

다양한 작동조건에 따른 로터리 베인 모터의 유동 특성 연구

Flow Characteristics of a Rotary Vane Motor according to Various Operating Conditions

이경준*† · 정동헌* · 이지환*

Kyong-Jun Lee*† , Dong-Heon Jeong* and Ji-Hwan Lee*

(Received 10 February 2020, Revision received 19 June 2020, Accepted 20 June 2020)

Abstract : A rotary vane motor is the most important component of the rudder roll stabilization system. This statement was rewritten to improve clarity and be more consistent with the original text. Please check if the intended meaning is retained. The main function of the rotary vane motor is to generate the torque that can rotate the vane blade using the energy of the hydraulic fluid flowing at high pressure to perform the steering function desired by the user. In this study, a flow analysis was conducted to analyze the flow characteristics, flow rate, and torque characteristics within the rotary vane motor under various operating conditions. The results of this study can provide important design data for the design of rotary vane motors.

Key Words : Rotary vane motor, Flow characteristics, Gap flow, Mass flow rate, Flow-induced torque

1. 서 론

함 안정 조타기(Rudder Roll Stabilization, RRS)는 일반적인 조타 기능과 황천 시 횡동요 감쇄기능, 자동항해 기능이 통합된 장비로 함정의 성능 향상 및 승조원의 작업환경을 개선하여 함정의 전투력을 향상시키기 위한 핵심 장비이다.^{1,2)} 함 안정 조타기 시스템에서 가장 중요한 부품인 로터리 베인 모터(Rotary Vane Motor, RVM)는 기계

효율이 높고, 가변 펌프와 결합되어 빠르게 타를 구동할 수 있는 장점이 있어 많이 사용되고 있다.

로터리 베인 모터의 핵심은 고압으로 유입되는 작동유의 유체에너지를 이용하여 베인 블레이드(blade)를 회전시킬 수 있는 토크(torque)를 발생시켜 사용자가 원하는 조타 기능을 수행하는 것이다. 그러므로 다양한 조건 하에서 로터리 베인 모터 내부의 유동특성, 유량 및 토크 특성에 대한 선행 연구가 수행되어야 한다.

*† 이경준(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1802-9162>) :
선임연구원, 건설기계부품연구원

E-mail : kjlee@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2562

*정동헌(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1112-4354>) :
선임연구원, 건설기계부품연구원

*이지환(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2971-1896>) :
선임연구원, 건설기계부품연구원

*† Kyong-Jun Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1802-9162>) :
Senior Researcher, Korea Construction Equipment Technology Institute.

E-mail : kjlee@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2562

* Dong-Heon Jeong(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1112-4354>) :
Senior Researcher, Korea Construction Equipment Technology Institute.

* Ji-Hwan Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2971-1896>) :
Senior Researcher, Korea Construction Equipment Technology Institute.

로터리 베인 모터를 대상으로 다양한 선행 연구가 수행되었다. Cho et al.³⁾은 로터리 압축기 내부에서 롤링 피스톤의 거동해석과 베인 선단부의 유회특성을 분석하였다. Kim et al.⁴⁾은 로터리 베인 공기 압축기의 최적설계 연구를 수행하였고, Montenegro et al.⁵⁾과 Kolasinski et al.⁶⁾은 자동차용 미세 ORC 시스템에서 베인 확장자의 특성 연구를 수행하였다. Klarecki et al.⁷⁾은 정유압 변속기에 사용되는 슬라이딩 베인 펌프의 압력 맥동을 실험적 방법과 해석적 방법으로 비교 분석하였다.

이처럼 국내외 연구자들은 베인 모터를 대상으로 다양한 선행 연구를 수행하였지만, 대부분은 블레이드와 하우징 사이에서 유회특성에 관련된 실험적, 해석적 연구들이다. 실험적 연구로는 다양한 작동 환경 하에서 유동특성을 정확하게 파악하기 어려우며, 해석적 연구 역시 Reynolds 방정식을 이용한 근사화된 방정식을 이용하기 때문에 정확한 3차원 유동 특성을 파악하는 데는 제한적이다.

따라서 본 연구에서는 로터리 베인 모터의 다양한 작동조건에서 내부 유동 특성, 유량, 토크 특성을 파악하기 위해 ANSYS CFX를 이용하여 유동해석을 수행하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 해석 대상

유동해석 대상품인 로터리 베인 모터의 형상은 Fig. 1과 같다. 고압과 저압의 작동유가 유출·입하는 포트가 각각 2개 있으며, 하우징, 베인 블레이드 등으로 구성되어 있다. 베인 블레이드 내부에는 각각 고압과 저압의 작동유가 흐를 수 있는 내부 유로가 있다. 내부 유로 중 고압 작동유의 이동 경로는 Fig. 2와 같다. 그림의 위쪽에 있는 입구 포트(Fig. 2의 A)에서 유입되는 고압의 작동유는 베인 블레이드와 하우징 사이의 공간(Fig. 2의 B)으로 유입되어 베인 블레이드를 반시계방향으로 회전시키는 토크를 발생시킨다. 또한 베인 블레이드 내부에 있는 유로(Fig. 2의 C)를 통해 반대편 베인 블레이드와 하우징 사이의 공간(Fig. 2의 D)으로 유입되어 블레이드의 회전 토크를 증가시키게 된다.

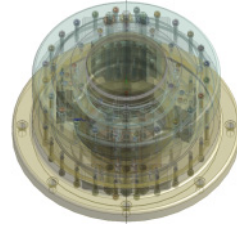


Fig. 1 Computational model of the Rotatory Vane Motor

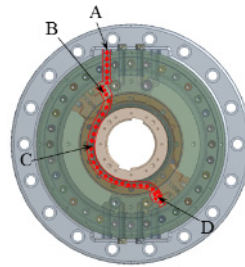


Fig. 2 Flow path in which the high pressure acts

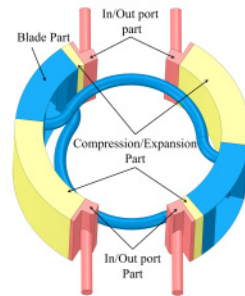


Fig. 3 Computational Domain

2.2 해석 영역

전체 유동해석 영역은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 입·출구 포트 영역, 베인 블레이드 영역, 압축·팽창 영역으로 구분할 수 있다. 입·출구 영역은 작동유가 유입 또는 유출되는 포트 주위의 고정된 유동영역이다. 베인 블레이드 영역은 베인 블레이드의 회전에 의해 일정한 각속도로 회전하는 영역이다. 이 영역에는 블레이드에 포함되어 있는 내부 유로와 블레이드 표면과 하우징 사이의 틈새 영역을 포함한다. 마지막 영역인 압축·팽창 영역은 베인 블레이드의 회전에 따라 압축 및 팽창하는 유동영역이다.



Fig. 4 Grid system

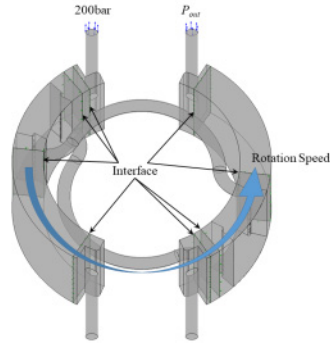


Fig. 5 Boundary condition

2.3 해석 격자계

Fig. 4는 해석에 사용된 격자 시스템을 나타낸다. 전체 사용격자수는 노드(Node) 약 104만개, 요소(element) 약 462만개이다. 압축·팽창하는 유동영역에는 육면체 격자를 사용하여 해석의 정확도 및 해석 수렴성을 향상시켰고, 나머지 영역에는 사면체 격자를 사용하여 복잡한 형상을 구현하였다.

2.4 경계조건

Fig. 5는 유동해석에 사용된 경계조건을 나타낸 그림이다. 유동영역의 입구와 출구에는 opening 경계조건을 사용하여 유동 특성에 따라 자유롭게 작동유의 유출·입이 발생할 수 있도록 하였다. 입구의 압력은 200 bar로 고정하였으며, 출구에서의 압력은 입·출구의 압력 차이가 3 bar, 5 bar, 10 bar, 20 bar, 40~180 bar(20 bar 간격으로 변화), 199 bar가 되도록 설정하였다. 나머지 면에는 점착조건(no-slip)을 설정하였다. 베인 블레이드의 회전속도는 0.2 rpm에서 2.0 rpm까지 0.2 rpm 간격으로 변화시키면서 해석을 수행하여 회전속도에 따른 유동 특성을 파악하였다. 앞서 언급한 것과 같이 3가지 유동영역의 경계면들에서는 경계면 처리를 통하여 질량 및 운동량 보존을 만족하도록 하였다. 베인 블레이드와 하우징 사이의 틈새(Gap)는 0.6 mm로 설정하였다.

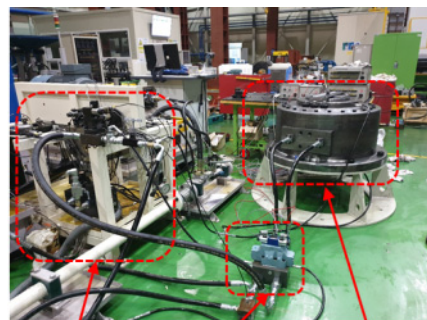
2.5 지배방정식

본 연구에서는 로터리 베인 모터 내부 유동 특성을 파악하기 위해 상용 CFD 프로그램인 ANSYS CFX를

사용하였다. 작동유체의 거동을 모사하기 위해 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용하였으며 비정상, 비압축성, 3차원 유동해석을 수행하였다. 대류항은 upwind, 점성항은 shape function을 기반으로 한 2차 정확도 기법을 사용하였으며, 비정상 해석을 위한 시간 전진은 1차 정확도의 backward euler 방법을 사용하였다. Reynolds stress 항은 k- ω 을 기반으로 한 SST(Shear stress transport) 모델을 사용하였다. 본 연구에 사용된 작동유는 ISO VG46이다.

3. 수치해석 기법의 검증

수치해석 기법의 검증을 위해 로터리 베인 모터를 대상으로 시험 장치를 Fig. 6과 같이 구성하였다. 로터리 베인 모터 입구 압력 200 bar, 출구 압력 197 bar, 블레이드 회전속도 1.509 rpm 조건



Hydraulic Power Source Directional Control Valve Rotary Vane Motor

Fig. 6 RVM Test Bench

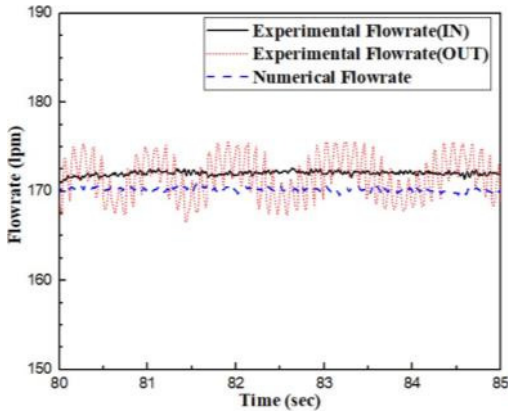


Fig. 7 Time history of the mass flow rate through the RVM bench

에서 실험 값과 수치해석 값을 비교 검증하였다. Fig. 7은 실험을 통해 측정한 시간에 따른 입·출구의 유량과 수치해석을 통해 계산된 유량을 나타낸 그림이다. 시간 평균된 실험 값은 172.9 lpm이며, 수치해석 계산 값은 169.7 lpm이다. 본 연구에 사용된 수치해석 기법은 오차율 1.86%으로 해석의 타당성을 확보하였다.

4. 해석 결과

4.1 블레이드 회전에 따른 유동 특성

입구 압력 200 bar, 출구압력 197 bar, 블레이드 회전속도 1 rpm으로 고정된 후 베인 블레이드의 회전에 따른 유동 특성을 분석하였다.

Fig. 8은 시간에 따른 특정 회전 각도에서 압력 contour를 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 입구에서 고압으로 유입된 작동유와 연결된 유동영역(Fig. 8 (a)의 A, B, E 영역)에는 대부분 200 bar와 유사한 압력 값을 가지며, 저압 출구와 연결된 유동영역(Fig. 8 (a)의 C, D, F 영역)에는 대부분 197 bar와 유사한 압력 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

블레이드의 회전은 고압 유동영역을 팽창시키고, 저압 유동영역을 압축시키게 되는데 팽창되는 유동영역이나 압축되는 유동영역에서 압력이 일정하게 유지된다. 회전하는 베인 블레이드와 하우

징 사이의 좁은 틈새에서는 선형적인 압력구배가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 시간에 따른 특정 회전 각도에서 유선(streamline)을 나타낸 그림이다. 입구 포트로부터 유입된 작동유는 하우징 벽면과 부딪히면서 분기된다.

입구 포트 주위(Fig. 9 (a)의 A 영역)에서는 블레이드의 회전방향으로 작동유가 흐르게 되면서 내부의 빈 공간을 채우는 방향으로 회전하는 와류가 발생한다. 블레이드의 내부 유로 중 고압의 작동유가 흐르는 내부유로(Fig. 9 (a)의 E 영역)는 저압의 작동유가 흐르는 내부유로(Fig. 9 (a)의 F 영역)보다 그림의 아래 부분에 위치해 있기 때문에 Fig. 9 (a)의 B 영역에서는 아랫부분의 유속이 빠르고 Fig. 9 (a)의 D 영역에서는 윗부분의 유속이 빠르다. Fig. 9 (a)의 C 영역은 출구와 거리가 멀며, 상대적으로 저압이기 때문에 유속이 가장 느리다. 블레이드의 틈 사이에서는 층을 이루면서 고압과 저압 사이의 압력차에 의해 틈새 유동이 발생한다.

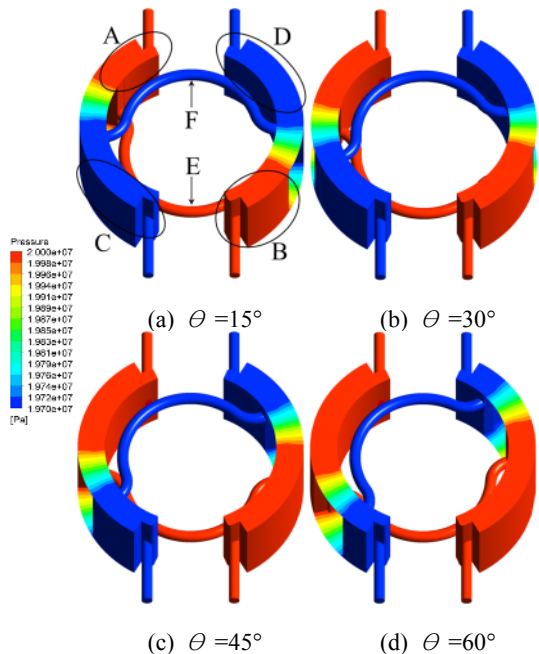


Fig. 8 Instantaneous pressure contour according to the rotation angle at pressure difference 3 bar

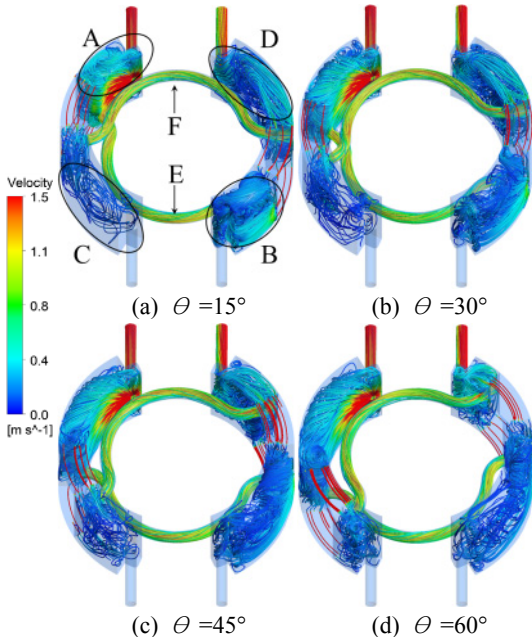


Fig. 9 Instantaneous streamlines according to the rotation angle at pressure difference 3 bar

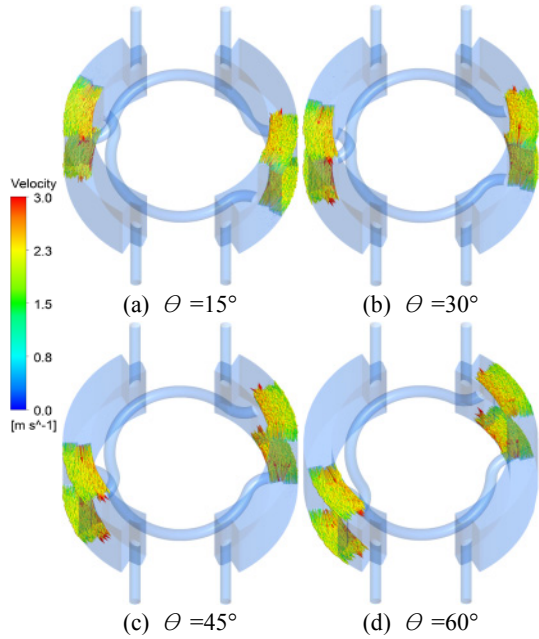


Fig. 11 Instantaneous velocity vector inside the gap according to the rotation angle at pressure difference 3 bar

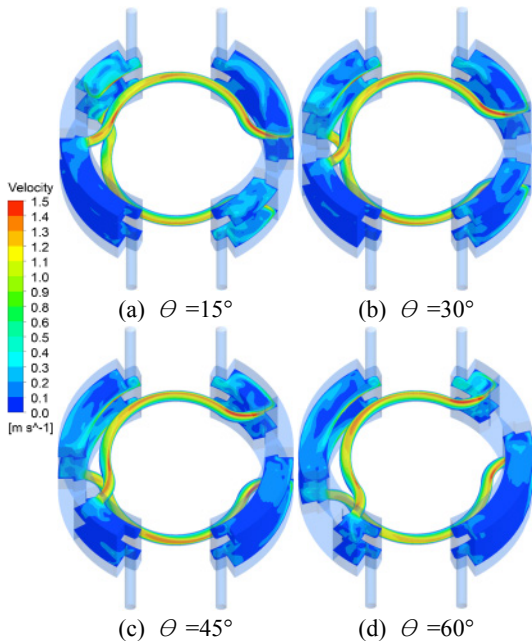


Fig. 10 Instantaneous velocity contour according to the rotation angle at pressure difference 3 bar

Fig. 10은 시간에 따른 특정 회전 각도에서 블레이드의 내부 유로를 지나는 면의 속도 contour를 나타낸 그림이다. 내부 관로를 통해 흐르는 작동유는 회전방향의 바깥쪽 부분(회전 반경이 큰 부분)의 속도가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 블레이드의 회전에 의한 원심력 때문이라고 판단된다. 입구와 출구에서 유출·입하는 작동유가 하우징과 수직에 가깝게 부딪히면서 하우징 벽면을 따라 작동유가 이동하기 때문에 벽면 주위의 속도가 내부의 속도보다 빠른 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 시간에 따른 특정 회전 각도에서 베인 블레이드와 하우징 사이의 틈새를 흐르는 유체의 속도 벡터를 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 틈새로 유입되는 지점과 유출되는 지점을 제외한 대부분의 틈새 유동영역에서 속도 벡터들이 층을 이루는 것을 확인할 수 있다. 또한 상대적으로 블레이드의 회전반경이 작은 지점의 속도가 회전반경이 큰 지점의 속도보다 크다. 이는 입·출구로 유출·입하는 작동유가 하우징의

안쪽 면(회전반경이 작은 면)에 부딪히면서 하우징 벽면을 따라 이동하기 때문이다.

4.2 블레이드 회전속도 변화에 따른 유동 특성

회전속도 변화에 따른 유동 특성을 분석하기 위해서 입구압력 200 bar, 출구압력 197 bar로 고정된 후 블레이드의 회전속도를 변화시키면서 해석을 수행하였다. 4.1절에서 언급하였듯이, 블레이드의 회전에 따른 비정상 유동 특성이 정성적으로 유사하기 때문에 회전각 30°에서의 결과만 본문에 포함하였다.

Fig. 12~14는 블레이드의 회전속도에 따른 압력 contour, 유선, 블레이드 내부 유로 위치에서의 속도 contour를 비교한 그림들이다. 회전속도 변화에 따른 정성적인 유동 특성은 유사하였다. 압력의 경우 입구와 연결된 유동영역에서는 고압, 출구와 연결된 유동영역에서는 저압, 틈새에서 선형적인 압력구배 특성이 유사하다. 블레이드의 회전속도

가 증가하게 되면 유동영역의 팽창 및 압축 속도가 증가하기 때문에 전체적인 유속이 증가하지만, 정성적인 특성은 유사하였다.

Fig. 15는 블레이드의 회전속도에 따른 압력 틈새에서의 속도 벡터를 나타낸 그림이다. 회전속도 변화는 전체적인 유속을 증가시키지만, 틈새에서는 회전속도 변화에도 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 블레이드의 회전속도는 틈새의 유동 특성에 주된 영향을 미치는 않는 것으로 판단된다. Fig. 16은 블레이드의 회전속도 변화에 따른 입·출구에서의 유량 및 고압 영역에서 저압 영역으로 틈새를 통해 빠져나가는 유량을 나타낸 그림이다.

블레이드의 회전속도와 유동영역의 크기 변화 속도가 직접적으로 연관되어 있기 때문에 회전속도가 증가하게 되면 입·출구에서의 유량은 선형적으로 증가한다. 그러나 틈새를 통해 빠져나가는 유량은 회전속도가 증가하더라도 그 크기 변화는

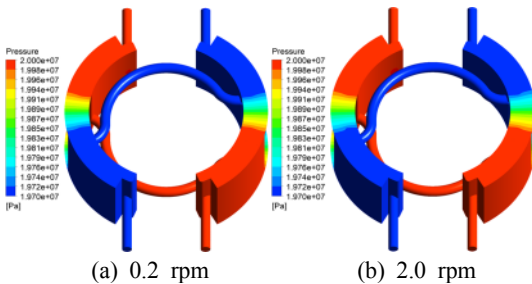


Fig. 12 Comparison of pressure contour according to the rotation speed

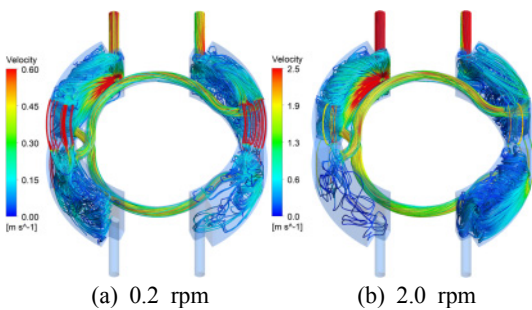


Fig. 13 Comparison of streamlines according to the rotation speed

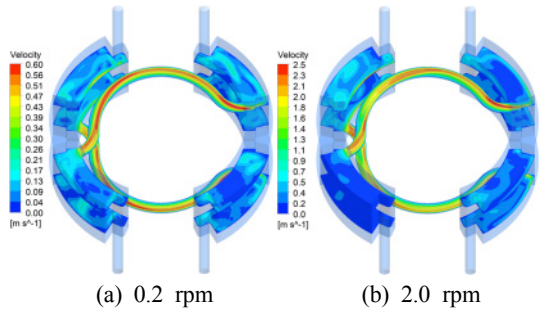


Fig. 14 Comparison of velocity contour according to the rotation speed

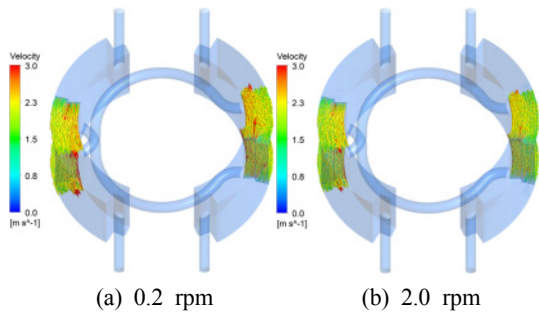


Fig. 15 Comparison of velocity vector inside the gap according to the rotation speed

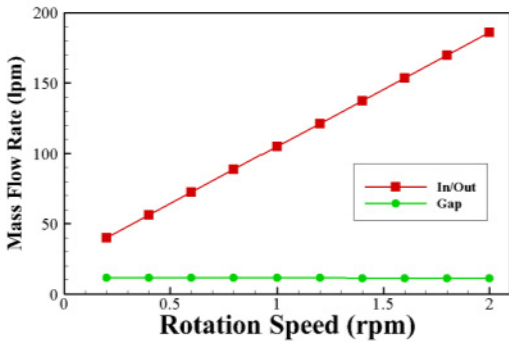


Fig. 16 Mass flow rate according to the rotation speed at pressure difference 3 bar

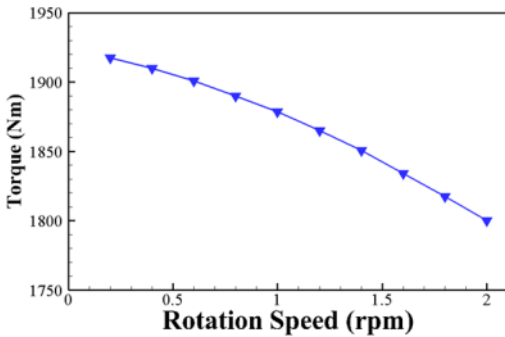


Fig. 17 Flow induced torque according to the rotation speed at pressure difference 3 bar

무시할 정도로 미세하게 감소한다.

Fig. 17은 블레이드의 회전속도 변화에 따른 유체력에 의한 토크를 나타낸 그림이다. 블레이드의 한 쪽 면에는 고압이, 다른 한쪽 면에는 저압이 작용하기 때문에 입·출구의 압력 차이가 일정하면 압력에 의한 토크는 큰 변화를 보이지 않는다. 다만 틈새에서의 미세한 유량 감소는 블레이드 틈새에서 전단력의 감소로 이어져 회전속도 증가에 따른 토크 값을 미세하게 감소시키는 것으로 판단된다.

4.3 입·출구 압력 차이에 따른 유동 특성

로터리 베인 모터의 입·출구 압력 차이에 따른 유동 특성을 분석하기 위해 입구압력 200 bar, 회전 각속도 1 rpm으로 고정한 후 출구의 압력을 변화시키면서 유동해석을 수행하였다. 4.1절에서

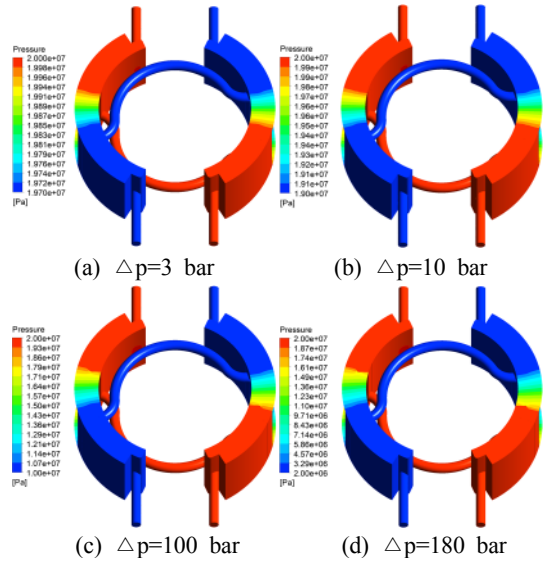


Fig. 18 Comparison of pressure contour according to the pressure difference

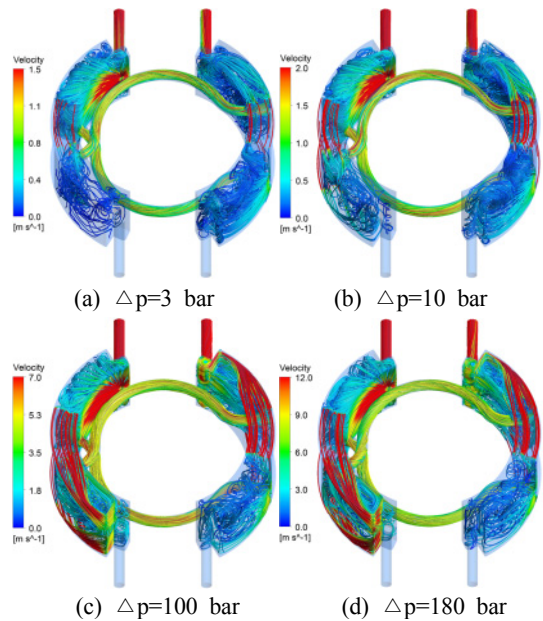


Fig. 19 Comparison of streamline according to the pressure difference

언급하였듯이, 블레이드의 회전에 따른 비정상 유동 특성이 정성적으로 유사하기 때문에 회전각 30°에서의 결과만 본 논문에 포함하였다.

Fig. 18은 로터리 베인 모터 입·출구의 압력 차이 변화에 따른 압력 contour를 나타낸 그림이다. 입·출구의 압력 차이가 증가하게 되면 전체 유동장의 압력구배가 증가하지만, 정성적인 압력 특성은 유사하다. 틸새에서는 입·출구 압력 차이에 의한 압력구배 값으로 선형적인 압력구배가 발생하였다.

Fig. 19는 로터리 베인 모터 입·출구의 압력 차이 변화에 따른 유선을 나타낸 그림이다. 입·출구의 압력 차이가 증가할수록 유동속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4.2절에서 언급하였듯이 입·출구의 압력 차이가 일정한 경우 회전속도가 증가하게 되면 전체적인 유동 속도가 증가하지만, 틸새에서는 유동 속도가 증가하지 않았다. 그러나 회전속도가 일정할 때 입·출구의 압력 차이가 증가하게 되면 틸새에서의 유동 속도(Fig. 20) 또한 증가한다. 틸새에서의 유속 증가는 고압영역에서 저압영역으로 빠져나가는 작동유의 운동량을 증가시키게 되는데 이는 저압영역에서 생성되는 강한 와류 생성의 원인이 된다.

Fig. 21은 로터리 베인 모터 입·출구의 압력 차이 변화에 따른 블레이드의 내부 유로를 지나는 면에서의 속도 contour를 나타낸 그림이다. 블레이드의 내부 유로에서 입·출구 압력 차이가 증가하게 되면 내부 유로를 따라 흐르는 작동유의 유량이 증가하게 되며, 블레이드의 회전으로 인한 원심력보다 내부 유로를 따라 진행하려는 운동량이 증가하여 유로 중앙 부위에서 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 틸새를 지나는 유량이 증가하기 때문에 Fig 21 (d)의 A영역의 속도가 상대적으로 증가한다.

Fig. 22는 로터리 베인 모터의 입·출구 압력 차이에 따른 입·출구에서의 유량 및 고압 영역에서 저압 영역으로 틸새를 통해 빠져나가는 유량을 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 입·출구의 압력 차이가 증가하게 되면 입·출구에서의 유량뿐만 아니라 틸새에서의 유량 또한 증가한다.

즉 틸새에서의 유량은 블레이드의 회전속도에는 영향을 받지 않지만, 입·출구의 압력 차이에는

많은 영향을 받는다. 압력 차이 변화에 따른 유량 변화 기울기는 압력 차이가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

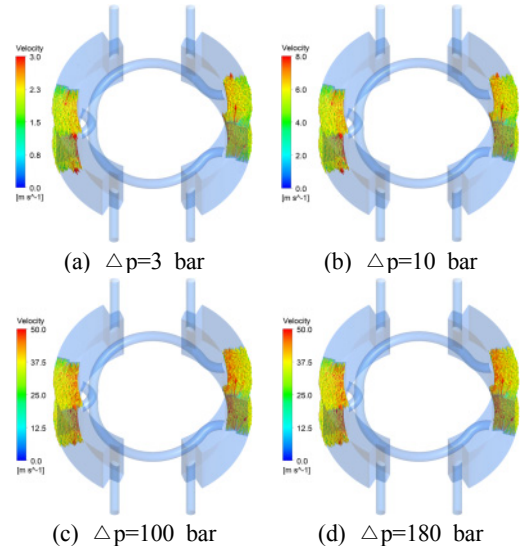


Fig. 20 Comparison of velocity vector inside the gap according to the pressure difference

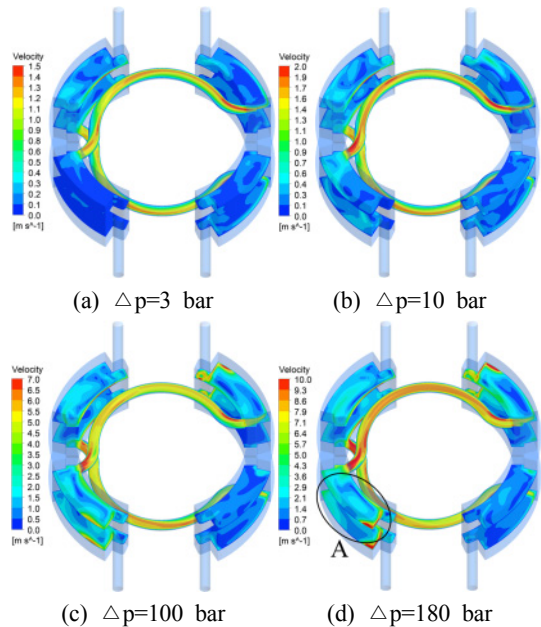


Fig. 21 Comparison of velocity contour according to the pressure difference

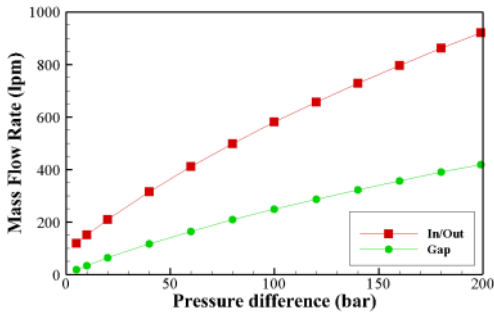


Fig. 22 Mass flow rate according to the pressure difference at rotation speed 1 rpm

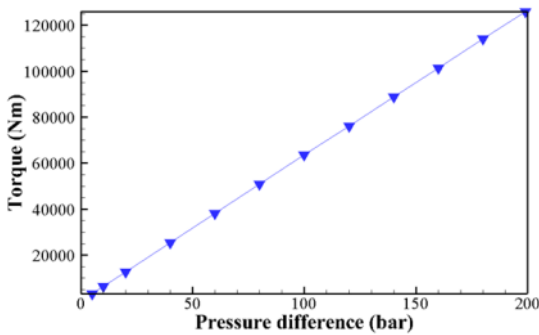


Fig. 23 Flow induced torque according to the pressure difference at rotation speed 1 rpm

Fig. 23은 로터리 베인 모터의 입·출구 압력 차이에 따른 유체력에 의한 토크를 나타낸 그림이다. 블레이드에 작용하는 유체력에 의한 토크 값은 압력 차이가 증가에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 압력 차이가 증가할수록 블레이드의 양 쪽 면에서의 압력 차이가 증가하게 되고, 블레이드에 작용하는 토크가 증가하게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 로터리 베인 모터를 대상으로 하여 회전속도, 입·출구의 압력 차이에 따른 유동 특성, 유량 및 토크 특성을 분석하였다. 압력의 경우 회전각, 회전속도, 입·출구 압력 차이가 발생하더라도 정성적인 특성은 유사하였다. 입구와 연결된 유로에는 고압, 출구와 연결된 유로에는 저압,

틈새에서는 선형적인 압력구배가 발생한다. 베인 모터의 회전속도 및 입·출구의 압력구배가 증가할수록 로터리 베인 모터 내부의 속도는 증가한다. 틈새 유동의 경우 회전속도에는 영향을 거의 받지 않으며, 입·출구 압력 차이가 증가할수록 유량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 로터리 베인 모터 설계에 있어 중요한 설계 자료를 제공할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (2,000-4,000톤급 함정의 함 안정 조타기용 로터리 베인 모터 개발)

Author contributions

D. Jeong; Conceptualization. K. Lee; Analysis. D. Jeong; Funding acquisition. K. Lee; Methodology. J. Lee; Experiment. D. Jeong; Supervision. K. J. Lee; Writing-original draft. D. Jeong, J. Lee; Writing-review.

References

1. Korean Register, 2017, "Part 4-Hull Equipment-Rules for the Classification of Steel Ships", pp. 1-6.
2. ICAS, 2010, "S10-Rudders-Sole Pieces and Rudder Horns-Common Structure Rule", pp. 1-16.
3. I. S. Cho and J. Y. Jung, 2010 "Lubrication characteristics of a rotary compressor used for refrigeration and air-conditioning systems", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 24, pp. 851-856. (<https://doi.org/10.1007/s12206-010-9310-1>)
4. H. J. Kim, B. Y. Nam and G Y. Lee, 2006, "Analytical study on the performance of a rotary vane compressor", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering,

- Vol. 18, No. 4, pp. 351-358.
5. G. Montenegro, A. D. Torre, M. Fiocco, A. Onorati, C. Benatzky and G. Schlager, 2014, "Evaluating the Performance of a Rotary Vane Expander for Small Scale Organic Rankine Cycles using CFD tools", *Energy Procedia*, Vol. 45, pp. 1136-1145.
(<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.119>)
6. P. Kolasinski, P. Blasiak and J. Rak, 2016, "Experimental and Numerical Analyses on the Rotary Vane Expander Operating Conditions in a Micro Organic Rankine Cycle System", *Energies*, Vol. 9, No. 8, p. 606.
(<https://doi.org/10.3390/en9080606>)
7. K. Klarecki, D. Rabsztyn, M. P. Hetmanczyk, 2015, "Analysis of pulsation of the sliding-vane pump for selected settings of hydrostatic system", *Maintenance and reliability*, Vol. 17, No. 3, pp. 338-344.
(<https://doi.org/10.17531/ein.2015.3.3>)