

풍력단지 출력 검증을 위한 기상탑의 최적위치 선정

오기용***, 이준신, 박준영, 이재경, 김지영

Optimal Location of Meteorological Mast for Power Curve Verification of Wind Farm

Ki-Yong Oh***, Jun-Shin Lee, Joon-Young Park, Jae-Kyung Lee and Ji-Young Kim

Abstract

The performance test of a wind turbine in a wind farm is generally carried out by the owner to verify the power curve of the wind turbine given by the turbine manufacturer. The international electro-technical commission provides the IEC 61400-12-1 standard on "Power performance measurements of electricity producing wind turbines". By using this code, one can easily find the suitable met-mast (meteorological mast) location for the wind data whether a wind farm is potential or already built. In this paper, the valid sectors for wind turbines installed in the HanKyoung wind farm, south-west in Jeju island are analyzed on the basis of the code by considering the wind farm layout. Among these sectors, the optimal met-mast location is presented for the power curve verification of the wind farm.

Key words

Wind Farm(풍력 단지), Power Curve(출력 곡선), Annual Energy Production(연간 에너지 생산량), Meteorological Mast(기상탑), IEC 61400-12-1

(접수일 2009. 6. 30, 게재확정일 2009. 7. 7)

*** 한전 전력연구원

■ E-mail : okyer@kepri.re.kr ■ Tel : (042)865-5376 ■ Fax : (042)865-5202

Nomenclature

L : distance between the wind turbine and the meteorological mast, m

L_e : distance between the wind turbine or the meteorological mast and an obstacle, m

L_n : distance between the wind turbine or the meteorological mast and a neighbouring and operating wind turbine, m

l_h : height of obstacle, m

l_w : width of obstacle, m

D : rotor diameter, m

D_e : equivalent rotor diameter, m

D_n : rotor diameter of neighbouring and operating wind turbine, m

1. 서론

오늘날 세계 각국은 에너지를 무기화하는 지정학적 관계 개선, 지구온난화 극복 그리고 기후변화협약 이행을 위해 신재생에너지 분야에 많은 투자와 관심을 기울이고 있으며 이중 경제성이 기존 전력원에 근접(Grid parity)하고 기술이 안정화되어 있는 풍력발전을 점점 확대하고 있는 실정이다.

그린에너지 산업육성이 중요 국가정책인 우리 정부도 제 1차 국가에너지기본계획⁽¹⁾을 통해 2030년까지 신재생에너지 비율을 11% 이상으로 유지한다는 강력한 의지를 표명하였다. 이를 위하여 그동안 시행해온 발전차액지원제(Feed-In Tariff, FIT)를 폐지하고 2013년부터 신재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standard, RPS)를 시행할 예정이다. 신재생에너지 의무할당제 시행 시 에너지공급 사업자는 전력생산량의 3% 이상을 직접 신재생에너지 사업을 통해 공급하거나 타사업자의 실적(인증서, REC)을 사들이는 방식으로 의무를 이행하여야 한다. 이를 위하여 한전 그룹사에서는 7조원 이상의 설비투자가 필요할 것으로 예상되며, 외부에서 REC를 구매하는 경우에도 한 해에 9000억 원이 소요될 것으로 예상된다.

상기 언급한 국가 제도의 변화로 신재생에너지 중 가장 경제성이 높은 풍력발전에 발전사들은 깊은 관심을 표명하고 있으며, 풍력발전단지 입지선점을 위해 지자체와 MOU를 체결하는 등 경쟁적으로 풍력사업에 참여하고자 노력하고 있다. 특히, 제주도는 국내에서 유일하게 풍향 등급(Wind Class)이 6 이상⁽²⁾인 풍력발전단지 최적 유망지로 다수의 발전사업자들이 제주도에 풍력발전단지 건설을 추진하고 있다.

한국남부발전(주)은 2004년 제주도 한경면에 NEG Micon 사(덴마크)의 1.5MW 풍력발전기 4기를 설치하여 한경풍력단지 1단계를 준공한 후, 2008년 Vestas(덴마크)사의 3MW 풍력발전기 5기를 2단계 설비로 추가하여 총 21MW 용량의 한경풍력발전단지를 완공하였다.

한경풍력발전단지 운영자인 한국남부발전(주)은 단지 내에 설치되어 운영되고 있는 풍력터빈의 성능 검증을 위하여 풍력터빈 제작사가 제공하는 출력 곡선(Power Curve)이 실제 풍력터빈에서 생산되는 발전량과 일치하는지를 검증하고자 한다. 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)는 이러한 풍력터빈의 성능 검증을 위하

여 국제 표준 IEC 61400-12-1을 발간하였다. IEC 61400-12-1에는 각 풍력터빈 별 후류효과(Wake Effect)를 고려한 측정대상 풍력터빈의 출력측정 유효영역 선정방법, 센서의 측정위치 및 보정방법, 출력 측정 절차, 출력곡선 작성, 연간 발전량(Annual Energy Production, AEP) 계산 및 불확도 분석 방법 등이 제시되어 있다. 지금까지 건설된 국내 풍력발전단지는 외국 풍력관련 업체에서 설계 및 검증되었기 때문에 이와 같은 출력검증 및 이를 위한 최적기상탑 위치 선정에 관한 체계적인 연구가 수행된 적이 없었다. 본 연구에서는 IEC 61400-12-1에 근거하여 풍력단지 배치에 따른 각 풍력터빈의 출력측정 가능 유효영역을 조사하였으며 이를 근거로 기상탑의 최적 위치를 제시하였다.

2. 풍력터빈별 유효영역 분석

IEC 61400-12-1에는 인접한 풍력터빈, 풍향 측정을 위한 기상탑 및 높이가 있는 건물 등이 후류 효과를 일으키기 때문에 풍력터빈 출력검증을 위한 성능시험 시 고려해야 할 대상으로 제시되어 있다⁽³⁾.

각 풍력터빈의 배제영역(Exclusive Sector)을 구하기 위한 계산식은 식 (1)과 같으며, 그 영역은 측정 대상인 풍력터빈과 그에 인접한 풍력터빈 사이의 거리 및 인접 풍력터빈의 블레이드 지름에 의해 변화한다. 후류효과를 발생시키는 요소가 인접한 풍력터빈 및 큰 건물인 경우, 식 (1)을 통해 산출된 배제영역 α 는 대상 풍력터빈을 기준으로 장애물 방향으로 풍력터빈 출력측정 유효영역(Valid Sector)에서 배제해야 한다. 또한 후류효과를 발생시키는 요소가 기상탑인 경우에는, 대상 풍력터빈을 기준으로 기상탑의 반대 방향으로 α 영역만큼 배제해야 한다. 식 (1)을 사용하여 배제영역 계산 시 기상탑 및 주변 풍력터빈의 후류효과에 기인한 배제 영역 산출시 식 (1)에 D_n, L_n 을 대입하며, 기타 장애물 후류효과에 기인한 배제 영역 산출 시 D_e, L_e 를 대입한다. D_e 계산식은 식 (2)에 도시하였다. Fig. 1에는 이와 같이 산출된 유효영역 및 배제영역을 도시하였다.

$$\begin{aligned}
 \alpha &= 1.3 \arctan(2.5D_e / L_e + 0.15) + 10 \\
 &\text{or } 1.3 \arctan(2.5D_n / L_n + 0.15) + 10 \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$D_e = 2I_h I_w / (I_h + I_w) \quad (2)$$

Fig. 2는 제주시 한경면에 설치되어 있는 풍력터빈들의 설치 위치를 도시하였다. 한경면에는 남부발전에서 1단계 사업으로 설치한 NM72C-1500 4호기(HK I 1~4), 2단계 사업으

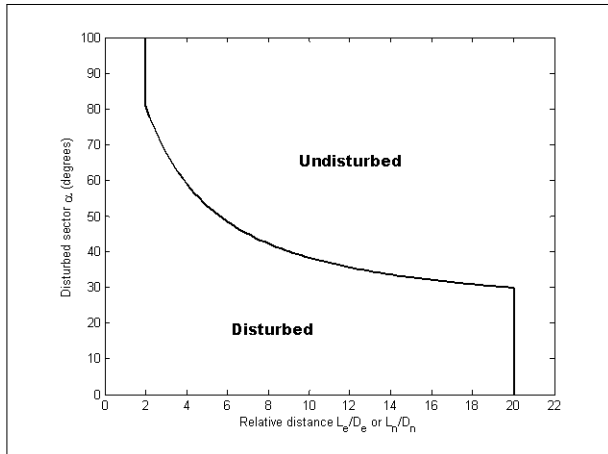


Fig. 1 Sectors to exclude due to wakes of neighbouring and operating wind turbines and significant obstacles

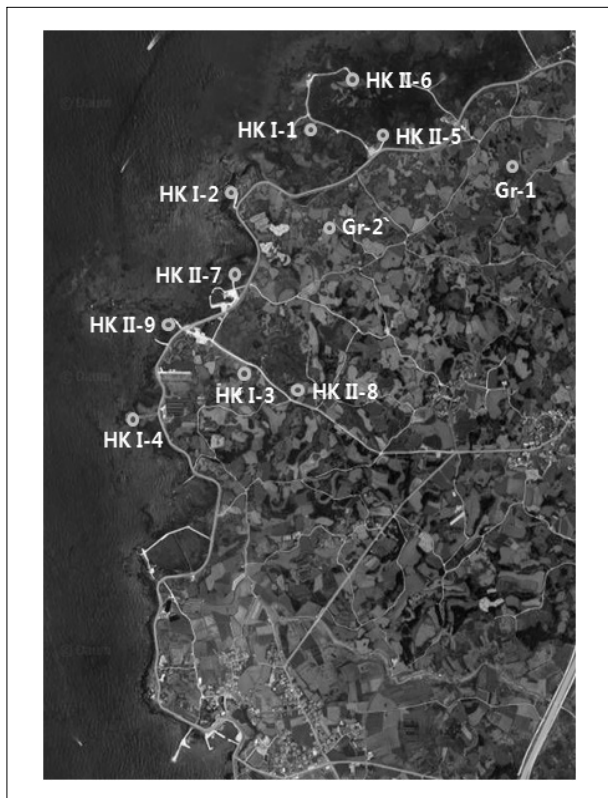


Fig. 2 Location of wind turbines at HanKyoung

로 설치한 V90-3000 5호기(HK II 5~9) 및 제주도가 운영하는 그린빌리지 신창풍력발전단지(Gr-1~2) V52-850 2호기 등 총 11개의 풍력터빈이 설치되어 운영되고 있다. 한경풍력 2단계로 설치된 풍력터빈 주위에는 많은 풍력터빈이 설치되어 있기 때문에 풍력터빈 성능 검증을 위해서는 각 풍력터빈의 출력측정 유효영역을 조사하는 것이 필수적이며, 각 풍력터빈의 출력측정 유효영역 조사를 통하여 기상탑의 최적 위치 선정이 가능하다.

식 (1)을 사용하여 한경풍력 2단계 풍력터빈 각각의 출력측정 유효영역을 선정하기 위해서는 각 풍력발전기의 상대위치 값이 필요하다. 풍력발전기의 위치 측정에는 GPS를 사용하였으며 그 결과 값을 Table 1에 도시하였다. 측정기기는 GARMIN Etrex VISTA C이며 도시된 좌표값은 UTM(Universal Transverse Mercator) 좌표계 52S를 기준으로 하였다. 한경면에는 Fig. 2에 도시된 것과 같이 풍력터빈에 영향을 줄만한 거대한 건물이 존재하지 않아 본 연구에서는 인접한 터빈만을 배제영역 산출 시 고려해야 할 장애물로 선정하였다.

Fig. 3에는 식 (1) 및 Table 1의 데이터를 근거로 산출한 한경풍력 5호기의 배제영역을 도시하였다. 화살표는 인근 풍력터빈에 기인한 후류영향을 받는 주방향을 나타내며 화살표 측면에는 풍력 터빈 명칭 및 각도를 표기하였다. 이 그림으로부터 가장 멀리 위치한 4호기에 기인한 배제지역(a)은 0으로 4호기에 기인한 후류영향은 존재하지 않는 것을 관찰할 수 있으며 다른 풍력터빈들은 후류효과 때문에 배제지역이 존재하는 것을 관찰할 수 있다.

Table 1. Coordinates of wind turbines

구분	중심좌표(UTM 52S)		기종	
	N	E		
한경 풍력 1단계	1호기	3692965	236521	NM72C -1500
	2호기	3692737	236578	
	3호기	3692072	236249	
	4호기	3691899	236285	
한경 풍력 2단계	5호기	3692940	235849	V90 -3000
	6호기	3693161	236852	
	7호기	3692430	236741	
	8호기	3692001	236257	
그린 빌리지	1호기	3692807	235993	V52 -850
	2호기	3692588	237368	

한경풍력 5호기는 인근 풍력터빈에 의해 영향을 받는 지역이 $0^{\circ}\sim 9^{\circ}$, $85^{\circ}\sim 123^{\circ}$ 및 $181^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 로 출력 검증을 위한 영역이 그리 많지 않음을 관찰할 수 있다.

Fig. 4에는 한경풍력 6호기의 배제영역을 도시하였다. 6호기는 4호기와의 상대 거리가 5호기보다 더욱 멀기 때문에 4호기에 기인한 후류영향은 존재하지 않으나 다른 풍력터빈에 의한 후류효과가 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 특히, 6호기는 제일 북쪽에 위치하여 인근 풍력터빈의 상대 위치가 남쪽에

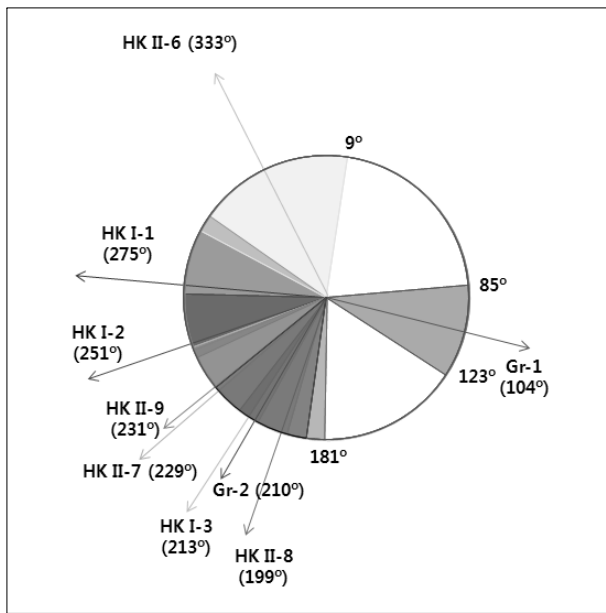


Fig. 3 Exclusive sector of HK II-5 (HK I-4: $\alpha=0$)

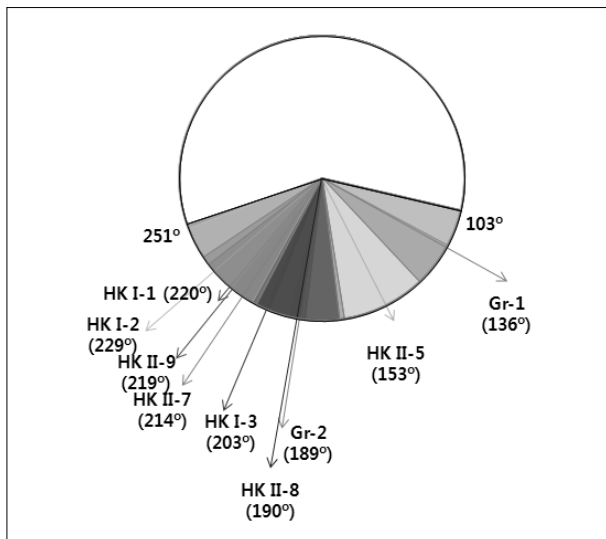


Fig. 4 Exclusive sector of HK II-6 (HK I-4: $\alpha=0$)

집중되어 있으며, 배제영역의 중복이 많아 측정 가능 영역이 넓은 것을 관찰할 수 있다. 6호기의 배제지역은 $103^{\circ}\sim 251^{\circ}$ 이다.

Fig. 5에는 한경풍력 7호기의 배제영역을 도시하였다. 7호기는 가장 멀리 떨어진 그린빌리지 1호기에 의한 후류효과는 존재하지 않으나, 풍력단지 중앙에 위치하여 다양한 방향으로부터 인근 풍력터빈의 후류효과에 의한 영향을 받기 때문에 출력 검증 시 이러한 영역을 제외시켜야 한다. 계산된 배제영역은 $0^{\circ}\sim 89^{\circ}$, $123^{\circ}\sim 266^{\circ}$ 및 $330^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 이다.

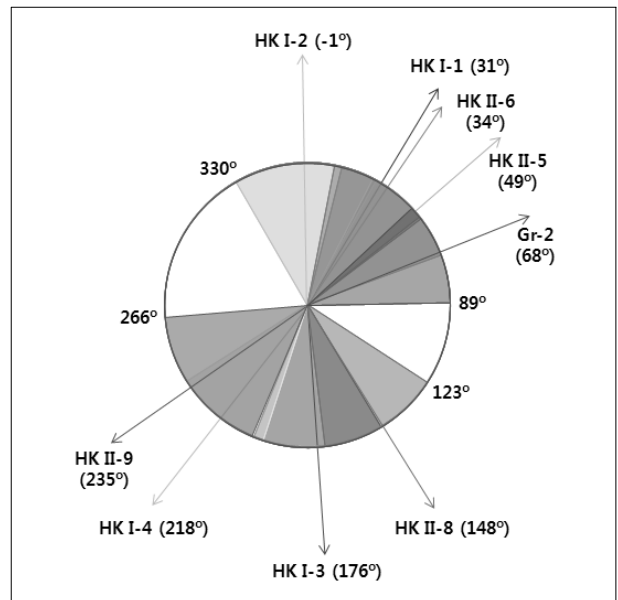


Fig. 5 Exclusive sector of HK II-7 (Gr-1: $\alpha=0$)

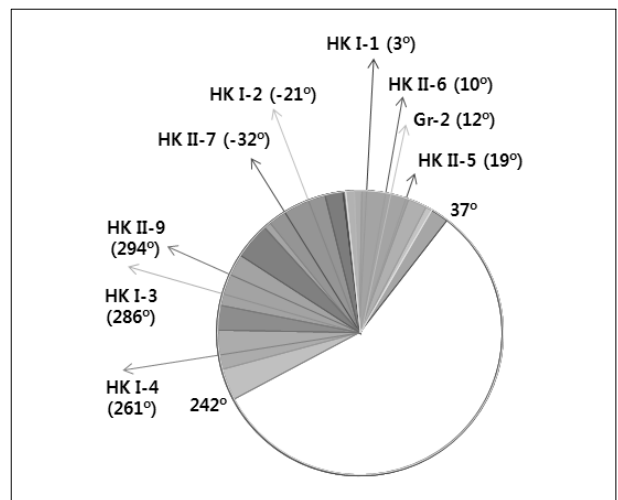


Fig. 6 Exclusive sector of HK II-8 (Gr-1: $\alpha=0$)

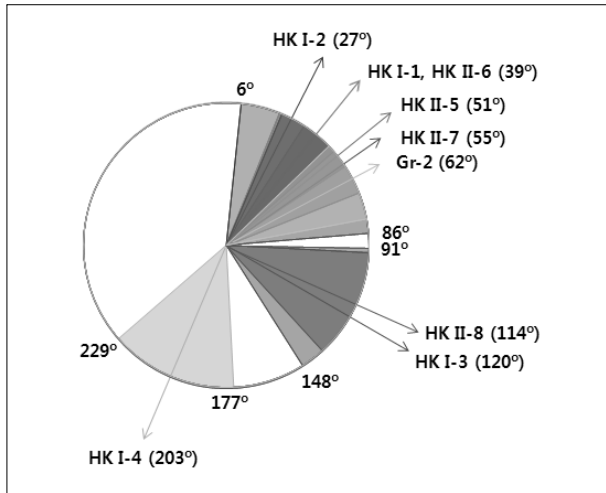


Fig. 7 Exclusive sector of HK II-9 (Gr-1: $\alpha=0$)

Fig. 6에는 한경풍력 8호기의 배제영역을 도시하였다. 8호기도 7호기와 동일하게 상대적으로 멀리 위치한 그린빌리지 1호기에 의한 후류영향은 존재하지 않으며 남쪽에 위치하여 인근 풍력터빈의 배제영역이 다수 중복됨을 관찰할 수 있다. 8호기의 배제영역은 $0^{\circ}\sim 37^{\circ}$, $242^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 이다.

Fig. 7에는 한경풍력 9호기의 배제영역을 도시하였다. 9호기도 7, 8호기와 동일하게 그린빌리지 1호기 후류영향은 받지 않는 것을 관찰 할 수 있으나, 3, 4, 7호기와 근접하여 배제영역이 적지 않아 이로 인해 다양한 방향을 배제영역으로 제외시켜야 하는 것을 관찰 할 수 있다. 계산된 배제영역은 $6^{\circ}\sim 86^{\circ}$, $91^{\circ}\sim 148^{\circ}$, $177^{\circ}\sim 229^{\circ}$ 이다.

3. 최적위치 선정

Table 2에는 2장에서 분석한 결과들을 토대로 한경풍력 2단계 각 호기별 유효영역 및 배제영역의 크기를 도시하였다. 외각에 위치한 6호기와 8호기는 측정가능 영역이 상대적으로 넓으며 가운데 위치한 7호기는 다양한 방향으로부터 인근 풍력터빈의 영향을 받기 때문에 유효영역이 가장 적은 것을 관찰 할 수 있다.

IEC 61400-12-1에서는 출력검증을 위한 데이터베이스를 구축 시, 출력측정 풍속범위로는 ‘시동 풍속(cut-in)의 1m/s 이하 풍속부터 풍력발전기 정격 출력의 85% 출력을 발생시키

Table 2. Valid & exclusive sectors

	Valid Sector	Exclusive Sector
HK II-5	134°	226°
HK II-6	212°	148°
HK II-7	98°	262°
HK II-8	205°	155°
HK II-9	177°	189°

는 풍속의 1.5배 풍속’ 혹은 ‘시동 풍속의 1m/s 이하 풍속부터 측정된 연간발전량이 외삽 연간발전량의 95%와 동일하거나 그 이상 되는 풍속’을 제시한다. 데이터 측정 간격은 0.5m/s, 각 구간별로 최소 30분 이상의 측정데이터를 확보하고 전체 측정기간은 최소 180시간 이상의 유효측정 데이터를 포함해야 한다. 본 논문에서는 이러한 조건을 만족시키기 위하여 유효영역이 가장 넓은 6호기를 선정하였을 때 데이터베이스 구축 기간을 가장 단축시킬 수 있을 것으로 판단하여 출력 검증용 터빈으로 6호기를 최종적으로 선정하였다.

IEC 61400-12-1은 기상탑 설치 가능 위치를 선정된 성능 검증용 풍력터빈으로부터 반경 2D~4D 사이로 제시하고 있으며, 최적위치는 반경 2.5D로 선정하고 있다. Fig. 8에는 한경풍력 6호기로부터 기상탑 설치 가능 반경 2D 및 4D를 점선으로 표시하였으며, 이 두 원 사이의 영역이 기상탑 설치 가능 지역이다. 그리고 최적 설치 위치인 반경 2.5D는 실선으로 도시하였다. 또한, 2장에서 계산한 6호기의 배제영역 ($103^{\circ}\sim 251^{\circ}$)을 추가로 도시하였다.

본 연구에서는 6호기로부터 기상탑 설치 최적 위치인 2.5D 반경 위에 설치가능 위치가 존재하기 때문에 이 지역을 우선 후보지 영역으로 고려하였다. 거리가 2.5D인 경우 D/L 값은 0.25이며 이 값을 식 (1)에 대입하면 계산되는 배제영역은 74° 이다. 즉, 기상탑의 반대 방향으로 74° 의 영역을 배제영역으로 선정해야하기 때문에 출력검증 시 기상탑 설치위치에 따른 배제영역도 함께 고려해야한다. 그러므로 기상탑 설치로 발생하는 배제영역이 다른 장애물에 의해 발생하는 배제영역과 중복되도록 배치할 경우 출력 유효영역이 최대가 되므로 출력 곡선 작성에 필요한 데이터베이스 구축이 용이하게 된다.

만약 인접한 터빈의 후류영향으로 인해 Fig. 8에서 출력측정 배제지역으로 선정된 $103^{\circ}\sim 251^{\circ}$ 지역에 기상탑을 설치하는 경우, 측정 유효영역이 배제영역과 상당 부분 겹치게 되며

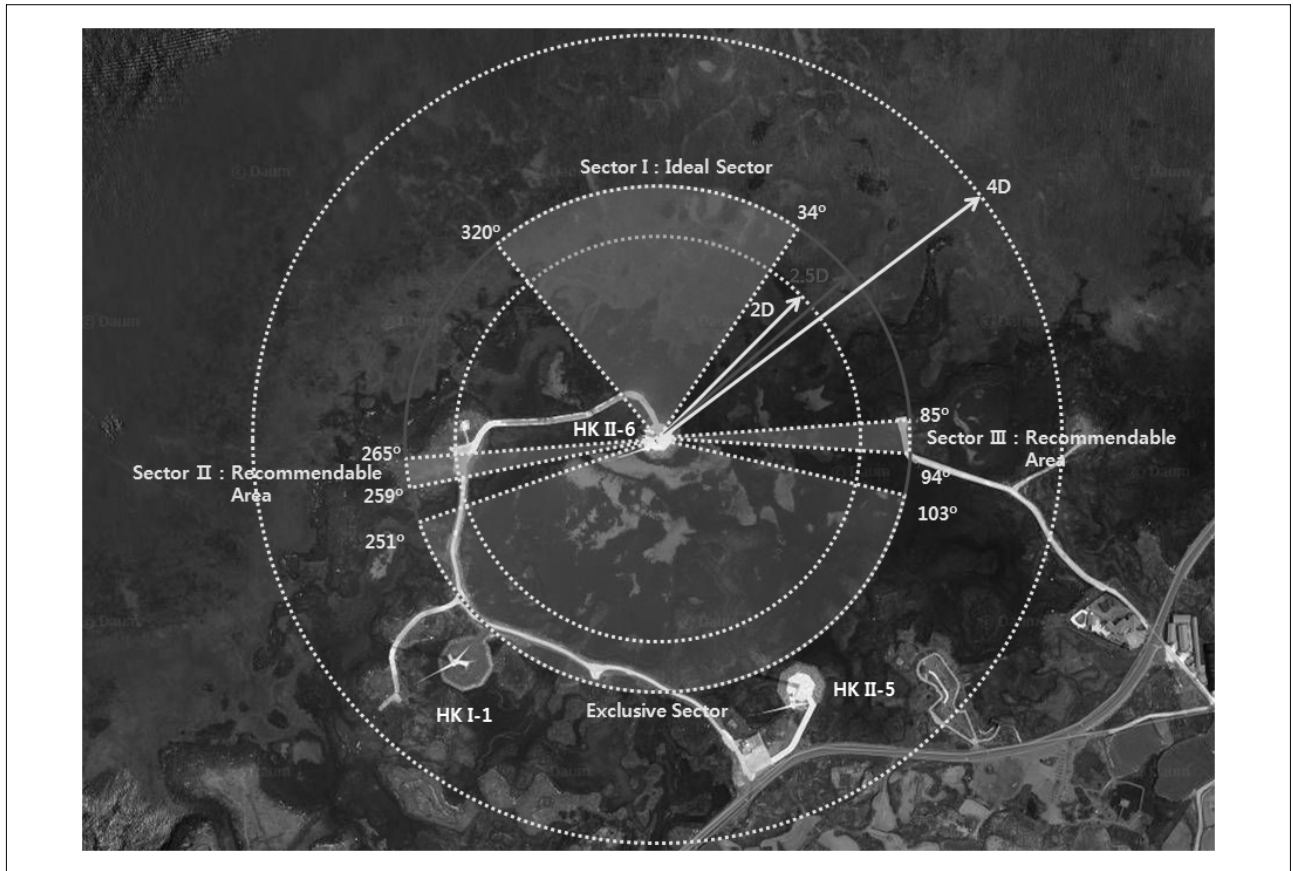


Fig. 8 Optimal location of meteorological mast

기상탑 후류효과로 인하여 주변에 인접한 풍력터빈 1, 5호기에 출력 손실이 발생할 가능성이 존재하기 때문에 103°~251° 지역에는 기상탑 설치를 지양해야 한다.

Fig. 8을 면밀히 분석해보면, Sector I 영역은 기상탑 설치 시 발생하는 배제영역이 기존의 배제영역과 100% 중첩되어 추가적인 배제영역이 발생하지 않으므로 기상탑 설치의 최적 후보 위치라고 할 수 있다. 그러나 그림에서 관찰 할 수 있듯이 이 영역은 해상이기 때문에, 기상탑 설치 시 해상에 기상탑 하부 기초 구조물을 추가로 설치하여야 하며 이를 위한 추가 비용이 발생한다. 다시 말하자면, 비용적인 측면을 크게 고려하지 않는다면 이 지역에 기상탑을 설치하는 것이 출력 검증에 가장 최적이지만, 경제적인 측면에서 평가할 경우 해상기초구조물 구조의 설치에는 상당한 비용이 소요되므로 이 영역은 기상탑 설치의 최적 위치로는 적합하지 않다. 그러므로 경제성을 함께 고려하였을 때 기상탑은 해상에 설치되는 것보다는 육지에 설치되는 것이 여러 가지 면에서 적합하다. 이

러한 관점으로부터 6호기에서 반경 2.5D 거리에 있는 지역 중에서 추가적인 배제영역 발생이 최소화되는 영역을 분석해보면 Fig. 8에 도시된 Sector II 및 Sector III 영역이 구해진다.

Fig. 9는 기상탑을 Sector II에 설치할 경우 추가되는 배제영역을 포함한 6호기 출력측정 배제영역을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 42°~112°영역이 기존 배제영역에 추가되며, 측정유효영역은 0°~42° 및 251°~360°로 총 151° 영역이 측정가능 영역이다.

마찬가지로, Fig. 10에는 Sector III 지역에 기상탑을 설치할 경우 추가되는 배제영역을 포함한 6호기의 출력측정 배제영역을 도시하였다. 228°~302° 영역이 기존 배제영역에 추가되며, 측정 유효영역은 0°~103° 및 302°~360°로 총 161° 영역이 측정가능 영역이다. Fig. 9 및 Fig. 10에 도시된 영역은 설치 가능영역 전체를 고려하여 산출되었기 때문에 실제 정확한 위치를 한 곳으로 선정하고자 할 경우 측정 가능영역은 증가된다.

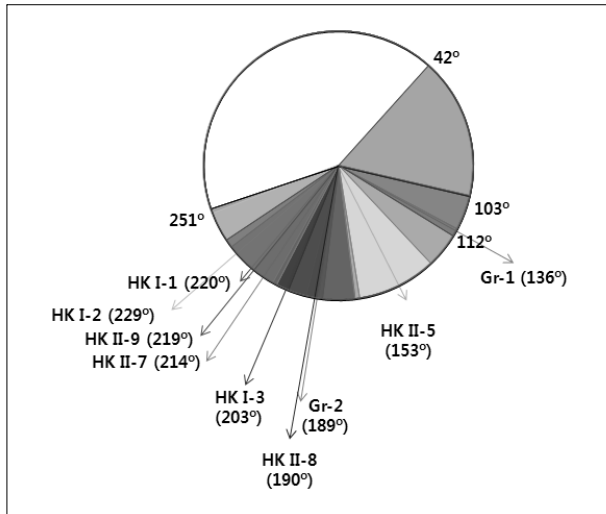


Fig. 9 Exclusive sector of HK II-6 considering meteorological mast location (Sector II)

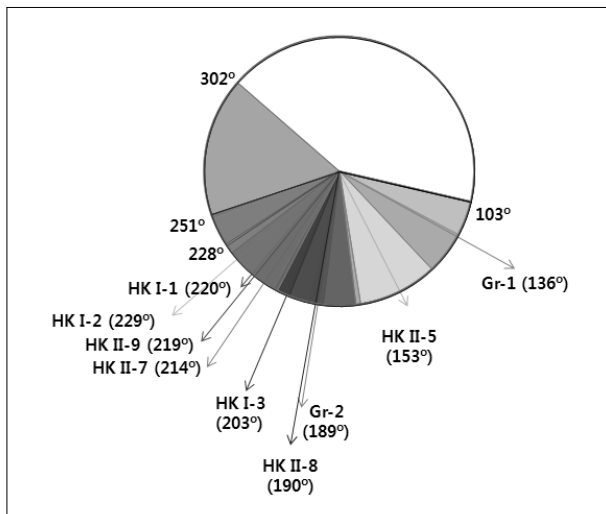


Fig. 10 Exclusive sector of HK II-6 considering meteorological mast location (Sector III)

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전단지 건설 후 반드시 실시되어야 하는 풍력발전단지 출력성능 검증을 위하여 한경풍력 2단계 5개의 풍력터빈에 대하여 각 풍력터빈별 출력측정 가능 영역을 조사하였다. 이를 기준으로 출력곡선 산출이 가장 유리한 풍력터빈 및 최적 기상탑 위치를 제시하였다. 추후 정확한 출력곡선 산출을 위해서는 제시된 풍력터빈 인근에 기상탑을 설치하여 풍향, 전력생산량, 밀도 등의 다양한 데이터를 측정해야 한다. 측정된 다양한 데이터로부터 출력곡선, 연간발전량, 이용률, 불확도 분석 등의 계산이 가능하며 이를 통하여 풍력터빈의 성능 검증, 향후 발전량 예측 및 풍력발전단지의 경제성을 검토 할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 신·재생에너지기술개발사업(과제명: 국내 해역의 중형 해상풍력발전 플랜트 타당성 조사 연구)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 국가에너지위원회, 2008, "제1차 국가에너지기본계획".
- [2] Archer, C. L., and Jacobson, M. Z., 2005, "Evaluation of Global Wind Power", Journal of Geophysical Research, Vol. 110, D12110.
- [3] IEC, 2005, "61400-12-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines".

오 기 용



2005년 한양대학교 기계공학부 공학사
2006년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사

현재 한전 전력연구원 녹색성장연구소 연구원
(E-mail : okyer@kepri.re.kr)

이 준 신



1985년 서울대학교 농공(기계전공)학과 공학사
1988년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사
1995년 한국과학기술원 기계공학과 공학박사

현재 한전 전력연구원 녹색성장연구소 책임연구원
(E-mail : ljs@kepri.re.kr)

박 준 영



1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
1997년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사
1989년 한국과학기술원 기계공학과 공학박사

현재 한전 전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
(E-mail : asura@kepri.re.kr)

이 재 경



2004년 경북대학교 전자전기공학과 공학사
2006년 한국과학기술원 전자전산학과 공학석사

현재 한전 전력연구원 녹색성장연구소 연구원
(E-mail : jklee78@kepri.re.kr)

김 지 영



2003년 경북대학교 토목공학과 공학사
2005년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사

현재 한전 전력연구원 녹색성장연구소 선임보연구원
(E-mail : jykim77@kepri.re.kr)