

선박 유압공급 장치용 사판식 유압 피스톤 펌프 내부 유동해석에 관한 연구

이중섭*, 이정실**, 임종학***, 곽범섭***, 이호성****, 송철기*****#

* 한국승강기대학교 승강기공학부, ** 하이에스지, *** 경상국립대학교 대학원 기계설계학과,

**** 경상국립대학교 기계융합공학과, 공학연구원, ***** 경상국립대학교 기계공학부

A Study on the Internal Flow Analysis in Swash Plate Piston Pump for Marine Hydraulic Power Supply

Chung-Seob Yi*, Jeong-Sil Lee**, Jong-hak Lim***, Beom-Seop Gwak***, Ho Seong Lee****, Chul Ki Song*****#

*School of Lift Engineering, Korea Lift Collage, **HYSG

***Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, GNU,

****Department of Mechanical Convergence Engineering, ERI, GNU,

*****School of Mechanical Engineering, ERI, GNU

(Received 27 July 2021; received in revised form 12 August 2021; accepted 9 October 2021)

ABSTRACT

In this paper, a flow analysis of a swash-plate type hydraulic piston pump installed on a hydraulic flow supply system for marine vessels is presented. A model and governing equations for computational fluid dynamics (CFD) analyses of swash-plate type hydraulic piston pumps were built, and simulation results regarding the internal flow field of the pump were obtained. By analyzing the internal flow of the swash-plate type hydraulic piston pump, we can confirm the time-dependent stroke of each piston as the pump rotates. We also verified that by analyzing the pulsating flow against the slope of the swash plate, the simulation results match well with the experimental results. The natural frequency of the system was computed to be approximately 380 Hz by applying and analyzing the fast Fourier transform (FFT) of each swash plate slope evaluated.

Keywords : Swash Plate Piston Pump(사판식 피스톤 펌프), Pulsation(맥동), Computational Fluid Dynamics (CFD, 전산유체역학)

1. 서 론

해양 선박 조선산업의 유압기술은 필수요건으로 사용되는 선박 엔진 유압펌프의 유체를 이용한 에너지 공급, 전송 분배 및 제어를 하는 기술이다. 산업군별 수요는 선박 항공 굴삭기 산업기계 등에 주로 사용되며, 유압기술의 핵심은 피스톤 펌프의

Corresponding Author : cksong@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1633, Fax: +82-55-772-1630

사판의 경사각도에 연동하여 전기적 신호 제어로 가변 조절이 가능한 기술이다.

현재 사판식 피스톤 유압펌프에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 수치해석을 통해 피스톤 펌프 내부 유동장에 대한 시뮬레이션 결과를 도출하고 있다. 특히, 개발제품에 대한 설계 검증이 많이 시도되고 있으며, 유동해석을 통한 결과를 바탕으로 실제 시제품 및 개발제품의 설계에 반영되고 있다. 또한 제조사의 경우 실험을 통해 사판식 유압 피스톤 펌프에 대한 유량 및 압력 등에 관한 설계 값을 검증하고 있다.^[1-6]

본 연구는 선박의 운항 안정성과 효율성을 충족시키기 위하여 전기적 제어와 기구적 제어를 통해 유압의 흐름이 안정적으로 흐르도록 하는데 목적이 있다. 또한 경전각의 동작이 가변 정밀 제어 및 조절이 가능해야 된다.

고압 출력을 요구하는 엔진의 연료분사 및 배기밸브의 개폐를 위해 압력 350BAR, 회전수 2600rpm, 용량 40cc/rev의 성능을 낼 수 있는 고품질, 고효율, 고성능 유압 피스톤 펌프를 개발하기 위한 선행연구로서 유동해석을 통해 사판식 피스톤 펌프의 맥동압력을 예측한 후 이를 FFT(Fast Fourier transform) 분석을 통해 고유진동수를 예측하여 설계 자료를 도출하고자 한다.

2. 사판식 피스톤 펌프

본 연구에 사용된 사판식 피스톤 펌프는 Fig. 1 과 같이 선박엔진의 유압공급장치에 사용되는 유압펌프이며, Fig. 2와 같은 형태를 나타내고 있다. 이때 사용되는 작동유의 밀도는 890kg/m³, 동점성 계수가 105mm²/s인 SAE(Society of automotive engineers) 30에 해당되는 유압유이다.

3. 유동해석

3.1 유동해석 방법

본 연구의 피스톤 펌프에 대한 내부유동해석을 수행하기 위하여 아래의 식 (1)과 (2)와 같이 연속 방정식과 운동량 방정식이 사용되었고, 온도에 대

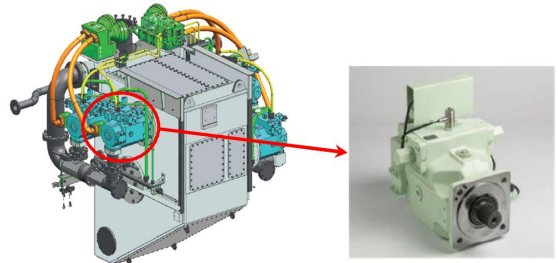
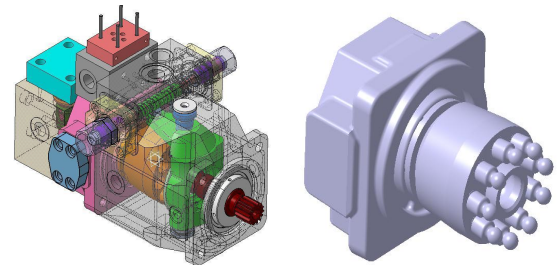


Fig. 1 The Configuration of hydraulic power supply and swash plate piston pump



(a) pump ass'y

(b) piston & cylinder

Fig. 2 The Configuration of swash plate assembly and piston & cylinder

한 변화는 관찰하지 않았기 때문에 에너지방정식을 제외되었다. (1)과 (2)의 식에서 W 는 가중치 함수, m 은 입자 질량, ρ 는 입자 밀도를 나타낸다.^[7-10]

난류모델은 Wall-Adapting Local Eddy 모델이 사용되었고, 이는 난류해석시 벽면 주변에서 해석 결과가 비교적 양호하기 때문이다. 따라서 난류모델은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 C_w 는 WALE 모델 상수이다.

(1) 연속 방정식

$$\rho_i \left(\frac{\rho}{x} \right) = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} \quad (1)$$

(2) 운동량 방정식

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nu_{ij}^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \epsilon_i^{\alpha\beta} \epsilon_i^{\alpha\beta} \quad (2)$$

(3) 난류모델

$$\nu_{turbulent} = (C_w \Delta)^2 \frac{(G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{3/2}}{(S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta})^{5/2} + (G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{5/4}} \quad (3)$$

여기서

$$S_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\alpha}{\partial r_\beta} + \frac{\partial v_\beta}{\partial r_\alpha} \right)$$

$$G_{\alpha\beta}^d = \frac{1}{2} (g_{\alpha\beta}^2 + g_{\beta\alpha}^2) - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} g_{\gamma\gamma}^2, \quad g_{\alpha\beta} = \frac{\partial v_\alpha}{\partial r_\beta}$$

3.2 유동해석 대상

사판식 유압 피스톤 펌프에 대한 유동해석을 수행하기 위하여 Fig. 3과 같이 모델링을 수행하였으며, 맥동압력을 해석하기 위하여 피스톤의 입출구 영역만 해석을 수행하였다.^[11-12]

3.3 경계조건

유동해석을 수행하기 위하여 사판이 기울어진 상태에서 유압펌프 회전이 Fig. 4와 같이 시계방향으로 회전하면서 피스톤이 왕복운동을 통해 유동이 발생되는 조건이다.

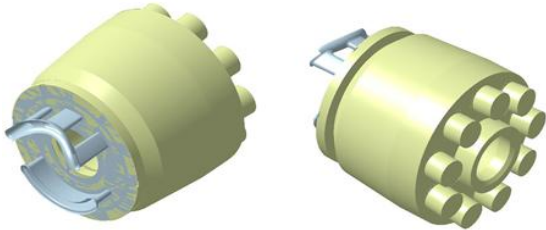


Fig. 3 The CFD internal flow analysis models

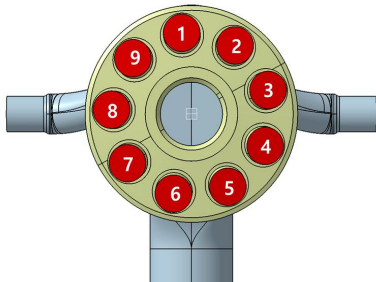
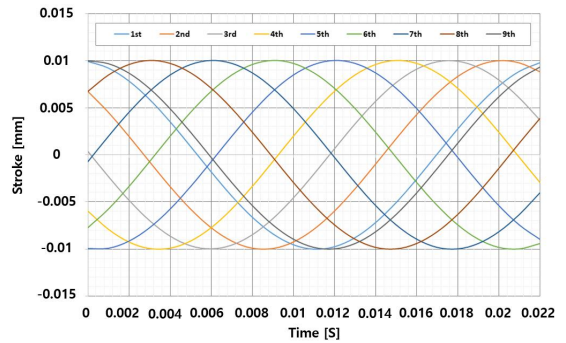


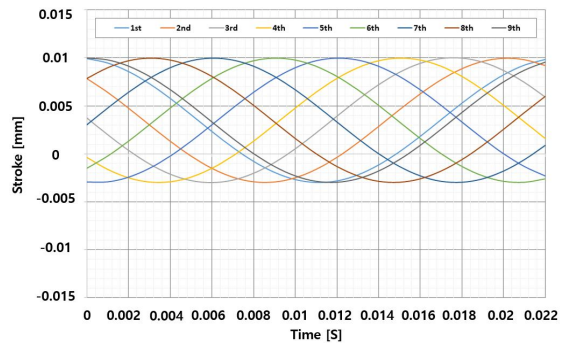
Fig. 4 The order of piston moving in hydraulic swash plate piston pump

Table 1 Value of boundary conditions

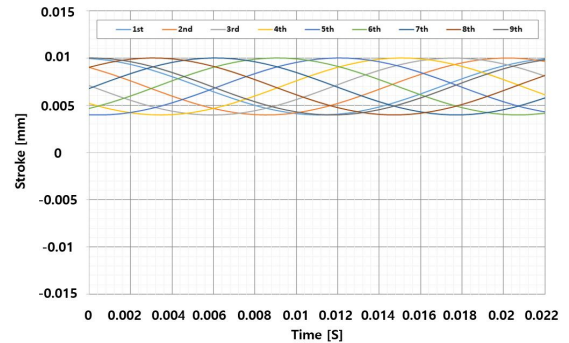
Boundary	Value
Pressure [bar]	1.5
RPM	2,600
Capacity [cc/rev.]	40
Flow rate [LPM]	104



(a) 15°



(b) 10°



(c) 5°

Fig. 5 Piston stroke change according to inclination of swash plate

Table 1은 유동해석을 수행하기 위한 압력, RPM, capacity, 유량의 경계조건을 부여하여 유동 해석을 진행하였다.

Fig. 5는 유압펌프 사판 기울기 변화에 따라 각각의 피스톤이 1번 왕복할 때 발생하는 행정을 나타내고 있다. (a)의 경우 사판의 각도가 15°일 경우 각각의 피스톤에 대한 행정을 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 1번 피스톤을 시작으로 2,600rpm으로 회전하면서 다음 피스톤으로 이동하면서 동일한 규칙으로 행정이 발생할 수 있도록 설정하였다. (b)의 경우 10°일 경우에 각각의 피스톤에 시간대비 행정을 비교한 것이다. 각도가 줄어들게 되어 피스톤의 행정이 감소하였고, 이에 대한 조건을 부여하여 유동해석을 수행하였다. (c)의 경우 5°일 경우에 대한 각각의 피스톤에 대한 행정을 비교한 것으로 사판의 각도가 감소함에 따라 행정이 급격하게 감소하였다.

3개의 사판 기울기 각도를 변수로 하여 각각의 피스톤의 행정에 대한 궤적을 경계조건으로 부여하여 유동해석을 수행하였다.

4. 유동해석 결과 및 분석

Fig. 6은 유동해석 결과 피스톤 펌프 출구에서 맥동유량을 경사각에 따라 서로 비교한 것이다. (a)의 경우 정방향 회전 15°일 경우 출구에서의 질량유량을 나타내고 있으며, 그림에서 보는 것과 같이 약 1.5kg/s를 기준으로 맥동유량이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

(b)는 정방향 회전 10°일 경우 출구에서의 질량유량을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 맥동유동이 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 약 1.0 kg/s의 토출유량을 발생하는 것을 확인할 수 있었다. (c)는 정방향 회전 5°일 경우에 출구에서의 질량유량을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 약 0.35kg/s 근처에서 맥동유량이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2는 사판식 유압 피스톤 펌프에 대한 개발제품의 토출유량을 측정하여 경사각 비율에 따라 비교한 결과이다. 이를 Fig. 7으로 토출유량을 질량유량으로 환산하여 비교하였으며, 실험결과를

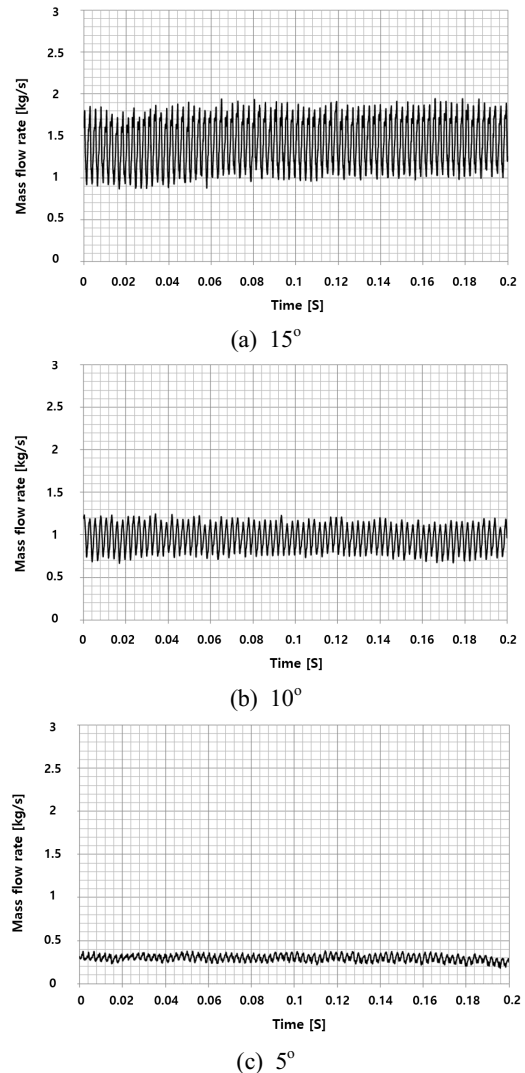


Fig. 6 Results of pulsation mass flow rate at piston pump outlet

Table 2 Experiment results of flow rate for Swash Plate Type hydraulic Piston Pump

Ratio of angle	Flow rate	
	LPM	kg/s
10% (1.5°)	10.4	0.154
25% (3.75°)	26	0.386
50% (7.5°)	52	0.771
75% (11.75°)	78	1.157
100% (15°)	104	1.542

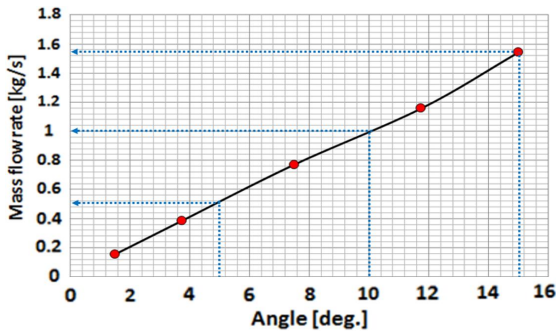
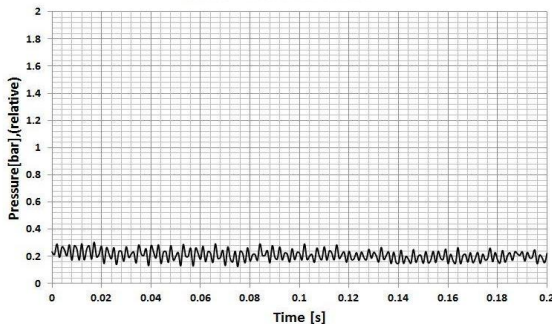
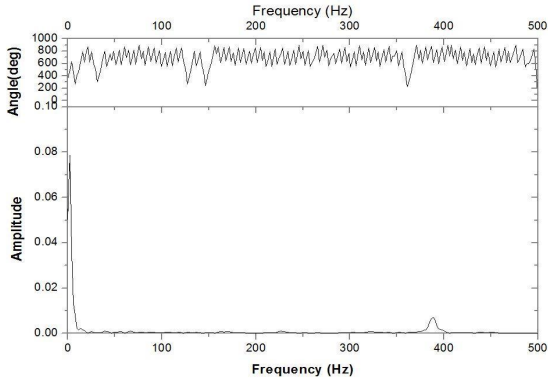


Fig. 7 Comparison of experimental and CFD results



(a) pressure

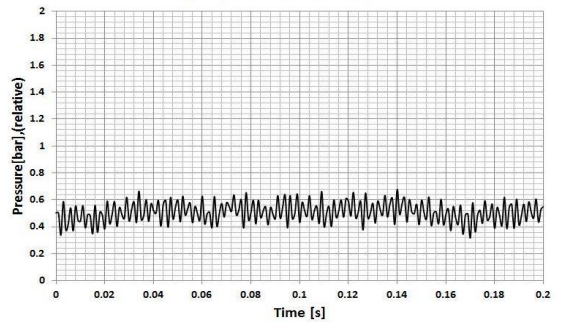


(b) FFT

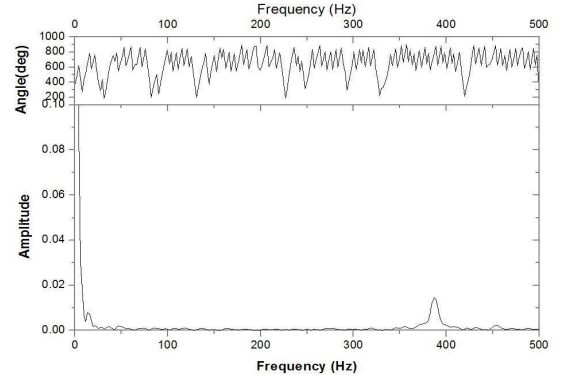
Fig. 8 Results of pulsation pressure and FFT analysis at 5°

그래프로 나타내었고, 수치해석 결과인 각도 5°, 10°, 15°일 경우에 대하여 각각의 각도에 대한 유량 결과가 유사하게 나타남을 확인하였다.

Fig. 8(a)는 정방향 회전 5°일 경우 출구에서의 맥동압력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과



(a) pressure



(b) FFT

Fig. 9 Results of pulsation pressure and FFT analysis at 10°

같이 약 0.2bar를 기준으로 맥동압력이 발생되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이를 FFT 분석한 결과 (b)와 같이 나타낼 수 있었다.

그림에서 보는 것과 같이 약 380Hz에서 고유진동수가 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 압력에 의한 진폭은 약 0.01 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9(a)는 정방향 회전 10°일 경우 출구에서의 맥동압력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 5도일 경우에 비해 압력이 증가되는 것을 확인할 수 있었고, 약 0.3bar 정도 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 맥동압력의 진폭이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 FFT 분석한 결과 (b)와 같이 나타낼 수 있었다. 펌프의 회전수가 동일하기 때문에 380Hz에서 맥동압력에 따른 공진 주파수가 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 이 때

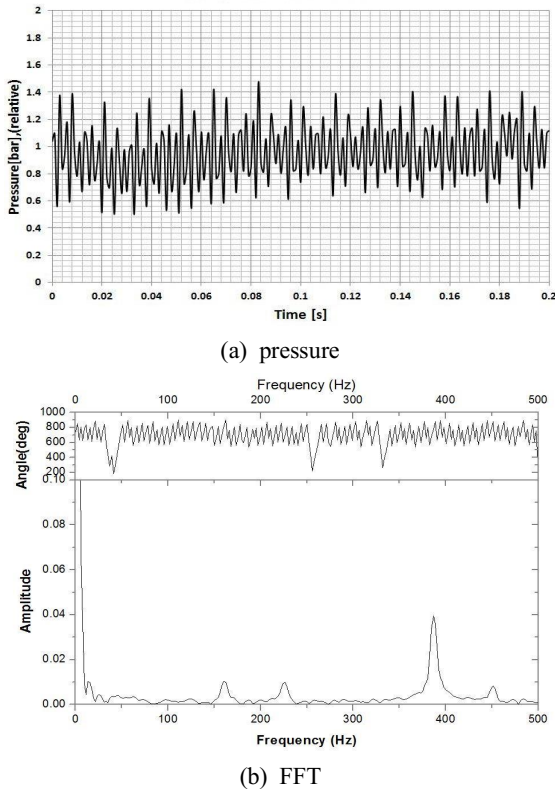


Fig. 10 Results of pulsation pressure and FFT analysis at 15°

약 0.02의 진폭이 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 각도 5°일 경우에 비해 약 2배 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10 (a)는 정방향 회전일 경우 각도 15°일 경우 출구에서의 맥동압력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 5°와 10°일 경우에 비해 맥동의 진폭이 크게 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 압력의 경우 5°일 경우에 비하여 압력이 약 0.8bar 증가되었고, 10°에 비해 약 0.5bar 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 맥동압력의 진폭이 증가되는 것을 확인할 수 있는데 이를 FFT 분석한 결과 (b)와 같이 나타낼 수 있었다. 15°의 경우 또한 펌프의 회전수가 동일하기 때문에 380Hz에서 맥동압력에 따른 공진주파수가 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 이 때 약 0.04의 진폭이 발생함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

선박용 유압공급장치에 설치되는 사판식 유압 피스톤 펌프에 대한 내부유동해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

사판식 피스톤 펌프가 회전하면서 발생하는 각 피스톤별 시간에 대한 행정을 알 수 있었고, 사판의 기울기에 따른 맥동유량을 유동해석한 결과 실험결과와 매우 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 맥동압력에 대한 결과의 경우 각 기울기에 대한 FFT 분석을 통해 약 380Hz의 고유진동수를 확인할 수 있었다.

FFT 분석을 통해 얻은 고유진동수로 유압 피스톤 펌프 설계에 있어 주변 물체와의 공진을 방지하는 공진 회피 설계가 가능하다.

후 기

본 논문은 2019년도 한국산업단지공단 생산기술 사업화지원사업 현장맞춤형 기술개발 사업의 지원에 의해 연구되었음

REFERENCES

1. Kim, B. H., Ahn, K. C., Chung, S. W., and Kim, Y. H., "Development of the Linear Piston Pump Driven by the Hydraulic Power for the Solid Transferring", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 3, pp. 82-89, 2009.
2. Yi, C. S., Suh, J. S., Song, C. K., Shin, Yun. J. H., and Chung, K. T., "A Study on the Flow Characteristic of Lubrication Oil System in Manual Transmission System for Large Commercial Vehicle", Journal of Korean Fluid Machinery and Systems, Vol. 13, No. 6, pp. 77-82, 2010.
3. Kim, D. M., Kim, S. D., Gu, J. S., and Oh, S., "Design of a Gerotor Pump and Experimental Investigation of its Volumetric Displacement Characteristics", Journal of Korean Society of

- Mechanical Engineers A, Vol. 35, No. 11, pp. 1383-1389, 2011.
4. Lee, J. W., Moon, J. S., Kim, J. G., Sung, K. K., and Kim, H. M., "Acoustic Structure Interaction Analysis of the Core Support Barrel for Pump Pulsation Loads", Journal of Korean Society of Mechanical Engineers C, Vol. 5, No. 2, pp. 127-134, 2011.
 5. Kim, J. H., Shin, M. J., and Kim, M. K., "A Study on Structural Improvement of the Swashplate Axial Piston Pump Valve Block (1)", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 69-75, 2018.
 6. Kim, J. H., Shin, M. J., and Kim, M. K., "A Study on Structural Improvement of the Swashplate Axial Piston Pump Valve Block (2)", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 76-81, 2018.
 7. Cho, Y. H., Lee, T. K., and Lee, Y. W., "A Study on the Flow Characteristic for Changing of Flow Region of the Motor Inserted Oil Pump", Journal of Korean Society of Power System Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 23-31, 2012.
 8. Choi, S. R., Lim, J. C., and Lee, I. Y., "Pressure Pulsation Characteristics of a Multiple-Delivery Radial Piston Hydraulic Pump", Journal of Korean Society of Fluid Power and Construction Equipments, Vol. 11, No. 2, pp. 1-8, 2014.
 9. Lee, Y. B., "A Study of the Life Test of Hydraulic Pump Driving Gear Box for the Large Excavator", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 3, pp. 211-216, 2015.
 10. Hong, H. J., Ji, H. S., and Kim, K. C., "PIV Measurement of Pulsatile Flows in 3D Curved Tubes Using Refractive Index Matching Method", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 40, No. 8, pp. 511-517, 2016.
 11. Sa, J. W., Chung, W. J., Bae, J. H., and Lee, J. M., "Pulsation According to Pre-Compression Sections and Valve Plate Design for a Swash Plate Type Piston Pump", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 25, No. 1, pp. 89-95, 2016.
 12. Zhen, Q., Wu, Y. T., Kim, D. S., Kim, S. B., and Lyu, S. K., "Study on Design of Hydraulic Pump with High Temperature and High Pressure Resistance for Cable-Stayed Bridge", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 118, No. 11, pp. 109-114, 2019.