사용하여 가공하였다. 체결부 시험은 Fig. 1과 같이 INSTRON사의 Universal Testing Machine 8516을 사용하였고, 1 mm/min 속도의 변위제어를 통한 하중을 부과하였다.

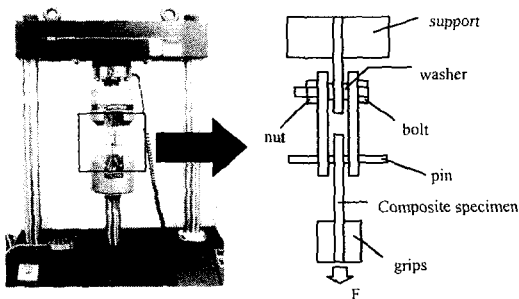


Fig. 1 Test set-up

2.2 시험 결과

핀하중을 받는 체결부에 대한 3차원 접촉응력해

석의 타당성과 정확성을 검증하기 위하여 치수가 다른 5종류의 복합재 체결부에 대한 인장시험을 수행하였다. 각 시편들에 대한 파손양상은 폭과 원공의 직경비, 원공과 끝단사이의 거리비에 따라 다양하게 나타났으며, M3 시편에 대한 파손양상에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 부시헤드의 영향을 관찰할 수 있다.

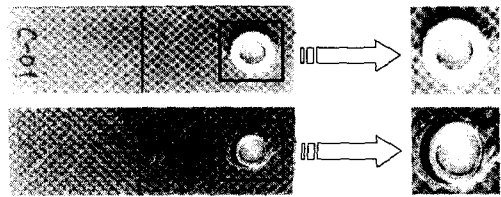


Fig. 2 Failure of M3 specimen at top and bottom surfaces

각 시편의 파손하중을 하중-변위선도 상에서의 최대하중으로 결정하였다. 각각의 경우에 대한 시험결과는 Table 1에 요약하였다.

Table 1 Experimental failure loads

Model	D	W/D	e/D	P Ave. (kN)	C_v (%)	Number of Failure Specimens	Failure mode
M 1	9.53	2.0	1.4	11.76	1.5	5	N
M 2	9.53	2.5	1.4	12.87	1.0	5	B
M 3	9.53	2.8	1.4	11.94	2.0	5	B
M 4	9.53	2.8	1.0	8.07	4.2	5	S
M 5	9.53	2.8	2.0	12.24	1.3	5	B

* D : Diameter of hole, W : Width of the specimen, e : Edge distance form the hole center
 * P : Failure load, C_v : Coefficient of variation ($C_v = S/P$, where S is the standard deviation)

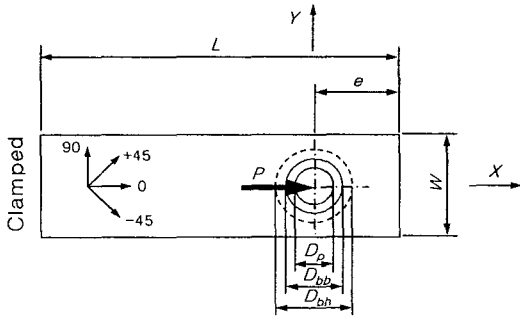
3. 유한요소해석

본 연구에서는 핀과 부시, 부시와 모재 사이의 접촉응력 및 핀의 탄성거동을 모사하기 위해 MSC/NASTRAN의 접촉요소를 사용한 3차원 비선형 해석을 수행하였다. 대부분의 체결부는 접촉면상의 순수한 모재의 변형과 함께 횡방향 변위와 관련이 있는 층간분리에 의한 영향을 줄이기 위해 와셔나 헤드가 있는 부시를 사용하고 있으며, 부시헤드에 의한 비대칭 효과를 고려하기 위해서는 3차원 유한요소해석을 해야 할 필요가 있다. 또한, 부시와 체결부 사이의 접촉 탄성거동에

의한 경계 비선형의 효과와 함께 부시헤드와 체결부 사이의 접촉효과를 고려해야 한다.

3.1 비대칭 경계조건을 가진 체결부 해석

해석에 사용한 체결부의 형상과 경계조건은 Fig. 3과 같으며, 부시헤드로 인해 비대칭 경계조건을 가지게 된다.



* D_p = Diameter for the pin. D_b = Diameter for the bush-body.
* D_{bh} = Diameter for the bush-head

Fig. 3 Joint geometry and boundary conditions

사용된 유한요소는 8절점 3차원 고체요소 (CHEXA)이며, 면내 상하대칭을 이용하여 절반만 모델링하였다. 경계조건은 좌단에서 회전을 구속하는 고정지지이고, 하중은 핀의 중앙에 두께 방향으로 분포하중을 가정하여 적용하였다. 부시가 존재하는 핀 체결부의 실제 접촉면 Fig. 4와 같다. 부시헤드와 체결부의 접촉면은 체결압력이 없는 단순한 접촉상태이며, 마찰계수에 따른 체결부의 응력분포와 파손강도의 변화를 연구하기 위해 마찰력을 고려하지 않은 경우와 마찰계수가 0.1, 0.2인 경우에 대한 해석을 수행하였다.

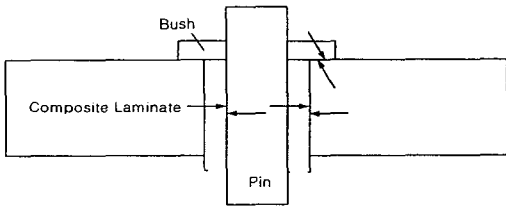


Fig. 4 Defined contact surfaces

3.2 결과 및 토론

체결부위의 접촉 후 변형형상은 비대칭 경계조건으로 인해 Fig. 5와 같이 가장 바깥 층의 변형정도가 일정하지 않음을 알 수 있다. 층간 분리

손상을 일으키는데 중요한 역할을 하는 베어링단면 층간 수직인장응력은 Fig. 6에 보인 바와 같이 부시헤드의 구속효과로 감소하였다. 이는 부시헤드와 접촉하는 층에 발생하는 수직압축응력으로 인한 수직인장응력의 감소효과 때문이다.

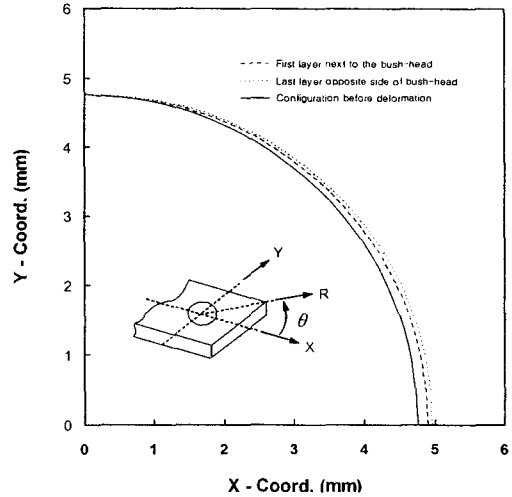


Fig. 5 Deformed shapes of the both side $\pm 45^\circ$ layers

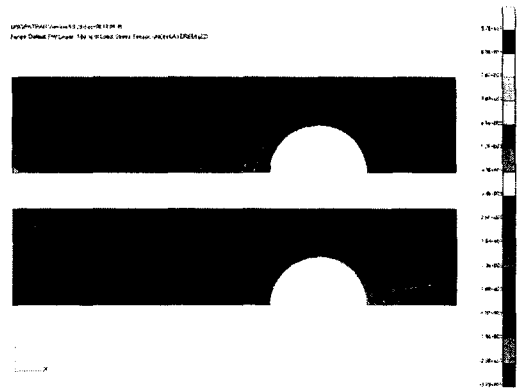


Fig. 6 Transverse normal stress distribution of the top(upper) and bottom(lower) layers

Fig. 7과 8은 각각 마찰력을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 법선방향 응력과 원주방향 응력을 무차원 상수로 나타낸 것이다. 마찰계수를 고려한 해석의 결과 모재와 부시 사이의 접촉면의 확장으로 인해 법선방향의 응력은 감소하여 축방향 변위는 줄어들었으나, 일부 접촉단면에서는 전단파손을 야기할 수 있는 원주방향 수축응력(Traction stress)이 발생하였다. 부시헤드와

체결부 사이의 마찰계수의 영향은 거의 없지만, 부시와 모재 사이의 마찰계수는 체결부위의 응력 분포에 상대적으로 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

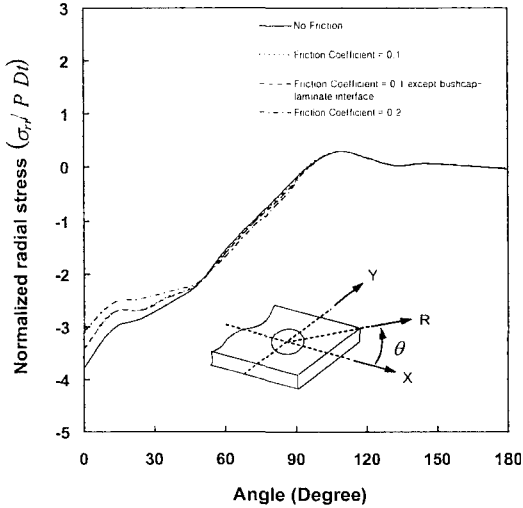


Fig. 7 Normalized average radial stress around hole

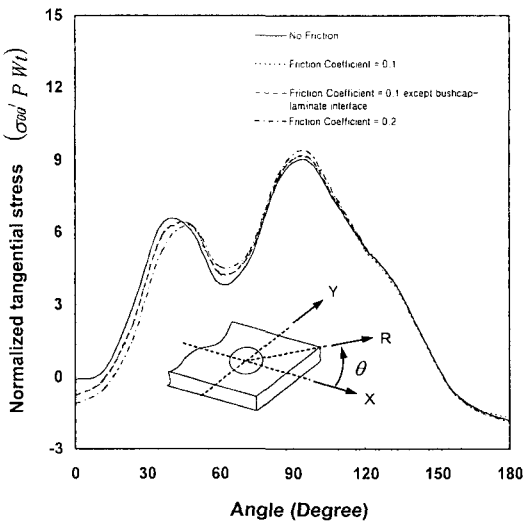


Fig. 8 Normalized average tangential stress around hole

4. 결론

본 연구에서는 비대칭 경계조건을 갖는 복합재

체결부 파손강도와 파손양상의 예측에 앞서 다양한 형상을 갖는 핀 체결부에 대한 체결부 시험과 3차원 접촉응력해석을 수행하여 비대칭 경계조건에 대한 체결부의 특성과 적합한 모델링 방법에 대한 연구를 수행하였다. 시험과 해석 결과 체결토크가 없는 부시 헤드라고 할지라도 체결부의 파손양상에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 베어링 파손이 예상되는 시편에 대한 체결부위의 파손양상은 부시헤드와 인접한 층은 극단적인 인장파손을 보이는 반면, 구속효과가 없는 반대 층은 안정한 형태의 베어링 파손을 보였다. 부시헤드가 존재하는 체결부의 경우 부시와 체결부 사이의 접촉 탄성거동에 의한 경계 비선형성의 효과와 함께 부시헤드와 체결부 사이의 접촉효과를 고려해야 하며, 체결부위의 응력분포에 큰 영향을 주는 마찰계수의 적절한 선정이 중요한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 경상대학교 항공기부품기술연구원과 두뇌한국 21사업의 지원에 의해 수행된 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) M. L. Dano, G. Gendron, and A. Picard, "Stress and Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 50, 2000, pp. 287-296.
- 2) F. K. Chang and K. Y. Chang, "Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-Out Mode Failure," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, 1987, 809-833.
- 3) W. H. Chen, S. S. Lee, and J. T. Yeh, "Three-dimensional Contact Stress Analysis of a Composite Laminate with Bolted Joint," *Composite Structures*, Vol. 30, 1995, pp. 287-297.
- 4) P. P. Camanho and F. L. Matthews, "A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, 1999, pp. 2248-2280.
- 5) T. Ireman, "Three-Dimensional Stress Analysis of Bolted Single-Lap Composite Joints," *Composite Structures*, Vol. 43, 1998, pp.195-216.