

유압 피스톤 펌프의 폐입구간에서 발생하는 압력변동 특성

김종기[†]·정재연*·노병준*·송규근*·오석형**

Pressure Variation Characteristics at Trapping Region in Oil Hydraulic Piston Pumps

Jong-Ki Kim, Jae-Youn Jung, Byung-Joon Rho,
Kyu-Keun Song and Seok-Hyung Oh

Key Words: Pressure Variation(압력변동), Trapping Region(폐입구간), Pre-Compression(예압축)

Abstract

Pressure variation is one of the major sources on noise emission in the oil hydraulic piston pumps. Therefore, it is necessary to clarify about pressure variation characteristics of the oil hydraulic piston pumps to reduce noise. Pressure variations in a cylinder at trapping region were measured during pump working period with discharge pressures, rotational speeds. The effect of pre-compression of the discharge port with three types valve plates also investigated. It was found that the pressure variation characteristics of oil hydraulic piston pumps deeply related with pre-compression design of the discharge port. Also, it was found that the pressure overshoot at trapping region can reduce by use of pre-compression at the end of the discharge port in valve plate

1. 서 론

전체효율이 높고 광범위한 운전조건에 대응이 수월하며 고속·고압화가 가능한 유압 액셀 피스톤 펌프가 산업기계를 비롯한 건설중장비, 공작기계, 사출 성형기 등 산업 전반에 걸쳐 다른 형식의 유압 펌프에 비해 점점 그 사용이 증가되고 있다. 이에 따라, 유압 액셀 피스톤 펌프 설계를 향상시키기 위한 많은 연구들이 행해졌고, 특히, 밸브 플레이트 설계에 대한 많은 연구들은 지금도 계속되고 있으며, 다수의 유용한 설계기술들이 개발되었다. 한편, 유압 시스템들의 무게는 고

압화에 따라 감소해가는 경향이지만, 그에 따른 방출 소음은 크게 증가되었다.

최근 들어 이러한 소음문제가 유압 시스템에서 해결해야 할 중요한 과제로 대두되고 있으며, 이 문제를 해결하기 위해서는 소음 방출 원인을 밝혀내는 것이 그 첫 번째 단계이다. 따라서 소음 발생 원인에 대한 이론적인 가정들이 이루어졌고[1][2] 이것을 실험적으로 증명하기 위해 노력중이나 지금까지 밝혀진 것은 매우 미미한 상태이다[3][4]. 그 중에서 폐입구간에서 발생하는 압력변동은 피스톤 펌프에서 주요 소음 원인 중에 하나로 알려져 있다.

그러나 실린더 블록이 고압이면서 고속으로 회전운동하기 때문에 폐입구간에서의 압력변동을 실험적으로 측정 하는 데는 기술적으로 많은 어려움이 있으며, 이로 인하여 신뢰성 있는 실험적인 연구가 행해지지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 피스톤 펌프의 주요 소음원 중의 하나인 폐

[†] 책임저자의 소속 : 전북대학교

E-mail : jungjy@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2372 FAX : (063)270-3918

* 저자 2의 소속 : 전북대학교

** 저자 3의 소속 : 군산대학교

입구간에서 압력변동을 실험적으로 측정하고 파악함으로써 액셀 피스톤 펌프의 성능향상을 도모하기 위한 설계 개선에 도움을 주고자 하였다

2. 실험장치 및 방법

피스톤 펌프의 구동은 75KW AC 서보 모터를 사용하였으며, vector inverter controller를 사용하여 0에서 2500rpm까지 무단 변속시킬 수 있다. 펌프와 모터는 절연 커플링으로 연결하였으며, 펌프 토출측에는 압력, 유량, 온도를 측정할 수 있는 센서를 부착하였다. 토출압력은 펌프 토출측에 부착한 압력제어 밸브(relief valve)를 사용하여 무부하에서 35MPa까지 변화시킬 수 있도록 하였다. 또한, 작동유의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 열 교환기를 설치하였으며, 작동유의 청정성을 유지시키기 위해서 펌프 흡입측 및 탱크로 드레인 되기 직전에 필터를 장착하였다

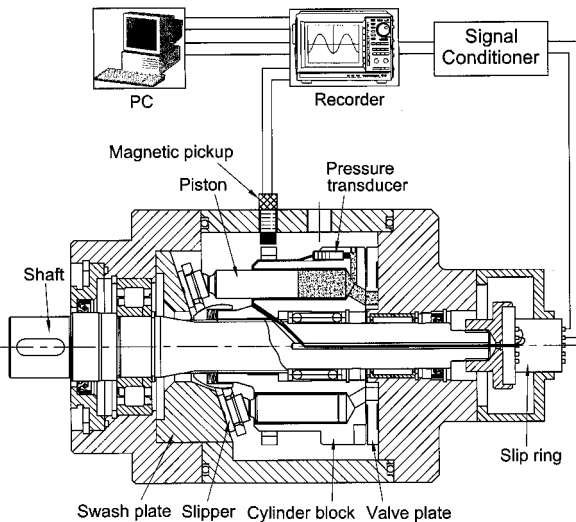
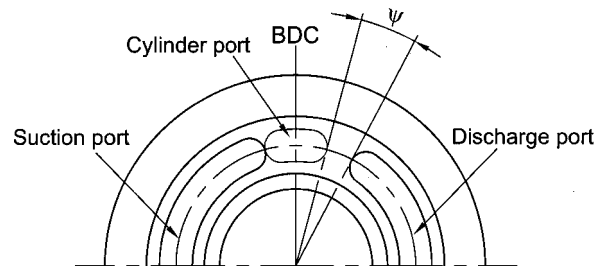


Fig. 1 Section diagram of test piston pump

Fig. 1은 실험용 유압 액셀 피스톤 펌프에 초소형 압력 변환기를 설치한 모습을 보여주는 단면도이다. 폐입구간에서 압력변동의 측정을 위해 하나의 실린더에 반경방향으로 구멍을 가공하여 고성능 초소형 압력 변환기를 장착하였다. 압력 변환기 선은 실린더 블록이 고속으로 회전하기 때문에 꼬임을 방지하기 위하여 실린더 블록 중심의 축을 통해 회전체로부터 신호를 측정할 수 있는 슬립링(slip ring)과 연결시켰다. 압력 변환기 신호는 슬립링(slip ring)에서 신호 조정기(signal conditioner) 통해 레코더로 보내져 아날로그 신호

로 볼 수 있고 동시에 디지털 값으로 저장된다. 획득한 데이터는 퍼스널 컴퓨터로 처리 및 분석하였다. 실험을 위해 서로 다른 형상의 밸브 플레이트 세 개를 설계 및 제작하였고, 그 중에서 토출 압력, 회전속도에 대한 영향은 valve plate 1(VP1)을 사용하여 측정하였다. 실험용 밸브 플레이트의 설계방법 및 예압축각의 치수는 Fig. 2에 나타내었다.



	Pre-compression angle
VP1	$\psi = 0^\circ$
VP2	$\psi = 5^\circ$
VP3	$\psi = 13^\circ$

Fig. 2 Designs of test valve plates

3. 실험결과 및 고찰

3.1 토출압력의 영향

Fig. 3은 예압축 구간이 0°인 밸브 플레이트 VP1을 대상으로 하나의 실린더가 밸브 플레이트 위를 회전할 때 나타나는 토출압력에 따른 폐입구간에서 압력변동들을 측정한 결과 그래프이다.

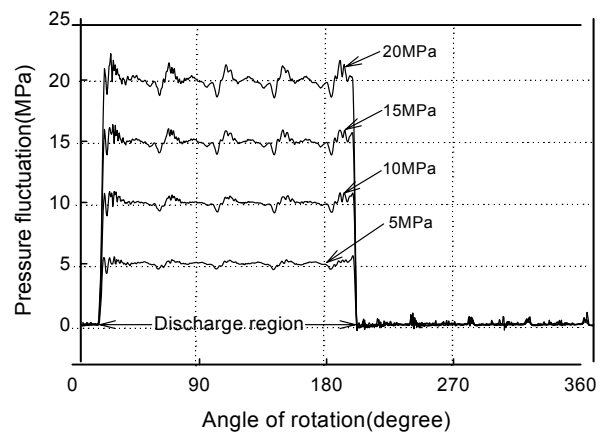


Fig. 3 Variations of pressure fluctuation at trapping region(1500rpm)

회전각은 360° 즉, 실린더 블록이 1회전하는 경우이고, 토출압력은 5~30MPa 까지 5MPa씩 증가시켰다. 그래프 상에 표시한 토출영역(discharge region) 이외의 영역은 흡입영역이다. 실린더가 토출영역을 지나는 동안 몇 번의 압력변동이 발생한다. 이것은 피스톤 수가 유한개이고, 펌프 토출영역에 존재하는 피스톤 수가 순간적으로 변화하기 때문에 나타나는 현상이다. 본 실험에 사용된 펌프의 피스톤 수는 9개로 이것의 반절인 4개 반 정도의 압력변동이 토출영역에 걸쳐 나타나고 있다. 이러한 토출영역에서의 압력변동은 토출압력이 5MPa에서 30MPa로 증가함에 따라 큰 폭으로 증가하는데, 그 원인은 토출압력이 증가하면 실린더가 겪어야 하는 흡입압력과 토출압력의 차가 커지고, 동일조건에서 더 급격한 압력상승이 이루어지기 때문이다. 또한, 흡입영역에서 저압의 작동유를 포함하고 있던 실린더가 토출영역으로 전환되면서 갑자기 고압의 작동유와 만나게 되어 나타나는 서지압력도 그 원인이 된다.

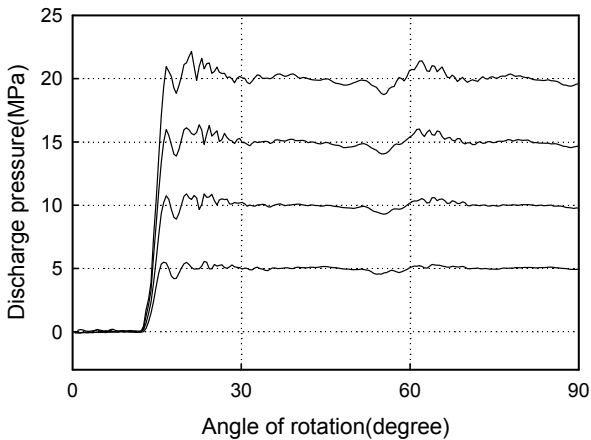


Fig. 4 Pressure rising slopes at trapping region

Fig. 4는 Fig. 3의 그래프에서 실린더 내부 압력이 흡입압력에서 토출압력으로 상승되는 폐입구간에서의 현상을 보다 자세히 살펴보기 위해 확대한 그래프이다. 토출압력이 증가함에 따라 폐입구간에서 압력 상승기울기의 증가 현상이 뚜렷이 관찰된다. 또한, 압력이 상승된 직후 서지압력에 의한 압력 오버슈트(overshoot) 현상도 나타난다. 이 오버슈트의 크기는 토출압력이 5MPa에서 20MPa까지 증가함에 따라 증가한다.

Fig. 5는 Fig. 3의 그래프에서 실린더 내부 압력이 토출압력에서 흡입압력으로 하강하는 폐입구

간에서의 압력변동 현상을 자세히 살펴보기 위해 확대한 그래프이다. 토출압력이 증가함에 따라 토출압력에서 흡입압력으로 하강하는 폐입구간에서 하강 기울기가 점점 급하게 나타나며, 토출압력증가에 따라 더욱더 갑작스런 압력변동이 발생하는 것을 알 수 있다.

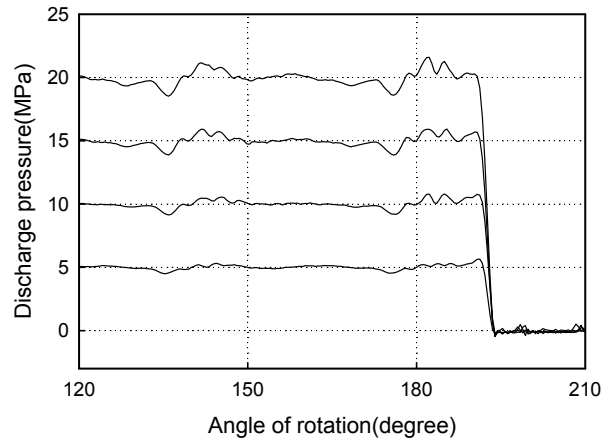


Fig. 5 Pressure dropping slopes at trapping region

3.2 회전수 영향

Fig. 6은 토출압력 20MPa의 동일 조건에서 회전속도를 500rpm, 1000rpm, 1500rpm 으로 변화시켰을 때 나타나는 폐입구간 및 실린더 내부 압력변동의 차이를 비교해 나타낸 그림이다. 회전속도의 증가에 따라 폐입구간에서 압력상승 초기에 나타나는 오버슈트(overshoot)가 증가되고, 압력변동이 큰 폭으로 증가한다. 이는 회전속도가 증가함에 따라 폐입구간을 통과하는 실린더의 순간속도가 증가되고 실린더 내부 피스톤의 순간 압축율도 증가되며, 따라서 작동유의 압축이 더욱 빠른 속도로 이루어지기 때문으로 생각된다. 그러나 압력변동 폭의 증가율이 회전속도의 증가율에 비례하지는 않는다.

즉, Fig. 6에서 회전속도가 500rpm에서 1000rpm으로 상승함에 따라서는 압력변동 폭의 증가가 미세하지만, 1000rpm에서 1500rpm으로 상승하면 압력변동 폭이 크게 증가한다. 이것은 토출된 작동유가 흘러가는 토출라인의 배관 및 밸브 등이 일정한 용량으로 고정되어져 있기 때문에 나타나는 현상이다. 즉, 회전속도가 증가하면 토출라인을 흘러가는 작동유의 유량이 증가하여 배관 및 밸브 등에 의해 더 큰 저항을 받게 되어 압력변동 폭의 증가를 초래한다. 또한, 그 증가현상은

설계된 배관 및 밸브의 용량을 근접하는 순간을 기점으로 급격히 증가되어 나타난다. 이로 인해 회전속도의 증가에 따라 폐입구간 및 실린더 내부 압력변동이 어느 회전속도를 기점으로 큰 폭으로 증가하게 된다. 따라서 펌프 정격용량에 맞는 토출라인의 설계가 압력변동을 줄이는 하나의 방법이 될 수 있다.

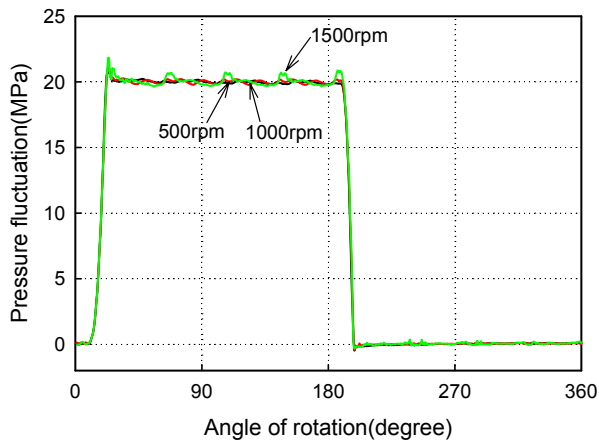


Fig. 6 Comparison of pressure fluctuation at trapping region with speed of rotation(20MPa)

이 외에 원인으로서는 회전속도의 증가에 따라 펌프 흡입 및 토출 측에서 캐비테이션 발생 위험성이 증가되는 것을 들 수 있다. 캐비테이션이 발생하면 흡입성능이 저하하고, 토출유량이 감소하면서 토출압력이 매우 불안정한 상태로 된다. 따라서 회전속도의 증가에 따른 캐비테이션의 발생도 압력변동의 원인으로 고려해야한다.

3.3 예압축(폐입)의 영향

밸브 플레이트에 예압축 구간(폐입구간)을 설계하면, 피스톤이 토출행정을 시작하여 이 예압축 구간을 지나는 동안 작동유를 강제 압축함으로써 실린더 내부 압력이 상승하고, 그 상승압력이 토출압력과 같을 때 실린더 포트가 토출포트에 연결되도록 하면 압력변동이 원활해진다.

Fig. 4.7~Fig. 9는 예압축 구간이 0°(VP1), 예압축 구간이 5°(VP2), 예압축 구간이 13°(VP3)을 대상으로 각각 실린더 블록이 1 회전하는 동안 토출압력에 따른 실린더 내부 압력변동을 측정된 결과 그래프들이다. 회전각 360°는 실린더 블록의 1회전을 의미하고, 토출압력은 5에서 30MPa까지 5MPa씩 증가시키며 실린더 내부 압력변동을 측

정하였다. Fig. 4.7~Fig. 4.9에서 전체적으로 모든 토출압력 범위에 걸쳐 동일 토출압력 조건에서 VP1의 압력변동 폭에 비해 VP2, VP3의 압력변동 폭이 크게 감소하여 나타난다. 토출압력 20MPa의 경우, VP1의 압력변동 폭은 3.05MPa 이고, VP3의 압력변동 폭은 1.92MPa 이다. 예압축 구간이 없는 VP1을 기준으로 했을 때, 13°의 예압축 구간을 갖는 VP3의 압력변동 폭은 전체적으로 37% 정도 감소한다.

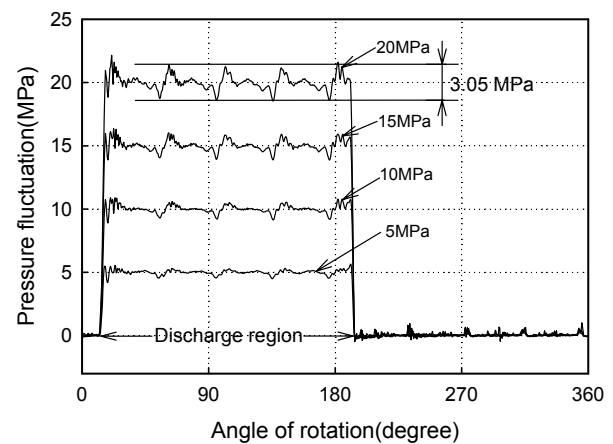


Fig. 7 Variations of pressure fluctuation at trapping region(1500rpm, VP1)

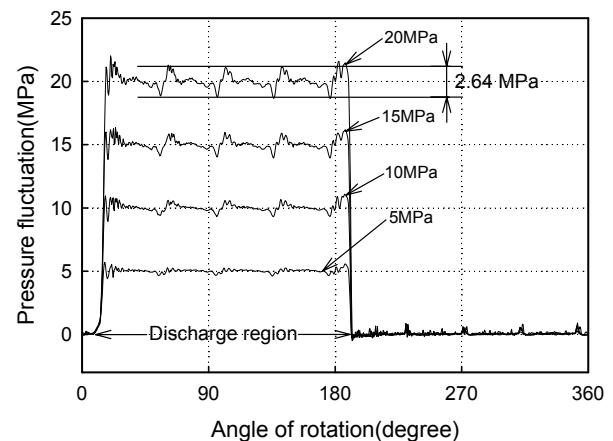


Fig. 8 Variations of pressure fluctuation at trapping region(1500rpm, VP2)

Fig. 4.10은 회전속도 1500rpm, 토출압력 20MPa의 조건에서 VP1, VP2, VP3의 폐입구간에서 압력변동의 차이를 비교해본 그래프이다. 저압의 흡입영역에서 고압의 토출영역으로 전환하는 압력상승의 기울기가 뚜렷이 차이를 보인다. VP1에

비해 VP2, VP3의 압력상승 기울기가 훨씬 완만하게 나타난다. 압력 상승기울기를 시간으로 환산해 보았다. VP1의 경우 흡입압력에서 토출압력까지 상승하는 시간이 6×10^{-4} (s)이고, VP의 경우는 15.5×10^{-4} (s)이다. 13°의 예압축 구간을 설계하면, 압력상승 시간은 약 2.6배 정도 느려지게 되어 보다 원만한 압력변동이 이루어짐으로써 실린더 내부변동압력 폭이 줄어들게 되는 것으로 판단된다.

그러나 이러한 예압축 구간의 설계는 펌프의 정격 토출압력, 회전속도, 작동유 등에 따라 변화하기 때문에 설계시 주의하지 않으면 안된다.

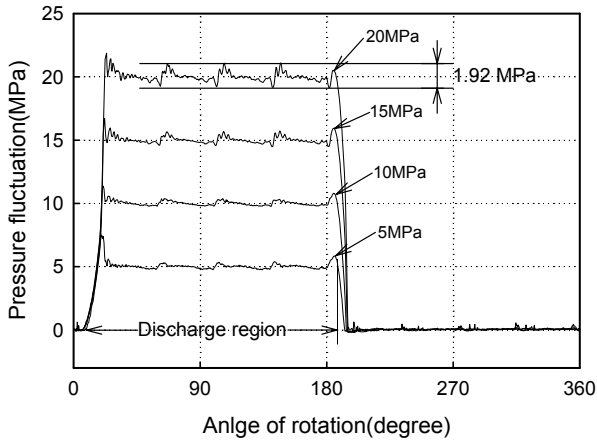


Fig. 9 Variations of pressure fluctuation at trapping region(1500rpm, VP3)

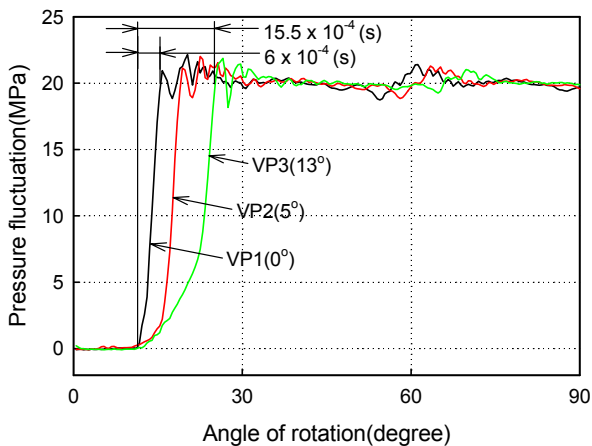


Fig. 10 Comparison of pressure rising times at trapping region(20MPa)

4. 결 론

유압 액셀 피스톤 펌프의 폐입구간에서 발생하는 압력변동 특성을 실험적으로 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폐입구간에서 토출 압력의 증가에 따라 압력 상승 및 하강 기울기가 증가하고, 상승초기 압력 오버슈트도 증가하여 압력변동은 큰 폭으로 증가한다.

2) 폐입구간에서 회전속도의 증가에 따라 압력 변동이 비선형적으로 증가하는데, 이것은 회전속도 증가에 따른 작동유의 순간 압축속도의 증가에 의한 압력 상승 시작점에서의 압력 오버슈트의 증가 및 펌프 토출라인의 배관 등이 원인으로 판단된다.

3) 밸브 플레이트에 예압축 구간(폐입구간)을 적절히 설계하면 압력변동을 원활하게 할 수 있으며 압력변동 폭도 크게 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Helgestad, B.O., Foser, K., and Bannister, F.K., "Pressure transients in an axial piston hydraulic pump," Proc. Inst. of Mech. Engrs., Vol. 188, No. 17, pp. 198-199, 1974.
- (2) Lin, S.J., Akers, A., and Zeiger, G., "The effect of oil entrapment in an axial piston pump," Transactions of the ASME, Vol. 107, pp. 246-251, 1985.
- (3) Edge K.A., Darling, J., "Cylinder pressure transients in oil hydraulic pumps with sliding plate valves," Proc. Inst. of Mech. Engrs., Vol. 200, pp. 45-54, 1986.
- (4) Hiroshi KOSODO, Masayoshi NARA, Shizuhiro KAKEHIDA, Yasuhiko IMANARI, "Experimental research on pressure-flow characteristics of the V-notch," Fluid power system, Vol. 29, No. 1, pp. 16-22, 1998.