

## [0/90°]s CFRP 복합재의 드릴작업손상과정 모니터링에 대한 AE의 적용

윤 유 성\* · 권 오 현\*\*  
(1999년 5월 4일 접수)

### The Application of AE for a Drilling Damage Process Monitoring in [0/90°]s CFRP Composites

Yu-Sung Yoon and Oh-Heon Kwon

**Key Words:** CFRP(탄소섬유강화복합재료), Acoustic Emission(음향방출), Drilling Damage Process(드릴작업손상과정), Delamination(적층분리)

#### Abstract

In recent years, CFRP composite materials have been increasingly used in various fields of engineering because of a high specific strength and stiffness properties. Drilling is one of the most important cutting processes that are generally carried out on CFRP materials owing to the need for the structural integration. However, delamination are often occurred as one of the drilling damages. Therefore, there are needs studying for the relationships between CFRP drilling and delamination in order to avoid low strength of the structures and inaccuracies of the integration. In this study, AE signals and thrust forces were used for the evaluations of the delamination from a drilling process in [0/90°]s CFRP materials. And the drilling damage processes were observed and measured by a real time monitoring technique with a video camera. From the results, we found that the relationships between the delamination from drilling and AE characteristics and drill thrust forces for [0/90°]s CFRP composites. Also, we proposed the monitoring method for a visual analysis of drilling damages.

#### 1. 서 론

구조물이 손상을 받을 경우에는 위험성이 초래되어 설비 및 기계 구조물의 파손 및 고장을 유발할 수 있으므로 안전성 측면에서 사용 목적에 부합되는 우수한 첨단재료의 개발과 그 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 최근에는 비강도와 비강성이 우수하고 내마멸성 그리고 절연성이 좋은 특성을 가지는 다양한 복합재료가 사용되고 있다. 복합재료는 적층각도, 적층순서 및 경화방법에 의해 원하는 방향으로 원하는 강도와 강성을 가질 수 있도록 설계, 제작이 가능하므로 항

공, 스포츠, 해양 그리고 자동차의 특정 부분들과 같은 산업에서 사용이 급격히 증가하고 있다.<sup>(1)</sup>

많은 CFRP 복합재료 부품은 거의 완전한 형태로 제작되지만 다른 재료에 CFRP 복합재를 결합하는 경우 기계가공도 종종 필요하게 된다. 이런 경우에 기계적 결합과 접착의 두 경우가 있게 된다. 접착은 많은 이점이 있으나 기계적 결합은 접착에 비해 보수를 할 경우에는 쉽게 분해할 수 있다는데 유리하다. 그러나 기계결합에는 필연적으로 드릴구멍작업이 필요하다. 따라서 드릴링은 CFRP 복합재에서 사용될 수 있는 가장 중요한 기계적량이지만 기지와 섬유사이의 큰 기계적 성질인 비균등성, 비등방성 때문에 종종 적층분리, 모서리 깨어짐, 스폐링 현상, 섬유균열 등을 포함하는 문제점이 발생되기 쉽다.<sup>(2)</sup>

\* 회원, 부경대학교 대학원 안전공학과  
E-mail : you-sung@hanmail.net  
TEL : (051)620-1522 FAX : (051)620-1516  
\*\* 회원, 부경대학교 산업시스템안전공학과

부품의 적층분리현상 등이 발생되면 기계 결합의 강도가 현저히 감소되므로 구조물의 신뢰성과 정밀성을 유지하기 위해서는 CFRP 구멍가공과 적층분리현상과의 관계를 규명할 필요성이 있다. 지금까지 CFRP에 대한 효율적 드릴링 가공에 대해서는 많은 연구가 수행되어져 왔다.<sup>(3,4)</sup> 한편 복합재료에서 드릴링작업 중 발생하는 적층분리현상에 대한 연구로서는 Dharan 등,<sup>(5)</sup> Dipaolo 등<sup>(6)</sup>이 있다. Dharan은 적층분리현상에 대한 실험적 모델을 제시하였고 Dipaolo는 드릴작업시 적층분리에 의한 균열성장과의 관계를 구하였다. 그러나 기계가공 작업중 발생하는 음향방출신호(AE Signal)를 이용한 연구는 아직 그다지 많이 이루어지고 있지 않다. Hundt 등<sup>(7)</sup>은 연삭작업 중의 AE특성에 대하여 모니터링기법을 적용하였고, Everson 등<sup>(8)</sup>은 정밀드릴링과정 중 발생하는 AE신호를 이용하여 정밀한 구멍가공을 하기 위한 조건을 제시하였으나, 드릴가공작업중 가장 빈번히 발생될 수 있는 적층분리현상과의 관계는 검토되지 않았다.

본 연구에서는 전보<sup>(9)</sup>에 이어  $[0/90^\circ]_s$  적층 CFRP 복합재에 전형적 드릴가공 작업시, 드릴지름의 변화에 따른 적층분리현상 및 손상에 대한 평가를 얻기 위하여 드릴 구멍가공이 시작됨과 동시에, AE특성인 음향방출계수 및 진폭을 검출, 평가하였다. 또한 소형 비디오카메라를 이용하여 드릴구멍 손상부위를 연속촬영한 후 실시간비디오 녹화 결과를 AE신호 정보에 따라 분석하여 적층분리현상 및 손상에 대한 특성을 조사하였다.

## 2. 기본정의 및 파라미터

### 2.1 AE의 정의 및 특성

재료가 내·외부의 응력에 의해 파괴되면, 작용 응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 독특한 소리를 내게 된다. 파괴시 축적되는 변형률에너지는 파면형성에너지, 열에너지, 격자변형에너지 그리고 본질적으로는 물체의 구성 입자들이 사방으로 진동하여 가는 현상의 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환되며 이 중에서 물체가 외력에 의해 소재 그 자체의 변형으로 방출되는 탄성파를 음향방출, 즉 AE(Acoustic Emission)신호라 한다. 이러한 물리적 현상을 하나의 공학적 평가법으로 연구하는 것이 음향방출법이다.

AE신호는 AE신호에 대한 개개의 사상에 의해 관측되고 AE에너지와 유지시간, 그리고 개개의 사상이 발생하는 시간적 빈도나 공간적 위치에 관한 정보를 나타내게 된다. AE파형의 상승에서 가해지는 하중의 형태를 구별할 수 있으며, 사상으로부터는 손상의 빈도, 시간분포에서 손상의 형태, 진폭이나 에너지로부터는 손상의 크기 등을 알 수 있다.<sup>(10,11)</sup> AE신호 특성은 진폭분포 또는 사상계수(event count)로써 정량화되어 결합, 파손 및 균열의 진전량 등을 파악한 후 더 정확한 설비수명을 예측하여 대형 사고를 미연에 방지할 수 있는 측면에서 유용하다.

### 2.2 적층분리인자와 드릴추력

적층분리는 전형적인 드릴링 기계를 사용하여 CFRP에 구멍 가공을 할 때 직면할 수 있는 문제이다. 파괴가 시작되면, 균열의 전파 과정은 Fig. 1과 같이 표시될 수 있다. 이 모델은 섬유강화복합재료의 구멍가공 동안에 발생하는 국부적인 파괴형태를 보여준다. 적층이 분리됨에 따라 섬유소의 방향을 따라서 손상부분이 생기게 되며 균열이 성장하게 된다. 드릴이 재료의 적층판을 통과하면서 발생하는 손상범위를 Fig. 1에 나타내듯이  $D_z$ 로 하면 드릴 반지름  $r$ 과의 비로서 적층분리인자  $D_F$ 를 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

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

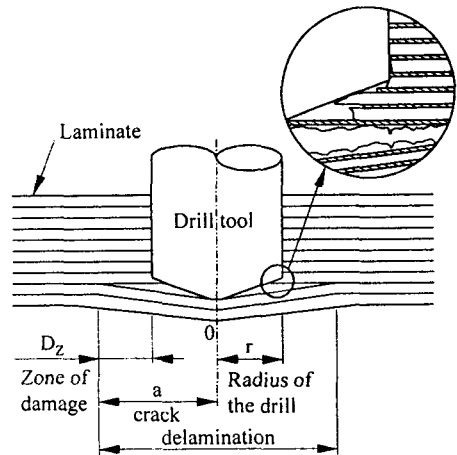


Fig. 1 A schematic depiction of delamination by drilling in CFRP composite

식 (1)에서, 드릴직경에 따른 적층분리손상의 관계를 평가할 수 있다. 적층분리인자  $D_F$ 는 Chen<sup>(12)</sup>이 구한 직교방향적층 CFRP에 대한 드릴작업시 드릴추력(thrust force)  $T$ 와의 관계를 이용하면 식 (2)와 같이 주어진다.

$$D_F = 1.285 + 0.01T \quad (2)$$

추력  $T$ 는 Jain<sup>(13)</sup>의 단방향 CFRP에서의 결과형태를 원용하여 직교방향적층의 경우에도 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 즉

$$T = C \cdot H_B \cdot d^\alpha \cdot s^\beta \quad (3)$$

여기서  $H_B$ 는 브리넬경도,  $C$ 는 상수 및  $\alpha, \beta$ 는 추력파라미터를 의미한다. 따라서 재료의 브리넬경도  $H_B$ , 드릴직경  $d$ 와 이송속도  $s(10^3 \text{mm/rev})$ 에 따른  $\alpha, \beta$ 를 구하면 추력이 구해진다. 즉 Jain이 구한 이송속도변화에 대한 직교방향적층판의 추력식 (4)을 간이적으로 이용하고, 실험에 의하여 브리넬경도 및 드릴직경 변화에 따른 추력의 변화를 구하면 드릴직경과 이송속도 및 경도치의 조합에 의한 추력식을 얻어 손상크기와의 관계를 얻을 수 있다.

$$T = 41.8 s^{0.317} \quad (4)$$

### 3. 시험편 및 실험방법

#### 3.1 시험편

실험재료는 일반탄성프리프레그인 표준 R/C CU 2503으로, 탄소섬유(두께; 0.281mm)를 혼입하여 반경화 상태로 가공된다. 프리프레그를 가로, 세로 각각 245mm로 절단하여 [0/90°]s로 24플라이를 적층하였다. 적층된 적층판은 열성형기에서 성형온도 140°C, 압력은 게이지압력 120kg/cm<sup>2</sup>로 하여 성형하였다. 적층된 복합재료는 다이아몬드 휠커터를 사용하여 가로, 세로 75mm×50mm(Fig. 2)로 절단가공 하였다.

#### 3.2 실험방법

드릴작업은 ML-360 소형 선반의 주축에 드릴을 장착하고 선반의 자동이송장치로 구멍가공을

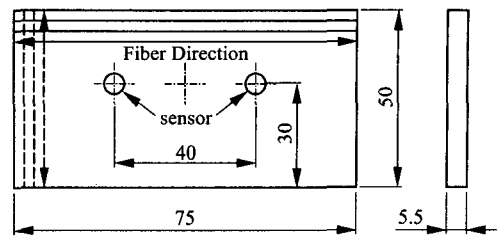


Fig. 2 Typical CFRP composite specimen

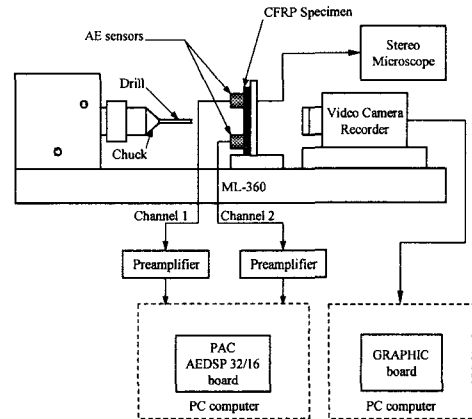


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

한다. 이때 피이드(s)는 1회전당 0.07mm/rev로 하고 드릴의 회전수는 520rpm으로 일정하게 하였다. 드릴은 HSS이며, 지름은 산업현장에서 많이 사용되는  $\varnothing 2\text{mm}, \varnothing 3\text{mm}, \varnothing 4\text{mm}, \varnothing 5\text{mm}$  및  $\varnothing 6\text{mm}$ 로 하여 각 드릴지름의 경우에 발생하는 AE 특성을 관찰 측정하였다. 드릴작업 동안, AE가 검출될 때의 균열발생 및 손상정도를 명확히 하기 위하여 CCD-TR850 소형 비디오카메라를 설치한 후 셔터 속도 1/4000로 녹화하였다. 녹화된 영상은 그래픽 그래브 보드가 장착된 PC에 순간의 가공 부위를 저장하여 AE특성 및 손상평가에 이용하였다. 손상부위에 나타난 균열의 위치측정을 정확히 파악하기는 어렵지만 드릴 사이클의 마지막 녹화 부위를 되감아 마지막의 순간적인 손상현상을 결정할 수 있다. 실험이 완료된 시험편은 손상부위의 크기를 측정하기 위하여 실체현미경을 이용하여 손상정도를 측정하였다.

AE특성 해석에는 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC시스템을 사용하였다. AE센서는 150kHz의 공진주파수를 갖는 R-15센서를 사용하였고 100kHz

에서 400kHz의 밴드패스필터를 사용한다.

Threshold 형은 Float로 설정하였고 Threshold 값은 45dB로 설정하였다. AE데이터 처리는 상용 해석 프로그램인 MISTRAS-2001에 의해 저장되고 분석되었다. 드릴직경에 따른 추력 T는 변형률계 이지형 힘센서를 이용하여 구하였다. 얻어진 신호는 AD보드를 장착한 컴퓨터에 입력하여 추력으로 변환하였다. 실험에 대한 개략도는 Fig. 3에 나타내었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 드릴직경에 따른 AE특성

ML-360 소형 선반에 드릴작업시 드릴직경에 따른 AE특성의 변화를 측정하고 적층분리와의 관계를 조사하였다.

Fig. 4 (a), (b), (c)는 시험편에서 드릴 직경이 2, 4, 6mm의 경우에 대한 예로서 주축회전속도 520rpm, 이송속도 0.07mm/rev로 구멍가공 하였을 때 얻어진 AE계수를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 드릴직경이 2mm의 경우, 드릴 끝이 나오기 직전의 9.3"에서 구멍이 확장됨에 따라 9.6", 9.9", 10.2"에서 AE계수가 피크치로 발생되고 있으며 9.3"~9.6" 사이에서는 AE계수가 급감소되어져 있음을 알 수 있다. 이것은 드릴 끝단 앞 층의 섬유소의 일부가 드릴진행 방향으로 밀리면서 절단되어져 적층분리현상이 발생하기 시작됨을 나타낸다. AE계수는 각 진행시간에 대하여 각각 132, 541, 807, 1063의 피크 분포 값을 가지며 적층분리가 점점 더 심하게 발생되고 있다. 이러한 현상은 적층분리가 시작되는 시점을 AE계수가 급증가하는 곳으로 여겨지며 비디오 녹화에 의한 결과와도 잘 일치한다. Fig. 4 (b), (c)는 각각 드릴직경이 4mm, 6mm의 경우로서, 드릴직경 2mm의 경우와 유사한 결과를 나타낸다. 각각 드릴직경의 경우에 있어서 최대계수가 0.3초 동안 발생한 계수 합의 피크치는  $\varnothing 4\text{mm}$ 의 경우에는 9", 10.2", 10.8"에서 구멍가공이 진행됨에 따라 321, 713, 631을 나타내고  $\varnothing 6\text{mm}$ 의 경우 8.9", 10.5", 11.6"에서 267, 651, 575로 나타났다. 역시 적층분리가 시작되는 시점에서 AE계수 피크치 분포가 급증가하는 현상이 나타나는 것으로 여겨지며 비디오 녹화에 의한 결과와도 잘 일치한다. 각  $\varnothing 2 \sim \varnothing 6\text{mm}$ 의 드릴직경의 경우 적층분리 개시 이

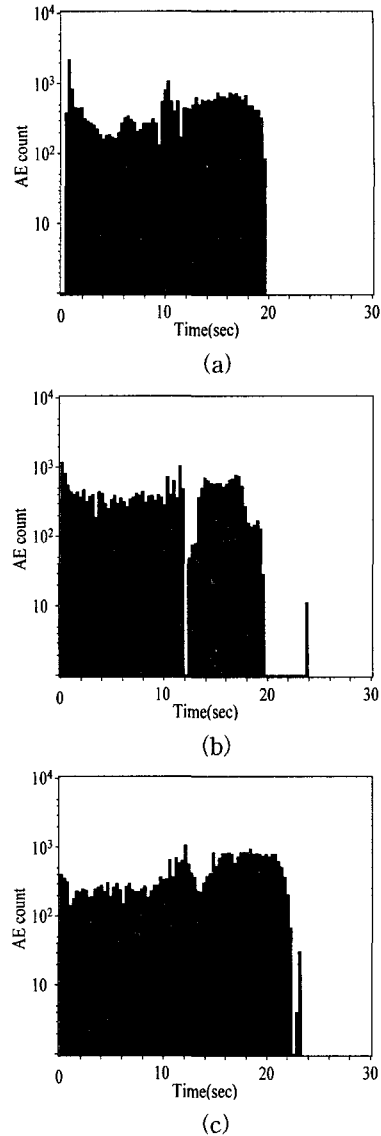


Fig. 4 The relationships between AE counts and time at each drill diameter (a)  $\varnothing 2$  (b)  $\varnothing 4$  (c)  $\varnothing 6\text{mm}$  in 520rpm

후 최대 피크치까지 시간차이는 각 드릴직경에 대해 절인 끝에서 완전한 드릴직경이 적층판을 통과하기까지의 절인 끝단에서 거리차이로 인한 시간지연이다. 드릴작업 초기에 큰 AE계수 값이 나타나는 것은 드릴날 끝단의 회전으로 적층판 진입 초기에 섬유소의 비틀림과 시험편 제작시 적층성형 과정에서 발생한 적층간 기포의 생성이나 초기결함의 확대에 의한 것으로 여겨진다.

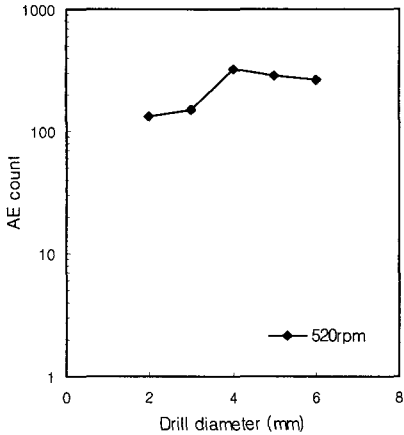
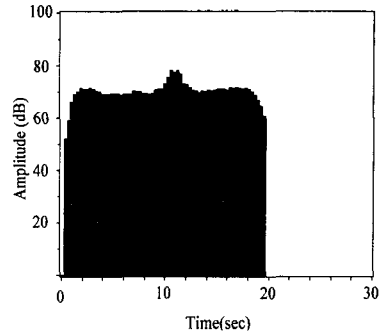


Fig. 5 The variation of AE count according to a drill diameter

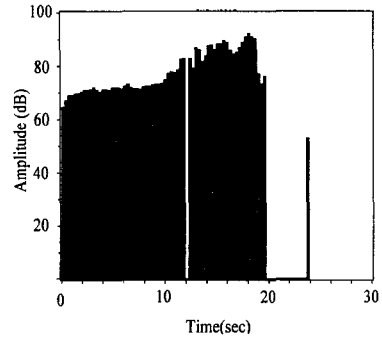
Fig. 5는 드릴직경 변화에 대하여 드릴 절인 끝단이 시험편을 뚫고 나오기 직전 AE계수의 관계를 나타낸다. 드릴직경이 증가함에 따라 AE계수의 값은 증가하다가 감소하는 경향이 있다. 여기서  $\varnothing 4\text{mm}$ 의 경우가 최대 AE계수 값을 나타내는데 이것은 본 시험편의 조건에서는  $\varnothing 4\text{mm}$ 에서 드릴구멍 주위의 손상범위가 최대로 됨을 나타낸다고 여겨진다.

Fig. 6은 0.3초 동안 발생한 AE진폭의 평균값을 가공작업시간에 따라 나타낸 결과이다. 주축회전수 520rpm에 있어서 가공작업시간 경과에 대한 AE진폭 변화를 드릴직경 2mm, 3mm, 4mm, 5mm 및 6mm에서 조사한 결과의 일부분이다. 가공 초기에는  $\varnothing 2\text{mm}$ ,  $\varnothing 4\text{mm}$  및  $\varnothing 6\text{mm}$ 에 대해서 각각 약 52.3, 64.7 및 61dB 정도의 값을 나타내며 구멍가공작업직후 AE진폭은 조금 증가하여 드릴직경 2mm~6mm에 대하여 각각 69.3~71.7dB, 68.7~70dB, 70.3~73.3dB, 71.3~73dB과 70~72.3dB의 비교적 일정한 분포를 나타내다가 적층분리가 발생되는 지점에서 진폭은 상승하기 시작하여 드릴구멍이 확대되어 드릴절인이 돌출됨에 따라 최대 AE진폭으로 상승한 후 섬유소의 파단과정에서 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 이처럼 AE진폭은 손상평가의 유효한 수단이 될 수 있음을 알 수 있다.

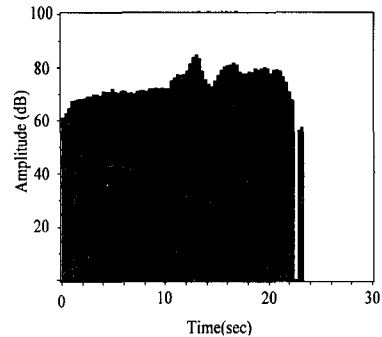
4.2 적층분리 및 손상평가에 대한 비디오 모니터링법



(a)



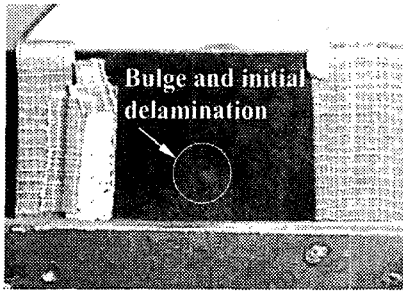
(b)



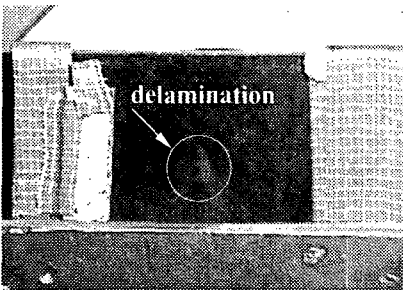
(c)

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

현재의 실험에서 적층분리가 드릴절인의 출구 거의 직전에 발생되기 시작하는 것으로 관찰되었다. 여기서는 최종 드릴의 선단부가 돌출되었을 때 구멍 주위의 적층분리현상에 의한 재료의 손상크기를 비디오촬영 한 결과로 정밀히 측정된 후 드릴직경에 따른 손상크기를 평가하여 AE특성과의 관계를 구하였다. Photo. 1 (a)~(d)는 Fig. 4 (a)의 경우에 해당하는 가공작업을 비디오로 녹



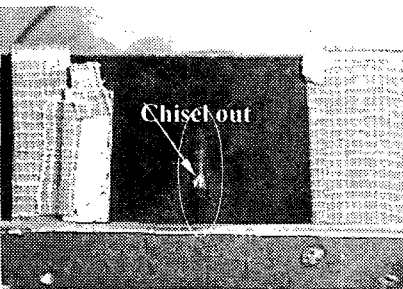
(a) t=8.10''



(b) t=9.01''



(c) t=9.10''



(d) t=10.01''

Photo. 1 Photographs of video recording of delaminations and damages by a drilling process(  $\varnothing$ 2mm, 520rpm)

화 한 영상 예를 그래픽 grabber 보드를 장착한 PC에서 획득한 결과를 나타낸다.

Photo. 1 (a)에서 적층분리가 일어나기 시작하

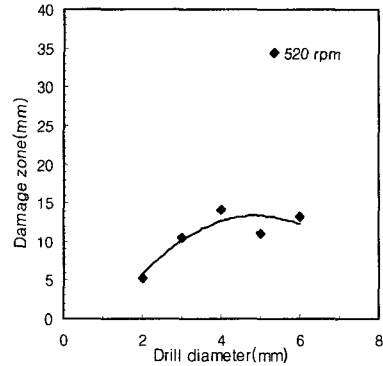


Fig. 7 The variation of the damage zone according to the drill diameter with a given spindle speed

는 벌지 부분을 관찰할 수 있으며 시간기록에 의하여 Fig. 4의 AE계수가 상승하는 순간임을 알 수 있다. Photo. 1 (b)에서와 같이 적층분리는 시간이 지남에 따라 점점 확대되어 가는 현상으로 Fig. 4의 AE계수가 상승하는 동안 유지되다가 드릴의 절인이 돌출되는 Photo. 1 (c)의 스폴 열림이 진행된 후 AE계수의 최대 지점 이후에 Photo. 1 (d)와 같이 드릴선단이 돌출되기 시작했다.

Fig. 7은 드릴직경 변화에 대한 구멍주위 최대 손상크기를 나타낸 결과이다. 손상범위는 구멍주위 좌우의 최대길이를 측정하여 구멍직경을 제외한 균열길이의 1/2를 구한 평균값이다. 주축회전수 520rpm의 경우 드릴직경이 2mm의 작은 경우에는 손상크기가 5mm 정도의 값을 나타내다가 직경이 4mm가 되었을 때 손상범위가 최대로 증가한 후 드릴직경 5mm 경우에는 오히려 감소하는 현상이 발생되고 있다. 따라서 현 시험편과 같은 조건의 적층구조인 경우에는 드릴직경이 4mm의 경우가 최대손상이 일어나는 것을 알 수 있다. 현재의 손상크기 값은 각 경우 3~4번의 실험의 평균값으로써 주어진다. 드릴직경이 증가함에 따라  $\varnothing$ 4mm에서 손상범위가 최대로 증가하다가 다시 감소하는 현상을 현재 실험조건인 상태에서 시험편 크기에 따른 구멍의 응력집중현상이  $\varnothing$ 4mm 이후 오히려 완화되는 상태로 주어지는 것으로 사료된다. 이에 대한 좀 더 명확한 원인을 규명하기 위하여서는 유한요소법에 의한 응력해석이 필요하며 향후 과제로 한다.

Fig. 8은 드릴직경 변화에 대하여 식 (2)의 적층분리인자  $D_f$ 와의 관계를 나타낸 결과이다. 최

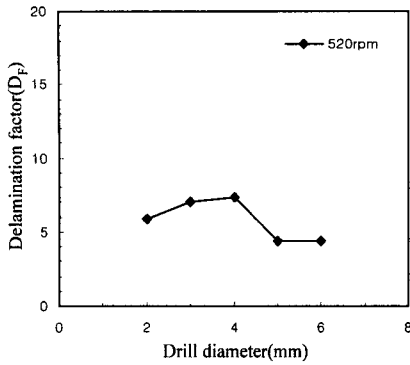


Fig. 8 The relationship between a delamination factor  $D_F$  and the drill diameter

대 손상범위의 경우와 같이  $D_F$ 는  $\varnothing 2\text{mm}$ 에서  $\varnothing 4\text{mm}$ 의 경우에는 거의 원활하게 증가하다가  $\varnothing 4\text{mm}$ 에서 최대치에 도달한 후 다시 일정한 값으로 감소를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 드릴직경의 영향을 고려한 적층분리인자의 변화도 드릴직경 4mm의 경우가 최대 손상을 발생시키는 크기임을 알 수 있다.

Fig. 9는 드릴직경에 따른 추력 T의 변화를 구한 결과를 나타낸다. 주어진 이송속도에 있어서는 드릴직경이 커짐에 따라 추력이 커짐을 알 수 있다. 얻어진 데이터는 최소자승법을 적용하여 다음 관계식 (5)을 얻었다.

$$T = 33.05 d^{0.655} \quad (5)$$

식 (5)에서 얻어진 추력은  $\text{kg}/\text{mm}^2$ 의 단위를 가진다. 식 (4)와 식 (5)의 추력식을 조합하여 브리넬경도  $H_B$ 에 비례하는 것으로 하면 드릴직경과 이송속도의 영향이 고려된 평균 추력  $T_{av}$ 는 식 (3)의 관계를 이용하여

$$T_{av} = 0.357 H_B d^{0.655} s^{0.317} \quad (6)$$

와 같이 얻어진다. 여기서 0.357은 추력 상수 C이며 추력파라미터  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 각각 0.655, 0.317을 나타낸다. 브리넬경도  $H_B(\text{kg}/\text{mm}^2)$ 는 3번 측정하여 평균치  $H_B(10/300)117$ 을 얻었다.

Fig. 10은 식 (6)에서 구한 추력  $T_{av}$ 을 이용하여 적층분리인자  $D_F$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 적층분리인자에 따른 평균 추력의 변화는 분리인자

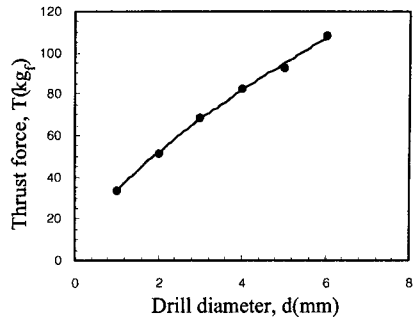


Fig. 9 The relationship between the thrust force and a drill diameter

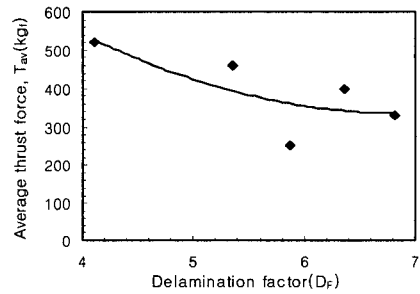


Fig. 10 The correlation between the delamination factor and average thrust force

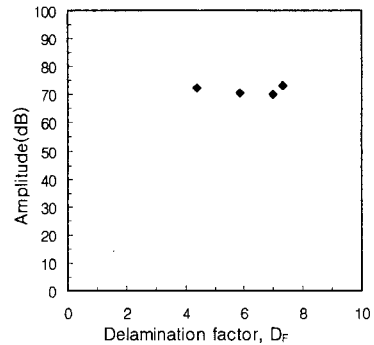


Fig. 11 The variation of the AE amplitude according to a delamination factor(rpm=520)

가 커짐에 따라 오히려 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이것은 적층분리가 커짐에 따라 그만큼 추력의 요구값이 감소됨을 나타낸다.

Fig. 11은 적층분리인자의 변화에 따른 AE최대진폭의 크기를 나타낸다. 적층분리가 발생되는 AE최대진폭의 크기는 적층분리인자의 크기에 관계없이 거의 일정한 분포를 나타냄을 알 수 있다.

## 5. 결 론

[0/90°]s 적층의 탄소섬유강화복합재료에 일반적 드릴링 작업을 할 때 발생될 수 있는 적층분리 현상 및 손상크기를 음향방출(AE)법을 이용한 AE특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AE계수는 적층분리현상이 시작될 때 급상승하는 경향이 있다.

(2) 적층분리현상이 일어난 후 드릴선단이 적층을 통과하기 직전의 AE계수는 드릴직경에 따라 267, 140, 386, 284 및 185로 얻어져 현재의 적층조건 및 실험조건에서 드릴직경이  $\varnothing 4\text{mm}$ 의 경우가 가장 큰 적층손상이 일어남을 나타내었다.

(3) 비디오 카메라를 이용한 손상범위의 실시간 영상획득을 모니터링하여 AE특성과의 관계를 얻을 수 있었다.

(4) AE진폭은 초기에 비교적 일정한 분포를 나타내다가 적층분리가 발생하는 지점에서 진폭은 상승하기 시작하여 드릴구멍이 확대되어 드릴절인이 돌출됨에 따라 최대 AE진폭으로 상승한 후 섬유소의 파단과정에서 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

## 참고문헌

- (1) 오세규, 남기우, 이상국, 김옥균, 1994, "음향방출에 의한 탄소섬유복합재료의 인장시험시 파괴동과 성형 모니터링에 관한 연구," 대한기계학회 춘계논문집(1), pp. 135~139.
- (2) Malhotra, S. K., 1990, "Some Studies on Drilling of Fibrous Composites," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 24, pp. 291~300.
- (3) Dillio, A., Tangiaferri, V. and Veniali, F., 1991, "Cutting Mechanisms in Drilling of Asanrid Composites," *Int. J. of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 31, pp. 155~165.
- (4) Lin, S. C. and Shen, J. M., 1999, "Drilling Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Composite

Materials at High Speed," *J. of Composite Materials*, Vol. 33, No. 9, pp. 827~851.

- (5) Dharan, C. K. H and H. Ho-cheng, 1990, "Delamination during Drilling in Composite Materials," *J. of Engng. for Industry*, Vol. 112, pp. 236~239.
- (6) Diapolo, G., Kapoor, S. G. and DeVor, R. E., 1996, "An Experimental Investigation of the Crack Growth Phenomenon for Drilling of Fiber-Reinforced Composite Materials," *J. of Engng. for Industry*, Vol. 118, pp. 104~110.
- (7) Hundt, W., Leuenerger, D. and Rehsteiner, F., 1994, "An Approach to Monitoring of the Grinding Process using AE technique," *Ann of CIRP*, Vol. 43, No. 1, pp. 295~298.
- (8) Everson, C. E. and Cheraghi, S. H., 1999, "The Application of Acoustic Emission for Precision Drilling Process Monitoring," *Int. J. of machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 371~387.
- (9) 윤유성, 권오현, 1998, "일방향적층 CFRP복합재료의 드릴작업중 발생하는 손상평가 및 AE특성," 한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집, pp. 107~114.
- (10) 손두익, 1997, "음향방출탐상 시험의 기초이론," 안전보건, 제9권, 제1호, p. 73.
- (11) 정희돈, 1994, "음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초," 대한기계학회지, 제34권, 제1호, pp. 20~32.
- (12) Chen, W. C., 1997, "Some experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 37, No. 8, pp. 1097~1108.
- (13) Jain, S. and Yang, D. C. H., 1994, "Delamination-Free Drilling of Composite Laminates," *J. of Engng. for Industry*, Vol. 116, pp. 475~481.