2514 大韓機械學會論文集 第18卷 第10號, pp. 2514~2522, 1994

〈論 文〉

탄소섬유강화 플라스틱의 경면연삭가공 특성

박규열* · 이대길* · 中川威雄**

(1994년 1월 17일 접수)

Mirror Surface Grinding Characteristics and Mechanism of Carbon Fiber Reinforced Plastics

Kyu Yeol Park, Dai Gil Lee and Takeo Nakagawa

Key Words: Carbon Fiber Reinforced Plastics(탄소섬유강화 플라스틱), Mirror Surface Grinding(경면연삭), Electrolytic In-Process Dressing Grinding(전해드레싱 연삭), Cast Iron Fiber Bonded Diamond Wheel(주철 파이버본드 다이아몬드숫돌), Surface Roughness(표면거칠기)

Abstract

The mirror surface grinding of carbon fiber reinforced plastics(CFRP) was realized by using the metal bonded super-abrasive micro grain wheel with electrolytic in-process dressing(ELID). The maximum surface roughness R_{max} of CFRP which was obtained with #6,000 wheel, was 0.65 μm, which was rougher surface finish compared to those of hard and brittle materials with the same mesh number wheel with ELID. The grinding performance was much dependent on the grinding direction and the best surface roughness was obtained at 90° grinding with fiber direction. The spark-out effect on the surface improvement was significant when smaller mesh number grinding wheels were used. From the surface observations of CFRP with scanning electron microscope(SEM) and Auger electron spectroscopy(AES), it was found that the mirror surface grinding of CFRP was generated by the homogenization due to carbonization of the ground surface and smearing of chips composed of the carbon fiber and carbonized epoxy resin into the ground surface.

1. 서 론

탄소섬유강화 플라스틱(carbon fiber reinforced plastics : CFRP)은 높은 비탄성계수(E/ρ), 비강도(S/ρ) 및 감쇠능과 온도변화에 대한 치수 안정성 등의 금속재료에서는 얻기 어려운 뛰어난 재료특성에 의해, 항공기와 우주개발 기기(機器)분야에서 일반 스포츠 레저(leisure)산업까지 폭 넓게 사용되고 있다.[1,2] 또한, CFRP를 강체 혹은 회전체의 구조재로 사용할 경우, 중량감소에 의한 에너지 절감효과가 얻어짐과 동시에 높은 정도의 위치결정이 가능하여, 이러한 이점을 이용하여 항공기 및 자동차의 샤프트류,[3] 공작기계의 스핀들,[4] 로보트 팔[5] 등에 사용이 확대되어지고 있다.

한편, CFRP를 기계요소 혹은 구조물의 부재로 적용하고자 할 때, 성형후에 드릴링, 절단 등의 2차

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과
**동경대학 생산기술연구소

가공이 필요하며, 일반적으로 절삭가공이 가장 널리 적용된다. 또한, CFRP를 구조재가 아닌 기능재의 용도로 사용하고자 할 경우, 일례로, 우주 스테이션에서 이용되는 태양열 집광판의 경우에 대상재료의 열안정성 및 내환경성 등을 감안해서 CFRP의 적용이 고려되고 있으며, 이 경우에 CFRP의 최대 표면조도 R_{max} : 50 nanometer 전후의 극히 높은 정도의 경면가공이 필요한 것으로 알려져 있다. 그러나, CFRP는 절삭가공에 있어 탄소섬유의 높은 경도 및 강도 특성에 의한 격심한 공구마멸과 이에 따른 섬유의 박리현상으로 인해 고품위 가공면을 얻는 것은 극히 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 난가공 특성을 갖는 CFRP의 효과적인 기계가공을 실현하기 위하여 CFRP의 절삭특성 및 절삭기구 등에 관한 많은 연구[6~8]가 진행되고 있으나, 가공능률과 가공정도를 동시에 만족시키는 가공방식이 확립되어 있지 않은 실정이며, 새로운 가공방식의 개발에 대한 요구가 높아지고 있다.

본 연구에서는 CFRP의 고정도 가공기술의 확립을 목표로 하여, 미세한 초지립의 메탈본드숫돌을 사용한 전해 인프로세스 드레싱(electrolytic in-process dressing : ELID) 연삭법[9,10]을 적용하여 CFRP의 경면연삭가공 특성과 Auger 전자분광(auger electron spectroscopy : AES)법[11]을 도입하여 연삭가공에 의한 CFRP의 경면 창성기구를 조사하였다.

2. 경면연삭실험 및 평가방법

2.1 실험장치 및 피삭재료

CFRP의 경면연삭가공에 사용한 실험장치의 사양을 Table 1에 나타낸다. 가공기는 주축모터 동력 2.2 kW의 공기 정압 베어링을 채용한 평면 연삭기를 사용하였으며, 연삭숫돌은 스트레이트형의 주철 파이버본드 다이아몬드숫돌(cast iron fiber bond diamond wheel : CIFB-D wheel)을 사용하였다. 또한, 연삭실험에 사용한 CFRP는 PAN(polyacrylonitrile)계 고강도의 탄소섬유를 에폭시 수지에 한방향으로 적층성형한 것으로, 기계적 성질은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 동소재는 탄소섬유와 에폭시 수지의 탄성률에 큰 차이가 나는 이종재의 복합재료로, 이러한 재료특성으로 인하여 경면연삭가공시의 많은 어려움이 예상된다. 연삭액은 연삭실험에 적용한 ELID방식에 의한 경면연삭 가공에 이용되고 있는 AFG-M의 50배 희석액을 사용하였다.

2.2 실험 및 평가방법

모든 연삭실험에 있어서, 먼저 실험에 사용할 숫돌의 트루잉을 실시하여 숫돌의 성형시의 결함 및 회전오차(wheel defect and eccentricity)를 수정한 후, 초기 드레싱을 실시하였다. 트루잉에는 #100C(carbo-

Table 1 Experimental equipments for mirror surface grinding of carbon fiber reinforced plastics

Grinding machine	Surface grinder machine : GS-CHF, 2.2 kw[KORODA Precision Industries Co. Ltd. Japan]
Grinding wheel	Cast iron fiber bonded diamond(CIFB-D)wheel, straight type : φ150 × W10 mm, mesh number : 325(63.0 μm), 1200(11.6 μm), 4000(4.0 μm), 6000(3.2 μm)[SINTO BRATOR Ltd. Japan]
Power source	ELID Pulse : EPD-10A[SINTO BRATOR Ltd. Japan]
Electorde	Around 1/4 area of wheel surface(copper)
Others	Fluid : AFG-M NORITAKE-cool. × 50[NORITAKE Co. Ltd. Japan] Truer : #100C, brake-truer[MARUTO Inst. Co. Ltd. Japan] Roughness-measurement : SURFTEST-701[Mitutoyo Corp. Japan] AES-analysis : PHI-660[PERKIN-ELMER Incorp. U. S. A.]

Table 2 Mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics for grinding experiments

Specific gravity	Tensile strength (GPa)	Fiber volume content(%)	Remarks (Tensile modulus : GPa)
1.6	1.47	55	Carbon fiber : 207.0, Epoxy resin : 1.3

rundum) 숫돌과 브레이크 트루어(brake truer)를 이용하였으며, 초기 드레싱에는 전해드레싱방식을 적용하였다. 드레싱조건은, 숫돌 회전수 900 rpm에서, 전해조건으로 무부하 전압(open voltage) Vo 60 V, 피크전류 IP 10 A 및 주파수 $\tau_{on/off}$ 2/2 μsec를 설정하여 15분간 실시하였다. 초기 드레싱 후의 연삭실험은 ELID 연삭법을 적용하였다. 실험결과는 연삭가공면의 거칠기, 주사식 전자현미경(SEM)에 의한 연삭면의 관찰, 그리고 Auger 전자분광(augercelectron spectrospcy : AES)법에 의한 CFRP의 연삭가공면의 원소분석 결과를 이용하여, CFRP의 경면연삭 특성을 평가하고 경면 창성기구에 대하여 고찰하였다.

2.3 ELID 경면연삭법[9,10] 및 AES법[11]

CFRP의 경면연삭가공에 적용한 ELID연삭법은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 메탈본드 숫돌을 사용한 연삭가공 중에 숫돌(Ve^+)과 숫돌면에 대향하여 설치된 전극(Ve^-)과의 사이에 도전성 전해액을 사용한 미세한 전해작용을 발생시켜, 인프로세스로 드레싱을 부가하는 방식이다. 즉, 전해작용에 의해 도전성을 갖은 숫돌의 본드재만이 선택적으로 제거됨으로서, 상대적으로 지립의 돌출효과가 얻어지게 된다. ELID 연삭에서는 전해액으로 극히 도전성이 낮은 일반 수용성 연삭액을 사용함으로, 종래의 전해드레싱 연삭방식에 의해서는 적용이 불가능한 미세지립의 숫돌이 사용가능하게 되며, 이로 인하여 지립당의 제거단위가 미세화되어 높은 품위(high integrity)의 경면이 얻어진다.

한편, AES법은 Auger효과를 이용한 표면의 원소분석법으로, 전자를 수 keV로 가속해서 물질에 입사시키면 그 에너지에 대응해서 내곽전자의 일부가 빈 여기상태가 발생한다. 이러한 여기상태는 전자의 천이에 의해 안정화되며, 그 과정에서 특성 X선 혹은 Auger전자가 방출된다. 이때 X선과 Auger전자가 발생하는 비율은 원소에 따라 다르며, 가벼운 원소(원자번호 Z<20)에서는 Auger전자의 방출확률이 더 높다. 특히, Z<15의 원소에서는 Auger전자만이 방출된다. 본 연구에서는 연삭가공에 의한 CFRP의 경면 창성기구를 규명하기 위하여 연삭가공된 CFRP의 표층부의 원소분석에 AES법을 도입하였으며, 분석하고자 하는 탄소섬유 및 에폭시 수지가 모두 원자번호 20 이하의 원소로 구성됨으로, 이러한 소재의 표면분석에는 AES법이 최적이라고 생각된다. 본 연구에서는 경면연삭한 CFRP의 표면에 대한 AES분석시에 PERKIN-ELMER사의 PHI-660형을 사용하여 입사전자에너지 : 5 keV, 입사전자전류 : 10 nA로 측정하였다. 측정시편은 CFRP를 10 mm×10 mm의 크기로 절단한 다음, 순수(純水) 중에서 초음파 세척하여 제작하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경면연삭가공 특성

CFRP의 연삭가공에 있어서 숫돌의 입도(wheel mesh size)와 연삭면 거칠기(surface roughness)와의 관계를 조사한 결과를 Fig. 2에 나타낸다. 연삭조건으로 숫돌의 입도에 관계없이 숫돌의 주속 Vt : 1200 m/min, 테이블 이송속도(feed rate) fx : 4 m/min, 테이블 이송피치(traverse pitch) t : 2 mm 및 절입량(depth of cut) dz : 1 μm의 일정한 연삭조건을 설정하였으나, 숫돌의 입도가 높아질수

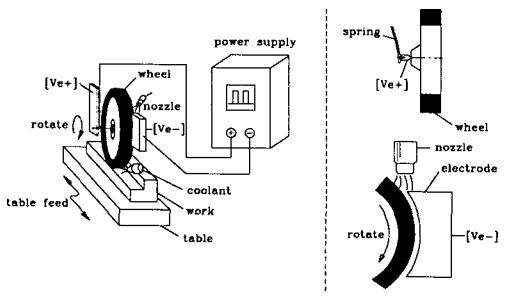


Fig. 1 Schematic illustration of the ELID-grinding method

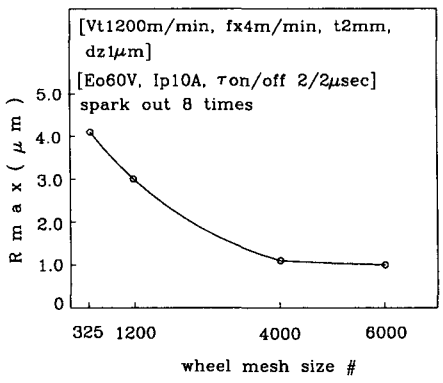


Fig. 2 Influence of the wheel mesh size on the surface roughness of CFRP

록 연삭면 거칠기가 개선되는 결과가 얻어졌다. 이것은 높은 입도의 숫돌을 사용함으로서 단위 면적의 제거에 기여하는 작용지립의 수가 증가하게 되고, 따라서 각 지립의 일회당 제거단위가 미세화됨으로 연삭면의 거칠기가 개선되어진 결과로 생각할 수 있다. 그러나 미세지립의 #4000 숫돌과 #6000 숫돌의 경우에는 지립입도의 변화에도 불구하고 연삭면 거칠기의 개선효과가 얻어지지 않으며, 거의 동일한 R_{max}값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 양숫돌의 평균 입자경(#4000 : 4.0 μm, #6000 : 3.2 μm)과 실험에 사용한 가공기의 최소절입 분해능(1 μm)을 고려했을 때, CFRP의 경면연삭가공에 적합한 숫돌의 지립입도는 #4000에서 #6000의 범위인 것으로 추정할 수 있다. 여기서, 미세지립의 숫돌을 사용한 CFRP의 경면연삭 가공의 경우, 가공면 거칠기는 동일한 지립의 숫돌을 사용한 일반 경취재에 비하여 크게 뒤떨어지는 것을 알 수 있으나,[12] 이것은 취성재인 탄소섬유와 연성재인 에폭시 수지의 제거형태 및 탄성계수가 서로 다르며, 이러한 이종재의 복합재료인 CFRP의 재료특성에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 #6000 숫돌을 사용한 CFRP의 경면연삭에 있어서 연삭방향에 따른 연삭면 거칠기의 차이를 조사한 결과이다. 연삭면 거칠기는 CFRP의 재료특성을 고려해서 연삭방향에 대한 직각 및 평행방향의 두방향으로 측정한 경계없이 섬유방향에 대한 90°(직각)방향의 연삭에서 가장 양호한 연삭면 거칠기가 얻어졌다. 여기서 0°방향의 연삭에서는 90°방향의 연삭에 비해 연삭면의 거칠기 R_{max}의 평균값이 약 2.5배가 되어, 연삭면 거칠기가 연삭방향에 크게 의존함을 알 수 있다. 이 결과는 90°방향의 연삭에서는 각 지립이 탄소섬유와 에폭시 수지를 순차적으로 제거하는 가공형태를 취하게 되는 반면에, 0°방향의 연삭에서는 작용지립에 따라 탄소섬유 혹은 에폭시 수지만을 선택적으로 제거하는 가공형태가 되며, 이때 내마모성이 약한 연질의 에폭시 수지가 선택적으로 보다 깊게 제거됨으로서 연삭면 거칠기의 악화를 초래한 것으로 판단된다. 이러한 연삭방향에 의한 가공면 거칠기의 차이를 SEM을 사용하여 관찰한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4에서 90°방향의 연삭가공면에 비해 0° 방향 연삭가공면에는 국부적으로 에폭시 수지가 보다 깊게 제거되어 있음을 확인할 수 있으며, 일련의 결과로부터 CFRP의 경면 연삭가공에는 90°방향의 연삭가공이 가장 적합한 것으로 판명되었다.

CFRP의 경면연삭가공에 있어서 스파크아웃

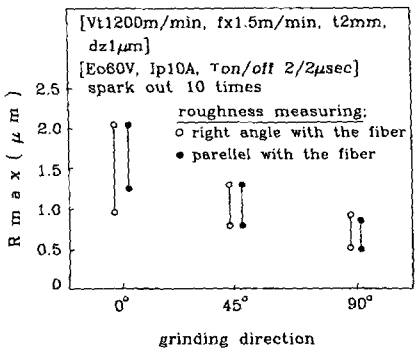
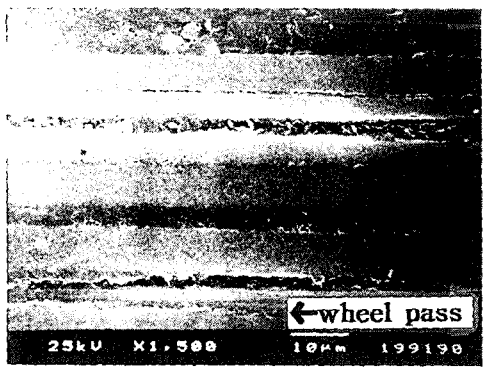
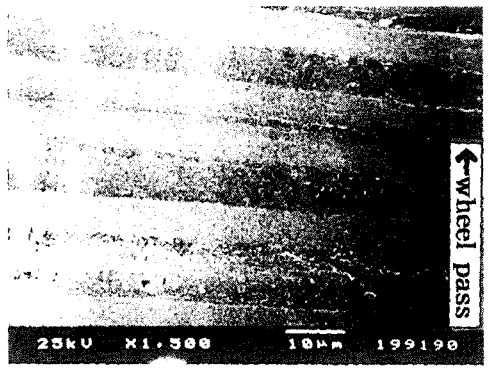


Fig. 3 Influence of grinding direction with the fiber axis on the surface roughness of CFRP



(a) 0° griding



(b) 90° griding

Fig. 4 Variation of the ground surfaces with grinding direction
[ELID conditions : Eo 60 V, Ip 10 A, $\tau_{on\ off}$ 2/2 μs]
[Grinding conditions : fx 1.5 m/min, t 2 mm, d 1 μm]

(spark-out)의 효과에 대해 조사한 결과를 Fig. 5에 나타낸다. #6000 숫돌을 사용한 90°방향의 연삭가공에서, 테이블 이송속도 fx : 15 m/min의 급속이송(rapid feed) 및 fx : 1.5 m/min의 준급속이송(semi-rapid feed)의 조건하에서는 스파크아웃 회수의 증가에 따른 연삭면 거칠기의 개선효과가 매우 큰 것을 알 수 있으며, fx : 15 m/min의 경우에는 강제절입 후의 연삭면 거칠기 R_{max} : 3.0 μm 전후의 상태에서 스파크아웃을 10회 실시함으로써 R_{max} : 0.65 μm이 얻어졌다. 한편, fx : 0.07 m/min의 저속이송(creep feed)의 조건 하에서는 스파크아웃에 의한 연삭면 거칠기의 개선효과가 거의 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 단위면적의 제거에 작용하는 지립의 수가 테이블 이송속도에 의해 좌우되며, 이송속도가 느린 조건 하에서는 단위 제거면적당의 작용 지립의 수가 증가해서 결국 상대적으로 스파크아웃을 실시한 것과 동일한 결과가 얻어지는 기구에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 6은 fx : 15 m/min의 조건 하에서 스파크아웃의 유무에 의한 연삭가공면의 형태를 비교한 결과이다. 연삭면의 관찰 결과로부터, 스파크아웃을 실시함에 의해서 연삭면의 표면거칠기가 개선되며, 또한 스파크아웃 회수의 증가와 더불어 연삭표면의 균질화가 진행됨을 확인할 수 있다. 이러한 스파크아웃에 의한 표면 성상의 향상효과는, 강제절입으로 인한 탄성변형의 제거와 탄소섬유와 에폭시의 혼합체인 미세한 칩의 연삭면 부착, 즉 스미어링(smearing) 현상에 의한 표면의 균질화에 의한 결과로 사료된다. 한편, 스파크아웃을 가공 중에 발생하는 탄성변형을 제거하는 작업으로 생각할 경우, 스파크아웃에 의한 연삭면 거칠기의 개선효과가(연삭가공 중에 강제절입에 의해서 설정한 총 절입량에 대한) 탄성 변형량에 대해서 비례관계가 있다고 가정 했을 때, CFRP의 경면연삭가공은 일반 경취재에 비해 보다 큰 탄성변형이 동반함을 나타내는 결과로 추정할 수 있다. 이러한 연삭가공에 의한 CFRP의 가공면의 탄성변형을 입증하기 위하여 스파크아웃을 10회 실시한 연삭가공면을 #340 블레이드와 파인 커터를 사용하여 정밀 절단하여 그 단면을

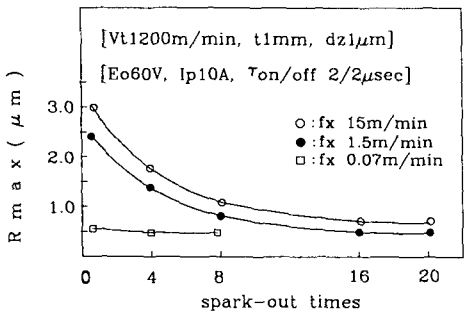
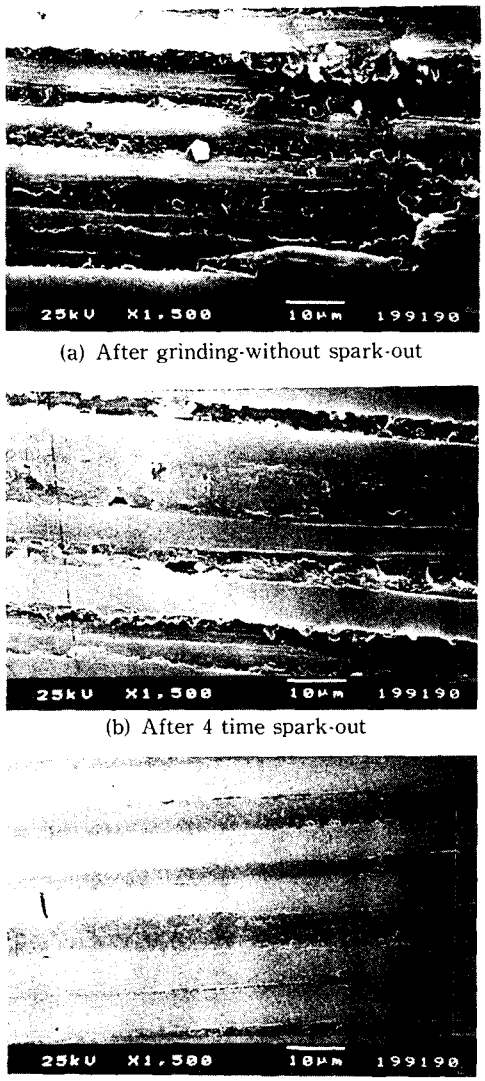


Fig. 5 Influence of the spark-out on the surface roughtness of CFRP



(a) After grinding-without spark-out

(b) After 4 time spark-out

(c) After 10 time spark-out

Fig. 6 Variation of the ground surfaces with spark-out times
[ELID conditions : Eo 60 V, Ip 10 A, $\tau_{on/off}$ 2/2 μs]
[Grinding conditions : fx 15 m/min, t 1 mm, d 1 μm]

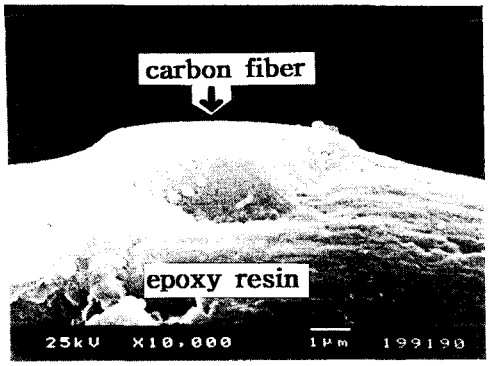


Fig. 7 View of sectional profile of CFRP after finish grinding

SEM을 이용하여 미세관찰한 결과, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 탄소섬유가 에폭시 수지보다 연삭가공면으로부터 다소 높게 돌출되어 있음을 알 수 있다. 이러한 일련의 결과로부터, CFRP의 경면 연삭가공은 일반 강취재에 비해 큰 탄성변형을 동반하게 되며, 이러한 탄성변형의 주된 원인으로는 전술한 바와 같이 탄성계수가 크게 다른 탄소섬유와 에폭시 수지의 복합재료인 CFRP의 재료 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

3.1 경면 창성기구

Fig. 8은 #6000 숫돌을 사용하여 CFRP의 연삭가공을 실시한 후, AES법에 의해 경면연삭가공된 CFRP의 표면상태를 분석한 결과를 나타내며, 위의 스펙트럼은 에폭시 수지부분이며 아래는 탄소섬유 부분에 대응하는 스펙트럼이다. 에폭시 수지 와 탄소섬유의 스펙트럼이 거의 일치하여 각 부위가 동일한 물성을 나타내며, 또한 연삭가공된 CFRP의 표층부가 약간의 N(질소) 및 O(산소)를 제외하고는 C(탄소)만으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 일반적으로 물체의 표층에는 약간의 N과 O등이 관찰됨으로, 이 경우의 N과 O의 피크는 시료 표면의 오염(contamination)에 의한 것으로 판단할 수 있다. 이와 같은 오염의 영향을 제거하기 위하여 Ar^+(아르곤)이온을 입사에너지 2 keV로 CFRP의 표면에 스퍼터링을 실시한 후에 AES를 측정하였다. Fig. 9에는 스퍼터링 시간이 각각 1분/12분/18분인 시료의 AES스펙트럼을 나타낸다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에서는 전술한 Fig. 8에 비하여 N과 O가 감소되어 있으며, Fig. 9(c)에서는 CFRP의 표면에서 N과 O가 완전히 제거되고 C만이 잔류함을 알 수 있다. 위의 분석결과와 10 nm/min전후의 스퍼터링속도(시료의 깊이방향)를 고려했을

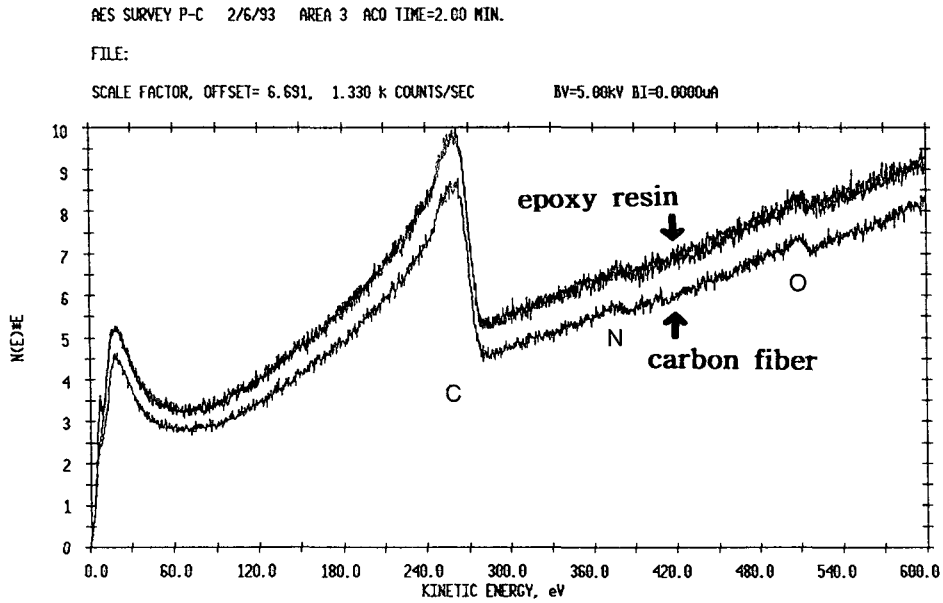
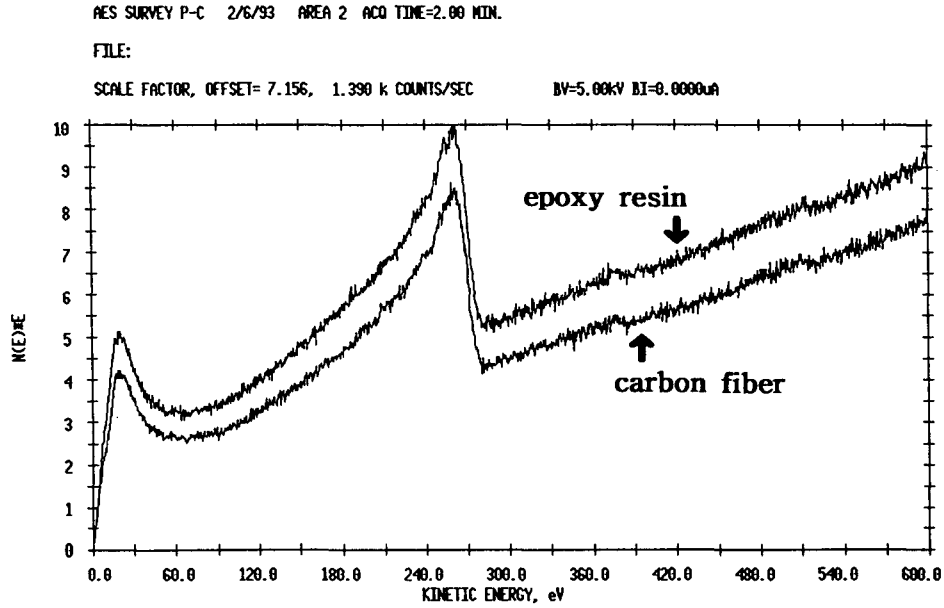
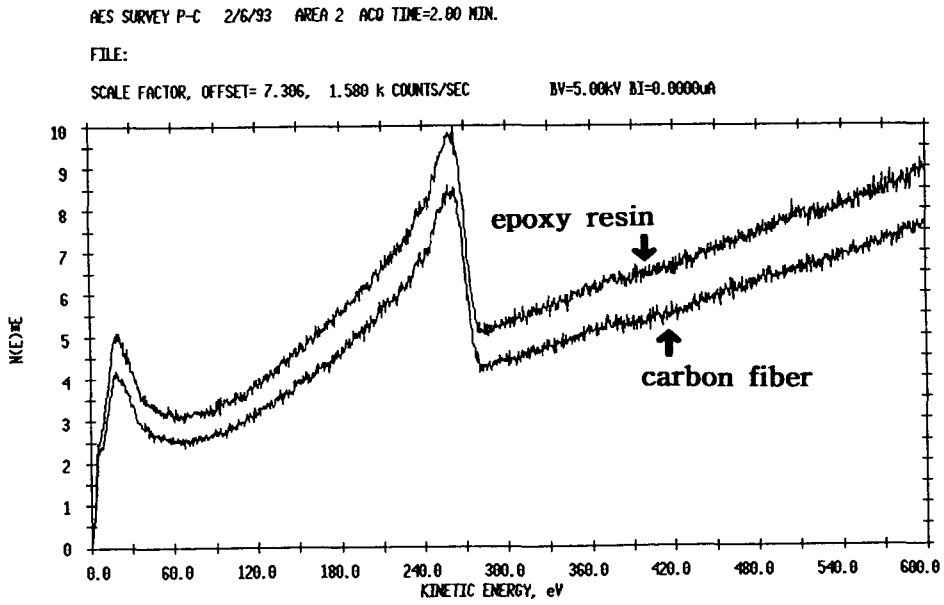


Fig. 8 AES analysis results of the surface layer of CFRP after finish grinding
[ELID conditions : Eo 60 V, Ip 10 A, $\tau_{on/off}$ 2/2 μ s]
[Grinding conditions : fx 1.5 m/min, t 2 mm, d 1 μm]

때, 경면연삭 가공된 CFRP의 표면에는 수십 나노메터 정도의 탄화층이 형성되어 있는 것으로 추정할 수 있다. 연삭가공시의 각 지립의 가공점에서의 공작물 표면온도, 즉 각 지립의 연삭점의 온도가 연삭조건 및 연삭환경에 따라 다소의 차이는 있으나 일반적으로 1000℃ 이상의 고온으로 되며,[13] 이와 같은 고온상태에서 250℃ 전후의 탄화점을 갖는 에폭시 수지가 탄화되는 것으로 사료된다. 따라서 CFRP의 경면연삭가공면의 탄화층 형성의 주된 원인으로서, 연삭시의 높은 가공열에 의한 CFRP 표층부의 탄화와 더불어 Fig. 6의 결과에서 서술한 탄소섬유 및 탄화된 에폭시 수지의 미세한 칩의

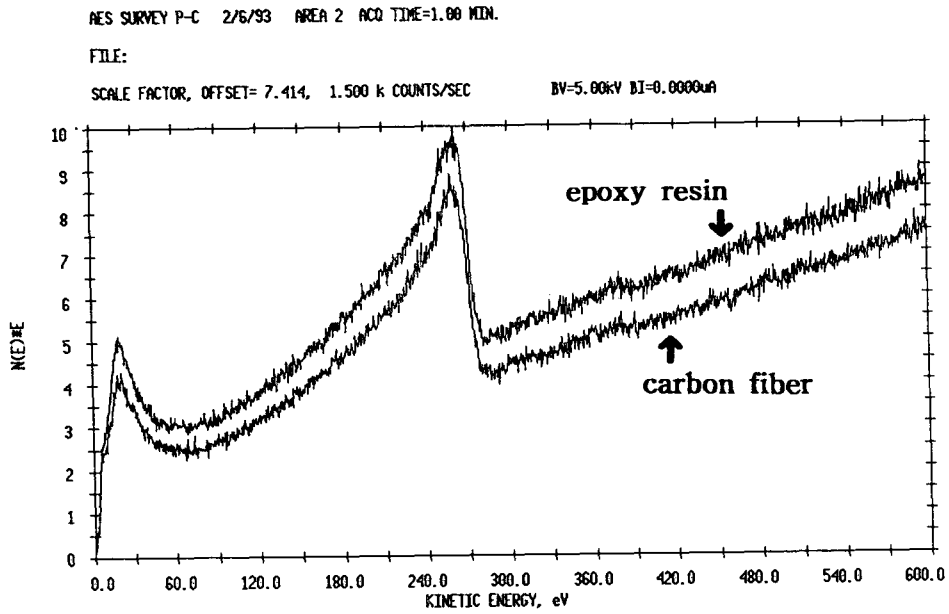


(a) After 1 minute sputtering



(b) After 12 minute sputtering

Fig. 9 (continued)



(c) After 18 minute sputtering

Fig. 9 AES analysis results of the surface layer of CFRP after Ar^+ sputtering the finish grinding surface
[ELID conditions : Eo 60 V, Ip 10 A, $\tau_{on/off}$ 2/2 μs]
[Grinding conditions : fx 1.5 m/min, t 2 mm, d 1 μm]

해 큰 탄성변형을 동반하며, 이로 인하여 경면연삭 CFRP 표면에의 부착을 생각할 수 있다. 일련의 AES 분석결과와 Figs. 4, 6의 연삭가공면의 SEM 관찰결과로부터, 연삭가공에 의한 CFRP의 경면 창성기구는 연삭 가공시의 발열에 의한 CFRP 전면의 탄화와 칩의 스미어링(smearing) 현상에 의해 연삭표면이 균질한 상태를 유지하며, 이로 인하여 전체 연삭면이 글라시카본(glassy carbon)과 같은 경면상태를 발현하게 되는 것으로 판단된다. Fig. 10은 #6000 숫돌을 사용한 CFRP의 경면연삭가공 시편을 나타낸다.

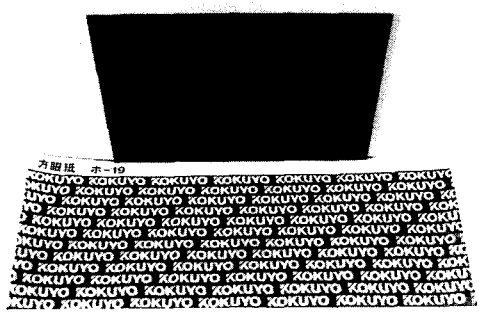


Fig. 10 View of the mirror surface ground of CFRP with #6000 wheel and ELID grinding
[ELID conditions : Eo 60 V, Ip 10 A, $\tau_{on/off}$ 2/2 μs]
[Grinding conditions : fx 15 m/min, t 1 mm, d 1 μm]

4. 결 론

미세한 초지립의 메탈본드 숫돌을 사용한 ELID연삭법을 적용하여 CFRP의 경면연삭가공 특성 및 경면 창성기구에 대해서 조사하였다. 본 연구에 의해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) ELID 연삭법에 의한 CFRP의 경면연삭가공에 적합한 숫돌의 입도는 #4000에서 #6000의 범위이다.

(2) CFRP의 경면연삭가공은 일반 경취재에 비가공면의 거칠기가 일반 경취재에 비하여 뒤떨어져, #6000 숫돌을 사용한 경우에 표면거칠기가 R_{max} : 0.65 μm 정도에 멈춘다.

(3) CFRP의 경면연삭가공에는 연삭면 거칠기의

연삭방향 의존성이 존재하며, 90°방향의 연삭가공에서 가장 양호한 연삭면 거칠기가 얻어진다.

(4) CFRP의 경면연삭가공에 있어서 스파크아웃에 의한 표면거칠기의 개선효과가 급속이송의 조건하에서는 매우 큰 반면, 저속이송의 조건하에서는 극히 적다.

(5) 연삭가공에 의한 CFRP의 경면 창성기구는 가공열에 의한 CFRP 표면의 탄화와 칩의 스미어링 현상에 의한 표면상태의 균질화에 기인한다.

참고문헌

(1) Macllick, P. K., 1988, *Fiber-Reinforced Composite,* Dekker, New York, pp. 3~4.

(2) Schwarts, M. M., 1984, *Composite Materials Handbook,* McGraw-Hill, New York, Ch. 7.

(3) Reugg, C. and Habermeir, J., 1980, "Composite Propeller Shafts Design and Optimization," in: A. Bunsell et al.(Eds.), *Advances in Composite Material, (Proc. ICCM 3),* Paris, Vol. 2, pp. 1740~1755.

(4) Lee, D. G., Sin, H. C. and Suh, N. P., 1985, "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool," *Ann. CIRP,* 34(1), pp. 365~369.

(5) Lee, D. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., 1991, "Manufacturing of a SCARA Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Material," *Robotica,* 9 pp. 219~229.

(6) Kaneeda, T., 1989, "CFRP Cutting Mechanism," *Proc. NAMRCXV, SME*, Columbus, OH, pp. 216~221.

(7) Wang, X., Nakayama, K. and Arai, M, 1990, "Improvement of Surface Finish in the Cutting of CFRP," *Proc. First Int. Conf. on New Manufacturing Technology,* Chiba, pp. 33~38.

(8) Lubin, G., 1982, *Handbook of Composites,* Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 625~629.

(9) Ohmori, H. and Nakagawa, T., 1990, "Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-Process Dressing," *Ann. CIRP,* 39(1), pp. 329~332.

(10) Ohmori, H., 1992, "Electrolytic In-Process Dressing(ELID) Grinding Technique for Ultra-Precision Mirror Surface Machning," *Ann. JSPE*, 26(4), pp. 273~278.

(11) Someno, M. and Yasumori, I., 1976, *Surface Analysis,* Kodansya, Tokyo, Ch. 4.

(12) Ohmori, H. and Nakagawa, T., 1988, "Grinding of Silicon using Cast Iron Fiber Bonded Diamond Wheel(4th Report: Mirror Surface Utilizing Super-Abrasive Wheel)," *Proc. of the Spring Conf. of JSPE*, pp. 521~552.

(13) Usui, E., 1971, *Cutting·Grinding Technology,* Kyoritsu, Tokyo, pp. 63~66.