

<論 文>

탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭(밀링) 특성

김기수* · 이대길* · 곽윤근*

(1989년 7월 22일 접수)

Cutting (Milling) Characteristics of Carbon Fiber/Epoxy Composites

Ki Soo Kim, Dai Gil Lee and Yoon Keun Kwak

Key Words : Carbon Fiber/Epoxy Composites(탄소섬유 에폭시 복합재료), Taylor's Tool Life Equation(Taylor의 공구수명식), Cutting Condition(절삭조건), Tool Wear(공구 마멸), Surface Roughness(표면거칠기)

Abstract

Carbon fiber epoxy composite materials are widely used in the structures of aircrafts, robots and other machines because of their high specific stiffness, high specific strength and damping. In order for the composite materials to be used in the robot structure or machine element, bearing mounting and joining surfaces must be provided, which require accurate machining. In this paper, the machinability and tool wear characteristics of the milling operation of the carbon fiber epoxy composite materials were experimentally measured. The tool wear mechanism and the Taylor tool wear constants were determined. Also, the surface roughness of milling operation was measured w.r.t. cutting speed and feed.

1. 서 론

탄소섬유 에폭시 복합재료는 재료의 높은 비탄성 계수(E/ρ)와 비강도(S/ρ) 특성⁽¹⁾ 때문에 구조물의 경량화가 요구되는 우주선, 항공기 등에 주로 이용되어왔다. 최근에는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 가격이 저렴하여지면서 이 재료의 높은 비탄성과 감쇠특성^(1,2)을 이용하고자 스포츠용품 및 기계 부품에도 복합재료의 이용이 증가되고 있다. 탄소섬유 에폭시 복합재료를 기계 및 구조물의 소재로 사용하면 중량감소에 의한 에너지 절감 및 동작부의 위치결정정도를 높일 수 있으며, 재료의 고유진동수와 감쇠값이 매우 크므로 빠른 속도로 움직이는 항공기의 transmission shaft나 자동차의 drive

shaft⁽³⁾ 및 동작기계의 주축⁽⁴⁾, 로봇 팔⁽⁵⁾ 등에 사용이 증가되고 있는 추세이다.

탄소섬유 복합재료를 기계나 항공기 및 로봇의 부품에 사용하려면, 베어링을 장착하거나 다른 요소와 접합(joining)을 하는 것이 필요하며, 이 경우 탄소섬유 복합재료는 가공을 요하게 된다. 이에 따라 복합재료의 절삭 특성에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 유리섬유 복합재료의 가공은 어느 정도 연구가 진행되고 있으며^(6,7), 참고문헌 (6)에서는 유리섬유 복합재료의 선삭시 공구수명 Taylor 지수값을 구하였다.

Koplev⁽⁸⁾은 탄소섬유를 카바이드 공구를 사용하여 셰이퍼로 가공 하였을 경우의 가공면 표면 거칠기를 섬유방향과 각도의 함수로 나타내었으며, 섬유가 파괴되는 깊이에 대해서도 연구를 수행하였다.

Toshiaki Kaneeda⁽⁹⁾는 2차원 절삭장치를 이용하

*정회원, 한국과학기술대학 기계·재료공학부

여 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭시 섬유 방향에 따른 표면거칠기와 칩 생성을 관찰하고, 절삭력을 측정하여 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭기구 (cutting mechanism) 해석에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 수직 밀링에서 탄소섬유 에폭시 복합재료를 절삭할 경우 절삭조건에 따른 공구마멸 형태를 조사하였으며, 여유면 마멸량을 측정하여 Taylor 지수를 구하였다. 또한 절삭조건 및 측정 방향에 따른 표면거칠기를 조사하여 탄소섬유 에폭시 복합재료의 가공특성을 조사하였다.

2. 절삭실험

본 실험에 사용한 피삭재는 탄소섬유 에폭시 복합재료로 섬유함유량이 부피기준으로 60%이며 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 제작된 시편의 형상과 치수이며 시편 제작은 각각 0°와 15°로 적층하여 autoclave내에서 성형하였다. Fig. 2는 autoclave내의 온도와 압력 분포를 나타내는 curing cycle이다. 제작된 적층판을 밀링바이스에 고정하기 위하여 열경화성 에폭시 (IPCO 9923A, 한국 IPCO)를 사용하여 steel plate에 접착하였다.

2.1 실험장치 및 실험방법

실험에 이용한 기계는 화천기계의 수직밀링머시인 (MW-1100)으로 테이블의 운동범위 1100×280

Table 1 The physical properties of carbon fiber/epoxy composites

Tensile strength (kg/mm ²)	Tensile modulus (Ton/mm ²)	Resin content (%)	Density
210	14.4	40	1.6

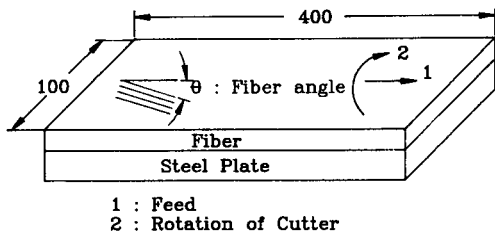


Fig. 1 Dimensions of workpiece

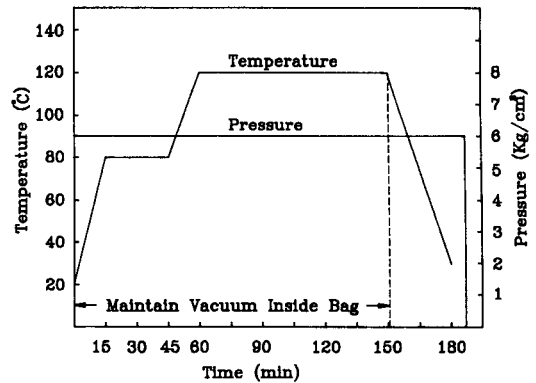


Fig. 2 Cure cycle for a fiber/epoxy prepreg

mm, 주축모터의 동력 3.75kW이며, 주축의 회전수 범위 95~1400rpm으로 9단계, 이송 속도범위 15~720mm/min로 12단계이며, 절삭시 발생하는 미세입자형 칩의 원활한 제거를 위하여 흡입용량 8.2m³/min, 동력 0.52kW의 흡진장치(삼전전기)를 주축 헤드에 부착하여 사용하였다.

사용공구는 클램프 커터로 회전지름 125mm, 텃재종 K10(Uncoated, SANDVIK SPKN 1203 EDR)으로 홀더와 텃의 형상은 Fig. 3과 같다.

절삭실험은 공구가 복합재료의 절삭 시작부터 절삭 종료시까지 균일한 절삭 깊이를 갖도록 하기 위하여 전가공(pre-cutting)을 행하였으며, 절삭공구는 폐기형 텃(throw-away tip)을 8개 장착할 수 있으나 본 실험에서는 1개만을 장착하여 실험하였다. 공구 마모량은 설정된 절삭조건의 종료시마다 공구 현미경 (Union Co. 1210, 미국)을 이용하여 공구의 여유면 마멸(flank wear)를 측정하였다. 절삭조건의 선정은 탄소섬유 복합재료를 기계부품 등에 이용할 때 베어링의 장착이나 다른 부품들과 접합하기 위한 가공여유가 크게 되면 고가격인 재료의 낭비로 인하여 부품의 제작단가를 높이게 되므로 성형과정에서 최소의 가공여유를 고려하여 제작하게 된다. 따라서 탄소섬유 복합재료의 가공여

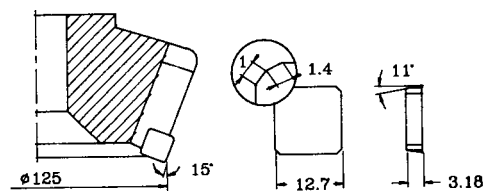


Fig. 3 Dimensions of tool

유는 0.5~1mm 범위를 초과하지 않게 되어 절삭 깊이를 0.5mm로 하였고, 이송속도와 절삭속도를 변화시켜 실험하였다.

표면거칠기의 측정은 표면거칠기 측정기(KO-SAKA SZ-3A, 일본)를 이용하여 행하였고, 측정 방향에 따른 표면거칠기의 변화를 조사하기 위하여 섬유방향 및 섬유방향에 수직한 방향, 테이블의 이송방향으로 표면거칠기를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공구마멸 형태 및 마멸량

Fig. 4는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭에 있어서 공구마멸 형태를 공구 현미경으로 찍은 것을 보여준다. 각각의 절삭조건은 절삭깊이 0.5mm, 이송속도 15mm/min, 절삭시간 7분 40초이고 절삭속도는 6단계로 실험을 행하였다. 마멸은 인선의 선단(nose)을 둥그렇게 만드는 다듬질 형태의 마멸이 발생하며 마멸면은 광택을 띠게 되는데 이것은 공구와 섬유의 연마(abrasive) 작용에 의한 것으로 판단된다. 또한 피삭재와의 접촉에 의해서 흑색의 착색영역이 발생한다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭속도 145m/min와 294m/min 사이에서 여유면으로부터 선단면으로 향하는 3각 형상의 급격한 마멸 증대현상이 발생되고 있다. 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭형태는 주로 buckling과 delamination으로 이루어지며, 칩의 형태는 섬유의 파단에 의한 분산재의 형태로 공구의 경사면에 마찰을 일으키지

않기 때문에 일반 금속 절삭시 나타나는 공구의 경사면의 크레이터 마멸 및 기계적 치핑(chipping)은 발생하지 않는다. 따라서 공구는 여유면 마멸만이 발생하며 인선(cutting edge)은 항상 날카로운 상태를 유지한다.

Fig. 5는 절삭속도와 절삭시간에 따른 여유면 마멸폭(V_B) 측정결과를 양축 대수좌표로 나타낸 것이다. 수직밀링절삭에서 공구가 실제로 시편을 절삭한 시간은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$T_R = \frac{\theta}{360} \cdot T_m \quad (1)$$

여기에서 T_R 는 실제 절삭시간, T_m 은 측정된 절삭시간, θ 는 실제로 절삭이 이루어진 공구의 회전각이다. 본 실험에서 시편의 크기가 100mm이고 공구의 회전지름이 125mm이므로 θ 값은 $2\sin^{-1} 100/125=106.26^\circ$ 가 된다. 이 값을 식 (1)에 대입하면

$$T_R = 0.295 T_m \quad (2)$$

이 된다. 이 식으로부터 실제 절삭시간을 환산하여 실제 절삭시간당 여유면 마멸량으로 표현하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 절삭시간과 여유면 마멸량과는 log-log좌표상에 나타내면 선형적인 경향을 보이고 있다. Fig. 5로부터 공구 수명판정의 기준 여유면 마멸량 0.3mm(ISO규격)가 되는 수명시간을 알기 위하여 다음과 같은 식을 최소 자승법을 이용하여 구할 수 있다.

$$\log V_B = a \log t_c + \log b \quad (3)$$

여기에서 V_B 는 공구수명 여유면 마멸량, t_c 는 수명시간, a 와 b 는 절삭조건에 따른 상수이다. 이

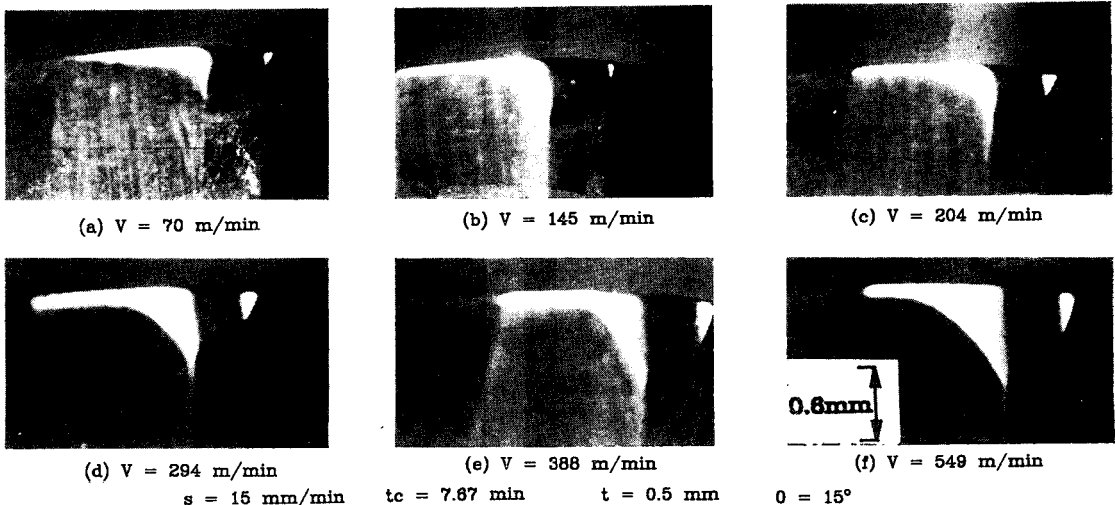
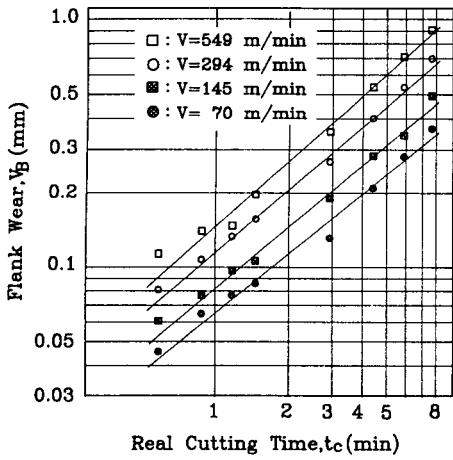


Fig. 4 Tool wear



$\theta = 15^\circ, s = 15 \text{ mm/min}, t = 0.5 \text{ mm}$

Fig. 5 Relationships between cutting time and flank wear w.r.t. cutting speed

식에서 공구수명 판정기준의 여유면 마멸량에 도달하는 절삭시간을 공구수명으로 하여 절삭속도와 공구수명과의 관계를 양측 대수좌표로 나타내면 Fig. 6과 같다. 이 결과로부터 Taylor의 공구수명식 $VT^n = C$ 의 상수 n 과 C 를 구하면 $n=1.95, C=2800$ 으로 강을 절삭할 때의 $n=0.17\sim 0.25$ 와 비교하면 n 의 값이 매우 증가하였다. 따라서 고속절삭이 진행될수록 매우 급격한 마멸이 진행됨으로 공구마멸을 고려할 경우 강을 절삭할 때보다 훨씬 낮은 절삭속도에서 절삭이 이루어져야 한다. 예를 들면 탄소섬유 복합재료를 절삭속도 145mm/min으로 가공하면 강철(SM45C)을 같은 절삭속도로 가공하는 것보다 공구수명이 약 3/8으로 줄어든다.

Fig. 7은 섬유 방향각 0° 및 15° , 이송속도 15 mm/min, 절삭깊이 0.5mm, 절삭시간 7분 40초일 경우 절삭속도 변화에 따른 여유면 마멸을 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭속도의 증가에 따른 여유면 마멸폭은 증가하며, 섬유 방향각의 증가에 따라 미세한 양의 증가를 보여주고 있다. 이것은 섬유의 방향각이 증가하게 되면 절삭각이 증가하게 되어 섬유의 파단길이 길어지고 섬유와의 마찰면이 증가하여 공구마멸에 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8은 섬유의 방향각 15° , 절삭속도 204m/min, 절삭깊이 0.5mm, 절삭시간 3분으로 하였을 때의 이송속도 변화에 따른 여유면 마멸을 측정하였다. 일반금속과 마찬가지로 이송속도 증가에

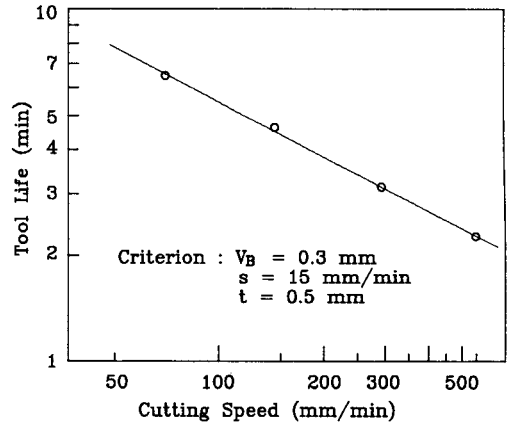


Fig. 6 Relationships between tool life and cutting speed

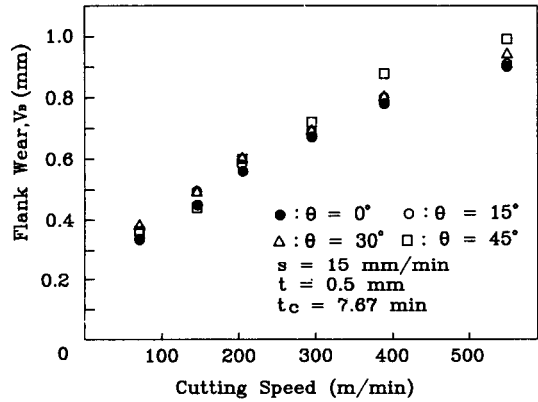


Fig. 7 Relationships between flank wear and cutting speed

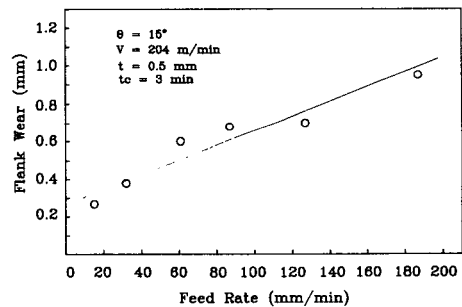
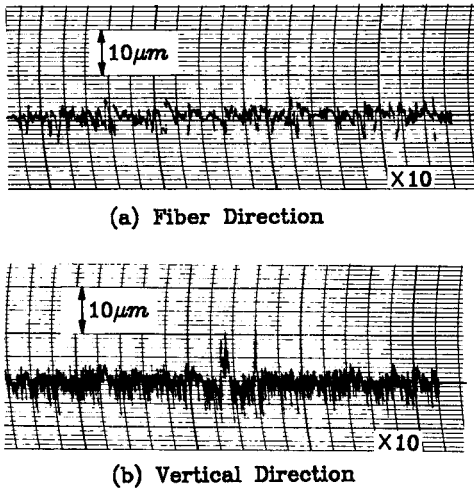


Fig. 8 Relationships between flank wear and feed rate

따라 여유면 마멸폭은 증가하는 경향을 보여주고 있다.

3.2 절삭조건에 따른 표면거칠기

Fig. 9는 절삭속도 70m/min, 이송속도 15mm/



$\theta = 0^\circ$
 $V = 70 \text{ m/min}$
 $s = 15 \text{ mm/min}$
 $t = 0.5 \text{ mm}$

Fig. 9 Dependence of surface roughness on fiber direction

min, 절삭깊이 0.5mm인 경우 표면거칠기의 측정 결과를 나타낸 것이다. 섬유방향의 표면거칠기와 섬유방향에 수직인 방향의 표면거칠기는 형태와 크기에 있어서 큰 차이를 나타내고 있다. 이것은 탄소섬유 에폭시 복합재료의 미세적 절삭현상이 섬유의 delamination과 buckling으로 이루어지므로 섬유가 탈락하면서 섬유의 결합재 역할을 하는 에폭시의 탈락을 유발시킨다. 그 결과 섬유간에는 탈락된 섬유로 인한 섬유방향으로 흠이 생성되어 측정 방향에 따라 표면거칠기 형태의 차이를 나타낸다. 따라서 탄소섬유 복합재료의 표면거칠기 측정은 섬유방향에 수직인 방향으로 측정하는 것이 보다 신뢰성이 있을 것으로 생각된다.

Fig. 10은 절삭속도 198m/min일 때 이송속도 변화에 따른 가공면의 표면거칠기를 측정 한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 이송속도 60 mm/min 이하 영역에서는 표면거칠기의 변화가 적고, 그 이상의 영역에서는 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이송속도 60mm/min 이하에서는 절삭형태가 주로 delamination으로 되어 이송속도에 비례하는 공구의 이송흔적이 매우 미세하게 존재하게 되지만, 이송속도가 60mm/min 이상이 되면 delamination 영역보다 이송량이 크게 되어 절

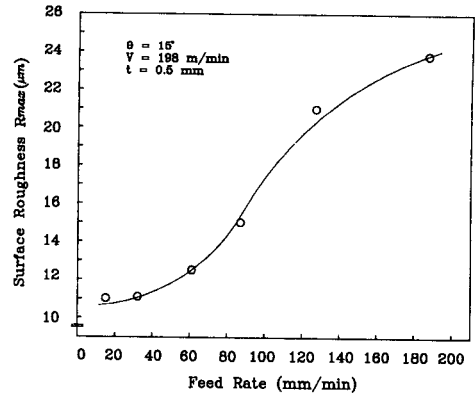


Fig. 10 Relationships between surface roughness and feed rate

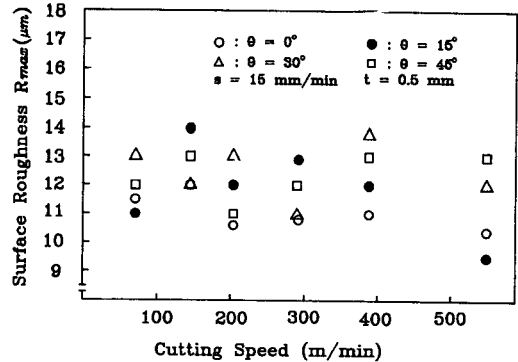


Fig. 11 Relationships between surface roughness and cutting speed

삭형태는 buckling 형태로 변화하게 된다. 이 경우 공작물의 표면거칠기는 buckling으로 인하여 손상을 입게 되며, 일반 강과 마찬가지로 공구의 이송흔적이 공작물 표면에 나타나게 되어 표면거칠기 값이 증가한다.

Fig. 11은 절삭속도와 표면거칠기와의 관계를 나타낸 것으로 절삭속도, 섬유의 적층방향과는 뚜렷한 상관관계를 나타내고 있지 않다. 이것은 Fig. 10에서 언급했던 것처럼 섬유의 절삭형태에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 12는 마멸실험으로부터 얻어진 일정량의 마멸이 진행된 팁을 이용하여 절삭실험을 행하고 공구마멸량과 표면거칠기와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공구마멸과 표면거칠기는 상관관계가 없음을 보여주고 있다. 이것은 탄소섬유 복합재료 절삭에 있어서 공구마멸은 여유면 마멸만이 발생하므로 인선이 항상 날카롭게 유

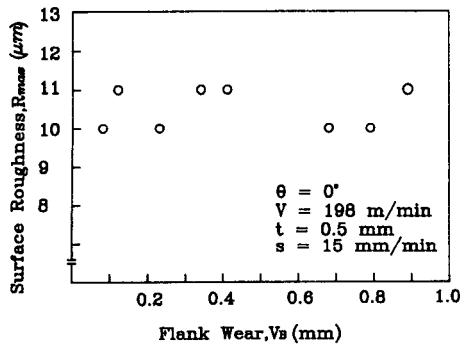


Fig. 12 Relationships between surface roughness and flank wear

지되어, 공구마멸이 절삭형태에 큰 영향을 주지 못하기 때문이다. 결론적으로 탄소섬유 복합재료의 가공표면거칠기는 절삭속도의 공구마멸에는 영향을 받지 않으며, 이송속도에 영향을 받는다.

4. 결 론

탄소섬유 에폭시 복합재료의 밀링 절삭실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 탄소섬유 에폭시 복합재료의 수직 밀링 절삭시 Taylor 지수는 이송속도 15mm/min, 절삭날 1개를 기준으로 $n=1.95$, $C=2800$ 이다.

(2) 공구마멸의 형태는 초기 상태인 인선 선단(nose)의 원형 마멸에서 마멸이 증가함에 따라 급격한 3각 형상 마멸의 형태를 보이며 크레이터 마멸과 칩핑(chipping)은 발생하지 않고 여유면과 경사면에 흑색 착색 영역이 나타난다.

(3) 가공면의 표면거칠기는 절삭속도 및 공구마멸에서 거의 영향을 받지 않고 이송속도의 증가에 따

라 증가한다. 또한 측정방향에 따라 큰 차이를 나타낸다.

(4) 탄소섬유 에폭시 복합재료의 수직 밀링 절삭시 추천 절삭속도는 60~100m/min이고 이송속도는 절삭날 1개 기준으로 15~60mm/min이다.

參 考 文 獻

- (1) Mallick, P.K., 1988, Fiber-Reinforced Composites, Marcel Dekker, Inc., pp. 3~4, 266.
- (2) Schwartz, M.M., 1984, Composite Materials Handbook, McGraw-Hill Book Company, Chapter 7.
- (3) Reugg, C. and Habermeir, J., 1980, "Composite Propeller Shafts Design and Optimization", Advances in Composite Materials", Proceedings of ICCM3, Vol. 2, pp. 1740~1755.
- (4) Lee, Dai Gil, Sin, Hyo-Chol and Suh, Nam P., 1985, "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool", Annals of the CIRP, Vol. 34(1).
- (5) 이대길, 김기수, 임창영, 박윤근, 1988, "SCARA 형 D.D. 로봇트 팔을 위한 복합재료 팔의 최적 Winding 각도 계산", 한국복합재료학회지, 제 1권, 제 1호, pp. 43~49.
- (6) 최수준, 이영문, 1988, "유리섬유 강화수지의 절삭 특성", 한국정밀기계학회지, 제 5권, 제 1호, pp. 78~83.
- (7) Lubin, G., 1982, Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold, pp. 625~629.
- (8) Koplev, A., 1980, Cutting of CFRP with Single Edge Tools", Proceedings of ECCM 3, Vol. 2, pp. 1597~1605.
- (9) Toshiaki Kaneeda, 1989, "CFRP Cutting Mechanism", NAMRC VIII, pp. 216~221.