

사판식 피스톤 펌프 흡입구의 유동 특성에 관한 연구

이정실* 전차수**,#

*경상국립대학교 융합기계공학과, **경상국립대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

A Study on the Flow Characteristics of a Swash-Plate Piston-Pump Inlet

Jeong-Sil Lee*, Cha-Soo Jun**,#

*Department of Convergence Mechanical Engineering, Gyeongsang National University,

**Department of Industrial and Systems Engineering, & Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

(Received 03 August 2021; received in revised form 13 August 2021; accepted 23 August 2021)

ABSTRACT

In this study, a cavitation occurrence in a piston-pump inlet was investigated by simulating the pressure distribution, according to the inlet shape of a variable-displacement swash-plate piston pump that supplies high-pressure oil to control the hydraulic system of a marine engine. Two types of pump inlets with different shapes were cast into impression models, and the models were reverse-engineered by 3D scanning. Then, the hydraulic-pressure distribution was analyzed through finite-element analysis. The results of the analysis confirmed that cavitation occurs more easily in the inlet with a steeper slope during pump operation because the inlet pressure on the valve plate is lower than that of the other pump with a gentler inlet slope.

Keywords : Piston Pump(피스톤 펌프), Hydraulic(유압), Cavitation(공동 현상), Suction Pressure(흡입 압력), Swash Plate(사판)

1. 서 론

가변용량형 사판식 피스톤 펌프는 조선, 건설, 일반 기계산업 등에서 유압 기계의 동력 공급원으로 널리 사용되고 있다. 본 연구는 선박 엔진에 적용되는 피스톤 펌프 개발 과정에서 캐비테이션이 발생하는 현상을 발견하고 그 발생 원인과 해결 방안을 찾고자 수행되었다.

피스톤 펌프에 관한 연구는 조선 분야보다는 항

공기 및 건설기계 분야에서 활발히 진행되고 있다. Choi는 노치 설계안이 펌프의 특성에 미치는 영향을 수치 시뮬레이션 및 실험을 통해 피스톤 펌프에 적용할 노치 설계에 관한 기본적인 방향을 제시하였고, Cho는 사판식 유압 피스톤 펌프의 슬리퍼 정압베어링 형상에 따른 윤활 특성을 파악하여 설계에 대한 이론적 접근과 성능 향상을 도모하였다. 지금까지 수행된 대부분의 연구는 윤활부인 정압 베어링과 밸브 플레이트의 노치에 따른 해석 연구가 주를 이루고 있다¹⁻⁶⁾.

가변용량형 사판식 피스톤 펌프는 사판(swash plate) 위의 실린더 블록이 회전함에 따라 피스톤

Corresponding Author : csjun@gun.ac.kr

Tel: +82-55-772-1693, Fax: +82-55-772-1

이 왕복 운동을 하여 유압유를 흡입하고 토출한다. 펌프의 토출 유량은 실린더 블록의 회전속도와 사판(swash plate)의 경사 각도인 경전각(swivel angle, 傾轉角)에 따라 결정된다. 사판의 하부에는 정압 베어링이 적용되어 구동되며 사판의 경전각 제어는 기계 유압식 또는 전자 유압식 제어 밸브를 사용하고 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 사판식 피스톤 펌프는 피스톤이 9개가 있으며 각 피스톤의 운동에 따라 유량 맥동이 발생한다. 이런 맥동은 펌프의 성능 및 내구 수명에 큰 영향을 미치는 캐비테이션을 일으킬 수 있다.

본 연구에서는 흡입구 형상에 따라 캐비테이션의 발생이 어떻게 달라지는지를 고찰하고자 한다. 이를 위해 두 가지 형태의 흡입구에 대해 내부 형상을 본뜨기 모형으로 제작한 후, 3D 스캐닝하여 형상모델을 생성하였다. 각각의 모델에 대해 압력 분포 해석을 하여 펌프 내부에서의 캐비테이션 발생 원인을 고찰하고자 한다.

2. 사판식 피스톤 펌프

본 연구에서 개발하는 사판식 피스톤 펌프는 선박 엔진에 적용되어 엔진 내의 유압 장치를 제어하고 조종하기 위해 고압의 작동유를 공급하는 역할을 수행하며, 압력 35MPa, 회전수 2200rpm, 용량 71cc/rev의 성능을 낼 수 있는 유압 펌프이다. Fig. 1은 전체 외형 모델이고, Fig. 2에는 주요 구성품들을 나타내었다. 펌프의 흡입과 관련된 주요 부품은 밸브 블록과 밸브 플레이트이다.

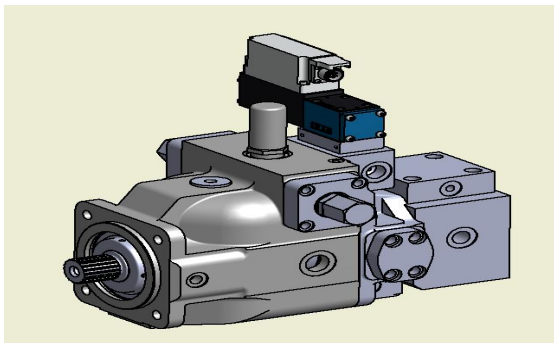


Fig. 1 Assembly modeling of the piston pump

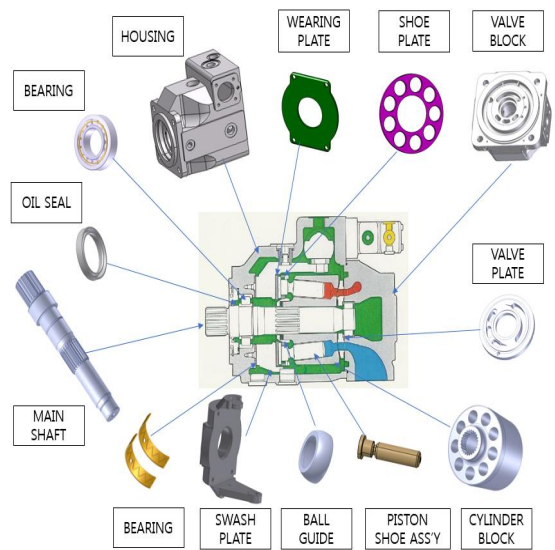


Fig. 2 Structure and main parts of a swash plate piston pump



Fig. 3 Cavitation of a valve plate

밸브 플레이트는 펌프의 핵심 부품 중 하나로 펌프의 흡입과 토출 영역을 구분하는 역할을 한다. 또한, 흡입과 토출이 구분되는 영역의 저압에

서 고압으로 변환될 때, 피스톤 내부의 압력에 큰 변화가 생기면서 펌프 흡입구를 포함한 저압부에서 캐비테이션이 발생하게 된다. Fig. 3은 밸브 플레이트의 흡입부 측에 캐비테이션에 의한 침식 흔적을 보여주고 있다. 캐비테이션에 의한 침식이 생기면 유동 저항이 커져 펌프 성능이 떨어지고, 지속적인 운전 시에는 펌프 플레이트의 파손이 발생할 수 있다.

3. 흡입구 형상에 따른 압력분포해석

3.1 밸브 블록 흡입 관로의 본뜨기 모형

가파른 경사(steepest slope type)와 완만한 경사(gentle slope type)를 가진 두 가지 종류의 밸브 블록의 흡입 관로에 형뜨기용 RTV(room temperature vulcanizing) 액체 실리콘 고무를 흘려 넣어 본뜨기 모형을 제작하였다. RTV 실리콘 고무는 주재와 경화제를 혼합하여 사용하는데 단시간에 고무 모형을 쉽게 만들 수 있고, 유동성이 뛰어나기 때문에 미세한 부분도 원형을 충실히 재현할 수 있으며, 굳은 다음 제품 파손 없이 모형을 뽑아낼 수 있다. 본뜨기 모형에 사용한 RTV 실리콘의 사양은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 4의 (a)는 피스톤 펌프의 흡입구를 가지는 밸브 블록(valve block)의 모델이며, (b)는 내부의 유로 형상을 나타내었다. Fig. 5는 가파른 경사의 형태를 가진 SS-type의 흡입부 내부 본뜨기 모형의 등각과 측면 사진을 보여준다. Fig. 6은 완만한 경사의 형태를 가진 GS-type의 흡입부 내부 본뜨기 모형을 나타내었으며 전면부(a)와 측면부(b)를 보여주고 있다.

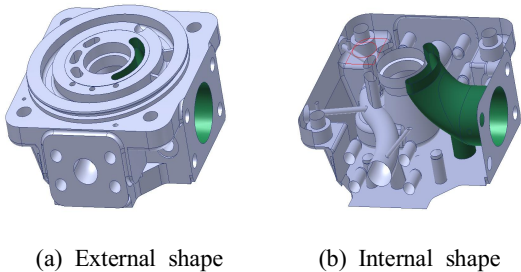


Fig. 4 Configuration of the valve block

Table 1 RTV Silicon Specifications

Item	Spec.
- Viscosity	10 Pa.s
- Standard hardening time	8hr @ 23°C
- Density	1.28 g/cm ³ @ 23°C
- Tensile strength	2.5 MPa
- Hardness	40 shore A



(a) iso-metric view (b) side view

Fig. 5 Inlet impression model of SS-type



(a) front view (b) side view

Fig. 6 Inlet impression model of GS-type

3.2 본뜨기 모형 제품의 측정 및 모델링

본뜨기로 제작한 두 가지 모형의 치수를 확인하고 형상 모델링을 하기 위해서 3D 스캐너를 사용하여 측정하였다. 3D 스캐너는 실제 물체의 형상 정보를 수많은 점(point)으로 취득하여 3D 형상 모델로 바꾸어주는 촬영 장치이다. 스캐닝 방식에는 접촉식 스캔방식과 비접촉식 스캔방식이 있다.

본 연구에서는 비접촉식의 3D 레이저 스캐너를

사용하였다. 레이저 빔을 초당 200만 점 이상의 속도로 방출하고 반사되는 빔의 왕복시간으로 거리를 계산하여 점의 좌표를 얻는데 이렇게 취득한 3차원 좌표를 수십만 점의 점군(point clouds)으로 저장한다. 점군 데이터는 대표적인 3D 스캔 데이터 파일인 STL(stereolithography) 파일로 추출한 후, 3D 형상 모델을 생성하였다.

3.3 메시 및 경계조건

두 종류의 밸브 블록 내부 흡입구 형상에 대한 3D 모델을 이용하여 Ansys CFX에서 압력 분포를 해석하였다.

결과의 정확성을 높이고, 격자 밀도를 높이기 위하여 tetrahedrons 방식을 사용하여 메시를 생성하였으며, node 수는 약 2000만 개, elements 수는 약 1억 1536만 개로 하였다.

Fig. 7의 (a)는 SS-type의 흡입부 내부 모델의 등각도를 나타내었고, (b)는 측면도를 나타내었다. 또한, Fig. 8의 (a)는 GS-type의 흡입부 내부 모델의 전면도를 나타내었고, (b)는 측면도를 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 두 개의 모델은 흡입 관로의 중간에 꺾이는 부분의 형상이 완만한 경사를 지닌 형태(GS-type)와 가파른 경사를 지닌 형태(SS-type)의 차이와 흡입 입구에서 출구에 이르는 곡면 곡률에서 약간의 형상의 차이가 있다.

입구 조건은 작동유가 유입되는 압력을 고려하여 250kPa와 100kPa (대기압)의 두 가지 압력 조건을 주었으며, 출구 조건의 경우 작동유의 유량을 고려하여 초당 2.85 kg/s (192Lpm)의 유량을 부여하였다. 유체의 물성은 작동유인 ATLANTA MARINE D 3005(SAE 30)의 것을 입력하였다.

3.4 압력 분포 해석 및 결과 분석

SS-type의 경우 입구 압력이 250kPa일 때 밸브 플레이트 입구 앞부분 압력은 226kPa이고, 최소 압력은 밸브 플레이트 직후에서 약 221kPa로 나타났다. 또한, 입구 압력이 100kPa일 때 밸브 플레이트 입구 앞부분 압력은 76.2kPa이고, 최저 압력은 같은 위치에서 발생하여 동일한 76.2kPa로 나타났다.

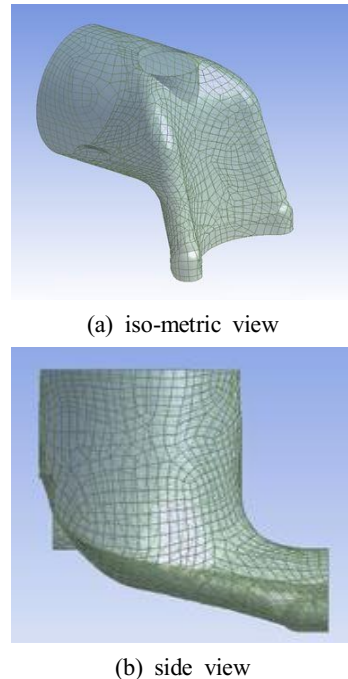


Fig. 7 Inlet 3D modeling of SS-type

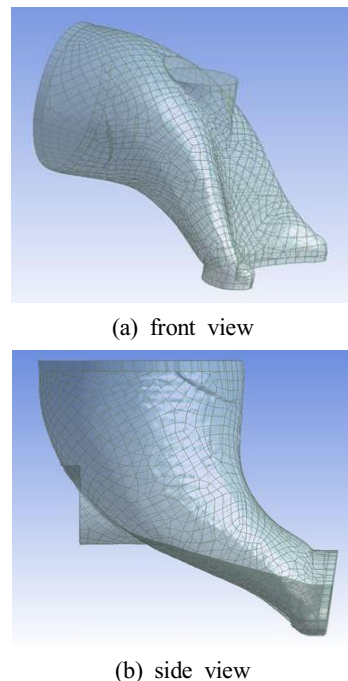
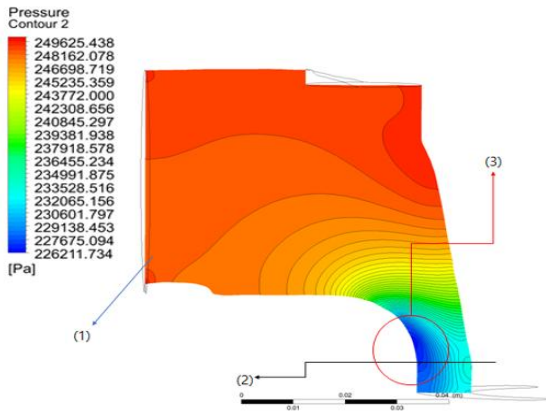
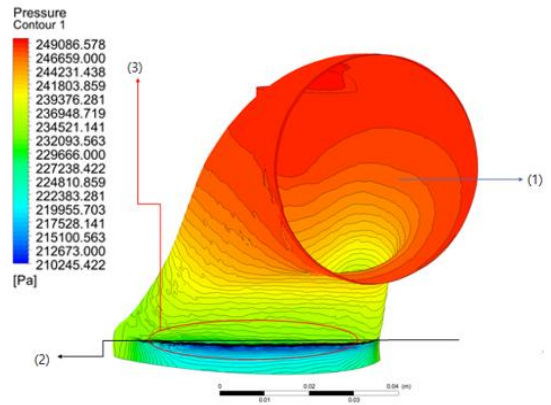


Fig. 8 Inlet 3D modeling of GS-type

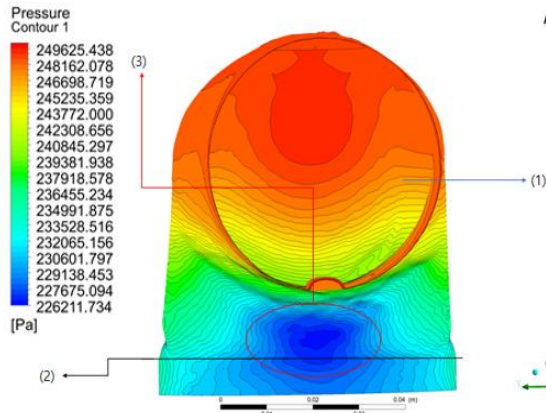


(a) front view



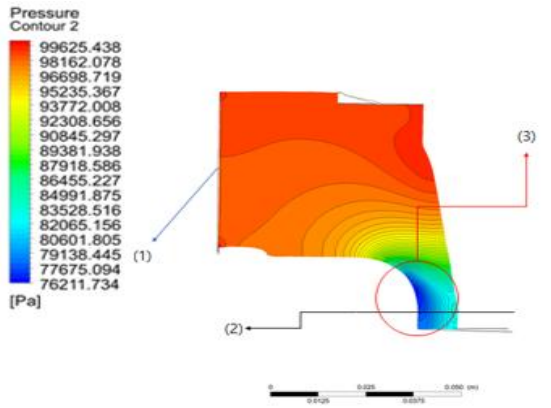
(b) side view

Fig. 10 Pressure distribution (250 kPa) (GS-type)

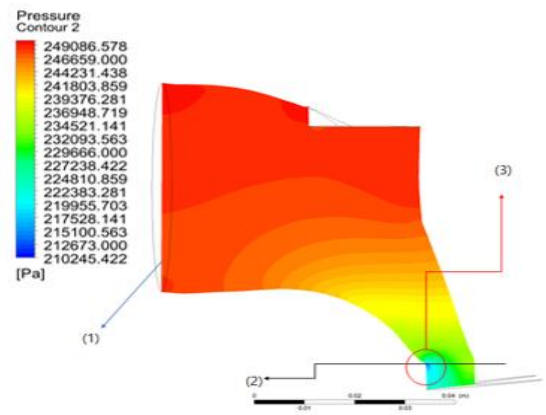


(b) side view

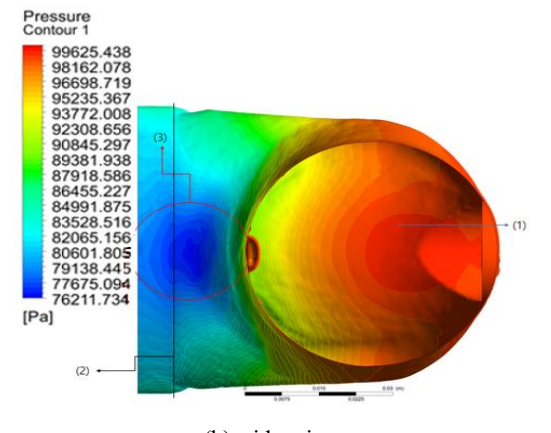
Fig. 9 Pressure distribution (250 kPa) (SS-type)



(a) front view

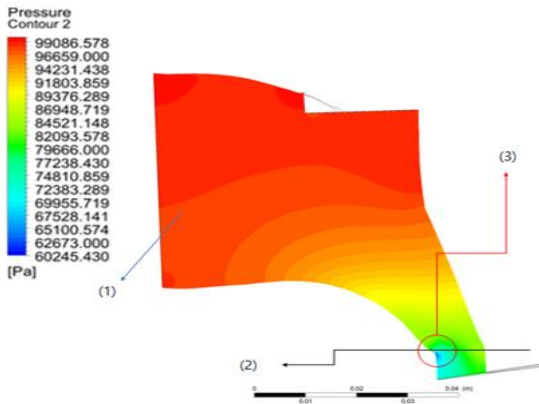


(a) front view

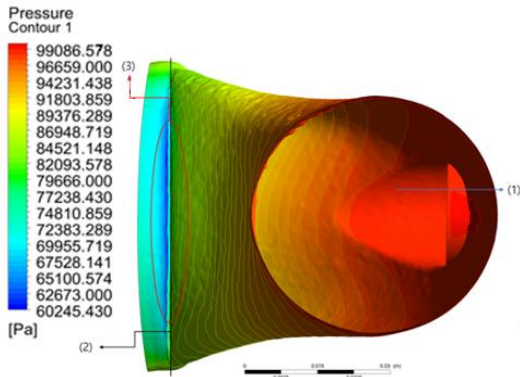


(b) side view

Fig. 11 Pressure distribution (100 kPa) (SS-type)



(a) front view



(b) side view

Fig. 12 Pressure distribution (100 kPa) (GS-type)

GS-type의 경우 입구 압력이 250kPa일 때 밸브 플레이트 입구 앞부분 압력은 232kPa이고, 밸브 플레이트 직후에서 최저 압력은 약 210kPa로 나타났다. 또한, 입구압력이 100kPa일 때 밸브 플레이트 입구 앞부분 압력은 82.0 kPa이며, 밸브 플레이트 직후에서 최저 압력은 약 60.2kPa로 나타났다.

흡입구의 압력만을 살펴보았을 때, 흡입구의 끝단에 해당하는 밸브 플레이트 입구 앞부분 압력을 기준으로 보면 입구 압력이 250 kPa 일 때 발생 압력이 GS-type이 SS-type보다 약 6kPa 높게 나타남이 확인되었고, 입구 압력이 100kPa일 때는 GS-type의 압력이 5.8kPa 높게 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10의 (a)에는 정면부, (b)에는

Table 2 Pressure distribution data

Inlet pressure (kPa)	Pressure position	Pressure (kPa)	
		SS-type	GS-type
100	Valve plate inlet	76.2	82.0
250	Valve plate inlet	226	232

측면부에 대한 입구 압력 250kPa 일 때의 각 부품 간의 위치와 저압부 위치를 표시한 그림을 나타내었고, Fig. 11과 Fig. 12의 (a)에는 정면부, (b)에는 측면부에 대한 입구 압력 100kPa 일 때의 각 부품 간의 위치와 저압부 위치를 표시한 그림을 나타내었다.

이 결과로 SS-type의 밸브 플레이트 흡입부에서 캐비테이션이 발생하는 원인을 확인할 수가 있었다. 같은 입구 압력에 대하여 급한 경사각을 가진 SS-type의 경우가 GS-type보다 낮은 압력이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 결국, 낮은 압력 때문에 캐비테이션이 발생함을 알 수 있다. 또한 GS-type의 경우 밸브 플레이트 흡입부에서 압력이 높게 나타나는 것은 흡입구와 밸브 플레이트 연결 부분 및 흡입 관로가 부드러운 경사각을 가진 형상이므로 보다 일정한 압력분포가 형성되기 때문인 것으로 여겨진다.

Table 2에는 SS-type과 GS-type에 대한 압력분포 중에서 캐비테이션의 발생이 우려되는 밸브 플레이트 입구부에서의 압력을 정리하였다.

4. 결론

본 연구에서 사판식 피스톤 펌프의 두 종류의 펌프 흡입구 형상을 본뜨기 모형으로 제작하여 3D 스캐닝 및 역설계 모델링하고 형상에 따른 압력분포 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흡입구 압력이 250kPa일 때, 밸브 플레이트 입구부의 압력은 GS-type이 SS-type보다 6kPa 더 높게 나타났다.

2. 흡입구 압력이 100kPa일 때, 밸브 플레이트 입구부의 압력은 GS-type이 SS-type보다 5.8kPa 더 높게 나타났다.
3. 펌프 성능시험 시 실제 캐비테이션이 나타난 SS-type의 밸브 플레이트 입구 압력이 GS-type보다 낮게 확인된 바와 같이 흡입구 형상에 따른 관로저항으로 밸브 플레이트 입구부 압력이 낮아져서 캐비테이션이 발생함을 확인할 수 있었다.

between Slipper and Swash plate in Swash plate Type Hydraulic Piston Pump,” Journal of the Korean Society of Tribologist and Lubrication Engineers, Vol. 29, No. 3, pp. 186-191, 2013.

REFERENCES

1. Lee, S. S., Chung, W. J., Lim, D. J., Cha, T. H., Kim, S. T., Lee, J. S. and Choi, K. S., "Simulation X[®]-based Modeling for Valve-Plate Notch Design of Variable Swash-Plate Axial Piston Pump,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 104~112, 2018.
2. Choi, S. R., Lee, I. Y., Han, S. M. and Shin, J. W., "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.
3. Cho, I. S., "Theoretical Analysis of the Slipper Hydrostatic Bearing Shape in the Swash Plate Type Axial Piston Pump,” Journal of The Korean Society Fluid Power Construction Equipment, Vol. 10 No. 1, pp. 14-20, 2013.
4. Ju, G. J., Seol, S. S., Kim, Y. G. and Kim, S. T., "A Study on the Load Characteristics of a Swash Plate Piston Pump Holder (Cradle) with Grooves Considering the Squeeze Effect,” Journal of Drive and Control, Vol. 17, No. 1, pp. 21-26, 2020.
5. Cho, I. S. and Jung, J. Y., "The Lubrication Characteristics According to the Rotating Radius of Piston in a Swash Plate Type Piston Pump,” Journal the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 30, No. 7, pp. 749-753, 2013.
6. Cho, I. S., "Characteristics of Lubrication