

망원경 거울의 효율적 가공을 위한 정량적 연삭공정 제어모델

Quantitative grinding process control model for efficient fabrication of telescope mirrors

한정열^{1,2,3}, 김석환^{1,2}, 김건희³, 김현배³, 김대욱¹, 김주환³

¹우주광학실험실, 연세대학교 천문우주학과

²자외선우주망원경연구단, 연세대학교

³초정밀가공실, 한국기초과학지원연구원

eqhan@hanmail.net

현재 허블 우주망원경과 같은 우주광학 망원경 목표 사양은 형상정밀도로서 약 $1/20 \lambda$ rms, 표면 조도(Ra)로서 약 1~2 nm급을 요구하고 있다. Ra의 감소는 초점면에서의 세기증가, 수차감소 등 광학적 특성 증진을 위해 필수적이다.

이러한 목표 경면을 얻기 위해서는 일반적으로 연삭(Grinding) - 래핑(Lapping) - 연마(Polishing) - Figuring 등의 가공 공정을 따른다. 연삭은 소재 표면에 machine 마크 (약 20 μm), subsurface damage (약 1 μm) 등 거친 표면을 만든다. 본 연구에서는 표면 조도(Ra)를 20 nm급으로 만드는 것과 Ra 예측을 위한 모델을 예측 정확도가 약 20 nm가 되도록 만듦으로써 정밀 CNC(Computer Numerical Control) 연삭 가공을 통하여 정량적 모델에 근거한 공정제어를 하여 연삭단계에서 바로 연마 단계의 가공을 수행할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하고 있다.

현재까지 정밀 CNC 연삭 가공에서는 세라믹⁽¹⁾, 다결정 SiC⁽²⁾, 알루미늄(Al_2O_3)⁽³⁾, TiC⁽³⁾ 등과 같은 소재를 사용한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 본 연구에서는 대형 광학 망원경이나 우주광학 탑재체의 광학 소재로써 주로 사용 중인 Zerodur 소재를 사용하여 정밀 연삭 가공에 관한 연구를 하였다. 또한 모델⁽⁴⁾⁽⁵⁾이나 실험⁽⁶⁾ 데이터를 통하여 최적의 Ra값을 얻고자 하는 연구는 진행되었으나, 본 연구에서는 실험 데이터로 모델을 만들고 결과 Ra값이 입력됨에 따라 변하는 모델로부터 결과 Ra값과 예측 Ra값을 비교하며 반복하는 정량화된 공정제어를 하였다.

목표 비구면은 ZEMAX 소프트웨어를 사용하였으며, Zerodur 직경 20 mm, 100 mm에 대해 곡률반경은 각각 160.6545 mm, 812.388 mm, 비구면 계수는 -5.9513, 비구면도는 0.003425 mm의 사양을 가지도록 설계하였다.

실험 장치는 한국기초과학지원연구원에 있는 Nanoform 600 연삭 가공기를 사용하였으며, 측정 장치로는 접촉식 측정 장치로서 Form Talysurf, 비접촉식 측정 장치로서 NT 2000을 사용하였다.

공정제어용 연삭 모델을 구성하기 위한 초기 연삭실험조건은 연삭 휠 입자의 크기(Grain size; GS)가 16, 9, 6 μm , 연삭 휠 직경의 크기는 10, 75 mm, 이송속도(F)는 0.5 ~ 32 mm/min, 공작물 회전 속도(Vp)는 100 ~ 400 rpm, 연삭 깊이는 1 ~ 16 μm , 휠 회전 속도는 1500 ~ 8500 rpm 등의 변수 범위를 가지고 실험 하였다. 이 중 직경이 작은 휠에 대해 직경이 큰 휠의 Ra값이 약 54% 큰 값을 나타내고 있어 직

경이 큰 휠에 의한 결과만을 이용하여 모델을 구성하였다. 또한 회귀 분석에 의하면 직경이 큰 휠을 사용한 실험에서는 실험조건 중 결과 Ra값에 미치는 영향이 연삭 깊이와 휠 회전속도가 가장 작게 분석되었다. 따라서, 두 변수는 모델구성을 위한 변수에서 제외하였다. 즉, 본 연구에서는 공정을 제어하기 위해서 GS, F, VpL(공작물 회전 선속도)등 세 가지 변수들을 택했다. 모델 구성을 위한 변수로는 세 변수 모두가 회귀분석모델에 적용되었고, 경험적 모델을 만들기 위해서는 두 변수 F와 VpL에 의해 두 모델을 만들었다.

초기 연삭 모델을 바탕으로 공정제어 실험을 위한 연삭 조건을 계획 하였다. 즉, 점차로 좋은 Ra값을 줄 것으로 예측되는 실험을 하도록 회귀 분석 모델에 의한 F와 VpL 그래프에서 Ra값이 120 nm에서 약 20 nm 간격으로 감소함에 따른 실험 계획을 세웠다. 계획에 의한 연삭조건은 F가 10.5 mm/min, Vp가 400 rpm에서 F는 2.5 mm/min, Vp는 80 rpm 씩 일정한 간격으로 감소하여 총 17회의 개별조건이다.

3개의 모델에서 각각 예측된 Ra 값들과 측정된 Ra 값과의 차이를 한 개의 모델로 만들고 편차를 막대(bar)로 표시한 것을 실험이 진행됨에 따라 그래프로 표시하면 그림 1과 같다. 실험이 진행되면서 3개의 모델에서 예측하는 Ra값은 실험결과 값이 들어옴과 동시에 계속하여 진화하며 그 다음 실험결과 값을 예측하였다. 실험이 진행됨에 따라 12회 이상에서는 ± 20 nm 이내로 차이가 줄어들고 있다. 이 결과는 10회 내외의 연삭 가공을 통해서도 정량적 공정제어를 통하여 목표로 하는 Ra값에 도달할 수 있다는 것을 의미한다.

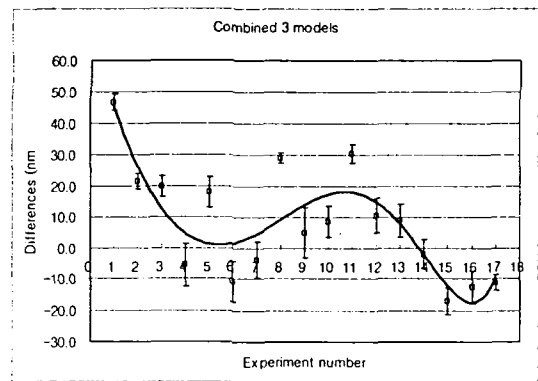


그림 1. 실험 진행에 따른 모델 예측 Ra 값과 측정 Ra 값과의 차이

결과적인 Ra값은 약 36 nm의 최소값을 얻었다. 모델들에 의하면 Ra값을 GS가 4.5 μ m인 휠을 사용했을 때 약 18.5 ± 11.7 nm로 예측한다. 연삭 공정의 효율 향상뿐 아니라 연삭에서 20 nm대의 표면 조도를 나타내 준다면 정량적인 모델에 의해 연삭과 연마가공 사이의 래핑 가공공정을 수행하지 않아도 되는 획기적인 공정제어를 의미한다.

1. Hyun-surk Kim & Dae-gil Lee, "Mirror surface grinding of ceramics using a three-axis precision CNC grinding machine", Int. J. Mach. Tools Manufact 37, 10, 1499-1510 (1997).
2. Ling Yin, E.Y.J. Vancoille, L.C. Lee, H. Hyang, K. Ramesh, X.D. Liu, "High-quality grinding of polycrystalline silicon carbide spherical surfaces", WEAR, Article in press (2003).
3. Hyun-surk Kim, Kwang-seop Jeong & Dai-gil Lee, "Structural design and evaluation of the three axis ultra-precision CNC grinding machine", 대한기계학회논문집 19, 12, 3392-3402 (1995).
4. T. Warren Liao, L.J. Chen, "A neural network approach for grinding processes: Modelling and optimization", Int. J. Mach. Tools Manufact 34, 7, 919-937 (1994).
5. Gunhoi Kim, "Evaluation of pre-estimation model to the inprocess surface roughness for grinding operations", 4, 2, 121-128 (1998).
6. H. Ali Razavi, Thomas R. Kurfess & Steven Danyluk, "Force control grinding of gamma titanium aluminide", 43, 185-191 (2003).