

## 초경드릴을 이용한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 특성에 있어 선단각의 영향

Effects of the Point Angle on Drilling Characteristics  
Carbon Fiber Epoxy Composite Materials Using WC-drill Drilling

김형철\*, 이우영\*\*, 남궁 석\*\*\*

\* : 충남대학교 기계공학과 대학원 \*\* : 한국기술교육대학 생산기계공학과 \*\*\* : 충남대학교 기계공학과

### ABSTRACT

The drilling experiment of carbon fiber epoxy composite material with WC-drill has been done under the various cutting condition in order to minimize the problems occurred in the material when being drilled. It has been confirmed by a frequency analysis of the cutting force signals that the variation of cutting force resulted from the periodic variation of the angle between the rotating drill and the stacking angle of the carbon fiber. The drilling experiment has been done with several drills having different point angles and the drilling characteristics, like the effects such that change in the point angle influences the cutting force and the external surface condition, was evaluated.

### 1. 서 론

최근에는 산업의 발전과 더불어 새로운 재료의 개발에 대한 요구가 날로 증가하고 있으며, 이와 같은 요구에 부응하기 위하여 각종의 신소재가 개발되고 있는 실정이다. 이러한 신소재 중에는 에폭시(epoxy)등의 수지를 기지로서 여기에 보강재로 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드계 섬유등을 사용한 섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite material)가 있다.<sup>1)</sup> 이들 재료들은 비강성(E/ $\rho$ ), 비강도(S/ $\rho$ ) 및 감쇠특성이 일반강이나 알루미늄에 비하여 우수하기 때문에 주로 경량화가 요구되는 항공기, 자동차, 스포츠용품 산업에서 이용되어 왔으며, 최근에는 섬유강화 복합재료의 이방성성질을 이용하여 부품에 작용하는 역학적 특성에 대응한 기능설계를 할 수 있다는 장점 때문에 건축용 구조물, 압력용기, 선박용 재료 및 기계 부품에의 활용이 증가되고 있다.<sup>2~3)</sup>

에폭시 수지등을 기지로서 하는 수지계 복합재료는 부품의 대형화, 일체성형화하는 경향이 있지만, 현재로는 반드시 2차 가공을 필요로 하는 부분이 많다고 할 수 있다. 복합재료의 가공방법에는 다이아몬드 휠커파, water-jet, laser 등을 이용하여 원하는 크기와 형상으로 절단하기 위한 절단작업, 복합재료를 다른 금속이나 다른 복합재료 부품에 접착제를 이용하여 접합하기 위한 접합부의 밀링가공이나

선삭가공, 그리고 볼트나 리벳등으로 체결하기 위한 구멍의 드릴가공 방법이 있다. 특히, 각각의 부품을 조립하기 위하여 준비되는 구멍가공인 드릴링은 구조물등의 성능을 좌우하는 중요한 공정중의 하나이다.<sup>4)</sup> 수지계 섬유강화 복합재료를 드릴링할 때 대두되는 문제점으로는 드릴의 입구와 출구에서 발생하는 층간박리(delamination), 재료 내부에서 각 섬유들의 분리(separation), 가공면 가장자리나 벽면에서 섬유 및 수지의 찢겨짐, 공구마멸의 심한 발생등의 결점을 가지고 있다.<sup>5~6)</sup> 따라서 이러한 결점을 최소화하여 고정밀도와 높은 생산성을 얻기 위하여는 수지계 섬유강화 복합재료의 드릴링에 대한 체계적인 연구를 진행하여 절삭기구(cutting mechanism) 해석, 파괴역학에 근간을 둔 드릴가공 역학적 측면에서의 연구, 최적의 가공 성능을 발휘할 수 있는 드릴형상의 도출, 가공상태 인식과 평가에 관한 연구, 드릴링 가공기술의 최적화, 실용화에 대한 자료등을 구축할 필요성이 있다.

그동안 본 연구실에서는 탄소섬유 및 유리섬유 에폭시 복합재료에 대하여 고속도강 드릴에 의한 드릴링실험과 내마멸성을 중대시킴과 동시에 연삭계념의 드릴가공을 실시하고자 다이아몬드 입자드릴에 의한 드릴링실험등을 행하였으며, 드릴링시 절삭조건에 따른 가공면생성, 공구마멸을 일으키는 절삭력의 분포등이 결합층에 미치는 영향을 파악하기 위한 절삭기구의 모델링을 설정하는 등의 연

구 수행하여 왔다.<sup>7-8)</sup>

본 연구는 이러한 신소재들이 역학적으로 다양한 물리적 환경 아래에서 요구기능에 부합될 수 있도록 하기 위하여 탄소섬유 에폭시 복합재료에 대한 기계가공기술의 개발에 목표를 두고 있으며, 그 일환으로 초경드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링실험을 실시하고, 회전하는 드릴과 섬유의 적층각이 만나는 각도가 주기적으로 변함에 따른 절삭력의 변화에 대한 절삭력 신호의 주파수 특성을 알아보는 한편, 드릴 주절삭날의 선단각(point angle)을 변화시키어 선단각의 변화가 절삭저항과 출구면 상태에 미치는 영향등의 드릴링 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 탄소섬유 에폭시 복합재료(CFRP) 시편

본 실험에 사용된 탄소섬유 에폭시 복합재료 prepreg (preimpregnated sheet)는 (주)태광산업의 TT2500 & ACELAN TZ-307형으로 시편은 손작업인 hand lay-up 방법으로 적층한 후 matched-die molding 경화법을 이용하여 성형하였으며, mold는 에폭시의 경화에 필요한 경화열을 신속히 전달하기 위하여 알루미늄으로 제작하였다. 시편제작에 이용한 mold의 크기는 250mm×250mm이며, 경화 후 두께가 10mm가 되도록 적층한 후, hot press에 의해 최저 점도를 보이는 65℃에서 40kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 가해 각각 80℃, 150℃에서 1시간씩 경화시켰었다. 경화 후 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료의 물리적 성질은 Table. 1과 같다.

Table. 1 The physical properties of carbon fiber epoxy composite materials

Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Poisson ratio ( $\nu$ )	Fiber content (Volume %)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
2.06	153	0.28	60	1.6

탄소섬유 복합재료 시편은 이방성재료가 드릴링에 미치는 영향을 가장 잘 나타낼 수 있도록 적층(stack)각도 0°, 경화 후 두께가 10mm가 되도록 적층한 시편과 드릴링의 출구면에서 뚜렷히 발생하는 표면박리 현상을 좀 더 자세히 관찰하고자 [0°/±45°/90°]s의 적층각도로 경화 후 두께가 5mm가 되도록 적층한 시편등 두가지 종류로 준비하였다. 성형된 재료는 다이아몬드 휠 커터(diamond wheel cutter)를 이용하여, 0°의 적층각도 시편은 25mm×

100mm의 크기로, [0°/±45°/90°]s의 적층각도 시편은 40mm×40mm의 크기로 절단하여 시편을 제작하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 시편은 적층각도 0°의 탄소섬유 복합재료와 [0°/±45°/90°]s의 적층각도를 갖는 두 종류의 시편을 이용하였으며, 공구는  $\varnothing$  10mm 초경드릴(KORLOY SSD 100)을 사용하였다. 실험방법은 건식드릴링으로 보조밀판을 부착시키지 않은 상태에서 수행하였고, 실험조건은 드릴의 이송을 10, 20, 30, 40, mm/min, 드릴의 주축 회전수는 400, 800, 1200, 1600, 2000 rpm으로 선정하였으며, 실험의 정확성을 위하여 동일한 가공조건으로 3회씩 수행하였고 공구마멸에 대한 영향을 줄이기 위하여 가공조건을 변화 시킬 때 마다 새로운 드릴로 교체하여 실시하였다.

Fig. 1은 드릴가공시 발생하는 절삭력을 측정하기 위한 실험장치의 개략도로, 시편은 CNC milling machine의 테이블 위에 압전형 공구동력계(Kistler, Type 9065)를 고정하고, 그 위에 3-jaw 척(삼천리기계공업)을 부착하여 bolt로 고정하였다. Chuck 위에 시편의 중심과 드릴의 위치를 정확히 일치시키기 위해 지그(jig)를 제작하여 시편을 견고하게 고정시켰다. Torque 및 thrust의 변화량은 고유진동수가 3 kHz인 공구동력계에서 나오는 미소한 전하량을 charge amplifier(Kistler, model 5807)를 통하여 증폭한 후 data recorder(TEAC SR-30)에 수록하였다. 이때 digital oscilloscope(금성 VC-6023 20MHz)를 이용하여 절삭상태를 실시간에서 확인하면서 실험하였으며, 각 절삭조건에서 측정된 절삭력은 A/D 변환하여 컴퓨터에서 시간영역 분석을 하였고, 주파수 영역에서 절삭력 신호의 주파수 특성을 알아보고자 dual-channel signal analyzer(B&K 3550)를 이용하여 FFT를 행하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 출구면 가공 상태

Fig. 2와 Fig. 3은 섬유 적층각도 0°의 시편과 [0°/±45°/90°]s의 시편을 초경 drill로 드릴링 한 후 출구면 상태를 나타낸 것이다. 가공조건과 가공후 출구면 가공상태의 관계를 살펴보면, 가공조건중 높은 회전속도에서는 낮은 이송속도에서, 낮은 회전속도에서는 높은 이송속도에서 즉, 이송속도와 드릴의 회전속도가 서로 상반되게 작용하면서 입구쪽 보다는 출구쪽에서 거스름(burr) 및 박리

현상이 발생하고 있다. 동일한 이송에서 드릴의 회전속도를 증가 시킴으로서 절삭점에서 단위 회전당 절삭 단면적이 감소됨에도 불구하고 출구쪽에서 심하게 발생하는 현상은 탄소섬유가 매우 고강성, 고경도 재질이기 때문에 가공중에 공구인선의 마멸이 발생하여 섬유를 절단하는 것이 어려워지기 때문이다. 또한 인선의 마멸이 증가되고 회전속도가 증가됨에 따라 절삭열이 증가한다. 탄소섬유의 열전도가 다른 복합재에 비하여 매우 좋음에도 불구하고 공구인선의 마멸이 급격히 증대되어 절삭점에서의 절삭열의 증가가 빨라지고, 일단 내부로 들어오면 열전도도가 나쁜 에폭시 수지의 영향으로 발생한 절삭열이 쉽게 발산되지 못함으로써 열에 대한 저항성이 낮은 에폭시 수지(사용온도 120 ℃ 이하)의 결합력을 약화시켜 층간 박리현상을 유발하기 때문이다.

#### 4. 2 절삭력

Fig. 4는 적층각도 0°의 시편에 대하여 드릴링 실험한 결과 중 한 예를 보인 것이며, Fig. 5는 적층각도 [0°/±45°/90°]s의 시편의 드릴링 실험결과이다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교하여 볼 때, 적층각도 0°인 시편의 경우, thrust force와 torque의 변동이 적층각도 [0°/±45°/90°]s인 시편의 결과에 비하여 심하게 발생되고 있다. 이러한 현상을 보이는 이유는 일방향(uni-direction)으로 적층된 섬유와 chisel edge와 주절삭날이 만나는 각도가 0°일 때 thrust force와 torque는 감소하고 90°일 때 강한 섬유를 절단하기 때문에 thrust force와 torque는 증가하기 때문으로 판단된다. 반면에, 적층각도 [0°/±45°/90°]s인 시편이 적층각도 0°인 시편의 경우보다 절삭력의 변동이 상대적으로 작은 이유는 드릴과 공작물의 접촉깊이에서 섬유의 적층각도와 드릴의 주절삭날이 만나는 각도가 어떤 한 층에서 절삭날이 섬유와 0°로 만난다면 그 다음층은 45°로 그 다음층은 90°로 만나면서 상향절삭과 하향절삭이 혼재된 상태로 가공이 진행되는 것으로 판단된다. 다시 말하면 섬유의 적층각도 [0°/±45°/90°]s의 시편의 경우가 섬유의 적층각도와 드릴의 주절삭날이 만나는 각도의 차이에 의한 절삭력의 변동에 영향을 덜 받는다고 할 수 있다.

Fig. 6은 적층각도 0°의 시편에 대한 각각의 절삭조건으로부터 획득한 thrust force와 torque를 rpm의 변화에 대하여 나타낸 그림이다. 전반적으로 드릴의 회전속도가 증가할수록 절삭력은 감소하며, 감소원인으로는 이송속도는 일정한데 반하여 절삭속도만 증가하기 때문에 단위 회

전당 절삭점에서의 절삭 단면적이 감소되기 때문이다. 또한, Fig. 7은 절삭력을 이송속도 대하여 나타낸 그림으로 이송속도에 대하여 검토하여 보면 이송속도의 증가에 따라 절삭력은 증가하지만, 어느 정도(20mm/min) 이상의 영역에서는 이송량에 큰 영향을 받지 않았다. 이것은 비교적 낮은 회전속도에서는 정상상태의 절삭이 이루어지지만 높은 회전속도에서는 공구마멸, 절삭열의 증가등 비선형적 절삭요소의 영향이 증대되기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 적층각도 [0°/±45°/90°]s 시편의 가공한 결과를 정리한 것으로 rpm이 증가함에 따라, 이송속도가 감소함에 따라 thrust force가 대체로 감소하고 있음을 보이고 있다. Fig. 6와 7의 결과와 비교할 때 절삭력 변화의 경향에 약간의 차이를 보이는 것은 시편 두께의 차이에서 오는 공구마멸의 효과와 적층각도의 차이에 의한 것으로 판단된다.

#### 4. 3 절삭력의 주파수 특성

이방성 재료인 복합재료의 드릴링에서 절삭력의 변동이 섬유의 적층각도와 드릴의 주절삭날이 만나는 각도에 따라 큰 변화가 있음을 Fig. 4와 Fig. 5를 통하여 확인할 수 있었으며, 회전하는 드릴과 섬유의 적층각이 주기적으로 변함에 따라 이러한 절삭력의 변화 또한 주기적으로 변화할 것이다. 따라서, 주파수 영역에서 절삭력 신호의 주파수 특성을 알아보고자 FFT를 행하였다. Fig. 9와 Fig. 7은 섬유 적층각도 0°의 시편과 [0°/±45°/90°]s의 시편의 드릴링 시 발생한 절삭력의 주파수분석 결과이다. 섬유 적층각도 0°의 시편의 경우, 드릴의 주절삭 날이 1회전 할 때 절삭날이 섬유와 직각으로 만나는 상태와 평행한 상태로 만나는 상태가 2번 있게 되며, 드릴의 회전수가 400rpm이므로 주파수분석에서 amplitude의 최고값은 약 14 Hz 대역에 존재하고 있다. 그리고 [0°/±45°/90°]s의 시편의 경우에는 주절삭 날이 1회전 할 때 절삭날이 섬유와 직각으로 만나는 상태와 평행한 상태로 만나는 상태가 6번 존재하게 된다. 따라서 amplitude의 최고값은 약 14 Hz 대역에 존재하고 있으며, 절삭력 변동의 차이가 섬유 적층각도 0°의 시편에 비하여 작기 때문에 amplitude의 값은 비교적 작은 수치를 보인다.

#### 4. 4 선단각(point angle)의 변화에 따른 가공특성

드릴 선단각의 변화에 따른 가공특성을 살펴보고자 드릴 선단각을 여러 값으로 변화를 준 후 구멍가공실험을

실시하였다. 실험에 사용된 공구는  $\varnothing$  10mm 초경드릴 (KORLOY SSD 100)의 선단각을 98° 105° 135° 150° 로 변화시킨 4종류의 드릴과 표준 선단각이 118° 인 드릴로서 총 5종류의 드릴을 이용하였다. 드릴의 연삭은 실험에 사용된 공구의 재조합체인 한국야금(주)에 제조를 의뢰하여, 선단각을 제외한 드릴형상의 모든 부위를 동일한 조건이 되도록 하였으며, 공구연삭기의 가공한계 때문에 드릴 선단각 98° 이하의 연삭은 불가능 하였다.

실험조건 선정은 4.1절의 출구면 가공상태 결과에서 비교적 양호한 출구면 상태에서 부터 불량한 출구면 상태 까지 골고루 나타내었던 가공조건인 주축의 회전수를 400rpm으로 일정하게 하고, 이송속도만을 10mm/min으로 부터 시작하여 10, 20, 30, 40mm/min으로 점차로 증가 시키었으며, 적층각도 0° 와 [0°/±45°/90°]s 의 두가지 시편에 대하여 실시하였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 선단각을 변화시킨 드릴로 섬유 적층각도 0° 의 시편과 [0°/±45°/90°]s의 시편을 드릴링 한 후, 출구면 상태를 나타낸 것이다. 선단각의 변화에 따른 출구면 상태는 큰 영향을 받고 있지 않지만, 선단각이 클수록 입구면에서의 거스러미가 많이 보이고 있다. 이러한 현상은 가공초기에는 드릴 날끝 부분의 절삭속도가 거의 없으므로 가공면을 마찰하는 듯한 현상이 발생하다가 차츰 드릴링이 진행됨에 따라 복합재료의 섬유들이 드릴의 흠(flute)을 따라 당겨지는 경향을 보이게 되고 기계가공이 완료 될때 까지 재료들은 나선형으로 말리는 spirals up 현상을 보이게 되는데, 이러한 미가공 부분으로 부터 적층판을 윗방향으로 분리시키는 힘 즉, 축방향으로의 수직분력이 선단각이 커질수록 크게 작용하기 때문이다.

Fig. 13은 적층각도 0° 의 시편에 대하여 선단각의 변화에 따른 thrust force와 torque의 변화를 나타낸 그림으로 thrust force의 관점에서 볼때 선단각이 작을 수록 적은 thrust force값을 보이고 있다. 이는 드릴의 선단각이 작아질 수록 드릴의 절삭면에 작용하는 수직분력이 작아지게 되고, 더불어 공구 진행방향으로의 마찰력이 감소되기 때문으로 생각되며, 드릴 선단각 98° 의 경우, 이송속도 30mm/min 이상의 값에서 오히려 thrust force값의 증가가 보이는데 이는 회전하는 드릴 선단에서의 절삭속도는 절삭날의 끝점 보다 절삭속도가 현저히 떨어지기 때문에 정상적인 가공이 진행되지 못하기 때문으로 생각된다. 그러나 torque의 경우는 선단각의 변화에 따른 영향이 그다지 크지 않지만, 이송속도 30mm/min 이상에서는 같은

실험조건에서의 thrust force값이 클때 작은 torque값을 보이고, thrust force값이 작을때 큰 torque값을 보이고 있다. Fig. 14는 적층각도 [0°/±45°/90°]s 시편에 대하여 선단각의 변화에 따른 thrust force와 torque를 변화를 나타낸 그림이다. 적층각도 0° 의 시편에 대한 선단각의 영향에 비하여 더욱 뚜렷한 결과를 보이고 있다. thrust force의 관점에서 볼 때, 선단각 105° 의 경우가 가장 작은 절삭력을 보이며, torque의 경우는 118° 가 가장 작은 절삭력을 보이고 있다.

결론적으로 초경드릴에 의한 적층각도 0° 시편의 구멍 가공은 적층각도 [0°/±45°/90°]s 시편의 경우 보다 절삭력의 변동이 크며, 이는 주절삭날이 섬유의 적층각과 이루는 각이 0° 일때와 90° 일때의 가공상태가 상이하기 때문이다. 그리고 선단각의 변화에 따라 출구면 상태는 큰 영향을 받고 있지 않지만, 선단각이 커질수록 축방향으로의 수직분력이 크게 작용하기 때문에 입구면에서의 거스러미가 많이 나타나게 되며, 절삭력과 관계는 선단각이 작을 수록 적은 thrust force값을 보이고 있으며, torque의 경우는 선단각의 변화에 따른 영향이 그다지 크지 않지만, 적층각도 [0°/±45°/90°]s의 탄소섬유 복합재료의 가공에 있어서 thrust force의 경우, 드릴 선단각이 105°, torque의 경우는 118° 가 비교적 낮은 절삭력의 분포를 나타내었다.

## 6. 결 론

본 연구는 초경드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링실험을 실시하고, 회전하는 드릴과 섬유의 적층각이 만나는 각도가 주기적으로 변함에 따른 절삭력의 변화에 대한 절삭력 신호의 주파수 특성을 알아보는 한편, 드릴 주절삭날의 선단각(point angle)을 변화시키어 선단각의 변화가 절삭저항과 출구면 상태에 미치는 영향등의 드릴링 특성을 살펴보고, 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 탄소섬유 복합재료의 드릴가공시 발생하는 절삭력의 변동은 적층각도 0° 경우가 [0°/±45°/90°]s의 경우보다 심하게 발생하며, 절삭력 변동에 대한 주파수분석을 통하여 섬유의 적층각도와 드릴의 주절삭날이 만나는 각도의 변화에 기인한 것임을 확인하였다.
- 선단각이 커질수록 축방향으로의 수직분력이 크게 작용하기 때문에 입구면에서의 거스러미가 많이 나타나게 된다.

3) 선단각이 작을 수록 적은 thrust force값을 보이고 있으며, torque의 경우는 선단각의 변화에 따른 영향이 그다지 크지 않지만, 적층각도  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ s의 탄소섬유 복합재료의 가공에 있어서 thrust force의 경우는 드릴 선단각이  $105^\circ$ , torque의 경우는  $118^\circ$ 가 비교적 낮은 절삭력의 분포를 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구과제(KOEF : 941-1000-056-2)로 수행되었으며, 이에 재단관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. M. M. Schwartz, *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill Book Company, Chap. 7, 1984
2. C. Reugg, J. Habermeir, "Composite Propeller Shafts Design and Optimization, Advances in Composite Material," Proceedings of ICCM 3, Vol. 2, pp. 1740-1755. 1980
3. 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
4. W. Koenig, Ch. Wulf, P. Grass, and H. Willerscheid, "Machining of Fiber Reinforced Plastics," Annals of the CIRP, Vol. 34/2, pp. 537-548. 1985
5. P. K. Malick, 1988, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., pp. 3-4
6. G. Lubin, 1895, *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold, pp. 625-629
7. 김홍배, 함승덕, 남궁 석, "탄소섬유 강화 복합재료의 드릴링 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 115-119, 1992
8. 김형철, 김기수, 함승덕, 김홍배, 남궁 석, "다이아몬드 입자 전착드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제12권, 제8호, pp. 27-38.

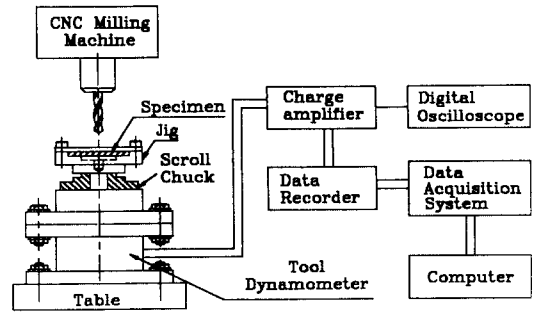


Fig. 1 Block diagram of the drilling test



Fig. 2 Photograph of the specimen after drilling (WC drill, stacking angle :  $0^\circ$ )

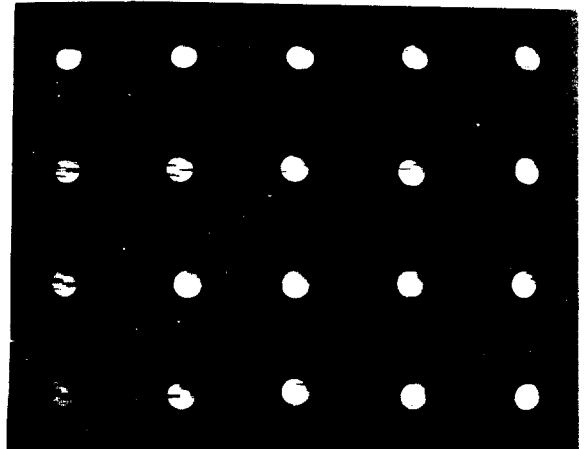


Fig. 3 Photograph of the specimen after drilling (WC drill, stacking angle :  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ s)

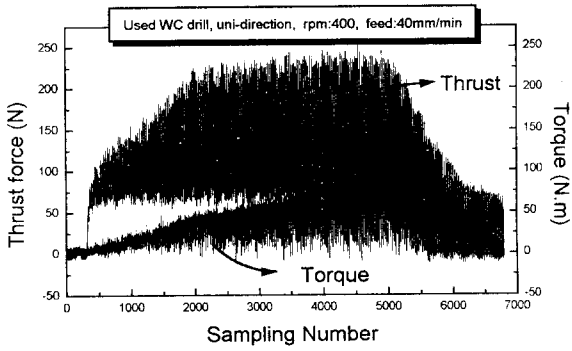


Fig. 4 Variation of cutting force

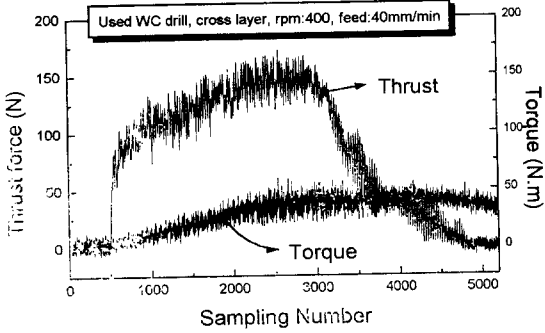


Fig. 5 Variation of cutting force

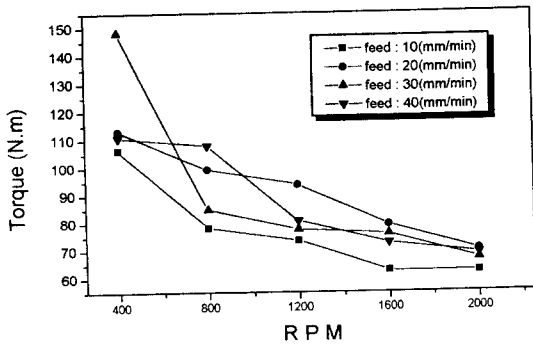
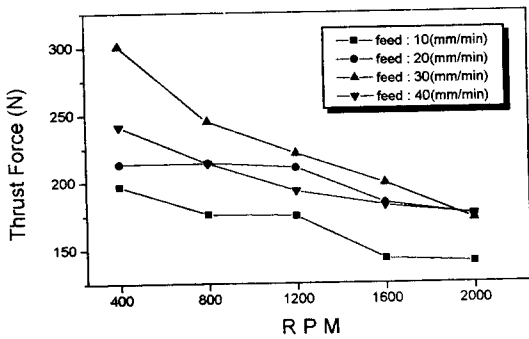


Fig. 6 Cutting forces with respect to spindle speed (stacking angle :  $0^\circ$ )

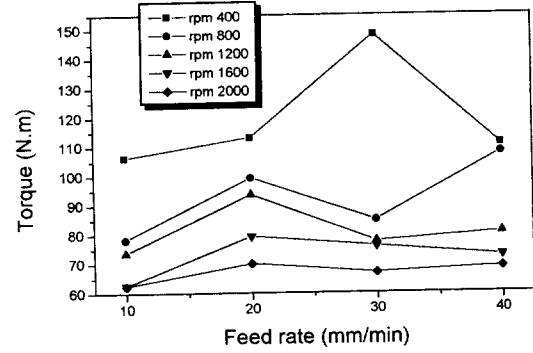
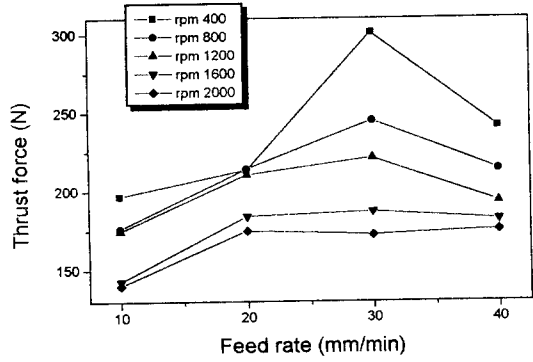


Fig. 7 Cutting forces with respect to feed rate (stacking angle :  $0^\circ$ )

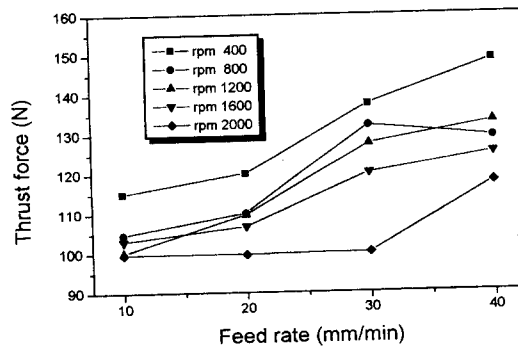
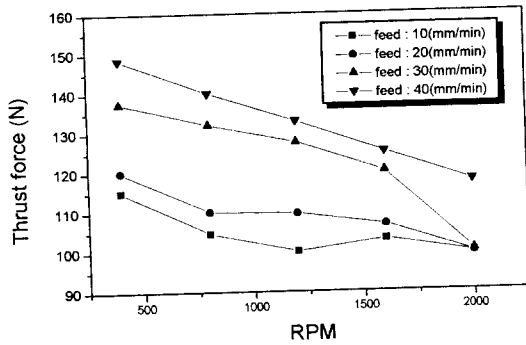


Fig. 8 Thrust forces with respect to spindle speed and feed rate (stacking angle :  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ s)

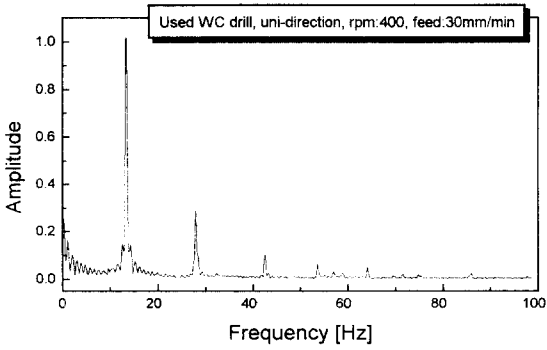


Fig. 9 Spectrum of thrust force in drilling (stacking angle : 0°)

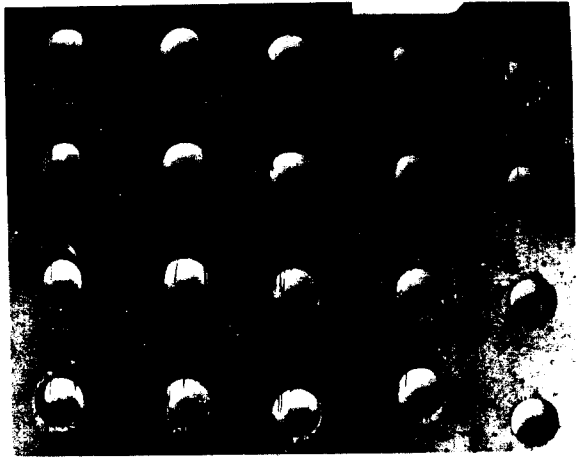


Fig. 11 Photograph of the specimen after drilling (changed point angle, stacking angle : 0°)

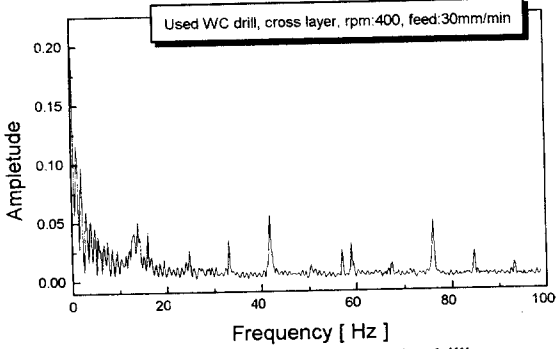


Fig. 10 Spectrum of thrust force in drilling (stacking angle : {0°/±45°/90°}s)

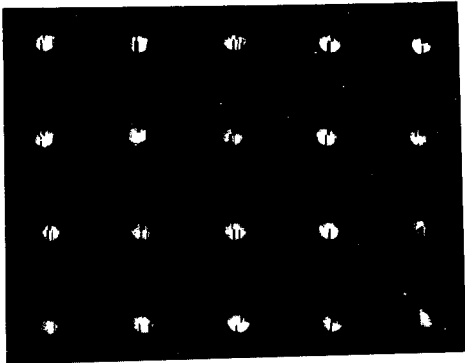


Fig. 12 Photograph of the specimen after drilling (changed point angle, stacking angle:{0°/±45°/90°}s)

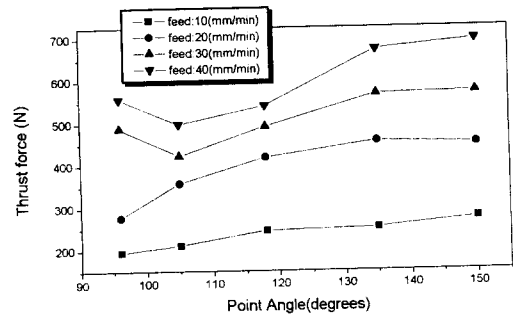
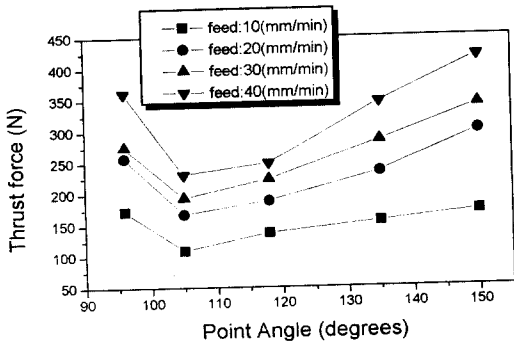


Fig. 13 Cutting forces with respect to point angle (stacking angle : 0°)

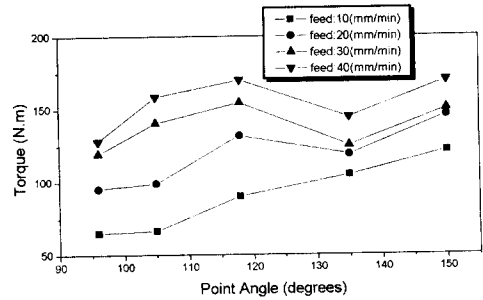


Fig. 14 Cutting forces with respect to point angle (stacking angle : {0°/±45°/90°}s)

