

## 유압 액셀 피스톤 펌프의 실린더 내부 압력 변동이 소음에 미치는 영향

정재연\*(전북대 기계공학부), 송규근(전북대 기계공학부), 오석형(군산대 기계공학부)  
김종기(전북대 대학원 정밀기계공학과), 곽재련(전북대 대학원 정밀기계공학과)

### Effect of the Cylinder Pressure Fluctuation on the Noise of Oil Hydraulic Axial Piston Pumps

J.Y. Jung(Mecha. Eng. Fac., CBNU), K. K. Song(Mechanical Eng. Fac., CBNU), S.H.Oh(Mechanical Eng. Fac.,  
KSNU), J.K.Kim(Prec. Mecha. Eng. Dept., CBNU), J.R.KWAG(Prec. Mecha. Eng. Dept., CBNU)

#### ABSTRACT

Pressure fluctuation in the cylinder is one of the major sources on noise emission in oil hydraulic piston pumps. This paper reports an experimental study of pressure fluctuation characteristics in the cylinder of oil hydraulic piston pumps. We measured pressure fluctuation at BDC with delivery pressure, rotational speed. Because the pre-compression and the V-grooves in the valve plate is known of noise reduction, we investigated also the effect of pre-compression and V-grooves at the ends of the kidney ports with four types valve plates. We found that the pre-compression and the V-grooves in valve plate could reduce the noise of oil hydraulic piston pumps.

**Key Words :** Pressure fluctuation (압력변동), Noise (소음), Cylinder (실린더), Valve plate (밸브 플레이트), Oil hydraulic axial piston pump (유압 액셀 피스톤 펌프)

#### 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, 산업 유니트들의 무게는 고압화에 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 노력 중이나 지금까지 밝혀진 것은 매우 미미한 상태이

다[3][4]. 그 중에서 실린더 내부의 압력변동은 피스톤 펌프에서 주요 소음 원인 중에 하나로 알려져 있다.

그러나 실린더 블록이 고압이면서 고속으로 회전운동하기 때문에 실린더 내부의 압력변동을 실험적으로 측정하는 것은 기술적으로 많은 어려움이 있으며, 이로 인하여 신뢰성 있는 실험적인 연구가 행해지지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 피스톤 펌프의 주요 소음원 중의 하나인 실린더 내부 압력변동을 실험적으로 측정하고 소음과의 상관관계를 살펴봄으로써 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 controller 를 사용하여 0~2,500rpm 까지 무단 변속시켰다. 펌프와 모터는 절연 커플링으로 연결하였고, 펌프 토출측에는 압력, 유량, 온도를 측정할 수 있는 센서를 부착하였

다. 토출압력은 펌프 토출측에 부착한 압력제어 밸브(relief valve)를 사용하여 무부하에서 35MPa 까지 변화시킬 수 있도록 하였다. 또한, 작동유의 온도를 일정하게 유지하기 위해 열 교환기를 설치하였으며, 작동유의 청정성을 유지시키기 위해서 펌프 흡입측 및 탱크로 드레인 되기 직전에 필터를 장착하였다

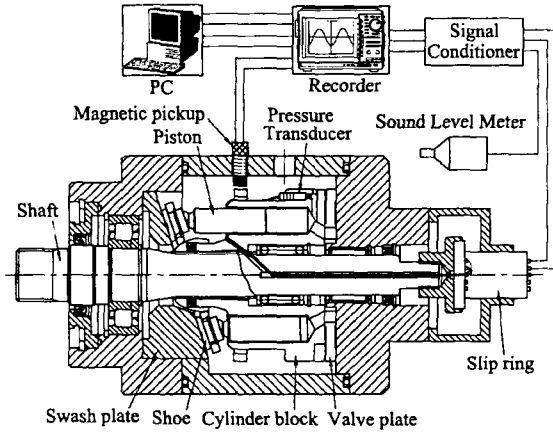


Fig. 1 Section diagram of test piston pump

Fig. 1 은 실험용 유압 액셀 피스톤 펌프에 초소형 압력 변환기를 설치한 모습을 보여주는 단면도이다. 실린더 내부 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 변환기의 신호는 슬립링(slip ring)에서 신호 조정기(signal conditioner)를 통해 레코더로 보내져 아날로그 신호로 볼 수 있고 동시에 디지털 값으로 저장된다. 획득한 데이터는 퍼스널 컴퓨터로 처리 및 분석하였다.

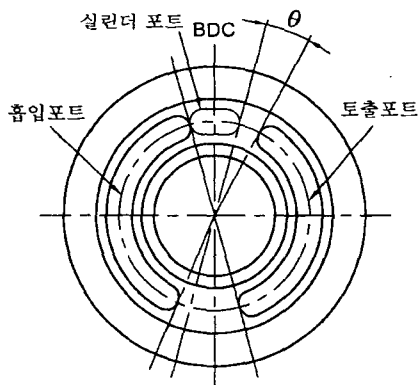


Fig. 2 Configuration of test valve plates

실험을 위해 서로 다른 형상의 밸브 플레이트 네 개를 설계 및 제작하였고, 그 중에서 토출 압력, 회전속도에 대한 영향은 valve plate 4 를 사용하여 측정하였다. 실험용 밸브 플레이트의 형상은 Fig. 2 에 나타내었고, 예 압축각( $\theta$ )의 치수는 Table. 1 에 나타내었다.

Table. 1 Dimension of test valve plates

구 분	예 압축각( $\theta$ )	V-노치
Valve plate 1(VP1)	0 도	없음
Valve plate 2(VP2)	5 도	없음
Valve plate 3(VP3)	13 도	없음
Valve plate 4(VP4)	13 도	있음

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 토출압력의 영향

Fig. 3 은 valve plate 4 를 대상으로 측정한 토출압력에 따른 실린더 내부 압력변동 결과를 보여주고 있다. 하나의 실린더는 1 회전당 흡입포트와 토출포트를 한번씩 지나게 된다. 따라서 토출압력의 증가는 실린더가 겪어야 하는 흡입압력과 토출압력 차의 증가를 의미하고, 토출압력이 증가할수록 동일조건에서 더 급격한 압력변동이 발생하게 된다. 이러한 이유 때문에 Fig. 3 에서 알 수 있듯이 흡입압력에서 토출압력으로의 변동 기울기가 토출압력이 증가할수록 증가하게 된다. 한편, 전 토출영역을 지나는 동안 실린더 내부 압력은 몇번의 맥동이 발생하게 되고, 이것은 피스톤의 개수가 유한개이기 때문에 발생하는 기구학적 구조가 그 원인으로 생각된다. 본 실험에서 사용된 피스톤 펌프는 피스톤 수가 9 개 이고, 예압축 구간의 영향으로 Fig. 3 에서 4 번 정도의 맥동이 발생함을 확인할 수 있다.

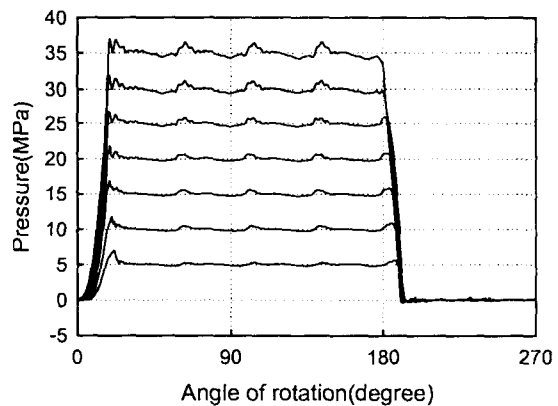


Fig. 3 Cylinder pressure fluctuation with delivery pressure

또한, 흡입압력에서 토출압력으로 전환되는 시

작점에서 실린더 내에는 압력 오버슈트(overshoot)가 발생함을 알 수 있다. 이것은 실린더 내부 작동유가 BDC 를 지나 토출포트로 연결될 때까지 피스톤에 의해 압축되다가 어느 순간 토출포트로 연결되면서 서로 다른 실린더 내부 압력과 토출 포트내 압력이 순간적으로 부딪침으로 인해 비정상적인 압력이 발생하는 것으로 생각된다.

### 3.2 회전수의 영향

회전속도에 따른 실린더 내부 압력변동을 조사하기 위해 valve plate 4 를 사용하여 동일압력 및 동일온도 조건에서 회전속도를 변화시키면서 측정하였고, 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 그림으로부터 BDC 에서 실린더 내부 압력변동의 크기는 회전속도의 증가에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다.

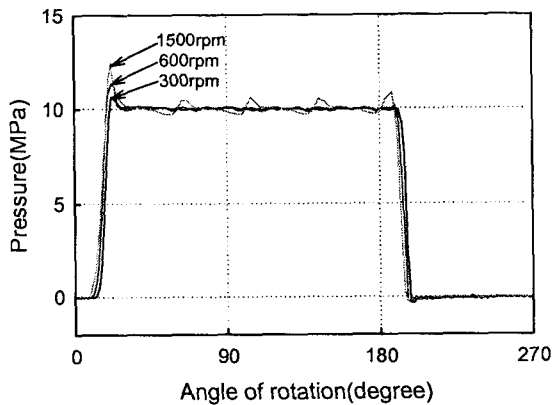


Fig. 4 Cylinder pressure fluctuation with rotational speed

이는 회전속도가 증가함에 따라 BDC 를 통과하는 실린더의 순간속도가 증가되고 실린더 내부 피스톤의 순간 압축율도 증가되며, 따라서 작동유의 압축이 더욱 빠른 속도로 이루어지게 되고 그에 따라 압력변동도 커지게 되는 것으로 생각된다. 즉, 회전속도의 증가에 따라 압력변동 기울기 및 압력변동폭이 증가하게 되기 때문에 고속 운전조건에서 펌프의 소음이 그만큼 증가하게 됨을 알 수 있다.

Fig 5 는 토출압력 및 회전속도에 따른 소음특성을 보여주고 있다. 그림에서 토출압력 및 회전속도의 증가에 따라 거의 선형적으로 소음이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이런 이유는 이미 전술한바와 같이 토출압력이 증가함에 따라 보다 급격한 압력 상승이 실린더 내부에서 발생하고, 회전속도가 증가함에 따라 작동유의 순간 압축속도의 증가에 의한 압력 상승 시작점에서 오버슈트의 증가가 그 원인으로 판단된다.

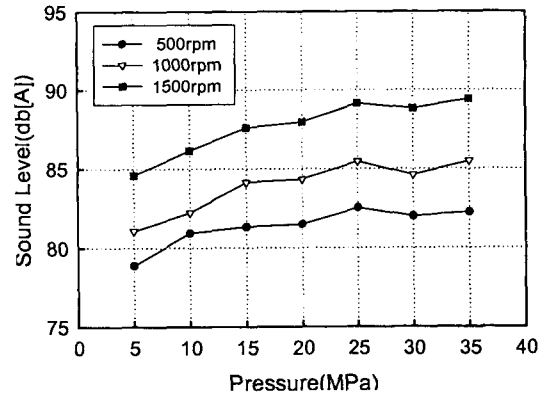


Fig. 5 Noise with deliver pressure and rotational speed

### 3.3 예압축의 영향

흡입압력에서 토출압력으로 전환되는 시작점에서 압력 오버슈트와 압력상승 기울기를 줄이는 것은 펌프 소음을 저감하는데 매우 중요하다. 이를 위해 실린더가 밸브 플레이트의 토출포트로 연결되기 직전에 예압축 구간을 설계하여 피스톤이 토출행정을 시작하여 이 예압축 구간을 지나는 동안 작동유를 압축함으로 인해 실린더 내부의 압력을 강제 상승시키게 된다. 그리고 이 상승 압력이 토출압력과 동일한 시점에 토출포트로 연결되도록 하면, 실린더 내부에서 발생하는 급격한 압력변동을 줄이는 것이 가능하다. Fig. 6 은 예압축 구간의 차이에 따른 실린더 내부 압력변동을 측정한 결과그래프이다.

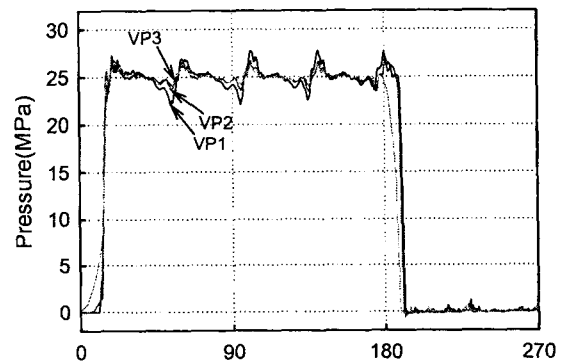


Fig. 6 Cylinder pressure fluctuation with pre-compression

그림으로부터 예압축 구간이 없는 VP1 에 비해 예압축 구간이 존재하는 VP2 및 VP3 의 압력상승 기울기 및 압력 변동폭이 상당히 감소함을 알 수 있다. 따라서 VP3 를 갖는 펌프의 소음은 상당히 감소될 것으로 예상할 수 있다. 결국, 예압축 구간의 설계는 실린더 내부 압력변동을 줄이고, 펌프 소음을 저감하는데 매우 중요함을 알 수 있다.

### 3.4 도망홈의 영향

밸브 플레이트의 토출 포트 시작위치에 설계되는 예압축 구간의 영향에 대해서는 전절에서 살펴 보았다. 그러나 예압축 구간의 설계는 어느 특정조건에 대해서만 만족할만한 결과를 얻을 수 있고, 그 조건을 벗어나게 되면 그 효과는 감소하게 된다. 따라서 보다 넓은 작동조건에 대해서 실린더 내 압력변동 및 소음을 감소시키는 방법이 강구되어야 하고, 그 대책의 하나가 바로 도망홈의 설계이다. 도망홈의 설계는 각 베이커 마다 조금씩 다르고, 경험적인 요소가 많이 포함되어져 있다. 따라서 이러한 도망홈의 영향을 실험적으로 살펴 보았으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

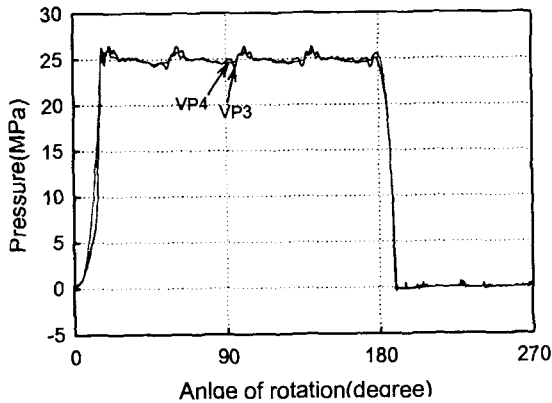


Fig. 7 Cylinder pressure fluctuation with V-notch

Fig. 7에서 알 수 있듯이 예압축 구간과 함께 도망홈이 설계된 VP4가 예압축 구간만 설계된 VP3에 비해 압력변동 폭이 감소함을 확인할 수 있다. 결국, Fig. 6과 Fig. 7에서 살펴본 바와 같이 예압축 구간 및 도망홈의 설계는 실린더 내부 압력변동을 완화시키게 되며, 이것은 곧 펌프 소음 감소로 이어지게 된다.

Fig. 8은 예압축 구간과 도망홈에 따른 펌프 소음을 측정된 결과그래프이다. 그림으로부터 예압축 구간 및 도망홈이 설계된 VP4가 전 영역에 걸쳐 가장 소음이 낮음을 확인할 수 있고, 이것은 이미 고찰한 바와 같이 실린더 내부 압력변동이 가장 작기 때문인 것으로 생각된다. 예압축 구간만 설계된 VP3의 소음은 예압축 구간이 없는 VP1과 비교해 볼 때 약 2dB 정도의 소음감소 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한, 예압축 구간과 함께 도망홈이 설계된 VP4는 예압축 구간만 설계된 VP3에 비해 전체적으로 약 3dB의 소음 감소효과가 있음을 알 수 있다. 결국, 예압축 구간과 도망홈의 설계에 의해 펌프 소음은 약 5dB 정도 감소됨을 알 수 있었다.

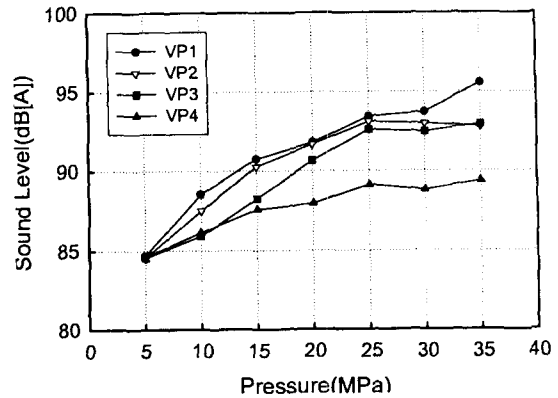


Fig. 8 Effect of pre-compression and V-notch on noise

### 4. 결론

유압 액셀 피스톤 펌프에서 밸브 플레이트 형상에 따른 실린더 내부 압력변동과 소음을 실험적으로 측정하여 그 상관 관계를 밝히고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펌프 소음은 토출압력의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는데, 이것은 토출압력의 증가에 따른 실린더 내부의 급격한 압력 상승과 압력 변동폭의 증가가 그 원인으로 판단된다.
- 2) 펌프 소음은 회전속도 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하며, 이것은 회전속도 증가에 따른 순간 압축속도 증가에 의한 압력 상승 시작점에서 압력 오버슈트 증가가 그 원인으로 판단된다.
- 3) 밸브 플레이트에 예압축 구간과 도망홈을 설계하여 실린더 내부 압력변동을 큰 폭으로 줄일 수 있으며, 펌프 소음을 약 5dB 정도 감소시킬 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 al., "Experimental research on pressure-flow characteristics of the V-notch," Fluid power system, Vol. 29, No. 1, pp. 16-22, 1998.