

## Vane Pump의 유동 특성에 대한 수치 해석

이상혁\* · 허남건\*\* · 진봉용\*\*\*

### Numerical Analysis on Flow Characteristics of a Vane Pump

Sang Hyuk Lee\*, Nahmkeon Hur\*\*, 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 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 observed. As a result of flow characteristics, The difference of pressure between both side of vane tip causes the back flow into the rotor. As the rotational velocity increases, the flow rate at the outlet and the pressure in the vane tip rises with higher amplitude of oscillation. In order to reducing the oscillation, the design of devices for decreasing the cross-area of the outlet part and returning the flow from the outlet to the inlet is required.

#### 1. 서론

최근 자동차의 미래형 첨단 기술 개발과 모토화 현상의 가속화로 완성차의 경쟁력뿐만 아니라 이를 뒷받침하는 부품 산업의 경쟁력 확보가 필수화되는 추세이며, 이에 따라 부품의 개발 및 성능 평가를 위한 지원 및 노력이 활발히 진행되고 있다. 그 한 예로 차량의 성능에 직접적인 영향을 주는 냉각수 펌프나 오일 펌프 등을 개

발하거나 그 성능을 예측하기 위한 실험이 수행되고 있다. 그러나 실험을 통한 개발 및 성능 평가는 부품의 형상이 바뀌거나 실험 조건이 달라짐에 따라 실험 장치를 새로 제작하거나 변경해 주어야 하기 때문에 많은 시간이 필요하고 경제적으로도 상당한 부담을 요구한다. 이러한 실험상의 문제점을 해결하기 위해 많은 산업 현장에서 검증된 CFD 기법을 이용한 해석의 필요성이 증가되고 있다. 또한 이를 통해 실험에서 확인할 수 없었던 장치 내의 국부적인 유동 현상 및 특징을 파악함으로써 부품의 효과적인 설계가 이루어질 수 있다.

본 연구에서는 동력조향장치용 베인 펌프의 유동 특성을 연구하였다. 동력조향장치는 동력장치를 이용하여

\* 서강대학교 기계공학과 대학원

\*\* 서강대학교 기계공학과

\*\*\* CDAK 기술연구소

책임저자 E-mail: nhur@sogang.ac.kr

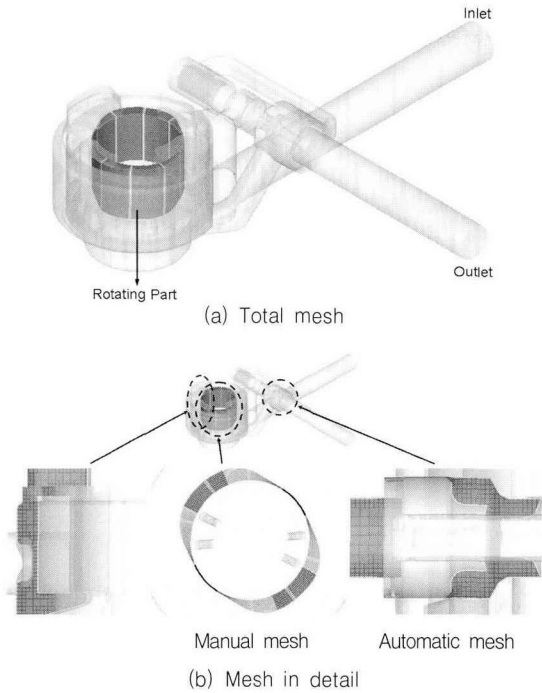


Fig. 1 Computational mesh of a vane pump

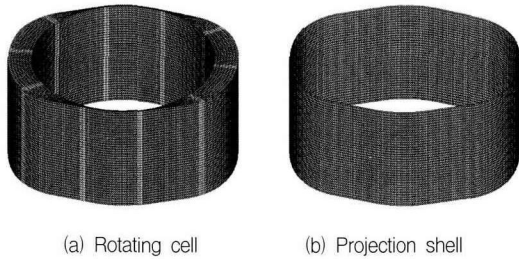


Fig. 2 Rotating vane

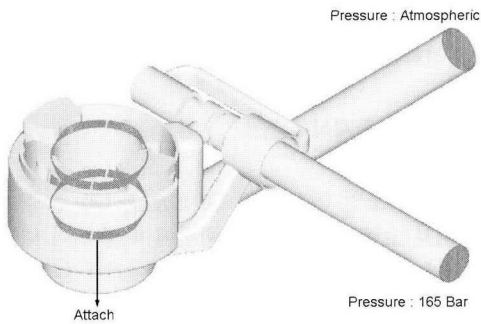


Fig. 3 Boundary conditions

운전자의 조타력을 증대시켜 손쉬운 조향을 가능하게 하는 장치이다. 초기에는 대형 차량에만 사용되던 장치였으나 요즘에는 운전자 편의 및 사고예방을 위한 차량 제작 및 설계시 엔진동력의 일부를 손해 보더라도 거의 모든 차량에 동력조향장치가 장착된다. 보통 유압식 동력 조향 장치에서는 동력원으로 유압을 공급하는 베인 펌프가 사용되는데, 이는 베인의 슬라이딩 운동이 가능하도록 조립되는 로터와 캠링 사이의 공간이 로터의 회전운동으로 인하여 확대 및 감소함으로써 오일을 흡입부에서 퇴출부 쪽으로 보낸다. 일반적으로 베인 펌프 내에서는 로터의 회전과 베인의 슬라이딩 운동, 로터와 캠링 사이의 공간, 회전 방향에 따른 오일의 유출입시 역류 등의 현상들은 베인 펌프의 효율과 직결된다.

이와 같은 베인 펌프 내의 작동 원리를 해석에 적용하기 위해서 다음과 같은 방법이 사용되었다. Jiang 등<sup>(1)</sup>은 비구조격자계와 임의 이동 경계면 방법을 사용하여 오일펌프에 대한 수치해석을 수행하였으며, 허남진 등<sup>(2)</sup>, 원찬식 등<sup>(3)</sup>은 격자점 신축 및 임의 이동 경계면 방법을 이용하여 제로터형 오일펌프의 해석 방법을 제시하고, 이를 통해 제로터 유동 해석을 위해 적용된 수치해석 기법의 효용성과 타당성을 확인하였다.

또한, Prakash와 Pandey<sup>(4)</sup>는 원심 펌프에서 압력 진동이 임펠러 베인 끝부분에 주기적 부하로 작용해 피로 파괴를 일으킴을 확인하였다. 박운성 등<sup>(5)</sup>은 베인 펌프에서의 베인 선단부에서의 마찰 특성을 실험을 통하여 알아보았다. 이와 같은 베인 펌프의 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 베인 펌프의 유동 현상을 해석 하였다.

## 2. 해석 조건 및 방법

### 2.1. 해석 격자

베인 펌프의 유동 해석을 위해서 Fig. 1과 같은 계산 격자를 생성하였다. 계산 격자는 회전 부분의 유체 격자 약 105,600개와 고체 격자 약 9,600개, 로터의 움직임을 모사하기 위한 로터의 외곽 형상에 대한 셀 격자 약 35,500개, 회전 부분 제외한 부분의 유체 격자 약 700,000개로 총 850,700개를 사용하였다.

이와 같은 베인 펌프의 계산 격자를 만드는 방법은

Fig. 2와 같다. 먼저 임의의 형상 셀 (custom cell)을 생성하고 나서 로터 바깥쪽 형상 데이터를 이용하여 로터 외곽 형상의 셀을 만든다. 셀을 만든 후 임의의 형상 격자 중 반경 방향 바깥쪽 격자점들을 셀 표면에 원통좌표계를 기준으로 직교 투영 (projection)시키고 임의의 형상 격자 내부의 격자점들을 정렬해두면 해석에 사용할 회전부의 해석 격자를 얻을 수 있다.

## 2.2. 경계 조건 및 해석 방법

본 연구에서는 베인 펌프의 유동 해석의 타당성을 검증하기 위하여 출구에서의 유량을 실험 결과와 비교하기 위해서 Fig. 3과 같은 경계 조건을 적용하였다. 계산 격자에서 펌프의 입구에는 대기압을, 출구 부분에는 165 bar의 압력 경계조건을 주었다. 그리고 로터의 회전 부분과 정지해 있는 부분을 시간에 따라 유량 및 압력에 대해 연결하기 위해 접합면에는 접합 (attach) 경계 조건을 적용하였다.

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 사용된다. 본 연구에서는 회전부분과 고정부분의 접하는 면이 시간에 따라 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 움직임이나 본 연구에서와 같이 펌프 내에서 베인의 움직임에 따른 회전부분의 움직임을 쉽게 처리할 수 있다.

본 계산에서는 로터부분에 해당 회전 속도를 적용하여 해석 격자의 반경 방향 생성 간격인 1도 이동시 접합면에 대한 연결을 재정의함으로써 펌프의 움직임을 모사하였다.

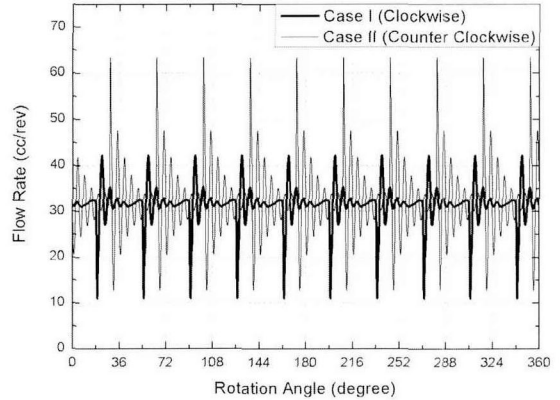


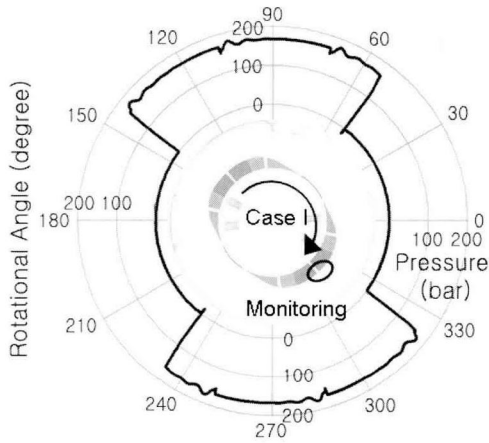
Fig. 4 Flow rate at the outlet

## 2.4. 회전에 따른 격자점 신축 방법

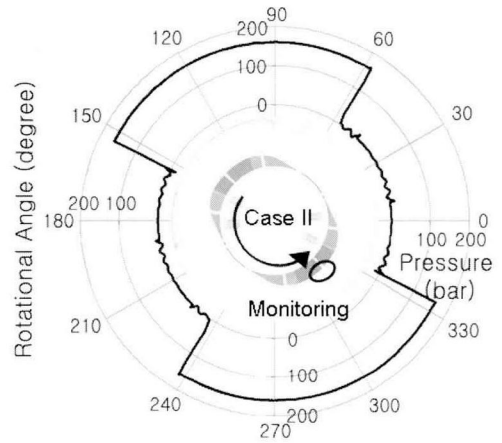
실질적인 베인 펌프의 유동 해석을 수행하기 위해서는 베인의 움직임과 로터의 회전에 따라 해석 격자가 로터의 형상을 유지하며 회전하는 움직임을 적절하게 모사하여야 한다. 이를 해결하기 위해서 단지 유체 격자 축에 대해 회전하는 것이 아니라 Fig. 2와 같이 유체 격자 이외에 로터 바깥쪽의 형상 데이터의 셀을 이용하여 회전시 로터의 위치에 따라 격자점을 반경방향으로 줄이거나 늘여서 계산 격자를 재정렬하여 로터의 움직임을 모사하였다. 즉, 로터의 안쪽과 바깥쪽 격자점을 각 계산 단계의 해당각으로 회전하고 회전에 따른 반경방향의 위치에 위치시키고 그 사이의 격자점들을 재정렬 시킴으로써 격자가 해당되는 회전 위치에 위치하도록 하였다. 계산시 사용된 격자점 이동 방법을 보면, 우선 로터 유체 격자를 적절한 회전각도로 회전시키고 유체 격자의 제일 바깥 쪽 격자점을 로터 형상을 가진 셀에 직교 투영시킨다. 그리고 나서 로터 내부 격자의 안쪽과 바깥쪽 사이의 격자점을 연결하면 회전된 로터의 형상을 얻을 수 있다. 이와 같이 시간에 따라 연속적으로 반복하면 회전하는 로터의 유동을 계산할 수 있다.

## 2.5. 밀도-압력 관계식

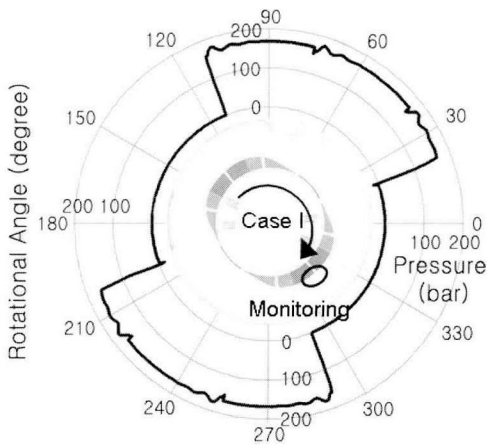
작동 유체인 오일 (SAE 5W-30 Engine Oil)은 통상 비압축성으로 고려할 수 있으나, 회전에 따라 로터 내부에서 유체가 순간적으로 빠른 속도를 보이거나 높은 압력구배를 갖는 부분을 갖는다. 일반적인 비압축성 계산은 이런 유동 특성의 영향으로 유동 계산시 수렴된 결과



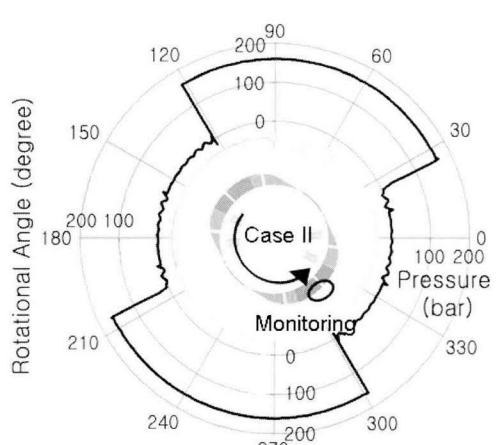
(a) Left side of vane



(a) Left side of vane



(b) Right side of vane



(b) Right side of vane

Fig. 5 Pressure variation by rotation of the rotor (Case I)

Fig. 6 Pressure variation by rotation of the rotor (Case II)

를 얻기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 압축성을 고려하여 다음과 같은 압력 밀도 관계식을 적용하였다.

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

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\rho_0$ 는 기준 밀도,  $k$ 는 압축률 그리고  $\phi$ 는 압력을 나타내며 본 연구에서는 베인 펌프에 사용되는 오일의 기준 밀도  $787.15 \text{ kg/m}^3$ 과 압축성을 고려하기 위한 압축률  $0.91\text{E-}9$ 를 사용하였다. 이 식을 적용하면, 전체적으로 밀도변화는 아주 작지만 로터 내에서의 유동 해석시 좋은 수렴성을 얻을 수 있다.

### 3. 해석 결과

베인 펌프를 위의 해석 조건 및 방법으로 수행하여 회전에 따라 주기적인 유동 특성이 발생할 때까지 계산을 수행하였다. 본 연구에서는 주기적인 유동 특성을 얻기 위해서 로터 부분이 5바퀴 회전 후의 결과로부터 베인 펌프의 유동 특성을 알아보았고 Intel Xeon 2.4 GHz ICPU Linux Cluster를 사용하여 로터 부분 1바퀴 회전으로 인한 유동 특성을 알아보는데 50시간 정도 소요되었으며 이로부터 회전각과 회전 속도에 따른 유량 및 압력 변화에 대한 특징을 알아보았다.

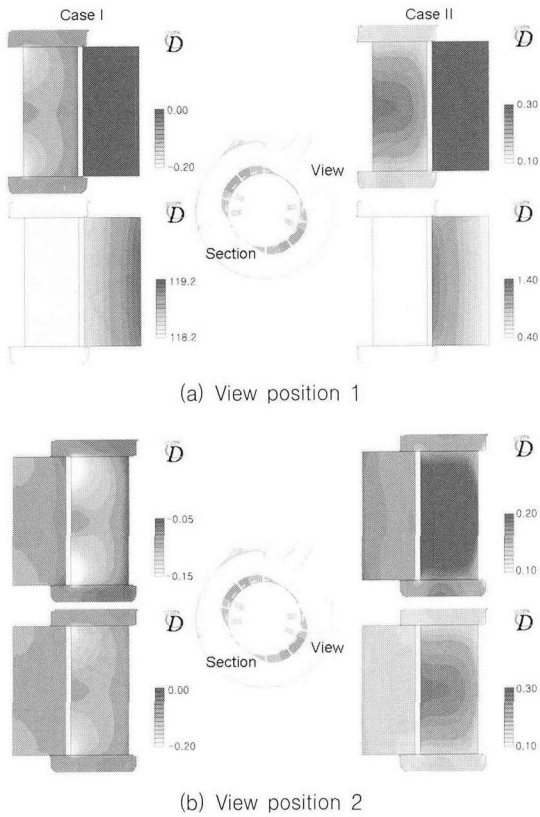


Fig. 7 Pressure distribution around vane (unit : bar)

### 3.1. 회전각에 따른 유량 변화

앞에서 언급한 것과 같이 생성된 격자 (Figs. 1과 2) 를 2가지 Case (시계방향, 반시계방향)에 해당하는 경계 조건 (Fig. 3)을 적용하여 해석하였다. Case에 따른 회전방향의 변화는 유체가 흐르는 방향을 바꾸어서 로터 부분으로 유체가 들어가고 나오는 곳의 압력 및 입출구의 형상에 따른 결과를 알 수 있다. 이 때, 시계와 반시계 방향 로터 부분 회전 속도 661.5 RPM으로 이동 격자를 설정하여 로터 부분의 회전을 표현하였다.

로터 부분의 해석 격자는 회전 방향으로 1도 간격으로 생성되어 있으므로 이동 격자를 적용하는데 있어서 로터 부분 0.1도 회전에 대한 정보를 1 step 해석에 대한 시간 간격 및 로터 부분 회전각으로 사용하며 격자 생성 각인 1도의 회전이 일어나는 10 step 간격으로 집합 경계면을 새로 연결하여 계산을 수행하였다.

Figure 4는 661.5 RPM으로 로터 부분 회전시 Case I (시계방향)과 II (반시계방향)의 계산 단계마다 0.1도 회

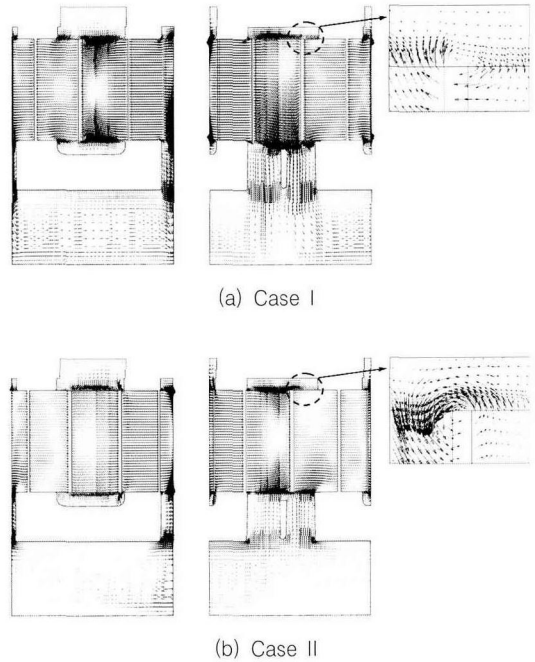


Fig. 8 Flow distribution in the rotor

전하였을 때 회전에 따른 베인 펌프의 출구 유량 변화이다. 이를 보면, 펌프가 10개의 베인으로 구성되어 있기 때문에 유량 진동과 같은 주기적인 특성이 회전각 36도 마다 형성되는 것을 확인할 수 있다. 각 Case 별로 평균 유량을 알아보면, Case I은 31.5 cc/rev, Case II는 32.5 cc/rev으로 이는 알려진 실험값과 매우 근접한 결과를 보인다.

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 오일을 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 보인다.

또한, Case II에서의 유량이 평균유량에서 진동폭이 Case I에 비해 크다. Case I은 로터로부터 나온 유체가 출구쪽으로 나가는 과정 중간에 Fig. 1(b)의 우측 하단의 형상과 같이 단면적이 작아지는 부분을 지남에 따라 감쇠 효과를 얻어 감쇠 효과가 없는 Case II에 비해 유량의 진동폭이 적다.

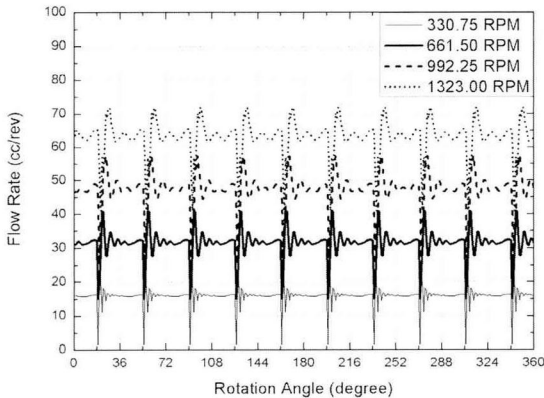


Fig. 9 Flow rate variation for various rotational speed

### 3.2. 회전각에 따른 압력 변화

Figures 5와 6은 661.5RPM으로 로터 부분 회전시 Case I (시계방향, Fig. 5)과 II (반시계방향, Fig. 6)에서 회전에 따른 베인에서의 압력 변화를 보여준다. 이를 보면, 전체적인 입출구의 압력은 일반적으로 경계조건의 영향으로 입구에서는 대기압, 출구에서는 165 bar를 갖는다.

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 캠핑 사이 공간이 베인에 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 대기압을 갖는 공간에 165 bar를 갖는 공간이 연결되는 경우, 압력이 급격히 바뀌어서 나가는 쪽의 압력에 진동이 생긴다.

이 때, 유체가 흘러 나가는 곳의 로터내 압력 변동 폭이 Case II보다 Case I에서 크게 형성된다. 또한, Case I의 경우 변동이 있는 구간이 165 bar를 형성하는 부분이고 Case II의 경우 대기압이 형성하는 부분이기 때문에 Case I의 경우가 Case II 보다 베인이 파단될 가능성이 더 높다.

### 3.3. 회전각에 따른 로터 내의 유동 특성

661.5 RPM으로 로터 부분 회전시 베인 펌프 내부 유

동 해석을 수행하여 얻은 속도와 압력 결과인 Figs. 7과 8을 통해 로터 내의 유동 특성을 확인할 수 있다. Fig. 7은 Case I과 II에서 베인이 해당 위치에 있을 때, 베인 양쪽면에 걸리는 압력을 나타낸 그림이다. Fig. 7 (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 베인의 중심부분에 큰 압력이 걸리고 바깥쪽으로 갈수록 압력이 작은 반면, Case I의 경우는 베인의 상단과 하단에 압력이 낮은 부분이 형성된다. 따라서, Case I의 경우 상하단의 베인에서 양면의 압력이 크게 달라지고 이로 인해 베인의 끝부분이 파단될 수 있다.

Case I과 II에서 로터 내 흡입부와 퇴출부의 유동 형태를 Fig. 8에서 볼 수 있다. 이를 보면, Case I의 유동이 나가는 곳과 Case II의 유동이 흘러 들어오는 퇴출부에서 역류가 발생한다. 이는 퇴출부의 형상으로 인해 유량 변동이 심한 상태에서 일어난다. 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.

### 3.4. 회전속도에 따른 유량 및 압력 변화

회전 속도의 변화에 따른 베인 펌프 내의 유동 특성을 알아보기 위해서 로터 부분이 시계방향으로 회전할 때 회전속도에 변화를 주어 330.75, 992.25, 1323.00 RPM에 대한 해석을 수행하여 기존의 661.50 RPM의 결과와 비교해 보았다.

로터 부분의 회전 속도에 따른 유량 변화인 Fig. 9를 보면 로터 부분의 회전 속도 증가에 따라 유량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 회전 속도가 330.75 RPM일 때 15.83 cc/rev이었던 평균 유량은 661.50 RPM에서 31.46 cc/rev, 992.25 RPM에서 47.19 cc/rev, 1323.00 RPM에서 62.89 cc/rev의 값을 갖으며 330.75 RPM일 때 최대 유량 및 최소 유량의 차이는 22.36 cc/rev이었으나 661.50 RPM에서 25.71 cc/rev, 992.25 RPM에서 28.33 cc/rev, 1323.00 RPM에서 30.82 cc/rev로 증가하는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 로터 부분의 회전 속도 증가는 유량의 증가와 함께 유량 값의 진동을 크게 하는 것을 볼 수 있다.

Figure 10은 로터 부분의 회전 속도에 따른 베인 양단의 압력을 나타낸다. (a)는 로터 회전시 베인의 회전 방향에 대해 앞부분의 압력이며, (b)는 베인의 뒷부분의

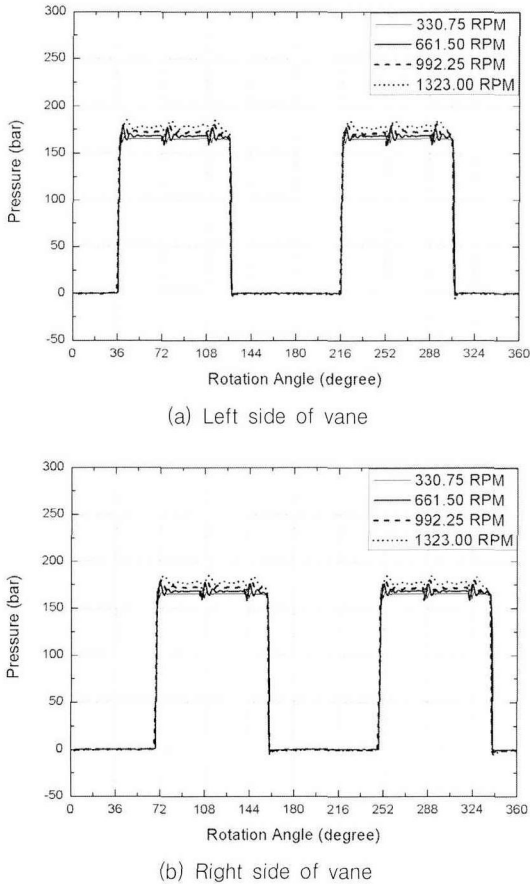


Fig. 10 Pressure variation for various rotational speed

압력이다. (a)와 (b)의 압력 값은 단지 36°의 위상차를 보일 뿐 전체적인 경향성은 일치하는 것을 볼 수 있다. 유체를 165 bar로 형성된 출구쪽으로 배출시키기 위해서 로터 내의 압력은 Fig. 10과 같이 165 bar 이상의 압력을 갖는다. 330.75 RPM으로 로터 회전시 베인에 작용하는 최대 압력은 171.65 bar, 661.50 RPM일 때 177.10 bar, 992.25 RPM일 때 180.95 bar, 1323.00 RPM일 때 185.19 bar로 회전 속도 증가는 베인에 작용하는 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 앞에서 언급한 것과 같이 로터의 회전에 따라 출구와 입구 쪽에 연결된 로터 내 압력의 급격한 변화는 로터 내 압력 값을 진동하게 하며 이 진동 폭은 Fig. 9와 같이 로터의 회전 속도의 증가에 따라 큰 폭으로 진동한다.

이와 같이 로터의 회전 속도 증가에 따라 출구 유량은 증가하나 유량의 진동 폭도 커졌다. 또한 로터 내의 압력의 증가와 더불어 베인에 걸리는 압력의 진동 폭이 크게

되어 베인이 파단할 수 있다. 따라서, 회전 속도의 증가에 따른 유량 및 압력 진동을 감소시킬 수 있는 현재 해석 격자 출구 쪽의 단면 감소 장치나 이 부분에서 압력 상승을 줄이기 위한 입구부로의 유량 재유입과 같은 방법이 베인 펌프의 설계 및 제작에 적용되어야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 동력조향장치에 사용되는 베인 펌프에 대해서 수치해석을 수행하였다. 이 때, 베인 펌프의 로터 부분의 회전을 모사하기 위해서 회전에 따른 격자 점 신축 및 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.

또한 출구부의 유량을 증가시키기 위한 로터 부분의 회전 속도 증가는 유량의 진동 폭도 증가시켰으며 로터 내 베인에 걸리는 압력의 상승과 함께 압력의 진동폭도 상승시켜 베인의 손상 및 파단 가능성이 높아진다. 따라서 베인 펌프 설계시 원하는 유량을 얻는 단면 감소비의 고려와 더불어 유량과 압력의 진동을 감소시킬 수 있는 장치의 설계가 동반되어야 한다.

#### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 허남건, 원찬식, 허성범, 권성호, 2002, "Water 펌프 및 Oil 펌프 유동해석," 서강대학교산업기술연구원 소.
- (3) 원찬식, 허남건, 권성호, 2002, "자동차용 Gerotor 형 오일 펌프의 유동 해석," 제2회 한국유체공학 학술대회 논문집, pp. 573~576.
- (4) 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.
- (5) 박운성, 정석훈, 오석형, 정재연, 2005, "Power Steering 용 유압 베인 펌프의 베인 선단부에서의 마찰특성," 한국운활학회지 제11권 3호, pp. 48~53.