

선삭가공에 있어서 탄소섬유 에폭시  
복합재료의 절삭 특성

김 기수\*, 이 대길\*\*, 박 윤근\*\*, 남궁 석\*\*\*

Machinability of Carbon Fiber Epoxy Composites in Turning

Ki Soo Kim\* Dai Gil Lee\*\* Yoon Keun Kwak\*\* Suk Namgung\*

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 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 carbon fiber epoxy composite materials in turning was experimentally investigated. The cutting mechanism and the Taylor Tool Wear constants were determined and the surface roughness was measured w. r. t. cutting speeds and feed rates.

\* 충남대학교 기계공학과  
\*\* 한국과학기술원 생산공학과  
\*\*\*충남대학교 기계공학과 교수

## 1. 서론

탄소섬유 에폭시 복합재료는 재료의 높은 비탄성 계수와 비강도 특성 때문에 구조물의 경량화가 요구되는 우주선, 항공기 등에 주로 이용되어 왔다. 최근에는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 가격이 저렴하여지면서 이 재료의 높은 비탄성과 감쇠 특성을 이용하고자 스포츠용품 및 기계부품에도 복합재료의 이용이 증가되고 있다<sup>(1) (2)</sup>

탄소섬유 에폭시 복합재료를 기계 및 구조물의 소재로 사용하면 중량을 감소시킬 수 있으며, 재료의 고유진동수와 감쇠값이 매우 크므로 빠른 속도로 움직이는 항공기의 Transmission Shaft나 자동차의 Drive Shaft<sup>(3)</sup> 및 공작기계의 주축<sup>(4)</sup>, 로봇 팔<sup>(5)</sup> 등에 사용이 증가되고 있는 추세이다.

탄소섬유 에폭시 복합재료를 항공기 및 로봇의 부품에 사용하려면 베어링을 장착하거나 다른 요소와 결합하는 것이 필요하며, 이 경우 가공을 요하게 된다. 탄소섬유 에폭시 복합재료는 성형후 선삭, 드릴링, 밀링, 절단작업을 하는 경우가 많다. 이러한 절삭가공은 금속가공과 다른 절삭현상이 나타나고, 급속한 공구마멸, 표면거칠기의 증대, 크랙이나 층간박리에 의한 결합층의 발생등의 문제점이 있다<sup>(6) (7)</sup>

Koplev<sup>(8) (9)</sup>은 일방향 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)의 절삭실험을 섬유방향에 수직인 방향과 평행한 방향에 대하여 수행하였다. 세이퍼 절삭장치와 Quick-stop 장치 그리고 새로운 칩 수집 방법을 이용하여 칩 생성 형태와 가공면 거칠기, 섬유방향에 따른 절삭력을 측정하였고, 칩 형태와 공구마멸에 관련된 결과를 조사하였다.

Sakuma<sup>(10) (11)</sup>는 유리섬유 강화 복합재료를 절삭할 때 섬유의 적층각과 공구마멸과의 관계를 검토하였고, 탄소섬유 강화 복합재료의 선삭실험을 공구재료의 종류에 따라 수행하여 공구마멸의 형태와 성장속도를 분석하였다. 또한 공구마멸의 절삭속도 의존성 및 공구재료의 물리적 기계적 성질과 공구마멸과의 관계를 유리섬유 복합재료의 결과와 비교 검토하였

다.

Santhanakrishnan<sup>(12)</sup>은 CFRP, 유리 섬유 강화 플라스틱(GFRP), 케블러 섬유 강화 플라스틱(KFRP) 튜브를 마찰표면으로 적용하기 위하여 표면 거칠기와 가공된 표면의 형태를 비교하였고, 절삭기구와 공구마멸을 전자현미경(Scanning Electronic Microscope)으로 관찰하였으며 또한 절삭력을 측정하였다.

Kaneeda<sup>(13)</sup>는 2차원 절삭장치를 이용하여 CFRP를 절삭할 경우 표면거칠기, 칩생성 및 절삭력과 섬유방향의 관계를 고찰하여 CFRP이 절삭기구(Cutting Mechanism)에 관한 연구를 수행하였다.

Wang<sup>(14)</sup>은 GFRP 절삭에서 가공면 상태를 향상시키기 위하여 가공표면의 형태, 섬유의 파괴 형태와 절삭조건과의 관계를 연구 하였다.

Ramulu<sup>(15)</sup>는 PCD(Polycrystalline Diamond) 공구를 이용하여 CFRP를 절삭할 때 공구마멸의 형태를 분류하였고, 공구재료의 미시조직과 절삭시간이 공구마멸에 미치는 영향에 관해 조사하였으며, 또한 표면거칠기에 대한 분석을 수행하였다. 그러나 이들의 연구의 대부분은 2차원 절삭장치를 이용하여 공구마멸, 절삭기구, 표면거칠기등에 관한 정성적인 연구로서 실제의 가공에서 이용할 수 있는 정량적인 정보를 제공하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 항공기 Transmission Shaft나 자동차의 Drive Shaft, 공작기계의 주축등 튜브형태의 부품을 복합재료로 제작하고자 할 경우 요구되는 치수 정밀도와 가공면 거칠기, 공구마멸등에 대한 정량적인 가공 정보를 얻고자 선삭실험을 행하였다. 실험은 섬유 방향각과 공구상면 경사각의 변화에 따른 절삭 메커니즘을 고속 카메라를 이용하여 관찰 하였으며, 섬유방향각, 절삭속도 및 이송량의 변화에 따른 공구의 여유면 마멸량을 측정하여 Taylor 지수를 구하였다. 또한 가공면 거칠기도 조사하였다. 이와 같은 실험결과를 토대로 탄소섬유 에폭시 복합재료의 선삭가공 특성을 조사하였고, 추천절삭속도를 제안하였다.

2. 절삭실험

본 실험에 사용한 탄소섬유 에폭시는 선경 인더스트리의 USN 257-125형 Prepreg이다. 시험편은 Hand Lay-up 방법으로 적층하여 제작하였으며, 경화후 일방향 탄소섬유 에폭시 복합 재료의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table1. The physical properties of carbon fiber/epoxy composites

Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Fiber content (Volume %)	Density
2.06	141.26	60	1.6

Fig. 1은 선삭 실험을 하기 위하여 제작된 시험편의 형상과 치수이며 제작에 사용된 맨드릴(Mandrel)의 외경은 50mm, 재질은 S45C이며, 맨드릴과 복합재료의 접착성을 좋게하기 위하여 표면을 사포(Sand Paper)로 연마하였다. 적층은 섬유 방향각이 맨드릴의 중심축 방향에 대하여 0°, ±15°, ±30°, ±45°로 Hand Lay-up방법으로 하여 Autoclave에서 Co-cure하였다.

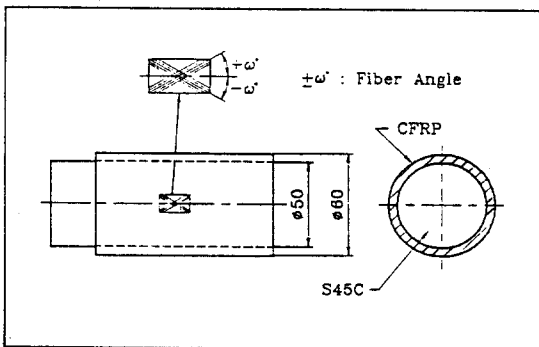


Fig. 1 Configuration of the specimen used in turning operation

항공기의 Transmission Shaft, 자동차의 Drive Shaft와 같은 튜브형태로 제작된 복합재료를 선반척에 고정하여 가공하면 척의 조임력(Chucking Force)에 의하여 진원도가 매우 큰 영향을 받게되어 정밀한 치수 정밀도를 얻을 수 없을 뿐만 아니라 양호한 가공면을 얻는 것은 거의 불가능하다. 이와 같이 척의 조임력에 의한 영향을 배제하여 정밀한 치수 정밀도와 양호한 가공면을 얻기 위하여는 맨드릴을 제거하지 않은 상태로 가공하는 것이 용이하기 때문에 시험편을 Mandrel에 Co-cure하여 제작하였다. 시험편 제작에 이용된 Autoclave는 내용적이 φ 60cm × 1m이며, 0.7MPa의 압력을 가할 수 있다. 또한 2°C/min의 온도상승이 가능한 Programable Heat Controller가 부착되어 있다. Fig. 2는 Autoclave내의 온도와 압력을 나타내는 Curing Cycle이다.

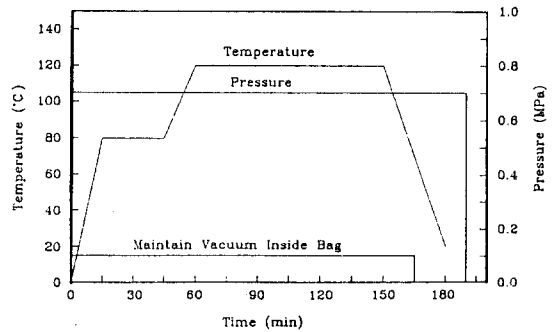


Fig. 2 Cure cycle for the autoclave in manufacturing of the specimen

절삭실험은 독일의 GEMA-LZ 200형 6kW 선반을 이용하였으며 주축의 회전속도는 50-1500rpm이다. 절삭시 발생하는 미세 입자형 칩을 원활하게 제거하기 위하여 흡입용량 8.2m<sup>3</sup>/min, 동력 0.52kW의 흡진장치를 사용하였다. 사용 공구는 폐기형(Throw-away Type) 공구로 팁의 재종은 K10(Uncoated, SNADVİK TNMA 331)으로 공구의 형상은 Fig. 3과 같다.

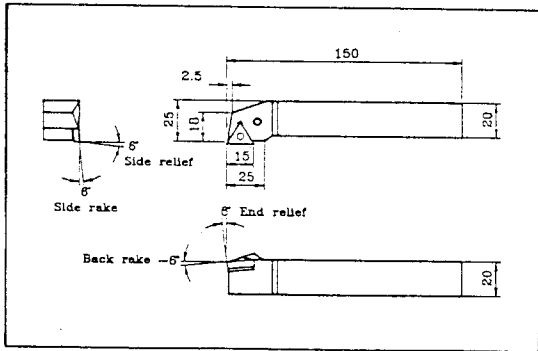


Fig. 3 Configurations of the cutting tool and the tool holder

절삭기구(Cutting Mechanism)를 관찰하기 위한 실험에 사용한 공구의 형상과 치수는 Fig. 3과 동일하며 공구 경사각을  $-10^\circ$ 에서  $+30^\circ$ 까지  $5^\circ$ 간격으로 변화시켜 주문 제작하였다.

절삭실험은 절삭시작에서 종료까지 균일한 절삭깊이와 가공면 거칠기를 갖도록 하기 위해 전가공(Pre-cutting)을 하였다. 이 때의 절삭조건은 절삭속도 25-30m/min, 이송량 0.11mm/rev, 절삭깊이 0.2mm이다. 절삭기구에 대한 실험은 축으로 부터  $-45^\circ$ 에서  $+45^\circ$ 까지  $15^\circ$ 간격으로 제작된 시험편 및  $90^\circ$  시험편을 사용하였다. 절삭상태의 관찰은 고속 카메라(KODAK EKTAPRO 1000 Intensified Imager)를 이용하였으며 초당 1000매씩 촬영하여 관찰하였다. 공구 마멸량은 설정된 절삭조건 중 종료시마다 공구 현미경(Union Co. 일본)을 이용하여 공구의 여유면 마멸량을 측정하였다.

탄소섬유 에폭시 복합재료를 이용하여 기계부품을 제작할 때는 다른 부품과의 접합(Joining) 및 베어링 장착을 위하여 가공 여유를 고려하여 성형하게 된다. 이 경우 가공 여유는 높은 재료비, 심한 공구마멸로 인한 공구수명 저하등 제작단가를 높이는 요인 때문에 최소한의 가공 여유(0.5-1mm)를 둔다. 따라서 공구 마멸량 실험에서는 절삭깊이를 0.5mm로 하였고, 섬유 방향각, 절삭속도, 이송량 및 절삭시간을 변화시켜 실험하였다.

표면거칠기 실험을 절삭깊이를 0.2mm로 하고 섬유 방향각, 절삭속도, 이송속도를 변화시켜 수행하였으며, 측정은 표면거칠기 측정기(KOSAKA SZ-3A 일본)를 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 절삭기구

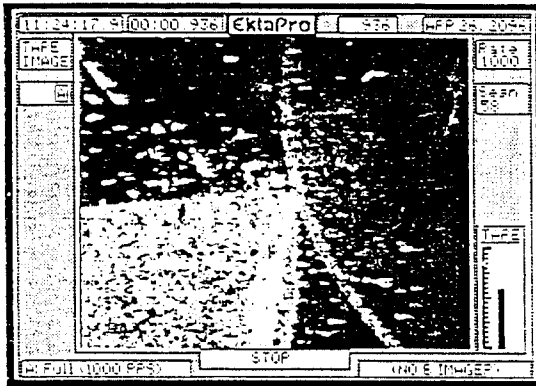
Fig. 4는 고속 카메라를 이용하여 관찰한 절삭상태의 대표적인 것을 나타낸 것으로 섬유각이  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 이고, 공구의 상면 경사각은  $20^\circ$ 와  $-10^\circ$ 인 경우이다.

이 때의 절삭조건은 절삭속도 10m/min, 이송량 0.11mm/rev, 절삭깊이 0.5mm이다.

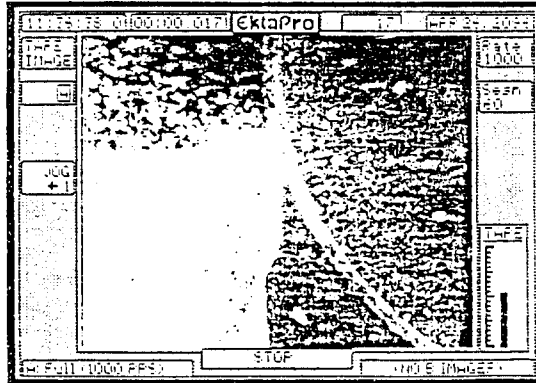
고속 카메라를 이용하여 관찰한 절삭기구의 형태는 Delamination, Buckling, Fiber Cutting 형태의 3가지 대표적인 형태로 이루어지고 있다. 이것은 Kaneda가 2차원 절삭장치를 이용한 실험에서 밝힌 절삭기구의 형태와 동일한 것으로, Kaneda는 Delamination 형태는 섬유각이  $0^\circ$ 일 경우 공구경사각  $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 에서 발생하며, Buckling 형태는 섬유각이  $0^\circ$ 일때 공구 경사각  $-10^\circ, 0^\circ$ 에서 발생하고 Fiber Cutting 형태는 섬유각이  $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 일때 공구경사각에 관계하여 발생한다고 보고하고 있다.

Fig. 4(a)는 Delamination 형태의 대표적인 예로서 섬유각이  $90^\circ$ 일때 공구 상면 경사각이 양의 값을 갖진 경우에 발생하였다. 이와 같이 절삭기구의 형태가 Delamination 형태를 갖으면 가공면 거칠기는 다른 절삭기구보다 양호하며 결함층의 두께가 매우 적다는 보고도 있다<sup>(13, 14)</sup>. 그러나 선삭가공에서는 파단되지 않은 섬유가 절삭단에서 거스러미 형태로 존재하기 때문에 이를 제거하기 위한 별도의 가공을 필요로 하며, 또한 칩의 크기도 다른 절삭형태 보다 크게 발생하였다.

Fig. 4(b)는 Buckling 형태의 대표적인 예로서 모든 섬유각에 대하여 공구 상면 경사각이 음의 값, 즉  $-5^\circ, -10^\circ$ 일 경우에 발생하였다. 이 경우 가공면 거칠기가 매우 나빠짐을 관찰할 수 있었다.



(a) Fiber Angle 90° , Rake Angle 20°



(b) Fiber angle 90° , Rake Angle -10° .

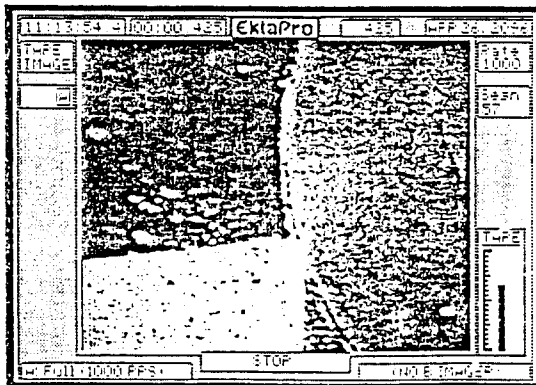
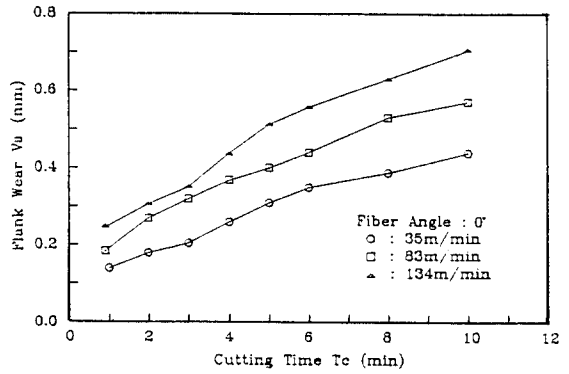
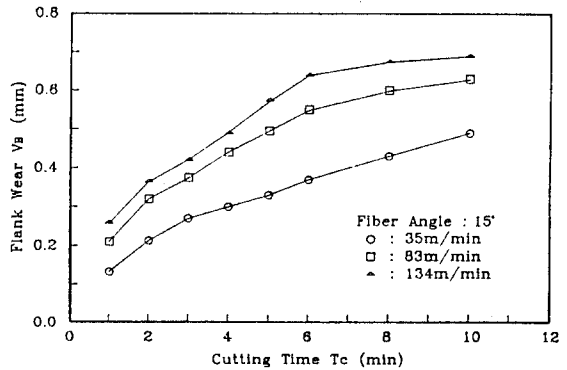


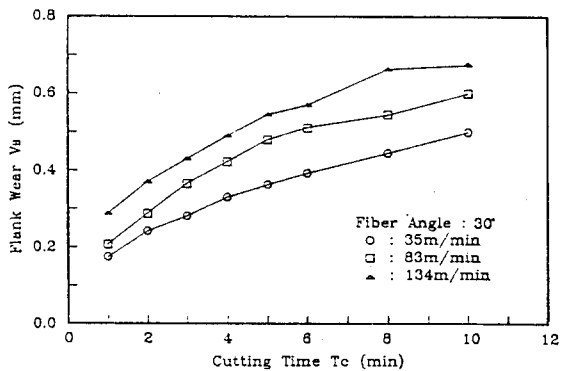
Fig. 4 Cutting mechanism observed by the high speed camera(Kodark Ektapro 1000)  
 (a) Delamination Type      (b) Buckling Type  
 (c) Fiber Cutting Type



(a)



(b)



(c)

Fig. 4(c)는 Fiber Cutting 형태의 대표적인 예로서 공구 상면 경사각이 0°에서 +α이고, 섬유각이

0°에서 + $\omega$ 일 경우에 발생하였다. 그러나 공구의 인선이 예리한 상태인 절삭초기에 발생하며, 절삭이 진행되어 공구인선의 마멸이 증가함에 따라 절삭 형태는 Buckling 형태로 변화함을 관찰할 수 있었다.

### 3.2 공구마멸

고속 카메라를 이용하여 절삭상태를 관찰한 결과에 의하면 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭형태는 주로 Delamination, Buckling 및 Fiber Cutting 형태로 이루어지고 있었으며, 칩의 형태는 섬유의 파단에 의한 분산재 형태와 섬유는 파단되지 않고 기지(Matrix)만 파단된 상태를 유지하다가 탈락되는 섬유형 칩이 관찰되었다. 이와 같은 절삭현상으로 인하여 일반금속 절삭시에 나타나는 기계적 Chipping 및 크레이터 마멸(Crater Wear)은 발생하지 않았다. 공구의 마멸은 인선(Cutting Edge)을 등그렇게 만드는 인선의 원형 마멸과 심한 여유면 마멸(Flank Wear)이 관찰 되었다. 인선의 원형 마멸은 섬유가 절삭력을 받으면 굽힘(Bending)이 발생하고, 다시 섬유의 높은 탄성계수로 인하여 탄성 회복을 하면서 공구 인선과의 심한 연마(Abrasive)작용이 발생하기 때문이며, 또한 심한 여유면 마멸은 섬유와의 계속적인 마찰 및 연마작용에 의한 것으로 판단된다. 공구의 여유면 마멸의 가장자리 부위에 흑색의 착색 영역이 존재하고 있었다.

Fig. 5는 절삭 시간에 따른 여유면 마멸량을 섬유각 0°, ±15°, ±30°, ±45°와 절삭속도 34m/min, 83m/min, 134m/min에 대하여 측정한 결과들이다. 그림에서 보는 바와같이 절삭속도와 절삭시간이 증가함에 따라 공구의 마멸량은 증가하며 급격한 초기 마멸이 발생하고 있다.

이 결과를 자세히 관찰하기 위하여 실험에서 가장 낮은 절삭속도인 34m/min와 가장 높은 절삭속도인 134m/min의 경우를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있는 것처럼 낮은 절삭속도에서는 섬유각이 증가함에 따라 공구 마멸량은 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 현상은 섬유와 공구의 경사면이 이루는

절삭각에 기인하는 것으로 섬유각이 0° 일때는 절삭작용이 섬유를 수직으로 절단하는 형태가 되며, 섬유각이 증가하면 절삭각이 증가하여 섬유를 비스듬히 절단하는 형태가 된다. 이와 같이 절삭각이 증가하면 절삭력이 증가<sup>(13)</sup>하며 증가된 절삭력은 섬유에 보다 큰 굽힘을 일으키게 된다. 증가된 굽힘량 만큼 탄성 회복량도 증가하므로 절삭점에서 공구와 섬유의 심한 마찰 작용이 발생하고 이로 인하여 보다 큰 공구 마멸 현상을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 절삭속도

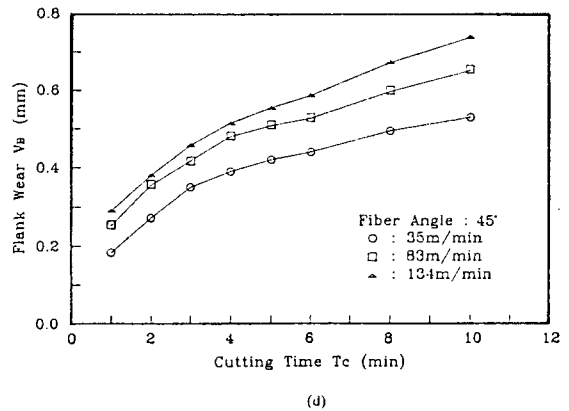
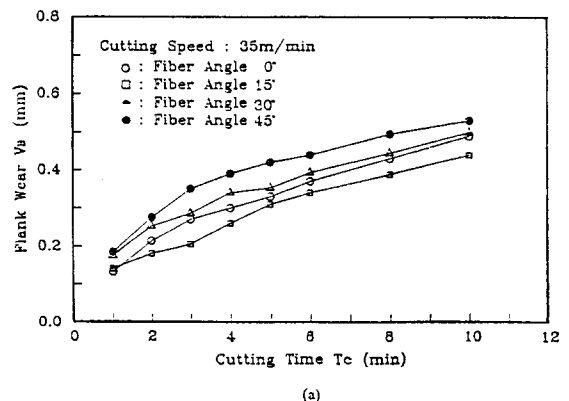
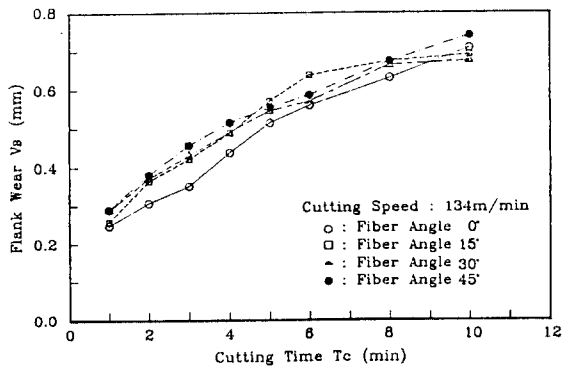


Fig. 5 Effect of cutting time, cutting speeds and fiber winding angles on the flank wear



가 가장 높은 134m/min에서는 Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 섬유 방향이 공구의 여유면 마멸에 크게 영향을 미치지 않고 있다. 이것은 고속 절삭 영역에서 매우 급격한 공구 마멸이 일어나기 때문에 절삭상태가 섬유의 방향 및 절삭각에 크게 영향을 받지 않고 불안정한 절삭상태로 급격히 변화하기 때문이라고 생각된다.



(b)

Fig. 6 Effect of the fiber winding angles on the flank wear

Fig. 7은 최적절삭조건을 구하기 위해 축방향 절삭 시험에서 측정된 공구 여유면 마멸량이 공구수명 판정의 기준인 여유면 마멸량 0.3mm (ISO 규정)에 도달할때까지의 절삭시간을 계산하여 절삭속도와 공구수명과의 관계를 양측 대수 좌표로 나타낸 결과이다. 계산은 각각의 절삭속도에서 측정된 여유면 마멸량을 최소 자승법을 이용하여 근사식으로 표현하고 이 식으로부터 여유면 마멸량이 0.3mm에 도달하는 절삭시간을 구하였다. 이 결과로부터 Taylor의 공구수명식  $VT^n=C$ 의 상수 n과 C를 구한 결과는 Table 2와 같고, 이 식의 의미를 알아보기위해 양변에 log를 취하고 정리하면 다음과 같다.

$$\log V + n \log T = \log C$$

$$\log T = -\frac{1}{n} \log V + \frac{1}{n} \log C$$

$$= -\frac{1}{n} \log V + C' \quad (1)$$

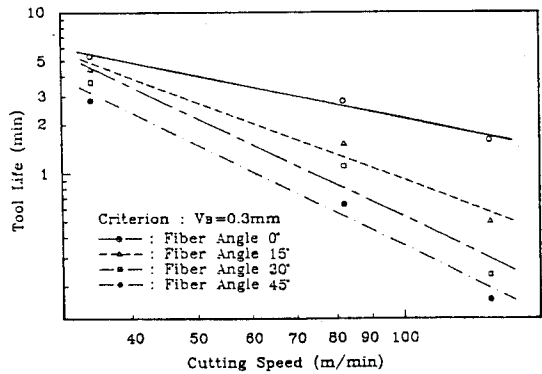
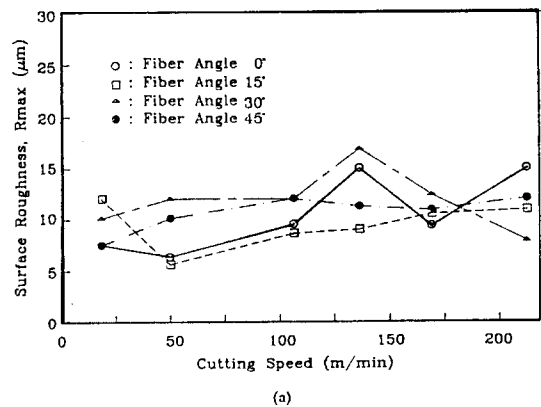


Fig. 7 Effect of the cutting speeds and fiber winding angles on the tool life



(a)

여기에서 V는 절삭속도, T는 공구수명시간이며, C는 공구수명시간 T=1min일때의 절삭속도이다. 이 식에서 알 수 있는 바와 같이 공구마멸은 n값이 작을수록 절삭속도 변화에 민감하므로 절삭성이 불량하며, 값이 클수록 절삭속도에 민감하지 않게되어 절삭

성이 상대적으로 양호하다. 또한 상수 C는 공구수명 시간이 1분 일때의 절삭속도이므로 C값이 클수록 절삭성은 양호하다.

**Table2. Taylor's constants, n and C in machining of carbon fiber exoxy composites with tungsten carbide tools(K10)**

Constant Fiber angle	n	C
± 0°	1.125	241.5
± 15°	0.617	93.8
± 30°	0.481	72.5
± 45°	0.451	55.4

Table 2에서 보는 바와같이 n값 및 C값은 섬유각에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. n값의 결과에 의하면 공구마멸은 섬유각이 45°일때 절삭속도의 변화에 가장 민감하며, 섬유각이 감소함에 따라 그 경향은 감소하고 있다. 이것은 탄소섬유 에폭시 복합재료를 절삭할 때 공구마멸을 지배하는 인자가 섬유이라는 것을 의미한다. 또한 C값은 섬유각이 증가함에 따라 급격히 작아지는 경향을 보이고 있다. C값이 작을수록 절삭성이 불량하다는 것을 의미하므로 섬유각의 증가는 절삭성을 저하시킨다. 이 n과 C값이 결과로부터 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭성과 일반강의 절삭성을 비교해보기 위해 Shaw<sup>(17)</sup>가 황(Sulphur)의 함유량에 따른 쾌삭강의 공구수명실험을 통하여 얻은 n과 C값의 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 탄소섬유 에폭시 복합재료를 초경공구(K10)로 절삭할 때의 Taylor 지수 n값은 0.45-1.125이며, C값은 55.4-241.5범위였고, Table 3에 나타낸 쾌삭강의 절삭에서는 지수 n값이 0.33(일반적으로는 0.17-0.25)이며, C값은 477-823의 범위였다. n값의 결과에 의하면 탄소섬유 에폭시 복합재료 절삭에서의 n값이 일반강에 비해 크므로 공구마멸은 상대적으로 절삭속도에 큰 영향을

**Table3. Taylor's constants for free-machining steels of differents machined with tungsten carbide tools<sup>(17)</sup>**

Sulphur Content (%)	n	C
0.033	0.33	477
0.11	0.33	549
0.18	0.33	701
0.26	0.33	732
0.37	0.33	823

받지 않는다.

절삭가공에 있어서 공구는 강한 압력을 받는 상태에서 칩 및 가공물과의 마찰작용을 하며, 이 때 발생하는 마찰열이 공구마멸을 지배한다. 일반강의 절삭에서 변형에 의해 가공경화된 칩과 공구표면의 마찰작용은 공구의 온도를 상승시키며, 공구의 재질이 연화되고 절삭성능이 저하된다. 마찰작용에 의한 마찰열은 칩의 형태가 유동형(Flow Type)인 경우에 가장 높고, 보다 심한 공구마멸을 일으킨다. 또한 절삭열은 절삭속도에 가장 큰 영향을 받으며, 따라서 절삭속도가 공구수명을 지배하는 인자가 된다. 그러나 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭에서 발생하는 칩은 가공경화를 일으키지 않으며, 칩의 형태가 분산재 형태이기 때문에 공구와의 마찰작용에 의한 마찰은 크게 발생하지 않는다. 이것은 칩과 공구의 경사면과의 마찰에 의하여 발생하는 크레이터 마멸이 발생하지 않는다는 것으로부터 알 수 있다. 따라서 탄소섬유 에폭시 복합재료를 절삭할 때의 공구마멸이 일반강의 절삭에서 보다 절삭속도에 영향을 받지 않는 것으로 생각된다.

그러나 C값의 결과에 의하면 탄소섬유 에폭시 복합재료의 경우가 쾌삭강에 비하여 작게 나타나고 있는데, 1분의 절삭으로 공구수명 기준마멸에 도달하는 절삭속도가 일반강의 1/4-1/8의 절삭속도이므로 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭성은 매우 불량하다. 이것은 절삭점에서 매우 경도가 높은 탄소섬유가 급힘을 일으킨 후 탄성회복 하면서 공구의 여유면과 심



한 마찰을 일으키기 때문에 낮은 절삭속도에서 빨리 공구수명에 도달하는 것으로 생각된다.

따라서 탄소섬유 에폭시 복합재료를 초경공구 (K10)로 절삭할 때의 추천 절삭속도는 공구마멸이 절삭속도에 크게 영향을 받지 않지만, 경도가 높은 탄소섬유로 인하여 심한 여유면 마멸이 발생하므로 낮은 절삭속도인 약20-40m/min범위가 바람직하다.

### 3.3 표면거칠기

Fig. 8은 절삭속도, 섬유각의 변화에 따른 가공면의 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 그림에서 볼수 있는 바와 같이 절삭속도 및 섬유각과는 뚜렷한 상관관계를 나타내고 있지 않다. 이것은 섬유의 절삭형태가 Buckling이나 Delamination의 형태로 이루어지며 기지재료인 에폭시 수지의 절삭성이 양호하기 때문에 일반강에서와 같은 구성인선(Built-Up Edge)이 발생하지 않기 때문이다.

Fig. 9는 이송량과 섬유각에 따른 가공면 표면거칠기의 측정결과를 공구의 형상과 이송량에 의하여 정의되는 이론 표면거칠기와 비교하여 나타낸 것이다.

선삭가공에 있어서 이론 표면거칠기는 피삭재의 재질이 균일하며 구성인선 및 공구마멸이 발생하지 않고 공작기계의 진동이 없다면 다음과 같이 공구 인선부의 형상과 이송량만으로 정의된다.

$$R_{max} = f^2 / 8r \quad (2)$$

$$R_a = 0.0321 f^2 / r \quad (3)$$

여기에서 Rmax는 최대 높이 거칠기, Ra는 평균 높이 거칠기, f는 이송량, r은 공구의 노우즈반경으로 본 실험에서는 r=0.4mm이다.

식에서 알 수 있는 바와같이 이송량이 증가하면 표면거칠기는 증가한다. 선삭가공에서 얻어지는 결과는 이론과 그 경향은 동일하지만 구성인선, 공작기계의 진동등 불안정한 절삭상태로 인하여 이론값보다 큰값을 갖는 것이 일반적이다.

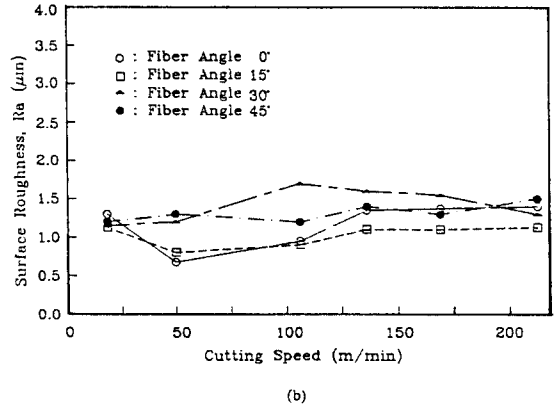


Fig. 8 Effect of the cutting speeds and fiber winding angles on the surface roughness

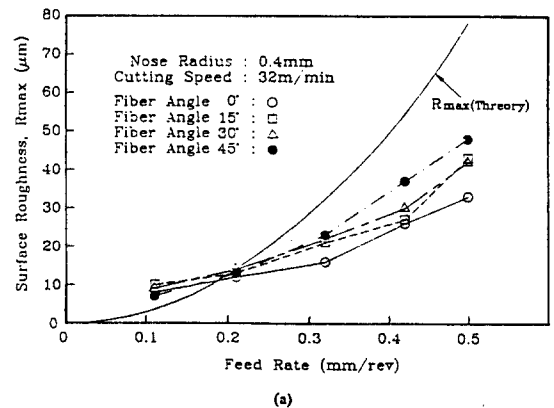


Fig. 9에서 알 수 있는 것처럼 탄소섬유 에폭시 복합재료를 절삭하는 경우 이송량이 증가하면 표면거칠기는 증가한다. 그러나 일반강 절삭에서의 현상과는 다르게 이송량 0.2mm/rev이상의 영역에서 이론값보다 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 0.2mm/rev이하의 이송량에서의 미시적 가공면 형태가 일반강과 마찬가지로 공구의 이송 흔적과 절삭상태를 반영한 나사산 모양의 가공면이 생성되지만 그 이상의 영역에서는 기지(Matrix)인 에폭시 수지와 탄소섬유의 결합력을 초과하는 절삭력이 작용하여 공구의 이송에 선행하는 재료의 Delamination이 발생하고 이로 인하여 공구의 이송흔적을 반영한 나사산 모양의 가공

면이 생성되지 못하기 때문이라고 생각된다. 이와 같이 표면거칠기가 이송량  $0.2\text{mm/rev}$  이상에서 이론값보다 작기 때문에 이송량을 크게하여 절삭하는 것이 타당하다고 판단할 수 있으나 이송량이 증가하면 표면거칠기 측정으로 평가할 수 없는 피삭재 내부의 결함층이 존재할 수 있으므로 이론값과 일치하는 영역 이하에서 절삭하는 것이 바람직하다.

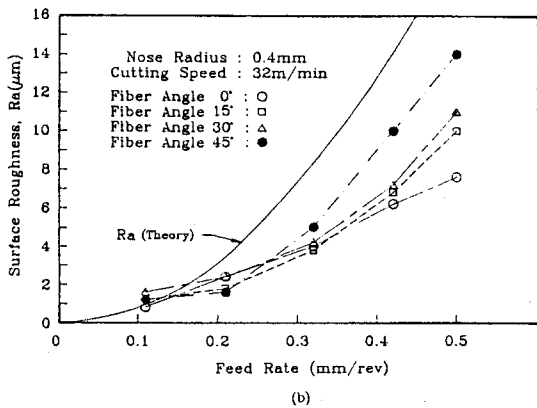


Fig. 9 Effect of the feed rates and fiber winding angles on the surface roughness

또한 Fig. 9에서 섬유각이 증가함에 따라 표면거칠기는 증가하며 그 경향은 최대 높이 거칠기  $R_{max}$ 보다는 평균 거칠기  $R_a$ 에서 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이송속도  $0.25\text{mm/rev}$  이하의 영역에서는 표면거칠기의 변화가 적고 섬유각의 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 이 이상의 영역에서는 표면거칠기가 급격히 증가하며 섬유각이 증가함에 따라 더욱 급격한 증가를 나타내고 있다. 이것은 이송속도  $0.25\text{mm/rev}$  이하의 영역에서는 섬유각에 관계없이 비교적 안정된 절삭이 이루어져 이송속도에 비례하는 공구의 이송 흔적이 존재하지만  $0.3\text{mm/rev}$  이상의 영역에서는 섬유각 증가에 따른 절삭력의 증가가 가공면 생성에 영향을 미치기 때문이라고 판단된다.

따라서 탄소섬유 에폭시 복합재료를 초경공구로 절삭할 때 이송량은 섬유각 및 이송의 영향이 거의 나타나지 않는  $0.2\text{mm/rev}$  이하가 바람직하다.

#### 4. 결론

탄소섬유 에폭시 복합재료의 선삭 실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 탄소섬유 에폭시 복합재료의 선삭 가공시 공구의 여유면 마멸량은 섬유각이 증가함에 따라 증가하며, 또한 공구의 여유면 마멸량은 섬유각이 클수록 절삭속도에 민감하였다.
- (2) K10공구로 탄소섬유 에폭시 복합재료를 절삭할 때 Taylor 지수는  $n=0.45-1.12$ ,  $C=55.4-241.5$ 의 범위로 일반강에 비해 절삭속도에 크게 영향을 받지 않지만 1min의 절삭으로 공구수명 기준마멸에 도달하는 절삭속도는 일반강의 1/4-1/8이었다.
- (3) 가공면 표면거칠기는 절삭속도의 영향을 받지 않고, 이송량 및 섬유각에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.
- (4) 공구의 여유면 마멸과 표면거칠기 측면에서 추천절삭조건은 절삭속도  $20-40\text{m/min}$ , 이송량  $0.2\text{mm/rev}$  이하이다.

#### 참고문헌

- (1) P. K. Mallick, 1988, Fiber-Reinforced Composites, Marcel Dekker, Inc., pp. 3-4.
- (2) M. M. Schwartz, 1984, Composite Materials Handbook, McGraw-Hill Book Company, Chapter 7.
- (3) C. Reugg and J. Habermair, 1982, "Composite Propeller Shafts Design and Optimization," Advances in Composite Material, Proceedings of ICCM 3, Vol. 2, pp. 1740-1755.
- (4) D. G. Lee, H. C. Sin and Nam P. Suh,

- 1985, "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool," *Annals of the CIRP*, Vol. 34(1), pp. 365-369.
- (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*, Accepted for Publication in 1990.
- (6) K. S. Kim, D. G. Lee and Y. K. Kwak, 1990, "Cutting(Milling) Characteristics of Carbon Fiber/Epoxy Composites," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 14(1), pp. 237-42.
- (7) G. Lubin, 1982, *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold, pp. 625-629.
- (8) A. Kopliv, 1980, "Cutting of CFRP with Single Edge Tools," *Proceedings of ICCM 3*, Vol. 2, pp. 1597-1605.
- (9) A. Koplev, A. Lystrup and T. Vorm, 1983, "The Cutting Process, Chips and Cutting Force in Machining CFRP," *Composites*, Vol. 14, pp. 371-376.
- (10) K. Sakuma and M. Seto, 1983, "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.
- (11) K. Sakuma, M. Seto, M. Taniguchi, 1985, "Tool Wear in Cutting Carbon-Fiber-Reinforced Plastics(The Effect of Physical Properties of Tool Materials)," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, No. 245, pp. 2781-2788.
- (12) G. Santhanakrishnan, R. Krishnamurthy, S. K. Malhotra, 1988, "Machinability Characteristics of Fiber Reinforced Plastics Composites," *J. Mechanical Working Technology*, Vol. 17, pp. 195-204.
- (13) T. Kaneeda, 1989, "CFRP Cutting Mechanism," *NAMRC XV III*, pp. 216-221.
- (14) X. Wang, K. Nakayama, M. Arai, 1990, "Improvement of surface finish in the Cutting of GFRP," *Proceedings of the First International Conference on New Manufacturing Technology*, pp. 33-38.
- (15) M. Ramulu, M. Faridnia, J. L. Garbini, J. E. Jorgensen, 1989, "Machining of Graphite/Epoxy Materials with Polycrystalline Diamond(PCD) Tools," *Conference Proceedings of the Winter Annual Meeting of ASME*, pp. 33-40.
- (16) W. König, C. Wulf, P. Grab, H. Willerscheid, 1985, "Machining of Fiber Reinforced Plastics," *Annals of the CIRP*, Vol. 34/2, pp. 537-548.
- (17) M. C. Shaw, 1986, *Metal Cutting Principles*, Clarendon press. Oxford, pp. 395-399, 510-512.