

형상수정 폴리싱에 관한 기초연구

김의중*, 김경일, 김호상(고등기술연구원 생산기술연구실)

Basic Studies on Corrective Polishing

E. J. Kim, K. I. Kim, H. S. Kim(Manufacturing Technology Lab., IAE)

ABSTRACT

For the development of a ultra-precision CNC polishing system including on-machine measurement system, we study a corrective polishing algorithm. We calculated unit removal profiles for various polishing tools and polishing tool positions. Using these results we simulate the corrective polishing process based on dwell time control. We calculate dwell time distributions and residual error of the polishing simulation method and the FFT calculation method. We got good dwell time distributions and small residual when we used the FFT calculation method. This results will be used for the optimization of corrective polishing process.

Key Words : Local area polishing (부분연마), Dwell time (체제시간), Corrective polishing (형상수정연마), Unit removal function (단위제거함수)

1. 서론

컴퓨터제어를 이용한 형상창성 폴리싱 기술은 폴리싱 중에 공작물의 형상을 목표로 하는 정밀도로 가공하는 기술로서 광학부품에 사용되는 광의 파장이 짧아짐에 따라서 광학부품의 초정밀한 가공이 요구되어 1970년대 미국을 중심으로 컴퓨터의 발전과 더불어 개발이 이루어졌다. 이 방식 폴리싱 기술은 평면이나 구면에 비하여 고비용인 비구면 가공을 위해 자주 사용되고 있다.^[1]

최근 광학, 정보기기 디바이스에 탑재되고있는 여러 종류의 광학렌즈에는 비구면형상화 및 고정도화가 행해지고 있다. 향후에도 이런 경향은 더욱 진행되는 동시에 양산화, 저가격화의 요구도 점점 심해질 것이 예상된다. 또 단과장용의 X선 반사경과 같은 초정밀한 비구면 광학부품의 개발이 요구되어지고 있다.

비구면 광학면을 가공하는 방법으로서의 우선 소재를 NC제어 비구면 연삭기에서 최종형상으로 가공한 후 점탄성체 폴리셔를 공기압 등에 의해 공작물과 접촉시켜 균등한 압력으로 폴리싱하여 전 가공에서 완성된 형상을 붕괴시키지 않고 표면품질만 향상시키는 균등 폴리싱법이 있다.^[2] 그러나 엑시머 레이저용 스테퍼 렌즈와 X선 응용광학 미러 등의 비구면에 있어서는 보다 높은 형상정도와 표면

의 미소한 물결 제거가 필요하게 되어 위의 균등폴리싱법 만으로는 필요한 형상정도를 달성하는 것이 쉽지 않다. 따라서 요구되는 형상정도를 얻기 위해 가공이 필요한 부분만을 폴리싱하여 원하는 형상을 얻는 형상 수정폴리싱이 유효한 폴리싱법이 된다.

본 논문은 미소한 회전공구를 임의의 축 대칭인 곡면형상을 가지는 가공물의 표면위를 CNC 제어하면서 이동시키는 것에 의해 목표형상으로 가공하는 폴리싱 방법에 대한 것이다. 최종적으로 On-Machine 측정시스템을 포함한 초정밀 CNC 폴리싱 시스템을 개발하기 위한 기초연구로서 형상수정 폴리싱에 대하여 해석적으로 검토하였다. 먼저 가공기의 프로그램을 작성하는데 사용하기 위해 공구형상에 따른 단위가공형상을 시뮬레이션에 의해 구하였다. 계산된 단위제거함수를 이용하여 임의의 목표형상을 가공하기 위한 체제시간 계산 알고리즘을 검토하여 간단한 목표가공형상에 대하여 가공 시뮬레이션법과 FFT기법을 사용하여 체제시간과 잔류오차를 구하였다.

2. 본론

2.1 형상수정 폴리싱

최종적으로 개발하게될 초정밀 CNC 폴리싱 시스템에 대한 개념도를 Fig. 1에 나타냈다. 공작물에 비

하여 상대적으로 작은 공구를 사용하여 전 가공공정인 연삭이나 절삭에서 발생된 형상오차를 수정가공하는 동시에 목표 표면거칠기로 다듬질가공하는 것으로 수정가공 회수의 증가에 따라서 목표로 하는 가공정밀도를 얻을 수 있다.

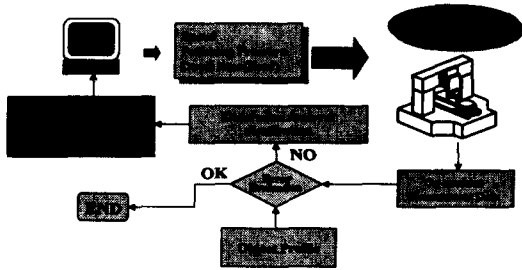


Fig. 1 Schematic diagram of CNC polishing system

위의 형상수정 폴리싱의 핵심인 체제시간 제어 가공법으로서 Preston의 가설로부터 유도된 식을 사용한 Convolution model이 제안되고 있다^[3]. Fig. 2에 그 원리를 나타낸다. 여기서 단위제거형상은 공구와 가공조건에 따라서 결정되며 본 논문에서는 다음절의 사용공구에 따른 시뮬레이션 값을 사용한다.

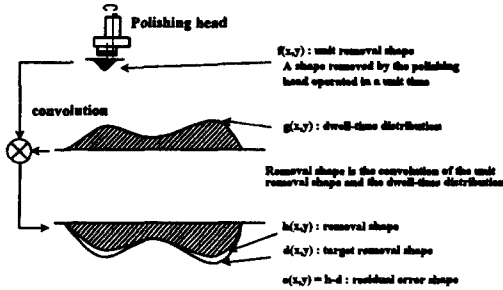


Fig. 2 Convolution model for corrective polishing based on dwell time control

2.2 폴리싱공구에 따른 단위제거함수

시뮬레이션에 사용된 공구는 Fig. 2와 같이 원형의 평면패드 공구로 공구회전 중심이 패드중심과 편심되어있다. 폴리싱 공구에 따른 단위제거형상을 계산하기 위해 Fig. 3과 같이 좌표계를 설정하였다. 공구의 회전중심 O_1 은 공작물 회전중심 O_2 에서 D 만큼 떨어져있고 패드의 중심 O_3 는 공구회전중심 O_1 으로부터 u 만큼 편심되어있다. 공작물이 회전하지 않는 경우 가공영역은 O_1 을 중심으로 하는 반지름 O_1N 의 원내가 된다. 폴리싱 가공량은 아래의 Preston의 경험식을 사용하여 구한다.

$$\frac{dh(x, y)}{dt} = K \cdot P(x, y) \cdot v(x, y) \quad (1)$$

여기서 K 는 폴리싱조건에 의해 결정되는 비례정수,

P 는 가공압력, v 는 폴리셔와 가공물의 상대속도, t 는 폴리싱시간이다.

한 점에서의 제거율(h)이 가공조건에 대하여 알려지면 다음의 방법으로 그 결과를 적용할 수 있다. 즉, 시간 간격을 압력과 속도가 거의 일정하게 남아있는 동안으로 설정하면 공작물 표면상의 한 점에서의 가공깊이는 단순한 시간적분이 된다.

$$\Delta h = \int_0^{\Delta t} K(\text{abrasive, toolmaterial, workmaterial}) \cdot P(x, y, t) \cdot v(x, y, t) \cdot dt \quad (2)$$

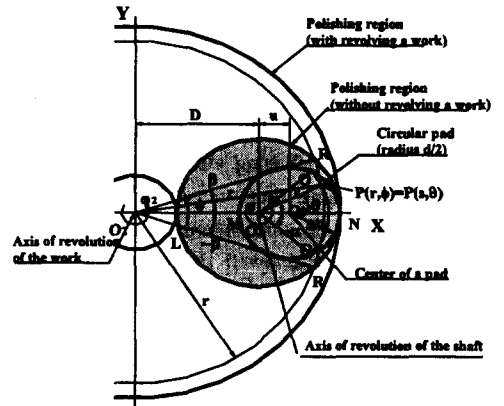


Fig. 3 Coordinate system for simulation of unit removal shape

또한 폴리싱헤드의 압력을 일정하게 제어하는 것에 의해 임의의 x 점에서의 가공시간 t 동안 가공된 가공 깊이는

$$h(x, y) = K \cdot P \cdot \int_0^t v(x, y) \cdot dt \quad (3)$$

로 쓸 수 있다.

Fig. 3의 좌표계에 식(3)을 적용하고, 계산된 가공깊이를 반지름 r 인 원주상에 균등 분배하여 공작물 1회전시의 평균화된 가공 깊이를 아래의 식으로 나타낼 수 있다.^[4]

$$H(r) = (1/2\pi) \int_{-\beta}^{\beta} (Kt'/2\pi) \int_{-\alpha}^{\alpha} v(r, \phi, \theta) d\theta \cdot d\phi \\ = (K') \int_0^{\beta} \int_0^{\alpha} v(r, \phi, \theta) d\theta \cdot d\phi \quad (4)$$

여기서 v 는 P 점에서의 공구와 공작물간의 상대속도이다.

식(4)를 사용하여 Table 1과 같은 조건에 대하여 u 에 따른 공구제거형상을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. K' 값은 편의상 1로 하였으며 결과 값을 정규화하지 않았다. 폴리싱 가공에서 K' 값은 매우 작기 때문에 결과값의 실제크기는 수마이크로미터 오더가 된다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 폴리싱 공구설계에 따라서 단위 제거형상이 다르게 되며 가공하고자하는

목표형상에 따라서 최적의 공구가 있음을 알 수 있다. 즉, 여기서 사용한 공구의 경우 편심량에 따라서 가공영역이 바뀌게 되고 단위제거형상의 예리함이 바뀌게 된다. 또한 편심량이 0.5 mm 이상이 되면 단위제거형상이 비대칭이 되어 형상수정에 사용하기에 좋지 않게 됨을 알 수 있다.

Table 1 Polishing simulation conditions

Pad size in diameter	2 mm
Revolving speed of pad, ω_1	500 rpm
Revolving speed of work, ω_2	100 rpm
Eccentricity, u	0.2 ~ 0.8 mm
Pad position in work radius	5 mm

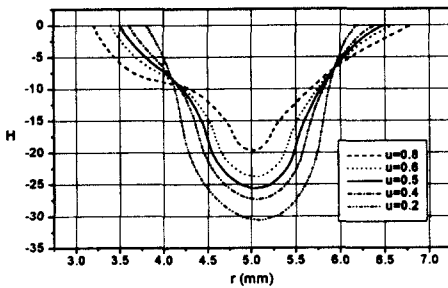


Fig. 4 Calculated unit removal profiles for various polishing tools

Fig. 5에 직경 50 mm 공작물상의 공구위치에 따른 단위제거형상을 계산한 결과를 나타냈다. 조건은 Table 1과 같으며 이때 $u = 0.5$ 를 사용하였으며 공구위치간격은 2 mm이다. 각각의 공구위치에서의 단위제거형상은 가공경로와 상대속도 차이에 의하여 다르게 된다. 공작물의 회전중심부분에서 제거형상이 급격하게 커지는 것은 가공경로가 짧은 것에 기인하는 것이다.

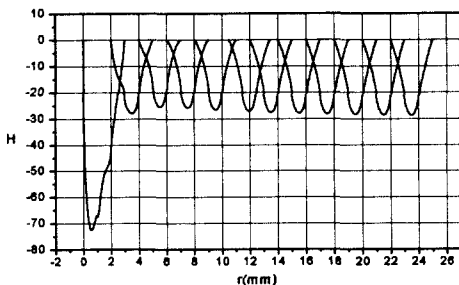


Fig. 5 Calculated unit removal profiles for various polishing tool positions

2.3 목표형상을 가공하기 위한 체제시간

앞절에서 계산된 단위제거형상을 사용하여 목표 제거형상으로 가공하기 위하여 체제시간을 계산하였다. 먼저 가공시물레이션에 의해 체제시간을 계산하는 순서를 Fig. 6에 나타냈다. 이 방법의 장점은 공구위치에 따른 단위제거형상을 그대로 반영하여 체제시간을 계산할 수 있는 점이다.

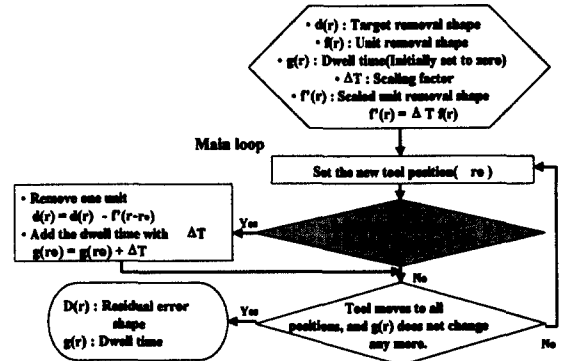


Fig. 6 Flow chart of deconvolution algorithm based on the simulation of polishing process

위의 순서도와 같은 방법으로 정현파 형태의 목표제거형상을 가공하기 위해 필요한 체제시간 계산 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 1회 가공시 나타난 잔류형상오차는 0.0361 RMS이며 작은 반지름부분에서 잔류오차가 크게 나타나고 있다. 이는 단위제거형상이 이 부분에서 크기가 급격하게 변하기 때문으로 생각된다.

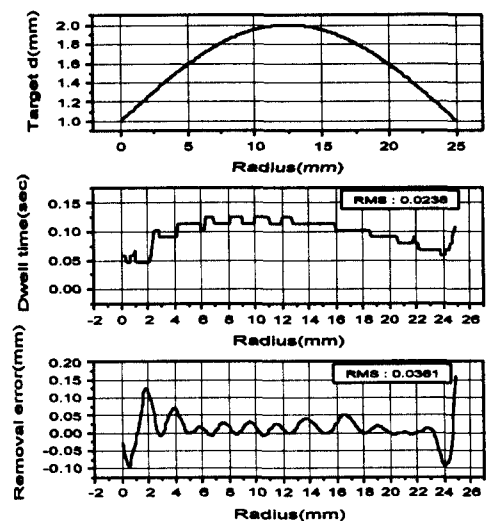


Fig. 7 Dwell time distributions and residual error of polishing simulation method

후기

본 논문은 선도기술 개발사업 중 첨단생산시스템 개발의 연구비에 의하여 지원되어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. I. Kataoka, "Super smooth polishing technology for aspheric mirrors", JSPE, Vol. 64 No. 7 pp983-986, 1998.
2. H. Susuki, S. Hara and H. Matsunaga, "Study on aspherical surface polishing using small rotating tool," JSPE, Vol. 59, No. 10, pp131-136, 1993.
3. R. Apsden, R. McDonough and F. R. Nitchie, Jr., "Computer assisted optical surfacing," Appl. Opt., 11, 12, pp2739, 1972.
4. T. Kurobe, Y. Yamada, N. Sakai, S. Ueda and K. Singu, "Local area polishing of glass by fine pressure controlling," JSPE, Vol. 60, No. 11, pp1642-1646, 1994.
5. M. Negishi, M. Ando, M. Takimoto, A. Deguchi and N. Nakamura, "Studies on super-smooth polishing(2nd report)," JSPE, Vol. 62, No. 3, pp408-412, 1996.

FFT기법을 이용하여 계산시간과 잔류오차를 동시에 줄일 수 있는 체재시간 계산법이 제안되었다.¹⁵⁾ 이 방법으로 앞에서와 동일한 목표제거형상에 대하여 $r = 5.0$ 에서의 단위제거형상을 사용하여 체재시간을 계산한 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 체재시간의 분포가 양호하고 잔류오차가 0.0020 RMS로 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 공구위치에 따라 바뀌는 단위제거형상을 고려하는 방법의 개발이 필요하다.

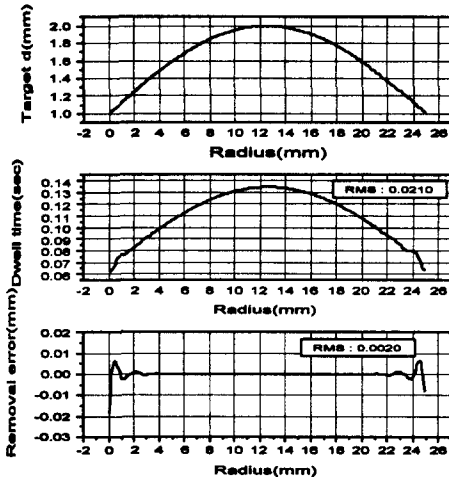


Fig. 8 Dwell time distributions and residual error of FFT calculation method

3. 결론

본 논문은 초정밀 CNC 폴리싱시스템을 개발하기 위한 기초적 연구로서 형상수정 폴리싱에 필요한 공구에 따른 단위가공형상을 구하고 이를 사용하여 형상수정 폴리싱을 시뮬레이션한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제거하고자하는 목표형상에 따라서 최적의 단위가공형상을 갖는 공구의 설계가 시뮬레이션을 통하여 가능하다.
- 2) 체재시간을 계산하는 방법 중에 가공시뮬레이션에 의한 방법이 공구위치에 따른 단위제거형상을 반영할 수 있어 실제와 더 가까운 조건이기는 하나 계산시간이 길고 잔류오차가 크다.
- 3) FFT기법을 사용하는 체재시간 계산법으로 하나의 평균적인 단위제거형상을 사용하여 시뮬레이션한 결과 체재시간분포가 양호하며 잔류오차가 작게 나타났다.

본 연구의 결과는 향후 실험을 통하여 실용성을 검증하여 초정밀 형상수정 폴리싱에 있어서 가공공정을 최적화하는데 사용될 예정이다.