

안정경계층 난류에서의 터빈 후류 특성 연구

나지성* · 고승철** · 이준상†

Investigation of wake characteristics in turbulence of stable atmospheric boundary layer

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

Abstract In this study, we investigate the wake characteristics in two cases which are laminar inflow and turbulent inflow. 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. Turbulent inflow which contains the characteristic of the stable atmospheric boundary layer is used. We perform the quantitative analysis of velocity deficit and turbulence intensity in two cases. Time series of velocity deficit at the first, the second column in two cases are compared to observe the performance of wind turbine. The performance in the first column in laminar inflow is overestimated compared to that in turbulent inflow. And we observe that wake in the case with turbulent inflow drive to the span-wise direction and wake recovery in turbulent inflow is more effective. In quadrant analysis of Reynolds stress, the ejection and the sweep motion in turbulent inflow case are bigger than those in laminar inflow case.

Key Words : 풍력 터빈(Wind turbine), 난류 입구 조건(Turbulent inflow),
안정경계층(Stable atmospheric boundary layer), 후류 특성(Wake characteristics)

1. 서론

풍력 터빈에서 발생하는 후류에 관한 연구는 전체 풍력 단지의 효율 및 각 터빈이 받는 하중 및

피로 파괴와 밀접한 관련이 있기 때문에 매우 중요하다. 블레이드의 회전 운동으로 인해 발생하는 후류는 바깥 유동에서의 모멘텀 유입으로 회복되며 회복되지 않고 downstream 풍력 터빈에 들어가는 경우, 에너지 생산 효율이 급격하게 저하하고 극적인 하중과 피로 파괴를 야기할 수 있다^{1, 2}.

풍력 터빈 주변의 유동 및 후류는 관측이 매우 어렵기 때문에 시뮬레이션을 이용한 수치해석연구를 통해 연구가 주로 수행되었다. 최근 크에디모사 및 층류 입구조건을 활용하여 풍력 단지의 최적 설계와 관련된 연구들이 수행되었다. 단지 내 터빈 간의 간격 또는 배열과 후류 및 후류 회복간의 상관관계가 연구되었으며, 터빈 간의 간격이 충

† Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 120-749, joonlee@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-5810

* Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

** Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

분하지 않은 경우, upstream 풍력 터빈에서 발생하는 후류로 인해 downstream 풍력 터빈의 효율이 저하됨을 관찰하였다^[3].

최근 풍력 단지의 정확한 후류모사를 위해 실제 대기 경계층의 난류를 포함하는 입구조건으로 모사하는 방법이 제시되고 있다. 풍력 터빈에서 발생하는 후류는 난류 환경 하에서 더 넓은 범위에 분포하면서 더 빠른 후류 회복을 보임을 관찰하였다. 이를 통해 downstream 풍력 터빈의 효율이 증가할 수 있음을 제시하였고 이를 기반으로 최적 설계를 위한 간격을 제시하였다^[4]. 그러나 안정경계층 내 복잡한 난류 환경 하에서의 후류 및 터빈 효율에 관한 연구는 미비한 상태이다.

본 연구에서는 TurbSim을 이용하여 안정경계층 내의 난류를 포함하는 난류 입구 조건을 생성하고 이를 20개의 풍력 단지 시뮬레이션에 활용하여 그 난류 특성을 관찰하였다. 안정 경계층 내에 발생하는 Low-Level-Jet (LLJ) 및 Ekman layer을 구현하고 안정경계층에서의 후류 회복과 풍력 터빈의 효율에 대해 연구하고자 한다.

2. 수치해석방법

2.1 유동 solver 및 지배방정식

본 연구에서는 큰에디모사 난류 모델을 통해 유동 및 난류 현상을 모사하였고 Filtered 비정상 압축성 나비에 스톡스 식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g_i - 2\epsilon_i^{jk} \omega_j u_k - \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} - \rho C_D \alpha_V |u| u_i + \alpha_i^m (\rho u_i - \rho u_i^e) + f \quad (1)$$

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

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

u_i 는 유동 속도, p 는 압력, ρ 는 밀도, $\epsilon^{jk} \omega_j u_k$ 는 코리올리 힘, R_{ij} 는 레이놀즈 스트레스 텐서, f 는 블레이드에 의한 힘을 의미한다. C_D 는 항력 상수로써 지표면 위의 식물의 높이 및 특성에 의해 결정된다. 코리올리 힘은 위도 45도를 기준으로 $f=1.0 \times 10^4$ 이 적용되었다.

2.2 액추에이터 라인 기법

풍력 터빈 블레이드에 의한 힘은 유동장과 블레이드 운동에 의해 계산되는 상대 속도와 풍력 터빈의 공력학 상수(양력 상수, 항력 상수)들에 의해 결정된다. 블레이드 주변의 유동 속도와 블레이드 속도에 따라 결정되는 상대 속도와 둘 간의 각도에 따라 받음각이 결정된다.

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

f 는 풍력 터빈 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 논문에서 활용한 풍력 터빈 관련 인자는 NREL 5MW급의 풍력 터빈에서 참조하였다^[5]. 또한 20개의 풍력 터빈을 설정하였고 각 풍력 터빈 간의 유동방향 거리는 6D, 수직 거리는 4D로 설정되었다.

2.3 시뮬레이션 도메인 및 경계 조건

도메인의 크기는 4608 m x 2304 m x 540 m로써 8 m, 8 m, 9 m의 격자로 구성되었다. 연직 격자는 지표면에 가까운 격자일수록 조밀하도록 설정되었고 지표면에서 가장 가까운 격자와 먼 격자의 크기의 비율은 2로 설정하였다. 사용된 경계조건은 다음과 같다. 입구조건에 Dirichlet 방법을 통한 일정 속도 조건(1/7th law profile, $u=7.5$ m/s at 90 m)과 TurbSim에서 생성한 난류 입구 조건(안정경계

층 입구 조건), 출구 조건에 외압 조건, 지표면에는 노슬립 경계조건, 좌우측 벽에는 반복조건 (periodic), 위쪽은 자유 전단조건을 적용하였다. 시뮬레이션은 총 200 초간 진행되었다.

3. 결과

3.1 Ekman layer & Low Level Jet

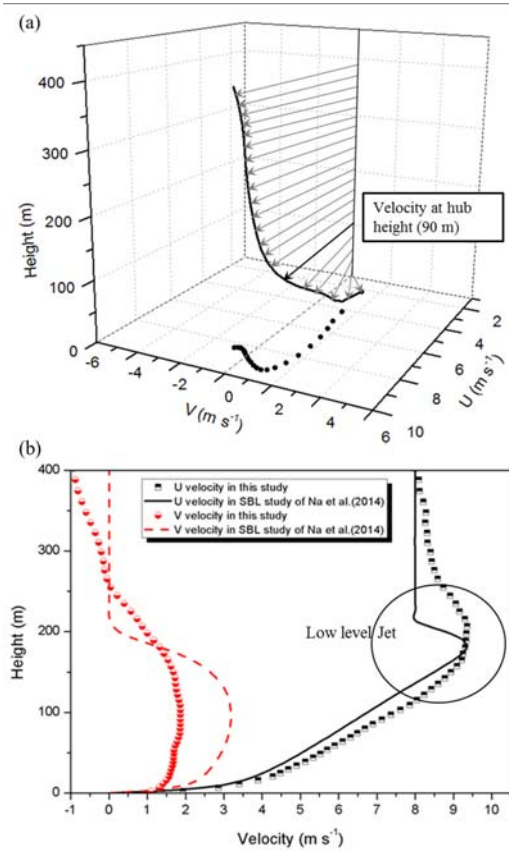


Fig. 1. Vertical profiles of velocities in stable atmospheric boundary layer. (a) 3D vertical profile and wind hodograph. (b) Comparison between velocities in this study and those in previous SBL study for validation

본 절에서는 난류 입구 조건 특성을 파악하고 안정경계층의 Ekman layer와 LLJ에 대하여 기존 연구와의 비교를 통해 검증을 수행하였다. Ekman layer, 즉 코리올리 힘과 바람 전단 힘, 압력 구배

힘 간의 힘 균형이 높이에 따라 달라짐에 따라 바람의 방향이 높이별로 달라지는 경계층을 의미한다. 그림 1-(a)에서 볼 수 있듯이 높이에 따라 바람의 방향이 점진적으로 바뀌는 것을 볼 수 있으며 허브 높이인 90 m에서는 $U=7.2\text{m s}^{-1}$, $V=1.8\text{m s}^{-1}$ 의 속도가 형성됨을 볼 수 있다. 그림 1-(b)에서는 기존 Na et al.(2014)에 의해 수행된 안정경계층 연구의 속도와 본 연구에서의 속도간의 비교를 통해 시뮬레이션의 검증이 수행되었다. 높이 180 m 주변에 발생하는 LLJ의 크기 및 위치를 유사하게 묘사하였으며 본 연구에서의 결과와 Na et al.의 결과간의 큰 차이가 없음을 확인하였다.

3.2 와류 구조 분석

두 경우에서의 속도 장을 보면, 터빈 뒤편으로 속도의 감소 및 주기적인 coherent 난류 구조가 보임을 알 수 있다. 후류는 속도의 감소로 인한 전단 구배에 의해 발생한다. 층류 입구 조건에서는 후류가 유동의 수직방향에 대해 대칭을 이루며 형성되는 반면, LLJ 경우에는 유동 방향의 왼쪽으로 쏠리는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Ekman layer에 의한 영향으로 설명할 수 있으며 이로 인해 downstream 풍력 터빈과 upstream 풍력 터빈간의 후류 및 터빈 효율이 유사한 것을 볼 수 있다.

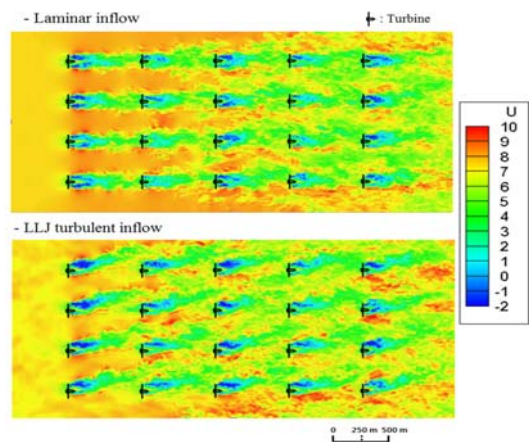


Fig. 2. Contours of stream-wise velocity in two cases. Upper panel and lower panel are about laminar inflow and LLJ turbulent inflow, respectively.

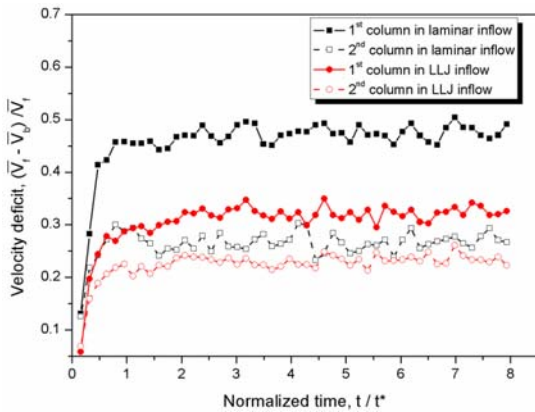


Fig. 3. Time series of velocity deficit at first, second column in two cases. t^* represent the large eddy turnover time.

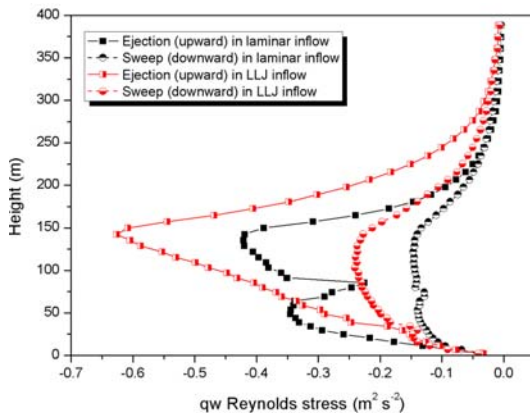


Fig. 4. Vertical profiles of quadrant components of Reynolds stress in two cases. Ejection motion and sweep motion mean upward mixing and downward mixing, respectively.

4. 결론

본 논문에서는 큰에디모사 및 액추에이터 라인 기법 그리고 난류 입구 조건을 통해 안정경계층 내에서 발생하는 난류 환경 하에서의 풍력 터빈

및 그 후류를 모사하였다. 층류 입구 조건을 사용하는 경우 첫 번째 줄의 풍력 터빈의 효율 및 속도 감소를 과모의함을 관찰하였다. 또한 LLJ 입구 조건에서 후류 회복이 강하게 발생함으로써 upstream과 downstream 풍력 터빈의 효율 차이가 더 작음을 확인하였다.

후 기

1. 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) Vermeer L. J., Sørensen J. N., Crespo A., 2003, "Wind turbine wake aerodynamics", *Prog. Aerosp. Sci.* Vol. 39(6), pp. 467~510.
- 3) Na, J. S., Koo, E., Muñoz-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.
- 4) 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.
- 5) 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.