

탄소섬유 에폭시 복합재료의 평면 연삭온도 특성에 관한 연구

한홍삼*, 이동주**, 홍준희**

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

Heung-Sam Han*, Dong-Ju Lee**, Jun-Hee Hong**

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 plain grinding were suggested.

Keywords : Loading(눈매움), Stacking sequence(적층각), Cure cycle(경화곡선), Depth of cut(절입깊이), Auto clamp vacuum bag molding method (진공백 성형법), Cutting speed(절삭속도)

1. 서 론

섬유강화 고분자복합재료(fiber reinforced polymer composite)는 금속재료에 비해 높은 비강성(E/ρ), 비강도(S/ρ), 고감쇠능 및 열적 치수 안정성으로 항공기 구조재료, 우주 개발 신소재 및 자동차 경량화 분야로부터 일반스�포츠, 레저(leisure)산업까지 폭 넓게 사용되고 있다¹²⁻³⁾. 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 이동 시에 부대비용의 절감효과를 기대할 수 있다^{4,5)}.

일반적으로 탄소섬유 에폭시 복합재료 구조물 또는 기계부품의 소재로 적용하고자 할

경우 정형가공(net shape manufacturing)을 하는 것이 가장 이상적이나, 정밀기계부품의 경우 사용목적에 따라 절삭, 드릴링, 절 연삭가공 등의 후 가공이 요구된다. 특히 장섬유 복합재료(long fiber composite material)는 섬유방향과 공구 이송 방향간의 각도차이에 따라 가공성능의 차이를 보이며, 눈매움/loading 및 날 결손 정도가 금속을 가공할 때와는 다르므로 기존의 금속재료와는 다른 가공조건이 적용되어야 한다^{6,7)}. 연삭시스템의 가공 과정중에 발생하는 이상 상태로는 채터, 버어닝, 크랙, 가공물의 재질 또는 형상의 변화 등이 있다⁸⁾. 이러한 현상은 연삭 시간의 경과에 따라 연삭회수가 거듭되면서 슛들의 눈매움이나 마멸에 의하여 표면의 열적 변화 및 표면정밀도 저하를 가져오며, 국부적인 열팽창은 피삭재의 굽힘 변형과 잔류응력을 생성시키므로, 표면 조

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 기계공학과

도를 악화시킨다⁹⁾. 이와 같이 여러 분야에서 그 활용도가 커지고 있는 복합재료는 정형가공으로 할 수 없는 경우, 이러한 난삭재인 복합재료를 연삭 가공하고자 할 때 연삭숫돌의 선택과 연삭조건 등의 선정이 요구되고 있으나 연삭가공에 대하여 제시된 연구가 없어 복합재료에 대한 효과적인 절삭, 연삭가공 특성 및 기구 등에 관한 연구가 요구된다. 또한, 동력 전달 축이나 유연성 (flexibility)을 가지는 중공축의 활용도가 늘어나면서 연삭조건의 필요성이 증가되고 있다. 그러나, 연삭의 내부결함 및 표면조도에 영향을 미치는 요소가 연삭점 경계면에 발생하는 높은 열에 의한 국부적인 열팽창 및 잔류응력으로 피삭재의 굽힘변형과 연삭열에 의한 숫돌의 탄성변형 등으로 연삭 가공면 정밀도에 많은 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 연삭의 활용범위를 넓히기 위하여 일반적으로 많이 사용하는 GC 계 숫돌을 가지고 범용 연삭기를 사용하여 가공면에 미치는 연삭온도 특성에 대해 실험하여 복합재료 구조생산에 연삭 특성을 제시하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시편의 제작

기존의 연구에서 가공온도의 측정은 주로 금속 재료에 대하여 수행되었으며, 측정기구로는 열전대(Thermocouple)를 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 적층하여 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 USN125BX 인 프리프레그를 적층하여 제작된 시편에 연삭하고자 하는 시편의 바로 아래면에 열전대를 부착하였다. 시편의 제작

과정으로는 0.15mm 의 얇은 프리프레그를 적층하여 오토크레이브 진공백성형법(autoclave vacuum bag molding)을 이용하여 Fig.2-1 의 경화 사이클에서와 같이 일정 압력하에서 가열 온도를 상승 유지하여 경화시켜 제작하였다.

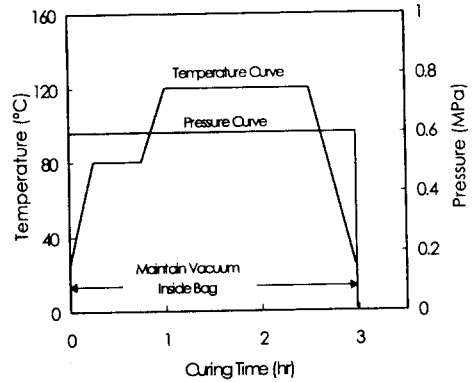


Fig.2-1 Cure cycle of the autoclave.

가공 중 발생하는 열에 의한 온도 증가량을 측정하기 위하여 열전대는 측정 범위가 -200°C 에서 800°C 인 J-타입(Iron-Constantine Thermocouple)을 사용하였다. 열전대의 비드(Bead)는 온도측정 시 변화하는 온도에 대한 응답성을 높이기 위해 가능한 작아야 하며, 본 연구에서는 0.05mm 두께를 가지는 비드(Bead)를 제작하여 사용하였다.

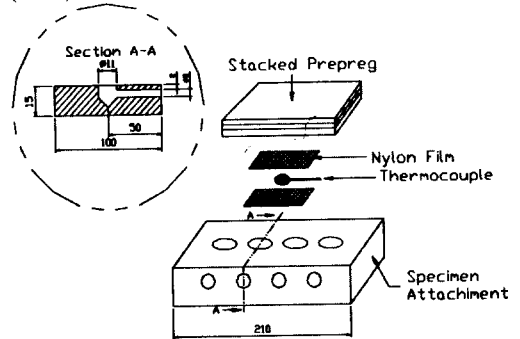


Fig.2-2 Schematic of composite specimen manufacturing

탄소섬유 에폭시 복합재료는 전기적으로 도체이므로, 열전대와 복합재료가 접촉하면 가공부위의 정확한 온도측정이 이루어지지 않는다^{9,10)}. 그러므로, 본 연구에서는 25 μ m 두께를

가지는 나일론필름(Nylon Film)을 이용하여 열전대와 탄소섬유를 전기적으로 절연하였다. Fig.2-2 은 시편의 연삭온도를 측정하기 위한 시편을 셋팅하는 그림으로 시편을 2mm 두께로 적층하여 오토크레이브에서 경화한후 유지온도가 -55℃에서 150℃인 나일론필름으로 절연하고 열전대를 그 밑에 삽입하여 시편 어태치먼트의 구멍을 통하여 열전대를 외부로 뽑아내어 A/D 변환기에 연결하였다. 시편의 섬유각도는 각각 $[0]_{nr}$, $[\pm 45]_{nr}$, $[90]_{nr}$ 로 제작하여 실험에 사용하였다.

2.2 실험장치

본 연구에 사용된 연삭기는 범용 평면 연삭기로 규격은 WGS 64 (화천기계주식회사)이고, 일반 금속 연삭 가공에 많이 사용하는 비트리파이드 연삭 스톨을 가지고 실험에 사용하였다. 일반적으로 입자가 클수록 가공성은 좋아지고, 표면조도는 거칠게 나온다. 표면 연삭에서 가공성과 표면조도를 동시에 만족시킬 수 있는 GC60k 7V의 연삭 스톨로 실험하였다. 연삭 스톨의 규격은 직경이 305mm 이며 폭은 38mm 이다. 스톨을 스핀들에 장착한 후 트루잉(Truing)을 수행하여 동심도를 맞추었다. Fig.2-3 는 실험장치를 설치한 연삭기 사진이다.



Fig.2-3 Photograph of experimental set-up for the grinding.

연삭시에 열전대에서 측정된 신호를 보정 및 증폭하기 위한 온도측정회로는 아날로그 디바이스(Analog Device)사의 AD594 칩과 OP07 칩을 이용하여 구성되었다. 온도측정 회로에서

보정 및 증폭된 신호는 아날로그/디지털 변환장치(A/D Converter)를 통하여 100Hz의 주파수로 PC에 저장되었다.

2.3 실험방법

일반 금속의 연삭시에는 연삭 방향에 대한 연삭열의 영향은 크게 나타나지 않으나 이방성 재료인 탄소섬유 에폭시 복합재료의 연삭시 연삭조건과 연삭 방향에 대한 섬유의 적층각에 따라 연삭표면에서 연삭열의 발생 정도와 가공 정밀도가 다르게 나타날 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 연삭방향과 연삭조건을 변경하여 이에 따른 연삭열의 발생과 표면 정밀도에 미치는 영향에 대하여 실험하였다. 연삭 조건으로는 절삭속도 1800m/min, 이송속도 4, 8, 12 m/min, 절입 깊이 10 μ m, 100 μ m, 200 μ m으로 각각 변경하여 연삭가공 하였으며, 일정한 연삭 시간에 대하여 발생하는 온도를 측정하기 위하여 열전대에서 부터 시편의 최종 연삭 두께는 0.2mm 까지 연삭하였다. 섬유각도는 $[0]_{nr}$, $[45]_{nr}$, $[90]_{nr}$ 시편을 연삭하여 결과를 얻은 후 $[0]_{nr}$ 시편을 건식 및 습식으로 연삭하여 열전대에서 측정된 신호를 PC로 받아 데이터를 분석하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 연삭방향에 의한 연삭온도

Fig. 3-1 은 탄소섬유 에폭시 복합재료의 섬유각도에 대한 연삭방향에 의한 연삭온도 결과를 나타낸다. 연삭조건은 절삭속도 1800m/min, 이송속도 4m/min, 절입깊이 10 μ m 이고, 섬유각도는 $[0]_{nr}$, $[45]_{nr}$, $[90]_{nr}$ 이며, 건식으로 연삭 하였다. 연삭방향에 대한 섬유 각이 $[90]_{nr}$ 일 때 가장 낮은 온도를 보이고, 다음이 섬유각도가 $[45]_{nr}$ 인 경우이고, $[0]_{nr}$ 일 때 가장 높은 연삭 열을 보이고 있다. 이는 비트리파이드 GC 연삭스톨을 가지고 복합 재료를 연삭할 때 섬유가 연삭되면서 파괴되므로 섬유각도가 $[0]_{nr}$ 일때 가장 파괴가 적어 연삭열이 상승하고, 90도인 경우는 섬유가 파손되면서 온도상승이 적은 것으로 사료된다¹³⁾.

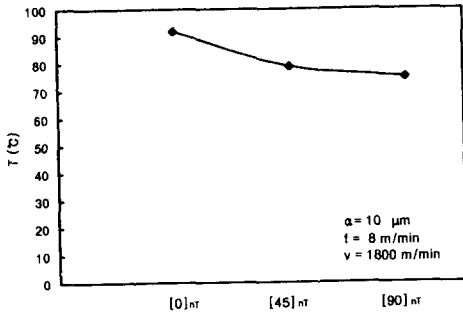


Fig.3-1 Temperature of grinding direction on ply angle ([0]_{nr}, [45]_{nr}, [90]_{nr}).

3.2 건식 연삭에 의한 연삭온도

Fig.3-1은 건식 연삭으로 시편의 섬유 각도를 [0]_{nr}로 하고, 테이블 이송속도를 4, 8, 12m/min, 절삭속도를 900, 1200, 1800m/min, 절입깊이를 10, 100, 200μm로 변경시의 연삭온도와 변화관계를 나타내 보인다.

이송속도관계는 테이블 이송속도 4, 8, 12m/min로 변경하여 적용하였고, 절입 깊이는 10μm, 절삭속도 1800m/min로 하여 연삭 실험하였다. 연삭시 시편에 부착한 열전대에서 측정된 연삭 온도 중 노이즈(noise)를 제거한 가장 높은 온도를 표시하였다. 이송속도가 증가됨에 따라 연삭 온도가 상승하며, 이송속도 변화에 따른 온도 상승 폭이 크지않은 것을 보이고 있으나, 복합재료의 경화온도가 120°C인것을 감안하면 이송속도 12m/min 이상으로 하면 안될 것으로 생각된다.

절삭속도관계는, 절삭속도 900, 1200, 1800m/min로 변경하여 적용하였고, [0]_{nr} 시편을 가지고 이송속도 8m/min, 절입깊이 10μm으로 하여 연삭가공 하였다. 절삭속도의 증가에 따라 점차 증가하다가 절삭속도 1800 m/min에서 급격한 상승을 보이고 있어 연삭기의 스펀들 회전속도에 따른 온도상승을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

절입 깊이 관계는, 절입 깊이를 10, 100, 200μm로 변경하여 적용하였고, [0]_{nr} 시편을 가지고 절삭속도 1800m/min, 이송속도 8m/min로 연삭 하였다. 절입 깊이가 상승에 따른 연삭 온도 상승은 절입 깊이가 100μm일 때 복합재

료의 경화온도 이상으로 되어 절입 깊이는 100μm 이하를 가져야 하며, 절입 깊이가 200μm에서 급격하게 온도가 떨어지는 것은 Shaw의 이론에서는 일정한 단위체적당 단위시간 이상의 연삭깊이가 되면 표면온도가 연삭깊이 증가와 더불어 감소한다^{11,12}. 본 실험에서도 절입 깊이가 너무 깊어 일정한 단위체적당 단위시간 이상의 연삭깊이가 되어 온도가 낮아지는 것으로 생각된다.

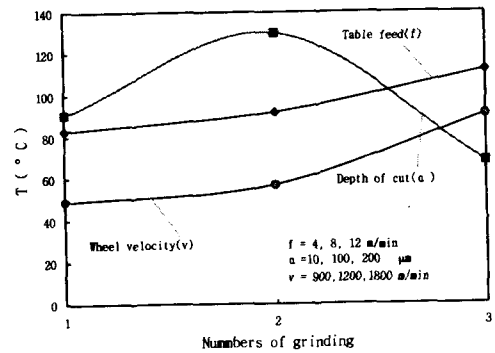


Fig.3-2 Temperature of the surface grinding in dry grinding.

3.3 습식 연삭에 의한 연삭온도

Fig.3-2의 습식 연삭에서는 시편의 섬유 각도를 [0]_{nr}로 하고, 테이블 이송속도를 4, 8, 12m/min, 절삭속도를 900, 1200, 1800m/min, 절입깊이를 10, 100, 200μm로 변경하며 연삭온도의 변화를 관찰하였다.

이송관계는, 테이블 이송속도 4, 8, 12m/min로 변경하고 건식 연삭조건과 같이 절입깊이를 10μm, 절삭속도 1800m/min로 하여 연삭 실험하였다. 연삭시 시편에 부착한 열전대에서 측정된 연삭온도 중, 노이즈를 제거한 가장 높은 온도를 표시하였다. 그림에 보인 바와 같이 건식연삭시보다 낮은 온도를 보이고 있어, 온도상승에 대하여는 매우 안정적이다.

절삭속도 관계는, 절삭속도 900, 1200, 1800m/min로 변경하고 절입깊이를 10μm, 이송속도를 8 m/min로 하여 습식으로 연삭 실험하였다. 절삭속도의 증가에 따라 온도상승이 나타나지만 상승폭이 작고 전체적으로 온도가 낮은 관계로 안정적으로 생각된다.

절입깊이 관계는, 절입깊이 10, 100, 200 μm 로 변경하고, 절삭속도 1800m/min, 이송속도 8 m/min로 습식연삭 하였다. 절입깊이 증가에 대하여 다소 감소하는 현상을 보이고 있으며, 건식연삭의 경우와 비슷한 현상으로 절삭량의 과다로 인해 낮아지는 것으로 사료된다. 절삭속도 증가 시에 온도의 상승은 있으나 상승폭이 크지는 않았다. 습식 연삭에서는 건식 연삭에서보다 낮은 온도를 보이고 있어 온도 상승에 대해서는 안정적이다.

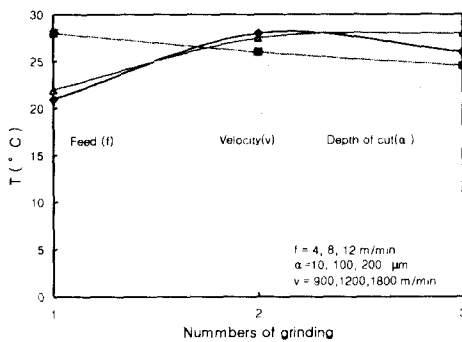


Fig.3-3 Temperature of the surface grinding in wet grinding.

3.4 연삭조건에 의한 표면조도

Fig. 3-4 에서 시편의 섬유 각도를 $[0]_{\text{NT}}$ 로 하고, 테이블 이송속도를 4, 8, 12m/min, 절삭속도를 900, 1200, 1800m/min, 절입 깊이를 10, 100, 200 μm 로 변경시의 표면조도를 나타내 보인다.

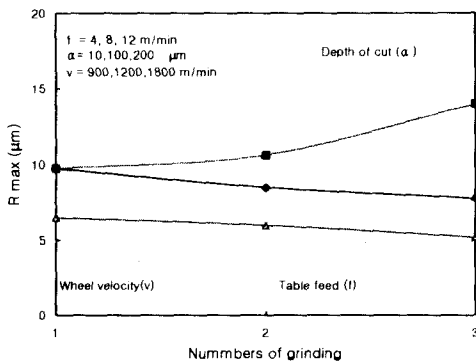


Fig.3-4 Surface roughness of the surface grinding

이송속도관계는 테이블 이송속도 4, 8, 12m/min로 변경하여 적용하였고, 각 경우 공통으로 이송속도 4m/min, 절입깊이는 10 μm , 절삭속도 1800m/min로 하여 연삭 실험 하였다. 그림은 각 연삭조건에서 건식 연삭하여 각 조건에서 표면조도를 10번씩 측정하여 평균을 기록한 그림이다. 이송 및 절삭속도의 증가에 따른 표면조도는 속도가 증가함에 따라 양호해지는 것을 보이고있다. 그러나, 절입깊이에 대하여는 절입깊이의 증가에 따라 표면조도가 거칠어지고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 평면연삭 실험을 통하여 연삭온도에 의한 특성을 파악하였다. 실험에 적용한 연삭방식은 범용 평면 연삭으로, SiC계 GC 60k 7v 인 비트리파이드 연삭숫돌을 사용 하였고, 숫돌의 크기는 직경 305mm, 폭 38mm의 숫돌을 사용하였다. 실험한 가공조건은 절삭속도 900,1200,1800m/min, 이송속도 4, 8, 12 m/min, 절입깊이 10, 100, 200 μm 으로 건식 및 습식 연삭가공 하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 복합재료의 섬유각도가 연삭방향과 같은 $[0]_{\text{NT}}$ 에서 연삭온도가 가장 높고, $[90]_{\text{NT}}$ 에서 가장 낮은 온도를 보인다.
2. 건식연삭 경우 절삭속도 1800m/min, 이송속도 12m/min, 절입깊이 100 μm 의 조건에서는 연삭온도가 복합재료 경화온도(120도)이상 올라갈 수 있다. 안정된 연삭조건은 위의 이송속도(12m/min)와 절입깊이(100 μm)이내가 안정적이다.
3. 연삭온도는 절삭속도와 이송속도에 비례하여 상승하며, 절입량에 대하여 일정한 절입깊이 까지 상승하다가 그 이상에서는 상승하지 않았다.
4. 건식 연삭의 경우, 연삭온도는 50 $^{\circ}\text{C}$ - 120 $^{\circ}\text{C}$ 로 높게 나타나고 있으나, 습식 연삭의 경우는 5 $^{\circ}\text{C}$ - 15 $^{\circ}\text{C}$ 로 연삭온도가 매우 낮게 나타났다.
5. 표면조도는 절삭속도와 이송속도 증가에 대해 양호해지고, 절입깊이 증가에 대해 거칠어 진다.

참고문헌

1. Reinhart, T. J., Composites, ASTM International, Vol. 1, pp. 816 ~ 822, 1987.
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. 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, pp. 241 ~ 251, 1997.
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. DesRuisseaux, 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 DesRuisseaux, 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. Malkin, S. and Anderson, R. B., "Thermal Aspects of Grinding. Part 1-Energy Partition," ASME *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, pp. 1177-1183, 1974.
12. Ramanath, S. and Shaw, M. C., "Abrasive Grain Temperature at the Beginning of a Cut in Fine Grinding," ASME *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, pp. 15-18, 1988.
13. 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.