

◆특집◆ 항공우주용 광학계의 초정밀가공기술 동향 및 적용 우주/천체 망원경용 대구경 미러의 초정밀 가공

곽태수*, 오오모리히토시****, 린웨이민***, 에토히로아키***, 우에하라요시히로***

Ultraprecision Machining of Large-aperture Mirror for Space and Astronomical Telescope

Tae Soo KWAK*, Hitoshi OHMORI****, Wemin Lin***, Hiroaki ETO*** and Yoshihiro UEHARA***

Key Words: Space and astronomical telescope(우주천체망원경), Large-aperture(대구경), ELID grinding(ELID 연삭), Sintered SiC(소결 탄화규소), Glass ceramic(글라스 세라믹)

1. 서론

인공위성에 장착되어 사용되는 우주망원경의 성능은 급속히 발전하고 있으며 높은 성능 수준을 만족하기 위해서 점차 대형화 추세에 있다. 우주망원경의 대구경(大口徑)화 및 경량화에 따라 높은 강성을 가진 경량 주경의 개발이 중요시되고 있다. 이러한 인공위성용 경량 미러의 소재로서는 금속이나 저팽창율 소재의 유리보다 가볍고 굽힘 강도가 수배 이상 높은 탄화규소(SiC)가 주목되고 있다.

소결 SiC 미러의 다듬질 공정은 유리 지립을 이용한 연마 가공이 주류이나 가공 능률이 낮고 요구되는 형상 정밀도를 달성하기 어려운 점이 있다. 따라서 운동 전사를 기초로 한 고능률 연삭에 의해 마이크론 이하의 형상 정밀도로 가공하고 최소한의 연마로서 다듬질 가공을 하는 방법에 의하면 가공 시간이 획기적으로 단축되므로 경비 절감에 크게 기여할 수 있다.¹

인공위성용 우주망원경 SiC 미러는 경량성과 강도를 확보하기 위해서 배면에 리브 구조로 구성되

어 전체적으로 살두께를 저감시키도록 설계되어 있다.

이와 같이 리브 구조의 미러를 연삭하는 경우에 연삭 저항에 의한 탄성 변형을 피하기 어렵다. 따라서, 미러의 가공 형상 정밀도를 높이기 위해서는 연삭저항 저감, 가공 변형의 예측 보정 가공 및 미러 가공용 고정 지그 등의 개발이 요구된다.^{1,2}

한편, 천문학 분야에서 적용되는 천체 망원경은 대형화가 진행됨에 따라 대구경 미러에 대한 요구가 매년 높아지고 있다. 구경(口徑) 1m 급 이상의 1매 미러를 이용한 천체 망원경이 설계되고 있으며, 북미에서는 차세대 천체 망원경으로서 1m 급의 분할 미러로 수십에서 수천 매를 조합하여 구경이 수십에서 수백 m 급의 초대형 천체 망원경을 구상하고 있다. 천체 망원경은 미러 표면의 고정도 형상 및 경면을 유지해야 하며, 재료는 높은 강도와 낮은 열팽창율을 보이는 글라스 세라믹(Zerodure)이 사용되고 있다. 글라스 세라믹 등의 대구경 미러 가공은 황삭 가공, 기상(機上)계측, 보정 가공, 연마 공정 순으로 진행된다. 그러나 보정 가공 후의 형상 정밀도와 표면 조도 상태에 따라 연마에 소요되는 시간과 다듬질 면의 정밀도가 크게 좌우된다.³

따라서 고강도 난삭 재료를 이용한 대구경 미러의 초정밀 가공을 위해서는 연마 전 공정까지의 가공 시간과 가공비를 저감하고, 형상 정밀도와 표

* 요업(세라믹)기술원 기술지원본부

Tel. (02) 3282-2449 FAX (02)3282-2470

E-mail tesukwak@kicet.re.kr

** RIKEN Materials Fabrication Laboratory

*** RIKEN VCAD Applied Fabrication Team

면 조도를 향상시키기 위해서는 최소한의 연마 공정으로 완성 가공하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 인공위성용 우주 망원경의 직경 360mm 대구경 SiC 구면 미러 가공과 대구경 천체 망원경에 적용되는 직경 300mm 의 글라스 세라믹의 구면 미러 제작에 있어서 ELID 연삭법을 적용하고 가공시 균일 고정용 지그 설계 및 제작 사례와 초정밀 대형 가공기에서의 기상 계측 기술 및 보정 가공 기술 적용 사례를 소개한다.

2. 기상 계측 시스템

광학 소자의 형상 측정법은 크게 측정법과 간섭계법으로 구분된다. 측정법은 프루브 또는 레이저 광 등을 이용하여 광학 소자 표면을 주사하여 측정하는 방법으로 다양한 형상에 대응이 가능하나 상대적으로 측정 시간이 길고 측정 정밀도에도 한계가 있다. 간섭계 법은 피조식 간섭계로 대표되는 여러 가지 형태의 간섭계를 이용하여 면 측정이 가능한 방법으로 단시간에 광학 소자의 광범위한 형상을 측정할 수 있으므로 고 능률 측정법으로 활용도가 높은 반면, 평면, 구면, 구면에 가까운 비구면 형상 등 측정 가능 형상이 제한되어 있으며 비교적 단순 형상의 측정에 유효하다.⁴

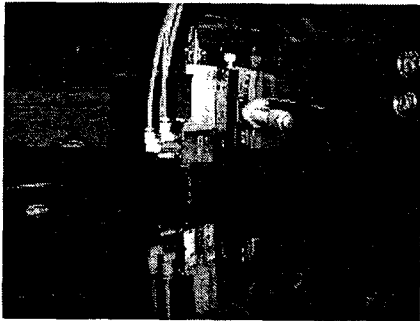


Fig. 1 On-machine measuring of spherical mirror by using probe type measurement system

구면, 비구면 가공에 있어서 계측 및 평가 기술은 피가공물의 가공 정도를 평가하고 보정하여 재가공함에 있어서 필수적이다. 특히 가공중에 반복적으로 측정이 이루어지는 초정밀 가공은 피가공물의 탈착에 따른 작업 손실과 피가공물의 회전축 변화로 인한 미소 변위 오차의 발생으로 인해 설계 형상대로 완성 가공하는데 상당한 시간적 경제

적 손실을 초래한다. 따라서 피가공물을 가공기상에 탑재하여 가공중에 형상 및 표면조도 등을 측정하고 평가하여 보정 가공 데이터로 피드백 시켜주는 기술이 요구되고 있다.

기상 계측 시스템은 이러한 고정도 피가공물을 위한 시스템 기술로서 연구 개발되어 실용화 되고 있다. Fig. 1 은 저접촉압(최소 50mgf)의 기상계측 프루브에 의한 대구경 우주망원경용 미러의 구면형상을 측정하고 있는 모습이다. 이 방법은 측정법으로서 대면적의 대상물을 측정하는데 유용하나 최대 경사각에 제한이 있고 측정하는데 다소의 시간이 요구되므로 간섭계법에 의한 레이저 간섭식 기상 측정법의 적용도 검토되고 있다.

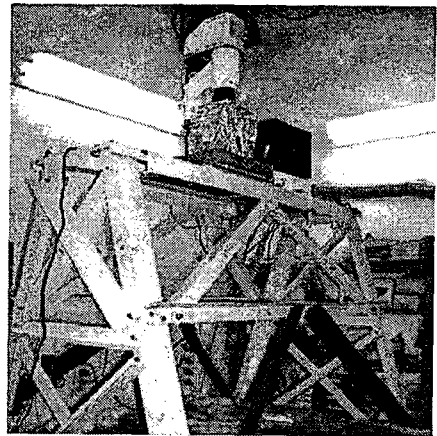


Fig.2 Spherical profile measuring of large-apertured mirror by using interferometer measurement system

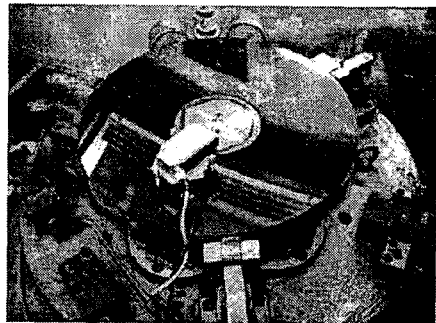


Fig.3 Surface roughness measurement by mobile AFM

Fig. 2 는 대형 비구면 가공기에 탑재되어 레이저 간섭 측정기로 대구경 천체망원경용 구면미러를

측정하고 있는 사진이다. 이와 같이 간섭호 해석에 의한 측정법은 외란 요인을 제거해야 하므로 접촉식 및 비접촉식 측정법을 조합한 계측 평가 기술이 요구되고 있다. Fig. 3은 미러 구면의 가공면 조도를 기상에서 이동식 원자간력 현미경을 이용하여 계측한 사진이다. 나노급 표면조도를 측정하기 위해서는 가공기상에서 AFM 을 이용함으로써 가능하다.

3. 우주 망원경용 경량 미러

우주망원경용 대구경 경량미러는 대형 소결 SiC 를 사용하여 구경 360mm 로 설계 및 제작되었다. SiC 미러의 배면 구조는 경량화를 위해 Fig. 4 와 같이 4.5mm 의 삼각형 리브 구조로 되어 있으며, 표면의 미러 구면 반경은 2,380mm 로 되어 있다.

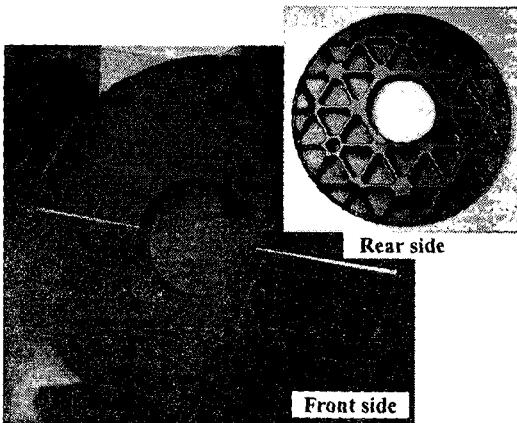


Fig. 4 Configuration of SiC light-weight mirror

SiC 미러 구조체에 대해서 유한요소 해석을 통해서 법선 방향의 연삭저항이 40N 이며, 0.5um 정도 변형량이 생긴다는 것을 확인한 바 있다.³⁵ 미러의 형상정밀도를 높이기 위해서 Fig.5 와 같이 정압서포터로 구성된 정압 지그를 설계 제작하여 사용하였다. 정압 지그는 다수의 삼각형 리브의 중심에 배면에서 정압서포터로 지지하므로써 가공 시 연삭 저항에 의한 변형을 최소화하도록 설계되었다. 정압서포터는 작동시 피스톤 로드와 접촉 저항을 400g 정도로 최소화 하여 피가공물과 가볍게 접촉한 상태에서 또 다른 유압 계통에 의해 잠기게 되는 독특한 구조로 되어있다.

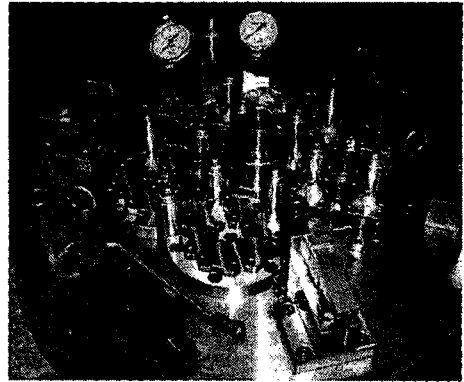


Fig. 5 Jig of static pressure supporter for SiC light-weight mirror machining

본 실험에 사용된 가공기는 정압구동에 의한 초정밀 로터리 연삭반 RG-800(Nagase)이다. 이 장치는 10nm 의 위치제어 분해능으로 제어되며 직경 800mm 의 턴테이블이 장착되어 있다. 사용한 슛들은 폭 10mm, 직경 305mm 의 주철본드 다이아몬드 슛들이며, 입도 #325, #1200, #4000 의 3 종류를 사용하였다. 다이아몬드 지립의 직경은 각각 50um, 13um, 4um 이다. 전해드레싱 전원은 ELID 전용 전원 ED621 을 사용하고, 연삭액은 CG-7 을 50 배 희석하여 사용하였다.

구면 미러는 턴테이블에 장착하여 동심축을 중심으로 회전시키면서 슛들이 공구 궤적을 따라 이동하며 연삭하게 된다. 슛들의 회전축과 피가공물의 회전축이 만나 이루는 평면상에서 반원형의 슛들을 피가공물의 구면 원호 궤적을 따라 이동하면 포락 원리에 의해 구면이 형성된다. 슛들의 선단 반경을 r , 폭을 W , 미러의 구경을 D , 미러의 구면 반경을 R 이라고 하면 기하학적 관계로부터 아래와 같은 부등식이 성립한다.

$$r < W \times R / D$$

W , D 와 R 의 값을 대입하면 $r < 66.1mm$ 가 되므로 슛들의 마모를 고려하여 슛들의 선단 반경을 r 60mm 로 제작하였다. 황삭 가공 시 3 종류의 연삭 슛들은 플라즈마 방전 트루인을 실시하고, 다듬질 공정에서 사용한 입도 #1200, #4000 연삭 슛들에 대해서는 트루어로서 입도 #325 의 청동본드 다이아몬드 슛들을 사용하여 트루인을 실시하였다.

연삭에 앞서서 슛들의 초기 전해 드레싱을 15 분

정도 행하였다. Table 1 은 실험에 수행된 연삭조건 표이다. 또한 피가공물의 측정을 위해 가공기에 기상계측 시스템인 촉침식 변위 프루브(검출정밀도 10nm)을 탑재하여 다듬질 가공이 완성된 피가공물의 형상을 측정하였다. 측정된 데이터는 보정 가공에 이용할 수 있다.

Table 1 ELID grinding conditions for SiC mirror

Grinding Wheel	Cast iron bond diamond grinding wheel: SD#325, SD#1200, SD#4000,	
Dressing conditions	Non-loading voltage: 70V, Peak current:10A, Pulse on/off: 2us	
Grinding conditions	Wheel revolution	1000rpm
	Table revolution	12rpm(#4000) 16rpm(#325,#1200)
	Feed rate	2mm/min(#4000) 5mm/min(#325,#1200)
	Depth of cut	0.6um(#4000),1.5um(#1200), 5um(#325)

가공은 #325, #1200, #4000 입도의 순서로 연삭하였다. 미리 면의 일부에 방사상의 모양이 남아 있는 것이 발견되었으나 전체적으로 양호한 경면 가공이 된 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6 은 기상계측을 수행한 결과 데이터이며, 미리 면의 형상 오차(PV 값)가 0.9um 이하로 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

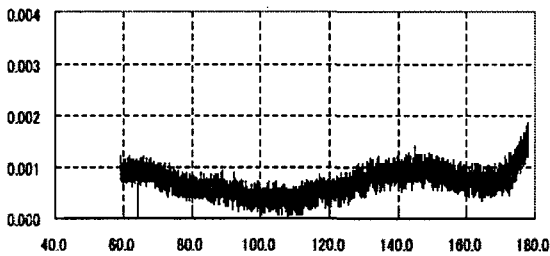


Fig. 6 On-machine measuring results after #4000 ELID grinding

4. 천체 관측용 대구경 미러

대구경 천체 관측용 망원경의 재료로 높은 강도와 저열팽창률을 보이는 글라스 세라믹(Zerodure)이 사용되고 있으나 해당 재료는 가공성이 매우 낮은 재질로서 가공에 장시간이 소요된다. 따라서 ELID

연삭법을 적용한 고효율 가공 실험을 수행하기 위해 직경 300mm 의 시편을 설계 및 제작하여 시험하였다. 사용 장비는 고강성 문형(門形)구조로 3축 동시 제어가 가능하며 각 직선축의 위치제어 분해능이 10nm 인 초정밀 대형 4축 가공기를 사용하였다(Fig.7).

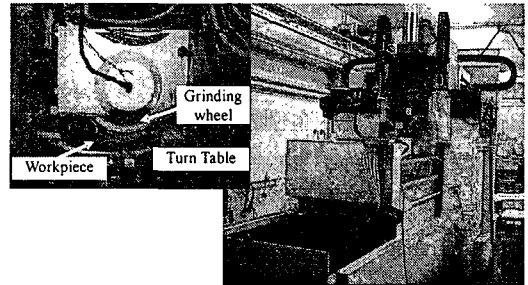


Fig. 7 Ultra precision large-sized 4 axis machining machine using in grinding of zerodure mirror Φ 300mm

본 실험 장치에 ELID Unit 을 장착하고 Table 2 와 같은 연삭가공 조건으로 실험하였다. 가공을 위한 숫돌은 입도 #325, #1200, #2000 및 #4000 의 주철본드 다이아몬드 숫돌을 사용하였다.

Table 2 ELID grinding conditions for zerodure mirror

Grinding Wheel	Cast iron bond diamond grinding wheel: SD#325, SD#1200, SD#2000, SD#4000	
Dressing conditions	Non-loading voltage: 90V, Peak current:5A, Pulse on/off: 5us	
Grinding conditions	Wheel revolution	1200rpm
	X,Y direction pitch	1mm(#325) 0.6mm(#1200,#2000) 0.1mm(#4000)
	Feed rate	2mm/min(#4000) 5mm/min(#325,#1200)
	Depth of cut	10um(#325),5um(#1200), 2um(#2000),1um(#4000)

숫돌은 가공 전에 플라즈마 방전 트루인 법에 따라 숫돌 선단의 노우즈 반경을 10mm 로 형성하였다. 입도별 연삭 가공 후 접촉식 기상계측 프루브를 이용하여 형상 오차를 측정하고 이동식 원자간력 현미경(Mobile AFM)을 이용하여 피가공물을 탈착하지 않고 표면 조도를 측정하였다. 이러한 측정 결과를 이용하여 보정 가공 데이터를 작성하여

가공하였다. 숫들의 이동 방향이 숫들의 회전 방향과 수직한 연삭과 수평한 연삭이 있으나 본 실험에서는 숫들의 마모와 변형을 고려하여 수평 연삭을 채용하였다.

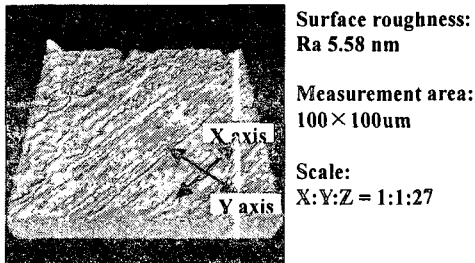


Fig. 8 surface measurement results by using mobile AFM

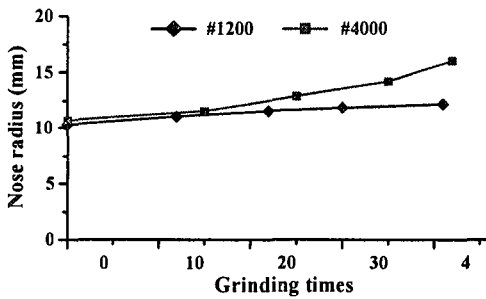


Fig. 9 Transition of nose radius of grinding wheel as grinding times

최적 가공 조건을 검토하기 위해서 Table 2의 연삭 조건을 변화시켜 가공을 수행하고 이동식 AFM을 이용하여 표면 조도를 기상에서 측정하였다. Fig. 8은 #4000 숫들로 연삭 후 가공 표면을 측정된 결과이다. 이러한 가공 조건의 최적화에 의해 국소 영역에서 평균 거칠기 Ra 5.58nm 까지 얻을 수 있었다. 또한, 숫들 마모에 의한 형상정밀도의 저하가 예상되므로 가공 경로에 따른 숫들의 선단 노우즈 반경의 변화를 관찰하였다. Fig. 9는 가공 경로의 횟수에 따라 #1200과 #4000 숫들의 선단 노우즈 반경을 측정된 결과이다. 숫들의 입도 번호가 높을수록 숫들의 마모가 커지고 있는 것을 알 수 있으며 본 실험 결과로부터 최다 가공 경로의 횟수를 결정할 수 있었다. 이와 같은 가공 기초 데이터로부터 Table 2의 최적 조건을 찾을 수 있었다.

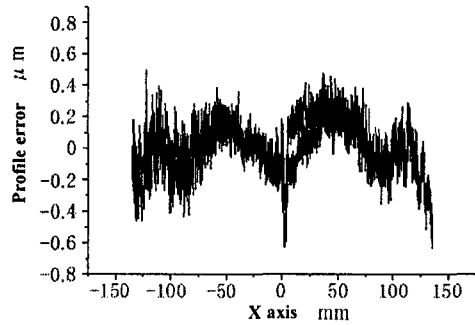
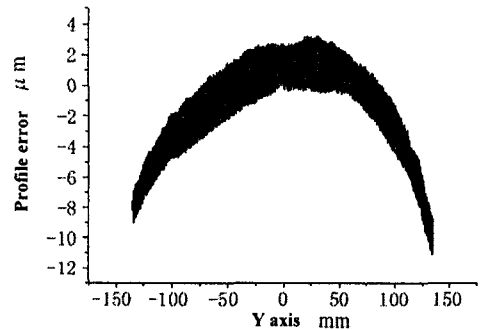
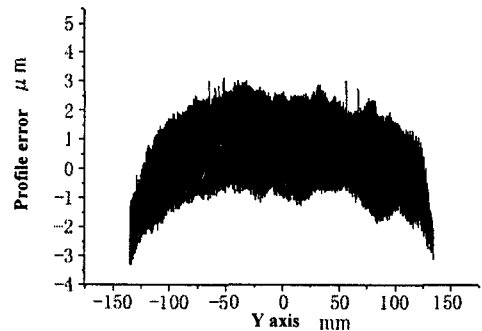


Fig. 10 Profile error in X axis direction after compensation grinding



(a) Before compensation grinding



(b) After compensation grinding

Fig. 11 Profile error in Y axis direction after compensation grinding

다음은 가공 경로에 따른 형상 정밀도를 측정하였다. 4 종류의 연삭 숫들을 이용하여 가공한 후 기상계측 프루브를 이용하여 미리 구면의 형상을 측정하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 #4000 숫들의 연삭 가공 후 형상 오차를 측정된 결과이다. Fig. 10은 X축 방향으로 보정 가공 후의 측정 결과이며 Fig. 11은 Y축 방향으로 보정 가공을 수행하기 전과 후

각각의 결과이다. X 축 방향의 형상 오차는 보정 가공 전과 최종 보정 가공 후에 약 1 μ m 의 오차가 발생하여 #4000 슛들을 이용한 X 축 방향의 가공에서는 보정 가공에 의한 형상 정밀도가 크게 향상되지는 않았다.

Y 축 방향의 보정 가공에 있어서는 보정 가공 전이 약 16 μ m 이었으나 마지막 보정 가공을 한 후에는 약 6 μ m 으로 형상정밀도가 60%이상 개선되었다. 또한, 미러 전체면의 형상을 측정하기 위해서 기상 간섭 측정을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 12 과 같다. 기상프루브 측정 결과와 마찬가지로 Y 축 방향의 형상정밀도가 낮은 것을 확인할 수 있으며 일부 간섭호의 불연속 영역이 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. 가공면의 평균거칠기는 약 12nmRa 였다. 직경 300mm 의 글라스 세라믹의 대구경 구면 미러의 초정밀 ELID 연삭 실험을 수행한 결과, 형상정밀도는 개선이 요구되는 수준이나 기상 프루브타입 형상측정기, 이동형 원자간력 현미경, 기상간섭 측정 등 각종 기상계측 시스템의 유효성을 확인할 수 있었으며 이를 이용한 보정 가공을 통해 형상정밀도가 향상된 것을 확인하였다.

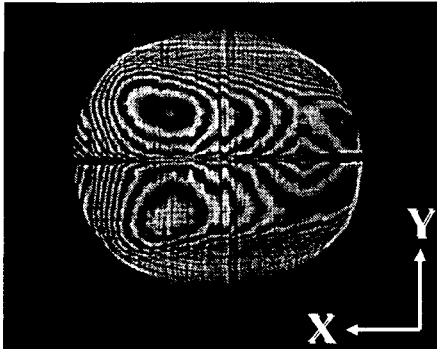


Fig. 12 Measured results for spherical profile by interferometer on-machine system

5. 결론

우주/천체용 망원경에 활용도가 높은 대구경 미러의 초정밀 경면 가공 기술을 소개하였다. ELID 연삭법 및 기상 계측 기술, 전용 지그 개발 등에 의한 고효율 가공 기술을 개발하고 초정밀 대형 가공기에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인공위성용 대구경 경량 미러의 고능률 연삭 경면 가공을 실현하기 위해서 구경 360mm 의 소결 SiC 구면 미러를 제작하고 정압서포터 지그 개발 및 ELID 경면 연삭법을 적용한 결과 연삭 가공으로 PV 값 0.9 μ m 이하의 형상 정밀도를 얻을 수 있었다.

2) 천체용 직경 300mm 의 글라스 세라믹의 대구경 구면 미러의 초정밀 ELID 연삭 실험을 수행한 결과, 기상 프루브 타입 형상측정기, 이동형 원자간력 현미경, 기상 간섭 측정법을 적용하여 기상계측 시스템의 유효성을 확인할 수 있었으며, 이를 이용한 보정 가공을 통해 형상 정밀도가 향상되었다.

참고문헌

1. Ohmori, H., Lin, W., Dai, Y., Eto, H., Suzuki, T. and Ebizuka, N., "ELID grinding of 360mm on Diameter CVD-SiC Light-weight Mirror," proceedings of the 40th ELID Seminar, Vol.40, pp164-165, 2004.
2. Kwak, T. S. and Ohmori, H., "Nano-level Mirror Surface Machining Technology for SiC Ceramics Mirror," Korea Society of Precision Engineering, Vol.23, No.6, pp.29-36, 2006.
3. Morita, S., Guo, J., Lin, W., Ohmori, H., Watanabe, Y. and Satoh, S., "An Experiment of Ultra-precision ELID Grinding for Large Astronomical Telescope Mirror," proceedings of the 40th ELID Seminar, Vol.40, pp.166-167, 2004.
4. Muranaka, M., "Technology and Application of Plastic lens System," CMC Books, pp.174, 2003.
5. Ohmori, H., Dai, Y., Suzuki, T., Lin, W., Katahira, K., and Ito, N., "Force Characteristics and Deformation Behaviors of Sintered SiC during ELID Grinding Process," Key engineering materials, Vol.238-239, pp.65-70, 2003.