

# SiC 강화 CFRP 복합재의 파괴거동에 관한 음향방출 적용

류영록 · 윤유성\* · 권오현\*\*

부경대학교 대학원 안전공학과 · \*부경대학교 안전공학과  
(2016. 2. 17. 접수 / 2016. 4. 12. 수정 / 2016. 4. 25. 채택)

## AE Application for Fracture Behavior of SiC Reinforced CFRP Composites

Yeong Rok Ryu · Yu Seong Yun\* · Oh Heon Kwon\*\*

Department of Safety Engineering, Graduate School, Pukyong National University

\*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received February 17, 2016 / Revised April 12, 2016 / Accepted April 25, 2016)

**Abstract :** Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP) composite with a higher specific strength and rigidity is more excellent than conventional metallic materials or other organic polymer of FRP. It has been widely used in vehicles, aerospace and high technology industries which are associated with nuclear power fields. However, CFRP laminated composite has several disadvantages as like a delamination, matrix brittleness and anisotropic fibers that are the weak points of the crack initiation. In this present work, the reinforced silicon carbide(SiC) particles were added to the interlayer of CFRP laminates in order to mitigate the physical vulnerability affecting the cracking and breaking of the matrix in the CFRP laminated composite because of excellent specific strength and thermal shock resistance characteristics of SiC. The 1wt% of SiC particles were spread into the CFRP prepreg by using a spray coating method. After that, CFRP prepregs were laminated for the specimen. Also, the twill woven type CFRP prepreg was used because it has excellent workability. Thus the mechanical and fracture behaviors of the twill woven CFRP laminated composite reinforced with SiC particles were investigated with the acoustic emission(AE) method under a fracture test. The results show that the SiC particles enhance the mechanical and fracture characteristics of the twill CFRP laminate composite.

**Key Words :** Twill CFRP laminate composite, Silicon carbide(SiC), Acoustic emission(AE), Fracture behavior

### 1. 서론

탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)은 유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)에 비하여 약 4~9배의 높은 비탄성계수를 가지며, 철강에 비하여 강도는 약 3배에 달한다<sup>1)</sup>. 이러한 장점으로 스포츠 레저분야, 자동차 제조분야, 우주 항공분야 및 원자력 발전 등 많은 산업분야에서 사용되어지고 있다. 하지만 층간면에서 나타나는 적층 분리현상, 기지의 취성과 섬유소의 이방성으로 인한 파괴는 CFRP 적층복합재의 취약점으로 나타난다<sup>2)</sup>. 따라서 CFRP 적층복합재의 파괴특성을 규명하고 안정적 균열거동을 위한 제조수법 및 이에 대한 평가방법이 요구된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 이종재료

로 보강한 하이브리드 복합재와 기지에 유·무기물을 첨가하여 강화한 CFRP 복합재가 활발히 연구되고 있다<sup>3)</sup>. Park 등<sup>4)</sup>은 비강도, 내열충격성 등의 우수한 열적·기계적 특성을 지닌 탄화규소(Silicon Carbide; 이하 SiC) 분말의 첨가가 평직 CFRP 복합재의 강도 향상에 긍정적인 영향을 주는 것으로 확인을 하였다. Liu 등<sup>5)</sup>은 polyethersulfone(PES)와 polyamide(PA) 입자로 에폭시 기지를 강화한 복합재를 제작하여 파괴실험을 수행하였으며 PA입자의 분산에 따른 층간 파괴인성의 증가를 평가하였다. 한편 Acoustic emission(이하 AE)법<sup>6)</sup>은 재료 내부의 손상을 평가하기 위한 유용한 비파괴적 검사법으로, Yun 등<sup>7)</sup>은 AE법을 이용하여 CFRP 복합재료에서 개구모드 층간 파괴인성치와 균열진전과의 관계를 평가하였다. 섬유복합재료는 평직(plain), 능직(twill), 견직

\* Corresponding Author : Oh Heon Kwon, Tel : +82-51-629-6469, E-mail : kwon@pknu.ac.kr  
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

(satin) 등 다양한 구조로 직조되어 사용되고 있다. 그 중에서 능직구조는 평직이 씨실과 날실이 하나씩 교차되는 것에 비해 두 개 혹은 그 이상의 섬유가 교차되어 직조된다. 따라서 구조적 안전성은 떨어지지만 비교적 수지의 함침성이 좋아서 강화재로 사용되는 섬유의 변형이 작고 표면이 원활하며 기계적 가공이 용이하다. Nicoletto 등<sup>8)</sup>은 능직구조 graphite-epoxy 적층복합재에 대하여 인장실험과 수치해석을 수행하여 강성 및 강도가 섬유 꼬임형태와 직조방법에 어떻게 영향을 받는지를 평가하였다. 그러나 능직구조 CFRP복합재에 대한 연구와 SiC 첨가에 따른 평가 연구는 아직 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 능직 구조 CFRP 적층복합재 층간에 SiC 입자분말을 첨가한 경우와 첨가하지 않은 두 가지의 경우에 대하여 AE법을 적용한 파괴시험을 수행하고 파괴 특성을 파악하여 재료 내부의 손상을 평가하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 CFRP는 능직 탄소섬유강화 프리프레그(prepreg)(HD520-14, HD. Fiber Co., Ltd)이며, CFRP에 첨가된 SiC 분말입자(#10000, HB. World Co., Ltd)는 입도가 1 μm인 입자를 사용하였다. Table 1과 2는 CFRP프리프레그에 대한 수지 및 섬유 함유량과 SiC 분말입자의 물리적 특성을 나타낸다. Table 3은 능직 CFRP의 물리적 특성을 나타낸다.

능직 CFRP 프리프레그는 폭 1 m의 원단으로 생산되기 때문에 압착성형 작업을 위해 성형판의 크기에 맞

Table 1. Compositions of the fiber and resin in prepreg

Material	Fiber wt(gr/m <sup>2</sup> )	Resin wt(gr/m <sup>2</sup> )	Resin content(%)	Total wt(gr/m <sup>2</sup> )
HD520-14	203	153	43 ± 2	356

Table 2. Physical properties of SiC particle

Material	Size (μm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Knoop hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	Mohs hardness
GC-#10000	1	3.20	2,500 ~ 2,900	9.5

Table 3. Physical properties of twill CFRP prepreg

Product	Type	Density (count/inch <sup>2</sup> )		Weight (g/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)
		Warp	Fill		
C520-3K	Twill	12.5	13.5	204	0.25

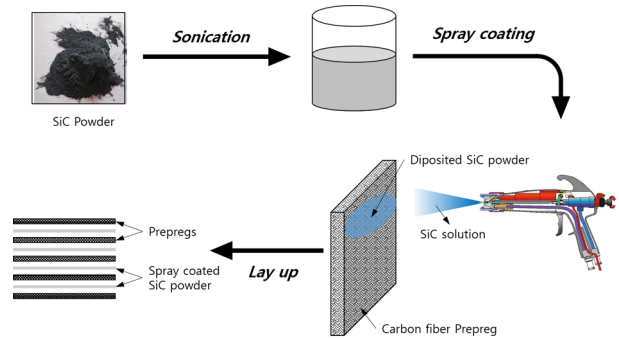


Fig. 1. Spray coating process.

추어 가로 세로 각각 250 mm로 절단하였다. SiC 분말 입자로 강화한 것과 비교 평가하기 위하여 SiC 입자를 프리프레그에 함량된 수지의 1wt%만큼 프리프레그 표면에 Spray Coating법을 이용하여 균일하게 도포하였다. Spray Coating법의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

SiC 분말입자를 에탄올에 섞은 뒤 초음파 분산기를 이용하여 30분간 균일하게 분산시켰다. 분산이 완료된 용액을 스프레이건을 이용하여 SiC 분말입자가 1wt%가 될 때까지 균일한 도포를 반복하였다. 도포가 완료된 프리프레그는 5 ply로 적층되었다.

SiC 분말입자를 첨가한 것(이하 CFRPS)과 첨가하지 않은 것(이하 CFRPC) 두 가지 형태로 적층된 능직

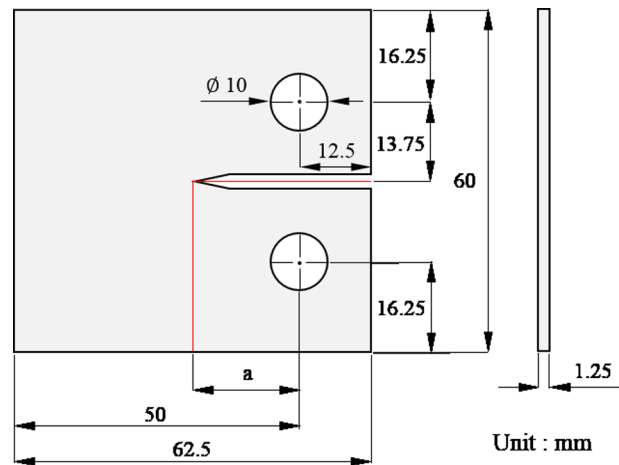
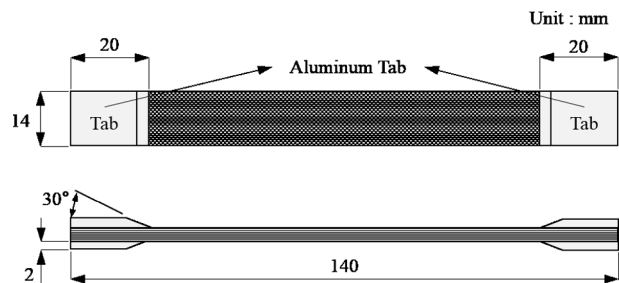


Fig. 2. Specimen configurations.

CFRP 복합재료는 열성형기(D. Co., Ltd)에서 성형온도 140℃, 성형압력 2 MPa 조건으로 60분 동안 가압하여 성형하였다. 성형된 적층판의 최종 두께는 약 1.25 mm로 얻어졌으며, 상온에서 3일간 aging 한 후 인장시험편과 CT(Compact Tension)시험편으로 정밀 기계 가공되었다. 인장시험편의 형상은 ASTM D 3039<sup>9)</sup>를 참고하였다. 인장시험 동안 시험기의 그림으로부터 손상 및 미끄러짐을 방지하기 위하여 인장시험편 양 끝단에 알루미늄 탭(두께 : 2.0 mm)을 부착한 후 전기로(HY-8000S, K. Co.,Ltd)에서 100℃로 30분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시켰다. 파괴 거동 실험을 위한 CT 시험편은 ASTM E 399<sup>10)</sup>에 따라 만능자동정밀 시편절단기(H. Technica)를 이용하여 커터 두께인 폭 0.3 mm로 노치를 가공하였다. 노치길이  $a_0$ 는 시험편폭  $W$ (=50 mm)에 대하여  $a_0/W=0.5$ 로 하였다. Fig. 2는 인장 시험편과 CT 시험편의 형상 및 치수를 나타낸다.

### 2.2 실험방법

능직 CFRP적층 복합재료에 SiC 분말입자를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우에 대하여 기계적 물성치를 획득하기 위하여 인장시험편에 2축 스트레인 게이지를 부착하였다. 실험에 사용된 시험기는 중형 인장시험기(T.O. Co., Ltd, H50KS)로서 ASTM D 3039를 참고하여 0.2 mm/min의 변위제어로 수행하였다. 두께가 약 1.25 mm인 박판 CT 시험편은 좌굴방지용 지그를 부착하여 파괴시험을 수행하였다. CT 시험편을 이용한 파괴시험 동안 균열 성장길이는 최고 40 배율인 이동식 실체 현미경(N. O. Works Co.)을 이용하여 일정 균열성장에 따라 측정되어 디지털변환기(IT-005D, M. Co.)를 거쳐 PC에 저장되었다.

AE 신호해석에는 AE 시스템 (AEDSP-32/16B & MISTRAS2001, PAC. Co.)을 이용하였다. AE기법은 고체 내부의 변화에 의해 발생한 탄성파를 획득하여 검사하는 방법이기 때문에 실시간으로 결함의 발생유무를 관측하는 것이 가능하다. AE센서는 공진 주파수가 150 kHz의 R15 센서와 공진주파수가 750 kHz인 Pico 센서를 사용하였다. AE 계측의 전기 및 기계적인 잡음을 제거하기 위하여 Hsu-Nielsen source법<sup>11)</sup>을 이용하여 44 dB로 임계값(threshold)을 정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기계적 물성 측정

SiC 분말입자의 첨가 유무에 따른 인장시험을 수행하여 얻어진 하중-하중선 변위 선도는 SiC 분말입자의

Table 4. Mechanical properties for two types of materials for a specimen

Type	Ultimate strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio (ν)
CFRPS	505.4	65.9	0.092
CFRPC	479.8	53.1	0.118

첨가 유무에 관계없이 선형적으로 증가하다가 급격히 파괴되는 관계를 보였다. 극한강도는 분말입자를 첨가한 CFRPS의 경우가 약 505.4 MPa이었으며, 분말입자가 첨가되지 않은 CFRPC의 경우에 약 479.8 MPa로 얻어져 SiC분말입자의 첨가가 극한강도의 증가에 기여함을 알 수 있다. 탄성계수 또한 CFRPS의 경우가 증가됨을 알 수 있었다. 이때 얻어진 기계적 특성치는 Table 4에 나타내었다.

### 3.2 CT시험편의 파괴특성

Fig. 3 (a)~(d)는 능직 CFRP 적층 복합재의 파괴시험 동안 관찰된 균열진전경로를 모델화하여 나타낸 것이다. Fig. 3 (a)는 초기 균열의 형성을 나타낸 것으로 노치 끝부분에 응력집중현상이 발생하여 초기 미소 균열이 노치선단에서 발생한다. 이때 노치의 끝부분의 위치가 능직구조에서 섬유 다발이 위사와 경사 중 어떤 위치에 있는가에 따라서 초기 균열진전 경로 및 길이가 다를 수 있다. 본 실험에서는 노치 끝부분의 위치를 모두 동일하게 가공하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3 (b)는 (a) 이후 계속 하중이 증가함에 따라 초

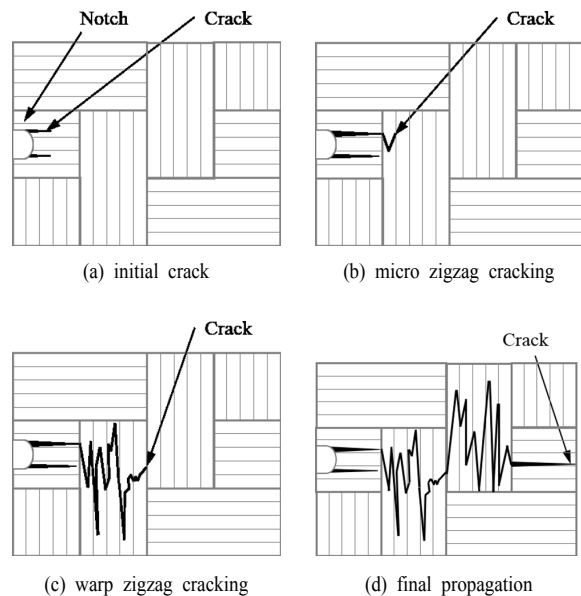


Fig. 3. Schematic models of crack extension under a fracture test(twill woven).

균열의 성장이 섬유 방향 표면까지 전파되면서 균열성장 방향과 수직인 섬유를 만나 경사방향(warp)으로 균열진전 방향이 바뀌는 것을 나타낸다. 이는 균열 진전방향에 대하여 경사방향섬유 다발에서 발생하는 전단력때문인 것으로 여겨진다. Fig. 3 (c)는 하중 방향과 일치하는 경사방향 섬유다발에서 균열이 지그재그 형태로 성장하는 모습을 보인다. 이때 섬유 파단과 기지 균열이 동시에 발생하여 복잡한 파단 형태를 가지게 된다. Fig. 3 (d)의 경우 하중방향에 대하여 수직방향으로 위사방향(weft) 섬유다발을 지나 진전된 균열이 최종 파단되어진 모습을 나타낸다.

Fig. 4에 CT시험편을 이용한 파괴시험에서 얻어진 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타낸다. CFRPC 및 CFRPS 두 시험편의 공통적인 특징으로는 변위증가에 따라 초기에는 비교적 안정적으로 하중이 증가하였으며 초기균열 성장개시 후 최대 하중점에서 급격한 감소와 더불어 균열이 급진전하였다. 이후 부터는 균열의 진전과 더불어 하중의 감소 증가가 반복되었다. SiC 분말입자가 첨가된 CFRPS의 경우에는 약 1.06 kN 하중점 및 변위 1.97 mm일때 0.49 mm의 초기균열이 관찰되었고, CFRPC에서는 762 N, 변위 1.64 mm에서 0.18 mm의 초기균열이 발생하여, 초기균열 성장이보다 더 낮은 하중과 변위에서 나타남을 알 수 있다.

또한 CFRPS에서는 최대하중 1.1 kN, 변위 2.19 mm에서 급격한 하중 감소와 더불어 균열길이가 1.61 mm로 성장하여 최대 9.02 mm까지 균열이 관찰되었다. CFRPC의 경우에는 최대하중 896 N, 변위 2.3 mm에서 하중 급감소에 따른 2.41 mm의 균열길이로 성장하여 최종 10.68 mm에서 파단되어 SiC 분말입자를 첨가하지 않은 경우가 보다 더 급격한 균열진전을 하는 것을 알 수 있었다. 따라서 SiC 분말입자로 강화된 능직

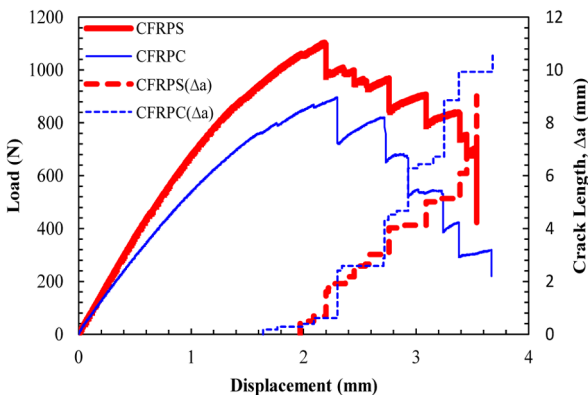


Fig. 4. Relationships of the load-displacement and the crack extension length for CFRPC and CFRPS under fracture tests.

CFRP적층 복합재가 최대강도의 증가와 더불어 안정적 균열성장함을 알 수 있다.

### 3.3 능직 CFRP 적층복합재의 파괴인성 평가

CT 시험편을 이용한 파괴시험에서 얻어지는 평면 응력 파괴인성은 균질재에 대하여 ASTM E 399에서 다음 식 (1)로 제시한 응력확대계수 K를 사용할 수 있다.

$$K = \frac{P}{B \sqrt{W}} f(a/w) \tag{1}$$

$$f(a/w) = \frac{(2+a/w)}{(1-a/w)^{3/2}} g(a/w) \tag{2}$$

$$g(a/w) = [0.886 + 4.63(a/w) - 13.32(a/w)^2 + 14.72(a/w)^3 - 5.6(a/w)^4] \tag{3}$$

여기서 P는 하중, B는 시험편 두께, W는 시험편의 폭이며 a는 균열길이이다. 이때 f(a/w)는 시험편 형상계수이다. 본 연구에 사용된 능직 CFRP 복합재료에서는 강화섬유 배열에 의한 현저한 이방성으로 ASTM E 399에 제시된 식(1)의 K의 적용은 곤란하다. 따라서 능직 CFRP 복합재료에 대한 응력확대계수 K를 Kageyama 등<sup>12)</sup>이 실험식으로 제시한 다음 형상계수 식 (4) f<sup>k</sup>(a/w)을 이용하여 평가하였다.

$$f^k(a/w) \tag{4}$$

$$= F_1 [C_0 + C_1(a/w - 0.5) + C_2(a/w - 0.5)^2]$$

여기서, F<sub>1</sub>는 a/W에 따른 균질탄성체의 형상계수이며 C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>는 섬유방향을 나타내는 보정계수로 섬유배열방향에 따라 주어진다. Table 5는 섬유 배열방향별 보정계수를 나타내며 본 실험에서는 섬유 적층방향이 0° 이므로 0°에 대한 보정계수를 적용하였다.

Fig. 5는 파괴시험에서 측정된 균열성장길이(Δa)에 대한 파괴저항곡선을 나타낸다. ASTM E 399에서 제시하는 균질재에 대한 식 (1)과 Kageyama의 실험식에서 제시하는 식 (4)를 적용하여 값을 나타내었다. 하중 및 균열이 성장함께 따라 K값이 서서히 증가하다가

Table 5. Coefficient of compact specimen<sup>12)</sup>

Direction Factor	0°	15°	30°	45°
C <sub>0</sub>	1.097	1.130	1.098	1.076
C <sub>1</sub>	-0.58	-0.47	0.00	0.47
C <sub>2</sub>	3.6	0.6	-0.4	-2.6

Table 6. The values of K by the materials and method

Fracture toughness Method Material	Kc (MPa · m <sup>1/2</sup> )		Kmax (MPa · m <sup>1/2</sup> )	
	Kageyama	ASTM	Kageyama	ASTM
CFRPS	40.09	36.55	45.48	42.03
CFRPC	28.92	26.36	39.01	36.21

최대하중 지점에서 감소한다. 이것은 급격한 하중감소와 균열성장으로 인해 발생했으며 이후 실험이 종료되는 시점까지 증감이 반복되었다. 또한 (1)식과 (4)식의 적용여부와 상관없이 CFRPS의 경우에는 균열성장에 따라 K가 계속 증가하는 경향을 보이고 CFRPC의 경우에는 일정 증가 후 다소 감소하는 추세를 나타낸다.

Kageyama의 실험식과 ASTM의 실험식을 적용하였을 때 각각의 파괴인성치는 Table 6과 같다.

Table 6의 결과를 보면 Kageyama의 식을 적용한 경우가 ASTM E 399 식을 적용한 경우보다 전체 평균적으로 약 9% 더 큰 값을 보였으며 이는 이방성의 특징을 가지는 CFRP 적층 복합재의 파괴인성 평가 시 ASTM E 399에서 제시하는 균질탄성체에 대한 형상계수를 적용한다면 그 결과 값이 다소 과소평가될 수 있음을 나타낸다. 이때, 식 (1)과 (4)는  $0.45 \leq a_0/W \leq 0.55$ 의 조건범위에만 적용이 가능하며 본 실험에서 사용한 CT시험편은  $0.5 \leq a_0/W \leq 0.55$ 의 범위를 적용하였다.  $\Delta a$ 가  $a_0/W=0.55$ 가 되는 지점인 2.5 mm에서 K 값을 보면 CFRPC에 비교하여 CFRPS의 파괴인성치가 약 38% 더 높아 파괴진전에 대한 저항력이 SiC 분말입자의 첨가에 의하여 향상됨을 알 수 있다.

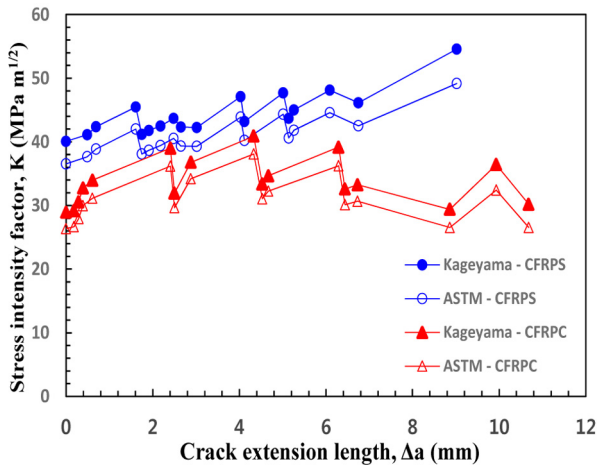


Fig. 5. The fracture resistance curve according to the crack extension under a fracture test for CFRPC and CFRPS.

### 3.4 파괴거동시 AE진폭특성

Fig. 6(a)와 (b)는 CT 시험편을 이용한 파괴시험으로 얻어진 AE 특성 중 AE 진폭과 균열성장길이( $\Delta a$ )와의 관계를 나타낸다. AE 진폭은 파괴가 발생할 때 균열성장에 대한 손상의 크기를 나타낸다. Fig. 6 (a)는 SiC 분말입자가 첨가된 CFRPS, (b)는 분말입자가 첨가되지 않은 CFRPC에 대한 경우이다. (a)의 경우 획득된 AE 진폭이 (b)에 비해 늦은 시간에 시작되고 비교적 많이 발생하는 경향을 나타내었으며 이는 강화재로 첨가된 SiC 분말입자의 손상 영향으로 여겨진다.

노치 끝단에서 초기 균열이 성장할 때 얻어진 AE 진폭은 하중부하 후 545.87 sec에서 44.9 dB로 나타났고 이후 실제 현미경을 통한 겉보기 균열이 성장 개시하는 591 sec에서 50.5 dB로 상승하였다. 최대 AE 진폭은 최대하중 감소 및 균열의 급성장 지점인 847 sec에서 73.1 dB로 나타났다. (b)의 경우엔 AE 진폭이 (a)보

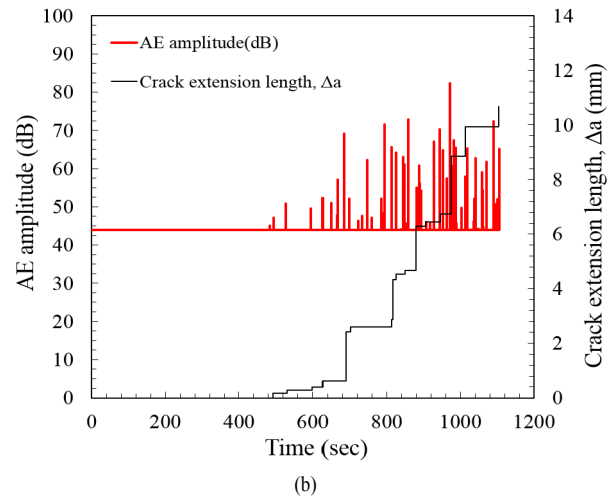
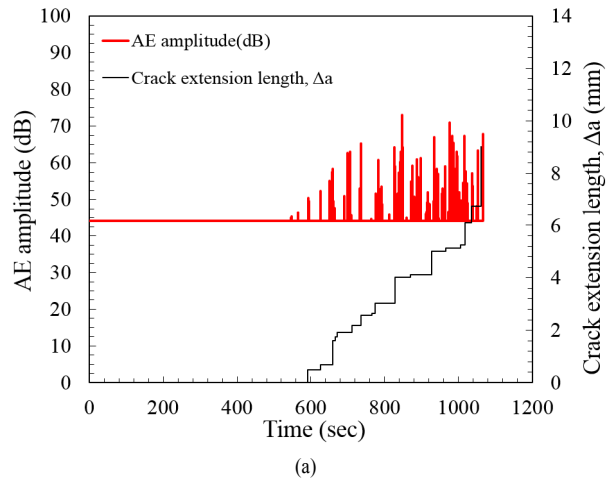


Fig. 6. The relationship between AE amplitude and crack extension under a fracture test for (a)CFRPS and (b)CFRPC.

다 상대적으로 적게 발생하였으며 초기 균열이 성장할 때 얻어진 AE 진폭은 484 sec에서 45 dB로 (a)의 경우와 유사하게 나타난 이후 겉보기 균열이 성장 개시하는 494 sec에서 47.2 dB로 나타나 분말입자가 첨가되지 않은 CFRPC가 평균적으로 더 높게 나타났다. 이것은 균열성장에 대한 손상의 크기가 CFRPS 경우보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

한편 초기균열 성장 시기의 AE 진폭 크기는 44.9 dB 및 45 dB로 매우 비슷하게 얻어져 균열성장개시에는 SiC 분말입자가 영향을 주지 못하는 것으로 여겨진다. 650~680 sec구간에서 고 진폭이 발생하는 것은 섬유 파단 및 기지와 섬유의 분리가 동시에 존재하는 지그재그 균열이 성장하기 때문이다. 이처럼 60 dB이상의 고 진폭을 나타내고 있는 것은 기지와 섬유 분리로 인한 손상과 더불어 섬유파단의 발생이 많음을 알 수 있으며 이는 눈으로 직접 보며 측정할 수 없는 미소 균열의 발생을 AE 진폭을 이용하여 정확하게 확인할 수 있음을 나타낸다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강화재로서 SiC 분말입자를 첨가한 능직 CFRP 적층복합재에 AE센서를 부착하고 인장 및 파괴시험을 수행하여 다음 결과를 얻었다.

- 1) CFRPS 및 CFRPC의 탄성계수와 극한강도는 각각 약 65.9 GPa, 53.1 GPa, 및 505.4 MPa, 479.8 MPa이다.
- 2) CT시험편 파괴시험에서 발생한 균열은 CFRPC 경우 보다 CFRPS 경우가 보다 더 안정적으로 진전되었다.
- 3) 파괴인성치는 CFRPS 경우가 CFRPC보다 약 38% 증가하였다. 이것은 SiC 분말입자를 첨가함으로써 파괴저항치를 보다 더 향상시킬 수 있음을 나타낸다. 따라서 SiC 분말입자가 강화재로서 CFRP 적층복합재의 강도 및 균열성장 안정성 향상에 기여하며, 또한 AE 진폭특성 평가는 구조물의 균열발생 및 진전에 따른 안전성 확보기법에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**감사의 글:** 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- 1) R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*, McGraw-Hill, Washington, D.C., pp.2-3, 1975.
- 2) J. L. Y. Tan, V. S. Deshpande and N. A. Fleck, "Failure Mechanisms of a Notched CFRP Laminate under Multi-axial Loading", *Composite: Part A*, Vol. 77, pp.56-66, 2015.
- 3) D. J. Kwon, Z. J. Wang, J. J. Kim, K. W. Jang and J. M. Park, "Improvement of Mechanical and Interfacial Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites by Adding Nano SiC Fillers", *Adhesion and Interface*, Vol. 14, No. 2, pp.75-81, 2013.
- 4) S. J. Park, J. S. Oh, J. R. Lee and K. Y. Rhee, "Effect of Surface Treated SiC on Thermal Stability and Mechanical Interfacial Properties of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites", *Composites Research*, Vol. 16, No.3, pp.25-31, 2003.
- 5) D. Liu, G. Li, B. Li, Y. Luan, H. Ling and X. Yang, "In-situ Toughened CFRP Composites by Shear-calender Orientation and Fiber Bundle Filtration of PA Microparticles at Prepreg Interlayer", *Composites: Part A*, Vol. 84, pp. 165-174, 2016.
- 6) K. Y. Jang, H. W. Lee and J. D. Kim, "AE Source on Line Localization on Material with Unknown Acoustic Wave Propagation Velocity", *KSME(A)*, Vol. 22, No. 3, pp. 688-694, 1998.
- 7) Y. S. Yun and O. H. Kwon, "The Evaluation of Interlaminar Fracture toughness and AE Characteristics in a Plain Woven CFRP Composite with DCB Specimen", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 20, No.1, pp.49-54, 2005.
- 8) G. Nicoletto and E. Riva, "Failure Mechanism in Twill-weave Laminates:FEM Prediction vs. Experiments", *Composites: Part A*, Vol. 35, pp.787-795, 2004.
- 9) Standard Test Method for "Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", ASTM D 3039, 2000.
- 10) Standard Test Method for "Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM E 399, 1997.
- 11) T. L. Anderson, *Fracture Mechanics:Fundamentals and Applications*, CRC Press, Florida, 1994.
- 12) K. Kageyama, K. Nonaka, S. Shimamura and S. Fukuda, "Fracture Toughness and Acoustic Emission of Carbon-cloth/poxy Composite", *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 50, pp. 1260-1266, 1984.