

CFRP의 드릴작업시 AE적용에 의한 손상평가

윤유성 · 최병국*†

부경대학교 안전공학과 대학원 · *동명대학 기계 · 자동화시스템계열
(2001. 7. 14. 접수 / 2001. 12. 5. 채택)

The Damage Evaluation for the Application of Acoustic Emission in a Drilling Procedure of the CFRP Composite Materials

Yu-Sung Yoon · Byung-Kuk Choi*†

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

*Department of Machine and Automation System, Tongmyong College

(Received July 14, 2001 / Accepted December 5, 2001)

Abstract : The carbon fiber reinforced plastics(CFRP) have been widely used in aircraft and spacecraft structures as well as sports goods because it has high specific strength, high specific stiffness and low coefficient of thermal expansion. Machining of CFRP poses problems not frequently seen for metals due to the nonhomogeneity, anisotropy, and abrasive characteristics of CFRP. Delamination is a common problem faced while drilling holes in CFRP using conventional drilling. Therefore, AE characteristics related to drilling damage process of unidirectional and [0/90]_s crossply laminate composite was studied. Also drilling damage like the delamination was observed by video camera in real time monitoring technique. From the results, we basically found the relationships between the delamination from drilling and AE characteristics for CFRP composites.

Key Words : acoustic emission, CFRP, delamination

1. 서 론

항공기체의 경량화 관점에서 70년대부터 대표적으로 사용되어 오고 있는 탄소섬유는 90년대는 경량 구조에 전자파 흡수 코팅 재료를 더하여 스텔스용 항공기의 구조재료로까지 개발되고 있다. 특히 탄소섬유강화복합재료(CFRP)는 비강도 및 비강성이 기존의 재료에 비해 매우 우수하며 적층각도, 적층순서 및 경화방법에 의해 원하는 강도와 강성을 가질 수 있도록 설계, 제작이 가능하므로 항공뿐만 아니라 스포츠, 해양구조물 그리고 자동차의 특정 부분 및 건축 구조물 등과 같이 여러 산업 분야에서 기존의 재료를 대체해 나가고 있다. CFRP 부속품은 거의 완성 형태로 제작이 되지만 일부 다른 재료에 CFRP 복합재를 결합하는 경우 필연적으로 드릴작

업이 필요하다. 따라서 드릴작업은 CFRP 복합재에서 사용될 수 있는 매우 중요한 기계가공이지만 복합재료의 기지와 섬유사이의 비균등성, 비등방성 때문에 금속가공에서 볼 수 없는 적층분리, 섬유균열 등을 포함하는 여러 문제점이 발생되기 쉽다.

현재까지 CFRP의 드릴작업에 대해서는 많은 연구¹⁻³⁾가 수행되어져 오고 있으며, 그 중 Dharan 등⁴⁾은 적층분리현상에 대한 실험적 모델을 제시하였고, Dipaolo 등⁵⁾은 드릴작업시 발생하는 적층분리와 균열성장과의 관계를 구하였으나 음향방출(Acoustic Emission, AE)을 이용한 연구는 그다지 많이 이루어지고 있지 않다. Everson 등⁶⁾은 정밀드릴과정중 발생하는 AE신호를 이용하여 정밀한 구멍가공을 하기 위한 조건을 제시하였으나, 드릴작업중 가장 빈번히 발생할 수 있는 적층분리현상과의 관계는 검토되지 않았다. 이러한 CFRP 복합재료 부품에 적층분리현상 및 균열 등이 발생되면 기계설비 및 구조물의 강도

†To Whom correspondence should be addressed.
bgchoi@yongma.tmc.ac.kr

저하로 인하여 신뢰성 및 안전성을 보장할 수 없다. 따라서 본 연구는 재료가 외력에 의해 소재 그 자체의 변형으로 방출되는 탄성파인 음향방출신호를 이용하여 진폭분포와 계수(count)로써 결합, 파손 및 균열의 진전량 등을 파악하는 것으로 더 정확한 설비수명을 예측하는데 기여할 수 있으므로 일방향 및 [0/90]_s 적층 CFRP 복합체에 전형적 드릴작업을 행하여, 드릴지름과 주축의 회전속도의 변화에 따른 적층분리현상과 손상의 AE특성에 미치는 적층방향의 영향을 검토하였다.

2. 실험

2.1. 시험편

본 연구의 실험재료는 한국화이버(주)에서 생산되는 일반탄성프리프레그인 표준 R/C CU2503을 사용하였다. 적층방향은 두 가지로 일방향과 [0/90]_s 24플라이로 하고 Hot Press에서 게이지 압력 120kgf/cm²와 성형온도 140°C로 가압·성형하였다. 성형된 CFRP 복합재료는 다이아몬드 휠커터를 사용하여 75mm×50mm로 절단가공 하였다. Fig. 1은 시험편의 크기와 형상을 나타낸다.

2.2. 실험방법

드릴작업은 일본 S사의 ML-360 소형 선반을 사용하였다. 선반의 주축에 드릴을 장착하고 자동이송장치로 구멍가공을 하였다. 이때 피이드(s)는 0.14mm/rev로 하고, 회전수는 520, 970rpm으로 하였다. 구멍

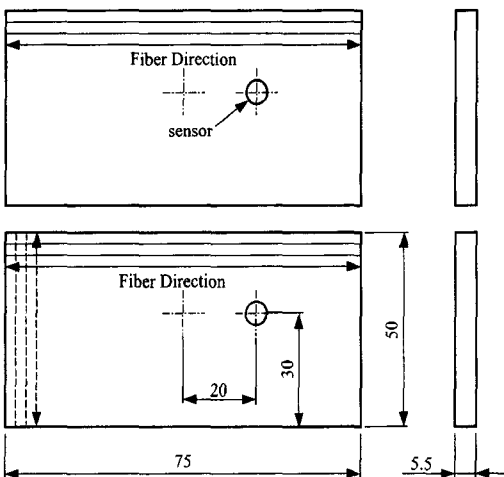


Fig. 1. CFRP composite specimen configuration

지름은 산업현장에서 많이 사용되는 범위(2~6mm)로 하여 각 드릴작업에서 발생하는 손상크기 및 AE 특성을 측정하였다. AE계측에는 미국 P사의 AEDSP 32/16 보드를 장착한 PC시스템을 사용하였다. AE센서는 공진주파수가 150kHz인 R15센서를 사용하였으며 시험편과 센서 사이에 접착매질을 바른 후 천테이프로 압착하였고, 100kHz에서 300kHz의 밴드패스필터를 사용하였다. Threshold 형은 Float로 설정하였고 Threshold값은 45dB로 시험편을 지그에 고정후 연필심 파괴로 자연적으로 발생하는 AE음원을 대신하여 고정·설정하였다. 또한 손상정도를 명확히 하기 위하여 CCD-TR850 소형 비디오카메라로 녹화한 후 영상은 그래픽 그래브 보드가 장착된 PC에 순간의 가공 부위를 저장하여 드릴작업 중 손상평가에 이용하였고, 실험이 완료된 시험편은 손상부위의 크기를 측정하기 위하여 실체현미경을 이용하여 전체 손상범위에서 드릴직경을 제외한 부분을 손상 정도로 계산하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 드릴작업에 의한 AE특성

Fig. 2(a),(b)는 주축 회전속도가 970rpm, 이송속도 0.14mm/rev에서 드릴직경이 6mm의 일방향 및 [0/90]_s 적층에 대한 경우로 AE count와 진폭을 드릴가공 시간에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 AE count는 드릴가공 시간에 대해 0.1초 동안 발생한 AE count의 합계이다. Fig. 2의 (a)에서는 현 가공 조건에서 드릴작업을 시작하여 드릴구멍이 시험편을 완전히 가공되는데 가공여유 0.1초를 포함하여 걸리는 총 작업시간이 3.19초인 일방향 적층의 경우로서 드릴작업 초기인 대략 8플라이 지점인 0.83초까지는 드릴 절인에서 완전한 드릴직경이 되기까지의 경과시간으로 73.3dB정도의 낮은 진폭을 나타낸다. AE count는 비교적 큰 값인 398을 나타내고 있다. 이것은 드릴날 끝단의 회전으로 적층판 진입 초기에 섬유소의 비틀림과 시험편 제작시 적층성형 과정에서 발생한 적층간 기포의 생성이나 초기결합의 확대에 의한 것으로 여겨진다. AE count는 비록 큰 값을 보이지만 진폭이 낮은 것으로 보아 시험편의 손상 정도에는 중대한 영향을 주지 않을 것으로 생각된다. 이후 대략 22플라이인 2.35초까지는 드릴가공에 의한 섬유소와 기지의 가공구간으로 AE count 값은 155로 감소하지만 진폭이 84.7dB로 상승하기 시작한다. 따

라서 손상의 빈도는 작아도 진폭이 크기 때문에 이 지점이 적층분리가 시작되는 지점으로 생각된다. 적층분리 개시 이후 2.45초까지는 드릴 절연에서 완전한 드릴직경이 돌출되면서 드릴작업이 완료되는 시점인 3.19초까지 AE count는 293과 진폭은 88.3dB로 상승한다. 이것은 시험편 내의 적층분리와 함께 드릴의 돌출과 출구쪽과 가까운 층간 결합력의 약화로 인하여 가공이라기보다 박리현상으로 발생하는 섬유소와 기지의 손상으로 인한 AE 특성을 나타낸다. 이후 계속되는 진폭의 상승구간은 층간분리 및 박리현상에 의한 출구면의 중대한 손상정도를 나타낸다. Fig. 2의 (b)는 [0/90]s 적층의 경우로서 (a)인 일방향 적층의 경우와 유사하게 가공여유 0.4초를 포함하여 드릴절연을 기준으로 1.12초(7~8플라이), 2.85초(23~24플라이)와 드릴의 완전한 직경으로 가공이 완료되는 3.58초에서 AE count 값은 각각 316, 302, 102를 나타내고, 진폭도 각 지점에서 86dB, 87dB, 91.3dB로 나타났다. [0/90]s 적층판에서 일방향 적층보다 다소 높은 평균 AE특성 값의 차이는

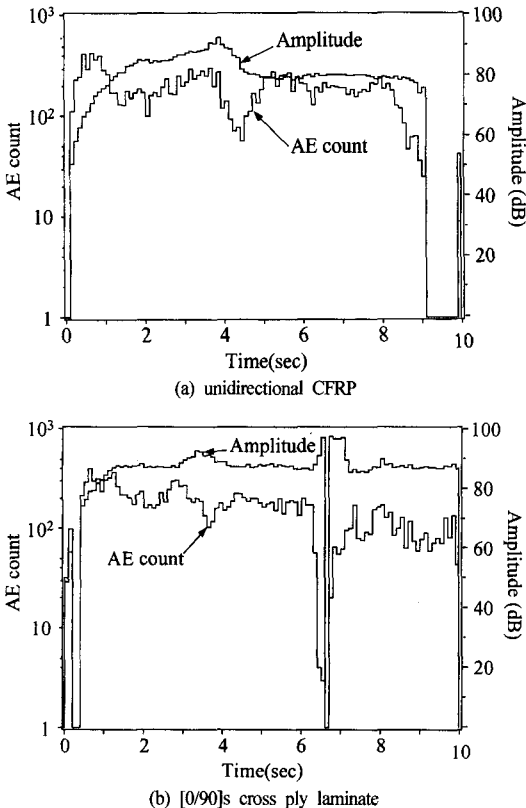


Fig. 2. AE counts and amplitude versus time(\varnothing 6mm, 970rpm)

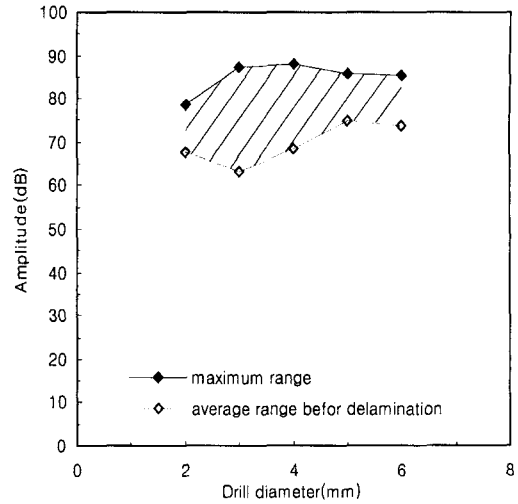


Fig. 3. Relationship between the AE amplitude and drill diameter(520rpm, [0/90]s)

섬유배열에 의한 차이로 보다 많은 섬유소의 파단에 의해 큰 특성 값이 발생하는 것으로 여겨진다.

Fig. 3은 드릴작업 동안 손상의 정도가 작은 가공 초기의 상태에서 드릴의 완전한 구멍가공이 되는 곳에서 적층분리가 발생되기 직전까지의 평균 진폭과 최대 진폭의 범위를 나타낸다. 드릴직경 2, 3, 4, 5, 6mm에 대하여 [0/90]s 적층의 주축 회전수가 520 rpm인 경우, 각각 67.5~78.7dB, 63~87.3dB, 68.35~88dB, 74.65~85.7dB과 73.7~85.3dB의 구간을 나타내고 있다. 이 범위가 드릴작업에 의해 발생하는 섬유 파단이나 적층분리가 발생하는 손상범위의 진폭 임을 알 수 있다.

3.2. 드릴작업시 비디오 모니터링기법

Fig. 4(a), (b), (c)는 [0/90]s 적층(520rpm, \varnothing 2mm)의 경우로 그래픽 grabber 보드를 장착한 PC에서 드릴작업을 비디오로 기록한 예를 나타낸다. Fig. 4(a)에서 적층분리가 일어나기 시작하는 벌지 부분을 관찰할 수 있으며 AE count가 상승하는 순간과 일치하고 있다. Fig. 4(b)에서 적층분리는 시간이 지남에 따라 점점 확대되어 가는 현상으로 AE count가 상승하는 동안 유지되다가 드릴의 절연이 돌출되는 Fig. 4(c)의 스톱 열림이 진행된 후 AE count의 최대 지점 이후에 드릴선단이 돌출되기 시작했다.

3.3. 드릴작업에 따른 손상에 대한 평가

Fig. 5는 드릴직경변화에 대한 최대 손상크기를

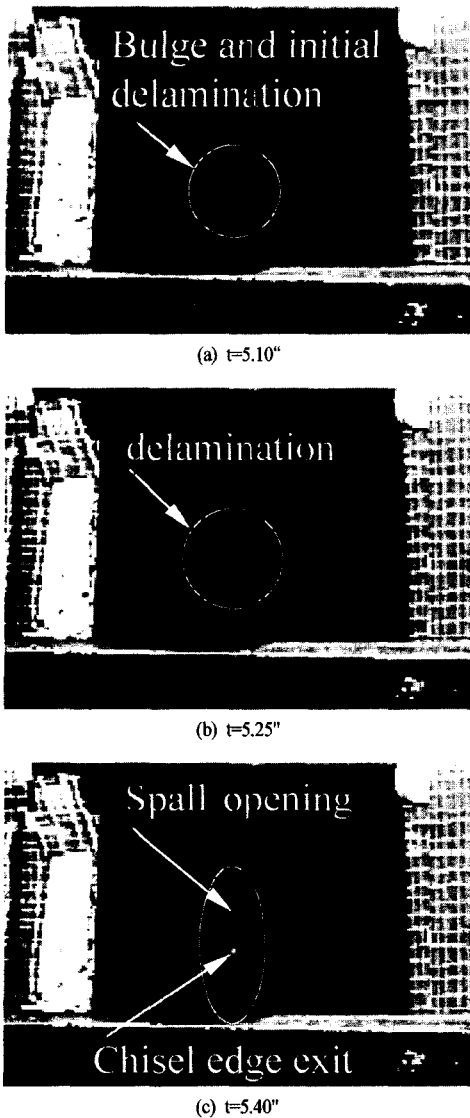


Fig. 4. Photographs of video recording of delaminations and damages by a drilling process($\varnothing 2\text{mm}$, [0/90]s)

나타낸 결과이다. 손상범위는 구멍주위 좌우의 최대 길이를 측정하여 구멍직경을 제외한 균열길이의 1/2를 구한 평균값으로 하였다. 손상부위의 크기는 실제현미경을 이용하여 3~4번의 평균값으로 손상정도를 측정하였다. 드릴직경이 2mm의 경우에는 손상크기가 평균 5.3mm 정도로 주축 회전수나 적층 방향에 관계없이 거의 일정한 값을 나타낸다. 하지만 드릴직경이 3mm 이상에서는 섬유방향이 일정한 일방향의 경우가 [0/90]s의 경우보다 드릴 작업에 의한 손상이 대체로 크게 발생함을 알 수 있다. 또한

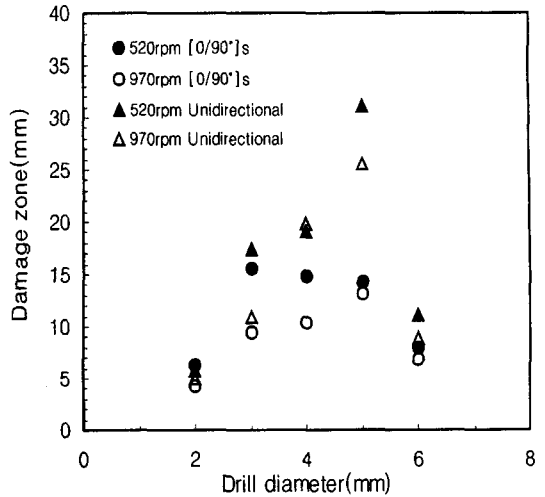


Fig. 5. The variation of the damage zone according to the drill diameter with a given spindle speed

주축 회전수가 520rpm의 경우와 970rpm의 경우 대체로 적층 방향에 다소 차이는 있지만 거의 520rpm의 경우가 손상의 정도가 심함을 알 수 있다. 드릴 지름에 따른 변화는 일방향 적층의 경우 드릴직경이 5mm에서 손상범위가 급격히 증가하다가 그 이후 감소하는 현상이 발생되고 있으나 [0/90]s 적층 경우에는 서서히 증가하다가 4mm~5mm직경에서 감소하기 시작한다. 따라서 현 이송속도에서 드릴가공은 일방향 적층의 $\varnothing 5\text{mm}$ 의 경우에 최대손상이 발생됨을 알 수 있다.

4. 결론

일방향 및 [0/90]s 적층의 탄소섬유강화복합재료에 드릴지름의 변화와 주축의 회전속도에 따른 전형적 드릴가공작업을 할 때 발생하는 적층분리현상과 손상에 대해서 음향방출(AE)법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AE특성의 변화로 드릴작업시 적층분리현상과 같은 손상을 예측할 수 있다.
- 2) 본 연구에 사용된 시험편의 구조에서 드릴직경이 $\varnothing 2\text{mm}$ 의 경우가 가공조건과 적층방향에 대해 비교적 안정된 가공지름을 나타내었다.
- 3) 동일한 이송조건인 경우에는 고속보다 저속의 회전수, [0/90]s와 같은 직교적층판보다는 일방향 적층판에서 보다 큰 손상이 발생됨을 알 수 있다.
- 4) 비디오 카메라를 이용한 실시간 모니터링수법

은 손상량과 AE특성과의 관계를 얻는데 유용함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 1) S. K. Malhotra, "Some Studies on Drilling of Fibrous Composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 24, pp. 291~300, 1990.
- 2) S. C. Lin and J. M. Shen, "Drilling Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Composite Materials at High Speed," *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 9, pp. 827~851, 1999.
- 3) A. Dillio, V. Tangliaferri and F. Veniali, "Cutting Mechanisms in Drilling of Asanrid Composites," *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 31, pp. 155~165, 1991.
- 4) C. K. H. Dharan and H. Ho-cheng, "Delamination during Drilling in Composite Materials," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 112, pp. 236~239, 1990.
- 5) G. Diapolo, 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.
- 6) C. E. Everson and S. H. Cheraghi, "The Application of Acoustic Emission for Precision Drilling Process Monitoring", *International Journal of machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 371~387, 1999.