

복합재료의 고속드릴링 가공시 칩형태에 관한 연구

성인식*, 임세환⁺, 김주현⁺⁺

A Study on the Chip Shapes Properties of the Fiber Reinforced Plastics by High Speed Drilling Process

Sung In-Sik*, Lim Se-Hwan⁺, Kim Joo-Hyun⁺⁺

Abstract

Composite material is combined with two or more chemical ingredient and different components. FRP has been widely used for the structure of aircraft, ships, automobiles, sporting goods and other machines because of their high specific strength, high specific stiffness and excellent fatigue strength. Recently, the development of machine tool and cutting tool greatly relies on high speed process to satisfy high precision, high efficient machining, shortened process time to maximize material removal rate (MRR) through high cutting speed and feed speed. The research molded CFRP, GFRP as stacking sequence methods of two direction (orientation angle 0° and 0°/90°) hand lay-up, drilled molded plates using cemented carbide drill and examined chip shapes, surface roughness properties.

Key Words : Composite Material, High Speed Drilling Process, CFRP, GFRP

1. 서론

최근 산업사회 전반의 급격한 발전과 더불어 경량하고 높은 내구성 등 우수한 기계적, 화학적 특성을 갖는 신소재 개발과 응용분야에 관심이 집중되고 있다. 또한 고도의 제품생산 능력과 고정밀도의 생산성을 높이기 위한 고속 가공에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 신소재 중 복합재료(Composite Material)는 두 개 이상의 화학적 성분이나 형태가 다른 구성요소가 결합되어 거시적으로 경계면을 갖으며 새로운 특성을 갖는 소재를 의미한다. 복합재료 중 섬유강화플라스틱은 일반 금속에 비해 비강도(St/p), 비탄성율(E/p), 내 마멸성, 피로특성, 내

열 및 내부식성이 뛰어나 우주항공재료, 자동차의 내장재료, 스포츠 용품, 선박재료, 전자 부품, 의료 용품까지 널리 사용되고 있다⁽¹⁾.

최근 섬유강화 플라스틱 중 보강재를 탄소섬유로 사용한 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)과 유리섬유를 사용한 유리섬유강화 플라스틱(GFRP)이 주로 사용되고 있는데, 탄소섬유강화 플라스틱은 유리섬유강화플라스틱에 비해 비탄성계수가 최소 4~9배 이상 크지만 상대적으로 고가이고, 철강에 비해 강도가 3배 이상 높은 장점이 있다. 복합재료를 성형하는 방법은 오토클레이브(Autoclave), 열 프레스(Hot press) 성형법 등으로 원하는 형상의 재료를 얻을 수 있지만 다른 재료 부품과의 접합 시에는

* 한국야금(주) (ibs2002@freechal.com)
충북 청주시 흥덕구 송정동 53-16 생산기술연구소
⁺ 국민대학교 자동차대학원
⁺⁺ 국민대학교 기계자동차공학부

2차 가공이 필요하다⁽²⁾. 주로 접착제 또는 드릴가공을 통한 볼트 체결 방식을 사용하고 있는데 섬유강화플라스틱은 일반 금속과 달리 드릴 가공시 가공면 가장자리나 벽면에서의 섬유 및 수지의 찢겨짐, 재료 내부에서의 섬유들의 분리 등의 결점이 존재하고⁽³⁾, 이러한 가공 결점을 해결하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이에 따른 연구들로는 Dharan⁽⁴⁾의 탄소섬유강화 플라스틱의 드릴 가공시 섬유배열과 방향에 의한 절삭력과 공구마모 상태, 입·출구 가공면에 대한 이론적 절삭 모델을 제안 하였다. Chen⁽⁵⁾은 탄소섬유강화 복합재료를 고속도강을 이용하여 선단각과 웹두께 등의 형상을 변화시키며 공구마모와 절삭력의 관계에 연구를 하였다.

Ho-Cheng⁽⁶⁾은 CFRP 복합재료의 드릴 가공시 표면박리 현상을 파괴역학 모델과 가공시 발생하는 트러스트를 이용하여 표면박리가 일어나지 않는 최소 추력을 예측하기 위한 연구를 수행 하였다.

Koenig⁽³⁾는 CFRP 복합재료의 드릴 가공시 트러스트의 변화에 따른 박리현상과 표면손상의 정의에 대하여 연구 하며, 구조물 수명에 영향을 주는 구멍가공의 정밀도에는 표면거칠기, 진직도, 진원도, burr의 형성, 결합층 등에 의해 나타남을 연구 하였다.

Wang^(7~8)은 CFRP와 GFRP를 일방향과 다방향으로 배열하여 절삭에 따른 칩 형상과 절삭력, 표면거칠기 등을 연구 하였다.

그러나 최근 공작기계와 공구의 발전으로 고속가공기를 이용한 고정도, 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있으나, 현실적으로 현장에서 필요로 한 고속가공을 통한 섬유강화 플라스틱에 대한 연구가 미진한 상황이다. 고속가공은 높은 절삭속도와 이송속도로 재료 제거율을 극대화시켜 가공시간을 단축시킬 수 있고, 또한 일반절삭가공으로 가공하기 힘들었던 고정도재 등의 난삭재의 절삭가공도 할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 고속가공시 절삭속도가 증가함에 따라 절삭온도가 급격히 증가된다. 높은 절삭온도는 가공시 공구의 수명을 크게 감소시키는 영향을 주며, 가공 표면 또한 가공 변질층, 잔류응력 발생 등의 단점이 존재 하게 된다.

본 연구에서는 고속 드릴가공을 통한 탄소섬유강화 플라스틱과 유리섬유강화 플라스틱을 섬유 배열각도 [0°]와 [0°/90°]의 두 가지 형태로 성형하여 초경 드릴을 통해 고속 가공시 발생하는 칩 형태, 표면 거칠기 특성을 실험적으로 알아보고자 함에 있다.

2. 드릴 가공시 칩 형상과 생성조건

트위스트 드릴에서 구멍을 가공할 때, 칩의 형상을 다음의 6 가지로 분류한다.

- 1) 원추나선형 칩 (Conical helix type chip)
- 2) 긴피치형 칩 (Long pitch type chip)
- 3) 지그재그형 칩 (Zigzag type chip)
- 4) 바늘형 칩 (Smaller : Pin type chip)
- 5) 부채꼴형 칩 (Segment type chip)
- 6) 절단형 칩 (Cutting-off type chip)

3. 실험 장치 및 방법

3-1. 실험장치

3-1-1. 실험장비

본 실험에 사용된 장비는 Table 1에 제시된 바와 같이 (주)화천공작기계의 Hi-M675i 고속가공 M/C를 사용하였고, 드릴을 홀더에 강력히 고정시키기 위해 드릴 홀더는 Nikken사의 BT-30-SK10-90, 콜레트는 흔들림 정도 5 μm의 강한 척킹력을 갖는 Nikken사의 SK10-7 슬립형 콜레트를 사용하였다. 가공면의 거칠기 측정을 위해 Mahr 사의 PGK120 축심 표면거칠기 측정 장치를 사용하였다.

3-1-2. 절삭공구

본 연구에 사용된 절삭공구는 일반 고속도강 드릴과 코발트 드릴은 고속가공시 발생하는 높은 절삭온도로 인해 정상적인 홈 가공이 불가능한 이유로 한국야금(주)사의 초경솔리드 드릴(SSD 070, 선단각 118°) φ 7mm를 사용하였다.

Table 1 Specifications of machining center

Specification	Dimensions & Illustration
Type	Vertical 3 axis M/C
Model	Hi-M675i
Max. main shaft rpm	24,000 rev/min
Table size	650×750 mm
Feed speed	1~25,000 mm/min

3-1-3. 파삭재 제작

본 연구에 사용된 탄소섬유와 유리섬유 에폭시 프리 프래그(prepreg)는 결합재를 강화섬유에 미리 함침 시킨 Sheet 형태의 제품이며, SK Chemicals사의 CFRP USN 200A형과 GFRP UGN 200B형을 사용하여 시편크기 250×250×20mm 판재형상의 섬유 배열각도 [0°]와 [0°/90°]의 CFRP와 GFRP를 두 가지 형태로 총 4종의 시편을 Hand lay-up 방법을 통해 Fig. 1과 같이 적층시켰으며, Hot-Press 성형법을 사용하여 제조사가 권장하는 경화사이클로 3시간 성형하여 제작하였다.

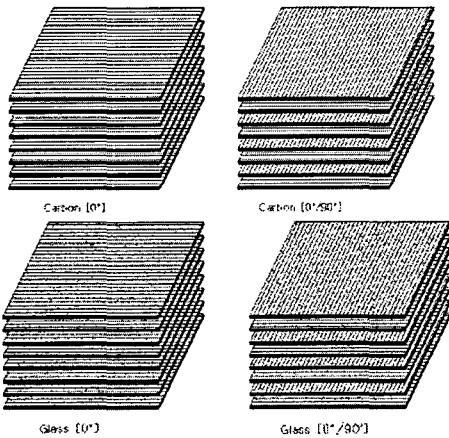


Fig. 1 Stacking sequences methods of two-direction hand lay-up

3-2. 실험방법

본 연구에서는 Table 2. 와 같은 절삭조건 하에 가공조건을 변화시키며 고속드릴링 작업 시 발생하는 칩 형태 및 표면거칠기를 측정하였다.

가공 거리는 20mm 두께의 시편을 50Hole (1,000mm) 가공하여 50Hole재 가공구멍을 기준으로 실험 데이터를 분석하였다. 그러나 CFRP는 주어진 절삭조건에서 가공을 완료 할 수 있었으나 GFRP는 절삭속도 439.8m/min에서 3Hole 가공 후 고속가공에서 발생하는 고온의 절삭온도의 급격한 상승으로 인해 피삭재와 칩이 타는 현상이 시작되어 10Hole 가공 후 심한 연기와 드릴의 주절삭 날에 구성인선 발생으로 심하게 공구가 파손되어 정상적인 가공을 할 수 없어 GFRP는 절삭조건을 낮추어서 실험하였다. 실험장비는 Fig. 2와 같이 지그를 제작해 실험을 하였고 칩의 형태를 분석하기 위하여 Werth

사의 비접촉 레이저 형상 삼차원 측정기인 Video check-ip를 이용하여 각 조건에 따른 칩 형태를 측정하여 이미지화 하였다.

Table 2 Cutting conditions

CFRP (f:mm/rev)	V=439.8m/min (20,000rpm)				V=219.9m/min (10,000rpm)			
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.05	0.1	0.15	0.2
GFRP (f:mm/rev)	V=219.9m/min (10,000rpm)				V=109.9m/min (5,000rpm)			
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.05	0.1	0.15	0.2

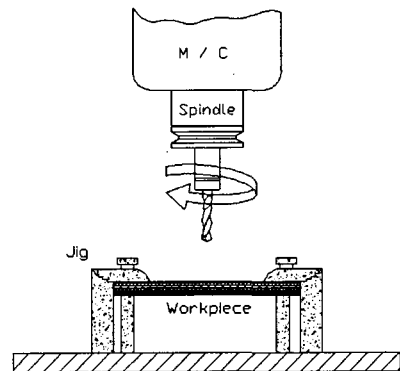


Fig. 2 Overall schematic of experimental setup for high speed drilling process

또한 가공된 구멍의 표면거칠기 측정을 위하여 다이몬드 휠 커터를 이용하여 가공 구멍의 단면을 절삭하여 접촉식 표면거칠기 측정기인 Mahr사의 PERTHOMETER PGK120를 이용하여 절삭속도와 이송속도의 변화에 따른 소재별 표면거칠기를 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

3-1. 칩 형태 측정

섬유강화 플라스틱은 고속가공시 일반 금속재료 가공시와 달리 두 종류 이상의 재료를 적층시켜 접착제로 압축 접합시켜 성형하는 제작 특성으로 연속칩이 아닌 절삭시 높은 절삭온도와 절삭력으로 인해 층간박리 현상이 발생되고, 이로 인해 금속재료와는 달리 불연속 칩이 생성된다.

CFRP를 절삭속도 439.9m/min, 회전당 이송속도

0.05mm/rev 가공시 칩의 형태는 분진과 함께 길이 20mm 정도의 칩이 배출되며, 이송속도가 빨라질수록 칩의 길이는 점차 줄어들어 이송속도 0.2mm/rev로 가공시 대부분의 칩이 분진형태로 배출됨을 알 수 있었다. 여기서 3mm의 칩은 강화재인 탄소섬유로 사료되며, 대부분의 분진형태의 칩은 기지재인 에폭시로 생각된다. 높은 절삭속도와 이송속도로 가공시 강화재인 섬유가 기지재료로부터 심한 탈락현상과 충분한 칩 형태가 형성되기 전에 가공이 되고, 분진형태의 기지재와 섬유간의 가공 후 칩 배출 되는 과정에서 제 2의 연삭가공 작용으로 칩의 길이가 더욱 짧게 발생되는 것이라 사료된다.

적층각도에 따른 칩 배출 형태[0°와 0°/90°]는 칩의 길이는 비슷하나, 적층각도 0° 가공시 0°/90° 보다 칩의 폭이 넓어짐을 확인 할 수 있었다. 이는 가공시 0°/90°의 방향성을 갖는 구조형태는 단방향 구조에 비해 섬유 절단 시 층간 성형 접착력이 절삭력보다 약해 직교방향의 섬유구조는 좀더 분리가 촉진되어 칩 폭이 작아지는 것이라 사료된다.

절삭속도 219.9m/min 경우 칩의 길이와 폭은 절삭속도 439.9m/min에 비해 비교적 길게 나타났으나

50 Hole [1.904mm]	V=439.8m/min (20,000rpm)			
	0.05mm/rev	0.1mm/rev	0.15mm/rev	0.2mm/rev
[0°] S=5/1				
[0°/90°] S=5/1				
50 Hole [1.904mm]	V=219.9m/min (10,000rpm)			
	0.05mm/rev	0.1mm/rev	0.15mm/rev	0.2mm/rev
[0°] S=5/1				
[0°/90°] S=5/1				

Fig. 3 Chip schematics of CFRP

50 Hole [1.904mm]	V=219.9m/min (10,000rpm)			
	0.05mm/rev	0.1mm/rev	0.15mm/rev	0.2mm/rev
[0°] S=5/1				
[0°/90°] S=5/1				
50 Hole [1.904mm]	V=109.9m/min (5,000rpm)			
	0.05mm/rev	0.1mm/rev	0.15mm/rev	0.2mm/rev
[0°] S=5/1				
[0°/90°] S=5/1				

Fig. 4 Chip schematics of GFRP

고속 가공조건에서 대부분의 칩의 형태는 분진 형태로 나타남을 알 수 있었다.

GFRP는 절삭속도 109.9m/min의 경우 CFRP와 비슷하게 나타났으나, 칩의 폭이 조금더 크게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 절삭속도 219.9m/min 가공시 칩의 형태가 분진의 비율이 커졌으며, 높은 절삭온도로 인해 칩이 타서 배출되는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 탄소섬유의 액상출현 시기가 3,550℃인데 비해 유리섬유의 경우 1,700℃이기 때문에 고속 가공시 높은 절삭온도로 탄소섬유에 비해 유리섬유가 타며 배출되는 것이라 사료된다.

3-2. 표면 거칠기 측정

각각의 실험조건에 따라 피삭재를 1,000mm 드릴가공 후 접촉식 표면 거칠기 장비를 통하여 Table 3과 같이 표면 거칠기를 각각 측정을 하였다.

측정거리는 시편의 두께인 20mm중 입-출구의 4mm를 제외한 12mm를 측정거리로 선정했다.

절삭속도 109.9m/min, 이송속도 0.05mm/rev 조건의 GFRP의 경우 이송속도가 너무 작아 높은 온도상의 총 가공시간이 길어짐에 따라 마찰에 의한 절삭온도가 상승하여 열에 의한 표면손상으로 인해 Ra 값이



Fig. 5 Tool wear for cemented carbide drill on 10th drilling, GFRP (439.8m/min, 0.1mm/rev)

4 μm ~ 6 μm 의 불량한 표면거칠기가 측정되어 일반적인 선삭, 밀링 가공과 달리 드릴 가공과 같은 가공면의 외부에 노출되어 있지 않는 경우 칩 배출과 열의 방출성이 낮고, 기지재가 열경화성 에폭시 수지이기 때문에 보강재와 에폭시 수지가 공구에 용착되어 가공표면에 악영향을 주므로 이송속도가 낮은 경우 표면거칠기가 나쁘게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 이송속도를 0.1 ~ 0.2mm/rev 가공 시 Ra 값이 2 μm ~ 3 μm 사이의 비교적 양호한 거칠기 값이 나타났다.

절삭속도 219.9m/min 에서는 이송속도 0.05mm/rev 보다 0.1mm/rev에서 각 시편의 표면거칠기가 향상되었지만, 0.15mm/rev, 0.2mm/rev의 빠른 이송속도로 가공할 수록 표면거칠기가 거칠어 짐을 알 수 있었다.

또한, 절삭속도 439.8m/min에서의 가공시 고속가공에서 발생하는 고온의 절삭온도의 급격한 상승으로 인해 피삭재와 칩이 타는 현상이 시작되어 드릴의 주절삭 날에 구성인선 발생으로 Fig. 5 와 같이 심하게 공구가 파손되어 정상적인 가공을 할 수 없음을 알 수 있었다.

CFRP의 경우 절삭속도 219.9mm/rev에서는 이송속도의 증가에 따라 거의 유사하게 나타났으나 조금씩 거칠어짐을 알 수 있었으며, 절삭속도 439.8m/min에

Table 3 Surface roughness

Ra (μm)		f=0.05	f=0.1	f=0.15	f=0.2
V=109.9m/min (5,000rpm)	GFRP 0°	4.4	2.3	2.2	2.3
	GFRP 90°	6.6	2.6	2.9	3
V=219.9m/min (10,000rpm)	GFRP 0°	4	3	3.3	4.3
	GFRP 90°	5	4.2	4.8	5.2
	CFRP 0°	2.8	2.9	3.1	3.2
	CFRP 90°	2.9	3	3.2	3.4
V=439.8m/min (20,000rpm)	CFRP 0°	3.6	3.2	3.1	4.1
	CFRP 90°	3.3	3	2.8	4.3

서는 이송속도가 증가 됨으로서 표면거칠기는 조금씩 향상되었고, 이송속도 0.15mm/rev로 가공시 각 시편마다 거칠기 값이 가장 양호하게 나타났지만, 0.2mm/rev의 이송속도의 가공시 표면거칠기가 다시 거칠어 짐을 확인 할 수 있었다.

섬유 적층각도에 따른 표면거칠기는 0°에 비해 0°/90°가 나쁘게 나타났는데 이는 섬유의 배열이 일정하지 않아 섬유와 절삭날이 절삭을 위해 만나는 전단 각도가 2부분 (0°/180°)에서 4부분(0°/90°/180°/270°)으로 늘어나 더 큰 절삭력과 열의 발생이 영향을 주었다고 사료된다.

표면거칠기는 CFRP에 비해 GFRP가 거칠게 나타났는데 GFRP는 단위면적당 보강재 함유 밀도가 높고, CFRP에 비해 인성이 상대적으로 우수해 보강재와 에폭시 수지의 분진 입자가 공구 및 가공표면에 더 잘 용착되어 이런 결과가 나타났다고 사료된다.

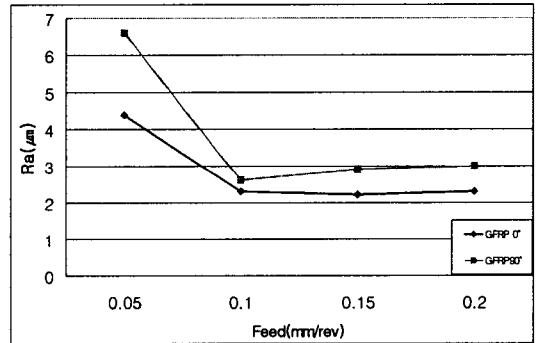


Fig. 6 Surface roughness (109.9m/min)

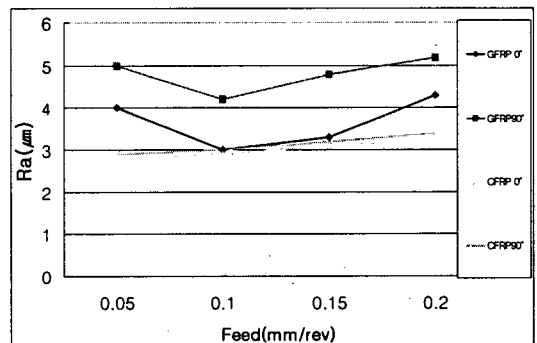


Fig. 7 Surface roughness (219.9m/min)

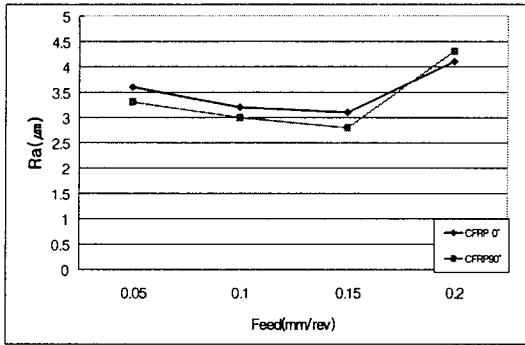


Fig. 8 Surface roughness (439.8m/min)

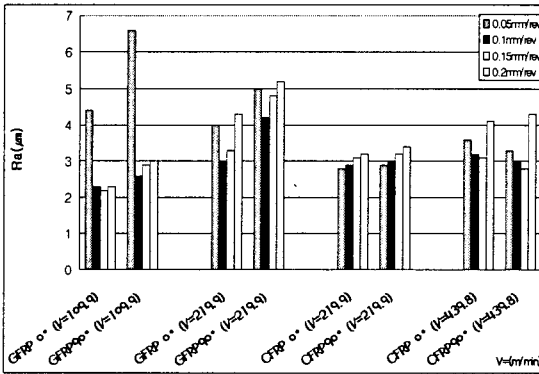


Fig. 9 Comparison of overall surface roughness

5. 결론

본 연구에서는 CFRP, GFRP를 적층방향을 0°와 0°/90°의 두가지로 성형하여, 초경드릴로 고속가공시 적층판 시험편에 나타나는 칩 형태 및 표면거칠기의 특성을 알아보고자 하는 연구로서 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 섬유강화 플라스틱은 일반 금속재료와 달리 고속 드릴 가공시 Curl 형태의 원추나선형 칩이 아닌 Curl이 없는 분진형태의 3mm이하의 칩 형태를 나타내며 작업자 및 공작기계의 요소요소에 들어가 성능을 악화 시킬 것으로 사료된다.
3. 이송속도의 증가에 따라 절삭날이 충분히 칩을 절삭시키지 못해 칩의 길이와 폭이 감소되었다.

4. 섬유강화 플라스틱의 적층 각도에 따른 칩 형상은 0°에 비해 0°/90°가 칩 폭이 작아지는 결과를 보였다.
5. 절삭속도 439.8mm/min에서의 GFRP 가공에서는 CFRP에 비해 상대적으로 용접이 낮은 특성때문에 고속 가공시 높은 절삭온도에 의해 날에 심한 용착이 생겨 정상적인 가공이 불가능하였다.
6. 표면거칠기는 이송속도보다 절삭속도에 의해 좌우되며, 대부분의 조건에서 이송속도가 0.15mm/rev로 증가할수록 좋은 결과를 보였고 0.2mm/rev로 증가하면서 다시 거칠어짐을 보였다.

참고문헌

1. P. K. Malick, "Fiber-Reinforced Composite", Marcel Dekker, INC, pp. 3~4, 1988
2. 김병선, 황병선 "섬유강화 복합재료의 가공" 한국고분자학회 Vol. 10, NO. 1, February 1999
3. W. Koenig and P. Grass, "Quality Definition and Assessment in drilling of Fiber Reinforced Thermosets", Annals of the CIRP, Vol. 38, NO. 9, pp. 985~1003, (1996)
4. 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
5. Chen Wen-Chou, "Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Plastics Composite Laminates", International journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 37, No. 8, pp. 639~650, 1997
6. Ho-Cheng, H, "An Analysis of Drilling of Composite", Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of California, Bakery, 1988
7. D. H. Wang, M. Ramulu and D. Arola, "Orthogonal Cutting Mechanism of Graphite/Epoxy Composite, Part I : Uni-Directional Laminate, Int. J. Mach. Tools. Manufacture. Vol. 35, No. 12, pp. 1623~1638, 1995
8. D. H. Wang, M. Ramulu and D. Arola, "Orthogonal Cutting Mechanism of Graphite/Epoxy Composite, Part II: Multi-Directional Laminate", Int. J. Mach. Tools. Manufacture. Vol. 35, No. 12, pp. 1639~1648, 1995