

유압 피스톤 펌프의 피스톤과 실린더 사이에서의 압력측정

김영환*(진주전문대), 박태조(경상대 수송기계공학부, 항공기부품RRC)

Measurement of Oil Pressure Distribution between the Piston and Cylinder in Hydraulic Piston Pump

Yeong Hwan Kim*(Chinju collage) and Tae Jo Park(Gyeongsang Nat. Univ., ReCAPT)

Abstract - In this paper, an experiment was carried out to measure the hydrodynamic oil pressure distribution in the clearance gap between a piston and cylinder. The results showed that the pressure distributions are highly affected by the eccentricity of the piston. Therefore present experimental method can be used to enhance the performance of hydraulic piston pumps. Further experimental studies for various operating conditions and improvement in data acquisition methods are required to obtain more accurate results.

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

1. 서론

고압이 요구되는 유압시스템의 유압원으로 널리 사용되는 유압 피스톤 펌프(hydraulic piston pump)는 유압장치의 고압화 추세에 따라서 주요 섭동부에서의 간극(clearance)의 크기는 더욱 작아지고 있다. 이 결과, 트라이볼로지(tribology) 분야와 관련된 많은 문제가 새롭게 발생하고 있다. 특히, 실린더 내를 왕복운동하는 피스톤과 실린더 사이에서의 윤활상태는 펌프의 성능과 신뢰성에 직접적으로 큰 영향을 미치므로 이에 대한 정확한 이해와 상세한 연구가 요구된다. 즉, 피스톤 펌프의

피스톤과 실린더 사이의 아주 작은 간극에서 점성유체인 유압유(hydraulic oil)의 윤활작용에 의해서 원주방향으로 비대칭적인 압력분포가 형성되면 이는 피스톤에 수직인 측력(lateral force)으로 작용한다[1-3]. 이러한 유체동력학적인 측력에 의하여 피스톤이 실린더 내벽쪽으로 더욱 편심될 경우, 피스톤이나 실린더에 과도한 마멸(wear)이 발생하여 작동불능상태에 이르게 한다[4]. 유체고착(hydraulic locking)현상으로 유압공학분야에서 잘 알려져 있는 이러한 문제는 유압유의 점성에 주로 기인하며 피스톤 펌프뿐만 아니라 유압 스푸울 밸브(spool valve), 유압 액츄에이트(actu-

ator)와 같이 피스톤-실린더 기구(piston-cylinder mechanism)를 채용하는 모든 유압기계에서 공통적으로 발생하고 있다.

하지만 피스톤과 실린더 사이에서의 윤활문제가 실제로 아주 중요함에도 불구하고 지금까지의 연구결과는 크게 미흡한 실정이다[5-13]. 특히, 실험적인 연구는 극소수에 불과할 뿐만 아니라 실험도 유압 시스템이나 조립품에 대하여 수행되었기 때문에 피스톤과 실린더 사이에서의 상세한 특성파악은 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 하나의 예로서, 참고문헌 [5-9]에서는 사판식(Swash plate type) 피스톤 펌프의 피스톤에 작용하는 마찰력이나 실린더와 피스톤 사이의 유막두께 등을 측정하고자 시도하였지만 다른 운동부에서의 영향이 포함되었기 때문에 간극에서의 정확한 특성자료로는 미흡하였다. 한편, Baké[10]는 새로운 실험방법으로 상대운동을 하는 피스톤과 실린더 사이에서의 압력과 온도를 정확하게 측정하고자 시도하였지만 사용한 압력조건이 고압이었기에 완전한 결과는 제시하지 못하였다.

이에, 본 논문에서는 완전한 연구결과가 아직 제시되지 않고 있는 피스톤 펌프의 피스톤과 실린더 사이 간극에서의 발생 압력을 실험적으로 측정하고자 한다. 간극에서의 압력분포는 피스톤에 작용하는 마찰력, 간극을 통하는 누설유량 및 피스톤의 왕복거동에 직접적인 영향을 미치기 때문에 아주 중요한 자료이다. 실험은 실제의 피스톤 펌프를 사용할 경우에는 조건을 정확하게 설정할 수가 없기 때문에 피스톤-실린더 기구를 설계·제작하여 압력을 측정하였다.

2. 실험장치

본 논문에서는 점성유체인 유압유의 윤활작용에 의하여 상대운동을 하는 피스톤

과 실린더 사이 간극에서 발생하는 유체압력(hydrodynamic pressure)의 분포를 실험적으로 측정하고자 한다. 그러나, 실제의 피스톤 펌프를 사용하는 경우에 발생하는 여러 가지의 제약조건으로 인하여 이를 정확하게 측정하기가 현실적으로 힘들다. 또한, 피스톤의 편심상태 등과 같은 세부적인 실험조건도 정확하게 설정할 수가 없기 때문에 결과가 제시되어 있는 이론해석 결과와의 비교도 어렵게 된다. 이에 본 논문에서는 다음과 같이 압력측정을 위한 피스톤-실린더 기구의 실험장치를 설계·제작하였다.

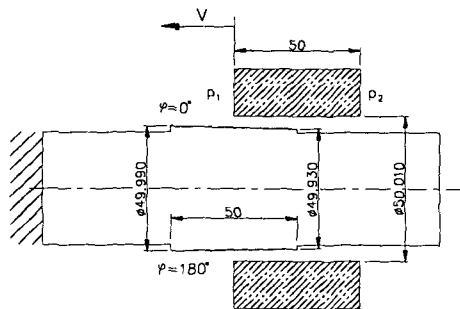


Fig. 1 Shape and dimension of the test section.

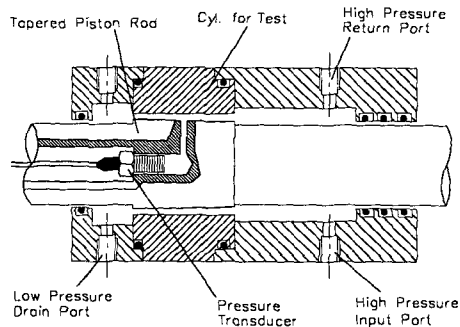


Fig. 2 Sectional view of the piston and cylinder for pressure measurement.

Fig.1은 압력측정을 위한 피스톤 로드와 실린더 형상과 크기를 개략적으로 나타낸 그림이다. 이때, 피스톤의 형상은 쐐기(wedge)작용에 의한 압력발생을 크게 하기 위하여 압력 측정부에서는 테이퍼지게(tapered) 설계하였으며, 실린더의 중심축에 대한 피스톤축의 편심상태를 변화시킬 수 있게 하였다. 편심상태를 일정하게 유지시키기 위하여 그림에 나타낸 것과 같이 피스톤은 고정시키는 대신에 실린더가 운동하게 하였다.

Fig.2는 압력 측정부를 상세하게 나타낸 그림으로 피스톤과 실린더 사이 간극에서의 길이방향 압력분포를 측정하기 위하여 내부에 압력센서를 설치한 테이퍼 형상의 피스톤 로드는 고정시킨 대신에 평행원통으로 가공한 실린더를 유압 실린더로써 좌우로 이동시킨다. 이때, 유체압력의 검출에는 피에조(piezo) 형식의 극소형 압력센서를 사용하였다. 압력센서의 설치정도를 높이고 쉽게 취부할 수 있게 하기 위하여 피스톤을 상대운동부와 좌우 로드부로 분리하여 가공하고 열처리를 하기 전에 상대운동부를 가열하여 좌우의 로드부에 열간압입시켰다. 실린더의 우측에는 고압의 압력실을 설치하여 일정한 상태의 압력이 유지되게 하였으며, 실린더의 좌측에는 드레인 포트(drain port)를 설치하여 실린더와 피스톤 로드 사이의 간극에서 누설된 유압유가 오일 탱크로 리턴(return)되게 하였다.

Fig.3은 실린더 내에서 피스톤의 편심상태를 변화시키기 위한 편심량 조절장치를 나타낸 것이다. 피스톤 로드의 좌우에는 전후 및 상하 방향으로 피스톤 로드를 미소하게 이동시킬 수 있는 쐐기장치(Dovetail)를 설치하였다. 이 쐐기장치는 2개가 1조로 이루어지며 접촉면의 경사각은 0.7° , 조정나사의 피치는 1mm로 설계하여 조정나사의 1회전당 편심량이 $12\mu\text{m}$ 변화하게 하였다. 한편, 편심량의 조정시

에는 실린더 양단부에 갭 센서(gap sensor)를 수직으로 설치하여 편심거리를 측정함으로써 이를 확인하였다.

Table 1.에는 실험에 사용된 피스톤 로드와 실린더의 제원을 나타내었으며, 상대운동부의 형상오차의 발생을 최소화하고 이로 인한 국부적인 압력변동을 줄이기 위하여 다음과 같은 방법에 따라서 제작하였다. 피스톤 로드는 침탄 열처리 후에 연삭 → 버핑 → 크롬도금 → 연삭 가공을 하였으며, 실린더 내경부는 침탄 열처리를 한 후에 연삭 → 호닝 가공을 각각 실시하였다.

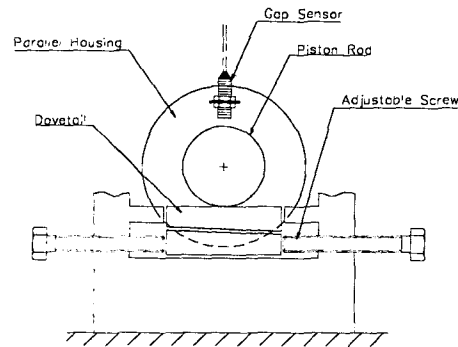


Fig. 3 Schematics of piston eccentricity adjustment device.

Table 1. Specification of piston rod and cylinder.

		Piston	Cylinder
Inner/Outer diameter, mm	Large	49.990	50.010
	Small	49.930	50.010
Material		SCM420H (Cr coating)	SCM420H
Roughness, μm		0.24	0.74
Cylindricity, μm		0.47	1.34
Rmax, μm		0.17	0.63
Hardness, Hv		800	630

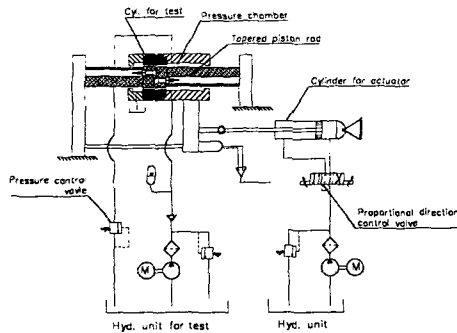


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental apparatus.

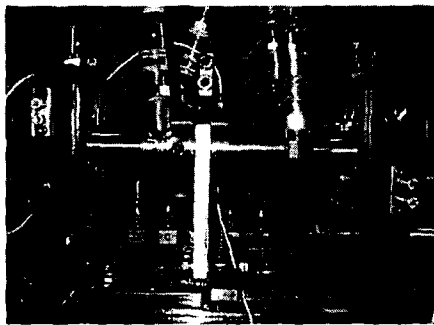


Fig. 5 Photo of the experimental set-up.

Fig.4에는 전체 실험장치의 개략적인 구성과 실린더의 작동을 위한 유압 회로도를 함께 나타내었다. 이때, 실험용 실린더에는 LM가이드(guide)를 2열로 설치하여 직진 안정성이 높게 되도록 하였다. 또한, 실험용과 액추에이터용의 실린더에 별개의 유압원을 설치하여 단일 유압원을 사용하는 경우에 발생할 수 있는 압력저하 등의 악영향을 방지하였다. 이때, 실험용 유압 회로에는 펌프에서 토출된 유압이 릴리프 밸브(relief valve)를 통해 감압된 후 압력실로 공급되게 하고, 리턴회로에 압력조절 밸브를 설치하여 실린더 내부의 압력을 시험조건에 따라 설정할 수 있게 하였다.

또한, 공급라인의 릴리프 밸브를 거친 후에는 체크 밸브(check valve)와 축압기(accumulator)를 설치하여 실린더의 작동에 따른 압력변동이 최소화 되도록 하였다. Fig.5는 실험장치에 대한 사진이다.

Table 2.와 Table 3.에는 실험조건과 실험에 사용된 유압작동유의 물성치를 각각 나타내었다.

Table 2. Test conditions.

Feed speed, cm/sec	220
Supply Oil Pressure, kg/cm ²	20
Oil temperature, °C	50
Eccentricity, μm	0, 6, 12

Table 3. Properties of hydraulic oil used.

Density, g/cm ³	0.896
Viscosity, cSt	48 @ 40°C 6.4 @ 100°C
Viscosity index	85
Flash Point, °C	210
Pour Point, °C	-9

3. 결과 및 고찰

Fig.6에는 테이퍼진 형상의 고정된 피스톤과 일정한 속도로 운동하는 실린더 사이 간극에서의 피스톤의 편심량에 따른 압력변화를 실린더의 운동방향으로 (Fig.1 참조) 나타내었다. 여기서, 피스톤 양단부에서의 압력상태는 p_2 가 고압(20kg/cm²)이고 p_1 이 저압(0kg/cm²)이다. 피스톤과 실린더가 상대운동을 하고 이에 따라서 간극의 크기가 변화하므로 간극에서는 점성유체인 유압유의 운환작용에 의하여 유체동압(hydrodynamic pressure)이 발생한다. Fig.6 (a)는 동심상태로 조정된 경우의 압

력분포를 측정된 결과이다. 여기서, $\varphi=0^\circ$ 와 $\varphi=180^\circ$ 에서 약간의 압력차이가 발생하는 것은 편심조정에 의한 오차와 함께 피스톤과 실린더 상대운동부의 진원도 및 원통도와 같은 형상오차의 영향이 포함된 결과로 추정된다. Fig.6의 (b)와 (c)는 피스톤이 $\varphi=180^\circ$ 방향으로 각각 $6\mu\text{m}$ 와 $12\mu\text{m}$ 편심된 경우의 압력분포이다. $\varphi=180^\circ$ 에서와는 반대로 $\varphi=0^\circ$ 방향에서는 피스톤의 편심으로 인하여 상대적으로 간극의 크기는 크고 유막의 기울기가 완만하다. 이 결과, 베어링에서의 썸기작용에 의하여 발생하는 압력이 $\varphi=180^\circ$ 방향에서 편심량의 증가에 따라서 보다 크게 나타나고 있다. 특히, 윤활작용에 의하여 발생하는 유체압력이 압력실로 공급되는 유압유의 압력보다 크게 될 수 있음을 보여주고 있다. 만일, 실린더가 정지상태인 경우에는 원주방향으로는 동일하고 길이방향으로는 적선적으로 변하는 압력분포를 나타낼 것으로 쉽게 예상할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 지금까지 실험적인 연구 결과가 제시되지 않고 있는 상대운동을 하는 피스톤과 실린더 사이 간극에서의 유체 압력을 성공적으로 측정하였다. 간극에서는 점성유체인 유압유의 윤활작용에 의하여 유체압력 발생하며 이는 피스톤의 편심 상태에 따라서 크게 변화함을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 제시하는 실험적인 방법과 결과는 유압 피스톤 펌프의 설계와 성능향상에 기여할 수 있을 것으로 예상되며, 다양한 조건에 대한 추가적인 실험과 함께 이론해석결과와의 비교를 위한 추가적인 연구가 요구된다.

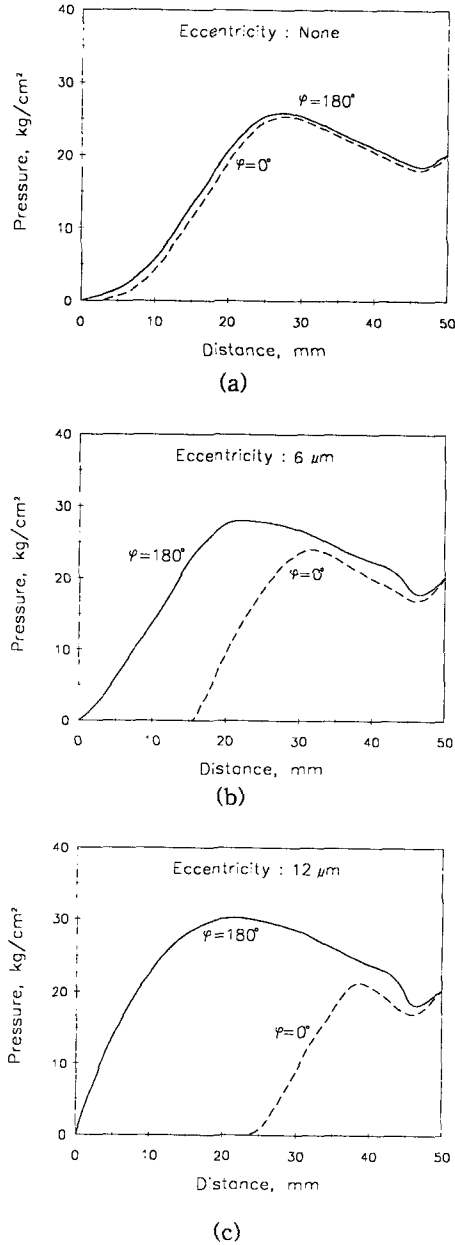


Fig. 6 Pressure distribution.
 $p_2=20\text{kg/cm}^2$, $p_1=0\text{kg/cm}^2$

후 기

이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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. Manhajm, J., "Further Aspects of Hydraulic Lock", Proc. Instn. Mech. Eng., Vol.173, pp.699-716, 1959.
4. Dowd, J. R. and Berwell, 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.
5. 京極啓史, 濱村有一, 長沼徹郎, 中原綱光, "油壓ピストンポンプ・モータの潤滑特性 : 第1報 ピストン・シリンダ間の摩擦力測定", トライボロジスト, 第35巻, 第12号, pp.914-921, 1990.
6. 京極啓史, 長沼徹郎, 濱村有一, 中原綱光, "油壓ピストンポンプの潤滑特性 : 第2報 ピストン・シリンダ間の油膜厚さ測定", トライボロジスト, 第36巻, 第1号, pp.28-35, 1991.
7. 方義, 池谷光榮, "斜板式アキシアルピストン・モータの低速時におけるピストン-シリンダ間潤滑状態", 油壓と空気壓, 第23巻, 4号, pp.420-426, 1991.
8. 松本和幸, 池谷光榮, "斜板式アキシアルピストン・モータの低速時におけるピストンの摩擦特性", 日本機械學會論文集C編, 第57巻, 540号, pp.2729-2733, 1991.
9. 田中嘉津彦, 中原綱光, 京極啓史, "ピストンポンプ・モータにおけるピストンの回転と摩擦力", 日本機械學會論文集C編, 第59巻, 560号, pp.1192-1197, 1993.
10. Backé, W. "Experimentelle Ermittlung der Druck und Temperaturverteilung in Dicht und Lagerfugen hydrostatischer Maschinen", Research Report, Inst. für Hydraulische und Pneumatische Antriebe und Steuerungen der RWTH Aachen, 1994.
11. Lee, C. O. and Park, T. J., "Querkräfte an hydraulischen Ventilen mit mehreren Umfangsnuten", Ölhydraulik und Pneumatik, Vol.34, Nr.4, pp.269-274, 1990
12. 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 Transmission & Control, Int. Academic Pub., pp.44-48, 1993.
13. 이정오, 박태조, "피스톤 형상이 유압 피스톤 펌프·모터의 윤활특성에 미치는 영향", 한국윤활학회지, Vol.10, No.3, pp.47-53, 1994.