

CU175NS 적층판 복합재의 절삭가공특성 연구

김동현*, 김우순**, 김경우**

A Study on the Machining Properties of CU175NS Composite Laminates

Dong-Hyun Kim*, Woo-Soon Kim**, Kyong-Woo Kim**

Abstract

Carbon fiber epoxy composite are widely used in airframe structures, space vehicles, sports equipment, and high speed reciprocating parts for industrial machinery. In this paper, the groove processing characteristics of carbon fiber epoxy composite was experimentally investigated in order to study the endmill operation of fiber reinforced epoxy composites.

Followings are main finding from the experimental results. First, the cutting and bending force in groove processing of the carbon fiber epoxy composite increased as the spindle speed deceased. They also decreased as the table feed increased. Second, the good cutting status obtained at the entrance of groove while delamination occurred at the exit of groove. Third, the regular high speed steel endmill was not efficient, thus the new endmill such as coated carbide rooter endmill or diamond endmill should be used for the effective endmill operation of carbon fiber epoxy composites.

Key Words : Carbon Fiber Epoxy Composite(탄소섬유 에폭시 복합재료), Groove Processing(홈가공), Delamination(층간분리)

1. 서 론

현재 자동차 구조재와 내장재에는 금속성 재료를 많이 사용하고 있다. 그러나 자동차의 경량화를 위하여 복합재료의 사용량이 증가하고 있다. 그 중에서도 에폭시 수지를 기지재로 하는 탄소섬유 에폭시 복합재료는 비강성(E/ρ), 비강도(S/ρ)가 기존의 재료에 비하여 크고, 원

하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있고, 열팽창 계수가 거의 0에 가깝기 때문에 온도에 영향을 받지 않는 구조물의 제조가 용이하다. 또한, 대형부품과 일체 성형 및 제조방법이 용이하고 자동화가 가능하다.

이러한 특징으로 인하여 주로 경량화가 요구되는 항공기, 자동차와 스포츠 용품산업에 이용되고 있으며, 최근에는 건축용 구조물, 압력용기, 선박용 재료, 기계 부품과 우

* 원광대학교 기계공학부(kdhbhk@wonnmw.wonkwang.ac.kr)
** 원광대학교 대학원

주 구조물 부품 등에 그 활용이 증가되고 있는 추세이다. 특히, 자동차에 유리섬유 복합재료와 탄소섬유 복합재료 등이 차체, 범퍼와 리프트 스프링 등에 많이 사용되고 있으며, 금속을 대체할 수 있는 강도와 강성도를 발생할 수 있기 때문에 자동차에 복합재료의 활용이 크게 증가되고 있는 추세이다.

탄소섬유 에폭시 복합재를 이용하여 구조물을 생산할 때에 마지막 단계로 탄소섬유 에폭시 복합재료를 다른 금속이나 다른 복합재료의 부품과 결합시켜야 한다. 이때에 접합 부분의 탄소섬유 에폭시 복합재료의 가공을 요하며 가공 정밀도 및 가공 형상에 대한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭특성에 관한 연구의 필요성이 부각되어 이에 대한 연구가 진행되어 왔다.

Sakuma⁽¹⁾는 섬유강화 복합재료의 일종인 유리섬유 에폭시 복합재료의 선삭가공에서 공구재료(초경합금, 세라믹, 서멧)와 유리섬유 에폭시 복합재료의 적층 수에 따른 공구마모, 절삭력과 표면 거칠기에 관하여 연구하였다. 연구내용은 섬유강화 복합재료의 적층각도에 따른 Iosipescu 전단실험과 섬유 배열 방향에 따른 전단강도를 계산하였고, 2차원 절삭을 실시하여 절삭력과 칩의 형태를 관찰하여 절삭모형을 제안하였고, 많은 연구 실험을 통하여 섬유 배열 방향과 절삭방향에 의하여 전단강도가 증가하는 것을 증명하였다.⁽²⁾⁽³⁾

복합재료의 절삭효과에 관한 연구는 아라미드 섬유강화 복합재료를 드릴링, 엔드밀, 워터 제트와 레이저를 이용하여 가공하였을 때 공구 수명, 표면 거칠기와 공구형상에 의한 절삭효과 등에 관한 연구결과가 발표되었다. 또한, 수치계 섬유강화 복합재료의 드릴링 가공에서 문제되는 재료의 입구와 출구에 발생하는 층간박리, 재료 내부의 각 플라이들의 분리, 가공면 가장자리와 벽면에서 섬유 및 수지의 찢겨짐과 심한 공구마모에 관한 연구가 수행되었다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾

Stone⁽⁶⁾는 흑연 에폭시 복합재료를 드릴을 이용한 구멍가공 시 허용오차 내의 구멍형상을 가공하기 위한 예상 추력을 연구하였고 흑연 에폭시 적층판의 층간분리(delamination)를 최소화 할 수 있는 방법으로 신경망 추력 제어기(Neural Network Thrust Force Controller)를 이용하는 방법을 제안하였다.

Dharan⁽⁷⁾은 탄소섬유 에폭시 복합재료에 관한 연구에서 드릴을 이용하여 구멍가공 시 선단각과 섬유 배열 방향에 의한 추력과 토크, 입구와 출구의 상태, 공구의 마모와 입구와 출구에서의 peel-up과 push-out 현상에 대한 이론적인 절삭 모델을 제안하였다.

탄소섬유 에폭시 복합재료를 볼트나 리벳을 이용하여 체결하기 위하여 엔드밀을 이용한 홈가공에서 지지체인 탄소섬유의 강한 연마성 때문에 심한 공구마모가 발생하고, 입구와 출구에서 각 플라이들의 층간분리 현상이 발생하며, 가공된 홈의 벽면에서 섬유 또는 수지의 탈락현상 등 많은 문제점들이 발생한다. 그러나 엔드밀을 이용한 홈가공에 대한 연구는 거의 발표되지 않은 실정이기 때문에 생산현장에 적용할 관련자료부족으로 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료를 대상으로 엔드밀을 이용한 홈가공에서 발생하는 결합을 최소화하고 고정밀도의 높은 생산성을 얻기 위한 공구선택과 해결 방안을 제시하려고 한다. 탄소섬유 에폭시 복합재료의 엔드밀을 이용한 홈가공 실험에서 고속도 공구강 2날 엔드밀을 사용하여 절삭 조건에 따른 홈가공에서 발생하는 칩의 형상, 입구와 출구의 형상, 공구의 마모와 절삭력이 미치는 영향에 대한 연구를 통하여 탄소섬유 에폭시 복합재료의 홈가공 특성을 규명하려고 한다.

2. 실험

2.1 시편 및 공구

본 실험에 사용된 탄소섬유 에폭시 복합재료 프리프레그(prepreg)는 (주)한국화이버의 CU175NS로서 핸드 레이업(hand lay-up)방법으로 48층을 일방향(0°)과 다방향($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$)s)으로 적층하여 시험편을 제작하였다. CU175NS의 물리적인 성질은 Table 1과 같다. 시험편의 제작은 최대 10MPa의 압력을 가할 수 있고 $2^\circ/\text{min}$ 의 온도상승이 가능한 열처리장치가 부착된 오토클레이브(autoclave)를 사용하였다. 시험편의 두께는 약 7.7mm이다.

Fig. 1은 오토클레이브내의 온도와 압력, 시간을 나타내는 성형 사이클(curing cycle)이다. 성형된 재료는 다이아몬드 휠커파를 이용하여 $30\text{mm} \times 60\text{mm}$ 의 크기로 절단하여 시험편을 준비하였다.

Table 1 Material properties of CU175NS prepreg

Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Poisson ratio (ν)	Fiber content (Volume %)	Density (g/cm^3)
1.61	124	0.28	65 ± 2	1.59

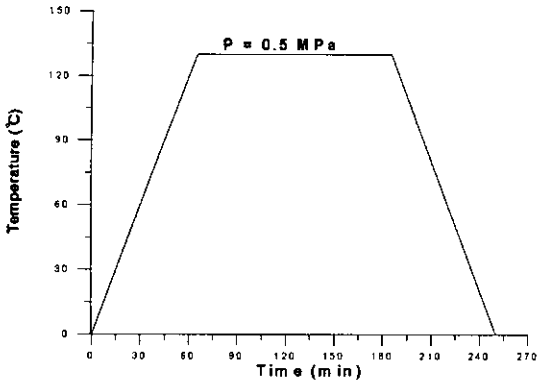


Fig. 1 Illustration of curing cycle

실험에 사용한 공구는 고속도 공구강 2날 엔드밀 ϕ 10mm을 사용하였다.

2.2 실험장치와 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치는 3축 운동이 자유로운 머시닝 센터로 주축의 동력은 11KW, 주축의 회전수는 36~3300rpm이고 테이블 이송속도는 최대 12,000m/min이다.

본 실험에서의 실험조건은 주축 회전속도를 285rpm, 520rpm, 1,040rpm으로 하였고, 테이블의 이송속도는 15m/min, 35m/min, 50m/min으로 하였다. 이때 엔드밀을 이용하여 15mm의 홈을 가공하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치를 나타낸다. 압전형 공구동력계(Piezoelectric Transducer ; Kistler 9257B)를 사용하여 건식절삭으로 각 실험조건에 대한 엔드밀의 절삭력 변동성분을 측정하였다. 공구동력계에

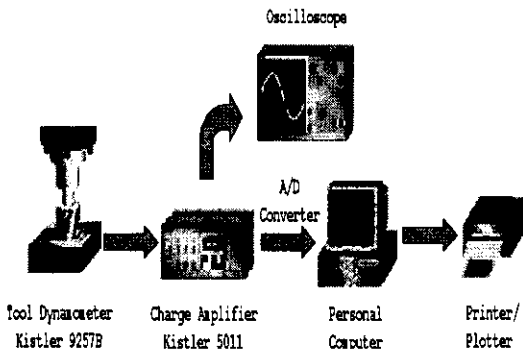


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup system

의하여 측정된 절삭력 성분은 증폭기(Charge Amplifier ; Kistler 5011)를 사용하여 증폭하고, 오실로스코프(Oscilloscope ; LG OS-3040D)를 이용하여 절삭력 성분을 측정하였다. 증폭기에서 출력된 절삭력 변동성분은 A/D 변환기(A/D Converter)를 이용하여 변환 후 컴퓨터로 절삭력 변동성분을 측정하였다.

공구의 마모량은 설정된 절삭조건으로 실험을 실시할 때마다 공구 현미경을 이용하여 엔드밀의 코너부와 외주면의 마모량을 측정하였고, 홈가공된 탄소섬유 에폭시 복합재료의 입구와 출구의 상태는 공구 현미경을 이용하여 측정하였다. 또한, 절삭 시 배출되는 칩은 공구현미경을 통하여 관측하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭조건에 의한 절삭력의 영향

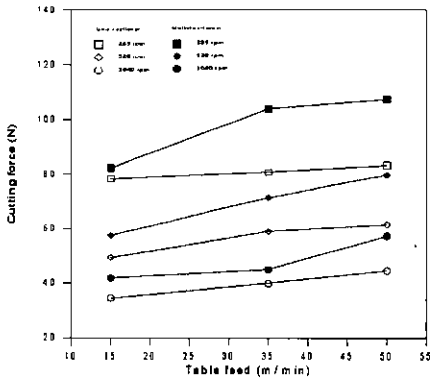
엔드밀을 이용하여 홈을 가공할 때 엔드밀은 수직분력, 이송분력과 배분력이 가해진다. 이때, 이송분력과 배분력의 합력인 굽힘력의 영향이 크게 작용한다. 이 굽힘력은 1회전을 주기로 인장과 압축을 반복하면서 홈의 절삭 부분에 집중해서 엔드밀에 작용한다. 이러한 굽힘력은 일정한 크기로 반복하여 엔드밀에 작용하여 엔드밀의 피로파괴에 직접적인 원인이 된다.

Fig. 3은 일방향과 다방향 탄소섬유 에폭시 복합재료를 엔드밀에 의한 홈가공 시 주축 회전수가 285rpm, 520rpm과 1,040rpm에서 테이블 이송속도를 15m/min, 35m/min과 50m/min 일 때 엔드밀의 절삭력과 굽힘력 변화를 측정된 값이다.

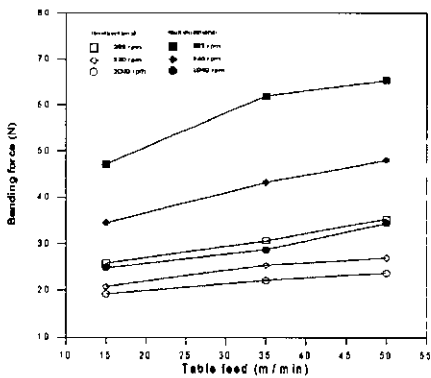
테이블의 이송속도가 증가할수록 엔드밀의 절삭력과 굽힘력은 증가하였다. 그러나 주축 회전속도가 증가할수록 절삭력과 굽힘력은 감소하였다. 이것은 주축의 회전속도가 일정할 때 테이블의 이송속도가 증가하면 절삭면에서 절삭 단면적이 증가하기 때문이다. 또한, 테이블의 이송속도가 일정할 때 주축의 회전속도가 증가하면 절삭력과 굽힘력이 감소하는 것은 주축의 회전속도가 저속일 때는 칩의 배출이 불량하며 공구의 온도가 상승하여 기지재인 에폭시가 공구에 용착되고 탄소섬유가 절단이 어려워져 절삭성이 저하되고 절삭력이 증가된다. 그러나 주축의 회전속도가 증가하면 칩배출이 용이하며 기지재인 에폭시의 공구 용착현상이 저하되고 탄소섬유의 절단이 용이하여 절삭력이 저하된다.

동일한 절삭조건에서 다방향 탄소섬유 복합재료가 일방

향 탄소섬유 복합재료 보다 절삭력과 굽힘력이 크게 발생하였다. 이것은 다방향 탄소섬유 복합재료에서 탄소섬유의 배열 방향성에 의하여 탄소섬유를 절단하는 절삭력과 굽힘력이 크게 발생하기 때문이다.



(a) Cutting force



(b) Bending force

Fig. 3 Cutting and bending forces of CFRP on various table feed rates

3.2 절삭조건에 의한 공구마모의 영향

탄소섬유 에폭시 복합재료를 다양한 가공조건에서 엔드밀에 의한 홈가공 시 엔드밀의 코너부와 외주 여유면의 마모와 형상을 공구 현미경을 이용하여 측정하였다.

Fig. 4는 정상상태의 엔드밀 외주 여유면과 주축 회전속도 285rpm과 테이블 이송속도 15m/min에서 가공한 엔드밀의 코너부와 외주 여유면을 나타낸 것이다. 사진에서 가공 후 엔드밀의 여유면에 마모된 에폭시 수지성분과 탄

소섬유의 용착현상을 볼 수 있었다. 이것은 탄소섬유 에폭시 복합재료에서 보강재로 사용하는 탄소섬유가 강하고 견고하기 때문에 마모가 현저하게 발생하고, 기지재로 사용하는 에폭시 수지 자체의 열전도율이 극히 작기(탄소강의 약 1/20) 때문에 절삭 시 발생하는 열이 칩이나 피삭재를 통하여 방열되지 않고 공구에 축적되기 때문에 공구의 온도가 상승하고 이로 인하여 에폭시 수지가 연화되어 공구에 용착하는 현상이 발생되는 것이다.

주축 회전속도와 테이블의 이송속도가 저속이면 절삭 시 엔드밀이 탄소섬유 에폭시 복합재료의 동일한 부분을 계속 절삭하는 현상이 발생하여 절삭열에 의한 공구의 온도가 증가하고 탄소섬유 에폭시 복합재료가 과다하게 공구에 용착되어 절삭성을 저하시키는 결과를 발생하게 된다. 따라서 주축 회전속도와 테이블 이송속도를 높여서 절삭함으로써 양호한 절삭 결과를 얻을 수 있었다.

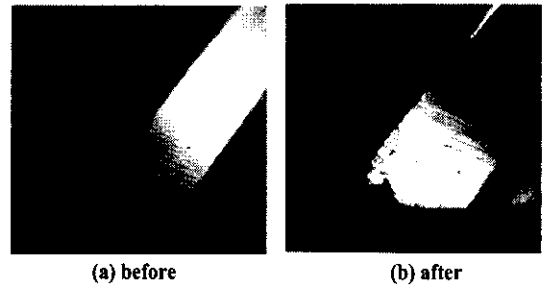


Fig. 4 Photographs of radial relief face of end

3.3 칩의 형상

Fig. 5는 탄소섬유 에폭시 복합재료를 엔드밀에 의한 홈가공에서 발생하는 칩형상이다. 사진에서 칩의 형상은 바늘형 칩(needle chip)을 나타내고 있다. 이것은 탄소섬유 에폭시 복합재료의 보강제인 탄소섬유가 엔드밀에 의한 홈가공에서 절삭되어 섬유형태로 배출되고, 기지제인 에폭시 수지는 덩어리의 형상으로 절삭되어 배출되기 때문이다.

공구진행방향과 피삭재 회전각도가 0° 근처에서는 큰 크기의 칩이 형성되고 회전각도가 증가될수록 탄소섬유가 절삭되어 비산되는 칩이 형성된다.

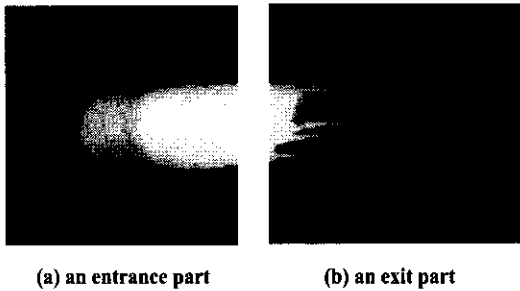
탄소섬유 에폭시 복합재료는 엔드밀에 의한 홈가공에서 배출되는 칩의 형상이 아주 미세하여 비산하는 경향이 있으므로 칩 흡입장치를 실험장치에 부착하여 가공실험을 실시하여야 할 것으로 판단된다.



Fig. 5 Chip forms in groove processing of CFRP

3.4 절삭조건에 의한 가공물의 영향

Fig. 6은 10mm 2날 엔드밀을 이용하여 주축 회전속도 520rpm과 테이블 이송속도 35m/min의 절삭조건에서 탄소섬유 에폭시 복합재료를 엔드밀에 의한 홈가공을 수행한 후의 입구와 출구의 상태를 나타낸 것이다.



(a) an entrance part (b) an exit part

Fig. 6 Photographs of groove

사진에서 엔드밀을 이용한 홈가공에서 입구쪽의 형상은 양호한 상태를 나타내고 있지만 출구쪽의 형상은 심한 내부 표면박리 현상이 발생하였다. 다른 절삭조건인 경우 입구쪽에서는 내부 표면박리 현상은 거의 발생하지 않았으나 출구쪽의 내부 표면박리 현상과 벽면의 섬유 또는 수지의 탈락현상은 절삭조건에 따라 달라지는 경향을 보였다.

Fig. 7은 탄소섬유 에폭시 복합재료를 테이블 이송속도가 50m/min일 때, 주축 회전속도를 285rpm, 520rpm과 1,040rpm으로 엔드밀을 이용한 홈가공에서 발생한 출구의 상태이다. 사진에서 동일한 테이블 이송속도에서 주축

회전속도가 증가할수록 출구의 표면 박리현상이 증가하였다. 이와 같은 현상은 탄소섬유 에폭시 복합재료의 보강재인 탄소섬유는 매우 경하고 고강도이기 때문에 주축의 회전속도가 증가할수록 공구의 마모가 발생하여 탄소섬유의 절삭이 어려워지기 때문이다. 또한, 주축 회전속도가 증가할수록 탄소섬유 에폭시 복합재료의 낮은 열전도성에 의해 절삭 시 발생하는 절삭열이 공구에 축적되어 공구마모를 촉진시키고 기지재인 에폭시 수지의 결합력을 약화시켜 층간분리 현상이 유발되고, 공구에 에폭시 수지가 용착하는 현상이 발생한다.

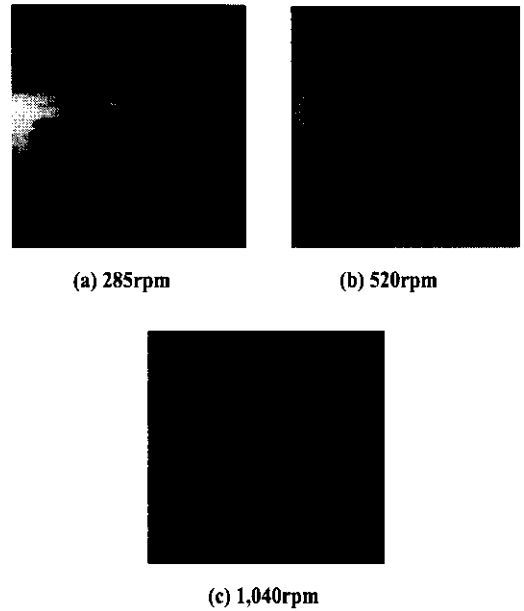


Fig. 7 Photographs of illustration status of groove exit as a function of spindle speed

탄소섬유 에폭시 복합재료의 엔드밀에 의한 홈가공에서 출구쪽으로 갈수록 홈내부 벽면에 많은 양의 섬유 또는 수지의 탈락현상이 발생하였다. 이것은 출구쪽으로 갈수록 공구의 마모가 진행되어 보강재인 탄소섬유와 기지재인 에폭시 수지를 절삭하지 못하고 인장시켜 찢는 현상으로 절삭하기 때문에 발생하는 현상이다.

탄소섬유 에폭시 복합재료를 엔드밀에 의한 홈가공에서 대부분의 조건에서 출구의 상태는 심한 내부 표면박리 현상이 발생하는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

참 고 문 헌

자동차용 복합재료로 많이 사용되는 탄소섬유 에폭시 복합재료를 엔드밀에 의한 홈가공 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주축 회전속도가 증가할수록 절삭력과 굽힘력은 감소하였고, 테이블의 이송속도가 증가할수록 절삭력과 굽힘력은 증가하였다.
- (2) 주축의 회전속도와 테이블 이송속도가 낮을수록 심한 공구 마모와 용착현상이 발생하였다.
- (3) 탄소섬유가 섬유질 형태로 절삭되어 바늘형 칩이 발생하였다.
- (4) 입구쪽은 양호한 가공상태를 나타냈지만 출구쪽은 내부 표면박리현상과 홈내부 벽면에서 많은 섬유 또는 수지의 탈락현상이 발생하였다.
- (5) 일반 고속도강 엔드밀을 사용하여 양호한 형상의 홈을 가공할 수 없었으며, 양호한 형상의 홈을 가공하기 위해서는 초경 루터 엔드밀이나 다이아몬드 전착 엔드밀과 같은 새로운 공구의 재료 또는 형상의 엔드밀이 설계되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2000년도 원광대학교 일반과제 연구비에 의하여 연구되었음.

- (1) K. Sakuma and M. Seto, "Tool Wear in Cutting Glass-Fiber-Reinforced Plastics", Bulletin of the JSME, Vol. 28, No. 218, pp. 1420-4127, 1983.
- (2) H. Y. Pwa and H. Hocheng, "Chip Formation Model of Cutting Fiber-Reinforced Plastic Perpendicular to Fiber Axis", Transactions of the ASME, Vol. 120, pp. 192-196, 1998.
- (3) N. Bhanagar, N. Ramakrishnan, N. K. Naik and R. Komanduri, "On the Machining of Fiber Reinforced Plastic(FRP) Composite Laminates", Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 35, No. 5, pp. 701-716, 1995.
- (4) W. K nig, Ch. Wulf, P. Graß and H. Willerscheid, "Machining of Fiber Reinforced Plastic", Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 2, pp. 537-548, 1985.
- (5) W. K nig and P. Graß, "Quality Definition and Assessment in Drilling of Fiber Reinforced Thermoses", Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 119-124, 1989.
- (6) R. Stone and K. Krishnamurthy, "A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Laminates", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 36, No. 9, pp. 985-1003, 1996.
- (7) H. Ho-Cheng and C. K. H. Dharan, "Delamination During Drilling in Composite Laminates", Transactions of the ASME, pp. 236-239, 1990.
- (8) 채왕석, 김경우, 김동현, "디젤 엔진용 캠축소재의 금속적 특성 및 선삭가공 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제14권 제7호, pp. 22-28, 1997.
- (9) 김동현, 박승근, 김 경우, "칩브레이커 형상변수에 의한 칩유동각 예측", 한국공작기계학회지, 제9권, 제2호, pp. 96-101, 2000.