

< 논 문 >

유리섬유강화 플라스틱의 공구재질 및 형상에 따른 절삭특성에 관한 연구

안상욱* · 노상래**

(1995년 7월 29일 접수)

A Study on the Cutting Characteristics of Glass Fiber Reinforced Plastics by Tool Materials and Type

Sang-Ook An and Sang-Lai Noh

Key Words : Glass Fiber Reinforced Plastics(유리섬유강화 플라스틱), Single Crystal Diamond Tool(단결정 천연다이아몬드 공구), Poly Crystal Diamond(다결정 소결다이아몬드), Cubic Boron Nitride(C.B.N. : 입방정 질화붕소), Tool Dynamometer(공구동력계), Scanning Electron Microscope(주사전자현미경), PSD(Power Spectrum Density)

Abstract

In the use of glass fiber reinforced plastics it is often necessary to cutting the components, but the cutting GFRP is often made difficult by the delamination of composites and the short tool life. In this paper, the machinability of GFRP by mean of tool materials and type was experimentally investigated. By proper selection of cutting tool material and type excellent machining of this workpiece is achieved. The surface quality relate closely with the feed rate and cutting tools.

1. 서 론

최근에 첨단산업의 발달로 인한 복합재료의 사용이 급증하고 있으며, 특히 유리섬유강화 플라스틱(GFRP, glass fiber reinforced plastics)의 용도가 다양해서 항공우주산업 등에 널리 사용되고 있다. 유리섬유강화 플라스틱의 특성은 일반 금속재료보다 비강도, 진기진열성, 높은 감쇠특성 및 내충격성⁽¹⁾을 갖고 있으나 절삭시 유리섬유에 의한 공구의 마멸을 유발⁽²⁾하여 일반적인 공구로 절삭가공이 용이하지 않다. 유리섬유강화 플라스틱을 기계부품에 적용하려면 다른 부품과 결합이 필요하며, 이 경우

에 유리섬유강화 플라스틱의 드릴링, 밀링 및 절삭 등의 가공이 필요하다. 따라서, 이런 복합재료의 절삭특성에 관한 연구가 필요하게 되었다. 그러나, 절삭가공시 급속한 공구마멸, 표면거칠기 악화, 크랙이나 층간박리 등 문제점⁽³⁾이 발생하는 가공성이 어려운 난삭재이다. 지금까지의 연구를 살펴보면, 유리섬유강화 플라스틱을 절삭할 경우 유리섬유의 각도와 마멸현상을 고찰한 연구가 있으며,⁽⁴⁾ 유리섬유강화 플라스틱, 케블러섬유강화 플라스틱을 마찰면으로 적용하기 위한 표면의 상태와 공구마멸을 주사전자현미경으로 분석한 연구가 있다.⁽²⁾ 유리섬유강화 플라스틱(GFRP)을 2차원 절삭형태에 의한 초음파 진동 절삭을 수행하고, 유리섬유 각도에 따른 여러가지 가공특성을 분석하였다.⁽⁵⁾

또한, 유리섬유강화 플라스틱의 가공표면 개선을

*회원, 인하대학교 기계공학과

**회원, 대우공업전문대학 금형설계과

위한 유리섬유의 각도, 표면거칠기, 섬유 의 파단형태 등을 분석한 연구가 진행되어 있다.⁽⁴⁾ 복합재료 중 탄소섬유강화 플라스틱의 절삭특성 및 마멸에 관한 연구가 진행되어 있으며,⁽⁶⁾ 2차원 절삭장치에 의한 탄소섬유강화 플라스틱 절삭시 표면상태, 절삭력 및 절삭기구에 대한 연구가 수행되어 있다.⁽⁷⁾

유리섬유강화 플라스틱 등 및 탄소섬유강화 플라스틱의 복합재료에서는 공구의 마멸 및 섬유의 적층에 따른 가공상태를 주로 한 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 실제의 절삭가공에 있어서는 공구마멸이 적고, 가공면의 상태를 보다 개선하기 위한 공구의 선정 및 그 특성에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 수요가 급증하고 있는 난삭재인 유리섬유강화 플라스틱의 공구재질 및 공구인선 형태에 따른 가공특성을 고찰 및 분석함으로써 최적의 사용공구를 선정하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 유리섬유강화 플라스틱은 원통형태로 유리섬유의 각도는 45° 경사진 상태로 구성 제작하였다. 공작물의 물리적인 성질은 Table 1과 같다. Fig. 1은 실험에서 적용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로서 CNC 선반을 사용하여 가공을 수행하였으며, 원통형태의 공작물을 척에 장착하여 원통절삭 실험을 하였다. 절삭가공시 절삭력측정을 위하여 공구동력계(kistler, 9257B)를 장착하고 A/D Converter를 이용하여 컴퓨터로 신호를 받아서 절삭력을 측정하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 공구형태를 나타낸 것으로서, 공구의 인선형태는 Philips Diamond Tools

카탈로그를 기준으로 하여 선정 제작하였으며, 0.5 (mm)의 인선반경을 갖는 R-type의 공구와 1.5 (mm)의 직선의 인선을 갖는 S-type의 공구를 사용하였다.

각각 공구인선에 따른 형태에 단결정 천연다이아몬드, 다결정 소결다이아몬드, 입방정 질화붕소(C.B.N.) 재질의 공구를 제작하여 유리섬유강화 플라스틱을 가공하는 적응성 실험을 수행하였다. 특히, 단결정 천연다이아몬드 공구는 (1, 1, 1)면에 평행하게 연마를 하여 이면을 공구경사면으로 적용되도록 하였다. Table 2는 가공한 실험조건 및 장치를 나타내고 있다. 유리섬유강화 플라스틱 절삭시 여러 참고문헌이 있었으나 공구재질 및 공구인선 형상을 적용한 분석자료가 없어서, 공구에 따른 경향 비교 및 고찰을 위해서 CNC 선반에 적용가능한 범위에서 절삭속도, 이송량 및 절삭깊이의 조건 등을 변화시키면서 실험을 수행한 후 절삭특성 비교

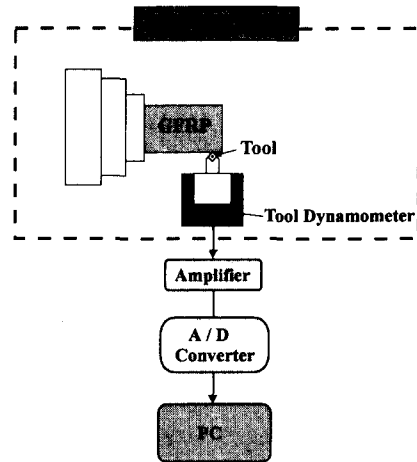


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Physical properties of GFRP

Specific weight(g/cm ³)	2.5
Tensile strength(N/mm ²)	1800
Young's modulus(N/mm ²)	74000
Thermal coefficient of expansion (m/mK)	5
Thermal conductivity(°C)	0.8
Glass Fiber	E-glass

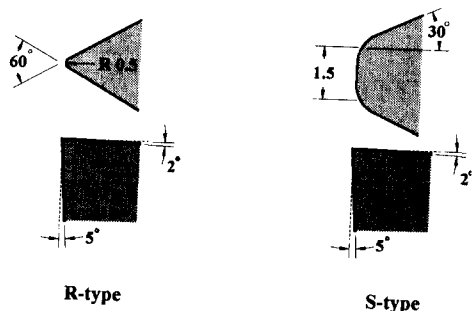


Fig. 2 Geometry of tools R-type S-type

Table 2 Experimental cutting conditions

Tool(material)	Cubic boron nitride. Poly crystal diamond. single Srrystal diamond.
(type)	Round type Straight type
Workpiece	Glass fiber reinforced plastics
Cutting speed	100~300 m/min
Feedrate	0.01~0.3 mm/rev
Depth of cut	0.1~1 mm
Tool dynamometer	Kistler 3-component dynamometer type. 9257B
Surface roughness tester	Rank taylor hobson surtronic 3*

고찰을 위한 절삭조건은 선정하였다. 가공후 표면 상태를 파악하기 위해서 표면거칠기 측정기를 사용하였으며, 가공면의 표면을 5번 측정하여 평균을 취하였다. 또한, 유리섬유강화 플라스틱의 가공정도와 표면분석을 위하여 주사전자현미경(scanning electron microscope)을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면거칠기의 분석

Fig. 3은 이송량을 변화시키면서 절삭공구에 따라 표면거칠기의 변화를 측정한 것을 나타낸 것으로서, 공구재질은 단결정 천연다이아몬드, 다결정 소결다이아몬드 및 입방정 질화붕소(C.B.N.)의 재질을 사용하였으며, 공구의 형상은 직선형태의 인선과 반경을 갖는 형태의 인선의 공구를 사용하였다. 전체적으로는 이송량의 감소에 따라 모든 공구의 표면거칠기가 향상됨을 관찰할 수 있다. 따라서, 유리섬유강화 플라스틱의 표면거칠기 향상을 위해서는 이송량의 변화가 매우 중요한 역할을 함을 알 수 있다. 공구의 재질에 따른 특성을 살펴보면 천연다이아몬드 재질의 공구를 사용하는 것이 소결다이아몬드 및 입방정 질화붕소 재질의 공구를 사용하는 것보다 우수한 표면거칠기를 생성됨을 알 수 있다. 공구의 재질뿐만 아니라 공구의 형태에

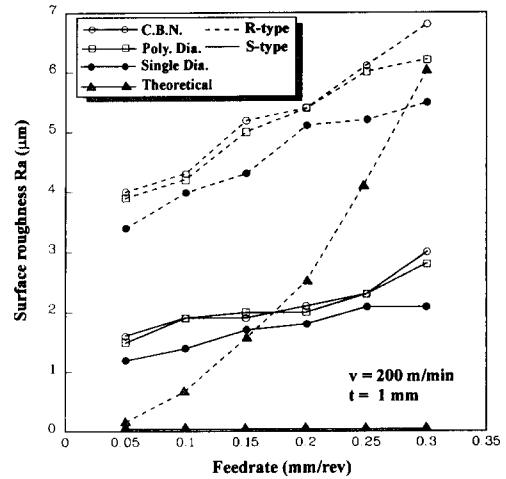


Fig. 3 Relationship between surface roughness and feedrate according to tool materials

따라 보다 크게 표면거칠기의 변화를 나타냄을 볼 수 있다. 여기서, 직선형태의 공구인선을 갖는 공구가 보다 양호한 표면을 생성함을 알 수 있으며, 공구의 재질보다 공구의 형태에 따라 표면거칠기가 크게 향상됨으로서 표면거칠기의 향상을 좌우하는 보다 큰 인자는 공구의 인선형태임을 알 수 있다. 이론적인 표면거칠기(Ra)는 다음과 같으며, 이송량의 감소에 따라서 표면거칠기가 감소하며 공구의 인선반경이 클수록 이론적인 표면거칠기가 양호하게 된다.

$$Ra = 0.0321f^2/r \quad (1)$$

여기서,

Ra : 평균 표면거칠기

f : 이송량

r : 공구의 인선반경

공구인선 반경이 0.5인 R-type 공구가 이송량이 0.3 mm/rev인 경우에는 이론적인 계산값이 Ra 5.8 μm 으로 실험값과 거의 같으나, 이송량이 적은 경우와 S-type 공구의 경우에는 실험값이 이론적인 표면거칠기값 보다 크게 나타나고 있다. 이론적인 표면거칠기는 단지 이송량과 공구의 인선 반경에만 의존하여 결정되는데, 실험적으로는 공작기계의 진동 및 공작물에 특성인 연질재료인 플라스틱과 경질재료인 유리섬유의 결합, 절삭공구의 설치조건 등 다른 제반요인이 있어서 이론적인 표면거칠기값 보다 크게 나타나게 된다고 사료된다. 가장 이상적

인 절삭상태라면 공구의 형상이 공작물에 그대로 전사되게 되나, 절삭시 공작기계 및 공구 등 외부 조건의 영향에 의해서 전사되는 것은 거의 불가능하다고 판단되어진다. 이론적인 표면거칠기의 경향과 같이 유리섬유강화 플라스틱을 절삭시 이송량이 작을수록 인선 반경이 클수록 표면거칠기가 향상되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 절삭깊이에 따른 표면거칠기 변화를 나타낸 그림으로서 각 공구의 재질 및 공구인선에 따라 표면거칠기 변화가 크게 나타나고 있으나, 절삭 깊이에 따라서는 크게 변화가 없는 경향을 나타내

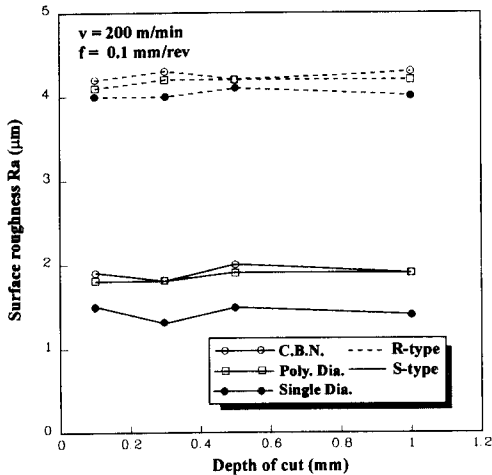


Fig. 4 Relationship between surface roughness and depth of cut according to tool materials

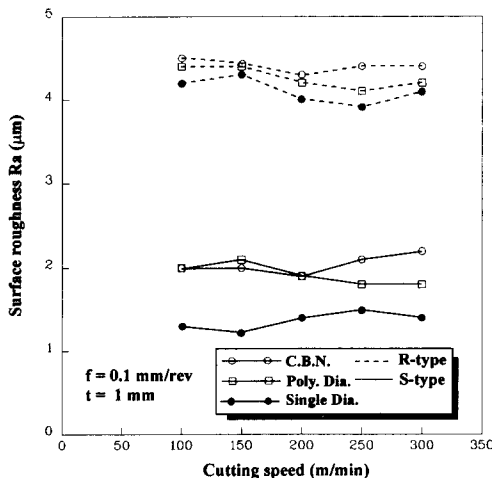


Fig. 5 Relationship between surface roughness and cutting speed according to tool materials

고 있다. 플라스틱은 절삭성이 양호하기 때문에 절삭깊이에 크게 영향을 받지 않으며, 단지 유리섬유만이 절삭성에 크게 영향을 미치게 되기 때문에 공구의 재질 및 형상에 따라서 크게 영향을 받게 되고, 절삭깊이의 변화에 따라 표면거칠기에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 여기서, 단결정 천연 연다이아몬드의 직선형 인선을 갖는 공구를 사용하여 절삭하는 것이 유리섬유강화 플라스틱의 가장 우수한 표면거칠기를 생성함을 알 수 있다.

Fig. 5는 이송량을 0.1 mm/rev, 절삭깊이를 1 mm로 고정하고 절삭속도의 변화에 따른 각공구의 표면거칠기 변화를 나타낸 것이다. 각 공구에 따른 표면거칠기의 경향은 뚜렷하게 나타나지만, 절삭속도에 따른 표면거칠기의 변화의 경향은 없음을 관찰할 수 있다. 따라서, 유리섬유강화 플라스틱의 절삭가공시 가공면의 표면거칠기는 절삭깊이와 절삭속도의 변화에 따른 영향은 무관하며, 이송량과 공구의 재질 및 형상을 조절하는 것이 표면거칠기 향상을 위해서 크게 작용된다.

3.2 절삭력의 분석

Fig. 6은 이송량의 변화에 따른 주절삭력의 변화를 나타낸 것으로서 이송량의 감소에 따라 절삭력이 적게 작용됨을 관찰할 수 있다. 단결정 천연다이아몬드가 다결정 소결다이아몬드 및 입방정 질화붕소보다 가장 적은 절삭력을 나타내고 있다. 이 원인은 단결정 천연다이아몬드가 탄소원자에 의한

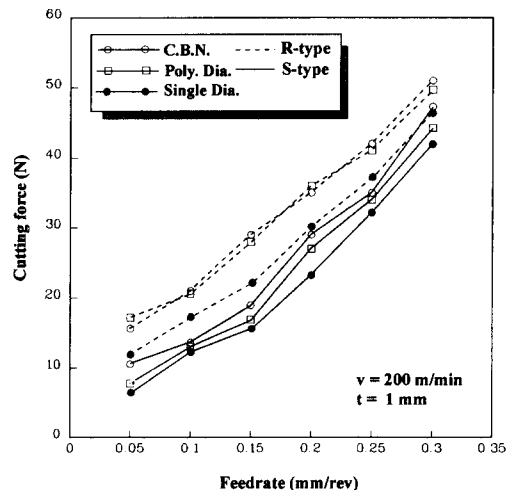


Fig. 6 Relationship between cutting force and feedrate according to tool materials

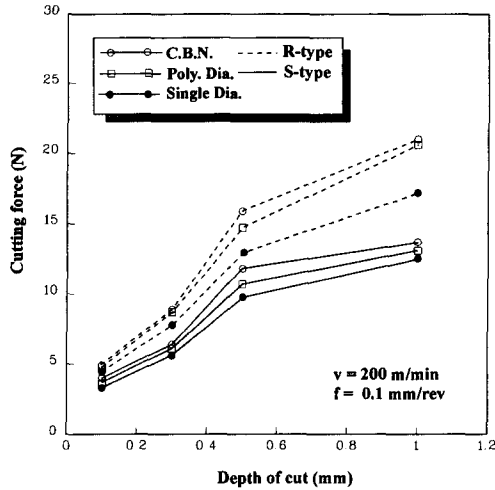


Fig. 7 Relationship between cutting force and depth of cut according to tool materials

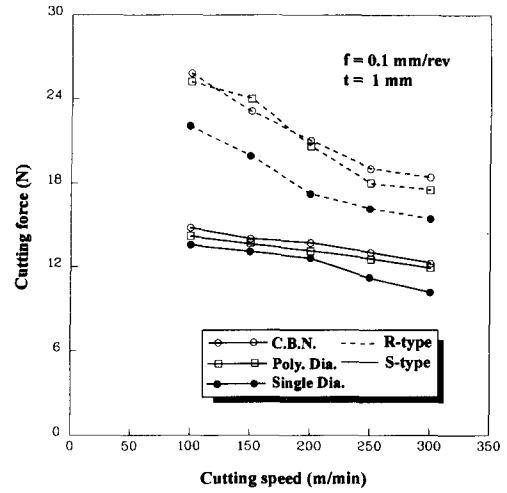


Fig. 8 Relationship between cutting force and cutting speed according to tool materials

공유결합으로 구성되어 있어서, 열전도율(5.0 Cal/cm·s·°C)이 매우 커서 가공시 절삭열의 전도가 빠르게 이루어져서 유리섬유강화 플라스틱 절삭시 다른 공구재료보다 절삭성이 용이하며, Table 3에서 나타난 바와 같이 경도면(9000 kg/mm²)에서 가장 우수한 성능을 보임으로서 경질의 유리섬유의 절삭을 용이하게 하여 절삭력면에서 우수한 성능을 보이게 된다. 이러한 특성에 의해서 절삭력면에서는 단결정 천연다이아몬드는 공구인선 형태에 관계없

이 가장 우수한 성능을 나타내고 있으며, 직선형 인선의 공구에서는 다결정 소결다이아몬드공구가 입방정 질화붕소 공구보다 약간 양호한 현상을 나타내고 있다. 또한, 0.5 인선반경을 갖는 R-type 공구는 다결정 소결다이아몬드 공구와 입방정 질화붕소 공구가 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 절삭깊이에 따른 주절삭력의 변화를 나타낸 것으로서 절삭깊이의 감소에 따라 절삭력이 줄어드는 경향을 보이고 있으며, 공구의 재질 및

Table 3 Mechanical properties of tool materials

Properties	Single crystal diamond	Poly crystal diamond	Cubic boron nitride
Density(g/cm ²)	3.52	4.12	3.48
Young's modulus (kg/mm ² × 10 ²)	990	810	710
Hardness(mHV)(kg/mm ²)	9000	5100	4500
Compressive strength (kg/mm ²)	870	770	390
Poisson's ratio(ν)	0.07	0.07	0.22
Thermal conductivity (Cal/cm·s·°C)	5.0	2.67	0.48
Coefficient of thermal expansion(10 ⁻⁶ /K)	3.1	4.2	4.7

공구인선의 형태에 따른 절삭력의 경향은 계속해서 유지되고 있음을 관찰할 수 있다. 절삭깊이에 따라 절삭력의 변화는 발생되지만 표면거칠기의 변화는 매우 적음으로서 적절한 공구만 선정된다면 유리섬유강화 플라스틱의 고능률 절삭의 수행도 가능하겠

다. Fig. 8은 절삭속도에 따른 주절삭력의 변화를 나타낸 것으로 절삭력은 절삭속도의 증가에 따라서 약간의 감소현상을 보이고 있다. 유리섬유강화 플라스틱의 절삭에 있어서, 플라스틱의 절삭성은 용이하기 때문이며 절삭속도의 변화가 절삭력에 미치는 영향이 다른재료의 공작물에 비하여 적음을 알 수 있다. 공구에 따라서는 이송량, 절삭속도, 절삭깊이의 변화에 의해서도 절삭력의 경향이 그대로 유지되며, 유리섬유강화 플라스틱 절삭가공시 공구의 재질에 대한 영향보다 공구인선에 따른 영향이 보다 큼을 관찰할 수 있다. R-type 공구의 적용에

의해서 경질유리섬유의 절삭이 보다 용이함을 알 수 있다.

각 공구에 따른 주절삭력의 신호값에 따른 주파수 영역에서의 분석을 통하여 그 특성을 고찰하고자 하였으며, Fig. 9에 그 결과가 나타나 있다. 주파수(ω) 영역에서의 PSD(power spectrum density)는 다음과 같이 표현되어진다.

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

$R(\omega)$: 시간영역에서 주절삭력 신호

절삭깊이를 1 mm로, 이송량을 0.1 mm/rev로, 절삭속도를 200 m/min로 고정한 후에 공구의 재질 및 공구인선의 형태에 따른 주절삭력을 주파수 영역에서 본 PSD분포이다. 전체적으로 볼때 R-type의 공구에 의한 주파수 영역에서의 PSD보다 S-type의 공구에 의한 주파수 영역에서 PSD가

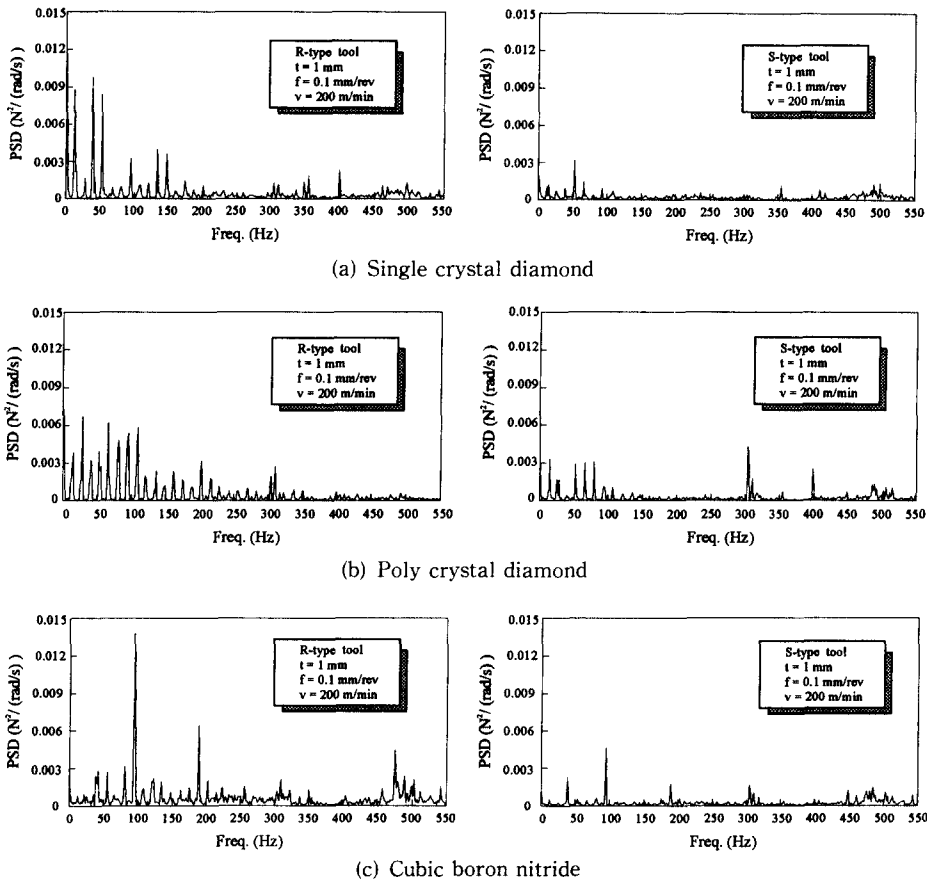


Fig. 9 Power spectrum density according to tool materials and type

보다 안정적임을 볼 수 있다. 또한, S-type의 단결정 천연 다이아몬드 공구에 의한 주절삭력 신호의 주파수영역에서 PSD분포를 분석할 때, 전체 에너지값이 적고 각 주파수에 따른 피크치도 매우 낮음으로서 유리섬유를 절삭할 경우 매우 안정적인 절삭상태임을 알 수 있다. 따라서, 절삭력의 안정성 및 양호한 표면을 기대할 수 있다고 하겠다.

3.3 가공표면의 주사전자현미경 분석

각 공구와 조건에 따른 가공면을 주사전자현미경

으로 관찰함으로써 유리섬유강화 플라스틱의 가공 특성을 분석하였다.

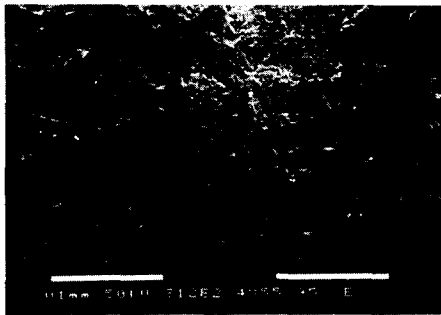
Fig. 10은 공구의 재질 및 형상에 따른 유리섬유 강화 플라스틱의 가공표면을 주사전자현미경으로 관찰한 것으로서 단결정 천연다이아몬드 공구를 사용한 것이 입방정 질화붕소 및 소결다이아몬드 공구를 사용한 것보다 양호한 면을 나타내고 있다. (b) S-type 단결정 천연다이아몬드 공구를 사용한 표면은 매우 양호하게 절삭되어서 표면에 유리섬유의 흔적을 거의 볼 수 없다. 다른 공구를 사용한



(a) Single dia.(R-type)



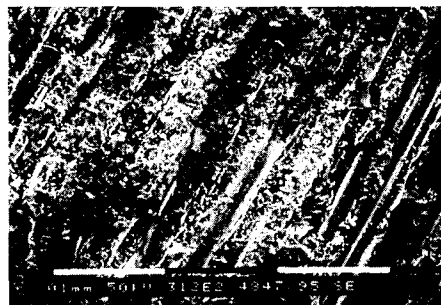
(d) Poly dia.(S-type)



(b) Single dia.(S-type)



(e) C. B. N.(R-type)



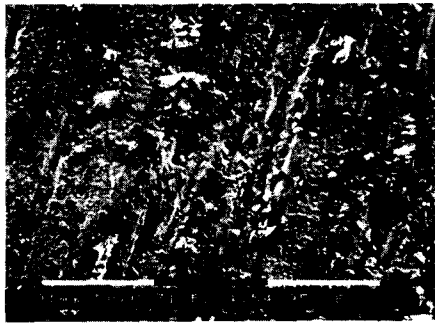
(c) Poly dia.(R-type)



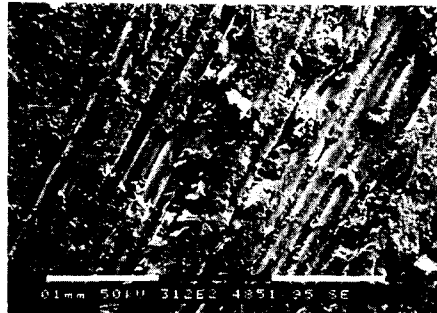
(f) C. B. N.(S-type)

Fig. 10 SEM photographs of cutting surface by using tool materials; $t=1$ mm, $f=0.1$ mm/rev, $v=200$ m/min

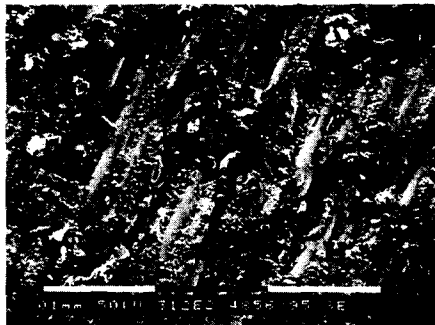
경우는 유리섬유가 표면에 약간 돌출됨을 관찰할 수 있다. (e) R-type 입방정 질화붕소 공구를 사용한 가공표면은 유리섬유가 절삭되지 않고 표면에 밀려서 돌출된 형상을 관찰할 수 있다. 따라서, 주사전자현미경을 관찰한 면을 분석하였을 때에 S-type의 공구와 단결정 천연다이아몬드 공구를 사용하는 것이 보다 양호한 표면을 생성할 수 있다. 각 공구에 가공조건 절삭깊이를 1 mm로, 이송량을 0.1 mm/rev로, 절삭속도를 200 m/min로 일정하게



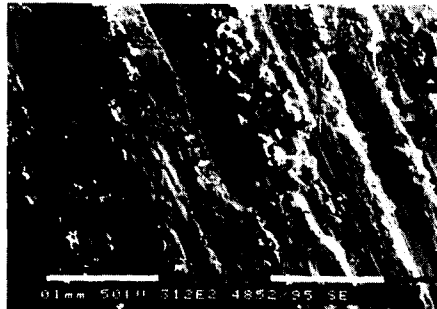
(a) 2 mm



(b) 0.1 mm/rev



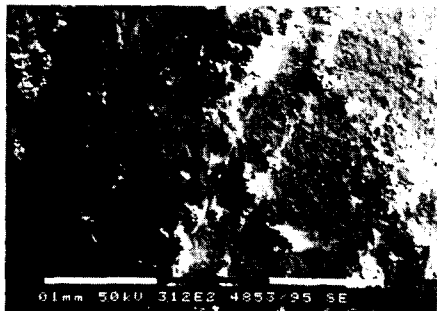
(b) 1 mm



(c) 0.05 mm/rev



(c) 0.5 mm



(d) 0.01 mm/rev

Fig. 11 SEM photographs of cutting surface according to depth of cut ; $f=0.1$ mm/rev, $v=200$ m/min, single crystal diamond(R-type)

Fig. 12 SEM photographs of cutting surface according to feedrate ; $t=1$ mm, $v=200$ m/min, single crystal diamond(R-type)

적용하였다. Fig. 11은 R-type 단결정 천연다이아몬드 공구를 사용하여, 절삭깊이 따른 표면의 상태를 주사전자현미경으로 관찰한 것으로서 절삭깊이를 감소시켜도 표면의 개선되는 정도는 거의 유사함을 보이고 있다. 따라서, 표면거칠기의 결과와 마찬가지로 절삭깊이에 따른 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 12는 R-type 단결정 천연다이아몬드 공구를 사용하여, 이송량의 변화에 따른 표면상태를 주사전자현미경으로 관찰한 것을 나타낸 것이다. (a) 0.3 mm/rev (b) 0.1 mm/rev인 경우보다 (c) 0.05 mm/rev인 표면이 양호하며, 유리섬유가 양호하게 절삭되어 있는 표면을 관찰할 수 있다. (d) 0.01 mm/rev인 경우에는 매우 양호하게 절삭이 수행되어서 표면에 유리섬유의 돌출형태를 관찰할 수 없다. 따라서, 주사전자현미경의 표면분석으로 이송량을 감소시키는 것이 유리섬유강화 플라스틱의 면 정도를 높이는데 매우 좋은 효과를 나타낸다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유리섬유강화 플라스틱의 절삭시 절삭공구의 재질은 단결정 천연다이아몬드를 사용하는 것이 표면생성 및 절삭력에 좋은 영향을 미친다.
- (2) 공구의 인선형태는 인선 반경을 갖는 R-type 공구보다 직선형의 S-type 공구를 적용하는 것이 유리섬유강화 플라스틱 절삭에 우수한 효과를 나타낸다.
- (3) 이송량을 감소시키는 것이 유리섬유강화 플라스틱의 가공시 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있고, 좋은 표면을 얻을 수 있다.
- (4) 유리섬유강화 플라스틱의 절삭시 절삭깊이와

절삭속도는 표면거칠기의 향상에 크게 관련이 없다.

후 기

본 연구는 '94년도 인하대 산업과학기술연구소 지원에 의해서 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Wang, X., Nakayama, K. and Arai, M., 1990, "Improvement of Surface Finish in the Cutting of GFRP," *Proceedings of 1st Int. Conf. on New Manuf. Tech*, Chiba, pp. 33~38.
- (2) Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R. and Malhotra, S. K., 1989, "High Speed Steel Tool Wear Studies in Machining of Glass-Fibre-Reinforced Plastics," *Wear*, Vol. 132, pp. 327~336.
- (3) Lubin, G., 1982, *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold, pp. 625~629.
- (4) Sakuma, K. and Seto, M., 1983, "Tool Wear in Cutting Glass Fiber Reinforced Plastics," *Bulletin of JSME*, Vol. 26, No. 218, pp. 1420~1427.
- (5) Takeyama, H. and Lijima, N., 1988, "Machinability of GFRP and Application of Ultrasonic Machining," *Annals of CIRP*, Vol. 37, pp. 93~96.
- (6) 김기수, 이대길, 광운근, 남궁석, 1991, "선삭 가공에 있어서 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭 특성," 한국정밀공학회지, 제8권, 제1호, pp. 63~73.
- (7) Kaneeda, T., 1989, *CFRP Cutting Mechanism*, NAMRC XV III, pp. 216~221.