

소형 기어펌프 최적화 설계를 위한 유동해석

이석영[†]·김승철

인하공업전문대학 기계과, 씨드

(2015년 2월 21일 접수, 2015년 3월 13일 수정, 2015년 3월 16일 채택)

Flow Analysis for Optimal Design of Small Gear Pump

Suk-Young Lee[†], Seung-Chul Kim

[†]Inha Technical College Department of Mechanical Engineering, Seed Company

(Received 21 February 2015, Revised 13 March 2015, Accepted 16 March 2015)

요 약

기어펌프는 단순한 구조를 가지면서도 신뢰성이 높고 작동과 유지가 쉽기 때문에 수력학 장치에 널리 사용된다. 일반적으로 기어펌프는 질량유량과 효율을 고려한 다양한 변수에 의해 설계된다. 본 연구에서는 기어펌프의 최적화 설계를 위해 ANSYS v15.0 CFX 상용프로그램을 사용한 3차원 유동해석을 실시하고 해석결과로부터 설계변수를 선정하도록 하였다. 즉, 기어펌프의 다양한 회전 속도 및 기어 끝단과 하우징 사이의 간극에 대한 질량유량 및 효율을 검토하였으며, 해석 결과로서, 회전 속도가 증가할수록 평균 질량유량 및 효율은 증가하였고, 기어펌프와 하우징의 간격이 증가할수록 평균 질량유량 및 효율은 감소하였다.

주요어 : 기어펌프, 전산유체역학, 최적설계, 변수

Abstract - Gear pump has a simple structure high reliability, easy operation and maintenance, widely used as a source of hydraulic system of hydraulic. In general, the gear pump was designed using variety of variables, the variables through the analysis of the mass flow rate and efficiency. In this paper, three-dimensional flow of the gear pump, in order to produce the optimal design of product, analysis was performed by using commercial software ANSYS v15.0 CFX. And then, combination of design parameters selected by ANSYS was carried out to confirm the simulation result. The efficiency and mass flow rate of the gear pump were studied by varying its rotational speed and the clearance between the gear tip and the housing. In the simulation results, as the rotational speed were increased, the average mass flow rate and efficiency increased. Furthermore, as the clearance between the gear tip and the housing was increased, the average mass flow rate and efficiency decreased.

Key words : Gear Pump, CFD, Optimal Design, Parameters

1. 서 론

해외시장의 다변화와 글로벌 기술 경쟁시대에서는 상품의 경쟁력이 세계적으로 우수한 제품만이 치열한 시장 경쟁으로부터 살아남을 수 있고, 변화하는 소비

자의 욕구 및 시장의 요구에 적극적으로 부합되는 제품을 개발해야만 한다. 현재 시중에 제품화되어 있는 센싱형 자동액체분사 장치는 대부분 벽이나 수전설비 근처에 고정할 수 있도록 하는 고정형으로, 액체 저장부와 펌핑시스템, 센싱부, 제어부 및 이를 받치는 구조물 등이 일체형으로 이루어져 이동 또는 휴대가 불가능하고 고가이며 설치에 제약이 있어, 설치, 이동 및 휴대가 간편하며 좀 더 저렴한 자동 액체 분사 장치에

[†]To whom corresponding should be addressed.
100 Inha-ro Nam-gu Incheon 402-752 South Korea
Tel : 032-870-2131 E-mail: syllee@inhatc.ac.kr

대한 소비자의 요구가 많은 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 일반 액체 용기에 탈부착이 가능한 소형 센싱형 액체 자동분사 장치는 기존의 일체형 액체 자동분사 장치와 비교하여 기존 용기에 착탈이 가능하도록 소형 모듈화되고 가격이 저렴하며 휴대성 및 이동성이 양호하고 설치가 간편하여 기존 제품과 차별화되는 장점이 있으며, 환경문제가 심각한 시기에 공중위생을 위해 대중이 이용하는 공공장소 및 개인위생을 위해 가정주부를 대상으로 할 수 있는 소비자요구에 부합되는 제품으로 제작하고자 한다. 또한, 본 개발기술을 통하여 휴대용 자동액체분사 장치와 관련된 기술이 일본, 유럽 등 선진국의 핵심기술의 모방과 단순한 디자인 변경에서 탈피하여, 우리의 자체기술이 세계적으로도 선두적인 역할을 할 수 있는 이 분야 기초기술을 확보하는 것이 본 연구의 중요성이라고 할 수 있다. 기존의 손 소독기는 대부분이 소독액 저장부와 펌핑 시스템, 센싱과 제어부, 전원부 및 이를 받치는 구조물 등이 일체형으로 이루어져 있었다. 그러나 본 개발품은 기존 제품과 대비하여 자동 센싱과 분사 시스템만을 별도로 구성하는 제품으로, 일반 용기에 제작된 뚜껑만 교체하면 자동분사가 가능하도록 제작되어 진다.

기술성으로는 기어펌프 및 와류형성 분사노즐 채용으로 자동액체분사 장치의 휴대성이 겸비된 분사량 조절기술을 한 단계 높일 수 있는 기술이 적용되며 손세정액 뿐만 아니라 샴푸에도 적용할 수 있도록 제작되어 질 예정이다. 이러한 작동을 위한 주요부품 중에서 기어펌프의 성능 조건으로 최대 흡입성능은 200mm 이상, 1회 토출량은 0.5gf 이상을 개발 목표로 하였으며, 현재까지 진행된 내용으로 상용화된 소형 기어식의 펌핑 시스템 벤치마킹으로 개발제품의 펌핑시스템을 구상하여, 시제품으로 성능평가를 수행한 결과, 본 과제에서 목표로 하는 최소 200mm 이상의 펌핑 흡입 성능이 충분히 만족되었으며 개발의 최종 제품 성능을 위해 실제 제품에 알맞게 크기를 감소시키면서 성능을 유지되도록 개발중하고자 진행중이며, 본 연구에서는 기어펌프 소형화 제작에 앞선 최적화 설계를 위한 유동해석을 소개하고자 한다.

2. 구조 및 원리

2-1. 개요

개발제품의 펌핑시스템의 기본적인 원리는 손과 같

은 인체가 접근하여 인체감지 센서에서 신체의 일부를 감지하면 전원부로부터 전원을 공급받은 구동모터가 외접기어 펌프를 작동시키고, 액체 용기에 저장된 액체가 흡입관을 통해 흡입된 다음 토출관을 통해 분사시킴으로서 노즐 커버 내에 위치한 노즐 인서트를 통해 액체를 분사 및 공급할 수 있게 하는 것이다. 또한, 분사량 조절 스위치를 조절하면, 제어부의 구동모터 동작시간이 분사량 조절스위치의 조절 정도에 따라 길게 혹은 짧게 설정되어, 액체 분사량을 편리하게 조절할 수 있도록 구성된다.

2-2. 원리

착탈식 센싱형 액체 자동분사 장치는 액체 흡입관과 액체를 상부로 흡입하기 위한 외접기어 펌프와 배터리에 의해 전원을 공급받아 기어 펌프를 구동시키기



Fig. 1. 자동액체 분사장치 개요도

위한 모터, 감지센서, 제어부 등으로 구성되어 있다. 본 제품에 손 등을 가까이 가져가면 감지센서가 작동되고, 감지신호를 입력받아 제어부는 구동모터의 동작을 제어하게 되며, 이 구동모터의 동작에 의하여 액체 용기의 하단부까지 연장된 흡입관을 통해 흡입된 액체가 분사노즐을 통해 분사되는 것이다. 개발 진행중인 외접기어 펌프는 액체용기 내부의 액체를 흡입하여 상측으로 이송시키는데 사용되는 흡입력을 제공하는 것으로, 일종의 소용량 유압펌프이다.

3. 해석을 위한 기초실험

초도 설계에 대한 작동 흡입성능 계산을 토대로 펌핑 시스템 시제품을 설계하고 제작하였으며 Fig. 2는 제작된 시제품이다. 개발하려는 펌핑시스템의 작동 흡입성능이 최소 200mm 이상은 되어야 하는데, 컴퓨터 해석만으로는 정확한 치수를 정하기가 어려운 게 현실이다. 따라서, 본 연구에서는 목표로 하는 치수보다 여유 있게 펌프 시스템을 설계하고 제작하였다. 시제작된 펌핑시스템은 외접기어 타입이며, 감지 센서와 배터리 및 제어시스템 등이 종합적으로 조립되어야 작동 성능을 제대로 파악할 수 있는데, 지금까지 진행된 개발은 감지센서와 제어계 등이 정상적으로 작동되어지지 않는 초기 제작상태이다. 기어 펌프는 펌프 몸체와 펌프 몸체의 내측에 설치된 외접기어 한 쌍 그리고 이 기어를 회전시키는 구동축 및 회전력을 발생시키는 모터와 배터리가 조립되어지는데, 구동모터에 의해 한쪽의 기어가 회전하면 그에 맞물린 외접기어 역시 회전하고, 이때 기어와 기어가 맞물리는 곳과 맞물림이 이탈하는 곳에서 각각 공간용적이 변화하면 이를 통해 소형 유압펌프의 역할을 하여, 액체 흡입공을 통해 흡입된 액체가 액체 토출공을 통해 토출되도록 하는 흡입력을 제공한다. 이러한 액체는 결국 분사노즐을 통해 토출되는데, 본 연구의 분사액체는 손소독액을 기본으로 개발되어짐에 따라 가능한 넓은 각도로 분무되도록 개발 계획이다. 최종 개발 제품은 펌핑시스템의 작동 흡입성능이 최소 200mm 이상이 되면서도 일반 액체통에 탈부착이 되어지는 것이 바람직하나 현재 제작된 시제품은 작동 흡입성능, 감지센서 및 제어시스템 작동성능 등의 타당성을 우선적으로 파악하기 위해 기능 위주로만 제작되어졌다. 본 시제품에 대한 컴퓨터 해석으로는 작동 흡입성능과 노즐에서의 분사상태 등이 만족스러운 결과를 보여주었지만, 실제 구동에 의한 성능

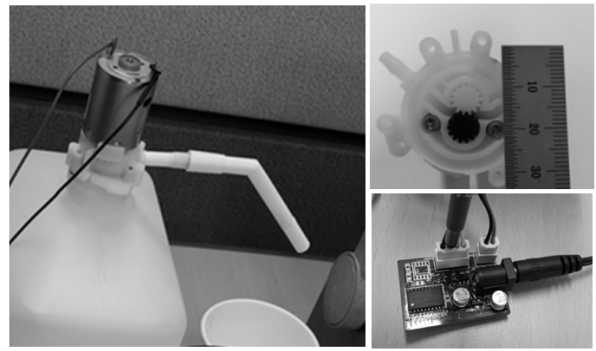


Fig. 2. 제작된 시제품



Fig. 3. 시제품 성능시험

Table 1. 기어펌프용 모터 제원

Item	Dimensions
모델	DWP-130
전원	DC 12V
재질	Polyethylene
회전속도	300rpm

평가는 진행 중이다. 이는 본 시제품이 아직 감지센서와 제어계 등이 정상적으로 작동되어지지 않는 초기 제작상태로 성능 평가에는 다소 무리가 있다는 판단에서 비롯된다. 다만 대략적으로 펌핑 흡입 성능을 육안으로 살펴본 결과 본 과제에서의 개발목표인 최소 200mm 이상은 달성되고 있는 것으로 확인되었다.

4. 수치해석

본 연구에서는 손소독기 제품설계를 하는 과정에서 펌핑시스템의 구성부품 중에서도 제품의 요구되는 성

능을 지닌 소형 기어펌프 제작을 위한 최적화 설계를 위한 유동해석을 위해 상용해석 프로그램인 ANSYS V15.0 CFX를 사용하였다[1,2].

4-1. 수치해석 모델

Fig. 4는 본 과제의 수치해석에 적용된 회전 용적형 기어펌프를 모델링한 형상을 보여주고 있다. 펌프 하우징 내에 동일한 형상을 가진 주축로터와 종축로터가 나란하게 정렬위치하며 로터의 기어의 치합에 의하여 작동하게 된다. 로터의 기어형상은 사이클로이드 곡선을 기본으로 설계되었으며, 기어치 개수는 주축로터, 종축로터 모두 동일한 10개로 구성된다. 로터 기어의 외경은 7.5mm, 내경은 6mm이며, 로터 설계회전수는 분당 300회를 기준으로 하였다. 이 때 로터와 하우징 사이에 형성된 배제용적으로부터 계산된 이론적 설계

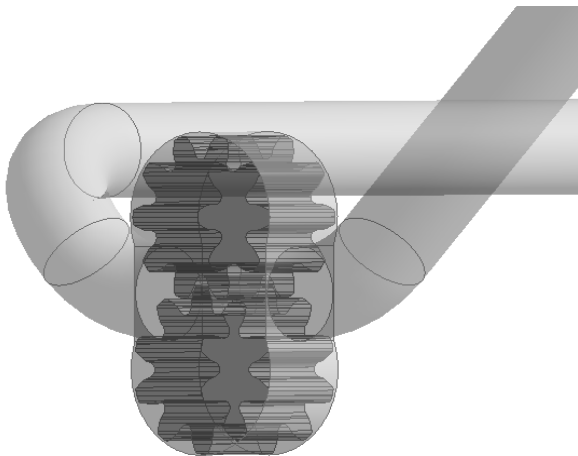


Fig. 4. Configuration of volumetric gear pump model

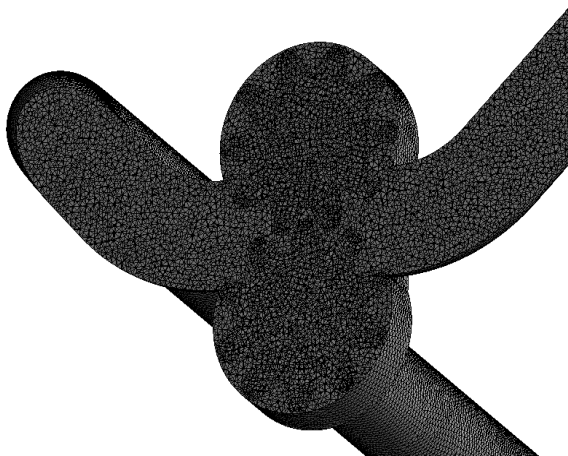


Fig. 5. Grid system of volumetric gear pump

토출량은 0.49g/s이 되며, 펌프 흡입부와 토출부 유로의 폭 크기는 실제 형상과 동일하게 적용하였다.

본 수치해석에 사용된 격자를 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에서 수행된 모든 여러 가지의 해석조건에 대하여 약 1,850,000개 이상의 삼각형 비정규 격자계를 사용하였으며, 특히 복잡한 유동장의 형성이 예상되는 영역에서의 해상도를 높이기 위하여 간극을 포함한 로터부 주위에 상대적으로 조밀한 격자를 생성하였다.

4-2. 수치해석 조건 및 방법

회전용적형 펌프 내부 액체는 손소독기용 알코올이지만 향후 샴푸 등과 같은 다양한 물성치를 가진 액체 사용을 감안하여 기준액을 중간정도의 점도를 지닌 물로 정하였다. 유동장은 3차원 비압축성, 점성유동으로 가정하였으며, 난류모델로는 standard k-ε 모델을 사용하였다[3,4]. 수치해석을 위하여 상용코드인 ANSYS v15.0 CFX (ANSYS Inc., PA, USA)를 이용하였으

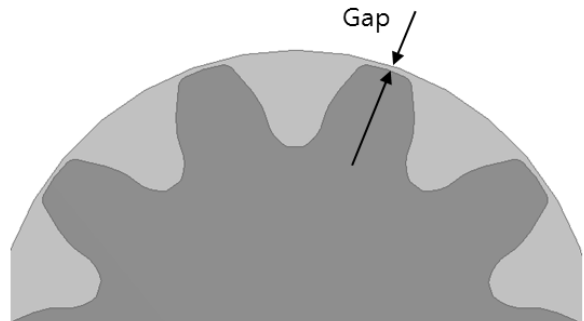


Fig. 6. Gap between gear end and housing(h1)

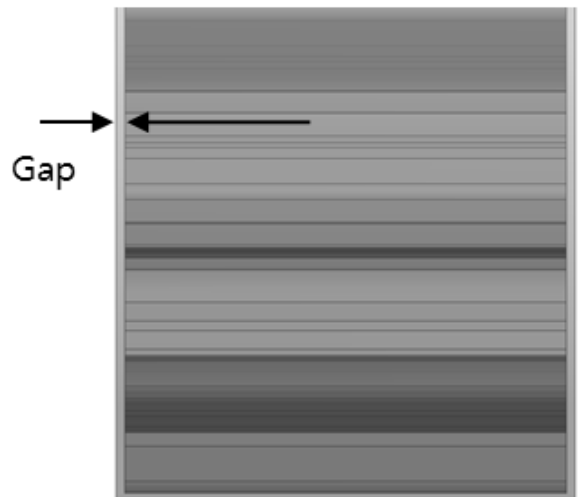


Fig. 7. Gap between gear side and housing(h2)

Table 2. 로터와 하우징 사이의 간극 입력치

Items	Relevant parameters, mm
Gap between gear end and housing, h1	0.025, 0.035, 0.045 , 0.055, 0.065
Gap between gear side and housing, h2	0.015, 0.020, 0.025 , 0.030, 0.035

며, 로터 회전으로 인한 계산영역에서의 격자계의 조밀한 부분을 계산하기 위하여 Immersed meshing technique을 적용하였다[5]. 계산영역의 경계조건으로는 입구와 출구에 대기압 조건을 설정하였으며, 특히 출구측은 체크밸브 방식을 적용하도록 하였다. 로터회전을 고려하기 위하여 주축로터와 종축로터에 반대방향으로 해석조건에 대응하는 동일한 크기의 회전속도를 적용하였다. 수치해석 조건에서 펌프의 회전속도는 300rpm을 기준으로 2 또는 4배로 증가시켜가며 경향을 분석하였다. 또한 로터와 하우징 사이의 간극변화에 따른 유동장 변화를 보기 위하여 Table 2, Fig. 6과 7에서 보는 바와 같이 각각의 로터회전수에 대하여 기어 끝단과 하우징 사이의 간극을 기준 간극인 0.045mm를 포함하여 h1=0.025, 0.035, 0.045, 0.055, 0.065mm인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 또한, 기어 사이드와 하우징 사이의 간극을 기준 간극인 0.025mm를 포함하여 h2=0.015, 0.020, 0.025, 0.030, 0.035mm에 대하여 마찬가지로 계산을 수행하였다. 이 때 증가된 간극크기를 고려하기 위하여 로터의 직경은 변화 없이 하우징의 직경만 대응되는 값만큼 증가시켰으며, 로터 회전각도 0° 일 때 주축로터와 종축로터 사이의 기준 간극도 로터와 하우징 사이의 간극과 동일하도록 로터 회전축을 이동시켰다. 그러나, 사이클로이드 형상의 특성상, 주축로터와 종축로터 사이의 간극은 이 기준값을 최대로 하여 로터회전과 함께 연속적으로 변하게 된다.

5. 해석 결과 및 고찰

유동해석 결과값을 통해 자동액체 분사장치 사용요구조건에 적합성을 판단하였으며 제품을 제작하기 위한 최적화 설계자료로써 제시되어 설계치수나 모터의 용량산정 등에 활용하였다[6,7].

5-1. 속도 및 압력 분포

Fig. 8에서 10은 기어펌프의 정상유동 해석을 통해 계산된 속도벡터와 스트림라인 및 압력 분포의 예를

보여주고 Fig. 11은 비정상유동 해석을 통해 시간에 따라 달라지는 회전각도별 속도벡터와 압력분포를 보여준다. 속도 벡터는 유체가 기어사이에서 형성되는 공간에 실려 입구부에서 토출부로 이송되면서 기어치의 맞물림에 의해 생성된 공간이 닫히면서 유체가 압력을 통해 분출되는 형태로 작동되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 로터의 회전과 함께 토출부 부근의 유속이 반복적으로 진동하게 됨으로서 로터에 근접한 토출이 지나가는 부위에 재순환되는 영역이 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 로터와 하우징 주위에서 속도벡터를 확대한 그림이며, 압력차로 인하여 간극에서 높은 속도의 누설유동이 발생함을 볼 수 있으며, 이러한 누설유동은 Fig. 11에서 압력값을 보면, 3가지 회전각도 중에서 유입부와 토출부 사이에 상대적으로 가장 높은 압력차가 발생하게 되는 40° 회전각도일 때 압력이 증가함과 동시에 누설유속이 가장 증가함을 알 수 있다. 특히, 로터와 하우징 사이의 간극에서 보다 더욱 높은 압력차가 발생하게 되는 한쌍의 로터 사이의 간극에서 더욱 높은 누설유동이 생성됨을 알 수 있으며, 이러한 누설유동은 펌프성능에 악영향을 끼치게 될 것이다. 또한, 로터 주위에서 발생하는 캐비테이션 정도를 나타내는 증기질량분율을 Fig. 13에서 보여주고 있으며, 로터와 로터의 치합이 열릴 때, 흡입부위로터 간극 주위의 압력이 낮아지면서 캐비테이션 발생이 높아지는 것을 확인할 수 있었으며 기어 끝단과 하우징 사이 간극에서도 발생이 간헐적으로 나타남을 확인할 수 있었다[8,9]. 이러한 현상은 h1의 경우 0.025, 0.035mm에서, h2의 경우 0.015, 0.020mm에서 많이 나타났다.

5-2. 토출유량

5-2-1. 로터 회전각 변화 조건

Fig. 14는 로터의 회전에 따른 토출부에서의 질량유량의 변화를 보여주며, 질량유량은 로터의 회전에 따라 주기적으로 일정한 진폭을 가지고 맥동하는 것을 알 수 있다. 이러한 맥동은 전체적으로 로터 기어

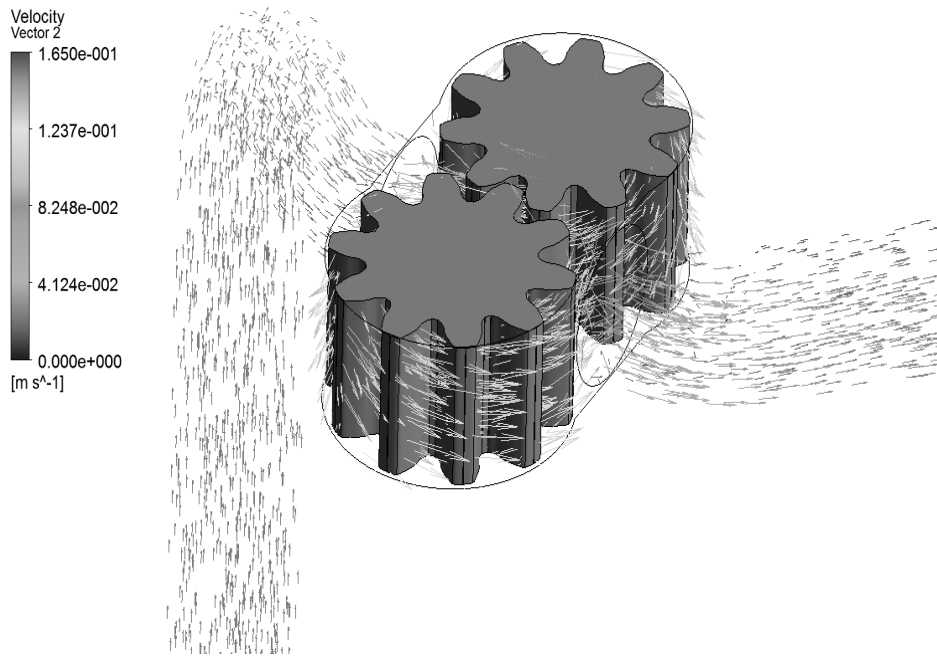


Fig. 8. Velocity vectors in housing (RPM=300, h1=0.045mm, h2=0.025mm)

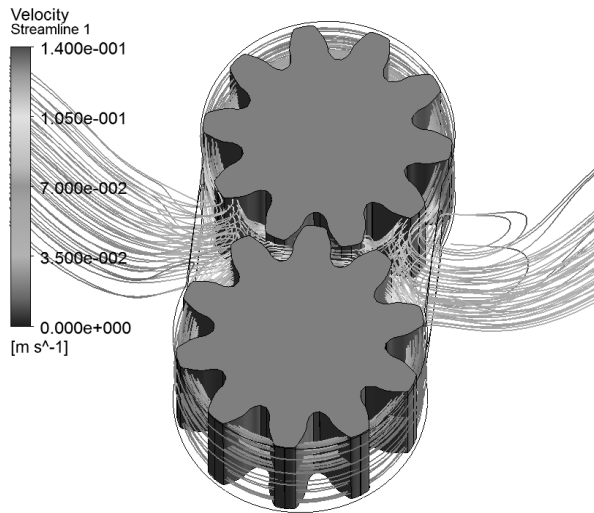


Fig. 9. Streamline for velocity in housing (RPM=300, h1=0.045mm, h2=0.025mm)

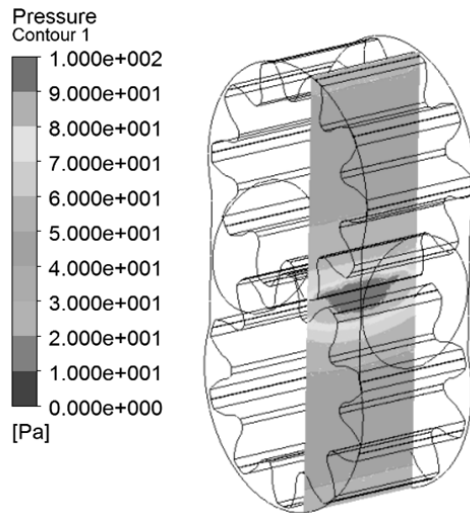


Fig. 10. Pressure distribution in housing (RPM=300, h1=0.045mm, h2=0.025mm)

치 배열주기인 36°의 일정한 주기와 함께 기어 1쌍의 상대적 회전에 의한 18° 주기가 나타남을 확인할 수 있다. 로터 회전으로 인한 최대토출 유량은 Fig 14에 보인 것과 같이 회전각도 18° 및 36° 부근에서 발생하게 되며, 이는 사이클로이드 곡선 형태 특성상 이 때 로터와 로터 사이에서 순간 접촉속도가 가장 급격히 변화되는 것에 기인한 것으로 여겨진다.

5-2-2. 로터 회전수 및 간극 변화 조건

Fig. 15과 16은 로터 회전수 및 로터와 하우징 사이의 간극의 변화에 따른 평균토출유량값을 보여주고 있다. 여기서, 로터 회전수가 증가하면 평균토출유량이 선형적으로 증가하고, 간극크기가 감소하면 토출유량이 증가하면서, 한쌍의 로터 사이의 배제용적으로부터 계산된 이론적 토출유량값으로 근접하는 것을 알

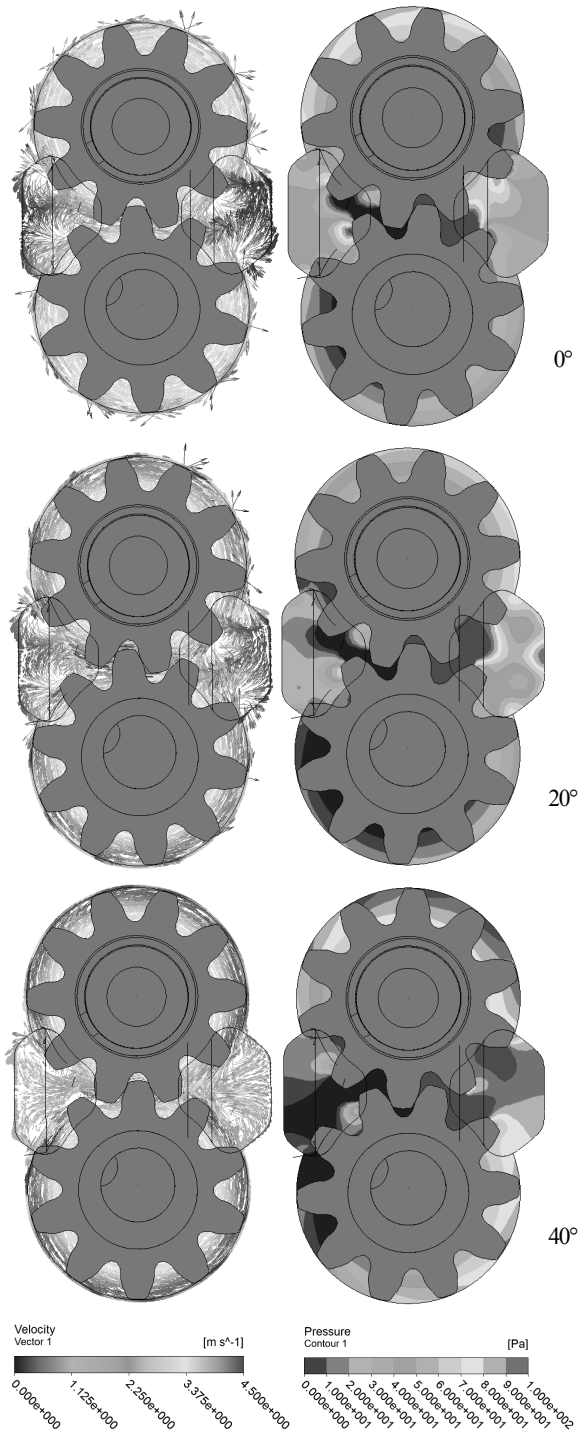


Fig. 11. Velocity magnitude and pressure distribution at different rotational angle (RPM=300, $h_1=0.045\text{mm}$, $h_2=0.025\text{mm}$)

수 있다. 수치해석 결과를 분석하면, 로터 설계 회전수인 300rpm에서 기어끝단과 하우징 사이의 간극크기가 $h=0.025$, 0.045 그리고 0.065mm 일 때 각각

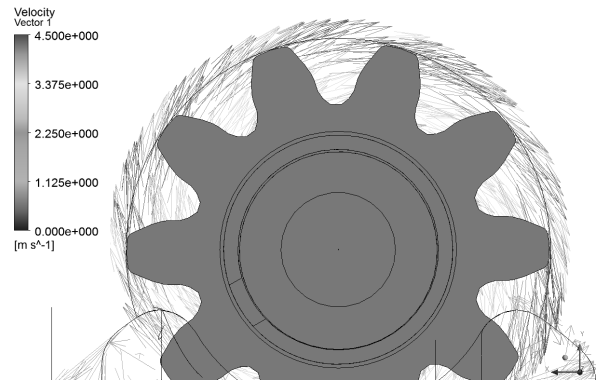


Fig. 12. Velocity vectors around the rotor clearance (RPM=300, $h_1=0.045\text{mm}$, $h_2=0.025\text{mm}$)

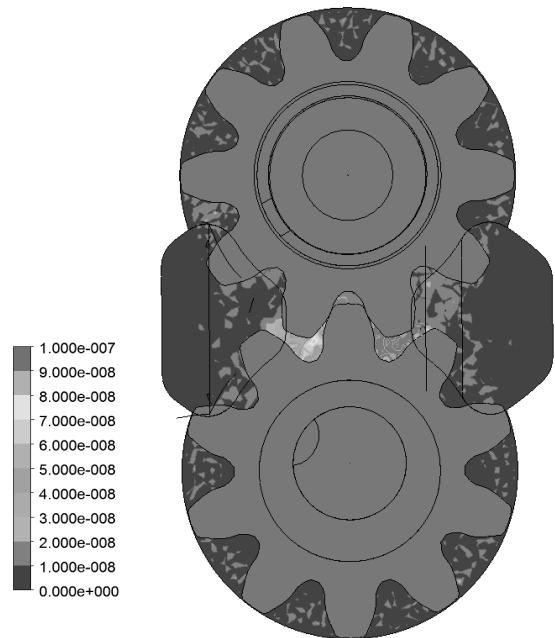


Fig. 13. Vapor mass fraction (RPM=300, $h_1=0.035\text{mm}$, $h_2=0.015\text{mm}$)

88%, 76%, 62%의 유량이 토출되는 것으로 계산되었으며, 거의 간극이 없는 경우 토출유량을 추정하였을 때 이론적 토출유량인 0.49g/s 와 매우 유사한 값을 얻을 수 있었다.

5.3. 토크 및 분무속도

점도 및 기어 회전수 증가에 따른 토크, 분사량 및 분사속도의 변화를 계산하였으며, Table 3에서는 점도를 증가시키면 토크는 기하급수적으로 증가되고 분사량과 분사속도는 증가하지 않는다는 것을 알 수 있는데, 이는 토크가 증가하는 것은 점도증가에

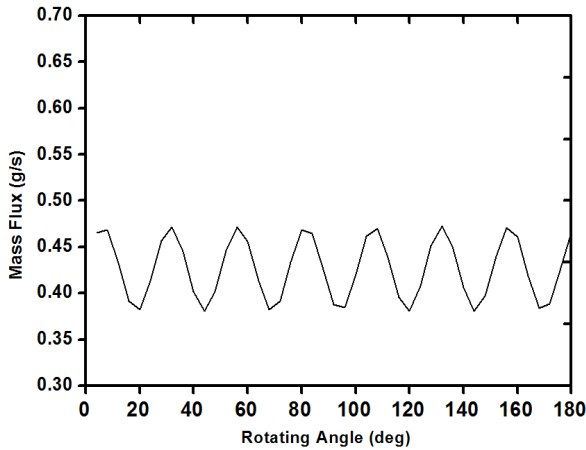


Fig. 14. Mass flow rate variation with time (RPM=300, $h_1=0.045\text{mm}$, $h_2=0.025\text{mm}$)

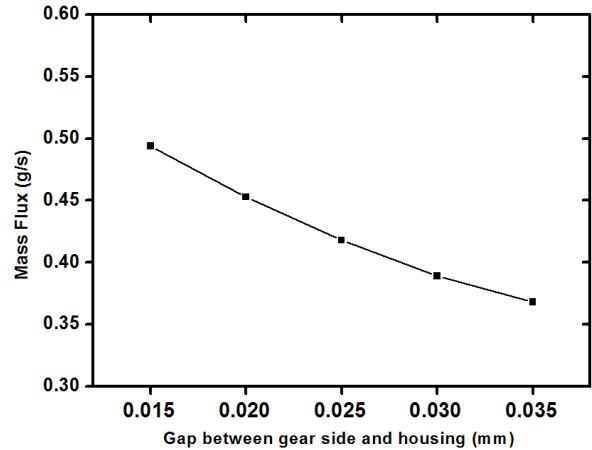


Fig. 16. Mass flux versus Gap between Gear side and Housing (RPM=300, $h_1=0.045\text{mm}$)

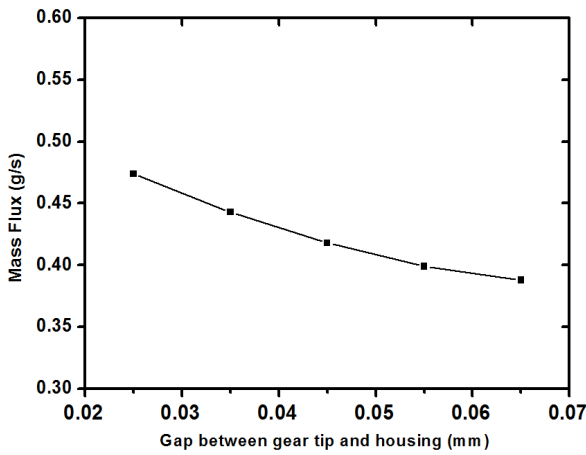


Fig. 15. Mass flux versus Gap between Gear tip and Housing (RPM=300, $h_2=0.025\text{mm}$)

따르는 유체저항에 기인하는 것으로 분석되며, 분사량과 분사속도의 변화가 없는 것은 회전수가 일정한 상태에서 비압축성인 유체를 체적형 펌프로 작동하기 때문인 것으로 사료된다. 또한, Table 4에서는 기어 회전수를 증가시키면 토크는 기하급수적으로 증가하고 분사량과 분사속도는 회전수 증가분 만큼 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서도 토크의 증가는 유체저항에 기인하는 것으로 사료되며, 분사속도와 분사량도 마찬가지로 체적형 펌프의 회전수가 증가할수록 비례하여 증가한 것으로 분석된다.

Table 3. 점도에 따른 토크, 분사량 및 분사속도의 변화(RPM=300, $h_1=0.045\text{mm}$, $h_2=0.025\text{mm}$)

점도 (cP)	토크(N.m)		분사량(g/s)		분사속도(cm/s)	
	값	증가율	값	증가율	값	증가율
1	1.80E-08	1	0.459	1	2.354	1
5	1.95E-07	10.8	0.463	1.0	2.371	1.0
10	5.62E-07	31.1	0.467	1.0	2.396	1.0

Table 4. 기어 회전수에 따른 토크, 분사량 및 분사속도의 변화(점도=1cP, $h_1=0.045\text{mm}$, $h_2=0.025\text{mm}$)

회전수 (rpm)	토크(N.m)		분사량(g/s)		분사속도(cm/s)	
	값	증가율	값	증가율	값	증가율
300	1.80E-08	1	0.459	1	2.354	1
600	5.73E-08	3.1	0.912	1.9	4.666	1.9
1,200	1.40E-07	7.7	1.792	3.9	9.169	3.8

6. 결 론

본 연구에서는 상용프로그램인 ANSYS v15.0 CFX를 사용하여 회전 용적형 기어펌프의 3차원 유동해석을 수행하였다. 이를 통하여 간극크기 및 로터회전수 변화에 따른 간극 누설유동, 펌프 토출유량 및 맥동압력 변화에 대한 관계를 살펴보고, 토출부의 비정상 맥동유동장 및 압력변화를 재현할 수 있었다. 또한, 로터 회전에 따른 흡입부에서의 캐비테이션 발생을 예측하였고, 이러한 해석결과를 통해 펌프성능을 예측하여 제품설계를 위한 최적화 설계의 자료로 제공하도록 하였다.

후 기

본 연구는 한국산학연합회에서 지원하는 2014년도 자율편성형 도약기술개발사업 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

Reference

1. Lee, Y. K., 2009, "Introduction to Analysis Method Theory of Gear Pump Using Immersed Solid Method of ANSYS CFX," Korean Fluid Machinery Association 2009 Fluid Machinery Research and Development Conference Program, pp.649-652
2. Ansys CFX Theory Guide
3. S. H. Kim, H. M. Son, J. C. Lee, "Characteristics of Two Dimensional Flow in an Involute Gear Pump" Journal's KFPS, Vol. 8, No. 2, pp. 36-41. 2011
4. Kim, H. and Marie, H., 2007, "Two-Dimensional CFD Analysis of a Hydraulic Gear Pump," Proceedings of the 2007 ASEE Annual Conference, Honolulu, Hawaii
5. J. H. Lee, T. G. Kim, S. W. Lee, "Fluid-structure Interaction Analysis of External Gear Pump" Journal's KSCFE, Vol. 2010., No. 5, pp. 83-85, 2010
6. D. H. Kim, K. S. Chung, B. M. Kim, "The Optimal Preform Design for Automotive Differential Bevel Gear, Journal's KASE, Vol. 12, No. 1, pp. 184-189, 2004
7. D. W. Yoo, J. H. Lee, "A Study on the Optimal

Shape Design of Front Axle of Wheel Loader using the Design of Experiments", Journal's KSPE, Vol. 29, No.2, pp. 193-200, 2012

8. Y. D. Choi, Y. T. Kim, Y. H. Lee, "CFD Analysis of Pressure pulsation and Internal Flow for a Positive Displacement Hydraulic Turbine" Journal's KOSME, Vol. 31, No. 6, pp. 687-69
9. Choi, Y. D., Kim, Y. T. and Lee, Y. H., 2007, "CFD Analysis of Pressure Pulsation and Internal Flow for a Positive Displacement Hydraulic Turbine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.31, No.6, pp. 687-693