

소형 반구형 고속 정밀베어링의 고능률 경면연마 시스템 해석 및 개발에 관한 연구

(Analysis and Development of an Efficient Mirror-like Polishing System
for High Speed Precision Hemispherical Bearings)

최민석*, 김정두 (KAIST 기계공학과), 우기명(삼성전자(주) 생산기술센터)
Min-Seog Choi*, Jeong-Du Kim and Gi-Myung Woo

ABSTRACT : The use of small hemispherical high-speed precision bearing has increased drastically these days in the field of computer disk driver, hightech devices as well as communication and electronic device drivers. It was suggested that the new 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. Polishing mechanism was analysed and the results were applied to the design and manufacturing of the polishing system. Experiments for selection of optimal polishing conditions were carried out using the polishing system.

1. 서론

미소기계를 비롯한 첨단 정밀기계의 핵심부품 및 기존의 메모리, 진자, 통신관련 부품들은 성능향상을 위해 나노미터 수준의 거울면과 같은 정밀한 표면과 서브미크론 단위의 치수정밀도를 요구하고 있다. 컴퓨터 디스크 드라이버, 초정밀 기계의 스피들 등 소형 정밀 구동 시스템에 사용되는 소형 반구형 고속 정밀 베어링은 최근 수요가 빠르게 증가하고 있으며 이에 따라 요구되는 가공정밀도를 만족시키기 위한 기존의 다단계 래핑방법으로는 가공능률이 낮아 늘어나는 수요를 충족시키기 어렵게 되었다. 경면을 얻기 위한 가공공정의 개발 및 개선에 관한 많은 연구[1,2]들이 진행되어 오고 있는데 특히 근래에는 첨단 제품들의 양산화에 따라 기존의 비능률적인 래핑, 폴리싱 공정을 개선하려는 연구[3,4]도 활발히 진행되고 있다. 또한 이형형상 부품의 경면가공에 관한 연구들이 최근 관심의 대상으로 되고 있는데, 그 중 유리봉의 끝단을 구면으로 가공하기 위한 연구[5,6]도 보고된 바 있다.

본 연구의 목적은 소형 반구형 베어링의 양산화와 정밀가공을 위한 폴리싱 시스템을 개발하는 것으로서, 반구형 베어링의 진구도를 신속히 향상시키기 위해 다이아몬드 연삭휠을 사용한 폴리싱을 1차 공정으로 하고 최종 표면거칠기의 향상을 위해 다듬질 폴리싱을 2차 공정으로 적용하였다. 공구와 공작물의 운동기구 및 운동특성을 해석함으로써 적절한 가공기구를 선정하였으며 해석결과를 가공시스템의 설계 및 제작에 응용하였다. 또한 요구되는 가공정밀도 및 가

공능률을 달성하기 위한 최적 가공조건 선정을 위한 실험을 수행하였다.

2. 가공기구 및 공구의 운동특성 해석

Fig.1은 소형 반구형 고속 정밀베어링의 폴리싱을 위한 가공기구를 나타낸다. 공작물은 회전축을 중심으로 회전운동하며 연삭휠 및 폴리싱 공구는 공작물 센터를 중심으로 좌우 요동운동을 한다. 연삭휠은 내부가 비어있는 튜브형으로 공작물의 구면반경과 같은 지석부분이 실제 가공을 수행한다. 폴리싱 공구는 같은 형상이나 가공을 일으키는 구면에 유연성이 좋은 연마지(polishing paper)를 부착하여 연마재를 공급한 상태에서 가공을 수행한다. 그림에 나타난 바와 같이 공작물은 반구형상을 하고 있으며 티타늄(Ti)재질의 모재위에 표면을 질화티타늄(TiN)으로 코팅하였다. 공구내경의 크기에 따라 공작물 표면전체의 접촉범위 및 가공상태가 영향을 받기 때문에 공구요동운동 범위를 조정할 수 있도록 하였다. Fig.2는 공구의 요동운동을 위한 구동기구를 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 조정변수 R과 X의 설정 계산식은 다음과 같다.

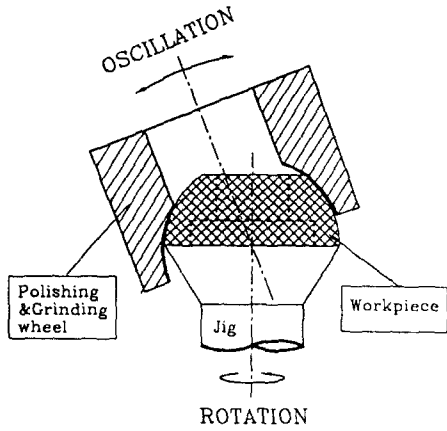


Fig.1 Schematic diagram of polishing mechanism for hemispherical bearing surface

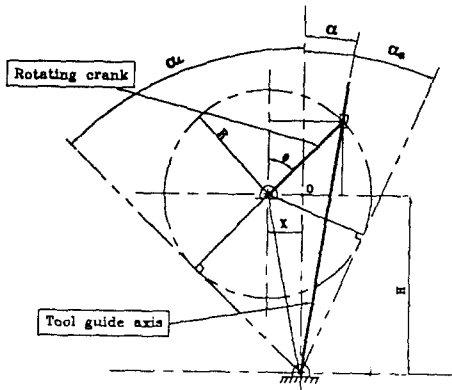


Fig.2 Driving mechanism for oscillation of the tool

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

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

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

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 요동 중심에서 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.3 및 Fig.4는 대칭요동의 경우와 비대칭 요동의 경우에 대한 공구운동특성을 나타낸다. Fig.3은 공

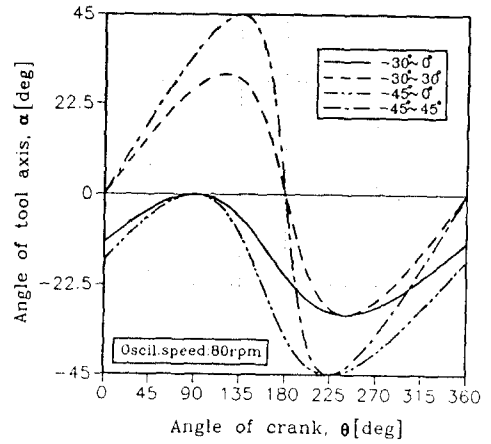
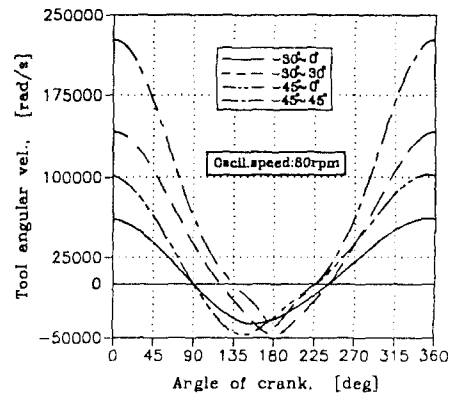
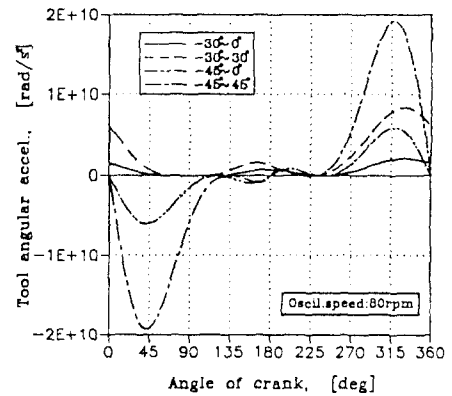


Fig.3 Profile of tool oscillation for one cycle of crank rotation



(a) Angular velocity



(b) Angular acceleration

Fig.4 Angular velocity and acceleration profile of the tool : symmetric vs. nonsymmetric

구요동각도가 $-30^\circ \sim 0^\circ$, $-30^\circ \sim 30^\circ$, $45^\circ \sim 0^\circ$ 및 $45^\circ \sim 15^\circ$ 일때 크랭크 1회전에 대한 요동각도의 변화를 나타낸다. Fig.4(a)는 공구요동범위에 대한 각속도 변화를 나타낸다. 공구의 위치에 따른 각속도 변화량은 가공의 균일성에 관계되며 요동각속도의 변화가 작을수록 전체 구면에 대한 균일한 가공을 기대할 수 있

다. 그림에서 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. Fig.4(b)는 각속도 변화를 나타낸 것으로서, 최대 각속도는 공구의 요동운동시 운동의 안정성 및 가공공정에 영향을 미치기 때문에 중요한 의미를 가지며 최대 각속도 값이 가능한 작아야 한다. 그래프에 나타난 바와 같이 최대 각속도는 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 각속도는 작게 나타났다. 이와같이 각속도 변화량 및 최대 각속도에 대한 크기의 비교를 통해 요동범위는 가능한 작게하고 대칭요동보다는 구면의 한 쪽에서만 요동시키는 비대칭 요동운동이 공구의 운동특성상 바람직함을 알 수 있다. Fig.5는 반구형 베어링의 표면 전체가 공구와 접촉하기 위한 요동각도의 계산모델을 나타낸다. 공구와 공작물은 실제적으로 면접촉이 접촉보다는 선접촉에 가까운 상태로 접촉하기 때문에 공구내경의 크기가 요동각도와 관련이 있으며 공구내경의 크기에 따라 요동범위도 변하며, 계산식은 다음과 같다.

$$\alpha_L = \theta_o \cdot \sin^{-1} \frac{r}{R_w} \quad (6)$$

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

여기서, α_L 및 α_R 은 공구 요동범위, θ_o 는 공작물 구면 시작위치, r 은 공구내부 반지름($-d/2$), R_w 은 공작물의 반경을 각각 나타낸다. Fig.6은 공구내경에 대한 요동범위(α_L, α_R)의 계산결과를 나타낸다. Fig.7과 Fig.8은 공구내경이 $\phi 7, \phi 8, \phi 9, \phi 10$ 및 $\phi 11$ 일 때 요동각도의 범위에 대한 공구의 요동운동 특성을 나타낸다. Fig.5로부터 계산된 공구내경에 따른 요동범

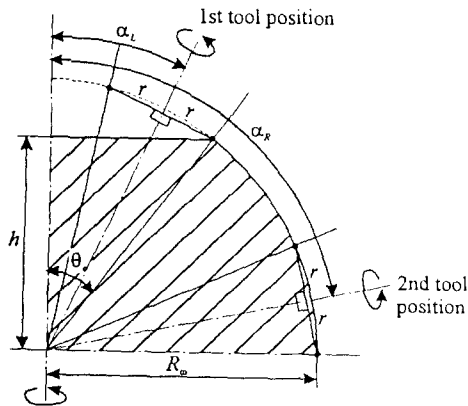


Fig.5 Model of calculation for tool oscillation range

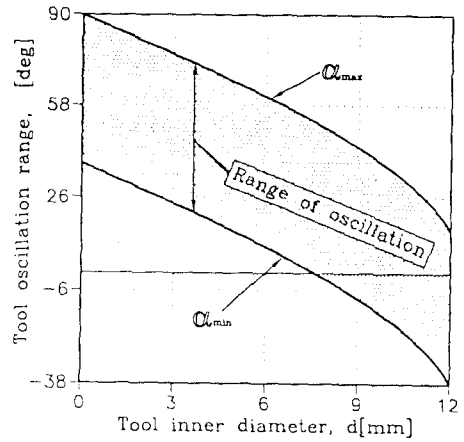


Fig.6 Tool oscillation range with respect to the tool inner diameter

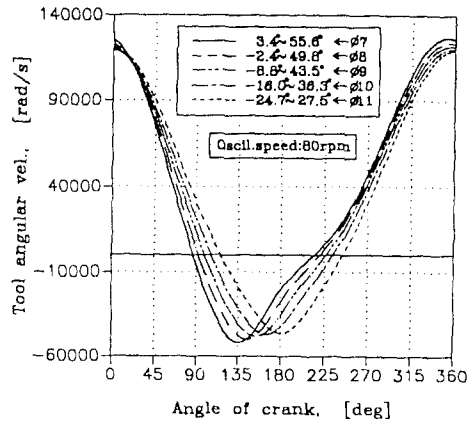


Fig.7 Angular velocity profile of the tool : tool inner diameter vs. oscill. range

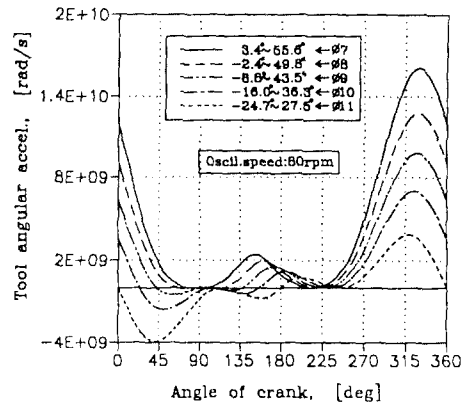


Fig.8 Angular acceleration profile of the tool : tool inner diameter vs. oscill. range

위는 $\phi 7$ 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 $-24.7^\circ \sim 27.5^\circ$ 이다. 공구내경이 증가할수록 요구되는 공구의 요동범위는 좌우 대칭에 가까워지고 최대 요동각의 크기는 작아지나 요동각속도 변

회량은 다섯 경우 모두 비슷함을 알 수 있다. 반면에, 요동각속도는 공구내경이 작아질수록, 즉 공구의 최대 요동각도가 작아질수록 감소한다.

3. 폴리싱 시스템의 개발

3.1 폴리싱 공구의 제작

Fig.9는 소형 반구 베어링의 형상을 나타낸다. 내부는 스피들이 통과하는 구멍이 존재하고 반구의 상단부가 잘린 형태이다. 베어링의 모재는 티타늄(Ti)이고 표면에 질화티타늄(TiN)을 코팅하였다. Fig.10은 폴리싱을 위한 두 가지 형태의 공구형상을 나타낸다. 연삭휠은 1차 폴리싱 공정에 사용되고 폴리싱공구는 2차 공정의 최종 다듬질에 사용된다. 연삭휠의 본체는 탄소강이고 지식은 전해드레싱이 가능하도록 입도가 높은 주철본드 다이아몬드 지식(#5000 또는 #10000)을 사용하였다. 2차 공정용 폴리싱 공구는 연삭휠과 같은 형태이며 백크라이트(bakelite) 재질로 구멍 내부에 연질의 연마지(polishing paper)를 부착하였다. Fig.11은 공구와 공압실린더의 연결부에 대한 개략도를 나타낸다. 압력을 인가한 상태에서 공구-공작물 사이의 상대속도 차이에 의한 불균일한 가공을 방지하고 스크래치 발생을 최소화하기 위해 공구는 외부 회전력에 자유롭게 회전할 수 있도록 볼조인트를 사용하여 공압실린더와 연결하였다.

3.2 전해트루잉 및 드레싱 시스템

입도가 높은 지식을 사용하여 폴리싱을 수행할 경우 일정시간 가공 후 지식의 눈매용이 발생하여 가공 능률이 떨어지고 표면상태가 나빠지기 때문에 드레싱이 필요하다. Fig.12는 연삭휠을 드레싱하기 위한 전해드레싱의 구성도를 나타낸다. 전원은 전용 전해드레싱 컨트롤러를 사용하였으며 펄스파형의 전류를 공급한다. 전해드레싱 변수로는 τ_{on} , τ_{off} , I_p 및 드레싱 시간이며 컨트롤러에 원하는 값을 미리 설정하면 자

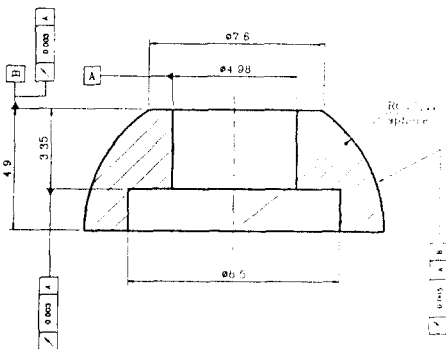


Fig.9 Schematic diagram of hemispherical bearing

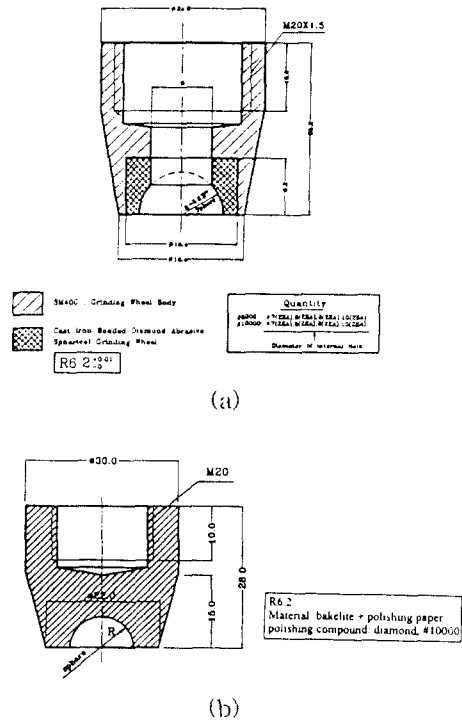


Fig.10 Diagram of the tool (a)for grinding (b)for polishing

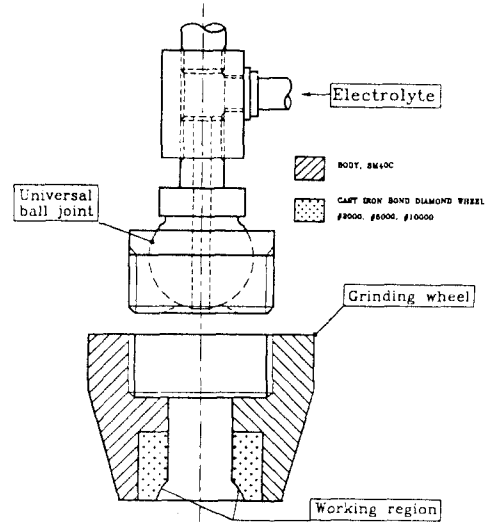


Fig.11 Tool handling part using universal ball joint

동으로 전해드레싱이 이루어진다. 전원의 공급은 공구쪽에 (+), 드레싱 진공쪽에 탄소브러쉬를 사용하여 (-)를 인가한다. 전해액은 연삭 가공시 사용하는 수용성3중의 연삭유를 사용하였으며 사용된 전해액은 전해탱크로 환원되도록 하였다.

3.3 폴리싱 시스템의 구성 및 제작

Fig.13은 제작한 반구형 고속 정밀 베어링 가공 전용 폴리싱 시스템을 나타낸다. 시스템의 구성은 크

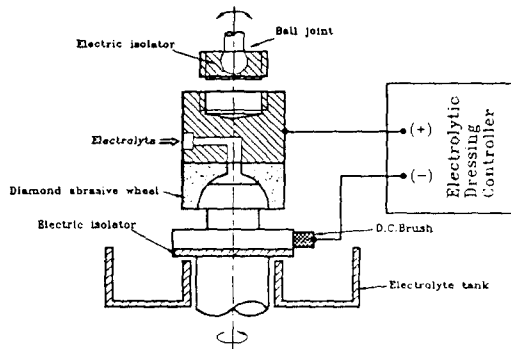


Fig.12 Schematic diagram of electrolytic dressing system

계 공구요동기구, 공작물 구동장치, 전해드레싱 장치, 가공압력 공급장치의 네 부분으로 되어있으며 1차 연삭, 2차 폴리싱 및 전해드레싱을 같은 시스템에서 수행할 수 있다. 1차 가공은 연삭휠을 사용하고 공구 내부를 통해 연삭유가 공급되도록 하였다. 2차 폴리싱은 공구를 교환하여 입도가 높은 다이아몬드 연마제(#10000)를 공급하여 수행하며 이 때 연삭유는 사용하지 않는다. 전해드레싱은 공작물 대신 드레싱 전극(Cu)을 장착하고 전원을 연결한 상태에서 연삭유를 공급하면서 수행한다. 공구요동기구는 크랭크의 회전에 따라 가공실린더 및 공구 가이드축이 좌우 요동운동을 한다. 크랭크 회전 중심축의 이동과 크랭크 반경의 변화를 가능하게 하여 계산에 의한 공구요동법

위를 설정할 수 있도록 하였다. 또한 크랭크의 회전 속도를 조절함으로써 공구요동속도를 조절할 수 있다. 공작물은 에어 스피들 모터를 사용하여 회전구동하며 회전속도를 0~12000rpm까지 변화시킬수 있다. 전해드레싱은 컨트롤러로부터 인가되는 펄스파를 통해 연삭휠과 동 전극사이에서 이루어지며 전해액은 전해액 탱크로부터 공구내부의 구멍을 통해 가공부위에 공급되며 사용되어진 전해액은 다시 탱크로 환원되도록 하였다. 가공압력의 중심은 공작물의 구면중심과 일치하도록 하였다.

4. 폴리싱 실험 및 최적조건 선정

Table 1은 공구의 선정을 위한 기초실험 결과로 공구의 구면반경과 입도 및 공구내경에 따른 실험결과를 나타낸다. 주축 회전수는 6000rpm, 공구요동각도는 23.1°~54.2°, 요동속도는 68rpm, 가공압력은 0.5kg/cm² 으로 하였다. 이들 값들은 성능시험을 통해 나타난 결과를 바탕으로 선정된 결과들이다. 전해드레싱 조건은 역시 기초실험을 통해 τ_{on} 은 10 μ s, τ_{off} 는 10 μ s, I_p 는 5A, 드레싱 시간은 20sec로 설정하였다. 실험결과로부터 알 수 있듯이 형상정도 및 표면거칠기 면에서 가장 우수한 결과를 나타내는 공구 및 선정하면 입도 #10000, 구면반경 R6.2 및 내경 ϕ 9인 공구이고 이 때 가공후의 형상정도(진구도)는 0.627

Table 1 Experimental results of grinding according to the grinding wheel parameters

가공조건 : 주축회전수 6000rpm, 요동각도 23.1°~54.2°
 요동속도 68rpm, 가공압력 0.5kg/cm²,
 전해드레싱 조건: τ_{on} 10 μ s, τ_{off} 10 μ s, I_p 5A, 드레싱시간 20초

공구	입도	구면 반경 [mm]	내경크기 (mm)	가공결과			
				가공시간 [sec]	형상정도 [μ m]	표면거칠기 R _a [nm]	
매달본 드레이 아몬드 지석	#2000	R6.2	ϕ 3	10	1.186	87.5 105.2	
		R6.5	ϕ 3	10	2.275	79.1 902.0	
		R7.0	ϕ 3	10	2.160	90.2 984.3	
	#5000	R6.2	ϕ 7	15	1.001	653.4	70.1
							61.4
							72.5
							34.5
							431.6
							71.7
#10000	R6.2	ϕ 7	15	1.012	63.6	701.9	
						55.8	
						631.9	
						26.3	
#10000	R6.2	ϕ 9	15	0.816	373.6	54.3	
						577.0	

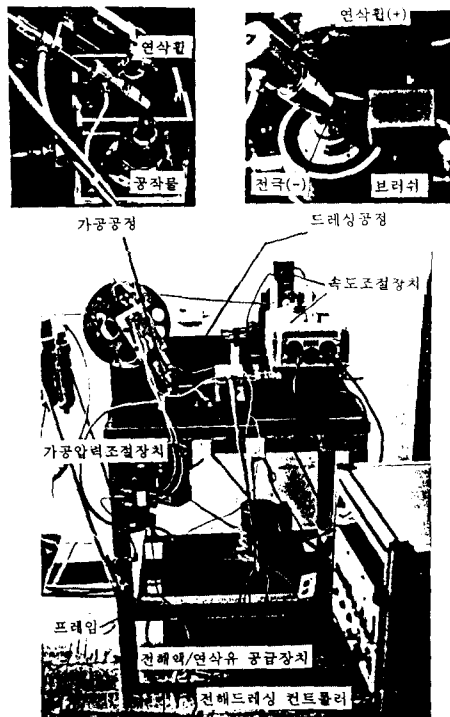


Fig.13 Mirror-like polishing system for hemispherical bearings

μm , 표면거칠기는 R_a 29.3nm, R_{max} 379.6nm로 얻어진다. Fig.14는 전해드레싱 전후의 가공정밀도를 나타낸다. 이것은 앞에서 선정된 연삭휠을 사용하여 전해드레싱을 한 경우와 하지 않은 경우에 대해 2차 다듬질 폴리싱까지 완료한 후의 가공정밀도이다. 실험결과로부터 전해드레싱을 실시한 후의 형상정밀도 및 표면거칠기가 전해드레싱을 실시하지 않은 경우보다 향상되었음을 알 수 있다. 이것은 전해드레싱을 실시하지 않고 지식의 눈매움이 존재한 상태에서는 가공량이 감소하여 형상정도의 개선이 완전히 이루어지지 못하고 또한 표면거칠기의 개선능력도 좋지 않음을 의미한다. Fig.15는 주축의 회전속도에 따른 가공정밀도의 평균치를 나타낸다. 표면거칠기는 3000rpm부터 6000rpm사이에서 큰 변화를 보이지 않으나 형상정도는 4500rpm부터 6000rpm사이에서 비교적 양호한 결

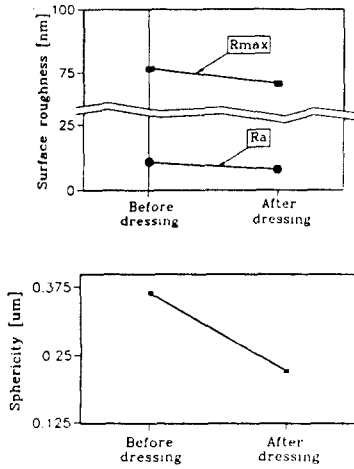


Fig.14 Effect of electrolytic dressing on the polishing process

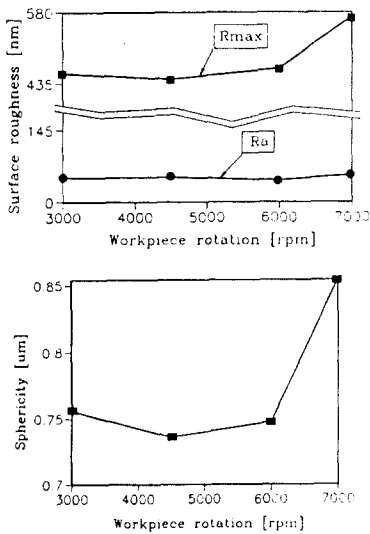


Fig.15 Effect of workpiece rotating speed on the polishing process

과를 나타냈다. 특히 주축회전이 7000rpm으로 증가하면 표면거칠기 및 형상정도는 급격히 나빠짐을 주목할 필요가 있다. 이것은 주축회전이 빨라짐에 따라 주축의 회전정밀도가 나빠졌기 때문이라 사료된다. Fig.16, Fig.17 및 Fig.18은 공구내경에 따라 설정한 요동각도별 가공실험 결과이다. 이것은 앞에서 해석한 공구내경($\phi 7$, $\phi 8$, $\phi 9$, $\phi 10$, $\phi 11$) 및 그에 따른 공구요동각도($3.4^\circ \sim 55.6^\circ$, $-2.4^\circ \sim 49.8^\circ$, $-8.8^\circ \sim 43.5^\circ$, $-16.0^\circ \sim 36.3^\circ$, $-24.7^\circ \sim 27.5^\circ$) 중 기초실험을 통해 가공상대가 매우 좋지 않은 요동각도 $-16.0^\circ \sim 36.3^\circ$, $-24.7^\circ \sim 27.5^\circ$ 를 제외하고 다른 세 가지 요동각도에 대해 실험을 실시한 결과이다. 그림에서 요동각도가 $3.4^\circ \sim 55.6^\circ$ 인 경우에는 공구내경이 $\phi 7$ 일때 가장 좋은 결과를 보였으며 요동각도가 $-2.4^\circ \sim 49.8^\circ$ 인 경우에는 $\phi 8$ 에서 비교적 좋은 가공정밀도를 얻을 수 있었다. 이것은 앞에서 공구내경에 따라 계산한 요동범위가 공구내경에 일치할 때 실제적으로 가공정밀도

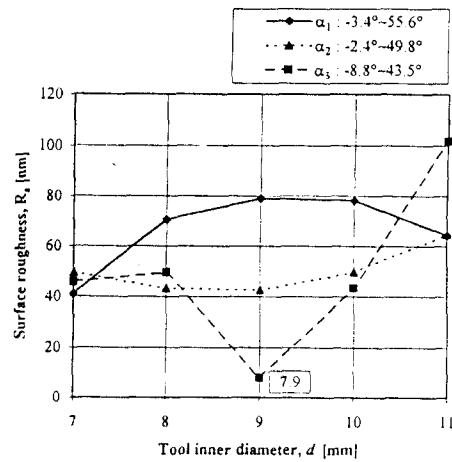


Fig.16 Surface roughness(R_a) according to oscillation range and tool inner diameter

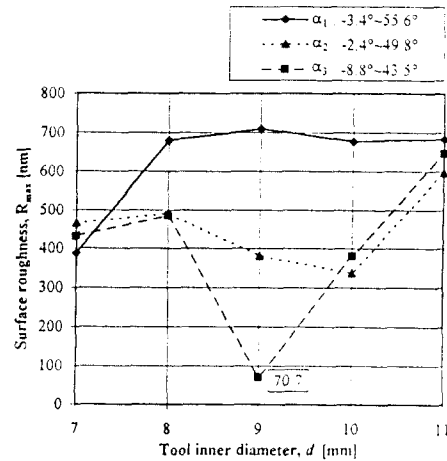


Fig.17 Surface roughness(R_{max}) according to oscillation range and tool inner diameter

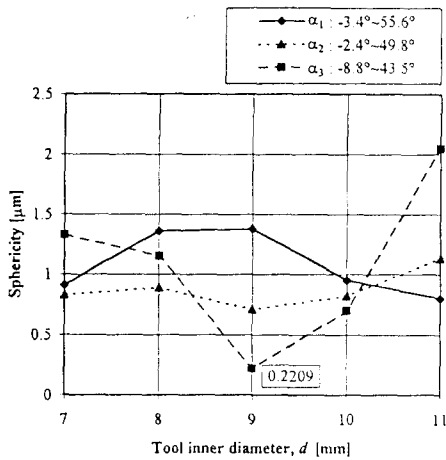
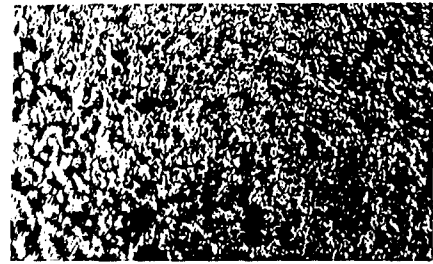


Fig.18 Sphericity according to oscillation range and tool inner diameter

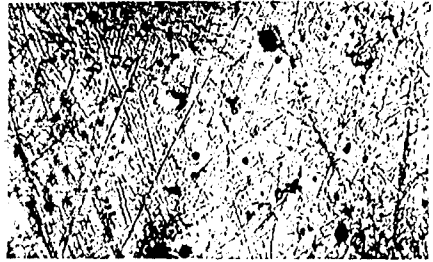
도 우수한 결과를 나타냄을 의미한다. 또한 그래프에서 알 수 있듯이 가공정밀도가 가장 우수한 경우는 요동범위가 $-8.8^{\circ} \sim 43.5^{\circ}$ 이고 공구내경이 $\phi 9$ 인 경우로 나타났으며 다른 경우에 비해 가장 우수한 가공정밀도를 나타내었다. 이와같은 결과는 공구요동운동의 각속도 변화특성과 공구-공작물의 가공 접촉길이가 다른 경우보다 균일하게 적용되었기 때문으로 사료된다. Table 2는 기초실험 및 가공조건에 따른 실험을 통해 얻어낸 최적가공조건을 나타낸다. 공정은 지식을 사용한 1차 연삭 공정과 다듬질 폴리싱의 2차 공정 등 다단계 공정으로 개발하였다. 각 조건은 표에 나타난 바와 같다. Fig.19는 가공전후 공작물의 표면형상을 공구현미경으로 관찰한 결과이다. (a)는 가공전의 매우 불균일한 표면을 나타내고 최적 연삭조건으로 1차 연삭가공한 후의 표면형상은 (b)에 나타나

Table 2 Selected optimal grinding/polishing conditions by experimental results

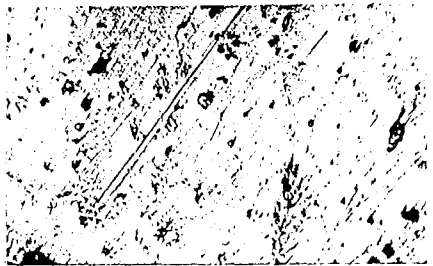
① 공구직경 : 구면반경 R6.2, 내부직경 $\phi 9$
② 공구요동 · 요동운동 속도 : 80rpm · 요동운동 범위 : $-8.8^{\circ} \sim 43.5^{\circ}$
③ 연삭지식 · Cast Iron Bonded Diamond, #10000
④ 가공압력 · 0.5 kgf/cm^2
⑤ 가공물 회전속도 · 연삭공정 : 6000rpm · 폴리싱공정 : 600~900rpm
⑥ 전해드레싱 조건 · 통전시간 (τ_{on}) : $10 \mu\text{s}$ · 휴지시간 (τ_{off}) : $10 \mu\text{s}$ · 피어크 전류 (I_p) : 5A · 드레싱 시간 : 20sec
⑦ 가공시간 · 연삭공정 : 15sec · 폴리싱공정 : 40sec · 총 가공시간 : 55초
⑧ 폴리싱 연마재 입도 · #10000 (평균직경 $0 \sim 1/2 \mu\text{m}$)



(a) initial surface



(b) after grinding



(c) after polishing

Fig.19 Surfaces generated by grinding and polishing

있다. 표면의 불균일성이 대부분 감소하였으나 특히 깊은 분화구는 제거되지 않았고 많은 연삭스크래치가 새로이 생성되어 있다. (c)는 연삭 및 폴리싱을 실시한 후의 최적가공된 표면형상이다. (b)에 남아있던 분화구는 그대로 있으나 연삭스크래치가 대부분 제거되었음을 알 수 있다. 그러나 깊은 연삭스크래치는 여전히 없어지지 않고 남아있다.

위의 실험결과로부터 반구형 베어링의 경면을 연기 위해서는 1차 연삭공정에서 초기 공작물 표면에 형성되어 있는 분화구를 모두 제거하고 깊은 연삭스크래치를 남기지 않아야 한다. 2차 폴리싱 공정은 기본적으로 얇은 연삭스크래치를 없애는 기능을 하며 깊은 분화구나 연삭스크래치의 제거능력이 없다.

Fig.20은 최적조건에서 가공전후의 공작물 표면 및 표면측정 형상을 나타낸다. 최적가공조건에서 가공한 후의 형상정도는 $0.2209 \mu\text{m}$, 표면거칠기는 R_a 7.9 nm, R_{max} 70.7nm로 나타났으며 가공정밀도 및 가공시간에서 목표값을 달성하였다.

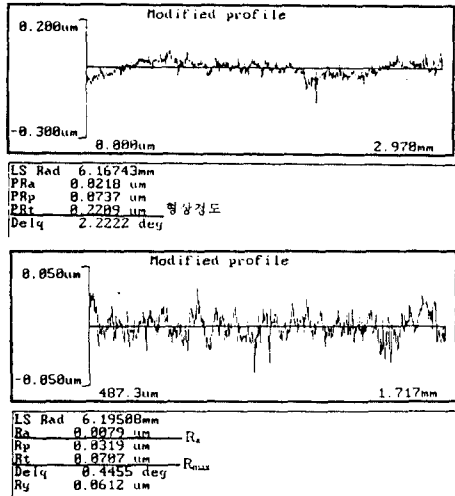
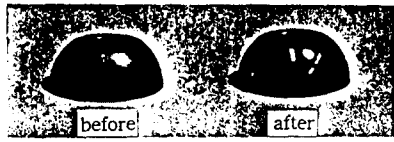


Fig.20 Result of polishing using the optimal polishing conditions

5. 결 론

- 1) 차세대 소형 고속 정밀 드라이버등의 핵심역할을 수행할 반구형 고속 정밀 베어링의 고능력, 경면가공기술을 개발하였다.
- 2) 반구형 고속 정밀 베어링의 가공 매카니즘 해석, 가공공정 개발, 가공시스템의 설계 및 제작을 통해 적합한 가공방법을 실현함으로써 기존의 단관계 래핑 및 폴리싱에 의한 비능률적인 생산공정을 개선하였다.
- 3) 가공실험 및 측정을 통해 최적 가공조건을 선정하였으며 최적 가공조건에서 실험한 결과 목표치에 대해 다음과 같은 결과를 얻었다.
 - 가공시간 60초/EA이내 (가공결과 55초/EA)
 - 형상정도 $\pm 1\mu\text{m}$ 이내 (가공결과 $0.2209\mu\text{m}$)
 - 표면거칠기 R_a 10nm이내 (가공결과 7.9nm)
 - $R_{n\text{max}}$ 100nm이내 (가공결과 70.7nm)
- 4) 개발된 고능력, 경면가공 공정은 입도가 높은 다이아몬드 연삭휠을 사용한 연삭공정(15초)과 다이아몬드 컴파운드를 사용한 폴리싱 공정(40초)의 2단계 가공공정이다.
- 5) 능률적이고 정밀한 가공을 위해서는 연삭공정이 특히 중요하며 초기의 깊은 분화구를 제거할 수 있도록 충분한 연삭을 실시하고 깊은 연삭스크래치를 발생시키지 않는 것이 고능력, 경면연마를

실현하는데 가장 중요하다.

- 5) 구동메카니즘의 해석, 구동조건의 선정방법 및 최적가공조건 등을 크기 및 재질이 다른 다양한 반구형 베어링의 경면가공에 적용할 수 있다.

참고문헌

- [1] Y.Namba and H.Tsuwa, 1978, Mechanism and some Applications of Ultra-Fine Finishing, Annals of the CIRP, vol.27/1, pp.511-516.
- [2] M.C.Shaw, 1995, Precision Finishing, Annals of the CIRP, vol.44/1, pp.343-348.
- [3] T.Kasai, K.Horio, 1990, 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, vol.39/1, pp.321-324.
- [4] T.Kasai, F.Matsumoto and A.Kobayashi, 1988, Newly Developed Fully Automatic Polishing Machines for Obtainable Super-Smooth Surfaces of Compound Semiconductor Wafers, Annals of the CIRP, vol.37/1, pp.537-540.
- [5] M.Ikeda, 1992, Accuracy of Spherical Shape on End of Small Diameter Glass Rods Obtained with Lip Type Tool, JSPE, vol.58/5, pp.853-858.
- [6] M.Ikeda, 1993, Spherical Shape Grinding with Lip Type Diamond Wheel, JSPE, vol.59/2, pp.287-292.