

## 유압실린더내 정압베어링의 특성에 관한 연구

강 형 선\*

(원고접수일 : 2007년 9월 27일, 심사완료일 : 2007년 11월 14일)

### A Study on the Characteristic of the Hydrostatic Bearing in the Hydraulic Cylinder

Hyung-Sun Kang\*

**Abstract :** On designing of hydrostatic bearing, load, quantity of oil, stiffness and friction load are considered as basic characteristics. For the analysis of these basic characteristics, pressure distribution by oil film is obtained. Speed of piston, clearance, leakage of oil, eccentricity, shape and roughness of bearing affect the results which are the analysis of basic characteristics of load, quantity of oil, stiffness and friction load. The relationship among those factors are required for optimum designing of hydrostatic bearing for machining tool. Reynold's Equation is calculated through finite element method. Load, leakage of quantity and pressure distribution as variation of length, land length ratio, eccentricity and axial velocity of bearing are investigated. Then optimum design variables are obtained.

**Key words :** Hydraulic cylinder(유압 실린더), Hydrostatic bearing(정압베어링), Finite element method(유한요소해석), High speed cylinder(고속실린더), Pocket(홈)

#### 기호설명

- $A_L$  : 베어링 Land부 면적 [mm]  
 $A_r$  : 베어링 recess부 면적 [mm]  
 $e$  : 편심량  
 $n$  : recess 수  
 $P_a$  : 베어링주위압력  
 $P_r$  : recess압력  
 $\rho$  : 공기밀도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $P_s$  : 공급압력

#### 1. 서 론

최근 공작기계 및 자동차 시뮬레이터의 이송계의 고속화, 소형화 및 정숙운전에 대한 요구가 엄격해지고 있는 추세이다. 피스톤의 고속운동시 발생하는 마찰저항을 최소화 하기위한 방법 중 하나가 정압 베어링을 사용하는 것으로 정압 베어링은 실린더의 밀봉부위에 고압의 강제윤활막을 형성시켜 피스톤을 항상 실린더의 중심으로 복원되게 함으로서 강제윤활막에 의한 금속간 마찰을 피하게 하여 밀

\* 교신저자(조선이공대 하이테크 CAD CAM, E-mail:hskang@chosun-c.ac.kr, Tel: 062)230-8253)

봉부위의 마멸을 극소화시킬 뿐 아니라 기계적인 접촉이 없으므로 고속운전이 가능케 하는 것이다.

이러한 정압베어링에 대한 연구가 여러 사람들에 의해 진행되어 왔는데 Laurenson<sup>[1]</sup> 과 Etsion<sup>[2]</sup>은 베어링의 정특성과 등속운동시의 특성에 대한 연구를, P. Block<sup>[3]</sup>는 베어링 내부에 오리피스를 두어 베어링 외부로 압력을 공급하여 영구 오일막이 형성되도록 하여 일반적인 베어링과 비교하여 베어링이 저 마찰, 유체 고착방지, 작동 마모 방지에 효과가 있다고 제시하였다.

정압 베어링의 설계에 있어 고려해야 할 기본적인 특성은 부하용량, 유량, 강성, 마찰력 등이며 이를 특성을 해석하기 위해서는 우선 유막에 의해 형성되는 압력 분포를 구할 필요가 있으며, 해석에 영향을 미치는 주요인자들이 피스톤속도, 틈새(clearance), 누설유량, 편심율, 베어링 형상, 표면 거칠기 등이다. 따라서 공작기계 및 각종 유압장치용 정압 베어링의 최적 설계를 위해서는 이들의 복합적인 상관관계를 구하여야 하므로, 본 연구에서는 레이놀즈 방정식에 유한 차분법을 적용하여 베어링 형상과 베어링 랜드비, 베어링 길이, 편심율 및 베어링 축방향의 속도변화에 따른 압력 분포, 부하 용량 및 누유량 등을 해석하여 최적의 부하특성에 맞는 설계인자를 검토하는데 목적을 두었다.

## 2. 이 론

### 2.1 정압베어링의 동작원리

정압베어링은 원리는 틈새  $20\mu\text{m}$  내외의 좁은 간격에 가압된 유체를 외부로부터 강제적으로 공급하여 그 유체막에 의해 부하를 지지하는 것이다. 정압베어링의 역할이 단순히 일정한 부하를 지지하는 것이라면 그 부하와 균형이 맞도록 압력을 공급하면 되나 이것만으로는 부하가 변동할 때의 균형을 맞출 수 없어 부하지지능력이 없어지고 만다. 즉, 변위에 대한 자기조정작용인 강성이 없어지고 만다. 그러므로 강성을 높여주기 위해서는 공급원과 베어링 사이에 유체저항을 줄 수 있는 보상요소(restrictor)를 삽입할 필요가 있다. Fig. 1은 정압베어링계의 기본구성을 등가의 전기회로로 나타

낸 것으로, 회로는 정전압원  $P_s$ , 보상요소저항  $R_r$ , 틈새의 가변저항  $R_1$ 로 이루어지며 회로를 흐르는 전류(유량)  $Q$ 는  $P_s$ 를 공급압  $P_a$ 를 대기압이라면

$$Q_r = \frac{P_s - P_r}{R_r}, \quad Q_1 = \frac{P_r - P_a}{R_1} \quad (1)$$

이 되며 유체가 비압축성인 경우에는  $Q_r = Q_1$ 의 관계를 갖는다.

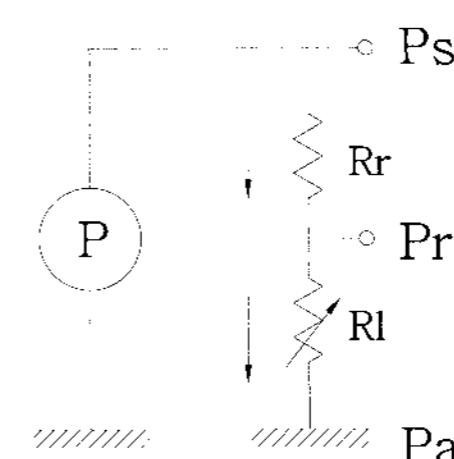


Fig. 1 The equivalent power source of static pressure bearing

## 3. 실험 및 해석

### 3.1 2차원 유동해석 결과

베어링의 격자모델은 Fig. 2에 보인바와 같이 5,000개의 요소(Element)로 분할했으며, 경계조건으로는 입구측 압력은 150 atm으로서 정압상태이며 출구측 압력은 대기압으로 설정 하였으며 작동유의 밀도는  $867.877 \text{ Kg/m}^3$ 이며 점도는  $0.028 \text{ Kg/ms}$  인 VG32를 적용 하였다. 정적해석 결과로 틈새(C)와 랜드부의 길이에 대한 무차원화중과 무차원 강성/유량의 값들을 나타내었다.

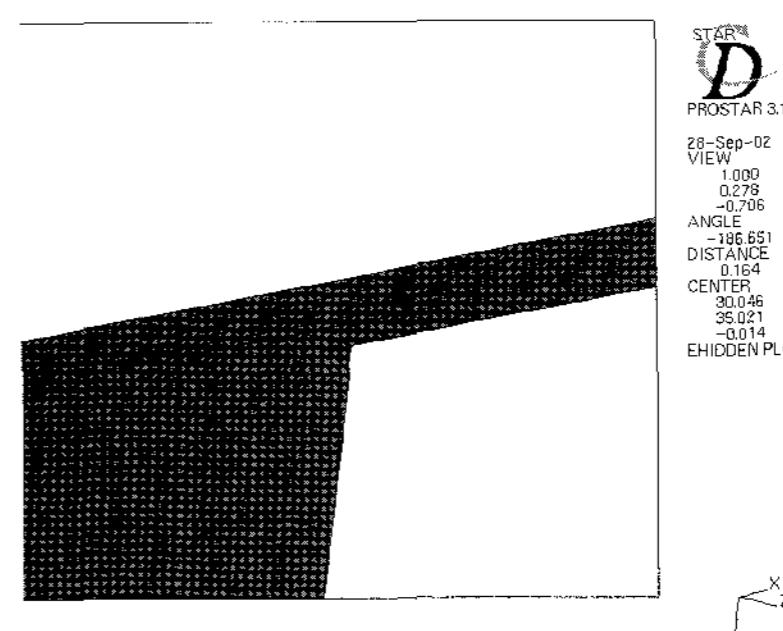


Fig. 2 Mesh of grid structure

실린더에 쓰이는 정압베어링은 반경방향의 외부하중에도 피스톤이 실린더벽과 접촉하지 않게 유막의 압력이 형성되는 특징을 가지고 있다. 따라서 그런 정압베어링의 성능을 보기위해 하중을 도시하였고, 실린더에서 피스톤사이로 유량손실이 생기면 실린더의 효율이 떨어지므로 피스톤사이의 유량손실은 가급적 적은 것이 좋다. 그리고 외부에서 가해진 하중에 대한 저항정도인 강성은 클수록 베어링이 외부하중에 강하게 저항한다는 것을 뜻하므로 강성/유량의 값은 클수록 바람직하다.

Fig. 3, Fig. 4에서는 무차원 하중값은 길이비(Land Length Ratio) 0.7부근에서 최대값을 갖고, 무차원 강성/유량값은 길이비(Land Length Ratio)에 반비례 한다. 즉  $L/L_0=0.6$ 인 경우보다 더 커도, 작아도 효과적인 하중형성이 되지 않음을 알 수 있다.

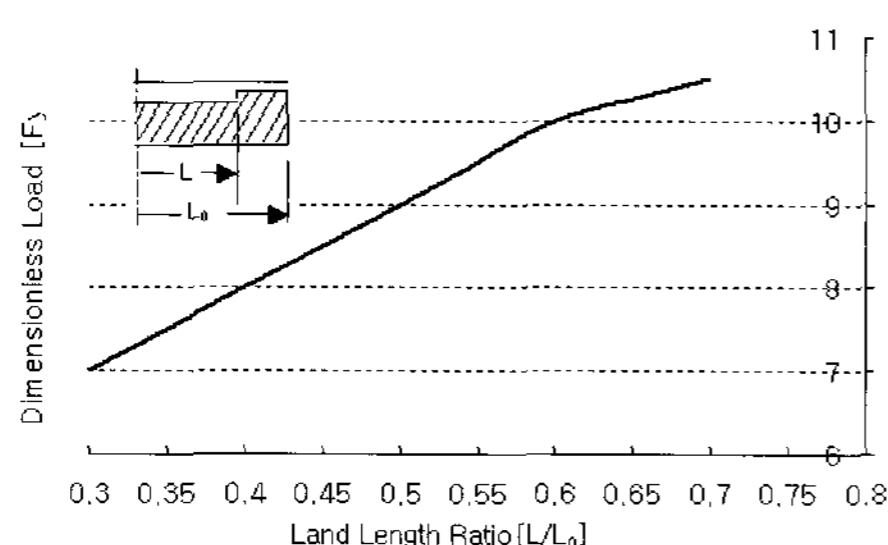


Fig. 3 Dimensionless load vs. land length ratio

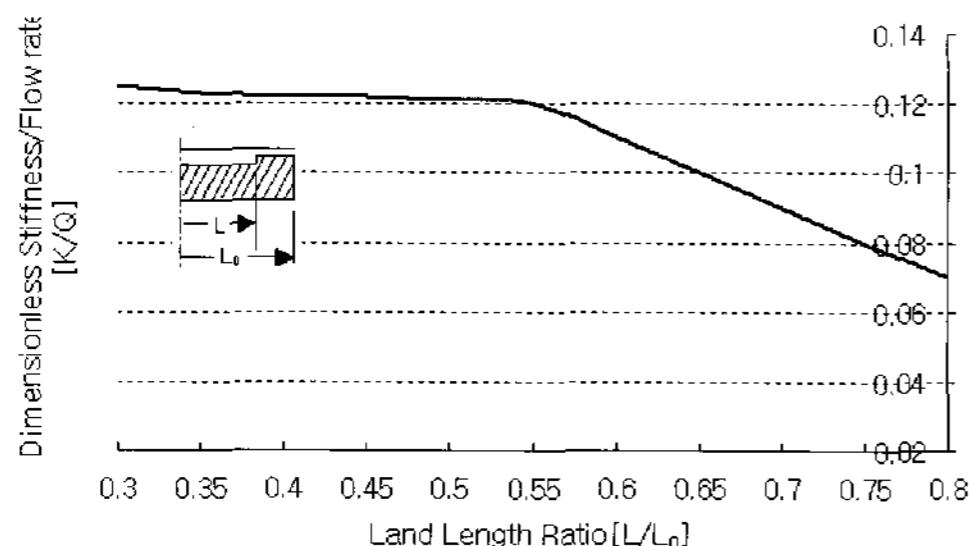


Fig. 4 Dimensionless stiffness/flow rate vs. land length ratio

### 3.2 부하특성

Fig. 5 ~ 6은 축이 직선운동시 각 흄부압력비에서의 편심률에 따른 부하용량을 측정한 결과로써

이론적으로  $\varepsilon < 0.3$ 정도의 범위에서는 설정압력비가 클수록 부하용량은 증가하나 그 이후에는 오히려 설정압력비가 작을수록 점차로 부하용량이 커지는 경향을 보이고 있으며 실험치의 경향과 잘 일치하고 있다. 그 이유로는 베어링의 유량(Q)는 틈새와  $Q = h^3$ 의 관계가 있으므로 설정압력비가 클수록 틈새가 작아지는 쪽, 즉 하부패드에서는 유량이 급격히 감소하여 강성이 상대적으로 크게 감소되며 상부패드에서는 그와는 반대로 설정압력비가 클수록 유량의 증가량은 커지므로 강성은 증가하여 하부패드와 상부패드의 반력차에 의해 결정되는 부하용량은 감소되기 때문이다.

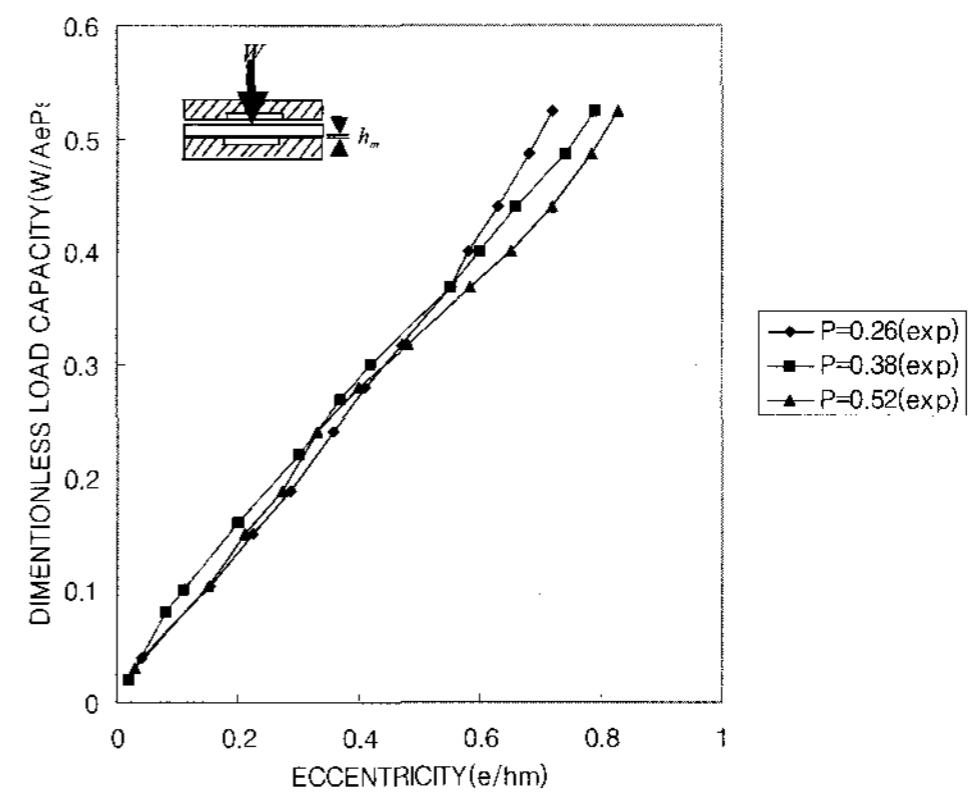


Fig. 5 Dimensionless load capacity versus eccentricity under variation of pressure at linear motion (exp)

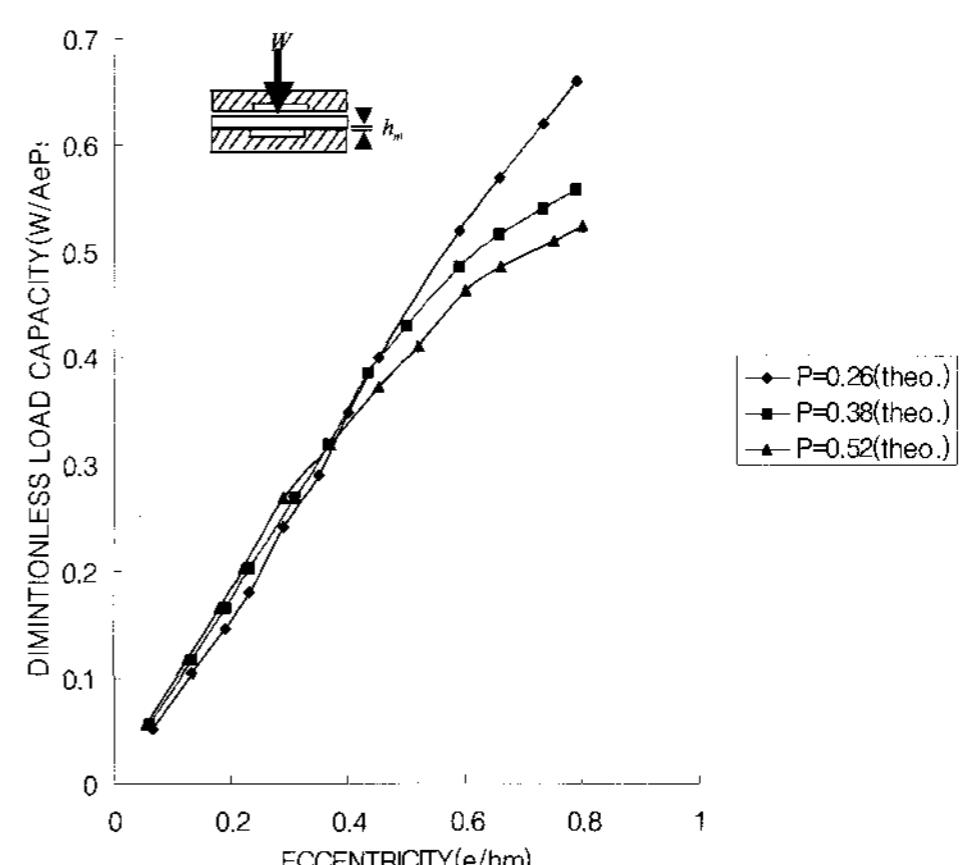


Fig. 6 Dimensionless load capacity vs. eccentricity under variation of pressure at linear motion (cal)

### 3.3 설계적용 및 제작

#### 1) 최대허용 베어링 틈새 ( $h_{max}$ )의 결정

베어링 틈새의 결정에 영향이 큰 요인으로는 펌프동력, 유량, 정강성 등을 들 수 있다. 일반적으로는 틈새가 작을수록 펌프동력, 유량은 감소하며 정강성은 증가하므로 보다 좋은 성질을 얻을 수 있으나 가공가능한 정도 및 요구되어지는 성능을 고려하여 선택하는 것이 바람직하다. 참고로 Rowe<sup>[6]</sup>에 의해 제안된 등급별 베어링 틈새의 추천치를 Fig. 7에 수록하였다.

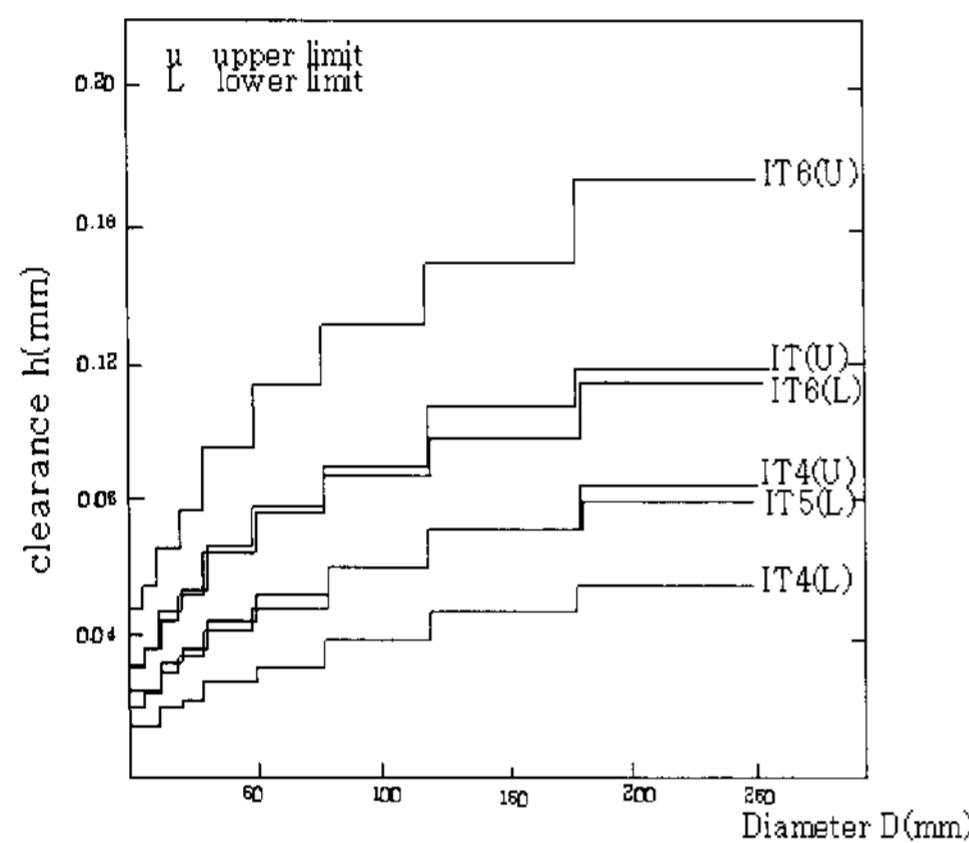


Fig. 7 Classification of hydrostatic bearing

#### 2) 최대공급 허용압력 ( $p_{smax}$ )의 결정

공급압력이 증가할수록 정강성 및 부하용량은 증가하나 이에 따른 펌프동력 유량의 증가, 온도상승 및 유압장치제작의 경제성 등도 고려되어야 한다. 일반적으로는  $20\sim40\text{ kg}/\text{cm}^2$ 의 범위에서 많이 사용되고 있다.

#### 3) 최대허용윤활유 유량 ( $Q_{max}$ )의 결정

실제 시스템에서는 보통 복수개의 정압베어링이 설치되므로 유압 장치 제작상의 한계, 경제성 등을 검토하여 결정할 필요가 있다.

#### 4) 흄 수 ( $n$ )의 결정

흡 수가 증가할수록 축의 편심에 의한 베어링의 부하용량 및 정강성의 구배가 작아 성능향상을 기대할 수 있으나 베어링 치수에 따른 가공의 용량도

를 고려할 필요가 있다. 보통 4개 이상의 갯수로 하되 베어링 내경이 클수록 갯수도 많은 것이 좋다. 본 설계는 4개 흄을 가진 경우를 가정하였다.

#### 5) 공급압력 ( $p_s$ )의 설계

$$P_{sl} = \frac{w}{WBD} \quad (2)$$

$$P_s = \frac{h_{min} K}{BDK} \quad (3)$$

이며  $p_{sl}$ 과  $p_s$  중에서 큰 값을 채용한다. 단,  $p_s$  가 제약조건  $p_{smax}$  보다 큰 경우는 랜드비를 작게하거나 설계조건을 변경해야 한다.

#### 6) 윤활유량 ( $Q$ )의 설계

$$Q = \frac{\overline{B}h_{min}^3 \overline{PP}_s^2}{n} \quad (4)$$

단,  $Q > Q_{max}$ 의 경우에는  $n$  값의 증가 또는 랜드  $C/L$ 의 증가를 고려하며, 그 외의 경우는 설계조건을 변경한다.

#### 7) 펌프동력 ( $N_p$ ), 마찰동력 ( $N_f$ ), 총소비동력 ( $N_t$ )의 설계

$$N_p = P_s \cdot Q = \frac{\overline{B}h_{min}^3 \overline{PP}_s^2}{n} \quad (5)$$

$$N_f = FR \cdot U = \frac{\pi D^3 B_0^2 F}{4h_{min}} \quad (6)$$

$$N_t = N_p + N_f \quad (7)$$

Fig. 8 ~ 9는 편심에 따른 하부패드의 평균 흄 압력의 변화를 측정한 것으로 편심률이 커질수록 각 설정압력비간 차가 작아지는 경향을 보이고 있고 하부패드에서는 설정압력비가 클수록 편심률에 증가에 따라 상대적으로 강성이 크게 감소됨을 확인할 수 있다. Fig. 10은 본 연구에 사용된 정압베어링을 이용한 고속실린더의 외관이다.

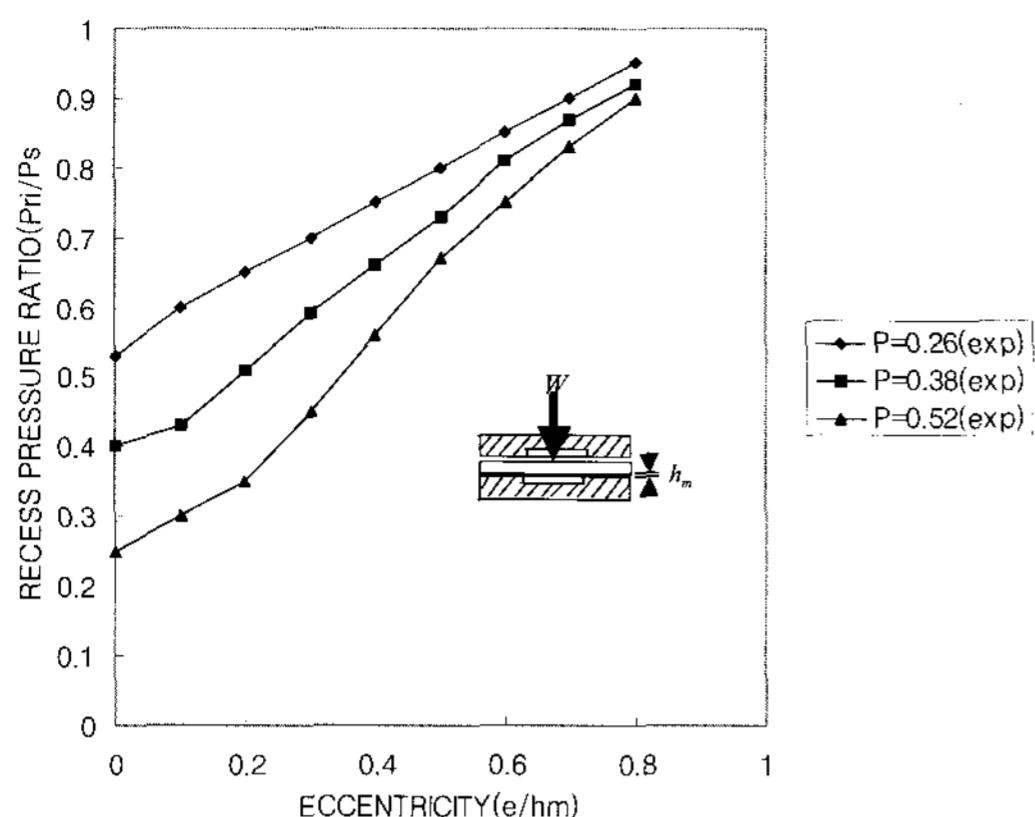


Fig. 8 Pocket pressure ratio vs. eccentricity under variation of pressure ratio at linear motion (exp)

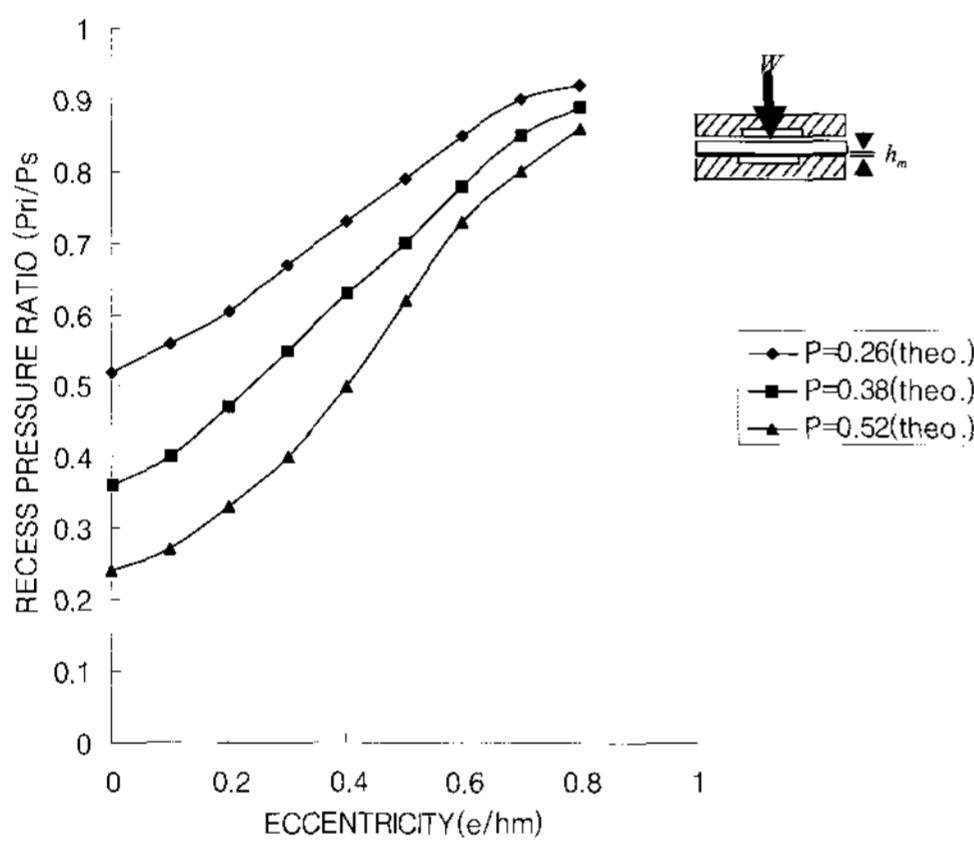


Fig. 9 Pocket pressure ratio vs. eccentricity under variation of pressure ratio at linear motion (cal)

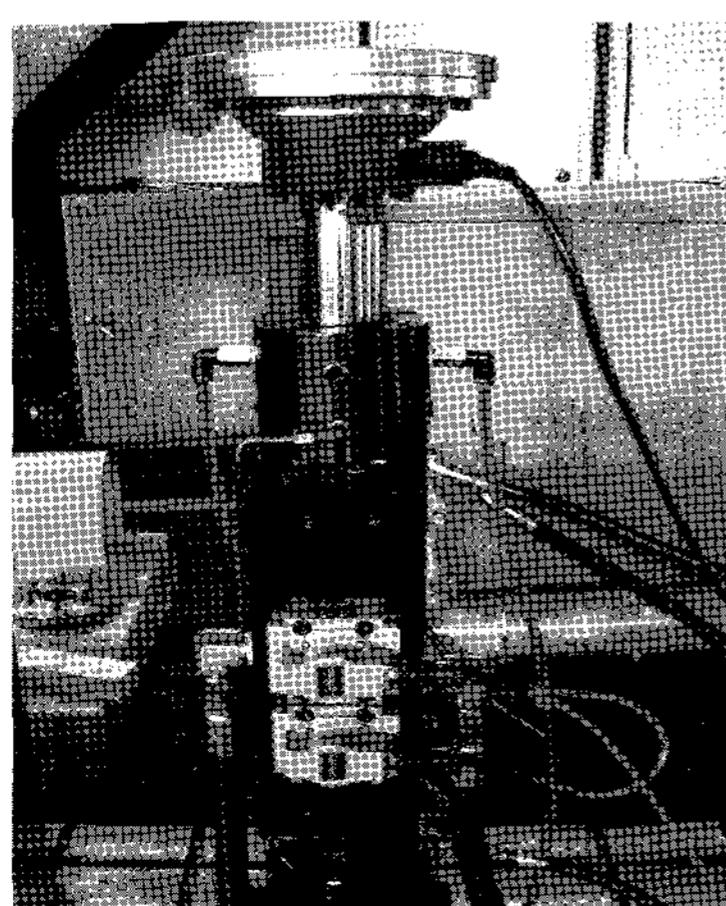


Fig. 10 Photo of high speed cylinder

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유압실린더내의 정압베어링의 정적특성에 대한 설계변수의 영향을 고려하였다. 해석에서는 설계변수들에 대한 무차원 하중과 무차원 유량에 대한 강성의 비를 구하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 해석결과에서 틈새량이 베어링의 특성에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 틈새값이 작은 경우에 무차원하중과 무차원강성/유량의 값이 급격히 커짐을 알 수 있다.

2. 무차원 하중값은 베어링 저어널길이비(Land length Ratio) 0.6부근에서 기울기의 감소가 나타나는 것을 해석결과를 통해서 알 수 있었다.

3. 해석결과 Pocket내에 작용되는 압력 ( $150\text{Kg/Cm}^2$ )의 분포형태는 일정 하였으며, 이론치와 일치하였고 이를 제작된 고속실린더에 적용하였다.

이러한 설계변수들을 적용하여 제작한 2축 타이어 가진장치에서의 실험결과 100Hz 가진범위에서의 축방향하중이 가해졌을 경우의 실험결과와 이론해석의 결과는 매우 일치함을 볼 수 있었다.

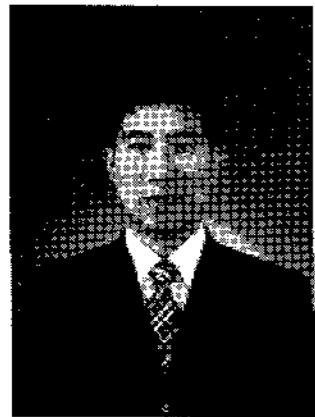
#### 참고문헌

- [1] Laurendon, I. T. and O'Donoghue, J. P., 'Hydrostatic seal design', J.mech. Sci., 1978, 20, 159-167
- [2] I. Etsion, An optimum step design for centring of piston, L. Fluids Eng., Trans.ASME, Dec.1975, 621-624
- [3] Petrus Block. Das Hydrostatische Keilspaltlager. Ph.D.Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1976
- [4] 박태조, "피스톤 현상이 유압피스톤 펌프.모터의 윤활 특성에 미치는 영향", 한국윤활학회지, 제10권 제3호 pp.47~53, 1994
- [5] 황평, 1988, "공기역학 탄성베어링의 정특성 및

동특성에 관한 연구”, 공학박사학위논문, 서울대학교

- [6] W.B. ROWE, 1983, "Hydrostatic and hybrid bearing design" pp. 215~218
- [7] H. YABE, 1972, "Design Method of Hydrostatic Bearing (Incompressible Fluid)", 潤滑, 17-7

## 저자 소개



강형선(姜馨善)

1966년 2월생, 1991년 조선대학교 정밀기계공학과 졸업, 1995년 동 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 2005년 전남대학교 박사과정 졸업(공학박사), 2008년~현재 조선이공대학 하이테크 CAD/CAM과 전임강사