

**가변 사판식 피스톤펌프의 맥동 변수 분석 및 최적 밸브플레이트 노치 설계를 위한  
압력 및 유량맥동에 관한 연구**

배준형<sup>a</sup>, 정원지<sup>b\*</sup>, 장준호<sup>c</sup>, 윤영환<sup>d</sup>, 전주열<sup>e</sup>

**Study of Pressure and Flux Pulsation to Design Optimum Valve-Plate Notch and  
Pulsation-Variables Analysis of Swash-Plate-Type Piston Pump**

Jun-Hyeong Bae<sup>a</sup>, Won-Jee Chung<sup>b\*</sup>, Jun-Ho Jang<sup>c</sup>, Young-Hwan Yoon<sup>d</sup>, Ju-Yeol Jeon<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Mechanical Design Engineering, Changwon National University,  
20, Changwondaehak-ro, Ulchang-gu, Chnagwon, Gyeongnam-do, 641-241, Korea

<sup>b</sup> Mechanical Engineering, Changwon National University,  
20, Changwondaehak-ro, Ulchang-gu, Chnagwon, Gyeongnam-do, 641-241, Korea

<sup>c</sup> Fluetek,  
6, Gongdan-ro, Seongsan-gu, Chnagwon, Gyeongnam-do, 641-241, Korea

<sup>d</sup> J&F Solution,  
5, Sinbanpo-ro 23-gil, Seocho, Seoul 102-707, Korea

<sup>e</sup> R&D Pools,  
50, Wanam-ro, Seongsan-gu, Chnagwon, Gyeongnam-do, 641-241, Korea

**ARTICLE INFO**

Article history:

Received 23 December 2014  
Revised 12 February 2015  
Accepted 13 February 2015

Keywords:

Swash plate type variable piston pump  
Valve plate notch design  
Pulsation variables  
Pressure/flow pulsation  
Kinematic analysis  
SimulationX<sup>®</sup>

**ABSTRACT**

We propose a simulation technique to estimate the reduction effect of the pressure/flow pulsation by analysis of the pulsation variables and notch shape of the valve plate of a swash-plate-type variable piston pump. First, using SimulationX<sup>®</sup>, we perform a theoretical kinematic analysis according to the variable swash-plate angle and rotational velocity in order to design a single-piston pump. In designing the notch shape of the valve plate of the swash-plate-type variable piston pump as one of the pulsation variables, we investigate the effect of the pulsation by comparing two notch types (circular type and V type). Then, we extend our analysis to a nine-piston pump model. This paper not only confirms the effect of the pressure/flow pulsation according to pulsation variables but can also be applied to the development of a SimulationX<sup>®</sup>-based simulation technique for notch-shape optimization for a swash-plate-type variable piston pump.

**1. 서론**

최근 기계산업의 발전이 가속화됨에 따라 기계를 이용하여 작업  
현장에서의 효율성 및 생산성을 높이고 편리하게 작업을 할 수 있

도록 전반적인 기계시스템을 자동화하거나 조작하기 쉽고 원하는  
입력에 원하는 출력을 얻고자 하는 시스템 분야에 대한 연구가 꾸  
준히 이루어지고 있다. 그 중 유공압 시스템은 작동유를 사용하고  
다른 동력전달 시스템에 비해 높은 동력밀도 때문에 오랜 기간 건

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-213-3624  
Fax: +82-55-263-5221

E-mail address: wjchung@changwon.ac.kr (Chung Won Jee)

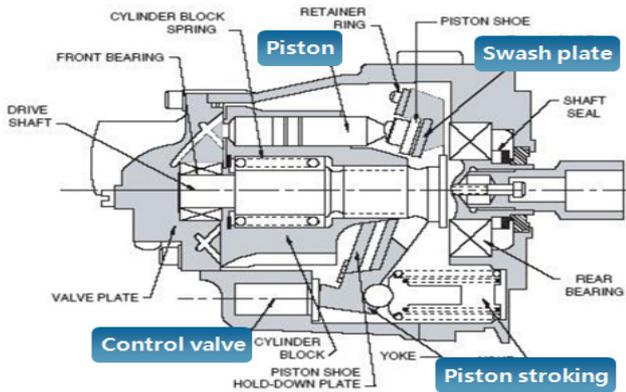


Fig. 1 Basic Structure of swash plate type axial piston pump<sup>[1]</sup>

설기계 산업에 두루 사용되어져왔다. 또한 대부분의 유압장비들은 강한 내구성을 가지고 있으며, 이는 거친 작업환경을 누비는 건설 기계의 특성에 잘 일치한다고 볼 수 있다.

유압장비 중 Fig. 1과 같은 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프는 유압시스템을 구성하는 가장 중요하고 기본적인 요소이며 기계에너지를 유체에너지로 변환하는 역할을 한다. 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프는 건설중장비용 메인 유압펌프로써 주로 사용되어지고 있으며, 근래 들어서는 가변 용량형 사판식 피스톤펌프를 포함한 유압시스템의 성능, 환경, 소음, 규제 등을 강화하는 방향으로 개발 및 연구가 진행되고 있기 때문에 유압 시스템의 소형경량화, 고속 고압 제어시스템, 저맥동화 등의 요소들을 복합적으로 고려해야 한다. 또한 피스톤펌프에서 발생하는 유량맥동과 유압회로 구성에 따른 전달특성의 상호작용으로 관로 내에 압력 맥동이 발생하며, 이러한 압력맥동은 시스템 구성기계의 기계진동을 일으킬 뿐만 아니라 유압장치의 소음의 원인이 된다. 이러한 이유로 유량 맥동의 저감화 대책의 효과를 단시간에 수치 실험으로 계산 가능한 시뮬레이션 프로그램을 개발하는 것은 유압시스템의 저소음화 대책을 진행함에 있어서 매우 강력한 설계 지원이 된다.

Quan<sup>[2]</sup>의 논문에서는 밸브플레이트의 개구면적에 대한 3가지 경우뿐만 아니라 회전속도에 대해 압력과 유량맥동 특성을 계산할 수 있는 시뮬레이션 프로그램 모델을 제시하였다. 반대로, Jang<sup>[3]</sup>의 논문에서는 노치의 디자인에 따라 맥동의 특성을 분석하기 위한 단일 피스톤 펌프의 수학적 모델링을 제안하고 노치 설계에 따른 맥동 연구를 수행하였지만 단순히 노치만을 다뤘고, 다른 맥동 변수에 따른 효과에 대해서는 다루지 않았다.

따라서 본 논문에서는 이러한 유압시스템의 안정성과 저맥동화를 실현하기 위해 Fig. 2와 같은 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프의 밸브플레이트 노치설계에 따른 압력 및 맥동 연구를 사판식 피스톤 펌프에서 발생하는 압력 및 유량맥동을 저감시키는 연구를 진행해 나갈 것이며, 우선적으로 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프의 기구학적, 수학적 모델링을 제시하고, 이 수학적 모델링을 유압 해석

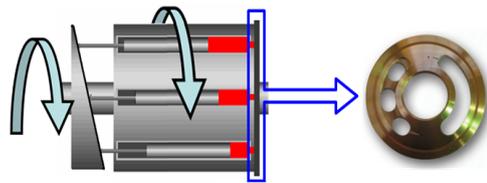


Fig. 2 Valve plate of variable swash plate type piston pump<sup>[4]</sup>

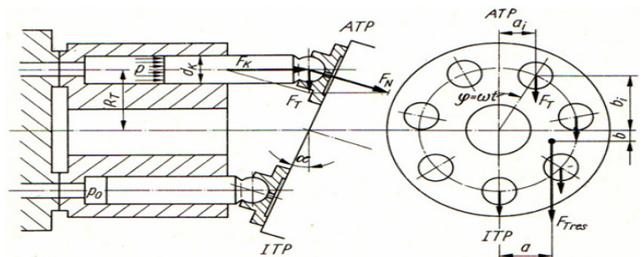


Fig. 3 Variable at the axial piston pump

프로그램인 SimulationX<sup>®</sup>에 적용해 평균이론유량식에 따른 맥동 변수를 살펴볼 것이며, 단일 사판식 피스톤 펌프의 밸브플레이트 노치 형상에 따른 맥동 영향을 살펴본 후 피스톤을 9개로 늘린 Nine Piston Pump 모델에도 적용하여 압력 및 유량 맥동을 분석 및 연구할 것이다.

## 2. Kinematic Analysis

### 2.1 Single piston pump의 기구학적 해석

가변 사판식 피스톤 펌프의 기본적인 구조는 Fig. 1과 같다. 사판에 의한 피스톤 운동으로 인해 펌핑하는 구조이며, 사판의 각도를 제어하는 제어 부품은 요크(yoke)와 스프링, 제어밸브로 구성되어 있다. 본 논문에서는 사판각에 필요한 가장 기본적인 이론적인 개념을 파악하고자 하며<sup>[1]</sup>, 단일 피스톤 펌프를 SimulationX<sup>®</sup>를 이용하여 설계를 하기 위해서, 피스톤 하나의 수학적 이론을 통하여 기구학적 으로 해석을 해보고자 한다. Fig. 3에서 피스톤의 변위는 식 (1)과 같이 구동축의 회전수와 사판각도로 표현할 수 있다.

$$XO_{P1} = -R \sin(\alpha) \cos(\phi) \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 pitch circle diameter이고,  $\alpha$ 는 swash plate angle이며,  $\phi$ 는 실린더블록의 회전각도이다.

가변 용량형 사판식 피스톤펌프의 기구적인 특성상 사판의 실린더블록이 고정된 축에 의해 회전하기 때문에 Euler angle frame보다 Fixed angle frame을 사용하여 식 (1)의 수학적 모델링을 설명하는 것이 더 바람직하다<sup>[5]</sup>.

Fig. 4는 이론적 검토를 위한 개념도로써, 1개의 피스톤과 사판

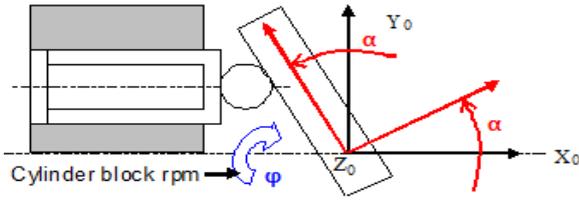


Fig. 4 Coordinate system in piston and swash plate

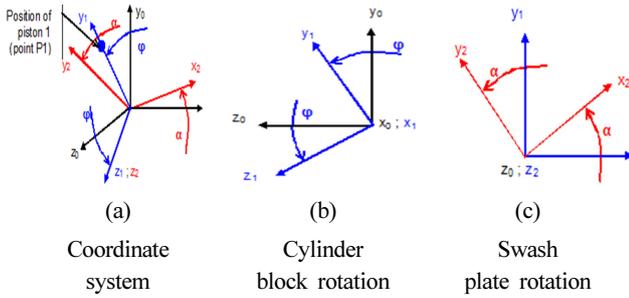


Fig. 5 Coordinate system corresponding to the 2-DOF

각에 대한 2개의 자유도를 가지고 있다.

사판식 피스톤 펌프의 회전운동은 실린더블록과 피스톤이  $X_0$  축을 중심으로 회전하는 회전운동( $\phi$ )과  $Z_0$  축을 중심으로 회전하는 사판각의 회전운동( $\alpha$ )으로 구성된다.

Fig. 5의 (b)는 실린더블록이  $X_0$  축을 중심으로 회전한 행렬  $R_X(\phi)$ 을 표현한 것이며 (c)는 사판이  $Z_0$  축을 중심으로 회전한 행렬  $R_Z(\alpha)$ 을 표현한 것이다. (a)는 (b)와 (c)를 함께 표현한 것이다. 이를 Fixed angle Frame을 사용하여 회전행렬로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)은 회전과정을 표현한 것이다.

$${}^0_2R = {}^0_1R \cdot {}^1_2R = R_Z(\alpha) \cdot R_X(\phi) \quad (2)$$

$$R_X(\phi) \quad R_Z(\alpha)$$

$$[\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0] \rightarrow [\hat{X}_1, \hat{Y}_1, \hat{Z}_1] \rightarrow [\hat{X}_2, \hat{Y}_2, \hat{Z}_2] \quad (3)$$

식 (2)에서  ${}^0_2R$ 는 회전하기 전의 피스톤의 위치에서 회전한 후의 피스톤의 위치를 나타낸 회전행렬이다. 이는 피스톤의 변위를 구하기 위해서 필요한 중요한 변수이며, 식 (2)를 풀이하면 아래와 같다.

$${}^0_2R = {}^0_1R \cdot {}^1_2R$$

$$= R_Z(\alpha) \cdot R_X(\phi)$$

$$= \begin{vmatrix} \cos\alpha - \sin\alpha \cdot 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} \cos\alpha - \sin\alpha \cdot \cos\phi & \sin\alpha \cdot \sin\phi \\ \sin\alpha & \cos\alpha \cdot \cos\phi - \cos\alpha \cdot \sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{vmatrix} \quad (4)$$

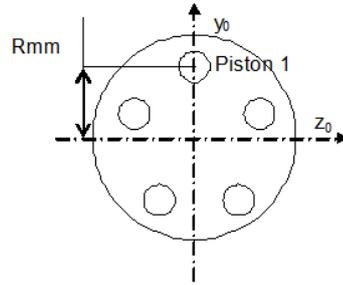


Fig. 6 Position of piston in cylinder block

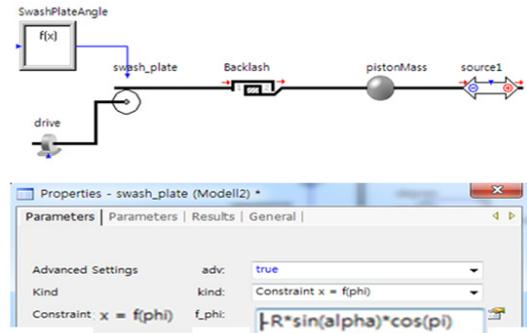


Fig. 7 Modeling of kinematic analysis for applying SimulaitonX®

회전하기 전의 기준좌표계에서 바라본 회전한 후의 피스톤의 위치벡터  ${}^0P_{\pi ston1}$ 와 회전한 후의 좌표계에서 바라본 회전한 후의 피스톤의 위치벡터  ${}^2P_{\pi ston1}$ 의 관점을 통일시키기 위해서 위에서 이미 계산한 식 (4)의 회전행렬  ${}^0_2R$ 을 내적한 형태인 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$${}^0P_{\pi ston1} = {}^0_2R \cdot {}^2P_{\pi ston1} \quad (5)$$

여기서 주의할 점은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 피스톤의 구조상 위치는 실린더블록 내에서 반지름 R을 기준으로 일정하게 배치되어 있기 때문에 회전하기 전의 좌표계에서 바라본 피스톤의 위치는  $Y_0$  축을 기준으로 반지름 R만큼 떨어져있으며, 피스톤이 각도  $\phi$ 만큼 회전한 후의 좌표계에서 회전 후 피스톤의 위치를 바라보아도  $Y_0$ 을 기준으로 R만큼 떨어져있다는 점이다.

따라서 이를 계산하면  ${}^0P_{\pi ston1}$ 은 식 (6)과 같으며 피스톤의 변위 X축 결과값은 (1)식과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

$${}^0P_{\pi ston1} = {}^0_2R \cdot {}^2P_{\pi ston1}$$

$$= \begin{vmatrix} \cos\alpha - \sin\alpha \cdot \cos\phi & \sin\alpha \cdot \sin\phi \\ \sin\alpha & \cos\alpha \cdot \cos\phi - \cos\alpha \cdot \sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} -R \cdot \sin\alpha \cdot \cos\phi \\ R \cdot \cos\alpha \cdot \cos\phi \\ R \cdot \sin\phi \end{vmatrix} \quad (6)$$

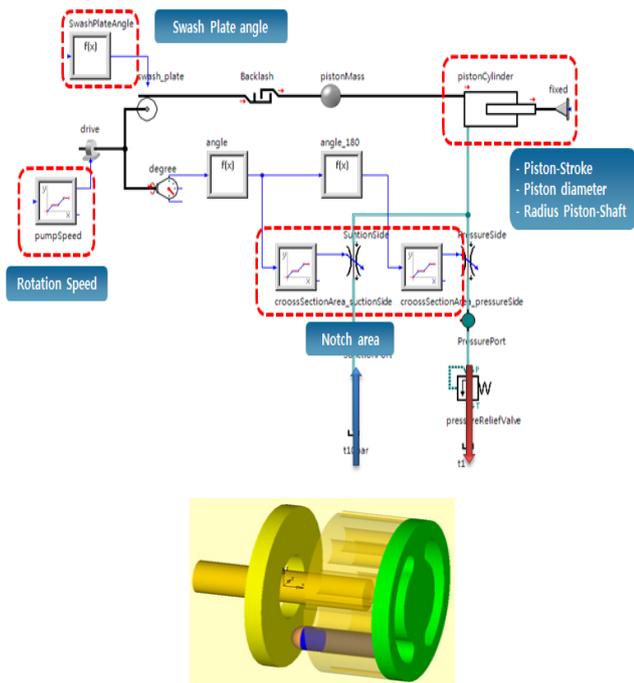


Fig. 8 Single piston pump modeling using SimulationX®

$$\therefore XO_{P1} = -R \cdot \sin\alpha \cdot \cos\phi \quad (7)$$

## 2.2 SimulationX®에의 적용

기구학적, 수학적 해석한 부분은 SimulationX®에 적용하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있으며, 흡입 및 토출 포트, 개구면적, 회전 속도를 고려한 단일 피스톤 펌프에 대한 모델링은 Fig. 8과 같다.

## 3. 단일 피스톤 펌프에 대한 맥동 변수 분석

### 3.1 평균이론유량식

사판식 피스톤펌프에서의 맥동은 기구적 특성상 반드시 유량맥동이 발생하며, 이러한 유량맥동은 관로계의 유체 임피던스와 상관하여 압력맥동으로 나타나게 된다. 이러한 맥동이 발생하는 변수를 분석하기 위해 2절에서 언급한 바와 같이 기구학적 해석을 실시하였으며, 평균이론유량 식 (10)에 의한 맥동 변수로써 최대 피스톤 행정(maximum piston stroke), 최대 피스톤 행정(maximum piston stroke)에 대한 맥동 영향을 분석하였다<sup>[6]</sup>.

$$Q_{th} = \frac{\omega V_P}{2\pi} = \omega z R A_p \tan\alpha \quad (10)$$

Fig. 9은 피스톤 지름( $d$ )를 10 mm, 15 mm, 20 mm로 변화시켜가며 해석을 실시한 결과이며, 압력과 유량맥동 영향을 살펴보면 피스톤 지름이 커질수록 전체적인 맥동이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 식 (10)에 의해 피스톤 지름이 증가할수록 단면적  $A_p$ 도

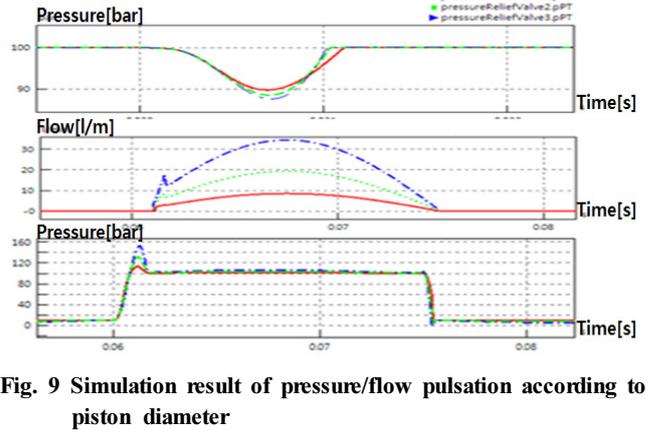


Fig. 9 Simulation result of pressure/flow pulsation according to piston diameter

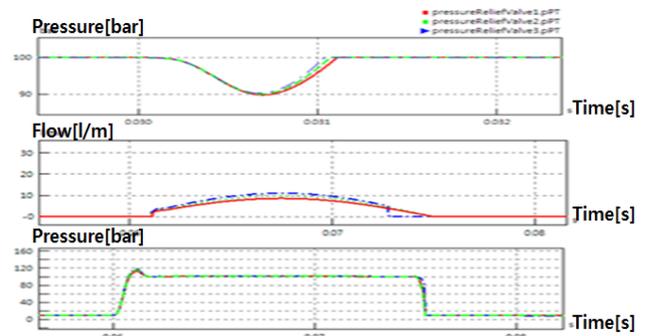


Fig. 10 Simulation result of pressure/flow pulsation according to pitch circle diameter

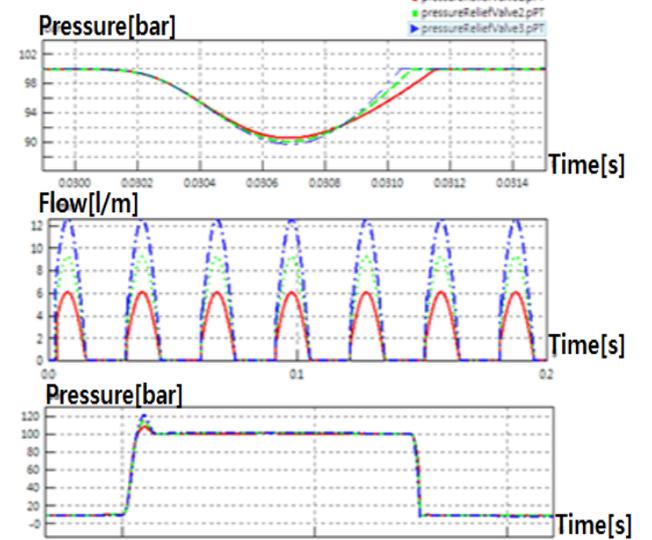


Fig. 11 Simulation result of pressure/flow pulsation according to swash plate angle

증가하고 이와 비례하여 평균이론유량도 증가하여 맥동에 영향을 미치기 때문이다.

두 번째 살펴볼 맥동 변수는 최대 피스톤 행정( $L$ )에 있는 pitch

circle diameter와 swash plate angle이며, 식 (11)과 같다<sup>[6]</sup>.

$$L = 2R \tan \alpha \tag{11}$$

Fig. 10은  $R$ (pitch circle diameter)값을 35 mm, 40 mm, 45 mm로 변화시켜가며 해석한 결과이며 큰 차이가 없음을 확인하였다. Fig. 11은  $\alpha$ (swash plate angle)값을 10°, 15°, 20°로 변화시켜가며 해석한 결과이며, 사판각이 증가할수록 토출유량이 증가하여 유량맥동도 비례하여 증가함은 물론 밸브플레이트의 노치부분에서 압력이 작을 때보다 조금 더 급격하게 변함을 알 수 있다. 실린더 내 압력맥동 또한 사판각이 증가할수록 더 많이 증가하였다.

### 3.1 노치 형상

2절에서 언급한 내용을 바탕으로 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프에서 발생하는 맥동 변수들을 분석하였으며, 계속해서 밸브 플레이트 노치 형상이 압력 및 유량 맥동에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 그 이유는 작동유가 흡입, 토출을 반복하면서 회전할 때 일정한 토출량을 유지해야하는데 밸브 플레이트의 기구적 형상에 따라 개구면적이 급변하게 되어 이에 따른 압력 및 유량맥동이 발생하게 되어 기계의 진동과 소음의 원인이 되기 때문이다. 따라서 Fig. 12와 같이 밸브플레이트의 개구면적이 급변하는 부분에 노치를 설계함으로써 개구면적이 점진적으로 증가하여 압력 변화도 점진적으로 증가하는 효과를 얻어 맥동을 저감시킬 수 있다. 주로 노치의 형상에는 Fig. 12와 같은 Circular type과 V type 형상이 많이 사

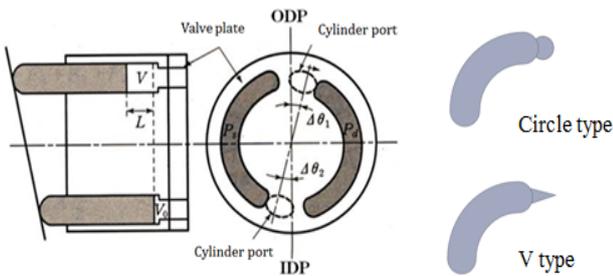


Fig. 12 Circular type and V type notch shapes

Table 1 Parameters of the model

No.	Variable	Value
1	Piston mass (m)	100 g
2	Rotational speed (RPM)	2000 rpm
3	Piston diameter (d)	10 mm
4	Pitch circle diameter	35 mm
5	Maximum piston stroke (L)	2Rtanα
6	Relief valve set pressure (P)	100 bar
7	Swash plate angle (deg)	14°
8	Notch type	Circular, V

용되며<sup>[7]</sup>, 이 두 가지의 노치 타입에 대한 맥동 영향을 살펴볼 것이다.

Table 1은 해석을 위한 기본적인 변수값들이며, Fig. 13은 Table 1에 따른 Circular type 노치에 대한 해석결과이다. Fig. 14는 Circular type notch에 대한 출구 압력(outlet pressure)을 확대하여 나타낸 그림이며 압력 맥동이 발생함을 알 수 있다.

앞서 해석한 Circular type 노치의 압력맥동과 V type 노치 개구 면적에 따른 해석결과를 비교한 결과는 Fig. 15와 같으며, Fig. 16은 각 노치의 개구면적을 percentage로 변화해가며 해석한 결과이다. Fig. 15를 보면 V type 노치의 압력 맥동이 더 적게 일어난 것을 확인할 수 있으며, Fig. 16에서는 V type 노치가 Circular type 노치보다 개구면적 변화에 따른 압력이 적게 변화하는 것을

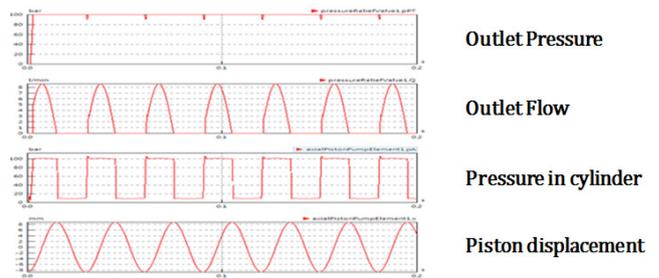


Fig. 13 Analysis result of the model

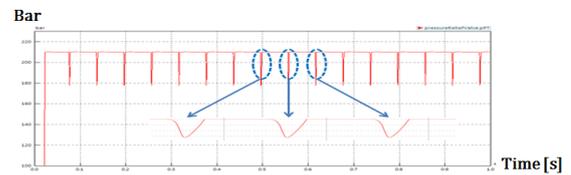


Fig. 14 Pressure pulsation of circular type notch

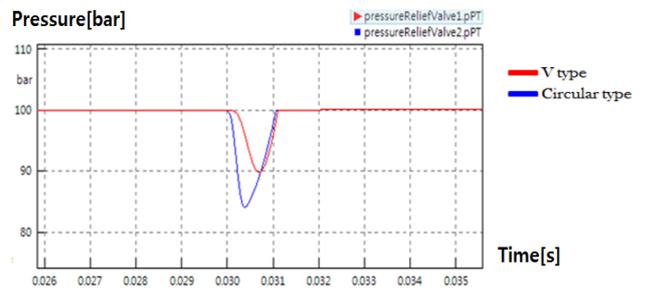


Fig. 15 Pressure pulsation vs. Notch type

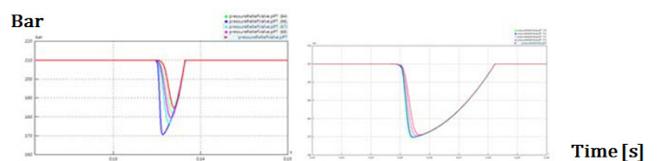


Fig. 16 Pressure pulsation of circular (left) and V (right) type notches according to the opening area

확인하였다. 이러한 이유는 피스톤이 회전하면서 밸브 플레이트에 닿을 때의 면적이 V type노치가 Circular type노치보다 점진적으로 증가함으로써 압력 또한 더 부드럽게 상승하게 되기 때문이다. 맥동을 고려한 노치 설계 시 이러한 압력 변화가 적은 V type의 노치를 설계함으로써 맥동에 의한 영향을 줄이고 일정한 토출량을 유지하며 진동과 소음을 효과적으로 줄일 수 있다.

이와 마찬가지로, 단일 피스톤 펌프 하나의 모델을 Fig. 17과 같이 실제 사판식 피스톤펌프에 주로 설계되어지는 나인 피스톤 펌프로 확대한 모델에 대해 먼저 Circular type 노치 개구면적으로 설정하고 해석한 결과는 Fig. 18과 같다.

단일 피스톤 펌프와 마찬가지로 나인 피스톤 펌프모델에서도 동일하게 V type 노치의 개구면적을 비교하여 해석해보면 Fig. 19와

같은 결과를 얻을 수 있으며, 단일 피스톤 펌프의 해석과 마찬가지로 V type 노치가 Circular type 노치보다 유량맥동이 더 적게 일어나는 것을 확인하였다. 각 노치별 개구면적 증감에 따른 맥동영향을 분석하여 최적화된 노치 설계를 하기 위해 Table 2와 같이 6가지 case로 해석을 실시하였다.

Fig. 20에서는 V 및 circular type 노치의 개구면적을 일정한 비율로 증가, 감소를 하며 개구면적에 따른 맥동 영향 특성을 해석한 결과이다. (a)는 실린더 내 압력에 따른 해석 결과이며, 노치 형상에 따른 오리피스 특성에 의해 맥동의 영향이 Circular type이 먼저 발생함을 확인하였다. (b)는 유량 맥동에 따른 해석결과이며,

Table 2 Candidate design specification of notch

Type deg[·]	V type notch [mm <sup>2</sup> ]			Circular type notch [mm <sup>2</sup> ]		
	initial	decrease	increase	initial	decrease	increase
0	0	0	0	0	0	0
4	0.5	0.45	0.6	4.5	3.8	5.1
5	2.5	1.5	3.5	5	5.2	7
10	4	3.5	6	7.5	6.4	8.5
14	8	6	9	8.5	7	9.5
18	10	8.8	11.2	10	8.7	10.5
22	56	56	56	56	56	56
165	56	56	56	56	56	56
170	56	56	56	56	56	56
180	0	0	0	0	0	0
185	0	0	0	0	0	0
195	0	0	0	0	0	0
355	0	0	0	0	0	0
360	0	0	0	0	0	0

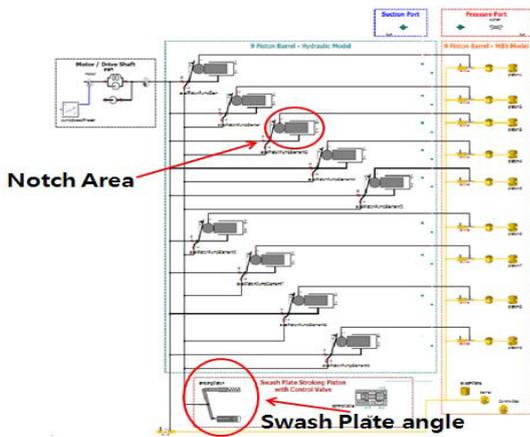


Fig. 17 Overall nine piston pump model using SimulationX®

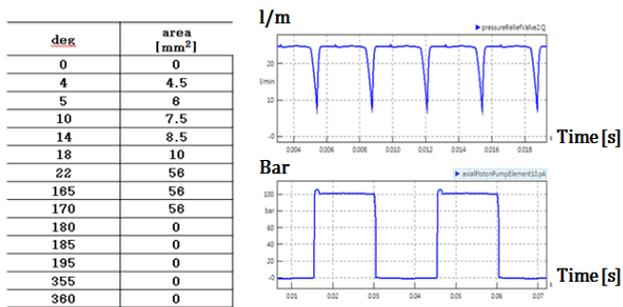


Fig. 18 Parameters (left), flow ripple (above) and cylinder pressure (below) of circular type notch model

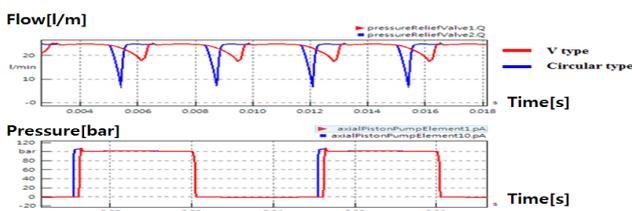
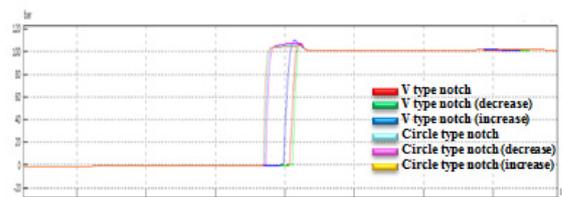
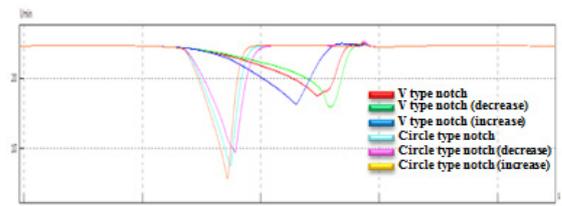


Fig. 19 Flow ripple (above) and cylinder pressure (below) vs. Notch type



(a) Cylinder pressure pulsation



(b) Flow pulsation

Fig. 20 Pressure and flow pulsation of six notch types (three circular types and three V types)

Table 3 Comparison of initial optimal design

	Value		Improvement rate
	Circular type	V type	
Pressure [bar]	117.89	102.55	13% (decrease)
Flow [L/min]	7.45	17.33	57% (decrease)

(a)와 동일한 맥동 영향을 확인하였고, 노치 형상 및 개구면적 증감에 따른 맥동 영향은 V type 노치가 더 적게 일어남을 확인할 수 있다. Table 3에 Fig. 20의 맥동이 저감된 정도를 수치로 정리하여 나타내었으며, 가변용량형 사판식 피스톤 펌프의 밸브플레이트에 V type 노치를 설계하는 것이 맥동 저감에 더 효율적인 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 유공압시스템에서 사용되는 유압장비중 굴삭기의 메인펌프 등에 주로 쓰이는 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프의 밸브플레이트 노치 설계에 대한 연구를 실시하였으며, 유압해석 프로그램인 SimulationX의 모델링을 위해 사판식 피스톤 펌프의 수학적 해석을 제시하였고, 평균이론유량식에 따른 맥동 변수를 분석하여, Piston diameter와 swash plate angle이 증가할수록 유량 및 압력 맥동이 증가함을 확인하였다. 또한 Circular type notch와 V type notch의 맥동 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하여 V type notch를 설계하는 것이 개구면적이 점진적으로 증가함으로써 더 효율적으로 맥동을 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 향후계획으로는 노치 비교를 통해 선정된 V type notch의 폭, 길이, 깊이 등의 변수에 대해서 연구할 것이며, 다른 노치 형상에 대해서도 연구를 진행할 것이다.

#### 후 기

이 연구는 “8~10톤 건설장비용 주행디바이스 핵심모듈 개발” 과제에 의해 연구되었음

#### References

- [1] Yoon, Y. H., Jang, J. S., Lee, Y. B., 2012, An Analysis of Dynamic Characteristics for Variable Swash Plate Type Axial Piston Pump, Proceedings of the KSFC 2012 Spring conference, 23-30.
- [2] Quan, L., Yang, Y., Hou, X., 2011, Simulation and experimental research on the axial piston pump with series three-windows in valve plate, Proceedings of the Fluid Power and Mechatronics 2011 international conference on 2011 Aug, 71-76
- [3] Jang, J. H., Chung, W. J., Lee, D. S., Yoon, Y. H., n.d., viewed 2013, Application of Simulation-X<sup>®</sup> based Simulation Technique to Notch Shape Optimization for a Variable Swash Plate Type Piston Pump, <<http://worldcomp-proceedings.com/proc/p2013/CSC2255.pdf>>
- [4] Choi, Se. Lyung, 2010, A basic study on simulation of flow ripple in the Piston Pump, Master Thesis, Pukyong National Univ., Republic of Korea
- [5] Fu, K. S., Gonzales, R. C., Lee, C. S. G., 1987, ROBOTICS : Control, Sensing, Vision, and Intelligence, Mcgraw-Hill Book Company, New York
- [6] Lee, I. Y., 2012, Hydraulic Engineering, Mun un dang, Republic of Korea
- [7] Lee, Y. B., Yoon, Y. H., 2013, A Study on pressure pulsation characteristics by notch type modeling and simulation of a plate valve for the piston motor, Proceedings of the KSME Fluid Engineering Division 2013 Spring Conference, 313-314
- [8] Yoon, Y. H., Kim, J. H., 2012, SimulationX, Multi-domain Simulation and modeling tool for the Design, Analysis, and Optimization of complex systems, Journal of The Korea Society for Fluid Power and Construction Equipments, 9:1 56-69
- [9] ITI., n.d., viewed 2011, SimulationX user manual and library manual, <[http://www.itisim.com/fileadmin/EN/ressources/tutorials/Tut\\_1\\_Getting\\_Started.pdf](http://www.itisim.com/fileadmin/EN/ressources/tutorials/Tut_1_Getting_Started.pdf)>