

1-D 시뮬레이션을 통한 피벗 타입 가변오일펌프 해석에 대한 연구

이진우
울산과학기술대학교 기계공학부

Performance Analysis of Pivot-type Variable Displacement Vane Oil Pump with 1-D

Jin-Woo Lee
School of Mechanical Engineering, Ulsan College

요약 가변오일펌프는 펌프의 로터와 스테이터 간의 편심을 조절을 통해 엔진 운전 속도와 무관하게 오일 토출 압력 및 유량을 제어할 수 있다. 따라서 기존 펌프 대비하여 불필요한 동력 소모 저감을 통한 차량 연비 개선 가능성이 높아, 효율개선을 위한 차량개발 요소기술로서 관련 연구가 지속되고 있다. 또한 최근 엔진 개발에 소요되는 시간 및 비용의 효율성을 개선하기 위해 선행단계에서 1D 모델 시뮬레이션 기반 성능예측 기술을 활용하는 벡추얼 개발의 중요성이 높아지고 있다. 이에 본 연구에서는 오일 온도 변화에 따른 가변오일펌프의 성능을 예측할 수 있는 1D 모델을 구성하여 이를 향후 엔진 구동계를 모사할 수 있는 1D 모델의 요소로서 전체 시스템 소모 동력 파악에 활용할 수 있도록 하였다. 본 모델은 AMESim을 활용하여 유압 특성 모사 부분과 제어 신호 부분으로 구분하여 구성하였으며, 펌프 토출 면적, 편심 및 구동 토크 계산 시에는 자체 모델을 개발하여 해석에 활용하였다. 특히, 펌프 내부에서 발생하는 누유를 내부 및 외부로 구분하여 모델에 반영하여 펌프 토출유량 모사 정확도를 개선하였다. 또한 펌프 내부의 다양한 마찰 발생 영역을 구분하여 마찰력을 계산할 수 있는 모델을 구성하여 펌프의 토크 계산 오차수준을 향상시켰다. 결과적으로 정상 상태 운전 조건에서 펌프 회전속도에 관계없이 토출유량을 3%, 토크를 8% 이내의 오차로 모사할 수 있는 모델을 완성하였으며, 본 모델을 활용하여 오일온도 변화에 따른 토출유량, 구동토크 및 체적효율 변화 수준을 예측할 수 있었다.

Abstract Variable displacement vane oil pumps control the discharge pressure and flow rate regardless of the engine operating speed by controlling the eccentricity between the rotor and stator. Therefore, research on this type of pump is in progress because of its high likelihood of improving fuel economy. The need for advanced research with 1D simulations is in demand to enhance the efficiency in terms of time and cost to deal with the increasing complexity of the engine development process. This research aimed to establish a robust 1D model to estimate the performance, such as discharge flow rate and torque, with the change in oil temperature. This model consists of a hydraulic and control signal part. An in-house model was developed to calculate the discharge flow area, eccentricity, and operating torque of the pump. The accuracy for discharge flow was improved with the help of leakage modeling considering both internal and outlet lead passage. In addition, the calculation model considering various types of friction torque made the simulated output for torque prediction more accurate. As a result, the final model showed an accuracy of approximately 97% and 92% compared with the experiment regarding discharge flow rate and torque, respectively, regardless of the pump speed under steady operating conditions. These results confirmed the possibility of estimating the discharge flow rate, operating torque, and volumetric efficiency regarding oil temperature.

Keywords : 1D Simulation, AMESim, Variable Displacement Vane Oil Pump, Discharge Flow Rate, Operating Torque, Oil Temperature

본 논문은 울산과학기술대학교 교내연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jin-woo Lee(Ulsan College)

email: jwlee2@uc.ac.kr

Received November 4, 2022

Revised December 1, 2022

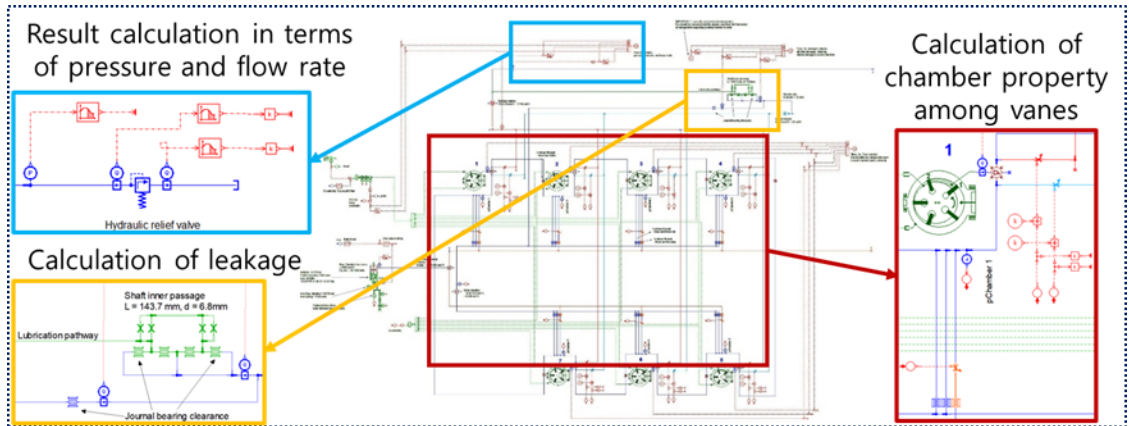
Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

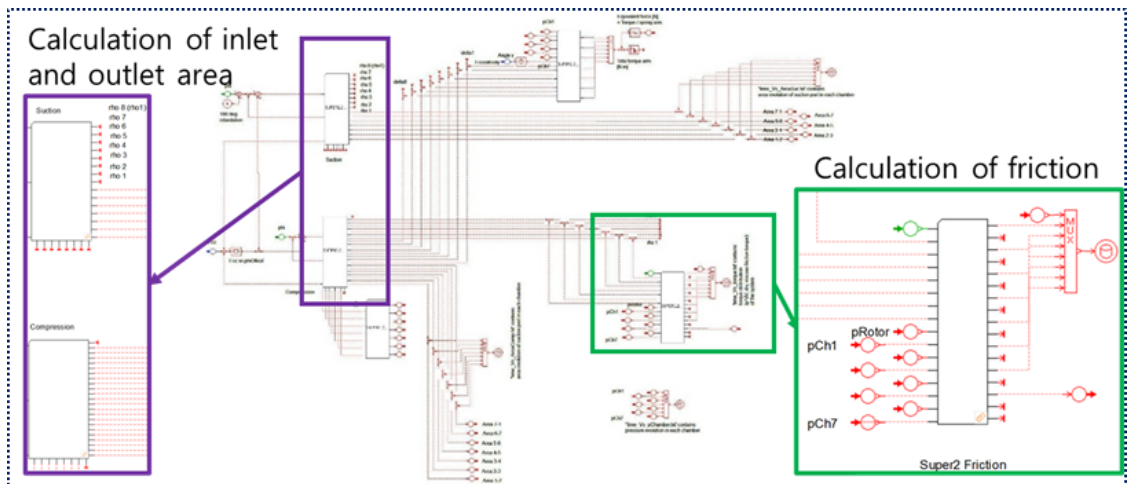
1. 서론

최근 수송 분야에서 탄소 중립에 대한 요구가 높아지고 있어, 내연기관에서도 CO₂ 저감을 위한 지속적인 효율 개선 기술 개발이 진행되고 있다. 연소계를 구성하는 하드웨어 최적화를 통한 연소개선 관련 연구도 있으나 [1,2], 내연기관 구동계에서 발생하는 손실 저감을 통한 시스템 효율 향상을 위해 엔진의 윤활 및 냉각을 목적으로 적용되는 오일펌프의 개선을 위한 연구도 활발히 진행되고 있다[3-7]. 기존에는 엔진의 내구성 확보를 우선으로 고려하여 고속, 고온 및 고부하 운전 조건으로 오일펌프를 개발하였으나, 이 경우, 실 운전 조건인 부분 부하 영역에서는 펌프 유량이 과도하여 손실이 발생한다

[4]. 이에 대한 해결 방안으로 운전 조건에 따른 편심제어를 통해 최적의 오일유량을 공급하며, 유압제어 범위 및 자유도가 높은 전자 제어 방식의 가변오일펌프 적용을 통해 연비개선을 시도한 연구가 진행되어 오고 있다 [5-7]. 다만 실험 기반 연구는 주로 기존 기계식 로터 오일펌프와 엔진 구동 조건에서의 오일압력 특성 및 연비 성능 평가를 통한 가변오일펌프의 적용 가능성에 대한 제시에 그치고 있다[4]. 또한, 시뮬레이션을 활용한 연구는 주로 3D CFD를 통해 가변오일펌프 단품에 대한 효율, 케이테이션 발생 등의 유동 특성 분석 및 맥동압 개선을 위한 설계 개선안을 제시하고 있다[6,8]. 이러한 3D 모델에 기반한 접근은 유온 변화 등을 고려한 펌프 성능 개선 설계 검토 등에는 시간 및 비용 관점에서 불리



(a)



(b)

Fig. 1. Overall AMESim sketch of Hydraulic part (a) and Control and signal part for variable displacement oil pump (b)

하여 최근 1D 기반 모델을 활용한 연구가 진행되고 있다 [9,10]. 다만, AMESim, GT-Power 등의 상용소프트웨어는 엔진 구동 시스템을 구성하는 주요 부품들에 대한 1D 모델을 통합적으로 구성하여 연비 및 성능을 평가하는데 유용한 것으로 알려져 있는데 [11,12], 피벗 타입 가변오일펌프를 해당 목적을 위해 적용한 연구는 미미한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 피벗 타입 가변오일펌프를 AMESim을 기반으로 운전조건에 따른 오일토출유량, 구동토크 등의 성능을 예측할 수 있는 1D 모델을 구성하여 향후, 엔진 개발 시 최적 시스템을 구현하는데 활용하고자 한다.

2. 1D 모델, 실험장치 및 조건

2.1 1D 모델

가변오일펌프에 대한 1D 모델 구성을 위해 AMESim 상용소프트웨어를 활용했다. AMESim은 멀티 도메인 제어 시스템을 모델링, 시뮬레이션 및 해석하는 기능을 제공하는 프로그램으로 유체, 열역학, 전기 분야 및 신호처리를 위한 다양한 모델을 제공하는 장점이 있어 유압분야 시스템 해석에 널리 활용되고 있다[13]. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 유압부분과 제어 및 신호 부분으로 AMESim 모델을 구성하였다. 유압부분은 펌프의 베인간 챔버의 유체역학적 속성을 정의하기 위해 작성되었으며, 제어 및 신호 부분은 토출, 흡입 면적, 편심도 및 마찰 등을 계산하기 위한 서브모델로 구성되었다. AMESim에서 제공하는 기본 베인타입펌프 모델을 기반으로, 피벗 타입으로 작동하는 특성을 모사하기 위한 별도의 서브모델을 작성하여 반영하였다. 최종적으로 유압부분과 제어 및 신호 부분 간의 계산을 통해 모터 회전 속도 및 유온 변화에 따른 출력값으로써 토출유량, 압력과 펌프 효율 등을 확인할 수 있도록 최종 모델을 도출하였다.

2.2 실험 장치 및 조건

가변오일펌프 모델의 검증에 위한 실험 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 펌프 운전 조건에 따른 토출 유량, 토출 압력 및 편심량을 유압라인과 센서류를 통해 측정하였다. 측정된 결과는 동일 조건에서 실행된 AMESim 기반의 1D 가변오일펌프 모델의 성능평가 결과와 비교하여 모델 개선 방향 설정에 활용하였다.

Table 1에 실험과 시뮬레이션에 적용한 조건을 나타

내었다. 내연기관 용 베인펌프에서 주로 적용되는 조건을 기반으로[8], 펌프 회전 속도 및 출구단 압력을 변경하여 그에 따른 유량과 구동토크 결과를 비교하였으며, 최종 토출 모델을 활용하여 오일 온도 변화에 따른 유량 특성을 파악하였다.

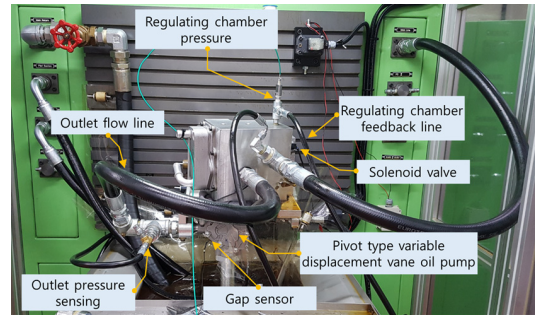


Fig. 2. Overall experimental setup of variable displacement oil pump for the measurement of pump outlet flow rate, pressure and eccentricity.

Table 1. Experimental and simulation conditions for validation of variable displacement vane oil pump

Pump speed [rpm]	2000, 3000, 4000
Pump outlet pressure [bar]	0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
Oil temperature [°C]	30, 90, 140

3. 연구 결과 및 논의

3.1 1차 1D 모델 구성

모델 구성에 활용한 AMESim은 가변오일펌프에 대한 기본 라이브러리를 제공하고 있다. 오일펌프의 아우터링과 회전축 간의 거리인 편심 제어를 통해 용량 변화를 발생하는데, 기본 모델은 토출압력과 스프링력에 의한 힘의 평형을 조절하여 편심을 제어한다. 하지만, 본 연구의 대상인 피벗 타입 베인펌프는 기본 모델만으로는 정확한 펌프 작동을 모사하기는 어렵다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 편심을 피벗을 기준으로 아우터링이 회전하도록 하여 변화시키는 작동구조를 가지고 있기 때문이다. 이를 해결하기 위해 피벗을 중심으로 스테이터의 회전에 따른 상대 좌표 및 베인 별 흡입 및 토출 시의 유동 면적을 펌프 구동과 함께 실시간으로 계산할 수 있는 모델을 구성하여 기본 모델에 반영할 필요성이 있다. 이를 위해

첫 단계로 Fig. 4의 왼편과 같이 펌프 내부의 기하학적 구조를 분석하였다. 이를 통해 피벗 각도에 따른 상대좌표의 이동각을 도출하였고, 이 상대좌표에 따른 포트 시작지점의 각도와 끝지점 각도를 Fig. 4의 오른편에 나타낸 예시와 같이 구해낼 수 있다. 이를 활용하여 스테이터의 회전에 따른 베인의 위치를 반영한 유로의 면적을 Eq. (1)과 같이 계산할 수 있었다.

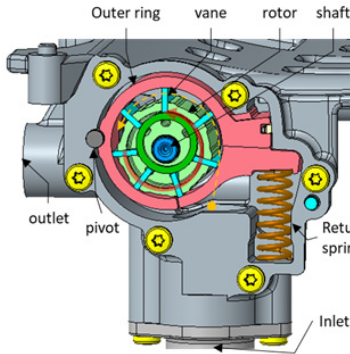


Fig. 3. Diagram for pivot type vane pump

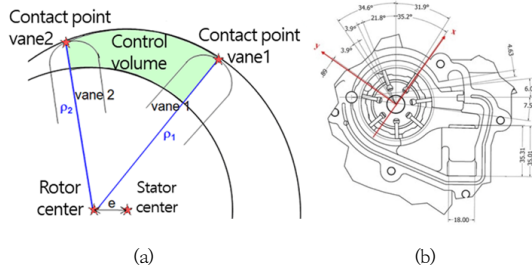


Fig. 4. Geometrical analysis of pivot type vane pump for flow area calculation (a) and example of relative coordinate calculation for port begin and port end (b)

$$Area = \int_{\phi_B}^{\phi_2} \left[\rho^2 - \left(\frac{D_r}{2} \right)^2 \right] \cdot d\phi \quad (1)$$

where, ϕ : angle between x axis of relative coordinate and vane, ρ : distance between rotor center and contact point with delivery rim, D_r : diameter of delivery rim

위 기술한 사항은 AMESim에서 제공하는 기본 펌프 모델에 베인 별 흡입 및 토출 유량을 모사할 수 있는 서브 모델 요소를 구성하여, 개별 신호를 입력값으로 하여 면적을 도출할 수 있는 계산 모델을 Fig. 5와 같이 추가하였다.

또한, 펌프의 실제 토출 유량은 설계치수에 의해 결정되는 배제용적 외에 펌프 내부의 챔버에서 발생하는 누유와 저널 베어링 부의 틈새(clearance)에서 생성되는 윤활관점의 외부 누유를 고려해야한다. 오리피스를 이용하여 Fig. 6(a)와 같이 차압 및 오리피스 길이에 따라 레귤레이팅 챔버 및 로터 챔버로 누유되는 유량을 계산할 수 있도록 하였다. 또한 축 내부 유로와 저널 베어링 부의 틈새를 오리피스로 나타내어 외부누유를 모사할 수 있도록 Fig. 6(b)와 같이 구성하였다.

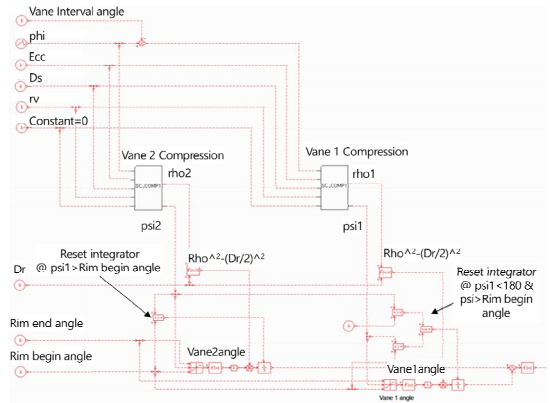


Fig. 5. AMESim diagram for the calculation of flow area of pivot type vane pump

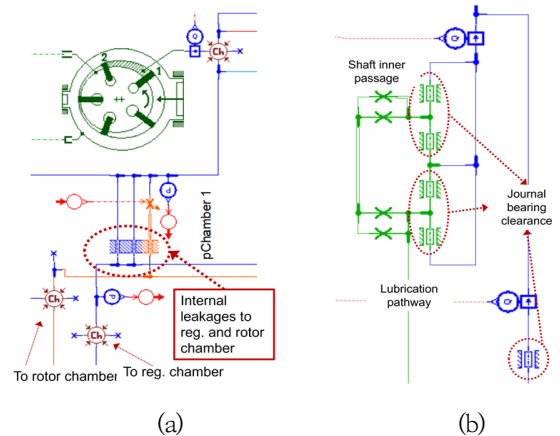


Fig. 6. AMESim sketch of internal leakage (a) and outlet leakage (b)

3.2 초기 1D 모델 결과 분석 및 모델 개선

베인펌프의 주요 치수와 작동 특성피벗 타입 베인펌프의 주요 치수와 작동 특성을 모사하여 작성한 1차 모델을 기반으로 시뮬레이션한 결과를 펌프 회전속도에 따라 토출압력과 유량, 그리고 토크 관점으로 실험 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 토출압력 별토출 유량은 실험결과를 3% 수준 이내로 모사하여 1차 모델의 유량 예측 수준은 우수한 것을 확인할 수 있었다. 다만, 토출압력 고정조건에서 펌프의 토크는 실험과 시뮬레이션의 오차가 최대 45% 수준으로 발생하여 출력 성능을 모사하는데 한계를 보였다. 이는 펌프의 체적효율은 펌프 내 누유와 관계가 있고, 기계적 효율은 마찰에 의한 손실과 연관이 있는데, 1차 모델에서는 마찰에 대한 고려가 없었기 때문에 판단된다[13]. 1차 모델은 Fig. 8(a)에 도식화 한 것처럼 베인 간 압축 챔버 내 발생하는 압축력 ($\sum F_{ch,vane}$), 레귤레이팅 챔버에 가해지는 압력에 의한 힘($F_{ch,reg}$), 스프링에 의한 복원력(F_{spring}) 그리고 스테이터 무게에 의한 중력(mg) 간의 평형 관계를 Fig. 8(b)와 같이 단순 레버시스템 이용하여 펌프 토크를 도출할 수 있도록 구성하였다.

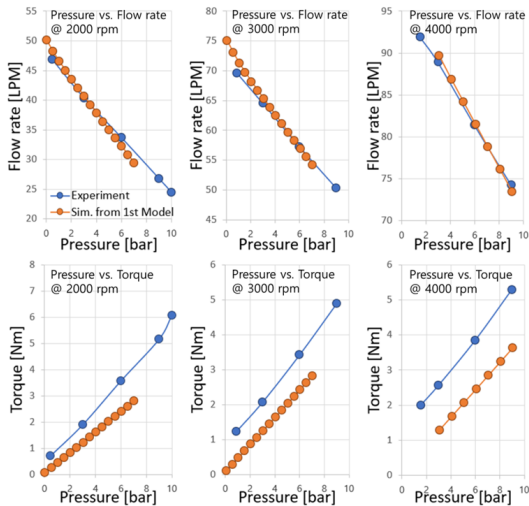


Fig. 7. Comparison of experiment and simulation with 1st model for flow rate and torque with oil pressure of pump outlet under different pump speed (2000, 3000, 4000 rpm)

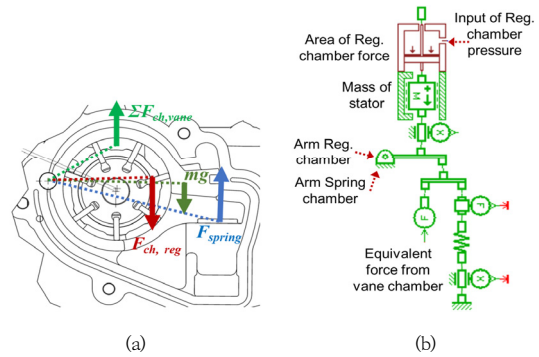


Fig. 8. Side view and top view of geometrical schematic for various type of friction calculation of pivot type vane pump

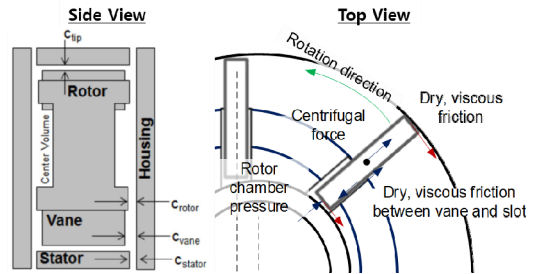


Fig. 9. Side view and top view of geometrical schematic for various type of friction calculation of pivot type vane pump

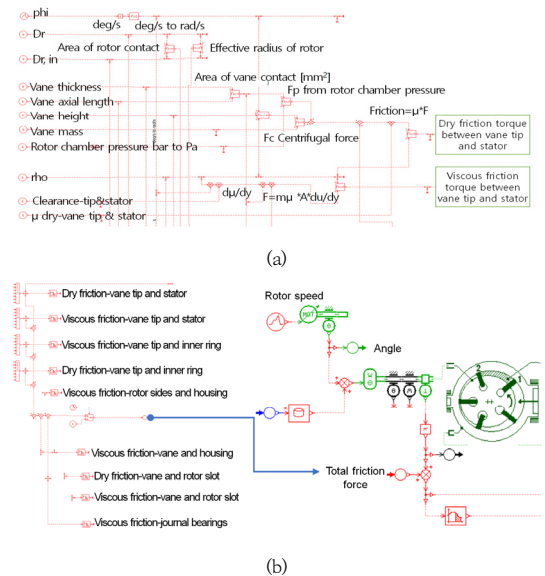


Fig. 10. Sample of AMESim diagram for calculation of friction torque (a) and AMESim sketch for torque calculation with regarding friction force inside pump (b)

모델의 개선을 위해 펌프 내에서 발생하는 마찰의 유형을 Fig. 9와 같이 베인 팁과 스테이터 간 건조마찰과 점성마찰, 베인 팁과 내부 링 간의 건조마찰과 점성마찰, 로터 측면과 하우징 간의 건조마찰과 점성마찰, 베인과 하우징 간의 점성마찰, 베인과 슬롯 간의 건조마찰과 점성마찰, 저널베어링의 점성마찰로 구분하여 모델에 반영하였다[10]. Fig. 10(a)는 베인 팁과 스테이터 간 건조마찰과 점성마찰에 의한 토크를 계산하기 위해 작성한 AMESim의 스케치이다. 해당 영역의 치수와 면적을 계산하고 건조마찰계수와 점성계수를 통해 마찰력을 구해낼 수 있다. Fig. 9에 제시된 개별 마찰을 계산한 한 값을 Fig. 10(b)의 왼편에 나타낸 바와 같이 모두 합산하여, 유체의 토출과 가압에만 요구되는 토크를 압력과 부피로 계산할 수 있는 기존 모델에 반영될 수 있도록 Fig. 10(b)의 오른편과 같이 수정하였다.

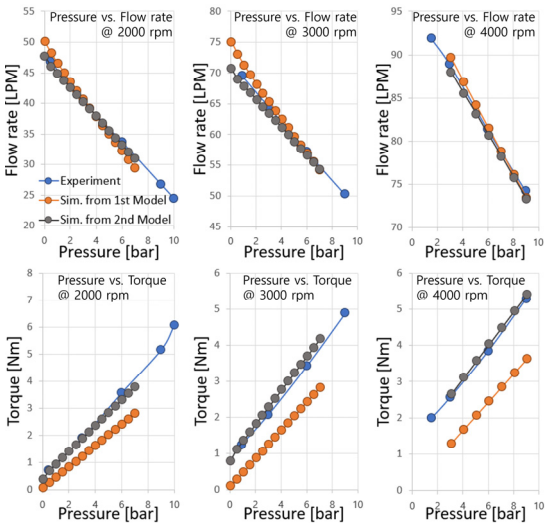


Fig. 11. Comparison of result of experiment, 1st and 2nd simulation for flow rate and torque for oil pressure under different pump speed (2000, 3000, 4000 rpm)

3.3 개선 모델 평가 결과

펌프 구동 시 발생하는 마찰력 성분을 모사하도록 개선한 모델을 실험결과와 초기 모델의 결과를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 펌프 생성 유량은 실험값 대비 오차 수준은 3% 이내로 여전히 우수한 예측 성능을 보였다. 또한 토크의 경우, 1차 모델에서는 실험값과 최대 45%수준의 오차를 보였으나, 펌프 내 마찰 현상 모델을 추가한 결과 모든 평가 조건에서 오차 수준이 8% 이내로

감소한 결과를 확인하였다.

펌프 성능 예측 수준이 확보된 2차 작성 모델을 기반으로 오일 온도 변화에 따른 펌프 성능 변화를 체적효율 관점에서 확인하기 위해 오일온도가 30, 93, 140℃ 조건에서 시뮬레이션 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 펌프 회전속도에 관계없이 오일온도가 낮아짐에 따라 체적효율이 높아지는 경향을 보였다. 펌프의 체적효율은 펌프의 배제용적에 따른 이론유량과 실제 유량의 비로 정의되기 때문에 오일온도에 따라 변화되는 인자는 실제 유량이다. 오일온도가 낮아짐에 따라 오일의 점도가 낮아져 펌프 내 간극을 통한 누설량이 적어지고, 이로 인해 실제 토출유량은 증가하여 체적효율이 상승한 것으로 판단된다.

향후, 본 연구를 통해 완성도가 검증된 피펫 타입 가변오일 펌프의 모델을 1D 모델 기반으로 구성된 엔진 시스템과 연동하여 외기온 등의 외부 인자를 포함한 다양한 운전 조건에서 기존 펌프 대비 연비 등 성능 개선에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 도출할 계획이다.

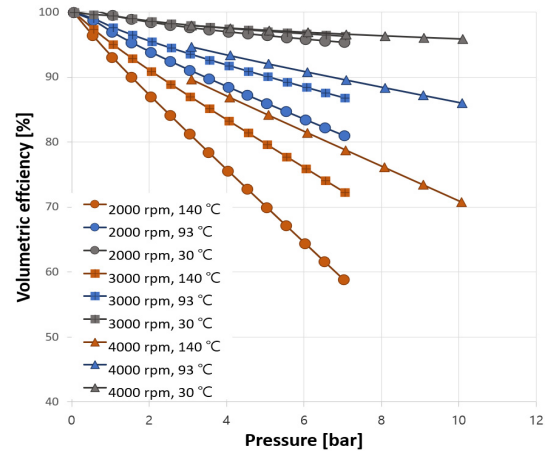


Fig. 12. Comparison of volumetric efficiency for different oil temperature with pump speed of 2000, 3000, 4000 rpm based on the 2nd simulation model

4. 결론

본 연구에서는 피펫 타입 가변오일펌프를 펌프 운전조건에 따른 토출유량, 구동토크 및 체적효율 등을 도출할 수 있는 1D 모델을 구성함에 있어 고려해야할 사항들과 그 영향에 대해 살펴보았다. 주요 결과는 아래와 같다.

- 1) 모델 구축의 대상인 피펫 타입 가변오일펌프의 작동 성능 모사를 위해 AMESim 1D sw를 활용하였

으며, 초기 모델 구성 시 기본 라이브러리를 기반으로 스테이터의 회전에 따른 상대 좌표 및 베인 별 흡입 및 토출 시의 유로의 면적을 펌프 구동과 함께 실시간으로 계산할 수 있는 모델을 별도로 작성하였다.

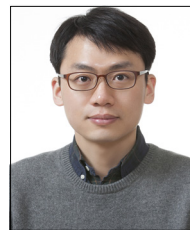
- 2) 모델의 정확도 개선을 위해 펌프의 구동 시 발생하는 마찰 현상을 6가지로 구분하여 펌프의 상세 치수를 기반으로 실시간으로 계산할 수 있는 서브모델을 추가하였다.
- 3) 최종 도출된 모델은 실험 결과와 비교 시, 토출 유량 관점으로 3%이내, 구동 토크 관점으로 8% 이내 수준의 정확도를 가지며, 오일온도에 따른 점도 변화에 따라 펌프 내 누설량 변화로 체적효율에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

References

- [1] L. Teodosio, D. Pirrello, F. Berni, V. Bellis, R. Lanzafame, "Impact of intake valve strategies on fuel consumption and knock tendency of a spark ignition engine", *Applied Energy*, Vol. 216, pp. 91-104, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.032>
- [2] G. H. Bae, S. S. Choi, S. W. Lee, S. S. Moon, J. Wang, K. H. Kim, J. W. Lee, J. S. Kang, "Experimental Investigation of Fuel Temperature Effects on Transient Needle Motion and Injection Velocity of Solenoid Type Diesel Injector", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 181, 121838, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121838>
- [3] H. B. Moon, H. H. Cho, "Performance Simulation Flow Control Oil Pump for Auto Transmission According to Rotating Speed", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 5, pp. 3044-3050, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.5.3044>
- [4] H. J. Kim, H. S. Ha, J. H. Kang, S. D. Oh, J. B. Kim, T. S. Oh, "Characteristics of Oil Pressure and Fuel Consumption on the Variable Oil Pump" *Proceedings of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, South Korea*, pp. 247-248, 2014. 10.
- [5] S. H. Lee, D. S. Moon, S. H. Bang, H. Y. Kang, S. S. Pae, S. M. Cho, "Development of Continuously Contolled Variable Oil Pump System" *Proceedings of The Korean Society of Automotive Engineers, South Korea*, pp.254-260, 2013. 11.
- [6] D. Wang, H. Ding, Y. Jiang, X. Xiang, "Numerical Modeling of Vane Oil Pump with Variable Displacement", SAE 2012 World Congress & Exhibition, SAE Tech. Paper 2012-01-0637, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0637>
- [7] G. Reddy, K. Annamalai, C. Naiju, "Modelling and Analysis of Variable Displacement Oil Pump for Automobile Applications", *International Conference on Advances in Design, Materials, Manufacturing and Surface Engineering for Mobility*, SAE Tech. Paper 2018-28-0080, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-28-0080>
- [8] T. Kim, K. Moon, "Numerical Approaches of a Variable Displacement Vane Pump to Improve Fuel Economy", *International Conference on Advances in Design, Materials, Proceedings of The Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 463-471, 2013.
- [9] S. Iwasaki, K. Nunami, M. Yoshida, T. Masuhisa, S. Kondo, T. Abekura, H. Nishizawa, "Model-Based Development Design for a Continuously Variable Discharge Oil Pump Design", *WCX SAE World Congress Experience*, 2019-01-0764, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0764>
- [10] J. Harrison, R. Aihara, M. Eshraghi, I. Dmitrieva, "Modeling Engine Oil Variable Displacement Vane Pumps in 1D to Predict Performance, pulsation and Friction", *SAE World Congress & Exhibition*, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1086>
- [11] M. Palmisano, *A Numerical Study on Fuel Consumption Reduction for a SI Engine Passenger Car Equipped with an Electrically Assisted Turbocharger*, Master's thesis, Politecnico Di Torino, Italy, pp. 22-26.
- [12] M. Tadros, M. Ventura, C. Soares, "Optimization procedure to minimize fuel consumption of a four-stroke marine turbocharged diesel engine", *Energy*, Vol. 168, pp. 897-908, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.146>
- [13] J. H. Kim, J. W. Lee, K. H. Kim, "Numerical Study on the Effect of Fuel Viscosity and Density on the Injection Rate Performance of a Solenoid Diesel Injector based on AMESim", *Fuel*, 256, 115912, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115912>
- [13] A. Esposito, *Fluid Power with Applications*, p.709, Pearson, 2009, pp.195-197.

이진우(Jin-Woo Lee)

[정회원]



- 2005년 2월 : KAIST 기계공학부 (공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 8월 ~ 2015년 1월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

에너지 시스템, 연소시스템, 친환경 시스템