

다중유형 풍력터빈을 가진 해상풍력단지의 최적 설계

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 장태현
(changtae@reseat.re.kr)

1. 서론

해상풍력단지에 대한 대부분의 설계는 동일한 형의 풍력터빈으로 구성하는 균일 풍력단지로 가정하였다. 에너지 비용을 줄이기 위하여, 비균일 풍력단지 설계를 연구하였다. 이 단지는 다중유형(multiple type)의 풍력터빈과 허브 높이를 가진다. 풍력단지 설계에서 터빈의 형태, 터빈의 수, 그리고 터빈의 위치 등으로 특성을 부여하였다. 에너지의 균등화 된 비용을 최소화하는 최적설계를 수행하였고, 이 설계는 지본비용 모델을 사용하였다.

이 분야의 국내 연구로는 박미호 등(1)은 제주도에 널리 분포하는 오름작은 산의 영향과 이웃하는 풍력시스템의 간섭으로 인한 난류강도를 CFD기법을 적용하여 개발된S/W인 MeteodynWT v4.5를 이용하여 분석하였다. 김현구 등(2)은 복잡지형에 적합한 전산유동해석 기반의 국소바람지도(micrositing wind mapping) 프로그램인 WindSim(Meissner 등, 2009)과 풍력단지설계용 적지분석 프로그램인 OpenWind를 이용하여 현재 가동 중인 풍력단지 중 하나를 모델로 설정하여 재설계를 수행하였다.

김도형 등(3)은 서해안 지역의 해상풍력발전단지 건설 예비타당성 조사의 일환으로 대상해역의 기상 측정자료를 수집하고 분석하였다. 송원 등(4)은 한국에서 해상풍력발전의 수행잠재성을 결정하기 하기위하여 상용풍력발전단지 설계툴과 국가풍력지도를 사용하였다. 김동욱 등(5)은 대규모해상풍력발전단지 SCADA 시스템개발을위해서 필요한 고려사항과 이를 바탕으로 SCADA 시스템 설계내용을 기술하였다. 김지원 등(6)은 해상풍력단지 설계과정의 일환으로 실험계획법의 일종인 반응표면 분석법을 이용하여 풍력터빈의 최적 배치조건을 연구하였다. 김민수 등(7)은 개발한 모델을 통하여, 해상및 육상 풍력단지 간의 비용 효율성 등 제주도에 적합한 최적 공급 시스템을 설계하였으며 경제성을 평가하였다. 또한 사용가능 부지면적에 관한 정책, 필요 부지면적 및 기술의 생산비용 변화 등 주요 비용 관련 변수에 관하여 최종 전력생산 비용의 민감도 분석을 수행 하였다.

이 보고서에서 Ju Feng 등(8)이 발표한 해상풍력단지에서 다중유형의 풍력터빈의 최적

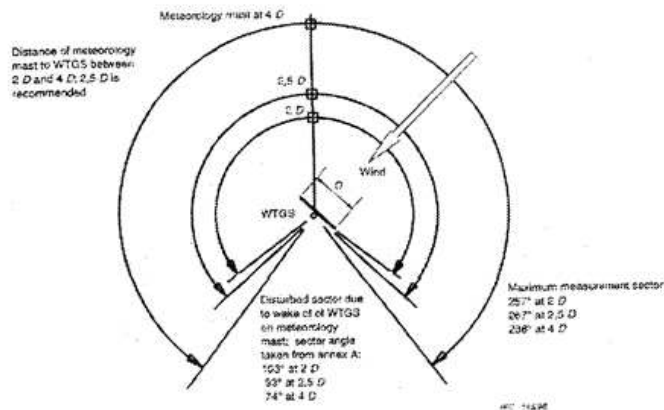
설계와 국내연구 결과를 참고하였다.

2. 비균일 해상풍력단지 풍력터빈의 최적화

풍력단지 설계최적화에 대해 발표된 대부분의 연구는 한 종류의 풍력터빈 사용을 가정했지만, 소수의 최근연구는 비균일 해상풍력단지(non-uniform offshore wind farm)의 가능성을 고려하였다. 이들 중에는 다중유형풍력터빈(multiple wind turbine)을 고려하였고, 최적화문제에서 풍력단지의 용량 인자를 최대화하는 풍력터빈의 형태와 위치를 알리 위해 식으로 나타내었다. 풍력단지의 비용은 각 풍력터빈 비용을 고려하여 계산되었고, 풍력터빈로터 직경의 2차함수에 근거를 두었다. PSO(particle swarm optimization)를 사용하여 문제를 해결하였고 다른 형태 터빈의 최적결합이 풍력단지의 용량을 상당히 향상시킴을 알 수 있었다.

그러나 이 비균일 해상풍력단지는 다음과 같은 몇가지 결점이 있다. ①연구에 사용된 실험용 풍력터빈은 오늘날 MW 크기의 풍력터빈의 추세와는 아주 다른 동력 선도를 나타내었다. ②사용된 비용 모델은 아주 간단하고 목적함수를 포함하지 않았다. ③ 고려된 바람 상태는 풍력터빈 설계에 실제적인 상태를 반영하기에 너무 간단하다. ④다른 형태의 풍력터빈의 로터 직경은 연속함수로 처리되었다. ⑤풍력터빈의 적절한 수의 선택은 고려되지 않았다.

일반적으로 비균일 해상풍력단지는 풍력터빈의 수를 정수형 변수(integer variable)로, 풍력 터빈 형은 확률변수(discrete variable)로, 좌표위치는 연속변수로 명기할 필요가 있다.



<그림 1> 기상측정마스트의 적정위치 및 허용방위각(IEC 61400-12)⁹⁾

국내의 연구 중에, 장문석(9)은 실증단지의 지형적인 입지조건으로는 <그림 1>과 같이 IEC 61400-12에 제시된 바와 같이 기상 측정 마스트의 거리, 측정 방위구간, 측정 영역의 유동왜곡에 대한 수정계수와 불확실성, 근접하거나 가동 중인 풍력발전기와 간섭사

항 배제 그리고 장애물에 대한 요구 사항 등을 고려하였다.

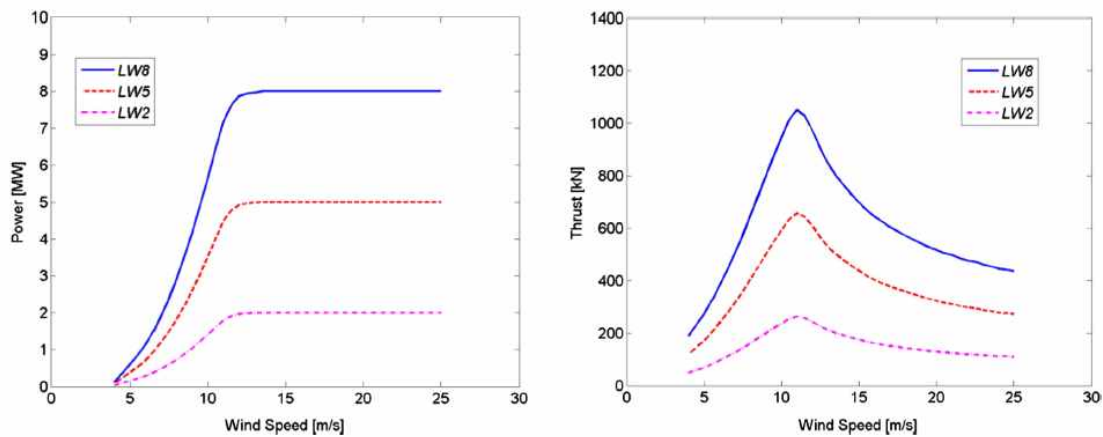
3. 풍력터빈의 선택

세계에 첫 해상풍력단지인 Vindeby는 Bonus 450kW 풍력터빈 11개로 구성된 4.95MW 용량이다. 세계에서 가장 큰 풍력단지인 London Array는 Siemens 3.6MW의 풍력터빈 175개를 가진 630MW 용량이다. 20MW이상으로 고급화된 풍력터빈의 실현가능성이 이미 연구자들에 의해서 확인되었고, 오늘날 풍력단지 개발자는 다른 크기의 풍력터빈 선택 범위에 직면하고 있다. 1-10MW크기의 다중유형풍력터빈을 설치하는 것이 용이하다.

설치와 운전 및 보수에 대한 복잡성을 제한하기 위하여, 해상풍력단지에 3종류의 다른 크기를 고려할 수 있다. 가장 큰 것은 LEANWIND 8MW 터빈(LW8)이고, 다른 두 형태는 LW8로부터 축소한 것으로 5MW와 2MW의 정격 출력이다. 이 터빈들의 변수와 특성은 <표 1>과 <그림 2>에 나타낸다.

<표 1> 세 개형태의 풍력터빈의 일반적인 변수⁸⁾

Name	Rad power(MW)	Rotor diameter(m)	Hub height(m)
LW8	8	164	110
LW5	5	130	90
LW2	2	82	70



<그림 2> 세개 형태의 풍력터빈의 동력커브와 추력커브⁸⁾

4. 비용모델

풍력단지 설계최적화에 대한 연구에서 유전자비용(genetic cost) 모델을 신뢰하였고, 다음 식을 제의하였다.

$$\text{Cost} = N \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174N^2} \right) \quad (1)$$

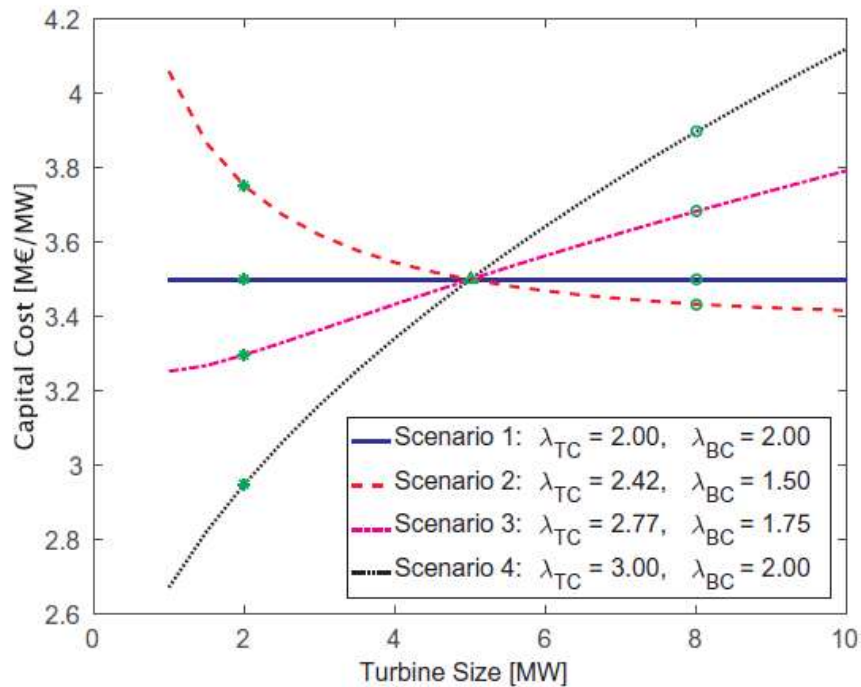
이 식에서 N은 터빈 수이다. 해상풍력단지의 비용은 장소의 특성이 있고, 물의 깊이, 육지로부터 거리 그리고 인건비 등의 요소가 있다.

4-1. 자본 비용

이 비용모델은 INNWIND 자본비용모델로부터 채용되었고, 터빈 비용과 BOP(balance of plant) 비용으로 나누고 5MW의 기준 풍력터빈으로 구성된 해상풍력단지에 근거하였다. 이 평가된 풍력터빈의 평균자본비용은 다음 식으로 나타낸다.

$$\text{CAPEXmean} = \frac{TC_{ref} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{\frac{\lambda_{TC}}{2}} + BC_{ref} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{\frac{\lambda_{BC}}{2}}}{P} \quad (2)$$

이 식에서 Pref= 5MW이다. 다른 비용 시나리오를 사용하기 위해, 네 개의 비용 시나리오를 고려해야 된다. 시나리오① 모든 풍력터빈 크기($\lambda_{TC}=2, \lambda_{BC}=2$)에 대한 MW당 일정한 자본비용을 가정한다. 시나리오② 지수($\lambda_{TC}=2.42, \lambda_{BC}=1.75$)를 사용한다. 시나리오③은 ($\lambda_{TC}=2.77, \lambda_{BC}=1.75$)이고 이는 풍력터빈의 크기와 함께 증가하는 MW당 자본비용을 추측한다. 시나리오④는 전통적으로 고급화된 것으로 ($\lambda_{TC}=3, \lambda_{BC}=2$)이다. 이는 대용량 풍력터빈에 대한 MW당 아주 높은 비용을 야기시킨다. 이들 네 개의 시나리오에 대한 자본비용에 대한 선도는 <그림 3>에 나타내고, 이 보고서에 사용된 풍력터빈의 형태는 <표 2>에 제시한다.



<그림 3> 네 개의 시나리오 하에서 다른 풍력터빈 크기에 대한 MW당 자본비용.⁸⁾

<표 2> 세 개의 풍력터빈 형태에 대한 MW당 자본비용.⁸⁾

Scenario	kλc[-]	λBC[-]	Capital cost [M€/MW]		
			LW2	LW5	LW8
1	2.00	2.00	3.50	3.50	3.50
2	2.42	1.50	3.75	3.50	3.43
3	2.77	1.75	3.30	3.50	3.68
4	3.00	2.00	2.95	3.50	3.90

4-2. 에너지 균등화비용

해상풍력단지의 에너지 균등화비용(LCOE: levelised cost of energy)이 유럽 WEII(wind International Initiative)에 의해 중요한 성능지표와 함께 계산되었다. 3가지 형태의 풍력터빈으로 구성하는 해상풍력단지를 고려하여 각 터빈의 평균자본비용을 근거로 총자본비용 CAEXtotal를 계산하였다. 이 풍력단지의 연간에너지 생산량은 다음 식으로 나타낸다.

$$AEP = P_{total} 8760 \eta \quad (3)$$

이 식에서 8760은 연간 총시간 수이고, η 는 유효성인자로 1이다. 풍력단지 총용량은 식 (4)로 나타낸다.

$$CF = \frac{P_{total}}{Capacity} \quad (4)$$

$$OPEX_{annual} = OPEX_{ref} \cdot Capacity \cdot [1 + 0.5(CF - CF_{ref})] \quad (5)$$

연간 보수유지비용을 식(5)로 제시하면, 에너지균등화비용(LCOE)은 식(5)로 나타낼 수 있다. 이 식에서 $OPEX_{ref} = 106 \text{ \$/kW/year}$ 이고, $CF_{ref} = 0.4$ 이다.

$$LCOE = \frac{CAEX_{total} \cdot CRF + OPEX_{annual}}{AEP} \quad (5)$$

여기서 CAPEXtotal은 각 풍력터빈의 형태에 따른 총자본비용이고, CRF는 자본회수계수이다. CAPEXtotal과 CRF계산식은 식(6)과 같다.

$$CAPEX_{total} = \sum_{j=1}^{N_{TYPE}} CAEX_{mean}^j \cdot capacity^j ,$$

$$CRF = \frac{d}{[1 - (1 + d)^{-N}]} \quad (6)$$

이식에서 $CAEX_{mean}^j$ 과 $Capacity^j$ 는 MW당 평균자본비용과 풍력터빈 j의 용량이다. $d = 5.39\%$, $N = 25$ 가 사용되었다.

5. 최적설계의 문제점

5-1. 문제의 체계화

비균일 해상풍력단지 설계에 대해, 각 터빈의 위치, 형, 그리고 허브(hub) 높이를 명확히 해야한다. 식(5)의 해상풍력단지의 LCOE는 중요한 설계함수이므로, 해상풍력단지 LCOE의 최적화문제는 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$LCOE = f(L, N_{wt}) \quad (7)$$

3가지의 구속을 고려하였다. 첫 형태는 총용량이다. 이는 전력수요와 송전용량과 관계되고 식(8)로 주어진다.

$$Capacity^{(L)} \leq Capacity(L, N_{wt}) \leq Capacity^{(U)} \quad (8)$$

여기서 Capacity^(L)과 Capacity^(U)는 용량의 고저 한계이다. 두 번째는 가능성이 있는 지역에 대한 구속으로 경계와 금지영역으로 식(9)와 같다.

$$(x_i, y_i) \in S_{feasible}, \quad i=1,2,\dots,Nwt \quad (9)$$

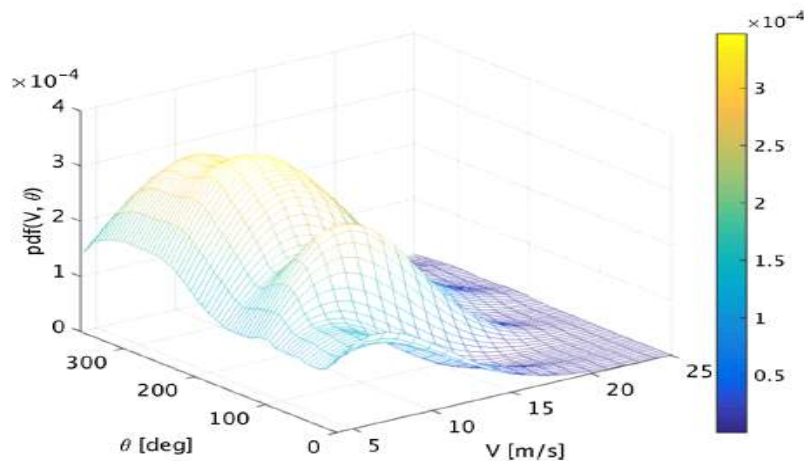
3번째는 어떤 풍력터빈 짝 사이의 접근거리로 다음 식(10)으로 주어진다.

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq \overline{Dist_{min}} \cdot \max(D_i, D_j) \quad (10)$$

여기서 $i = 1, 2, \dots, Nwt$, $j = i+1, \dots, Nwt$ 이고, $\overline{Dist_{min}}$ 은 요구되는 최소 무차원거리이고 D_i 는 i 차 풍력터빈의 로터직경이다. $\overline{Dist_{min}} = 5$ 를 사용하였다.

5-2. 해상풍력단지 모델링

해상풍력단지의 가장 중요한 역할은 전력을 생산하는 것이기 때문에, 풍력단지의 설계 최적화에서 동력생산을 정확하게 계산하는 것이 필수적이다. 이 보고서에서 덴마크에서 측정된 실제 풍력 특성을 사용하였고, <그림 4>에 그 분포를 나타낸다.



<그림 4> 풍속과 풍방방향의 결합확률분포⁸⁾

계측된 풍력 데이터는 기준높이 H_{ref} 에서 얻었고, 허브높이 H 를 가진 풍력터빈의 동력생산을 예측하는 데 사용하였다. 허브 H 에서 풍속을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$v = v^H(v_{ref}) = v_{ref} \frac{\ln(H/z_0)}{\ln(H_{ref}/z_0)} \quad (11)$$

여기서 v_{ref} 는 계측높이 z_0 에서 풍속이다. 기준높이 70m에서 $z_0=0.0001m$ 를 가정하였다. 주어진 자유흐름에서, 풍력터빈 사이의 후류효과는 Jensen 웨이크모델을 사용하였다. 풍력단지의 생산할 수 있는 예측 동력은 식(11)로 나타낸다.

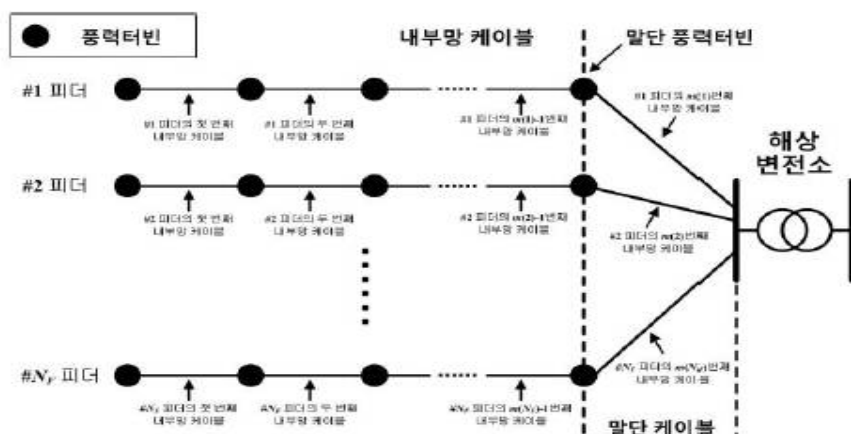
자유흐름 유입상태(v, θ)에서, 터빈들 사이에서 후류효과는 Jensen 모델을 사용하여 계산하였고, 각 풍력터빈에서 유효풍속은 평가된다. 이 유입상태에서 풍력터빈의 생산된 동력은 동력커브를 기초로 계산된다. 바람상태의 PDF(probability density function)를 결합하여, 풍력단지에서 생산된 총 동력은 다음 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^{N_{ut}} \iint Pdf(v, \theta) dv d\theta \quad (12)$$

국내의 이 분야 연구 중에서, 이기학 등(11)은 한반도 해상에서 풍력단지를 조성하기 위한 경제성있는 유망지역 내의 공간을 가정하기위하여 공간 보정모델을 사용하였고, 800-1200W/m²(H=60m)의 우수한 풍력밀도를 가지는 세 영역을 가정하고 각 영역에서 최적화를 수행하여 최적지를 선정하였다. 문원식 등(11)은 해상풍력발전단지의 출력 모델연구에서 풍력단지 지역의 풍속에 관한 확률분포 함수와 풍속에 대한 풍력터빈의 출력특성을 통해 발전 출력에 대한 전체 풍력발전단지의 확률밀도함수를 도출한다. 발전단지의 출력에 대한 확률밀도함수는 발전단지의 평균 전력생산과 케이블의 고장에 따른 신뢰도 비용 산출에 응용된다.

해상풍력발전단지는 일정한 출력을 내지 않고 풍속에 따라 출력의 크기가 변동하게 된다. 즉, 해상풍력발전단지의 출력은 풍속에 의해 결정되며 결국 풍속의 분포에 따라 단지 전체 출력의 분포 또한 달라진다.

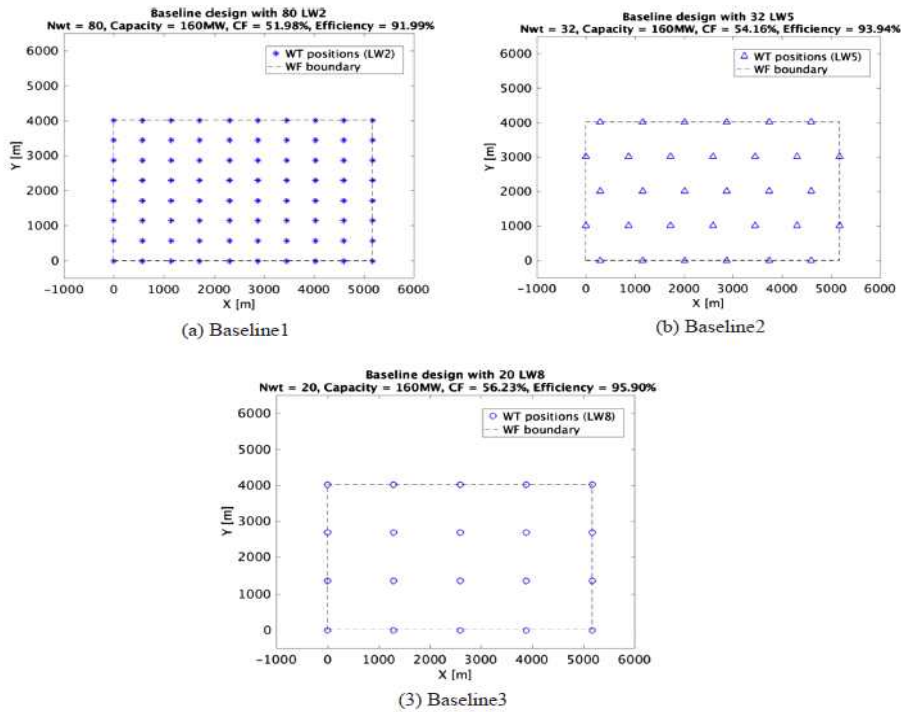
출력의 확률분포를 계산하기 위해서 풍속의 확률분포와 풍력터빈의 출력특성을 이용한다. 일반적으로 풍속에 대한 확률분포는 Weibull 분포 함수를 이용해 나타낼 수 있고, <그림 5>에 해상풍력발전단지 내부전력망 상세 구성을 나타낸다.



<그림 5> 해상풍력발전단지 내부 전력망 상세 구성도¹¹⁾

5-3. 기저 설계

참고로 세 가지 기저 설계를 제시하였고, 총 발전용량은 160MW이고, 각각 다른 형태의 풍력터빈으로 구성된다. 첫 번째는 80 LW2 풍력터빈으로 구성되고, 해상풍력단지 5166m×4018m의 직사각 면적이다. 두 번째와 세 번째는 32 LWS와 20 LW8 풍력터빈으로 유사하게 건설되었다. 이들 세 방법은 <그림 6>에 나타낸다.



<Fig. 6> 단일 형태의 풍력터빈의 베이스라인 설계⁸⁾

<표 3>에 이들 기저 설계의 LCOE를 네 개의 다른 시나리오에서 나타낸다.

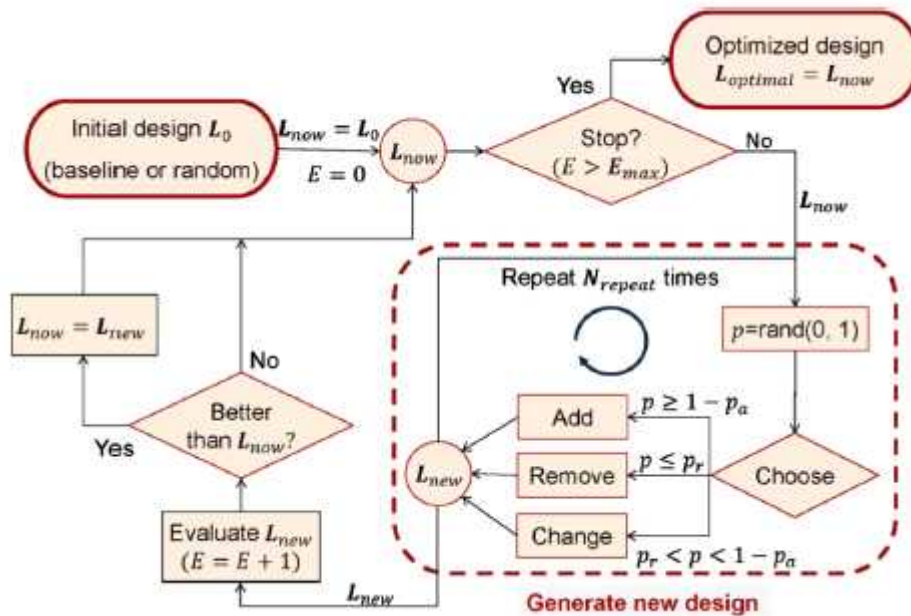
<표 3> LCOE의 기저 설계⁸⁾

Scenario	LCOE[€/MW h]		
	Baseline1(LW2)	Baseline2(LW5)	Baseline3(LW8)
1	81.36	78.33	75.66
2	85.45	78.33	74.67
3	78.07	78.33	78.41
4	72.43	78.33	81.61

MW당 자본비용이 풍력터빈의 크기의 증가와 함께 일정하거나 낮아지면, 큰 풍력터빈의 기저 설계는 <그림 6>에서와 같이 성능이 우수해진다. 보다 큰 풍력터빈의 설계에서 허브 높이가 높아지면 풍력원은 좋아진다. 풍력터빈의 수가 작아져 공간은 로터직경 견지에서 넓어진다. 이렇게 해서 웨이크 효과는 저하한다. 반면에 MW당 자본비용은 풍력터빈 크기와 함께 증가한다.

6. 최적화 알고리즘

해상풍력단지 최적설계를 위해 RS(random search) 알고리즘을 개발하였고 단일 해 검색 방법이다. 이 과정을 <그림 7>에 나타낸다.

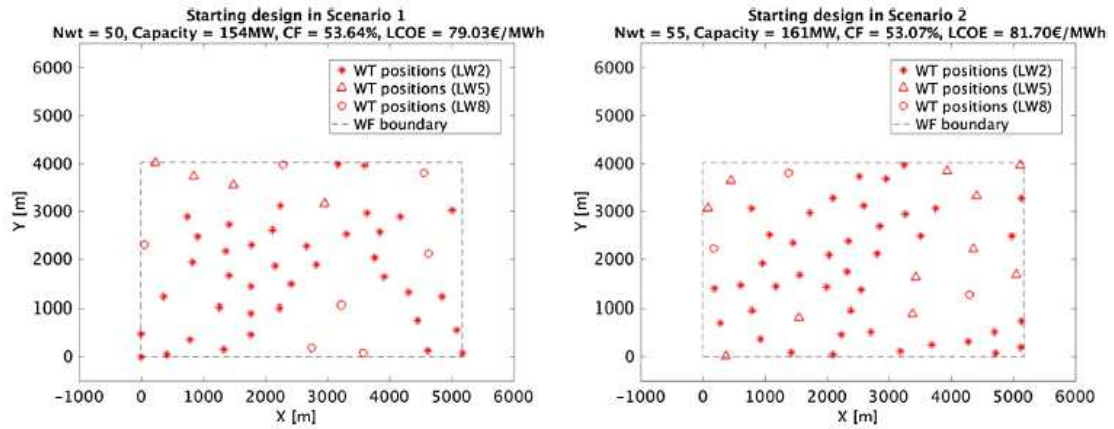


<Fig. 7> 확장된 random search algorithm⁸⁾

국내에서 이 분야의 연구로는 문원식(11)은 전력망 구성은 풍력발전단지의 풍력터빈이 나열되는 조합에 따라 다양한 구성이 생성될 수 있도록 Open-multiple traveling salesman problem (omTSP) 알고리즘을 적용하였고, 풍력터빈 용량과 전력망 구조에 따른 해저케이블 선종을 선택할 수 있도록 하여 전력망 구성에 대한 가중치로 활용하였다.

7. 최적화 결과

풍력단지 최적화설계에서 광범위하게 사용된 알고리즘들과 마찬가지로 확장된 RS 알고리즘은 메타휴리스틱(metaheuristics) 군에 속한다. 초기해의 영향을 알기위해 최적화는 비균일 설계시나리오를 수행하는 임의적 설계(PR)로부터 계산하였다. <그림 8>에 두 개의 초기설계를 나타낸다.



<그림 8> 2개의 random designs as starting solutions for: (left) Scenario 1, (right) Scenario 2.⁸⁾

다중유형풍력터빈에서 계산한 설계의 LCOE의 통계는 <표 4>에 요약하였다.

<표 4> 달성한 설계의 LCOE.⁸⁾

Best Baseline		LCOE[€/MWh]							
		Scenario1		Scenario2		Scenario3		Scenario4	
		75.66(B3)		74.67(B3)		78.07(B1)			
		1type	3type	1type	3type	1type	3type	1type	3type
From B1/RB1s(10runs)	min	81.00	80.58	85.07	74.38	77.72	77.72	72.08	72.11
	mean	81.02	80.91	85.10	75.96	77.75	77.74	72.12	72.14
	max	81.06	81.03	85.21	85.07	77.79	77.78	72.14	72.19
From B2/RB2s(10runs)	min	77.63	75.74	77.61	74.38	78.14	77.47	77.64	74.02
	mean	77.71	77.36	77.69	74.85	78.20	77.61	77.70	75.52
	max	77.77	79.01	77.74	75.39	77.79	77.72	77.75	76.58
From B3/RB3s(10runs)	min	75.39	75.42	74.40	74.47	78.14	77.51	81.36	75.81
	mean	75.45	76.05	74.47	74.66	78.20	77.91	81.41	76.22
	max	75.49	77.31	74.51	75.31	78.25	78.29	81.43	76.55
From PRs(10mm)	min	/	76.47	/	74.48	/	77.53	/	74.20
	mean	/	77.14	/	74.66	/	77.69	/	75.08
	max	/	77.88	/	74.99	/	77.81	/	76.18

네 개의 비용 시나리오 하에서 최상풍력단지 설계는 균일 선택(한 개의 터빈)와 비균일 선택(3개의 터빈)이 <그림 9>에 제시하고, 최저 허용된 용량은 152MW이다. 저 용량의 해상풍력단지는 소수의 풍력터빈을 가지고 이로 인하여 웨이크 효과는 보다 적다. 이것은 연간에너지생산을 용량과 함께 부 선형적(sub-linearly)으로 저하시켰고, 반면에 비용

모델에서 자본비용은 용량과 함께 선형적으로 저하하였다.

8. 혼합이산변수 입자군집최적화와 비교

확장된 RS의 성능은 비균일 풍력단지 최적화 설계 테스트를 위해 혼합이산변수 입자군집최적화 결과와 비교하였다. 최적화 과정동안, i 차 입자는 아래 식과 같이 이동하였다.

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1},$$

$$V_i^{t+1} = \alpha V_i^t + \beta_1 \gamma_1 (P_i - X_i^t) + \beta_2 \gamma_2 (P_g - X_i^t) + \gamma_c \gamma_3 (X_i^t - P_g) \quad (13)$$

이 식에서 X_i^t 와 V_i^t 는 i차 입자의 위치와 속도 벡터이다. α, β_1, β_2 는 입자운동을 제어하는 계수이다. γ 는 임의의 수로 0-1이다. P_i 는 i차입자에서 최상해이고, P_g 는 전모집단에서 최상해, γ_c 는 diversity preservation coefficient이다.

확장된 RS와 혼합이산변수 입자군집최적화의 중요한 차이는 풍력터빈의 수이다. 연속과 불연속적인 설계변수에 대해 혼합이산변수 입자군집최적화에서는 고정으로 가정하였고, 최적화 과정 중에 풍력터빈 수는 고정된다.

문제를 단순화하기 위해, 일정한 풍력속도 8m/s를 가정하고, 풍력단지 경계, 유용한 터빈 형, 그리고 LCOE 모델링은 이전과 동일하다. 풍력터빈 수는 20개로 고정하였다. 풍력단지 설계최적화에 사용된 제어 변수들은 <표 1>과 같다. 이들 두 개의 알고리즘의 성능<표 5>에 요약하였다.

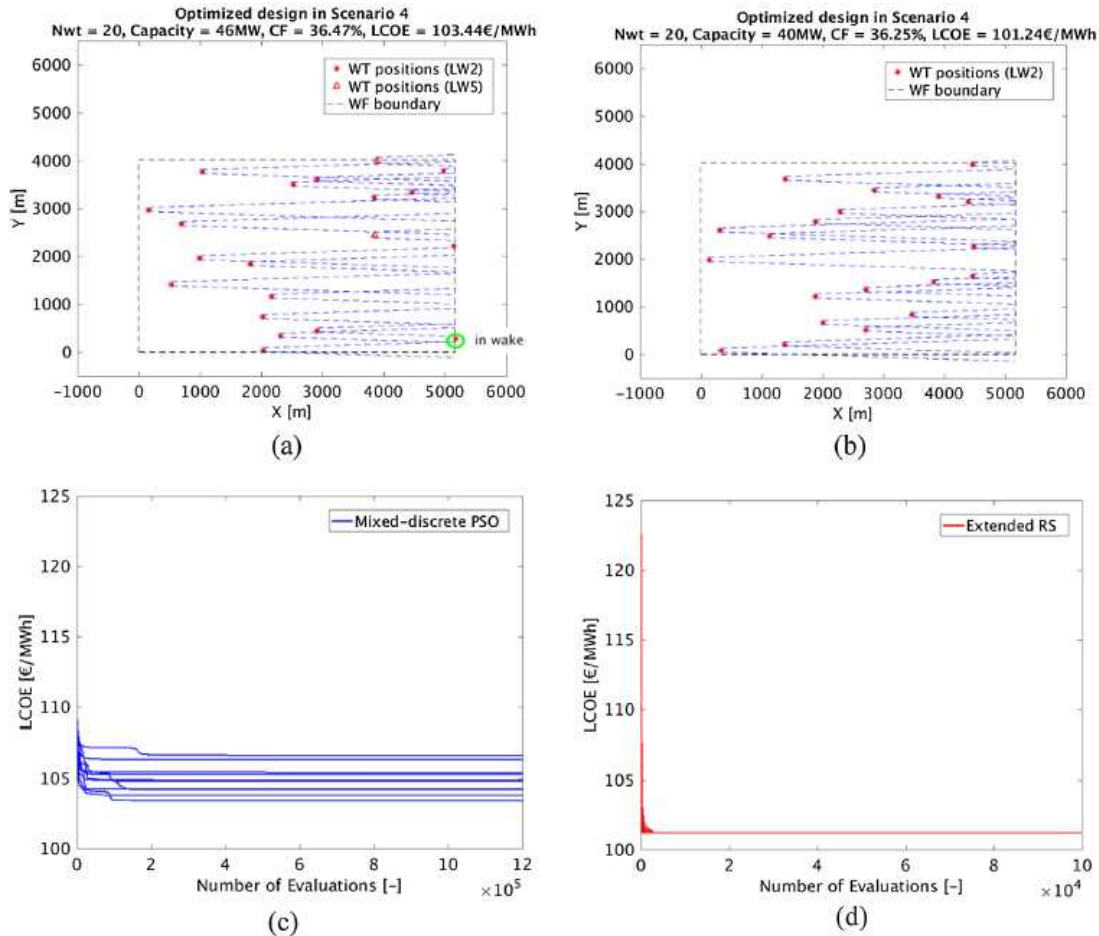
<표 5> 확장된 RS와 혼합된 이산화 PSO사이의 성능비교.⁸⁾

Scenario	LCOE[€/MWh]				
		1	2	3	4
Extended RS(10runs)	min	103.98	102.82	107.29	101.24
	mean	104.46	103.46	107.45	101.24
	max	104.96	104.24	107.66	101.24
Mxed-discriminate PSO(10runs)	min	106.56	108.23	108.00	103.44
	mean	108.08	109.01	108.75	104.93
	max	109.20	110.85	109.60	106.68

분명히 확장된 RS는 혼합이산변수 입자군집최적화보다 성능이 우수했고, 모든 시나리오에서 현저하게 낮은 LCOE 값을 얻었다. 이들 두 알고리즘을 더욱 깊이 비교하기 위하여, 가장 좋은 혼합이산변수 입자군집최적화 실행으로 최적화 설계, 확장된 RS의 실행에서 최적화 설계 그리고 시나리오 4에서 두 알고리즘 10번 실행의 수렴기록 등은 <그림 9>에 나타낸다.

(a), (b)는 20개 터빈의 각각으로부터 워크 영역의 경계이다. 확장된 RS는 풍력터빈의

위치에 의한 웨이크 효과를 피하는 최적설계를 찾는다. 반면에 혼합이산변수 입자군집 최적화는 실패한다. 확장된 RS 알고리즘이 혼합이산변수 입자군집최적화 보다 좋은 성능을 보였다.



<그림 9> 12. (a)혼합된 이산 PSO가도으로부터 최적설계와 (b) 확장된 RS의 최적가동, (c)혼합된 이산 PSO의 수렴, (d) 확장된 RS⁸⁾

9. 결론

이 보고서에서 다른 크기의 풍력터빈과 함께 해상풍력단지설계를 다루었다. 주어진 풍력단지 영역에 대한 대형풍력터빈을 사용한 최적화는 높은 용량인자를 가진 해상풍력단지를 나타내었고, 이는 높은 풍속과 낮은 웨이크효과와 결과이다.

해상풍력단지에서 다중터빈유형 풍력터빈의 사용은 다른 풍력터빈의 평균자본비용의 차이에 강하게 의존된다. 이 시나리오에서 작은 풍력터빈의 MW당 자본비용이 큰 풍력터빈보다 염가이다.

수치해석 최적화로부터, 이 수치해석은 비균일 풍력터빈 설계최적화로서 문제를 체계적으로 나타내는 것이 유익하다. 확장된 RS 등 제의된 최적화 방법은 비균일 해상풍력

단지 설계를 위한 강력한 방법이다.

이 보고서에서 Ju Feng 등(8)이 제시한 설계에 관계된 모든 수식을 모두 수록하였다. 이 결과는 연구소나 기업에서 설계관련 프로그래밍에 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 국내에 연구한 풍력단지 선정과 해상풍력발전단지 내부 전력망을 참고하였다.

<참고문헌>

1. 박미호, 고경남, 허종철, 복잡지형에서 난류강도를 고려한 풍력발전단지설계, 한국태양에너지학회 논문집 v.33 no.6 ,pp. 1 - 11 , 2013 , 1598-6411
2. 김현구, 황효정, 김주현, 고수희, 정우식, OpenWind를 이용한 풍력단지설계 사례 연구 -영덕풍력단지, 한국환경과학회지 v.19 no.9 ,pp. 1169 - 1175 , 2010 , 1225-4517.
3. 김도형, 장은영, 경남호, 김홍우, 김성완, 김창석, 해상풍력발전 단지배치에 따른 민감도 분석에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집 v.31 no.3 ,pp. 29 - 35 , 2011 , 1598-6411.
4. 송원, 김찬중, 백인수, 김현구, 국가바람지도와 상용 단지설계 프로그램을 활용한 국내 해상풍력단지 공급가능 잠재량 산정, 한국태양에너지학회 논문집 v.36 no.4 ,pp. 21 - 29 , 2016 , 1598-6411.
5. 김동욱, 송재주, 정남준, 최효열, 대규모 해상풍력발전단지 운용을 위한 SCADA 시스템 설계, 정보처리학회논문지 컴퓨터 및 통신 시스템 관련메뉴 v.1 no.3, 2012년, pp.161 - 170.
6. 김지영, 김경열, 이준신, 반응표면분석법에 의한 해상풍력터빈 최적배치 설계, 한국해양·해양공학학회논문집 제 23 권 제 2 호, pp. 163~170, 2011년 4월.
7. 김민수, 김지용, 육/해상 풍력기반 에너지생산 공정 최적 설계 및 경제성 평가,
8. Ju Feng, Wen Zhong Shen, Design optimization of offshore wind farms with multiple types of wind turbines, Applied Energy 205 (2017) 1283 - .1297.
9. 장문석, 육/해상 풍력실증연구단지조성 기획 연구, 한국신재생에너지학회 2005년도 제17회 워크샵 및 추계학술대회 2005 Nov. 11, 2005년, pp.253 - 264
10. 이기학, 전상욱, 구요천, 박경현, 이동호, 기상풍황자료 통계적 분석을 통한 한국형 해상 풍력터빈 설치지점 선정 최적화 연구, 한국신재생에너지학회 2007년도 추계학술대회
11. 문원식, 조아라, 김재철, 배인수, 윤기갑, 박상호, 최영도, 해상풍력발전단지의 전력망 구성의 최적화에 관한 연구, 2015년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2015. 7. 15 - 17