

탄소 섬유 에폭시 복합재료의 절단 연삭 특성

김포진* · 최진경** · 이대길***

(1999년 3월 2일 접수)

Cut-off Grinding Characteristics of the Carbon Fiber Epoxy Composite Materials

Po Jin Kim, Jin Kyung Choi and Dai Gil Lee

Key Words : 절단 연삭(Cut-off Grinding), 탄소 섬유 에폭시 복합재료(Carbon Fiber Epoxy Composite), 가공 온도(Machining Temperature), 표면 조도(Surface Roughness), 절삭력(Cutting Force).

Abstract

Although the net-shape molding of composites is generally recommended, molded composites are frequently required cutting or grinding due to the dimensional inaccuracy for precision machine elements. During the composite machining operations such as cutting and grinding, the temperature at the cutting point may increase beyond the allowed limit due to the low thermal conductivity of composites, which might degrade the matrix of composite. Therefore, in this work, the temperature at the cutting point during cut-off grinding of carbon fiber epoxy composites was measured. The cutting force and surface roughness were also measured to investigate the cut-off grinding characteristics of the composites. The experiments were performed both under dry and wet grinding conditions with respect to cutting speed and feed rate. From the experimental investigation, the optimal conditions for the composite cut-off grinding were suggested.

1. 서론

탄소 섬유 에폭시(carbon / epoxy) 복합재료는 일반 금속 재료에 비하여 높은 비강성, 비강도, 고감쇠 성능 및 열적 안정성을 가지며 특히, 선박 및 자동차의 구동축(drive shaft), 공작기계의 주축, 펄름 및 금속박판 제조용 롤러(roller) 등과 같은 회전 주축의 구조재로 사용할 경우 동특성 향상 및 고 정도의 유지가 가능하며, 경량화로 인한 작업장 내의 이동이 용이하기 때문에 인건비와 추가부대 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다.^(1~3)

일반적으로 탄소 장섬유 에폭시 복합재료는 진공백 정형 성형법(vacuum bag net shape molding)⁽⁴⁾을 이용하여 제작하는 것이 효율적이나, 구조물

또는 기계 부품 소재의 적용을 위하여 높은 치수 정밀도를 요구할 경우에 절단, 드릴링, 절삭 및 연삭가공 등의 후가공이 요구된다.

장섬유(long fiber) 복합재료의 경우 일반 금속 재료와 달리 기계적 이방성을 가지고 있기 때문에, 기존의 절삭 및 연삭 가공과는 다른 조건으로 가공되어야 한다.^(5~7) 특히, 장섬유 복합재료는 절삭 및 연삭시 섬유 방향과 공구이송 방향이 이루는 각도 차이에 따라 가공특성에 큰 차이를 보이며,⁽⁸⁾ 가공시 발생하는 열에 의하여 복합재료의 모재(matrix)의 기계적 성질인 강성 및 강도의 저하⁽⁹⁾를 유발할 수 있다. 따라서, 기계 가공이 된 복합재료 제품의 품질을 향상시키기 위해서는 절삭속도(cutting speed), 이송 조건, 절입깊이 등의 가공조건을 최적화하는 것이 필요하며, 이를 위하여는 가공시의 열발생을 고려하여야 한다.

기계 가공시의 등방성 물질의 열발생에 관한 연구는 Jaeger의 이동 열원에 관한 열전달 모델⁽¹⁰⁾에 의하여 시작되었으며, Lee 등의 원통 플런지 연삭(cylindrical plunge grinding)시의 온도분포 예측⁽¹¹⁾

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 대우고등기술연구원

*** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : dglee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3221 FAX : (042)869-3210

및 Malkin 등에 의한 시편으로 유입되는 가공 에너지의 비에 관한 연구^(12,13) 등 계속적으로 연구가 수행되고 있다. 절단 연삭시의 온도 분포는 Eshghy 에 의하여 이론적으로 계산되었다.^(14, 15)

이와 같이 등방성 물질의 연삭시의 열전달 방정식과 온도분포에 관하여 많은 연구가 수행되었으나, 이방성 물질인 탄소 섬유 에폭시 복합재료에 대한 연삭 및 절단 연삭시의 온도 상승 및 열손상에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 그러므로, 탄소 섬유 에폭시 복합재료 연삭시의 가공열 및 온도증가에 관한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 탄소 섬유 에폭시 복합재료의 시편 제조 및 제품의 치수를 맞추고자 할 경우에 많이 사용되는 절단 연삭 가공조건에 대한 가공특성을 파악하고, 복합재료 절단 연삭에 적합한 가공조건을 찾는 것이다.

본 연구에서 고려한 가공조건으로는 절삭속도와 절입속도(in-feed speed)이며, 연삭액의 적용 유무를 고려하였다. 절단 연삭시의 절삭력, 표면조도, 연삭에 의한 온도증가 등의 가공특성을 파악하고, 이러한 가공특성을 기준으로 표면조도를 향상시키면서 가공시의 열발생을 최소화할 수 있는 가공조건을 제시하였다.

2. 절단 연삭 실험

절단 연삭 실험은 절단 연삭휠의 상하 이송에 의한 플런지 컷 연삭(plunge cut grinding) 방식을 사용하였으며, 다음은 실험 수행에 필요한 시편, 실험장치 및 가공조건에 대하여 기술하였다.

Table 1 Properties of the carbon fiber epoxy composites (USN125BX, SK Chemicals, Korea)

	Carbon/Epoxy
Tensile modulus (GPa)	131.6
Transverse modulus (GPa)	8.2
Shear modulus (GPa)	4.5
Major poisson's ratio	0.28
Longitudinal tensile strength (MPa)	1800
Transverse strength (MPa)	50
Shear strength (MPa)	88
Fiber volume fraction (%)	60
Density (kg/m ³)	1550
Thermal conductivity (W/m K)	
(Longitudinal)	5.180
(Transverse)	0.734
Specific heat (kJ/kg K)	1.0

2.1 시편

2.1.1 시편의 재료 및 형상

절단 연삭을 위한 시편(specimen)의 재료는 PAN 계열의 일방향 탄소 섬유 에폭시 복합재료인 (주) SKC의 USN125BX 제품을 사용하였다. Table 1은 0.6의 섬유 부피분율(fiber volume fraction)을 가지는 USN125BX의 물성을 나타낸다.

절단 연삭의 가공기구 (cutting mechanism)는 연삭휠을 이루는 연삭입자들에 의하여 이루어지므로, 연삭입자에 비하여 상당히 큰 시편의 크기 및 형상은 복합재료의 가공특성에 영향을 주지 않는다. 또한, 가공시의 온도는 주위 온도에 따라 변할 수 있으므로 가공온도를 최소화하기 위하여는 시편의 부피를 가능한 크게 하는 것이 바람직하나, 재료와 시간이 많이 소요되므로 이를 고려하여 시편의 치수를 결정하였다.

Fig. 1은 시편의 치수 및 형상을 나타낸다. 시편의 형상은 블록형상으로 하였으며, 시편의 폭은 20mm, 길이는 100mm, 두께는 20mm로 결정하였다. 가공시편의 적층각은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 절삭방향을 기준으로 하여, 절삭 방향과 섬유 방향이 평행한 경우인 적층각 $[0]_{nr}$ 와 수직인 경우인 적층각 $[90]_{nr}$ 의 두가지이다.

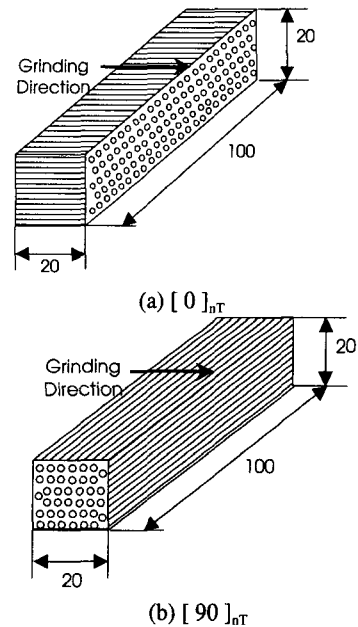


Fig. 1 Dimensions (mm) of the composite specimen with stacking sequence of $[\theta]_{nr}$

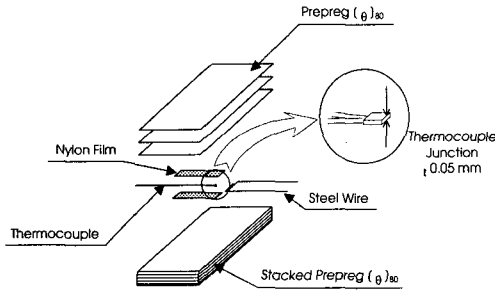


Fig. 2 Schematic diagram of composite specimen manufacturing

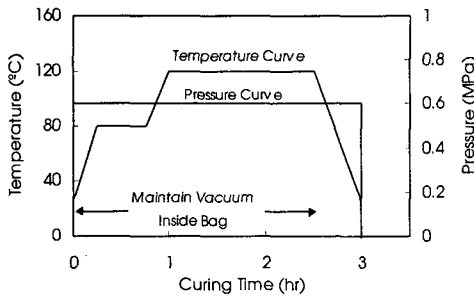


Fig. 3 Cure cycle for composite specimens

2.1.2 시편의 제작

Fig. 2 는 시편의 제작 개략도이다. 복합재료는 프리프레그(prepreg)를 적층하여 제작하였으며, 프리프레그 적층시에 열전대(thermocouple)를 장착하여 오토클레이브(autoclave) 진공백 성형법을 적용하여 열전대와 복합재료 시편을 일체형으로 제작하였다. Fig. 3 은 시편 제작시 사용된 경화 사이클(cure cycle)을 나타낸다.

열전대는 J-타입 iron-constantan 열전대를 사용하였으며, 열전대의 비드 (bead)는 변화하는 온도에 대한 응답성을 높이기 위해서 가능한 작아야 하므로, 본 연구에서는 사포 처리를 이용하여 0.05mm 두께를 가지는 비드를 제작하여 사용하였다.

Table 2 는 열전대의 전기적 절연을 위한 여러가지 절연체의 종류를 나타낸다. 절연체는 측정 온도의 오차를 최소화하기 위하여 가능한 작은 두께를 가지며, Fig. 3 의 복합재료의 경화조건에서 파손되지 않아야 한다. 따라서, 강도 및 인성이 높은 나일론 필름을 이용하였으며, 적용된 나일론 필름의 두께는 25 μ m 이다. 또한, 가공시 열전대와 연삭휠의 주철모재가 접촉하는 순간을 파악하기 위하여 직경 0.125 mm 를 가지는 두개의 철선(steel wire)을 삽입하였다.

Table 2 Material Characteristics for thermocouple-wire insulation

Material	Abrasion Resistance	Flexibility	Temperature (°C)	
			Min.	Max
Polyvinyl Chloride	Good	Excellent	105	-55
Polyethylene	Good	Excellent	75	-75
Nylon	Excellent	Good	150	-55
Teflon-FEP	Excellent	Good	200	-165
Silicon rubber	Fair	Excellent	200	-75
Asbestos	Good	Good	540	-75
Glass	Poor	Good	540	-75
Refrasil	Poor	Good	980	-75

2.2 실험장치

2.2.1 절단 연삭휠과 연삭기

복합재료의 가공시에는 연삭 입자의 마모가 빠르므로, 마모율이 적은 주철 본드 모재에 다이아몬드 입자로 구성된 140 메시(mesh)의 절단 연삭휠(이화다이아몬드 공업㈜)을 실험에 사용하였다. 절단 연삭휠의 직경은 150mm 이며 폭은 1mm 이다.

본 연구에 사용한 연삭기는 1.1 kW 의 CNC 연삭기이며, 에어 스피들(air spindle)이 장착되었으며, X, Y 축은 1 μ m, Z 축은 0.1 μ m 의 분해능으로 3 축을 동시 제어할 수 있는 제어가 장착되었으며, 내진용 레진 콘크리트 베드(resin concrete bed)가 적용된 평면 정밀연삭기이다.

2.2.2 온도 측정 및 절삭력 측정 장치

Fig. 4 와 Fig. 5 는 절단 연삭시의 온도 및 절삭력 측정을 위하여 구성한 실험장치의 개략도 및 모습을 나타낸다.

절삭력은 3 축 방향의 힘을 동시에 측정이 가능한 공구 동력계(tool dynamometer)와 증폭기(amplifier)를 이용하여 측정하였으며, PC 에 저장되었다. 공구 동력계 및 증폭기는 Kistler 사(Swiss)의 9257B 와 5019A 타입을 사용하였다.

절단 연삭시에 열전대에서 측정되어진 신호는 온도 측정 회로에서 보정 및 증폭된 후, 아날로그/디지털 변환장치(A/D convertor)를 통하여 100Hz 의 주파수로 PC (personal computer)에 저장되었다.

휠과 열전대 사이의 거리는 다음과 같이 파악할 수 있다. 시편내 삽입된 두개의 철선에 전원공

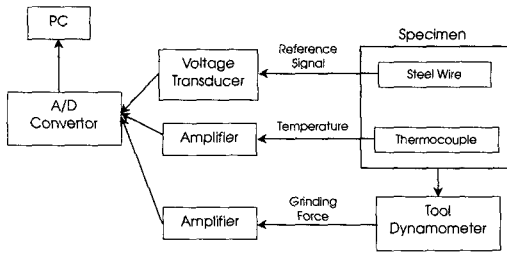


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

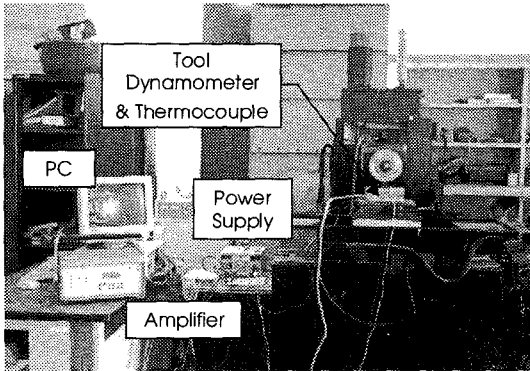


Fig. 5 Photograph of the device for temperature and grinding force measurement

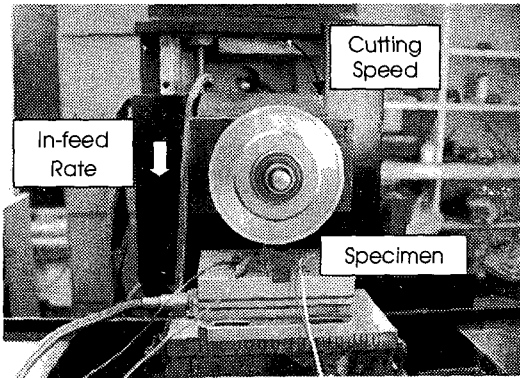
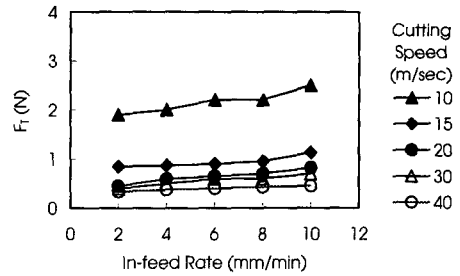


Fig. 6 Photograph of the experimental setup

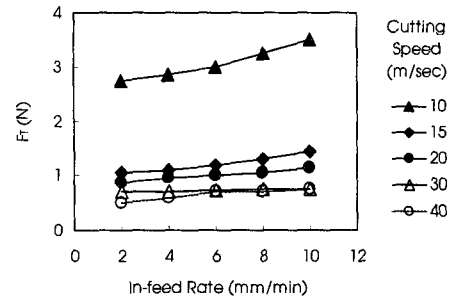
급기로 5Volt의 전압을 가하여 금속 연삭휠과 열전대가 접촉하는 순간 전압이 측정되며, 이를 기준신호로 하여 온도가 측정되는 시점을 파악할 수 있다. 측정된 전압은 온도 및 절삭력과 마찬가지로 아날로그/디지털 변환장치를 통하여 PC에 저장되었다.

2.2.3 실험 조건

휠의 연삭속도는 10, 20, 30, 40 m/sec, 절입속도는 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 mm/min에 대하여 절단 연삭시의 가공온도를 알기 위하여 실험하였다. 또한, 건식 연삭 (dry grinding)과 습식 연삭 (wet grinding)의 온도 증가량을 비교하기 위하여 연삭액의 적용



(a) Stacking sequence of [0]nT



(b) Stacking sequence of [90]nT

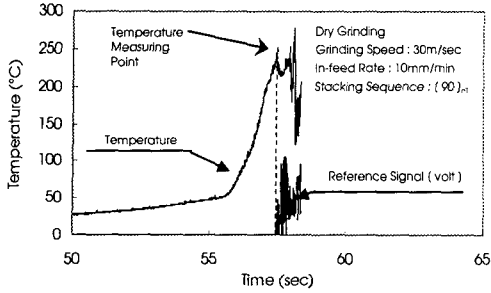
Fig. 7 Tangential grinding forces of carbon/epoxy composite with respect to grinding speed and in-feed rate

유·무에 대하여 실험을 수행하였다. 시편을 장착한 모습은 Fig. 6과 같다. 가공실험은 접착제를 이용하여 시편을 공구 동력계 (tool dynamometer) 위에 장착한 후 온도와 절삭력을 동시에 측정하며 수행되었다.

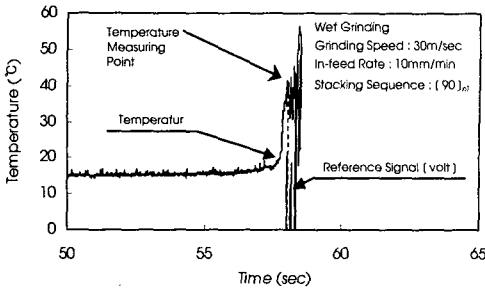
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 절삭력

Fig. 7 (a)와 (b)는 복합재료 절단 연삭시의 접선 방향의 절삭력을 나타낸다. 절삭력은 절단연삭이 시작되면서 증가하다가 재료제거율이 일정하게 되는 순간부터 일정한 값을 가지며, 본 연구에서는 재료제거율이 일정한 순간부터 절단연삭이 끝날때까지의 평균값을 나타내었다. 적층각에 대한 절삭력은 적층각 [90]nT가 [0]nT보다 큰데, 이는 [90]nT의 경우 탄소섬유는 길이의 수직방향으로 절단되면서 가공이 이루어지고, [0]nT는 탄소섬유의 절단보다는 탄소섬유와 모재사이의 계면파괴에 의하여 가공이 이루어지기 때문이다. 절삭속도에 대한 절삭력은 절삭속도 증가에 따라 감소하였으



(a) Dry grinding



(b) Wet grinding

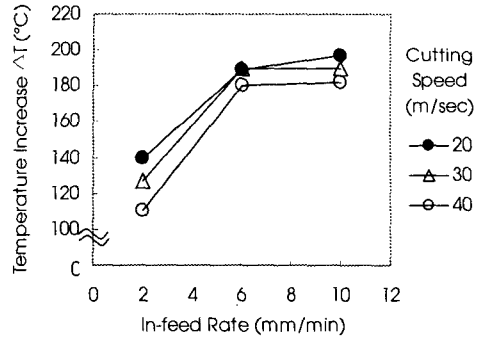
Fig. 8 Temperature histories during cut-off grinding with respect to time

며, 15m/sec 이상의 절삭속도에서 절삭력의 감소가 크게 나타났다. 또한, 절삭력은 절입속도에 비례하여 증가하였다.

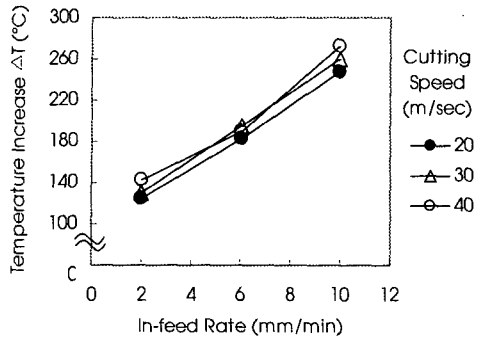
3.2 온도 증가

Fig. 8은 절단 연삭시 열전대에서 측정되어진 시간에 관한 온도 그래프이다. 연삭시 가공면의 온도는 휠과 열전대가 접촉하는 순간 측정되어진 온도이며, Fig. 8의 온도 그래프에서 외란이 발생하기 전의 최대점이다. Fig. 8(a)와 (b)의 건식 연삭과 습식 연삭의 온도 그래프를 비교하면, 가공온도는 건식 연삭의 경우 복합재료의 경화온도 이상 증가하며 습식 연삭에서는 경화온도 이하인데, 이는 연삭액(ELID No. 35, 범우화학공업주식회사)을 적용시 냉각효과가 크기 때문이다.

Fig. 9(a)와 (b)는 적층각 $[0]_{nr}$ 와 $[90]_{nr}$ 의 건식 연삭에 대한 최대 온도 증가량 ΔT 을 나타낸다. 여기서, 최대 온도 증가량 ΔT 은 외부온도와 휠과 철선이 접촉할 때의 온도차이를 나타낸다. 건식 연삭의 경우, 가공온도는 복합재료 경화온도를 넘게 되므로 기계적 물성의 저하가 발생할 수 있다. 적층각에 대한 온도 증가량은 $[90]_{nr}$ 가 $[0]_{nr}$ 보다 높는데, 이는 $[90]_{nr}$ 의 가공시 시편 내부로 유입되는 에너지가 크기 때문이다. 절삭속도에 대



(a) Stacking sequence of $[0]_{nr}$



(b) Stacking sequence of $[90]_{nr}$

Fig. 9 Maximum temperature increases of the carbon/epoxy composite in dry grinding with respect to grinding speed and in-feed rate

한 온도 증가량은 적층각 $[0]_{nr}$ 의 경우 절삭속도 증가에 따라 감소하였으며, 반대로 $[90]_{nr}$ 의 경우 증가하였다. 또한, $[0]_{nr}$ 와 $[90]_{nr}$ 에서 가공온도 상승은 절입속도에 비례하였으며, $[0]_{nr}$ 의 경우, 절입속도 6mm/min과 10mm/min에서 유사한 가공 온도 상승을 나타낸다.

따라서, 가공시의 절삭온도를 감소시키기 위하여는 $[0]_{nr}$ 일 경우, 절삭속도를 증가시키고 절입속도는 감소시켜야 하며, $[90]_{nr}$ 의 경우는 절삭속도와 절입속도를 감소시켜야 한다.

Fig. 10은 습식 연삭(wet grinding)에 대한 온도 증가량 ΔT 을 나타낸다. 절입 속도는 10mm/min이며 절삭속도는 20, 30, 40m/sec에 대하여 실험을 수행하였다. 습식 연삭의 경우, 가공에 의한 온도는 복합재료의 경화온도 이하이므로 가공시의 열에 의한 기계적 물성 저하는 없기 때문에, 습식 연삭시 가공에 의한 온도 상승은 고려하지 않아도 된다.

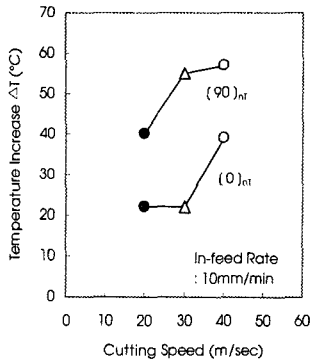


Fig. 10 Maximum temperature increases of the carbon/epoxy composite in wet grinding with respect to grinding speed

3.3 표면조도

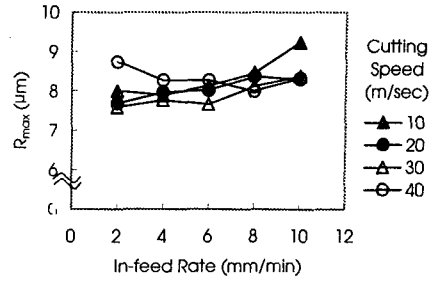
표면조도(surface roughness)는 가공후의 절단면을 측정하였으며, 표면거칠기 파형의 최대 높이 (R_{max})를 표시하였다. 사용된 표면조도계는 Taylor-Hobson 사의 Surtronic 3+이다. 또한, 표면조도 측정은 연삭방향에 수직하며, 절입방향과 나란한 방향으로 측정하였으며, 20 회 측정후의 평균한 값을 나타내었다.

Fig. 11 (a)와 (b)는 가공조건에 대한 최대 표면조도 (R_{max})를 나타낸다. 적층각에 대한 표면조도는 $[90]_{NT}$ 가 $[0]_{NT}$ 보다 양호하였다. 절삭속도에 대한 표면조도는 절삭속도 증가에 따라 향상되었고, 향상 정도는 적층각 $[0]_{NT}$ 경우보다 $[90]_{NT}$ 의 경우가 크게 나타났다. 그러나, 40m/sec의 절삭속도에서는 오히려 표면조도가 나빠졌으며, 이는 칩 크기의 감소로 인한 연삭철의 눈때움에 의한 것으로 보인다. 또한, 절입속도 증가에 따라 표면조도는 나빠졌으나, 적층각 $[0]_{NT}$ 의 절삭속도 40m/sec에서는 절입속도 증가에 따라 표면조도가 향상되었으며, $[90]_{NT}$ 의 경우 2mm/min의 절입속도에서 표면조도가 나빠졌다.

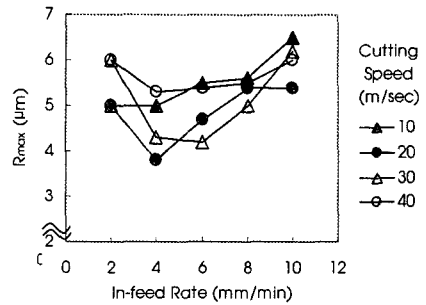
따라서, 표면조도를 향상시키기 위하여는 절삭속도는 증가시켜야 하나 30m/sec를 넘지 않도록 하고, 절입속도는 감소하여야 하나 $[90]_{NT}$ 의 경우에는 4mm/min보다 작지 않도록 한다.

3.4 SEM 촬영

SEM (scanning electron microscope)을 이용하여 가공후의 절단면을 관찰하였다. Fig. 12는 $[0]_{NT}$ 와 $[90]_{NT}$ 의 절단면의 사진이다. $[0]_{NT}$ 에서는 섬유와 모재의 경계면에서 파손된 후, 섬유가 연삭철과의 마찰에 의하여 인출 (pull-out)되었다. $[90]_{NT}$ 에서는

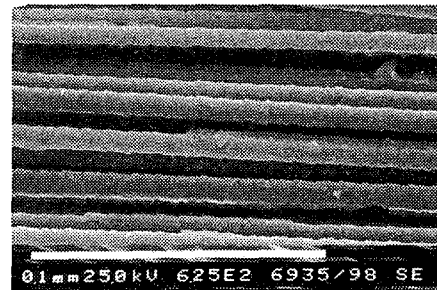


(a) Stacking sequence of $[0]_{NT}$

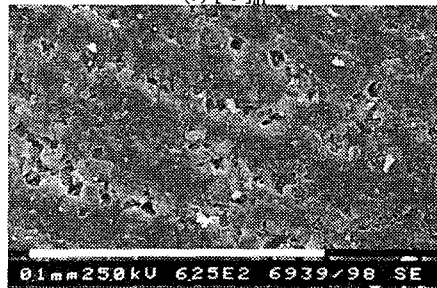


(b) Stacking sequence of $[90]_{NT}$

Fig. 11 Maximum surface roughnesses of the carbon/epoxy composite with respect to grinding speed and in-feed rate



(a) $[0]_{NT}$



(b) $[90]_{NT}$

Fig. 12 Photographs of the grinding surface measured with SEM with respect to stacking sequence type $[\theta]_{NT}$

섬유의 전단 방향으로 가공이 이루어지며, 섬유의 파단면 위에 모재의 스미어링 (smearing) 현상이 발생함을 관찰하였다.

4. 유한 요소 해석 (FEM)을 이용한 가공 시의 에너지 전도를 예측

4.1 절단 연삭의 모델링

Fig. 13은 가공시편의 모델링 모습이다. 유한 요소 해석을 위하여 상용 유한 요소 패키지인 ANSYS 5.3을 이용하였다. 탄소 섬유 에폭시 복합 재료 가공시의 열전달 방정식을 풀기 위하여 Table 1의 물성값을 적용하였다. 또한, 해석의 편의를 위하여 휠의 절삭면에서 발생하는 열만을 고려하였고, 가공면의 곡률은 무시하였다. 가공시의 재료 제거는 상용 유한 요소 해석 패키지에서 제공하는 요소 제거 방법(elimination of element)을 이용하였으며, 요소는 0.5mm 길이의 정사각형 형상을 가진다. Fig. 14는 절단 연삭 과정의 해석을 위한 알고리즘 (algorithm)을 나타낸다.

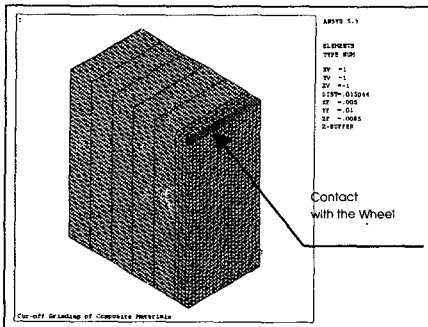


Fig. 13 Finite element model of the composite cut-off grinding for temperature analysis

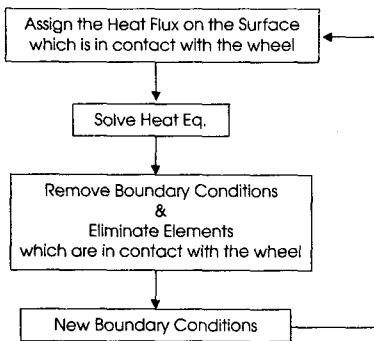


Fig. 14 Flow-chart for temperature analysis of cut-off grinding

4.2 경계 조건

해석을 위한 경계조건(Boundary condition)은 다음과 같다. 시편의 아랫면은 공구 동력계에 부착되어 있으므로 강(steel)에 의하여 전도된다고 하였으며, 외부에 노출된 면은 자연대류라고 가정하였다. 휠과 접촉하는 부분은 휠의 회전에 의한 대류 및 가공으로 인하여 발생한 열유속(heat flux) q 를 추가하였다. 식 (1)은 회전하는 실린더(rotating cylinder)에 대한 대류 계수를 나타내며,⁽¹⁰⁾ Table 3은 건식연삭일 경우의 가공속도에 대한 대류계수(convection coefficient) h 의 값을 보여준다.

$$h \cong h_r + 0.17D^{0.4}N^{0.7} \quad (1)$$

여기서 h_r 은 복사 계수(radiation coefficient), D 는 연삭휠의 직경, N 은 회전수를 나타낸다.

휠과 접촉하는 요소에 적용된 열유속 q 는 식 (2)와 같다.

$$q = \frac{\epsilon P}{W\delta} \quad (2)$$

여기서, ϵ 은 가공에너지에 대하여 시편으로 유입되는 에너지의 비율, W 는 절단 연삭휠과 시편의 접촉길이, δ 는 절단면의 폭, P 는 연삭동력(grinding power)을 나타낸다. 식 (3)은 연삭 동력 P 를 나타낸다.

$$P = V_w F_T \quad (3)$$

여기서, V_w 는 절삭속도, F_T 는 접선방향의 절삭력 성분이며 Fig. 7의 실험값을 사용하였다.

4.3 수치해석 결과

Fig. 15는 수치해석에 의한 시편의 온도구배를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 시편내의 열전달은 주로 섬유방향으로 나타나며, 가공온도는 외부의 냉각조건보다는 열유속의 크기에 따라 변화가 크다.

Fig. 16은 적층각 $[0]_{nr}$ 와 $[90]_{nr}$ 의 가공에너지에 대하여 시편으로 전도되는 에너지 비율 ϵ 을 나타낸다. 적층각 $[0]_{nr}$ 의 경우, 절삭속도의 증가에 따라 가공열이 시편으로 전도되는 시간이 짧아지며 칩에 의한 열유출이 크므로, ϵ 은 절삭속도에 반비례한다. 그러나, 적층각 $[90]_{nr}$ 의 경우 ϵ 은 절삭속도보다 절입속도의 영향을 주로 받으며, 절입속도에 비례하였다.

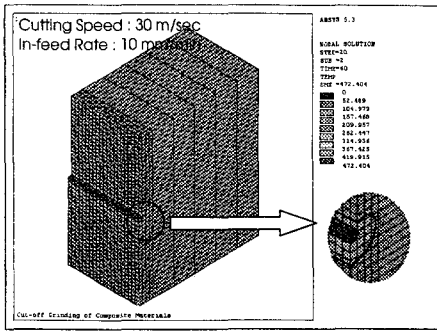
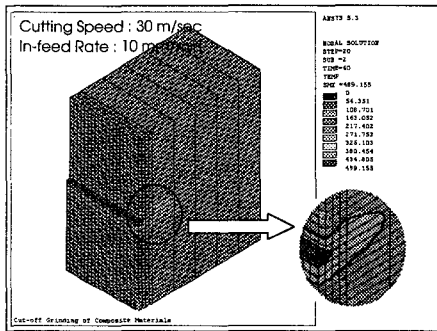
(a) Stacking sequence of $[0]_{nT}$ (b) Stacking Sequence of $[90]_{nT}$

Fig. 15 Calculated temperature profiles of the composite when the grinding wheel advanced at the middle point of the specimen

5. 결론

본 연구에서는 탄소 섬유 에폭시 복합재료의 절단 연삭 특성을 실험을 통하여 파악하였다. 실험에 적용한 연삭방식은 플린지 컷 연삭이며, 직경 150mm, 두께 1mm, 140 메시의 메탈 본드 다이아몬드 휠을 사용하였다. 고려한 가공조건은 10 ~ 40m/sec의 절삭속도와 2 ~ 10mm/min의 절입속도이며, 건식연삭과 습식연삭을 비교하였다.

(1) 표면조도를 향상시키기 위한 가공조건은 다음과 같다.

$[0]_{nT}$ 의 경우 : 20~30m/sec의 절삭속도
6mm/min 이하의 절입속도

$[90]_{nT}$ 의 경우 : 20~30m/sec의 절삭속도
4~6mm/min 절입속도

(2) 건식 연삭의 경우 가공시의 온도 증가는 복합재료의 경화온도보다 높으며, 이를 최소화하는 가공조건은 다음과 같다.

$[0]_{nT}$ 의 경우 : 온도 상승량은 절삭속도와 반비례하며 절입속도는 비례하므로 절삭속도는 증가시키며 절입속도는 감소하여야 한다.

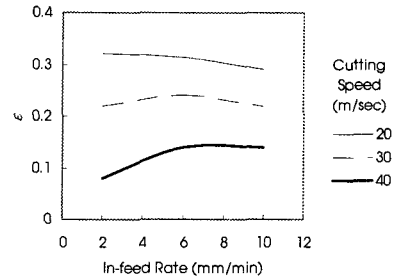
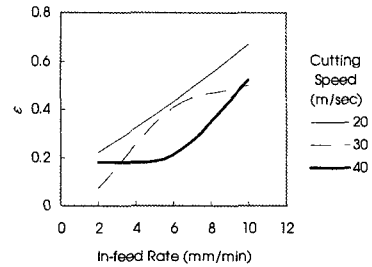
(a) Stacking sequence of $[0]_{nT}$ (b) Stacking sequence of $[90]_{nT}$

Fig. 16 Fractions of the grinding heat entering the specimen with respect to grinding speed and in-feed rate of carbon/epoxy composite using finite element method

$[90]_{nT}$ 의 경우 : 온도 상승량은 절삭속도와 절입속도에 비례하므로 절삭속도와 절입속도는 감소하여야 한다.

(3) 습식 연삭의 경우, 가공시의 온도 증가는 복합재료의 경화온도 이하이다. 따라서, (1)의 가공조건을 적용한다.

(4) 따라서, 건식 연삭의 경우, 표면조도를 향상시키며, 온도 상승을 최소화하는 가공조건은 다음과 같다.

$[0]_{nT}$ 의 경우 : 30m/sec의 절삭속도
4~6mm/min의 절입속도

$[90]_{nT}$ 의 경우 : 20m/sec의 절삭속도
4~6mm/min 절입속도

참고문헌

- (1) Bang, K. G., Choi, J. K., Kim, H. S., Lee, D. G. and Jeon, H. S., 1997, "Development of Guide Roller Using Electroplated Carbon Fiber Composite for Thin Polymer Film Processing," *Composite Structures*, Vol. 38, pp. 321~328.
- (2) Lee, D. G., Jeong, K. S., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., 1993, "Development of the Anthropomorphic

- Robot with Carbon Fiber Epoxy Composite Material," *Composite Structures*, Vol. 25, pp. 313~324.
- (3) Choi, J. K. and Lee, D. G., 1997, "Manufacturing of a Carbon Fiber-Epoxy Composite Spindle-Bearing System for a Machine Tool," *Composite Structures*, Vol. 37, pp. 241~251.
- (4) 이대길, 정광섭, 최진호, 1998, 복합재료 역학 및 제조 기술, 시그마프레스, pp. 249 - 284.
- (5) Wang, D. H., Ramulu, M. and Arola, D., 1995, "Orthogonal Cutting Mechanism of Graphite/Epoxy Composite," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, pp. 1623~1638.
- (6) Park, K. Y., Lee, D. G. and Nakagawa, T., 1994, "Mirror Surface Grinding Characteristics and Mechanism of Carbon Fiber Reinforced Plastics," *KSME*, Vol. 18, No. 10, pp. 2514 ~ 2522.
- (7) Park, K. Y., Choi, J. H. and Lee, D. G., 1994, "Highly Precise and Efficient Drilling of Carbon Fiber Reinforce Plastics," *KSME*, Vol. 18, No. 12, pp. 3175 - 3184.
- (8) Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N. K. and Komanduri, R., 1995, "On the Machining of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, pp. 701~716.
- (9) Oh, J. H., Kim, J. K., Lee, D. G. and Jeong, K. S., "Interlaminar Shear Behavior of Thick Carbon/Epoxy Composite Materials," *Journal of Composite Materials* (in press)
- (10) Jaeger, J. C., 1942, "Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts," *Journal and Proc. of the Royal Society of New South Wales*, Vol. 76, pp. 204~224.
- (11) Lee, D. G., Zerkle, R. D. and DesRuisseaux, N. R., 1972, "An Experimental Study of Thermal Aspects of Cylindrical Plunge Grinding," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 94, pp. 1206~1214.
- (12) Malkin, S. and Anderson, R. B., 1974, "Thermal Aspects of Grinding. Part1-Energy Partition," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, pp. 1177~1183.
- (13) Malkin, S., 1974, "Thermal Aspects of Grinding. Part2-Surface Temperatures and Workpiece Burn," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, pp. 1177~1183.
- (14) Eshghy, S., 1967, "Thermal Aspects of the Abrasive Cutoff Operation. Part 1-Theoretical Analysis," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 89, pp. 356~360.
- (15) Eshghy, S., 1968, "Thermal Aspects of the Abrasive Cutoff Operation. Part 2-Partition Functions and Optimum Cutoff," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 90, pp. 360~364.