

탄소섬유 에폭시 복합재료 연삭온도에 의한 연삭특성

한홍삼*, 이동주**

A Study on the Grinding Characteristics of the Carbon Fiber Epoxy Composite Material Grinding Temperature

Heung-Sam Han*, Dong-Ju Lee**

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. During the composite machining operations such as cutting and grinding, the temperature at the grinding area 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 grinding point during surface grinding of carbon fiber epoxy composite was measured. The grinding temperature and surface roughness were also measured to investigate the surface grinding characteristics of the composites. The experiments were performed both under dry and wet grinding conditions with respect to cutting speed, feed speed, depth of cut and stacking angle. From the experimental investigation, the optimal conditions for the composite surface grinding were suggested.

Key Words : Loading(눈메움), Stacking sequence(적층각), Cure cycle(경화곡선), Depth of cut(절입깊이), Bead(열전대)

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, 레저산업

까지 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, 자동차, 공작기계 등과 같은 구조 재료 사용될 경우, 에너지 절감효과 및 경량화로 인한 이동시에 부대비용의 절감효과를 기대할 수 있다.^(4,5)

* 한국과학기술원 기계공학과
** 충남대학교 기계공학과

일반적으로 탄소섬유 에폭시 복합재료 구조물 또는 기계부품의 소재로 적용하고자 할 경우 정형가공을 하는 것이 가장 이상적이나, 정밀기계부품의 경우 사용목적에 따라 절삭, 드릴링, 절 연삭가공 등의 후 가공이 요구된다. 특히, 장 섬유 복합재료(long fiber composite material)는 섬유방향과 공구 이송 방향간의 각도차이에 따라 가공능력의 차이를 보이며, 눈 메움 및 날 결손 정도가 금속을 가공할 때와는 다른 가공조건이 적용되어야 한다.^{6,7)} 연삭 시스템의 가공 과정중에 발생하는 이상 상태로는 채터, 버어닝, 크랙, 가공물의 재질 또는 형상의 변화 등이 있다.⁶⁾ 이러한 현상은 연삭 시간의 경과에 따라 연삭 회수가 거듭되면서 스톨의 눈 메움이나 마멸에 의하여 표면의 열적 변화 및 표면 정밀도 저하를 가져오며, 국부적인 열 팽창은 피삭재의 굽힘 변형과 잔류응력을 생성시키므로, 표면 조도를 악화시킨다.⁹⁾ 이와 같이 여러 분야에서 그 활용도가 커지고 있는 복합재료는 정형가공으로 할 수 없는 경우, 이러한 난삭재인 복합재료를 연삭 가공하고자 할 때 연삭 스톨의 선택과 연삭 조건 등의 선정이 요구되고 있으나 연삭 가공에 대하여 제시된 연구가 없어 복합재료에 대한 효과적인 절삭, 연삭 가공특성 및 기구 등에 관한 연구가 요구된다. 또한, 동력 전달 축이나 유연성을 가지는 중공축의 활용도가 늘어나면서 연삭 조건의 필요성이 증가되고 있다. 그러나, 연삭의 내부결함 및 표면 조도에 영향을 미치는 요소가 연삭점 경계면에 발생하는 높은 열에 의한 국부적인 열 팽창 및 잔류응력으로 피삭재의 굽힘변형과 연삭 열에 의한 스톨의 탄성변형 등으로 연삭 가공면 정밀도에 많은 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 연삭의 활용범위를 넓히기 위하여 일반적으로 많이 사용하는 GC계 스톨을 이용한 범용 연삭기를 사용하여 가공면에 미치는 연삭 온도의 특성에 대한 실험을 하여 복합재료 기계구조물 생산에 연삭 특성을 제시하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시편의 제작

기존의 연구에서 가공온도 측정은 주로 금속 재료에 대하여 수행되었으며 측정기구로 열전대를 이용하였다. 금속 재료의 경우, 열전대는 가공시편에 작은 구멍을 낸 후 삽입되기 때문에, 온도 측정시의 오차를 최소화하기 위하여 작은 직경의 드릴을 사용하는 등의 정밀 가공이 요구된다. 그러나, 복합재료의 경우 프리프레그(prepreg)를 적

층하여 제작하므로, 드릴링 등의 후처리 없이 시편 내부나 또는 후면에 열전대를 삽입하거나 부착할 수 있다. 그러므로, 복합재료는 금속의 경우에 비하여 열전대의 장착이 비교적 간편하며, 또한 금속 재료에 비하여 온도 측정시의 오차를 줄일 수 있다.

본 연구에서는 일 방향 탄소섬유 에폭시 복합재료 USN125 BX인 프리프레그를 적층하여 제작된 시편에 연삭 하고자 하는 시편의 바로 아래면에 열전대를 부착하였다. 시편의 제작과정으로는 0.15 mm의 얇은 프리프레그를 적층하여 오토크레이브 진공백성형법(Autoclave vacuum bag molding method)을 이용하여 Fig. 1의 경화 싸이클에서와 같이 일정 압력하에서 가열온도를 상승 유지하여 경화시켜 제작하였다.

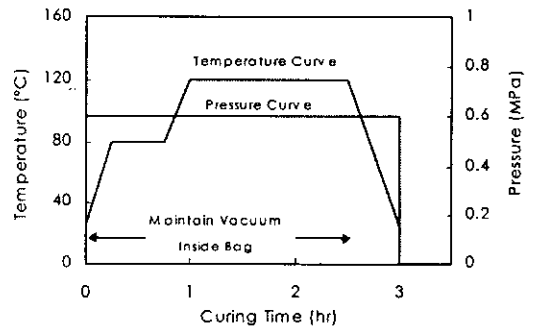


Fig. 1 Cure cycle of the autoclave

가공 중 발생하는 열에 의한 온도 증가량을 측정하기 위하여 열전대는 측정 범위가 -200℃에서 800℃인 J-타입을 사용하였다. 열전대의 비드(Bead)는 온도측정시 변화하는 온도에 대한 응답성을 높이기 위해 가능한 작아야 하므로 본 연구에서는 0.05 mm 두께를 가지는 비드를 제작하여 사용하였다.^{9,10)} 탄소섬유 에폭시 복합재료는 전기적으로 도체이므로 열전대와 복합재료가 접촉하면 가공부위의 정확한 온도측정이 이루어지지 않는다. 그러므로, 본 연구에서는 25 μm 두께를 가지는 나일론 필름을 이용하여 열전대와 탄소섬유를 전기적으로 절연하였다. Fig. 2는 연삭 온도를 측정하기 위한 시편을 설치한 그림이다. 시편을 2 mm 두께로 적층하여 오토크레이브에서 경화한 후 유지 온도 범위가 -55℃에서 150℃인 나일론 필름으로 절연하고 열전대를 그 밑에 부착하였으며, 시편 마운트의 구멍을 통하여 열전대를 외부로 뽑아내고 신호 확장 장치를 통하여 A/D 변환기에 연결하였다. 시편의 섬유각도는 각각 [0

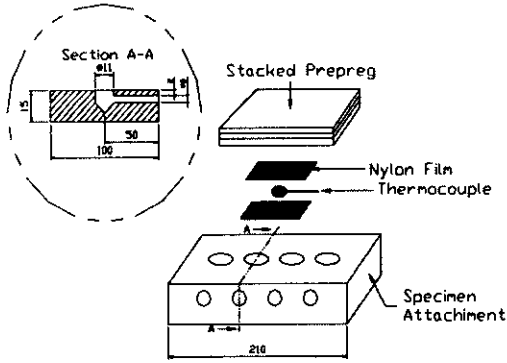


Fig. 2 Schematic of the composite specimen manufacturing

인T, [45]nT, [90]nT로 제작하여 실험에 사용하였다.

2.2 실험장치

본 연구에 사용된 연삭기는 범용 평면 연삭기로 규격은 WGS 64 (화천기계주식회사)이고, 일반 금속 연삭 가공에 많이 사용하고 표면연삭에서 가공성과 표면 조도를 동시에 만족시킬 수 있는 GC60 k 7V의 비트리파이드 연삭숫돌을 가지고 실험하였다. 연삭 숫돌의 규격은 직경이 305 mm이며 폭은 38 mm이다. 숫돌을 스펀들에 장착한 후 트루잉을 수행하여 동심도를 맞추었고, 드레싱을 실시하여 숫돌면의 밀도를 맞추었다. Table 1은 평면 연삭기의 사양이며, 연삭시에 열전대에서 측정된 신호를 보정 및 증폭하기 위한 온도측정 회로는 아날로그 디바이스사의 AD594칩과 OP07칩을 이용하여 구성되었다. 온도측정 회로에서 보정 및 증폭된 신호는 아날로그/디지털 변환장치를 통하여 100 Hz의 주파수로 PC에 저장하였다.

Table 1 Specifications of the surface grinding machine (WGS-64, Whacheon Machinery Works Co.)

Wheel rotational speed (inverter)	0 - 1800 (rpm)
Feed of table	1 - 25 (m/min)
Wheel dimension	∅305 × ∅127.238 (mm)
Wheel material	GC 60k 7V

2.3 실험방법

일반 금속의 연삭에서는 연삭 방향에 대한 연삭 열의 영향이 크게 나타나지 않으나 이방성 재료인 탄소섬유에

폭시 복합재료의 연삭시에는 연삭 방향에 대한 섬유 방향의 적층각에 따라 연삭 면에서 연삭 열의 발생 정도와 가공 정밀도가 다르게 나타날 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 연삭 방향과 연삭 조건의 변경에 따른 연삭 열의 발생과 표면정밀도에 미치는 영향에 대하여 실험 및 고찰하였다. 연삭 조건으로는 숫돌 주속도 900, 1200, 1800 m/min, 이송속도 4, 8, 12 m/min, 절입 깊이 10, 100, 200 μm로 각각 변경하여 연삭 가공하였으며, 일정한 연삭 시간에 대하여 발생하는 온도를 측정하기 위하여 열전대에서 부터 시편의 최종 연삭 두께는 0.2 mm까지 연삭하여 최고온도를 기록하였다. 섬유각도는 [0]nT, [45]nT, [90]nT 시편을 연삭하여 결과를 얻은 후 [0]nT 시편을 건식 및 습식으로 연삭하여 열전대에서 측정된 신호를 PC로 받아 데이터를 분석하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 연삭 방향에 의한 연삭 온도

Fig. 3은 탄소섬유 에폭시 복합재료의 섬유각도에 대한 연삭 방향에 따른 연삭 온도 결과를 나타낸다. 연삭 조건은 숫돌 주속도 1800 m/min, 이송속도 4 m/min, 절입 깊이 10 μm 이고, 섬유각도는 [0]nT, [45]nT, [90]nT이며, 건식으로 연삭하였다. 연삭 방향에 대한 섬유 각이 [90]nT 일 때 가장 낮은 온도를 보이고, 다음이 섬유각도가 [45]nT인 경우이고, [0]nT일 때 가장 높은 연삭 열을 보이고 있다. 이는 비트리파이드 GC연삭 숫돌을 가지고 복합재료를 연삭 할 때 섬유가 연삭 되면서 부서지게 되는 데, 섬유의 길이방향의 열 전도도가 섬유의 가로방향의 열

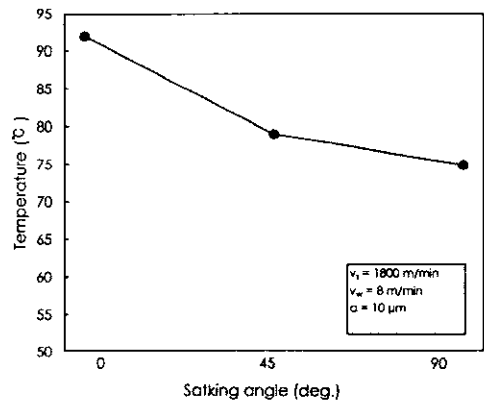


Fig. 3 Temperature versus stacking angle in surface grinding

전도도보다 양호한 것을 감안하여 고찰해 볼 때 섬유각도가 [0]nT일 때 가장 부서짐이 적어 열 전도율이 양호하게 되어 연삭 열이 상승하고, [90]nT인 경우는 섬유가 부서져 열 전도율이 감소하여 온도 상승이 적은 것으로 사료된다.

3.2 건식 및 습식연삭에 의한 연삭온도

시편의 섬유각도가 스톨의 회전방향과 일치하는 [0]nT 시편을 가지고 건식 및 습식으로 연삭 조건에 따라 연삭할 때 연삭 온도의 변화를 측정하였으며, 연삭시 시편에 부착한 열 전대에서 측정된 연삭 온도 중 노이즈를 제거한 가장 높은 온도를 표시하였다.

Fig. 4는 스톨 주속도를 900, 1200, 1800 m/min로 변경하여 적용하고, 테이블 이송속도를 4 m/min, 절입 깊이를 10 μm 으로 연삭하여 연삭 온도변화를 나타내었다. 스톨 주속도의 증가에 따라 건식 연삭에서는 다소 온도의 증가를 보이고 있다. 스톨 주속도가 1800 m/min에서 가장 높은 연삭 온도를 보이고 있으나 이는 [0]nT시편 연삭에서 스톨의 주속도가 증가하면 섬유의 길이방향에서 열 전도율이 높아 스톨 주속도 증가에 따라 연삭 온도가 상승하는 경향을 보이고 있으나 이러한 연삭 조건에서는 스톨의 주속도에 의한 연삭시의 온도상승은 안정된 연삭 온도를 보이고 있으며 습식의 경우에는 복합재료가 수분을 흡수하고 스톨의 수분흡수와 연삭 액의 냉각효과로 인해 낮은 연삭 온도를 나타내었다.

Fig. 5는 테이블 이송속도를 4, 8, 12 m/min로 변경하여 적용하였고, 절입 깊이는 10 μm , 스톨 주속도 1800 m/min로 하여 연삭 실험을 하였다. 이송속도가 증가됨에

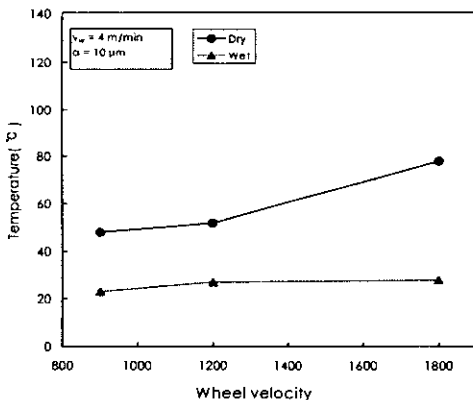


Fig. 4 Temperature versus wheel velocity in surface grinding

따라 연삭 온도가 상승하며, 이송속도 변화에 따른 온도 상승 폭은 크지않은 것을 보이고 있으나, 복합재료의 경화 온도가 120°C인 것을 감안하면 이송속도 12 m/min이하에서 연삭하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. 이송속도 변경시의 연삭인 경우에도 습식 연삭에서 연삭 온도는 낮은 온도를 보이고 있어 연삭 시의 온도에 대하여는 안정된 것으로 사료된다.

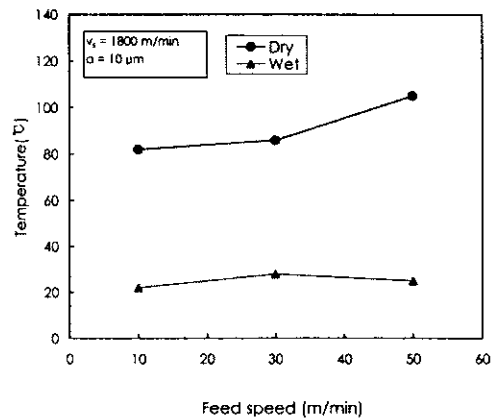


Fig. 5 Temperature versus feed speed in surface grinding

Fig. 6은 절입 깊이를 10, 100, 200 μm 로 변경하여 적용하였고, 스톨 주속도 1800 m/min, 이송속도 4 m/min로 연삭 하였다. 절입 깊이 상승에 따른 연삭 온도 상승은 절입 깊이가 100 μm 일 때 복합재료의 경화온도 이상의 연삭 온도를 나타내고있어 절입 깊이는 100 μm 이하에서 연삭하는 것이 바람직한 것으로 생각되며, 절입 깊이 200 μm 에서 급격하게 온도가 떨어지는 것은 일반 철을 연삭한 경우는 M.C. Shaw의 이론에서 일정한 단위체적당 단위시간 이상의 연삭 깊이가 되면 표면온도가 연삭 깊이 증가와 더불어 감소한다는 이론에 따른 감소로 볼 수 있으며, 한편 탄소섬유의 경우는 과도한 연삭 깊이로 일부 섬유의 파손이 발생하면서 연삭 온도의 전도율이 약화되어 연삭 온도가 낮아지는 것으로 생각된다.⁽¹¹⁾ 이방성 재료인 탄소섬유 복합재료의 경우 섬유방향에 의한 열 전도성과 과도한 절입 깊이로 섬유가 부서지면서 연삭 열의 전도를 차단하게 되어 연삭 온도가 감소하는 경향을 보이고있다. 따라서 절입깊이가 100 μm 이하에서 연삭하는 것이 바람직하다고 생각된다. 습식 연삭시에 연삭 온도는 전제한 것처럼 냉각 효과에 의한 연삭 온도가 감소하는 경향을 보이고 있다.

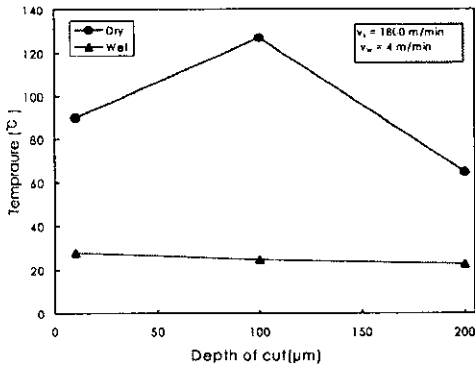


Fig. 6 Temperature versus depth of cut in surface grinding

3.3 연삭 조건에 의한 표면조도

탄소섬유 에폭시 복합재료의 건식연삭시 연삭 온도의 상승과 표면 조도에 관하여 연구하기위해 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에서 연삭 온도 측정시 연삭 가공한 면을 표면 조도기(SJ-201 Mitutoyo Co.)로 10번씩 측정하여 평균을 나타내었다.

Fig. 7은 슷돌 주속도 변경시 연삭 온도를 측정한 Fig. 4에서의 연삭 조건을 가진 연삭 실험할 때 표면 조도를 측정 한 것으로, 슷돌의 주속도 증가에 따라 표면 조도가 다소 개선되었다. 이는 탄소섬유의 길이방향 연삭시 섬유 의 부서짐이 적어 열 전도도가 좋으므로 연삭 온도가 다소 상승하였고, 섬유의 부서짐이 적은 결과로 표면 조도는 개선된 것을 보였다.

Fig. 8은 이송속도가 증가함에 따라 표면 조도는 다소 개선되고 있다. Fig. 5에서 연삭 온도는 테이블 이송속도가 증가함에 따라 다소 증가하고 있는 것을 보이고 있다. 이송속도의 증가시에 칩의 물림깊이를 증가시키는 경향이 온도의 상승을 가져오는 것으로 생각되나 가공면은 손상 이 적은 것으로 보이며 따라서 표면 조도가 다소 개선된 것으로 사료된다.

Fig. 9는 연삭 깊이를 변경하며 연삭 실험하여 연삭 온도를 측정한 Fig. 6의 연삭 조건에서 연삭 온도를 실험한 표면을 표면 조도기로 측정한 결과이다. 일정어상의 연삭 깊이에서 섬유의 부서짐으로 연삭 온도가 떨어지는 경향을 보였고, 이러한 연삭면을 표면 조도기로 측정하여 나타 낸 그림이다. 연삭 깊이에 대한 연삭면의 표면 조도는 다소 악화되었다. 이는 슷돌 기공의 크기와 칩의 영향으로 섬유 의 부서짐이 증가될 수 있어 표면 조도가 악화되는 것으로 생각된다.

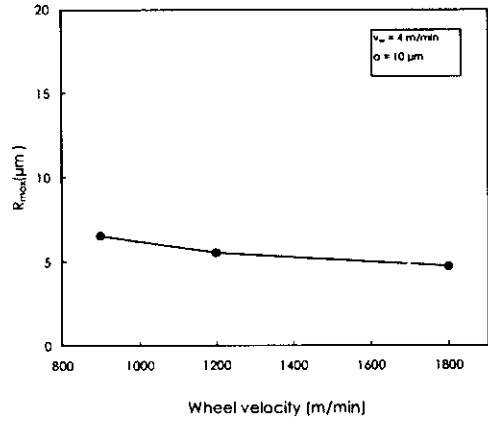


Fig. 7 Surface roughness versus wheel velocity in surface grinding

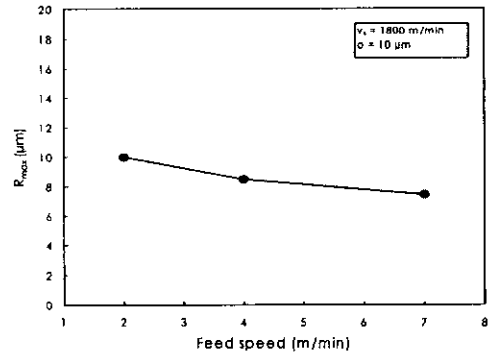


Fig. 8 Surface roughness versus feed speed in surface grinding

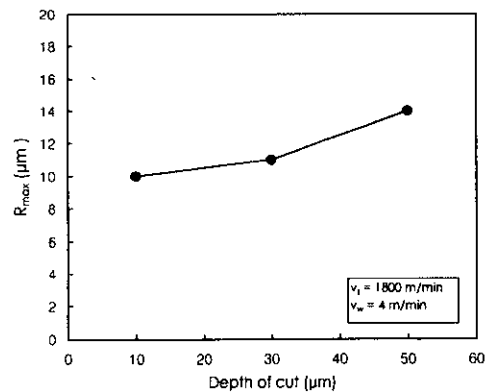


Fig. 9 Surface roughness versus depth of cut in surface grinding

4. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 평면연삭 실험을 통하여 연삭 온도에 의한 특성을 파악하였다. 실험에 적용한 장비는 WGS-64 범용 평면 연삭기와 GC 60k 7v인 비트리파이드 연삭 스톨을 사용하여 건식 및 습식으로 연삭한 연삭 온도와 표면 조도를 측정하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 복합재료의 섬유각도가 연삭 방향과 같은 [0]nT에서 연삭 온도가 높고, [90]nT에서 가장 낮은 온도를 보인다.
- (2) 연삭 온도는 일정한 스톨의 주속도에서 연삭 깊이와 테이블 이송속도의 증가에 따라 일정량 상승하다가 그 이상에서는 섬유의 부서짐으로 낮은 연삭 온도를 보인다. 즉, 스톨 주속도 1800 m/min에서 이송속도 12 m/min, 절입 깊이 100 μ m의 조건에서는 연삭 온도가 복합재료 경화 온도인 120℃이상 상승하므로 이송속도는 12 m/min와 절입 깊이는 100 μ m이 내가 안정적이다.
- (3) 건식 연삭의 경우, 연삭 온도는 50℃~ 128℃이상 높게 나타나고 있으나, 습식 연삭의 경우는 21℃~ 28℃로 연삭 온도가 낮게 나타났다.

참 고 문 헌

- (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, pp. 219~229, 1991.
- (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, pp. 321~328, 1997.
- (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, pp. 313~324, 1993.

- (5) M. Hong, "연삭가공시 연삭스톨의 드레싱 시기검출 방법에 관한 연구", 한국공작기계학회지, Vol.7, No.1, pp.112~118, 1998.
- (6) Wang, D. H., "Ramulu, M. and Arola, D., Orthogonal Cutting Mechanism of Graphite Epoxy Composite," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, pp. 1623~1638, 1995.
- (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, pp.701~716, 1995.
- (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, pp. 428~434, 1970.
- (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, pp. 1206~1214, 1972.
- (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, pp. 473~478, 1995.