

## 사보니우스 풍력 터빈의 효율 향상을 위한 연구

홍 철 현<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2011년 2월 11일, 원고수정일 : 2011년 2월 18일, 심사완료일 : 2011년 3월 8일)

### A Study for Improving the Performance of Savonius Wind Turbine

Cheol-Hyun Hong<sup>†</sup>

**요 약 :** 본 연구는 국내 풍향 조건에 적합한 사보니우스 풍력 터빈의 개발과 효율향상을 위한 기초설계 자료를 얻고자 한다. 이를 위해 1/4 윈드실드가 부착된 풍력 터빈 주변의 유동장 특성을 수치해석으로 확인하였고, 터빈 로터의 회전수를 수치해석과 실험을 통하여 측정하였다. 측정결과 수치해석결과와 실험결과와의 경향이 일치하였고, 윈드실드가 부착된 경우의 회전수가 약 70% 이상 향상됨을 확인하였다.

**주제어 :** 사보니우스 풍력 터빈, 수치해석, 윈드실드

**Abstract:** This study is aimed at obtaining basic design data for Savonius wind turbine, available in the domestic wind environments. To the end, the flow field characteristics around the wind turbine attached with 1/4 wind shield were monitored along with numerical analysis. On the top of this, numerical analysis and experiments on the rpm of the turbine rotor were conducted. As a result, this study found that the numerical analysis results squares with the experiment results and the rpm improves by over 70 %.

**Key words:** Savonius wind turbine, CFD, Wind-shield

#### 1. 서 론

최근 석유에너지의 가격 폭등으로 인한 대체 에너지 개발에 대한 관심과 이산화탄소 및 기타 여러 대기 오염 물질을 줄이기 위한 일환으로 국내에서도 중형 풍력 발전시스템의 개발과 함께 소형 풍력 발전시스템의 개발에 활기를 띄고 있다. 국내의 경우 2006년 말 기준으로 풍력발전 설치용량은 177MW이며, 2011년까지 총 에너지의 5%를 신재생에너지로 공급한다는 계획을 갖고는 있으나, 풍력발전 설비의 높은 수입 의존도를 극복하기 위해서는 자체적인 기술의 상용화가 무엇보다 중요하다[1].

소형 수평축(horizontal-axis) 터빈은 구조가 간단하고 설치하기 편리하지만 바람의 방향에 영향

을 많이 받는다. 반면, 소형 수직축(vertical-axis) 터빈은 낮은 시동 풍속 설정이 가능하고, 약한 풍속에서도 풍력 발전이 가능하다. 또한, 로터 회전 속도가 상대적으로 낮아 높은 정밀도를 요구하지 않으므로 소형 터빈으로 많이 활용되고 있다.

특히 우리나라는 산지가 많고 해안에 인접한 지형을 갖추고 있어 지역별로 풍향이 수시로 변화한다. 이러한 풍향의 급격한 변화에 무관하게 지속적인 안정적인 에너지 변환을 수행할 수 있는 소형의 수직축 풍력 터빈의 개발이 절실히 필요하다 [2].

공기역학적 최적 설계를 요구하는 대부분의 풍력 터빈의 경우는 터빈의 효율증대와 성능향상을 위해 우선 터빈 주변 유동장의 특성을 명확하게 이해할

<sup>†</sup> 교신저자(부산대학교 기계설계전산화인력양성센터, E-mail: chhong@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-1665)

필요가 있다. 그리고 풍속과 로터 회전수의 관계를 알지 못하는 상황에서의 해석은 해당풍속 조건에서의 정확한 출력을 예측함에 있어 물리적으로 타당하지 않는 결과를 초래할 수 있다[3].

본 연구에서는 이러한 점을 개선하기 위하여 기존 사보니우스 풍력 터빈(savonius wind turbine)에 윈드실드(wind-shield)를 적용하여 상용 해석 프로그램인 Fluent를 이용한 간략한 수치해석(CFD)과 실험을 수행하고, 이를 통한 터빈 로터의 회전수 효율개선을 확인하고자 한다.

## 2. 수직축 풍력터빈의 설계 및 제작

### 2.1 선행연구

풍력터빈은 가장 많이 보급된 수평축 방식과 소형 중심의 수직축 방식, 그리고 2가지가 조합된 하이브리드 방식으로 구분된다.

양력을 이용한 다리우스(Darrieus) 방식[4]과 항력을 이용한 사보니우스(Savonius)[5-6], 베네쉬(Benesh)[7-8] 방식 그리고 복합형의 방식이 있다. 특히, 사보니우스 터빈은 대표적인 항력식 수직축 터빈으로 날개의 개수에 따라 2-블레이드와 3-블레이드 등으로 구분할 수 있다.

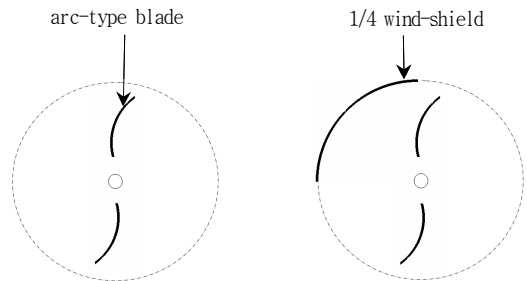
[9]은 2-블레이드와 3-블레이드 사보니우스 로터를 실험하여 2-블레이드가 3-블레이드보다 더 높은 터빈 효율을 갖는다고 제시하였고, [8]이 제시한 베네쉬 로터는 [9]이 제시한 2-블레이드 사보니우스에 비해 20% 향상되는 결과를 얻었다. 그리고 [2]이 제시한 다수의 원호(circular arc)형 날개를 부착한 로터는 기존의 2-블레이드 로터에 비해 높은 토크 계수를 얻었다. [1]은 이승배 등이 고안한 제트-휠-터보형 수직축 터빈의 실험적 검증에서 최대 동력계수(maximum Cp) 0.5의 성능을 확인하였다.

### 2.2 설계 및 제작

본 연구에 사용된 사보니우스 풍력 터빈 모형은 **Figure 1**에서와 같이 터빈의 입구 부분에 유입되는 유체의 에너지가 축을 중심으로 터빈의 회전력에 장애가 되는 영역에서의 유입은 최소화 하도록 하기 위하여 호(arc)형 날개 주위에 유입공기의 흐

름을 차단하는 1/4(90°)의 윈드실드를 부착한 구조로, 회전축의 아래 부분과 발전기를 직접 구동하도록 제작하였다.

전체적인 형상은 터빈의 외곽 직경(D) 673mm, 높이 795mm로 유동에 대한 투영면적은 0.1876m<sup>2</sup> 이다. 풍력 터빈을 설계함에 있어서 효율을 증대할 수 있는 윈드실드의 부착에 의한 효능 검증과 실험에 필요한 수직축 풍력 터빈의 제원 및 변수를 **Table 1**에 나타내었다.



**Figure 1:** Vertical axis turbine rotor with wind-shield

**Table 1:** Configurations of turbine rotor model

Blade type	arc
Diameter(D)	673mm
Hight(H)	795mm
Number of blade(B)	2
Area of reflection(A)	0.1876m <sup>2</sup>
Chord of blade(a)	236mm
Wind speed(U)	5 ~ 17m/s

## 3. 수치해석 및 실험

### 3.1 모델링

실험에 앞서 풍력터빈 로터 주변의 기본적인 유동현상을 파악하기 위하여 전산유체해석(CFD)을 수행하였다. 수치계산은 상용해석 프로그램인 FLUENT의 표준  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하여 해석을 수행하였다.

[10]과 [11]은 사보니우스 풍력 터빈의 공기역학적 특성 연구에서  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하여 수치계산과 실험결과가 대체로 일치함을 보였고, 풍력 터빈의 성능을 확인하였다.

난류유동장 내의 유체유동의 해석은 다음과 같은 연속방정식, 시간평균 운동량방정식에 의해서 이루어지며, 온도의 변화를 고려하지 않기 때문에 에너지 방정식은 포함하지 않는다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

시간평균 운동량방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & - \frac{\partial P}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + \rho f_i \end{aligned} \tag{2}$$

표준  $k-\epsilon$  난류모델 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = & \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ & - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = & C_{\epsilon 1} \tau_{ij} \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ & - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, 와점성 계수(kinetic eddy viscosity)는 다음과 같이 정의된다.

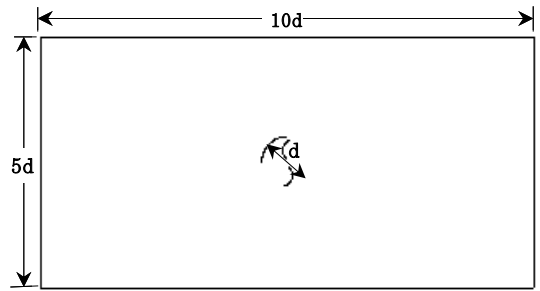
$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \tag{6}$$

이때 사용된 모델링 상수는  $C_{\epsilon 1}=1.44$ ,  $C_{\epsilon 2}=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\epsilon=1.3$ 이다.

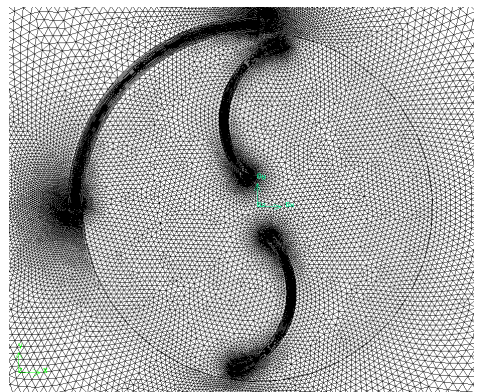
3.2 격자생성

전산해석 수행은 해석상의 효율을 도모하기 위하여 2차원으로 간략화된 형상을 이용하여 수행하였고, 해석영역(analysis domain)의 격자(grid)는 상용 프로그램인 GAMBIT을 활용하여 생성하였다. **Figure 2**와 같이 유체가 유입되는 입구부분은 터빈 로터 직경의 5d, 길이는 10d로 하여 입구

와 출구부분에서의 순환유동 등에 의한 수치계산에 영향을 주는 것을 방지하였다. 격자구조는 비정렬(unstructured) 격자로 로터와 윈드실드 주변의 격자를 집중시켜 수치적 오류 요인을 제거하였다. 그리고 날개와 윈드실드의 벽면 등의 유체와 고체부가 접하게 되는 부분에서는 경계층 형성 및 이탈에 따른 와류동의 생성을 충분히 모사할 수 있도록 하였다. 수치계산을 위해서 생성된 노드(node)수와 엘리먼트(element)의 수는 각각 32,955개, 62,600개이다.



(a) Computational analysis domain



(b) Detail view of grid generation

**Figure 2:** Computational analysis domain and grid generation of 1/4 wind-shield-type vertical axis turbine model

3.3 해석

수치계산을 위해 입구와 아래, 위 측면에서 실제 실험에서 적용될 풍속(wind speed) 조건인 5~17m/s의 유속을 연속적으로 변화시켜 해석을

수행하였다.

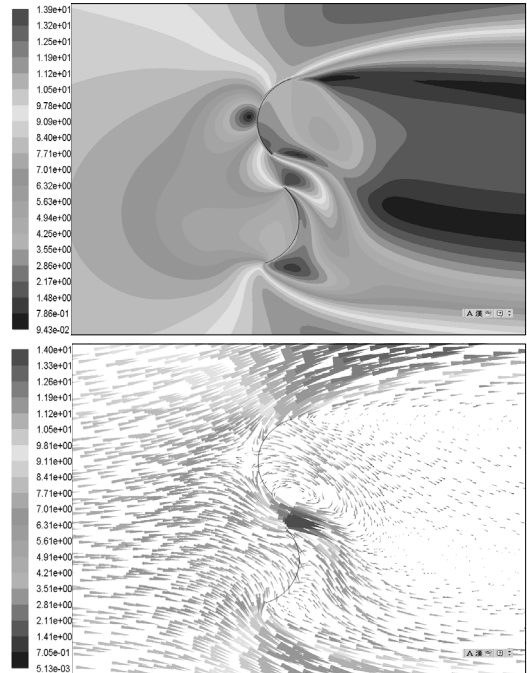
유동과 구조 그리고 동역학적 연성(interaction) 해석기법의 적용은 해석상의 어려움이 많아 본 연구에서는 상용해석 프로그램인 FLUENT를 활용하여 수치해석을 수행 후 각 유속에서 터빈 로터의 회전수(rpm)를 계산한다.

이를 위해서 FLUENT의 'moving reference frame' 기능을 활용하여 고정 풍속에서 터빈 로터가 일정 회전수로 회전한다고 가정하여 수치계산을 실시하고, 1차로 각 날개 벽면에 작용하는 압력에 의한 회전모멘트(moment)를 구한다.

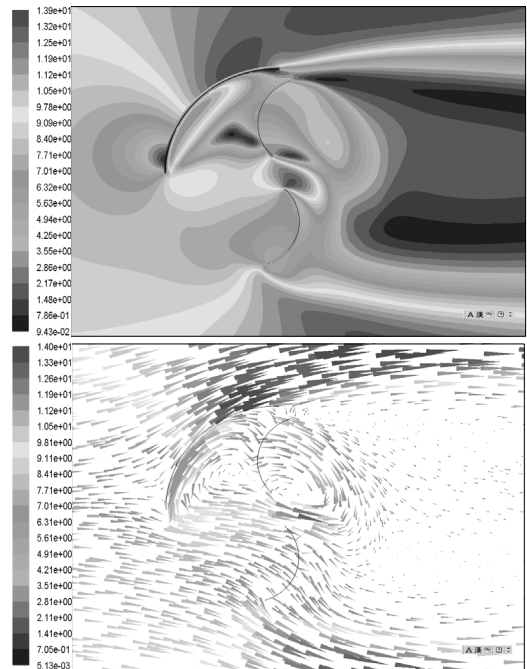
터빈 로터에 작용하는 회전모멘트가 양의 값을 나타낼 경우, 가정한 터빈 로터의 회전수가 적절한 회전수 보다 작게 지정된 것이고, 반대로 적절한 회전수 보다 큰 회전수로 지정이 되었다면 회전모멘트의 값은 음으로 나타날 것이다.

따라서 각 날개에 작용하는 회전모멘트의 합이 0이 될 때 회전수가 풍속에 대한 터빈 로터의 적정 회전수라고 할 수 있을 것이다. 적정 회전수를 결정짓기 위해서 회전모멘트의 합이 최소화하는 값을 찾기 위해서 순차적으로 회전수를 변경하여 수치계산을 반복 실시하였고, 회전모멘트의 값이  $\pm 0.05\text{N}\cdot\text{m}$  이하가 될 때 터빈 로터의 회전수를 최종 결정하였다.

Figure 3은 입구 풍속 9m/s에서 윈드실드가 부착되지 않은 경우(a)와 부착된 경우(b)의 터빈 로터의 축과 날개, 그리고 윈드실드 주변의 유동현상을 규명하기 위해 속도장(velocity contour)과 속도벡터(velocity vector)를 나타내었다. 그림에서와 같이 (a)의 경우에는 상부 날개 원호의 외부에서 발생하는 속도의 감소가 (b)의 경우에서 보다 확연하게 나타나고 있고, (b)에서는 이러한 속도의 감소가 윈드실드 외부의 하단에서 발생되고 있다. 이것은 높은 정압(static pressure)에 의한 유체 저항의 발생위치가 (a)의 경우에는 상부 날개에서 발생하고, (b)의 경우에는 윈드실드에서 발생하는 것을 의미한다. 그리고 상부 날개 원호의 내부에서 양의 회전모멘트( $M^+$ )에 도움이 되는 와류 유동의 세기가 (a)의 경우보다 (b)의 경우에서 높게 발생하고 있다. 윈드실드로 인해 로터의 중심에서 시계



(a) no wind-shield



(b) 1/4 wind-shield

Figure 3: Velocity contours and vectors around wind turbine at wind velocity 9m/s simulated by FLUENT

방향인 음의 회전모멘트를 받는 날개로 유입되는 유체의 최소화, 와류 유동의 세기가 윈드실드가 부착되지 않은 경우에 비해 상대적으로 양의 회전모멘트( $M^+$ )가 증가시킴을 알 수 있다.

3.4 실험장치

본 연구에서 수행한 사보니우스 풍력 터빈의 실험은 Figure 4에서와 같이 개방형 풍동 시험 설비를 이용하여 이루어졌다. 풍동의 구조는 송풍기(vane-axial blower), 확산부(diffuser), 수축부(contraction)로 이루어져 있으며, 전체길이는 약 8m이다.

그리고 풍동의 구동과 유속을 제어하기 위한 제어장비인 인버터가 풍동의 외부에 설치되어 최대속도는 30m/s까지 연속적인 유속의 변화가 가능하다. 풍동의 직접적인 구동은 185kW의 3상 440V 가변 직류 전동기에 의해 구동되며, 직류전동기의 최대 분당 회전수는 1,750N이다. 풍동의 최대 유량은 5,040m<sup>3</sup>/min이다.

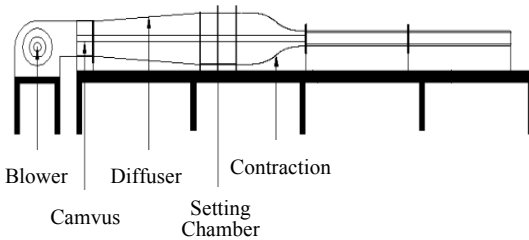


Figure 4: Schematic of open-type wind tunnel

풍력터빈의 기초적인 평가를 위해 최대출력이 회전수 200rpm에서 540W, 발전전극 12극(poles), 기동토크(starting torque) 0.02N-m의 발전기의 축에 직접 연결 설치하여 회전 속도계로 각각의 실험조건에 따라 회전수(rpm, N)를 측정하였다. 풍속은 피토크관(pitot tube)과 디지털 마이크로 마노메타(digital micro manometer)를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 사보니우스 풍력 터빈의 윈드실드 부착여부에 따른 상대적인 특성 비교와 향후 상세설계를 위한 기초자료로 활용하기 위한 기초 실험을 목적으로 하고 있어, 평가특성은 단순히 발전기가 부착된 상태에서 터빈 로터의 회

전수만을 고려하였다.

실험에서는 터빈의 베어링 마찰저항, 자체무게, 관성 등 터빈 로터의 회전력에 미치는 인자들을 수치해석에서 반영될 수 없기 때문에 수치해석결과와 실제 실험결과에서 획득된 회전수를 단순 비교할 수는 없다. 따라서 입구측 최고유속(17m/s,  $U_{max}$ )에서 획득된 최고회전수( $N_{max}$ )로 나눈 값으로 수치계산결과와 실험결과를 Figure 5에서 비교하였다.

그림에서와 같이 수치해석결과와 실험결과와의 경향이 대체적으로 잘 일치하고 있다. 저속에서 수치해석결과와 실험결과가 다소 차이를 보이는 것은 실제 실험에서는 터빈과 발전기 자체의 기동토크, 각 연결부위에서 마찰저항 등을 가지지만, 수치계산에는 이러한 영향을 고려할 수 없기 때문에 파악된다.

그리고 일반적인 사보니우스 풍력 터빈의 정격출력 풍속이 구간인 10~13m/s에서 1/4 윈드실드가 부착된 터빈 로터의 경우, 수치해석결과와 실험결과에서 약 70% 정도 향상된 결과를 보였다.

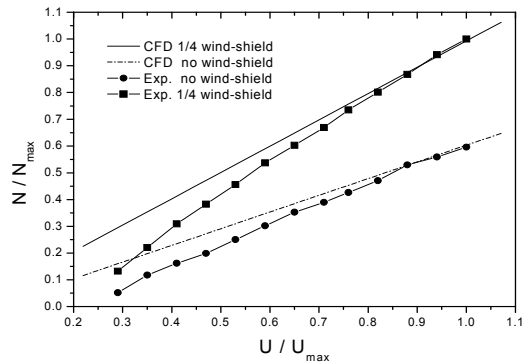


Figure 5: Rotational speed changes of turbine rotor according to wind velocity

4. 결론

본 연구에서는 기존 수치축 풍력 터빈의 효율향상을 위해 부착된 윈드실드의 효과를 수치해석과 실험을 통해 검증하고 다음과 같은 결론을 얻었다. 터빈 로터의 회전수 측정에 대한 수치해석결과와 실험결과와의 경향이 일치함을 확인하였고, 1/4 윈드실드를 부착한 풍력 터빈의 회전수 측정 결과 기존

의 풍력 터빈의 회전수보다 약 70% 이상의 향상을 보였다.

1/4 형상의 윈드실드가 기존 터빈의 효율개선에 기여할 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후 1/4 윈드실드 형상이외에 1/2 윈드실드 또는 3/4 윈드실드 등의 다양한 윈드실드의 형상이 터빈의 효율개선에 도움이 될 것으로 판단되며, 이에 대한 추가 연구가 필요할 것을 생각된다.

그리고 향후 풍력 터빈 성능해석을 위한 선행 기초자료로 회전수 예측 시 수치해석을 활용한 회전수 측정방법이 도움이 될 것으로 사료된다.

### 참고문헌

[1] 박준용, 이명재, 이승진, 이승배, “고효율 소형 수직형 풍력터빈의 공력성능에 관한 실험적 연구,” 대한기계학회논문집, B권 제33권, 제8호, pp. 580-588, 2009.

[2] 김동진, 김문경, 차득근, 윤순현, “아크형 날개를 이용한 항력식 수직축 소형 풍력 터빈 설계,” 유체기계저널, 제9권, 제2호, pp. 7-12, 2006.

[3] 김범석, 이강수, 김만응, “2MW급 풍력터빈 블레이드 설계 및 단방향 유체-구조연성해석,” 대한기계학회논문집 B권, 제33권, 제12호, pp. 1007-1013, 2009.

[4] Kim, K.H. and Lee, J.O., “About analysis of vertical axis wind turbine generator”, Trans. of the KSME(B), vol. 3, no. 2, pp. 60-67, 1979.

[5] J. L. Menet, “A double-step Savonius rotor for local production of electricity : A design study renewable energy”, vol. 29, pp. 1843-1862, 2004.

[6] Mojola, O.O. and Onasanya, O.E., “Performance testing of a Savonius windmill rotor in shear flows”, Journal of Wind Engineering, vol. 8, no. 2, p. 109, 1982.

[7] V. H. Morcos and O. M. E. Abdel-Hafez March, “Testing of an arrow-

head vertical-axis wind turbine model Renewable Energy”, vol. 7, pp. 223-231, 1996.

[8] Moutsoglou, A. and Weng Y., “Performance tests of a benesh wind turbine roter and a Savonius rotor”, WIND ENGINEERING LONDON, vo1. 19, no. 6, pp. 349-362, 1995.

[9] Blackwell, B.B., Sheldahl, R.E. and Feltz, L.V., “Wind-tunnel performance data for two and three-bucket Savonius rotors”, Sandia Laboratories Energy Report, SAND76-0131, also Journal of Energy, vol. 2, pp. 160-164, 1978.

[10] 신지영, 손영석, 차득근, 이철균, 황이철, “수직축 풍력터빈 블레이드의 공기역학적 특성,” 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 제8호, pp. 877-844, 2006.

[11] Burcin Deda Altan, Mehmet Atilgan, “An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor”, Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 3425-3432, 2008.

### 저 자 소 개



#### 홍철현(洪徹弦)

1997년 부산대학교 기계공학과 (공학사), 1997년 부산대학교 기계공학과(공학석사), 2004년 부산대학교 기계공학과(공학박사), 1999년 - 2000년 대우정밀(주) 기술연구소(연구원), 부산대학교 기계설계 전산화인력양성센터(전임연구원), 2000년 - 2006년 부산대학교 기계설계전산화인력양성센터(전임연구원), 2006년 - 2009년 부산대학교 기계공학부 NURI BEAM(교수), 2009년 - 현재 부산대학교 기계설계전산화인력양성센터(전임연구원). 관심분야: 기계공학, CAD/CFD/CAE