

# SimulationX<sup>®</sup>를 이용한 가변 사판식 액셀 피스톤 펌프의 밸브플레이트 노치 최적화에 관한 연구

이산성\*, 정원지\*<sup>#</sup>, 임동재\*, 차태형\*, 김수태\*\*, 이정실\*\*\*, 최경신\*\*\*\*

\*국립 창원대학교 기계설계공학과, \*\*국립 창원대학교 기계공학과, \*\*\*세계유압, \*\*\*\*로이드스급

## SimulationX<sup>®</sup> -based Modeling for Valve-Plate Notch Design of Variable Swash-Plate Axial Piston Pump

San Seong Lee\*, Won Jee Chung\*<sup>#</sup>, Dong Jae Lim\*, Tae Hyung Cha\*,  
Soo Tae Kim\*\*, Jeong Sil Lee\*\*\*, Kyung Shin Choi\*\*\*\*

\*Mechanical Design, Changwon national UNIV., \*\*Mechanical Engineering, Changwon national UNIV.

\*\*\*Segae Hydraulic, \*\*\*\*Lloyd's Register

(Received 4 June 2018; received in revised form 11 June 2018; accepted 15 June 2018)

### ABSTRACT

Considering the shape of a valve plate in design is important for reducing the pulsation phenomenon, which is a negative factor in pump performance. The purpose of this study is to propose an optimized method for a valve-plate V-type notch of a piston pump by modeling and simulation. The method uses SimulationX<sup>®</sup>, a commercial hydraulic analysis program, and to provide data for the designing of the notch. The opening areas are determined by performing kinematic analysis of the notch part where the opening area changes rapidly. After applying the result analysis, the main effects on maximum pressure pulsation and maximum backflow according to the notch design factors are analyzed by using the full factorial method of experimental design. The optimized solutions are derived for the notch design variables, based on the analyzed data.

Key Words : Swash Plate Type Axial Piston Pump(가변 사판식 피스톤 펌프), Valve Plate(밸브 플레이트), Notch(노치), Opening Area(개구면적), Pressure/Flow Pulsation(압력/유량 맥동)

### 1. 서 론

액셀형 유압 피스톤 펌프는 용이한 가변 용량화, 우수한 응답성, 높은 에너지 효율 등의 이점 때문에 산업현장에서 널리 사용되어지고 있다. 액셀형 유압 피스톤 펌프는 구동축과 보통 7개 또는 9개의

피스톤이 삽입되는 실린더 블록과의 상관관계에 따라 사판식과 사축식 유압 피스톤 펌프로 분류된다.<sup>[1]</sup>

유압 펌프의 송출 유량 맥동은 압력 맥동을 유발하며, 유압 시스템에서의 진동 및 소음의 주요 기인이 된다. 액셀 피스톤 펌프에서는 작동유의 압축성 때문에 피스톤 하사점 근방(bottom dead center, BDC)의 송출 포트로부터 실린더 실로 급격히 역류하는 유동이 발생한다. 이러한 비정상 누설 유량은

# Corresponding Author : wjchung@changwon.ac.kr

Tel: +82-53-581-2239, Fax: +82-53-581-2295

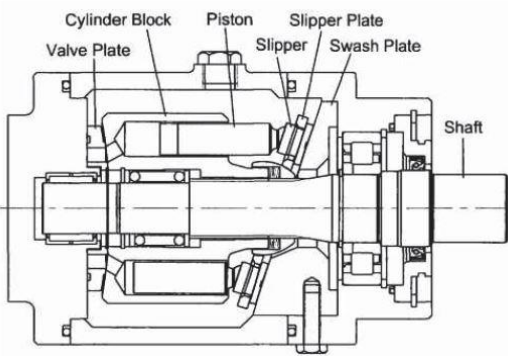


Fig. 1 Swash plate type axial piston pump<sup>[3]</sup>

펌핑 기구의 유한한 피스톤 수에 기초한 유량 맥동에 비하여 맥동의 진폭이 매우 큰 것으로 알려져 있다.<sup>[2]</sup> 또한 유압 펌프의 유량 맥동은 밸브 플레이트에 설치된 노치의 설계치수와 예가압·예팽창 구간의 설계치수, 운전조건(모터의 회전수, 송출압력, 경전각 등), 작동유의 체적탄성계수 등의 인자에 따라서 크게 영향을 받게 된다. 결국, 펌프의 설계론적 관점에서 펌프의 성능을 저하시키는 맥동 현상을 저감하기 위하여 펌프의 성능 및 제원에 따라 밸브 플레이트 형상을 고려하여 설계하는 것은 매우 중요한 기술 요소이다.

Sa<sup>[3]</sup>의 논문에서는 밸브 플레이트의 설계 요소인 b factor가 펌프의 맥동에 미치는 영향을 분석하여 흡입 및 토출 부에 각각 1~2개의 개구보다는 3개의 개구를 가공하는 것이 성능에 유리함을 확인하였다. 그리고, 1<sup>st</sup> V-type 노치와 2<sup>nd</sup> U-type 노치, 2<sup>nd</sup> V-type 노치의 비교 분석을 통하여 2<sup>nd</sup> V-type 노치가 다른 두 노치에 비해 압력 맥동을 더 효율적으로 저감시킨다는 것을 확인하였다.<sup>[3]</sup> 하지만, Sa의 논문에서는 단순히 노치의 형상에 따른 해석만을 실시하였고 실제로 노치의 형상을 결정하는 설계 요소에 따라 발생하는 맥동에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 실제로 밸브 플레이트의 노치 설계를 하기 위해서는 노치의 설계 변수에 따른 개구면적에 대한 정확한 계산과 그 결과를 기반으로 해석 모델에 적용하여 노치 설계 변수의 조합에 따른 비정상 압력 및 유량에 대한 분석이 필요하다.

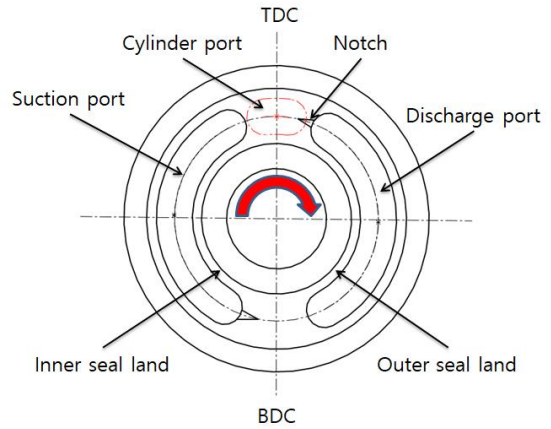


Fig. 2 Basic valve plate with notch

따라서, 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 가변 사판식 액셀 피스톤 펌프의 밸브 플레이트의 설계에 활용할 수 있도록 노치의 설계 변수에 따라 변화하는 개구면적을 분석하고, 상용 유압 해석 프로그램인 SimulationX<sup>®</sup>를 이용하여 불필요한 압력 및 유량에 대한 데이터를 도출하고 분석하여 V-type노치에 대한 최적화 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 밸브 플레이트 분석 및 노치부 개구면적 계산

### 2.1 밸브 플레이트 분석

사판식 피스톤 펌프에서 유압 작동유가 흡입, 토출을 반복하면서 회전할 때 일정한 토출량을 유지해야 할 필요가 있다. 하지만 밸브 플레이트의 기구학적 형상에 따라 개구면적이 급변하게 되어 필연적으로 압력 및 유량맥동이 발생하게 된다. 그렇기 때문에 밸브 플레이트의 개구면적이 급변하는 부분에 대한 노치의 설계가 필수적이며, 이를 통해 유압 펌프의 수명을 연장하고 신뢰성을 향상시킬 수 있게 된다.<sup>[3]</sup>

밸브 플레이트는 펌프의 종류에 따라 약간의 차이는 있지만, 일반적으로 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 흡입 포트, 토출 포트 내·외부 실(seal) 랜드로 구성

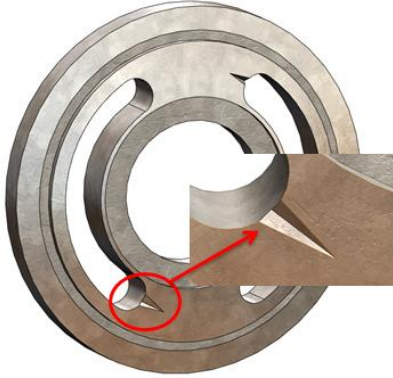


Fig. 3 Valve plate notch model

되어지고, Fig. 2 상단의 붉은 색으로 표시된 실린더 포트(Cylinder port)로부터 유량을 흡입, 토출하게 된다.

흡입과 토출이 시작되게 되면, 흡입 포트와 토출 포트에서의 불안정한 압력 및 유량의 변동을 막고자 밸브 플레이트에 Fig. 3와 같이 노치 홈을 설계하게 된다.

이론적으로 펌프의 흡입, 토출시의 불안정한 압력 및 유량을 최소화하기 위해서는 식 (1)과 같이  $\Delta P$ 의 압력차가 발생하게 될 때,  $\Delta V$ 만큼의 압축성이 생기며, 이 때의  $\Delta V$ 를 밸브 플레이트의 노치 길이 부만큼의 회전시간  $\Delta t$ 동안 잘 분배하여야한다.<sup>[4]</sup>

$$\Delta P = \beta \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

$\Delta P$  : 실린더 내부와 밸브 플레이트 개구부 간의 압력차

$\beta$  : 체적탄성계수

$\Delta V$  : 압력차에 의한 체적변화

$V$  : 실린더 내부 체적

## 2.2 노치부 개구면적

최적의 노치를 설계하기 위해서는 노치의 설계변수에 따라 달라지는 노치부에서의 개구면적에 대한 정확한 계산을 통하여 해석모델에 적용하고, 넓은

작동 영역에 걸친 압력 및 유량맥동을 파악할 필요가 있다.

노치부를 제외한 토출 및 흡입 포트 구간에서의 개구면적의 증가나 감소는 선형적으로 계산되어질 수 있으나, 노치 구간의 경우, 이후 설명할 천이영역으로 불리는 주요 관심 구간으로서 본 연구에서는 맥동 및 유동 특성 해석에 앞서 그 영역에서의 개구면적에 대한 기하학적 분석을 진행하였다.

Fig. 3에 노치의 대표적인 형태인 V-type 노치를 나타내었고 해석 모델로서 선정하였다.

### 2.2.1 V-type 노치 개구면적 기하학적 분석

이론적으로 개구면적은 유선에 수직인 단면적이지만, 밸브 플레이트 내의 유체의 유동 및 유선의 형상 추정이 불가능하기 때문에 정확한 개구면적 형상을 파악하기는 어렵다. 이에 전제조건으로 개구면적은 그 시점에서의 단면적이 최소가 되는 것을 선정하기로 한다.<sup>[5]</sup>

실린더 포트 하나를 기준으로 밸브 플레이트를 통한 개구면적을 본다면 Fig. 4와 같이 실린더 포트의 각도에 따른 개구면적 구간이 정해지게 되며, 일반적으로 다음과 같이 명명된다.<sup>[4]</sup>

- ①  $L_1 \sim L_2$  : 천이영역(A1)
- ②  $L_2 \sim L_3$  : 흡입영역(A2)
- ③  $L_3 \sim L_4$  : 폐입영역(A3)
- ④  $L_4 \sim L_5$  : 천이영역(A4)
- ⑤  $L_5 \sim L_6$  : 토출영역(A5)
- ⑥  $L_6 \sim L_1$  : 폐입영역(A6)

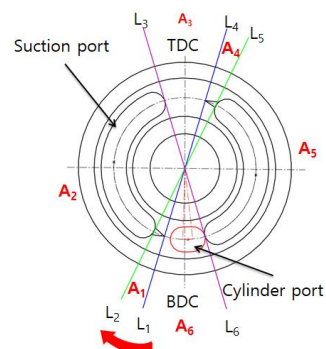


Fig. 4 Section of open-areas in valve plate

각 구간에 따른 개구면적 변화의 추이를 살펴볼게 되면, 실린더 포트가 시계 방향으로 회전하면서 개구면적은 천이영역(A1) 구간을 지나면서 개구면적 변화에 노치의 영향만이 존재하고,  $L_2$ 를 지나면서 천이영역(A1)과 흡입영역(A2)의 영향이 혼재하게 된다. 다음으로 실린더 포트가 천이영역(A1)을 완전히 벗어나게 되면 실린더 포트의 각도 변화에 상관없이 개구면적이 일정하게 된다.

다음으로  $L_3$ 를 지나면서 실린더 포트가 폐입영역(A3)에 들어가게 되면 개구면적이 점점 줄어들게 되어 결국 0에 수렴하게 된다.

이후 천이영역(A4)로 들어가게 되면 A1~A3 영역에서의 개구면적 변화와 동일한 과정을 거치게 된다.

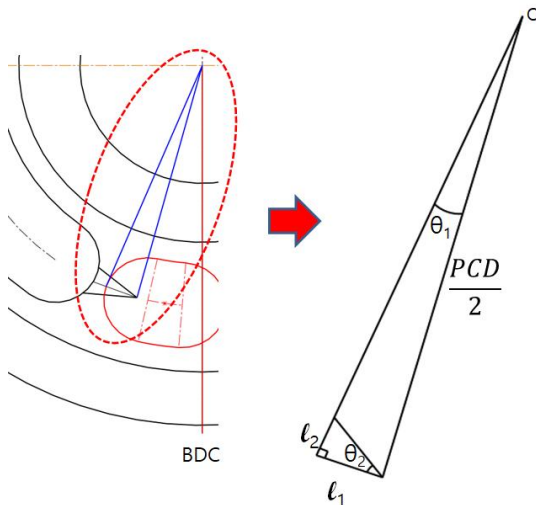


Fig. 5 Geometric analysis in top view of A1

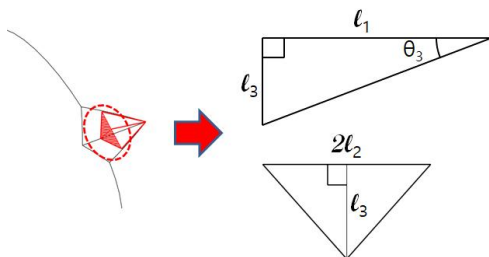


Fig. 6 Geometric analysis in side view of A1

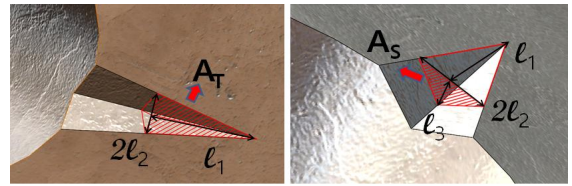


Fig. 7 Top view(left) and side view(right) of the notch

Fig. 5, 6에 노치가 존재하는 천이영역(A1) 영역에서의 개구면적에 대한 기하학적 분석을 나타내었다. 실린더 포트의 변위에 따른 개구면적은 그 시점에서의 최소 단면적이어야 하기 때문에, Fig. 7에서의 평면도의 면적( $A_T$ )과 측면도의 면적( $A_S$ )을 비교했을 때 더 작은 면적을 선택하여 그 시점에서의 개구면적을 결정한다.

Fig. 5, 6에 대한 기하학적 계산식은 다음과 같다.

$$l_1 = \frac{PCD}{2} \sin\theta_1 \quad (2)$$

$$l_2 = l_1 \tan\theta_2 \quad (3)$$

$$l_3 = l_1 \tan\theta_3 \quad (4)$$

결과적으로 식 (2)-(4)에 의하여 Fig. 7의 평면도상의 면적( $A_T$ )는 식 (5)와 같이 되고,

$$A_T = \left(\frac{PCD}{2}\right)^2 (\sin\theta_1)^2 \tan\theta_2 \quad (5)$$

측면도에서의 면적( $A_S$ )는 식 (6)와 같이 된다.

$$A_S = \left(\frac{PCD}{2}\right)^2 (\sin\theta_1)^2 \tan\theta_2 \tan\theta_3 \quad (6)$$

식 (5), (6)에 의하여 실린더 포트의 변위에 의해 변화하는  $\theta_1$ 에 따른  $A_T$ ,  $A_S$ 의 면적을 계산하여 동일한 시점에서 더 작은 단면적이 개구면적으로 결정된다.

결과적으로 Fig. 8에서와 같이 어느 시점에서든 평면도상의 면적보다 측면도상의 면적이 더 작음이 나타났고, 개구면적은 측면도상의 면적을 따른다.

다음으로, 실린더 포트가 천이영역(A1)을 지나 흡입영역(A2)으로 들어가면서 총 개구면적은 증가하게 되지만, 노치부에서의 개구면적이 줄어들게 되는 시점

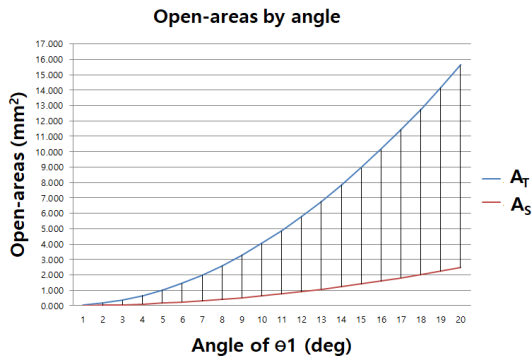


Fig. 8 Open-areas by angle

에서는 항상 측면도상의 면적이 더 작기 때문에 식 (6)를 사용하여 감소분에 대한 면적을 계산할 수 있다.

다음으로, 실린더 포트의 흡입 영역으로의 이동에 의하여 발생하는 개구면적의 증가분은 실린더 포트와 밸브 플레이트의 흡입포트(Suction port)가 만나면서 생성되는 면적으로, 앞서 언급한 것처럼 선형적으로 계산되어질 수 있다. 토출영역으로의 이동에 의하여 변화되는 개구면적은 밸브 플레이트의 대칭성에 의하여 흡입부와 동일하다.

### 3. 해석 실험 설계

#### 3.1 Modeling by SimulationX<sup>®</sup>

밸브 플레이트 노치의 설계 요소에 대한 유동 특성을 해석하기 위해서는 먼저 사판식 피스톤 펌프의 기구학적인 분석이 필요하며, 이미 Jang<sup>[6]</sup>의 논문에서 Fig. 9에서와 같이 복합회전행렬(Fixed Angle Frame)을 이용하여 식 (7)과 같은 결과를 도출하였다.

$$X_{O_{P1}} = -R_T \tan(\alpha) \cos(\varphi) \quad (7)$$

여기서  $R_T$ 은 pitch circle diameter이고,  $\alpha$ 는 swash plate angle,  $\varphi$ 는 실린더 블록의 회전각도이다.<sup>[6]</sup>

기구학적 해석을 적용하여 상용 유압해석 프로그램

인 SimulationX<sup>®</sup>로 모델링한 단일 피스톤 펌프의 모델은 Fig. 10과 같으며, 해석 모델에 대한 운전 조건 및 제원은 Table 1에 나타내었고, 해석 모델에 적용된 유압 작동유의 상태량은 Table 2에 나타내었다.

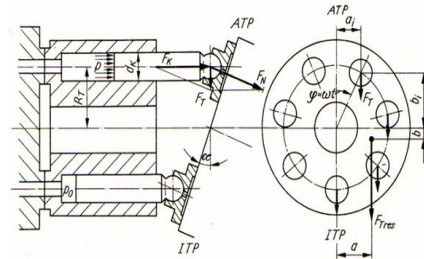


Fig. 9 Variable at the axial piston pump<sup>[6]</sup>

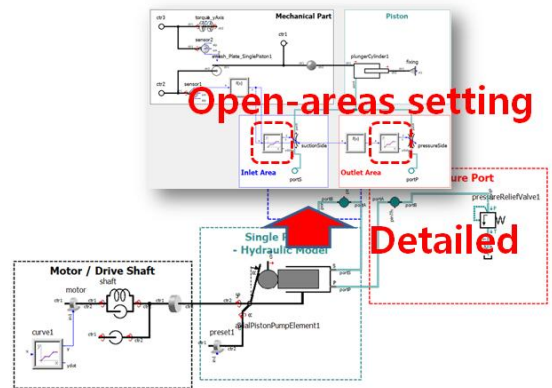


Fig. 10 Single piston pump model using SimulationX

Table 1 Parameters of the model

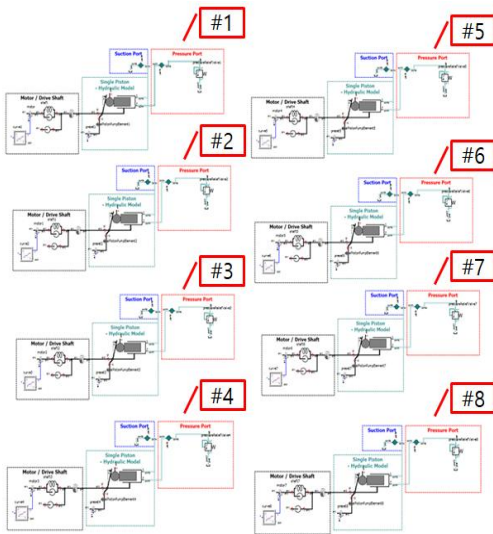
No.	Variable	Value
1	Piston mass(m)	212 g
2	Rotational speed (RPM)	2000 rpm
3	Piston diameter(d)	21 mm
4	Radius piston-shaft(R)	20 mm
5	Maximum piston stroke(L)	2Rtan $\alpha$ mm
6	Relief valve set pressure(P)	300 bar
7	Swash plate angle( $\alpha$ )	14°
8	Notch type	V-type

**Table 2 Technical properties of the hydraulic fluid**

Properties	Factors
SAE GRADE	30
Density at 15°C	0.895 [ $g/cm^3$ ]
Viscosity at 40°C	105 [ $cSt$ ]
Viscosity at 100°C	11.5 [ $cSt$ ]

**Table 3 Levels of notch design value**

Variables	Factors	Concentration	
		-1 Level	1 Level
A	Max $\theta_1$	14.4°	17.6°
B	$\theta_2$	12.6°	15.4°
C	$\theta_3$	8.1°	9.9°

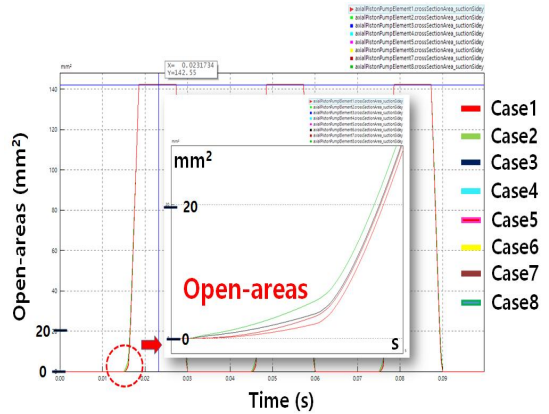


**Fig. 11 8 case of single piston pump model**

### 3.2 완전요인배치법을 통한 실험 설계

V-type 노치의 설계 요소에 따른 압력 및 유량특성을 알아보기 위해, 실험계획법을 이용하여 Fig. 5, 6의 노치부의  $\theta_1$ 의 최대값 및  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 의 크기를 실험계획의 반응 인자로 선정하였다.

완전요인배치법을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였고, 반응 인자의 수준은 2수준으로, Table 3에서



**Fig. 12 Open-areas of 8 case**

나타낸 바와 같이 기존 V-type 노치의 설계치수인 최대  $\theta_1$ 은 16°,  $\theta_2$ 는 14°,  $\theta_3$ 는 9°에서 10%를 상승, 하락하여 선정하였다.

3인자 2수준이므로 수식으로  $2^3 = 8$ 회의 실험 횟수가 나오며, Fig. 11에 Table 3의 설계치수들을 적용한 8개의 모델들을 나타내었다.

시뮬레이션을 통하여 실린더 내에서의 최대 압력 맥동, 최대 역류 유량에 대한 데이터를 얻을 것이며, 얻은 데이터를 통해 완전요인배치법을 이용하여 최적의 노치를 선정할 것이다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 결과

총 8회의 실험에 대한 노치의 개구면적 그래프는 Fig. 12에 나타내었으며 개구면적을 적용한 해석결과로서, 최대 압력 맥동 및 최대 역류 유량에 대한 그래프를 Fig. 13~Fig. 16에 나타내었다.

각각의 결과 그래프에서 그래프가 겹쳐서 보이지 않는 부분에 대한 결과치는 생략하여 나타내었다.

총 8회의 실험에 대한 완전요인배치법의 실험설계와 각각의 실험 순서에 따라 실험을 수행한 후의 최대 압력 및 최대 역류 유량에 대한 결과 데이터를 정리하여 Table 4에 나타내었다.

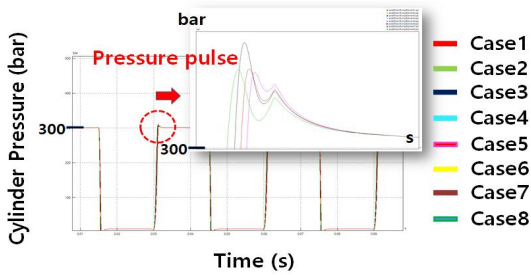


Fig. 13 8 case result of pressure pulse

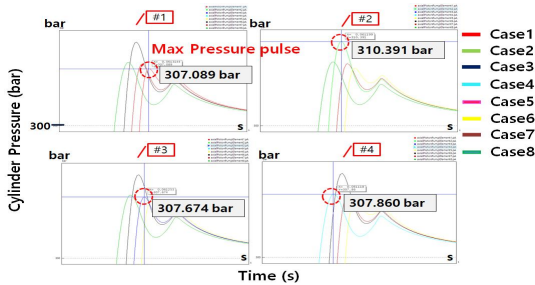


Fig. 14 Main result of pressure pulse

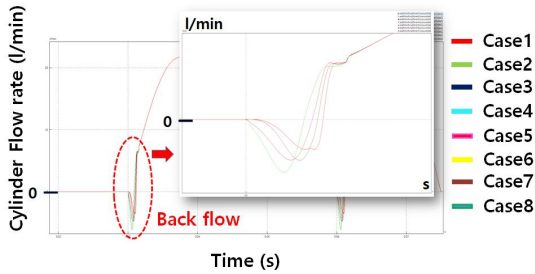


Fig. 15 8 case result of back flow

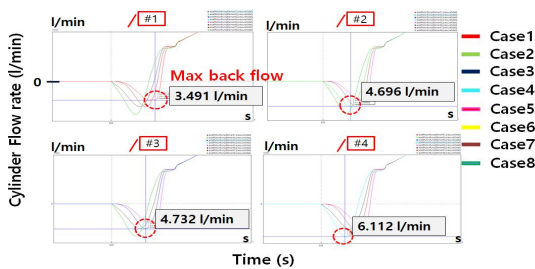


Fig. 16 Main result of back flow

Table 4 Result data

Case	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	Max pressure(bar)	Max back flow(l/min)
1	14.4°	12.6°	8.1°	307.089	3.491
2	17.6°	12.6°	8.1°	310.391	4.696
3	14.4°	15.4°	8.1°	307.674	4.732
4	17.6°	15.4°	8.1°	307.860	6.112
5	14.4°	12.6°	9.9°	307.090	3.503
6	17.6°	12.6°	9.9°	310.392	4.671
7	14.4°	15.4°	9.9°	307.674	4.747
8	17.6°	15.4°	9.9°	307.860	6.126

## 4.2 데이터 분석

상용 데이터 분석 프로그램인 MINITAB<sup>®</sup>을 이용하여, 도출된 Table 4의 실험 데이터에 대한 분석을 진행하였다. 각 인자간의 독립적 효과를 추정하기 위하여 최대 압력 맥동 및 최대 역류 유량에 대한 주효과도를 그려 분석을 진행하였다. 주효과도에서는 직선의 기울기가 급할수록, 즉 수평선과 이루는 사이 각이 클수록 효과가 크다고 할 수 있다.<sup>[7]</sup>

최대 압력 맥동에 대한 주효과도를 Fig. 17에 나타내었다. 먼저 최대  $\theta_1$ 에 대한 기울기를 살펴보면 우-상방향 그래프로 그 값이 증가할수록 최대 압력 맥동이 증가함을 볼 수 있지만, 반면에  $\theta_2$ 의 기울기는 우-하방향 그래프로 그 값이 증가할수록 최대 압력 맥동이 감소함을 알 수 있다. 기울기의 크기를 살펴보면  $\theta_2$ 보다는  $\theta_1$ 이 더 급격하므로, 최대 압력 맥동에 미치는 영향은  $\theta_1$ 이  $\theta_2$ 보다 우세함으로 판단된다.

다음으로  $\theta_3$ 의 기울기는 거의 수평에 가까움으로, 최대 압력 맥동에 미치는 영향이  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 에 비해 현저히 적음을 알 수 있다. 실린더 내부에서의 최대 역류 유량에 대한 주효과도는 Fig. 18에 나타내었다.

$\theta_1$ ,  $\theta_2$ 에 대한 기울기는 우-상향이며,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 크기가 커질수록 최대 역류 유량은 증가함으로 판단된다. 기울기의 크기는  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 이 비슷한 양상을 보이고 있으므로 최대 역류 유량에 미치는 영향이 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

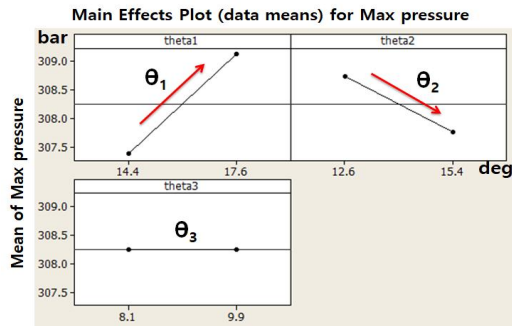


Fig. 17 Main effect plot for max pressure pulse

New D	Hi	theta1	theta2	theta3
0.00000	Cur	[16.0117]	[14.0647]	[8.9891]
	Lo	14.40	12.60	8.10
Max pres				
Targ: 300.0				
y = 308.2374				
d = 0.00000				
Max back				
Targ: 0.0				
y = 4.7953				
d = 0.04093				

Fig. 20 Response optimization

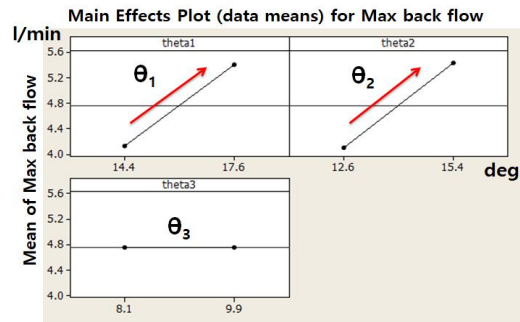


Fig. 18 Main effect plot for max back flow

Table 5 Optimized value

$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	Max pressure(bar)	Max back flow(l/min)
16.01°	14.06°	8.98°	308.23	4.79

예압축 구간이 감소하여 실린더 내부 상승 압력 구배가 커짐으로서 최대 압력 맥동 및 최대 역류 유량이 증가함으로 판단되었다. 또한 최대  $\theta_1$ 의 크기와  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 의 크기의 조합에 따라 Fig. 19와 같이 실린더 내부의 압력구배가 다양하게 변화함으로서 실린더 내부 압력맥동과 역류 유량에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 비정상적인 압력 맥동과 역류 유량을 최소화하기 위해서는 최대  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ , 즉 세 가지 인자의 조합을 적절히 선정해야함으로 판단되었다.

최종적으로 MINITAB<sup>®</sup>의 반응 최적화 기능을 이용하여 최대 압력 맥동 및 최대 역류 유량이 최소화 될 수 있는 최적조건을 도출하였다. Fig. 20은 절충 조건을 만족시킬 수 있는 최적해를 계산한 결과이며, Table 5에 최적해를 나타내었다. 결국, 최대  $\theta_1$ 은 16.01°,  $\theta_2$ 는 14.06°,  $\theta_3$ 는 8.98°일 때 최적의 조건이 도출됨으로 판단된다.

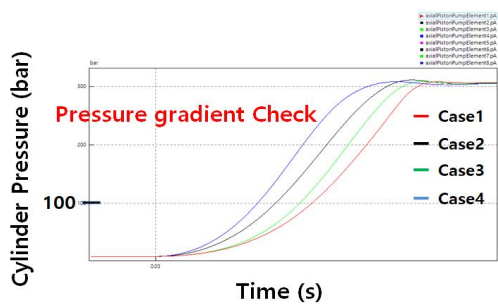


Fig. 19 Pressure gradient inside the cylinder

다음으로  $\theta_3$ 의 기울기는 최대 압력 맥동의 주효과도에서와 마찬가지로  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 에 비해 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

이론적으로 밸브 플레이트의 예압축 구간에 따라 실린더 내부의 압력구배가 달라져 최대 압력 맥동 및 최대 역류 유량에 지대한 영향을 끼치게 된다.<sup>[4]</sup>

분석결과 최대  $\theta_1$ 의 크기가 커지게 되면 이러한

#### 4. 결론

본 논문에서는 유압 액셀형 피스톤 펌프의 성능을 저하시키는 비정상적인 압력 맥동과 역류 현상을 저감하기 위하여 펌프의 성능 및 제원에 따른



밸브 플레이트 V-type 노치의 설계변수의 최적화에 관하여 연구하였다.

첫째로 SimulationX<sup>®</sup>의 해석에 적용하기 위하여 개구면적이 급변하게 되는 밸브 플레이트 노치부의 개구면적에 대한 기하학적 분석과 계산을 진행하였다. 천이 영역의 V-type 노치부에서의 개구면적은 결과적으로 평면도상의 면적보다 측면도상의 면적이 항상 더 작음으로 나타났고, 결국 개구면적은 그 시점에서의 단면적이 최소가 되는 것이므로 측면도상의 면적으로 결정되었다.

다음으로, 실험계획법의 완전요인배치법을 이용하여 노치 설계변수인 최대  $\theta_1$ , 그리고  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 를 반응 인자로 설정하고 3인자 2수준으로 총 8회의 실험 계획에서 각각의 조건을 만족하는 모델을 SimulationX<sup>®</sup>로 모델링하여 최적화를 진행하였다. 해석결과로 최대 압력 맥동과 최대 역류 유량에 대한 데이터를 도출하였고  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 에 대한 주효과도를 분석하여  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 가 실린더 내부 압력구배에 미치는 영향을 파악하였다. 결론적으로  $\theta_1$ 의 크기가 커질수록 예압 축 구간의 감소로 인해 실린더 내부의 상승 압력구배가 커짐으로서 최대 압력 맥동 및 최대 역류 유량이 증가함으로 판단되었으며, 주효과도의 다양한 기울기를 보았을 때  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 의 적절한 조합으로 최대 압력 맥동과 최대 역류 유량을 최소화할 수 있음으로 판단되었다.

최종적으로 MINITAB<sup>®</sup>의 반응 최적화 기능을 이용하여 절충 조건을 만족시킬 수 있는 최적해를 도출하였고, 이러한 밸브 플레이트의 노치 설계변수에 대한 최적화 방법으로 액셀형 피스톤 펌프의 성능을 저하시키는 불필요한 압력변동과 유량맥동을 최소화 할 수 있음을 확인하였다. 향후 유압 펌프의 여러 가지 운전 조건에 대한 노치 최적화 방안에 대해서 연구를 진행할 예정이다.

## Acknowledgment

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다.(R0005818)

## REFERENCES

1. Park, J. H., "The Study on Development of Fixed Displacement Piston Pump for Special Access Vehicle," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 3, pp. 19-27, 2010.
2. Edge, k. Daling, J., "A Theoretical Model of Axial Piston Pump Flow Ripple," 1th Bath Int. Fluid Power Workshop, pp. 113~136, 1988.
3. Cho, I. S., "Characteristics of Lubrication between Slipper and Swash plate in Swash plate Type Hydraulic Piston Pump," Journal of the KSTLE, Vol. 29, No. 3, pp. 186~191, 2013.
4. Kim, J. G., "Performance Characteristics with Valve Plate Shapes in Swash Plate Type Oil Piston Pumps," A Thesis for a Doctorate, Chonbuk National University, Republic of Korea. 2003.
5. Kim, B. S., "A Study on Open-area Planning of Main Control Valve for Excavators," A Master's Thesis, Ulsan National University, Republic of Korea. 2007.
6. Jang, J. H., Chung, W. J., "Application of Simulation X Based Simulation Technique to Notch Shape Optimization for a Variable Swash Plate Type Piston Pump," Proceedings of the International Conference on Scientific Computing, pp. 137-142, 2013.
7. Jeong, Y. S., Chung, W. J., "A Study on the Characteristic of Remote Control Valve Using SimulationX," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 78~84, 2017.