

발전소 운전 효율 향상을 위한 CTCS 성능 개선에 관한 수치해석적 연구

김광호¹ · 정순영¹ · 김 성^{1,2†}

¹한국생산기술연구원 지속가능기술연구소 산업에너지연구부문, ²과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학

A Numerical Study on the Condenser Tube Cleaning System Performance Improvement of the Power Plant for Improving Operation Efficiency

KWANG-HO KIM¹, SOON-YOUNG JEONG¹, SUNG KIM^{1,2†}

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

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

†Corresponding author :
ks2928@kitech.re.kr

Received 22 November, 2024
Revised 9 December, 2024
Accepted 13 December, 2024

Abstract >> This paper presents a numerical study on the design of sensor condenser geometry which is used for condenser tube cleaning system. In order to achieve an optimum sensor condenser geometry and to explain the interactions between the different geometric configurations, the three dimensional computational fluid dynamics and the optimum design technique have been applied. Geometric design variables describing the guide vane through the sensor condenser were selected. The objective functions are defined as the flow uniformity of the condenser tube cleaning system at the heat exchanger. From the response surface method results, the performance of the guide vane was improved compared to the base model.

Key words : Condenser tube cleaning system(복수기 세정 시스템), Heat exchanger (열교환기), Guide vane(안내깃), Optimum design technique(최적화 기법), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서론

가정 및 산업에서 가장 많이 쓰이는 전기에너지는 발전소에서 다양한 에너지를 이용하여 생산된다. 발전소에서는 화석연료뿐만 아니라 수소 및 신에너지 등 다양한 에너지를 이용하여 전기에너지를 생산하나 전기에너지가 생산되는 과정에서 다양한 손

실이 발생하여 에너지원 대비 전기에너지 생산량은 매우 낮은 실정이다. 이러한 문제는 자원 고갈이나 환경 문제로 이어지므로 발전소에서 생산되는 전기 에너지를 높이기 위해서는 발전소의 주요 설비에 대한 운전 효율 개선이 필요하다.

발전소의 주요 설비 중 유체의 혼합 없이 열에너지를 전달하는 장치로는 열교환기가 많이 사용되는

데 금속판과 같은 전열 벽에 의하여 온도가 높은 유체로부터 온도가 낮은 유체에 열을 효과적으로 전달하는 장치이다. 이러한 열교환기는 열을 효과적으로 전달하므로 발전소 내 가열이나 냉각이 필요한 공정에 많이 쓰인다. 특히 발전소에서 냉각 과정에서 냉각수로는 주로 무한 공급이 가능한 해수를 많이 사용하는데 해수는 염분뿐만 아니라 다양한 이물질들을 포함하고 있으므로 열교환 성능이 현저하게 저하된다¹⁾. 또한 해수의 염분으로 인하여 열교환기 내부 튜브의 부식 작용으로 인하여 유지 보수 비용도 크게 증가한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 열교환기 튜브 내부에 스펀지 볼을 주기적으로 순환시켜 세척해 주는 복수기 세정 시스템을 적용하여 열교환 성능을 향상시킨다²⁾. Fig. 1은 열교환기 냉각을 위한 열교환기 형상과 복수기 세정 시스템을 나타낸 것이다³⁾. 해수를 이용한 냉각 성능을 향상시키기 위해서는 열교환기 튜브 내부에 스펀지 볼을 균일하게 순환시켜 열교환기 튜브를 효과적으로 세척하여야 한다⁴⁾. 그러나 복수기 형상 및 유체가 유입되는 배관 형상에 따라 열교환기 입구부의 유체의 흐름은 편심되어 흐르거나 매우 불균일하게 흐른다.

본 연구에서는 발전소 운전 효율 향상을 위하여

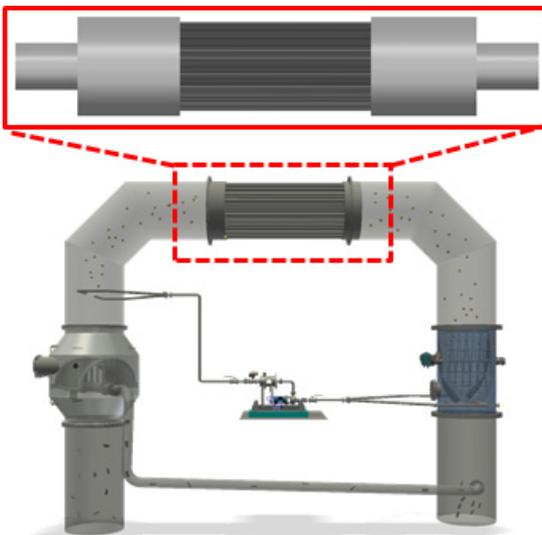


Fig. 1. Three-dimensional shape of sensor condenser for condenser tube cleaning system³⁾

열교환기의 튜브를 효과적으로 세정이 가능한 복수기 세정 시스템 내부의 안내깃(guide vane) 설계를 수행하였다. 열교환기 입구부 내부에 유체의 유동 균일성이 향상되면 열교환기 세정 효율이 향상되므로 열교환기 입구부 유동 균일성 향상을 위한 안내깃 형상의 최적 설계를 수행하였다. 안내깃 형상에 따른 유체의 유동 흐름 및 유동 균일성은 전산유체역학을 활용하여 분석하였으며 최적화 기법을 적용하여 안내깃의 설계 최적화를 수행하였다.

2. 복수기 형상 및 안내깃 설계변수

복수기 세정 시스템의 복수기 형상 및 안내깃 형상의 설계변수는 Fig. 2에 나타내었다. 열교환기 튜브를 효과적으로 세정하기 위하여 열교환기 입구부에 안내깃을 설치하는 방안으로 접근하였으며 안내깃을 쉽게 제어하는 설계변수로 선정하였다. Fig. 2에서 GV_L은 유체가 흐르는 방향의 안내깃 길이이며 CV_D는 대칭 구조의 안내깃 폭을 나타낸 것이다. 또한 GV_A는 유체가 흐르는 방향의 기준으로 기울어진 각도를 나타낸 것이다. Fig. 2에 제시한 3개의 안내깃 설계변수는 안내깃 형상 및 열교환기 입구부 유동 균일성에 영향을 주므로 최적화 기법을 적용하여 최적 설계를 수행하였다.

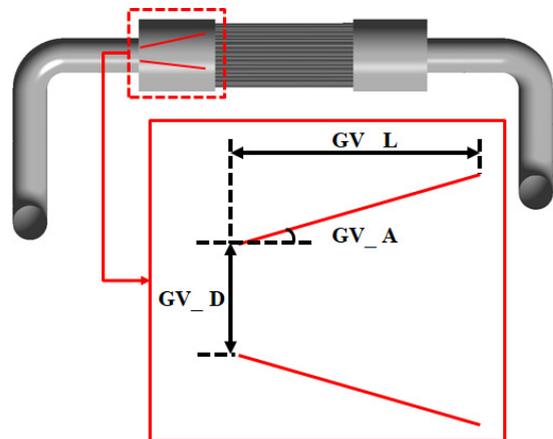


Fig. 2. Design variables of guide vane for sensor condenser

3. 수치해석 방법

안내깃 형상에 따른 내부 유동 특성 분석을 위하여 상용 유동 해석 프로그램인 ANSYS CFX-21 (Ansys, Canonsburg, PA, USA)을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 복수기, 열교환기 및 안내깃 형상은 SolidWorks 프로그램(SolidWorks, Waltham, MA, USA)을 이용하여 생성하였다. 또한 열교환기 입구부의 배관 형상에 의해서도 유체 흐름 및 유동 균일성이 영향을 받으므로 복수기 세정 시스템에 장착된 배관 형상을 고려하여 생성하였다. 격자계는 ICEM-CFD (Ansys)를 사용하여 비정렬 격자계(unstructured grid)로 생성하였다⁵⁾. 복수기 세정 시스템의 격자계는 격자 테스트를 수행한 후에 약 417만 개로 고정된 상태에서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 3은 수치해석 수행을 위한 복수기 세정 시스템의 경계 조건(boundary condition)을 보여준다. 입구부는 질량유량(mass flow rate)을 주었고 출구부에는 대기압(atmospheric pressure) 조건을 주었다. 복수기 세정 시스템의 비압축성 난류 흐름(turbulent flow) 분석을 위하여 3차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였다⁶⁾. 난류의 흐름을 분석하기 위하여 난류 모델(turbulent model)은 유동 박리(flow separation)의 예측에 유리한 SST model을 사용하였다⁷⁾.

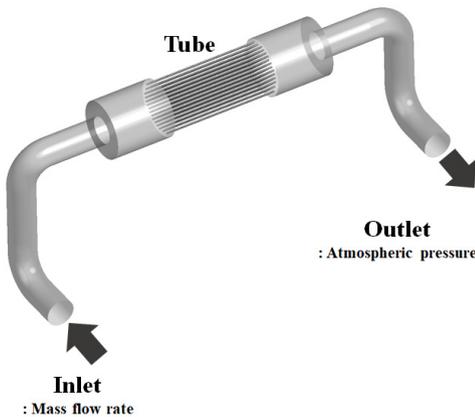


Fig. 3. Boundary conditions for the condenser tube cleaning system calculation

작동유체(working fluid)는 25°C의 물로 사용하였다.

4. 설계 최적화

복수기 세정 시스템의 세정 효율 향상을 위한 안내깃 최적 설계는 반응 표면 기법을 적용하여 수행하였다. 분석 시 Minitab 14 프로그램(Minitab, State College, PA, USA)⁸⁾을 이용하여 분석하였으며 최적화 절차는 Fig. 4에 나타내었다. 반응 표면 기법은 선정된 설계변수(design variable)의 설계 범위 내에서 요인 설계 시험을 실시하지 않고 설계변수의 조합의 효과를 추정하는 최적 설계 기법이다. 설계변수는 2개 이상이어야 하며 설계변수와 반응변수(response variable) 간의 함수관계를 데이터로 추정하여 설계변수 변화에 따른 성능 변동성을 예측할 수 있으므로 성능이 향상된 최적 결과 도출이 가능하다. 안내깃의 설계변수는 안내깃 형상 및 내부 유동에 영향을 주는 설계변수로 선정하였으며 선정된 주요 설계변수는 중심 합성법(central composite design)을 이용하



Fig. 4. Flow chart of design optimization⁹⁾

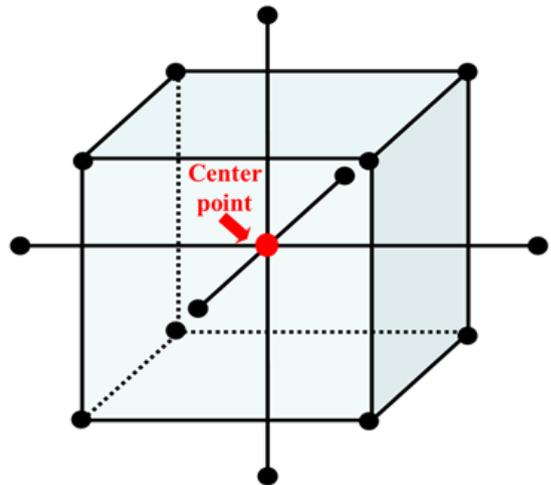


Fig. 5. Central composite design of three design variables

여 총 15개의 실험 set을 도출하였다. Fig. 5는 3개의 중심 합성법 배열을 보여준다.

Table 1은 중심 합성법을 이용한 3개의 설계변수의 배열을 나타낸 것이다. 중심 합성법 배열에 의한 안내깃 형상은 Fig. 6에 비교하였다⁹⁾. 3개의 설계변수 수준 범위는 배관 내부 및 열교환기 입구부 형상을 고려하여 선정하였으며 열교환기 입구부에 연결되는

Table 1. Arrangement method of central composite design

Case	GV_L	GV_D	GV_A
1	500	150	3
2	650	150	3
3	500	250	3
4	650	250	3
5	500	150	11
6	650	150	11
7	500	250	11
8	650	250	11
10	448.9	200	7
11	701.1	200	7
12	575	115.9	7
13	575	284.1	7
14	575	200	0.3
Center	575	200	13.7

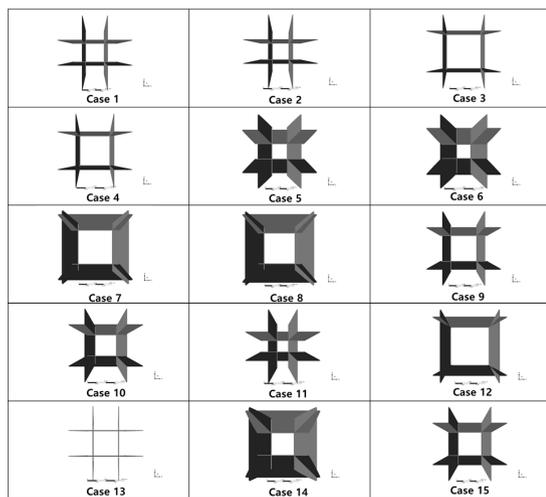


Fig. 6. Guide vane shapes depending on arrangement of central composite design⁹⁾

배관 형상은 원형을 나타내므로 안내깃은 상하좌우 대칭되는 형상으로 설계하였다. Table 1 및 Fig. 6을 보면 중심 합성법 배열에 따라 다양한 안내깃 형상이 도출됨을 알 수 있다.

중심 합성법 배열에 따라 설계된 안내깃 형상은 수치해석을 활용하여 내부 유동 특성을 분석하였고 Fig. 7과 같이 안내깃 내부의 유동 흐름을 비교하였다¹⁰⁾. Fig. 7을 보면 안내깃 형상에 따라 유동 흐름이 다양함을 확인할 수 있다. 최적 설계를 위한 설계 목적값은 열교환기 각각의 튜브에 통과되는 유동 흐름이 균일하게 흘러야 하므로 튜브에 측정되는 압력 차이

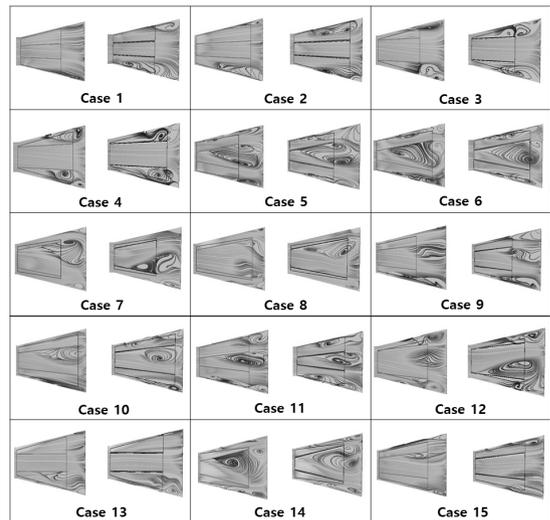


Fig. 7. Comparison of streamline depending on arrangement of central composite design¹⁰⁾

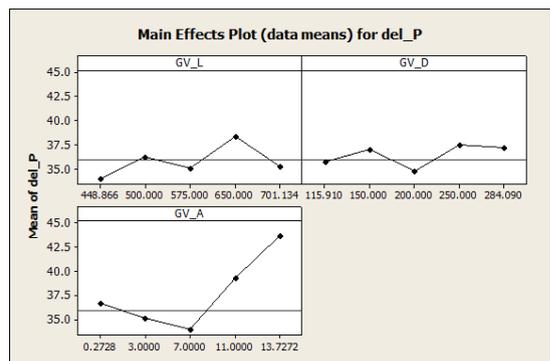


Fig. 8. Main effects plot for del_P

의 최소화로 선정하였다. Fig. 8은 선정된 주요 설계 변수 변화에 따른 압력 차이 변화를 주 효과 도표 (main effects plot)를 이용하여 나타낸 것이다. Fig. 8을 보면 GV_L, GV_D보다 GV_A가 압력 차이에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 또한 GV_L, GV_D 및 GV_A 모두 특정 설계변수에서 압력 차이가 최소화되는 변곡점이 존재함을 알 수 있다.

설계 목적값인 압력 차이가 최소화되는 안내깃의 최적 조건은 반응 최적화 기법을 이용하여 도출하였으며 반응 최적화(response optimization) 도표를 Fig. 9에 나타내었다¹¹⁾. 또한 반응 최적화를 위한 회귀분석(regression analysis)에 대한 추정식(estimate equation)은 식 (1)에 제시하였다¹²⁾.

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \times X_1 + \hat{\beta}_2 \times X_2^2 + \dots + \hat{\beta}_n \times X_n \quad (1)$$

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

반응 최적화 결과는 GV_L은 약 550 mm, GV_D는 약 170 mm, GV_A는 약 5°에서 압력 차이는 약 32.48 kPa로 예측되었다. 설계변수의 최적값은 설계 목적값을 만족하므로 최적 형상으로 선정하고 수치 해석을 이용하여 성능을 검증하였다. 최적 형상의 수치 해석 결과는 32.71 kPa로 계산되었으며 반응 표면

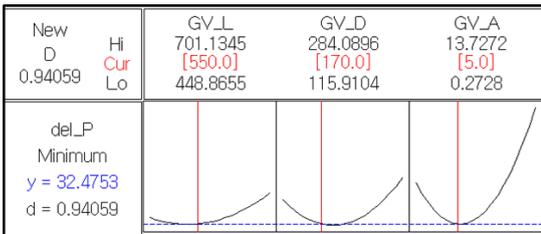


Fig. 9. Response optimization

Table 2. Comparison of CFD results

	del_P (kPa)
No guide vane	35.74
Reference model	33.30
Optimum model	32.71

기법의 예측 결과와 약 0.7%의 오차를 보이고 있어 반응 표면 기법을 이용한 성능 예측이 매우 정확함을 확인할 수 있다.

복수기 세정 시스템 내부의 안내깃 설치에 따른 유동 특성을 분석하기 위하여 안내깃이 없는 형상,

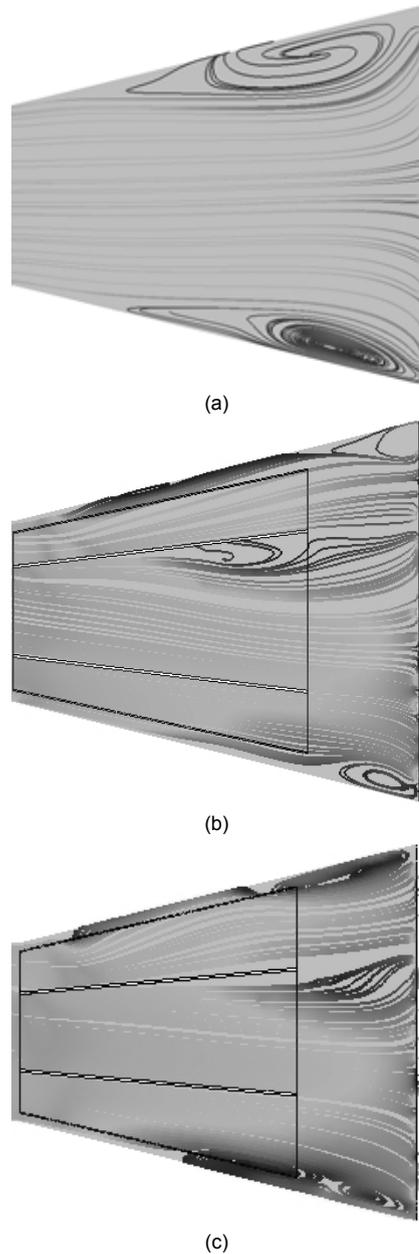


Fig. 10. Comparison of streamline. (a) No-guide vane, (b) reference model, (c) optimum model

기존 형상 및 최적 형상의 수치해석 결과를 Table 2에 비교하였으며 내부 유동 흐름을 Fig. 10에 비교하였다. Table 2를 보면 안내깃이 없는 형상 기준으로 기존 형상은 약 6.8%, 최적 형상은 약 8.5% 향상되었다. Fig. 10(a)를 보면 안내깃이 없는 경우에는 벽면 근처에서 유동 박리(flow separation)가 발생하여 불규칙적으로 유체가 흐르는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)의 안내깃이 포함된 기존 형상을 보면 안내깃에 의하여 유동 박리가 개선된 것을 확인할 수 있으나 안내깃 근처에서 유체 흐름이 매끄럽지 않은 것을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 10(c)의 안내깃 최적 형상을 보면 벽면 및 안내깃 근처에서 발생하는 와류 현상이 개선되었음을 확인할 수 있다.

따라서 복수기 세정 시스템 내부에 안내깃을 설치하면 열교환기 입구부에 유동 흐름 및 균일성이 개선되어 복수기 세정 시스템의 세정 효율이 향상되며 더 나아가 발전소 운전 효율도 향상될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 발전소 운전 효율 향상을 위하여 복수기 세정 시스템의 내부 유동 균일성 향상에 관한 안내깃 최적 설계를 최적화 기법을 이용하여 수행하였다. 그리고 내부 유동 특성 및 균일성을 전산 유체역학을 활용하여 객관적으로 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 열교환기는 발전소 냉각 성능에 영향을 준다. 열교환기 튜브 내부는 주기적으로 세척되어야 하며 세척용 스펀지 볼이 열교환기 각각의 튜브에 균일하게 순환되어야 한다. 따라서 열교환기 입구부의 유동 균일성 향상을 위하여 안내깃 형상을 제어하고 유체의 유동 균일성에 영향을 주는 설계변수로 선정하였다.

2) 안내깃의 주요 설계변수에서 유체의 유동 균일성에 영향을 주는 설계변수는 안내깃 길이를 제어하는 설계변수보다 안내깃의 각도를 제어하는 설계변수가 영향을 준다. 또한 선정된 설계변수 범위 내에서 설계 목적값을 만족하는 설계변수 값이 존재함을 확인하였다.

3) 최적화 기법을 활용하여 최적 설계된 안내깃 형상은 안내깃이 없는 형상보다 약 8.5% 향상됨을 확인할 수 있었다. 그리고 내부 유동 균일성 및 유동 특성을 비교 분석하여 객관적인 성능을 검증 및 성능 향상에 관한 근거를 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20018176, 열교환기의 사용 에너지 25% 이상 절감이 가능한 열교환기 세정 시스템 및 자동운전기술 개발).

References

1. C. S. Yi and C. W. Lee, "Development on cleaning system of condenser for nuclear power plant by using sponge ball", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 6, 2015, pp. 21-26, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.6.021>.
2. D. Jung, S. Lee, D. Kim, and H. Suh, "Analysis of cleaning sponge ball recovery performance according to vortex promoter design parameters in CTCS for power plant", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 28, No. 3, 2023, pp. 126-133, doi: <https://doi.org/10.15435/JILASSKR.2023.28.3.126>.
3. S. Y. Jeong and S. Kim, "Design optimization on sensor condenser of heat exchanger cleaning system for improved flow uniformity", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 4, 2024, pp. 377-383, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.4.377>.
4. H. M. Chae, J. T. Kwon, D. A. Cha, and O. K. Kwon, "The measurements of ball recovery rate for the cleaning apparatus in plate heat exchanger using ceramic ball", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 18, No. 1, 2014, pp. 38-44, doi: <https://doi.org/10.9726/ksps.2014.18.1.038>.
5. D. Lee, S. B. Ma, S. Kim, J. Y. Kim, C. Kang, and J. H. Kim, "A numerical study on the flow uniformity according to chamber shapes used for test of the semi-conductor chip", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 480-488, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.480>.
6. G. C. Jeong, H. S. Lee, and C. W. Lee, "Numerical analysis of ball strainer screen module blockage effects", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 19, No. 1, 2015, pp. 83-89, doi: <https://doi.org/10.9726/ksps.2015.19.1.083>.

7. S. B. Ma, H. Park, S. J. Kim, S. Kim, and J. H. Kim, "Optimization design for improving the hydraulic performances of the portable hydro-turbine Enomad UNO", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 24, No. 5, 2021, pp. 16-23, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2021.24.5.016>.
8. 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>.
9. 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>.
10. 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, pp. 541-547, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0107-8>.
11. 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>.
12. S. Kim and J. H. Kim, "Design optimization on wastewater treatment pump of satisfaction for high head and low flow rate", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 33, No. 5, 2022, pp. 583-590, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.5.583>.