

굴삭기 엔진용 저압연료펌프 유체의 유동변화에 대한 수치해석적 연구

†이일권·김승철*

대림대학교 자동차공학과, (주)이노비*
(2015년 9월 16일 접수, 2015년 11월 19일 수정, 2015년 11월 20일 채택)

A Study for Numerical Analysis of Flow Variation on Low Pressure Fuel Pump Fluid using Excavator Engine

IL Kwon Lee[†] · Seung Chul Kim*

Department of Automotive Engineering, Daelim University College, *INNOBE
(Received September 16, 2015; Revised November 19, 2015; Accepted November 20, 2015)

요약

이 논문은 굴삭기 엔진용 저압연료 펌프의 연료 유동에 대한 유동장 및 속도, 압력에 관하여 수치해석 방법을 적용하여 연구한 것이다. 연료 펌프의 압력 분포는 로터의 회전각도에 따라 연속적으로 변하며, 특히 회전각도 40°에서 상대적으로 매우 높은 토출부 압력과 낮은 흡입부 압력이 동시에 발생함을 확인하였다. 또한, 이 각도에서 누설유동 유속이 가장 증가함을 알 수 있었다. 그리고 연료 펌프의 로터 회전수의 증가에 따라 평균토출유량이 선형적으로 증가하였고, 간극크기가 감소함에 따라 토출유량이 로터 기어 사이의 배제용적으로부터 계산된 이론적 토출유량 0.0712kg/s으로 접근하는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract - This paper is to study applying for numerical analysis method for flow field, velocity and pressure of fuel on the low pressure pump using excavator. The pressure distribution of fuel pump certified the linear variation according to rotation angle of rotor. Especially, it knew the fact that the pressure in rotation angle 40° appeared high outlet and low inlet of fuel pump. Also, this range angle can seek the fact that the leakage flow and velocity are the most increasing. And the more rotor rotation of fuel pump, the more mean outlet flow rate increased in linear. Whenever the gap size decrease with rotor and housing, the discharge flow rate could seek the approaching 0.0712kg/s that consider with theory discharge flow rate calculated from displacement between rotor gear and idle gear.

Key words : excavator, gear pump, velocity, pressure, numerical analysis, discharge flow rate

1. 서론

최근 산업의 급속한 발전으로 인해 도로, 항만, 공항등과 같은 운수 산업의 핵심인 기간산업 시설의 건설 필요성이 크게 대두되고 있다. 이러한 운송망을 확보하고 건설하는 데 있어 자동차 및 중장비의 수요가 폭발적으로 증가되었다. 특히, 중장비의 수요 확대로 인해 기존의 인력에 의존하던 것을 쉽고, 빠르고, 안전하게 건설현장에서 작업하는 데 커다란

역할을 하게 되었다. 이러한 건설 중장비의 핵심인 엔진의 개발은 매우 중요하다. 이러한 중장비 엔진의 작동을 위한 연료를 연료탱크에서 이송하는 펌프의 역할 또한 매우 중요하다. 이러한 연료의 공급시스템은 연료탱크에서 유입된 연료가 5kg/cm² 정도의 압력으로 가압되어 고압펌프로 공급되면 120~300kg/cm²의 압력으로 상승하여 노즐을 통하여 엔진 내부의 연소실로 공급된다. 이러한 기계적인 시스템은 최근에는 전자제어식 방식으로 제어되면서 고압인 1200~2000kg/cm²의 압력으로 상승되어 분사되는 커먼레일(common rail) 방식의 고압 분사방식의 시스템이 적용되었다. 이 연료 펌프는 내부의 구동기어와 피동

†Corresponding author: iklee@daelim.ac.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

기어의 내부 기어는 코팅효과에 의해 고착현상이 개선되고, 펌프 구동시에 펌프의 지지메커니즘이 펌프의 이송효율에 영향을 준다는 것을 실험을 통하여 확인하였다[1]. 이러한 연료펌프는 유체라는 연료를 이송하면서 연료량, 연료의 속도 및 연료의 압력에 따라 성능에 영향을 준다[2,3]. 또한, 로터 사이의 간극이 유동 특성에 크게 영향을 미친다는 연구결과도 발표되었다[5,6]. 따라서, 이러한 연료의 흐름을 적절히 제어함으로써 연료 펌프의 성능을 크게 개선할 수 있다.

따라서, 이 논문은 실험에 의해 개발된 굴삭기용 저압 연료 펌프의 모델을 이용하여 수치해석을 통해 펌프의 최적 상태를 분석하고 이의 최적성을 연구하고자 하기 위함이다.

II. 이론적 배경

2.1 개요

일반적으로 디젤 엔진에 장착되는 저압 연료펌프는 엔진의 회전과 함께 회전하며 에어컨 컴프레서(compressor) 축에 의해 구동되며 내접기어 방식이 많이 사용된다. 이것은 연료 탱크로부터 실린더 헤드까지 연료를 공급하며, 유닛 인젝터에서 연료를 분사하는데 필요한 연료의 압력과 유량을 유지하는 기능을 하여야 한다.

Fig. 1은 중장비에 적용되는 기어식 연료 펌프의 다양한 적용사례를 보여주는 것이다.

2.2 연료펌프의 작동이론

기계식 저압연료 펌프는 기어 방식으로 고압펌프와 일체식으로 구성되어 있다.

2.2.1 연료펌프의 적용

기어식 연료펌프는 중장비 및 대형 차량인 버스, 소방차 등에 사용되는 디젤(diesel) 엔진에 장착된다. 최근에는 디젤엔진의 효율을 높이고 최적 제어를 위해 고압연료펌프를 장착한 커먼레일 방식의 분사방식도 적용되고 있다. Fig. 2는 커먼레일 방식의 디젤엔진 연료 시스템의 연료 흐름도를 보여주는 것이다.

2.2.2 연료 펌프의 구조 및 작동원리

일반적으로 기어형식(gear type), 제로터 형식(generator type), 베인형식(vane Type), 나사형식(screw type) 등 여러 종류가 있다. Fig.3은 기어 펌프의 구조 및 원리를 보여주는 것이다.

이 저압 연료 펌프의 구조는 Fig.3의 오른쪽 형상과 같은 2개의 인볼류트 스피어 기어(involute spur

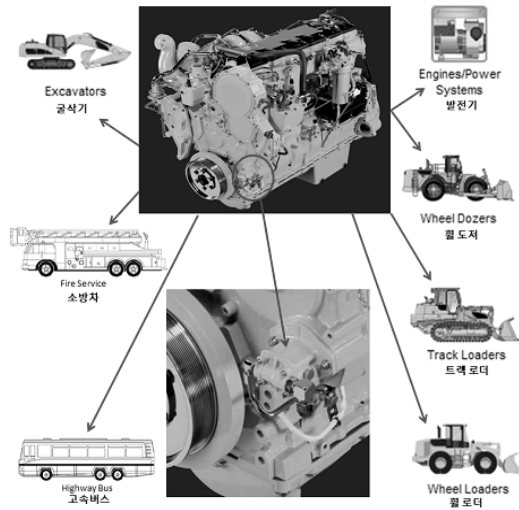


Fig. 1. Using example of fuel pump.



Fig. 2. Fuel flow chart of diesel engine fuel system.

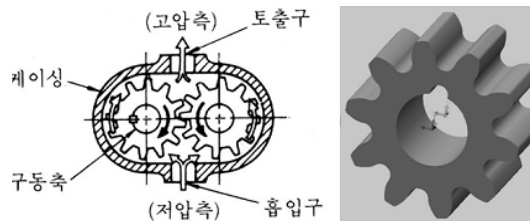


Fig. 3. Structure and operating theory of gear pump.

gear)로 구성되어 있다. 작동은 엔진의 회전 동력을 받아 서로 맞물려서 회전하게 되고, 연료는 기어의 이(tooth)와 이 사이의 공간에 채워진 상태로 케이싱(casing)의 외벽에 갇혀서 회전 방향에 따라 이송되어 압력이 형성되어 토출구로 빠져 나가게 된다.

III. 수치해석

수치해석에서는 로터 회전수를 조건으로 로터와

케이싱 사이의 간극 변화에 따른 비정상 유동장 및 맥동압력 변화를 이해하기 위하여 회전(rotation) 용적형기어펌프(positive displacement gear pump)의 내부유동을 3차원 유동장으로 설정한 뒤, 유체 유동 해석 상용프로그램인 ANSYS V14.5 CFX의 격자생성기법(Immersed meshing technique)를 적용하여 수치해석을 수행하고, 그 특성을 고찰하였다.

3.1 해석모델

Fig. 4는 수치해석에 적용된 회전용적형 기어펌프 모델의 형상을 보이고 있다. 펌프 케이싱 내에 동일한 형상을 가진 주축로터와 종축로터가 상하에 정렬하여 위치하며 로터 기어의 치합에 의하여 작동하게 된다. 로터의 기어형상은 사이클로이드 곡선(cycloid curve)을 기본으로 설계되었으며, 기어의 잇수는 주축로터, 종축로터 각각 동일한 10개로 구성된다. 로터 기어의 외경은 29.6mm, 내경은 20mm이며, 로터 설계 회전수는 840rpm, 2940rpm이다. 이 때 로터와 케이싱 사이에 형성된 배제용적으로부터 계산된 이론전설계 토출량은 0.0712kg/s 이다. 펌프 흡입부와 토출부 유로의 폭 크기는 실제 형상과 동일하게 적용하였다.

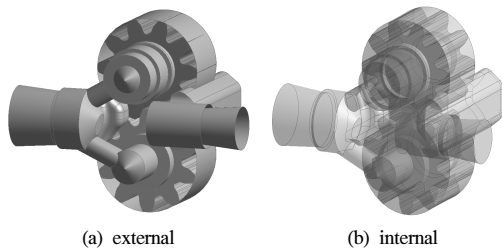


Fig. 4. Configuration of volumetric gear pump model.

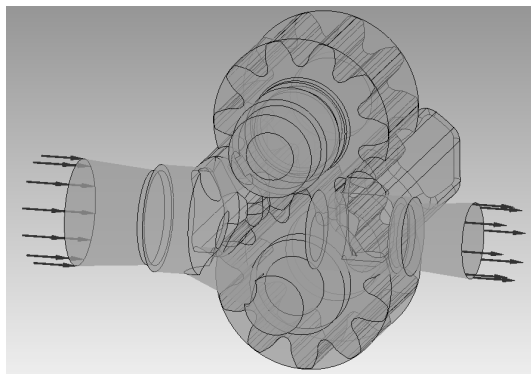


Fig. 5. Inlet and outlet condition of pump.

3.1.1 수치해석기법 및 해석조건

회전용적형 펌프 내부 유동장을 3차원 비압축성, 점성유동으로 가정하였으며, 난류모델로는 standard k-ε 모델을 사용하였다. 계산영역의 경계조건으로는 Fig. 5와 같이 입구와 출구에 대기압 조건을 설정하였으며, 특히 출구측은 체크밸브 방식을 적용하도록 하였다. 로터회전을 고려하기 위하여 주축로터와 종축로터에 반대방향으로 각 해석조건에 대응하는 동일한 크기의 회전속도를 적용하였다.

수치해석 조건은 펌프모델의 840rpm 및 2940rpm을 각각 적용하였다. 또한 로터와 케이싱 사이의 간극 변화에 따른 유동장 변화를 보기 위하여 각각의 로터 회전수에 대하여 기어끝단과 하우징 사이의 간극을 기준 간극인 0.045mm를 포함하여 h=0.025, 0.035, 0.045, 0.055, 0.065인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 또한, 기어 사이드와 하우징 사이의 간극을 기준 간극인 0.025mm를 포함하여 h=0.015, 0.020, 0.025, 0.030, 0.035에 대하여 마찬가지로 계산을 수행하였다. 여기서, h1은 기어끝단과 하우징 사이의 간극, h2는 기어 사이드와 하우징 사이의 간극이다.

3.2 해석 결과 및 고찰

3.2.1 속도 및 압력 분포

Fig. 6, 7은 계산된 속도벡터, 스트림라인 및 압력

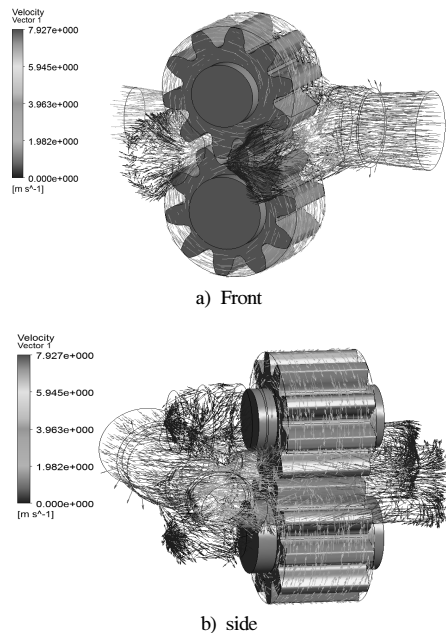


Fig. 6. Velocity vectors in housing (RPM=2940, h1=0.045mm, h2=0.025mm).

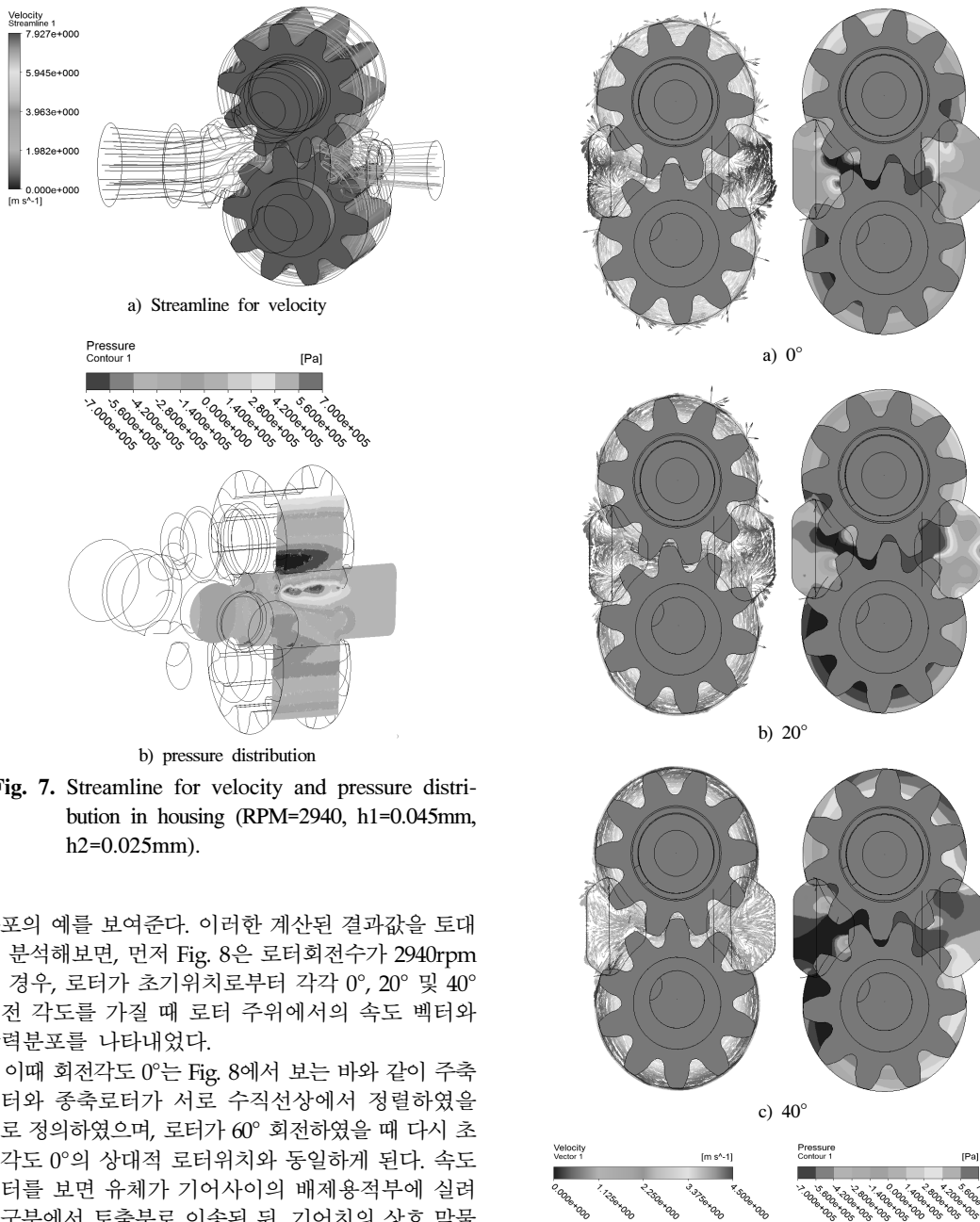


Fig. 7. Streamline for velocity and pressure distribution in housing (RPM=2940, $h_1=0.045\text{mm}$, $h_2=0.025\text{mm}$).

분포의 예를 보여준다. 이러한 계산된 결과값을 토대로 분석해보면, 먼저 Fig. 8은 로터회전수가 2940rpm인 경우, 로터가 초기위치로부터 각각 0°, 20° 및 40° 회전 각도를 가질 때 로터 주위에서의 속도 벡터와 압력분포를 나타내었다.

이때 회전각도 0°는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 주축 로터와 종축로터가 서로 수직선상에서 정렬하였을 때로 정의하였으며, 로터가 60° 회전하였을 때 다시 초기각도 0°의 상대적 로터위치와 동일하게 된다. 속도 벡터를 보면 유체가 기어사이의 배제용적부에 실려 입구부에서 토출부로 이동된 뒤, 기어치의 상호 맞물림에 의해 배제용적부가 닫히면서 유체가 압축되는 형태로 펌프가 작동되는 것을 확인할 수 있다. 이 때문에 로터의 회전과 함께 로터의 토출부 유속이 상하로 반복적으로 진동하게 되며, 로터에 근접한 토출유로의 상·하부에 재순환(recirculation)영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. 압력 분포 또한 로터의 회전각도에

Fig. 8. Velocity magnitude and pressure distribution at different rotational angles (rpm=2940, $h_1=0.045\text{mm}$, $h_2=0.025\text{mm}$).

따라 연속적으로 변하며, 특히 회전각도 40°에서 상대적으로 매우 높은 토출부 압력과 낮은 흡입부 압

력이 동시에 발생함을 알 수 있다.

Fig. 9는 로터와 케이싱 및 주축로터와 종축로터 사이의 간극주위에서 속도벡터를 확대한 그림이다. 압력차로 인하여 간극에서 높은 속도의 누설유동이 발생함을 확인할 수 있으며, Fig. 8에서 볼 수 있는 것처럼 세 가지 회전각도 중 유입부와 토출부 사이에 상대적으로 가장 높은 압력차가 발생하게 되는 40°

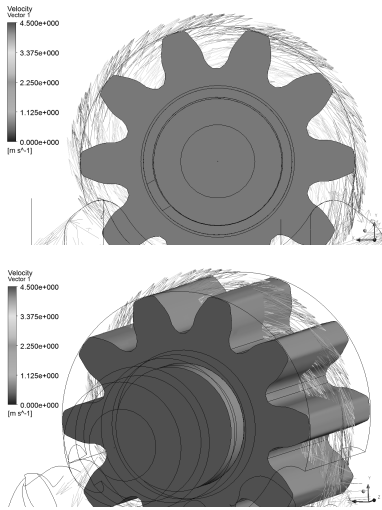


Fig. 9. Velocity vectors around the rotor clearance (RPM=2940, h1=0.045mm, h2=0.025mm).

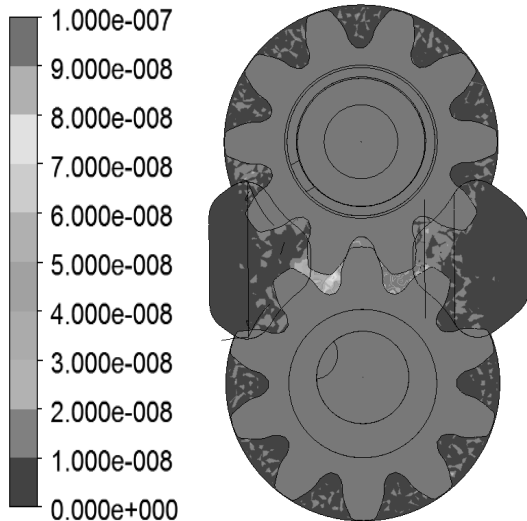


Fig. 10. Vapor mass fraction (RPM=2940, h1=0.035mm, h2=0.015mm).

회전각도일 때 누설유동 유속이 가장 증가함을 알 수 있다. 특히, 로터와 케이싱 사이의 간극보다 압출 시 높은 압력차가 발생하게 되는 주축로터와 종축로터 사이의 간극에서 훨씬 높은 유속의 누설유동이 생성됨을 알 수 있으며, 이는 40° 회전각도일 때 훨씬 두드러진다. 이러한 누설유동은 펌프성능 저하에 가장 중요한 요인으로 작용할 것이다.

또한, 로터의 회전 각도에 따라 로터 주위에서 발생하는 캐비테이션 발생 정도를 나타내는 증발 질량 분율(vapor mass fraction)을 Fig.9에서 계산된 속도의 크기를 토대로 계산하면 Fig.10과 같이 로터와 로터의 치합이 열릴 때, 흡입부의 로터 간극 주위의 압력이 낮아지면서 캐비테이션 발생이 높아지는 것을 확인할 수 있었으며 기어 끝단과 하우징 사이 간극에서도 발생이 간헐적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 h1의 경우 0.025, 0.035mm에서, h2의 경우 0.015, 0.020mm에서 많이 나타났다.

3.2.2 로터 회전에 따른 토출유량 및 맥동압력

Fig. 11은 로터의 회전에 따른 토출부에서의 질량 유

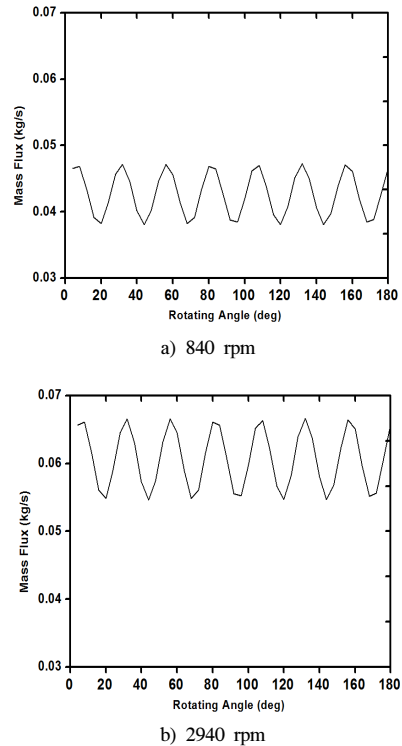


Fig. 11. Mass flow rate variation with time (h1=0.045mm, h2=0.025mm).

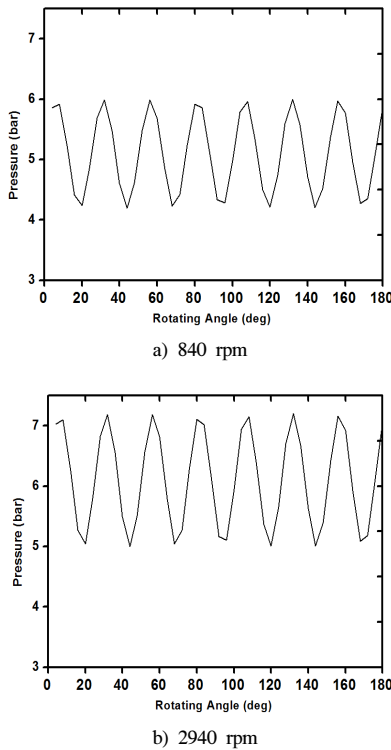


Fig. 12. Pressure variation with time (h1=0.045mm, h2=0.025mm).

량의 변화를 나타내었다. 토출부에서의 질량유량은 일정한 위치에서 일직선상에 대한 유속을 적분함으로써 구하였다. 질량유량은 로터의 회전에 따라 주기적으로 일정한 진폭을 가지고 맥동하는 것을 알 수 있다. 이러한 맥동은 전체적으로 로터 기어치 배열주기와 일치하는 60°의 일정한 주기를 보이며, 이에 더하여 상하로터의 상대적 회전에 의한 30°의 뚜렷한 주기를 가짐을 볼 수 있다. 로터 회전으로 인한 최대토출 유량은 Fig. 11에 보인 것과 같이 회전각도 30° 및 60° 부근에서 발생하게 되며, 이는 사이클로이드 곡선 형태 특성상 이 때 로터와 로터간의 순간 접촉속도가 가장 급격히 변화되는 것에 기인한 것으로 여겨진다.

Fig. 12는 로터의 회전에 따른 토출부 평균압력변화를 나타내었다. 토출부 평균압력은 토출유량을 계산한 위치에 동일한 선상에서 평균을 취함으로써 도출하였다. 이 때 맥동압력 또한 토출부 유량 변화와 동일한 위상을 갖고 로터의 회전에 따라 일정한 주기를 보이고 있으며, 간극 크기 및 로터회전수의 변화에 따라 이러한 맥동압력 진폭도 변화를 보였다.

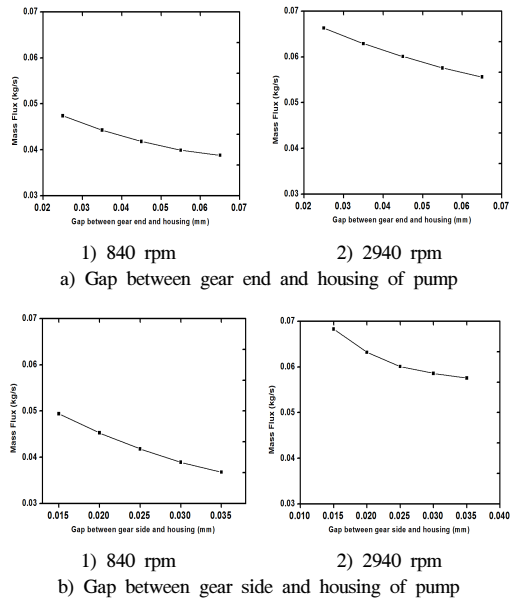


Fig. 13. Mass flux with different clearance size.

3.2.3 로터 회전수 및 간극 변화에 따른 토출유량 변화

Fig. 13은 로터 회전수 변화 및 로터와 케이싱 사이의 간극변화에 따른 평균토출유량의 변화를 그래프로 나타내었다. 로터 회전수의 증가에 따라 평균 토출유량이 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 간극크기가 감소함에 따라 토출유량이 로터 기어 사이의 배제용적으로부터 계산된 이론적 토출유량으로 접근하는 것을 볼 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 회전용적형 기어 펌프의 내부유동장에 대한 수치 해석을 통하여 간극크기 및 로터회전수 변화에 따른 간극 누설유동 특성, 펌프 토출유량 및 맥동압력 변화에 대하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 연료 펌프의 압력 분포는 로터의 회전각도에 따라 연속적으로 변하며, 특히 회전각도 40°에서 상대적으로 매우 높은 토출부 압력과 낮은 흡입부 압력이 동시에 발생함을 확인하였다. 또한, 이 각도에서 누설유동 유속이 가장 증가함을 알 수 있었다. 로터 회전으로 인한 최대 토출 유량은 회전각도 30°와 60° 부근에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 연료 펌프의 로터 회전수의 증가에 따라 평균토출유량이 선형적으로 증가하였고, 간극크기가 감소함에 따라 토출유량이 로터 기어 사이의

배제용적으로부터 계산된 이론적 토출유량으로 0.0712kg/s로 접근하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년도부터 2013년도까지 산업통상자원부가 시행한 첫걸음 부품소재기술개발사업의 일환으로 수행된 연구의 결과입니다.

REFERENCES

- [1] L.K. Lee, etc, "Experimental Study on Reducing the Adherence Phenomenon between Idle Gear and Housing for Low-Pressure Fuel Pump of Excavator engine", Journal of KSTLE Vol. 29, No. 2, (2013)
- [2] Jung-Ho Lee, etc, "Numerical Simulation of 3-D Cavitation Flow in Volumetric Gear Pump", Spring Conference of KSME, (2011)
- [3] S.H Kim, etc, "Characteristics of Two Dimension Flow in an Involute Gear Pump", Journal of KSFC, Vol. 8, No.2, (2011)
- [4] Nam Kyung-Woo, etc, "Numerical Simulation In the IC Engine Lubricating Gerotor Oil Pump", Journal B of KSME, Vol. 2, No.6, (2006)
- [5] Chan-Shik Won, etc, "Flow Analysis of Automotive Oil Pump of Gerotor type", Journal of Fluid Mechanical, Vol. 6, No. 4, (2003)
- [6] Mincheol Park, etc, "Flow Analysis for 30ton Wheel Loader Gear Pump", Busan and Ulsan Spring Conference of KSAE, (2012)