

# 항력식 조류발전 터빈의 최적 형상 설계 및 유동 수치해석을 통한 성능 평가

조철희\*, 고광오, 이준호, 이강희\*\*

## Design and Performance Evaluation of the Savonius Tidal Current Turbine

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

### Abstract

Due to global warming, the need to secure an alternative resource has become more important nationally. Having very strong current on the west coast with up to 10 m tidal range, there are many suitable site for the application of TCP (Tidal Current Power) in Korea. On the south west regions between many islands that create strong current in the narrow channels. The rotor is one of the essential components which can convert tidal current energy into rotational energy to generate electricity. The design optimization of rotor is very important to maximize the power production. The performance of rotor can be determined by various parameters including number of blades, shape, sectional size, diameters and etc. This paper introduces the multi-layer vertical axis tidal current power system which can be applied to offshore jetties and piers effectively. Various cases of VAT turbine were designed. Specifically, the number of blades and turbine shape are changed in several cases. Also, performance analysis was carried out by CFD.

### Key words

TCP(Tidal Current Power, 조류발전), Renewable energy(신재생 에너지), VAT(Vertical Axis Turbine, 수직축 터빈), Savonius turbine(사보니우스 터빈), CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)

(접수일 2012. 2. 22, 수정일 2012. 5. 11, 게재확정일 2012. 5. 11)

\* 인하대학교 조선해양공학과 (Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University)

■ E-mail : chjo@inha.ac.kr ■ Tel : (032)860-7342 ■ Fax : (032)864-5850

\*\* 인하대학교 조선해양공학과 (Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University)

■ E-mail : kanghee@inha.edu ■ Tel : (032)860-8849 ■ Fax : (032)864-5850

## 1. 서론

조류발전 시스템은 조류의 운동에너지를 회전에너지로 변

환시켜 전기를 얻는 방식이다. 터빈은 유향과 회전축 방향에 따라 크게 HAT(Horizontal Axis Turbine)과 VAT(Vertical Axis Turbine)으로 구분된다. 수평축 터빈은 효율이 높은 반

면 유향 변화에 대처할 수 있는 방안이 요구되고, 수직축 터빈은 일반적으로 수평축 터빈에 비해 효율이 낮은 단점이 있으나, 전 유향에 대해 일정한 효율을 나타내어 신뢰성이 높고, 구동시간이 길며, 안정적인 기동이 가능하다. 또한 수직축 터빈은 발전기 및 주요 장비를 수면 위에 위치시킬 수 있어 유지보수 측면에서 유리하다.

수직축 터빈은 기동 원리에 따라 크게 양력식 터빈과 항력식 터빈으로 구분되며, 다리우스 방식이 대표적인 양력식 터빈으로 알려져 있다. 이를 응용하여 효율을 향상시킨 헬리컬 터빈이 제안 되었고<sup>(1)</sup>, 헬리컬 터빈의 이론적인 최대효율이 연구되었다<sup>(2)</sup>. 국내에서는 대표적인 항력식 터빈인 사보니우스 터빈을 이용한 발전장치의 최대출력 특성이 연구 되었다<sup>(3)</sup>. 또한 조류발전 뿐만 아니라 사보니우스 터빈을 적용한 파력발전 시스템과<sup>(4)</sup> 풍력발전 시스템<sup>(5)</sup> 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 해양 구조물에 적용할 경우 송전 및 모니터링이 효과적으로 수행 될 수 있는 장점이 있고 생산전력을 등대, 조명 등 부분적으로 소비할 수 있어 친환경적인 연안개발이 가능하다<sup>(6)</sup>. 또한 기존의 구조물에 발전시스템을 적용하는 방식으로써 막대한 비용이 소비되는 해양시공비를 절약 할 수 있다.

본 연구에서는 잔교식 부두 및 항만과 같은 연안 해양구조물에 적용 가능한 다중 수직축 터빈을 CFD 해석을 통해 최적 형상과 블레이드 수를 갖는 수직축 항력식 터빈을 설계 및 분석하였다.

## 2. 터빈 설계

조류발전용 수직축터빈 설계를 위해 선행연구 자료를 검토 하였다. 양력을 활용하지 않는 항력식 터빈을 기초설계 모델로 선정하였고 블레이드 형태는 원호로 결정하였다. 최적의 블레이드 수 및 설계변수를 검토한 논문<sup>(7)</sup>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. CATIA V5R19를 이용하여 모델링을 수행하였으며 직경과 높이를 각각 3m로 설정하였다.

### 2.1 블레이드 수 변화

최적 블레이드 수가 10매가 됨을 검토하기 위해 블레이드 수에 변화를 주었다. 블레이드 수가 3, 4개인 그룹과 8, 9, 10매인 그룹, 홀수·짝수 그룹으로 나누어 블레이드 수에 따른 터빈의 성능을 판단하였다.

각 터빈 형상을 다음 Fig. 1에 도시하였다.

### 2.2 터빈 형상 변화

기존 터빈의 블레이드를 비틀어 Twist 블레이드 터빈을 정의하였는데 Twist 블레이드 터빈은 기존 블레이드 터빈에서

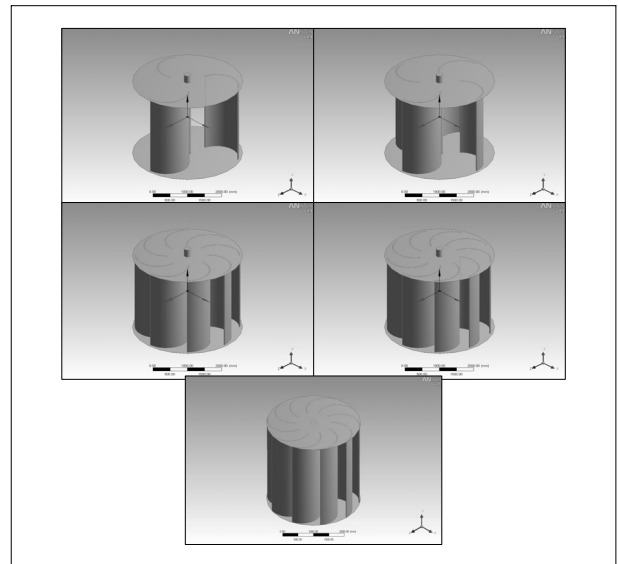


Fig. 1 3D modeling(VERTICAL blade turbine)

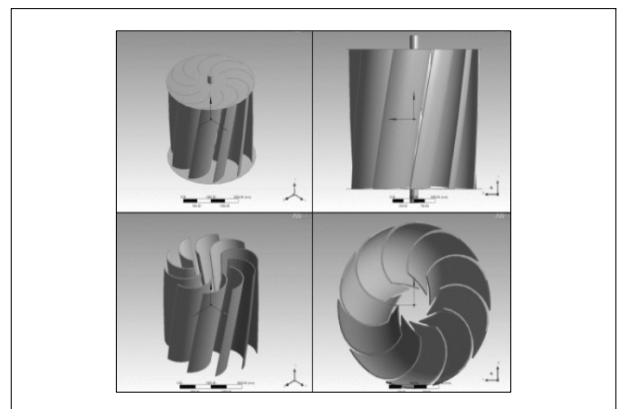


Fig. 2 3D modeling(TWIST blade turbine)

상판과 하판을 서로 비틀었을 때의 형상으로 정의하였다. 비틀림 각은 날개 사이의 각도인 36도로 설정하였다. Twist 블레이드 터빈의 형상을 다음 Fig. 2에 도시하였다.

### 3. 수치해석기법

#### 3.1 격자 생성

ANSYS 사의 상용코드 ANSYS CFX-11.0<sup>(8)</sup>을 사용하여 설계된 터빈을 대상으로 유동해석을 수행하였다. 단일 CPU 환경에 의한 하드웨어의 성능 한계를 고려하여 충분한 격자 공간해상도를 확보해야 하므로, 격자의 질을 높이기 위하여 3차원 격자를 한 층만 생성한 준 2차원 격자계를 구성하였다. 유동장 전체에 걸쳐 프리즘 격자를 사용하였으며 벽 근처 격자는 Fig. 3과 같이 6면체 정렬격자를 사용하였다. 블레이드 표면의  $y^+$ 를 2 이하로 유지하여 Wall function보다 경계층에서의 정확성이 높은 Low reynolds model이 적용되도록 하였다.

또한 효율적인 격자 생성을 위해 회전영역과 정적 영역의 격자를 따로 생성하여 유동해석의 전처리 과정인 CFX-Pre에서 통합하였다. 각 도메인의 격자계와 전체 격자 정보를 Fig 4, 5와 Table 1에 각각 나타냈다.

#### 3.2 경계조건

수직축 터빈의 유동은 시간에 따른 블레이드의 위치에 따라 변화하는 비정상 상태의 유동현상이지만, 유동패턴은 날개 수와 위상에 따라 변화하며 Fig. 6은 비정상 유동해석을 수행한 사례<sup>(9)</sup>로써 토크 값이 날개 수와 같은 주기로 반복됨을 보여준다. 비정상 유동현상을 보이는 수직축 터빈을 정상 상태로 설정하여 날개의 위상을 6도로 분할하고 각각의 정상 유동 상태에 대한 평균토크를 취해 성능을 평가한 사례<sup>(10)</sup>도 찾아볼 수 있다. 따라서 전체 유동장은 비압축성 3차원 정상 상태로 가정하였고, 해석영역을 회전 도메인과 정적 도메인으로 나누어 해석하였으며 3차원 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치 해석에 사용한 지배방정식은 유한체 적법으로 이산화 되었다. 이산화 기법으로는 2차 이상의 정

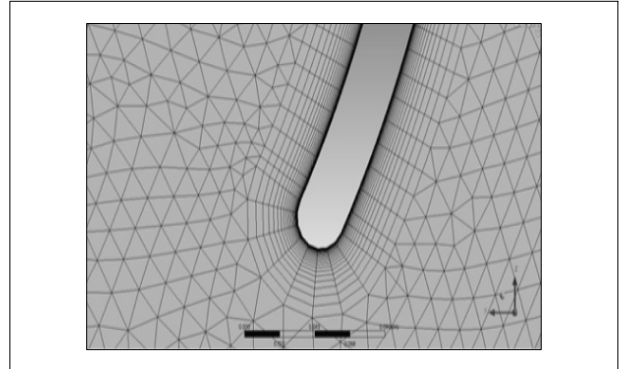


Fig. 3 Grid system(Blade)

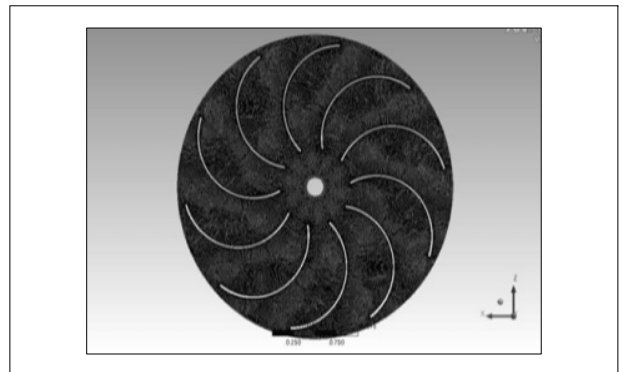


Fig. 4 Grid system(Rotating domain)

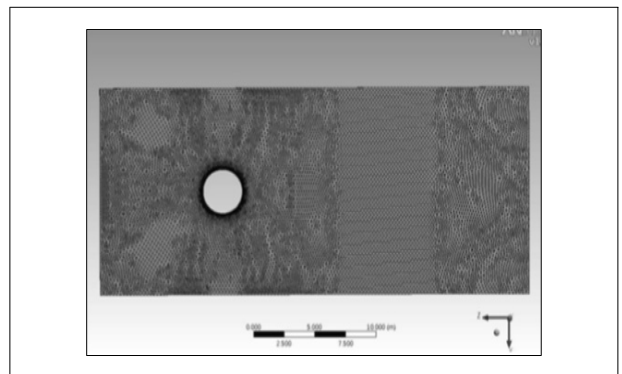


Fig. 5 Grid system(Stationary domain)

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

확도를 갖는 고해상도기법(high resolution scheme)을 사용하였으며, 난류모델은 유동박리현상 등에 적절한 전단이송모델(shear stress transport, SST)을 사용하였다<sup>(11)</sup>.

SST 모델은  $k-\omega$ 모델과  $k-\epsilon$ 모델의 장점을 결합한 모델로서, 일반적으로  $k-\omega$ 모델은 벽 근처에서 사용되며,  $k-\epsilon$ 모델은 나머지 영역에서 사용된다. Bardina 등<sup>(12)</sup>은 자신들의 연

구를 통해 SST모델이 역 압력구배로 인한 유동박리의 예측에 효과적이기 때문에 박리가 수반되는 벽 근처 난류유동해석의 정확성이 타 모델에 비해 높다고 밝힌 바 있다.

회전체인 터빈에 상대속도를 부여하기 위해, 터빈 주위에 실린더 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. 계산영역을 Fig. 7과 Table 2에 나타냈고, 회전 도메인의 지름은 3.2m, 정적 도메인의 크기는  $35m \times 15m \times 0.05m$ 이다.

입구는 수직 유입 유속 조건으로 설정하였고 출구는 기준 압력(대기압)에 대해 0기압으로, 실린더 옆면은 유체가 자유롭게 출입할 수 있는 opening 조건을 부여하였다. 경계조건 및 해석정보를 Table 3에 나타냈다.

주속비(TSR)에 따른 터빈의 성능을 고찰하기 위해 터빈 회전속도를 주속비 0.3부터 0.7까지 변화시키며 정적해석을 수행하였다.

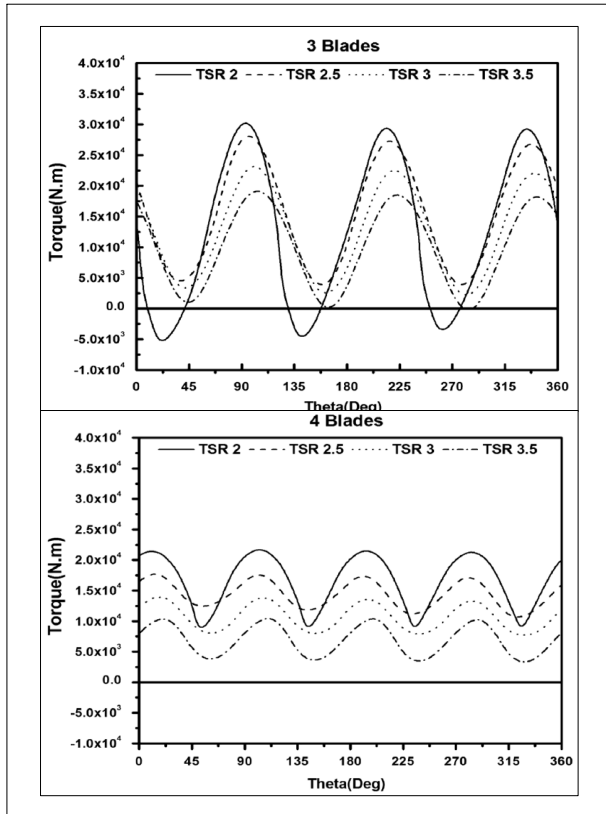


Fig. 6 Periodicity of torque according to the number of blades

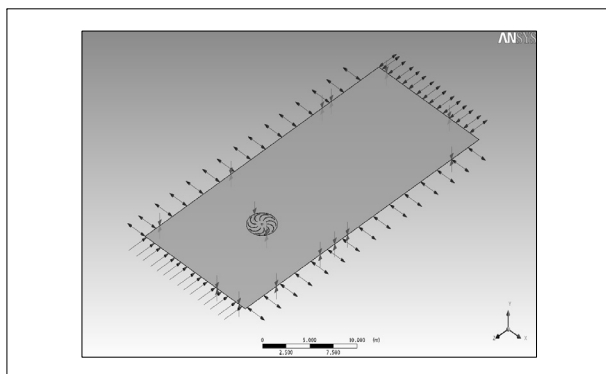


Fig. 7 Computational domain

Table 2. Modeling

Turbine diameter	3m
Turbine height	3m
Distance to inlet	10m(3.3 D)
Distance to outlet	25m(8.3 D)
Width of side wall	7.5m(2.5 D)
Height of domain	0.05m
Domain size	$35m \times 15m \times 0.05m$

Table 3. Boundary condition

Working fluid	Water(isothermal, 25°C)
Rotating domain	Angular velocity(1,2rad/s) Rotation axis(global Y)
Stationary domain	Stationary
Inlet	Normal speed(3m/s)
Opening	Opening
Outlet	Opening
Interface area	Frozen rotor
Turbine	Wall(no slip)
Turbulence model	SST

## 4. 유동해석 결과

### 4.1 속도분포

터빈의 속도분포를 Fig. 8에 나타냈다. 날개수가 10매인 터빈에서 항력식 수직축 터빈의 유동특성이 잘 나타난다. 8, 9번과 9, 10번 블레이드 사이로 각각 흐르는 유동이 2, 3번 블레이드로 흘러들어 토크 증가에 기여하고 있으며, 아크형 항력식 터빈의 장점을 보여준다. 그러나 블레이드 수가 적은 터빈에 비해, 가장 큰 토크를 발생 시킬 수 있는 1번 블레이드의 유동이 9, 10번 블레이드에 의해 원활하지 못함을 확인할 수 있다.

터빈을 블레이드 수가 3, 4매인 터빈과 8, 9, 10매인 터빈인 그룹으로 나누어 봤을 때, 블레이드 수가 3, 4매인 터빈은 유동이 날개에 항력을 더해줄지 못하고 유출되는 현상이 효율 감

소의 원인으로 작용하고 있다. 각각의 그룹 내에서는 유사한 속도분포를 보인다.

### 4.2 압력분포

터빈의 압력분포를 Fig. 9에 나타냈다. 블레이드 수가 3, 4매인 터빈은 블레이드 표면에 압력이 효율적으로 형성되지 못하고 매우 낮은 분포를 보인다. 이는 속도분포(Fig. 8)에서 나타났듯이, 유동이 날개에 항력을 더해줄지 못하고 유출되는 현상과 관계가 있으며, 이러한 유동패턴은 터빈효율 감소의 원인으로 작용하고 있다. 1번 블레이드 표면에 큰 압력이 형성되었으나, 반대방향에 있는 터빈에 역방향으로 큰 압력이 형성됨으로써, 효율을 저하 시키는 요소로 작용하고 있다. 블레이드 수가 많을수록, 즉 솔리디티가 높아질수록 회전방향으로 압력이 효율적으로 발생하고 있다.

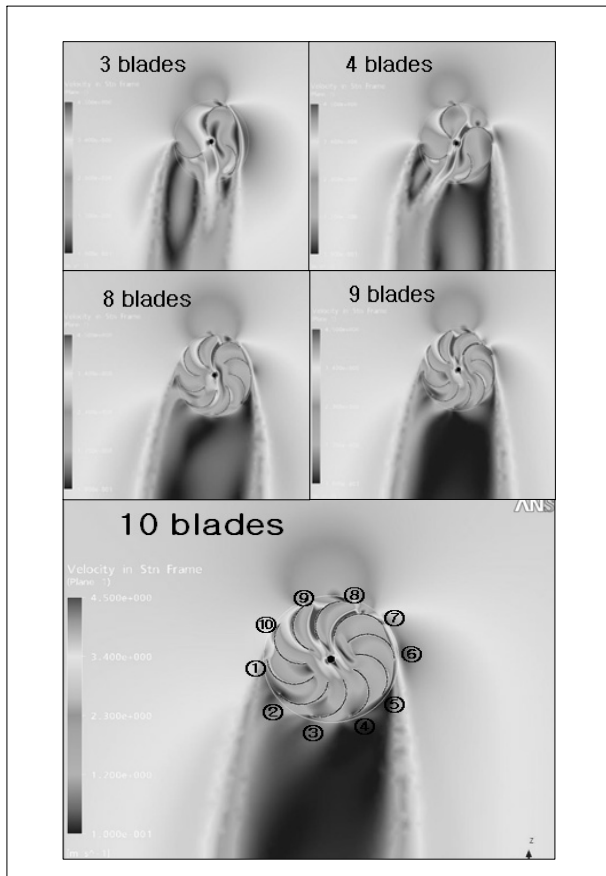


Fig. 8 Velocity distribution

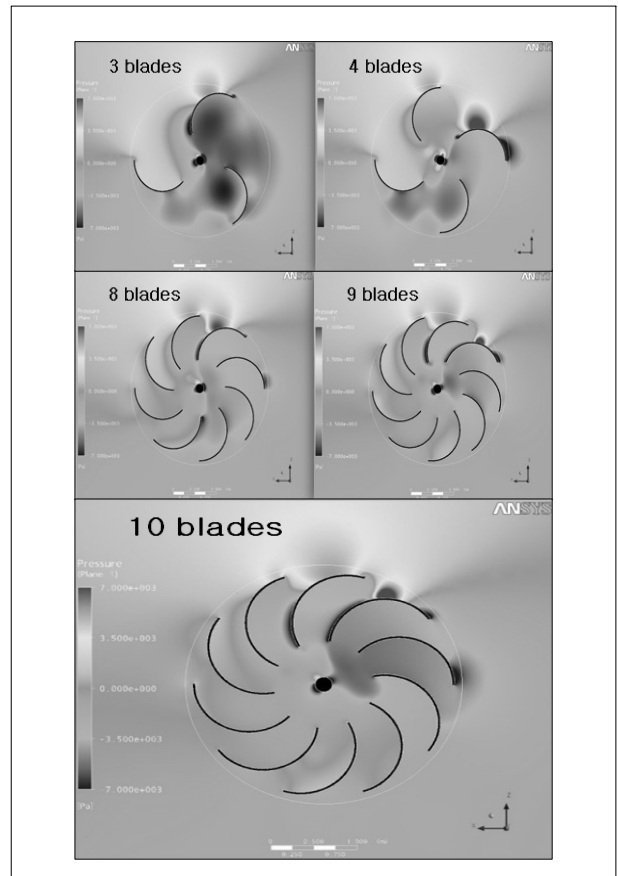


Fig. 9 Pressure distribution

### 4.3 $C_p$ 곡선 비교

$C_p$ (Power coefficient)곡선을 통해 항력식 터빈의 특징을 알 수 있다. 양력을 사용하지 않기 때문에 주속비가 1을 초과할 수 없으며, 낮은 회전수에서 최대효율이 발생하므로 효율은 양력을 사용하는 터빈보다 낮게 나타난다. 성능 평가를 위한 블레이드 수에 따른 터빈의  $C_p$ 곡선 비교를 Fig. 10, 11에 나타냈으며 최대 효율이 높은 순서는 10매, 8매, 9매, 3매, 4매 순이다.

블레이드 수가 3,4매인 터빈에서의  $C_p$ 곡선 개형이 8,9,10매인  $C_p$ 곡선의 개형과 큰 차이를 보이는 이유는 블레이드 수에 따른 터빈의 솔리디티 때문인 것으로 판단된다. 블레이드 수가 3,4매인 터빈은 낮은 솔리디티를 가지며, 유동의 비정상 특성이 강하므로 비정상 해석 또는 실험을 통한 검증이 요구된다.

Fig. 12에 블레이드 매수 별 터빈의 토크곡선을 나타냈다. 회전수가 작을수록 토크가 증가하는 경향을 나타냈고, 이는 회전속도가 느릴수록 날개표면에 큰 압력이 발생하는 항력식

터빈의 고유한 특성이 반영된 결과이다. 또한 양력식 터빈과 달리 날개 끝단의 속도가 유속보다 빠를 수 없는 특성에 의해 주속비 1을 초과할 수 없으므로, 최대효율이 발생하는 주속비는 낮은 회전속도 영역에 존재한다. 날개 수가 많은 터빈이 높은 토크를 발생시켰으며, 각 터빈의 최대 효율이 발생하는 최적 주속비가 다른 이유는 회전 속도에 따른 토크 특성이 다르기 때문으로 판단된다.

터빈 형상에 따른 터빈의  $C_p$ 곡선을 Fig. 13에 나타냈다. 대체적으로 vertical 블레이드 터빈의  $C_p$ 가 높으나 주속비 0.65 이상의 빠른 회전수에서는 twist 블레이드 터빈의 효율이 더 높았다. 최대 효율은 두 터빈 모두 주속비 0.6에서 나타났으며 vertical 블레이드 터빈의 최대 효율이 약 1%가량 높다.

본 유동해석의 난류강도는 기본적인 값인 5%가 적용되었으나, 실제 해상상태의 난류강도는 지역에 따라 그 차가 크다. 또한 수직축 터빈은 타 형식의 터빈에 비해 유향이 매우 다양하게 나타나는 지역에 적용성이 좋으므로, 난류강도가 큰 유동조건에서의 성능이 고려되어야 한다.

현재 블레이드 수가 10매인 터빈이 최대효율을 나타냈고,

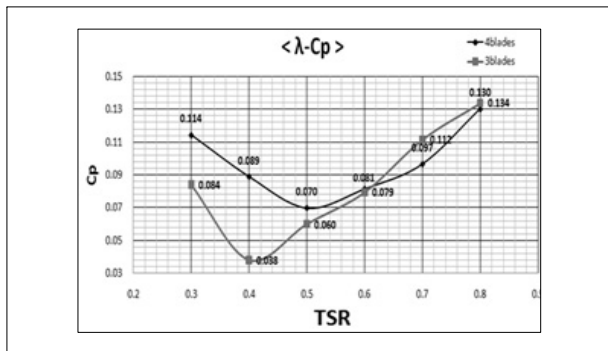


Fig. 10  $C_p$  curves of 3 & 4 bladed turbines

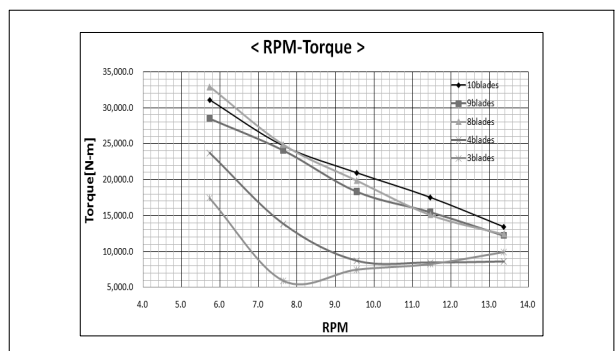


Fig. 12 Torque curves

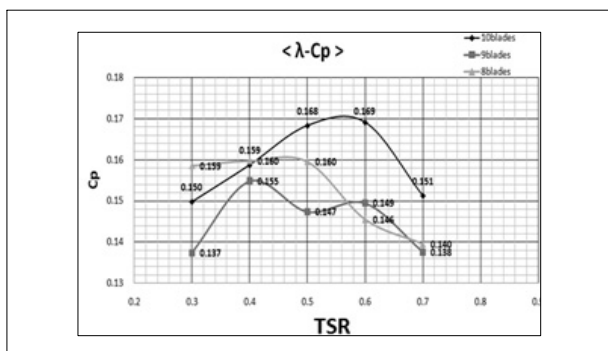


Fig. 11  $C_p$  curves of 8, 9 & 10 bladed turbines

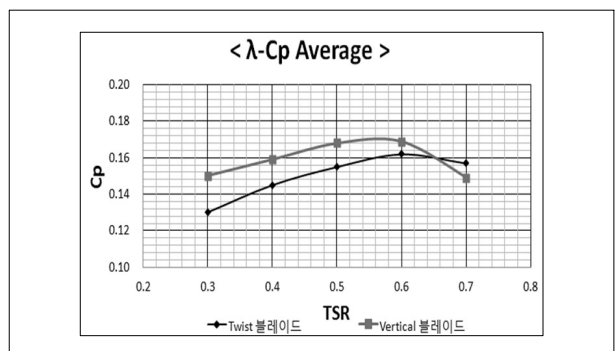


Fig. 13  $C_p$  curves of twist & vertical turbines

다양한 회전속도에 대해 안정적인 성능을 보였으나, 난류강도가 커지면 전체적으로 효율이 감소될 뿐만 아니라, 상대적으로 적은 슬리디티를 가지는 터빈이 유리 할 수 있다. 따라서 전 유형에 대해 발전이 가능한 수직축 터빈의 장점을 제고하기 위해, 추후 난류강도가 큰 유동에서의 성능이 검증되어야 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 아크형 항력식 수직축 터빈의 기본설계를 수행하였고 CFD를 이용하여 다양한 터빈의 성능을 계산·비교하였다.

아크형 항력식 수직축 터빈의 설계변수를 이해하고 3m급 조류발전용 터빈의 기본설계를 수행하였다. 최초 설계된 터빈에서 블레이드 수와 형상을 변화시켰고, 각 케이스마다 CFD해석을 수행한 결과, 블레이드 수가 10매인 vertical 블레이드 터빈이 최대효율을 발생시켰다. 또한 주속비 0.65 이상의 일부 영역에서는 twist 블레이드 터빈의 효율이 높게 나타났다.

본 논문에서 수행된 연구는 다층으로 적재한 multi-layer VAT 시스템을 위한 기초 연구로써 항만이나 연안의 방파제, 잔교에 적용 가능한 소규모 발전 시스템의 연구방향을 제시하였다.

## 후 기

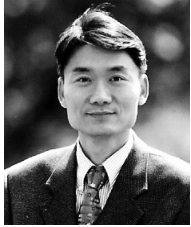
이 연구는 현대건설(주) 연구개발과제(10ECOS03)의 지원을 받아서 수행되었으며, 현대건설(주)의 연구비 지원에 감사드립니다.

본 연구는 인하대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] 김동건, 금종윤, 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.
- [2] 김병국, 김영호, 송우석, 이승배, 남상규, 김사만, 2007, “수직축 풍력터빈 성능개선에 관한 실험적 연구(An Experimental Study on the Performance of the Vertical-Axis Wind Turbine)”, 유체기계저널, Vol. 10, No. 3, pp. 17–24.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 조철희, 이강희, 이준호, 홍성준, 고평오, 2011, “조류발전용 다층 수직축 터빈의 성능평가(Performance of the multi-layer vertical axis tidal current turbine)”, 한국해양공학회 2011 추계학술대회 논문집, pp. 169–172.
- [8] ANSYS CFX-11.0, 2006, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc.
- [9] Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, “Turbulence Modeling Validation”, 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, June 29–July 2, Snow Village, Colorado, USA, AIAA Paper 1997-2121.
- [10] Durbine, P. A. and Petterson-Rief, B. A., 2001, Statical Theory and Modeling for Turbulent Flows, John Wiley & Sons, New York, USA.
- [11] 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.
- [12] Gorlov, A. M., 1995, “The helical turbine: A new idea for low-head hydropower”, Hydro Review, Vol. 14, No. 5, pp. 44–50.

### 조 철 희



1984년 인하대학교 조선공학과 공학사  
1985년 미국 Steven Institute of Technology  
해양공학과 공학석사  
1991년 미국 Texas A&M University 해양공학과  
공학박사

현재 인하대학교 조선해양공학과 교수  
(E-mail : chjo@inha.ac.kr)

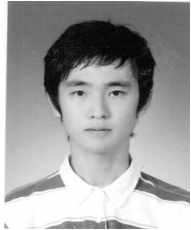
### 고 광 오



1995년 한양대학교 토목환경공학과 공학사  
1997년 한양대학교 대학원 토목공학과 공학석사  
2006년 한양대학교 대학원 토목공학과 박사수료

현재 현대건설 연구개발본부 차장  
(E-mail : zeus@hdec.co.kr)

### 이 준 호



현재 인하대학교 조선해양공학과 학부 4년  
(E-mail : ljunh330@nate.com)

### 이 강 희



2009년 인하대학교 선박해양공학과 공학사  
2011년 인하대학교 조선해양공학과 공학석사

현재 인하대학교 조선해양공학과 박사과정  
(E-mail : kanghee@inha.edu)