

2 Vane 펌프 임펠러의 성능 개선에 관한 수치해석적 연구

김 성¹ · 마상범¹ · 최영석^{1,2} · 김진혁^{1,2*}

¹한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부문 ²과학기술연합대학원대학교 생산기술전공

A Numerical Study on the Improvement of Performance for the 2 Vane Pump Impeller

SUNG KIM¹, SANG-BUM MA¹, YOUNG-SEOK CHOI^{1,2}, JIN-HYUK KIM^{1,2*}

¹Clean Energy R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

²Industrial Technology, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

*Corresponding author :
jinhyuk@kitech.re.kr

Received 20 April, 2020

Revised 27 May, 2020

Accepted 30 June, 2020

Abstract >> This paper describes a numerical study on the improvement of performance of the 2 vane pump impellers. The design of these impellers was optimized using a commercial computation fluid dynamics code and design of experiments. Geometric design variables were defined by the impeller blade angle distribution. The objective functions were defined as the total head, total efficiency and solid material size of the impellers. The importance of the geometric design variables was analyzed using 2^k factorial designs. The interaction between the total head, total efficiency and solid material size, according to the impeller blade angle distribution, is discussed by analyzing the 2^k factorial design results.

Key words : 2 vane pump (2 베인 펌프), Impeller(임펠러), Pump performance(펌프 성능), Design of experiment(실험계획법), Computation fluid dynamics (전산유체역학)

1. 서론

일반적으로 펌프는 유체를 이송하는 유체기계이다. 그러나 환경사업이 중요한 사업으로 부각되면서 유체뿐만 아니라 오폐수와 같은 고형물을 이송하는 특수 펌프에 관한 설계 기술의 관심이 높아지고 있다. 따라서 국내뿐만 아니라 해외에서도 유체를 포함한 오폐수를 이송하는 동안에 막힘(clogging) 현상이

없이 이송이 가능한 특수 펌프 사업의 수요가 증가함에 따라 고형물을 이송하는 환경 및 오폐수 처리 사업 등의 설비 설계에 관한 연구가 급격하게 성장하고 있다. 그러나 현재 오폐수 이송으로 사용하는 특수 펌프는 볼텍스 펌프(vortex pump) 및 그라인더 펌프(grinder pump)나 수력학적 효율이 낮고 잦은 유지보수로 인해 비용이 증가하는 단점이 있다. 따라서 고형물이 쉽게 통과할 수 있는 특수용 펌프 개발이

필요하다. 유체뿐만 아니라 고형물을 이송하기 위해서는 임펠러 설계가 중요하며, 특히 임펠러 유로 단면적 및 단면적 분포 설계가 매우 중요하다. 이와 관련하여 최근 Kim 등¹⁾은 최적화기법 및 CFD를 활용하여 단단하고 큰 고형물 이송이 가능한 단일채널펌프의 수력 성능을 향상시키는 연구를 수행하였다. 또한 Song 등²⁾은 단일채널펌프의 수력학적 성능 향상 및 유체유발진동의 감소를 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 유체 및 고형물 이송을 위해 2 vane 펌프 임펠러의 유로설계를 수행하였다. 2 vane 펌프 임펠러의 형상 변화에 따른 성능 특성은 실험계획법 (design of experiment) 중에서 2^k 요인실험(factorial designs)을 적용하여 분석하였고, 2 vane 펌프 임펠러의 내부유동특성은 CFD를 활용하여 분석하였다. 2 vane 펌프 임펠러의 유로설계를 위해 임펠러 형상을 제어할 수 있는 설계변수를 선정하여 설계변수 변화에 따른 성능 변화를 분석하였다. 유체 및 고형물을 효과적으로 이송하기 위해서는 임펠러 내부유로면적을 확보하는 유로설계가 필요하다. 따라서 임펠러의 내부유로 및 유동특성을 분석하여 성능을 향상시키면서 고형물 이송이 가능한 임펠러 형상을 제시하였다.

2. 2 vane 펌프 임펠러 형상

2 vane 펌프는 회전체인 임펠러와 고정체인 벌류트로 구성되어 있으며, 2 vane 펌프의 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 2 vane 펌프는 회전하는 임펠러로부터

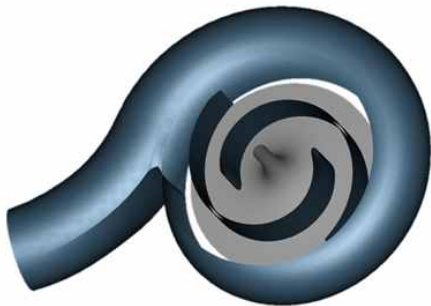


Fig. 1. Three-dimensional 2 vane pump impeller and volute

운동에너지에서 압력에너지를 변화하여 벌류트에서 압력에너지를 회복하는 유체기계이다. 특히 임펠러는 유체 및 고형물을 이송하는 주요 구성품이므로 임펠러 설계가 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 유체 및 고형물을 효과적으로 이송하기 위해 2 vane 펌프 임펠러를 설계하였다. 임펠러는 자오면 및 날개각분포 설계로 나누어진다. 임펠러의 자오면은 기존 형상을 분석하여 설계사양을 만족하는 자오면으로 재설계하여 고정하였고, 설계된 자오면은 Fig. 2에 제시하였다. 이때, 설계사양은 Table 1에 제시하였다.

임펠러 날개각 분포 설계를 위해 Fig. 3과 같이 설계변수를 정의하였다. Fig. 3에서 Beta 1은 입구각을 나타내며, Beta 2는 출구각을 나타낸다. 임펠러 날개각 분포는 베지어 곡선(bezier curve)의 조정점

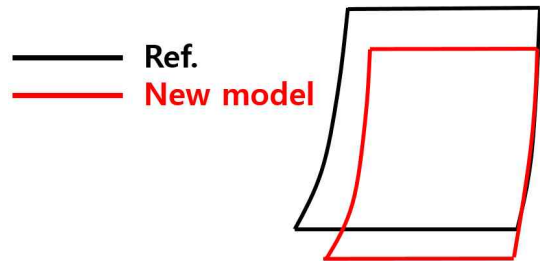


Fig. 2. Comparison of meridional plane

Table 1. Design specification

Q (m ³ /min)	Total head (m)	Rotational speed (rev/min)
0.5	10	1,760

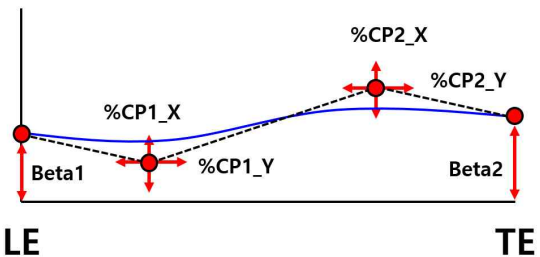


Fig. 3. Design variables of blade angle distribution

(control point)을 이용하여 설계하였다. 이때 입구부 조정점은 %CP1_X 및 %CP1_Y로 정의하였고, 출구부 조정점은 %CP2_X 및 %CP2_Y로 정의하였다³⁾. 선정된 설계변수는 2^k 요인 실험 및 CFD를 활용하여 설계변수 변화에 따른 펌프 성능 변화를 분석하였다.

3. 수치 해석방법

2 vane 펌프 임펠러의 내부유동해석은 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-19를 사용하였다. 임펠러 형상은 ANSYS Baldegen을 이용하여 생성하였고, 격자계는 ANSYS Turbogrid를 사용하여 정렬격자계(structured grid)로 생성하였다⁴⁾. 임펠러 입구부는 축방향으로 일정한 면적을 갖는 파이프(pipe) 형상으로 단순화하였고, 출구부는 반경방향으로 폭이 감소하는 베인리스 디퓨저(vaneless diffuser)로 단순화하였다. 수치 해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 임펠러의 격자 테스트를 수행하였고 약 120만 개로 고정하여 수치 해석을 수행하였다.

임펠러의 비압축성 난류 흐름(turbulent flow) 분석을 위해 3차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 난류의 흐름을 분석하기 위해 난류 모델(turbulent model)은 유동박리(flow separation)의 예측에 유리한 SST model을 사용하였다^{5,6)}. Fig. 4는 임펠러의 경계조건(boundary condition)을 보여준다.

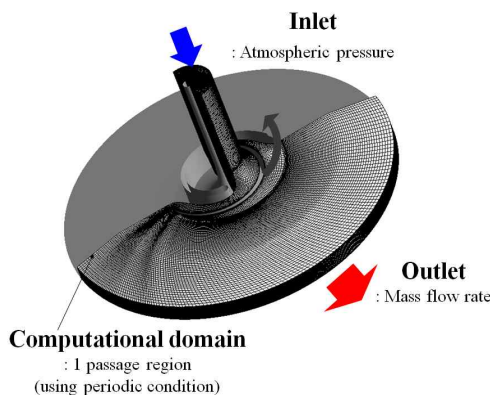


Fig. 4. Boundary conditions and grid system for the 2 vane pump impeller calculation

입구부에는 대기압(atmospheric pressure)을 주었고, 출구부에는 질량유량(mass flow rate)을 부여하였다. 작동유체(working fluid)는 25°C의 물로 사용하였다. 이때 디스크 마찰 손실, 기계적 손실 그리고 누출 손실은 수치 해석 결과에 포함되지 않았다.

4. 2 vane 펌프 임펠러 성능 분석

4.1 2^k 요인실험

실험계획법은 근대적 통계해석법을 기반으로 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정하고 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다. 그리고 동시에 두 종류 이상의 인자를 대상으로 하여 인자들의 효과를 개별적으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 2 vane 펌프 임펠러의 설계변수에 의한 유동 특성을 알아보기 위해 실험계획법의 2^k 요인 실험을 사용하였고, 분석은 상용 프로그램인 Minitab 14를 이용하였다⁷⁾. Fig. 5는 2^k 요인 실험을 이용한 분석 절차를 보여준다. 본 연구에서 관심 있는 인자의 수, 실행할 수 있는 실험의 수, 비용 및 시간 등을 고려하여 의미가 적은 고차의 상호작용을 교락시켜서 실험의 횟수를 적게 하는 일부실시설계(fractional factorial designs)로 2^k 요인실험을 수행하였다. 2^k 요인실험에서 선택한 변수들은 임펠

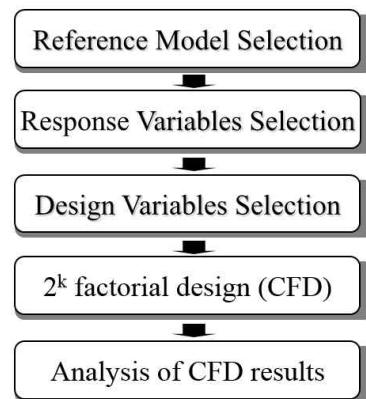


Fig. 5. Flow chart of 2^k factorial design. CFD, computation fluid dynamics.

리의 변수 중에서 날개각분포를 쉽게 제어하고, 성능에 영향을 미칠 것이라 인식되는 변수들 즉, Beta 1, %CP1_X, %CP1_Y, %CP2_X, %CP2_Y 및 Beta 2로 지정하였다. 이때 허브와 쉬라우드의 날개각 분포는 동일한 날개각 분포로 설계하였다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 일부실시설계의 해상도는 IV 수준으로 주 효과가 2차 상호작용과 교락되지 않으나, 2차 상호작용 간에는 교락된 형태로서 즉, 변수 6개의 중심값을 포함한 17개의 수치 해석 실험 셋을 생성할 수 있다. Table 2는 2^k 요인실험에 적용된 실험조건을 보여준다⁷⁾.

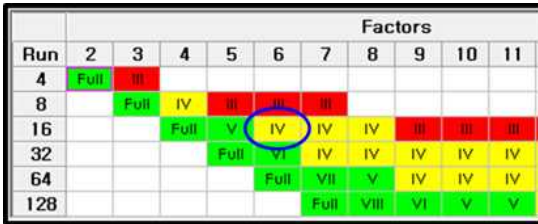


Fig. 6. Fractional factorial of DOE

Table 2. 2^k factorial design set

	Beta 1	%CP1_X	%CP1_Y	%CP2_X	%CP2_Y	Beta 2
1	-2	10	-5	50	-5	-5
2	2	10	-5	50	5	-5
3	-2	50	-5	50	5	5
4	2	50	-5	50	-5	5
5	-2	10	5	50	5	5
6	2	10	5	50	-5	5
7	-2	50	5	50	-5	-5
8	2	50	5	50	5	-5
9	-2	10	-5	90	-5	5
10	2	10	-5	90	5	5
11	-2	50	-5	90	5	-5
12	2	50	-5	90	-5	-5
13	-2	10	5	90	5	-5
14	2	10	5	90	-5	-5
15	-2	50	5	90	-5	5
16	2	50	5	90	5	5
Center	0	30	0	70	0	0

4.2.2 vane 펌프 임펠러 설계변수 변화에 대한 성능 특성 분석

Fig. 7은 성능곡선을 나타내며, 펌프는 설계유량에서 양정을 만족하고 효율이 최대화로 설계한다. 따라서 임펠러도 설계유량에서 양정을 만족하고 효율을 최대화 하는 설계로 수행하였다. 양정 및 효율에 대한 식은 다음과 같다⁸⁾.

$$H_t = \frac{\Delta Pt}{\rho \times g} \tag{1}$$

$$\eta_t = \frac{Q \times \Delta Pt}{\tau \times \omega} \tag{2}$$

이때, ρ 및 g는 각각 작동유체의 밀도와 중력가속도이며 τ 및 ω는 토크와 각속도를 의미한다.

Fig. 8은 임펠러 내부유로에 이송이 가능한 고�형물 크기를 정의한 것이다. 임펠러 내부유로에서 입구 부 단면적이 가장 작으므로 고�형물의 크기는 임펠러

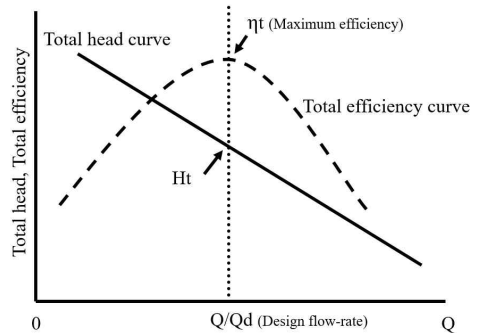


Fig. 7. Total head and total efficiency curve

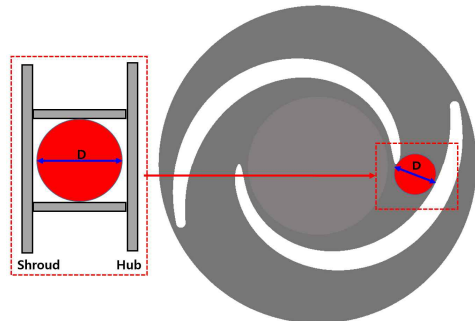


Fig. 8. Solid material size from impeller inlet

입구부에서 접선 방향으로 지나는 면적을 기준으로 정의하였다. 고품물 체적의 식은 다음과 같다.

$$Solid = \frac{1}{6} \pi D^3 \quad (3)$$

이때 D는 임펠러 내부유로 단면적을 통화하는 고품물의 직경을 의미한다.

2 vane 펌프 임펠러 형상변화에 따른 성능 변화는 주 효과 도표(main effects plot) 및 파레토 차트(pareto chart)를 이용하여 분석하였다^{9,10}.

Fig. 9는 임펠러 설계변수 변화에 따른 양정의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9를 보면 Beta 1, %CP1_Y 및 %CP2_X가 증가할수록 양정이 증가하고 %CP1_X, %CP2_Y 및 Beta 2가 감소할수록 양정이 증가한다. Fig. 10의 파레토 도표를 보면 Beta 1, %CP1_X, %CP2_Y 순으로 양정 변화에 영향을 준다.

Fig. 11은 임펠러 설계변수 변화에 따른 효율의 변

화를 나타낸 것이다. Fig. 11을 보면 설계변수 변화에 따른 효율 변화는 양정과 같은 경향성을 나타낸다. 그러나 Fig. 12의 파레토 도표를 보면 %CP2_Y Beta 1, %CP1_X 순으로 효율 변화에 영향을 준다. 한편, Fig. 13은 임펠러 설계변수 변화에 따른 고품

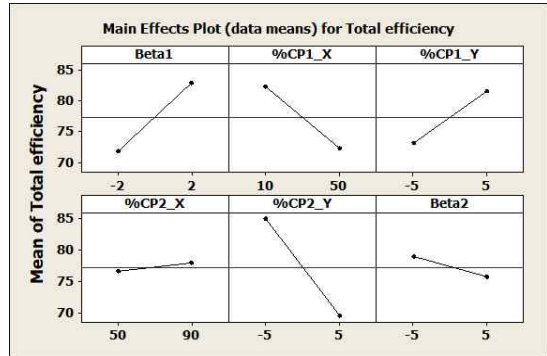


Fig. 11. Main effects plot for total efficiency

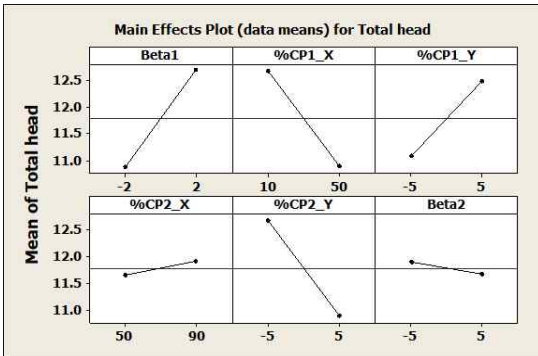


Fig. 9. Main effects plot for total head

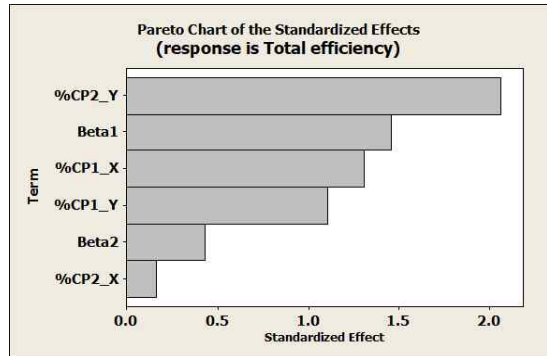


Fig. 12. Pareto chart for total efficiency

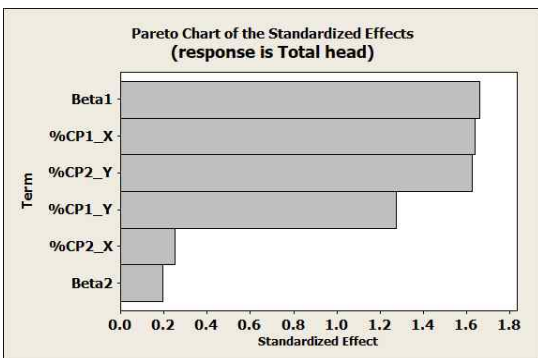


Fig. 10. Pareto chart for total head

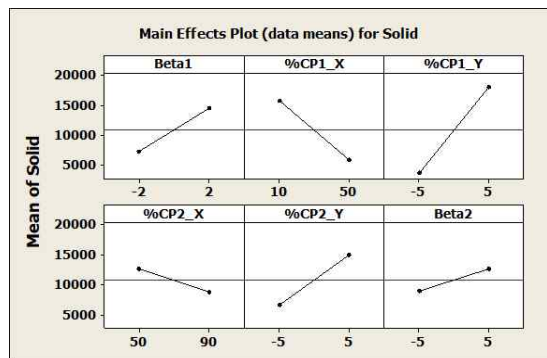


Fig. 13. Main effects plot for solid

물의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 13을 살펴보면 출구 부 설계변수 경향성이 양정 및 효율과 다르다. Fig. 14의 파레토 도표를 보면 효율과 같은 설계변수 순으로 고품질 변화에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 설계유량에서 양정은 만족하고 효율 및 고품질은 최대화로 설계 목표값(target of design)으로 설정하였다. 목표값을 만족하는 형상을 결정하기 위해 반응최적화(response optimization)기법을 이용하여 Fig. 15와 같은 반응최적화 도표를 도식하였다. 중심값(center point)으로 반응최적화 결과는 Beta 1은 2, %CP1_X는 10%, %CP1_Y는 -5, %CP2_X는 50%, %CP2_Y는 5 및 Beta 2는 -5에서 양정은 만족하고 효율 및 고품질은 최대화로 예측되었다. 이 결과는 설계 목표값을 만족하여 최적형상으로 선정하였고 수치 해석을 이용하여 성능을 검증하였다.

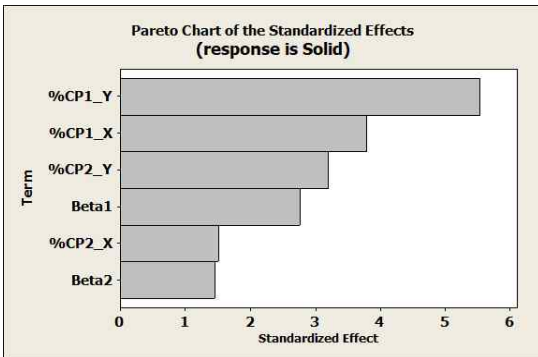


Fig. 14. Pareto chart for solid

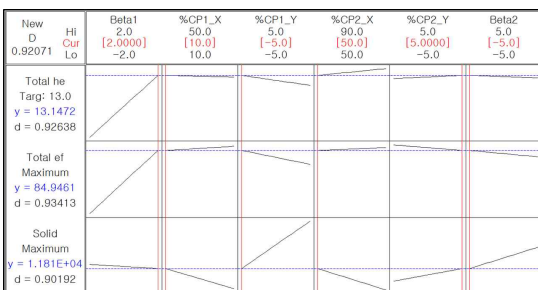


Fig. 15. Plot of response optimization

5. 2 vane 펌프 임펠러 설계 결과 분석

Fig. 16은 임펠러의 기존형상 및 최적형상을 비교한 것이고, Table 2는 설계유량에서 양정, 효율 및 고품질의 결과를 비교한 것이다. Fig. 16을 보면 기존형상은 최적형상보다 외경이 약 10% 크다. 따라서 Table 3 및 Fig. 17(a)의 CFD 결과를 보면 기존형상의 양정은 과설계 된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 16 및 Table 3에서 고품질의 크기를 비교하면 최적형상의 고품질 크기는 기존형상보다 약 48% 증가하였다. 최적형상의 외경은 기존형상보다 약 10% 작음에도 불구하고 이송하는 고품질은 기존형상보다 크다. Table 3 및 Fig 17(b)를 보면 최적형상은 기존형상보다 설계유량에서 효율이 약 2% 향상되었음을 확인할 수 있다. Table 3, Fig. 16 및 17의 결과를 종합해보면 최적형상은 기존형상보다 성능이 본 연구의 설계 기준 관점에서 향상되었음을 확인할 수 있다.

2 vane 펌프 임펠러 최적형상 성능이 개선된 객관적인 검토는 CFD를 활용하여 분석하였다. 기존형상 및 최적형상의 내부압력분포 및 유동흐름을 분석하

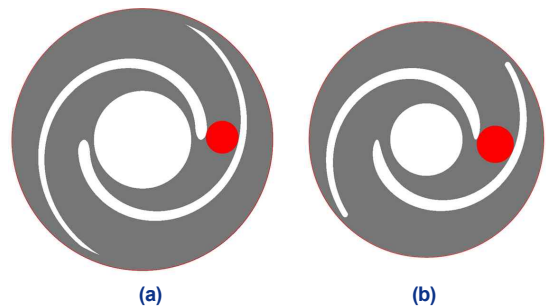


Fig. 16. Comparison of three-dimensional geometry 2 vane pump impeller (a) reference model, (b) optimum model

Table 3. Comparison of CFD results

	Reference model	Optimum model
Total head (m)	18	13
Total efficiency (%)	83	85
Solid (mm ³)	8,181	12,121

여 성능이 향상된 근거를 확인하였다.

Fig. 18은 기존형상 및 최적형상 자오면에서 내부 압력분포를 비교한 것이다. Fig. 18(a)를 보면 기존형상은 과설계되어 있으므로 전반적으로 높은 압력분포를 나타내고 있다. 그러나 Fig. 18(b)의 최적형상의 압력분포는 설계사양 압력 기준으로 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 파이프 방향으로 매우 부드럽게 흐르므로 기존형상보다 내부유동흐름이 개선된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 19는 기존형상 및 최적형상의 내부유동흐름을 비교한 것이다. Fig. 19(a)를 보면 기존형상의 입

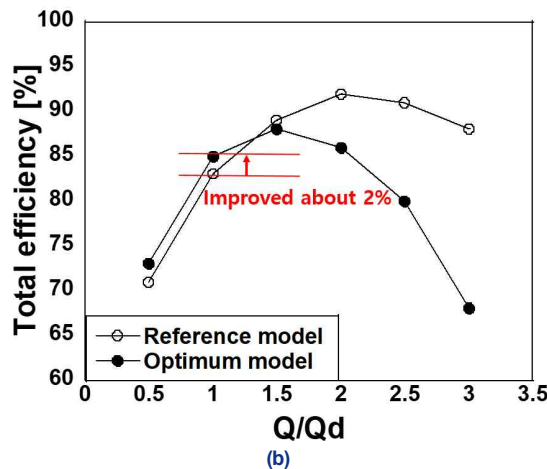
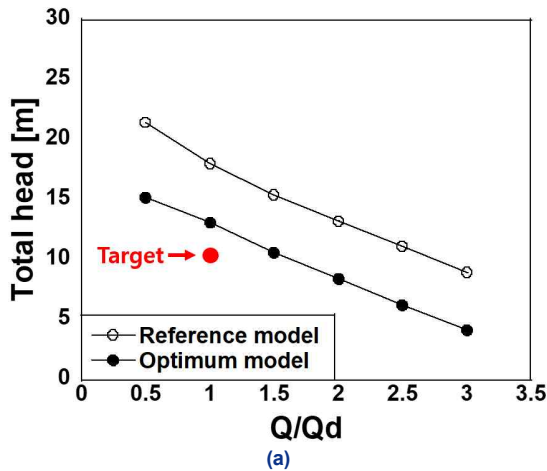


Fig. 17. Comparative analysis of the pump performance curve (a) total head, (b) total efficiency

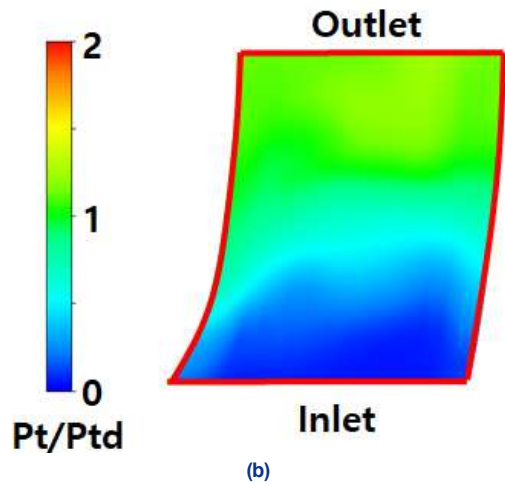
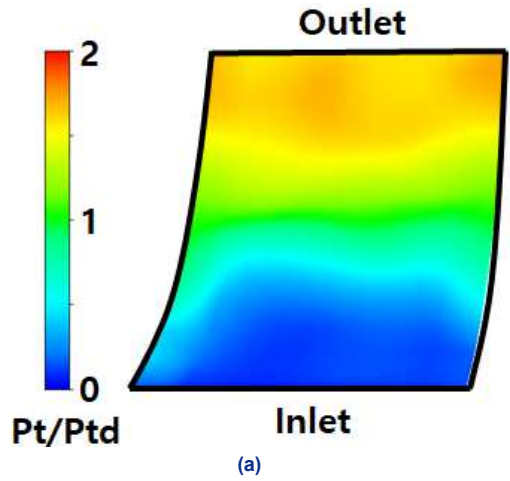


Fig. 18. Comparison of the total pressure contour on the meridional plane (a) reference model, (b) optimum model

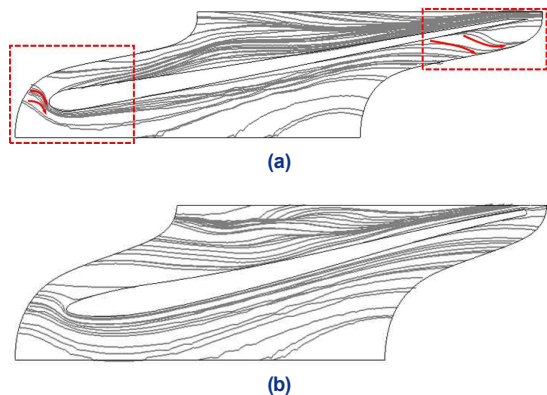


Fig. 19. Comparison of the streamline at hub (a) reference model, (b) optimum model

구 및 출구부의 내부유동흐름이 매끄럽지 않다. 반면에 Fig. 19(b)의 최적형상의 유동흐름은 개선된 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 2 vane 펌프의 성능을 분석하기 위해 CFD를 활용하였고, 2 vane 펌프 임펠러의 설계변수 변화에 따른 성능변화는 실험계획법 중 2^k요인실험을 이용하여 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 펌프 성능을 만족하고 유체뿐만 아니라 고형물 이송하기 위해서는 임펠러 내부유로설계가 매우 중요하다. 따라서 유체 및 고형물 이송이 가능한 2 vane 펌프 임펠러를 설계하였다.

2) 2 vane 펌프 임펠러 형상을 제어할 수 있는 설계변수를 정의하였고, 임펠러 날개각분포를 효율적으로 제어할 수 있는 설계변수를 제시하였다.

3) 임펠러 설계변수 변화에 따른 양정 및 효율의 경향성은 동일하게 나타난다. 그러나 양정 및 효율에 영향을 주는 설계변수의 순은 다르다.

4) 고형물의 크기 변화에 따른 출구부 설계변수의 경향성은 양정 및 효율의 경향성과 다르다. 그러나 효율에 영향을 주는 설계변수 순은 같은 것을 확인하였다.

5) 최적설계된 형상은 기존형상보다 내부유동흐름이 안정적이며, 기존형상 대비 효율은 약 2%, 고형물의 크기는 약 48% 증가되었다.

6) 2 vane 펌프는 임펠러뿐만 아니라 벌류트 설계도 매우 중요하다. 벌류트는 임펠러 형상을 고려하여 설계하므로 임펠러 형상에 따라 벌류트 설계 방향이 정해진다. 따라서 최적설계된 임펠러 설계 결과를 기준으로 벌류트 설계를 진행한다면 설계사양을 만족하는 2 vane 펌프 형상 도출이 가능하다.

후 기

본 연구에서는 과학기술정보통신부의 재원으로

한국생산기술연구원의 기업수요기반 생산기술실용화사업(No. JB200007)의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

1. J. H. Kim, S. B. Ma, S. Kim, S. Y. Choi, and K. Y. Kim, "Design and verification of a single-channel pump model based on a hybrid optimization technique", *Processes*, Vol. 7, No. 10, 2019, pp. 747, doi: <https://doi.org/10.3390/pr7100747>.
2. W. G. Song, S. B. Ma, Y. S. Choi, K. Y. Lee, Y. S. Kim, K. Y. Kim, and J. H. Kim, "Multi-objective optimization for designing a high-efficiency and low-fluid-induced-vibration single-channel pump", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 21, No. 4, 2018, pp. 5-12, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2018.21.4.030>.
3. J. W. Kim, J. W. Suh, J. H. Kim, Y. S. Choi, K. Y. Lee, and J. H. Kim, "Effect on the Efficiency of a counter-rotating pump-turbine with the variation of blade angle using design of experiment (2^k factorial design)", *New & Renewable Energy*, Vol. 13, No. 1, 2017, pp. 5-12, doi: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2017.3.13.1.017>.
4. J. H. Kim, H. C. Lee, J. H. Kim, S. Kim, J. Y. Yoon, and Y. S. Choi, "Design techniques to improve the performance of a centrifugal pump using CFD," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 1, 2015, pp. 215-225, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1228-6>.
5. K. S. Lee, K. Y. Kim, and A. Samad, "Design optimization of low-speed axial flow fan blade with three-dimensional RANS analysis", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22 No. 10, 2008, pp. 1864-1869, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0724-y>.
6. S. Y. Lee and K. Y. Kim, "Design optimization of axial flow compressor blades with three-dimensional navier-stokes solver", *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 9, 2000, pp. 1005-1012, doi: <https://doi.org/10.1007/BF03185803>.
7. Minitab Inc, "MINITAB statistical software release 14 for Windows", State College USA, 2003. Retrieved from <http://www.minitab.co.kr/minitab/new/main/main.php>.
8. S. Kim, K. Y. Lee, J. H. Kim, and Y. S. Choi, "A numerical study on the improvement of suction performance and hydraulic efficiency for a mixed-flow pump impeller", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, 2014, pp. 1-17, doi: <https://doi.org/10.1155/2014/269483>.
9. U. H. Jung, J. H. Kim, J. H. Kim, C. H. Park, S. O. Jun, and Y. S. Choi, "Optimum design of diffuser in a small high-speed centrifugal fan using CFD & DOE", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 3, 2016,

- pp. 1171–1184. doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0221-7>.
10. X. Sun, S. Kim, S. D. Yang, H. S. Kim, and J. Y. Yoon, "Multi-objective optimization of a stairmand cyclone separator using response surface methodology and computational fluid dynamics", *Powder Technology*, Vol. 320, 2017, pp. 51–65, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0221-7>.