

# 효율적인 풍력발전단지 설계기술

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 장태현  
([changtae@reseat.re.kr](mailto:changtae@reseat.re.kr))

## 1. 서론

재생에너지 기술은 빠르게 발전하고 있다. 지난 세기에 가장 흥미 있는 것은 우연히 풍력에너지의 등장이었으며, 에너지 위기와 화석에너지의 이용으로부터 나타난 심각한 환경 문제 때문에 다수의 풍력발전단지(wind farm)가 세계 곳곳에 설치되었다. 이 분석에서, 육상풍력의 최적화 설계에 대한 새로운 문제가 대두되었고, 여기서 풍력부하(wind load)는 통계영역을 이용하여 계산되었다. 이 목적을 위하여 메타휴리스틱(metaheuristic) 알고리즘이 문제를 풀기위해 사용되었다. 풍력발전단지 설계문제는 자연에 의해 제한된 최적화와 후류 영향(wake effect)이 문제가 되었다.

풍력발전단지 설계에 대한 국내의 연구로는, 이기학 등(1)은 3차원 풍력터빈 블레이드 최적형상설계를 위한 실용적이고 효율적인 설계과정을 구현하였고, 국내 연안의 해상풍력에 적용하기 위해서 통계적 모델을 이용하여 풍향 자료를 분석하였다.

임성진(2)등의 연구에서 유리섬유/에폭시 복합재를 이용한 2 MW 풍력터빈 시스템 타워에 대한 특정 구조설계 절차가 하중 분석, 단계적 설계 변경 통한 최적 구조설계 및 해석을 통해 새로이 제안되었다. 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC.NASTRAN/PATRAN을 통하여 구조적 안전성을 검토 하였고, 최종 제안한 타워 형상은 모든 설계 요구조건을 충족함을 확인하였다.

이지영 등(3)은 해상풍력발전단지 설계과정의 일환으로 실험계획법의 일종인 반응표면 분석법을 이용하여 풍력터빈의 최적 배치조건을 연구하였다. 총 36기 터빈을 해상에 설치한다는 가정 하에 터빈들의 행렬조합, 행간 및 열간 거리를 반응표면 분석시의 설계 변수로 사용하였으며, 터빈 후류손실에 의해 저하되는 발전효율과 내부 전력선 공사비를 목적함수로 고려하였다.

다른 연구자로서는 장세명 등(4)은 10 kW급 수평축 풍력 터빈의 로터를 개발하기 위해 블레이드의 공력 설계 절차를 체계적으로 연구하였다. 운동량 이론과 깃 요소법에 근거한 역 설계 방법을 확립하고, 이를 이용하여 주어진 공력 분포에 따른 근사 최적 형상을 설계하였다.

한국과학기술정보연구원(KISTI) RESEAT의 전문연구원들이 분석한 결과로서는, 신호순(5)은 “반 잠수 부유식 기초지지 풍력터빈 개발”, 나덕주(6)는 풍력터빈 블레이드의 얼음 비산 예측 방법”, 백태현(7)은 “혁신적 풍력터빈 시스템의 최신 설계기술”, 그리고

조흥곤(8)은 “풍력발전 장치용 베어링의 기술동향” 등의 430여편이 분석되었고. 국내의 연구로서는 229편의 학술연구 결과가 발표되었다.

그러나 풍력발전단지 전체를 설계한 연구는 적은 편이다. 이 분석에서는 Nikos Ath. Kallioras 등(9)이 발표한 육상풍력발전단지의 최적설계, S. A. ,MirHassani 등(10)이 제시한 풍력발전단지 최적설계에서 불확실성(uncertainty) 그리고 Sittichoke Pookpant 등(11)이 보고한 태국의 사례보고 등을 수록하였다.

## 2. 풍력발전단지의 설계를 위한 웨이크 효과 및 풍속 계산

이 절에서는 최적화 문제의 목적함수(objective function)와 설계변수를 다루고, 두 개의 문제점이 제기된다. 첫째의 목적은 N개의 풍력 타워의 최적화된 위치가 명시된 풍력발전단지로부터 얻은 풍력에너지를 극대화하는 것이다. 그러므로 극대화된 목적함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\max \sum_{i=1}^N C_i \tag{1}$$

이 식에서,  $C_i$ 는 각 풍력터빈으로부터 얻은 풍력에너지이다. 두 번째 문제에서, 목적은 비에너지 생산,  $E_o$ 에 대한 요구된 풍력타워 수를 최소화하는 목적함수는 다음 식(2)로 주어진다.

$$\min \sum_{i=1}^N |E_{tot} - E_o| \tag{2}$$

이 식에서  $E_{tot}$ 는 연간 생산된 총 풍력 에너지이다.

### 2-1. 웨이크 효과 모델을 이용한 후류 풍속 계산

후류의 영향으로 다수의 풍력 타워(wind tower)의 경우, 바람의 유동과 속도는 다음에 위치한 풍력 타워와 다른 것에 현저하게 영향을 미친다. 그러므로 가장 중요한 인자는 Fig. 1과 같이 후류의 영향이다. 이 영향으로 에너지 손실은 풍력에너지 생산을 현저하게 저하시키고, 풍력발전단지(wind farm)의 동력출력을 변동시킨다. 그래서 다수의 풍력 터빈(wind turbine) 설치에 대해 최적위치를 분명하게 예측하는 것이 중요하다. Jensen의 모델에 의하면, 웨이크효과(wake effect)를 고려한 속도는 식(3)으로 주어진다.

$$u = u_0 \left[ 1 - \frac{2a}{\left(1 + b \left(\frac{X}{r_1}\right)\right)^2} \right] \tag{3}$$

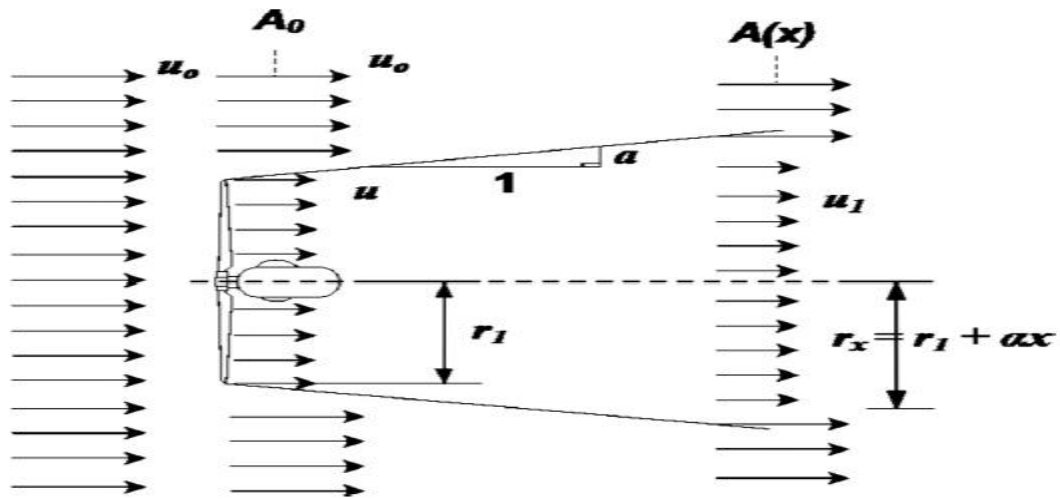


Fig. 1 The Jensen's [27] wake model that assumes linear expansion of the wake cone<sup>(9)</sup>

이 식에서  $u_0$ 는 자유흐름의 평균풍속,  $X$ 는 후류방향에서 터빈 중심에 대한 거리,  $r_1$ 은 터빈 로터의 반경,  $a$ 는 axial induction factor,  $b$ 는 실험적으로 계산되는 엔터테인먼트 상수(entertainment constant)로 식(4)와 같이 나타낸다.

$$b = \frac{1}{2 \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad (4)$$

$z$ 는 풍력터빈의 중심 높이,  $z_0$ 는 표면 거칠기, 반면에,  $a$ 는 axial induction factor로 식(5)로 계산된다.

$$C_T = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (5)$$

여기서,  $C_T$ 는 터빈의 추력계수(thrust coefficient)이고, 후류효과의 선형적 팽창을 가정하면, 터빈날개를 통하여 지나가는 바람의 통로는 원뿔 형태로 나타내어진다. 원뿔의 후류의 반경을  $r_1$ 이고 다음 식(6)으로 주어진다.

$$r_1 = r_0 + bX \quad (6)$$

여기서  $r_0$ 는 터빈로터의 반경이다. 혼합된 후류의 운동에너지 손실이 에너지 손실의 합과 같다고 가정하고, 식(3-6)으로부터,  $N$  터빈의 후류풍속은 식(7)로 계산되고, Fig.2로 나타낸다.

$$u = u_0 \left[ 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( 1 - \frac{u_i}{u_0} \right)^2} \right] \quad (7)$$

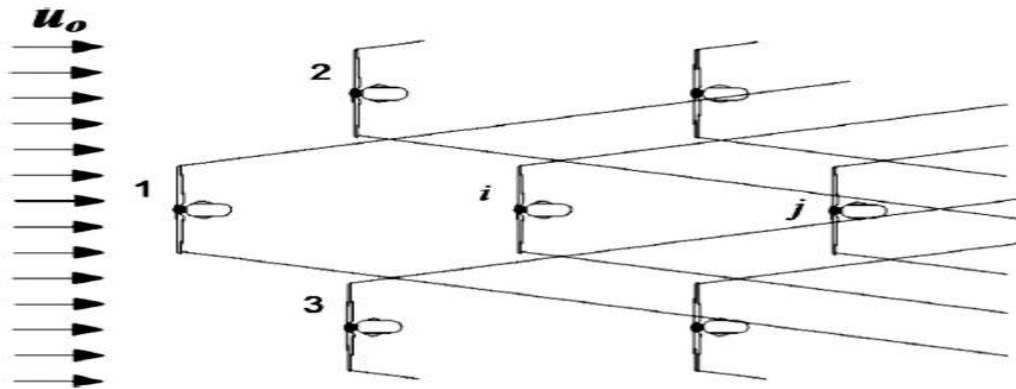


Fig. 2 This example of multiple wakes shows why multiple wake models must combine the influence of every upstream wake, which shadows a turbine, into a single effect to obtain a usable result<sup>(9)</sup>

## 2-2. 풍속, 공기밀도 그리고 풍하중 계산

풍력타워의 꼭대기에서 풍속계산은 타워의 지주 꼭대기의 풍하중(wind load)을 결정하기 위해서다. 바람직한 높이에서 풍속은 다음 식(8)로 계산된다.

$$u(h) = u_g \frac{\ln\left(\frac{h}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{Z_0}\right)} \quad (8)$$

여기서  $u(h)$ 는 높이  $h$ 에서 풍속,  $u_g$ 는 참고 높이( $h_{ref}$ )에서 평균풍속이다. 참고 높이는 보통 10m이고,  $Z_0$ 는 거칠기 길이(roughness length)이고, 0.01를 취한다. 식(8)은 참고 높이 10.0m, 풍속방향(30°)에 따라 12개의 방향과 3개의 다른 위험요소들에서 풍속을 제공한다. 공기의 밀도는 공기의 압력과 온도의 함수이고, 타워높이의 증가와 함께 저하한다. 높이에 따른 공기의 압력은 식(9)로 계산된다.

$$p = p_0 \left( 1 - \frac{Lh}{T_0} \right)^{\frac{gM}{RL}} \quad (9)$$

이 식에서  $p$ 는 공기의 압력(Pa),  $p_0$ 는 해수면 기준 평균대기압(101325Pa).  $L$ 은 기온 감률(Temperature Lapse Rate),  $h$ 는 해수면으로부터 높이,  $T_0$ 는 해수면기준 표준온도

(288.15K),  $g$ 는 지구표면 중력가속도(9.80665m/s<sup>2</sup>),  $M$ 은 건공기의 분자량(0.0289644kg/mol) 이고, 밀도는 다음 식(10)으로 계산된다.

$$d = \frac{pM}{RT} \quad (10)$$

풍력터빈 로터의 높이에서 계산된 풍속을 가지고, 운전 풍하중은 다음 식(11)으로 주어진다.

$$F_w = \frac{1}{2} C_d d A u^2(h) \quad (11)$$

이 식에서  $C_d$ 는 항력계수(=0.9),  $d$ 는 밀도,  $A$ 는 풍력발전기 로터 표면적이다.

### 2-3. 동력과 비용모델에 대한 목적함수

풍력에너지는 공기흐름에 의해 발생하는 운동에너지를 의미하고, 다음 식(12)로 나타낸다.

$$E = \frac{1}{2} m \cdot u^2 = \frac{1}{2} (A \cdot u \cdot t \cdot \rho) u^2 = \frac{1}{2} A \cdot t \cdot \rho \cdot u^3 \quad (12)$$

여기서  $A$ 는 바람의 방향에 수직으로 풍력발전기 로터가 휩쓰는 면적이고,  $t$ 는 지속기간,  $u$ 는 풍속이고, 단위시간당 풍력( $P$ )의 에너지 지수(Watt)는 다음 식(13)으로 주어진다.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} (A \cdot \rho) u^3 \quad (13)$$

풍차는 바람으로 부터 최대 59.3%의 에너지를 얻는 것이 가능하면, 식(13)은 다음 식(14)와 같이 수정할 수 있다.

$$P_t = \frac{1}{2} (A \cdot \rho \cdot C_p) u^3 \quad (14)$$

이 식에서  $C_p$ 는 풍력장치의 성능계수이다. 풍력타워로부터 연간 생산된 에너지는 다음 식(15)로 주어진다.

### 3. 풍하중의 통계 모델

탐색알고리즘의 최적단계에서 풍력발전단지의 바람의 잠재력을 명시하기 위해, 풍력발전단지의 최적설계배치는 바람의 위험수준에 대한 풍하중(wind load)을 결정해야 한다. 이 작업에서, 두 개의 접근방법에서 불확실한 변수의 모델링을 사용되었다. 통계확률에서 기본적인 가정은 2차원 영역을 횡단하는 불확실한 변수 P의 변동이고, 이는 다음 식과 같이 나타낸다.

$$P(x,y)=P_0[1+f(x,y)] \quad (15)$$

여기서,  $P_0$ 는 변수 P의 평균값이고,  $f(x,y)$ 는 zero-mean 2D Gaussian homogeneous 통계영역이다. 이 작업에서 통계학적으로 모델링된 풍하중 특성이 사용되었고, 스펙트럼 표현방법을 이용하였다. 스펙트럼 표현방법을 기본으로, 샘플은 불확실한 풍속을 나타내는 2차원 단변량 homogeneous Gaussian stochastic 영역의 i차 시뮬레이션을 요구하고, 다음의 연속 cosine식이 된다.

$$f^{(j)}(x) = \sqrt{2} \sum_{n=0}^{N-1} [A_n \cos(K_n x + \phi_n^{(j)})] \quad (16)$$

여기서,  $\phi_n^{(j)}$  ( $n=0, 1, \dots, N-1$ )은 임의적의 상의 각  $\phi_n$ 의 i차 실현을 나타내고,  $A_n$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$A_n = \sqrt{2S_{ff}(K_n)\Delta K} \quad (17)$$

여기서,  $K_n = n\Delta K$ 이고,

$$\Delta K = \frac{K_u}{N} \quad (18)$$

위의 식에서, 통계영역의 파워 스펙트럼(power spectrum)  $S_{ff}$ 는 파수(wave number) k의 real non-negative function이다. 반면에,  $\Delta K$ 는 파수의 증분이다. power spectral density function이 사용되었고, 다음 식으로 나타낸다.

$$S_{ff}(K) = \frac{1}{4} \sigma^2 b^3 K^2 e^{-bK} \quad (19)$$



이 식에서  $\sigma$ 는 통계영역의 변분계수(coefficient of variation)이고,  $b$ 는 변수의 correlation length parameter, 생성된 12개의 통계영역은 Fig.3에 나타난다. 이는 고려된 다른 풍방향에 대한 통계영역과 상응한다.

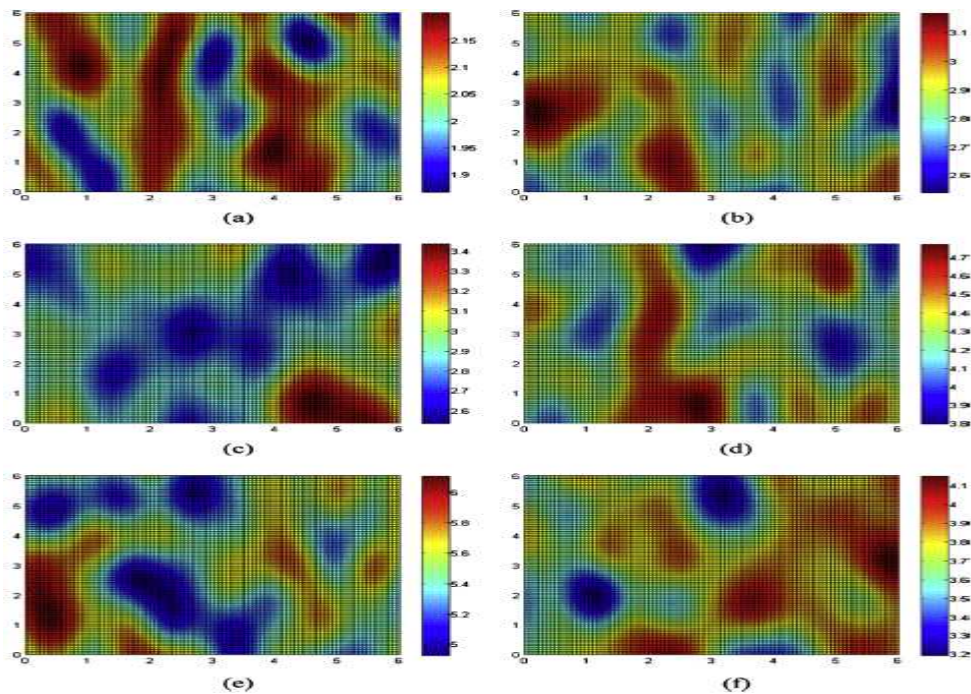


Fig. 3 Stochastic field for the frequent wind hazard level and different wind directions: (a) 0, (b) 30, (c) 60, (d) 90, (e) 120, (f) 150, (g) 180, (h) 210, (i) 240, (j) 270, (k) 300 and (l) 330<sup>(9)</sup>

#### 4. Harmony search algorithm을 이용한 풍력타워 위치 결정

HM(Harmony search)은 각 풍력 타워의 위치를 명시하는 임의로 생성된 벡터해로부터 시작되고 다음 식(20)으로 주어진다.

$$HM = \begin{bmatrix} S_1^1 & S_2^1 & S_3^1 \cdots & S_n^1 \\ S_1^2 & S_2^2 & S_3^2 \cdots & S_n^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_1^{HMS} & S_2^{HMS} & S_3^{HMS} \cdots & S_n^{HMS} \end{bmatrix}$$

(20)

이 해를 위해, 연구영역은 셀로 이산화(discrete) 된다. 이렇게 하여 이산화 최적문제를 위해, 새로운 조화된 벡터가 다음과 같이 생성된다.

$$s_i^{New} = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} s_i \in \{x_i(1), \dots, x_i(k), \dots, x_i(K_i)\} \\ s_i \in [x_i^{Lower}, x_i^{Upper}] \end{array} \right\} & \text{with probability } 1-HMCR \\ \left. \begin{array}{l} s_i \in HM = \{s_i^1, s_i^2, \dots, s_i^{HMS}\} \\ s_i(k+m) \text{ if } s_i(k) \in HM \\ s_i + \kappa \text{ if } s_i \in HM \end{array} \right\} & \begin{array}{l} \text{with probability } HMCR \times (1-PAR) \\ \text{with probability } HMCR \times PAR \end{array} \end{cases} \quad (21)$$

이 식에서  $x_i(K)$ 는 풍력터빈이 위치한 셀을 나타내는 정수다.  $k$ 는 다음 분포를 가진 Poisson 분포다.

$$P(k) = \frac{(\gamma)^k}{K} e^{-\gamma} \quad (22)$$

이 식에서  $\gamma$ 는 Poisson 분포 정수 랜덤(random number)의 벗어남과 확률이다.

## 5. 수치해석 결과

이 설계에서는 풍력발전단지의 최적설계를 위해 HS 최적화알고리즘이 사용되었다. 반면에 실제 세계의 사례가 고려되었다. 메타휴리스틱해법(metaheuristics)의 성능은 알고리즘 변수의 선택이 중요하다. 알고리즘 변수를 적절히 결합하기 위해, LHS(Latin hypercube sampling)이 이용되었다.

### 5-1. 체계화의 첫 번째 문제

풍력타워의 최적 위치를 결정하는 것이 목적이고, 이는 최대 성능에 이르게 된다. 문제는 다음식과 같이 비선형 프로그래밍 최적화문제로서 형성되었다.

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^N [P_{tj}(u(x))] \cdot C_m t_h \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{cell}} X_i = N, X_i \in (0,1) \forall i=1, \dots, N_{cell} \quad (24)$$

이 식에서,  $C_{tot}$ 는 풍력발전단지에 의해 얻은 수익,  $N$ 은 풍력타워의 수,  $C_{gen}$ 은 각 타워의 비용,  $P_{tj}$ 는 풍력터빈  $j$ 차에 의해서 발전된 동력,  $H_i$ 는 풍속의 분포,  $C_m$ 은 전기에너지 발전을 위한 단위 비용(MU/Wh), 여기에서 MU는 달러나 유로화에 상응한다.



### 5-2. 체계화의 두 번째 문제

두 번째 문제는 총에너지를 참고한 최소 경비로 나타낸다. 이 문제는 비선형 프로그래밍 최적화문제로 나타내고, 다음 식으로 표시한다.

$$\min \left| \sum_{i=1}^N [P_{t,j}(u(x)) \cdot H_i(u(x))] \cdot C_m t_h - E_0 \right| \quad (25)$$

$$\text{이식에서, } \sum_{i=1}^{N_{cell}} \chi_i = N, \chi_i \in (0,1) \forall i=1, \dots, N_{cells} \quad (26)$$

이 식들에서, N은 풍력원의 수, P<sub>t,j</sub>는 풍력터빈 j차에 의해서 발전된 동력, H<sub>i</sub>는 풍속의 분포, C<sub>m</sub>은 전기에너지 발전을 위한 단위 비용(MU/Wh), 여기에서 MU는 달러나 유로화에 상응한다. 식(25)와 (26)에 나타난 최적화 문제를 풀기위해, 풍력타워의 최저수는 13개이고, 생산된 에너지는 132.50MWh이다. 풍력발전단지의 최적설계는 Fig. 4와 Fig.5에 나타낸다.

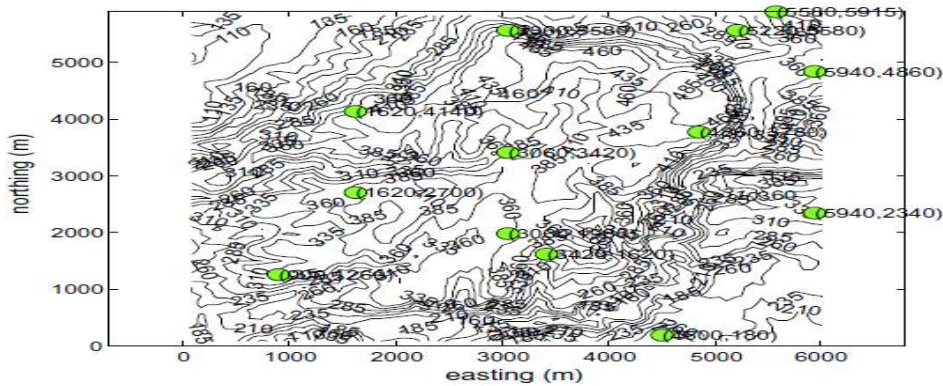


Fig.4 Second problem formulation - . optimized location of wind towers<sup>(9)</sup>

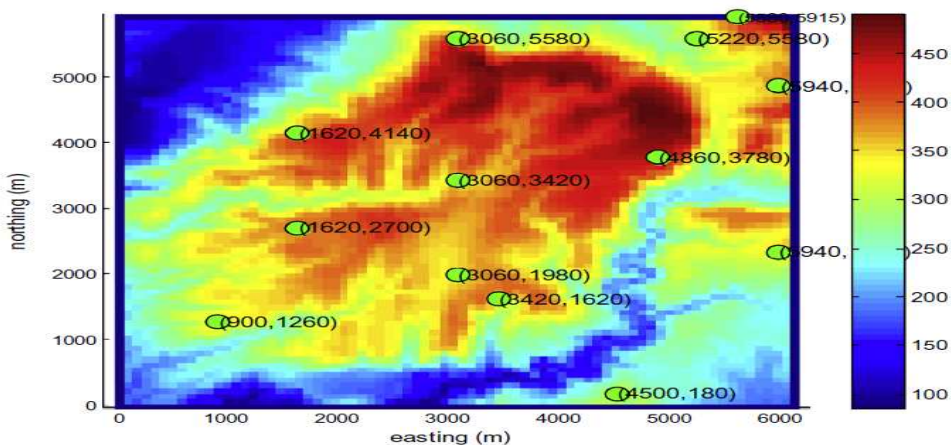


Fig. 5 Second problem formulation - . optimized location of wind towers with reference to the area landscape<sup>(9)</sup>

## 6. 후류 모델 : 불확실성하에서 풍력발전단지의 최적설계

### 6-1. 후류 모델(wake model)

바람이 터빈 타워를 통과 할 때, 완만한 원뿔형 유동 혹은 터빈을 통과한 공기는 후류를 형성한다. 이 현상을 Fig. 6과 같이 공기역학에서 웨이크 효과(wake effect)라고 알려져 있고, 다음 식들로 나타낸다.

$$v = v_0 \left[ 1 - \frac{2\alpha}{\left(1 + \frac{\alpha D_{ij}^d}{r_1}\right)} \right] \quad (27)$$

여기서,  $r_1 = \alpha D_{ij}^d + r_r$  이다. 
$$\alpha = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (28)$$

$$\alpha = 0.5(1 - \sqrt{1 - C_r}) \quad (29)$$

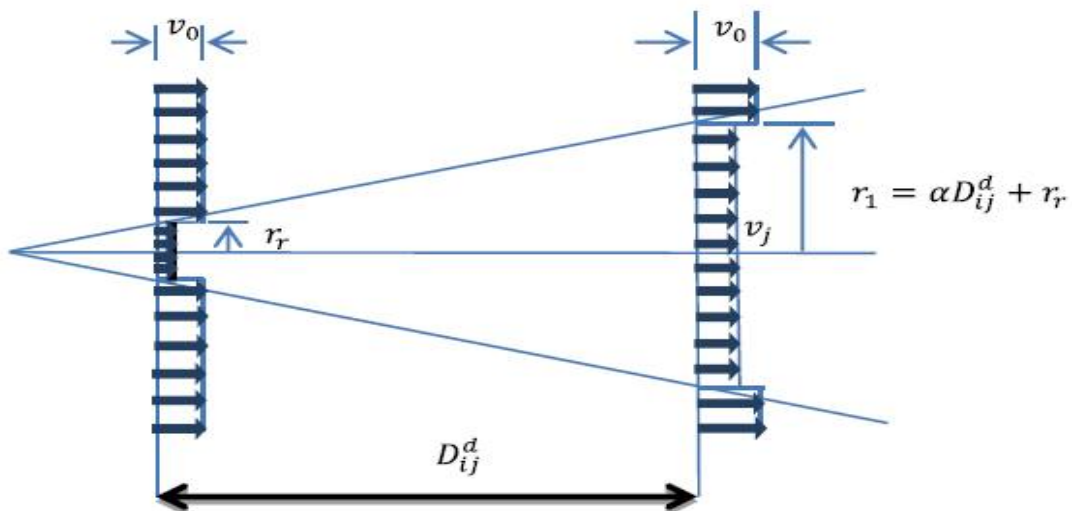


Fig. 6 Schematic representation of the wake effect<sup>(10)</sup>

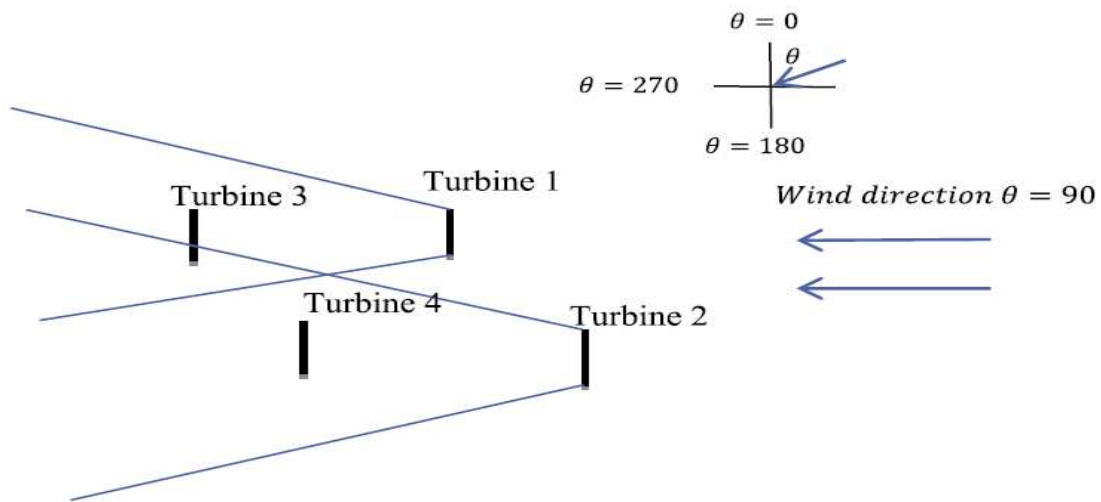


Fig.7 The wake effect and a wind farm model<sup>(10)</sup>

다수의 후류가 각 후류에 의해서 생성된 각 운동에너지의 불균형의 합과 같기 때문에, 유동에서, 총 운동에너지는 불균형이라고 가정한다. 이 가정으로, 다수의 연속 터빈 뒤의 j위치에서 풍속을 계산하는 식은 식(30)을 사용하였다.

$$v_j = [1 - \sqrt{\sum_{i \in j} d_{ij}^2}] \quad (30)$$

$$\text{여기서, } d_{ij} = \frac{2\alpha}{\left(1 + \frac{\alpha D_{ij}^d}{\alpha D^{d_{ij}+r_r}\right)^2} \quad (31)$$

## 6-2. 매트릭스 계산

풍력발전단지 내에서 웨이크 효과의 정확한 구조는 풍력터빈의 최적 위치에 중요한 역할을 하므로, 모델 형성에서 바람의 방향을 고려해야한다. 상호작용 매트릭스 (interaction matrix) 크기는 격자(J×J)이다. 다음 알고리즘을 사용하여 입력되는 바람의 방향에 대한 매트릭스를 고려하였다.

### 6-2-1. 알고리즘

①지역(terrian)을 네 개의 영역으로 나누었다. 각 영역은 입력 바람의 방향과 터빈의 좌표를 Table 1과 같이 결정한다.

Table 1 Classification of wind direction and turbines' coordinates<sup>(10)</sup>

wind direction	turbines' coordinates	Remarks
$\frac{\pi}{4} \leq \theta < \frac{3\pi}{4}$	$X_j < X_i$	
$\frac{3\pi}{4} \leq \theta < \frac{5\pi}{4}$	$Y_j > Y_i$	
$\frac{5\pi}{4} \leq \theta < \frac{7\pi}{4}$	$X_j > X_i$	
$\frac{7\pi}{4} \leq \theta < \frac{9\pi}{4}$	$Y_j < Y_i$	

②바람 방향에 의존되는 각 터빈의 통과하는 선을 다음 식(32)과 같이 나타낸다.

$$y = m^l(\chi - X_i) + Y_i \tag{32}$$

③Fig.8에 의해서, 첫 단계 조건을 만족하는 터빈의  $D_{ij}^v$ 를 계산하고, 유클리드 거리(Euclidean distance)를 고려한 이들 터빈에 대한  $D_{ij}^d$ 를 계산한다.

④  $\omega_{ij}$  값은 다음 식들과 같이 계산된다.

만약 ( $D_{ij}^v > r_1+r_r$ )이면, 그리고  $\omega_{ij} = 0$

$$\text{만약, } (r_1 - r_r < D_{ij}^v < r_1 + r_r) \text{ 이면, } \omega_{ij} = \frac{2\alpha}{\left(1 + \frac{\alpha D_{ij}^d}{\alpha D_{ij}^d + r_r}\right)^2} \left(\frac{A_0}{A}\right) \tag{33}$$

$$\text{만약, } (D_{ij}^v > r_1 - r_r) \text{ 이면, } \omega_{ij} = \frac{2\alpha}{\left(1 + \frac{\alpha D_{ij}^d}{\alpha D_{ij}^d + r_r}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } A_0 &= r_1^2 \cos^{-1}\left(\frac{1}{2hr_1}(h^2 + r_1^2 - r_0^2)\right) - \\ &\frac{1}{2} \sqrt{(-h + r_0 + r_1)(h - r_0 + r_1)(h + r_0 - r_1)(h + r_0 + r_1)} \end{aligned} \tag{34}$$

이 식에서 변수 h는 웨크효과 중심과 터빈 날개의 중심 사이의 거리이다.

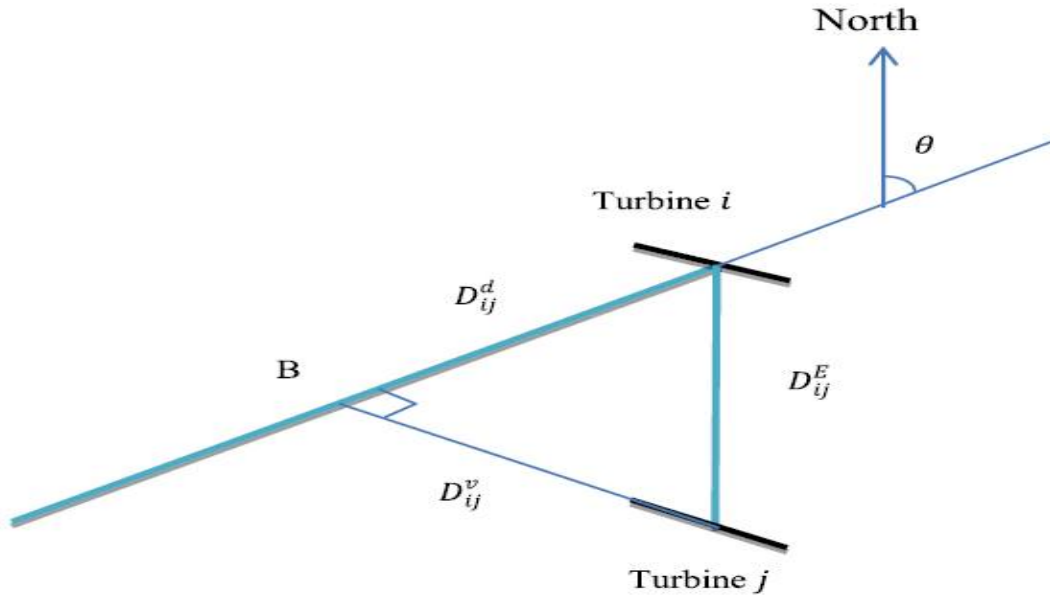


Fig. 8 Determination of the wake radius at point<sup>(10)</sup>

## 7. 다른 중심 높이를 가진 풍력터빈의 구조

WFLO(Wind farm layout optimization) 문제에 대한 수학적 모델을 설명하고, 첫 부분에서, 대수법칙(Lograthmic law)이 설명된다.

### 7-1. 대수법칙

대수법칙(Lograthmic law) 방법이 참고 높이  $Z_r$ 로부터 다른 높이  $Z$ 까지 풍속을 평가하기 위하여 사용되었다. 이 방법을 바탕으로, 풍속은 타워 높이만큼 증가한다는 것을 알 수 있고, 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{v(z)}{v(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (35)$$

이 식에서  $v(z_r)$ 은 풍력터빈의 중심 높이에서, 터빈 앞의 자유흐름 속도이다.

### 7-2. 수학적 모델

수정상수를 계산하기 위하여, 다른 중심축 높이에 관련된 변화를 고려하여 식(28)을 이용한다. 각 터빈에 대한  $\alpha$ (entrainment constant)와  $j$ 위치의 터빈에서 풍속은 식(36)과

식(37)로 주어진다.

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (36)$$

$$v_j = \left[1 - \sqrt{\sum_k \sum_{i \in J} d_{ij}^{k^2}}\right] \text{ 여기서, } d_{ij}^k = \frac{2\alpha}{\left(\frac{\alpha_k D_{ij}^d}{\alpha D_{ij}^d + r_r}\right)^2} \quad \forall k \in J \quad (37)$$

식(30)과 식(31)은 다음 형태로 된다. 만약 터빈 형  $k$ 가 위치  $j$ 에 위치한다면, 이항변수  $y_j^k = 1$ 이 된다. 모델의 목적함수는 풍속의 세제곱에 비례한다. 확장된 모델은 다음식과 같이 된다.

$$\text{최대화, } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J y_j^k (v_0 [1 - \sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^J d_{ij}^{k^2} y_i^k}])^3 \quad (38)$$

$$\sum_{j=1}^J y_j^k = N^k \quad \forall j \in J \text{라 가정하여} \quad (39)$$

$$\sum_{k=1}^K y_j^k \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (40)$$

$$y_j^k \in (0,1), \quad \forall j \in J \quad (41)$$

여기서 만약 터빈  $k$ 가 위치  $i \in J$ 에 위치한다면, 이항변수  $y_i^k = 1$ 이다. 이 모델의 목적함수의 비선형 때문에 풀기가 어렵고, 여러 가지 변환을 적용하여 근사 해를 구한다. 목적함수는 다음형태로 주어진다.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J y_j^k (v_0 [1 - \sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^J d_{ij}^{k^2} y_i^k}]) \quad (42)$$

$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J y_j^k v_0$  항은 상수  $NT \cdot v_0$ 와 같으므로, 다음식과 같이 고려한다.



$$\omega^{kk_{ij}} = (d_{ij}^{kk})^2, (y_{ij}^k)^2 = y_j^k \quad \text{그리고} \quad W_{ij}^{kk} = \sum_{I=1}^L p^I \omega_{ij}^{kkI} \quad (43)$$

최종의 2차방정식 모델은 다음 식(44)로 주어진다.

$$\sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K W_{ij}^{kk} y_i^k y_j^k \quad (44)$$

$y_j^k \in Y$ 이고, Y는 제한(constrain) 39-41에 의해서 만들어진 실현가능한 영역이다.

### 7-3. 다른 터빈의 경우에서 수정된 상관도 행렬

식(33)-식(34)에서 사용된 수정된 상수는 터빈 위치 I과 변수 h의해서 상술되고, 다음 식과 Fig. 9에서 나타낸다.

$$h = \sqrt{D_{ij}^{v^2} + (Z_k - Z_{k'})^2} \quad (45)$$

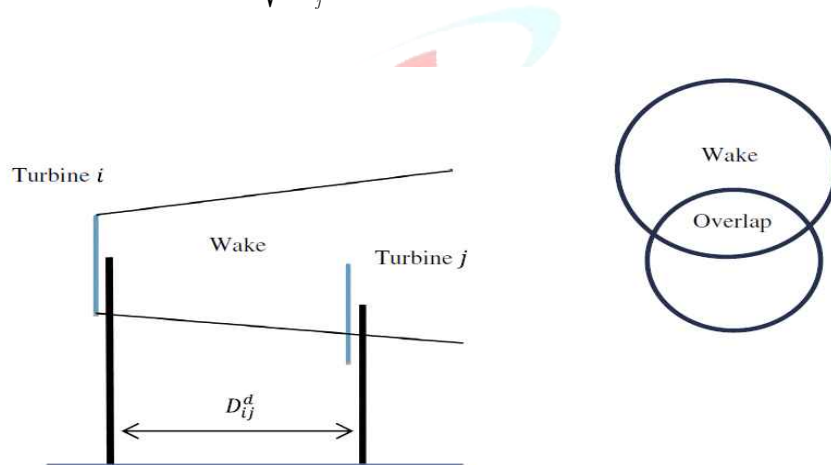


Fig. 9 Schematic representation of a wake effect in a wind farm consisting of wind turbines with different hub heights<sup>(10)</sup>

## 8. 방법론

바람 방향에 대한 상관도 행렬(interaction matrix)을 만들었고, 식(44)를 가진 모델을 해석하는 것은 아주 어렵다. 다음의 두 가지 방법이 제의되었고, ①선형화 기술, ②차원 모델의 직접해법이다.

### 8-1. 선형화 기술

$$\text{최소화(minimize)} \quad \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K W_{ij}^{kk'} \chi_{ij}^{kk'} \quad (46)$$

$$\text{가정} \quad \sum_{i=1}^J y_j^k = N^k \quad \forall k \in K \quad (47)$$

$$\sum_{k=1}^K y_j^k \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (48)$$

$$\begin{aligned} x_{ij}^{kk'} &\leq y_i^k \quad \forall i, j \in J, i \neq j, \forall k, k' \in K \\ x_{ij}^{kk'} &\leq y_j^{k'} \quad \forall i, j \in J, i \neq j, \forall k, k' \in K \\ x_{ij}^{kk'} &\geq y_i^k + y_j^{k'} - 1 \quad \forall i, j \in J, i \neq j, \forall k, k' \in K \\ y_j^k &\in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \\ x_{ij}^{kk'} &\geq 0 \quad \forall i, j \in J, i \neq j, \forall k, k' \in K \end{aligned} \quad (49)$$

이 방법을 사용하여 정수2차원모델이 혼합정수 선형계획법(MILP: mixed integer linear)으로 바뀐다.

## 9. 계산 결과

이 계산에서 두 종류의 터빈이 사용되었고, 각 바람 방향은 상관도 행렬로 나타내었다. 터빈 특성과 WFLO에 대한 입력변수는 Table 2와 Table 3에 나타낸다. 참고 문헌들에서 세가지 경우가 논의 되었고, 경우①지배하는 풍속방향은 북에서 남쪽으로 12m/s이다. 경우②가능한 36 바람방향으로 구성하고, 풍속은 12m/s이다. 경우③ 불규칙한 부분 발생과 복합 풍속, 8m/s, 12m/s, 17m/s 등을 가진 36 풍속방향이다.

Table 2 Parameters used in cases with identical wind turbines<sup>(10)</sup>

Parameters	dimensions	10Remarks
r <sub>0</sub>	20m	
z	60m	
z <sub>0</sub>	0.3	
J	100	
Cell size	100r <sub>0</sub> (200m×200m)	
Wind farm size	2km×2km	
Cr	0.88	
P	$\sum_i^J 0.3v_i^3$	

Table 3 Parameters used in the case with different hub height turbines<sup>(10)</sup>

Parameters	dimensions	Remarks
r <sub>0</sub>	20m	
z <sub>1</sub>	50m	
z <sub>2</sub>	78m	
z <sub>0</sub>	0.3	
J	100	
Cell size	10r <sub>0</sub> (200m×200m)	
Wind farm size	2km×2km	
Cr	0.88	
P	$\sum_i^J 0.3v_i^3$	

### 9-1. 사례연구

S.D.O. Turner 등의 사용한 동일 터빈을 사용하여 WFLO MILP 모델을 비교하였다.

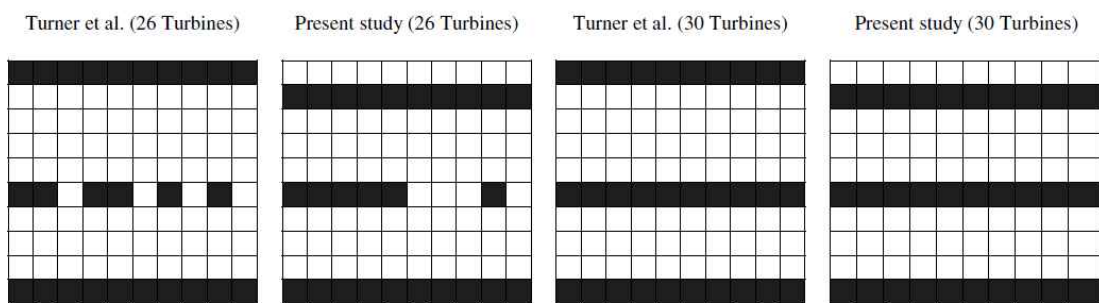


Fig. 10 WFLO MILP layouts<sup>(10)</sup>

Fig. 11에서 여러 가지 풍속이 있는 경우, 36개의 바람 방향의 경우를 이전의 연구와 비교하였다.

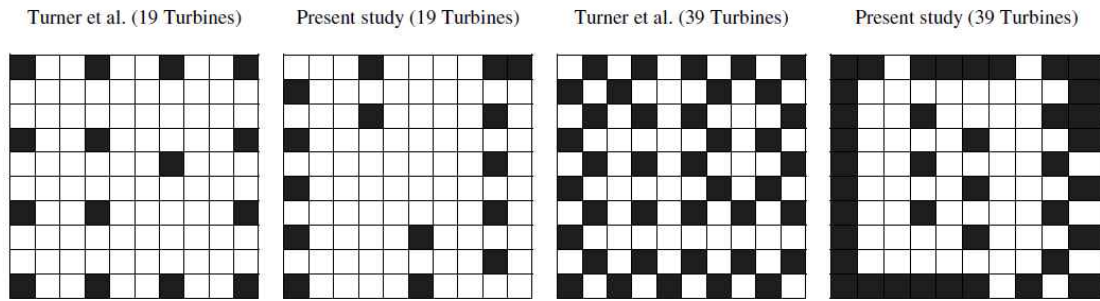


Fig. 11 36 wind directions with three speeds of 8 m/s, 12 m/s and 17 m/s with unequal fractions of occurrence<sup>(10)</sup>

## 10. 태국의 풍력발전단지 설계 사례

### 10-1. 태국의 풍력자원 평가

태국의 풍력특성은 열대몬순에 의해서 제어하고, 이는 서남풍 몬순과 동북풍 몬순을 포함하고, 바람의 방향에서 계절적 변화를 가져온다. Fig.12에 태국의 평균풍속빈도와 방향을 나타낸다. 전통적인 풍력발전단지의 설계를 Fig.13에 나타낸다.

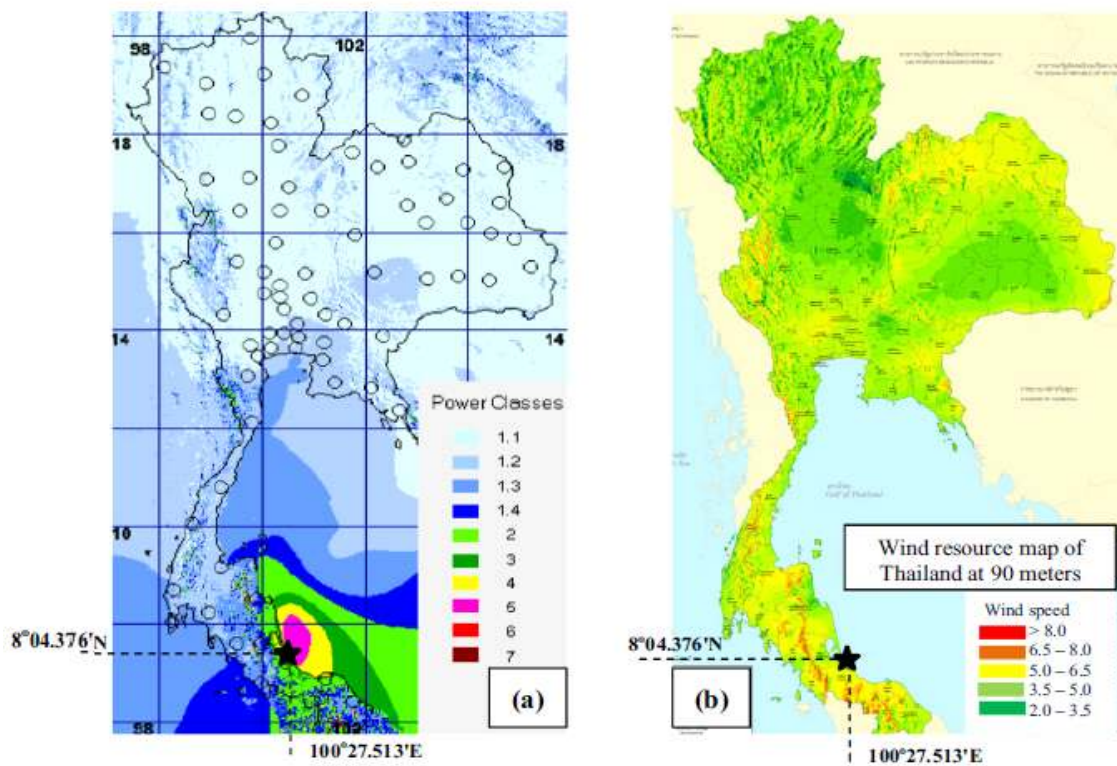


Fig.12 Thailand wind map data (a) version 2001 at 50 m height [23] and (b) version 2010 at 90 m height [24] with Huasai location<sup>(11)</sup>

## 10-2. 풍력발전단지 모델

### 10-2-1. 풍력발전단지의 설계

많은 풍력터빈 수가 증가함에 따라, 풍력 터빈 당 평균출력전력은 웨이크 효과 때문에 저하하였다.

### 10-2-2. 웨이크효과 모델

바람으로부터 에너지 추출에서, 터빈은 원뿔형 느린 후류와 더 많은 난류를 생성한다. Jensen의 간략화한 후류모델을 고려하여, 풍력터빈 p의 후류는 다음식으로 주어진다.

$$\left(1 - \frac{u_{pq}}{u_0}\right) = \left(1 - \sqrt{1 - C_r}\right) \left(\frac{r_p}{r_p + 2\alpha_1 \chi_{pq}}\right)^2 \quad (50)$$

반경  $r_q$ 을 가진 하류 터빈 로터 q는 상류터빈 로터 p(반경  $r_p$ )와 axial induction factor(a)에 관계된다. 추력계수( $C_r$ )은 Betz 상관식을 통한 axial induction factor(a)에 관계된다.

$$r_p = r_q \sqrt{\frac{(1-a)}{(1-2a)'}} \quad , \quad C_r = 4a(1-a) \quad (51)$$

entertainment constant는 다음식과 같이 정의 된다.

$$\alpha_1 = \frac{0.5}{\ln(z/z_0)} \quad (52)$$

혼합된 후류의 운동에너지의 결손이 에너지 결손의 합과 같음을 가정하고, 풍력터빈q( $\overline{u_q}$ )의 하류의 결과 속도는 다음 식으로 주어진다. 풍력 터빈으로부터 추출된 전력은 바람의 방향, 강도 그리고 생기확률(probability of occurrence)에 의존된다.

$$\left(1 - \frac{\overline{u_q}}{u_0}\right)^2 = \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^N \left(1 - \frac{u_{pq}}{u_0}\right)^2 \quad (53)$$

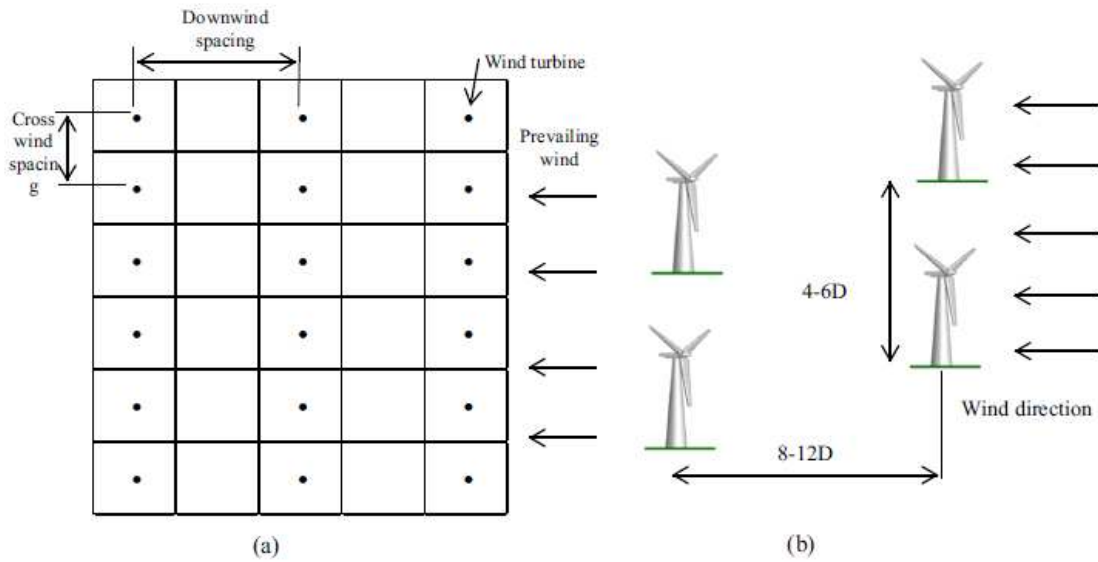


Fig.13 Conventional wind farm layout schematic [1,30,31] (a) and turbines spacing (b).<sup>(11)</sup>

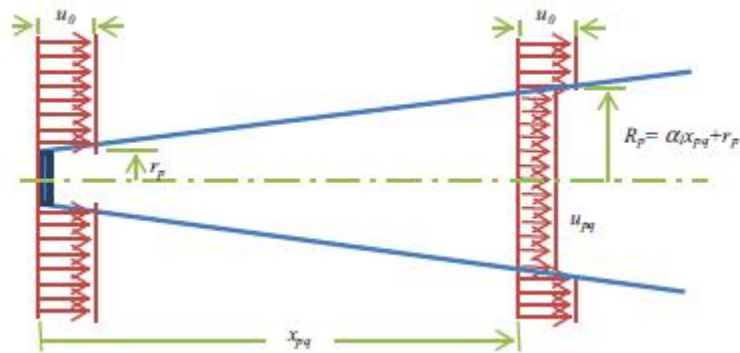


Fig.14 Schematic representation of wake effect model<sup>(11)</sup>

### 10-2-3. 높이에 따른 풍속의 변화

고도와 함께 풍속 증가의 간단한 기술은 다음과 같이 멱법칙(power law)으로 정의된다.

$$\overline{u_H} = \overline{u_{ref}} \left( \frac{H}{H_{ref}} \right)^{\alpha_2} \quad (54)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\ln(H/z_0)} \quad (55)$$

이 식에서  $z_0$ 는 풍속 계측지의 표면 거칠기이다.



### 10-2-4. 풍력터빈의 동력커브모델

풍력터빈에 의한 전력에 대한 전통적인 풍력은 몇 가지 기준에 의존되고, 이들은 끼어드는 풍속( $C_j$ ), 차단하는 풍속( $C_i$ ), 지정된 풍속( $C_r$ ), 파워커브(power curve), 추력계수 커브, 로터 직경( $d_R$ ) 그리고 중심높이( $H$ )이다. Table 4에 터빈 크기를 나타내고, Fig. 15에 식(56)으로부터 결정된 풍력발전단지의 각 터빈의 동력을 나타낸다.

$$P_i(\bar{u}_i) = \begin{cases} 0: & \bar{u}_i < C_i \\ \left(\frac{C_r - \bar{u}_i}{C_r - C_i}\right) \bar{u}_i^3: & C_i \leq \bar{u}_i < C_r \\ T_R: & C_r \leq \bar{u}_i \leq C_o \\ 0: & \bar{u}_i > C_o \end{cases} \quad (56)$$

Table 4 The characteristic of wind turbine series<sup>(11)</sup>

Size in ex(T)	Model	Relative power, Tg(kW)	Rotor diameter, dg(m)	Stand ar d hub, H (m)	Cut-i n speed (m/s)	Rated speed, c <sub>f</sub> (m/s)	Cut-o u t speed, c <sub>o</sub> (m/s)	Swept (m <sup>2</sup> )	Densi ty(W/m <sup>2</sup> )	Cost (\$)	Cost/kW(\$/kW)
1	V29	225	29	31	3	13	20	661	341	302,556	1345
2	V47	660	47	50	3.5	14	25	1735	380	762,046	1155
3	V60	900	60	60	3.5	15	25	2827	318	1,123,759	1249
4	W1250	1250	70	70	3.5	15	25	3848	325	1,576,249	1261
5	V82	1650	82	80	3.5	15	25	5281	312	2,132,321	1292
6	V90	2000	90	90	3.5	15	25	6362	314	2,741,270	1371
7	V100	2600	100	100	3.5	15	25	7854	331	3,654,107	1405
8	V112	3000	110	115	3.5	15	25	5852	305	4,693,588	1565

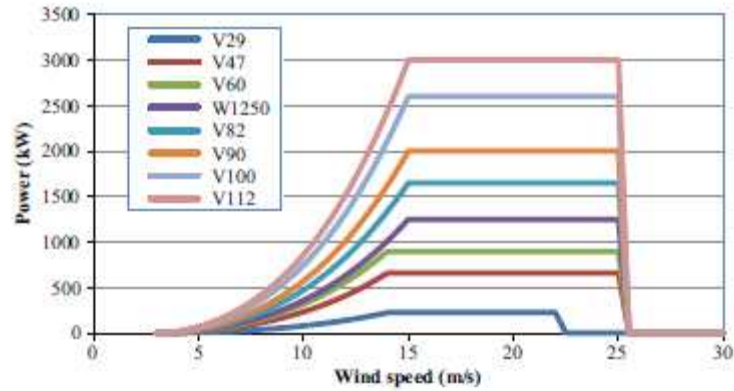


Fig.15 The series of wind turbine power curve model following<sup>(11)</sup>.

풍력발전단지로부터 연간 평균동력 생산은 각 터빈의 생산 합계로 계산되고, 다음 식으로 주어진다.

$$P_T = \sum_{k=0}^{360} \sum_{i=1}^{N_T} f_k P_i(\bar{u}_i) \quad (57)$$

이 식에서  $N_T$ 는 풍력터빈의 총수,  $f_k$ 는 방향k에서 계산된 풍속의 확률분포(probability distribution)이다. 풍력발전단지의 연간 에너지생산(AEP)은 다음식으로 결정된다.

$$AEP = P_T \times 8760 \quad (58)$$

연간 풍력발전단지의 이용률(capacity factor)은 다음 식으로 주어진다.

$$CF = \frac{AEP}{T_R \times 8760 \times N_T} = \frac{P_r}{T_R \times N_T} \quad (59)$$

### 10-2-5. 풍력발전단지의 비용 모델

미국의 DOE and NREL(Department of Energy and National Renewable Laboratory)은 풍력터빈 부품과 하부구조의 비용을 추정하는 관련측도(relationship scale)를 사용하는 spreadsheet-based scaling을 개발하였다. 한 유닛 터빈을 평가하는 초기자본비용은 다음식과 같이 나타낸다.

$$ICC_R = TCC_R + BOS_R \quad (60)$$

이 식에서 R은 터빈의 크기 인덱스이고, TCCR은 터빈부품 비용, BOSR은 지지비

용의 평가이다.

### 10-2-6. 학습곡선(learning curve)

풍력발전단지 비용을 평가하기 위하여, 많은 수의 터빈과 다른 장비의 구매로 인한 단지의 실제 낮은 비용을 평가하기 위하여 학습곡선의 개념이 사용되었다. 풍력발전단지의 비용모델은 산업생산과 부품조립을 위해 학습곡선을 이용하였고, 다음 식을 사용한다.

$$ICC_N = \sum_{i=1}^N (ICC_R \times i^{-In(T_f)In2}) \quad (61)$$

여기서 N은 유닛의 수이고, ICCN은 총N유닛의 비용, ICCR은 터빈크기의 첫 유닛의 비용 그리고 T<sub>f</sub>는 기술인자로 0.85-0.95이다.

### 10-2-7. 에너지 비용

연간 에너지 평가와 함께 부품비용모델은 다음식과 같이 에너지비용을 평가하기 위하여 사용되었다.

$$COE = \frac{CRF \times ICC_N + AOE}{AEP} = \frac{\left( \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^{n-1}} \times ICC_N + [LLC + O M + LRC] \right)}{AEP} \quad (62)$$

여기서 COE는 균등화비용(levelized cost)이고, CRF(capital recovery factor)는 자본회수 인자 이고, LLC는 토지임대비용이다.

## 11. 풍력 분포도

### 11-1. 계측 장소와 풍력 데이터의 묘사

Huasai 지방은 남 태국의 Nakorn Si Thammarat 지방에 위치하고, 위도는 8° 04'36 "N이다. Fig. 16은 이지방의 매달평균 풍속과 풍 방향을 나타낸다. 네 개의 중요한 풍방향은 북쪽에서 0° 혹은 360°, 동쪽에서 90°, 남쪽에서 180° 그리고 서쪽에서 270° 이다.

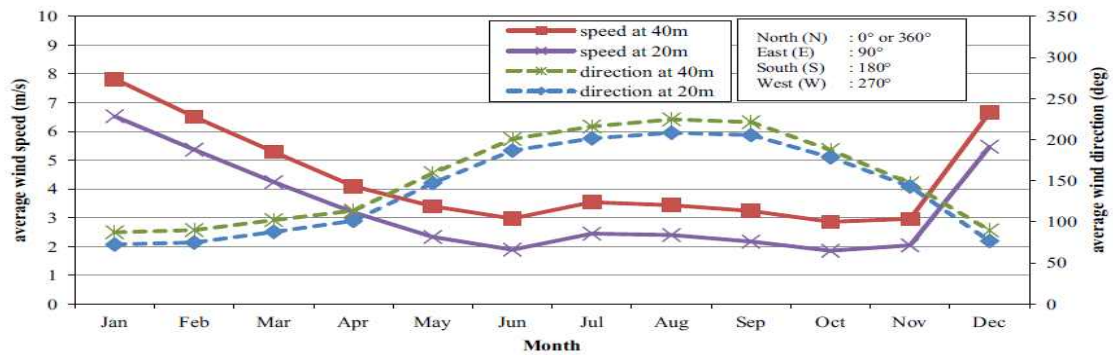


Fig. 16 Average monthly wind speed and direction at Huasai site over period of 1 year<sup>(11)</sup>

### 11-2. 풍력에너지 평가 방법

Fig. 17에서 풍력발전단지의 영업이익을 나타낸다. 이 영업이익은 판매가와 에너지비용(COE)의 차이이다.

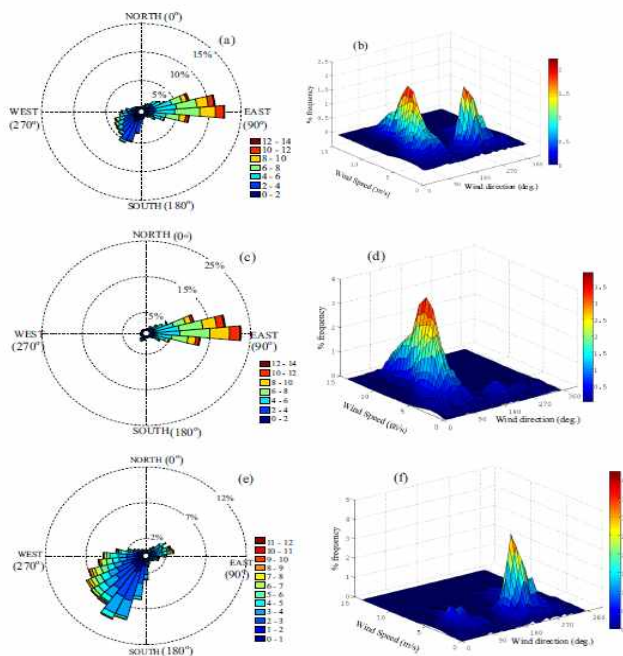


Fig. 17 (a) Annual wind rose and (b) and wind probability distribution map at 40 m due to influence of tropical monsoon. (c) Wind rose and (d) wind distribution map at 40m of northeast monsoon during November to April. (e) Wind rose and (f) wind distribution map at 40 m of southwest monsoon during May to October<sup>(11)</sup>

#### 11-2-1. 풍속 결손 계산 방법

선형후류모델이 최적화 알고리즘을 바탕으로 터빈 후방의 풍속결손(wind speed deficit) 계산에 사용되었다. 선형후류모델은 다음을 가정하였다.

- ① 자유풍속과 방향이 첫 상류터빈 면에 일관되게 분포되어있다.
- ② 후류터빈에 대한 웨이크효과는 다른 환경에 어떤 방해도 없이 일관되게 팽창한다.
- ③ 하루의 풍속은 선형팽창식과 함께 웨이크효과 모델을 기본으로 계산하였다.
- ④ 부분적 웨이크를 고려한 웨이크효과 결합모델 SST(sum square total)를 이용하여 하류터빈의 풍속결손을 계산하였다.
- ⑤ 풍력발전단지의 지세(topology)는 지면의 거칠기 길이로 특성화 되었고, 근해의 평지에서 상수  $z_0=0.3$ 이다.
- ⑥ 개별 터빈동력 추출은 식(56)의 동력모델로부터 얻었고, 추력계수, Cr은 0.88이다.

## 12. BPSO-TVAC에 의한 풍력터빈의 최적 배치

풍력발전지대의 면적은  $2000 \times 2000m^2$ 로, 이를 많은 정사각 셀로 나누고, 이는 풍력터빈을 배치하거나 혹은 없는 위치를 Fig. 18과 같이 나타내었다.

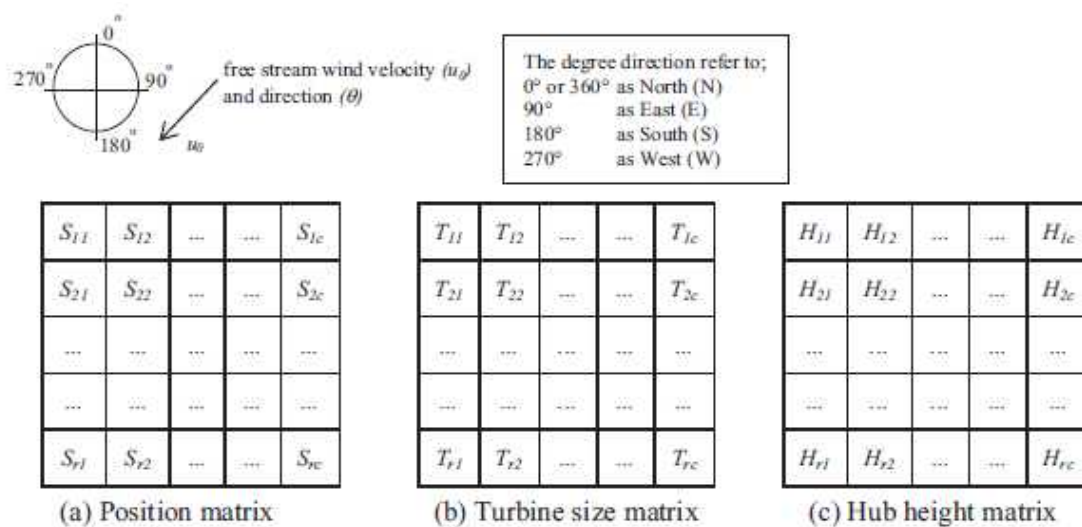


Fig. 18 Divided wind farm matrix represented as a particle in BPSO-TVAC with the matrix including (a) the position, (b) the turbine size, and (c) the hub height<sup>(11)</sup>

투자 예산과 수익은 다음의 Patel rule of thumb에 의해 터빈 공간과 특정 터빈의 크기를 가지고, 풍력발전단지의 전통적인 설계에 의해서 결정된다.

① 적합도 함수(fitness function)의 최대화(S,T,H)= [(기본관세율+프리미엄-COE) × AEP=910.81+11.26) × AEP - {  $\frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \times ICC_N + (LLC + OandM + LRC_N) \}$  }

(63)

가정: 풍력터빈의 수;  $0 < N_T = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^C S_{ij} \leq r \times c$  (64)

터빈 위치 ;  $S_{ij} \in \{0, 1\}$

터빈 크기 인덱스 ;  $T_{ij}, S_{ij} \in \{1, 2, \dots, 8\}$

중심높이 배율 ;  $T_{ij}, S_{ij} \in \{0.8, 0.9, \dots, 1.5\}$

연간 에너지 생산;  $AEP(S, T, H) = AEP(S, T, H) =$

$$\sum_{k=0}^{360} \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^C f_k \cdot S_{ij} \cdot P(T_{ij}, H_{ij}) \times 8760 \text{ kWh/year} \quad (65)$$

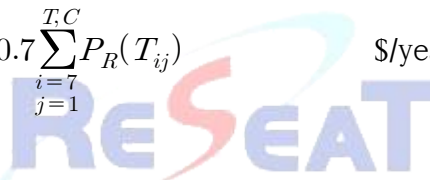
Investment cost constraint;  $ICCN(S, T, H) \leq ICC_{RN} \text{ \$}$

여기서, 전통적인 설계투자비용;  $ICC_{RN} = \sum_{i=1}^{N_T} (ICC_R(T_{ij}, H_{ij}))^{In(T_j)/(In2)} \text{ \$}$

토지임차 비용;  $LLC = 0.00108 \times AEP(S_{ij}, T_{ij}, H_{ij}) \text{ \$/year}$

운전과 보수비용;  $O\&M = 0.007 \times AEP(S_{ij}, T_{ij}, H_{ij}) \text{ \$/year}$

개선 교체비용;  $LRC_N = 10.7 \sum_{i=7}^{T,C} \sum_{j=1} P_R(T_{ij}) \text{ \$/year}$



### 12-1. 시간가변 가속계수를 가진 이진 입자군집최적화(BPSO-TVA)

BPSO-TVAC(Binary Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients)는 메타휴리스틱(Metaheuristic) 최적화 알고리즘이고, 풍력발전단지에서 웨이크효과를 최소화하기 위하여 터빈의 위치, 터빈의 크기 그리고 중심 높이를 선택한다.

### 12-2. 전통적 방법과 최적화 배치의 비교

동일 터빈 크기에 대하여, 연간 에너지생산(AEP)은 전통설계와 최적화배치에서 모두 터빈의 큰 간격과 함께 저하하였고, 이를 Fig. 19에 나타낸다.

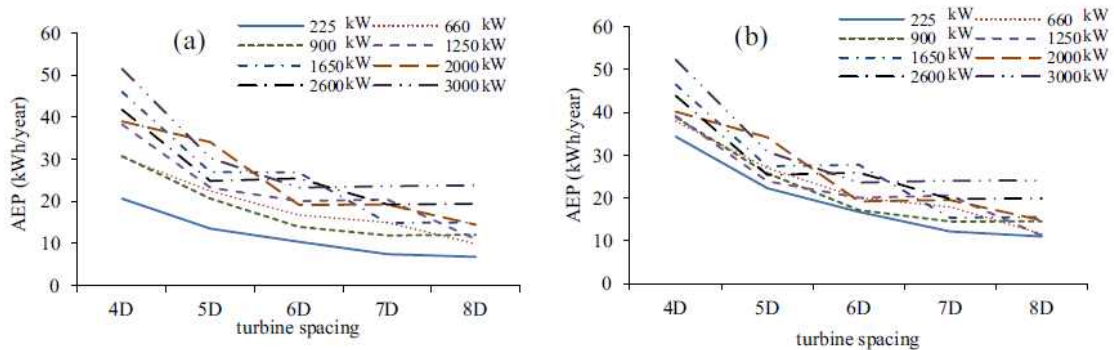


Fig. 19 Comparison of AEP with different turbine sizing and spacing between (a) the



conventional layout and (b) the optimal placement<sup>(11)</sup>

연간 영업이익도 유사한 경향을 보였고, Fig. 20에 제시한다. 그러나 작은 터빈크기의 225kW를 가진 전통적 설계는 마이너스 영업이익을 나타내었다. 이것은 낮은 중심높이에서 낮은 평균풍속의 원인이었다.

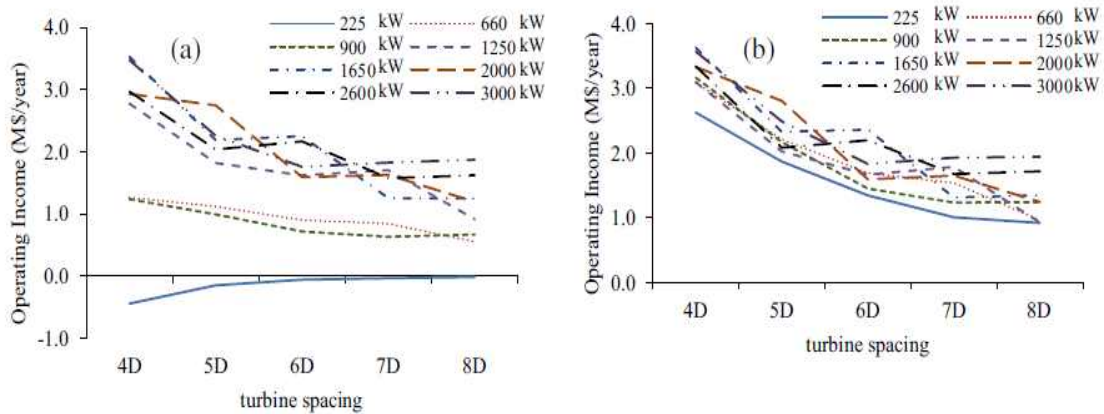


Fig. 20 Comparison of annual operating income with different turbine sizing and spacing between (a) the conventional layout and (b) the optimal placement<sup>(11)</sup>

### 13. 결론



풍력발전단지를 설계하기 위해 웨이크 효과, Jensen 모델, 풍하중 계산 Harmony search algorithm 등을 설명하였고, 태국의 사례연구를 첨부하였다. 그러나 이들 모두가 상당한 수학적 그리고 최적화지식을 요구한다. 중소기업에서는 이 분석물을 숙지하여 풍력발전단지 설계의 기본개념을 파악하고, 관계된 프로그램을 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 단, 프로그래밍 개발자를 위해 사용된 수식을 거의 모두 수록하였다.

1. 풍력터빈을 이용한 전력은 각 터빈의 다른 터빈에 대한 영향을 고려한 후류 영향에 의존된다. 최적화문제를 풀기위해 Harmony search algorithm이 사용되었다. 풍하중에 대해서는 메타휴리스틱 최적화 솔버(metaheuristic optimization solver)와 stochastic representation이 적용되었다.

2. 불확실성하에서 풍력발전단지의 최적설계에서는 상관도 행렬에서 Jensen's wake decay를 모델링을 소개하였다. WFLO 모델이 다른 중심높이 터빈과 함께 확장되었다. 선형화기술을 사용하여 모델을 혼합정수 선형계획법(MILP: mixed integer linear)으로 변형시켜, 레이아웃 설계는 이전의 연구들만큼 좋은 결과를 보였다.

3. 풍력발전단지의 풍력터빈의 최적크기, 배치 그리고 중심높이를 결정하기위하여 BPSO-TVAC 알고리즘이 사용되었다. 이들 풍력터빈의 최적변수들은 전통적인 설계보다 높은 연간에너지 생산과 향상된 영업이익을 가져왔다.

#### <참고문헌>

1. 이기학, 홍상원, 정지훈, 김규홍, 이동호, 이경태식, “효율적인 2단계 최적화를 통한 3 차원 해상풍력터빈 블레이드 설계”, 신재생에너지 제3권 제3호, 63-71 (9 pages), 2007.
2. 임성진, 공창덕, 박현범, “2 MW급 대형 수평축 풍력발전시스템을 위한 필라멘트 와 인딩 복합재 타워의 최적설계에 관한 연구”, 한국복합재료학회, 한국복합재료학회지, 25권2호, pp.54-61, 2012.
3. 김지영, 김경열, 이준신, “반응표면분석법에 의한 해상풍력터빈 최적배치 설계”, 한국 해안해양공학회논문집 제23권 제2호, 163-170 (8 pages), 2011.
4. 장세명, 이장호, “10 kW급 수평축 풍력 터빈 로터 블레이드의 공력 설계”, 韓國航空宇宙學會誌 第35卷 第10號, 884-890 (7 pages), 2007
5. 신호순, “반 잠수 부유식 기초지지 풍력터빈 개발”, 한국과학기술정보연구원 RESEAT 분석물, 2016.
6. 나덕주, “풍력터빈 블레이드의 얼음 비산 예측 방법”, 한국과학기술정보연구원 RESEAT 분석물, 2016.
7. 백태현, “혁신적 풍력터빈 시스템의 최신 설계기술”, 한국과학기술정보연구원 RESEAT 분석물, 2016.
8. 조홍근, “풍력발전 장치용 베어링의 기술동향”, 한국과학기술정보연구원 RESEAT 분석물, 2013.
9. Nikos Ath. Kallioras, Nikos D. Lagaros., Matthew G. Karlaftis, Paraskevi Pachy, “Optimum layout design of onshore wind farms considering stochastic loading”, Advances in Engineering Software, 88 8 - .20, 권(호), 2015.
10. S. A. MirHassani, A. Yarahmadi, “Wind farm layout optimization under uncertainty”, Renewable Energy 107, 288-297, 2017
11. Sittichoke Pookpunt, Weerakorn Ongsakul, “Design of optimal wind farm configuration using a binary particle swarm optimization at Huasai district, Southern Thailand”, Energy Conversion and Management 108 160-180, 2016.

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.