

베인 펌프 설계인자 변화에 따른 내부 유동 해석

이상혁* · 허남건**

Numerical Study on Effects of Design Factors on Flow Characteristics of a Vane Pump

Sang Hyuk Lee*, Nahmkeon Hur**

Key Words : Vane Pump(베인펌프), CFD(전산유체역학), Power Steering(동력조향장치), Design Factor(설계인자), Operating Condition(작동조건)

ABSTRACT

In the present study, the effects of the design factors and operating conditions on flow characteristics of a vane pump for the automotive power steering system has been analyzed numerically. An unsteady moving mesh technique with cell expansion/contraction method is used to simulate the rotation of vanes with respect to stationary inlet and outlet. As a result, the flow characteristics of the flow rate and pressure rise across the vane pump were obtained. The numerical analyses for the various design factors such as number of vanes and thickness between the rotor and camring and for various operating conditions such as rotational speed and pressure difference between inlet and outlet were extensively performed. And the results were discussed in the paper.

1. 서론

베인 펌프는 기계적인 운동으로부터 수두차를 얻음으로써 여타의 펌프와 마찬가지로 작동유체의 에너지를 변화시킨다. 또한, 베인 펌프는 소형이며 경량으로 큰 출력을 얻을 수 있으며 구조가 간단하며 수명이 길기 때문에 여러 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 최근에는 차량의 운전자의 조타력을 증대시켜 손쉬운 조향이 가능하게 하는 동력조향장치의 동력원으로 많이 사용되고 있다. 초기 동력조향장치는 대형 차량에만 사용되던 장치였으나 요즘에는 운전자의 편의 및 사고

예방을 위해 대부분의 차량에 사용되고 있다. 이 때, 베인 펌프는 베인의 슬라이딩 운동이 가능하도록 조립되는 로터와 캠링 사이의 공간이 로터의 회전운동으로 인하여 확대 및 감소함으로써 오일을 흡입부에서 토출부로 이동시킨다. 일반적으로 베인 펌프 내의 로터의 회전과 베인의 슬라이딩 운동, 로터와 캠링 사이의 공간, 회전 방향에 따른 오일의 유출입시 역류 현상 등은 베인 펌프의 효율과 직결된다.

최적의 펌프를 설계하기 위하여 많은 연구가 수행되고 있다. Giuffrida와 Lanzafame⁽¹⁾은 베인 펌프의 설계에 있어 캠링 형상으로부터 얻을 수 있는 유량에 대한 이론식을 도출하였다. Prakash와 Pandey⁽²⁾는 실험을 통해 원심 펌프에서 압력 진동이 임펠러 베인 끝부분에 주기적인 부하로 작용하여 피로파괴가 일어

* 서강대학교 기계공학과 대학원

** 서강대학교 기계공학과

E-mail : nhur@sogang.ac.kr

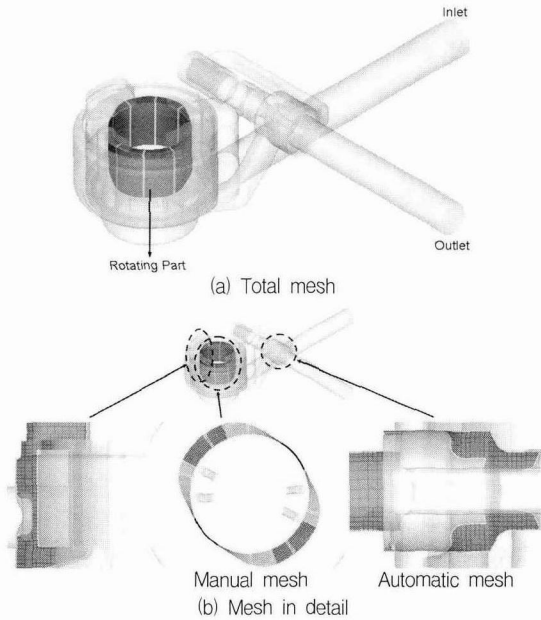


Fig. 1 Computational mesh of a vane pump

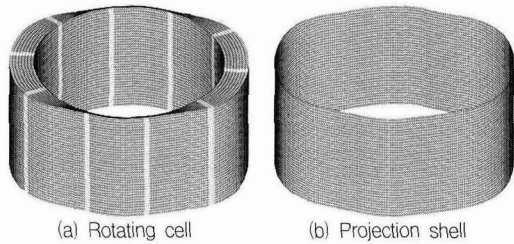


Fig. 2 Mesh for performing the rotation of the vane

남을 검증하였으며 박운성 등⁽³⁾은 베인 펌프의 베인 선단부에서 마찰 특성을 분석하였다. 그러나 이러한 실험을 통한 개발 및 성능 평가는 부품의 형상이나 실험 조건의 변화에 따라 실험 장치를 새로 제작해야 하기 때문에 많은 시간이 필요하고 경제적인 부담이 요구되며 실험을 통한 연구는 구조적 제약 및 국부적인 유동 현상 파악에 미흡하다.

이러한 실험상의 문제점을 해결하기 위해서 많은 산업 현장에 CAE를 통한 연구가 진행되고 있으며 펌프 내부 유동에 대한 CFD 해석이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 베인펌프에 대한 수치해석은 아직 많이 이루어지지 않아 베인펌프와 유사한 형상과 원리를 갖는 제로터형 오일펌프에 적용된 해석 방법을 통해 베인펌프의 유동을 해석하였다. Jiang 등⁽⁴⁾은 비구조적 자체와 임의 이동 경계면 방법을 사용하여 오일펌프에

대한 해석을 수행하였으며, 원찬식 등⁽⁵⁾은 격자점 신축 및 임의 이동 경계면 방법을 이용하여 제로터형 오일펌프를 해석함으로써 적용된 수치해석 기법의 효용성과 타당성을 확인하였다. 이상혁 등⁽⁶⁾은 이와 같은 해석기법을 사용하여 베인 펌프의 내부 유동 현상에 대해 수치 해석하였다. 본 연구에서는 위 논문을 기반으로 동력조향장치의 동력원으로 사용되는 베인 펌프의 유동특성에 설계인자 및 작동조건이 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 해석 조건 및 방법

2.1. 해석 격자 및 경계 조건

베인 펌프의 유동특성을 해석하기 위한 계산 격자는 Fig. 1과 같다. 로터와 캠링 사이에 베인으로 구분되어진 회전하는 공간이 있으며 이는 일정한 압력을 갖는 입구와 출구 부분과 연결되어 있다. 계산 격자는 회전하는 부분의 약 105,600 개 유체 격자와 약 9,600개 고체 격자, 로터의 움직임을 모사하기 위해서 로터의 외곽 형상에 대한 약 35,500 개 셸 격자, 회전 부분을 제외한 부분의 약 700,000 개 유체격자로 총 850,700 개로 구성되어 있다.

이 때, 로터와 캠링 사이 공간의 회전을 모사하기 위해서 Fig. 2와 같은 격자를 구성하였다. 먼저 회전하는 부분의 임의의 형상 격자를 구성하고 캠링의 형상 데이터를 이용하여 로터 외곽 형상 셸 격자를 만든다. 임의의 형상 격자 중에 반경 방향 바깥쪽의 격자점들을 셸 표면에 원통 좌표계를 기준으로 직교 투영시키고 임의의 형상 격자의 내부 격자점을 정렬하여 해석에 사용할 회전부분의 격자를 생성하였다. 격자생성시 베인 끝 부분 형상은 마찰에 의한 손실을 줄이기 위해 라운드 처리되어 있지만 이로 인한 내부 유동의 변화가 적다고 가정하고 격자생성 및 회전부분과 고정부분 연결의 용이함을 위해 직사각형 형태로 격자를 구성하였다.

베인 펌프의 내부 유동 해석을 위해서 사용한 경계 조건으로는 본 연구에서 사용한 펌프의 작동 범위 중 가혹한 상황에서 작동을 표현하기 위해서 입구 부분에 대기압, 출구 부분에 165 bar의 압력 경계조건을 적용하였으며 회전 부분과 정지해 있는 부분을 시간에 따라 유량 및 압력에 대해 연결하기 위해서 접합면에 접합 경계조건을 사용하였다.

2.2. 해석 방법

베인 펌프의 유동 해석에 있어서 실질적인 작동원리를 적용하기 위해서는 로터와 캠링 사이 공간의 회전을 모사하여야 하며 본 연구에서는 이동 격자 방법과 격자점 신축 방법을 사용하였다.⁽⁵⁾

이동 격자 방법은 해석 영역 내의 격자가 변화되는 경우 사용되며 엔진 실린더 내 유동 계산에서 필요한 밸브의 개폐시 움직임이나 본 연구에서와 같은 펌프 내 베인의 움직임에 따른 회전부분의 움직임을 처리할 때 사용된다. 베인 펌프의 경우 회전부분과 고정부분이 접하는 면이 시간에 따라 바뀌므로 회전부분과 고정부분의 연결을 재정의 해 가며 계산을 수행한다. 본 계산에서는 로터와 캠링 사이 공간의 격자가 회전 방향에 대해 1도 간격으로 형성되어 있기 때문에 로터의 회전 속도를 적용하여 1도의 회전이 이루어졌을 때 접합면에 대한 연결을 재정의함으로써 펌프의 움직임을 나타내었다.

또한 실질적인 베인 펌프의 유동 해석을 위해서는 베인의 움직임과 로터의 회전에 따라 회전하는 부분의 해석 격자가 캠링 외곽 형상을 유지하여야 한다. 이를 해결하기 위해서 회전부분의 격자를 단지 축에 대해 회전하는 것이 아니라 Fig. 2와 같은 캠링 형상 데이터로부터 얻은 셀 격자를 사용하여 회전 시 로터의 위치에 따라 격자점을 반경방향으로 줄이거나 늘여서 계산 격자를 재정렬하여 로터와 베인의 움직임을 모사하였다. 계산시 사용된 격자점 신축 방법을 보면, 우선 회전부분의 격자를 적절한 회전 각도로 회전시키고 회전부분 격자의 가장 바깥쪽 격자점을 캠링의 외곽 형상 격자에 직교 투영시켜 회전부분 안쪽과 바깥쪽 사이의 격자점을 연결하면 회전된 로터와 캠링 사이 형상을 얻을 수 있다. 이와 같은 방법을 연속적으로 반복하면 회전하는 베인 펌프를 나타낼 수 있다.

베인 펌프의 작동 유체는 통상 비압축성으로 고려할 수 있으나, 회전에 따라 로터 내부에서 유체가 순간적으로 빠른 속도를 보이거나 높은 압력 구배를 갖는 부분을 갖는다. 일반적인 비압축성 계산은 이런 유동 특성의 영향으로 유동 계산에 있어 수렴된 결과를 얻기 힘들다. 따라서 압축성을 고려하기 위해 다음과 같은 압력-밀도 관계식을 적용하였다.⁽⁷⁾

$$\rho = \rho_0 \exp(-k p) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, ρ_0 는 기준 밀도, k 는 압축률 그리고 p 는 압력을 나타내며, 본 연구에서는 베인 펌프에 사용되는 유체가 SAE 5W-30 Engine Oil과 유사한 압축성을 갖는다고 가정하여 기준 밀도 787.15 kg/m³과 압축률 $0.91 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 를 사용하였다. 이 식을 적용하면, 전체적으로 밀도변화는 아주 작지만 로터와 캠링 사이 체적이 변화하는 구간과 같은 압축성을 보이는 공간에서 유동 해석 시 좋은 수렴성을 얻을 수 있다.

이와 같은 해석 조건과 방법을 적용하여 본 연구에서는 상용 프로그램인 STAR-CD⁽⁸⁾를 사용하여 비정상 압축성 난류유동을 해석하였다. 또한, 베인 펌프 내부 유동의 비정상 해석으로부터 유동이 충분히 발달하여 주기적인 속도와 압력 분포를 가질 때까지 해석을 수행하였다. 대부분의 해석에서 회전부분이 약 5 바퀴 회전 후에 주기적인 결과를 보였으며 이 결과로부터 베인 펌프의 유동 특성을 분석하였다. 또한 비정상상태 해석에 있어 시간 간격을 회전부분이 0.1도 회전할 때의 시간으로 설정하고 이동 격자 방법에 있어 접합면은 10 번의 시간 간격마다 재정의하였다. 이와 같은 방법으로 베인 펌프의 주기적인 유동 특성을 얻는데 Intel Xeon 2.4 GHz 1 CPU Linux Cluster의 Node 한 개를 사용하여 50 시간 정도 소요되었다.

3. 해석 결과

베인 펌프를 설계하는데 있어 설계인자 및 작동조건이 베인 펌프의 성능에 미치는 연구를 병행하여야 한다. 베인 펌프로부터 얻고자하는 유량에 맞는 로터와 캠링, 베인 등의 형상을 설계할 때 이들의 변화는 베인 펌프의 내부 유동에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 설계인자의 변화에 따른 유동특성을 파악하여야 한다. 또한 설계인자가 미치는 영향뿐만 아니라 베인 펌프의 작동조건에 대한 연구도 진행되어야 한다. 특히 로터의 회전속도와 유동이 나가는 곳에서의 압력과 같은 작동조건에 대한 유동 특성 파악이 필요하다. 본 연구에서는 베인 펌프의 설계인자인 회전에 따른 체적 변화 구간과 베인 개수의 변화 및 작동 조건인 로터의 회전 속도와 출구에서 압력의 변화가 내부 유동 특성에 미치는 영향에 대해 수치해석 하였다.

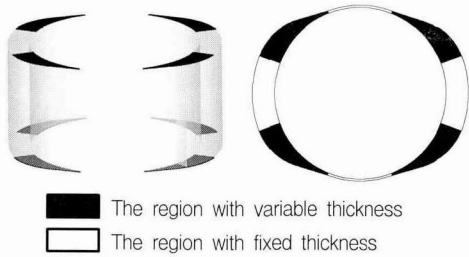


Fig. 3 Spatial geometry between the rotor and camring

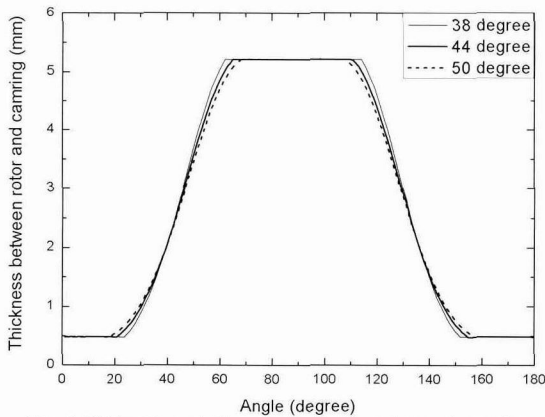


Fig. 4 Thickness variations between the rotor and camring

3.1. 로터와 캠링 사이 체적 변화구간의 영향

베인 펌프는 로터가 회전함에 따라 로터와 캠링 사이의 두께 차이로 인해 회전각마다 체적의 변화가 일어나게 되어 유동을 흐르게 한다. 베인 펌프 내의 회전하는 부분은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 로터와 캠링 사이의 공간으로 형성되어 있으며, 이 때 각도에 따른 로터와 캠링 사이의 두께는 Fig. 4와 같다. 로터와 캠링 사이 두께에 대해 보면, 일정한 두께를 갖는 부분과 두께가 변화하는 부분으로 나누어져 있다. 작동유체가 일정한 두께를 갖는 부분을 지날 때는 체적의 변화가 없지만 두께가 변화하는 부분을 지나게 되면 체적이 변화하게 되고 이에 따라 압력의 변화가 발생한다. 이 때, 체적이 변화하는 부분은 입출구 부분과 연결된다. 이는 입출구와 연결이 되어 있지 않는 부분에서 체적의 변화가 일어나면 일반적으로 비압축성 성질을 가진 오일의 압력이 증가하게 되고 이로 인해 캠링과 베인에 큰 힘이 가해지게 된다. 따라서, 체적의 변화가 일어나는 각도에 맞추어서 입출구에 연결되는

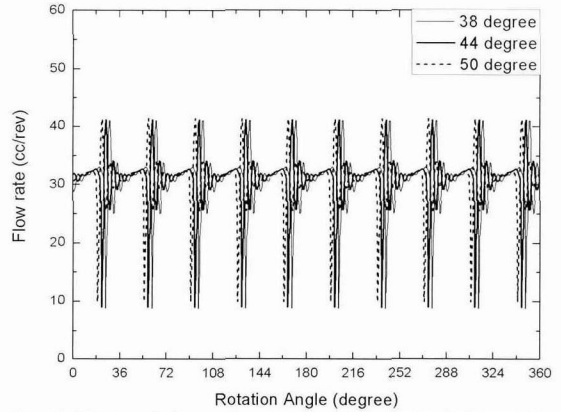


Fig. 5 Effects of the region varying the volume between the rotor and camring on the flow rate at the outlet

부분의 크기도 변화한다.

체적 변화 구간에 따른 내부 유동의 영향을 해석하기 위해서 로터와 캠링 사이의 두께 변화 구간을 Fig. 4와 같이 38, 44, 50도로 변경하였으며 입출구는 각 2개씩 존재하기 때문에 90도 간격으로 체적변화 구간을 위치시켜 회전부분을 구성하고 이에 따른 입출구와 연결되는 형상도 변화시켰다. 또한 베인 펌프는 10개의 베인으로 구성되어 있으며 661.50 RPM으로 회전하고 출구 압력은 165 bar를 형성하고 있다.

유동 해석 결과로부터 체적 변화 구간의 각도에 따른 유량의 변화를 Fig. 5와 같이 얻을 수 있다. 이를 보면, 펌프가 10개의 베인으로 구성되어 있기 때문에 36도의 회전각마다 주기적인 유량을 갖는다. 또한, 체적이 변화하는 구간의 각도가 바뀌면서 베인으로 구분된 영역이 회전에 따라 처음으로 입구나 출구와 만나는 회전각 위치가 달라졌기 때문에 유량의 위상차가 생길 뿐 전체적인 유량 특성에는 변화가 없다.

Figure. 6은 체적 변화 구간의 각도에 따른 베인 주변의 압력 변화를 보여주고 있다. 전체적인 압력 변화 결과를 보면, 크게 2가지의 압력 분포를 갖는 것을 확인할 수 있으며 이는 베인으로 구분된 부분이 입구 부분과 연결되면 대기압을, 출구 부분과 연결되면 165 bar 근처의 압력을 갖는다. 이 때, 입구와 연결된 영역에서는 체적이 늘어남에 따라 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흘러 들어가는 유동이 발생하여 급격한 압력 변화는 발생하지 않지만 출구와 연결된 영역에서는 급격한 체적 감소와 압력 차이로 압력이 진동하는 영역이 발생한다. 이와 같은 압력 진동은 베인 펌프의 사용에 있어 베인에 손상을 입힐 가능성을 높인다. 그

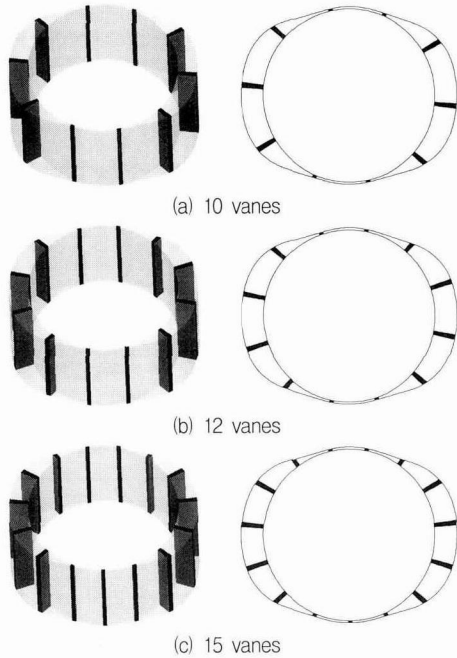


Fig. 6 Geometries with the various numbers of the vanes

러나 체적 변화 구간이 달라져도 압력 변화 결과는 유량 결과와 같이 입출구와 연결이 시작되는 회전각의 변화로 인해 위상차만 보일 뿐 전체적인 압력 변화는 비슷한 결과를 갖는다.

3.2. 베인 개수에 따른 영향

로터와 캠링 사이의 체적 변화 구간과 더불어 베인의 개수 선정도 베인 펌프의 유동 특성에 큰 영향을 미친다. 베인 개수의 변화는 베인으로 나누어진 공간의 크기를 변화시키며 이는 베인 펌프의 유량 및 압력의 변화를 가져오게 된다. 이와 같은 베인 개수에 따른 유동 특성을 분석하기 위해 회전부분의 체적 변화 구간을 46~47도 정도로 형성하고 Fig. 7과 같이 베인개수에 따라 회전부분을 생성하여 해석을 수행하였다.

Figure. 8은 베인 개수의 변화에 따른 유량의 변화를 보여주고 있다. 이를 보면, 베인의 개수가 증가할수록 베인이 차지하는 체적이 증가하기 때문에 베인 사이 공간은 베인의 체적으로 인해 감소하게 된다. 베인 사이 공간의 체적 감소는 평균 유량을 다소 감소시키며 전체적인 유량의 진동폭도 감소시킨다. 이는 베인 개수 증가로 인해 베인으로 구분된 공간과 입출구의

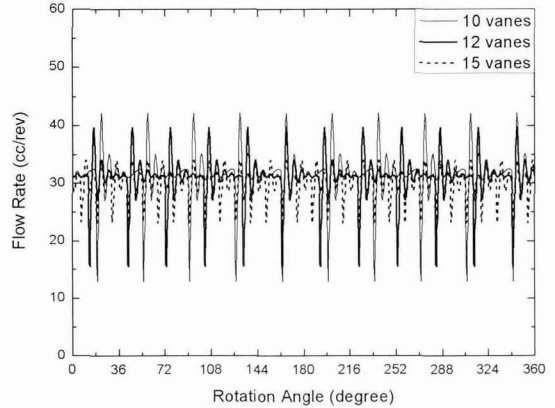


Fig. 7 Flow rate with the various numbers of the vanes

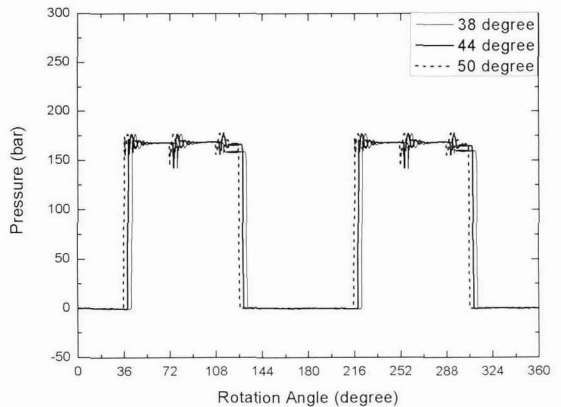


Fig. 8 Effects of the region varying the volume between the rotor and camring on the pressure around the vane

연결이 더 자주 일어나기 때문에 원활하게 유량을 이동시킬 수 있기 때문이다.

그러나 베인의 개수의 변화에 따른 베인 주변의 압력 변화를 보여주는 Fig. 9를 보면, 베인의 개수가 증가할수록 최대 압력값은 다소 감소하나 유량이 회전부분으로 들어오는 곳에서 압력이 급격하게 떨어진다. 베인으로 구분된 공간이 입구와 연결되게 되면 낮은 압력인 입구의 영향으로 인해 회전부분 내에서 압력 강하가 발생하며 베인으로 구분된 공간에서 급격한 압력 강하는 완화되어 진다. 베인의 개수가 적을 경우에는 베인으로 구분된 회전부분이 넓게 형성되어 있기 때문에 입구와 연결된 부분에서 부피 팽창으로 인한 압력 강하가 완화되어 급격한 압력 강하는 발생하지 않지만 베인의 개수가 증가할수록 압력 강하 발생시 이를 완화시키지 못하고 압력이 급격히 감소하게 되며 이러한 압력 강하는 캐비테이션을 초래할 수도 있다.

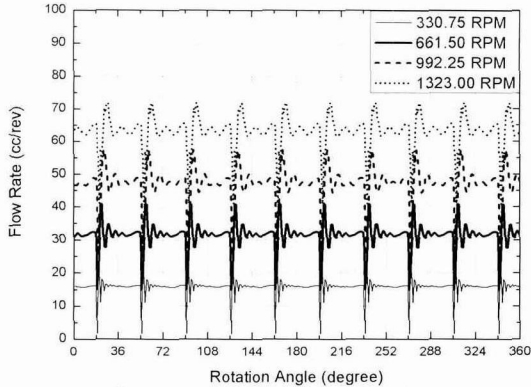


Fig. 9 Flow rate with various rotational speed

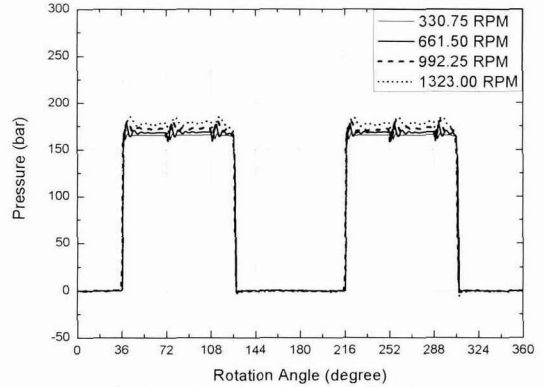


Fig. 11 Pressure with various rotational speed

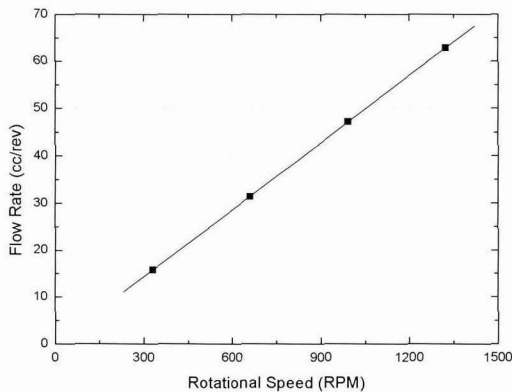


Fig. 10 Averaged Flow rate with various rotational speed

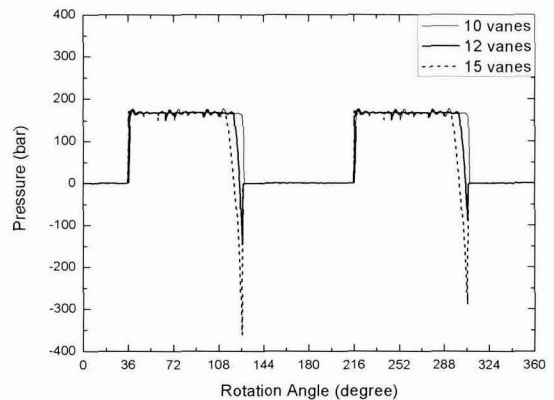


Fig. 12 Pressure with the various numbers of the vanes

그러나 이와 같은 급격한 압력 강하는 수치적 불안정성으로 인해 초래될 수 있기 때문에 이에 관한 추가 연구가 필요하다.

3.3. 로터의 회전 속도에 따른 영향

베인 펌프의 성능에 있어 위의 설계인자 뿐만 아니라 펌프의 작동조건도 큰 영향을 미친다. 로터의 회전 속도와 출구의 압력은 펌프를 구동함에 있어 상황에 따라 수시로 변화하기 때문에 이는 베인 펌프 내의 유동 특성에 영향을 준다.

많은 유량의 이동을 위해서는 로터의 회전 속도를 증가시켜야 하고 이는 유량 및 압력을 변화시킨다. 따라서, 베인이 10 개이고 체적 변화 구간이 46~47도 정도인 베인 펌프에 대해 회전속도가 330.75, 661.50, 992.25, 1323.00 RPM에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 10은 회전 속도에 따른 유량의 변화이다. 회전 속도가 증가할수록 평균 유량의 값은 Fig. 11과

같이 선형적으로 증가한다. 로터의 한바퀴 회전으로부터 얻을 수 있는 유량은 로터와 캠링의 형상으로부터 정해지므로 회전으로부터 얻는 유량은 회전 속도와 비례관계를 갖는다. 유량의 진동폭 역시 회전 속도가 증가할수록 증가하게 되며 이는 회전 속도 증가로 인해 출구와 연결된 부분에서 압력 변화가 더 짧은 시간 내에 일어나기 때문에 유량의 진동이 더 크게 일어난다.

회전 속도에 따른 베인 주변의 압력 변화는 Fig. 12와 같다. 더 많은 유량을 얻기 위한 회전 속도 증가는 출구와 연결된 회전부분의 체적 감소가 일어나는 시간이 줄어들어 따라 압력이 급격히 변화하게 되며 이로 인해 베인 주변에 더 큰 압력 진동을 발생시킨다. 이와 같이 로터의 회전 속도 증가는 원하고자 하는 유량을 얻기 위해 유량에는 증가를 가져왔지만 유량의 진동 폭과 로터 주변의 압력 상승과 더불어 베인에 걸리는 압력의 진동폭을 크게 하여 베인에 심한 손상을 입힐 수 있다.

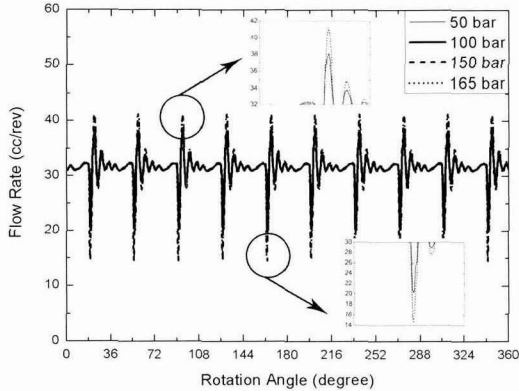


Fig. 13 Flow rate for the different pressure at the outlet

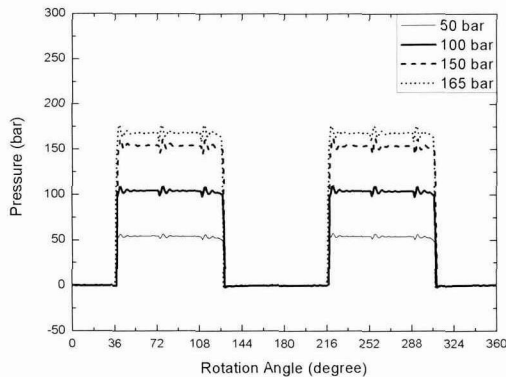


Fig. 14 Pressure for the different pressure at the outlet

3.4. 출구 압력에 따른 영향

로터의 회전속도와 더불어 베인 펌프의 작동조건에 큰 영향을 미치는 출구 압력의 변화에 따른 해석을 수행하였다. Fig. 13은 출구 압력에 대한 유량에 대해 보여준다. 661.50 RPM의 일정한 회전속도로 로터가 회전하기 때문에 전반적인 평균 유량은 비슷하나 출구 압력이 증가할수록 유량의 진동폭은 증가한다. 회전 부분이 출구와 연결될 경우 회전 부분의 압력은 대체적으로 입구의 압력과 비슷한 값을 가지나 출구 압력의 영향으로 급격한 압력 변화가 발생하는데 출구 압력의 증가는 더 큰 압력차를 초래하여 유량의 진동폭도 함께 증가시킨다. 또한 Fig. 14의 출구 압력에 따른 압력 변화를 보면, 유동이 흘러나가는 곳의 압력은 일반적으로 출구 압력과 같은 값을 갖으며 유량의 진동과 같이 출구 압력의 증가는 베인 주변 압력의 진동폭을 증가시킨다.

이와 같이 로터의 회전속도와 출구 압력의 변화는 압력과 유량의 진동을 가져올 수 있다. 이러한 진동폭의 증가는 베인에 부하로 작용하여 이는 베인의 심각한 손상을 초래할 수 있다. 따라서, 유량 및 압력의 진동을 감소시킬 수 있는 유량이 흘러나가는 부분의 단면 감소 장치나 압력 진동을 줄이기 위한 입구로의 유량 재유입과 같은 장치가 베인 펌프의 설계 및 제작에 적용되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 동력조향장치의 동력원으로 사용되는 베인펌프의 설계인자 및 작동조건 변화가 유동 특성에 미치는 영향에 대해 해석하였다. 베인펌프의 유동 현상을 수치해석하기 위해서 이동 격자 방법 및 격자점 신축 방법을 사용함으로써 실제적인 작동조건을 적용할 수 있었다.

이와 같은 조건을 적용한 계산을 통해 로터와 캠링 사이의 공간의 회전에 따른 출구에서 유량 및 베인 주변의 압력 변화를 예측하였다. 또한 베인펌프 로터와 캠링의 설계에 있어 중요한 설계인자인 로터와 캠링 사이의 두께 차이로 인한 체적 변화 구간과 베인 개수가 유동 현상에 미치는 영향을 해석하였다. 체적 변화 구간은 베인 펌프의 유동에 큰 영향을 미치지 않았으나, 베인 개수의 변화는 유량에는 큰 변화를 주지 않았지만 베인 주변에 급격한 압력강하를 발생시켜 캐비테이션을 일으킬 수 있음을 알았다.

베인 펌프 설계에 있어 형상 설계인자의 영향 뿐 아니라 작동조건인 회전 속도와 출구 압력이 미치는 영향에 대한 연구도 진행되었다. 이 때, 회전 속도 및 출구 압력의 증가는 출구 유량과 베인 주변 압력의 증가를 가져올 수 있고 이는 회전 부분 내의 베인에 걸리는 압력의 상승과 함께 압력의 진동폭도 상승시켜 베인에 심각한 손상을 초래할 수 있다. 따라서, 베인 설계시 원하는 유량을 얻는 단면 감소비와 같은 형상 설계와 더불어 유량과 압력의 진동폭을 감소시킬 수 있는 장치의 설계도 고려되어야 한다.

참고문헌

- (1) A. Giuffrida and R. Lanzafame, 2005, "Cam shape and theoretical flow rate in balanced vane pumps," Mechanism and Machine Theory,

- Vol.40, pp. 353~369.
- (2) O. Prakash and P.K. Pandey, 1996, "Failure Analysis of the Impeller of a Feed Pump," *Engineering Failure Analysis*, Vol.3, No.1, pp. 45~52.
 - (3) 박운성, 정석훈, 오석형, 정재연, 2005, "Power Steeing 용 유압 베인 펌프의 베인 선단부에서의 마찰특성," *한국윤활학회지* 제11권 3호, pp. 48~53.
 - (4) Y. Jiang, A. Przekwas and C.-Y. Perng, 1996, "Computational Analysis of Oil Pumps with an Implicit Pressure Based Method Using Unstructured Mixed Element Grids," SAE paper-960423.
 - (5) 원찬식, 허남건, 권성호, 2003, "자동차용 제로터형 오일 펌프의 유동 해석," *유체기계저널*, 제6권 4호, pp. 7~13.
 - (6) 이상혁, 허남건, 진봉용, 2007, "Vane Pump의 유동 특성에 대한 수치 해석," *유체기계저널*, 제10권 1호, pp. 34~40.
 - (7) 허남건, 원찬식, 허성범, 권성호, 윤상훈, 김승해, 이명선, 2003, "Gerotor형 오일펌프 유동해석," *한국과학기술정보연구원*.
 - (8) Star-CD Manual, Ver. 3.24, 2004, Computational Dynamics Ltd.