

사판식 피스톤 모터의 성능향상을 위한 설계변수 특성 연구

정유성^a, 정원지^{a*}, 사진웅^a, 정용욱^aDesign Parameter Characteristics to Improve Performance of
a Swash-Plate-Type Piston MotorYoo Seong Jeong^a, Won Jee Chung^{a*}, Jin Woong Sa^a, Young Wook Jeong^a^a School of Mechatronics, Changwon National University.

20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon, Gyeongnam-do, 51140, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 November 2016

Revised 12 January 2017

Accepted 13 January 2017

Keywords:

Swash-plate type piston motor

Pressure pulsation

Torque pulsation

Swash plate angle

Piston stroke

Simulation

ABSTRACT

Hydraulic equipment have been traditionally used for constructing machines with high power density and durability. In particular, pumps and motors are considered essential equipment, and are consistently investigated to find suitable methods for optimal utilization of their characteristics. A kinematic analysis of a swash-plate-type piston motor model using the hydraulic analysis program SimulationX[®] to model a nine-piston motor and simulate a swash-plate angle with a low-pulsation and high-efficiency performance of the motor has been provided in this paper. Finally, along with the theoretical consideration of the stroke, the effect of changing strokes and notch shape (V, U, non-type) on the pulsation is simulated to analyze and determine the effects of reduction in pulsation. The optimal swash-plate angle and stroke thus obtained will reduce the trial and error in future design.

1. 서론

건설기계 산업에서 유압 장비들은 높은 동력 밀도와 강한 내구성을 바탕으로 오랫동안 건설기계 장비에 사용되어져 왔다. 펌프와 모터는 그중에서도 핵심장비로 여겨져 왔으며 그 특성을 적절히 사용하기 위하여 지속적인 연구가 이루어지고 있다. 특히 모터를 포함한 유압 실린더 및 요동 모터를 총괄하여 유압 액추에이터라고 부르며 유체 에너지를 이용하여 직선운동이 필요할 때는 유압실린더, 회전 운동이 필요할 때는 유압 모터를 사용한다. 또한 유압모터는 건설장비라는 특수한 환경에서 높은 내구성을 유지함과 동시에 높은 효율을 지니고 있기 때문에 굴삭기의 선회 모터

등에 사용되는 등 그 사용범위가 매우 넓다^[1]. 본 논문은 여러 유압모터 중에서도 사판 경사각의 각도에 의해 쉽게 가변 되고, 가변 용량부의 관성 모멘트가 작아 고속 제어가 가능한 사판식 피스톤 모터의 설계 변수에 따른 모터 성능과 맥동 변화 분석을 할 예정이다.

가변 용량부의 관성 모멘트가 작아 고속 제어가 가능한 사판식 피스톤 모터의 설계 변수에 따른 모터 성능과 맥동 변화 분석을 할 예정이다. Fig. 1과 같이 사판식 피스톤 모터는 밸브 플레이트, 실린더 블록, 사판, 피스톤, 슬리퍼, 슈 등으로 이루어져 있다.

최근에는 유압시스템의 경량화, 저소음, 저맥동화 등의 연구가 선진사 보쉬렉스로스, 가와사키 등에 의해 활발히 이루어지고 있으

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

Fax: +82-55-213-5221

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

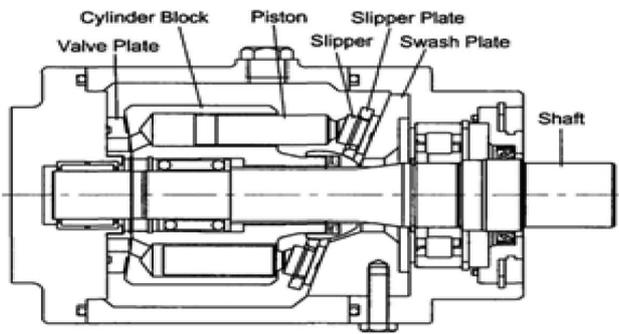


Fig. 1 swash plate type piston motor^[2]

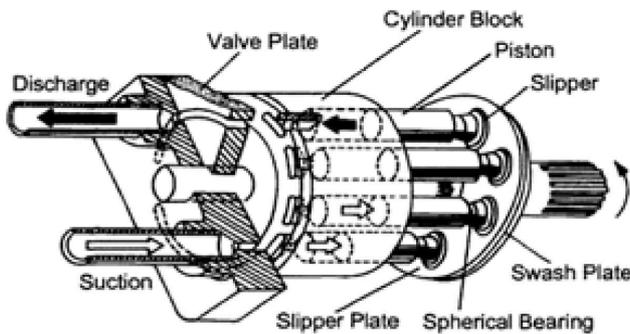


Fig. 2 Rotary parts of Swash plate type piston pump and motor^[3]

며 시스템의 저소음, 저맥동화 등의 최적화는 앞서 언급된 여러 요소들을 설계시 고려하여야 한다. 사판식 피스톤 모터의 저소음화, 저맥동화, 안전성 있는 모터를 설계하기 위해서는 먼저 사판 경사각에 대한 연구가 필요하다. 사판각에 의해 행정 스트로크, 맥동, 토크 등 여러 요소들이 변화하며 이러한 사판각을 적절하게 설계하는 것은 앞으로의 저맥동화, 저소음화, 고효율의 모터를 개발하기 위한 기초가 된다. Bae^[3]의 논문에서 사판식 피스톤 펌프의 밸브플레이트 노치 형상에 따른 압력 및 유량 맥동을 연구하였다. 하지만 Bae^[3]의 논문에서는 오로지 사판식 피스톤 펌프에 대한 맥동 저감에 대한 연구만 이루어졌을 뿐 모터와 관련된 토크 안정화 및 행정 스트로크, 사판각에 대한 연구는 이루어지지 않았다. Fig. 2와 같이 펌프와 모터는 흡입과 토출에 의해 회전력을 발생시키느냐, 회전력을 통하여 흡입과 토출이 이루어지는가의 차이로 구조는 매우 흡사하다. 하지만, 피스톤 변위 및 사판각에 따른 맥동 저감 효과나 모터 효율의 차이가 크기 때문에 펌프뿐 만 아니라 모터에 대한 연구도 필요하다. 따라서 본 논문에서는 기구학적 해석을 끝낸 사판식 피스톤 모터의 모델을 바탕으로 유압 해석프로그램 중 Simulation X를 이용하여 Single Piston Motor를 모델링하고 저 맥동, 고효율의 모터 성능을 낼 수 있는 사판각도를 시뮬레이션을 통해 찾을 것이다. 또한, 행정 스트로크에 대한 이론적 고찰과 함께 시뮬레이션을 통해 행정 스트로크 변화에 따른 맥동 영향을 분석하고 마지막으로 노치형상에 따른 맥동 저감 효과 여부를 확인할 것이다.

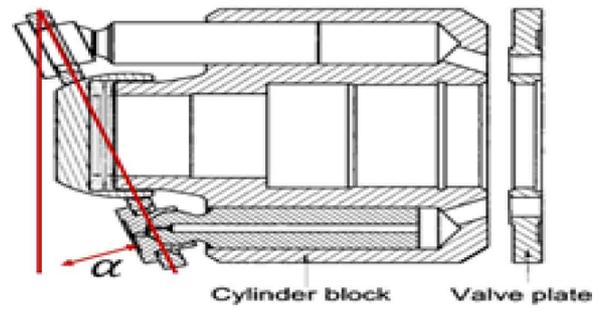


Fig. 3 The swash plate angle 'α'^[4]

Table 1 Parameter of the swash plate angle

Case	Swash plate angle
1	14
2	16
3	18

2. 사판식 피스톤 모터의 사판각

피스톤 모터의 일반적인 작동 방식은 경사판이 α 만큼 기울어진 상태에서 압력유체가 밸브 플레이트를 경유, 실린더 블록의 흡입포트로 유입되어 피스톤을 밀어낸다.

그렇게 되면 경사진 사판에 피스톤과 피스톤 슈가 미끄럼 운동을 하면서 회전, 왕복운동을 하고 실린더 블록이 같이 회전하면서 스플라인으로 연결된 주축이 회전하여 기계 에너지를 만들어 내는 구조로 되어있다. 경사판 α 는 Fig. 3과 같이 설계되며 그 각도에 따라 모터의 회전 속도 및 효율, 압력 맥동이 변화하게 된다. 그러므로 사판식 피스톤 모터 설계 시 사판각 α 의 값이 매우 중요함을 알 수 있다. 본 논문에서는 사판각 α 에 따른 모터 회전 속도변화 및 효율, 압력맥동의 변화를 시뮬레이션 하기 위해 일반적으로 사용되는 사판각도인 14~18도 사이의 사판각을 사용하여 그에 따른 특성을 찾아볼 것이다. Table 1과 같이 Case 1~3로 나누어 사판각이 변화할 때마다 어떠한 모터 성능의 변화가 일어나는지 유동해석 프로그램인 Simulation X를 통하여 모델을 구성하고 그 결과를 분석할 것이다.

3. SimulationX를 이용한 해석

Simulation X를 이용하여 단일 피스톤 모터를 설계하기 위해서는 피스톤 모터 모델의 기구학적 해석이 필요하다. Fig. 4는 사판식 피스톤 펌프 모델을 설계하기 위한 기본적인 개념도이다.

Fixed angle frame 방법을 사용하여 Jang^[4]의 논문에서와 같은 결과를 얻을 수 있으며 이 설계요소의 설계 값은 모터와 펌프가

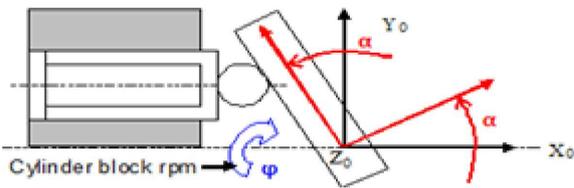


Fig. 4 Coordinate system in piston and swash plate^[5]

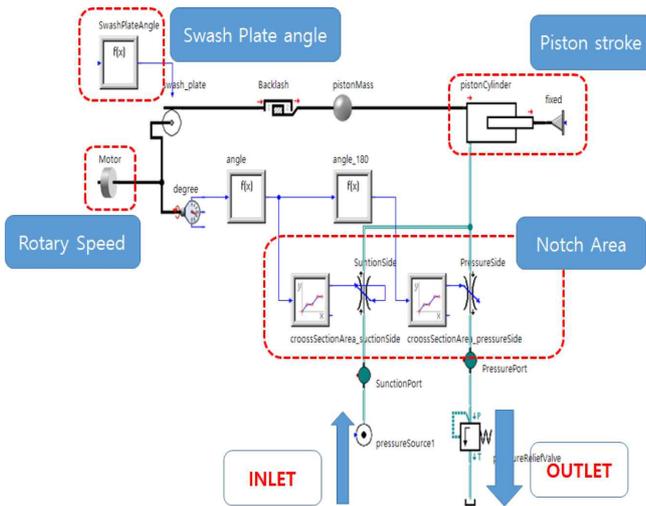


Fig. 5 Single piston motor modeling using Simulation X

Table 2 Parameter of the model

Variable	Value
Pressure supply (bar)	100
Piston diameter (mm), d	16.5
Stroke (mm), L	$2R \tan \alpha$
Pitch circle diameter (mm), R	37
Piston mass (g)	100

동일하기 때문에 그대로 사용하였다. 해당 해석 값을 적용한 단일 피스톤 모터의 모델링은 Fig. 5와 같다.

$$XQ_{p1} = -R \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

Fig. 4에서 R 은 pitch circle diameter이고, α 는 swash plate angle이며, φ 는 실린더블록의 회전각도이다. 위의 기구학적 해석을 바탕으로 구성된 단일 피스톤 모터 모델은 Fig. 5와 같으며 이 모델에서는 사판 각 뿐만 아니라 노치형상, 흡입압력, 피스톤 무게 등 여러 파라미터들을 조작할 수 있도록 되어있다. 이번 장에서는 사판각에 따른 모터 성능 변화 및 특성에 대해서 시뮬레이션을 진행할 것이기 때문에 다른 파라미터 값들은 Table 2와 같으며, Case 1~3의 3가지 경우에 대해서 해석을 실시하였다. 오로지 사판각에 따른 맥동 및 모터 성능을 알아보기 위해 노치형상이 없는 개구면적을 모든 해석 모델에 동일하게 실시하였으며 그 개구면적 계도는

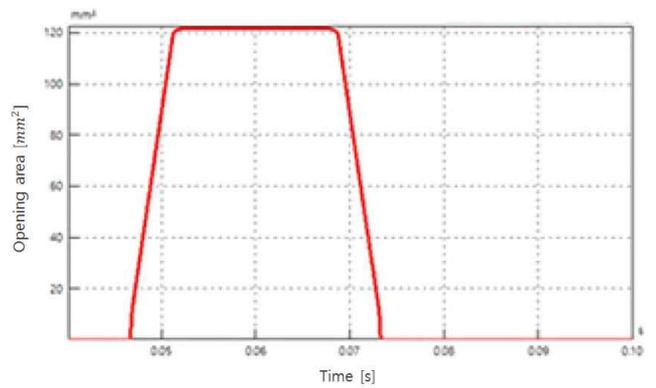


Fig. 6 The opening area without notch

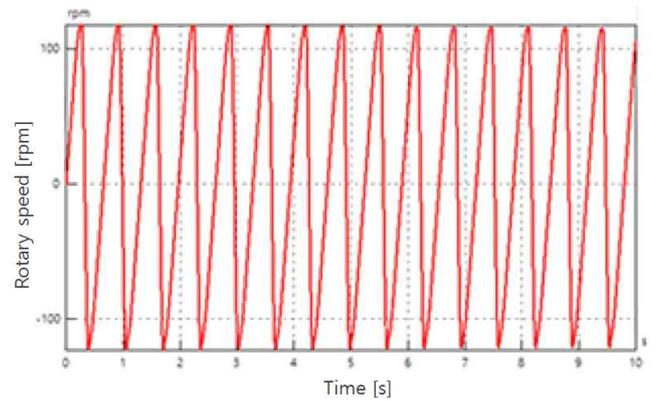


Fig. 7 The rotary speed at single piston motor

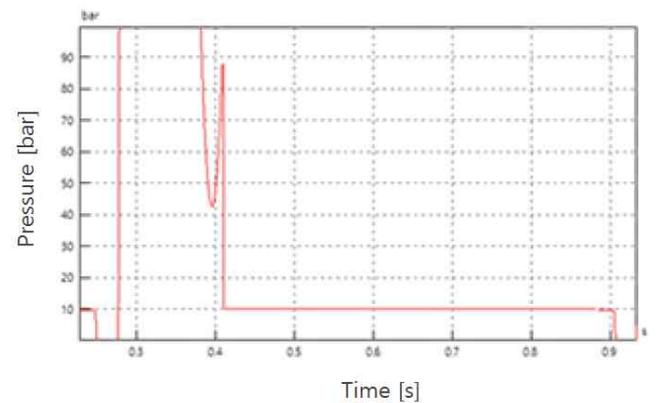


Fig. 8 The pressure pulsation at single piston motor

Fig. 6과 같다^[6]. 이것은 유압 모터의 경우 압력에 의해 회전력이 발생되는 구조이기 때문에 일정한 rpm이나 압력 맥동을 보기 위해서는 적어도 3개의 piston으로 구성하여 해석해야 한다.

Fig. 7은 단일피스톤으로 구성된 피스톤 모터의 회전속도 그래프이며, Fig. 8은 단일피스톤 모터의 압력맥동이다. 단일피스톤모터로만은 회전속도 및 압력맥동을 예측하기에는 한계가 있다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 대외적으로 알려진 대로 구조적으로 안정적이면서 가장 많이 사용하는 9개의 피스톤 모터를 구성하여 사판각에 따른 모터 성능 및 압력맥동에 관한 시뮬레이션을 진행하였다.

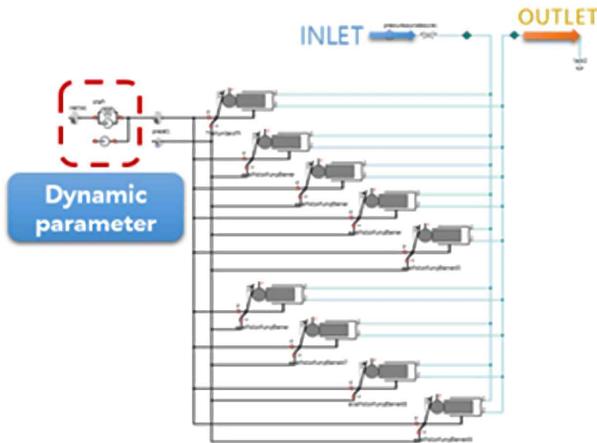


Fig. 9 Nine piston motor model using simulation X

Table 3 Parameters of the model

Variable	Value
Moment of inertia (kgm ²)	0.01
Piston	9
Stiffness of contact (Nm/rad)	500000
Damper (Nms/rad)	0.001

싱글 피스톤 모터를 9개의 피스톤으로 구성하여 Fig. 9와 같이 9개의 피스톤 모터를 구성하였다. 9개의 피스톤 모터에서는 Fig. 9와 같이 회전부, 즉 Dynamic parameter에 대한 설계 변수를 지정해 줘야 한다. 모터에 대한 회전 부하의 회전 관성크기는 0.01 kgm²으로 설정하였으며 다른 변수는 Table 3과 같이 지정되어 있다.

밸브 플레이트의 노치 형상을 통하여 압력 맥동 저감 효과를 볼 수 있지만, 다른 설계요소에 영향 없이 사판각에 대한 모터 성능을 위해 노치가 없는 개구면적을 사용하였다. 또한, 밸브 플레이트의 흡입 영역과 토출 영역을 표현하기 위하여 가변 오리피스를 사용하여 흡입이 필요할 때 토출 오리피스가 흐르지 못하게 하고 토출이 필요할 때 흡입 오리피스가 흐르지 못하게 하는 함숫값을 입력하여 밸브 플레이트의 역할을 표현하였다. Case 1~3를 같은 조건에서 시뮬레이션 한 결과 회전속도, 압력맥동, 토크맥동에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 회전속도는 Fig. 10과 같이 사판각이 커질수록 초기 반응속도는 빠르지만 일정하게 유지되는 rpm의 속도가 낮아짐을 알 수 있다. 확대된 부분에 의해 그 특성을 더욱 잘 파악 할 수 있다. Case 1의 경우 일정한 속도에 이르는 데까지 0.4초가 걸리고, Case 2의 경우에는 0.33초, Case 3의 경우에는 0.32초가 걸린다. 또한 회전속도는 Case 1의 경우 1,966 rpm, Case 2는 1,833 rpm, Case 3는 1,707 rpm까지 떨어짐을 알 수 있다. 이는 같은 흡입압력에 의한 나인 피스톤 모터의 조건으로서 사판각 만으로도 모터 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. Table 4는 결과값을 정리한 테이블이다.

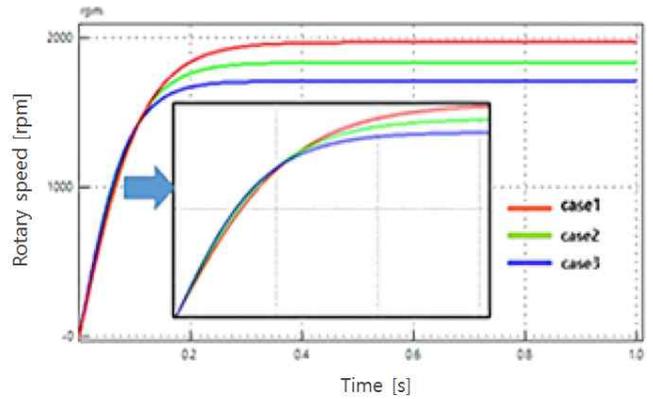


Fig. 10 Rotary speed according to swash plate angle

Table 4 Rotary speed & stable time

Case	Time (s)	Rotary speed (rpm)
Case 1	0.4	1966
Case 2	0.32	1833
Case 3	0.33	1707

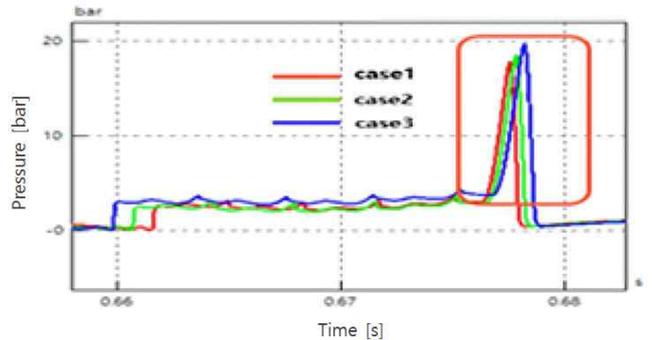


Fig. 11 The pressure pulsation at cylinder according to swash plate angle

$$V = z \cdot A \cdot H = z \cdot \frac{\pi d^2}{2} R \cdot \tan \alpha \quad (2)$$

1회전당 용적은 식 (2)^[1]과 같이 피스톤개수(z), 피스톤의 단면적(A), 피스톤의 직경(d) 등에 의해 영향을 받으며, 사판각에 의해서도 용적이 변화함을 알 수 있다. 그러므로 사판각이 증가할수록 유량도 증가하게 되므로 밸브 플레이트에서의 맥동 또한 증가하게 된다.

Fig. 11을 보게 되면 유량 증가로 인해 압력의 크기도 증가하였지만, 확대된 부분을 보면 맥동 또한 증가한 것을 알 수 있다. 그러므로 사판 각도를 과도하게 증가시키는 것은 맥동으로 인한 소음 및 내구성에 큰 영향을 주게 되므로 적당한 각도의 선택이 중요함을 알 수 있다. 또한 토크 맥동의 경우 식 (3)^[7]의 영향을 받게 되는데, 이 식에서와 같이 토크 맥동은 사판각도에 영향을 받음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과 Fig. 12를 보면 사판 각도가 커질수록 토크 맥동 및 토크의 값이 커짐을 알 수 있다.

$$T_i = \frac{Z}{2\pi} \int_0^{2\pi} T \cdot d\varnothing = \frac{d^2}{4} Z \cdot P \cdot R \cdot \tan\alpha \quad (3)$$

이때, 모터의 토크 맥동의 크기는

$$\delta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_i} \quad (4)$$

이다.

4. Stroke에 따른 해석

사판식 피스톤 모터의 저 맥동화를 위해 순간 맥동이 생기는 이론적 접근을 통하여 설계요소를 파악하는 것이 매우 중요하다. Fig. 13 사판식 피스톤 모터의 밸브 플레이트를 제외한 로터리 부분이다. d_p 는 피스톤 직경을 말하며, H_k 는 피스톤의 최대 스트로크를 말한다. 그리고 D_z 는 PCD (pitch circle diameter)를 뜻한다. 우리는 이 중에서도 피스톤의 최대 스트로크 값이 맥동에 끼치는 영향을 이론적으로 증명하고^[1], Simulation X를 이용하여 시뮬레이션 결과들에 의한 맥동저감 효과를 증명할 것이다. 먼저 Fig. 14에 나타나있는 α 는 사판각이며, \varnothing 는 실린더블록이 회전한 각이다.

$$y = R \cdot \tan\alpha \quad (5)$$

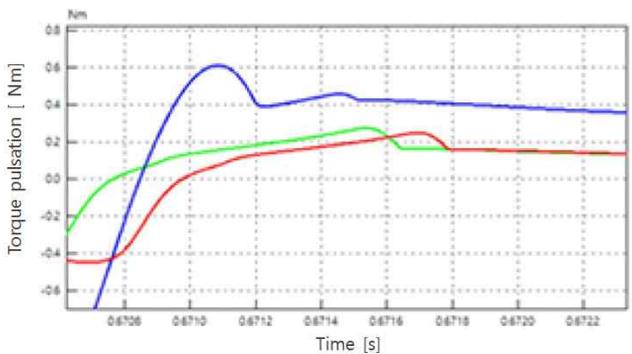


Fig. 12 Torque pulsation according to swash plate angle

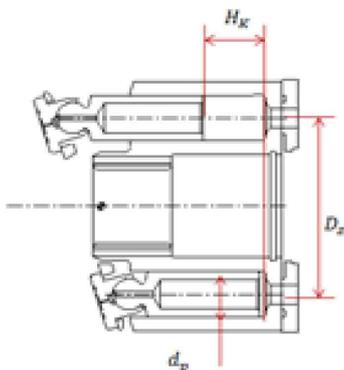


Fig. 13 Section diagram of 'H_k'^[8]

$$b = R \cdot \cos\psi \cdot \tan\alpha \quad (6)$$

$$S_k = y - b = R \cdot \tan\alpha \quad (7)$$

$$H_k = 2R \cdot \tan\alpha \quad (8)$$

여기서, 식 (8)^[1]이 피스톤의 변위이며, H_k 가 피스톤 최대 변위이다. 순간적으로 펌프로부터 모터가 얻어지는 유량 맥동은

$$Q = \sum_{i=1}^{z_0} A_p v_i = A_p \frac{H_k w}{2} \sum_{i=1}^{z_0} \sin\theta + (i-1) \frac{2\pi}{z} \quad (9)$$

$$V = \frac{H_k}{2} w \cdot \sin\theta \quad (10)$$

이다. 유량 맥동은 기본적으로 피스톤의 수가 흡수일 때와 짝수일 때에 비하여 단위 시간 동안의 유량 맥동의 횟수가 많으며 유량 맥동률은 낮다. 그러므로 우리는 나인 피스톤 모터를 선택한 것이고, 이에 따른 흡수의 유량 맥동식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{A_p H_k w}{2} \cos \frac{\pi}{2z} \cos(\theta - \frac{\pi}{2z}) / \sin \frac{\pi}{2} \quad (11)^{[1]}$$

$$= \frac{A_p H_k w}{2} \cos(\theta - \frac{\pi}{2z}) / \sin \frac{\pi}{2}$$

식 (11)^[1]에 의해 이론적으로 계산된 H_k 값 17.5 mm와 함께 10 mm, 20 mm, 25 mm로 변화시키며 해석을 실시하여 H_k 값이 사판식 피스톤 모터의 유량 맥동에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 그 결과는 Fig. 16과 같다.

Fig. 16에서 보듯이 모터의 파라미터 값들에 맞게 계산된 17.5 mm에서 가장 낮은 맥동을 볼 수 있었고 너무 짧거나 긴 행정 스트

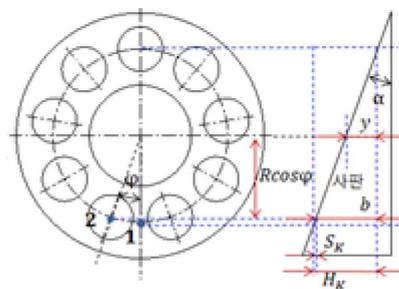


Fig. 14 Section diagram of 'H_k'²

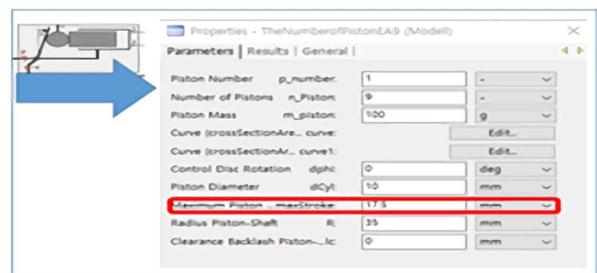


Fig. 15 Setting a value of 'H_k' at Simulation X

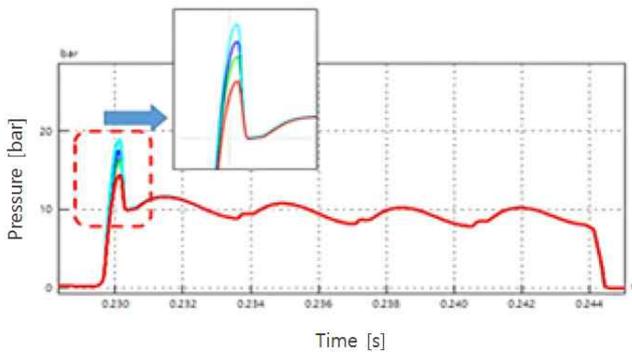


Fig. 16 The pressure pulsation at cylinder according to ‘ H_k ’

Table 5 Value of ‘ H_k ’ and pressure pulsation

Case	Piston stroke (mm)	Pressure pulsation (bar)
Case 1	17.5	14
Case 2	20	16
Case 3	25	17.5
Case 4	30	18.8

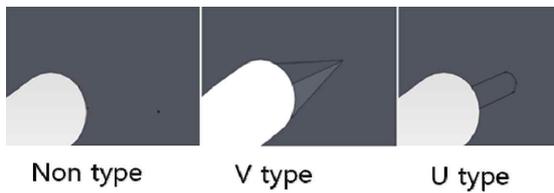


Fig. 17 Notch shapes

로크를 갖는 모터에서는 실린더 내의 맥동이 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 5와 같이 이론적 계산 값인 Case 2의 피스톤 행정 스트로크에서 가장 적은 맥동을 확인 할 수 있었고, 이를 바탕으로 피스톤 모터를 설계하는데 있어 이론적 설계에 근거한 행정 스트로크를 설정해야 한다.

5. 노치에 따른 해석

피스톤 모터에서 발생하는 압력 맥동을 저감하기 위하여 흔히 밸브 플레이트의 개구부 끝에 V형 또는 U형 노치를 가공한다. 노치형상이 추가된 밸브 플레이트를 사용하면 각 실린더가 외사점을 지나 고압 측 개구와 처음 만날 때 실린더와 개구 사이의 유통 면적이 점진적으로 증가하므로 실린더 내 압력 맥동이 감소하며, 각 실린더가 내사점을 지나 저압 측 개구와 처음 만날 때에도 유통 면적의 점진적 증가로 실린더 내 압력 강하율이 완화되어 압력 맥동이 감소한다. 앞서 Simulation X를 이용하여 나인피스톤모터를 구성하고 사판각에 따른 맥동 영향을 분석한 결과 사판각이 커질수록 압력맥동 및 토크의 크기가 커짐을 확인하였다.

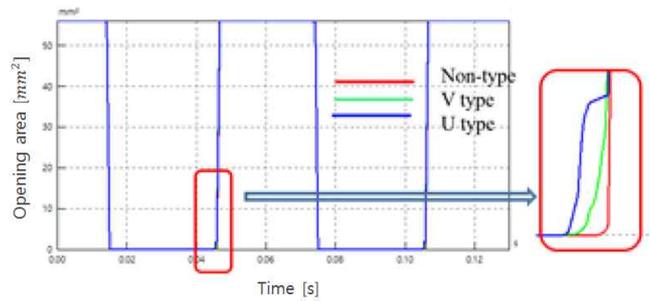


Fig. 18 Opening area of 3 types

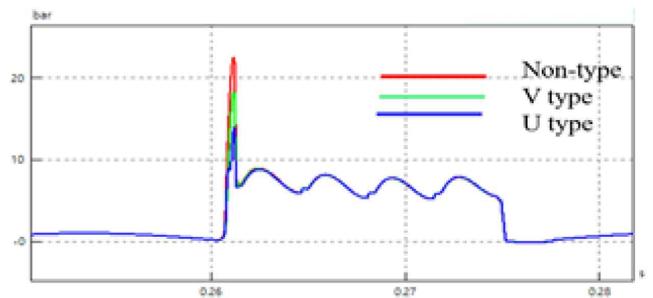


Fig. 19 Piston chamber pressuer

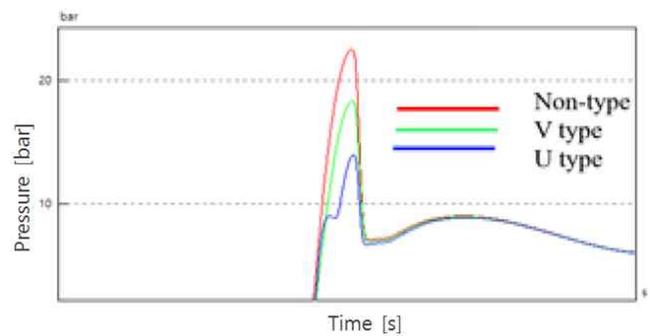


Fig. 20 Pressure pulsation of 3 cases

Table 6 Comparison of pressure pulsation on three notch types

	Value		
	Non type	V type	U type
Pressure [bar]	22.4	18.3	13.9

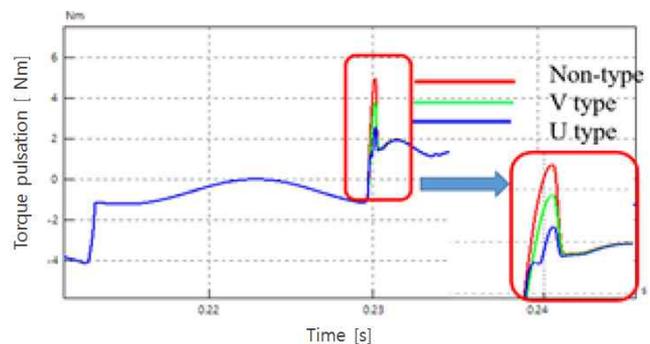


Fig. 21 Torque pulsation of 3 cases

다음으로, 흡입 및 토출과정에서 급격한 개구 면적의 변화로 인해 생기는 맥동을 저감시키는 요소인 노치 타입에 따른 설계를 통해 V type과 U type에 대한 해석을 실시하여 맥동 저감 효과를 확인 할 것이다. Fig. 17는 non-type과 V type, U type 노치에 대한 형상이다. 이러한 형상을 토대로 Simulation X 모델에 Fig. 18와 같이 개구 면적의 변화를 확인 할 수 있다.

Table 5에 Fig. 19의 맥동이 저감된 정도를 수치로 정리하여 나타내었으며 사판식피스톤모터의 밸브 플레이트 설계에 있어서는 Non-type 보다는 V type, U type 순으로 맥동을 저감시키는데 더 효율적인 것을 확인하였다. Fig. 20의 결과에서 토크맥동 또한 Non-type, V type, U type 순으로 안정화된 맥동을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 건설기계의 선회 모터 등에 사용되는 높은 힘과 회전 속도를 가진 사판식 피스톤 모터의 사판각 설계 및 행정 스트로크 설계, 밸브 플레이트의 노치형상에 대한 연구를 하였으며, 유압해석 프로그램인 Simulation X를 활용하여 사판각과 행정 스트로크, 노치형상이 모터 성능 및 맥동에 끼치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 첫째, 사판각은 기존 14도~18도 사이의 각도를 임의로 결정하여 사용하였지만, 모터 파라미터 값들에 따라 최적의 각도가 존재하며 논문에서 사용된 모터의 경우 14도에서 모터의 안정적인 토크맥동과 압력 맥동을 보여주었다. 둘째, 맥동에 영향을 미치는 설계요소들을 이론적으로 증명하고 특히 피스톤 행정 스트로크가 맥동에 끼치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 증명하였다. 최대 행정 스트로크는 이론식에 계산하여 사용할 때 최적의 맥동이 나타남을 알 수 있다. 셋째, 밸브 플레이트의 개구면적이 변하는 노치형상은 U타입 노치가 최저 맥동을 발생시키는 것을 알 수 있다. 결론적으로 본 논문은 사판식 피스톤 모터의 고성능화 고내구성을 위하여 사판각과 행정 스트로

크에 대한 시뮬레이션을 진행하였고, 최적의 사판각과 행정 스트로크, 밸브 플레이트의 노치형상을 찾아냄으로서 향후 설계를 함에 있어 시행착오를 줄일 수 있게 되었다.

References

- [1] Lee, Y. Y., 2012, Hydraulic Engineering, Munundang, Republic of Korea.
- [2] 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.
- [3] Bae, J. H., Chung, W. J., Kim, S. B. 2015, Application of Simulation X based Simulation Technique to the Design of Opening Area for a Valve Plate of Swash Plate Type Piston Pump, Int'l Conf. Scientific Computing 128-134.
- [4] Jang, J. H., Chung, W. J., Jeong, S. W., 2012, A Study of Efficiency for Variable Swash Plate Type Piston Pump, Proceedings of the KSPE conference, 753-754.
- [5] Jang, J. H., Chung, W. J., Lee, D. S., Yoon, Y. H., 2013, Application of SimulationX based Simulation Technique to Notch Shape Optimization for a Variable Swash Plate Type Piston Pump, Journal of The International Conference on Scientific Computing, 40-46.
- [6] Noh, D. K., Jang, J. S., 2013, Shape Design Sensitivity Analysis of the Valves Installed in the Hydraulic Driving Motor, Journal of The KSFC, 22:3 81-87.
- [7] Jeong, Y. W., 2015, A Study on the Design of Rotary Parts in a Fixed Displacement Swash Plate Type Piston Motor, A Thesis for a Master Degree, Changwon National University, Republic of Korea.
- [8] ITI, 2011, SimulationX user Manual and Library Manual, ITI GmbH.
- [9] Liu, L. L., Jang, J. S., 2013, Characteristics Analysis of the Hydraulic Motor Design Variables, Journal of the KSAE, 21:4 188-194.