

신소재 경면가공용 CNC 연삭기의 가공성능평가 Evaluation of the CNC grinding machine for ultra-precision machining of advanced materials

김 현석*, 이 대길

한국과학기술원 기계공학과 신소재응용 기계설계 연구실

Hyun Suk Kim and Dai Gil Lee

Mechanical engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

The three axis CNC grinding machine tool for ultra-precision mirror surface grinding of advanced materials such as ceramics and other hard and brittle materials was designed and manufactured. The grinding machine is composed of the air spindle, the high damping resin concrete bed, and the three axis CNC controller with the high resolution AC servo motor. To investigate the dynamic properties of the grinding machine, the natural frequencies of the spindle and the headstock were experimentally measured. The truing method using the break truer to revise the shape of the metal bonded diamond wheel was developed. From the results of the machining using the prototype three axis CNC grinding machine manufactured, the mirror surface were achieved.

1. 서 론

최근 급속히 발전하고 있는 전자산업을 중심으로 광학, 컴퓨터 등에 경취성 신소재의 사용이 확장되고 있으며, 신소재를 이용한 부품에 대한 형상 및 치수 정밀도와 표면거친기에 대한 요구정도(정밀도 및 정화도)가 날로 업격하여지고 있다. 특히 사용되는 신소재는 구조용 세라믹, 전자용 세라믹, 광학유리, 초경학금 등으로 대부분 내마모성이 높고 취성이 강한 난삭가공제이다. 난삭가공제의 초정밀가공을 위해서는 초정밀 공작기계, 초정밀 가공기술, 측정시스템 및 가공검과의 평가기술을 포함한 초정밀 가공시스템이 구축되어야 한다.

본 연구에서는 경취성 신소재를 경면가공할 수 있는 초정밀 가공시스템의 구축을 위해 Prototype 신소재 경면가공용 CNC 연삭기를 설계·제작하였으며, 제작된 연삭기의 성능을 평가하였다. 제작된 연삭기의 주축부는 가공에 직접적인 영향을 미치기 때문에 주축부에 대하여 진동실험을 수행하였으며, 실험결과를 바탕으로 가공조건을 결정하였다. 본 연구에서 사용한 연삭가공방식은 주철결합제 나이아몬드 숫돌(Cast Iron Bonded Diamond Wheel)과 인프로세스 전해드레싱(In-process Electrolytic Dressing)을 이용한 전해드레싱 연삭법^(1,2)을 사용하였다. 전해드레싱 연삭법을 이용하기 위해서는 금속결합제 숫돌의 트루잉 방법에 관련된 기초연구를 수행하였다. 일련의 연구결과로부터 결정된 연삭가공조건을 이용하여 경취성 신소재의

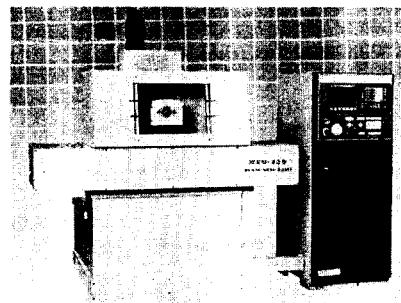


Fig.1 Drawings of the grinding machine for ultra-precision machining

초정밀 연삭가공을 수행하였다. 가공실험으로부터 나노미터(10^{-9} m)정도의 표면조도를 가지는 경면을 얻어, 개발된 연삭기가 경취성 신소재의 초정밀 가공에 적합한 것으로 판단되었다.

2. 신소재 경면가공용 CNC 연삭기의 설계

초정밀 연삭가공을 실현하기 위해서는 공작기계가 충분한 강성을 유지하여야 하며, 정밀한 위치검침이 가능해야 한다. 따라서, 초정밀 연삭기로서의 기능을 갖추기 위해서는 고속회전중에도 진동특성이 우수하며 높은 회전정밀도를 유지하는 스플들과 고강성 및 고정도를 갖고 원활한 이

송이 가능한 이송기구^(3,4,5) 등이 구비되어야 한다. 본 연구에서는 이상과 같은 조건을 만족하는 기계요소를 선정하고 이에 따른 구조설계를 수행하였다. 본 연삭기는 3축 동시 제어가 가능하며 Straight 스크류 사용하는 Prototype 평면 연삭기로 X, Y 및 Z 축의 행정거리는 각각 400 mm, 250 mm, 300 mm이다. 또한, 본 연삭기는 주축 회전 구동을 위한 공기 정압 스판들(Air spindle)과, 테이블, 세들 및 헤드스톡의 이송을 위한 직선운동 안내기구(Linear motion guide)와 볼스크류(Ball screw), 위치제어용 서보 모터 및 CNC 3축 컨트롤러 등으로 구성되고, 베드는 전동 액제와 열변형을 최소화하기 위하여 레진 콘크리트^(6,7,8,9)를 사용하였다. Fig. 1은 제작된 Prototype 신소재 경면가공용 CNC 연삭기의 모습이다.

3. 신소재 경면가공용 CNC 연삭기의 진동성능평가

가공중의 질삭점에서의 공작기계의 강성은 주축부에서 50 % 이상이 발생하고, 그 외에는 베드, 슬라이드 및 접속부에서 발생하는 것으로 알려져 있다⁽¹⁰⁾. 따라서, 본 연구에서는 가공정도에 직접적인 영향을 미치는 주축스핀들을 포함한 헤드스톡 부분의 진동특성을 측정하였다. 주축스핀들은 가공시 주축스핀들의 회전에 실험에 사용한 장비는 주파수 분석기(FFT Analyzer)와 임펄스 해머, 가속도계 및 신호증폭기 등이다. Fig. 2는 진동실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다.

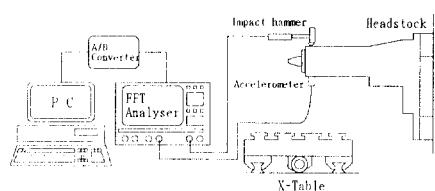


Fig. 2 Experimental setup for vibration test

주축스핀들의 진동실험은, 주축스핀들의 하우징에 가속도계를 부착한 후 하우징 부분을 가진한 경우와 주축스핀들을 가진한 경우, 주축스핀들에 가속도계를 부착한 후 하우징부를 가진시킨 경우로 나누어 스팬들에 공급되는 공기압을 변화시키면서 실험하였다. 각각의 경우를 실험한 결과 전체적으로 거의 유사한 경향으로 나타났으며, 측정된 스팬들의 기본 고유진동수는 공기압이 5기압 이상인 경우에 각각 815 Hz였다. 이 주파수는 스팬들의 사용범위를 훨씬 넘고 있어 공전에 의한 진동은 발생하지 않는 것

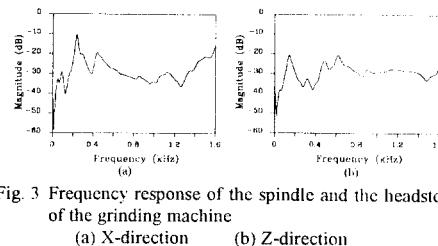


Fig. 3 Frequency response of the spindle and the headstock of the grinding machine
(a) X-direction (b) Z-direction

으로 확인되었다. 또한, 주축스핀들은 공기압이 증가함에 따라 감쇠인자(Damping Factor)은 감소하나 주파수 특성이 점차 안정되며, 또한 강성이 증가되는 결과가 얻어졌다. 주축스핀들의 감쇠인자는 5기압에서 1.1 %였다.

Fig. 3은 주축스핀들과 헤드스톡으로 구성된 주축부의 진동실험결과로, Fig. 3(a)는 X축, Fig. 3(b)는 Z축의 주파수 특성을 나타낸다. X축 방향의 경우, 기본 고유진동수(First Natural Frequency)는 142.5 Hz로 주축스핀들의 사용범위에서 안정된 특성을 갖게 된다. Z축방향의 경우, 미안하지만 50 Hz에서 기본 고유진동수가 나타난다. 따라서, 제작된 연삭기를 사용한 연삭가공에서 3000 rpm 전후의 스팬들 회전영역에서 공진 발생이 우려된다. 헤드스톡의 공진 발생을 방지하기 위해서 제작된 연삭기를 이용한 가공에서 3000 rpm 전후의 회전영역을 피하였으며, 공진을 피할 수 있도록 헤드스톡 부분의 강성을 증가시킬 수 있도록 설계를 변경하였다.

4. 신소재 경면가공용 CNC 연삭기의 가공성능평가

일반적으로 연삭가공의 가공공정은 트루잉(Truing)공정, 초기 드레싱 공정, 연삭 가공공정 등 크게 세단계의 공정으로 나누어진다. 트루잉 공정은 연삭수돌의 형상정도를 균일하게 만들어 주는 공정으로, 연삭가공시 가공정밀도의 한계를 결정짓게 되는 매우 중요한 공정이다. 트루잉 공정에 의해 연삭수돌의 표면층이 심하게 손상되었기 때문에 트루잉으로 손상된 연삭수돌 표면층의 연삭입자를 제거하고 새로운 연삭입자를 표면으로 통출시키는 초기 드레싱(Dressing) 공정을 수행한다. 초기 드레싱 공정을 거쳐 수돌의 표면층의 연삭입자들이 충분하게 밴딩되어 있는 상태에서 연삭가공공정을 수행하게 된다. 이러한 연삭가공공정은 사용하는 연삭수돌 및 드레싱 방법에 따라서 약간씩의 차이를 나타내지만 기본적으로는 위에서 언급한 세단계의 공정을 거치게 된다. 초정밀 연삭가공은 이러한 세단계의 공정 각각이 초정밀 가공에 적합하도록 수행되어야만 가능하게 된다. 본 연구에서는 주침경합제 다이아

몬드 숫돌과 전해 인 프로세스 드레싱 방법을 이용하는 전해드레싱 연삭법을 채택하였다. 초정밀 가공을 위해 금속 결합제 다이아몬드 숫돌의 트루잉 방법에 관한 기초연구를 수행하였다. 전해드레싱법을 사용하여 제작된 신소재 경면가공용 CNC 연삭기에서 가공실험을 수행하였다.

4.1 전해드레싱 연삭법

금속결합제 연삭숫돌에 적합한 전해드레싱은 전기화학적 가공원리에 기반을 두고 있으며, 연삭가공공정중에 드레싱을 수행함으로써 금속결합제 초미립자 연삭숫돌의 안정적 이용이 가능하도록 한 "전해 복합 인 프로세스 드레싱(ELID) 연삭법"이 확립되었다. Fig. 4는 전해드레싱의 기본원리와 드레싱 사이클을 나타낸다. 전해드레싱이 시작되면 표면의 주철결합제가 전기분해에 의해 부식되어 전극과 숫돌사이에 흐르는 전류가 감소한다. 이때 부식된 결합제의 강도는 상대적으로 약하기 때문에 가공중에 가공대상물의 침에 의해 제거가 되며 이때 마모된 연삭입자가 제거되고 세로운 연삭입자가 둘출하게 된다. 부식된 결합제가 표면으로부터 제거됨에 따라 전극과 숫돌사이에 흐

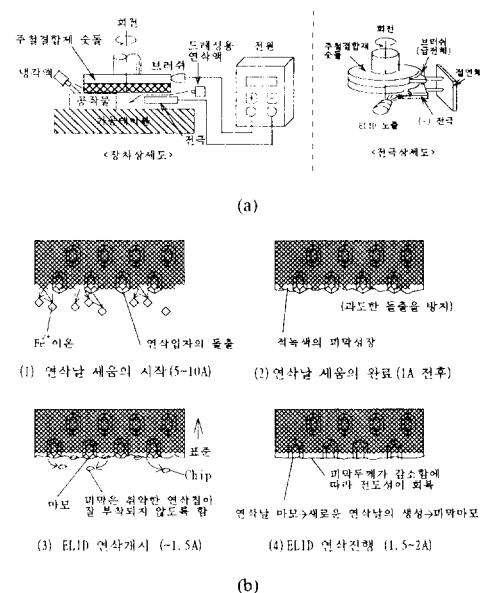


Fig. 4 Basic principle and dressing cycle of the electrolytic in-process dressing
(a) basic principle (b) dressing cycle

르는 전류가 증가하여 다시 전기분해가 시작된다. 이러한 일련의 과정이 반복되면서 연삭가공중에 연속적으로 드레싱이 이루어져 연삭력을 일정하게 유지할 수 있게 된다. 전해드레싱을 이용하는 경우, 전원장치와 연삭액의 선정에 따라 결합제의 부식속도를 조절할 수 있기 때문에 입도 4000이상의 초미립 연삭입자를 포함하는 숫돌을 이용한 초정밀 연삭가공이 가능하게 된다.

4.2 금속결합제 연삭숫돌의 트루잉

연삭가공은 연삭숫돌의 표면을 가공물의 표면에 전사시키는 가공이라 말할 수 있다. 따라서 연삭숫돌의 가공면의 회전축에 대한 동심도와 숫돌의 단면에 대한 평탄도 등을 얼마나 정확하게 보정할 수 있을 것인가 하는 것이 매우 중요하다. 이러한 연삭숫돌의 형상보정 공정이 트루잉(Truing) 공정이다. 레진결합제 연삭숫돌의 경우에는 결합제의 강도가 약해서 연삭숫돌입자의 제거가 비교적 용이하기 때문에 트루잉 공정은 다이아몬드 드레서(Dresser)를 이용하여 연삭숫돌의 형상과 드레싱을 동시에 수행할 수 있다. 그러나, 금속결합제 연삭숫돌은 결합제의 경도와 강도가 높기 때문에 금속결합제 연삭숫돌에 적합한 트루잉 방법이 개발되어야 한다.

본 연구에서는 CNC화 된 연삭기에서 금속결합제 연삭숫돌을 효율적으로 트루잉할 수 있는 방법으로 브레이크 트루어(Brake truer)를 이용한 트루잉 방법에 관해 연구하였

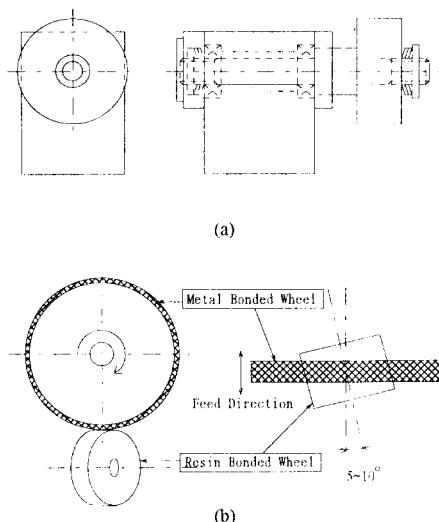


Fig. 5 Schematic illustration of the brake truer and Truing process using brake truer
(a) schematic illustration of the brake truer
(b) truing process using brake truer

Feed Vd (mm/min)	A	B	C	A'	B'	C'
Case 1	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Case 2	1000	100	1000	1000	100	1000
Case 3	1000	100	1000	1000	1000	1000

Fig. 6 Truing process using relative velocities ratio

다. Fig. 5는 브레이크 트루아의 기본형상과 브레이크 트루아를 이용하는 트루잉 방법을 나타낸 것이다. 브레이크 트루아로는 저경도 레진결합제 속들을 이용하여, 금속결합제 연삭속들을 브레이크 트루아간의 상대속도의 차이에 의해서 금속결합제 속들을 보정하게 된다. 브레이크 트루아로 사용되는 연삭속들은 입도 60~100의 레진결합제 연삭속들이다.

초미립 연삭입자를 함유한 금속결합제 연삭속들을 사용하여 초정밀 연삭가공을 수행하는 경우에는 연삭속들의 형상정도를 $1 \mu\text{m}$ 이내로 정밀하게 보정해야 한다. Fig. 6의 Case 1과 같이 일정한 속도로 트루잉을 하는 경우에는, 연삭속들 단면의 양끝단에서 수 μm 의 오차를 발생하였으며, 이와 같은 상태에서 트루잉을 계속하여도 오차를 줄일 수 없었다. 이러한 현상은 금속결합제 연삭속들이 브레이크 트루아의 연삭속들과 닿는 접촉면적이 트루아의 전방 끝단(A, A')에서부터 점점 증가하였다가, 다시 트루아의 후방 끝단(B, B')으로 가면서 점점 감소하게 되기 때문에 연삭속들 단면의 양끝단이 다른 부분보다 쉽게 마모가 일어나는데서 그 원인이 있다. 또한 끝단 A, A'의 경우보다는 끝단 B, B'의 경우에 연삭속들과 트루아 사이에서 더 큰 부하가 작용하므로 끝단 B, B'에서 더 많은 마모가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6의 Case 2와 Case 3와 같이 연삭속들과 트루아의 접촉면적의 변화가 일어나는 구간과 변화되지 않는 구간으로 나누어 3구간으로 구분하고 각 구간별 이동속도를 다르게 하여서 실험하였다. 실험 결과 Case 3의 경우가 가장 우수한 조건임을 발견할 수 있었다. Case 3의 조건으로 트루잉을 수행함으로서 연삭속들의 형상을 연삭속들 폭에 대한 진직도와 스픬들의 중심에 대한 오차를 $1 \mu\text{m}$ 이하로 보정할 수 있었다. 이상과 같이 CNC화 된 머시닝 센터(M/C)나 연삭기에서 간단한 NC 프로그램과 브레이크 트루아를 이용하여 연삭속들의 형상을 초정밀 연삭가공에 적합하게 보정할 수 있음을 알 수 있었다.

4.3 초정밀 연삭가공 실험

브레이크 트루아를 이용하여 주철결합제 속들을 트루잉한 후 초기 드레싱을 수행하였다. 초기 드레싱에 사용된 연삭액은 일본에서 시판되고 있는 AFG-M(수용성 연삭액: W3종)이며, 전원장치는 일본의 Fuji-dies사에서 제작한 90 V, 20 A의 용량을 갖는 ED-920 모델을 사용하였다. 선정된 연삭액과 전원장치를 이용하여 전해드레싱을 수행한 경우, 시간에 따른 전극과 속들간에 흐르는 전류와 전압은 Fig. 7와 같다. 국내에서 생산중인 대부분의 수용성 연삭액은 전해드레싱을 수행한 경우 적절한 페막을 형성하지 못하여 전해드레싱에 부적합한 것으로 판단되었다. 또한, 속들의 회전수가 4000 rpm이상인 경우 전해드레싱에 의해 전극과 속들간에 흐르는 전류의 양이 0.5 A이하로 나타나 가공중 충분한 전해드레싱 효과를 얻기 어려웠다. 따라서 주축의 강성과 전해드레싱 효과를 모두 고려하면, 2500~3500 rpm이 전해드레싱에 적합한 주축 스플들의 회전영역으로 판단된다.

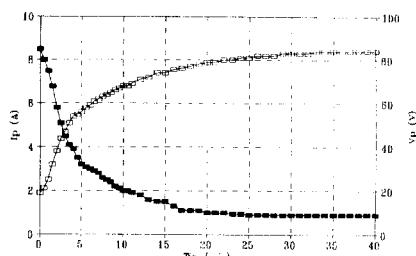


Fig. 7 Electrolytic in-process dressing(ELID) curve

초기 드레싱을 마친 후, 경취성 신소재를 이용한 연삭가공을 수행하였다. 초정밀 연삭가공에서는 일반적으로 서로 다른 입도를 가지는 속들을 이용하여 입도가 낮은 속들부터 이용하여 단계적으로 가공을 한다. 본 연구에서는 입도 325의 속들을 횡삭용으로, 입도 1200의 속들을 종삭용으로, 마지막으로 입도 4000의 속들을 초정밀 가공용으로 사용하였다. 가공조건은 테이블의 이송속도를 5000 mm/min으로, 주축스핀들의 회전속도는 3500 rpm으로, 전압값은 1 mm로 설정하였으며, Traverse pitch는 1 mm로 한 Traverse cutting을 수행하였다. 전삭력의 측정은 KISTLER사의 연·절삭용 공구동력계(Tool Dynamometer: Type 9257B)를 사용하였으며, 절삭력의 측정을 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 8에 나타내었다. 절삭력 측정에

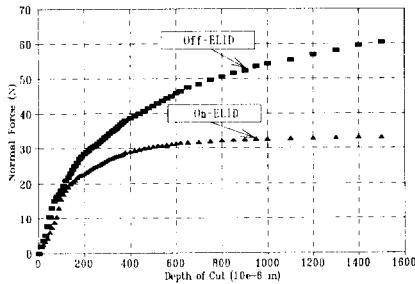


Fig. 8 Variations of the cutting forces w.r.t. existence and/or nonexistence of ELID

사용한 재료는 Si_3N_4 이다.

전해드레싱 효과를 살펴보기 위해 초기 드레싱이 된 상태에서 전원장치를 끈 경우와 켜 경우에 대하여 비교하였다. 전원장치를 작동시키지 않은 경우에는 절입이 진행될 수록 절삭력이 증가하였다. 전원장치를 작동시킨 경우에는 절입이 진행되는 경우에도 수직 절삭력이 어느 값에 이르러서는 일정한 값을 유지됨을 알 수 있었다(Fig. 9). 각각의 속들을 이용하여 연삭가공을 하는 경우, 황삭 가공, 종삭 가공 및 초정밀 가공순으로 절삭력이 증가하였으며, 각각의 경우에서 수직 절삭력이 수평 절삭력보다 5~7배 정도 큰 값을 나타내었다(Fig. 10). 가공된 표면의 표면조도를 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다. 입도 4000의 속들을 이용하여 초정밀 가공을 수행하는 경우 평균 표면조도가 6.5 nm인 경면을 얻을 수 있었다. 이 때의 절삭력이 수직방향의 경우, 가공재상재료에 따라 다르지만 구조용 세라믹의 경우 40~50 N을 나타내었다. 본 연삭기에 사용된 주축 스플린들은 3400 rpm에서 1.1 kW의 출력을 가지며, 유박파 과하중이 반경방향으로 600 N, 축방향으로 430 N이기 때문에 전해드레싱을 사용하는 경우 초정밀 연삭가공에 적합한 것으로 판단된다. Fig.11는 제작된 연삭기로 가공한 경취상 재료의 예를 나타낸다.

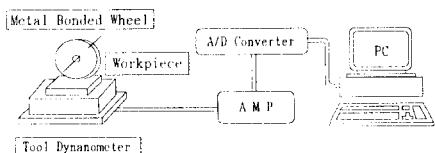


Fig. 9 Schematic illustration of the experimental setup for cutting force measurement

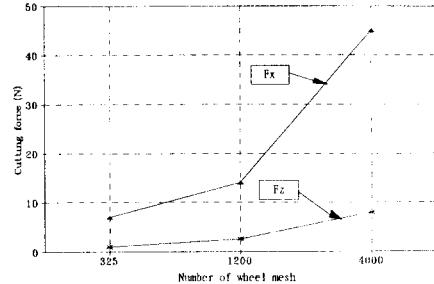


Fig. 10 Variations of the cutting forces w.r.t. the mesh size of grinding wheel

Table I Surface roughness w.r.t. the mesh size of the grinding wheel

Number of wheel mesh	325	1200	4000
Average surface roughness R_a (μm)	0.14~0.5	0.04~0.08	0.0065~0.01
Maximum surface roughness R_{max} (μm)	1.5~3.3	0.5~0.6	0.031~0.09



Fig. 11 Photograph of the mirror surface of brittle materials obtained by grinding machine
(a) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ (b) Si_3N_4

5. 결 론

본 연구에서는 세라믹 재료를 포함한 각종 경취성 신소재의 경면연삭가공을 위한 3축의 Prototype CNC 평면 연삭기를 개발하였다. 개발된 연삭기의 주축부의 진동특성을 측정하였으며, 초정밀 연삭가공에 필요한 기초연구를 수행하였으며, 연삭가공실험을 수행하였다. 일련의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 세라믹 재료를 포함한 각종 경취성 신소재의 경면연삭가공을 위한 3축의 Prototype CNC 평면 연삭기를 개발하였다.
- (2) 개발된 연삭기의 주축부에 대한 진동실험결과 대부분의 주축스핀들 사용 영역에서 안정된 진동특성을 나타내었다. 하지만, 3000 rpm주위에서 미약하나마 공진에 의한 진동발생의 우려가 있어 이를 개선할 수 있도록 설계를 변경하였다.
- (3) 금속결합제 슬롯의 트루잉 방법으로 주축스핀들의 이송속도를 조절하여 브레이크 트루아로 $1 \mu\text{m}$ 이하로 정밀하게 형상을 보정할 수 있는 방법을 개발하였다.
- (4) 개발된 연삭기를 이용한 초정밀 연삭가공에서 나노미터 정도의 표면조도를 가지는 경면을 얻었다. 따라서 본 연구에서 개발한 신소재 경면가공용 CNC 연삭기는 초정밀 연삭가공에 적합한 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 국민은행의 무상지원으로 (주)청송기계와 함께 수행되었습니다. 국민은행 및 (주)청송기계의 관계자 여러분께 감사드리며, 본 연구수행에 많은 수고와 조언을 주신 정광섭 박사님과 박규열 박사님께도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Ohmori, H. and Nakagawa, T., "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*, 1988(3), pp. 521-552.
2. Ohmori, H. and Nakagawa, T., "Mirror surface grinding of silicon wafers with electrolytic in-process dressing." *Ann. CIRP*, 39(1), 1990, pp. 329-332.
3. Ohmori, H., "Electrolytic In-process Dressing (ELID) grinding technique for ultra precision mirror surface machining." *Ann. JSPE*, 26(4), 1992, pp. 273-278.
4. Slocum, A. H., *Precision Machine Design*, Prentice-Hall inc., 1992, pp. 502-512, 589-625, 719-727.
5. Weck, M., *Machine Tools*, John Wiley & Sons Vol.2, 1984, pp. 129-157, 167-173, 203-205.
6. Morgan, G. H., McKeown, P. A., and Renker, H. J., "Materials for machine tool structures." *Proc. 20th MITDR*, 1980, pp. 429-434.
7. Rahman, M., Mansur, M. A., and Chua, K. H., "Evaluation of advanced cementitious composite for machine tool structures." *Ann. CIRP*, Vol 37, 1988, pp. 373-376.
8. Schalets, H. and Nicklau, R. G., "Designing machine tool structures in polymer concrete." *Industrial and Production Engineering*, 1982, pp. 74-77.
9. Kirlikovali, E., "Polymer/concrete composite-a review." *Polymer Engineering and Science*, 21(8), 1981, pp. 507-509.
10. Kadoda, K., "Ultraprecision air spindle and its driving mechanism." *Machine tool design*, Japan, 29(14), 1985, pp. 33-39.