

피스톤과 실린더 사이에서의 압력분포 - 실험(1)

김영환*(진주전문대), 박태조(경상대 BK21사업단, ReCAPT)

Hydrodynamic pressure distribution between a piston and cylinder - Experiment (1)

Y. H. Kim* (Chinju Collage) and T. J. Park (Gyeongsang Nat. Univ., ReCAPT)

ABSTRACT - In this paper, the hydraulic oil pressure distributions are measured in the clearance gap between a stationary piston and moving cylinder apparatus. The results showed that the hydrodynamic pressure distributions are highly affected by the speed of cylinder and further experimental and analytical studies are required to obtain more accurate results. Therefore present experimental method can be used to enhance the performance of various hydraulic components adopting the piston-cylinder mechanism.

Keywords : Piston(피스톤), Cylinder(실린더), Hydraulic oil(유압유), Lubrication(윤활), Pressure measurement (압력측정)

1. 서론

유압유(hydraulic oil)가 작동유체로서의 역할과 동시에 윤활제 역할도 하는 유압기기에서는 과도한 내부누설을 억제하기 위하여 상대운동을 하는 부품간의 간극(clearance)의 크기를 $10\mu\text{m}$ 이내로 설계하는 경우가 대부분이다. 이 결과, 유압기기의 성능은 상대운동부에서의 윤활특성에 따라서 크게 변화한다. 특히, 유압 피스톤 펌프/모터(piston pump/motor), 스푸울 밸브(spool valve) 등은 구조가 단순하고 가공이 용이한 등의 장점이 있는 피스톤-실린더 형태를 아주 대부분 채용하고 있다. 이때, 피스톤과 실린더 사이의 간극에서는 유압유의 점성작용에 의해서 유체동력학적 압력(hydrodynamic pressure)이 발생하며,

원주방향으로 비대칭의 압력분포가 형성될 경우에는 실린더 내의 피스톤이나 스푸울을 더욱 편심시키거나 틸팅(tilting)시키는 측력(lateral force)으로 작용한다[1-4]. 이러한 경우에 유체고착(hydraulic locking)으로 널리 알려진 현상에 의하여 피스톤이나 스푸울의 선단부 및 실린더 내면은 과도하게 마멸(wear)되거나 작동불능상태에 이르게 된다[5].

이와 같이 피스톤-실린더 기구를 채용하고 있는 유압기기들의 실제적인 중요성에도 불구하고 상대운동부에서의 윤활작용에 기인하는 제반문제들에 대한 지금까지의 이론적인 연구결과는 크게 미흡하다[6-11]. 특히, 간극에서의 압력분포는 피스톤에 작용하는 측력과 마찰력, 간극을 통하는 누설 유량 및 피스톤의 거동에 직접적인 영향을

미치기 때문에 아주 중요하지만 피스톤이 운동중인 경우에 대한 실험결과는 극소수에 불과한 실정이다. 특히, 본 연구자들은 유압유의 점도변화[12]와 피스톤의 편심[13]에 따른 동압의 분포를 각각 측정하였지만 정확한 결과의 제시에는 이르지 못하였다.

본 논문에서는 상대운동을 하는 피스톤과 실린더 사이 간극에서의 유체압력을 보다 정확하게 측정하기 위하여 기존에 사용한 실험장치에서의 문제점을 보완하였으며, 피스톤의 운동속도에 의한 영향을 조사하였다.

2. 실험장치의 설계 및 제작

본 논문에서는 피스톤이 운동하는 경우, 간극에서 점성유체인 유압유의 순환작용에 의하여 발생하는 유체압력을 측정하고자 한다. 하지만 실제의 피스톤 펌프 등으로 실험하기는 현실적으로 한계가 있기 때문에 피스톤-실린더 기구의 실험장치를 설계·제작하였다. 전체적인 실험장치는 참고문헌[12,13]과 거의 동일하다.

Fig.1은 압력측정을 위한 실험장치부를 개략적으로 나타낸 그림으로 피스톤은 테이퍼 형상이며, 실린더의 중심축에 대하여 e 만큼 편심되어 있다. 이때, 실린더내에서 피스톤의 편심량을 일정하게 유지시키기 위하여 피스톤은 고정시키고 실린더가 운동할 수 있게 하였다.

Fig.2는 압력 측정부를 상세하게 나타낸 그림으로서 편심방향으로 180° 위치에 피에조(piezo) 형식의 극소형 압력센서 2개를 설치하였다. 이때, 실린더의 우측에는 일정한 고압이 유지되는 압력실을, 실린더의 좌측에는 드레인 포트(drain port)를 각각 설치하였으며 간극을 통하는 누설유는 오일 탱크로 리턴(return)시켰다.

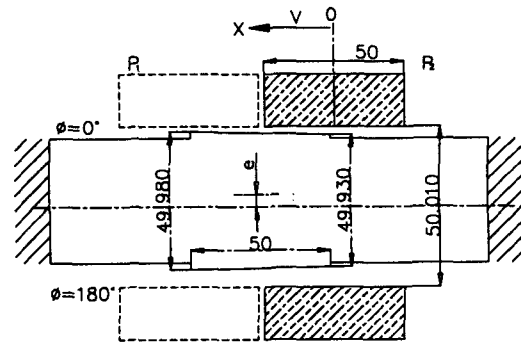


Fig. 1 Shape and dimension of the test section.

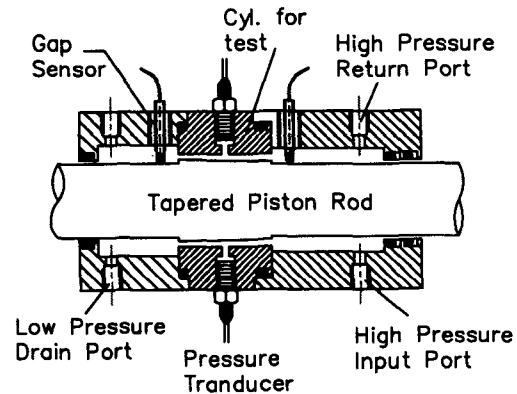


Fig. 2 Schematics for pressure measurement.

Table 1. Specification of test piston and cylinder.

		Piston	Cylinder
Diameter, mm	Large	49.980	50.010
	Small	49.930	50.010
Material		SCM420H (Cr coating)	SCM420H
Roundness, μm		0.73	0.54
Cylindricity, μm		0.98	0.68
Rmax, μm		0.67	0.36
Hardness, Hv		800	630

Table 1.에는 실험에 사용된 피스톤과 실린더에 대한 제작사양을 나타내었다. 상대운동부에서의 형상오차에 의한 국부적인 압력변동을 줄이기 위하여 피스톤은 연삭 → 버핑 → 크롬 도금 → 연삭 가공공정을, 실린더의 내경부는 연삭후 호닝 가공을 각각 실시하였다. Fig.3에는 실린더 내면부에 대한 진원도와 표면 거칠기의 측정결과를 나타내었다.

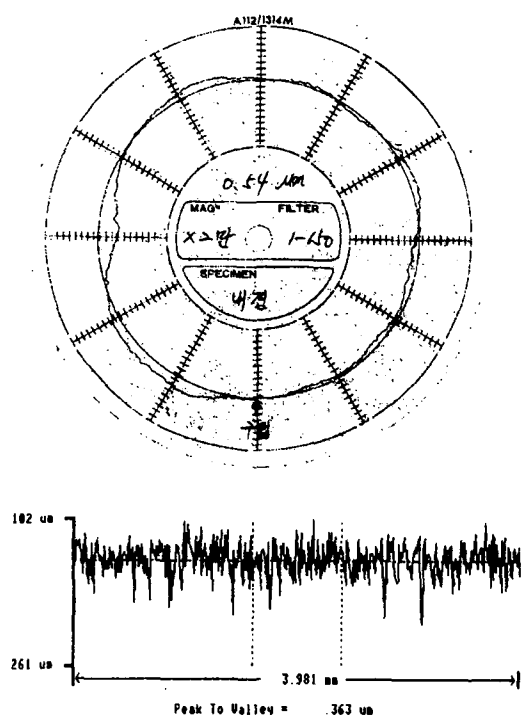


Fig. 3 Roundness and roughness data of the cylinder.

Fig.4에는 실험장치의 개략적인 전체 형상과 각 실린더의 작동을 위한 유압 회로를 나타내었다. 간극에서 상대운동이 있는 경우에 대한 압력을 정확하게 측정하기 위하여 테이퍼 형상인 피스톤은 고정시키고, 압력센서가 부착된 압력측정용 실린더를 구동(actuator)용 실린더로써 좌우로 이동시킨다. 이때, 압력측정용 실린더에는 LM 가이드(guide)의 레일을 2열로 설치하고 각

열에 블록을 2개씩 설치하여 직진 안정성이 높게 되도록 하였다. 압력측정용과 구동용 실린더에는 별도의 유압원을 설치하여 단일 유압원을 사용할 경우에 발생할 수 있는 압력저하 등의 문제가 발생하지 않게 하면서 실험에 요구되는 유압유의 온도유지도 쉽게 하였다. 이때, 압력측정용 유압회로에는 펌프에서 토출된 유압유를 릴리프 밸브(relief valve)로 감압시켜 압력실로 공급하였으며, 리턴회로에는 압력조절 밸브를 설치하여 실린더 내부의 압력을 시험조건에 따라 설정할 수 있게 하였다. 공급라인에는 체크 밸브(check valve)와 축압기(accumulator)를 릴리프 밸브 다음에 설치하여 펌프에서 발생된 맥동의 저감과 실린더의 이동에 따른 압력변동을 최소화시켰다. 편심량 조정장치용 실린더와 구동용 실린더에는 동일한 유압원을 사용함에 따라 구동용 실린더의 동작시에 유압이 변동하여 피스톤에 작용하는 힘이 변화되어 편심량의 변화를 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 비례 감압밸브(proportional reducing valve)를 중간에 설치함으로써 피스톤 지지용 실린더에는 항상 일정한 유압을 작용시켜 실험중에 편심량이 변하지 않게 하였다.

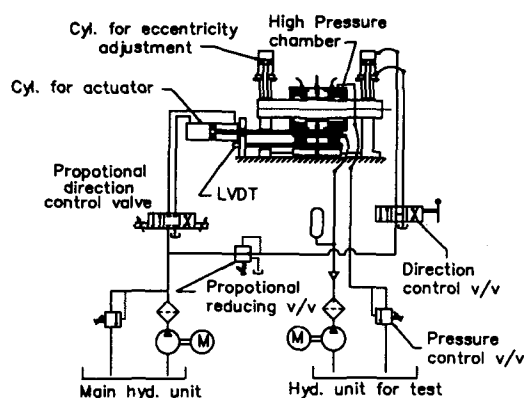


Fig. 4 Schematics of the experimental setup and hydraulic circuits.

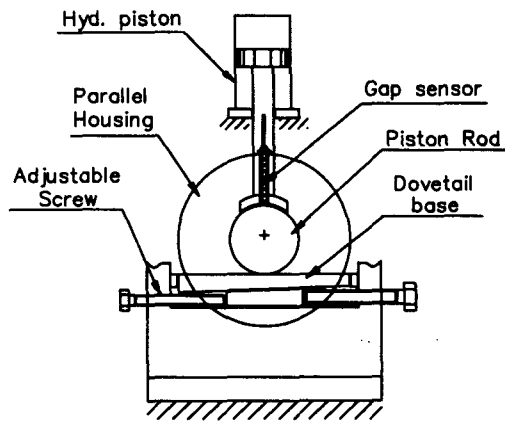


Fig. 5 Schematics of piston eccentricity adjustment device.

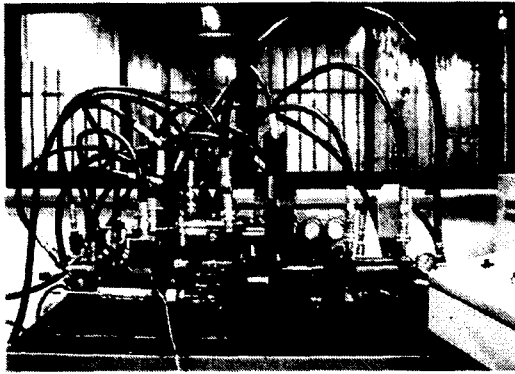


Fig. 6 Photo of the test bench.

Fig. 5는 실린더 내에서 피스톤의 편심상태를 변화시키기 위한 편심량 조정장치를 나타낸 그림이다. 피스톤 로드의 상부와 측면부에는 피스톤 로드를 고정시키는 실린더를, 맞은편에 썸머(dovetail)를 각각 설치하여 피스톤 로드의 중심선 위치를 미세하게 조정할 수 있게 하였다. 썸머장치는 2개가 1개조인 접촉면 경사각이 0.5° , 피치가 1mm인 구성되어 있으며, 나사를 1회 전시킬 경우에 편심량은 $8\mu\text{m}$ 씩 변화한다. 피스톤의 편심량은 최종적으로 실린더 양단부에 설치된 변위 센서(gap sensor)로써

확인하였다. Fig.6에는 실험장치에 대한 사진을, Table 2.에는 실험조건을 각각 나타내었다.

Table 2. Test conditions.

Feed speed, cm/sec	90, 150, 220
Supply pressure, bar	20
Oil viscosity, cSt	48
Oil temperature, $^\circ\text{C}$	40
Oil density, g/cm^3	0.896
Eccentricity, μm	4

3. 결과 및 고찰

Fig. 7에는 정지상태의 테이퍼진 피스톤과 일정 속도로 운동하는 실린더 사이 간극에서의 압력분포를 실린더의 운동방향(Fig. 1 참조)으로 나타내었다. 이때, 실린더는 피스톤의 소단부에서 대단부 방향으로 운동하기 때문에 간극에서는 썸머(wedge)작용에 의하여 동압(hydrodynamic pressure)이 발생한다. 또한, 피스톤이 $\psi = 0^\circ$ 방향으로 편심되어 있기 때문에 반대쪽인 $\psi = 180^\circ$ 방향에 비하여 이곳에서의 간극 크기가 작으므로 유막의 기울기는 상대적으로 크게 되어 썸머효과는 크게 된다. 이 결과, 간극내에서의 발생하는 압력이 $\psi = 0^\circ$ 방향에서 상대적으로 크게 나타났다. 특히, 윤활작용에 의하여 발생하는 유체압력이 압력실로 공급되는 유압유의 압력보다 크게 될 수 있음을 보여주고 있으며, 실린더가 고속으로 운동할수록 발생압력은 더욱 크게 된다. 한편, 피스톤의 테이퍼부 길이에 비하여 압력이 발생하는 거리가 짧은 것은 압력측정용 구멍의 크기 등에 부분적으로 영향이 있는 것으로 판단된다. 특히, 간극이 넓은 $\psi = 180^\circ$ 방향에서의 압력분포가 공급압력보다 쉽게 작아지는 것

은 조정된 편심량이 예상과는 다른 상태에 있을 가능성을 배제할 수 없음을 의미한다. 따라서, 보다 확실한 조건에 대한 정확한 실험결과를 구하기 위해서는 추가적인 연구와 함께 실험결과의 검증에 의한 이론해석도 병행되어야 할 것으로 생각된다.

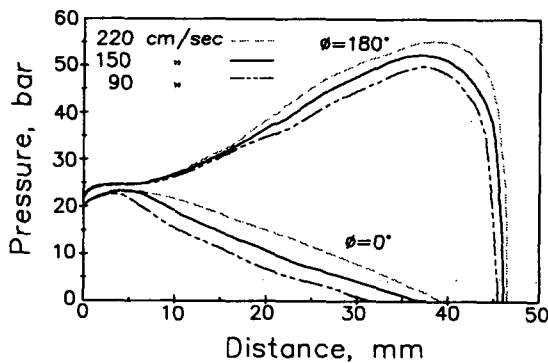


Fig. 7 Measured pressure profiles.

4. 결론

본 논문에서는 피스톤-실린더 기구를 채용하는 유압부품의 설계와 성능향상에 사용될 수 있는 기초자료의 확립을 위하여 편심상태의 테이퍼진 피스톤에 대하여 상대운동을 하는 실린더 사이 간극에서 발생하는 유체압력을 실험적으로 측정하였다. 이 결과, 점성유체인 유압유의 윤활작용에 의하여 발생하는 유체압력은 실린더의 이송속도에 따라서 크게 변화함을 확인하였다. 하지만 보다 정확한 실험결과의 제시를 위해서는 실험장치의 부분적인 보완과 아울러 실험결과의 검증에 의한 이론해석적인 연구의 병행도 필요하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터와 두뇌한국21

사업의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Blackburn, J. F., "Contributions to Hydraulic Control - 5 Lateral Forces on Hydraulic Pistons", Trans. ASME, pp.1175~1180, 1953.
2. Manhajm, J. and Sweeny, D.C., "An Investigation of Hydraulic Lock", Proc. Instn. Mech. Eng., Vol.169, pp.865~879, 1953.
3. Mannam, J., "Further Aspects of Hydraulic Lock", Proc. Instn. Mech. Eng., Vol.173, pp.699~716, 1959.
4. Meritt, H. E., Hydraulic Control Systems, John & Sons Inc, 1967.
5. Dowd, J. R. and Barwell, F. T., "Tribological Interaction between Piston and Cylinder of a Model High Pressure Hydraulic Pump", ASLE Trans., Vol.18, No.1, pp.21~30, 1975.
6. Etsion, I. and Pinkus, O., "The Hydrodynamics of Plug Beaing", Trans. ASME, J. of Lub. Tech., Vol.98, pp.433~440, 1976.
7. Lee, C. O. und Park, T. J., "Querkräfte an hydraulischen Ventilen mit mehreren Umfangsnuten", Ölhydraulik und Pneumatik, Vol.34, Nr.4, pp.269~274, 1990.
8. Meikandan, N., Raman, R., Singaperumal, M. and Seetharamu, K. N., "Theoretical Analysis of Tapered Pistons in High Speed Hydraulic Actuators", Wear, Vol.137, pp.299~321, 1990.
9. 박태조, 이정오, "유압피스톤펌프의 피스톤에 작용하는 측력에 관한 해석", 대한

- 기계학회 춘계학술대회논문집(Ⅱ), pp.129~133, 1991.
10. Park, T. J. and Lee, C. O., "Hydrodynamic Lateral Force on a Tapered Piston Subjected to a Large Pressure Gradient", Proc. of 3rd Int. Conf. on Fluid Power Trans. & Control, Int. Academic Pub., pp.44~48, 1993.
 11. 이정오, 박태조, "피스톤 형상이 유압 피스톤 펌프·모터의 운할특성에 미치는 영향", 한국윤활학회지, Vol.10, No.3, pp.47~53, 1994.
 12. 김영환, 박태조, "상대운동을 하는 피스톤과 실린더 사이의 유압측정", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.8~11, 2000.
 13. 김영환, 박태조, "유압 피스톤 펌프의 피스톤과 실린더 사이에서의 압력측정", 한국윤활학회 춘계학술대회논문집, pp.237~242, 2000.