

수치해석을 이용한 오물 처리용 진공펌프의 성능평가

이힘찬* · 김준형* · 윤준용** · 김창조*** · 최영석****†

A Numerical Study on the Performance Evaluation of the Vacuum Pump for Waste Treatment

Him-Chan Lee*, Joon-Hyung Kim*, Joon-Yong Yoon**, Chang-Jo Kim***, Young-Seok Choi****†

Key Words : Vacuum pump(진공 펌프), Macerator(파쇄기), Pump efficiency(펌프 효율), Inlet flow path(내부 유로), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

Vacuum pump transfers waste that is pulverized by integrated macerator. For this reason, unlike ordinary pump systems, there is a rotating macerator ahead of impeller for pulverizing. It is hard to predict numerical solution because area of Inlet flow path changes according to the rotation angle of the integrated macerator. So, in this study, the verification of performance evaluation method of Marine vacuum pump were numerically studied by commercial ANSYS CFX 13.0 software. We select a model of performance evaluation for study, and we analyze change of inlet flow path of integrated macerator according to rotation angle. We generate 5 model sets according to rotation angle of the integrated macerator. And we evaluate their performance by numerical analysis. Then, we analyze internal flow field and performance according to rotation angle of the integrated macerator based on numerical analysis result. In addition, we compared with experimental data for validity of numerical result by using steady state analysis.

1. 서 론

진공 펌프는 파이프 내부를 진공으로 만들어 유체를 이송시키는 장치로 산업 전반에 광범위하게 사용되고 있다. 그 중 오물 처리를 위해 사용되는 진공 펌프는 항공기나 선박 등 용수가 한정적인 시스템에 주로 설치된다. 진공펌프를 이용한 처리 방식을 적용함으로써 오물 처리 시 필요한 물의 양을 최소화할 수 있으며 진공상태로 오물을 이송하기 때문에 중력으로부터 자유롭게 설계할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인해 오물 처리용 진공펌프 시장은 꾸준히 성장하고 있으며 그에 따른 연구가 진행되었다.⁽¹⁾

기존에 사용되던 오물 처리용 진공펌프 시스템은 Fig. 1

의 (a)와 같이 진공펌프를 이용해 오물을 이송한 뒤 탱크 내부에서 오물을 파쇄 하여 배출 시키는 방식이었다. 이러한 방식은 저장용 탱크가 요구되어 시스템 부피가 커질 뿐 아니라 별도로 오물 배출을 위한 펌프가 설치되어 전체적인 시스템 비용이 비싸다는 단점을 가지고 있었다. 최근에는 Fig. 1의 (b)와 같이 파쇄기를 포함한 진공펌프를 이용하여 오물을 처리하는 시스템이 주로 사용되고 있다.⁽²⁾ 이러한 일체형 방식은 오물 처리를 위한 탱크나 배출을 위한 별도의 펌프가 불필요하기 때문에 시스템의 부피가 매우 작고, 시스템의 설치비용이 매우 저렴하다는 장점이 있다.

일체형 진공펌프는 Fig. 2와 같이 펌프 임펠러 선단에 파쇄기가 부착되어 있다. 때문에 일반적인 펌프 시스템에 비해

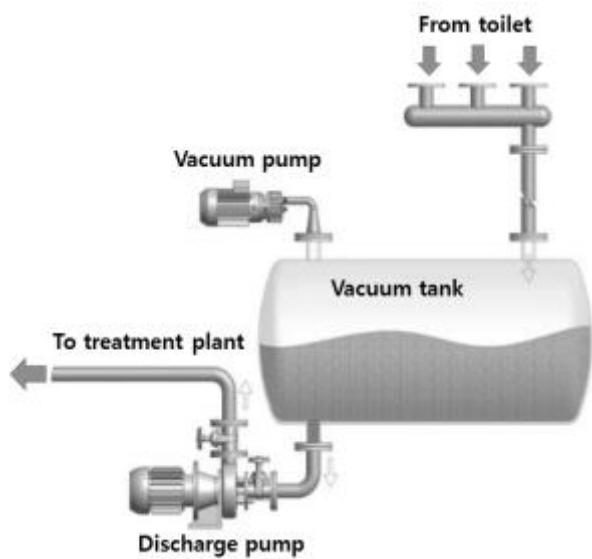
* 한양대학교 대학원/한국생산기술연구원(Hanyang University/Korea Institute of Industrial Technology)

** 한양대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)

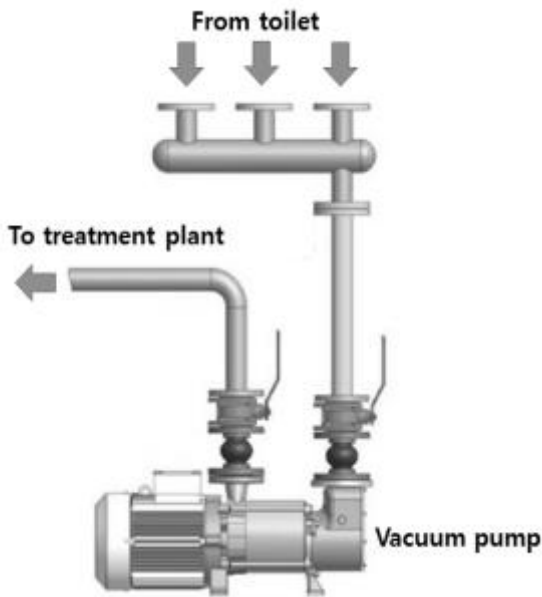
*** 대원기계(주)(Daewon Machinery Co.,Ltd)

**** 한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : himchan1123@kitech.re.kr



(a) Ordinary vacuum pump system for waste treatment



(b) New vacuum pump system

Fig. 1 Vacuum pump system for waste treatment

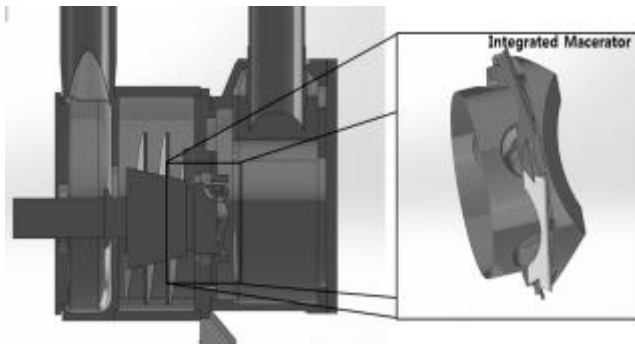


Fig. 2 Integrated macerator in vacuum pump

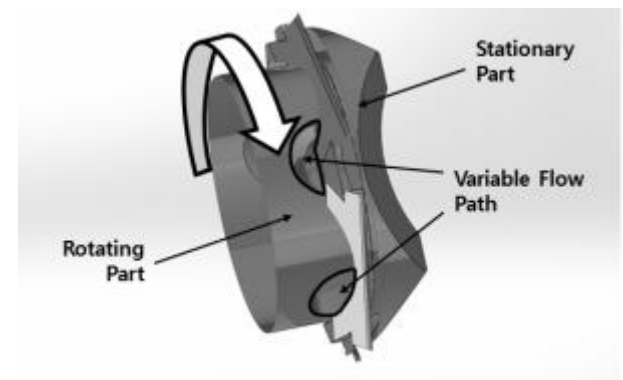


Fig. 3 Integrated macerator

펌프 임펠러로 유입되는 유동이 복잡해지게 된다. 이렇게 복잡한 유동 성분들은 펌프 성능 평가 시 불안정 요소로 작용하게 된다. 특히 수치해석을 이용한 성능평가 시 예측된 성능의 정확성에 대한 검증이 요구 되어왔다. 그에 따라 본 연구에서는 일체형 진공펌프 성능 예측을 위한 수치해석 검증 작업을 수행하였다. 연구 수행을 위하여 기존에 사용되고 있는 일체형 오물처리용 진공 펌프를 선정하였다. 선정된 진공 펌프에 대하여 파쇄기 회전 위치에 따른 유로를 분석하였으며 각각의 회전위치에 따라 수치해석을 통한 성능 평가를 수행하였다. 최종적으로 수치해석을 통해 산출된 성능 평가 결과를 시험 데이터와 비교 분석하여 수치해석의 신뢰성을 검증하였다.

2. 파쇄부 유로 분석

진공 펌프의 파쇄기는 Fig. 3과 같이 2개의 부분으로 구성이 된다. 파쇄기의 한 부분은 고정되어 있으며 다른 한 부분은 임펠러 축과 연결되어 회전함으로써 유입되는 오물을 파쇄 하는 역할을 한다. 이러한 파쇄과정에서 회전부의 회전 각도에 따라 유입 유로가 변하게 된다. 수치해석을 이용한 성능 평가 시 유입 유로 변동에 따른 정확한 성능 예측을 위해서는 비정상 상태 해석이 효과적이다. 하지만 비정상 상태 해석은 해석 시간이 길며 데이터 처리량이 많다는 단점을 가지고 있다. 또한 진공 펌프는 시스템 특성 상 내부 유로가 매우 복잡하기 때문에 비정상 상태 해석 수행 시 수렴성이나 성능 평가를 위한 데이터 처리에 문제점들이 수반된다. 반면에 정상 상태 해석을 수행할 경우 비정상 상태 해석에 비해 해석 시간이 길지 않아 해석에 대한 효율성이 뛰어나다. 그에 따라 본 연구에서는 정상 상태 수치해석을 통한 성능 평가를 수행하였다. 하지만 회전 시 유동 조건이 변하는 일체형 진공 펌프의 특성 상 정상 상태 해석 시 회전체의 회전 각도에 따라 성능의 차이가 발생할 가능성이 높다. 따라서 회전 각도에 따른 유로 분석 및 성능 검증이 요구되었다.

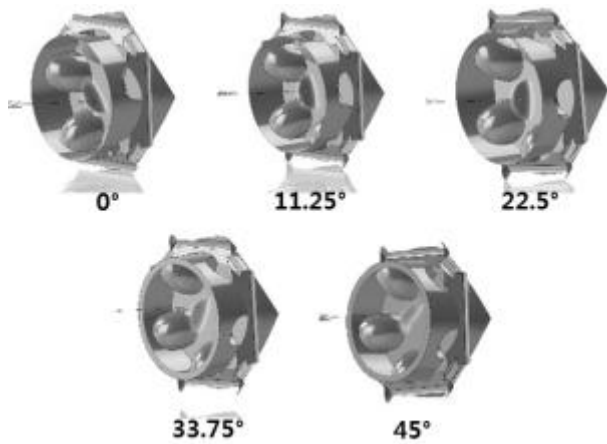


Fig. 4 Area of flow path of front plane at each degrees

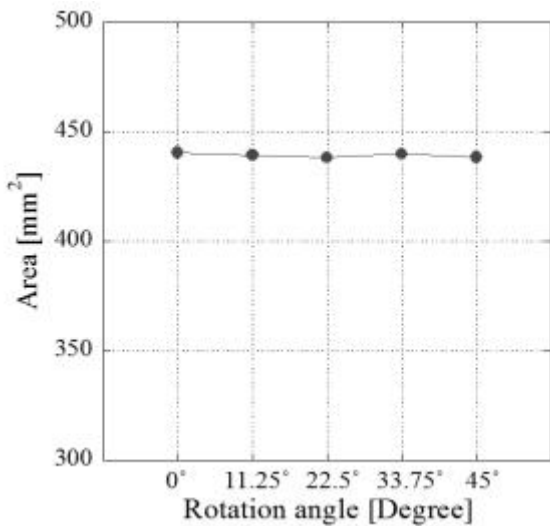


Fig. 5 Total area of flow path at each degrees

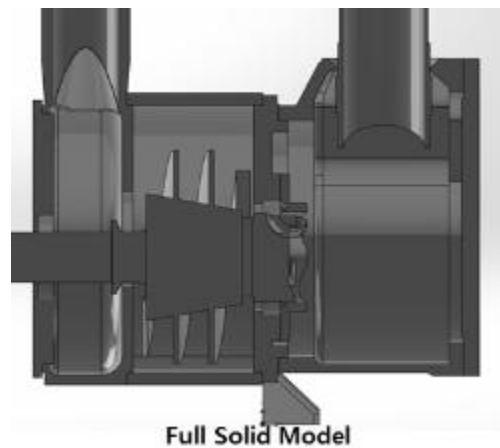
연구 수행을 위해 선정된 진공 펌프의 파쇄기는 고정부에 4개, 회전부에 5개의 홈을 가진다. 파쇄기 회전에 따른 파쇄부 유로의 변화를 알아보기 위하여 0°부터 45°까지의 회전각을 5 등분하여 Fig. 4와 같이 0°, 11.25°, 22.5°, 33.75°, 45°의 회전 각도에 대한 파쇄부 모델링 작업을 수행하였다. 모델링 작업 시 상용 모델링 프로그램인 SolidWorks 2013을 사용하였다. 파쇄기에서 토출된 유동은 임펠러 입구로 유입되게 된다. 따라서 파쇄기의 유로가 변화함에 따라 임펠러로 유입되는 유동 특성이 달라지고 결과적으로 펌프 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 변화 요소들 중에서도 가장 중요하게 다루어지는 것은 파쇄기의 토출 유로 면적이다. 토출 유로 면적이 달라질 경우 펌프로 유입되는 유동 속도가 변하게 되며 이러한 유속 변동은 임펠러로 유입되는 유동 각도를 변화시켜 펌프 효율 등에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 그렇기 때문에 정확한 성능 예측을 위해 먼저 생성된 모델링을 바탕으로 회전 각도에 따른 파쇄부 토출 유로 면적을 분석해

보았다. Fig. 5의 결과를 통해 회전 각도에 따른 파쇄부 토출 면적이 균일함을 확인할 수 있었다. 이러한 토출 유로 면적의 균일성은 임펠러 유입 유속을 균일하게 하기 위한 설계 경향으로 판단된다.

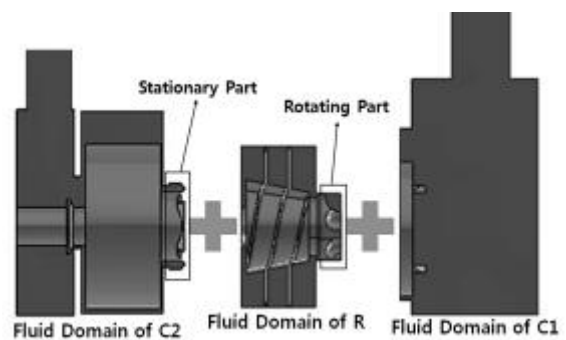
3. 수치해석을 통한 진공 펌프 성능 평가

3.1. 수치해석 도메인

Fig. 6의 (a)는 진공펌프의 고체 영역을 나타낸다. 수치해석을 통한 성능 평가 작업을 수행하기 위하여 유동 영역을 추출하였으며 추출된 유동 영역은 케이싱 1 영역(C1), 케이싱 2 영역(C2), 회전 영역(R)으로 각각 분리하였다. 각 해석 영역의 단면 형상은 Fig. 6의 (b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 해석영역 분리과정 중 파쇄부의 회전 부는 회전 영역에, 고정부는 케이싱 1 영역에 포함시켜 회전 각도에 따라 격자 재생성 없이 CFX의 전 처리 과정에서 회전각도를 변경할 수 있도록 하였다. 추가적으로 유동에 큰 영향을 미치지 않는 단차나 굴곡면은 수치해석 효율을 감안하여 단순화하였다.

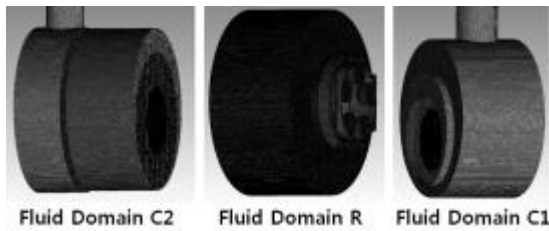


(a)

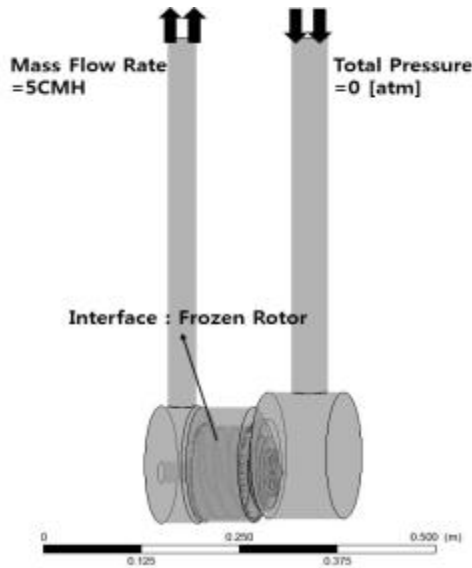


(b)

Fig. 6 (a) Solid model of vacuum pump (b) Simplified and separate fluid model of vacuum pump



(a) Mesh



(b) Boundary condition

Fig. 7 Mesh and boundary condition of vacuum pump

3.2. 수치해석 격자계

Fig. 7의 (a)와 같이 각각의 해석 영역에 대하여 ANSYS ICEM CFD ver 13.0을 이용해 비정렬 격자계를 생성하였다. 생성 격자의 총 노드 수는 약 480만개로 회전 영역이 약 215만개, 케이싱 1 영역이 약 110만개, 케이싱 2 영역이 약 150만개의 분포를 보인다. 전반적인 격자 수준은 선행 연구들을 통해 정립된 격자 신뢰성 검증 결과를 바탕으로 설정하였으며 회전 영역은 수치해석 적용 난류 모델을 감안하여 최대 y^+ 가 100이하가 되도록 하였다.⁽³⁾

3.3. 수치해석 경계조건

Fig. 7의 (b)는 해석 시 적용된 경계 조건을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 입구부에 대기압 조건을 부여하였으며 출구부에는 유량조건을 부여하였다. 회전 영역과 정지 영역인 케이싱 1, 케이싱 2 영역 사이의 경계면에는 Frozen rotor 조건을 부여하였다. 일반적으로 수치해석을 이용한 유체기계의 성능평가 시 회전 영역과 정지 영역 사이의 경계면에는 Stage average 조건을 사용한다. 날개의 위치에 따라

성능 차이가 발생할 수 있기 때문에 평균된 값을 적용하기 때문이다. 하지만 본 연구는 회전각도에 따른 성능 차이를 확인해 보는 것이 목적이므로 경계면에 Frozen rotor 조건을 부여하는 것이 적합하다. 부가적으로 임펠러의 회전수는 해당 모델의 정격 사양인 3500rpm을 적용하였으며 작동 유체는 물을 사용하였다.

3.4. 수치해석 기법

수치해석 시 상용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX ver 13.0을 사용하였다. 비압축성 난류유동해석을 위하여 3차원 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치해석 계산에 사용한 지배방정식은 유한체적법(FVM)으로 이산화 되었으며, 이산화 기법으로는 2차 이상의 정확도를 가지는 고해상도기법(high resolution scheme)을 사용하였다. 난류유동의 해석을 위해 난류모델로는 유동박리 등의 예측에 적절한 SST(Shear Stress Transport)모델을 사용하였다.⁽⁴⁾

3.5. 성능평가 결과분석

앞서 언급한 것처럼 연구 수행을 위해 선정된 진공 펌프는 파쇄기 고정부에 4개, 회전부에 5개의 홈을 가지고 있었다. 그로 인해 회전각도에 따른 유동 면적이 거의 균일하게 유지되는 것을 확인하였다. 그에 따라 펌프 성능 평가를 위한 수치해석은 $0^\circ \sim 22.5^\circ$ 까지의 3가지 경우에 대하여 수행하였다.

Fig. 8은 펌프 작동점(5CMH)에서의 회전 각도에 따른 전압 성능에 대한 결과이다. 결과를 통해 회전각도에 따른 펌프의 성능이 거의 균일하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 파쇄기가 회전할 때 유동 면적이 균일하게 유지됨에 따라 임펠러로 유입되는 유동속도 또한 균일하게 유지되기 때문에 펌프 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

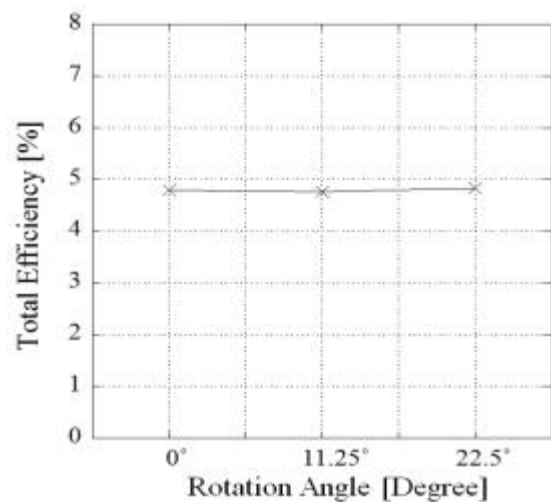
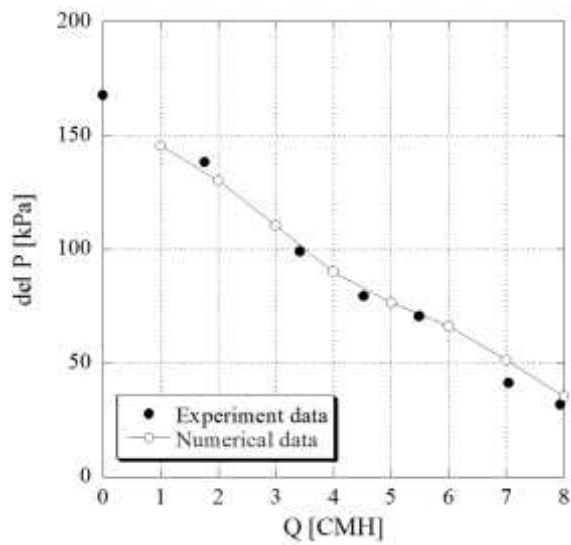
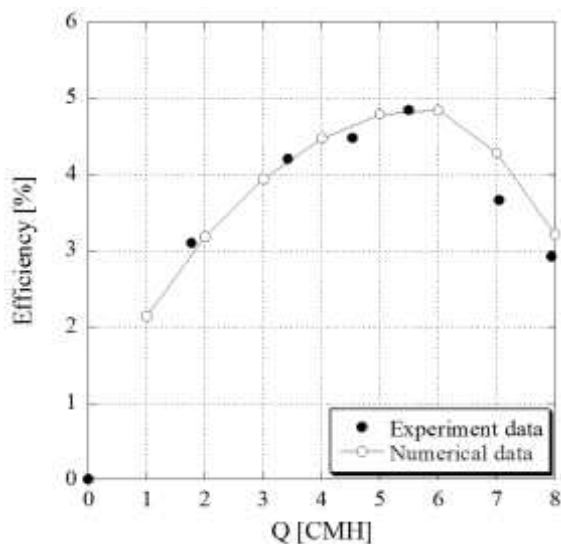


Fig. 8 Total efficiency between inlet and outlet



(a) del P



(b) Efficiency

Fig. 9 Comparison between CFD and experimental data

또한 회전각도에 따른 파쇄부 토출면의 형상 변화는 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 수치해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 Fig. 9 (a) 와 (b) 같이 수치해석을 통한 성능 평가 결과를 해당 모델의 시험 결과와 비교 분석하였다. 시험 결과는 생산 업체로부터 제공받은 결과를 사용하였다. 회전 각도에 따른 수치해석 결과는 거의 동일하였지만 정확한 결과 분석을 위하여 각도 별 결과 값을 평균하여 사용하였다. 비교 분석 결과를 통해 수치해석 결과와 시험의 결과가 매우 근접한 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로 수치해석 결과를 이용하여 펌프 시스템의 구간에 따른 압력 변화를 분석해 보았다. 결과 산출을 위해 Fig. 10과 같이 입구부에서 출구부까지의 유동 영역 중 7개의 주요 압력 변화 예상 구간에 결과 분석을 위한 면(Plane)

을 생성하였다. Fig. 11은 각 유동 구간에 대한 압력 결과를 나타낸다. 결과를 통하여 입구부에서 유입된 유동이 파쇄기를 통과하는 과정에서 압력 저하 현상이 발생하게 되며 임펠러를 통해 상승된 압력이 다시 후단의 출구부로 이송되는 과정에서 압력 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 파쇄부에서 발생하는 압력손실의 원인을 파악하기 위해 파쇄부에서의 내부 유동을 분석해 보았다. 여기서의 내부 유동을 분석해 보았다.

Fig. 12는 회전각에 따른 파쇄부 영역에서의 속도 벡터를 나타낸다. 대부분의 파쇄부 유로 영역에서 vortex 성분들이 관측되었다. 이러한 불 균일 유동 성분들은 파쇄부를 통과하는 과정에서 유로 영역이 급격히 변화하기 때문에 발생한다. 파쇄기의 특성으로 인하여 이러한 손실은 불가피하지만 파쇄기의 토출 유로 면적이나 형상, 간극 등을 조절하여 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

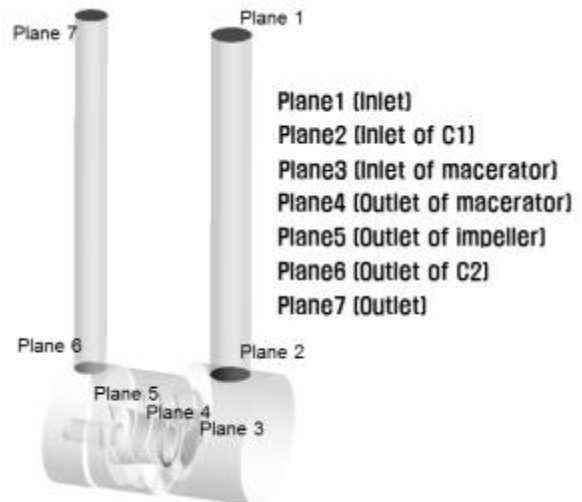


Fig. 10 Location of planes in vacuum pump

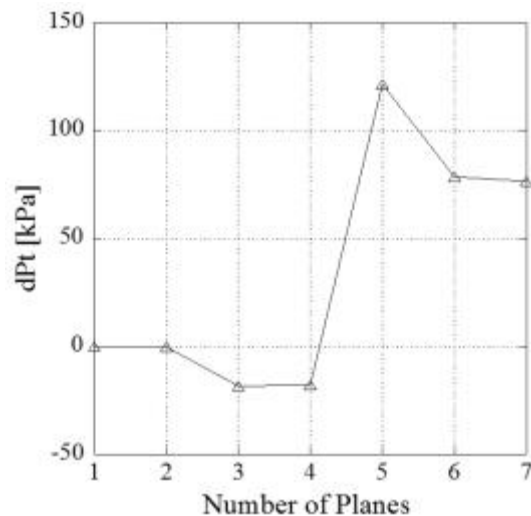


Fig. 11 Total pressure of each planes in vacuum pump

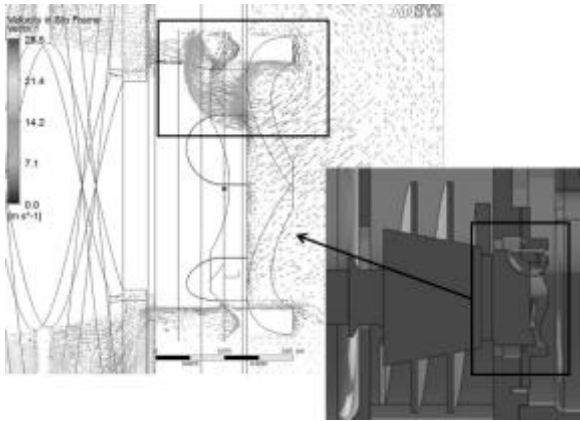


Fig. 12 Velocity vector at the macerator

4. 결 론

본 연구를 통하여 수치해석을 이용한 일체형 진공펌프 성능 평가 작업을 수행하였다.

성능 평가를 위한 수치해석 수행 시 내부 유동 조건이 변하는 시스템 특성상 비정상 상태 해석을 수행하는 것이 효과적이지만 복잡한 유동 성분을 수반하는 일체형 진공 펌프는 비정상 상태 해석에 한계가 있었다. 그에 따라 정상 상태 수치해석을 이용한 성능 평가 작업을 수행하였다.

정확한 성능 분석을 위해 회전 각도에 따른 파쇄부 유로 형상 변화를 분석하였다. 그 결과 회전 각도에 따라 파쇄부 유로의 형상에는 차이가 있으나 유로 단면적은 균일하게 유지되는 것을 확인하였다. 각 회전 각도별 정상 상태 수치해석을 수행한 결과 회전 각도에 따른 성능 차이 또한 크지 않았다. 유로 단면적 변화가 작을 경우 유로 변동이 펌프 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

추가적으로 시험 결과와의 비교분석을 통해 정상 상태 수치해석을 이용한 성능 평가 결과의 신뢰도가 매우 높은 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과를 종합해 볼 때 일체형 진공 펌프 성능평가 시 단면적이 균일하게 유지되는 경우 정상 상태 수치 해석으로도 정확한 평가가 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 산업계 연계형 기술지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

(1) H. W. Kun, C. W. Park, I. S. Kang, 2011, "Development of water seal vacuum pump for high-efficient tunnel

shovel," Proceedings of the KSPE 2011 Autumn Annual Conference, 519~520.

(2) K. W. Suh, Y. B. Ji, D. W. Kim, Y. J. Kang, J. H. Kim, 2013, "A study on the soil water system using a vacuum self-priming pump," Proceedings of the SAREK 2013 Summer Annual Conference, 640~646.

(3) J. H. Kim, J. H. Kim, K. Y. Kim, J. Y. Yoon, Y. S. Choi, S. H. Yang, 2011, "Numerical Optimization for Performance Improvement of a Tunnel Ventilation Jet fan," Journal of fluid machinery, 63~68.

(4) Y. S. Choi, K. Y. Lee, J. H. Kim, S. Kim, 2008, "Design Optimization of Mixed-flow Pump Impellers and Diffusers," Proceedings of the KFMA Annual Meeting 2008, 57~62.