

유압모터 구면 정압베어링의 마찰특성에 관한 연구

함영복*(한국기계연구원 산업기술연구부), 최영호(금오공대 학원 기계공학부),
김성동(금오공대 기계공학부)

The study on the friction characteristics of spherical hydrostatic bearing for hydraulic piston motor

Young-Bog Ham(Inst. Tech. Dept., KIMM), Young-Ho Choi(Mech. Eng. Dept., KNUT),
Sung-Dong Kim(Mech. Eng. Dept., KNUT)

ABSTRACT

In case of bent axis type axial piston hydraulic pump or motor, hydrostatic bearing used to achieve the lubrication effect on the mechanical sliding contact areas between the following pairs, piston shoe and swash plate, valve plate and cylinder block, piston and cylinder block, etc. In this research, we designed two pairs of spherical ball joint in witch connecting rod piston end. The one is not hydrostatic bearing, the other is designed with spherical hydrostatic bearing in point of view minimum pumping power loss. By varying supply pressure on the piston, we can know that it is possible to reduce the friction torque by using hydrostatic bearing designed one. Finally, by comparing the results of driving torque between the two models, it was verified that the spherical hydrostatic bearing is well designed.

Key Words : spherical hydrostatic bearing(구면 정압 베어링), bent axis type(사축식), hydraulic motor(유압모터), piston shoe(피스톤 슈우), friction torque(마찰 토크), connecting rod(커넥팅 로드)

1. 서론

최근에 들어와서 유압 펌프 및 모터는 고성능화 되어 가는 추세이며, 이에 정압 베어링의 역할은 한층 더 높아졌다. 정압베어링은 특성상 하중지지 능력이 뛰어나고 고강성 및 정적, 동적 마찰계수가 극히 작아 유압 펌프, 유압 모터, 유압 실린더 등 많은 유압 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. 이에 정압 베어링은 유압 부품뿐만 아니라 공작기계, 레이더용 안내나, 터어빈 발전장치, 압연기, 베어링 시험기 등 초정밀 가공기계, 정밀 산업 기계 등에 널리 사용되어지고 있다. 특히 구면 정압 베어링은 사축식 액셀 피스톤 펌프와 모터에서 주로 사용되어진다.

유압펌프 또는 모터 내부 부품들의 상호적인 운동은 유압 평형을 이루는 상태에서 습동되는 부분이 핵심이고, 그 동안 습동부에 대한 유압적 윤활방식

의 최적 이론해석^(1,2)과 정압 베어링 설계⁽³⁾, 및 특성시험⁽⁴⁾, 유압 피스톤모터용 Slipper Pad의 정압 시험에 관한 연구⁽⁵⁾, 유압 피스톤 슈우의 정압 균형 특성에 관한 실험적 연구⁽⁶⁾등의 많은 연구가 이루어졌다.

유압 피스톤 펌프/모터의 내부 습동 부분을 크게 3가지 부분으로 나누어 피스톤 슈우(piston shoe)와 슈우 플레이트(shoe plate)사이, 밸브판(vaive plate)과 실린더블록(cylinder block)사이, 피스톤(piston)과 실린더 보어(cylinder bore)사이이고 이들 모두의 윤활상태의 해석은 정압 베어링 설계이론이 핵심 요소기술이다.

본 연구에서는 일반적인 정압베어링 이론으로부터 가장 단순하고 기초적인 구면 정압베어링의 마찰특성에 대한 실험을 위해 이론토크와 공급압력과 전기 모터의 구동 회전수 변화에 따른 실제 측정 회전토크를 비교 분석함으로써 커빅팅 로드형 피스톤에서 구면 정압베어링의 마찰특성을 연구 하고자 한다.

2. 기초이론

2.1 커넥팅로드형 피스톤 운동 메카니즘

Fig. 1은 피스톤이 왕복운동을 하고 실린더 보어를 따라 운동할 때 실린더 블럭 1회전에 2번 자전을 하며 그 궤적은 그림과 같이 원뿔 모양으로 약 2°의 각으로 공전 운동을 한다 이것을 지연각(β)이라 하면 사축식의 회전경사각이 클 질수록 지연각은 증가한다.

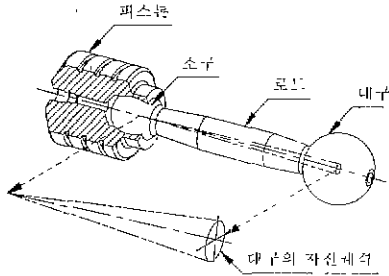


Fig. 1 Movement of the connecting rod mechanism

2.2 구면 정압 베어링의 설계

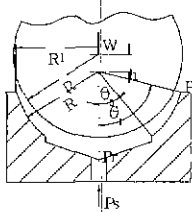
정압베어링 시스템에 있어서, 정압 베어링에 윤활을 위해 유압을 공급하게되고 이때 소비되는 동력을 펌프동력이라 하면, 정압베어링이 구동될 때 윤활 유막의 점성마찰저항에 기인하여 소비된 동력은 마찰동력으로 정의할 수 있다. 펌프동력과 마찰동력의 합은 총합 소비동력이 되며 그 크기는 베어링의 온도 상승에 직접적인 영향을 미친다.

2.2.1 펌프소비동력

고압의 윤활유를 베어링에 공급하기 위해 필요한 펌프동력은 윤활유 유량과 공급압력의 곱으로서 다음 식으로 나타낼 수 있다

$$N_P = \frac{Q_{out}(P_r - P_a)}{\eta} \quad (1)$$

여기서 Q_{out} 는 연속방정식을 이용하여 포켓으로부터 베어링 틈새를 통과해서 베어링 외부로 흐르는 윤활유 유량으로 나타낼 수 있고, η 는 펌프의 효율이다.



Parameter	Model	SPH 1	SPH 2
D_{s1} [mm]		17.0	17.0
D_{s2} [mm]		12.5	12.5
D_{b1} [mm]		0	12.0
D_{b2} [mm]		0	8.8
D_0 [mm]		2.5	2.5

Fig. 2 Designed spherical hydrostatic bearing

Fig. 2에 나타난 구면 정압베어링에 대해서 펌프동력 N_P 를 베어링 형상과 관계된 펌프동력에 비례하는 펌프동력계수 C_{NP} 로 정의하면

$$C_{NP} = \frac{K_B}{\bar{A}_e^2} \quad (2)$$

여기서 K_B 는 베어링 형상계수이고, \bar{A}_e 는 유효 베어링 면적비 이고 여기서,

$$A_e = \frac{\pi R^2 (\tan^2 \theta_1 - \tan^2 \theta_0)}{\tan^2 \theta_1 - \tan^2 \theta_0 + 2 \log(\tan \theta_1 / \tan \theta_0)} \quad (3)$$

$$K_B = \frac{\pi}{3 \{ \tan^2 \theta_1 - \tan^2 \theta_0 + 2 \log(\tan \theta_1 / \tan \theta_0) \}} \quad (4)$$

펌프동력 N_P 를 최소화 하는 최적포켓의 크기는

$$C_{NP} \text{를 } \varphi = \frac{\tan \theta_0}{\tan \theta_1} \text{로 편미분하여,}$$

즉 $\frac{\partial C_{NP}}{\partial \varphi} = 0$ 를 만족하는 φ 값을 구하면 된다 조건을 만족하는 방정식은

$$\varphi^2 \log \varphi + \frac{1}{\varphi} (1 - \varphi^2) - \frac{1}{\varphi} (1 - \varphi^2) \varphi^2 \tan^2 \theta_1 = 0$$

으로 되고 이것을 Fig 3의 형상을 갖는 피스톤

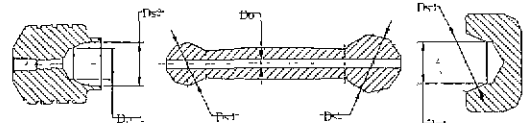


Fig 3 Configuration of the hydrostatic bearing

측(소구) 구면베어링에 대하여 위의 방정식을 풀기 위해 $\theta_1 = 89^\circ$ 로 결정하면 $\varphi = 0.017442$ 를 얻을 수 있고, $\theta_0 = 44.97^\circ$ 를 얻을 수 있다 이것을 그래프로 나타내면 Fig 4와 같다.

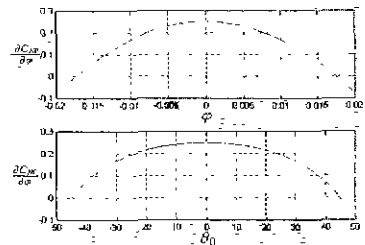


Fig. 4 Pocket size data to minimum power loss 이 결과로부터 구면 베어링의 치수를 계산하면

$$R = D_{s2}/2 = 6.25 \text{ mm}$$

$$R_1 = R \sin \theta_1 = 6.2490 \text{ mm}$$

$$D_{F2} = 2R \sin \theta_0 = 8.8 \text{ mm}$$

또한 같은 방법으로 구동축 디스크축(대구)의 구면베어링에 대하여

$$R = D_{s1}/2 = 8.5 \text{ mm}$$

$$R_1 = R \sin \theta_1 = 8.4987 \text{ mm}$$

$$D_{F2} = 2R \sin \theta_0 = 12.0 \text{ mm}$$

이 결과를 정리하면 Fig. 2의 표에서 SPH 2와 같고 SPH 1은 정압베어링 개념 없이 설계된 모델이다

2.2.2 마찰소비동력

베어링 접촉면이 직선운동 하는 경우를 고려하여 베어링이 운동을 위해 소비되는 마찰동력은 구동력 F 와 운동속도 v 로 다음과 같이 정의된다

$$N_f = F \cdot v \quad (5)$$

여기서 구동력 F 는 윤활유막의 점성저항에 기인 하기 때문에

$$F = \mu A_f \frac{v}{h} \quad (6)$$

μ 윤활유의 점도

A_f , 베어링 면의 유효 마찰면적이다

h , 유막두께

으로 되며 원판형 정압베어링에서 회전하는 경우를 고려하면

$$N_f = \frac{\pi \omega \mu R_1^3}{2h} \left\{ 1 - \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^4 \right\} = \frac{\mu \omega^2 R_1^4}{h} C_M \quad (7)$$

여기서 C_M 는 원판형 정압베어링에서의 마찰동력 계수로 베어링 형상만의 함수로 정의되고

$$C_M = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^4 \right\} \quad (8)$$

가 되며, 마찬가지로 방법으로 Fig 6 와 같은 구면 정압베어링에 대해서 C_M 를 정의하면

$$C_M = \frac{2\pi R_1^4}{R_1^4} \left\{ \frac{1}{2} (\sin^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_1) + \log \left(\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_1} \right) \right\} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다

2.2.3 이론구동토크

사축식 유압펌프에서와 같은 조건으로 구성된 실험장치에 있어서 피스톤 1개의 힘에 의해 발생되는 구동토크를 계산하기 위해 Fig 5와 같이 토크를 발생에 기인하는 힘(F_y)을 고려할 수 있고,

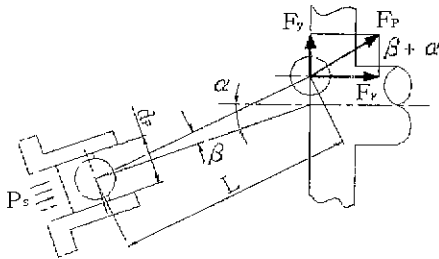


Fig 5 Driving torque analysis model

구동토크 T_a 는

$$T_a = F_y \cdot r_a \quad (10)$$

$$F_y = \frac{\pi d_p^2}{4} (\sin \alpha + \beta) \quad (11)$$

$$r_a = L \cos \alpha \cdot \tan(\alpha + \beta) - L \sin \alpha \quad (12)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig 6 에 나타난 바와 같이 실제 유압피스톤 펌프 또는 모터에 사용되는 커넥팅 로드형 피스톤 1개를 실제 사축식 유압펌프에서의 운동 조건에 부합되도록 구동축과 20°의 각도를 이루게 하고 커넥팅로드가 지연각에 해당하는 만큼의 원뿔운동 하도록 2°의 각도로 구동축 중심에 대해 편위 되도록 설치하였다

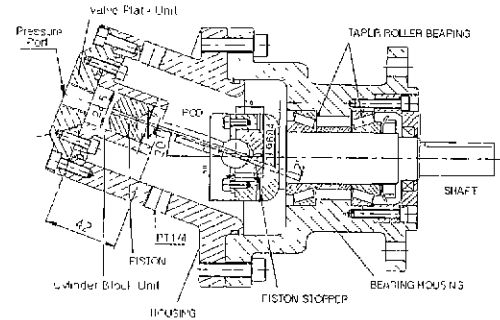


Fig. 6 Schematic of spherical hydrostatic bearing tester

본 연구에서 비교실험 하기 위해 Fig. 2 에 나타난 구면 조인트에 대해 표 에 나타난 바와 같이 두가지 모델을 설계 및 제작하였다 모델 SPH 1은 커넥팅로드 양측 구면접촉부에 정압베어링의 개념의 포켓(pocket)이 없고 중앙급유 동로가 없게 가공된 것이며, 모델 SPH 2는 유압펌프소비동력 최소의 조건에 의해 포켓의 크기를 결정하여 정압베어링 형태로 설계 및 가공된 것이다.

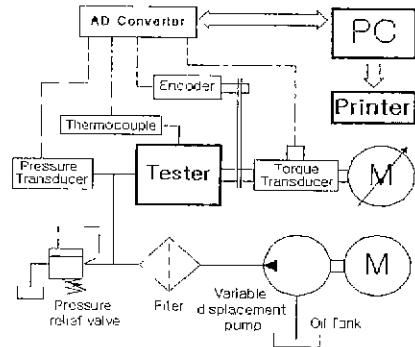


Fig 7 Block diagram of experimental equipment

두 모델에 대한 동력소비에 따른 마찰열에 의해 상승되는 유온을 비교하기 위해 Fig 7에 나타난 바와 같이 온도센서를 시험장치 하우징에 설치하였고, 피스톤에 공급되는 압력 측정을 위하여 압력센서를 취부 하였다 또한 구동 회전수와 토크를 측정하기 위해 입력 회전수 센서와 토크센서를 설치하였다. 이러한 센서들로부터의 값을 데이터 획득장비에 의해 측정하여 데이터를 저장할 수 있는 장치로 구성하였으며, 실험에 사용된 기자재의 사양을 Table 1에

나타내었다

Table 1 Specifications of experimental instruments

Item	Spec	Maker	Type	Model No	Remark
Electric Motor		LG Industrial System	AC vector Motor	V15HK1KUM	SN 8120001
Hydraulic Pump		Vickers	Axial Piston	PVB10	Max Pres 210bar
Relief Valve		Nachi	Manual	RT06	Max Pres 210bar
Torque Sensor		Sensor Development	Strain-Gauge	01224-023	SN 171796 2000lb in
Pressure Sensor		Sensys	Strain-Gauge	PMSA0200KAAA	0-200kgf/cm ²
Speed Sensor		Autonics	두과형	BUD-30S	회전속도 반출타이머
Thermocouple		Autonics	PT100 Ohm	PT100	Analog Output
Data Acquisition		Leeroy	Digital Oscilloscope	9314AM	4 channel

3.2 실험방법

Table 2의 조건으로 두 가지 모델을 동일 조건하에서 교체하면서 일정회전속도에 대해 단계별 공급압력변화에 따른 회전토크를 측정하고, 아울러 일정공급압력에 대해 각 단계별로 회전수를 증가시키면서 회전토크를 측정하여 기록한다

Table 2 Experimental condition

Experimental Condition	Range
Supply Pressure [kgf/cm ²]	0 ~ 70
Rotating Speed [rev/min]	200 ~ 1300
Room Temperature [°C]	10 ~ 15
Operating Oil	ISO VG32

4. 실험결과

4.1 공급압력 상승에 따른 회전토크측정

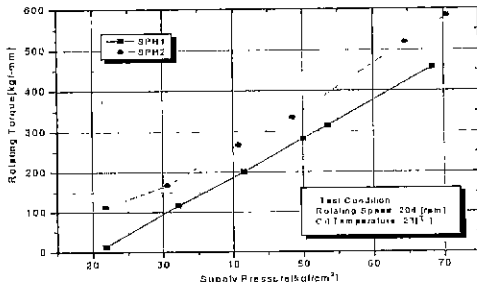


Fig. 8 Torque characteristics for supply pressure (rotating speed = constant)

4.2 회전속도 상승에 따른 토크측정

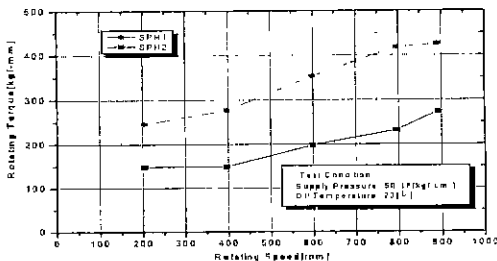


Fig. 9 Torque characteristics for rotating speed (supply pressure = constant)

4.3 결과검토

한 개의 피스톤에 대해서 구면 조인트에서의 마찰저항 토크를 측정하였으나, 운동부 전체가 작동유에 의해 잠겨져있어 슬리퍼부에서의 마찰저항이 매우 미소한 값으로 측정되었고, Fig 8에서 나타난 비외 같이 공급압력이 포켓에 전달되는 구조의 모델 SPH 2의 경우, SPH 1에 비해 회전토크가 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다

또한 일정압력조건에서 구동회전수를 증가시키면서 두 가지 모델에 대한 회전토크를 측정한 결과 Fig 9에서 나타난 바와 같이, 압력증가의 경우보다 동압효과에 의해 더 큰 차이로 SPH 1의 마찰토크가 증가함을 알 수 있다

4. 결론

- 1) 구면 정압베어링을 소비동력 최소의 조건, $\phi=0.017442$ 으로 되는 SPH 2모델을 설계하였으며, 이 모델의 경우 부하조건에 대해서 SPH 1모델에 비해 다소 낮은 마찰손실이 있음을 알 수 있다
- 2) 구면 정압베어링을 적용하지 않았을 경우 공급압력이 높아짐에 따라 회전구동 토크가 증가하여 마찰열에 의한 온도상승으로 나타났다
- 3) 유압피스톤펌프/모터의 커넥팅 로드형 피스톤의 구면 조인트에서의 윤활특성을 실험할 수 있는 실험장치가 구성되었다

참고문헌

- 1 T.KAZAMA, A. YAMAGUCHI, Optimum Design of Bearing/Seal Parts for Hydraulic Equipment (1st Report, Basic Equipment and Optimum Conditions), 油壓と空氣壓, 23-6, 1992
- 2 H. YABE, Design Method of Hydrostatic Bearing (Incompressible Fluid), 潤滑, 17-7, 1972
- 3 益子止巳, 中原綱光, 靜態案内面の基礎研究, (第2報, 單純 Pocketにする實驗結果), 日本機械學會論文集, pp.38~316, 47-12
- 4 함영복, 김광영, 김형의 "유압 피스톤 모터용 Slipper Pad의 정압시험에 관한 연구" 한국정밀공학회지 춘계학술대회논문집 pp.645~649, 1997
- 5 함영복, 조정대, 김성동 "유압 피스톤 슈우의 정압 특성에 관한 실험적 연구" 한국정밀공학회지 추계학술대회논문집 pp 583~587, 1999
- 6 W. B. ROWE, "Hydrostatic and hybrid bearing design" pp.187~194, 1984
- 7 Herbert E. Merritt "Hydraulic Control Systems" pp.6~75