

• 특집 • 초소형 티타늄 나사의 설계 및 제조기술

# FEM을 이용한 M1.0 초소형 나사 적용을 위한 CFRP 적층판의 홀 가공 영향평가

## Evaluation on Effect of Hole Machining for Application of M1.0 Subminiature Screw to CFRP Laminate Using FEM

김대영<sup>1</sup>, 김희성<sup>1</sup>, 김지훈<sup>2,#</sup>  
Dae Young Kim<sup>1</sup>, Hee Seong Kim<sup>1</sup>, and Ji Hoon Kim<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 조선대학교 대학원 기계시스템공학과 (Graduate School, Department of Mechanical System Engineering, Chosun University)  
<sup>2</sup> 조선대학교 기계시스템·미래자동차공학부 (School of Mechanical System and Automotive Engineering, Chosun University)  
# Corresponding Author | Email: [kjh@chosun.ac.kr](mailto:kjh@chosun.ac.kr), TEL: +82-62-230-7523, FAX: +82-62-230-7171

KEYWORDS: Carbon fiber reinforced plastic (탄소섬유강화플라스틱), Hole machining (구멍 가공), Laminate (적층판), Subminiature screw (초소형나사)

*The recent development of core techniques in the IT industry can be summarized as a technical advancement for safety and convenience, and mechanical technology for being "eco-friendly" and lightweight. Under these circumstances, research of lightweight material has become attractive. In this study, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) laminate specimens are subjected to a tensile test using the UTM(Universal Testing Machine, AG-IS 100 kN) to estimate their mechanical properties in terms of the Hole machining impact evaluation. The FEM (Finite Elements Method) analysis method is applied and the material properties obtained from basic experiments such as the Tensile test, the compressive test, and the shear test. CFRP materials properties from a previous study, as well as a finite element analysis program for Hole machining CFRP was compared with the experiments.*

Manuscript Received: November 17, 2016 | Revised: December 25, 2016 | Accepted: December 28, 2016

### 1. 서론

최근 IT 산업의 발전은 슬림화, 경량화 등의 기술집약산업으로 발전 되고 있다. 대표적인 IT 시장 중 하나인 스마트 폰 시장의 경우 슬림화, 경량화를 넘어 웨어러블 디바이스 개발에 앞장 서고 있다. 이러한 추세에 따라 금속보다 가벼운 경량화 재료에 대한 연구가 진행 되고 있다.

IT 시장에서 슬림화 및 경량화를 위한 기술개발 및 신기술 적용이 빠른 휴대용 스마트 기기는 S사의 갤럭시 S 시리즈와 A사의 아이폰 시리즈가 각각 세계 1,2위를 점유하고 있으며 두 제조사를 비롯한 IT 관련 산업계는 제품의 두께와 무게를 줄이기 위하여 다양한 방법과 기술에 투자하고 있다.<sup>1</sup>

이러한 경량화를 위한 소재로서 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 가 주목 받고 있다. 최근 경량화 소재로 주목

받고 있는 재료 중 하나인 CFRP는 금속재료보다 가벼울 뿐만 아니라 금속재료보다 비강성 및 비강도가 뛰어나 경량적인 측면 뿐만 아니라 강도적인 측면에서도 우수한 기계적 성질을 가지고 있다.<sup>2,3</sup> 이러한 기계적 특성 때문에 과거부터 우주항공 분야에서 활발한 연구가 진행되어왔으며, 오늘날에는 자동차, 건축, 레저, 스포츠 등의 분야에서도 연구가 진행되고 있다.<sup>4</sup>

CFRP의 경우 섬유와 수지의 복합재 형태로 이루어져 있어, 제품생산 시 단일형으로 제작하는게 가장 이상적이거나, 각 제품의 부품 모양이나 크기가 달라지기 때문에 단일형으로 제작하는데 어려움을 가지고 있다. 또한 부품형태로 제작 시 체결용 요소부품 즉 리벳, 볼트 너트 결합 등의 기계적 체결이 필요하다. 그러나 CFRP 적층판의 경우 경량화 금속재료인 알루미늄이나 마그네슘과 같은 등방성 재료와 달리 탄소섬유와 수지로 구성 된 이방성 재료이기 때문에 Hole 가공 시 섬유 파단과 기지의 손상으

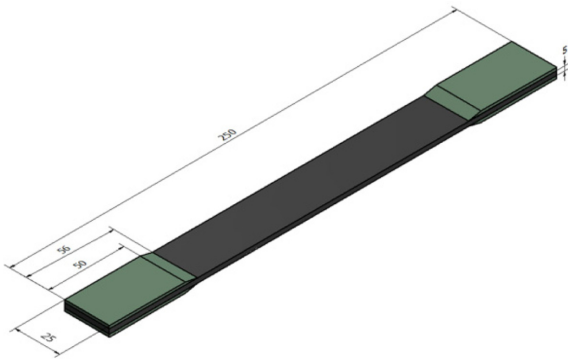


Fig. 1 Geometry of the tensile testing specimen

로 강도저하가 일어나게 된다. 특히 기계적 체결의 경우 Hole 가공으로 인해 섬유 및 기지를 손상시키게 되며, 체결부위의 응력 집중으로 강도 저하를 초래하여 피접합물의 파괴를 가져올 수 있다.<sup>5</sup>

따라서 본 논문에서는 휴대용 스마트기기에 CFRP 적용을 검토하기 위해, Hole 가공되지 않은 CFRP 적층판과 Hole 가공된 CFRP 적층판의 강도저하 비교를 통한 Hole 가공 영향에 대한 특성을 알아보고자 한다. 또한 기초실험을 통해 얻은 재료물성을 이용하여 FEM 해석 방법을 제시하고 Hole 가공에 적절한 CFRP 적층판의 설계데이터를 제공하고자 한다.

## 2. 시험방법

### 2.1 시편

시편 제작 및 인장 시험은 복합재료 인장시험 규격인 ASTM D3090/D3039M-00에 따라 진행하였다.<sup>6</sup> 규격에 따라 제작된 인장시험 시편은 NC Drilling/Tapping Machine을 이용하여 시편의 정 중앙에 탭 가공을 하였다. 탭 가공을 위해 먼저 Ø0.78 드릴을 이용하여 Hole을 먼저 가공한 후, M1.0 × 0.25P 스파이럴 탭을 이용하여 탭 가공을 하였다.<sup>7</sup>

### 2.2 인장시험

인장시험은 UTM (Universal Testing Machine)을 이용하여 진행하였다. 인장력은 시험 시 UTM에서 측정되도록 하였고, 변형률은 탭 가공이 완료된 시편에 스트레인 게이지를 부착하여 Strain-Meter 를 통해 측정 되도록 하였다. 그리고 스트레인 게이지는 시편 정 중앙에 가공된 구멍 주변에 부착하였다.

## 3. FEM 해석

Material Properties는 인장, 압축, 전단, 등의 기초시험을 진행하여 Composite Material (Orthotropic Material), Density, Tsai-Wu Constants, Orthotropic Stress Limits 등의 Material Properties 를 복합재료 전용 툴인 GENOA-MCQ를 이용하여 Pre-Post 과

Table 1 Size of the tensile testing specimen according to type of the specimen

Specimen	Width	Length	Thickness
(15°/-15°) <sub>10</sub>	25	250	2.5
(45°/-45°) <sub>10</sub>	25	250	2.5
(0°/90°) <sub>10</sub>	25	250	2.5
(90°/0°) <sub>10</sub>	25	250	2.5

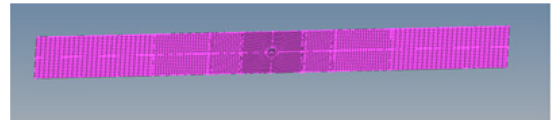


Fig. 2 Geometry of FEM simulation model



Fig. 3 Applying boundary condition in simulation

Property	Symbol	Value	Units
Longitudinal Modulus	E11	2.352000E+05	N/(mm <sup>2</sup> )
Transverse Modulus	E22	1.435000E+04	N/(mm <sup>2</sup> )
Shear Modulus	G12	1.636000E+04	N/(mm <sup>2</sup> )
Shear Modulus	G23	4.944000E+03	N/(mm <sup>2</sup> )
Poisson's Ratio	NU12	2.821000E-01	
Poisson's Ratio	NU23	4.513000E-01	
Tensile Strength	S11T	3.414000E+03	N/(mm <sup>2</sup> )
Compressive Strength	S11C	7.543000E+02	N/(mm <sup>2</sup> )

(a) Carbon Fiber Material Properties in GENOA

Property	Symbol	Value	Units
Modulus	E	3.697000E+03	N/(mm <sup>2</sup> )
Poisson's Ratio	NU	3.400000E-01	
Tensile Strength	ST	4.344000E+01	N/(mm <sup>2</sup> )
Compressive Strength	SC	3.096000E+02	N/(mm <sup>2</sup> )
Shear Strength	SS	1.559000E+02	N/(mm <sup>2</sup> )

(b) Matrix Material Properties in GENOA

Fig. 4 CFRP Material Properties

정에 적용하였다.<sup>8,9</sup>

해석 모델은 CATIA를 이용하여 모델링 하였으며, 실제 시편과 같은 크기의 Surface로 모델링 하였다. FEM 해석은 ANSYS Workbench를 이용하여 해석하였으며, Surface 모델에 두께 값을 지정 하였고, Fig. 2와 같이 Element Type은 Quads로 설정하였으며, Node 수는 2157개를 가지고 Element 2020개를 가지고 있으며 보다 정밀한 FEM 해석 결과를 얻기 위해 구멍 형상 주변의 Element 크기를 0.13 mm로 하였으며 그 외 나머지 부분들은 모두 1 mm로 설정하였다.

구속 조건은 실제 인장 시험과 유사한 조건을 만들기 위해 시험편 하단 부분을 고정시켰고, 시험편 상단 부분에는 2 mm/min의 일정한 변위를 주어 시험편에 인장력이 발생하도록 Fig. 3과 같이 조건을 설정하였고, CFRP 대한 Material Properties를 다 Fig. 4와 같이 설정하여 FEM 해석을 진행하였다.

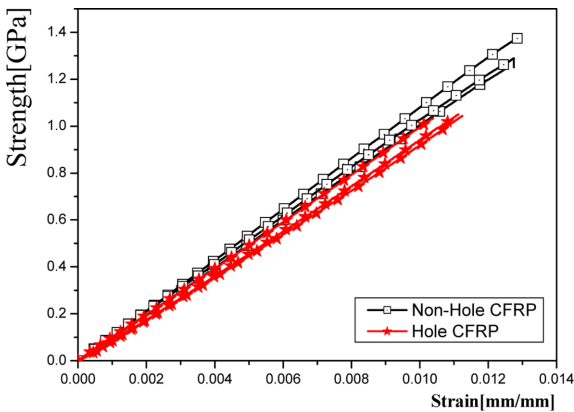


Fig. 5 Comparison stress-strain diagram of general and hole machined specimen:  $(15^\circ/-15^\circ)_{10}$

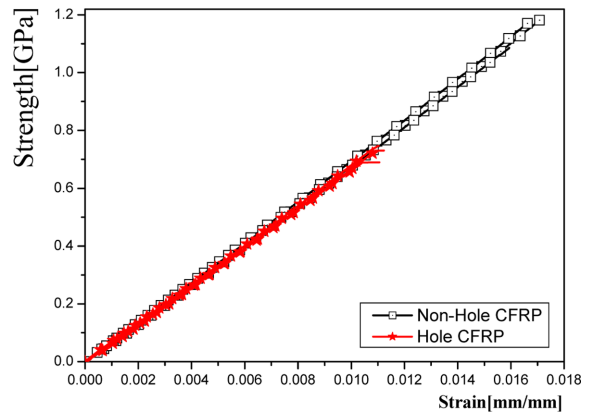


Fig. 8 Comparison stress-strain diagram of general and hole machined specimen:  $(90^\circ/0^\circ)_{10}$

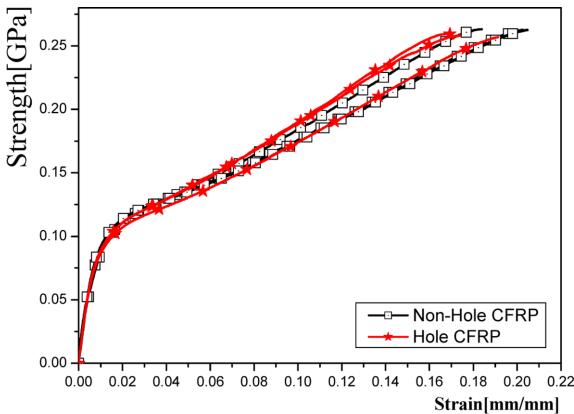


Fig. 6 Comparison stress-strain diagram of general and hole machined specimen:  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$

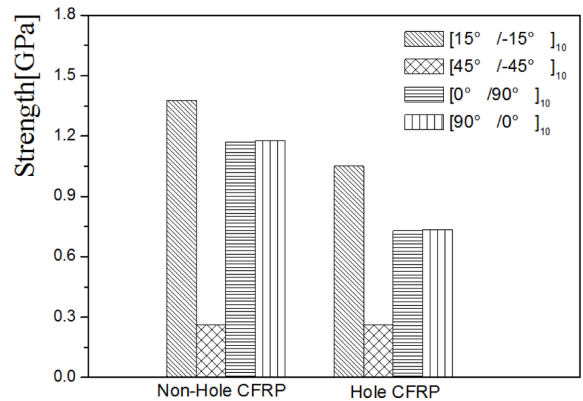


Fig. 9 Comparison of tensile strength of the general specimen and the hole machined specimen

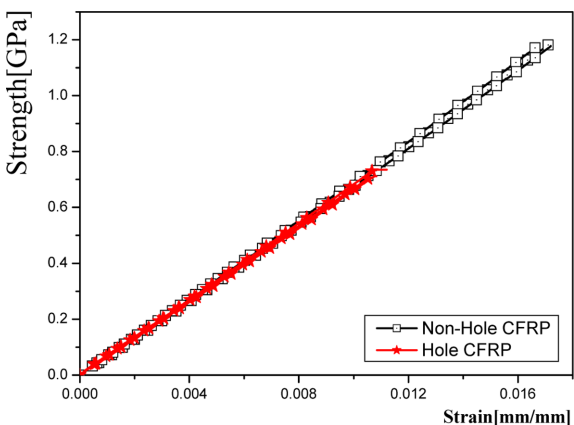


Fig. 7 Comparison stress-strain diagram of general and hole machined specimen:  $(0^\circ/90^\circ)_{10}$

4. 결과

4.1 인장시험 결과

Figs. 5-8에 각각의 적층각도에 따른 인장시험 및 홀 가공 후의 인장시험결과를 비교하여 나타냈다. 각 시험편의 결과로 홀

가공 전후의 강성변화는 아주 미세하나 강도가 급격히 줄어드는 경향을 알 수 있다.

Fig. 9은 각각의 인장 시험결과를 비교 평가하였다. Hole 가공 되지 않은 일반 CFRP 시험대비 Hole 가공된 CFRP 시험의 인장강도를 비교해 보면  $(15^\circ/-15^\circ)_{10}$ ,  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$ ,  $(0^\circ/90^\circ)_{10}$ ,  $(90^\circ/0^\circ)_{10}$  시험은 대략적으로 각각 24%, 1%, 38%, 38%의 인장강도 저하가 발생함을 알 수 있다. 이는 강도에 미치는 CFRP 구성인자로 탄소섬유 파단에 따른 강도저하로 추측된다.

4.2 FEM 해석 결과

인장시험과 FEM 해석의 응력-변형률 선도를 비교해 보면, 선형구간에서의 강성은 4가지 시험 모두 거의 일치하였다. 비선형구간에서의 강성은  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$  시험을 제외한 나머지 시험은 거의 일치하였다. 한편, 인장강도는 4가지 시험 모두 큰 오차 없이 일치하였다.

5. 결론

본 연구에서는 Hole 가공된 CFRP 시험편을 이용하여 인장시험

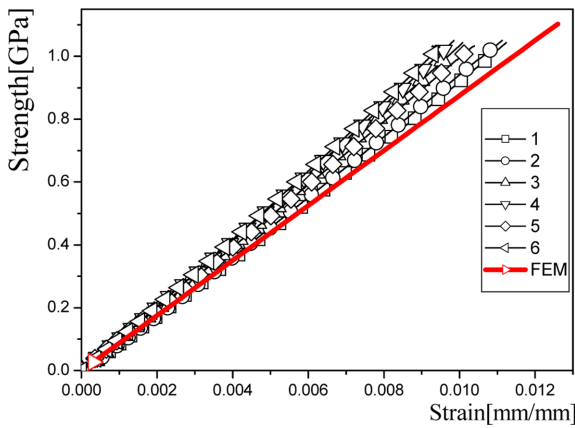


Fig. 10 Stress-Strain diagram of the hole machined specimen of  $(15^\circ/-15^\circ)_{10}$

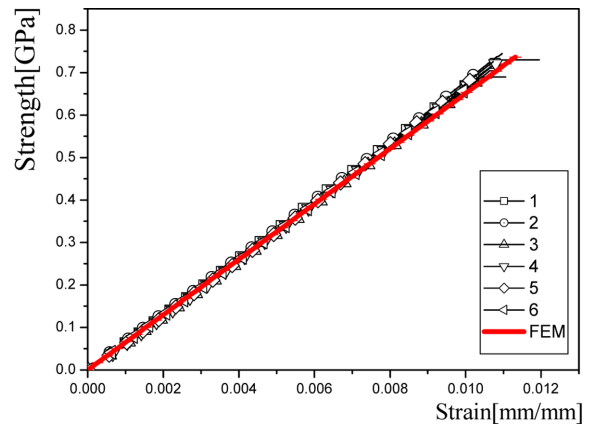


Fig. 13 Stress-Strain diagram of the hole machined specimen of  $(90^\circ/0^\circ)_{10}$

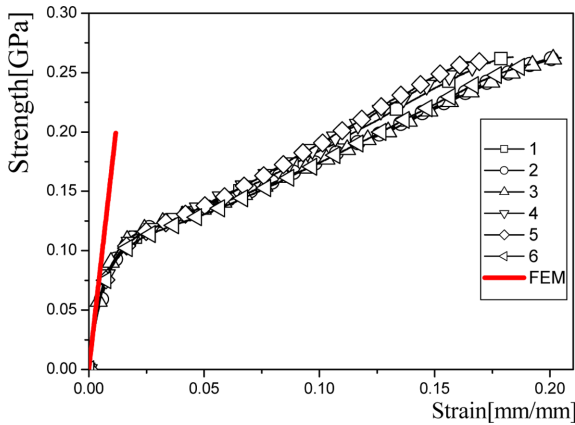


Fig. 11 Stress-Strain diagram of the hole machined specimen of  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$

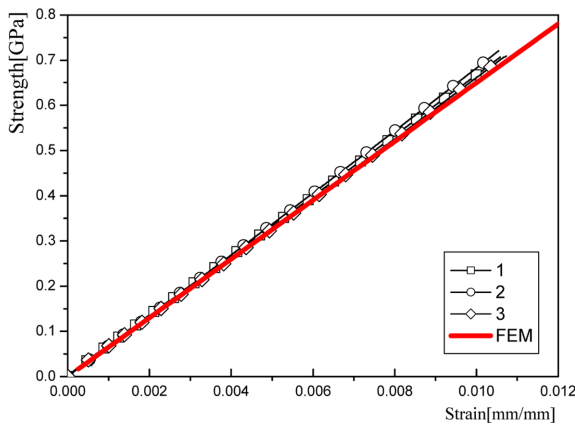


Fig. 12 Stress-Strain diagram of the hole machined specimen of  $(0^\circ/90^\circ)_{10}$

을 진행하였고, 이 결과를 FEM 해석 결과와 비교하였다. 또한, Hole 가공된 CFRP 시편과 Hole 가공되지 않은 일반 CFRP 시편의 인장강도를 비교하여 M1.0 초소형 나사 적용을 위한 CFRP 적층판의 홀 가공 영향을 평가하였다.

(1) Hole 가공되지 않은 일반 CFRP 시편대비 Hole 가공된

CFRP 시편의 인장강도를 비교해 보면  $(15^\circ/-15^\circ)_{10}$ ,  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$ ,  $(0^\circ/90^\circ)_{10}$ ,  $(90^\circ/0^\circ)_{10}$  시편은 대략적으로 각각 24%, 1%, 38%, 38%의 인장강도 저하가 발생함을 알 수 있다. 이는 강도에 미치는 CFRP 구성인자로 탄소섬유 파단에 따른 강도저하로 추측된다.

(2) Hole 가공된 CFRP 시편의 인장강도를 비교해보면  $(15^\circ/-15^\circ)_{10}$ ,  $(0^\circ/90^\circ)_{10}$ ,  $(90^\circ/0^\circ)_{10}$ ,  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$  순서로 인장강도가 높게 측정되었다. 이는 적층각이 0°에 가까울수록 하중이 작용하는 방향에 가까울수록 탄소섬유가 더 많은 인장강도를 가질 수 있기 때문에  $(90^\circ/0^\circ)_{10}$  시편보다  $(15^\circ/-15^\circ)_{10}$  시편이 인장강도가 높게 측정된 것으로 사료된다.

(3) 인장강도가 가장 높게 측정된  $(15^\circ/-15^\circ)_{10}$  시편을 기준으로,  $(90^\circ/0^\circ)_{10}$ ,  $(0^\circ/90^\circ)_{10}$ ,  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$  시편의 인장강도를 비교해 보면 대략적으로 각각 70%, 70%, 25%씩 낮은 것을 확인하였다.

(4) 기초실험을 통해 얻은 물성으로 FEM 해석 전 처리과정 후 범용 소프트웨어인 Ansys Workbench를 이용한 복합재료의 인장강도 및 선형구간에서의 강성 값은 예측할 수 있었으나,  $(45^\circ/-45^\circ)_{10}$  시편의 비선형구간 예측은 추후 추가적인 비선형 모델 해석이 필요함을 확인하였다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

본 논문(저서)은 산업통상자원부 산업기술혁신 사업(우수기술 연구센터사업)으로 지원된 연구임(No.10045724).

**REFERENCES**

1. Kim, J. H., Ra, S. W., Kim, H. S., and Kim, J. H., "On Clamping Force Characteristics in M1.4 Subminiature Screw for CFRP Stacking Angles," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 6, pp. 517-518, 2015.

2. Yang, I. Y., Kim, J. H., and Kim, J. H., "The Characteristics of Flexure Strength and Rigidity in Light-Weight CFRP Members," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 11, pp. 95-99, 2008.
3. Kim, H. J., Kim, J. H., Ra, S. W., and Kim, J. H., "Reliability Design for Interaction between Light-Weight Material of Carbon Composite and Subminiature Screw," Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1809-1810, 2013.
4. Kim, H. J., Kim, J. H., and Kim, J. H., "Study about Fastened Properties by Applied to CFRP Laminates of Subminiature Screw," Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 7-8, 2014.
5. Lee, D. G., Jeong, M. Y., Choi, J. H., Jeon, S. S., Jang, S. H., et al., "Composite Materials," Hongrung Publishing Company, 2007.
6. ASTM D3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," 2014.
7. Koon, D. J., Wang, Z. J., Gu, G. Y., and Park, J. M., "Comparison of Optimum Drilling Conditions of Aircraft CFRP Composites Using CVD Diamond and PCD Drills," Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 24, No. 4, pp. 23-28, 2011.
8. Kim, H. J., "The Study on FEM Simulation of CFRP Laminate Plate through Material Properties Prediction Simulation," M.Sc. Thesis, Chosun University, 2015.
9. Bang, J. M., "The Study of Strength Prediction of CFRP Stacking Orientation according to Simulation Technique," M.Sc. Thesis, Chosun University, 2011.