

사보니우스형 조류발전 터빈의 설계 및 회류수조 실험을 통한 성능평가

조철희* · 이준호* · 노유호* · 고광오** · 이강희*

*인하대학교 조선해양공학과

**현대건설(주) 기술품질개발원

Design and Performance Test of Savonius Tidal Current Turbine with CWC

Chul-Hee Jo*, Jun-Ho Lee*, Yu-Ho Rho*, Kwang-Oh Ko** and Kang-Hee Lee*

*Inha University, Incheon, Korea

**Hyundai Engineering and Construction, Yongin, Korea

KEY WORDS: TCP (Tidal current power) 조류발전, Renewable energy 신재생 에너지, VAT (Vertical axis turbine) 수직축 터빈, CWC (Circulating water channel) 회류수조, Savonius turbine 사보니우스 터빈, CFD (Computational fluid dynamics) 전산유체역학

ABSTRACT: Due to global warming, the need to secure alternative resources has become more important nationally. Because of the very strong current on the west coast, with a tidal range of up to 10 m, there are many suitable sites for the application of TCP (tidal current power) in Korea. In the southwest region, a strong current is created in the narrow channels between the numerous islands. A rotor is an essential component that can convert tidal current energy into rotational energy to generate electricity. The design optimization of a rotor is very important to maximize the power production. The performance of a rotor can be determined using various parameters, including the number of blades, shape, sectional size, diameter, etc. There are many offshore jetties and piers with high current velocities. Thus, a VAT (vertical axis turbine) system, which can generate power regardless of flow direction changes, could be effectively applied to cylindrical structures. A VAT system could give an advantage to a caisson-type breakwater because it allows water to circulate well. This paper introduces a multi-layer vertical axis tidal current power system. A Savonius turbine was designed, and a performance analysis was carried out using CFD. A physical model was also demonstrated in CWC, and the results are compared with CFD.

1. 서 론

조류발전 시스템은 조류의 운동에너지를 회전에너지로 변환시켜 전기를 얻는 방식이다. 터빈은 유향과 회전축 방향에 따라 크게 HAT(Horizontal axis turbine)과 VAT(Vertical axis turbine)으로 구분된다. 수평축 터빈은 효율이 높은 반면 유향변화에 대처할 수 있는 방안이 요구되고, 수직축 터빈은 효율은 상대적으로 낮으나 전 유향에 대해 일정한 효율을 가지며 안정적인 기동이 가능하다.

수직축 터빈은 기동 원리에 따라 크게 양력식 터빈과 항력식 터빈으로 구분되며, 다리우스 방식이 대표적인 양력식 터빈으로 알려져 있다. 이를 응용하여 효율을 향상시킨 헬리컬 터빈이 제안되었고(Gorlov, 1995), 헬리컬 터빈의 이론적인 최대효율이 연구되었다(Gorban, 2001). 국내에서는 대표적인 항력식 터빈인 사보니우스 터빈을 이용한 발전장치의 최대출력 특성이 연구되었고(명관범, 2004), 양력식 터빈의 비정상 해석 연구와 실험이 수행된 바 있다(정현주 외, 2009). 또한 조류발전 뿐만 아니라 사보니우스 터빈을 적용한 파력발전 시스템과(조영진 외, 2008) 풍력발전 시스템(노태현 외, 2007) 등 다양한 분야에 응용 연구가 수행 되었다.

국내의 서해 및 남해안은 큰 조수간만 차와 지형적인 영향으로 고 유속 분포지역이 매우 많으며 방파제, 부두, 항만 등 많은 연안 구조물이 존재한다. 조류발전 시스템을 연안 해양구조물에 적용할 경우 송전 및 모니터링이 효과적으로 수행될 수 있는 장점이 있고 생산전력을 등대, 조명 등 부분적으로 소비할 수 있어 친환경적인 연안개발이 가능하다(조철희 외, 2011). 또한 기존의 구조물에 발전시스템을 적용하는 방식으로써 막대한 비용이 소비되는 해양 시공비를 절약 할 수 있다. 본 연구에서는 전 유향에 대해 일정한 효율을 나타내어 신뢰성이 높고 가동시간이 긴 수직축 터빈을 고려하였다. 잔교식 부두 및 항만과 같은 연안 해양 구조물에 적용 가능한 다층 수직축 터빈을 설계하고 CFD 해석을 통해 설계방법의 타당성을 검토 하였다. 또한 회류수조를 이용한 터빈 성능실험 결과를 수치해석 결과와 비교하였으며, 다층 터빈을 구성하여 시스템의 효율성을 검증하였다.

2. 터빈설계 및 CFD 해석

2.1 터빈설계

조류발전용 수직축터빈 설계를 위해 선행연구 자료를 검토하

였다. 양력을 활용하지 않는 항력식 터빈을 기초설계 모델로 선정하였고 블레이드 형태는 원호로 결정하였다. 최적의 블레이드 수 및 설계변수를 검토한 논문(김동진 외, 2006)을 참고하였다. 위 논문에서는 다양한 형상의 터빈을 직접 제작하여 최대 RPM 효율을 나타내는 터빈을 검토하였으며, 블레이드 수는 10매, 블레이드 폭을 나타내는 형상비(a/R)는 0.73인 터빈이 최종적으로 제안되었다. 각 파라미터의 정의는 Fig. 1과 같다.

CATIA V5R19를 이용하여 모델링을 수행하였으며, 직경 3m, 높이 3m이다. 블레이드 수가 3, 4, 8, 9, 10매인 터빈을 Fig. 2와 같이 형상화 하였다. 블레이드 수가 상대적으로 적은 터빈과 많은 터빈의 성능 특성을 비교하기 위해 다양한 해석 케이스를 설정 하였으며, 블레이드 수가 홀수 또는 짝수에 따라 터빈 위상이 변화 하므로, 이에 대한 변화를 관찰하기 위해 총 5 종류의 터빈을 형상화 하였다.

2.2 격자 생성

상용코드인 ANSYS CFX V.11을 이용하여 터빈을 대상으로

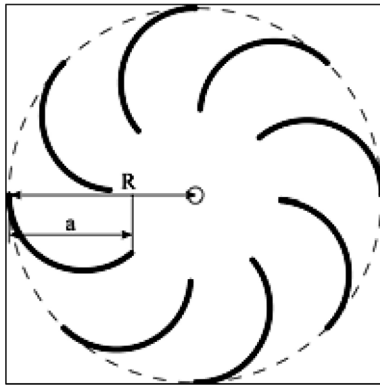


Fig. 1 Definition of design parameters

유동해석을 수행하였다. 계산격자의 생성은 적용 난류모델의 특성에 따라 원활한 수렴 및 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 $y+$, 경계층 격자 밀집도, 격자 형태, 종횡비(Aspect ratio) 등을 신중히 고려해야 한다. 단일 CPU에 의한 계산환경에서는 하드웨어 성능 한계를 고려하여 격자 공간해상도를 확보하여야 한다.

격자의 질을 높이기 위해 3차원 격자를 한층만 생성하여 일정 두께를 가진 준 2차원 해석을 수행하였다. 얇은 블레이드의 면에 작용하는 유체력으로 전체 터빈의 토크를 계산할 수 있다. 효율적인 격자생성을 위해 회전영역과 정적영역의 격자를 따로 생성하고, 유동해석의 전처리 과정에서 통합하였다. 회전영역에서는 블레이드에서 발생하는 토크의 정확한 예측을 위해 Fig. 3과 같이 블레이드 주변에 조밀한 Prism layer를 구성하였고, 최대 $y+$ 값을 2 이하로 유지하였다. 나머지 영역은 tetra 격자계로 구성하였으며 Table 1에 격자정보를 나타냈다.

2.3 경계조건

해석영역을 회전 도메인과 정적 도메인으로 나누어 해석하였으며 전체 유동장은 비압축성 3차원 정상상태로 가정하였다. 회전체인 터빈에 상대속도를 부여하기 위해, 터빈 주위에 실린더

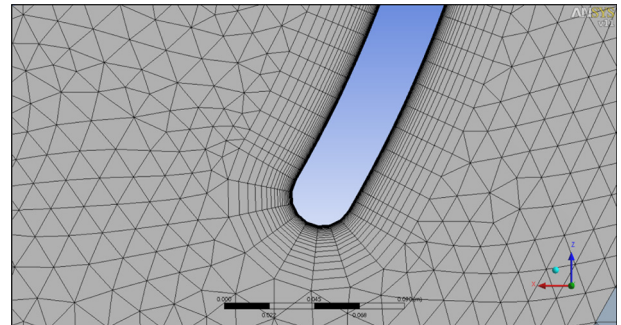


Fig. 3 Grid system near the wall

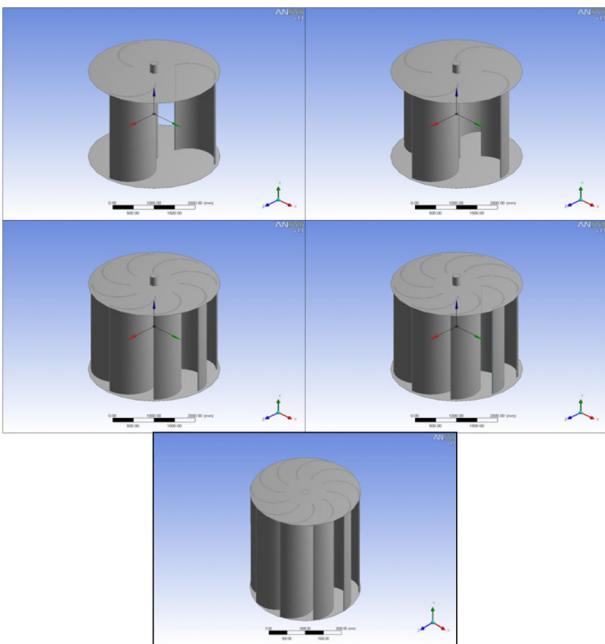


Fig. 2 3D modeling

Table 1 Mesh statistics

Mesh statistics	
Total number of nodes	361116
Total number of prisms	91005
Total number of hexahedra	132885
Total number of elements	223890

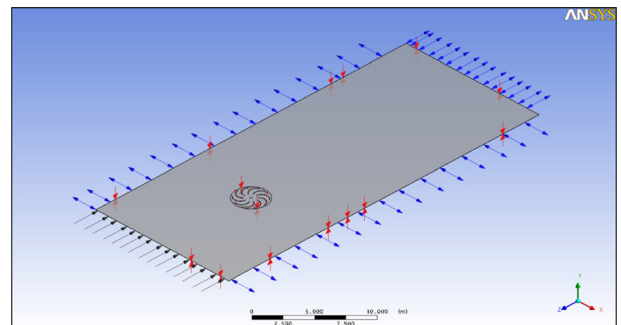


Fig. 4 Computational domain

Table 2 Boundary condition and analysis information

Working fluid	Water (isothermal, 25°C)
Rotating domain	Angular velocity (1.2 rad/s) Rotation axis (global Y)
Stationary domain	Stationary
Inlet	Normal speed (3 m/s)
Opening	Opening
Outlet	Opening
Interface area	Frozen rotor
Turbine	Wall (no slip)
Turbulence model	SST

형태의 회전 도메인을 생성하고, 나머지 영역에 정적 도메인을 생성하였다.

터빈 중심에서 입구까지의 거리는 10m, 출구까지의 거리는 25m, 양 측면과의 이격 거리는 각각 7.5m로 설정하였다. 계산 영역을 Fig. 4에 나타냈고 회전 도메인의 지름은 3.2m, 정적 도메인의 크기는 35m×15m×0.05m이다.

경계조건 및 해석정보를 Table 2에 나타냈다. 회전영역과 정적영역이 접하는 면은 GGI(General grid interface) 방법에 의해 인터페이스 되었다. 입구는 수직 유입 유속 조건으로 설정하였고 출구는 기준압력(대기압)에 대해 0기압으로, 실린더 옆면은 유체가 자유롭게 출입할 수 있는 조건을 부여하였다.

주속비에 따른 터빈의 성능을 고찰하기 위해 회전속도를 변화시키며 CFD 해석을 수행하였고 주속비 0.3부터 0.7까지 0.1단위로 정적 해석을 진행하였다.

2.4 해석결과

터빈은 유체의 가용출력을 회전력으로 변환하는 장치이므로 에너지 변환효율을 의미하는 출력계수에 의해 성능을 평가할 수 있다. 출력계수는 식 (1)과 같이 표현된다. 주속비는 터빈으로 유입되는 유속과 블레이드 팁의 선속도 비로써 터빈의 회전속도를 알 수 있는 무차원 값이며 식 (2)와 같이 표현된다. 유속, 터빈의 직경, 회전속도 등 많은 변수들에 의해 터빈의 출력 특성은 달라지나 출력특성을 주속비에 대해 표현하면 다양한 터빈들의 성능을 일관되게 비교할 수 있다. 따라서 터빈의 성능 평가 시 주속비를 이용한 해석이 널리 사용 되고 있다.

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_\infty} \tag{2}$$

- C_p : power coefficient
- T : torque
- ω : angular velocity
- ρ : fluid density
- A : projected area of turbine
- U_∞ : upstream velocity
- λ : tip speed ratio

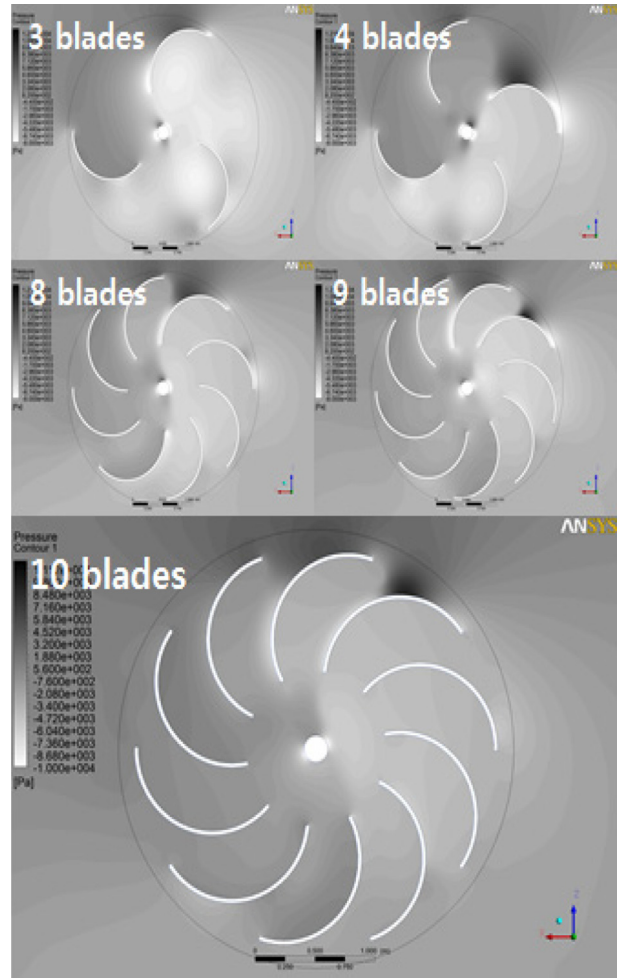


Fig. 5 Pressure distribution

- R : radius of turbine

블레이드 매수에 따른 터빈의 압력분포를 Fig. 5에 나타냈다. 블레이드 수가 상대적으로 적은 3, 4매인 터빈은 유동이 블레이드에 항력을 더해주지 못하고 유출되는 현상이 관찰되었으며, 유동박리에 의한 압력 강하와 역회전 방향으로 큰 항력이 발생되어 터빈 회전에 유리한 압력분포가 형성되지 않았다. 총 5개의 케이스 중 10블레이드 터빈에서 효율적인 압력차가 발생하였다. 많은 수의 블레이드가 유동이 유출되는 것을 방지하여 터빈 내부로 유동이 유입되게 하였고, 특히 유향의 반대방향에 위치한 블레이드에 순방향의 항력을 더해주는 현상이 관찰되었다.

터빈의 속도벡터를 Fig. 6에 나타냈다. 압력분포에서 유추하였듯이 3, 4블레이드 터빈의 유동이 블레이드 사이로 유출되고 있다. 블레이드 수가 10매인 터빈에서는 블레이드 사이로 유동이 효율적으로 유입되어 반대편 블레이드의 토크 증가에 기여하고 있으며, 아크형 항력식 터빈의 장점을 보여주고 있다. 그러나 가장 큰 토크를 발생시킬 수 있는 1번 블레이드의 유동이 9번, 10번 블레이드에 의해 원활하지 못함을 확인할 수 있다.

터빈의 출력은 항력에 의한 토크 뿐만 아니라 회전속도 역시 중요하다. 다양한 회전속도에 따른 토크의 변화가 터빈의 효율을

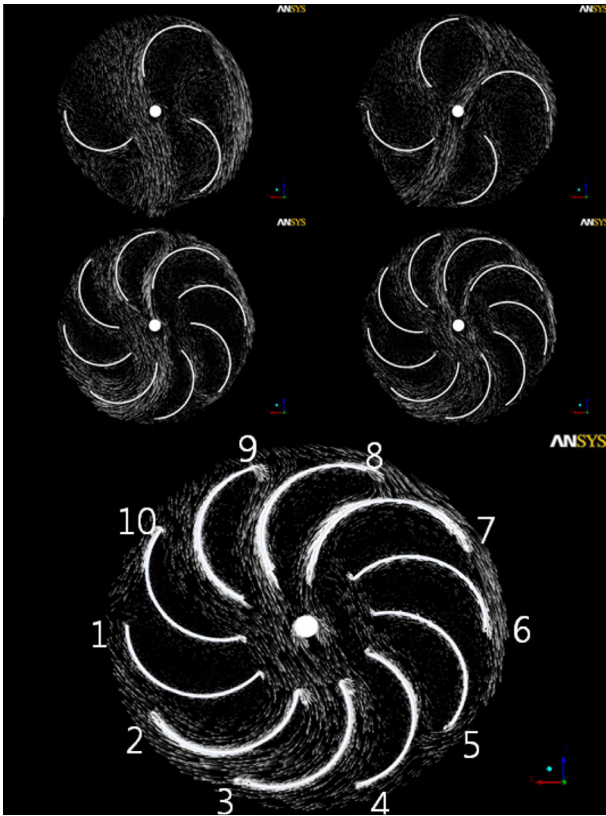


Fig. 6 Velocity vector plot

Table 3 C_p with number of blades

No. of blades	C_p				
	TSR=0.3	TSR=0.4	TSR=0.5	TSR=0.6	TSR=0.7
3	0.084	0.038	0.060	0.079	0.112
4	0.114	0.089	0.070	0.081	0.097
8	0.139	0.140	0.140	0.126	0.120
9	0.117	0.135	0.127	0.129	0.118
10	0.142	0.150	0.147	0.140	0.128

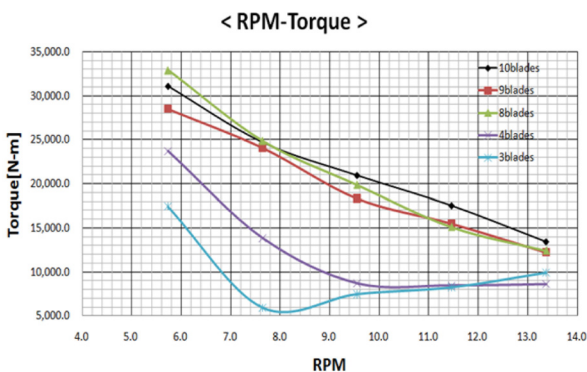


Fig. 7 Comparison of torque

결정하는 요소이므로, 각 터빈별로 블레이드 면에 작용하는 토크 데이터를 추출하여 여러 주속비에서의 출력 및 그에 따른 에너지

변환효율을 계산하였다. Table 3에 터빈의 블레이드 수와 주속비에 따른 평균 C_p 를 나타내었다.

Fig. 7은 각 터빈의 토크곡선이며, 블레이드 매수가 많은 터빈의 토크가 대체로 높다. 특히 블레이드 수가 10매인 터빈은 빠른 회전속도에서도 상대적으로 높은 토크를 유지하였다.

블레이드 수가 증가할수록 C_p 와 토크는 증가한다. 저 회전 구간에서는 블레이드 수가 8매인 터빈의 C_p 와 토크가 높은 값을 갖지만, 고 회전 구간에서는 내부 유동 간섭이 블레이드 수 증가에 따른 토크 값 증가를 상쇄시켜 주지 못하여 낮은 값을 갖는 것으로 판단된다. 블레이드 수 10매, 주속비가 0.4일 때 최고 효율(0.15)이 발생하였다.

3. 회류수조를 이용한 수리모형 실험

인하대학교가 보유한 회류수조에서 용수철을 이용한 동력계를 통해 수직축 터빈의 실험모델과 CFD 결과와의 비교 실험을 수행하였다. Table 4에 회류수조의 제원을 나타내었고, Table 5에 실험모델의 제원을 나타내었다.

Fig. 8은 다양한 RPM에서의 터빈의 토크를 측정할 실험 모습이다. 유속 1m/s의 환경에서 터빈과 동력계 실험 장치를 설치하고, 벨트의 마찰력을 조정하여 터빈 회전속도를 제어, 다양한 RPM에서의 마찰력을 측정하였다. 측정된 마찰력으로 토크를

Table 4 CWC specification

	Main Particular	Measuring section
Length(m)	6.0	2.3
Breadth(m)	1.0	1.0
Height(m)	3.0	0.9
Max. Velocity (m/s)	1.2	-

Table 5 Specification of experimental model

Diameter (m)	0.5
Height (m)	0.5
Material	Stainless steel
Inflow velocity (m/s)	1.0

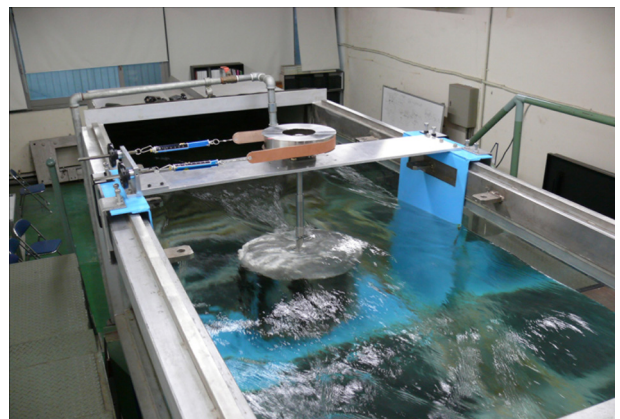


Fig. 8 Experiment arrangement

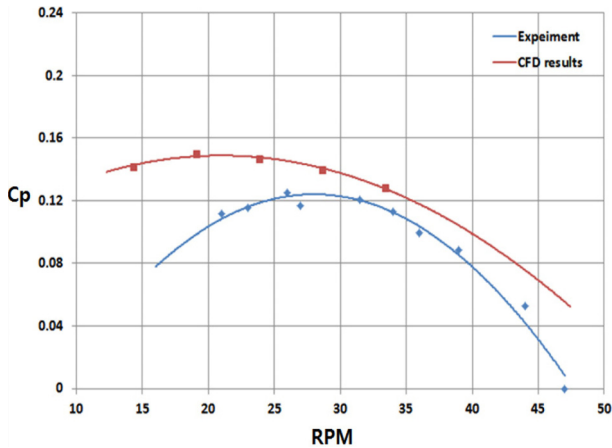


Fig. 9 Comparison between experiment and CFD

계산하고, 회전속도에 따른 터빈의 성능곡선(C_p)을 작성하였다. Fig. 9에 CFD와 실험을 통해 작성된 C_p 곡선을 비교하였다. CFD 계산 결과 최고 효율이 실험 결과보다 2.4% 더 높음을 확인하였으며, 특히 RPM이 낮은 구간에서의 오차가 크게 나타났다. 회전속도가 낮을수록 터빈이 발생 시키는 토크는 증가하게 되며 특정 구간 이하에서는 스프링 상수가 터빈의 토크에 비해 낮아 정확한 측정이 어려웠다. 이는 낮은 회전속도에서 오차가 크게 발생한 주 원인이 된 것으로 판단된다. 이를 통해 향후 동력계 설계에 보완해야 할 문제점을 파악하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 아크형 항력식 수직축 터빈의 설계와 CFD를 이용한 성능해석을 수행하고 회류수조에서 성능을 검증·비교함으로써 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 수직축 다층조류발전 시스템을 연안 해양구조물에 효과적으로 적용함으로써 친환경 연안개발이 가능하다.
- (2) 항력식 수직축 터빈의 기본설계를 수행하였으며 CFD를 통해 유동특성 및 성능이 검증되었다.
- (3) 블레이드 수가 3, 4, 8, 9, 10매인 수직축 터빈의 유동해석이 수행되었으며 10매인 터빈의 효율이 0.15로 가장 높게 측정되었다.
- (4) 회류수조에서의 실험을 수행하여 CFD 계산 결과와 비교하였으며, CFD 계산 결과의 최대 효율이 2.4% 가량 높았다.
- (5) 본 연구를 기반으로 추후 10매 이상의 블레이드를 갖는 터빈의 성능을 분석함으로써 아크형 항력식 조류발전 터빈의 최적 블레이드 수 도출이 요구된다.

후 기

본 과제(결과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지

전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

이 연구는 현대건설(주) 연구개발과제(10ECOS03)의 지원을 받아서 수행되었으며, 현대건설(주)의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김동진, 금중윤, 윤순현 (2006). “수직축 항력식 풍력터빈의 구조설계 및 실험평가(Structure Design and Experimental Appraisal of the Drag Force Type Vertical Axis Wind Turbine)”, 대한기계학회논문집, Vol 30, No 3, pp 278-286.

노태현, 장세명, 서현수 (2007). “사보니우스형 풍력 블레이드 주변의 유동장 해석(Flowfield analysis of Savonius-type wind turbine blade)”, 대한기계학회 2007 추계학술대회 논문집, pp. 13-18.

명관범 (2004). “복합 블레이드 방식 수직축 터빈을 이용한 최대전력 출력특성(The Maximum Electric Power Output Characteristics of Vertical Axis wind Turbine Adopted Combination Blade Method)”, 동의대학교 대학원, 석사학위논문.

정현주, 이신형, 송무석, 현범수 (2009). “조류발전용 수직축 터빈 주위의 비정상 유동 수치해석(A Numerical Study of Unsteady Flow Around a Vertical Axis Turbine for Tidal Current Energy Conversion)”, 한국해양환경공학회지, Vol 12, No 1, pp 9-14.

조영진, 김규한, 신범식, 최영도, 이영호 (2008). “사보니우스 터빈을 이용한 파력발전 CFD 성능해석 연구(Performance Analysis of a Savonius Turbine for Wave Energy Conversion by CFD)”, 2008 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp 557-558.

조철희, 이강희, 이준호, 홍성준, 고광오 (2011). “조류발전용 다층 수직축 터빈의 성능평가(Performance of The Multi-layer Vertical Axis Tidal Current Turbine)”, 한국해양공학회 2011 추계학술대회 논문집, pp 169-172.

Gorban, A.N., Gorlov, A.M. and Silantyev, V.M. (2001). “Limits of The Turbine Efficiency for Free Fluid Flow”, Journal of Energy Resources Technology, Vol 123, No 4, pp 311-317.

Gorlov, A.M. (1995). “The Helical Turbine: A New Idea for Low-head Hydropower”, Hydro Review, Vol 14, No 5, pp 44-50.

2012년 2월 22일 원고 접수

2012년 7월 25일 심사 완료

2012년 8월 20일 게재 확정