

클램핑 포스가 존재하는 복합재료 조인트의 특성 평가

류충오*, 유연호*, 이영환*, 최진호**, 권진회**

Evaluation of mechanically fastened composite joint with the clamping force

Coong-O Ryu*, Yeun-Ho Yu*, Young-Hwan Lee*, Jin-Ho Choi** and Jin-Hwe Kweon**

Abstract

The design of composite joint is a very important research area because they are often the weakest areas in composite structures. In this paper, the failure load of the mechanically fastened composite joint with the clamping force was predicted by the failure area index method. By the suggested failure area index method, the strength of the mechanically fastened composite joint could be predicted within 22.5% when clamping force was applied to the composite joint.

Key Words: 파괴면적지수(Failure area index), 클램핑포스(Clamping force)

1. 서론

복합재료 구조물은 금속부와 연결되는 체결구조를 포함하고 있으며 이에 대한 강도 평가 및 설계는 매우 중요한 연구분야로 대두되고 있다. 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하기 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔다. Whitney and Nuismer [1,2]는 평균응력과 파손기준에 근거한 특성길이(characteristic length)를 제안하였으며, Chang[3,4]은 인장과 압축 특성길이의 조합으로 정의되는 특성곡선을 제안하여 기계적 체결부의 파손강도를 예측하였다. Choi[5,6,7]등은 파손이 일어날 수 있는 특정면적에 대하여 파손지수의 평

균값을 계산한 파괴면적지수법을 제안하였다. 본 논문에서는 파괴면적지수법을 이용하여 클램핑 포스(Clamping Force)가 존재하는 복합재료 체결부 시편의 파손강도를 예측하고 평가하였다.

2. 시편 및 실험방법

Fig. 1은 복합재료 시편의 체결부 형상을 나타낸 그림으로 체결부의 폭과 원공 직경의 비(w/d)와 끝단까지의 거리와 원공직경의 비를 달리 하여 체결부의 파손강도 실험을 수행하였다. 체결부 시편의 형상과 치수는 참고논문 [5,6]와 동일한 값을 사용하였으며, 클램핑 포스를 가하여 체결부 강도를 평가하였다. 시편 제작에 사용된 재료는 SK사의 USN 125 Carbon/ Epoxy 일방향 프리프레그와 HFG사의

* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소

평직(fabric)을 사용하여 제작하였으며, 소재의 물성치는 Table 1과 Table 2에 나타나 있다. 복합재 체결부 시편의 치수는 Table 3에 나타나 있으며, 적층순서는 $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$ 이다. 복합재료 체결부에 일정한 클램핑 포스를 가하기 위해 토크렌치로 균일한 토크를 가하였으며, Fig. 2에서 보는바와 같이 동일 토크가 가해진 알루미늄관에 스트레인게이지를 부착하여 클램핑 포스를 측정하였다. 측정된 클램핑 포스는 9.822kN이었으며, 체결부 강도시험에 사용한 장비는 Instron사의 5582이다.

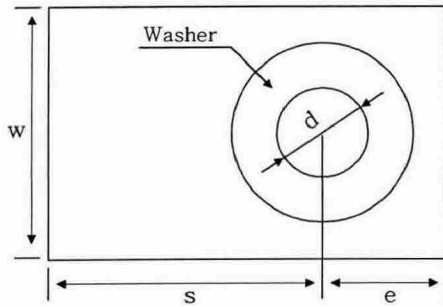


Fig. 1 Shape of the joint specimen

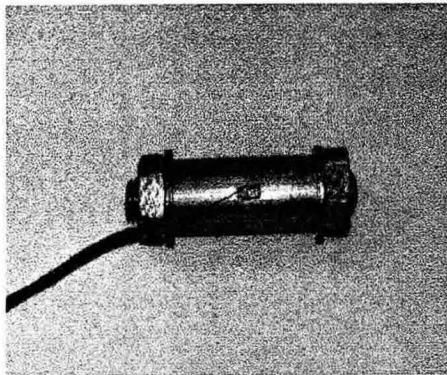


Fig. 2 Aluminum cylinder

Table 1 Material properties of SK carbon/epoxy composite material.

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_1	131.0 GPa
Elastic moduli in transverse directions	E_2, E_3	8.20 GPa
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes	G_{12}, G_{13}	4.50 GPa
Shear modulus in 2-3 plane	G_{23}	3.50 GPa
Poisson's ratios	ν_{12}, ν_{13} ν_{23}	0.281 0.470
Tensile strength in fiber-direction	X_T	2000 MPa
Compressive strength in fiber-direction	X_C	1400 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_T	61 MPa
Compressive strength in transverse direction	Y_C	130 MPa
Shear strengths in 1-2 and 1-3 planes	S_{12}, S_{13}	70 MPa
Shear strength in 2-3 plane	S_{23}	40 MPa

Table 2 Material properties of HFG carbon/epoxy fabric composite material.

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_1	65.4 GPa
Elastic modulus in transverse directions	E_2	65.4 GPa
Shear modulus in 1-2 planes	G_{12}	3.59 GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.058
Tensile strength in fiber-direction	X_T	959.1 MPa
Compressive strength in fiber-direction	X_C	692.9 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_T	959.1 MPa
Compressive strength in transverse direction	Y_C	692.9 MPa
Shear strength	S	64.9 MPa

Table 3 Dimensions of the test specimens.

Model	w	e	d	s	w/d	e/d
1	26.8	13.4	9.53	30	2.8	1.4
2	19	13.4	9.53	30	2	1.4
3	38	13.4	9.53	30	4	1.4
4	26.8	9.6	9.53	30	2.8	1
5	26.8	19	9.53	30	2.8	2
6	26.8	23.8	9.53	30	2.8	2.5
7	26.8	28.6	9.53	30	2.8	3

3. 파괴면적 지수법

파괴면적지수법은 복합재료의 파손이 일어날 수 있는 특정면적에 대하여 파손지수의 평균적인 크기를 평가하는 방법으로, 복합재료의 파손이 일어날 수 있는 특정면적은 사용된 파손 판정식의 파손지수가 1 이상인 부분으로 한정되며 파괴면적지수는 다음과 같다[5,6,7].

$$FAI_j = \frac{\int F^n dA}{H_A} \approx \frac{\sum_{i=1}^n F_i^n \cdot A_i}{H_A} \quad (1)$$

FAI : 파괴면적지수 (Failure Area Index)

F_i : 파괴지수 (Failure Index)

H_A : 원공의 내부면적

n : 가중치 (Weighting factor)

전체 적층판에 대한 파손면적지수는 다음과 같다.

$$FAI = \sum_{j=1}^m FAI_j \quad (2)$$

m : 전체 적층수

식 (1)의 A_i 는 복합재료 파손식의 파괴지수가 1 이상인 각 유한요소의 면적으로 정의되며, n 은 면적에 대한 파괴지수의 상대적인 가중치를 나타낸다. 또한 식 (1)의 H_A 는 원공의 내부면적으로 정의되며, 파괴면적지수법은 동일한 적층순서를 가지는 복합재료 체결부 구조물에 대하여 파괴면적지수(FAI)값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이다.

4. 체결부의 파손강도에 측

본 논문에서는 시편의 설계변수인 체결부의 형상에 대하여 선형 유한요소해석을 수행하고 파괴면적지수법을 적용하여 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. 복합재료 기계적

체결부에 대한 선형 해석방법은 Fig. 3에서와 같이 핀 구멍 주위의 반원 부분에 반경 방향으로의 변위를 구속하고 시편의 한쪽 끝에서 하중을 가하는 방법으로, 원공과 접촉하는 핀을 강체로 가정하는 방법이다[5,6,7]. 이 방법은 핀과 평판에 작용하는 접촉하중 분포를 모재의 특성에 관계없이 근사적으로 잘 모사할 수 있는 방법으로, 본 논문에서는 이를 복합재료 체결부 해석에 사용하였다.

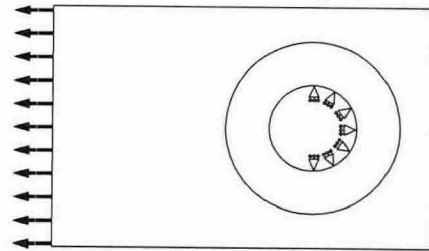


Fig. 3 Fixed radial displacement along hole boundary

파손하중은 각 시편당 7회 실시하였으며, 최고값과 최저값을 제외한 평균값을 적용하였다. Fig. 4는 시편에 따른 파손하중의 범위와 평균값을 나타낸다.

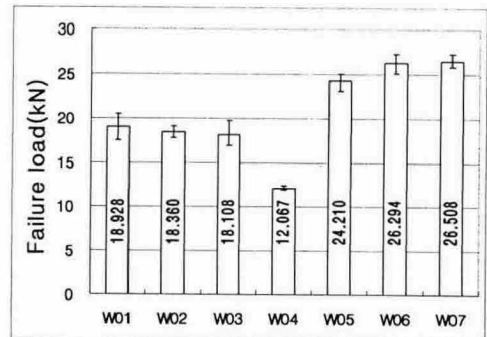


Fig. 4 Failure load of specimens

Fig. 5은 복합재료 체결부의 파손해석을 위한 유한요소 모델을 나타낸 그림으로 좌우 대칭성을 이용하여 시편의 1/2만 해석하였으며, Layered Structural Solid 요소를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 유한요소해석 프로그

램은 상용 프로그램인 ANSYS 8.0이다.

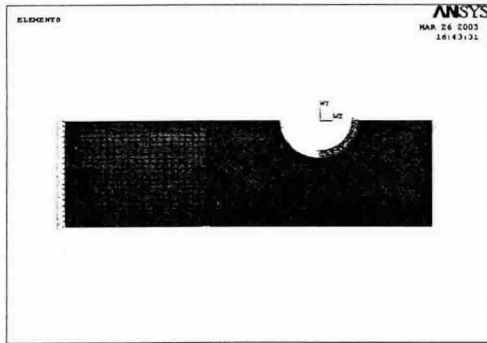


Fig. 5 Finite element model for the linear analysis of the composite joint.

Fig. 6과 Fig. 7은 선형 유한요소해석의 결과를 나타낸 그림으로, W01시편에 파손하중(18.928 kN)을 가하였을 때 Yamada-Sun 파손지수와 Tsai-Wu 파손지수를 나타낸 그림이다.

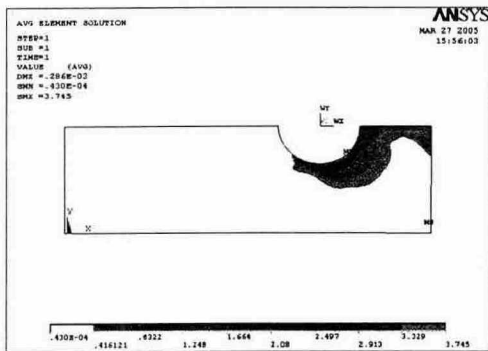


Fig. 6 Yamada-Sun

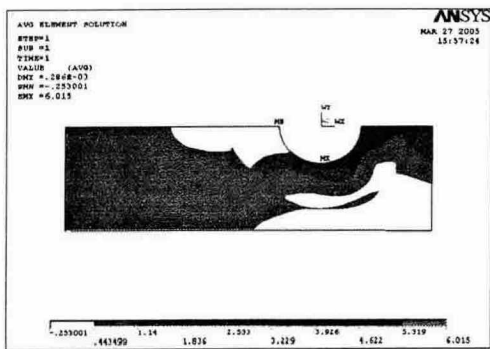


Fig. 7 Tsai-Wu

이상에서 구한 선형 유한요소해석의 결과를 이용하여 파괴면적지수법으로 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. 파괴면적지수법은 동일한 적층순서를 가지는 복합재료 체결부 구조물에 대하여 파괴면적지수(FAI)값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이므로 파괴면적지수의 기준값을 선정하여야 한다. 파괴면적지수의 기준값은 W01 시편으로 선정하였으며, 식 (1)의 가중치 n 을 1로 고정하고 Yamada-Sun 파손식과 Tsai-Wu 파손식으로 평가하였다. Fig. 8와 Fig. 9은 파괴면적지수법을 적용하여 파손강도를 예측한 결과이다.

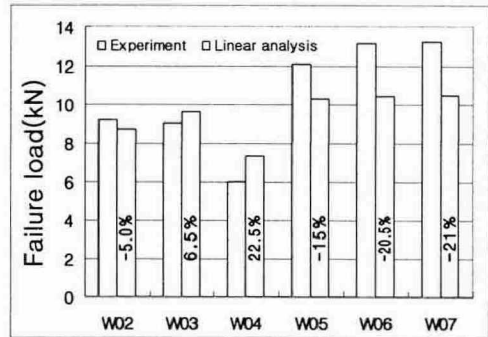


Fig. 8 Failure load(Yamada-Sun)

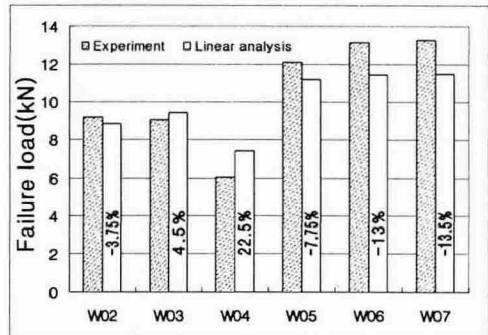


Fig. 9 Failure load(Tsai-Wu)

W01 기준시편에 Yamada-Sun파손식을 적용하였을 경우 파괴면적지수값은 6.592를 나타내었으며 Tsai-Wu파손식을 적용하였을 경우 파괴면적지수값은 13.004를 나타내었다. 상기 두 파손식 모두 22.5%이내의 오차를 보이지

만, Tsai-Wu파손식이 Yamada-Sun파손식보다 실험값에 근접한 결과를 나타내었다.

클램핑 포스가 존재하는 복합재료 조인트의 파괴강도를 특성길이 방법(Characteristic length)으로 예측한 참고논문[8]의 결과와 비교하기 위해 파괴면적지수법으로 조인트의 파손강도를 재 예측하였다. 이때 클램핑 포스는 400lbs이었으며, 시편의 치수와 체결부 강도는 참고문헌[8,9,10]과 동일한 값을 사용하였다. 기준시편은 폭과 원공의 직경비가 3이며, 끝단까지의 거리와 원공 직경비가 3인 시편으로 설정하였으며, 적층순서가 [(0/90)₆]_s와 [(90/±45/0)₃]_s인 두 가지 시편에 대하여 파손강도를 예측하였다. Fig 10와 Fig 11는 파괴면적지수법으로 조인트의 파손강도를 예측한 결과로서, 그림에서 볼 수 있듯이 15% 범위 내에서 파손하중을 예측할 수 있었다.

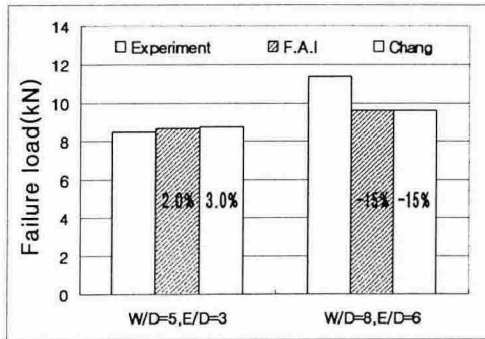


Fig. 10 [(0/90)₆]_s, 400lbs

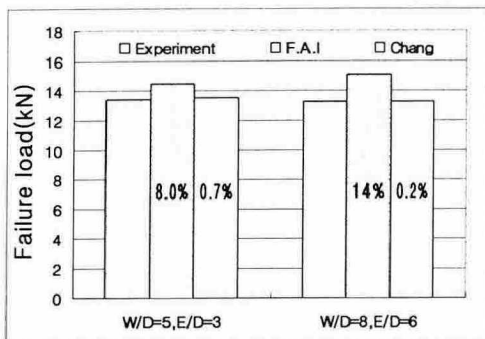


Fig. 11 [(90/±45/0)₃]_s, 400lbs

4. 결론

본 논문에서는 클램핑 포스가 존재하는 복합재료 체결부를 마찰이 없는 강제핀으로 가정하여 선형 유한요소해석을 수행하고 파괴면적지수법을 적용하여 체결부의 파손강도를 예측하였다. 복합재료 체결부의 파손하중은 22.5% 범위내에서 예측할 수 있었으며, 이상의 결과로부터 클램핑 포스가 존재하는 복합재료 조인트의 파손강도예측에 파괴면적지수법이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03)과 지방대학혁신역량강화사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) J. M. Whitney and R. J. Nuismer, 1974, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, Vol. 8, pp. 253-265.
- 2) J. M. Whitney and R. J. Nuismer, 1975, "Uniaxial Failure of Composite Laminated Containing Stress Concentrations," *Fracture Mechanics of Composites*, ASTM STP 593, pp.117-142.
- 3) F. K. Chang and R. A. Scott, 1982, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints," *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, pp. 470-494.
- 4) F. K. Chang and R. A. Scott, 1984, "Failure of Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes-Method of Solution," *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, pp. 255-278.

- 5) 최진호, 전영준, 권진희, 2002, "기계적으로 체결된 복합재료 조인트의 강도에 관한 연구," *한국복합재료학회논문집*, 제15권, 제4호, pp. 9-16.
- 6) 전영준, 최진호, 권진희, 2003, "파괴면적지수법을 이용한 복합재료 기계적 체결부의 강도 평가에 관한 연구," *한국복합재료학회논문집*, 제16권, 제5호, pp. 1-6.
- 7) J. H. Choi and Y. J. Chun, "Failure Load Prediction of Mechanically Fastened Composite Joint," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 24, pp. 2163-2177.
- 8) H. S. Wang, C. L. Hung and F. K. Chang, 1996, "Bearing Failure of Bolted Composite Joints. Part I : Experimental Characterization", *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 12.
- 9) C. L. Hung and F. K. Chang, 1996, "Strength Envelope of Bolted Composite Joints under Bypass Loads", *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 13.
- 10) Y. Xiong, C. Poon, P. V. Straznicky and H. Vietinghoff, 1995, "A prediction method for the compressive strength of impact damaged composite laminates", *Composite Structures*, Vol. 30, pp.357-367.