

## 사축식 유압 피스톤 펌프의 압력 맥동 특성에 관한 연구

조인성 · 신창근 · 정재연\*

전북대학교 기계시스템공학부

### A Study on Pressure Ripple Characteristics in Bent-Axis Type Oil Hydraulic Piston Pump

I. S. Cho, C. G. Shin and J. Y. Jung<sup>†</sup>

Division of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University, #664-14, 1 Ga, Duckjin-dong, Duckjin-gu, Jeonju, Jeonbuk, 561-756, Korea

(Received February 21, 2011; Revised May 30, 2011; Accepted June 15, 2011)

**Abstract** – To improve the performance of a bent-axis type axial piston pump driven by the tapered pistons, it is necessary to know the pressure ripple characteristics. The purpose of this paper is to understand the effect on the pressure ripple characteristics and the prediction by comparing experimental and theoretical results. The simulation model of the bent-axis type axial piston pump is developed in the AMESim environment using the geometrical dimension and the driving mechanism of the piston pump. The results can be obtained to predict the performance characteristics of the bent-axis type axial piston pump.

**Keywords** – pressure ripple characteristics(압력 맥동 특성), hydraulic piston pump(유압 피스톤 펌프), AMESim(아메심)

#### 1. 서 론

사축식 유압 피스톤 펌프에서 실린더 블록이 회전축을 기준으로 하부방향으로 경사져 있기 때문에, 회전방향의 우측부의 경우 피스톤이 상사점으로 이동하면서 실린더블록내의 작동유를 밸브플레이트의 토출포트를 통해 유출시키며, 회전방향의 좌측부의 경우 피스톤이 하사점으로 이동하면서 흡입포트에서 실린더블록 내부로 작동유를 유입시키게 된다.

유압 시스템에서 압력 맥동은 관로 및 밸브 등에서 진동과 소음을 유발시키며 유압 시스템의 손상을 가져올 수 있다. 이러한 압력 맥동 특성에 관한 연구는 유압 시스템의 수명과 효율에 직접적인 관련을 가지며, 최적의 설계를 통해 압력 맥동을 감소시키는 것은 매우 중요하다.

이와 관련된 주요 연구내용을 살펴보면, Kim[1]은 액설형 사축식 유압 피스톤 펌프에서 압력파의 위상간섭을 이용하여 토출 압력 맥동의 감소효과에 대한 실험과 시뮬레이션을 통하여 이를 확인하였다. Akira[2]는 7중 유압모터에 대해서 실험을 수행하여 회전수의 변화에 따른 마찰특성, 압력변화에 대한 토크 특성을 분석하였으며, 기존의 모델과 마찰 및 토크특성을 비교하여 수학적 모델을 확립하였다.

본 연구는 피스톤 펌프의 동특성 해석을 연구대상으로 하고 있다. 사축식 피스톤 펌프의 토출압력 맥동 특성을 파악하고 분석하여 맥동의 주요 원인을 예측하여 펌프의 최적 설계를 위한 기초 자료를 획득하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 사축식 액설형 피스톤 펌프의 이론해석을 위하여 상용 소프트웨어인 AMESim을 사용하여 모델링하였고, 해석 결과를 검증하기 위하여 실험을 통해 모델링을 검증하였다.

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : jungjy@chonbuk.ac.kr

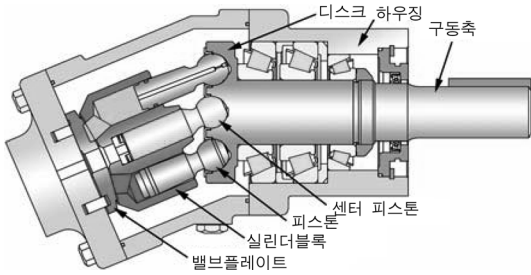


Fig. 1. Structure of a bent-axis type axial piston pump.

2. 이론해석모델

2-1. 유압 피스톤 펌프의 이론적 고찰

Fig. 1은 사축식 피스톤 펌프의 구조를 나타낸다. 구동축이 원동기(전동기, 엔진 등)에 의해 구동되면, 축의 디스크와 디스크의 구면부에 연결된 피스톤이 회전하고, 피스톤의 횡분력에 의해 실린더 블록이 회전하며, 동시에 피스톤은 실린더 보어 내를 왕복 및 자전 운동을 하게 된다.

실린더 블록이 회전축을 기준으로 하부방향으로 경사져 있기 때문에, 회전방향의 우측부의 경우 피스톤이 상사점으로 이동하면서 실린더블록 내의 작동유를 밸브플레이트의 토출포트를 통해 유출시키며, 회전방향의 좌측부의 경우 피스톤이 하사점으로 이동하면서 흡입포트에서 실린더블록 내부로 작동유를 유입시키게 된다.

디스크의 중심축과 실린더 블록의 중심축은 경전각  $\alpha$ 만큼 경사져 있기 때문에 피스톤이 왕복운동하는 거리인 행정  $S$ 는 다음과 같이 계산된다. 이 때의 반경을 디스크 반경  $R_d$ 로 정의한다.

$$S = 2R_d \sin \alpha \tag{1}$$

피스톤의 단면적을  $A_p$ , 피스톤의 수를  $Z$ 라 할 때, 디스크의 1회전당 고유토출용적(displacement,  $cm^3/rev$ )은 다음과 같이 계산된다.

$$V_{th} = Z A_p S = 2 Z A_p R_d \sin \alpha \tag{2}$$

디스크가 BDC(하사점)에서 시계방향으로 임의각도  $\theta$ 만큼 회전했을 때, 피스톤 변위  $x$ 는 다음과 같다.

$$x = \frac{S}{2} (1 - \cos \theta) \tag{3}$$

따라서 실린더 블록의 각속도를  $\omega$ 로 하면 상기 식으로부터 피스톤 속도  $v$ 는 다음식과 같이 된다.

$$v = \frac{S}{2} \omega \sin \theta \tag{4}$$

단,  $\omega$ 는  $d\theta/dt$ 이다.

따라서 토출작용을 하는 피스톤의 수를 고려한 펌프의 순간 유량  $Q$ 는 연속방정식을 응용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_i = \sum_{i=1}^{Z_0} A_p v_i = A_p \frac{S \omega}{2} \sum_{i=1}^{Z_0} \sin \left\{ \theta + (i-1) \frac{2\pi}{Z} \right\} \tag{5}$$

여기서  $Z_0$ 는 토출작용을 하는 피스톤의 수이다.

2-2. 밸브 플레이트와 실린더 포트간의 면적 변화

Fig. 2는 실린더 위치에 따른 실린더 포트와 밸브 플레이트와의 겹치는 면적을 계산하기 위해 실린더 포트의 위치에 따른 구간으로 나눈 것을 보여주고 있으며, 그 내용은 다음과 같다.

- (1)  $\theta_1(\theta=0^\circ)$  : 실린더 포트가 밸브플레이트의 흡입과 토출 포트 사이에 위치한다.
- (2)  $\theta_1 \sim \theta_2$  : 실린더 포트가 notch와 겹치기 시작하여 흡입 포트와 겹치기 전까지의 구간으로 실린더 내의 낮은 압력에서 토출 압력까지 순간적으로 상승하는 변동압력이 발생한다.
- (3)  $\theta_2 \sim \theta_3$  : 실린더 포트가 밸브 플레이트의 흡입 포트와 겹치기 시작하며, notch의 시작점에서 다시 겹쳐지기 전까지의 구간이다.
- (4)  $\theta_3 \sim \theta_4$  : 실린더 포트가 notch의 시작점부터 벗어나기 시작하여 notch와 겹쳐진 면적이 상대적으로 0이 되며, 흡입 포트와 완전히 겹쳐지기 전까지의 구간이다.

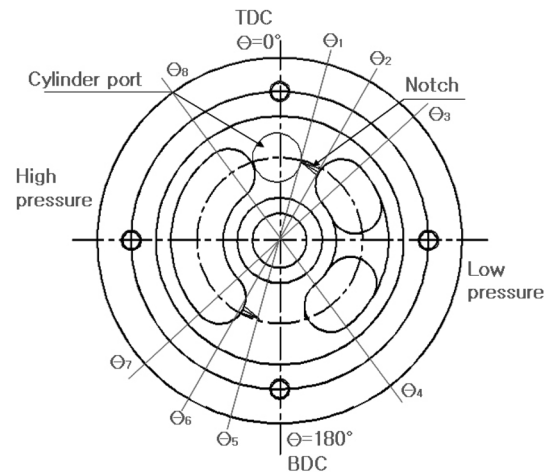


Fig. 2. Definition of for simulation studies.

- (5)  $\theta_3 \sim \theta_4$  : 실린더 포트가 밸브플레이트의 흡입포트와 완전히 겹쳐진 흡입구간으로 흡입압력이 작용한다.
- (6)  $\theta_4 \sim \theta_5$  : 흡입구간에서 폐입구간으로 변하는 구간으로 흡입압력으로부터 압력이 순간적으로 하강한다.
- (7)  $\theta_5 \sim$  : 토출과정으로 흡입과정과 동일한 면적 변화를 보인다.

2-3. 유압 피스톤 펌프의 해석모델링

상용 소프트웨어인 AMESim을 사용하여 정격유량이  $70 \text{ cm}^3/\text{rev}$ 이고, 피스톤의 수가 7개인 액셀형 사축식 유압 피스톤 펌프를 모델링하였다.

Fig. 3은 AMESim을 사용하여 하나의 피스톤에 대한 sub-model을 나타낸 것이다. 피스톤의 행정  $S$ 의 모델링은 식(1)을 이용하여 회전축을 기준으로 하부 방향으로 경사진 경사각  $\alpha$ 와 피스톤이 연결된 디스크의 반경에 따라 결정된다. 작동유의 흡입 및 토출 구간을 결정하는 밸브 플레이트는  $0^\circ \sim 360^\circ$ 의 흡입 및 토출구간에서 실린더블록의 흡토출 포트와 밸브플레이트 사이에 겹치는 면적 변화량을 각도변화에 따라 수학적으로 계산하여 데이터 파일로 저장하고, 데이터 파일을 가변 오리피스의 신호로 지정하여 회전축의 회전각에 따라 가변 오리피스를 조절하도록 하였다. 이를 통해 각 피스톤의 흡입과 토출과정을 결정하게 된다.

Fig. 4는 Fig. 3의 sub-model을 이용하여 7개의 피스톤을 가지는 사축식 피스톤 펌프의 전체를 모델링한 것이다. 실린더 블록에 결합된 피스톤의 배열에 따라 각 피스톤의 초기 구동 각도를 설정하고, 각 피스톤의 초기 행정을 설정하였다. 피스톤과 실린더 보어 사이, 피

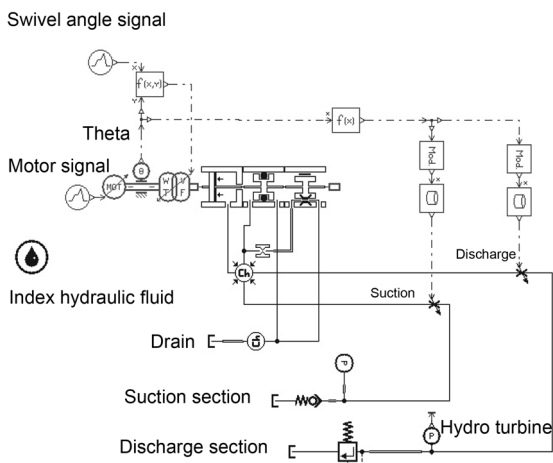


Fig. 3. Sub-model of one piston.

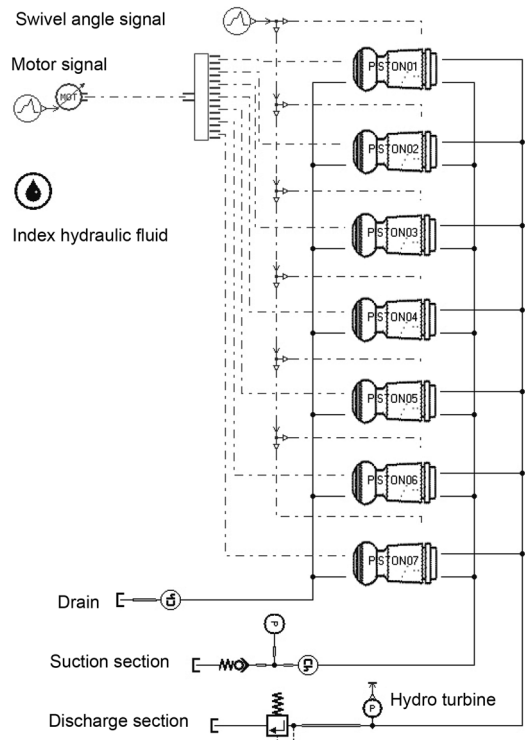


Fig. 4. Model of the bent-axis type axial piston pump with seven pistons.

스톤 헤드부와 디스크 사이의 작동유 누설은 드레인 포트를 통해 배출된다. 또한, 케이스 내부의 압력을 설정할 수 있도록 압력원을 사용하였다.

펌프의 토출측은 직경 21.4 mm, 두께 2.9 mm로 설정하였으며, 릴리프 밸브를 설치하여 펌프의 토출 압력을 제어하였으며, 릴리프의 유량-압력 특성을 고려하여 모델링하였다.

압력 측정 지점은 실험에서 hydro-turbine의 위치와 동일하게 펌프 토출측으로부터 약 250 mm 지점에서 측정하였다. 추가적으로 실험에 사용된 펌프 성능시험기에 부착되어있는 체크밸브와 필터 또한 모델링에 추가하여 압력 손실율을 고려하였다.

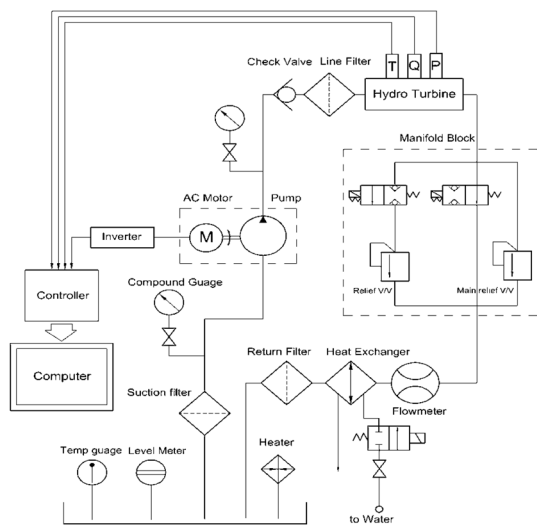
모델링에 사용된 작동유는 실험과 동일하게 VG 46의 물성치로 설정하였으며, 작동유의 온도를 일정하게 유지시키는 열교환기를 추가하였다.

3. 실험모델 및 측정 방법

본 연구의 대상이 되는 사축식 유압 피스톤 펌프는

**Table 1. Specifications of the analysis model**

Working oil	VG46	
Displacement	70	$cm^3/rev$
Rotational speed	2,250	$rpm$
Discharge pressure	35	$MPa$
Swivel angle	23	$^\circ$



**Fig. 5. Hydraulic circuit of the test equipment.**

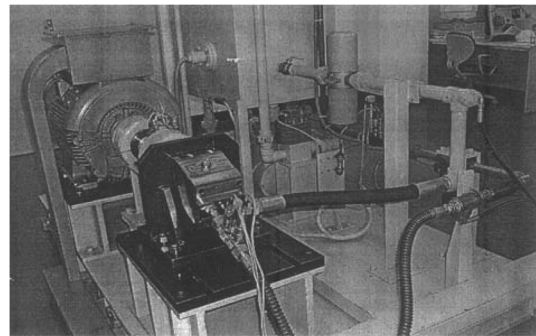
본 연구실에서 개발한 펌프로 고유토출용적  $70\text{ cm}^3/rev$ , 토출압력  $35\text{ MPa}$ 의 고정용량형 유압 피스톤 펌프이다.

Table 1은 사축식 유압 피스톤 펌프의 제원을 나타내고 있으며, Fig. 5는 실험장치의 회로도를 나타낸 것이고, Fig. 6은 실험에 사용된 펌프 성능시험기 및 실험 장치를 보여주고 있다.

액설형 사축식 피스톤 펌프의 해석 모델링과의 신뢰성을 검증하기 위하여 본 연구실에서 보유중인 피스톤 펌프 성능시험기를 통해 실제 제작펌프를 실험하였다. 펌프의 회전수와 설정압력을 바꾸어가며 펌프의 토출 압력을 측정하였으며, 이를 이용하여 해석 모델링과 비교하여 시뮬레이션의 신뢰성을 얻을 수 있다.

압력센서는 토출포트로부터 약  $250\text{ mm}$  거리에 설치하여 펌프의 토출 압력을 측정하고, 측정된 신호는 인디케이터를 통해 PC로 전달되어 저장된다.

펌프의 토출압력은 제어반을 통해 릴리프 밸브를 작동시켜 조절하였으며, 작동유의 온도를 일정하게 유지하도록 열교환기를 설치되어 있다.



**Fig. 6. Photograph of the test equipment.**

#### 4. 결과 및 고찰

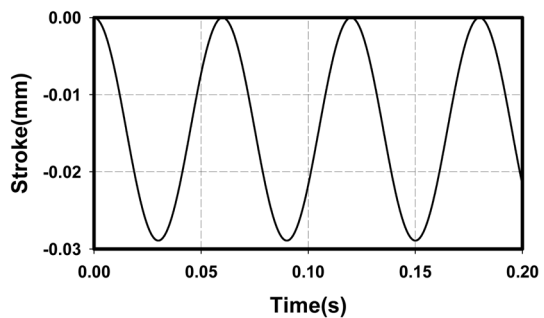
액설형 사축식 피스톤 펌프의 실험 결과와 해석 모델링에서 얻어진 결과를 비교하여 모델링의 신뢰성을 검증하고, 검증된 모델링을 토대로 펌프의 맥동 특성 변화를 연구하는 것이 본 논문의 목적이다.

##### 4-1. 모델링 해석 결과

액설형 사축식 피스톤 펌프의 수학적 이론을 이용하여 AMESim을 통해 모델링하였고, 이를 토대로 얻어진 결과는 다음과 같다.

Fig. 7은 실린더 보어 내를 운동하는 하나의 피스톤에 대한 변위를 나타낸 것이다. 실린더 블록이 회전축을 기준으로 하부방향으로 경사져 있기 때문에 경전각에 따른 피스톤의 행정이 결정되고, 회전축이 회전할 때 회전각도에 따라 피스톤의 변위가 발생하고, 이에 따라 피스톤은 흡·토출 포트를 통해 작동유를 흡입 또는 토출시키게 되며, 이는 펌프 성능을 결정하는데 중요한 요소로 작용한다.

Fig. 8은 액설형 사축식 피스톤 펌프의 피스톤 하나



**Fig. 7. Displacement of one piston.**

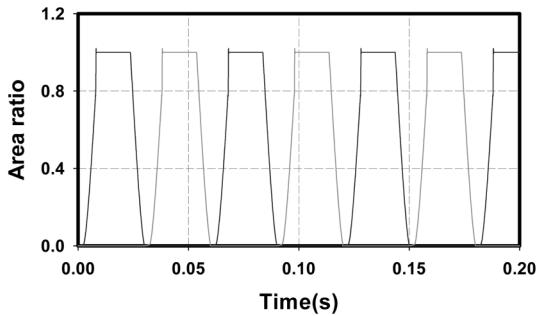


Fig. 8. Opened area ratio between cylinder port and valve plate port.

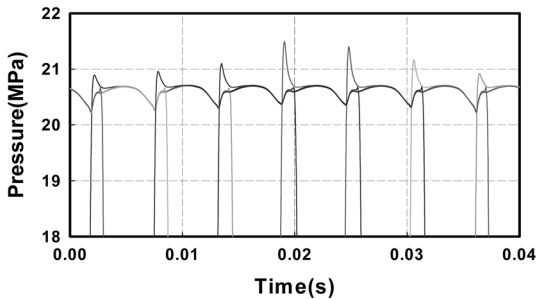


Fig. 9. Discharge pressure of each piston at discharge port.

에 대한 회전각에 따른 실린더 포트와 밸브 플레이트 포트간의 면적 변화를 보여주고 있다. 해석 대상인 밸브 플레이트는 폐입이나 오버랩이 없으며, 흡입과 토출 시작점에 노치를 설계하였다. 흡입이 시작되면서 실린더 포트는 노치와 겹치기 시작하며 이후 노치를 지나 흡입포트를 거쳐 최대로 열고, 180°를 기준으로 흡입을 마친 후 토출을 시작하여 노치와 겹치기 시작하고 다시 최대로 열린 후 360°에서 다시 흡입을 시작한다.

Fig. 9는 Fig. 8에서 실린더 포트와 밸브 플레이트 포트간의 면적 변화에 따라 각각의 피스톤에서의 토출 압력을 나타낸 것이다. 각각의 피스톤은 회전각에 따라 순차적으로 운동하며, 각각의 피스톤에 연결된 실린더 포트와 밸브 플레이트 간의 위치에 따라 토출 압력의 변화를 나타내고 있다. 토출 시작점에서 실린더 포트가 밸브 플레이트의 노치와 만나기 시작하면서 비정상적인 압력 증가를 보이게 되며, 이는 실린더 내의 낮은 압력과 토출 포트 내의 높은 압력이 순간적으로 연결되면서 비정상적인 압력 증가로 이어지는 것으로 판단된다. 이러한 압력 증가는 피스톤 펌프의 압력 맥동 감소 측면에서 중요한 인자로 작용된다. 따라서 실린더

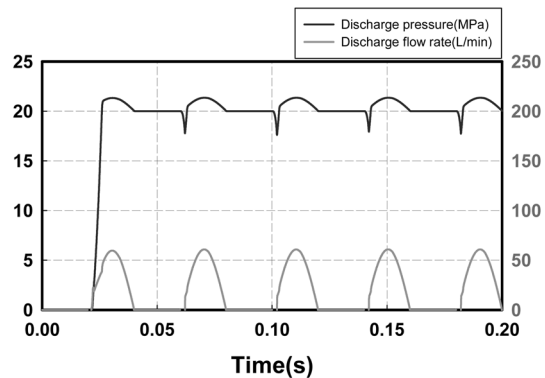


Fig. 10. Discharge pressure and flow rate of one piston(1,500 rpm, 20 MPa).

포트와 토출 포트 사이의 설계 변화를 통해서 효율적으로 압력 맥동을 감소시킬 수 있는 연구가 진행되어야 하며, 이는 펌프 성능에 중요한 영향을 줄 수 있다.

Fig. 10은 하나의 피스톤에 대한 토출 압력 및 유량 변동을 나타낸 것이며, 흡입구간에서는 토출이 발생하지 않으며, 토출구간에서만 토출이 발생하고 있음을 알 수 있다. 토출이 발생하는 토출구간에서 유량의 변동에 따라서 토출압력이 변하고 있음을 알 수 있으며, 토출이 발생하지 않는 구간에서는 릴리프 압력을 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한, 흡입이 시작되는 위치에서 실린더 내 체적의 갑작스런 증가로 인해 압력이 하강하고 있음을 알 수 있다.

#### 4-2. 이론 및 실험 비교

액셜형 사축식 피스톤 펌프의 이론과 실험 결과를 비교하였다.

Fig. 11의 (a)는 1,000 rpm, 20 MPa일 때, (b)는 1,500 rpm, 20 MPa일 때 해석 및 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다.

평균 토출압력, 압력 맥동의 크기 등에 있어서 실험 결과와 해석 결과가 상당히 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로 AMESim을 이용한 액셜형 사축식 피스톤 펌프의 모델링을 통해 실제 펌프의 맥동 특성을 예측하는 것이 가능하며, 펌프 및 실험장치의 공차 및 설정을 변경하여 펌프의 맥동 변화를 예측할 수 있다.

## 5. 결 론

액셜형 사축식 피스톤 펌프의 실험 결과와 해석 모

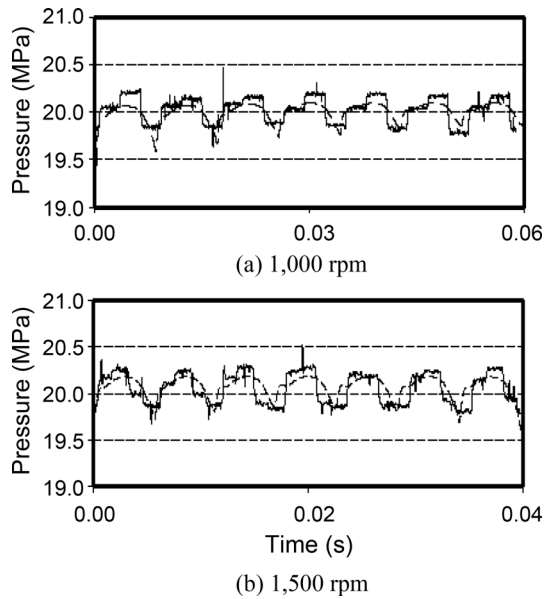


Fig. 11. Comparison of discharge pressure experiments and theoretical predictions at 20 MPa.

텔링에서 얻어진 결과를 비교하여 모델링의 신뢰성을 검증하고, 검증된 모델링을 토대로 펌프의 맥동 특성을 파악하고자 하였으며, 액설형 사축식 피스톤 펌프의 이론 및 구동 메커니즘을 바탕으로 상용 소프트웨어인 AMESim을 이용하여 모델링하였다. 또한 모델링의 해석 결과에 대한 신뢰성을 얻고자 실제 본 연구실에서 개발한 액설형 사축식 피스톤 펌프 및 펌프 성능 시험기를 이용하여 실험하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AMESim을 이용한 액설형 사축식 피스톤 펌프의 모델링을 통해 실제 펌프의 맥동 특성을 예측하는 것이 가능하였으며, 펌프 및 실험장치의 공차 및 설정을 변경하여 펌프의 맥동 변화를 예측할 수 있을 것으로 여겨진다.

2) 실제 펌프 성능 시험기와 동일한 회로를 구성하여 펌프의 설계인자 뿐만 아니라 펌프 작동에 영향을 줄 수 있는 환경을 동일하게 모델링함으로써 이론 해석 결과의 정확성을 향상시켰다.

3) 경전각과 회전각도에 따른 피스톤의 변위 및 회전각에 따른 실린더 포트와 밸브 플레이트 간의 면적

변화를 수학적으로 계산하여 실제 펌프의 구동 메커니즘을 구현하였다.

### 기호 설명

- $\alpha$  : 경전각(Swivel angle)
- $S$  : 행정(Stroke)
- $R_d$  : 디스크 반경(Radius of disk)
- $A_p$  : 피스톤의 단면적(Cross section of piston)
- $Z$  : 피스톤의 수(Number of piston)
- $x$  : 피스톤 변위(Displacement of piston)
- $\omega$  : 실린더 블록의 각속도(Angular velocity of cylinder block)
- $v$  : 피스톤 속도(Velocity of piston)
- $V_{th}$  : 고유토출용적(Displacement)
- $Q_i$  : 펌프의 순간 유량(Moment flux of pump)
- $Z_0$  : 토출작용을 하고 있는 피스톤 수
- $\theta$  : 디스크회전각도

### 참고문헌

1. K. H. Kim, K. W. Lee, and J. S. Jang, "A Study on the Reduction in Pressure Ripples for a Bent-Axis Piston Pump by a Phase Interference," *Journal of KSPE*, Vol. 21, No. 9, pp. 103-110, 2004.
2. Akira Hibi, "Mathematical Model of the Torque Characteristics for Hydraulic Motors," *JSME*, Vol. 20, No. 143, pp. 616-621, 1977.
3. I. Y. Lee and J. H. Park, "Flow Ripples Simulation Model of Axial Piston Pump," *Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society*, Vol. 2, No. 3, pp. 12-17, 2005.
4. Y. S. Hong and Y. H. Doh, "Analysis on the Friction Losses of a Bent-Axis Type Hydraulic Piston Pump," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 9, pp. 1668-1679, 2004.
5. Yasuo Kita, "An Improvement on the Variable Displacement Pump/Motor," *Journal of the Japan Hydraulic & Pneumatics Society*, Vol. 20, No. 2, pp. 101-108, 1989.
6. H. W. Choi, J. K. Kim, and J. Y. Jung, "Pressure Characteristics at the Land of Valve Plate in the Oil Hydraulic Axial Piston Pump," *Journal of KSTLE*, Vol. 32, No. 11, pp. 221-227, 2000.