

고양정 및 저유량을 만족하는 폐수처리용 펌프 설계 최적화

김 성¹ · 김진혁^{1,2†}

¹한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부, ²과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학

Design Optimization on Wastewater Treatment Pump of Satisfaction for High Head and Low Flow Rate

SUNG KIM¹, JIN-HYUK KIM^{1,2†}

¹Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 889 Yangdaegiro-gil, Ippang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

²Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

†Corresponding author :
jinhyuk@kitech.re.kr

Received 29 July, 2022
Revised 26 September, 2022
Accepted 8 October, 2022

Abstract >> In this paper, the performance characteristics of the 2 vane pump for wastewater treatment were investigated using response surface method(RSM) with commercial computation fluid dynamics(CFD) software. Design variables of wastewater treatment pump were defined with the meridional plane of the 2 vane pump impeller. The objective functions were defined as the total head and the efficiency at the design flow rate. The hydraulic performance of optimum model was verified by numerical analysis and the reliability of the model was retained by comparison of numerical analysis and comparative analysis with the reference model.

Key words : Wastewater treatment pump(폐수처리용 펌프), 2 vane pump (2베인 펌프), Pump performance(펌프성능), Response surface method(반응표면기법), Computation fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서론

일반적으로 펌프는 액화수소, 청수 및 해수 등 이물질 및 고형물 등을 포함하지 않는 유체를 이송하는 유체기계이다. 일반적인 펌프의 형상은 유체가 이송하는 유체가 매우 작아서 유체만 이송하도록 설계되어 있으므로 이물질과 같은 고형물 이송은 불가능하다. 따라서 펌프가 유체를 이송하는 과정에서 이물

질도 이송되어 펌프 내부에 들어가 경우에는 펌프가 정상적인 운전이 어렵고 더 나아가 펌프가 파손되는 경우도 발생한다. 이러한 결과는 펌프 운전 효율이 매우 급격하게 저하되며, 유지보수비용도 증가한다. 과거에는 펌프가 유체만 이송하는 기계로만 사용되었으나 현재는 유체뿐만 아니라 이물질도 이송이 가능한 특수형 펌프 수요가 증가되는 추세이다. 특히 환경사업에서 부각되면서 특수형 펌프 수요는 꾸준

히 증가하는 추세이므로 특수형 펌프 개발에 대한 연구도 꾸준히 증가되고 있다.

특수형 펌프는 유체뿐만 아니라 고형물도 이송해야 하므로 일반적인 펌프와 달리 유체를 이송하는 유로가 매우 넓게 설계되어야 한다. 펌프의 유로를 넓게 설계하면 효율이 급격하게 저하되므로 효율을 만족하면서 고형물을 이송하는 특수형 펌프 설계는 일반적인 펌프보다 수력학적 설계기술력이 요구된다.

특수형 펌프 수요가 증가함에 따라 국내뿐만 아니라 국외에서 유체 및 오폐수를 이송하는 특수형 펌프 연구 사례가 급격하게 증가하고 있다. Song 등¹⁾은 단일채널펌프의 수력학적 효율을 증가하면서 유체유발진동의 감소하는 연구를 수행하였고, Nishi 등²⁾은 유체뿐만 아니라 고형물도 이송이 가능하도록 펌프의 내부 유로 크기를 증가하면서 수력학적 성능도 증가시키는 연구를 수행하였다. 또한 Ma 등³⁾은 수력학적 효율을 만족하면서 고형물 이송이 가능한 펌프의 임펠러와 벌류트를 설계하였다.

또한, 최근에는 펌프 및 송풍기와 같은 유체기계의 성능을 향상시키기 위해 CFD 및 최적화 기법을 이용한 연구가 진행되었다. Pei 등⁴⁾은 단일 블레이드 펌프의 수력학적 성능 및 유동특성을 CFD를 활용하여 분석하였고, Khalifa 등⁵⁾은 원심펌프의 회전체인

임펠러와 벌류트의 내부 유동특성을 CFD를 활용하여 분석하였다. Table 1은 설계사양을 나타내며, Fig. 1은 2 vane 펌프 형상을 나타낸다.

폐수처리용 펌프는 주로 고유량 이송용이므로 펌프형상이 크다. 본 연구에서는 고형물 이송이 가능하고 고양정 및 저유량 이송이 가능한 콤팩트형 2 vane 펌프 최적설계를 위해 실험계획법(design of experiment) 중에서 반응표면기법(response surface method)을 이용하였다⁶⁾. 또한, 오폐수용 2 vane 펌프의 수력학적 성능검증은 CFD를 활용하여 검증하였다.

2. 폐수처리용 펌프 형상 및 설계변수

폐수처리용 2 vane 펌프 최적설계를 위해 설계변수는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 임펠러 자오면 설계변수를 나타내며, B1은 임펠러 입구 폭을 나타내며, B2는 출구 폭을 나타낸다. 또한 D1 및 D2는 입구부 및 출구부의 직경을 나타낸다. Fig. 2(b)는 벌

Table 1. Design specification

Q (m ³ /min)	Total head (m)	Rotational speed (rev/min)
0.2	10≤	1,760

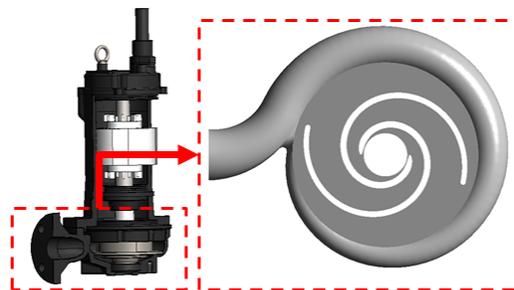
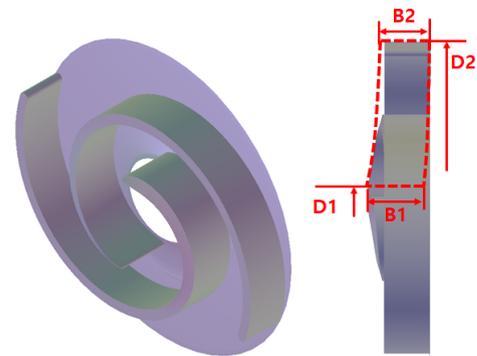
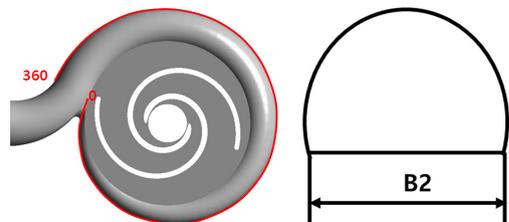


Fig. 1. Three-dimensional shape of 2 vane pump



(a)



(b)

Fig. 2. Design variables of 2 vane pump (a) meridional plane of impeller, (b) volute

류트 설계변수를 나타내나 임펠러 출구 폭인 B2 변화에 따라 단면적 분포가 변경되는 종속변수로 선정하였다. 이때, 임펠러 날개각 분포는 기존형상으로 고정하였다.

3. 수치해석 방법

폐수처리용 2 vane 펌프의 수력학적 성능검증 및 내부 유동흐름 분석을 위해, 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-19를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 임펠러 형상은 ANSYS Bladegen을 이용하여 생성하였고, 격자계는 ANSYS Turbogrid를 사용하여 정렬격자계(structured grid)로 생성하였다. 벌류트 형상은 Solid Works 프로그램을 이용하여 생성하였고, 격자계는 ICEM-CFD를 사용하여 비정렬 격자계(unstructured grid)로 생성하였다. 이때, 수치해석 수렴성을 위해

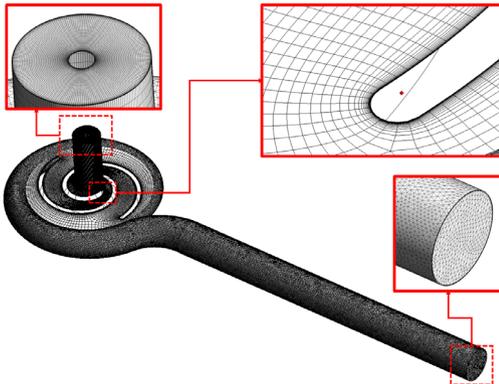


Fig. 3. Grid system for the 2 vane pump calculation

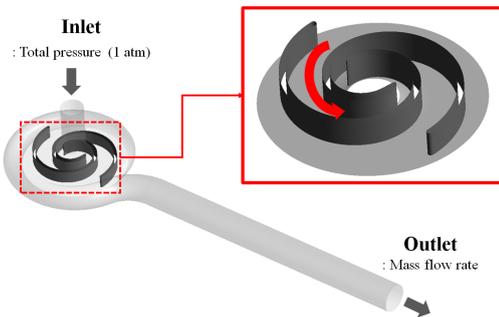


Fig. 4. Boundary conditions for the 2 vane pump calculation

임펠러 입구부와 벌류트 출구부는 동일한 면적을 갖는 원통형 형상으로 구현하였다. 또한, 폐수처리용 2 vane 펌프의 격자계는 격자 테스트를 수행한 후에 약 300만 개로 고정하였고 수치해석을 수행하였다. Fig. 3은 폐수처리용 2 vane 펌프의 격자계(grid system)를 보여준다.

Fig. 4는 폐수처리용 2 vane 펌프의 경계조건(boundary condition)을 보여준다. 임펠러는 회전체이므로 회전수 조건을 주었고, 입구부에는 대기압(atmospheric pressure) 조건을 주었다. 벌류트 형상에서 출구부는 질량 유량(mass flow rate)을 주었다. 2 vane 펌프 임펠러 및 벌류트의 비압축성 난류흐름(turbulent flow) 분석을 위해 3차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 난류의 흐름을 분석하기 위해 난류모델(turbulent model)은 유동박리(flow separation)의 예측에 유리한 SST model을 사용하였다. 작동유체(working fluid)는 25°C의 물로 사용하였다⁷⁾.

4. 폐수처리용 펌프 설계 최적화

4.1 반응표면기법

Fig. 5는 폐수처리용 펌프의 설계 최적화 절차를 보여준다⁸⁾. 최적설계는 반응표면기법을 사용하였고 분석은 Minitab 14를 이용하였다⁹⁾.

반응표면기법은 분석하고자 하는 설계변수(design variable) 변화에 의하여 반응변수(response variable) 변화가 있을 경우, 설계변수 변화에 따른 반응면을 근사 모델링하고 해석 및 분석하기 위한 통계적이고 수학적인 기술을 의미한다. 반응표면기법의 목적은 설계변수 변화에 대한 반응변수의 변화를 분석하여 반응변수의 최적값을 갖기 위한 설계변수의 조건을 선정하는 것이다.

반응변수인 목적값은 펌프의 성능지표인 성능곡선에서 선정하였고, Fig. 6은 펌프의 성능곡선을 나타내었다¹⁰⁾. 일반적으로 펌프는 설계사양의 유량에서 양정은 만족하고 효율은 최대화로 설계한다. 따라서 폐수처리용 2 vane 펌프도 설계사양의 유량에서

양정을 만족하고 효율을 최대화로 설계하였다. 펌프의 성능지표인 양정 및 효율 식은 식 (1) 및 (2)에 나타내었다¹¹⁾.

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

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

이때 ρ 및 g 는 각각 작동유체의 밀도와 중력가속도이며 τ 및 ω 는 토크와 각속도를 의미한다.

4.2 폐수처리용 펌프 최적설계

본 연구에서는 폐수처리용 펌프의 주요 설계변수는 임펠러 입구 직경과 입구 폭인 D1 및 B1로 선정하였고, 최적설계를 수행하였다. 이때 기존 형상은 양정을 만족하므로 양정에 영향을 주는 출구부 설계 변수는 고정하였다. 또한, 임펠러 출구부 형상이 고정되었으므로 벌류트 형상도 고정하였다.

주요 설계변수 변화에 따른 목적값 변화를 분석하기 위해, 등고선 플롯(overlaid contour plot)을 이용하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7을 보면 양정범위가 11.5-12 m, 효율범위가 65-70%를 만족하는 설계변수 값은 D1은 약 6-10%, B1은 0-7%에서 존재한다.

설계 목적값을 만족하는 최적의 설계변수 조건을 결정하기 위해 반응최적화기법을 이용하여 Fig. 8과 같은 반응최적화(response optimization) 도표를 나타내었다.

반응 최적화는 회귀 분석(regression analysis)을 사용하여 수행되었다. 회귀 분석에 대한 추정 식(estimate equation)은 식 (3)과 같다.

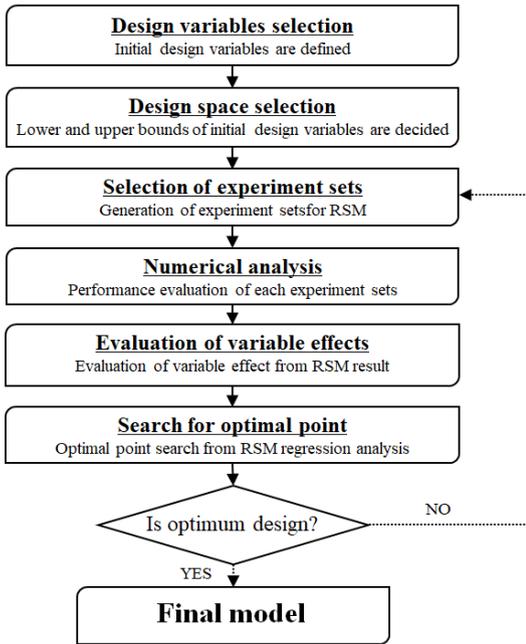


Fig. 5. Flow chart of design optimization⁹⁾

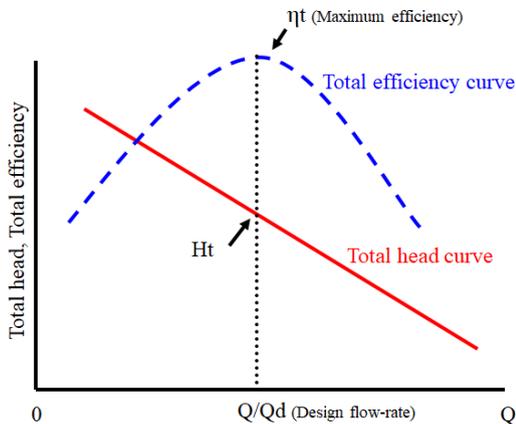


Fig. 6. Total head and total efficiency curve¹⁰⁾

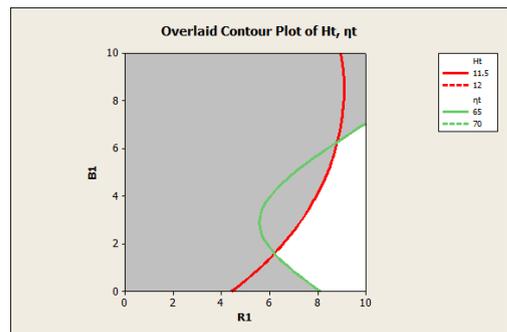


Fig. 7. Overlaid contour plot

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \times X_1 + \hat{\beta}_2 \times X_2^2 + \dots + \hat{\beta}_n \times X_n^n \quad (3)$$

이때 X 및 $\hat{\beta}$ 는 설계변수 및 회귀계수를 나타내며, \hat{Y} 는 목적함수를 나타낸다.

본 연구에서는 설계사양의 유량에서 양정은 만족하고 효율은 최대화로 설계 목적값(target of design)으로 설정하였다. 반응최적화 결과는 D1은 10%, B1은 5%에서 양정은 약 11.7 m, 효율은 약 65.7%로 예측하였다. 설계변수의 최적값은 설계 목적값을 만족하므로 최적형상으로 선정하였다. 선정된 폐수처리용 2 vane 펌프는 수치해석을 이용하여 성능을 분석 및 검증하였다.

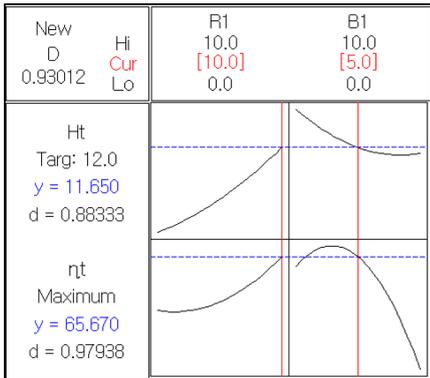


Fig. 8. Response optimization

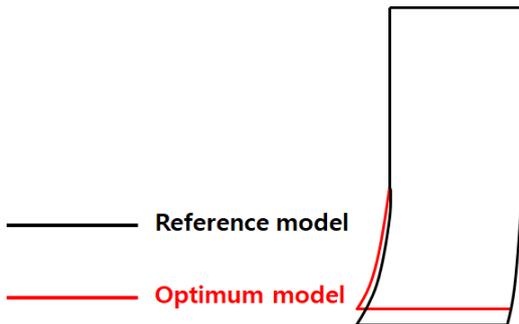


Fig. 9. Comparison of meridional plane for the impeller

5. 폐수처리용 펌프 성능분석

최적 설계된 폐수처리용 펌프 임펠러 자오면 형상 및 기존형상은 Fig. 9에 비교하였고, 설계사양의 유량에서 양정 및 효율의 수치해석 결과는 Table 2에 비교하였다. 수치해석 결과는 양정은 11.6 m, 효율은 약 65.6%로 Fig. 8의 반응최적화 도표 결과와 유사하다.

최적형상의 성능이 개선된 결과를 분석하기 위해 기존형상 및 최적형상의 유량변화에 양정곡선 및 효율곡선은 Fig. 10에 나타내었다. Table 2 및 Fig. 10(a)

Table 2. Comparison of CFD results

	Reference model	Optimum model
Total head (m)	11.4	11.6
Total efficiency (%)	62.9	65.6

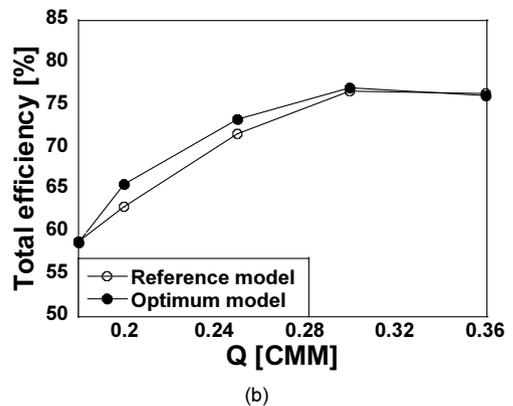
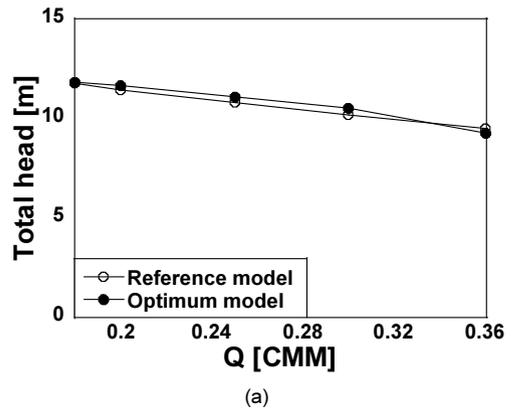


Fig. 10. Comparative analysis of the pump performance curve (a) total head, (b) total efficiency

보면, 기존형상 및 최적형상의 양정은 유사하다. 또한, 유량변화에 따른 기존형상 및 최적형상의 양정곡선의 경향성도 유사하다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 기존형상 및 최적형상의 출구부 형상이 유사하기 때

문이다. Table 2 및 Fig. 10(b)를 보면, 최적형상의 효율은 기존형상보다 설계유량의 효율이 약 3% 향상되었다. 또한, 유량변화에 따른 효율곡선을 최적형상의 효율이 기존형상보다 전반적으로 향상되었음을 확인

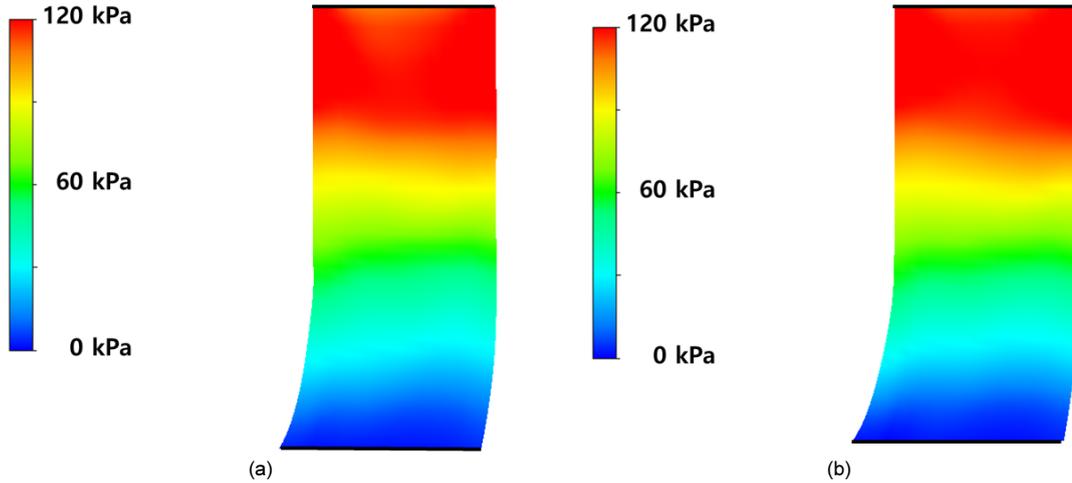


Fig. 11. Comparison of the total pressure contour on the meridional plane (a) reference model, (b) optimum model

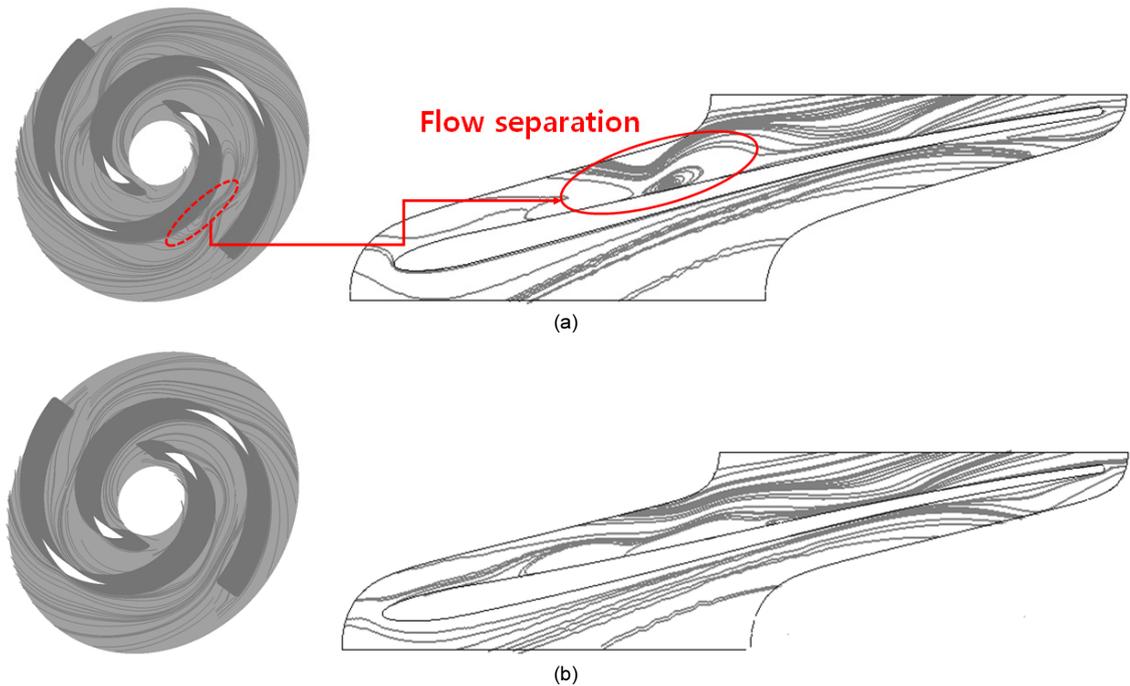


Fig. 12. Comparison of the streamline at mid-span (0.1%) (a) reference model, (b) optimum model

할 수 있다. Table 2 및 Fig. 10의 수치해석 결과를 종합해보면, 최적형상은 기존형상의 양정을 유지하면서 설계유량의 효율 및 고유량 부분의 효율도 향상되었음을 확인할 수 있다.

설계유량에서 성능이 개선된 근거를 확인하기 위해, 펌프의 압력분포 및 내부 유동흐름을 분석하였다.

Fig. 11을 보면 기존형상 및 최적형상의 임펠러 출구부 형상이 유사하므로 압력분포도 유사하다. Fig. 12는 기존형상 및 최적형상의 임펠러 중간면(mid-span, 0.1%)의 내부유동흐름을 비교한 것이다. Fig. 12(a)를 보면, 기존형상의 임펠러 내부에 유동박리(flow separation)가 발생함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 12(b)와 같이 최적형상은 임펠러 내부 유동흐름이 기존형상보다 개선되었음을 확인할 수 있다. 또한, 최적형상은 기존형상보다 입구부 면적이 크다. 고형물 이송은 입구부 면적이 클수록 유리하므로 최적형상은 고형물 이송에도 유리하다.

6. 결론

본 연구에서는 폐수처리용 2 vane 펌프의 수력학적 성능을 향상시키기 위하여 최적화기법을 이용하였고, 내부유동 분석 및 성능검증은 전산유체역학을 이용하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 폐수처리용 펌프의 수력학적 성능을 향상시키기 위하여 설계변수는 임펠러 자오면 형상을 제어하는 설계변수로 선정하였다. 특히, 임펠러 자오면 설계변수 중에서 펌프 성능에 영향을 주는 설계변수 대상으로 최적설계를 수행하였다.

2) 수력학적 성능 향상을 위한 폐수처리용 펌프 최적설계의 주요 설계변수는 임펠러 입구부 직경 및 폭으로 선정하였다. 따라서 기존형상 및 최적형상의 임펠러 출구부 형상은 유사하므로 설계유량의 양정도 유사하다.

3) 폐수처리용 펌프 최적형상의 내부유동흐름은 기존형상에서 발생된 유동박리 현상이 개선되었으

며, 기존형상의 양정을 유지하면서 설계유량의 효율이 약 3% 향상되었다.

후 기

본 연구에서는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국생산기술연구원의 기업수요기반 생산기술실용화사업(No. JB220011)의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

1. 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>.
2. Y. Nishi, R. Fujiwara, and J. Fukutomi, "Design method for single-blade centrifugal pump impeller", *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, 2009, pp. 786-800, doi: <https://doi.org/10.1299/jfst.4.786>.
3. S. B. Ma, S. Kim, and J. H. Kim, "Optimization design of a two-vane pump for wastewater treatment using machine-learning-based surrogate modeling", *Processes*, Vol. 8, No. 9, 2020, pp. 1170, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8091170>.
4. J. Pei, S. Q. Yuan, and J. P. Yuan, "Numerical analysis of periodic flow unsteadiness in a single-blade centrifugal pump", *Science China Technological Sciences*, Vol. 56, No. 1, 2013, pp. 212-221, doi: <https://doi.org/10.1007/s11431-012-5044-x>.
5. A. E. Khalifa, A. M. Al-Qutub, and R. Ben-Mansour, "Study of pressure fluctuations and induced vibration at blade-passing frequencies of a double volute pump", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 36, No. 7, 2011, pp. 1333-1345, doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-011-0119-8>.
6. S. Kim, Y. I. Kim, J. H. Kim, and Y. S. Choi, "Design optimization for mixed-flow pump impeller by improved suction performance and efficiency with variables of specific speeds", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 34, No. 6, 2020, pp. 2377-2389, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0515-7>.
7. J. H. Kim, S. B. Ma, S. Kim, Y. S. 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>.
8. S. Kim, Y. I. Kim, J. H. Kim, and Y. S. Choi, "Three-objective optimization of a mixed-flow pump impeller for improved suction performance and efficiency", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 12, 2019, pp. 1-13, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814019898969>.
9. Minitab Inc, "MINITAB statistical software release 14 for Windows", Minitab Inc, 2003. Retrieved from <http://www.minitab.co.kr/minitab/new/main/main.php>.
10. 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. 269483, doi: <https://doi.org/10.1155/2014/269483>.
11. S. Kim, S. B. Ma, Y. S. Choi, and J. H. Kim, "Design optimization of 2 vane pump impeller and volute for performance improvement", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 395-403, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.395>.