

주요 성능변수를 근거한 단일채널펌프 설계기술

김 성¹ · 최영석^{1,2} · 김진혁^{1,2,†}

¹한국생산기술연구원 열유체시스템그룹 ²과학기술연합대학원대학교 생산기술전공

Advanced Design Technique for a Single-Channel Pump Based on the Main Performance Parameters

SUNG KIM¹, YOUNG-SEOK CHOI^{1,2}, JIN-HYUK KIM^{1,2,†}

¹Thermal & Fluid System R&D Group, 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 19 August, 2019
Revised 10 September, 2019
Accepted 31 October, 2019

Abstract >> This paper presents a high-efficiency design technique for developing the serialized models of a single-channel pump based on the diameter, flow rate and head as the main performance parameters. The variation in pump performance by changing of the single-channel pump geometry was predicted based on computational fluid dynamics (CFD). Numerical analysis was conducted by solving three-dimensional steady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations with the shear stress transport (SST) turbulence model. The tendencies of the hydraulic performance depending on the pump geometry scale were analyzed with the fixed rotational speed. These performances were expressed and evaluated as the functionalization for designing the serialized models of a single-channel pump in this work.

Key words : Single-channel pump(단일채널펌프), Impeller(임펠러), Pump performance(펌프 성능), CFD(전산유체역학)

1. 서론

국내뿐만 아니라 해외에서도 환경산업이 중요한 사업으로 부각되면서 자연환경 분야 산업에 대하여 기초시설 투자가 확대되고 있다. 또한 과거와는 다르게 물 산업이 더욱 각광받고 있는 추세로 인해 유체 이송을 위해 사용되고 있는 펌프에 관한 설계 기술에 대한 관심이 높아지고 있다.

특히, Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 오폐수에 포함된 슬러지 등의 고형물을 이송하는 동안에 유로 막힘(clogging) 현상 없이 이송시킬 수 있는 특수펌프 산업의 수요가 증가함에 따라 고형물을 이송하는 오폐수 처리 산업도 펌프 산업 중에 하나로서 해외에서는 이미 오폐수 처리 산업의 설비 투자 및 설계에 관한 기술향상이 급격하게 성장하였다.

오폐수를 이송하는 특수 펌프는 다양하게 있으나

그 중에서도 단단하고 큰 고형물을 이송할 수 있도록 유체이송 유로가 넓은 단일채널 펌프 설계에 관한 연구가 진행되었다. Cho 등¹⁾은 최적화기법 및 CFD를 활용하여 단일채널펌프의 수력 성능을 향상시키는 연구를 수행하였다. Song 등²⁾은 수력학적 성능뿐만 아니라 진동을 저감시키는 연구를 다중목적 최적화 기법을 적용하여 수행하였다. Pei 등³⁾은 단일채널펌프의 내부유동 및 성능검증을 위해 CFD를 활용하여 분석하였고 임펠러 및 벌류트의 내부유동장을 설계하였다.

이처럼 단일채널펌프의 수력학적 성능 및 진동을 저감시키는 연구나 내부유동 및 성능을 분석하는 연구는 많이 수행되었으나, 단일채널펌프 형상과 성능의 상관관계의 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 단일채널형상에 따른 성능변화를 파악하고 단일채널펌프의 성능과 형상의 상관관계를 분석하였다. 단일채널펌프 형상의 성능검증은 수치 해석결과를 이용하여 검증하고, 단일채널펌프 형상 변화에 따른 성능변화를 분석 및 함수화 하였다.

2. 단일채널펌프 형상

기존의 오페수용으로 사용되고 있는 특수펌프는 볼텍스 펌프(vortex pump)나 그라인더 펌프(grinder pump)이다. 그러나 수력학적 효율이 낮고 잦은 유지보수로 인해 비용이 증가하여 오페수 이송에 근본적인 대안이 되지 않고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 고형물이 쉽게 통과하도록 임펠러 유로 크기를 최대화할 수 있는 단일채널펌프가 개발되었다. 단일채널펌프는 임펠러 유로가 볼텍스 및 그라인더 펌프보다 임펠러 유로가 넓은 장점이 있어 단단

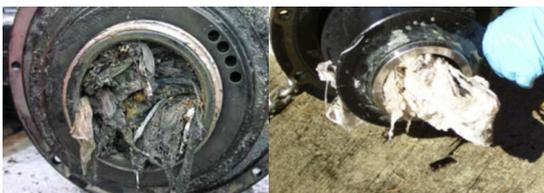


Fig. 1. Clogging problem of submerged pump

하고 큰 고형물을 쉽게 이송할 수 있다. Fig. 2에 볼텍스 펌프와 단일채널펌프 형상을 비교하였다.

단일채널펌프는 회전체인 임펠러와 고정체인 벌류트로 구성되어 있으며, 단일채널펌프의 형상은 Fig. 3⁴⁾에 나타내었다. 단일채널펌프는 회전하는 임펠러로부터 운동에너지에서 압력에너지를 변화하여 벌류트에서 압력에너지를 회복하는 유체기계이다. 단일채널펌프의 임펠러 및 벌류트 설계는 회전하는 방향으로 단면적을 증가하는 방법으로 설계한다. 선행연구^{1,2)}를 통해 수력학적 성능이 향상된 단일채널펌프 형상을 대상으로 단일채널펌프 형상 변화에 따른 성능변화를 분석하였다. 단일채널펌프 형상은 임펠러 직경 기준으로 전체형상을 상사하였고 형상변화에 따른 성능은 CFD를 활용하여 분석하였다.

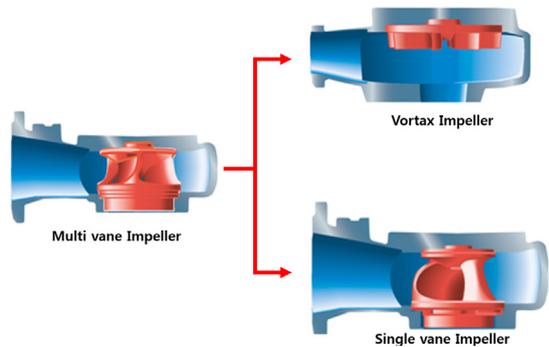


Fig. 2. Vortex pump and single-channel pump

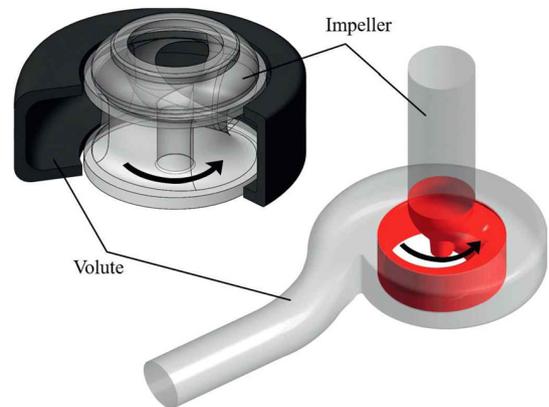


Fig. 3. Three-dimensional single-channel pump impeller and volute⁴⁾

3. 수치해석방법

단일채널펌프의 내부유동해석은 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-17.1을 이용하였다.⁵⁾ 단일채널펌프의 임펠러 및 벌류트 형상은 Solid Works 프로그램을 이용하여 생성하였고, 격자계는 ANSYS ICEM-CFD를 사용하여 비정렬격자계(unstructured grid)로 생성하였다. 이 과정에서 단일채널펌프 성능을 확인하기 위해 입구부 및 출구부 이후는 일정한 면적을 갖는 파이프 형상으로 근사화 하였다. 수치해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 임펠러 및 벌류트의 격자 테스트를 수행하였고 약 4,000,000개에서 수치해석 결과가 일정하였다. 격자 테스트에 대한 결과는 Fig. 4(a)에 나타내었다.

단일채널펌프의 비압축성(incompressibility) 난류흐름(turbulent flow)의 분석을 위해 3차원 Reynolds-

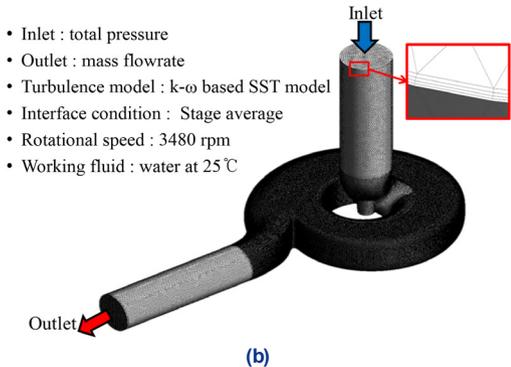
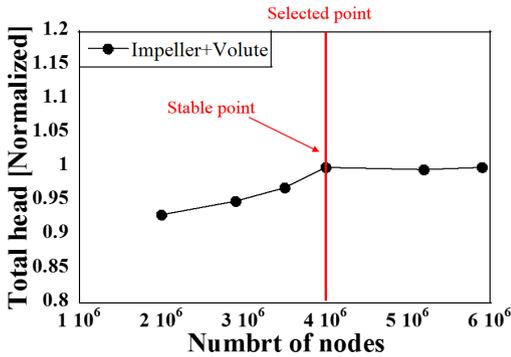


Fig. 4. Boundary conditions and grid system for the single-channel pump calculation (a) Grid test, (b) Boundary conditions

averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 난류의 흐름을 분석하기 위해 난류모델(turbulent model)은 유동박리(flow separation)의 예측에 유리한 SST model을 사용하였다.^{6,7)}

Fig. 4는 단일채널펌프의 경계조건(boundary condition)을 보여준다. 임펠러는 회전하는 형상이므로 회전수 조건을 주었다.⁵⁾ 또한 임펠러의 입구 부분에 대기압(atmospheric pressure)을 주었고 벌류트 출구부에는 질량유량(mass flow rate)을 주었다. 작동유체(working fluid)는 물로 사용하였다. 디스크 마찰 손실, 기계적 손실 그리고 누출 손실은 수치해석 결과에 포함되지 않았다.

4. 단일채널펌프 성능분석 및 함수화

단일채널펌프 임펠러 직경 스케일 변화 형상에 따른 양정곡선을 Fig. 5에 나타내었고, 단일채널펌프의 형상 변화에 따른 양정곡선의 변화를 확인할 수 있다. Fig. 5에서 D2는 임펠러 직경을 의미하며 단위는 mm이다. 이때 임펠러 입구부 직경, 벌류트 형상 및 출구부 직경은 임펠러 직경(D2)과 동일한 스케일을 적용하여 변경하였다. 임펠러 회전수는 모터 사양을 고려하여 3,480 rpm으로 고정하였다. Fig. 5를 보면, 모든 단일채널펌프 형상의 양정곡선은 저유량에서는 양정이 증가하고 고유량으로 이동하면 양정이 감소

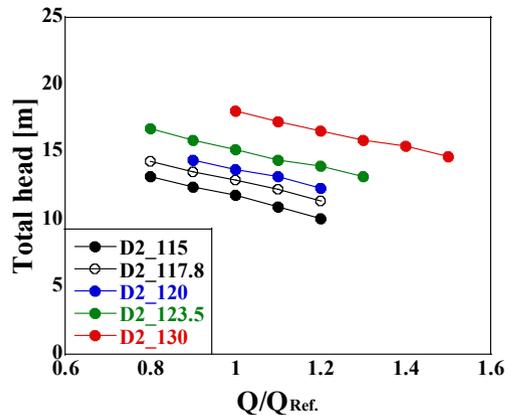
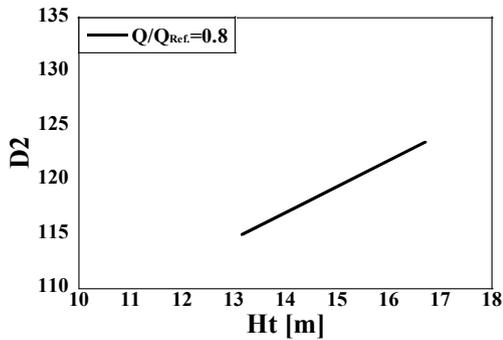
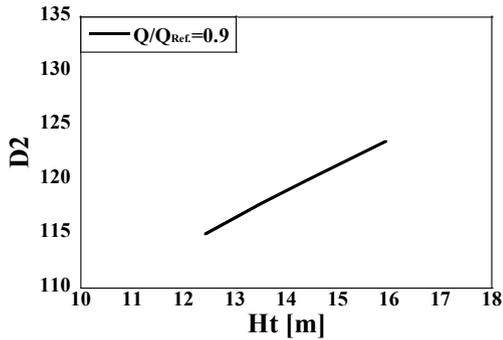


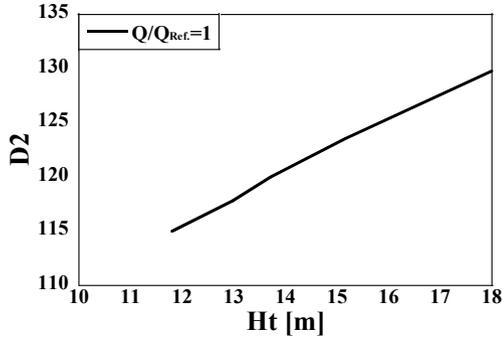
Fig. 5. Comparative analysis of total head depending on single-channel pump based on the diameter



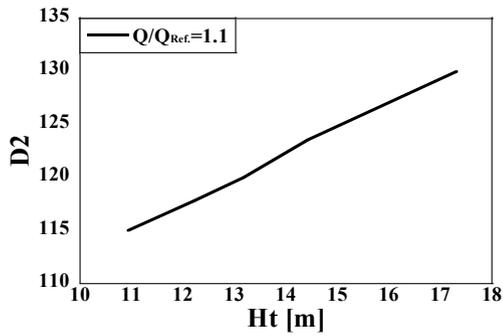
(a)



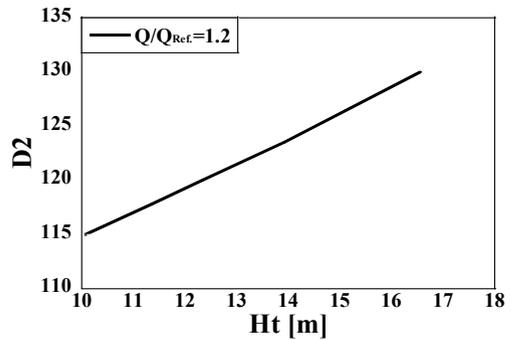
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6. Comparative analysis of total head depending on single-channel pump at the flow-rate (a) $Q/Q_{Ref}=0.8$, (b) $Q/Q_{Ref}=0.9$, (c) $Q/Q_{Ref}=1.0$, (d) $Q/Q_{Ref}=1.1$, (e) $Q/Q_{Ref}=1.2$

하는 동일한 경향성을 보인다.

모든 단일채널펌프 형상의 양정곡선이 고유량으로 이동하면서 감소하는 일차 선형의 경향성을 나타내고 있으나 유량기준으로 비교하면 단일채널펌프 형상에 따라 양정이 다른 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5를 보면 단일채널펌프 형상이 작을수록 양정곡선이 전반적으로 낮게 예측된다. 이러한 현상은 단일채널펌프 형상이 작을수록 압력에너지 변화량이 작으므로 동일한 유량에서 비교하면 형상이 작을수록 양정이 작게 예측된다.

Fig. 5의 양정곡선과 단일채널펌프 형상의 경향성을 분석하기 위해서는 동일한 유량에서 형상변화에 따른 양정변화 분석이 필수적이다. Fig. 6을 보면 동일한 유량에서 단일채널펌프 직경변화에 따른 양정의 경향성을 나타내었다. Fig. 6을 보면 동일한 유량에서 단일채널펌프 직경변화에 따른 양정은 선형적인 경향성을 나타내고 있고, 저유량 뿐만 아니라 고유량에서도 동일한 경향성을 나타내고 있다. Fig. 6에서 Ht는 양정을 의미한다.

이러한 단일채널펌프 직경과 양정의 경향성은 일차식으로 표현이 가능하다. 따라서 동일한 유량에서 단일채널펌프의 직경 및 양정의 일차식을 확보하면 요구되는 유량 및 양정을 만족하는 단일채널펌프 직경 정보를 확보할 수 있다.

유량에 따른 양정의 일차식은 다음과 같다.

$$D_2(Q/Q_{Ref.} = 0.8) = 2.39 \times (H_t) + 83.6 \quad (1)$$

$$D_2(Q/Q_{Ref.} = 0.9) = 2.42 \times (H_t) + 85.0 \quad (2)$$

$$D_2(Q/Q_{Ref.} = 1.0) = 2.40 \times (H_t) + 86.8 \quad (3)$$

$$D_2(Q/Q_{Ref.} = 1.1) = 2.38 \times (H_t) + 88.9 \quad (4)$$

$$D_2(Q/Q_{Ref.} = 1.2) = 2.30 \times (H_t) + 91.7 \quad (5)$$

각각의 유량에서 양정변화가 일차 선형의 경향성을 나타내고 있으므로 유량에 따른 일차식의 기울기와 상수항을 분석하면 유량변화에 따른 단일채널형상 및 양정변화를 분석할 수 있다.

정밀한 분석을 위해, 유량에 따른 단일채널펌프 직경과 양정의 일차식의 기울기와 상수항의 경향성을 분석하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 X는 양정의 1차식 기울기이며 C는 양정의 1차식의 상수항이다.

Fig. 7을 보면 유량변화에 따른 일차식의 기울기와 상수항의 경향성을 확인할 수 있다. 일차식의 기울기는 유량이 증가함에 따라 증가 및 감소하는 2차함수의 경향성을 나타낸다. 또한 일차식의 상수항은 유량이 증가함에 따라 증가하는 2차함수의 경향성을 나타낸다. 유량변화에 따른 일차식의 기울기 및 상수항의 2차식은 다음과 같다.

$$X = -1.5 \times (Q/Q_{Ref.})^2 + 2.9 \times (Q/Q_{Ref.}) + 1.1 \quad (6)$$

$$C = 20.5 \times (Q/Q_{Ref.})^2 - 20.9 \times (Q/Q_{Ref.}) + 87.2 \quad (7)$$

단일채널펌프 형상 변화에 따른 성능곡선의 변화를 분석하면 요구되는 설계사양의 단일채널펌프 형상을 도출할 수 있다.

5. 단일채널펌프 성능 검증

요구되는 유량에서 양정을 만족하는 형상을 도출하기 위해 식 (6) 및 (7)을 이용하였다. 기존형상을 기준으로 80% 유량에서 14 m를 만족하는 형상을 도출하기 위해 식 (6) 및 (7)을 분석하였고, 기존형상 대비 65% 상사된 형상을 도출할 수 있었다. 도출된 형상의 성능은 수치해석과 성능시험을 통하여 검증하였다.

Fig. 8은 펌프 성능시험 장치를 나타내며, Fig. 9는 펌프 성능시험장치의 개략도를 보여준다. 측정센서는 측정결과와 신뢰도 확보를 위해 정기적으로 검/교정(calibration)을 실시한 측정센서로 사용하였다.

펌프 시험조건 및 평가방법은 펌프 성능평가 관련 규격(standard)인 KS (korean industrial standards) B (B: machine) 6301 : 2015 규정(code)에 따라 수행하

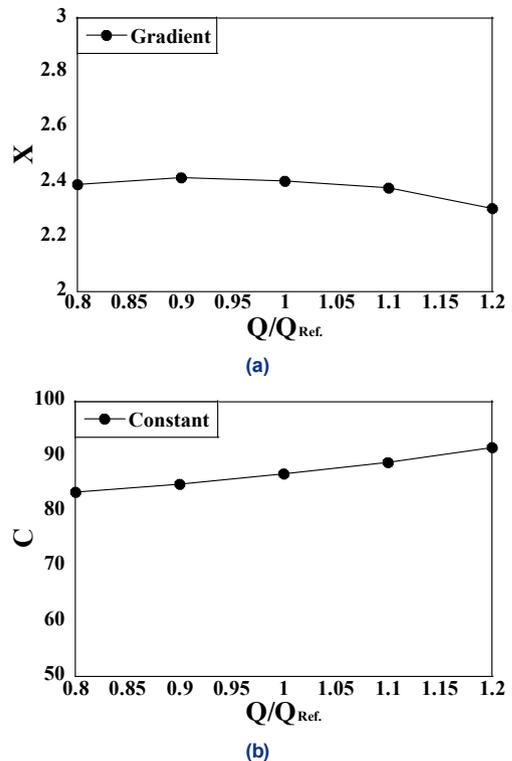


Fig. 7. Tendencies of linear equation depending on flow-rate (a) gradient, (b) constant



Fig. 8. Experimental apparatus of pump performance

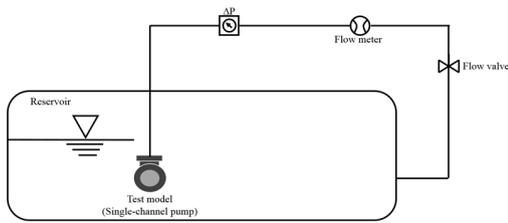


Fig. 9. Schematic diagram of experimental apparatus for pump performance

고 펌프의 성능을 분석하였다.⁸⁾ 펌프의 성능을 측정하기 위해, 임펠러는 모터로 구동하였고, 임펠러의 회전은 인버터(inverter)를 통해 제어하였다. 펌프의 유량에 따른 성능을 측정하기 위해, 유량조절밸브를 이용하여 유량을 조절하였고 전자유량계를 통해 정확한 유량을 측정하였다. 그리고 펌프의 출구부에 압력계(pressure gauge)를 장착하여 압력을 측정하여 펌프의 양정을 계산하였다.

유량변화에 따른 일차식의 경향성을 이용하여 도출된 형상의 수치해석 및 시험결과를 Table 1 및 Fig. 10에 나타내었다. Table 1을 보면 도출된 형상은 요구되는 유량 및 양정을 만족하였다. 또한 Fig. 10을 보면 수치해석 및 시험결과의 양정 곡선 경향성도 전반적으로 유사하다. 그러나 Table 1 및 Fig. 10을 보면 수치해석 결과와 실험결과의 정량적 차이가 있다. 이는 수치해석 결과는 임펠러 및 벌류트 형상에 대한 결과이며, 조도 및 기계적 손실 등은 수치해석 결과에 포함되어 있지 않기 때문이다.

Table 1 및 Fig. 10을 분석하면 유량변화에 따른 일차식의 경향성을 이용하여 도출된 형상은 요구되

Table 1. Design target, CFD and experiment results

	$Q/Q_{Ref.}$	Ht (m)
Design target	0.8	14.0
CFD	0.8	16.1
Exp.	0.8	14.1

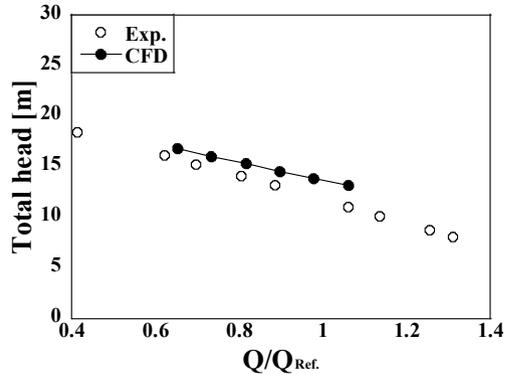


Fig. 10. Comparative analysis of the total head evaluation (experiment vs. numerical analysis)

는 사양을 만족한다. 결과적으로 단일채널펌프 형상과 성능곡선의 변화를 분석하면, 요구되는 설계사양의 단일채널펌프 임펠러 및 벌류트 형상을 도출할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 단일채널펌프 성능을 분석하기 위해 CFD를 활용하였다. 단일채널펌프의 형상 변화에 따라 성능을 분석하였고, 형상정보 변화에 따른 성능변화를 함수화 하였다. 단일채널펌프 형상에 따른 성능 함수화는 CFD를 활용하여 검증하였고, 본 연구를 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

1) 단일채널펌프는 회전체인 임펠러와 고정체인 벌류트로 구성되어 있으며, 임펠러 및 벌류트의 수력설계가 단일채널펌프 성능에 많은 영향을 준다.

2) 단일채널펌프 형상의 상사에 따른 성능변화를 분석하였고, 형상 변화에 따른 성능 경향성을 구축하였다.

3) 단일채널펌프 형상 변화에 따른 성능 경향성을 이용하여 설계된 형상은 요구되는 사양 및 성능을 만족하였다.

4) 단일채널펌프의 성능은 수치해석뿐만 아니라 성능시험을 통해 성능을 검증하였고, 단일채널펌프의 성능을 객관적으로 검토하였다.

후 기

본 연구에서는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국생산기술연구원의 기업주문형생산기술실용화사업(No. JB190004)의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

1. B. M. Cho, J. H. Kim, Y. S. Choi, J. W. Kim, Y. S. Kim, K. Y. Kim, T. S. Ahn and J. H. Kim, "Surrogate Based Optimization of a Single-Channel Pump Impeller," 7th International Conference on Pumps and Fans 2015 (ICPF 2015), 2015, Hangzhou, Zhejiang Province, China, ICPF-121. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Kwang-Yong_Kim/publication/299570145_Surrogate_Based_Optimization_of_a_Single-Channel_Pump_Impeller/links/57ec966608ae93b7fa95996c/Surrogate-Based-Optimization-of-a-Single-Channel-Pump-Impeller.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. 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>.
4. J. H. Kim, and Y. S. Choi, "State-of-the-Art Design Technique of a Single-Channel Pump for Wastewater Treatment," *Wastewater and Water Quality*, InTechOpen, August 29th 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75171>.
5. ANSYS, CFX. Version 17.0, "ANSYS CFX-Solver Theory Guide", ANSYS Inc 2016. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/344928476/ANSYS-CFX-Solver-Theory-Guide>.
6. A. Hellsten, and S. Laine, "Extension of the k- ω -SST turbulence models for flows over rough surfaces", *J AIAA*, 97, 1997, 3577, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1997-3577>.
7. F. R. Menter, "Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows", 1993, AIAA Paper 93-2906, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>.
8. KS (korean industrial standards) B (B: machine) 6301, "Testing methods for centrifugal pumps, mixed flow pumps and axial flow pumps", Korea, 2015, doi: <https://standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do?pageIndex=1&pageUnit=10&ksNo=KSB6301&tmprKsNo=KSB7501&reformNo=19&menuId=919&topMenuId=502&upperMenuId=503>.