

자유곡면 연마를 위한 자동 연마 시스템 개발

전 문식(충북대원)* 오 창진(충북대원)

이 응석(충북대) 김 옥현(충북대)

Development of Computer Control Polishing System for Free Form Surface

M. S. Jeon*, C. J. Oh, E. S. Lee, O. H. Kim

Abstract : In the process of optical parts machining, polishing has been applied. Traditional polishing process is suitable for spherical optical parts. But it is very difficult to apply traditional process for aspheric optical parts. Nowadays, as growing needs for aspherical optic parts, many researches have been conducted. In this study, we developed computer controlled polishing system which consists of three major parts of active pressure control for correcting polishing process, mechanical on-machine measurement for rough polishing, and optical on-machine measurement for finish polishing, respectively.

In this paper, a systematic strategy for correcting polishing process, pressure control scheme for polishing tool, and on-machine measurement methods for automated and precise polishing are suggested. The information about developed machine is also included.

1. 서론

비구면 광학소자가 사용되는 분야는 가까이
는 CD 픽업렌즈, DVD 렌즈의 가전제품에서, 천
체 망원경, Space Telescope, 지구관측(Remote
Sensing), LIDAR등 넓은 분야에 걸쳐 그 수요가
증가하고 있다. 또한, 이런 광학기기등에 사용되

는 광학부품(특히,비구면렌즈 또는 반사경)은 0.1
 μm 이내 높은 형상 정밀도와 5~10 nmRa의 매
우 높은 표면품질이 요구된다.

기존의 연마작업은 연삭에 의해 1차 가공된
형상을 그대로 유지하면서 표면 거칠기만을 향상
시키는 방식이 주로 이루어지고 있으며, 현재 사
용되고 있는 폴리싱 방법중에는 요구하는 형상과
유사한 모양을 가진 폴리싱 툴을 제작하여 연마
하는 랩형식이 있지만, 이는 연마기의 구조상 구
면 연마작업에는 용이하나, 고부가가치를 창출할
수 있고 난이도가 높은 회전축 비대칭의 비구면
가공에는 적용하기가 곤란하며, 형상이 바뀔때마
다 툴을 다시 제작해야 한다는 문제점을 가지고
있다. 그래서 현재의 비구면 광학부품가공은 주
로 숙련된 기술자의 수작업에 많이 의존하고 있
으며, 생산되고 있는 제품가격 또한 고가이다. 이
러한 문제를 극복하기 위하여 최근에는 제어 기
술을 바탕으로한 정밀 형상 수정연마가 시도되고
있다.

본 연구에서는 연마작업을 자동화하고 수정
연마과정을 적용하여 높은 정밀도의 비구면 광학
부품을 제작할 수 있는 컴퓨터 제어 형상수정연
마 시스템의 설계 및 제작에 대한 내용을 다루고
있다.

2. 시스템 설계

기존에 연마작업에 사용되고 있는 스윙암형
태의 연마기는 전체 형상을 끌고루 문질러 표면

품질을 향상시키는 형식으로 위치제어가 곤란하며 수정가공에는 적합하지 못하다. 이에 비해 5축의 문형타입 구조는 3차원 형상 가공에 적합하며, 강성에도 유리한 장점을 가지고 있으며 위치제어가 용이하다. 본 연구에서 선정된 시스템은 직교3축(X,Y,Z축)에 곡면대응성 향상을 위한 z축의 기울임축(S축)과 회전 테이블(A축)을 포함하여 총 5축으로 설계하였다.

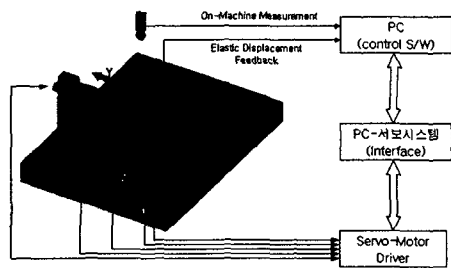


Fig. 1 System Configuration of Computer Controlled Polishing System

X축은 소재가 고정되는 회전테이블이 부착되는 축으로 Y축과 함께 접촉식 기기상 측정(OMM) 시 동작하게 된다. Y축은 공구의 이송 및 접촉식 OMM 측정 프로브를 이송하게 된다. Z축은 공구가 부착되어 변위를 발생시켜 능동압력제어가 이루어지는 축이다. S(기울임축)축은 곡면 대응성을 향상시키기 위하여 Z축을 기울이는 축으로 감속기를 탑재하여 부하능력을 향상하고 정밀한 회전각을 얻을 수 있도록 하였다. Table 1.은 설계된 가공 시스템의 기본 사양을 나타내었다.

가공물은 연삭에 의해 1차 형상가공하게 되고 본 시스템에 부착되어 2~3단계의 형상 수정 과정을 거치게 된다. 연마 가공중 가공물의 착탈은 위치 선정에 좋지 않은 영향을 주게 될뿐만 아니라 측정 및 가공 오차가 발생할 우려가 있어, 측정과 수정가공이 한 기기에서 이루어야 할 필요가 있다. 이를 위해서는 기기상측정(OMM)이 공정중에 반드시 필요하다. 본 연구에서 구현되는 기기상측정은 접촉식과 광학식으로 나누어 진행되며, 접촉식은 연마공정 초기 단계에서 거

Table 1 Specification of designed system

형태	문형	
제어축수	5축(X,Y,Z,S,A) 동시제어	
작업공간	X축	1600
	Y축	1250
	Z축	300
	S축 선회	$\pm 45^\circ$
	A축 회전	$\pm \infty$
이송속도	X축	300 mm/s
	Y축	500 mm/s
	Z축	150 mm/s
	S축	150 rpm
	A축	60 rpm
작업하중	50 kg	
기 타	PC based control	

칠은 형상수정을 위해 진행되며, 광학식 형상측정은 마무리 단계에서 정밀측정 및 정밀 형상수정을 위해 적용된다.

Fig 2.는 설계된 시스템의 강성 해석 결과를 나타내고 있으며, 1차 모드가 109.17 Hz에서 나타나고 있으며 충분히 견고하게 설계되었음을 확인하였다.

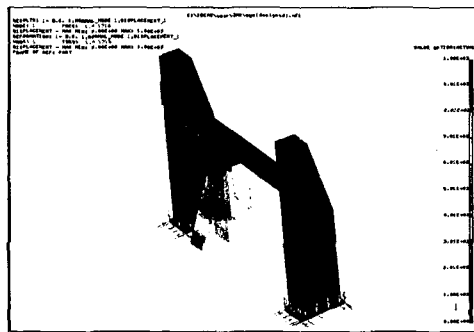


Fig 2 . 1st natural mode of designed system

3 연마용 공구 설계

3.1 능동형 압력제어 공구설계.

폴리싱 공정에서 재료제거량에 영향을 미치는 요소에는 Preston계수, 공구와 공작물 사이의 상

대속도, 압력, 체제시간이 있다. 여기에서 Preston계수는 연마조건에 의해 결정되는 상수이고, 상대속도와 체제시간은 가공조건에 의해 설정될 수 있으나, 압력은 별개의 메카니즘을 가지도록 설계되어야 하며, 임의의 압력을 설정하기 위해서는 전체 시스템과는 별도의 제어구조를 가지도록 해야 한다. 본 연구에서는 구조를 간단히 하고 원활한 압력제어를 위하여 탄성체의 변형을 이용하여 공구이송변위를 제어함으로써 압력이 발생되도록 하였다.

설계된 압력제어 공구는 Z축에 설치되고 변위센서로 스프링의 변형량을 측정, 압력으로 환산하여 피드백 제어하도록 하였다. 또한 공구접촉면에 전달되는 압력은 가공면에 항상 수직하게 유지되어야 하며, 이를 위해 Z축을 기울일 수 있도록 시스템을 설계하고, 폴리싱 공구 끝단은 가공면에 잘 접촉되도록 볼조인트로 연결하였다.

수정연마를 위한 조건중 압력과 더불어 고려되어야 할 것이 가공물과 폴리싱패드간의 상대속도이다.

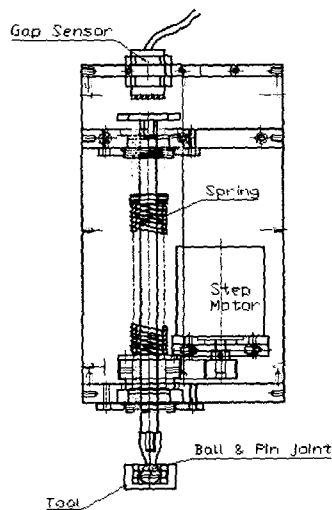


Fig 3. Drawing of active pressure control polishing tool

본 시스템에서는 모터를 이용하여 공구를 회전시켜 속도를 제어 하도록 하였다. 설계된 압력

공구의 구조를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 압력제어공구의 정,동적 특성

본 연구에서는 압력발생원으로 탄성체의 변형을 이용하였으며, 탄성체로는 인장스프링을 이용하였다. 스프링은 가공시 적용하게 될 최대 압력을 기준으로 하여 설계하였다. 최대 발생 압력인 30 kPa을 기준으로 하여 설계하였다. 스프링 변형량 측정 변위센서의 감지거리를 10 mm, 연마틀의 직경을 50 mm로 할 경우 최대 발생력은 6 kgf이고 탄성계수는 약 0.6 kgf/mm로 계산된다. Fig. 4에 탄성계수 0.6으로 설계된 스프링의 정적 하중에 대한 변형량을 실험한 결과를 나타내었다. 실험 결과 스프링상수는 0.59 kgf/mm로 설계한 값과 잘 맞았다.

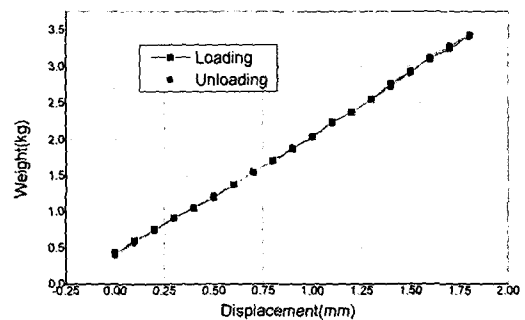


Fig. 4 Static characteristic of designed tool

Fig. 5은 탄성계수 0.6인 스프링이 조립된 상태에서 압력제어 공구에 임펄스를 가하여 동특성 실험을 한 결과이며, 지수적 감소방법을 적용하여 해석한 결과는 다음과 같다.

Table 2 Dynamic Characteristic of Designed Tool

Parameter	Value
$C(\text{kg} \cdot \text{s}/\text{mm})$	0.026
$k(\text{kg}/\text{mm})$	0.4512
ζ	0.0386
$\omega_n(\text{rad}/\text{sec})$	296.6

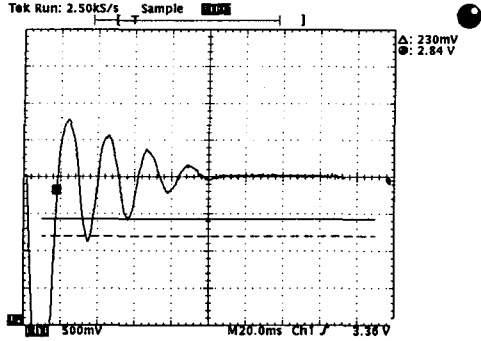


Fig 5. Dynamic Characteristic of designed Tool

4 압력제어 방식 수정연마가공 알고리즘

폴리싱의 가공변수와 재료 제거율에 관한 관계는 Preston식으로 알려진 다음식에 의해서 표현되고 있다.

$$dh(x, y)/dt = K_{wear} \cdot P(w, y) \cdot V(x, y)$$

폴리싱 공구가 소재의 반경방향의 한 위치에서 접촉할 때의 재료 제거율을 단위제거함수라하면, 단위제거함수 $dh(x, y)/dt$ 는 압력 P, 상대속도 V, Preston계수인 K_{wear} 에 의해 결정된다. 일정시간 폴리싱한 후에, 그 영역의 크기와 깊이를 측정하여 접촉 영역 계수 값을 구함으로써, 폴리싱의 가공 영역을 예측할 수 있다.

수정연마가공 순서는 Fig. 6에 나타나있으며 연삭공정을 통하여 기본형상으로 가공한 소재의 형상데이터를 접촉식 기기상측정을 사용해서 얻는다. 이 데이터를 이용하여 CAD데이터와 비교하여 형상오차를 획득하고, 각 위치의 형상오차의 크기에 따라 결정된 제거량으로부터 단위제거함수를 적용하여 압력, 상대속도, 체재시간 등 연마 가공 조건을 구성한다. 시스템의 제어기에서 주어진 가공조건이 적용될 수 있도록 이송속도 및 공구의 위치제어를 수행한다.

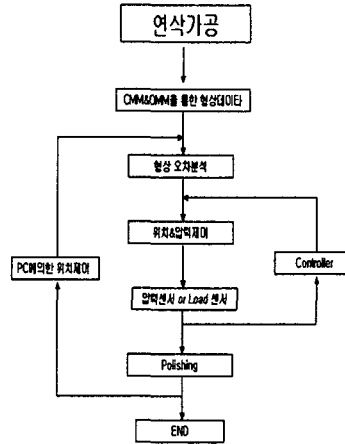


Fig. 6 Flow chart of correcting polishing process

능동 압력제어는 Fig. 7에서 보인 바와 같이 공작물 표면형상변화에 대하여 일정하게 압력이 유지될 수 있어야하며 Fig. 8에 압력제어 시스템의 블록선도를 나타내었다. 그림에서 처럼 기준 입력으로 주어지는 압력을 발생시킬 수 있는 z축 변위로 변환하고 스프링 변형량을 피드백하여 제어한다.

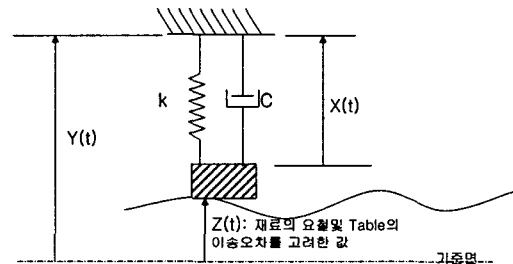


Fig. 7 Schematic of polishing process model

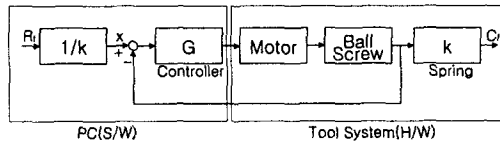


Fig. 8 Block diagram of active pressure control system

5 토론

비구면 형상을 가공하는 방법으로는 다이아몬드 선삭 또는 정밀 연삭을 이용하여 가능하나 선삭후 공구자국을 제거하거나 광학면을 얻기 위해서는 후공정으로 폴리싱이 반드시 수행되어야 한다. 일반적으로 폴리싱 공정을 거치면 선삭 또는 연삭을 통하여 가공된 형상을 해치게 되며 이를 방지하기 위해서는 많은 노력이 필요하다.

기기상 측정 장치는 제작된 장치의 이송 기구에 부착하여 사용되므로 정확한 측정 결과를 얻기 위하여 오차 보정을 실시하여 보완할 것이다. 형상 수정연마를 위해서는 가공조건에 따른 정확한 제거량 예측이 가능해야 하며 광학 유리 소재에 대한 연마특성 실험을 진행중이다.

6 결론

본 연구에서는 비교적 덜 정밀하게 가공된 형상의 소재로부터 가공중 측정과 수정의 단계를 반복하여 고정밀 고품위의 비구면 광학 소자를 가공할 수 있는 컴퓨터 제어 방식 폴리싱 머신을 연구하였다.

기기상 측정을 통하여 수정연마가공으로 제거해야하는 제거량을 결정할 수 있도록 하였다.

정밀한 수정 연마가공이 이루어지도록 실시간 압력제어방식을 적용하였다.

압력 제어가 용이하도록 탄성체의 변형을 이용하는 능동압력제어 공구를 적용하였다.

Fig. 9에 개발된 컴퓨터 제어방식 수정연마가공 시스템의 사진이 나와있다.



Fig. 9 Photo. of developed computer controlled polishing machine.

참 고 문 헌

1. 황학변, 光學렌즈 精密加工(研磨편)
2. Johanmir M. Ramulu, *Machining of Ceramics And Composites*, 1998, Marcel Dekker,inc.
3. Bahram Shahian & Michel Hassul, *Control System Design Using Matlab*, 1993, Prentice-Hall, inc.
4. Manabe Ando, Mahito Negishi, Masahumi Takimoto, Akinobu Deguchi and Nobuo Nakamura, "studies on super-smooth polishing(2nd report)" JSPE, vol 62, No. 3, pp408-412, 1996
5. Manabe Ando, Mahito Negishi, Masahumi Takimoto, Akinobu Deguchi and Nobuo Nakamura, "Local area polishing of glass by fine pressure controlling", JSPE, vol 60, pp1642-1646, 1994