

복합재료 공기정압 주축부

방경근* · 장승환* · 이대길**

(Composite Aerostatic Spindle)

Kyung Geun Bang, Seung Hwan Chang and Dai Gil Lee

KEY WORDS : carbon fiber/epoxy composite, composite spindle, aerostatic bearing, fundamental natural frequency

ABSTRACT

For the stable operation of high speed aerostatic spindle, the low rotational inertia and high damping ratio of spindle shafts as well as high fundamental natural frequency are indispensable. Conventional steel spindles are not appropriate for very high speed operation because of their high rotational inertia and low damping ratio. In this study, the composite spindles with aerostatic bearing were designed and manufactured with carbon fiber/epoxy composite. The fundamental natural frequency of the composite spindle was evaluated through the modal testing.

1. 서 론

현대 산업사회의 발달과 소비자 요구의 다양화로 최근 제조, 가공 및 기타 서비스 분야에서는 다품종, 소량 생산과 함께 제품의 고 정밀도를 요구하고 있으며, 생산 원가의 절감을 위해 제조 및 가공 시간의 단축에 대한 관심이 증대되고 있다 [1]. 일례로, 첨단 전자 산업 및 의료, 광학기기의 발달에 따른 컴퓨터 용 하드 디스크 (Hard disk), 치과용 드릴 (Drill) 및 레이저 스캐너 (Laser scanner)용 다면경 (Polygon mirror) 등과 같은 정밀한 부품의 필요성이 증대됨에 따라 초고속, 고정도의 정밀 공기 주축 (Air spindle)이 폭넓게 이용되고 있다. 공기 주축은 기름에 비하여 점성이 매우 작은 공기를 작동 유체로 사용하기 때문에 마찰에 의한 열 발생량이 적으며, 고속 회전이 가능하다.

그러나, 기존의 공기 주축의 재료로 사용되는 스테인리스 강 (Stainless steel)은 과다한 무게와 낮은 감쇠 계수로 요구되는 정밀도를 얻는데 한계가 있으며, 고속 회전 중에 발생하는 선회 (Whirling)

의 조기 발생 원인이 되어 불안정한 구동을 유발한다. 특히, 작동 유체로 사용되는 공기의 경우, 마찰계수가 기름에 비하여 10-2 배 이상 작은 값으로 마찰열로 인한 온도 상승의 억제면에서는 유리하나, 공정 중의 진동 및 외란 (Disturbance)의 감쇠 효과는 매우 낮다 [2].

공기 주축의 고속 및 안정 구동을 얻기 위한 기술적인 방법은 여러 사람들에 의해 연구되었으며, 본 연구와 관련된 몇 가지 예를 소개하면 다음과 같다.

1854년 Hirn은 베어링의 작동 유체로 공기를 제안했으며 [3], Gross는 외부 가압 고속 공기 베어링의 불안정 구동의 발생 시점과 선회의 특성을 실험적으로 규명하였다 [4]. Larson은 불안정 구동의 시작 속도는 공급 압력이 높아지거나 베어링의 간격이 작을 수록 높아지는 것을 확인하였으며, 집중 매개변수 (Lumped parameter)를 이용한 이론적 해석을 시도하였다 [5]. Taniguchi는 급기 구멍의 개수와 급기 압력, 베어링의 간격이 주축의 구동에 미치는 영향을 조사하였으며, 불안정 구동의 시작 속도를 높일 수 있는 최적의 베어링 간격을 얻기 위한 실험적 연구를 수행하였다 [6]. Blondeel

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

은 공기 베어링을 피드백 루프 (Feedback loop)를 갖는 제어 시스템으로 모델링하였으며, 주파수 해석을 통한 외부 가압 공기 베어링의 동적인 안정성을 해석하였다 [7]. 강철 공기 주축의 불안정 구동을 억제하기 위해서는 비진원 단면가공의 비효율성과 능동 제어 (Active control)를 위한 부대 장치가 요구되기 때문에 공기 주축의 불안정 구동을 효율적으로 억제하기 위하여, 가볍고 감쇠 성능이 높은 재료를 공기 주축의 소재로 사용하는 것이 더욱 효과적이다.

탄소섬유 에폭시 복합재료는 높은 비강성 (E/ρ) 과 비강도 (S/ρ), 전동에 대한 고감쇠 특성 및 작은 열팽창 계수로 기존의 강철 주축에 비하여 주축의 경량화 및 정, 동적 안정성을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 온도 상승에 대한 열적 안정성이 향상되며, 복합재료의 우수한 감쇠 효과로 가공 중의 채터 (Chatter)의 발생을 효율적으로 억제할 수 있는 등의 장점을 얻을 수 있다. 복합재료의 회전체에 대한 적용은 이미 Lee [8]와 Choi [9]에 의해 연구되었으며, 복합재료를 고속 블 베어링 주축에 적용하였을 경우, 기존의 강철 주축에 비하여 정, 동적 특성이 향상하는 것을 규명하였다.

본 연구에서는 모터 내장형 (Built-in type motor) 복합재료 공기 정압 주축의 설계, 제조 방법 및 특성에 대하여 기술하였으며, 기존의 강철 공기 주축과 비교하였다.

2. 복합재료 공기정압 주축의 설계

복합재료 공기정압 주축부에는 기존 강철 공기 정압 주축부와의 비교를 위하여, 강철 공기정압 주축부의 스테인리스 (Stainless steel) 주축만을 탄소섬유/에폭시 복합재료로 설계하였다. 공기정압 주축부의 설계 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1. Specifications of the aerostatic spindle

Shaft outer diameter (mm)	25
Shaft length (mm)	210
Bearing clearance (μm)	15
Max. radial load capacity (N)	80
Max. radial stiffness (MN/m)	6

공기정압 베어링의 강성 측정 실험

공기정압 주축부의 정적 및 동적 특성이 공기 정압 베어링의 반경방향 강성에 따라 크게 변화하

기 때문에 복합재료 주축을 설계하기 전에 반경방향 강성의 정확한 값을 알아야 한다. 공기정압 베어링의 반경방향 강성은 작은 베어링 가공 공차에도 크게 변화하기 때문에 본 연구에서는 실험을 통하여 공기정압 베어링의 반경방향 강성을 측정하였다. 반경방향 강성 측정을 위한 실험 장치는 Figure 1 과 같으며, 주축의 반경방향 변위는 유도 전류형 변위 센서 (Inductive gauging sensor)를 이용하여 측정하였다.

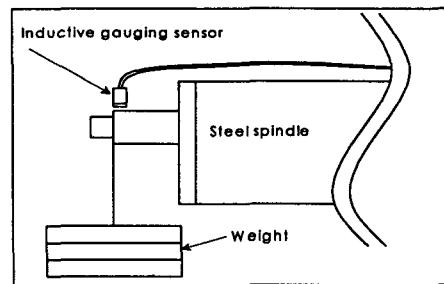


Fig. 1. Schematic diagram of test for measuring the radial stiffness of the aerostatic bearing.

실험에서 공기정압 베어링의 공급압력이 0.2 MPa ~ 0.9 MPa 일 때, 추의 무게를 5 N에서 80 N 까지 5 N씩 증가시키면서 주축 선단부의 하중 방향 변위가 측정되었다. 공기정압 베어링은 Figure 2 와 같이 선형 스프링으로 가정하였으며, 공기정압 베어링의 반경방향 강성과 주축 선단부의 하중 및 저점량과의 관계는 식(1)과 같다.

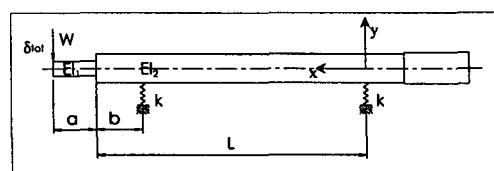


Fig. 2. The model of the shaft and the aerostatic bearing

$$k = \frac{W(L+b)(2a+L)+2a^3}{(L-b)^2(\delta_{\infty} + \frac{Wa^3}{EI_1}) + \frac{W(L-b)}{6EI_1}[2a^3L - 2ab(a+L)(2b+L) - b^3(b+L+4a)]} \quad (1)$$

식(1)을 통하여 계산된 공기정압 베어링의 반경방향 강성은 Figure 3 과 같다. Figure 3에서 공급압력이 일정할 경우, 공기정압 베어링의 반경방향 강성은 변위에 따라 일정한 값을 나타내기 때문에 공기정압 베어링이 선형 스프링이라는 가정과 일치함을 알 수 있다. 베어링의 강성은 공급압력이

증가함에 따라 증가하며, Figure 3 으로부터 공급압력이 0.7 MPa 에 이르면 베어링의 강성값이 포화 된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 복합재료 주축부의 설계에 공급압력이 0.7 MPa 일 때, 베어링 강성의 평균값인 6 MN/m 을 사용하였다.

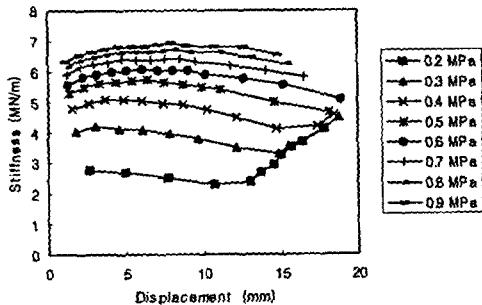


Fig. 3. The radial stiffness of the aerostatic bearing w. r. t. displacement when applied pressure vary from 0.2 MPa to 0.9 MPa per 0.2 MPa.

복합재료 주축의 설계

본 연구에서는 토크용량은 작지만, 안정적인 고속 회전이 요구되는 시스템에 적합한 주축을 설계하였다. 주축은 고속 회전 시의 안정성을 향상시키기 위하여, 비틀림 강성의 보강보다는 시스템의 고유진동수를 높이는데 설계의 초점을 맞추었다.

복합재료 주축의 고유진동수 및 모드형상은 상용 FEM 소프트웨어인 ANSYS 5.3 을 이용하여 구하였다. 해석에서 복합재료 주축은 1 차원 보(Beam)요소로 모델링하였으며, 전단과 후단의 공기정압 베어링은 각각 5 개의 등가 스프링으로 모델링하였다. 해석에 사용된 모델은 Figure 4 와 같다.

주축의 외경을 고정시킨 상태에서 주축의 두께를 1 mm 에서 12.5 mm 까지 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. Figure 5, Figure 6 그리고 Figure 7 은 각각 복합재료 주축부와 강철 주축부의 1 차, 2 차 및 3 차 고유진동수를 나타낸다. 1 차와 2 차모드는 강체모드로 1 차모드는 수평이동모드 (Translatory mode), 2 차모드는 원추형모드 (Conical mode)를 나타내며, 3 차모드는 굽힘모드 (Bending mode)를 나타낸다.

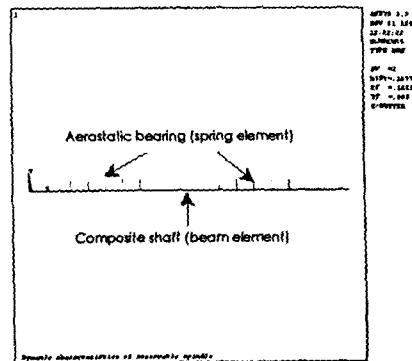


Fig. 4. The model of the composite shaft and aerostatic bearing for FE analysis.

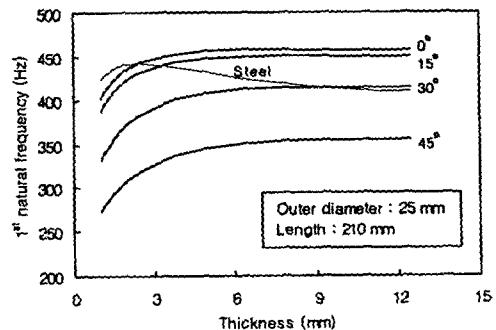


Fig. 5. Fundamental natural frequency of the composite aerostatic spindle and the steel aerostatic spindle w. r. t. thickness of the shaft

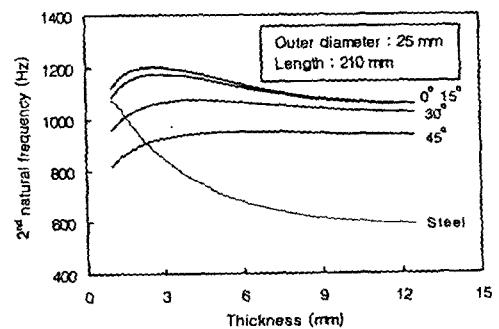


Fig. 6. 2nd natural frequency of the composite aerostatic spindle and the steel aerostatic spindle w. r. t. thickness of the shaft

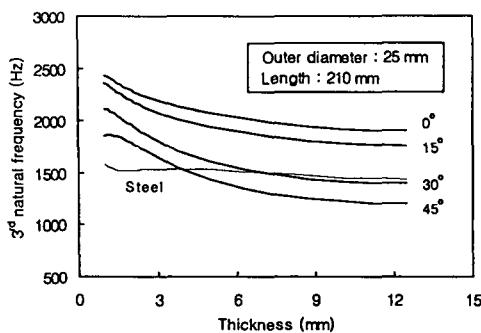


Fig. 7. 3rd natural frequency of the composite aerostatic spindle and the steel aerostatic spindle w. r. t. thickness of the shaft

현재, 반도체용 웨이퍼 등의 초정밀 가공에 사용되는 주축의 회전수 범위는 대략 40,000 ~ 100,000 rpm이며, 이는 복합재료 주축과 강철 주축의 2 차 고유진동수 영역과 일치한다. 복합재료 주축부와 강철 주축부 모두, 주축의 두께가 얇을 수록 2 차 고유진동수가 상승하여 고속 가공에 유리하지만, 중공형 강철 주축은 가공상의 어려움과 벨런싱의 어려움 때문에 실제로는 거의 사용되고 있지 않다. 그러나, 복합재료 주축은 금형에 의하여 성형되므로 정확한 형상의 주축을 만들기가 용이하다.

본 연구에서는 복합재료 주축부의 2 차 고유진동수가 최대가 되도록 복합재료 주축의 두께를 3 mm로 결정하였으며, 적층각도는 비틀림 응력을 고려하여 15°로 결정하였다.

3. 복합재료 공기정압 주축의 제작 및

성능 평가

복합재료 공기정압 주축의 제작

복합재료 주축은 탄소섬유/에폭시 복합재료를 강철 맨드렐 (Mandrel)에 적층한 후, 오토클레이브 내에서 진공백 성형 공정으로 제조되었다. 주축의 제조에는 (주) SKC의 USN150BX 제품을 사용하였으며, 주요 물성치는 Table 2 과 같다. 진공백 성형 공정을 통하여 제조된 복합재료 주축은 황삭가공을 통하여 대강의 외경치수와 양 끝단의 직각도를 맞추고 강철 슬리브를 접합한 후, 복합재료 주축과 강철 슬리브를 동시에 정삭가공하여 치수정밀도를 맞추었다. 복합재료 주축과 강철 슬리브의

접합에는 National starch 사의 IPCO9923 이 사용되었으며, 접합부위의 기공을 줄이고 빠른 경화를 위하여 80°C, 0.6 MPa 인 환경하에서 2 시간 30 분 동안 유지시켰다. 완성된 복합재료 주축은 Figure 8 과 같다.

Table 2. Properties of the unidirectional carbon fiber/epoxy composite material (USN125, (주) SKC)

Tensile modulus (GPa)	131.6
Transverse modulus (GPa)	8.2
Shear modulus (GPa)	6.1
Tensile strength (GPa)	1.78
Transverse strength (MPa)	50
Shear strength (MPa)	88
Density (kg/m ³)	1560

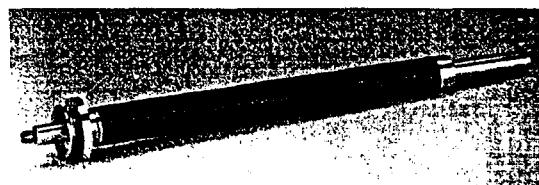


Fig. 8. Photograph of the composite shaft.

복합재료 공기정압 주축의 성능 평가

제작된 복합재료 주축부는 진동 실험을 통하여 고유진동수 및 감쇠계수를 구해, 동적 특성을 평가하였으며, 공구를 장착하지 않은 상태의 회전 실험을 통하여 구동 중의 회전 안정성을 평가하였다.

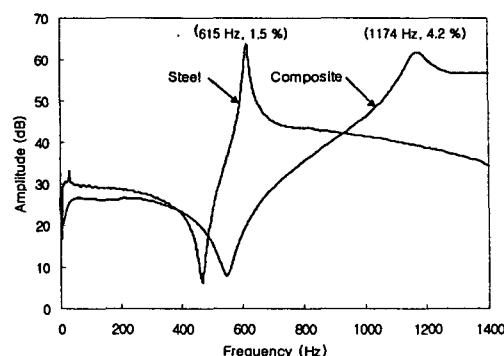


Fig. 9. Amplitude of the acceleration for the steel and composite aerostatic spindle w. r. t. the frequency.

Figure 9는 진동 실험을 통하여 얻어진 복합재료 주축부와 강철 주축부의 2차 고유진동수에 대한 주파수 응답곡선이다. Figure 9에서 복합재료 스픈들의 2차 고유진동수와 진동 감쇠계수가 강철 스픈들에 비해서 매우 높기 때문에, 강철 스픈들에 비해서 복합재료 스픈들이 구동중에 외란의 영향을 덜 받고, 안정적으로 회전할 것을 알 수 있다.

복합재료 스픈들과 강철 스픈들의 회전 안정성을 파악하기 위하여 회전 속도를 변화시키면서 회전 실험을 수행하였다. 회전 실험 결과, 복합재료 스픈들이 강철 스픈들에 비하여 회전시, 진동 및 소음이 적어 안정적으로 회전함을 알 수 있었다. 강철 스픈들과 복합재료 스픈들의 여러가지 동적 특성을 Table 3에 비교하여 나타내었다.

Table 3. Performance comparisons of the composite aerostatic spindle and the steel aerostatic spindle.

	Steel spindle	Composite spindle
Spindle section shape	Solid	Hollow
Mass (kg)	1.11	0.37
Rotational moment of inertia (kgm^2)	9.14×10^{-5}	3.32×10^{-5}
Second natural frequency (rpm)	36,900	70,440
Loss factor (%)	1.5	4.2

4. 결 론

본 연구에서는 강철 공기정압 주축부를 대체하는 복합재료 공기정압 주축부를 설계, 제작하였다. 복합재료 공기정압 주축부는 강철 공기정압 주축부에 비하여 질량과 회전관성모멘트가 각각 67 %, 64 % 감소하였으며, 2차 고유진동수와 감쇠비가 각각 1.9 배, 2.8 배 증가하였다. 복합재료 공기정압 주축부는 초정밀 가공을 위한 40,000 ~ 100,000 rpm 영역에서 높은 고유진동수를 나타내어 복합재료 공기정압 주축부를 이용한 초정밀 가공시, 강철 공기정압 주축부보다 안정적인 구동이 예상된다.

후 기

본 연구는 (주) 예원 테크와 공동 연구에 의해 이루어 졌으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Weck, M. and Koch, A., "Spindle-Bearing Systems for High-Speed Applications in Machine Tools," *Ann. CIRP*, Vol. 42(1), pp. 445-448 (1993).
2. Grassam, N. S. and Powell, J. W., *Gas Lubricated Bearings*, Butterworths, London, Chap. 1 (1964).
3. Hirn, G., "Sur les Principaux Phenomenes qui Present les Frottements Mediats," *Soc. Ind. Mulhouse Bull.*, Vol. 26, pp. 188-277 (1854).
4. Gross, W. A., "Investigation of Whirl in Externally Pressurized Air-Lubricated Journal Bearings," *J. Basic Eng. Trans. ASME*, Vol. 84, pp. 132-138 (1962).
5. Larson, R. H. and Richardson, H. H., "A Preliminary Study of Whirl Instability for Pressurized Gas Bearings," *J. Basic Eng. Trans. ASME*, Vol. 84, pp. 511-520 (1962).
6. Taniguchi, O., "Experimental Study on Instability of Externally Pressurized Air Journal Bearing," *JSME Int. J.*, Vol. 33, pp. 997-1004 (1967).
7. Blondeel, E., Snoeys, R. and Devrieze, L., "Dynamic Stability of Externally Pressurized Gas Bearings," *J. Lub. Tech. Trans. ASME*, Vol. 102, pp. 511-519 (1980).
8. Lee, D. G. Sin, H. C. and Suh, N. P., "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool," *Ann. CIRP*, Vol. 34, pp. 365-369 (1985).
9. Choi, J. K. and Lee, D. G., "Manufacture of a Carbon Fiber-Epoxy Composite Spindle-Bearing System for a Machine Tool," *Composite Structures*, Vol. 37, pp. 241-251 (1997).