

## 수직축 풍력터빈의 날개 형상에 따른 성능비교

김준호<sup>\*†</sup> · 류인호<sup>\*\*</sup> · 김부기<sup>\*</sup> · 양창조<sup>\*\*\*</sup>

### A Study on the Vertical Axis Wind Turbine Performance in Different Blade Shapes

Jun-Ho Kim<sup>\*†</sup>, In-Ho Ryu<sup>\*\*</sup>, Bu-Gi Kim<sup>\*</sup>, Chang Jo Yang<sup>\*\*\*</sup>

Key Words : Guide Vane(안내날개), Vertical Axis Wind Turbine(수직축 풍력터빈), Wind Energy(풍력)

#### ABSTRACT

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) has advantages including simpler structure and significantly cheaper cost to build and maintain than the conventional Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), attract the most of world's attention. However, such rotor is suffering from poor efficiency problems. The present study will consider the design improvement of a VAWT that employs a multi-blade design using both rectangular guide vanes and rotor blades arrays. As a result, an optimum formation of guide vanes as well as rotor blades needs to be found in order to enhance the power performance. The study used CFD code to obtain the flow field characteristics for purpose of evaluating the turbine performance with guide vanes and rotor blades in different shapes, at different tip speed ratio (TSR) values. From the simulation results, it was shown that the performance is apparently improved than Conventional VAWT.

#### 1. 서론

산업화와 더불어 시작된 화석에너지 개발과 사용에 따른 화석 연료의 고갈과 대기 오염의 심화로 인하여 전 세계적으로 재생 가능한 자연에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 풍력 에너지는 재생 가능한 에너지 가운데 하나이며 유해물질이 발생되지 않는 청정에너지이기 때문에 환경문제의 심각성 및 에너지 고갈 문제를 대체할 수 있는 에너지로서 각광 받고 있다.

풍력 터빈은 공기의 운동에너지를 회전자의 공기역학적 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 회전운동에너지로 변환시키는 역할을 하는 것으로서, 회전자 축의 방향에 따라 수평축 터빈(Horizontal Axis Wind Turbine : HAWT) 방식과 수직축 터빈(Vertical Axis Wind Turbine : VAWT) 방식으로 나눌 수 있다.

수직축 풍력터빈은 수평축에 비해 바람의 방향에 관계없

이 운전 가능하기 때문에 구조적으로 간단하고 설치비용이 저렴하다. 또한 수직축 풍력터빈의 경우 낮은 회전속도에서도 정격출력으로 발전하기 때문에 미풍에서도 풍력발전이 가능하며 소음이 적은 장점이 있다. 대표적인 수직축 터빈으로는 Savonius 풍력 터빈과 Darrieus 풍력 터빈이 있다. 전자는 항력을 이용하여 발전하며 후자는 양력을 이용하여 발전한다.<sup>(1)</sup>

수직축 풍력 터빈은 일정한 바람이 불더라도 수직축 날개에 상대적인 유동방향과 속도는 1회전하는 동안 주기적으로 변화하며 이런 주기적인 유동은 공기역학적인 성능 즉 출력을 감소시킬 수 있다. 또한 큰 기동 토크를 요구 할 뿐 아니라 풍력에너지 회수율이 낮아 넓은 전용 면적을 필요로 하는 단점을 가지고 있다.<sup>(2)</sup>

그에 따라 수년간 수직축 풍력터빈의 출력 상승을 위해 많은 연구들이 이루어지고 있다. 김동건 등<sup>(3)</sup>은 아크형 날개를 이용한 항력식 수직축 소형 풍력 터빈 설계를 통해 성능을

\* 목포해양대학교 해양메카트로닉스학부(Division of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University)

\*\* 목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과(Graduate School Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University)

\*\*\* 목포해양대학교 기관시스템공학부(Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University)

† 교신저자, E-mail : junho.kim@mmu.ac.kr

Table 1 Specification of VAWT

Rotor diameter [m]	9
Full diameter [m]	11
Height [m]	6
Number of blade	24
Number of guide vane	42
Blade type	Case 1,2,3,4,5
Guide vane type	Plain Rectangular
Design guide vane angle [ ° ]	45
Design wind speed [m/s]	7
TSR range	0.2-0.5

향상시켰다. 박찬 등<sup>(4)</sup>은 수직 항력식 터빈을 이용한 풍력발전 현상 변화 및 피치각 변화에 따른 유동해석을 통해 최적 설계에 대한 방향을 제시하였다. 홍철현<sup>(5)</sup>은 윈드실드를 이용한 Savonius 풍력 터빈의 효율 향상을 위한 연구하였다.

본 연구에서는 수직축 풍력터빈의 안내날개의 유무에 따른 성능을 비교하고 터빈의 날개 형상에 따른 성능해석을 통해 최적 형상을 제시하고자 한다.

또한, 현재 전남 영광군 백수읍에 위치한 전남 테크노파크 풍력평가시스템센터 내에 본 연구를 바탕으로 한 50kW 급 풍력 터빈을 2018년 2월 완공을 목표로 건설 중이며, 해석결과와 신뢰성 향상을 위해 추후 해석결과와 풍력터빈의 실험 결과를 비교할 예정이다.

## 2. 터빈 형상 및 해석 모델

공기의 흐름에 의한 풍력에너지는 식 (1)과 같다.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

$\rho$  : 공기밀도[ $kg/m^3$ ]      $A$  : 풍력터빈의 단면적[ $m^2$ ]  
 $v$  : 풍속[ $m/s$ ]

$P_w$ 는 터빈에 의해 기계적인 동력으로 변환되는데 터빈의 이상적인 회전의 경우 즉, 운동량의 변화가 없고 터빈 끝의 간섭흐름이 없는 경우 변환효율을 표시하는 동력계수  $C_p$ 는 0.593을 넘을 수 없음을 Betz limit를 통해 알고 있다. 실제 터빈의 회전은 이상적인 가정상태와는 다르게 공기의 점성에 의한 각운동량의 손실과 터빈 끝의 간섭흐름 등에 의한 영향으로 동력계수는 줄어들어 Savonius 풍력 터빈은 약 0.15, Darrieus 풍력 터빈은 약 0.35 정도의 값을 가진다.<sup>(6)</sup>

Table 1에 본 연구에 사용된 수직축 풍력 터빈의 제원을 나타내고 있다.

Fig. 1은 수직축 풍력터빈의 단면형상을 나타내고 있고,

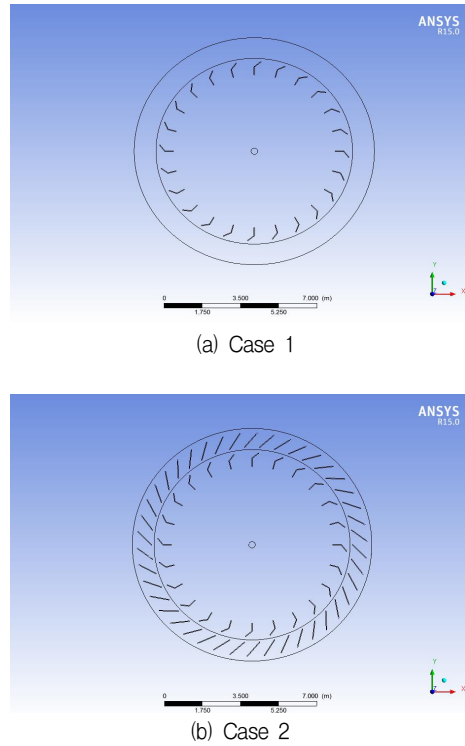


Fig. 1 Shape of vertical axis wind turbine

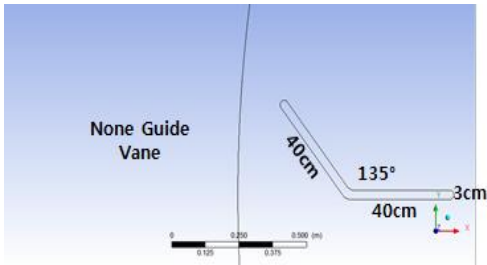
Case 2는 터빈 둘레에 안내날개가 부착된 형상으로 안내날개의 유무에 따른 터빈의 성능 개선여부를

비교하였다. 터빈은 총 24개의 날개와 42개의 안내날개로 구성되어 있다. 24개의 날개는 로터의 가장자리에 등간격으로 위치하여 큰 토크를 발생시키기 쉽도록 설계되었으며, 날개의 형상은 풍력에너지를 운동에너지로 잘 변환시킬 수 있도록 만들었다.

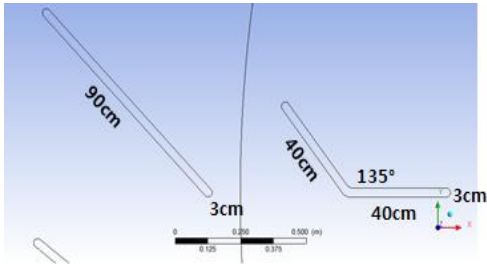
Fig. 2는 여러 형태의 터빈 날개형상과 안내날개의 조합을 나타낸 그림이다. Case 1과 Case 2는 동일한 터빈 날개형상에 안내날개 부착 유무를 나타낸 경우이며,

Case 2와 Case 3은 날개각도는 135°로 동일하지만 방향이 다르게 설계되어 있는 형상이다. Case 4와 Case 5는 날개각도가 90°로 동일한 형상이지만 방향이 반대로 설계되어 있다.

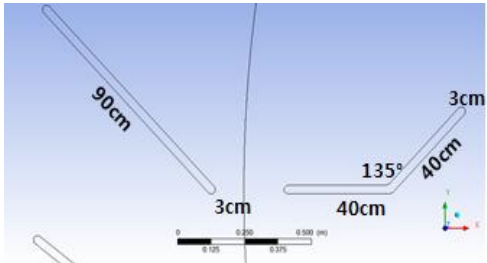
Case 1과 Case 2를 비교하여 안내날개의 유무에 따른 성능을 비교하고자 하였다. 또한 안내날개가 부착된 형태를 기준으로 터빈 날개 입사각이 안내날개와 동일한 135°를 기준으로 성능을 비교하고자 하였고, 날개 각도를 줄여 90°형상으로 설계했을 때의 성능도 비교하고자 하였다. 본 연구에서는 안내날개는 바람의 흐름을 날개에 전달하는 중요한 역할을 하기 때문에 성능비교를 위해서 기준이 되도록 45°로 고정시킨 후 터빈 날개의 형상을 바꿔가며 성능을 비교하였으며, 추후 안내날개 각도를 변경하였을 때 성능 또한 비교할 예정이다.



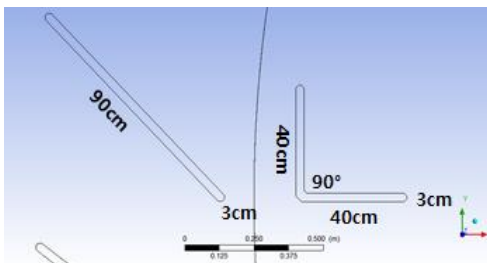
(a) case 1



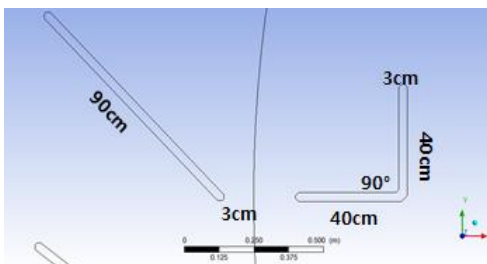
(b) case 2



(c) case 3



(d) case 4



(e) case 5

Fig. 2 Vertical axis turbine rotor with guide vane

### 3. 수치해석법

해석 툴은 ANSYS CFX 15.0 버전을 사용하였으며, Domain Field의 Node수는 약 44만개, Rotor Field Node

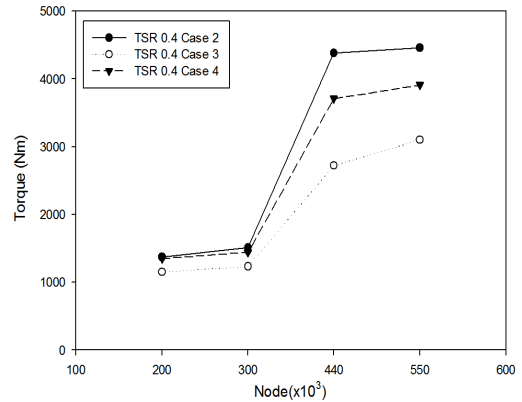


Fig. 3 Influence of nodes on torque

Table 2 Simulation cases

TSR	0.2	0.3	0.4	0.5
Corresponding RPM	2.9708	4.4563	5.9417	7.4272

수 모두 약 21만개의 Hexahedral로 구성하였다. 모델링의 수렴성 여부는  $y^+$ 에 의한 격자 밀집도에 의해 판단하였으며 Domain 벽면은 최대 8 이하, 블레이드 단면은 5 이하로  $y^+$  값이 유지되도록 구성하였다. 난류 모델은 블레이드의 에어 포일 및 회전체의 경계층 영역 해석에 적합한 SST(Shear Stress Transient) 모델을 적용하였다.

Fig. 3은 Node 수에 따른 수렴성 확인을 위하여 TSR 0.4에서 Case 2, 3, 4에 대하여 Node 개수에 따른 Torque 변화를 나타내었다. 계산 결과 약 44만개의 Node는 수렴성이 있음을 확인 할 수 있다. 계산 영역 내 경계조건의 설정 시, 입구 경계는 균일한 속도 구배를 주었고, 출구경계는 대기압과 같은 조건으로 설정하였다.

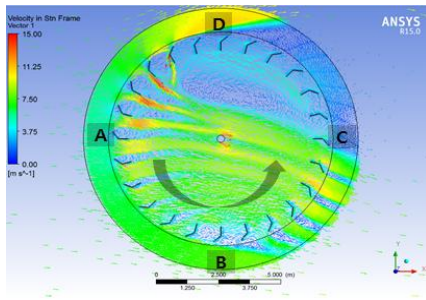
실제 풍력 발전기에서는 바람이 불면 발전기 토크와 바람에 의한 토크가 평형을 이루는 속도로 블레이드가 회전한다. 해석에 있어 이와 같은 현상을 구현하는데 어려움이 있어 블레이드의 속도를 고정하고 그 속도에서 블레이드를 회전시키는 반력의 개념으로 토크를 구하였다. 이렇게 해석할 경우 반력으로 계산된 값의 토크를 가지는 발전기를 사용하면 그때 지정해준 속도로 회전한다고 생각 할 수 있다.<sup>(7)</sup>

풍력터빈의 성능을 나타내기 위해서 풍력터빈의 블레이드 끝단 속도와 유입 풍속의 비로 정의 되는 TSR

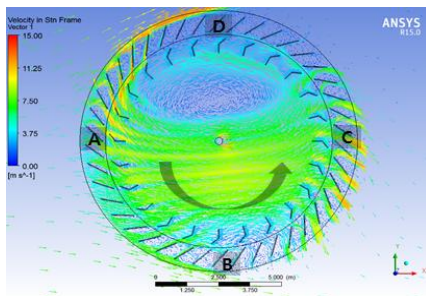
(Tip Speed Ratio)가 이용되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. Table 2에는 각각의 TSR에 대한 조건을 나타내고 있다.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (1)$$

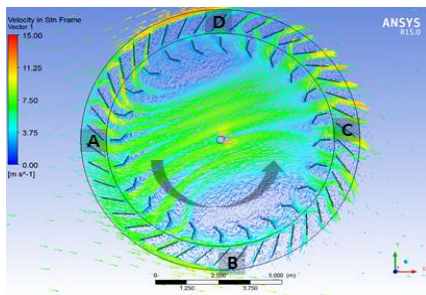
$\lambda$  : 익단속도비       $\omega$  : 로터의 회전각속도[rad/s]  
 $R$  : 로터의 반경[m]     $v$  : 바람의 속도[m/s]



(a) Velocity vector plot at case 1



(b) Velocity vector plot at case 2



(c) Velocity vector plot at case 3

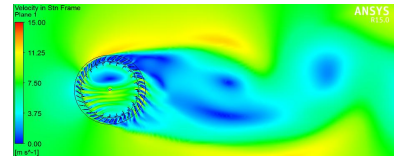
Fig. 4 Velocity vector plots at TSR 0.5

## 4. 결과 및 고찰

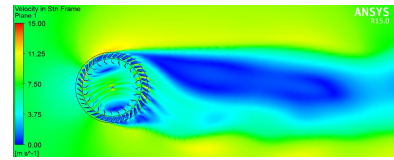
### 4.1 유동 패턴

Fig. 4는 TSR 0.5에서 터빈을 통과하는 유체의 속도분포를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 안내날개를 통과한 유체의 속도 분포를 통해 Rotor 날개에 전달되어 양의 회전모멘트 또는 음의 회전모멘트로 작용하는 것을 알 수 있다. 통상 유체가 들어오는 입구부를 (A), 터빈을 통과하고 나가는 출구부를 (C), 입구부를 기준으로 터빈의 우측을 (B), 좌측을 (D)로 정의 하였으며, 터빈의 회전방향은 반시계 방향이다.

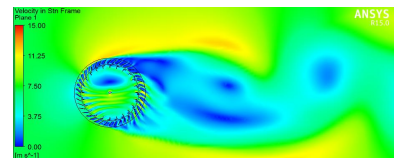
Fig. 4(a)는 안내날개가 부착되지 않은 터빈 단독운전 상태이고, (b)는 터빈 둘레에 안내날개를 부착한 경우의 속도 분포를 나타내고 있다. Case 2의 경우 안내날개를 통과하며



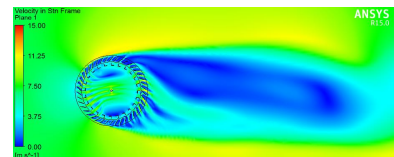
(a) Case 2



(b) Case 3



(c) Case 4



(d) Case 5

Fig. 5 Flow distribution at TSR 0.5

속도가 증가한 유체가 Case 1에 비해

여 터빈에 더 큰 힘을 전달하는 것을 알 수 있다. 또한 Case 2의 경우 안내날개를 통과한 후 유체의 흐름방향이 터빈이 회전하는 방향과 동일한 방향으로 회전하는 것을 알 수 있다. Case 2의 터빈 좌측 D 영역에서 반시계 방향으로 커다란 와류가 형성되는데 이 와류의 영향으로 터빈이 C영역을 지나 D영역으로 입구 유입 유동과 반대로 되돌아오는 부분에서 플러스 요인으로 작용했기 때문이라고 판단된다. 이러한 영향으로 인해 Fig. 4(a)의 Case 1 터빈 단독 운전보다는 (b)의 Case 2 와 같이 안내날개를 부착한 것이 터빈 운전 에 더욱 효과가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4(c)의 Case 3의 경우도 안내날개를 통과한 유체가 증속이 되어 터빈에 힘을 잘 전달하고 있지만 Case 3의 경우는 터빈 날개 형상이 Case 2와는 반대 방향으로 각도를 형성하고 있어 로터 내부에서 유동이 Case 2와는 다른 유동 형태를 보이고 있다. 즉, Case 2에서는 보이지 않았던 B영역에 시계 방향의 와류가 형성되어 터빈의 회전 방향인 반시계 방향에 마이너스 요인으로 작용하는 저항성분이 커졌다고 판단된다. Case 2와 Case 3의 경우, 동일한 안내날개에 같은 사이즈의 터빈 날개를 단지 형상을 반대로 부착함에 따라 터빈 출구부 C에서 흐름과 특히 로터 내부에서 와류형상에 큰 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 5는 TSR 0.5에서 터빈 주변의 유체 흐름을 나타내고



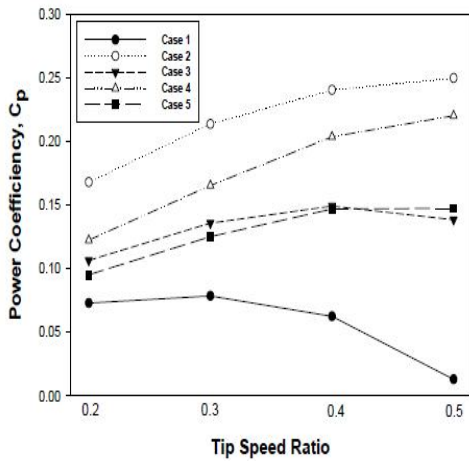


Fig. 6 Power coefficient of  $c_p$  at different TSR

있다. 터빈 날개의 형상은 다르지만 날개가 이루는 각도가 안내날개 방향으로 열려 있는 형태인 Case 3과 Case 5가 유사한 형태의 흐름을 보였고, 닫혀 있는 형태인 Case 2와 Case 4가 유사한 유체의 흐름을 나타냈다. 여기서 터빈 날개 설계 시 안내날개와 터빈의 날개가 이루는 각도의 방향이 중요한 요소임을 알 수 있다.

#### 4.2 동력계수

풍력 터빈의 공기역학적 동력계수인  $C_p$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_W = \frac{1}{2} \rho U^3 A \quad (2)$$

$$P_T = T\omega \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_T}{P_W} \quad (4)$$

$T$  : 토크[N·m]       $A$  : 터빈의 투영면적[m<sup>2</sup>]

$\rho$  : 공기밀도[kg/m<sup>3</sup>]       $U$  : 바람의 속도[m/s]

$P_T$  : 터빈에 입사되는 공기 동력에너지

$P_W$  : 터빈에 의해 발생하는 축동력

$\omega$  : 로터의 회전각속도[rad/s]

Fig. 6은 TSR에 따른 동력계수  $C_p$ 를 각 Case별로 나타냈다. 안내날개를 부착하지 않은 터빈단독 운전인 Case 1이 안내날개를 부착한 다른 Case들 보다 현저히 낮은 동력계수를 나타내고 있다. 수직축 풍력터빈에 안내날개를 부착하는 것이 매우 효과적임을 알 수 있다. 안내날개를 부착한 Case들 중에는 Case 2가 가장 높은 동력계수를 나타냈고 Case 4가 두 번째로 높은 동력계수를 나타냈다. 이것은 Fig. 4의 유동 해석 결과와 일치하며 Fig. 5에서 Case 2와 Case 4의 유동

형태가 유사함을 통해서도 알 수 있었다. 반면 안내날개가 부착된 터빈 형상 중 Case 3과 Case 5가 거의 동일한 값으로 가장 낮은 동력계수를 나타냈다. 이것을 통해 향후 터빈 설계 시 날개 형태도 중요하지만 성능향상을 위해서는 날개가 이루는 각도가 안내날개에 닫혀 있는 방향으로 설계하는 것이 중요한 요소임을 알 수 있었다. 즉, 안내날개를 통과해 속도가 증가된 유체를 터빈이 얼마나 잘 받아들일 수 있도록 날개를 설계하느냐가 성능향상에 중요한 요소라고 판단된다.

또한, Case 3과 5는 TSR 0.4에서 최대 동력계수를 나타내고 약간 저하되는 경향을 나타냈지만, Case 2와 4는 TSR 0.5보다 더 큰 값에서 최대 동력계수를 나타낼 수 있다고 예상된다. 반면 안내날개가 부착되지 않은 Case 1은 TSR이 커질수록 성능이 급격히 저하되는 경향을 나타냈다. 즉, 안내날개를 부착한 경우는 낮은 TSR 보다는 TSR 0.5 이상에서 더 효과가 있음을 알 수 있다.

Case 2의 경우 일반적으로 알려진 Savonius 타입의 동력계수 0.15 보다 더 높은 0.20~0.25 값을 나타냈으며 안내날개를 부착하는 것이 수직축 풍력터빈의 동력계수 향상에 효과가 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 안내날개의 부착 유무 및 터빈 날개 형상 변경에 따른 성능비교를 통하여 최적의 터빈 형상을 제시하였다.

1) 안내날개가 부착 되지 않은 Case 1의 경우 현저히 동력계수가 감소되어 안내날개 부착이 터빈 성능향상에 효과가 있음을 알 수 있었다.

2) 안내날개가 부착된 Case 2가 TSR 0.5에서 최대 동력계수 0.25를 나타냈다.

3) 동력계수가 높은 Case 2와 Case 4를 통해, 터빈 날개가 이루는 각도가 안내날개에 닫혀 있는 반대방향으로 설계하는 것이 중요한 요소임을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 터빈 돌레에 안내날개를 부착하는 것이 동력계수 향상에 효과가 있음을 확인하였으며, 향후 연구로 터빈 및 안내날개의 매수 변화에 따른 성능변화를 검토할 예정이다.

#### 후 기

이 연구는 목포해양대학교 산학협력단 학술연구비에 의하여 지원된 논문임.

#### References

(1) Cha, D. G. Yoon, S. H., and Kwon, S. S., 2006, “항력식 수직축 풍력 발전시스템의 운전특성에 관한 연구,”

- Proceedings of KIIEE Annual Conference pp. 435~441.
- (2) Shin, J. Y., Son, Y. S., Cha, D. G., Lee, C. G., and Hwang, I. C., 2006, "Aerodynamic Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine Blade," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* Vol. 30, No. 8, pp. 877~884.
- (3) Kim, D. K., Kim, M. K., Cha, D. K., and Yoon, S. H. 2006, "Design of Drag-type Vertical Axis Miniature Wind Turbine Using Arc Shaped Blade," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 9, No. 2, pp. 7~12.
- (4) Park, C., Park, G. S., Park, W. G., and Yoon, S. H., 2004, "Numerical Analysis of Wind Turbine of Drag Force Type with change of Blade Number and Pitch Angle," *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering* Vol. 10, pp. 61~64.
- (5) Hong, C. H., 2011, "A Study for Improving the Performance of Savonius Wind Turbine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* Vol. 35, No. 2, pp. 258~263.
- (6) Park, J. S., 2004, "A Study on Wind Power Generation System Using Vertical Axis Wind Turbine," Thesis, Department of Electrical Engineering, DONG-EUI University Busan,VA.
- (7) Kim, J. H., Kim, J. B., and Oh, Y. L., 2013, "Performance Prediction of Wind Power Turbine by CFD Analysis," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B* Vol. 37, No. 4, pp. 423~429.