

수평축 조류발전 터빈의 노즈 형상 및 유입각도, 타워 구조물의 영향을 고려한 터빈 성능특성 분석

A Study on Performance Characteristics of Horizontal Axis Tidal Turbine Considering Nose Shape, Angle of Inflow and Tower Structure

허만웅* · 김동환** · 이진학***
Man-Woong Heo*, Dong-Hwan Kim** and Jin-Hak Yi***

요지 : 본 연구에서는 1MW급 수평축 조류발전기의 출력 및 유동특성을 분석하기 위해 3차원 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 해석을 수행하였다. 난류해석을 위해 SST(shear stress transport) 난류모델을 사용하였고, 유동해석을 위한 계산영역은 육면체격자로 구성하였으며, 최적의 격자 크기를 결정하기 위하여 격자 의존성 시험을 수행하였다. 터빈의 노즈 형상 및 유입각도, 그리고 타워 구조물의 영향을 분석하였다. 노즈 형상의 경우 노즈의 직경 대비 축방향 길이의 비가 증가할수록 터빈 출력이 향상되는 결과를 확인할 수 있었고, 유입각도가 약 15° 이상에서는 터빈의 성능이 약 10% 이상 감소하는 것을 확인하였다. 또한 타워 구조물에 의하여 하류식 터빈의 경우 상류식 터빈에 비하여 성능이 1% 감소함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 조류발전, 수평축 터빈, 터빈 노즈, 유입각도, 3차원 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 해석, 출력계수

Abstract : In this study, three-dimensional fluid flow analyses have been performed in order to investigate the performance characteristics of a horizontal axis tidal turbine (HATT) by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations utilizing the shear-stress-transport turbulence model. The computational domain for the flow analysis has been composed of hexahedral grids, and the grid dependency test has been carried out so as to determine the optimum grid size. Performance characteristics of the HATT have been investigated in consideration of the effects of hub nose geometry, inflow angle, and the tower. It has been found that the power output can be enhanced along with an increase of the ratio of the length to the diameter of the turbine nose, and the power of HATT has been reduced by approximately 10% when the primary fluid flow had an inflow angle of 15°. The power output of downstream HATT is found to be lower than that of the upstream HATT by about 1%.

Keywords : tidal energy convertor, horizontal axial turbine, turbine nose, inflow angle, three dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis, power coefficient

1. 서론

조류발전은 조석 현상에 의해 발생하는 해수의 흐름, 즉 조류의 운동에너지를 이용하여 전기를 생산하는 발전방식으로 해수의 흐름을 동력원으로 사용한다. 조석 및 조류는 천체의 운동에 기인하여 규칙적으로 발생하기 때문에 장기간에 걸쳐 정확한 발전량 예측이 가능하고 계통 내에서 조절이 가능하다는 장점이 있다. 특히 지형적인 특성으로 우리나라는 세계적으로 주목받는 조류발전 입지 조건을 보유하고 있다. 장죽

수도, 맹골수도 및 거차수도에는 약 8.3 GW 규모의 조류에너지가 부존하고 있는 것으로 평가하고 있으며(Park et al., 2019), 서·남해안에는 약 12 GW 규모의 조류에너지가 부존하고 있는 것으로 예측되고 있다. 이와 같이 우리나라에는 대규모의 조류에너지가 부존해 있으며, 또한 전 세계적으로도 많은 조류에너지가 부존되어 있는 것으로 평가되고 있다. 이에 따라 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 조류에너지를 활용하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다.

Batten et al.(2007)은 NACA 63-8 시리즈 단면을 갖는 직경

*한국해양과학기술원 연안개발에너지연구센터 선임연구원(Senior Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

**한국해양과학기술원 연안개발에너지연구센터 연구원(Researcher, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

***한국해양과학기술원 연안개발에너지연구센터 책임연구원(Corresponding author: Jin-Hak Yi, Principal Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, 385 Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3527, yijh@kiost.ac.kr)

16 m의 수평축 조류발전 터빈(horizontal axis tidal turbine, HATT)의 1/20 축소 모형에 대하여 BEMT(blade element momentum theory) 기반 수치해석과 실험을 수행하였고, 이를 통하여 주속비(tip speed ratio, TSR) 5.5~6.0에서 최대 45%의 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다. Goundar와 Ahmed (2013)는 S1210 단면을 기준으로 최대 캠버 두께를 변화시킨 블레이드를 생성하고 30 cm의 반경을 갖는 모형 HATT에 대해 BEMT와 캐비테이션 모델에 기반하여 수치해석과 실험을 수행하였고, 최종적으로 3엽 터빈이 TSR 4.0에서 47.6%의 효율을 갖는 것을 알 수 있었다. Huang et al.(2016)은 엇 회전 수평축 조류발전 터빈(counter-rotating HATT)에 대한 수치해석을 수행하여, 이러한 터빈이 단일 터빈보다 약 13% 높은 효율을 가질 수 있음을 증명하였고, 또한 양항비(lift to drag ratio)를 개선한 최적설계를 통하여 추가적으로 약 8%의 효율을 향상시켰다. 또한, Ren et al.(2017)은 윙렛(winglet)이 있는 3엽 HATT에 대한 레이놀즈 평균 나비에-스톡스(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 해석을 수행하여, 윙렛이 삼각형 형상을 가질 때 전반적으로 우수한 성능을 갖는다는 것을 확인하였다. Kaufmann et al.(2017)은 BEMT 방법에 캐비테이션 모델을 도입시켜 직경 0.5 m 및 1.5 m의 3엽 HATT 축소 모형에 대한 수치해석을 수행하였고, 결과를 실험값과 비교하였다. 그리고 Li et al.(2019)은 GH-Bladed S/W를 사용하여 600 kW급 2엽 수평축 조류발전기를 설계하고 수치해석을 통해 38%의 효율을 확인한 후, 이에 대한 실험실 실험을 수행하였으며, Kumar et al.(2019)은 100 kW급 3엽 HATT의 블레이드 단면 두께 및 최고 두께 위치 등을 설계변수로 고려한 최적설계를 수행하여 효율을 17.9% 향상시킨 형상을 도출하였다. Ordonez-Sanchez et al.(2019)은 3엽 HATT의 하나 혹은 두 개의 블레이드 피치(pitch) 각에 오류가 있는 경우, 이러한 오류가 터빈 효율에 대해 미치는 영향을 수치적으로 분석되었고, Seo et al.(2019)은 BEMT 기반의 HARP-Opt S/W를 사용하여, 200 kW급 HATT 블레이드 형상을 설계하고 다양한 운전조건에서의 특성을 비교한 바 있다. Abuan과 Howell(2019)은 평균유속의 25% 진동폭과 1 Hz의 주파수를 갖는 비정상 유동 내에서 HATT의 성능 변화를 수치해석을 통해 분석하였다. 이와 같이 여러 문헌에 제시되어 있는 HATT에 대한 연구결과를 통하여, HATT는 대체적으로 35~50%의 효율을 갖는 것을 알 수 있으며, 터빈 블레이드의 익형, 설치각도, 그리고 솔리디티(solidity) 등이 터빈 효율에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

이상에서 언급한 것과 같이 조류발전 터빈에 대한 많은 연구들이 수행되고 있지만, MeyGen 프로젝트에 적용된 바 있는 Atlantis AR1500과 Andritz Hammerfest Mk1 등을 제외하면 아직 전 세계적으로 조류발전용 터빈을 상용화 단계까지 진입시켜 발전한 경우는 극히 드문 실정이다. 우리나라에서도 이에 대한 상용화를 추진하기 위해 체계적인 연구개발을 바탕으로 한 설계가 필요한 상황이다.

본 연구에서는 1 MW급 수평축 조류발전기에 대한 3차원 유동해석을 수행하여 성능특성을 분석하였다. 이를 위해 BEMT를 이용하여 블레이드 형상을 설계하고, 3차원 RANS 해석을 바탕으로 유동특성 및 출력성능을 분석하였다. 또한 수평축 조류발전기의 출력 성능에 대한 터빈 허브 노즈(nose)와 유입각도의 영향성을 평가하고, 타워 구조물의 유무에 따른 터빈의 성능특성을 비교하였다.

2. 조류발전기 블레이드 형상 설계

본 연구에서는 1 MW급 HATT 블레이드를 설계하기 위하여 BEMT 기반의 자체 설계코드를 활용하였다. 사용된 설계코드는 BEMT에 기반하여 형상설계 및 초기 로터 블레이드의 성능해석을 수행할 수 있는 터빈 블레이드 형상 설계 프로그램으로, 유속, 로터 회전수, 수심, 그리고 공동지수(cavitation number) 등의 설계조건을 고려하여 최적 코드 길이(chord length) 및 비틀림각(twisting angel) 등을 설계할 수 있다.

터빈의 성능특성을 확인하기 위하여 필요한 주속비(tip speed ratio, TSR)와 출력계수(coefficient of power, C_p) 및 추력계수(coefficient of thrust, C_t)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$TSR = \frac{r\omega}{V_\infty} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2}\rho A V_\infty^3} \quad (2)$$

$$C_t = \frac{Thrust}{\frac{1}{2}\rho A V_\infty^2} \quad (3)$$

여기서, r 과 ω 는 각각 터빈의 반경과 각속도를 의미하고, T 는 터빈의 토크, ρ , A , 그리고 V_∞ 는 각각 작동유체의 밀도, 터빈의 투영면적(projected capture area), 그리고 유입속도(input velocity)를 나타낸다.

본 연구에서는 1 MW급 HATT 블레이드 형상을 설계하기 위하여 정격유속, 설치수심, 반경, 그리고 허브 직경을 각각 2.3 m/s, 40 m, 12 m, 그리고 4 m로 고려하였고, 최대효율(출력계수)은 주속비(tip speed ratio, TSR) 4~6 범위에서 발생하도록 설계하였다. 본 프로그램을 사용하여 설계한 1 MW급 조류발전 수평축 터빈의 블레이드 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 터빈 블레이드의 기초설계형상은 양항비가 상대적으로 우수하다고 알려진 NACA 63-824의 단면을 적용하도록 하였고(Zhu et al.(2020)), 3엽 블레이드를 갖도록 설계하였다. 이와 같이 설계된 터빈의 주속비(tip speed ratio, TSR)에 따른 출력계수 및 추력계수를 BEMT를 이용하여 계산한 결과를 Fig. 2에 제시하였으며, 제시된 바와 같이 주속비 5.5에서 약 51.1%의 최대 출력계수를 가짐을 알 수 있다.

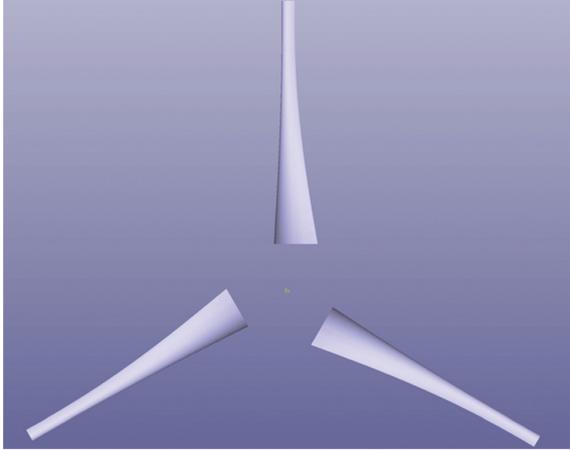


Fig. 1. Geometry of the HATT blade designed by BEMT.

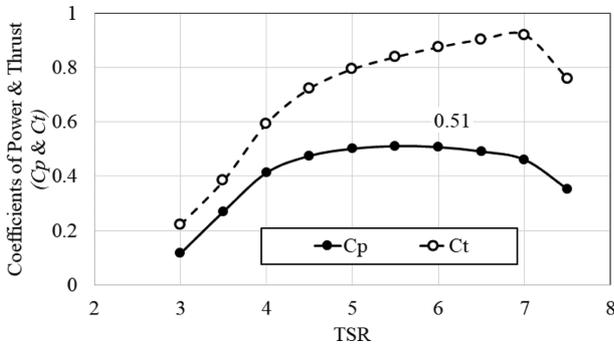


Fig. 2. Performance curve of preliminary HATT blade design.

3. 수치해석방법

본 연구에서는 1 MW급 HATT에 대한 출력 및 유동특성을 분석하기 위하여 유동장을 비압축성 정상상태의 3차원 유동으로 가정하고, 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-19.2 (ANSYS, 2019)를 사용하여 3차원 RANS 해석을 수행하였다. ANSYS CFX S/W를 사용하여 HATT의 성능특성을 분석한 Huang et al.(2016) 및 Goundar와 Ahmed(2013)의 연구를 통해 CFX의 적용성을 간접적으로 검증할 수 있다. 본 연구에서 수행한 정상상태 비압축성 난류유동에 대한 지배방정식인 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} + \rho W \frac{\partial U}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial x} - \rho \overline{u^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial y} - \rho \overline{uv} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial z} - \rho \overline{uw} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} + \rho W \frac{\partial V}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial V}{\partial x} - \rho \overline{uv} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial V}{\partial y} - \rho \overline{v^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial V}{\partial z} - \rho \overline{vw} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

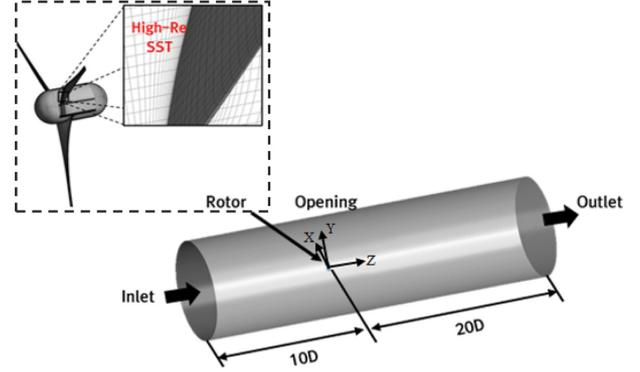


Fig. 3. Computational domain and grid system of 1 MW Class HATT.

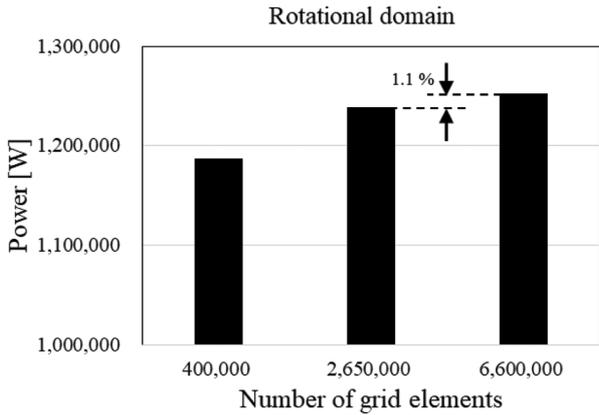
$$\begin{aligned} \rho U \frac{\partial W}{\partial x} + \rho V \frac{\partial W}{\partial y} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial W}{\partial x} - \rho \overline{uw} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial W}{\partial y} - \rho \overline{vw} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial W}{\partial z} - \rho \overline{w^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, U , V , 그리고 W 는 각각 x , y , z 방향에 대한 속도성분을 나타내고, μ 와 P 는 작동유체의 점성계수 및 압력을 의미한다.

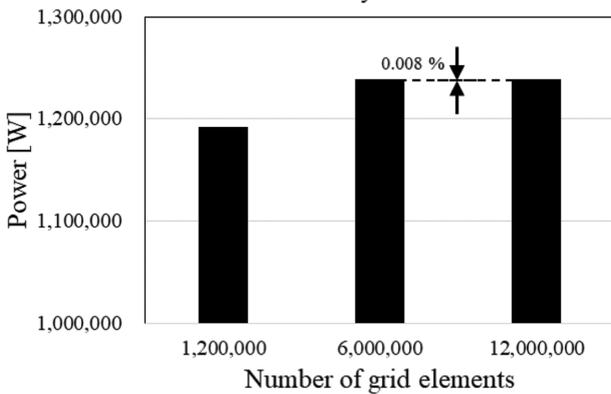
본 연구대상인 HATT 유동분석을 위한 계산영역을 Fig. 3에 도식화하였다. 터빈 블레이드는 전술한 바와 같이 자체 설계코드를 사용하여 설계한 형상을 적용하였고, 허브를 포함한 나셀의 직경 및 길이는 각각 4 m 및 8 m로 고려하였다. 계산영역은 정지영역과 회전영역으로 구분하였으며, 입-출구부는 터빈의 위치를 기준으로 각각 터빈 직경의 10배 및 20배의 길이를 확보하여 유동이 충분히 발달할 수 있도록 설정하였다. 또한 터빈 블레이드의 성능해석 시 차폐효과(blockage effect)가 1% 이내, 즉 무시할 수 있도록 터빈 직경의 10배 직경을 계산영역으로 고려하였다.

조류발전 수평축 터빈의 성능해석을 수행하는 과정에서 계산 격자에 대한 해석 결과의 의존성을 배제시키기 위하여 회전영역과 정지영역에 대해 각각 격자 의존성 시험을 수행하였다. Fig. 4에서 제시한 바와 같이, 회전영역에 대한 격자 의존성 시험은 블레이드 1엽에 대해 약 400,000~6,600,000개의 범위에서 수행하였고, 격자수가 2,650,000개 이상에서부터 출력 값이 약 1.1%의 차이를 보여 이를 회전영역의 계산을 위한 최적의 격자크기로 결정하였다. 또한 정지영역의 경우에는 격자수 약 1,200,000~12,000,000개의 범위에서 격자 의존성 시험을 수행하였으며, 격자수가 약 6,000,000개 이상부터 결과 값이 약 0.008%의 차이를 보여 이를 정지영역에 대한 최적의 격자크기로 정하였다. 이러한 격자 의존성 시험을 바탕으로 전체 계산영역에 대한 최적의 격자는 약 14,350,000개의 격자수를 갖는 격자크기로 정하였다.

계산영역은 Fig. 3에 보인 것과 같이 육면체 격자로 구성하였으며, 벽 근처 y^+ 값을 10 이상이 되도록 격자를 구성하여 high-Re SST(shear stress transport) 난류모델을 사용하



(a) Rotational domain
Stationary domain



(b) Stationary domain

Fig. 4. Grid dependency test results of 1 MW HATT.

Table 1. Boundary conditions for 3D analysis

Boundary conditions	
Inlet	Velocity constant
Outlet	Pressure constant
Interface between rotational and stational domains	Frozen rotor method

도록 하였다. SST 난류모델은 벽면 근처에는 $k-\omega$ 모델을 사용하고, 그 외 영역에서는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 계산을 수행하는 것으로 이러한 특성을 바탕으로 역압력구배를 잘 예측할 수 있다는 장점이 있다.

3차원 정밀유동해석을 수행하기 위한 경계조건은 Table 1에 제시한 바와 같이, 계산영역의 입·출구부는 각각 속도 및 압력조건을, 회전영역과 정지영역 사이의 경계면에는 frozen-rotor기법을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 BEMT와 CFD 해석결과 비교

1 MW급 HATT 블레이드에 대해 BEMT를 이용하여 기초설계를 수행하였고, 기초설계형상을 바탕으로 3차원 RANS 해석을 수행하여 성능특성을 확인하였다. 주속비에 따른 출

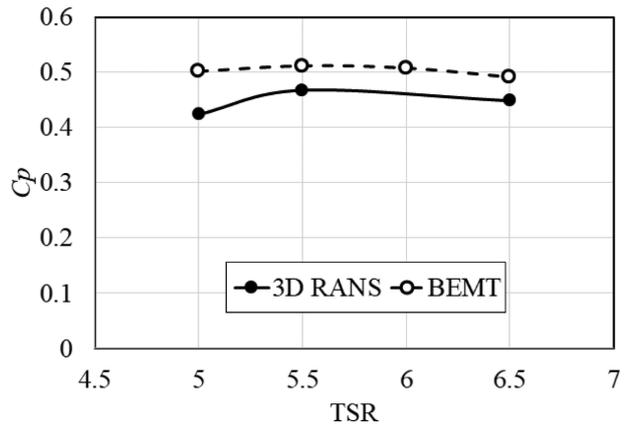


Fig. 5. Comparison between the results of BEMT and 3D RANS analysis.

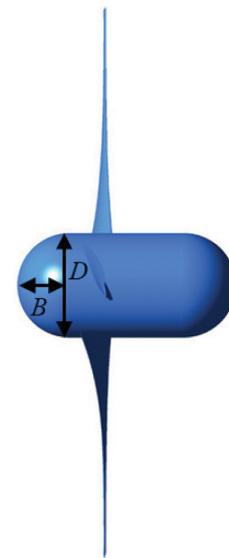


Fig. 6. Definition of length (B) and diameter (D) for aspect ratio ($AR = 2B/D$) of hub nose.

력과 출력계수(C_p)를 RANS 해석과 BEMT를 이용하여 계산하고, 그 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 두 방법에 의한 분석 결과 모두 주속비 5.5에서 최대 효율을 갖는 것으로 일치하는 결과를 보여 주었으며, 출력 및 출력계수는 BEMT에 의한 결과가 전체 주속비 범위에서 다소 높게 분석되었다. 이는 2차원 계산 및 여러 이상적인 조건 등을 가정한 BEMT의 특성에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 결과를 통하여 BEMT 및 3차원 RANS 해석 결과는 전체 주속비 범위에서 정성적으로 잘 일치하는 경향을 보여주었다.

4.2 허브 노즈 형상 변화에 따른 성능특성 비교

조류발전을 위한 작동유체가 흐르면서 가장 먼저 닿는 부분은 터빈 허브의 노즈(nose)이며, 노즈를 지나면서 발생하는 유동의 특성이 터빈 블레이드의 성능에 영향을 미치게 된다. 이러한 허브 노즈 형상 변화에 의한 유동특성 변화가 수평축 터빈의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Fig. 6에

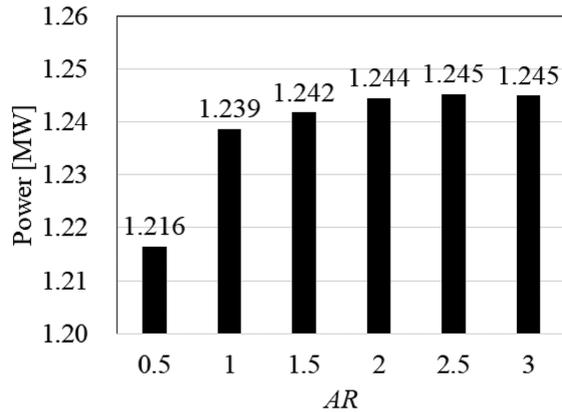


Fig. 7. Variation of output power with different ARs.

나타낸 것과 같이 허브의 직경(D)에 대한 노즈의 길이(B)로부터 AR (aspect ratio)를 식(8)과 같이 정의하였다.

$$AR = \frac{2B}{D} \quad (8)$$

AR 의 변화에 따른 HATT의 출력계수를 Fig. 7에 제시하였다. 기준형상의 AR 은 1.0이고 AR 의 증가에 따라 터빈 출력이 증가하는 경향을 보였으며, 기준형상과 비교하여 0.5의 AR 에서는 수평축 터빈의 출력이 약 1.8% 감소하는 것을 확인하였다. AR 가 2.5의 형상에서는 기준형상과 비교하여 약

0.5%의 출력 성능 향상이 나타나는 것을 알 수 있었고 2.5 이상의 AR 에서는 출력이 거의 변하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 AR 의 변화에 따른 수평축 터빈 주변부의 속도 분포를 보여준다. 작동유체는 좌측에서 우측으로 진행하고, 전반적으로 유입되는 유동은 터빈 근처 상류부에서 속도가 감소하는 경향을 보이며 터빈의 후류에서 낮은 속도를 갖는 영역이 관찰된다. AR 가 작은 형상일수록 터빈 상류에서의 유동이 상대적으로 낮은 속도 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 AR 가 0.5일 경우에는 터빈 후류에서 저속도 영역이 매우 크게 발생하는 것을 확인하였으며, 이러한 저속도 영역의 발생이 터빈 성능을 감소시키는 요인으로 작용하는 것을 알 수 있었다.

4.3 상류식(upstream)과 하류식(downstream) 발전에 대한 성능특성 비교

현재 전 세계적으로 실증 중인 조류발전시스템 중에는 Atlantis AR1500과 같은 상류식(upstream) 터빈도 있지만, Verdant Power에서 개발 중인 터빈과 같은 하류식(downstream) 터빈도 있고, Sabella D10과 같이 상류식, 하류식 모두 대응할 수 있는 양방향 터빈(bi-directional turbine)도 개발되고 있다. 360도 전 방향에서 바람이 불어오는 풍력발전과 달리 창조류 및 낙조류는 일정한 유향을 유지하며, 만약 창조류와 낙조류가 180도를 이루는 경우, 터빈의 요(yaw)제

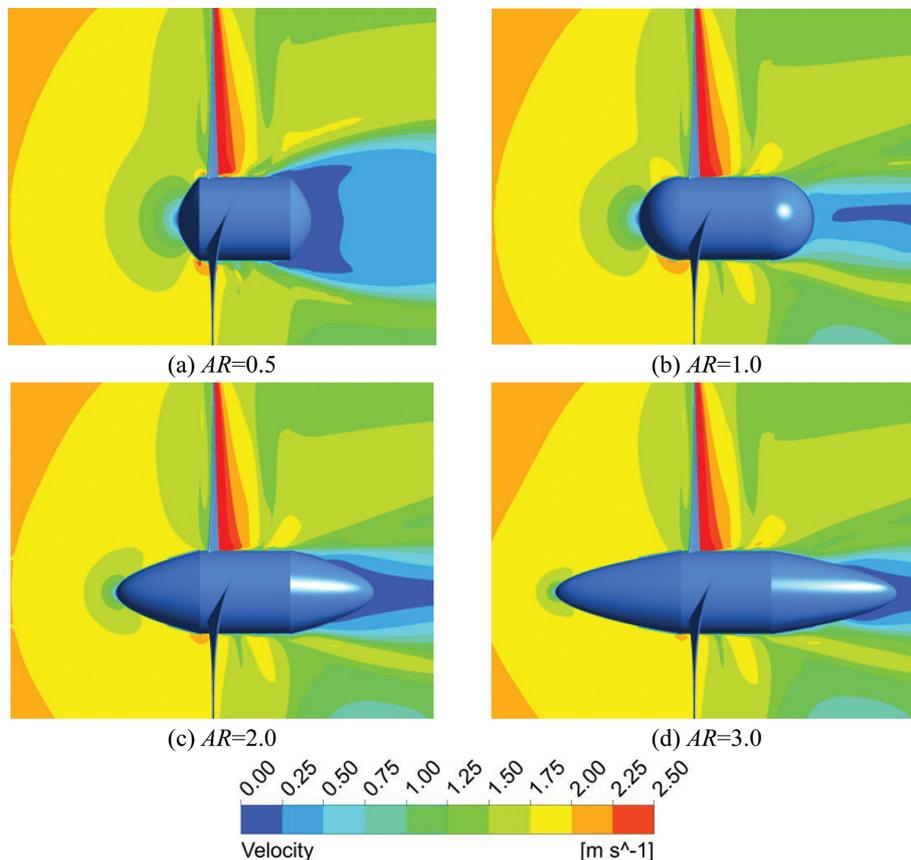


Fig. 8. Velocity contours near HATT with different ARs.

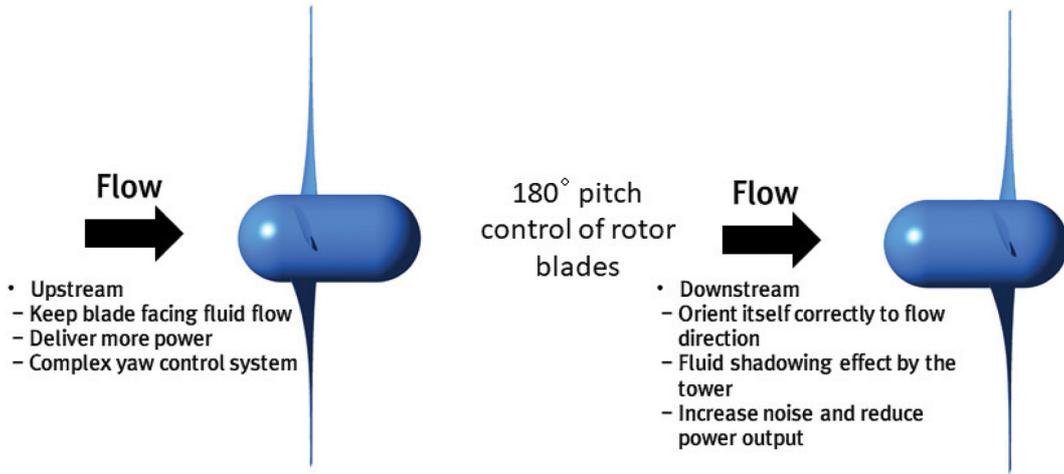


Fig. 9. Comparison between upstream and downstream flow of HATT.

어가 필요하지 않을 수도 있다. 이와 같이 요제어를 고려하지 않은 경우에 대해 창조류 및 낙조류에서의 유동특성을 분석하기 위해 Fig. 9와 같이 작동유체를 상류식 및 하류식 발전의 유동조건으로 3차원 정밀유동해석을 수행하여 비교하였다. 상류식 발전은 일반적으로 작동유체의 유동방향에 대해 블레이드 회전면을 정면으로 맞추기 위해 요 제어가 요구된다. 이러한 상류식 발전은 하류식 발전과 비교하여 구조물 간섭에 의한 유동 교란이 적어 상대적으로 높은 성능을 보이게 된다. 반대로, 하류식은 작동유체의 유동방향에 맞춰 스스로 터빈 방향을 맞출 수 있다는 장점이 있지만 타워 등과 같은 구조물에 의해 간섭을 받아 상류식 발전에 비해 상대적으로 성능이 낮고 소음이 크다는 단점을 갖는다. 본 연구에서는 우선 타워를 제외시키고 단순히 상류식 및 하류식 발전의 성능 특성을 비교하도록 하였다. 하류식 발전에서 터빈 블레이드의 각도는 피치(pitch)각도를 180° 회전시킬 수 있다는 가정으로 상류식 조류발전기에서의 블레이드 각도와 동일하도록 하였다.

상류식 및 하류식 발전에서 타워 구조물을 고려하지 않은 HATT의 성능특성을 Table 2에 비교하였다. 성능비교는 HATT에 대한 유동해석 결과에서 최대 수력학적 성능 값을 나타낸 주속비 5.5의 조건을 고려하였다. 3차원 RANS 해석 결과는 하류식 조류발전기의 수력학적 성능이 상류식 발전과 비교하여 약 3% 증가하는 결과를 나타냈다. 일반적으로 타워 구조물에 의한 간섭의 영향으로 상류식 발전이 상대적으로 출력 성능이 우수한 것으로 알려져 있지만, 타워 구조물을 고려하지 않을 경우에는 하류식 발전이 더 높은 출력성능을 보이는

결과를 보였다. 이에 대한 추가적인 분석을 위하여 상류식 및 하류식 조류발전기 주변 유동의 속도장을 Fig. 10에서와 같이 비교하였다. 상류식 발전의 경우 터빈 블레이드의 약 80% 이상에서 속도가 낮은 영역(원형 점선)이 관찰되고 이러한 낮은 속도영역은 하류식 발전의 터빈 블레이드에서는 나타나지

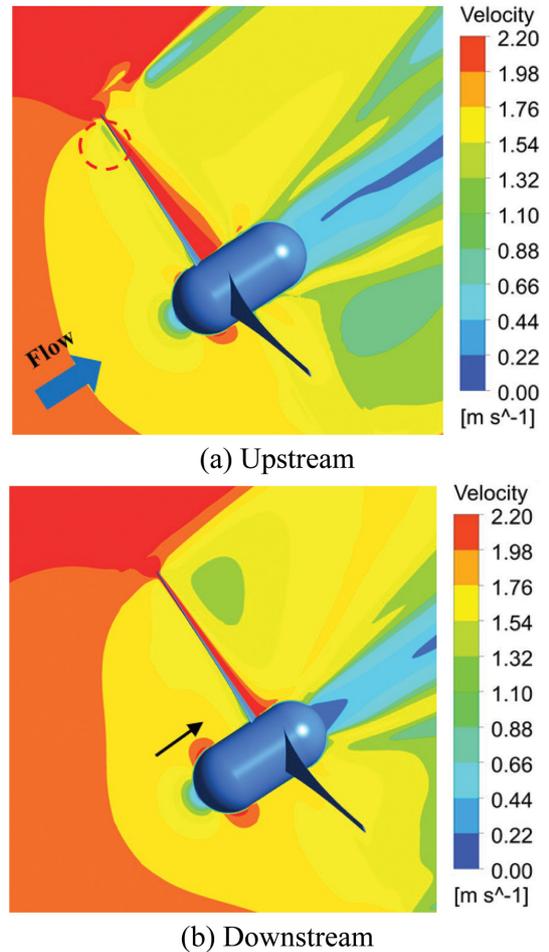


Fig. 10. Velocity contours of HATT under upstream and downstream flow.

Table 2. Performance comparison of the HATT under upstream and downstream flow

Type	TSR	Power [MW]	C_p [%]	Increment [%]
Upstream	5.5	1.24	45.1	-
Downstream	5.5	1.28	46.6	3

않는다. 또한, 하류식 발전은 터빈 블레이드의 지점에서 스펠 방향(spanwise)으로 고르게 높은 속도분포를 갖는 것을 확인할 수 있다(화살표). 이러한 속도분포의 차이는 하류식 발전에서 터빈의 허브를 지나면서 유동이 가속되어 상대적으로 높은 유속이 유지되는 것으로 사료된다.

4.4 유입각도에 따른 성능특성 비교

작동유체의 유입각도는 조류발전 수평축 터빈의 성능에 영향을 미치며 이러한 영향을 고려해 수평축 터빈은 유입각도가 변하는 유동에 맞춰 대응할 수 있도록 요제어 기술을 적용하기도 한다. 그러나 요제어 기술의 적용은 요드라이브(yaw drive), 브레이크, 케이블 수중결합장치 등의 설치 및 유지관

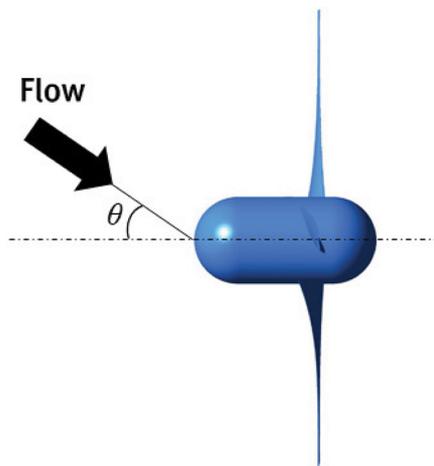
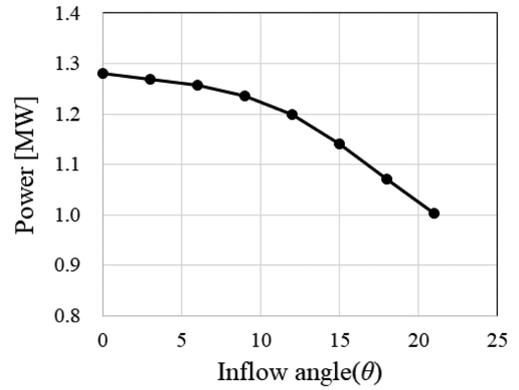
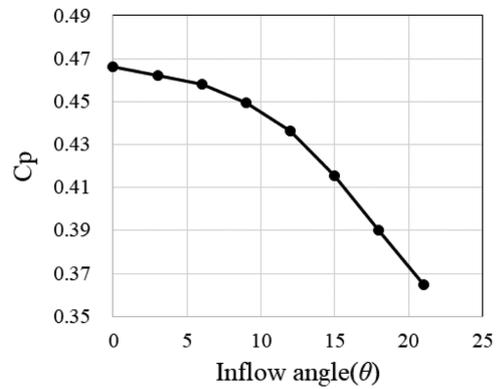


Fig. 11. Definition of the inflow angle (θ) forward HATT under downstream flow.

리에 대한 비용을 증가시키기 때문에 이에 대한 체계적인 검토가 요구된다. 본 연구에서는 수평축 터빈에 유입되는 흐름의 유입각도의 변화에 따른 터빈의 성능특성을 분석하기 위



(a) Power



(b) Power coefficient

Fig. 12. Performance curves with variation of θ .

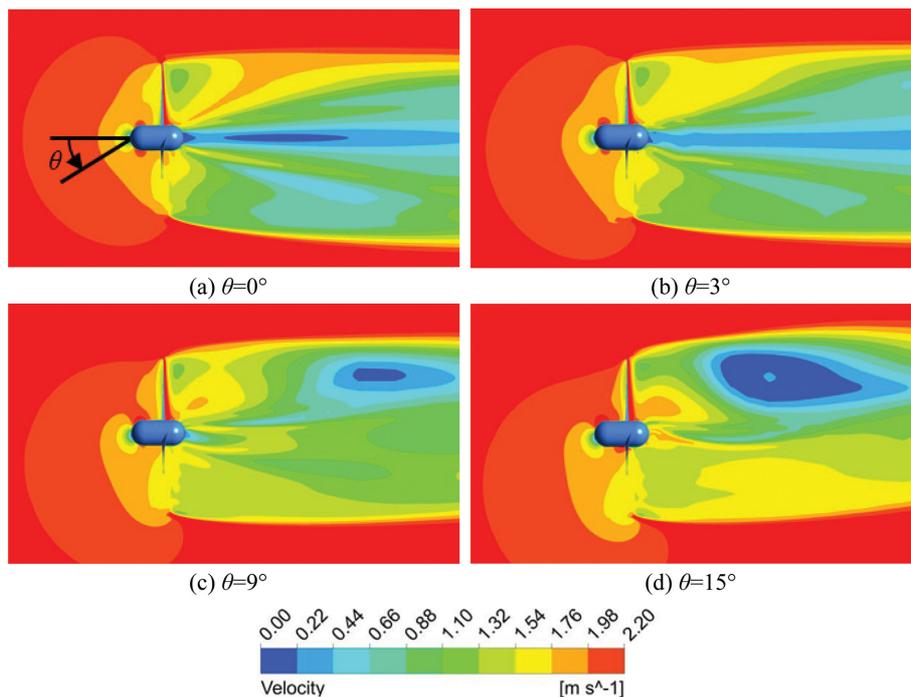


Fig. 13. Velocity contours with different θ

하여 3차원 유동해석을 수행하였다. 하류식 방식을 기준으로 타워 구조물을 적용하지 않은 수평축 터빈에 대해 유입각도의 변화에 따른 터빈의 성능특성 변화를 비교하기 위해 Fig. 11과 같이 유입각도(θ)를 정의하였다.

θ 의 변화에 따른 수평축 터빈의 성능특성을 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. TSR 5.5의 터빈 회전속도에서 비교하였으며, θ 가 증가함에 따라 수평축 터빈의 출력성능은 감소하는 경향을 보인다. θ 가 약 15° 의 경우에는 유입각도가 0° 인 경우에 비해 약 10.9% 감소한 출력 성능을 보였다.

Fig. 13은 θ 의 변화에 따른 수평축 터빈 주변의 속도장 변화를 비교하여 보여준다. 작동유체는 그림의 좌측에서 우측으로 흐르는 것으로 일반적으로 터빈의 후류에 낮은 속도 영역이 분포하는 것을 확인할 수 있으며, θ 가 9° 이상에서는 후류에서의 와류 발생이 확연히 관찰되었다.

4.5 타워 구조물의 영향 분석

조류발전용 수평축 터빈을 수중에 고정시키기 위해서 설치하는 타워 구조물은 주변의 유동을 교란시키기 때문에 터빈 성능에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 이러한 타워 구조물의 설치가 터빈의 성능에 미치는 영향성을 평가하기 위해 타워의 유무에 따른 성능특성을 비교하였다. 타워의 직경과 길이는 각각 1.5 m 및 20 m로 가정하였으며 해저면의 영향은 고려하지 않았다.

Fig. 14는 타워 구조물의 유무에 따른 상류식 및 하류식 터빈의 출력계수(C_p)를 제시하였다. 타워 구조물을 고려할 경우, 간섭효과로 인하여 출력계수가 감소하는 것을 알 수 있으며, 상류식 발전의 경우 약 2%p 감소하였고, 하류식 발전의 경우 약 4%p 감소하는 결과를 보여주었다. 한편, 타워 구조물을 고려하지 않은 경우, 하류식 발전이 더 높은 효율을 보였지만, 타워 구조물을 고려할 경우 상류식 발전 방식이 약 1%p 높은 효율을 보여 일반적으로 알려져 있는 경향과 일치하는 결과를 얻을 수 있다. 그러나 전체적으로 볼 때 1%p의 효율 감소는 심각한 수준은 아닌 것으로 판단할 수 있으며, 다만 타

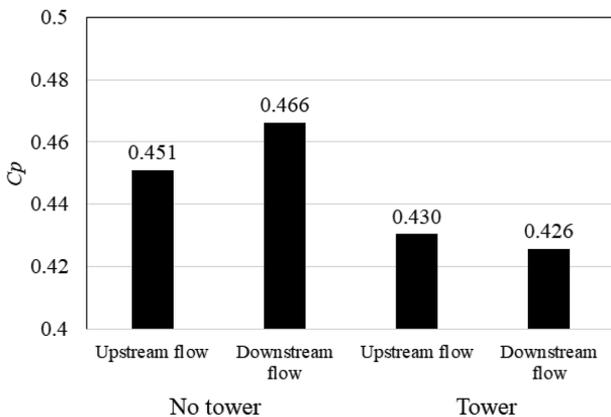


Fig. 14. C_p of HATT with and without the tower under upstream and downstream flow.

워 구조물의 직경에 따른 영향을 추가적으로 고려할 필요는 있을 것으로 사료된다.

타워 구조물을 설치한 수평축 터빈의 유동특성을 확인하기 위해 Fig. 15와 같이 상류식 및 하류식 조류발전 터빈 근처에서 Q-criterion 값이 2 s^{-1} 의 값을 갖는 영역을 비교하였으며, 이 영역에 대해 나선도(helicity) 분포를 나타내었다. 상류식 발전의 수평축 터빈은 작동유체가 터빈 블레이드에 에너지를 전달한 후에 타워로 흐르기 때문에 타워 구조물에 의한 유동 간섭이 상대적으로 적다. 그러나 하류식의 경우에는 타워 구조물을 지나면서 유동이 크게 교란되고 교란된 유동이 바로 터빈 블레이드를 만나게 된다(점선 원형). 이러한 유동의 교란이 터빈 블레이드의 성능을 현저히 감소시키는 요인으로 작용하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 1 MW급 조류발전용 수평축 터빈에 대한 성

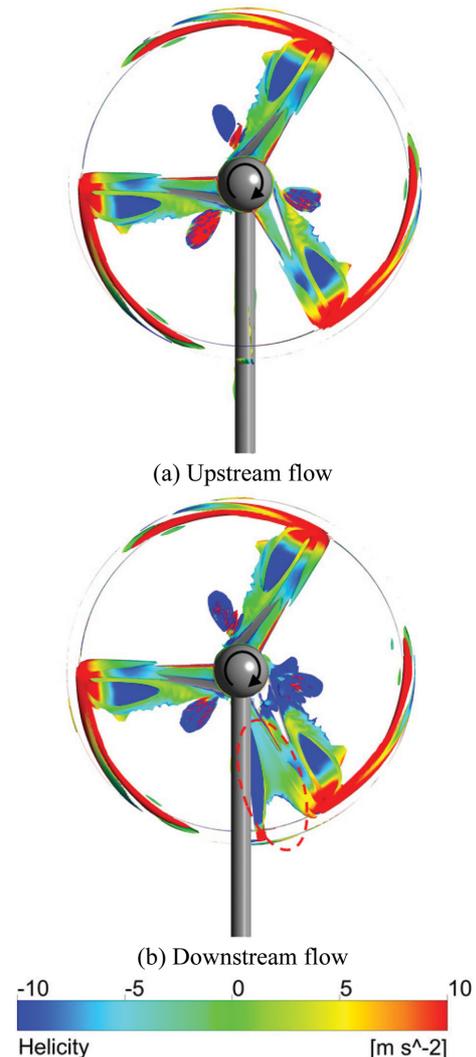


Fig. 15. Helicity contours on the Q-criterion region of 2 s^{-1} near the HATT with tower.

능특성을 분석하고자 3차원 RANS 해석을 수행하였다. 유동 해석을 위해 SST 난류모델을 사용하였고, 격자 의존성시험을 수행하여 계산을 위한 최적의 격자크기를 결정하였다. 우선, 타워 구조물을 고려하지 않고, 수평축 터빈의 성능에 대한 노즈 형상의 영향성을 분석하기 위해 AR 에 따른 출력 성능을 비교하였고, AR 이 2.5 이상에서는 출력 성능의 변화가 없는 것을 확인하였다. 또한, 하류식 터빈에 대해 작동유체의 유입각도(θ)에 따른 출력 성능을 비교하였고, θ 가 15° 의 경우에 출력계수는 θ 가 0° 일 때와 비교하여 약 10.9% 감소하는 것을 알 수 있었다. 그리고 HATT의 출력성능에 대한 타워 구조물의 영향을 분석한 결과, 타워 구조물을 고려하지 않을 경우 하류식 발전의 효율이 상류식 발전보다 약 3% 높게 분석되었지만, 타워 구조물을 고려하면 하류식 발전의 터빈 효율이 상류식 발전보다 약 1% 낮은 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과는 수평축 조류발전기의 상세설계를 위한 기초자료로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 재원을 받아 수행된 연구임(과제명: 1 MW급 조류발전 상용화 시스템 개발, 과제번호 20190499).

References

- Abuan, B.E. and Howell, R.J. (2019). The performance and hydrodynamics in unsteady flow of a horizontal axis tidal turbine. *Renewable Energy*, 133, 1338-1351.
- ANSYS CFX 19.2 tutorial (2019). ANSYS Inc.
- Batten, W.M.J., Bahaj, A.S., Molland, A.F. and Chaplin, J.R. (2007). Experimentally validated numerical method for the hydrodynamic design of horizontal axis tidal turbines. *Ocean Engineering*, 34, 1013-1020.
- Goundar, J.N. and Ahmed, M.R. (2013). Design of a horizontal axis tidal current turbine. *Applied Energy*, 111, 161-174.
- Huang, B., Zhu, G.J. and Kanemoto, T. (2016). Design and performance enhancement of a bi-directional counter-rotating type horizontal axis tidal turbine. *Ocean Engineering*, 128, 116-123.
- Kaufmann, N., Carolus, T.H. and Carolus, R. (2017). An enhanced and validated performance and cavitation prediction model for horizontal axis tidal turbine. *International Journal of Marine Energy*, 19, 145-163.
- Kumar, P.M., Seo, J., Seok, W., Rhee, S.H. and Samad, A. (2019). Multi-fidelity optimization of blade thickness parameters for a horizontal axis tidal stream turbine. *Renewable Energy*, 135, 277-287.
- Li, Y., Liu, H., Lin, Y., Li, W. and Gu, Y. (2019). Design and test of a 600-kW horizontal-axis tidal current turbine. *Energy*, 182, 177-186.
- Ordonez-Sanchez, S., Ellis, R., Porter, K.E., Allmark, M., O'Doherty, T., Mason-Jones, A. and Johnstone, C. (2019). Numerical models to predict the performance of tidal stream turbines working under off-design conditions. *Ocean Engineering*, 181, 198-211.
- Park, J.S., Lee, C.Y., Park, J.S., Choi, H.W., Ko, D.H. and Lee, J.L. (2019). Assessment of tidal stream energy resources using a numerical model in Southwestern Sea of Korea. *Ocean Science Journal*, 54(4), 529-541.
- Ren, Y., Liu, B., Zhang, T. and Fang, Q. (2017). Design and hydrodynamic analysis of horizontal axis tidal stream turbines with winglets. *Ocean Engineering*, 144, 374-383.
- Seo, J., Yi, J., Park, J. and Lee, K. (2019). Review of tidal characteristics of Uldolmok Strait and optimal design of blade shape for horizontal axis tidal current turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109273.
- Zhu, F.W., Ding, L., Huang, B., Bao, M. and Liu, J.T. (2020). Blade design and optimization of a horizontal axis turbine. *Ocean Engineering*, 195, 106652.

Received 13 December, 2019

1st Revised 8 January, 2020

2nd Revised 27 January, 2020

Accepted 31 January, 2020