

◆특집◆ 지능형 연삭 가공 시스템 I

마이크로 렌즈 연삭기용 주축설계 및 제작에 관한 연구

김의중\*, 한정훈\*, 이건범\*\*, 박상일\*

A Study on the Design of High Speed Spindle for Micro Glass Lens Grinding

Eui Jung Kim\*, Jeong Hoon Han\*, Keon Beom Lee\*\*, Sang Il Park\*

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 있으며, 이와 동시에 성능향상을 위한 고정도화 실현을 위한 연구가 수행되고 있다.<sup>1</sup> 향후에도 이런 경향은 계속 유지될 것으로 판단되며, 양산화, 저가격화의 요구도 점차 심해질 것으로 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.<sup>2</sup> 비구면 가공기를 구축하기 위해서는 여러 가지 요소기술이 필요하나 그 중에서 제품의 표면거칠기와 형상정밀도에 영향을 미치는 중요한 항목은 가공용 주축의 성능이다.<sup>3</sup>

본 논문에서는 최종적으로 초정밀 미세 곡면형상 연삭시스템을 구현하기 위하여, 정밀급 가공시스템을 구축하고 마이크로 렌즈를 가공시험한 결과와 향후 초정밀 연삭가공 시스템에 사용될 고

속 고정밀 주축을 개발하기 위해 주축 시제품을 설계, 제작하고 기본성능을 평가한 결과를 나타내었다.

개발된 정밀렌즈 가공시스템은 연삭기와 폴리싱기가 하나의 시스템으로 구성되어 있다. 먼저 연삭기로 비구면형상을 가공하고 최종적으로 폴리싱기로 가공된 비구면형상의 정밀도를 유지하면서 표면거칠기만을 향상시키도록 하였다. 고속 고정밀 주축설계 단계에서는 상용 주축들에 대한 사양 및 성능을 비교, 분석한 후 가공용 주축의 기본적인 성능을 설계하였으며, 기초적인 가공실험을 통하여 설계의 타당성을 검토하였다. 또한 상세설계를 통하여 제작된 주축의 성능을 평가하고 선진국의 상용제품과 비교하였다. 주축의 기본 성능으로서 공기소모량에 따른 회전수, 정강성, 회전정밀도를 평가한 결과를 나타내었다.

2. 정밀 마이크로 렌즈 가공시스템

2.1 시스템 사양

본 연구에서는 초정밀급의 마이크로 렌즈 연삭기 개발시 리스크를 줄이기 위해 먼저 Table 1 과 같은 사양으로 연삭시스템을 구축하였다. 비구면 렌즈의 가공방식은 연삭숫돌의 정보를 기초로 가공물의 형상을 재현할 수 있는 CL 데이터를 생성한 후 적절한 가공조건이 부여된 NC 코드를 생성하여 소형의 연삭숫돌을 NC 가공경로를 따라

\* (주)엔투에이 OEMS 연구소

\*\* 청주기능대학 컴퓨터응용기계과

Tel. 031-330-7692, Fax. 031-330-7609

Email: ejkim@n2a.co.kr

초정밀 마이크로렌즈 가공기의 핵심부품 및 가공 시스템 특히, 연삭가공 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

이동시키는 방식을 적용하였다. 가공기는 공작물 주축을 X 축위에 수직으로 설치하고, 연삭주축은 X 축과 동시제어로 원하는 궤적을 생성하는 Z 축과 공구와 공작물간의 중심위치를 맞추는데 사용되는 Y 축에 장착되어 있는 구조이다. 공작물 주축에는 정밀 볼베어링을 사용하였으며, 가공용 주축에는 공기베어링 주축을 사용하였다. 또한 기계의 이송계에는 리니어블가이드를 사용하였으며, 기계의 위치정밀도에 대한 반복성능을 확보하기 위해 각 축에는 스케일을 사용하였다.

본 시스템은 연삭기와 폴리싱기를 한 세트로 구성하였으며, 먼저 연삭기로 비구면을 가공한 후 폴리싱기로 형상정밀도를 만족하는 범위에서 표면정도를 향상시키는 작업을 할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

Table 1 Specifications of grinding machine

Machine axes	X	Stroke: 100 mm Position feedback resolution: 0.1 $\mu$ m
	Y	
	Z	
Grinding Spindle	Speed: 0 ~ 30000 rpm	
Work spindle	Speed: 60 ~ 1500 rpm	
Controller	PCNC	

또한, 폴리싱 공정을 위해서 Table 2 와 같은 사양의 폴리싱기를 구축하였다.

Table 2 Specifications of the polishing machine

Machine axes	X	Stroke: 100 mm( $\pm 90^\circ$ ) Position feedback: 0.1 $\mu$ m  (0.01 $^\circ$ )
	Y	
	Z	
	Tilt	
Polishing spindle	Speed: 10 - 3000 rpm Polishing force: max 10 kgf	
Work spindle	Speed: 60 - 600 rpm	
Controller	PCNC	

가공방식은 소형의 회전하는 폴리싱공구를 가공점에 수직한 방향으로 가압하면서 가공하고자 하는 가공물의 형상에 대한 공구궤적을 프로그램

하여 이송시키는 방식이다. 기계구조는 공작물 주축을 폴리싱 공구의 가압력이 가공중에 공작물과의 접촉점에서 수직으로 작용하도록 틸트시키는 축과 이 축을 X 방향으로 이송하는 축, 폴리싱공구를 수직방향으로 가압하면서 X 축과 동시제어로 원하는 형상궤적을 만드는 Z 축과 공작물과 공구의 중심을 맞추는데 필요한 Y 축으로 구성되어 있다.

본 폴리싱기를 사용하기 위해서는 가공물의 중심부와 외주부간의 폴리싱 경로차에 의한 가공깊이차이를 보상하는 4 프로그램기술이 필요하며 체제시간을 이용하여 보상하는 방법을 개발, 적용하였다. Fig. 1 은 개발된 가공기 시스템의 사진이다.



Fig. 1 Precision lens grinding & polishing machine

## 2.2 가공시험

구축된 정밀렌즈가공시스템을 사용하여 다음과 같은 가공조건으로 렌즈연삭 가공실험을 수행하였다.

공작물 : Material H-LTAF 3

Size  $\phi 4 \times 1.3 \text{ t}$

가공면기준반경 R1:22.4 mm, R2:4.25 mm

공구 : Size  $\phi 3$

SD2000L150BS25

공작물 회전속도 : 300 rpm

공구 회전속도 : 20000 rpm

이송속도 : 3 mm/min

1 회가공 절입량 : 2  $\mu$ m (정상가공시)

또한, 연삭가공된 공작물을 폴리싱기에서 다음과 같은 가공조건으로 폴리싱 작업을 수행하였다.

공구 재질 : Poly Urethane  
 공구크기 :  $\phi 11$   
 공구 회전속도 : 1000 rpm  
 공작물 회전속도 : 200 rpm  
 폴리싱 가압력 : 2 kg  
 폴리싱입자: CeO<sub>2</sub>  
 평균입자크기 : 0.9  $\mu\text{m}$   
 농도 : 20%(Wt)

연삭후 가공된 렌즈 면을 접촉식 형상측정기로 측정된 결과, R1 과 R2 면의 형상정밀도는 각각 1.056, 0.898  $\mu\text{m}$  P-V, 표면거칠기는 120 nm Rt 였으나, 폴리싱 후 측정된 결과 R1 과 R2 면의 형상정밀도는 각각 0.817, 0.897  $\mu\text{m}$  P-V, 표면거칠기는 30 nm Rt(3 nm Ra)로 향상되었다. 사용된 측정기는 FormTalysurf Series2 이다.

### 2.3 결과검토

폴리싱 후 가공면의 형상오차가 다소 향상된 것은 폴리싱 후 표면의 불규칙한 가공흔적이 제거되었기 때문이며 폴리싱에 의해 형상오차는 그대로 유지되고 표면 거칠기만 향상되었음을 알 수 있다. 가공에 사용된 프로그램은 비구면 궤적을 직선보간한 것으로 Under-Cut 이 발생하지 않을 공구반경을 가진 공구로 가공해야 한다.

일반적으로 마이크로렌즈 가공에 적합한 공구를 검토한 결과 대개  $\phi 3$  mm 이하의 공구가 요구되었으며, 가공 시험한 렌즈의 경우 공구의 최대반경이 R1, R2 면의 경우 각각 2.2, 4.2 mm 였다. 또한 연삭에 사용되는 공구직경이 작으므로 연삭에 필요한 가공속도를 만족하기 위해서는 주축의 회전속도가 100,000 rpm 정도를 유지해야 하지만 사용된 주축이 상대적으로 저속이므로 가공한 면이 뜯기는 현상이 발생하였다. 또한, 사용된 연삭숫돌의 직경이 작아 가공시 공구 마모가 심하게 발생하여 자주 공구반경을 보상에 주어야만 했다. 따라서 가공효율을 높이기 위해서는 가공정밀도와 가공면거칠기를 동시에 만족시키면서 마모가 적은 연삭 숫돌의 선택이 중요하다. 결론적으로 연삭주축의 회전속도를 높이면 가공면거칠기를 향상시키고, 연삭 가공시간을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

## 3. 주축개발사양 결정

### 3.1 회전속도

연삭가공에서 연삭숫돌의 회전속도는 가공물의 표면거칠기를 결정하는 중요한 인자중의 하나로, 일반적인 가공속도로 1,500~1,800 m/min 가 요구된다. 가공이 가능한 최소 가공속도가 1,000~1,200 m/min 이고, 가공하고자 하는 비구면의 기준반경(R)이 3 mm 정도인 오목면일 경우, 공구직경은 기준반경보다 작은 반경을 가져야 하기 때문에 최대 5 mm 가 되고 필요한 공구 회전수는 약 63,000~76,000 rpm 이 된다. 따라서 주축의 최대 회전수는 약 100,000 rpm 정도가 되어야만 마이크로렌즈 가공에 사용 가능하다고 판단된다.

### 3.2 강성

일반적인 상용 공기베어링 주축시스템의 용도는 마이크로 드릴링용으로 반경방향의 강성보다 축방향 강성이 높게 요구되나, 연삭용 공기베어링 주축시스템은 반경방향의 강성이 축 방향 강성보다 크게 요구된다.

Table 3 Spec. comparison of the air bearing spindles

제조사	Max rpm	Radial 강성 (N/ $\mu\text{m}$ )	회전 정밀도 ( $\mu\text{m}$ )	구동 방식	출력 (kW)	냉각 방식	중량 (kg)	크기 (mm)
I 사	60k	14	1	AC 모터	1.2	수냉	6.3	80×200
W 사	100k	1.5	-	터빈	-	공냉	1.2	41×190
L 사(1)	80k	1.6	5	터빈	-	공냉	3	41×180
L 사(2)	40k	8.8	5	터빈	-	수냉	4	57×186
L 사(3)	110k	5.5	5	AC 모터	1.3	수냉	8	76×227
L 사(4)	20k	30	5	DC 모터	2.5	수냉	30	200 × 451
N 사	57k	-	-	터빈	4	-	-	55×110

또한, 주축의 크기는 가공기의 크기에 영향을 주고 주축의 중량이 클수록 기계구조물의 크기가 커져야 한다는 점을 감안하여, 먼저 주축크기의 범위를 결정한 뒤 주축의 강성을 만족시킬 수 있도록 주축시스템을 설계해야 한다. 따라서 본 연구에서는 주축의 크기를 100×200 mm(d×l) 정도로 제한하고 Table 3 과 같이 상용 주축의 강성과 비교 검토하여 적절한 주축 강성을 결정하였다. 이 값은 일반적인 상용주축과는 달리 사용속도에서의 강성으로 동압 베어링을 적용하여 목표 값을 얻도록 공기 주축시스템을 설계하였다.

### 3.3 구동방식

설계 대상인 주축은 마이크로 렌즈 가공용으로 상대적으로 높은 출력을 요구하지 않기 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.

이와 같은 기본적인 검토를 통하여 결정된 주축의 기본사양은 Table 4 와 같다.

Table 4 specification of air spindle

	100,000 rpm
	0.5 / 1 $\mu\text{m}$
	20/25 N/ $\mu\text{m}$ at 60,000rpm
	350 W at 5 atm
	100 × 200 mm
	Air turbine
	Below 5 kg

### 3.4 주요성능항목 검증

주축의 기본 성능 중 필요강성을 검증하기 위해 연삭력 측정시험을 하였다. 연삭력 측정시험에는 피삭재로서 직경이 8 mm 인 BK7 을 사용하였다. 연삭 스톨은 오오사카다이아몬드에서 제작된 #1,200 다이아몬드 입자, 집중도 100 인 메탈본드 스톨을 사용하였다. 연삭력 측정에 Kistler 9256A Tool Dynamometer 를 사용하였으며 연삭기는 연삭시험을 위해 제작된 연삭장치를 사용하였다. Fig. 2 는 연삭력 측정에 사용된 측정장치이다.

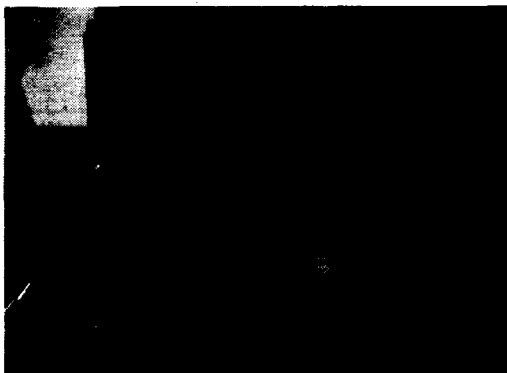


Fig. 2 Test apparatus for measuring of grinding force

실험결과  $F_x$ ,  $F_y$  는 값이 상대적으로 작아(0.5N 미만) 가공정밀도에 민감한 방향인 Z 축 방향의 연삭력  $F_z$  의 최대값을 연삭 속도별로 측정하였다.

실험결과 연삭력은 절입이 클수록, 절삭속도가 낮을수록 큼을 알 수 있었다. 유리렌즈 연삭가공시 최대절입량 15  $\mu\text{m}$ 일 때 연삭력은 3.6 N으로 측정되는데, 정삭조건시 절입이 5  $\mu\text{m}$  미만인 것을 고려하면 주축의 반경방향 강성의 설계 목표값 20 N/ $\mu\text{m}$ 는 마이크로렌즈 가공을 위해 적합한 것으로 판단된다.

### 4. 주축제작결과

본 연구에서는 타사 제품과 경쟁력을 가진 가공기를 제작하기 위하여 앞에서 요구된 사양을 만족시킬 수 있는 공기주축 시스템을 설계 제작하였다. Fig. 3 은 설계된 공기주축 시스템을 나타낸 것이며, Fig. 4 는 제작 완료된 공기주축 시스템의 전체 모습이다.



Fig. 3 3D modeling of air spindle

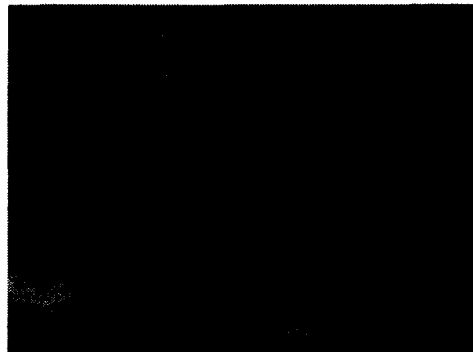


Fig. 4 Air spindle (N2A-ATS)

설계된 공기주축 시스템은 주축, 레디얼 공기 베어링, 스러스트 공기베어링 및 터빈으로 구성되어 있다.

설계된 공기주축 시스템은 주축에 열박음 되어 있는 터빈에 압축공기가 공급됨으로써 작동되며, 주축의 가공공차는 1  $\mu\text{m}$ 이하, 표면거칠기는 0.08 Ra 이하가 되어야 한다.

Fig. 5 는 레디얼 공기베어링의 단면도로 정압과 동압이 혼합된 형태로서, 회전수가 높아짐에 따라 레귤레이터에 의해 내부압력이 조절되도록 설계되었다. 레디얼 공기베어링은 축의 와류 운동을 안정화 시키기 위해 Fig. 5 와 같은 형상(구멍, 홈 및 포켓)으로 설계하였으며, 운전시작과 종료 상태에서 베어링이 부상할 수 있도록 가압장치(구멍과 미세홈)를 설치하였다.

앞쪽에 설치된 스러스트 공기베어링은 축 방향의 힘이 작용할 때 레디얼 베어링과 터빈의 접촉을 방지하기 위한 것으로, 5  $\text{kgf/cm}^2$  의 압력이 공급되었을 때 축 방향으로 분출되는 공기에 의해 스러스트 베어링과 레디얼 베어링의 간격이 12~15  $\mu\text{m}$ 정도 유지되도록 설계하였다. 뒤쪽에 설치된 스러스트 베어링은 주축 시스템과 급기부와의 접촉을 방지하기 위한 것으로 5~7  $\mu\text{m}$ 의 간극을 유지하도록 설계되었으며, 반경방향의 간극은 공기공급 후 10~15  $\mu\text{m}$ 를 유지하도록 설계되었다.

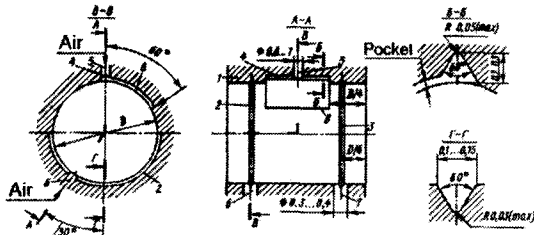


Fig. 5 Design of air bearing

## 5. 주축성능평가

### 5.1 회전속도

Fig. 6 은 공기소모량에 따른 주축 회전수를 측정 한 결과를 타사에서 제작된 에어스핀과 비교한 결과를 나타낸 것이다.

D1091 은 최고 회전속도가 100,000 rpm 인 W 사 제품으로서 공기소모량에 따른 속도 증가율이 가장 높은 제품이다. B03196 과 B03172 는 L 사 제품

으로서 최고 회전속도가 80,000, 40,000 rpm 인 모델이다. N2A-ATS 는 본 연구를 통해 설계, 제작한 스피들로서 최고 회전속도 100,000 rpm 에 도달하기 위해서는 공기소모량이 약 510 $\ell$ /min 이 될 것으로 예상된다. 이 같은 공기소모량은 타사 제품에 비하여 상대적으로 매우 많다.

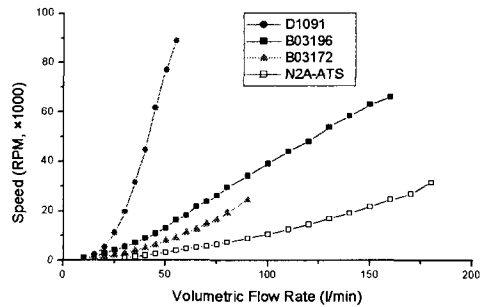


Fig. 6 Spindle speed with air consumption

이처럼 공기소모량이 많은 것은 설계 목표인 출력력을 만족시키기 위한 것이며 적정한 요구 출력에 대한 검증을 통하여 향후 공기소모량을 줄일 필요가 있다.

### 5.2 정 강성

제작된 주축은 정압과 동압베어링이 혼합되어 작용하도록 설계되어 있으므로 설계목표의 강성은 실제 사용속도범위를 만족할 수 있다. 그러나 실제적으로 고속에서의 동적 강성은 측정이 어렵기 때문에 최소의 강성을 가지는 정강성을 측정하였다. Fig. 7 은 반경방향의 정강성을 측정하는 장치이다.



Fig. 7 Static stiffness of the spindles

Fig. 8은 설계 제작 완료된 N2A-ATS의 반경방향의 정강성을 측정된 결과와 타사 주축시스템의 정강성을 비교하여 나타낸 것이다.

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 공기베어링으로 되어 있어 사용속도에서 설계사양에 맞는 강성이 나오도록 설계되었기 때문이다. 그리고 강성 측정값이 큰 상용 주축들은 정압 공기베어링을 채용하고 있는 모델이다. 측정된 정강성 값은 제작된 주축의 경우 최소강성으로 생각될 수 있다.

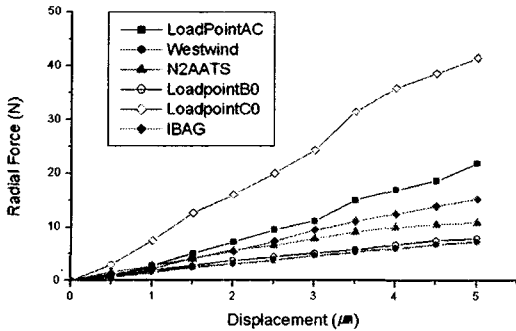


Fig. 8 Static stiffness of the spindles

### 5.3 회전정밀도

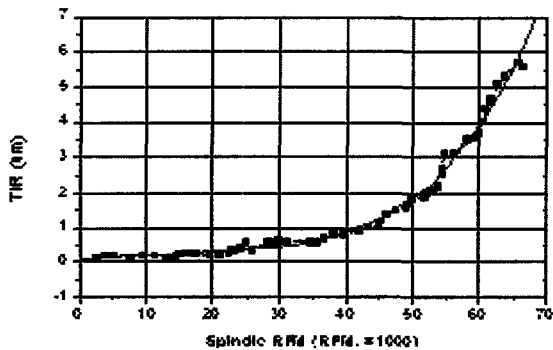


Fig. 9 TIR for spindle speed

제작된 주축의 회전정밀도를 가공 형상 오차를 초래하는 축심의 움직임량으로 한다. 따라서 런아웃(runout)으로 주축 회전정밀도를 나타내며, TIR을 측정하기로 하였다<sup>5</sup>. 측정용 마스터는 진

원도 오차가 0.4  $\mu\text{m}$  정도이나 설계 목표인 runout 0.5  $\mu\text{m}$ 를 확인하기에는 충분하다고 판단되어 사용하였다. 사용된 센서는 ADE사의 정전용량형 센서로 분해능이 10 nm이다.

12,000 rpm 회전시 반경방향 회전정밀도는 약 0.45  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이 값은 측정용 마스터의 진원도 오차와 조립오차가 포함된 값이기 때문에 제작된 주축의 회전정밀도는 설계목표인 0.5  $\mu\text{m}$ 를 만족한다. 회전속도를 높이면 TIR의 변동을 측정된 결과 Fig. 9와 같이 회전속도가 35,000 rpm 이상에서는 0.5  $\mu\text{m}$ 보다 커짐을 알 수 있다.

## 6. 결론

초정밀 미세곡면 형상 연삭시스템을 개발하기 위하여 고정밀 가공시스템을 구축하여 가공시험을 수행하고, 연삭용 고정밀 주축을 설계, 제작하여 기본성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 정밀렌즈가공시스템을 구축하고 가공시험을 한 결과 형상오차의 P-V 값이 1  $\mu\text{m}$  이하의 렌즈를 얻을 수 있었다.

2) 초정밀 렌즈를 가공하기 위해서는 주축의 회전속도를 포함하여 가공기의 성능개선이 필요하며 가공시험을 통하여 설계요구사항을 분석할 수 있었다.

3) 기본성능 실험을 통하여 설계, 제작된 주축의 성능은 선진국에서 시판하는 연삭용 주축에 비하여 출력이나 회전정밀도 측면에서 우수한 성능을 가지는 것으로 판단된다.

4) 주축의 강성은 기초가공실험을 통하여 측정된 연삭력을 고려할 때 충분하다고 판단되며 향후 주축의 크기를 줄이기 위한 검토가 필요하다.

5) 설계 제작된 주축은 공기소모량에 따른 회전속도 측정결과 공기소모량이 과다하여 향후 주축의 출력과 절충하여 공기소모량을 줄일 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 “고기능성 부품용 지능형 연삭시스템개발”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 森山茂夫, "非軸對稱非球面レンズの研削加工," 砥粒加工學會誌, Vol. 36, No.1, pp. 10-13, Jan. 1992.
2. Kazushi Nomura, "On Recent Manufacturing Technology of Aspherical Optics," 光學 22. 2 pp 82-87, Feb. 1993.
3. Miller, M. H and Dow, T. A., "Wheel speed equilibria in precision contour grinding," Precision Engineering, Vol. 19, No. 2/3, pp. 148-156, 1996.
4. Kurobe, T., Yamada, Y., Sakai, N., Ueda, S. and Shingu, K., "Local area polishing of glass by fine pressure controlling," JSPE, Vol. 60, No. 11, pp. 1642-1646, Nov. 1994.
5. Slocum, A. H., "Precision Machine Design," Prentice-Hall International, pp. 66-67, 1992.