

통계적 바람장모형에 의한 고해상도($1Km \times 1Km$)풍력에너지지도 작성에 관한 연구

김혜중¹ · 김현식² · 최영진³ · 변재영⁴

¹동국대학교 통계학과, ²동국대학교 통계학과, ³기상청 국립기상연구소 응용기상연구과

⁴기상청 국립기상연구소 응용기상연구과

(2010년 10월 접수, 2010년 10월 채택)

요약

본 논문은 남한지역 풍력자원의 계량화 및 바람환경분석 등에 필요한 풍력에너지지도를 고해상도로 작성하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 $1Km \times 1Km$ 격자로 나누어진 남한전역(345,682 지점)의 월별풍속에 적합한 통계적 바람장모형을 설정하여 각종 풍력에너지통계를 $1Km \times 1Km$ 격자지점 별로 계산하고, 통계값들을 지도로 구현하는 절차를 연구하였다. 바람장모형의 적합성검정에는 국내 76개 기상관측소에서 관측된 TMY (typical meteorological year) 바람자료가 사용되었으며, Kolmogrov-Smirnov 검정결과 로그정규모형이 남한지역의 월별 바람장모형에 적합하였다. 또한 로그정규모형 하에서 얻어지는 다양한 형태의 풍력에너지통계들을 소개하였으며, 국립기상연구소가 제공하는 $1Km \times 1Km$ 격자지점(345,682 지점)의 풍속자료를 사용하여 남한(지상 80m)의 풍력에너지지도(W/m^2)지도를 공간분포도 형태로 작성해 보였다.

주요어: 통계적 바람장모형, 풍력에너지지도, $1Km \times 1Km$ 해상도, 로그정규모형, TMY 바람자료, 평균풍력에너지지도.

1. 서론

최근에 들어 풍력에너지(wind energy)는 지속적으로 생산 가능한 신·재생에너지원으로 각광을 받고 있으며, 풍력발전에 대한 연구와 투자가 활발하게 이루어지고 있다. 이에 힘입어 풍력발전은 신·재생에너지발전 방법들 중 기술성숙도가 가장 높고 발전단가가 낮은 발전방법으로 되었으며, 한국은 물론 유럽, 미국 등 세계 70여 개국에서 풍력발전을 사용하고 있다. 또한 설비투자의 효율성 측면에서 볼 때, 풍력발전이 우리나라에서 주로 사용되는 화력발전과 원자력발전에 비해 훨씬 효율적인 것으로 나타나, 정부는 풍력발전을 선진국수준의 공급규모로 확장시킬 계획에 있다 (서은경 등, 2009; 지식경제부, 2008). 풍력발전은 친환경적이고 설비유지비용이 적게 드는 장점을 가진 반면, 풍력발전단지(wind farm) 확보의 제한성 및 낮은 발전설비이용률을 단점으로 가진다 (정승환 등, 2010). 이러한 문제를 해결하기 위해서는 바람자원을 효율적으로 활용할 수 있는 최적의 입지에 풍력발전단지가 들어서야 된다. 최적의 입지선정을 위해서는 한반도 바람자원의 정보를 이용한 바람환경분석(wind site analysis)이 필요하다. 이때 사용되는 정보는 풍력자원(wind resource)정보와 풍력에너지통계(wind energy statistic)로 구분

본 연구는 기상청 국립기상연구소의 학술용역과제인 「기상자원지도 및 국지기상분석기술개발」의 지원으로 수행되었음.

¹교신저자: (100-715) 서울시 중구 필동 3가 26번지, 동국대학교 통계학과 교수. E-mail: kim3hj@dongguk.edu

된다. 풍력자원정보는 풍속, 풍향, 풍정 등 특정 지역에서 관측되는 바람자원에 대한 정보를 나타낸다. 한편 풍력에너지통계는 풍력에너지밀도(wind energy density), 풍력에너지합(total wind energy) 등과 같이 풍력자원정보를 에너지형태로 변환시켜 계산한 것이며, 풍력발전량과 관련된 다양한 통계들이 포함된다. 따라서 바람환경분석에는 풍력에너지통계가 더 직접적으로 관련되는 정보이다 (Peterson 등, 1997; Mathew 등, 2002).

국내에서 풍력자원정보의 제공역량은 기상청이 개발한 고해상도($1Km \times 1Km$ 이하 해상도)의 풍력자원지도(국립기상연구소, 2009)에 힘입어 선진국수준에 있다. 이에 비해 풍력에너지통계 개발 및 정보제공 수준은 선진국에 미치지 못한 실정이다. 미국의 NREL (rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas)과 유럽의 ameos GmbH(www.anemos.de)와 RNL(www.windatlas.dk/europe) 그리고 Environment Canada(windatlas.ca/en/maps.php)에서 작성한 바람자원지도(wind energy resource atlas)들은 해당 지역의 풍력에너지통계인 풍력에너지밀도와 풍력에너지합을 풍력자원정보와 함께 제공하고 있다. 한편 국내에서는 남한전역의 풍력에너지통계를 체계적으로 개발·생산하여 일반에게 제공한 경우가 없는 실정이다. 다만 김해중 등 (2010)과 김현구 등 (2003)에 의해 몇몇 관심지역을 대상으로 특정기간 동안의 풍력에너지통계를 한시적으로 생산한 경우는 있다.

이 점을 고려하여 본 연구는 남한전역의 풍력에너지통계지도를 개발하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 다음과 같이 세 단계의 내용으로 이루어진다. 첫째는 기상청에서 제공하는 전국 76개 기상관측소의 TMY (국립기상연구소, 2009) 풍속자료를 사용하여 대상지역의 통계적 풍속모형을 추정하고, 이의 일반화과정을 통해 $1Km \times 1Km$ 격자지점(기상청 풍력자원지도 작성에 사용된 345,682개 지점)에 적합한 통계적 바람장모형을 설정하는 단계이다. 둘째는 역학적으로 정의된 다양한 풍력에너지 특성값들을 통계적 바람장모형 하에서 격자지점 별로 추정하여 남한전역의 풍력에너지통계를 생산하는 단계이다. 셋째는 풍력에너지통계를 지도로 제공하고 그 유용성을 평가하는 단계이다.

따라서 본 논문은 앞으로 다음과 같은 체재와 내용으로 이루어진다. 2장에서는 한반도 76개 기상관측소 지역의 TMY바람자료를 사용하여 남한전역의 통계적 바람장모형을 설정하고, 3장에서는 통계적 바람장모형의 성질을 사용하여 다양한 형태의 풍력에너지통계를 제안하였다. 4장은 남한전역의 풍력에너지통계를 고해상도($1Km \times 1Km$ 해상도)의 지도로 작성하여 풍력에너지통계지도의 유용성을 실증적으로 보였다. 마지막으로 5장에서는 연구결과에 대하여 논하였다.

2. 통계적 바람장모형

2.1. 전국 76개 기상관측소지역의 풍속모형

풍속모형은 특정지역의 풍력에너지통계 개발 또는 생산에 필수적이다. 풍속모형은 그 지역 풍속의 경험적 빈도분포에 적합한 확률분포에 의해 설정되며, 통계적 바람장모형의 구성요소가 된다. 본 연구에서 고려하는 통계적 바람장모형은 남한의 각 지역에서 설정된 풍속모형들을 위도 및 경도 별로 표현한 통합모형을 의미한다. 기상학계는 풍속모형에 적합한 다양한 확률분포들을 소개하고, 그 성질 및 응용에 대한 연구를 활발히 진행해 왔다. Panda 등 (1990)은 Pearson Type VI 분포, 지수분포 및 감마분포를 사용한 풍속모형을 연구하였고, Scerri와 Farrugi (1996)의 로지스틱 풍속모형, Jamil 등 (1995)의 Rayleigh 모형 등 다양한 풍속모형들이 국내외에서 연구되어 왔으나, 현재는 Garcia 등 (1998)이 연구한 로그정규풍속모형과 와이블풍속모형이 풍력자원 연구에 주로 사용되고 있다. 이와 관련된 국내 연구는 김현구 등 (2003)과 서은경 등 (2009)의 와이블풍속모형과 김해중 등 (2010)의 로그정규풍속모형에 의한 풍력자원 연구를 들 수 있다.

본 연구는 1998년~2009년까지의 풍속자료가 축적되어있는 전국 76개 기상관측소지역(표 2.2 참조)을

표 2.1. 76개 기상관측소 지역 월별풍속모형의 Kolmogorov-Smirnov 검정결과

모형	기각된 월풍속모형수													합
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Log-normal	71	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76
Weibull	59	14	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76

대상으로 그 지역의 월별풍속모형을 추정하고, 일반화 시켜 남한의 바람장모형을 구할 것이다. 이를 위해 사용된 자료는 76개 기상관측소 지역에서 관측된 TMY자료의 일별평균풍속(m/s)이다. 참고로 TMY자료란 2009년 국립기상연구소에서 개발하여 발표한 것으로, 1998년~2009년까지의 한반도 바람자원을 대표하는 1년 치 바람자료를 의미한다 (김해중 등, 2009 참조).

표 2.1은 76개 기상관측소 지역의 월별풍속모형에 대해 로그정규분포와 와이블분포의 적합성을 $\alpha = .05$ 의 유의수준으로 검정(Kolmogorov-Smirnov 검정)한 결과를 요약한 것이다. 표 2.1에 의하면 로그정규풍속모형의 적합성을 검정한 결과 비교모형(와이블풍속모형)과는 달리 총 912개의 관측소지역별(76지역)/월별(12개월)풍속들 중에서 6개(5개 지역의 월풍속)만을 제외한 모든 풍속들이 로그정규풍속모형에 적합한 것을 알 수 있다. 검정에서 기각된 5개 지역의 6개 월풍속은 양평의 8월, 정읍의 9월, 홍천의 10월, 울릉도의 9월, 순천의 6월과 9월 풍속들이었다 (김해중 등, 2010 참조). 따라서 표 2.1은 로그정규모형이 와이블모형에 비해 76개 기상관측소지역의 월별풍속에 더 적합한 단일모형임을 나타내고 있다.

76개 기상관측소 지역의 월별풍속 $V(m/sec)$ 에 적합한 로그정규모형의 확률밀도함수는

$$f(v) = \frac{1}{v\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln v - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad v > 0 \tag{2.1}$$

이며, $V \sim LN(\mu, \sigma^2)$ 로 표기하자. 여기서 모수 μ 와 σ 는 각각 척도모수(scale parameter)와 형상모수(shape parameter)를 나타낸다. 그리고 월별풍속의 평균과 분산은 각각

$$E[V] = \exp\left\{\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right\} \text{ 와 } \text{Var}(V) = e^{2\mu} e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \tag{2.2}$$

이며, 상수 $c > 0$ 에 대해 cV 의 분포는 $cV \sim LN(\ln c + \mu, \sigma^2)$ 인 성질을 가진다. 로그정규풍속모형의 관측소별(76지역)/월별(12월) 척도모수(μ)와 형상모수(σ)값들을 최대우도추정법에 의해 추정된다. 만약 V_1, \dots, V_n 이 특정관측소에서 관측된 특정월의 일별평균풍속일 때 로그정규풍속모형의 척도모수(μ)와 형상모수(σ)는 각각 다음의 최대우도추정량을 갖는다.

$$\hat{\mu} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \ln V_i, \quad \hat{\sigma} = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (\ln V_i - \hat{\mu})^2}. \tag{2.3}$$

그림 2.1은 76개 기상관측소 지역의 TMY자료를 사용하여 로그정규풍속모형의 척도모수를 월별로 최대우도추정한 결과를 상자그림(Box plot)을 사용하여 그 지역의 월평균풍속과 대비시켰으며, 표 2.2는 척도모수와 형상모수의 최우추정값들 중에서 1월과 2월에 해당하는 추정값들을 기상관측소 지역별로 열거한 것이다. 식 (2.3)에서와 같이 척도모수 μ 와 형상모수 σ 는 그 지역의 월평균풍속과 일풍속의 분산과 각각 관련된 모수들이다. 따라서 그림 2.1(a)와 (b)는 이러한 관계를 정확하게 반영하고 있어, 76개 기상관측소지점에서 추정된 월별 척도모수값과 월평균 풍속이 유사한 변동패턴을 가짐을 나타내고 있다.

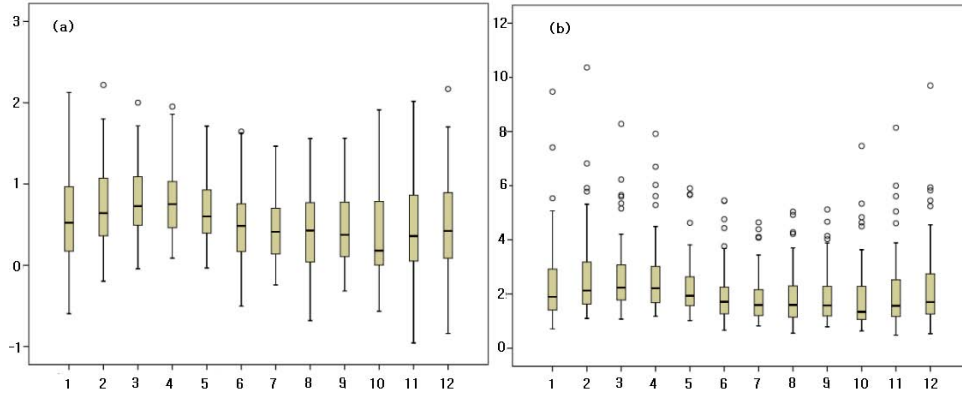


그림 2.1. 76개 기상관측소 지점의 로그정규월별풍속모형 척도모수추정값(a)과 월평균풍속(b)의 Box plot

2.2. 남한지역의 통계적 바람장모형

76개 기상관측소지역은 남한전역을 $1Km \times 1Km$ 격자로 나눈 지점들로부터 추출된 표본지역으로 생각할 수 있다. 따라서 2.1절에서 실시된 76개 표본지역의 적합성 검정결과는 “ $1Km \times 1Km$ 격자지점들의 월별풍속모형은 로그정규모형이다”라는 가정을 가능하게 한다. 이러한 가정 하에서 남한지역의 통계적 바람장 모형은 다음의 네 단계로 이루어진 절차에 의해 고도별(지상고도 50m와 80m)로 설정된다.

(단계 1) Deacon의 공식 (대기환경연구회, 2003)에 의해 76개 기상관측소지점의 월별평균풍속값과 로그정규풍속모형의 월별척도모수값(표 2.2 참조)을 각각 고도 50m와 고도80m(발전기 설치고도)의 값으로 각각 변환시킨다.

(단계 2) 변환된 고도별 척도모수값($\hat{\mu}$)을 종속변수로 하고 그 지역의 위치정보(경도, 위도, 고도 등) 및 고도별 풍속 등을 독립변수로 사용한 다중선형회귀식을 지상고도별(고도50m와 고도80m)로 추정한다.

(단계 3) 국립기상연구소에서 제공되는 345,682개 지점($1Km \times 1Km$ 격자지점)의 고도별 월별평균풍속(풍력자원지도, 2009 제공)과 위치정보를 추정된 회귀식에 대입시켜 각 격자지점에 해당되는 로그정규풍속모형의 척도모수를 고도별로 추정한다.

(단계 4) $1Km \times 1Km$ 격자지점의 월평균풍속과 (단계 3)에서 고도별로 추정한 척도모수값을 평균풍속식인 식 (2.2)에 대입시켜, 각 격자지점에 설정된 로그정규풍속모형의 형상모수를 고도별로 추정한다.

위의 단계를 월별로 적용하면 $1Km \times 1Km$ 격자지점의 로그정규월별풍속모형(345,682개 지점 \times 12개월)들을 추정할 수 있으며, 추정된 모형들을 위도, 경도 및 고도별로 나타낸 것을 통계적 바람장모형이라 한다.

h_0 와 $V_0(h_0)$ 는 관측고도와 관측고도에서의 풍속 그리고 h 와 $V(h)$ 는 발전기설치고도와 발전기설치고도의 풍속이라 할 때, (단계 1)에서 사용되는 Deacon의 공식은

$$\frac{V(h)}{V_0(h_0)} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad \text{이며,} \quad \alpha = a + b \ln V_0(h_0) \quad (2.4)$$

표 2.2. 76개 지역 로그정규월별풍속모형의 적도 및 형상모수 추정결과(1월과 2월)

관측지역	1월		2월		관측지역	1월		2월	
	형상	적도	형상	적도		형상	적도	형상	적도
Sokcho	0.270	0.931	0.339	1.021	Gosan	0.531	2.126	0.496	2.218
Cheorwon	0.515	0.235	0.495	0.632	Seongsan	0.213	1.272	0.382	1.355
Dongducheon	0.375	0.328	0.426	0.575	Seogwipo	0.273	0.771	0.332	1.065
Munsan	0.471	0.312	0.388	0.575	Jinju	0.630	-0.061	0.646	0.161
Daegwallyeong	0.714	0.962	0.644	1.504	Ganghwa	0.414	0.564	0.365	0.580
Chuncheon	0.777	-0.596	0.496	0.300	Yangpyeong	0.543	0.065	0.593	0.151
Baengnyeongdo	0.272	1.308	0.288	1.715	Icheon	0.460	0.173	0.503	0.166
Gangneung	0.383	1.170	0.395	1.244	Inje	0.494	0.380	0.412	0.688
Donghae	0.285	1.026	0.252	1.127	Hongcheon	0.551	-0.360	0.527	-0.031
Seoul	0.304	0.799	0.289	0.898	Taebaek	0.405	0.329	0.419	0.410
Incheon	0.372	1.091	0.425	1.075	Jecheon	0.549	0.175	0.514	0.291
Wonju	0.497	-0.149	0.434	0.226	Boeun	0.742	-0.096	0.622	0.208
Ulleungdo	0.329	1.301	0.377	1.283	Cheonan	0.511	0.494	0.538	0.616
Suwon	0.550	0.228	0.427	0.651	Boryeong	0.486	0.529	0.402	0.436
Yeongwol	0.560	0.041	0.448	0.439	Buyeo	0.602	0.123	0.435	0.315
Chungju	0.594	0.093	0.509	0.439	Geumsan	0.565	-0.162	0.565	-0.006
Seosan	0.491	0.920	0.408	0.945	Buan	0.559	0.171	0.521	0.425
Ulsan	0.252	1.280	0.220	1.395	Imsil	0.636	0.093	0.520	0.214
Cheongju	0.441	0.154	0.341	0.426	Jeongeup	0.398	-0.053	0.371	0.227
Daejeon	0.423	0.296	0.380	0.531	Namwon	0.620	0.208	0.586	0.263
Chupungnyeong	0.593	0.931	0.462	1.069	Jangsu	0.560	0.402	0.485	0.550
Andong	0.566	0.212	0.530	0.586	Suncheon	0.721	0.136	0.641	0.298
Sangju	0.627	0.516	0.515	0.838	Jangheung	0.585	0.974	0.541	0.897
Pohang	0.336	0.771	0.254	1.056	Haenam	0.522	0.813	0.428	0.976
Gunsan	0.548	0.398	0.471	0.936	Goheung	0.568	0.684	0.539	0.752
Daegu	0.439	0.611	0.412	0.916	Bongwhoa	0.446	0.311	0.536	0.175
Jeonju	0.419	0.357	0.368	0.697	Yeongju	0.636	1.010	0.667	1.075
Ulsan	0.483	0.642	0.396	0.863	Mungyeong	0.499	0.575	0.578	0.725
Masan	0.321	0.705	0.315	0.843	Yeongdeok	0.437	1.129	0.335	1.166
Gwangju	0.435	0.554	0.376	0.617	Uiseong	0.537	-0.014	0.695	0.049
Busan	0.299	1.181	0.304	1.166	Gumi	0.593	0.436	0.535	0.555
Tongyeong	0.416	0.988	0.357	1.111	Yeongcheon	0.582	0.657	0.613	0.609
Mokpo	0.625	1.226	0.566	1.485	Geochang	0.620	0.113	0.446	0.302
Yoesu	0.474	1.523	0.447	1.497	Hapcheon	0.511	0.097	0.443	0.191
Heuksando	0.529	1.882	0.519	1.801	Miryang	0.562	0.211	0.791	-0.195
Wando	0.541	1.329	0.596	1.496	Sancheong	0.753	0.397	0.719	0.735
Jindo	0.266	1.678	0.346	1.721	Geoje	0.572	0.529	0.466	0.603
Jeju	0.385	1.323	0.384	1.274	Namhae	0.418	0.550	0.367	0.536

으로 정의된다. 여기서 α 는 각 지점에서 측정되는 주변지형의 거칠기와 관련된 인자이며, 다음의 계수 a 와 b 에 의해 결정된다 (서은경 등, 2009 참조).

$$a = \frac{1}{\ln h_g - \ln Z_0} - b, \quad b = \frac{-0.088}{1 - 0.088(\ln h_0 - \ln 10)}. \quad (2.5)$$

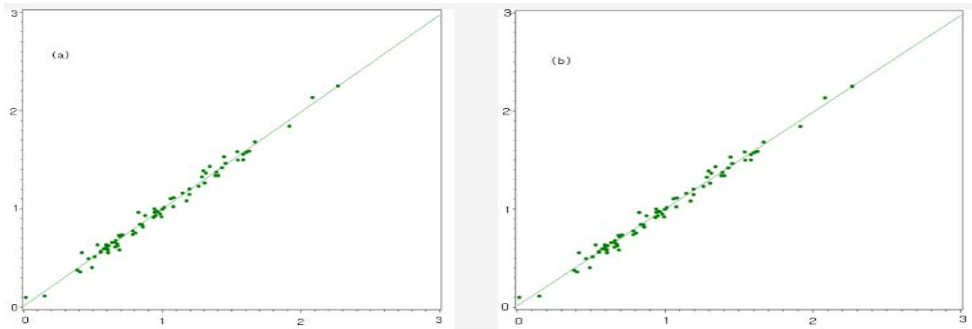


그림 2.2. 척도모수 예측값(수직축)과 추정값(수평축)의 산점도: (a) 1월 산점도; (b) 2월 산점도

그리고 $h_g = \sqrt{hZ_0}$, Z_0 는 주변지형의 거칠기 길이(roughness length)이며, Z_0 는 기상청에서 제공되는 지표이용도자료에 USGS (united states geological survey)의 24개 거칠기 길이 분류표를 적용하면 얻어진다. 한편 2.1절에서 소개된 로그정규분포를 식 (2.4)의 관계식을 사용하여 변수변환하면, 관측고도 h_0 의 풍속분포가 $V_0(h_0) \sim LN(\mu(h_0), \sigma^2)$ 일 때, 풍력발전기설치고도 h 의 풍속분포는

$$V(h) \sim LN(\alpha(\ln h - \ln h_0) + \mu(h_0), \sigma^2) \quad (2.6)$$

이 된다. 따라서 $V_0(h_0)$ 와 $V(h)$ 의 분포는 모두 로그정규분포이고, 분포의 형상모수도 동일하나 척도모수는 고도에 따라 변하여 $\mu(h_0)$ 에서 $\mu(h) = \alpha(\ln h - \ln h_0) + \mu(h_0)$ 값으로 조정됨을 알 수 있다.

앞에서 설명된 절차를 76개 기상관측소지역의 TMY자료에 적용하여 남한지역의 통계적 바람장모형을 추정하였다. (단계 1)에서는 식 (2.4)를 사용하여 76개 기상관측소지역의 월별평균풍속들을 발전소설치 고도(고도 50m와 고도 80m)에 맞게 변환시켰으며, 표 2.2에 열거된 관측소별/월별 척도모수값들도 식 (2.6)에 의해 발전소설치 고도별/관측소별/월별 척도모수값으로 보정시켰다. (단계 2)에서는 고도 80m에 맞게 보정된 척도모수값 ($\hat{\mu}_{ik}$)을 종속변수로 하고, 보정된 월별풍속과 관측소지역의 위치정보(위도, 경도, 해발고도 등)들을 독립변수로 한 회귀식을 단계적 변수선택법으로 추정한 결과 다음의 회귀식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \widehat{\mu}_{ik}(80) = & -3.23608 + .00005902X_i^2 - .00005035Y_i \\ & (.17968) \quad (.00001982) \quad (.00001288) \\ & + 4.06617V_{ik}^{\frac{1}{2}} - 1.08426V_{ik} + .04849V_{ik}^2 - .00148V_{ik}^3 \\ & (.29228) \quad (.01365) \quad (.0103) \quad (.00041) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$i = 1, \dots, 76$; $k = 1, \dots, 12$. 여기서 X_i 는 i -번째 기상관측소지점의 위도, Y_i 는 i -번째 기상관측소지점의 해발고도, V_{ik} 는 i -번째 기상관측소지점/ k -번째 월의 평균풍속을 나타내며 괄호안의 값은 최소제곱 추정량의 표준오차 값들이다.

식 (2.7)의 결정계수는 $R^2 = .9852$ (또는 Adjusted- $R^2 = .9851$)으로, 척도모수값 $\hat{\mu}_{ik}(80)$ 의 변동에 대해 높은 설명력을 가진 회귀식으로 나타났다. 그림 2.2는 1월과 2월 자료로부터 추정된 76개 기상관측소지점의 척도모수와 식 (2.7)에 의해 예측된 척도모수값들의 산점도이며, 표 2.3은 76개 지점의 월별로그정규풍속모형들의 척도모수 추정값과 척도모수 예측값(76개 쌍)간의 상관계수가 높음을 보여 주고 있다. 따라서 그림 2.1과 표 2.3은 로그정규월별풍속(지상고도 80m)모형의 척도모수추정에 식 (2.7)이 유

표 2.3. 76개 지점의 척도모수 추정값과 척도모수 예측값간의 상관계수(월별)

월	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
상관계수	.9932	.9937	.9956	.9980	.9982	.9974	.9958	.9952	.9971	.9964	.9955	.9893

용하게 사용될 수 있음을 나타내고 있다. 한편 식 (2.6)에 의해

$$\hat{\mu}_{ik}(80) = \alpha(\ln 80 - \ln 50) + \hat{\mu}_{ik}(50) \tag{2.8}$$

이 성립된다. 따라서 로그정규월별풍속(지상고도 50m)모형의 척도모수값 $\hat{\mu}_{ik}(50)$ 은 별도의 회귀식 추정 없이 식 (2.8)에 $\hat{\mu}_{ik}(80)$ 의 값을 대입시키면 간단히 추정 및 예측이 가능하다.

(단계 3)에서는 식 (2.7)을 사용하여 345,682개 지점(1Km × 1Km 격자지점)의 80m 고도의 로그정규월별풍속모형의 척도모수($\mu(80)$)를 모두 추정하였고, (단계 4)에서는 추정된 척도모수값과 월평균풍속 값을 식 (2.2)에 대입시켜 각 격자점 풍속모형의 형상모수($\sigma(80)$)값을 월별로 추정하였다. 이와 같은 절차에 의해 추정된 로그정규월별풍속모형들을 각 격자점의 위·경도에 맞게 통합시켜 표현하면 남한의 고도 80m 통계적 바람장모형이 된다. 한편 고도 50m의 바람장 모형은 고도 80m의 바람장모형에서 척도모수만 보정(식 (2.8) 적용)하면 간단히 구해진다.

3. 풍력에너지통계지도

3.1. 풍력에너지통계

풍력발전단지의 조성을 위한 바람환경분석에는 풍력발전 가능성을 조사하기 위해 대상 지역의 풍력자원에 대한 통계적분석이 선행된다. 즉 통계적 바람장모형을 사용하여 그 지역의 풍력자원에 대한 특성을 파악하고, 경제성 있는 풍속(5m/s~20m/s)을 가진 바람의 확률, 년 중 경제성 있는 바람이 부는 총시간 수 (또는 일 수) 등에 대한 분석이 필요하다. 풍력자원의 특성들 중에서 평균풍력에너지밀도(W/m^2)는 풍력자원의 평가에서 특히 중요한 역할을 한다. 그 이유는 풍력발전입지에 대한 환경평가에서 대상지역의 풍력에너지밀도와 주 풍향분석은 풍력발전기 배치를 결정하는데 필수적인 사항이기 때문이다.

순간 풍력에너지는 풍속(V)의 세제곱과 연관된 다음의 식으로 정의된다 (Jamil 등, 1995; Mathew 등, 2002 참조):

$$P_e = \frac{1}{2}\rho AV^3. \tag{3.1}$$

여기서, $\rho(kg/m^3)$ 은 공기밀도를 나타내며, 풍속측정지역의 고도(h)의 함수인

$$\rho = 1.225 - (1.194 \times 10^{-4}) h \tag{3.2}$$

에 의해 계산된다 (NREL, 1986). 그리고 A 는 에너지 측정지역의 넓이를 나타낸다. 따라서 로그정규풍속모형인 식 (2.1)으로부터 계산된 평균풍력에너지밀도(MWED; mean wind energy density)는

$$MWED = E \left[\frac{P_e}{A} \right] = \frac{\rho}{2} \int_0^\infty v^3 f(v) dv = \frac{\rho}{2} \exp \left\{ 3\mu + \frac{9}{2}\sigma^2 \right\} \tag{3.3}$$

이다. 바람환경의 분석에 사용되는 다른 풍력에너지특성값들도 로그정규풍속모형 하에서 쉽게 유도할 수 있다. 예를 들어, 최대에너지풍속(wind speed of maximum energy carrier)와 최대확률풍속(most

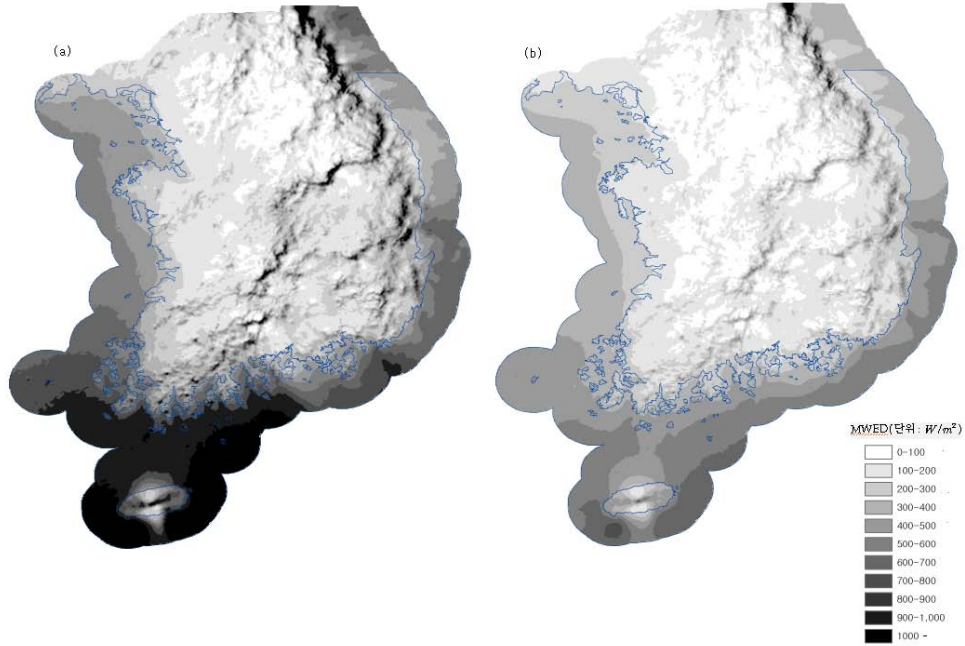


그림 3.1. 남한의 2월의 풍력에너지밀도통계지도(a)와 연평균풍력에너지밀도통계지도(b).

probable wind speed)는 각각 $d/dv v^3 f(v) = 0$ 와 $d/dv f(v) = 0$ 의 해를 정리하여 얻을 수 있으며, 그 값들은 각각

$$V_{mec} = \exp\{\mu + 2\sigma^2\} \quad \text{와} \quad V_{mp} = \exp\{\mu - \sigma^2\} \quad (3.4)$$

이다. 식 (2.3)에 정의된 형상 및 척도모수의 최대우도추정량(또는 추정값)을 식 (2.2), (3.3), (3.4) 등 여러 형태의 풍력에너지특성값에 대입시켜서 얻은 통계를 풍력에너지통계라 한다. 최대우도추정의 성질에 따라 풍력에너지통계의 점근분포는 정규분포이며, 점근분포의 분산은 Delta법으로 유도된다. 예를 들어, V_1, V_2, \dots, V_n 이 풍속의 랜덤표본인 경우 로그정규모형하에서 추정된 최대풍속에너지통계(V_{mec} 의 최대우도추정량인 \hat{V}_{mec})의 점근분포는 다음과 같다 (Press, 2005 참조).

$$\sqrt{n} (\hat{V}_{mec} - V_{mec}) \sim N(0, \phi' \Sigma \phi). \quad (3.5)$$

여기서, $\hat{V}_{mec} = \exp\{\hat{\mu} + 2\hat{\sigma}^2\}$, $\hat{\mu} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \ln V_i$, $\hat{\sigma}^2 = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\ln V_i - \hat{\mu})^2$,

$$\phi = (\phi_1, \phi_2)^\top, \quad \phi_1 = \exp\{\mu + 2\sigma^2\}, \quad \phi_2 = 2 \exp\{\mu + 2\sigma^2\}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & 2\sigma^4 \end{pmatrix} \text{이다.}$$

따라서 식 (3.5)의 점근분포는 최대풍속에너지에 대한 통계적 추론을 가능하게 한다. 이와 같이 최대우도추정량의 점근분포를 사용하면, MWED 등 다양한 풍력에너지특성들을 통계적으로 추론할 수 있다.

3.2. 1Km × 1Km 해상도의 평균풍력에너지밀도지도

풍력에너지통계지도는 다음의 순서에 의해 작성된다. 먼저 2.2절의 절차로 부터 추정된 남한지역의 통계적 바람장모형의 형상 및 척도모수 추정값들을 풍력에너지 특성값(3.1절 참조)에 대입시켜 풍력에너지

지통계를 $1Km \times 1Km$ 격자지점(345,682개 지점)별/월별/고도별로 계산한다. 다음으로, 계산된 풍력 에너지통계값 크기를 각 격자지점의 위도와 경도에 따라 나타내는 월별/고도별 공간분포도에 의해 작성한다. 이와 같은 과정에 의해 작성된 공간분포도를 $1Km \times 1Km$ 해상도의 풍력에너지통계지도라 한다.

그림 3.1은 지상고도 80m의 MWED(식 (3.3) 참조)를 앞에서 설명한 지도 작성 절차에 따라 구한 것이다. 이 그림은 $1Km \times 1Km$ 해상도의 통계지도(또는 공간분포도)들이며, 2월의 풍력에너지밀도와 연평균풍력에너지밀도를 각각 나타내고 있다. 이 지도의 표출범례는 11구간($100W/m^2$ 간격)을 사용하였다. 참고로, 미국 NREL는 풍력밀도에너지밀도를 다음과 같이 7가지 구간으로 나누어 특정지역의 풍력에너지를 평가하고 있다. MWED가 300~400(단위: W/m^2)이면 “Pair” 지역; 400~500이면 “Good” 지역; 500~600이면 “Excellent” 지역; 600~800이면 “Outstanding” 지역; 800~1600이면 “Superb” 지역 그리고 그 외 최저밀도지역(0~300)과 최대밀도지역(1600 이상)이 있다. 따라서 그림 3.1은 남한 지역의 풍력에너지밀도에 대해 다음의 공간적인 정보를 제공하고 있다. 첫째로, 육지에서는 동해안의 태백산맥지역의 풍력에너지밀도가 타 지역에 비해 높게 나타나고 있어, 이 지역이 풍력발전단지의 조성에 적절한 곳으로 평가된다. 둘째로, 제주도 근해를 포함한 남서해 바다의 풍력에너지밀도가 타 지역에 비해 높다. 따라서 이 지역이 해상풍력발전단지에 적절한 곳으로 평가된다. 셋째로, 남한의 모든 지역에서 2월의 평균풍력에너지밀도가 연평균 풍력에너지밀도보다 높음을 보여주고 있다. 이상과 같이 본 연구에서 제안된 풍력에너지통계지도가 가진 공간적 정보들은 풍력발전단지 선정을 위한 바람환경 분석에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문은 풍력발전단지의 입지선정에 필요한 풍력에너지통계지도를 $1Km \times 1Km$ 의 해상도로 작성하는 방법을 남한지역을 대상으로 제안하였다. 이를 위해 남한의 바람장모형을 $1Km \times 1Km$ 해상도로 추정하는 방법을 설명하였고, 각종 풍력에너지값들의 유도 및 추정방법에 대해서도 논하였다. 추정된 통계적 바람장모형은 다음과 같은 특성이 있음을 보였다: (i) 통계적 바람장모형은 기상학계에서 일반적으로 사용하고 있는 와이블모형보다 로그정규모형에 더 적합하였다(표 2.1 참조). (ii) 제안된 바람장모형은 지상고도의 변화에 대응하여 모형을 쉽게 수정할 수 있어(식(2.6) 참조), 타 모형들과 차별되는 장점을 가졌다. (iii) 풍력에너지 특성값들의 최대우도추정량들은 폐쇄형태(closed form)를 가지며, 추정량의 점근적 정규성(asymptotic normality)에 의해 풍력에너지통계에 대한 추론이 가능하다는 장점을 가졌다. 국내 76개 기상관측소의 TMY바람자료와 국립기상연구소에서 제공하는 $1Km \times 1Km$ 격자지점의 월별평균풍속자료를 사용하여 남한의 바람장 모형을 추정하였고, 추정된 모형으로 남한지역의 지상 80m 평균풍력에너지밀도(W/m^2) 지도를 작성하여 본 연구내용의 유용성을 보였다.

참고문헌

- 기상청 국립기상연구소 (2009). 한반도 풍력자원지도.
- 김현구, 최재우, 손정봉, 정우식, 이화운 (2003). 풍력발전 단지조성을 위한 바람환경 분석, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **19**, 745-756.
- 김혜중, 곽화륜, 최영진, 변재영 (2010). 로그정규풍속모형에 의한 풍력자원의 특성추론 및 응용에 관한 연구, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, **9**, 2761-2772.
- 김혜중, 정선, 최영진, 김규량, 정영림 (2009). 한반도바람자원의 TMY(typical meteorological year) 구축알고리즘에 관한 연구, <응용통계연구>, **22**, 943-960.
- 대기환경연구회 (2003). <대기환경개론>, 신평문화사, 179-181.

- 서은경, 윤준희, 박영산 (2009). 북한 지역에서의 30년 동안의 평균바람지도, **30**, 845-854.
- 정승환, 박만식, 김기환 (2010). 풍속자료의 공간예측, <응용통계연구>, **23**, 345-356.
- 지식경제부 (2008). 제 1차 국가에너지 기본계획(2008-2030), <제3차 국가에너지위원회>, 의안번호 제 1호, 179.
- Garcia, A., Torres, J. L., Prieto, E. and De Francisco, A. (1998). Fitting wind speed distributions: A case study, *Solar Energy*, **62**, 130-144.
- Jamil, M., Parsa, S. and Majidi, M. (1995). Wind power statistics and evaluation of wind energy density, *Renewable Energy*, **6**, 623-628.
- Mathew, S., Pandey, K. P. and Kumar, V. A. (2002). Analysis of Wind regimes for energy estimation, *Renewable Energy*, **25**, 381-399.
- NREL(National Renewable Energy Laboratory) (1986). Wind Energy Resource Atlas of the United States, http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/atlas_index.html.
- Panda, R. K., Sarkar, T. K. and Bhattacharya, A. K. (1990). Stochastic study of wind energy potential of India, *Energy*, **15**, 921-930.
- Petersen, E. L., Mortensen, N. G., Landberg, L., Hojstrup, J. and Frank, H. P. (1997). *Wind Power Meteorology*, Riso-I-1206(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Press, S. J. (2005). *Applied Multivariate Analysis: Using Bayesian and Frequentist Methods of Inference*, 2nd ed., Dover Publications, New York.
- Scerri, E. and Farrugia, R. (1996). Wind data evaluation in the Maltase Islands, *Renewable Energy*, **7**, 109-114.

The Establishment of a High Resolution($1Km \times 1Km$) Wind Energy Map Based on a Statistical Wind Field Model

Hea-Jung Kim¹ · Hyun-Sik Kim² · Young-Jean Choi³ · Jae-Young Byon⁴

¹Department of Statistics, Dongguk University; ²Department of Statistics, Dongguk University

³Meteorological Application Research Lab, National Institute of Meteorological Research

⁴Meteorological Application Research Lab, National Institute of Meteorological Research

(Received October 2010; accepted October 2010)

Abstract

This paper details a method for establishing a wind energy map having($1Km \times 1Km$) resolution. The map is essential for measurement and efficiency-testing of wind energy resources and wind site analysis. To this end, a statistical wind field model is estimated that covers 345,682 regions obtained by $1Km \times 1Km$ lattices made over South Korea. The paper derives various characteristics of a regional wind energy resource under the statistical wind field model and estimates them to construct the wind energy map. Kolmogorov-Smirnov test, based on TMY(typical meteorological year) wind data of 76 weather station areas, shows that a Log-normal model is adequate for the statistical wind field model. The model is estimated by using the wind speed data of 345,682 regions provided by the National Institute of Meteorological Research(NIMR). Various wind energy statistics are studied under the Log-normal wind field model. As an application, the wind energy density(W/m^2) map of South Korea is constructed with a resolution of $1Km \times 1Km$ and its utility for the wind site analysis is discussed.

Keywords: Statistical wind field model, Wind energy map, $1Km \times 1Km$ resolution, Log-normal model, TMY wind data, Mean wind energy density.

This research was supported by a Grant「Weather Resources Maps and Development of analysis for Local Weather」from the National Institute of Meteorological Research.

¹Corresponding author: Professor, Department of Statistics, Dongguk University-Seoul, Seoul 100-715, Korea. E-mail: kim3hj@dongguk.edu