ORIGINAL ARTICLE

GIS 및 수치지도를 활용한 육상풍력발전단지 적지분석

박재형, 이화운*, 김동혁¹⁾, 김현구²⁾, 김태욱³⁾

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경연구원, ²⁾한국에너지기술연구원, ³⁾한국수력원자력 중앙연구원

Suitability Analysis of Onshore Wind Farm using GIS Program and Digital maps

Jae-Hyeong Park, Hwa-Woon Lee*, Dong-Hyuk Kim¹⁾, Hyun-Goo Kim²⁾, Tae-Wook Kim³⁾

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹⁾*Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

²⁾*Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*

³⁾*Korea Hydro & Nuclear Power Central Research Institute, Daejeon 305-343, Korea*

Abstract

In order to decide the location of appropriate onshore wind farm with higher potential wind energy, several decision processes using Geographic Information System (GIS) including Digital Elevation Map (DEM) were proposed and we also estimated the wind resources through the proposed decision process. Decision process consists with three steps.

First step is excluding inappropriate location geographically using DEM data including SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) terrain data, landslide, land-use, roadway, and forest road data. And the second step of decision process is consideration of the difficulty caused by the natural environmental problem. This step is carried out using ECVAM (Environmental Conservation Value Assessment Map) data. And final step is determination of the most suitable location through the Moving Suitability Identification Method (MSIM) based on the moving potentially estimated wind resources area. Proposed decision process was applied over the Korean Peninsula.

Wind resource potential estimated by the first and the second step is cases shows 35.09 GW and 7.17 GW, respectively, and the total evaluated energy from the all proposed step were 0.43 GW and 1.87 GW for the 3 km and 1.5 km geographical grid size, respectively.

Key words : Onshore wind farm, GIS, Excluded analysis, Suitability analysis

1. 서론

풍력발전은 탄소배출이 전혀 없는 환경 친화적 무공해 청정에너지로, 다양한 신재생에너지 중 가장 경제성

이 높다고 알려져 있다(REN21, 2013). “제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2009~2030)” (Ministry of Knowledge Economy, 2008)에서는 2030년까지 신재생에너지 중 보급률 11 % 달성과 16.6 GW

Received 2 October, 2014; Revised 3 November, 2014;

Accepted 11 November, 2014

*Corresponding author: Hwa-Woon Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-583-2651
E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(육상 4.23 GW, 해상 12.37 GW)의 발전용량을 목표로 하고 있으며, 이에 맞춰 국내풍력발전시장은 2012년에는 18.8 % 2013년에는 16.3 %의 성장을 이루고 있다 (Korea Wind Energy Introduction Association). 하지만 국내 풍력발전보급량은 총 591.3 MW(2014년 3월 기준)로 보급목표달성을 위해서 풍력발전단지 개발을 더욱 활발하게 추진해야 하나 진행이 원활하지 못하다. 현재 인 · 허가가 진행 중인 지역 및 허가된 지역이 환경부와 산림청의 환경규제 및 제약에 의해 진행되지 못하고 있으며, 생태계 파괴 등의 문제로 인한 환경단체들의 반발 역시 풍력발전단지를 건설하는데 방해가 되고 있다. 또한 이미 설치되었던 일부 풍력발전단지는 운영효율이 30 % 이하로 효율성이 떨어지는 것으로 보고되고 있어, 풍력발전단지 건설 시 정확한 풍황 파악과 환경파괴를 최소화 할 수 있는 지역에 건설하는 것이 매우 중요하다.

하지만 단지 건설을 위해 전국의 풍황 및 환경적인 문제 상황을 실측 · 조사 하는 것이 불가능하므로, 대안으로 GIS 프로그램 및 수치지도를 활용한 적지분석연구가 타당하다. 유사연구로 작물재배지, 천변저류지, 도시 근린공원 및 폐기물 매립지 등 다양한 분야에서 활용되어 적지분석에 지표로 사용되고 있으며(Kim 등, 2011; Ha와 Lee, 2006; Hong과 Park, 2003; Lee 등, 2000), Kim 등(2013a)의 연구에서는 녹색성장과 환경규제를 국토환경성평가지도 활용으로 환경규제 시나리오에 따른 육상풍력자원 잠재량을, Park 등(2010)의 연구에서

는 지형요인 및 기후요인을 고려하여 풍력자원 잠재량을 산출하는 등 활발하게 사용되고 있다. 하지만 신재생 에너지의 경우 에너지의 양 그리고 단지건설을 위한 지리적인 영향과 환경적인 영향 및 단지용량 등을 고려해야 하기 때문에 풍력발전단지 적지 분석에 필요한 복합적인 요소를 다각도로 고려하는데 한계를 보이며, 선행 연구는 잠재량 산정에 편중되어 있어 실질적으로 개발 가능한 발전단지 선정에 대한 분석이 부족하다.

따라서 본 연구에서는 GIS 프로그램 및 수치지도를 이용하여 풍력자원과 지리 · 환경적 제약조건 및 단지용량을 고려한 잠재량을 재산정하고 육상풍력발전단지 적지를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 배제분석

본 연구에서는 육상풍력 가이드라인(Korea Environment Institute, 2008)을 적용해 입지선정에 영향을 미치는 요소를 기술적 인자, 지리적 인자, 생태환경적 인자로 분류하였다. 발전량에 직접적인 영향을 미치는 풍력자원을 기술적 인자로 분류하였으며 경사도, 산사태 위험지도, 토지피복도, 도로 및 임도망 자료는 단지 설치에 영향을 미치는 지리적 인자, 그리고 생태환경적 인자는 국토환경성평가지도를 사용해 생태계가 보존되어야 할 지역을 배제분석 하였다. 배제분석에 사용된 자료의 형태 및 해상도는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 적지분석을 위한 배제분석흐름을 나타낸 것

Fig. 1. Exclusion analysis flow chart in this study.

Table 1. Data format and resolution of digital maps

Data	Data Format	Resolution	Reference
Wind resource map	Raster	3 km	Korea Institute of Energy Research
SRTM (slope)	Raster	90 m	U. S. National Geospatial-Intelligence
Landslide	Raster	5 m	Korea Forest Service
Land use	Raster	5 m	Ministry of Environment
Road & Forest road	Polygon	-	Ministry of Land, Infrastructure and Transport & Korea Forest Service
ECVAM	Raster	10 m	Ministry of Environment

으로 풍력자원지도에 경사도, 산사태 위험지도, 토지피복도, 도로 및 임도망도 자료를 활용해 지리적 배제분석(Case I)을 하였으며, 지리적 배제분석 및 국토환경성평가지도도를 활용한 생태환경적 배제분석(Case II)을 하였다.

2.1.1. 기술적 배제분석

분석지역의 풍력자원량 및 발전효율성을 파악하기 위해 한국에너지기술연구원(Korea Institute of Energy Research, KIER)에서 제작한 풍력자원지도를 사용하여 기술적 배제분석을 수행하였다. 사용된 중해상도 풍력자원지도는 2005년부터 2007년까지 3년간 고도 78 m의 1시간 평균풍속자료이며, 도메인은 33.055°N, 124.9723°E부터 38.3124°N, 130.4163°E까지의 크기로 한반도 남한의 육상 및 해상자료가 포함되어있다. 또한 수평해상도 및 수평격자는 각각 3 km, 184 × 157 개이다.

풍력발전단지의 경제성을 고려하기 위해 International Energy Studies(2011)의 풍력등급을 사용하였으며, 각

고도에 따른 풍력등급은 Table 2에 나타내었다. Lee 등(2009)의 연구에 따르면 3 km 한반도 풍력자원지도의 경우 풍속을 과대모의 하는 것으로 나타나고 있어, 풍력등급이 3등급 이상 지역에서 최소한의 경제성이 보장된다고 가정하여 3등급 미만지역을 배제분석 하였다.

2.1.2. 지리적 배제분석

경사도, 산사태 위험지도, 토지피복도, 도로 및 임도망 자료를 활용해 산지 능선 및 지형과 토지 이용 및 재해에 대한 지리적 배제분석을 수행하였다.

급경사로 인한 재해지역 및 수송 불가능 지역을 배제 분석을 위해 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 지형자료를 사용하였으며, 자료의 해상도는 약 90 m 이다. 경사도는 SRTM 자료를 입력자료로 GIS 도구를 사용해 계산하였으며, Kim 등(2013b)에서 경사도가 25°를 초과하는 지점의 경우 육상수송에 어려움이 있다고 분석되어 경사도가 25°를 초과하는 지역을 배제분석 하였다. 산사태발생 위험지역 배제분석에는 산림청의 산사태 위험지도를 활용하였다. 산사태 위험지도는 산지

Table 2. MWS* and WPD* in accordance with Power class

Wind power class	10m height		50m height		80m height	
	MWS* (ms ⁻¹)	WPD* (Wm ⁻²)	MWS (ms ⁻¹)	WPD (Wm ⁻²)	MWS (ms ⁻¹)	WPD (Wm ⁻²)
1	0.0 ~ 4.4	0 ~ 100	0.0 ~ 5.6	0 ~ 200	0.0 ~ 5.9	0 ~ 251.3
2	4.4 ~ 5.1	100 ~ 150	5.6 ~ 6.4	200 ~ 300	5.9 ~ 6.8	251.3 ~ 375.1
3	5.1 ~ 5.6	150 ~ 200	6.4 ~ 7.0	300 ~ 400	6.8 ~ 7.5	375.1 ~ 490.8
4	5.6 ~ 6.0	200 ~ 250	7.0 ~ 7.5	400 ~ 500	7.5 ~ 8.1	490.8 ~ 603.6
5	6.0 ~ 6.4	250 ~ 300	7.5 ~ 8.0	500 ~ 600	8.1 ~ 8.6	603.6 ~ 732.6
6	6.4 ~ 7.0	300 ~ 400	8.0 ~ 8.8	600 ~ 800	8.6 ~ 9.4	732.6 ~ 975.1

MWS* : Mean Wind Speed, WPD* : Wind Power Density

가 가지고 있는 외적요인(사면경사, 임상, 토질, 모암 등 9개 인자 활용)에 대해 산사태발생 가능성이 높은 지역을 위험 순으로 5등급(1등급(매우 높음), 2등급(높음), 3등급(낮음), 4등급(매우 낮음), 5등급(없음))으로 구분한 자료로, 풍력발전단지 가이드라인에서 최대회피지역인 산사태 위험 1등급 지역에 대해 배제분석 하였다. 또한 조성지역 주변의 소음 및 그림자 효과에 의한 피해를 최소화하기 위해 환경부 중분류 토지피복도 자료를 사용하였다. 토지피복 자료 중 거주지, 종교시설 및 휴양시설 등을 포함한 시가화건조지역 자료를 사용하였으며, 500 m의 완충영역을 두어 배제분석 하였다. 마지막으로 풍력발전단지 건설 시 재해 및 사고의 예방과 진입도로 및 손전시설 등 발전부대시설 설치로 인한 환경의 피해를 최소화하기 위해 국토교통부의 도로망 자료와 산림청의 임도망도 자료를 사용하였다. 모든 도로에 대하여 200 m 완충영역을 주었으며, 또한 도로와의 거리가 멀어지는 경우 신설 도로 건설비용으로 인한 비용 및 자연훼손의 문제를 최소화하기 위해 도로와의 거리가 2 km 미만의 지역에 대해 풍력발전 가능지역으로 분석하였다.

2.1.3. 생태환경적 배제분석

풍력발전단지 입지선정 시 생태계 훼손을 최소화

하기 위해 환경부 국토환경성평가지도(Environmental Conservation Value Assessment Map, ECVAM)를 활용해 생태환경적 배제분석을 하였다.

국토환경성평가지도는 57개의 법제적 항목(생태경관보전지역, 야생동·식물특별보호구역 등)과 8개의 생태환경적 가치 항목(다양성, 자연성, 희귀성 등)을 통해 국토에 대한 환경적 가치를 나타낸 자료로, 국토의 환경정보를 5등급으로 나타내었다. 1등급부터 4등급은 상대적인 측면에서 환경적 보전가치의 정도를 평가하고 5등급은 기개발지역이다. 국토환경성평가지도 사용시 현존 환경정보의 유무파악 및 중점적으로 고려하여야 하는 환경요소를 쉽게 파악할 수 있으며, 환경문제로 인한 사회갈등을 예방해 부적절한 입지선정에 따른 손실을 예방할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 환경적 가치가 가장 높은 1등급 지역에 대해 배제분석을 하였다.

2.2. 적지분석

본 연구에서는 앞서 분석한 지리·생태환경적 배제분석 결과로부터 풍력발전단지 적지분석을 수행하였다. 적지분석에는 이동적지판별법을 사용하였으며, 이동적지판별법은 3 km × 3 km 크기의 격자를 이동시켜 단지 건설이 가능한 지역을 찾는 방법으로 Fig. 2와 같이 3 km 격자 이동 시 적지로 판별되지 않지만 1.5 km 이

Fig. 2. Moving suitability identification method, (a) 3 km, (b) 1.5 km.

동할 경우 적지로 판별이 될 수 있다. 단지 규모는 Kim 등 (2008)에서 활용한 단위면적당 이론적으로 설치 가능한 풍력설비용량인 API(Average Power Intercepted)를 적용하여 단지 규모 및 단지용량을 설정하여 적지분석을 하였다. API는 5MW/km²를 적용하였으며 (Elliott 등, 2010; Kim 등, 2013a), 10 MW 규모 이상의 단지 건설이 가능한 지역에 대하여 이동적지판별법을 수행하였다. 적지분석을 위해 격자는 3 km(Case III)와 1.5 km(Case IV)로 각각 이동시켜 적지분석을 수행하였으며, 각각의 사례에 대하여 풍력자원 잠재량을 산정하였다.

3. 결과

3.1. 배제분석

Fig. 3은 GIS 프로그램으로 풍력자원지도와 배제분석요소인 경사도, 산사태 위험도, 시가화권조지역, 도로 및 임도망도 및 국토환경성평가지도를 활용해 배제분석한 결과를 나타낸 것이다.

각 등급별 배제분석 결과는 Table 3에 나타내었으며,

분석결과 풍력자원 3등급 이상 면적은 총 20709.7 km²로 전체 면적의 약 20.8 %로 나타났다. 지리적 배제분석 결과는 7017.7 km²로 나타났으며(Fig. 3(b)), 생태환경적 배제분석 결과는 1433.1 km²(Fig. 3(c))로 나타났다. 단위 면적당 이론적으로 설치 가능한 풍력설비용량을 살펴보았을 때 환경적 요인을 고려하지 않고 풍력발전단지를 건설할 경우(Case I)에는 35.09 GW, 환경적 요인을 고려할 경우(Case II)에는 7.17 GW로 지리적 환경적 요인을 모두 고려한 육상풍력단지 개발 시 보급률 달성에 충분한 것을 확인할 수 있다.

3.2. 적지 분석

Fig. 4는 2.2장에서의 이동적지판별법을 이용해 풍력발전단지 선정할 결과를 나타낸 것이다. 발전단지의 경우 앞선 10 MW 이상 단지건설이 가능한 지역을 적지로 분석하였으며, 적지분석 결과 Case III과 IV 모두 강원도, 전라남도, 경상남도, 경상북도에서 개발 가능한 지역이 나타났으나, 경기도와 충청남도 및 충청북도 지역에서는 풍량이 3등급 미만으로 대부분의 지역이 배제

Table 3. Wind power graded area in accordance with scenario

Class	Wind resource map (km ² /%)	Case I (km ² /%)	Case II (km ² /%)
1	42438.9 (42.5)	6513.3 (31.5)	2334.9 (38.8)
2	34719.5 (34.7)	7178.7 (34.7)	2250.3 (37.4)
3	14646.3 (14.7)	3867.9 (18.7)	957.1 (15.9)
4	4602.3 (4.6)	1687.9 (8.2)	311.3 (5.2)
5	2686.4 (2.7)	1089.5 (5.3)	133.4 (2.2)
6	758.0 (0.8)	335.5 (1.6)	30.8 (0.5)
7	70.3 (0.1)	36.9 (0.2)	0.5 (0.0)
Total	99921.6 (100)	20709.7 (100)	6018.3 (100)

Table 4. Scenarios in accordance with wind power graded area

Class	Case II (km ² /%)	Case III (km ² /%)	Case IV (km ² /%)
3	957.1 (66.8)	41.6 (48.0)	173.2 (46.4)
4	311.3 (21.7)	27.6 (31.8)	114.5 (30.7)
5	133.4 (9.3)	12.6 (14.5)	65.1 (17.4)
6	30.8 (2.1)	4.9 (5.7)	20.5 (5.5)
7	0.5 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
Total	1433.1 (100)	86.7 (100)	373.2 (100)

Fig. 3. Horizontal distribution of (a) wind resource map, (b) Geographical, and (c) Eco-environmental excluded analysis.

되었다. 적지분석된 지역의 총 면적은 Case III이 86.7 km^2 , Case IV가 373.2 km^2 으로 나타나 배제분석지역 중 6 %, 26 % 비율이 단지건설가능지역으로 나타났으며 (Table 4), API 분석결과 Case III은 0.43 GW, Case IV는 1.87 GW로 나타났다.

3.3. 후보지 비교 분석

앞서 분석된 적지 지점 중 현재 운영되고 있는 발전단지와 개발예정단지를 선정하여 지리적, 생태환경적 요소를 분석하였다. 기발전단지의 경우 영덕풍력발전단지, 건설예정지는 밀양풍력발전단지를 선정하였다.

Fig. 4. The results of onshore wind farm suitability site using Moving Suitability Identification Method, (a) 3 km and (b) 1.5 km.

Fig. 5. Wind farm suitability assessment at (a) Yeongdeok, (b) Miryang.

경상북도 영덕군 영덕읍에 위치한 영덕풍력발전단지(Fig. 5(a))는 평균풍속이 약 7.42 ms^{-1} 로 4등급의 풍황을 나타내고 있다. 단지는 100 m 미만의 저지대로 단지 건설에 지리적 제한요인이 크게 없으며, 주거지역 또한 떨어져 있어 소음 및 반복적인 그림자 효과에 의한 피해가 없을 것으로 예상된다. 또한 산사태 위험지역의 면적이 약 25.3 % 이며, 해안지역에 위치해 풍력발전에 유리한 조건을 갖추고 있어 풍력발전단지 건설에 적합한 지역으로 예상된다.

Fig. 5(b)는 건설 예정중인 밀양 산내면 삼양리 지역에 대한 중첩 분석결과를 나타낸 것으로, 풍력자원지도 분석결과 평균풍속이 약 8.15 ms^{-1} 로 풍황이 매우 우수한 지역으로 나타났다. 또한 예정지 부근에 도로가 있고, 주거지역과는 거리가 있어 단지건설예정지로는 적합하다. 하지만 산사태 위험지역이 설정 면적의 약 28.2 %가 분포하며, 가시산도립공원 및 생태1등급지역이 위치해있는 등 국토환경성평가 1등급 지역이 96.3 % 포함되어 있어 단지개발에 어려움이 있다고 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 GIS 프로그램 및 수치지도를 활용한 배제분석과 이동적지판별법으로 육상풍력발전단지 적지지점을 선정하였다. 육상의 풍량을 정의하기 위해 풍력자원지도를 사용하였으며, 환경부의 풍력발전단지 입지선정 가이드라인을 활용해 경사도, 산사태 위험지도, 도로 및 임도망도, 국토환경성평가지도를 고려한 배제분석을 실시해 입지선정을 위한 평가인자들을 다양하게 적용함으로써 다각도로 분석하였다. 지리적 배제분석결과 육상풍력잠재량은 35.09 GW, 생태환경적 배제분석결과 육상풍력잠재량은 7.17 GW로 나타났으며, 지리·생태환경적 배제분석 결과를 이용해 이동적지판별법을 3 km와 1.5 km로 수행한 결과 발전가능한 모든 지역에서의 잠재량은 각각 0.43 GW, 1.87 GW로 나타났다. 이는 1.5 km로 이동적지분석 시 총 발전가능한 면적의 약 26 %가 개발가능하며, 각 해상도에 따라 1.44 GW의 잠재량 차이가 나타나 저해상도로 판별 시 발전단지에 적합한 지역을 선정하지 못하는 것으로 확인되었다.

본 연구과정을 통해 배제분석과정을 실시한 결과 국

내 육상풍력발전단지 적지 및 이론적 잠재량을 제시할 수 있었다. 하지만 풍력자원지도에 대한 풍량의 의존성이 높기 때문에 풍력자원지도의 해상도를 높여 정확성을 향상시키고, 이동적지판별법을 통한 단지 선정 시 정방격자가 아닌 다른 격자형태의 단지선정 및 고해상도로 판별하는 연구가 추가적으로 이루어진다면 국내 육상풍력발전단지 선정에 긍정적인 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Elliott, D., Schwartz, M., Haymes, S., Heimiller, D., Scott, G., Flowers, L., 2010, 80 and 100 meter wind energy resource potential for the United States, WINDPOWER 2010 Conference & Exhibition, 23-26 May 2010, Dallas, Texas.
- Ha, S. R., Lee, J. Y., 2006, A Case of Analysis of Constructed wetland using Geographic Information System, Journal of Korean Wetlands Society, 8(1), 107-112.
- Hong, S. E., Park, S. H., 2003, Analyzing the Location of Urban Neighborhood Parks Using Gis and AHP Techniques, Journal of The Korean Geographical Society, 38(5), 849-860.
- International Energy Studies, 2011, "Reassessing Wind Potential Estimates for India : Economic and Policy Implications", Environmental Energy Technologies Division.
- Kim, H. G., 2008, Preliminary estimation of wind resource potential in South Korea, Journal of the Korean Solar Energy Society, 28(6), 1-7.
- Kim, H. G., Hwang, H. J., Kang, Y. H., 2013a, Evaluation of onshore wind resource potential according to Environmental Conservation Value Assessment, Journal of Environmental Science International, 22(6), 717-721.
- Kim H. G., Hwang H. J., Kang Y. H., Yun C. Y., 2013b, Evaluation of onshore wind resource potential according to the road proximity, 9(4), 13-18.
- Kim, H., Kim, H. J., Choi, S. M., Lee, S. H., 2011, A GIS

- based analysis for suitable site of *chisandra chinensis* cultivation - Focused on Jangsu County forest -, Journal of Agriculture & Life Science, 45(1), 41-47.
- Korea Environment Institute, 2008, Environmental considerations in the siting of solar and wind power plants. Korea Wind Energy Industry Association, [Http://www.kweia.or.kr](http://www.kweia.or.kr).
- Lee, J. D., Yeon, S. H., Kim, S. G., 2000, A case study on suitability analysis of solid waste landfill site utilizing GIS, Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies, 3(4), 33-49.
- Lee, S. H., Lee, H. W., Kim, D. H., Kim, M. J., Kim, H. G., 2009, Numerical study on the impact of the spatial resolution of wind map in the Korean peninsula on the accuracy of wind Energy resources estimation, Journal of The Environmental Sciences, 18(8), 885-897.
- Ministry of Knowledge Economy, 2008, Review of the 3rd Basic Plan for Technology Development, Application, and Deployment of New & Renewable Energy (2009-2030).
- Park, J. I., Park, M. H., Lim, R. T., 2010, A study on the new renewable energy suitable position using GIS, Journal of The Korean Cadastre Information Association, 11, 129-141.
- REN21(Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), 2013, "Renewables : Global Futures Report 2013".