論文 한국정밀공학회지 제14권 제4호 (1997년 4월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No. 4. April. 1997.

탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 특성에 있어 섬유 배열방향과 선단각의 영향에 관한 연구

김 형 철*, 이 우 영**, 남궁 석***

A Study on Effects of the Fiber Orientation and Point Angle on Drilling Characteristics of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials

Hyeong C. Kim*, Woo Y. Lee**, Suk. Namgung***

ABSTRACT

The drilling experiment of carbon fiber epoxy composite material with WC-drill has been done under the various cutting conditions in order to minimize the problems occurred in the material while 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. By the drilling experiment with several drills having different point angles, the drilling characteristics, which show the relations between the change in the point angle and cutting force or external surface condition, were analyzed.

Key Words : CFRP(탄소섬유 에폭시 복합재료), Point angle(선단각), Torque(토오크) Thrust force(트러스트), Fiber orientation(섬유 배열방향), External surface condition(출구면 가공상태), Main cutting edge(주절삭날)

1. 서 론

최근, 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 기지로 하여 여기에 보강재로 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드계 섬유 등을 사용한 섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite material)가 있다.[1] 이들 재료들은 비강성(E/ρ), 비강도(S/ρ)및 감쇠특성이 일반강이나 알루미늄에 비하여 우수하고, 섬유강화 복합재료의 이방성성질을 이용하여 부품에 작용하는 역학적 특성에 대응한 기능설계를 할 수 있다는 장점 때문에 스포츠용품, 경량화가 요구되는 항공기, 자동차 및 기계부품에의 활용이 증가되고 있다[2~3].

에폭시 수지 등을 기지로 하는 수지계 복합재료는 부품의 일체 성형화, 대형화되는 경향이 있지만, 치수정밀도 및 표면거칠기와 같은 형상정밀도를 충족하기 위해서는 반드시 2차 가공을 필요로 하는 부분이 많다고 할 수 있다. 복합재료의 가공방법에는 워터-젯(water-jet), 레이

* 충남대학교 대학원
** 한국기술교육대학 생산기계공학과
*** 충남대학교 기계공학과

져(laser), 다이아몬드 휠 커터(diamond wheel cutter), 등을 이용하여 원하는 크기와 형상으로 절단하기 위한 절단작업, 복합재료를 다른 금속이나 다른 복합재료 부품에 접착제를 이용하여 접합하기 위한 접합부의 밀링 가공이나 선삭가공; 그리고 볼트나 리벳등으로 체결하기 위한 구멍의 드릴가공 방법이 있다[4~6]. 특히, 각각의 부품을 조립하기 위하여 준비되는 구멍가공인 드릴링은 구조물 등의 성능을 좌우하는 중요한 공정중의 하나이다. 수지계 섬유강화 복합재료의 드릴링 가공에서 대두되는 문제점으로 재료의 입구와 출구에서 발생하는 층간박리(delamination), 재료내부에서 각 섬유들의 분리(separation), 가공면 가장자리나 벽면에서 섬유 및 수지의 찢겨짐, 심한 공구마멸 발생 등의 결점을 가지고 있다[7]. 따라서 이러한 결점을 최소화하여 고정밀도와 높은 생산성을 얻기 위한 수지계 섬유강화 복합재료의 드릴링에 대한 연구로써, 드릴에의한 가공 입 · 출구면에서의 peel-up과 push-out 현상으로 정의되는 절삭모델을 제안하고, 파괴역학에 근간을 둔 드릴가공 역학적 측면에서의 연구[8], 탄소섬유 에폭시 복합재료에 대하여 내마멸성을 증대시킴과 동시에 연삭개념의 드릴가공을 실시한 다이아몬드 입자드릴에 의한 드릴링 실험등을 들 수 있으며, 드릴링 시 절삭조건에 따른 가공면 생성, 공구마멸을 일으키는 절삭력의 분포 등이 결함층에 미치는 영향을 파악하기 위한 절삭기구의 모델링을 설정하는 등의 연구 등이 있다.[9]

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 일방향(unidirection) 적층과 다방향(multidirection) 적층 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 실험을 실시하여 초경드릴에 의한 가공성을 알아보고, 섬유 배열방향(fiber orientation)에 따른 절삭력 변화의 관계를 알아보는 한편, 드릴 주절삭날의 선단각(point angle)을 변화시키어 선단각의 변화가 절삭력과 입 · 출구면 상태에 미치는 영향 등의 드릴링 특성을 실험적으로 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2. 1 시편 제작 및 공구

시편 제작에 사용된 탄소섬유 에폭시 복합재료 prepreg (preimpregnated sheet)는 (주)태광산업의 TT2500 & ACELAN TZ-307형으로, 이방성재료의 특성이 드릴링에 미치는 영향을 나타낼 수 있도록 적층각도 0 °인 일방향 적층시편과 일방향 적층시편과의 가공특성을 비교하기 위하여 [0°/±45°/90°]s의 적층구조를 갖는 다방향 적층 시편등 2 종류로 준비하였고, 경화 후 두께가 각각 10mm와 5mm가 되도록 적층순서와 두께를 선정하였으며, 수작업(hand lay-up)방법으로 적층하였다. 복합재료의 경화는 가열 프레스(hot-press) 경화법을 이용하여 성형하였으며, 금형(mold)은 에폭시의 경화에 필요한 경화열을 신속히 전달하기 위하여 알루미늄으로 제작하였다. 시편제작에 이용한 금형의 크기는 250mm×250mm이며, hot press에 의해 최저 점도를 보이는 65 ℃에서 40kg/cm^{2}의 압력을 가해 각각 80℃, 150℃에서 1시간씩 경화시키었다. 경화된 탄소섬유 에폭시 복합재료는 다이아몬드 휠 커터(diamond wheel cutter)를 이용하여, 각각 25mm×100mm와 25mm×25mm의 크기로 절단하여 최종 시편을 제작하였다. 경화 후 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료의 기계적 및 물리적 성질은 Table. 1과 같다.

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

Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Poisson ratio (ν)	Fiber content (Volume %)	Density (g/cm^3)
2.06	153	0.28	60	1.6

실험에 사용한 공구는 ϕ10mm 초경드릴(KORLOY SSD 100)을 사용하였으며, 선단각의 변화에 따른 드릴링 특성을 파악하고자 선단각을 98 °, 105 °, 135 °, 150°로 변화시킨 4종류의 드릴등 총 5종류의 드릴을 이용하였다. 드릴 선단각의 연삭은 실험에 사용된 공구의 제조업체(한국야금(주))에 재연삭을 의뢰하여, 선단각을 제외한 드릴형상의 모든 부위를 동일한 조건이 되도록 하였으며, 공구연삭기의 가공한계 때문에 드릴 선단각 98 ° 이하의 연삭은 불가능하였다.

2. 2 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 드릴링 가공시 발생되는 절삭력을 측정하기 위한 실험장치의 개략도로, 시편은 CNC 밀링 머신(독일 DEKEL)의 테이블 위에 압전형 공구동력계 (Kistler, Type 9065)를 고정하고, 그 위에 3-jaw 척(삼천리기계

공업)을 부착하여 볼트로 고정하였다. 이때 공구동력계와 드릴링 중심의 편심에서 발생할 수 있는 오차를 제거하기 위하여 공구동력계의 중심과 밀링헤드의 중심을 편심량 0.01mm 이하가 되도록 하였으며, 척(chuck) 위에 시편의 중심과 드릴의 위치를 정확히 일치시키기 위해 지그(jig)를 제작하여 시편을 견고하게 고정시켰고, 드릴의 장착은 콜릿척을 이용하였다. 드릴링 가공에서 발생되는 트러스트 및 토오크의 변화량은 고유진동수가 3 kHz인 공구동력계에서 나오는 미소한 전하량을 증폭기(charge amplifier:Kistler, model 5807)를 통하여 증폭한 후 데이터 획득장치(GLOBAL Lab. DT2831-G)를 이용하여 샘플링 주파수 100Hz로 A/D 변환하였으며, 이때 디지탈 오실로스코프(금성 VC-6023 20MHz)를 이용하여 가공상태를 실시간에서 확인하면서 실험하였다. 각 절삭조건에서 측정된 절삭력은 컴퓨터에서 시간영역 분석과 FFT를 하여 주파수영역 분석을 행하였다.

드릴링 실험조건의 선정은 주축의 회전수를 400rpm(절삭속도 V=12.57m/min)으로 일정하게 하고, 이송률만을 0.025, 0.05, 0.075, 0.1mm/rev로 점차 증가시키었다. 가공중 발생되는 공구마멸의 영향을 최소화하기 위하여 매번 실험조건이 변화 될 때마다 새로운 드릴로 교환하여 실시하였으며, 절삭유제를 사용하지 않은 건식드릴링으로 보조밀판을 부착시키지 않은 상태에서 수행하였다.

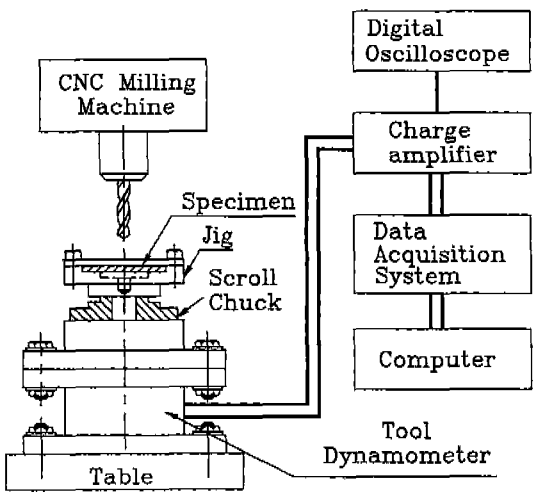

Fig. 1 Block diagram of the drilling test

3. 결과 및 고찰

3. 1 섬유배열각과 절삭력 변화의 관계

섬유강화 복합재료는 일반 등방성(isotropic) 재료와는 달리 높은 강도의 강화섬유의 성질과 상대적으로 낮은 강도로 이들을 붙잡고 있는 수지의 성질 때문에 섬유의 적층방향에 따라 그 가공특성이 달라진다. 이방성재료인 섬유강화 복합재료의 드릴링 가공에서 섬유 배열방향(fiber orientation)에 따른 절삭력 변화의 관계를 살펴보고자 초경드릴에 의한 일방향(unidirection)과 다방향(multidirection) 적층 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 실험을 실시하였다.

Fig. 2(a)와 (b)는 적층각도가 0°인 시편의 드릴링 실험에 의하여 획득된 절삭력 변화 중 한 예를 보인 것이다. 절삭력 변화의 양상은 드릴선단이 시편의 맨 처음 적층판에 접촉후 가공이 진행됨에 따라 선단각만큼 기울어진 주절삭날의 가공면적이 증가하게 되고, 이에 따라서 절삭력도 서서히 증가하게 된다. 트러스트의 경우 주절삭

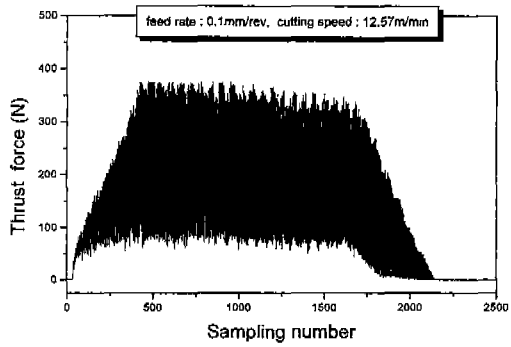

Fig. 2(a) Variation of thrust force (stacking angle:0°)

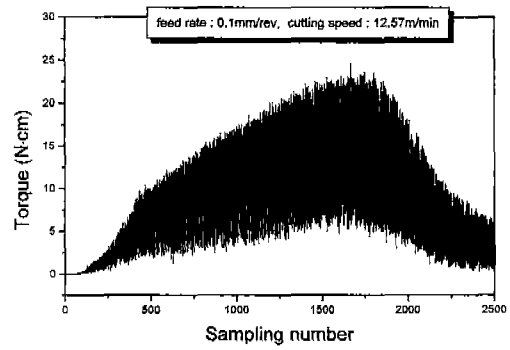

Fig. 2(b) Variation of torque (stacking angle:0°)

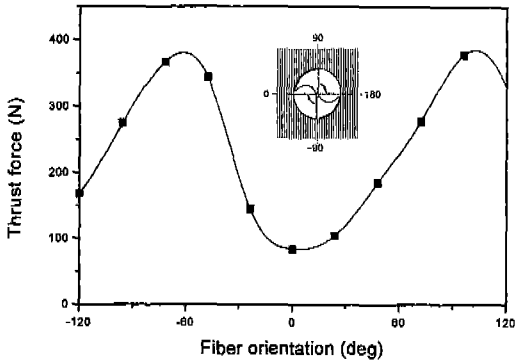

Fig. 3 Relationship fiber orientation and thrust force (stacking angle:0°)

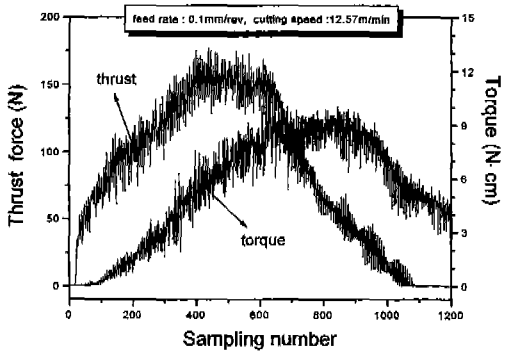

Fig. 4 Variation of thrust force and torque (stacking angle:[0°/±45°/90°]s)

날의 마아진 부분이 시편의 가장 윗면을 통과할 때가 가장 크고, 토오크의 경우는 가공이 진행됨에 따라 드릴의 주와 시편 가공면과의 마찰력이 증대되면서 시편의 가장 아랫면을 통과할 때 최대값을 보인다. 그리고, 절삭력 변동의 진폭변화가 매우 크게 나타나고 있는데, 이는 드릴이 회전함에 따라 섬유 배열방향과 절삭방향이 이루는 각도 θ가 0°에서 ±180°까지 주기적으로 변함에 따른 재료의 전단강도의 변화와 절삭기구의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 재료의 전단강도 변화에 기인한 절삭력의 변화는 N. Bhatnagar 등의[10] 연구를 통해서 알 수 있다. N. Bhatnagar 등은 적층각도가 다른 일방향 탄소섬유 복합재료에 대한 Iosipescu 전단실험을 실시하여 섬유 배열방향의 변화에 따른 전단강도를 구하고, 2차원 절삭(orthogonal cutting)을 실시하여 절삭력과 칩(chip) 형태의 관찰로 부터 절삭모델을 제안하였으며, 섬유 배열방향과 절삭방향에 따른 전단강도가 증가할수록 절삭력도 따라서 증가하고 있음을 설명하고 있다.

Fig. 3은 섬유 배열방향과 절삭방향이 이루는 각도와 절삭력 변화의 관계를 자세히 알아보기 위해 Fig. 2(a)에서 최대 트러스트를 나타내는 부분(sampling number : 480~490)을 확대하여 나타낸 것으로 일방향(unidirection)으로 적층된 섬유의 적층방향과 주절삭날의 절삭방향이 만나는 각도 θ가 0° 로 부터 증가함에 따라 전단강도도 증가하게 되고 트러스트도 증가하게 되며, θ가 90°일 때 최대가 되고, 이후 θ가 감소함에 따라 전단강도와 트러스트도 비례적으로 감소한다. 그러나 θ가 0° ~ 90° 에서는 섬유층간박리(fiber delamination) 형태의 절삭기구를 보이면서 비교적 완만한 트러스트의 증가를 나타내며, 90° ~ 180° 에서는 주절삭날이 섬유를 누르며 절단하는 섬유절단(fiber cutting) 형태의 절삭기구를 나타내기 때문에 트러스트 감소의 정도가 심하게 발생되고 있다.

반면에, Fig. 4는 적층각도 [0°/±45°/90°]s 시편의 드릴링 실험에 의하여 획득된 절삭력 변화 중 한 예를 나타낸 것으로, 적층각도 0° 인 시편의 경우(Fig. 2)에 비하여 절삭력의 변동이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이와 같이 절삭력의 변동이 상대적으로 작게 나타나고 이유는 드릴의 주절삭날이 선단각만큼 기울어져 있기 때문에 드릴의 주절삭날과 시편의 가공부분에서 탄소섬유의 배열방향과 주절삭날의 절삭방향이 만나는 각도가 어떤 한 층에서 0° 로 만난다면 그 다음 층은 45° 로 그 다음 층은 90° 로 만나면서 전단강도 변동의 차이를 줄여 주게 되고, 절삭기구도 섬유층간박리 형태와 섬유절단 형태가 혼재된 상태로 가공이 진행되기 때문으로 판단된다.

이방성 재료인 복합재료의 드릴링에서 절삭력의 변동이 섬유의 적층각도과 드릴의 주절삭날이 만나는 각도에 기인함을 확인하기 위하여 절삭력 신호의 주파수 특성을 알아보고자 FFT를 행하였다. Fig. 5는 섬유 적층각도 0° 의 시편과 [0°/±45°/90°]s의 시편의 드릴링시 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 주파수 분석에서 진폭(amplitude)의 최고 값은 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 진폭의 최고값은 약 42 Hz 대역에 존

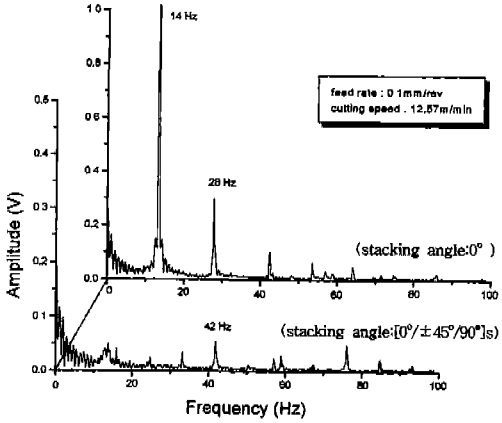

Fig. 5 Spectrum of thrust force in drilling

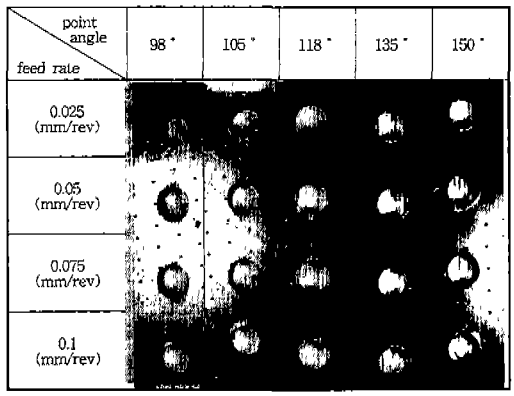

Fig. 6 Photograph of the specimen after drilling(stacking angle:0°)

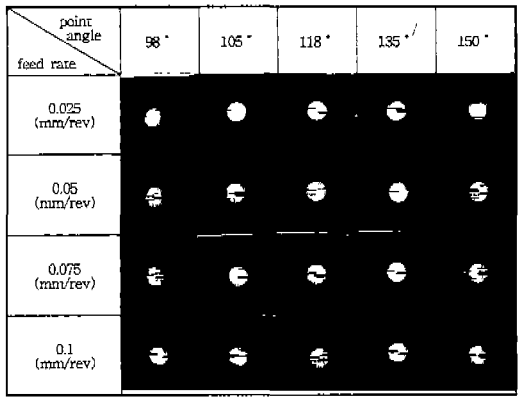

Fig. 7 Photograph of the specimen after drilling(stacking angle:[0°/±45°/90°]s)

재하고 있으며, 절삭력 변동의 차이가 섬유 적층각도 0 ° 의 시편에 비하여 작기 때문에 진폭 값은 비교적 작은 수치를 보인다.

동방성재료인 금속이나 합금재료의 드릴링 가공과는 달리, 이방성재료인 섬유강화 복합재료의 드릴링 가공에서의 두드러진 차이점은 주절삭날의 회전운동에 대하여 섬유의 배열각과 절삭날이 만나는 각도가 주기적으로 변화하게 되고, 공구에 의하여 가해지는 외력에 대한 재료의 전단강도가 변화하게 되고, 결과적으로 이러한 전단강도의 변화는 절삭력의 변화로 이어지고 또한, 절삭기구의 형태도 달리 나타나게 된다.

3. 2 선단각의 변화에 따른 입 · 출구면 가공 상태

Fig. 6과 Fig. 7은 드릴 선단각을 98 ° , 105 ° , 118 ° , 135 ° , 150° 등으로 변화시킨 드릴로 섬유 적층각도 0 ° 의 시편과 [0°/±45°/90°]s의 시편을 이송률을 달리하여 드릴링 한 후, 출구면 상태를 나타낸 것이다. 입구면 보다는 출구면에서 탄소섬유의 잔류빈도가 높게 나타났고, 이송률이 증가할 수록 그 정도는 더욱 심해지고, 같은 이송률에서 선단각의 변화에 따른 출구면 상태는 선단각의 변화에 큰 영향을 받지 않는다. 탄소섬유의 잔류영역을 섬유 배열방향에 따라 살펴보면, 섬유 배열방향과 드릴의 가공방향이 만나는 각도가 0 ° ~ 45 ° , -180 ° ~ -135 ° 부근에서 드릴의 주절삭날이 섬유를 절단하지 못하고 절삭날의 상면을 따라 들려 일어나는 듯한 섬유층간박리 형태의 절삭기구를 이루므로 탄소섬유의 잔류 빈도가 높게 나타나게 된다. 그러나, 선단각 변화에 따른 입구면 상태는 선단각과 이송률이 커질 수록 90 ° 부근에서 층간박리 형태의 균열이 발생하여 탄소섬유의 잔류빈도가 높게 나타나고, 특히 다방향 적층([0°/±45°/90°]s) 시편에서는 이러한 현상이 더욱 뚜렷하다. 이러한 입구면 가공상태를 보이는 이유는 드릴링 초기의 드릴 날끝(chisel edge) 부근에서 절삭작용은 거의 이루어지지 않고 단지, 압입작용이 이루어지고 차츰 드릴링이 진행됨에 따라 복합재료의 섬유들이 드릴의 홈(flute)을 따라 당겨지는 경향을 보이게 되고, 드릴링이 완료 될 때까지 재료들은 나선형으로 말리는 현상(spiral up)을 보이게 되는데, 이러한 미가공 부분으로 부터 적층판을 윗방향으로 분리시키는 힘 즉, 축방향으로의 수직분력이 선단각이 커질수록 크게 작용하기 때문이다.

3. 3 선단각의 변화에 따른 절삭력 변화

Fig. 8(a)와 (b)는 적층각도 0°의 시편에 대하여 선단각의 변화에 따른 최대 트러스트와 토오크의 변화를 나타낸 것으로 트러스트의 경우, 드릴 선단각 98°인 경우를 제외하고 선단각이 작을 수록 적은 트러스트를 보이고 있다. 이는 드릴의 선단각이 작아질 수록 드릴의 절삭면에 작용하는 수직분력이 작아지게 되고, 더불어 공구 이송방향으로의 마찰력이 감소되기 때문으로 생각된다. 그러나, 드릴 선단각 98°의 경우 오히려 트러스트의 증가가 보이는데, 이는 회전하는 드릴 선단으로부터 주절삭날의 마아진 부분까지 가공이 이루어질 때 다른 선단각 값을 갖고 있는 드릴들에 비하여 주절삭날의 기울어진 부분의 절삭속도가 현저히 떨어지기 때문에 정상적인 가공이 진행되지 못하기 때문으로 생각된다. 그러나 토오크의 경우는 선단각의 변화에 따른 영향이 그다지 크지 않지만, 이송률 0.075mm/rev 이상에서는 같은 선단각에서 트러스트가 클 때 작은 토오크를 보이고, 트러스트가 작을 때 큰 토오크를 보이고 있다. Fig. 9(a)와 (b)는 적층각도 ([0°/±45°/90°]s 시편에 대하여 선단각의 변화에 따른 최대 트러스트와 토오크의 변화를 나타낸 것이다. 적층각도 0°의 시편에 대한 선단각의 영향에 비하여 더욱 뚜렷한 결과를 보이고 있다. 트러스트의 관점에서 볼 때, 선단각 105°의 경우가, 토오크의 경우는 118°가 가장 작은 절삭력을 보이고 있다.

결론적으로 초경드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링에서 절삭력 변화는 드릴의 회전운동에 의한 가공방향과 섬유 배열방향이 이루는 각도의 주기적 변화에 따른 전단강도의 변화와 절삭기구 차이에 기인하며, 따라서 절삭력의 변동은 적층각도 0°시편의 경우가 적층각도 ([0°/±45°/90°]s 시편의 경우 보다 심하게 발생한다. 그리고 선단각의 변화에 따라 출구면 상태는 큰 영향을 받고 있지 않지만, 선단각이 커질수록 축방향으로의 수직분력이 크게 작용하기 때문에 입구면에서의 탄소섬유의 잔류가 많이 나타나게 되며, 절삭력과의 관계는 선단각이

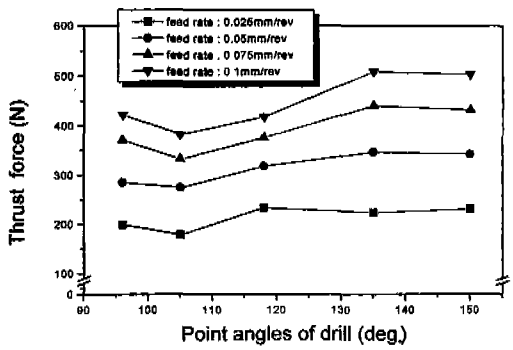

Fig.8(a) Maximum thrust force with respect to point angle (stacking angle:0°)

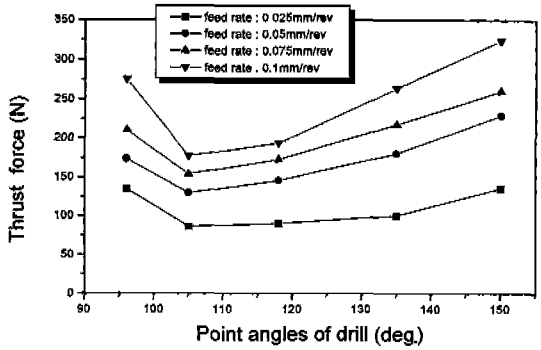

Fig.9(a) Maximum thrust force with respect to point angle (stacking angle:[0°/±45°/90°]s)

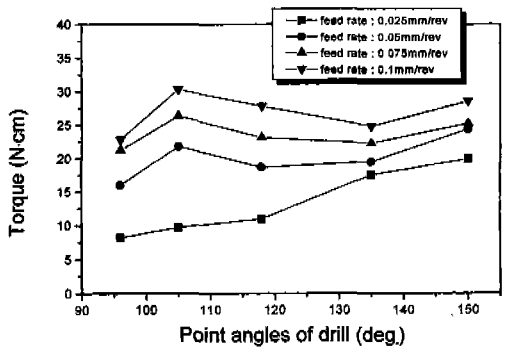

Fig.8(b) Maximum torque with respect to point angle (stacking angle:0°)

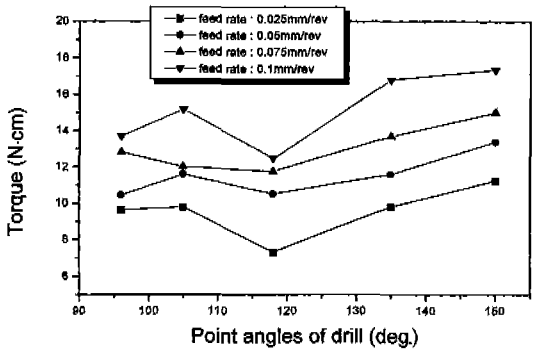

Fig.9(b) Maximum torque with respect to point angle (stacking angle:[0°/±45°/90°]s)

작을 수록 적은 트러스트를 보이고 있으며, 토오크의 경우는 선단각의 변화에 따른 영향이 그다지 크지 않지만, 적층각도 [0°/±45°/90°]s의 탄소섬유 복합재료의 가공에 있어서 트러스트의 경우, 드릴 선단각이 105°, 토오크의 경우는 118°가 비교적 낮은 절삭력의 분포를 나타내었다.

4. 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 최대 절삭력과 출구면 상태에 미치는 영향 등의 드릴링 특성을 살펴보았고, 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 탄소섬유 복합재료의 드릴가공시 발생되는 절삭력의 변동은 적층각도 0° 경우가 [0°/±45°/90°]s의 경우보다 심하게 발생하며, 절삭력 변동에 대한 주파수분석을 통하여 섬유의 배열방향과 드릴의 주절삭날이 만나는 각도의 변화에 기인한 것임을 확인하였다.

2) 동일한 이송률에서 선단각이 커질수록 축방향으로의 수직분력이 크게 작용하기 때문에 입구면에서의 균열과 거스러미(burr)가 많이 나타나게 된다.

3) 선단각이 작을 수록 적은 트러스트(thrust force)를 보이고 있으며, 토오크(torque)의 경우는 선단각의 변화에 따른 영향이 그다지 크지 않지만, 적층각도[0°/±45°/90°]s의 탄소섬유 복합재료의 가공에 있어서 트러스트의 경우는 드릴 선단각이 105°, 토오크의 경우는 118°가 비교적 낮은 절삭력의 분포를 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구과제(KOSEF : 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. M. Ramulu and D. Arora, "Waterjet and Abrasive Waterjet Cutting of Unidirection Graphite/Epoxy Composites" Composites, Vol. 24, No. 4, pp. 299-308, 1993.
6. V. Tagliaferri, A. Diilio and I. Crivelli Visconti, "Laser Cutting of Fiber-reinferced Polyesters", Composites, Vol. 16, No. 4, pp. 317-325, 1985.
7. W. Koenig, P. Grass, "Quality Definition and Assessment in drilling of Fiber Reinforced Thermosets", Annals of the CIRP, Vol. 38/1, pp. 119-124, 1989.
8. H. Ho.-Cheng, C. K. H. Dharan, "Delamination During Drilling in Composite Laminates", Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 236-239, 1990.
9. 김형철, 김기수, 함승덕, 김홍배, 남궁 석, "다이아몬드 입자 전착드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제12권, 제8호, pp. 27-38. 1995.
10. N. Bhatnagar, N. Ramakrishnan, K. naik, R. Komanduri, "On the Machining of Fiber Reinforced Plastic(FRP) Composite Laminates", Int. J. Mach. Tools Manu fact. Vol. 35, No.5, pp. 701-716, 1995.