

# 음향방출특성에 의한 탄소섬유강화 복합재의 손상파괴거동에 관한 연구

권 오 현

부경대학교 안전공학과

(2001. 8. 22. 접수 / 2002. 1. 3. 채택)

## Study on Evaluating the Damage Fracture Behavior of the Carbon Fiber Reinforced Composite Material by Acoustic Emission Characteristics

Oh-Heon Kwon

Department of safety engineering, Pukyong National University

(Received August 22, 2001/ Accepted January 3, 2002)

**Abstract** : An approach for the damage of delamination which is the major concern during mechanical working for composite laminate material is proposed based on linear elastic fracture mechanics. This paper presents method evaluating of damage crack length using by average thrust force with AE characteristics. Also, the relations of AE characteristics are obtained from delamination damages. We found the onset ply of the delamination and a critical energy release rate and expressed a stress intensity factor by AEcount equation.

**Key Words** : carbon fiber reinforced composite, delamination, damage crack length, ae characteristics, fracture parameter

### 1. 서 론

고 비강도, 고탄성인 복합재료는 초기 군용제품, 항공기 등에 주로 사용되어져 왔으나 최근 10여 년 동안에 의료계, 산업현장 등에 그 적용분야가 급격히 증가하고 있다. 이러한 각종 산업분야에 복합재료의 사용 증가는 가공상, 레이저 커팅, 워터젯 커팅 등 새로운 기술들과 접목되어지고 있다. 그러나 여전히 재래가공 방법인 드릴링, 밀링, 쇼잉 등은 복합재의 가공에 광범위하게 사용되어지고 있다. 기계가공 중에서, 특히 드릴링은 구조물의 결합에서 중요한 위치를 차지하고 있으며 복합재의 구조물에서도 같은 맥락에서 설명될 수 있다. 이러한 드릴링 작업 중 복합재료는 금속 균일재의 경우와는 달리 복합적층재의 중요한 제한적 요소로서 적층분리 현상이 일어날 수 있다. 이 적층분리 현상은 가공의 경제적 효율성을 저해할 뿐만 아니라 초기 적층분리 현상을 인지하지 못한 채 장시간 사용시 구조물

안전성에 중대한 영향을 초래할 수 있다. 따라서 적층분리가 일어나는 현상을 파악함으로써 구조물의 안전성 평가에 기여할 수 있다. Ho<sup>1)</sup> 등은 드릴링 매개변수와 재료상수에 기인한 복합적층판의 적층분리 현상에 대한 모델을 제시하였다. 또한 Jain<sup>2)</sup> 등은 추력과 적층분리와의 관계를 도출하였다.

한편 복합재의 파괴거동 해명에 유효한 수단으로 음향방출법이 이용되어지고 있다. Blanchette<sup>3)</sup> 등은 음향방출 사상계수와 응력확대계수와와의 관계를 금속 재료에 적용하여 균열진전량과의 관계를 구하였다.

본 연구에서는 탄소섬유강화복합재료에 드릴링 가공작업시 발생하는 적층분리 현상에 대하여 적층손상길이를 음향방출특성치와의 관계로 도출하고 파괴강도적 입장에서 평가하였다.

### 2. 적층손상 및 AE 신호특성의 파괴거동

#### 2.1. 적층손상과 에너지해방률과의 관계

복합적층판에 드릴링작업을 할 때 구멍 가공 시작시에는 구멍 주위에 손상이 거의 발생되지 않으

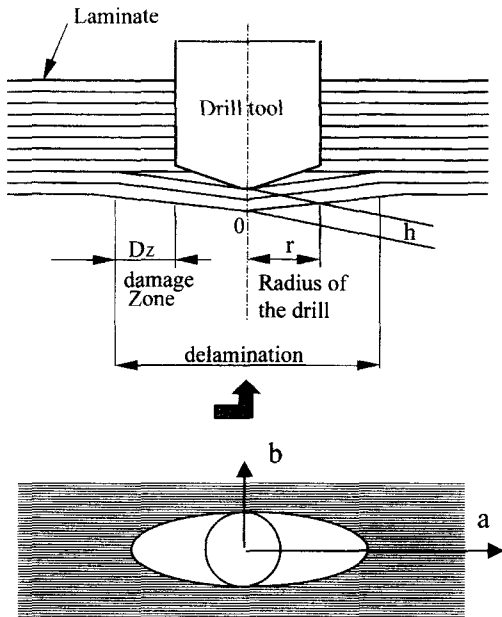


Fig. 1. The Concept of the delamination in laminated composites

나 드릴이 적층판을 관통하기 직전부터는 추력 때문에 밀면 적층에 일부 적층분리현상이 발생한다. Fig. 1은 적층분리 현상의 개념도이다.

여기서  $h$ 는 적층분리 후면 깊이이다. 드릴반경을  $r$ 로 했을 때 드릴반경을 제외한 손상범위를  $Dz$ 로 하여 드릴반경을  $r$ 과의 비를 구하여 적층분리인자로 정의할 수 있다.<sup>4)</sup> 이때 적층분리인자는  $Df$ 로 식(1)처럼 구해진다.

$$Df = \frac{Dz}{r} + 1 \quad (1)$$

드릴링가공에 의해 구멍주위에 발생하는 손상균열의 형태는 일방향 적층복합재의 경우에는 구멍을 중심으로 섬유배열 방향으로 타원형의 모양을 형성되며 적층분리가 발생된다. 따라서 탄성파괴역학에서의 에너지평형관계를 도입하여 식(2)가 성립된다.<sup>5)</sup>

$$G \cdot dA = Tdy \cdot dU \quad (2)$$

여기서  $G$ 는 에너지해방률을 의미하며  $A$ 는 손상균열이 차지하는 면적,  $U$ 는 변형률에너지를 나타낸다. 또한  $Ty$ 는 각각 드릴추력과 섬유직각방향의 변위를 나타낸다. 식(2)에서 변위  $v$ 는 Timoshenko 판이론<sup>6)</sup>

에 의해 식(3)과 같이 주어진다.

$$v = v_0 \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^2 \quad (3)$$

또한 변형률에너지  $U$ 는 Ritz<sup>7)</sup>의 방법에 의해 식(4)와 같이 얻어진다. 이때  $a=r+Dz$ ,  $b=r$ 로 간주한다.

$$U = \frac{T^2 \cdot r^2 \cdot (1+Df)^2 Df^2}{9\pi [D_{11} + 2/3(D_{12} + 2D_{66})Df^2 + D_{22}Df^4]} \quad (4)$$

여기서,  $D_{11}, D_{22}, D_{12}, D_{66}$ 은 다음과 같다.

$$D_{ij} = \frac{E_{ij} h^3}{12(1-\nu_{12}\nu_{21})}, D_{66} = \frac{G_s h^3}{12}$$

$E_{ij}, G_s, \nu_{ij}$ 는 각각 탄성계수, 전단계수, 포아송비를 나타낸다.

식(3)과 (4)를 미분하여  $dv, dU$ 를 얻고, 식(5)를 이용하여 식(2)에 대입하면 식(6)을 얻을 수 있다.

$$dA = 2\pi a \cdot db \quad (5)$$

$$G = \frac{2T^2(1-\nu_{12}\nu_{21})}{3h^3 E^* \pi^3} Df^4 \quad (6)$$

$$E^* = 2E_{11} + 2/3 Df^2 (E_{22}\nu_{12} + 2G_s(1-\nu_{12}\nu_{21})) \quad (7)$$

추력  $T$ 는 Chen<sup>4)</sup>의 결과를 이용하여 식(8)과 같이 주어진다.

$$T = (Df - 0.671)/0.00487 \quad (8)$$

식(8)을 식(6)에 대입하여 에너지해방률  $G$ 와 손상균열길이  $Df$ 와의 관계가 얻어진다.

## 2.2. AE 신호특성과 파괴거동

음향방출(Acoustic Emission: 이하 AE)은 어떤 물체가 외내력에 의해 변형 또는 파괴가 발생할 때 재료내부의 탄성파를 포함한 변형률에너지가 방출된다. 이러한 탄성파를 AE신호라 하며 AE특성치로서 사상계수, 진폭, 에너지, RMS 등이 얻어진다. AE파형의 상승에서는 하중의 형태를 결정할 수 있으며 사상계수로부터는 손상빈도, 진폭이나 에너지로부터는 손상의 정도를 알 수 있어 파괴기구의 해명에 이용된다. AE계수는 센서에 도달된 신호가 기준치를

넘는 경우의 AE신호를 의미한다. 이러한 AE계수는 재료의 파괴거동을 지배하는 파라미터인 응력확대 계수 K와 밀접한 관계가 주어진다. 응력확대계수는 균열의 크기와 응력에 의존하며 AE파라미터와 다음과 같은 관계가 Dunegan<sup>8)</sup>에 의해 주어져 있다.

$$N \propto K^m \quad (9)$$

여기서, N은 누적AE계수, K는 응력확대계수 및 m은 상수이다.

식(6)~(9) 및 K와 G의 관계를 이용하면 G와 AE 누적계수와의 관계, K와 손상균열길이 Df 및 AE신호 파라미터와의 관계 등을 얻을 수 있다.

### 3. 시험편 및 실험방법

#### 3.1. 재료 및 시험편

본 실험의 실험재료는 (주)한국카본에서 생산되는 일반탄성프리프레그인 표준 R/C CU 2503(CF Wt 250gr/m<sup>2</sup>)을 사용하였다. 0.223mm두께를 가진 프리프레그는 Hot press 급형의 크기인 250mm×250mm로 먼저 절단한 후 일방향으로 24플라이 적층을 하여 Hot Press에서 게이지 압력 11.76MPa와 성형온도 140°C로 가압·성형하였다. 성형된 CFRP 복합재료는 다이아몬드 휠커터를 사용하여 시험편으로 절단 가공하였다.

Table 1에는 사용된 복합재료의 기계적 성질을 나타낸다.

#### 3.2. 실험방법

드릴작업은 일본S사 제품인 ML-360 소형 복합선반에서 행하여 졌다. 선반의 주축에 HSS드릴을 장착하고 자동이송장치를 이용하여 피이드(f) 0.14mm/rev로 구멍가공을 하였다. 이때 회전수는 970rpm으로 하였다. 구멍지름은 산업현장에서 일반적으로 많이 사용되는 범위중 6mm를 선택하였다. 드릴작업에서 발생하는 손상크기 및 AE특성측정에는 미국 PAC의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC시스템과 실체현

미경을 사용하였다. AE센서는 잡음제거에 유용한 공진주파수가 150kHz인 R15센서를 사용하였으며 시험편과 센서 사이에 접착매질을 바른 후 천테이프 로 압착하였고, 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였다. Threshold 형은 Float로 설정하였고 Threshold값은 45dB로 하였다. 센서는 ASTM E976-94<sup>9)</sup>에 의해 교정하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. AE 특성

Fig. 2는 주축 회전속도가 970rpm, 이송속도 0.14 mm/rev에서 드릴직경이 6mm의 일방향 적층에 대한 경우로 AE계수와 진폭을 드릴가공 시간에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 AE계수는 드릴가공 시간에 대해 0.1초 동안 발생한 AE계수의 합계이다.

Fig. 2에서는 현 가공 조건에서 드릴작업을 시작하여 드릴구멍이 시험편을 완전히 가공되는데 걸리는 총시간이 3.19초인 일방향 적층의 경우로서 드릴 작업 초기인 대략 8플라이 지점인 0.83초까지는 드릴 절연에서 완전한 드릴직경이 되기까지의 경과시간으로 74.7dB 정도의 낮은 진폭을 나타낸다. AE계수는 비교적 큰 값인 398을 나타내고 있다. 이것은 드릴날 끝단의 회전으로 적층판 진입 초기에 섬유소의 비틀림과 시험편 제작시 적층성형 과정에서

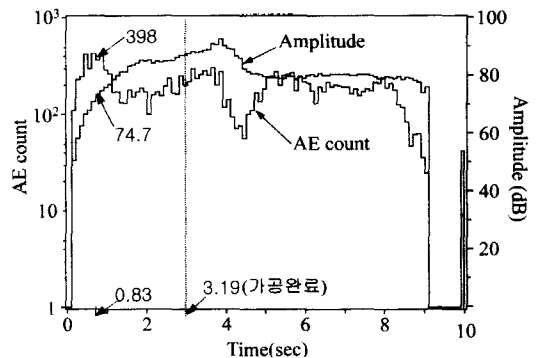


Fig. 2. The relationships of AE characteristics according to the time

Table 1. The Mechanical properties of CFRP used in experiments

ultimate strength $\sigma_u$ (MPa)	longitudinal elastic modulus $E_{11}$ (GPa)	transverse elastic modulus $E_{22}$ (GPa)	poission's ratio $\nu_{12}$	shear modulus $G_s$ (GPa)	elongation $\delta$ (%)	brinell hardness HB
720.3	150.0	10.3	0.32	4.8	1.75	117.89

발생한 적층간 기포의 생성이나 초기결합의 확대에 의한 것으로 여겨진다. AE계수는 비록 큰 값을 보이지만 진폭이 낮은 것으로 보아 시험편의 손상 정도에는 중대한 영향을 주지 않을 것으로 생각된다. 이후 대략 21플라이인 2.1초까지는 드릴가공에 의한 섬유소와 기지의 가공구간으로 AE계수 값은 순간적으로 100으로 감소하지만 진폭이 85.3dB로 상승하기 시작한다. 따라서 손상의 빈도는 작아도 진폭이 최초 최대값을 가지기 때문에 이 지점이 적층분리가 시작되는 지점으로 생각된다. 적층분리 개시 이후 2.43초 정도에서 드릴 절인이 마지막 플라이에 도달하여 완전한 드릴직경이 돌출되면서 AE계수와 진폭은 계속적으로 상승하고 있으며 드릴작업이 완료되는 시점인 3.19초에서 AE계수는 234 및 진폭은 88.3dB로 상승한다. 이것은 시험편 내의 적층분리와 함께 드릴의 돌출과 출구쪽과 가까운 층간 결합력의 약화로 인하여 가공이라기보다 박리현상으로 발생하는 섬유소와 기지의 손상으로 인한 AE특성을 나타내는 것으로 간주될 수 있다. 이후 계속되는 진폭의 상승구간은 층간분리 및 박리현상에 의한 출구면의 연속적인 추가 손상정도를 나타낸다고 여겨진다.

**4.2. 손상균열길이 측정**

AE신호가 발생되는 동안의 균열발생 및 손상길이를 측정하기 위하여 CCD카메라를 장착하고 1/4000 속도로 가공재료 뒷면을 연속촬영하였다. 촬영된 영상은 그래픽그래브보드(DT3153)장착 컴퓨터에 전송하였다. 손상균열길이의 순간위치측정은 드릴사이클의 마지막 영상부위로부터 되감아 가면서 각 위치에서의 시간을 구하여 얻어졌으며 각 위치에서의 손상균열길이는 HL이미지 S/W를 이용하여 획득되었다. 실험이 완료된 시험편의 손상부위는 실제현미경을 이용하여 손상정도를 측정하여 HL이미지 S/W 측정결과와 비교결정하였다.

Fig. 3은 적층분리인자와 AE진폭과의 관계를 나타내고 있다. Fig. 3에서 보는 것처럼 적층분리가 일어나는 것으로 간주되는 85.3dB 진폭크기에서 손상길이가 측정가능해져 Df가 약 1 정도이며 88.3dB 진폭크기까지 손상균열이 직선적으로 성장하여 Df가 최대 약 3의 값을 나타내고 있다.

**4.3. 적층분리현상의 파괴거동 평가**

Fig. 4는 적층분리인자Df에 따른 G의 변화를 나

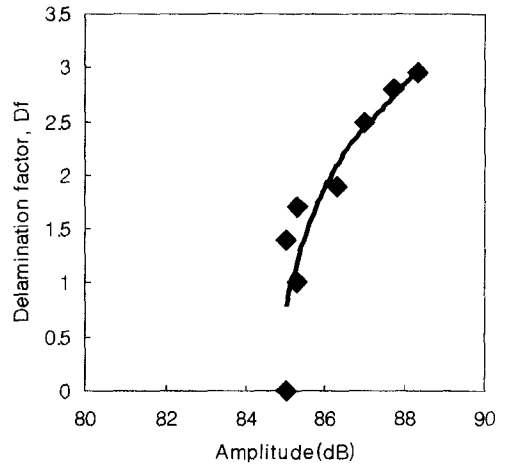


Fig. 3. The relation between the delamination factor and AE amplitude

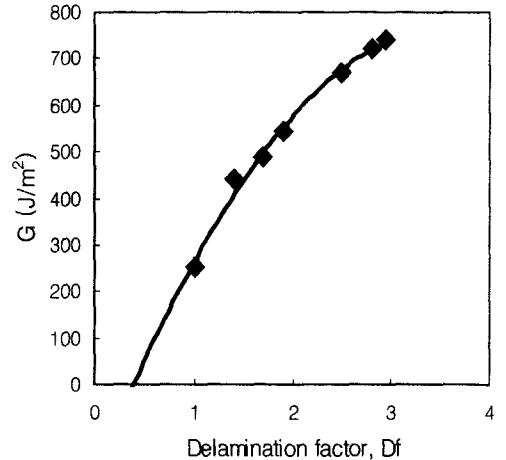


Fig. 4. The relationship between energy release rate and delamination factor

타내고 있다. G는 Df가 1의 위치에서 성장하기 시작하여 적층분리인자가 커짐에 따라 완만히 증가하고 있다. 여기서 임계에너지해방률  $G_c$ 는  $250.3J/m^2$ 를 얻었다. 따라서 주어진 임계에너지해방률의 값에 따라 AE특성치가 임계치를 나타낼 때 적층분리가 일어나기 시작하는 것으로 평가되어질 수 있다.

Fig. 5는 누적AE계수와 에너지해방률에서 구한 응력확대계수K의 관계를 나타내고 있다. Fig. 5로부터 식(9)의 비례상수는 0.1699이며 승수 m은 1.2208을 얻었다. 따라서 식(9)는 식(10)과 같이 얻어진다.

$$N = 0.1699K^{1.2208} \tag{10}$$

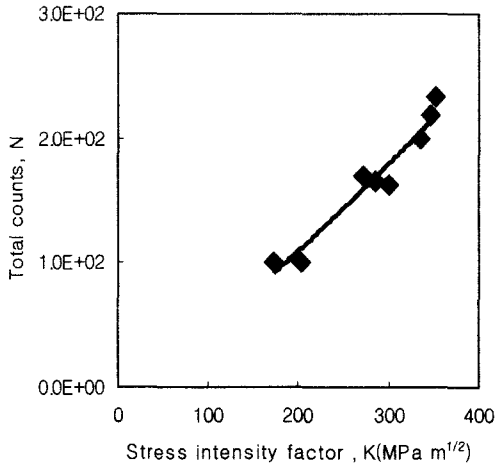


Fig. 5. The relationship of between total AE counts and stress intensity factor K

### 5. 결론

일방향 탄소섬유강화 복합재료에 대하여 드릴링 작업을 행하여 AE 특성치와 가공구멍으로부터의 손상균열길이를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AE 진폭특성치는 적층분리 현상을 비교적 잘 나타내어 주었으며 시편두께의 87.5%의 깊이인 21 번째 적층에서 적층분리가 개시되었다.
- 2) 드릴가공 구멍으로부터 발생되어진 손상균열 길이는 이미지보드에 의해 측정가능하였다.
- 3) 적층분리인자는 에너지해방률에 의해 표현되어 적층분리 개시시의 임계에너지해방률의 의미로  $250.3\text{J/m}^2$ 을 얻을 수 있었다.
- 4) 응력확대계수는 누적 AE계수에 의해 누승식으로 표현가능하였으며 AE특성치를 이용한 재료의 응력을 구하는데 적용될 것으로 간주된다.

감사의 글 : 이 논문은 부경대학교 교내 기성회

연구지원비로 이루어진 것으로 관계자에게 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Ho-Cheng, H. and Dharan, C. K. H., "Delamination during drilling in composites," Trans. ASME, Vol. 112, pp. 236~239, 1990.
- 2) Jain, S. and yang, D. C. H., "Delamination free drilling of composite laminates," Jour. of Engineering for Industry, Vol. 116, pp. 475-481, 1994.
- 3) Blanchette, Y. and Dickson, J. I., "The use of acoustic emission to evaluate critical values of K and J in 7075-T6H aluminium alloy," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 20, No. 2, pp. 359-371, 1984.
- 4) Chen, W. C., "Some experimental evaluations in the drilling of carbon fiber reinforced plastics composite laminates," Int. Jour. Machine Tools and Manufacturing, Vol. 37, No. 8, pp. 1097~1108, 1997.
- 5) Kanninen, M. F. and Popelar, C. H., Advanced Fracture Mechanics, Oxford Press, pp. 38~39, 1985.
- 6) Timoshenko, S. and Woinowsky-keiger, S., Theory of Plates and Shells, 2nd, MacGraw Hill, pp. 51~59, 1959.
- 7) Timoshenko, S. and Woinowsky-keiger, S., Theory of Plates and Shells, 2nd, MacGraw Hill, pp. 376~377, 1959.
- 8) Dungegan, H. L., harris, D. O. and Tatro, C. A., "Fracture analysis by use of acoustic emission," Engineering Fracture mechanics, Vol. 1, pp. 105~122, 1968.
- 9) Annual Book of Standards - Non Destructive Testing, E976-94, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor response, Vol. 3.03, ASTM, Philadelphia, pp. 374~379, 1994.