

볼-유정압 복합베어링을 갖는 고정밀 주축의 회전특성에 관한 연구

이찬홍*, 이후상

Rotational Characteristics of High Precision Spindle Unit with Ball-Hydrostatic Bearing

Chan-Hong Lee*, Husang Lee

ABSTRACT

The spindle unit is core parts in high precision machine tools. Diverse static and dynamic characteristics of spindle unit are needed for special purpose of machine tools. Specially, high damping ability may be very useful to high precision and high speed spindle unit. But commercial bearing system has very low damping value and high stiffness.

In this paper, the combined bearing system with ball-hydrostatic bearing is suggested for high damping spindle unit. The suggested bearing system has 30% damping ability more than general ball bearing's. The average rotational accuracy of spindle with combined bearing in working speed is 24% better than with ball bearing. The unbalance rotating experiment in spindle show that rotating error with combined bearing is only half value of with ball bearing.

Key Words: High damping(고감쇠), Spindle(주축), Rotational accuracy(회전정도), Hydrostatic bearing(유정압 베어링), Combined bearing(복합베어링)

1. 서론

공작기계의 가공정밀도는 일차적으로 주축의 회전정밀도와 이송계의 위치정밀도에 의해 크게 좌우되기 때문에 설계시 동력전달 기능외에 주축과 이송계에 정적인 강성과 감쇠능력을 최대한 부여하게 된다. 특히, 주축은 큰 동력을 공작물에 전달하고 이때 발생하는 절삭력을 다시 기계구조물에 전달하는 역할을 하면서 볼베어링의 경우 점 접촉에 의해, 동압베어링의 경우 매개유체에 의해 힘을 전달하므로 상대적으로 킬럼과 베드등에 비해 정적, 동적으로 취약한 부위가 된다. 그래서 많은 공작기계에서는 주축의 정적 강성을 위주로 설계를 하지만, 가공품질의 중요성이 점차 높아지면서 표면조도에 대한 대책으로 주축의 감쇠능력 부여가 강조되고 있다.

주축에 감쇠능력을 크게 부여하기위한 방법으로 볼베어링과 유정압베어링을 직렬로 연결하는 구조가 제시되었으나⁽¹⁾ 베어링의 직렬구조로 인해 주축의 반경방향 크기가 커지고 정적 강성이 약간 손상되며 제작비가 상승하는 약점이 있어, 이에 대한 대책으로 정적강성 증가, 병렬형 복합베어링 구조, 제작비

감소의 조건을 만족하는 고감쇠 복합베어링의 구조 개선이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 구조적 단점을 보완함으로써 주축의 정, 동특성이 동시에 개선될 수 있는 볼베어링과 유정압베어링의 병렬형 복합베어링 시스템을 주축 베어링으로 제한하고자 하며, 그 타당성을 이론적으로, 실험적으로 검증하였다. 그리고 주축의 베어링 시스템인 볼베어링, 직렬형 복합베어링⁽¹⁾, 제시된 병렬형 복합베어링 주축에 대한 성능과 특성을 비교 분석하였다.

2. 병렬형 복합베어링의 이론해석

2-1. 고감쇠 주축의 구성요소 결정

볼베어링 주축이 고속회전을 하면 주축의 불균형, 지지 볼베어링의 강성 및 감쇠특성 감소때문에 시스템 전체의 감쇠특성이 저하되어 작은 외부하중의 변화에도 쉽게 불안정해진다. 고속주축으로서 상응한 정강성을 유지하고, 동특성 특히 감쇠특성이 우수해지려면 사용가능한 베어링의 종류에 따른 주축의 동특성 개선을 충분히 파악하여 두 개의 각각

다른 베어링을 복합 구성해 볼 필요가 있다.

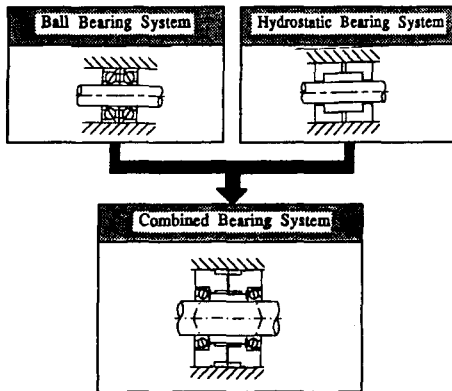


Fig. 1 Components and Configuration of a Combined Bearing System

2.2 병렬형 복합베어링의 수학적 모델링

병렬형 복합베어링이 주축의 특성개선에 어떤 효과를 나타내는지 이론적으로 해석하기 위해서 각각의 베어링을 스프링, 감쇠기의 형태로 모델링하였는데, 병렬형 복합베어링의 경우에는 볼베어링과 유정압 베어링이 병렬로 연결된 상태여서 Fig. 2와 같이 각각의 K와 C를 병렬로 연결시켰다. 여기서 K_1 , K_3 와 C_1 , C_3 는 Ball Bearing의 고유특성이고 K_2 와 C_2 는 유정압베어링의 고유특성이다.

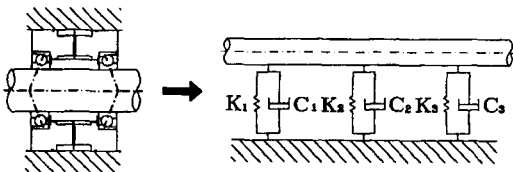
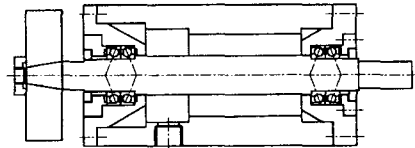


Fig. 2 Mathematical Modeling of a Combined Bearing System

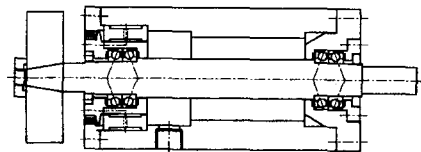
3가지 형태의 주축베어링의 정적, 동적 특성을 비교하기 위해 Fig. 3과 같이 주축을 설계하여 전절에서 서술한 바와 같이 베어링을 스프링으로, 주축은 Beam의 형태로 모델링하였다.

볼베어링 타입의 주축은 Angular Contact Ball Bearing을 사용하였고 예압이 약 70N으로 두개의 베어링을 O-Type으로 조립하였다. 전부, 후부 베어링의 간격은 190mm이고 전부 베어링은 고정형, 후부 베어링은 자유단으로 설계하였으며 베어링의 윤활방법은 그리스 윤활을 하였다. 동력 전달방법은 직결타입으로 Flexible Coupling을 사용하여 동력전달시 불필요한 진동을 최소한으로 줄였다. 주축의 실험 회전수는 0~10000rpm 정도로서 일반적인 고속주축에

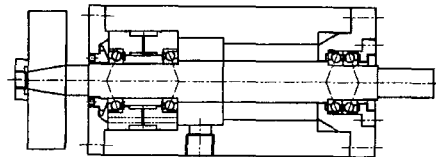
서 많이 사용하는 범위를 택하였고, 회전중의 Unbalance 효과를 관찰하기 위해서 앞쪽에 3kg 정도의 Disc를 장착하였는데, 이 Disc는 또한 정지상태에서 진동질량으로도 작용해 동특성을 측정하는데 매우 유용하다.



a) Spindle Unit with Ball Bearing



b) Spindle Unit with serial combined Bearing



c) Spindle Unit with parallel combined Bearing

Fig. 3 Spindle Unit with Several Type Bearing

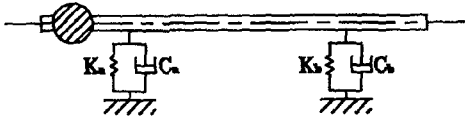
직렬형 복합베어링 주축은 볼베어링 타입의 주축과 마찬가지로 전, 후부에 볼베어링을 사용하였고, 전부에 베어링 하우징을 유정압베어링의 로터로 사용하여 두개의 상이한 베어링을 직렬로 복합하였다. 유정압베어링의 로터 직경은 66mm로서 공급유압은 15kg/cm²과 30kg/cm²으로 각각 변화시켰고, 유정압베어링의 회전상태를 관찰하기 위해 로터의 회전부위를 외부로 돌출시켰다.

병렬형 복합베어링 주축은 전부베어링에서 양쪽에 볼베어링을 장착하고 가운데 유정압 베어링을 설치하여 전부베어링의 감쇠능력을 증가시켰다. 여기서 유정압 베어링의 로터 직경은 45mm이고, 유정압 베어링에서 유출된 기름은 볼베어링 윤활에 계속해서 사용되게 된다. 후부베어링은 볼베어링의 직경 30mm인 것을 O-Type으로 조립하였고, 열변위에 대응하기 위해서 자유단으로 설치하였다.

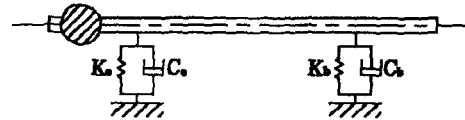
2.3 3가지 베어링을 갖는 주축구조의 이론적 정동적 해석

주축모델을 이용해서 정적, 동적 특성을 계산하

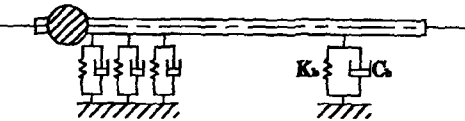
기 위해서 볼베어링 주축과 복합베어링 직렬형(I), 병렬형(II) 주축의 전,후부 베어링 K와 C를 순서대로 나타내면 그림4와 같다. 볼베어링의 고유치는 베어링 카탈로그나 관련문헌에서 수치를 얻었고, 복합베어링은 위에서 서술한 방법에 의해 계산하여 얻었다. 복합베어링의 증가강성($f=300$ Hz일때)은 볼베어링의 강성과 비슷하고 반면 증가감쇠계수는 2배정도 크다.



a) $K_a = 1.77 \times 10^8$ N/m $C_a = 3000$ N · s/m
 $K_b = 1.77 \times 10^8$ N/m $C_b = 3000$ N · s/m



b) $K_e = 8.785 \times 10^7$ N/m $C_e = 0$ N · s/m
 ($f = 0$ Hz 때)
 $K_e = 1.758 \times 10^8$ N/m $C_e = 6344$ N · s/m
 ($f = 300$ Hz 이상일 때)
 $K_b = 1.77 \times 10^8$ N/m $C_b = 3000$ N · s/m



c) $K_{a1} = 0.885 \times 10^8$ N/m $C_{a1} = 1500$ N · s/m
 $K_{a2} = 0.5 \times 10^8$ N/m $C_{a2} = 5.07 \times 10^5$ N · s/m
 $K_{a3} = 0.885 \times 10^8$ N/m $C_{a3} = 1500$ N · s/m
 $K_b = 1.77 \times 10^8$ N/m $C_b = 3000$ N · s/m

Fig. 4 Static Stiffness and Damping of Bearing a)Ball Bearing b)serial combined Bearing(I) c)parallel combined Bearing(II)

정적 특성의 계산은 주축선단에 있는 Disc에 1N의 하중을 가하고 같은 위치에서 변위를 계산하는 것으로 기준을 정하였다. 주축선단은 공작물이나 연삭숫돌이 부착되는 부위이므로 이 부분의 정적 변위는 직접 가공물의 형상정도에 영향을 미치게 된다. 주축시스템을 유한요소법으로 해석하기 위해 베어링의 고유치와 주축의 형상을 입력하면 Fig. 5와 같이 전부베어링에서 많은 처짐이 생기고, 후부베어링에서는 거의 처짐이 없다. 전,후부 베어링 사이에서는 축의 강성이 약한 관계로 축의 처짐이 많이 생기고 있다. 볼베어링 주축은 선단에서 1N의 하중에 대해서 $0.063\mu\text{m}$ 의 처짐이 생기고 복합베어링 I 주축은 선단에서 $0.074\mu\text{m}$ 의 처짐이 생겨서 17.5%의 주축선단 강성의 약화가 생겼다. 그러나, 복합베어링 I, II

의 목적은 주로 동적 특성개선으로서 정적강성 약화는 불가피 하다.

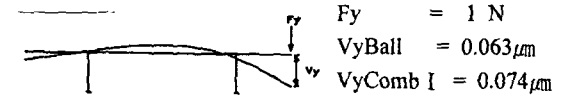


Fig. 5 Static Deflection of Ball Bearing, Combined Bearing Spindle(I)

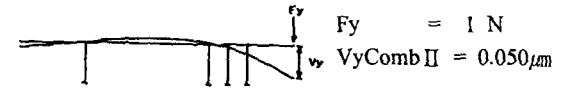


Fig. 6 Static Deflection of Combined Bearing Spindle(II)

동적 특성의 계산에서는 일반적으로 주축계의 고유진동수와 진동모우드 형태규명에 일차적으로 주안점을 두고, 다음으로 1차 고유진동수 부분의 전달함수를 표시하는 것으로 기준을 정한다. 고유진동수는 주축계가 임의의 가진주파수에 대해서 안정하게 될 것인가를 나타내는 척도로서, 공작기계에서는 가진주파수가 저주파수 영역에 존재하므로 1차 고유진동수의 크기가 매우 중요하다. Fig. 4에 도시된 진동시스템을 유한요소법으로 해석하면 Fig. 7과 같다. 볼베어링 주축과 복합베어링 I, II 주축의 진동모우드는 비슷한 형태로 나타나고, 고유진동수는 병렬형 복합베어링이 약 10%정도 상승하였다.

Mode	Shape	Eigenfreq. (Hz)
1		FREQ= 406.2
2		FREQ= 1397.83
3		FREQ= 2184.44
4		FREQ= 4038.58

Fig. 7 Mode Shape of Spindle with parallel combined Bearing

1차 고유진동수의 중요성을 고려하여 1차 고유진동수의 Amplitude를 비교해 보면, 볼베어링 주축은 $9.4\mu\text{m}/\text{N}$ 이고, 직렬형 복합베어링(I)은 $4.6\mu\text{m}/\text{N}$ 을 나타내서 51%의 진폭 감소를 보였고 병렬형 복합베어링(II)은 $6.6\mu\text{m}/\text{N}$ 으로 30%의 진폭감소를 보였다. 이때 감쇠비는 각각 0.003과 0.007, 0.004로서 복합베어링 I 주축이 2.4배, 복합베어링 II 주축이 1.75배의 감쇠능력을 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 병렬형 복합베어링 주축의 실험 결과

병렬형 복합베어링 주축의 실험조건을 볼베어링 주축의 조건과 거의 동일하게 유지하고자 주축과 볼베어링을 동일하게 사용하였고, 주축 하우징 역시 같은 것을 사용하였다. Fig. 8에는 복합베어링 II 주축의 요소부품과 실험 전경을 나타내었다.

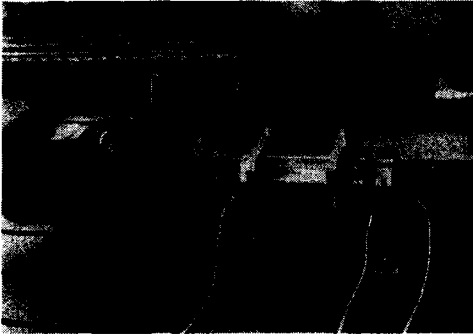


Fig. 8 Experimental Set Up of a parallel combined Bearing Spindle

3.1 정적 처짐의 측정 및 비교

세 종류의 주축선단에서 정적 처짐을 측정하기 위해 1.23kg, 2.83kg, 5kg의 표준질량을 Disc위에 차례로 올려 놓았고, 주축의 조립 후 조립공차 때문에 부품이 어느 정도 흔들릴 가능성이 있기 때문에 Disc위에 예하중용 질량을 1kg 올려놓고 전기식 다이얼 게이지의 영점을 조정하였다.

Fig. 9에는 실험에 의한 정적 처짐 변화와 이론에 의한 정적 처짐 변화를 비교하였는데, 두 종류의 주축 모두에서 비교적 잘 일치하고 있고, 고부하 영역에서 오차가 약간 증가하는 것을 알 수 있다.

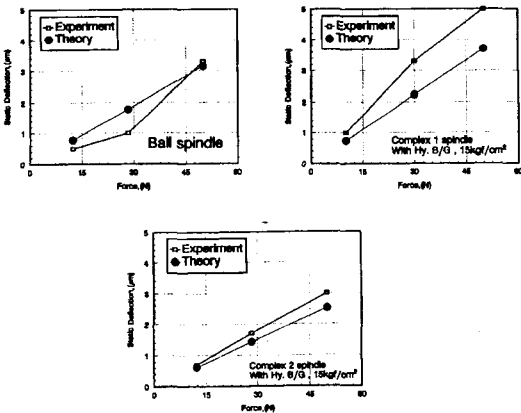
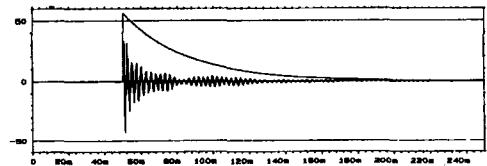


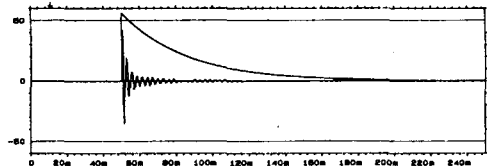
Fig. 9 Static Deflection of Spindle with Ball, combined Bearing I, II

3.2 주축의 고유진동수와 감쇠능력 측정 및 비교

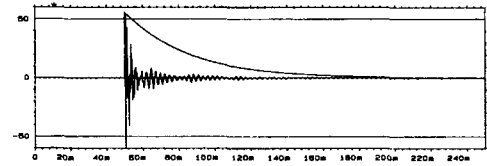
주축의 고유진동수는 Impulse Hammer에 의해서 가진력을 입력으로 하고 가속도계에 의한 가속도를 출력으로 하는 전달함수를 구해서 Amplitude가 가장 큰 Peak를 찾으면 된다. 볼베어링 주축은 1차 고유진동수가 380Hz가 되고, 복합베어링 I 주축은 고유진동수가 356Hz, 복합베어링 II 주축은 380Hz로 나타났다. 이론치에 대해서 각각 4.5%, 2.3%, 5%의 Error를 나타내서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 여기서 감쇠비는 Half Power법을 이용하여 구해보면 볼베어링 주축의 감쇠비는 0.003이 되고, 복합베어링 I의 감쇠비는 0.007, 복합베어링 II의 감쇠비는 0.004가 되어서 이론치와 9%와 7%, 31%의 Error를 나타내고 있다. 이것은 정확하지 않은 그림의 판독과 Peak의 좌우 불평형의 원인으로 들 수 있다. 무엇보다도 중요한 복합베어링의 감쇠능력을 좀더 시각적으로 관찰하기 위해 6.2g되는 Ball을 1.1m되는 상공에서 낙하시켜 앞쪽의 Disc에 충돌하게 하였다. 이때 Disc에서의 진동이 얼마나 빨리 감쇠되는가를 관찰하였다. Fig. 10에서 보듯이 복합베어링 I, II의 감쇠 효과를 매우 큰 것을 알 수 있다.



a) Ball Bearing Spindle



b) combined Bearing(I) Spindle



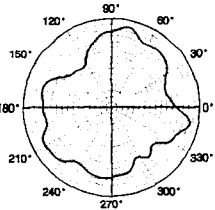
c) combined Bearing(II) Spindle

Fig. 10 Damping Characteristics Comparison of Spindle using Ball Impact

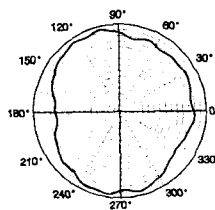
3.3 주축베어링의 형태에 따른 회전정도의 평가

주축베어링의 형태에 따라서 회전정도가 얼마나 변화하는지 알기위해 Capacity Type의 Gap Sensor를 이용해 주축의 회전정도를 측정하였다. 결과에 의하면 복합베어링 I, II 주축이 볼베어링 주축의 회전정도에 대해서 안정되고, 전 회전영역에서 복합베어링 II 주축은 볼베어링 주축에 대해서 평균적으로 24%이상의 회전정도 개선효과가 보인다.

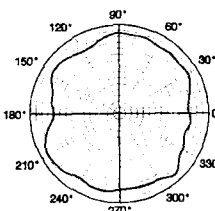
Fig. 11에는 회전수별로 측정 데이터를 나타내어 축의 떨림이 각도에 따라서 어떻게 변하고 있는지 표시하였다. 볼베어링 주축에서는 복합베어링 I, II 주축보다 축이 많이 떨리는 현상을 볼 수가 있다. 복합베어링 주축의 감쇠특성은 주축 Disc에 편심을 의도적으로 만들어 실험해 보면 더욱 확실하게 나타난다. Fig. 12에 보이는 것과 같이 14g의 편심을 추가하면 4000rpm에서 회전정도의 값이 복합베어링 I, II 주축에서는 각각 12%, 24%악화, 볼베어링 주축에서는 52%나 악화되어서, 복합베어링 I, II 주축은 외부 가진력에 대한 감쇠능력이 뛰어난을 알 수 있다.



a) Ball Bearing Spindle



b) combined Bearing(I) Spindle



c) combined Bearing(II) Spindle

Fig. 11 Rotational Accuracy of Spindle at 4000rpm

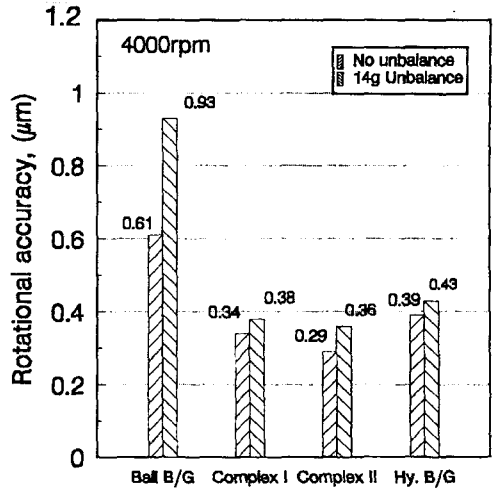


Fig. 12 Variation of Rotational Accuracy with Unbalance Mass 14g

4. 결론

볼베어링과 유정압베어링을 결합한 병렬형 복합베어링 시스템을 개발하여 공작기계의 주축에 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 병렬형 복합베어링은 볼베어링의 감쇠능력보다 적어도 1.3배 이상의 능력을 갖는다.
- 2) 병렬형 복합베어링은 외부 가진에 매우 큰 감쇠능력을 가지고 있고, 고유진동수에서 45%의 진동억제효과를 나타낸다.
- 3) 병렬형 복합베어링 주축은 볼베어링 주축에 비해서 전 회전영역에서 회전정도가 평균적으로 24%정도 우수하고, Unbalance실험에 대해서도 볼베어링 주축에 비해 2배정도 우수한 감쇠성을 나타냈다.

5. 참고 문헌

- 1) 이후상, 이찬홍, 박천홍 "복합베어링을 갖는 고속고감쇠 주축개발에 관한 연구", 한국정밀공학회, 94년도 춘계학술대회논문집, pp420~424.
- 2) 日本機械學會, 1984, "すべり軸受の靜特性および動特性資料集", 日本工業出版.
- 3) L. Opey, 1985, "Dämpfung- und Steifigkeitseigenschaften vorgespannter Schrägkugellager", Fortschritt-Berichte VDI, Reihe1, Nr.138.
- 4) G. Spur, A. Kirchheim and C. H. Lee, 1990, "Berechnung von Spindel-Lager-Systemen", ZWF, 85, 1, pp.55~59.