

# 유리섬유 에폭시 복합재료의 정밀 드릴가공 특성

김 홍 배\*

Precise Drilling characteristics of glass fiber epoxy composite material

Hong-Bae Kim\*

## Abstract

Glass fiber epoxy composite material is 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 of the glass fiber epoxy composite material was experimentally investigated. The results can be summarized 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 glass fiber epoxy composite material is decreased as the drilling speed increased.
3. If the glass fiber epoxy composite material is drilling by the standaar twist drill, then the hole recommand cutting condition is spindle speed 400~600rpm, feed 40~50mm/min.

Keywords: Glass fiber epoxy composite material(유리섬유 에폭시 복합재료), Damping(감쇠), Specific strength(비강도), Specific stiffness(비강성), Cutting force(절삭력), Surface exfoliation(표면 박리), Cutting condition(절삭조건), Precise machining(정밀가공)

## 1. 서론

산업사회의 발전과 더불어 새로운 재료의 개발에 대한 요구가 날로 증가하고 있으며 이와 같은 요구에 부응하기

위하여 각종의 신소재가 개발되고 있다. 이들 신소재중에서 유리섬유 에폭시 복합재료는 높은 비탄성과 비강도특성 때문에 구조물의 경량화가 요구되는 우주선, 항공기 등에 주로 이용되어 왔으며 최근에는 복합재료의 가격이 저

\* 충남대학교 공과대학 기계공학과

렴해 지면서 이 재료의 높은 비탄성과 감쇠특성을 이용하고자 스포츠용품 및 기계부품에도 섬유강화 복합재료의 이용이 증가 되고있다.<sup>(1,2)</sup>

유리섬유 에폭시 복합재료를 기계및 구조물의 소재로 사용하면 중량을 감소시킬 수 있으며, 재료의 고유진동수와 감쇠값이 매우 크므로 빠른 속도로 움직이는 항공기의 트랜스미션 샤프트(Transmission Shaft)나 자동차의 드라이브 샤프트(Drive Shaft) 및 공작기계의 주축, 로봇 팔 등에 사용이 증가되고 있는 추세이다.<sup>(3~6)</sup>

항공기나 고속회전체의 부품을 유리섬유 에폭시 복합재료로 제작하였을 경우 복합재료를 다른 금속이나 다른 복합재료 부품에 접합(Joining)시켜야 하는데 이 경우 구조물의 효율은 조인트(Joint)에서 주로 좌우된다. 조인트(Joint)를 제작하기 위해서는 유리섬유 에폭시 복합재료의 표면을 가공한 후 접착제(Adhesive)를 사용하거나 볼트로 체결하기 위한 구멍을 뚫기 위한 작업이 필요하여 드릴링을 하였을때 이 재료가 매우 연마성이 강하여 심한 공구마멸을 일으키며, 드릴의 입구와 출구쪽에서 각 플라이(Ply)들의 박리현상이 발생하고, 드릴가공된 벽면으로부터 섬유 또는 레진의 탈락현상등이 발생하는 결점을 가지고 있다.<sup>(7~10)</sup>

따라서, 본 연구에서는 이러한 결점을 최소화하여 고정밀도의 높은 생산성을 얻기 위한 최적의 가공기술에 대한 자료를 만들고자 고속도강 표준드릴을 사용하여 유리섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 실험에서 절삭조건에 따른 가공면상태, 공구마멸, 절삭력에 미치는 영향에 대하여 조사하였고, 이 결과로부터 유리섬유 에폭시 복합재료의 드릴 가공 특성에 대하여 검토하였다.

## 2. 절삭실험.

### 2.1 시편 및 공구

본 실험에 사용한 재료는 유리섬유 에폭시 복합재료이고 시험편은 Hand Lay-up 방법으로 적층하여 제작하였으며, 유리섬유 에폭시 복합재료의 물리적 성질은 Table 1과 같고 유리섬유 에폭시 복합재료 시험편은 두께 5mm, 적층각도 ± 90° / ± 45°인 시험편을 사용하였다. 시험편 제작에 이용된 오토클레이브(Autoclave)는 내용적이 ø600mm × 1000mm 이며 0.7MPa의 압력을 가할 수 있다. Fig. 1은 오토클레이브(Autoclave) 내의 온도와 압력을 나타내는 성형 사이클(Curing Cycle)이

다. 성형된 재료는 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 50mm × 50mm의 크기로 절단하여 시험편을 준비하였고, 시험편의 형태는 Fig. 2와 같다. 한편 실험에 사용한 공구는 고속도강 표준드릴 ø 8 mm 을 사용하였다.

Table 1 The physical properties of glass fiber/epoxy composites

Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Fiber content (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
1.06	141.26	60	1.6

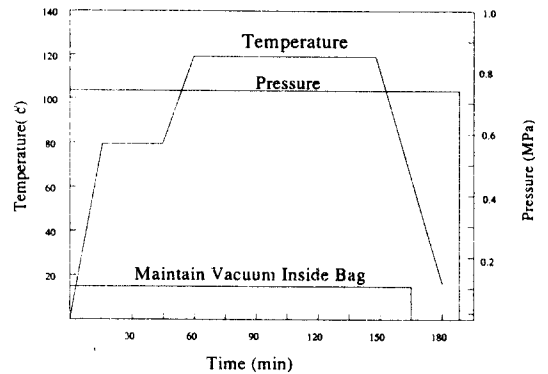


Fig.1 Cure cycle for the autoclave in manufacturing of the specimens

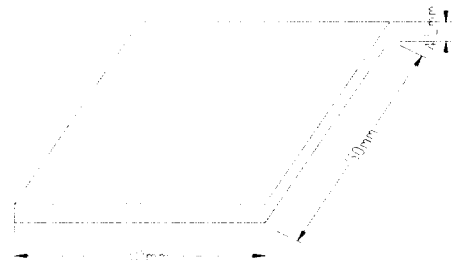


Fig.2 Experimental workpiece

### 2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 상하, 전후, 좌우 운동이 자유로운 만능밀링머시인으로 주축의 동력은 1.5kW, 주축의 회전수는 10~2000rpm, 이송속도 5~500mm/min이다. 또한 절삭시 발생하는 미세입자형 칩의 원활한 제거를 위하여 흡입용량 8.2m<sup>3</sup>/min, 동력 0.52kW의 흡

입장치를 사용하였다. Fig. 3은 드릴가공에 있어서 절삭 저항의 변동성분을 측정한 공구동력계이다. 이 그림에서 압전식 공구동력계(Piezoelectric Transducer)위에 어댑터(재질 : 연강)를 고정하고, 그 위에 3조우 스크롤척

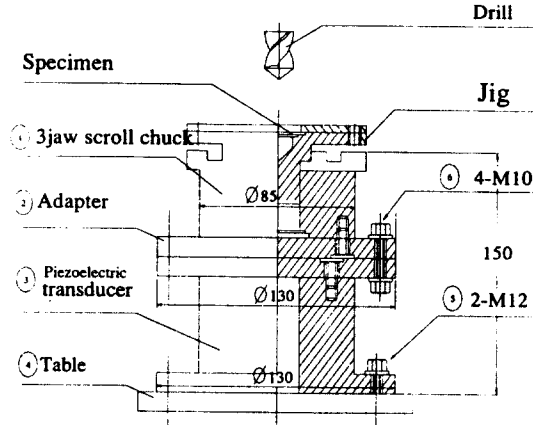


Fig. 3 Experimental set-up

(Three Jaw Scroll Chuck,  $\phi 85\text{mm}$ )을 고정하고 다음, 그림과 같이 부착하여 볼트로 고정하였다. 실험할 때에는 전술한 실험장치를 만능밀링머시인의 테이블 위에 티-볼트로 고정하고, 척위에 시험편의 중심과 드릴의 위치를 정확히 일치시키기 위해 지그를 제작하여 시험편을 고정시켜다. 실험조건은 드릴의 이송속도를 20mm/min, 30mm/min, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min으로 하였으며, 드릴의 회전속도는 200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm으로 하였고, Fig. 4는 본 실험에서 이용한 실험장치의 개략도이다.

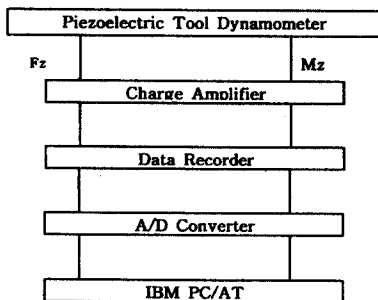


Fig 4. Experimental set-up of measuring system

이 계측장치의 회로를 이용하여 건식절삭에 의한 드릴 가공 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 처리를 행하고 토크(Torque) 및 트러스트(Thrust)의 변동성분을 검사하였다.

공구마모량은 설정된 절삭조건 중의 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. 5는  $\phi 8\text{mm}$ 의 드릴로 200rpm 이상 20mm/min 조건에서 유리섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공 한 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 나

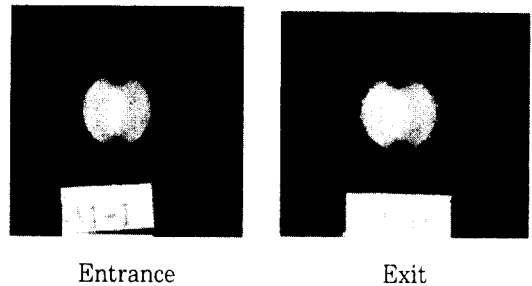


Fig. 5 Photographs of the drilled holes of the glass fiber epoxy composite

타내었다. 따라서 본 연구에서는 출구쪽에서의 박리현상을 주로 관찰하였다.

Fig. 6은 유리섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공 실험으로부터 얻어진 실험결과와 대표적인 것이다. 실험조건은 드릴의 이송속도 20mm/min로 고정시키고, 회전속도

200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm으로 변화시켜 가공후의 출구면 상태를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 것처럼 드릴의 회전속도가 증가하면 출구쪽에서 심한 박리현상이 발생하고 있다. 이와 같은 현상은 동일한 이송에서 회전속도가 증가하면 심한 공구 인선의 마멸이 발생하여 강한 섬유를 절단하는 것이 어려워지기 때문이다. 또한 인선의 마멸이 진행됨에 따라 절삭 열이 증가한다. 이 절삭열은 열전도도가 나쁘고 열에 대한 저항이 낮은 에폭시 수지(사용온도 120 ℃ 이하)의 결합력을 약화시켜 층간 박리현상을 유발하기 때문이다.

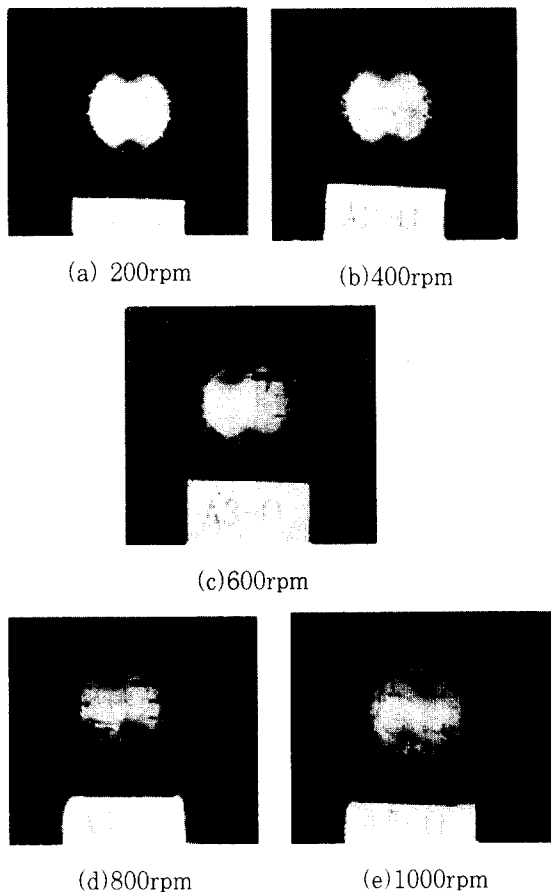


Fig. 6 Photographs of the drilled holes of the glass fiber epoxy composite with respect drilling speeds

Fig. 7는 유리섬유 에폭시 복합재료를 드릴 회전속도는 1000rpm 으로 고정시키고, 드릴의 이송속도를

20mm/min, 30mm/min, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min으로 변화시켜 가공후의 출구면 상태를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이송속도가 증가할 수록 표면의 박리현상이 적게 일어나고 있다. 이것은 이송속도가 증가할수록 섬유와 공구의 연마(abrasive)작용을 일으키는 시간, 즉 공구가 매우 연마성이 강한 섬유와의 마찰시간이 감소됨으로서 공구마멸이 적게 일어나고 인선의 예리함을 좀더 오래동안 유지하는 비교적 정상 상태의 절삭이 이루어지기 때문이라고 생각된다.

유리섬유 에폭시 복합재료의 드릴링에서 이와같은 대표적인 것들 이외의 조건에서 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

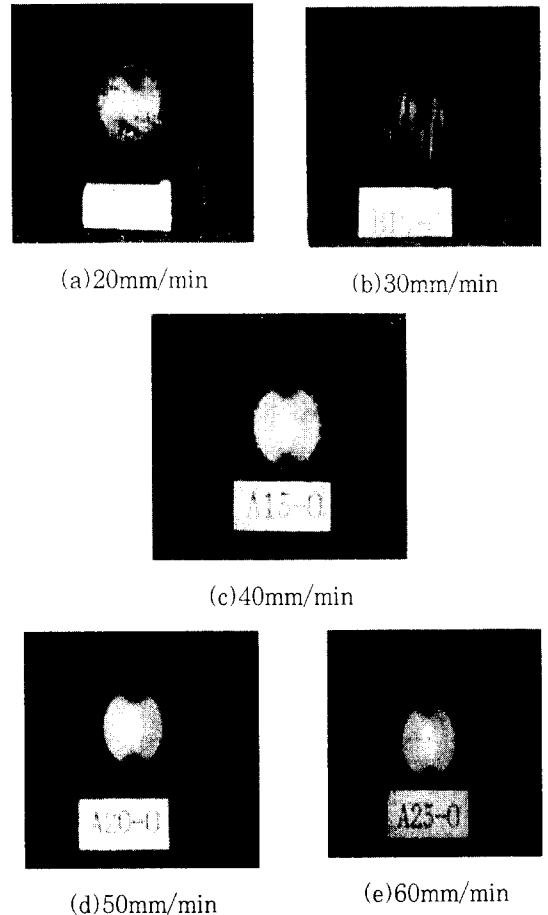
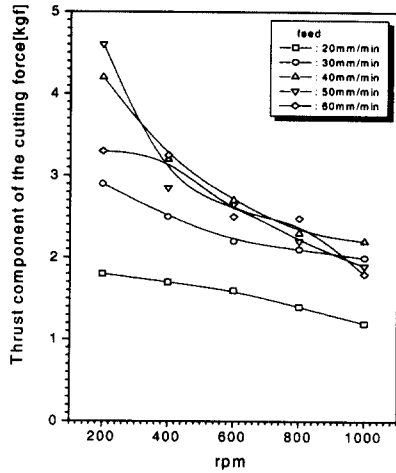
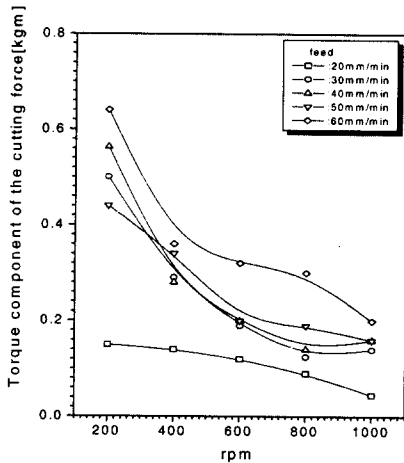


Fig. 7 Photographs of the drilledholes of the glass fiber epoxy composite with respect to feed rates



(a) Thrust



(b) Torque

Fig. 8 Cutting forces of the glass fiber epoxy composites with respect to drilling speeds and feed rates

### 3.2. 절삭조건이 절삭력에 미치는 영향

Fig. 8(a),(b)는 유리섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공시 발생하는 절삭력을 각각의 이송속도 20mm/min, 30mm/min, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min에서 드릴의 회전속도 200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm 변화에 따른 값을 측정된 결과이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 모든 경우에 대하여 드릴의 회전속도가 증가할수록 절삭력은 감소한다. 이것은 이송속도는 일정한데 절삭속도만이 증가하기 때문에 절삭점에서

의 절삭단면적이 감소되기 때문이다. 또한 이송속도에 대하여 검토하여 보면 드릴의 회전속도 200rpm, 400rpm에서는 이송속도의 증가에 따라 절삭력은 증가하지만 그 이상의 영역에서는 이송량에 큰영향을 받지 않았다. 이것은 비교적 낮은 회전속도에서는 정상상태의 절삭이 이루어지지만 높은 회전속도에서는 심한 공구마멸, 절삭열의 증가등 비정상상태가 심화되기 때문이라고 사료된다.

### 3.3 절삭조건이 공구마멸에 미치는 영향

유리섬유 에폭시 복합재료를 드릴의 이송속도 20mm/min, 30mm/min, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min, 드릴의 회전속도 200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm, 1000rpm의 조건으로 공구마멸 실험을 하였다.

실험방법은 드릴가공후에 공구현미경에서 표준 고속도강 드릴의 주절삭면과 치즐(Chisel)부분을 측정하였다.

Fig. 9는 유리섬유 에폭시 복합재료를 드릴링 공구마멸 실험으로부터 얻어진 실험결과의 대표적인 것이다. 실험조건은 드릴의 회전속도를 400rpm으로 고정시키고, 드릴의 이송속도 20mm/min, 30mm/min, 40mm/min, 50mm/min, 60mm/min으로 변화시켜 드릴가공후 측정된 공구마멸값을 나타낸것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 드릴의 이송속도가 감소하면 심한 공구마멸 현상이 발생하고 있다. 이와같은 현상은 동일한 회전속도에서 이송속도가 감소하면 유리섬유와 공구의 연마작용을 일으키는 시간, 즉 공구가 매우 연마성이 강한 섬유와의 마찰시간이 증가됨으로써 공구마멸이 심하게 일어나고 인선의 예리함이 짧은시간 동안 유지하는 비교적 비정상상태에서 이루어지기 때문이다. 이상과 같이 가공구멍의 형태, 절삭력, 공구마멸을 검토한 결과 유리섬유 에폭시 복합재료의 구멍가공은 일반 표준 고속도강 드릴을 사용하여도 적절한 가공조건내에서 양호한 정도를 갖는 구멍을 가공할 수 있었다. 유리섬유 에폭시 복합재료의 드릴링은 빠른 회전속도와 낮은 이송속도에서 수행하는 것보다 낮은 회전속도와 빠른 이송속도로 하는 것이 보다 양호한 구멍 정도를 얻을 수 있다. 그러나 낮은 회전속도에서 이송속도가 너무 빠르면 과도한 절삭력의 발생으로 인하여 내부의 층간바리 및 섬유 또는 에폭시 수지의 탈락현상이 발생할 수 있다. 이러한 조건 등을 고려할 때  $\phi 8$ mm의 표준 고속도강 드릴로 유리섬유 에폭시 복합재료를 구멍가공할 경우 추천 절삭 조건은 드릴의 회전속도 400 ~ 600 rpm, 이송속도 40 ~ 50 mm/min이다.

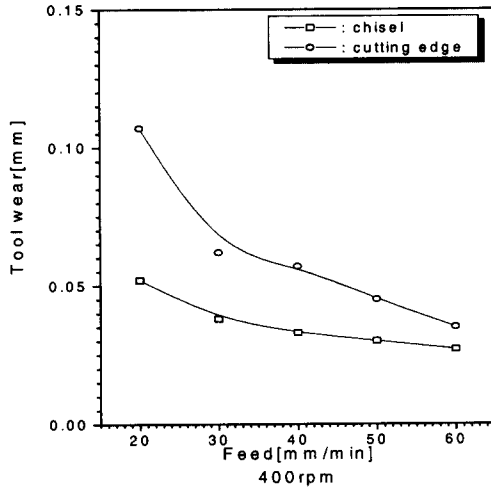


Fig. 9 Tool wear of the glass fiber epoxy composite with respect to feed rates

#### 4. 결 론

유리섬유 에폭시 복합재료의 드릴기공 실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다

- (1) 유리섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공 하였을 때 구멍의 입구쪽은 양호한 가공상태를 나타내지만 출구쪽에 서는 심한 표면 박리현상이 나타난다.
- (2) 유리섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공 하였을 때 모든 경우에 대하여 드릴의 회전속도가 증가할수록 절삭력은 감소한다.
- (3) 유리섬유 에폭시 복합재료를 드릴가공할 때는 빠른 회전속도와 낮은 이송속도에서 수행하는 것보다 낮은 회전속도와 빠른 이송속도로 하는 것이 보다 양호한 구멍 정도를 얻을 수 있다.
- (4)  $\phi 8\text{mm}$ 의 표준고속도강 드릴로 유리섬유 에폭시 복합 재료를 구멍가공할 경우 추천 절삭 조건은 드릴의 회전 속도 400 ~ 600 rpm, 이송속도 40 ~ 50 mm/min이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) P. K. Malick, "Fiber-Reinforced Composite

- s", 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(1), 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. S. Kim, D. G. Lee and Y. K. Kwak, "Cutting(Milling) Characteristics of Carbon Fiber Epoxy Composites", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.14(1), pp.37-42, 1990.
- (7) 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.1420-1427, 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) X. Wang, K. Nakayama, M. Arai, "Improvement of Surface Finish in the Cutting of GFRP", Proceedings of the First International Conference on New Manufacturing Technology, pp.33-38, 1990.
- (10) W. Konig, Ch. Wulf, P. Grab, H. Willerscheid, "Machining of Fiber Reinforced Plastics", Annals of the CIRP, Vol.34/2, pp. 537-548, 1985.