

이상 난류 조건에서의 풍력 터빈 후류 특성 연구

나지성* · 고승철** · 이준상†

Investigation of wind-turbine wake characteristics in ideal turbulent inflow

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

Abstract In this study, we investigate the wake characteristics in laminar inflow and two different turbulent inflow cases. To solve the flow with wind turbines and its wake, we use large eddy simulation (LES) technique with actuator line method (ALM) and turbulent inflow of Turbsim. We perform the quantitative analysis of velocity deficit and turbulent intensity in laminar inflow case and turbulent inflow case with different turbulent intensity. In turbulent inflow, unsteady strong wake recovery which is highly fluctuated in time. Normalized power in turbulent inflow case is also highly fluctuated with unsteady wake recovery, while that in laminar inflow has quasi steady characteristic in power generation.

Key Words : 풍력 터빈 (Wind turbine), 난류 입구 조건 (Turbulent inflow), 후류 특성 (Wake characteristics), 레이놀즈 응력 (Reynolds stress)

1. 서론

풍력 터빈 후류 및 이를 제어하는 방법에 대한 연구는 풍력 단지의 효율 및 안정성과 직결되는 문제이기 때문에 매우 중요하다^[1]. 블레이드의 회전으로 인해 발생하는 후류는 주변 유동과의 상호작용을 통해 점차 그 강도가 작아지게 되는데, 후류의 강도가 충분히 작아지지 않은 채 풍력단지 뒤쪽 풍력 터빈에 들어가는 경우 에너지 생산 효

율의 저하와 극적인 하중 및 피로파괴를 발생시키기 때문이다^[2].

후류의 발생은 블레이드의 회전에 의해 주도되는 반면, 후류 회복은 후류와 상호작용하는 주변 유동의 난류 특성과 밀접한 관련이 있다^[3]. 따라서 주변 유동의 난류 특성을 포함하고 있는 난류 입구 조건에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 층류 입구조건을 설정하고 유동이 진행함에 따라 cascade되는 기존 연구에 비해 난류를 포함하는 입구조건을 활용한 연구에서는 대기 난류의 강한 이류 작용으로 인해 후류 회복이 강화되는 것을 관찰하였다^[4, 5].

풍력터빈 블레이드 주변의 유동 및 후류, 그리고 구체적인 와류 구조에 대한 관측이 매우 어렵기 때문에 조밀한 격자 구조를 갖는 수치모사방법을 통한 연구가 진행되어야한다. 또한 와류 구조를

† Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering
joonlee@yonsei.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

** Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

정확하게 모사하기 위해 기존의 RANS방법이 아닌 LES 방법이 사용되어야 하며 후류를 잘 모사할 수 있는 액추에이터 라인 기법이 활용되어야 한다^[6].

본 연구에서는 이상적인 난류 조건인 Kaimal, Von Karman 난류의 특성을 포함하는 난류 입구 조건과 큰에디모사, 액추에이터 라인 기법을 활용하여 난류 환경 하에서의 풍력 터빈 모사를 수행할 것이다. 이를 통해 주변 대기의 난류와 후류가 어떻게 상호작용하는 지를 관찰하고 난류의 강도가 변함에 따라 후류 회복이 어떻게 달라지는 지를 연구할 것이다.

2. 수치해석방법

2.1절 유동 solver 및 지배방정식

본 연구에서는 큰에디모사 방법을 통해 유동 및 풍력 터빈 주변 난류를 모사하였고 큰에디모사의 지배방정식인 3D Filtered 비정상 압축성 나비에 스토크스 식과 질량보존 방정식, 다중 레이놀즈 응력 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i - 2\varepsilon_i^{jk} \omega_j u_k \quad (1)$$

$$-\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} - \rho C_D \alpha_V |u| u_i + \alpha_i^m (\rho u_i - \rho u_i^c) + f$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$R_{ij} = R_{ij,A} + R_{ij,B} + \dots + R_{ij,N} \quad (3)$$

$$= \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho (v_{T,n} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + K_N) - \rho v_{T,n} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$$

u_i 는 유동속도, p 는 압력, ρ 는 밀도, $\varepsilon^{jk} \omega_j u_k$ 는 전향력, R_{ij} 는 레이놀즈 스트레스, f 는 블레이드에 의한 추가적인 힘을 의미한다. C_D 는 지표면 거칠기 및 식물에 의한 항력 상수를 뜻한다.

2.2 액추에이터 라인 기법

풍력터빈 블레이드가 유동에 가해지는 힘은 유동장과 블레이드 회전 운동에 따라 정해지는 상대 속도와 블레이드의 공력학 상수들(양력 상수, 항력 상수)에 의해 결정된다. 상대 속도와 유동장과 블레이드 회전속도 간의 각도에 따라 받음각이 결정된다. 블레이드를 각 100개의 라그랑지안 격자로 나누고 각 100개의 지점에서 공력학 상수 및 상대 속도를 통해 계산된 힘이 유동장 계산에 추가된다. 이와 동시에 힘에 따른 이동거리를 통해 블레이드의 회전 속도를 계산한다.

$$f = \frac{1}{2} V_r^2 c (C_L e_L + C_D e_D) \quad (4)$$

f 는 풍력터빈 블레이드에 의한 힘을 나타내며 V_r 은 상대 속도, c 는 코드 길이, C_L 과 C_D 는 각각 양력과 항력 상수를 나타낸다. 본 연구에서 활용하는 풍력 터빈은 NREL 5MW급 풍력 터빈에서 참조하였고 주요 제원은 표1에 도시되었다^[7].

2.3 시뮬레이션 도메인 및 경계 조건

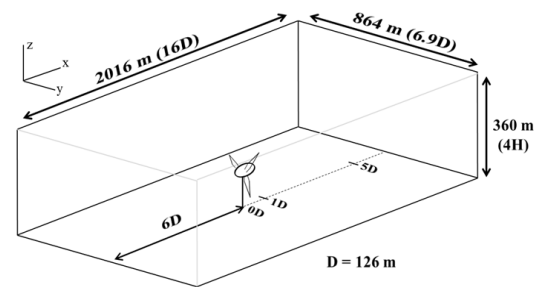


Fig. 1. Computational domain and information of wind turbine.

도메인의 크기는 2016 m x 864 m x 360 m이며 4 m, 4 m, 4 m의 격자(약 980만개)로 구성되었다. 연직 격자는 지표면에 가까운 격자일수록 조밀하도록 설정되었고 지표면에서 가장 가까운 격자라면 격자의 크기의 비율은 2로 설정하였다. 구체적인 도메인 및 터빈의 정보는 Fig. 1에 도시되었다.

입구조건은 Kaimal, Von Karman, 두 가지 난류 조건을 적용하였으며 난류 조건은 Chebyshev polynomial을 활용하여 2D Random 난류를 형성하는 TurbSim 모델을 통해 조성되었다⁸⁾. Kaimal flow와 Von Karman flow는 부력이 크지 않고 쉬어가 주도하는 대기 경계층에서의 난류를 의미한다. 다만 Kaimal flow의 경우, 주유동 방향으로의 난류 강도가 더 강한 반면, Von Karman flow는 모든 방향의 난류 강도가 동일하다. 출구 조건에 외압 조건, 지표면에는 점착 조건, 양쪽 좌우측 벽에는 반복 조건(periodic), 상단 벽은 자유 쉬어 조건을 적용하였다. 상단 벽 근처에서 속도의 발산을 막기 위해 330 m에 Rayleigh damping이 적용되었다⁹⁾. Rayleigh damping은 속도의 구배가 급격하게 변하지 않도록 상단부터 330 m까지 구배를 조정하는 기법을 뜻한다. 시뮬레이션은 총 240 초간 진행되었다.

표 2에서 볼 수 있듯이, 케이스는 2가지의 난류 입구 조건과 20 %, 17.5 %, 15 %의 난류 강도에 의해 총 6가지와 층류 입구 조건을 통해 모사된 1가

지, 총 7가지로 설정되었다. 모든 케이스에서의 속도는 12 m/s로 모의되었다. 풍속 및 난류 강도는 IEC 61400에서 정의된 A, B, C Class를 기준으로 정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 장에서는 층류 입구 조건과 2가지 난류 입구 조건을 통해 모사된 결과에 대한 분석 및 고찰을 다룬다. Fig. 2는 case_1와 case_2에 대하여 허브 높이(90 m)에서의 순간 속도장의 contour를 나타낸다. 입구에서부터 형성된 큰 규모의 난류 구조로 인해 강하게 후류 회복이 발생하는 것을 관찰할 수 있으며 또한 풍력 터빈 뒤편에서의 후류의 구조가 급격하게 무너지는 것을 볼 수 있다. 후류 회복에 의한 운동량의 유입은 후류가 안정 적으로 발달하는 영역을 1D 길이 정도로 짧게 만들었다. 특히 수평방향 레이놀즈 응력에 대한 수평 난류 혼합이 강하게 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

Table 1. NREL 5MW Wind Turbine

Rating	6 MW
Rotor configuration	3 Blades
Rotor	126 m
Hub height	90 m
Cut-in, Rated, Cut-out wind speed	3, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-in, Rated Rotor speed	6.9 rpm, 12.1 rpm

Table 2. 7 simulation cases for ideal turbulent inflows

Case	Turbulent inflow	Turbulence intensity
Laminar	Laminar inflow	-
Case_1	Kaimal inflow	C (15%)
Case_2	Von Karman inflow	C (15%)
Case_3	Kaimal inflow	B (17.5%)
Case_4	Von Karman inflow	B (17.5%)
Case_5	Kaimal inflow	A (20%)
Case_6	Von Karman inflow	A (20%)

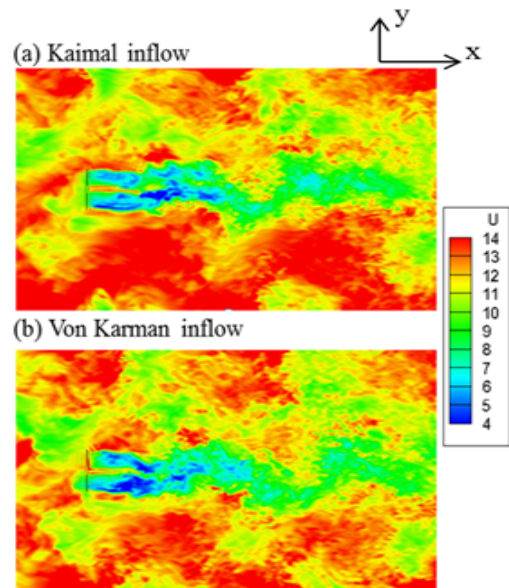


Fig. 2. Contours of the instantaneous velocity (240 s) of wind turbine flow with two different turbulent inflows at the hub height.

Fig. 3는 층류 입구 조건 및 2 개의 난류 입구 조건에서 대하여, 1D, 5D 위치에서 속도 감소의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 1D 위치 후류에서는 난류 입구 조건에서의 속도 감소 결과가 큰 변동을 가지는 것을 제외하고는 층류 입구 조건에서의 속도 감소 결과와 매우 유사하였다. 그러나 5D 위치 후류에서는 난류 입구 조건에서의 속도 감소가 높은 후류 회복으로 인해 층류 입구 조건에서의 속도 감소에 비해 약 40 % 더 많이 회복되었다.

Fig. 4은 층류 입구 조건 및 난류 강도가 다른 Kaimal 난류 입구 조건에서 uv 레이놀즈 응력 (수평 운동량 속) 및 qw 레이놀즈 응력 (수직 운동량속)의 2, 4 성분의 연직방향 분포를 나타낸다. 이 때 q 는 수평방향 속도로서 u, v , 그리고 둘간의 각도를 통해 계산되며 Na et al. (2016)의 계산을 참조하였다²⁾. u, v 또는 q, w 의 부호에 따

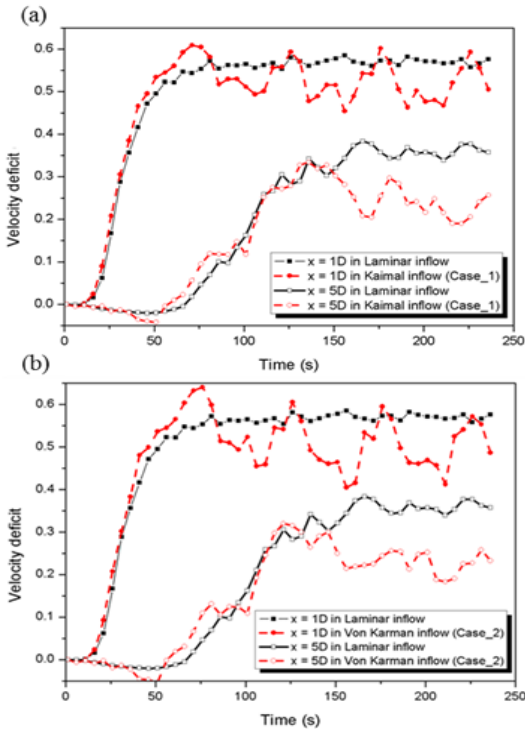


Fig. 3. Time series of the velocity deficit at different streamwise distances in two different turbulent inflows. (a) Kaimal inflow, (b) Von Karman inflow.

에 따라 사분면을 구성할 수 있고 uv 또는 qw 가 음수가 되는 사분면, 즉 2, 4분면의 값이 각각 ejection과 sweep이라 정의할 수 있다. 레이놀즈응력이 음수가 될 때 난류운동에너지를 생성시키기 때문에, 2, 4 분면의 값이 난류운동에너지의 생성 양이라 할 수 있다. 수평 및 수직 운동량 속의 최대는 허브 높이에서 발생하였다. 또한 Kaimal 입구 조건에서는 수평 및 수직 운동량 속이 층류 입구 조건에서의 운동량 속보다 강했으며 또한 난류 강도가 강해질수록 운동량 속이 강해지는 것을 관찰하였다.

Fig. 5는 층류 입구 조건, 다른 난류 강도를 갖는 Kaimal 난류 입구 조건에 대해, 에너지 생산량의 시간에 대한 변화를 보여준다. 에너지 생산량($P = \tau_{\omega}$,

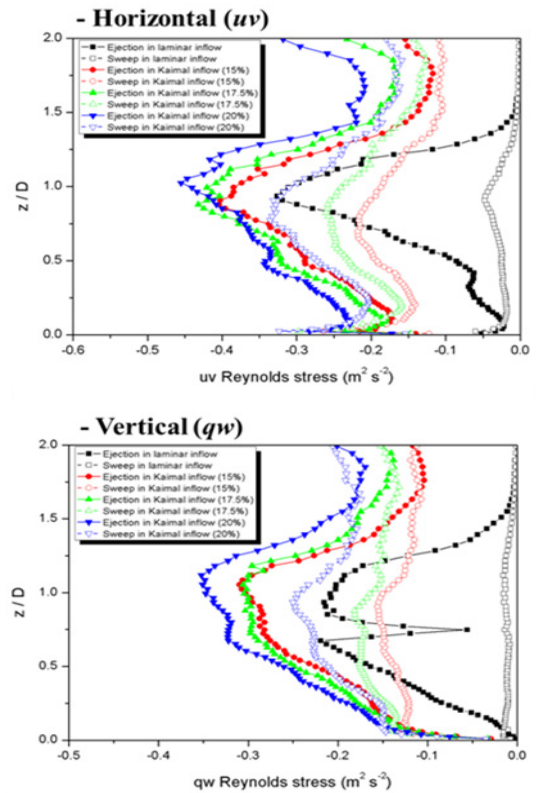


Fig. 4. Vertical profiles of uv Reynolds stress and qw Reynolds stress in laminar inflow and Kaimal inflows (Turbulence intensity: 15%, 17.5%, 20%). (a) uv Reynolds stress, (b) qw Reynolds stress.

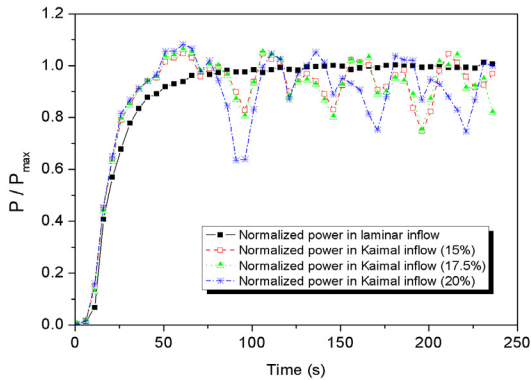


Fig. 5. Time series of the normalized power in laminar inflow, Kaimal inflows with different turbulence intensity

thrust x angular velocity)은 층류 결과에서의 최대 생산량(P_{max})을 기준으로 무차원화되었다. 층류 입구 조건에서 에너지 생산량은 시간에 따라 크게 변화하지 않는 안정적인 특성을 보였으나 Kaimal 난류 입구 조건에서는 Fig. 3에서의 속도 감소 경향과 유사하게 큰 변동을 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 큰에디모사 및 엑츄에이터 라인 기법 그리고 2 가지의 난류 입구 조건을 통해 풍력 터빈에서 발생하는 후류 및 주변 난류와의 상호작용을 모사하였다. 층류 입구 조건에 비해 난류 입구 조건에서는 시간에 따라 큰 변화를 갖는 비정상 후류 회복이 관찰되었다. 수평 방향과 수직 방향의 운동량 속의 분석을 통해, 난류 강도가 강해질수록 후류 회복이 강해짐을 관찰하였다.

후 기

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

REFERENCES

1) Park J., Basu S., Manuel L., 2014, "Large-eddy simulation of stable boundary layer turbulence and

estimation of associated wind turbine loads", *Wind Energy*, Vol. 17(3), pp. 359~384.

2) Na, J. S., Koo, E., Munoz-Esparza, D., Jin, E. K., Linn, R., Lee, J. S., 2016, "Turbulent kinetics of a large wind farm and their impact in the neutral boundary layer.", *Energy*, Vol. 95, pp. 79~90.

3) Vermeer L. J., Sørensen J. N., Crespo A., 2003, "Wind turbine wake aerodynamics", *Prog. Aerosp. Sci.* Vol. 39(6), pp. 467~510.

4) Na, J. S., Koo, E., Jin, E. K., Linn, R., Ko, S. C., Muñoz-Esparza, D., Lee, J. S., 2017, "Large-eddy simulations of wind-farm wake characteristics associated with a low-level jet", *Wind Energy*.

5) Dörenkämper M., Witha B., Steinfeld G., Heinemann D., Kuhn M., 2015, "The impact of stable atmospheric boundary layers on wind-turbine wakes within offshore wind farms." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 144, pp. 146~153.

6) Allaerts, D., Meyers, J., 2015, "Large eddy simulation of a large wind-turbine array in a conventionally neutral atmospheric boundary layer", *Physics of Fluids*, Vol. 27(6), 065108.

7) Jonkman J., Butterfield S., Musial W., Scott G., 2009, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development", National Renewable Energy Laboratory.

8) Jonkman, B. J., 2009, "TurbSim user's guide: Version 1.50", National Renewable Energy Laboratory.

9) Stevens, B., Duan, J., McWilliams, J. C., Münnich, M., & Neelin, J. D., 2002, "Entrainment, Rayleigh friction, and boundary layer winds over the tropical Pacific", *Journal of climate*, Vol. 15(1), 30-44.