

일방향-평직 복합재 혼합 적층판의 기계적 체결부 강도에 관한 인자연구

안현수*·신소영*·권진희**·최진호**·이상관***·양승운****

Parametric Study on the Joint Strength of Unidirectional and Fabric Hybrid Laminate

H. S. Ahn, S. Y. Shin, J. H. Kweon, J. H. Choi, S. K. Lee and S. Y. Yang

Key Words: Joint, Composite, Pin Load, Characteristic Length, Parametric Study

Abstract

A parametric study has been conducted to investigate the effect of the geometry on the strength of an unidirectional and fabric hybrid laminated composite joint. Tests are conducted for the specimens with nine different edge-to-hole diameter or width-to-hole diameter ratios. For the finite element analysis, the characteristic length method is used, and the tests for determining the characteristic length are performed additionally. Nonlinear contact problem between the pin and laminate is modeled by the gap element in MSC/NASTRAN. Tsai-Wu failure criteria is applied to the stress on the characteristic curve. The finite element and experimental results shows good agreement in strength of composite joint. Results of the parametric study shows the effect of the geometry is remarkable in the specimens with width-to-hole diameter ratio less than 2.8 and edge-to-hole diameter ratio less than 1.4.

1. 서 론

최근 섬유강화 복합재료는 항공기와 같이 높은 비강도와 비강성은 물론, 설계 유연성 및 여러 가지 우수한 물리적, 화학적 특성이 요구되는 구조물의 재료로 광범위하게 사용되고 있으며, 그 응용 범위도 부구조를 위주에서 주구조물과 주요 핵심부품으로 확대되고 있다. 구조물의 효율성만을 고려한다면 체결부위가 없는 일체형의 제품을 제작하는 것이 이상적이지만 구조물의 사용목적이나 크기, 가동상의 어려움, 제작 후 점검 등의 이유로 실체로는 여러 개의 독립된 부품으로 제

작되는 경우가 많다. 이로 인하여 복합재 적층 구조물의 체결부에 대한 문제는 특히 중요한 부분이며 체결방법 및 체결부 설계에 대한 지속적인 연구가 이루어져 오고 있다.

일반적으로 복합재 적층 구조물의 체결방법은 크게 기계적 체결방법과 접착에 의한 체결방법으로 나눌 수 있다. 대부분의 항공기 내부 구조물의 경우 장비의 검사 및 장·탈착 편의 등의 이유로 기계적 체결방법을 채택하고 있다. 기계적 체결방법을 사용할 경우 원공의 존재로 인해 필연적으로 원공 주위에 응력집중이 발생하여 국부적인 손상과 강도저하를 가져오게 되며, 파손강도와 파손양상은 적층순서, 보강섬유의 방향, 체결부위의 기하학적 형상, 섬유와 기지의 특성, 원공의 가공방법 등 여러 가지 설계인자들의 영향을 받게 된다.

시편의 폭(w), 원공의 직경(d), 끝단거리(d_l)와 같은 체결부의 기하학적 형상에 따른 체결부의 파손거동과 강도에 관한 많은 연구가 이미 수행되었으며[1-3], 기 수행된 연구들은 일방향 혹은

* 경상대학교 대학원 항공공학과

** 경상대학교 항공기부품기술연구센터

*** 한국기계연구원

**** 한국항공우주산업(주)

평직만으로 적층된 체결부가 대부분이다. 본 연구에서는 일방향-평직 복합재를 혼합한 적층판의 기계적 체결부에 대한 파손거동과 강도에 관한 인자연구를 수행하였다. 기하학적 설계변수인 w/d 와 e/d 가 다른 9개의 모델에 대한 시험을 수행하였으며, 특성길이 방법[4]을 이용하여 해석을 수행하였다.

2. 시험

2.1 시편 제작

시편은 SK사의 USN 125* Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그와 HFG사의 평직(Fabric)을 사용하여 제작하였고, 적층순서는 [$\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3$]이고, ± 45 도층은 평직 층이다. 시편은 항공기용 부품에 일반적으로 사용되는 오토클레이브에서 진공백(Vacuum Bag) 성형과정을 통하여 제작하였으며, 인장시험, 베어링 파손시험 및 체결부 시험을 위하여 시편을 제작하였다. 시편의 원공은 텅스텐 카바이드 드릴을 사용하여 가공하였으며, 베어링 시험과 체결부 시험을 위해 별도의 치구를 제작하였다.

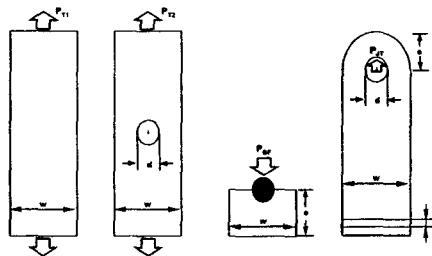


Fig 1. Schematic representation of test specimens

Table 1. Dimensions of test specimens

Model	d (mm)	w (mm)	e (mm)	w/d	e/d
A1	9.53	19.00	13.40	2.0	1.4
A2	9.53	23.80	13.40	2.5	1.4
A3	9.53	26.80	13.40	2.8	1.4
A4	9.53	33.40	13.40	3.5	1.4
A5	9.53	38.00	13.40	4.0	1.4
B1	9.53	26.80	9.60	2.8	1.0
B2	9.53	26.80	13.40	2.8	1.4
B3	9.53	26.80	19.00	2.8	2.0
B4	9.53	26.80	23.80	2.8	2.5
B5	9.53	26.80	28.60	2.8	3.0

* d : hole diameter , w : specimen width , e : edge distance

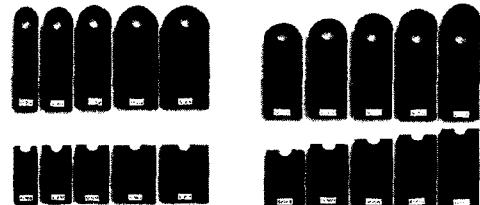


Fig. 2 Test specimens

Table 2. Material properties

Properties	UD	Fabric
E_1	131 GPa	65.4 GPa
E_2	8.2 GPa	65.4 GPa
G_{12}	8.2 GPa	3.59 GPa
ν_{12}	0.281	0.058
X_T	2000 MPa	959.1 MPa
X_C	1400 MPa	692.9 MPa
Y_T	61 MPa	959.1 MPa
Y_C	130 MPa	692.9 MPa
S	70 MPa	64.9 MPa
t	0.114 mm	0.198 mm

2.2 시험방법

시험은 INSTRON 8516을 사용하였으며, 하중은 변위제어를 통하여 가하였다. 인장 시험의 경우 $2\text{mm}/\text{min}$, 체결부 시험의 경우 $1\text{mm}/\text{min}$, 베어링 파손 시험의 경우 $0.1\text{mm}/\text{min}$ 의 속도로 하중을 가하였다. 또한, 베어링 파손시험과 체결부 시험의 경우 체결부위와 체결재 사이 간극을 최소화 하기 위한 초기하중을 부과하였다.

2.3 시험결과

시험은 원공이 없는 평판의 인장강도 결정을 위한 인장시험, 인장 특성길이 결정을 위한 원공이 있는 평판의 인장시험, 압축 특성길이 결정을 위한 베어링 시험, 체결부 강도 평가를 위한 체결부 시험으로 총 4가지가 이루어진다. 각각의 경우에 대한 시험결과는 Table 3에 요약하였으며, w/d 및 e/d 에 따른 체결부 시편의 파손양상은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3 Experimental results of each model

Model	ID	P Ave. (kN)	σ'' Ave. (Mpa)	C_v (%)	Number of Specimens
A1	TTS	75.77	872.5	3	10
	TSH	24.34	770.0	4	5
	BS	9.91	321.0	6	5
A2	JS	9.72	156.6	5	4
	TSH	33.77	735.7	2	5
	BS	10.48	339.2	5	5
A3	JS	9.97	129.4	3	3
	TSH	41.85	750.1	1	5
	BS	10.49	339.6	5	5
A4	JS	10.41	120.4	1	5
	TSH	56.12	726.2	2	5
	BS	11.00	365.0	4	5
A5	JS	10.66	99.7	2	3
	TSH	66.36	714.3	3	5
	BS	11.26	364.7	6	5
B1	JS	10.83	87.9	3	6
	BS	10.55	341.7	7	5
	JS	7.56	87.3	5	4
B2	BS	10.49	339.2	5	5
	JS	10.41	120.4	1	5
B3	BS	9.86	319.3	8	5
	JS	10.76	124.2	5	4
B4	BS	9.77	316.5	6	5
	JS	10.76	124.5	4	5
B5	BS	9.75	315.8	8	5
	JS	11.45	132.1	3	5

* TTS : Tensile Test Specimen . TSR : Tensile Test Specimen with a Hole

* BS : Bearing Test Specimen , JS : Joint Test Specimen

* P : Failure Load . σ'' : Ultimate Strength

* C_v : Coefficient of variation ($C_v = S/\sigma''$, where S is the standard deviation)

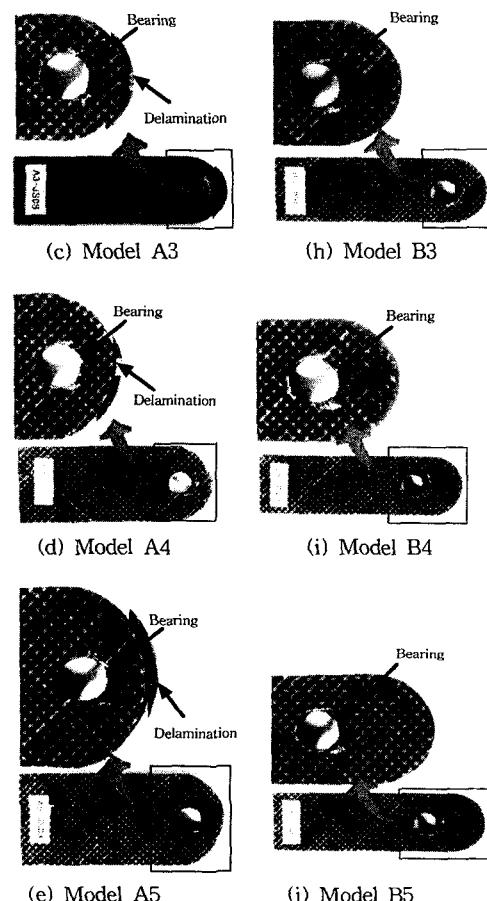
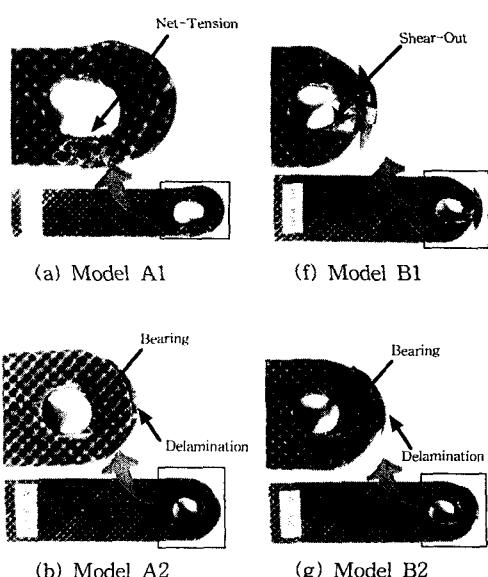


Fig. 3 Joint specimens of each model after fracture

3. 유한요소해석

유한요소해석은 MSC/NASTRAN을 사용하였고, 전·후처리 프로그램은 MSC/PATRAN을 사용하였다. 편과 원공 사이에는 미세한 틈(Gap)이 있음을 가정하여 압축하중만을 전달하는 접촉요소를 정의하여 접촉응력 상태와 편 자체의 탄성거동을 묘사하였다. 체결부의 파손강도와 파손양상을 파악하기 위해 특성길이와 특성곡선 개념을 적용하였으며, 파손을 판정하기 위해 Tsai-Wu 파손식을 사용하였다. 특성곡선 상에서 파손지수가 1일 될 경우 파손이 발생하며 최초로 한 층의 파손이 발생할 경우 전체 구조물의 파손을 가정하는 초기층 파손(First-ply Failure) 이론을 사용

하였다.

파손해석의 결과는 Table 4에 제시된 바와 같으며, 특성길이와 체결부에 대한 기하학적 인자의 영향은 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 제시하였다.

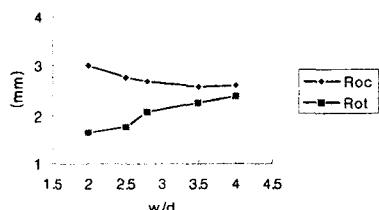
Table 4. Finite element and experimental failure load

Model	Rot (mm)	Roc (mm)	P_{EXP} (kN)	Failure Mode of EXP	P_{FEM} (kN)	Error (%)	Failure Mode of FEM
A1	1.65	3.00	9.72	N	9.3	-4.3	N
A2	1.77	2.77	9.97	B	9.17	-8.0	B
A3	2.08	2.70	10.42	B	9.15	-12.0	B
A4	2.27	2.58	10.66	B	8.81	-17.4	B
A5	2.38	2.61	10.83	B	8.80	-18.7	B
B1	2.08	3.09	7.56	S	5.7	-24.6	B
B2	2.08	2.70	10.41	B	9.15	-12.1	B
B3	2.08	2.63	10.76	B	10.15	-5.7	B
B4	2.08	2.62	10.76	B	10.15	-3.7	B
B5	2.08	2.60	11.45	B	10.06	-12.1	B

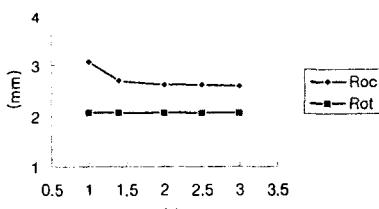
* Rot : Characteristic Length for Tension

* Roc : Characteristic Length for Compression

* N : Net-Tension Failure , S : Shear-Out Failure , B : Bearing Failure .

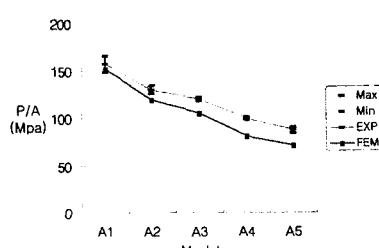


(a) Characteristic Length of each model based on w/d

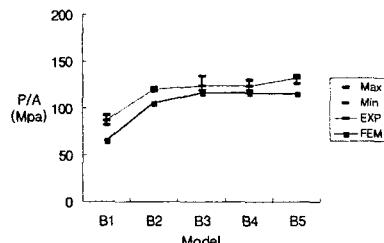


(b) Characteristic Length of each model based on e/d

Fig. 4 Characteristic Length of each models based on Parametric factors



(a) Ultimate joint strength each model based on w/d



(b) Ultimate joint strength each model based on e/d

Fig. 5 Ultimate joint strength of each models based on Parametric factors

4. 결 론

본 연구에서는 기하학적 형상이 다른 일방향-평직 복합재 혼합 적층판의 기계적 체결부에 대한 시험과 체결부 강도해석을 수행하였다. 시험 결과, w/d 가 2.5 이상이 될 경우 체결부의 폭이 상대적으로 작은 경우 발생하는 인장 파손을 피할 수 있으며, e/d 는 1.4 이상이 될 경우 체결부와 끝단사이의 거리가 짧은 경우 발생하는 전단 파손을 피할 수 있었다. 또한, e/d 가 1.4인 모델에서는 층간분리에 의한 파손이 발생되었으며, e/d 가 2.0 이상일 때 안정된 파손형태인 베어링 파손이 발생됨을 관찰할 수 있었다. 특성길이 방법을 이용한 해석결과는 몇몇 모델을 제외하고 비교적 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 경상대학교 항공기부품기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) E. W. Godwin, F. L. Matthews, "A Review of the Strength of Joint in Fiber-Reinforced Plastics Part I. Mechanically Fastened Joints", Composites Vol.11, 1980, p. 155-160.
- (2) S. E. Yamada and C. T. Sun, "Analysis of Laminate Strength and Its Distribution", J. of Composite Materials, Vol.12, 1978, p. 275-284
- (3) P. A. Smith, K. J. Pascoe, C. Polak, and D. O. Stroud, "The Behavior of Single-Lap Bolted Joints in CFRP Laminates", Composite Structures, Vol.6, 1986, p. 41-55.
- (4) F. K. Chang and R. A. Scott, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints", J. of Composite Materials, Vol.16, 1982, p. 470-494