

다리우스와 사보니우스를 결합한 하이브리드 타입의 조류발전 터빈 설계

허만웅* · 김동환* · 박진순*†

Design of Hybrid Turbine Combining Darrieus and Savonius for Tidal Current Energy Convertor

Man-Woong Heo*, Dong-Hwan Kim*, Jin-Soon Park*†

Key Words : Tidal current energy convertor(조류발전), Turbine design(터빈 설계), Darrieus type(다리우스), Savonius type(사보니우스), Hybrid dual turbine(하이브리드 듀얼 터빈), RANS equations(레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식)

ABSTRACT

This study aimed to design a vertical axis turbine of tidal energy convertor by solving the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equation. Precise flow analysis was carried out to design a hybrid vertical dual turbine that combines the darrieus type and savonius type. The hexa- and tetra-hedral grids were used to construct the computational domain and the grid dependency test was performed to find the optimum grid system. Hybrid vertical turbine has been shown to further improve operational stability and power performance compared to the conventional darrieus turbine.

1. 서 론

지난 수십 년 동안 지구온난화 문제, 화석연료 고갈, 그리고 환경문제로 인한 규제 강화로 재생에너지 활용에 대한 필요성이 더욱 증가되고 있다. 다양한 재생에너지 자원들 중 조류에너지는 조석현상에 의해 발생하는 조류로부터 얻을 수 있는 해양에너지로 주기적으로 창조와 낙조를 발생시켜 예측이 가능하다는 장점이 있다. 한편 우리나라는 서남해안의 장축수도, 맹골수도 및 거차수도에 약 8.3 GW 규모의 개발 가능한 조류에너지가 부존돼 있다고 평가되며¹⁾ 세계적으로도 우수한 조류발전 입지 조건을 보유하고 있다고 평가받고 있다. 이에 따라 조류발전에너지를 활용하기 위한 적극적이고 체계적인 연구개발이 이루어져야 할 것이다.

조류발전은 크게 수평축 터빈과 수직축 터빈으로 구분할 수 있다. 수직축 터빈의 로터는 회전 시 입사 유속 대비 블레이드 방위각에 따라 양력비의 편차가 크기 때문에 토크의 편차가 커 수평축 터빈보다 평균 출력과 효율이 낮은 특성을 나

타낸다. 그럼에도 불구하고 수직축 터빈 시스템은 수평축 터빈 시스템에 비해 다음과 같은 장점들을 가지고 있어 이에 대한 성능 분석 및 출력 강화에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다: (1) 수평축 터빈은 조류의 입사각도와 로터의 정면이 같은 방향일 경우 높은 출력을 기대할 수 있어 yaw제어가 필요하지만 수직축 터빈은 조류 방향과 무관하게 로터의 회전과 발전이 가능하기 때문에 yaw제어가 필요하지 않다; (2) 블레이드 설계/제작 시 단일 단면의 압출형태를 채택하므로 블레이드 제작이 수월하다; (3) 시스템을 구성함에 있어 로터 축의 길이에 구애받는 정도가 수평축 터빈 시스템보다 작다. 예를 들면, 터빈 시스템이 수중에 놓일 경우 로터 축을 수면 위로 끌어올려 발전기를 수면 위에 배치시킬 수 있다; (4) 로터의 병렬/직렬 배치에 이점을 보여 복수개의 터빈 구성에 유리하고, 특히 직렬 배치의 경우 단일 로터 축과 단일 발전기를 사용할 수 있다; (5) 발전기가 수면위에 배치될 경우 플랫폼이 요구되는데, 플랫폼에서 이루어지는 유지/보수가 수평축 터빈보다 경제적인 측면에서 장기적으로 유리하다.

* 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 (Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

† 교신저자, E-mail : jpark@kiost.ac.kr

수직축 터빈의 출력 강화를 위해 고려되는 사항은 다음과 같다: (a) 블레이드 형상 최적화를 통한 최적 단면/제원 결정; (b) 로터 작동 중 블레이드 피치 제어; (c) 배치/부가물에 의한 간접적인 영향. 앞서 언급된 사항들 중 (a)은 터빈의 환경/작동 조건에 의한 영향에 가변적이고 (b)는 주속비가 낮을 때 활용도가 높다.

수직축 터빈은 날개를 구성함에 있어 양력 사용의 여부에 따라 수직축 터빈은 다리우스 타입과 사보니우스 타입이 있다. 다리우스 터빈은 양력 사용을 위해 2D 익형이 스펀방향으로 압출된 형태의 날개를 사용하며 날개가 반경방향으로 회전축과 터빈반경 만큼 떨어져있는 반면 사보니우스 터빈은 항력을 주로 사용하므로 회전축으로부터 터빈반경까지 반경방향으로 빈 공간 없이 채워진 형태의 날개를 사용한다. H-type 다리우스 터빈은 수직축 터빈에서 높은 출력 성능을 나타내지만 자가 구동(self-starting) 성능이 좋지 않다는 특징이 있다. 사보니우스 터빈은 출력 성능이 낮지만 자가 구동 성능이 우수하다는 장점을 가진다. 2000년도 중반에 들어서며 수직축 터빈의 장점이 재부각됨에 따라 소-중형 크기의 터빈을 에너지가 요구되는 현장에 직접적인 공급원 차원으로 사용하려는 노력이 잇따르고 있어 수직축 터빈의 성능 향상에 대한 연구도 더불어 재개되고 있다.²⁾

수직축 터빈의 출력 예측 및 향상을 위해 다양한 선행 연구들이 수행되었다. Nishizawa 와 Ushiyama³⁾은 헬릭스(Helix) 터빈의 출력과 자가 구동 성능을 블레이드의 비틀림 각, 유속 그리고 코드 길이를 변경하며 실험적으로 측정하였다. Vergaerde 등⁴⁾은 병렬 배치된 2개의 H-type 다리우스(Darrieus)터빈의 성능을 실험적으로 측정하 바 있고 병렬 배치 시 측정되는 출력이 개별적인 터빈의 출력보다 약 13~16% 높음을 확인하였다. Peng 등⁵⁾은 병렬 배치된 2개의 다리우스 터빈의 블레이드 단면, Solidity, 피치 각, 회전 방향, 터빈 사이 간격을 조정하며 2차원 유동해석을 수행하였다. He 등⁶⁾은 LES(Large Eddy Simulation)을 이용하여 H-type 다리우스 터빈의 출력을 예측하 바 있고, Guillaud 등⁷⁾ 또한 LES를 사용해 Solidity에 의한 터빈의 출력 변화를 예측하 바 있다.

이상과 같이 수직축 단일터빈에 대한 성능특성을 분석하기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있지만, 수직축 듀얼터빈의 출력 및 자가 구동 성능을 체계적으로 분석한 연구는 미비하다. 듀얼터빈의 경우에는 병렬로 위치한 터빈들 사이의 상호작용이 성능특성에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 체계적인 분석이 요구된다. 조류발전 터빈을 상용화 단계까지 발전시킨 시스템은 전 세계적으로도 미비한 실정으로, 우리나라는 전 세계적으로도 우수한 조류에너지를 많이 보유하고 있기 때문에 이를 상용화 단계까지 추진하여 개발하는 것이 필요하고 이를 위해서는 조류발전에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 또한 육지 전력계통에 연계되어 있지 않은 도서지역의 경우 조류에너지를 이용할 경우 친환경에

너지를 도서지역에 공급할 수 있어, 도서지역에 적용가능한 조류발전시스템 개발도 필요하다.

본 연구에서는 도서지역에 적용 가능한 조류발전 터빈을 설계하기 위하여 H-type 다리우스 터빈과 사보니우스 터빈을 결합한 하이브리드 터빈을 설계하고 이에 대한 유동특성을 체계적으로 분석하기 위해 3차원 비정상 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 해석을 수행하였다. 수직축 듀얼 터빈의 출력 성능을 향상시키기 위하여 유속강화장치를 제안하였으며, 하이브리드 터빈의 형상 변화가 듀얼터빈의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치해석방법

2.1 유동해석방법

본 연구에서는 100kW급 조류발전시스템을 설계하기 위하여, 50kW급 수직축 터빈 2기를 고려하고 조류방향에 대해 좌우로 배치한 듀얼 터빈을 설계하였다. 이러한 듀얼 수직축 터빈에 대한 설계 및 수력학적 성능 특성을 분석하기 위하여 유동장을 비압축성 3차원 비정상상태로 가정하고 상용 CFD코드인 ANSYS CFX-19.2⁸⁾를 사용하여 비정상 RANS해석을 수행하였다. 본 연구 대상인 조류발전용 수직축 듀얼 터빈의 유동해석을 위한 계산영역을 Fig. 1에 도식화하였다. 단일 터빈의 직경(D)과 높이(H)는 각각 3 m 및 6 m이고, 계산영역의 높이는 대상해역의 수심을 고려하여 9 m로 고려하였다. 그리고 계산영역의 폭과 길이는 터빈 직경에 대해 각각 20배와 30배로 설정하였으며, 듀얼 수직축 터빈은 입구부로부터 10D의 위치에서 바닥면과 2 m의 거리를 두도록 하였다.

유동해석을 위해 작동유체는 물로 가정하였고, 속도 및 압력을 계산영역의 입구와 출구에 각각 경계조건으로 부여하였다. 계산영역의 바닥면은 점착(non-slip)조건을 부여하고, 상부면과 좌우의 양 옆면은 각각 미끄럼(slip)조건과 opening 조건을 적용하였다. 수직축터빈은 로터의 회전으로 발생하는 후류가 로터 성능에 비정상상태로 영향을 미치기 때문에 수

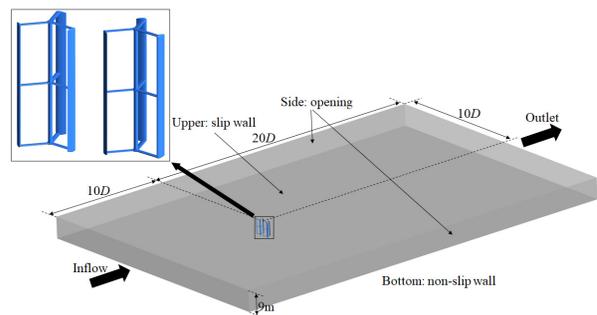


Fig. 1 Computational domain of a dual vertical axis turbine

직축 터빈의 유동특성을 분석하기 위하여 비정상해석을 수행하였다. 수치해석은 로터가 총 10회전할 때까지 수행되었으며, 반복해석(iteration) 당 로터가 3°씩 회전할 수 있도록 설정하였다. 로터의 회전영역과 고정영역의 경계면에는 transient rotor stator interface 방법으로 처리하였고, 로터 블레이드와 지지대(spoke) 및 축(shaft) 등에는 점착조건으로 경계조건을 부여하였다. 지배방정식의 난류항을 계산하기 위하여 shear stress transport(SST) $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다. SST 난류모델은 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델의 장점을 결합한 것으로, 벽 근처 영역에서는 $k-\omega$ 모델을 사용하고 이외의 영역에서는 $k-\epsilon$ 모델을 사용한다.

비정상 계산을 수행하기 위해서 Intel Xeon E5-2690 CPU를 사용하였고 단일 계산 당 약 80시간이 소요되었다.

2.2 격자의존성시험

유동해석 결과에 대한 격자의 영향성을 배제시키기 위한 격자의존성시험을 수행하여 Fig. 2에 결과를 나타내었다. Fig. 1에 나타난 H-type 다리우스형 수직축 듀얼터빈에 대해 격자수의 변화에 따른 출력효율의 변화를 비교하여 Fig. 2에 그래프로 나타내었으며, 계산영역에 대한 격자수는 약 5백만~23백만 개의 범위에서 평가하였다. 격자의존성시험의 결과를 바탕으로 격자수가 약 15백만 개 이상에서 결과 값이 약 2% 미만의 변화를 보이는 것을 확인하여 이를 계산영역에 대한 최적의 격자 크기로 정하였다. 격자의존성시험을 통해 결정된 최적 격자 크기를 바탕으로 하이브리드 듀얼터빈과 유속강화장치를 적용한 계산영역에 대한 격자계를 Fig. 3에 나타내었다. 주유동의 정지영역 및 듀얼터빈의 회전영역은 각각 육면체 및 사면체 격자계로 구성하였고, 벽면의 첫 번째 격자점에서의 $y+$ 값은 10이상을 유지시켜 high-Re SST모델이 적용되도록 하였다.

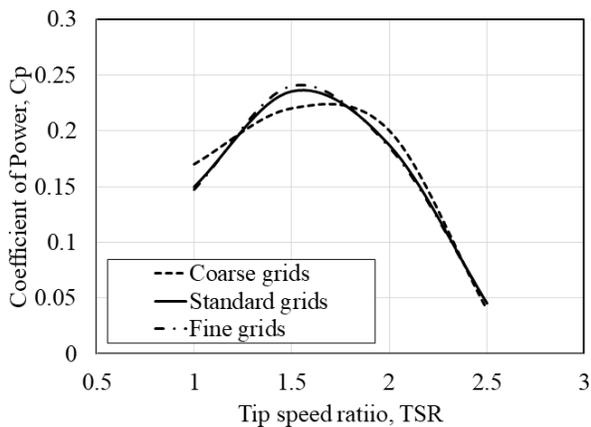


Fig. 2 Grid dependency test result

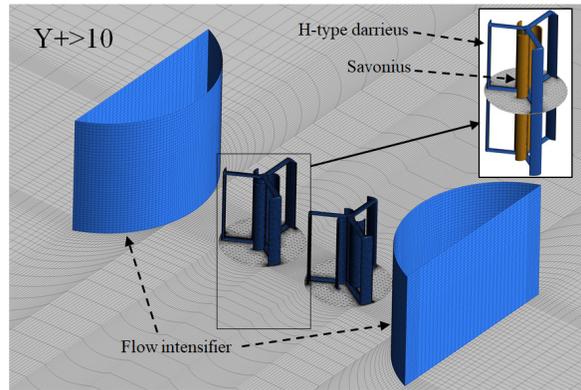


Fig. 3 Structure of the grid system

3. 결과 및 고찰

3.1 수직축 듀얼터빈의 기초설계

본 연구에서는 100 kW급 조류발전시스템을 개발하기 위하여 수직축 듀얼터빈을 설계하였다. 우선 터빈을 설계하기 위해서는 시스템을 설치하기 위한 해역의 입지조건을 분석해야 한다. 적지 후보지들을 분석하여 2.6 m/s의 유속 조건을 터빈 설계를 위한 정격유속으로 결정하였다.

조류발전용 듀얼터빈에 대한 성능함수로서 출력 및 출력효율을 고려하였고, 출력효율은 다음의 식으로 정의한다.

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

여기서, ρ , A , 그리고 V 는 각각 작동유체의 밀도, 터빈의 투영면적, 그리고 작동유체의 유입속도를 의미하며, 식(1)을 터빈 직경(D)에 대한 식으로 변환하면 아래의 식으로 정리할 수 있다.

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

여기서 H 는 수직축 터빈의 높이를 의미하며, 본 연구에서는 수심 9 m에 대해 수면 및 바닥으로부터 각각 1 m와 2 m의 간격을 두고 터빈을 설치하는 것으로 고려하여 H 는 6 m로 결정하였다.

기초설계 단계에서는 식 (2)로부터 듀얼터빈의 출력 및 효율 값을 각각 100 kW 및 30%로 가정하였으며, 이로부터 D 는 약 3 m로 계산되었다. NACA00xx계열의 익형을 갖는 수직축 H-type 다리우스 터빈은 약 25~35%의 출력 효율을 가지며⁹⁾, 본 연구에서는 NACA0025 익형을 사용하여 기초설계 단계에

Table 1 Design specifications of vertical axis dual turbine for tidal current convertor

Rated flow rate, m/s	2.6
Turbine height(H), m	6
Turbine diameter(D), m	3
Hydrofoil	NACA0025
Solidity	0.16
Type	H-type darrius

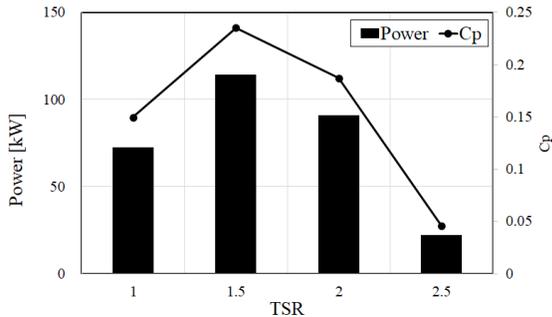


Fig. 4 Performance data of the preliminary design of the vertical axis dual turbine

서 단일 터빈의 출력 효율을 30%로 가정하여 기초설계를 수행하였다. 기초설계한 형상에 대한 상세정보는 Table 1에 정리하였다. 기초설계한 터빈은 듀얼로 배치시켜 발전하도록 하였고, 두 터빈 사이의 거리는 1.375D로 간격을 유지시켰다. 듀얼 터빈의 회전방향은 서로 반대 방향으로 회전시키는 것이 같은 방향으로 회전하는 듀얼 터빈과 비교하여 출력성능이 증가한다는 것을 Li와 Calisal¹⁰⁾ 및 Heo 등¹¹⁾의 연구를 통해 확인하였고, 이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 듀얼 터빈을 서로 반대방향으로 회전시키도록 하였다.

기초설계를 바탕으로 도출한 수직축 듀얼 터빈에 대해 3차원 비정상 RANS 해석을 수행하여 듀얼 터빈의 출력 및 효율 값을 주속비(tip speed ratio, TSR)의 변화에 따라 Fig. 4에 나타내었다. 터빈의 회전에 따라 출력 값이 변하기 때문에 터빈의 마지막 10바퀴 회전에서 평균한 출력 값을 성능함수로서 고려하였다. 듀얼 터빈의 최대 출력 및 효율 값은 1.5의 TSR에서 약 114 kW 및 23.5%를 예측하였다. 날개 수와 익형의 차이는 있으나 NACA0018의 익형을 사용한 H-type 다리우스 듀얼터빈의 출력 효율은 약 20%로 Vergaerde 등³⁾의 연구에서 확인되었고, 본 연구에서는 기초설계한 듀얼터빈의 효율이 23.5%으로 계산되었으므로 설계 결과가 타당한 것으로 사료된다.

3.2 유속강화장치 적용의 영향성 분석

수직축 듀얼 터빈의 기초설계 형상에 대한 3차원 유동해석을 수행하여 최대 출력 값은 약 114 kW로 예측되는 것을

확인하였다. 그러나 조류발전 시스템 손실을 고려하면 목표 출력 값을 달성하기 위해서는 터빈의 출력을 향상시키는 것이 요구된다. 터빈의 출력을 향상시키기 위해서는 터빈 형상에 대한 최적설계를 통한 방법도 있지만, 본 연구에서는 터빈의 기초형상에 대해 동일 유속 경계조건(2.6 m/s)에서 터빈이 받는 유속만 증가시킬 수 있도록 유속강화장치 개념을 제안하고자 한다. 제안하는 유속강화장치를 Fig. 3에 도식화하였으며, 이러한 유속강화장치를 통해 동일한 유속 환경조건에서 벤츄리 효과를 바탕으로 터빈이 실제로 받는 조류속을 증가시킬 수 있다. Fig. 5에 유속강화장치 사이(A-A')에서의 높이 방향으로 평균한 유속 분포를 나타내었다. 조류속이 2.6 m/s의 조건에서 유속강화장치 사이에서 벤츄리 효과에 의한 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 듀얼 터빈을 설치할 위치에서는 유속이 상대적으로 약 30% 증가하는 효과가 있지만 실제 터빈을 설치하면 유속은 다소 감소할 것으로 사료된다.

Fig. 6에 유속강화장치의 적용에 따른 출력 성능의 변화를 그래프로 비교하여 나타내었다. 유속강화장치를 적용함으로써 전반적으로 출력 성능이 증가하는 것을 확인하였고, 최대 출력 값이 약 160 kW로 예측되어 상대적으로 약 40.3%의 출력상승 효과를 보였다. 또한 최대 출력 값이 나타나는 주속비는 1.5에서 1.75로 변경되어 터빈의 회전수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

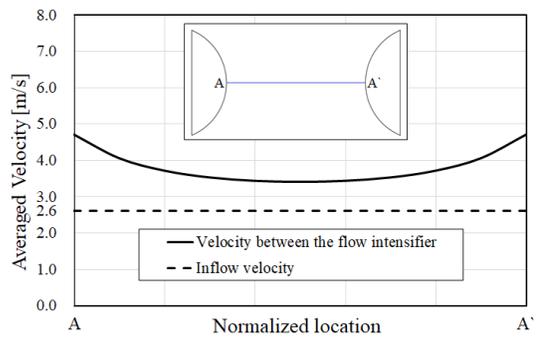


Fig. 5 Velocity distribution averaged in vertically between the flow intensifier(A-A')

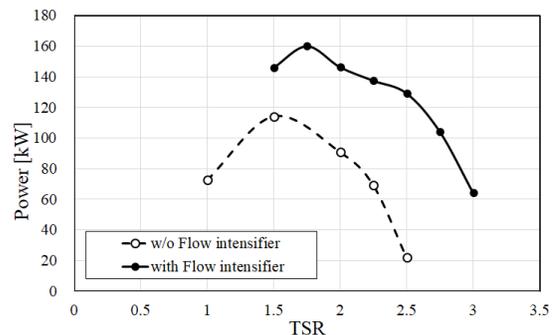


Fig. 6 Power of vertical axis dual turbines with and w/o the flow intensifier

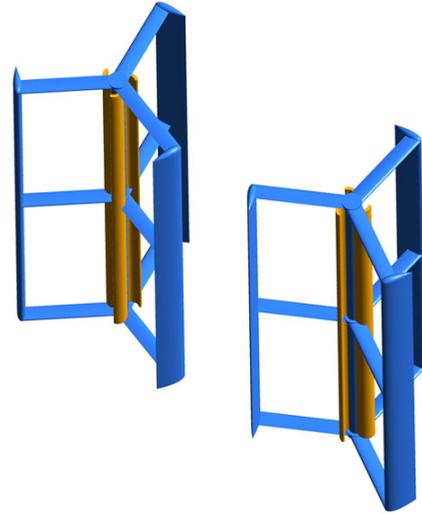
3.3 사보니우스 터빈의 영향성 분석

수직축 터빈들 중에서 H-type 다리우스 터빈의 경우에는 일반적으로 출력 성능은 높지만 자가 구동(self-starting) 성능이 좋지 않다는 특징¹²⁾이 있다. Fig. 7에 기초설계한 조류 터빈의 회전에 따른 토크 값의 변화를 나타내었다. 터빈 회전에 따라 토크 값이 거의 0 Nm에 가까운 구간들이 존재하며, 해당 구간에서는 터빈의 회전력이 상쇄되기 때문에 출력이 거의 발생하지 않게 된다. 또한 터빈의 회전에 따라 토크 값이 최대 약 50,000 Nm에서 최소 0 Nm 이하로 급격히 변경되기 때문에 발전기에 급격한 부하의 변동을 야기한다.

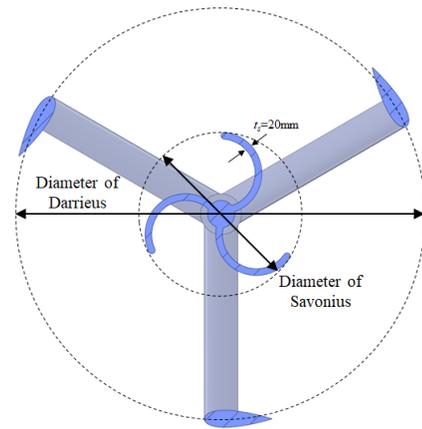
사보니우스 터빈의 경우에는 출력 효율이 상대적으로 작지만 자가 구동 성능이 우수하다는 장점¹²⁾이 있다. 이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 다리우스 터빈의 상대적으로 높은 출력 성능 특성과 사보니우스 터빈의 상대적으로 높은 자가 구동 성능 특성을 결합하고자 다리우스 터빈과 사보니우스 터빈을 결합한 하이브리드 터빈의 성능 특성을 분석하였다. 하이브리드 터빈의 기본형상을 Fig. 8에 도식화하였다. 기본형상의 사보니우스 터빈은 다리우스 터빈과 같이 3엽의 날개를 갖고 다리우스 터빈의 직경보다 작게 설계하였다. Table 1에 나타난 것과 같이 다리우스 터빈에는 NACA0025 익형으로 설계하고 사보니우스 터빈은 일반적인 반원형으로 설계하였다.

조류발전 수직축 하이브리드 듀얼 터빈의 출력 성능을 다리우스 듀얼 터빈의 출력과 비교하여 Fig. 9에 그래프로 나타내었다. 다리우스 터빈과 사보니우스 터빈을 결합한 하이브리드 터빈 기본형상의 출력 값은 다리우스 터빈과 비교하여 전반적으로 감소한 경향을 보였고 최대 출력 값은 TSR=1.75에서 약 9.3% 감소하였다. 또한 하이브리드 터빈은 주속비

1.5~2.5의 구간에서 출력의 변화가 작은 경향을 보였다. 이러한 경향은 조류발전시스템의 발전기가 안정적으로 작동할 수 있는 요인으로 작용하기 때문에 매우 중요하다. 주속비



(a) 3D geometry



(b) schematic of hybrid turbine

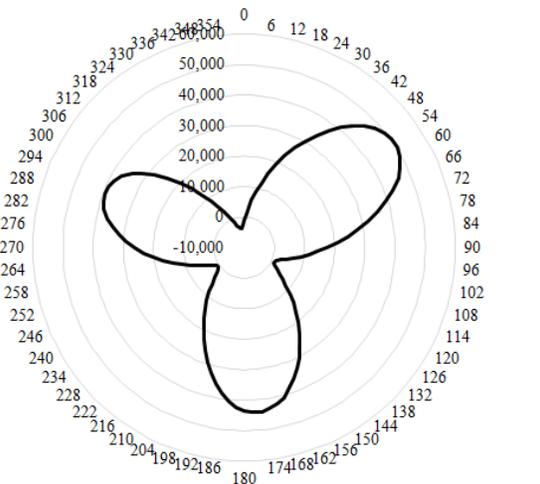


Fig. 7 Instantaneous torque with respect to azimuth angle during the last revolution for the preliminary design of the vertical axis turbine at TSR of 2.0 (@rated speed=2.6 m/s)

Fig. 8 Hybrid turbine combining darrieus(blue color) and savonius(orange color) turbines

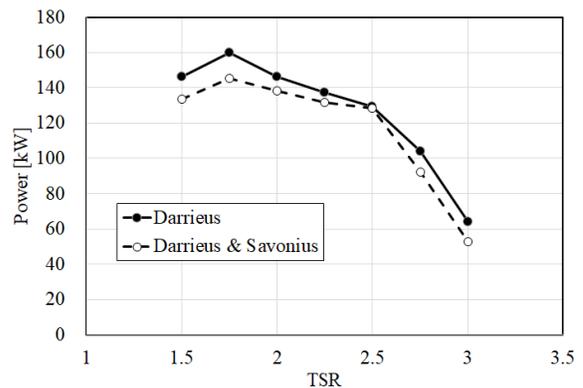


Fig. 9 Power performance comparison of darrieus turbine and hybrid turbine

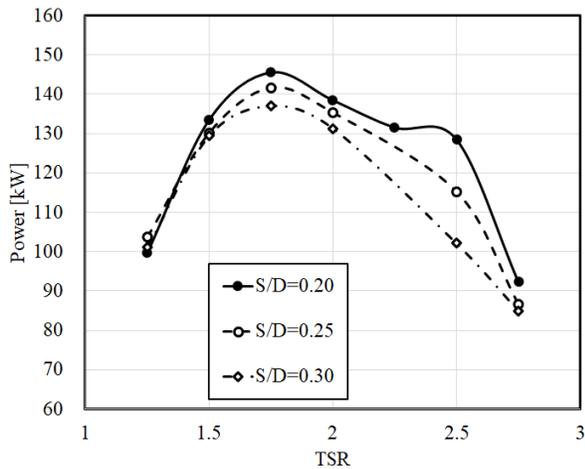


Fig. 10 Power of vertical axis hybrid dual turbines with different the S/D

2.5에서는 다리우스 듀얼 터빈의 출력과 하이브리드 듀얼 터빈의 출력이 거의 같은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

하이브리드 터빈 내의 사보니우스 터빈의 직경(S) 변화가 출력 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 10에 S 의 변화에 따른 터빈 출력 값의 변화를 비교하였다. 사보니우스 터빈의 직경과 다리우스 직경의 비(S/D)가 20%의 경우가 전반적으로 높은 출력 성능을 나타냈으며, S/D 의 증가에 따라 주속비에 따른 출력 성능 곡선이 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 그리고 S/D 가 25% 및 30%의 경우에는 $TSR=2.5$ 의 구간에서 출력 값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 하이브리드 터빈의 사보니우스 1엽 및 다리우스 터빈의 회전에 따른 토크의 변화를 보여준다. S/D 가 20% 및 30%의 터빈에 대해 비교하였으며, S/D 가 증가함에 따라 사보니우스 1의 회전에 따른 토크의 변동 폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 사보니우스 1이 음(-)의 토크 값을 나타내는 경

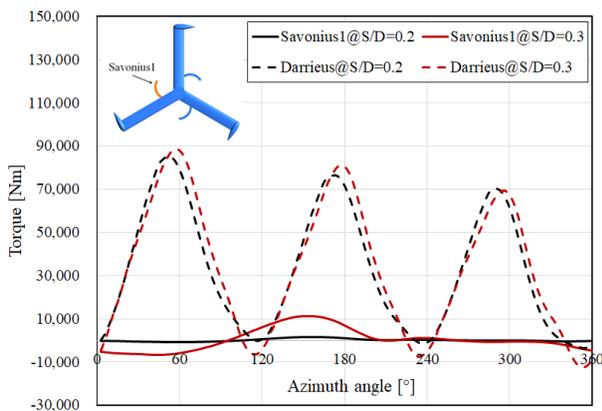


Fig. 11 Instantaneous torque for Savonius 1 and Darrieus turbine with respect to azimuth angle during the last revolution@ $TSR=1,75$

우에는 $S/D=0.3$ 에서의 최대 작은 값이 $S/D=0.2$ 와 비교하여 약 610% 더 작은 값을 나타내었다. 또한 다리우스 터빈의 경우에도 S/D 가 증가함에 따라 회전에 따른 토크의 변동 폭이 상대적으로 커지는 것을 확인하였고, 음의 토크를 갖는 영역에서의 값이 더 작은 값을 나타내었다. 이러한 영향으로 Fig. 10에서와 같이 $TSR>1.5$ 구간에서 S/D 의 증가에 따라 출력이 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 유속강화장치 사이 거리의 영향성 분석

조류발전 수직축 듀얼 터빈의 성능에 대한 유속강화장치의 영향을 분석하기 위하여 유속강화장치 사이 거리의 변화에 따른 하이브리드 듀얼 터빈의 출력 성능 변화를 Fig. 12에 그래프로 비교하였다. 유속강화장치 사이 거리를 수직축 터빈의 직경에 대하여 4.7, 5.0, 그리고 5.3배의 거리만큼 변화시켰으며, 4.7D~5.3D의 범위에서는 유속강화장치 사이 거리가 가장 먼 5.3D의 경우에 가장 높은 출력 성능을 보였다. 유속강화장치 사이 거리가 4.7D의 경우에는 5.0D의 경우와 비교하여 $TSR<2.0$ 구간에서 상대적으로 작은 출력 성능을 보였지만 TSR 이 2.25 이상에서는 더 큰 출력 값을 나타내었다.

유속강화장치 사이 거리의 변화에 따른 터빈 주변에서의 속도장 비교를 Fig. 13에 나타내었다. 터빈 입구부에서는 유속이 줄어드는 것을 확인할 수 있는데 유속강화장치의 거리가 터빈과 가까우면 봉쇄효과(blockage effect)에 의해 유속 강화 효과가 감소되고 이로 인해 듀얼 터빈의 출력이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그리고 유속강화장치 사이 거리는 자켓 구조물의 크기와 연계되어 계속 증가할 수 없으므로, 유속강화장치는 수직축 터빈의 직경에 대해 5.3D의 거리를 유지시키는 것으로 설계하였다.

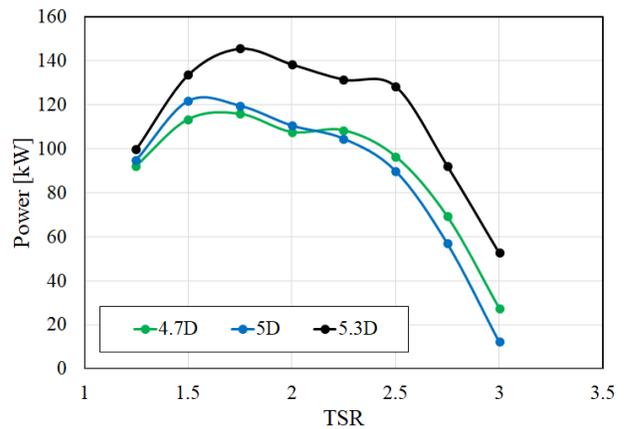
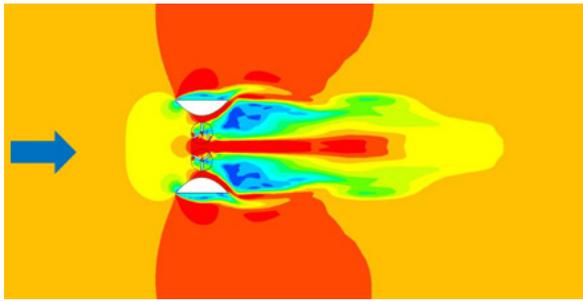
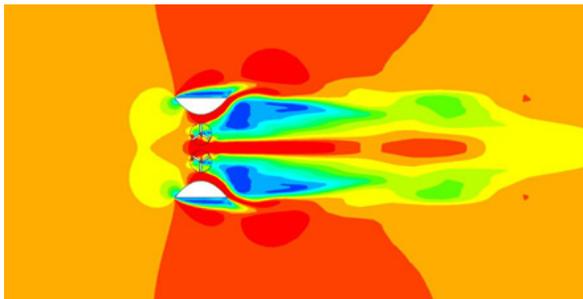


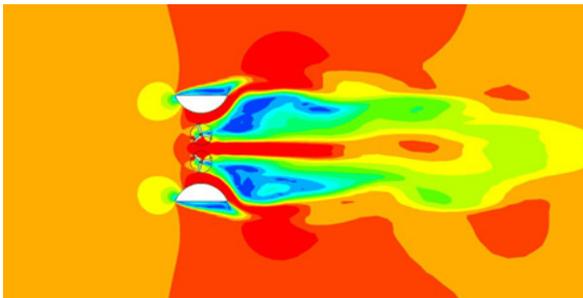
Fig. 12 Power of vertical axis hybrid dual turbine with different distances between the flow intensifiers



(a) 4.7D



(b) 5.0D



(c) 5.3D

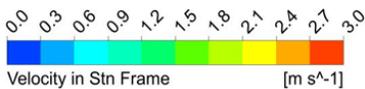


Fig. 13 Velocity contour around vertical axis hybrid dual turbine with different distances between the flow intensifiers at TSR=1.75

3.5 2단 하이브리드 듀얼 터빈 설계

수직축 터빈은 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 터빈 회전에 따라 터빈의 토크 값이 급격히 변하며 극부적으로는 음의 값을 나타내기도 한다. 이러한 구간에 의해 터빈의 회전에 따른 출력 값의 변동이 크며, 발전기의 부하를 증가시키는 요인으로 작용한다. 이러한 문제를 해결하고자 Fig. 14에 도식화한 것과 같이 수직축 터빈을 상부와 하부로 구분한 2단 하이브리드 듀얼 터빈을 제안하였다. 상부와 하부 터빈은 60°의 위상 차이를 주어 구분하였으며, 이러한 2단 하이브리드 듀얼

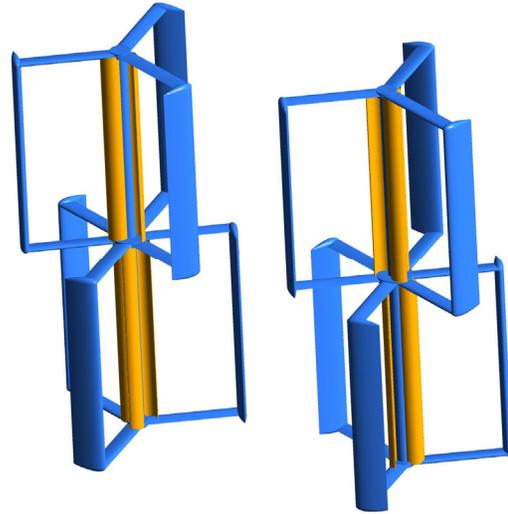


Fig. 14 Hybrid turbine combining darrieus(blue color) and savonius(orange color) turbines

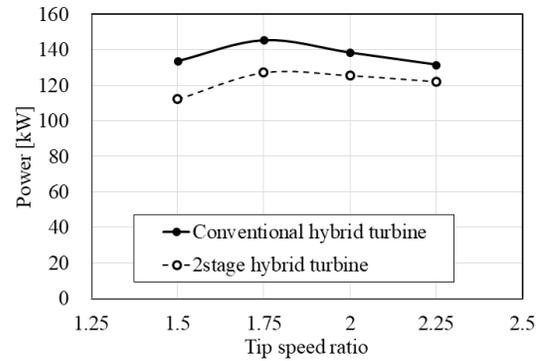


Fig. 15 Comparison of power between the conventional hybrid dual turbine and the 2stage hybrid dual turbine

터빈의 출력 성능을 Fig. 15에 나타내었다. 기존의 하이브리드 듀얼 터빈의 출력과 비교하여 전반적으로 출력이 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 최대 출력을 나타내는 TSR=1.75에서 약 12.4%의 출력 감소를 보였고 TSR=2.0에서는 약 9.4%만큼 출력이 감소하였다. 그러나 주 발전이 이루어지는 TSR<2.0의 구간에서는 목표 출력 값인 100 kW를 상회하는 결과를 보여주었다.

시간의 변화에 따라 회전하는 하이브리드 듀얼 터빈의 출력 값 변화를 Fig. 16에 나타내었다. 기존의 하이브리드 듀얼 터빈의 경우에는 토크 값의 변동 폭이 매우 크게 나타나며, 음의 값을 갖는 매우 낮은 토크 값의 구간이 있는 것도 확인된다. 그러나 2단 하이브리드 듀얼 터빈의 경우에는 전반적으로 토크 값이 약 20,000 Nm 부근에서 작은 변동 폭으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 변동 폭이 작은 터빈 설계는 조류발전 터빈 지지구조물 및 발전기 시스템의 설계에도 영향을 주는 요소로서 매우 중요하게 평가된다. 최종적으로 2단 하이브리드 듀얼 터빈을 본 연구의 최종설계 형상으로서 도출하였다.

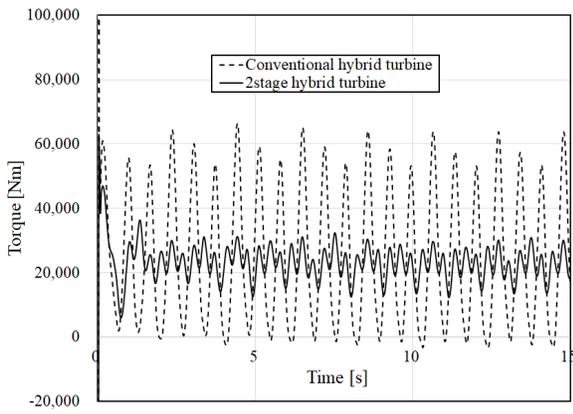
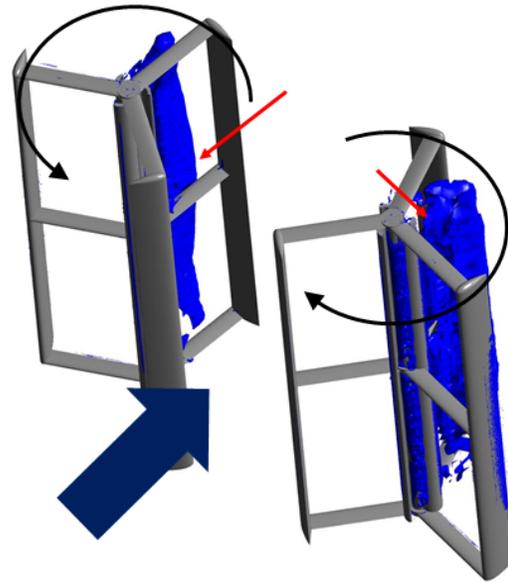
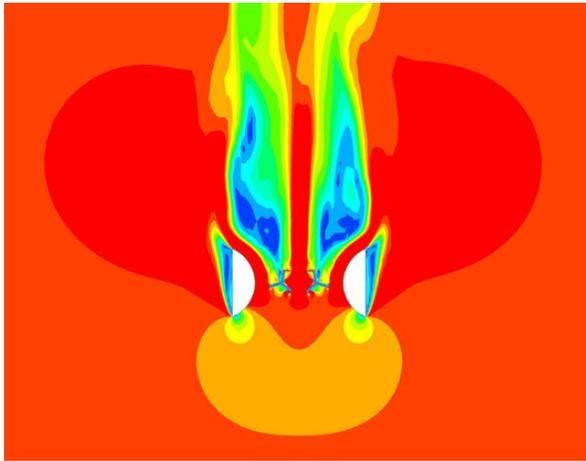


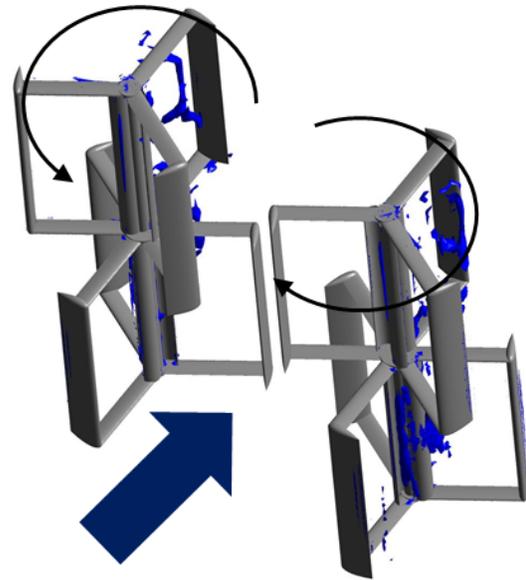
Fig. 16 Time history of torque of conventional and 2stage hybrid dual turbines at TSR=1,75



(a) Conventional hybrid dual turbine

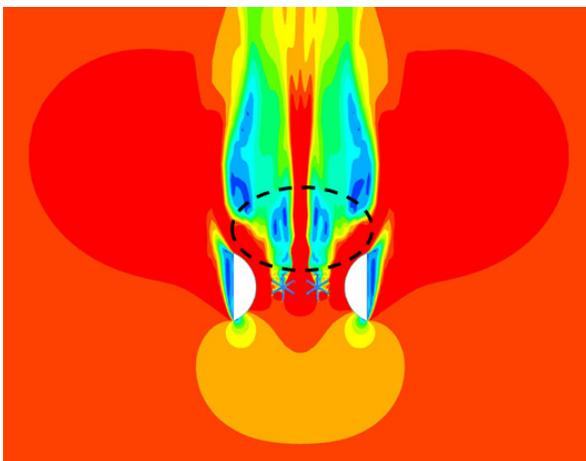


(a) Conventional hybrid dual turbine



(b) 2stage hybrid dual turbine

Fig. 18 Low velocity region(0,2 m/s) in conventional and 2stage hybrid dual turbines at TSR=1,75



(b) 2stage hybrid dual turbine

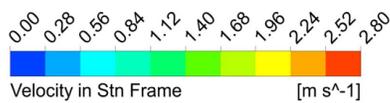


Fig. 17 Velocity contour of conventional and 2stage hybrid dual turbines at TSR=1,75

Fig. 17는 기존의 하이브리드 듀얼 터빈이 가장 낮은 음의 토크 값을 갖는 위치에서 터빈 주위의 속도 분포를 2단 하이브리드 듀얼 터빈의 것과 비교하여 보여준다. 기존의 하이브리드 터빈은 후류에 매우 복잡한 유동을 보이며 낮은 속도 영역이 넓게 분포하였다. 이것은 터빈이 음의 토크 값을 갖는 위치에서 터빈의 후류에 낮은 속도분포가 넓게 발생하는 것이며, 2단 하이브리드 터빈의 적용으로 인해 개선된 것을 Fig. 17(b)에서 확인할 수 있다. Fig. 15에 나타낸 것과 같이 기존 하이브리드 듀얼 터빈의 출력은 2단 하이브리드 듀얼

터빈의 출력보다 높은 경향을 보이지만, 터빈의 회전에 따른 토크의 변화를 고려하면 기존의 하이브리드 듀얼 터빈은 매우 작은 음의 토크 값을 나타내는 구간이 발생하지만 2단 하이브리드 듀얼 터빈에서는 크게 개선되어 전체적으로 토크의 변동 폭이 작은 것을 확인할 수 있었다.

2단 하이브리드 듀얼 터빈의 적용에 따른 터빈 내부의 유동 특성을 비교하기 위하여 Fig. 18에 터빈 내부에서 발생하는 저속도(0.2 m/s) 영역을 비교하여 나타내었다. Fig. 18(a)에서 보는 것과 같이 터빈의 회전에 따라 발생하는 와류가 터빈 내부에 길이 방향으로 길게 분포하는 것을 확인하였다. 이러한 터빈 내부에 발생하는 저속도 영역은 터빈의 성능을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있으며, 터빈을 2단으로 설계함에 따라 저속도 영역이 상당히 줄어든다는 것을 Fig. 18(b)를 통해 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 100 kW급 조류발전 수직축 터빈을 설계하기 위하여 3차원 RANS 해석을 수행하였다. 50 kW급 수직축 터빈을 병렬로 위치시킨 듀얼 터빈을 제안하고 이에 대한 유동특성을 분석하였다. 유동해석을 수행하기 위하여 계산 영역에 대한 격자의존성시험을 수행하여 해석을 위한 최적의 격자크기를 결정하였다. 수직축 터빈은 회전에 따른 상류의 유동이 하류에 영향을 미치는 특성을 고려하여 비정상해석을 수행하였으며, 이러한 해석조건을 고려하여 100 kW급 조류발전용 수직축 듀얼 터빈을 설계하였다.

1) 설치해역에 대한 환경조건을 고려하여 50 kW급 수직축 터빈을 병렬로 배치시킨 듀얼 터빈을 설계하였다. 환경 조건을 고려하여 H-type 다리우스 터빈의 높이 및 직경은 각각 6 m 및 3 m로 결정하였다.

2) 터빈 출력 성능을 향상시키기 위하여 유속강화장치를 제안하였고 이를 적용하여 출력 값이 약 40.3% 향상되었다. 또한 유속강화장치의 적용으로 터빈의 회전수를 증가시킬 수 있었다.

3) 다리우스 터빈과 사보니우스 터빈을 결합한 하이브리드 터빈을 설계하였으며, 다리우스 터빈과 비교하여 하이브리드 터빈은 최대 출력 값이 다소 감소하였지만 주속비의 변화에 따른 출력 값의 변화는 감소하였다. 또한 사보니우스 직경 변화의 영향성을 분석하였으며, 다리우스 터빈 직경 대비 20% 직경을 갖는 사보니우스 터빈을 결합한 하이브리드 터빈이 가장 높은 출력 성능을 보였다.

4) 유속강화장치 사이 거리의 변화가 하이브리드 듀얼 터빈의 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 유속강화장치 사이 거리를 줄이면 봉쇄효과에 의해 유속강화 효과가 상쇄되는 것을 확인할 수 있었다.

5) 기존의 하이브리드 듀얼 터빈은 터빈의 회전에 따라 토

크 값의 변동 폭이 너무 크기 때문에 발전기 부하 변동이 또한 크다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 2단 하이브리드 듀얼 터빈을 제안하였으며, 결과적으로 터빈 회전에 따른 토크 변동을 확연히 줄일 수 있었다.

본 연구 결과를 바탕으로 추후에는 실해역의 환경조건을 고려한 설계근거를 바탕으로 유속강화장치와 터빈 사이 거리의 영향성 분석 등에 대한 체계적인 연구를 수행할 예정이다. 또한 본 연구의 결과는 수직축 조류발전시스템의 하이브리드 듀얼 터빈의 최적설계를 수행하는데 참고자료로서 활용이 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(도서지역 적용 조류발전-ESS 연계형 융복합 시스템 개발, No. 20190187).

References

- (1) 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*, Vol. 54, pp. 529-541.
- (2) Peng, H. Y., Liu, H. J., and Yang, J. H., 2021, "A review on the wake aerodynamics of H-rotor vertical axis wind turbines," *Energy*, Vol. 232, 121003
- (3) Nishizawa, Y. and Ushiyama, I., 2003, "A Study on Helix-Darrieus Type Wind Turbine," *The Proceedings of the JSME Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 59-60.
- (4) Vergaerde, A., Troyer, T. D., Standaert, L., Kluczevska-Bordier, J., Pitance, D., Immas, A., Silvert, F., and Runacres, M. C., 2020, "Experimental Validation of the Power Enhancement of a Pair of Vertical-axis Wind Turbines," *Renewable Energy*, Vol. 146, pp. 181-187.
- (5) Peng, H. Y., Han, Z. D., Liu, H. J., Lin, K., and Lam H. F., 2020, "Assessment and Optimization of the Power Performance of Twin Vertical Axis Wind Turbines via Numerical Simulations," *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 43-54.
- (6) He, J., Jin, X., Xie, S., Cao, L., Wang, Y., Lin, Y., and Wang, N., 2020, "CFD Modelling of Varying Complexity for Aerodynamic Analysis of H-vertical Axis Wind Turbines," *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 2658-2670.
- (7) Guillaud, N., Balarac, G., Goncalves, E., and Zanette, J., 2020, "Large Eddy Simulations on Vertical Axis Hydrokinetic Turbines - Power Coefficient Analysis for Various Solidities," *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 473-486.
- (8) ANSYS Inc., ANSYS CFX 19.2 tutorial, 2019.

- (9) Mohamed, M. H., Ali, A. M., and Hafiz, A. A., 2015, "CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-13.
- (10) Li, Y. and Calisal, S. M., 2010, "Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: part I- power output", *Ocean Engineering*, Vol. 37, No. 7, pp. 627-637.
- (11) Heo, M. W., Kim, D. H., and Park, J. S., 2020, "Investigation on Performance Characteristics of Dual Vertical Axis Turbine of 100kW Class Tidal Energy Converter," *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 1, pp. 151-159.
- (12) Dewan, A., Gautam, A., and Goyal, R., 2021, "Savonius wind turbines: A review of recent advances in design and performance enhancements," *Materials Today: Proceedings*, In Press.