

조류발전 시스템 내 블레이드 회전수 변화에 따른 효율 특성 분석 Analysis of Coefficiency According to Blade rpm Change in Tidal Current Power Generation System

이욱재* · 한석중** · 박다인** · 정신태*

Uk Jae Lee*, Seok Jong Han**, Da In Bak** and Shin Taek Jeong*

요 지 : 초기 유속과 블레이드의 회전수에 따라 변화하는 쉬라우드 시스템 내 유속 변화와 블레이드의 효율 특성을 분석을 위해 수치해석 방법을 이용한 연구를 수행했다. 해석 조건으로 0.35 m/s에서 1.0 m/s까지 초기 유속 변화와 50 rpm부터 300 rpm까지 블레이드의 회전수를 변화시키며 기계적 효율을 추정했다. 유속 변화는 유입부 대비 중심부에서 모든 경우 약 1.8배 이상 증가하는 경향을 보였으며, 초기 유속 0.5 m/s 대비 0.75 m/s에서 유속 변화율이 감소했다. 또한 블레이드의 토크를 이용한 기계적 효율 역시 0.5 m/s의 경우 가장 높은 효율을 보였으며, 모든 경우 유사한 경향성을 보였다. 한편 최대 효율은 초기 유속 0.5 m/s인 경우 TSR 4.77에서 약 20.88%로 산정됐다. 본 연구에서 수행한 블레이드의 기계적 효율 분석은 수리모형실험에 필요한 기초적 자료를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 조류발전, 쉬라우드 시스템, 수치해석, 유속 변화율, 주속비, 기계적 효율

Abstract : The numerical simulation method was used to analyze the flow velocity change and mechanical coefficient characteristics of the blade in the shroud system that changes with the initial flow velocity and the blade rpm. In the analysis condition, the initial flow velocity was varied from 0.35 m/s to 1.0 m/s, and the blade rpm varied from 50 rpm to 300 rpm. Through this, the mechanical coefficient was estimated. The flow velocity changes tended to increase more than 1.8 times at the middle point compared to the inlet. When the flow velocity ratio was 0.75 m/s compared to the initial flow velocity of 0.5 m/s, the flow velocity ratio decreased. The mechanical coefficient using the torque of the blade also showed the highest coefficient at 0.5 m/s, and the trends were similar. On the other hand, the maximum coefficient was estimated to be about 20.88% in TSR 4.77 when the initial flow velocity was 0.5 m/s. The mechanical coefficient analysis of blades in this study is expected to provide the basic data for hydraulic model experimental.

Keywords : tidal current power generation(TCP), shroud system, numerical simulation, flow velocity ratio, tip speed ratio(TSR), mechanical coefficient

1. 서 론

최근 신·재생에너지의 중요성이 강조됨에 따라 해양에너지를 이용한 발전이 주목 받고 있으며, 이는 대규모 개발이 가능한 무한한 재생에너지 자원으로서 오염문제가 없는 무공해 자원이다. 해양에너지 중 조석에너지를 이용하여 발전하는 조류발전은 조석의 흐름이 갖는 운동에너지를 전기 에너지로 변환시켜 발전하는 방식이며, 발전량 예측이 가능하고, 계절의 영향을 받지 않는 청정에너지 발전이다. 한편, 조류발전(Tidal Current Power Generation, TCP)은 조수간만의 차가 크고, 유속이 최소 1.0 m/s 이상인 지역에 적합하며, 국내 인천 및 서·남해 지역은 조류발전에 가장 적합한 특성을 갖고 있어 조

류발전 시장이 꾸준히 성장할 것으로 기대된다.

조류발전의 효율은 시스템 내 부착된 터빈 블레이드(Tidal Stream Turbine, TST)의 설계가 중요하며, 그에 따라 터빈 블레이드의 설계에 많은 연구자들이 연구를 수행하고 있다. Liu et al.(2016), Atcheson et al.(2015), Jeffcoate et al.(2016), Tian et al.(2017)은 수평축 조류발전용 터빈(Horizontal axis Tidal Turbines, HATTs)에 대해 수리모형 실험을 수행하였으며, 이를 통해 주속비와 효율의 상관성 및 터빈 블레이드에 의한 주변 유동 변화에 대한 연구를 수행한 바 있다. 모형실험은 실제 해역 특성을 고려하고, 수리학적 상사율을 적용하여 수행하기에 결과에 대한 정확도가 높지만, 비용 및 시간에 대한 제약 조건이 있으므로 3차원 해석 프로그램을 통한

*원광대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Shin Taek Jeong, Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksandae-ro 460, Iksan, Jeonbuk 54538, Korea, Tel: +82-63-850-6714, stjeong@wonkwang.ac.kr)

**원광대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University)

수치해석 적 연구가 대다수 수행되고 있다. 또한 수치해석을 통한 분석은 수리모형 실험에 비해 다양한 조건에 대한 분석을 할 수 있다는 장점이 있으며, 이에 Alidadi et al.(2014), Brog et al.(2018)은 수치해석 기법을 통해 다양한 실험 조건 및 유속 조건을 적용하여 덕트형 조류발전기 내부 유동 변화, 터빈 출력 및 주속비와 효율의 상관관계 특성을 분석하는 연구를 수행하였다. 하지만, 현재까지 수행된 연구는 조류발전 시스템 주위 또는 내부에서의 유동 변화 분석과 주속비, 터빈의 효율 등을 산정하는 연구들이 주를 이루었으며, 터빈 블레이드의 회전수 변화 조건을 적용하였을 때, 발생하는 유동 및 출력 특성을 분석하는 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 4가지 유속 조건에 대하여 Lee et al. (2019)에서 사용된 조류발전용 수평축 터빈의 회전수 변화 조건이 적용되었을 때의 유속, 주속비 및 기계적 출력 효율 성능을 추정하였다.

2. 수치 해석 및 분석 방법

조류발전용 쉬라우드 시스템 내 설치된 블레이드의 회전수 변화에 따른 효율 특성을 분석하기 위해 3차원 범용 프로그램인 Ansys Fluent를 사용했으며, Solidworks 프로그램을 통해 조류발전 시스템 형상을 구현했다. 프로그램의 지배방정식을 풀기위해 일반적인 SIMPLE 알고리즘과 2차 상류차분법(Second Order Upwind Scheme)을 적용한 유한 체적법이 사용됐으며, 난류모델은 일반적으로 사용되는 RNG $k-\varepsilon$ 모델

을 사용했다.

2.1 지배방정식

수치해석을 위한 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식과 난류 해석을 위한 난류운동에너지 및 소산율 방정식이 적용됐으며, 식(1)~(6)과 같이 표현된다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

난류운동에너지 및 소산율 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\rho} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

여기서 x 는 좌표축상의 거리, ρ 는 유체의 밀도, u 는 축방

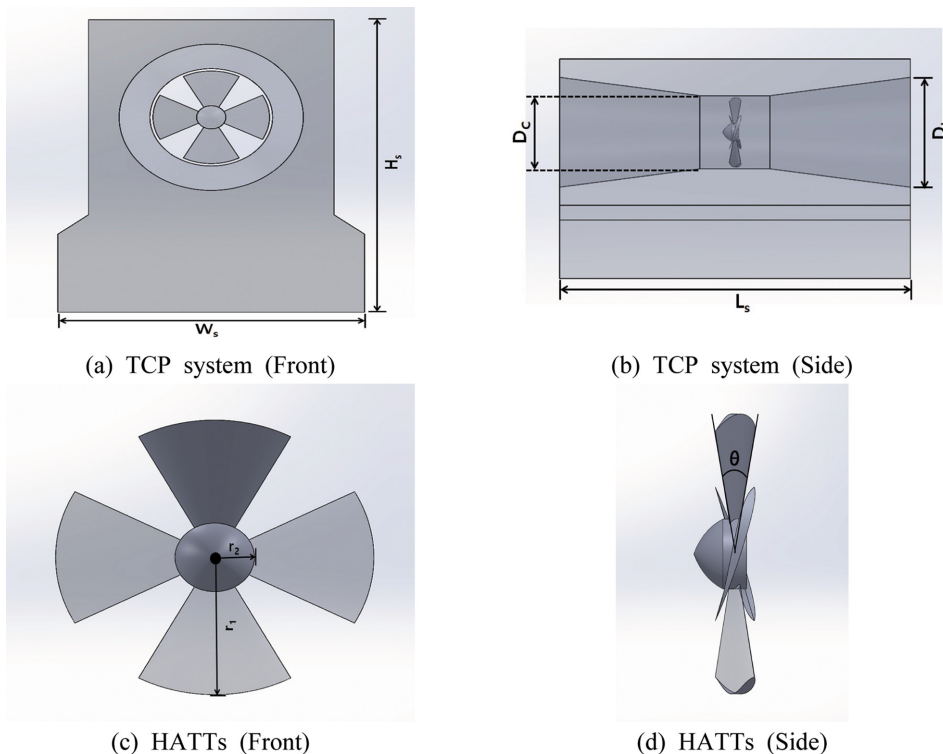


Fig. 1. Three Dimension model for the TCP system and HATTs.

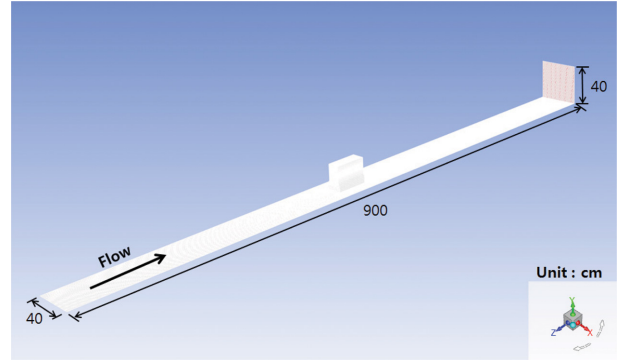
Table 1. Specification of TCP system and HATTs

Type	Variable	Parameter	Specification
TCP system	Inlet diameter	D_i	9.0 cm
	Center diameter	D_c	6.0 cm
	Length	L_s	30 cm
	Height	H_s	18 cm
	Width	W_s	15 cm
HATTs	Blade radius	r_1	2.5 cm
	Hub radius	r_2	0.7 cm
	θ (Pitch angle)	θ	20°
	Applied airfoil model	-	NREL S814

향의 속도, p 는 압력, g 는 중력가속도, k 는 난류운동에너지, μ 는 난류점도, ϵ 은 난류 소산율, 하첨자 i, j, k 는 각각 1, 2, 3으로 x, y, z 방향을 나타낸다.

2.2 조류발전 시스템 및 블레이드 형상

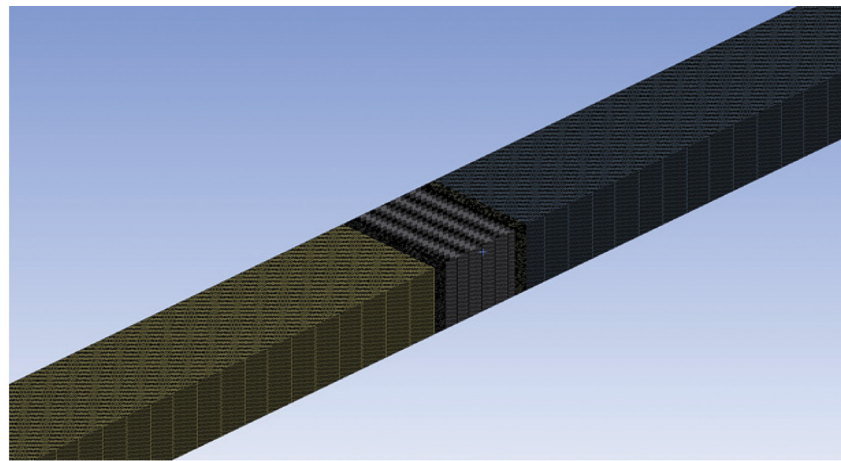
유속 및 회전수 변화에 따른 시스템 효율을 추정하기 위해 Lee et al.(2019)에서 사용한 조류발전 시스템 및 터빈 블레이드 형상을 이용했으며, 유입 유속 대비 중심부에서의 유속 증폭을 통해 발전하는 쉬라우드 시스템 내 직경비($D_c:D_i$)는 1:1.5, 블레이드의 회전각은 20° 이다. Fig. 1의 (a), (c)는 시스템 및 블레이드의 정면, (b), (d)는 각각의 측면에 해당하는 기하학적 형상 모습이며, 이에 대한 제원은 다음 Table 1에 제시했다.

**Fig. 2.** Flow field boundary condition and specification.

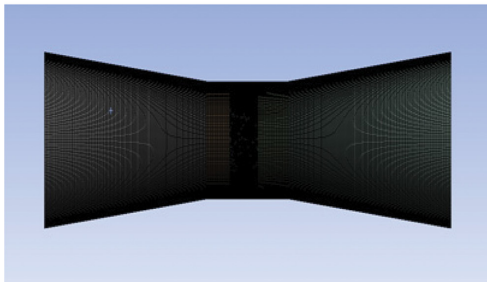
2.2 해석 조건 및 격자 구성

변화하는 유속 및 회전수에 대해 쉬라우드 시스템 내 효율 분석을 위한 경계 조건으로, 유입부와 유출부에 유속 조건 및 유출 조건을, 그 외 모든 면은 벽 조건으로 설정했다. 이에 대한 해석 조건 정보를 다음 Fig. 2에 제시했다. 해석 유동장의 크기는 추후 수행할 모형실험 수조와 동일 크기로서 구성했으며, 본 해석에서는 0.35 m/s, 0.5 m/s, 0.75 m/s, 1.0 m/s에 대한 유속변화와 50 rpm, 100 rpm, 150 rpm, 200 rpm, 250 rpm, 300 rpm의 회전수 변화에 대해 효율 특성을 분석했다.

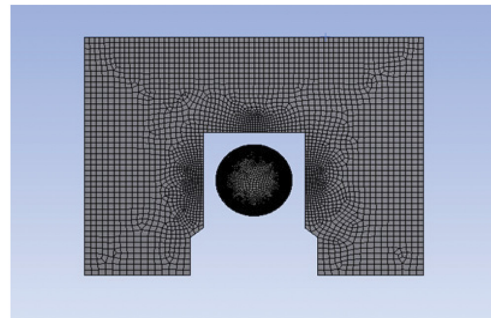
본 연구에서는 수치 해석적 기법을 사용했으며, 다음 Fig. 3에 해석에 사용된 격자 구성을 제시했다. 해석에 사용된 격



(a) Mesh of all domain



(b) System mesh component (side)



(c) System mesh component (front)

Fig. 3. Three dimensional mesh component.

자는 약 100만개이며, 격자에 따른 해석 결과의 오차를 추정하기 위해 격자수를 조정하여 65만개, 80만개, 120만개에 대하여 해석한 결과 100만개와 120만개의 결과 오차율은 0.21%로서 두 경우에 대해서 결과의 경향이 유사하게 분석됐다. 이에 해석에서 사용된 격자는 계산 시간을 고려하여 약 100만개로 구성했다. 또한 hexa 격자를 효율적으로 구성하기 위해 관심 부분의 전·후방에 테트라 격자를 사용하여 결과의 정확도를 높였다.

3. 분석 결과

3.1 시스템 내 유속 변화 분석

단면적 차이를 이용해 발전하는 쉬라우드 시스템 내 유속 증가율을 분석하기 위해 시스템 내 유입부에서 유출부까지 유속 변화를 분석했으며, 초기유속 대비 중심부의 유속비를 다음 식(7)을 이용해 무차원화로 표현했다. 이에 대한 결과는 다음 Fig. 4에 제시했다.

$$U^* = \frac{U_x}{U_\infty} \quad (7)$$

여기서, U_x [m/s]는 유입부에서의 유속이며, U_∞ [m/s]는 쉬라

우드 중심부에서의 유속이다.

초기 흐름이 쉬라우드 시스템 내부로 유입되는 유입부에서 블레이드 앞까지의 유속은 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 블레이드를 통과한 흐름은 일정하지 않은 유속 분포를 보였다. 이는 회전하고 있는 블레이드에 의해 흐름이 급격히 변화하며, 난류를 형성하는 것으로 판단된다. 또한 초기 유속이 증가할수록 유속 변화율이 증가하다가 0.75 m/s에서 유속 변화율이 약 1.3배 감소하고, 이는 해석 유동장의 크기로 인해 발생하는 현상으로 사료되며, 유속 증가율 경향은 Lee et al.(2019)의 연구결과와 유사하게 나타났다. 한편, 각각의 경우 동일하게 블레이드의 회전수가 빠를수록 유속변화가 크게 나타나는 경향을 보였으며, 이에 대한 수치해석 결과를 Fig. 5에 제시했다.

3.2 시스템 내 효율 특성 분석

쉬라우드 시스템 내 효율 변화 특성을 분석했으며, 회전수의 무차원화 표현을 위해 다음 식(8)을 이용했다. 다음 Fig. 6은 해석을 통해 분석된 결과이다. 선 끝단 속도를 나타내는 주속비(Tip Speed Ratio, TSR, λ)는 변화하는 유속 및 블레이드의 회전수, 반경 조건에 대해 무차원화를 함으로서 다양한 형태의 블레이드 성능 특성을 비교할 수 있다.

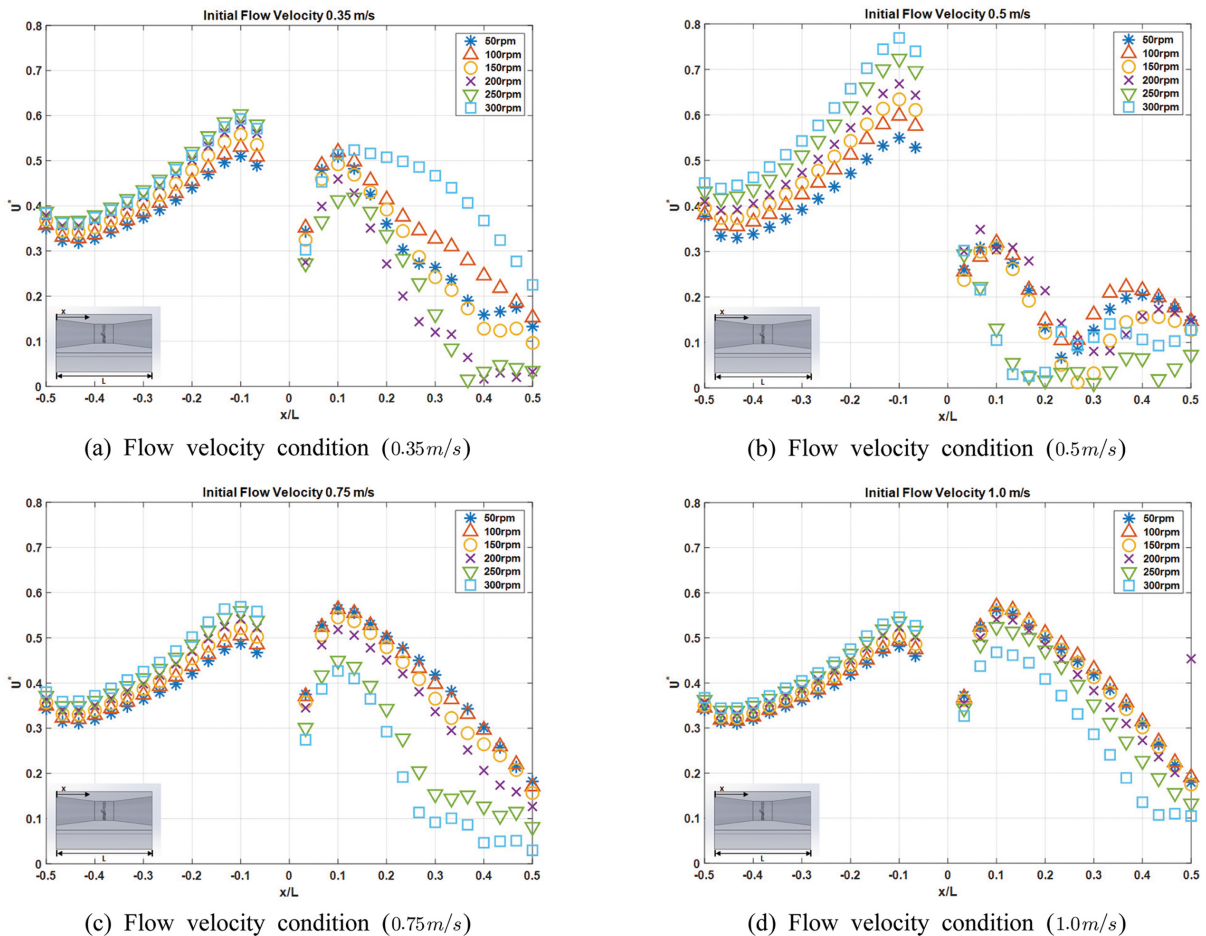


Fig. 4. Flow velocity distribution characteristics in shroud system expressed dimensionally.

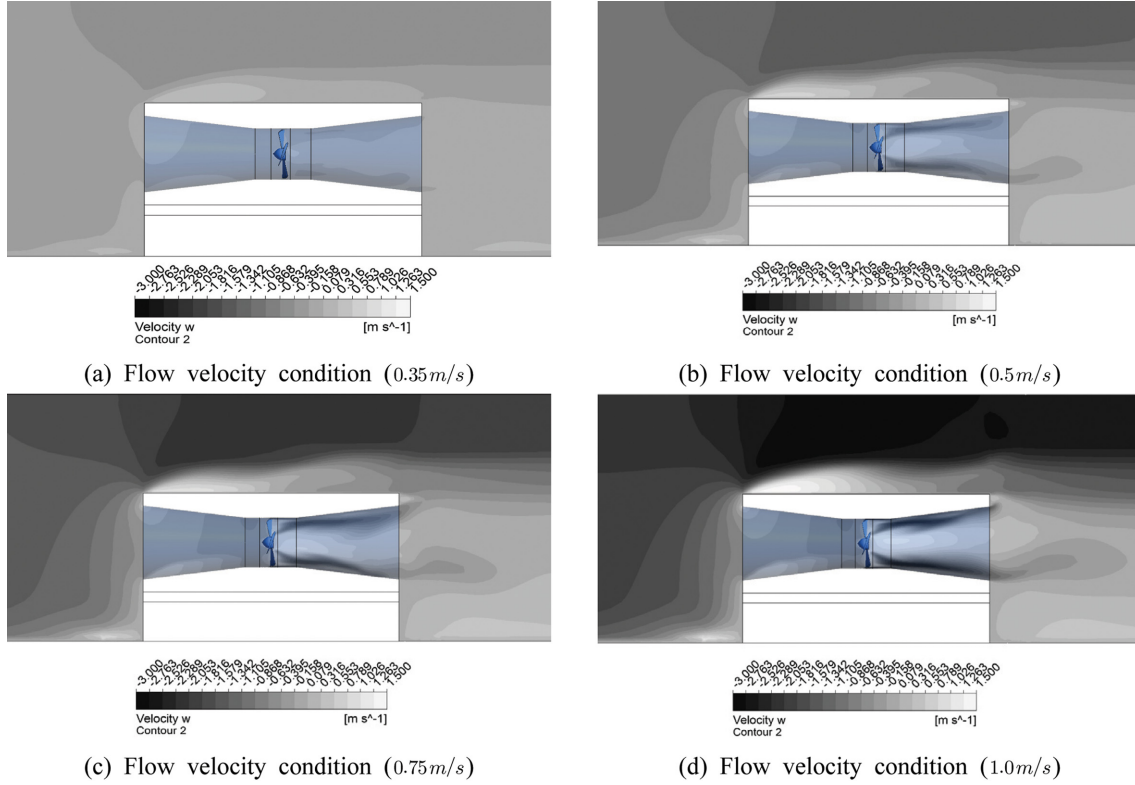


Fig. 5. Comparison of distribution of flow velocity variation around shroud (for 4 flow velocity).

$$\lambda(TSR) = \frac{w \cdot r}{U_{\infty}} \quad (8)$$

여기서, U_{∞} [m/s]는 시스템 중심부 유속, w [rad/s]는 블레이드의 회전수, r [m]은 블레이드의 반경이며, 본 연구에서 분석하고자 하는 시스템 내 기계적 효율은 다음 식(9)를 이용해 산정했으며, 이에 대한 결과를 다음 Fig. 6에 제시했다.

$$C_p(\text{Thrust coefficient}) = \frac{T \cdot w}{0.5 \rho A_1 U_{\infty}^3} \quad (9)$$

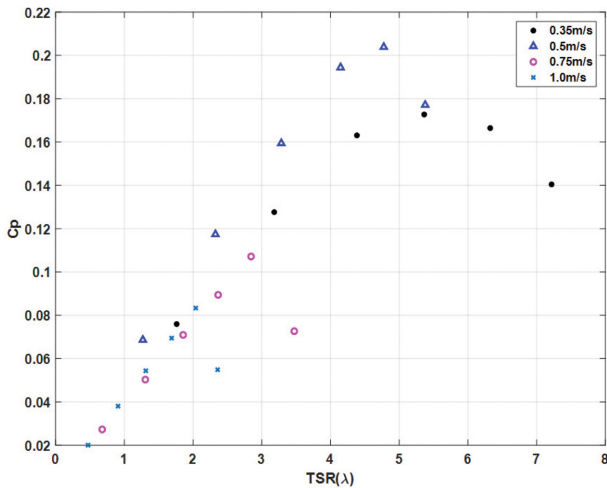


Fig. 6. Tip speed ratio (λ) - power efficiency (C_p) distribution characteristic.

여기서, ρ [kg/m³]는 유체의 밀도이며, A_1 [m²]는 중심부에서의 단면적, T [N/m]는 블레이드의 토크를 의미하며, 해석을 통해 블레이드의 토크를 구할 수 있다. 산정된 토크와 입력조건에 사용된 회전수를 이용하여 효율을 평가했으며, 이를 통해 주속비와 기계적 효율 관계 곡선을 도출했다. 덕트 형태를 지닌 쉬라우드 시스템은 모든 경우에서 주속비가 증가할수록 효율이 급격히 증가한 후, 특정 지점에서 재차 감소하는 경향을 보였으며 각 경우에 대한 효율 곡선의 침두 부분을 다음 Table 2에 정리하여 제시했다.

본 해석결과와 간략한 검증용 위해 모형실험을 수행한 Han et al.(2019)와 비교한 결과 $TSR-C_p$ 관계 곡선의 경향성은 대체적으로 유사하게 나타났으며, 유사한 유속 및 주속비와의 결과를 비교했을 때 약 10%의 오차가 발생했다. 이는 실험의 경우 기계적 출력에서 전기적 출력으로 변화될 때, 수심 밖으로 연결된 출력장치에서 효율 손실이 발생하는 오차로 판단된다. 한편, 주속비-효율 관계 곡선의 경향은 초기 유속이 증가함에 따라 블레이드의 회전수가 증가하고, 이때 효율이

Table 2. $TSR-C_p$ analysis result

Flow velocity condition (m/s)	Tip speed ratio (λ , TSR)	Thrust coefficient (%)
0.35	5.36	17.27
0.50	4.77	20.38
0.75	2.84	10.71
1.00	2.04	8.33

증가함을 Han et al.(2019)와 Yi et al.(2013)의 연구 결과를 통해 증명됐다. 그러나 본 연구는 초기 유속과 블레이드 회전수에 따른 최적 효율을 추정하는 연구이며, 0.75 m/s부터 저 유속에 비해 효율이 감소하는 것은 유체의 힘을 통해 발생하는 블레이드의 회전수가 아닌 6가지의 회전수 고정조건을 통해 분석이 수행되어 발생한 것으로 사료되며, 또한 부여된 유속에 비해 유동장의 크기가 작아 효율의 한계성을 보인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석 방법을 이용해 기존에 수행된 수조와 조류발전 시스템 및 블레이드를 적용하여 쉬라우드 시스템 내 유속 변화 및 4가지 유속과 6가지 블레이드의 회전수 조건을 통해 최적 효율을 판정했다.

조류발전용 쉬라우드 시스템 내 유입부 대비 중심부에서의 유속 변화율을 분석한 결과 모든 경우에서 약 1.8배 이상 증가하는 경향을 보였다. 이는 단면적 차를 이용한 시스템 내 구조적 특성 효과로 인해 발생하는 것으로 사료되며, 또한 수조 용량의 한계성으로 인해 초기 유속 0.75 m/s 이후 유속은 약 1.3배 감소했다.

한편, 유속 분포와 유사한 경향을 보이는 기계적 효율 역시 0.75 m/s에서 최고 효율 대비 약 18% 감소했으며, 모든 경우에서 블레이드의 주속비가 증가함에 따라 효율이 증가하고, 특정 지점에서 감소하는 경향을 보였다. 본 연구에서 산정된 최적 효율은 0.5 m/s의 초기유속에서 주속비 4.77인 경우 약 20.38%로 분석됐다.

본 연구를 통해 분석된 조류발전용 쉬라우드 시스템 내 블레이드의 최적 효율 분석 결과는 추후 수행될 수리모형실험에 대한 기초적 연구로서 활용이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2018학년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Alidadi, M. and Calisal, S. (2014). A numerical method for calculation of power output from ducted vertical axis hydro-current turbines. *Computers & Fluids*, 105, 76-81.
- Atcheson, M., MacKinnon, P. and Elsaesser, B. (2015). A large scale model experimental study of a tidal turbine in uniform steady flow. *Ocean Engineering*, 110, 51-61.
- Borg, M.G., Xiao, Q., Allsop, S., Incecik, A. and Peyrard, C. (2018). Numerical Analysis of a Ducted High-Solidity Tidal Turbine. In 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), 1-5, IEEE.
- de Jesus Henriques, T.A., Tedds, S.C., Botsari, A., Najafian, G., Hedges, T.S., Sutcliffe, C.J., Owen, I. and Poole, R.J. (2014). The effects of wave-current interaction on the performance of a model horizontal axis tidal turbine. *International Journal of Marine Energy*, 8, 17-35.
- FLUENT User's Guide, FLUENT Inc.
- Han, S.J., Lee, U.J., Park, D.I., Lee, S.H., Jeong, S.T. and Lee, S.S. (2019). Experimental performance analysis using a compact scale model for shroud tidal current power generation system. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(4), 221-228 (in Korean).
- Jeffcoate, P., Whittaker, T., Boake, C. and Elsaesser, B. (2016). Field tests of multiple 1/10 scale tidal turbines in steady flows. *Renewable Energy*, 87, 240-252.
- Kim, J.W. and Lee, S.H. (2012). A study on seawater flow characteristics inside the shrouds used in tidal current generation systems for various geometric angles under constant tidal current velocity. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(2), 77-83 (in Korean).
- Lee, U.J., Han, S.J., Jeong, S.T. and Lee, S.H. (2019). Analysis of flow velocity change in blade installed shroud system for tidal current generation. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(1), 9-16 (in Korean).
- Liu, H.W., Zhou, H.B., Lin, Y.G., Li, W. and Gu, H.G. (2016). Design and test of 1/5th scale horizontal axis tidal current turbine. *China Ocean Engineering*, 30(3), 407-420.
- Solidworks User' Manual, 2016, Dassault System.
- Tian, W., Mao, Z. and Ding, H. (2018). Design, test and numerical simulation of a low-speed horizontal axis hydrokinetic turbine. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(6), 782-793.
- Yang, C.J. and Hoang, T.G. (2016). Development trends of tidal current energy and its test bed. *Vacuum Magazine*, 3(2), 11-16 (in Korean).
- Yi, J.H., Oh, S.H., Park, J.S., Lee, K.S. and Lee, S.Y. (2013). Flow-turbine interaction CFD analysis for performance evaluation of vertical axis tidal current turbines (II). *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(3), 73-78 (in Korean).

Received 11 October, 2019

Accepted 25 October, 2019