

고속 연삭기용 유정압 스피들 개발에 관한 연구

김정석⁺, 조용권⁺, 박진호^{**}, 문홍만⁺⁺

(논문접수일 2010. 12. 11, 심사완료일 2011. 1. 14)

A Study on the Development of Hydrostatic High Speed Spindle for Grinding Machine

Jeong-Suk Kim⁺, Yong-Kwon Cho⁺, Jin-Hyo Park^{**}, Hong-Man Moon⁺⁺

Abstract

The hydrostatic bearings have a relatively small run-out comparing to its shape error by fluid film effect in hydrostatic state as like pneumatic bearing and have a high stiffness, load capacity and damping characteristics. As there is no maintenance and semipermanent in these bearing type, it has been usually adopted as main spindle bearing for grinding machine. In this thesis, to develop hydrostatic bearing for high speed spindle, the cooler setting temperature, bearing clearance and nozzle pressure of belt-driven hydrostatic bearing are investigated. The bearing temperature is decreased, as the cooler setting temperature is lower, nozzle pressure is higher and bearing clearance is wider. The front temperature of bearing is nearly 8°C higher than the rear one up to 13,000 rpm of spindle revolution. The thermal deflection of X-axis is $\pm 1.6 \mu\text{m}$ in range of 12,000 rpm-13,000 rpm. Therefore, it is conformed that the built-in motor hydrostatic bearing can be used to high speed spindle.

Key Words : Hydrostatic bearing(유정압 베어링), High speed spindle(고속 주축), Thermal displacement(열 변위), Grinding spindle(연삭 스피들)

1. 서론

연삭기의 특성상 필요로 하는 고정밀 가공을 실현하기 위해서는 가공물의 형상정도와 표면조도를 주로 지배하는 주축 회전계의 고정밀화가 요구된다. 유정압 베어링은 공기베어링과 같은 유막의 평균화 효과를 기대할 수 있어 구성 부분의 형상 오차보다 우수한 회전정도를 기대 할 수 있으며 상대적으로 높은 강성, 부하용량 및 우수한 감쇠특성을 보유하고 있으면서도 비접촉에 의한 무보수, 반영구적 수명 등의 장점이 있

어 정밀연삭기용 주축 베어링으로 많이 사용된다^(1,2).

연삭기의 주축 스피들이 10,000rpm이상의 고속회전 영역에서는 유정압 베어링이 과열되기 쉽고, 이에 따라 공동현상(Cavitation)이 발생할 수 있다⁽³⁻⁵⁾. 또한 유정압 베어링이 고속 회전하게 되면 동압효과가 커질 수 있고 이로 인해 강성 및 부하용량이 증가하는 효과를 볼 수는 있으나, 이 동압효과는 방향성이 존재하므로 일부 방향에 대해서 부압이 발생하여 동작한계로 작용된다⁽⁶⁻⁷⁾.

유정압 베어링의 유압장치는 펌프동력소비와 베어링 간극의

* 부산대학교 기계공학부 (jhpark@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30번지
+ 부산대학교 기계공학부
++ 덕흥(주)

마찰동력소비에 기인하여 윤활유의 온도가 상승하고 특히 고부하 고속회전 시에는 상승폭이 더 크다. 이 때 베어링 간극의 윤활유 흐름상태가 층류에서 난류로 변화할 수도 있으므로 베어링 성능이 급격히 저하될 수 있다. 이러한 이유로 현재까지 고속회전용 유정압 베어링을 개발하는데 많은 어려움이 있었던 것이 사실이다.

본 연구에서는 위와 같은 고속 회전용 유정압 베어링의 개발을 목표로 베어링 틈새 및 노즐 공급용 압력을 변화시켜 베어링 특성을 실험한 선행 연구결과를 바탕으로 빌트인 모터(Built-in motor)를 적용하여 고속회전에 적합한 유정압 스피ndl을 개발하고자 한다.

2. 시제품 설계 및 제작

원통연삭가공에 대한 절삭력을 증대하기 위하여 빌트인 모터는 아래 Fig. 1의 출력선도에서 나타나듯이 Max. 40,000rpm 까지 구동할 수 있고, 30,000rpm 회전 영역대까지 4.1Nm의 토크와 13kW의 추력을 가지는 고추력의 빌트인 모터를 선정하였다. Fig. 2는 선정된 빌트-인 모터의 실제 형상이며 스피ndl 하우징에 조립시 열박음 공정으로 조립되어진다.

빌트-인 모터 내장형 유정압 스피ndl 설계 및 제작 사양은 Table 1과 같으며 Fig. 3은 유정압 스피ndl을 설계 완료한 제작도면이다. 주요 부품은 동심도, 진원도 원통도, 평형도, 직각도가 2 μ m~3 μ m 이내로 정밀 가공되어 조립 완료 후 제작의 회전 정밀도를 얻을 수 있으며 가공 완료 후 각 부품들은 억지 끼워

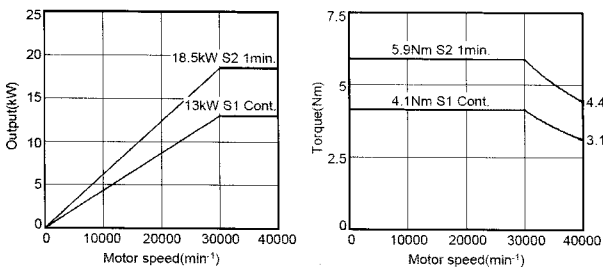


Fig. 1 Power and torque characteristics built-in motor

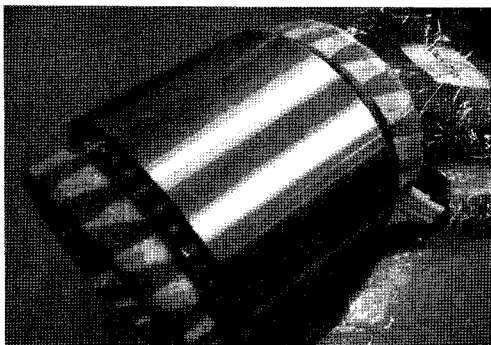


Fig. 2 Built-in motor

맞춤 조립으로 완성하였다.

제작된 유정압 베어링 및 스피ndl은 포켓 내에 랜드부를 포함함으로써 회전시의 강성과 감쇠성을 증대시키는 효과를 얻을 수 있다. 고속 회전 시 공급오일이 스피ndl 좌우의 틈새로 유출되는 현상을 억제하기 위해 2차에 걸친 드레인홀(Drain hole)이 유정압 베어링에 포함되어 있으며 그 이후의 유출 오일은 Labyrinth 실(Seal) 구조에서 배유된다. 13,000급 빌트인 모터 내장형 유정압 스피ndl의 외양은 Fig. 4에 제작된 모습을 보이고 있다.

Table 1 Specifications of hydrostatic spindle

	Items	Unit	Spec.
Main Spec.	Wheel rotation speed	rpm	Max. 13,000
	Wheel circumferential speed	m/sec	100
	Motor	-	Built-in
Design spec.	Built-in Motor rated output	kW	13
	Built-in Motor Torque	Nm	4.1
	Main Spindle Diameter	∅	52
	Bearing Span	mm	34
	Nozzle supply pressure	kgf/cm ²	5
	Capillary Diameter	∅	0.4
	Bearing gap	μm	25
Main spindle stiffness	kgf/μm	2	

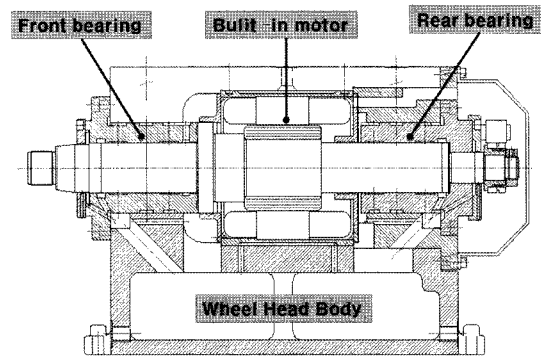


Fig. 3 Assembly drawing of hydrostatic spindle

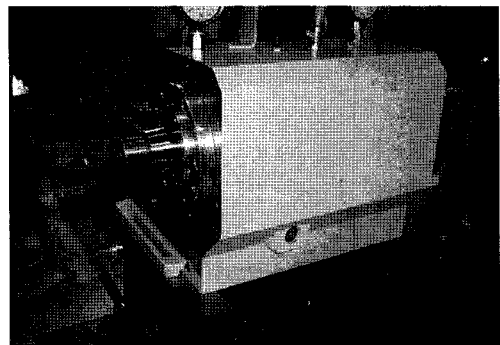


Fig. 4 Photograph of hydrostatic spindle

3. 실험장치 및 방법

빌트인 모터 내장형 스피들에 발열 상승에 따른 열변위를 파악하고자 Fig. 5와 같이 유정압 스피들 열변위 실험장치를 구성하였다. 스피들의 고속회전에 따른 온도 상승을 파악하기 위하여 Fig. 6과 같이 전·후 베어링과 스피들 바다, 배유 온도

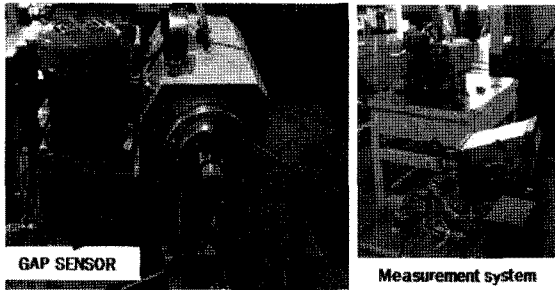


Fig. 5 Measurement system

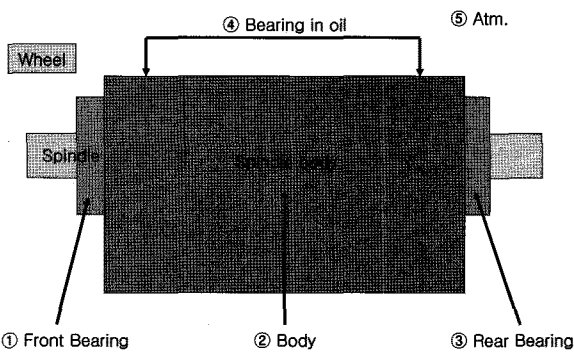


Fig. 6 Sensor location



X-axis acc. Y-axis acc. Z-axis acc.

Fig. 7 Vibration measurement



Fig. 8 Noise measurement

를 측정하였고 그에 따른 열변위량을 파악하기 위하여 주축선단에서 원통연삭 가공시 직접적인 영향을 미치는 X축 방향의 온도에 따른 열변위를 측정하였다.

그리고 Fig. 7은 1,000rpm 구동 단위로 13,000까지 구동시 스피들 하우징에 가속도 센서를 장착 그에 따른 진동 가속도를 X, Y, Z-Axis 방향으로 측정하였고 Fig. 8은 소음 측정은 주파수 영역대가 20Hz~8,000Hz 범위에서 27dB~130dB까지 측정 가능한 SOKKI/JAPAN의 LA12 10 SOUND LEVEL METER로 소음원에서 500mm 떨어진 거리에서 13,000rpm까지 구동시의 소음을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유정압 스피들의 주축 회전 특성

Fig. 9는 유정압 스피들의 회전제어 특성을 파악하기 위하여 FANUC SERVO GUIDE를 이용하여 실시간 측정된 결과이다. 연삭가공은 원주속도와 관련이 있어 특정 회전수 범위를 주로 사용하기 때문에 가감속 시간에는 큰 의미를 부여하지 않지만 측정된 결과에 의하면 가감속 시간은 1,000msec이고 2,500msec의 등속구간에서 13,000rpm으로 구동하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 13,000rpm의 영역대를 확대한 그래프이며

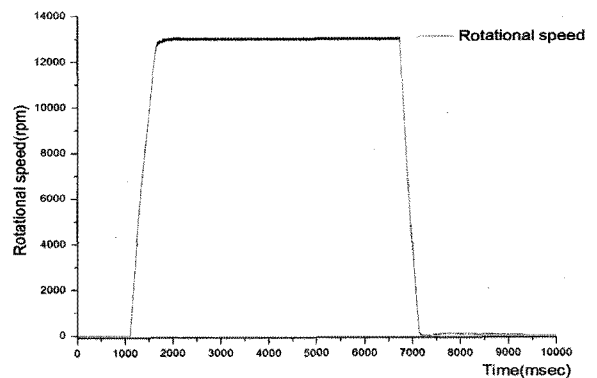


Fig. 9 Characteristics of acceleration/deceleration

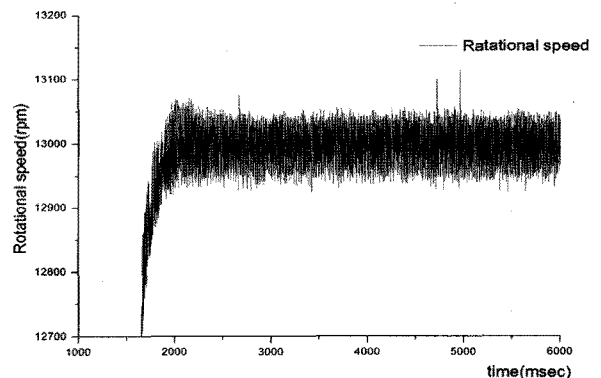


Fig. 10 Characteristics of acceleration/deceleration

회전수 오차량이 $\pm 50\text{rpm}$ 으로 측정되었다.

4.2 유정압 스피ndl의 주축 열변위 특성

빌트인 모터 내장형 유정압 스피ndl을 1,000rpm 단위로 15분간 구동하여 Max. 13,500rpm까지 발열특성을 Fig. 11에 나타내었으며 13,000rpm기준일 때 Front Bearing의 발열온도가 Rear Bearing의 발열온도보다 약 8°C 가 높았다. 이는 슷들

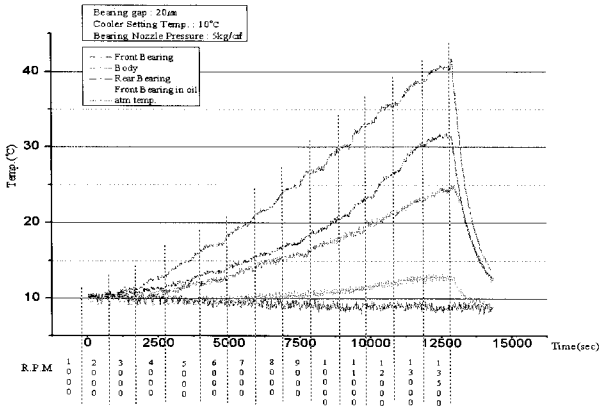


Fig. 11 Temperature change depending on spindle speed

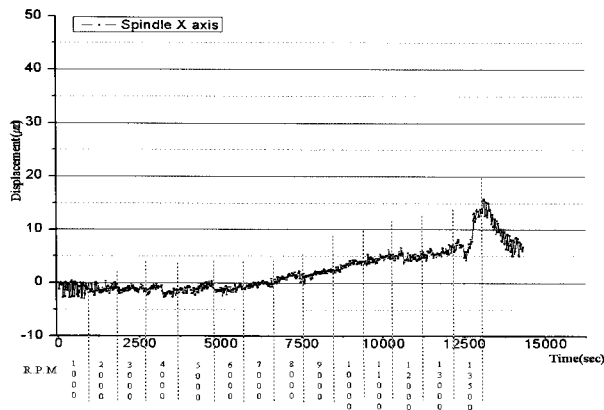


Fig. 12 Thermal displacement depending on spindle speed

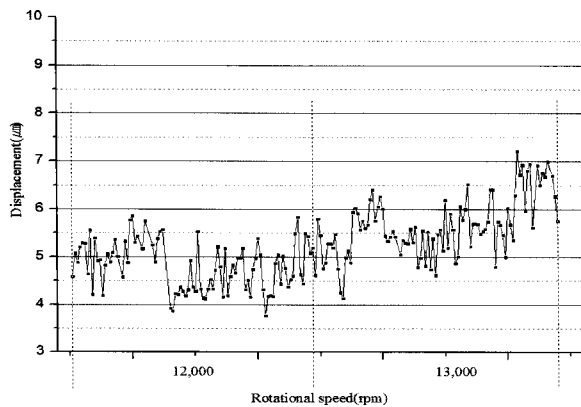


Fig. 13 Thermal displacement depending on spindle speed (12,000~13,000rpm)

이 없는 무부하 상태의 영향으로 사료된다. 또한 Body는 실온 대비 약 15°C 상승 되었다. Fig. 12는 빌트인 모터 내장형 유정압 스피ndl을 13,000rpm까지 구동시 X축 방향의 열변위량을 측정하한 그래프로써 전체구간에서 약 $\pm 5\mu\text{m}$ 으로 측정되었고, Fig. 13은 12,000~13,000rpm 단일 고속회전 구간에서는 $\pm 1.6\mu\text{m}$ 정도 측정되었다.

4.3 유정압 스피ndl의 주축 진동 특성

일반적인 공작기계 주축은 주축회전수가 증가할수록 반경 방향 진동가속도가 증가되는 양상을 보이며 진폭의 피크 (Peak)치로써 주축의 고유진동 영역대를 파악한다. Fig. 14는 1,000rpm 단위로 13,000rpm까지 진동가속도를 측정하한 결과, 측정 Peak치는 X, Y, Z-axis 방향으로 각각 1.8%, 4.0%, 4.6%으로 측정 되었다.

4.4 유정압 스피ndl의 주축 소음 특성

Fig. 15는 1,000rpm 단위로 13,000rpm 까지 구동하여 소음을 측정하한 그래프로써, 넓은 회전수 구간에서 안정된 소음특성을 보이고 있다. 13,000rpm 회전시에 69.3dB 수준의 소음발

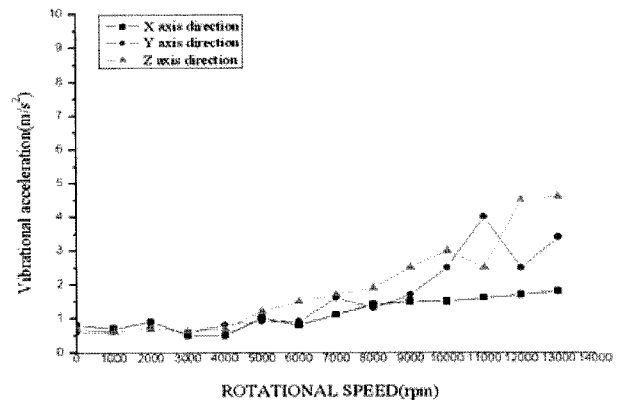


Fig. 14 Vibration characteristics depending on spindle speed

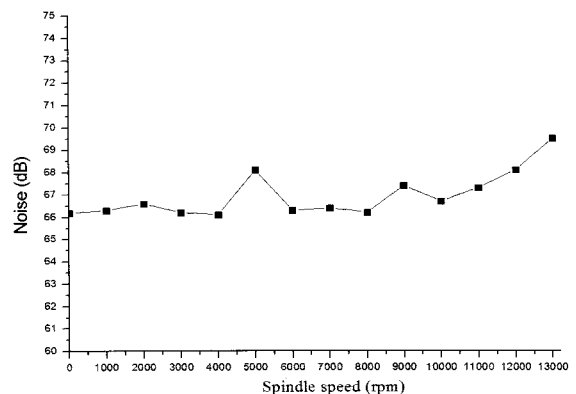


Fig. 15 Noise characteristics depending on spindle speed

생이 나타났다. 위아(주) 원통연삭기 검사성적서의 주축 회전시 소음 허용치인 80dB 이하이므로 측정소음치가 허용소음치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 빌트인 모터 내장형 고속 연삭용 스피ndl을 개발하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 스피ndl 회전을 실시간 측정된 결과로 가감속 시간은 1,000 msec이고 2,500msec의 등속구간에서 13,000rpm으로 구동하는 것을 알 수 있었고, 이 때 회전 오차량이 ± 50 rpm으로 측정되었다.
- (2) 12,000~13,000rpm 단일 고속회전 구간에서의 열변위량은 $\pm 1.6\mu\text{m}$ 으로 측정되었다.
- (3) 스피ndl 회전수의 증가에 따라 진동 가속도가 증가하는 경향을 보이고 있으나 13,000rpm까지의 각 축의 가속도 특성은 허용 동특성을 만족하고 있다.
- (4) 연삭기 주축 회전시 소음이 허용치가 80dB이며 개발 스피ndl의 소음 측정값이 13,000rpm 회전시 67.5dB로 허용치에 만족하는 것을 알 수 있다.

위의 결론을 통해서 고속 연삭용 유정압 스피ndl의 상용화 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, C. H., Park, C. H., and Lee, H. S., 1996, "The Optimization of a Hydrostatic Spindle System for Grinding Machines", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 140~146.
- (2) Lee, C. S., Moon, H. M., Cho, Y. K., Cho, H. T., Baek, Y. J., Chae, S. S., and Lee, J. C., 2006, "A Study on the Development of Hydrostatic High Speed Spindle for Nano CNC Grinding Machine", *Proceeding of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, pp. 228~233.
- (3) Development of Industrial Technology Final Report, 2008, "A study on the Development of Nano CNC Grinding Machine Technology"
- (4) Aoyama, T., 1990, *Design and Application of Hydrostatic Bearing*, Japanese Industrial Standards Committee, Japan.
- (5) Park, C. H., Lee, H. S., and Shin, Y. J., 1989, "The Static Performance Analyses of Considering the Precision Change for Hydrostatic Journal Bearing", *Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 154~157.
- (6) Park, C. H., Lee, H. S., and Shin, Y. J., 1997, "Development of A High Precision CNC Lathe for mirror surface", *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering*, pp. 82~88.
- (7) Dozodz, M., Braun, M. J., and Hendricks, R. C., 1996, "Pressure and Flow Characteristics in a Shallow Hydrostatic Pocket with Rounded Pocket/Land Joints," *Tribology International*, Vol. 29, No. 1, pp. 69~76.
- (8) Ugural, A. C., 2004, *Mechanical Design*, Mc Graw Hill, United States.