사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성에 관한 수치적 연구

Numerical Analysis on the Flow Noise Characteristics of Savonius Wind Turbines

김 상 현* · 정 철 웅†
Sanghyeon Kim and Cheolung Cheong

(Received March 5, 2013 ; Revised May 27, 2013 ; Accepted June 3, 2013)

Key Words : Flow Noise(유동소음), Wind Turbine Noise(풍력터빈소음), Vertical-axis Wind Turbine(수직축 풍력터빈), Savonius Wind Turbine(사보니우스 풍력터빈)

ABSTRACT

Noise performance of small wind turbines is critical since these are generally installed near the community. In this study, flow noise characteristics of Savonius wind turbines are numerically investigated. Flow field around the turbine are computed by solving unsteady RANS equation using CFD techniques and the radiated noise are predicted by applying acoustic analogy to the computed flow data. Parametric study is then carried out to investigate the effects of operating conditions and geometric design factors of the Savonius wind turbine. Tonal noise components with higher harmonic frequency than the BPF are identified in the predicted noise spectra from a Savonius wind turbine. The end-plates and helical blades are shown to reduce overall noise levels. These results can be used to design low-noise Savonius wind turbines.

Nomenclature

BPF : 날개 통과 주파수
 C_D : 항력 계수
 C_L : 양력 계수
 C_P : 파워 계수
 TSR : 주속비

1. 서 론

풍력발전기는 날개의 회전축과 입사되는 바람의 방향이 이루는 각도에 따라, 수평축 풍력발전기와

수직축 풍력발전기로 나뉜다. 수평축 풍력발전기는 높은 발전 효율로 인해 풍력발전 연구 초기부터 많은 연구가 이루어지고 있고, 현재에는 그 영역을 육지를 넘어 해양에 까지 확대해가고 있다. 이에 비해 수직축 풍력발전기는 바람의 방향에 대한 발전의 제약이 없고, 구조적으로 안전하며, 유지·보수가 용이한 점 등 많은 장점을 가지고 있지만, 낮은 발전효율이라는 치명적인 단점으로 인해 그 연구가 미비한 실정이다.

하지만 최근 들어 독립형 풍력발전기 시장이 확대됨에 따라 수직축 풍력발전기가 주목 받고 있다. 독립형 풍력발전은 생산한 전기를 배터리를 충전하거나 가로등을 밝히는 등 생산한 곳에서 직접 사용

† Corresponding Author ; Member, Pusan National University
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel : +82-51-510-2311, Fax : +82-51-514-7640
* Pusan National University

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

하는 자급자족 형태의 소규모 풍력발전이다. 독립형 풍력발전은 주로 주거지역이나 도심지에 설치되는 경우가 많기 때문에, 풍황이 좋지 못한 환경에서도 일정수준 이상의 발전을 할 수 있는 수직축 풍력발전기가 사용되고 있다. 그 중에서도 사보니우스 풍력발전기는 초기 구동 시 매우 낮은 풍속에서도 발전이 가능한 장점으로 인해 독립형 풍력발전에서 널리 사용되고 있다.

사보니우스 풍력발전기에 관한 연구는 실험적/수치적 방법을 통해 연구되어왔다. Blackwell 등은 풍동 터널 실험을 통하여 날개 수와 풍속, 회전속도에 따른 사보니우스 풍력발전기의 성능특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다⁽¹⁾. Fujisawa는 유동가시화 실험 및 날개 위에서의 압력 측정 실험을 통해 사보니우스 풍력발전기의 토크 생성 메커니즘을 실험적으로 밝혀내었다⁽²⁾. Akwa 등은 수치적 해석기법을 통해 사보니우스 풍력발전기의 날개 겹침비가 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고, 특정 겹침비에서 평균 발전량이 최댓값을 가진다는 결과를 제시하였다⁽³⁾. Fernando 등은 사보니우스 풍력발전기 주변의 비정상 유동장에 대한 수치적 해석을 수행하였고, 이를 실험결과와 비교해 검증하였다⁽⁴⁾. 하지만 이러한 대부분의 연구는 성능향상에 그 목적을 두고 있을 뿐 소음에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성에 관한 연구를 수행하여 주요 소음원을 밝히고, 저소음 사보니우스 풍력발전기 설계를 위한 기초 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 풍력발전기가 일정한 입사 풍속과 일정한 회전속도의 조건하에서 구동한다고 가정하였고, Lighthill⁽⁵⁻⁶⁾의 음향상사법(acoustic analogy)에 그 기초를 둔 Ffowcs Williams and Hawkins⁽⁷⁾ 방정식을 사용한 복합 전산공력음향학(computational aeroacoustics, CAA)을 이용한 수치적 기법을 통해 분석하였다.

2. 사보니우스 풍력발전기

사보니우스 풍력발전기는 Savonius⁽⁸⁾에 의해 고안된 항력형 수직축 풍력발전기로, Fig. 1과 같이 반원 형태를 한 복수의 날개(bucket), 중심축(shaft), 그리고 스핀방향으로 양 측에 위치한 두 개의 끝판(end-plate)을 가진 간단한 형태로 구성되어 있다.

Fig. 1 Configuration of a Savonius wind turbine

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

Fig. 2는 날개단면 형상을 결정하는 설계인자를 나타내고 있다. 이 연구에서는 사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성을 분석하기 위하여, 가장 기본적인 형태의 날개단면 형상을 고려하였다. 이를 위해 중심축을 배제하였으며 겹침비 a , 간격비 e 의 값을 0으로 설정하였다. 날개 직경 d 는 0.55 m, 끝판의 직경 D 는 0.57 m, 로터 높이 h 는 0.72 m로 정하였고, 풍력발전기의 회전 속도 및 입사유동의 풍속은 정격 출력 조건인 16.364 rad/s와 9.0 m/s로 설정하였다.

3. 전산유체역학을 이용한 유동장 해석

3.1 해석격자

사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성을 분석하기 위해 먼저, 전산유체역학을 이용한 수치해석기법을 적용하여 비정상 비압축성 3차원 유동장을 해석

Fig. 3 Computational grids for entire computation domain: inlet boundary at $x=-5D$ and outlet boundary at $x=9D$

하였다. 해석에 사용된 격자 및 해석 영역은 Fig. 3과 같다. 전체 해석 영역은 일정한 속도로 회전하는 풍력발전기의 운동을 모사하기 위해 풍력발전기를 포함한 회전 영역과 그 주위의 정지하고 있는 유체, 두 영역으로 나누어 설정하였다. 풍력발전기 날개 주변은 날개 주변에서 일어나는 복잡한 유동현상을 정확히 모사하기 위해 더욱 조밀한 격자를 생성하였다. 풍력발전기의 중심은 상류 경계조건으로부터 하류쪽으로 $5D$ 떨어진 곳에 위치하고 있다. 격자생성은 상용 격자생성 프로그램인 ANSYS ICEM CFD V13.0을 사용하였다⁽⁹⁾.

3.2 지배방정식 및 해석 기법

사보니우스 풍력발전기의 유동소음을 예측하기 위해서는 풍력발전기 주위의 비정상 유동장에 대한 정보가 필요하다. 그러므로 전산유체역학을 이용하여 풍력발전기 주변의 비정상 유동장을 식 (1)~(3)과 같은 비정상 비압축성 3차원 RANS방정식을 사용하여 해석하였다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \rho u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i) \\ &= \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

여기에서 ρ 는 밀도, u 는 속도벡터, p 는 압력, μ 는 점성을 나타낸다. 식 (2)의 우변에서 나타나는 $-\overline{\rho u_i u_j}$ 항은 Reynolds stress로, 유동장 내의 난류에 의한 영향을 모사하기 위한 항이다. 전산유체역학에

서는 일반적으로 식 (3)과 같은 Boussinesq approximation을 적용하여 난류에 의한 영향을 모사한다. 여기에서 k 는 난류 운동에너지를 μ_t 는 난류 점성을 나타낸다. 이러한 난류 운동에너지와 난류 점성을 계산하기 위해 여러 가지 난류모델이 개발되어 왔다. 풍력발전기에서는 입사하는 바람과 회전하는 날개 사이의 상호작용으로 인해 벽면 근처에서 복잡한 유동현상이 발생하게 된다. 이러한 벽면 근처의 복잡한 유동현상을 정확하게 해석하기 위해 $k-\omega$ 난류모델을 선정하였다. 그 중에서도, 벽면 근처의 복잡한 유동장뿐 아니라 충분히 발달된(fully-developed) 유동장에서도 뛰어난 정확성을 보일 수 있도록 고안된 $k-\omega$ SST 난류모델을 사용하여 난류 운동에너지 및 난류 점성을 계산하였다⁽¹⁰⁾.

비정상 비압축성 3차원 RANS방정식을 이용한 유동장을 해석하기 위해 유한체적법을 적용하여 공간을 이산화 하였고, 2차 UPWIND 방법과 SIMPLE 방법을 이용하여 수치적 연산을 수행하였다. 경계조건으로는 일정한 풍속을 모델링하기 위한 velocity inlet 조건과 대기 조건을 모델링하기 위한 pressure outlet 조건을 적용하였고, 회전 영역과 정지하고 있는 유체 사이의 유동현상을 수치적으로 모사하기 위해 sliding mesh기법을 적용하였다⁽¹⁰⁾.

3.3 수치해석기법의 검증

풍력발전기의 경우 특정 풍속에서 전력생산의 최대 효율성을 가지는 특정 회전속도를 가지게 되므로, 해당 회전 주기를 가진 물리적 현상이 반복하여 발생한다. 전산유체역학을 이용한 수치해석이 이러한 사보니우스 풍력발전기의 운동을 정성적으로 모사하고 있는지 검증하기 위해, 사보니우스 풍력발전기의 항력계수(drag coefficient, C_D), 양력계수(lift coefficient, C_L), 그리고 파워계수(power coefficient, C_P)를 계산하였다. 세 가지 무차원수는 다음 식 (4)~(6)과 같이 나타낸다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (4)$$

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

Fig. 4 Time variation of aerodynamic non-dimensional coefficients

Fig. 5 Predicted result of grid refinement study

$$C_P = \frac{T w}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (6)$$

여기에서 A 는 사보니우스 풍력발전기 단면적, U 는 입사풍속, T 는 풍력발전기의 토크(torque), w 는 회전속도를 의미한다. 세 가지 무차원수는 Fig. 4와 같이, 일정 회전 수 이후에서 사보니우스 풍력발전기의 회전주기에 맞추어 반복적인 거동을 보이는 것을 확인하였다. 이 연구에서는, 이러한 반복적인 거동을 보이는 수치해석 결과를 이용하여 향후 사보니우스 풍력발전기의 소음예측을 수행하였다. 전산유체역학을 이용한 유동장 해석에는 상용해석 프로그램인 ANSYS FLUENT V13.0을 사용하였다⁽¹⁰⁾.

전산유체역학을 이용한 수치해석 결과는 격자의 크기에 무관하게 일정한 결과를 보여야 그 결과의

신뢰성을 확보할 수 있다. 이를 위해 격자 미세화 연구를 수행하였고, 식 (6)의 파워계수 값을 이용하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 격자의 개수가 150만개 이상이 될 경우 거의 동일한 파워계수 약 0.23을 확보할 수 있다. 이 때 얻어진 파워계수의 값을 Blackwell⁽¹⁾등이 제시한 실험값과 비교해보았을 때, 약 8.5%의 오차를 나타내는 것을 확인하였고 이는 충분히 신뢰할 만한 결과로 판단하였다. 그러므로 이 연구에서는 150만개의 격자를 사용하여 사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성에 관한 연구를 수행하였다.

4. 음향상사법을 이용한 유동소음 해석

유동장내에서 발생하는 유동소음을 예측하기 위한 수학모델은 Lighthill⁽⁵⁻⁶⁾의 음향상사법(acoustic analogy)에 그 기초를 두고 있다. Lighthill은 Navier-Stokes 방정식을 파동방정식 형태로 정리하여 유동장내에서 발생하는 난류에 의한 공기역학적 소음을 사극자(quadrupole) 소음원으로 모델링 할 수 있음을 보였다. 이후, Curle⁽¹¹⁾은 Lighthill의 음향상사법을 확장하여, 유동장내의 정지해 있는 물체에 의해 발생하는 유동소음을 물체 표면에서의 힘의 변화에 따른 이극자(dipole) 소음원으로 나타내었다. 이후, Ffowcs Williams와 Hawkins⁽⁷⁾는 움직이는 물체가 포함된 유동장 내에서 발생하는 유동소음을 단극자(monopole), 이극자, 사극자 소음원으로 모델링 할 수 있다는 것을 보였다. 식 (7)은 Ffowcs Williams와 Hawkins에 의해 제안된 FW-H 방정식을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = & \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho(u_n - v_n)] \delta(f) \} \\ & - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho(u_n - v_n)] \delta(f) \} \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{ T_{ij} H(f) \} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 T_{ij} 는 Lighthill의 응력텐서로 $T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2(\rho - \rho_0)\delta_{ij}$ 로 나타낸다. 식 (7)의 오른쪽 항은 차례대로 부피의 시간 변화율에 따른 단극자 소음원, 물체표면의 압력섭동에 따른 이극자 소음원,

유체내의 난류속도장의 섭동에 따른 사극자 소음원을 나타낸다. 저마하수 회전체에서 발생하는 유동소음과 마찬가지로 사보니우스 풍력발전기에서 발생하는 소음은, 날개표면에서의 압력변동에 의한 이극자 소음원이 전체 유동소음에 지배적으로 작용할 것이라는 가정 하에 풍력발전기 날개를 주요 소음원 영역으로 설정하였으며, 단극자 소음원과 사극자 소음원은 무시하였다.

소음원을 모델링하기 위하여 우선 3.2절에서 언급한 3차원 비정상 비압축성 RANS방정식을 이용하여 3차원 유동장 해석을 수행하였다. 충분한 수렴성 및 반복성을 확보한 해석결과를 바탕으로, 시간에 따른 풍력발전기 날개위의 압력 정보를 취득하였고, 이를 식 (7)에 적용하여 사보니우스 풍력발전기의 유동소음을 예측하기 위한 소음원으로 적용하였다.

5. 사보니우스 풍력발전기 유동소음특성

5.1 소음원 분석

(1) 날개 통과 주파수 소음

Fig. 6은 $U=9.0$ m/s, $d=0.55$ m, $w=16.364$ rad/s인 경우에 대하여, 식 (7)의 FW-H 방정식을 이용하여 해석한 대상 사보니우스 풍력발전기의 후류방향 4m 위치에서 발생하는 유동소음에 대한 전형적인 음압 스펙트럼을 나타내고 있다. 풍력발전기는 행과 마찬가지로 n 개의 날개를 가지고 일정한 회전속도로 회전하는 특성을 가지고 있다. 이러한 회전체의 경우, 날개의 수와 회전속도에 의해 정해지는 날개 통과 주파수(blade passing frequency, BPF)와 그의 하모닉 주파수에서 지배적인 소음이 발생하는 것으로 알려져 있다⁽¹²⁾. 날개 통과 주파수는 아래 식 (8)과 같이 정의된다.

$$BPF = \frac{wn}{2\pi} \quad (8)$$

대상 사보니우스 풍력발전기의 경우, 회전속도가 $w=16.364$ rad/s이고, 날개의 수가 $n=2$ 이므로 날개 통과 주파수는 식 (8)에 의해 약 5.2 Hz임을 알 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 사보니우스 풍력발전기 역시 해당 날개 통과 주파수에서 큰 음압 레벨의 소음이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 본 연구의 대상인 사보니우스 풍력발전기의 경

우, 날개의 수가 대부분 2개 또는 3개로 이루어져 있고, 회전속도 또한 매우 느리기 때문에 날개 통과 주파수가 5~15 Hz의 매우 낮은 주파수 영역 내에서 형성되고, 이는 인프라 사운드 영역 대에 속하게 된다. 그러므로 사보니우스 풍력발전기에서 발생하는 날개 통과 주파수 소음의 경우 비록 그 음압 레벨이 크다고 하더라도 가청주파수내에서의 주요한 소음원으로 작용하진 않는다는 것을 확인할 수 있다.

(2) 고조파 소음

Fig. 6에서 확인할 수 있는 또 다른 사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성은 약 162 Hz의 기본 주파수를 가지는 하모닉(harmonic) 성분의 소음을 들 수 있다. 이 연구에서는 편의상 이러한 하모닉 성분의 소음을 ‘고조파 소음’이라 부르기로 한다. 사보니우스 풍력발전기에서 고조파 소음이 발생하는 원인은 Fig. 7과 Fig. 8을 통해 분석할 수 있다. Fig. 7은 음압 레벨에 대한 방향성(directionality)을 나타낸 것이고, Fig. 8은 시간에 따른 유동장내의 와도(vorticity)를 나타낸 것이다. 음압 레벨은 Fig. 7에서처럼 풍력발전기와와의 상대적 위치에 따라 그 방향성이 뚜렷하게 나타난다. 사보니우스 풍력발전기가 항력형이기 때문에 전체적으로 양력 이극자 음원보다 항력 이극자 소음이 주요하게 작용하여 상·하류방향으로 높은 음압이 전파하게 되고, 또한 상류방향보다 후류방향에서 음압 레벨이 크게 나타나고 있으며, 구체적으로 입사유동과 이루는 각도가 약 150~210°인 영역에서 특히 더 큰 음압 레벨이 나타나는 것을 알 수 있다. 좀 더 자세하게 소음원 발생 메커니즘을 분석하기 위하여 Fig. 8을 살펴보면 입사유동과 풍력발

Fig. 6 Predicted sound pressure spectra of a Savonius wind turbine

전기의 회전에 의한 상호작용으로 풍력발전기 내부에서부터 와류가 생성되고, 생성된 와류는 날개내부에서 발달하다 입사유동이 날개를 빠져나가게 되면 날개 양 끝 단을 통해 풍력발전기의 후류방향으로 빠져나가게 된다. 그로 인해 와류에 의한 압력변동이 후류 방향으로 크게 작용하여, Fig. 7에서와 같이 풍력발전기의 후류방향, 특히 입사유동과 이루는 각도가 약 $150\sim 210^\circ$ 인 영역에서 음압 레벨이 크게 나타나는 것으로 이해할 수 있다.

이러한 와류에 의해 발생하는 소음원에 대한 연관성을 정량적으로 분석하기 위해, 유동장 내에서 와류가 생성되는 지점에서의 압력 신호를 분석해보았다. Fig. 9는 이에 사용된 점의 위치를 나타내고 있다. 사보니우스 풍력발전기가 1 바퀴 회전하는 동안의 시간에 따른 압력변화 데이터를 취득하여 Fourier transform한 결과를 Fig. 10에서 나타내고 있다.

Fig. 7 Predicted directivity of overall SPLs of a Savonius wind turbine

Fig. 8 Snapshot of vorticity distribution during one rotation of Savonius wind turbine

Fig. 10에서 보이듯이, 해당 위치에서의 압력변화에 대한 주파수 영역 대 분석결과는 정확히 고조파 소음이 발생하는 주파수에서 큰 압력변동 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 고조파 소음의 발생 원인은 사보니우스 풍력발전기와 입사 유동 사이의 상호작용에 의한 와류의 생성 및 발달, 떨어짐과 큰 연관이 있음을 알 수 있다. 즉 와류가 풍력터빈 날개 위에서 생성, 발달, 이탈하며 날개 표면 상에서 고조파 성분의 압력장을 유도하고 이 압력장이 다시 이극자 성분으로 작용하여 원방으로 전파해가는 압력파의 스펙트럼으로 나타나는 것으로 이해된다.

5.2 유동소음특성 분석

앞서 언급한바와 같이 사보니우스 풍력발전기의 주요한 소음성분은 날개 통과 주파수 소음과 고조파 소음이다. 이 연구에서는 이러한 특성을 가지는 사보니우스 풍력발전기의 유동소음에 대해, 풍력발전기의 작동 조건이나 형상 등의 변화에 대해 유동소

Fig. 9 Pressure monitoring points

Fig. 10 Fourier transform results of point pressure

음특성이 어떠한 변화를 보이는지 분석하였다.

(1) 끝판의 영향

먼저, 사보니우스 풍력발전기의 가장 큰 특징 중 하나인 끝판의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 끝판은 사보니우스 풍력발전기의 구조적 안정성을 확보하고 더불어 발전효율을 높이기 위해 고안된 설계 요소로써, Sivasegaram은 끝판의 직경(D)이 날개 직경(d)의 1.1배가 되었을 때, 최적의 효과를 나타냄을 실험적 연구를 통해 밝혔다⁽¹³⁾.

Fig. 11은 끝판의 유무를 제외한 나머지 요소가 동일한 두 사보니우스 풍력발전기에 대한 스펙트럼을

Fig. 11 Comparison of predicted sound pressure spectrum - with end plates and without end plates

Fig. 12 ISO-surface of vorticity (a) and (b) for with end plates; (c) and (d) for without end plates

비교하여 나타내고 있다. 스펙트럼으로부터 끝판의 유무에 상관없이 날개 통과 주파수 소음은 동일하게 발생함을 알 수 있다. 반면, 고조파 소음의 경우 소음의 발생주파수는 동일하게 유지되고 있지만 그 크기는 끝판이 없을 경우 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그 이유는 Fig. 12를 통해 분석할 수 있다.

끝판이 없을 경우 스핀방향으로 와류가 크게 발달하여 x축을 기준으로 크게 회전하는 양뿔 형태의 날개끝 와류(tip vortex)가 발달하게 된다. 반면 끝판이 존재할 경우, 끝판이 와류의 발달을 방해하는 차단막 역할을 하게 되어 날개 내부에서 발달한 와류가 스핀방향으로 발달하지 못하게 된다. 그렇기 때문에 끝판이 없을 경우 스핀방향의 와류성분이 크게 발달하여 추가적인 소음 성분이 나타나게 된다. 전체적인 음압 레벨의 크기에서도 이러한 효과는 확연히 드러난다. 끝판이 없을 경우 약 49.2 dBA의 소음레벨을 나타내지만, 끝판이 있을 경우 약 8 dBA가 줄어든 41.48 dBA를 나타낸다.

(2) 날개 꼬임의 영향

다음으로 사보니우스 풍력발전기 날개의 꼬임에 대한 영향을 분석하였다. 일반적인 사보니우스 풍력발전기의 경우 스핀방향으로 날개 단면형상이 일정하게 유지된다. 반면 헬리컬 사보니우스 풍력발전기는 양 끝판에서의 날개 단면 형상 사이에 각도 유도하여 날개에 꼬임각을 형성시키게 된다. 이러한 헬리컬 사보니우스 풍력발전기의 형상을 Fig. 13에 나타내었다. 헬리컬 사보니우스 풍력발전기가 어떠한 소음특성을 나타내는지 확인하기 위해 꼬임각을 45°로 설정하여 그 소음특성을 비교·분석하였다. Fig. 14는

Fig. 13 Configuration of a Helical Savonius wind turbine

음압 스펙트럼 비교를, Fig. 15는 삼차원 상에서의 등고선 면을 각각 나타내었다.

Fig. 14의 스펙트럼 비교결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 약 800 Hz 이하의 영역 내에서 헬리컬 사보니우스 풍력발전기가 큰 소음레벨 저감효과를 가져오는 것을 확인할 수 있다. 특히, 고조파 소음의 경우 그 크기가 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 날개 꼬임에 의해 유동장내에서 발생하는 와류가 스펜방향으로 위상차를 가지고 발생하게 되어 소음원의 스펜방향의 상관도가 작아지는 것으로 이해할 수 있다. 이러한 와류의 스펜 방향으로의 상관도 저감은 Fig. 15로 부터 정성적으로 확인할

Fig. 14 Comparison of predicted sound pressure spectrum - straight blades and helical blades Savonius wind turbine

Fig. 15 ISO-surface of vorticity (a) and (b) for straight blades; (c) and (d) for helical blades

수 있다. 풍력발전기 날개의 꼬임각만큼 와류가 기울어져 발달하는 것을 확인할 수 있고 이로 인한 소음원의 위상차가 방사소음레벨 저감을 가져온 것으로 추정할 수 있다. 헬리컬 사보니우스 풍력발전기의 전체적인 소음레벨은 40.89 dBA로 기존형상에 비해 약 0.59 dBA 정도의 소음 저감효과를 확인하였다.

(3) 주속비의 영향

풍력발전기의 주속비(tip speed ratio, TSR)에 따른 음압 레벨 변화를 고찰하였다. 주속비는 풍력발전기 날개 끝단의 속도와 입사유속 사이의 비를 나타내는 무차원수로 식 (9)와 같이 정의된다. 이 연구에서는 입사 풍속을 일정하게 유지하면서, 풍력발전기의 반경과 회전속도를 변화시켜 음압 레벨이 어떻게 변하는지 알아보았다. Fig. 16에서 녹색 선은 회전속도를 고정시킨 상태에서 날개 반경을 변화시킨 결과이고, 붉은 선은 날개 반경을 고정시킨 상태에서 회전속도를 변화시킨 결과이다.

$$TSR = \frac{wr}{U} \quad (9)$$

전체적으로 주속비가 커지면 풍력발전기의 크기가 커지고, 회전속도가 빨라지기 때문에 음압 레벨 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 여기에서 주목해야 할 점은, 동일한 주속비라 할지라도 날개 반경을 변화시킨 경우와 회전속도를 변화시킨 경우에서 그 음압 레벨이 다르게 나타난다는 점이다. 초기조건을 기준으로 주속비를 상승시킬 경우에는 풍력발

Fig. 16 Overall sound pressure level versus TSR

전기의 회전속도를 이용하여 주속비를 상승시키는 것이 음압 레벨이 낮게 나타났으며, 초기조건에서 주속비를 낮출 경우, 반대로 날개 반경을 변화시킨 경우에서 음압 레벨이 낮게 나타났다.

회전속도와 반경의 변화에 따른 음압스펙트럼의 분석을 통하여 고조파 성분의 기본 주파수가 끝판의 유무나 날개의 헬리컬 모양과는 관계가 없으나 회전 속도에는 선형적으로 반경에 대해서는 비선형적(근사적으로 $\sqrt{r}$ 에 비례)으로 증가하는 것을 발견하였다. 이것을 근거로 날개의 회전에 따른 원심력이 와류의 회전력에 영향을 주고 이것이 고조파 성분의 기본 주파수에 영향을 주는 것으로 판단된다.

6. 결 론

이 연구에서는 독립형 풍력발전으로 사용되는 소형 수직축 사보니우스 풍력발전기의 유동소음특성을 전산공력음향학 기법을 이용하여 분석하였고, 사보니우스 풍력발전기의 유동소음은 날개 통과 주파수 소음과 고조파 소음으로 구성된다는 것을 확인하였다. 사보니우스 풍력발전기의 경우 날개 통과 주파수가 인프라 사운드 영역 내에서 형성되기 때문에, 주요 가청 소음원으로 작용하지는 않는다. 반면, 고조파 소음의 경우 사람이 민감하게 반응하는 주파수 영역 내에서 발생하기 때문에, 사보니우스 풍력발전기의 방사소음에 있어서 중요한 소음 특성이 됨을 확인하였다. 이러한 고조파 소음 성분은 날개 내부에서 입사 유동과 상호작용으로 발생하는 와류에 의한 것임을 확인하였고 그 기본주파수는 날개의 회전속도와 반경의 제곱에 근사적으로 비례함을 발견하였다. 추가적으로 사보니우스 풍력발전기의 기하학적 모양에 따른 유동소음특성에 대한 영향을 분석하였다. 이를 통해 끝판의 존재와 날개 꼬임이 방사되는 소음레벨을 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였고, 이러한 결과는 향후 저소음 사보니우스 풍력발전기의 설계를 위한 기초 연구 자료로 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지원 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 또한,

이 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20113020020010)입니다.

References

- (1) Blackwell, B. F., Sheldahl, R. E. and Feltz, L. V., 1977, Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors, *Journal of Energy*, Vol. 2, pp. 160~164.
- (2) Fujisawa, N., 1992, On the Torque Mechanism of Savonius Rotors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 40, No. 3, pp. 277~292.
- (3) 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, No. 1, pp. 141~149.
- (4) Fernando, M. S. U. K. and Modi, V. J., 1989, A Numerical Analysis of the Unsteady Flow Past a Savonius Wind Turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 32, No. 3, pp. 303~327.
- (5) Lighthill M. J., 1952, On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 211, No. 1107, pp. 564~587.
- (6) Lighthill M. J., 1954, On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 222, No. 1148, pp. 1~32.
- (7) Ffowcs Williams J. E. and Hawkings D. L., 1969, Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 264, No. 1151, pp. 321~342.
- (8) Savonius S. J., 1931, The S-rotor and Its Applications, *Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 5, pp. 333~338.
- (9) ICEM CFD V13.0 Userguide, ANSYS(2010).
- (10) Fluent 12.0 Theory Guide, ANSYS(2009).
- (11) Curle, N., 1955, The Influence of Solid Boundaries Upon Aerodynamic Sound, *Proceedings of*

the Royal Society of London, Vol. 231, No. 1187, pp. 505~514.

(12) Heo, S., Kim, D. H., Cheong, C. U. and Kim, T.-H., 2011, Prediction of Internal Broadband Noise of a Centrifugal Fan Using Stochastic Turbulent Synthetic Model, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 1138~1145.

(13) Sivasegaram, S., 1978, Secondary Parameters Affecting the Performance of Resistance-type Vertical-axis Wind Rotors, Wind Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 49~58.

Sanghyeon Kim received his BS and MS degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University in 2011 and 2013, respectively. He then continued his study as a PhD candidate in Pusan National University. His

main research interest is on centrifugal fan performance and noise.

Cheolung Cheong received his BS in Aerospace Engineering from Seoul National University in 1997. He received his MS and PhD degrees in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University, Korea, in 1999 and 2003. He is now an associate professor at the School of Mechanical Engineering, Pusan National University in Busan, Korea. Dr. Cheong's current research interests include fan broadband noise, wind turbine noise, and computational aeroacoustics.