

공구 형상에 따른 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 복합재료의 절삭 특성에 관한 연구

신봉철*, 김규복⁺, 하석재⁺, 조명우⁺⁺

(논문접수일 2011. 05. 17, 수정일 2011. 08. 05, 심사완료일 2011. 08. 10)

A study on the machinability of Carbon Fiber Reinforced Plastics on tool shape

Bong-Cheul Shin*, Kyu-Bok Kim⁺, Seok-Jae Ha⁺, Myeong-W Cho⁺⁺

Abstract

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) has been used many industries aerospace, automobile, medical device and building material industries, etc. Because it is lighter than other metals and has good properties, such as rigidity, strength and wear. CFRP may be cured integrity. However, it needs postprocessing similar to drilling or endmilling for shape cutting and combination of various material. In this paper, tool dynamometer and accelerometer used to signal analysis for machining properties under various cutting conditions and tool shape changes. In addition, microscope used to verify the machined CFRP surface. As the results, it was found that the cutting force and the vibration were decreased in the increasing of cutting edge (2-flute < 4-flute < composite tool), and the good machined surface can be obtained in this experiments.

Key Words : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)(탄소섬유 강화 플라스틱), Tool Dynamometer(공구 동력계), Accelerometer sensor(가속도계 센서), Composite Tool(복합재료 가공용 공구), Conventional cutting(범용 절삭)

1. 서론

최근 산업의 발달과 기술의 진보에 따라 고정밀도, 높은 생산성 및 금속재료의 대체 가능성이 높은 신소재 개발과 응용 분야에 관심이 집중되고 있다. 신소재 중 복합재료는 두 가지 이상의 화학적 성분이나 다른 구성 요소가 조합되어 요구되는 기계적 특성을 가지도록 설계하여 만든 재료를 말한다⁽¹⁾. 이 중 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 복합재료는 항공기, 자동차, 선박, 스포츠 용품 및 의료기기 산업 등에서 많이 사용되고 있으며, 특히 재료의 특성은 알루미늄보다 가볍고, 비강성

과 비강도, 내마멸성, 피로 특성 등 우수한 기계적 특성으로 인해 각광받고 있다⁽²⁻³⁾. CFRP 복합 재료는 탄소섬유(carbon fiber)를 기본으로 하여 fiber의 형상을 유지하기 위해 기계적, 화학적 성질이 우수한 에폭시(epoxy) 수지를 기지재(matrix)로 사용하여 만들어진 재료로서 방향성에 의한 배열 및 적층수와 각 fiber의 물성에 의해 강성 및 강도를 조절할 수 있다는 장점이 있다⁽⁴⁾. CFRP 복합재료의 제조 방법은 오토클레이브 성형법(Autoclave), 진공백 성형법(Vacuum Bag Molding), SMC 성형법(Sheet Molding Compound), RTM 성형법(Resin Transfer Molding) 등을 이용하여 1차 성형만으로도 형상 제조를 할 수

* 인하대학교 기계공학과 (kenny77b@empal.com)

주소: 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

+ 인하대학교 기계공학과

++ 인하대학교 기계공학부

있다. 또한, CFRP 복합재료의 용도가 다양화되고 금속 재료와의 결합과 형상 가공을 위해서는 2차 가공인 절삭 공정이 필요하며 절삭 가공에서는 주로 드릴링 및 밀링 공정 등을 통해 가공이 이루어진다⁽⁵⁾. 이러한 CFRP 복합재료의 절삭공정을 통하여 형상가공에 따른 절삭특성 및 가공 결점을 해결하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. Hocheng⁽⁶⁾과 Pwa는 섬유 배열 방향 및 절삭방향에 의하여 전단강도가 증가하는 것을 많은 실험을 통하여 증명하였으며, Wang⁽⁷⁻⁸⁾은 CFRP를 일방향과 다방향으로 배열하여 절삭에 따른 칩 형태와 절삭력, 표면거칠기 등을 연구하였다. Davim 과 Reis⁽⁹⁾은 CFRP 복합재료의 드릴 가공 시 factors와 박리계수 사이의 상관관계를 연구 하였으며, 절삭 매개변수에 따른 표면 손상 및 박리 현상에 대하여 연구하였다. 하지만 복합재료의 밀링 공정에서는 드릴 공정에서와 같이 절삭 조건 및 절삭 공정에 따른 재료의 표면 상태 및 절삭 특성에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CFRP 복합재료에 대하여 밀링 공정에서의 측면 절삭(Side Cutting)을 통한 절삭 조건 변화 및 절삭 공구(공구형상 및 절삭날)에 따른 절삭 표면 상태 분석을 수행하였다. 또한 절삭 공정의 상태 모니터링을 위하여 공구 동력계(Tool Dynamometer)와 가속도계(Acceleration sensor)를 사용하였다.

2. 실험 장치 구성 및 조건

2.1 시편 선정

본 연구에서 사용한 CFRP 복합재료는 Toray사에서 생산한 일방향 탄소섬유 (Carbon Fiber)와 에폭시 수지로 조합된 프리프레그(prepreg)를 적층하여 제작된 시편(T800HB)를 사용하였다. 시편의 전체 크기는 60×100×4mm 판재형상으로 제작하였고, 절삭 공정에서 사용된 시편은 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 50mm×100mm의 크기로 절단하여 사용하였다. 시편의 제작공정은 탄소섬유의 적층 각도를 [0°/±45°/90°]으로 총 20층(ply)으로 적층되었다. 성형조건은 Fig. 1과 같이 챔버(Chamber)

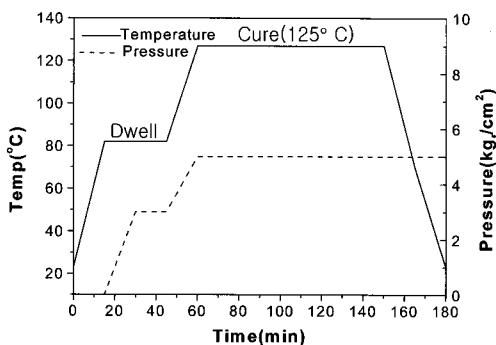


Fig. 1 Stacking sequence for CFRP fabrication

Table 1 Mechanical properties of Carbon Fiber Prepreg (T800HB)

Tensile Strength	5490 Mpa
Tensile Modulus	294 Gpa
Elongation	1.9 %
Density	1.81 g/cm ³

내부에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 125°C, 경화 시간 180분, 성형 시 압력은 5kg/cm²로 가압시켜 제작되었다. Table 1은 탄소섬유 프리프레그의 기계적인 물성치를 나타낸다.

2.2 실험 장치 구성

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험 장치 및 절삭 공정 상태 모니터링 시스템의 개략도를 나타낸다. 실험 장치는 수직형 머시닝 센터(Hyundai, Hi-Mac-V100)를 사용하였다. CFRP 복합재료의 절삭 특성을 분석하기 위해 시편 하단에 공구 동력계(Kistler, Type 9272)를 설치하였다.

또한, 절삭 가공 중 공구형상에 의한 복합재료에서 발생하는 진동 신호를 측정하기 위해 시편 상단에 3축 가속도 센서(Fuji, SA12ZSC-T1)를 설치하였다. 이러한 신호는 A/D Board (NI, PCI-9133)와 LabVIEW를 이용해 데이터를 획득하였으며, 획득한 데이터는 샘플링 주파수 26,500Hz, 측정 시간을 20초로 설정하여 획득하였다. 절삭 가공 후 공구 현미경을 이용해 절삭 가공된 표면의 버(burr) 및 절삭 상태를 관찰하였다. 실험 조건은 절삭 조건(이송속도 및 절삭속도)과 절삭 공구(공구형상 및 절삭날)에 따른 가공 특성을 분석하기 위해 Fig. 3과 같이 절삭 공구는 일반적으로 사용하는 직경 Φ 6mm 범용 엔드밀 2날 (UNION TOOL, C-CES 2060-1500, Helix angle : 30°, Length of Cut : 15mm), 4날 (UNION TOOL, C-CHES 4060-1500,

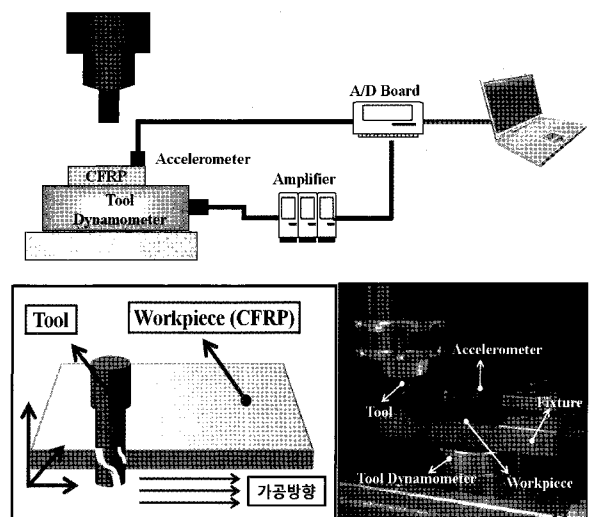


Fig. 2 Experimental set up for CFRP monitoring system

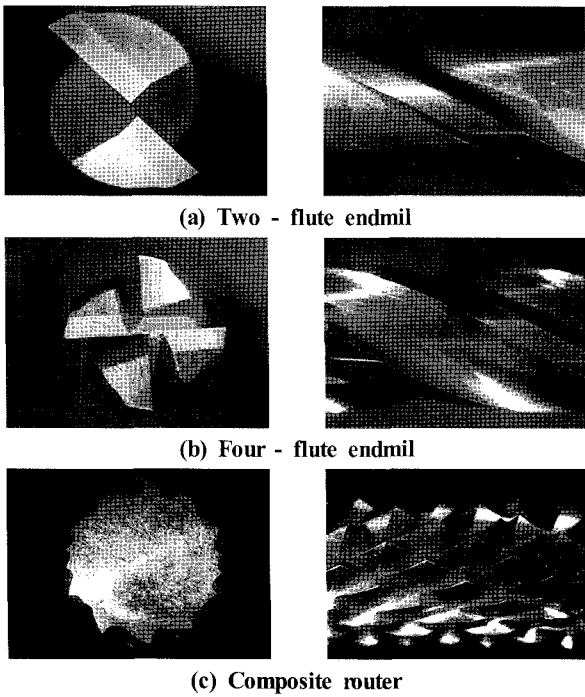


Fig. 3 Used tools for experiments

Table 2 Cutting condition

Index	Level
Tool shape	2/4-Flat Endmill, Composite tool
Cutting velocity	800, 1600, 2400 rpm
Feed rate	300, 350, 400 mm/min

Helix angle : 30°, Length of Cut : 15mm)을 사용하였으며, 범용 엔드밀과 절삭날 형상이 상이한 복합소재 가공용 공구 (Composite Tool, SGS, Cutter Diameter : 1/4 inch, Flute Length : 3/4 inch)를 사용하였다.

따라서 본 연구에서 사용한 절삭 조건으로는 절입량을 2mm로 고정하고 절삭 속도 및 이송 속도의 변화를 주었다. 절삭 조건에 따른 절삭력 및 진동 신호를 일정하게 측정하기 위해 시편과 고정치구와의 거리를 일정하게 유지시키고, 상향 밀링으로 실험을 수행하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 실험 조건을 나타낸다.

3. 실험 결과

3.1 절삭조건 및 절삭공구에 따른 신호분석

CFRP 복합재료의 절삭특성을 평가하기 위해 절삭공구 및 절삭조건 변화에 따른 실험을 수행하였다. Fig. 4~6은 절삭공구(2날/4날 및 복합소재 가공용 공구)에 따른 공구 수직방향의 절삭력을 나타낸다. 실험 결과 절삭 공구의 수직방향 절삭력은 절삭 속도 증가에 따라 절삭력은 감소하였고, 이송 속도의

증가는 절삭력을 증가시키는 경향을 보이고 있다. 절삭날의 개수에 따라 비교 해보면 각 조건에 따라 2날과 4날 엔드밀에 비해 복합소재 가공용 공구는 상대적으로 적게 절삭력이 작용하는 것을 확인 할 수 있었다. 복합소재 가공용 공구는 앞선 공구형상 측정결과와 같이 공구 헬릭스 각이 없고 절삭날 비틀림 방향이 반대방향으로 되어 있어 절삭력이 감소한 것으로 확인할 수 있다.

Fig. 7은 절삭공구 형상에 따른 절삭력을 시간영역에서 신호를 분석한 것이다. Fig. 7의 좌측 신호는 전체 절삭 구간의 신호를 시간에 대하여 나타내었으며, Fig. 7의 우측 신호는 절삭 공

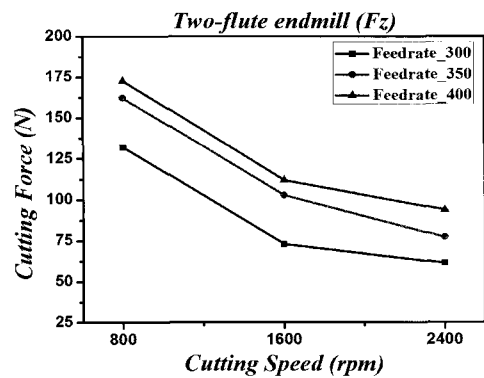


Fig. 4 Cutting force variation using 2-flat endmill

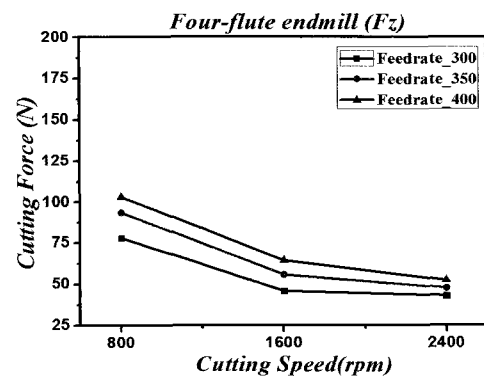


Fig. 5 Cutting force variation using 4-flat endmill

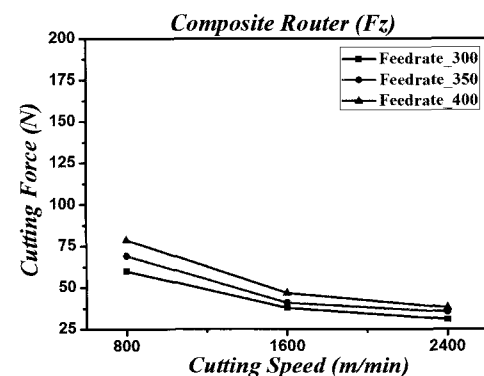


Fig. 6 Cutting force variation using composite router

구의 날 당 절삭력을 분석하기 위해 공구 2회전 시 데이터만을 추출하여 나타내었다. 2날과 4날 엔드밀의 경우에는 헬릭스 각 및 비틀림 방향의 영향으로 절삭 시 시편을 상단으로 들어 올리는 현상으로 절삭력은 (-) 방향으로 작용하게 된다. 또한 동일 조건에서 2날에 비해 4날 엔드밀이 절삭 날의 증가로 절삭 부피가 감소하게 되어 절삭력은 감소하게 된다. 복합소재 가공용 공구의 경우에는 범용 엔드밀과 다르게 비틀림 방향이 반대인 원 비틀림 엔드밀로서 힘이 (+) 방향으로 작용하게 되고 2날과 4날 엔드밀에 비해서 절삭날이 없어 공구 절삭 날에 대한 1회전 주기를 찾기 힘들었다.

이는 Fig. 8과 같이 절삭 공구 각 날의 길이가 B방향 날 길이보다 A방향 절삭날의 길이가 증가 되어 있어 시편 상단으로 들어 올리는 힘보다 소재 아래 면으로 누르는 힘이 보다 크게 작용하게 되고 동일 위치의 날들이 같은 절삭 작용으로 인해 주기를 찾기 힘들다고 판단된다. 또한 절삭날 개수의 증가로 절삭 부피가 상대적으로 작게 걸리게 되어 절삭력이 작게 작용

하게 된다.

또한 본 연구에서는 가속도계를 이용하여 공구 형상 및 절삭 날 수에 의한 탄소섬유 복합재료의 가공 특성을 분석하기 위해 진동 신호를 분석하였다. 절삭공구의 형상에 따른 절삭력의 신호 경향을 분석하기 위해 절삭력이 가장 적게 걸리는 절삭속도 45mm/min, 이송 속도 300mm/min 조건에 대하여 신호 분석을 하였다. Fig. 9는 3축 가속도 센서를 이용하여 앞에서 언급한 3가지 공구에 대하여 진동 신호를 시간영역에서 분석하였다. 앞에 절삭력 신호 분석과 마찬가지로 동일한 조건 절삭 속도 45mm/min, 이송 속도 300mm/min 에 대하여 진동 신호를 분석해 본 결과 절삭력과 유사한 경향을 나타내었다. 이 결과 동일한 조건에서 범용 엔드밀에 비해 복합소재 가공용 공구의 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 절삭력 실험과 마찬가지로 절삭 부하에 영향과 공구의 비틀림 방향의 특성상 부하가 적게 걸려 진동이 적게 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9의 좌측 신호는 전체 절삭 구간의 진동 신호를 시간에 대하여 나타내었으며, Fig. 9의 우측 신호는 절삭 공구의 날 당 절삭력을 분석하기 위해 각각의 공구에 대하여 2회전 했을 때의 데이터를 추출하여 나타내었다. 하지만 진동 신호를 이용해 절삭력과 같은 절삭 주기는 찾기 힘들었으나 공구에 따른 진동 신호의 진폭 변화는 확인할 수 있었다. 측정 결과 4날 엔드밀에 비해 2날 엔드밀은 진동의 진폭이 상대적으로 크게 발생하였고

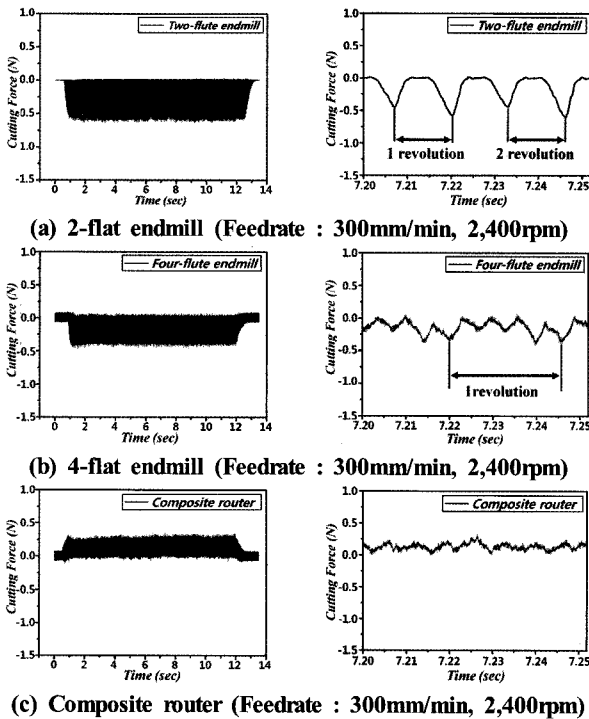


Fig. 7 Measured cutting force signals according to tool shape

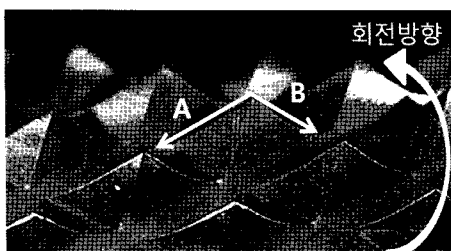


Fig. 8 Photograph of composite router

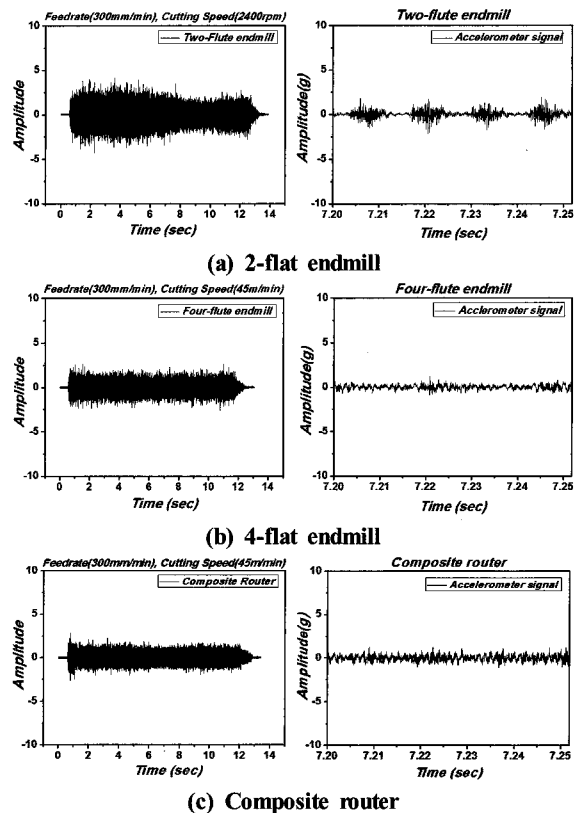


Fig. 9 Measured accelerometer signals according to tool shape

복합소재 가공용 공구의 경우에는 범용 엔드밀에 비해 진폭이 적게 발생하였는데 이는 절삭날의 형상이 격자로 이루어져 있으며, 범용 엔드밀에 비해 예리한 절삭날이 없기 때문이다. 따라서 복합소재 가공용 공구는 복합소재 가공 시 진동에 의한 영향이 범용 엔드밀보다 적게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 표면 형상 분석

Fig. 10은 앞에서 실험한 절삭공구의 형상에 따른 시편의 형상을 보여주고 있다. 가공된 복합소재의 표면 상태 측정은 공구 현미경을 이용하여 측정하였다. 범용 엔드밀 공구를 이용한 시편의 표면 상태는 비교적 양호하지만 2날 및 4날 엔드밀을 사용한 모든 시편의 상단 부에 burr가 발생하였다. 2날 엔드밀을 사용했을 때 보다 4날 엔드밀을 사용했을 경우 CFRP 복합재료의 상단 부에 burr의 발생이 상대적으로 적게 발생하였고, 절삭속도 및 이송속도가 증가할 때에도 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 복합소재 가공용 공구의 경우에는 범용 엔드밀을

사용한 시편보다 표면이 거칠지만 CFRP 복합재료 상단 부에 burr가 거의 발생하지 않았다. 이러한 현상은 범용 엔드밀 공구의 경우에는 헬릭스 각에 의해 CFRP 복합재료 시편의 측면이 절삭 되지만, CFRP 복합재료 시편의 상단 부위에서는 섬유 배열방향 및 적층 각도에 따라 절삭 가공 시 공구 헬릭스 각에 의해 층(ply)을 들어 올려 나선형으로 말리는 현상(Spiral up)이 발생하게 된다. 복합소재 가공용 공구의 경우에는 범용 엔드밀 보다 절삭날이 예리하지 않고 형상이 격자로 이루어져 있어서 절삭가공 보다는 분진형태의 기지재(matrix)와 섬유를 갈아내는 형태로 가공이 되므로 표면은 거칠어지지만 상단 부에 burr가 발생하지 않았다. 이 결과 CFRP 판재는 범용 공구를 이용한 형상 가공 보다는 복합소재 가공용 공구를 이용한 형상 가공이 보다 유용하다는 것을 판단할 수 있었다.

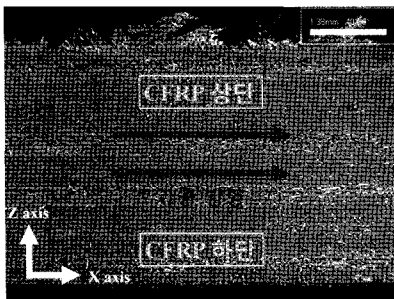
4. 결론

본 연구에서는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)복합재료에서의 측면 밀링 가공을 통한 절삭 특성을 분석하기 위해 절삭 조건 변화에 따른 2날, 4날 엔드밀 및 복합재료 가공용 공구를 이용하여 절삭 공정에서의 센서신호 분석 및 가공 표면 형상 측정을 통해 CFRP 복합재료의 가공 특성을 분석하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

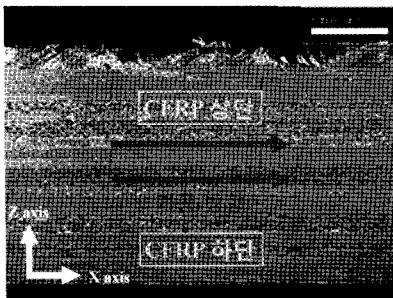
- (1) 각 공구에 따른 절삭력은 절삭속도의 증가와 이송속도가 감소에 따라 절삭력은 적게 작용하였고 동일 절삭 조건에서는 2날, 4날, 복합재료 가공용 공구 순서로 적게 작용하였다.
- (2) 2날과 4날 엔드밀의 절삭력 측정 결과 절삭가공이 이루어지는 영역에서 Z축 방향 절삭력이 약 100N정도 측정되었고, 복합재료 가공용 공구의 경우에는 약 50N 절삭력이 측정되어 CFRP 절삭가공 시 절삭력이 약 2배 정도 적게 나타났다. 이는 복합재료 가공용 공의 경우 절삭날이 격자 형상을 가지며 범용 엔드밀에 비해 예리한 절삭날이 없기 때문이다.
- (3) 절삭 공구에 따른 가공된 표면을 분석한 결과 2날과 4날 엔드밀의 경우 공구 헬릭스 각의 영향으로 시편을 위로 들어 올리는 현상으로 상단부위에 burr가 발생한 반면에 방향성이 없는 복합재료 가공용 공구는 burr가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

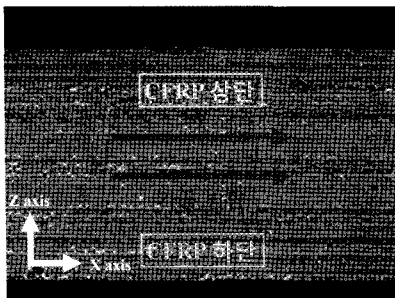
이 논문은 2011학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.



(a) 2-Flat Endmill (Feedrate : 300mm/min, rpm : 2,400)



(b) 4-Flat Endmill (Feedrate : 300mm/min, rpm : 2,400)



(c) Composite router (feedrate : 300mm/min, rpm : 2,400)

Fig. 10 Photographs of cross sections machined specimen according to tool shape

참고 문헌

- (1) Abrate, S., and Walton, D., 1992, "Machining of composite materials. Part I : Traditional methods," *Composites Manufacturing*, Vol. 3, No. 2, pp. 75~83.
- (2) Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J. R. S., and Tan, D. C. G., 1999, "Machinability Study of Carbon Fiber Reinforced Composite," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 89-90, pp. 292~297.
- (3) Teti, R., 2002, "Machining of Composite Materials," *CIRP Annals-Manu. Tech.*, Vol. 51, Issue 2, pp. 611~634.
- (4) Paule Davim, J., and Pedro Reis., 2005, "Damage and Dimensional Precision on Milling Carbon Fiber-reinforced Plastics using Design Experiments," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 160, Issue 2, pp. 160~167.
- (5) Sung, I. S., Lim, S. H., and Kim, J. H., 2005, "A Study on the Chip Shapes Properties of the Fiber Reinforced Plastics by High Speed Drilling Process," *J. of the KSMTE.*, Vol 2005, pp. 168~173.
- (6) Pwa, H. Y., and Hocheng, H., 1998, "Chip Formation Model of Cutting Fiber Reinforced Plastic Perpendicular to Fiber Axis," *Trans. of the ASME*, Vol. 120, pp. 192~196.
- (7) Wang, D. H., Ramulu, M., and Arola, D., 1995, "Orthogonal Cutting Mechanisms of Graphite/Epoxy Composite. Part I : Multi-Directional Laminate," *Int. J. of Mach. Tools and Manu.*, Vol. 35, No. 12, pp. 1623~1638.
- (8) Wang, D. H., Ramulu, M., and Arola D., 1995, "Orthogonal Cutting Mechanisms of Graphite/Epoxy Composite. Part II : Multi-Directional Laminate," *Int. J. of Mach. Tools and Manu.*, Vol. 35, No. 12, pp. 1639~1648.
- (9) Davim, J. P., and Reis, P., 2003, "Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber-reinforced Plastics (CFRP) using Design Experiments," *Composite Structures*, No. 59, Issue 4, pp. 481~487.