

수직형 정압 베어링을 채택한 초정밀 프레스의 설계

이종구*, 전상열, 함주혁(고려대 대학원 기계공학과), 김권희(고려대 기계공학과)

Design of a high precision press with vertical hydrostatic bearings

J. K. Lee, S. Y. Jeon, J. H. Hahm(Graduate school, KRU) and K. H. Kim(Mech. Eng. Dept., KRU)

ABSTRACT

Linear hydrostatic bearings have high stiffness, high damping and excellent guided motion straightness, and thus they are suitable for high precision machine tools. This paper describes the procedure for design and test of a high precision stamping press with vertical hydrostatic bearings. For a hydrostatic bearing set designed and manufactured, measurements were made for the straightness, repeatability and stiffness. They are found to be $1.36\mu\text{m}/100\text{mm}$, $0.19\mu\text{m}/100\text{mm}$ and $1,261\text{N}/\mu\text{m}$ respectively. Based upon the experiences with the hydrostatic bearing, an improved design of the precision press is proposed.

Key Words hydrostatic bearing (정압 베어링), precision press (정밀 프레스), stiffness (강성), straightness (진직도), repeatability (반복정도), Taguchi's method (다구치법)

1. 서론

기술의 발전과 더불어 프레스 가공 기술 역시 초소형화, 초정밀화, 복합화, 고속화를 요구하고 있다. 전자제품, 반도체 생산장비, 의료기기 등의 분야에서는 μm 단위 이하의 스탬핑 정밀도를 필요로 하기도 한다.

정밀 가공을 위해서는 정밀한 가이드가 필수적인데, 이러한 목적으로 많이 사용되는 것이 정압 베어링(hydrostatic bearing)이다.⁽¹⁾

최근 정압 베어링에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 기존 연구의 대부분은 회전축 지지용 저널 베어링에 대한 것이며, 직선 운동용 정압 베어링에 대한 연구는 비교적 드문 편이다.^{(2),(3),(4)} 직선 운동용 정압 베어링에 대한 연구도 수평 운동에 관한 것이 일반적이다. 따라서, 기존 연구 결과를 수직 운동을 하는 프레스의 램(ram)에 직접 적용하기 위해서는 실현적인 검증 과정이 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 기존 설계 이론의 수직 운동용 정압 베어링에 대한 적용 타당성을 실험적으로 검증하고, 이를 토대로 수백 mm 행정에 대하여 $1\mu\text{m}$ 이하의 진직 정밀도를 갖는 초정밀 스탬핑 프레스를 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 정압 베어링

2.1 프레스 설계 사양

본 연구에서 개발할 스탬핑 장치는 유압식 프레스로서, 용량은 25kN 이며 설치될 급형의 크기를 고려하여 베드(bed) 크기는 $400 \times 500\text{mm}$ 로 하였다. 게랑 높이는 300mm , 행정은 110mm 이며, 1차 설계의 목표 정밀도는 진직도(straightness) $2.5\mu\text{m}/100\text{mm}$, 반복정도(repeatability) $1\mu\text{m}/100\text{mm}$ 이다.

2.2 정압 베어링의 설계⁽⁵⁾

프레스의 정밀도는 가이드에 의해 큰 영향을 받으므로, 가이드의 선택은 매우 중요한 문제이다. 정밀 가이드로는 LM(linear motion) 가이드, 공기 베어링, 정압 베어링 등을 생각할 수 있는데, 이들 중 정압 베어링을 채택하였다. 그 이유는 정압 베어링이 강성, 온도 안정성, 내구성, 진직 정밀도 등에서 탁월한 성능을 보이기 때문이다.

정압 베어링은 레일(rail)과 베어링 블록(bearing block)으로 이루어진다. 베어링 블록은 리스트릭터(restrictor)와 패드(pad)를 수용하고, 패드는 다시 포켓(pocket)과 랜드(land)로 구성된다.

프레스에는 좌우 방향과 전후 방향의 수평 하중

이 모두 작용하므로, 베어링은 양방향의 수평 하중을 모두 지탱할 수 있어야 한다. 본 연구에서 설계한 정압 베어링은 패드가 레일 양쪽에 설치되는 양면지지 방식이며, 1차 구조의 레일은 6쌍의 징면 패드(front pad)와 3쌍의 측면 패드(side pad)로 지지된다. 징면 패드는 프레스 징면을 기준으로 좌우 방향의 수평 하중을 지지하며, 측면 패드는 전후 방향의 수평 하중을 담당한다. 프레스에는 1쌍의 정압 베어링이 좌우 대칭으로 설치된다.

프레스 작업 하중(수직 하중)의 10% 정도가 정압 베어링에 가해지고, 이 때 램의 수평 방향 허용 변위가 $1\mu\text{m}$ 이내라고 가정하면, 정압 베어링의 요구 강성(stiffness)은 $2,500\text{N}/\mu\text{m}$ 이다. 이러한 기준에 맞추어, 전후 방향의 경우 패드 1쌍의 강성이 $416\text{N}/\mu\text{m}$ 이 되도록 설계하였다. 램의 좌우 베어링에 각각 3쌍의 패드가 설치되어 있으므로, 전체 강성은 $2,496\text{N}/\mu\text{m}$ 이다. 좌우 방향은 각각의 패드 강성이 $217\text{N}/\mu\text{m}$ 이며, 좌우 12쌍의 패드가 있으므로 전체 $2,604\text{N}/\mu\text{m}$ 의 강성을 갖는다.

Fig. 1은 설계된 베어링의 형상을 보인다.

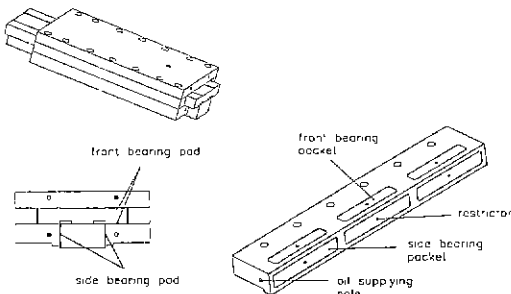


Fig 1 Geometry of bearing pad

2.3 실험을 통한 베어링 성능 측정

설계한 베어링의 성능을 측정하기 위해, 한 세트의 정압 베어링 시제품을 제작하여 프레스에 설치하였다. 측정 변수는 베어링의 강성, 직선 운동의 진폭도와 반복정도, 각도 오차 등이며 레이저 간섭계(laser interferometer)를 이용하여 측정하였다. Fig 2에 측정 변수를 나타내었다. 여기서 점 1, 4는 강성을 구하기 위해 충격하중(impact)을 가한 지점이며, 점 2, 3, 5, 6은 패드면의 수직 방향 운동 변위 측정 지점이다.

수직형 정압 베어링은 매우 큰 강성을 가지고 있으므로 경직된 상태에서 강성을 측정하기는 어렵다. 따라서, 충격하중에 의한 베어링의 진동 변위를 측정하여 고유 주파수(natural frequency)를 구하고, 이로부터 강성을 계산하는 간접 동적 측정 방법을 이용하였다. Fig. 3은 동적 강성 측정을 위해 레이저 간섭계를 설치한 베어링을 보이고 있다.

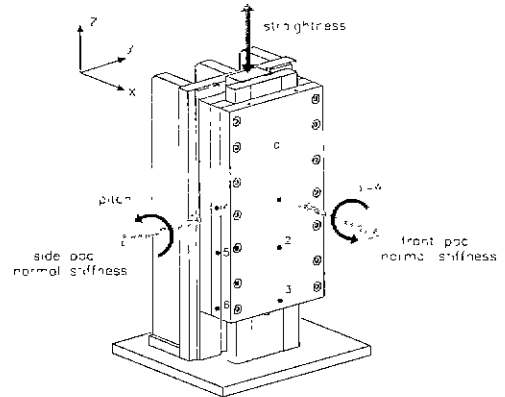


Fig 2 Definition of parameters for measurement

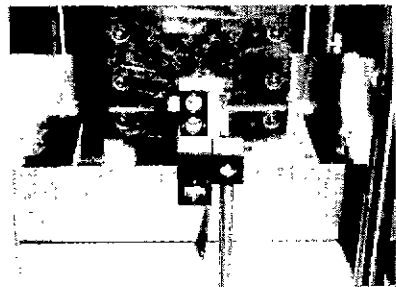


Fig 3 Laser interferometer setup for dynamic measurement

Table 1에 베어링의 설계 요구사항과 측정을 통해 얻은 결과를 비교하여 나타내었다. 실험 결과, 제작된 베어링은 요구되는 운동 정밀도와 강성을 충분히 만족시키는 것이 확인되었다. 측면 패드의 강성은 설계치보다 조금 작게 나왔는데, 이것은 가공과 조립상의 오차에 의한 것으로 보인다.

Table 1 Comparison of design requirement and experiment

		design requirements	experimental results
stiffness ($\text{N}/\mu\text{m}$)	front	1,302	1,261
	side	1,248	1,246
straightness ($\mu\text{m}/100\text{mm}$)	front	2.5	1.36
	side	2.5	0.58
repeatability ($\mu\text{m}/100\text{mm}$)	front	1.0	0.19
	side	1.0	0.28

2.4 패드 각 치수의 기여도 평가⁽⁶⁾

프레스 지지구조의 크기는 베어링의 크기에 의해 좌우되며, 레일의 치수는 패드 치수에 직접적인 영

향을 받는다. 따라서 프레스 구조를 최적화하기 위해서는 패드 치수를 최소화하는 것이 필요하다.

이를 위해, 다구치법(Taguchi's method)을 이용하여 패드 각 치수의 기여도 분석을 수행하였다 Fig. 4는 기여도 분석을 위해 패드부의 치수를 정의한 것이며, Fig. 5는 평균치 분석 결과를 나타낸다. 결과를 보면, 각 부분의 크기가 구조 강성에 미치는 영향은 미약함을 알 수 있다. 즉, 패드의 두께를 줄여도 강성은 크게 줄어들지 않을 것으로 생각된다.

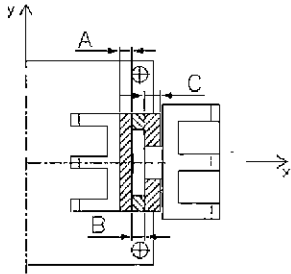


Fig. 4 Definition of control parameter

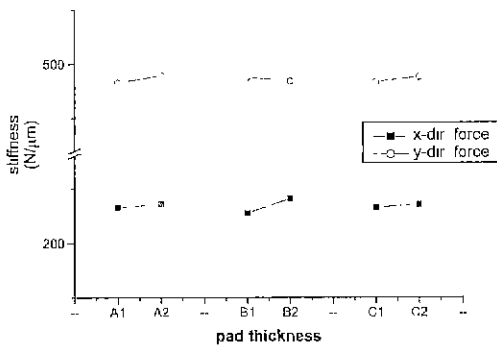


Fig. 5 Result of mean-value analysis

3. 프레스 및 순환계 설계

3.1 프레스 구조의 1차 설계⁽⁵⁾

유압 프레스의 기능 단위는 크게 구조 부분과 유압회로 부분으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 구입한 기존의 프레스를 최대한 활용하기 위해, 유압 회로 부분은 그대로 사용하고 구조 부분만을 일부 개조하기로 하였다. 이에 따라, 베드 및 하부 지지구조를 그대로 사용하는 대신 베드 측면에는 정압 베어링을 장착할 구조물을 부착하며 이를 보강하는 방법을 채택하였다

FEM을 이용하여 구입한 프레스에 대한 응력 해석을 한 결과, 25kN의 수직 집중 하중에 대해 베드 중심부에서 72.8μm의 변위가 발생하였다. 이러한 정도의 변형은 요구 정밀도에 비해 매우 큰 것이므로, 구조의 변형이 정압 베어링의 직선 운동 안내 기능

에 직접적인 영향을 주지 않도록 하기 위하여, 램-가이드 부분을 베드와 칼럼(column)으로부터 분리 설계, 칼럼은 하중 지지를 담당하고 베어링은 가이드의 역할만을 담당하도록 하였다 Fig. 6은 이러한 구조의 램-가이드 개념도이다

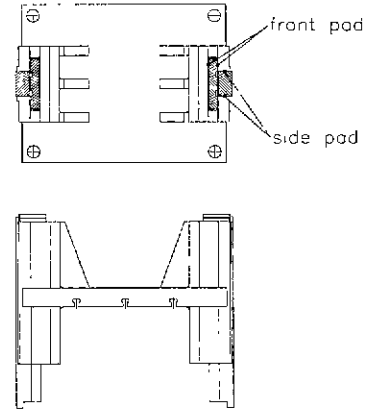


Fig. 6 Ram with hydrostatic bearing guide

또한, 램과 램 홀더간에는 스프링 연결 구조를 채택하여, 램과 유압 실린더간의 수평 자유도는 허용하고 상하 방향으로만 구속하도록 하였다. 이는 램의 수직 방향 직선 운동의 구조 변형과 정렬 오차에 의한 영향을 억제하기 위한 것이다.

이상과 같이 각 기능 단위로 선택된 설계안을 바탕으로 1차 설계의 프레스 전체 layout을 결정하였다 이를 Fig. 7에 나타내었다

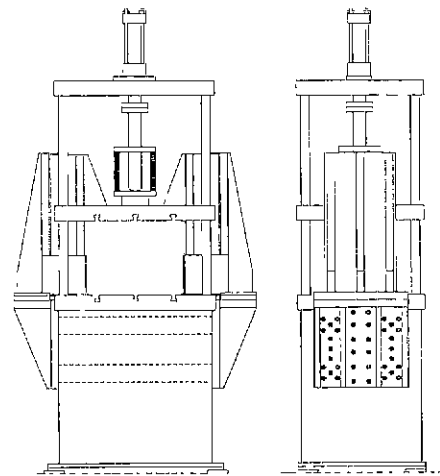


Fig. 7 Press layout (first model)

3.2 프레스 구조 강성 분석⁽⁶⁾

프레스의 정밀성은 가이드로 사용되는 정압 베어링의 성능뿐만 아니라 지지구조의 강성에 의해서도

많은 영향을 받는다. 따라서 프레스 구조의 강성을 측정하여, 필요하다면 지지구조를 보강하여야 한다 이를 검증하기 위하여 정적 해석을 수행하였다.

먼저 설계한 프레스 구조를 간단히 모델링한 후, z축(수직) 방향으로 프레스 용량인 25kN의 집중 하중을 베드 중앙에 가하였다. x와 y축 방향으로, 프레스의 운동 정밀도가 가장 나쁠 것으로 예상되는 비대칭적 전단 가공을 가짐하여, 램의 밑면 중앙과 베드 상면 중앙에 각 6.25kN의 집중 하중을 가하였다 이 수치는, 한 방향 전단의 경우 프레스 구조가 완전 강체처럼 거동한다면 램의 좌저면에 용량의 25%에 해당하는 하중이 걸린다는 연구 결과에서 나온 것이다 x와 y축은 각각 Fig. 7에서 정면으로 보이는 방향과 좌우를 향한 방향이다 해석의 결과를 Table 2에 보인다.

Table 2 Displacement and max. stress by each directional force

	x-dir.	y-dir.	z-dir.
ram	35.5 μm	18.7 μm	113.4 μm
bed	0.7 μm	3.6 μm	-24.3 μm
ram-bed	34.8 μm	15.1 μm	137.7 μm
max stress	6.37 MPa	5.67 MPa	47.7 MPa

해석 결과를 보면, 세 방향 모두 구조의 변형이 정압 베어링의 요구 정밀도에 비해 매우 큼을 알 수 있다 따라서 베어링의 성능을 극대화하기 위해서는 프레스 구조의 강성을 확보하는 것이 중요하다 각각의 하중 조건에 대해 발생하는 최대 응력은 강철의 항복 응력에 비해 상당히 낮게 나타났다

3.3 프레스 구조의 2차 설계

기존 설계로는 정압 베어링의 강성에 비해 프레스 구조가 지나치게 취약한 것으로 판명되었다 새로운 설계에서는 베드와 정압 베어링 설치 부위를 일체형으로 하고, 베드 및 하부 구조의 두께를 증가시켰다 베드 하부 구조 내부에는 십자형으로 보강용 관을 설치하여 구조 강성을 확보하도록 하였다

또한, 기존 설계에서는 램과 베어링 패드를 용접으로 결합하는 방법을 채택하였으나, 이러한 방법으로는 조립 시 정렬 문제가 생길 수 있다는 판단에 따라, 이 부분을 볼트 결합 방식으로 변경하여 조립성 향상을 꾀하였다.

3.4 순환계 설계

정압 베어링의 작동에는 유압이 사용된다. Fig. 8은 채택된 유압회로를 보이며, 펌프와 구동용 모터, 일정한 압력을 유지하도록 하는 릴리프 밸브(relief

valve)와 어큐뮬레이터(accumulator), 불순물을 걸러내기 위한 필터(filter), 솔레노이드 밸브(solenoid valve) 등으로 구성된다

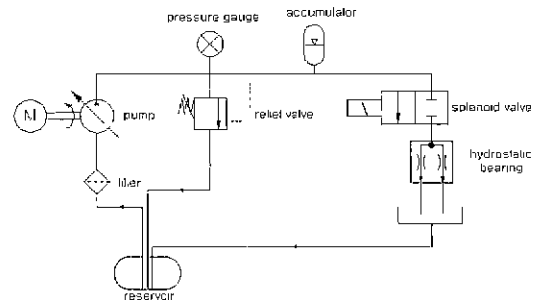


Fig 8 Hydraulic circuit

정압 베어링 시제품의 평가 과정에서, 오일의 순환에 여러 가지 문제가 있음을 발견하였다. 첫째, 배출구와 배출 호스의 크기가 충분하지 않아, 베어링을 통과하여 나오는 오일이 잘 배출되지 못하고 원활한 순환이 이루어지지 않는 현상을 발생하였다 둘째, 고압으로 베어링에 공급되는 오일이 베어링을 통과하여 나오면서 공기 중으로 비산하고, 패드 윗면을 통해 레일 뒤쪽으로 흐르기도 하였다 따라서 순환계를 작업 공간과 완전히 차단시키는 장치가 필요함을 확인하였다.

배출 문제를 해결하기 위하여 간단한 배출 실험을 행하였다 베어링 시제품의 하단에 임시 오일 저장소(oil reservoir)를 설치하고 그 밑면에 1 inch 호스를 연결하여 배출하여 보았다 실험 결과, 이 경우 오일의 공급 속도가 배출 속도의 약 2배가 됨을 확인하였다. 다른 조건이 같다면 유량은 관의 직경의 네제곱에 비례하므로, 필요한 배출 호스의 최소 직경은 약 1.6 inch로 계산되었다 따라서 새로운 설계에서는 베드의 밑면에 배출구를 설치하고 각각의 베어링에 대해 각각 직경 2 inch인 하나의 호스를 통해 배출하여 이를 프레스의 중앙 부분으로 집결, 직경 2.5 inch 호스로 탱크로 이송하는 구조를 채택하였다 Fig 9는 이러한 배출 시스템의 개념도이다

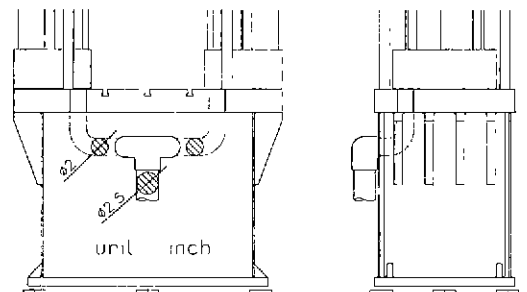


Fig 9 Concept design of drain system

순환계의 외부 차단을 위해서는, 베어링 하단부에 페드 및 레일 부분을 모두 둘러싸는 오일 저장소를 설치하고, 베어링 전체를 자바라로 완전히 밀폐시키는 구조를 채택하였다.

3.5 프레스 layout

이상의 변경안을 바탕으로 두 번째 모델의 프레스 layout을 결정하였다. 이를 Fig 10에 나타내었다. 2차 시제품은 진직도(straightness) 1.0 μ m/100mm, 반복정도(repeatability) 0.2 μ m/100mm의 운동 정밀도를 목표로 하고 있다.

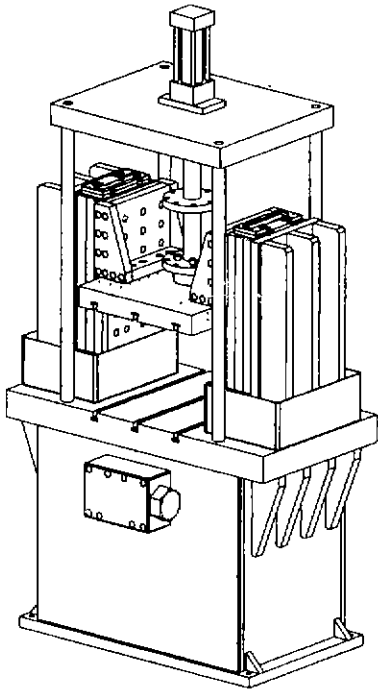


Fig 10 Press layout (second model)

5. 결론

본 연구에서는 초정밀 스탬핑 장치 개발을 목적으로 정압 베어링을 설계, 제작하여 그 성능을 확인하고 이를 바탕으로 프레스를 설계하였다.

정압 베어링은 양면지지 방식을 택하였고, 프레스 가공 시 램에 작용할 수 있는 전후, 좌우의 수평 하중을 모두 지지할 수 있도록 페드를 징면과 측면 모두에 설치했으며, 레일을 T자형으로 설계하였다.

설계안을 바탕으로 직접 정압 베어링의 시제품을 제작하여 레이저 간섭계를 이용하여 강성과 진직정도와 반복정도를 측정하였다.

측정 결과, 정압 베어링은 수직 방향 운동을 가이드하기 위해 충분한 운동 정밀도와 수평 하중을 지지할

수 있는 강성을 나타냈으며 정밀 스탬핑 프레스의 램-가이드로 사용하기에 적합한 것으로 확인되었다.

이러한 정압 베어링 시제품의 성능 평가 및 1차 설계에 대한 FEM 해석의 결과를 반영하고, 성능 평가 시 나타난 여러 가지 문제점들을 개선하여 실제로 제작하게 될 프레스를 설계하였다.

앞으로 설계안을 바탕으로 프레스를 제작하여, 성능을 확인해 보아야 할 것이며, 프레스의 고속 운전에 대한 진동 문제, 연속 작업에 대한 신뢰성 및 안정성 문제, 정압 베어링의 경제성 설계 등이 향후 연구 과제가 될 것이다.

궁극적으로는, 산업 현장에 직접 적용할 수 있는, 상업성을 갖춘 초정밀 스탬핑 장치의 개발이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Chun Hong Park, Eung Sook Lee, and Hu Sang Lee, "A review on research in ultra precision engineering at KIMM". International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 1793~1805, 1999.
- (2) Alexander H. Slocum, Paul A. Scagnetti, Nathan R. Kane, and Christoph Brunner, "Design of self-compensated, water-hydrostatic bearings", Precision Engineering, Vol. 19, 1995.
- (3) 柳井直樹, 羽山定治, 吉山昌節, "水作動液静軸受を用いた直動ステージの研究". 精密工學會誌, Vol. 65, No. 8, 1999.
- (4) 노승국, 이찬홍, 박천홍, "유정압 테이블의 동적 Modelling에 관한 연구". 한국정밀공학회지, 제 15 권 3호, 1998.
- (5) 전상열, 변재호, 함주희, 현소영, 김권희, "정압 베어링을 채택한 미세 스탬핑 장치의 설계", 대한 기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 712~717, 2000.
- (6) 현소영, "다구저 범을 이용한 정밀 프레스 구조의 성능향상에 대한 연구", 고려대학교 대학원 석사학위논문, 2000.