

풍력발전단지의 후류손실 및 터빈 재배치에 관한 연구

Wake Losses and Repositioning of Wind Turbines at Wind Farm

박근성* · 유기완**† · 김현구***

Park Kun-Sung*, Ryu Ki-Wahn**† and Kim Hyun-Goo***

(Received 17 March 2015; accepted 22 June 2015)

Abstract : The main objective of this study is to predict the wind power generation at the wind farm using various wake models. Modeling of wind farm is a prerequisite for prediction of annual energy production at the wind farm. In this study, we modeled 20 MW class Seongsan wind farm which has 10 wind turbines located at the eastern part of Jeju Island. WindSim based on the computational fluid dynamics was adopted for the estimation of power generation. The power curve and thrust coefficient with meteorology file were prepared for wind farm modelling. The meteorology file was produced based on the measured data of the Korea Wind Atlas provided by Korea Institute of Energy Research. Three types of wake models such as Jensen, Larsen, and Ishihara et al. wake models were applied to investigate the wake effects. From the result, Jensen and Ishihara wake models show nearly the same value of power generation whereas the Larsen wake model shows the largest value. New positions of wind turbines are proposed to reduce the wake loss, and to increase the annual energy production of the wind farm

Key Words : 거칠기 길이(Roughness height), 풍력단지(Wind farm), 후류 효과(Wake effect), 정격 풍속(Rated wind speed), 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics), 추력 계수(Thrust coefficient)

1. 서 론

풍력 에너지 산업은 화석 연료와 원자력에
너지의 대체수단으로써 전 세계적으로 급성장

하고 있으며, GWEC에 따르면 2014년말 전세
계 설치용량은 370 GW에 이른다.¹⁾ 현재 국내
에서는 제주도와 서남해상 등의 새로운 풍력
발전단지를 조성하여 풍력 설비용량을 증가

*박근성 : 전북대학교 항공우주공학과 대학원
**† 유기완(교신저자) : 전북대학교 항공우주공학과 /
전북대학교 스마트그리드연구센터
E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr, Tel : 063-270-4286
***김현구 : 한국에너지기술연구원

**† Ryu Ki-Wahn(corresponding author) : Department of
Aerospace Engineering, Chonbuk National University.
E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr, Tel : 063-270-4286
*Park Kun-Sung : Graduate student, Department of Aerospace
Engineering, Chonbuk National University.
***Kim Hyun-Goo : New & Renewable Energy Resource
Center, Korea Institute of Energy Research.

시킬 계획에 있다.

풍력발전단지를 조성하기 위해선 바람자원이 풍부한 지역을 선정 한 후, 그 지역에서 생산 가능한 연간 발전량을 예측해야 한다. 또한 풍력발전단지 내 풍력터빈 간의 후류영향을 정확히 고려해야 후류 손실을 최소화 시키고 최대의 에너지를 생산 할 수 있다. 현재 이러한 풍력발전단지의 생산 가능한 에너지 예측과 후류 영향 분석을 위한 다양한 상용 툴이 개발되어있는데, 그중 대표적으로 WindSim A/S에서 개발한 WindSim이 있다. 특히 이 툴은 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 기법을 이용하기 때문에 복잡지형에서 풍속 및 풍력발전량을 비교적 정확히 예측하는 것으로 알려져 있다.²⁾

본 연구에서는 제주도 동부 초원평지에 조성되어 있는 성산 풍력발전단지를 대상으로 전산유체역학 기법과 3종류(Jensen, Larsen, Ishihara 등)의 후류모델을 적용하여 후류 영향을 분석하고 후류 영향을 줄일 수 있는 터빈 배치를 찾는 것을 목표로 한다.

2. 성산 풍력발전단지 모델링

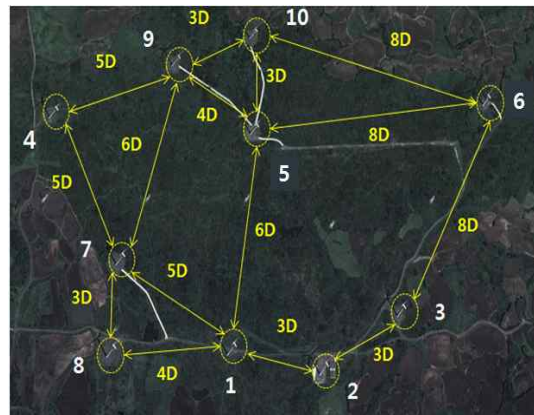
2.1 성산 풍력발전단지

성산 풍력발전단지는 20 MW 규모로 제주도 동부 내륙의 성산읍 수산리로 해안으로부터 약 5 km 떨어져 위치하며, Vestas V80 2 MW급 풍력발전기 10기가 2010년에 준공되어 가동되고 있다. Fig. 1은 성산 풍력발전단지의 위치와 풍력발전단지 내에서 풍력터빈의 위치를 각각 나타낸다.

성산 풍력발전단지 내에 설치되어있는 풍력터빈은 피치제어 방식의 Vestas V80으로서 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다.



(a) Location of wind farm



(b) Position of wind turbines

Fig. 1 Seongsan wind farm

Table. 1 Specification of Vestas V80 wind turbine

| Control type | Pitch control |
|--------------------------|---------------|
| Rated power [kW] | 2,000 |
| Hub height [m] | 78 |
| Rotor diameter [m] | 80 |
| Cut-in wind speed [m/s] | 4 |
| Cut-out wind speed [m/s] | 25 |
| Rated wind speed [m/s] | 15 |

2.2 성산 풍력발전단지 모델링

성산 풍력발전단지의 후류 영향 분석을 위

해 Fig. 2와 같이 지형정보자료를 이용하여 계산영역을 설정한 후 실제 발전단지와 동일하게 모델링 하였다. Fig. 2에서 풍력터빈의 순서는 실제 설치된 순서와 동일하게 설정하였다.

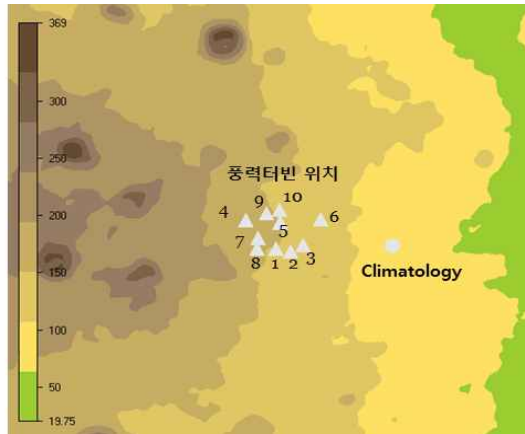


Fig. 2 Seongsan wind farm in WindSim

성산 풍력발전단지를 모델링하기 위해 GWS 파일 형식의 지형정보파일을 입력하여야 한다. 이 지형정보파일에는 지형의 고도와 지형 거칠기 데이터가 포함 되어 있다. 지형 거칠기는 환경부 토지이용도 조사에서 제시한 데이터이며, 이 데이터에 근거한 속도분포 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

여기에서, U 는 풍속, U_* 는 마찰속도(friction velocity), κ 는 von Karman 상수로 0.435이다. 또한, z 는 수직방향의 위치를 나타내고, z_0 [m]는 거칠기 길이를 나타낸다.

2.3 입력자료

성산 풍력발전단지의 후류 분석을 위해서는

Vestas V80의 풍력터빈 제원과 출력곡선(power curve) 및 추력 계수(thrust coefficient)와 기상 자료가 입력되어야 한다. 자세한 입력 자료는 다음과 같다.

(1) 출력곡선 및 추력계수

풍력 터빈의 출력곡선과 추력계수는 후류 분석을 위해 입력되어야 하는 필수 자료이다. 본 연구에서 사용한 Vestas V80의 출력곡선과 추력계수는 Fig. 3과 같다. 추력계수는 풍력발전기의 시동풍속인 4 m/s에서 가장 크며, 풍속이 커질수록 작아지는 것을 알 수 있다. 여기에서 추력계수는 본 연구에서 사용된 Jensen, Larsen, Ishihara 등이 고안한 후류 모델에 대한 속도 손실(velocity deficit) 값을 결정하는데 중요한 변수로 사용된다.

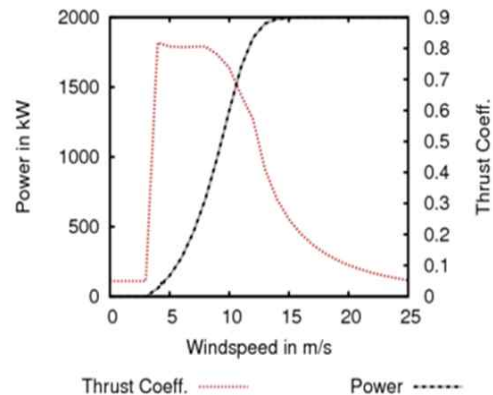


Fig. 3 Power curve and thrust coefficient of Vestas V80

(2) 기상자료

기상자료(meteorology)는 출력곡선, 추력계수와 함께 풍력발전단지의 후류영향을 분석하기 위해 중요한 입력 자료로 사용된다. 본 연구에서는 기상자료로써 한국에너지기술연구원에서 제작한 국가바람지도를 사용하였다. 국가바람지도는 수치기상예측 모델을 이용하여 제작

되었으며, 이 모델은 MM5(Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)를 기반으로 하며, WRF(Weather Research and Forecasting)을 병행 사용하여 모델간의 상호 보정과 검증을 통해 예측 오차를 최소화하였다.³⁾ 기상자료의 측정기간은 2005년 1월 1일 ~ 2008년 1월 1일으로 총 3년간이다. 해당 높이는 78 m 이고, 주 풍향은 북북서이며, 평균 풍속은 7.1 m/s이다. Fig. 4는 기상자료를 바람장미(wind rose)로 나타낸 것이고, Table 2는 기상자료의 자세한 속성을 나타낸 것이다.

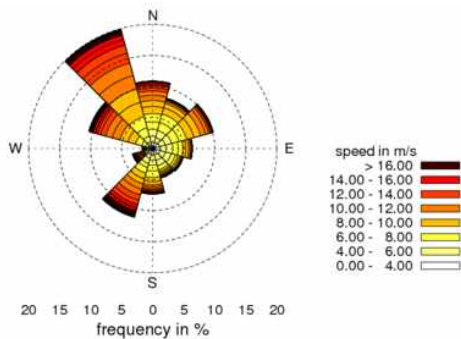


Fig. 4 Wind rose at Seongsan wind farm

Table. 2 Properties of meteorology file

| | |
|-----------------------|---------|
| Main wind direction | NNW |
| Height [m] | 78 |
| Mean wind speed [m/s] | 7.1 |
| Weibull, k | 1.9 |
| Weibull, c | 8.1 |
| Position | m055015 |

3. 후류 모델

3.1 후류 모델

본 연구에서는 전통적으로 많이 사용되고 있는 속도 손실 법칙(velocity deficit laws)의 후류 모델을 사용한다. WindSim에서는 이 방

법을 이용한 3종류의 후류모델을 사용할 수 있으며, 3종류의 모델은 Jensen, Larsen, 그리고 Ishihara 등의 후류 모델이다. Fig. 5는 후류 영역(wake region)에서의 풍속 감소를 나타내고, 식 (2)는 속도 손실 (velocity deficit)을 나타낸다.

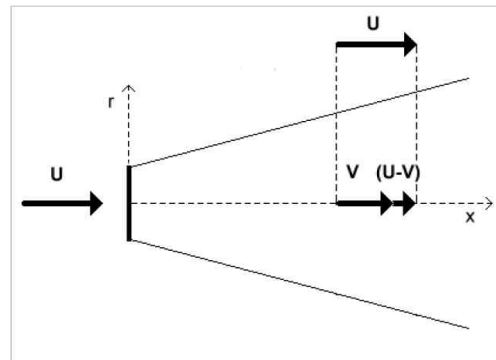


Fig. 5 Velocity deficit inside wake region

$$\delta V = \frac{U - V}{U} \quad (2)$$

여기에서, U 는 자유흐름 풍속을 나타내고, V 는 풍력터빈을 통과한 뒤 후류영향이 고려되어 감소된 풍속을 나타낸다.

(1) Jensen 후류 모델

Jensen 후류 모델은 해석적인 후류 모델이며, Jensen에 의해 개발되었고, Katic에 의해 보고되었다.⁴⁾ 이 모델은 가장 오래되고 단순한 방법 중에 하나이며, 후류는 선형적으로 확장되고, 속도 손실은 터빈의 이격거리에 따라 변화한다. Jensen 후류 모델의 각 지점에서 후류의 지름은 식 (3)과 같고, 완전히 발달된 후류에서의 속도 손실은 식 (4)와 같다.

$$D_{wake} = D(1 + 2ks) \quad (3)$$

$$\delta V = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{(1 + 2ks)^2} \quad (4)$$

여기에서, 식 (3)과 식 (4)는 회전자 후방으로부터 각 거리에 따른 상대거리인 $s = x/D$ 에 의해 변한다. 한편, C_T 는 추력계수, x 는 터빈 간의 거리, D 는 로터 직경을 나타낸다. 파라미터 k 는 후류 손실계수(wake decay factor)이며, 식 (5)와 같다.

$$k = \frac{A}{\log \frac{h}{z_0}} \quad (5)$$

여기에서, A 값은 0.5이고, h 는 허브높이 [m]이며, z_0 는 지형 거칠기를 나타낸다.

(2) Larsen 후류 모델

Larsen 후류 모델은 다소 복잡한 모델이며, Prandtl 혼합거리 이론이 사용된다.⁵⁾ 식 (6)은 Larsen 후류 모델의 각 지점에서 후류의 지름이고, 식 (7)은 속도 손실을 나타낸다.

$$D_{wake} = 2 \left(\frac{35}{2\pi} \right)^{\frac{1}{5}} (3c_1^2)^{\frac{1}{5}} (C_T A_r x)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\delta V = \frac{1}{9} (C_T A_r x^{-2})^{\frac{1}{3}} \times \left\{ r^{\frac{3}{2}} (3c_1^2 C_T A_r x)^{-\frac{1}{2}} - \left(\frac{35}{2\pi} \right)^{\frac{3}{10}} (3c_1^2)^{-\frac{1}{5}} \right\} \quad (7)$$

여기에서, A_r 은 회전자 면적(rotor swept area), c_1 은 무차원 혼합거리를 나타낸다. 한편 A_r , c_1 , x_0 , $R_{9.5}$ 그리고 R_{nb} 에 해당하는 식은 식 (8) ~ (12)와 같다.

$$A_r = \frac{\pi D^2}{4} \quad (8)$$

$$c_1 = \left(\frac{D}{2} \right)^{\frac{5}{2}} (C_T A_r x_0)^{-\frac{5}{6}} \quad (9)$$

$$x_0 = \frac{9.5D}{\left(\frac{2R_{9.5}}{D} \right)^3 - 1} \quad (10)$$

$$R_{9.5} = 0.5(R_{nb} + \min[h, R_{nb}]) \quad (11)$$

$$R_{nb} = \max[1.08D, 1.08D + 21.7D(I_a - 0.05)] \quad (12)$$

여기에서, $R_{9.5}$ 는 로터 직경 $9.5D$ 의 거리와 관련된 후류 반경(wake radius)을 나타내고, I_a 는 허브 높이에서 주변난류강도(ambient turbulent intensity)를 나타내며, R_{nb} 는 주변 난류강도와 관련된 경험 항이다.

(3) Ishihara 등의 후류 모델

Ishihara 등의 후류 모델은 주변난류(ambient turbulence)와 후류 난류(wake TI)에 대한 후류 회복(wake recovery)의 관점에서 난류의 영향을 설명한다.⁶⁾ 식 (13)은 Ishihara 등의 후류 모델의 속도 손실을 나타낸다.

$$\delta V = \frac{C_T^2}{32} \left(\frac{1.666}{k_1} \right)^2 \left(\frac{x}{D} \right)^{-Pe} e^{-\frac{x^2}{D_{wake}^2}} \quad (13)$$

여기에서, 후류의 성장에 관한 식은 D_{wake} 로 나타내며, 식 (14)와 같다.

$$D_{wake} = k_1 \frac{C_T^{\frac{1}{4}}}{0.833} D^{1 - \frac{p}{2}} x^{\frac{p}{2}} \quad (14)$$

여기에서, 변수 p 는 난류 강도의 함수이며, 식 (15)와 같다.

$$p = k_2(I_a + I_w) \quad (15)$$

여기에서, I_a 와 I_w 는 주변 난류강도와 터빈에서 생성된 난류강도를 나타낸다. 터빈에서 생성된 난류강도는 식 (16)과 같다.

$$I_w = k_3 \frac{C_T}{\max[I_a, 0.03]} \left(1 - e^{-4\left(\frac{x}{10D}\right)^2}\right) \quad (16)$$

또한, 상수 $k_1 = 0.27$, $k_2 = 6$ 및 $k_3 = 0.04$ 를 적용하였다.

한편, 후류모델들의 중첩은 에너지 관점에서 각각의 속도 손실의 제곱의 합에 대한 제곱근(RSS, root square of sum of square)이며, 식 (17)과 같다.

$$\delta V = \sqrt{\delta V_1^2 + \delta V_2^2 + \dots + \delta V_n^2} \quad (17)$$

후류 손실 (wake loss, β)은 후류 영향이 없을 때의 AEP_w 와 있을 때의 AEP_0 에 대한 상대오차의 비로 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta(\%) = \frac{AEP_0 - AEP_w}{AEP_0} \times 100 \quad (18)$$

4. 후류 영향 분석 및 새로운 터빈 배치 제시

4.1 후류 영향 분석

풍력터빈의 후류 영향은 각 터빈간의 이격거리, 주 풍향 및 에너지 밀도에 따라서 크게 달라진다.⁷⁾ Fig. 6은 풍속과 에너지 밀도를 고려한 total wind energy의 바람장미를 나타낸

것이고, 각 풍력터빈 간의 이격거리(D는 회전자 직경)은 Fig. 1에서 알 수 있다. Fig. 6에서 total wind energy의 빈도수가 높은 방향은 북서방향과 남서방향인 것을 알 수 있다. 주풍향 방향은 풍력단지를 개발하는데 있어서 후류의 영향을 최소화 하고 연간 발전량을 극대화 할 수 있는 풍력터빈의 배열을 결정하는데 유용한 정보이다. 이에 대해서는 다음 절에서 구체적으로 언급하기로 한다.

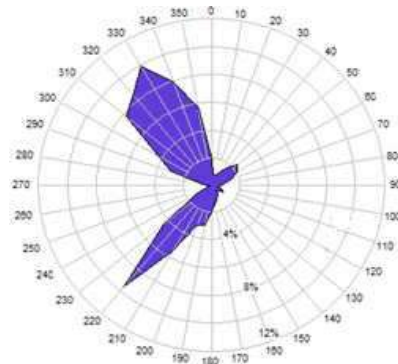


Fig. 6 Total wind energy

각 터빈의 후류 모델별 후류 손실(wake loss)은 Fig. 7과 같다. 세 모델 모두 터빈 5와 터빈 7에서 후류 손실이 크게 발생하고, 터빈 4와 터빈 6에서 작게 발생하는 것을 알 수 있다.

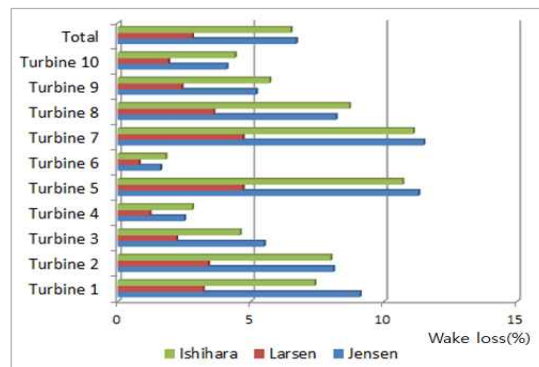


Fig. 7 Wake loss

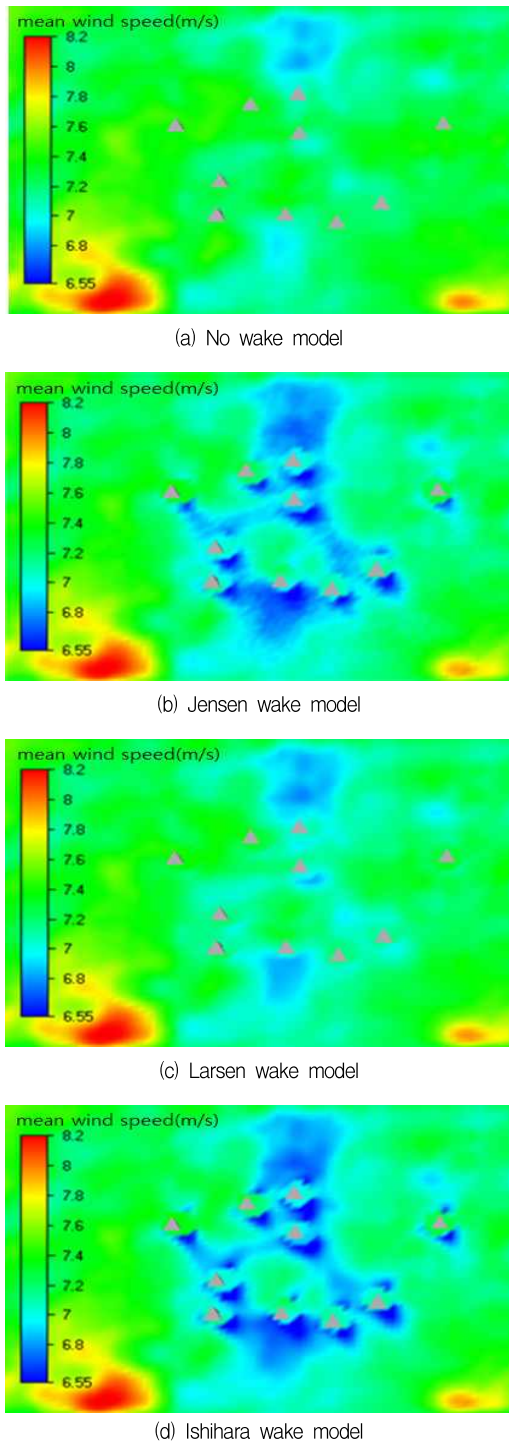


Fig. 8 Mean wind speed according to wake models at Seongsan wind farm

Fig. 8(a) ~ (d)는 성산 풍력발전단지 내의 평균 풍속 분포도를 나타내는데, Fig. 8(a)는 후류 모델을 적용하지 않았을 때, Fig. 8(b) ~ (d)는 순서대로 Jensen, Larsen, Ishihara 후류 모델을 적용했을 때의 평균 풍속 분포도이다. 결과적으로 Larsen 모델은 Jensen과 Ishihara 후류 모델에 비해서 후류 손실을 과소평가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8로부터 두 개의 풍력터빈이 후류 영향을 크게 받는 것으로 확인된다. 즉 터빈 5는 터빈 9와 10에 의해, 터빈 7은 터빈 4에 의해서 이격 거리가 5D 이내에 들어오면서 주 풍향에 따른 후류 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

4.2 새로운 터빈 배치를 위한 조건 분석

(1) 속도 손실 분석

이격거리에 따른 후류 손실을 분석하기 위해 성산 풍력발전단지 내의 지형 거칠기 길이 ($z_0 = 0.11$)과 평균 풍속에 해당하는 Vestas V80의 추력계수 ($C_T = 0.8$)의 조건에서 이격거리에 따른 후류 모델별 속도 손실(velocity deficit, δV)을 Fig. 9와 같이 계산하였다. 터빈

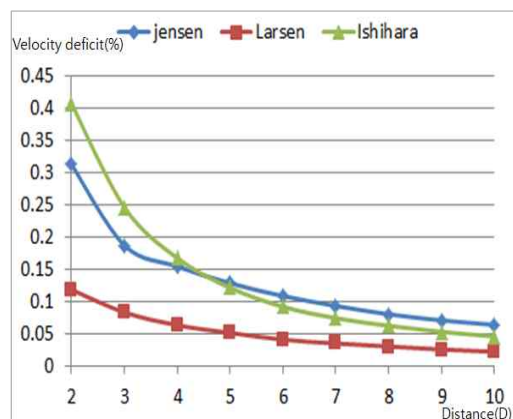


Fig. 9 Velocity deficits of wake models according to separation distance D

이격거리 8D 이후부터 후류 손실 값이 어느 정도 수렴해가는 것을 확인 할 수 있다. 또한 성산풍력발전단지 내의 터빈 이격거리가 Fig. 1(b)에서와 같이 4D ~ 6D로 많이 분포하는데, 이 때 Larsen 모델의 속도 손실이 Jensen과 Ishihara의 값의 약 40 % 수준으로 나타낸다. 따라서 Fig. 8에서 Larsen 모델이 후류손실을 과소평가한 것이다. 한편, 세 후류 모델의 속도 손실은거칠기 길이(z_0)와 풍력터빈의 추력 계수(C_T)에 따라 달라지기 때문에 해상, 평야, 복잡지형 등의 지형특성과 터빈사양에 따라 달라진다고 할 수 있다.

(2) 풍황 자료 분석

Fig. 10의 total wind energy 분석을 통해 동-서 방향으로 터빈을 배치하면, 후류 손실을 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

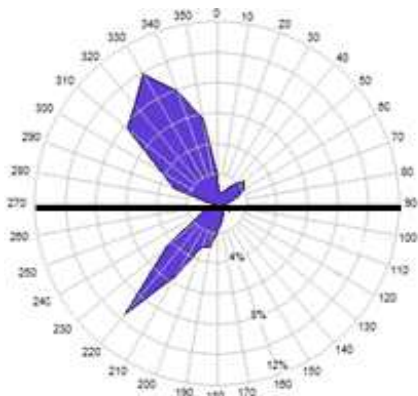


Fig. 10 Total wind energy

(3) 풍속 분포도 분석

Fig. 11의 풍속 분포도 분석을 통해 지형적으로 풍속이 낮은 지역을 피해서 설치를 할 경우 에너지를 더 많이 생산할 수 있다는 것을 확인하였다.

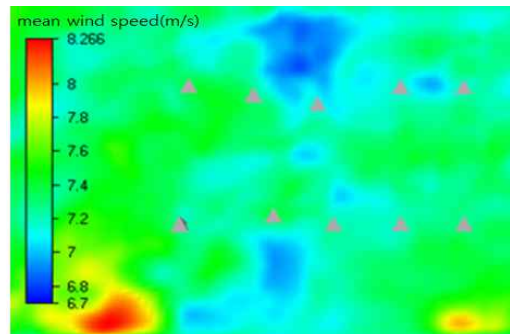


Fig. 11 Mean wind speed in Seongsan

4.3 새로운 터빈 배치

속도 손실 분석과 풍황 자료 분석, 그리고 풍속분포도 분석을 통해 후류 손실을 줄일 수 있도록 Fig. 12와 같이 성산풍력발전단지의 터빈을 재배치하였다. 그 결과 Fig. 13과 같이

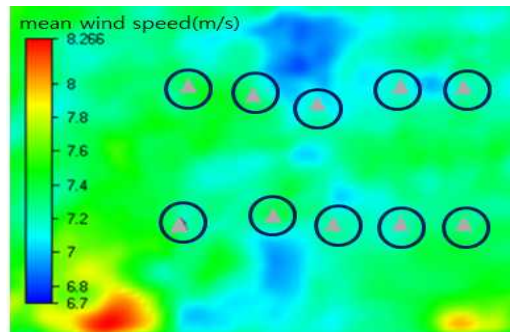


Fig. 12 Repositioning of wind turbines at Seongsan wind farm

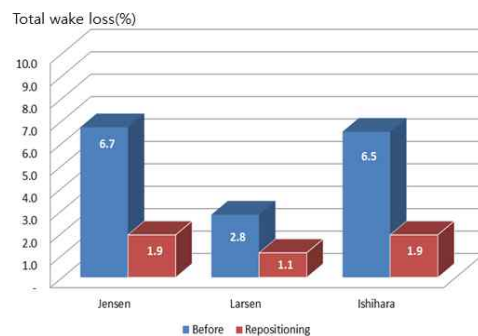


Fig. 13 A decrease of wake loss after repositioning

세 종류의 후류 모델에서 모두 후류 손실을 2% 이하 수준으로 크게 감소시키는 것을 확인하였다. 여기서 후류 손실은 식 (18)에서 주어지며, 후류 손실이 감소하였다는 것은 발전단지의 연간 발전량이 증가하였음을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 제주 성산 풍력발전단지의 후류영향을 분석과 후류 손실을 줄일 수 있는 새로운 터빈 배치를 찾기 위해 WindSim을 이용하여 실제와 동일하게 발전단지를 모델링 하였고, Vestas V80의 출력 곡선과 추력 계수를 입력하였다. 또한 국가바람지도를 기상정보파일로 사용하였으며, Jensen, Larsen, Ishihara 등이 고안한 후류 모델을 사용하였다.

후류 모델별 후류 영향을 분석하기 위해 후류 모델별 속도 손실 계산과 성산 풍력발전단지 내의 터빈 이격거리를 분석하였다. 세 후류 모델 모두 주 풍향과 동일한 라인에 두 터빈이 설치되어 있는 경우 후방에 위치한 터빈 이격거리를 8D 이상으로 설치할 경우 후류 영향을 줄일 수 있음을 확인하였다.

후류 영향 분석으로부터 성산 발전단지 내에 2개의 풍력 발전기가 주풍향에 따른 후류 영향을 크게 받아 출력 감소로 이어지는 결과를 보여주었다. 이 후류 손실을 줄이기 위해 속도 손실 분석과 풍황 자료 분석, 그리고 풍속분포도 분석을 수행하여 풍력터빈 위치를 재배치함으로써 후류 손실을 2% 이하 수준으로 줄일 수 있었다.

Reference

1. Global Wind Statistics 2014, Global Wind Energy Council, Feb. 2015.

2. K. J. Nilsson, "Estimation of Wind Energy Production in Relation to Orographic Complexity," Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, 2010.

3. H. G. Kim, M. S. Jang, J. H. Yi, and S. H. Lee, "National Wind Atlas Database and Visualization Based on IDL," *New & Renewable Energy*, Vol. 5, No. 3, pp. 1-9, 2013.

4. I. Katic, J. Højstrup, and N. O. Jensen, "A Simple Model for Cluster Efficiency," *EWEC Proceedings*, 7-9 October, 1986.

5. C. G. Larsen, "A Simple Wake Calculation Procedure," *Risø-M-2760*, 1988.

6. T. Ishihara, A. Yamaguchi, and Y. Fujino, "Development of a New Wake Model Based on a Wind Tunnel Experiment," *Global Wind Power*, 2004.

7. W. Tong, and A. Messac, "Impact of Different Wake Models on the Estimation of Wind Farm Power Generation," *AIAA 2012-5430*, 2012.