

## 研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.4.009>

## AE기법을 이용한 원통형 복합재의 핀 체결부 파괴거동

윤성호\*<sup>†</sup> · 황영은\*\* · 김찬규\*\*\*Failure Behavior of Pin-jointed Cylindrical Composites  
Using Acoustic Emission TechniqueSung Ho Yoon\*<sup>†</sup> · Young Eun Hwang\*\* · Chan Gyu Kim\*\*\*

## ABSTRACT

In this paper, the bearing strengths and fracture behaviors of the pin-jointed carbon fiber/epoxy composites were investigated through pin loading test with acoustic emission technique. The composites were fabricated by a filament winding process, and three types of laminated patterns were considered. Type 1 was fabricated with stitch, Type 2 was fabricated without stitich and Type 3 was fabricated with prepregs. According to the results, bearing strength of Type 1 was 3.3% lower than that of Type 2 and that of Type 3 was highest. Type 1 and Type 2 revealed a net-tension failure mode, respectively, whereas Type 3 pattern exhibited a bearing failure mode. Also, acoustic emission energy of the Type 3 was higher than that of the Type 1 and Type 2. Therefore, the Type 3 was found to be structurally safer than the Type 1 and Type 2.

## 초 록

본 연구에서는 핀 하중 시험을 통해 탄소섬유/에폭시 복합재의 핀 체결부에 대한 베어링 강도를 조사하고 음향방출법을 적용하여 파괴거동을 조사하였다. 복합재는 필라멘트 와인딩 공법을 적용하여 제작되었으며 적층패턴을 달리한 세 종류의 시편을 적용하였다. Type 1은 스티치가 있는 일방향 섬유시트가 적용된 적층패턴을 가지고 있고, Type 2는 스티치가 제거된 일방향 섬유시트가 적용된 적층패턴을 가지고 있으며, Type 3는 프리프레그가 적용된 적층패턴을 가지고 있다. 연구결과에 따르면 Type 1은 Type 2에 비해 베어링 강도가 3.3% 낮게 나타났으며 Type 3가 가장 높은 베어링 강도를 나타내었다. Type 1과 Type 2는 net-tension 모드 파손이, Type 3는 베어링 모드 파손이 나타났으며 Type 3의 음향방출 에너지는 Type 1과 Type 2의 경우에 비해 높게 나타났다. 이로 미루어 보면 Type 3가 구조적으로 가장 안전함을 알 수 있었다.

Key Words: Carbon/Epoxy Composite(탄소섬유/에폭시 복합재), Acoustic Emission Technique(음향방출법), Pin-joint(핀 체결), Bearing Strength(베어링 강도)

접수일 2012. 6. 11, 수정완료일 2012. 7. 16, 게재확정일 2012. 7. 20

\* 종신회원, 금오공과대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 학생회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

† 교신저자, E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr

## 1. 서 론

섬유강화 복합재는 기존 금속재에 비해 비강

성과 비강도가 우수하여 비행체 제작 등의 국방 분야에 널리 적용되고 있으며, 또한 추진기관 연소관의 제작에도 적용되고 있다. 일반적으로 연소관은 원주방향으로 작용하는 내압과 길이방향으로 작용하는 추진력을 지지해야 하고 추진기관의 특성상 경량화가 되어야 하며 동시에 내온 특성을 가지도록 설계가 되어야 한다. 이러한 다양한 설계조건을 만족시키기 위해 필라멘트와 인딩 공정을 적용하여 다양한 적층패턴을 갖는 원통형 복합재를 제작하여 연소관에 적용하고 있다.

원통형 복합재 연소관은 다른 기계부품과 체결하기 위해 조립 특성상 핀 체결 방법이 널리 적용되고 있다. 이때 복합재 연소관의 구조적 안전성을 확보하기 위해서는 핀 체결부의 파괴거동을 정확히 조사할 필요가 있다. 그러나 연소관에 적용되는 복합재는 적층패턴과 형상이 복잡하고 다양한 파손모드가 나타나기 때문에 핀 체결부의 파괴거동을 정량적으로 평가하는데 어려움이 있다. 최근에는 재료 내부에서부터 발생하는 변형에 의한 탄성파를 감지하여 신호를 분석하는 음향방출법(Acoustic Emission, AE)을 적용하여 복합재의 파괴거동을 평가하기 위한 시도가 행해지고 있다. 음향방출법을 적용한 복합재의 파괴거동에 대한 선행연구를 살펴보면 Ramirez- Jimenez 등[1]과 Loutas 등[2]은 주파수분석을 통해 적층각도에 따른 주파수대역을 조사하고 복합재 파손모드를 구분하는 주파수대역을 제시하였다. Bourchak 등[3]은 에너지를 분석하여 CFRP 복합재의 유효파손기준을 제공하고 복합재의 파손진행을 판단하였다. Pappas 등[4]은 원공이 있는 탄소섬유직물 복합재에서 원공의 크기에 따른 음향방출신호를 분석하여 복합재 파괴거동을 분석하였다. Oh 등[5]은 음향방출신호에서 진폭의 분포와 크기에 따라 층간파괴과정을 규명하고 K-means clustering 알고리즘을 적용하여 수집자료를 분석할 수 있는 음향방출신호 분석기법을 제안하였다. Surgeon 등[6]은 판 형태의 복합재 시편에 두 개의 센서를 부착하여 두 센서에서 도달하는 신호의 시간 차를 통해 신호의 발생 위치를 판단하였다. Lee 등[7]

은 복합재 압력 용기로부터 방출되는 음향방출신호를 측정함으로써 음향방출 신호와 복합재 압력 용기의 과열압력과의 상관 관계 및 건전성을 예측하였다. 이러한 음향방출법을 통한 복합재의 파괴거동 연구는 다양하게 수행되어 왔지만 복잡한 적층패턴을 가지면서 원통형 복합재에 음향방출기법을 적용한 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 세 가지 적층패턴을 고려한 원통형 복합재의 핀 체결부에 대해 핀 하중 시험을 진행하여 베어링 강도를 구하였다. 또한 핀 체결부에 음향방출 센서를 부착하여 복합재 내부에서 발생하는 음향방출신호를 수집함으로써 복합재 내의 손상을 분석하고 실제현미경을 통해 실시간으로 파손거동을 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편 제작

본 연구에서 고려한 원통형 복합재는 탄소섬유(T800, Toray)와 에폭시(Epon826, Hexion)로 구성되어 있으며 직경 160mm의 맨드릴에 0°, 90°, ±45°, ±10° 각도로 적층하여 제작하였다. 일반적으로 원통형 복합재 연소관은 원주방향 뿐만 아니라 길이방향으로도 작용하중을 충분히 지지할 수 있어야 하기 때문에 본 연구에서는 필라멘트와인딩 공정 중에 일방향 섬유시트나 일방향 프리프레그를 이용한 핸드레이업 공정을 추가함으로써 길이방향의 하중지지능력을 보강하였다.

Table 1에는 복합재 시편에 적용된 적층각도에 따른 적층수가 나타나 있다. Type 1은 ±10° 층과 90° 층을 필라멘트와인딩 공정으로 적층하고 0° 층과 ±45° 층을 스티치(Stitch)가 있는 일방향 섬유시트(T700, Toray)로 핸드레이업하여 적층하였으며, Type 2는 ±10° 층과 90° 층을 필라멘트와인딩 공정으로 적층하고 0° 층과 ±45° 층은 스티치(Stitch)를 제거한 일방향 섬유시트(T700, Toray)로 핸드레이업하여 적층하였다. 이때 스티치는 섬유다발을 일정한 양으로 묶어 섬유다발

Table 1. Three types of the specimens

Specimen	Number of layers				Note
	0	90	±45	±10	
Type 1	6	8	3	2	0, ±45 : UD sheet (stitch 적용)
Type 2	6	8	3	2	0, ±45 : UD sheet (stitch 제거)
Type 3	15	8	6	2	0, ±45 : UD prepreg

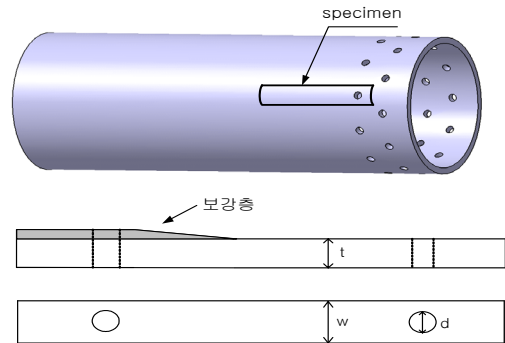
들이 서로 흩어지지 않도록 하는 역할을 한다. Type 3은 Type 1과 Type 2와는 다른 적층패턴을 가지고 있으며 ±10°층과 90°층은 필라멘트 와인딩 공정을 통해, 0°층과 ±45°층은 일방향 프리프레그(CU150NS, 한국화이버)를 적용하여 적층하였다.

Figure 1에는 핀 체결부의 핀 하중 시험을 위한 시편채취방법과 시편의 제원이 나타나 있다. 각 Type 별로 제작된 원통형 복합재로부터 0° 방향을 따라 평행하게 절단하여 굴곡이 있는 시편을 채취하였다. 시편에는 핀 체결이 가능하도록 양단에 원공이 가공되어 있으며 한쪽 원공에서의 파손을 유도하기 위해 다른 한쪽 원공을 보강하였다.

2.2 음향방출법

Figure 2에는 음향방출신호 분석을 위한 시스템 구성도가 나타나 있다. 먼저 기계적 체결부에 AE 센서(R15, PAC, USA)를 부착하여 탄성파를 감지하였다. 이때 센서는 노이즈를 최소화하기 위해 진공 그리스인 접착매질을 사용하여 부착시켰다. 센서에서 감지한 음향방출신호는 preamplifier에서 40 dB gain을 적용하여 증폭시킨 다음 AD board(AEDSP-32/16B, PAC, USA)를 통해 수집하였으며 수집된 음향방출신호는 MISTRAS-2001™ 소프트웨어를 사용하여 분석하였다. 이때 임계값(V<sub>i</sub>)은 45 dB를 적용하였다.

Figure 3에는 전형적인 음향방출신호가 나타나 있다. 하나의 탄성파를 hit라 하며 변형이 계속



	Dimension(mm)		
	Width	Diameter	Thickness
Type 1	17.6	8	7.10
Type 2	17.6	8	7.12
Type 3	17.6	8	6.86

Fig. 1 Configuration of pin-jointed specimen

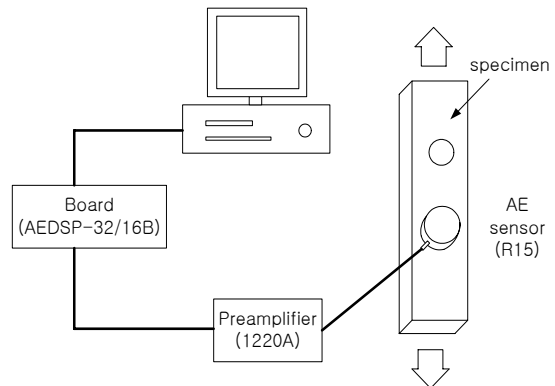


Fig. 2 Schematic diagram of acoustic emission system

진행될수록 탄성파들이 계속 발생된다. 이때 누적된 탄성파의 개수를 누적 hit수라고 한다. 이러한 하나의 탄성파로부터 peak amplitude(A<sub>p</sub>, A<sub>v</sub>), count, rise time(τ<sub>r</sub> or τ<sub>+</sub>), duration(τ<sub>s</sub>), energy(1/2RA<sub>p</sub>τ<sub>s</sub>) 등이 결정된다. 이때 peak amplitude는 최대 진폭값, count는 설정된 임계 전압을 넘는 파고의 수, rise time은 하나의 hit에서 임계전압을 능가한 시점부터 최대진폭에 도달할 때까지 걸린 시간, duration은 하나의 hit에서 임계전압을 넘는 시점부터 hit가 끝나는 시점까지 걸린 시간, energy는 한 개의 hit의 면적

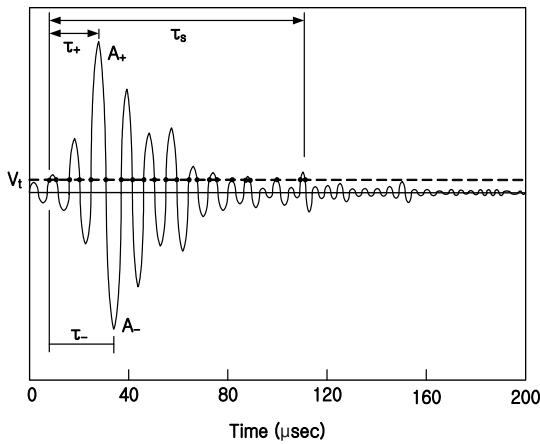


Fig. 3 The typical shape of an AE signal

에 해당하는 것으로 탄성파의 세기와 밀접한 관계가 있다.

### 2.3 핀 하중 시험

Figure 4에는 탄소섬유/에폭시 원통형 복합체의 핀 하중 시험을 위한 하중시험장치(Z100/Zwick, Germany), 음향방출신호를 얻기 위한 AE 센서, 핀 체결부의 파손 양상을 실시간으로 관찰하기 위한 실체현미경 등이 나타나 있다. 핀 하중 시험은 ASTM D5961[8]에 근거하여 수행하였으며 작용하중은 1.0 mm/min의 변위 제어상태로 가하였고 음향방출신호는 핀 체결부 하단부에 부착된 AE 센서를 통해 얻었다. 복합체의 핀 체결부 파손은 net-tension 모드, shear-out 모드, bearing 모드 등으로 구분된다. Net-tension 모드는 인장파손, shear-out 모드는 전단파손, bearing 모드는 압축파손과 관계가 있다. 특히 bearing 강도는 핀 하중 시험을 통해 수집된 하중신호를 이용하여 Eq. 1에 의해 평가하였다.

$$S = \frac{P}{d \times t} \quad (1)$$

이때  $P$ 는 파손하중,  $d$ 는 원공 직경,  $t$ 는 시편 두께를 나타낸다.

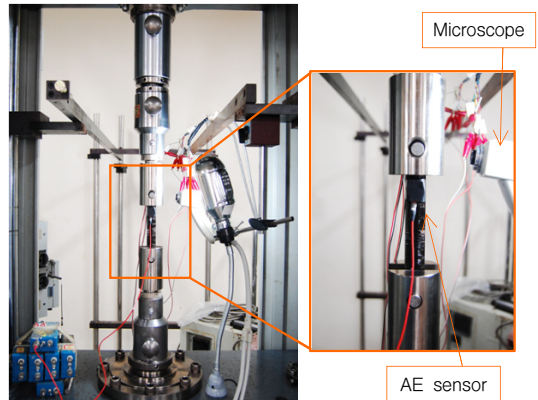


Fig. 4 Test set-up of pin-loading test for composites

### 3. 실험 결과

Figure 5에는 핀 하중 시험을 통해 얻은 하중-시간 선도와 음향방출신호 선도가 나타나 있다. 유형별 누적히트수-시간 선도를 보면 하중이 증가함에 따라 기울기가 다르게 나타나는데 누적히트수가 서서히 증가하면서 일정한 기울기를 나타내는 구간을 초기변형구간(A), 파손이 가속화되면서 기울기가 A구간의 경우에 비해 커지는 구간을 파손진행구간(B)으로 구분하였다[9-10]. Type 1의 초기변형구간에서는 복합체 내부의 마찰에 의해 500 이하의 에너지가 방출되지만 9.2 kN 이상의 하중이 작용되면 누적히트수가 급격하게 증가하는 파손진행구간(B)이 나타난다. 파손진행구간에서는 비교적 큰 내부마찰로 인한 에너지가 방출되며 동시에 국부적인 모재균열(matrix cracking)에 의해 500 이상의 에너지가 방출되었다. 파손진행구간에서 하중이 15.9 kN에 이르게 되면 큰 에너지가 방출됨과 동시에 파손이 발생하며 Eq. 1을 이용하여 계산된 Type 1의 베어링 강도는 273 MPa로 나타났다. Type 2의 경우에서도 Type 1과 마찬가지로 하중이 증가함에 따라 누적히트수가 서서히 증가하는 초기변형구간(A)과 기울기가 급격하게 높아지는 파손진행구간(B)이 나타났으며 파손은 16.2 kN에서 발생하였고 베어링 강도는 283 MPa로 나타났다. Type 1과 Type 2의 결과를 비교해 보면

파손진행구간(B)이 시작되는 하중은 Type 1의 경우가 Type 2에 비해 낮다. 이에 대한 원인을 살펴 보면 Type 1의 경우 0°와 ±45° 일방향 섬유시트에 적용된 스티치가 층간접착을 약화시켰기 때문으로 판단된다. 또한 Type 1의 경우 Type 2에 비해 많은 히트수가 감지되고 누적히트수도 3배 이상 높게 나타났는데 이는 Type 1에 적용된 스티치의 마찰에 의해 낮은 에너지를 가지는 히트수가 많이 감지되기 때문이다. Type 3의 경우 0°층과 ±45°층에 프리프레그가 적층되고 Type 1과 Type 2에 비해 0° 적층수가 많아지면서 파손하중이 높게 나타났으며 파손진행구간(B)이 시작하는 하중도 Type 1과 Type 2에 비해 높게 나타났다. Type 3의 파손하중은 18.5 kN이고 베어링 강도는 344 MPa로 나타났다. 또한 Type 1과 Type 2와는 달리 하중이 16.4 kN인 지점에서 일시적인 하중감소가 나타난 이후에 다시 하중이 증가하는 양상이 나타났으며 파손진행구간(B) 이후 누적히트수의 기울기가 더 증가하는 파손진행구간(C)이 나타났다. 이는 비교적 0° 적층수가 많고 Type 1과 Type 2에 비해 대칭적으로 적층되어 있기 때문에 B구간 이후에도 더 큰 하중지지 능력을 가지는 것으로 판단된다. 또한 에너지 선도를 보면 층간마찰에 의해 500 미만의 에너지가 발생하다가 모재균열에 의해 5000 이상의 높은 에너지가 방출되었고 최대하중에서 베어링 모드로 파손이 되면서 18000 이상의 에너지가 방출되었다.

Figure 6에는 핀 하중 시험 후의 Type 별 파손양상이 나타나 있다. Type 1과 Type 2에 핀 하중이 작용하면 0° 방향의 작용하중에 대해 상대적으로 취약한 90°층과 ±45°층이 많이 적층된 내경 부위에서 모재균열에 의해 net-tension 파손이 발생하고, 0°층은 베어링 모드로 파손되었다. 특히 Type 1의 경우 0°층과 ±45°층에 스티치가 존재함을 할 수 있으며 이러한 스티치가 층간접착을 약화시키는 원인으로 베어링 강도가 Type 2에 비해 낮게 나타나는 것으로 판단된다. Type 3의 경우 90°층과 ±45°층에는 부분적인 모재균열이 발생하며 0°층이 비교적 균일하게 분포된 층에서는 베어링 모드가 지배적인 파손양

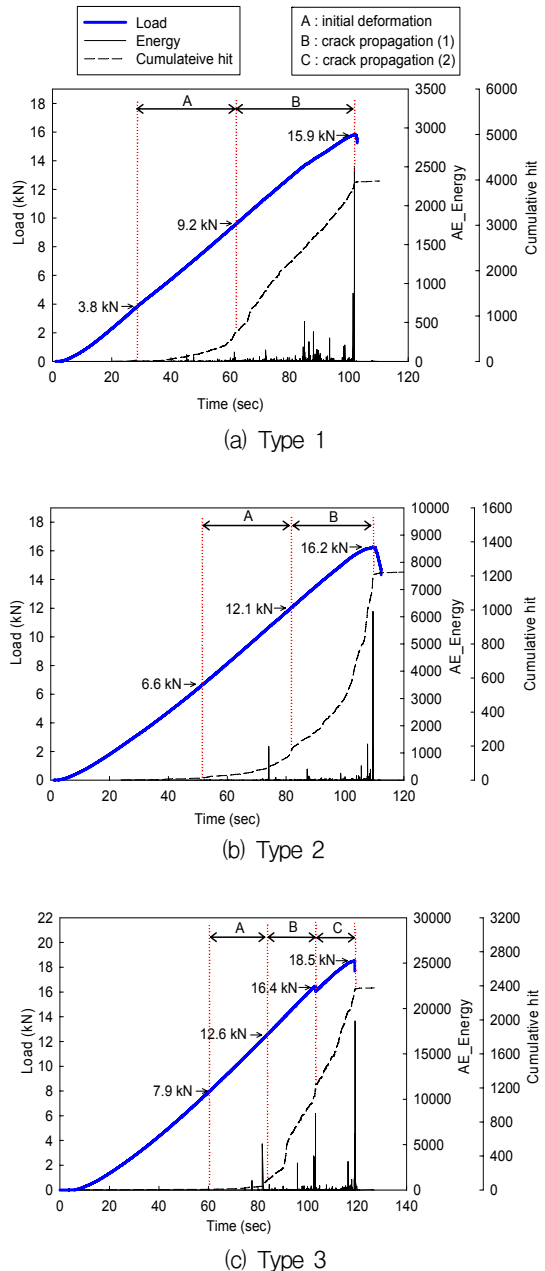


Fig. 5 Test results of pin loading test and acoustic emission signals with various types

상으로 나타났다. 복합재의 파손양상은 적층패턴에 영향을 받으며 0°층이 비교적 균일하게 적층된 Type 3의 경우가 Type 1과 Type 2에 비해 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

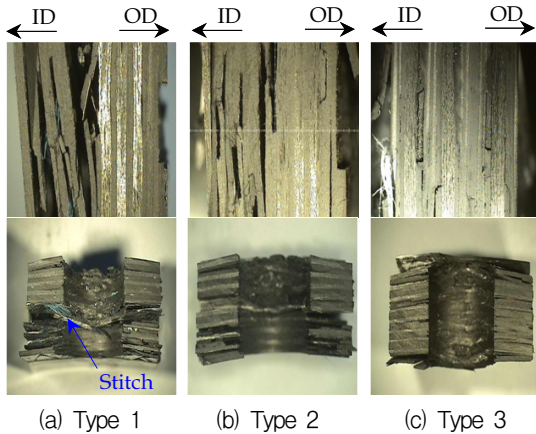


Fig. 6 Photos of failure modes for the specimens (ID : inner diameter, OD : outer diameter)

#### 4. 결 론

음향방출법을 적용하여 탄소섬유/에폭시 원통형 복합재의 핀 하중 시험을 수행하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수집된 음향방출신호와 실체현미경으로 관찰한 파손모드를 통해 각 파손모드에 따른 음향방출신호 차이와 복합재 내부의 균열진전 상태를 알 수 있었다.
- (2) 층간접착을 약화시키는 스티치가 없는 Type 2의 경우 스티치가 적용된 Type 1에 비해 베어링 강도 뿐 아니라 파손 가속화 시점의 하중도 높게 나타났다.
- (3) Type 1과 Type 2는 net-tension 모드로 파손이 발생하였지만 하중지지능력이 큰 0°층이 균일하게 적층된 Type 3은 베어링 모드로 파손이 발생하였다. 또한 Type 3는 Type 1과 Type 2에 비해 베어링 강도가 가장 높으며 음향방출에너지도 가장 높게 나타났다. 이로 미루어 보면 Type 3가 구조적으로 안전함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 핵심기술 연구개발 과제 (과제명 : 내고온 경량 복합재연소관 기술) 의 지원을 받아 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

1. Ramirez-Jimenez, C. R., Papadakis, N., Reynolds, N., Gan, T. H., Pirmell, P. and Pharaoh, M., "Identification of Failure Modes in Glass/Polypropylene Composites by Mean of the Primary Frequency Content of the Acoustic Emission Event," *Composite Science and Technology*, Vol. 64, No. 12, 2004, pp.1819-1827
2. Loutas, T. H., Kostopoulos, V., Ramirez-Jimenez, C. and Pharaoh, M., "Damage Evolution in Center-holed Glass/Polyester Composites under Quasi-static Loading using Time/Frequency Analysis of Acoustic Emission Monitored Waveforms," *Composite Science and Technology*, Vol. 66, No. 10, 2006, pp.1366-1375
3. Burchak, M., Farrow, I. R., Bond, I. P., Rowland, C. W. and Menan, F., "Acoustic Emission Energy as a Fatigue Damage Parameter for CFRP Composites," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No. 3, 2007, pp.457-470
4. Pappas, Y. Z., Markopoulos, Y. P. and Kostopoulos, V., "Failure Mechanism Analysis of 2D Carbon/Carbon using Acoustic Emission Monitoring," *Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 31, No. 3, 1998, pp.157-163
5. Oh, J. S., Woo, C. K. and Lee, Z. K., "A Study on the Fracture Behavior of Laminate Carbon/Epoxy Composite by Acoustic Emission," *The Korean Society for Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 3,

- 2010, pp.326-333
6. Surgeon, M. and Wevers, M., "One Sensor Linear Location of Acoustic Emission Events using Plate Wave Theories," *Materials Science and Engineering*, Vol. 265, No. 1-2, 1999, pp.254-261
  7. Lee, S. H. and Choi, Y. G., "The Structural Integrity Evaluation of Composite Pressure Vessel Using Acoustic Emission," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 1, No. 2, 1997, pp.1-11
  8. ASTM D5961/D 5961M-01, "Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates," American Society for Testing and Materials, Vol. 15.03, 2001
  9. Park, J. S., Kim, K. S. and Lee, H. S., "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Laminated Composite Structures," *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 16, No. 3, 2003, pp.16-22
  10. Xiao, Y. and Ishikawa, T., "Bearing Strength and Failure Behavior of Bolted Composite Joints (part I: Experimental Investigation)," *Composite Science and Technology*, Vol. 65, No. 7-8, 2005, pp.1022-1031