

양력형 디스크 풍력 발전기의 유동 및 소음 해석

고승철* · 나지성** · 이준상†

Noise and flow analysis of lift-type disk wind power System

Seungchul Ko*, Jisung Na** and Joon Sang Lee†

Abstract In this study, we investigate the flow characteristics of lift-type disk which behaves the up-down motion using the large eddy simulation (LES) and immersed boundary method (IBM). Also, we perform the noise analysis using pressure field at 1.35 m distance and reveal the cause of noise to observe the vortical structure analysis of flow result. It is observed that vortical structure and wind shear were generated at leading edge and tower with high velocity deficit and flow separation. High magnitude of flow noise was observed in low frequency range which is from 30 Hz to 60 Hz. It was observed that vortical structure at leading edge was generated in frequency range from 33.3 Hz to 41.6 Hz. Temporal characteristic in vortical structure at leading edge was similar to noise characteristics, having the similar frequency ranges.

Key Words : 풍력 터빈 (Wind turbine), 소음 (noise), 양력형 디스크 (Lift-type disk), 후류 (Wake), 잠입 경계 기법 (Immersed boundary method)

1. 서론

최근 온실가스로 인한 지구온난화에 대한 대응으로써 화석 연료의 사용을 절감하고 태양광, 풍력과 같은 신재생에너지의 비율이 높아지고 있는 추세이다^[1]. 화석연료에 비해 신재생에너지는 온실가스의 배출이 현저히 낮고 환경오염에 대한 영향이 거의 없기 때문이다. 그 중에서도 풍력 발전은

풍력 단지의 형태로써 지상이나 해상에서 발전이 이루어지며 무한하고 환경에 무해한 에너지로써 주목받고 있다^[2].

에너지 생산량을 증대하기 위해 블레이드의 크기가 커지는 있는 추세이며 이에 따라 풍력 터빈 및 단지가 주변 환경에 미치는 영향이 큼이 최근 보고되고 있다. 대기 상태의 변화, 생태계의 파괴 등이 보고되고 있으며 이는 풍력 발전 규모의 성장과 함께 지속적으로 문제가 될 것이다. 미국 내 풍력단지에 의한 강수량 변화를 연구한 논문에서는, 풍력 단지로 인해 1~2%의 강수량이 변화할 수 있음을 보고하였다^[3]. 또한 Deshorm et al.은 풍력 터빈 블레이드로 충돌하는 새들에 대하여 관측하였고 그 피해를 완화할 수 있는 방법에 대해 논의하였다^[4]. Laratro et al.은 풍력 단지에서 발생하는

† Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Yonsei University
E-mail: joonlee@yonsei.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

** Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

소음이 블레이드에서 발생하는 동적 stall에 기인함을 관찰하고 보고하였다⁵⁾.

환경적 영향을 고려하고 효율성을 높이기 위해, 기존의 풍력 발전 방식에서 벗어난 새로운 형태의 풍력 발전이 제시되고 있다. 양력형 디스크의 상하운동을 통한 발전 방식이나 Vortex, bladeless 처럼 바람의 난류 성분을 이용하여 횡방향으로 진동하는 방식 등에 제시되었다^{6, 7)}. 이러한 방식은 기존 로터형 풍력 터빈에 비해 후류가 작고 제어가 용이하다는 장점을 가진다.

본 연구에서는 상하 운동하는 양력형 디스크 풍력 발전의 거동을 모사하고 이를 통해 풍력 발전이 이루어질 때 발생하는 소음을 연구하고자 한다. 끝단에서 발생하는 후류와 소음 발생간의 상관관계를 밝히고 소음의 규모를 예측할 것이다.

2. 수치해석방법

2.1 유동 solver 및 지배방정식

본 연구에서는 Ansys-cfx 모델을 통해 유동 및 디스크의 거동을 모사하였다. 그 중 LES 난류 모델을 통해 유동 및 유동 내 난류 현상을 모사하였다. LES 모델은 큰 스케일의 와류는 직접 계산하고 작은 스케일의 와류는 모델링을 통해 그 영향을 모수화하는 방법으로써 스케일의 구분은 필터를 통해 이루어진다. 아래 식 1, 2에서 기술하는 질량, 운동량 보존 방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

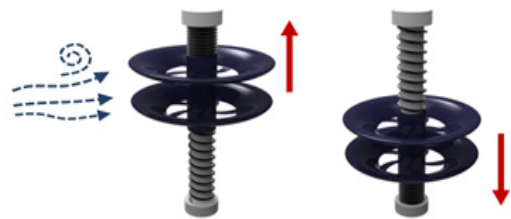
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{u_i} \quad (2)$$

여기서 u_i 는 유동속도, p 는 압력, ρ 는 밀도, τ_{ij} 는 응력 텐서, S_{u_i} 는 외력에 의한 추가적인 운동량을 의미한다. 난류 운동은 와점성(eddy viscosity)이 추가되고, 방정식은 레이놀즈 평균 물리량에 의해 유도된다. 방정식의 형태는 동일하다.

2.2절 시뮬레이션 도메인 및 경계 조건

디스크 타워의 길이는 2 m, 디스크의 지름은 2.4 m (D)로 설정되었다. 도메인의 크기는 6 (2.5D) m x 6 (2.5D) m x 3 (1.25D) m로 설정되었고 총 1400만개의 격자로 차분화되었다. 격자는 ICEM-CFD 모듈을 통해 디스크 및 벽 주변의 격자를 좀 더 조밀하게 구성하는 multi-grid 방법을 적용하여 격자를 구성하였다. 양력형 디스크 풍력 발전은 거동에 따라 익형의 방향이 바뀌도록 설계된 디스크가 위 아래로 양력을 받아 거동하면서 에너지를 생산하는 발전 형태를 뜻하며 자세한 메커니즘은 Fig. 1에 도시되었다. 양력을 받아 거동하는 양력형 디스크의 거동은 cfx 내 잠입 경계 기법 (Immersed boundary method)를 통해 구현하였다. 위아래 주기적인 상하운동을 하는 디스크를 구현하였고 이를 sine 함수 형태로 강제하였다. 상하운동의 주기는 0.6 Hz (1.6 초)로 설정되었다. 디스크의 속도는 0.5 m/s 입구조건은 Dirichlet 방법을 통한 일정 속도 조건이 주어졌으며 유동의 속도는 11 m/s로 설정되었다. 출구 조건 및 좌우측 벽에 외삽 조건, 지표면에는 노슬립 경계조건, 위쪽은 자유 전단 응력 조건을 적용되었다. 시간간격은 0.5 ms로 설정되었고 14000 time step, 총 7 초간 모사가 진행되었다.



Up-down motion due to lift force generated by a wind

Fig. 1. Schematic diagram of lift-type wind power generator.

3. 3장 결과 및 고찰

3.1절 유동 모사 결과

본 절에서는 상하운동하는 디스크 주변의 유동장 및 와류 구조를 관찰한 결과를 논의한다. Fig. 2에서는 디스크의 상하운동에 의한 유동장의 변화가 안정화된 이후 ($t=6.4$ s)에서의 와류 구조를 도시하였다. 와류 구조는 Lamda2방법을 통해 나타내었다. 유동의 속도는 디스크 전면부의 leading edge 주변과 타워 뒤편에서 큰 감소를 보였으며 속도의 감소로 인한 전단 응력이 발달하였다. 디스크의 전면부와 타워, 그리고 후면부 끝단에서 와류가 발생하고 발생된 와류가 와류 간의 간섭으로 인해 부서지면서 디스크 뒤편으로 발달하는 것을 볼 수 있다. 그림 3은 디스크 윗면에서의 xy 평면, 타워 옆 xz 평면에서의 주 유동방향 속도와 유선을 나타낸다. xy 평면에서, 타워의 뒤편에서 가장 큰 속도의 감소가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 타워의 측면부에서 강한 전단 응력이 유동박리와 함께 발생하는 것을 관찰할 수 있다. xz 평면에서는 타워 주변과 전면부의 상단에서 속도가 증가하는 것을 볼 수 있으며 디스크의 후면 leading edge에서 가장 큰 전단 응력이 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

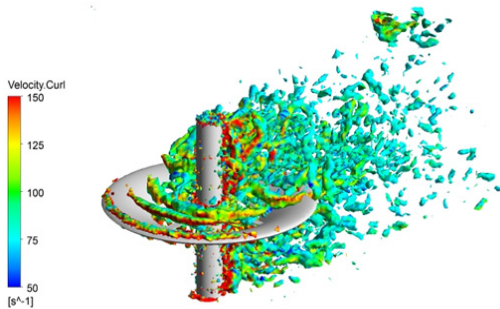


Fig. 2. Isosurface of vortical structure colored by streamwise velocity at $t=6.4$ s.

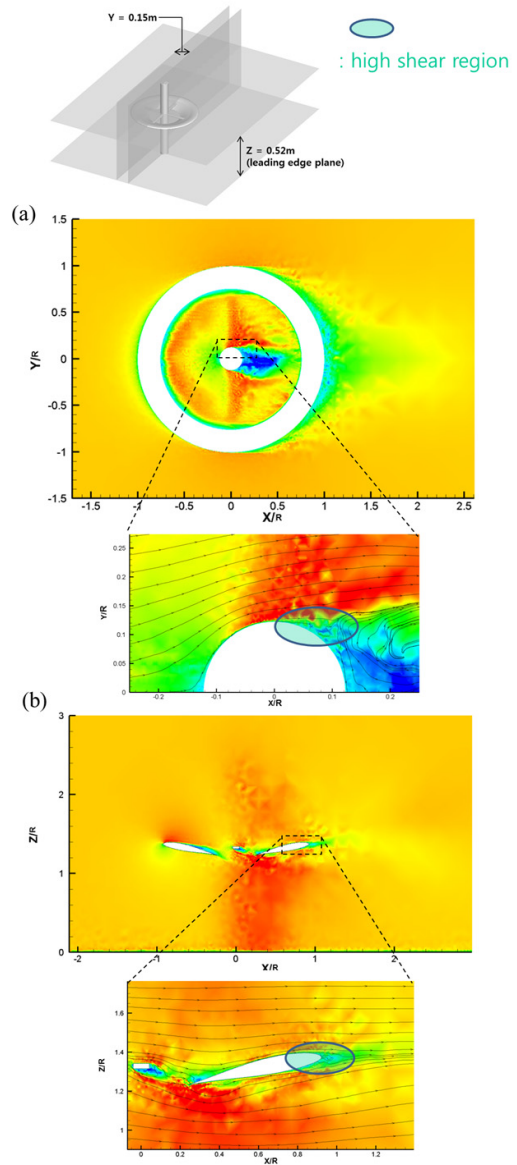


Fig. 3. Contours of streamwise velocity with flow stream line. (a) xy plane ($z = 0.52m$), (b) xz plane ($y = 0.15m$)

3.2 소음 분석

본 절에서는 유동해석 결과에서 압력장을 도출하여 직접 해석법을 이용해 소음의 세기 및 특성을 분석하였다. 직접 해석법은 소음 측정 위치에서의 압력의 시간에 따른 변화량을 직접 구하고 시

간에 대한 변화를 주파수 영역으로 변환하여 주파수 영역에서 소음의 분포 및 강도를 관찰하는 방법을 뜻한다. 소음의 크기를 나타내는 Sound Pressure Level (SPL)은 아래 식 3으로 나타낼 수 있다.

$$SPL = \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) Np = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) B = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) dB \quad (3)$$

압력은 풍력터빈의 소음 관련 표준인 IEC 61400-11을 참조하여, 타워 뒤 1.35 m에서의 압력장을 구하였다. 압력의 시간에 따른 변화를 도출하여 직접 해석법을 통해 유동 소음을 계산하였다. Fig. 4은 주파수 영역에서의 소음 분포를 나타낸다. 낮은 주파수 영역에서 35 ~ 40 dB의 소음이 발생하는 것을 볼 수 있으며 주파수가 증가할수록 점진적으로 소음이 감소함을 볼 수 있다. 가장 높은 소음인 37.5 dB는 30 Hz ~ 60 Hz 영역에서 발생하였다.

디스크 유동 소음의 원인을 찾기 위해 leading edge 끝단의 와류 구조를 분석하였다. 그림 5는 와류 구조의 발생주기 및 크기를 분석하기 위해 leading edge 주변 와류 강도를 시간에 따라 구한 결과를 나타낸다. 와류 강도의 세기의 최대 값이 0.024 s ~ 0.03 s의 간격으로 나타나는 것을 볼 수 있으며 즉 33.3 Hz ~ 41.6 Hz의 주파수 간격으로

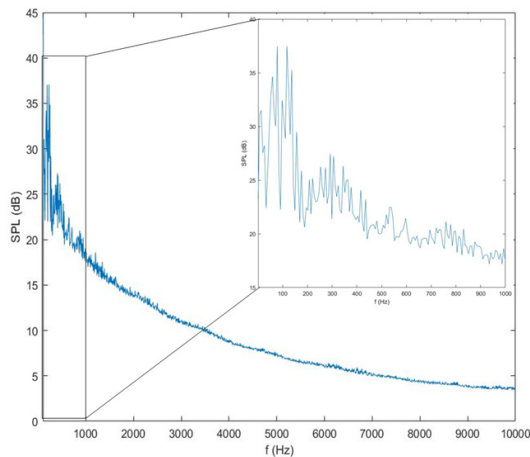


Fig. 4. Flow Noise (Sound Pressure Level) distribution in frequency range from 2 Hz to 10,000 Hz.

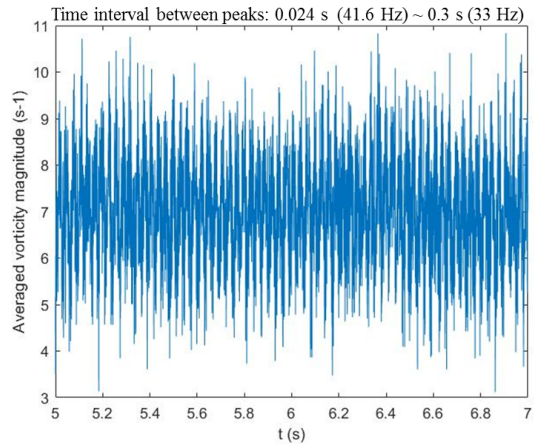


Fig. 5. Time series of averaged vorticity magnitude at leading edge of disk.

와류 구조가 형성되는 것을 알 수 있다. 이는 그림 3에서 최대 소음의 주파수 영역이었던 30 Hz ~ 60 Hz의 범위와 유사함을 알 수 있고 즉 유동 소음의 원인이 leading edge에서의 와류 발생임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LES 및 잠입경계 기법을 활용하여 상하 운동하는 양력형 디스크의 유동 해석을 성공적으로 수행하였고 압력장의 직접 해석법을 통해 유동 소음을 도출하였다. 디스크 뒷편에서 발생하는 유동 소음의 최대 값은 30 Hz ~ 60 Hz영역에서 발생하였고 디스크 leading edge에서 와류가 발생하는 주기는 33.3 Hz ~ 41.6 Hz임을 도출하였다. 즉 유동소음은 디스크 끝단에서 발생하는 와류 구조와 매우 밀접한 관계를 가지며 그 주파수 영역이 유사함을 통해 이를 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20163030024420).

REFERENCES

- 1) Na, J. S., Koo, E., Munoz-Esparza, D., Jin, E. K., Linn, R., Lee, J. S., "Turbulent kinetics of a large wind farm and their impact in the neutral boundary layer.", *Energy*, vol. 95, pp. 79-90, 2016
- 2) Baidya Roy, S., Pacala, S. W., Walko, R. L., "Can large wind farms affect local meteorology?", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol.109(D19), 2004
- 3) Fiedler, B. H., Bukovsky, M. S., "The effect of a giant wind farm on precipitation in a regional climate model". *Environmental Research Letters*, vol.6, no. 4, pp. 045101, 2011
- 4) Desholm, M., Fox, A. D., Beasley, P. D. L., Kahlert, J., "Remote techniques for counting and estimating the number of bird-wind turbine collisions at sea: a review", *Ibis*, vol.148(s1), pp. 76-89, 2006
- 5) Laratro, A., Arjomandi, M., Kelso, R., Cazzolato, B., "A discussion of wind turbine interaction and stall contributions to wind farm noise", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.127, pp. 1-10, 2014
- 6) 김예진, 유영민, 이소영, 윤재현, 이종수, 블레이드 형상 변화 및 유동하중 분포에 따른 디스크형 풍력발전 구조 강도해석. 대한기계학회 춘추학술대회, 3277-3279, 2016.
- 7) Salvador, C. S., Teresa, J. A., Martinez, J. M., Bacasnot, M. C., Orilla, K. V., Cabana, R. J., Ladaran, W. I., "Design and Construction of Arc Shaped and Disc Shaped Pendulum for Vortex Bladeless Wind Generator". In 2017 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng) (pp. 363-369). IEEE, 2017