

◆특집◆ 지능형 연삭가공 시스템 III

마이크로렌즈 연삭용 고속 고정밀도 공기주축의 설계 및 해석에 대한 연구

편영식\*, 이근범\*\*, 박정현\*, 요코이 요시유키\*\*\*, V. Alexeev\*\*\*\*

A Study on the Design and Analysis of High Speed & Accuracy Air Spindle for Micro-Lens Grinding

Young-Shik Pyoun\*, Keon-Beom Lee\*\*, Jeong-Hyun Park\* and Yoshiyuki Yokoi\*\*\*, V. Alexeev\*\*\*\*

Key Words : Aspherical lens(비구면 렌즈), Micro-lens(마이크로 렌즈), Air Grinding Spindle (연삭기용 공기주축)

1. 서론

산업의 발달과 더불어 초소형, 고정밀 제품에 대한 수요가 증가함에 따라 이를 가공할 수 있는 마이크로 가공기술 및 초정밀 공작기계를 구현할 수 있는 설계기술이 국가 경쟁력을 결정하는 핵심 기술로 인식되기에 이르렀다<sup>1</sup>.

공작기계의 성능은 주축계 설계 및 제작기술, 이송계 설계 및 제작기술, 오차 보상기술, 베드 구조물 설계 및 방진기술, 시스템 종합기술 등에 의해 결정되며, 이중에서도 주축계의 설계 및 제작기술은 가공정밀도 및 생산기술을 주도하는 핵심 기술이라 할 수 있다. 이와 같이 주축 시스템은 공작기계의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치므로, 소재의 변형이 작고, 절삭력이나 절삭토크의 영향이 적으며 가동 중 열 영향을 최대한 배제할 수 있도록 주축 시스템이 설계되어야 한다<sup>2,3,4,5</sup>.

본 연구에서는 초정밀 비구면 렌즈 가공용 연

삭기의 주축시스템의 개발을 통해 구축된 소음과 진동이 거의 없고 초고속 회전에 적합한 공기베어링을 적용한 연삭기용 공기주축의 설계 및 해석방법을 소개하고자 한다.

2. 고정밀 공기 스피들의 개발 배경

정도의 차이는 있지만 대부분의 렌즈는 굴곡을 가지고 있으며, 이 곡선을 연장시켜보면 하나의 커다란 원을 형성하게 되는데 이러한 렌즈를 구면 렌즈라 한다. 비구면 렌즈는 구면렌즈와는 달리 하나의 곡률로 형상이 정의되지 않기 때문에 설계와 제작이 대단히 어렵지만, 비구면렌즈를 활용하면 보다 넓은 시야를 확보할 수 있고 수차를 감소시켜 정보의 정확도를 높일 수 있다<sup>6</sup>.

여기서, 수차란 빛이 어느 위치로 들어오느냐에 따라 초점의 위치가 서로 달라지는 것으로, 구면렌즈는 그 구조상 구면수차가 발생하는 문제점을 갖게 되는데 이러한 수차는 렌즈 주변부로 갈수록 더 커지게 된다.

렌즈중심부와 가장자리의 굴곡을 달리하여 렌즈의 가장자리를 극미량 더 가공해주면 렌즈중심부는 물론 주변부에 입사한 광선들도 한 점에 초점이 맺히게 되므로 구면수차를 완전히 없앨 수는 없지만 획기적으로 줄일 수 있다. 그러나, 비구면 렌즈는 설계에서 가공에 이르기까지의 전과정이

\* 선문대학교 기계 및 제어공학부  
Tel : 041-530-2333, Fax : 041-530-2307  
Email : pyoun@sunmoon.ac.kr  
기계설계자동화, 생산시스템설계, 초음파에너지를 이용한 무공해 가공공정기술개발에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.  
\*\* 청주기능대학 컴퓨터응용기계과  
\*\*\* ㈜ 디자인메카  
\*\*\*\* Mikron Vladimir, Russia

복잡하고 까다롭기 때문에 제품 단가가 구면렌즈에 비해 비싸 이의 적용이 특수한 부분에 제한되었다.

최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어 CAD/CAM 기술이 현저히 발전되었으며, 이를 기반으로 한 초 정밀 절삭기계가 개발되기에 이르렀다. 이에 따라 비구면렌즈의 절삭기술이 크게 발전하고, 그 가공법도 수월해져 제조원가가 낮아지고, 반도체, 영상정보, 전자광학분야 등의 첨단산업분야에서 광학기계의 경량화 요구가 높아짐에 따라 비구면 렌즈의 적용이 카메라 촬영렌즈, 파인더 렌즈, CD 용 픽업렌즈, 프로젝션 TV 용 렌즈 등 민간용 전자제품에까지 확대되었다.

현재 초정밀 광학렌즈의 세계적 수준은 직경 50[mm]에 대해 형상정도 5[nm] rms, 표면거칠기 0.2[nm] rms 수준이며, X선 광학계에는 형상정도와 표면거칠기 모두 0.3[nm] rms 이하의 수준이 요구되고 있다. 현재의 국내기술을 선진국과 비교하면 최소 10년 이상의 현격한 기술수준 격차가 있는 것으로 알려지고 있다<sup>7</sup>. 뿐만 아니라, 국내 대부분의 광학부품 가공업체가 중소 업체이므로, 비구면 광학부품 가공의 자동화가 거의 이루어지지 않았으며, 제품의 정밀도가 작업자의 숙련 정도에 의해 결정되므로 정밀한 비구면 광학부품의 생산 경쟁력이 매우 뒤떨어져 있는 실정이다. 이로 인해 국내 산업계에서 정밀 비구면 광학부품을 이용한 제품개발에 많은 어려움을 겪고 있으며, 높은 제조원가로 인해 관련 제품의 국제적 가격경쟁력을 확보하기가 어려운 실정이다.

국내 정밀공업분야의 경쟁력을 확보하려면 정밀공업의 핵심 요소인 고정밀 주축시스템의 자체 설계 및 제조능력을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다 할 수 있다.

### 3. 공기 스피ndl의 설계

#### 3.1 개발 요구사항

구면렌즈는 총형 연삭으로 근사 형상을 만든 후 폴리싱 과정을 거쳐 가공하지만, 비구면 렌즈는 초 정밀 연삭기로 비구면의 근사형상과 최종형상을 만들므로 매우 높은 수준의 주축정밀도와 안정성이 요구된다.

정밀 가공용 공작기계의 주축은 고속으로 회전하므로 일반적으로 널리 사용되고 있는 볼 베어

링으로 구성된 주축은 고열이 발생하여 높은 회전 정밀도를 유지하기가 어렵고, 고속회전으로 인한 열 발생을 억제할 수 있는 특수 냉각장치가 필요하므로 시스템이 복잡해지고 고장수리가 어렵다.

본 연구에서는 고속회전 하에서도 소음과 열 발생이 거의 없고, 시스템이 간단하여 보수 유지가 용이하고, 높은 정밀도와 안정성을 보장할 수 있는 공기 주축의 설계 및 설계검증을 위한 해석 방법을 기술하였다. Table 1 은 개발 공기 주축에 적용된 사양이다.

Table 1 Specifications of spindle

항목	개발 목표
Radial stiffness [N/ $\mu$ m]	30
Axial stiffness [N/ $\mu$ m]	25
Radial run-out [ $\mu$ m]	0.2
Axial run-out [ $\mu$ m]	1
Maximum speed [rpm]	100,000

#### 3.2 주축의 설계

개발된 공기 주축의 주요 구성요소는 Fig. 1 과 같이 축 ①, 레디얼 베어링 ②, 스러스트 베어링 ③ 및 터빈 ④로 구성되어 있으며, 강성, 런아웃(run-out) 등의 설계 목표를 만족할 수 있는 구조로 설계 및 제작되었다.

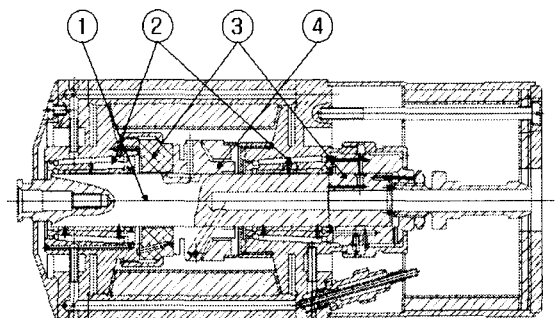


Fig. 1 Assembly drawing of aero spindle

##### 3.2.1 공기 레디얼베어링 설계

레디얼베어링은 반경방향의 연삭력에 의해 주축이 베어링에 접촉하는 것을 방지하는 역할을 한다. 개발된 공기 레디얼베어링은 연삭력을 고려하여 레디얼 강성이 20 [N/ $\mu$ m]을 만족하도록 설계하였으며, 정숙한 운전이 이루어질 수 있도록 주축

에 차동 베어링(differential bearing) 방식을 적용하였다.

차동 베어링과 일반 공기베어링의 차이점은 축의 와류 운동을 안정화 시키기 위해 Fig. 2 와 같은 “half speed curl”(구멍 5, 홈 4, 포켓 8)과 운전 시작과 종료 상태에서 베어링이 부상할 수 있도록 가압 장치(구멍 7 과 미세 홈 2)를 가지고 있다는 것이다.

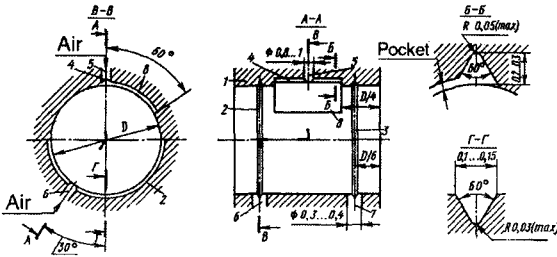


Fig. 2 Section view of differential bearing

그러나 차동 베어링을 정밀하게 설계 및 해석한다는 것은 극히 어려운 일이므로 근사적 해석기법에 기초하여 하중장치와 가압장치 및 기타 설계 파라미터를 결정하였다[A-1].

베어링에 작용하는 총양력은 식 (3)의 비양력(specific lifting force)  $K_H$  를 이용하여 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$W = DLp_a K_H \quad (1)$$

베어링의 마찰 토크는 식 (2)로 계산한다.

$$M_{h0} = \frac{\pi D^2 \mu mL}{2c} \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \quad (2)$$

$$K_H = \frac{\pi \chi \varepsilon}{2\lambda \sqrt{1+\chi^2}} \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3)$$

여기서,  $\chi, \varepsilon, \lambda$ 는 각각 베어링 압축수, 상대편심율 및 상대길이를 나타내는 무차원수이다. D는 베어링의 직경, L은 베어링의 길이,  $P_a$ 는 대기압이다.  $\mu$ 는 공기의 절대점도, c는 반경방향의 간극,  $\varepsilon$ 은 상대 편심율,  $\lambda$ 는 베어링 직경에 대한 길이의 비, m은 축의 질량, X, Y는 상수이다.

래디얼 강성(radial stiffness)은 실험을 통하여 다양한 상대 편심률에 대한 양력을 구한 후 이 값을 이용하여 식 (4)와 같이 계산한다.

$$G = (W_{\varepsilon=0.2} - W_{\varepsilon=0.1}) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (4)$$

Fig. 3 은 개발된 래디얼베어링 유닛의 3D 형상 모델과 가공 완료된 부품의 사진이고, Table 2 는 실험을 통해 구한 다양한 상대 편심률에 대한 양력을 나타낸 것이다.

Table 2 Lifting force to the relative eccentricities

E	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
W	1.15	2.97	4.45	5.94	7.42	8.90	10.39

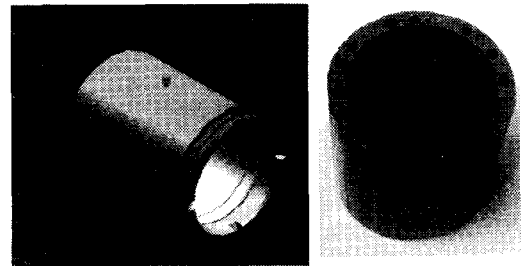


Fig. 3 Radial differential bearing

### 3.2.2 공기 스러스트 베어링 설계

스러스트 베어링은 연삭시 축 방향으로 작용하는 힘에 의해 축 또는 래디얼 베어링이 다른 부품과 접촉하는 것을 방지하는 역할을 하기 위한 것으로, 연삭력을 고려하여 축 방향 강성의 설계 목표를 25 [N/μm]로 설정하였다.

공기 스러스트 베어링을 설계한다는 것은 목표 설계치를 기초로 공기 주입압력  $P_s$ , 축 방향 틈새  $h_0$ , 공기 소모량  $Q_a$  및 마찰손실  $M_0$ 를 결정하는 것으로 다음과 같은 식을 이용하여 설계하였다.

- 포켓에서의 압력:

$$p_d = 2\tau(1 + \sqrt{1 + \tau^{-1}}) p_a \quad (5)$$

$$\tau = \frac{1}{8} \left( 1 + \frac{3w_{ez}}{Ap_a} \right), \quad w_{ez} \text{는 축 방향 외력}$$

- 공급 압력에서 자동적으로 결정되는 틈새:

$$h_o = \sqrt{\frac{BND_d}{\bar{m} p_s}} \quad (6)$$

B:압력과 온도 영향 계수, N: 노즐 수,  
 $D_d$ :노즐 직경,  $\bar{m}$ : 주 동작 파라미터

- 축 방향 비강성:

$$\bar{K}^\varepsilon = \frac{(3 - \tau) \bar{p}_d k}{2 \bar{p}_d} \quad (7)$$

$k$ : 비열비,  $\bar{p}_d = p_d / p_s$

- 절대 축 방향 강성:

$$K_z^\varepsilon = \frac{A p_s \bar{K}^\varepsilon}{h_o} \quad (8)$$

A: 스러스트 베어링의 면적

- 공기 소모량:

$$Q_a = \frac{\pi h_o^3 p_s^2 \bar{m}}{12 \mu p_a} \quad (9)$$

- 스러스트 베어링의 마찰 토크  $M_0$ :

$$M_0 = (\pi \mu \omega / 2 h_o) (r_H^4 - r_k^4) \quad (10)$$

$\omega$ : 축의 각속도,  $r_H$ : 스러스트 베어링 외경,

$r_k$ :베어링 내경

- 레이디얼과 스러스트 베어링의 총 마찰 토크:

$$M_c = 2M_h + M_0 \quad (11)$$

- 마찰로 인한 동력 손실:

$$N_c = M_c \omega / 10.2 \quad (12)$$

Fig. 4 는 주어진 식을 기초로 개발된 스러스트 공기베어링 유닛의 3D 형상모델과 가공완료된 부품의 사진이다.

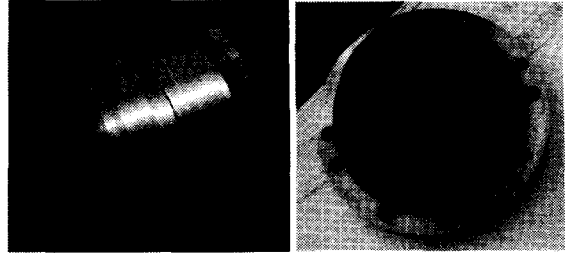


Fig. 4 Thrust air bearing

### 3.2.3 주축 및 터빈 설계

주축의 설계과정은 축 설계 및 해석용 소프트웨어를 이용하여 주축 시스템을 구성하는 설계변수들의 조합으로 구성된 설계대안을 생성하고, 생성된 대안들을 해석한 결과를 비교 검토하여 최적 시스템을 결정하는 설계 프로세스로 이루어졌다. Fig. 5 는 설계된 주축의 설계기준에 적합한가를 판단하기 위해 사용한 소프트웨어 사용결과 중 하나로 처짐량에 대한 해석결과를 표시하고 있다<sup>8,9</sup>.

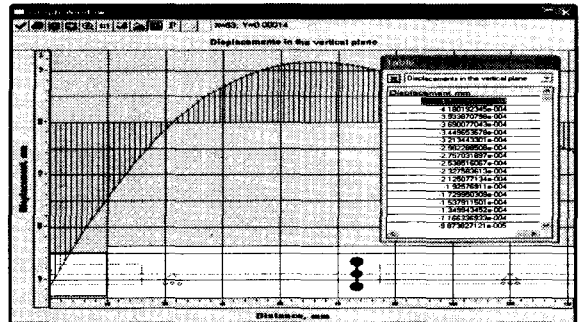


Fig. 5 Analysis result of shaft deformation

공기 주축 시스템은 외부에서 공급된 공기가 터빈의 노즐을 통하여 빠른 속도로 분출하는 반력에 의해 축이 회전할 수 있도록 설계 되었으며, 터빈이 주축과 일체가 될 수 있도록 가공 후 열박음 하도록 하였다. 터빈설계는 주축에 요구되는 동력, 회전수, 공기소모량, 공급 압력 등을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 식 (13)~(17)을 이용하여 터빈의 노즐 단면적, 노즐을 통과한 유체의 중량 및 질량, 모멘트 및 동력 등을 설계하였다.

- 노즐 단면적:  $f = \pi d^2 / 4 \quad (13)$

- 노즐 통과 유체증량:  $Q = \epsilon f p \sqrt{q/(2RT)}$  (14)
- 노즐 통과 유체질량:  $G = Q/q$  (15)
- 터빈 모멘트:  $M_k = nGr(U - r\omega)$  (16)
- 터빈 동력:  $N = M_k \omega / 10.2$  (17)

Fig. 6 은 최적화 과정을 거쳐 최종 설계된 주축과 공기터빈이 조립된 3D 모델과 실물의 사진이고, Fig.7 은 최종 설계된 공기 스피들의 3D 형상과 실물 사진이다.

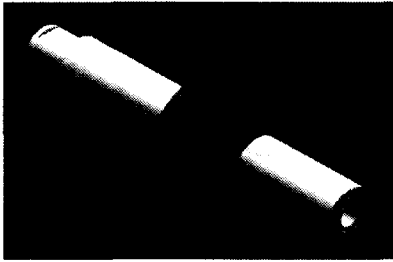


Fig. 6 Engineering drawing and the developed main shaft

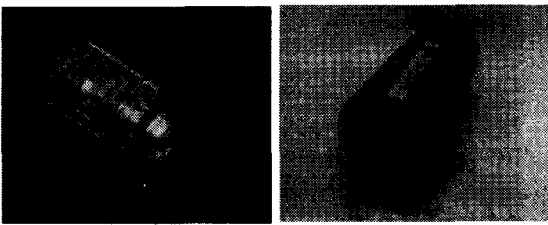


Fig. 7 Assembly drawing and the developed spindle

### 3.2.4 레귤레이터 선정

공기 드라이브의 특징중의 하나는 하중이 축에 작용하여 회전속도가 감소할 경우 절삭속도의 변동으로 인해 가공부의 질이 저하될 수 있다는 것이 비동기 전기모터와 다른 점이라 할 수 있다. 이러한 결함은 자동 레귤레이터(automatic regulator)를 도입함으로써 제거할 수 있다.

본 연구를 통해 설계 개발된 공기 레디얼 베어링, 공기 스러스트 베어링 및 공기터빈에 소요

되는 공기 소모량을 고려하여 적정한 용량의 레귤레이터를 선정 적용하였다.

## 4. 주축의 안정성 평가

공기 주축시스템은 비접촉으로 공기 중에서 회전하므로 주축의 진동형태는 주축 정밀도 및 안정성과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 주축의 진동형태는 원통형 진동과 원추형 진동이 있으며 원추형 진동이 발생하면 축의 안정성을 해치므로 원통형의 진동형태가 되도록 설계해야 한다. 본 연구에서는 주축의 안정조건과 진동형태를 판단하는 식으로 식 (18)과 (19)를 적용하였다.

공기 베어링의 최대 위험상태는 축이 임의의 방향으로 회전하는 축의 와동(vortex motion)이라 할 수 있으며 안정조건은 식 (18)과 같다.

$$G_N \geq m\omega^2 / 8 \quad (18)$$

여기서  $G_N$  은 베어링의 반경방향 강성이다.

축의 진동형태를 판별하는 파라미터  $D$  는 식 (19)와 같다.

$$D = m(1 - \lambda_b^2) - (J_e - 2J_o) / b^2 \quad (19)$$

$D > 0$  이면 축의 진동형태는 원통형 진동이고,  $D < 0$  이면 원추형 진동이다.

축의 진동형태가 원통형 진동일 경우, 베어링의 반경방향 강성은 식 (20)과 같고, 원추형 진동일 경우는 베어링의 반경방향 강성은 식 (21)과 같다.

$$G_N = m\omega^2(1 + \lambda_b) / 8 \quad (20)$$

$$G_N = \omega^2(m\lambda_b(1 + \lambda_b) + (J_e - 2J_o) / b^2) \quad (21)$$

개발된 공기 주축을 식 (19)으로  $D$  를 계산한 결과,  $D = 0.014$  로 축의 진동형태가 원통형이므로 공기 스피들 시스템의 반경방향 강성  $G_N$  은 식 (20)과 같다. 따라서 식 (20)을 공기 스피들의 안정 조건식 (18)에 대입하면 식 주어진 조건을 만족하므로 설계된 공기 스피들은 안정하다고 할 수 있다.

## 5. 결론

비구면 마이크로 렌즈 가공용 연삭기 주축의 개발을 통해 구축된 주축의 설계 및 설계검증을 위한 해석방법에 대한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 1,2 차년도 기술개발을 통해 회전정밀도  $0.2/\mu\text{m}$  와 동강성  $30[\text{N}/\mu\text{m}]$ 를 구현할 수 있는 유사동압베어링과 공기조절기(Regulator)를 채택한 마이크로연삭용 고속 고정밀 주축의 설계방법을 구축하였다.
- (2) 차동 베어링(differential bearing) 방식을 적용한 Radial Air Bearing 의 설계 및 해석방법을 구축하였다.
- (3) 고속 고정밀용 Thrust Air Bearing 의 설계 및 해석방법을 구축하였다.
- (4) 적정 토크와 회전수에 적합한 Turbine 의 설계 및 해석방법을 구축하였다.
- (5) 연삭시 속도와 토크 안정성을 확보할 수 있는 적정 조절기 선정법을 확인하였다.
- (6) 이와 같은 주축에서는 베어링에 열발생을 고려할 필요가 없다는 사실을 설계와 개발을 통해 확인하였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. Kim, K. M., Choi, D. K., Ju, J. N., “Development of a minute electric discharge machine for machining of shaft hole,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 55~61, 1998.
2. Park, J. K., Rho, S. K., Kyoung, J. H., “Design of cone-shaped magnetic bearing spindle system for high speed internal grinding machine,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 213~219, 2002.
3. Park, J. K., Rho, S. K., Kyoung, J. H., “A study on the magnetically suspended spindle with 16-pole

radial magnets,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 203~212, 2002.

4. Han, D. C., A study on the development of spindle system for advanced cutting machine, The Ministry of Industry, 1997.
5. Kang, C. H., Kim, J. D., “A study on the development of machine tool for super precision machining (II),” The Ministry of Science and Technology, 1991.
6. Kim, H. S., Park, K. Y., “Development of a module for design and manufacturing of aspherical lens,” Workshop on the Development of Intelligent Grinding System for High Functional Parts Machining, pp. 94-100, 2003.
7. Choi, H. J., “The existing state and case example of machining technology of optical elements,” Monthly Journal of Machine Tool.
8. APM Winshaft DesignMecha Co., Ltd., <http://www.designmecha.co.kr>
9. Makarov, V. A., “Calculation of aerostatic bearing,” No. 9, 1967.
10. Kim, E. J., Han, J. H., Lee, K. B., Park, S. I., “A Study on the Design of High Speed Spindle for Micro Glass Lens Grinding,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 11~17, 2003.

## 부록

### [A-1] 권장 설계치수

상대길이 :  $\lambda = L/D = 1.5$

직경방향 틈새 :  $2c = 0.001D$

베어링 모서리에서 홈까지 거리:  $l = D/6$

베어링 모서리에서 포켓까지 거리:  $k = D/4$

포켓 영역의 각도 범위:  $\Phi = 60^\circ$

포켓의 깊이:  $t = 1.5c$

### [A-2] 베어링 해석에 적용된 기호

베어링 내륜의 반경 :  $r = D/2$  [cm]

반경 방향 틈새 :  $c$  [cm]

베어링과 축의 최소 틈새 :  $h_0$  [cm]

현재 틈새 :  $h$  [cm]

축과 베어링의 편심량 :  $e$  [cm]  
 베어링 길이 :  $L = 1.5D = 3r$  [cm]  
 회전 속도 :  $n$  [rpm]  
 공급 공기압 :  $p_s = 5$  [kg/cm<sup>2</sup>]  
 대기압 :  $p_a = 1$  [kg/cm<sup>2</sup>]  
 윤활 층에서의 압력 :  $p$  [kg/cm<sup>2</sup>]  
 공기의 절대 점도 :  $\mu = 1.8 \cdot 10^{-10}$  [kg·s/cm<sup>2</sup>]

[A-3] Coefficients used in equations for calculation of  
 aero thrust bearing

$$b = \sqrt{0.5(\sqrt{1 + \chi^2} - 1)}$$

$$a = \chi / 2b$$

$$A = a \sinh(2a\lambda) + b \sin(2b\lambda)$$

$$B = b \sinh(2a\lambda) - a \sin(2b\lambda)$$

$$C = \cosh(2a\lambda) + \cos(2b\lambda)$$

$$X = \chi\lambda - (\chi A + B) / C\sqrt{1 + \chi^2}$$

$$Y = -(\lambda - (\chi A + B) / C\sqrt{1 + \chi^2})$$

$$\alpha = (r_H^2 - r_k^2) / (4r_k \ln(r_H / r_k))$$

$$\beta = (r_k^2 - r_b^2) / (4r_k \ln(r_k / r_b))$$

$$\delta = Kp_k(p_k^2 - 1) / (p_k^2 + K(3p_k^4 - 2p_k^2 - 1))$$

[A-4] 공기 드라이브에 적용된 조건

노즐이 배치된 반경 :  $r = 0.021$  [m]  
 노즐의 수 :  $n = 3$   
 노즐의 직경 :  $d = 0.002$  [m]  
 회전속도 :  $\omega = 6280$  [s<sup>-1</sup>]  
 가속도 :  $q = 9.8$  [m/s<sup>2</sup>]  
 공기 공급압력 :  $p = 1.0$  [kg/cm<sup>2</sup>]  
 유출계수 :  $\epsilon = 0.8$   
 기체상수 :  $R = 29.27$  [m/deg]  
 절대온도 :  $T = 288$  [K]  
 노즐에서의 유출속도 :  $U = 350$  [m/s]