

디지털 VTR드럼용 반구 고속 정밀베어링의 경면연마 시스템

(Development of Mirror-like Polishing System for Hemispherical High-speed Precision Bearing for Digital VTR Drum)

김정두*, 최민석*, 우기명**, 김영일**

* KAIST 기계공학과 , ** 삼성전자 기술총괄 생산기술센터 초정밀 기술팀

ABSTRACT

Mirror-like polishing system of hemispherical high-speed precision bearing for digital VTR drum was developed. Mechanism of the polishing process was analyzed in the view point of polishing contact range and contact length between the tool and the workpiece surface. It was suggested that the two stage polishing process adopting the diamond grinding wheel and polishing tool instead of multi stage lapping processes, which enables the mass production of the bearing by reduction of polishing time.

Key Words: Hemispherical high-speed precision bearing(반구 고속 정밀베어링), Polishing mechanism (폴리싱기구), Polishing contact length(폴리싱접촉거리), Surface roughness(표면거칠기), Sphericity(진구도)

1. 서 론

미소기계를 비롯한 첨단 정밀기계의 핵심부품 및 기존의 메모리, 전자, 통신관련 부품들은 성능향상을 위해 나노미터 수준의 거울면과 같은 정밀한 표면과 서브미크론 단위의 치수정밀도를 요구하고 있다[1-3]. 디지털 VTR드럼, 컴퓨터 디스크, 초정밀 기계의 스피들 등 정밀 구동 시스템에 사용되는 반구형 고속 정밀 베어링은 최근 수요가 빠르게 증가하고 있으며 이에 따라 요구되는 가공정밀도를 만족시키고 수요를 충족시키기 위한 양산화 가공공정의 개발이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 디지털 VTR드럼용 반구 고속 정밀 베어링의 양산화와 정밀가공을 위해 요구되는 가공정밀도를 만족시키면서 가공능률이 높은 폴리싱 공정을 개발하기 위한 가공기구의 해석 및 폴리싱 시스템 개발을 수행하였다. 반구형 베어링의 형상정도를 개선시키기 위해 연삭휠을 사용한 연삭폴리싱을 1차 공정으로 적용하고 표면거칠기의 개선을 위해 다이아몬드 컴파운드를 이용한 다듬질 폴리싱을 2차 공정으로 선정하였다. 폴리싱공정은 공작물이 회전하고 공구가 좌우 요동운동 하는 구동기구로써 요동운동 범위와 공구형상의 관계, 반구 표면위치에 따른 공구-공작물의 상대 접촉거리를 계산하고 해석하였다.

2. 반구 고속 정밀베어링의 가공기구

Fig.1은 소형 반구형 고속 정밀베어링의 폴리싱을 위한 가공기구를 나타낸다. 공작물은 회전축을 중심으로 회전운동하며 공구는 내부가 비어있는 튜브형으로 일정한 범위내에서 요동운동을 한다. 공작물과 접촉하여 가공을 수행하는 것은 다이아몬드 지석으로 공작물의 구면반경과 같은 크기의 구면형상을 하고 있다. 가공하고자 하는 반구 고속 정밀베어링의 형상은 위쪽에 잘린 반구형상으로 표면이 질화티타늄(TiN)으로 코팅되었다.

3. 공구요동운동 및 공구내경의 관계해석

Fig.2는 공구의 요동운동 계산을 위한 계산모델을 나타낸다. 크랭크가 회전함에 따라 공구 가이드 축에 장착되어 있는 공구는 좌우방향으로 요동운동을 하게 된다. 이 때 공구의 요동운동 범위는 크랭크의 회전축과 공구요동 중심축의 수평방향 거리 X 및 크랭크의 회전반경 R을 조정함으로써 원하는 범위내에서 공구를 요동운동시킬 수 있다. 요동운동 범위에 따른 조정 변수 R과 X의 설정 계산식은 다음과 같다.

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{R \sin \theta - X}{H + R \cos \theta} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_L = \sin^{-1} \frac{R}{\sqrt{X^2 + H^2}} + \tan^{-1} \frac{X}{H} \quad (2)$$

$$\alpha_R = \sin^{-1} \frac{R}{\sqrt{X^2 + H^2}} - \tan^{-1} \frac{X}{H} \quad (3)$$

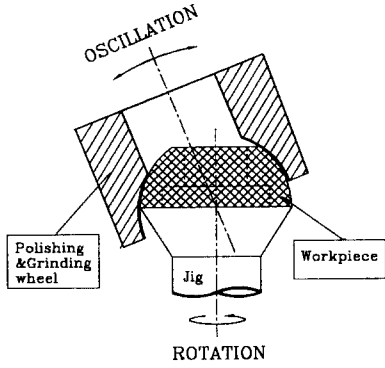


Fig.1 Schematic diagram of polishing mechanism for hemispherical bearings

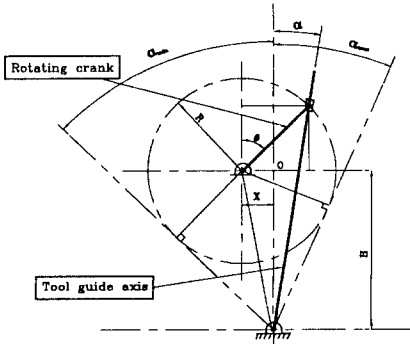


Fig.2 Tool oscillation mechanism for calculating the design parameters and dynamic performance

여기서 α 는 공구의 요동 중심축에 대한 각변위를 나타내고 α_L 과 α_R 은 좌측 및 우측 한계 각변위를 나타낸다. θ 는 크랭크의 회전변위를 나타내고 요동중심에서 원판회전중심까지의 거리는 H 로 표시하였다. 식(2)와 식(3)에서 설정변수 X 및 R 은 다음과 같다.

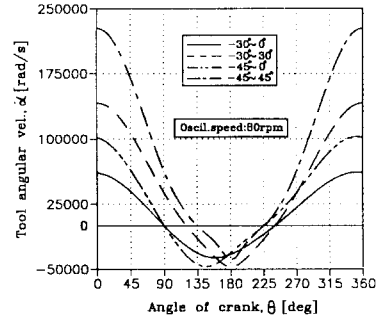
$$X = H \tan\left(\frac{\alpha_L - \alpha_R}{2}\right) \quad (4)$$

$$R = \sqrt{H^2 + X^2} \sin\left(\frac{\alpha_L + \alpha_R}{2}\right) \quad (5)$$

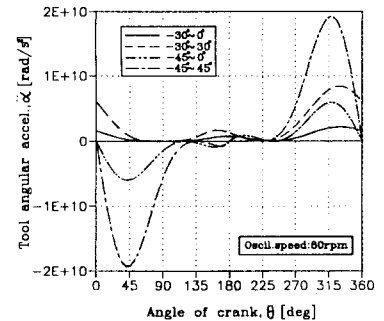
설정변수 X 및 R 을 변화시킴으로써 공구요동범위의 크기뿐만 아니라 요동축을 중심으로 한 좌우대칭($\alpha_L = \alpha_R$), 또는 비대칭($\alpha_L > \alpha_R$ or $\alpha_L < \alpha_R$)으로 구동시킬 수 있다.

Fig.3은 공구를 좌우 대칭으로 요동시키는 경우와 한쪽 방향에서만 요동시키는 경우에 대해 크랭크 1회전당 각속도 및 각가속도 분포를 계산한 결과이다. 요동범위가 작은 경우가 큰 경우보다 각속도 변화가 작고 대칭인 경우보다 비대칭인 경우에 각속도 변화가 작을 뿐 아니라 최대 각속도도 약 1/2정도로 감소됨을 알 수 있다. $-30^\circ \sim 30^\circ$ 인 경우보다 $-45^\circ \sim 0^\circ$ 인 경우가 최대 각속도는 작게 나타났다. 최대 각가속도는 공구의 요동운동시 운동의 안정성 및 가공공정에 영향을

미치기 때문에 중요한 의미를 가지며 최대 각가속도 값이 가능한 작아야 한다. 그래프에 나타난 바와 같이 최대 각가속도는 요동범위의 증가에 대해 매우 큰 증가율을 보이고 있으며 대칭인 경우보다 비대칭인 경우에 큰 감소를 나타낸다. 즉, $-30^\circ \sim 30^\circ$ 인 경우보다 $-45^\circ \sim 0^\circ$ 인 경우가 최대 각가속도는 작게 나타났다. 이와같이 각속도 변화량 및 최대 각가속도의 크기의 비교를 통해 요동범위는 가능한 작게하고 대칭요동보다는 구면의 한 쪽에서만 요동시키는 비대칭 요동운동이 공구의 운동특성상 바람직함을 알 수 있다.



(a) Angular velocity



(b) Angular acceleration

Fig.3 Angular velocity and acceleration of the tool oscillation for one cycle

Fig.4는 공구와 공작물이 선접촉을 한다는 가정하에 반구면 전체에 대한 가공이 이루어지도록 하는 공구의 요동각도 범위를 계산하기 위한 모델이다. 기본적으로 공구는 좌우 대칭보다는 한쪽 방향에서 요동운동하는 것으로 하였고 공구내경에 따른 요동운동범위를 계산하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$\alpha_{\min} = \theta_0 - \sin^{-1} \frac{r}{R_w} \quad (6)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{r}{R_w} \quad (7)$$

여기서 α_{\min} 및 α_{\max} 는 공구 요동범위, θ_0 는 공작물 구면의 시작위치, r 은 공구내부 반지름($=d/2$), R_w 은 공작물의 반경을 각각 나타낸다. Fig.5는 공구내경에 대한 요동범위(α_L, α_R)의 관계를 나타낸다.

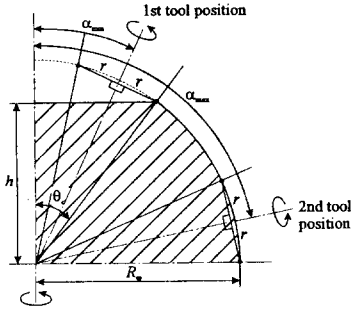


Fig.4 Model for calculating of tool oscillation range with respect to the tool inner diameter

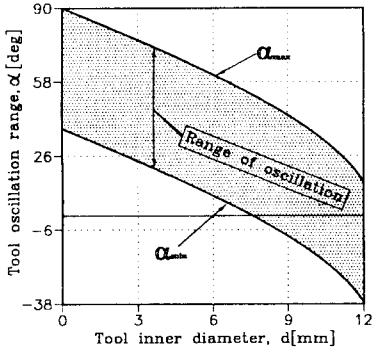


Fig.5 Tool oscillation range with respect to the inner diameter of the tool

Fig.6은 공구내경이 $\phi 7$, $\phi 8$, $\phi 9$, $\phi 10$ 및 $\phi 11$ 일 때 요동각도의 범위에 대한 공구의 요동운동 특성을 나타낸다. 공구내경에 따른 요동범위는 $\phi 7$ 인 경우 $3.4^\circ \sim 55.6^\circ$, $\phi 8$ 인 경우 $-2.4^\circ \sim 49.8^\circ$, $\phi 9$ 인 경우 $-8.8^\circ \sim 43.5^\circ$, $\phi 10$ 인 경우 $-16.0^\circ \sim 36.3^\circ$, $\phi 11$ 인 경우 $-24.7^\circ \sim 27.5^\circ$ 로 공구내경이 증가할수록 요구되는 공구의 요동범위는 좌우 대칭에 가까워지고 최대 요동각의 크기는 작아진다. 요동각속도 변화량은 비슷하나 각속도는 공구내경이 작아질수록 감소한다.

4. 반구면 가공 접촉거리 분포 해석

Fig.7은 공작물 표면위치에 따른 가공접촉거리의 계산을 위한 모델을 나타낸다. 공구와 공작물은 공구 내경 근처에서 선접촉하므로 공작물 구면의 가공 위치는 공구의 요동각도에 의해 결정된다. 또한 공작물의 회전 토크는 공구 중심축에 대해 다음과 같은 크기로 전달된다.

$$T_r = C_1 \cdot T_w \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

$$N_r = C_2 \cdot N_w \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

여기서 공구요동 중심축의 위치가 α 일때, T_r 및 N_r 는 공구에 전달되는 회전토크 및 회전속도를 나타내고 T_w 및 N_w 는 공작물의 회전토크 및 회전속도를 나타낸다. C_1 및 C_2 는 공작물-공구 접촉면의 압력 및 마찰계수에 따라 결정되는 상수이다.

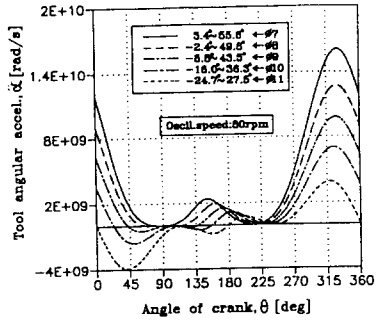
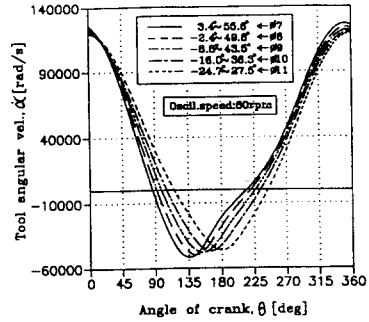


Fig.6 Angular velocity and acceleration profile with respect to the tool inner diameter

따라서 공구의 요동각 위치 α 에서의 이론적인 공작물-공구 상대속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_r = N_w - N_i = N_w (1 - C_2 \cos \alpha) \quad (10)$$

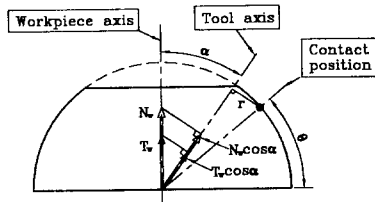


Fig.7 Calculation model of contact length between the tool and the workpiece

Fig.8은 공구의 자전속도 N_w 및 공작물-공구 상대속도 N_r 를 공구요동 중심축의 위치에 따라 나타낸 것이다. 상수 C_2 의 크기는 0보다 크고 1보다는 작으며 공작물의 기계적 특성, 지석의 크기 및 재질, 공작물과 공구의 물리적, 화학적 친화력, 공구 구동부의 특성 및 가공환경 등 복합적인 요인에 의해 결정되기 때문에 이론적으로 정확한 값을 결정하기는 어렵다. 다만 정성적으로 가공압력이 증가하면 C_2 값도 증가함은 명백하다. 계산에서는 가공압력이 클 때와 작을 때로 구분 하였으며 가공압력이 클 때 C_2 의 값을 0.8, 가공압력이 작을 때 C_2 값을 0.4로 하였다. 그림은 연삭철을 사용한 1차 폴리싱의 경우와 다이아몬드 킴파운드를 사용한 2차 폴리싱의 경우에 대한 공구의 자전속도 및 공작물-공구의 상대속도의 변화형태를 나타낸다. 공구

의 요동각도가 증가함에 따라 공구의 자전속도는 감소하고 따라서 공작물-공구 상대속도는 증가함을 알 수 있다.

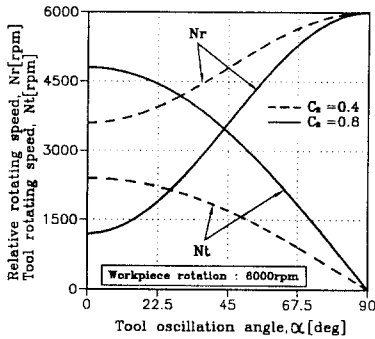


Fig.8 Rotating speed of the tool and relative speed along the contact line

Fig.9는 공구의 내경이 $\phi 7$, $\phi 8$, $\phi 9$, $\phi 10$, $\phi 11$ 일 때 앞에서 계산한 공구 요동범위 $3.4^\circ \sim 55.6^\circ$, $-2.4^\circ \sim 49.8^\circ$, $-8.8^\circ \sim 43.5^\circ$, $-16.0^\circ \sim 36.3^\circ$ 및 $-24.7^\circ \sim 27.5^\circ$ 에 대한 공작물-공구 접촉거리의 분포를 반구면의 위치에 따라 계산한 결과이다. 공작물의 회전속도는 6000rpm, 공구 요동속도는 80rpm으로 하였고 상수 C_2 의 값은 0.4로 하였다. 그래프에 나타난 결과는 공구가 1회 요동운동하는 동안의 접촉거리를 나타내며 앞에서 분석한 각속도의 불균일성을 보상하여 계산하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$l(\theta) = 2\pi R_r \cos \theta \times \frac{N_r}{60} \times \frac{\Delta \theta}{\alpha(\theta)} \quad (11)$$

그래프에서 나타난 바와 같이 접촉거리는 반구면의 특정한 위치에서 특별히 큰 값을 갖는다. 이처럼 접촉거리가 특히 큰 위치에서는 다른 부분보다 가공스크래치가 발생 할 가능성이 크고 따라서 전체의 형상정도를 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다. 그러나 보다 정확한 해석을 위해서는 가공압력의 분포를 보정한 계산이 필요하다. 전체 반구면에 대한 접촉거리의 균일성 측면에서 공구내경이 $\phi 9$ 일때의 공구 요동범위 $-8.8^\circ \sim 43.5^\circ$ 인 경우가 가장 바람직한 폴리싱 조건임을 알 수 있다.

5. 반구 고속 정밀베어링 폴리싱 시스템 및 실험결과

Fig.10은 반구 고속 정밀베어링의 폴리싱을 위한 공구형상을 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 폴리싱 공정은 연삭휠을 사용한 1차 폴리싱과 다이아몬드 컴파운드를 사용한 2차 다듬질 폴리싱의 2단계로 설계하였으며 1차 폴리싱에서는 반구 형상정도의 개선, 2차 폴리싱에서는 최종 표면거칠기의 개선을 목적으로 하였다. Fig.11은 제작한 반구 고속 정밀베어링의

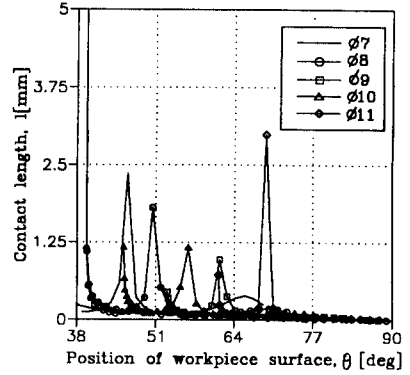


Fig.9 Polishing contact length along the workpiece surface for one cycle of the tool oscillation

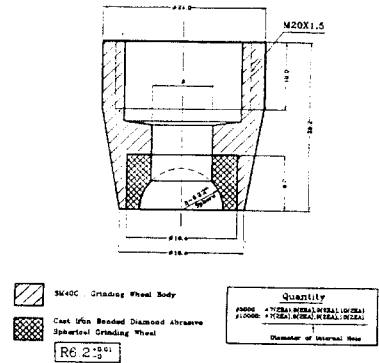


Fig.10 Shape of the polishing tool for grinding type polishing

폴리싱 시스템을 나타낸다. 가공 및 구동 메카니즘은 앞에서 해석한 바와 같다. 전체 시스템의 구성은 크게 반구형 고속 정밀 베어링 가공 전용 폴리싱 시스템을 나타낸다. 시스템의 구성은 크게 공구요동기구, 공작물 구동장치, 전해드레싱 장치, 가공압력 공급장치의 네 부분으로 되어있으며 1차 폴리싱, 2차 폴리싱 및 전해드레싱을 같은 시스템에서 수행할 수 있다. 연삭지식은 고입도(#5000이상)의 다이아몬드 입자를 사용하고 2차 다듬질 폴리싱의 경우에는 다이아몬드 컴파운드(#10000)를 공구내부에 부착된 연마페이퍼에 공급하였다. 1차 폴리싱에 사용하는 고입도의 연삭지식의 눈매물 제거를 위해 전해드레싱을 실시하였다. Table 1에 폴리싱 시스템의 테스트를 위한 실험조건이 나타나 있다. 공작물의 회전속도는 6000rpm, 요동각도는 $-8.8^\circ \sim 43.5^\circ$, 공구(연삭휠)내경 $\phi 9$, 요동속도 80rpm, 가공압력 0.5kg/cm^2 이고 드레싱은 20초간 실시하였다.

Fig.12는 폴리싱 전·후의 반구 고속 정밀 베어링의 표면사진 및 측정결과를 나타낸다. 연삭휠을 사용한 폴리싱만으로 이와같은 조건하에서 약 30초간 가공한 결과 형상 정도는 가공전 $2.933\mu\text{m}$ 에서 가공후

0.627 μ m, 표면거칠기는 가공전 R_a 204.4nm(R_{max} 2593.8 nm)에서 가공후 R_a 29.3nm(R_{max} 379.6nm)로 개선되었다.

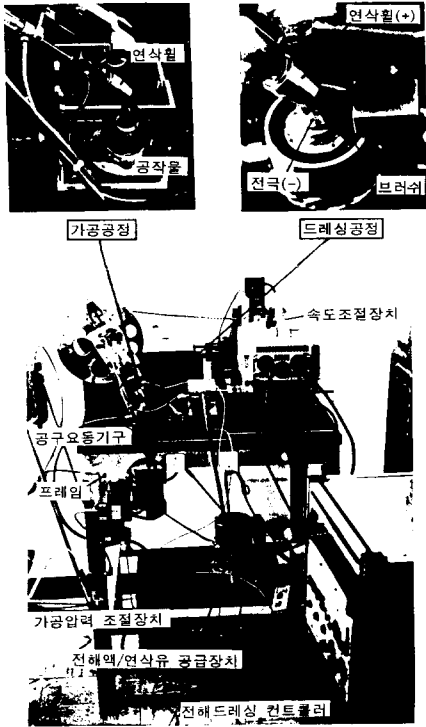


Fig.11 Polishing system of hemispherical bearings

6. 결론

디지털 VTR드럼용 반구 고속 정밀베어링의 고능률, 고정밀 폴리싱 시스템의 개발을 위한 가공기구의 해석을 실시하였고 이를 이용한 시스템의 제작 및 테스트 실험 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 공구 운동운동의 최대 각속도는 공구의 안정성 및 공작물-공구 접촉면에 대한 진동유발등 좋지않은 영향을 미치며 최대 각속도를 감소시키기 위해서는 최대 운동각도를 낮추는 것보다 비대칭 운동운동을 시키는 것이 바람직하다.
- 2) 반구면 전체의 접촉을 위한 공구 운동범위는 공구내경에 따라 결정된다.
- 3) 공작물-공구 상대속도 차이에 의한 공작물의 회전력이 공구에 전달되며 공구의 자전을 허용함으로써 반구면의 위치에 따른 가공의 균일성을 보장하고 깊은 스크래치의 발생을 억제할 수 있다.
- 4) 반구면에 대한 가공거리를 공구 운동각속도 분포 및 공작물-공구 상대속도를 고려하여 계산함으로써 최적의 공구형상 및 공구 운동범위를 선정할 수 있으며 해석결과 공구내경 $\phi 9$, 공구 운동범위 $-8.8^{\circ} \sim 43.5^{\circ}$ 로 나타났다.

Table 1 Experimental conditions and devices

Workpiece rotation	6000rpm
Polishing tool	Metal Bonded Diamond (#10000) Inner diameter : $\phi 9$
Oscillation range	$-8.8^{\circ} \sim 43.5^{\circ}$
Oscillation speed	80rpm
Polishing pressure	0.5kg/cm ²
Dressing time	20sec
Surface tester	Form Talysurf Series 2 (Taylor Hobson)

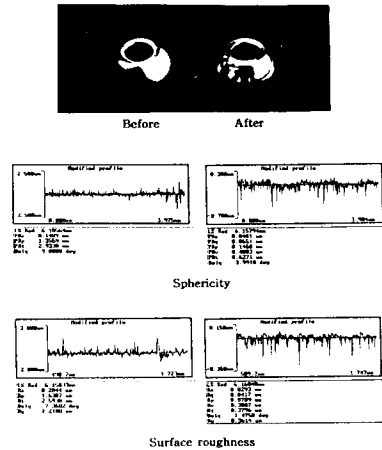


Fig.12 Hemispherical bearing before and after polishing and the measured surface profile

5) 제작한 폴리싱 시스템의 테스트 실험결과 연삭휠을 사용한 1차 폴리싱을 30초간 수행하여 형상정도 0.627 μ m, 표면거칠기 R_a 29.3nm(R_{max} 379.6nm)인 가공결과를 얻었다.

6) 제작한 폴리싱 시스템을 제작하고 실험을 통하여 디지털 VTR드럼용 반구 고속 베어링의 고능률, 고정밀 폴리싱에 대한 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Y.Namba and H.Tsuwa, Mechanism and some Applications of Ultra-Fine Finishing, Annals of the CIRP, 1978, vol.27/1, pp.511-516.
- [2] T.Kasai, K.Horio, K.Karaki-Doy and A.Kobayashi, Improvement of Conventional Polishing Conditions for Obtaining Super Smooth Surfaces of Glass and Metal Works, Annals of the CIRP, 1990, vol.39/1, pp.321-324.
- [3] T.Kasai, F.Matsumoto and A.Kobayashi, Newly Developed Fully Automatic Polishing Machines for Obtainable Super-Smooth Surfaces of Compound Semiconductor Wafers, Annals of the CIRP, 1988, vol.37/1, pp.537-540.