

# 유압 피스톤 모터의 오리피스 변화에 따른 정압베어링의 특성에 관한 연구

## A Study on the Characteristics of the Hydrostatic Bearing by the Variation of the Orifice in Hydraulic Piston Motor

김광민 · 이용범 · 김태석  
K. M. Kim, Y. B. Lee and T. S. Kim

**Key Words** : Hydrostatic bearing(정압베어링), Orifice(오리피스), Piston shoe(피스톤 슈)

**Abstract:** In the case of hydraulic piston motor, hydrostatic bearing is designed to be adapted the hydrostatic bearing for the relative lubrication in the structural design. It's available to make it highly efficient and that's why it's widely used. The thing which largely influence the high pressure, the high efficiency, and the life is the hydrostatic bearing between a shoe and a swash plate. In this study, with the most general "hydrostatic bearing shoe" that has one recess as the subject of this research, I designed and made the 4 kind of piston shoe that have different orifice diameter each other, and studied the features of the hydrostatic bearing by observing the change of the leakage flow rate, the torque and the volumetric efficiency through experiments on the changes of the pressure & the speed of the revolution. As a result, the bigger diameter of the orifice, the less torque. And with an increase of the orifice diameter under the high pressure, the leakage flow rate decreased remarkably. Also it was observed the leakage flow rate increased linearly according to the increase of the supply pressure.

### 기호 설명

- h : 유막 두께 [ $\mu\text{m}$ ]
- $P_r$  : 리세스(recess)부의 압력 [MPa]
- $P_s$  : 피스톤 공급압력 [MPa]
- $Q_1$  : 오리피스를 통한 유량 [L/min]
- $Q_{out}$  : 슈와 사판사이의 누설유량 [L/min]
- $q_{out}$  : 토출유량 [L/min]
- $r_1$  : 리세스(recess) 반경 [cm]
- $r_2$  : 슈 바깥 반경 [cm]
- $r_3$  : 오리피스(orifice) 반경 [cm]
- $r$  : 피스톤 반경 [cm]
- $\mu$  : 점성계수 [Pa · s]

### 1. 서 론

액셀피스톤 모터는 접촉하여 회전하는 부분에 정압 베어링을 채용하기 때문에 고속, 고압화로 고출력밀도화가 가능하여 널리 사용되고 있다.

액셀피스톤 모터는 윤활부분의 마찰손실 및 용적손실과 기구적 조립부분의 마찰손실 및 오일의 관로 저항에 의한 압력저하와 압축성에 의한 체적손실 등이 있으며, 고압·고속화와 고 효율화 및 수명에 가장 큰 영향을 미치는 부분이 슈와 사판사이의 정압베어링이다.

정압 베어링과 관련된 윤활특성과, 정압베어링 비에 따른 윤활특성에 관한연구<sup>1)</sup>, 정압베어링 응답특성에 관한연구<sup>2)</sup>, 피스톤 슈의 균형과 형상을 중심으로 피스톤 슈 부분에 대한 해석연구<sup>3)</sup> 등이 있다.

본 연구에서는 가장 일반적인 형태인 하나의 리세스(recess)를 갖는 슈 정압베어링을 대상으로 실험을 통해 효율 및 누설유량의 변화 등을 관찰하고, 오리피스의 직경변화에 따른 정압베어링의 특성을 파악하고자 한다.

---

접수일 : 2010년 7월 1일, 게재확정일 : 2010년 8월 2일  
 김광민(책임저자): 한국기계연구원  
 E-mail : [kmkim85@kimm.re.kr](mailto:kmkim85@kimm.re.kr), Tel : 042-868-7975  
 이용범, 김태석 : 한국기계연구원

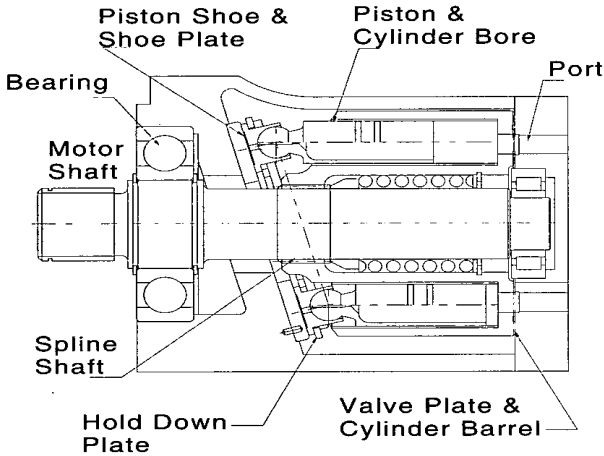


Fig. 1 Hydraulic piston motor

## 2. 정압베어링 이론

### 2.1 기본 구조 및 이론

피스톤 슈와 슈 플레이트의 습동 부분에서 상대운동을 할 때 얇은 유막에서 압력 구배가 형성되고, 이로 인해 체적손실은 발생하지만 이 유막은 다른 한편으로 윤활을 원활하게 하기 때문에 기계효율을 증가시키는 특성도 있다.

Fig. 2와 같이 피스톤 지름  $d$ 에 공급압력  $P_s$ 를 공급하면 선형 힘  $F$ 가 발생하고, 이 힘은 사판의 경사 각  $\alpha$ 와 회전 반경  $R$ 에 의해서 토크가 발생하며, 공급유량  $Q$ 를 피스톤 단면적  $A$ 로 나누면 속도  $V$ 가 되고, 공급압력은 오리피스 지름  $2r_3$ 와 길이  $L_1$ 을 통과하며 압력 저하가 발생하고 리세스 부분의 압력  $P_r$ 을 유지하게 된다.

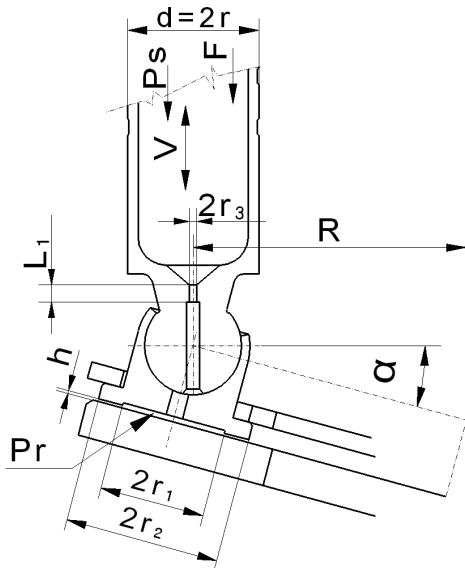


Fig. 2 Simplified geometry of piston shoe & plate

사판과 슈 랜드 사이의 틈새  $h$ 는 리세스 지름  $2r_1$ 과 랜드의 지름  $2r_2$ 에 의해 유막으로 형성되고 이 유막의 두께의 3승과 압력구배에 따라서 유량이 흐르게 되는데 이 누설 유량  $Q_{out}$ 이 정압베어링의 용적효율에 가장 큰 영향을 미치게 된다.

### 2.2 피스톤 슈에 대한 해석

정압베어링의 틈새로부터 유출하는 유량  $Q_{out}$ 은 단순히 압력차에 의한 흐름으로 피스톤 슈 밑면의 임의의 반경  $r$ 에서의 누설유량은 다음과 같다.

$$Q_{out} = \frac{\Delta P \cdot h^3 \cdot 2\pi \cdot r}{\delta r \cdot 12\mu} \quad (\text{단, } r_1 \leq r \leq r_2) \quad (1)$$

식(1)을 경계조건  $r=r_1$  일 때  $P=P_r$ ,  $r=r_2$  일 때  $P=0$ 에 대하여 적분하면 피스톤 슈 밑면을 통한 누설유량  $Q_{out}$ 은 다음 식으로 표현된다.

$$Q_{out} = \frac{P_r \cdot \pi \cdot h^3}{6\mu \ln(r_2/r_1)} \quad (2)$$

여기서, 반경이  $r_3$ 이고 길이가  $L_1$ 인 피스톤의 모세관을 통한 유량  $Q_1$ 은 음식과 같이 주어진다.

$$Q_1 = \frac{(P_s - P_r) \cdot r_3^4 \cdot \pi}{8\mu \cdot L_1} \quad (3)$$

오리피스 반경  $r_3$ 와  $L_1$ 의 함수이므로 이를 적절히 조절함으로써 효율손실을 최대한 줄일 수 있다.

식 (2)와 (3)을 유량 연속방정식에 의해 리세스 부의 압력  $P_r$ 에 관한 방정식을 풀면 다음 식과 같이 주어진다.

$$P_r = \frac{3 \cdot r_3^4 \cdot \ln(r_2/r_1)}{4L_1 h^3 + 3r_3^4 \ln(r_2/r_1)} \cdot P_s \quad (4)$$

일반적으로 유압 피스톤 모터의 피스톤 수는 9개이지만 본 연구에서는 2개의 피스톤만을 실험했으며 수정된 용적효율  $\eta_v$ 는 다음 식과 같다.

$$\eta_v = \frac{Q_{total}}{Q_{total} + 2Q_{out}} \times 100 \quad (5)$$

따라서, 서로 다른 오리피스 직경을 가진 4종의 슈를 설계 및 제작하고, 실험을 통하여 정압베어링 윤활특성에 관해 살펴보려고 한다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에서 사용된 시험장비 Fig. 3은 피스톤 2개의 행정이 경사판의 회전에 동기 적으로 작동하도록 설계되었으며, 전진하는 1개의 피스톤에서 토출된 오일이 후진하는 다른 1개로 흡입되게 함으로써 연속적으로 동일한 체적이 되어 유량변동이 발생하지 않는다.

Fig. 4에 나타난 실험 장치는 높은 압력과 고속회전에도 유량변동과 추력이 거의 발생하지 않으므로 피스톤 슈와 경사판, 피스톤과 피스톤블록사이의 마찰에 의한 토크 및 누출유량의 계측이 가능하도록 설계된 시험 장치이다, 피스톤형 초고압 펌프를 사용하여

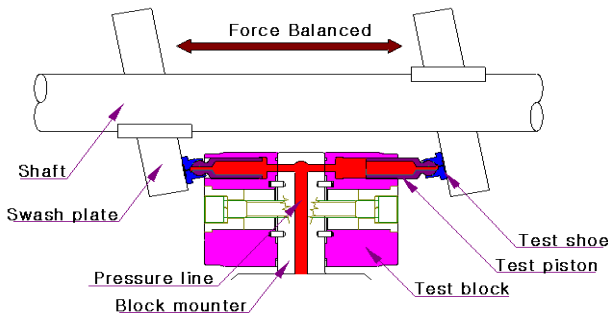


Fig. 3 Force balanced type test jig

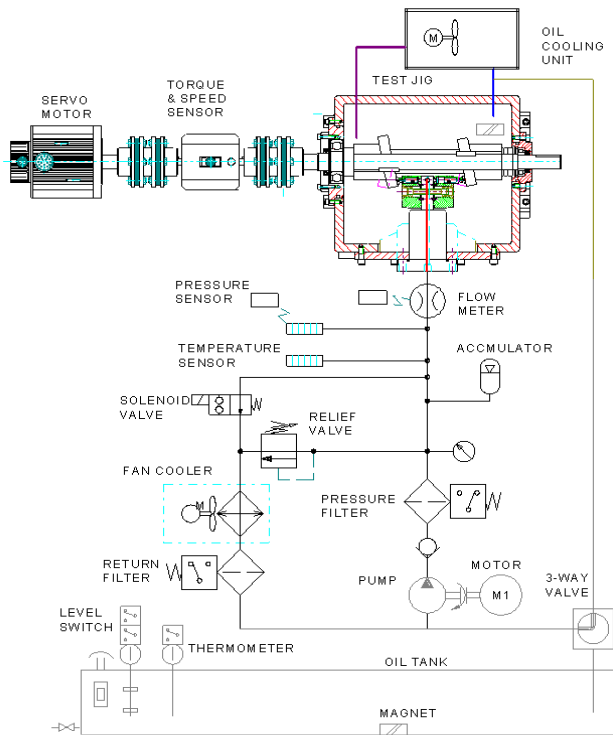


Fig. 4 Hydraulic circuit for the test



Fig. 5 Photo of test equipment

여 실험최고 압력이 70[MPa]이 되도록 하였고, AC모터를 사용하여 0~4,500[rpm]범위까지 속도제어가 되도록 하였다. 정압베어링부와 피스톤 블록 틈새의 누유량을 측정하기 위해 실험지그와 가장 근접한 유압공급 관로에 기어형 정밀 유량센서를 장착하였다. 또한 실험부의 온도와 시스템의 온도를 측정하기 위하여 고압오일 공급관로와 오일저장 탱크에 온도센서(thermo couple)를 설치하였고, 실험압력을 측정하여 기계효율을 연산하기 위해, 밸브매니폴드와 고압 관로에 동일한 사양의 압력센서를 설치하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 제작하여 사용된 실제 실험장치 전체모습을 나타낸 것이다.

#### 3.2 실험방법

본 연구를 위해 Table 1에서 나타낸 바와 같이 서로 다른 오리피스 직경을 가진 4종의 슈를 설계 및 제작하였다.

제작된 4종의 슈를 대상으로 시험장비에 장착하여 공급압력 및 회전속도에 따른 슈와 사판사이에서의 누설유량과 마찰토크를 측정하였다. 작동유는 ISO VG 32를 사용 하였으며, 온도의 영향을 최소화 하기 위해 작동유 온도는  $50 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 제어하였다. 시험은 사판각도  $15^{\circ}$ , 시험압력 10~40[MPa], 회전속도 500~3000[rpm] 등의 조건에서 시험하였다.

Table 1 Diameter of Piston shoe & Orifice

Piston diameter $2r$ [mm]	14.5	
Shoe diameter $2r_2$ [mm]	19.2	
Recess diameter $2r_1$ [mm]	9.6	
Orifice diameter $2r_3$ [mm]	Test model 1.	0.8
	Test model 2.	1.0
	Test model 3.	1.2
	Test model 4.	1.4

먼저 시험장비에 슈를 장착하고 시험전 30분 이상 충분히 시운전을 실시하고 작동유 온도가  $50 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 안정되면 시험압력 및 회전속도를 변화하여 누설유량과 토크를 측정한다. 같은 방법으로 4종의 시험 슈에 대해서 시험을 수행한다.

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 누설유량

##### 4.1.1 회전속도의 영향

Fig. 6은 공급압력이 20[MPa]에서 오리피스 변화에 따른 누설유량을 나타낸 것이다. 회전속도가 증가할수록 누설유량이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 여기서, 오리피스 직경이 1.0[mm]와 1.2[mm]에서는 누설유량이 유사하지만 전반적으로 오리피스 직경이 증가할수록 회전속도에 따라 누설유량이 증가하는 누설유량 특성을 파악할 수 있다. 따라서 압력이 20[MPa]일 때 회전속도가 2,500[rpm]에서 오리피스 직경이 0.8[mm]에서 1.4 [mm]로 증가되면 누설유량은 0.63[L/min]에서 0.80[L/min]으로 증가함을 확인할 수 있다. 이는 오리피스 직경이 증가함으로써, 오리피스를 통과하는 유량이 증가하게 되고 유막두께가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

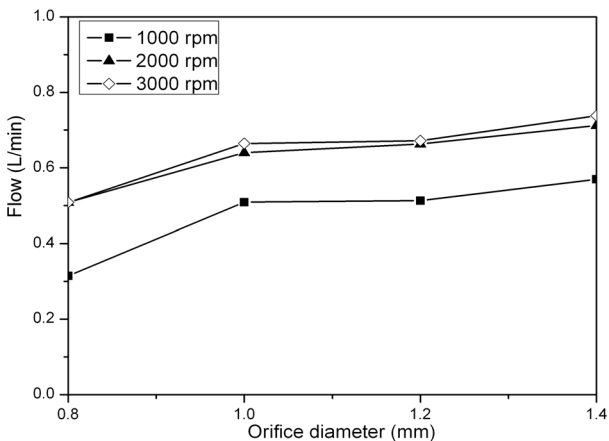


Fig. 6 Leak flow rate with operating speed (at  $P_s = 20$ [MPa])

##### 4.1.2 공급압력의 영향

Fig. 7은 회전 속도 1,000[rpm]에서 공급압력의 변화에 따른 누설유량의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 공급압력이 증가함에 따라 누설유량이 증가한다. 전반적으로 유사한 누설유량 특성이 나타난다. 고압의 조건에서 누설유량이 급격히 증가하는 경향이

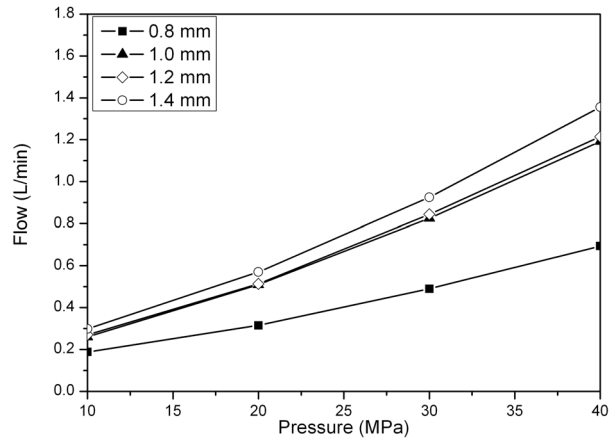


Fig. 7 Leak flow rate with supply pressure

나타나는데, 이것은 고압의 영역에서 미소간극이 증가하여 누설유량이 증가하는 것으로 판단된다. 회전속도가 1,000[rpm]에서  $2r_3$ 가 1.4[mm]일 경우, 공급압력이 10[MPa]에서 40[MPa]로 4배 증가할 때 0.19[L/min]에서 0.7 [L/min]으로 3.7배 증가하는 것으로 나타난다. 오리피스 직경이 증가할수록 누설유량이 증가하는 것을 앞에서 살펴본바와 같이 이번 실험에서도 유사한 경향이 나타난다. 공급압력의 변화에 따라 오리피스 직경이 증가할수록 기울기가 증가하는 것으로 보아 고압의 조건에서 오리피스 직경이 증가할수록 누설유량이 급격히 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 공급압력의 증가로 포켓압력이 증가하여 랜드 부의 압력차가 증가하게 되는데 식(3)에서와 같이 누설유량은 압력차와 오리피스 직경에 비례하므로 오리피스 직경이 증가할수록 누설유량이 증가하는 것으로 판단된다.

#### 4.2 토크

##### 4.2.1 회전속도의 영향

Fig. 8은 공급압력 20[MPa] 조건에서 회전속도의 증가에 따른 토크 특성을 비교한 그래프이다. 회전속도의 증가에 따라 토크는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 슈의 정압베어링에 의한 유체마찰에 의한 것으로 판단된다. 즉, 슈와 사판사이의 유막이 존재하여 유체유회환이 이루어짐으로써 회전속도 증가에 따라 토크가 대부분 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 전체적으로 오리피스 직경이 0.8[mm]인 경우 토크가 가장 크며, 1.4[mm]인 경우 가장 작게 나타나고 있는데 오리피스 직경이 증가할수록 토크는 감소하는 경향을 파악할 수 있다.

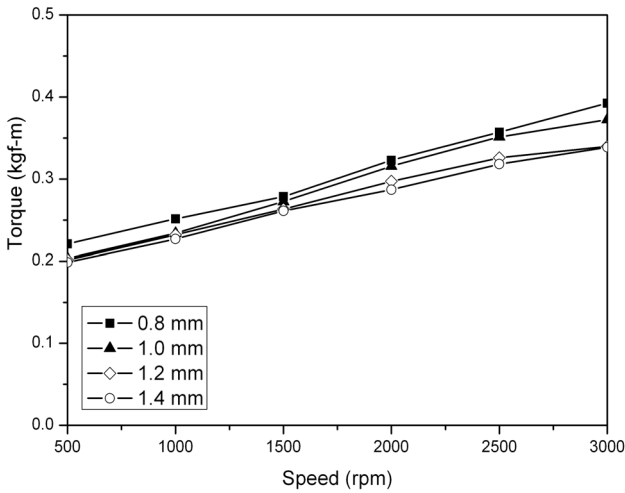


Fig. 8 Torque with rotating speed between shoe and swash plate (at  $P_s=20$ [MPa])

#### 4.2.2 공급압력의 영향

Fig. 9는 회전속도 2,000[rpm]에서 공급압력 증가에 따라 토크특성을 나타낸 그래프이다. 전반적으로  $2r_3$ 가 0.8[mm]의 경우가 가장 큰 토크를 나타내고 1.4[mm]인 경우가 가장 작은 토크특성을 나타낸다. 오리피스 직경이 감소하면 오리피스를 통과하는 유량이 감소하고 유막두께가 작아져 전단응력의 증가로 토크가 증가하게 되는 것으로 생각된다. 오리피스 직경에 따른 토크는 큰 차이를 보이지는 않지만 오리피스 직경이 증가할수록 토크는 감소하는 경향을 보인다. 일반적으로 공급압력이 증가할수록 토크가 증가하는 경향을 보인다. 이는 공급압력이 증가함으로써 공급압력과 랜드 부의 압력차가 증가되기 때문으로 판단된다.

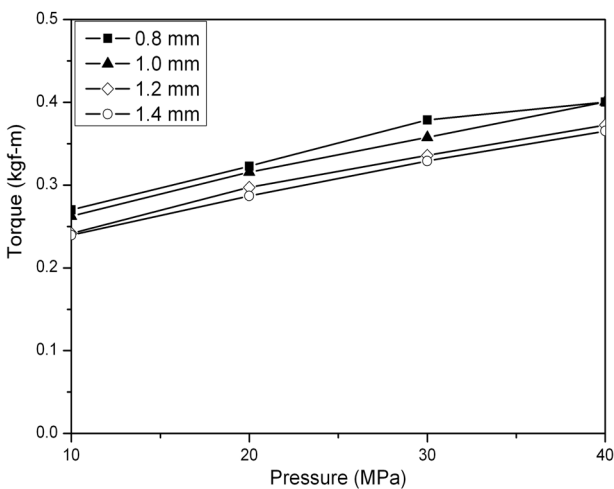


Fig. 9 Torque with pressure between shoe and swash plate

### 4.3 용적효율

#### 4.3.1 회전속도의 영향

Fig. 10은 공급압력이 20[MPa]의 조건으로 회전속도 변화에 따른 체적효율 특성을 식(5)를 이용하여 체적효율을 비교한 그래프이다. 회전속도가 증가할수록 체적효율은 감소하지만 2,500 [rpm] 이후부터는 동적효과에 의해 체적효율이 증가하는 경향을 보인다. 오리피스 직경이 증가 할수록 체적효율이 감소하는 경향을 보인다. 따라서 회전속도는 2,500[rpm] 전후를 피해서 작동하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

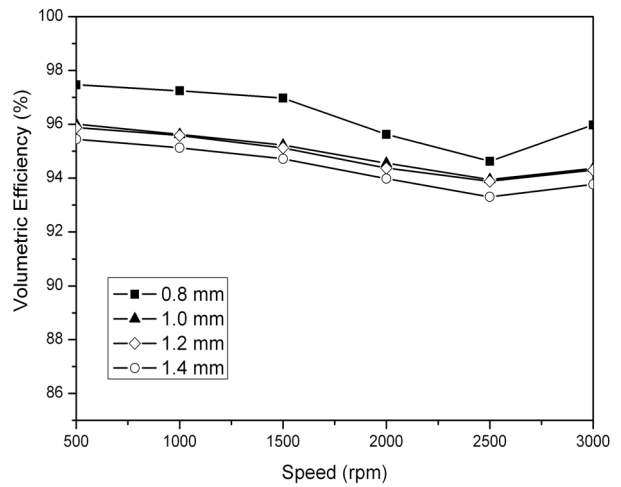


Fig. 10 Volumetric efficiency with operating speed (at  $P_s=20$ [MPa])

#### 4.3.2 공급압력의 영향

Fig. 11은 회전속도 1,000[rpm]에서 공급압력에 따른 체적효율 변화를 식(5)를 이용하여 체적효율을 비교한 그래프이다. 공급압력이 증가함에 따라 체적효율은 전반적으로 선형적으로 감소한다. 특히, 오리피스 직경이 증가할수록 체적 효율은 급격히 떨어지는 경향을 보인다. 이러한 체적효율 특성은 Fig. 7에서 살펴본 누설유량과 관련이 있다. 즉, 공급압력이 증가함에 따라 유막두께가 증가하여 누설유량이 증가하기 때문에 체적효율이 떨어지는 것으로 판단된다. 특히, 공급압력이 20[MPa]이후부터 급격히 체적효율이 감소하는 경향이 나타난다. 이는 공급압력의 증가로 포켓압력이 증가하여 랜드 부의 압력차가 증가하게 되는데 누설유량은 압력차와 오리피스 직경에 비례하므로, 오리피스 직경이 증가할수록 누설유량이 증가하여 체적효율은 급속히 감소하는 것으로 판단된다.

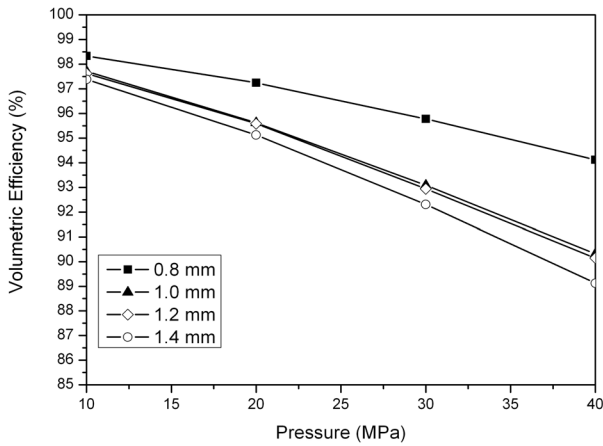


Fig. 11 Volumetric efficiency with supply pressure

### 5. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 오리피스 직경을 가지는 4종의 피스톤 슈를 설계 및 제작하여 실험을 통해 윤활특성에 관한 연구를 하고자 하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 슈와 사판사이의 누설유량은 공급압력의 영향을 많이 받으며, 공급압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

2) 오리피스 직경이 감소하면 오리피스를 통과하는 유량이 감소하고 유막두께가 작아져 전단응력의 증가로 토크가 증가하게 되는 것을 확인할 수 있었다.

3) 누설유량은 압력차와 오리피스 직경에 비례하므로, 고압 조건에서 오리피스 직경이 증가할수록 누설유량은 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

### 참고 문헌

- 1) 이용범, 박종호. “사판식 피스톤 모터의 슈 정압베어링 비에 따른 윤활특성 연구”, KASBIR, Vol. 5, No. 2, pp.103~109. 2005.
- 2) 함영복외 4인. “유압 피스톤 펌프/모터의 정압베어링 응답특성 평가”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집. B, pp.116~120. 2001.
- 3) E. Koc and C. J. Hooke. “Investigation into the effects of orifice size, offset and over clamp ratio on the lubrication of slipper bearings”, Tribology International, Vol. 29, No. 4, pp.299~305. 1996.
- 4) 이용범, “유압 피스톤 펌프의 정압베어링 비 변화에 따른 효율특성에 관한 연구” 한밭대학교 석사논문, pp.9~17. 2002.
- 5) 이용범, “가속시험에 의한 정유압 변속기용 피스톤 신뢰성 연구” 충남대학교 박사논문, pp.45~47. 2006.