

## 자기보상형 유정압저어널베어링의 기본특성

박천홍\* (한국기계연구원 공작기계그룹), 이영준(금오공대 대학원), 홍성욱(금오공대, 기계공학과), 이후삼(한국기계연구원 공작기계그룹)

### Basic Characteristics of a Self-Compensated Hydrostatic Journal Bearing

C. H. Park(KIMM), Y. J. Lee(Graduated School, Kumoh Univ.), S. W. Hong(Mechanical Eng. Dept., Kumoh Univ.) and H. Lee(KIMM)

#### ABSTRACT

A self-compensated water-hydrostatic bearing has advantages in bearing stiffness. In this paper, the mechanism is applied to hydrostatic journal bearing for achieving the high bearing stiffness. The finite element method is applied to analyze the load characteristics of the self-compensated journal bearing. From the analyzed results, it is confirmed that though the self-compensated journal bearing has higher load capacity and stiffness than conventional fixed capillary journal bearing, the merit is decreased in the case of high eccentricity, that is, a spindle system with self-compensated journal bearing must be designed to have the load capacity large enough. For improving the practicality, a rectangular type capillary is introduced and discussed. Theoretically analyzed results show that it has more advantages than the conventional annular type capillary in the practical usage. The experimental verification on the analysis method is performed, and the experimental results show good agreement with theoretical results.

**Key Words** : Self compensating type(자기보상형), Hydrostatic journal bearing(유정압저어널베어링), Load characteristics(부하특성), FEM analysis(유한요소해석), Rectangular type capillary(직사각형 모세관)

#### 1. 서론

본 논문에서는 Slocum<sup>1</sup> 등이 제안한 바 있는 자기보상형 베어링 메커니즘을 적용하여 유정압 저어널베어링(이하, 저어널베어링)의 고강성화를 달성하고자 하였다. 그를 위해 먼저, 유한요소법을 이용한 자기보상형 저어널베어링의 부하특성 해석방법을 제시하였으며, 부하특성의 해석결과를 기존 고정보상요소와 비교, 검토하였다. 한편, 자기보상형 모세관의 기존 구조인 원판형 모세관의 실용적 측면의 단점을 보완하기 위해 직사각형 모세관 구조를 제안하고 원판형 모세관과의 상대적인 특성을 비교하였다. 또한, 자기보상형 저어널베어링을 제작하고, 부하특성실험을 통해 제안한 해석법에 의한 이론해석 결과의 타당성을 검증하였다.

#### 2. 자기보상형 베어링의 원리

그림 1 에 자기보상형 베어링의 원리를 나타내었다. 각 베어링 패드의 측면에 원판형태의 모세관을 가공하여 설치하고 각 모세관을 서로 대향하는 패드에 연결시키면, 각 패드의 간극변화가 반대편

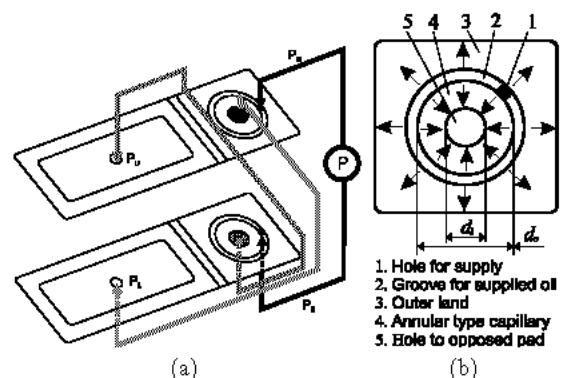


Fig. 1 Principle of self compensating hydrostatic bearing

패드에의 유입 유량을 조정하게 된다. 즉, 간극이 감소하여 압력이 증가하는 패드 쪽의 유량을 증가시키고, 반대편의 압력이 감소하는 패드 쪽의 유량은 감소시켜 강성을 증대시키는 역할을 하게 된다. 이때 원판형 모세관의 모세관계수는 식 (1)과 같이 된다.

$$k_c = \frac{\pi h_c^3}{6 \ln(d_o/d_i)} = f_c h_c^3 \quad (1)$$

단, 여기서  $h_c$ 는 모세관의 간극,  $d_o/d_i$ 는 모세관 직경비로 그림 1에서의 모세관 외경과 내경의 비를 나타내며,  $f_c$ 는 모세관의 형상에 의해 정해지는 형상계수이다.

### 3. FEM을 이용한 저어널베어링의 성능해석

비압축성 유체에 대한 레이놀즈방정식을 삼각요소를 이용하여 유한요소화하고<sup>2,3</sup>, 외부 경계절점에서의 압력이 0임을 이용하여 미지압력과 기지압력에 대한 부분행렬로 전개하여 정리하면 식(2)와 같게 된다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_u \\ P_k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2)$$

$$[K]^e = \iint \frac{h_n^3}{6\eta} [R_n]^T [R_n] dx dy$$

여기서 벡터  $\{Q_1\}$ 은 내부 절점에서의 유량의 선적분이므로 식(3)와 같이 기지의 값이 되며, 이것과 기지압력  $\{P_k\}$ 를 이용하여 연립방정식을 풀면 식(4)와 같이 미지 절점의 압력  $\{P_u\}$  및 유량  $\{Q_2\}$ 를 구할 수 있다. 여기서  $k_{ci}$ 는  $i$ 번째 패드에서의 모세관계수,  $m$ 은 패드수를 나타낸다.

$$\{Q_1\} = \begin{cases} -k_{ci} P_s / \eta, & \text{if } (i \leq m) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\{P_u\} = -[K_{11}]^{-1} \{Q_1\} \quad (4)$$

$$\{Q_2\} = [K_{21}] [K_{11}]^{-1} \{Q_1\}$$

이 경우, 모세관간극  $h_{ci}$ 는 식(3)과 대항하는 패드의 평균 베어링간극을 이용하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 단,  $\theta_1$  및  $\theta_n$ 은 한 개의 패드의 양 끝단이 좌표기준선(그림 2에서  $\theta=0$ )과 이루는 각도를 나타내며  $i$ 는 패드 순서,  $n$ 은 하나의 패드에 대한 원주방향 절점수를 나타낸다.

$$h_{ci} = \frac{1}{n} \int_{\theta_1}^{\theta_n} h_0 \left[ 1 + \varepsilon \cos \left\{ \theta + \frac{\pi}{2} (i+1) \right\} \right] d\theta \quad (5)$$

## 4. 자기보상형 저어널베어링의 특성 검토

### 4.1 가변보상요소의 특성

그림 3은 그림 1(b)와 같은 원판형 모세관의 경우에 있어 모세관 직경비 및 패드내 포켓비(포켓길이/패드길이)  $\beta$ 에 따른 포켓압력비  $\bar{P}$  및 베어링강성  $K_s$ 를 계산한 결과이다. 포켓비의 변화에 관계없이 포켓압력비가 0.5인 경우에 베어링강성이 최대가 되는 것을 확인할 수 있다.

한편, 포켓비가 클수록 베어링 램드부에서의 저항이 작아 소비유량이 많아지므로 최대 강성을 얻을 수 있는 모세관직경비가 작아지며, 이에 따라, 베어링 제작에 있어 모세관의 가공공차가 매우 엄격해지는 어려움이 있다.

원판형 모세관을 적용하는 경우, 저어널베어링의 특성상, 모세관의 외부 램드부는 직사각형이므로, 대부분의 외부 램드부는 불용 공간으로 남게 된다. 한편, 그림 4와 같이, 직사각형 모세관을 적용한 경우, 이 불용공간을 가공공차의 여유를 얻는데 활용할 수 있다.

그림 5는 베어링 패드내 포켓비  $\beta=0.9$ 의 경우에 있어, 직사각형 모세관에서의 모세관 포켓비  $\beta_c (=a_0/a_1=b_0/b_1)$  및 모세관 길이비  $\alpha (=b_1/a_1)$ 에 따른 포켓압력비 및 베어링강성을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 베어링 원주방향으로의 길이  $a_1$ 을 길게 할

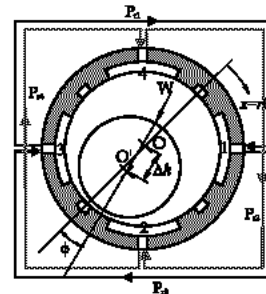


Fig. 2 Model of self-compensated journal bearing

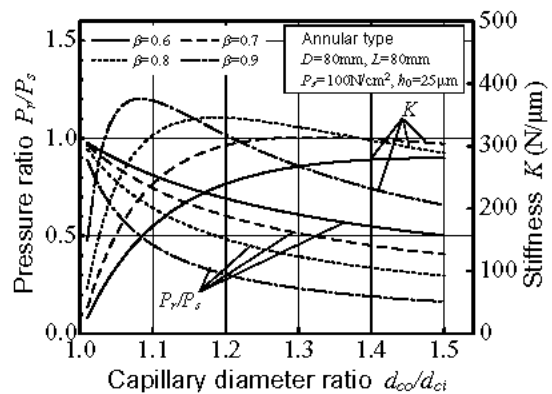


Fig. 3 Pressure ratio and stiffness of bearing according to the dimension of capillary(annular)

수축, 즉  $\alpha$ 를 작게할수록, 최대 강성을 얻는 모세관 포켓비는 작아지고, 그 부근의 곡선은 완만해지므로 가공공차에 여유를 갖게 된다. 또한 기계 가공면에서도 원판형보다는 직사각형 구조가 유리하므로 제작상의 이점도 갖게 된다.

따라서, 본 논문에서는 직사각형의 모세관 구조를 갖는 자기보상형 저어널베어링을 대상으로 그 특성을 해석하였다.

#### 4.2 고정보상요소와의 베어링특성 비교

본 절에서는 고정보상요소를 갖는 베어링과의 상대적인 성능 비교를 통해 자기보상형 베어링의 특성을 파악하고자 하였다. 비교 대상인 고정보상요소 베어링은, 베어링 패드치수가 자기보상형과 동일한 경우(고정보상요소 A) 및 가변보상요소가 차지하는 공간까지도 패드로 사용하는 경우(고정보상요소 B)의 두 가지로 설정하였다.

먼저, 그림 6(a)는 부하용량을 비교한 결과로, 자기보상형의 경우, 고정보상요소 A는 물론 고정보상요소 B보다도 충분한 큰 부하용량을 나타내고 있다. 또한 그림 6(b)의 강성에 있어서도 같은 경향을 보이고 있어 자기보상형이 부하특성에 큰 장점이 있는 것을 확인할 수 있다.

그러나, 강성의 경우에는 편심율이 커짐에 따라

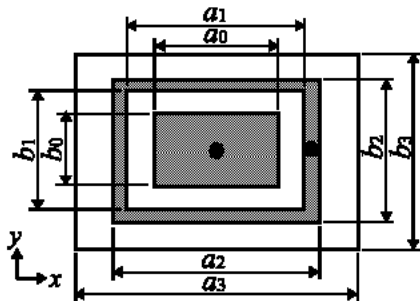


Fig. 4 Shape and dimensional parameters of rectangular type capillary

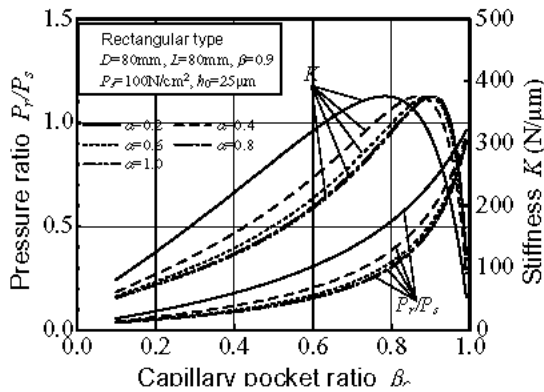


Fig. 5 Pressure ratio and stiffness of bearing according to the dimension of capillary(rectangular)

고정형과의 차이가 급격히 감소되는 특성을 보이고 있다. 이것은 편심율이 커짐에 따라 간극이 커지는 측의 포켓압력이 크게 감소하여 복원력이 급격히 감소하기 때문이다. 따라서 자기보상형을 사용하는 경우에는 주축 시스템에 작용하는 부하에 의해 큰 편심이 발생하지 않도록 충분한 부하용량을 갖도록 설계할 필요가 있다.

자기보상형 저어널베어링의 경우, 포켓의 압력 평균화 작용에 의해, 같은 하중이 가해지더라도, 가해지는 방향에 따라 모세관 간극이 달라질 수 있으며, 이에 따라 부하특성이 변하게 된다. 그림 2와 같이, 좌표기준선과 하중방향이 이루는 각을 하중각  $\phi$ 로 정의하고, 하중각의 변화에 따른 부하특성을 계산하여 그림 7에 나타내었다.  $\phi=0^\circ$ 는 포켓 사이의 슬롯 중앙위치,  $45^\circ$ 는 포켓 중앙위치에 하중이 가해짐을 의미한다. 그림으로부터 하중방향이 포켓 중앙부에 근접할수록 편심율증가에 따른 강성, 부하용량의 감소가 커지며, 특히 강성의 경우, 그 경향이 현저하게 나타나고 있다. 따라서, 실제 설계시에는 하중을 받는 위치가 양 포켓사이 슬롯의 중앙이 되도록 할 필요가 있다.

### 5. 실험적 검증

#### 5.1 실험장치 및 실험방법

이론해석의 타당성을 검증하기위해 그림 8과

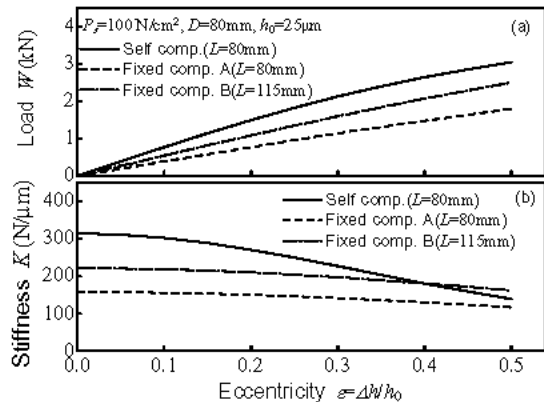


Fig. 6 Load characteristics according to the type of compensator

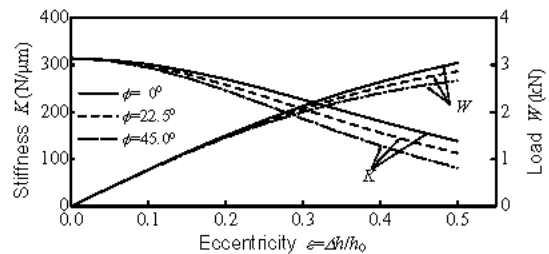


Fig. 7 Load characteristics according to the load angle in the self-compensated journal bearing

같이 실험장치를 제작하고 부하특성을 실험하였다.

부하특성 실험을 위해 저어널베어링 윗면과 별치의 지지구조물 사이에 와이어로프를 이용하여 로드셀을 설치하고, 인장력을 가했을 때의 저어널베어링의 상하방향 변위를 용량형센서(ADE, Micro sense 3401)를 이용하여 측정하였다. 저어널베어링은 하중각  $\phi=0^\circ$ , 즉, 하중이 포켓사이 슬롯중앙에 작용하도록 설치하였으며 포켓압력의 변화는 상, 하방향 각각 1 개씩 2 개의 포켓에 스트레인게이지식 압력센서를 설치하여 측정하였다.

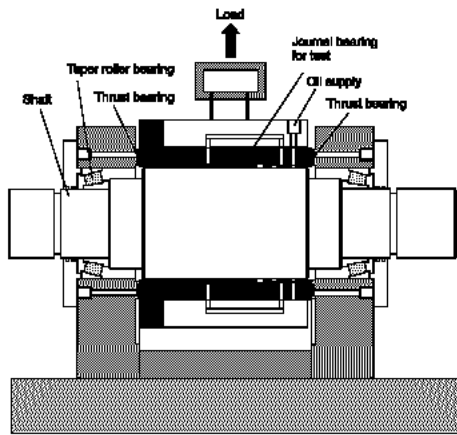


Fig. 8 Test rig of load characteristics

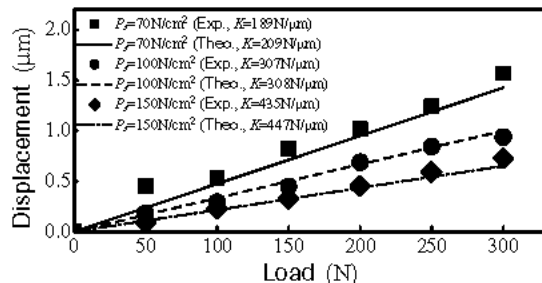


Fig. 9 Load characteristics according to the supply pressure

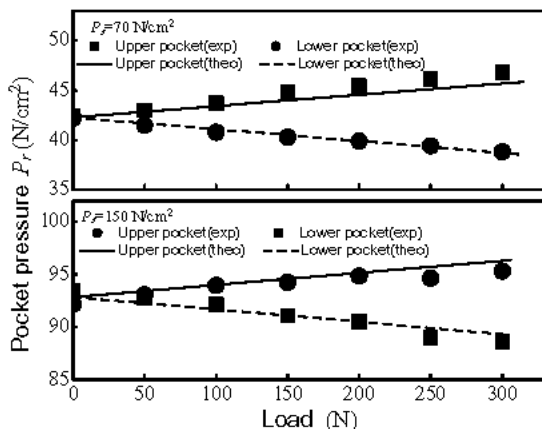


Fig. 10 Pocket pressure according to the supply pressure

## 5.1 실험결과 및 고찰

그림 9는 공급압력을 70, 100, 150 N/cm<sup>2</sup>으로 변화시켰을 때의 부하에 따른 저어널베어링의 변위를 측정된 결과로서 이론해석에 의한 결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

그림 10은 공급압력 70, 150 N/cm<sup>2</sup>에서의 상, 하방향 각각 1 개의 포켓에 대한 압력변화를 측정된 결과로 역시 해석결과와는 잘 일치하고 있다.

이상의 결과로부터, 본 논문에서 제시한 유한요소법을 이용한 해석법은 자기보상형 유정압 저어널베어링의 부하특성 해석에 매우 유효함을 검증할 수 있었다.

## 6. 결론

유한요소법을 이용하여 자기보상형 저어널베어링의 부하특성을 해석하고, 기존의 고정보상요소를 갖는 저어널베어링과 특성을 비교한 결과, 부하용량, 강성면에서 큰 장점이 있는 것을 확인하였다. 그러나, 베어링 강성의 경우, 편심율이 커지면 고정보상요소와의 차이가 급격히 감소하며, 특히 하중이 포켓중앙부에 작용하는 경우에는 감소폭이 더 커지므로, 주축에 작용하는 부하에 의해 큰 편심이 발생하지 않도록 충분한 부하용량으로 설계할 필요가 있음을 알 수 있었다. 한편, 자기보상형 베어링의 실용적인 보상요소방식으로서 직사각형 모세관을 제시하였으며, 특성해석 결과로부터, 기존의 원판형 모세관에 비해 가공공정이나 가공공차 등에서 실용적임을 확인하였다. 또한, 직사각형 보상요소를 갖는 저어널베어링에 대한 부하 및 압력특성 실험 결과는 이론치와 잘 일치하고 있어 유한요소법을 이용한 해석법이 자기보상형 저어널베어링의 부하특성 예측에 매우 유효함을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- Slocum, A. H., Scagnetti, P. A., Kane, N. R., and Brunner, C., "Design of self-compensated water-hydrostatic bearings," Precision Engineering, Vol. 17, pp. 173-185, 1995.
- Reddi, M. M., "Finite-Element Solution of the Incompressible Lubrication Problem," Trans. ASME, Jr. of Lub. Tech., July, pp. 524-, 1969
- Park, C. H., Chung, J. H., Lee, H., and Kim, S. T., "Finite Element Analysis on the Motion Accuracy of Hydrostatic Table(1st. Analysis and Experimental Verification on Single-side Table)," J. of KSPE, Vol. 17, No. 12, pp.137-144, 2000.