

# PCB드릴링용 공기 베어링 스피ن들의 설계 제작 및 성능평가에 관한 연구

김상진\*, 배명일\*\*, 김형철\*\*\*, 김기수#

A study on the design, manufacturing and performance evaluation of air bearing spindle for PCB drilling.

Sang Jin Kim\*, Myung Il Bae\*\*, Hyeung Chul Kim\*\*\* and Ki Soo Kim#

## ABSTRACT

Micro drilling by high-speed air bearing spindle is very useful manufacturing technology in electronic industry. For the design of high speed air bearing spindle, there are considered stability of air bearing spindle, allowable load of air bearing, run out and tooling system design for micro drill's attach and remove. According to suggested details, we designed and manufactured high-speed air bearing spindle and carried out performance estimation such as run out, temperature change in running air bearing spindle, stiffness, chucking torque. Results are follows; Run out was measured under  $5\mu\text{m}$  at air bearing spindle revolution 20,000~125,000rpm. High speed air bearing spindle's temperature rose about  $20^{\circ}\text{C}$  after 5 minutes from running and then was fixed. Allowable thrust load of spindle was  $17\text{kg}_f$ . Chucking torque of collet was  $15\text{kg}_f\text{cm}$ .

**Key Words** : Air bearing spindle(공기 베어링 스피ن들), Change of temperature(온도변화), Natural frequency (고유 진동수), PCB(printed circuit board), Radial bearing(레이디얼 베어링), Run-out(런 아웃), Stiffness(강성), Thrust bearing(트러스트 베어링)

## 1. 서론

마이크로 드릴링은 노즐, 카메라, 의학용 노즐, 에어 베어링 등 정밀 가공 산업에 다양하게 이용되고 있으며, 전자 및 컴퓨터 부품 산업에서 급격하게 활용의 범위를 넓히고 있다. 특히 전자 부품산업의 발달에 따라 PCB(printed circuit board) 및 IC 차폐 가공에도 그 이용범위가 점차

커지고 있는 추세이다. PCB는 사용 목적에 따라 매우 다양한 재질의 제품이 생산되고 있으며, PCB의 집적도가 향상됨에 따라 고밀도의 PCB에 작은 홀(hole)을 가공할 수 있는 가공기술이 곧 전자 및 컴퓨터 부품산업의 경쟁력을 결정하는 중요한 요소로 부각되고 있다<sup>1</sup>.

PCB의 집적도가 높아짐에 따라서 다층구조를 가진 PCB에서는 층과 층을 연결하는 Via hole의

접수일: 2005년 10월 13일; 게재승인일: 2006년 2월 10일

\* 충남대학교 기계공학과 대학원

\*\* 충남대학교 기계공학과

\*\*\* 충북과학대학 기계자동차과

# 교신저자: 충남대학교 기술교육과

E-mail: [kksoo@cnu.ac.kr](mailto:kksoo@cnu.ac.kr) Tel. (042) 821-5699

종류가 다양해지고 있으며, 이에 따라 홀의 가공 기술도 SLC(surface laminar circuit), Laser Via Drill, Plasma Etching, Chemical Drill등 다양한 방법이 이용되고 있다<sup>2</sup>. 하지만 이들 방법들은 매우 다양한 종류의 PCB에 동일하게 적용할 수 없고, 가공 방법이 매우 복잡하기 때문에 짧은 시간에 많은 제품을 생산하기에는 적합하지 않은 단점을 가지고 있다.

그러나 기계적인 드릴링은 타 가공방법에 비하여 PCB재질에 관계없이 사용할 수 있고, 열 변형이 타 가공 방법에 비하여 적고, 마무리 작업이 필요 없으며, 깊은 홀을 가공하더라도 진원도 및 직진도, 가공표면이 양호하기 때문에 널리 이용되고 있다. 그러나 집적도가 높은 PCB가공의 경우 드릴의 굽힘 강성이 낮기 때문에 잘 휘어지고, 이로 인하여 홀의 정확도가 낮아지게 되며, 드릴이 부러지는 경우가 발생 한다<sup>3-4</sup>. 이와 같은 PCB 홀 가공에 있어서의 문제를 해결하기 위해서는 드릴의 절삭속도를 증가시키고 런 아웃(run-out)이 우수한 초고속 초정밀 스피들이 요구되고 있다<sup>5-7</sup>.

따라서 본 연구에서는 PCB 드릴링 가공을 위한 공기 베어링 스피들을 설계 제작하였다. 그리고 제작된 공기베어링 스피들 주축의 고유진동수, 런 아웃(run-out), 운전 중의 온도변화, 허용하중 및 척킹 토크(chucking torque) 등의 성능평가를 실시하였다.

## 2. 공기베어링 스피들의 설계 및 제작

### 2.1 공기베어링 스피들 시스템

Fig. 1은 본 연구를 통해 설계, 제작된 공기 베어링 스피들의 구조를 나타내고 있다. 공기베어링 스피들은 회전축, 레이디얼 공기 베어링, 스러스트 공기 베어링, 구동 모터로 이루어지고 있으며, 회전축은 모터의 회전자를 회전축에 직결하는 로터 일체형이고, 회전축의 전방부에 스러스트 베어링을 위한 칼라가 설치되어 있다. 스러스트 베어링은 압축 공기가 공기 유로를 통하여 회전축 스러스트 칼라의 양쪽에 있는 2개의 스러스트 베어링에 공급되며, 원주방향으로 설치된 공기공급 노즐을 통하여 분사되고, 스러스트 칼라와 베어링 사이에 공기막이 형성되도록 구성하였다. 이때 공기 공기막의 두께는 스러스트 공기막 조절 스페이서의 크기에 의하여 결정된다. 레이디얼 베어링은

압축공기가 공기 유로를 통하여 레이디얼 베어링으로 공급되며, 원주 방향으로 설치된 공기 공급 노즐을 통하여 분사되고, 회전축과 레이디얼 베어링 사이에 공기막이 형성되도록 구성하였다.

드릴의 장착 및 탈착을 위해 콜릿(collet), 콜릿 너트(collet nut), 디스크스프링(disk spring), 공압 실린더로 ATC(auto tool changer)시스템을 구성하였다.

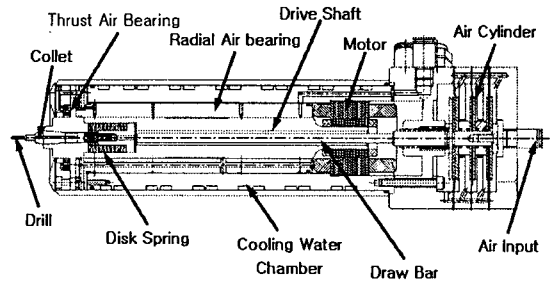


Fig. 1 Assembly drawing of the air spindle

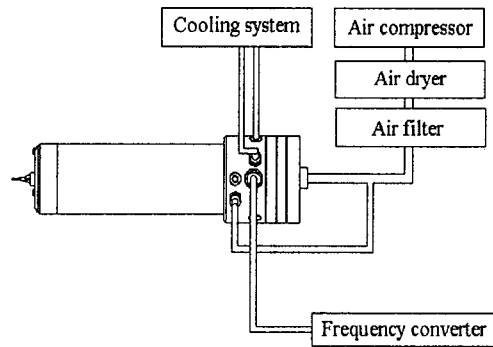


Fig. 2 Configuration of the air bearing spindle system

Fig. 2는 공기 베어링 스피들 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 공기 베어링 스피들 시스템은 공기압을 제공하는 공기 압축기와 압축공기의 수분을 제거하기 위한 공기 건조기, 불순물 제거를 위한 필터, 공급 공기압 조절밸브로 이루어진 공기압 공급 시스템과 스피들의 구동을 위한 전원부, 운전 중 발생하는 열을 냉각하기 위한 냉각 시스템, 공기 베어링 스피들로 이루어져 있다. 공기 베어링 스피들의 운전은 공기압 공급 시스템에

의하여 스펀들에 압축공기가 공급되면 스펀들의 회전축이 공기압에 의하여 부상하게 되며, 이때 스펀들에 전원을 공급하게 되면 회전 운동이 시작된다. 회전수의 조절은 공급 전원의 주파수 변화 방법에 의하여 이루어진다.

### 2.2 회전축(Shaft)의 설계

회전축은 공기베어링 스펀들의 가장 중요한 요소로서 회전축의 적절한 설계가 공기 베어링 스펀들의 성능을 결정하며, 회전축의 크기는 스펀들의 크기 및 공기베어링 스펀들 시스템의 크기에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 회전축의 크기를 직경 20mm, 길이 200mm로 제한하고 설계하였다. 회전축은 사용목적에 따라 비틀림이나 굽힘 등의 하중이 작용함으로 이들 하중에 대한 충분한 강도와 강성을 가져야만 한다. 하지만, PCB 드릴링용 공기 베어링 스펀들의 경우, 작은 직경의 드릴작업을 하므로 회전축의 강성보다 고속의 회전에 적합한 회전축의 고유 진동수가 매우 중요한 변수로 작용한다. 따라서 이론적 해석을 바탕으로 한 설계를 통하여 3000Hz 이상의 고유 진동수를 갖는 회전축을 설계하였다. 또한 회전축은 무게를 가볍게 하고 자동공구교환(ATC, Auto Tool Changer)장치에 적합하도록 공기탈착시스템을 설계하기위해 중공축으로 설계하였다.

### 2.3 공기베어링의 설계

공기 베어링을 설계하기 위해서는 공기 베어링의 부하능력, 강성, 유량, 안정성 등의 베어링 성능을 파악하는 것이 필요하다. 공기 베어링의 성능을 지배하는 요소는 베어링 틈새 내의 압력분포이다. 따라서 본 연구에서는 공기 정압 베어링의 형식으로 다수의 급기공을 가지는 오리피스 리스트릭터를 선정하였으며, 이에 대한 설계는 RPI-MTI에서 제공한 설계도표를 이용하였다.<sup>8</sup>

스러스트베어링의 설계를 위해 베어링의 내외반경비  $R_i/R_o = 0.5$ 로 하고, 급기공의 위치의 반경은  $R_c = \sqrt{R_o R_i}$  로 설정하여 등 간격으로 배치되도록 하였다.

급기계수  $\Gamma_s$ 는 급기 리스트릭터의 유체저항과 베어링 틈새의 유체저항의 비율로 나타내게 되고 식 (1)로 표현된다.

$$\Gamma_s = \frac{3\mu nd^2 \sqrt{gRT_0}}{2p_s h^2} \quad (1)$$

여기에서,  $R$ 은 기체상수,  $T_0$ 는 급기온도,  $\mu$ 는 공기의 점성계수,  $p_s$ 는 급기압력,  $g$ 는 중력가속도,  $n$ 은 급기구의 수,  $d$ 는 급기구의 직경이다.

급기계수와 RPI-MTI 설계도표의 무 차원 부하능력  $\bar{W}$ , 무 차원 베어링강성  $\bar{k}_s$  및 무 차원 베어링 유량  $\bar{G}$  을 이용하여 실제의 부하능력  $W$ , 베어링 강성  $k_s$  및 베어링 유량  $G$  는 아래의 식으로 구하였다.

$$W = \pi(R_o^2 - R_i^2)(p_s - p_a) \bar{W} \quad (2)$$

$$k_s = \frac{1}{h} \pi(R_o^2 - R_i^2)(p_s - p_a) \bar{k}_s \quad (3)$$

$$G = \frac{\pi P_s^2 h^3}{6\mu g RT_o} \bar{G} \quad (4)$$

레이디얼 베어링은 2열 급기의 방식을 선택하였으며, 축의 직경을  $D$ , 베어링의 길이를  $L$ , 급기공에서 베어링 끝단까지의 길이를  $L_2$ , 2열의 급기공 사이의 중앙부분의 길이를  $L_1$ , 베어링의 반경 틈새를  $C_r$ , 한 원주상의 급기공의 수를  $n$ , 급기공의 직경을  $d$  라고 하면 급기계수  $\Gamma_s$ 는 식 (5)로 표현된다.

$$\Gamma_s = \frac{6\mu nd^2 \sqrt{gRT_0}}{p_s C_r^3} \frac{L_2}{D} \quad (5)$$

스러스트 베어링과 동일한 방법으로 급기계수와 RPI-MTI 설계도표를 이용하면 부하능력, 강성, 유량은 아래의 식으로 표현된다.

$$W = k_s \epsilon C_r \quad (6)$$

$$k_s = \frac{(p_s - p_a)LD}{C_r} \bar{k}_s \quad (7)$$

$$G = \frac{\pi p_s^2 C_r^3}{6\mu g RT_o} \frac{D}{2L_2} \bar{G} \quad (8)$$

단,  $\epsilon$ 은 편심율을 나타낸다.

위의 식을 이용하여 스러스트 베어링 및 레디얼 베어링의 부하능력, 강성, 유량을 계산하여 최적의 베어링조건을 선정하였다<sup>1</sup>.

선정된 공기베어링의 설계변수는 스러스트 방향의 경우, 급기구의 수 8개, 급기구의 직경 0.2mm, 베어링 외경 42mm, 내경 22mm, 베어링 공기막 두께는 20 $\mu$ m로 설정하였다. 레이다얼 베어링의 경우, 2열 급기형식으로 동일 원주상의 급기구의 수 8개, 급 기구 직경 0.2mm, 베어링의 공기막두께 15 $\mu$ m로 설계 제작하였다.

## 2.4 공구탈착시스템(Tooling system)의 설계

PCB 드릴링용 공기 베어링 스피들의 공구탈착 시스템은 Fig. 3에 나타내었다. 공구탈착시스템은 공기 베어링 스피들 끝단에서 회전축 내부에 걸쳐 설치되며, 플랜지(flange), 다이아프램(diaphragm), 드로우바(draw bar), 드로우바 부시(draw bar bush), 콜렛 너트(collet nut), 디스크 스프링(disk spring), 콜렛(collet)으로 구성되어 있다.

공구의 장착방법은 공기압이 플랜지를 밀어주면 플랜지와 연결된 드로우 바가 전진하게 된다. 공기압이 플랜지를 밀기 이전에는 드로우 바와 콜렛 너트는 일정한 간격을 유지하고 있으며, 이 간격은 드로우 바의 전체 스트로크(stroke)보다 작다. 공기압이 플랜지를 밀면 드로우 바는 콜렛 너트를 전진시키게 되며, 이때 드로우 바의 끝단과 접촉하고 있는 콜렛 너트와 콜렛이 전진하면서 테이퍼에 밀착되어있는 콜렛이 벌어지게 된다. 이 순간 드릴을 삽입한 상태에서 공기압을 제거하게 되면 내부 디스크 스프링에서 복원력이 작용하여 콜렛 너트를 드로우 바가 밀기 이전의 위치로 복귀하게 되며, 벌어져 있던 콜렛이 회전축 테이퍼에 밀착되어 드릴을 회전축에 고정시키게 된다.

디스크 스프링은 여러 개의 스프링을 조합하여 사용되어지며, 직렬 및 병렬 조합이 함께 사용된다. 병렬조합의 경우 충수가 커지면 하중은 충수에 비례하고, 직렬조합의 경우 충수와 변위는 비례한다. 디스크 스프링의 설계는 이론 공기압에 의해 압축되는 압축력을 이용하여 계산 하게 되지만, 실제에는 여러 조합의 압축테스트를 통해 이루어진다. 디스크 스프링의 설계에 따라 콜렛이 드릴을 물고 있는 척킹토크(chucking torque)이 결

정되므로 중요한 요소이다.

콜렛의 고정방법은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 스페이서 타입(spacer type)과 로크 너트 타입(lock nut type)을 병행하여 사용하였으며, 이때 콜렛을 고정하는 체결 나사의 정밀도를 확보하기 위하여 나사의 피치(pitch)를 0.5로 가공을 하고, 콜렛과 콜렛 너트를 스페이서를 통해 외경부의 단면에 접촉할 수 있도록 하였으며, 2중으로 체결된 로크 너트를 통하여 운전 중 발생할 수 있는 콜렛의 움직임을 보정할 수 있도록 고안하였다.

공구교환을 위한 다이아프램에 작용하는 공기압을 5kg/cm<sup>2</sup>로 실제 사용 환경보다 낮게 설정하고 다이아프램의 면적을 계산하면 드로우바를 밀어주는 힘은 360kg가 된다. 디스크 스프링의 설치는 드로우바의 스트로크와 디스크스프링의 하중을 고려하여 3장씩 병렬연결 하였으며 이를 다시 7층으로 직렬 연결하였다.

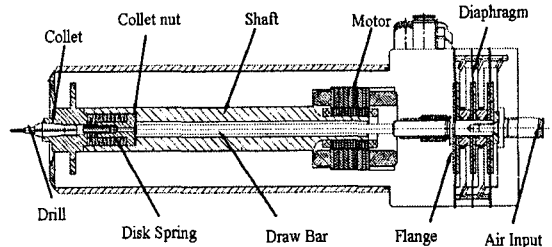


Fig. 3 Assembly drawing of ATC system

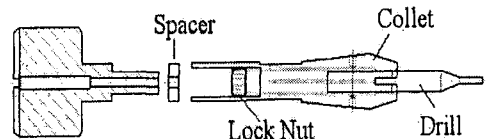


Fig. 4 Assembly drawing of collet

## 3. 공기베어링 스피들의 성능평가

### 3.1 회전축의 고유 진동수

공기 베어링 스피들에 있어서 회전축의 고유

진동수가 스피들을 구동시키는 모터의 회전 주파수 범위에 있다면 구동 시 공진현상에 의하여 진동현상이 발생하게 되고 이는 매우 작은 간극의 공기막에 의하여 부상하는 공기 베어링 스피들의 경우 공기막이 파괴될 수도 있다. 따라서 공기 베어링 스피들 축의 고유 진동수를 평가하는 것은 매우 중요한 사항이 된다.

초고속 공기 베어링 스피들 시스템을 운용하기 위해서 스피들 축계는 진동이 없는 매우 안정적인 운전상태가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 설계 제작된 공기 베어링 스피들의 축을 제작하여 축의 고유진동수를 측정하였다. 측정시 진동감지 센서는 Brüel Kjaer사의 압전형 가속도계(Accerometer Type 4369), 신호증폭기(Charge Amplifier Type 2635), 충격 햄머(Impact Hammer Type 8202)를 이용하였으며, 신호분석기(Signal Analyzer)는 Brüel Kjaer사의 Type 2035를 이용하였다.

Fig. 5에 공기 베어링 스피들 주축의 진동실험 결과를 나타내었다. 측정된 공기 베어링 스피들 주축의 고유진동수는 3.23KHz로서 사용하고자는 125,000rpm에서 안정적으로 사용 가능하며, 고유진동수에 의한 특성만을 고려한다면, 180,000rpm의 회전영역에까지 안정적인 운전이 가능함을 보이고 있다.

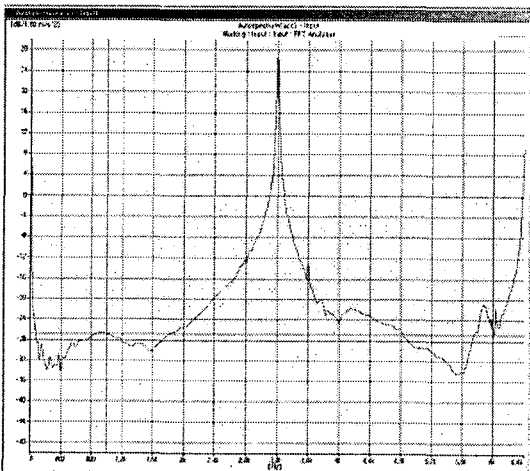


Fig. 5 Natural frequency of the shaft

### 3.2 런아웃 (Runout)

런아웃(runout)은 회전체가 회전을 할 때 진동하는 진폭의 크기를 의미하는 것으로 공기 베어링 스피들 성능평가에 가장 기본적으로 수행해야 되는 항목이다. 일반적으로 런아웃은 반복적인 성분인 RRO(repeatable runout,)와 비 반복적인 성분인 NRRO(nonrepeatable runout)로 나누어진다. 또한, RRO와 NRRO를 합한 성분을 TIR(Total Indicated Runout)이라고 한다.

런아웃 값이 커짐에 따라 PCB 드릴링에 있어서 위치정밀도가 저하되고 드릴의 파손 및 마모가 심하게 되어 생산성이 떨어지게 되므로 가장 중요한 성능항목이 된다.

본 논문에서는 런아웃은 축의 회전 궤적으로 나타났다. 여기서, 반복성의 떨림(RRO)은 데이터의 궤적이 그리고 있는 원의 평균지름으로 정의되어지며, 비반복성의 떨림(NRRO)은 원의 반경의 진동폭으로 나타나고 있다. 또한 N개의 데이터 점이 있을 때, RRO와 NRRO는 다음과 같은 과정으로 결정된다.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (9)$$

여기서, N은 데이터의 수이고,  $X_i, Y_i$  는 각각의 측정 데이터를 의미한다.

회전축의 회전시 발생하는 흔들림 반경과 표준편차는 아래와 같이 최소 자승법으로 구한다.

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2} \quad (11)$$

여기서,  $\bar{R}, \sigma$ 는 각각 반경의 평균값과 반경의 표준편차이다.

위의 값으로부터 RRO와 NRRO는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$RRO = 2\bar{R}$$

$$NRRO = 4\sigma \quad (12)$$

본 연구에서는 드릴링 가공을 위한 공기 베어링 스피ndl의 특성을 파악하기 위하여 식 (12)에서 정의된 RRO와 NRRO를 합하여 전체적인 축의 최대 흔들림인 TIR값으로 런 아웃을 평가하였다.

런 아웃 평가를 위한 데이터의 획득은 공기 베어링 스피ndl의 회전속도가 고속이므로 비접촉식 센서를 사용하였다. 센서사양은 Table 1에 나타내었다. 회전 시 회전축의 변위는 반경방향으로는 2차원이므로 2개의 센서를 가지고 수평면에 직각으로 설치하여 축의 변위를 측정하였다.

Table 1 General specification of laser sensor

|                    |   |
|--------------------|---|
| Measurement Range  | ±0.25mm                                       |
| Stand-off Distance | 5mm   |
| Linearity          | 2µm   |
| Resolution         | 0.1µm   |
| Spot Diameter      | 0.1mm   |
| Light Source       | Semiconductor Laser,<br>wave length: red675nm |
| Measurement Speed  | 40kHz   |

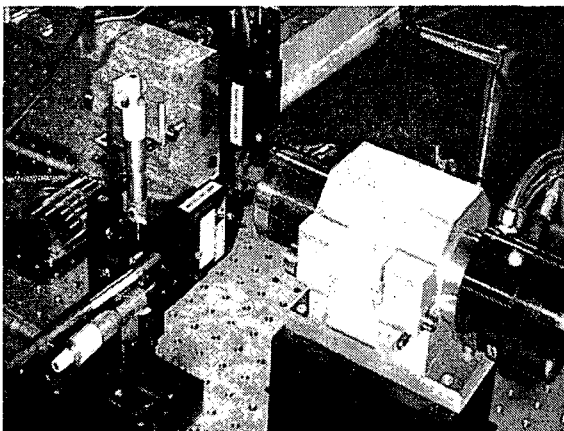


Fig. 6 Sensor and air bearing spindle arrangement for Runout test

공간상에서 원하는 위치에 센서를 설치하기 위해 linear guide를 가지고 정밀하게 제작한 측정용 지그에 각각의 갭 센서(gap sensor)를 고정시켜 독립적으로 각각의 방향으로 움직일 수 있도록 설계·제작하였다. 또한 리니어 가이드에 마이크로미터를 부착시켜 구동 하도록 하였다.

변위센서는 수평면에 독립적인 성분을 검출할 수 있도록 하기 위하여 X, Y방향으로 이동가능하도록 설치하였다. 2개의 센서로부터 획득된 데이터는 신호증폭기를 통과하여 A/D변환을 거쳐 PC에 저장되며, 저장된 데이터는 연산과정을 통하여 계산된 런 아웃 값이 출력되게 된다.

Fig. 7은 공기 베어링 스피ndl 회전수를 20,000 ~ 125,000rpm으로 변화시키면서 20,000rpm간격으로 런 아웃을 측정한 결과이다. 공기 베어링 스피ndl 회전수의 증가에 따라 런 아웃은 증가하는 경향을 보이며, 변화의 폭은 2µm 이내로 나타났다. 또한 공기 베어링 스피ndl이 구동되는 공기 베어링 스피ndl 회전수 125,000rpm이내에서 5µm이내의 흔들림을 보여주며, 안정적인 구동을 하고 있음을 알 수 있었다.

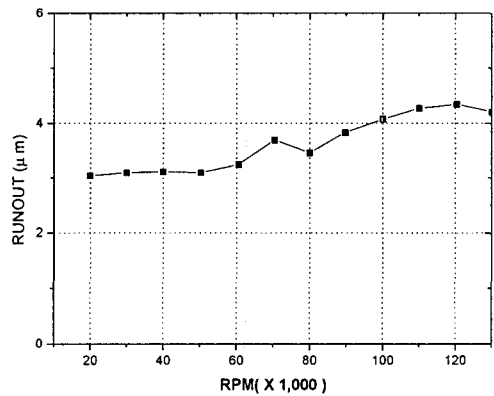


Fig. 7 Runout of aerostatic spindle system

### 3.3 온도변화

공기 베어링 스피ndl 구동시 발생하는 열은 내부 부품의 열팽창의 원인으로 미세한 베어링 공기막의 변화를 발생시켜 회전 안정성을 저하시키게 되며, 모터의 효율을 감소시켜 출력이 낮아지고 드릴링 시 공기베어링 스피ndl의 회전수를 불안

정하게 하는 원인이 된다.

공기 베어링 스피들 구동 시 주된 열 발생부는 모터의 스테이터부, 회전반경에 의한 선속도가 가장 빠른 슬러스트 베어링 부. 스피들 선단이다. 이들 각부의 온도변화를 측정하기 위하여 크로멜(+ )과 알루미늄(-)로 구성된 온도 측정범위 0~370℃인 오메가(OMEGA)사의 K type 열전대(Thermo-couple)를 설치하였다. 열전대에서 발생한 열 기전력은 아이오테크(IO Tech)사의 Daqbook 1120에서 증폭 되고 신호의 노이즈(Noise)가 제거되며 A/D 변환 거쳐 PC에 저장하였다.

Fig. 8은 설계 제작된 공기 베어링 스피들을 125,000rpm으로 구동시키고, 이때의 각 부분의 온도변화를 나타내었다.

공기 베어링 스피들의 온도는 모든 측정부위에서 구동을 시작한 후 약 5분 동안 급격히 온도가 상승한 후 온도가 안정적인 분포를 나타내고 있다. 발열은 모터의 스테이터에서 가장 높게 나타나고, 스피들의 선단에서 가장 작게 나타남을 확인하였다.

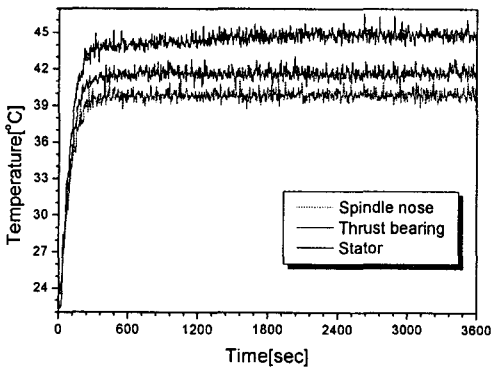


Fig. 8 Temperature change of the air bearing spindle in running

### 3.4 허용하중 및 척킹 토크

Fig. 9는 공기 베어링 스피들의 슬러스트 강성 및 레이디얼 강성의 측정을 위한 실험장치의 개략도이다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 강성 측정 장치는 변위량을 측정하기 위한 센서, 신호를 증폭하기 위한 증폭기, 증폭된 신호를 디지털로 변환하

기 위한 A/D변환기, 그리고 측정된 값을 읽을 수 있는 PC로 구성되어 있다. 증폭기는 AEC 5706PS의 모델을 사용하였으며, A/D변환기는 NI사의 SCB-68을 사용하였다. 그리고 가해지는 힘의 변화량의 크기는 CAS사의 CI-5010A를 이용하여 힘의 크기를 변화시켰다. 공기 베어링 스피들 강성의 측정은 스피들을 옵티컬 테이블(optical table) 위에 지그로 고정시킨 다음 스피들의 콜렛을 축방향과 반경방향으로 각각 500gr 단위로 힘을 가하면서 변위센서로 변위를 측정하였다.

이 때 허용하중을 처음의 위치에서 공기베어링 공기막의 두께의 50%가 변화하는 위치로 설정하였다.

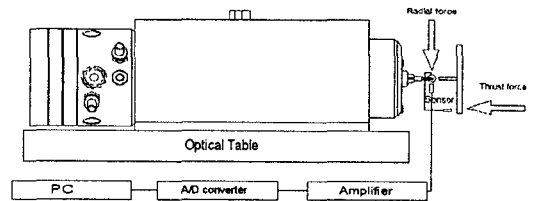


Fig. 9 Block diagram for air bearing spindle stiffness test

드릴작업은 고속의 회전을 이용하게 되므로 드릴의 고정력을 측정하기 위해 척킹토크를 측정하였다. 측정방법은 콜렛에 끝이 육각인 볼트를 체결하고 축의 회전을 고정시킨 후 토크렌치를 이용하여 측정하였다.

PCB 드릴링용 공기 베어링 스피들의 허용하중은 드릴작업 시 더 큰 하중을 요구하는 슬러스트방향은 17kg<sub>r</sub>, 반경방향은 8kg<sub>r</sub>로 측정되었으며, 이 측정값은 상용화된 스피들보다 높은 하중에서 안정성을 보이고 있다.

콜렛의 척킹 토크는 기존의 에어베어링 스피들의 기준치인 약 10kg<sub>r</sub>cm보다 높은 15kg<sub>r</sub>cm로 측정되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 PCB 드릴링에 이용할 수 있는 공

기 베어링 스피들을 설계 제작한 후 성능 평가를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 설계 제작된 주축은 그 고유진동수가 3.23KHz로서 약 180,000rpm의 영역에서도 안정적인 구동을 할 수 있음을 확인하였다.
2. 설계 제작된 공기 베어링 스피들의 런아웃은 전 구동영역에서 5 $\mu$ m보다 작게 나타남으로서 드릴링 작업에 적합함을 확인하였다.
3. 설계 제작된 공기 베어링 스피들의 온도변화는 구동 후 5분간 초기온도보다 약 20℃ 상승하고 그 이후에는 온도가 일정하게 유지됨을 확인하였다.
4. 공기 베어링 스피들은 축방향의 허용하중이 17kgf, 콜렛의 척킹토크는 15kgfcm로 측정되었으며, 이는 PCB 드릴링에 적합함을 확인하였다.

6. Mori, A., "An Analysis of Whirl-Instability of Externally Pressurized Gas Journal Bearing," JSME Trans, Vol. 36, No. 283, pp. 494-502, 1970.
7. Mori, A., "Influence of Gas-film Inertia Forces on the Dynamic Characteristics of Externally Pressurized Gas Journal Bearings Part II," JSME Bull, Vol. 23, No. 180, pp. 953-960, 1980.
8. Rieger, N.F., "Design of gas bearing," RPI-MTI, pp. 107-175, 1967.

### 참고문헌

1. Bae, M. I., Kim, K. S., Lee, Y. H., "An Optimal Design of Air Bearing for PCB Drilling Spindle," Journal of KIIE, Vol. 1, No. 26, pp. 89-95, 2001.
2. Lee, J. H., "The change of PCB manufacturing technology," The magazine of IEEK, Vol. 21, No. 8, pp. 39-47, 1994.
3. Frank, L., "Wear and cutting performance of coated micro drills," Surface & Coatings Technology, Vol. 107, No. 2-3, pp. 191-196, 1998.
4. Cheong, M. S., Cho, D. W., Kernel, F. E., "Identification and control for micro-drilling productivity enhancement," Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, No. 7, pp. 1539-1561, 1999.
5. Bae, M. I., Kim, S. J., Kim, K. S., "A study on the PCB(Printed Circuit Board) Drilling by Air Bearing Spindle," Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 3, pp. 15-20, 2005.