

論文

클램핑 포스가 존재하는 복합재료 체결부의 파손강도 예측

류충오*, 최진호^{***}, 권진회^{**}

Failure load prediction of mechanically fastened composite joint with the clamping force

Choong-O Ryu*, 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 the clamping force was applied to the composite joint.

초 록

복합재 구조물에서 체결부위는 매우 취약한 부분이므로 복합재료 체결부에 대한 설계는 중요한 연구분야로 대두되고 있다. 본 논문에서는 클램핑 포스가 존재하는 복합재료 기계적 체결부의 파손강도를 파괴면적지수법으로 예측하였다. 클램핑 포스가 존재하는 기계적 체결부의 파손강도를 파괴면적지수법으로 예측한 결과, 22.5% 범위 내에서 체결부의 강도를 예측할 수 있었다.

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

1. 서 론

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. Hart-Smith[1]는 체결부 강도예측에 응력집중계수를 이용하였고, Whitney and Nuismer [2,3]는 평균응력과 파손기준에 근거한 특성길이(characteristic length)를 제안하였으며, Chang[4,5]은 인장과 압축 특성길이의 조합으로 정의되는 특성곡선을 제안하여 기계적 체결부의 파손강도를 예측하였다. Sun[6,7]등은 체결부에 대한 3차원 모델을 이용하여 점진적 파손 해석방법으로 체결부의 파손강도를 예측하였

다. Choi[8,9,10]등은 파손이 일어날 수 있는 특정면적에 대하여 파손지수의 평균값을 계산한 파괴면적지수법을 제안하였다. 본 논문에서는 파괴면적지수법을 이용하여 클램핑 포스(Clamping Force)가 존재하는 복합재료 체결부 시편의 파손강도를 예측하고 평가하였다.

2. 시편제작 및 실험결과

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

* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

*** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:choi@gsnu.ac.kr)

** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소

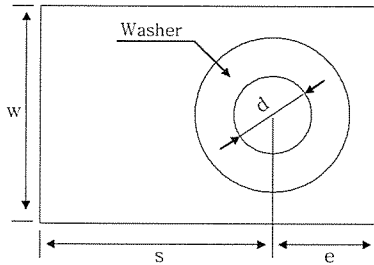


Fig. 1 Shape of the joint specimen.

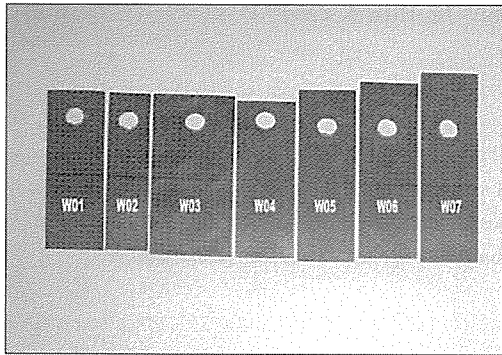


Fig. 2 Photograph of the joint specimens.

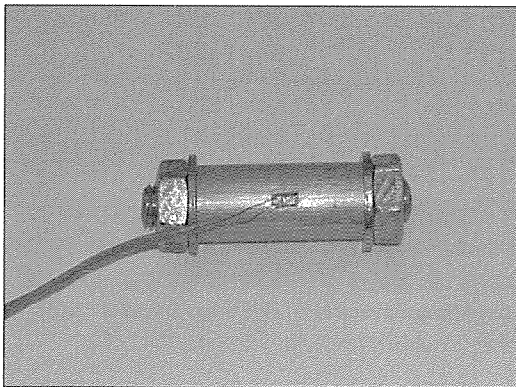


Fig. 3 Aluminum tube for measuring the clamping force.

[8,9]와 동일한 값을 사용하였으며, 클램핑 포스를 가하여 체결부 강도를 평가하였다. 시편 제작에 사용된 재료는 SK사의 USN 125 Carbon/ Epoxy 일방향 프리프레그와 HFG사의 평직(fabric)을 사용하여 제작하였다. Fig. 2는 제작된 시편들의 형상을 나타낸 사진이다. 복합재료 체결부에 일정한 클램핑 포스를 가하기 위해 토크렌치로 균일한 토크를 가하였으며, Fig. 3에서 보는바와 같이 동일 토크가 가해진 알루미늄관에 스트레인게이지를 부착하여 클램핑 포스를

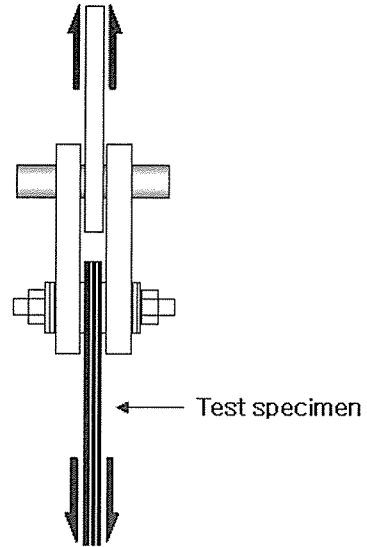


Fig. 4 Double lap joint jig.

Table 1 Material properties of SK carbon/epoxy composite materia

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

측정하였다. 실험에 사용된 와셔의 내경은 9.53mm이며 외경은 20.9mm이다.

측정된 클램핑 포스는 9.822kN이었으며, 체결부 강도시험에 사용한 장비는 Instron사의 5582이다. Fig. 4는 파손강도를 측정하기 위한 체결부 지그로서, 이중 겹치기 이음 구조로 되어 있다.

시편제작에 사용된 재료의 물성은 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 시편의 치수는 Table 3에 나타내었다. 적용 순서는 $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$ 이다. 각 모델 당

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

7개의 시편을 제작하고 실험하여 최대하중의 산술평균값을 파손하중으로 결정하였다. Fig. 5는 복합재료 체결부 시편에 $F=9.822\text{kN}$ 의 클램핑 포스가 존재할 때 파손하중을 실험으로 구한 결과이다.

3. 파괴면적 지수법

파괴면적지수법은 복합재료의 파손이 일어날 수 있는 특정면적에 대하여 파손지수의 평균적인 크기를 평가하는 방법으로, 복합재료의 파손이 일어날 수 있는 특정면적은

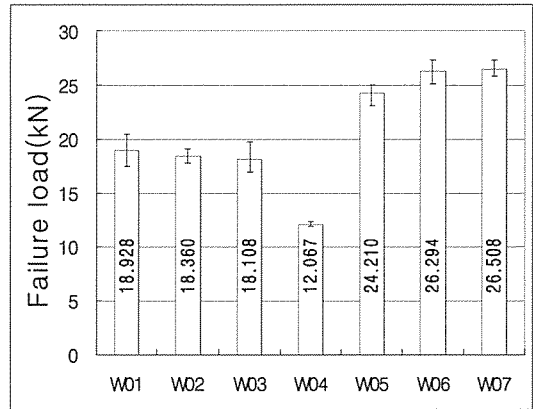


Fig. 5 Experimental failure loads of the composite joints with the clamping force.

사용된 파손 판정식의 파손지수가 1 이상인 부분으로 한정되며 파괴면적지수는 다음과 같다[8,9,10].

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

FAI : 파괴면적지수 (Failure Area Index)

F_i : 파괴지수 (Failure Index)

H_A : 원공의 내부면적

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 1이상인 각 유한요소의 면적으로 정의된다. 또한 식 (1)의 H_A 는 원공의 내부 면적으로 정의되며, 파괴면적지수법은 동일한 적층순서를 가지는 복합재료 체결부 구조물에 대하여 파괴면적지수(FAI)값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이다.

4. 체결부의 파손강도예측

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

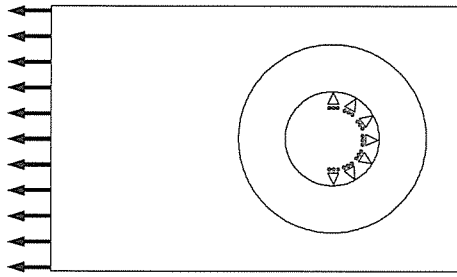


Fig. 6 Fixed radial displacement along hole boundary.

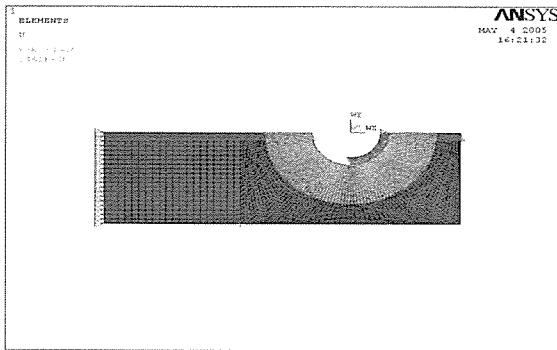


Fig. 7 Finite element model for the linear analysis of the composite joint.

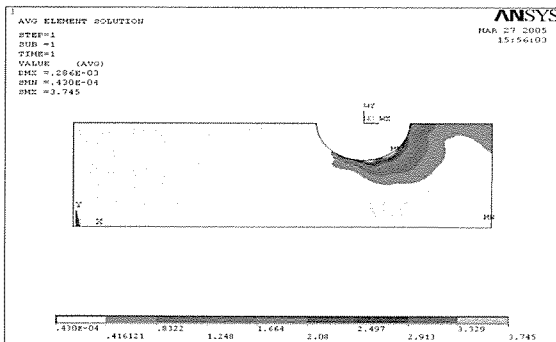


Fig. 8 Yamada-Sun failure indexes when the experimental failure load was applied.

재료 기계적 체결부의 선형 해석방법에는 여러 가지가 있으나[8,9,10], 본 논문에서는 Fig. 6과 같이 핀 구멍 주위의 반원 부분을 반경 방향으로 구속하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 원공과 접촉하는 핀을 강체로 가정하는 방법으로, 핀과 평판에 작용하는 접촉하중 분포를 모재의 특성에 관계없이 근사적으로 잘 묘사할 수 있는 방법으로 알려져 있다. Fig. 7은 복합재료 체결부의 파손해석을 위한 유한요소 모델을 나타낸 그림으로 좌우 대칭성을 이용하여 1/2모델만 해석하였다. 와셔부에 작용하는 클램핑 포스는 압력

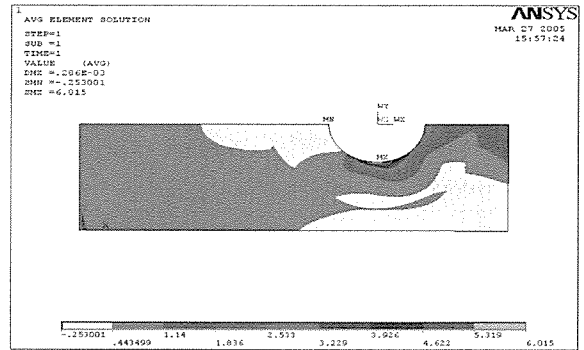


Fig. 9 Tsai-Wu failure indexes when the experimental failure load was applied.

으로 환산하여 적용하였으며, 상용 프로그램인 ANSYS 8.0을 이용하여 적층(Layered structural solid) 요소로 구성하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 선형 유한요소해석의 결과를 나타낸 그림으로, 실험으로 구한 파손하중(18.928 kN)을 W01모델에 적용하여 계산한 파손지수를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 Yamada-Sun 파손지수와 Tasi-Wu 파손지수의 최대값이 각각 3.745와 6.015로 나타나 Tasi-Wu 파손식이 더 높게 나타남을 볼 수 있었다. 파괴면적지수법은 동일한 적층순서를 가지는 복합재료 체결부 구조물에 대하여 파괴면적지수(FAI)값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이므로 파괴면적지수의 기준값을 선정하여야 한다. 파괴면적지수의 기준값을 선정하기 위하여 W01모델을 기준 모델로 선정하였으며, Fig. 8과 9의 결과를 이용하여 파괴면적지수값을 계산하였다.

Yamada-Sun 파손식과 Tasi-Wu 파손식으로 계산된 파괴면적지수값은 각각 6.592와 13.004이었으며, 각각의 모델이 이 값에 도달하면 파손이 일어난다고 예측하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 클램핑 포스가 존재하는 복합재료 체결부 시편의 파손강도를 파괴면적지수법으로 예측한 결과로서, 23% 범위 내에서 파손하중을 예측할 수 있었다. 복합재료 체결부의 파손강도는 복합재료의 가공정밀도, 핀과 구멍의 공차, 클램핑 포스 등에 따라 크게 변화될 수 있으며, 파괴면적지수법은 실험에서 구하여진 파손하중을 적용하므로 이를 반영하고 있다고 볼 수 있다. 또한 체결부의 클램핑 포스에 의한 수직응력성분은 핀 하중에 의한 수평 응력성분보다 상대적으로 작은 값을 가진다. 따라서 파괴면적지수법의 적용을 위한 체결부의 유한요소해석은 실험으로 구한 파손하중만 적용하고 수직응력은 가하지 않아도 된다고 생각할 수 있다. 이를 검증하기 위하여 클램핑 포스에 의한 수직응력을 적용하지 않은 유한요소해석을 수행하여 파괴면적지수법으로 파손강도를 예측하였다. W01 모델에 수직응력을 적용하지 않고 Yamada-Sun파손식으로 파괴면적지수값을 계산한 결과, 6.565가 되어 수직응력을 적용한 결과와

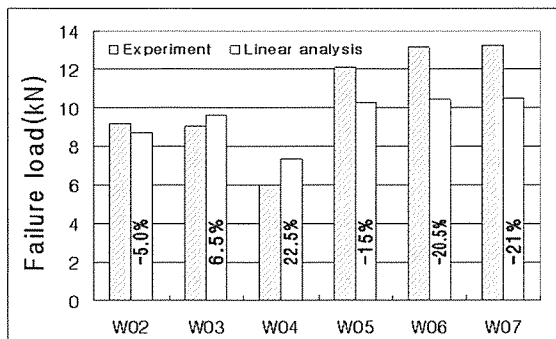


Fig. 10 Failure load prediction of the composite joint with the clamping force. (Yamada-Sun)

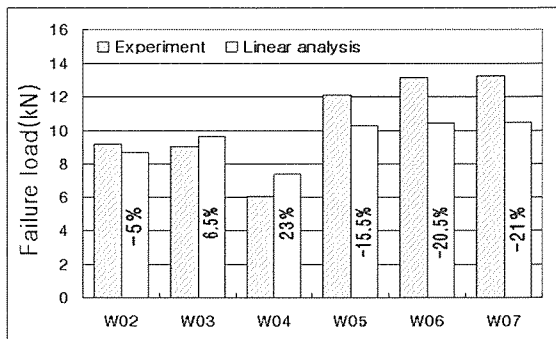


Fig. 12 Failure load prediction when the clamping force was not applied to FEM model. (Yamada-Sun)

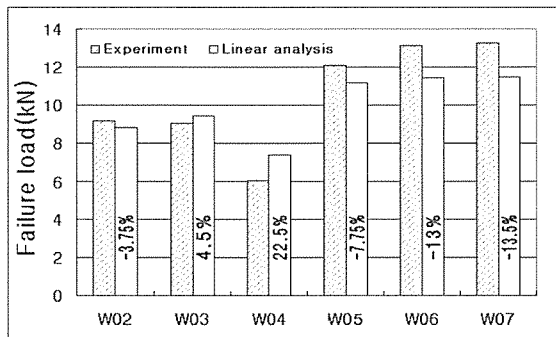


Fig. 11 Failure load prediction of the composite joint with the clamping force. (Tsai-Wu)

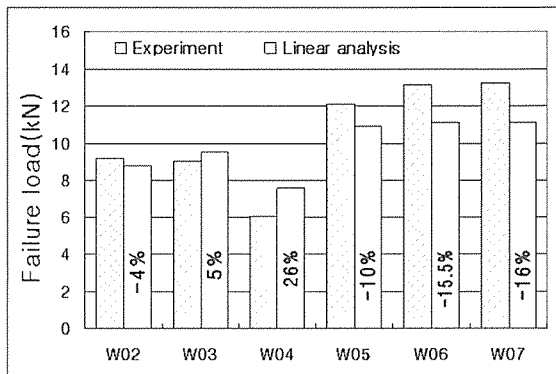


Fig. 13 Failure load prediction when the clamping force was not applied to FEM model. (Tsai-Wu)

거의 동일한 값을 나타내었다. Fig. 12는 수직응력을 가하지 않은 유한요소해석을 수행하여 파괴면적지수법으로 복합재료의 파손하중을 예측한 결과로, 23% 범위 내에서 예측할 수 있었으며, Fig. 10과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. W01 모델에 수직응력을 적용하지 않고 Tasi-Wu 파손식으로 계산한 파괴면적지수값은 18.315이었으며, 유한요소모델에 수직응력을 적용하여 구한 값과 약 40% 이상의 큰 차이를 나타내었다. Fig. 13은 Tasi-Wu 파손식으로 수직응력을 적용하지 않고 계산한 파괴면적지수값을 기준으로 복합재료 체결부의 파손강도를 예측한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 26% 범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었으며, Fig. 11과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이상의 결과로부터, 유한요소해석 시 수직응력의 유무는 파괴면적지수값의 변화를 가져올 수 있지만 복합재료 체결부의 파손강도 예측에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있었다.

클램핑 포스가 존재하는 복합재료 체결부의 파손강도를 특성길이 방법(Characteristic length)으로 예측한 참고논문[11]의 결과와 비교하기 위해 Yamada-Sun 파손식을 적용하여

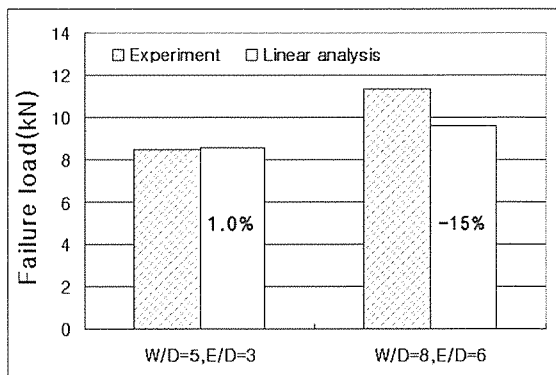


Fig. 14 Failure load prediction of Ref. [8] models. $((0/90)_s)$

파괴면적지수법으로 조인트 파손강도를 재 예측하였다. 클램핑 포스가 1.78kN인 경우에 대하여 파손강도를 예측하였으며, 시편의 치수와 체결부 강도는 참고문헌[11,12,13]과 동일한 값을 사용하였다. 기준시편은 폭과 원공의 직경비가 3이며,

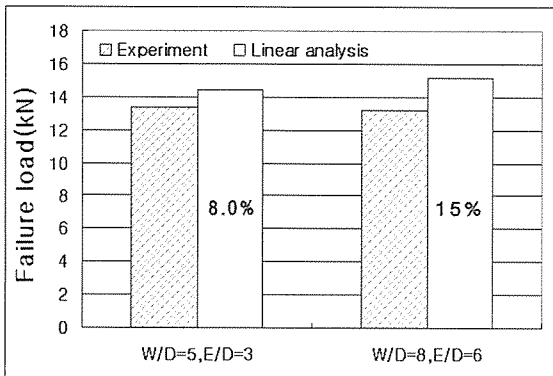


Fig. 15 Failure load prediction of Ref. [8] models. $[(90/\pm 45/0)_3]_S$

끝단까지의 거리와 원공 직경비가 3인 시편으로 설정하였으며, 적층순서가 $[(0/90)_6]_S$ 와 $[(90/\pm 45/0)_3]_S$ 인 두 가지 시편에 대하여 파손강도를 예측하였다. Fig 14와 Fig 15는 유한요소 모델에 클램핑 포스에 의한 수직응력을 적용하지 않고 파괴면적지수법으로 복합재료 체결부의 파손강도를 예측한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 복합재료 체결부의 파손강도를 15% 범위 내에서 예측할 수 있었으며, 파괴면적지수법은 클램핑 포스가 존재하는 복합재료 체결부의 강도예측에 충분히 사용할 수 있다는 결론을 내릴 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 클램핑 포스가 존재하는 복합재료 체결부를 마찰이 없는 강체핀으로 가정하여 선형 유한요소해석을 수행하고 파괴면적지수법을 적용하여 체결부의 파손강도를 예측하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 유한요소해석에서 수직응력의 유무는 파괴면적지수값의 변화를 가져올 수 있지만 복합재료 체결부의 파손강도 예측에는 큰 영향이 없음을 확인하였다.
2. 이상에서 제시된 복합재료 체결부 모델의 파손강도를 22.5% 범위 내에서 예측할 수 있었으며, 파괴면적지수법은 클램핑 포스가 존재하는 복합재료 체결부의 강도예측에 충분히 적용할 수 있음을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

- 1) L. J. Hart-Smith, "Mechanically Fastened Joints For Advanced Composites · Phenomenological Considerations and Simple Analysis," Fibrous Composite in Structural Design, Plenum Press, 1980, pp. 543-574.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) F. K. Chang and R. A. Scott, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints," Journal of Composite Materials, Vol. 16, 1982, pp. 470-494.
- 5) 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.
- 6) H. T. Sun, F. K. Chang and X. Qing, "The response of Composite Joints with Bolt-Clamping Loads, Part I: Model Development," Journal of Composite Materials, Vol. 36, 2002, pp. 47-67.
- 7) H. T. Sun, F. K. Chang and X. Qing, "The response of Composite Joints with Bolt-Clamping Loads, Part II: Model Verification," Journal of Composite Materials, Vol. 36, 2002, pp. 69-92.
- 8) 최진호, 전영준, 권진희, "기계적으로 체결된 복합재료 조인트의 강도에 관한 연구," 한국복합재료학회논문집, 제15권, 제4호, 2002, pp. 9-16.
- 9) 전영준, 최진호, 권진희, 2003, "파괴면적지수법을 이용한 복합재료 기계적 체결부의 강도평가에 관한 연구," 한국복합재료학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 1-6.
- 10) 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.
- 11) H. S. Wang, C. L. Hung and F. K. Chang, "Bearing Failure of Bolted Composite Joints. Part I: Experimental Characterization," Journal of Composite Materials, Vol. 30, No. 12, 1996.
- 12) C. L. Hung and F. K. Chang, "Strength Envelope of Bolted Composite Joints under Bypass Loads," Journal of Composite Materials, Vol. 30, No. 13, 1996.
- 13) Y. Xiong, C. Poon, P. V. Straznicki and H. Vietinghoff, 1995, "A prediction method for the compressive strength of impact damaged composite laminates," Composite Structures, Vol. 30, pp. 357-367.