

## 드레이퍼 방식 연마기에서의 툴 영향 함수 기법

이현수<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>한국표준과학연구원 우주광학연구단  
Ⓣ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

<sup>2</sup>과학기술연합대학원 측정과학과  
Ⓣ 305-333 대전광역시 유성구 어은동 52번지

양호순<sup>†</sup> · 이윤우

한국표준과학연구원 우주광학연구단  
Ⓣ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

김석환

연세대학교 천문우주학과 우주광학연구실  
Ⓣ 120-749 서울특별시 서대문구 신촌동 134번지

(2008년 9월 24일 받음, 2008년 12월 4일 수정본 받음, 2008년 12월 8일 게재 확정)

본 논문에서는 툴 영향 함수(Tool Influence Function)를 이용한 피치(pitch)툴의 정량적 물질 제거 제어 기법에 대하여 기술하였다. 피치 툴은 뛰어난 표면 거칠기를 생성시키는 반면 툴의 물질 변형이 상대적으로 크고 물질제거가 어렵기 때문에 일반적으로 숙련된 가공 기술자에 의한 정성적 연마 기법으로 간주되었다. 하지만 이러한 피치툴을 이용한 수치모사 및 실험을 수행한 결과, 정량적 피치 툴 연마 기법이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 실험과 수치모사에 의한 물질 제거 형상은 약 79%의 정확도로 일치하였다. 또한 직경 280 mm의 평면가공에 대한 수치모사 단계에서 5번의 모의 가공 후 p-v(peak to valley) 1 μm의 최초 형상오차를 168 nm까지 낮추는 결과를 얻을 수 있었다.

주제어: Pitch tool polishing, Tool influence function, Polishing, Figuring

### I. 연구 배경 및 목적

우주 산업 분야의 연구가 활발히 진행됨에 따라, 국내에서도 대형 정밀 광학계에 대한 수요가 증가하고 있다. 한국항공우주연구원은 다목적 실용위성 2호에 직경 0.6 m의 고해상도카메라(MSC: Multi-Spectral Camera)<sup>[1]</sup>를 탑재하여 운용 중에 있으며, 2014년까지 지속적인 다목적 실용위성의 개발 계획이 수립되어 있다. 뿐만 아니라, 국방 산업 및 정밀 측정 분야 등 다양한 산업 전반에 걸쳐, 고정밀 광학계의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 광학 가공기술은 이러한 산업 및 연구분야의 성장을 위한 핵심기술로 인식되고 있다.

광학 가공 기술은 크게 연삭(grinding), 연마(polishing)의 두 가지 공정으로 나뉘고 가공면의 형상 정밀도와 표면 거칠기의 정도에 따라 세분화 된다.<sup>[2]</sup> 연삭은 rms(root mean square) 수 μm의 형상오차로 피가공물(연삭 및 연마 단계의 광학거울)의 면을 가공하는 단계이다. 연삭 단계에서는 피가공물의 표면에서 반사가 일어 나지 않기 때문에 접촉식 형상 측정법이 사용된다. 일반적으로는 고정 입자 연삭(bound abrasive grinding) 후 자유 입자 연삭(loose abrasive grinding)의 과정

으로 가공이 이루어 진다. 연마단계에서는 피가공물 표면에서 빛의 반사가 이루어 지므로 간접계를 이용한 비접촉식 형상 측정법이 사용된다. 연마는 가공면의 거칠기를 낮추고 표면조도를 높이는 초기연마(polishing)와 연마 후의 형상을 수정하는 형상연마(figuring)로 나뉜다. 초기연마단계에서 가공면의 표면거칠기는 수 nm로 낮아진다. 이후의 형상연마단계에서는 측정과 가공의 반복과정을 통해 면의 형상을 수정한다. 면의 형상오차를 허용치까지 가공하면 광학가공의 모든 과정이 완료된다.

연마의 경우, 툴의 재질 선택에 따라 표면 거칠기, 가공 소요 시간 등 가공특성이 변하게 된다. 연마 툴에 사용되는 재료는 피치(pitch), 폴리우레탄(polyurethane), 합성천(synthetic cloath) 등 다양한 종류의 물질이 있는데, 이러한 툴의 재료 중 피치는 상대적으로 우수한 표면 거칠기를 생성시킨다. 하지만 연마 과정 중 툴 표면의 형상 변형이 상대적으로 크고 가공 중 손상 되는 경우가 많기 때문에 정량화된 연구가 이루어 지지 않은 연마 기법이다.

국내에서는 한국표준과학연구원(이하 표준연)이 직경 1 m급의 대형 비구면 제작 기술을 보유하고 있다. 현재까지 표준연에서 제작된 대형광학거울로는 600 mm 시민천문대 망원경용 주경, 800 mm 광학기준평면, 900 mm 시준장치용 주

<sup>†</sup>E-mail: hsy@kriss.re.kr

경, 1000 mm 비축포물면 등이 있다.<sup>[3,4]</sup> 하지만 현재까지는 국내에서 제작된 대형 광학거울의 경우 숙련된 가공 기술자의 경험에 의한 정성적 가공기법으로 제작되었기 때문에 쉽게 기술전수가 이루어지지 않아 제한된 기술자의 손에만 의존하는 단점이 있었다.

본 연구는 피치를 이용한 연마 툴의 영향 함수(이하 툴 영향 함수)를 적용하여 연마 후의 가공 결과를 예측하고 최적화된 가공 공정을 찾음으로써 기술자의 경험을 적게 사용할 수 있도록 하기 위한 것이다. 이를 위해, 표준연의 드레이퍼(Draper)<sup>[5]</sup> 방식 600 mm 광학연마기를 사용하였으며 연마기의 운동분석을 실시하였다. 또한 피치 툴 연마시 발생하는 물질의 제거 깊이 및 물질제거형상을 예측하기 위하여 툴 영

향 함수 실험을 실시하고 동일조건에 대한 수치모사와 비교한 결과 부피를 기준으로 79.12±0.12%의 정확도로 물질 제거 형상을 수치모사를 통해서 예측할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 광학거울 가공시 적용되는 연마기의 다양한 운동을 적용한 동적 툴 영향 함수(Dynamic Tool Influence Function)를 수치 모사하였다. 또한, 각각의 동적 툴 영향 함수를 기반으로 가공 데이터 베이스를 제작하여 280 mm 광학면의 가공 수치모사를 실시한 결과 p-v 1 μm, rms 340 nm의 형상오차를 p-v 168 nm, rms 26 nm까지 낮출 수 있었다.

## II. 광학연마기 반자동화

피치 툴의 연마 실험 및 수치모사를 위하여 표준 과학 연구원의 드레이퍼 방식 600 mm 광학연마기를 사용하였다. 그림 1과 같이 드레이퍼 방식 연마기는 피가공물의 회전과 툴의 스트로크(stroke)를 이용한 가공 방식으로 가공 변수의 설정에 따라 다양한 툴의 운동이 만들어 진다. 일반적인 드레이퍼 방식 연마기는 연마 툴이 광학 거울과의 마찰에 의해 불규칙하게 회전함으로써 결정론적인 연마에 한계가 있었다.

따라서 이러한 단점을 개선하기 위하여 새로운 툴 제어부를 제작 하였다. 개선된 툴 제어부는 그림 2와 같다. 툴 제어부에 서보모터(servo motor)를 장착한 후 타이밍 벨트(timing belt)를 사용하여 툴의 회전 축과 연결하였다. 이러한 연마기의 개선을 통해 툴의 회전 속도를 일정한 속도로 제어할 수 있었으며, 연마기의 각 제어부에 대한 초기 변수 제어가 가능한 반자동화된 광학연마 시스템을 구성하였다.

## III. 연마 툴의 해석적 운동 분석

그림 3은 회전하는 피가공물 표면 위의 툴의 운동을 보여 준다. 툴 표면의 임의의 점의 위치와 상대속도는 툴의 회전 속도, 스트로크 팔의 길이와 회전속도, 피가공물의 회전속도, 툴의 초기 위치에 의해 결정된다. 피가공물에 대한 툴의 임의의 점의 위치와 속도는 방정식 (1)과 같이 표현된다. 그림

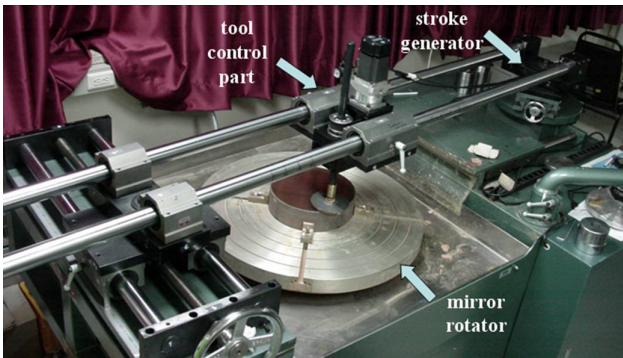
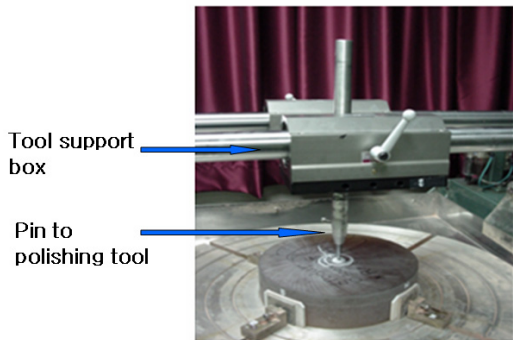
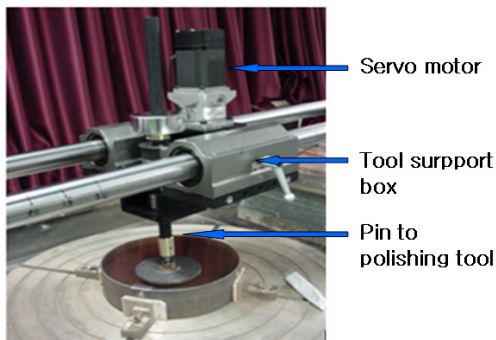


그림 1. 드레이퍼 방식 600 mm 연마기.



(a) 개선 전



(b) 개선 후

그림 2. 툴 제어부의 개선.

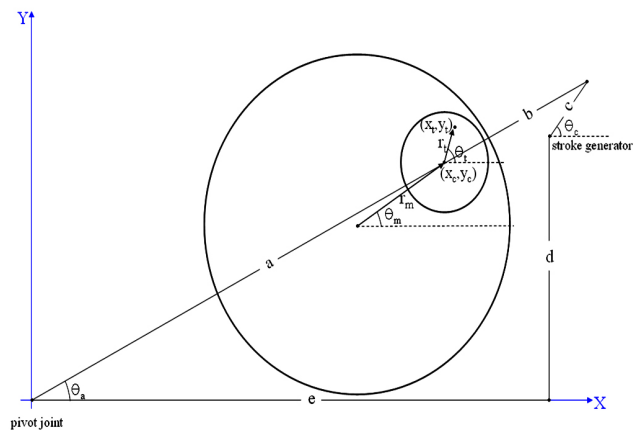


그림 3. 피가공물에 대한 툴의 운동.

의  $a$ 는 pivot joint로부터 툴의 중심까지의 거리,  $b$ 는 툴의 중심으로부터 스트로크 팔(stroke arm)까지의 거리,  $c$ 는 스트로크 팔의 길이,  $d$ 는 스트로크 발생장치의 중심에서 pivot joint까지의 수직거리,  $e$ 는 스트로크 발생장치의 중심에서 pivot joint까지의 수평거리를 나타낸다.  $\dot{\theta}_a$ 는 pivot joint의 각속도로 스트로크의 회전속도( $\dot{\theta}_c$ )의 함수이다.

$$\begin{aligned} x &= (a \cos \theta_a + r_i \cos \theta_i) \cos \theta_m + (a \sin \theta_a + r_i \sin \theta_i) \sin \theta_m \\ y &= -(a \cos \theta_a + r_i \cos \theta_i) \sin \theta_m + (a \sin \theta_a + r_i \sin \theta_i) \cos \theta_m \\ V_x &= -\dot{\theta}_m (r_m \cos \theta_m + r_i \cos \theta_i) + \dot{\theta}_i r_i \cos \theta_i + \dot{a} \cos \theta_a - a \cdot \dot{\theta}_a \sin \theta_a \\ V_y &= -\dot{\theta}_m (r_m \sin \theta_m + r_i \sin \theta_i) + \dot{\theta}_i r_i \sin \theta_i + \dot{a} \sin \theta_a + a \cdot \dot{\theta}_a \cos \theta_a \end{aligned} \quad (1)$$

툴의 운동 방정식이 물질의 제거 깊이와 형상을 예측하기 위한 중요한 요인으로 작용하기 때문에 식 (1)의 운동 방정식에 대한 검증은 실시하였다. 이를 위하여, CosmosMotion<sup>tm</sup>에서 3차원 모델링 기법을 사용하여 600 mm 광학연마기를 동일한 크기와 구조로 재 구성하고 가공변수의 초기값을 준 후 툴의 운동 궤적을 동일 시간 간격으로 추적하였다. 그림 4는 반사거울의 회전속도 6 rpm, 스트로크(stroke)의 길이 20

mm, 회전속도 2 rpm으로 1분간 가공할 경우 툴의 임의의 점이 만드는 운동 궤적으로, 그림 4의 (a)는 운동방정식에 의한 궤적이고, 그림 4의 (b)는 3차원 모델링에 의한 것이다. 그림 4의 (c)는 툴의 운동 시간 변화에 따른 두 궤적간의 차이를 보여주는데 1  $\mu$ m 이하의 오차를 갖는 것을 볼 수 있었고, 이는 실제 트레이퍼 연마기의 각 축에 대한 위치 정확도 0.5 mm의 약 0.2%에 해당한다. 또한, 오차의 폭은 증가 하지 않고 주기적으로 반복되었다. 따라서, cut-off error를 감안했을 때, 위에서 구한 운동방정식이 트레이퍼 연마기가 만드는 툴의 운동 궤적을 정확하게 표현한다는 것을 확인하였다.

#### IV. 연마 툴의 영향 함수 수치모사 및 실험

툴 영향 함수는 물질제거방정식<sup>[6]</sup>으로부터 유도된다. 물질 제거방정식은 광학면 연마시 발생하는 물리적 화학적 현상을 기술한 것으로 식 (2)와 같이 표현된다.  $\kappa$ 는 물질제거상수,  $P$ 는 연마압력,  $V$ 는 피가공물에 대한 툴의 상대속도,  $\Delta T$ 는 툴의 가공시간,  $\Delta Z$ 는 물질의 제거깊이를 표현한다.

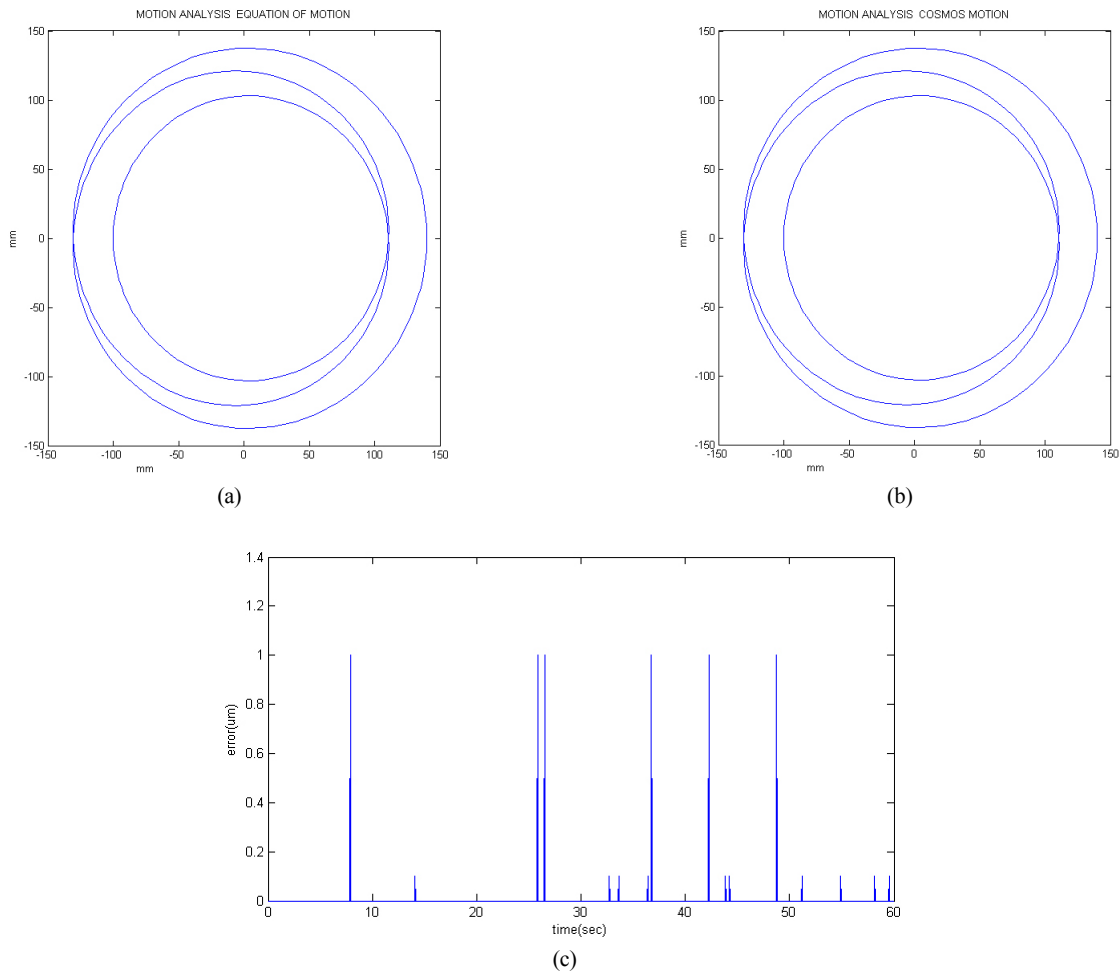


그림 4. Motion analysis results (a) 이론적으로 계산된 궤적 (b) 3D model에 의한 궤적 (c) 각 좌표점의 오차.

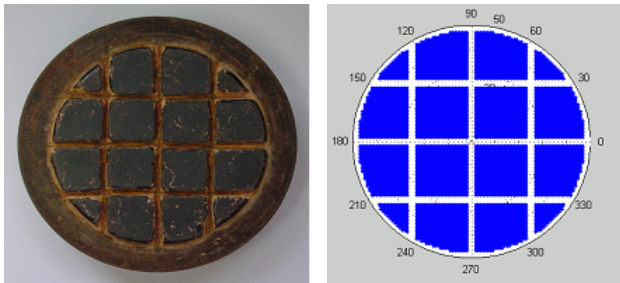
$$\Delta Z = \kappa \cdot P \cdot V \cdot \Delta T \quad (2)$$

물질제거방정식의 각 변수들을 600 mm 광학 연마기의 가공 조건들로 이루어진 값으로 변환할 수 있으며, 본 연구에 사용된 연마기의 가공 변수 및 가공자에 의해 설정이 가능한 입력 변수의 형태로 변환하면 식 (3)에서 표현된 바와 같이 600 mm 드레이퍼 방식 연마기에 사용된 피치 툴의 툴 영향 함수를 구할 수 있다. 식의  $W_{tool}$ 는 툴의 무게,  $A_{contact}$  툴의 접촉면적이며,  $V_x, V_y$ 는 식 (1)에서 구한 운동방정식의 x, y방향 속도 성분이다.

$$\Delta Z = \kappa \cdot W_{tool} / A_{contact} \cdot (V_x^2 + V_y^2)^{1/2} \cdot \Delta T \quad (3)$$

이러한 운동방정식과 툴 영향 함수를 이용하면, 초기 가공 변수의 설정에 따라 다양하게 발생되는 툴의 운동 및 물질의 제거 형상을 예측하도록 하는 툴 영향 함수의 수치모사가 가능하다. 수치모사를 위해서, 그림 5와 같이 실제 피치 툴의 형상과 동일한 모양과 크기를 갖도록 수치모사용 툴을 구성하였다. 수치모사 및 실험에 사용된 툴의 크기는 직경 96 mm로, 25 mm 간격으로 연마제의 유입을 원활히 하기 위한 홈을 내었다. 수치모사에서는 툴 위에 1 mm 간격으로 툴 영향 함수를 적용하기 위한 점들을 생성시켰다. 툴 위의 각각의 점들은, 일정 시간 간격으로 운동방정식에 따라 위치를 변화 시켜 가면서 툴 영향 함수에 의해 계산된 물질의 제거 깊이를 피가공물위에 누적시키도록 하였다. 이러한 과정을 통해, 물질의 형상을 예측할 수 있는 수치 모사가 가능하게 되었다.

이미 알려진 바와 같이 물질제거 상수는 연마조건에 따라



(a) 96 mm 피치 툴 (b) 수치모사용 96 mm 피치 툴

그림 5. 실제 피치 툴과 수치모사용 피치 툴.

유동적인 값을 갖는데, 연마제의 온도 및 농도, 연마 입자의 크기, 공기의 온도 및 습도, 피치 툴의 경도 등 다양한 환경적 요인에 의해 변하게 된다. 따라서 물질 제거 상수의 값을 일정하게 유지시켜 주는 것이 정량적 피치 툴 연마의 핵심이라고 할 수 있다. 이러한 피치 툴의 물질제거 상수의 변화 및 연마 특성을 파악하기 위하여 표 1과 같은 조건에서 실험 및 수치모사를 실시하였다. 툴을 피가공물의 중앙에 위치 시킨 후 툴의 회전과 압력에 의해서만 연마를 하도록 설정하였다. 툴의 회전속도는 20, 25, 30, 35, 40 rpm, 연마압력은 0.0056, 0.0081, 0.0097, 0.0103, 0.0109  $\times 10^{-6}$  N/mm<sup>2</sup>의 값으로 변화를 시켜가면서 총 13가지 경우를 선택하여 각각에 대해 3회씩 반복적으로 툴 영향 함수 실험을 실시하였다. 피가공물은 p-v 0.5  $\lambda$  ( $\lambda=633$  nm) 이하의 형상오차를 갖는 직경 150 mm의 Astro\_Sital<sup>[7]</sup>을 사용하였다. ZYGO<sup>®</sup>사의 GPI 간섭계를 이용하여 피가공물의 형상오차를 실험 전과 후에 측정하고 두 데이터의 차를 계산하여 물질의 제거 형상을 구하였다.

그림 6은 연마압력과 툴의 회전속도 변화에 따른 물질 제거율의 결과이다. 전반적으로 물질 제거율이 연마 툴의 회전속도와 연마 압력에 따라 증가 하는 경향을 보여주었다. 하지만 높은 압력과 회전 속도에서 물질 제거율이 감소하는 경우도 발생하였다. 이러한 원인은 각 실험마다 관심을 가지고 조절하는 실험조건뿐만 아니라 측정오차나 피치 툴의 변형 등과 같이 예상하지 못하는 실험조건들이 미세하게 바뀔때

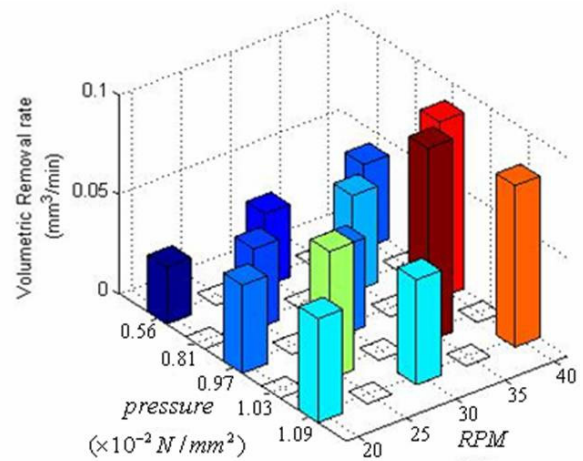


그림 6. 물질제거율의 변화.

표 1. 실험 및 수치모사 조건

air temperature	20±1 °C
slurry	cerium oxide : water (1:10)
time	5 min
rotational velocity of tool	20, 25, 30, 35, 40 (rpm)
polishing pressure	0.0056, 0.0081, 0.0097, 0.0103, 0.0109 ( $\times 10^{-6}$ N/mm <sup>2</sup> )
pitch	#64 GUGOLZ (stiffness: standard) <sup>[8]</sup>
mirror material	Astro-Sital

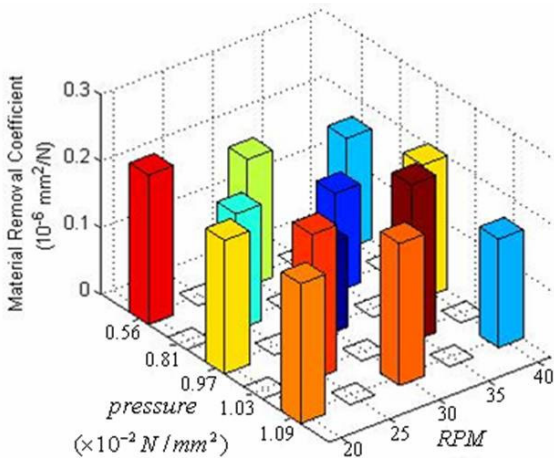


그림 7. 물질제거상수값의 변화.

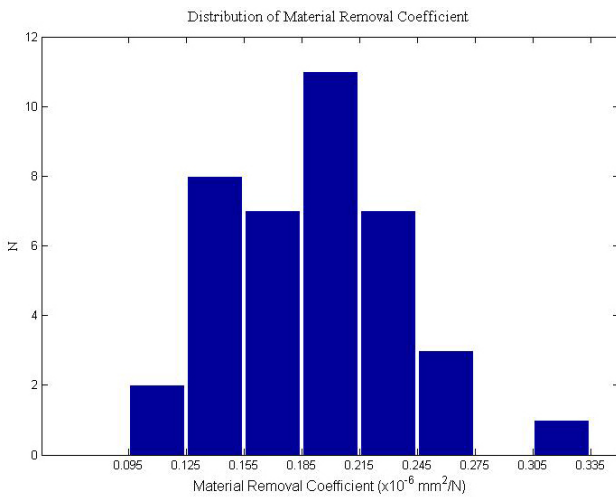


그림 8. 물질제거상수값의 분포.

따라 물질제거상수가 변하여 나타나는 현상으로 생각된다. 그림 7은 각 실험에서의 물질 제거 상수의 변화를 보여준다. 물질 제거 상수값이 가공 변수와 뚜렷한 상관관계를 가지고 있지 않는 것으로 보아 물질 제거 상수값이 상수 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이 상수값은 그림 8과 같은 분포를 보여준다. 평균값  $0.1909 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ 에 표준편차  $0.045 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ 인 Gaussian 함수와 유사한 형태의 분포를 보였으며, 최소값은  $0.104 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ , 최대값은  $0.312 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ 이었다. 따라서 실제 연마작업을 진행할 때는 초과연마를 막기 위하여 물질제거상수의 이러한 범위를 고려하여 연마공정을 제어해야 할 것이다.

그림 9는 툴 영향함수 실험 및 수치모사의 물질제거형상을 비교한 한 예이다. 툴의 회전속도 35 rpm, 연마압력  $0.0103 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ 의 조건에 대한 결과이다. 그림 9의 실험과 수치모사의 일치도는 제거된 부피기준으로 85.12%이며, 모든 툴 영향 함수 실험과 수치모사의 일치도는 제거된 부피기준으로 평균  $79.12 \pm 0.12\%$ 였다. x축 중심으로부터 27 mm와 40 mm

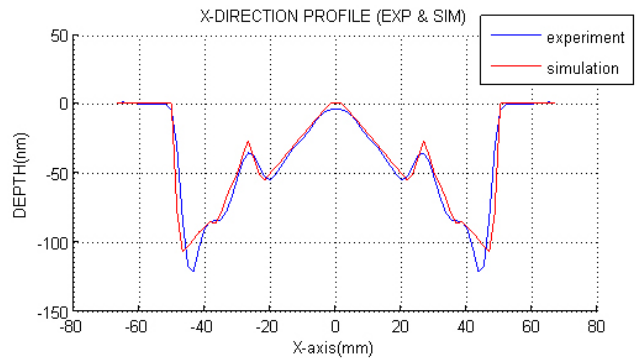


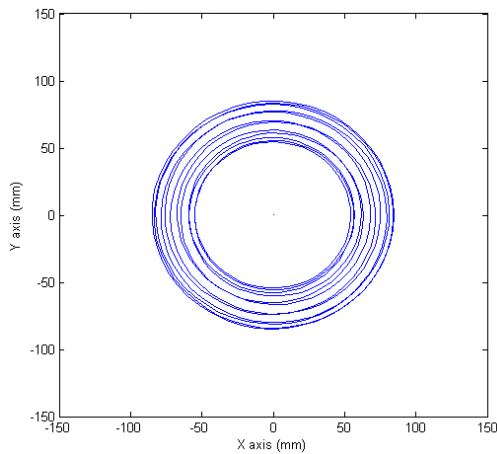
그림 9. 툴 영향 함수 실험 및 수치모사의 물질제거 형상.

지점의 용기된 지점들은 연마제의 유입을 위해 피치 툴에 만든 홈의 패턴에 의해 생성된 것으로 생각된다. 이러한 결과들은 툴 영향 함수를 이용한 피치 툴의 물질 제거 제어 기법의 가능성과 본 연구를 위해 제작된 툴 영향 함수 수치모사의 정확성을 입증해 주었다.

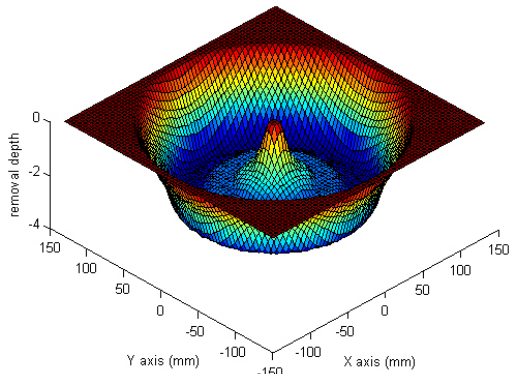
### V. 동적 툴 영향 함수를 이용한 광학거울 수치모사

지금까지 보여진 결과들은 연마물의 스트로크와 피가공물이 정지된 상태에서 툴의 회전과 연마압력에 의한 가공 실험으로부터 나온 것이다. 툴이 회전을 하지만 피가공물의 일정한 위치에 고정되어 있으므로 이와 관련한 가공함수의 표현을 정적 툴 영향 함수라고 할 수 있다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 드래어퍼 방식 연마기의 경우 스트로크와 피가공물의 회전에 따라 매우 다양한 툴의 궤적과 그에 따른 각각의 물질 제거 형상을 갖게 된다. 따라서, 실제 광학면의 연마에서 발생하는 물질의 제거 형상을 예측하기 위해서는 다양한 가공변수들에 의해 생성되는 동적 툴 영향 함수가 필요하다. 즉, 연마물의 스트로크, 피가공물의 회전, 연마물의 초기 위치에 의해 생성되는 다양한 물질 제거 형상(동적 툴 영향 함수)에 기존의 정적 툴 영향 함수에서 제시된 물질 제거 상수의 범위를 이용하면, 현재의 피가공물 표면의 형상오차를 효과적으로 제거 하기 위한 가공변수 및 가공 시간을 예측할 수 있는 것이다. 그림 9는 이러한 동적 툴 영향 함수의 한 예이다. 그림 10(a)는 직경 280 mm인 피가공물의 회전속도는 6 rpm, 스트로크 1 rpm, 스트로크 폭이 40 mm인 상태에서 생성되는 툴의 중심의 궤적을 나타내며, (b)는 이러한 툴의 운동에 의해 발생하는 동적 툴 영향 함수의 물질 제거 형상을 보여준다. 초기 조건을 다르게 하면 다른 물질 제거 형상을 얻을 수 있는데, 이와 같이 피가공물의 회전속도, 스트로크 및 스트로크의 폭에 관한 조건을 달리해가면서 총 2156 개의 동적 툴 영향 함수로 구성된 가공 데이터 베이스를 구축하였다.

이러한 가공데이터 베이스를 이용하여 가상의 직경 280 mm 평면 형상 연마를 위한 알고리즘을 구현하였다. 기본 원리는 가공데이터 베이스의 동적 툴 영향 함수 중에서 현재의 형상



(a) 틀의 궤적



(b) 물질제거형상(3D)

그림 10. 동적 틀 영향 함수의 예.

오차와 가장 유사한 형태를 갖는 틀 영향 함수를 찾아내게 되는데, 이에 대한 원리는 그림 11에 나타나 있다. 우선 초기 형상오차(initial surface error)에 맞게 2156개의 동적 틀 영향 함수 각각의 크기 즉 가공 시간을 조절한다. 그리고 초기 형상오차에서 각각의 틀 영향 함수를 뺀다. 잔여 형상 오차(residual error)의 p-v와 rms를 계산하여 가장 낮은 잔여 형상 오차를 보여준 틀 영향 함수를 뽑아내게 된다. 그러면 다음 단계에서의 초기 형상오차는 전 단계의 초기 형상오차에서 뽑힌 틀 영향 함수를 뺀 결과가 된다. 이러한 과정을 반복하여 지속적으로 형상 오차를 줄여나가게 된다.

이러한 알고리즘을 이용하여, 도넛 형태의 형상오차를 제거하는 연마 수치모사를 실시하였다. 도넛형태의 형상 오차는 연삭 후 초기 연마단계에서 나타나는 가장 일반 적인 형태의 형상 오차이며, 그림 12와 같이 피가공물의 중심과 모서리 부근이 움푹 패인 형태를 보여준다. 그림 12(a)와 같이 연마가 반복되면서 피가공물의 형상오차가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 처음 2회의 연마는 96 mm 틀을 이용한 결과이며, 면의 형상오차의 공간주파수가 점차 커짐에 따라 다음 3회의 연마는 48 mm 틀을 이용하였다. 그림 (b)는 연마에 의한 p-v, rms의 변화를 보여준다. 총 5회의 연마 실행으

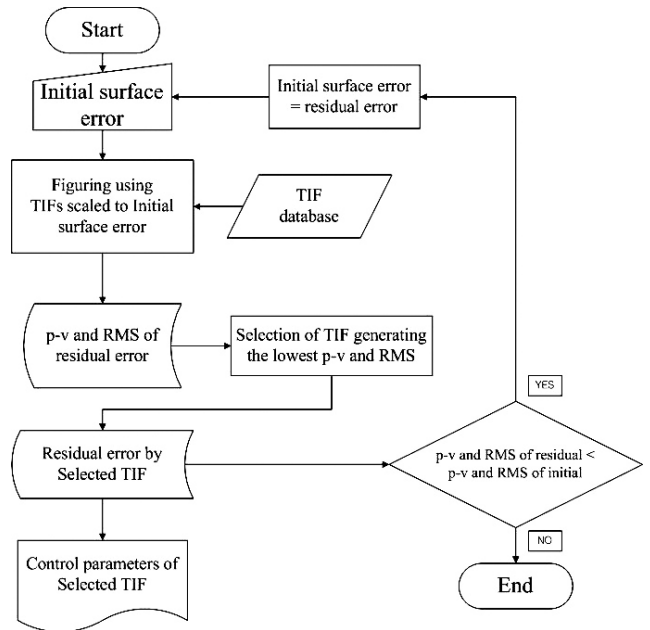
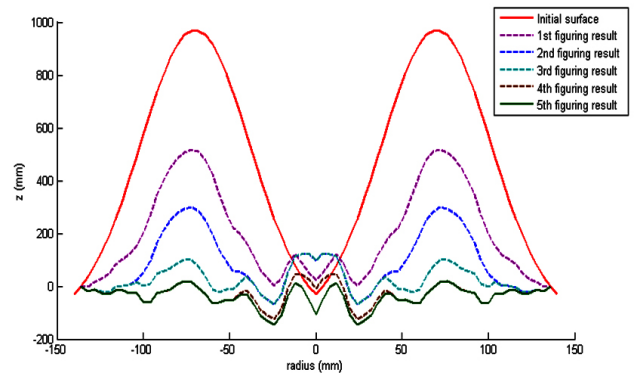
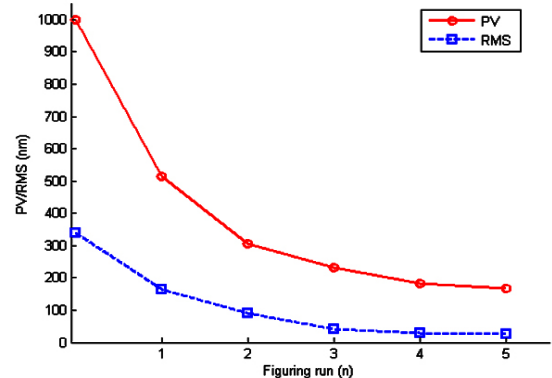


그림 11. 가공 알고리즘.



(a) 형상오차 변화



(b) p-v, rms의 변화

그림 12. 연마수치모사에 의한 피가공물의 형상오차 변화.

로 초기에 p-v 1  $\mu$ m, rms 340 nm의 형상오차를 가졌던 면이 p-v 168 nm, rms 26 nm까지 낮추어지는 결과를 얻을 수 있었다.

## VI. 결 론

본 연구는 새로운 연마 기술로서 툴 영향 함수를 이용한 피치 툴의 물질 제거 기법의 초기 연구에 관한 것이다. 피치 툴의 툴 영향 함수 실험 및 수치모사를 실시하여 두 결과가 79%의 정확도로 일치하는 것을 보여 정량적 피치 툴 연마 기법의 가능성을 제시하였다. 또한 실제 가공에 적용이 가능한 가공 수치 모사 기법을 개발하였고 수치모사 단계에서 가공 표면의 오차 형상을 효과적으로 제거하는 결과를 얻을 수 있었다. 앞으로 이러한 연구를 바탕으로 실제 평면 가공에 대한 피치 툴 연마 실험 및 수치모사와의 결과 비교를 실시할 것이다. 이러한 결과비교를 통해 피치 툴 연마 수치모사의 정확성이 입증되면, 향후 미터급 대구경 가공에 확대 적용할 예정이다. 피치 툴을 이용한 이러한 정량화된 물질 제거 기법은 과거 시도된 적이 거의 없었던 만큼 이러한 결과는 광학 가공공정에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

[1] Y. S. Kim, E. S. Lee, and S. H. Woo, "SYSTEM TRADE-

OFF STUDY AND OPTO-THERMO-MECHANICAL ANALYSIS OF A SUNSHIELD ON THE MSC OF THE KOMPSAT-2," *한국우주과학회지*, 제20권 4호, pp. 393-402, 2003.

[2] Pierre, Y. Bely, *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* (Springer, New York, 2003), pp. 157-160.

[3] 이윤우, *우주산업용 측정 및 시험기술 개발* (표준과학연구원, 2005), pp. 53-61.

[4] 양호순, "직경 1 m 비축포물면의 가공 및 평가," *한국광학회지*, 제19권 4호, pp. 287-293, 2008.

[5] Optical Surface Technology, LLC, <http://www.opticalsurfacetech.com/ostprod.html>.

[6] D. W. Kim and S. W. Kim, "Novel Simulation technique for efficient fabrication of 2m class hexagonal segments for extremely large telescope primary mirror," *Proc. SPIE* 5639, pp. 48-59, 2005.

[7] LZOS, INC, [http://www.lzos.ru/en/glass\\_sitall.htm](http://www.lzos.ru/en/glass_sitall.htm).

[8] Stephen P. Sutton, "Development of New Synthetic Optical Polishing Pitches," *Optical Fabrication and Testing (OFT), OTuA2*, 2004.

## Deterministic Pitch Tool Polishing Using Tool Influence Function

Hyun-Su Yi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Space Optics Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, 1 Doryoung-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-340, Rep. of Korea*

<sup>2</sup>*Dept. of measurement science, University of Science and Technology, 113 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-333, Rep. of Korea*

Ho-Soon Yang<sup>†</sup> and Yun-Woo Lee

*Space Optics Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, 1 Doryoung-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-340, Rep. of Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: hsy@kriss.re.kr*

Sug-Whan Kim

*Space Optics Laboratory, Dept. of Astronomy, Yonsei univ., 134 Sinchon-Dong, Seodaemun-Gu, Seoul 120-740, Rep. of Korea.*

(Received September 24, 2008; Revised manuscript December 4, 2008; Accepted December 8, 2008)

In this paper, we described a well-determined material removal technique using a pitch tool by TIF (Tool Influence Function). The pitch tool provides superior surface roughness compared to other types of polishing tool. However, because of difficulty in handling the pitch tool, pitch tool polishing has rarely been analysed, which led many craftsman to eliminate the pitch tool from their experiences. We found that it was possible to use a pitch tool in the well-determined material removal after the completion of computer simulation and experiment. We could simulate the TIF of the pitch tool with 79% accuracy. Also, after five successive simulations of polishing process on a 280 mm optical flat, the surface p-v error was found to be reduced from 1 μm to 168 nm.

OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (220.5450) Polishing; (240.6700) Surface.