

## 우주망원경용 비구면 반사경 표면조도 향상을 위한 진화형 수치제어 연삭공정 모델

한정열<sup>1,2,3†</sup>, 김석환<sup>1,2</sup>, 김건희<sup>3</sup>, 김대욱<sup>1</sup>, 김주환<sup>3</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 천문우주학과 우주광학연구실

<sup>2</sup>연세대학교 자외선우주망원경연구단

<sup>3</sup>한국기초과학지원연구원 초정밀가공실

## NOVEL CNC GRINDING PROCESS CONTROL FOR NANOMETRIC SURFACE ROUGHNESS FOR ASPHERIC SPACE OPTICAL SURFACES

Jeong-Yeol Han<sup>1,2,3†</sup>, Sug-Whan Kim<sup>1,2</sup>, Geon-Hee Kim<sup>3</sup>,  
Dae-Wook Kim<sup>1</sup>, and Ju-Whan Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Space Optics Laboratory, Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Center for Space Astrophysics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>3</sup>Ultra-Precision Engineering Laboratory, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

E-mail: eqhan@hanmail.net

(Received February 9, 2004; Accepted April 3, 2004)

### 요 약

우주망원경용 비구면 반사경 가공 공정은 고정입자 연삭, 자유입자 래핑, 연마의 순서를 따른다. 숙련공에 의한 경험적 공정조절에 의해 목표 비구면을 가공하는 전통적 연삭공정에서는 수  $\mu\text{m}$  높이의 표면 밀 손상을 남기며 뒤이은 자유입자 래핑 및 연마 공정에서 이를 제거하며 가공한다. 본 연구는 컴퓨터 수치 제어 연삭 공정진화 모델을 개발하여, 연삭가공을 통해 반사경 표면조도 최소 40nm 이하, 가공 예측정확도 20nm 급을 이루었다. 구체적인 방법론으로 초정밀가공기의 연삭모듈을 이용하여 연삭 휠 입자의 크기, 이송속도, 공작물 회전선속도 등 연삭 변수를 변화시키며 직경 20, 100mm Zerodur 소재를 초기 연삭하였다. 초기 연삭 변수와 측정된 표면조도와와의 관계를 경험적 해석과 다 변수 회귀분석 해석 방법을 통하여 공정조절용 수치 연삭 모델을 구성하였다. 정량적 공정제어는 입력된 연삭변수들로부터 가공 후 표면조도를 예측하고, 측정된 표면조도를 이용하여 수치연삭 모델을 개량한 후 다음 가공에서 측정될 표면조도를 예측하는 순으로 반복 진행되었다. 본 연구에서는 CNC 연삭공정조절로부터 최소 평균 표면조도 36nm, 예측정확도  $\pm 20\text{nm}$ 를 얻었다. 이 연구결과는 정량적 연삭공정제어 모델을 사용하여 자유입자 래핑 공정을 수행할 필요 없이 연삭에서 직접 연마 공정으로 진행할 수 있는 획기적인 공정 효율 향상을 의미한다.

### ABSTRACT

Optics fabrication process for precision space optical parts includes bound abrasive grinding, loose abrasive lapping and polishing. The traditional bound abrasive grinding with bronze bond cupped diamond wheel leaves the machine marks of about 20  $\mu\text{m}$  rms in height and the subsurface damage of about 1  $\mu\text{m}$  rms in height to be removed by subsequent loose abrasive lapping. We explored an efficient quantitative control of precision CNC grinding. The machining parameters such as grain size,

†corresponding author

work-piece rotation speed and feed rate were altered while grinding the work-piece surfaces of 20-100 mm in diameter. The input grinding variables and the resulting surface quality data were used to build grinding prediction models using empirical and multi-variable regression analysis. The effectiveness of such grinding prediction models was then examined by running a series of precision CNC grinding operation with a set of controlled input variables and predicted output surface quality indicators. The experiment achieved the predictability down to  $\pm 20$  nm in height and the surface roughness down to 36 nm in height. This study contributed to improvement of the process efficiency reaching directly the polishing and figuring process without the need for the loose abrasive lapping stage.

*Keywords:* surface grinding, precision space optics, CNC grinding, surface roughness, quantitative process control

## 1. 서 론

지상 및 우주배치 천체망원경 비구면 광학계 가공은 두 단계로 나뉜다(Texereau 1957, Kim, David & David 2003). 첫 번째 단계에서는 가공이전의 소재 표면 및 모서리를 다듬는 초기가공이 후 면의 표면조도(Ra)를 수  $\mu\text{m}$  급으로 다듬기 위하여 속박된 연삭입자(bound abrasive)에 의한 연삭가공(Pierre 2003a)을 최적 구면으로 가공한다. 두 번째 단계에서는 연삭가공의 특성상 발생하기 쉬운 표면 결함을 보상하고 소재 표면조도를 수백 nm급(Taniguchi 1994)으로 만들어주기 위해 공구와 소재사이의 자유입자 이장(slurry)이 소재 표면의 물질을 제거하는 공정(Pierre 2003, Gatzen & Chris 1997)인 자유입자 래핑(loose abrasive lapping)과 최종 목표 비구면 형상을 만들고 표면조도를 수 nm 급(Taniguchi 1994)으로 만들어주기 위한 연마 공정이 있다. 표면조도는 중심선 평균 거칠기를 나타내며 한 기준길이내의 산과 골의 높이와 깊이를 기준선을 중심으로 평균한 값으로 표면 거칠기를 나타내는 가장 보편화된 파라미터이다(Hecker & Liang 2003).

연삭가공은 부서짐(fracture) 과정에 의한 가공공정(Shen et al. 2003)중 하나로써, 많은 가공변수가 퍼 가공물에 복잡하게 영향을 주는 가공공정이므로(Chen, Allanson & Rowe 1998) 전통적인 연삭 가공에서는 숙련된 가공자가 경험에 의한 공정제어에 의해 최소의 표면조도를 줄 것으로 예상되는 변수들을 설정하여 연삭이 이루어지고 있다. 따라서 숙련된 가공자 이외에는 가공하기 어렵고, 목표구면으로의 도달시간 및 가공의 결과를 정량적으로 예측하기 어렵다는 단점이 있으므로 이를 보완하기 위한 정량적 예측모델의 연구가 진행되어왔다. 즉, 신경망(neural network)모델(Kim 1998), 뉴로-퍼지(neuro-fuzzy) 모델(Kim 1998), 통계 분포(stochastic distribution) 모델(Zhou & Xi 2002) 등의 연구들이며, 예측정확도를 표 1에 정리하였다.

선행연구에서 사용된 방법들은 수치계산의 작업량이 많기 때문에 매 작업 시 가공자가 신속하게 가공변수 설정을 수행하기 어렵다는 단점이 있었고, 모델에 사용된 1개의 연삭변수로는 다수의 가공변수에 의해 영향 받는 연삭가공에서 표면 예측정밀도를 높이는 데 한계가 있었으며, 연삭모델을 고정하여 매 연삭가공 후 측정된 표면조도의 연삭모델에 대한 영향을 무시하였기 때문에 공정조절

표 1. 표면조도 예측모델별 예측정확도 비교표.

모델	연삭 변수	측정 표면조도 범위(nm)	예측오차 범위(nm)	참고문헌
신경망모델	연삭 깊이	120~590	-10 ~ +300	Kim(1998)
뉴로-퍼지 모델	연삭 깊이	300~400	+50 ~ -70	Kim(1998)
통계분포 모델	휠 입자모양 변화	290~2730	+210 ~ +230	Zhou & Xi(2002)

표 2. 정밀 CNC 연삭 소재별 최소 표면조도 수치.

소재	최소 표면조도(nm)	연삭 방법	참고문헌
세라믹	6.5	ELID	Kim & Lee(1997)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiC	6.5	3축 평면연삭기	김현석 등(1995)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	600	실린더 형 연삭기	김원일과 강재훈(1991)

표 3. Zerodur 소재 사용 예(1970~2003).

연도	망원경 이름	직경
1970-1975	MPIA (Max Planck Institute for Astronomy)의 3개 망원경	1.3m, 2.3m, 3.6m
1984	스페인의 MPI	3.5m
1986	ESO의 NTT (New Technology Telescope)	3.6m
1990	Chandra	24 실린더형 반사경
1986-1990	KECK 1	1.8m (×42개 육각모양 단편)
1991-1993	KECK 2	상동
1993-1996	ESO의 VLT (Very Large Telescope)	8.2m
1993-1996	HET (American-German Hobby Eberly Telescope)	1.8m(6각형, 전체 9.5m)
1997	SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy)	2.7m
1999-2002	GTC (Gran Telescopio Canaria)	42개 반사경(전체 10.4m)
1997/2002	미국의 Magellan	1.7m 부경(전체 6.5m)
2002	NASA의 Constellation X	샘플 가공
2002-2003	VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)	4.1m

정확도를 증진시키기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 통계적 분석방법인 회귀분석(Feng & Wang 2002) 및 경험적 자료해석 방법을 이용하여 (1) 수치계산 속도가 빠르며, (2) 현상에 대한 다 변수 해석이 가능하고, (3) 연삭 공정에 따라 지속적으로 진화하는 모델을 개발하였고 실험을 통하여 효용성을 입증하였다.

## 2. 정성적 연삭공정제어

정밀 CNC 연삭 가공 선행 연구에서는 TiAl<sub>3</sub>(Sugishita, Kawabata & Kumamoto 2003), TiAl- $\gamma$ , Cubic Boron Nitride(CBN)(Ali Razavi, Kurfess & Steven 2003), 세라믹(Kim & Lee 1997), 다결정 SiC(Ling et al. 2003, 김원일과 강재훈 1991), 알루미늄나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)(김현석 등 1995), TiC(김현석 등 1995), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(김원일과 강재훈 1991) 등의 물질을 사용하여 표 2에 소개한 바와 같이 수 nm에서 수 백 nm에 이르는 다양한 표면조도를 이루었다. 그러나 표 3(Pierre 2003)에 열거된 바와 같이 1970년 이후 우주망원경 및 대구경 망원경의 반사경 소재로 Zerodur가 사용되었으나 이를 사용한 나노미터 범위의 연삭 특성에 관한 연구는 전무하였다.

표 4. 초기 연삭실험 조건.

연삭 변수	수치 범위
연삭 휠 입자의 크기(G)	16, 9, 6 $\mu\text{m}$
이송속도(F)	0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 32 mm/min
공작물 회전 속도( $V_P$ )	240, 320, 400 rpm
휠 회전 속도( $V_t$ )	1500, 3000, 4500, 6000, 7500, 8500 rpm
소재 직경( $D_p$ )	10, 75 mm
연삭 휠 직경( $D_t$ )	20, 100 mm

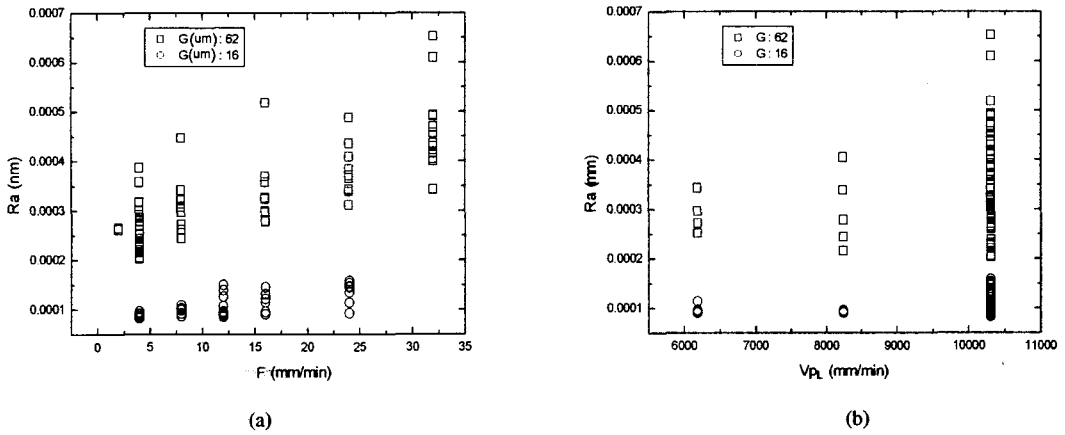


그림 1. 초기연삭실험의 연삭 변수들 중 이송속도(F), 공작물 회전선속도( $V_{PL}$ )와 측정된 표면조도의 상관관계: (a) F와 Ra, (b)  $V_{PL}$ 과 Ra.

본 연구에서는 비구면 계수  $-5.95$ , 비구면도(asphericity)  $0.0034\text{mm}$ 인 직경 20, 100mm Zerodur 소재를 사용하였다. 미국 Precitech사의 Pneumo-K001 Nanoform 600 Diamond Turning Machine(DTM)의  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$  연삭 모듈(Grinding module)을 사용하여 소재를 가공하였고, 접촉식 측정 장치인 Rank Taylor Hobson사의 Form Talysurf, 비접촉식 측정 장치인 Veeco사의 NT 2000을 사용하여 소재 표면 3 ~ 7곳의 서로 다른 위치에서 표면조도를 측정하였다.

초기 정성적 연삭실험조건은 표 4에 제시된 바와 같이 절삭 실험의 경험과 연삭기의 가공 한계 범위 내에서 조절되었다. 이 같은 정성적 공정제어 실험에서 총 121회의 이송속도(F), 공작물 회전선속도( $V_{PL}$ )와 표면조도와의 관계를 연삭 휠 입자의 크기(G)에 따라 그림 1에 나타내었다. 또한, 연삭 휠 입자의 크기가 표면조도와  $Ra \approx 0.02G$ 의 비례관계에 있고, 가장 작은 표면조도를 주는 연삭 휠 회전속도( $V_t$ )는 8500rpm이었으며, 직경이 작은(10mm) 휠에 비해 직경이 큰(75mm) 휠을 사용한 17회 연삭공정에서 소재의 표면조도는 약 54% 큰 값을 나타내었고, 소재 직경( $D_p$ )이 변화함에 따른 표면조도는 큰 변화가 없었다. 따라서, 큰 연삭 휠을 사용한 공정(17회)의 측정 표면조도를 정량적 공정 제어 모델에 적용하였으며, 그림 1에 제시된 정성적 연삭실험 자료를 회귀 분석에 적용하면 G, F,  $V_{PL}$ 은 표면조도와 관련성이 크게 있는 반면,  $V_t$ 는 작게 분석되어 정량적 공정제어 모델 구성을 위한 변수에서 제외하였다.

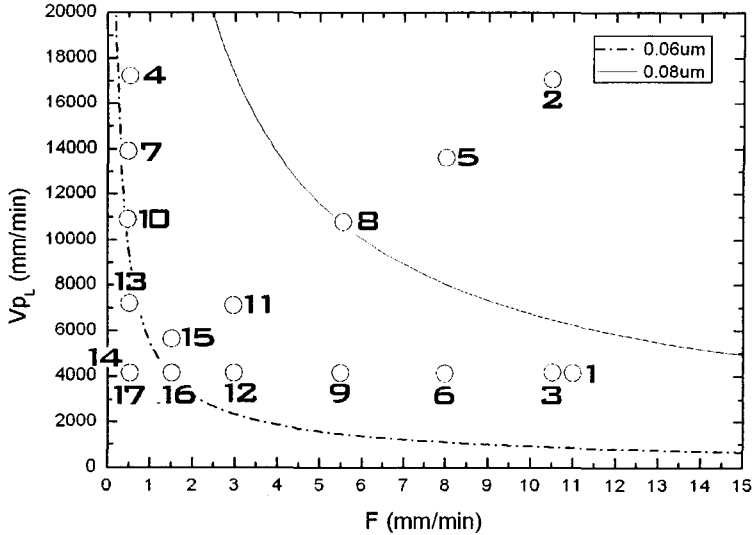


그림 2. 이송속도(F)와 공작물 회전선속도( $V_{PL}$ ) 공간에서 17회 공정제어 실험조건(숫자는 17회 실험순서).

### 3. 정량적 연삭공정제어

#### 3.1 공정제어입력 모델

초기 실험 측정 표면조도를 Feng & Wang(2002)의 회귀분석 방법에 적용하여 공정조정 모델을 식(1)과 같이 성립하였다.

$$R_a = 0.01G^{1.15}F^{0.046}V_{PL}^{0.059} \quad (1)$$

또한  $F$ ,  $V_{PL}$ 과 표면조도와의 관계를 최소자승법에 의해 지수함수로 근사한 경험적 공정조정 모델로서 식(2), 식(3)과 같이 구성하였다.

$$R_a = 0.000074F^{0.1267} \quad (2)$$

$$R_a = 0.000014V_{PL}^{0.1992} \quad (3)$$

#### 3.2 공정제어 실험

공정제어라 함은 정량적 수치모형으로부터 가공 변수의 결정과 가공 결과의 표면조도 예측을 자동적으로 수행하는 방법을 의미한다. 본 연구에서는 가공결과예측에 중점을 두어 아래와 같이 공정제어 실험을 수행하였다. 식(1), 식(2) 그리고 식(3)에 표현된 3개의 입력모델을 이용하고 최소 이송속도( $F$ ) 0.5mm/min, 최소 공작물회전속도( $V_P$ ) 100rpm이라는 Nanoform 600의 기계적 제한조건을 고려하여 정량적 공정제어 실험을 위한 연삭조건을 모델 예측이 표면조도 60nm(점선), 80nm(실선)의 곡선과 함께 그림 2에 나타내었다. 연삭조건은  $F$ 가 10.9mm/min로부터 2.5mm/min 간격으로,  $V_P$ 가 400rpm로부터 80rpm 간격으로 일정하게 감소하여 초기 입력모델이 예측하는 바 표면조도는 97.9nm에서 55.9nm까지 42nm를 감소하도록 결정하였다. 측정 표면조도가 입력되어 진화된 모델에서 제시하는 표면조도는 공정제어 실험 중 계속하여 변화되었다.

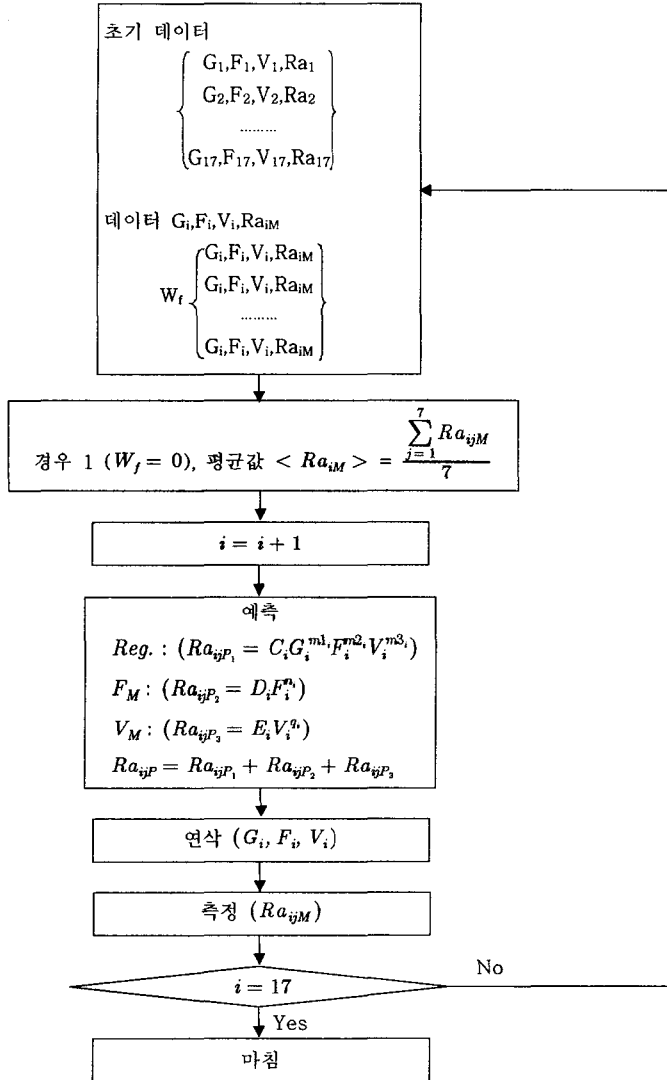


그림 3. 공정조절 실험 진행 순서도(M: measured, P: predicted).

연삭공정은 그림 3에 제시한 바와 같이 예측 - 연삭 - 공정조절 모델진화의 과정을 17회 반복( $i=17$ )하며 제어하였다. 17회 연삭조건 및 표면조도 자료가 입력된 초기 자료베이스에  $G, F, V(V_{PL}), Ra$  등 공정조절 변수들이 입력되었고, 측정 표면조도에 가중치( $W_f$ )를 두지 않고(경우 1,  $W_f = 0$ ) 서로 다른 7곳의 표면조도 측정치를 평균한 대표값( $\langle Ra_{iM} \rangle$ )으로 모델(평균모델)을 진화시켜 다음 공정조절 변수에 의한 표면조도( $Ra_{ijP}$ )를 예측하였다.

추가적인 해석방법으로 자료의 가중치에 따라 (1) 모델 구성 이후의 매 공정제어 가공 실험 과정에서 표면조도의 가중치를 누적하면서 예측하는 모델(경우 2), (2) 모델 구성 이후의 매 공정제어 실험

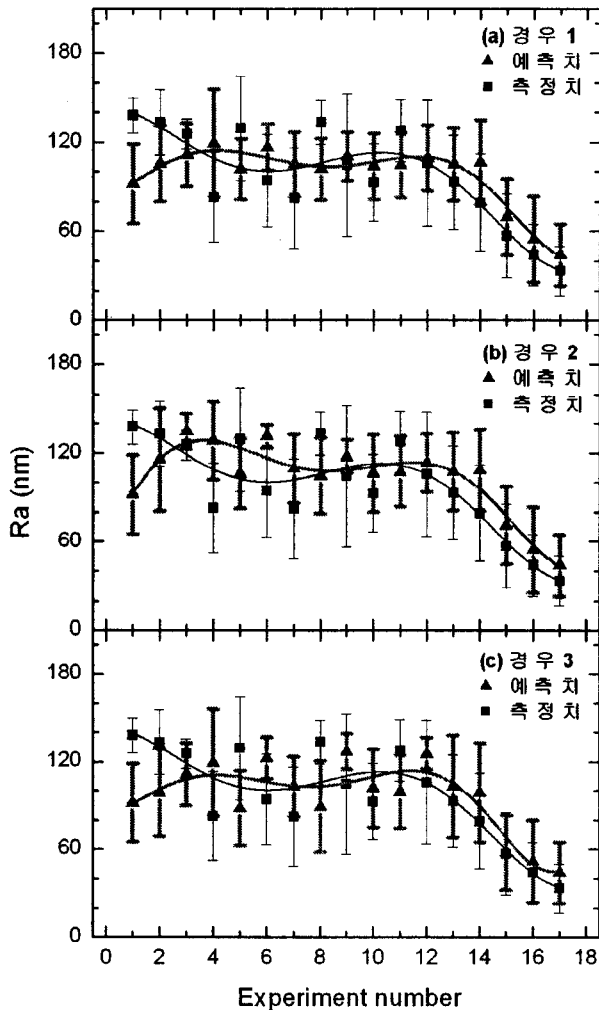


그림 4. 공정조절 실험(17회)진행 중 평균모델에 의한 표면조도의 예측 - 측정치 도표: (a) 경우 1, (b) 경우 2, (c) 경우 3.

과정 중 표면조도의 가중치를 개별적으로 두어 표면조도를 예측하는 모델(경우 3), (3) 자료의 대표성에 따라 소재 표면의 서로 다른 7곳에서 측정된 표면조도에 의한 7개 개별모델(위치별 모델)을 전개하는 분석 방법을 사용하였다.

#### 4. 결과 및 해석

회귀분석 모델과 이송속도, 연삭 휠 회전선속도에 의한 경험적 모델 등 3개의 모델을 결합한 후 공정제어 실험진행 순서에 따라 평균모델과 위치별 모델의 예측 표면조도와 측정 표면조도를 그림 4와 그림 6, 그들 간의 차이를 그림 5와 그림 7에 나타내었다. 매 도표마다 7곳의 예측 및 측정 표면

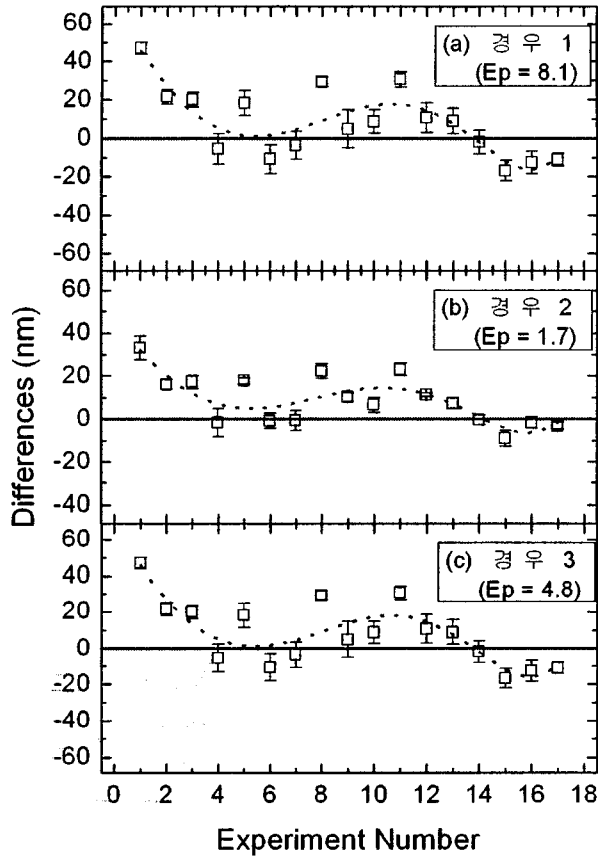


그림 5. 공정조정 실험(17회) 진행 중 평균모델에 의한 표면조도의 예측 - 측정치의 차: (a) 경우 1, (b) 경우 2, (c) 경우 3.

조도 평균을 최소자승법에 의해 6차 다항식으로 근사한 함수를 실선 혹은 점선으로 나타내었다. 실험이 진행되면서 3개의 모델에서 예측하는 표면조도는 측정치가 입력됨과 동시에 지속적으로 진화하며 그 다음 표면조도를 예측하였다. 그림 5와 그림 7에서 모델들이 공통적으로 12회 공정제어 이후  $\pm 20\text{nm Ra}$  이내로 차이가 줄어들고 있다. 이 경향은 10회 내외의 정량적 연삭 공정제어를 수행하여 목표로 하는 표면조도에 도달할 수 있다는 것을 의미한다.

실험 결과를 정리하면 (1) 측정 표면조도가  $140 \sim 36\text{nm}$ , 예측 표면조도가  $110 \sim 40\text{nm}$ 의 범위 내에서 그들 간의 차이가 감쇠진동의 형태로 축소되어 최소  $20\text{nm}$ 에 도달하였으며, (2) 그림 8(b)에 제시된 바와 같이 최소 평균표면조도  $36\text{nm}$ 에 도달하였다. 그림 4(a)의 17회 공정조정 이후 최종 진화된 모델별 수식은 다음 식(4), 식(5) 그리고 식(6)과 같이 결정 되었다.

$$R_a = 0.002G^{1.256}F^{0.242}V_{PL}^{0.256} \tag{4}$$

$$R_a = 0.000071F^{0.159} \tag{5}$$



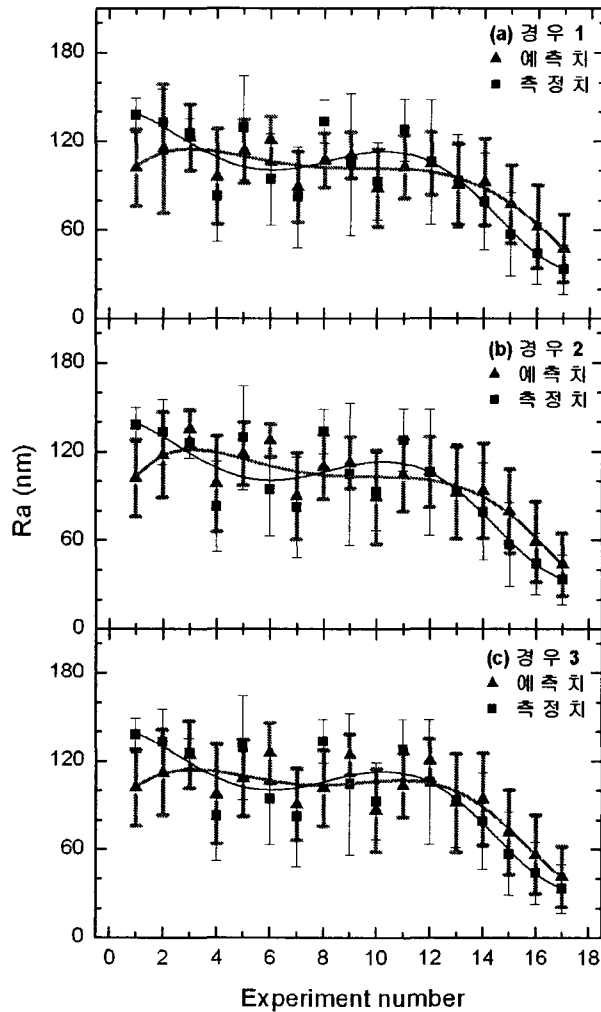


그림 6. 공정조절 실험(17회)진행 중 위치별 모델에 의한 표면조도의 예측 - 측정치 도표: (a) 경우 1, (b) 경우 2, (c) 경우 3.

$$R_a = 0.000036V_{PL}^{0.0098} \tag{6}$$

한편 예측표면조도( $R_{aP}$ )와 측정표면조도( $R_{aM}$ )의 평균치를 표면조도 예측오차( $E_p$ )로 정의하면 식(7)과 같이 표현되며,

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^{17} (R_{aP_i} R_{aM_i})}{17} \tag{7}$$

그림 5와 그림 7에서 제시된 예측오차 값이 의미하는 바는 평균모델(그림 5)에 비해 위치별 결합모델(그림 7)의 차이가 모두 감소하였으나 평균모델에서는 경우 2가 가장 작은 차이 값을 나타내는 반면 위치별 결합모델에서는 경우 2가 가장 큰 차이를 나타내는 것으로 해석된다. 이것은 평균모델이

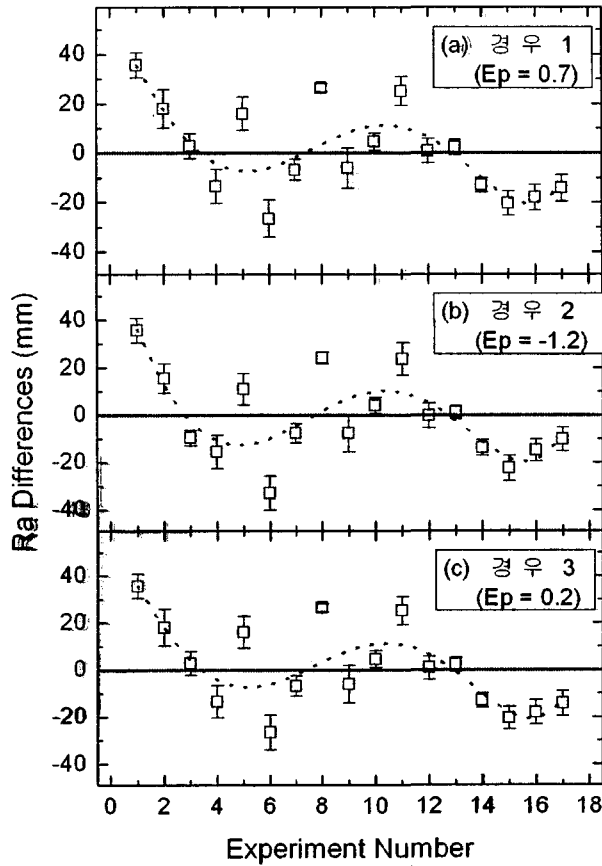


그림 7. 공정조절 실험(17회)진행 중 위치별 모델에 의한 표면조도의 예측 - 측정치의 차: (a) 경우 1, (b) 경우 2, (c) 경우 3.

위치별 모델보다 작은 표면조도로 예측된다는 것을 의미한다. 한편 경우 1, 경우 2 그리고 경우 3이 평균모델, 위치별 모델에 따라 차이가 다른 경향을 나타내는 것은 위치별 모델에서의 자료 적음, 소재중심으로부터 반경 1.1, 41.2mm 영역에서 표면조도 측정치와 예측 치와의 큰 편차 등이 원인일 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 공정조절용 모델 구성을 위한 초기연삭실험 자료를 사용하여 회귀분석모델, 이송 속도에 의한 경험적 모델, 휠 회전선속도에 의한 경험적 모델 등 3개 모델을 구성하였다. 모델에 의해 예측되는 표면조도가 감소하는 방향으로 연삭 실험 조건을 계획하였으며, 계획된 연삭 조건을 수행하면서 예측, 측정, 모델 진화의 단계를 반복하며 공정을 제어하였다. 3개 모델 모두 12회의 연삭 공정 이후로는 측정 표면조도가 모델의 예측 표면조도에 대해 +20 ~ -30nm 이내로 예측하였으며, 마지막 17회의 연삭공정에서 직경 100mm Zerodur 소재의 평균 표면조도가 36nm로 측정되었다.

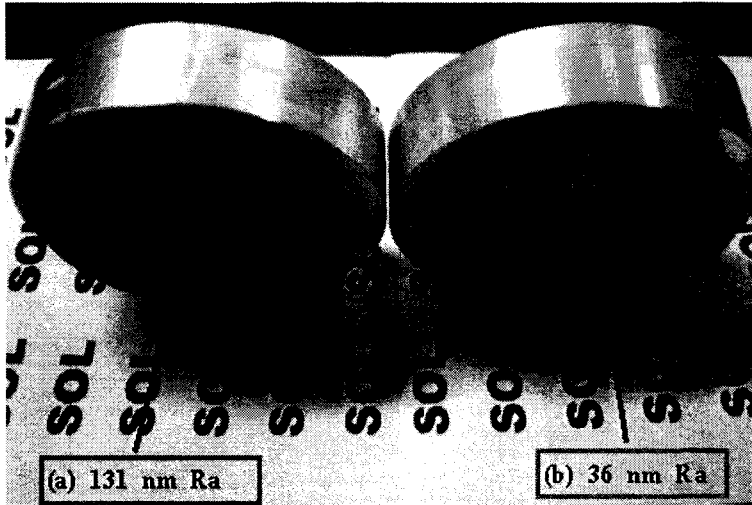


그림 8. 17회 공정조절 전(a), 후(b)에서 표면조도의 차이: (a) 131nm (b) 36nm.

공정조절용 실험 중 측정된 표면조도는 평균 137nm에서 36nm로 약 73% 감소하였고, 3개 모델의 결합에 의한 예측 표면조도는 측정 표면조도와 초기 46.9nm의 차이를 기록하다가 약 10회의 공정조절이후로는  $\pm 20$ nm로 차이가 감소하여 예측정확도는 약 57.4% 증가하였다. 초기 연삭실험의 정성적 공정조절에 의한 연삭가공에서는 121회 실험 중 1회(0.8%)만이 20nm 대의 표면조도를 나타낸 것에 비해 본 연구에서 사용한 정량적 공정조절에서는 17회 실험 중 총 6회(35.3%) 측정됨으로써 공정효율을 향상시켰다.

선행연구에서의 예측시간 지연, 단일 변수 해석, 공정진행 중 모델 고정 등의 단점은 본 연구에서 매 가공측정순환작업 시 표면조도 예측 모델 진화, G, F,  $V_{PL}$  등 다 변수 모델 해석, 연삭공정 진행에 따른 진화형 표면조도예측 모델을 개발함으로써 개선되었다. 한편 휠 입자의 크기가  $4.5\mu\text{m}$ 인 휠을 사용할 경우 식 4에 의하면 표면조도가 약  $19.7 \pm 9.5\text{nm}$ 로 예측되었다. 이는 향후 연삭가공에서 표면조도를 크게 감소시킴으로서 자유입자 래핑 가공공정을 수행할 필요 없이 연삭에서 직접 연마가공 공정으로 진행할 수 있는 획기적인 공정효율 향상을 이룩함으로써 우주망원경용 정밀 비구면 반사경 생산효율증가에 크게 기여할 것으로 기대된다.

**감사의 글:** 이 연구는 과학기술평가원(과제: M1-0206-00-0014) 및 연세대학교(과제: 2002-1-0216)의 지원에 의해 수행되었다. 본 연구의 치공구 설계 및 제작에 도움 주신 기초과학지원연구원 초정밀가공실의 김효식, 복민갑, 김상보님께 감사를 드린다.

### 참고문헌

- 김원일, 강재훈 1991, in Thesis collection, ed. Center for Advanced Materials, vol.1 (Masan: Kyungnam Univ.), p.1
- 김현석, 정광섭, 이대길 1995, 대한기계학회논문집, 19, 3392

- Ali Razavi, H., Kurfess, T. R., & Steven, D. 2003, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 185
- Chen, X., Allanson, D. R., & Rowe, W. B. 1998, *Computer in Industry*, 36, 5
- Feng, C. X. & Wang, X. 2002, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 348
- Gatzen, H. H. & Chris, M. J. 1997, *Precision Engineering*, 21, 134
- Hecker, R. L. & Liang, S. Y. 2003, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 755
- Kim, G. 1998, *J. Institute for Eng. & Tech.*, 4, 121
- Kim, H. S. & Lee, D. G. 1997, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37, 1499
- Kim, S. W., David, W., & David, B. 2003, *Mechatronics*, 13, 295
- Ling, Y., Vancoille, E. Y. J., Lee, L. C., Huang, H., Ramesh, K., & Liu, X. D. 2003, *WEAR*, in press
- Pierre, Y. B. 2003, *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* (New York: Springer-Verlab)
- Shen, J. Y., Li, Y., Xu, X. P., & Gao, Y. 2003, *Key Engineering Materials*, 238, 105
- Sugishita, J., Kawabata, N., & Kumamoto, K. 2003, *Precision Engineering*, 13, 184
- Taniguchi, N. 1994, *American Society for Precision Engineering*, 16, 5
- Texereau, J. 1957, in *How to make a telescope* (New York: Interscience publishers), p.17
- Zhou, X. & Xi, F. 2002, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 969