

〈論 文〉

# 탄소섬유강화 플라스틱의 초음파 진동절삭에 관한 연구

김정두\* · 이은상\*\* · 최인휴\*\*

(1993년 3월 5일 접수)

## A Study on Ultrasonic Vibration Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics

Jeong-Du Kim, Eun-Sang Lee and In-Hyu Choi

**Key Words :** Carbon Fiber Reinforced Plastics (탄소섬유강화 플라스틱), Ultrasonic Vibration Cutting (초음파 진동절삭), Conventional Cutting (범용절삭), Critical Cutting Speed (임계절삭속도), Tool Dynamometer (공구동력계), Single Crystal Diamond Tool (단결정 다이아몬드공구), Scanning Electron Microscope (전자주사현미경)

### Abstract

The main applications of CFRP are sports, aerospace and general industrial uses including automobiles. As this application fields expands the opportunity of machining, but CFRP is difficult to cut because of delamination of the composites and the short tool life. In this paper, the machinability of multidirectional CFRP by means of ultrasonic vibration cutting was experimentally investigated. The experimental results have led to trial application of ultrasonic vibration cutting, which has been verified experimentally to be highly effective in view of cutting force and surface quality.

### 1. 서 론

탄소섬유강화 플라스틱(CFRP, carbon fiber reinforced plastics)은 일반 금속재료에 비하여 강도·강성·마멸저항력·피로강도의 우수성으로 구조물의 경량화가 요구되는 항공우주산업 등에 주로 이용되어 왔다. 최근에는 탄소섬유강화 플라스틱의 가격이 저렴해지면서 이 재료의 높은 비탄성과 감쇠특성을 이용한 스포츠 레저용품 및 자동차 등 산업용 기계부품에도 사용이 증가추세에 있고, 경량이면서 강성이 매우 높고 전자파 실드성을 갖는 새로운 형태의 탄소섬유강화 플라스틱이 개발되어 노트북 컴퓨터 하우징 등에 사용되고 있다. 1984년에는 그 수요가 2840톤에 이르는 등 매우 사용범위가

확대되고 있다.<sup>(1)</sup> 탄소섬유강화 플라스틱을 기계 및 구조물의 소재로 사용하면서 중량감소에 의한 에너지 절감 및 동작부의 위치결정정도를 높일 수 있으며, 재료의 고유진동수와 감쇠값이 매우 크므로 빠른 속도로 움직이는 항공기의 변속축(transmission shaft)이나 자동차의 드라이브축(drive shaft) 및 공작기계의 주축, 로봇팔 등에 사용이 증가되고 있는 추세이다.<sup>(2)</sup> 따라서, 이런 기계부품으로 사용되기 위해서 탄소섬유강화 플라스틱의 가공이 요구되어지며, 이런 복합재료의 절삭특성에 관한 연구가 필요하게 되었다. 그러나, 절삭가공시 급속한 공구마멸, 표면거칠기 악화, 크랙이나 층간 박리 등 문제점<sup>(3)</sup>이 발생하는 가공성이 어려운 난삭재이다. Koplev<sup>(4)</sup>는 한방향 탄소섬유강화 플라스틱을 가공시 층의 분리과 공구수명의 단축에 대해 언급하였고, 급속정지(quick-stop)장치와 새로운 칩수집방법에 대해 연구하였다. 탄소섬유강화

\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

\*\*한국과학기술원 정밀공학과 대학원

플라스틱 절삭가공에 있어서 공구마멸 및 가공면의 상태를 개선한다는 것은 범용 절삭조건에 한계가 있으므로 이를 개선하기 위한 특수가공법의 개발 필요성이 대두되고 있다. Skelton<sup>(5)</sup>은 선삭가공의 초음파 진동의 효과중에서 가공재료의 우수한 기계적성질 즉, 강성 등을 감소시키기 위해서 초음파진동이 사용된다고 언급하였다. Takeyama<sup>(6)</sup>는 복합재료인 유리섬유강화 플라스틱(GFRP)을 초음파진동을 통한 가공으로 절삭력과 표면정도에 좋은 현상을 보였다. 그러나, 단일방향의 유리섬유강화 플라스틱을 실험재료로 사용하였고, 유리섬유의 각도에 따른 고찰을 주로하였으며, 2차원 절삭(semi-orthogonal cutting)으로 실험하였다. 본 연구에서는 산업용으로 주로 사용되는 여러 방향성을 갖는 탄소섬유강화 플라스틱을 사용하였고, 2차원 절삭이 아닌 공작물의 원통면절삭으로 실험을 수행하였으며, 초음파 진동절삭에 의한 절삭력, 가공정도 등을 중심으로 범용절삭과 비교하여 탄소섬유강화 플라스틱가공법의 새로운 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 진동절삭이론<sup>(7)</sup>

진동절삭에서의 절삭기구는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 진동수  $f$ , 편진폭  $a$ , 진동주기를  $T$ 라고 할 때 원점 0에서부터 진동을 시작하는 바이트와 절삭속도  $V$ 는 이동하는 공작물에 대하여 시간에 따른 바이트의 변위곡선과 펄스형의 절삭력이 가해져서 2차원 절삭할 때의 절삭력 파형이 나타난다.

절삭공구의 변위  $y$ 는

$$y = a \sin \omega t \quad (\omega : \text{절삭공구의 각 진동수}) \quad (1)$$

이고, 절삭공구의 속도  $y'$ 는

$$y' = a\omega \cos \omega t \quad (2)$$

이다. A, D점에서 절삭공구와 공작물의 속도가 동일하므로 A점에서 시간  $t_1$ 일때 D점에서의 시간은  $(t_1 + T)$ 이므로 속도  $V$ 는 다음과 같다.

$$-V = a\omega \cos \omega t \quad (3)$$

절삭속도  $V$ 가  $a\omega$ 로 되어, 절삭공구 경사면이 공작물 및 칩과 접촉하여 진동절삭이 이루어질 수 있는 한계인 임계절삭속도는 다음과 같다.

$$V_c = a\omega = 2\pi af \quad (4)$$

절삭공구의 속도와 공작물의 속도가 동일한 A점

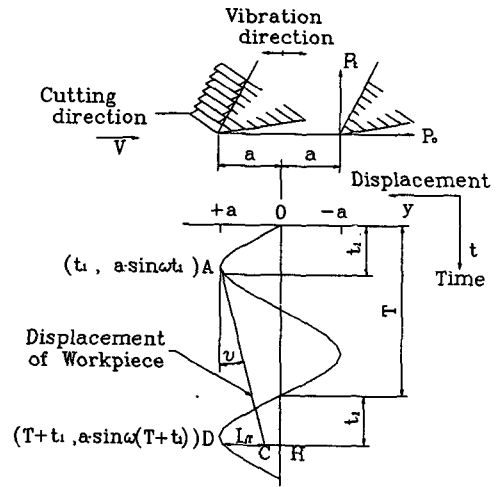


Fig. 1 Ultrasonic vibration cutting mechanism

에서부터 다시 절삭공구의 속도와 공작물의 속도가 동일한 D점까지가 절삭공구의 1주기이고 그 사이에 절삭속도  $V$ 로 이동한 거리  $CD$ 가 절삭공구 1주기동안 절삭한 길이이다. A점 이후의 공작물의 변위  $y$ 는 다음과 같다.

$$y = a \sin \omega t_1 - V(t - t_1) \quad (5)$$

D점에서의 시간은  $T + t_1$ 이고 A점 이후의 시간은  $(T + t_1) - t_1$ 이므로

$$CH = a \sin \omega t_1 - VT \quad (6)$$

$$CD = L_r = DH - CH = VT = V/f \quad (7)$$

따라서, 절삭공구의 1주기 동안 절삭방향에 절삭되는 길이  $L_r$ 는

$$L_r = V/f \quad (8)$$

로 표현된다.

## 3. 실험장치 및 방법

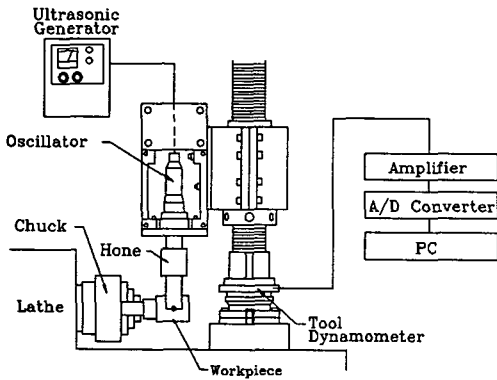
산업용으로 사용되는 탄소섬유강화 플라스틱은 대부분이 여러방향성을 갖는 제품<sup>(9)</sup>이 사용되고 있으며, 본 실험 또한 피삭재를 여러 방향성을 갖는 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)을 사용하였고, 물리적성질은 Table 1과 같다. Fig. 2는 초음파 절삭 실험을 수행하기 위해서 선반(TIPL-4)에 초음파 진동장치를 장착한 구성도를 나타낸 것이다. 절삭력 측정을 위해 공구동력계(strain gauge type)를 발전장치 밀면에 설치하여, 절삭시 절삭력신호를

**Table 1** The physical properties of carbon fiber reinforced plastics

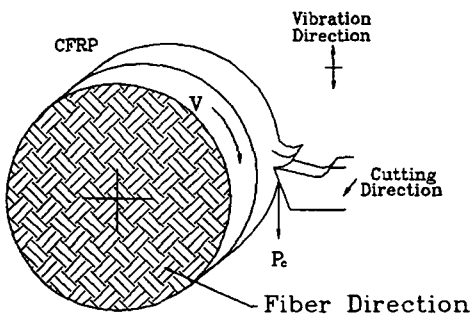
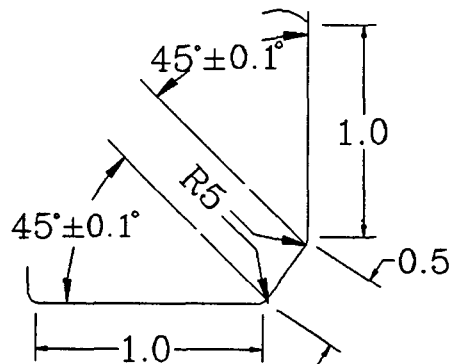
Tensile strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile modulus (ton/mm <sup>2</sup> )	Fiber content (Volume%)	Density
210	14.4	60	1.6

A/D Converter를 이용하여 컴퓨터로 처리하였다. 사용된 초음파 발전장치(경일초음파 W-1400)의 사양은 주파수가 19.5 kHz 이고, 진폭이 15 μm이다. 표면거칠기의 측정은 측정식표면조도계(Surf-test-420)를 사용하였으며, 각 실험후 3~4회 측정하여 평균값으로 나타냈다. Fig. 3은 탄소섬유강화 플라스틱을 초음파 진동절삭실험을 보여주는 그림으로, 시편은 탄소섬유강화 플라스틱판을 여러장 겹쳐서 사용하였다. Fig. 4는 본 실험에서 사용한 모든 공구의 형태를 나타낸 것으로, 0.5 mm 직선면으로 가공이 되게 설치하였다. 본 실험에서 우선 초음파 진동절삭이 탄소섬유강화 플라스틱의 가공에 효과

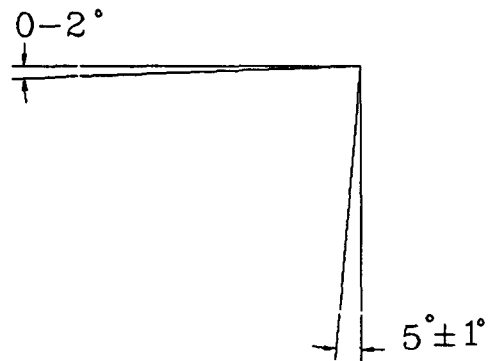
가 있는지 범용절삭실험과 비교하여 수행한 후 초음파 진동절삭의 적용 타당성을 확인하고, 각 공구 재질에 따른 실험을 수행하여 탄소섬유강화 플라스틱 가공의 적응성을 고찰하였다. 공구의 재질은 초경·단결정·다결정 다이아몬드공구를 사용하였으며, 가공 후 각 공구의 마멸이 거의 없어서 같은 공구로 계속 실험을 수행하였다. 초음파 진동절삭은 절삭속도에 따른 영향이 매우 중요함에 따라 절삭속도를 임계절삭속도 전후로 하여 실험을 수행하였으며, 이송량과 절삭깊이에 따른 가공현상을 분석 고려하였다. Table 2는 초음파 절삭실험한 각 조건을 나타낸 것이다. 탄소섬유강화 플라스틱의



**Fig. 2** Experimental apparatus of ultrasonic vibration cutting



**Fig. 3** Ultrasonic vibration cutting of CFRP



**Fig. 4** Geometry of tool

Table 2 Experimental cutting conditions

Tool(material)	Tungsten carbide Poly crystal diamond Single crystal diamond
Workpiece	Carbon fiber reinforced plastics
Cutting speed	19~165 m/min
Feedrate	0.1~0.4 mm/rev
Depth of cut	0.05~0.3 mm
Ultrasonic frequency	19.5 kHz
Amplitude	15 $\mu\text{m}$
Tool dynamometer	Strain gauge type Sambo Elec. CO.
Surface roughness tester	Mitutoyo surfstest — 420 $\lambda_c/L=0.8$

가공정도와 표면 분석을 위하여 표면조도계와 전자 주사현미경(scanning electron microscope)을 사용하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 초음파 진동절삭의 영향

Fig. 5는 초경공구(K-10)로 탄소섬유강화 플라스틱을 절삭속도 변화에 따라 범용과 초음파 진동절삭을 수행하여 표면거칠기를 비교하여 나타낸 것이

다. 이송량은 0.1 mm/rev로 고정하고, 절삭깊이도 0.2 mm로 일정하게 유지하면서 실험을 하였다. 범용이나 초음파 진동절삭이 절삭속도 증가에 따라 표면거칠기가 증가되는 동일한 경향을 나타낸다. 100 m/min 이하 속도에서는 초음파 진동절삭의 표면거칠기가 범용절삭시보다 양호하게 나타남으로 탄소섬유강화 플라스틱 가공표면에 좋은 효과가 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 다결정 다이아몬드공구로 탄소섬유강화 플라스틱을 가공한 상태를 표면거칠기로 나타낸 그림이다. 절삭속도가 약 100 m/

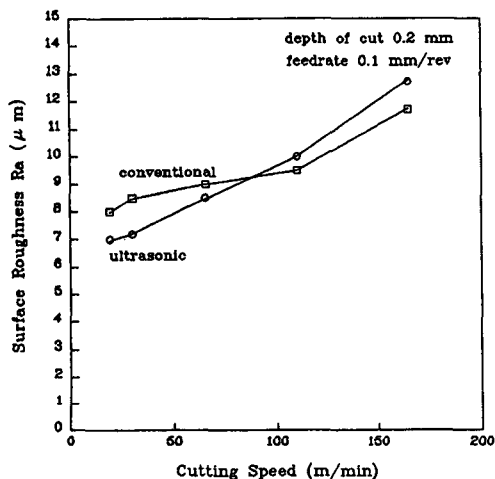


Fig. 5 Surface roughness with ultrasonic vibration and conventional cutting by tungsten carbide

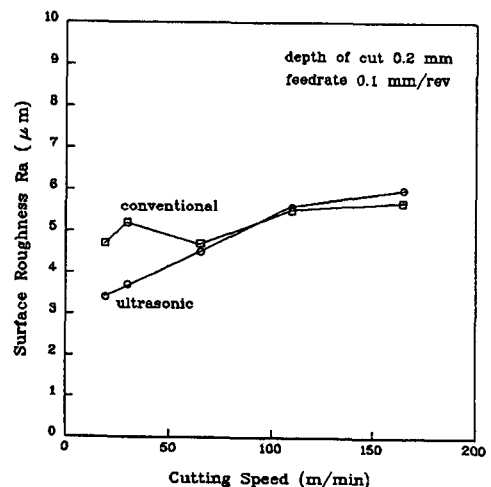


Fig. 6 Surface roughness with ultrasonic vibration and conventional cutting by P.C.D.

min 이하에서는 초경공구에서 나타내는 경향과 유사한 표면거칠기를 갖으므로, 초음파 진동절삭이 매우 우수함을 나타낸다. 이 현상은 초음파 발진장치에서 정현파진동을 강제로 작동시켜서 탄소섬유강화 플라스틱 가공시 공구와 공작물 사이에 순간적인 분리 및 재접촉으로 인한 충격력작용으로 가공이 됨으로 탄소섬유가 절삭가공시 크랙이나 층간 박리 현상이 감소함으로 가공면이 양호하게 된다고 사료된다. Fig. 7은 단결정 다이아몬드공구로 탄소섬유강화 플라스틱을 범용 및 초음파 진동절삭을 수행한 표면거칠기를 나타낸 그림으로 초경, 다결정 다이아몬드공구와 유사한 경향을 나타낸다. 범용 절삭시는 단결정 다이아몬드공구 재료의 특성에 의해서 표면거칠기의 변화가 절삭속도에 크게 영향을 받지 않음을 볼수 있다. 각 그림을 통해서 보면 초음파 진동절삭이 절삭속도 100 m/min 이하 정도에서 범용절삭보다 우수한 표면거칠기를 보였다. 그러나, 절삭속도 100 m/min 이상에서는 범용절삭이 보다 좋은 표면거칠기를 나타냈다. 이 현상은 공작물의 절삭속도가 초음파 진동절삭의 임계절삭속도  $V_c = 2\pi af$  ( $a$ : 공구의 진폭,  $f$ : 공구의 주파수) 보다 크면, 공구와 공작물 분리 및 재접촉 현상이 발생되지 않아서 초음파 진동의 효과가 상쇄된다. 초음파 발진장치의 사양( $a=15\mu\text{m}$ ,  $f=19.5\text{kHz}$ )에 따른 임계절삭속도는 110 m/min 로서, 실험결과에서 초음파 진동효과가 상쇄되는 약 100 m/min에 근사하다. 절삭속도가 증가하게 되면 절

삭공구의 1주기동안 절삭방향에 절삭되는 길이  $L_T = V/f$ 가 증가하게 되고, 따라서 진동절삭에 대한 표면거칠기의 영향은 감소하게 된다. 1주기당 절삭 길이가 짧을수록 탄소섬유에 얽은 부위에 파단 및 분리를 발생시킬 경우가 적다고 할 수 있다. 따라서, 절삭속도는 작게하고 초음파 주파수를 크게하는 것이 효과적이다. 그러나, 초음파 발진장치의 주파수는 19.5 kHz로 일정함으로 절삭속도를 줄이는 것이 탄소섬유강화 플라스틱의 표면 향상에 좋은 효과를 나타낸다. Fig. 8은 초음파 진동절삭시

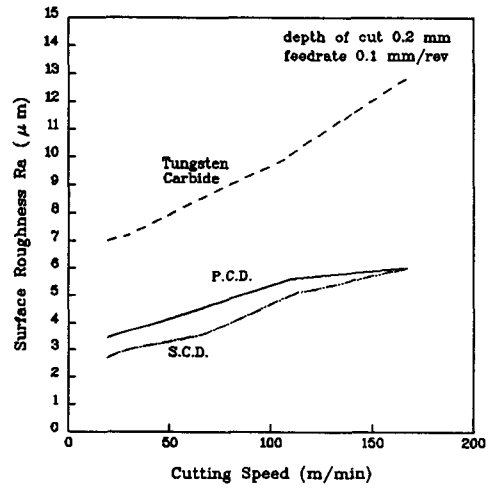


Fig. 8 Comparison of surface roughness according to tool material

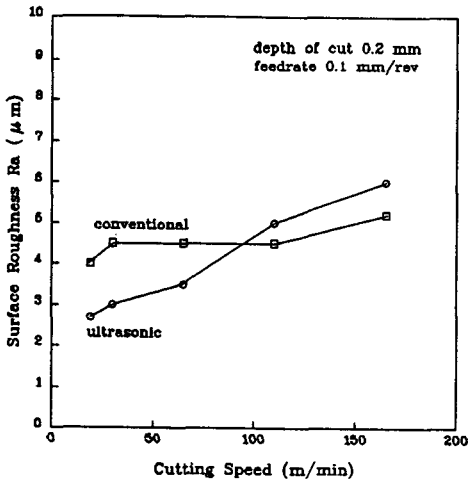


Fig. 7 Surface roughness with ultrasonic vibration and conventional cutting by S.C.D.

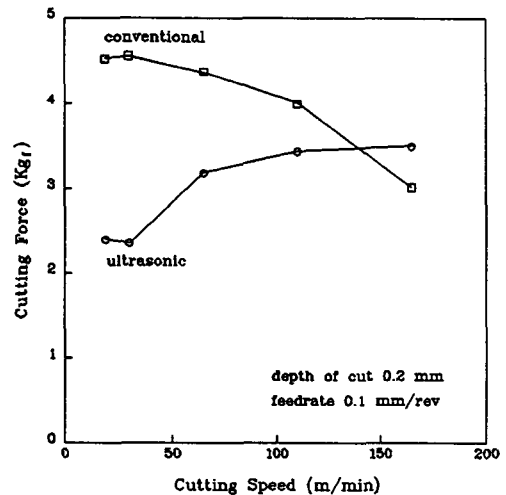


Fig. 9 Relation of cutting force and cutting speed by tungsten carbide

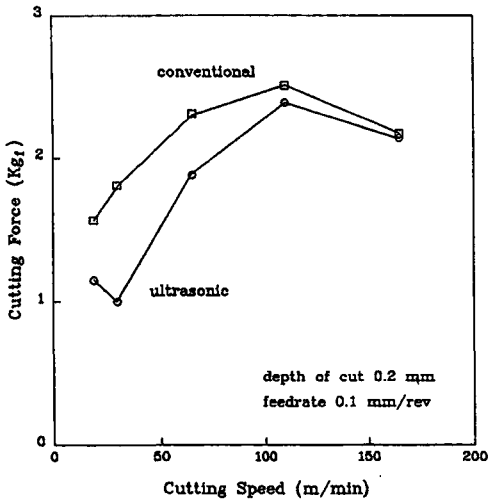


Fig. 10 Relation of cutting force and cutting speed by P.C.D.

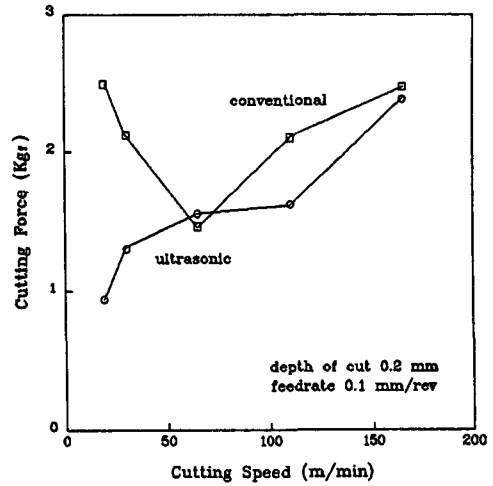


Fig. 11 Relation of cutting force and cutting speed by S.C.D.

초경·다결정·단결정 다이아몬드공구의 절삭속도에 따른 탄소섬유강화 플라스틱 가공상태를 비교한 것으로써 초경공구보다는 다결정 다이아몬드가 양호하고, 다결정 다이아몬드공구보다는 단결정 다이아몬드공구가 우수함을 볼 수 있다. 따라서, 결론적으로 탄소섬유강화 플라스틱 가공에 따른 공구재질로는 단결정 다이아몬드공구가 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 9~11은 절삭속도에 따른 범용절삭과 초음파 진동절삭시 주절삭력의 추이를 나타낸 그림이다. 탄소섬유가 절삭되면서 공구에 미치는 영향은 주절삭방향에 크게 작용되므로 주절삭력을 선정 평가하였다. Fig. 9는 사용공구 재질을 초경합금으로 절삭력 실험결과를 나타낸 것으로 절삭속도 165 m/min을 제외한 모든 절삭속도에는 초음파 진동절삭시 절삭력이 적게 작용됨을 알 수 있다. 19 m/min 절삭속도는 범용절삭시 4.5 Kgf인데 비하여 초음파 진동절삭시 2.4 Kgf인 약 반정도의 절삭력을 나타낸다. 절삭속도가 증가될수록 범용과 초음파 진동절삭시 절삭력이 서로 근접하는 현상을 나타낸다. 이 현상은 다결정 다이아몬드(Fig. 10)와 단결정 다이아몬드(Fig. 11)공구로 진동절삭한 절삭력 분석결과에서도 같은 효과를 나타낸다. 절삭속도가 증가하여 임계절삭속도에 도달하게 되면, 절삭공구의 인선이 항상 공작물 및 칩과 접촉하여 범용절삭기구와 같은 상태로 절삭이 진행되어 진동절삭기구가 소멸되게 된다. Fig. 12는 각 공구재질에 따른 절삭력의 변화를 나타낸 그림으로 표면거

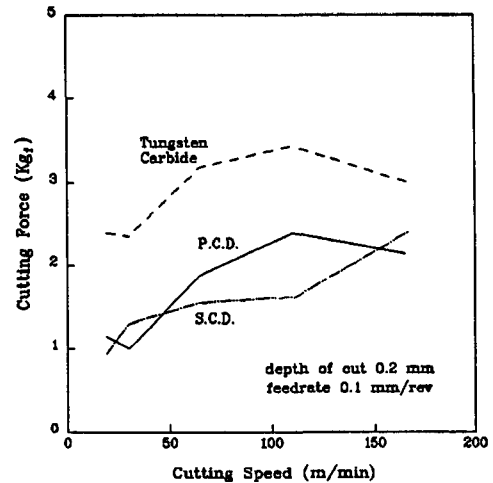


Fig. 12 Comparison of cutting force according to tool material

칠기 분석현상과 유사하게 초경공구와 다결정 다이아몬드공구보다 단결정 다이아몬드공구가 초음파 진동절삭에서 우수한 효과를 나타냄을 보이고 있다. 주절삭력이 적게 작용되는 현상은 탄소섬유의 절삭가공에 적합하다는 것을 나타낸다고 볼 수 있으며, 또한 표면거칠기도 양호한 현상을 보이고 있다.

#### 4.2 이송량 및 절삭깊이에 따른 영향

Fig. 13은 다결정 다이아몬드공구로 절삭속도(30

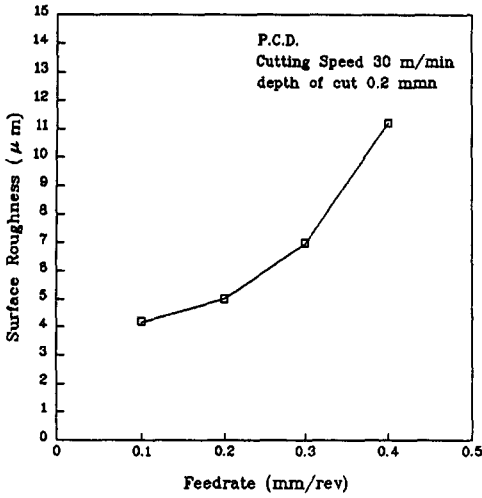


Fig. 13 Relation of surface roughness and feedrate

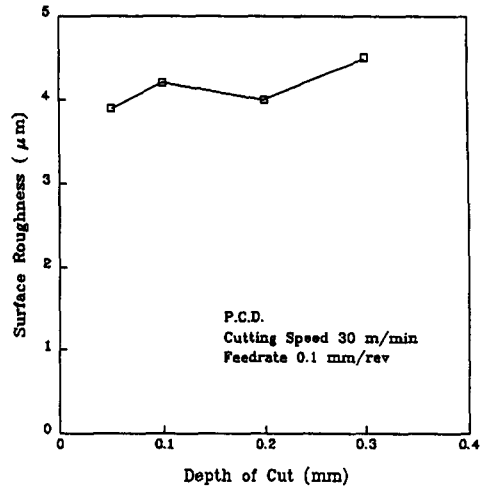


Fig. 15 Relation of surface roughness and depth of cut

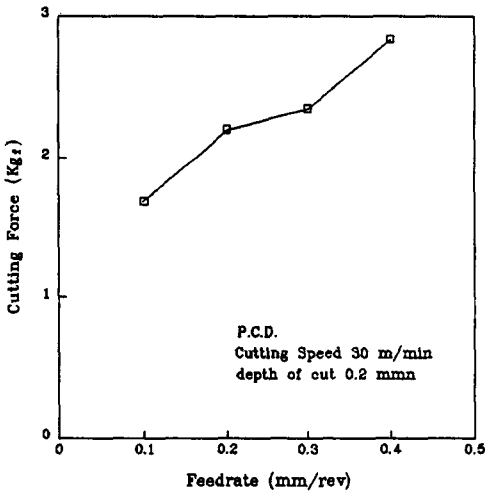


Fig. 14 Relation of cutting force and feedrate

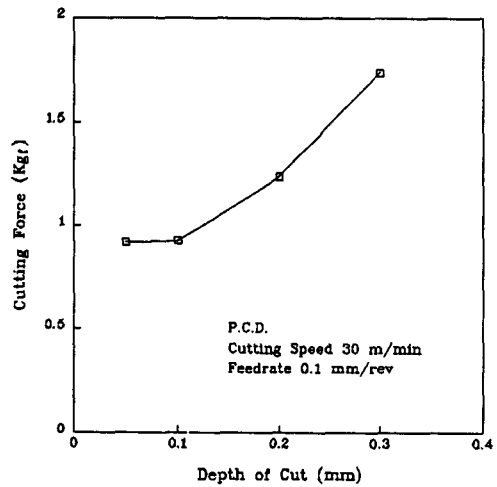


Fig. 16 Relation of cutting force and depth of cut

m/min)와 절삭깊이(0.2 mm)를 일정하게 유지시키고, 초음파 진동에 의해서 탄소섬유강화 플라스틱을 가공한 표면거칠기를 나타낸 그림으로, 이송량이 증가될수록 표면거칠기에 나쁜영향을 주는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 14는 이송량과 절삭력의 관계를 나타낸 것으로 표면거칠기의 현상과 유사하게 이송량이 증가될수록 절삭력이 증가된다. 따라서, 이송량의 증가는 탄소섬유강화 플라스틱의 표면에 좋지 않은 영향을 미침으로 좋은 표면을 위해서는 이송량의 감소가 요구된다. Fig. 15는 절삭깊이에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 그림으로

절삭깊이가 증가하여도 표면거칠기에는 큰변화가 없음이 관찰되었다. Fig. 16은 절삭깊이에 따른 절삭력의 변화를 나타낸 그림으로 절삭깊이가 증가됨에 따라 범용절삭과 유사하게 절삭력이 증가함을 관찰할 수 있었다. 그러나, 이 절삭력의 증가에 초음파 진동절삭시 탄소섬유강화 플라스틱 표면에 좋지않은 영향을 주게되어야 하나 Fig. 14에서 관찰된 것처럼 표면거칠기에는 거의 변화가 없었다. 이 현상은 범용절삭과 매우 다른현상으로써 초음파 진동에 의한 공구와 공작물의 분리 및 재접촉에 따른 표면의 다듬질현상이 절삭속도와 이송량에만 크게

좌우됨을 알 수 있다.

#### 4.3 가공표면의 전자주사현미경 분석

탄소섬유강화 플라스틱은 절삭가공 후 다듬질면 뿐만 아니라 그 절삭된 상태도 중요하다 하겠다. Fig. 17은 공구재질에 따라 범용 및 초음파 진동절삭을 수행한 표면을 전자주사현미경으로 관찰한 것

이다. (a)는 단결정 다이아몬드공구에 의한 범용 절삭 가공면을 1200배율로 관찰한 것으로써, 어느 정도의 가공면이 양호하나 탄소섬유가 표면에 흩어져 있거나 돌출된 상태(A부분)를 관찰할 수 있었고, (b)는 초음파 진동절삭시의 표면상태로 탄소섬유가 깨끗하게 절단되어 탄소섬유가 가공표면에 돌출됨이 없는 상태를 관찰할 수 있다. 이 현상은



(a) Conventional(S.C.D.)



(d) Ultrasonic(P.C.D.)



(b) Ultrasonic(S.C.D.)



(e) Conventional(Tungsten Carbide)



(c) Conventional(P.C.D.)



(f) Ultrasonic(Tungsten Carbide)

Fig. 17 SEM photographs of conventional and ultrasonic vibration cutting surface by tool materials

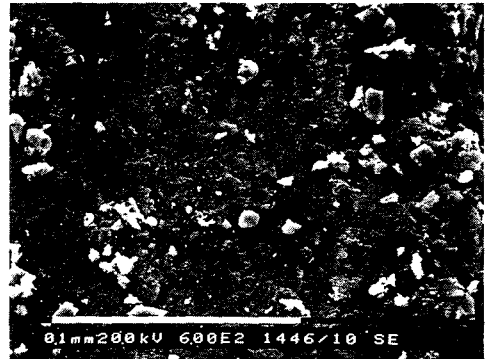


다결정 다이아몬드(c), (d)와 초경공구(e), (f)에서도 같은 현상을 나타냈다. 초음파 진동절삭이 탄소섬유강화 플라스틱의 표면다듬질에 범용절삭보다 우수한 현상을 나타내는 결과이다. 초경공구로 진동절삭으로 가공한 표면(f)도 탄소섬유의 돌출이

발견되지 않지만 버어(burr)가 생성되어 탄소섬유강화 플라스틱의 가공에는 초경공구가 적당하지 않다 하겠다. 단결정·다결정 다이아몬드공구에서는 이 버어가 생기는 현상이 발생되지 않는다. 따라서, 탄소섬유강화 플라스틱 가공시 초음파 진동절



(a) 19 m/min



(a) 0.1 mm/rev



(b) 65 m/min



(b) 0.3 mm/rev



(c) 165 m/min



(c) 0.4 mm/rev

Feedrate 0.1 mm/rev Depth of cut 0.2 mm

Fig. 18 SEM photographs of uluasonic vibration cutting surface according to cutting speed

Cutting speed 30 m/min Depth of cut 0.2 mm

Fig. 19 SEM photographs of ultrasonic vibration cutting surface according to feedrate

삭으로 다이아몬드공구를 사용하는 것이 절삭성을 개선하는데 매우 유효하다. Fig. 18은 다결정 다이아몬드공구로 초음파 절삭시 절삭속도에 따른 가공표면을 전자주사현미경 600배율로 관찰한 사진으로서 저속에서는 가공표면의 상태가 양호하게 나타났으나, (b) 65 m/min 나 (c) 165 m/min 에서 탄소섬유가 잘 절단되지 않고 파괴되어 가공표면에 돌출되어있는 현상(B부분)을 관찰할 수 있다. 따라서, 저속일수록 초음파 진동절삭의 효과가 양호하게 나타나 탄소섬유강화 플라스틱 표면을 좋게 한다고 분석할 수 있으며, 주절삭력 또한 적게 작용되므로서 탄소섬유 절삭에 유효하다. Fig. 19는 다결정 다이아몬드공구로 이송량의 변화에 따른 표면을 분석한 사진이다. 이송량 (a) 0.1 mm/rev 에서 가공면에 탄소섬유의 돌출을 관찰할 수 없었으나, 이송량 (c) 0.4 mm/rev 에서는 탄소섬유의 돌출(C부분)을 가공표면에서 관찰할 수 있었다. 따라서, 이송량의 증가에 따라 탄소섬유강화 플라스틱 표면에 좋지않은 영향을 줌을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄소섬유강화 플라스틱을 초음파 진동절삭시 임계절삭속도 이하에서는 범용절삭보다 양호한 가공표면을 얻을 수 있고, 주절삭력도 적게 작용된다.
- (2) 탄소섬유강화 플라스틱의 가공공구로써는 초음파 진동절삭뿐만 아니라 범용절삭에서도 단결정 다이아몬드공구가 좋은 효과를 나타낸다.
- (3) 초음파 진동절삭시 탄소섬유강화 플라스틱 표면생성의 효과는 절삭깊이에 무관하고, 절삭속도

와 이송량에 매우 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Terumichi Ono., 1985, "The Future Prospect of CFRP for Industrial Uses," Trans. JSCM, Vol. 11, No. 2, pp. 35~40.
- (2) 김기수, 이대길, 박윤근, 남궁석, 1991, "선삭 가공에 있어서 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭 특성," 한국정밀공학회지, 제8권, 제1호, pp. 63~73.
- (3) Lubin, G., 1982, Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold, pp. 625~629.
- (4) Koplev, A. Lystrup, A. and Vorm, T., 1983, "The Cutting Process, Chips, and Cutting Forces in machining CFRP, Composites," Vol. 14, No. 4, pp. 371~376
- (5) Skelton, R. C., 1969, "Effect of Ultrasonic Vibration on the Turning Process," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 9, pp. 363~374
- (6) Takeyama, H. and Lijima, N., 1988, "Machinability of GFRP and Application of Ultrasonic Machining," Annals of CIRP, Vol. 37, pp. 93~96
- (7) 김정두, 박윤근, 1990, "초음파 진동을 이용한 정밀절삭에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제4호, pp. 818~829.
- (8) Shikhanter, L. Cina, B. and Eldror, I., 1991, "Fractography of Multidirectional CFRP Composites Tested Staticly," Composites, Vol. 22, pp. 437~444.