

피스톤-실린더 기구에서 오일압력 분포에 관한 실험적 연구

김영환[#]

An Experimental Study on Oil Pressure Distribution in the Piston-Cylinder Mechanism

Yeong-Hwan Kim[#]

(Received 4 August 2011; received in revised form 21 November 2011; accepted 6 December 2011)

ABSTRACT

The piston-cylinder mechanism is widely adopted in the hydraulic machine components. In these cases, the hydrodynamic pressures are generated in the clearance gap between the piston and cylinder under lubrication action of the piston. Under the eccentric and tilted condition of the piston in the cylinder bore, the non-symmetric pressure distributions in the circumferential direction result in lateral forces. When the lateral forces act as increasing the eccentricity and tilting ratios, excessive wear can be result in cylinder and piston which are well known 'hydraulic locking' phenomena. In this paper, the hydrodynamic pressures generated in the clearance are measured using a stationary piston and moving cylinder apparatus. The experimental results showed that the hydrodynamic pressure distributions are highly affected by the speed and eccentricity of the cylinder and the oil viscosity.

Key Words : Piston-Cylinder Mechanism(피스톤-실린더 기구), Hydrodynamic Pressure(유체동압), Lubrication(윤활), Eccentricity(편심), Viscosity(점도)

1. 서 론

유압시스템은 경량화 추세에 따라 고압화, 고속화 및 동력손실의 감소를 위해 저 점도유의 사용 등의 경향으로 발전되고 있다. 피스톤-실린더 기구를 채용한 대표적인 유압기기인 피스톤 펌프는 간단한 구조로서 고압발생이 용이하여 유압시스템의 유압원으로 점유율은 점차 확대되고 있으나, 최근의 발전 경향에 따라 실린더와 피스톤 사이의 간극은 점차 작아지고

있다. 그 결과 트라이볼로지와 관련된 새로운 문제가 많이 발생되고 있다. 특히 피스톤과 실린더사이의 작은 간극에서는 유압유(hydraulic oil)의 윤활작용(lubrication action)에 의해서 원주방향으로 비대칭인 압력이 형성될 수 있고, 그 결과 피스톤 축에 수직으로 작용하는 힘인 측력(lateral force)이 발생한다. 이러한 유체동력학적(hydrodynamic)인 측력의 작용에 의하여 피스톤이 실린더 내벽으로 더욱 편심되거나 틸팅(tilting)되면 피스톤과 실린더 사이의 마찰을 심화시키고, 결국 피스톤과 실린더가 달라붙게 되어 작동불능 상태에 이르기도 한다¹⁻⁴⁾.

피스톤-실린더 기구를 채용하는 모든 유압기기에서

[#] 교신저자 : 한국국제대학교 기계자동차공학
E-mail : ilmae@naver.com

공통적으로 발생하는 이러한 현상을 유체고착 (hydraulic locking)이라 부른다.

따라서 피스톤-실린더 기구를 채용하는 유압기기의 성능 향상, 마찰력 및 마멸감소를 위해서는 간극사이에서 발생하는 압력분포와 크기에 대한 정확한 고찰이 요구되어진다. 지금까지의 연구결과는 이론해석결과는 다양하나, 실험적인 연구는 소수에 불과하고, 대부분 실제의 피스톤펌프를 사용하여, 피스톤에 미치는 마찰력, 유막두께, 및 피스톤의 거동 등을 측정하였으나, 다른 운동부의 영향이 포함되어 간극에서의 정확한 특성자료로서는 미흡하다^[5-11].

이에 본 연구에서는 아직 완전한 연구결과가 제시되지 않고 있는 상대 운동하는 피스톤과 실린더 사이 간극에서 생성되는 압력을 실험적으로 측정하고자 한다. 간극에서 생성되는 압력발생에 미치는 인자는 매우 다양하나, 여기서는 피스톤과 실린더 사이의 틈새 간극, 상대 속도 및 유압유의 온도변화에 따른 점도의 영향만을 국한하여 고려하여 실험하였다. 간극에서의 압력분포는 피스톤의 마찰력, 누설유량 및 피스톤의 거동 등에 영향을 미치기 때문에 아주 중요한 자료이다.

2. 실험장치의 설계 및 제작

피스톤 펌프를 사용하면 피스톤과 실린더 사이에 간극의 설정 및 유지가 불가능하여, 일정한 조건에서 피스톤과 실린더사이 간극에서 발생하는 오일압력을 측정하기 위하여 피스톤-실린더 기구의 실험 장치를 설계·제작하였다.

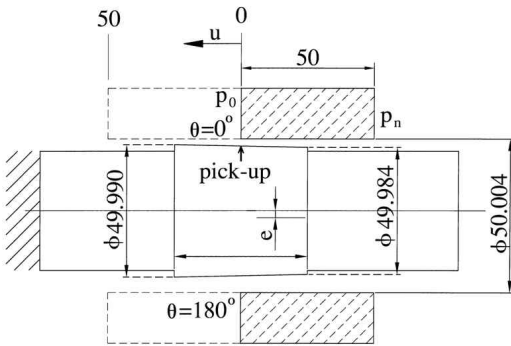


Fig. 1 Shape and dimension of the test section

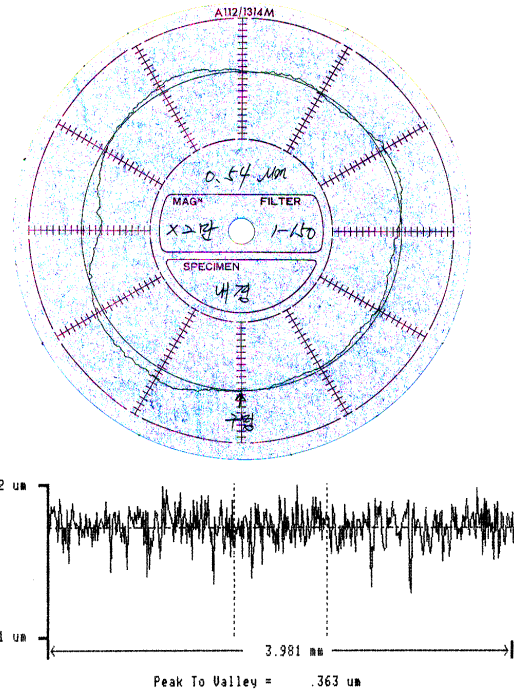


Fig. 2 Roundness and roughness data of the cylinder

Table 1 Specification of test piston and cylinder

| | | Piston | Cylinder |
|-----------------------------|-------|----------------------|----------|
| Diameter, mm | Large | 49.990 | 50.004 |
| | Small | 49.984 | 50.004 |
| Material | | SCM420H (Cr coating) | SCM420H |
| Roundness, μm | | 0.43 | 0.54 |
| Cylindricity, μm | | 0.55 | 0.68 |
| Rmax, μm | | 0.8 | 0.36 |
| Hardness, Hv | | 800 | 630 |

2.1 시편

Fig. 1은 피스톤과 실린더 사이에서의 압력측정을 위하여 설계한 압력측정부의 치수와 조립형상을 개략적으로 나타내고 있다. 이때 피스톤과 실린더 사이의 아주 미소한 간극의 변화에도 발생하는 압력은 크게 변동하기 때문에 시편의 치수 및 형상 오차를 최소화하기 위해서 피스톤의 외경부는 Cr도금→정밀연삭, 실린더의 내경부는 연삭→호닝 공정의 정밀가공법을 사용하였다. Table 1과 Fig. 2에는 피스톤과 실린더의

치수, 형상오차 등의 사양과 실린더 내부부의 진원도와 표면 거칠기를 측정 한 결과를 나타내었다.

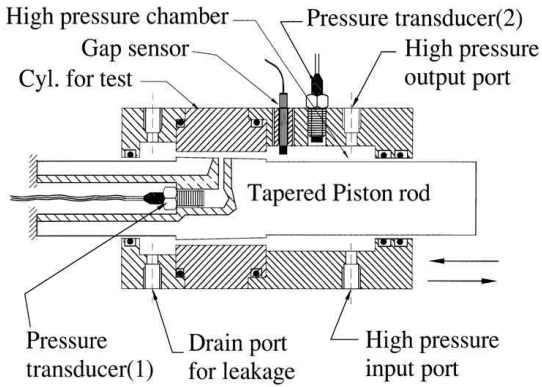


Fig. 3 Schematic drawing of pressure measuring part

2.2 실험 장치

Fig. 3은 피스톤-실린더 기구부의 상세도를 나타낸 그림이다. 테이퍼 형상의 피스톤은 실린더의 중심축에 대하여 편심시킬 수 있도록 되어 있으며, 편심량을 일정하게 유지시키기 위하여 피스톤은 고정시키고 실린더부를 좌우로 이송할 수 있게 하였다. 실린더 우측의 고압실에는 외부펌프에서 유압유를 공급받는 입력 포트와 고압실내의 일정압력을 유지하기 위한 압력조절 밸브와 연결되는 출력포트, 피스톤과 실린더의 정렬 상태 및 간극 크기를 측정하기 위한 갭 센서(gap sensor)가 설치되어 있다. 피스톤과 실린더사이에서 발생하는 압력측정용 센서는 피스톤 내부에 설치되어 피스톤 중앙위치의 압력을 측정토록 설치되어 있다.

Fig. 4는 전체 실험장치의 구성도 및 유압회로도를 나타낸다. 이송거리에 따른 피스톤과 실린더 간극에서 압력변화를 측정하기 위하여 피스톤로드의 양단을 유압실린더로 고정시키고, 비례방향 제어밸브에 의해 속도조절이 가능한 이송용 액츄에이터를 사용하여 실린더를 좌·우측으로 이송시킬 수 있게 제작하였다.

고압실(p_n) 공급용 유압원은 별도로 설치하여 간섭에 의한 외부 영향을 차단하였으며, 입력라인에는 실린더가 이송하는 동안에 고압실의 압력상승에 의한 역류를 방지, 펌프의 토출 맥동 및 회로내의 압력변동을 흡수하기 위해 체크밸브와 축압기를 설치하였다. 리턴회로에는 고압실내의 압력이 조절을 위한 압력조

절밸브, 유압유의 온도조절을 위한 히터와 수냉식 냉각장치를 설치하였다.

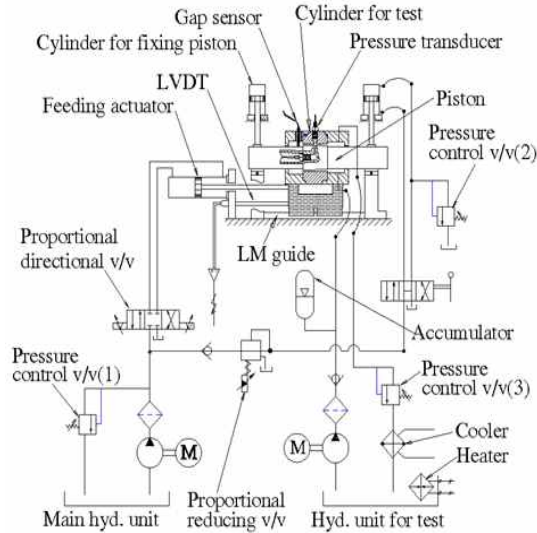


Fig. 4 Schematics of the experimental setup and hydraulic circuits

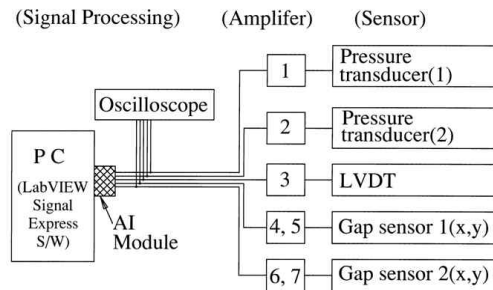


Fig. 5 Data acquisition system

Fig. 5는 측정 신호의 저장 및 처리를 위한 시스템의 구성도를 나타낸다. 실린더의 이송거리의 검출은 LVDT를 사용하였고, 피스톤과 실린더 사이의 간극에서 발생하는 압력은 Entran사의 EPX-N01Type의 압전형 압력센서를 사용하였다. 고압실내의 압력은 스트레인 게이지 타입의 kyowa사 PGM-100KH 압력센서를 사용하였다. 피스톤의 정렬 및 편심설정을 위해 피스톤로드 양단의 상하·좌우방향에 총4개의 AEC사 5V/mm의 분해능을 가진 PU-05type의 Gap sensor를 설치하여 피스톤과 실린더 사이의 정렬상태와 간극의 크기를 측정할 수 있게 하였다. 측정신호는 Amplifier로 증폭한 후 12bit의 분해

능을 가진 NI사의 USB-9221 AI Module를 사용하여 얻어진 데이터를 컴퓨터에 저장하고, LabVIEW Signal Express S/W를 사용하여 처리하였다.

또한 Tektronix사 TDS210 Model의 오실로스코프를 병렬로 연결하여 센서 신호를 시각화하여 변화거동을 관찰하였다. Fig. 6은 실험장치의 사진을 나타낸다.

Table 2 Experimental conditions

| Items | Type |
|-------------------------|--|
| Pressure transducer (1) | Entran EPX-N01-50B/L10F |
| Amplifier | Entran MSC-A1 |
| Pressure transducer (2) | kyowa PGM-100KH |
| LVDT | Kyowa DT-100A |
| Amplifier | Kyowa DPM-714B |
| Gap sensor | AEC PU-05 |
| Amplifier | ACE 5505model |
| Machining conditions | Feed speed: 30, 38, 45cm/s Eccentricity: 2, 3, 4 Oil Temp.: 15, 20, 35°C |



Fig. 6 Photograph of experimental apparatus

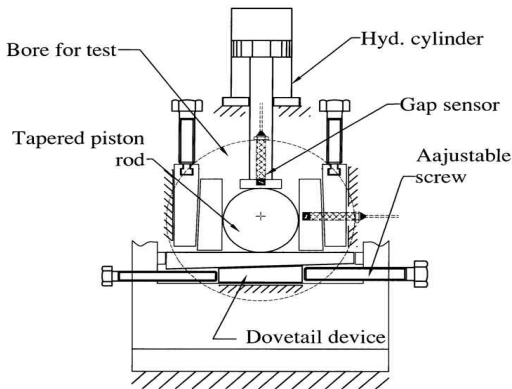


Fig. 7 Piston eccentricity adjustment device

3. 실험

3.1 피스톤-실린더의 정렬 및 편심 조정

피스톤과 실린더사이 간극에서 발생하는 압력측정의 신뢰성 향상을 위해서는 피스톤과 실린더의 정렬과 편심량을 정확히 설정해야 한다. Fig. 7은 피스톤로드의 정렬 조정 및 편심량을 변화시키기 위한 편심조정 장치의 구성도이다. 피스톤 양단 지지부에는 피스톤을 직각방향(상하 및 좌우)로 이동시킬 수 있는 편심조정 장치를 각각 설치하였다. 피스톤 로드 상부에는 유압 실린더를 사용하여 피스톤로드를 밀어 고정시키고, 맞은편 하부에는 썸기장치(dovetail)를 설치하여 피스톤 로드 중심위치를 상하방향으로 미세하게 조정할 수 있게 하였다. 썸기 장치의 썸기는 2개가 1조로 되어 있으며, 상부의 썸기는 고정되고 하부 것은 양측에 설치된 조정나사에 의해 좌우로 이동되면서 피스톤 로드 중심위치를 변화시킬 수 있게 되어 있다. 좌우방향은 양측에 설치된 썸기장치를 사용하여 조정할 수 있게 하였다. 썸기의 경사각은 0.5°, 조정나사 사양은 M5×p0.8로서 1회전에 피스톤로드 중심은 4 μ m 이동된다. Fig. 8은 이송거리에 따른 피스톤과 실린더의 동심 및 피스톤이 $\Phi=0^\circ$ 방향으로 2 μ m 편심된 상태에서 간극의 변화를 측정하는 것이다. 점선 (a)와 (b)는 편심량 0, 2 μ m위치에서 테이퍼 기울기가 3 μ m/50mm인 가상적인 피스톤의 간극 변화를 나타낸 것이고, 실선은 gap sensor를 사용하여 간극변화를 측정하는 결과를 나타낸다. 측정결과에는 시편의 형상오차와 정렬에 기인한 오차가 포함되어 있으며, 최대 오차량은 0.35 μ m정도이다.

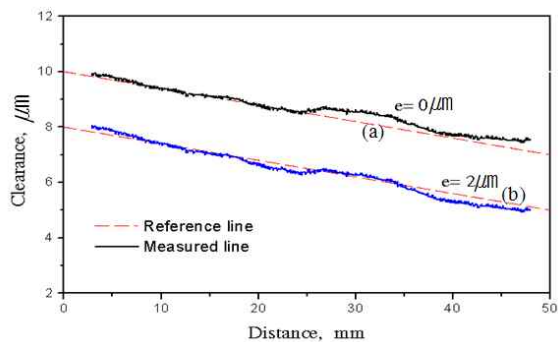


Fig. 8 Alignment and eccentricity adjustment of piston

4. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 피스톤의 편심량, 이송속도 및 유압유의 온도에 따른 점도의 변화 조건에서 피스톤과 실린더 사이의 간극에서 발생한 압력분포를 측정하기 위하여 압력조건은 $p_0=0$, $p_n=1\text{Mpa}$ 로 일정하게 설정하였다. Fig. 9는 온도 20℃, 이송속도 30cm/s, 피스톤의 편심량이 0, 2, 4 μm 인 조건에서 압력분포를 측정한 결과이다. 피스톤이 $\theta=0^\circ$ 방향으로 편심되어 있기 때문에 간극크기가 $\theta=180^\circ$ 방향에 비해 작고 상대적인 간극의 기울기가 한층 크게 된다.

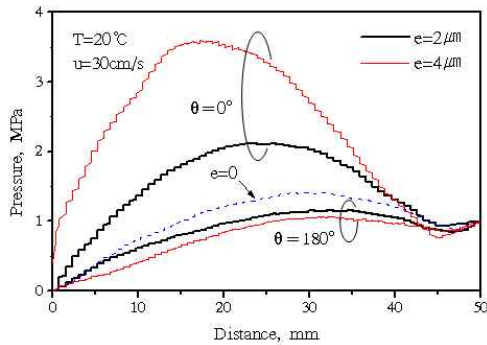


Fig. 9 Pressure distributions with eccentricity variation

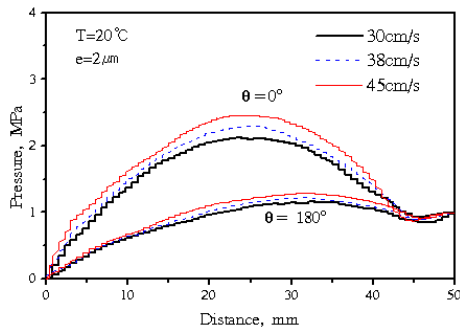


Fig. 10 Pressure distributions with feeding velocity variation

따라서 췌기(wedge)작용에 의해 발생하는 압력이 $\theta=0^\circ$ 에서 상대적으로 크게 나타난다. 편심량이 4 μm 경우는 2 μm 경우보다 최대발생압력이 $\theta=0^\circ$ 방향에서는 2배 정도 크게, $\theta=180^\circ$ 에서는 미소하게 작게 나타남을 알 수 있다. 이러한 원주방향에서의 압력 차이는 피스톤에 수직인 축력으로 작용한다.

Fig. 10은 온도 20℃, 피스톤의 편심량이 2 μm , 이송속

도가 30, 38, 45cm/s인 조건에서 압력분포를 측정한 결과이다. $\theta=0^\circ$, $\theta=180^\circ$ 의 양방향에서 이송속도가 증가함에 비례하여 발생압력의 크기도 상승되는 경향을 나타내고 있다.

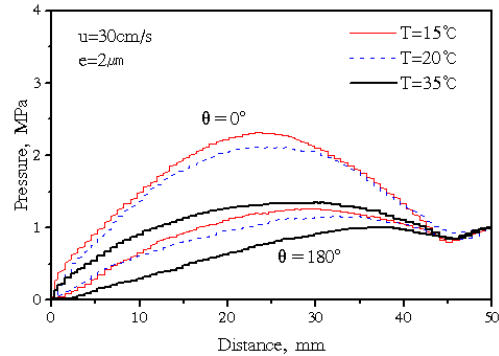


Fig. 11 Pressure distributions with oil temperature variation

Fig. 11은 이송속도 30cm/s, 피스톤의 편심량이 2 μm , 유압유의 온도가 15, 20, 35℃인 조건에서 압력분포를 측정한 결과이다. 유압유의 온도가 상승하면 유압유의 점도가 낮아지게 된다. 유압유의 온도가 상승함에 따라 발생압력의 크기는 $\theta=0^\circ$, $\theta=180^\circ$ 의 양방향에서 낮아지는 경향을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 피스톤-실린더 기구를 제작하여 상대운동을 하는 피스톤과 실린더사이의 간극에서 발생하는 압력분포를 실험적으로 측정하였다.

실험결과 간극사이에서는 점성유체인 유압유의 윤활작용에 의하여 발생하는 압력은

1. 피스톤의 편심량이 증가할수록 윤활작용에 의한 발생압력의 크기는 증가한다.
2. 피스톤의 편심량이 클수록 원주방향의 압력차이가 증가됨으로 이는 결과적으로 피스톤에 작용하는 축력의 크기도 크게 증가할 것으로 추정된다.
3. 이송속도, 즉 피스톤과 실린더의 상대속도가 증가할수록 발생압력의 크기도 증가한다.
4. 유압유의 온도가 높아질수록 저점도이므로 발생압력의 크기는 작아진다.

따라서 본 논문에서 제시하는 실험적인 방법과 결

과는 피스톤-실린더 기구를 채용하는 모든 유압기기의 설계, 성능향상 및 설비보전 등에 기여하리라 예상된다.

참고문헌

1. 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.
2. Mannam, J., "Further Aspects of Hydraulic Lock", Proc. Instn. Mech. Eng., Vol. 173, pp. 699-716, 1959.
3. Manhajm, J. and Sweeney, D.C., "An Investigation of Hydraulic Lock", Proc. Instn. Mech. Eng., Vol. 169, pp. 865-879, 1953.
4. Blackburn, J. F., "Contributions to Hydraulic Control - 5 Lateral Forces on Hydraulic Pistons", Trans. ASME, pp. 1175-1180, 1953.
5. 京極啓史, 瀨村有一, 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卷 第12号, pp. 914-921, 1990.
6. 京極啓史, 長沼徹郎, 瀨村有一, 中原綱光, "油壓ピストンポンプ・モータの潤滑特性(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卷 第1号, pp. 28-35, 1991.
7. 松本和幸, 池谷光榮, "斜板式アキシアルピストンモータの微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), 57卷, 540号 pp. 2729-2733, 1991.
8. 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轉運動と摩擦力", 日本機械學會論文集(C編), 59卷, 560号, pp. 1192-1197, 1993.
9. Park, T. J. and Lee, C. O., "Hydrodynamic Lateral Force on a Tapered Piston Subjected to Large Pressure Gradient", Proc. of 3rd Int. Conf. on Fluid Power Transmission & Control, Int. Academic Pub., pp. 44-48, 1993.
10. Backé, W., "Experimentelle Ermittlung der Druck und Temperaturverteilung in Dicht und Largerfugen hydrostatischer Maschinen", Research Report, Inst. für Hydraulische und Pneumatische Antrieb und Steuerung der RWTH Aachen, 1994.
11. Kim, Y. H. and Park, T. J., "Measurement of Hydrodynamic Pressure Distribution between a Piston and Cylinder", Proceedings of The Second Asia International Conference on Tribology pp. 419-420, 2002.