

300W 급 Savonius 형 수직축 풍력발전기의 유동소음특성에 관한 수치적 연구

Numerical analysis on the flow noise characteristics of 300W Savonius-type vertical-axis wind turbines

김상현* · 이광세* · 정철웅* †

Sanghyoen Kim, Gwangse Lee, and Cheolung Cheong

Key Words : Vertical-axis wind turbine(수직축 풍력발전기), Savonius(사보니우스), Flow noise(유동소음), Tip speed ratio(유속비)

ABSTRACT

In this paper, flow noise characteristics of Savonius-type vertical-axis wind turbines are numerically investigated using hybrid CAA techniques. High frequency harmonics as well as BPF components are identified in the predicted noise spectra from a Savonius wind turbine. As the BPF components belong to infrasound, the higher harmonic components affects human response dominantly. Further analysis is performed to investigate the reason causing the higher frequency harmonic noise by changing operational conditions of a Savonius wind turbine. Based on this result, it is revealed that the frequency of higher harmonic components is determined by the radius of blades and angular velocity of Savonius wind turbine.

기 호 설 명

- TSR : 유속비
- BPF : 블레이드 통과 주파수 [Hz]
- w : 회전속도 [rad/s]
- U : 입사풍속 [m/s]
- r : 날개 반경 [m]
- f : 고조파소음 발생주파수 [Hz]

1. 서 론

최근 들어 화석연료의 고갈 및 공급 불안으로 인한 고유가의 영향, 날로 엄격해지는 이산화탄소 배출제한, 기후협약 등으로 인해 기존의 화석연료를 대체할 새로운 에너지원에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이러한 상황에서 차세대 에너지원으로 신·재

생에너지가 주목 받고 있다. 대표적인 신·재생에너지로는 태양열, 풍력, 조력, 원자력, 바이오 에너지 등이 있다. 그 중에서도 풍력발전은 바람의 운동에너지를 기계적 에너지로 변환하여 발전에 이용하는 수단으로, 에너지원인 바람의 고갈 걱정이 없고 전 세계 어디에서나 쉽게 구할 수 있는 점 등에서 특히 주목 받고 있는 신·재생에너지이다.

풍력발전기는 풍력발전기 날개의 회전축과 바람의 방향이 이루는 각도에 따라, 수평축 풍력발전기와 수직축 풍력발전기로 나뉘어 진다. 수평축 풍력발전기는 높은 발전 효율과, 크기에 비례하는 발전량으로 인해 점점 더 대형화가 이루어지고 있고, 이에 따른 관련 연구도 활발히 진행되고 있다. 이에 비해 수직축 풍력발전기는 바람의 방향에 대한 발전의 제약이 없고, 유지·보수가 용이할 뿐 아니라 제작이 간편하고 비용이 저렴한 장점을 가지고 있지만, 동일면적대비 수평축에 비해 현저히 떨어지는 발전효율을 가지는 치명적인 단점으로 인해 비교적 관련 연구가 미비한 실정이다.

하지만 최근 들어, 독립형 풍력발전기로서 소형

† 교신저자; 정철웅, 부산대학교
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel :051-510-2311 , Fax :051-514-7640
* 부산대학교

수직축 풍력발전기가 주목 받고 있다. 독립형 풍력 발전기는, 실생활에 필요로 하는 적은 양의 전기를 직접 생산해 사용하는 소규모 풍력발전이다. 이러한 독립형 풍력발전기에 사용되는 소형 수직축 풍력발전기는 주거지역과 가까운 장소에 설치되는 경우가 많기 때문에, 풍력발전기의 성능뿐 아니라 소음 또한 중요한 문제점으로 지적 받고 있다. 하지만, 현재 수직축 풍력발전기의 유동소음에 관한 연구는 대단히 미비한 실정이고, 그 연구 또한 전체 음압레벨 평가에 주목하고 있을 뿐, 그 특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 그러므로 본 연구에서는 복합 전산공력음향학(Hybrid Computational Aeroacoustics)기법^{(1),(2)}을 이용하여, 수직축 소형 풍력발전기의 유동소음 특성을 수치적으로 분석하였다.

2. 사보니우스 풍력발전기

본 연구에서는 대표적인 수직축 풍력발전기의 형태 중 하나인 사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성에 대하여 연구를 수행하였다. 사보니우스 풍력발전기는 핀란드의 공학자 Savonius⁽³⁾에 의해 고안된 풍력발전기로 Fig. 1과 같이 반원형태를 한 복수의 날개와 중심축, 그리고 스팬방향으로 두 개의 끝판을 가진 간단한 형태로 구성되어 있다. 사보니우스 풍력발전기는 항력형 풍력발전기로, 양력형 풍력발전기에 비해 그 효율이나 발전량이 적은 단점을 가지고 있지만, 초기 작동 시 비교적 낮은 풍속에서도 발전이 가능하고, 형태가 간단하여 제작이 용이한 장점을 가지고 있다.



Fig. 1 Configuration of a Savonius wind turbine

Fig. 2는 사보니우스 풍력발전기의 날개단면 형상을 결정하는 설계인자를 나타내고 있다. 본 연구에서는 가장 기본적인 형태의 날개단면 형상을 고려하여 연구를 수행하였다. 설계인자 중, a 및 e 의 값은 0으로 하였으며, $r=0.275m$, $D=0.57m$ 로 설정

하였다.

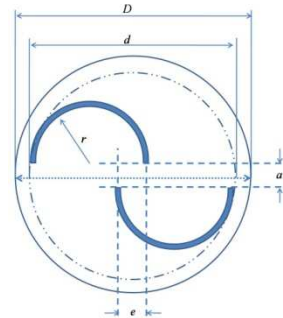


Fig. 2 Cross-sectional view of Savonius wind turbine blade

사보니우스 풍력발전기는 Fig. 3과 같이 TSR(Tip speed ratio)에 따라 발전효율이 정해지는 특징을 가지고 있다⁽⁴⁾. TSR은 풍력발전기 끝 단의 속도와 입사 풍속간의 비를 나타내는 무차원수로 다음 Eq. (1)과 같이 나타낸다.

$$TSR = \frac{wr}{U} \quad (1)$$

여기에서 w 는 풍력발전기의 회전속도, r 은 날개반경, U 는 입사풍속을 의미한다. 본 연구에서는 TSR을 결정하는 세 가지 변수인 회전속도, 반경, 입사 풍속의 변화에 따른 사보니우스 풍력발전기의 유동소음에 관한 연구를 수행하였다.

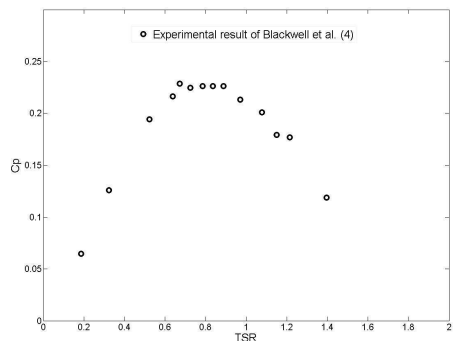


Fig. 3 Power coefficient versus Tip speed ratio

3. 전산유체역학을 이용한 수치해석

3.1 격자

사보니우스 풍력발전기의 유동소음원을 예측하기 위하여 먼저 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 이용한 수치해석 기법을 적용하였다. 수치해석에 사용된 격자 및 전체 계산영역은 Fig. 4

와 같이 설정하였다. 풍력발전기의 회전을 모사하기 위해 풍력발전기를 포함하면서 일정한 속도로 회전하는 영역과 그 주위의 정지하고 있는 유체, 두 영역으로 나누어 격자를 구성하였다. 격자생성을 위하여 상용프로그램인 ANSYS ICEM CFD를 사용하였다.

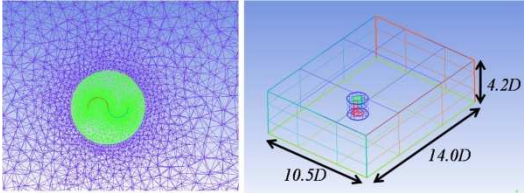


Fig. 4 Computational grid

3.2 지배방정식과 수치기법

일정한 속도로 입사되는 바람속에서 회전하는 풍력발전기 주위의 유동장을 해석하기 위해 전산유체역학을 이용한 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 Eq. (2)와 Eq. (3)과 같은 비정상 비압축 3차원 RANS방정식을 지배방정식으로 사용하였다⁽⁵⁾.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

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

여기에서 $-\rho \overline{u_i u_j}$ 항은 난류에 의한 영향을 나타내기 위한 항으로 이를 모델링하기 위해 많은 종류의 난류모델이 사용되고 있다. 본 연구에서는 그 중, k- ω SST(Shear-Stress Transport) 난류모델을 사용하여 이러한 난류에 의한 유동영향을 모사하였다. k- ω SST 난류모델은 다른 여러 가지 난류모델에 비해, 벽면 근처에서의 복잡한 유동현상을 정확하게 예측하는 장점을 가지고 있어, 입사되는 바람과 회전하는 풍력발전기 사이에서 발생하는 복잡한 유동현상을 분석하기에 적합한 난류모델이라 할 수 있다.

비정상 비압축 3차원 RANS방정식을 이용한 유동장 해석을 위해 사면체 격자를 이용한 유한체적법을 통하여 공간을 이산화하였고, SIMPLE method와 2nd order UPWIND method를 이용하여 이를 모델링 하였다. 또한, 풍력발전기를 포함하여 회전하는 유체와 정지해 있는 유체 사이의 유동현상을 수치적으로 해석하기 위해 Sliding mesh기법을 사용하였다.

전산유체역학을 이용한 풍력발전기의 유동소음원

을 이용하여 소음해석을 수행하기 위해 FW-H(Ffowcs Williams and Hawkings) 방정식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} \\ + \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f) \} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서, T_{ij} 는 Lighthill 응력텐서로 $T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij}$ 로 나타낸다. 대부분의 회전체 소음과 같이 날개표면 위의 이중극 소음이 주요하게 작용할 것이라는 가정하에 소음원 영역으로는 풍력발전기 날개를 설정하였고 출극, 사중극 소음원은 무시하였다.

전산유체역학을 통한 수치해석이 사보니우스 풍력발전기에 의해 발생하는 3차원 유동장에서의 유동현상을 정확히 모사하고 있는지 검증하기 위해 다음과 같은 항력계수, 양력계수, 파워계수 세 가지 무차원수를 이용하였다.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (5)$$

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (6)$$

$$C_p = \frac{T_w}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (7)$$

여기에서 A 는 풍력발전기의 면적, U 는 입사풍속을 의미한다. 풍력발전기는 일정한 회전속도를 가지고 회전하고 있기 때문에 특정한 주기를 가진 물리적 현상이 반복적으로 일어나게 된다. 세 가지 무차원수 역시 Fig. 5에서와 같이 일정한 주기로 반복되는 것을 확인하였고, 이러한 유동해석 결과를 사용하여 소음 예측을 수행하였다.

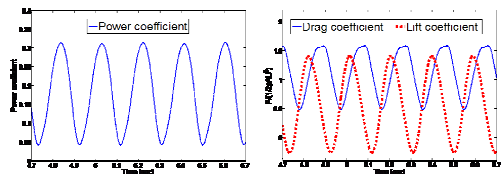


Fig. 5 Coefficient versus time

4. 결과 및 고찰

4.1 사보니우스 풍력발전기 유동소음 특성

풍력발전기는 n 개의 날개를 가지고 w 의 회전속도로 회전하게 된다. 이러한 회전체

는 날개의 개수와 회전속도에 의해 다음 Eq. (8)과 같이 정의되는 BPF(Blade passing frequency)에서 지배적인 소음이 발생하는 것으로 알려져 있다⁽⁶⁾.

$$BPF = \frac{rpm \times n}{60} \quad (8)$$

Fig. 6은 U=9.0m/s, r=0.275m, w=16.364rad/s 인 경우, 사보니우스 풍력발전기에서 발생하는 유동 소음에 대하여 예측한 스펙트럼을 나타내고 있다. 해당 조건에서 사보니우스 풍력발전기의 BPF는 약 5.2Hz이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 사보니우스 풍력발전기에서도 웬과 마찬가지로 BPF에서 소음이 주요하게 발생하는 것을 알 수 있다. 웬에서 발생하는 BPF 소음은 그 음압의 레벨이 높고, 웬의 빠른 회전속도에 의해 높은 주파수 영역 내에서 발생하기 때문에 웬의 소음특성을 규정하는 주요한 성분이다. 하지만 사보니우스 풍력발전기의 BPF소음은 그 주파수 영역대가 5Hz ~ 20Hz로서 인프라스운드 영역에 속하게 되어 사람들이 청각으로 인지하기는 힘들다.

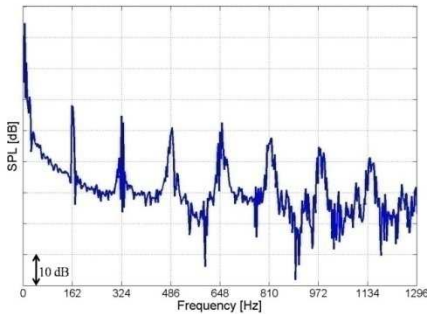


Fig. 6 Spectrum of Savonius W.T

스펙트럼으로부터 사보니우스 풍력발전기는 BPF 소음뿐 아니라 162Hz의 주파수를 가지는 하모닉 성분의 소음이 발생하고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 편의상 이러한 하모닉 성분의 소음을 고조파소음성분이라 칭하기로 한다. 이러한 고조파소음은 BPF소음과 더불어 사보니우스 풍력발전기의 유동소음을 특정 짓는 사보니우스 풍력발전기의 고유한 소음특성이라 할 수 있다. 사보니우스 풍력발전기에서 고조파소음이 발생하는 원인은 Fig. 7과 Fig. 8을 통해 분석할 수 있다. Fig. 7은 음압레벨의 방향성 (directivity) 을 나타낸 것이고, Fig. 8은 시간에 따른 유동장내의 와도 (vorticity) 를 나타낸 것이다. 사보니우스 풍력발전기의 음압레벨은 Fig. 7에서처럼 풍력발전기와 상대적 위치에 따라 그

방향성이 뚜렷하게 나타난다. 전체적으로 상류방향보다 후류방향에서 음압레벨이 크게 나타나고 있으며, 입사유동과 이루는 각도가 약 150~210° 인 영역에서 특히 더 큰 음압레벨이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 사보니우스 풍력발전기가 항력형이기 때문에 양력 이중극 (lift dipole) 소음원보다 항력 이중극(drag dipole) 소음원이 주요하게 작용하고 있다는 것을 나타낸다. Fig. 8은 입사유동과 풍력발전기의 상대적인 위치에 따른 유동장 내의 와도를 나타내고 있다. 입사유동과 풍력발전기의 회전에 의한 상호작용으로 인해 풍력발전기 내부에서부터 vortex가 생성되고, 생성된 vortex는 입사유동이 사보니우스 풍력발전기 날개 내부에 머무르는 동안 날개내부에서 점점 발달하다 입사유동이 날개를 빠져나가게 되면 날개 양 끝 단을 통해 풍력발전기의 후류방향으로 빠져나가게 된다.

Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 통해 날개내부에서 발생한 vortex가 후류방향으로 빠져나오면서 풍력발전기의 후류방향, 특히 입사유동과 이루는 각도가 약 150~210° 인 영역에서 vortex와 발전기 날개의 상호작용이 사보니우스 풍력발전기의 고조파소음을 발생시키는 것으로 판단된다.

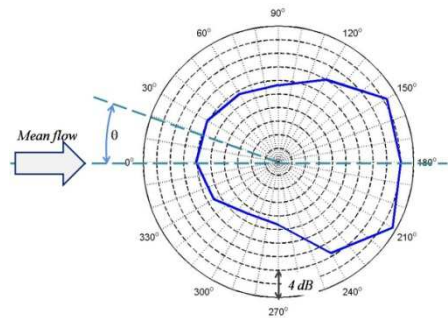


Fig. 7 Spectrum of Savonius W.T

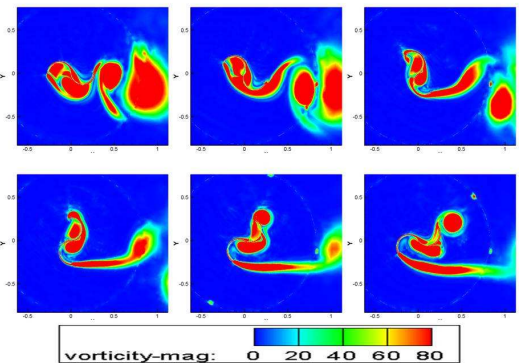


Fig. 8 Snap-shots of vorticity variation during one rotation of a wind turbine

4.2 고조파소음 발생 주파수

앞절에서 기술한 바와 같이, 사보니우스 풍력발전기에서는 BPF보다 높은 주파수에서 고조파소음이 발생하고 있고, 풍력발전기 날개와 입사되는 바람 사이의 상호작용으로 인한 와류가 그 원인으로 판단된다. 이러한 가정하에서 본 논문에서는 사보니우스 풍력발전기의 작동조건에 따른 고조파소음의 발생주파수 변화에 대한 연구를 수행하였다. 풍력발전기의 작동조건으로는 TSR을 정의하는데 사용되는 세 가지 요소인 회전속도(ω), 날개반경(r), 그리고 입사풍속(U)을 설정하였다.

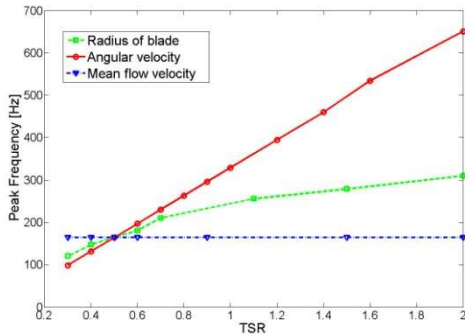


Fig. 9 Peak frequency versus TSR

Fig. 9는 풍력발전기의 작동조건의 변화에 따른 고조파 소음의 발생주파수 변화를 나타내고 있다. 세 가지 조건 중, 나머지 두 개를 고정시킨 상태에서 하나의 조건을 변화시키며 해당 조건에 의한 영향을 분석하였다. 먼저, 입사풍속의 영향을 살펴보면, 입사풍속은 고조파소음의 발생주파수와 무관함을 알 수 있다. 즉, 사보니우스 풍력발전기의 회전속도와 날개반경이 일정하게 유지된다면, 입사풍속이 변하여도 고조파소음의 발생주파수는 변하지 않는다. 풍력발전기의 회전속도의 경우, 관심영역 내에서 회전속도가 증가하면 주파수 또한 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 고조파소음 발생주파수와 풍력발전기 회전속도의 비는 관심영역 내에서, 약 10으로 일정하게 나타났다. 마지막으로 날개반경의 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 날개반경의 경우, 회전속도와 마찬가지로 날개반경이 커질수록 고조파소음의 발생주파수 역시 증가하는 경향을 보였다. 하지만 회전속도와는 다르게 그 증가폭이 점점 감소하는 경향을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는, 300W급 소형 수직축 사보니우스 풍력발전기의 유동소음 특성에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 사보니우스 풍력발전기는 웬에서와 마찬가지로 BPF 소음이 발생하고 있지만, 그 주파수 영역대가 매우 낮아 주요한 가청 소음원으로 작용하지는 못한다. 사보니우스 풍력발전기의 고유한 유동소음 특성으로 작동조건에 의해 결정되는 주파수에서 발생하는 보다 높은 주파수의 고조파소음이 발생함을 확인하였다. 이러한 소음성분은 입사되는 바람과 회전하는 풍력발전기 날개 사이의 상호작용에 의해 발생하는 vortex에 기인한 것으로 분석된다. 이러한 고조파소음이 발생하는 주파수는 풍력발전기의 회전속도 및 날개반경과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 향후, 고조파소음 발생주파수에 대한 풍력발전기의 높이, 단면 설계 인자 등의 영향을 추가적으로 연구한다면, 초기 설계 시 활용할 수 있는 고조파소음 발생주파수 예측식을 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20114010203080)

참 고 문 헌

- (1) Seung Heo, Daehwan Kim, Cheolung Cheong and Tae-Hoon Kim, 2011, Prediction of Internal Broadband Noise of a Centrifugal Fan Using Stochastic Turbulent Synthetic Model, Transactions of the KSNVE. Vol. 21, No. 12, pp. 1138-1145.
- (2) Seungyub Lee, Seung Heo and Cheolung Cheong, 2010, The Prediction and Reduction of the Internal Blade-passing-frequency Noise of the Centrifugal Fan in a Refrigerator, International Journal of Refrigerator, Vol. 33, No. 6, pp. 1129-1141.
- (3) Savonius S.J, 1931, The S-rotor and its applications, Mech. Eng., Vol. 53, pp. 333~338.
- (4) Ben F. Blackwell, Robert E. Sheldahl, 1978, Louis V. Feltz, 1997, Wind tunnel performance data for two- and three-bucket savonius rotors, Journal of Energy. Vol. 2, pp. 160~164.

- (5) Fluent 12.0 theory guide, ANSYS (2009).
- (6) Seungyub Lee, Seung Heo, Cheolung Cheong, Seokro Kim and Min-Young Seo, 2009, Computation of Internal BPF Noise of Axial Circulating Fan in Refrigerators, Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering. Vol. 19, No. 5, pp. 454-461.
- (7) João Vicente Akwa, Gilmar Alves da Silva Júnior, Adriane Prisco Petry, 2012, Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics, Journal of Renewable Energy. Vol. 38, pp. 141~149.
- (8) Nobuyuki Fujisawa, 1992, On the torque mechanism of Savonius rotors, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 40, pp. 277~292.
- (9) Ivan Dobrev, Fawaz Massouh, 2011, CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine, Energy Procedia. Vol. 6, pp. 711~720.
- (10) João Vicente Akwa, Horácio Antonio Vielmo, Adriane Prisco Petry, 2012, A review on the performance of Savonius wind turbines, Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 16, pp. 3054~3064.
- (11) David Afungchui, Baddreddinne Kamoun, Ali Helali, Abdellatif Ben Djemaa, 2010, The unsteady pressure field and aerodynamic performances of a Savonius rotor based on the discrete vortex method, Journal of Renewable Energy. Vol. 35, pp. 307~313.