

## 사판식 피스톤 펌프의 밸브 플레이트 설계와 예압에 따른 맥동

사진웅<sup>a</sup>, 정원지<sup>a\*</sup>, 배준형<sup>a</sup>, 이정민<sup>b</sup>**Pulsation According to Pre-Compression Sections and Valve Plate Design for a Swash Plate Type Piston Pump**Jin-Woong Sa<sup>a</sup>, Won-Jee Chung<sup>a\*</sup>, Jun-Hyeong Bae<sup>a</sup>, Jeong-Min Lee<sup>b</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Design Engineering, Changwon National University,  
20, Changwondaehak-ro, Ulchang-gu, Changwon, Gyeongnam-do, 51140, Korea<sup>b</sup> Flutek, Ltd.,

6, Gongdan-ro 98beon-gil, Seongsan-gu, Changwon,, Gyeongnam-do, 51567, Korea

**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	28	October	2015
Revised	7	January	2016
Accepted	1	February	2016

*Keywords:*Swash plate type variable piston pump  
Pulsation  
Structure analysis  
Pre-compression  
SimulationX  
Notch design of valve plate**ABSTRACT**

This study investigated the design factors of the opening area in order to consider the kinematic stability of a valve plate, conducting an analysis of the reduction effects of pressure pulsation and flow ripple depending on the design factors, using the SimulationX<sup>®</sup> (Germany) hydraulic analysis program. Further, we performed a structure analysis to confirm the kinematic stability of the valve plate in a swash plate type piston pump, and analyzed the effects of pulsation on a 1-step V-type notch, 2-step V-type notch, and 2-step U-type notch to determine the effects of pulsation reduction. Finally, we show the effectiveness of our proposed design of the pre-compression sections on a valve plate in terms of low pulsation by using the hydraulic analysis program, SimulationX<sup>®</sup>.

**1. 서론**

유압시스템은 유체의 정압을 이용해서 형성된 밀폐공간의 이동 또는 변화에 의해 유체 에너지와 기계에너지의 에너지 변환을 행하는 장치로 전기, 전자시스템에 비해 제어성, 소음, 가격 등의 면에서 열세이지만, 동력 밀도가 높아 소형 및 경량화에 유리하다.

사축식 피스톤 펌프보다 사판 경사각의 변화에 의해 쉽게 가변 용량화 할 수 있고, 구조가 간단하며, 가변 용량부의 관성 모멘트가 작아 고속 제어가 가능하다는 특징이 있어 사용이 증가하고 있다<sup>[1]</sup>. 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프는 건설중장비용 메인 펌

프로써 주로 사용되어지고 있으며, 유압시스템의 소형경량화, 고속 고압 제어시스템, 저맥동화 등의 요소들을 복합적으로 고려해야 한다.

사판식 피스톤 펌프는 Fig. 1과 같다. 사판식 피스톤 펌프의 주요 구성품인 밸브 플레이트는 실린더 블록과의 상대운동으로 인해 압착력과 분리력이 생기며, 압착력이 크면 두 부품간의 마찰이 발생하여 기계적 파손 우려가 있고, 분리력이 크면 그 틈새로 인해 누설 유량이 생기게 된다.

또한 밸브 플레이트의 개구면적 및 노치의 형상에 따라 유량 맥동 및 실린더 내 압력 맥동이 발생하기 때문에 펌프의 성능 및 제원

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

Fax: +82-10-55-263-5221

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

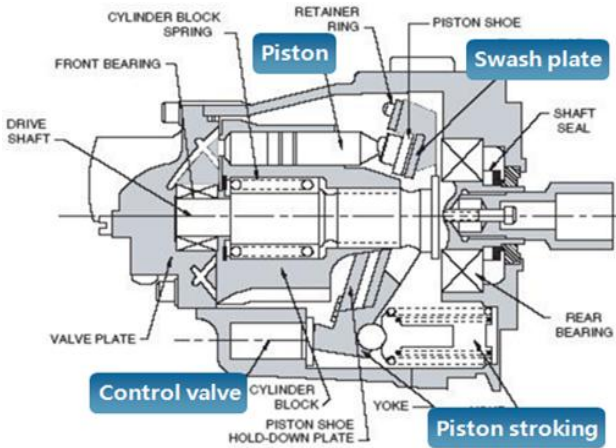


Fig. 1 Basic structure of swash plate type axial piston pump<sup>[2]</sup>

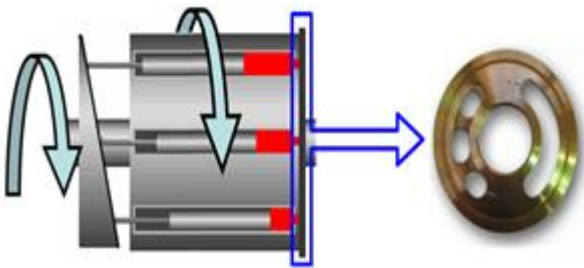


Fig. 2 valve plate of swash plate type piston pump<sup>[3]</sup>

에 따라 개구면적과 노치의 형상을 설계를 하는 것은 매우 중요한 설계 관점이 된다.

Jang<sup>[3]</sup>의 논문에서는, 밸브 플레이트의 노치 형상에 따른 압력 및 유량 맥동을 연구하였으며, 이를 위해 사판식 피스톤 펌프의 기구학적 해석을 실시하였고, Circular notch type 보다 V notch type이 맥동이 더 효율적으로 저감됨을 확인하였다. 하지만, Jang의 논문에서는 단지 Circular type과 V type노치의 형상에 따른 해석만을 실시하였을 뿐, 개구면적을 설계하는 요소에 따른 분석 및 개구간의 간격에 대한 연구는 없었으며, 다른 타입에 대한 노치의 연구는 이루어지지 않았다. Fig. 2에서 보면, 밸브 플레이트 오른쪽 개구면적과 같이 밸브 플레이트에 천공되는 부분이 많으면 흡입 및 토출부의 유량이 일정하나 기구적 안정성까지 가져갈 수 없다. 또한, Fig. 2에서 밸브 플레이트의 왼쪽부와 같이 개구를 여러 개로 가공을 하면 밸브 플레이트 기구적 안정성을 고려할 수 있기 때문에 수명을 연장할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 사판식 피스톤 펌프의 주요 구성품인 밸브 플레이트의 기구적 안정성을 고려하기 위한 개구면적의 설계 요소를 분석하고, 유압 해석 프로그램인 SimulationX(Germany)를 사용하여 설계 요소에 따른 압력 및 유량 맥동의 영향에 대한 해석을 실시함과 더불어 사판식 피스톤 펌프의 밸브 플레이트의 기구적 안정성을 확인하기 위한 구조해석을 실시할 것이다. 이어서

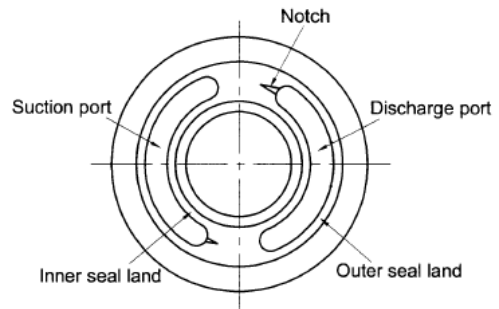


Fig. 3 basic valve plate<sup>[1]</sup>

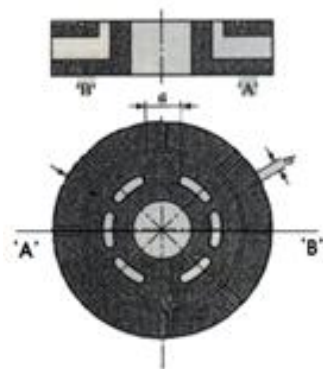


Fig. 4 Structure of the valve plate<sup>[4]</sup>

Jang의 논문에서는 다루지 않은 1단 V notch type과 2단 V type notch, U type notch에 대한 맥동 영향과 밸브플레이트에 예압축 구간을 설계하여 맥동 해석을 실시하고 분석하여 맥동 저감 효과 여부를 확인하고자 한다.

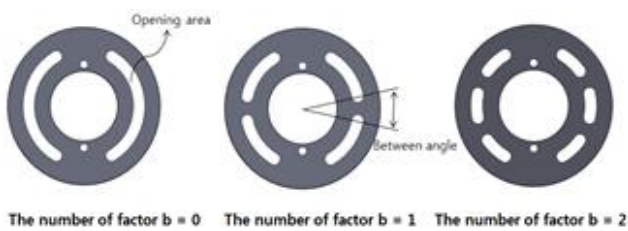
## 2. 이론적 접근과 구조해석

피스톤 펌프의 일반적인 동작은 펌프의 흡입 및 토출 포트를 피스톤이 왕복운동을 하면서 일정한 유량을 펌핑하는 것으로 설명할 수 있다. 이 때, 저압의 흡입영역에서 고압의 토출영역으로 천이될 때, 즉 압력변동차가 큰 부분에서 캐비테이션 및 압력, 유량맥동이 발생하는데 이 맥동은 유압시스템에 상당히 큰 영향을 미친다. 이러한 압력 및 유량 맥동을 줄이는 것은 유압펌프의 수명을 연장하고 신뢰성을 향상시키기 때문에 매우 중요하다. 밸브 플레이트의 개구면적은 일반적으로 Fig. 3과 같이 콩팥 모양을 한 2개의 개구를 가공하며, 각각 흡입 및 토출부에 해당된다. 흡입과 토출이 시작될 때 개구 면적이 급격하게 변하기 때문에 압력 및 유량맥동이 생기지 않도록 노치홈을 설계하여 가공하며, 이미 Jang<sup>[3]</sup>의 논문에서 이 노치홈에 대해 V notch type이 circular notch type보다 맥동이 더 저감됨을 확인하였다.

Fig. 4는 밸브 플레이트를 설계하기 위한 요소들을 나타낸 그림이며, 일반적으로 흡입 및 토출부에 각각 2~4개의 작은 콩팥 모양

으로 가공을 한다. 흡입 및 토출부 사이의 거리 a는 실린더 포트의 긴 반지름보다 같거나 크게 설계하며, 간격 b는 보통 a의 1/4만큼 설계한다<sup>4)</sup>.

기구적 안정성을 고려하기 위한 factor로써 b에 대해 Fig. 5와 같이 나누고, Table 1과 같이 8가지 Case로 나누어 구조해석을 진행하였다. 밸브 플레이트의 재질은 SHPC로 선정하였고, 해석 경계조건은 1) 개구측에 가해지는 압력 p=300 bar, 2) 실린더 블록이 밸브 플레이트를 미는 힘 F=28 GN, 3) 핀과 밸브 플레이트 중심부에 구속조건을 주었으며, 해석 결과는 Fig. 6과 같다. B factor를 설계하지 않은 Case 1의 경우, 최대응력은 60 MPa



The number of factor b = 0 The number of factor b = 1 The number of factor b = 2

Fig. 5 Design according to the factor b of valve plate

Table 1 Parameters of the valve plate in order to analyze

Case	The number of the opening area	Between angle (°)	Distance of b (mm)
1	1	0	0
2	2	24	7.9
3	2	20	5.3
4	2	16	2.8
5	2	14	1.5
6	3	24	8
7	3	19.5	5.3
8	3	15	2.1

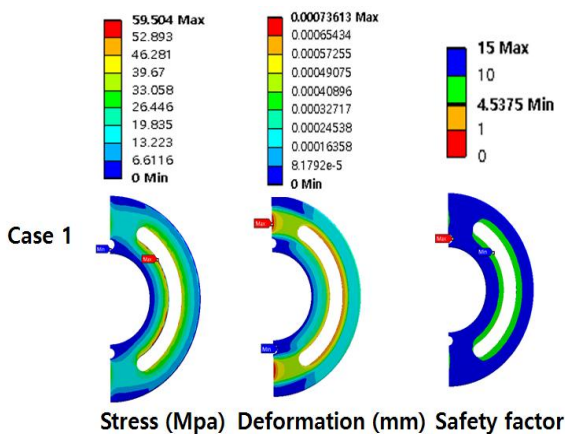


Fig. 6 Result of the structure analysis about case 1

로 개구의 양 옆면에서 발생하였으며, 안전율은 4.5임을 확인하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이, Case 2에서 Case 5로 갈수록, 즉, b factor 사이의 각도와 간격이 줄어들수록 개구 양 옆면에 가해지는 최대 응력이 개구측의 b factor 측에 집중되는 것을 알 수 있다. 최대응력은 45~55 MPa, 안전율 4~5로 확인되었다.

Fig. 8에서는 Case 6~8은 b 간격 2개, 개구 3개에 대해 진행한 해석이며 case 2~5에서와 마찬가지로, b factor 사이의 각도와 간격이 줄어들수록 응력이 b factor측으로 집중되는 것을 확인하였다. 개구 3개에 대한 해석의 최대응력 또한 40~50 MPa, 안전율 4~5로 확인되었으며, b factor를 설계함으로써 밸브 플레이트 응력이 줄어들어 기구적 안정성을 유지함을 확인하였고, b factor의 간격이 줄어들수록 응력은 집중되나, 기구적 안정성은 유지하였음을 알 수 있다. 하지만, 높은 압력 조건과 간격이

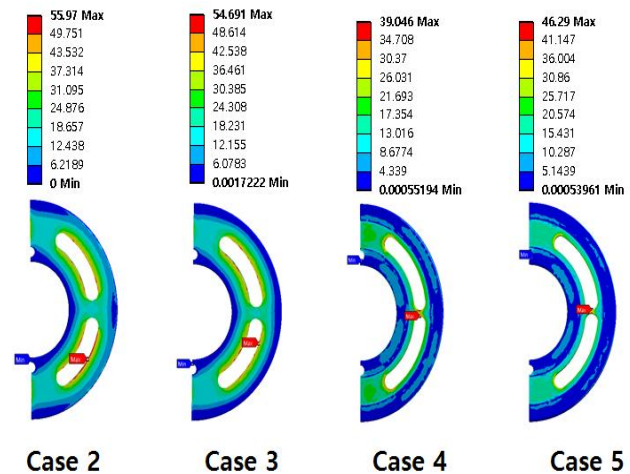


Fig. 7 Result of the structure analysis about Case 2 to 5 (MPa)

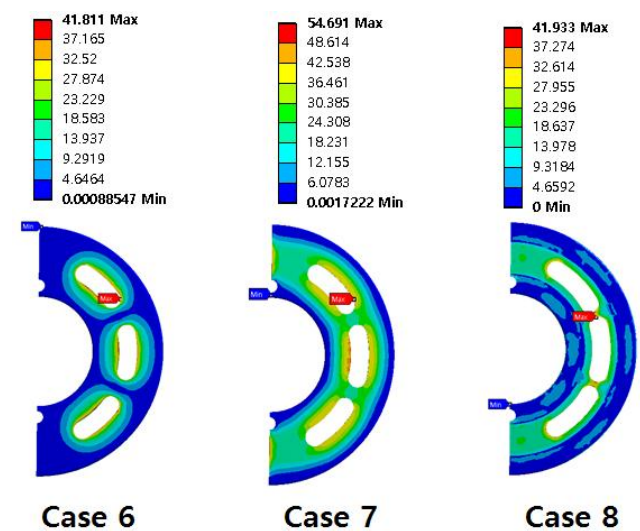


Fig. 8 Result of the structure analysis about Case 6 to 8 (MPa)

극히 작은 경우에는 b factor의 안정성을 필히 고려한 설계를 해야 한다.

### 3. SimulationX를 이용한 해석

밸브 플레이트의 설계 요소 b factor에 대한 맥동 영향을 분석하기 위해서는 먼저 사판식 피스톤 펌프의 기구학적인 분석이 필요하다. Fig. 9는 유압해석 프로그램인 SimulationX를 이용하여 단일 피스톤 펌프 모델을 설계하기 위한 사판식 피스톤 펌프의 기본적인 개념도이며, Fixed angle frame 방법을 사용하면, 식 (1)과 같은 결과를 얻어낼 수 있다. 이미 Jang의 논문<sup>[3]</sup>에서, 이를 위한 기구학적 해석을 실시하였으며, 기구학적 해석을 적용한 단일 피스톤 펌프의 모델링은 Fig. 10과 같다.

$$XQ_{pl} = -R \cdot \sin\alpha \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

여기서, R은 pitch circle diameter이고, α는 swash plate angle이며, φ는 실린더 블록의 회전각도이다.

밸브 플레이트의 b factor의 맥동 영향을 분석하기 위한 파라미터 값들은 Table 2와 같으며, b의 개수에 따른 맥동영향을 살펴보기 위해 Table 1에서의 Case 1, Case 2, Case 6의 3가지 경우에 대해서 해석을 실시하였다. 또한 b factor의 영향만을 보기 위해

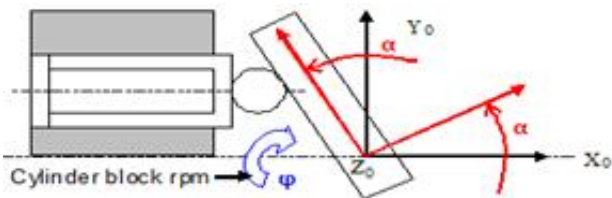


Fig. 9 Coordinate system in piston and swash plate<sup>[3]</sup>

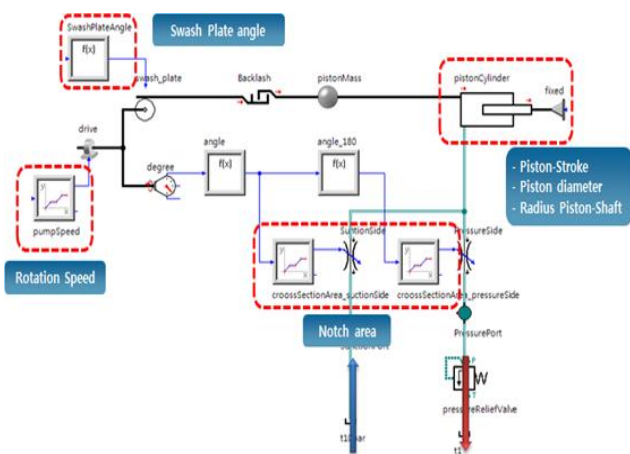


Fig. 10 Single piston pump modelling using SimulationX

노치가 없는 밸브 플레이트의 개구면적에 대한 해석을 실시하였으며, 각 개구면적 궤도는 Fig. 11과 같다.

Table 2의 값들로 설정하고, Fig. 11의 개구면적을 두고 해석을 실시한 결과값은 Fig. 12~14와 같다. Fig. 12~14 모두 Case 1과 Case 2의 맥동은 차이가 없음을 확인할 수 있다. 개구가 3개로 가공된 Case 6의 경우 Case 1과 Case 2에 비해 압력맥동이 줄어들었음을 Fig. 12~13을 통해 알 수 있다. Fig. 14에서의 유량맥동은 Case 1보다 압력 강하가 덜 일어남을 알 수 있다. 밸브 플레이트를 설계하는 데 있어서 b factor의 설계는 기구적인 안정성을 유지하는 요소일 뿐만 아니라, 1~2개의 개구를 가공할 때보다 3개의 개구를 가공할 때 맥동이 저감되는 것을 확인하였다.

Table 2 Parameters of the model

Variable	Value
Swash plate angle (deg)	15
Pump speed (RPM)	2000
Piston diameter (mm), d	16.5
Stroke (mm), L	2R
The number of piston (ea)	9
Pitch circle diameter (mm), R	37
Piston mass (g)	100

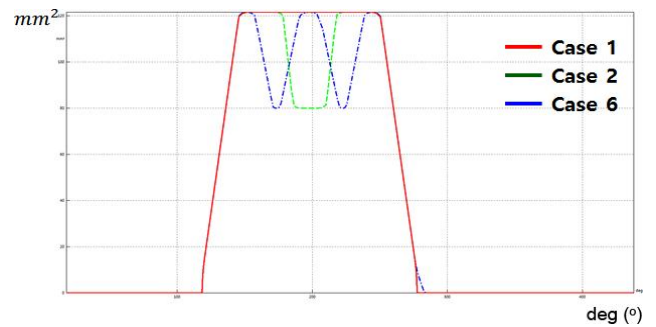


Fig. 11 The opening area according to the factor 'b'

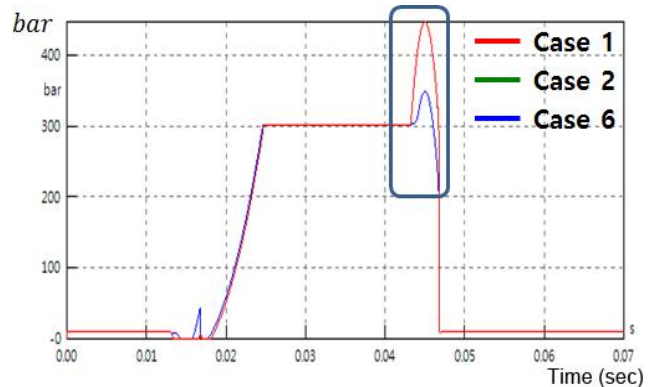


Fig. 12 Pressure inside the cylinder to the factor 'b'

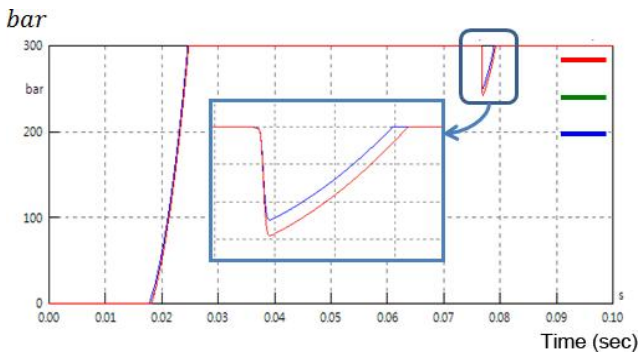


Fig. 13 Pulsation at pressure fluctuation

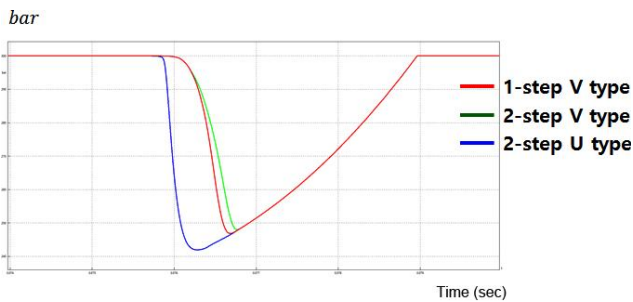


Fig. 14 Flow ripple

#### 4. 노치 타입에 따른 해석

앞서 SimulationX를 이용하여 단일 피스톤 펌프에서의 밸브 플레이트의 설계 요소 b에 대한 구조해석을 실시하여 기구적 안정성을 확인하였고, b의 개수에 대하여 맥동 영향을 분석한 결과 흡입 및 토출 포트 측에 개구를 3개씩 가공한 경우가 맥동이 더 저감됨을 확인하였다.

이 뿐만 아니라, 흡입 및 토출과정에서 급격한 개구면적의 변화로 인해 생기는 맥동을 저감시키는 요소가 노치 타입에 따른 설계이며, 이를 통해 원활한 증압과 감압을 시켜 맥동을 저감시킬 수 있다. Jang의 논문에서는 Circular type과 V type에 대한 해석을 실시하였지만, 본 연구에서는 맥동 저감효과가 있었던 V type과 더불어 2단 V type, 2단 U type에 대해서도 맥동 분석을 진행할 것이다. Fig. 15는 V type, 2단 V type, 2단 U type에 대한 노치형상이다.

SimulationX를 사용하여 모델링한 단일 피스톤 펌프 모델에 Fig. 15의 각 노치의 형상을 앞서 맥동이 저감된 것이 확인된 Case 6의 개구면적에 설계하여 나타난 그림이다. Fig. 17은 Fig. 16의 노치부분을 확대한 그림이다. 해석 조건은 Table 2와 동일하며, 단일 피스톤 펌프 모델에 대해 해석을 실시한 결과는 아래와 같다.

Fig. 18은 노치 타입에 따른 실린더 내 압력에 대한 그래프이며, Fig. 19는 outlet pressure에 대한 맥동을 나타낸 그래프이다. Fig. 20은 Fig. 19에서 압력 맥동이 발생하는 부분을 확대한 그림이며, 단 U type 노치가 1단 V type 노치에 비해 맥동이 더 큰 폭으로

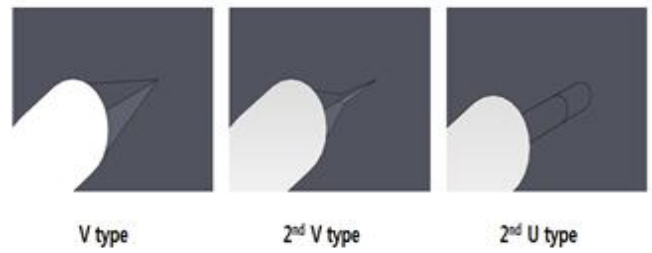


Fig. 15 Notch shapes according to notch types

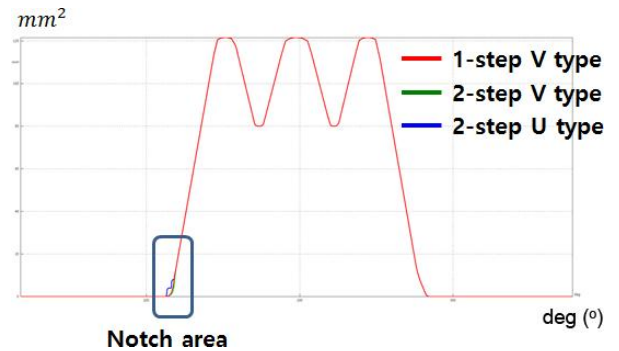


Fig. 16 The opening area including notch types

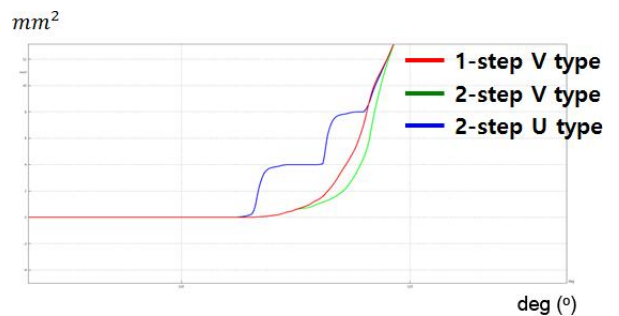


Fig. 17 Notch area according to notch types

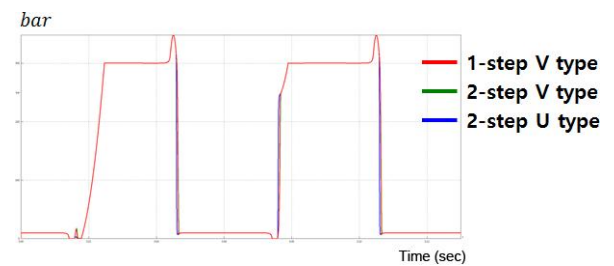


Fig. 18 Pressure inside the cylinder according to notch types

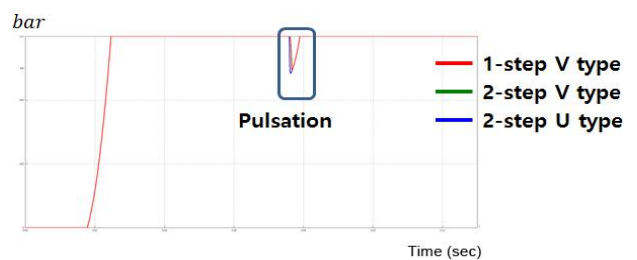


Fig. 19 Outlet pressure

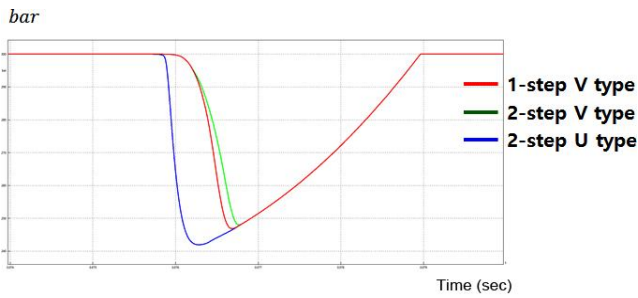


Fig. 20 Fluctuation at outlet pressure

Table 3 Comparison of pressure fluctuation on three notch types

	Value			Improvement Rate
	2 <sup>nd</sup> U type	1 <sup>st</sup> V type	2 <sup>nd</sup> V type	
Pressure (bar)	58.1	53.2	52	10.5% , 2.3% (decrease)

발생하였으며, 1단 V type 노치보다는 2단 V type 노치가 맥동이 약간 더 저감되는 효과를 확인할 수 있다.

Table 3에 Fig. 20의 맥동이 저감된 정도를 수치로 정리하여 나타내었으며, 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프의 밸브 플레이트의 노치 형상을 설계할 때에 2<sup>nd</sup> U type 노치보다는 1<sup>st</sup> V type 노치를 설계하는 것이 맥동 저감에 좋으며, 1<sup>st</sup> V type 노치보다는 2<sup>nd</sup> type 노치를 설계하는 것이 맥동을 저감시키는데 더 효율적인 것을 확인하였다.

### 5. 예압축 구간에 따른 해석

실린더 포트가 토출 포트에 연결이 되어 큰 압력차가 없이 연결되어야 소음 및 진동, 즉 맥동을 줄일 수 있는데 이때 극단적인 상황을 방지하고 토출유의 원활한 증압과 감압을 위하여 underlap과 critical 같은 예압축 구간을 설계함으로써 실린더 내부 압력을 상승시켜 실린더 포트와 토출 포트가 연결되었을 때 압력변동이 원활하게 유지시킬 수 있다<sup>[1]</sup>. 즉, 실린더 내부 압력을 미리 예압축으로써 압력 변동이 심하게 일어나는 맥동현상을 감소시킬 수 있는 것이다.

SimulationX를 사용하여 모델링한 단일 피스톤 펌프 모델에 Fig. 21의 각 예압축 구간을 앞서 맥동이 저감된 것이 확인된 Case 6의 개구면적을 설계하여 나타낸 그림이다. Fig. 23은 Fig. 22의 노치부분을 확대한 그림이다. 해석 조건은 Table 2와 동일하며, 단일 피스톤 펌프 모델에 대해 해석을 실시한 결과는 아래와 같다.

Fig. 24는 노치 타입에 따른 실린더 내 압력에 대한 그래프이며 Type 2, Type 3의 압력상승 기울기가 완만하고 맥동이 저감됨을 알 수 있다. Fig. 25는 outlet pressure에 대한 맥동을 나타낸 그래

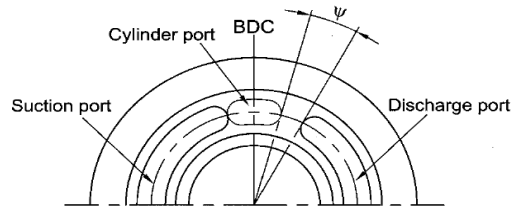


Fig. 21 Pre-compression type (underlap type vs. critical type)

Table 4 Pre-Compression angle

Type	Pre-Compression angle (°)
Type 1	$\psi=0$
Type 2	$\psi=5$
Type 3	$\psi=10$

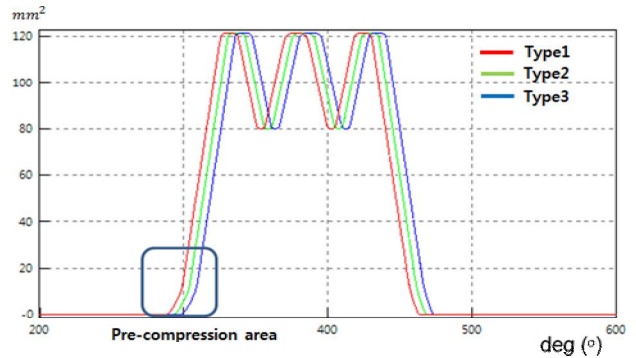


Fig. 22 The opening area including pre-compression

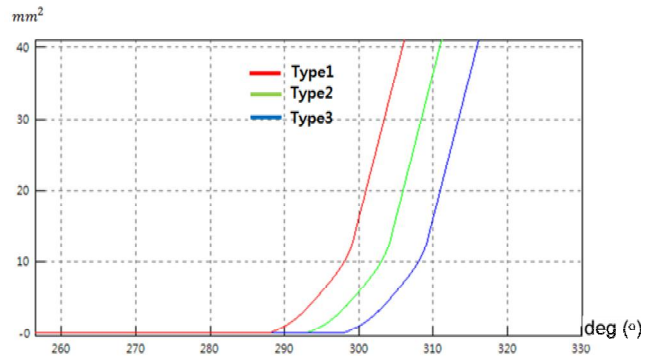


Fig. 23 Pre-compression area

프이다. Fig. 26은 Fig. 25에서 압력 맥동이 발생하는 부분을 확대한 그림이며, Type 3, 즉 10의 예압축 구간을 설계하면 압력변동이 보다 원활하게 이루어짐으로 맥동이 저감됨을 알 수 있다.

Critical type 즉, Type 1 같이 예압축 구간이 0인 경우보다는 Type 2, Type 3처럼 예압축 구간의 설계가 포함된 밸브 플레이트가 맥동 저감효과가 더 좋은 것으로 판단된다. 그러나 이러한 예압축 구간의 설계는 펌프의 정격 토출압력, 회전속도, 작동유 등에 따라 변화하기 때문에 예압축 구간을 설계할 시에는 여러 설계 요소들을 고려하지 않으면 안 된다.

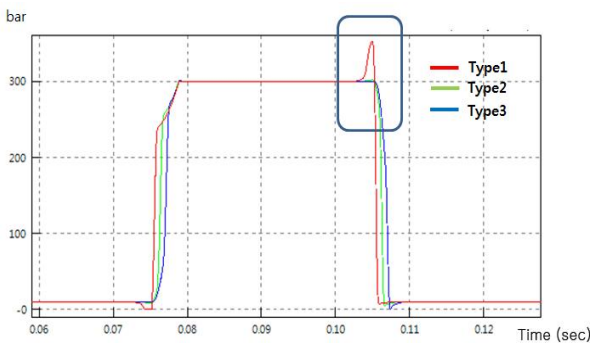


Fig. 24 Pressure inside the cylinder according to pre-compression type

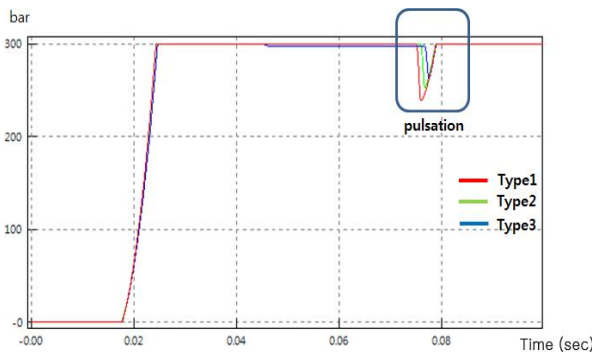


Fig. 25 Outlet pressure

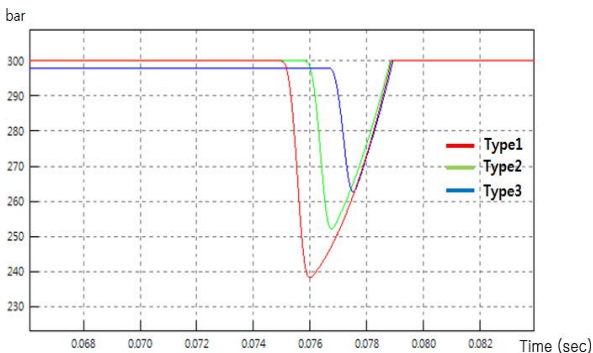


Fig. 26 Pluctuation at outlet pressure

## 6. 결론

본 논문에서는 유공압 시스템에서 사용되는 유압장비 중 굴삭기의 메인펌프 등에 주로 쓰이는 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프의 밸브 플레이트의 개구면적을 설계하는 요소에 대하여 연구를 하였다. 첫째로, 밸브 플레이트의 설계 요소인 b factor의 간격과 간격의 개수에 대해 기구적 안정성을 확인하기 위한 구조해석을 진행하였다. 또한, b factor가 맥동에 미치는 영향을 분석하여 흡입 및 토출 부에 각각 1~2개의 개구보다는 3개의 개구를 가공하는 것이 좋음을 확인하였다. 그리고, 1<sup>st</sup> V type 노치와 2<sup>nd</sup> U type 노치,

2<sup>nd</sup> V type노치의 비교 분석을 통해 2<sup>nd</sup> V type 노치가 다른 두 노치에 비해 압력 맥동을 더 효율적으로 저감시킨다는 것을 확인하였다. 마지막으로, 본 연구에서는 Jang<sup>[3]</sup>의 논문에서 더 나아가, 사판식 피스톤 펌프의 맥동에 영향을 미치고 기구적 안정성을 유지하는 설계 요소로서 factor b를 제시하였으며, 유압해석 프로그램인 SimulationX를 이용하여 현재 밸브 플레이트 설계 시 자주 사용하고 있는 1<sup>st</sup> V type, 2<sup>nd</sup> V type, 2<sup>nd</sup> U type 등의 맥동 영향을 분석하였으며, 더 나아가 예압축 구간 즉, 예압각에 따른 맥동 현상을 분석하여 예압각을 적절히 설계하면 맥동을 원활하게 할 수 있으며 그 폭도 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

## References

- [1] Kim, J. G., 2003, Performance Characteristics with Valve Plate Shapes in Swash Plate Type Oil Piston Pumps, A Thesis for a Doctorate, Chonbuk National University, Republic of Korea.
- [2] 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 Conference on Korea Society for Fluid Power and Construction Equipments, 23-30.
- [3] Jang, J. H., Chung, W. J., 2013, 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, 137-142.
- [4] Lee, I. Y., 2012, Hydraulic Engineering, Munundang, Republic of Korea.
- [5] Jang, D. H., Lee, S. G., Kwon, J. H., Park, S. H., 2009, A Study on Pressure, Flow Fluctuation and Noise in the Cylinder of Swash Plate Type Axial Piston Pump, Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, 6:3 1-9.
- [6] Yoon, Y. H., Jang, J. S., 2012, Simulation X, Multi-domain Simulation and Modeling Tool for the Design, Analysis, and Optimization of Complex systems, Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, 9:1 56-69.
- [7] Choi, S. L., Jang, J. S., 2013, Shape Design Sensitivity Analysis of the Valves Installed in the Hydraulic Driving Motor, Journal of the Korea Society for Simulation, 22:3 81-87.
- [8] Jung, C. D., Chung, W. J., 2012, Application of Solid Works®, and Lab View®-based Simulation Technique to Gain Tuning of a 6-axis Articulated Robot, Proceedings of the International Conference on Scientific Computing, 132-138