

차륜형 장갑차용 액시얼 피스톤 펌프 개발을 위한 피스톤 수에 대한
시뮬레이션에 관한 연구

A Study on Simulation of Piston Number for Development
of Axial Piston Pump for Wheeled Armored Vehicle

최성웅¹ · 이창돈² · 양순용^{3*}

Seong Woong Choi, Chang Don Lee and Soon Yong Yang

Received: 18 Sep. 2018, Revised: 03 Dec. 2018, Accepted: 22 Jan. 2019

Key Words : Axial Piston Pump(액시얼 피스톤 펌프), Number of Piston(피스톤 수), Simulation(시뮬레이션), Design of Pump(펌프 설계), AMESim Model(아메심 모델)

Abstract: Axial piston pump is a significant part in wheeled armored vehicle, for generating hydraulic power of vehicle power system. The Axial Piston Pump is a high-performer, core functional item that is developed and applied to most of the military models in the development of military weapon systems. However, in the case of military equipment, there are conditions of limited size and weight required depending on the operating conditions and the operating environment. Under these conditions, it is required that the performance and the environmental resistance are verified to exert the required output. A unique technology is needed for the development of such equipment both in the present and in the future. Therefore, in this study, mathematical modeling of an axial piston pump is presented as a basic data for securing proprietary technology. In addition, a simulation model is designed and compared with the models of six kinds of pistons through simulation. It was established that when the number of pistons of the axial piston pump, which is the development objective, is seven, the model is suitable for the wheeled armored vehicle.

기호 설명

Z : Number of Piston

d_p : Diameter of Piston, mm

A_p : Diameter of Area, mm²

R_p : PCD of Piston, mm

S_p : Stroke of Piston, mm

V_d : Volume of Pump, cc/rev

Q : Pump Flow Rate, lpm

r : Radius of Kidney & Sausage port, mm

α : From end to circle center angle of Kidney port, deg

β : From circle center to circle center angle of Kidney port, deg

γ : Full angle of Kidney port, deg

N : Pump Speed, rpm

* Corresponding author: soonyy@ulsan.ac.kr

1 Department of Construction Machinery Engineering, University of Ulsan, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

2 Defence Systems Division, Research and Development 1 Team, Doosan Corporation, Gyeongnam 51528, Korea

3 Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

Copyright © 2019, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

차륜형 장갑차에 적용되는 액시얼 피스톤 펌프는 차체 동력장치의 오일냉각을 위해 소요되는 유압 동력을 발생시키는 핵심구성품으로 운용요구조건과 사

용 환경에 따라 장비에서 요구되는 크기와 중량 조건에서 최적의 출력과 성능검증을 요구한다.

핵심구성품 중 액시얼 피스톤 펌프의 경우 해외에서 수입하여 적용하고 있으나 차륜형 장갑차의 장비 특성상 해외에서 소량으로 수급하기 때문에 가격이 비싸고 안정적인 적기에 수급이 어렵다.

또한, 완성품을 해외에서 수입 시 운용 중 발생하는 기능저하와 같은 문제로 인해 적기에 대응이 어렵고 최적의 장비 운용이 어렵게 된다. 따라서, 차륜형 장갑차의 핵심기능품목의 경우 국산화 개발과 독자기술력을 확보할 필요가 있다.

따라서, 국산화 개발과 독자기술력을 확보하기 위해서는 유압시스템의 작동 특성을 파악하고 고효율, 고성능화를 위해서는 유압 펌프의 소음, 진동, 맥동 감소에 대한 연구가 필요하다. 이에 대해 밸브플레이트의 노치형상, 치수, 각도 등의 변화에 따른 설계와 밸브플레이트의 형상, 동적거동예측을 위한 새로운 모델 등의 성능에 대한 시뮬레이션 해석이 필요하다.¹⁻⁴⁾

본 논문에서는 차륜형 장갑차의 차체 파워팩의 핵심기능품목인 액시얼 피스톤 펌프를 대상으로 기초 설계기술 확보와 구현을 목적으로 한다. 이에 대해 피스톤 수가 7개를 기준으로 수학적 모델링과 시뮬레이션 모델을 수립하여 AMESim을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 피스톤 수별로 유량과 유량 맥동해석결과를 비교 분석한다.

2. 이론적 배경

2.1 액시얼 피스톤 펌프의 개요

액시얼 피스톤 펌프는 전동기, 엔진 등에 의해 공급되는 기계적 에너지를 유압에너지로 변환하는 장치로써 고압, 고성능, 고효율의 액시얼 피스톤 펌프가 널리 적용되고 사용되고 있다. 다양한 작업 환경을 가지는 시스템에 사용되는 액시얼 피스톤 펌프는 동작 조건에 따라 토출마력이 넓은 범위에 걸쳐 변동한다. 펌프를 구동하는 원동기의 출력은 일반적으로 느린 응답성을 가지며 부하가 급격히 변화할 경우 펌프 구동계의 동축성 및 원동기의 동특성이 함께 작용하여 사용자가 의도한 제어효과가 감소되어 유압시스템의 응답특성이 저하될 수 있다.

액시얼 피스톤 펌프는 피스톤, 사판-캠 결합부, 액추에이터 피스톤, 캠 스프링으로 구성된다. 외부 부하가 변함에 따라 적정 유량과 압력을 공급하며 액

시얼 피스톤 펌프 구성요소들의 상호 작용으로 이루어진다. 따라서 Fig. 1과 같이 액시얼 피스톤 펌프의 주요 구성 요소를 나열할 수 있으며 Rotary Group, Compensating Group, Drive Group 3가지로 나눌 수 있다. 이렇게 구분된 구성 요소들은 외부 부하의 변화에 따라 유량과 압력을 공급하며 서로 간의 상호 작용으로 이루어진다.

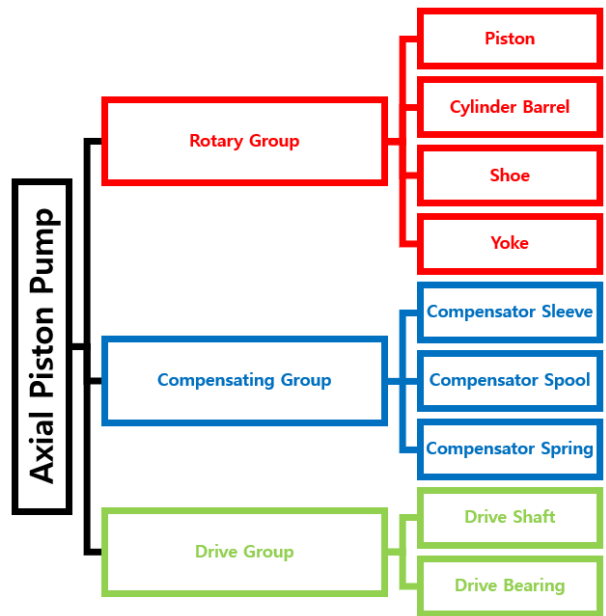


Fig. 1 Main Components of Axial Piston Pumps

2.2 액시얼 피스톤 펌프의 작동원리

구동축은 실린더블록을 회전시키며, 실린더 블록과 피스톤은 구동축과 함께 회전한다. 각각의 피스톤은 슬리퍼에 부착되고 피스톤과 슬리퍼는 리테이너 플레이트의 홈에 삽입된다. 리테이너 플레이트는 피스톤과 실린더 블록과 함께 회전하며 슬리퍼의 궤적은 사판과 리테이너 플레이트에 의해 결정된다. 실린더 블록이 회전하는 동안 각각의 피스톤은 왕복운동을 하게 된다. 피스톤의 왕복운동에서 유체의 용적이 포트 플레이트의 제어 포트를 통해 흡입되거나 토출된다.⁵⁾

2.3 액시얼 피스톤 펌프의 맥동

액시얼 피스톤 펌프의 경우 구조가 복잡하고 맥동이 큰 단점을 가지고 있다. 유압 펌프에서 발생하는 맥동은 유압 시스템을 구성하는 각 요소들의 내구성 저하에 따른 에너지 손실, 열 발생, 진동 및 소음의 발생과 같은 여러가지 문제를 야기한다.⁶⁾

액시얼 피스톤 펌프의 피스톤은 단순 운동을 한다.

피스톤의 단순 운동에 의한 펌프 토출유량은 토출구에 연결된 피스톤들에 의해 토출되는 유량의 합이 된다. 2개 또는 3개의 피스톤이 동시에 토출하게 된다. 피스톤의 수가 홀수이고 많을수록 유량 맥동이 작아진다. 따라서 액시얼 피스톤 펌프는 홀수개의 피스톤을 가지게 된다.⁷⁾

3. 액시얼 피스톤 펌프의 수학적 모델

3.1 피스톤 위치, 속도, 유량⁸⁾

액시얼 피스톤 펌프의 수학적 모델링을 수립하기 위해 운동방정식을 이용하였으며 Fig. 2와 같이 사판이 고정되어 있는 경우에 대하여 액시얼 피스톤 펌프의 피스톤 위치와 속도를 도출하면 다음과 같다.

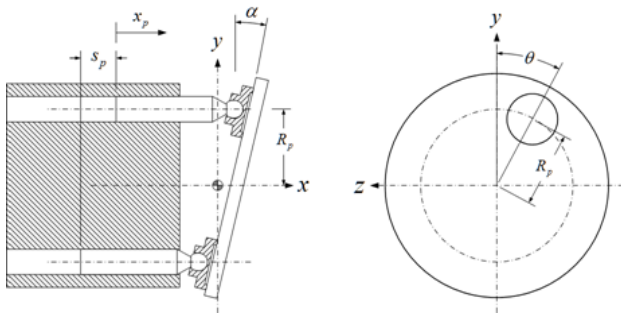


Fig. 2 Model of Axial Piston Pump

$$s_p = R_p \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

$$\dot{s}_p = \dot{\theta} \cdot R_p \cdot \tan \alpha \cdot \sin \theta \quad (2)$$

피스톤의 면적을 A_p 라 하였을 때, 각각의 피스톤에 의해 토출되는 유량은 피스톤 속도와 피스톤 면적의 곱과 같다. 따라서, 피스톤의 토출 유량 식을 도출하면 다음과 같다.

$$Q_p = A_p \cdot \dot{\theta} \cdot R_p \cdot \tan \alpha \cdot \sin \theta \quad (3)$$

3.2 Kidney Port와 Sausage Port 각도

Fig. 3에 나타낸 것처럼 밸브판 포트(Kidney Port)와 실린더 포트(Sausage Port)간에는 중합(Overlap)이 생긴다. 중합에 의해 펌프 작용 효율이 높게 유지된다. 이와 같은 폐입부 상태가 펌프의 진동과 소음에 큰 영향을 주게 된다.

따라서, 중합영역을 결정하기 위해서는 밸브판 포

트(Kidney Port)의 각도를 도출해야 한다. Fig. 4에 나타낸 것처럼 Sausage Port와 Kidney Port의 α 각과 Kidney Port의 β , γ 는 다음과 같다.

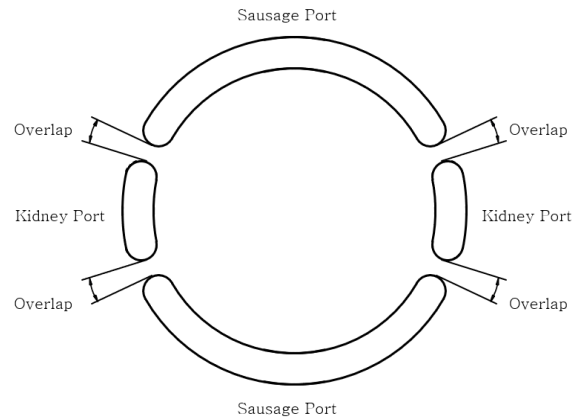


Fig. 3 Kidney Port and Sausage Port

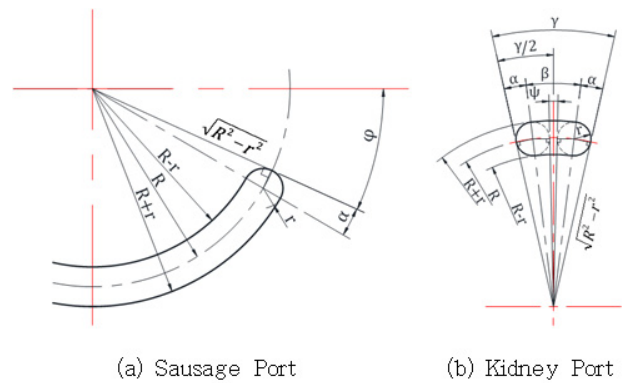


Fig. 4 Structure of (a) Sausage Port and (b) Kidney Port

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{2r}{R_p} \right) \left(\frac{180}{\pi} \right) \text{ [deg]} \quad (4)$$

$$\beta = \left\{ \frac{2\pi}{Z} - 3 \sin^{-1} \left(\frac{2r}{R_p} \right) \right\} \left\{ \frac{180}{\pi} \right\} \text{ [deg]} \quad (5)$$

$$\gamma = 2\alpha + \frac{\beta}{2} \text{ [deg]} \quad (6)$$

4. 액시얼 피스톤 펌프의 시뮬레이션

4.1 기초 설계 값

액시얼 피스톤 펌프의 시뮬레이션 모델링을 하기 위해서는 정립한 수학 모델을 이용하여 6가지의 피스톤 수에 대해 유량, Kidney Port 각도 등의 필요한 기초 설계 값을 도출하였으며 Table 1과 같다.

Table 1 Basic Design Value for Piston Number

Item	Unit	Value					
Z	[EA]	5	6	7	8	9	10
d_p	[mm]	32.0	28.5	25.85	23.7	21.95	20.5
A_p	[mm ²]	804.2	637.9	524.8	441.2	378.4	330.1
R_p	[mm]	69.7	73.0	76.3	79.3	82.1	84.95
S_p	[mm]	243.5	255.1	266.6	277.1	286.9	296.8
V_d	[cc/rev]	85.7	85.4	85.7	85.6	85.5	85.7
Q	[lpm]	149.9	149.4	149.9	149.7	149.7	150.0
r	[mm]	5.7	5.2	4.8	4.5	4.2	4.0
α	[deg]	9.41	8.19	7.23	6.52	5.87	5.40
β	[deg]	43.76	35.43	29.74	25.45	22.38	19.79
γ	[deg]	40.71	34.10	29.33	25.76	22.94	20.70

4.2 Kidney Port와 Sausage Port 개구면적

기초 설계 값을 이용하여 6가지의 모델의 Kidney Port와 Sausage Port 개구면적을 구하면 Table 2와 같다.

Table 2 Opening Area of Kidney Port and Sausage Port

No. Piston	Unit	Value
5	[mm ²]	405.503
6	[mm ²]	319.682
7	[mm ²]	262.483
8	[mm ²]	222.125
9	[mm ²]	190.106
10	[mm ²]	167.573

이 때 구동축에 의해 회전하는 실린더 배럴의 Sausage Port가 시작되는 상사점(TDC) 흡입구간을 지나 Kidney Port를 만나면서 유량 흡입이 시작되고 하사점(BDC) 토출구간을 지나면서 유량이 토출된다.

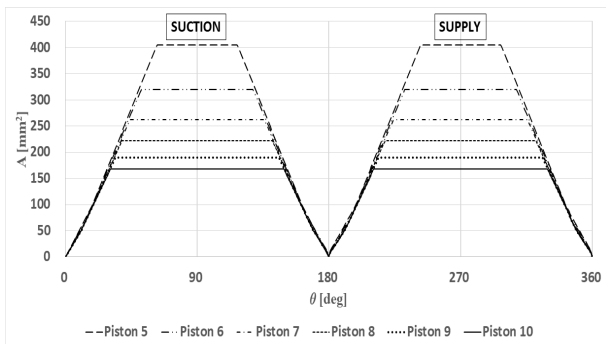


Fig. 5 The opening area between the Kidney port and the Sausage port

압력이 상승하게 되면 개구면적이 0이 되는 구간이 발생하는데 본 논문에서는 개구면적이 항상 오픈되어 있는 Open Area 형태로 시뮬레이션 하였다. 6가지의 모델의 개구면적 변화는 Fig. 5와 같다.

4.3 AMESim 시뮬레이션 모델⁹⁾

액시얼 피스톤 펌프의 펌프 몸체, 피스톤과 실린더 배럴, 구동축에 대해 AMESim으로 모델링을 하였다. 각 요소모델을 바탕으로 피스톤의 수가 5, 6, 7, 8, 9, 10개의 6가지 종류에 대해 모델을 구성하였으며 시뮬레이션 조건으로 펌프의 회전속도 1750 [rpm], 사판각 17 [°]로 고정하였다. 본 논문에서는 피스톤 수 7개에 대한 시뮬레이션 모델링한 것은 Fig. 6과 같다.

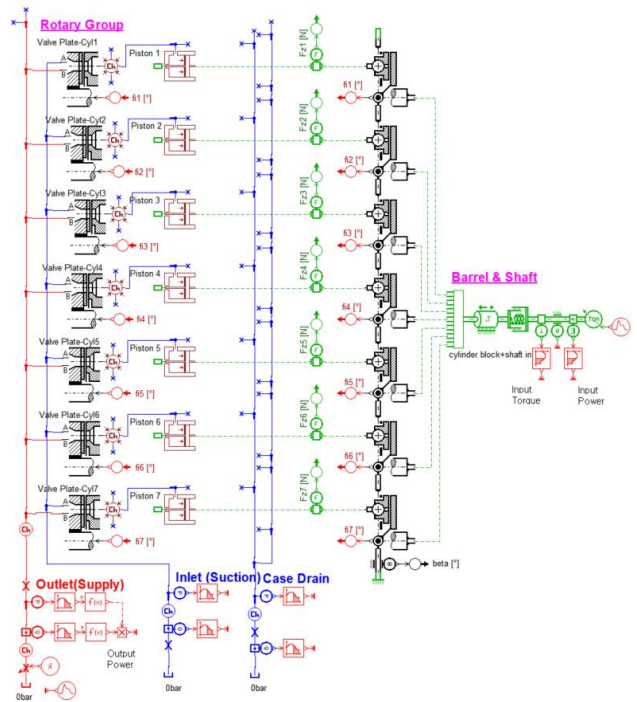


Fig. 6 AMESim model of axial piston pump

4.4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 통해 6가지 종류의 피스톤 수에 따른 흡입유량과 토출유량 결과를 도출하였다. 초기 0~0.01s 사이의 값은 유량이 상승하는 구간으로 결과에서는 제외하였다.

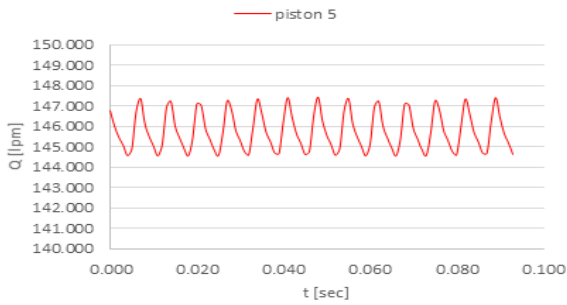
본 시뮬레이션 결과를 통해 액시얼 피스톤 펌프 6가지 모델의 흡입유량과 토출유량 결과는 모두 일정 범위 내에서 그래프가 나타났다. 이에 대해 유량의 결과로만 봤을 때 피스톤 수가 7개일 때 가장 좋은 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

(1) 흡입유량

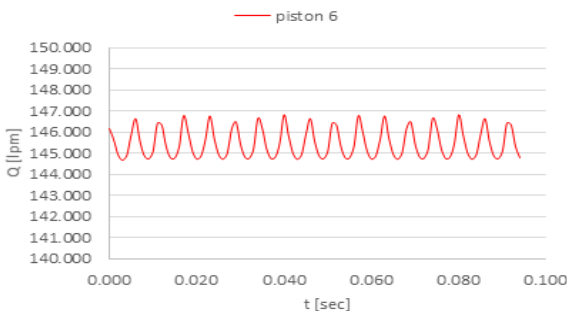
시뮬레이션 결과 값은 Table 3, 그래프는 Fig. 7과 같다. 결과에서 알 수 있듯이 피스톤 수가 7개일 때 흡입유량의 최대 유량 값과 최소 유량 값 차이가 가장 작게 나타남을 알 수 있다.

Table 3 Suction Flow Rate

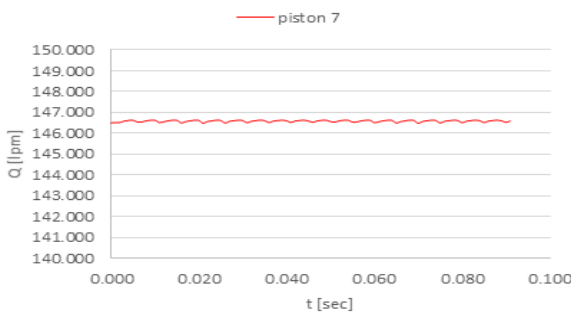
No. Piston	Unit	Max (Q_2)	Min (Q_1)	$Q_2 - Q_1$
5	[lpm]	147.428	144.552	2.876
6	[lpm]	146.833	144.674	2.159
7	[lpm]	146.624	146.491	0.133
8	[lpm]	146.660	145.609	1.051
9	[lpm]	146.728	145.995	0.733
10	[lpm]	147.053	146.101	0.952



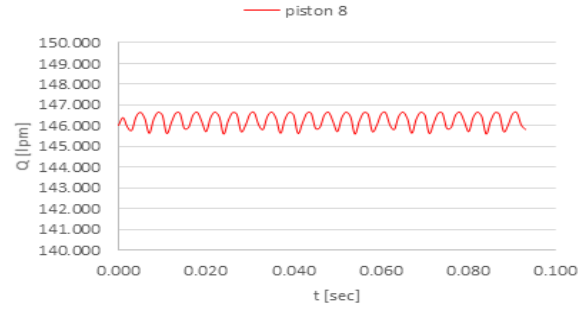
(a) Number of 5 Pistons



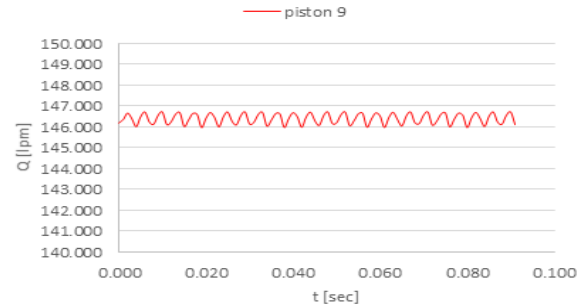
(b) Number of 6 Pistons



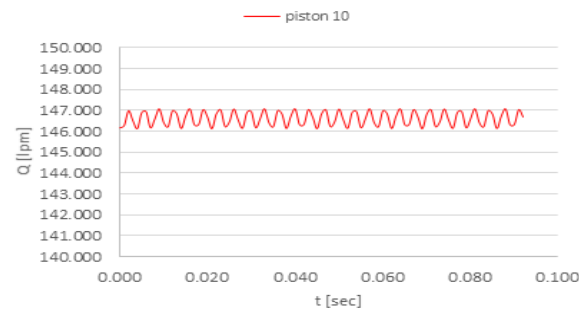
(c) Number of 7 Pistons



(d) Number of 8 Pistons



(e) Number of 9 Pistons



(f) Number of 10 Pistons

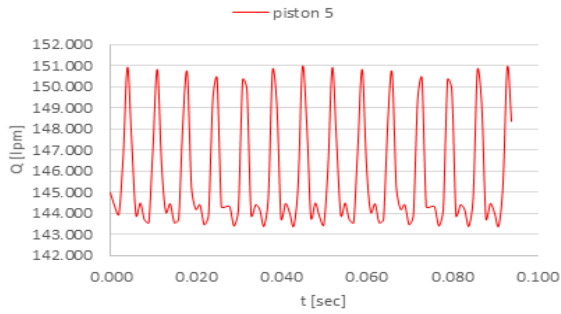
Fig. 7 Suction Flow Rate by Piston Number

(2) 토출유량

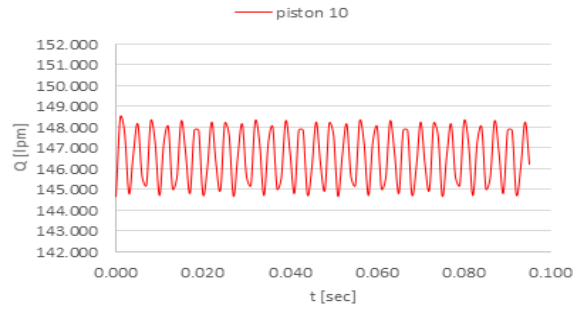
시뮬레이션 결과 값은 Table 4, 그래프는 Fig. 8과 같다. 결과에서 알 수 있듯이 피스톤 수가 7개일 때 토출유량의 최대 유량 값과 최소 유량 값 차이가 가장 작게 나타남을 알 수 있다.

Table 4 Supply Flow Rate

No. Piston	Unit	Max (Q_2)	Min (Q_1)	$Q_2 - Q_1$
5	[lpm]	150.921	143.376	7.545
6	[lpm]	149.524	143.850	5.674
7	[lpm]	146.692	146.140	0.552
8	[lpm]	147.425	143.689	3.736
9	[lpm]	147.427	144.554	2.873
10	[lpm]	148.487	144.655	3.832

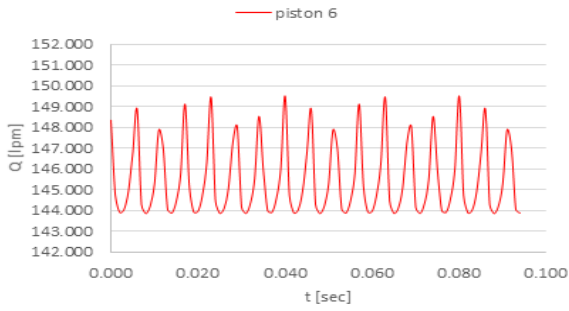


(a) Number of 5 Pistons

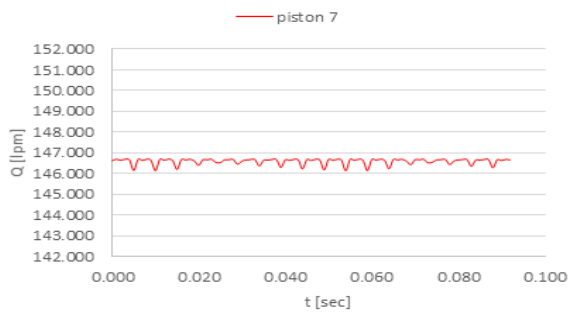


(f) Number of 10 Pistons

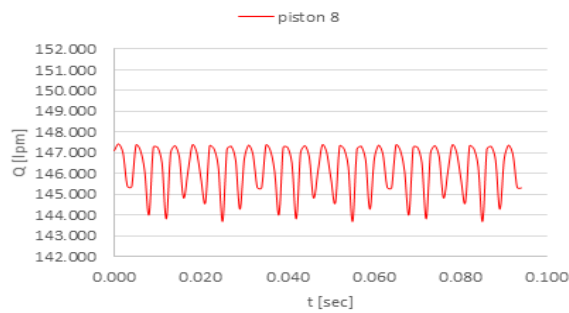
Fig. 8 Supply Flow Rate by Piston Number



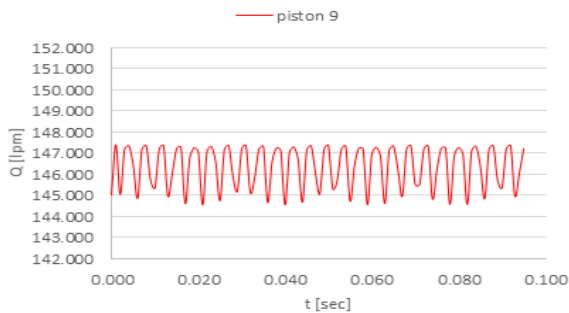
(b) Number of 6 Pistons



(c) Number of 7 Pistons



(d) Number of 8 Pistons



(e) Number of 9 Pistons

(3) 유량 맥동율에 대한 결과

이론과 시뮬레이션의 유량 맥동율 결과를 비교하기 위해 이론상의 유량 맥동율을 참고하였다. 이론상의 피스톤 수에 따른 유량 맥동율은 다음과 같은 식을 이용하여 값을 도출하였다.⁴⁾

$$\delta Q_O = \frac{\pi}{2 \cdot Z} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4 \cdot Z}\right) \quad (7)$$

$$\delta Q_E = \frac{\pi}{Z} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2 \cdot Z}\right) \quad (8)$$

이론상의 맥동율 결과 값과 시뮬레이션의 맥동율 결과 값을 Table 5와 같다.

Table 5 Result of Flow Pulsation Rate

No. Piston	Theory ⁷⁾	Simulation
5	4.98 [%]	16.8 [%]
6	14.03 [%]	19.1 [%]
7	2.53 [%]	11.0 [%]
8	7.81 [%]	12.5 [%]
9	1.53 [%]	8.2 [%]
10	4.98 [%]	9.3 [%]

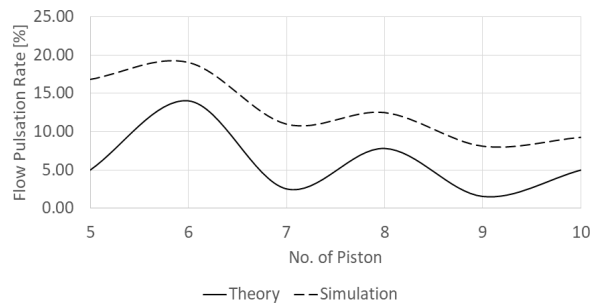


Fig. 9 Flow Pulsation Rate of Axial Piston Pump

이론 결과 값과 시뮬레이션 결과 값을 비교한 결과 그래프는 Fig. 9와 같다. 결과 값을 그래프로 나타내었을 때 이론의 경향과 시뮬레이션의 경향이 유사한 그래프 형상을 나타냄을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 기초 설계기술 확보와 구현을 위해 6가지 종류의 피스톤 수에 따른 액시얼 피스톤 펌프의 수학적 모델링을 수립하고 기초 설계 값을 도출하였다. AMESim을 이용하여 액시얼 피스톤 펌프 모델을 설계하고 시뮬레이션을 실시하였다.

본 논문에서는 다음과 같은 결과를 확인하였다.

1) 일반적으로 액시얼 피스톤 펌프의 경우 피스톤 수가 9개일 때 유량 맥동 값이 작다. 하지만, 피스톤 수가 7개일 때의 피스톤 펌프 모델을 대상으로 개발을 진행했기 때문에 본 논문에서는 차륜형 장갑차에 적용되는 액시얼 피스톤 펌프의 시뮬레이션을 통해 피스톤 수가 7개일 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

하지만, 본 논문의 유량 값과 유량 맥동 값의 시뮬레이션 결과로 실제 적용되는 액시얼 피스톤 펌프의 적합성을 논의하기는 어렵다. 외부환경, 소음, 진동 등 다양한 환경조건과 내부 부품 형상 등을 고려한 액시얼 피스톤 펌프의 선정이 필요하다.

2) 시뮬레이션을 통해 피스톤 수에 따라 유량 값과 맥동율에 영향이 있음을 알 수 있다. 하지만, 본 논문에서는 시뮬레이션 조건을 특정 값으로 고정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

향후 다양한 조건에 따라서 피스톤 수가 유량 값과 맥동율에 어떤 영향을 미치는지에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

마지막으로 개발된 피스톤 펌프의 성능시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 설계된 시뮬레이션 모델이 검증된다면 국산화 개발과 독자기술력을 확보에 대한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.¹⁰⁻¹²⁾

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 구매조건부기술개발사업(국내수요처) [No. S2435981 차륜형 장갑차 가변피

스톤형 유압펌프 개발]과 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT) [2018년 건설기계R&D전문인력 양성사업, 과제번호 : N0001292]의 지원으로 수행된 연구임.

References

- 1) S. R. Choi, S. S. Shin, I. Y. Lee, D. H. Jang and J. H. Kwon, "A Basic Study on Pressure & Flow Ripple Simulation of Axial Piston Pump", Proceedings of the KFPS 2010 Autumn Conference, pp.57~62, 2010.
- 2) I. Y. Lee, J. H. Park and M. G. Kang, "Flow Ripple Simulation Model of Axial Piston Pump," Journal of Drive and Control, Vol.2, No.3, pp. 54~59, 2005.
- 3) D. H. Jang, S. K. Lee, J. H. Kwon and S. H. Park, "A Study on Pressure, Flow Fluctuation and Noise in the Cylinder of Swash Plate Type Axial Piston Pump," Journal of Drive and Control, Vol.6, No.3, pp.38~46, 2009.
- 4) J. H. Shin, H. E. Kim and K. W. Kim, "A Study on Models for the Analysis of Pressure Pulsation in a Swash-Plate Type Axial Piston Pump," Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol.27, No.6, pp.314~320, 2011.
- 5) M. Galal Rabie, Fluid Power Engineering, McGraw-Hill, New York, pp.103~105, 2009.
- 6) J. H. Bae, W. J. Chung, J. H. Jang, Y. H. Yoon, J. Y. Jeon, "Study of Pressure and Flux Pulsation to Design Optimum Valve-Plate Notch and Pulsation-Variables Analysis of Swash-Plate-Type Piston Pump", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.24, No.2, pp.244-250, 2015.
- 7) J. Ivantysyn and M. Ivantysynova, Hydrostatic Pumps and Motors, Tech Books International, New Delhi, pp.123, 2003.
- 8) Y. H. Yoon, J. S. Jang, Y. B. Lee, "An Analysis of Dynamic Characteristics for Variable Swash Plate Type Axial Piston Pump", Proceedings of the KSFC 2012 Spring Conference, pp.23~30, 2012.
- 9) S. W. Choi, Q. H. Le, S. J. Kim and S. Y. Yang, "Analysis of flow characteristics according to the

- tilting angle of the variable swash plate type piston pump for power transmission device," Proceedings of 2017 Autumn Conference on Drive and Control, pp. 40~41, 2017.
- 10) S. R. Choi et al., "A Study on Design of Notches in Valve Plate of Swash Plate Type Axial Piston Pumps Operated Bi-directionally", Journal of Drive and Control, Vol.13, No.3, pp.39-46, 2016.
- 11) S. S. Park et al., "Development of a Concrete Pump Truck's Core Pump Model and Its Validation", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.2, pp.1-8, 2018.
- 12) D. S. Jung, Y. B. Lee and B. S. Kang, "Study for the Reliability Evaluation of a Volute Pump", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.23-29, 2018.