반응표면분석법에 의한 해상풍력터빈 최적배치 설계 Optimal Layout Design of Offshore Wind Turbines by Response Surface Analysis

김지영* · 김경열* · 이준신*
Ji Young Kim*, Kyoung Yul Kim*, Jun Shin Lee*

요 지 : 해상풍력단지 설계과정의 일환으로 실험계획법의 일종인 반응표면분석법을 이용하여 풍력터빈의 최적 배치조건을 연구하였다. 총 36기 터빈을 해상에 설치한다는 가정 하에 터빈들의 행렬조합, 행간 및 열간거리를 반응 표면 분석시의 설계변수로 사용하였으며, 터빈 후류손실에 의해 저하되는 발전효율과 내부 전력선 공사비를 목적함수로 고려하였다. 이러한 설계변수와 목적함수간의 관계를 이용한 반응 최적화 분석을 통해 목표 설계조건을 도출하였으며, 해상풍력단지의 경제성을 확보하기 위한 풍력터빈의 배치조건은 “설계범위에서 행수 및 행간거리를 최소화하고, 최적 열간거리를 산정하여 적용해야 한다”는 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 해상풍력터빈, 반응표면분석법, 실험계획법, 터빈배치

Abstract : An optimal layout condition of the offshore wind turbines is studied by using the response surface analysis which is a kind of the design of experiments. Based on the assumption that total 36 turbines would be installed in the offshore wind farm, the number and distance of the rows and columns are used as the design variables and the efficiency decrease of power generation due to the wake decay by the interactions of turbines and the installation cost of the internal electric grid are considered as the objective functions of the response surface analysis for the layout design of turbines. Useful design information can be derived by analyzing the relationship between the design variables and target functions. It is found that the row number and the distance between rows should be minimized, and the optimal distance between columns should be estimated and adopted to the layout design within the specified design range in order to ensure the economics for the offshore wind farm.

Keywords : offshore wind turbine, response surface analysis, design of experiment, turbine layout

1. 서 론

신재생에너지 공급의무 할당제(RPS)의 도입이 결정됨에 따라 대규모 신재생에너지 개발이 요구되고 있는 가운데, 해상풍력이 이에 대한 가장 현실적인 대안으로 여겨지고 있다. 이와 더불어 해상풍력 개발에 대한 관심이 증대되고 있지만, 아직까지 해상풍력 개발을 위한 기반기술의 확보, 산업기반, 시장형성 등이 매우 미흡한 실정이다. 최근 지식경제부의 제안으로 국내 해역의 중대형 해상풍력발전단지 조성을 위한 타당성 조사연구가 수행 중이며, 입지 분석과 단지 설계 등이 진행되고 있다. 해상풍력단지 설계는 입지 분석, 터빈기계 제원 선정, 지지구조물인 기초의 형식 선정 및 설계, 전력계통 설계 등의 과정으로 이루어지는데, 본 연구는 이러한 단지 설계 과정에서 풍력터빈의 배치 설계에 관한 것이다. 터빈의 간격, 배열 형태 등에 따라 터빈간 간섭 영향으로 발전효율이 달라지기 때문에 풍력터빈의 배치 설계는 경제성에 영향을 주는 중요한 과정이라 할 수 있다. 육상풍력의 경우 터빈 배치시 지형의

영향이 크기 때문에 지형조건과 터빈간 간섭 영향을 고려해야 하나, 외해에 설치되는 대규모 해상풍력은 지형의 영향이 없기 때문에 터빈간 간섭 영향에 의해 배치 형태가 결정된다.

지금까지 국내에서는 해상풍력 단지 설계 사례가 전무하며, 터빈 배치 관련 연구사례도 찾아보기 힘들다. 유럽의 경우 터빈의 후류손실 산정에 관한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 터빈 배치 설계를 위한 단지효율 계산모형이 개발되어 왔다. Sorensen et al.(2006)은 덴마크 Horns Rev 단지의 계측값을 토대로 각 해상풍력 후류손실 계산모형과 계수값들의 적합성을 비교 분석하여, N.O.Jensen 후류모형(Katic et al., 1986)과 후류손실 계수(Wake decay Constant; WDC) 0.04를 적용한 경우 계측치와 가장 잘 일치하는 결과를 얻은 바가 있으며, Kusiak and Song (2010)은 최대 발전량 확보를 위한 풍력단지 배치 설계를 위하여 다중 목적 진화(multi-objective evolutionary) 알고리즘을 기본으로 하는 최적화 계산을 통해 다양한 풍속과 풍향에 대한 터빈 2~6기 최적 배치안을 검토한 바가 있다. 일반적으로 터빈간 거리가 클수록 후류영향이 작아져서 단지 효

*한국전력공사 전력연구원 (Corresponding author : Ji Young Kim, KEPSCO Research Institute, Daejeon 305-380, Korea, jykim77@kepri.re.kr)

율이 커지는 반면, 내부 전력선 연결비용이 증가하기 때문에 최적 배치 설계를 위해서는 단지면적을 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 대규모 해상풍력단지 개발이 예상되는 부안-영광 해역을 대상으로 3 MW 터빈 36기로 이루어진 108 MW 단지설계를 위하여 단지면적의 제한선이 정해지지 않은 상황에서 일단 영역의 제한을 두지 않고 내부 전력선 공사비와 터빈간섭 손실에 의한 발전효율 감소량을 비교하여 터빈 최적 배치조건을 도출해 보았다. 최적 조건의 도출을 위하여 통계적 기법의 일종인 반응표면분석법을 이용하였다.

2. 기본 이론

2.1 N.O.Jensen 후류 계산모형

후류손실 계산을 위하여 가장 보편적인 N.O.Jensen 모형을 이용하였다. 터빈 1기에 대한 단일 후류 손실계산시 터빈 후단에서의 감소된 풍속 V 는 다음 식으로부터 계산된다.

$$V = U \left[1 - C_T \left(\frac{R}{R + \alpha X} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, U 는 허브높이에서의 주변풍속, C_T 는 추력계수(thrust coefficient)이며 2/3로 근사된다. R 은 터빈날개 반지름, X 는 터빈으로부터 후류손실 계산지점까지의 거리, α 는 후류손실계수(WDC)로서, Fig.1과 같다.

그리고 다수의 터빈에 의한 다중 후류손실 계산은 상기 식 (1)로부터 계산된 풍속 감소량의 제곱합을 이용하여 제곱합은 다음과 같이 계산된다. 본 연구에서는 EMD사의 WindPRO ver.2.7 (EMD International A/S, 2010)을 이용하여 해상풍력 터빈에 의한 후류손실을 계산하였다.

$$\delta V_n = \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} (\delta V_{kn})^2} \quad (2)$$

여기서, δV 는 $(1 - V/U)$ 로 정의되는 풍속 감소량, n 은 터빈 수를 나타낸다.

2.2 반응표면분석법

반응표면분석(response surface analysis)은 여러 개의 독립변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변

Fig. 1. N.O.Jensen wake model.

수(η)에 영향을 주고 있을 때, 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 일반적으로 반응표면분석을 통해 독립변수들($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$)과 반응변수(η)간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값의 변화에 따른 반응량의 변동성을 예측하며, 독립변수들의 어떤 값에서 반응량이 최적화가 될 것인가를 찾아내는 최적화 알고리즘이다. 독립변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 와 반응변수 η 간의 관계를 다음과 같이 함수 f 로 나타내면,

$$\eta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (3)$$

새로 정의된 독립변수에 의한 1차 회귀 모형을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (4)$$

최소제곱법에 의하면 적합된 반응표면식은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i \leq j} \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

여기서, x 는 설계인자이며, $\hat{y}$ 는 목적함수이다. 그리고 실험결과 데이터에 의해서 구해진 $\hat{\beta}$ 는 회귀계수이며, 최소제곱법에 의해 구해진다. 본 연구에서는 반응표면분석을 비롯한 각 통계분석을 MINITAB R15(Minitab Inc., 2007)를 이용하여 수행하였다.

3. 설계변수

3.1 대상영역 및 풍향

해상풍력단지 배치 위치는 대규모 해상풍력 개발 후보지 중 하나로 추정되는 전북 부안 및 전남 영광 앞바다인 위도와 안마도 사이 해역으로 고려하였다. Fig. 2는 후류손실 계산을 위한

Fig. 2. Location of study area.

모델링 영역과 터빈 배치 위치를 나타내며, 입력변수로 쓰인 풍황관측자료의 관측위치도 함께 나타내고 있다. Table 1은 대상 영역의 범위를 UTM 좌표로 나타낸 것이다. 터빈 설치 지점에서의 해상 풍황자료를 이용하여야 하나, 대상 해역에서의 풍황관측자료가 없기 때문에 인근 육상에서 관측중인 풍황관측자료를 사용하였다. 이 관측자료는 한국전력공사 고창 전력시험센터 내에 위치한 Fig. 3과 같은 유도낙뢰철탑에 고도 80 m, 100 m, 120 m에 계측기를 설치하여 2008년 11월 21일부터 2010년 2월 7일까지 약 14개월간 관측한 자료이다. 입력된 풍황자료는 발전량 및 후류손실 계산을 위하여 지형정보(고도 및 조도)를 바탕으로 대상영역 전체에 대하여 추정 확장되는데, 본 연구에서는 Table 2와 같이 200 m 격자간격으로 분포도를 추정하였다. 관측지점이 많을수록 그리고 대상지점과 가까울수록 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 터빈배치를 위한 후류손실 계산시 중요한 변수는 풍향분포로서 관측지점과 대상지점의 차이가 크지 않을 것으로 예상되어 인근 지점의 관

측자료를 이용하는데 무리가 없을 것으로 판단하였다.

입력된 관측자료의 특성을 보면 Fig. 4와 같으며, 평균풍속이 약 5.28 m/s로 Fig. 5와 같은 국립기상연구소(NIMR; National Institute of Meteorological Research)의 수치기상지도의 평균풍속에 비해 약 1 m/s 정도 작게 나타난 것을 확인하였다. 수치기상자료는 미국 대기과학연구소(NCAR; National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 중규모 및 미규모 기상현상 모델인 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델을 이용하여 1 km × 1 km 격자로 1998년에서 2008년까지 11년간의 기후특성을 반영하여 산출한 풍속자료로서, 수치 기상자료에 비해 관측자료가 작게 나타난 것은 수치 기상자료의 오차가 어느 정도 존재는 하겠지만 관측기간 동안의 풍속이 예년평균 풍속에 미치지 못한 것으로 판단된다. 단, 이에 대한 검증은 보다 장기간의 관측자료가 확보된 후에 이루어져야 할 것이다. 한편, 관측자료의 바람장미도를 보면 북서계절풍의 영향으로 주풍향이 비교적 뚜렷함을 확인할 수 있다. 각도 330°의

Table 1. Coordinates of study area

UTM 52N	x (m)	y (m)
Min.	231,242	3,903,287
Max.	281,279	3,953,206

Table 2. Mesh information

	x-dir.	y-dir.
Number	250	249
Distance	200 m	200 m

Fig. 3. Steel tower for inducing lightning.

(a) Wind rose

Mean Wind Speed : 5.28 m/s
Weibull Scale factor : 5.91 m/s
Weibull Shape factor : 1.669

(b) Weibull distribution for wind speed

Fig. 4. Characteristics of wind data at EL. 80 m.

Fig. 5. Numerical mean wind speed map at EL. 80 m by NIMR.

북북서풍 출현율이 약 20.2%로 나타나 풍력터빈 배치 설계에는 유리한 조건임을 알 수 있다.

3.2 설계변수 선정 및 민감도 분석

해상풍력 단지설계를 위해서는 총 개발 용량 대비 단지면적, 기타 입지조건과 경제성에 좌우되는 목표 발전량 등이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 타당성 조사단계에서의 사전 검토 수준으로 상기와 같은 사항들이 결정이 되지 않은 상태에서 해상풍력단지의 터빈 배치 형태에 영향을 주는 조건 중 하나인 단지효율과 내부 전력선 공사비만을 고려하여 최적 배치안을 설계하고자 하였다. 단지효율과 내부 전력선 공사비에 영향을 미치는 인자는 전제조건인 풍황 등의 기상조건과 설계변수인 터빈제원, 터빈간 거리, 배치형태, 행렬조합형태 등이 있다. 이들 설계변수 중에서 터빈제원은 Vestas V90-3000으로 고정하고, Fig. 6과 같은 터빈간 거리, 배치형태, 행렬조합형태를 실험 인자로 하여 각 인자들의 민감도 분석을 위하여 Table 3과 같이 실험계획을 수립하였다. 설계변수의 실험범위는 100 MW 규

Table 3. Ranges of experiment factors

Factor	Laver 1 (-)	Laver 2 (+)
Turbine row distance	5D	10D
Turbine column distance	5D	10D
Turbine row angle	0°	90°
Turbine column angle	45°	90°
Combination of turbine row and column number	2 × 18	6 × 6

*D : Turbine rotor diameter (= 90 m)

Fig. 7. Sensitivity analysis result.

Fig. 6. Experiment factors.

모 단지를 고려하여 3MW 터빈 36기를 배치하는 조합으로, 행간거리와 열간거리는 유럽의 단지 설계 사례 등을 토대로 분석된 5D~10D 범위로 설정하였다. 민감도 분석을 위한 실험 case는 2수준 5인자 부분배치법에 의해 16 case (= 2⁵⁻¹)로 구성하고, 각 case의 발전효율을 계산하여 주효과도를 Pareto 차트로 도시한 결과 Fig. 7과 같이 나타났다. 각 인자들의 반

응결과는 표준화된 효과로서 각 발전효율 값을 표준편차로 나누어 표준화시킨 값을 나타낸다. 후류손실만을 고려한 발전 효율에 가장 큰 영향을 주는 인자는 행렬조합형태로 나타났으며, 열간거리와 행간거리가 그 다음 순서로 나타났다. 한편, 배치각도는 유의수준을 0.1로 보았을 때 기각범위에 들며, 상대적으로 영향이 작은 것으로 나타났다.

4. 반응표면분석

4.1 실험 설계

해상풍력터빈 최적 배치안을 도출하기 위하여 최적화에 널리 이용되는 통계적 기법인 반응표면분석을 실시하였다. 민감도 분석 결과 유의수준에 들지 못하는 열배치각도와 행배치각도는 영향이 작은 것으로 나타나, 반응표면 실험에서는 두 인자를 상대적으로 효율이 크게 나타난 0°와 90°로 각각 고정하고 나머지 세 인자에 대해서 실험계획을 수립하였다. 실험 계획은 중심합성 계획법에 의하여 총 20 가지의 실험 case를 수립하였으며, 이중 중심점에 위치하는 중복되는 5 case를 제외하고 Table 4와 같이 총 15가지의 실험 case를 수립하였다. 그리고 이들 case에 대한 발전효율과 내부 전력선 공사비 계산 결과도 Table 4에 나타낸 바와 같다. 여기서 발전효율은 후류손실만을 고려한 발전효율로서, 후류손실이 5% 발생한다면 발전효율이 95%라는 뜻이다. 후류손실 계산은 앞서 언급한 EMD사의 WindPRO ver.2.7 (EMD International A/S, 2010)을 이용하여 수행하였으며, 풍속 Weibull 분포와 바람장미에서 보여주는 풍황특성을 고려하여 각 터빈별로 16방위별 후류손실을 계산

Table 4. Design of experiment for response surface analysis and calculation results

Standard order	Row distance	Column distance	Combination of row and column number	Efficiency (%)	Cost of internal grid (100 million₩)
1	5D	5D	2 × 18	92.2	118.125
2	10D	5D	2 × 18	92.3	121.500
3	5D	10D	2 × 18	96.7	175.500
4	10D	10D	2 × 18	97.6	236.250
5	5D	5D	6 × 6	79.2	118.125
6	10D	5D	6 × 6	86.0	135.000
7	5D	10D	6 × 6	90.0	135.000
8	10D	10D	6 × 6	91.1	236.250
9	5D	7.5D	4 × 9	90.3	131.625
10	10D	7.5D	4 × 9	91.0	182.250
11	7.5D	5D	4 × 9	85.1	123.188
12	7.5D	10D	4 × 9	94.3	190.688
13	7.5D	7.5D	2 × 18	95.2	177.188
14	7.5D	7.5D	6 × 6	87.2	177.188
15	7.5D	7.5D	4 × 9	89.5	177.188

Table 5. Regression result for efficiency

Term	Regression coefficient	P
Constant	90.2600	0.000
Row distance	0.6200	0.098
Column distance	3.4900	0.000
Combination of row and column	-4.0500	0.000
Row distance × Column distance	-0.8125	0.057
Row distance × Combination	1.1125	0.013
Column distance × Combination	0.7625	0.072
R ²	95.16%	

Table 6. Regression result for cost

Term	Regression coefficient	P
Constant	166.05	0.000
Row distance	23.29	0.000
Column distance	35.78	0.000
Row distance × Column distance	17.72	0.001
R ²	88.85%	

하여 누적한 후 단지전체의 평균 후류손실을 산정하였다. 그리고 내부 전력선 공사비는 각 터빈간을 연결하는 전력선의 총 공사비로서, 공사비 단가를 유럽에서의 선행사례를 참조하여 7.5억원/km으로 가정하고 모든 터빈을 경유하는 최단거리에 공사비 단가를 곱하여 산출하였다. 계산결과를 바탕으로 최적화를 위한 회귀모형을 구성하기 위하여 선형 회귀분석하였으며, 결과는 Table 5~6과 같다. 효율에 대한 회귀모형은 R²가 95.16%로 적합성이 우수하며, 비용에 대한 R²도 88.85%로 양호한 편으로 나타났다. 비용에 대해 선형 적합성이 다소 낮은 이유는 터빈간 최소연결 거리가 연결방향에 따라 달라질 수 있어 터빈간 거리에만 선형적으로 비례하지 않기 때문이다. 다시 말해서, 행간 거리와 열간 거리가 다를 경우, 행방향으로 연결을 많이 할 것인지 열방향으로 연결을 많이 할 것인지에 따라 최소 연결거리가 달라진다. 따라서 Table 4의 2번, 3번, 7번의 경우처럼 터빈간 거리가 같더라도 행렬조합에 따라 최소연결 거리가 달라지므로 최소연결거리는 터빈간 거리에만 비례하지 않는다는 것이다. 각 요인별 분산의 기대치 P값을 살펴보면, 효율에 대해 행렬조합과 열간거리는 각각 0.05 이하로 유의수준 5%에서 주요 영향 인자로 나타났으며, 행간거리는 주요 영향 인자로 나타나지 않았다. 단, 행간거리와 행렬조합 두 인자의 조합에 대한 P값이 0.05 이하로 나타나 행간거리 인자의 교호작용이 존재하므로 설계인자에 포함하였다. 공사비에 대해서는 열간거리와 행간거리가 주요 영향 인자로 나타났다.

각 요인별 주효과도를 살펴보면 Fig. 8~9와 같으며, 민감도 분석 결과와 마찬가지로 효율에 대한 영향은 행렬조합이 가장 크고, 열간거리, 행간거리 순으로 나타났다. 여기서 주효과란 각 요인이 반응변수에 미치는 영향으로, 요인의 수준에 따라

Fig. 8. Main effects for efficiency.

Fig. 9. Main effects for cost.

반응에 다른 영향을 미치면 주효과가 존재하는 것이다. 주효과는 각 요인 수준의 반응 평균을 선으로 연결하여 주효과의 변화정도를 알아보기 위한 그림이다. 행간거리의 경우 P값이 보여준 바와 같이 효율 변화폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 행렬조합의 경우 행수가 많을수록 선행터빈에 의한 효율감소가 증폭되어 커지기 때문에 행수가 적은 조합일수록 효율이 크게 나타나며, 주풍향이 매우 뚜렷하여 행간거리보다는 열간거리에 의한 효율변화폭이 큰 것으로 판단된다. 공사비에 대한 주효과도를 보면, 행간거리와 열간거리에 의한 변화폭이 모두 크게 나타났으며, 열간거리에 의한 영향이 다소 큰 것으로 나타났다. 공사비가 터빈간 최소 연결거리에 좌우되므로 행간거리 및 열간거리에 의한 변화폭이 크게 나타나는 것은 자명하며, 대부분의 실험 case가 터빈의 행방향 배치수보다 열방향 배치수가 많은 경우이므로 열간거리에 의한 변화폭이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

4.2 반응표면 설계분석

Fig. 10(a)~(d)는 반응표면 설계의 결과를 평면으로 그린 등고선도로서, 반응표면분석 그래프 중의 하나이다. 각 등고선은 인자의 조합에 대한 반응곡선을 나타내는 것으로, 등고선의 모든 지점에서의 반응치 값은 동일하다. Fig. 10(a)는 효율에 대한 행간거리와 열간거리의 반응 등고선도를 나타내며, 열간거리가 길수록 효율이 높게 나타나고 있다. 또한, 열간거리가 긴 경우에는 행간거리에 의한 효율변화가 거의 없으나 열간

(a) Contour plot of column and row distance for efficiency

(b) Contour plot of row distance and combination for efficiency

(c) Contour plot of column distance and combination for efficiency

(d) Contour plot of column and row distance for cost

Fig. 10. Response contour plots.

거리가 짧을수록 효율변화가 커짐을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 효율에 대한 행렬조합과 행간거리의 반응 등고선도로서, 행수가 많은 조합일수록 행간거리에 의한 효율변화가 커지는 것으로 나타나고 있다. Fig. 10(c)의 경우에는 효율에 대한 행렬조합과 열간거리의 반응 등고선도를 나타내는데, 행수가 적은 조합일수록, 열간거리가 길수록 효율이 높아지는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 10(d)는 전력선 공사비에 대한 행간거리와 열간거리의 반응 등고선도로서, 열간거리와 행간거리가 짧을수록 공사비가 작아지며, 열간거리가 짧아질수록 행간거리에 의한 공사비 변화가 감소함을 알 수 있다.

4.3 최적 배치안 도출 및 검증

이상과 같이 분석된 각 요인별 반응영역을 바탕으로 여러 개의 반응변수의 목표값을 동시에 만족하는 최적 조건 도출을 위하여 MINITAB R15의 반응 최적화 도구를 사용하여 최적 조건을 탐색하였다. 최적 조건 탐색은 특정범위에서 최대 또는 최소값을 만족하는 최적점을 탐색할 수 있으며, 특정변수에 대해 목표값을 만족하는 조건을 탐색할 수도 있다. 본 연구에서는 발전효율은 높을수록, 그리고 공사비는 적을수록 경제성이 향상되므로, Table 4의 계산치를 토대로 발전효율은 90~100% 범위에서 최대값을, 전력선 공사비는 180억원 이하의 범위에서 최소값을 추구하는 최적 조건을 탐색하였다. 또한, 효율과 공사비 목표값을 설정하였는데, 효율 목표값이 각 99%, 95%, 91%인 세 가지 경우에 대하여 설계안을 도출하고 상호 비교하였다. 이 세 가지 조건은 발전효율을 가능한 최대로 확보할 수 있는 경우와 효율은 최소가 되더라도 공사비를 최소로 줄일 수 있는 경우, 그리고 일반적인 발전효율 목표인 95% 조건을 만족하기 위한 경우로 설정이 된 것이다. 세 가지 조건은 Table 7과 같으며, 이에 대한 반응 최적화 도구의 탐색 결과는 Fig. 11과 같다. 반응 최적화 도구는 각 요인들의 변화에 따른 반응변수들의 변화를 산출하며, 각 요인들이 주어진 탐색조건을 동시에 가장 잘 만족시키는 값을 찾아내게 된다. 이러한 동시에 만족시키는 정도를 나타내는 값이 합성만족도로서, 합성만족도가 가장 높을 때의 요인값을 주어진 탐색조건에서의 최적 설계치로 선정하게 된다. 세 가지 경우 모두 행간거리는 5D, 행렬조합은 2×18 조건으로 나타났으며, 열간거

(a) case 1

(b) case 2

(c) case 3

Fig. 11. Results of optimization.

Table 7. Optimal response conditions of turbine layout

Case	Response	Objective	Lower limit	Target	Upper limit
1	Efficiency (%)	maximize	90	99	100
1	Coast (100million₩)	minimize	-	100	180
2	Efficiency (%)	maximize	90	91	100
2	Coast (100million₩)	minimize	-	100	180
3	Efficiency (%)	maximize	90	95	100
3	Coast (100million₩)	minimize	-	100	180

리만 다르게 나타났다. 이와 같이 반응표면 모형에 의하여 도출된 세 가지 조건에 대해 후류손실과 내부 전력선 공사비를 직접 계산하여 Table 8과 같이 비교하여 보았다. 그 결과 Case 1의 경우에는 효율이 다소 과다, 공사비가 과소 추정되었으며, Case 2의 경우에는 공사비는 다소 과다, 효율은 과소 추정되었음을 알 수 있었다. 그리고 Case 3의 경우에는 모두 다소 과소 추정되었음을 확인하였다. 또한, 재계산된 발전효율과 공사비를 토대로 세 가지 안의 경제성을 비교하기 위하여 B/C ratio도 Table 8에 함께 나타내었다. 경제성 분석에 필요한 투

Table 8. Comparison of optimal response results

Factor		Case 1	Case 2	Case 3
Row distance		5D	5D	5D
Column distance		9.7D	5D	7.6D
Combination of row and column		2 × 18	2 × 18	2 × 18
Row angle		0°	0°	0°
Column angle		90°	90°	90°
Park efficiency (%)	regression	98.3	91.3	95.0
	estimation	97.6	92.3	97.3
Cost of internal grid (100million₩)	regression	159.0	124.7	143.8
	estimation	172.1	118.1	148.0
B/C ratio (operation for 20years)		0.968	0.923	0.972

*Assumption for estimation of B/C ratio

- Total construction cost : 3.8billion₩/MW + cost of internal grid (750million₩/kW)

- Capacity factor : 30%

- Price of electricity : 188₩/kWh (SMP + 2REC)

**SMP : System Marginal Price, 계통한계가격

REC : Renewable Energy Certificate, 신재생에너지 인증서

자비, 유지보수비 등의 고려사항은 국내 개발 사례가 없어 유럽 수준으로 가정하여, 실제 경제성과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 각 안의 발전효율과 내부 전력선 공사비 외에는 모두 동일한 조건이며 B/C ratio의 차이는 전적으로 발전효율과 내부 전력선 공사비에 기인한 것으로 세 가지 조건간의 비교를 위한 기준으로 활용할 수 있다. 검토 결과 제3안이 경제성이 가장 높은 것으로 나타나 최적 조건으로 선정할 수 있었다.

5. 결 론

해상풍력단지 설계의 과정 중 터빈의 최적 배치 설계가 필요하다. 본 연구에서는 터빈 배치안 설계변수로서 행렬조합, 행간 및 열간거리를 고려하였으며, 이들 설계변수와 발전효율 감소량 및 내부 전력선 공사비의 관계를 통해 최적 터빈 배치안을 도출하고자 하였다. 발전효율 감소량 계산시 인근 해안에 위치한 고창시험센터의 철탑에서 관측한 풍황자료를 이용하였으며, 터빈제원은 Vestas사의 V90-3000 모델을 기준으로 하고 100 MW급 단지 구성을 위하여 36기를 배치하는 조건으로 검토하였다. 또한 터빈간의 간섭에 의한 후류손실만을 고려하였으며, WindPRO의 N.O.Jensen 후류손실 모델을 이용하여 계산하였다. 최적 조건의 탐색방법은 실험계획법의 하나인 반응표면분석법을 이용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 터빈 배치를 결정하는 인자로서 행렬조합, 행간 및 열간거리, 행렬배치각도를 선정하였으며, 이들 인자가 발전효율에 미치는 영향을 분석한 결과, 행렬조합이 가장 큰 영향을 미쳤고, 열간거리, 행간거리가 그 다음 순으로 나타났다. 행렬배치각도는 상대적으로 영향이 작아 반응표면분석에는 고려하지 않았다.

2) 반응표면분석 결과, 발전효율에 대해 행렬조합, 행간 및 열간거리가 주요 영향 인자로 나타났고, 내부 전력선 공사비에 대해 행간 및 열간거리가 주요 영향 인자로 나타났다.

3) 반응 최적화 도구를 통해 발전효율은 최대로, 내부 전력선 공사비는 최소로 하며, 발전효율의 목표값을 99%, 95%, 91%로 추구하는 세 가지 경우에 대하여 최적 조건을 도출한 결과, 세 가지 경우 모두 행렬 조합은 행수가 가장 적은 2 × 18의 조합, 행간거리는 5D로 나타났으며, 열간거리는 9.7D, 7.6D, 5D로 나타났다.

4) 도출된 세 가지 안의 발전효율과 내부 전력선 공사비를 고려하여 전체사업 경제성을 개략 추정해 본 결과 열간거리가 7.6D인 제3안이 공사비 대비 효율이 가장 좋은 것으로 분석되었다.

이상과 같이 해상풍력 터빈 최적 배치안의 효율적인 도출을 위하여 반응표면분석법과 같은 실험계획법의 적용을 시도해 보았다. 실제 단지설계 시에는 보다 다양한 설계 변수와 현장 조건 등을 고려한 상세 검토가 이루어져야 하겠지만, 본 연구에서 수립된 모형을 기반으로 한다면 터빈 배치설계를 효율적으로 수행할 수 있을 것이라고 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 “국내 해역의 중형 해상풍력발전 플랜트 타당성 조사 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 또한 사용된 풍력-수치기상지도는 국립기상연구소에서 지원되었습니다. 재원과 자료의 제공에 감사의 말씀드립니다.

참고문헌

- Kusiak, A. and Song, Z. (2010). Design of wind farm layout for maximum wind energy capture. J. of Renewable Energy, 35, 685-694.
- EMD International A/S (2008). WindPRO 2.6 User Guide.
- EMD International A/S (2010). WindPRO 2.7 Quick-Guide.
- Katic, I., Højstrup, J. and Jensen, N.O. (1986). A Simple Model for Cluster Efficiency. European Wind Energy Association Conference and Exhibition, 7-9 October 1986, Rome, Italy.
- Minitab Inc. (2007). Minitab 15 길잡이.
- Sørensen, T., Nielsen, P. and Thøgersen, M.L. (2006). Recalibrating Wind Turbine Wake Model Parameters - Validating Wake Model Performance for Large Offshore Wind Farms. European Wind Energy Conference, 27 February - 2 March 2006. Athens, Greece.

원고접수일: 2011년 1월 13일

수정본채택: 2011년 3월 4일

게재확정일: 2011년 3월 28일