복합형 수직축 풍력발전기의 유동소음특성에 관한 수치적 고찰

Numerical Investigation on the Flow Noise Characteristics of the Hybrid Vertical-axis Wind Turbine

김상현, 정철웅[†]

(Sanghyeon Kim and Cheolung Cheong[†])

부산대학교 기계공학부 응용기계음향 및 소음제어연구실

(접수일자: 2014년 8월 6일; 수정일자: 2014년 9월 17일; 채택일자: 2014년 9월 23일)

초 록: 본 논문에서는 복합형 수직축 풍력발전기의 유동소음특성에 관한 연구를 수행하였다. 복합형 수직축 풍력발전기는 Savonius형과 Darrieus형을 동시에 사용하여 두 풍력발전기의 장점을 극대화하여 단점을 상쇄시키는 새로운 개념의 수직축 풍력발전기이다. 본 연구에서는 이러한 특성을 갖는 복합형 수직축 풍력발전기에 대하여, 복합 전산공학 음향학 기법을 이용하여 풍력발전기에서 발생하는 유동소음을 예측하였다. 먼저, 전산유체역학 기법을 이용하여 터빈 주위의 비정상유동장을 예측하였다. 다음으로, 예측한 비정상유동장에 음향상사법을 적용하여 터빈으로부터 방사하는 유동소음을 예측하였다. 해석결과를 바탕으로 복합형 수직축 풍력발전기의 유동소음특성을 분석하였고, 이를 Savonius형 및 Darrieus형의 유동소음특성과 비교하였다.

핵심용어: 수직축 풍력발전기, 유동소음, Savonius, Darrieus

ABSTRACT: In this paper, flow noise characteristics of the hybrid vertical-axis wind turbine is investigated. Hybrid vertical-axis wind turbines consisting of two types of vertical-axis wind turbines, Savonius and Darrieus, are devised to maximize merits of one turbine and thus minimize demerits of the other turbine. In order to predict flow noise radiating from hybrid vertical-axis wind turbines, hybrid computational aero acoustic techniques are used. First, unsteady flow fields around the turbine are predicted using computational fluid dynamics method. Then, the flow noise radiations from the turbines are predicted by applying acoustic analogy to the predicted flow fields. Based on numerical results, noise characteristics of a hybrid vertical-axis wind turbine is investigated and is compared with those of Savonius and Darrieus wind turbines.

Keywords: Hybrid vertical-axis wind turbine, Flow noise characteristic, Savonius, Darrieus

PACS numbers: 43.28.Ra

1. 서 론

수직축 풍력발전기는 풍력발전기 날개를 회전시키는 힘의 종류에 따라, 항력형의 Savonius형 풍력발전기와 양력형의 Darrieus형 풍력발전기로 분류할 수 있다. Savonius형 풍력발전기와 Darrieus형 풍력발전기는 수직축 풍력발전기를 대표하는 두 형태이면서

서도, 그 특징이 뚜렷하게 대비된다. Savonius형 풍력발전기의 경우, 구조적 특징으로 인해 매우 낮은 풍속에서부터 발전이 가능하다. 하지만 발전효율이 낮은 단점으로 인해 성능 향상을 위한 연구가 활발히 이루어 지고 있다. Fernando et al.^[1]은 Savonius형 풍력발전기의 작동 메커니즘을 이해하기 위해, 풍력발전기 주변 유동장을 수치적으로 해석하였고, 이를 실험결과와 비교·제시 하였다. 이 외에도, Fujisawa,^[2] Akwa et al.,^[3] Mohamed et al.,^[4] Kamoji et al.^[5]와 같은 많은 연구들이 수행되고 있다. 또한, Kim et al.^[6,7]은

[†]Corresponding author: Cheolung Cheong (ccheong@pusan.ac.kr)
School of Mechanical Engineering, Pusan National University,
2, BusanDaehak-Ro, 63 Beon-Gil, Geumjung-Gu, Busan 609-735,
Republic of Korea
(Tel: 82-51-510-2311, Fax: 82-51-514-7640)

Savonius형 풍력발전기의 유동소음특성을 전산공학 음향학 기법을 적용하여 분석하였고, 이를 바탕으로 저소음화에 대한 연구를 수행하였다.

반면 Darrieus형 풍력발전기의 경우, 비교적 높은 발전 효율을 가지지만, 초기 구동을 위해 큰 양력을 필요로 하기 때문에 이를 해결하기 위한 자력시동에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다. 대표적으로, Hill et al.^[8]이 일정한 풍속에서의 초기구동에 관한 실험적·수치적 연구를 수행한 바 있으며, Rossetti et al.^[9] Beri et al.^[10]와 같은 연구도 이루어진 바 있다. 또한, Iida et al.^[11]은 Vortex Method를 사용하여 Darrieus형 풍력발전기에서 발생하는 소음에 대한 연구를 수행하였고, 그 결과 방사되는 소음레벨이 유속의 6승에 비례함을 밝혔다.

복합형 수직축 풍력발전기는 이러한 두 종류의 풍력발전기를 동시에 사용하는 새로운 개념의 수직축 풍력발전기이다. 초기 구동을 위해 큰 힘이 필요로 하는 Darrieus형 풍력발전기의 단점을 극복하기 위해, 낮은 풍속 또는 초기 구동 영역에서는 Savonius형 풍력발전기에서 발생하는 큰 항력을 이용해 발전을 하고 이후 높은 풍속 또는 회전속도를 가지게 되면 Darrieus형 풍력발전기에서 발생하는 양력을 통해 발전을 하여, 결과적으로 보다 넓은 풍속 범위에서 효율적으로 발전을 할 수 있다.

본 연구에서는 성능을 극대화하기 위해 개발된 복합형 수직축 풍력발전기에 대하여, 풍력발전기에서 발생하는 유동소음특성에 관한 연구를 수행하였다. 유동소음을 해석하기 위하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)과 음향상사법을 연계한 복합 전산공학음향학(Computational Aeroacoustics, 이하 CAA) 사용하였다. 먼저, 균일한 바람이 입사하며 회전속도가 일정한 복합형 풍력발전기 주변의 3차원 유동장을 비정상 비압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 CFD기법을 적용하여 풀어서 예측하였다. 해석한 유동장 정보를 바탕으로 Lighthill의 음향상사법(acoustics analogy)^[12,13]에 기초한 Ffowcs Williams - Hawkins^[14] 방정식을 사용하여, 복합형 수직축 풍력발전기에서 발생하는 유동소음을 예측하였다. 예측 결과의 분석을 통해, 복합형 수직축 풍력발전기의 유동소음특성을 Savonius 및

Darrieus형 풍력발전기의 소음특성과 비교하여 제시하였다.

II. 복합형 수직축 풍력발전기

복합형 수직축 풍력발전기는 항력형의 Savonius형 풍력발전기와 양력형의 Darrieus형 풍력발전기를 동시에 사용하는 형태로, Fig. 1과 같이 내부에는 Savonius형 풍력발전기를 외부에는 Darrieus형 풍력발전기를 배치하는 것이 일반적인 형태이다.

본 연구에서 사용한 복합형 풍력발전기는 기존연구^[6,7]를 통해 제안한 저소음 Savonius형 풍력발전기에 4개의 날개를 가지는 Darrieus형 풍력발전기를 추가하였다. 풍력발전기의 날개 반경은 Savonius형 풍력발전기에서 $r_s = 550 \text{ mm}$, Darrieus형 풍력발전기에서 $r_d = 1100 \text{ mm}$ 이다. 양단 끝판의 직경은 $D = 1100 \text{ mm}$ 이고, 날개의 높이는 $h = 1400 \text{ mm}$, 풍속과 풍력발전기의 회전속도는 $U = 12 \text{ m/s}$, $w = 156 \text{ RPM}$ 으로 설정하였다. 해석의 간편성을 위해 Darrieus형 풍력발전기 날개의 지지대는 생략하였다.

III. 수치해석기법

복합형 풍력발전기에서 발생하는 유동소음을 예측하기 위해, 복합 CAA기법을 적용하였다. 먼저, 소음원이 되는 풍력발전기 주변 3차원 유동장을 CFD 기법을 적용하여 해석한다. 다음으로 예측한 유동장 정보를 바탕으로 Ffowcs Williams - Hawkins 방정식을 적용하여 풍력발전기로부터 방사되는 소음을 예측하였다.

Fig. 1. Schematic view of target hybrid vertical-axis wind turbine.

3.1 해석격자

Fig. 2는 풍력발전기 주변의 유동장을 해석하기 위해 사용한 해석격자를 나타내고 있다. 풍력발전기의 회전에 의한 비정상 유동장을 모사하기 위해서는 미끄럼 격자기법을 적용하여 시간에 따른 회전을 해석하여야 한다. 따라서 전체 해석격자를 풍력발전기 주변의 회전하는 유체격자계와 그 주변의 비회전 유체격자계로 나누어 생성하여, 두 유체격자계 사이에 인터페이스 경계를 적용할 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 격자의 수는 약 230만개이며, 풍력발전기 날개 근처에서 $y^+ < 5$ 를 만족하도록 하였다.

3.2 유동장 해석

풍력발전기와 같은 회전체가 포함된 유동장은 시간에 따른 회전에 의해 강력한 비정상 유동장이 발달하게 되므로, 3차원 유동장에 대한 비정상 해석이 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 Eqs.(1)과 (2)와 같은 3차원 비정상 비압축성 RANS 방정식을 적용하였다.^[15]

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

Fig. 2. Computational grid.

Fig. 3. Variation of power coefficient according to the number of turbine rotation.

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

Eq.(2)에서 $-\overline{\rho u_i u_j}$ 항은 유동장내의 난류를 모사하기 위해 도입된 Reynolds 응력항으로, 전산유체역학 기법에서는 여러 종류의 난류모델을 도입하여 이를 계산한다. 본 연구에서는 기존연구^[6,7]를 통해 그 적합성이 검증된 $k-w$ SST 난류 모델을 적용하였다. 3차원 유동장을 해석하기 위해 유한체적법을 적용하여 이산화하였으며, 회전 유체격자계와 비회전 유체격자계 사이에는 인터페이스 경계를 적용하였다. 일정한 크기와 방향의 바람을 모사하기 위해 속도입구 경계를 풍력발전기 상류방향에 설정하였고, 그 외의 경계에는 압력출구 경계조건을 설정하여 대기 조건을 모사하였다. 3차원 공간을 해석하기 위해 유한체적법을 이용하여 공간을 이산화하였으며, 2차 UPWIND 방법과 SIMPLE 방법을 적용하여 수치연산을 수행하였다.

3차원 유동장 해석은 풍력발전기의 회전에 따라 일정하게 반복되는 유동현상이 나타날 때까지 수행하였다. 이를 확인하기 위해 Eq.(3)과 같은 파워계수 C_P 를 사용하였다.

$$C_P = \frac{T w}{0.5 \rho A U^3}. \quad (3)$$

여기에서 T 는 토크, w 는 풍력발전기의 회전속도, U 는 입사풍속을 의미한다. 또한, A 는 투영 단면적으로 $A = 2r_d h$ 로 정의하였다. Fig. 3은 예측한 파워계수의 시간에 따른 변동량을 나타내고 있다. 이와 같은 반복성을 확보한 유동장 정보를 사용하여 풍력발전기에서 발생하는 유동소음을 예측하였다.

3.3 유동소음 해석

앞서 언급한 수치해석방법을 통해 확보한 3차원 유동장 정보를 바탕으로, 풍력발전기에서 발생하는 유동소음을 예측하기 Ffowcs Williams - Hawkings 방

정식을 사용하였다. Ffowcs Williams와 Hawkings는 Lighthill의 음향상사법을 움직이는 물체가 포함되어 있는 유동장으로 확장하였고, 그 결과 유동장 내에서 발생하는 소음을 물체의 움직임에 의한 단극자 소음원, 물체 표면 압력섭동에 따른 이극자 소음원, 유동장 내의 난류에 의한 사극자 소음원의 합으로 나타내어 다음 Eq.(4)와 같은 형태로 나타내었다.^[14]

$$4\pi c_0^2 \rho = \rho_o \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{v_i}{|r-r_o|} l_i dS - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{P_{ij}}{|r-r_o|} l_j dS - \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}}{|r-r_o|} dV, \quad (4)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij}, \quad (5)$$

여기에서 T_{ij} 는 Lighthill의 응력텐서로서 Eq.(5)와 같이 나타낸다. Ffowcs Williams - Hawkings 방정식을 이용한 유동소음해석을 위해, 3차원 유동장 내에서 풍력발전기를 둘러싸는 임의의 폐곡면을 적분 영역으로 설정하였고, 시간에 따른 유동해석결과를 바탕으로 소음원에 대한 정보를 취득하였다.

IV. 결과 및 분석

III장에서 기술한 수치해석 기법을 적용하여 복합형 수직축 풍력발전기의 유동소음을 예측하였다. 유동장 해석결과와 소음예측결과를 통해 복합형 풍력발전기의 유동소음특성을 분석하였고, 세 종류의 수직축 풍력발전기에 대해 그 소음특성을 비교하였다.

4.1 유동장 분석

Figs. 4~6은 세 종류의 수직축 풍력발전기에 대해 풍력발전기가 한 바퀴 회전하는 동안 주변 유동장에서의 와도 변화를 X-Z평면과 X-Y평면에서 각각 나타내고 있다. Savonius형 풍력발전기의 경우 회전 속도에 의해 발생하는 Blade Passing Frequency(BPF)소음 이외에, 추가적인 소음성분이 발생하고 있고, 이는 입사하는 유동과 회전하는 풍력발전기 날개에 의해

날개 주변에서 생성, 발달, 이탈하는 와류에 의한 소음성분임을 기존연구^[6,7]를 통해 밝힌바있다. 이러한 기존연구를 바탕으로 본 연구에서는 풍력발전기 소음특성에 큰 기여를 하는 와류의 거동을 유동장 분석을 통해 알아보았다.

복합형 풍력발전기에서는 크게 두 가지의 특이한 유동현상을 확인할 수 있다. 첫 번째는 Savonius형 풍력발전기 주변에서 와류 생성이 억제되고 있다는 점이다. Fig. 5를 보면, Savonius형 풍력발전기가 단독으로 쓰이고 있을 때는 반원형상의 날개 내부 및 날개 틈 부근에서 와류가 크게 발생하여 후류 방향으로 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있다. 하지만 복합형의 경우, Fig. 4(b)와 같이 Savonius형 풍력발전기 날개 근처에서는 이러한 와류가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 복합형 풍력발전기를 이루는 또 하나의 날개 요소인 Darrieus형 풍력발전기 날개에 의해 풍력발전기 내부의 유속이 낮아지게 되고, 이에 따라 속도의 변화량으로 정의되는 와류의 크기 역시 작아져 와류 생성이 억제된 것이다.

다음으로는, Fig. 4(a)에서 확인할 수 있는 날개-와류 상호작용(Blade-Vortex Interaction, BVI) 현상이다.

Fig. 4. Variation of magnitude of vorticity for turbine one rotation: hybrid turbine, (a) X-Z plane, (b) X-Y plane.

Fig. 5. Variation of magnitude of vorticity for turbine one rotation: Savonius turbine, (a) X-Z plane, (b) X-Y plane.

Darrieus형 풍력발전기는 구조적인 특징으로 인해 앞선 날개에서 발생한 와류가 뒤따르는 날개에 부딪혀[Fig. 6(b)] BVI현상이 발생하게 된다. 하지만 복합형 풍력발전기에서는 이에 추가적으로 Fig. 4(a)에서와 같이, Darrieus형 풍력발전기 날개 양 끝단에서 발생한 팁-와류(tip-vortex)가 상대적으로 후류에 위치하고 있는 Savonius형 풍력발전기 날개의 끝판(end-plate)와 부딪혀 또 다른 BVI현상이 발생하고 있는 것이다. 이러한 BVI현상은 큰 음압레벨의 순음(tonal)성분 소음을 발생시키는 요인으로 작용하므로, 복합형 풍력발전기를 설계함에 있어 고려되어야 할 주요한 소음 특성이라고 할 수 있다.

결론적으로 복합형 풍력발전기의 유동소음특성은, Darrieus형 풍력발전기의 날개에 의해 유도되는 두 종류의 BVI현상이 지배적인 역할을 하게 되고, 상대적으로 내부에 위치한 Savonius형 풍력발전기에 의한 영향은 적을 것이라 판단된다. 즉, 복합형 풍력발전기의 저소음화에는 Darrieus형 풍력발전기 날개의

Fig. 6. Variation of magnitude of vorticity for turbine one rotation: Darrieus turbine, (a) X-Z plane, (b) X-Y plane.

형상변경 및 재배치가 효과적일 것이라 사료된다.

4.2 음압 스펙트럼

유동장 해석을 통해 예측한 복합형 및 Savonius형, Darrieus형 풍력발전기의 음압 스펙트럼을 Fig. 7에 나타내었다. 스펙트럼의 예측 위치는 풍력발전기 후류 방향으로 $8r_d$ 만큼 떨어진 위치이다. 스펙트럼에서 확인할 수 있듯이, 다른 두 종류의 수직축 풍력발전기와 비교되는 복합형 수직축 풍력발전기의 유동소음 스펙트럼의 특징은 1) 저주파수 대역의 소음레벨 증가, 2) 100~200 Hz 대역에서 발생하는 소음성분을 들 수 있다.

먼저, 저주파수 대역에서 다른 두 풍력발전기에 비해 소음 레벨이 증가하는 원인은 BPF 소음에 의한 영향이라 판단된다. Savonius형과 Darrieus형 풍력발전기 날개 개수가 정수배가 됨에 따라, 날개 개수에 의해 결정되는 BPF 소음이 서로 중첩되어 소음레벨이 증가한 것으로 생각된다. 다음으로, 100~200 Hz

Fig. 7. Comparison of predicted noise spectrum.

대역에서 발생하는 소음의 경우, Fig. 4(a)에서 확인할 수 있는 날개 팁-와류에 의해 발생하는 추가적인 BVI현상에 의한 소음으로 판단된다. 4.1절에서 기술한 바와 같이, Darrieus형 풍력발전기 날개 양 끝단에서 발생한 팁-와류가 내부에 위치한 Savonius형 풍력발전기 끝판과 부딪히는 현상이 발생하고, 이로 인해 다른 두 종류의 수직축 풍력발전기에서와는 다른 추가적인 소음성분이 발생하게 된 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 복합형 수직축 풍력발전기의 유동 소음특성에 관한 연구를 수치적 방법을 통해 수행하였다. 수직축 풍력발전기의 두 종류인 Savonius형과 Darrieus형 풍력발전기를 동시에 사용하는 복합형 수직축 풍력발전기는, 두 풍력발전기에서 나타나는 소음특성과는 차별된 독특한 소음특성을 나타냄을 확인하였다. 날개 개수와 회전속도에 의해 정의되는 Blade Passing Frequency 소음은 저주파수 대역에서 서로 중첩되어 소음레벨의 증가를 야기하였다. 또한 복합형 풍력발전기의 구조적인 특성으로 인해 BVI 현상이 Darrieus형 풍력발전기의 날개 및 끝판에서 발생하고 있으며, 이로 인해 100~200 Hz 대역에서 추가적인 소음 성분이 발생하고 있음을 확인 하였다. 결과적으로 복합형 풍력발전기에서는 Savonius형 풍력발전기의 90.8 dB, Darrieus형 풍력발전기의 91.3 dB 보다 큰 97.1 dB의 소음이 발생하였다. 향후 복합형

풍력발전기의 저소음화를 위해서는, 풍력발전기 날개 크기 및 날개 배치에 의한 영향을 연구할 필요성이 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2013R1A1A2012672).

References

1. M. S. U. K. Fernando and V. J. Modi, "A numerical analysis of the unsteady flow past a savonius wind turbine," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn* **32**, 303-327 (1989).
2. N. Fujisawa, "On the torque mechanism of savonius rotors," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn* **40**, 277-292 (1992).
3. J. V. Akwa, G. A. da Silva Junior, and A. P. Petry, "Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a savonius wind rotor using computational fluid dynamics," *Renew. Energy* **38**, 141-149 (2012).
4. M. H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, and D. Thevenin, "Optimal blade shape of a modified savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade," *Energy Convers. Manag.* **52**, 236-242 (2011).
5. M. A. Kamoji, S. B. Kedare, and S. V. Prabhu, "Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor," *Int. J. Energy Res.* **32**, 877-895 (2008).
6. S. Kim and C. Cheong, "Numerical analysis on the flow noise characteristics of savonius wind turbines" (in Korean), *Trans. KSNVE* **23**, 502-511 (2013).
7. S. Kim and C. Cheong, "Numerical analysis on the low noise designs of savonius wind turbines by inducing phase difference in vortex shedding" (in Korean), *Trans. Korea Soc. Mech. Eng. A* **38**, 269-274 (2014).
8. N. Hill, R. Dominy, G. Ingram, and J. Dominy, "Darrieus turbines: the physics of self-starting," *Proc. IMechE.* **223**, PartA: J. PowerandEnergy 21-29 (2009).
9. A. Rossetti and G. Pavesi, "Comparison of different numerical approaches to the study of the H-Darrieus turbines start-up," *Renew. Energy* **50**, 7-19 (2013).
10. H. Beri and Y. Yao, "Numerical simulation of unsteady flow to show self-starting of vertical axis wind turbine using fluent," *J. Appl. Sci.* **11**, 962-970 (2011).
11. A. Iida, A. Mizuno, and K. Fukudome, "Numerical simulation of aerodynamic noise radiated from vertical axis wind

- turbines,” Proceedings of 18th International Congress on Acoustics, 2004.
12. M. J. Lighthill, “On sound generated aerodynamically. I. general theory,” Proc. R. Soc. Lond. A. Math. Phys. Sci. **211**, 564-587 (1952).
 13. M. J. Lighthill, “On sound generated aerodynamically. II. turbulence as a source of sound,” Proc. R. Soc. Lond. A. Math. Phys. Sci. **222**, 1-32 (1954).
 14. J. E. Ffowcs Williams and D. L. Hawkings, “Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion,” Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci. **264**, 321-342 (1969).
 15. Fluent 12.0 Theory Guide, ANSYS (2009).

저자 약력

▶ 김 상 현 (Sanghyeon Kim)

2011년 2월: 부산대학교 학사 졸업
 2013년 2월: 부산대학교 석사 졸업
 2013년 2월 ~ 현재: 부산대학교 박사 재학

▶ 정 철 웅 (Cheolung Cheong)

1997년 2월: 서울대학교 학사 졸업
 1999년 2월: 서울대학교 석사 졸업
 2003년 2월: 서울대학교 박사 졸업
 2006년 3월 ~ 2010년 3월: 부산대학교 조교수
 2010년 04월 ~ 현재: 부산대학교 부교수