

파괴면적지수법을 이용한 조인트 강도 예측에 관한 연구

전영준*·최진호**·권진회**·양승운***·김광수***

A study on the prediction of the joint strength using the failure area index method

Young-Jun Chun, Jin-Ho Choi, Jin-Hwe Kweon, Seung-Un Yang and Kwang-Soo Kim

Key Words: Failure area index method (파괴면적지수법), Failure index (파괴지수)

Abstract

With the wide application of fiber-reinforced composite material in aero-structures and mechanical parts, the design of composite joint have become a very important research area because they are often the weakest areas in composite structures. In this paper, the failure area index method to predict the strength of the mechanically fastened composite joint which has the same stacking sequence was used and evaluated. By the used failure area index method, the strength of the mechanically fastened composite joint which has the specimen of different shape and stacking sequence could be predicted within 9.96%.

1. 서 론

복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 감쇠특성과 충격특성이 우수하기 때문에 그 사용이 증가하고 있으며 응용분야 또한 다변화되고 있다[1]. 그러나, 대부분의 복합재료 구조물은 체결구조를 포함하고 있으며 이로 인해 전체 구조물의 효율성이 저하되는 경우가 대부분이다. 일반적으로 복합재료 적층 구조물의 체결방법은 크게 기계적 체결방법과 접착에 의한 체결방법으로 나눌 수 있다. 기계적 체결방법은 모재에 원공을 가공한 후, 볼트나 리벳 혹은 핀 등을 이용하여 결합하게 된다. 이로 인하여 복합재료의 강도가 저하되고 체결부 주위에는 높은

응력집중현상이 발생하여 구조물의 파괴를 가져올 수가 있다. 그러나, 분해결합이 쉽고 파손점검 및 수리가 용이하며 표면처리가 거의 필요 없는 장점을 가지고 있다[2,3].

본 논문에서는 기계적 체결을 하는 복합재료 체결부의 파손강도를 예측할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하는 방법에는 여러 가지가 있으나, Chang 등이 제안한 특성길이방법[4]이 주로 사용되고 있다. 특성길이방법은 특성곡선 상에서 파손 판정식을 적용하여 체결부의 파손을 예측하는 방법으로 실험과 해석이 매우 복잡하다. 최진호[5] 등은 특정면적의 파손지수를 근거로 한 파괴면적지수법을 제안하였으며, 동일한 적층구조를 가진 복합재료 체결부의 강도예측에 매우 유용한 방법임을 증명하였다.

본 논문에서는 복합재료 체결부의 형상 및 적층순서의 변화에 따른 복합재료 체결부의 강도 변화를 파괴면적지수법으로 예측하고 실험치와

* 경상대학교 공과대학 기계설계학과 대학원

** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구센터

*** (주) 테크

비교하여 파괴면적지수법의 유효성을 검토하였다.

2. 파괴면적지수법

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].

$$FAI = \frac{\int F^n dA}{A} \approx \frac{\sum F_i^n \cdot A_i}{A} \quad (1)$$

FAI : 파괴면적지수 (Failure Area Index)

F_i : 파괴지수 (Failure Index)

A : 면적 (Area)

n : 가중치 (Weighting factor)

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

3. 시편 제작 및 체결부 강도평가

복합재료 체결부의 형상 및 적층순서의 변화에 따른 복합재료 체결부의 강도를 평가하기 위하여 복합재료 체결부 시편을 제작하고 체결부의 파손 강도 실험을 수행하였다. 시편 제작에 사용된 재료는 탄소섬유강화 에폭시 복합재료로서 SK사의 USN 125* Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그와 HFG사의 평직(Fabric)을 사용하여 제작하였으며, 소재의 물성치는 Table 1과 Table 2에 나타나 있다.

시편제작방법은 진공백(Vacuum Bag)성형방법으로 오토클레이브(Autoclave)내에서 제작하였다. 실험장비는 INSTRON사의 Universal Machine 8516

Table 1 Material properties of SK carbon/epoxy composite material

E_x (GPa)	131	X_T (MPa)	2000
E_y, E_z (GPa)	8.2	X_C (MPa)	-1400
G_{xy}, G_{xz} (GPa)	4.5	Y_T (MPa)	61
G_{yz} (GPa)	3.5	Y_C (MPa)	-130
ν_{xy}, ν_{xz}	0.281	S_{xy}, S_{xz} (MPa)	70
ν_{yz}	0.470	S_{yz} (MPa)	40

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

E_x (GPa)	65.4	X_T, Y_T (MPa)	959.1
E_y (GPa)	65.4	X_C, Y_C (MPa)	-692.9
G_{xy} (GPa)	4.5	S	64.9
ν_{xy}	0.281		

이며 1mm/min의 속도로 복합재료 체결부의 강도 실험을 수행하였다.

Fig. 1과 같은 복합재료 체결부에 대하여 주요 설계변수인 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비에 따른 체결부의 강도실험은 이미 수행한 바 있으므로[5], 복합재료 체결부의 형상을 Fig. 2와 같은 사각형 형태로 제작하여 체결부의 강도실험을 수행하였다. 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 서로 다른 3가지 모델에 대하여 시편을 제작하였는데, 시편의 치수는 Table 3에 나타나 있다. 이때 적층순서는 $[\pm 45_2/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$ 이고 $\pm 45^\circ$ 층은 평직층을 의미한다.

복합재료 체결부의 적층순서를 변화시켜 복합재료 체결부의 파손강도를 평가하였다. 적층순서는 $[0_2/45/-45/90_2/0_2]_s$ 이며, Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그만 사용하였다. 체결부의 형상은 Fig. 2와 같은 사각형 형상이며, 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 서로 다른 7가지 모델에 대하여 시편을 제작하였다. Table 4는 실험에 사용한 시편의 치수를 나타낸다.

Table 3 Dimensions of the test specimens

	w(mm)	e(mm)	d(mm)	s(mm)	w/d	e/d
R01	26.8	13.4	9.53	30	2.8	1.4
R02	19	13.4	9.53	30	2	1.4
R03	26.8	9.6	9.53	30	2.8	1

Table 4 Dimensions of the test specimens

	w(mm)	e(mm)	d(mm)	s(mm)	w/d	e/d
M01	26.8	13.4	9.53	30	2.8	1.4
M02	19	13.4	9.53	30	2	1.4
M03	38	13.4	9.53	30	4	1.4
M04	26.8	9.6	9.53	30	2.8	1
M05	26.8	19	9.53	30	2.8	2
M06	26.8	23.8	9.53	30	2.8	2.5
M07	26.8	28.6	9.53	30	2.8	3

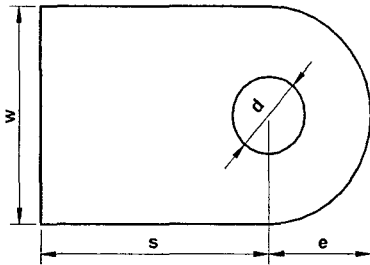


Fig. 1 Dimension of the circle specimen.

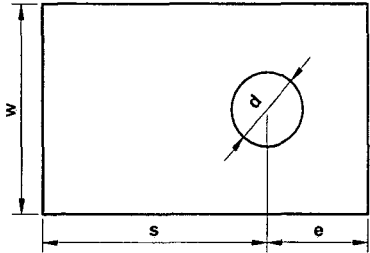


Fig. 2 Dimension of the square specimen.

4. 파괴면적지수법을 이용한 복합재료 체결부 강도 예측

파괴면적지수법의 타당성을 검증하기 위하여 시편의 설계변수인 체결부의 형상 및 적층순서를 달리한 각각의 시편에 대하여 유한요소해석을 수행하고 파괴면적지수법을 적용하여 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. 파괴면적지수법으로 체결부의 강도를 예측하고자 할 경우에는 복합재료 체결부 구조에 대한 유한요소해석을 수행하여야 한다. 유한요소해석을 위하여 상용 프로그램인 ANSYS 6.1을 사용하였다.

파괴면적지수법은 식(1)의 파괴면적지수값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는

방법이므로 파손판정의 기준값을 선정하여야 한다. 본 논문의 복합재료 기계적 체결부의 적층순서는 참고논문[5]와 같은 적층순서를 가지므로 동일한 기준값을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 식(1)의 가중치 n 을 1로 고정하고 Yamada-Sun 파손식을 적용한 참고문헌[5]의 계산결과를 이용하였는데, 파괴면적지수의 기준값은 0.1303 이었다.

복합재료 체결부의 형상을 사각형 형태로 제작하고 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 서로 다른 3가지 모델에 대해 파괴면적지수법을 이용하여 복합재료 체결부의 파손하중을 예측하였다. Fig. 3은 파괴면적지수법으로 예측한 복합재료 체결부 파손하중과 실험으로 구한 파손하중을 비교하여 나타낸 그림이다. 파괴면적지수법으로 예측한 하중이 실험에서 구한 하중보다 다소 낮게 평가되나 -6.22% 범위 내에서 일치함을 볼 수 있다.

복합재료 체결부의 주요 설계변수 중 하나인 적층순서를 다르게 하여 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. 파괴면적지수법은 동일한 적층순서를 가지는 복합재료 체결부 구조물에 대하여 파괴면적지수값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이다. 따라서 적층순서가 다른 체결부의 강도를 예측하기 위해서는 파괴면적지수의 기준값을 재 선정하여야 한다. 파괴면적지수의 기준값은 복합재료의 파손판정식에 따라 달라질 수 있으므로 적절한 파손판정식을 선정하여야 한다. 본 논문에서는 원공이 없는 단순인장시편에 대하여 인장시험과 응력해석을 수행하고 파손지수를 계산하여 적절한 파손판정식을 선정하였다[5].

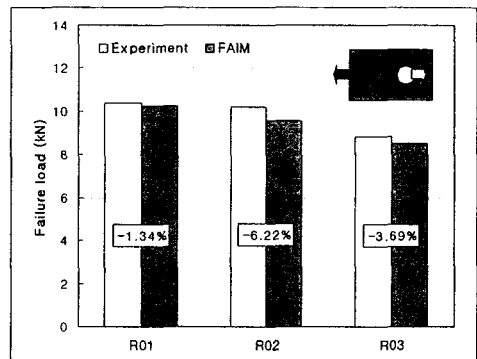


Fig. 3 Comparison of FAIM and Experiment results.

5. 결론

본 논문에서는 파괴면적지수법의 유효성을 검증하기 위하여 복합재료 체결부의 주요 설계변수인 체결부의 모양 및 적층순서 변화시켜 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 복합재료 체결부의 설계 변수인 형상을 달리하여 복합재료 체결부의 강도를 예측한 결과, 최대 -6.22% 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다.

2. 복합재료 체결부의 주요 설계 변수인 적층순서를 달리하고 단일소재 복합재료 체결부의 파손강도를 파괴면적지수법으로 예측한 결과, 최대 9.96% 범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다.

3. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 파괴면적지수법은 동일한 적층구조를 가지는 복합재료 체결부의 파손강도 예측에 매우 효과적인 방법임을 입증하였다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업과 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) J. J. Reinhart (Eds), Composite, ASM International, Vol. 1, 1987, pp. 479-495.
- (2) P. K. Mallick, Fiber-Reinforced Composite, 1988, p. 418.
- (3) J. R. Vinson and R. L. Sierakowski, The Behavior of Structure Composed of Composite Materials, Martinus Nijhoff Publishers, 1987, Chap. 8.
- (4) F. K. Chang and R. A. Scott, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints", J. of Composite Materials, Vol. 16, 1982, pp. 470-494.
- (5) 최진호, 전영준, 권진희, 기계적으로 체결된 복합재료 조인트의 강도에 관한 연구, 한국복합재료학회논문집, 제15권, 제4호, 2002년, pp. 9-16

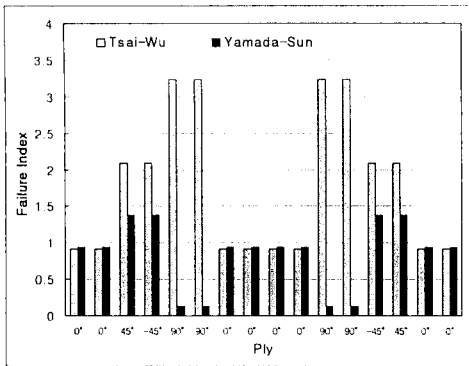


Fig. 4 Failure index of the tensile test specimen under the ultimate tensile load.

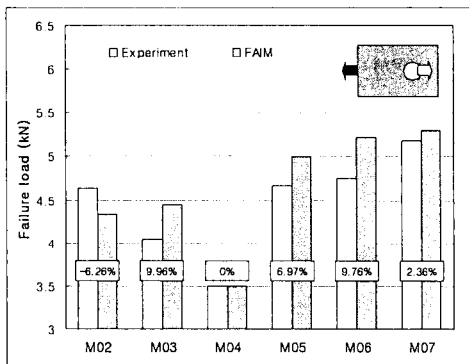


Fig. 5 Comparison of FAIM and Experiment results.

Fig. 4는 $[0_2/45/-45/90_2/0_2]_s$ 의 적층순서를 갖는 단순인장시편의 각 층별 파손지수를 계산한 그림으로, Yamada-Sun 파손지수값이 1에 근접한 값을 가지므로 Yamada-Sun 파손식을 복합재료의 체결부의 파손판정식으로 채택하였다.

파괴면적지수의 기준값을 구하기 위하여 M01 시편을 기준시편으로 정하고 실험에서 구한 파손하중을 유한요소해석에 적용하여 응력분포를 구한 다음, Yamada-Sun 파손판정식을 적용하였다. 파손지수가 1이상인 면적에 대하여 식(1)의 파괴면적지수값을 계산한 결과, 파괴면적지수의 기준값은 0.2030 이었다. Fig. 5는 $[0_2/45/-45/90_2/0_2]_s$ 의 적층순서를 갖는 복합재료 체결부의 파손하중을 파괴면적지수법으로 예측한 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 5에서 보는바와 같이 파괴면적지수법을 이용하여 계산한 파손하중은 9.96% 범위 내에서 실험값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.