

◆특집◆ 초정밀가공기술

SiC 세라믹 경면미러의 나노가공

곽태수*, 오오모리히토시**

Nano-Level Mirror Surface Machining Technology for SiC Ceramics Mirror

Tae Soo KWAK* and Hitoshi OHMORI**

Key Words: SiC ceramic(탄화규소세라믹), ELectrolytic In-process Dressing grinding(ELID 연삭), Magnetorheological finishing(자성유체연마), Spherical mirror(구면반사경)

1. 서론

최근 광학소자로서 구면, 비구면 및 자유곡면 등의 형상을 가진 렌즈와 미러는 고정밀도 뿐만 아니라 초평활면이 요구되고 있다. 이와 같은 형상을 제작하는 데는 고정도의 평활성과 초정밀성, 고능률화가 요구되고 있으나 동시에 충족시키기에는 매우 어렵다. 광학부품으로 사용되는 재료는 고강도로 경취 재료가 대다수이므로 초정밀, 고능률 가공을 동시에 실현하기 어려운 이유 가운데 하나이다. SiC 재는 광학특성과 기계적 특성, 전기적 특성 등의 면에서 뛰어난 특성을 보여주는 재료로서 우주망원경, 레이저 광 및 X 선 반사용 미러 등에 적용되는 등 다종다양한 용도로 이용되고 있으며 여러 분야로부터 주목 받고 있는 재료이다. 그러나 SiC 는 경취 재료로서 가공성이 나쁜 난가공재이기 때문에 그 응용성에 다소 제약이 있다.

전자, 자성, 광학분야에서 사용되는 경취 재료의 가공은 나노급 표면평활성 뿐만 아니라 서브 마이크론의 형상치수 정밀도를 달성하는 초정밀 가공기술이 요구되고 있다. 이러한 엄격한 요구를 실현하기 위해서는 절대치수와 정밀도를 추구할 수 있는 초정밀가공 시스템과 이에 의한 나노 수준의 표면 가공기술의 구축이 필요하다.

국내에서는 전해 인프로세스 드레싱(ELID) 연삭

법으로 잘 알려져 있는 ELID 연삭법은 반도체, 유리, 세라믹스, 초경합금, 소입강을 시작으로 각종 재료의 피가공 특성을 조사한 결과, 고능율 연삭가공법으로서 응용성이 높다는 사실이 다수의 연구논문¹을 통해 실증된 바 있다. 특히 #8000 을 넘는 초미립 금속결합숫돌을 이용하여 나노 수준의 표면 평활성을 실현 함으로서 피가공물의 품질향상에 크게 기여하고 있다. 최근, 국내 광학산업의 확대와 함께 ELID 경면 연삭법은 다시 주목 받고 있다. ELID 연삭법에 의해 얻어진 초평활표면에 서브 마이크론의 형상과 치수정밀도를 얻기 위해서는 초정밀 가공기에 높은 수준의 운동정밀도가 요구된다.

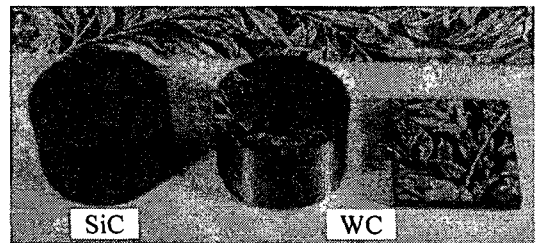


Fig. 1 Examples for mirror surface grinding, SiC, WC

이와 같은 가공기에 ELID 연삭법을 적용하면 필요한 운동정밀도와 안정성을 실현 함으로서 나노

* 요업(세라믹)기술원 기술지원본부
 ** RIKEN Material Fabrication Laboratory
 Tel. (02) 3282-2449 FAX (02)3282-2470
 E-mail tesukwak@kicet.re.kr

급 초정밀 ELID 경면연삭이 가능하다.

본 논문은 기계적 및 광학적으로 우수한 물성을 가진 SiC 세라믹에 대해서 그 응용성을 높이고 광학계에서 요구되는 경면가공을 위해 초정밀 가공기를 구성하고, ELID 연삭법 및 자성유체연마(MRF) 등을 응용하여 SiC 세라믹의 피가공 특성을 파악하는 한편, 효과적인 경면 미러 가공사례를 소개한다.

2. 대면적 경면 연삭 시스템

대면적 SiC 경량 미러 가공을 위해 개발된 경면 연삭 시스템의 구성은 다음과 같다. 초정밀 가공시스템으로서 안정성이 우수한 2 중 정압 슬라이드로 구성된 전축초정밀 유정압 구동기구 및 전폐형 스케일 피드백(Full-closed scale feedback)을 채용하고 위치제어 분해능은 10nm 로 구성되어 있다. 또한, ELID 경면 연삭을 위해서는 Fig.2 와 같이 초정밀 경면가공 시스템을 구성해야 한다.

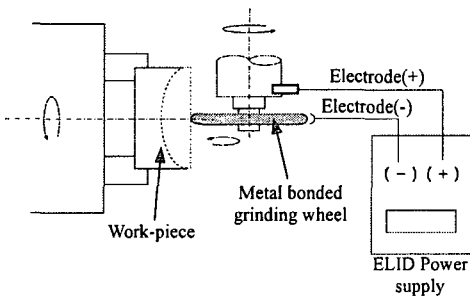


Fig. 2 Schematic diagram of ELID grinding system

대면적 가공을 위해서 피가공물 척의 크기는 1200mm(X) x 500mm(Y)이며, 적재 최대질량은 1200kg, 두께방향(Z)으로는 500mm 의 스트로크가 있으므로 대형의 피가공물 가공이 가능하도록 설계되어 있다. ELID 전극은 연삭 슷돌 직경방향의 간극을 서보모터로 미세조정이 가능하게 되어 있으며 슷돌의 편마모를 피하기 위해 슷돌의 축방향 조절도 가능하게 되어 있다. 또한, 노이즈를 최소화하기 위해 주수에 의한 초정밀 오토밸런스 조정이 가능한 플랜지를 사용하고 있다. 연마작업으로의 전환을 위해서 예비작업 없이 초경면 폴리싱 헤드 유닛을 바꾸면 경면연마 가공이 가능하게 구성되어 있다. ELID 장치는 NC 프로그램에 의해 원격 on-off 되도록 자동화 되어 있다. 한편, 본 시스

템은 온도관리가 되고 있으며 24 시간 운전으로 가공 정밀도를 보증할 수 있다. 전축의 정압 및 슷돌들에 공급하는 오일의 온도는 오일 컨디셔너에서 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 로 정밀 제어되고 있으며 장시간에 걸쳐 연삭 작업중의 열변동을 억제한다.

초정밀 경면연삭 시스템은 플라즈마 방전 트루인법 및 ELID 연삭 장치를 탑재하고 있다. ELID 연삭에 사용되는 금속결합 연삭 슷돌은 강도가 높으므로 기계적인 트루인으로는 효율적이지 못하고 가공 정도를 높이기 위해서는 고정도의 트루인을 행할 필요가 있다. 따라서 효율적으로 트루인을 실시하는 방법으로서 플라즈마 방전 트루인법을 채용하였다.

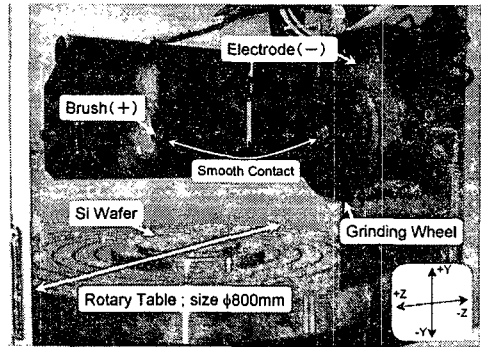


Fig. 3 System for large dimension mirror-surface grinding

가공기상에 로터리 트루어($\Phi 150\text{mm} \times W3\text{mm}$, #140 청동결합 다이아몬드 연삭스틀)를 장착하여 슷돌과 트루어와의 접촉영역을 가능한 작게 하면 고정밀도 트루인이 가능하므로 슷돌과 트루어를 직교로 배치하였다. 플라즈마 방전 트루인은 연삭 슷돌을 양극으로 트루어를 음극으로 접속하고 양극간에 고전압을 주어 미스트를 공급하며 행한다. 이와 같은 방법으로 금속결합 슷돌을 효과적으로 트루인이 가능하다. 연삭에 사용된 슷돌은 황가공용으로 #325, 정삭가공용으로 #1200, 경면연삭용으로 #4000(평균입경 약 4 μm)의 주철결합 다이아몬드 슷돌을 사용하고, 슷돌의 형상은 $\Phi 350\text{mm} \times W10\text{mm}$ 스트레이트형이다. 또한 ELID 장치로서 무부하 전압 90V, 최대전류 20A 용량의 장치를 사용하였다.

본 장치(Fig.3)를 이용하여 지르코니아 세라믹스(1400mm x 30mm x 150mm)를 시험 가공하여 가공면의 진직도와 표면조도를 측정 한 결과, 1400mm 길

이에 대해 가공면의 기복을 약 0.3um 이하로 억제할 수 있었으며, 표면조도는 #4000 슷들을 이용하여 67nmRy, 7nmRa 를 달성한 것으로 보고된 바 있다.

3. 수치계산에 의한 SiC 미러의 보정가공²³

대형우주망원경의 주경은 고강도와 함께 경량화가 요구되며 이를 위해 고강도 반응 소결(High-strength reaction sintered) SiC 가 사용되고 있으며, 경량화를 위해 배면에 리브 구조로 설계되어 있다. 대형일수록 리브의 구조는 복잡해 지고 미러 면과 리브 부분은 박육이 된다. 연삭 저항이 낮은 ELID 연삭에 있어서도 가공변형은 무시할 수 없으며 변형의 양상은 일정하지 않으므로 경험에 의한 보정은 매우 어렵다. 따라서 가공 변형을 수치계산에 의해 예측하고 가공 변형량을 보정 함으로서 SiC 미러를 연삭 할 수 있는 최적 조건을 도출한 사례를 소개한다.

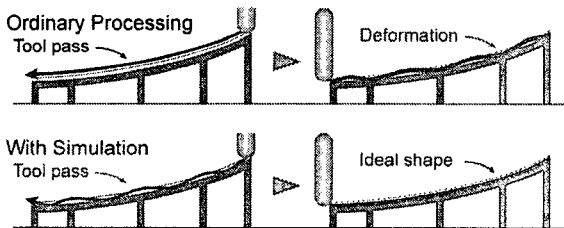


Fig. 4 Compensation grinding process for lightweight mirror using spring-back simulation results

수치계산에 의한 SiC 미러의 보정가공의 필요성은 Fig. 4 에서 표시한 것과 같이 경량화를 위해 미러 피가공물을 최대한 얇은 구조로 설계하므로 통상의 가공에서는 리브의 내측에서 스프링백(가공변형)이 발생할 수 밖에 없으므로 높은 형상정밀도를 얻기 어렵다. 따라서, 수치계산에 의해 가공변형해석을 수행하고, 최적 슷들의 궤적을 구하면 효율적으로 고정밀도의 가공을 실현할 수 있다. 리브 구조를 가진 $\Phi 80\text{mm}$ 소결 SiC 미러(미러면 및 리브 두께 3mm)를 이용하여 수치계산에 의한 보정가공을 시험한 순서와 가공 결과를 소개한다. 보정 가공의 순서는 아래와 같다.

a. 계산에 필요한 하중데이터 수집: 가공변형 시 물레이션을 하기 위해서는 슷들에 의해 피가공물

이 받는 가공하중 데이터를 수집할 필요가 있다. 재료와 절입량, 이송속도, 슷들의 종류에 따라 연삭 저항을 측정한다. 소결 SiC 의 #4000 에 의한 연삭 저항을 측정한 결과에 따르면 연삭 저항은 이송 속도보다 절입량에 크게 의존한다는 사실을 확인하였다. 연삭 저항은 가공기와 연삭 방법에 따라 달라지므로 사용 조건에 따른 데이터의 수집이 필요하다. 또한 초기 연삭할 때의 결과로부터 연삭저항을 역산하는 것도 한가지 방법이 될 수 있다.

b.미러가공 변형량의 수치계산: 소결 SiC 미러의 가공 변형량의 계산에는 범용 유한요소 프로그램인 Ansys 를 사용하였다. 수치계산에 이용한 재료계수는 영율: 440GPa, 프와송비: 0.17 로 고정조건은 리브 아래면을 완전 고정시켰다. 계산시에는 유한요소와 미러 중심에 하중을 작용시켰으며, 실험에서 사용된 가공기는 초정밀 연삭기 ULG100(H3), 실험에서 구해진 연삭 저항은 약 3kgf 이었다. 3kgf 를 60 도에 대해서 10 도 마다 중심에서 원주까지 11 점에 집중하중을 주어 변형해석하고 하중이 작용하는 점의 변형량을 계산하였다. 예상된 스프링백은 피가공물의 중심에서 720nm 정도였다.

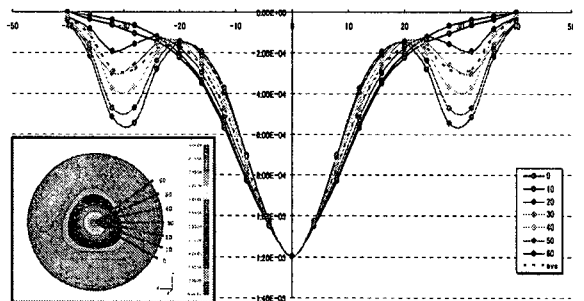


Fig. 5 Simulation results for compensation grinding of model lightweight mirror

Table 1 Experimental grinding conditions

Mesh size		#2000
Grinding conditions	Grinding wheel revolution[rpm]	6000
	Workpiece revolution[rpm]	36
	Depth of cut[um]	0.3
	Feed rate[um/mim]	10
ELID conditions	Non-loading voltage[V]	40
	Peak current[A]	4
	Electrolysis time[sec/pass]	60
	Pulse on/off[us]	2

c.보정가공용 슷들케도의 생성: 미러의 변형해석 결과를 기초로 하여 10 도마다 근사곡선을 산출하여 보정가공용 슷들의 케도를 제작하였다. Fig.5 는 수치계산에 의해 구해진 슷들케도의 3 차원 이미지이며, 리브의 배치와 변형 양상을 확인할 수 있다. 그림과 같은 슷들의 케도를 실현하는 NC 프로그램을 작성하고 연삭한다. 실제로는 C 축(피가공물의 회전축)에 대해서 슷들축의 X, Z 축이 추종한다.

d.보정가공: 앞서 얻어진 최적 가공조건을 고려한 NC 프로그램에 따라 보정가공을 하였다. 이에 적용된 ELID 연삭조건은 Table 1 과 같다. 전해는 1 path 마다 연삭 전에 60sec 를 하였다. 보정가공을 하지 않는 통상의 평면연삭을 행한 결과, 형상정도 PV 값은 약 700~800nm 정도의 가공변형이 발생하였다.

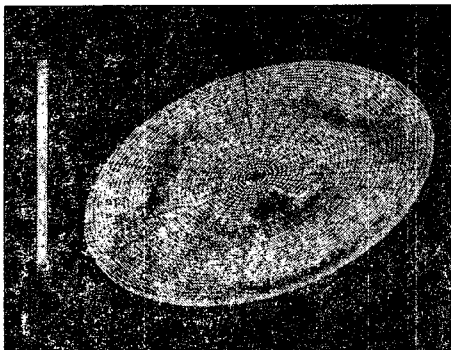


Fig. 6 calculated trace of grinding wheel from simulation results

여기서 보정가공을 절입량(0.3 마이크론)으로 연삭 회수를 3 회로 한 결과 PV 값은 200nm 를 밀들었으며 10 회 이상의 보정가공으로 200~250nm 정도의 결과를 얻을 수 있었다. 또한 최적가공 조건에서 연삭된 경우에는 PV 값이 67nm, rms 는 10nm 의 결과를 얻을 수 있었다.

본 실험을 통해 박육 SiC 미러의 경면가공에 있어서, ELID 연삭법 및 수치계산에 의한 보정가공이 유효함을 확인하였다. 본 연구에서 행한 보정가공법은 미러 제작 이외에도 적용범위는 넓다. 현재는 수치계산에서 NC 프로그램을 제작하고 가공까지 각각 독립적으로 이루어져 효율성 측면에서 개선이 필요하나, 이러한 일련의 프로세스를 통일한 시스템을 개발하면 보다 효율적인 보정가공이 가능할 것이다.

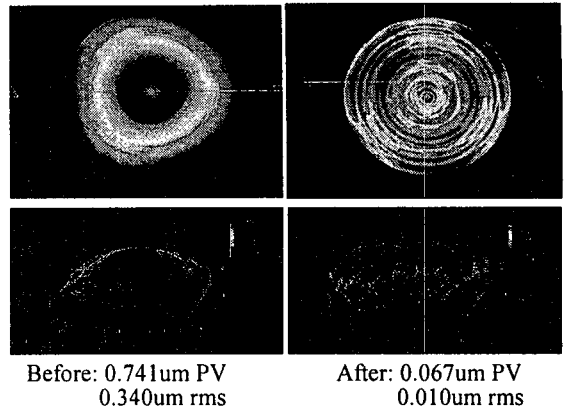


Fig. 7 Surface profile results before and after compensation grinding

4. 자성유체연마에 의한 CVD-SiC 가공³

화학기상성장 탄화규소(CVD-SiC)는 열전도성이 좋고 선팅창 계수가 적으며 내열성이 우수한 특성을 가지고 있으므로 경량 반사경 재료로서 천문학 및 화학분야에서 자주 적용된다. 특히 최근 단파장 광학소자의 응용이 증가하면서 경면에 요구되는 정밀도가 한층 높아지고 있다. 수십 나노 미터의 형상정밀도와 서브 나노 미터의 표면조도가 요구되고 있는 실정이다. 경량 미러 SiC 의 경면 제작공정은 유리 지립을 이용한 연마가공이 주류를 이루고 있다. SiC 재질은 경도와 파괴인성이 높아서 가공효율이 낮고 형상정밀도를 달성하기 어렵다는 지적을 받고 있다. 따라서 운동전사에 의한 고능률 연삭으로 높은 형상정밀도로 가공하고, 최소한의 연마로 경면을 가공하는 것이 가공시간을 획기적으로 단축하고 원가절감에 크게 기여할 것이다. 이러한 요구에 따라 경취 재료의 경면가공에 효과적인 ELID 연삭법은 미세 지립 슷들의 날을 장시간 유지할 수 있으며 피가공물에 연삭 저항이 적어 연성모드로 연삭이 가능하므로 CVD-SiC 의 고정밀도 뿐만 아니라 고품위의 형상가공을 할 수 있다.

한편, 연삭 가공에서 피할 수 없는 가공변질층은 피가공물의 표면에 잔류하게 된다. 초미립 슷들을 이용할 수 있는 ELID 연삭은 취성 재료에 대해서도 연성파괴를 실현할 수 있다. 가공변질층은 작지만 경시변화와 변형을 회피해야 하는 고기능 광학

부품에 대해서는 한층 높은 고품위 표면의 가공이 요구된다.

Table 2 Material properties of CVD-SiC

Type of crystal	Polycrystal cubic(β)
Mesh size	5-10um
Density[g/mm ³]	3.21
Vicker's hardness[kg/mm ²]	2500
Fracture toughness[MNm ^{-1/2}]	3.3
Degree of purity	>99.9995%
4 point bending strength[Mpa]	470
Coefficient of thermal expansion[1/K]	2.2×10^{-6}
thermal conductivity[W/m-K]	300

본 절에서는 고순도 다결정 SiC 에 대해 자성유체연마(MRF) 특성을 시험한 결과를 소개한다. Table 2 는 재료 특성을 나타내고 있다. 가공기는 Q22-Y MRF 연마기(QED 사)를 사용하였다. MRF 가공조건은 Table 3 과 같다. SiC 재질은 경도와 파괴인성이 높으므로 종래의 연마방법에 의한 제거율은 BK7 유리의 1/10~1/20 정도인 것으로 알려져 있다.

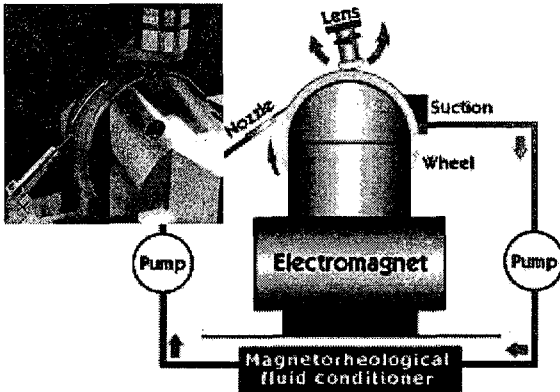


Fig. 8 Schematic diagram for Magnetorheological finishing system

MRF 에 의한 제거율은 체류시간 20 초로 하였을 때 깊이 제거율은 0.909um/min, 용적 제거율 0.005mm³/min 로 BK7 유리의 1/10 로 나타났다. 또한, 피가공물이 MR 유체에 침입한 깊이와 연마능률의 상관관계를 조사한 결과 침입 깊이를 0.2mm 에서 0.35mm 로 증가하면 용적제거율은 5 배로 커

지는 것을 확인하였다. MRF 가공에 따른 경시변화를 조사하기 위해 가공전 표면이 939nm rms, 11.662um PV 인 시편을 연마한 결과 최초 2 시간 동안은 표면조도에 큰 변화가 없었으나 그 이후에 점점 표면조도가 개선되어 8.5 시간 후에 200nm rms 이하로 되었으며 18.5 시간 후에는 2.8nm rms, 25nm PV 의 가공면이 얻어졌다. MRF 만을 사용하는 경우 CVD-SiC 의 표면가공은 가공시간이 길고 가공 능률 측면에서 비효율적이었다.

한편, #4000 과 #12000 슷돌에 의한 ELID 연삭면과 MRF 가공면을 비교한 결과를 소개한다. #4000 에 의한 가공면은 연성파괴 모드와 취성파괴 모드가 혼재하고 있으나 표면조도는 5.7nm rms 로 개선되었으며, #12000 의 연삭면과 MRF 가공면의 경우에는 연성파괴 모드로 가공되어 2~3nm rms 의 표면조도를 얻을 수 있었다.

Table 3 MRF machining conditions

Workpiece	CVD-SiC, Φ 30mm
Condition of magnetic fluid supply system	magnetization current: 12A Hoil revolution: 450 min ⁻¹ Revolution of magnetic fluid supply pump: 3000 min ⁻¹
Tool for magnetic fluid polishing	Diameter: Φ 50mm Max. height: 0.9mm Gap: 0.55mm Depth of cut: 0.35mm Abrasive grain: diamond abrasive

Table 4 ELID grinding conditions

Workpiece	CVD-SiC(Φ 30mm \times 10mm)
Grinding devices	Rotary infeed grinding machine HSG-10A2[Fujikosi co.ltd]
Grinding wheel	Cast iron bond diamond grinding wheel: SD#325M100, SD#4000M100 Metal resin bond grinding wheel: SD#12000M75
Grinding conditions	Revolution of grinding wheel: 2000min ⁻¹ Revolution of workpiece: 300min ⁻¹ Grinding rate: 1um/min
ELID conditions	ED-910(90V,10A) [Fujidies co.ltd]

MRF 가공의 경우에는 표면조도의 현저한 개선은 이루어 지지 않았다. #4000(평균입경 4um), #12000(평균입경 1.5um) 슷돌 및 MR 유체(연마재 평균입경 1.5um)에 의한 가공단면의 PV 값은 각각

12.7nm, 2.7nm, 1.3nm 였다. MR 유체와 #12000 슷들에 포함된 연마재 입자는 거의 같은 크기이지만 MRF 가공이 연삭에 비해 연마흔적이 작았다. 이것은 인피드 방식의 연삭 가공은 다이아몬드 입자를 강제적으로 압입하여 재료를 제거하는데 비해 MRF 가공은 유체유동에 의한 전단응력을 받은 지립을 끌어당겨 재료를 제거하기 때문에 제거 메커니즘의 차이로 인한 것으로 생각된다. 가공면의 형상정밀도를 레이저 간섭계(Zygo 사 GPI)로 평가한 결과에 따르면, #4000 의 ELID 연삭 가공면 41.3nm PV, 9.8nm rms 에 대해 약 3 분간의 MRF 가공으로 21.2nm PV, 2.9nm rms 로 현저하게 개선되었다.

5. CVD-SiC 구면 미러의 경면연삭 및 연마^{4,5}

CVD-SiC 재에 대해서 ELID 연삭법에 의한 고품위, 고정밀도 가공을 해왔으나 기계적 가공에서 불가피한 가공물의 표면에 미소한 가공흔이 존재한다. 본 절에서는 CVD-SiC 재료를 초정밀 비구면가공기와 ELID 연삭법, 비접촉 기상 측정기(Table 5)를 이용하여 초정밀 구면 미러 가공을 수행하고 연삭흔적 저감을 위해 연마가공법과 연계한 표면가공 결과를 소개한다.

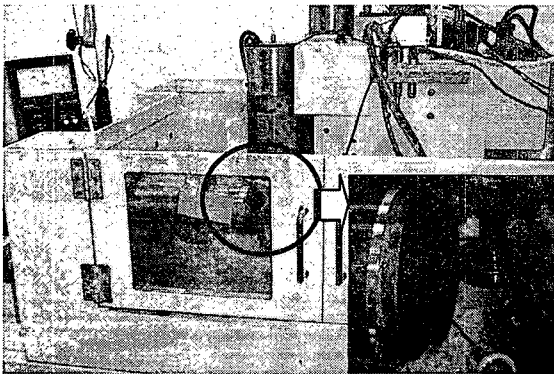


Fig. 9 Grinding system, ULG-100H3 for CVD-SiC material

ELID 연삭은 지립의 미세화와 가공시스템의 제어 정밀도의 미세화에 의해 초정밀 가공이 가능하게 되었으며 최근에는 스틱 슬립을 배제한 구동기구와 1nm 제어가 가능한 나노가공 시스템의 복합화에 따라 비약적인 가공정밀도의 향상이 이루어져 왔다. ELID 연삭법에서 사용되는 금속결합 슷들은 플라즈마 방전 트루인을 적용하여 슷들의 형상

을 초정밀 제어하는 것이 가능하게 되어 슷들의 운동체적의 전사가공을 나노 수준의 정밀도로 가공하게 되었으며, 가공중 기상에서 계측할 수 있는 계측기능을 부여하여 가공 및 계측의 복합화를 통해 나노정밀도급 정밀가공 시스템으로 진보하고 있다. ELID 연삭법에서 피가공물의 직경이 작은 경우와 연삭 슷 및 가공기가 소형인 경우에는 전극설치가 곤란하며, 초정밀 형상가공 시 슷들에 필요이상의 전해가 요구되지 않는 경우에는 전해 인터벌 드레싱법(Electrolytic Interval Dressing)을 적용할 수 있다. 구면 CVD-SiC 피가공물은 직경 Φ30mm, 설계형상 반경 R 300mm 로서 고정밀도 가공을 위해 1 path 마다 수초간 전해 인터벌 드레싱을 하였다. 사용 슷들의 트루인을 위해 Φ30mm, #325 청동결합캡형 슷들을 이용하여 피가공물 축의 회전중심에 설치한 트루어 슷들과 피가공물의 가공에 사용하는 슷들을 밀면서 플라즈마 방전 트루인 및 ELID 전해 트루인을 하고 슷들의 외경과 선단부 형상을 가공한다.

Table 5 Specification of non-contact type on-machine measurement system

AF part	Measuring limits	10mm
	Reproducibility	$\sigma = 5.6\text{nm}$
	Resolution	1nm
	Accuracy	-0.09~0.12um
	Working mechanism	Cross roller, gear mission
Microscopic part	Objective lens	×100
	CCD camera	400 thousand pixels

구면형상 가공은 #325, #1200, #4000 3 종류의 슷들을 이용하여 입도를 높여가며 경면가공을 하였다. 연삭가공 조건 및 사용스틀의 사양, ELID 전해 조건은 Table 6 과 같다.

구면형상의 정밀도를 향상시키기 위해서 비접촉식 기상 계측기를 이용하여 피가공물을 탈착시키지 않고 구면의 가공형상을 평가하였다. 기상 계측기를 이용하여 형상오차를 측정된 결과 #325, #1200, #4000 슷들에 대해서 각각, PV 2.46um, PV 1.141um, PV 0.179um 의 정밀도를 달성하였다. #4000 면에 대해서 3 차원표면형상측정기(Zygo Newview)를 이용하여 표면조도를 측정된 결과 Ry 49nm, Ra 3.5nm 였다. ELID 연삭후 가공표면에 생기는 미세

한 가공흔적을 저감하기 위해 우레탄 패드와 다이아몬드 입자를 이용하여 경면 연마하였다.

CVD-SiC 의 연마 제거량을 확인하기 위해 #4000 슷돌을 이용하여 평면으로 연삭된 가공면을 준비하여 연마실험을 수행한 결과, 가공제거량은 가공시간과 가공압력에 비례해서 증가하였으며, 표면조도는 가공시간 20 분 정도에서 Ra 3nm 로 안정되었다. 이와 같이 얻어진 연마조건을 구면형상에 적용하고 레이저 간섭계를 이용하여 측정한 결과, 구면형상 정밀도는 PV 55.907nm, 표면조도는 Ra 0.992nm, PV 6.911nm 로 우수한 가공면을 얻을 수 있었다.

Table 6 Grinding wheel and ELID grinding conditions

Workpiece	CVD-SiC, Φ 30mm Design spherical radius: R=300mm
Grinding devices	ULG-100H3[Toshiba co.ltd]
Grinding wheel	Cast iron bonded diamond grinding wheel: #325, #1200, #4000 Grinding wheel diameter: Φ 40mm
Grinding conditions	Revolution of grinding wheel: 10000min ⁻¹ Revolution of workpiece: 100min ⁻¹ Grinding rate: 1um/min Depth of cut: 0.5-2um Feed rate: 5~20mm/min
ELID power supply and lubricant	NZ-ED921 NX-CL-CG7
ELID conditions	Voltage: 40V, on/off pulse: 2uS/2uS, Gap to wheel: 0.1mm, Interval dressing period: 15s

Table 7 Experimental polishing conditions

Workpiece	CVD-SiC, Φ 30mm
Pre-grinding wheel	Cast iron bonded diamond grinding wheel: FC1#4000
Pad type	Urethane pad(plane type)
Abrasive compound	Diamond abrasive #8000 Supply 0.004g/min
polishing pressure	0.1Mpa / 0.2Mpa

6. 결론

기계적 및 광학적으로 우수한 물성을 가진 SiC 세라믹은 경면 미러 재료로서 최근 각광 받고 있다. 본 논문은 SiC 세라믹의 응용성을 높이고 광학에서 요구되는 고정도의 경면가공을 위해 효과적인

인 초정밀 가공법을 소개하였다.

1. 고강도 경량 미러용 SiC 세라믹의 경면가공에 있어서 실험 및 수치계산으로 변형량을 예측하고 ELID 연삭법을 적용 함으로서 형상정밀도 0.067um PV, 0.010um rms 의 미러면 가공이 가능하였다.
2. CVD-SiC 세라믹의 경면 연삭을 위해 자성유체 연마법(MRF)을 적용한 결과 경면 연삭 후 표면의 미세한 가공 변질층을 자성유체 연마로 제거하는 것이 효과적이었다.
3. #4000 슷돌을 이용한 ELID 연삭 가공면 41.3nm PV, 9.8nm rms 에 대해 약 3 분간의 자성유체 연마(MRF)가공으로 가공표면은 21.2nm PV, 2.9nm rms 로 현저하게 개선되었다.
4. CVD-SiC 세라믹의 경면 연삭을 위해 ELID 연삭 가공하고 우레탄 패드 및 다이아몬드 입자를 이용하여 실험한 결과, 형상정밀도는 PV 55.907nm, 표면조도는 Ra 0.992nm, PV 6.911nm 의 가공면을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Ohmori, H. and Nakagawa, T., "Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electrolytic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels," Annals of the CIRP, Vol.44, No.1, pp.287-290, 1995.
2. Dai, Y., Ohmori, H., Watanabe, Y., Eto, H., Lin, W. and Suzuki, T., "Subsurface properties of ceramics for lightweight mirrors after ELID grinding," International Journal of Japan Society of Mechanical Engineering(JSME) Series C, Vol.47, No.1, pp.66, 2004.
3. Eto, H., Ebizuka, N., Lin, W., Suzuki, T., Ohmori, H., Ebizukaki, T. and Makinouchi, A., "Ultraprecision Fabrication of Large Sintered SiC Mirror," Journal of Japan Society of Precision Engineering(JSPE), Proceedings of autumn conference, 2005.
4. Zhang, C., Kato, T., Li, W. and Ohmori, H., "A comparative study: surface characteristics of CVD-SiC ground with cast iron bond diamond wheel," International Journal of Machine Tools &

Manufacture, Vol.40, pp527, 2000.

5. Suzuki, T., Morita, S., Lin, W., Watanabe, Y., Uehara, Y., Tetsuya, N. and Ohmori, H., "ELID grinding of CVD-SiC sphere mirror and examination of finishing process," Journal of Japan Society of Precision Engineering(JSPE), Proceedings of spring conference, 2006.