

2.5 kW 급 프로펠러형 마이크로 수차 매개변수 연구

마상범¹ · 김 성¹ · 최영석^{1,2} · 차동안¹ · 김진혁^{1,2*}

¹한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부, ²과학기술연합대학원대학교 생산기술전공

Parametric Study of 2.5 kW Class Propeller Type Micro Hydraulic Turbine

SANG-BUM MA¹, SUNG KIM¹, YOUNG-SEOK CHOI^{1,2}, DONG-AN CHA¹, 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 1 June, 2020
Revised 15 July, 2020
Accepted 30 August, 2020

Abstract >> A parametric study of a 2.5 kW class propeller type micro hydraulic turbine was performed. In order to analyze the internal flow characteristics in the hydraulic turbine, three dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with shear stress transport turbulence model were used and the hexahedral grid system was used to construct computational domain. To secure the reliability of the numerical analysis, the grid dependency test was performed using the grid convergence index method based on the Richardson extrapolation, and the grid dependency was removed when about 1.7 million nodes were used. For the parametric study, the axial distance at shroud span (L) between the inlet guide vane and the runner, and the inlet and outlet blade angles (β_1, β_2) of the runner were selected as the geometric parameters. The inlet and outlet angles of the runner were defined in the 3 spans from the hub to tip, and a total of 7 geometric parameters were investigated. It was confirmed that the outlet angles of the runner had the most sensitive effect on the power and efficiency of the micro hydraulic turbine.

Key words : Hydraulic turbine(수차), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Inlet guide vane(입구 가이드 베인), Runner(러너), Parametric study (매개변수 연구)

1. 서론

신·재생에너지원 중 높은 에너지 밀도를 갖는 수력 발전은 공해가 없는 에너지를 생성할 수 있으며, 연평균 강수량이 약 1,200 mm로 강수량이 풍부한

국내 기후여건에 적합한 신·재생에너지원이라고 할 수 있다. 소수력 발전은 상대적으로 저낙차조건에서도 운용이 가능하고, 전 국토의 60% 이상이 산지로 구성되어 있는 국내 지리적 여건에서 활용 가능성이 매우 크다. 그러나 종래의 발전시설과 비교하여 발전

용량 대비 건설비의 비율이 높다는 점이 소수력 발전 설비 보급에 걸림돌이 되고 있다¹⁾. 따라서 소수력 발전 설비의 초기 설치비용이 크다는 단점을 극복하기 위해 고효율 소수력 수차 설계가 필수적이며, 수차의 내부 유동장 분석을 통해 수력학적 성능을 향상시키는 연구들이 수행되고 있다²⁻⁴⁾. Lee 등¹⁾은 튜블러(tubular)형 수차의 낙차조건에 따른 내부 유동장 분석을 수행하였고, 실험 결과와 비교하였다. Li 등²⁾은 벌브(bulb)형 수차의 가이드 베인(guide vane)의 개도 각도 변화에 따른 수차의 수력학적 성능을 분석하였다. 이를 위해 이동격자기법을 이용하여 시간에 따른 가이드 베인 개도의 연속적인 변화 과정을 수치해석을 통해 모사하였다. Park 등⁴⁾은 10 kW급 프로펠러(propeller)형 수차를 대상으로 러너(runner)의 깃 수 변화에 따른 수차의 성능을 유동해석을 통해 분석하였으며, 저유량에서 깃 수가 증가할수록 높은 효율을 얻을 수 있고 고유량에서는 깃 수의 영향이 거의 없음을 보고하였다. 이처럼 소수력 발전용

수차를 대상으로 가이드 베인의 개도 각도, 러너의 깃 수 변화 및 유량(낙차)조건에 따른 수차의 내부 유동을 분석한 연구들은 많이 수행되었지만, 프로펠러형 마이크로 수차의 가이드 베인과 러너의 형상변수를 세분화하여 그에 따른 내부 유동 변화를 조사한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 선행 연구⁵⁾에서 기초설계된 2.5 kW급 프로펠러형 수차를 대상으로 입구 가이드 베인과 러너의 축 방향 거리, 러너의 입·출구 각도가 수차의 수력학적 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 프로펠러형 마이크로 수차의 매개변수 연구를 위해 삼차원 비압축성 RANS 해석을 ANSYS CFX 15.0⁶⁾을 통해 수행하였고, 난류모델로는 shear stress transport (SST) 난류 모델⁷⁾을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 수차는 Fig. 1(a)와 같이 4개의 입구 가이드 베인과 3개의 러너로 구성되었으며, 2.5 m의 낙차조건에서 최고효율점(best efficiency point, BEP)이 형성된다. 자세한 설계사양은 Table 1에 나타내었다. 계산 시간의 단축과 수렴성 향상을 위해 계산영역은 Fig. 1(b)와 같이 주기조건을 부여하여 단일 유로 형태로 구성하였다.

작동유체는 25°C의 물을 사용하였으며, 입구 경계조건으로 낙차에 따른 전압력 조건을 부여하였고, 출구 경계조건은 표준 상태의 대기압으로 가정하였다. 러너의 표면에는 O형 격자를 사용하여 격자계를 구

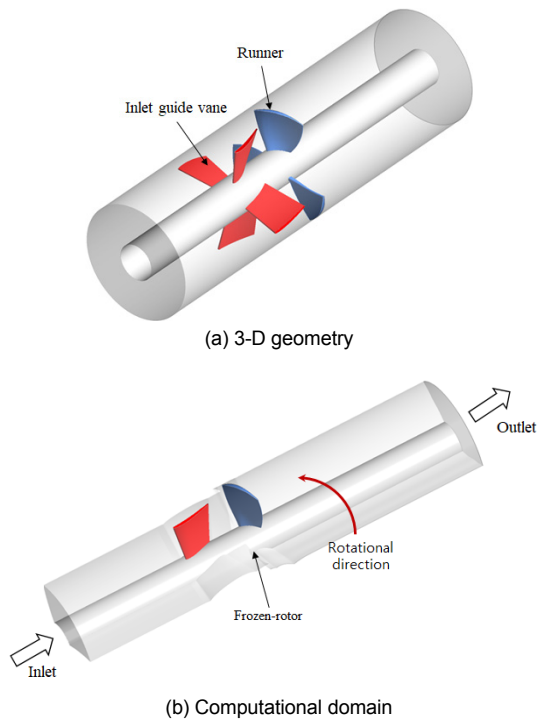


Fig. 1. 2.5 kW class propeller type micro hydraulic turbine

Table 1. Design specifications of the reference hydraulic turbine

Flow rate (m ³ /s)	0.190
Rotational speed (RPM)	962
Head (m)	1.60
Power (kW)	2.50
Number of runners (EA)	3
Number of IGVs (EA)	4

성하였고, Low-Reynolds number SST 모델 사용을 위해 y^+ 가 5 미만으로 유지되도록 하였다.

격자의존성을 제거하기 위해 Richardson 외삽법을 기반으로 한 이산화 오류 예측법^{8,9)}을 사용하여 최적의 격자계를 선정하였다. 이를 위해 3개의 서로 다른 격자계(N_1 , N_2 및 N_3)를 구성하였고, 격자 세분화 인자(grid refinement factor, r)를 1.3으로 설정한 격자의존성 시험 결과를 Table 2에 나타내었다. 이를 위해 다음과 같이 정의된 러너의 수력학적 효율을 사용하였다.

$$\eta = \frac{\tau\omega}{\Delta P_l Q} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 τ 와 ω 는 각각 러너에 작용하는 토크와 회전 속도를 의미하며, ΔP_l 와 Q 는 각각 입출구 전압력차와 유량을 의미한다.

Table 2에 나타낸 바와 같이 격자수가 증가할수록

Table 2. Grid dependency test using grid convergence index

$N_1/N_2/N_3$	1,708,925/1,369,619/1,027,879
$\eta_1/\eta_2/\eta_{3i}$	84.992/84.978/84.681
r	1.3
Apparent order (p)	11.643
$\epsilon_{21}/\epsilon_{32}$	-0.014/-0.297
ϕ_{ext}^{21}	84.993
e_a^{21}	1.65E-02%
e_{ext}^{21}	8.15E-04%
GCI_{fine}^{21}	1.02E-01%

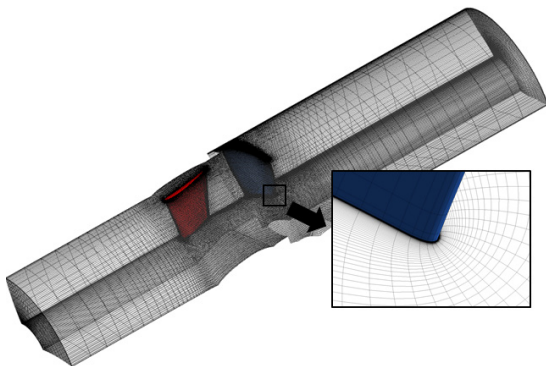


Fig. 2. Computational domain of the reference runner model

러너의 수력학적 효율이 점차 수렴하는 경향을 보이며, N_1 을 사용한 경우 외삽 상대 오차(e_{ext}^{21})와 격자 수렴 지표(grid convergence index)는 각각 8.15E-04% 및 1.02E-01%로 예측되어 수치적 불확실성이 매우 작게 예측되었다. 이 결과를 바탕으로 N_1 을 최적의 격자계로 선정하였고, Fig. 2에 나타내었다.

3. 매개변수 연구

3.1 2^k 요인실험

실험계획법은 통계해석 기법을 기반으로 여러 변수들을 대상으로 서로간의 조합들이 이상변동을 가져오는 원인을 분석하기 위해 적은 비용(혹은 조합)을 선정하고, 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다. 동시에 두 종류 이상의 변수를 대상으로 하여 변수들의 효과를 개별적으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 수차의 형상변수에 의한 유동 특성을 알아보기 위해 실험계획법 중 2^k 요인실험을 사용하였고, 상용 프로그램인 Minitab 14¹⁰⁾를 이용하였다. 본 연구에서는 사용되는 변수의 수, 실험의 횟수, 비용 및

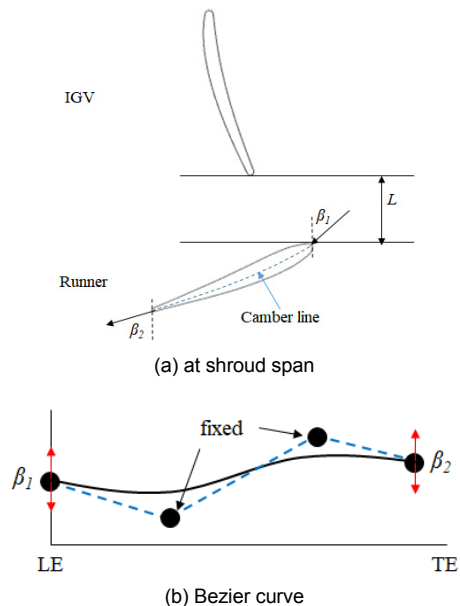


Fig. 3. Definition of geometric variables

시간 등을 고려하여 의미가 적은 고차의 상호작용을 교락(confounding)시켜 실험의 횟수를 적게 하는 일부실시설계(fractional factorial designs)를 수행하였다. 2^k 요인실험에서 선택한 변수들은 수차의 입구 가이드 베인과 러너의 쉬라우드 스펜에서 축 방향 거리(L [mm])와 러너의 입구 및 출구 각도(β_1, β_2 [°])를 형상변수로 선정하였고, 러너의 입·출구 각도는 허브부터 팁까지 3개의 스펜에서 각각 정의하여 총 7개의 형상변수를 선정하였다(Fig. 3). 러너의 입·출구 각도를 제어하기 위해서 ANSYS Blade-gen⁶⁾을 사용하였고, Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 러너의 각 스펜에서 bezier 곡선으로 blade 각도를 정의하였다.

본 연구에서 사용된 일부실시설계 방법은 주 효과(main effect)가 2차 상호작용과 교락되지 않고, 2차 상호작용 간에는 교락된 형태인 해상도 IV 수준이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 7개의 형상변수를 선정하였을 때 해상도 IV 수준으로 매개변수 연구를 수행하기 위해 중심값을 포함한 16개의 실험 세트(set)를 생성하였고, Table 3에 나타내었다.

3.2 매개변수 연구 결과 및 검토

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 수차의 기준 형상(각 변수들의 중심값을 사용한 형상)의 성능곡선을 나타내었다. 성능곡선을 예측하기 위해 낙차조건에 따른 수차의 효율과 출력을 계산하였다. 효율은 식 (1)을 사용하였고, 출력은 다음과 같이 정의하였다.

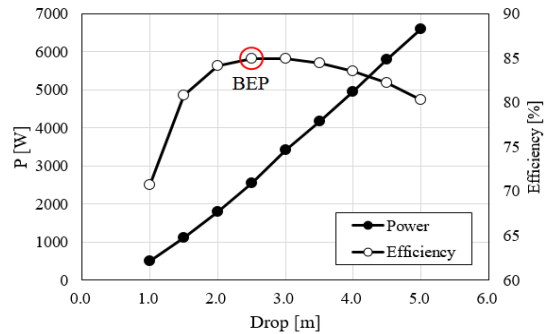
$$P = \tau \times \omega \tag{2}$$

Runs	Number of factors										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
4	Full	III									
8		Full	IV	III	III	III					
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	
128						Full	VIII	VI	V	V	

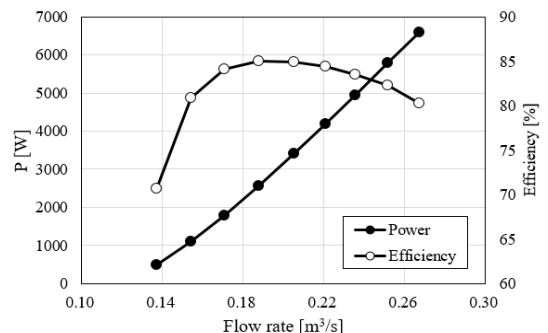
Fig. 4. Fractional factorial of design of experiment¹⁰⁾

Table 3. 2^k factorial design set

Cases	$\beta_{1,h}$	$\beta_{1,m}$	$\beta_{1,s}$	$\beta_{2,h}$	$\beta_{2,m}$	$\beta_{2,s}$	L
1	-10	-7	-5	-5	-5	-5	4
2	10	-7	-5	-5	5	-5	6
3	-10	7	-5	-5	5	5	4
4	10	7	-5	-5	-5	5	6
5	-10	-7	5	-5	5	5	6
6	10	-7	5	-5	-5	5	4
7	-10	7	5	-5	-5	-5	6
8	10	7	5	-5	5	-5	4
9	-10	-7	-5	5	-5	5	6
10	10	-7	-5	5	5	5	4
11	-10	7	-5	5	5	-5	6
12	10	7	-5	5	-5	-5	4
13	-10	-7	5	5	5	-5	4
14	10	-7	5	5	-5	-5	6
15	-10	7	5	5	-5	5	4
16	10	7	5	5	5	5	6
Center	0	0	0	0	0	0	4



(a) Drop conditions



(b) Flow rates

Fig. 5. Performance curves of the reference model

전술한 바와 같이 2.5 m의 낙차조건에서 최고효율 점이 형성되고, 그때의 출력과 효율은 각각 2.55 kW와 84.992%로 예측되었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 수차의 효율은 최고효율점을 기준으로 유량(낙차)이 변하면 효율이 감소하고, 출력은 유량이 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 수차 형상변수의 변화에 따른 효율 및 출력 변화를 비교하였다. 이를 위해 최고효율점이 형성되는 2.5 m 낙차조건 외 저낙차(1.5 m) 및 고낙차(4.5 m)조건에서도 수치해석을 수행하였다. Fig. 6에서 나타난 바와 같이 case 7을 제외하고 2.5 m 낙차조건에서 효율과 출력이 향상되면 저낙차와 고낙차조건에서도 효율과 출력이 향상되는 것을 확인할 수 있으며, 반대로 2.5 m 낙차조건에서 효율과 출력이 감소하면 저낙차와 고낙차조건에서도 수력학적 성능이 감소하는 것을 관찰하였다.

수차 형상변수 변화에 따른 효율과 출력 변화는 주 효과 도표(main effects plot)를 이용하여 분석하였고, Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 각 형상변수의 변화에 따라 수차의 효율과 출력의 변화는 동일한 경향을 보여주고 있다. β_{1_h} , β_{1_m} , β_{2_h}

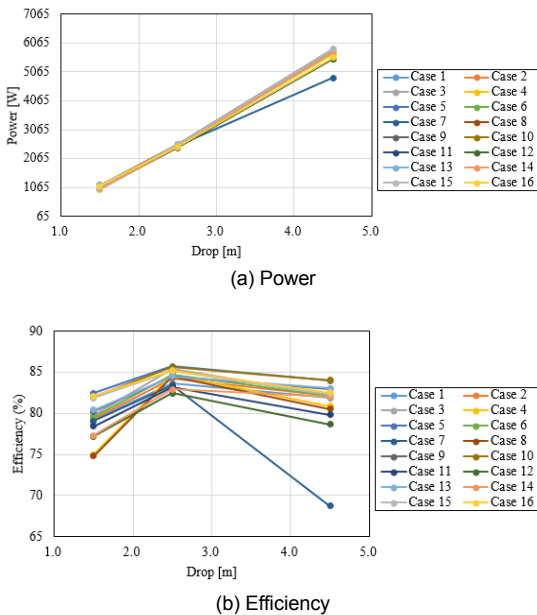


Fig. 6. Comparative analysis of hydraulic performances

및 L 은 중심값과 비교하여 그 값이 증가할수록 수차의 효율과 출력은 감소하였고, β_{1_s} , β_{2_m} 및 β_{2_s} 는 증가할수록 수차의 효율과 출력이 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 8은 위 결과를 바탕으로 한 파레토 도표(pareto chart)를 보여준다. 수차의 출력은 Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 러너의 쉬라우드와 허브에서의 출구 각도 (β_{2_s} , β_{2_h})가 가장 민감하게 영향을 미치는 것을 관찰하였다. 반면, Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 러너의 모든 스펙에서 출구 각도가 수차의 효율에 가장 민감한 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, β_{2_s} , β_{2_m} 및 β_{2_h} 순으로 민감하였다.

러너의 출구 각도 변화에 따른 수차의 수력학적 성능 변화를 조사하기 위해 case 5와 14를 선정하여 Fig. 9와 같이 10%, 50% 및 90% 스펙에서 압력분포를 나타내었다. Table 3에 나타난 바와 같이 case 5의

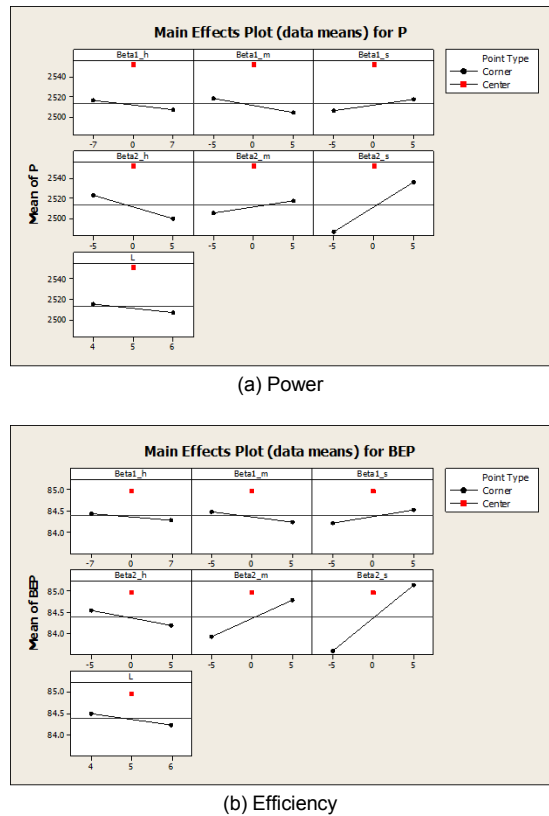


Fig. 7. Main effects plot

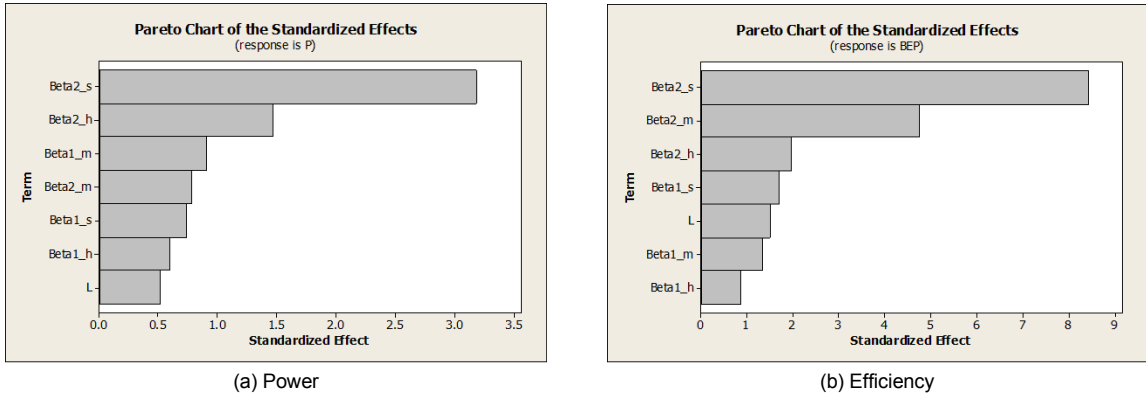


Fig. 8. Pareto chart

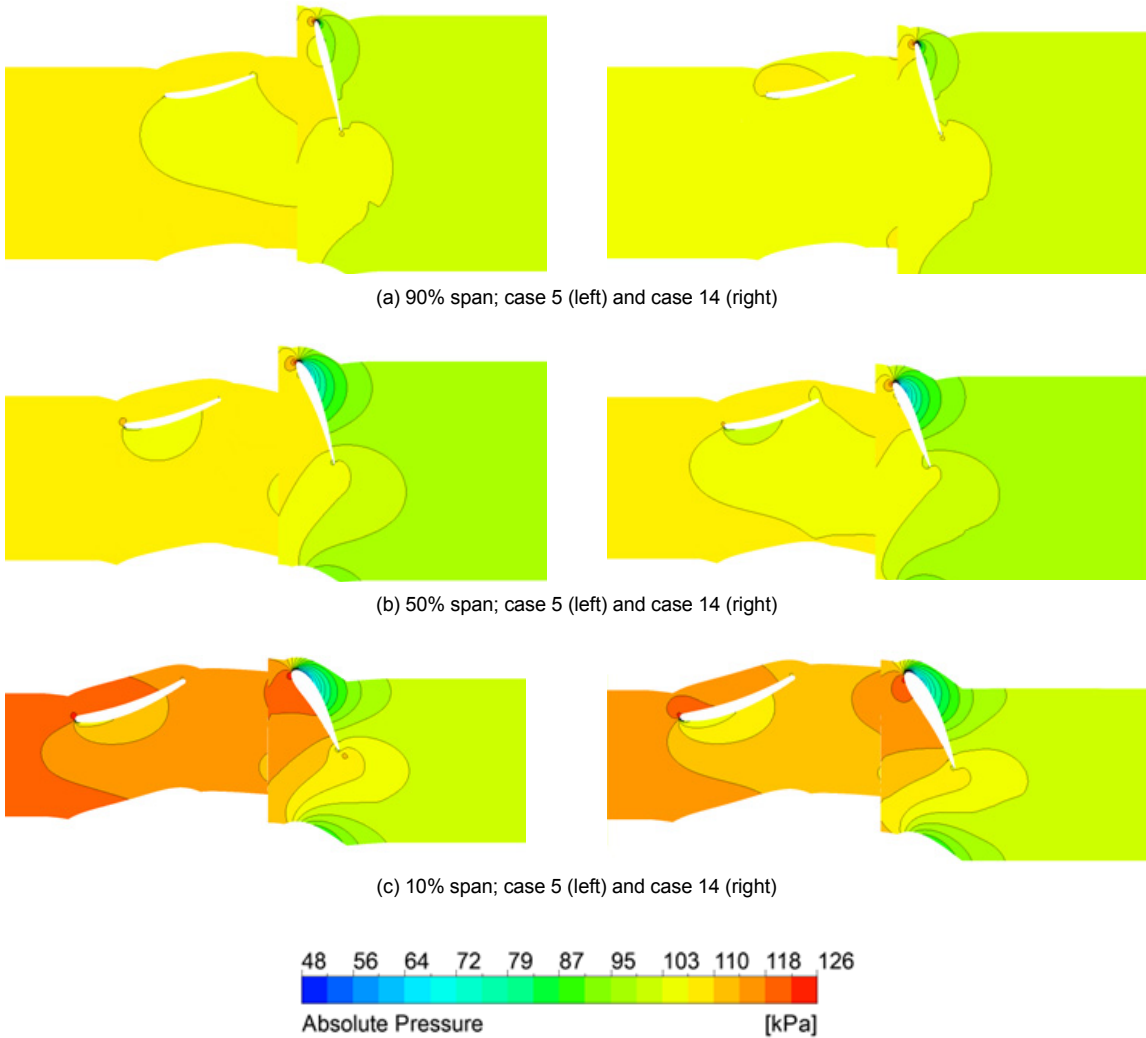


Fig. 9. Pressure distributions of case 5 and case 14

경우 case 14와 비교하여 러너의 출구 각도가 허브에서 작고, 미드 스펠 및 쉬라우드에서 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 러너의 출구 각도가 허브에서 작을수록, 미드 스펠 및 쉬라우드에서는 출구 각도가 커질수록 효율과 출력이 증가하는 경향이 있다. Case 5의 효율과 출력은 각각 85.710%와 2,555.6 W이고, case 14의 경우 효율과 출력은 각각 82.908%, 2,462.8 W이다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 허브부터 팁까지 러너 압력면에서 case 5의 압력분포가 상대적으로 case 14보다 높은 것을 알 수 있다. 즉, case 5에서 러너의 압력면과 흡입면 사이의 압력차가 크기 때문에 토크가 증가하여 출력과 효율 향상에 기인한 것으로 판단된다.

회전유체기계의 유동 특성상 원심력에 의해 유량의 분포가 허브 부분보다는 쉬라우드 근처에서 집중된다. 따라서 Fig. 9(c)에 나타난 바와 같이 허브 부분에서 case 5의 러너 프로파일이 상대적으로 유동 회전각(turning angle)이 더 크게 설계되어 충동형(impulse) 터빈의 프로파일과 유사한 것을 알 수 있다. 반면, 미드 스펠과 쉬라우드 부분에서는 case 5의 러너 프로파일이 상대적으로 평평한 것을 확인할 수 있다. 이 부분에서는 원심력에 의해 유동의 분포가 집중되기 때문에 유동 회전각에 의한 영향보다 작동 유체에 의한 반동(reaction)의 영향이 더 큰 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 선행 연구⁵⁾에서 기초설계 된 2.5 kW 급 프로펠러형 마이크로 수차의 매개변수 연구를 수행하였다. 수차의 형상과 관련된 총 7개의 형상변수를 선정하였고, 각 형상변수들의 상호작용이 효율과 출력에 미치는 영향을 평가하였다. 입구 가이드 베인과 러너와의 축 방향 거리, 러너의 3개 스펠에서 입출구 각도를 선정하여 2^k 요인실험을 수행하였다. 각 변수들의 주 효과와 상호작용을 고려하였을 때 러너의 허브, 미드 및 쉬라우드 스펠에서 출구 각도가 수

차의 효율과 출력에 상대적으로 가장 민감한 영향을 미쳤다. 또한, 본 연구에서 사용된 마이크로 수차는 허브 부분에서 충동형 터빈 특성을 갖고, 미드 스펠과 쉬라우드 부분에서는 반동형 터빈 특성을 나타낼 때 상대적으로 고효율 및 고출력 성능을 갖는 것을 관찰하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 수차의 수력학적 성능을 극대화하기 위한 연구와 작동 안정성을 고려한 다중 목적 최적설계 연구가 필요하다고 사료된다. 아울러, 실험을 통한 성능 검증을 위하여 수차의 형상 제작 및 실험 설비를 구축하고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국생산기술연구원의 생산기술 산업선도 핵심기술 개발사업(No. EO200019)의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

1. S. Y. Lee, Y. D. Choi, Y. C. Hwang, and Y. H. Lee, "A study on internal flow characteristics and performance analysis of a micro hydro tubular turbine," Proceedings of the Korean Society for New and Renewable Energy 2009, 2009, pp. 606-609. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06189926>.
2. K. M. Li, W. Kwon, and Y. W. Lee, "Numerical study on effects of guide vane opening of a bulb turbine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 43, No. 7, 2019, pp. 528-534, doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2019.43.7.528>.
3. D. Y. Kim and Y. T. Kim, "Design and performance analysis of a 115kW class bulb-type hydro-turbine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 42, No. 4, 2018, pp. 304-311, doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.4.304>.
4. J. H. Park, Y. T. Kim, Y. Cho, B. K. Kim, and Y. H. Lee, "Performance analysis of 10kW class propeller hydro turbine by the change of flow rates and the number of runner vane using CFD", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 17, No. 2, 2014, pp. 5-11, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2014.17.2.005>.
5. S. B. Ma, S. Kim, Y. S. Choi, D. A. Cha, and J. H. Kim,

- “Development of 2.5 kW class propeller type micro hydraulic turbine”, *Tran. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 3, 2020, pp. 314-321, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.3.314>.
6. “ANSYS CFX-15.0, ANSYS CFX-solver theory guide”, ANSYS Inc., 2013. Retrieved from http://read.pudn.com/downloads500/ebook/2077964/cfx_thry.pdf.
7. F. R. Menter, “Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective”, *Int. J. Comput. Fluid. Dyn.*, Vol. 23, No. 4, 2009, pp. 305-316, doi: <https://doi.org/10.1080/10618560902773387>.
8. P. J. Roache, “Verification of codes and calculations”, *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 5, 1998, pp. 696-702, doi: <https://doi.org/10.2514/2.457>.
9. I. Celik and O. Karatekin, “Numerical experiments on application of richardson extrapolation with nonuniform grids”, *J. Fluids Eng.*, Vol. 119, No. 3, 1997, pp. 584-590, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2819284>.
10. 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>.