

## 마이크로 렌즈 연삭기용 주축설계 및 제작에 관한 기초연구

김의중\*, 한정훈, 박상일, 송승훈 ((주)엔투에이 OEMS연구소)

### A Basic Study of High Precision Spindle Design for Micro-Glass Lens Grinding

E. J. Kim, J. H. Han, S. I. Park, S.H. Song (N2A Co, Ltd.)

#### ABSTRACT

The high precision spindle is essential for mass and low cost production of aspherical glass lens. Especially, in the grinding process of micro glass lens the performance of the spindle determine the machined surface quality. For the aspheric micro glass lens grinding, we design and make a high precision spindle. We use air bearings for high speed and low motion errors of the spindle. And the driving mechanism is an air turbine to remove heat generation. In this study, we make basic performance requirements of the spindle through benchmarking. And we confirm the requirements by basic machining test. We test air consumption, static stiffness, run-out and vibration of the spindle.

**Key Words** : Micro aspherical glass lens(마이크로 비구면유리렌즈), Air spindle (공기주축), Grinding (연삭가공), Stiffness(강성)

#### 1. 서론

비구면의 반사경이나 렌즈는 광학적인 수차를 보정할 수 있기 때문에 최근 광학, 정보기기 디바이스에 채용이 늘어나고 있다. 또한 동시에 성능향상을 위한 고정도화가 행해지고 있다. 향후에도 이런 경향이 계속 진행되는 동시에 양산화, 저가격화의 요구도 점점 심해질 것이 예상된다. 그러나, 비구면렌즈를 가공하는 경우 구면렌즈와는 다르게 공구를 비구면 궤적에 따라 운동시켜 가공할 수 있는 CNC 비구면 연삭기가 필요하며, 요구되는 제품의 정밀도에 따라서 가공기가 고정밀화되어야 한다. 비구면 가공기를 구축하기 위해서는 여러 가지 요소기술이 필요하나 그 중에서 제품의 표면거칠기와 형상정밀도에 영향을 미치는 중요한 항목은 가공용 주축의 성능이다.

본 논문에서는 최종적으로 미세 곡면형상 연삭시스템을 구현하기 위한 고정밀 주축개발을 위해 주축시제품을 설계, 제작하고 기본성능을 평가하였다. 먼저 상용주축들에 대한 사양 및 성능을 비교, 분석한 후 가공용 주축의 기본적인 성능을 설계하고 기초적인 가공실험을 통하여 타당성을 검토하였다. 또한 상세설계를 통하여 제작된 주축의 성능을 평가하고

선진국의 상용제품과 비교하였다. 주축의 기본 성능으로서 공기소모량에 따른 회전수, 정강성, 회전정밀도를 평가한 결과를 나타내었다.

#### 2. 주축 개발사양 결정

최종적으로 개발될 가공기는 직경 5mm 미만의 마이크로렌즈 연삭기로서 가공용 주축에 요구되는 사양을 다음의 검토를 통하여 결정하였다.

##### 2.1 가공물에 따른 요구회전 속도

연삭가공에서 연삭휠의 속도는 가공물의 표면거칠기를 결정하는 중요한 인자가 된다. 일반적으로 가공속도는 1,500~1,800 m/min가 필요하다. 가공이 가능한 최소 가공속도를 1,000~1,200 m/min로 했을 때, 가공하고자 하는 비구면의 기준반경(R)이 3 mm 정도인 오목면일 경우 공구직경은 기준반경보다 작은 반경을 가져야 하기 때문에 최대 5 mm가 되고 필요 공구회전수는 약 63,000~76,000 rpm이 된다. 따라서 주축의 최대회전수는 약 100,000 rpm 정도가 되어야만 마이크로렌즈 가공에 사용 가능하다고 판단된다.

## 2.2 강성

일반적인 상용 공기베어링 주축은 그 용도가 마이크로 드릴링용으로 반경방향 강성보다 축방향 강성이 높으나, 연삭용 스피ndl의 경우 반경방향 강성이 커야한다. 또한, 기계 주축의 크기가 가공기의 크기에 영향을 주고 주축의 중량이 클수록 기계의 구조물이 커져야 한다는 점을 생각할 때, 주축의 강성은 주축의 크기범위를 먼저 정하고 최대 강성을 얻도록 해야 한다. 먼저 가공기를 제작할 때를 고려하여 주축의 크기를 100×200 mm(직경×길이)정도로 제한하고 강성의 값을 Table 1과 같이 상용 주축의 비교 검토를 통하여 결정하였다. 이 값은 일반적인 상용 주축과 달리 사용속도에서의 강성이며 동압베어링을 적용하여 목표값을 얻도록 베어링을 설계하였다.

Table. 1 Spec. comparison of the air bearing spindles

제조사	Max. rpm	Radial 강성 (N/μm)	회전 정밀도 (μm)	구동 방식	출력 (kW)	냉각 방식	중량 (kg)	크기 (mm)
I사	60k	14	1	AC 모터	1.2	수냉	6.3	80×200
W사	100k	1.5	-	터빈	-	공냉	1.2	41×190
L사(1)	80k	1.6	5	터빈	-	공냉	3	41×180
L사(2)	40k	8.8	5	터빈	-	수냉	4	57×186
L사(3)	110k	5.5	5	AC 모터	1.3	수냉	8	76×227
L사(4)	20k	30	5	DC 모터	2.5	수냉	30	200×451
N사	57k	-	-	터빈	4	-	-	55×110

## 2.3 구동방식

설계대상인 주축은 마이크로렌즈 가공용으로 상대적으로 낮은 출력이 요구되기 때문에 구동모터의 발열에 대한 온도제어가 필요 없는 에어터빈 구동방식으로 결정하였다. 단, 가공에 필요한 주축의 출력을 일반 전기모터를 사용한 주축에 비하여 50%정도인 350 W 급으로 결정하였다.

이상의 기본적인 검토를 통하여 결정된 주축의 기본사양을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Development specification of air spindle

Maximum speed	100,000 rpm
Runout(Radial/Axial)	0.5 / 1 μm
Stiffness(Radial/Axial)	20/25 N/μm at 60,000rpm
Power	350 W at 5 atm
Size(Max. D×L)	100 × 200 mm
Drive	Air turbine
Weight	below 5 kg

## 2.4. 주요 성능항목 검증

주축의 기본 성능 중 필요강성을 검증하기 위해 연삭력 측정시험을 하였다. 연삭력 측정시험에는 피삭재로서 직경이 8 mm인 BK7을 사용하였다. 연삭휠은 오오사카다이아몬드에서 제작된 #1,200 다이아몬드 입자, 집중도100인 메탈본드 휠을 사용하였다. 아래의 Fig. 1에 연삭력 측정시험장치를 나타내었다. 연삭력 측정에는 Kistler 9256A Tool Dynamometer를 사용하였으며 연삭기는 연삭시험을 위해 제작된 연삭장치를 사용하였다.

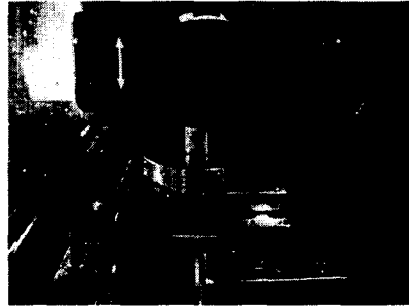


Fig. 1 Test apparatus for measuring of grinding force

실험결과 Fx, Fy는 값이 상대적으로 작아(0.5N 미만) 가공정밀도에 민감한 방향인 Z축 방향의 연삭력, Fz의 최대값을 연삭속도별로 측정하였다.

실험결과 연삭력은 절입이 클수록, 절삭속도가 낮을수록 크를 알 수 있었다. 유리렌즈 연삭가공시 최대절입량 15 μm일 때 연삭력은 3.6 N으로 측정되는데, 정상조건시 절입이 5 μm 미만인 것을 고려하면 주축의 반경방향 강성의 설계 목표값 20 N/μm은 마이크로렌즈 가공에 적합한 것으로 판단된다.

## 3. 주축의 제작

성능사양을 만족시킬 수 있는 에어스핀들을 Fig. 2와 같이 설계하였다.

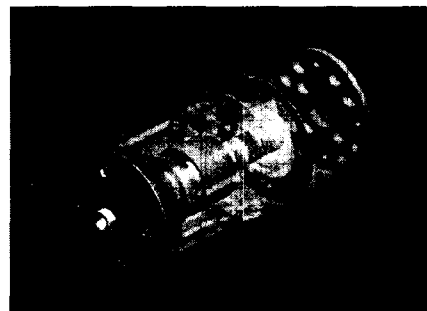


Fig. 2 3D modeling of air spindle

Fig. 3은 설계대로 제작된 스피들의 전체모습이다.

에어스핀들은 샤프트에 열박음 되어 있는 터빈에 압축공기가 공급됨으로써 작동된다. 샤프트의 가공 공차는 1  $\mu\text{m}$ 이하이어야 하며, 표면거칠기는 0.08 Ra 이하가 되도록 하였다.

에어베어링은 Fig. 4와 같이 정압과 동압베어링이 혼합된 형태로써, 회전수가 높아짐에 따라 레굴레이터에 의해 내부압력이 조절된다.

스핀들 샤프트는 5  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력을 공급하였을 때 앞단 스러스트베어링으로부터 12~15  $\mu\text{m}$ 의 간극이 유지되며, 뒷측 스러스트베어링과는 5~7  $\mu\text{m}$ 의 간극을 유지하게 된다. 레이디얼 방향의 간극은 에어공급 후 2~5  $\mu\text{m}$ 를 유지한다.

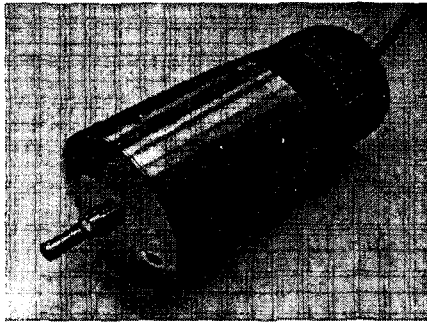


Fig. 3 Air spindle (N2A-ATS)

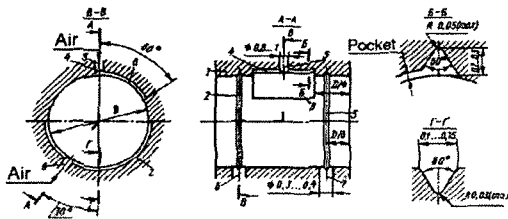


Fig. 4 Design of air bearing

#### 4. 개발주축의 성능평가

##### 4.1 회전속도 평가

공기소모량에 따른 주축의 회전수를 측정한 결과를 타사의 에어스핀들 제품과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. D1091은 최고 회전속도가 100,000 rpm인 W사 제품으로서 공기소모량에 따른 속도 증가율이 가장 높은 제품이다. B03196과 B03172는 L사 제품으로서 최고 회전속도가 80,000, 40,000 rpm인 모델이다. N2A-ATS는 본 연구를 통해 설계, 제작한 스피들로서 최고 회전속도 100,000 rpm에 도달하기 위해서는 공기소모량이 약 510 $\ell$  /min이 될 것으로 예상된

다. 이 같은 공기소모량은 타사 제품에 비하여 상대적으로 매우 많다. 이처럼 공기소모량이 많은 것은 설계목표인 출력을 내기 위한 것이며 적절한 요구 출력에 대한 검증은 통하여 향후 공기소모량을 줄일 필요가 있다.

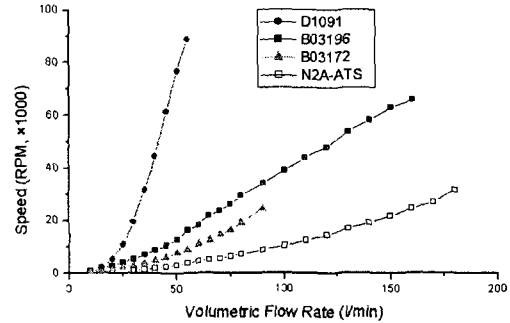


Fig. 5 Spindle speed with air consumption

##### 4.2 정강성 평가

제작된 주축은 정압과 동압베어링이 혼합되어 적용하도록 설계되어 있으므로 설계목표의 강성은 실제 사용속도범위에서 만족될 수 있다. 그러나 실제적으로 고속에서의 동적 강성은 측정이 어렵기 때문에 최소의 강성값을 가지는 정강성을 측정하였다. 반경방향의 정강성을 측정하는 장치를 Fig. 6에 나타내었다. 측정된 반경방향의 정강성은 Fig. 7에 다른 상용 주축의 측정값과 대비하여 나타내었다. 측정값을 선형적으로 계산하면 본 연구를 통해 설계 제작된 N2A-ATS의 경우 2.24 N/ $\mu\text{m}$ 이다. 정강성 값이 이 같이 작게 나타난 것은 제작된 주축이 정, 동압 공기 베어링으로 되어 있어 사용속도에서 설계사양에 맞는 강성이 나오도록 되어있기 때문이다. 그리고 강성 측정값이 큰 상용주축들은 정압 공기베어링을 채용하고 있는 모델이다. 측정된 정강성 값은 제작된 주축의 경우 최소강성으로 생각될 수 있다.

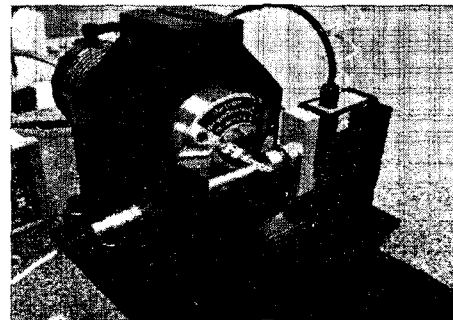


Fig. 6 Test apparatus for static stiffness

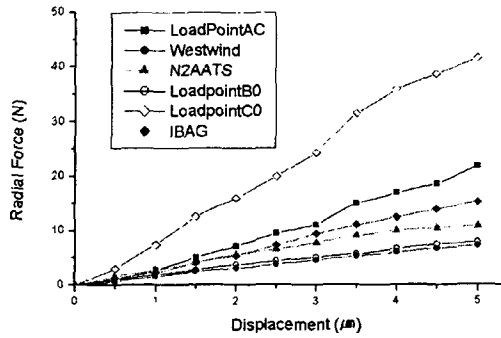


Fig. 7 Static stiffness of the spindles

#### 4.3 회전정밀도 평가

제작된 주축의 회전정밀도를 가공 형상 오차를 초래하는 축심의 움직임량으로 한다. 따라서 런아웃(runout)으로 주축 회전정밀도를 나타내며, TIR을 측정하기로 하였다.

측정용 마스터는 진원도 오차가 0.4 μm 정도이나 설계목표인 runout 0.5 μm를 확인하기에는 충분하다고 판단되어 사용하였다. 사용된 센서는 ADE사 정전용량형 센서로 분해능이 10 nm이다.

12,000 rpm 회전시 반경방향 회전정밀도는 약 0.45 μm로 측정되었다. 이 값은 측정용 마스터의 진원도 오차와 조립오차가 포함된 값이기 때문에 제작된 주축의 회전정밀도는 설계목표인 0.5 μm를 만족한다. 회전속도를 높이면서 TIR의 변동을 측정한 결과 Fig. 8과 같이 회전속도가 35,000 rpm 이상에서는 0.5 μm보다 커짐을 알 수 있다.

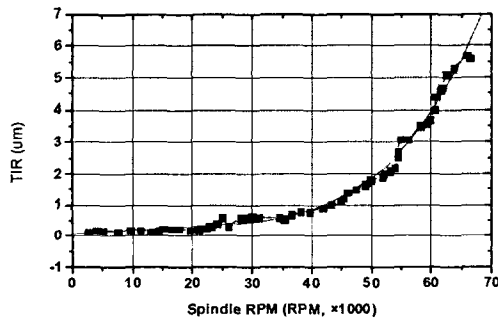


Fig. 8 TIR for spindle speed

이것은 주축의 회전속도가 증가함에 따라 불평형 질량의 효과가 커지기 때문으로 판단된다. 따라서 주축 사용시 부착되는 공구의 밸런싱이 중요할 것으로 판단된다.

#### 4.4 진동측정

주축의 사용속도범위를 중심으로 회전속도를 변화시키면서 주축의 상단에 가속도계를 부착하여 진동을 측정하였다.

가속도계를 이용하여 회전속도마다 가속도성분의 진폭을 측정하여 그 때의 진동주파수를 적용하여 변위로 계산하였을 때 최고 진폭은 사용속도 60,000 rpm일 때 약  $6 \times 10^{-6}$  μm에 지나지 않아 설계사양 0.7 μm를 충분히 만족함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

미세곡면 형상 연삭시스템을 구현하기 위한 고정밀 주축을 제작하고 기본성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기본성능 실험을 통하여 설계, 제작된 주축의 성능은 선진국에서 시판하는 연삭용 주축에 비하여 출력이나 회전정밀도 측면에서 우수한 성능을 가지는 것으로 판단된다..
- 2) 주축의 강성은 기초가공실험을 통하여 측정한 연삭력을 고려할 때 충분하다고 판단되며 향후 주축의 크기를 줄이기 위한 검토가 필요하다.
- 3) 설계 제작된 주축은 공기소모량이 따른 회전속도 측정결과 공기소모량이 과다하여 향후 주축의 출력과 절충하여 공기소모량을 줄일 필요가 있다.

#### 후기

본 연구는 "산업기술기반 중기거점 사업"의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 森山茂夫, "非軸對称非球面レンズの研削加工," 砥粒加工學會誌, vol.36, no.1, pp10-13, Jan.1992.
2. M.H Miller and T.A Dow, "Wheel speed equilibria in precision contour grinding," Precision Engineering, vol.19, no.2/3, pp148-156, 1996.
3. A.H. Slocum, "Precision Machine Design", Prentice-Hall International, 1992, pp.66-67.