

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.1.021>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 풍력터빈 후류 유동특성 측정 데이터를 이용한 Eddy Viscosity 및 Lange 후류모델의 예측 정확도 검증

전상현\* · 고영준\*\* · 김범석\*† · 허중철\*\*\*

\* 제주대학교 풍력공학부, \*\* 한진산업, \*\*\* 제주대학교 기계공학과

### Validation of the Eddy Viscosity and Lange Wake Models using Measured Wake Flow Characteristics Behind a Large Wind Turbine Rotor

Sang Hyeon Jeon\*, Young Jun Go\*\*, Bum Suk Kim\*† and Jong Chul Huh\*\*\*

\* Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju Nat'l Univ.,  
\*\* Hanjin IND. CO., LTD.,

\*\*\* Faculty of Mechanical Engineering, Jeju Nat'l Univ.

(Received June 1, 2015 ; Revised October 9, 2015 ; Accepted November 20, 2015)

**Key Words:** Wind Turbine(풍력터빈), Single Wake(단일 후류), Velocity Deficit(풍속저감), Turbulence Intensity(난류강도)

**초록:** 상업용 풍력발전단지에 설치된 기상 탑의 측정데이터와 풍력터빈의 SCADA(Supervisory Control and data Acquisition) 데이터를 이용하여 풍력터빈의 후류영향을 분석하고 후류 풍속저감 예측을 위한 eddy viscosity 모델 및 난류강도 예측을 위한 Lange 모델의 계산값과 비교하였다. 후류영향 분석결과, 자유단(free stream) 풍속이 낮아질수록 풍력터빈 후류에서의 풍속 감소율은 증가하였으며 후류 난류강도 역시 자유단 풍속이 낮아질수록 증가하는 특징을 보였다. Eddy viscosity 모델에 의해 예측된 풍력터빈 후류중심에서의 풍속 감소율은 측정값에 비해 과대 예측되었으며 Lange 모델에 의한 후류 난류강도 예측은 실측값과 유사하게 예측되고 있음을 보였다.

**Abstract:** The wake effects behind wind turbines were investigated by using data from a Met Mast tower and the SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system for a wind turbine. The results of the wake investigations and predicted values for the velocity deficit based on the eddy viscosity model were compared with the turbulence intensity from the Lange model. As a result, the velocity deficit and turbulence intensity of the wake increased as the free stream wind speed decreased. In addition, the magnitude of the velocity deficit for the center of the wake using the eddy viscosity model was overestimated while the turbulence intensity from the Lange model showed similarities with measured values.

- 기호설명 -

$A, B$  : 랑지모델 실험상수  
 $b$  : 후류 폭 (m)  
 $C_t$  : 추력계수  
 $D$  : 로터직경 (m)  
 $D_m$  : 후류중심 속도 감소율

$D_{mi}$  : 후류중심 초기 속도 감소율  
 $F$  : 필터인자  
 $h$  : 지면에서의 높이 (m)  
 $h_H$  : 허브높이 (m)  
 $h_0$  : 기준높이 (m)  
 $I_0$  : 주변 난류강도  
 $I_{add}$  : 추가적인 후류 난류강도  
 $I_{eff}$  : 유효 난류강도  
 $I_{mean}$  : 평균난류강도

† Corresponding Author, [bkim@jejunu.ac.kr](mailto:bkim@jejunu.ac.kr)

$k$	: 폰 칼만 상수
$k_1$	: 상수
$l_w$	: 길이 스케일
$N$	: 주변 풍력터빈 개수
$R$	: 로터반경 (m)
$r$	: 반경거리 (m)
$V$	: 반경방향 속도 (m/s)
$V_{correction}$	: 보정 후 나셀 측정풍속 (m/s)
$V_{nacelle}$	: 보정 전 나셀 측정풍속 (m/s)
$x$	: 후방거리 (m)
$U$	: 길이방향 속도 (m/s)
$U_c$	: 후류중심 풍속저감 (m/s)
$U_0$	: 주변풍속 (m/s)
$U_w$	: 풍속 스케일
$u_0$	: 자유단 풍속
$u^*$	: 마찰속도
$\tilde{u}$	: 후류 속도저감
$z_H$	: 지면에서의 높이
$\varepsilon$	: 에디 점성
$\varepsilon_a$	: 주변 에디 점성

## 1. 서 론

풍력발전단지 설계 시 중요한 설계인자인 풍력터빈의 후류영향은 풍력터빈의 출력 및 작용하는 기계하중에 영향을 미치게 된다. 상류 풍력터빈의 후류영향을 받는 하류 풍력터빈은 출력감소와 함께 피로하중의 증가로 인한 기계적 수명감소를 겪게 되는 것이다. 결과적으로 이러한 문제점은 풍력발전단지의 총 발전량을 감소시키고 유지보수 비용의 상승을 초래하기 때문에 풍력발전사업의 경제성에 중요한 영향을 끼치게 된다. 따라서 풍력발전단지 설계 시에는 주변 풍력터빈에 의한 후류영향을 최소화 할 수 있는 풍력터빈 배치가 이루어지며, 다양한 후류 예측모델들을 이용하여 풍력단지 내 후류영향 평가를 수행한다. 그러나 풍력터빈 후류에서의 유동형태는 비정상상태, 기상 조건의 변화 및 중첩후류(multiple wake)영향 등이 복합적으로 상호작용을 일으키는 현상이기 때문에 후류모델을 이용한 예측결과는 그 정확도가 높지 않다고 보고되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 복잡한 후류유동 특성을 이해하고 예측모델의 정확도를 향상시키기 위한 노력의 일환으로 상업운전중인 풍력터빈의 하류에서 후류특성 측정 및 후류모델과의 비교·검증과 관련된 다수의 연구 프로젝트들이 수행되고 있다.

ECN(Energy Research Center of the Netherlands)<sup>(2,3)</sup>

에서는 실증용 풍력터빈의 후류특성을 측정하고 후류영향 분석결과를 제시하였다. 분석결과, 풍력터빈으로부터 2.5  $D$  떨어진 후류영역에서 자유단(free stream) 풍속대비 최대 45%의 풍속저감율이 나타났으며, 3.5  $D$  떨어진 지점에서는 최대 35%의 풍속저감율이 나타났다. 또한 풍속의 변동성을 나타내는 표준편차값은 풍력터빈 후류에서 크게 증가하고 있음을 제시하였는데, 특히 후류영역에서 측정된 풍속이 높을수록 표준편차값 역시 높게 나타나고 있음을 보였다.

독일의 풍력터빈 시험기관인 DEWI 에서는 Alpha Ventus 해상풍력발전단지를 대상으로 대기안정도 변화에 따른 풍력터빈 단일후류(single wake)와 중첩후류의 영향을 분석하였다.<sup>(4)</sup> 자유단에서의 풍속범위가 7m/s ~ 11m/s 이고, 풍력터빈의 이격거리가 7  $D$  인 조건에서 측정된 결과를 통해 안정된 대기상태에서 후류영향에 노출된 풍력터빈의 출력감소율이 불안정 대기상태에서보다 약 4% 더 높게 나타난다고 보고하였다. 또한 일렬로 배치된 풍력터빈들이 중첩후류의 영향을 받을 경우, 두 번째에 위치하는 풍력터빈의 출력감소율이 세 번째에 위치하는 풍력터빈의 출력감소율보다 약 1% 더 높게 나타나고 있음을 보였다.

최근에는 DTU(Technical University of Denmark)의 M Grumond et al. 등이 덴마크의 Horns Rev 와 스웨덴의 Lillgrund 해상풍력발전단지를 대상으로 Jensen,<sup>(5)</sup> Larsen,<sup>(6)</sup> Fuga 후류모델<sup>(7)</sup>에 대한 검증용 실시하였다.<sup>(8)</sup> 후류모델들에 대한 예측정확도 검증결과, Larsen 모델은 실측값 대비 하류 풍력터빈의 출력값을 다소 과대평가하였으며, Jensen 모델과 Fuga 모델은 후류중심에서의 출력값은 과소평가하나 그 외 후류외곽 영역에서의 출력값은 과대평가한다고 보고하였다.

이상과 같이 풍력터빈 후류영향은 터빈 이격거리, 대기안정도 그리고 단일후류 및 중첩후류 조건에 따라 다르게 나타나며, 후류모델에 의한 예측결과 또한 이러한 입력변수들의 조건변화에 따라 예측정확도가 다르게 나타난다.

본 연구에서는 제주특별자치도 가시리육상풍력단지의 기상탑에서 측정된 데이터와 풍력터빈 SCADA 데이터를 이용하여 단일 풍력터빈 후류에서의 풍속저감 및 난류강도 변화율을 분석하였다. 분석결과인 풍속저감 및 난류강도변화율은 후류에서의 풍속저감 예측을 위한 eddy viscosity 모델과 후류 난류강도 예측을 위한 Lange 모델을 이용한 해석결과와 비교·검증되었고, 사용된 두 후류모



Fig. 1 Lay-out of Gasiri wind farm

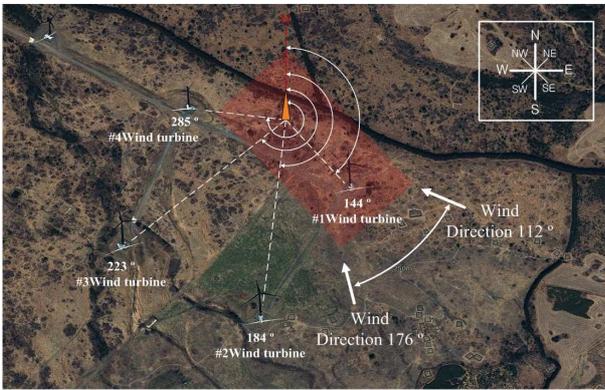


Fig. 2 Met. Mast and neighbor wind turbines

델들의 예측 정확도를 제시하였다.

## 2. 측정 데이터 수집 및 분석

풍력터빈 후류분석을 위해 2012년 4월부터 2013년 9월까지 총 1년 5개월 동안 측정된 기상 탐 데이터 (풍속, 풍향, 난류강도)와 풍력터빈 SCADA 시스템에 의해 측정된 풍속 데이터가 함께 사용되었다. 기상탐은 가시리풍력단지 내에 설치된 70m 높이의 기상탐으로써 35m, 68m 그리고 70m 높이에 풍속계가 위치하며, 66m 와 67m 높이에 풍향계가 위치하고 있다. 그 외 온도, 습도, 대기압 등을 측정할 수 있는 센서들이 설치되어 사이트에서의 대기 조건변화를 측정할 수 있다. 기상탐으로 후류영향을 주게 되는 풍력터빈은 77m의 로터직경을 가지는 1.5MW 용량의 풍력터빈으로써 운전 시동풍속은 3.5m/s, 정격풍속은 13m/s 그리고 정지풍속은 25m/s 이다.

Fig. 1은 가시리풍력발전단지에 설치된 기상 탐과 풍력터빈들을 나타낸다. 풍력터빈 단일후류 분석을 위해, 오직 기상탐이 #1 풍력터빈으로부터 후류영향을 받는 조건에 한해서 측정된 풍속과 난

류강도 값이 획득되었다. #1 풍력터빈은 기상탐으로부터 2.5 D 이격되어 있으며 남동(SE) 방향으로 바람이 불어올 때 기상탐은 #1 풍력터빈의 후류영향에 놓이게 된다.

Fig. 2는 기상탐을 중심으로 주변에 위치하고 있는 풍력터빈들의 배치를 나타낸다. 본 연구에서는 #1 풍력터빈으로부터 유발되는 단일후류 영향을 분석하기 위해 기상탐 측정 데이터의 풍향범위를 112° ~ 176° 로 한정하였다. 이 범위 이외의 풍향 조건에서는 주변의 다른 풍력터빈들로부터 발생되는 후류가 영향을 미치지 때문이다.

Fig. 3은 1년 5개월 동안 기상탐에서 측정된 방향 별 난류강도의 크기를 보여준다. 기상탐을 중심으로 #1 풍력터빈의 위치에 해당하는 144° 방향과 #4 풍력터빈의 위치에 해당하는 285° 방향에서 각각 높은 난류강도가 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 285° 방향으로의 난류강도 값이 가장 크게 나타나고 있으며, 이 방향으로 후류영향을 미치는 #4 풍력터빈의 로터직경과 허브높이는 동일한 50m(750kW)의 값을 가진다. #4 풍력터빈과 기상탐의 이격거리는 2.5 D(로터직경=50m, 거리=126m)로써 #1 풍력터빈의 조건과 동일하지만 기상탐과의 실제 거리가 더 짧기 때문에 난류강도 값이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 285° 방향으로의 상류에는 #4 풍력터빈 외에도 또 다른 풍력터빈이 위치하고 있어 두 대의 풍력터빈으로부터의 중첩후류(Multiple wake)영향으로 난류강도 값이 더욱 증가되었을 것으로 판단할 수 있다.

일반적으로 풍력터빈 후류 유동특성이라 함은 상류 풍력터빈으로부터 발생하는 후류에 의한 하류에서의 풍속저감 및 난류강도의 증가를 의미한다. Fig. 1에서 풍향조건 변화에 따라 기상탐이 #1 풍력터빈의 후류영역에 놓이게 될 경우, 기상 탐에서 측정된 풍속과 자유단에서 측정된 풍속의 비교를 통해 #1 풍력터빈 후류에서의 풍속 감소율을 확인할 수 있다. 자유단 풍속은 #1 풍력터빈의 나셀(nacelle) 풍속계로부터 측정되었다. 나셀풍속계로부터 측정된 데이터는 로터의 회전에 의한 외란성분을 포함하고 있기 때문에 반드시 나셀변환함수(nacelle transfer function)를 이용한 보정작업이 필요하다. 나셀 풍속계로부터 측정된 데이터의 외란성분은 동일시간 대에 기상탐으로부터 측정된 풍속을 기준으로 보정될 수 있다. 본 연구에서는 기상탐과 #1 풍력터빈 모두가 주변 터빈의 후류영향을 받지 않는 조건인 340° ~ 20° (NE) 구간에서 바람이 불어올 때, 기상탐과 나셀 풍속계로부터

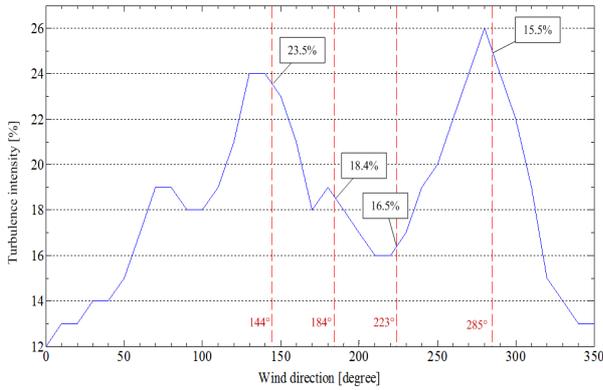


Fig. 3 Variation of turbulence intensity measured at the Met. Mast in all sectors

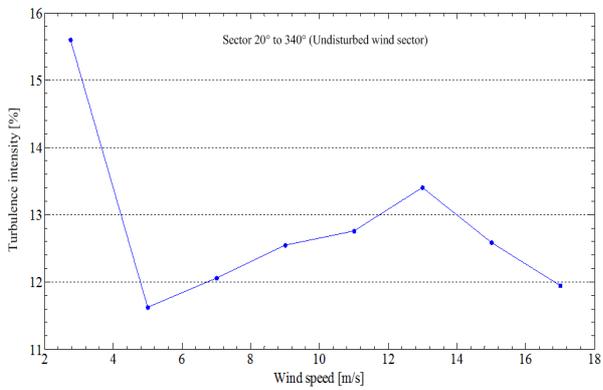


Fig. 4 Variation of turbulence intensity measured at Met. Mast in the undisturbed sectors

측정된 풍속의 비교를 통해 나셀변환함수를 도출하였다. 기상탑과 나셀 풍속계로부터 각각 측정된 데이터의 비교를 위해 Windographer v3.1<sup>(9)</sup>을 이용하였으며 최종적으로 도출된 나셀변환함수는 식 (1)과 같다.

$$V_{correction} = V_{nacelle} \times 0.91 + 0.79 \quad (1)$$

여기서  $V_{nacelle}$  는 보정전의 나셀에서 측정된 풍속을 의미하며  $V_{correction}$  은 보정후의 나셀풍속을 의미한다. 나셀에서 측정된 풍속은 식 (1)에 의해 모두 보정되었으며, 따라서 고려대상 풍향범위 112° ~ 176° 구간에서 측정된 보정 나셀풍속 데이터는 로터의 외란 성분이 모두 제거된 자유단 풍속으로 간주할 수 있으며, 기상탑 측정 데이터는 #1 풍력터빈 후류에서 측정된 풍속이 된다.

#1 풍력터빈 후류영향에 의한 풍속저감 외에도 후류에서의 난류강도변화를 분석하기 위해서는 자유단에서 측정된 난류강도 값과 후류영역에서 측정된 난류강도 값이 필요하다. 후류영역에서의 난

류강도는 기상탑이 #1 풍력터빈의 후류영향을 받는 풍향조건(112° ~ 176°)에서 측정되었다. 기상탑 주변에 높은 장애물이 위치하지 않는 방향으로 부터 불어오는 바람의 난류강도는 풍향에 관계없이 유사하다고 가정할 수 있기 때문에<sup>(3)</sup> 자유단에서의 난류강도는 기상탑이 어떠한 풍력터빈으로부터도 후류영향을 받지 않는 풍향조건(340° ~ 20°)에서 측정되었다.

Fig. 4는 340° ~ 20° 방향(자유단 조건)에서 불어오는 바람의 난류강도를 풍속 별로 나타내고 있다. 난류강도는 풍속 5m/s 부터 점차 증가하다가 13m/s 부근을 기점으로 다시 감소하고 있다. 본 연구에서는 자유단 풍속이 7m/s, 11m/s 그리고 15m/s 일 때 풍력터빈의 후류영향을 분석하였으며, 이때 자유단에서의 난류강도 값은 12.06%, 12.76%, 12.59%로 측정되었다.

### 3. 후류모델

#### 3.1 Eddy viscosity 모델

Eddy viscosity 모델은 식 (2)에 나타낸 바와 같이 Navier-Stokes 방정식의 단순화된 형태로써 1988 년 J.F. Ainslie<sup>(10,11)</sup>에 의해 제안된 후 현재까지 후류 풍속저감 예측을 위해 널리 사용되고 있다. Eddy viscosity 모델은 로터직경의 2 배(2 D) 이상 떨어진 하류에서부터의 풍속저감 예측이 가능하며 지배방정식은 다음과 같다.

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{\varepsilon}{r} \left( \frac{\partial U}{\partial r} + r \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right) \quad (2)$$

여기서  $U$ ,  $V$  는 길이방향 속도와 반경방향 속도를 나타내며  $x$ ,  $r$  은 후방거리와 반경거리를 나타낸다.  $\varepsilon$  (eddy viscosity)는 주변유동(ambient flow)과 후류유동(wake flow)의 혼합작용에 의하여 발생하는 전단층(shear layer)을 의미한다.  $\varepsilon$  는 다시 전단층을 기술하는 length scale,  $l_w(x)$  와 velocity scale,  $U_w(x)$  로 구분되어 표현될 수 있으며 식 (3)과 같다.

$$\varepsilon = l_w(x)U_w(x) + \varepsilon_a \quad (3)$$

$\varepsilon_a$  는 주변유동이  $\varepsilon$  (eddy viscosity)에 기여하는 정도를 나타내는 ambient eddy viscosity 를 의미한다. Length scale 은 후류 폭  $b$  에 비례하고 velocity scale 은 전단 층을 가로지르는 속도차이 ( $U_0 - U_c$ ) 에 비례한다고 가정되어 다시 식 (4)로 표현된다.

$$\varepsilon = F(k_1 b(U_0 - U_c) + K_m) \quad (4)$$

여기서  $U_0$  는 허브높이에서의 주변풍속(ambient wind speed),  $U_c$  는 후류중심에서의 풍속을 나타내며,  $k_1$  은 전단층의 특성을 나타내는 상수로써 값 0.015 를 가진다. 경계층이론에서 사용되는 eddy diffusivity of momentum,  $K_m$  은  $\varepsilon_a$  가  $\varepsilon$  에 기여하는 정도를 나타내기 위해 사용된다. 근거리후류(near wake)와 원거리후류(far wake)를 구별하기 위한 필터인자,  $F$  는 후류거리  $5.5 D$  를 기준으로 식 (5)와 같다.

$$F = \begin{cases} 0.65 + ((x - 4.5) / 23.32)^{1/3}, & x < 5.5 \\ 1, & x \geq 5.5 \end{cases} \quad (5)$$

Eddy viscosity 모델의 경계조건으로써, Ainslie 는 로터직경의 2 배( $2 D$ ) 떨어진 곳에서 후류유동이 시작된다는 가정과 함께 로터디스크 후단거리  $x$  만큼 떨어진 곳에서의 속도분포는 가우시안분포(Gaussian distribution)를 따른다는 경계조건을 사용하였다. 가우시안 속도분포 식은 식 (6)과 같이 주어진다.

$$1 - \frac{U}{U_0} = D_m \exp(-3.56(r/b)^2) \quad (6)$$

식 (6)의 후류 폭  $b$  는 식 (7)로부터 계산되며  $D_m$  은 후류 중심축에서의 속도 감소율을 나타낸다.

$$b = \sqrt{\frac{3.56 C_t}{8 D_m (1 - 0.5 D_m)}} \quad (7)$$

로터직경의 2 배 떨어진 위치에서의 초기 속도 감소율,  $D_{mi}$  은 식 (8)로부터 계산될 수 있다.

$$D_{mi} = 1 - \frac{U_c}{U_0} = C_t - 0.05 - [(16 C_t - 0.5) I_0 / 1000] \quad (8)$$

여기서  $I_0$  는 주변 난류강도를 의미하며,  $K_m$  은 중립대기(neutral atmospheric) 조건에서 식 (9)를 이용하여 계산될 수 있다.

$$K_m = k u^* h = k^2 U_0 h / \ln(h_H / h_0) \quad (9)$$

식 (9)의  $k$  는 Von Karman 상수,  $u^*$  는 fiction velocity,  $h_H$  는 허브높이,  $h_0$  는 기준높이를 의미한다. 최종적으로 중립대기 경계층에서의  $\varepsilon$  (eddy viscosity)는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon / U_0 D = F \left( k_1 \frac{b}{D} \left( 1 - \frac{U_c}{U_0} \right) + k^2 / \ln(h_H / h_0) \right) \quad (10)$$

최종적으로 풍력터빈 후류영역에서의 풍속분포는 식 (2)와 식 (10)에 의해 계산될 수 있다.

### 3.2 Lange 모델

출력성능에 영향을 미치는 후류 풍속저감과 마찬가지로 풍력터빈 후류에서의 난류강도 특성 또한 매우 중요한 후류 유동특성이며, 이는 주로 풍력터빈의 피로수명에 영향을 미친다. 이러한 난류강도 특성은 Bernhard Lange 등<sup>(12)</sup>에 의해 제안된 Lange 후류모델을 적용하여 계산될 수 있다. Lange 모델에서 후류 난류강도 증분은 식 (11)과 같이 속도구배와 확산(diffusion)에 의해 결정된다.

$$I_{add}(r, x) = AI_{mean}(x) \frac{\partial \tilde{u}(r, x)}{\partial \frac{r}{R}} + B \tilde{u}(r, x) \quad (11)$$

여기서  $AI_{mean}(x) \frac{\partial \tilde{u}(r, x)}{\partial \frac{r}{R}}$  는 후류에서의 속도구배

를 나타내며,  $B \tilde{u}(r, x)$  는 후류에서의 확산을 나타내는 항이다. 속도구배항의  $I_{mean}$  은 후류에서의 평균난류강도를 의미하며,  $r$  과  $x$  는 반경방향으로의 거리와 풍력터빈으로부터의 후방거리를 의미한다. 그리고 확산항의  $\tilde{u}$  는 후류에서의 속도저감을 나타내며  $A$  와  $B$  는 풍력터빈의 종류와 주변지형조건에 의해 결정되는 실험상수이다. 평균난류강도,  $I_{mean}$  은  $\varepsilon$  (eddy viscosity) 항을 사용하여 식 (12)와 같이 표현된다.

$$I_{mean} = \varepsilon \frac{2.4}{k u_0 z_H} \quad (12)$$

$u_0$  는 무차원 값인 자유단에서의 풍속,  $z_H$  는 지면에서부터의 높이를 나타낸다. 최종적으로 후류에서의 유효난류강도  $I_{eff}$  는 식 (13)과 같이 표현될 수 있다.

$$I_{eff} = I_0 + \sqrt{\sum_{i=1}^N I_{add,i}^2} \quad (13)$$

여기서  $I_0$  는 주변난류강도,  $N$  은 상류에 위치한 풍력터빈의 수를 의미한다.

### 3.3 후류모델을 이용한 풍속저감 및 난류강도 계산

Eddy viscosity 모델을 사용하여 후류에서의 풍속저감을 계산하기 위해 RES 의 simplified method<sup>(13)</sup> 가 사용되었으며, 최종적으로 후류중심에서의 풍속저감은 식 (14)와 같이 1 차 미분방정식으로 나타내어진다.

$$\frac{dU_c}{dx} = \frac{16\varepsilon(U_c^3 - U_c^2 - U_c + 1)}{U_c C_t} \quad (14)$$

$U_c$  는 후류중심에서의 풍속저감을 나타내며,  $C_t$  는 풍력터빈 추력계수를 의미한다. 또한 Lange 모델을 이용한 후류에서의 유효난류강도  $I_{eff}$  는 식 (15)에 따라 계산될 수 있으며  $\varepsilon$  는 식 (4)를 이용하여 계산될 수 있다.

$$I_{eff} = I_{amb} + \sqrt{\left[ A \left( \varepsilon \frac{2.4}{ku_0 z_H} \right) \frac{d\tilde{u}}{d} \frac{r}{R} + B\tilde{u} \right]^2} \quad (15)$$

각각의 후류모델 해석결과는 Matlab 을 이용한 수치해석을 통해 얻었다. 후류에서의 속도저감 및 난류강도를 계산하기 위해 초기 입력값들이 필요하며, 수치해석에 필요한 변수값들로서 자유단에서의 풍속, 주변난류강도, 지표면 거칠기, 로터직경, 풍력터빈으로부터의 후방거리 그리고 풍력터빈 추력계수 및 주속비가 필요하다. Table 1은 수치해석에 사용된 입력 변수값을 나타낸다.

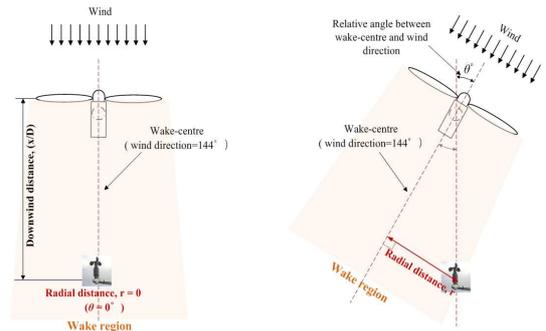
## 3. 결과 및 고찰

### 4.1 후류 풍속저감

본 연구에서는 후류 풍속저감 정도를 확인하기 위해 7m/s, 11m/s, 15m/s 조건의 자유단 풍속(보정 후 나셀풍속)과 풍력터빈 후류영역에 위치한 기상탑 측정풍속 결과를 비(ratio)로 나타내었다. 또한 기상탑과 후류중심과의 반경거리 ' $r$ ' 변화에 따라 풍속저감이 어떻게 나타나는지를 고찰하기 위해 풍향변화 조건을 정의하였다. Fig. 5는 자유단 풍

**Table 1** Input parameters for wake model calculations

Input parameter	Value
Freestream wind speed	7m/s, 11m/s, 15m/s
Ambient turbulence intensity	12.06% (7m/s), 12.76% (11m/s), 12.59% (15m/s)
Site roughness length	0.4m
Upwind turbine rotor diameter	77m (1 D)
Hub height	70m
Downstream distance	195m (2.5 D)
Upwind turbine thrust coefficient	0.72 (7m/s), 0.48 (11m/s), 0.19 (15m/s)
Upwind turbine tip speed ratio	9.80 (7m/s), 6.30 (11m/s), 4.60 (15m/s)



(a) Aligned with wake-centre: relative angle between wake-centre and wind direction :  $0^\circ$   
(b) After yawing: relative angle between wake-centre and wind direction :  $\theta^\circ$

**Fig. 5** Radial distance( $r$ ) between the wake-centre and Met. Mast in accordance with relative angle  $\theta$

향변화( $112^\circ \sim 176^\circ$ )에 따라 후류중심( $144^\circ$ )과 풍향(바람이 불어오는 각도)의 상대각도인 ' $\theta$ '의 변화를 나타내며, 이때 후류중심과 기상탑 사이의 거리 ' $r$ '을 정의한다.

Fig. 6은 풍향변화에 따른 후류에서의 풍속비를 나타낸다. 측정 데이터의 분석결과, 자유단 풍속이 높고 상대각도 ' $\theta$ '가 클수록 후류 풍속비가 증가하였다. 또한 풍속비가 비교적 낮게 나타나는 자유단 풍속 7m/s 조건에서는 후류중심을 기준으로 포물선 형태의 상대풍속 프로파일이 나타났으며, 이때의 후류중심 풍속저감율은 47% (풍속비=0.57)이다. 이는 풍력터빈으로 7m/s 의 바람이 불어올 경우 후류방향으로 2.5 D 지점에서의 풍속은 4.4m/s 로 감소하게 됨을 의미한다. 후류중심각

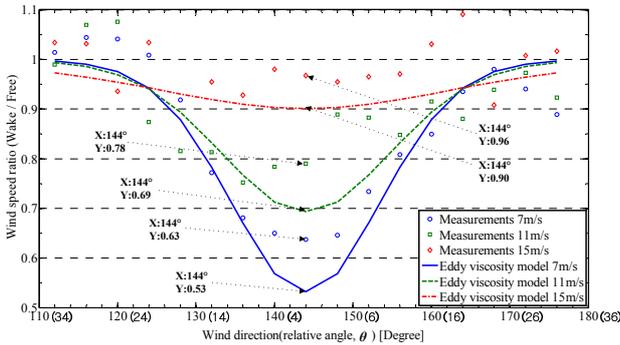


Fig. 6 Wind speed ratio profile in a single wake at 2.5D downstream distance

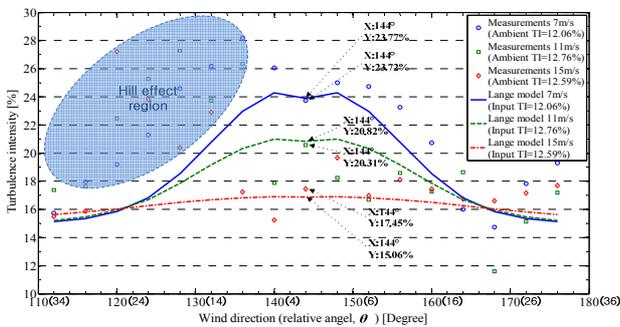


Fig. 7 Turbulence intensity profile in a single wake at 2.5D downstream distance

144° 을 기준으로  $\pm 32^\circ$  이상의 풍향 ( $\theta = \pm 32^\circ$ )에서는 풍속비가 1에 근접한 결과를 보이며, 이때 하류에 위치한 기상탑은 #1 풍력터빈의 후류영역에서 벗어나게 된다. 풍력터빈 하류 방향으로의 거리와 후류영역을 이탈하는 상대각도( $\theta$ )를 알면 삼각법에 의해 후류 폭을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 풍력터빈 후방거리 2.5 D 지점에서의 후류영역 이탈 상대각도는 후류중심(144°)을 기준으로 좌측 32°와 우측 26° 부근에서 나타나고 있으며, 이에 따른 전체 후류 폭은 162m~200m 정도로 판단할 수 있다. Fig. 6의 eddy viscosity 후류 모델에 의해 예측된 결과 또한 자유단풍속이 높을수록 풍속비가 증가(풍속저감율 감소)하는 결과를 보여주고 있으며, 후류중심부에서는 측정값 대비 다소 낮은 풍속비를 예측함에 따라 후류에서의 풍속저감이 과대평가되고 있음을 알 수 있다. 후류모델 계산에 의해 풍속비가 1이 되는 후류영역 이탈각도는 실측 데이터 값과 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 후류 난류강도

후류에서의 난류강도 값은 후류영역에 놓이게 되는 기상탑에서 직접 측정되었으며, 후류에서의



Fig. 8 Wake effects at #2 wind turbine according to #1 wind turbine

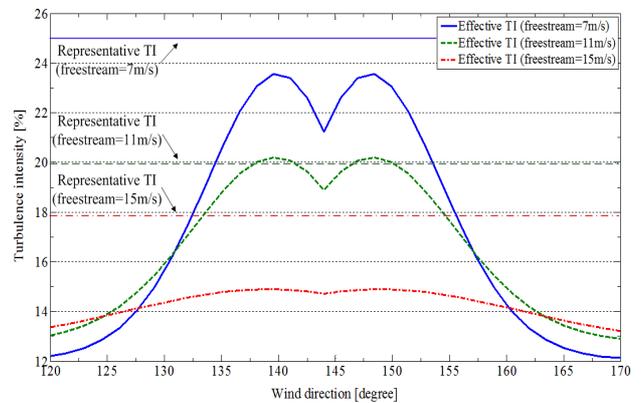


Fig. 9 Effective turbulence intensity in a single wake effects

풍속저감과 마찬가지로 후류중심에서 벗어나에 따른 난류강도의 변화를 관찰하기 위해 후류중심각인 144°을 중심으로 좌·우 4°의 풍향 간격으로 측정 데이터를 구분하여 난류강도 값을 관찰하였다.

Fig. 7은 후류중심각 144°을 기준으로 풍향변화에 따라 측정된 후류에서의 난류강도를 보여주고 있다. 자유단풍속이 7m/s 이고 이때의 난류강도가 12.06%이면 풍력터빈을 거친 후 2.5 D 떨어진 후류중심에서의 난류강도는 23.72%로 증가되었음을 확인할 수 있으며, 이는 풍력터빈 후류에서의 난류강도가 자유단 대비 96% 증가하였음을 나타낸다. 자유단에서의 난류강도가 12.76%(풍속 11m/s)일 때 후류중심에서의 난류강도 증가율은 60%, 자유단에서의 난류강도가 12.59%(풍속 15m/s)일 때는 38%의 난류강도 증가율을 보이고 있는데, 풍력터빈으로 불어오는 자유단 풍속이 낮을수록 후류에서의 난류강도 증가율은 커지고 있음을 알 수 있다. 후류중심 144°를 기준으로 Fig. 7의 왼쪽구역(110 ~ 140° 범위) 측정값들이 오른쪽구역에 비해 높게 솟구치는 모습을 관찰할 수 있는데 이

는 주변 지형조건의 영향에 따른 것으로 Fig. 1에 나타내었듯이 이 방위 전방 800m 떨어진 곳에 오름이 위치하고 있기 때문이다. 난류강도의 측정값에서 보인 경향과 마찬가지로 Lange 후류모델에 의한 난류강도 역시 자유단 풍속이 낮을수록 후류에서의 난류강도 증가율은 커지고 있으며, 후류중심각에서 멀어질수록(후류영역을 벗어날수록) 난류강도 값은 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 풍력터빈은 국제표준인 IEC 61400-1<sup>(14)</sup>의 기준에 준하여 20년 내구수명을 갖도록 설계되며 설계수명 20년 동안 견딜 수 있는 난류강도의 크기에 따라 난류강도등급 A, B 그리고 C로 구분된다. 가시리풍력단지에 설치된 풍력터빈은 난류강도등급 A 로써 국제표준 IEC 61400-1 이 규정하는 대표난류강도(representative T.I.) 값이 설계에 반영되었으며, 이 대표난류강도에 의해 발생하는 피로하중을 견딜 수 있도록 설계되었다. 그러나 전술한 바와 같이 후류영역에 놓인 풍력터빈은 높은 난류강도의 영향을 받게 된다. 따라서 후류영역에서 운전되는 풍력터빈이 영향을 받게되는 난류강도 값이 설계기준인 대표난류강도 범위 이내에 해당되는지 여부가 검토될 필요가 있으므로, 풍력단지 내에 실제 풍력터빈 설치지점에서의 유효난류강도(effective T.I.)를 Lange 모델을 이용하여 예측하였다.

Fig. 8은 북동쪽(NE)에서 바람이 불어올 경우 #1 풍력터빈의 후류영향을 받는 #2 풍력터빈을 나타내고 있다. 난류등급 A 인 #2 풍력터빈은 풍속 7m/s 조건에서 난류강도(representative TI) 24.8%를 견딜 수 있도록 설계되었으며, 풍속 11m/s 에서는 20.1%, 15m/s 에서는 17.9%의 난류강도를 견디도록 설계되었다. Lange 모델에 의해 #1 풍력터빈의 후류영향을 받는 #2 풍력터빈의 유효난류강도를 Fig. 9에 보여주고 있다. 난류강도가 12.06% 인 7m/s 의 자유단 바람이 #1 풍력터빈을 거쳐 #2 풍력터빈에 이를 때 #2 풍력터빈이 위치한 곳에서의 유효난류강도 값은 최대 23.56%로 예측되고 있으며, 난류강도가 12.76%인 11m/s 의 자유단 바람이 불어올 경우는 최대 20.21%, 난류강도가 12.59%인 15m/s 의 자유단 바람이 불어올 경우는 최대 14.9%의 유효난류강도가 예측되고 있다. 즉 자유단 풍속 11m/s 의 조건에서는 #1 풍력터빈의 후류영향에 의해 증가된 난류강도(effective TI)가 #2 풍력터빈의 설계난류강도(representative TI)보다 높게 나타날 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이 후류조건에서 풍력터빈이 겪는 피로하중은 설계 피로하

**Table 2** Error rates of wake models in condition with free stream wind speed(at wake centre)

Free stream wind speed	Eddy viscosity model error rate	Lange model error rate
7m/s	16% (Overestimation)	0.2% (Overestimation)
11m/s	12% (Overestimation)	2.5% (Overestimation)
15m/s	6% (Overestimation)	13.7% (Underestimation)

**Table 3** Wind direction standard deviation in condition with free stream wind speed

Free stream wind speed	Wind direction standard deviation
7m/s	9.4°
11m/s	7.8°
15m/s	7.1°

중보다 높게 나타날 수 있음을 예상할 수 있다.

4.3 후류모델 예측 정확도 검증

Table 2는 후류중심에서의 측정값대비 모델예측값의 오차율을 나타낸다. Eddy viscosity 모델은 자유단 풍속이 7m/s 인 조건에서 16%의 가장 큰 오차율을 보이며, Lange 모델은 자유단 풍속이 15m/s(TI=12.59%)인 조건에서 13.7%의 가장 큰 오차율을 보이고 있다. Eddy viscosity 모델은 자유단 풍속이 낮을수록, Lange 모델은 자유단 풍속이 높을수록 예측정확도가 낮게 나타남을 알 수 있다. Eddy viscosity 모델의 풍속저감 예측이 비교적 저풍속조건에서 큰 차이를 보이는 이유는 후류유동의 곡절현상(wake meandering)때문으로 낮은 풍속에서 곡절현상이 크게 나타나기 때문이다. 후류유동의 곡절은 측정되는 풍향값의 표준편차 크기에 비례하며,<sup>(10)</sup> 이러한 현상으로 후류중심에 어긋난 지점이 후류중심값으로 측정된다. 즉 실제풍속보다 높은 값이 후류중심 풍속으로 측정되는 것이다. 따라서 Table 2의 오차율은 모델값이 아닌 측정값에서 발생하였다고 볼 수 있다. Table 3은 풍속별 측정된 풍향의 표준편차 평균을 보여주며, 풍속 7m/s 에서 표준편차 값이 가장 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 또한 고풍속 구간에서 보인

Lange 모델의 난류강도 예측오차율은 정격풍속이 상에서 풍력터빈 피치(pitch)동작에 따른 왜란이 후류의 유동흐름에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 본 연구의 후류 측정지점은 풍력터빈으로부터 2.5 D 떨어진 근거리후류 거리에 속하며 이 영역 이내에서는 풍력터빈 피치동작에 따른 왜란이 측정지점인 기상탑까지 영향을 미쳤을 것으로 보인다. Fig. 7의 흐름의 영향이 없는 그래프 오른쪽부근을 살펴보면, 모델값과 유사한 경향성을 나타내는 풍속은 7m/s 로써 피치동작이 발생하지 않는 평균풍속구역이다. 그 외 상위 평균풍속에서 측정된 난류강도값은 모델예측값 부근에 산개하여 분포하고 있음을 관찰할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 가시리 풍력발전단지에서 측정된 풍향 데이터와 eddy viscosity 및 Lange 후류모델을 이용한 해석결과의 비교를 통해 풍력터빈 후류 유동특성 및 후류모델 예측정확도를 분석하였다.

측정데이터 분석결과 후류중심에서 풍속저감이 가장 크게 나타났으며, 자유단 풍속이 낮을수록 풍속저감은 증가하였다. Eddy viscosity 후류모델은 후류중심에서의 풍속저감을 과대예측하는 경향을 보이며 자유단 풍속이 낮을수록 낮은 예측정확도를 보였다. 반대로 Lange 모델은 자유단 풍속이 높을수록 낮은 예측정확도를 보였다. 이는 실험실이 아닌 운전중인 풍력발전단지현장에서 측정된 값에서 발생한 오차이지만 오차를 유발한 원인이 풍력발전단지에서 발생하는 실제 유동현상이다. 따라서 이러한 유동예측에 영향을 주는 인자요소를 포함하지 못한 후류모델의 오차라고 할 수 있을 것이다. 마지막으로 Lange 모델을 이용하여 단일후류영향을 받는 풍력터빈이 겪을 수 있는 난류강도를 예측해 보았고, 결과로써 특정 풍속조건에서는 설계 값보다 높은 난류강도를 겪을 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(과제번호: 20094020200020)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. 또한 본 연구는 해양수산부의 해양 청정에너지 개발사업“10MW급

부유식 과력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라구축”지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Sorensen, T., Nielsen, P. and Thogersen, M. L., 2008, "Adapting and Calibration of Existing Wake Models to Meet the Conditions Inside Offshore Wind Farms," EMD International A/S.
- (2) Machielse, L. A. H., Eecen, P. J., Korterink, H., van der Pijl, S. P. and Schepers, J. G., 2007, "ECN Test Farm Measurements for Validation of Wake Models," Tech. Report, ECN-M--07-044, Energy research Center of the Netherlands.
- (3) Schepers, J. G., Obdam, T. S. and Prospathopoulos, J., "Analysis of Wake Measurements from the ECN Wind Turbine Test Site Wieringermeer, EWTW," Tech. Report, Energy research Center of the Netherlands.
- (4) DEWI, "Wake Measurements at Alpha Ventus - Dependency on Stability and Turbulence Intensity," Tech. Report for RAVE-OWEA project, DEWI.
- (5) Katic, I., Hojstrup, J. and Jensen, N. O., 1986, "A Simple Model for Cluster Efficient," *EWEA conference*, pp. 407~410.
- (6) Larsen, G. C., 2009, "A Simple Stationary Semi-analytical Wake Model," Tech. Report, Riso-R-1713(EN), Riso National Laboratory.
- (7) Ott, S., Berg, J. and Nielsen, M., 2011, "Linearised CFD models for wakes," Tech. Report, Riso-R-1772(EN), Riso National Laboratory.
- (8) Gaumont, M., Rethore, P.-E., Bechmann, A., Ott, S., Larsen, G. C., Pena, A. and Hansen, K. S., "Benchmarking of Wind Turbine Wake Models in Large Offshore Wind farms," DTU Wind Energy.
- (9) Windographer user manual, AWS Truepower.
- (10) Ainslie, J.F., 1985, "Development of an Eddy Viscosity Model for Wind Turbine Wake," in 7th *BWEA Wind Energy Conference*.
- (11) Ainslie, J.F., 1988, "Calculation the Flow Field in the Wake of Wind Turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 27.
- (12) Wessel, A. and Lange, B., "Modeling Turbulence Intensities Inside Offshore Wind Farms"
- (13) Anderson, M., 2009, "Simplified Solution to the Eddy-Viscosity Wake Model," Tech. Report, 01327-000202, Renewable Energy Systems Ltd (REC).
- (14) International Electrotechnical Commission, 2005, INTERNATIONAL STANDARD IEC 61400-1 Third edition.