

# 선형해석을 이용한 복합재료 기계적 체결부의 강도평가에 관한 연구

전영준\* · 최진호\*\* · 권진희\*\* · 변준형\*\*\* · 양승운\*\*\*\*

## A Study on the Strength of Mechanically Fastened Composite Joint Using the Linear Analysis

Y-J Chun, J-H Choi, J-H Kweon, J-H Byun and S-Y Yang

**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 failure load of the mechanically fastened composite joint was used and the prediction accuracies of the linear finite element analysis were compared with those of nonlinear finite element analysis.

### 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 기계적 체결방법(Mechanically Fastened Joint)과 접착에 의한 체결방법(Adhesively Bonded Joint)으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 기계적 체결을 하는 복합재료 체결부의 파손강도를 예측 할 수 있는 파괴면적지수법에 대하여 연구하였다[2]. 파괴면적지수법은 복

합재료의 파손이 일어날 수 있는 특정면적에 파손지수의 평균적인 크기를 평가하는 방법으로 체결부의 강도를 예측하고자 할 경우 복합재료 체결부 구조에 대하여 유한요소해석을 수행하여야 한다. 최진호[2]등은 복합재료 체결부 구조에 하중이 가해질 때 복합재료 구멍과 핀 사이의 접촉현상을 고려한 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 복합재료 구멍과 핀 사이의 접촉을 고려한 비선형 유한요소해석은 접촉각, 접촉응력 상태를 보다 정확하게 평가 할 수 있고 핀의 탄성거동도 모사할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 수치적인 접근이 복잡하고 계산시간이 많이 소요되므로 그 적용에 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 체결부의 형상, 원공의 크기 및 적층순서가 서로 다른 복합재료 체결부 구조를 마찰이 없는 강체 핀으로 단순화하여 선형 유한요소 해석방법[3,4,5]을 수행하였으며, 이를 이용하여 파괴면적지수법으로 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였고 그 결과를 비선형 해석의 결과와 상호 비교 하였다.

\* 한국기계연구원 복합재료그룹

\*\* 경성대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구센터

\*\*\* 한국기계연구원 복합재료그룹

\*\*\*\* (주) DACC

## 2. 복합재료 체결부 시편의 형상

Fig. 1 은 복합재료 체결부 시편의 형상을 나타낸 그림으로 체결부 끝단형상이 원형과 사각형 형태로 구분되며, 체결부의 폭과 원공 직경 비( $w/d$ ), 끝단까지의 거리와 원공 직경 비( $e/d$ ), 적층순서, 원공의 크기 등이 서로 다른 모델들을 선정하였다. 해석에 사용한 복합재료 체결부 시편을 형태에 따라 크게 4 가지로 분류하였다. 첫째는 체결부의 끝단 형상을 Fig. 1 (a)와 같이 원형으로 하고 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 서로 다른 M01 - M07 모델이다. 이때 적층순서는  $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$ 이며,  $\pm 45^\circ$  층은 평직층을 의미한다. 둘째는 앞에서와 동일한 구조의 복합재료 시편을 Fig. 1 (b)와 같이 체결부 끝단형상을 사각형 형태로 변화시킨 R01, R02, R04 시편이다. 셋째는 체결부의 원공 크기를 0.5 배, 1.5 배로 변화하여 복합재료 체결부의 크기에 따른 파손강도를 평가한 M0.5, M1.5 시편으로, 원공 직경에 대한 체결부의 폭 및 끝단까지의 거리 비는 일정한 값으로 고정하였다. 넷째는 복합재료 체결부의 적층순서를  $[0_2/45/-45/90_2/0_2]_s$ 로 변화시킨 S01 - S07 모델로서, Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그만 사용하였으며 체결부의 형상은 Fig. 1 (b)와 같은 사각형 형상으로 하였다.

위에서 설명한 4 가지 종류에 대한 복합재료 체결부 시편의 치수는 Table 1 과 Table 2 에 나타나 있다.

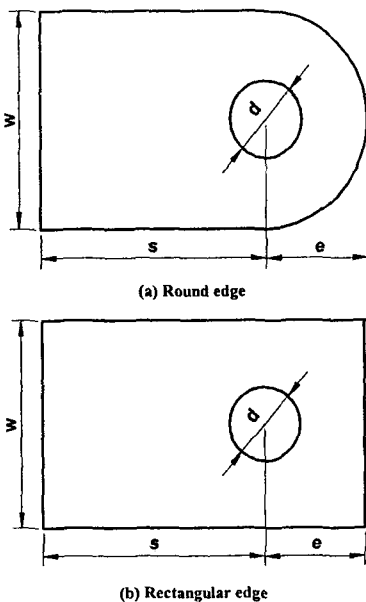


Fig. 1 Shape of the joint specimen.

Table 1 Dimensions of the test specimens.

Model (M*, R**, S***)	w	e	d	s	w/d	e/d
01	26.8	13.4	9.53	30	2.8	1.4
02	19	13.4	9.53	30	2	1.4
03	38	13.4	9.53	30	4	1.4
04	26.8	9.6	9.53	30	2.8	1
05	26.8	19	9.53	30	2.8	2
06	26.8	23.8	9.53	30	2.8	2.5
07	26.8	28.6	9.53	30	2.8	3

M\* : Round edge,  $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$

R\*\* : Rectangular edge,  $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$

S\*\*\* : Rectangular edge,  $[0_2/45/-45/90_2/0_2]_s$

Table 2 Dimensions of the test specimens.

Model	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

## 3. 파괴면적지수법을 이용한 복합재료 체결부 파손강도 예측

본 논문에서는 시편의 설계변수인 체결부의 형상, 원공의 크기 및 적층순서를 달리한 각각의 시편에 대하여 선형 유한요소해석을 수행하고 파괴면적지수법을 적용하여 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. 복합재료 기계적 체결부에 대한 선형 해석방법은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 일반적으로 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 Fig. 2 (a)에서와 같이 핀과 접촉이 일어날 수 있는 원공의 절반 부위에 코사인 하중을 부과하는 방법이다[6,7]. 이 방법은 등방성 재료의 경우에는 핀과 평판에 작용하는 접촉하중 분포가 유사하나, 복합재료 평판의 경우에는 적층각과 이방성 정도에 따라 코사인 분포와 상당한 차이를 나타내므로 그다지 사용하지 않는 방법이다. 두 번째 방법은 Fig. 2 (b)에서와 같이 핀 구멍 주위의 반원 부분에 반경 방향으로의 변위를 구속하고 시편의 한쪽 끝에서 하중을 가하는 방법으로, 원공과 접촉하는 핀을 강체로 가정하는 방법이다[3,4,5]. 이 방법은 핀과 평판에 작용하는 접촉하중 분포를 모재의 특성에 관계없이 근사적으로 잘 묘사할 수 있는 방법으로, 본 논문의 복합재료 체결부 선형해석에 도입하였다.

위의 선형 유한요소해석방법을 이용하여 유한요소해석을 수행하고 파괴면적지수법으로 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. 파괴면적지수법

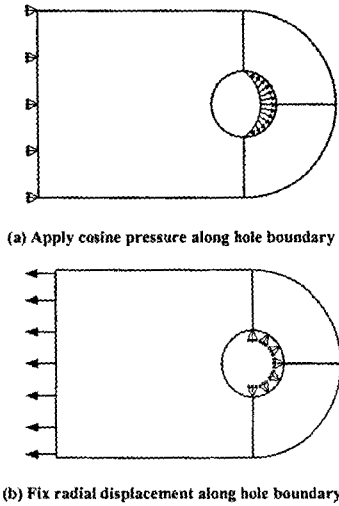


Fig. 2 Linear analyses of finite element modeling for mechanical fastened joint.

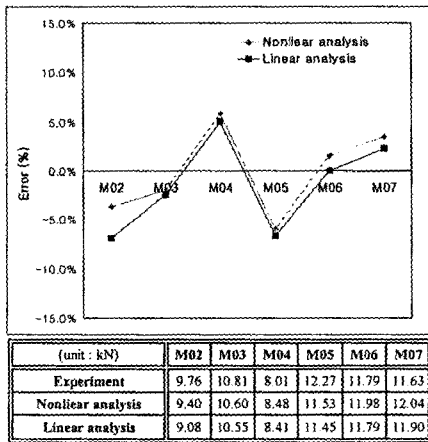


Fig. 3 Comparison of the nonlinear and linear analysis.

은 동일한 적층순서를 가지는 복합재료 체결부 구조물에 대하여 파괴면적지수(FAI)값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이므로 파괴면적지수의 기준값을 선정하여야 한다. 파괴면적지수의 기준값은 참고논문[2]와 같이 M01 시편으로 선정하였으며, 복합재료 파손식은 Yamada-Sun 파손식을 사용하였다.

Fig. 3 은 적층순서를  $[\pm 45_2/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_2]$ 하고 Fig. 1 (a)와 같은 복합재료 체결부에 대하여 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 다른 7 가지 시편에 대하여 체결부 강도를 예측한 결과이다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 선형 해석방법을 이용하여 체결부의 파손강도를 예측한 결과 -6.97%내에서 예측 할 수 있었으며 비선형 해석방법과 0.94%의 오차를 보였

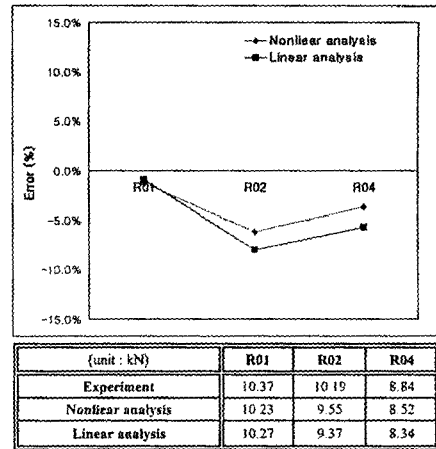


Fig. 4 Comparison of the nonlinear and linear analysis.

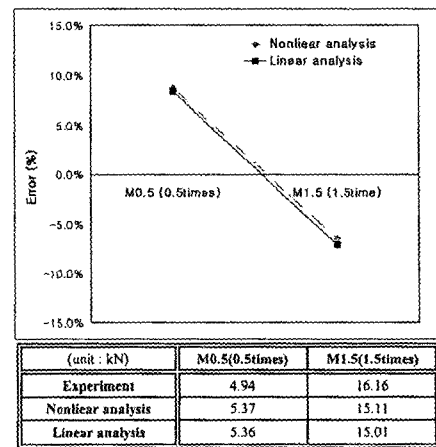


Fig. 5 Comparison of the nonlinear and linear analysis.

다.

복합재료 체결부의 형상을 Fig. 1 (b)와 같은 사각형 형태로 제작하고 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비가 서로 다른 3 가지 모델에 대해 파괴면적지수법으로 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. Fig. 4 는 파괴면적지수법으로 예측한 복합재료 체결부 파손강도와 실험으로 구한 파손강도를 비교하여 나타낸 그림으로 선형해석방법을 적용하여 체결부의 파손강도를 예측한 결과 -8.01%내에서 예측 할 수 있었으며 비선형 해석방법과는 1.79%의 오차를 보였다. 이때 적층순서는  $[\pm 45_2/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_2]$ 로 하였다.

복합재료 체결부의 원공 크기를 0.5 배, 1.5 배로 하여 파괴면적지수법으로 복합재료 체결부의 파손강도를 예측하였다. 원공 직경에 대한 체결부 폭 및 끝단까지의 거리 비는 일정한 값으로 고정하였

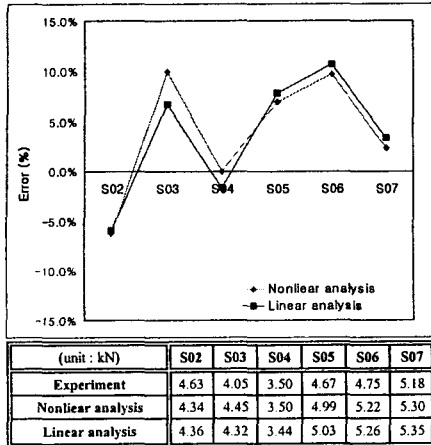


Fig. 6 Comparison of the nonlinear and linear analysis.

으며, 적층순서는  $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$ 이다. Fig. 5 는 복합재료 체결부 파손강도를 예측한 결과로 8.38%내에서 예측 할 수 있었으며 비선형 해석방법과는 0.64%의 오차를 보였다.

복합재료 체결부의 적층순서를  $[0_2/45/-45/90_2/0_2]_s$ 로 변화시킨 S01 - S07 모델의 체결부 파손강도를 파괴면적지수법으로 예측하였다. 파괴면적지수법은 동일한 적층구조를 가지는 복합재료 체결부 구조물에 대하여 파괴면적지수값이 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하는 방법이므로, 적층구조가 다른 복합재료 체결부의 강도를 예측하기 위해서는 파괴면적지수의 기준값을 재 선정하여야 한다. 앞에서 같은 방법으로 S01 모델의 파괴면적지수값을 계산한 결과 0.1737 이었으며, 파손 판정의 기준값으로 사용하였다. Fig. 6 은 복합재료 체결부 파손강도를 예측한 결과로 10.63%내에서 예측 할 수 있었으며 비선형 해석방법과는 0.67%의 오차를 보였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 파괴면적지수법의 유한요소해석 방법을 마찰이 없는 강제 핀으로 단순화한 선형 해석방법으로 적용하고 체결부의 형상, 원공의 크기 및 적층순서가 다른 복합재료 체결부의 파손강도를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 복합재료 체결부의 형상이 서로 다른 시편의 파손강도를 선형 유한요소해석으로 예측한 결과 8.38%내에서 파손강도를 예측 할 수 있었다.

2. 복합재료 체결부의 적층순서를 달리하여 제작한 시편의 파손강도를 선형 유한요소해석으로 예측한 결과 10.63%내에서 파손강도를 예측 할 수 있었다.

3. 파괴면적지수법으로 체결부의 파손강도를 예측할 경우, 마찰이 없는 강제 핀으로 단순화한 선형 유한요소해석방법은 접촉요소를 이용한 비선형 해석과 비슷한 오차범위를 가지고 계산시간을 크게 줄일 수 있으므로 매우 효율적인 방법으로 추천할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국 21 사업과 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) 최진호, 전영준, 권진희, "기계적으로 체결된 복합재료 조인트의 강도에 관한 연구," 한국복합재료학회논문집, 제 15 권, 제 4 호, 2002 년, pp. 9-16
- (3) B. L. Agarwal, "Static Strength Prediction of Bolted Joint in Composite Materials," AIAA, Vol. 18, No. 11, 1980, pp. 1371-1375
- (4) S. R. Soni, "Failure Analysis of Composite Laminate with a Fastener Hole," ASTM STP 749, pp. 145-164
- (5) Y. Tsujimoto and D. Wilson, "Elasto-Plastic Failure Analysis of Composite Bolted Joints," Journal of Composite Materials, Vol. 20, 1986, pp. 236-251
- (6) F. K. Chang, R. A. Scott and G. S. Springer, "Failure of Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes Method of Solution," Journal of Composite Materials, Vol.18, 1984, pp. 255-278
- (7) C. M. S. Wong and F. L. Matthews, "A Finite Element Analysis of Single and Two-Hole Bolted Joints in Fibre Reinforced Plastic," Journal of Composite Materials, Vol.15, 1981, pp. 481-490