

# 유압 피스톤 펌프/모터의 정압베어링 응답특성 평가

함영복\* · 윤소남\* · 김동수\* · 최병오\* · 김성동\*\*

## Dynamic Response Characteristics Evaluation of Hydrostatic Bearing in Hydraulic Piston Pump/Motor

Young-Bog Ham, So-Nam Yun, Dong-Soo Kim, Byoung-Oh, Choi and Sung-Dong Kim

**Key Words:** Hydrostatic Bearing(정유압 베어링), Hydraulic Piston Pump/Motor(유압 피스톤 펌프/모터), Dynamic Response Characteristic(동적 응답특성), Piston Shoe(피스톤 슈우)

### Abstract

In swash plate type axial piston hydraulic pump and motor, the piston shoe is periodically pressurized with square function shape by supply pressure load as rotation of cylinder barrel. Therefore the recess pressure on bottom part of piston shoe is suddenly increase through orifice in the piston shoe. In this study, we simulated that the frequency response of the recess pressure against with change of supply pressure with analysis tool. Also, we evaluate the dynamic response characteristics of overbalanced hydrostatic bearing with change of the orifice diameter.

#### 기호설명

$A_o$  : 오리피스 단면적[ $\text{cm}^2$ ]

$A_p$  : 피스톤 단면적[ $\text{cm}^2$ ]

$A_e$  : 베어링의 유효 단면적[ $\text{cm}^2$ ]

$b_f$  : 피스톤 마찰계수[ $\text{kgf} \cdot \text{sec}/\text{cm}$ ]

$C_o$  : 오리피스 유량계수

$d_o$  : 오리피스 직경[ $\text{cm}$ ]

$h$  : 유막두께, 피스톤 변위[ $\text{cm}$ ]

$m_p$  : 피스톤 질량[ $\text{kgf}$ ]

$P_s$  : 공급압력[ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ]

$P_r$  : 포켓 또는 리세스(recess)부 압력[ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ]

$P_a$  : 대기압[ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ]

$R_1$  : 포켓의 반경[ $\text{cm}$ ]

$R_2$  : 베어링 외측 반경[ $\text{cm}$ ]

$V$  : 리세스부 체적[ $\text{cm}^3$ ]

$\beta$  : 기름의 압축율[ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ]

$\mu$  : 기름의 점성계수

$\rho$  : 기름의 밀도[ $\text{kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ ]

### 1. 서론

사관식 액셀 피스톤 유압펌프 또는 유압모터 내부 부품들의 상호적인 운동은 유압적으로 힘의 평형을 이루는 상태에서 상대운동하는 부분이 핵심부품이며, 크게 3가지 부분으로 나누어 피스톤 슈우(piston shoe)와 슈우 플레이트(shoe plate) 사이, 밸브 판(valve plate)과 실린더 블록(cylinder block)사이, 피스톤(piston)과 실린더 보어(cylinder bore) 사이 이고 이들에 대한 해석은 윤활이론 또는 정압베어링 설계이론이 핵심 요소기술이며, 정압베어링은 특성상 하중지지 능력이 뛰어나고 고강성 및 정적, 동적 마찰계수가 극히 작아 유압 펌프, 유압 모터, 유압 실린더 등 많은 유압

\* 한국기계연구원 산업기술연구부

\*\* 금오공과대학교 기계공학부 교수

부품의 베어링요소로서 사용이 날로 증가하고 있다. 특히 정압 베어링은 높은 하중 지지력을 가질 뿐만 아니라 저진동 및 높은 댐핑 특성을 가지고 있어 매우 안정된 작동을 할 수 있다.

또한 실제적인 운전조건에서 사판식 유압 피스톤 펌프/모터의 피스톤과 슈우의 조립체는 실린더 블록의 보어 내에서 왕복운동 하면서 공전하게 되는데 이때 피스톤은 구형파(square wave)형태의 고압과 저압을 반복적으로 받게된다.

그 동안 습동부에 대한 유압적 윤회방식의 최적 이론해석<sup>(1)</sup>과 정압 베어링 설계<sup>(2),(3),(5)</sup>, 및 특성시험<sup>(6)</sup>, 유압 피스톤모터용 슬리퍼 패드의 정압 시험에 관한 연구<sup>(7)</sup>, 유압 피스톤 슈우의 정압 균형 특성에 관한 실험적 연구<sup>(8)</sup>등의 많은 연구가 이루어졌으나, 유압 피스톤펌프 및 모터에서와 같이 정압베어링이 동적부하를 받는 상태를 모의하여 응답특성 구하는 것에 대한 많은 연구는 드물다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 동적 부하조건을 모의 할 수 있도록 Fig. 1과 같은 실험회로에서, 이론적인 고찰로부터 모델링하고 구형파의 공급압력이 주기적으로 가압 될 때 피스톤 슈우 저면 부에서의 포켓압력 또는 유막 두께의 거동에 대한 응답특성을 시뮬레이션하고 그 결과를 평가 하고자 한다.

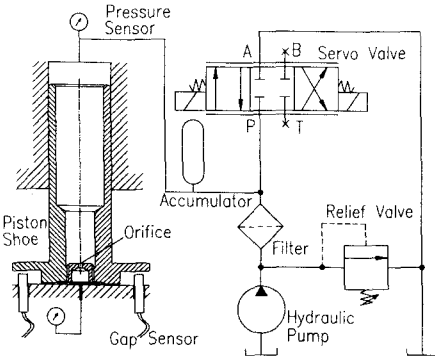


Fig. 1 Circuit diagram of hydrostatic bearing tester

## 2. 정압베어링 이론

### 2.1 기본 구조 및 이론

부하를 가진 상태로 미끄럼운동 하는 부위의 윤회를 위해 작동유의 정압(static pressure)을 가능

한 유효하게 이용하고 부하용량을 크게 하기 위해서 베어링 면에 포켓(pocket) 또는 리세스(recess)를 설치하고, 충격적인 부하변동을 감쇄하기 위해 오리피스를 갖는 일반적인 원판형 정압베어링의 구조는 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

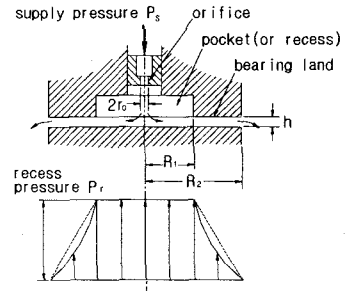


Fig. 2 Circular hydrostatic bearing with simple pocket & orifice

사판식 유압 피스톤 펌프 또는 모터에서 이용되는 피스톤 슈우 조립체를 일반적인 정압베어링 이론으로부터 단순 포켓을 갖는 원판형 정압형(quite balance) 정압베어링<sup>(8)</sup> 형태로 단순화하고 오리피스 직경을 몇 가지로 변화시켜 보기 위해 오리피스 부위만 교환이 가능하도록 설계한 것을 Fig. 3에 나타내었다.

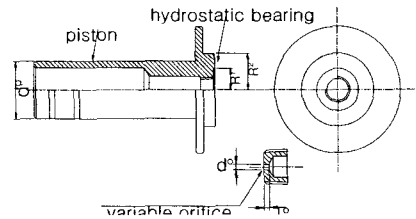


Fig. 3 Simplified piston shoe for test

#### 2.1.1 슈우 베어링 면의 압력분포

윤회유막의 압력분포를 지배하는 방정식은 윤회유의 운동방정식과 연속방정식을 통해 나비에-스토크스(Navier-Stokes) 방정식으로부터 레이놀즈(Reynolds) 방정식으로 유도되며, 지금 Fig. 1에서 베어링 내에서는 정상 점성유동으로 가정하면 압력분포는  $R_1 \leq r \leq R_2$ 의 구간에 대해서

$$p = (P_r - P_a) \frac{\ln(R_2/r)}{\ln(R_2/R_1)} + P_a \quad (1)$$

이며,  $r \leq R_1$ 의 구간에서는  $p = P_r$ 로 된다.

### 2.1.2 슈우 베어링의 부하지지용량

식(1)으로부터의 압력분포를 베어링면적 전체에 걸쳐서 적분하면 부하용량  $W$ 가 얻어지고

$$W = \frac{\pi(R_2^2 - R_1^2)}{2\ln(R_2/R_1)}(P_r - P_a) \equiv A_e(P_r - P_a) \quad (2)$$

으로 되며,  $A_e$ 는 유효 베어링 면적으로

$$A_e = \frac{\pi(R_2^2 - R_1^2)}{2\ln(R_2/R_1)} \quad (3)$$

이지만, 선형 분포로 가정할 경우에는

$$A_e = \frac{\pi(R_1 + R_2)^2}{4} \quad (4)$$

로 단순화 시킬 수 있다.

### 2.1.3 정압 베어링 틈새를 통한 누설유량

부균형 또는 정균형의 슈우의 경우, 틈새가 형성 되지 않으므로 틈새를 통한 누설유량은 없으며, 과균형 정압베어링의 틈새로부터 유출하는 유량  $Q_{out}$ 는 단순히 압력차에 의한 흐름 즉, 포아젤 플로우(Poiseuille flow)로 되어,

$$Q_{out} = \frac{\pi h^3(P_r - P_a)}{6\mu \ln(R_2/R_1)} \equiv \frac{h^3(P_r - P_a)}{\mu} K_B, \quad (5)$$

$$K_B = \frac{\pi}{6\ln(R_2/R_1)}$$

로 된다.  $K_B$ 는 유량특성 계수이며 이것은  $A_e$ 와 같이 베어링 형상만의 함수가 된다.

### 2.1.4 오리피스를 통과하는 유량

정압력 공급형의 정압 베어링에서는 베어링 강성을 얻기 위하여 유압원으로부터 공급라인에 교축 장치(restrictor)라고 불리우는 유체저항기를 설치한다. 오리피스 저항기의 경우 이것을 통과하는 유량은 베르누이(Bernoulli) 방정식으로부터

$$Q_o = C_o \cdot A_o \sqrt{\frac{2(P_s - P_r)}{\rho}} \equiv K_o \sqrt{P_s - P_r} \quad (6)$$

로 되고, 여기서,  $A_o = \frac{\pi d_o^2}{4}$  이고 오리피스 유량 계수는 레이놀즈수에 따라  $Re = 1000 \sim 5000$ 의 값에서  $C_o$ 는 약 0.7~0.8의 값을 갖는다.<sup>(3)</sup> 또한  $K_o$ 는 오리피스 계수이며  $C_o \cdot \frac{\pi d_o^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}}$  로 정의된다.

### 2.1.5 포켓 압력

식(5)와 (6)을 유량의 연속방정식에 의해 정리하여  $P_a \approx 0$ 로 하고  $P_r$ 에 대한 2차방정식을 풀면

$$P_r = \frac{\mu^2 K_o^2}{2 K_B^2 h^6} \left( \sqrt{1 + \frac{4 K_B^2 h^6 P_s}{\mu^2 K_o^2}} - 1 \right) \quad (7)$$

으로 된다.

### 2.2 피스톤운동의 지배 방정식

피스톤부에 공급되는 압력이 임의의 변동은 없으며, 실린더 보어와 피스톤 사이에서의 누설은 없다는 가정하에 피스톤 슈우부에서 오리피스를 통과하는 유량과 베어링 면을 통과해서  $P_a \approx 0$ 로 빠져나가는 누설유량은 식(5), (6)과 연속방정식에 의해

$$C_o \cdot A_o \sqrt{\frac{2(P_s - P_r)}{\rho}} = \frac{P_r \cdot \pi \cdot h^3}{6\mu \ln(R_2/R_1)} + \frac{V}{\beta} \cdot \frac{dP_r}{dt} \quad (8)$$

으로 되고, 갑작스런 압력을 공급받아 피스톤 슈우와 바닥면이 밀착한 상태에서 부하지지용량에 의해 부상(floating)하는 것에 대한 피스톤의 운동 방정식은

$$P_r \cdot A_e - P_s \cdot A_p = m_p \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} + b_f \frac{dh}{dt} \quad (9)$$

으로 되며, 피스톤이 바닥면으로부터 부상하게 되면  $h$ 가 + 값을 갖는 것으로 한다.

$P_r$ 이  $P_s$ 의 변화에 대응하여 어떻게 변하는지를 알아보기 위해 연속방정식 식(8)을 다시쓰면

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{\beta}{V} \left\{ C_o \cdot A_o \sqrt{\frac{2(P_s - P_r)}{\rho}} - \frac{P_r \cdot \pi \cdot h^3}{6\mu \ln(R_2/R_1)} \right\} \quad (10)$$

으로 되며,  $h$ 의 변화를 알아보기 위해 피스톤의 운동방정식, 식(9)를 다시 쓰면

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{1}{m_p} \left( P_r \cdot A_e - P_s \cdot A_p - b_f \frac{dh}{dt} \right) \quad (11)$$

여기에서,  $A_e$ 는 아래의 경계조건에 의해 다르게 적용되도록 경계조건을 부여한다.

$$\begin{aligned} h < 0, & A_e = \pi R_1^2 \\ h \geq 0, & A_e = \frac{\pi(R_1 + R_2)^2}{4} \end{aligned} \quad (12)$$

## 3. 시뮬레이션

### 3.1 입력 정수값

피스톤 슈우에 설치된 오리피스를 통과할 때

$R_e=1000 \sim 5000$  범위의 값을 가지면 대해서  $C_o$  값은 0.7~0.8의 값을 가지며, 크레이쓰(F. Kreith)의 실험식  $C_o = [1.5 + 13.74 (-\frac{L}{DR_e})^{1/2}]^{-1/2}$  으로부터

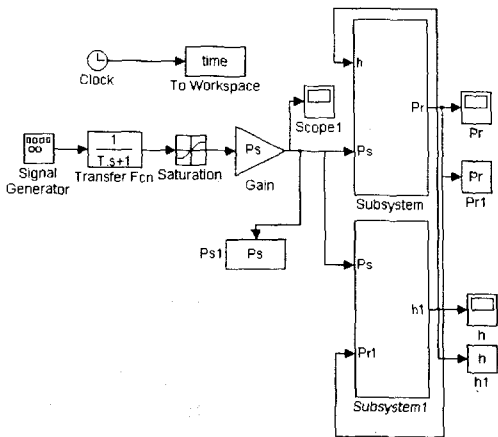
0.64를 얻을 수 있고<sup>(4)</sup>,  $V$  값은 간단히 계산하기 위해 초기 밀착된 상태에서 포켓의 체적을 제어체적으로 하여 계산하면  $V = \pi R_1^2 \times \text{깊이} = 565.49 \text{ mm}^3$ 으로 결정할 수 있으며, 이들 모델링 파라미터를 정리하면 Table 1 과 같다.

Table 1 Parameters and value for simulation

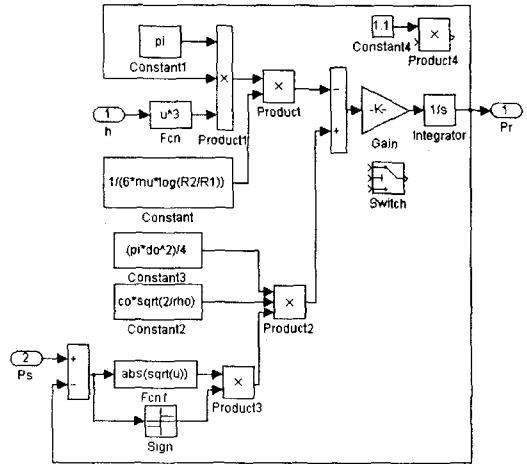
Parameter	Symbol	Value	Unit
damping coefficient	$b_f$	100.0	-
orifice coefficient	$C_o$	0.64	-
orifice diameter	$d_o$	0.10	cm
		0.05	
piston diameter	$d_p$	3.0	cm
mass of piston	$m_p$	0.374	kg <sub>m</sub>
supply pressure	$P_s$	200	kgf/cm <sup>2</sup>
radius of pocket	$R_1$	1.51	cm
radius of shoe	$R_2$	1.90	cm
control volume	$V$	0.5655	cm <sup>3</sup>
bulk modulus	$\beta$	14074.029	kgf/cm <sup>2</sup>
density of oil	$\rho$	$8.5077 \times 10^{-7}$	kgf.sec <sup>2</sup> /cm <sup>4</sup>
absolutely viscosity	$\mu$	$2.7224 \times 10^{-1}$	kgf.sec/cm <sup>2</sup>
dynamic viscosity	$\nu$	0.32	cm <sup>2</sup> /sec

### 3.2 모델링 다이어그램

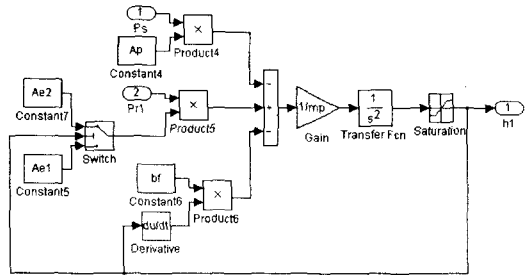
식(10), (11)과 경계조건(12)으로부터 공급압력에 대한 유막두께 변화를 시뮬레이션 하기 위한 모델링 다이어그램은 Fig. 4 와 같다.



(a) Main system



(b) subsystem

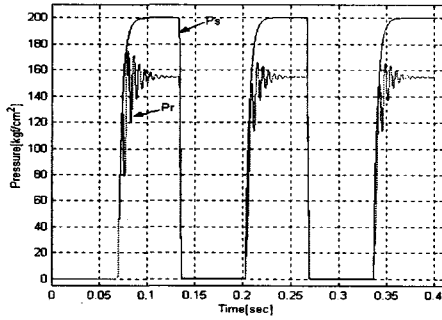


(c) subsystem 1

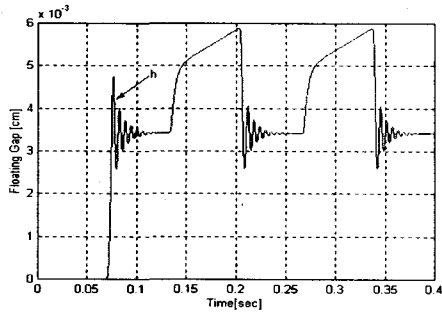
Fig. 4 Block diagram of system modeling

### 3.2 시뮬레이션 결과

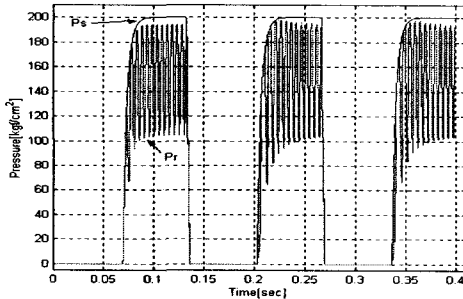
Table 1의 값과  $d_o$ 의 값을 1.0mm과 0.5mm의 경우에 대해서 7.5Hz의 공급압력 주파수로 시뮬레이션 한 결과를 Fig. 5에 나타낸다.  $P_s$  200bar에 대해서  $P_r$ 이 다소 과도응답을 보이지만 곧 안정화되어 공급압력보다 낮은 155bar 정도로 유지되고 있다. 공급압력의 입력파형을 표준 구형파(square wave)로 하지 않고 부드럽게 상승하도록 한 것은 실제 운전조건에 가깝게 하기 위해서이다. 포켓의 반경이 고정된 상태( $R_1=15.1\text{mm}$ )로 오리피스 직경을 1.0mm에서 0.5mm로 변화시켰을 때는 Fig. 5의 (b)와 (c)에서 처럼 더욱 큰 진폭으로 변동하고있지만 평균적으로 20 $\mu\text{m}$ 의 유막이 형성되어 있으며, 오리피스의 직경이 작아지면 응답특성에는 좋은 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 공급압력이 제거되는 순간 피스톤 유유가 최종위치에서 정지해 있는 것이 아니라 60 $\mu\text{m}$ 까지 순간적으로 상승하는 것을 볼 수 있는



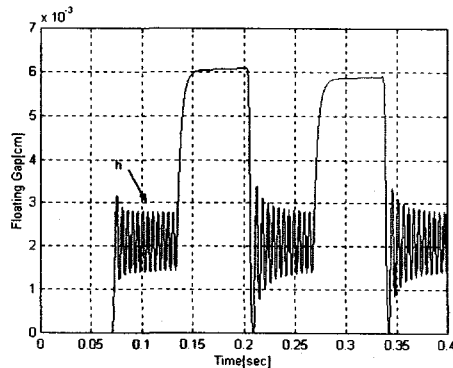
(a) Pressure response ( $R_1=1.51\text{cm}$ ,  $d_o=0.1\text{cm}$ )



(b) Floating gap response ( $R_1=1.51\text{cm}$ ,  $d_o=0.1\text{cm}$ )



(c) Pressure response ( $R_1=1.51\text{cm}$ ,  $d_o=0.05\text{cm}$ )



(b) Floating gap response ( $R_1=1.51\text{cm}$ ,  $d_o=0.05\text{cm}$ )

Fig. 5 Pocket Pressure and Floating Gap response

데 이것은 공급압력이 순간적으로 제거되더라도 포켓압력은 순간적으로 제거되지 않는다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

원판형 정압베어링을 이론적인 해석으로 모델링 하였으며, 정압베어링이 미끄럼운동 하지 않는 정적인 상태에서 주파수 7.5Hz의 공급압력 변화에 대응한 포켓압력은 오리피스 직경 1.0mm 인 경우, 약 50msec의 응답속도와 압력비 ( $P_s/P_r$ )는 0.75로 응답하고 있음을 알 수 있다. 또한 유막두께는 33 $\mu\text{m}$ 로 안정화되어 반응하고 있다. 오리피스 직경이 0.5mm 인 경우에는, 포켓압력이 유막 틈새와 함께 다소 큰 진폭으로 변동하지만 평균적으로 20 $\mu\text{m}$  정도의 유막틈새로 유지됨을 알 수 있다. 이러한 결과를 실제적인 조건하에서 실험적 방법으로 확인하는 것이 중요한 과제라 할 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) T.KAZAMA, A. YAMAGUCHI, 1992, "Optimum Design of Bearing/Seal Parts for Hydraulic Equipment (1st Report, Basic Equipment and Optimum Conditions)", 油壓と空氣壓, 23-6
- (2) W. B. ROWE, 1983, "Hydrostatic and hybrid bearing design" pp. 215~218,
- (3) 青山勝詞郎, 1990, "靜壓軸受-設計と應用-", 工業調査會, pp. 175~177
- (4) Herbert. E. Merritt, 1967, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, New York, pp. 64~173
- (5) H. YABE, 1972, "Design Method of Hydrostatic Bearing (Incompressible Fluid)", 潤滑, 17-7
- (6) 益子正己, 中原綱光, "靜壓案内面の基礎研究, (第2報, 單純 Pocketにする實驗結果)", 日本機械學會論文集, 47-12, pp. 38~316
- (7) 함영복, 김광영, 김형의, 1997, "유압 피스톤 모터용 Slipper Pad의 정압시험에 관한 연구", KSPE 춘계학술대회논문집, pp. 645~649
- (8) 함영복, 조정대, 김성동, 1999, "유압 피스톤 슈우의 정압균형특성에 관한 실험적 연구" KSPE 추계학술대회논문집, pp. 583~587