

# 드릴작업중 발생하는 일방향 적층 CFRP 복합재료의 손상평가 및 AE특성

## The Damage Evaluation and Acoustic Emission Characteristics of the Unidirectional Ply CFRP Composite Materials in a Drilling Procedure

윤유성 · 권오현

Y. S. Youn and O. H. Kwon

**Key Words** : Acoustic Emission(음향방출), CFRP(탄소섬유강화복합재료), Drilling Procedure(드릴작업)

**Abstract** : In recent years, composite materials like CFRP are increasingly used in various fields of engineering because of their unique properties which offer a high strength/density and high modulus/density. When CFRP structures are manufactured in drilling processes which are frequently practiced in an industry, they bring on the delaminations sometimes. So, acoustic emission(AE) techniques were used for a condition monitoring of the drilling process in CFRP. In this study, the AE from CFRP estimated the delamination which reduces the strength and load carrying capacity under the drilling process and the initial delamination were well caught and measured by a video camera. From the results, it was found the relationships between failure mechanism of CFRP delamination and AE characteristics as like amplitude and count.

### 1. 서 론

최근 구조물의 손상 및 파손을 평가하는 공학적 수법으로 AE법(Acoustic Emission Technique)의 연구가 활발히 이루어지고 있다. AE는 물체가 외력에 의해 소재 그 자체의 변형으로 방출되는 탄성파로서 1950년대 초기에 독일의 Kaiser로부터 시작되어 Schofield가 AE의 정의를 최초로 내린 후 1970년대 이후 크게 발전되어왔다.

재료의 AE신호특성은 진폭분포 또는 사상계수(event count)로써 결함, 파손 및 균열의 진전량 등을 파악한다. 또한 AE파형의 상승에서 가해지는 하중의 형태를 구별할 수 있으며 사상으로부터 손상의 빈도, 시간분포에서 손상의 형태, 진폭이나 에너지로부터는 손상의 크기 등을 알 수 있어 재료내의 동적인 구조변화, 구조물의 결합위치와 설비의 파괴진단에 적용할 수 있다.

Nakamura<sup>1)</sup>은 재료의 신호방출특성을 진폭분포로서 평가하였고, Ono 등<sup>2)</sup>은 진폭분포를 정량화하

여 미시파괴과정을 평가하였다. 또한 Blanchette 등<sup>3)</sup>은 AE법과 균열진전량과의 관계를 K와 사상계수와의 관계로 설명하였다. 근래에는 Ni 등<sup>4,6)</sup> 및 Ni<sup>7)</sup>은 AE와 파괴파라미터와의 관계를 규명하기 위하여 복합재료를 사용하였다. 한편 DiPaolo 등<sup>8)</sup>과 Chen<sup>9)</sup>은 FRCM에 드릴작업을 행하여 균열이 성장하는 현상을 관찰하여 드릴력과 균열단의 위치관계를 규명하였다. Dong 등<sup>10)</sup>은 상태 모니터링에 AE수법을 적용하기 위하여 그라인딩 과정에서 발생하는 AE의 주파수 특성을 평가하였다. 본 연구에서는 CFRP 복합재료의 적층분리 및 섬유소파단 현상에 대한 평가를 얻기 위하여, 드릴 구멍의 외부 손상이 시작됨과 동시에, 음향방출로 AE에너지 분포, 계수 그리고 진폭을 검출하여 AE특성을 평가하여 비디오 카메라에 의해 모니터링된 손상현상과의 관계를 수립하고자 한다.

### 2. CFRP 적층분리 현상과 손상평가

적층분리는 전형적인 드릴링 기계를 사용하여 CFRP에 구멍 가공을 할 때 직면할 수 있는 문제이다. 작업시 가공물의 최초 표면에 발생하는 균열

접수일 : 1998년 11월 25일  
윤유성 : 부경대학교 대학원  
권오현 : 부경대학교 산업시스템·안전공학부

은 통상 제품가공에 그다지 큰 영향을 미치지 않으나, 드릴 출구 표면상태는 제품의 강도 및 품질면에서 대단히 중요하다. 부적절한 드릴 추진력과 회전속도 등은 가공물의 강도 및 품질에 중요한 영향을 줄 수 있는 균열발생 또는 섬유소의 부분절단을 야기하거나 적층판의 박리현상을 초래한다. Fig. 1은 일방향 적층 섬유강화복합재료의 구멍가공 동안에 발생하는 국부적인 손상형태를 나타낸다.

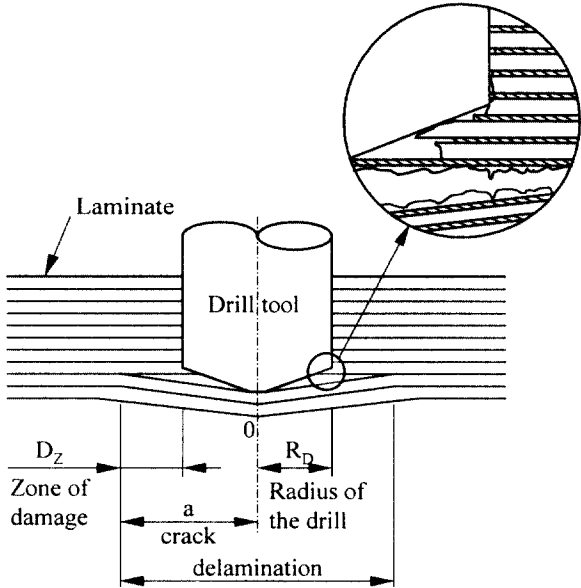


Fig. 1 A schematic depiction of delamination by drilling in CFRP composite

적층이 분리됨에 따라 섬유소의 방향을 따라서 손상부분이 생기게 되며 균열이 성장하게 된다. 드릴이 재료의 적층판을 통과하면서 발생하는 손상범위를  $D_z$ 로 하면 드릴 반지름  $R_D$ 와 적층분리인자  $D_F$ 의 비를 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$D_F = \frac{D_z}{R_D} \quad (1)$$

드릴직경에 따른 적층분리 손상의 관계를 평가할 수 있다. 적층분리인자  $D_F$ 는 단일방향 적층 CFRP의 드릴링 작업시 드릴 추력  $T_F$ 와 식(2)의 관계가 주어진다<sup>9)</sup>.

$$D_F = f(T_F) \quad (2)$$

여기서  $f(T_F)$ 는 추력함수식을 의미한다. 추력  $T_F$ 는 Jain 등<sup>11)</sup>의 결과를 이용하면 다음과 같다.

$$T_F = 0.136 H_B (d)^{0.78} (s)^{0.40} \quad (3)$$

여기서  $H_B$ 는 브리넬경도를 의미한다. 따라서 재료의 브리넬경도  $H_B$ 와 드릴직경  $d$ , 이송속도  $s(10^{-3} \text{mm/rev})$ 를 구하면 추력이 구해진다. 즉 손상크기  $D_z$ 는 식(4)과 같이 성립하며

$$D_z = R_D \cdot f(T_F) \quad (4)$$

드릴 추력에 따른 손상크기를 평가할 수 있다.

### 3. 시험편 및 실험방법

#### 3.1 시험편

본 실험에 사용된 실험재료는 국내 (주)한국카본에서 생산되는 일반 탄성 프리프레그인 표준 R/C CU 2503을 일방향으로 24플라이를 적층하였다. 적층판은 열성형기에서 성형온도 140℃, 압력은 게이지압력 80kg/cm<sup>2</sup>로 성형하였다. 적층된 CFRP 복합재료는 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 섬유방향에 대해서 가로, 세로 각각 75mm×50mm로 절단가공 하였다. Fig. 2는 전형적인 시험편의 크기와 형상을 나타낸다.

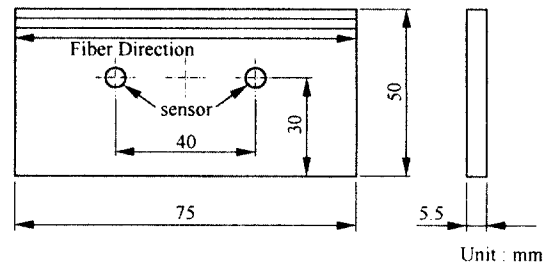


Fig. 2 Typical CFRP composite specimens

#### 3.2 실험 방법

구멍가공은 (H)SAKAI사의 ML-360 소형선반을 사용하여 선반의 주축에 드릴을 장착하고 선반의 자동이송장치로 드릴작업을 하였다. 이때 자동이송거리는 주축 1회전당 0.07mm( $s=0.07 \text{mm/rev}$ )로 일정하게 하고 드릴의 회전수는 각각 970rpm, 520rpm, 260rpm의 3종류로 변환시켰다. 드릴지름은  $\varnothing 2 \text{mm}$ ,  $\varnothing 4 \text{mm}$ ,  $\varnothing 6 \text{mm}$ 로 하여 각 경우에 발생하는 AE특성을 측정 및 관찰하였다. 사용된 드릴 비트는 HSS 드릴이며, 드릴작업 동안 AE가 검출될 때의 균열발생 및 손상정도를 명확히 하기 위하여 (H)SONY사의 CCD-TR850 소형 비디오 카메라를 설치한 후 셔터 속도 1/4000로 녹화하였

다. 녹화된 영상은 그래픽 grabber 보드가 장착된 PC에 순간의 가공 부위를 저장하여 AE특성 및 손상평가에 이용한다. AE특성 계측 및 해석에는 PAC사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC 시스템을 사용하였다. 발생하는 신호는 매우 민감하므로 자동이송 테이블의 지그에 시편을 고정할 때 지그와 시편사이에 흡음재를 장착하여 드릴 작업시 발생하는 기계적 잡음을 가능한 제거하고, 시편과 센서사이에 실리콘 접착매질을 바르고 천테이프를 압착하였다. AE센서는 150kHz에서 공진주파수를 갖는 R-15센서를 사용하였다. 실험에 사용된 AE변수는 Table 1에 나타내었다. 실험에 대한 개략도는 Fig. 3에 나타낸다.

Table 1 Parameter setup

parameter type	Instrument set values
	CFRP
Threshold type	Fixed
Threshold value	80 dB
Peak Definition Time(PDT)	100 $\mu$ s
Hit Lock Time(HLT)	300 $\mu$ s
Hit Definition Time(HDT)	200 $\mu$ s
Sample rate	4 MHz
Filter on board(low)	100 kHz
Filter on board(high)	1.2 MHz

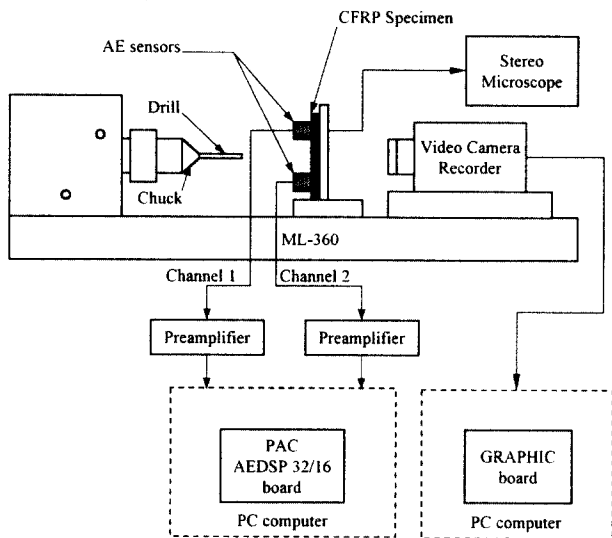
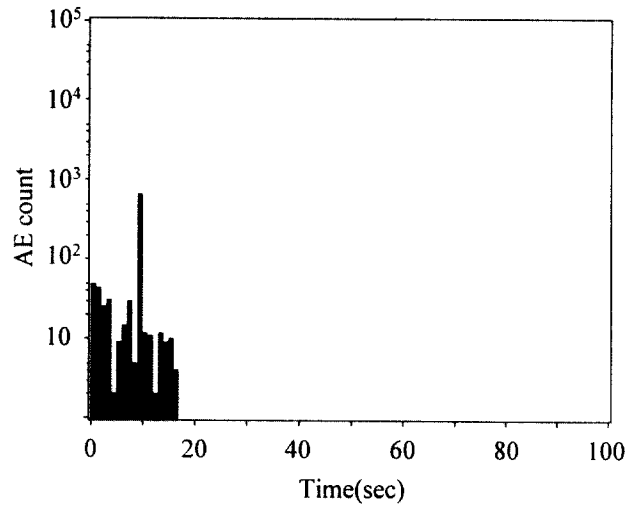
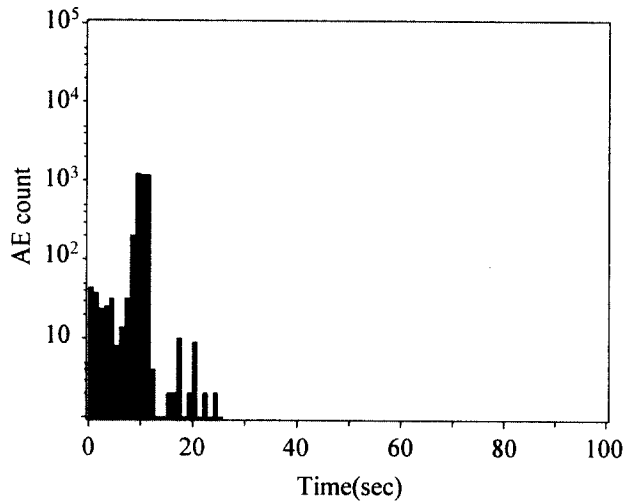


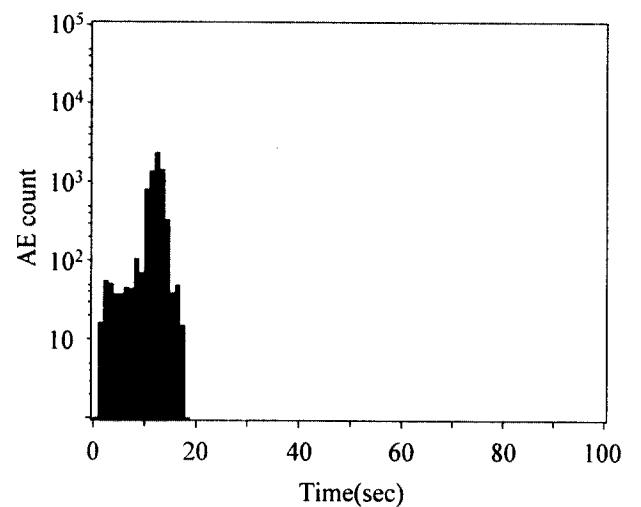
Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 The variation of between AE counts and time according to a drill diameter (a)  $\varnothing$  2 (b)  $\varnothing$  4 (c)  $\varnothing$  6mm in 520rpm

4. 실험결과 및 고찰

4.1 CFRP의 AE특성

HSS 드릴에 의하여 구멍가공을 행할 때 드릴 직경에 따른 AE변수의 변화를 측정하고 적층분리와의 관계를 조사하였다.

Fig. 4 (a), (b), (c)는 섬유소 길이방향으로 지지된 시험편에서 드릴 직경이  $\varnothing 2$ ,  $\varnothing 4$ ,  $\varnothing 6\text{mm}$ 의 경우에 대하여 주축회전속도 520rpm, 이송속도 0.07mm/rev로 구멍가공 하였을 때 얻어진 AE계수를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 최대계수가 얻어지는 시간은 9", 9.5", 12"에서 발생되어 구멍가공이 커짐에 따라 소요시간이 약간 길어짐을 알 수 있다. 또한 최대계수 값은 구멍 직경이 커짐에 따라 656, 1212, 2326을 나타내고 있으며 섬유소 또는 적층의 손상이 더 심하게 일어나고 있음을 의미한다. 적층분리가 시작되는 시점이 AE최대계수가 나타나기 시작하여 마지막 층이 드릴에 의하여 밀리면서 드릴의 끝 부분에 섬유가 인장되어 끊어지는 것으로 여겨지며 비디오 녹화에 의한 결과와도 잘 일치한다.

Fig. 5는 드릴직경 변화에 대한 AE계수의 관계를 나타낸다. 2가지 주축회전속도의 경우 모두 드릴 직경이 증가함에 따라 AE계수의 값은 증가하는 경향이 있다. 또한 주축회전속도가 높을수록 AE계수는 상대적으로 더 큰 값을 지니고 있음을 알 수 있다.

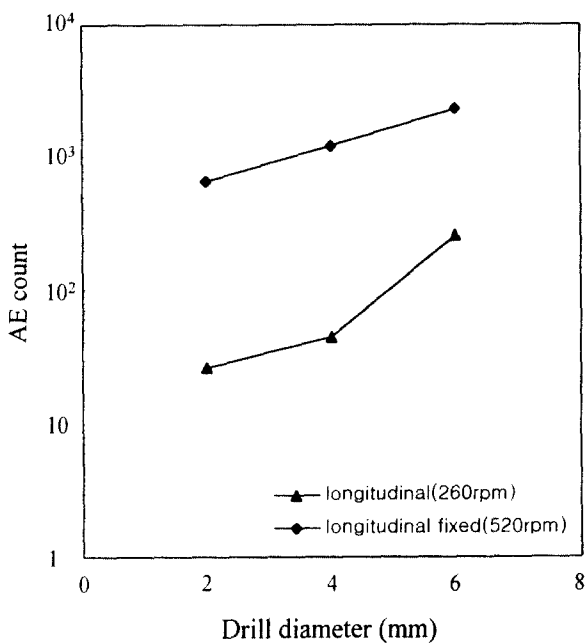
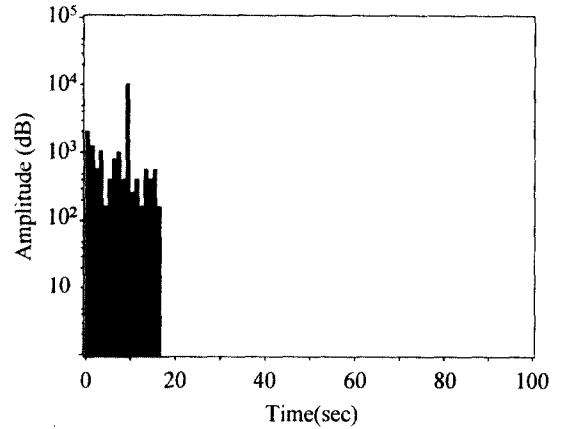
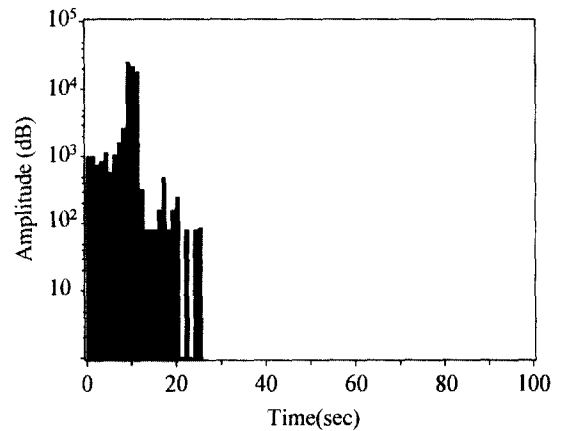


Fig. 5 The variation of AE count according to a drill diameter

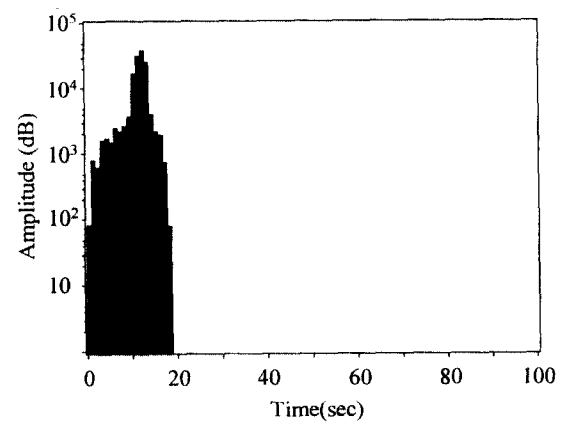
Fig. 6은 AE진폭의 분포를 나타낸 결과이다. 가공작업 시간경과에 대한 변화를 조사한 결과로서 드릴작업 초기부터 큰 진폭값을 나타내어 주축회



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 The variation of between AE amplitude and time according to a drill diameter (a)  $\varnothing 2$  (b)  $\varnothing 4\text{mm}$  (c)  $\varnothing 6\text{mm}$  in 520rpm

전수 520rpm의 드릴직경  $\varnothing 2$ ,  $\varnothing 4$ ,  $\varnothing 6$ mm에서 각각 약  $2 \times 10^3$ ,  $1 \times 10^3$ ,  $8 \times 10^2$ dB 정도의 값을 지님을 알 수 있다. 초기의 고진폭분포는 시험편 제작시 적층성형 과정에서 발생한 적층간 기포의 생성이나 초기결합과 드릴날 끝의 회전으로 섬유소의 비틀림에 의한 것으로 여겨지며, 가공작업직후 AE진폭은 조금 감소하여  $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$ dB,  $5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3$ dB,  $6 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3$ dB의 분포를 나타내다가 적층분리가 발생되기 시작하는 지점에서 AE 최대진폭은 급상승하여 마지막 층의 밀림현상과 더불어 드릴선단에 의해 섬유소의 인장 파단과정 이후 점차 감소하는 경향을 나타낸다고 생각된다. 이처럼 AE진폭은 손상 평가의 유효한 수단이 될 수 있음을 알 수 있다. 또한 섬유파단의 AE에너지의 값과 적층분리현상이 발생할 때의 AE에너지를 비교해 볼 때 적층분리에 필요한 에너지 값이 훨씬 큰 분포 값을 가지고 있음을 Fig. 7 (a), (b), (c)에서 나타낸다.

Fig. 7에서 얻어진 AE에너지의 결과는 주축회전수 520rpm에서 약  $10^4$ ,  $2 \times 10^4$ ,  $4 \times 10^4$ dB<sup>2</sup>의 최대 값을 가진다. AE에너지는 최대진폭 제곱의 상대값으로 주어지므로 적층분리 현상이 발생하는 최대 지점을 지나 섬유소가 파단되어지는 단계에서는 상대적으로 AE에너지 분포가 급격히 감소하여짐을 알 수 있다. 또한 드릴직경이 커짐에 따라 AE 에너지의 값도 커짐을 알 수 있으며 드릴직경이 큰 경우가 초기 적층분리현상이 발생하기가 더 쉽다는 것을 나타낸다.

Fig. 8 (a), (b), (c)는 드릴의 지름이 6mm일 때 각 주축속도에 있어서의 AE진폭분포 결과의 예이다. 주축회전수가 260, 520, 970rpm으로 증가함에 따라 적층분리가 발생하는 경우의 AE진폭값은 각각  $5.84 \times 10^2$ ,  $3.687 \times 10^3$ ,  $8.577 \times 10^3$ dB로 증가하는 추세로 나타났다. 260rpm의 경우에 가공 초기에 있어서 비교적 큰 진폭변화가 발생되었으나 즉시 낮아져 재료 두께의 거의 반정도의 위치까지는 점차 감소하다가 드릴과정 동안의 잔류응력 발생증가로 인하여 적층분리 직전의 AE진폭분포가 일시 상승하는 경향이 있는 것 같다. 어느 경우에서나 드릴 절인끝과 절삭날이 시험편 출구로 나올 때까지 다시 한 번 진폭분포는 증가한 후 감소하기 시작한다. 드릴이 완전히 밖으로 노출되었을 때에도 구멍에서 아직 파단되지 않은 섬유소 조직과 파편이 여전히 접촉되어 있는 상태이므로 분포값은 완전히 사라지지 않고 손상에 의한 외부 균열이 안정상태까지 계속 성장함으로 인하여 여진폭이 나

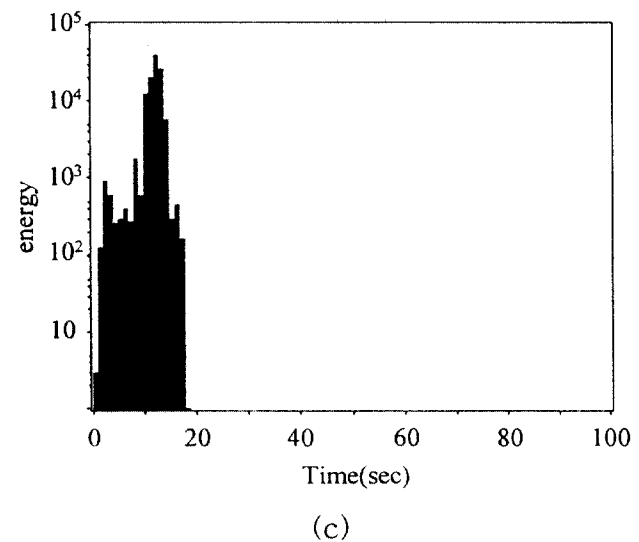
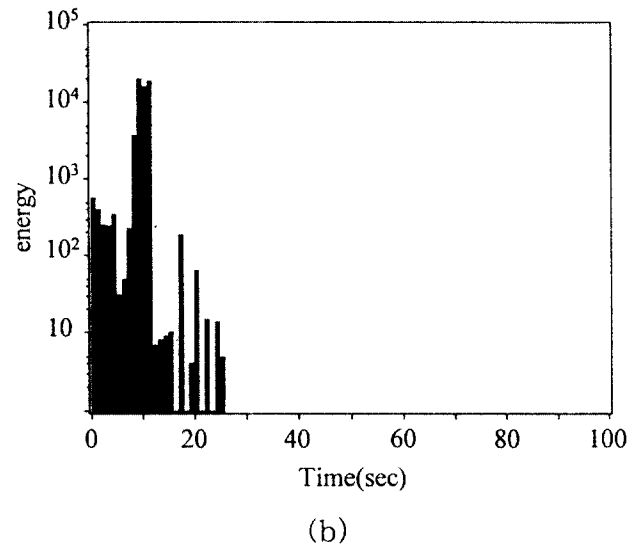
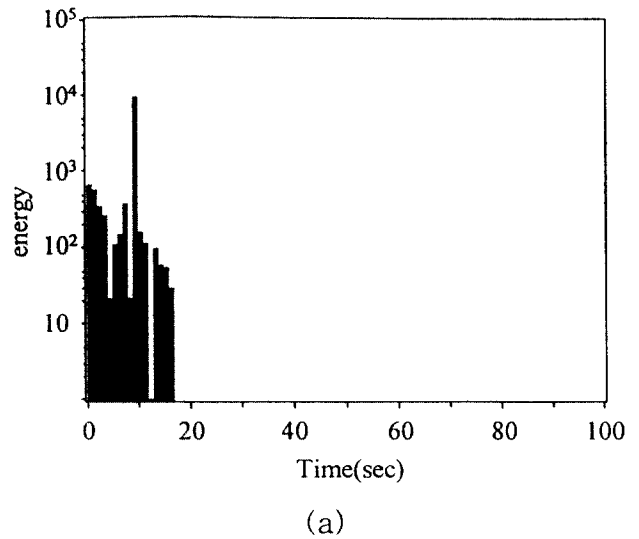
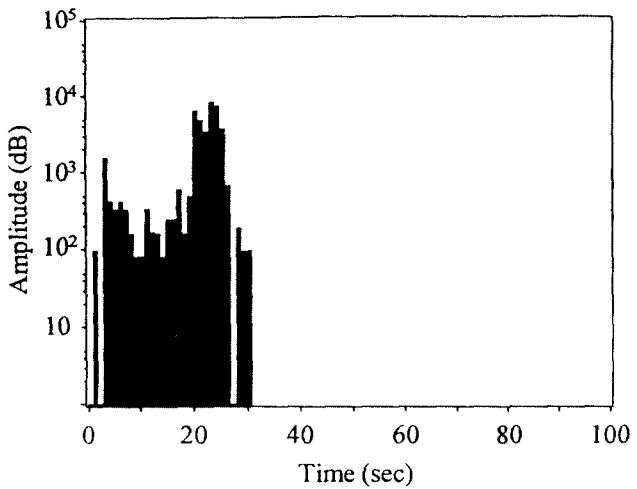
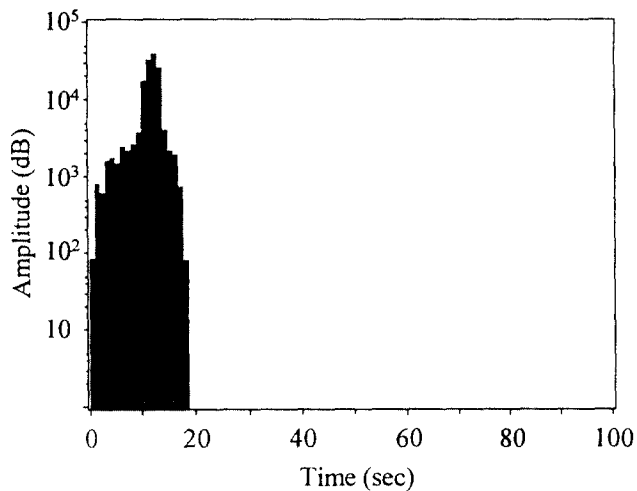


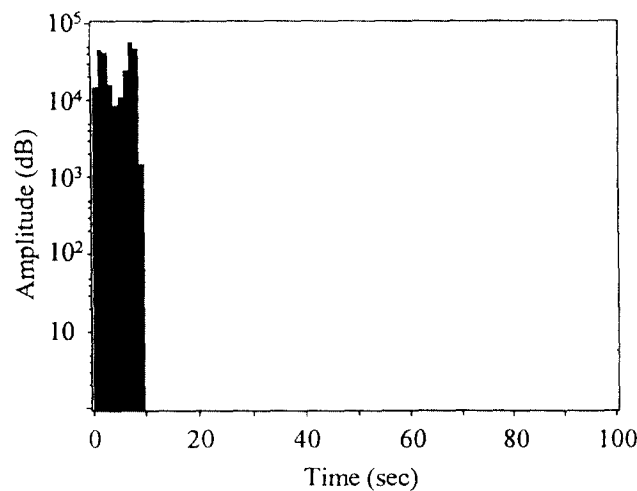
Fig. 7 AE energy distributions according to a time during the drilling process (a)  $\varnothing 2$ mm (b)  $\varnothing 4$ mm (c)  $\varnothing 6$ mm in 520rpm



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Histogram of AE amplitude distributions according to a spindle speed (a) 260rpm (b) 520 (c) 970rpm in a drill diameter 6mm

타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 주축회전수에 대한 적층분리 발생시의 AE진폭분포의 변화를 드릴 직경별로 나타낸 결과이다. 주축회전수의 증가에 따라 AE진폭값은 거의 선형적으로 증가하고 있어 드릴 회전수가 빠를수록 AE분포값은 증대하여 재료에 더 큰 손상을 입히는 것으로 여겨진다.

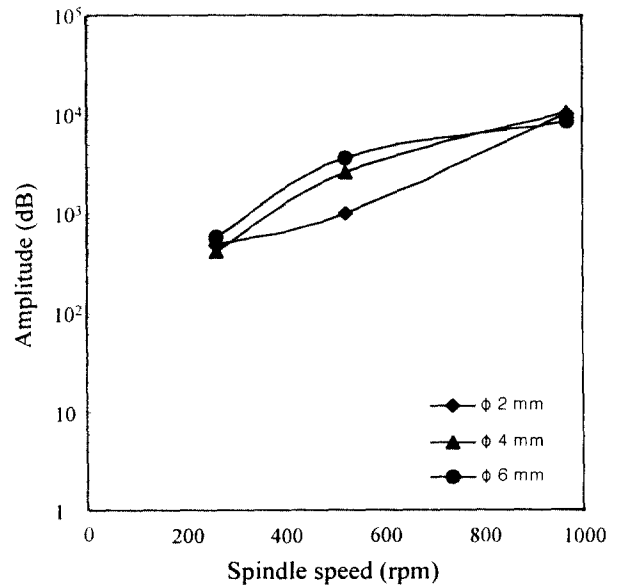


Fig. 9 The variation of AE amplitude with a spindle speed at each drill diameter

#### 4.2 모니터링에 의한 적층분리 및 손상평가

현재의 실험에서 적층분리가 드릴절인의 출구 거의 직전에 발생되기 시작하는 것으로 관찰되었다. 여기서는 최종 드릴의 선단부가 돌출되었을 때 구멍주위의 적층분리 현상에 의한 재료의 손상크기를 비디오촬영 결과를 정밀히 측정한 후 드릴직경 및 주축회전수에 따른 손상평가를 하여 AE특성과의 관계를 얻었다.

Photo. 1 (a)~(e)는 Fig. 4 (b)의 경우에 해당하는 가공작업을 비디오로 녹화한 영상 예를 그래픽 grabber 보드를 가진 PC에서 획득한 결과를 나타낸다. Photo. 1 (a)에서 적층분리 현상이 일어나기 시작하는 벌지부분을 관찰할 수 있으며 시간기록에 의하여 Fig. 4의 AE계수가 최대값이 얻어지는 순간임을 알 수 있다.

Fig. 10은 드릴직경에 따른 손상크기를 주축회전수 별로 나타낸 결과이다. 주축회전수의 어느 경우나 드릴직경이 2mm의 작은 경우에는 손상크기가 5mm이하의 거의 같은 값을 나타내다가 직경

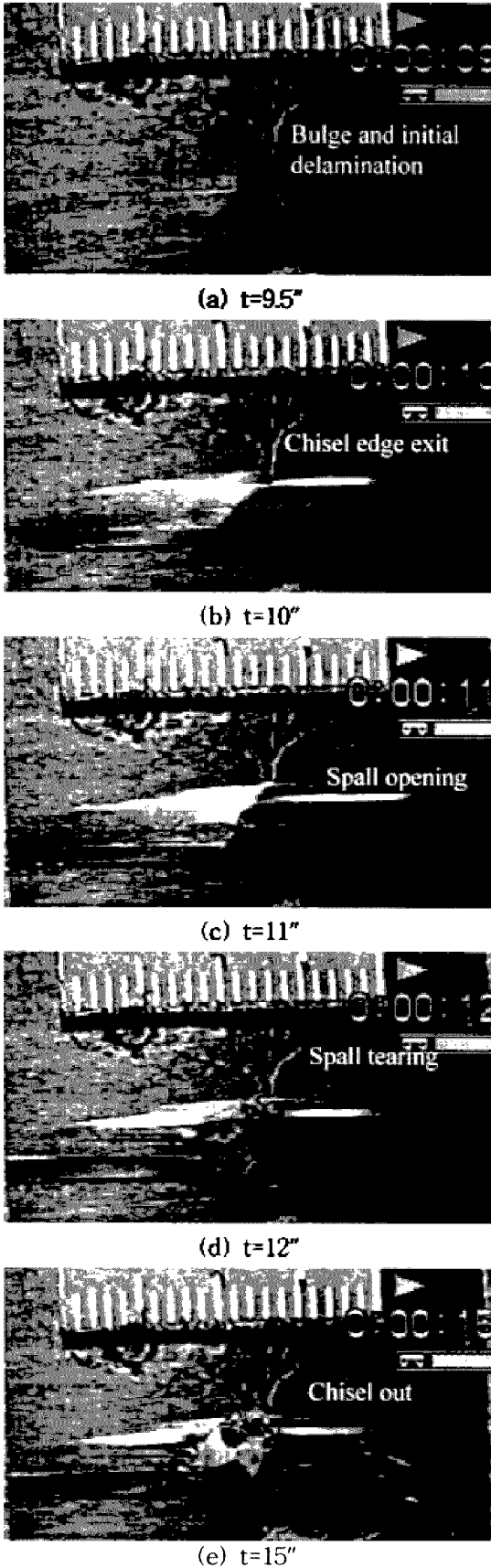


Photo. 1 Photographs of video recording of delaminations and damages by a drilling process(  $\phi$  4mm, 520rpm)

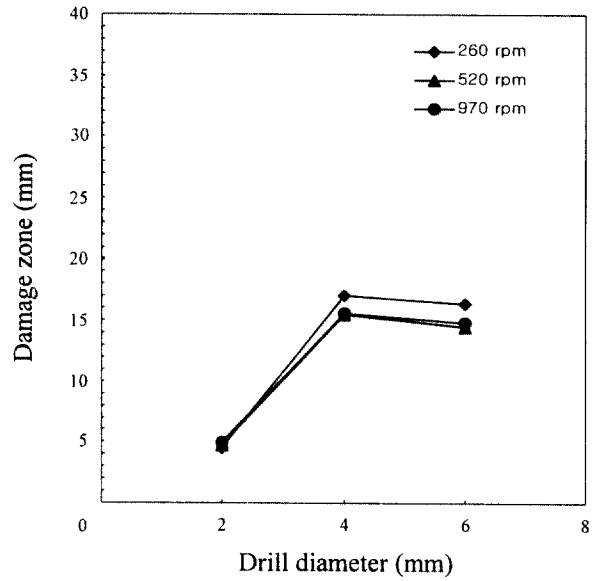


Fig. 10 The variation of the damage zone according to the drill diameter with a given spindle speed

이 4mm가 되었을 때 손상범위가 급격히 증가한 후 드릴직경 6mm경우까지 거의 약간의 손상크기가 감소하는 현상이 발생되고 있다. 따라서 현시시험편과 같은 조건의 적층구조인 경우에는 드릴직경이 4mm의 경우가 최대손상이 일어나는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 주축회전수 변화에 대하여 식(2)의 적층분리인자  $D_F$ 와의 관계를 나타낸 결과이다. 주축회전수에 대하여서는 각 드릴직경에 있어서  $D_F$ 는

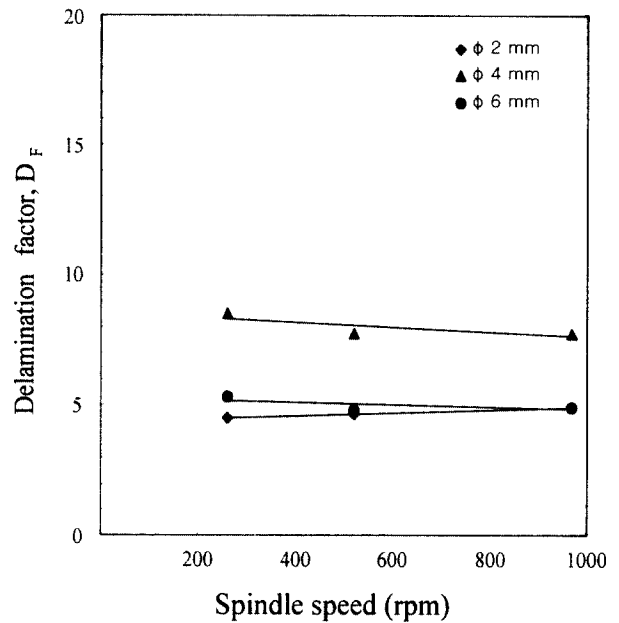


Fig. 11 The relationship of between a delamination factor and a spindle speed

### 5. 결 론

드릴직경 2mm의 경우에는 다소 증가의 경향이 보이나 거의 일정한 값을 가지며  $\varnothing 4$ ,  $\varnothing 6$ 의 경우에는 다소 감소하나 거의 일정한 값을 나타남을 알 수 있다. 따라서 절대적 손상의 크기는 커지나 드릴직경 크기의 영향을 고려한 경우에는 적층이 분리되는 정도는 주축회전수에 그다지 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12는 적층분리인자  $D_F$ 와 AE특성값인 진폭 변화 값과의 관계를 나타낸 것이다. 현재의 실험에서는 발생하는 AE진폭은  $10^2 \sim 8 \times 10^4$ 에서 분포되고 있으며, 각 드릴직경에 있어서 직선식은 (6)~(8)을 얻었다.

$$D_F = 4.3057 A^{0.0132} : R_D = 1 \quad (6)$$

$$D_F = 6.9764 A^{0.0213} : R_D = 2 \quad (7)$$

$$D_F = 5.8135 A^{-0.0173} : R_D = 3 \quad (8)$$

여기서 A는 AE진폭크기이다. 따라서 각 드릴직경에 있어서 발생하는 AE진폭값을 얻으면 식(6)~(8)을 이용하여 적층분리인자  $D_F$ 를 얻을 수 있다. 식(4)에서 브리넬경도  $H_B$ 는 현재의 CFRP 재료에서는 만능경도시험기에 의해  $117.89H_B(2.5/187.5)$ 을 구하여, 추력  $T_F$ 는 각각 142.16, 244.13, 334.505를 얻었다.

여기서 각 드릴직경에서의  $D_F$ 값을 3가지 주축회전수에서의 값의 평균값으로 사용하여 식(3)에 의해서 구해진 추력  $T_F$ 와의 관계를 구하여 보면 손상크기  $D_F$ 를 평가할 수 있을 것으로 여겨진다.

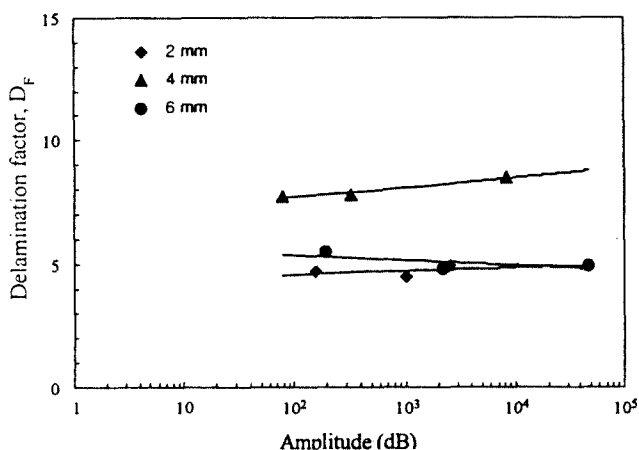


Fig. 12 The correlation between  $D_F$  and AE amplitude

단방향 탄소섬유강화복합재료에 드릴링 기계를 사용할 때 발생하는 적층분리 현상을 음향방출(AE)법을 이용하여 재료손상과 AE특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AE계수는 적층분리 현상이 일어날 때의 드릴 직경에 따라 656, 1212, 2326(520rpm)으로 얻어져 드릴의 직경이 증가함에 따라 적층분리가 일어날 때의 재료 적층 손상이 더 심함을 나타내었다.
- 2) 비디오 카메라를 이용한 손상정도의 평가 및 시간을 모니터링하여 AE특성과의 관계를 얻을 수 있었다.
- 3) AE진폭 및 에너지분포도 적층분리의 현상을 잘 표현해 주었다. 주축회전수 520rpm의 경우 AE 에너지의 최대값은  $10^4$ ,  $2 \times 10^4$ ,  $4 \times 10^4$ 로써 주어져 적층분리 현상이 발생하는 지점을 지나 섬유소가 파단되는 지점에서 AE에너지 분포는 급격히 감소하였다.
- 4) 드릴추력과 직경에 따른 AE진폭특성에 의하여 드릴가공 중 구멍주위의 손상평가가 가능하였다.

### 참고문헌

1. Y. Nakamura, "Amplitude distribution of Acoustic Emission signals", ASTM, STP 505, p. 164, 1972
2. K. Ono and H. B. Teoh, "Acoustic Emission in Fracture of structural Materials with Non-metallic inclusions", Journal of Acoustic Emission, Vol. 6, p. 1, 1987
3. Y. Blanchette and J. I. Dickson, "The use of Acoustic Emission to Evaluate critical values of K and J in 7075-T6H Aluminium Alloy", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 20, p. 359, 1984
4. Q. Q. Ni and E. Jinen, "Acoustic Emission and Fracture of Carbon Fiber Reinforced Thermosoftening Plastic(CFRTP) Materials under Monotonous Tensile loading", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 45, No. 5, p. 611, 1993
5. Q. Q. Ni and E. Jinen, "Fracture Mechanism and Acoustic Emission of short Carbon Fiber Reinforced Nylon", Soc. Mater. Sci. (Japan), Vol. 42, p. 255, 1993



6. Q. Q. Ni and E. Jinen, "Fracture Behavior and Acoustic Emission of SFC", Soc. Mater. Sci.(Japan), Vol. 42, p. 561, 1993
7. Q. Q. Ni, "Fracture Behavior and Acoustic Emission in Bending Test on single-fiber Composites" Engng. Fracture Mechanics, Vol. 56, p. 779, 1997
8. G. DiPaolo, S. G. Kapoor and R. E. DeVor, "An Experimental Investigation of the Crack Growth Phenomenon for Drilling of Fiber-Reinforced Composite Materials", Journal of Engineering for Industry, Vol. 118, pp. 104~110, 1996
9. W. C. Chen, "Some experimental Investigations in The Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic(CFRP) Composite Laminates", Engng. Fracture Mechanics, Vol. 37, No. 8, pp. 1097~1108, 1997
10. W. P. Dong and J. A. Webster, "Assessment of Frequency Characteristics of Acoustic Emission in Grinding", Proceeding of the advances in Electronic Packaging, Vol. 1 pp. 34~37, 1997
11. S. Jain and D. C. H. Yang, "Delamination-Free Drilling of Composite Laminates", Journal of Engng. for Industry, Vol. 116, pp. 475~481, 1994