

## 論文

## 탄소섬유 에폭시 복합재료 중공축의 연삭 특성에 관한 연구

김포진\* · 이대길\* · 한홍삼\*\* · 이동주\*\*

## A Study on the Grinding Characteristics of Carbon Fiber Epoxy Composite Hollow Shafts

P.J.Kim\*, D.G.Lee\*, H.S.Han\*\* and D.J.Lee\*\*

## ABSTRACT

Since carbon fiber epoxy composite materials have excellent properties for structures due to their high specific strength, high modulus, high damping and low thermal expansion, the hollow shafts made of carbon fiber epoxy composites have been widely used for power transmission shafts for motor vehicles, spindles of machine tools and rollers for film manufacturing. However, the molded composite shafts are not usually accurate enough for mechanical machine elements, which require turning or grinding of composite hollow shafts.

In this paper, the grinding characteristics of composite hollow shafts, which are flexible in the radial and circumferential directions, were investigated experimentally and analytically with respect to the stacking angle, thickness and outer diameter.

## 1. 서론

섬유 강화 고분자 복합재료 (fiber reinforced polymer composite)는 일반 금속 재료에 비하여 높은 비강성 ( $E/\rho$ ), 비강도 ( $S/\rho$ ), 고감쇠 성능 및 열적 치수 안정성으로 항공기의 구조재, 우주개발 신소재 및 자동차 경량화 분야로부터 일반 스포츠, 레저 (leisure) 산업까지 폭 넓게 사용되고 있다 [1-3]. 특히, 탄소섬유 에폭시 복합재료 (carbon fiber epoxy composite)의 경우 높은 비강성 및 낮은 회전 관성 모멘트로 항공기, 선박 및 자동차의 구동축 (drive shaft), 공작기계의 주축, 펄름 및 금속박판 제조용 롤러 등과 같은 회전 주축의 구조재로 사용될 경우, 에너지의 절감 효과 및 높

은 회전 정밀도를 얻을 수 있으며, 경량화로 인한 용이한 이동성으로 부대 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다 [4, 5].

일반적으로 탄소섬유 에폭시 복합재료를 구조물 또는 기계 부품의 소재로 적용하고자 할 경우, 정형 가공 (net shape manufacturing)을 하는 것이 가장 이상적이나 정밀기계 부품의 경우, 사용목적에 따라 절단, 드릴링 및 절, 연삭 가공 등의 후 가공이 요구되기도 한다. 특히, 장섬유 복합재료 (long fiber composite material)는 섬유 방향과 공구이송 방향 간의 각도 차이에 따라 가공 성능에 차이를 보이며, 절입 깊이 및 이송 조건에 따른 열발생 정도는 복합재료 기지의 물성에 영향을 주기 때문에, 기존 금속재료의 절, 연삭 가

\*한국과학기술원

\*\*충남대학교

공조건과 다른 조건으로 가공되어야 한다 [6, 7].

복합재료의 고 효율, 고 정도 가공을 위하여 많은 연구가 수행되었으며, 가공 효율의 극대화와 소요 비용의 절감을 위한 다양한 시도가 수행되고 있다. 다음은 본 연구와 관련하여 기 수행된 절, 연삭 가공에 관한 연구를 나타낸다.

Kang은 유리섬유 에폭시 복합재료의 선삭 과정 중 발생하는 초경 및 텅스텐 카바이드 (TiC) 인서트 (insert ; P20, M10, K10)의 마모에 관한 연구를 수행하였으며, 각각의 절삭 조건에 대하여 실험하였다 [8]. Wang은 유리 섬유 에폭시 복합재료의 일방향 및 다방향 적층구조에 대한 다이아몬드 공구의 가공 조건을 전자 주사 현미경 (scanning electron microscope ; SEM) 및 표면조도기로 측정하여 비교하였으며, 시편의 가공 각도와 공구의 경사각 (rake angle) 및 여유각 (relief angle)의 변화에 따른 복합재료 가공면의 상태와 다이아몬드 공구의 마모 특성을 연구하였다 [9]. Chen은 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 (drilling) 가공 시 공구의 기하학적인 형상, 절삭력 등이 절삭 성능 및 공구의 마모율과 공구 수명에 미치는 영향을 연구하였다 [10]. Caprino는 유리섬유 에폭시 복합재료 드릴링 가공 시 절입 속도에 따른 복합재료의 손상 정도에 대하여 연구하였다 [11]. Asahina등은 엔드밀 (end mill)을 이용한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 다듬질 가공 시 최적의 절삭 조건을 선정하기 위하여, 절삭 방향 및 공구 경사각이 가공 정도에 미치는 영향에 대한 실험을 하였다 [12]. Caprino는 이산화탄소 레이저 (CO<sub>2</sub> laser)를 이용하여 유리섬유 에폭시 복합재료의 가공을 수행하였으며, 최적 가공 조건에 관하여 연구하였다 [13]. Park은 탄소섬유 에폭시 복합재료를 전해 드레싱 방법과 금속 결합 초미립 다이아몬드 스톨을 이용하여 경면 연삭 가공을 하였으며, 섬유 방향과 직각을 이루는 방향으로 가공하였을 경우, 우수한 표면조도를 얻었다. 특히, 스파크-아웃 (spark-out)은 스톨의 메시가 작을수록 표면 정도의 개선에 많은 영향을 준다는 사실을 전자 주사현미경과 오거 전자 분광기 (auger electron spectroscopy ; AES)를 이용하여 확인하였다 [14]. An은 유리 섬유 에폭시 복합재료를 전해 드레싱 방법과 금속 결합 초미립 다이아몬드 스톨을 이용하여 경면 연삭 가공을 하였으며, 연삭력과 가공면의 표면조도의 상호 관계에 관하여 연구하였다 [15].

이와 같이 난삭재에 대한 효과적인 절삭, 연삭가공에 대하여 가공 특성 및 기구 등에 관한 연구가 진행되고

있으나, 유연성 (flexibility)을 가지는 중공축 연삭에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았다. 특히, 중공축과 같이 축 방향 및 원주 방향의 강성과 두께가 가공 정밀도에 영향을 주는 구조의 경우, 일반 평면 형상 복합재료와 다른 연삭 조건을 갖기 때문에 이에 대한 연구가 요구된다.

본 연구의 목적은 일반적으로 많이 사용되는 비트리파이드 연삭 스톨 (vitrified grinding wheel)을 사용하였을 경우, 탄소섬유 에폭시 복합재료 중공축의 연삭 가공 특성을 얻는데 있다.

## 2. 중공축 시편 제작

Fig. 1은 고분자 필름의 제조 공정에서 사용되는 중공축 형상을 갖는 탄소섬유 에폭시 복합재료 압착 롤러의 외형으로써, 사용 목적에 따라 다양한 치수로 제조된다. 본 연구에서는 롤러와 같은 중공축의 원통 연삭특성을 파악하기 위하여 시편을 제작, 실험하였다. 복합재료 중공축 시편의 적층각 및 치수는 사용된 원통 연삭기 (TGU-27, 통일중공업)의 가공 범위 이내에서 중공축의 가공 특성이 최대한 반영되며, 실험의 효율성을 높일 수 있도록 결정되었다. Table 1과 Table 2는 본 연구에서 사용한 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료 (USN150, SK Chemicals, Korea)의 물성 및 원통 연삭기의 사양을 나타낸다.

복합재료의 이방성 물성으로 중공축은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 적층각의 크기가 증가함에 따라 축 방향의 강성 ( $E_L$ )는 감소하며, 원주 방향의 강성 ( $E_T$ )는

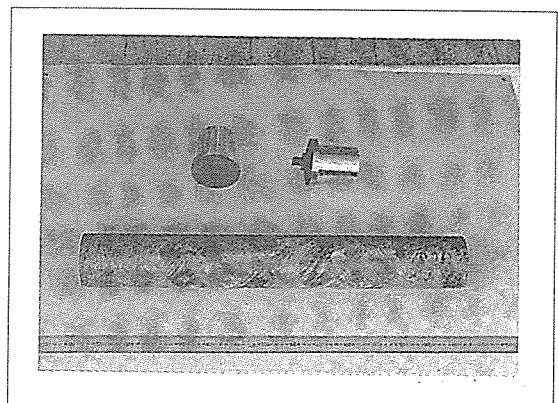


Fig. 1. Photograph of the carbon fiber epoxy composite roller used in the film process.

Table 1. Properties of the unidirectional carbon fiber epoxy composite material.

(USN150, SK Chemicals, Korea)	
Tensile modulus (GPa)	131
Transverse modulus (GPa)	8.2
Shear modulus (GPa)	6.1
Poisson's ratio	0.3
Tensile strength (MPa)	1800
Transverse strength (MPa)	50
Shear strength (MPa)	88
Fiber volume fraction (%)	60
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1600

Table 2. Specifications of the universal cylindrical grinding machine.

(TGU-27, Tong-il Ltd., Korea)	
Wheel rotational speed (rpm)	1700, 1900
Workpiece rotational speed (rpm)	46 - 360
Feed rate of table (mm/min)	50 - 4000
Wheel dimension (mm)	
(Outer diameter × Width)	355.0 × 32.0

증가하나, 전단 강성 (G)는  $[\pm 45]$ 일 경우에 최대값을 갖는다. 적층각에 따른 이방성 물성에 의한 중공축의 강성 변화 및 가공 기구 [6, 9, 14]의 차이는 가공 정도에 영향을 미치므로, 중공축의 적층각은 축 방향에

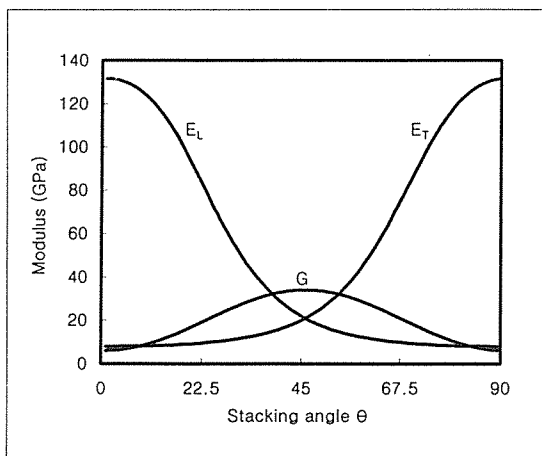
Fig. 2. Variations of the tensile modulus ( $E_L$ ), transverse modulus ( $E_T$ ) and shear modulus (G) with respect to the stacking angle type of  $[\pm\theta]_{nT}$ .

Table 3. Dimensions of the hollow composite shaft.

Inner diameter (mm)	50
Length (mm)	300
Thickness (mm)	0.5, 1.0, 2.0
Stacking angle	$[0]_{nT}$ , $[\pm 45]_{nT}$ , $[90]_{nT}$

대하여  $[0]_{nT}$ ,  $[\pm 45]_{nT}$ ,  $[90]_{nT}$ 로 결정하였다. 내경, 두께, 길이 등은 유한 요소 해석 (finite element method)을 이용하여 중공축의 특성이 최대한 반영되도록 설계하였다. Table 3은 복합재료 중공축 시편의 치수를 나타낸다.

복합재료 중공축의 연삭 공정 중의 연삭 스톨의 절입 깊이 (depth of cut), 복합재료 중공축의 두께 및 적층각에 따른 중공축의 변형 정도를 상용 유한 요소 해석 패키지 (ANSYS 5.3)를 이용하여 구하였다. 이때, 복합재료 중공축의 직교 이방성 물성을 모델링하기 위하여 솔리드 요소 (solid element)를 사용하였으며, 연삭 스톨과 복합재료가 만나는 부분은 접촉 요소 (contact element)를 사용하였다. 해석의 편의를 위하여 시편의 회전 및 이동은 무시하였고, 휠은 강체로 가정하였으며, 접촉면은 4.5 MPa의 접촉강성 [16]을 가진다고 하였다. Fig. 3은 Table 3의 사양을 갖는 복합재료 중공축의 연삭 공정을 유한 요소 해석하기 위한 3차원 모델을 나타낸다. 휠은 반경방향으로 50  $\mu$ m 절입하며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 시편에서 발생하는 변형을 관찰하였다. Fig. 4는 휠의 절입량이 50  $\mu$ m인 경우 위에서 관찰한 복합재료 중공축의 변형 모습을 나

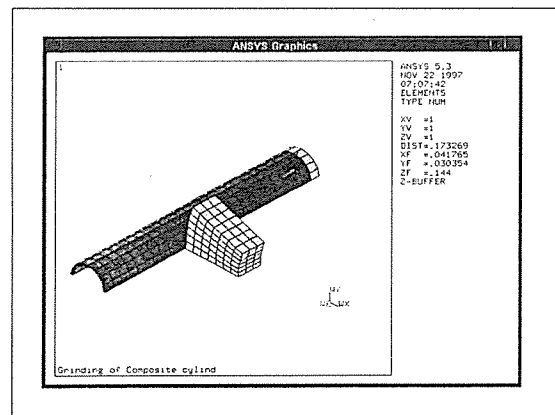


Fig. 3. FEM model for the grinding characteristics of the composite hollow shaft with respect to machining conditions.

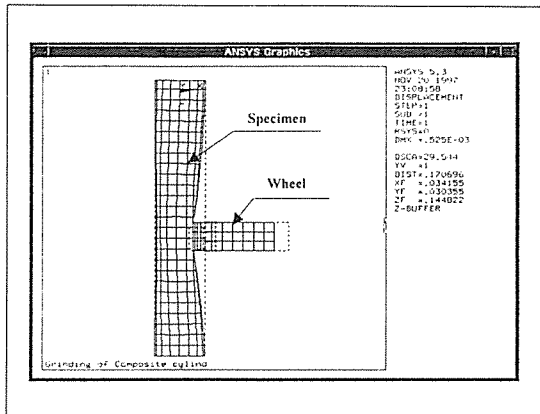


Fig. 4. Deflection shape of the composite hollow shaft when the depth of cut was  $50\mu\text{m}$ .

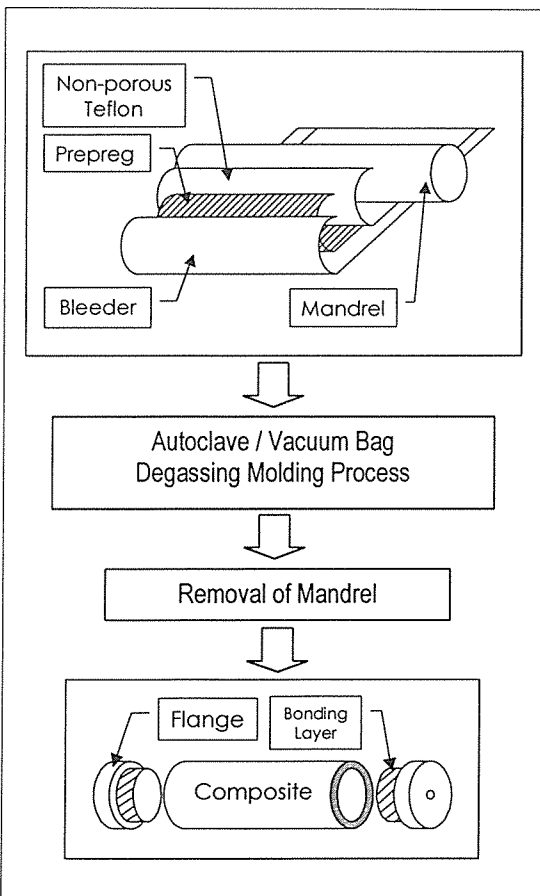


Fig. 5. Schematic diagram of composite specimen manufacturing.

타낸다.

Fig. 5는 시편의 제작순서를 나타낸다. 우선 맨드릴 (mandrel)위에 프리프레그 (prepreg)를 적층한 후, 오토클레이브 진공백 성형법을 사용하여 경화시킨다. 경화된 시편은 원통 연삭에 의하여 1차가공을 거친 후, 시편 내부의 맨드릴을 제거한다. 맨드릴이 제거되어진 중공 원통형의 복합재료에 플레지를 접합하여 시편을 완성한다.

### 3. 연삭 가공 실험

복합재료의 초정밀 연삭 가공을 위하여 주철 본드 다이아몬드 스톨이 장착된 전해드레싱 (electrolytic in-process dressing ; ELID) 장치를 가진 전용 연삭기를 사용하기도하나 [15], 본 연구에서는 비트리파이드 (vitrified) 범용 스톨이 장착된 일반 범용 원통 연삭기와 수용성 절삭유를 사용하여 연삭 가공의 이용

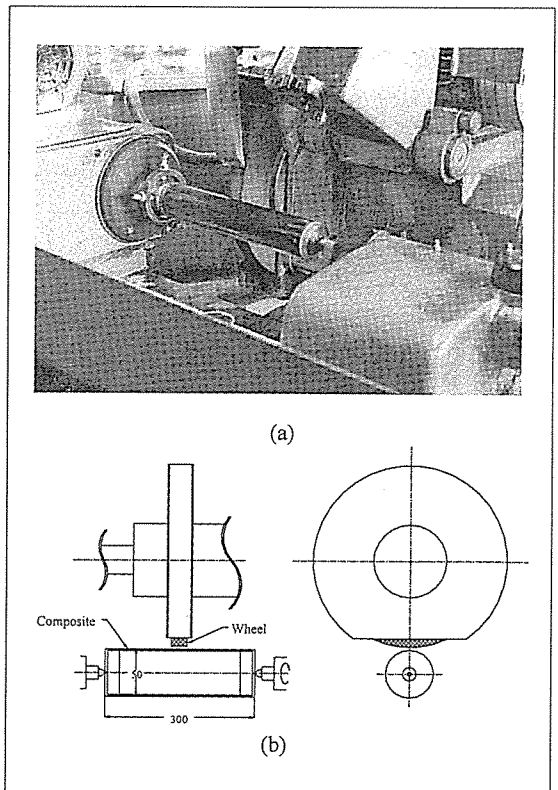


Fig. 6. Experimental set-up for the composite hollow shafts.  
(a) Photograph (b) Schematic diagram

범위를 확대하였다. Fig. 6은 복합재료 중공축 연삭을 위한 실험 장치를 나타낸다. 또한, 적층각  $[0]_{NT}$ ,  $[\pm 45]_{NT}$ ,  $[90]_{NT}$ 에 대하여 각각 시편을 제작하여 실험하였다.

### 3.1. 복합재료 중공축의 반경 방향 스프링 상수에 따른 연삭 가공 정도

전절에서 언급한 바와 같이 이방성 복합재료는 적층각에 따라 축 및 원주 방향의 인장 강성과 전단 강성이 변하기 때문에 복합재료 중공축의 적층각 및 두께에 따라 반경 방향의 스프링 상수가 결정되며, 이 값에 따라 다른 가공조건을 갖는다. Table 3의 설계 사양을 갖는 중공축에 대하여 연삭 스톨의 회전 속도 2,100m/min, 가로 이송 속도 180mm/min, 가공물의 회전속도 46rpm, 그리고, 절입 깊이  $50\mu\text{m}$ 의 절삭 조건으로 연삭 가공을 수행하였다. 표면조도 및 진원도의 측정위치는 중공축의 특성이 가장 잘 반영되는 시편의 중간위치이다. Fig. 7은 복합재료 중공축의 두께와 적층각의 변화에 따른 최대 표면조도 ( $R_{\max}$ )의 변화를 나타낸다. 중공축의 두께가 증가할수록, 양호한 표면조도를 얻었으나, 적층각에 따른 표면조도는 중공축의 두께가 감소함에 따라 차이가 컸다. 중공축의 진원도는 Taylor-Hobson사 (England)의 Talyrond 100를 사

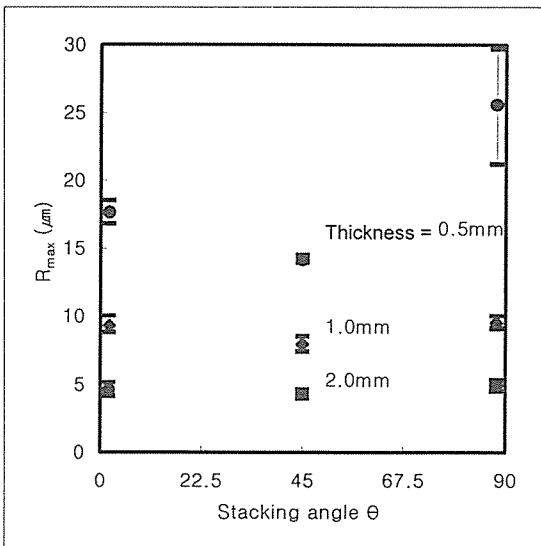


Fig. 7. Maximum surface roughness  $R_{\max}$  of the hollow composite shaft specimen ( $\phi 50 \times 300\text{mm}$ ) with respect to thickness and stacking angle when the depth of cut was  $50\mu\text{m}$ .

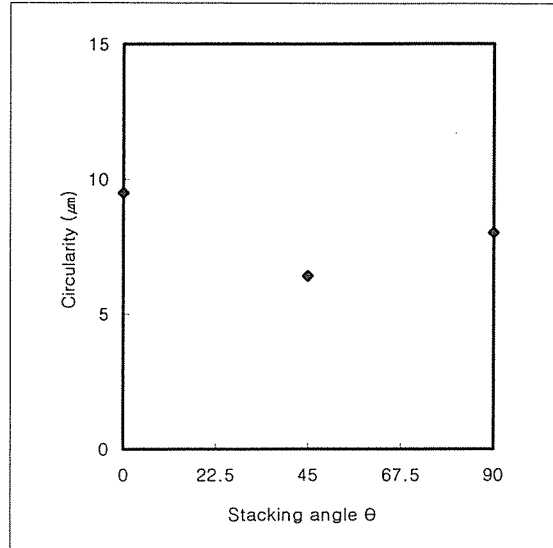


Fig. 8. Circularities of the 1mm thickness composite hollow shaft with respect to the stacking angle type  $[\pm\theta]_{NT}$ .

용하여 측정하였으며, Fig. 8에서 보는 바와 같이 최대 표면조도와 비슷한 경향을 나타내었다.

일반적으로 연삭 가공에 의한 피삭재의 표면조도는 피삭재의 가로 이송 마크 (transverse feed mark)와 쟁기질 (plowing)과 러빙 (rubbing) 현상에 의한 마모에 기인한다. Fig. 9는 스톨과 가공물 간의 접촉면에서 발생하는 절삭 기구 (cutting mechanism)를 나타낸다 [17]. 절삭력의 반경 방향 분력이 작을 경우 쟁기질과 러빙에 의한 마모 현상이 발생하며, 한계값  $F_c$  이상으로 증가했을 때 절삭이 발생하게 된다. 이때, 절삭력의 반경 방향 분력은 피삭재의 반경 방향 스프링 상수의 함수로써 일반 평면 연삭과 같이 피삭재의 스프링 상수가 큰 가공물의 경우, Fig. 10 (a)와 같이 변형 영역이 작기 때문에 area (I)에서 절삭만이 발생한다. 그러나, 중공축과 같이 피삭재의 스프링 상수가 작은 Fig. 10 (b)의 경우, 가공물의 변형이 발생하여 연삭 스톨과 가공물 간의 접촉 면적이 넓어진다. 이 경우에 area (I)에서는 가공물의 변형으로 절입 깊이보다 적은 깊이로 절삭되며, area (II)에서는 스톨과 가공물 사이에 접촉이 발생하게 되지만, 절삭이 아닌 쟁기질과 러빙 같은 마모 현상이 발생한다. 쟁기질과 러빙의 연속적인 진행은 가공물의 마모를 가져오며, 가공물의 마모가 증가할수록 표면조도는 악화된다. 따라서, 스프링 상수가 상대

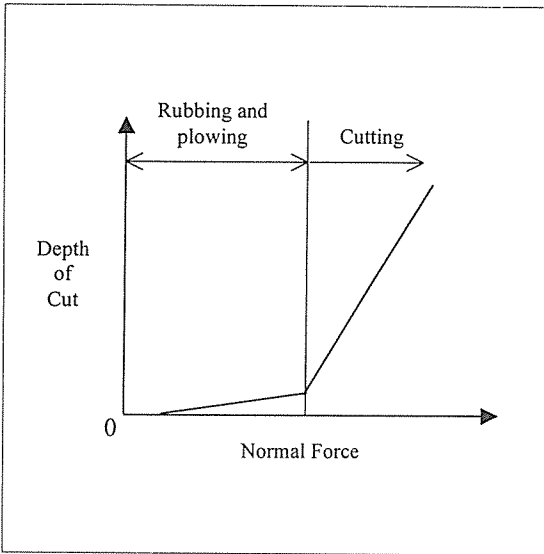


Fig. 9. Cutting mechanism with respect to the cutting force [17].

적으로 큰 두께 1mm와 2mm인 복합재료 시편의 경우, 절삭이 주로 발생하며, 스프링 상수가 낮은 두께 0.5mm의 복합재료 시편의 경우에는 절삭과 마모가

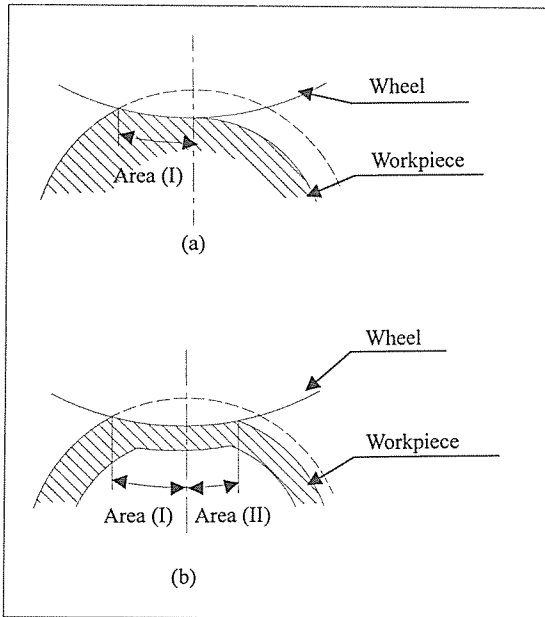


Fig. 10. Change of the contact area between the workpiece and the wheel.

(a) Rigid workpiece (b) Flexible workpiece

동시에 발생하여 표면조도가 악화된다.

특히, 원통형 피삭재의 내, 외경 연삭 (internal or external cylindrical grinding) 시에 발생하는 이송 마크는 평판 연삭 과정과 달리 주로 피삭재의 반경 방향의 스프링 상수 저하에 따른 국부 변형 정도에 따라 크기가 결정된다. Fig. 11은 복합재료 중공축의 이송 마크 발생 기구를 도식적으로 나타낸 그림으로써 반경 방향의 스프링 상수가 감소할수록 실제 가공 깊이는 공구의 절입 깊이보다 작으며, 이들 값의 차이만큼 국부 변형이 발생하게 된다. 이와 같은 피삭재의 국부 변형은 공구의 양측면에서 보다 많은 가공을 유발시켜 이송 마크가 발생하게 된다. 이때, 이송 마크 간의 거리  $S_t$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [18].

$$S_t = \frac{\pi d_w v_t}{v_w} \quad (1)$$

여기서  $d_w$ 는 원통형 피삭재의 지름,  $v_t$ 는 공구의 이송 속도, 그리고  $v_w$ 는 피삭재의 회전수이다. 복합재료 중공축의 두께 및 적층각에 따른 반경 방향 스프링 상수의 변화를 계산하기 위하여 유한 요소 해석을 이용하였다. 휠과 접촉하는 시편의 면적에 대하여 외력을 가하고, 시편이 변형된 양을 계산하여 반경방향의 스프링 상수를 구하였다. Fig. 12는 중공축의 두께 및 적층각에 대한 반경 방향의 스프링 상수 (spring constant ;  $k$ )와 컴플라이언스 (compliance ;  $C=1/k$ )를 나타낸다. 중공축의 스프링 상수와 컴플라이언스는 Fig. 2에 나타난 중공축의 축방향과 원주방향의 강성변화를 함께 반영하므로 시편의 치수 및 적층각에 따라 다르게 나타난다. 또한, Fig. 12의 컴플라이언스는 Fig. 7의 표면조도와 같은 경향을 나타냄을 알 수 있다.

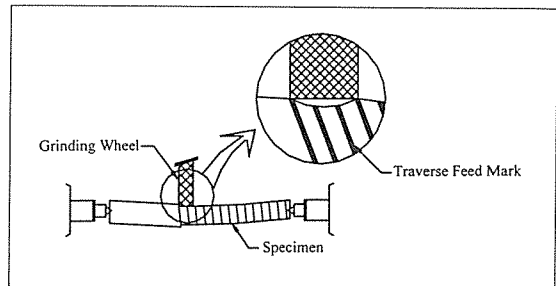


Fig. 11. Effect of the stiffness of the composite cylindrical workpiece on the traverse feed mark.

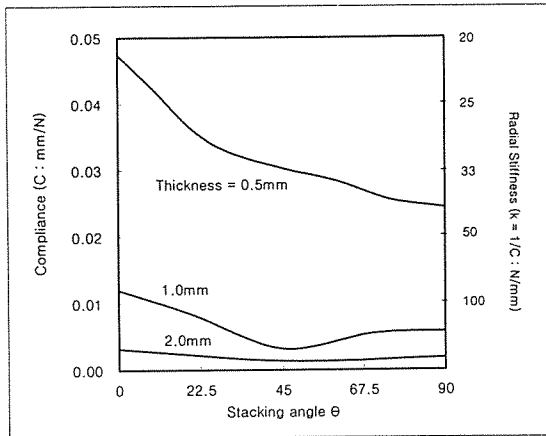


Fig. 12. Radial compliance of the composite hollow shaft ( $\phi 50 \times 300\text{mm}$ ).

스프링 상수가 상대적으로 큰 복합재료의 평면 연삭의 경우, 연삭 슛들의 가공 방향이 섬유와 직각을 이루는 방향  $[0]_{\text{NT}}$ 로 가공하였을 때, 가장 우수한 연삭 성능을 나타내었으며, 섬유와 평행한 방향  $[90]_{\text{NT}}$ 로 가공하였을 때, 연삭 성능은 감소한다 [14]. 그러나, 유연성 (flexibility)을 갖는 복합재료 중공축 연삭의 경우, Fig. 7에서 나타난 바와 같이 두께가 감소함에 따라 적층각  $[\pm 45]_{\text{NT}}$ 에서 연삭 성능이 가장 우수하였으며,  $[0]_{\text{NT}}$ 와  $[90]_{\text{NT}}$ 에서 연삭 성능이 악화되었다.

전절에서 언급한 바와 같이 연삭 가공에 의한 중공형 피삭재의 표면조도는 연삭 마모 (plowing and rubbing) 정도와 가공 중의 섬유와 기지 (matrix)의 분리 (debonding) 발생 범위에 의하여 결정된다. 탄소 섬유 에폭시 복합재료 중공축의 연삭 마모 정도는 반경 방향의 스프링 상수가 가장 작은 적층각  $[0]_{\text{NT}}$ 인 경우에 가장 크며,  $[\pm 45]_{\text{NT}}$ ,  $[90]_{\text{NT}}$ 의 순으로 감소하기 때문에 마모 정도만을 고려할 경우, 적층각이  $[0]_{\text{NT}}$ 인 경우에 가장 악화된 표면 상태를 나타낸다 [19]. 그러나, 중공형 복합재료 피삭재의 경우, 연삭 슛들의 절입과 마찰로 인한 피삭재의 국부적인 변형으로 발생하는 층간 전단 응력이 표면조도에 영향을 주기 때문에 Fig. 13과 같은 유한 요소 해석을 하여 층간 전단 응력을 구하였다. 연삭 슛들의 절입량이  $50\mu\text{m}$ 이고, 절삭력의 접선 방향 분력  $10\text{N}$ 이 연삭 슛들 폭  $32.0\text{mm}$ 에 대하여 균일하게 분포되었다고 가정하였을 경우, Fig. 14에서 보는 바와 같이  $0.5\text{mm}$ 의 두께를 갖는 복합재료 중공축의 평균 전단 응력은  $[0]_{\text{NT}}$ ,  $[\pm 45]_{\text{NT}}$ ,  $[90]_{\text{NT}}$  순으로 증가한다. 따라서, 마모 발생 중의 섬유와 기지

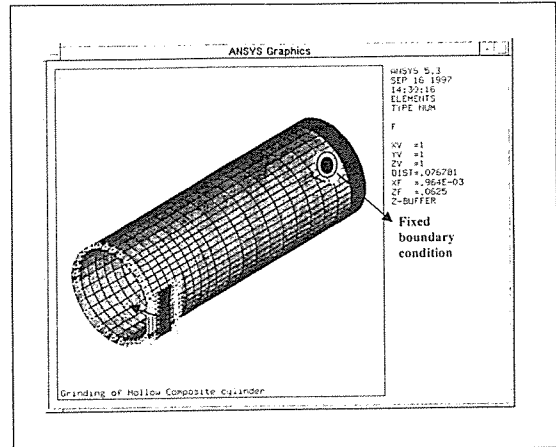


Fig. 13. Half modeling for inter-laminar shear stresses of composite hollow cylindrical grinding.

의 분리만을 고려하였을 경우, 피삭재의 표면조도는 평균 층간 전단 응력이 가장 크게 작용하여 섬유와 기지의 분리 영역이 가장 깊은 위치까지 발생하는  $[90]_{\text{NT}}$ 에서 가장 불량하였다.

Fig. 15는 두께가  $0.5\text{mm}$ 인  $[0]_{\text{NT}}$ ,  $[\pm 45]_{\text{NT}}$ ,  $[90]_{\text{NT}}$  시편 각각에 대한 전자 주사 현미경 사진이다.  $[0]_{\text{NT}}$ 의 경우, 작은 스프링 상수로 섬유의 전단 방향의 마모가 증가되었으며, 이송 마크에 의한 표면조도의 악화가 상대적으로 컸다.  $[\pm 45]_{\text{NT}}$ 인 경우, 쟁기질과 러빙에 의한 마모 현상과 이송 마크가 상대적으로 적었다.  $[90]_{\text{NT}}$ 의

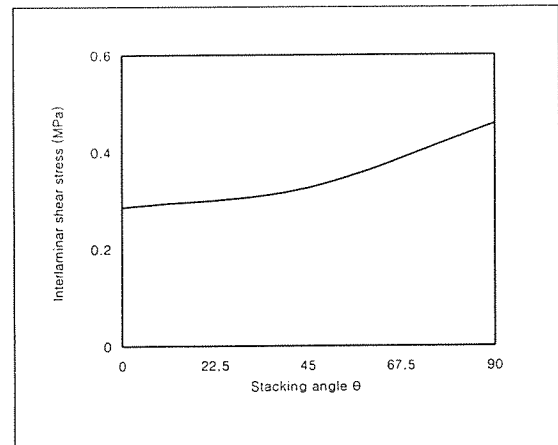
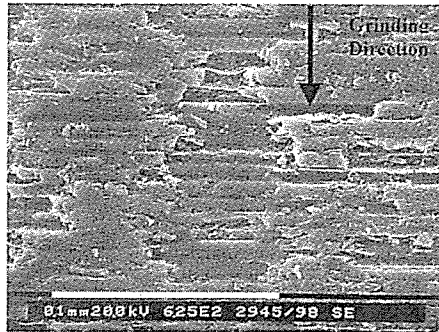
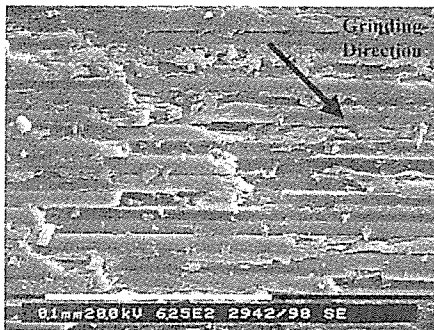


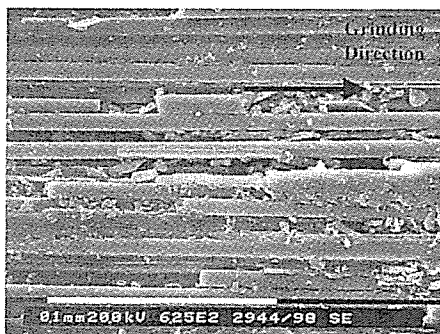
Fig. 14. Average inter-laminar shear stress due to cutting force with respect to the stacking angle type of  $[\pm\theta]_{\text{NT}}$  when the thickness of the hollow composite shaft is  $0.5\text{mm}$ .



(a)



(b)



(c)

Fig. 15. SEM photographs of the composite surface when the stacking angles were  $[0]_{NT}$ ,  $[\pm 45]_{NT}$  and  $[90]_{NT}$ .

(a)  $[0]_{NT}$  (b)  $[\pm 45]_{NT}$  (c)  $[90]_{NT}$

경우, 층간 전단 응력의 증가로 인하여 연삭 가공 중 섬유와 기지의 분리 영역이 보다 깊이 발생하여, 이에 따른 섬유의 인출 (pull-out)이  $[0]_{NT}$ 와  $[\pm 45]_{NT}$ 에서 보다 많이 나타났다.

따라서, Fig. 7의 실험결과와 Fig. 12를 비교하면, 복합재료 중공축의 두께 감소로 인하여 반경 방향 스프링 상수가  $40\text{kN/m}$  이하인 경우, 가로 이송 (cross Feed) 마크, 쟁기질 (plowing)과 러빙 (rubbing)에 의한 마모, 그리고, 섬유의 인출이 각 적층각의 조건에 대하여 주요하게 발생하여 표면조도의 악화가 심화되었음을 알 수 있다.

### 3. 2. 절입 깊이에 따른 연삭 가공 정도 비교

복합재료를 연삭하는 경우, 연삭 슷들의 절입 깊이 (depth of cut)에 따라 피삭재인 복합재료 중공축의 최종 표면조도 및 치수 정밀도 등이 결정된다. 본 연구에서는 복합재료 중공축의 두께가  $1\text{mm}$ 이고, 적층각이  $[\pm 45]_{NT}$ 인 반경 방향 스프링 상수  $300\text{kN/m}$ 의 경우, 연삭 슷들의 절삭 속도  $2,100\text{m/min}$ , 이송 속도는  $180\text{mm/min}$ , 절입 깊이는  $5, 10, 20, 50, 100, 150\mu\text{m}$ 에 대하여 가공 성능을 비교하였다. Fig. 16은 연삭 슷들의 절입 깊이에 따른 피삭재의 표면조도를 나타낸다. 절입 깊이  $50\mu\text{m}$  이하에서는 절입 깊이에 따른 표면조도의 개선 정도가 적은 것으로 나타났으며, 절입 깊이가  $100, 150\mu\text{m}$ 에서는 표면조도가 악화되었다. 이는 절입 깊이가 증가할 경우, 복합재료 중공축의 변형이 커

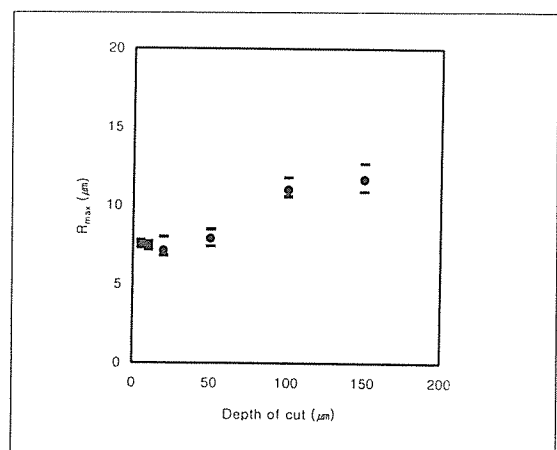


Fig. 16. Surface roughnesses of the composite shaft with  $[\pm 45]_{NT}$  stacking angle with respect to the depth of cut when the thickness and the inner diameter of the shaft were  $1\text{mm}$  and  $5\text{mm}$ , respectively.

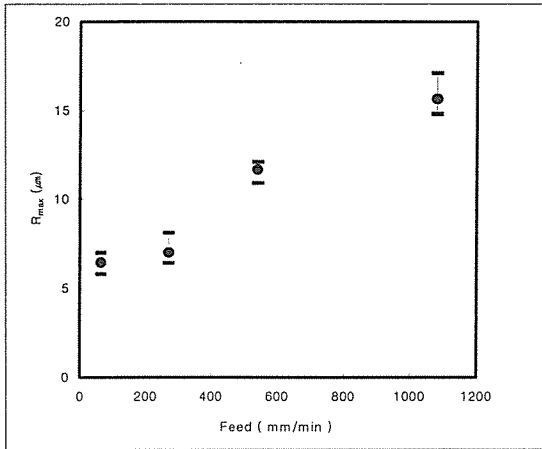


Fig. 17. Surface roughnesses of the composite shaft with  $[\pm 45]_{\text{NT}}$  stacking angle with respect to the feed rate when the thickness and the inner diameter of the shaft were 1mm and 5mm, respectively.

지게 되어 불균일한 재료 제거 및 이송 마크가 발생하게 되어 표면조도가 악화되는 것으로 판단된다.

### 3.3. 이송 속도에 따른 연삭 가공 정도 비교

연삭 스톨의 이송 속도에 따른 복합재료 중공축의 연삭 정도를 측정하기 위하여, 복합재료 중공축의 두께가 1mm, 적층각이  $[\pm 45]_{\text{NT}}$ 인 반경 방향 스프링 상수 300kN/m의 경우, 연삭 스톨의 절입 깊이를  $50\mu\text{m}$ , 이송 속도를 50, 180, 270, 550, 1100mm/min으로 하여 연삭 가공을 수행하였다. Fig. 17은 이송 속도에 따른 표면조도를 나타낸다. 연삭 가공 중에 가공물의 표면은 수많은 연삭 스톨의 입자가 동일한 표면을 가공하므로, 이송 속도가 증가함에 따라 가공물의 표면을 지나가는 연삭 스톨의 입자의 개수가 감소되어 완벽한 재료 제거가 이루어지지 않으므로 표면조도가 악화된다. 이송 속도가 550, 1,100mm/min일 경우, 이송 마크가 발생하였으나, 이송 속도가 50, 180, 270mm/min일 때는 이송 마크 없이 표면조도가 양호하였다. 이송 속도가 증가함에 따라 단위 시간당 피삭재의 재료 제거율이 커져서 많은 절삭력이 작용하므로 반경 방향의 변형이 증가되어 이송 마크가 발생하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 복합재료 중공축의 연삭 특성을 실험과 이론적인 방법으로 규명하였으며, 평면 연삭과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 복합재료 중공축의 두께가 감소함에 따라 중공축의 반경 방향 스프링 상수의 감소에 의하여 낮은 연삭 정도를 얻었다. 특히, 복합재료 중공축의 반경 방향의 스프링 상수가 40kN/m 이하인 경우, 가로 이송 (cross feed) 마크, 쟁기질 (plowing) 과 러빙 (rubbing)에 의한 마모, 그리고, 섬유의 인출이 각 적층각의 조건에 대하여 주요하게 발생하여 표면조도의 악화가 심화되었다.
2. 복합재료 중공축의 적층각이  $[90]_{\text{NT}}$ 일 경우, 다른 적층각에 비하여 큰 층간 전단 응력의 발생으로, 적층각이  $[0]_{\text{NT}}$ 일 경우, 낮은 반경 방향 스프링 상수로 인한 마모 작용으로 표면조도 악화의 원인이 되었다. 이와 같은 경향은 평면 연삭과 다른 특성을 나타내며, 반경 방향의 스프링 상수가 감소할수록 평면 연삭과 복합재료 중공축 연삭의 차이는 컸다.
3. 복합재료 중공축의 반경 방향 스프링 상수가 300kN/m일 경우, 연삭 스톨의 절입 깊이와 이송 속도에 따른 연삭 정도는 각각  $50\mu\text{m}$ 와 270mm/min 이상에서 불량하였다.

## 참고문헌

1. Reinhart, T. J., Composites, ASTM International, Vol. 1, 1987, pp. 816~822.
2. Lee, D. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., "Manufacturing of a SCARA Type Direct-Drive Robot with Graphite Epoxy Composite Materials," Robotica, Vol. 9, 1991, pp. 219~229.
3. Bang, K. G., Choi, J. K., Kim, H. S., Lee, D. G. and Jeon, H. S., "Development of Guide Roller Using Electroplated Carbon Fiber Composite for Thin Polymer Film Processing," Composite Structures, Vol. 38, 1997, pp. 321~328.
4. Lee, D. G., Jeong, K. S., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., "Development of the Anthropomorphic Robot with Carbon Fiber Epoxy Composite Material," Composite Structures, Vol. 25, 1993, pp. 313~324.
5. Choi, J. K. and Lee, D. G., "Manufacturing of a Carbon Fiber-Epoxy Composite Spindle-Bearing System for a Machine Tool," Composite Structures, Vol. 37, 1997, pp. 241~251.
6. Wang, D. H., Ramulu, M. and Arola, D.,

"Orthogonal Cutting Mechanism of Graphite/Epoxy Composite," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, 1995, pp. 1623~1638.

7. Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N. K. and Komanduri, R., "On the Machining of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, 1995, pp. 701~716.

8. Kang, M. S. and Lee, W. P., "Characteristics of Tool Wear in Cutting of Glass Fiber Reinforced Plastics," *KSME*, Vol. 12, 1988, pp. 1055~1062.

9. Wang, D. H., "A Study on the Machine Surface Morphology of Laminate Composite," *KSPE*, Vol. 12, 1995, pp. 130~138.

10. Chen, W. C., "Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, 1997, pp. 1097~1108.

11. Caprino, G. and Tagliaferri, V., "Damage Development in Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, 1995, pp. 817~829.

12. Asahina, K. and Suzuki, S., "Characteristics of trimming CFRP with End Mills," *JSPE*, Vol.

27, 1993, pp. 100~106.

13. Caprino, G., Tagliaferri, V. and Covelli, L., "Cutting Glass Fiber Reinforced Composite Using CO<sub>2</sub> Laser with Multimodal - Gaussian Distribution," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, 1995, pp. 831~840.

14. Park, K. Y., Lee, D. G. and Nakagawa, T., "Mirror Surface Grinding Characteristics and Mechanism of Carbon Fiber Reinforced Plastics," *KSME*, Vol. 18, 1994, pp. 2514~2522.

15. An, S. O. and Noh, S. L., "A Study on Grinding Characteristics of Glass Fiber Reinforced Plastics with Electrolytic In-Process Dressing," *KSCM*, Vol. 10, 1997, pp. 1216~1224.

16. ANSYS User's Manual (Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, TX, U.S.A., 1989).

17. Dorzda, T. J. and Wick, C., *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4th Edition, Vol. 1, 1983, pp. 11, 109 ~ 11, 118.

18. Malkin, S., *Grinding Technology*, John Wiley & Sons, 1989, pp. 67 ~ 68.

19. Sung, N. H. and Suh, N. P., "Effect of Fiber Orientation on Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymeric Composites," *Wear*, Vol. 53, 1979, pp. 129~141.