

# 100 kW급 조류발전용 듀얼 수직축 터빈의 성능특성 연구

허만웅 · 김동환 · 박진순<sup>†</sup>

한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터

## Investigation on Performance Characteristics of Dual Vertical Axis Turbine of 100 kW Class Tidal Energy Converter

MAN-WOONG HEO, DONG-HWAN KIM, JIN-SOON PARK<sup>†</sup>

Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385 Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
jpark@kiost.ac.kr

Received 2 December, 2019  
Revised 31 January, 2020  
Accepted 28 February, 2020

**Abstract >>** This study aimed to investigate the performance characteristics of vertical axis turbine of tidal energy converter. Three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equation with shear stress transport turbulence model has been solved to analyze the fluid flow of the vertical axis turbine. The hexahedral grids have been used to construct the computational domain and the grid dependency test has been performed to find the optimum grid system. Four steps have been carried out to design the vertical axis turbine of the 100 kW class tidal energy converter.

**Key words :** Tidal energy converter(조류발전), Vertical axis turbine(수직축 터빈), Power(출력), Darrieus type(다리우스 타입), 3D Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis (3차원 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 해석)

### 1. 서론

최근 유가의 수급 불균형에 따라 빈번하게 변동 폭이 증가하고, 전 세계적으로 기후변화협약에 따른 규제에 대응하기 위해 국가적인 차원에서 에너지 안보에 대한 강화를 요구하고 있다. 이에 따라 화석에너지의 고갈과 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 신재생에너지의 중요성이 크게 대두되고 있는 실정으로, 우리나라는 기후변화 대응을 위한 후발 선진국가로서 국가위상에 걸맞는 기어 및 온실가스 감축

등과 같이 능동적으로 대응할 필요가 있다. 지형적인 특성으로 우리나라는 세계적으로 주목받는 조류발전 입지 조건을 보유하고 있다. 특히 장죽수도 및 맹골수도, 거차수도에는 기술적으로 개발 가능한 조류에너지가 약 8.3 GW 부존하고 있는 것으로 평가하고 있으며<sup>1)</sup>, 서·남해안에는 약 12 GW 규모의 조류에너지가 부존돼 있다고 예측되고 있다. 이에 따라 조류발전에너지를 활용하기 위한 적극적인 연구개발이 필요하며 이에 대한 체계적인 연구개발이 이루어져야 할 것이다.

Li and Calisal<sup>2)</sup>은 조류발전용 수직축 터빈에 대한 유동특성을 분석하기 위하여 새롭게 개발한 와법(vortex method)을 사용하였으며, 이들은 터빈의 높이가 반경에 대해 7배 이상일 경우 3차원 유동 효과는 무시할 수 있다고 평가하였다. Clarke 등<sup>3)</sup>은 조류발전용 수평축 터빈에 두 개의 로터를 설치하고 서로 엇회전시키는 방법을 통해 구조물에 전달되는 토크 및 후류에서 발생하는 와류를 거의 없애고 상대적인 회전수를 크게 증가시킬 수 있다는 것을 실험을 통해 증명하였다. Kim 등<sup>4)</sup>과 Li and Calidal<sup>5)</sup>은 수직축 터빈을 듀얼로 설치하여 단일 터빈과 비교하여 성능이 향상되는 것을 증명하였으며, 듀얼 터빈의 상대 회전 방향에 따른 성능 변화를 비교하였다. 그리고 조류발전터빈의 성능을 평가하기 위하여 blade element momentum theory와 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 해석을 결합한 방법이 Turnock 등<sup>6)</sup>에 의해 제안되었다. Mohamed 등<sup>7)</sup>은 다리우스 터빈의 블레이드 형상에 대해 24가지의 익형을 고려하여 성능을 비교하였고, NACA 63-series는 약 40%의 효율을 가지며 NACA 00-series는 약 25% 이하의 효율을 갖는 것을 확인하였다.

이상에서 언급한 것과 같이 현재 조류발전용 터빈에 대한 연구개발이 활발히 수행되고 있다. 그러나 아직 전 세계적으로 조류발전용 터빈을 상용화 단계로 진입하여 발전한 경우는 극히 드물며, 우리나라에서도 이에 대한 상용화를 추진하기 위한 체계적인 연구개발이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 100 kW급 조류발전용 수직축 터빈에 대한 3차원 유동해석을 수행하여 성능특성을 분석하였다. 이를 위해 수직축 터빈에 대한 기초설계를 수행하고, 터빈의 출력과 효율에 대한 터빈 직경과 높이의 비( $AR$ )와 블레이드 지지대 형상의 영향성을 분석하였다. 이러한 체계적인 분석을 바탕으로 조류발전용 수직축 터빈을 개발하였다.

## 2. 수치해석방법

### 2.1 유동해석방법

본 연구에서는 100 kW급 조류발전시스템의 수직형 터빈에 대한 설계 및 수력학적 성능 특성을 분석하기 위하여 유동장을 비압축성 3차원 비정상상태로 가정하고 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-19.2<sup>8)</sup>를 사용하여 3차원 정밀 유동해석을 수행하였다. 본 연구 대상인 조류발전용 수직축 터빈의 유동해석을 위한 계산영역을 Fig. 1에 도식화하였다. 조류발전용 터빈은 다리우스 타입의 3엽 블레이드(NACA0020)를 갖는 수직축 터빈을 고려하였다. 계산영역의 높이, 폭 그리고 길이는 터빈의 직경( $D$ )에 대해 각각 20배, 20배 그리고 60배로 설정하였으며, 입구부로부터  $20D$ 의 거리에 터빈을 위치하도록 하였다.

유동해석을 위해 작동유체는 물로 가정하였고, 계산 영역의 입구와 출구에는 각각 속도 및 압력 경계 조건을 적용하였다. 수직축 터빈의 유동특성을 분석하기 위하여 비정상해석을 수행하였고, 해석의 반복 해석(iteration)당 터빈이 3°씩 회전하도록 설정하여 총 계산은 터빈이 10회전 할 때까지 해석을 진행하였다. 터빈이 회전하는 회전영역(rotational domain)과 주유동이 지나는 고정영역(stational domain) 사이의 경계면 처리는 transient rotor stator interface 기법을 적용하였고, 터빈의 면(블레이드 및 축 등)에는 점착조건을 부여하였다. 난류해석을 위해서는 shear stress transport (SST)  $k-\omega$  모델을 사용하였다. SST 모델을  $k-\omega$  모델과  $k-\epsilon$  모델의 장점만을 결합한 것으로, 벽

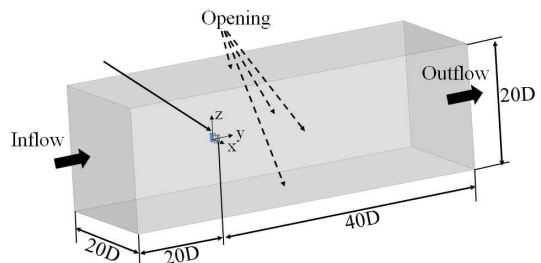


Fig. 1. Computational domain of a vertical axis turbine

근처 영역에서는  $k-\omega$  모델을 사용하고 벽 근처를 제외한 영역에서는  $k-\epsilon$  모델을 사용하게 된다.

단일 비정상 계산에 Intel Xeon E5-2690 CPU를 사용하여 터빈이 10회전 할 때까지 약 80시간이 소요되었다.

### 2.2 격자의존성시험

본 연구의 조류발전용 수직축 터빈의 유동해석을 수행하는 과정에서 격자에 대한 해석 결과의 의존성을 배제시키기 위하여 격자의존성시험을 수행하였다. 회전영역과 정지영역에 대해 각각 격자의존성시험을 수행하였다. Fig. 2는 회전영역에 대한 격자의존성시험 결과를 보여주며, 격자수의 변화에 따른 출력 및 출력계수를 비교하였다. 회전영역에 대해 격자수를 약 백만~2백만 개의 범위에서 평가하였고, 격자수가 약 8백만 개 이상에서 결과값이 약 1% 미만의 변화를 보이는 것을 확인하여 이를 회전영역에 대한 최적의 격자 크기로 정하였다. 또한 정지영역에 대한 격자의존성시험을 수행하여 Fig. 3에 나타내었다. 정지영역에 대해 약 750만~2천만의 격자수 범위에서 격자의존성시험을 수행하여 터빈 후류(A-A')에서의 속도분포 변화를 비교하였다. 이를 통해 격자수 약 백만 개 이상에서 터빈 후류에 발생하는 저속도 영역에 대한 예측을 잘 하는 것으로 확인하였으며, 이 격자 크기를 정지영역에 대한 최적의 크기로 결정하였다.

본 연구의 수치해석을 위한 격자영역에 대한 격자

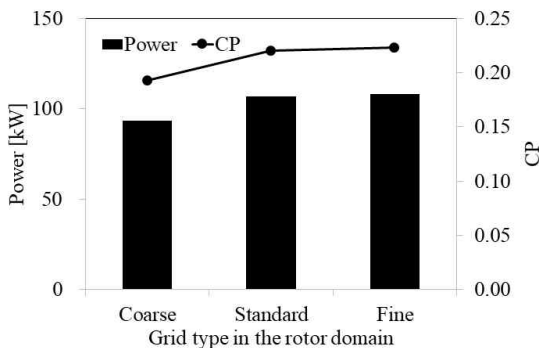


Fig. 2. Grid dependency test results for the rotational domain

계는 Fig. 4에 나타내었다. 격자계는 사면체(터빈 영역) 및 육면체(주유동 영역) 격자들을 사용하여 구성하였으며, 벽면의 첫 번째 격자점에서의  $y^+$  값은 10 이상을 유지하여 high-Re SST모델이 적용되도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수직축 터빈의 1차 기초설계

본 연구에서는 100 kW급 조류발전시스템을 설계하기 위하여 2개의 50 kW급 수직축 터빈을 고려하

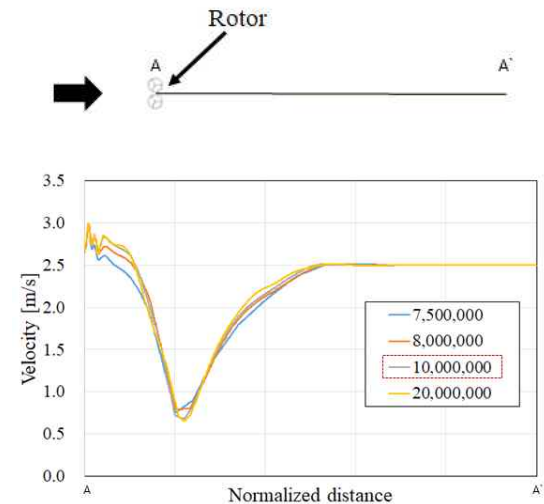


Fig. 3. Grid dependency test results for the stationary domain

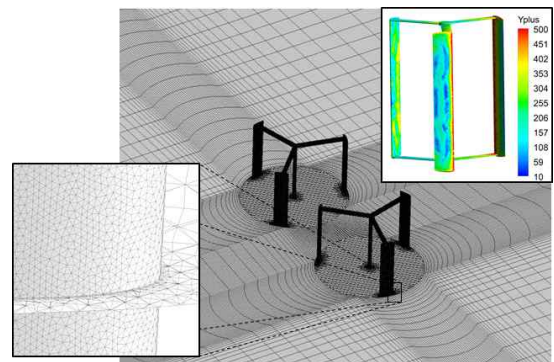


Fig. 4. Structure of the grid system

였다. 조류발전터빈을 설계하기 위해서는 우선 적지 평가를 통해 설치할 장소의 입지조건을 파악해야 하며, 적지 후보지들에 대한 평가를 통해 정격유속 2.5m/s를 유동해석을 위한 경계조건으로 설정하였다. 그러나 설치를 위한 적지의 수심에 대한 확정된 정보가 없는 상황에서 수심에 대한 제한이 없다는 상황을 가정하여 기초설계를 진행하였다.

조류발전 터빈에 대한 성능함수로서 출력 및 출력계수를 고려하였고, 출력계수는 아래의 식과 같이 정의한다.

$$CP = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (1)$$

여기서  $\rho$ ,  $A$  그리고  $V$ 는 각각 작동유체의 밀도, 터빈의 투영면적 그리고 작동유체의 유입속도를 의미한다. 식 (1)을 터빈의 직경에 대한 식으로 변환하면 아래의 식과 정리할 수 있다.

$$D = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho H V^3 CP} \quad (2)$$

여기서  $H$ 는 터빈의 높이를 나타낸다.

기초설계 단계에서는 직경과 높이의 비에 대한 선행 연구 결과<sup>9)</sup>를 참조하여 식 (2)로부터 출력 및 효율 값을 각각 50 kW 및 25%로 가정하고 터빈의 직경을 계산하였다. 이러한 직경에 대한 계산 결과를

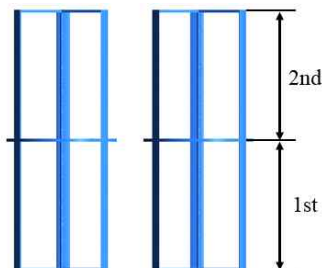


Fig. 5. Preliminary design of the tidal current turbine with dual vertically (two) stacked turbines

바탕으로 Fig. 5와 같이 기초형상을 도출하였다. 1차 기초설계 한 수직축 터빈의 직경 및 높이는 3.42 m 및 8.76 m이다. 기초설계 한 형상에 대해 두 개의 터빈을 듀얼로 설치하여 발전하도록 하였고, 1차 기초설계 터빈의 구조적 안정성을 고려하여 2단으로 설계하였으며, 두 터빈 사이의 거리는 터빈 반경에 대해 2.75배로 거리를 위치시켰다. Li and Calisal<sup>5)</sup>의 연구 결과에서 두 터빈을 반대 방향으로 회전시킨 듀얼 터빈이 같은 방향으로 회전하는 듀얼 터빈과 비교하여 향상된 성능을 갖는다는 것을 확인하였고 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 듀얼 터빈을 서로 반대 방향으로 회전하도록 하였다.

듀얼로 설치한 터빈의 토크 변화와 단일로 설치한 터빈의 결과를 Fig. 6에 비교하였다. TSR이 1.75의 경우에서 터빈을 회전시키며 각 한 개의 터빈에 대해 변화하는 토크를 비교하였고, 듀얼 터빈으로 작동할 경우에 예측되는 토크값의 평균은 단일로 작동하는 터빈과 비교하여 약 13.3% 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 듀얼 터빈에서의 토크 증가는 두 터빈 사이의 공간에서 터빈의 회전에 의해 유속이 가속되면서 수력학적 성능이 향상된 것으로 사료된다. 이러한 결과는 선행연구들(Kim 등<sup>4)</sup>과 Li and Calisal<sup>5)</sup>의 결과와 동일한 경향을 보인다.

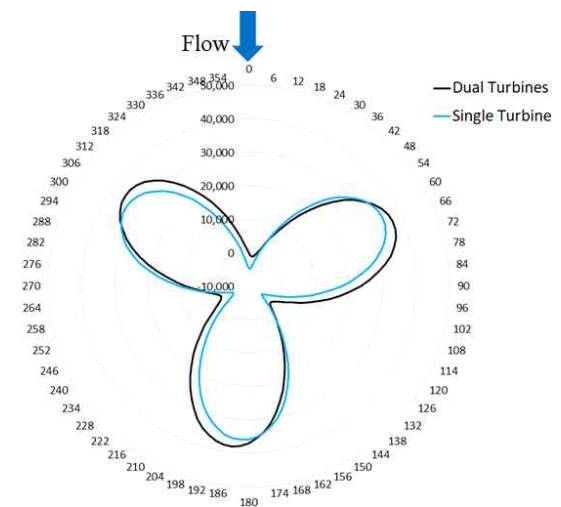


Fig. 6. Instantaneous torque with azimuth during the last revolution for the dual and single turbines

이러한 기초설계를 바탕으로 듀얼 수직축 터빈의 성능곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 주속비(tip speed ratio)의 변화에 따른 출력 및 출력계수 변화를 보여주며, 1.75의 주속비에서 터빈의 최대 출력값이 108.2kW로 예측되었으며 22.3%의 효율값을 나타내었다.

기초설계 한 조류발전터빈의 높이 변화에 따른 성능변화를 분석하기 위하여 직경과 높이의 비를 AR (aspect ratio= $H/2R$ )로 정의하고, 터빈의 직경과 터빈 사이의 거리를 고정시키고  $H$ 의 변화에 따른 성능 변화를 Fig. 8에 비교하였다. 기초설계 한 형상의 AR은 2.56의 값을 가지며, AR를 감소시키면서 주속도의 변화에 따른 성능을 비교하였다. Fig. 8에서 확인할 수 있는 것과 같이 AR를 감소시키기에 따라 전체 주속도 범위에서 터빈의 출력 성능이 감소하였다. 이러한 출력 성능의 감소는 터빈의 높이가 줄어들어 따라 작동유체로부터 에너지를 얻을 수 있는 단면적이 줄어들기 때문으로 사료된다.

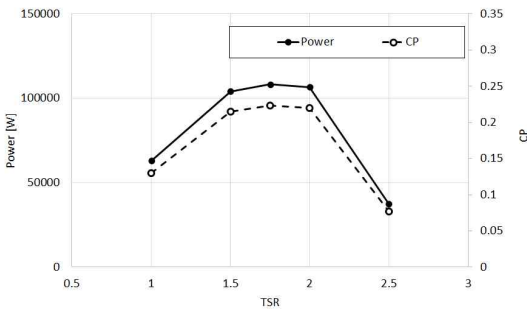


Fig. 7. Performance curves of the preliminary design of the vertical axis turbine

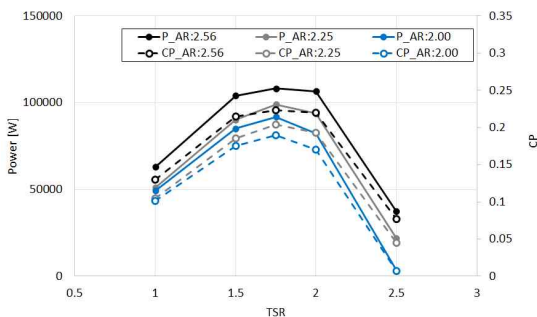


Fig. 8. Performances curves of the vertical axis turbine with different AR

### 3.2 수심을 고려한 수직축 터빈 설계

#### 3.2.1 수심을 고려한 수직축 터빈의 2차 기초설계

터빈을 설치하기 위한 적지선정에 대한 평가를 수행하고 최종 후보지의 수심을 고려한 터빈의 높이를 6m로 결정하였다. 터빈 높이 제한조건을 고려하여 수직축 터빈에 대한 기초설계를 다시 수행하였으며, 정격유속 2.5 m/s, 예상 출력 및 효율은 50 kW 및 25% 그리고 터빈의 높이를 6m로 고려하여 식 (2)를 통해 터빈의 직경을 5m로 계산하였다. 이러한 계산을 바탕으로 설계한 2차 기초형상을 Fig. 9에 같이 도식화하였다.

2차 기초설계에 대한 3차원 정밀유동해석을 수행하여 이에 대한 성능곡선을 Fig. 10에 나타내었다. TSR에 따라 출력의 변화를 나타내며, TSR 1.75에서 71 kW의 최대 출력값이 예측되었다. 이는 목표한

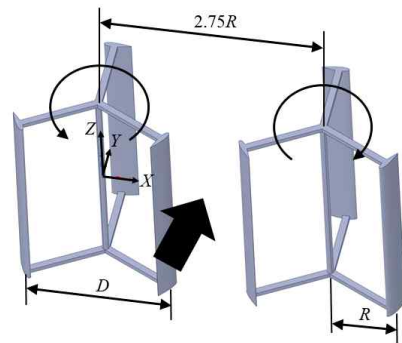


Fig. 9. 2nd preliminary design of the vertical axis turbine

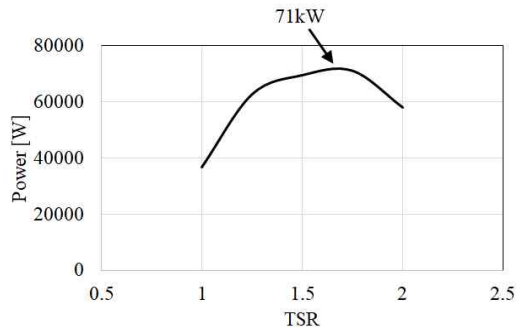


Fig. 10. Power curve of 2nd preliminary design

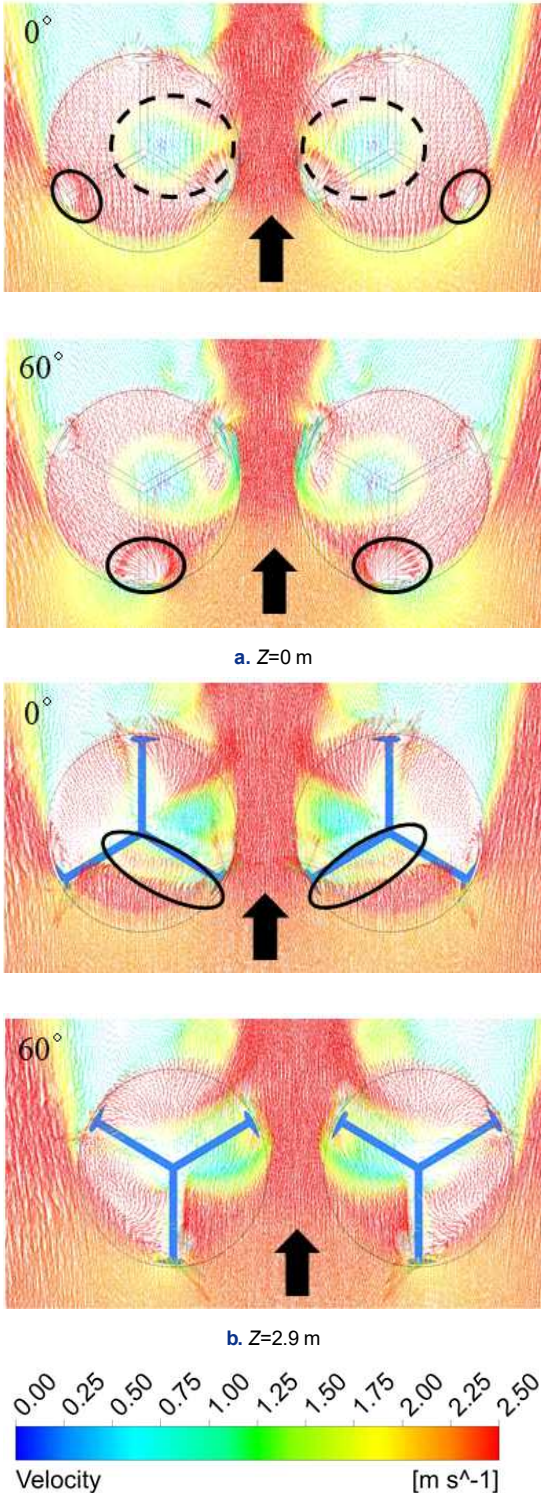


Fig. 11. Velocity contours on the different span of turbine blade of 2nd preliminary design

100 kW와 비교하여 매우 낮은 값으로 이에 대한 원인을 규명하고자 내부 유동장에 대한 분석을 수행하였다.

Fig. 11은 수직축 터빈 높이에 따른 속도벡터 분포를 보여준다. 터빈의 중심 높이( $Z=0\text{ m}$ )에서 블레이드에서의 2차 유동이 관찰(원형 실선)되고 이것은 시간이 변하여 터빈이  $60^\circ$  회전할 경우 더 커지는 것을 알 수 있다. 또한 터빈 내부에 큰 와류가 발생(원형 점선)하는 것을 확인할 수 있으며, 터빈이 회전하여도 터빈 내부에 와류가 발생하는 것을 확인하였다. 블레이드 지지대(spoke)의 높이( $Z=2.9\text{ m}$ )에서는 지지대에 의한 유속이 감소되는 영역(타원형 실선)이 관찰되고 지지대에 의한 2차 유동(원형 점선)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 지지대에 의해 발생하는 2차 유동은 터빈 성능을 저하시키는 요인으로 작용하여 지지대에서의 성능저하 요인을 개선시키기 위한 설계가 요구된다.

### 3.2.2 블레이드 지지대의 영향성 분석

2차 기초설계 형상의 블레이드 지지대는 단순한 사각형을 갖는 형상을 가지며, 이에 대한 재설계를 통해 터빈의 성능을 개선시키는 것이 요구된다. 단순한 사각형 형상에 의해 발생하는 2차 유동을 억제시키기 위하여 익형을 고려하여 재설계하였다. 2차 기초설계 한 터빈에 대해 NACA0020 익형을 갖는 지지대를 적용하여 Fig. 12와 같이 수직축 터빈을 재설계하였다. 터빈의 상·하단에 2단의 지지대를 지지하

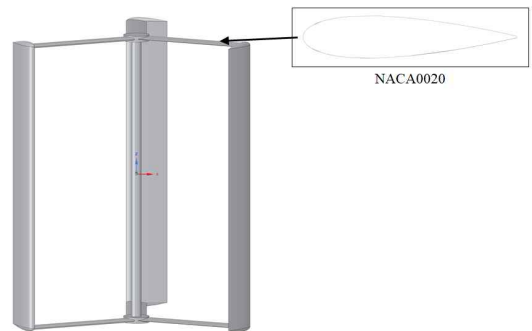


Fig. 12. Vertical axis turbine with NACA0020 airfoil type spokes

도록 하였으며, 지지대의 코드길이는 블레이드 길이의 절반이 되도록 설계하였다.

Fig. 13은 익형 지지대를 갖는 수직축 터빈의 성능 특성을 보여준다. TSR의 변화에 따른 출력 및 출력 계수를 보여주며, 최대 출력은 1.5-1.75 사이의 TSR에서 나타나는 것으로 예측하였다. TSR이 1.75에서의 출력값은 약 119 kW로 예측되어, 효율은 약 24.7%로 계산된다. 이러한 계산 결과는 사각형 지지대를 갖는 터빈과 비교하여 약 40%의 수력학적 성능이 향상된 것으로 계산되며, 블레이드 지지대의 형상이 조류발전터빈의 성능에 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

수직축 터빈 블레이드 지지대의 형상에 따른 유동 특성을 분석하기 위하여 Fig. 14에 블레이드 지지대 위치에서의 Z축에 대한 회전성분 분포를 비교하였다. 사각형 지지대의 후류에서 매우 복잡한 와류가 발생하는 것을 Fig. 14(a)에서 확인할 수 있으며, 이것은 지지대를 NACA0020 익형으로 변경하면서 크게 개선되었다. 이러한 블레이드 지지대 후류에서 발생하는 와류발생의 억제가 수직축 터빈의 수력학적 성능 향상에 기여한다는 것을 알 수 있었다.

수직축 터빈의 블레이드를 상·하단의 지지대로 연결하여 고정된 터빈의 구조적인 안정성을 보완하기 위하여 중간부에 연결 지지대를 추가하여 이에 대한 성능특성을 검토하였다. Fig. 15는 블레이드 지지대를 터빈 중간 위치( $Z=0$  m)에 추가로 연결한 형상을 보여준다.

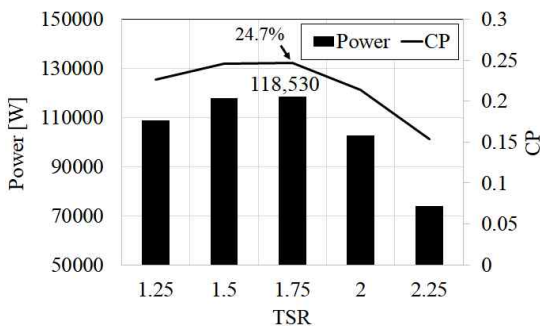


Fig. 13. Performance characteristics of the vertical axis turbine with NACA0020 airfoil type spokes

블레이드 연결 지지대를 터빈 중간부에 추가한 조류발전터빈의 TSR에 따른 성능특성 변화를 Fig. 16에 나타내었다. 블레이드 지지대를 3단으로 설치한 수직축 터빈의 최대 출력 성능은 1.75의 TSR 부근에서 나타나는 것을 확인하였으며, 1.75의 TSR에서의 출력 및 출력계수는 각각 128 kW 및 27%의 값을 보였다. 3단의 연결 지지대를 갖는 터빈은 상·하단에만 지지대를 연결한 터빈과 비교하여 약 7% 증가하는 출력 성능을 보였다.

터빈의 중간부에 블레이드 연결 지지대의 설치 유무에 따른 터빈 내부의 유동 특성 비교를 Fig. 17에

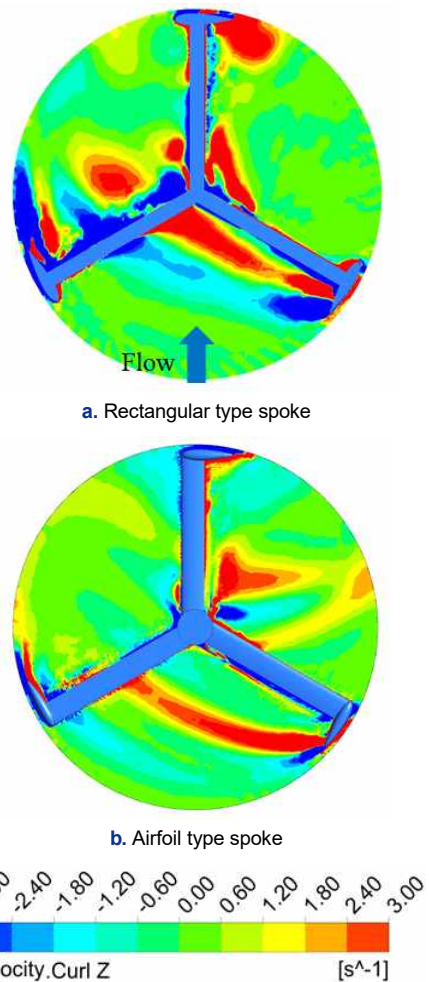


Fig. 14. Rotating factor contours about the Z-axis on the  $Z=2.9$  m plane for the vertical axis turbines with rectangular and airfoil type spokes

나타내었다. 터빈 내부에서 발생하는 저속도(0.2 m/s) 영역을 나타내었으며, Fig. 17(a)에서 보는 것과 같이 후류에 위치한 블레이드의 전연 부근에 블레이드 스펠을 따라 길게 저속도 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 전연 부근에 발생한 저속도 영역은 터빈 중간에 추가적으로 설치한 블레이드 연결 지지대의 의해 상단과 하단으로 분리되어 나타나고 영역이 상대적으로 줄어들었다. 이러한 터빈 내부에 발생하는 저속도 영역은 터빈의 수력학적 성능을 감소시키며, 터빈 중간부에 구조적 안정성 향상을 위해 추가적으로 설치한 블레이드 지지대에 의해 저속도 영역이 줄어든다는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 100 kW급 조류발전 수직축 터빈을

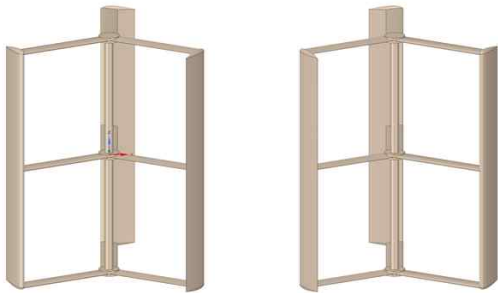


Fig. 15. Geometry of the vertical axis turbine with blades installed by three NACA0020 airfoil type stage spokes

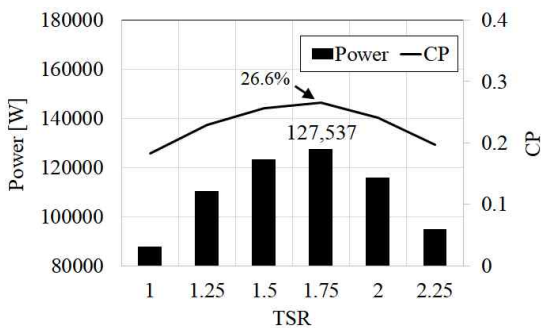
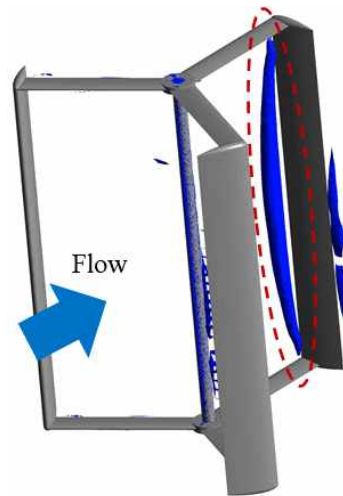
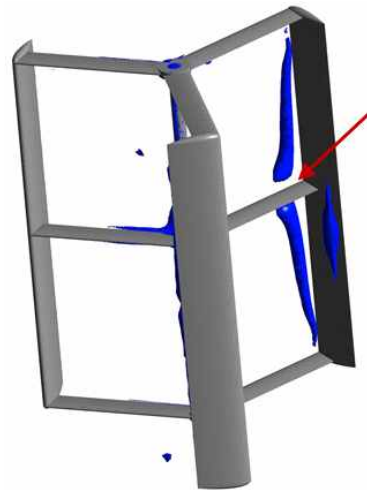


Fig. 16. Performance characteristics of the vertical axis turbine with blades installed by three NACA0020 airfoil type stage spokes

설계 및 유동특성을 분석하기 위해 3차원 RANS 해석을 수행하였다. 50 kW급 수직축 터빈을 두 개 설치하여 총 100 kW의 출력을 낼 수 있도록 고려하였다. 유동해석을 수행하기 위하여 계산영역의 회전영역 및 정지영역에 대해 각각 격자의존성시험을 수행하여 해석을 위한 최적의 격자크기를 결정하였다. 또한, 수직축 터빈이 회전에 따른 상류의 유동이 하류에 영향을 미치는 특성을 고려하여 비정상해석을 수행하였다. 이러한 유동해석을 바탕으로 수직축 터빈



a. Blades supported by two spokes



b. Blades supported by three spokes

Fig. 17. Low velocity region (0.2 m/s) in the vertical axis turbine



의 설계를 수행하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 조류발전 설치를 위한 수심에 대한 제한을 고려하지 않고 1차 기초설계를 수행하였으며, 터빈의 직경과 높이는 3.42 m 및 8.76 m로 설계하였다. 1차 설계한 조류발전터빈의 출력과 효율은 108.2 kW와 22.3%로 예측되었다.

2) 조류발전터빈을 설치하기 위한 적지선정 평가를 통한 수심을 고려하여 터빈의 높이를 6 m로 제한시켜 2차 설계를 수행하였으며, 이러한 수심에 대한 설계조건을 바탕으로 5 m로 터빈의 직경을 결정하였다. 조류발전 터빈의 2차 설계 형상에 대한 유동해석 결과는 71 kW의 출력을 예측하였다.

3) 2차 설계한 조류발전터빈은 블레이드 지지대의 영향으로 2차 유동이 발생하고 이는 터빈의 성능을 저하시키는 요인으로 작용하는 것을 확인하였다. 이를 개선시키기 위하여 블레이드 지지대를 NACA0020 익형으로 설계하였고, 익형을 갖는 지지대의 설치를 바탕으로 약 119 kW의 출력 및 24.7%의 효율을 갖는 터빈을 설계할 수 있었다.

4) 조류발전터빈의 구조적인 안정성을 향상시키기 위하여 터빈 중간부에 블레이드 연결 지지대를 추가로 설치하였으며, 이를 바탕으로 터빈 내부에 발생하는 와류 발생을 개선시켜 약 127 kW의 출력을 갖고 효율 26.6%를 보이는 조류발전용 수직축 터빈을 설계할 수 있었다.

본 연구에서는 3차원 RANS해석에 기반하여 100 kW급 조류발전용 수직축 터빈의 설계 및 성능특성을 분석하였다. 본 연구에서는 NACA0020 익형을 사용하고 터빈 반경에 대해 2.75배로 사이 거리를 정해 약 26.6%의 효율값을 갖는 터빈을 설계하였지만 익형의 형상 변화가 터빈 성능에 미치는 영향성 분석은 추후 연구에서 수행될 예정이다. 또한 본 연구에서 설계한 수직축 터빈에 대해 추가적으로 제작 및 성능시험을 수행하여 해석 결과와 비교를 통한 타당성을 검증할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산과학기술진흥원 청정재생에너지시스템 개발사업 ‘도서지역 적용 조류발전-ESS 연계형 융복합시스템 개발’ 과제의 지원에 의해 수행되었음을 밝힌다(No. 20190187).

## References

1. J. S. Park, C. Y. Lee, J. S. Park, H. W. Choi, D. H. Ko, and J. L. Lee, "Assessment of tidal stream energy resources using a numerical model in Southwestern Sea of Korea", *Ocean Sci. J.*, Vol. 54, No. 4, pp. 529–541, doi: <https://doi.org/10.1007/s12601-019-0038-2>.
2. Y. Li, S. M. Calisal, "Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine", *Renew Energy*, Vol. 35, No. 10, 2010, pp. 2325–2334, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.002>.
3. J. A. Clarke, G. Connor, A. D. Grant, and C. M. Johnstone, "Design and testing of a contra-rotating tidal current turbine", *J. Power and Energy*, Vol. 221, 2007, pp. 171–179, doi: <https://doi.org/10.1243/09576509JPE296>.
4. J. H. Kim, J. S. Park, and J. H. Ko, "Experimental study on interaction effect of darrieus tidal stream turbines", *Ocean and Polar Res.*, Vol. 41, No. 3, 2019, pp. 193–202, doi: <https://doi.org/10.4217/OPR.2019.41.3.193>.
5. Y. Li, S. M. Calisal, "Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: part I—power output", *Ocean Eng.*, Vol. 37, No. 7, 2010, pp. 627–637, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.01.006>.
6. S. R. Turnock, A. B. Phillips, J. Banks, and R. N. Lee, "Modelling tidal current turbine wakes using a coupled RANS-BEMT approach as a tool for analysing power capture of arrays of turbines", *Ocean Eng.*, Vol. 38, No. 11–12, 2011, pp. 1300–1307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.05.018>.
7. M. H. Mohamed, A. M. Ali, and A. A. Hafiz, "CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter", *Eng. Sci. Technol.*, Vol. 18, No. 1, 2015, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.08.002>.
8. ANSYS Inc., ANSYS CFX 19.2 tutorial, 2019.
9. B. R. Won, J. H. Ko, and J. S. Park, "Parametric study on optimum arrangement of darrieus tidal turbine", *Proc. KSNRE Conference*, 2016, pp. 130. Retrieved from [http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NO06691459&nodeId=NODE06691459&language=ko\\_KR](http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NO06691459&nodeId=NODE06691459&language=ko_KR).