한국정밀공학회지 제19권 제1호 (2002년 1월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 1, January 2002.

소형 평면공구를 이용한 형상수정 폴리싱에 관한 연구

김의중*, 신근하**

A Study on Corrective Polishing Using a Small Flat Type Polisher

Eui Jung Kim*, Keun Ha Shin**

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 flat type 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 test corrective polishing algorithm with an optical glass. The target removal shape is a sine wave that has amplitude 0.3 micro meters. We find this polishing process has a machining resolution of nanometer order and is effective for sub-micrometer order machining. This result will be used for the software development of the CNC polishing system.

Key Words : Local area polishing (부분연마), Dwell time (체재시간), Corrective polishing (형상수정연마), Unit removal shape (단위가공형상), Small flat type tool (소형평면공구)

1. 서론

컴퓨터제어를 이용한 형상창성 폴리싱 기술은 폴리싱 중에 공작물의 형상을 목표로 하는 정밀도로 가공하는 기술로써 광학부품에 사용되는 광의 파장이 짧아짐에 따라서 광학부품의 초정밀한 가공이 요구되어 1970년대 미국을 중심으로 컴퓨터의 발전과 더불어 개발이 이루어졌다. 이러한 방식의 폴리싱기술은 평면이나 구면에 비하여 고비용인 비구면 가공을 위해 자주 사용되고 있다.[1,2]

최근 광학, 정보기기 디바이스에 탑재되고 있는 여러 종류의 광학렌즈에는 비구면형상화 및 고정도화가 행해지고 있다. 향후에도 이런 경향이 계속되는 동시에 양산화, 저가격화의 요구도 점점 심해질 것으로 예상된다.

비구면 광학면을 가공하는 방법으로써는 우선 소재를 NC제어 비구면 연삭기에서 최종형상으로 가공한 후 점탄성체 폴리셔를 공기압 등에 의해 공작물과 접촉시켜 균등한 압력으로 폴리싱하여 전가공에서 완성된 형상을 붕괴시키지 않고 표면품질만 향상시키는 균등 폴리싱법이 있다.[3] 그러나 엑시머 레이저용 스테퍼 렌즈와 X선 응용광학 미러 등의 비구면에 있어서는 보다 높은 형상정도와 표면의 미소한 물결 제거가 필요하게 되어 위의 균등 폴리싱법 만으로는 필요한 형상정도를 달성하는 것이 쉽지 않다. 따라서 요구되는 형상정도를 얻기

☞ 2001년 5월 8일 접수
* 고등기술연구원 생산기술센터 및 아주대 시스템공학과
** 아주대 기계및산업공학부

위해 가공이 필요한 부분만을 폴리싱하여 원하는 형상을 얻는 형상 수정폴리싱이 유효한 폴리싱법이 된다. 그러나 이러한 부분 폴리싱의 경우 목표로 하는 가공성능을 얻기 위해서는 폴리싱 공구의 설계와 공구에 따른 가공조건을 포함한 가공성능평가가 중요하다.

본 논문은 미소한 평면 형상의 회전공구를 임의의 축 대칭인 곡면형상을 가지는 가공물의 표면위에 CNC 제어하면서 이동시킴으로써 목표형상으로 가공하는 폴리싱 방법에 대한 것이다. 최종적으로 On- Machine 측정시스템을 포함한 초정밀 CNC 폴리싱 시스템의 가공제어 프로그램을 개발하기 위한 기초연구로써 해석적인 검토와 실험을 통하여 평면 공구의 형상수정 폴리싱 성능을 검토하였다. 먼저 평면 형상 공구에 대한 단위가공형상과 공작물상의 위치에 따른 단위가공형상을 시뮬레이션에 의해 구하였다. 단위가공형상을 구하는 기초실험을 통하여 폴리싱 상수를 구하고 이를 이용하여 목표제거형상을 가공하기 위한 공구의 체재시간을 계산하고 가공실험을 하였다. 또한 공작물 위치에 따른 단위가공형상을 시뮬레이션에 의해 구한 값과 실험값을 사용하여 목표제거형상을 가공하기 위한 공구의 체재시간을 계산하고 이를 사용하여 가공실험을 수행한 결과를 비교하여 나타내었다.

2. 폴리싱 시뮬레이션

2.1 형상수정 폴리싱

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

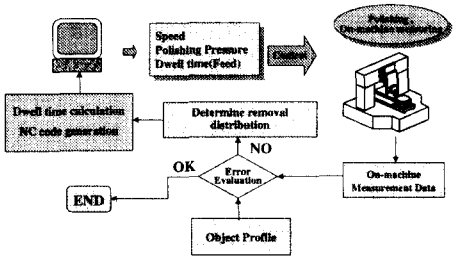

Fig. 1 Schematic diagram of CNC polishing system

공작물에 비하여 상대적으로 작은 공구를 사용하여 전 가공공정인 연삭이나 절삭에서 발생된 형상오차를 수정 가공하는 동시에 목표 표면 거칠기로 다듬질가공 하는 것으로 수정가공 회수의 증가에 따라서 목표로 하는 가공정밀도를 얻을 수 있다. 위의 형상수정 폴리싱의 핵심인 체재시간 제어 가공법으로서 Preston의 가설로부터 유도된 식을 사용한 Convolution model이 제안되고 있다[4]. Fig. 2에 그 원리를 나타낸다. 여기서 단위가공형상은 공구와 가공조건에 따라서 결정된다.

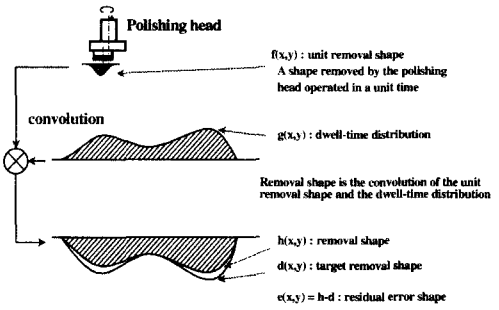

Fig. 2 Convolution model for corrective polishing based on dwell time control

2.2 공구형상에 따른 단위가공형상

시뮬레이션에 사용된 공구는 Fig. 2와 같이 원형의 평면 공구로 공구회전 중심이 공구의 중심과 편심되어 있다. 폴리싱 공구에 따른 단위가공형상을 계산하기 위해 Fig. 3과 같이 좌표계를 설정하였다.

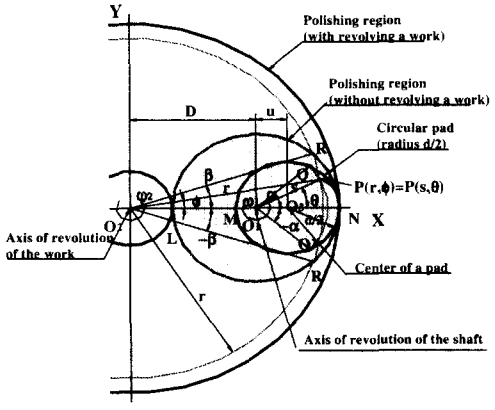

Fig. 3 Coordinate system for simulation of unit removal shape

공구의 회전중심 O_1은 공작물 회전중심 O_2에서

D만큼 떨어져 있고 패드의 중심 O_3은 공구회전중심 O_1으로부터 u 만큼 편심되어 있다. 공작물이 회전하지 않는 경우 가공영역은 O_1을 중심으로 하는 반지름 O_1N의 원내가 된다. 폴리싱 가공량은 아래의 Preston의 경험식을 사용하여 구한다.

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

여기서 K는 폴리싱조건에 의해 결정되는 비례정수, P는 가공압력, v는 폴리셔와 가공물의 상대속도, t는 폴리싱시간이다. 한 점에서의 제거율(dh/dt)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.

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

또한 폴리싱헤드의 압력을 일정하게 제어하는 것에 의해 임의의 점에서의 가공시간 t 동안 가공된 가공깊이는

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

로 쓸 수 있다.

Fig. 3의 좌표계에서 폴리싱 시간이 폴리셔 및 공작물의 회전주기에 비하여 충분히 길고 폴리셔와 공작물의 회전주기가 동기 되어 있지 않는다면 결과적으로 폴리싱 가공된 형상은 공작물 중심에 대하여 회전대칭이 된다고 할 수 있다. 따라서 공작물 회전중심으로부터 반경 r의 원주상의 임의점 P(r,ϕ)에서는 같은 형상으로 균일하게 가공된다고 가정할 수 있다. 공작물이 회전하지 않고 폴리셔만 회전할 때는 공작물 반경 r 의 원주 중 폴리싱된 부분은 원호 RR'이며, 원호 RR'상의 모든 점에 대하여 식(3)을 적용하여 가공깊이를 계산하고 이것을 반경 r의 원주상의 각 점에 균등하게 분배하여 평균화한 것을 공작물 1회전시의 가공깊이로써 아래의 식으로 나타낼 수 있다.[5]

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

여기서 v는 P점에서의 공구와 공작물간의 상대속도이다.

식(4)를 사용하여 Table 1과 같은 조건에 대하여 u에 따른 공구가공형상을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 4에 나타냈다.

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

K'값은 편의상 1로 하였으며 계산결과 값을 정규화하지 않았다. 폴리싱 가공에서 K'값은 매우 작기 때문에 결과값의 실제크기는 수마이크로미터 오더가 된다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 폴리싱 공구설계에 따라서 단위가공형상이 다르게 되며 가공하고자 하는 목표제거형상에 따라서 최적의 공구가 있음을 알 수 있다. 즉, 여기서 사용한 공구의 경우 편심량에 따라서 가공영역이 바뀌게 되고 단위가공형상의 예리함이 바뀌게 된다. 또한 편심량이 0.5 mm 이상이 되면 단위가공형상이 비대칭이 되어 형상수정가공에 사용하기에 좋지 않게 됨을 알 수 있다.

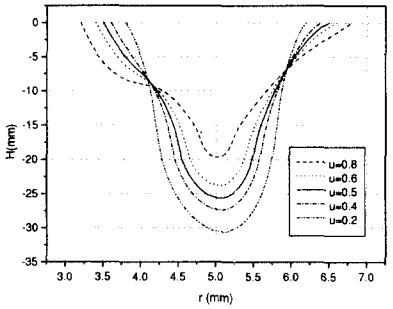

Fig. 4 Calculated unit removal profiles for various polishing tools

Fig. 5에 직경 50 mm 공작물상의 공구위치에 따른 단위가공형상을 계산한 결과를 나타냈다. 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같으며 이때 u = 0.5, 공구위치간격은 2 mm이다. 각각의 공구위치에서의 단위가공형상은 가공경로와 상대속도 차이에 의하여 다르게 된다. 공작물의 회전중심부분에서 가공형상이 급격하게 커지는 것은 가공경로가 짧은 것에 기인하는 것이다.

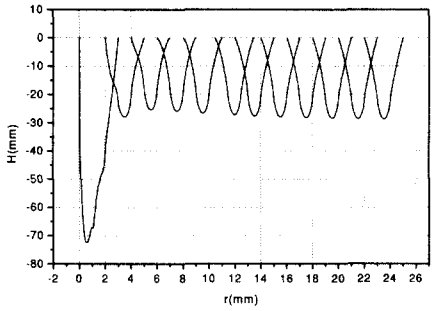

Fig. 5 Calculated unit removal profiles for various polishing tool positions

2.3 체재시간 계산

앞 절에서 계산된 단위가공형상을 사용하여 계산위치에서의 단위가공형상의 중첩을 고려하여 목표제거형상으로 가공하기 위한 체재시간을 계산하였다. 먼저 가공시뮬레이션에 의해 체재시간을 계산하는 순서를 Fig. 6에 나타냈다. 이 방법의 장점은 공구위치에 따른 단위가공형상을 그대로 반영하여 체재시간을 계산할 수 있는 점이다.

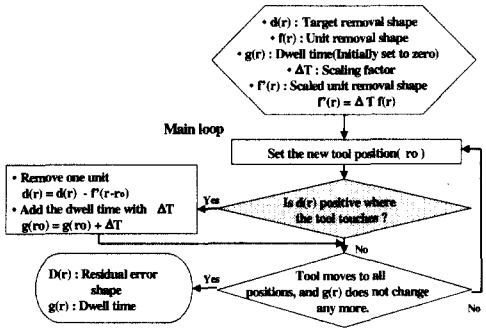

Fig. 6 Flow chart of deconvolution algorithm based on the simulation of polishing process

위의 순서도와 같은 방법으로 정현파 형태의 목표제거형상을 가공하기 위해 필요한 체재시간 계산결과를 Fig. 7에 나타냈다. 1회 가공시 나타난 잔류형상오차는 0.0361 RMS이며 중심에 가까운 부분에서 잔류오차가 크게 나타나고 있다. 이는 단위가공형상이 이 부분에서 크기가 급격하게 변하기 때문으로 생각된다.

FFT기법을 이용하여 계산시간과 잔류오차를 동시에 줄일 수 있는 체재시간 계산법이 제안되었다.[6] 이 방법으로 앞에서와 동일한 목표제거형상에 대하여 r = 5.0에서의 단위가공형상을 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 단위가공형상을 고려하는 방법의 개발이 필요하다.

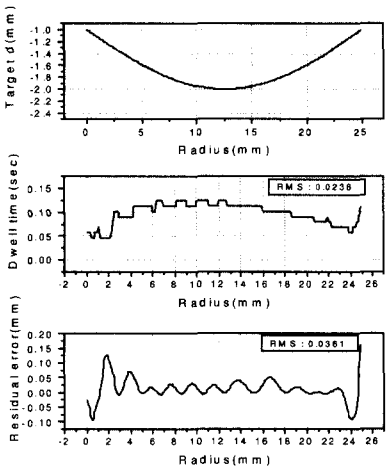

Fig. 7 Dwell time distributions and residual error of polishing simulation method

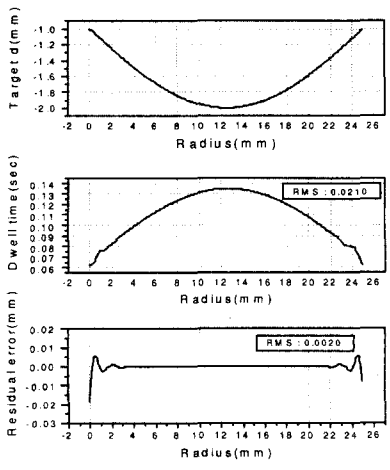

Fig. 8 Dwell time distributions and residual error of FFT calculation method.

3. 폴리싱 실험 및 고찰

3.1 폴리싱 조건 및 공구

폴리싱 실험의 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Polishing condition for a flat polishing tool

Workpiece	BK7(ϕ50 x 40 t)
Polisher	Polyurethane plate(ϕ2.8 x 2t) Eccentricity, u = 1.0 mm
Abrasive	CeO_2
Particle size	0.9 ㎛
Concentration	20 wt%
pH	7
Rotational speed	
Tool	ω_1 = 500 rpm
Workpiece	ω_2 = 50 rpm

가공조건은 시뮬레이션시 사용한 조건과 비슷하도록 설정하였으며 공구는 두께 2.0 mm, 지름 2.8 mm 의 폴리우레탄 패드를 금속으로된 원형의 공구에 1.0 mm 편심을 주어 본드를 사용하여 부착하여 만들었다. Fig. 9에 제작된 공구의 외관을 나타내었다. Fig. 10에 사용된 실험장치의 외관과 Table 3에 사양을 각각 나타내었다.

Fig. 9 Flat type polishing tool

Fig. 10 Polishing test apparatus

Table 3 Specifications of test apparatus

Stroke(X x Y)	300 x 300 mm
Feed rate of axes	0.001~5 m/min
Feedback resolution of axes	1 ㎛
Rotational speed	
Work spindle	~ 600 rpm
Polishing spindle	~ 3000 rpm
Polishing Force feedback resolution	1 g

가공전 소재의 표면 거칠기 값은 Ra 3.5 nm로 양호한 가공면을 가지고 있었다. 가공중 폴리싱액은 공구근처에 적하 방식으로 20 mℓ/min 으로 공급하였다. 가공된 형상의 측정에는 Talyor Hobson사의 Form TalySurf Series2를 사용하였다.

3.2 단위가공형상 실험

앞의 폴리싱 실험조건에서 공작물을 정지시키고(ω2 = 0) 여러 가지의 가공력과 가공시간에 대하여 공구를 이송시키지 않고 고정된 위치에서 가공실험을 수행하였다. 일정한 가공력에서 최대가공깊이는 Fig. 11에서 보듯이 가공시간에 잘 비례함을 알 수 있다.

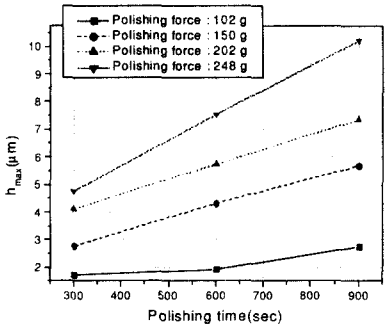

Fig. 11 Maximum height of unit removal shape with polishing time

또한 같은 가공시간에서 최대가공깊이는 Fig. 12에서 보듯이 가공력에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 13에 가공력 202 g을 주고 900 초 동안 가공한 가공형상의 단면 측정결과를 시뮬레이션한 결과와 함께 나타내었다. 공구의 회전 중심부분에서는 공구와 공작물사이의 상대속도가 0 이기 때문에

거의 가공이 되지 않았다. 전체적으로 실제 가공형상이 시뮬레이션한 결과보다 약간 더 뾰쪽한 형상이나 시뮬레이션 결과와 매우 유사하게 가공되는 것을 알 수 있다.

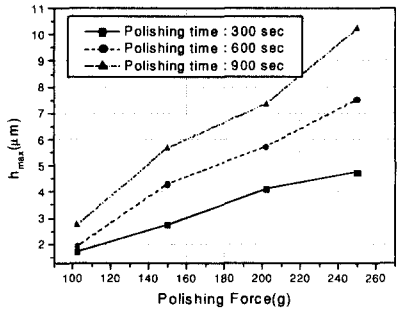

Fig. 12 Maximum height of unit removal shape with polishing force

가공면의 거칠기는 Ra 30 ~ 200 nm정도의 값이고 가공하중이 커지고 가공시간이 길어짐에 따라서 거칠기는 악화되며 하나의 가공형상에서도 Fig. 13에서 보듯이 공구의 중앙부위는 폴리싱액의 유입이 어렵기 때문에 외주면 보다 거친면이 된다.

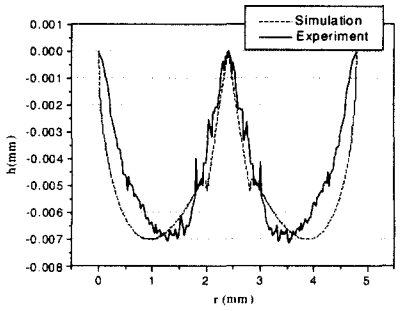

Fig. 13 Profiles of a polishing trace of flat polishing tool(ω_2 = 0)

공작물상의 공구의 위치에 따른 단위가공형상을 구하기 위한 실험조건은 가공력 200 g, 공구회전속도 500 rpm, 공작물회전속도 50 rpm으로 설정하였다. 공작물상의 가공위치는 반경 5, 13, 20 mm이며 각 위치에서의 가공시간은 900 초를 주었다. 가공중에 공작물의 회전속도가 공작물과 공구의 마찰로 인하여 설정회전속도 50 rpm에서 45 rpm으로 변경되었다.

가공된 면의 표면 거칠기를 가공방향과 직각으로 측정한 결과 Ra 2.4 nm, Rt 24.3 nm 정도의 매끄러운 면이 얻어졌다. 이것은 공작물을 정지시키고 가공한 단위가공형상 실험과는 다르게 공작물의 회전으로 인하여 가공점으로의 폴리싱 입자의 유입이 용이하게 되고 가공깊이도 단일가공형상 가공시보다 깊지 않기 때문으로 생각된다.

공작물의 반경방향으로의 가공형상의 단면을 시뮬레이션 결과와 같이 Fig. 14에 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 K값으로 r = 5에서의 실험값을 (5.264E-5) 사용한 것이다.

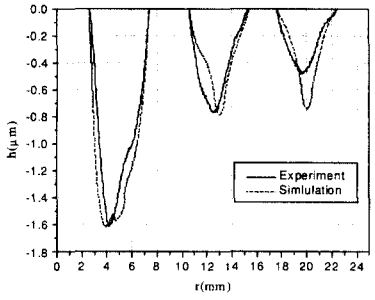

Fig. 14 Profiles of a polishing trace of flat polishing tool(ω_2 = 45 rpm)

그림에서 알 수 있듯이 가공물의 중앙부에서는 가공경로가 짧아 가공형상이 크고 공작물의 외주로 갈수록 가공경로가 길어져 단위가공형상이 작아진다. 중앙부에서의 가공분해능은 수 나노미터가 되는 것을 알 수 있다.(1.614㎛ / 675회전 = 2.4 nm/회전) 또한 중앙부위에서는 실험값과 시뮬레이션한 결과가 잘 일치하고 있으나 바깥부분에서 시뮬레이션 결과에 비하여 실제 가공된 깊이가 작게 나타나 있다. 이것은 가공 중에 폴리싱 입자가 폴리싱용액과 같이 가공물의 가장자리 밖으로 흘러내려 충분히 공작물과 공구사이로 공급되지 못한 것이 원인이라고 판단된다. 또한 가장자리에서는 실험값이 시뮬레이션한 값에 비하여 가공형상이 펑퍼짐하게 나타났다. 이것은 앞에서와 같은 원인으로 가공액이 공구의 회전 중심부에 공급되기 어렵기 때문으로 생각된다. 최대 가공깊이가 약간 치우치게 나타나는 것은 공구의 형상정밀도에 의한 영향으로 생각된다.

3.3 체재시간제어에 의한 형상가공

목표제거형상과 목표제거형상을 가공하기 위한 체재시간을 공구의 위치에 따른 단위가공형상을 시뮬레이션한 값을 사용하여 계산한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 가공횟수는 1회이다.

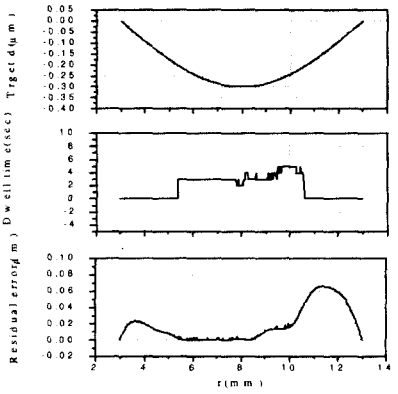

Fig. 15 Dwell time distribution(using simulated unit removal)

단일가공형상이 목표제거형상에 비하여 비교적 크기 때문에 체재시간이 짧으며 목표제거형상의 양단에서 잔류오차가 크게 나타났다. 이것은 단일가공형상이 크고 양단에서 목표제거형상에 비하여 급격한 경사를 가지고 있어 목표제거형상의 양단을 가공할 때 불리하기 때문이다.

앞에서 구한 체재시간으로 가공프로그램을 작성하여 시편을 폴리싱하고 가공형상을 공작물의 반경방향으로 측정하여 Fig. 16에 나타내었다.

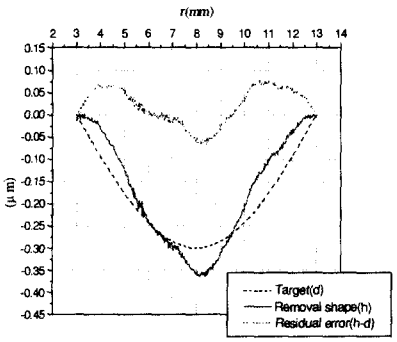

Fig. 16 Deviation form the target profile after polishing(using simulated unit removal)

실험시 가공력은 200 g, 공구의 회전속도는 500 rpm, 공작물의 회전속도는 45 rpm이었다. 가공된 형상은 전체적으로 목표제거형상과 유사하나 가공된 형상의 가장자리에서 시뮬레이션 결과와 같이 가공오차가 크게 나타났다. 가공오차의 최대값은 0.1 ㎛정도이나 RMS 값은 0.0452 ㎛로 비교적 목표형상대로 잘 가공되었음을 알 수 있다. 가공면의 거칠기는 앞의 공작물 회전시의 단위가공형상실험결과와 같은 Ra 2.4 nm로 공작물의 표면이 보다 양호한 광학면으로 개선되었다.

목표제거형상을 가공하기 위한 체재시간을 공구의 위치에 따른 단위가공형상의 실험값을 사용하여 계산한 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 가공횟수는 1회이다. 계산결과에서 알 수 있듯이 앞의 계산결과보다 체재시간이 짧게 나타났으며 목표제거형상의 양단에서 잔류오차가 앞의 시뮬레이션에 의해 구한 단위가공형상을 사용할 때 보다 크게 나타났다. 체재시간이 짧게 된 것은 단일가공형상의 실험값이 시뮬레이션한 값에 비하여 평퍼짐한 형상을 하고있어 목표제거형상의 양단을 가공할 때 불리하여 잔류오차가 크게 되기 때문이다.

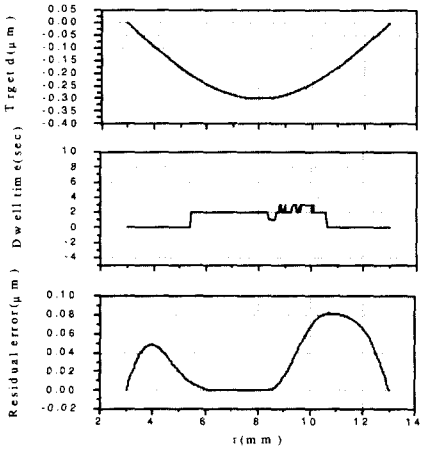

Fig. 17 Dwell time distributions(using experimental unit removal)

앞에서 구한 체재시간으로 가공프로그램을 작성하여 시편을 폴리싱하고 가공형상을 공작물의 반경방향으로 측정하여 Fig. 18에 나타내었다. 실험시 가공력은 200 g, 공구의 회전속도는 500 rpm, 공작

물의 회전속도는 45 rpm이었다.

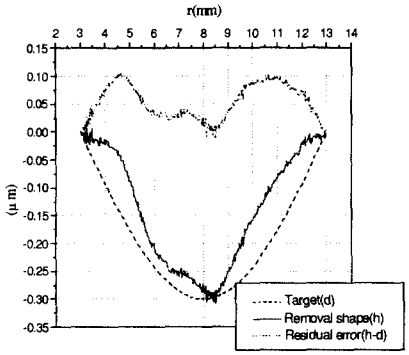

Fig. 18 Deviation form the target profile after polishing(using experimental unit removal)

가공형상은 전체적으로 목표제거형상과 유사하나 앞의 가공결과보다 체재시간이 짧아 목표제거형상에 가공량이 미치지 못했음을 알 수 있다. 그리고 가공형상의 가장자리에서 시뮬레이션 결과와 같이 가공오차가 크게 나타났다. 가공오차의 최대값은 0.1 ㎛정도이며 RMS 값은 0.0615 ㎛로 시뮬레이션한 단위가공형상을 사용하여 실험한 결과에 비하여 가공오차가 크게 나타났다. 가공면의 거칠기는 앞의 실험결과와 같이 Ra 2.4 nm로 양호한 광학면이 얻어졌다.

4. 결론

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

1) 가공하고자 하는 목표제거형상에 따라서 최적의 단위가공형상을 갖는 공구의 설계가 시뮬레이션을 통하여 가능하다.

2) 체재시간을 계산하는 방법 중에 가공시뮬레이션에 의한 방법이 공구위치에 따른 단위가공형상을 반영할 수 있어 실제와 더 가까운 조건이기는 하나 계산시간이 길고 잔류오차가 크다.

3) FFT기법을 사용하는 체재시간 계산법으로 하나의 평균적인 단위가공형상을 사용하여 시뮬레이션한 결과 체재시간분포가 양호하며 잔류오차가 작게 나타났다.

4) 평면공구의 가공분해능은 수 나노미터로 서브마이크로미터 오더의 형상가공에 사용될 수 있다.

5) 평면공구는 동일한 목표제거형상을 가공하기 위한 체재시간은 구 형상의 공구에 비하여 매우 짧으나 단위 가공형상의 폭이 상대적으로 크게 되어 가공형상의 양단에서의 가공오차가 크다.

6) 단위가공형상을 시뮬레이션하여 목표제거형상을 가공하기 위한 체재시간을 계산할 수 있다.

7) 평면 형상의 공구는 가공면의 표면 거칠기 개선성능이 우수하다.

후기

본 논문은 선도기술 개발사업 중 첨단생산시스템개발의 연구비에 의하여 지원되어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. R. Komanduri, D.A. Lucca and Y. Tani, "Technological advances in fine abrasive processes," Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 2, pp. 545-596, 1997.
2. 양민양, 이호철,"비구면을 위한 컴퓨터제어 폴리싱장치의 개발," 한국정밀공학회추계학술대회논문집, pp. 228-232, 1998.
3. H. Susuki, S. Hara and H. Matsunaga, "Study on aspherical surface polishing using small rotating tool," JSPE, Vol. 59, No. 10, pp. 131-136, 1993.
4. R. Apsden, R. McDonough and F. R. Nitchie, Jr., "Computer assisted optical surfacing," Appl. Opt., 11, 12, pp. 2739-2747, 1972.
5. 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, pp. 1642-1646, 1994.
6. M. Negishi, M. Ando, M. Takimoto, A. Deguchi and N. Nakamura, "Studies on super-smooth polishing(2nd report)," JSPE, Vol. 62, No. 3. pp. 408-412, 1996.