

효율향상을 위한 폐수처리용 2 Vane 펌프 설계 최적화

김 성¹ · 마상범¹ · 김진혁^{1,2†}

¹한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문, ²과학기술연합대학원대학교 생산기술전공

Design Optimization on 2 Vane Pump of Wastewater Treatment for Efficiency Improvement

SUNG KIM¹, SANG-BUM MA¹, JIN-HYUK KIM^{1,2†}

¹Carbon Neutral Technology 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 29 July, 2021
Revised 17 August, 2021
Accepted 18 August, 2021

Abstract >> This paper deals with multi-objective optimization using response surface method to improve the hydraulic performances of a 2 vane pump for wastewater treatment. For analyzing the internal flow field in the pump, steady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations were solved with the shear stress transport turbulence model as a turbulence closure model. The impeller and volute variables were defined in the shape of the 2 vane pump. The objective functions were set to satisfy the total head at the design flow rate as well as to improve the efficiency. The hydraulic performance of the optimally designed shape was verified by numerical analysis results.

Key words : 2 vane pump (2 베인 펌프), Impeller(임펠러), Pump performance(펌프 성능), Response surface method(반응표면기법), Computation fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서론

가정 및 산업체에서 일반적으로 유체를 이송하는 장치는 주로 펌프를 사용된다. 그러나 환경사업이 주요한 사업으로 부각되면서 유체뿐만 아니라 오폐수와 같은 고형물을 이송하는 특수형 펌프 사용 비율이 증가하는 추세이다.

국내뿐만 아니라 국외에서도 수요가 증가함에 따라 국내/외에서 유체 및 오폐수를 이송하는 특수형

펌프 연구사례가 급격하게 증가하고 있다. 특수형 펌프는 유체뿐만 아니라 고형물도 이송하므로 일반 펌프보다 설계기술력이 요구된다. Wang 등¹⁾은 그라인더 펌프의 수력학적 성능과 압력맥동 특성을 수치해석을 통하여 연구를 수행하였다. Song 등²⁾은 단일 채널펌프의 유체유발진동의 감소를 통한 수력학적 성능향상에 관한 연구를 수행하였고, Kim 등³⁾은 단단하고 큰 고형물 이송이 가능한 단일 채널펌프의 수력설계를 최적화 기법 및 computation fluid

dynamics (CFD)를 활용하여 수행하였다.

또한, 최근에는 CFD를 활용한 유체기계 성능분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. CFD는 실험적 방법으로 분석이 불가능한 내부 유동흐름에 대한 전반적인 분석이 가능하다는 장점이 있으므로 유체기계 내부 유동 특성 분석을 CFD를 활용하여 연구하는 추세이다. Heo 등⁴⁾은 사류펌프의 임펠러 및 디퓨저의 최적 설계를 위한 유동 특성 분석을 CFD를 활용하여 연구하였고, Kim 등⁵⁾은 원심펌프 임펠러 및 벌류트의 내부 유동 특성 분석을 CFD를 활용하여 분석하였다. 또한 Kim 등⁶⁾은 사류펌프 수력학적 효율과 흡입성능 향상을 위해 CFD를 활용하여 내부 유동 특성을 분석하고 수력학적 성능향상에 관한 객관적인 검토를 수행하였다.

본 연구에서는 유체뿐만 아니라 고형물도 이송이 가능한 2 vane 펌프의 최적 설계를 수행하였다. 2 vane 펌프의 최적 설계를 위해 실험계획법(design of experiment) 중에서 반응표면기법(response surface method)을 이용하였고, 2 vane 펌프의 내부유동 특성은 CFD를 활용하여 분석하였다⁷⁾. 2 vane 펌프의 유로 설계를 위해 임펠러 날개 형상 및 크기를 제어 가능한 설계변수로 선정하였다⁸⁾. 2 vane 펌프의 주

요설계변수 대상으로 변화에 따른 성능변화를 분석하고 성능을 만족하는 형상을 도출하였다.

2. 2 Vane 펌프 형상 및 설계변수

2 vane 펌프 설계사양은 Table 1에 나타내었고, 2 vane 펌프 임펠러 및 벌류트 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 2 vane 펌프는 회전하는 임펠러에 의하여 운동에너지에서 압력으로 변화시키고 벌류트에서 압력을 회복하는 역할을 한다.

2 vane 펌프가 유체뿐만 아니라 고형물도 이송하기 위해서는 임펠러 유로 설계가 매우 중요하다. 임펠러 설계를 위해 Fig. 2와 같이 설계변수를 정의하였다. Fig. 2에서 B1은 임펠러 입구 폭을 나타내며,

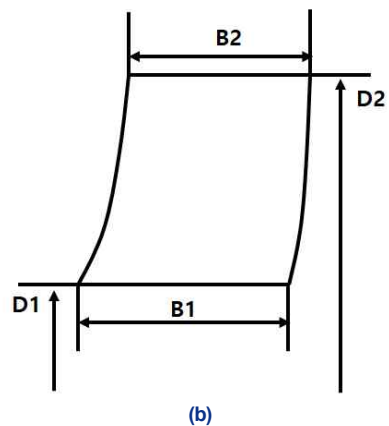
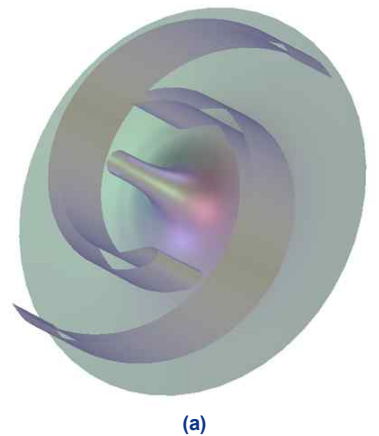


Table 1. Design specification

Q (m ³ /min)	Total head (m)	Rotational speed (rev/min)
1.2	17	1,760

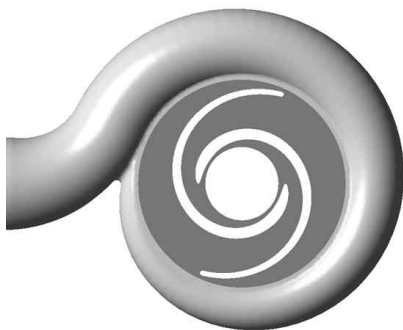


Fig. 1. Three-dimensional 2 vane pump impeller and volute

Fig. 2. Design variables of impeller. (a) Three-dimensional geometry, (b) design variables of meridional plane.

B2는 출구 폭을 나타낸다. 또한 D1 및 D2는 각각 입구부 및 출구부의 직경을 나타낸다. 이때, 임펠러 날개의 각 분포와 벌류트 형상은 기존 형상으로 고정하였다.

3. 수치해석방법

2 vane 펌프 임펠러 및 벌류트의 내부유동해석은 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-19 (Canonsburg, PA, USA)를 사용하였다. 임펠러 형상은 ANSYS Bladegen을 이용하여 생성하였고, 벌류트 형상은 Solid Works 프로그램(Dassault systems, Vélizy-Villacoublay, France)을 이용하여 생성하였다. 이때, 임펠러 입구부는 축방향으로 일정한 면적을 갖는 파이프(pipe) 형상으로 단순화하였다. 임펠러 격자계는 ANSYS Turbogrid를 사용하여 정렬격자계(structured grid)로 생성하였고 벌류트 격자계는 ICFM-CFD (ANSYS)를 사용하여 비정렬 격자계(unstructured grid)로 생성하였다. 수치해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 임펠러의 격자테스트를 수행하였고 약 300만 개로 고정하여 수치해석을 수행하였다.

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 shear stress transport (SST) model을 사용하였다. Fig. 3은 2 vane

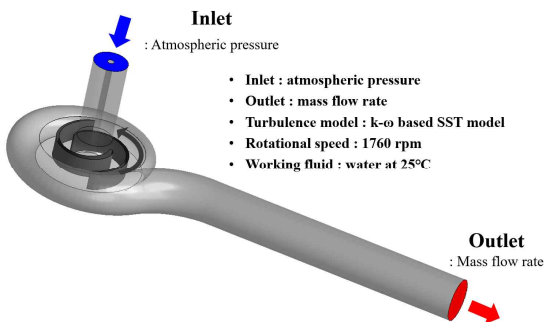


Fig. 3. Boundary conditions and grid system for the 2 vane pump calculation⁹⁾

펌프 임펠러 및 벌류트의 경계조건(boundary condition)을 보여준다. 임펠러는 회전하는 형상이므로 회전수 조건을 주었다. 또한 임펠러 입구부에는 대기압(atmospheric pressure)을 주었고, 벌류트 출구부에는 질량유량(mass flow rate)을 부여하였다. 작동유체(working fluid)는 25°C의 물로 사용하였다⁹⁾.

4. 2 Vane 펌프 설계 최적화

4.1 반응표면기법

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 있다¹⁰⁾.

본 연구에서는 2 vane 펌프 최적 설계 및 유동 특성을 알아보기 위해 실험계획법의 반응표면기법을

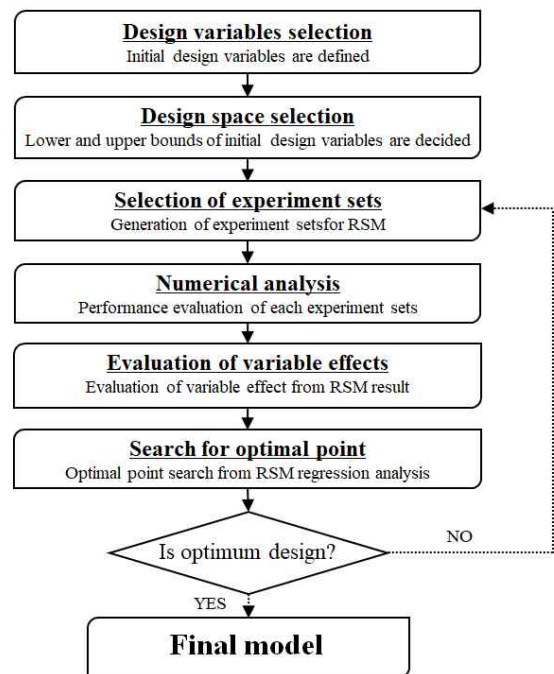


Fig. 4. Flow chart of design optimization

사용하였고, 분석은 상용 프로그램인 Minitab 14 (Minitab Inc., State College, PA, USA)를 이용하였다. 반응표면기법을 이용하여 주요 설계변수들과 반응변수 간의 관계를 분석하였다. 반응표면기법 분석의 목적은 반응변수를 최적값을 갖기 위한 주요설계 변수의 최적 조건을 결정하는 것이다. Fig. 4는 반응표면기법을 이용한 2 vane 펌프설계 절차를 보여준다.

Fig. 5는 펌프의 성능곡선을 나타내며, 펌프는 설계 유량에서 양정을 만족하고 효율이 최대화로 설계한다. 따라서 2 vane 펌프도 설계 유량에서 양정을 만족하고 효율을 최대화하는 설계로 수행하였다. 양정 및 효율에 대한 식은 다음과 같다¹¹⁾.

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

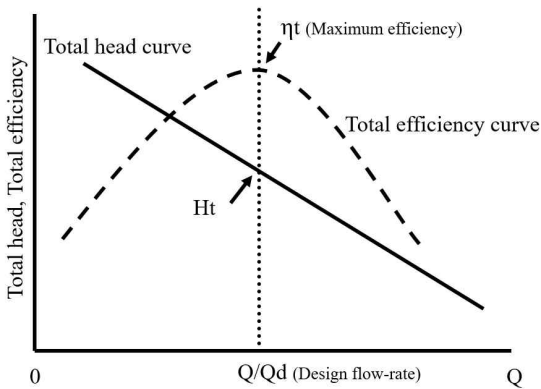


Fig. 5. Total head and total efficiency curve¹¹⁾

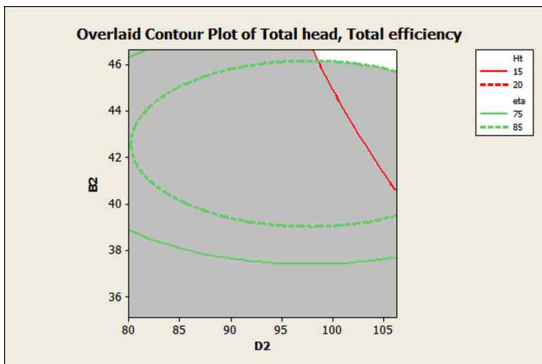


Fig. 6. Overlaid contour plot

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

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

4.2 2 Vane 펌프 최적 설계

2 vane 펌프 최적 설계를 위해, 주요 설계변수는 임펠러 출구 직경과 출구 폭인 D2 및 B2로 선정하여 수행하였다.

주요 설계변수 변화에 따른 목적함수 변화를 분석하기 위해, 등고선 플롯(overlaid contour plot)을 이용하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6을 보면, 양정 범위가 15-20 m, 효율범위가 75-80%를 만족하는 설계변

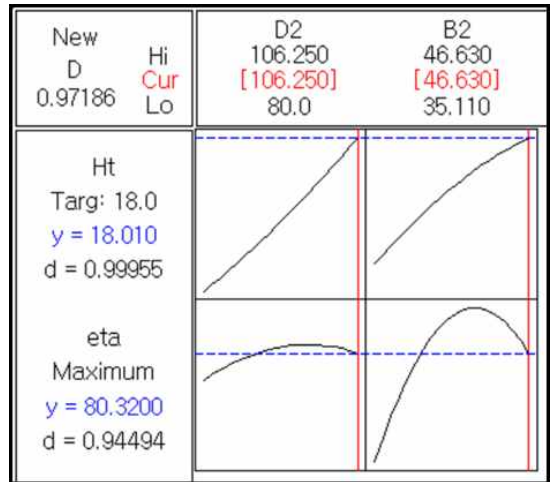


Fig. 7. Response optimization

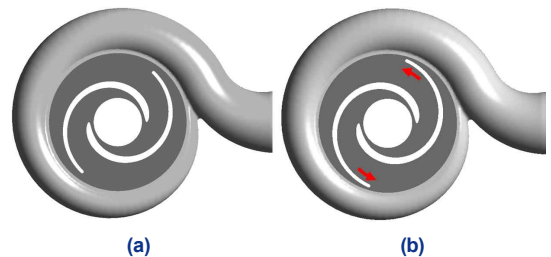


Fig. 8. Comparison of three-dimensional geometry 2 vane pump. (a) Reference model, (b) optimum model.

수 값은 D2는 약 100-106, B2는 45-47에서 존재함을 확인할 수 있다.

반응 최적화(response optimization)는 회귀 분석(regression analysis)을 사용하여 수행되었다. 회귀 분석에 대한 추정 식(estimate equation)은 다음과 같다.

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

Table 2. Comparison of CFD results

	Reference model	Optimum model
Total head (m)	15.7	18.0
Total efficiency (%)	82.3	80.3

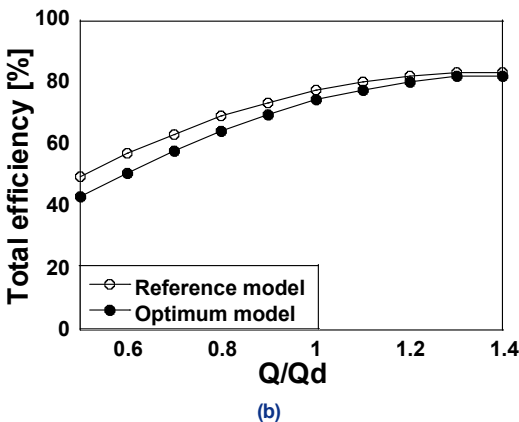
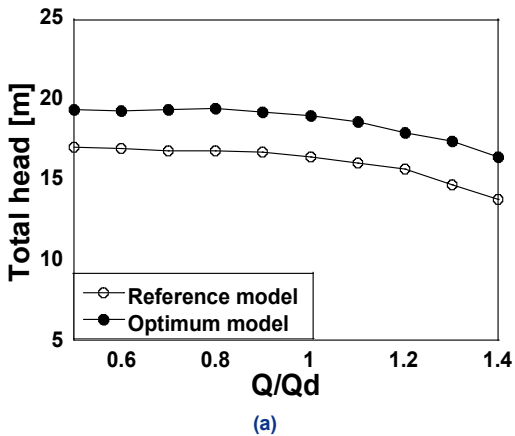


Fig. 9. Comparative analysis of the pump performance curve. (a) Total head, (b) total efficiency.

이때, X 및 $\hat{\beta}$ 는 설계변수 및 회귀계수를 나타내며, \hat{Y} 는 목적함수를 나타낸다. 본 연구에서는 설계 유량에서 양정은 만족하고 효율은 최대화로 설계 목표값(target of design)으로 설정하였다. 목표값을 만족하는 형상을 결정하기 위해 반응최적화 기법을 이용하여 Fig. 7과 같은 반응최적화 도표를 도식하였다. 반응최적화 결과는 D2는 80, B2는 20에서 양정은 만족하고 효율 최대화로 예측되었다. 이 결과는 설계 목표값을 만족하여 최적 형상으로 선정하였고 수치해석을 이용하여 성능을 검증하였다.

5. 2 Vane 펌프 설계 결과 분석

Fig. 8은 2 vane 펌프의 기존 형상 및 최적 형상을 비교한 것으로써 기존 형상 및 최적 설계형상은 수치해석을 통하여 성능을 검증하였고, 설계 유량의 양정 및 효율 수치해석 결과를 Table 2에 비교하였다. 2 vane 펌프 기존 형상 및 최적 형상의 수력학적 성능곡선은 Fig. 9에 비교하였다. Table 2 및 Fig. 9(a)

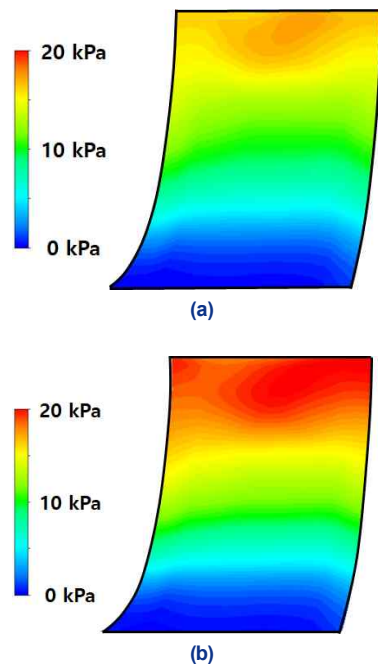


Fig. 10. Comparison of the total pressure contour on the meridional plane. (a) Reference model, (b) optimum model.

를 보면, 기존 형상은 설계사양의 양정으로 만족하지 못한다. 반면에 최적 형상은 설계사양의 양정을 만족한다. Table 2 및 Fig. 9(b)를 보면, 설계 유량에서 기존 형상 및 최적 형상 효율은 저유량 부근을 제외하곤 유사하다. Table 2 및 Fig. 9의 결과를 종합해보면, 기존 형상은 선행연구로 효율 향상을 위한 설계가 진행된 형상이므로 효율이 높으나 설계 사양의 양정을 만족하지 못한다. 반면에 최적 형상은 설계 사양

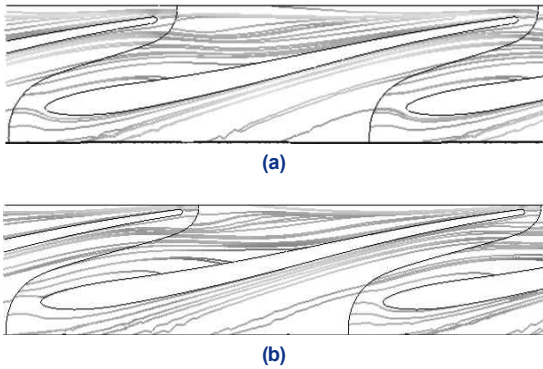


Fig. 11. Comparison of the streamline at mid-span. (a) Reference model, (b) optimum model.



Fig. 12. Experimental apparatus of pump performance¹²⁾

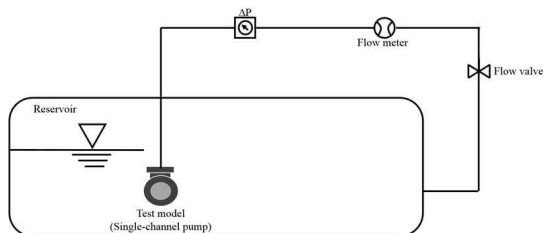


Fig. 13. Schematic diagram of experimental apparatus for pump performance¹²⁾

의 양정을 만족하면서 기존 형상의 효율과 설계점 및 고유량 부근에서 유사함을 알 수 있다.

2 vane 펌프의 최적 형상 성능이 개선된 근거를 확인하기 위하여 수치해석 결과를 활용하여 펌프 내부 압력분포 및 내부 유동흐름을 분석하였다. Fig. 10

Table 3. Specifications of a measurement device

Measurement	Uncertainty
Power meter	±0.04%
Flow meter	±0.2%
Absolute pressure transducer	±0.25%
Differential pressure transducer	±0.2%

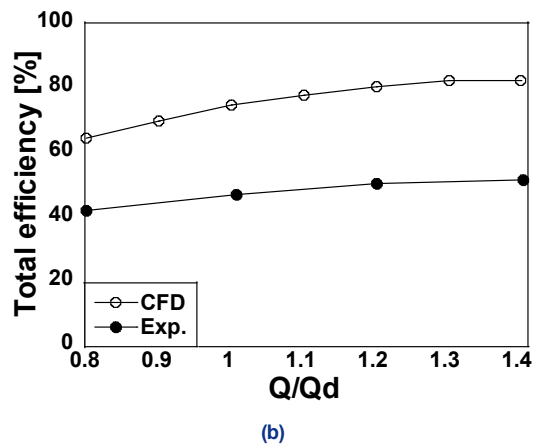
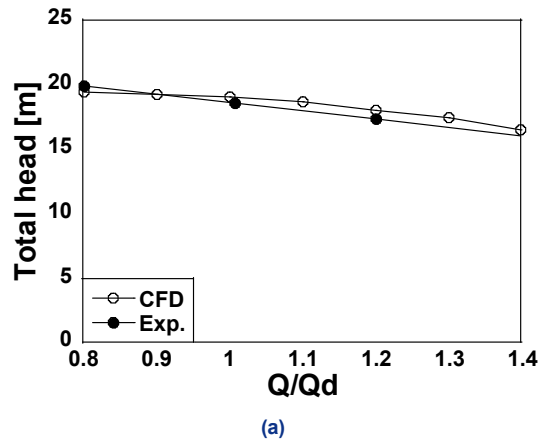


Fig. 14. Comparative analysis of the performance evaluation (experiment vs. numerical analysis). (a) Total head, (b) total efficiency.

은 기존 형상 및 최적 형상 자오면에서 내부압력분포를 비교한 것이다. Fig. 10(a)을 보면, 기존 형상은 설계사양의 양정을 만족하지 못하므로 전반적으로 낮은 압력분포를 나타내고 있다. 그러나 Fig. 10(b)의 최적 형상의 압력분포는 설계 사양 압력 기준으로 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11을 보면, 기존 형상 및 최적 형상은 입구뿐만 아니라 출구부에서도 내부 유동흐름이 부드럽게 흐르는 것을 확인할 수 있다.

6. 2 Vane 펌프 성능검증

Fig. 12는 펌프 성능시험 장치를 나타내며, Fig. 13은 펌프 성능시험 장치의 개략도를 보여준다. 측정센서는 측정 결과의 신뢰도 확보를 위해 정기적으로 검/교정(calibration)을 실시한 측정센서로 사용하였다¹²⁾.

펌프 시험조건 및 평가방법은 펌프 성능평가 관련 규격(standard)인 Korean industrial standards (KS), B: machine (B) 6301 : 2015 규정(code)에 따라 수행하고 펌프의 성능을 분석하였다. 펌프의 성능을 측정하기 위해, 임펠러는 모터로 구동하였고, 임펠러의 회전은 인버터(inverter)를 통해 제어하였다. 펌프의 유량에 따른 성능을 측정하기 위해, 유량조절 밸브를 이용하여 유량을 조절하였고 전자유량계를 통해 정확한 유량을 측정하였다. 그리고 펌프의 출구부에 압력계(pressure gauge)를 장착하여 압력을 측정하여 펌프의 양정을 계산하였다. Table 3은 측정 센서 불확정도를 보여준다.

최적 형상의 수치해석 및 시험 결과는 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14를 보면, 수치해석 및 시험 결과의 성능곡선 경향성이 전반적으로 유사하다. 그러나 Fig. 14(b)의 효율 곡선을 보면, 수치해석 결과와 실험 결과의 정량적 차이가 있다. 수치해석 결과는 임펠러 및 벌류트 형상에 관한 결과이며, 조도 및 기계적 손실 등은 수치해석 결과에 포함되어 있지 않기 때문이다.

7. 결 론

본 연구에서는 최적화 기법 및 전산 유체역학을 이용하여 2 vane 펌프 최적 설계를 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 2 vane 펌프는 유체뿐만 아니라 고형물도 이송해야하므로 수력학적 유로 설계가 매우 중요하다. 따라서 2 vane 펌프 임펠러 형상 제어가 가능한 자오면 설계변수를 선정하여 최적 설계를 수행하였다.

2) 임펠러 최적 설계를 위한 설계변수는 임펠러 출구부 직경 및 폭으로 선정하였다. 임펠러 출구 직경 및 폭 변화에 따른 양정의 경향성은 증가하는 선형적인 경향성을 나타낸다. 반면에 효율의 경향성은 증가하면서 감소하는 2차원 곡선의 경향성을 나타낸다.

3) 주요 설계변수 대상으로 최적 설계를 수행한 결과, 설계사양 및 성능을 만족한 최적 형상을 도출하였고, 최적 형상은 기존 형상보다 양정이 약 14.6% 개선되었다.

4) 최적 형상의 객관적인 성능검증을 위해, 성능시험을 수행하였고 결과를 분석하였다. 최적 형상의 수치해석 및 시험 결과를 비교하면, 전반적인 성능곡선의 경향성은 유사하다.

후 기

본 연구에서는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국생산기술연구원의 기업수요기반 생산기술실용화사업(No. JB210001)의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

1. X. Wang, Y. Lu, R. Zhu, Q. Fu, and W. Zong, "Study of hydraulic performance and pressure pulsation characteristics of the grinder pump in case of clogging", Bulg. Chem. Commun., Vol. 48, 2016, pp. 87–95. Retrieved from http://www.bcc.bas.bg/BCC_Volumes/Volume_48_Special_F_2016/48-SE-F-Wang-87-95.pdf.
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. 30-38, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2018.21.4.030>.
3. 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>.
 4. M. W. Heo, K. Y. Kim, J. H. Kim, and Y. S. Choi, "High-efficiency design of a mixed-flow pump using a surrogate model", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 2, 2016 541-547, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0107-8>.
 5. 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>.
 6. 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>.
 7. 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/10.1016/j.powtec.2017.06.065>.
 8. K. B. Pyun, J. H. Kim, Y. S. Choi, and J. Y. Yoon, "Design optimization of a centrifugal pump impeller using RSM and design of volute", *Korean Fluid Machinery Association*, Vol. 15, No. 3, 2012, pp. 39-45, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2012.15.3.039>.
 9. S. Kim, S. B. Ma, Y. S. Choi, and J. H. Kim, "A numerical study on the improvement of performance for the 2 vane pump impeller", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 3, 2020, pp. 293-301, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.3.293>.
 10. Minitab Inc, "MINITAB statistical software release 14 for windows", 2003. Retrieved from <http://www.minitab.co.kr/minitab/new/main/main.php>.
 11. S. Kim, U. B. Jeong, K. Y. Lee, J. H. Kim, J. Y. Yoon and Y. S. Choi, "Design optimization of mixed-flow pump impellers with various shaft diameters at the same specific speed", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, 2018, pp. 1171-1180, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0220-y>.
 12. S. Kim, Y. S. Choi, and J. H. Kim, "Advanced design technique for a single-channel pump based on the main performance parameters", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 448-454, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.448>.