

초정밀 이송 스테이지용 수정압 베어링 모세관 설계에 관한 연구 Water Hydrostatic Bearing Capillary Design for Precision Motion Stages

*#심종엽¹, 오정석¹, 박천홍¹

*#J. Y. Shim¹(jyshim@kimm.re.kr), J.S. Oh¹, C.H.Park¹

¹ 한국기계연구원 초정밀기계시스템 연구실

Key words : water hydrostatic bearing, precision stage, capillary design

1. 서론

최근의 초정밀 스테이지 기술은 초정밀 가공기 및 디스플레이, 반도체 및 IT 생산 장비 성능 요구에 있어서 더욱 큰 역할을 수행하고 있으며 이러한 첨단 가공기 및 장비 산업이 차세대 성장동력원으로 나아감에 있어서 핵심적인 기술 기반을 형성하고 있다. 초정밀 스테이지 기술에는 초정밀 베어링 기술, 초정밀 위치센서 기술, 위치제어 기술, 초정밀 운동오차 보상기술 등이 있다. 이 중에서 베어링 기술로는 기존의 베어링 기술에는 LM 가이드, 공기베어링이 디스플레이, 반도체 및 IT 제품 생산장비에 많이 연구되고 사용되었으며 초정밀 가공기에는 LM 가이드 및 유정압 베어링이 연구 및 적용되었다. 초미세 가공요구에 따른 초정밀가공기의 고 정밀화, 고강성화 및 차세대 디스플레이, 반도체 및 IT 제품의 초미세화 및 대면적화의 경향으로 초정밀스테이지의 베어링에 대한 요구는 점점 더 커질 것으로 예상된다. 요구되는 초정밀 베어링의 특성조건으로는 고강성화, 고감쇄 특성, 나노급정밀도 및 고속이송제어 성능이 있고 최근의 친환경 생산요구에 부합하여 청정환경 생산이 가능한 베어링의 요건도 부가 될 수 있다. 일반적으로 LM 가이드의 경우 단순한 구조 및 높은 강성의 특성을 보이나 고감쇄, 나노급정밀도, 고속이송제어 성능에서 한계를 보이고 공기베어링의 경우 무마찰 특성으로 인한 나노급정밀도가 구현 가능하고 고속이송성능이 뛰어나나 고강성, 고감쇄 특성에서 한계를 가짐이 일반적으로 알려져 있다. 유정압베어링의 경우 고강성/고감쇄의 베어링 특성을 갖고 나노급 이송 정밀도 및 중속 이송제어를 구현할 수 있으나 디스플레이 및 반도체 등 IT 생산장비에 초정밀스테이지로 사용될 경우 청정환경대응이 문제가 된다.

수정압 베어링을 초정밀 이송 스테이지에 적용한 사례는 MIT의 Slocum 교수팀이 세라믹 creep-feed grinding에 수정압 베어링을 사용하였으며¹ 일본 Ueno박사는 초정밀 연삭기에 수정압베어링을 이용하였음을 발표하였고 KUSUI 교수팀은 반도체 제조장비의 초정밀 스테이지로 적용하였다. 최근에는 일본의 Kanagawa 대학 및 Okamoto Machine Tool 사에서 수정압 베어링을 이용한 연구를 발표하기도 하였다. 수정압 베어링을 초정밀 스테이지에 적용하면

고강성, 고감쇄, 청정환경대응, 나노급정밀도의 성능을 만족하는 차세대 생산장비의 초정밀 스테이지 구현이 가능할 것으로 예상된다.

2. 수정압 공급/냉각 시스템

수정압 베어링을 이용한 스테이지는 유정압 베어링의 경우와 같이 부가적인 시스템을 요구한다. 부가적인 시스템으로는 물을 공급할 수 있는 펌프 시스템과 베어링 간극 등에서 발생하는 열을 제거하기 위한 수냉각 시스템(칠러)이 있다. 적용된 칠러 시스템 온도제어 안정성은 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이고 $10\ \mu\text{m}$ particle filter 를 내장하고 있고 냉각능력은 20°C 에서 $4.5\ \text{kW}$ 의 냉각능력을 가진다. 물이 펌프를 거치거나 베어링 간극을 지날 때 압력손실 및 마찰에 의한 온도상승이 일어나게 되어 초정밀 베어링에 사용하기 위해서는 이러한 열을 지속적으로 제거하여 스테이지에 공급되는 수온이 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 수정압 베어링을 초정밀 스테이지에 적용하기 위하여 물 공급 시스템 설계에 있어 펌프의 선택 및 릴리프 밸브, 어큐뮬레이터 등 압력제어 요소들의 선택이 중요하다. 펌프는 초정밀 응용을 고려하여 베인펌프 타입을 적용하였고 용량은 압력 $14\ \text{bar}$ 및 유량 $42\ \text{L/min}$ 의 성능을 갖는다. 필터는 $10\ \mu\text{m}$ 및 $1\ \mu\text{m}$ particle filter 를 통과하게 하였고 릴리프 밸브의 작동 압력을 고려하여 어큐뮬레이터 압력을 조정하였다.

3. 수정압 베어링 설계

유체를 사용하는 정압 베어링은 일반적으로 압력보상요소로 저항체를 사용하게 된다. 사용되는 저항체로는 모세관, 판형 저항체 및 오리피스 타입이 있으며 상대적으로 복잡한 구성을 갖는 시스템으로는 정유량 제어 밸브 및 압력 측정 밸브가 사용되고 있고 표면 자체보상형 형태도 존재한다. 스테이지 베어링 및 레일 면의 가공오차나 저항체의 형상 오차 등을 스테이지 조립 시에 편리하게 보상하기 위하여 모세관 타입의 저항체를 일반적으로 사용한다. 수정압 베어링을 설계하기 위해서는 베어링 패드부의 유체역학적인 해석이 이루어져야 하며 모세관의 유동 특성 또한 모델링 되어야 한다. 유체 정압 베어링의 베어링으로써 물리적인 특성으로는 일반적으로 베어링 강성, 부하 용량 및 열발생 특성이 있다. 이러한 베어링 특성들은 베어링 패드부 및 모세관의 유체역학적 모델에 의해서 모델링 가능하다. Figure 2(b)에 실험에 사용된 베어링 패드 형상을 보이고 있다. 양면 지지형 베어링(opposed pad bearing)이며 포켓부분 및 랜드부분을 보이고 있다. 정확한 베어링 패드부의 모델링은 본 연구실에서 기 개발된 FEM code ²로써 구현 가능하나 선택적으로 물리적인 관계를 파악하기 위하여 간단하게 패드부를 단순화하여 모델링한 수식을 이용해 보기로 한다. Figure 2(c)의 베어링 요소 도식화 모델을 참고로 하여 패드부의 형상을 단순화 하여 모델링을 수행하면 다음의 수식과 같이 된다.

$$R_B = \frac{1}{\frac{d_1 h_1^3}{6l_1 \mu} + \frac{d_2 h_2^3}{6l_2 \mu}} \quad (1)$$



Fig. 1 Water hydrostatic bearing advantages and applications

위의 수식에서 R_b 는 베어링 패드부의 전후 압력차에 대한 유량값을 나타내는 유체 저항이며 d 는 랜드부의 길이, h 는 베어링 간극, l 은 랜드부의 폭 그리고 μ 는 점성계수이다. 베어링 패드의 형상 치수 및 물의 점성계수 수치를 사용하고 베어링 간극은 가공 및 조립된 스테이지의 간극을 측정된 값(15 μm)을 사용하여 베어링 저항을 계산하면 $6.51 \times 10^{10} \text{Ns/m}^5$ 의 값이 된다. 모세관유동 모델링은 층류유동의 경우 Hagen-Poiseuille 관계식을 사용하게 되는데 그 경우의 모세관 저항값은 다음 수식과 같다.

$$R_c = \frac{128 \mu l_c}{\pi d_c^4} \quad (2)$$

위의 수식에서 l_c 는 모세관의 길이, d_c 는 모세관의 관내 직경을 나타낸다. 일반적으로 유정압 베어링에서 같은 베어링 패드크기에 쓰이는 모세관의 치수를 사용하여 모세관 저항값을 구하면 $7.86 \times 10^9 \text{Ns/m}^5$ 의 값을 가진다. 이에 구해진 베어링 및 모세관의 저항값을 이용하여 베어링 압력을 구하면, 입력 펌프압력이 P 의 값일 경우 약 0.9P 의 값을 갖는다. 이러한 결과는 모세관의 저항이 너무 작다는 결과인데 Fig. 3 의 스테이지를 이용하여 실험적으로 베어링 압력을 구하면 반대의 결과를 보였다. 즉, 실험적으로 구한 모세관 저항값이 식(2)에 의한 값보다 훨씬 크게 나타났다. 4 bar 의 입력 압력에 대하여 베어링 압력이 1 bar 이하로 나타났다. 이러한 차이는 모세관 내부 유체의 흐름 특성에 이유가 있다. 식 (1) 과 (2)로 유량을 구하고 모세관 내부의 평균 유속을 구하면 약 20 m/sec 가 되는데 Reynolds number 를 구해보면 12,000 의 값을 가져 난류영역으로 유체 흐름이 정의됨을 알 수 있다. 이에 난류의 영향으로 층류유동을 가정한 값보다 아주 큰 저항을 갖는 것이다. 간단히 난류유동의 모델링을 검토하면 다음과 같이 Darcy 마찰계수와 Blasius 의 관계식을 고려할 수 있다.

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 2.0 \log(\text{Re} f^{1/2}) - 0.8 \quad (3)$$

$$f = 0.316 \text{Re}^{-1/4} \quad (4)$$

위의 식에서 f 는 Darcy 마찰계수이고 Re 는 Reynolds number 를 나타낸다. 위의 두 수식을 이용하면 다음과 같은 압력차와 유량의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta p \approx 0.241 \frac{l \rho^{3/4} \mu^{1/4}}{d^{4.75}} Q^{1.75} \quad (5)$$

수식(5)의 계수를 모세관 파라미터에서 구하고 베어링 저항값과 같이 관계식을 풀면 베어링 압력치가 4 bar 입력 압력에 대하여 2.6 bar 가 계산이 된다. 층류의 경우보다 실제에 가까운 값이지만 차이가 나는 이유는 모세관 내부 표면의 조도 때문이다. 이에 조도를 가정하고 Darcy 마찰계수를 이용하여 계산하면 베어링 압력이 1 bar 이하로 내려가는 결과를 얻을 수 있다. 위의 결과로써 수정압 베어링의 설계 시에는 모세관 설계에 있어 난류유동을 고려하고 실험적으로 모델링 계수들을 구하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 추후 과제

초정밀 이송 스테이지에 적용할 수정압 베어링에 대한 이론적 및 실험적인 연구를 소개하였다. 수정압의 유체 공급/냉각 시스템의 구성 및 사양에 대하여 논의 하였고 수정압 베어링 설계에 있어서 베어링부 및 모세관 모델링을

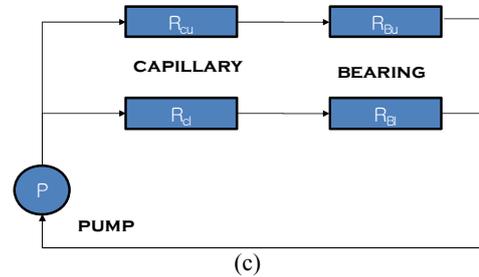
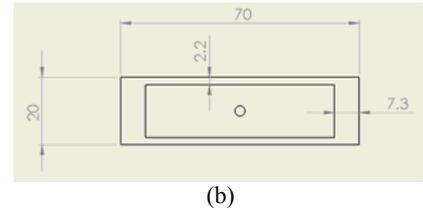
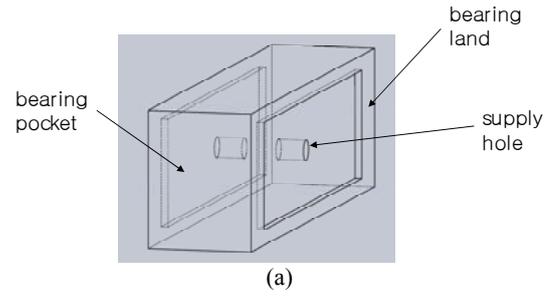


Fig. 2 (a) water hydrostatic bearing, (b) pad dimensions and (c) bearing fluid system schematic

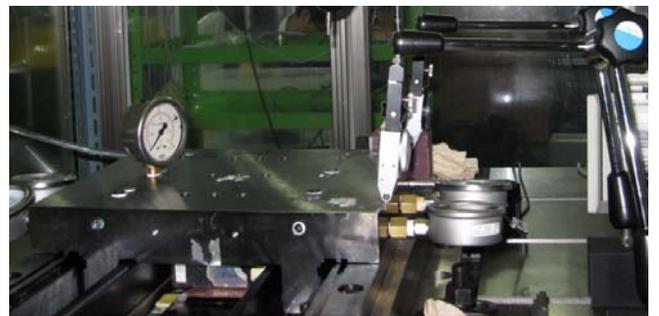


Fig. 3 Tested water hydrostatic bearing stage picture. Opposed pad horizontal bearing is adopted

수행하였고 실험적인 결과와 비교/분석 후 모델링 방법을 소개하였다. 추후로는 기 개발된 FEM 시뮬레이션 방법과 연동하여 모델링을 진행하고 실험적으로 필요 계수들을 구하여 초정밀 이송 스테이지에 적용할 수정압 베어링 설계 방법을 연구하고자 한다.

후기

본 연구는 한국기계연구원 자체사업 “수정압 베어링 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Slocum, A. H., Scagnetti, P. A., Kane, N. R. and Brunner, C., “Design of self-compensated water-hydrostatic bearings”, *Prec. Eng.*, **17**, 173-185, 1995.
2. 박천홍, 정재훈, 이후상, 김수태, “FEM 을 이용한 유정압 테이블의 운동정밀도 해석”, *한국정밀공학회지*, **17**, 137-144, 2000.