

이동 격자를 이용한 Power Steering용 Vane Pump 유동 해석

이상혁*, 허남건**, 진봉용***

Numerical Simulation of a Vane Pump Characteristics of an Automotive Power Steering System Using Moving Mesh Technique

Sang Hyuk Lee*, Nahmkeon Hur** and Bong Yong Jin***

Keywords : Vane Pump(베인펌프), CFD(전산유체역학), Moving Mesh(이동격자), Power Steering(동력조향장치), Node Expansion and contraction Method(격자점신축방법)

Abstract

In this study, the characteristic of a vane pump of an automotive power steering system is numerically analyzed. The vane pump changes the energy level of operation fluid by converting mechanical input power to hydraulic output. To simulate this mechanism, moving mesh technique is adopted. As a result, the flow rate and pressure are obtained by numerical analysis. The flow rate agrees well with the experimental data. Moreover, the variation and oscillation of the pressure around the rotating vane are confirmed. The difference of pressure appears in the vane tip as a result of the flow characteristics. Furthermore, the back flow into the rotor was observed.

1. 서론

최근 완성차 업체를 중심으로 부품산업의 중요성이 대두되기 시작하여 부품의 개발 및 성능 평가를 위해 각 완성차 업체가 부품업체를 지원하거나 부품 업체 자체의 자구노력이 진행되고 있다. 그 한 예로 Water 펌프나 Oil 펌프 등을 개발하고 그 성능을 예측하기 위한 실험들이 수행되고 있다[1]. 그러나 현실적으로 실험을 수행하기 위해서는 많은 시간이 필요하며 경제적으로도 상당한 부담을 요구한다. 이는 부품의 형상이 바뀌거나 실험 조건이 달라질 때마다 실험 장치를 새로 제작하거나 변경해 주어야 하기 때문이다. 따라서 이러한 실험상의 문제점을 해결하기 위해 지금까지 많은 산업현장에서 검증된 CFD 기법을 이용한 해석의 필요성이 증가되고 있다. 아울러 실험을 통하여 확인할 수 없는 각각의 장치내의 국부적인 유동현상을 파악함으로써 부품 설계시 CFD 해석 자료가 효과적으로 사용될 수 있음을 자명한 일이다.

그 중 본 연구에서는 Power Steering용 Vane Pump의 유동 특성을 연구하였다. Power Steering, 즉 동력 조향장치는 동력장치를 이용하여 운전자의 조타력을 증대시켜 손쉬운 조향을 이루어 내는 장치이다. 초기에는 대형 차량에만 사용되던 장치였으나 요즘에는 거의 모든 차량에 Power Steering 장치가 장착된다. 이는 운전자 편의 및 사고 예방을 위한 차량 제작 및 설계가 이루어지기 때문에 엔진 동력의 일부를 손해 볼지라도 많은 차량에서 사용된다. 이 때, 유압식 Power Steering에서는 동력원으로 유압을 공급하는 Vane Pump가 사용되는데, 이는 베인의 슬라이딩

운동이 가능하게 조립되는 로터와 캠링 사이 로터의 회전방향 쪽으로만 공간을 형성함으로써 Oil을 흡입포트에서 퇴출포트 쪽으로 보낸다. 일반적으로 Vane Pump 내에서는 로터의 회전과 베인의 슬라이딩 운동, 로터와 캠링 사이의 공간, 회전 방향에 따른 오일의 유출입시와 역류 등의 현상들은 Vane Pump의 효율과 직결된다.

위와 같은 사실을 해석에 적용하기 위해서 Yu 등[2]은 비구조 격자계와 임의 이동 경계면 방법을 사용하여 베인 펌프에 대한 수치해석을 수행하였으며, 허남건[1], 원찬식[3]은 격자점 신축 방법과 임의 이동 경계면 방법을 이용하여 제로터형 오일 펌프의 해석 방법을 제시하고, 이를 통해 제로터 유동 해석을 위해 적용된 수치해석 기법의 효율성과 타당성을 확인하였다.

또한, 박운성 등[4]은 Vane Pump에서의 베인 선단부에서의 마찰 특성을 실험을 통하여 알아보았다. 이와 같은 Vane Pump의 압력과 마찰에 관해서 많은 연구가 있었으나, 실험을 통한 연구였기 때문에 구조적 제약 및 국부적인 유동 현상 파악이 미흡하였다. 따라서, 본 연구에서는 수치해석 상의 문제점 및 여러 가지 해석 인자들의 영향 등을 고려하여 CFD를 통한 Vane Pump의 유동 현상을 해석 하였다.

2. 해석 조건 및 방법

2.1 해석 격자

Vane Pump의 유동 해석을 위해서 Fig. 1과 같은 계산 격자를 생성하였다. 계산 격자는 회전 부분의 유체 Cell 약 105,600개, 고체 Cell 약 9,600개, 로터의 움직임을 모사하기 위한 Shell Cell 약 35,500개, 회전 부분 제외한 부분의 유체 Cell 약 700,000개로 총 850,700개를 사용하였다.

이와 같은 Vane Pump의 계산 격자를 만드는 방법은 Fig. 2와 같다. 먼저 임의의 형상 셀(Custom Cell)을 생성하고 나서 로터

* 서강대학교 기계공학과 대학원, sh4638@nate.com

** 서강대학교 기계공학과, nhur@sogang.ac.kr

*** CDAK 기술연구소, jby@cdak.co.kr

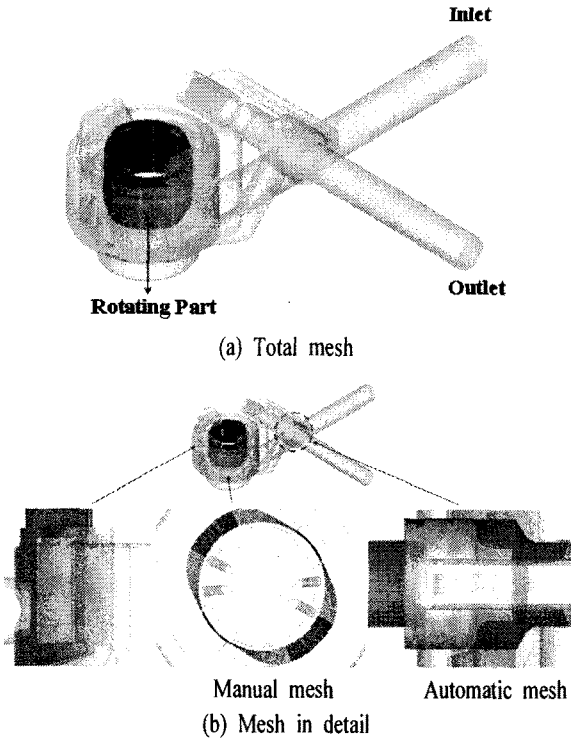


Fig. 1 Computational mesh of a vane pump

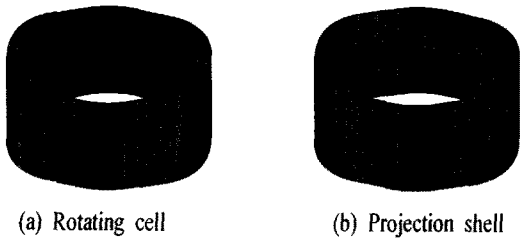


Fig. 2 Rotating vane

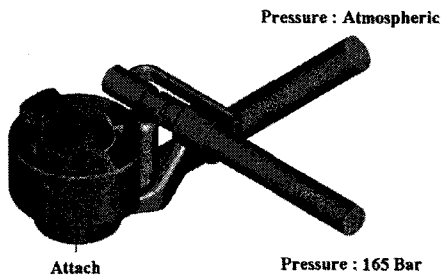


Fig. 3. Boundary conditions

바깥쪽 형상 데이터를 이용하여 로터 바깥 형상의 Shell을 만든다. Shell을 만든 후 임의의 형상 Cell 중 반경 방향 바깥쪽 격자점들을 Shell 표면에 원통좌표계를 기준으로 직교 투영(Projection)시키고 임의의 형상 Cell 내부의 격자점들을 연결해주면 해석에 사용할 회전부의 해석 격자를 얻을 수 있다.

2.2 경계 조건 및 해석 방법

본 연구에서는 Vane Pump의 유동 해석의 타당성을 검증하기 위하여 출구에서의 유량을 실험 결과와 비교하였다. 이를 위해서 Fig. 3과 같은 경계 조건을 적용하였다. 계산 격자에서 펌프

의 입구에는 대기압을, 출구 부분에는 165 Bar의 압력 경계조건을 주었다. 그리고 로터 회전부와 정지해 있는 부분은 잇기 위해서 접합면에는 접합(Attach) 경계 조건을 적용하였다. 이는 회전부와 정지부의 시간에 따른 형상에서 유량, 압력들의 연결을 위한 임의의 이동 경계면 조건을 적용하기 위해 고려되었다.

또한, 본 연구를 위해 상용 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 비정상 압축성 난류유동을 해석하였으며, 지배방정식은 기본적인 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델, 해석 알고리즘은 PISO 법을 적용하였다. 또한, 결과를 얻기 위해서 속도, 압력 분포가 시간에 따라 주기적인 특성을 갖게 되어 유동이 충분히 발달되었다고 판단될 때까지 해석을 수행하였다.

2.3 이동 격자(Moving Mesh) 방법

이동 격자 방법은 계산 공간 내의 격자가 변화되는 경우 사용한다. 본 연구에서는 회전부분이 고정부분과 접하는 면이 매 Step 바뀌므로 회전부분과 고정부분의 연결을 재정의 해가며 계산을 수행한다. 이 때 회전부분의 움직임에 따라 그 경계는 자동으로 바뀌게 된다.

특히 이 방법을 사용하면 엔진 실린더 내의 유동 계산에서 필요한 밸브의 개폐시 움직임과, 본 연구에서와 같이 펌프내에서 Vane의 움직임에 따른 회전부분의 움직임을 쉽게 처리할 수 있다.

본 계산에서는 해석시 로터부분의 회전 속도인 661.5 rpm을 이용하여 해석 격자 반경방향 생성 간격 1 Degree 이동시 연결을 재정의하여 펌프의 움직임을 모사하였다.

2.4 회전에 따른 격자점 신축 방법

실제로 Vane Pump는 Vane의 움직임과 로터의 회전에 따라 해석 격자가 로터의 형상을 유지하며 회전하는 움직임을 적절하게 모사할 수 있어야 유동 해석을 수행할 수 있다. 이를 해결하기 위해서 Fig. 2와 같이 단지 유체 Cell을 축에 대해 회전하는 것이 아니라 유체 Cell 이외에 로터 바깥쪽의 형상 데이터의 Shell을 이용하여 회전시 로터의 위치에 따라 격자점을 반경 방향으로 줄이거나 늘여서 계산 격자를 변경하여 로터의 움직임을 모사하였다. 즉, 로터의 안쪽과 바깥쪽 격자점을 매 Time Step의 해당각으로 회전하고 회전에 따른 반경방향의 위치에 위치시키고 그 사이의 격자점들을 재정렬 시킴으로써 격자가 해당되는 회전 위치에 위치하도록 하였다. 계산시 사용된 격자점 이동 방법을 보면, 우선 로터 유체 Cell을 적절한 회전각도로 회전시키고 유체 Cell 제일 바깥 쪽 격자점을 로터 형상을 가진 Shell에 직교 투영시킨다. 그리고 나서 로터 내부 Cell의 안쪽과 바깥쪽 사이의 격자점들을 연결하면 회전된 로터의 형상을 얻을 수 있다. 이와 같이 시간에 따라 연속적으로 반복하면 회전하는 로터의 유동을 계산할 수 있다.

2.5 밀도-압력 관계식

작동 유체인 오일은(SAE 5W-30 Engine Oil) 통상 비압축성으로 고려할 수 있으나, 회전에 따라 로터 내부에서 유체가 순간적으로 빠른 속도를 보이거나 높은 압력구배를 갖는 부분이 나타난다. 일반적인 비압축성 계산이 이런 유동 특성의 영향으로 유동 계산시 수렴된 결과를 얻기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 압축성을 고려하여 다음과 같은 압력 밀도 관계식을 적용하였다.

$$\rho = \rho_0 \exp(-kp) \quad (1)$$

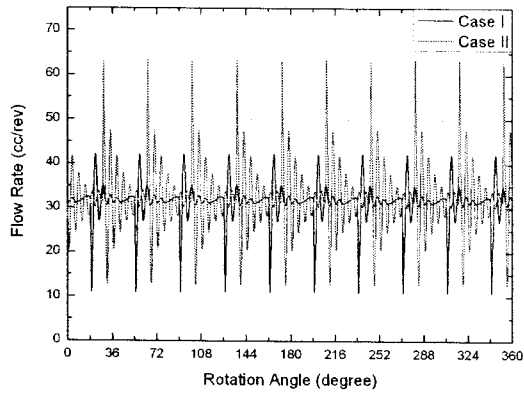


Fig. 4 Flow rate at the outlet

여기서 ρ 는 밀도, ρ_0 는 기준 밀도, k 는 압축률 그리고 p 는 압력을 나타낸다. 이 식을 적용하면, 전체적으로 밀도변화는 아주 작지만 로터 내에서의 유동 해석시 좋은 수렴성을 얻을 수 있다.

3. 해석 결과

3.1 회전각에 따른 유량 변화

앞에서 언급한 것과 같이 생성된 격자(Fig. 1 & 2)를 2가지 Case(시계방향 & 반시계방향)에 해당하는 경계조건(Fig. 3)을 설정하여 해석하였다. 이 때, 시계, 반시계 방향으로 이동 격자를 설정하여 로터 부분의 회전을 표현하였다.

이동 격자를 설정하는데 있어서 회전 방향으로 1도씩 간격으로 격자를 생성하였기 때문에 기본적으로 1 Step에 로터 부분을 0.1도씩 회전하고 격자 생성각인 1도를 움직였을 때 접합 경계면을 새로 연결하여 계산을 수행하였다.

Fig. 4는 Case I(시계방향)과 II(반시계방향)의 0.1도씩 회전하였을 때 회전에 따른 Vane Pump를 빠져나가는 유량 변화를 나타낸다. 각 Case 별로 평균 유량을 알아보면, Case I은 31.450 cc/rev, Case II는 32.536 cc/rev으로 이는 실험에서 구한 유량인 32 cc/rev에 매우 근접한 결과를 얻었다.

Case I의 경우 로터 부분이 시계방향으로 회전하기 때문에 유량이 출구 쪽으로 나가고, Case II의 경우 반시계방향으로 회전하기 때문에 유량이 입구 쪽으로 나간다. 이 때, Case II의 결과가 Case I의 결과보다 값이 약간 크다. 이는 해석을 하는데 있어서 수렴을 좋게 하기 위해서 Oil을 압축성으로 가정하여 구하였기 때문에 Case I의 출구 압력이 Case II의 입구 압력보다 크기 때문에 출구에서의 부피 유량에 있어서 Case II의 값이 Case I보다 큰 결과를 얻을 수 있었다.

또한, 두가지 Case를 비교해보면, Case II에서의 유량이 평균유량에서 진동폭이 Case I에 비해 크다. 이는 Case I은 출구쪽으로 나가는 유동이 단면적이 작아지는 부분을 지나면서 Damping 효과를 얻어 유량의 진동폭이 Damping 효과가 없는 Case II에 비해 적다.

3.3 회전각에 따른 압력 변화

Fig. 5은 Case I(시계방향)과 II(반시계방향)의 0.1도씩 회전하였을 때 Vane에서의 회전에 따른 압력 변화를 보여준다. 이를 보면, 전체적인 입출구의 압력은 일반적으로 경계조건의 영향으로 입구에서는 대기압, 출구에서는 165 Bar를 갖는다.

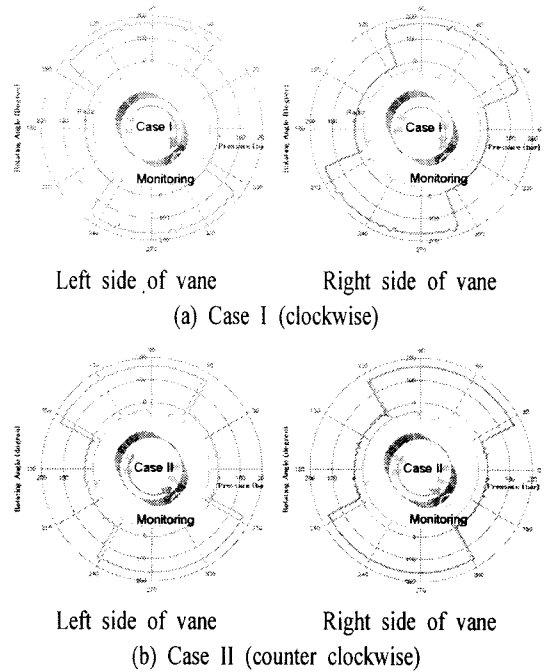


Fig. 5 Pressure distribution at the vane pump

이 때, Case I의 경우 출구쪽에서 Case II의 경우 입구쪽에서 압력이 진동하는 현상이 발생한다. Case I의 출구와 Case II의 입구는 유량이 흘러 나가는 방향이다. 이는 유량이 회전부로 들어오는 부분은 회전에 따라 로터의 회전부분의 단면적이 늘어나서 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흘러 들어가기 때문에 압력이 변화가 거의 없다. 그러나 유량이 나가는 부분은 로터와 캠링 사이 공간이 Vane에 의해서 10개의 부분으로 나누어져 있는데 회전에 따라 각각의 공간은 연결된 입출구의 압력에 의해 대기압과 165 Bar를 갖는다. 이 때, 회전에 의해 165 Bar로 압력이 형성된 공간에 대기압을 갖는 공간이 연결되거나 0 Bar로 압력이 형성된 공간에 165 Bar를 갖는 공간이 연결되는 경우, 압력이 급격히 바뀌어서 나가는 쪽의 압력에 진동이 생긴다.

이 때, Case I의 압력이 Case II의 압력보다 변동 폭이 더 크다. 또한, Case I의 경우 변동이 있는 구간이 165 Bar를 형성하는 부분이고 Case II의 경우 대기압이 형성하는 부분이기 때문에 Case I의 경우가 Case II 보다 Vane이 파단될 가능성이 더 높다.

3.3 회전각에 따른 로터 내의 유동 특성

Fig. 6, 7은 Vane Pump 내부 유동 해석을 수행하여 얻은 속도와 압력 결과이다. Fig. 6은 Case I과 II에서 Vane이 해당 위치에 있을 때, Vane 양쪽면에 걸리는 압력을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a,b)의 형상 그림 왼쪽은 Case I의 결과(회전방향 : 왼쪽)이고 오른쪽은 Case II의 결과(회전방향 : 오른쪽)이다. 이를 보면, Case II의 경우 회전에 따라 Vane의 중심부분에 큰 압력이 걸리고 바깥쪽으로 갈수록 압력이 작은 반면, Case I의 경우는 Vane의 상단과 하단에 압력이 낮은 부분이 형성된다. 따라서, Case I의 경우 상하단의 Vane에서 양면의 압력이 크게 달라지고 이로 인해 Vane의 끝 부분이 파단될 수 있다.

Fig. 7은 Case I과 II에서 흡입부와 퇴출부에서 유동 형태를 보여준다. 이를 보면, Case II에서는 흡입부에서 로터 안쪽으로 퇴출부에서 바깥쪽으로 유동이 형성되나, Case I에서는 앞에서 언급한 것과 같이 Vane의 상하단에서 압력차가 심하여 재순환을 형성하며 역류한다.

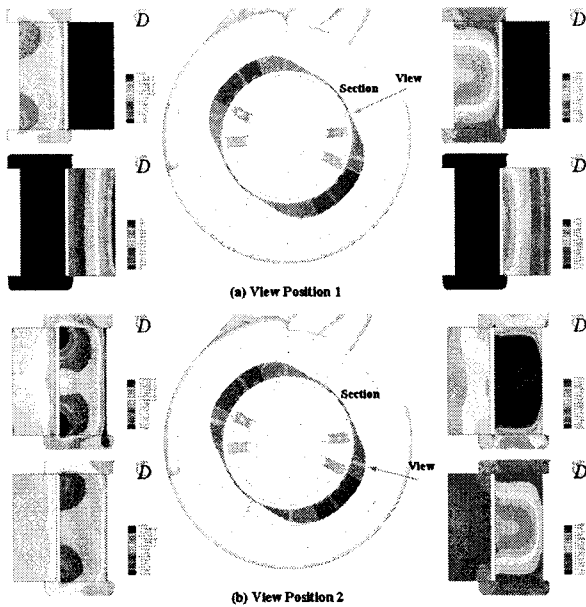


Fig. 6 Pressure distribution around vane

결국 이러한 유동 양상은 펌프 효율에 손실을 가져오게 되며 로터 형상이 최적화 되어 있지 않음을 알 수 있다. 따라서 좀더 효율적인 펌프 설계를 위해서는 로터의 흡입/퇴출부에서 와류가 발생하지 않도록 로터의 형상 설계가 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 Power Steering에 사용되는 Vane Pump에 대해 수치해석을 수행하였다. 이 때, Vane Pump의 로터 부분의 회전을 모사하기 위해서 회전에 따른 격자점 신축 방법과 이동 격자 방법을 적용하였다.

이를 이용한 계산을 통해 로터 부분의 회전에 따른 유량 및 압력의 변화를 예측하였다. 또한, 회전시 나타나는 로터 내부의 유동과 압력을 통해 역류 현상 및 와류 발생 등의 유동 현상을 볼 수 있었다.

그러나 Oil의 밀도의 영향은 펌프 내의 물리적인 특성뿐만 아니라 수치해석상 계산해의 수렴성에도 상당히 영향을 미치게 되므로 이 인자의 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

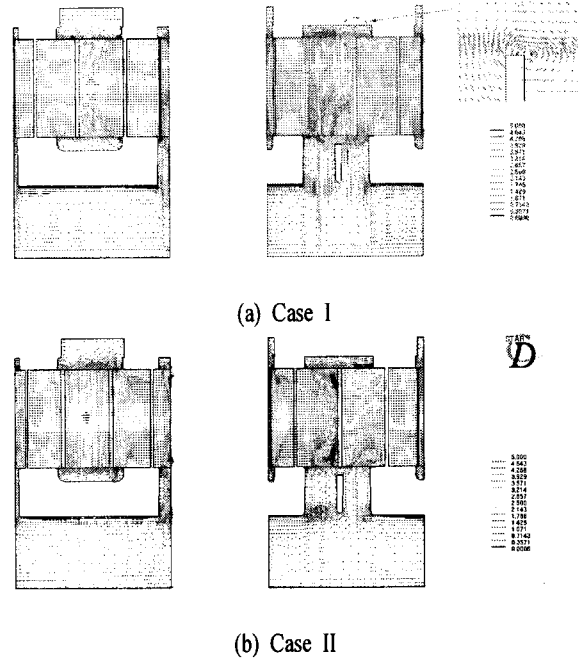


Fig. 7 Velocity vector at leaving and suction part

참고 문헌

- [1] 허남건, 원찬식, 허성범, 권성호, 2002, *Water 펌프 및 Oil 펌프 유동해석*, 서강대학교산업기술연구소.
- [2] Yu Jiang, Andrzej Przekwas and Chin-Yuan Perng, 1996, "Computational Analysis of Oil Pumps with an Implicit Pressure Based Method Using Unstructured Mixed Element Grids," *SAE paper-960423*
- [3] 원찬식, 허남건, 권성호, 2002, "자동차용 Gerotor형 오일 펌프의 유동 해석," *제2회 한국유체공학술대회 논문집*, pp.573-576.
- [4] 박운성, 정석훈, 오석형, 정재연, 2005, "Power Steering 용 유압 베인 펌프의 베인 선단부에서의 마찰특성," *한국운활학회지 제11권 3호*, pp.48-53.