

적층구조 복합재료의 절삭면 형상에 관한 연구

왕 덕 현*

A Study on the Machined Surface Morphology of Laminate Composite

Duck Hyun Wang*

ABSTRACT

Machined graphite/epoxy surfaces were studied by using SEM (Scanning Electron Microscopy), surface profilometry and its analysis to determine suitable surface describing parameters for machined unidirectional and multidirectional laminate composite. The surface roughness and profile are found to be highly dependent on the fiber layup direction and the measurement direction. It was possible to machine 90 and -45 plies due to the adjacent plies, which were holding those plies. It was found that the microgeometrical variations in terms of roughness parameters R_a without D_y (Maximum Damage Depth) region and D_y are better descriptors of the machined laminate composite surface than commonly used roughness parameters R_a and R_{max} . The characteristics of surface profiles in laminate composite are well represented in CPD (Cumulative Probability Distribution) plot and PPD (Percentage Probability Density) plot. Edge-trimmed multidirectional laminate surfaces are Gaussian and random for profiles measured along the tool movement direction, they are periodic and non-Gaussian in the direction perpendicular to the tool movement.

Key Words : Laminate(적층구조), Graphite/Epoxy, PCD(다결정 다이아몬드), SEM(전자현미경), Surface Roughness(표면거칠기).

1. 서 론

섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite)는 강화섬유(fiber)와 수지(matrix)의 조성을 조절함으로써 혹은 강화섬유의 방향 및 플라이(ply)들의 방향성을 변화시킴으로써 재료의 특성을 선택적으로 이용할 수

있다. 특히 높은 인장강도와 강성과 더불어 가벼운 성질 때문에, 이 복합재료는 우주항공산업등에 많이 쓰여지고 있다.

복합재료의 제조방법에 따라 필요한 치수에 근사한 제품을 얻지만, 치수여유, 표면거칠기, 그리고 다른 기능적 요구를 충족시키기 위하여 가공이 필요하다. 복합

* 경남대학교 공과대학 기계공학과

재료의 직교이방성 성질과 강화섬유의 높은 공구마멸 현상으로 기존의 공구로는 부적합하다는 것이 연구되었고, 경제성을 고려하여 다결정 다이아몬드 공구(PCD: Polycrystalline Diamond)의 가능성이 연구되었다. (1) 가공방법으로는 주로 waterjet 가공(2)과 레이저 가공방식인 특수가공방법과 다이아몬드공구를 이용한 라우터 다듬질인 일반가공방법이 주로 이용되어 왔다. (3, 4) 이 라우터 다듬질에 대한 유사방법으로 특성해석을 위한 연구가 직교가공조건에 의한 CNC 선반가공방법과 셰이퍼-플레이너 가공방법에 의하여 진행되었다. (5-7)

비행기 동체에 필요한 복합재료들은 많은 드릴링 가공에 의하여 이루어지고 있는데 이 작업과정 중에서 마지막 플라이들의 층간분리(delamination)현상의 문제점이 제기되어 최근에는 많은 연구들이 진행되었다. (8-10) 그 밖에도 강화섬유 이탈(pullout) 현상과 fuzzing 현상들이 가공면에 영향을 미친다. 본 연구는 일방향(unidirectional)과 다방향(multidirectional) 적층구조(laminate)의 복합재료 표면을 다결정 다이아몬드 공구로 절삭하여 여러 방향으로 표면형상을 측정함으로써 강화섬유의 방향성이 표면형상에 미치는 특성을 밝히는데 있다. 복합재료의 표면형상은 강화섬유의 방향성에 따른 절삭기구와 밀접한 관계가 있으며 이 연구가 진행됨으로써 복합재료의 드릴의 형상을 설계함으로써 층간분리의 문제점을 해결하는데 기본이 되고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험재료 및 공구

본 실험에 사용된 재료는 graphite/epoxy 섬유강화 복합재료로 밀도는 1525 kg/m³ 이고, 섬유의 체적비(fiber volume fraction)는 0.68이다. 이 복합재료 판은 3501-6 열경화성 에폭시 수지에 직경 6 μ m의 IM-6 graphite섬유가 보강되어 있다. 시험편은 일방향 적층구조 복합재료로 강화섬유의 방향이 0, 15, 30, 45, 60 인 것과 $(45/-45)/(0/90/45/-45)_2$ s의 적층순서를 갖고 있는 다방향 적층구조 복합재료에 대하여 실행하였다.

입도가 7 μ m이고 중간결합도인 GE Superabrasive 회사에서 만들어진 COMPAX 1300 다결정 다이아몬드공구를 사용하였다. 다이아몬드공구의 형상이 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 공구의 뒷면경사각(back rake angle)을 0, 5, 10로 변화시키고 또한 앞면

유각(end relief angle)을 7, 17로 변화시켜 표면형상을 측정하였다. Fig. 1은 섬유의 방향과 공구의 형상을 나타내고 있다. 또한 Table 1에 실험재료 graphite/epoxy의 0 및 90 플라이에서의 기계적 성질과 다결정 다이아몬드 공구의 특성을 나타내고 있다.

2.2 실험기기 및 측정장치

라우터 다듬질 가공방식에 유사한 직교가공인 CNC 선삭가공에 의하여 다이아몬드공구 마멸현상을 측정하여 공구형상이 설계되었고, (9-10) 이 얻어진 다이아몬드 공구의 형상을 사용하여 복합재료의 표면형상등을 측정하기 위하여 셰이퍼-플레이너에서 직교가공이 진행되었다.

절삭가공된 복합재료의 표면은 표면거칠기 측정장치로 측정되어 A/D board로 PC에 저장하여, 형상의 표면거칠기 특성이 연구되었다. 표면형상은 반경 2.54mm EPT-01049 다이아몬드 측정바늘로 Federal Surf-analyzer System 4000으로 측정되었다. 표면거칠기

Table 1 Mechanical properties of Gr/Ep and PCD tool

Property	Material	
	Graphite/Epoxy	
	0° ply	90° ply
Tensile Strength (MPa)	1378	41
Tensile Modulus (GPa)	117 - 138	11.8
Compressive Strength (MPa)	1309	N/A
Compressive Modulus (GPa)	107 - 124	N/A
	PCD Tool	
Knoop Hardness (HK)	3400 - 3700	
Compressive Strength (GPa)	700	
Modulus of Elasticity (GPa)	827 - 1103	
TRS (MPa)	482 - 1723	
Thermal Conductivity (W/m ² C)	50 - 92	

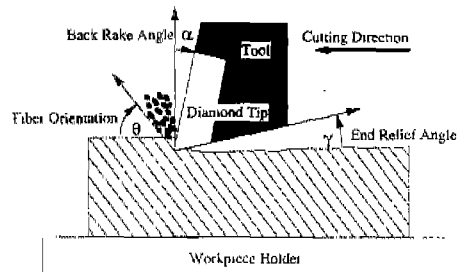


Fig. 1 Fiber orientation and tool geometry

높이는 1.25 μ m 간격으로 13mm씩 측정되었고, 그 값들은 해석적 처리를 위하여 디지털 값으로 저장되었다. 표면거칠기 특성은 0.8mm의 컷오프(cutoff)를 기준으로 평가되었다. Fig. 2는 표면거칠기 측정장치의 개략도이고, 표면형상값들은 평행(longitudinal)방향으로 여러 플라이에서 측정하였고, 횡단(transverse)방향과 대각선(cross)방향에서도 반복 측정을 하였다. Table 2에 본실험에 사용된 측정기기와 가공조건들을 나타내고 있다.

3. 표면형상의 해석적 방법

일방향과 적층구조 복합재료 가공시 양의 방향, 90 $^{\circ}$ 음의 방향(-45 $^{\circ}$)의 복합재료 가공시 발생하는 절삭기구는 현저히 다르게 나타난다. 즉 양의 방향은 강화섬유의 절삭과 수지의 퍼져덮힘(smearing)으로 균일한 표면형상을 나타낸다. 음의 방향의 복합재료는 강화섬유 방향으로 분열(splitting)이 일어난다. 이때 일방향 복합재료는 그 방향으로 파단이 일어나지만, 적층구조 복합재료에서는 옆의 플라이들의 영향으로 손상영역이 존

재하게 된다.

표면거칠기 변수들인 R_a 와 R_{max} 값들은 표면거칠기 측정장치로부터 그 값들이 얻을 수도 있으나, 이 값들은 Fig. 3(a)에서 보는 것처럼 경사각을 갖고 있는 측정값들로부터 최소자승(least square fit)방법으로 그 경사각도를 수정을 한 다음 통계학적인 표면거칠기 값들을 계산한다. 그러나 이 방법은 적층구조 복합재료 가공시 발생하는 특정각도 플라이의 손상영역으로 인한 경우 경사수정이 완전하지 못한 점이 있다.

본 연구에서는 이 방법을 보완하기 위하여 최빈도(median fit)방법을 사용하여 변수들을 계산하였다. 즉, 손상영역의 형상값을 제외한 최빈도의 측정값들을 이용하여 경사수정을 하는 방법이다. Fig. 3(b)는 표면형상의 측정값들을 최소자승방법과 최빈도방법들에 의하여 경사수정을 한 다음 얻어지는 곡선이다. 그림에서 보는 것과 같이 작은 범위에서 손상영역이 존재하는 경우에는 최빈도방법으로 실행한 것이 최소자승방법에 의한 것보다 더 정확한 수정이 이루어졌다.

한편 측정장치로 얻은 표면형상값들은 A/D board를 통하여 디지털신호로 변환되어 PC에 저장된다. 저장된

Table 2 Experimental equipment and cutting conditions

Experimental Equipment	
Equipment	Manufacturer/Model
Planer	Rockford(USA)
Surface roughness tester	Federal Surfanalyzer 4000 (USA)
SEM	JOAL JSM-T330A (Japan)
Cutting Conditions	
Depth of cut	0.127, 0.254, 0.381 [mm]
Cutting speed	4 m/min
Workpiece(Holder upper part)	60 x 20 x 4 [mm]

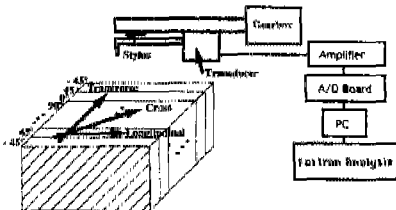
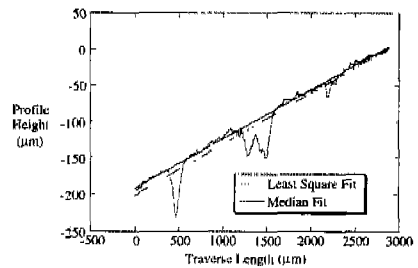
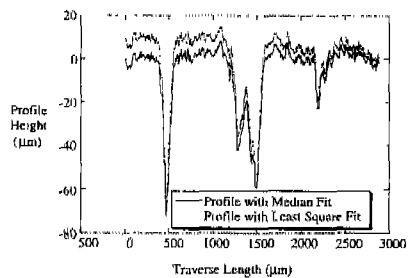


Fig. 2 Systematic diagram of surface roughness measurement



(a) Measured profile



(b) Removed trend profile

Fig. 3 Comparison of least square fit and median fit

표면형상의 데이터 값들은 FORTRAN 프로그램을 통하여 통계적 분석과 주파수영역에서의 해석을 하였다. 경시수정을 행한 후에 FORTRAN 프로그램을 실행하여 다음과 같은 통계학적 값들을 얻을 수 있다. 중심선 평균거칠기(arithmetic average roughness)는 거칠기 곡선에서 그 중심선의 방향으로 측정길이 L만큼 취득하고, 거칠기 곡선을 $y=z(x)$ 로 표시하였을 때 다음 식에서 구해지는 값을 표시한다.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (1)$$

확률밀도함수는 다음과 같이 나타내질 수 있다.

$$\rho(h) = \frac{dP(h)}{dz} \quad (2)$$

여기서, 확률함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$P(h) = \text{Pr ob}[z(x) < h] \quad (3)$$

위의 표 P_{Prob} 의하여 누적확률밀도함수(cumulative probability density function)를 나타낼 수 있다. 또한 비대칭성의 분포를 나타내는 Skewness값과 분포값의 중앙의 날카롭게 밀집된 정도를 나타내는 Kurtosis값은 다음과 같이 나타내진다.

$$Sk = \sigma^{-3} \int_{-\infty}^{\infty} z^3 p(z) dz \quad (4)$$

$$Ku = \sigma^{-4} \int_{-\infty}^{\infty} z^4 p(z) dz \quad (5)$$

여기서, σ 는 $p(z)$ 의 표준편차

Skewness값이 0을 나타내면, 중앙값에 대하여 대칭을 나타내며, 음의 Skewness는 중앙에서 우측으로 분포가 기울어지고, 양의 Skewness는 그 반대이다. 한

편 Kurtosis값이 3을 나타내면 Gaussian분포를 나타내며, 3보다 큰 경우에는 Gaussian분포보다 중앙값에 더 밀집된 형태를 나타낸다. 한편 이들의 Kurtosis 값의 Gaussian 분포는 누적확률밀도에서 probit scale로 나타낸다.

주파수영역에서의 분석은 다음과 같다. 상호상관관계 함수(autocorrelation function : ACF) $\rho(\tau)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{\sigma^2} \quad (6)$$

여기서,
$$R(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L z(x)z(x+\tau) dx$$

파워 스펙트럼 밀도 함수(power spectrum density function : PSDF)는 다음과 같이 표현된다.

$$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (7)$$

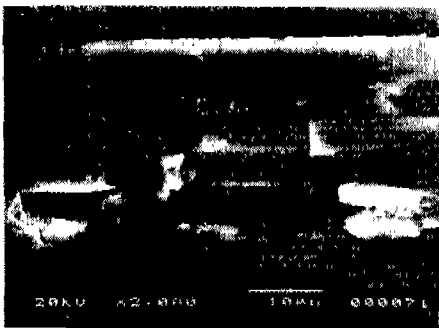
또한 PSDF는 표면형상 데이터로부터 다음과 같은 식으로 얻어 질 수 있다.

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} z(x) \exp(-i\omega x) dx \quad (8)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 일방향 적층구조 복합재료의 표면형상

일방향의 복합재료는 일반 등방성(isotropic)재료와는 달리 강화섬유의 방향에 따라 그 특성이 달라진다. 이 현상은 높은 강도의 강화섬유의 성질과 이들을 붙잡고 있는 수지에 따라 영향을 받는다. Fig. 4는 강화섬



(a) 0° Ply (Mag. x2000)



(b) 45° Ply (Mag. x2000)

Fig. 4 SEM photographs of unidirectional laminate composite

유의 방향이 0, 45인 경우 절삭가공된 일방향 복합재료의 표면을 나타낸 사진들이다. 일방향 복합재료의 절삭표면은 균일한 모양으로 보이나, 미세적으로 현미경으로 관찰하면 강화섬유의 절삭 및 빠져나오는 현상(fiber pull-out), 수지의 퍼져들림 현상(matrix smearing)으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 4(b)에서 보는 것처럼 절삭방향에 대하여 양의 각도를 갖고 있는 플라이는 강화섬유를 절삭하는 과정이지만, Fig. 4(a)처럼 0 플라이에서는 쪼개는(split) 과정으로 이루어져, 드러난 강화섬유 위에 수지가 한 방향으로 되어있는 cusps와 scarps 현상을 나타낸다.

강화섬유가 절삭방향과 0인 표면에서 평행방향으로 측정된 표면형상은 수지의 퍼져들림 현상이 균일하지 않고 강화섬유가 그대로 드러나 중심선 평균 표면거칠기와 최대 표면거칠기는 다른 양의 방향각도보다도 큰 값을 나타내고 있다. 하지만 강화섬유 각도가 증가함에 따라, 비록 강화섬유들이 절삭되어 있지만 수지의 퍼져들림이 균일하게 분포되어 약간의 변화를 갖는 낮은 중

심선 평균 표면거칠기를 나타냈으며, 또한 횡단방향으로 측정된 중심선 평균 표면거칠기 값이 역시 낮은 값을 나타내고 있다.

4.2 다방향 적층구조 복합재료의 표면형상

다방향 적층구조 복합재료는 각 플라이들이 다른 방향각도에 의하여 평행방향(longitudinal)의 표면형상 측정은 측정위치에 따라 큰 차이를 나타낸다. 또한 횡단방향(transverse)의 표면거칠기 측정은 0, 45, 그리고 90 방향의 플라이에서는 2 μ m 이내의 변화가 있지만, -45 방향의 플라이에서는 100 μ m 이상의 큰 차이도 보인다. 즉, 횡단방향의 표면형상도 -45 플라이에 손상영역의 존재로 큰 영향을 받는다.

Fig. 5는 다방향 적층구조 재료의 평행방향을 따라 -45 플라이와 0 플라이에서 공구형상각도에 따른 절삭깊이 0.127, 0.254, 0.381mm에서 3번 반복 측정된 중심선 표면거칠기(R_a)와 최대손상깊이(D_y)에 관한 것이다. R_a 값은 측정위치에 따라 0 플라이처럼 5 μ m 이

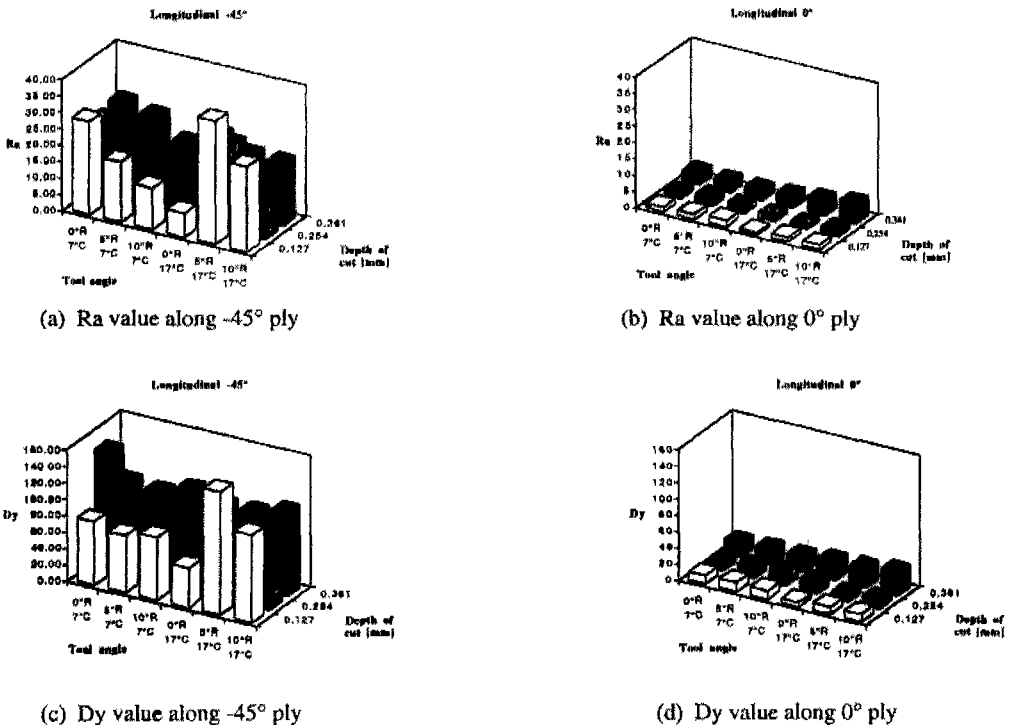
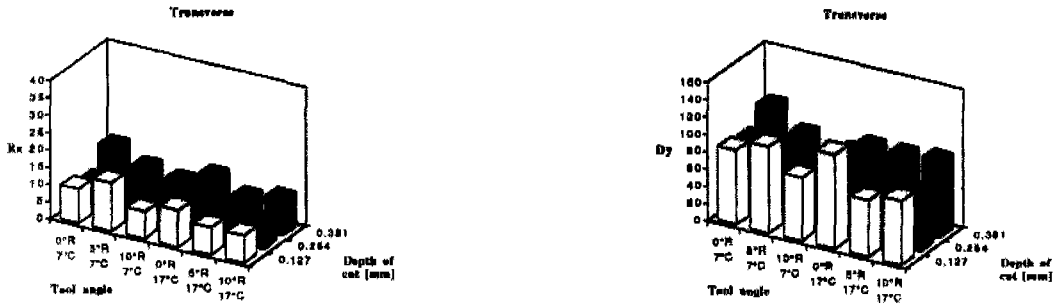


Fig. 5 R_a and D_y values measured along longitudinal direction



(a) Ra value along transverse direction

(b) Dy value along transverse direction

Fig. 6 Ra and Dy values measured along transverse direction

내가 될 수도 있지만, -45° 플라이에서 측정된다면 수십 μm 가 될 수 있다. 또한 최대손상깊이도 0 플라이에서는 절삭깊이 0.127mm에서는 10 μm 내외에서 30 ~ 40 μm 까지 나타나지만, -45° 플라이에서는 40 μm 에서 100 μm 까지 큰 차이로 불규칙하게 나타난다. 한편 Fig. 6은 같은 재료에서 횡단방향에서 측정된 R_a 와 D_y 의 표면거칠기 값들의 표현을 나타낸 그림이다. 이 두 그림에서 보는 것처럼 평행방향에서는 각 플라이에서 측정된 값들의 차가 크며 측정위치에 따라 불규칙적인 값들을 나타내므로, 횡단방향으로 측정하여 표현하는 것이 더 타당성이 있다는 것을 알았다. 또한 횡단방향의 표면형상은 -45° 플라이에 손상영역의 존재로 큰 영향을 받는다.

다방향 적층구조 복합재료의 절삭가공에 의한 표면형상은 일방향 복합재료와는 또 다른 특성을 갖는다. 즉 90° 방향의 플라이는 옆 플라이들의 영향으로 마치 양의 방향각도를 갖고 있는 상태로 절삭된다. 하지만 -45° 방향의 플라이들은 어느 깊이까지 파단되고 그리고 절삭되어 마치 파형을 형성하면서 절삭된다. 이 현상들은 다방향 적층구조 복합재료의 표면형상을 전자현미경(SEM)으로 나타낸 Fig. 7에 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 중심부분인 [... 45°/-45°/-45°/45° ...] 플라이들이고, Fig. 7(b)는 그 중 -45° 플라이의 섬유방향만 확대한 사진이다. Fig. 7(c)는 중심선에서 벗어난 [... 45°/-45°/0°/90° ...] 플라이들의 표면이고, Fig. 7(d)는 그 중 0°와 90° 플라이들의 확대 사진이다.

절삭방향과 -45°의 강화섬유 각도를 갖고 있는 적층구조 복합재료는 Fig. 7(a)와 7(b)에서 보는 것처럼 양옆의 플라이들로부터 붙잡고 있기 때문에 어느 정도

깊이까지 파단되어 손상영역이 존재하게 된다. 이 손상영역을 자세히 관찰하면 강화섬유의 이탈현상(fiber pullout)과 강화섬유 방향으로 파단되어 강화섬유가 그대로 나타나는 현상이 반복되어 나타난다. Fig. 7(c)에서 0°, 45° 방향의 플라이들은 일방향 복합재료와 마찬가지로 절삭되어 표면형상이 이루어지나, 90° 플라이에서는 양옆의 플라이들의 영향으로 Fig. 7(d)에서 보는 것처럼 마치 양의 방향 복합재료를 절삭하는 모양으로 나타난다. 즉 강화섬유가 어느 정도 파단되어 강화섬유 이탈현상도 포함되어 나타난다.

절삭방향과 같은 방향에서 측정된 표면형상은 측정위치에 따라 크게 다른 값을 나타낸다. 또한 절삭방향에 대하여 횡단방향에서 측정된 표면형상은 플라이의 손상영역이 존재하여 R_a 값에 영향을 준다. 그러므로 적층구조 복합재료의 표면형상은 손상영역을 포함하지 않는 R_a 값과 손상영역에서의 최대손상깊이(maximum damage depth, D_y)로 표현하는 것이 타당하다고 본다.

Fig. 8에서 11까지는 윗면경사각이 5°이고 앞면여유각이 17°인 형상을 갖고 있는 다결정 다이아몬드공구로 [45°/-45°/(0°/90°/45°/-45°)]_{2s}의 적층순서를 갖고 있는 다방향 적층구조 복합재료를 절삭가공한 표면의 표면형상을 최빈도방법에 의하여 경사수정을 한 후에 얻은 표면형상의 특성 값들이다. 이들은 절삭방향과 평행방향에서 측정위치에 따라 다른 -45° 플라이와 0° 플라이에서 얻은 표면형상 값들과 횡단방향과 대각선방향에서 얻은 표면형상 값의 각도 수정 후의 특성을 나타낸 그림이다. Fig. 8과 9는 각각 측정된 형상들의 누적확률분포(cumulative probability distribution)와 비

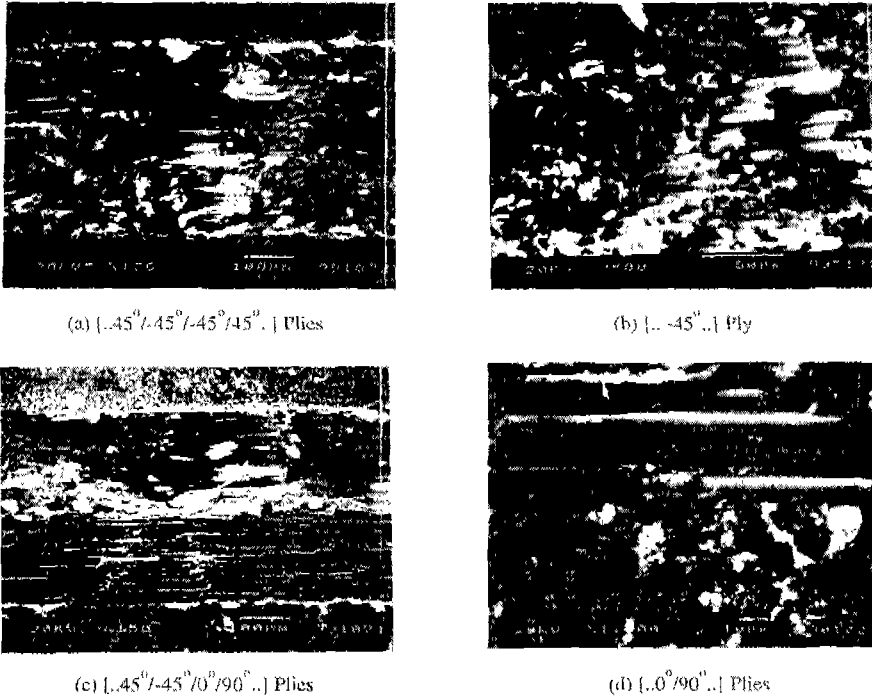


Fig. 7 SEM photographs of multidirectional laminte composites

율확률밀도(percentage probability density)이다. 또한 Fig. 10은 자기상관관계함수(autocorrelation function)를 나타내며, Fig. 11은 파워 스펙트럼 분포(power spectrum density distribution)이다.

평행방향중 0 플라이에서 측정된 표면형상은 Fig. 8과 9에서 보는 것과 같이 비대칭(skew)이 아닌 대칭으로 Gaussian분포를 나타낸다. 즉 Gaussian분포는 누적확률분포에서 probit scale로 직선으로 나타나고, 비율확률분포에서는 중앙에 집중적으로 나타난다.⁽¹¹⁾

그러나 -45 플라이에서 측정된 표면형상은 Fig. 10에서 보는 것처럼 손상영역이 반복적으로 형성되어 있고, Fig. 8에서 보는 것처럼 누적확률분포는 중앙선 0 μ m에 넓은 영역에서 거의 대칭으로 존재하고 또한 Fig. 9에서 나타난 것처럼 비율확률밀도는 넓은 범위에서 대칭적으로 나타난다. Fig. 11에서 보는 것처럼 파워 스펙트럼 밀도는 여러 값에서 주기(wavelength)를 갖는 형태로 나타났다.

절삭방향과 횡단방향(transverse)에서 측정된 표면형상은 손상영역의 존재로 Fig. 8과 9에 나타난 누적확

률분포와 비율확률밀도에서 손상영역의 깊이와 손상영역을 제외한 중심선표면거칠기 값으로 표현할 가능성을 나타내었다. 횡단방향에서 측정된 표면형상의 파워 스펙트럼 밀도는 손상영역에서 극대값의 높은 주기를 갖는 형태로 나타났다.

5. 결 론

다결정 다이아몬드공구에 의한 절삭가공된 일방향 및 다방향 복합재료와 직충구조 복합재료의 표면형상은 강화섬유의 절삭 및 빠져나오는 현상 (fiber pull-out), 수지의 퍼져달림 현상(matrix smearing)으로 이루어져 있고 그 특성에 대한 연구에서 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1. 일방향 복합재료의 표면형상은 강화섬유의 방향과 측정방향에 따라 영향을 받는다. 대부분의 절삭방향에 대하여 평행방향과 횡단방향에서 측정된 표면거칠기는 수 μ m 이내의 R_a 표면거칠기 값을 나타내나, 섬유가 방

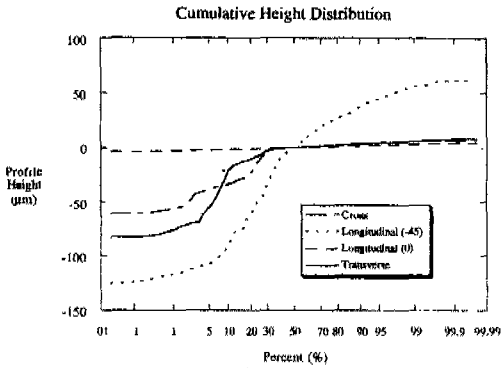


Fig. 8 Cumulative probability distribution of surface profile
 Tool angle : 5° back rake and 17° end relief
 Material : [45°/-45°/(0°/90°/45°/-45°)₂]_s

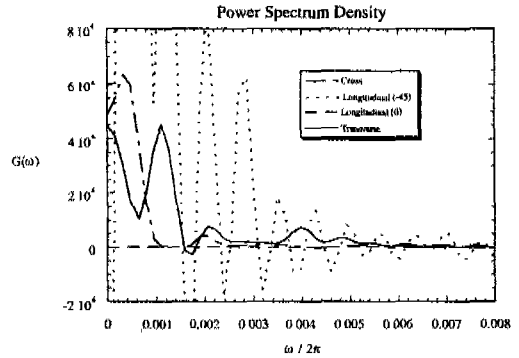


Fig. 11 Power spectrum density function of surface profile
 Tool angle : 5° back rake and 17° end relief
 Material : [45°/-45°/(0°/90°/45°/-45°)₂]_s

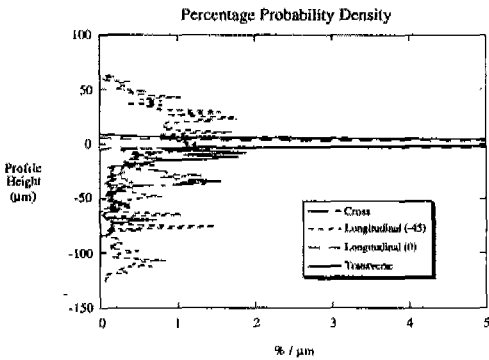


Fig. 9 Percentage probability density of surface profile
 Tool angle : 5° back rake and 17° end relief
 Material : [45°/-45°/(0°/90°/45°/-45°)₂]_s

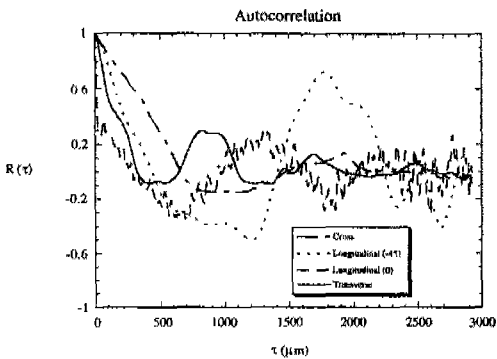


Fig. 10 Autocorrelation function of surface profile
 Tool angle : 5° back rake and 17° end relief

향이 0 일 경우에, 평행방향에서 측정된 표면거칠기는 수지의 퍼져덮힘 현상이 적기 때문에 강화섬유가 그대로 드러내는 표면형상을 나타낸다.

2. 다방향 적층구조 복합재료의 표면형상 측정값들은 측정방향에 따라 큰 차이를 나타내며, 또한 양쪽에 있는 다른 각도의 플라이들의 영향을 받아, 90 방향의 플라이는 마치 양의 각도를 갖고 있는 플라이처럼 절삭된다. 하지만 -45 방향의 플라이들은 어느 깊이까지 파단되고 절삭되는 파형을 형성하면서 절삭된다.

3. 다방향 적층구조 복합재료의 가공후의 표면형상값들을 표시하는 최적방법은 횡단방향으로 측정하여 손상영역을 제외한 평균표면거칠기 R_a 와, 최대손상깊이 (maximum damage depth) D_y 로 나누어서 표현하는 것이 바람직하며, 이들의 특성은 누적확률분포와 비율확률밀도에 잘 표현된다.

4. 자기상관관계함수와 파워 스펙트럼 분포함수는 횡단방향으로 측정된 경우, 큰 파장의 주기적인 관계를 나타내고 있다. 다방향 적층구조 복합재료의 절삭가공된 표면형상은 평행(longitudinal)방향에서는 Gaussian 및 비규칙성 분포이고 횡단(transverse)방향에서는 Non-Gaussian 및 주기성 분포이다.

참고문헌

1. M. Ramulu, M. Faridnia, J. L. Garbini, and J. E. Jorgensen, "Machining of Graphite/Epoxy Composite Materials with Polycrystalline Diamond Tool," *Tran. of ASME, J. of Engr. Materials and Technology*, Vol. 113, No. 4, pp. 430-436, 1991.
2. M. Ramulu and D. Arora, "Waterjet and Abrasive Waterjet Cutting of Unidirectional Graphite/Epoxy Composites," *Composites*, Vol. 24, No. 4, pp. 299-308, 1993.
3. M. Ramulu and D. H. Wang, "Chip Formation in Graphite/Epoxy," Boeing Defence and Space Group Final Technical Report, Dec. 10, 1991.
4. D. H. Wang, M. Ramulu, and C. W. Wern, "Orthogonal Cutting Characteristics of Graphite/Epoxy Composite Materials," *Tran. of NAMRI/SME*, Vol. 20, pp.159-165, 1992.
5. K. Colligan and M. Ramulu, "The effect of Edge Trimming on Composite Surface Plies," *Manufacturing Review*, Vol. 5, No. 4, pp. 274-293, 1992.
6. S. Jane and D.-C. H. Yang, "Delamination Free Drilling of Composite Laminates," *Processing, Fabrication, and Manufacturing of Composite Materials*, ASME MD-Vol.35, pp. 45-59, 1992.
7. H. Hocheng, and H. Y. Puw, "On Drilling Characteristics of Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastics," *Int. J. Mach. Tools and Manufact.*, Vol. 32, No. 4, pp. 583-592, 1992.
8. V. Tagliaferri, G. Caprino, and A. Diterlizzi, "Effect of Drilling Parameters on the Finish and Mechanical Properties of GFRP Composites," *Int. J. Mach. Tools and Manuf.*, Vol. 30, No.1, pp.77-84, 1990.
9. D. H. Wang, M. Ramulu, and D. Arola, "Orthogonal Cutting Mechanisms in Graphite/Epoxy Composite. Part I : Unidirectional Laminate", accepted for publication in *Int. J. of Mach. Tool and Manuf.*, 1995.
10. D. H. Wang, M. Ramulu, and D. Arola, "Orthogonal Cutting Mechanisms in Graphite/Epoxy. Part II : Multi-directional Laminate", accepted for publication in *Int. J. of Mach. Tool and Manuf.*, 1995.
11. R. B. Zipin, "The Analysis of Profile Strata for Surface Texture Specification," *Application of Surface Science*, Vol. 15, pp. 334-358, 1983.