論文

파괴면적지수법을 이용한 복합재료 기계적 체결부의 강도평가에 관한 연구

전영준*, 최진호**+, 권진회**

A Study on the strength of mechanically fastened composite joint using the failure area index method

Young-Jun Chun*, Jin-Ho Choi**+ and Jin-Hwe Kweon**

ABSTRACT

As the use of composites has become popular in recent years, the design of the composite joints has become a very important research area because the structural efficiency of the composite structure is determined by its joints, not by its basic structures. In this paper, presented comparisons of numerical results by the FAI (Failure area index) method[9] and measured data for a various geometric shapes and stacking sequence justify the validity of the FAI method. The FAI method is shown to produce very favorable comparisons with measured failure loads of mechanically fastened composite joints with the difference well within 9.96% for all 11 cases investigated.

초 록

복합재료의 사용이 일반화되면서 복합재료 구조물의 효율성은 복합재료 구조자체 보다는 복합재료 체결부에 의해서 결정되기 때문에 복합재료 체결부의 설계는 매우 중요한 연구분야가 되고 있다. 본 논문에서는 체결부의 형상변화 및 적층순서의 변화에 따른 파손하중을 파괴면적지수법에 의한 수치적인 예측과 실험치를 비교하여 파괴면적지수법의 유용성을 검토하였다. 연구되어진 11 cases에 대해서 파괴면적지수법에 의한 예측하중은 측정된 파손하중과 최대 9.96%내의 오차를 가짐을 볼 수 있었다.

Key Words : 기계적 체결(Mechanical joint), 파손지수(Failure index)

1. 서 론

고분자 복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 감쇠특성과 충격특성이 우수하기 때문에 그 사용이 점점 증가되고 있다[1]. 그러나, 복합재료 구조물의 효율성은 복합재료 구조자체 보다는 복합재료 체결부에 의해서 결정되기 때문에 복합재료 체결부의 설계는 매우 중요한 연구분야로 대두되고 있다. 복합재료 구조물의 체결방법은 크게 기계적 체결방법(Mechanically Fastened Joint)과 접착에 의한 체결방법(Adhesively Bonded Joint)으로 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 필요없는 장점을 가지고 있다[2].

기계적으로 체결된 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하기 위해서 많은 연구들이 진행되었다. Chamis[3]는 기하

* 경상대학교 기계설계학과 대학원
**+ 경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구센터, 교신저자(E-mail:choi@gsnu.ac.kr)
** 경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구센터

학적 형상과 적층판 강도에 대한 체결부강도의 변화에 대한 연구를 수행하였다. Hart-Smith[4]는 체결부 강도예측에 응력집중계수를 이용하였으며, Whitney and Nuismer[5,6]는 파손평가식과 평균응력을 기초로 한 특성길이방법을 제안하였다. Chang[7]등은 인장과 압축에 대한 특성길이를 조합한 특성곡선을 제안하였다. Hollman[8]은 점진적 파손해석과 파괴에너지에 기초한 파손영역모델을 제안하였다. 최진호[9]등은 특정면적의 파손지수를 근거로 한 파괴면적지수법(Failure Area Index Method)을 제안하였으며, 동일한 적층구조를 가진 복합재료 체결부의 강도예측에 매우 유용한 방법임을 증명하였다.

본 논문에서는 복합재료 체결부의 형상, 원공의 크기, 적층순서의 변화 등 다양한 변수에 대한 복합재료 체결부의 강도를 파괴면적지수법으로 예측하고 실험치와 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 각각의 층에 대한 파괴면적지수 FAI_j는 다음과 같이 표현될 수 있다[9].

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

FAI : 파괴면적지수 (Failure Area Index)

F_i : 파괴지수 (Failure Index)

H_A : 원공의 내부면적

n : 가중치 (Weighting factor)

전체 적층판에 대한 파손면적지수는 다음과 같다.

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

m : 전체 적층수

식 (1)의 A_i는 복합재료 파손식의 파괴지수가 1이상인 각 유한요소의 면적으로 정의되며, n은 면적에 대한 파괴지수의 상대적인 가중치를 나타낸다. 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, 원공의 크기 및 적층순서의 변화에 따른 복합재료 체결부의 강도를 평가하기 위하여 복합재료 체결부 시편을 제작하고 체결부의 파손강도 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.

Table 1 Material properties of SK carbon/epoxy composite material

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_1	131 GPa
Elastic moduli in transverse directions	E_2, E_3	8.2 GPa
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes	G_{12}, G_{13}	4.5 GPa
Shear modulus in 2-3 plane	G_{23}	3.5 GPa
Poisson's ratios	ν_{12}, ν_{13}	0.281
	ν_{23}	0.47
Tensile stength in fiber-direction	X_T	2000 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_T	61 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 stength in fiber-direction	X_T	959.1 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_T	929.1 MPa
Shear strength	S	64.9 MPa

시편제작방법은 진공백(Vacuum Bag)성형방법으로 오토클레이브(Autoclave)내에서 제작하였고, 경화 사이클은 Fig. 1과 같다. 드릴링 가공에 쓰인 공구는 텅스텐 카바이드 드릴(Tungsten Carbide Drill)이며, 사용 횟수를 1회로 제한하여 가공조건에 대한 영향을 최소화하였다. 드릴가공된 복합재료 시편은 금속핀으로 체결되었으므로 볼트체결과 같은 고정력(Clamping Force)은 고려되지 않았다. Fig. 2는 파손강도 측정을 위한 체결부 실험 치구로서 이중 겹치기 이음(Double Lap Joint)의 형상이며, 강판의 두께를 충분히 크게 하여 복합재료 체결부의 파손강도를 견딜 수 있도록 설계하였다.

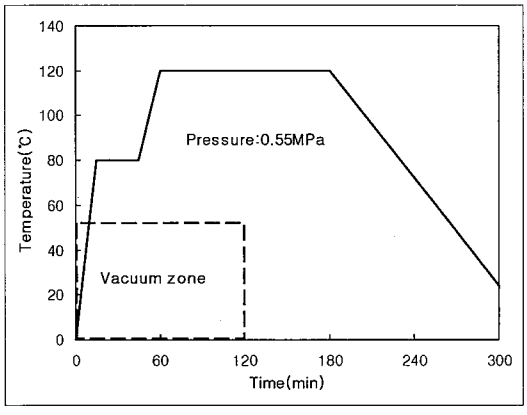


Fig. 1 Cure cycle of the composite materials.

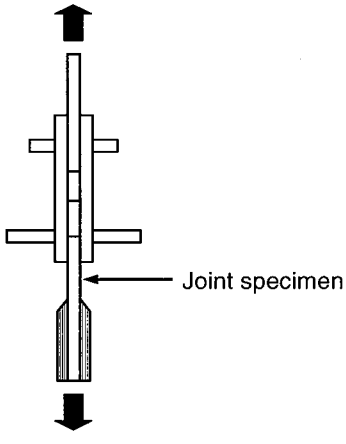
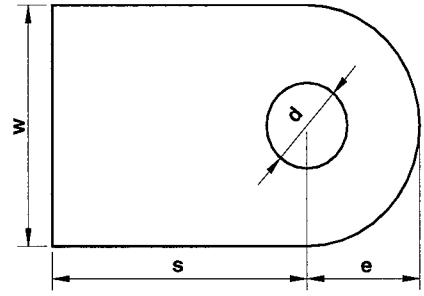


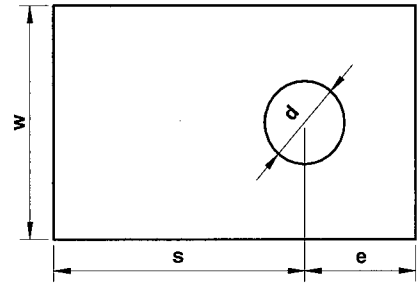
Fig. 2 Jig for a joint test.

실험장비는 INSTRON사의 Universal Machine 8516이며 1mm/min의 속도로 복합재료 체결부의 강도실험을 수행하였다. 각 모델에 대한 복합재료 체결부의 파손강도는 하중의 최대값을 파손강도값으로 선정하였으며, 각 모델당 10개의 시편을 제작하여 산술평균값을 각 시편의 파손 하중으로 결정하였다.

Fig. 3 (a)와 같은 복합재료 체결부에 대하여 주요 설계변수인 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리비에 따른 체결부의 강도실험은 이미 수행한 바 있으므로 [9], 복합재료 체결부의 형상을 Fig. 3 (b)와 같은 사각형형태로 제작하여 체결부의 강도실험을 수행하였다. 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 서로 다른 3가지 모델에 대하여 시편을 제작하였는데, 시편의 치수는



(a) Round edge[M]



(b) Rectangular edge[R, S]

Fig. 3 Geometry of the joint specimen.

Table 3 Dimensions of the test specimens with rectangular edge

	w	e	d	s	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 with different joint size

	w	e	d	s	w/d	e/d
M0.5(0.5times)	14	7	5	15.8	2.8	1.4
M1.5(1.5times)	39.4	19.7	14	44	2.8	1.4

Table 5 Dimensions of the test specimens with different stacking sequence

	w	e	d	s	w/d	e/d
S01	26.8	13.4	9.53	30	2.8	1.4
S02	19	13.4	9.53	30	2	1.4
S03	38	13.4	9.53	30	4	1.4
S04	26.8	9.6	9.53	30	2.8	1
S05	26.8	19	9.53	30	2.8	2
S06	26.8	23.8	9.53	30	2.8	2.5
S07	26.8	28.6	9.53	30	2.8	3

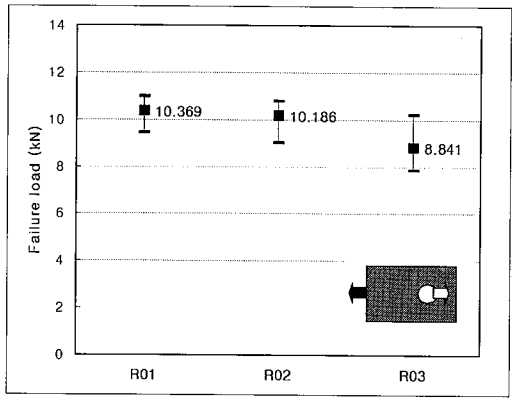


Fig. 4 Failure load of the composite joint with rectangular edge.

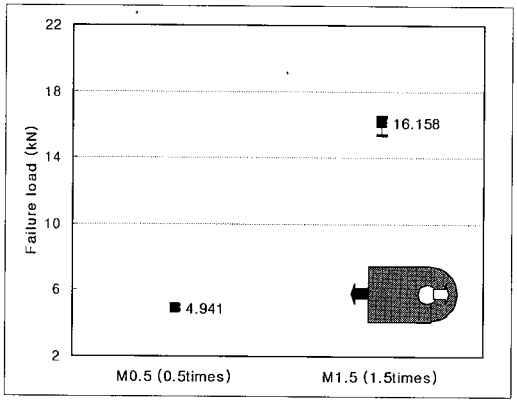


Fig. 5 Failure load of the composite joint with different joint size.

Table 3에 나타나 있다. 이때 적층순서는 $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$이고 ±45°층은 평직층을 의미한다. Fig. 4는 복합재료 체결부의 파손강도를 실험한 결과이다.

복합재료 체결부에 원공의 크기를 0.5배, 1.5배로 변화시켜 복합재료 체결부의 파손강도를 평가하였다. 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비는 일정한 값으로 고정하였으며, 체결부의 치수는 Table 4에 나타나 있다. Fig. 5는 복합재료 체결부의 파손강도를 실험한 결과이다.

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. 3 (b)와 같은 사각형 형상이며, 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 서로 다른 7가지 모델에 대하여 시편을 제작하였다. Table 5는 실험에 사용한 시편의 치수를 나타내며, 복합재료 체결부의 파손강도 실험결과는 Fig. 6에 나타나 있다.

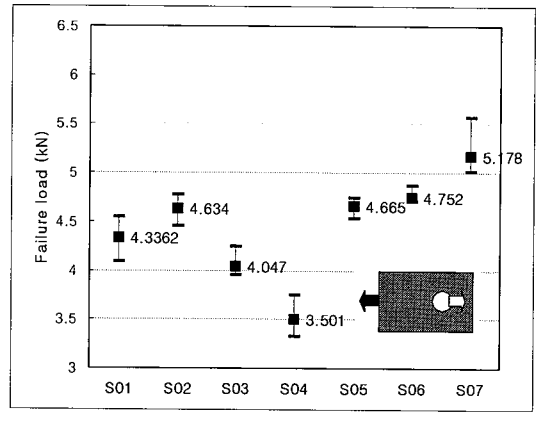


Fig. 6 Failure load of the composite joint with different stacking sequence.

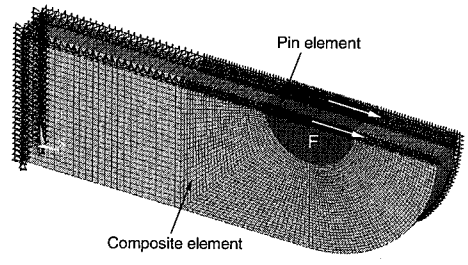


Fig. 7 Finite element model of the composite joint.

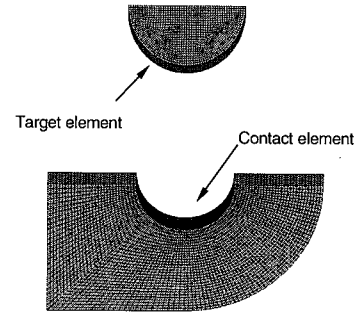


Fig. 8 Configuration of the contact element.

4. 파괴면적지수법을 이용한 복합재료 체결부 강도 예측

파괴면적지수법의 타당성을 검증하기 위하여 시편의 설계변수인 체결부의 형상, 원공의 크기 및 적층순서를 달리

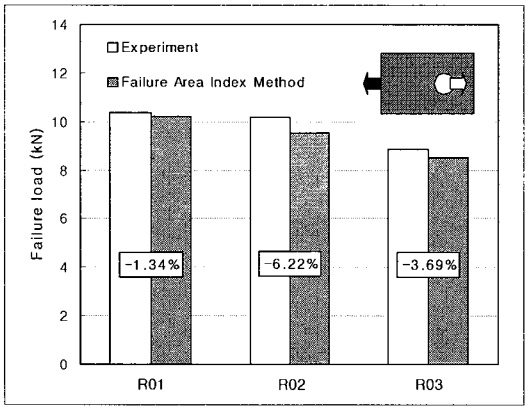


Fig. 9 Failure load of the composite joint with rectangular edge by the FAI method.

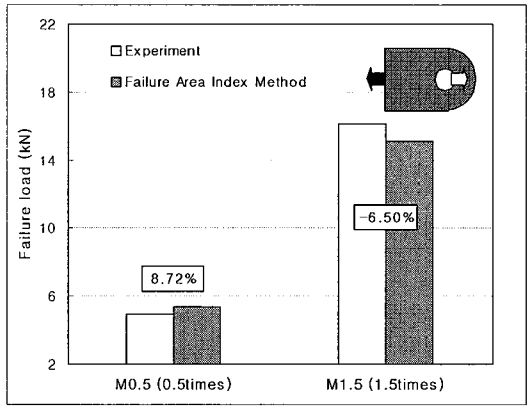


Fig. 10 Failure load of the composite joint with different joint size by the FAI method.

한 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. Fig. 7은 복합재료 체결부의 파손해석을 위한 유한요소 모델을 나타낸 그림으로 좌·우 대칭성을 이용하여 시편의 1/2만 해석하였다. 복합재 체결부는 8-Noded Layered Structural Solid 요소를 사용하였으며, 핀은 3-D Structural Solid 요소를 사용하여 해석하였다. 복합재료 체결부 시편에 하중이 가해 질 때, 복합재료의 접촉상태는 변화하게 되므로 Fig. 8에서 보는 바와 같은 접촉요소를 정의하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다.

파괴면적지수법은 식 (1)의 파괴면적지수값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이므로 파손판정의 기준값을 선정하여야 하며 동일한 적층순서에 대하여 동일한 값을 가진다. 본 논문에서 복합재료 체결부의 적층순서는 참고논문[9]와 같은 적층순서를 가지므로 동일한 기준값을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 식 (1)의 가중치 n을 1로 고정하고 Yamada-Sun 파손식을 적용한 참고문헌[9]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. 9는 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.

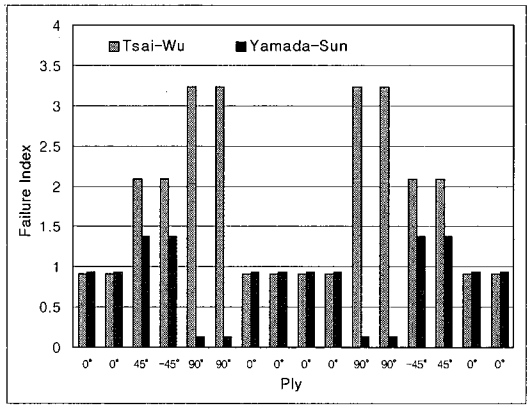


Fig. 11 Failure index of the tensile test specimen under the ultimate tensile load.

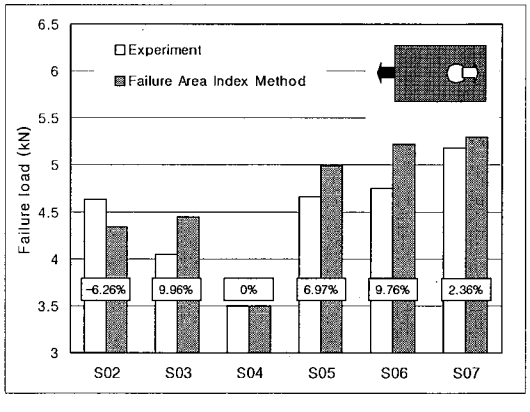


Fig. 12 Failure load of the composite joint with different stacking sequence by the FAI method.

위에서와 같이 동일한 적층순서를 가진 복합재료 체결부 시편에 원공의 크기를 0.5배, 1.5배로 변화하고, 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리비를 일정하게 하여 체결부의 파손강도를 예측하였다. Fig. 10은 파괴면적지수법을 이용하여 예측한 복합재료 체결부 파손하중과실험으로 구한 파손하중을 나타낸 그림이다. 원공의 크기에 따라 다소 차이가 있으나 8.72% 범위 내에서 실험값과 일치됨을 볼 수 있었다.

복합재료 체결부의 주요 설계변수중 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 재선정하여야 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[9].

Fig. 11은 $[0_2/45/-45/90_2/0_2]s$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 S01 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 0.2030이었다. Fig. 12는 $[0_2/45/-45/90_2/0_2]s$의 적층순서를 갖는 복합재료 체결부의 파손하중을 파괴면적지수법으로 예측한 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 12에서 보는바와 같이 파괴면적지수법을 이용하여 계산한 파손하중은 9.96% 범위내에서 실험값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 파괴면적지수법의 유효성을 검증하기 위하여 복합재료 체결부의 주요설계변수인 체결부의 크기, 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 크기를 0.5배, 1.5배로 달리하여 파괴면적지수법을 적용시켜 복합재료 체결부 강도를 예측한 결과, 최대 8.72% 범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다.
3. 복합재료 체결부의 주요 설계 변수인 적층순서를 달리하고 단일소재 복합재료 체결부의 파손강도를 파괴면적지수법으로 예측한 결과, 최대 9.96% 범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다.
4. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 파괴면적지수법은 동일한 적층구조를 가지는 복합재료 체결부의 파손강도 예측에 매우 효과적인 방법임을 입증하였다.

후 기

이 논문은 2003년도 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) C. C. Chamis, "Simplified Procedure for Designing Composite Bolted Joints," *J. of Composite Materials,* Vol. 9, 1990, pp. 615-626.
4) L. J. Hart-Smith, "Mechanically Fastened Joints For Advanced Composites · Phenomenological Considerations and Simple Analysis," *Fibrous Composite in Structural Design,* Plenuum Press, 1980, pp. 543-574.
5) J. M. Whitney and R. J. Nuismer, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *J. of Composite Materials,* Vol. 8, 1974, pp. 253-265.
6) J. M. Whitney and R. J. Nuismer, "Uniaxial Failure of Composite Laminated Containing Stress Concentrations," *Fracture Mechanics of Composites,* ASTM STP 593, 1975, pp. 117-142.
7) F. K. Chang and R. A. Scott, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints," F. K. Chang and R. A. Scott, 1982, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints," *J. of Composite Materials,* Vol. 16, 1982, pp. 470-494.
8) K. Hollman, "Failure Analysis of Bolted Composite Joints Exhibiting In-Plane Failure Modes," *J. of Composite Materials,* Vol. 30, 1996, pp. 358-383.
9) 최진호, 전영준, 권진회, "기계적으로 체결된 복합재료 조인트의 강도에 관한 연구," 한국복합재료학회논문집, 제15권, 제4호, 2002년, pp. 9-16