

탄소섬유 에폭시 복합재료의 정밀드릴가공 특성에 관한 연구

김 흥 배*

A Study on Precise Drilling Characteristics of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials

Hong-Bae Kim*

ABSTRACT

Carbon fiber epoxy composite materials are widely used in the structures of aircrafts, robots and other machines because of their high specific strength, high specific stiffness and high damping. In order for the composite materials to be used in the aircraft structures or machine elements, accurate surfaces for bearing mounting or joints must be provided, which require precise machining. In this paper, the machinability characteristics of the drilling operation of the carbon fiber epoxy composite materials was experimentally investigated. The experimental results are as follows

1. The entrance of hole is very good manufacturing existing, but exit come to occur sever surface exfoliation.
2. The cutting force in drilling of the carbon fiber epoxy composite materials is decreased as the drilling speed increased.
3. The hole of the carbon fiber epoxy composite materials is not good manufacturing by use of the standard twist, therefore, the new drill designed in order to accurate hole.

Key Words : Carbon fiber epoxy composite materials(탄소섬유 에폭시 복합재료), Cutting force(절삭력), Machinability characteristics(가공특성), Surface exfoliation(표면박리), Precise machining(정밀가공).

1. 서 론

탄소섬유 에폭시 복합재료는 재료의 높은 비탄성과 비강도특성 때문에 구조물의 경량화가 요구되는 우주선, 항공기 등에 주로 이용되어 왔으며, 최근에는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 가격이 저렴해 지면서 이 재료의 높은

비탄성과 감쇠특성을 이용하고자 스포츠용품 및 기계부품에도 탄소섬유 에폭시 복합재료의 이용이 증가 되고있다.^(1,2)

탄소섬유 에폭시 복합재료를 기계및 구조물의 소재로 사용하면 중량감소에 의한 에너지절감 및 동작부의 위치결정정도를 높일 수 있으며, 재료의 고유진동수와 감쇠값

* 충남대학교 대학원 기계공학과

이 일반재료와 비교하여 매우 크므로 빠른 속도로 움직이는 항공기의 트랜스미션 샤프트(Transmission Shaft)나 자동차의 구동축(Drive Shaft) 및 공작기계의 주축, 로봇팔 등에 사용이 증가되고 있는 추세이다.^(3,4,5)

항공기나 고속회전체의 부품을 탄소섬유 에폭시 복합재료로 제작하는 경우 탄소섬유 에폭시 복합재료를 다른 금속이나 다른 복합재료 부품에 접합(Joining)시켜야 하는데 이 경우 탄소섬유 에폭시 복합재료는 가공을 요하게 되며 가공정도 및 형상위치 등에 따라 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭 특성에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

섬유강화 복합재료 가공중에 유리섬유 에폭시 복합재료의 가공에 대하여 어느정도 연구가 진행되어 왔으며, 이들의 연구는 유리섬유 에폭시 복합재료를 초경공구로 가공할 때의 공구수명 Taylor지수를 구하였으며, 역학모델을 이용하여 공구마멸 특성을 해석하였다.^(6,7,8)

Koplev⁽⁹⁾은 탄소섬유를 초경공구를 사용하여 세이퍼로 가공 하였을 경우의 가공면표면 거칠기를 섬유방향과 각도의 함수로 나타내었으며, 섬유가 파괴되는 깊이에 대해서도 연구를 수행하였다.

Toshiaki Kaneeda⁽¹⁰⁾는 2차원 절삭장치를 이용하여 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭시 섬유 방향에 따른 표면거칠기와 칩 생성을 관찰하고, 절삭력을 측정하여 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭기구 해석에 관한 연구를 수행하였다. 이들의 연구는 주로 선삭가공이나 2차원 절삭장치를 이용하여 칩생성기구, 공구수명, 가공면거칠기 등에 대한 연구가 이루어져 왔다. 탄소섬유 에폭시 복합재료를 볼트로 체결하기 위한 구멍을 뚫기 위한 작업이 필요하여 드릴링을 하였을 때 이 재료가 매우 연마성이 강하기 때문에 심한 공구마멸을 일으키며, 드릴의 입구와 출구쪽에서 각 플라이(Ply)들의 박리 현상이 발생하고, 드릴가공된 벽면으로부터 섬유또는 레진의 탈락현상등이 발생하는 결점을 가지고 있다. 그러나 드릴링에 대한 자료는 거의 발표되고 있지 않는 실정이기 때문에 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 가공시 생산현장에 적용시키기에는 많은 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 결점을 최소화하고 고정밀도의 높은 생산성을 얻기 위한 최적의 가공기술에 대한 자료 및 복합재료 가공용 드릴의 설계지침을 제시하기 위한 방법으로 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 실험에서 고속도강 표준 드릴을 사용하여 절삭조건이 가공면 생성, 공구마멸, 절삭력에 미치는 영향에 대하여 조사 하였고, 이 결과로부터 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공

특성에 대하여 검토하였다.

2. 절삭실험.

2.1 시편 및 공구

본 실험에 사용된 탄소섬유 에폭시는 선경 인더스트리트의 USN-150형 프리프래그(Prepreg)이고, 시험편은 핸드 레이업(Hand Lay-up)방법으로 적층하여 제작하였으며, 탄소섬유 에폭시 복합재료의 물리적 성질은 Table 1과 같고 탄소섬유 에폭시 복합재료 시험편은 두께 5mm의 일방향 시험편과 두께 5mm, 적층 각도 0 / ± 45° / 90°인 시험편을 사용하였고, 시험편 제작에 이용된 오토클레이브(Autoclave)는 내용적이 600mm×1000mm 이며 0.7MPa의 압력을 가할 수 있으며, 2℃/min의 온도상승이 가능한 열제어장치가 부착되어 있다.

Fig. 1은 오토클레이브(Autoclave) 내의 온도와 압력을 나타내는 큐링 사이클(Curing Cycle)이다. 성형된 재료는 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 50mm×50mm의 크기로 절단하여 시험편을 준비하였다.

한편 실험에 사용한 공구는 고속도강 표준드릴 φ8mm을 사용하였다.

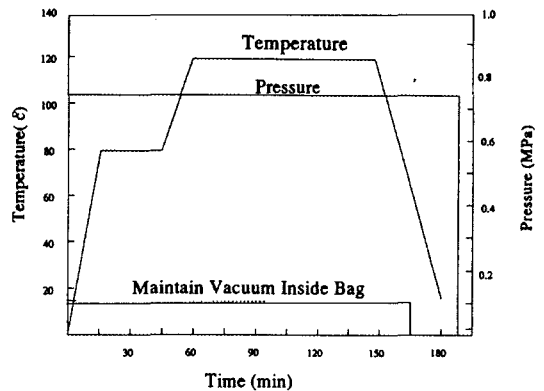


Fig. 1 Cure cycle for the autoclave in manufacturing of the specimens

Table 1 The physical properties of the carbon fiber/epoxy composites

| Tesile strength (GPa) | Tensile modulus (GPa) | Fiber content (%) | Density (g/cm ³) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| 2.06 | 141.26 | 60 | 1.6 |

2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 상하, 전후, 좌우운동이 자유로운 만능밀링머신으로 주축의 동력은 1.5kW, 주축의 회전수는 10~2000rpm, 이송속도 5~500mm/min이다. 또한 절삭시 발생하는 미세입자형 칩의 원활한 제거를 위하여 흡입용량 8.2m³/min, 동력 0.52kW의 흡입장치를 사용하였다.

Fig. 2는 드릴가공에 있어서 절삭저항의 변동성분을 측정할 공구동력계이다. 이 그림에서 압전식 공구동력계(Piezoelectric Transducer) 위에 어댑터(재질: 연강)를 고정하고, 그 위에 3개의 조를 가진 스크롤척(Three Jaw Scroll Chuck, 85mm)을 고정한다. 그림과 같이 부착하여 볼트 6으로 고정하였다. 실험할 때에는 전술한 실험장치를 만능밀링머신의 테이블 위에 T-볼트 5로 고정하고, 척 1위에 시험편의 중심과 드릴의 위치를 정확히 일치시키기 위해 지그를 제작하여 시험편을 고정시켰다. 실험조건은 드릴의 이송속도를 20mm/min, 30mm/min, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min으로 하였으며, 드릴의 회전속도는 200rpm, 400rpm,

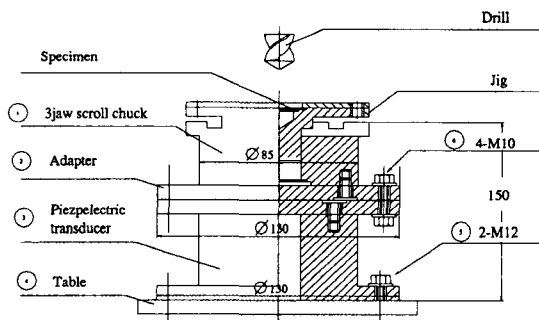


Fig. 2 Experimental set-up

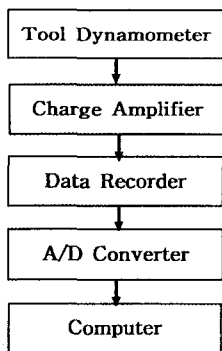


Fig. 3 Experimental set-up of measuring system

600rpm, 800rpm, 1000rpm 으로 하였다.

Fig. 3는 본 실험에서 이용한 실험장치의 개략도이다. 이 측정장치의 회로를 이용하여 건식절삭에 의한 드릴가공 중의 토크(Torque) 및 트러스트(Thrust)의 변동성분을 다음과 같이 측정하였다. 먼저 공구동력계에서의 출력을 증폭기(Charge Amplifier)로 증폭하여 데이터 레코더(Data Recorder)에 기록한 다음 검출된 신호를 증폭하여 A/D 변환후 컴퓨터에서 데이터의 RMS(Root Mean Square) 처리를 행하고 토크(Torque) 및 트러스트(Thrust)의 변동성분을 검사하였다.

공구마멸량은 설정된 절삭조건에 종료마다 공구현미경을 이용하여 공구의 주절삭면과 치끝(Chisel)부분의 마멸을 측정하였고 가공된 재료의 표면은 사진을 촬영하여 입구와 출구의 상태를 회전수와 이송을 변화시켜서 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭조건이 가공면 생성에 미치는 영향

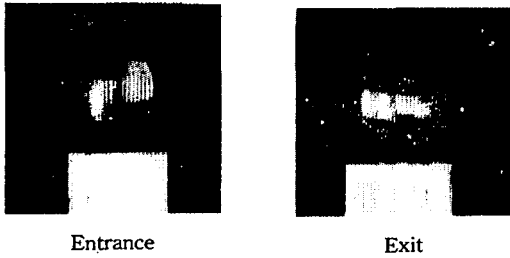
Fig. 4는 8mm의 드릴로 회전속도 200rpm, 이송속도 20mm/min 조건에서 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공한 후 구멍의 입출구를 나타낸 것이다. 이 그림에서 구멍의 입구쪽의 모양은 양호한 상태를 나타내고 있지만 출구쪽에서는 심한 표면 박리현상이 나타나고 있다. 입구쪽에서의 표면 박리현상은 모든 경우에 대하여 발생하지 않으며, 출구쪽에서의 박리현상은 절삭조건에 따라 달라지는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 출구쪽에서의 박리현상을 주로 관찰하였다.

Fig. 5는 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공 실험으로부터 얻어진 실험결과이다. 실험조건은 드릴의 이송속도 30mm/min, 회전속도 200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm이다.

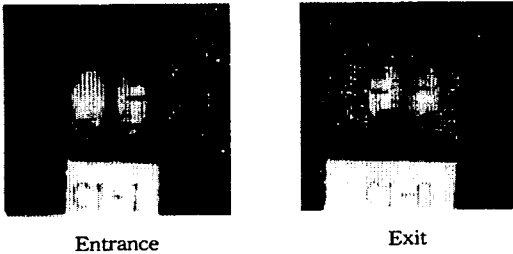
그림에서 알 수 있는 것처럼 드릴의 회전속도가 증가할수록 출구쪽에서 심한 박리 현상이 발생하고 있다. 이와 같은 현상은 동일한 이송에서 회전속도의 증가에 무관하게 출구쪽에서 심한 박리현상이 발생하고 있다. 이와 같은 현상은 탄소섬유는 매우 강도가 높고 경하기 때문에 낮은 절삭속도에서도 보다 심한 공구 인선의 마멸이 발생하여 강한 섬유를 절단하는 것이 어려워지기 때문이다. 또한 인선의 마멸 증가되고 회전속도가 증가됨에 따라 절삭열이 증가한다. 탄소섬유는 열전도가 매우 좋음에도 불구하고 공구인선의 마멸이 급격히 증대되어 절삭점에서

의 절삭열의 증가가 빨라지고, 열전도도가 나쁜 에폭시 수지의 영향으로 발생한 절삭열이 쉽게 발산되지 못함으로서 열에 대한 저항성이 낮은 에폭시 수지(사용온도 120 ℃ 이하)의 결합력을 약화시켜 층간 박리현상을 유

발하기 때문이라고 생각된다. 또한 0°/±45°/90°로 적층한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공 실험에서도 동일한 이송속도에서 회전속도의 증가와 무관하게 출구쪽에 심한 박리현상이 발생하고 있고 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료와 동일한 결과를 나타내어왔고, 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공에서 이와같은 대표적인 것들 이외의 조건에서 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.



(a) the unidirectional carbon fiber epoxy composite



(b) the cross ply carbon fiber epoxy composite

Fig. 4 Potographs of the drilled holes

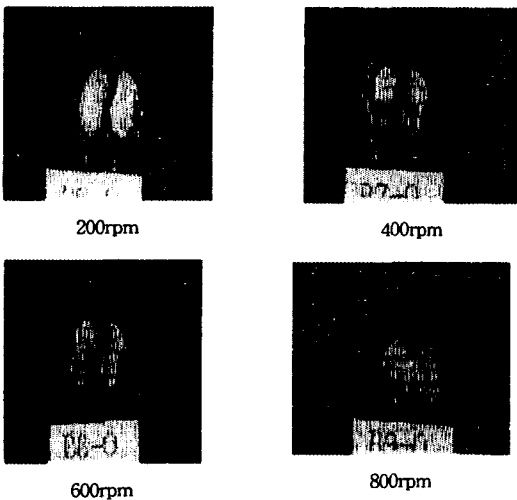


Fig. 5 Potographs of the drilled holes of the unidirectional carbon fiber epoxy composite with respect to drilling speeds

3.2. 절삭조건이 절삭력에 미치는 영향

Fig. 6은 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공 시 발생하는 절삭력을 각각의 이송속도 20mm/mim, 30mm/mim, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min 에, 드릴의 회전속도 200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm 변화에 따른 값을 측정할 결과이다.

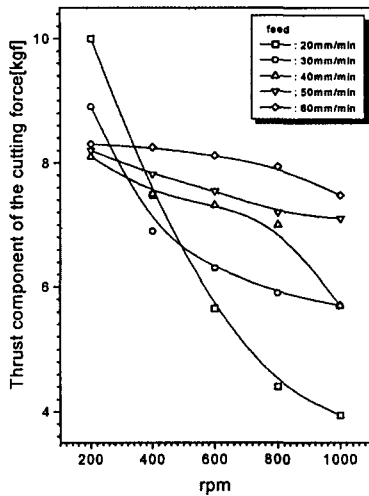
그림에서 알 수 있는 것처럼 모든 경우에 대하여 드릴의 회전속도가 증가할수록 절삭력은 감소한다. 이것은 이송속도는 일정한데 절삭속도만이 증가하기 때문에 절삭점에서의 절삭단면적이 감소되기 때문이다. 또한 이송속도에 대하여 검토하여 보면 이송속도의 증가에 따라 절삭력은 증가하지만, 그 이상의 영역에서는 이송량에 큰영향을 받지 않았다. 이것은 비교적 낮은 회전속도 200~400rpm에서는 정상상태의 절삭이 이루어지지만 높은 회전속도 800~1000rpm에서는 심한 공구마멸, 절삭열의 증가등 비정상상태가 심화되기 때문이라고 사료된다.

3.3. 절삭조건이 공구마멸에 미치는 영향

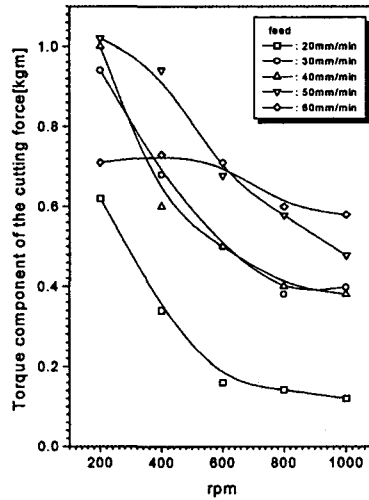
탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴의 이송속도 20mm/mim, 30mm/mim, 40mm/mim, 50mm/mim, 60mm/mim로 하고, 각각의 이송속도에서 드릴의 회전속도 200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm의 조건으로 변화시키면서 공구마멸 실험을 하였다. 실험방법은 드릴가공후에 공구현미경에서 표준 고속도강 드릴의 주절삭면과 치즐(Chisel)부분을 측정하였다.

Fig. 7는 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴링 공구마멸 실험으로부터 얻어진 실험결과의 대표적인 것을 나타낸 것이다.

실험조건은 드릴의 이송속도 20mm/mim, 30mm/mim, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min, 드릴의 회전속도 400rpm이다. 그림에서 알 수있는 것처럼 드릴의 이송속도가 감소하면 심한 공구마멸 현상이 발생하고있다. 이와같은 현상은 동일한 회전속도에서 이송속도가 감소하면 탄소섬유와 공구의 연마작용을 일으키

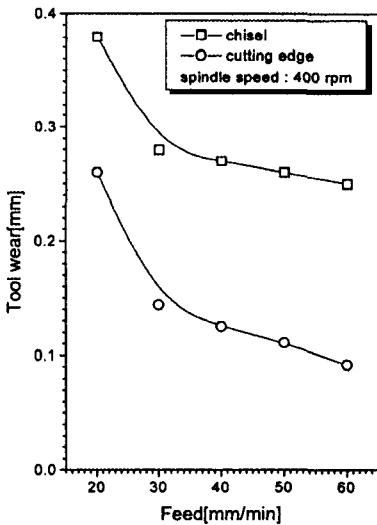


(a) Thrust w.r.t rpm

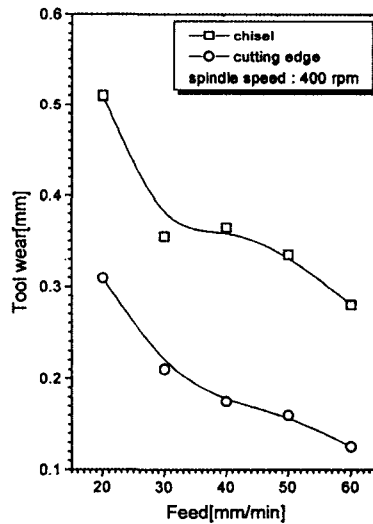


(b) Torque w.r.t rpm

Fig. 6 Cutting forces of the unidirectional carbon fiber epoxy composite with respect to various drilling speeds and feed rates



(a) the unidirectional carbon fiber epoxy composite



(b) the cross ply carbon fiber epoxy composite

Fig. 7 Tool wear of the carbon fiber epoxy composite with respect to feed rates

는 시간, 즉 공구가 매우 연마성이 강한 탄소섬유와의 마찰시간이 증가됨으로서 공구마멸이 심하게 일어나고 인선의 예리함이 짧은시간 동안 유지하는 비교적 비정상상태에서 이루어지기 때문이다. 이상과 같이 가공구멍의 형태, 절삭력, 공구마멸을 검토한 결과 탄소섬유 에폭시 복합재료의 구멍가공은 일반 표준 고속도강 드릴을 사용하

여 적절한 가공조건내에서 양호한 정도를 갖는 구멍을 가공할 수 없으며, 양호한 정도를 갖는 구멍을 가공하기 위해서는 새로운 형태를 갖는 드릴이 설계되어야 한다고 생각된다. 즉 본 연구를 통하여 파악한 절삭 현상을 고려할 때 우선 심한 공구마멸을 최소화할 수 있도록 CBN 또는 다이아몬드 공구를 사용하는 것이 바람직하며, 박리현상

을 최소화하기 위해서는 드릴 절삭날끝 각을 작게하고 인선을 예리하게 하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이와 같은 것을 종합하여 추천할 수 있는 탄소섬유 에폭시 복합재료 가공용 드릴의 개념도는 다음과 같다. 즉 절삭날 각은 90°로 하고, 칩 배출을 위한 나선형 홈을 두며 절삭작용을 하는 인선의 재료는 다이아몬드 입자로 하고, 입자를 드릴 몸체에 부착하는 방법으로 제작하고, 앞으로 이 연구과제를 좀더 수행한다면 위와 같은 형태를 갖는 드릴을 다이아몬드 입자의 크기, 입자 수 등을 고려한 최적조건에 대한 연구가 이루어 질 수 있으며, 좀더 나아가 섬유유화 복합재료뿐만 아니라 각종 세라믹재료의 구멍가공에도 응용될 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공 실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다

- (1) 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공 하였을 때 구멍의 입구쪽은 양호한 가공상태를 나타내지만 출구쪽에서는 심한 표면 박리현상이 나타난다.
- (2) 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공 하였을 때 드릴의 회전속도가 증가할 수록 절삭력은 감소한다.
- (3) 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공 하였을 때 이송속도가 감소하면 심한 공구마멸이 나타난다.
- (4) 탄소섬유 에폭시 복합재료의 구멍가공은 일반 표준고속도강 드릴을 사용하여 양호한 정도를 갖는 구멍을 가공할 수 없으며, 양호한 정도를 갖는 구멍을 가공하기 위해서는 새로운 형태를 갖는 드릴이 설계되어야 한다.

참 고 문 헌

1. P. K. Malick, "Fiber-Reinforced Composites, Marcel Dekker," Inc., pp. 3-4. 1988.
2. M. M. Schwartz, "Composite Materials Handbook," McGraw-Hill Book Company, Chapter 7. 1984.
3. C. Reugg and J. Habermeir, "Composite Propeller Shafts Design and Optimization," Advances in Composite Material, Proceedings of ICCM 3, Vol. 2, pp. 1740-1755. 1989.
4. D. G. Lee, H. C. Sin and Nam P. Suh, "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool," Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 365-369. 1985.
5. D. G. Lee, K. S. Kim and Y. K. Kwak, "Manufacturing of a SCARA Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Material," Robotica, Vol. 9, pp. 219-229. 1991.
6. K. Sakuma and M. Seto, "Tool Wear in Cutting Glass-Fiber-Reinforced Plastics (The Relationship between Fiber Orientation and Tool Wear)," Bulletin of JSME, Vol. 26, No. 218, pp. 14200-1427. 1983.
7. G. Lubin, "Handbook of Composites," Van Nostrand Reinhold, pp. 625-629. 1983.
8. G. Santhanakrishnan, R. Krishnamurthy, S. K. Malhotra, "Machinability Characteristics of fiber Reinforced Plastics Composites," J. Mechanical Working Technology, Vol. 17, pp. 195-204. 1988.
9. A. Koplev, "Cutting of CFRP with Single Edge Tools," Proceedings of ECCM 3, Vol. 2, PP. 1597-1605. 1980.
10. T. Kaneeda, "CFRP Cutting Mechanism," NAMRC XVIII, pp. 216-221. 1989.