

로드형 피스톤의 왕복운동 저항력 측정실험

함영복*, 박경민(한국기계연구원), 김성동(금오공대 기계공학과), 최병오(한국기계연구원)

Measuring Experiment of Resistance Force on a Reciprocating Motion of Rod Type Piston

Y. B. Ham, K. M. Park(KIMM), S. D. Kim(Mech. Eng. Dept., KNTU), B. O. Choi(KIMM)

ABSTRACT

To reduce lateral force of traditional plunger type piston in the swash plate type hydraulic piston pumps and motors, we have proposed rod type piston with ball joint on both ends. We have studied the theoretical reaction force on two types of piston moving in the cylinder block bore, and made an experiment for the resistance force measurement on a reciprocating motion of plunger and rod type piston, changing the test condition such as swash plate angel and supply oil pressure and so on. As a result, a rod type piston has more smaller resistance force, about 29%, than a plunger type one.

Key Words : Hydraulic Piston Pump/Motor(유압 피스톤 펌프/모터), Plunger Type Piston (플런저 피스톤), Rod Type Piston (로드 피스톤), Lateral force (측력), Resistance Force(저항력)

1. 서론

유압 피스톤 펌프·모터에 있어 고압화·고출력화에 대한 요구에 부응하기 위한 방안으로 구조적 설계 변화와 마찰력 감소를 비롯한 윤활 조건을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 사판식 피스톤 모터(swash plate type piston motor)의 경우는 사판(swash plate) 경사각을 크게 함으로써 컴팩트한 구조와 높은 출력밀도를 실현시킬 수 있으나, 피스톤 슈우(piston shoe)의 요동운동에 따른 공간 확보 등과 같은 구조적 한계뿐 아니라, 회전력을 전달하는 메커니즘에서 발생하는 플런저형 피스톤과 실린더블록 보어(cylinder block bore) 내면의 접촉에 의해 야기되는 집중하중과 같은 제한을 받게 된다. 특히, 실린더블록과 플런저형 피스톤 사이에 발생하는 마찰력 해석에 대한 연구는 활발히 진행중이나, 모터 구동시에 플런저형 피스톤에서 발생하는 측력(lateral force)에 대한 이론적인 해석 및 실험¹⁻³⁾과 플런저형 피스톤 옆면에 그루브(groove)나 포켓(pocket) 가공 등을 통한 윤활조건 향상에 관한 연구⁴⁻⁶⁾ 등이 대부분이다. 한편, 본 연구에서는 피스톤에 작용하는 집중하중을 줄이고, 보다 큰 경사각을 실현하기 위한 방법으로써, 기존 플런저형 피스

톤 구조를 탈피하여 양쪽 끝단부가 구면 볼 조인트(spherical ball joint)로 구성된 로드형(rod type) 피스톤을 제안하였으며, 각 피스톤의 왕복운동 저항력을 측정하여 서로 비교함으로써 로드형 피스톤의 측력(lateral force)의 저감효과를 확인하고자 한다.

2. 작용력 해석

실린더 블록 보어 내를 왕복운동하는 피스톤은 3차원 공간상에서 운동을 하므로 힘의 작용을 정확하게 해석하는 것은 매우 복잡하나, 본 연구에서는 해석의 편의를 위해서 다음과 같은 가정과 해석 방법을 적용한다.

a. 피스톤과 각 기구에 작용하는 유압력에 비교하여 각 부품의 질량효과는 상대적으로 작으므로 질량 관성력은 무시한다.

b. 정압베어링 부위의 마찰력에 관한 정확한 해석은 피하고 정성적으로만 분석한다.

기존에 사판식 유압 모터에 주로 이용되고 있는 플런저형 피스톤은 피스톤 슈우가 경사진 사판의 표면을 미끄러져 운동함에 따라 플런저의 몸체부가 틸팅(tilting)되면서 실린더 블록에 회전력을 전달하는 구조이며, Fig. 1은 플런저형 피스톤의 자유물체

도를 나타낸다.

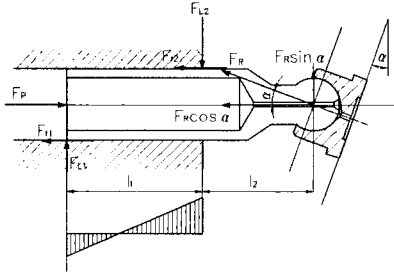


Fig. 1 Free body diagram of plunger type piston

피스톤에 작용하는 측력 F_{l1} 과 F_{l2} 를 알아보기 위해 모멘트 평형을 고려하면

$$F_{l1} = \frac{l_2}{l_1} F_R \sin \alpha \quad (1)$$

$$F_{l2} = \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right) F_R \sin \alpha \quad (2)$$

로 되고, 피스톤 운동 방향으로의 힘 평형을 고려하면,

$$F_p = F_{f1} + F_{f2} + F_R \cos \alpha + \mu_f \pi d_p l_1 \frac{v_p}{h_p} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 F_{f1} 과 F_{f2} 는 측력 F_{l1} 과 F_{l2} 에 의해 발생하는 마찰력이며, 플린저형 피스톤의 경우 틸팅될 때 집중하중이 적용되는 경우

$$F_{f1} = C_{df} \cdot F_{l1} \quad (4)$$

$$F_{f2} = C_{df} \cdot F_{l2} \quad (5)$$

로 된다.

여기서, C_{df} 는 피스톤 측면과 실린더 내면 사이의 고체마찰계수를 의미하고, μ_f 는 유압유의 점도, l_1 은 접촉부의 피스톤 길이이며, h_p 는 피스톤과 실린더 보어 사이의 평균 틈새크기, v_p 은 피스톤의 왕복 속도이다.

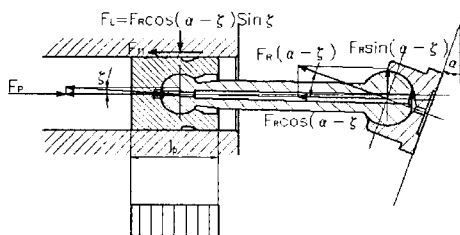


Fig. 2 Free body diagram of rod type piston

Fig. 2 는 로드형 피스톤의 작용력을 나타내는 자유물체도이며, 피스톤 측면 방향으로의 측력 F_L 의 크기를 알아보기 위해 D 점에서 받는 반력 F_R 로 인해 C 점에서 발생하는 반력과 유압력 간의 힘 평형을 고려하면

$$F_p = F_R \cos(\alpha - \xi) \cdot \cos \xi + \mu_f \pi d_p l_1 \frac{v_p}{h_p} \quad (6)$$

여기서, α 는 사판의 경사각, ξ 는 로드와 틸팅각, l_p 는 피스톤의 길이이다. 이때, 측력 F_L 은

$$F_L = F_R \cos(\alpha - \xi) \cdot \sin \xi \quad (7)$$

로 되며, ξ 는 사판각이 20~40° 인 유압 모터에서 일반적으로 1~2° 의 변위를 가지므로 피스톤의 측면에 작용하는 측력은 피스톤이 틸팅되지 않으므로 짧은 피스톤 전체 길이에 분포하중으로 작용하며 그 양도 작은 값이므로, 이 경우에 사판각을 더욱 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다.

3. 실험방법 및 장치

3.1 실험방법

각 형식의 피스톤에 대해 일정한 경사각으로 기울어진 실린더 블록 보어 내를 왕복 운동 하는 조건을 부여하고, 이때의 운동저항력을 측정할 수 있도록 하였다. 피스톤 한 개의 운동 변위는 서보 액츄에이터를 이용하여 주파수 1Hz, 정현파(sine wave) 형태로 입력하였고, LVDT 센서를 이용하여 일정 스트로크를 유지하였다. 피스톤부에는 별도의 유압 유닛(hydraulic unit)을 이용하여 압력(30, 60, 100kg/cm²)을 공급하였으며, 이때 서보 액츄에이터 끝단에 장착한 로드셀(loadcell)을 통해 전달 하중, 즉 공급되는 압력에 의한 힘과 측력에 의한 마찰력이 합쳐진 상태로 측정하였다.

Fig. 3 은 저항력 측정실험 유압회로도이며, Table 1 은 본 장치의 실험 조건을 나타낸다.

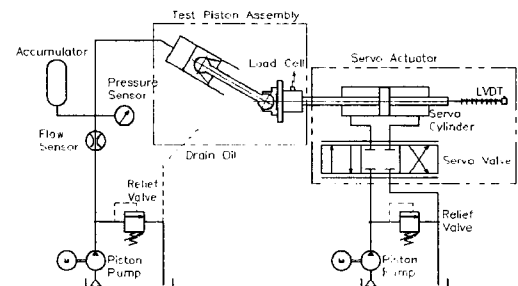


Fig. 3 Hydraulic circuit for resistant force measurement

Table 1 Test condition

Parameter	Range
Tilting angle of piston [°]	0, 20
Frequency of actuator [Hz]	1
Load pressure condition [kgf/cm ²]	30,60,100
Stroke of actuator [mm]	32.8

3.2 실험장치

실험장치의 구성은 플런저형과 로드형 피스톤을 별도로 제작한 단공 실린더 블록, 원하는 속도와 스트로크로 왕복운동을 시키기 위한 서보 액추에이터(servo actuator), 스트로크 측정을 위한 LVDT 센서, 유압력을 공급하기 위한 유압 펌프 유닛(hydraulic pump unit), 공급되는 유압력과 마찰력의 영향으로 가해지는 힘 측정을 위한 로드셀(loadcell) 등이다.

서보 액추에이터 작동은 서보밸브의 개폐량에 따라 속도 및 스트로크를 조정하였으며, 경사각은 별도의 지그(zig)를 제작하여 실린더 블록과 조립하여 유지하였다.

Fig. 4는 왕복운동 저항력 실험장치의 설계도이며, Fig. 5는 제작된 저항력 실험장치 사진이다.

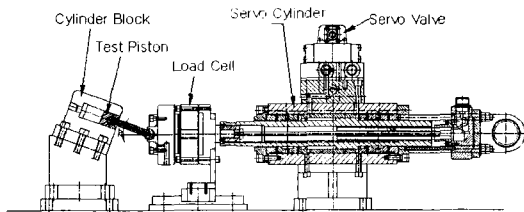


Fig. 4 Test rig for resistance force measurement

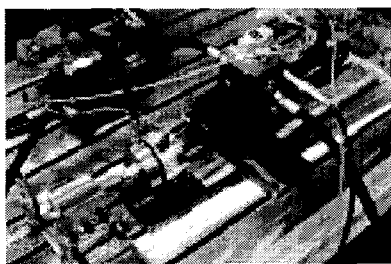


Fig. 5 Photograph of experimental setup

3.3 실험결과

Fig. 6은 피스톤 경사각이 0° 일 때, 두 형식의 피스톤에 대해 로드셀에서 측정된 하중값을 비교한 그래프이다. 실험조건에서 명시된 각 공급압력이 증가함에 따라 피스톤에 작용하는 저항력은 증가하였으나, 경사진 상태의 운동이 아니므로 두 피스톤 형식에 따라서 큰 차이를 보이지 않았다.

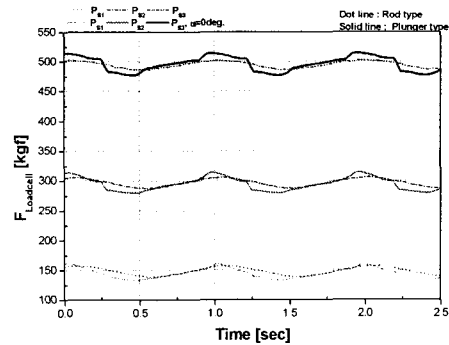
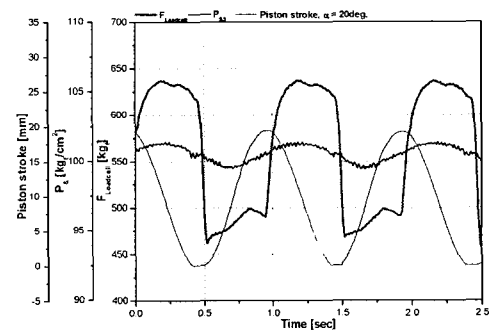
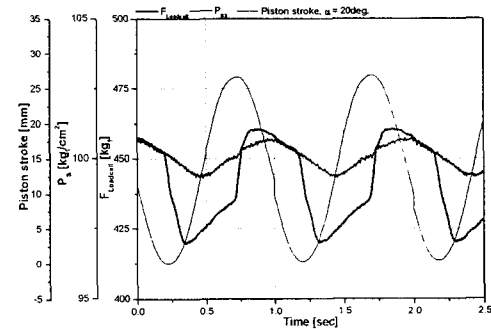


Fig. 6 Comparison of resistance force on plunger and rod type piston ($\alpha = 0^\circ$, $P_s = 30, 60, 90 \text{ kgf/cm}^2$)

한편, 두 형식의 피스톤에 대해 경사각 20°, 공급압력, 100kgf/cm²으로 조정된 상태로 서보 액추에이터의 왕복운동 주파수 1 Hz 일 때의 공급압력의 변동과 로드셀에 작용하는 저항력을 측정된 결과를 Fig. 7 (a)와 (b)에 나타내었다. 여기서 F_{loadcell}은 공급압력에 의한 힘과 마찰력이 합쳐진 왕복운동 저항력을 나타낸다. 서보 액추에이터의 왕복운동 주기보다 약 0.5sec 정도 위상차를 가지고 공급압력과 저항력의 변동값을 나타내며, 플런저형 피스톤이 로드형에 비해 큰 왕복운동 저항력(F_{loadcell})이 발생함을 알 수 있다.



(a) Plunger type piston



(b) Rod type piston

Fig. 7 Test result of resistant force ($\alpha = 20^\circ$, $P_s = 100 \text{ kgf/cm}^2$)

Fig. 8 은 피스톤의 경사각이 20° 이고, 피스톤에 공급하는 압력이 100kgf/cm^2 인 경우, 1 Hz 의 서보 액츄에이터의 왕복 운동에 대한 저항력을 두 피스톤 형식에 대해 비교한 그래프이다. 최대 저항력은 플런저형의 경우 약 638kgf 이며, 로드형은 약 460kgf 정도로 로드형이 작은 값은 나타났다. 한편, 저항력 비율(resistant force ratio)은 두 피스톤의 왕복운동 저항력의 차를 플런저형 피스톤의 저항력에 대해 나타낸 비율로 정의하였을 때, 그래프에 나타난 바와 같이 저항력 비율의 최대값은 약 0.28 정도이며 공급압력 100kgf/cm^2 일 때, 로드형 피스톤의 왕복운동 저항력이 플런저형 피스톤의 왕복운동 저항력보다 약 28% 정도 더 작다는 것을 알 수 있다.

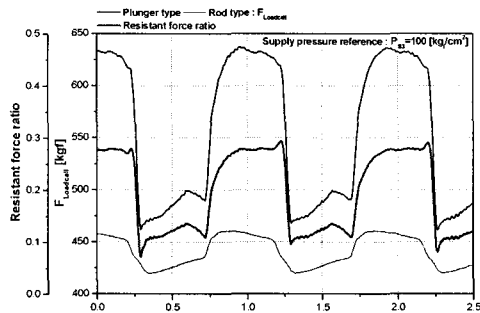


Fig. 8 Graph of resistance force & resistance force ratio on two types piston ($\alpha = 20^\circ$, $P_s = 100\text{kgf/cm}^2$)

Fig. 9 는 피스톤 경사각 20° 일 때, 플런저형 피스톤과 로드형 피스톤에 대해 공급압력의 변동에 따른 왕복운동 저항력의 크기 변화를 알아보기 위해 나타난 그래프이다. 두 형식의 피스톤 모두 공급압력이 증가함에 따라 왕복운동 저항력은 증가하고 있으나, 저항력의 크기뿐만 아니라 저항력 증가율도 플런저형 피스톤이 로드형 피스톤보다 크게 됨을 알 수 있다.

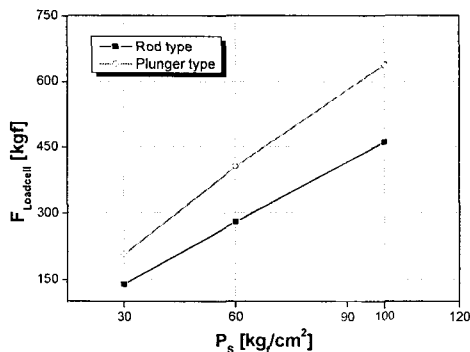


Fig. 9 Comparison of resistant force with variation of supply pressure on plunger type and rod type piston ($\alpha = 20^\circ$)

4. 결론

본 연구에서는 플런저형 피스톤의 모서리부에 작용하는 집중하중을 줄이기 위한 방법으로 로드형 피스톤을 제안하였고, 플런저형과 왕복운동 저항력을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공급압력의 증가에 따라 왕복운동 저항력은 증가하였으며, 경사각이 0° 인 경우 로드형과 플런저형의 왕복운동 저항력은 큰 차이가 발생되지 않았다.
2. 경사각이 20° 인 경우 로드형 피스톤이 플런저형보다 왕복운동 저항력은 물론, 공급압력의 증가에 따른 왕복운동 저항력 증가율도 낮게 나타남을 알 수 있었다.
3. 로드형 피스톤을 적용하는 경우, 경사각 20° , 공급압력 100kgf/cm^2 일 때 플런저형 피스톤에 비해 약 28% 정도 왕복운동 저항력 저감 효과가 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Yamaguchi, A., "Motion of Piston in Piston Pumps and Motors (1st Report, In Case of Metallic Contact)", JSME, Vol. 55-518, pp.3122-3128, 1989
2. Yamaguchi, A., "Motion of Piston in Piston Pumps and Motors (1st Report, Experiments and Theoretical Discussion)", JSME, Vol. 58-547, pp.785-790, 1992
3. Fang, Y., Shirakashi, M., "Evaluation of Lubrication Characteristics between the Piston and Cylinder in Hydraulic Piston Pump and Motor," Annals of the CIRP, Vol. 60 No.570, pp. 254 - 260, 1994.
4. Yamaguchi, A., "Motion of Piston in Piston Pumps and Motors (2st Report, Piston with Hydrostatic Pads)", JSME, Vol. 57 No.537, pp.165-170, 1991
5. 박테조, 이정오, "그루브를 한 유압 피스톤펌프의 피스톤에 작용하는 측력의 해석", 한국유탄학회지, 제 8 권 제 2 호, pp.44~49, 1992
6. Fang, Y., Ikeya, M., "Lubrication Condition between the Piston and Cylinder for Low-speed Ranges of Swash plate Type Axial Piston Pumps and Motors", Hydraulics and Pneumatics, Vol. 23 No. 3, pp. 76-83, 1992