

論文

탄소섬유 에폭시 복합재료 연삭숫돌 선정에 관한 연구

한홍삼*

A Study on the Grinding Characteristics of the Carbon Fiber Epoxy Composite Materials with the Vitrified Bonded Wheel

Heung-Sam Han*

ABSTRACT

Although the net-shape molding of composites is generally recommended, molded composites frequently requires cutting or grinding due to the dimensional inaccuracy for precision machine elements. The surface roughness and cutting force were also measured to investigate the surface grinding characteristics of the composites using the vitrified bonded wheel (WA, GC). The experiments were performed dry grinding conditions with respect to cutting speed, feed speed, depth of cut of the stacking sequence [0]_{nT}. From the experimental investigation, the optimal conditions both the vitrified bonded wheel WA and GC for the surface grinding are suggested.

KeyWords : Stacking sequence (적층각), Cure cycle (경화곡선), Depth of cut (절입깊이), Vitrified bonded wheel (자기질 결합제 숫돌)

1. 서 론

섬유강화 고분자복합재료 (fiber reinforced polymer composite)는 금속재료에 비해 높은 비강성, 비강도, 고감쇠능 및 열적 치수 안정성으로 항공기 구조재료, 우주 개발 신소재 및 자동차 경량화 분야로부터 일반스포츠, 레저산업까지 폭 넓게 사용되고 있다. 특히, 탄소섬유 에폭시 복합재료(carbon fiber epoxy composite)의 경우 높은 비강성 및 낮은 회전 관성 모멘트로 기계구조 재료 사용될 경우, 에너지 절감효과 및 경량화로 인한 이동시에 부대비용의 절감효과를 기대할 수 있다[1~3].

일반적으로 탄소섬유 에폭시 복합재료 구조물 또는 기계부품의 소재로 적용하고자 할 경우 정형가공을 하

는 것이 가장 이상적이나, 정밀기계부품의 경우 사용목적에 따라 절삭, 드릴링, 연삭가공 등의 후 가공이 요구된다. 특히 장섬유 복합재료는 섬유방향과 공구 이송 방향간의 각도차이에 따라 가공성능의 차이를 보이며, 눈매움 및 날 결손 정도가 금속을 가공할 때와는 다르므로 기존의 금속재료와는 다른 가공조건이 적용되어야 한다[4]. 연삭 시스템의 가공 과정 중에 발생하는 이상 상태로는 채터, 버어닝, 크랙, 가공물의 재질 또는 형상의 변화 등이 있다. 이러한 현상은 연삭 시간의 경과에 따라 연삭 회수가 거듭되면서 숫돌의 눈매움이나 마멸에 의하여 발생하게 된다[5]. 연삭 숫돌의 눈매움은 피삭재 표면에 문지름 현상을 유발하여 표면의 열적 변화 및 표면정밀도 저하를 가져오며, 국부적인 열 팽창은 피삭재의 굽힘 변형과 잔류응력을 생성시키므

* 한국과학기술원 기계공학과

로, 표면 조도를 악화시킨다. 이러한 난삭재를 연삭 가공하고자 할 때는 금속을 연삭하는 경우와 다른 연삭 조건 및 연삭숫돌로 연삭하여야 한다. 연삭시의 연삭효과와 연삭 숫돌과 피삭재의 선택 그리고 연삭 조건과 연삭기 및 주변장치의 안전성 등에 의해 영향을 받는다[6~8]. 따라서 복합재료로 기계구조물을 제작하고자 할 경우 지금까지 알려진 바에 의하면 거의 경면가공을 위주로하여 소개되므로써 다이아몬드 연삭 숫돌의 이용에 관한 자료가 소개되었으며 한편 난삭재이므로 정형가공을 이용한 것이 대부분이다. 일반금속가공에서처럼 널리 사용되고 있는 비트리파이드 지석을 이용하여 연삭하는 경우 참고 될 수 있는 자료가 많지 않다. 최근에는 산업의 발달로 고속회전이나 환경에 대한 부식의 방지 및 경량화를 위한 구조물제작이 요구되어 고가의 다이아몬드 숫돌을 사용하지 않고 비트리파이드 숫돌을 가지고 연삭 가공 함으로서 가공비를 절감 할 수 있고, 생산성 향상을 가져올 수 있는 이점이 있으므로 복합재료를 연삭 가공하는 데에 적정의 숫돌 선정이 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 WA계와 GC계의 비트리파이드 숫돌을 비교연삭 실험하여 복합재료 가공에 적합한 연삭 숫돌을 선정코자 연삭성에 관한 실험을 하였다.

2. 실험

2.1 시편 제작

탄소섬유 에폭시 복합재료의 평면 연삭을 위한 시편의 재질은 비강성 및 비강도가 높으며, 동적 특성이 우수하여 기계구조물에 많이 적용되는 일 방향 탄소섬유

Table 1 Properties of the composites (USN 125BX, SK Chemicals, Korea).

Mechanical properties of the Carbon/Epoxy Composite	
Tensile Modulus	131.6 Gpa
Transverse Modulus	8.2 GPa
Shear Modulus	4.5 Gpa
Longitudinal Poisson's Ratio	0.28
Tensile Strength	1800 Mpa
Transverse Strength (MPa)	50 MPa
Shear Strength (MPa)	88 Mpa
Fiber Volume Fraction	60 %
Density	1550 kg/m ³

에폭시 복합재료인 (주)SK Chemicals의 USN125BX제품을 사용하였다. Table 1은 일 방향 탄소섬유 에폭시 복합재료의 물성을 나타낸다.

시편의 치수 및 형상은 공구동력계에 설치할 수 있도록 길이100 mm, 폭 20 mm, 두께8 mm로 결정하였다. 가공시편의 적층각 [0]_{nr}는 연삭 방향을 기준으로 하여 섬유 방향이 평행한 방향이다.

시편의 성형 방법으로는 섬유각도와 치수에 알맞게 프리프레그를 적층한 후, 시편을 진공백에 넣어 오토크레이브 진공 성형법을 적용하여 제작하였다. 시편을 제작하는 과정에서 프리프레그를 적층하여 경화시키는 과정에서 적용되는 하중은 진공에 의한 압력과 6기압의 외부 압력이며, 경화온도는 120℃로 하였다. 본 연구에서는 미소한 절삭력을 정밀하게 측정하기 위해서 가능한 얇은 탄소강 시편 마운트를 사용하였으며, 재질은 SM45C, 크기는 110 mm × 90 mm × 3 mm로 제작하였다. 시편을 연삭하기 전에 시편을 마운트에 접착제로 부착하고 공구동력계 위에 M8 볼트 4개로 고정하였다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용한 실험장치를 구성하여 설치한 CNC연삭기의 그림이다. 본 CNC 연삭기는 KAIST 공작기계 및 구조 설계실험실에서 제작한 장비로 X,Y축은 1 μm, Z축은 0.1 μm의 분해능을 가진 3축을 동시에 제어할 수 있는 제어기가 장착되어 있다. 연삭기는 스핀들 모터동력이 1.5 kw의 에어스핀들이 장착된 CNC 평면 연삭기를 이용하였고, 공구동력계는 Kistler Co. 9257B 및 앰프(amplifier) 5019 타입을 사용하였다. 한편 건식으로 연삭하기 위하여 에어 흡입 펌프를 설치하고 흡입호수는 연삭 숫돌을 설치한 스핀들의 헤드 하단부위에 부착하여 칩이 발생할 때 즉시 흡입하여 필타를 거쳐 외부로 배출되도록 하였다.

탄소섬유 에폭시 복합재료 평면연삭 에서 연삭 숫돌의 선정을 위하여 변수로 작용하는 여러 가지 연삭 조건들로 연삭숫돌 입자의 재질 및 크기에 따라 결과가 크게 달라질 수 있다. 그러므로 연삭 능력 및 표면 품질의 정밀도 차이 등을 고려하여 연삭 숫돌의 입도, 시편의 재질 및 섬유방향, 절삭속도, 절입 깊이, 이송속도 등의 변수들을 정하였다. 한편 연삭숫돌은 탄화규소 계와 알루미나 계의 비트리파이드 연삭 숫돌을 가지고 연삭성에 대한 절삭력 및 표면 조도에 대하여 실험 하였다. 위의 평가 결과에 따라 효율적인 연삭 실험을 위

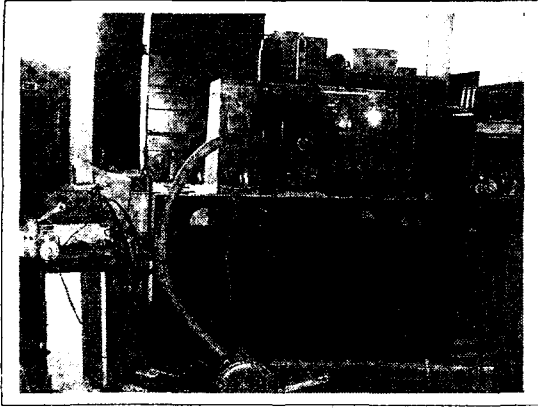


Fig. 1 Photograph of experimental set-up system

해 슷들의 재질을 선택하고, 일정한 연삭 조건인 절삭 속도, 절입 깊이, 이송속도를 변경하며 슷들의 입도에 대해서 실험한 결과의 절삭력 및 표면 조도를 고찰하였다. Fig. 1과 같이 연삭 동력의 측정을 위한 실험장치를 구성하여 연삭력을 측정하였으며, 표면정밀도 측정은 한가지 연삭 조건이 끝난 후에 섬유방향과 연삭 방향이 일치하는 방향과 수직방향으로 표면 조도기(SJ-201 Mitutyo Co.)를 가지고 10번씩 측정하여 결과의 평균을 그래프로 나타내었다. 시편은 가공할 부위를 예비 연삭하여 가공 면의 평면을 정밀하게 연삭한 후 실험에 들어갔으며, 연삭 조건에 의한 각 연삭에 앞서 드레싱을 실시하였고, 시편의 연삭면과 슷들의 눈매움을 조사하기위해 SEM사진을 찍어 제시하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 슷들입자 재질에 의한 연삭특성

연삭 슷들은 흑색 탄화규소질 C, 녹색 탄화규소질 GC, 백색 알루미나질 WA가 있다. 이중 WA계 연삭 슷들은 일반적으로 탄소강, 합금강, 스테레스강 등에 사용하며, C계 연삭 슷들은 황동, 알루미늄에 사용하고, GC계 연삭 슷들은 초경합금, 특수주철에 사용하는 것으로 구분되어있다. 그러나, 탄소섬유 에폭시 복합재료를 가지고 구조물을 제작하고자 할 때는 비철이면서 강도가 높고 이방성이므로 연삭 능력이 좋고 경제적인 연삭 슷들을 선정할 필요가 있다.

C계의 연삭 슷들은 마모율이 아주 낮으므로 슷들의 자생시간이 길고, 글레이징이나 눈매움으로 인해 피삭

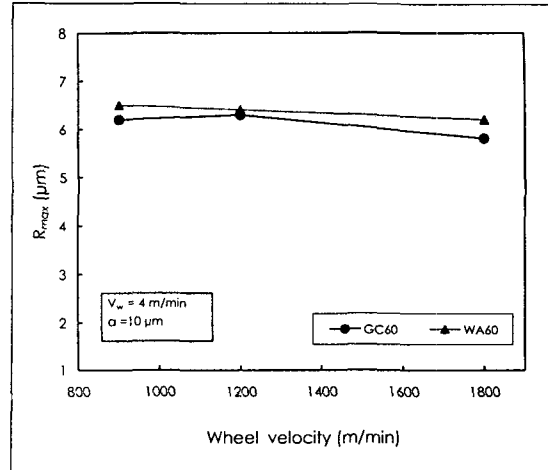


Fig. 2 Surface roughness versus wheel velocity in surface grinding

재의 표면을 쉽게 소손 시키는 것으로 되어있고, GC계 연삭 슷들의 경우는 경도가 높고, 입자 날의 신생이 잘되어 표면의 정밀도유지에 적합하고 연삭시 발열이 적은 것으로 소개되고 있다[9,10]. 이러한 연삭성으로 인해 WA계와 GC계는 피삭재에 따른 연삭성에서 다소의 차이가 있어 복합재료 연삭에서 연삭성을 비교 실험하였다. 연삭 표면의 정밀도에서는 Fig. 2의 WA계와 GC계의 비트리파이드 연삭 슷들을 가지고 슷들의 주속도를 900, 1200, 1800 m/min로 변경하여 연삭한 결과를 표면 조도기로 측정 비교하여 나타내고 있다. 이 그림에서 슷들의 주속도 변화에 대한 GC60k 7V와 WA60k 7V 슷들의 연삭성에 대한 표면 조도는 큰 차이를 보이지는 않고 있으나 비교적 GC60 슷들을 사용하여 연삭한 표면 조도가 양호한 것으로 보인다. 이는 슷들 입자의 크기와 입도가 같은 슷들을 사용하였으나 경도가 높고 인성이 떨어져 GC 슷들을 이용한 복합재료의 연삭시에 입자의 자생작용이 우수하여 연삭 효과가 좋은 것으로 사료된다.

Fig. 3은 절입 깊이 10, 30, 50 μm로 변경하고 슷들의 주속도 1800 m/min, 이송속도를 4 m/min로 하여 연삭한 표면 조도의 결과를 비교하여 나타내었다. 이 그림에서 GC60 연삭 슷들을 사용한 연삭 실험에서 양호한 표면 조도를 보인다. 이 실험에서의 절입 깊이 구간은 비교적 양호한 연삭 성을 보이는 구간으로 볼 수 있으며, 따라서 연삭스�들의 연삭성 비교를 파악하는 데에 효과적이라고 판단되어 본 실험의 연삭 조건으로 절입 깊이를 정하였다. 절입 깊이가 깊어지면 표면 조

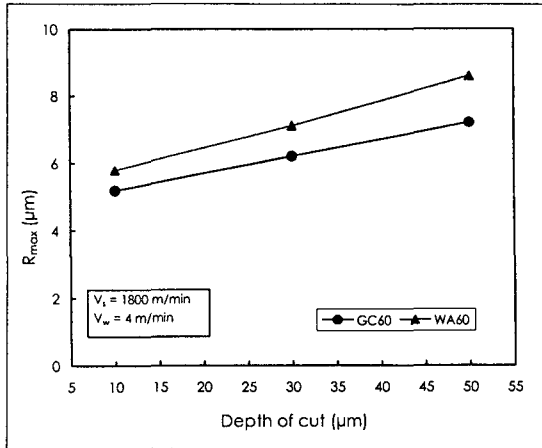


Fig. 3 Surface roughness versus depth of cut in surface grinding

도는 비례하여 악화되는 것을 보이고 있으나 WA60 숫돌을 사용한 경우보다 GC60의 연삭 숫돌을 사용한 경우가 연삭성이 좋은 것을 보이고 있다. 이는 알루미늄 나계인 WA숫돌로 연삭한 경우보다 제작사 소개에 따르면 탄화규소계인 GC 연삭숫돌을 가지고 연삭한 경우가 발열이 적고, 인성이 적으며 숫돌의 자생작용이 원활하여 표면 조도를 양호하게 하는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 이송속도 2, 4, 7 m/min로 변경하고 숫돌의 주속도 1800 m/min로 하고 절입 깊이를 10 μm로 하여 연삭한 표면 조도의 결과를 비교하여 나타내고 있다. 이 그림에서 표면 조도는 GC 연삭 숫돌의 경우가 WA 연삭 숫돌로 연삭한 경우보다 양호한 결과를

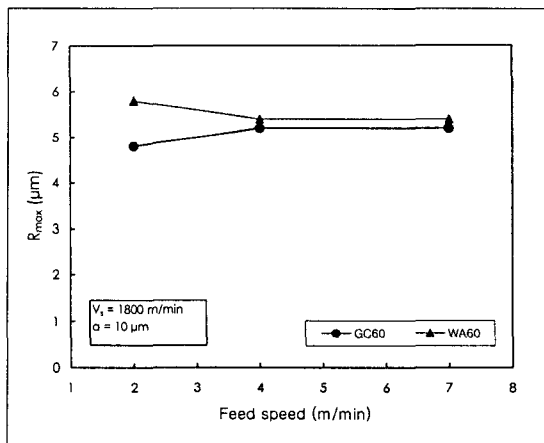


Fig. 4 Surface roughness versus table feed speed in surface grinding

보이고 있다. 이송속도 증가에 따라 표면 조도의 큰 변화는 보이지 않고 있으나 비트리파이드 연삭 숫돌의 연삭시에 표면 조도는 다소 차이를 보이고 있으며, GC60의 연삭 숫돌을 사용한 경우가 다소 양호한 조도를 보이고 있다. 복합재료의 연삭시 일정량 이하의 이송속도에서 표면 조도에 미치는 영향이 작은 것을 보이고 있다. 이송속도를 더 높게 취하지 않은 것은 특수 연삭이 아닌 일반 연삭기에서의 이송속도를 사용하여 실험에 적용하였으므로 사용된 연삭 속도내의 표면 조도를 비교하여 제시하였다.

3.2 숫돌입도에 의한 연삭특성

Fig. 5는 이상의 실험에서 규명된 것처럼 숫돌입자에 의한 연삭 특성에서 GC계 연삭 숫돌을 사용하여 연삭한 WA계 연삭 숫돌을 가지고 연삭한 경우보다 양호한 표면 조도를 보이고 있으므로 본 실험에서 GC계 연삭 숫돌을 가지고 숫돌의 입도크기를 변경하여 적용하므로써 입도에 대한 연삭 특성을 고찰하고자 하였다. 따라서 GC 연삭 숫돌의 입도가 GC46, GC60, GC80을 사용하여 연삭력을 측정된 그림으로 각 입도의 숫돌에 대하여 연삭 조건은 숫돌의 주속도 1800 m/min, 이송속도 4 m/min, 절입깊이 10 μm로 연삭하여 연삭력의 변화를 측정하고, 표면조도를 측정하여 나타내었다. GC46 연삭 숫돌의 실험에서는 연삭 시간에 대하여 절삭력이 서서히 증가하는 상태를 보이고 있으며, GC60경우는 절삭력이 증가하다가 일정하게 되는 것을 볼 수 있는데, 이는 입도의 공극에 칩이 채워져 입자가 탈락하며 연삭날이 재생되어 절삭력의 증

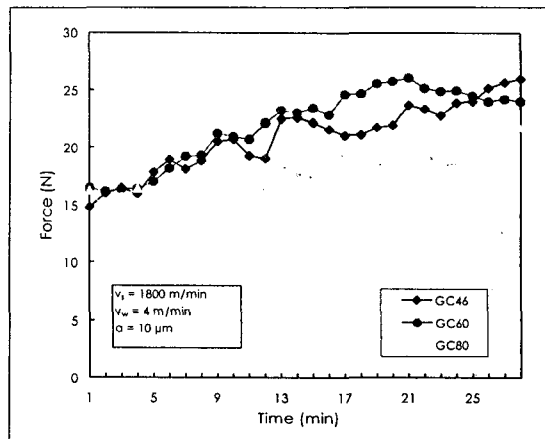


Fig. 5 Grinding force in surface grinding

가가 둔화되는 것으로 사료된다. 한편 GC80숫돌 경우는 공극이 작고, 칩으로 인한 입자의 탈락과 자생시간이 짧아 절삭력의 증가가 둔화되는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 표면조도 측정에는 표면조도계를 이용하여 cut off 는 0.8로 하여 최대표면 거칠기(R_{max})를 연삭 방향과 섬유 방향이 같은 방향으로 연삭하여 연삭방향과 수직방향으로 측정하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 연삭방향과 일치하는 방향으로 측정된 경우가 수직 방향의 측정시 보다 양호한 표면 조도를 보인다. 따라서 섬유방향이 연삭방향일 때 표면 조도가 양호한 것으로 생각된다. 입도에 따른 경향으로는 입자가 큰 GC46보다 입자가 작은 GC80이 양호한 표면 조도를 보인다. 그러나 GC80의 숫돌은 입자가 작아 눈메움이나 마모로 연삭 효율이 떨어질 수 있고, 이로 인해 드레싱 등으로 연삭 시간이 많이 걸린다. GC46숫돌은 가공면이 거칠게 나타나므로 요구되는 품질에 따라 선택하여 사용할 수 있다. 연삭시간의 경과에 따라 GC60 숫돌을 사용한 경우의 표면 조도와 절삭력이 다소 양호한 상태를 보이고 있다.

GC 연삭 숫돌로 연삭시 표면 조도에 영향을 주는 인자 중 눈메움의 영향이 매우 크며, 눈메움은 연삭면에 연삭 온도를 증가시키고 이로 인한 표면의 정밀도를 손상시킨다. 눈메움은 연삭가공 할 때 숫돌 표면의 공극을 칩이 메움으로서 생기는데, 높은 제거율을 가진 연한재료에서 특히 문제가 된다. 칩의 제거율이 공극의 칩 저장능력을 초과 할 때 공극이 메워져 피삭체의 표면에 연삭 압력이 증가하고 열이 발생한다. 이것은 전체적인 입자의 제거 또는 칩이 만들어지지 않는 요인으로 작용하게 된다. 연삭 입자는 대부분 음의 경사각을 가지며 여유면은 일부 피삭체에 면 접촉하는 부위가 있다. 눈메움은 음의 경사면에 구성인선처럼 생기거나 쌓이게 되어 피삭체의 표면정도를 손상시킨다. 연삭칩의 크기에 따라 공극에 저장되는 비율이 다르게 되며 입자 공극의 눈메움이 진행됨에 따라 연삭력의 변화와 표면의 품질을 손상시키게 된다.

Fig. 7은 GC60의 연삭 숫돌을 가지고 탄소섬유 에폭시 복합재료를 연삭 가공한 연삭 숫돌면의 눈메움을 SEM으로 200배 확대하여 찍은 사진이다. 눈메움 현상과 연삭 조건에 의한 연삭과정에서 나타나는 표면 정밀도에 미치는 요소로서 숫돌의 마모 및 눈메움으로 인한 문제의 해결을 위해서는 절입 깊이를 작게 하고, 절삭속도를 증가 시키는 것이 효과적이며, 냉각수를 사용하여 칩과 입자의 접착력을 감소시키고, 숫돌 선정시

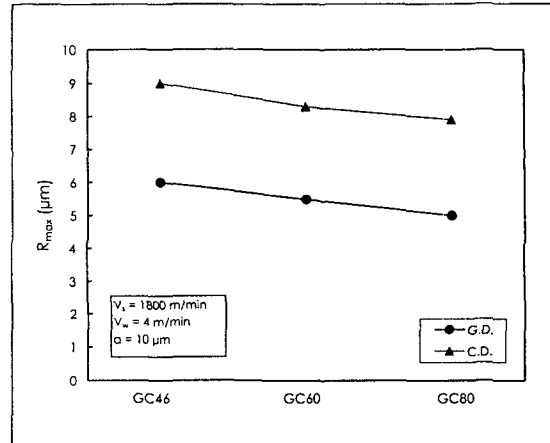


Fig. 6 Surface roughness versus grinding wheel grain in grinding direction (G.D.) and cross direction (C.D.) measured

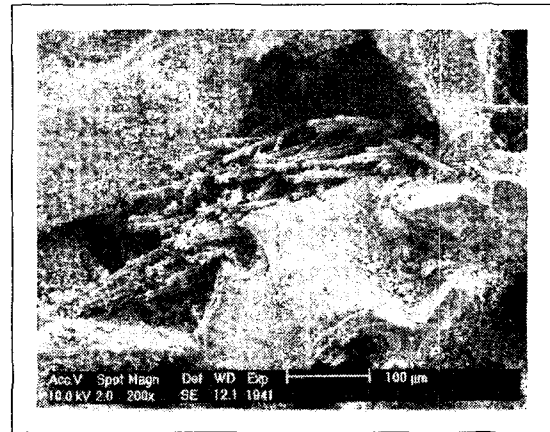


Fig. 7 SEM. Photographs of loading of the grinding wheel

공극이 큰 것이나 거친 것을 사용하면 좋다. 고압의 공기를 노즐을 통하여 숫돌에 불어주어 숫돌의 표면을 항상 깨끗이 하는 것도 효과적이며, 일정 연삭 회수 마다 드레싱을 하여 주는 것이 좋다[11].

4. 결론

탄소섬유 에폭시 복합재료 평면 연삭에서 눈메움 현상과 연삭 조건에 의한 CNC 연삭기에서 일정한 연삭 조건의 변화를 통해 연삭 가공을 실시하였으며, GC와 WA 연삭 숫돌의 적절한 입도 선정을 위한 실험과 시

편의 섬유각도에 따른 연삭으로 표면의 정밀도를 비교 하였으며, 연삭 조건의 변경에 따른 연삭력과 표면 조도에 미치는 영향에 대한 실험을 하여 아래와 같은 결론을 얻다.

1. 연삭숫돌의 입자가 GC계 숫돌로 연삭한 경우가 WA계 숫돌로 연삭한 경우보다 표면 조도가 다소 양호하였다.

2. 연삭 숫돌의 입도가 GC46, GC60, GC80인 연삭 숫돌을 이용한 실험에서 연삭시간이 흐름에 따라 GC60숫돌의 연삭경우 숫돌의 자생작용으로 연삭력이 다소 감소하였고, 또한, 표면 조도가 양호하였다.

3. 연삭시 눈매움 현상은 일반강의 재료와 달리 구성 인선의 형성을 이루지는 못하고, 숫돌의 공극에 쌓여 마찰 등으로 절삭력과 표면 조도에 영향을 주었다.

참고문헌

1. 이대길, 정광섭, 최진오, "복합재료 역학 및 재료기술", 시그마프레스, 1998.
2. Lee, D. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., "Manufacturing of a SCARA Type Direct-Drive Robot with Graphite Epoxy Composite Materials", *Robotics*, 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. M. Hong, "연삭가공시 연삭숫돌의 드레싱 시기 검출 방법에 관한 연구", *한국공작기계학회지*, Vol.7, No.1, 1998, pp.112~118.

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. Jacobs, F.B., "Abrasives and Abrasive Wheels", Henly, New York, 1919.

9. Des Ruisseaux, N. R. and Zerkle, R. D., "Thermal Analysis of the Grinding Process", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 92, 1970, pp. 428-434.

10. Lee, D. G., Zerkle, R. D. and Des Ruisseaux, N. R., "An Experimental Study of Thermal Aspects of Cylindrical Plunge Grinding", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 94, 1972, pp. 1206-1214.

11. Jen, T. C. and Lavine, A. S., "A Variable Heat Flux Model of Heat Transfer in Grinding Model Development", *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, 1995, pp. 473-478.