

천체망원경용 비구면 반사경 표면조도 향상을 위한 최적연삭변수 수치결정모델

한정열^{1,2†}, 김석환³, 김건희⁴, 한인우^{1,2}, 양순철⁴

¹과학기술연합대학원대학교 천문우주학과

²한국천문연구원 광학천문연구부

³연세대학교 천문우주학과 우주광학연구실

⁴한국기초과학지원연구원 초정밀가공실

GRINDING OPTIMIZATION MODEL FOR NANOMETRIC SURFACE ROUGHNESS FOR ASPHERIC ASTRONOMICAL OPTICAL SURFACES

Jeong-Yeol Han^{1,2†}, Sug-Whan Kim³, Geon-Hee Kim⁴,
In-Woo Han^{1,2}, and Sun-Choel Yang⁴

¹Department of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology, Daejeon 305-333, Korea

²Optical Astronomy Division, Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

³Space Optics Laboratory, Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

⁴Ultra-Precision Engineering Laboratory, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

E-mail: eqhan@kasi.re.kr

(Received November 22, 2004; Accepted December 6, 2004)

요 약

지상 및 우주 천체 망원경용 비구면 반사경면 초기 제작공정에는 고정입자 휠을 사용하는 연삭이 있다. 본 연구에서는 매 연삭 가공 이전에 설정한 목표 표면조도를 달성할 수 있도록 입력 연삭변수들을 결정하고, 표면 가공오차를 추적하며, 가공 경과시간을 최소화하는 새로운 연삭공정을 개발하였다. 특별히 이 공정 기법은 이전 연삭 가공 작업 시 까지 수집된 입력 변수 및 가공 결과 표면조도 자료를 다 변수 회귀분석 방법에 대입하여 목표 표면조도에 따른 최적 연삭가공 입력변수를 매 가공 작업 시 진화적으로 제시하는 지능형 공정 조절 능력을 갖추고 있다. 개발된 공정기법과 초정밀 컴퓨터 수치제어 연삭기를 사용하여 96.1 ~ 65.0nm(Ra) 범위의 목표 표면조도를 갖는 제로듀어 소재에 대하여 10회 가공 실험을 수행 한 결과 $\langle E_{TC} \rangle = -0.906 \pm 3.38(\sigma)\text{nm(Ra)}$ 의 가공 정밀도를 달성하여, 지능형 연삭공정의 효율을 입증하였다. 이러한 연구결과는 천체망원경용 반사경면 연삭 가공 시 정성적 경험에 의존하여 가공하는 기존 기술을 극복하고 정량적 수치모형에 의하여 가공소요시간 최소화 및 나노미터 급 표면조도를 달성하는 진화형 공정 최적화 기술의 확립이라는 의의를 가지고 있다.

ABSTRACT

Bound abrasive grinding is used for the initial fabrication phase of the precision aspheric mirrors for both space and ground based astronomical telescopes. We developed a new grinding optimization process that determines the input grinding variables for the target surface roughness, checks the grinding error magnitude in resulting surface roughnesses, and minimizes the required machining time. Using the machining

†corresponding author

data collected from the previous grinding runs and subsequently fed into the multi-variable regression engine, the process has the evolving controllability that suggests the optimum set of grinding variables for each target surface roughness. The process model was then used for ten grinding experiments that resulted in the grinding accuracy of $\langle E_{TC} \rangle = -0.906 \pm 3.38(\sigma)$ nm (Ra) for the target surface roughnesses of Zerodur substrate ranging from 96.1 nm (Ra) to 65.0 nm (Ra). The results imply that the quantitative process optimization technique developed in this study minimizes the machining time and offers the nanometric surface roughness controllability superior to the traditional, qualitative, craftsman based grinding process for the astronomical optical surfaces.

Keywords: astronomical telescopes, aspheric mirrors, surface roughness, grinding optimization process

1. 서 론

천체망원경용 비구면 광학면 가공에서 첫 번째 가공 단계인 연삭가공(Pierre 2003)은 전통적으로 면의 표면조도(Ra)를 수 um 급으로 가공하는 단계이며, 많은 가공변수가 피 가공물에 복잡하게 영향을 주는 가공공정이다. 표면조도는 연삭가공 장치의 효율을 가능하는 주요한 매개 변수로서 피 가공물 표면의 거친 정도를 나타낸다(Benardos & Vosniakos 2003). Zerodur는 1970년 이후 주경 1.3m인 MPIA(Max Planck Institute for Astronomy) 망원경으로부터 2003년에 주경 4.1m인 VISTA(Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) 망원경에 이르기까지 망원경 반사경 소재로서 지속적으로 사용되어 왔다.

연삭가공에서 표면조도를 예측하는 선행 연구들은 Zhou & Xi(2002)이 연삭 휠에 분포한 미소입자(grain)의 돌출높이의 변화에 따른 휠 부피 마모량과 연삭 후 표면조도를 가우스 분포 모델에 적용하여 휠 마모량이 0um부터 18um까지 증가함에 따라 표면조도가 2730nm로부터 290nm까지 감소함을 예측하였고, 실험을 통하여 휠 마모량이 증가함에 따라 표면조도가 1500nm로부터 500nm까지 감소하여 모델과 실험이 일관된 경향을 보인다고 하였으나, 증가한 휠 마모량을 정량적으로 제시하지 못하였으므로 일관된 경향을 나타낸다고 할 수 없다. Hecker & Liang(2003)은 원통형 연삭에서 연삭 조각들(chip)의 두께를 확률밀도함수를 사용하여 340 - 650nm(Ra) 범위의 측정치에 대하여 약 10%의 평균오차로 예측하였으며, 한정열 등(2004)은 Zerodur 소재를 사용하여 나노미터 범위의 연삭 특성에 관한 연구를 수행하여, 36 - 140nm(Ra) 범위의 측정치에 대하여 평균 -10.95nm(Ra), 표준편차 5.12nm(Ra)의 예측오차를 나타내었다. 그러나 이러한 연구들은 연삭이전에 목표로 한 표면조도 없이 임의로 설정된 연삭 변수들에 의한 연삭가공 후 표면조도를 예측하였기 때문에 연삭 이전에 목표 표면조도를 설정하고 그 표면조도를 달성할 수 있도록 입력 연삭변수들을 결정할 수 없었다.

본 연구에서는 1) 연삭 이전에 목표 표면조도에 도달할 수 있는 입력 연삭변수들을 결정할 수 있고, 2) 표면조도 예측오차를 추적하며, 3) 연삭공정의 경과시간이 상대적으로 작게 소요되는 변수들을 택하도록 모델을 개발하였고 실험을 통하여 효용성을 입증하였다.

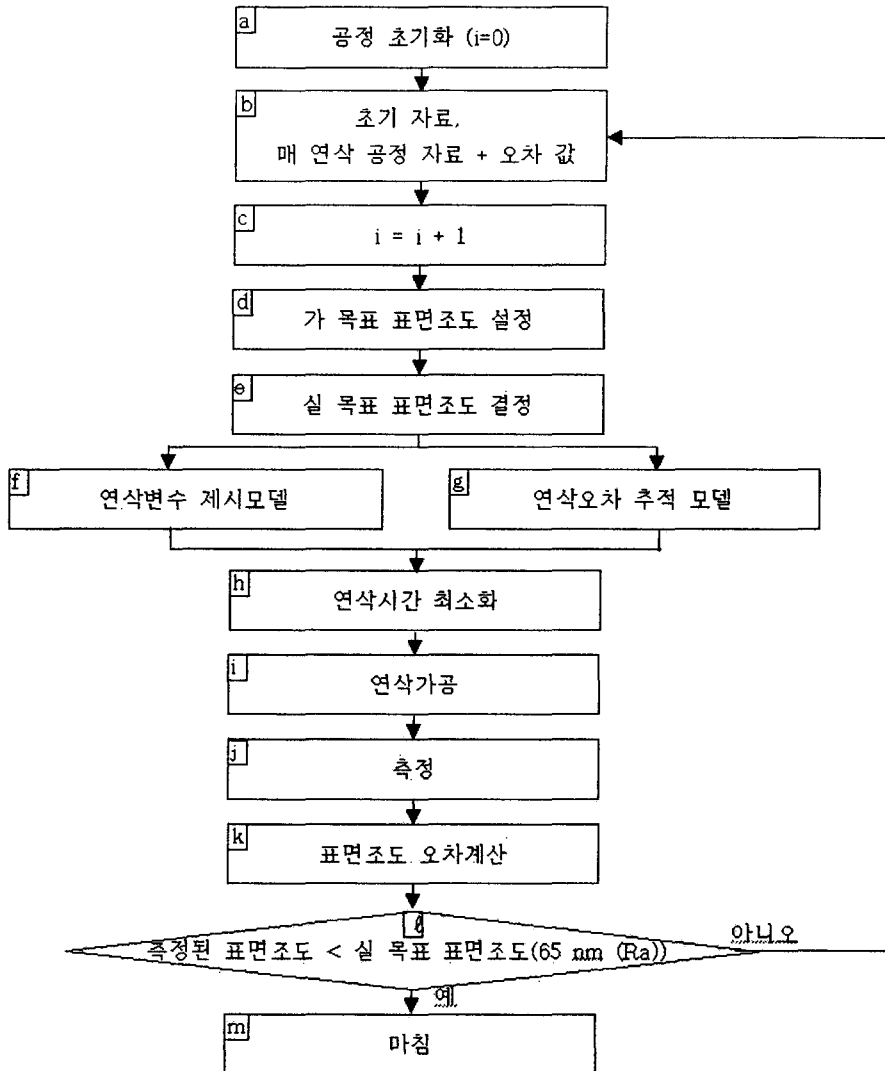


그림 1. 최적연삭변수 결정공정 순서도.

2. 최적 연삭변수 결정공정

본 연구에서는 비구면 계수 -5.95, 비구면도(asphericity) 0.0034mm인 직경 100mm Zerodur 소재를 사용하였다. 연삭 가공기는 미국 Precitech사의 Pneumo-K001 Nanoform 600 Diamond Turning Machine(DTM, Serial number: 960040)이며, 300mm × 300mm 연삭 모듈(Grinding module)에 Diagrind사의 직경 75mm 연삭 휠(Serial number: 62981-01)을 장착하여 소재를 가공하였고, 접촉식 측정 장치인 Rank Taylor Hobson사의 Form Talysurf(Serial number: 0626)는 소재 표면의 서로 다른 일곱 군데에서 표면조도를 측정하였다. 각 위치에서의 측정 길이는 ISO(International Organization for Standardization) 기준 길이인 5.6mm이다. 연삭초반과 후반의 휠 상태가 변화함으로 인하여 연

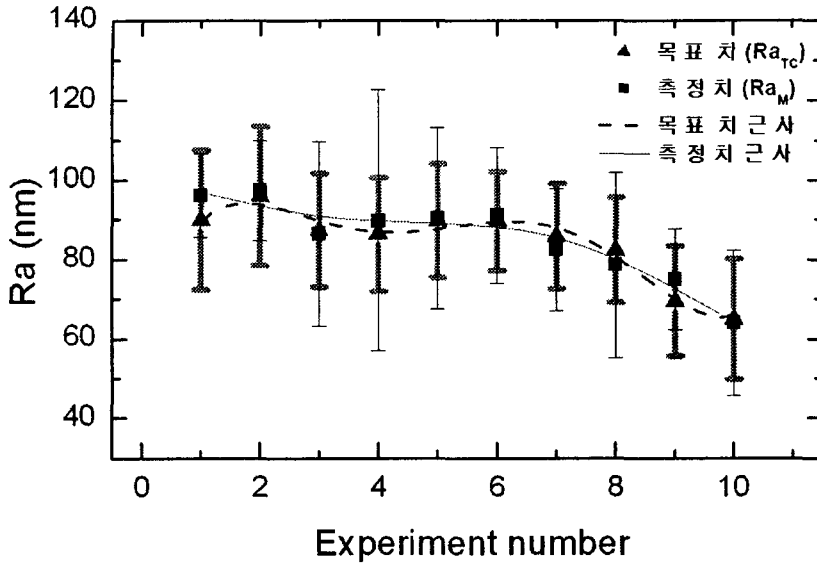


그림 2. 목표치와 측정치 및 근사 그래프.

삭 후 표면조도는 소재의 위치에 따라 다르게 측정될 것이다. 자료의 대표성을 위하여 측정 기준 길이와 그 사이의 공간 약 10mm를 고려하여 100mm 크기의 소재가 사용되었다.

연삭변수 제시공정은 그림 1에 제시한 바와 같이 목표 표면조도 설정 - 연삭 변수와 표면조도 및 오차 사이의 관계 진화 - 최소시간 연삭조건 결정 - 연삭 가공 및 측정의 과정을 아래 자세히 설명한 바와 같이 반복하며 제어하였다. 실험 초기에 가(Nominal) 목표 표면조도(Ra_T)와 연삭 후 표면조도(Ra_M)와의 차이인 오차 값(E_R)을 0으로 초기화 하였다(공정 a). 초기 자료는 한정열 등(2004)이 37회 연삭가공 했을 때 사용되었던 연삭변수들(연삭 휠 입자크기; G₁ ~ G₃₇, 공작물 이송속도; F₁ ~ F₃₇, 연삭 휠 회전 선속도; V_{PL1} ~ V_{PL37}), 측정된 표면조도(Ra_{P1} ~ Ra_{P37})와 가공 오차 값(E_{M1} ~ E_{M37})이다. 이전 실험 자료는 매 연삭가공 후 획득한 자료들이 계속 누적되면서 다음 회 가공 실험 시 공정조절용 데이터베이스를 만드는 데 사용되었다(공정 b).

공정 c에서는 금회 실시되는 가공 실험의 고유 번호를 정의하며, 이는 이후 공정 순서에서 발생되는 모든 입력 및 측정 변수, 또한 그들로부터 만들어지는 파생 자료의 고유 번호 표식으로 사용되었다. 공정진행 중 도달하고자 하는 실 목표 표면조도(Ra_{Tc})에 근사한 정수 값으로 약 10nm 간격의 가 목표 표면조도를 90nm(Ra)에서 55nm(Ra) 범위에서 진화하며 설정하였다(공정 d). 가공기 자체가 가지는 연삭변수의 비선형적 미소변화가 원인이 되어 결과적으로 나타나는 가공 후 표면조도의 불확실성을 진화적으로 보상하기 위하여 본 연구에서는 실 목표 표면조도를 가 목표 표면조도로부터 직전 오차 값(E_R)을 제한 값으로 수정 결정하였다(공정 e).

실 목표 표면조도가 결정된 후 입력 연삭변수를 제시해줄 수 있는 연삭변수 제시모델은 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 구성하였다(공정 f).

$$Ra_P = CG^{m_1} F^{m_2} V_{PL}^{m_3} \tag{1}$$

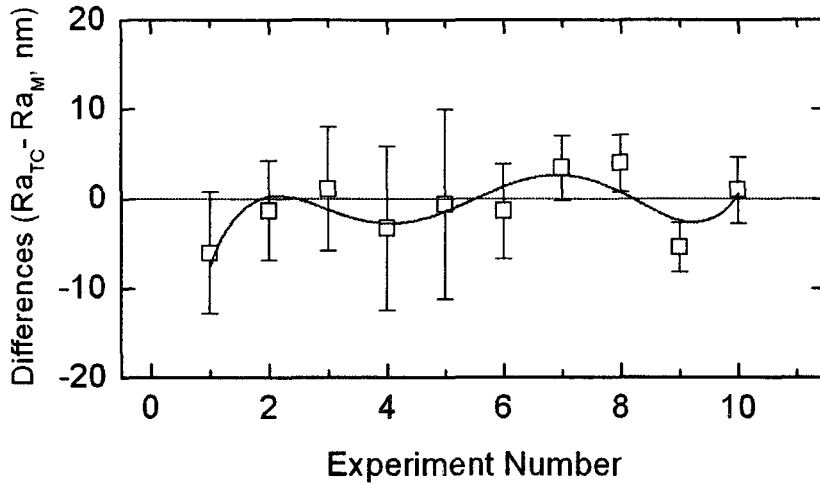


그림 3. 목표치와 측정치와의 차이 그래프.

여기서, 계수 및 지수들은 초기 자료에서 가공 후 표면조도(Ra_P)와 연삭변수들로부터 Feng & Wang (2002)의 다변수 회귀분석 방법에 적용하여 $C = 0.0015$, $m_1 = 0.932$, $m_2 = 0.155$, $m_3 = 0.151$ 의 초기값으로 계산되었다. 연삭가공이 진행되면서 이전 실험 자료에 금회 실험에서 획득한 가공 후 표면조도(Ra_M)와 연삭변수들이 지속적으로 누적되면서 계수 및 지수들이 진화되었다. 연삭변수 제시모델로부터 예측된 표면조도와 가공 후 표면조도와의 차이를 추적하여 그 모델이 제시한 최적연삭변수 범위의 채택 여부를 판단하기 위하여 연삭 오차추적 모델을 구성하였다(공정 g). 연삭 오차추적 모델은 주어진 연삭조건들이 가 목표 표면조도와 가공 후 표면조도와의 오차(E_M)에 기여하는 값을 회귀분석 하여 얻은 다음 식(2)를 기본으로 한다.

$$E_M = HG^{m_4} F^{m_5} V_{PL}^{m_6} \quad (2)$$

여기서, 계수 및 지수들은 $H = 0.0031$, $m_4 = 0.806$, $m_5 = 0.0967$, $m_6 = -0.142$ 의 초기값으로 계산되었으며, 연삭가공이 진행되면서 지속적으로 진화되었다. f)와 g)의 두 공정은 최적 연삭조건 제시 모델(최적 연삭 모델)이라 명명하였으며, 목표 표면조도에 도달할 수 있는 연삭조건들, 개개의 연삭조건들에 대응하는 연삭소요시간(T)들, 그리고 모델예측 오차들을 제시하였다. 많은 연삭후보 조건들 중 최적 연삭변수 수치는 다음 2회의 선별과정을 거쳐 결정되었다.

제시된 연삭조건들 중 공작물 이송속도(F)와 연삭 휠 회전 선속도(V_{PL}) 등 2개 연삭조건 선택 한계는 최소한계 수치로서 Nanoform 600의 기계적 제한범위인, 공작물 이송속도 0.5mm/min 이상, 연삭 휠 회전선속도 100rpm 이상, 최대한계 수치는 공작물 이송속도 10mm/min 이하, 연삭 휠 회전선속도 400rpm이하로 하였다. 그리고 연삭 휠 입자의 크기(Grit number)는 9.3 μ m(2200), 6.9 μ m(3000), 5.3 μ m(4000), 4.2 μ m(5000) 등 네 종류 중에서 선택하도록 하였다. 첫 번째 선별과정은 최적 연삭 모델에서 제시된 연삭조건들 중 위 선택한계 범위 내에서 공작물 이송속도와 연삭 휠 회전속도의 최소, 최대 한계치를 연결하여주는 직선상에 놓여진 연삭조건들과 가장 유사한 범위에 있는 연삭조건들을 선별하는 것이다.

표 1. 최적연삭 조건(최적연삭변수 결정모델이 매 가공마다 진화되어 결정된 F, V_{PL}들의 모음).

연삭 변수	수치 범위
연삭 휠 입자의 크기(G)	6.9um
이송속도(F)	1.2, 2.3, 3.8, 5.0, 6.1, 9.7mm/min
공작물 회전 속도(V _P)	136, 158, 177, 230, 264, 370rpm
연삭 깊이	1um
휠 회전속도	8500rpm
소재 직경	100mm
연삭 휠 직경	75mm

두 번째 선별과정은 연삭가공 소요시간(T)이 최소인 연삭조건을 선별하는 것이다. 연삭가공 소요시간은 연삭 길이와 공작물 이송속도로부터 결정되는데, 본 연구에서는 90mm 직경의 소재를 연삭 하였으므로 공작물은 중심으로부터 45mm 지점까지 이동하면서 연삭하였고, 이송속도는 최적연삭 모델로부터 진화적으로 제시되었다. 따라서 공작물의 이송길이(L)는 45mm이다. 연삭은 제시된 이송속도의 두 배 속도로 1회(L/2F), 제시된 이송속도로 2회(2L/F)를 수행하였다. 이로써 연삭가공 소요시간은 이들의 합인 다음 식(3)으로 주어진다(공정 h).

$$T = 2.5 \left(\frac{L}{F} \right) \quad (3)$$

최적 연삭 모델로부터 매 공정마다 2회에 걸친 선별과정을 거쳐 제시된 3개의 연삭조건(G, F, V) 과 이미 고정되어 사용된 연삭 깊이(D), 휠 회전 속도(V_t) 등의 가공 변수들이 연삭 가공기에 입력되어 연삭이 수행되었으며(공정 i), 사용된 모든 연삭조건들을 표 1에 나타내었다. 가공 후 표면조도는 Form Talysurf를 사용하여 측정하였고(공정 j), 가공 오차 값(E_R)은 공정 e)의 실 목표 표면조도에 보상하도록 하였다(공정 k). 측정 표면조도가 오차(E_M)범위 이내에 있고, 가공 후 표면조도(Ra_M)가 실 목표 표면조도인 65nm(Ra) 이하일 때 연삭가공 실험을 종료하였다(공정 l).

3. 결 과

그림 2, 3에 제시된 바와 같이 가 목표 표면조도는 90.0nm(Ra)에서 65.0nm(Ra)까지 설정하였으며, 가공 후 표면조도는 97.4nm(Ra) 에서 64.1nm(Ra)까지 측정되었다. 그림 2에서 실 목표 표면조도와 가공 후 표면조도는 점으로, 표준편차 값은 오차막대로 표시하였고, 평균값들을 6차 다항식으로 근사한 그래프를 함께 나타내었으며, 실 목표 표면조도와 가공 후 표면조도의 차는 그림 3에 나타내었다. 표 2에서 실 오차(E_{TC})가 연삭오차 추적모델에서 추적한 오차(E_M)이내에 모두 포함되어 있으므로 연삭변수 제시모델은 자신의 오차를 지속적으로 감소시키는 방향으로 진화되었다. 결과적으로 매 실험에서의 실 오차 평균치(< E_{TC} >)는 -0.906nm(Ra)이고 평균치에 대한 표준편차(σ) 값은 ±3.38nm(Ra)으로 계산되었다.

연삭 가공 소요시간을 비교한 표 3에서 이송속도가 가장 느린 0.5mm/min(제 3안)을 택하여 10회를 가공하였을 때 총 연삭시간은 2250분이 되는 반면 본 모델에 의해 결정된 최소 소요시간의 이송속도(제 1안)로 연삭한 경우 302.8분이 소요되어 약 86.5%의 시간절감효과를 나타내었다. 한편 연삭

표 2. 예측 및 측정 표면조도와 오차.

실험번호	Ra _{TC} (nm)	Ra _T (nm)	Ra _M (nm)	E _M (nm)	E _R (nm)	E _{TC} (nm)
1	90	90	96.08	±17.63	-6.08	-6.08
2	96.08	90	97.41	±17.63	-7.41	-1.33
3	87.41	80	86.39	±14.31	-6.39	+1.02
4	86.39	80	89.71	±14.31	-9.71	-3.32
5	89.71	80	90.4	±14.31	-10.4	-0.69
6	89.7	79.3	91.1	±12.58	-11.8	-1.4
7	85.9	74.1	82.49	±13.23	-8.39	+3.41
8	82.49	74.1	78.57	±13.23	-4.47	+3.92
9	69.47	65	74.95	±13.91	-9.95	-5.48
10	64.95	55	64.06	±15.23	-9.06	+0.89

Ra_{TC}: 실목표 Ra(Ra_T - E_{RP}, E_{RP}: 전단계 E_R)

Ra_T: 가목표 Ra, Ra_M: 측정 Ra, E_M: 오차모델이 예측한 오차 범위, E_R: 가오차(Ra_T - Ra_M)

E_{TC}: 실오차(Ra_{TC} - Ra_M)

표 3. 연삭가공 소요시간 비교표.

실험번호	제 1안		제 2안		제 3안	
	F ₁ (mm/min)	T ₁ (min)	F ₂ (mm/min)	T ₂ (min)	F ₃ (mm/min)	T ₃ (min)
1	9.7	11.6	2	56.3	0.5	225
2	9.7	11.6	2	56.3	0.5	225
3	6.1	18.4	1.9	59.2	0.5	225
4	6.1	18.4	1.9	59.2	0.5	225
5	6.1	18.4	1.9	59.2	0.5	225
6	5	22.5	1.8	62.5	0.5	225
7	3.8	29.6	1.6	70.3	0.5	225
8	3.8	29.6	1.6	70.3	0.5	225
9	2.3	48.9	0.9	125	0.5	225
10	1.2	93.8	0.5	225	0.5	225
Elapsed time		302.8	843.3		2250	

변수 제시모델에 의해 두 번째 최적연삭조건(제 2안)으로 연삭하면 843.3분이 소요되어 약 64.1% 시간절감을 통하여 제조원가의 절감을 이루었다.

4. 결 론

본 연구에서는 한정열 등(2004)이 무작위로 선택한 가공변수로 연삭했을 때 연삭 가공 이후 표면 조도를 예측하는 방법과 구별되어 목표 표면조도와 연삭변수를 가공이전에 결정함으로써 그림 1의 순서도와 같이 광학가공 현장에서 곧바로 응용할 수 있는 정량적 최적 연삭 모델을 독자 개발하였다. 한편 가공기 자체가 가지는 연삭변수의 미소변화로부터 야기되는 가공 및 측정조건의 불확실성을 보상하기 위하여 가 목표 표면조도와 가공 후 표면조도와의 차를 다음 회 연삭가공 가 목표 표면

조도로부터 감하여 줌으로써 매 가공-측정 순환마다 실 목표 표면조도가 수정 진화되도록 가공 공정이 조절 되었다. 한정열 등(2004)이 수행한 연구와 비교하여 본 연구에서 개발한 최적 연삭 모델은 10회의 연삭공정을 수행하면서 실 오차가 평균 $-0.906\text{nm}(\text{Ra})$, 표준편차 $3.38\text{nm}(\text{Ra})$ 으로 계산됨으로써 가공예측 오차가 평균 91.3%, 표준편차 34%의 향상을 이루었다.

본 연구에서는 연삭 이전에 목표 표면조도를 설정하였고 그 목표 표면조도에 도달 가능한 최적 연삭변수 수치를 제시할 수 있도록 매 공정마다 진화하는 최적 연삭 모델을 개발하였으며, 가공 소요 시간을 최소로 하고 실 오차를 나노미터 정밀도로 조절할 수 있음을 입증하였다. 이는 연삭가공 현장에서 본 연구를 통하여 개발한 최적 연삭 모델을 적용시킴으로써 천체망원경 및 우주망원경 사업에서 반사경면을 국내에서 가공할 수 있도록 해주는 원천 기반기술을 마련한 것이다.

감사의 글: 이 연구는 한국기계연구원(과제:M1-0332-00-0011)의 지원에 의해 수행되었다. 본 연구의 치공구 설계 및 제작에 도움 주신 한국기초과학지원연구원 초정밀가공실의 김효식, 복민갑, 김상보님께 감사를 드린다.

참고문헌

- 한정열, 김석환, 김건희, 김대욱, 김주환 2004, 한국우주과학회지, 21, 141
- Benardos, P. G., & Vosniakos, G.-C. 2003, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 833
- Feng, C. X., & Wang, X. 2002, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 348
- Hecker, R. L., & Liang, S. Y. 2003, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 755
- Pierre, Y. B. 2003, *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* (New York: Springer-Verlab)
- Zhou, X.. & Xi, F. 2002. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 42. 969