

남한전역 1Km × 1Km 격자지점에 대한 수치기상모의풍속의 정확도 향상을 위한 통계적 보정법

김혜중¹ · 김현식² · 최영진³ · 이승우⁴ · 서범근⁵

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

⁴기상청 국립기상연구소, 응용기상연구과, ⁵기상청 국립기상연구소, 응용기상연구과

(2011년 8월 접수, 2011년 10월 채택)

요약

본 논문은 수치기상모형에 의해 계산된 수치기상모의풍속(1km × 1km 해상도)의 정확도를 향상시키기 위한 통계적 보정법을 제안하였다. 이를 위해 남한전역을 1km × 1km 격자로 나눈 지점(345,682지점)에 적합한 통계적 바람장 모형으로 부터 남한지역의 바람장을 추정하는 절차와 격자지점별/월별 보정인자를 계산하여 추정된 바람장과 수치 기상모의풍속간의 간극을 보정하는 절차로 이루어진 보정인자법을 개발하였다. 또한 75개 기상관측소지점에서 계산된 수치기상모의풍속자료에 보정인자법을 적용시켜 본 논문에서 제안된 보정법의 유용성을 보였다.

주요용어: 보정인자법, 수치기상모의풍속, 통계적 바람장모형, TMY 풍속자료, 기상자원지도, 풍속보정.

1. 서론

불규칙한 기상자원을 국가차원에서 효율적으로 확보·관리하기 위해 기상청은 풍력-기상자원지도, 태양광-기상자원지도, 수문기상정보 등 여러 형태의 기상정보를 기상관련 수요자들에게 제공하고 있다. 최근에는 이러한 정보를 정확하게 생산하기위해 기상청은 수치모형인 중규모 수치기상모형과 CFD(computation fluid dynamics)기반의 기상진단모형 개발에 큰 진전을 보였고, 이러한 경험을 바탕으로 국제적인 경쟁력과 그린에너지 산업 현장에서의 유용성을 가진 상세기상진단모형의 개발과 활용기술에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 한편 수치모형으로 부터 생산된 기상정보의 효율증대를 위해서는 무엇보다도 자료의 정확성이 담보되어야 하고, 기상정보자료를 사용한 기상예측시스템의 정확도가 높아야 할 것이다. 기상정보의 정확성 향상을 위한 노력의 일환으로 국립기상연구소는 2009년에 한반도의 풍력-기상자원지도를 선진국 수준인 1km × 1km 이하의 해상도로 향상시켰다 (기상청 국립기상연구소, 2009). 이러한 고해상도의 자원지도는 한반도바람자원 TMY(typical meteorological year)로부터 얻은 전구기상분석자료를 초기자료로 입력한 중규모 수치기상모형의 수치기상모의에 의해 작성된 것이다 (김혜중 등, 2009). 다만 고해상도의 자원지도임에도 불구하고 산악지역 등 복잡한 지형에서는 수치모형에 사용된 지형이 실제지형을 정확하게 반영하지 못한 지역이 생기며, 그 지역에서의 수치기상모의풍속은 실제 풍속과 불일치할 수도 있다 (대기환경연구회, 2003). 따라서 풍력-기상자원지도의 정확도를 한층 더 향상시키기 위해서는 수치기상모의로부터 계산된 각 격자지점별 풍속과 그 지

본 연구는 기상청 국립기상연구소의 학술용역과제인 「시범지역 수문기상 감시 및 모델링연구」의 지원으로 수행되었음.

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

역의 실제풍속이 최대한 일치되도록 보정하는 방법이 필요하다. 이를 위해 권진욱과 강부식 (2008) 및 Leung 등 (1999), Wood 등 (2002)들이 사용한 분위수사상법(quantile mapping)과 Benth와 Saltyte (2011)의 시공간 풍속모형 등을 고려할 수 있다. 그러나 남한 전역을 $1km \times 1km$ 격자로 나눈 지점의 대다수는 풍속관측 시설이 존재하지 않아, 그 지점들에 대한 수치기상모의풍속(또는 풍력-기상자원지도)의 보정에 실제풍속의 관측값들을 필요로 하는 기존의 방법(앞에서 언급한 방법)들은 적용할 수가 없다. 또한 실제풍속이 없는 지점에서 계산된 수치기상모의풍속의 보정에 대한 체계적인 연구는 아직 없는 것으로 알려졌다 (권진욱과 강부식, 2008).

이점에 착안하여 본 논문은 고해상도의 풍력-기상자원지도 작성에 필요한 $1km \times 1km$ 격자점별/월별 수치기상모의풍속의 정확성 향상 및 품질관리에 필요한 보정법을 제안하고 그 유용성을 보이고자 한다. 이를 위해 통계적 바람장모형을 사용한 보정인자법(tuning factor method)을 새로이 개발하였으며, 개발된 방법은 실제풍속의 관측값 유무에 관계없이 모든 지점들에 대한 수치기상모의풍속의 보정이 가능하여 기존 보정법의 한계점을 극복하는 방법이다. 이 방법을 개발하기 위해, 2장은 국내 75개 기상관측소지점의 실제 TMY풍속(m/sec)과 수치기상모의풍속(m/sec)간의 간극에 대해 월별/지역별로 분석하고, 그 결과를 바탕으로 통계적 바람장모형(wind field model)을 설정하여 $1km \times 1km$ 격자지점(위도와 경도로 표시되는 345,682개 지점)에서 예상되는 실제풍속과 수치기상모의풍속간의 간극을 추정하는 방법을 제시하였다. 3장은 통계적 바람장모형으로 추정된 두 풍속간의 간극을 상쇄하는데 필요한 보정인자계산식과 수치기상모의풍속의 보정식을 함께 제안하였다. 또한 4장은 본 연구에서 개발된 보정인자법을 75개 기상관측소지역의 수치모의풍속자료 (국립기상연구소, 2010)에 적용시켜 그 방법의 유용성을 보였다.

2. 통계적 바람장모형

2.1. 풍속의 아노말리분석

국립기상연구소의 중규모 수치기상모형 (국립기상연구소, 2010)에 의해 계산된 월별/고도별/ $1km \times 1km$ 격자지점별 수치기상모의풍속을 보정하는 방법을 개발하기 위해서는 실제풍속과 모의풍속간의 아노말리분석(anomaly analysis)이 선행되어야한다. 이에 실제풍속자료가 있는 75개 기상관측소지점의 지상 80미터(발전기 설치고도)의 TMY풍속과 수치기상모의풍속간의 아노말리분석을 월별/관측소지점별로 실시하였다. i 번째 기상관측소의 지상 80미터(m) TMY풍속($v_i(80)$)은 수정-Deacon의 변환공식인

$$v_i(h) = v_i(h_{0i}) \times \left(\frac{h}{h_{0i}} \right)^{\alpha_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 75 \quad (2.1)$$

을 사용하여 계산하였다 (서은경 등, 2009). 단 $v_i(h_{0i}) = i$ 번째 관측소의 지상 h_{0i} 미터에서 관측된 TMY풍속, $\alpha_i = a_i + b_i \ln v(h_{0i})$, $a_i = (\ln h_{gi} - \ln Z_{0i})^{-1} - b_i$, $h_{gi} = \sqrt{h \times h_{0i}}$, $b_i = -.088 \times \{1 - .088 \ln(h_{0i}/10)\}^{-1}$, Z_{0i} 는 주변지형의 거칠기 길이(roughness length)이며, Z_{0i} 값은 기상청에서 제공되는 지표이용도자료에 USGS(united states geological survey)의 24개 거칠기 길이 분류표를 적용하여 얻는다. 한편 김해중 등 (2010a)은 75개 관측소지점의 풍속($v_i(h_{0i})$)자료에 Kolmogorov-Smirnov 검정을 월별로 실시하여 각 기상관측소지점의 월별풍속분포가 로그정규풍속분포인

$$f(v_i(h_{0i})) = \frac{1}{v_i(h_{0i})\sigma_i\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\ln v_i(h_{0i}) - \mu_i(h_{0i}))^2}{2\sigma_i^2} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, 75 \quad (2.2)$$

에 적합함을 보였다. 여기서 $\mu_i(h_{0i})$ 와 $\sigma_i = \sigma_i(h_{0i})$ 는 i 번째 기상관측소의 지상 h_{0i} 미터 풍속분포의 척

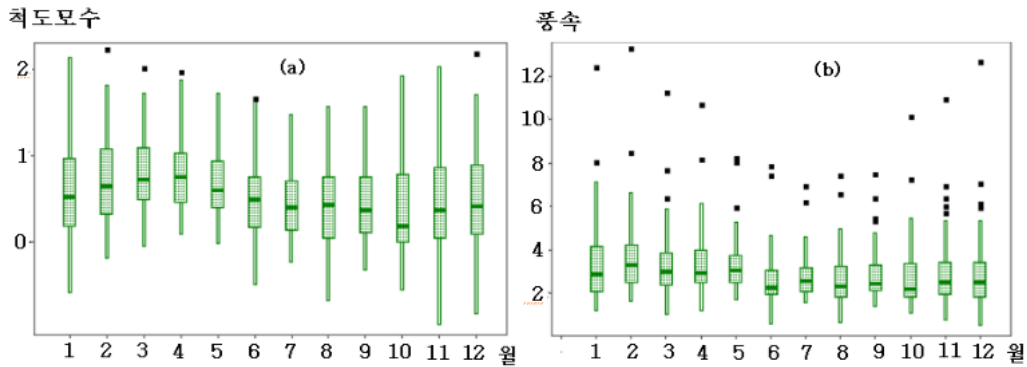


그림 2.1. 75개 기상관측소 지상 80미터지점의 월별 풍속모형의 척도모수추정값(a)과 평균풍속(b)의 Box plot

도모수와 형상모수를 각각 나타낸다. 또한 로그정규분포의 성질과 식 (2.1)에 의하면

$$\mu_i(h) = \alpha_i(\ln h - \ln h_{0i}) + \mu_i(h_{0i}) \text{와 } \sigma_i = \sigma_i(h_{0i}) = \sigma_i(h) \quad (2.3)$$

의 관계가 성립된다. 이는 분포의 척도모수는 고도에 따라 식 (2.3)에 의해 변하나 형상모수는 고도가 변하여도 동일한 값인 σ_i 이 됨을 나타낸다. 따라서 i 번째 기상관측소의 지상 h_{0i} 미터의 풍속과 풍속분포의 척도모수의 값만 있으면 별도의 절차없이 지상 h 미터의 풍속과 풍속분포의 척도모수를 식 (2.3)으로부터 간단히 계산(또는 추정)할 수 있다. 그림 2.1은 변환식 (2.3)을 사용하여 추정한 75개 기상관측지점의 지상 80미터 월별 풍속모형 (로그정규풍속모형)의 척도모수추정값과 평균풍속의 분포를 상자그림으로 나타낸 것이다. 그림 2.1은 TMY 풍속분포의 월별 척도모수추정값과 평균풍속이 유사한 변동패턴을 가지고 있어, 월 평균풍속과 척도모수간의 회귀성이 유의함을 나타내고 있다.

한편 수정-Deacon의 변환공식으로 계산한 75개 기상관측소 지상 80미터의 TMY 풍속과 수치기상모의 풍속의 월 평균풍속들에 대해 아노말리분석을 실시하였다. 그림 2.2는 75개 기상관측소지점의 1월과 6월의 평균풍속(TMY 풍속 및 수치기상모의 풍속)을 시도표(times series plot)로 나타낸 것으로 이 그림들은 아노말리분석에서 얻어진 다음의 두 가지 결과를 잘 나타내고 있다: 첫째, TMY 풍속과 수치기상모의 풍속 간에는 차이가 존재하며, 그 차이의 크기와 부호(sign)는 매월마다 불규칙하게 변한다. 둘째, TMY 풍속과 수치기상모의 풍속차의 월별변동은 지역에 따라 서로 다른 패턴을 보인다. 이와 같은 아노말리분석 결과는 1km × 1km 격자지점별/월별 수치기상모의 풍속에 대한 보정이 풍력-기상자원지도의 정확도 향상을 위해 필요하며, 유효한 보정효과를 기대하기 위해서는 격자지점별/월별 보정인자(tuning factor)를 사용하여 평균풍속과 수치기상모의 평균풍속간의 간극을 상쇄하는 방법이 필요하다는 것을 의미한다. 그리고 그림 2.1에 의하면 격자지점별/월별 평균풍속은, 해당풍속에 적합한 로그정규풍속모형의 척도모수와 유의한 관계를 가지고 있어, 격자지점별/월별 보정인자 추정을 위한 통계적 바람장모형에 풍속모형의 척도모수값의 정보를 반영시켜야 되는 것으로 나타났다.

2.2. 통계적 바람장모형

앞 절의 아노말리분석에 의하면 풍력-기상자원지도(1km × 1km 해상도)의 정확도 향상을 위해서는 수치모델로부터 계산된 수치기상모의 풍속을 자원지도의 작성에 직접 사용하는 대신 그 값을 적절히 보정하여 사용해야 되는 것으로 나타났다. 수치기상모의 풍속의 보정법에는 Leung 등 (1999)과 Wood 등

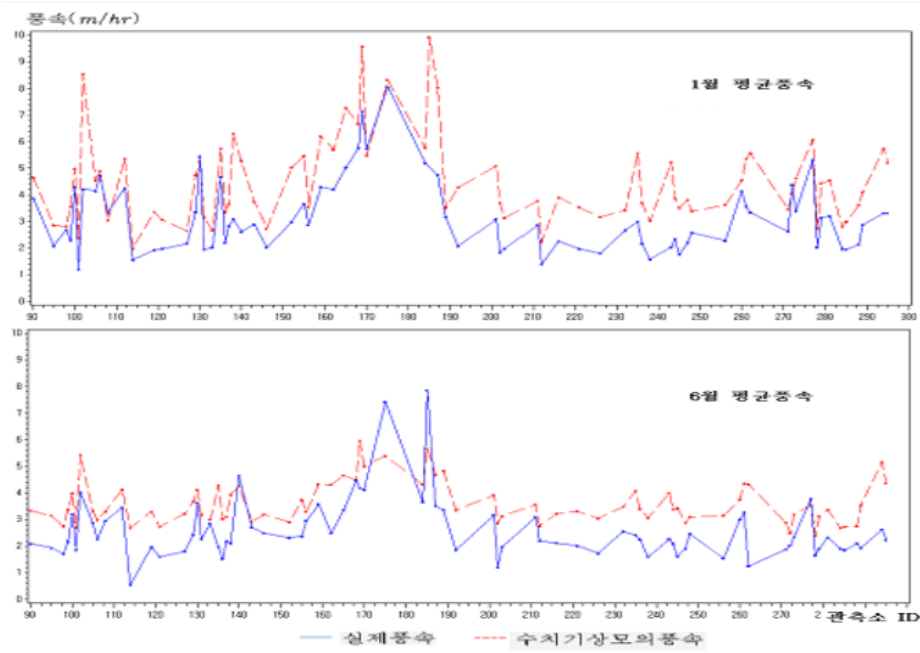


그림 2.2. 75개 기상관측소 지상 80미터지점의 월별 풍속모형과 수치기상모의평균풍속(1월과 6월)

(2002)들이 사용한 분위수사상법(quantile mapping)과 Benth와 Saltyte (2011) 등이 사용한 시공간 풍속모형에 의한 보정법이 있다. 전자는 보정지점에 대한 수치기상모의풍속과 TMY풍속의 경험적 분포가 유사하도록 보정하는 방법이다. 그러나 경험적 풍속분포의 작성에 필요한 TMY풍속자료의 수집이 불가능하여(345,682개 $1km \times 1km$ 격자지점들 중에서 75개 기상관측소지점에서만 TMY풍속자료의 수집이 가능), 분위수사상법은 본 연구의 목적인 풍력-기상자원지도의 보정에는 부적합한 방법이다. 후자 역시 모든 $1km \times 1km$ 격자지점에 대한 풍속자료의 수집이 불가능하여 풍력-기상자원지도의 보정에 적용될 수 없는 방법이다. 이에 본 논문은 후자와 다른 형태의 통계적 바람장모형에 근거한 풍속보정법을 개발하고, 개발된 방법이 풍력-기상자원지도의 보정에 유용함을 보이고자 한다.

75개 기상관측소지점의 위치는 남한전역의 기상상황을 감시할 수 있도록 전국에 걸쳐 골고루 퍼져 있다. 따라서 이 지점들은 345,682개 지점($1km \times 1km$ 격자지점)으로부터 랜덤추출한 표본지점으로 가정할 수 있을 것이다. 이 가정을 김해중 등 (2010a)의 결과에 적용시키면, 남한전역에 있는 $1km \times 1km$ 격자지점들의 월별 풍속분포가 로그정규분포를 따른다는 가정이 가능하게 된다. 이러한 가정들을 전제로 하여, 한반도 통계적 바람장 모형(월별 모형)을 다음 세 개의 확률모형들로 설정하였다.

[j 번째 월의 통계적 바람장모형]

- (i) i 번째 격자점에서 측정된 j 번째 월의 지상 h 미터 평균풍속모형:

$$W_{ij}(h) = f_j \left(S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, K_i, \hat{\mu}_{ij}(h), \hat{Y}_{ij}(h) \right) + \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} \sim iid N(0, \sigma_\varepsilon^2). \quad (2.4)$$

- (ii) i 번째 격자점에서 계산된 j 번째 월의 지상 h 미터 로그정규풍속분포의 척도모수모형:

$$\mu_{ij}(h) = g_j \left(S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, K_i, \hat{Y}_{ij}(h) \right) + e_{ij}, \quad e_{ij} \sim iid N(0, \sigma_e^2). \quad (2.5)$$

(iii) i 번째 격자점에서 조정된 j 번째 월의 지상 h 미터 수치기상모의 평균풍속모형:

$$Y_{ij}(h) = \ell_j(S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, K_i, V_{ij}(h)) + \eta_{ij}, \quad \eta_{ij} \sim iid N(0, \sigma_\eta^2). \quad (2.6)$$

$i = 1, 2, \dots, N$ ($N = 345,682$ 격자지점의 수). 단 f_j, g_j 와 ℓ_j 는 선형회귀함수이며, 함수에 나타난 독립 변수들의 여러 함수형태(로그함수, 제곱근 등)를 회귀식의 독립변수로 가진다. 여기서 $S_{i1} = i$ 번째 격자점의 위도, $S_{i2} = i$ 번째 격자점의 경도, $S_{i3} = i$ 번째 격자점의 해발고도, $K_i = i$ 번째 격자점의 지표 이용도, $W_{ij}(h) = i$ 번째 격자점에서 관측되는 j 번째 월의 지상 h 미터 평균풍속값, $\mu_{ij}(h) = i$ 번째 격자점에서 계산되는 j 번째 월의 지상 h 미터 로그정규풍속분포의 척도모수값, $Y_{ij}(h) = i$ 번째 격자점에서 계산되는 j 번째 월의 지상 h 미터 수치기상모의 평균풍속의 조정값. $V_{ij}(h) = i$ 번째 격자점에서 계산되는 j 번째 월의 지상 h 미터 수치기상모의 평균풍속의 조정값. $V_{ij}(h) = i$ 번째 격자점에서 계산된 j 번째 월의 지상 h 미터 수치기상모의 평균풍속. 그리고 $\hat{Y}_{ij}(h)$ 와 $\hat{\mu}_{ij}(h)$ 는 회귀식 (2.6)과 (2.5)에서 각각 추정된 $Y_{ij}(h)$ 와 $\mu_{ij}(h)$ 의 값. 앞에서 정의된 통계적 바람장 모형은 다음의 네 단계 절차를 통해 추정된다.

[통계적 바람장 모형 추정절차]

- (단계 1) 자료변환: 수정-Deacon의 공식인 식 (2.1)을 사용하여 j 번째 월의 75개 기상관 측지점별 TMY풍속과 수치기상모의풍속을 지상고도 h 미터의 풍속으로 변환시켜 각각의 월 평균풍속을 계산한다.
- (단계 2) 수치기상모의 풍속조정식 추정: 75개 기상관측소지점 지상 h 미터에서 관측된 j 번째 월의 평균풍속을 사용하여 식 (2.6)을 추정하는 단계이다. 여기서 회귀식의 종속 변수인 $Y_{ij}(h)$ 의 관측값은 (단계 1)에서 변환시킨 75개 기상관측소 지점의 j 번째 월 지상 h 미터의 TMY평균풍속이 된다.
- (단계 3) 척도모수식 추정: 식 (2.3)을 사용하여 75개 기상관측소지점의 j 번째 월 지상 h 미터에 적합한 로그정규풍속모형의 척도모수를 최대우도법으로 추정하고, 추정된 값들을 종속변수의 관측값으로 사용하여 회귀식 (2.5)를 추정한다 (김해중 등, 2010b).
- (단계 4) 월평균풍속식 추정: (단계 1)~(단계 3)을 통해 얻은 75개 기상관측소지점 지상 h 미터의 독립변수값($\hat{Y}_{ij}(h)$ 와 $\hat{\mu}_{ij}(h)$ 값)들을 j 번째 월 평균풍속인 $W_{ij}(h)$ 에 회귀시켜 식 (2.4)를 추정한다. 여기서 회귀식의 추정에 사용될 종속변수인 $W_{ij}(h)$ 의 관측값은 (단계 1)에서 지상 h 미터의 값으로 변환시킨 75개 기상관측소지점의 j 번째 월의 TMY평균풍속이다.

위의 절차를 월별로 적용시키면 $1km \times 1km$ 격자지점별/고도별/월별 평균풍속인 $W_{ij}(h)$ 을 추정할 수 있으며, 추정된 $W_{ij}(h)$ 값들을 위도, 경도에 따라 종합하여 나타낸 것을 남한전역의 월평균 바람장이라 한다. 예를 들어, 위의 네 단계 계산절차를 통해 선형회귀식인 식 (2.4)~(2.6)을 변수선택법으로 추정한 결과, 남한전역 지상 80미터(발전기 설치고도)의 1월 바람장 모형은 다음과 같이 나타났다.

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad \hat{W}_{i1}(80) &= -1.1014S_{i1}^{\frac{1}{2}} + 0.0654S_{i2} - 0.0015\hat{Y}_{i1}(80)^3 + 1.4114\hat{\mu}_{i1}(80) + 0.7057\hat{\mu}_{i1}(80)^3 + 0.0378K_i. \\
 &\quad (0.446) \quad (0.021) \quad (9.369 * 10^{-4}) \quad (0.146) \quad (0.086) \quad (0.012) \\
 \text{(ii)} \quad \hat{\mu}_{i1}(80) &= 3.49677S_{i1}^{\frac{1}{2}} - 0.04651S_{i1}^2 + 0.00079729S_{i1}^3 + 2.06486\hat{Y}_{i1}(80)^{\frac{1}{2}} - 0.2137\hat{Y}_{i1}(80) - 0.00995K_i. \\
 &\quad (0.69429) \quad (0.00801) \quad (0.000133) \quad (0.20921) \quad (0.05483) \quad (0.00265) \\
 \text{(iii)} \quad \hat{Y}_{i1}(80) &= 0.8866V_{i1}(80) + 0.0620V_{i1}(80)^2, \quad i = 1, 2, \dots, 345,682. \\
 &\quad (0.099) \quad (0.007)
 \end{aligned}$$

여기서 괄호안의 값은 최소제곱추정량의 표준오차이며, 추정된 회귀식 (i), (ii), (iii)의 결정계수(R^2)는 각각 $R_{(i)}^2 = 0.9419$, $R_{(ii)}^2 = 0.8544$, $R_{(iii)}^2 = 0.9901$ 로 계산되어 종속변수값의 변동에 대해 높은 설명력을 가진 회귀식들이므로 나타났다. 만약 회귀식 (i)에서 추정되는 $1km \times 1km$ 격자지점들의 지상 80미터 평균풍속 $\hat{W}_{i1}(80)$ 을 위도 및 경도별로 한꺼번에 표현하면 남한 전역 평균풍속(1월)의 지상 80미터 바람장이 될 것이다. 또한 지상 80미터와 다른 지상 h 미터의 바람장은 $\hat{W}_{i1}(80)$ 값들을 식 (2.1)을 사용하여 $\hat{W}_{i1}(h)$ 의 값으로 변환시키는 계산에 의해 간단히 추정된다.

3. 보정인자법

앞 장에서 설정한 통계적 바람장모형에 의해 남한전역의 월평균풍속을 $1km \times 1km$ 해상도로 추정하고, 추정된 풍속을 사용하여 계산한 격자지점별/월별/고도별 보정인자(tuning factor; TF)에 의해 수치기상모의풍속을 보정하는 방법(보정인자법)을 개발하였다. 보정인자법의 첫째 단계는 i 번째 격자점 j 번째 월의 지상 h 미터 평균풍속인 $W_{ij}(h)$ 값을 회귀식 (2.4)로부터 추정된 후, 격자지점별/월별/고도별 보정인자를 다음 식으로 계산하는 단계이다.

i 번째 격자지점의 j 번째 월의 지상 h 미터에 대한 보정인자식:

$$TF_{ij}(h) = \frac{\hat{W}_{ij}(h)}{V_{ij}(h)}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, 12. \quad (3.1)$$

여기서 $N = 345,682$ (격자지점의 수)이며, $\hat{W}_{ij}(h) =$ 추정된 회귀식 (2.4)로 부터 추정된 i 번째 격자지점의 j 번째 월의 지상 h 미터 평균풍속, $V_{ij}(h) =$ 수치기상모의로부터 계산된 i 번째 격자지점 j 번째 월의 지상 h 미터 수치기상모의 평균풍속이다. 따라서 $TF_{ij}(h) > 1$ 이면, 수치기상모의에 의해 계산된 i 번째 격자지점의 j 번째 월의 지상 h 미터 평균풍속이 실제풍속보다 과소추정되어 과소추정부분의 보정이 필요함을 의미하며; $TF_{ij}(h) < 1$ 이면, 수치기상모의에 의해 계산된 풍속이 실제풍속보다 과대추정되어 이에 대한 보정이 역시 필요함을 의미한다. 그리고 $TF_{ij}(h) = 1$ 이면, 보정의 필요가 없음을 의미한다.

보정인자법의 둘째 단계는 i 번째 격자지점의 j 번째 월에서 1시간(또는 10분) 간격으로 계산된 모든 수치기상모의풍속을 보정하는 단계로 이때 사용될 수치기상모의풍속의 보정식은 다음과 같다.

i 번째 격자지점의 j 번째 월의 t 시점에서 지상 h 미터 수치기상모의풍속보정식:

$$V_{aij}(h, t) = TF_{ij}(h) \times V_{ij}(h, t). \quad (3.2)$$

따라서 둘째 단계는 해당 격자지점의 j 번째 월에서 1시간(또는 10분) 간격으로 계산된 지상 h 미터의 수치기상모의풍속($V_{ij}(h, t)$)에 식 (3.1)로부터 얻은 $TF_{ij}(h)$ 값을 일률적으로 곱하여 수치기상모의풍속에서 과대 또는 과소 추정된 부분을 모두 보정하는 단계이다.

표 3.1은 식 (3.1)에 의해 계산된 남한전역 지상 80미터의 격자지점별/월별 보정인자들 중에서 75개 기상관측소지점의 1월에 해당되는 보정인자를 나열한 것이다. 표 3.1에 의하면 서울, 울진, 완도, 고산, 영동(5개)지역의 보정인자는 $TF > 1$ 를 만족시킨다. 따라서 이들 지역의 수치기상모의풍속이 실제풍속을 과소추정하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 이에 반하여, 그 외의 기상관측소지점(70개)들에 대한 수치기상모의풍속은 그 지역 실제풍속을 과대추정하여, 보정인자가 모두 $TF < 1$ 인 값으로 계산되었다. 특히 춘천지역의 보정인자(1월)는 75개 지점 중에서 최소인 $TF = .31055$ 의 값을 가져 수치기상모의이 이 지역의 1월 풍속에 대해서는 타 지역보다 훨씬 과대추정하는 것으로 나타났다. 특히 강릉지역의 보정인자는 1에 가장 가까운 $TF = .99863$ 으로 계산되었으며, 이는 강릉지역 풍속에 대한 1월의 수치기상모의결과는 실제평균풍속과 거의 일치하고 있음을 보인다.

표 3.1. 75개 기상관측지점 지상 80미터의 보정인자(1월)

지점명	TF	지점명	TF	지점명	TF	지점명	TF
속초	0.81877	추풍령	0.69881	성산	0.52714	장수	0.7987
철원	0.73912	안동	0.72197	서귀포	0.96335	순천	0.64173
동두천	0.86367	상주	0.74515	진주	0.51125	장흥	0.87303
문산	0.634	포항	0.56914	강화	0.54098	해남	0.65438
대관령	0.78639	군산	0.49558	양평	0.49511	고흥	0.59544
춘천	0.31055	대구	0.78728	이천	0.63023	봉화	0.77652
백령도	0.58808	전주	0.86878	인제	0.68982	영주	1.01801
강릉	0.99863	울산	0.65282	홍천	0.66902	문경	0.6722
동해	0.87504	마산	0.66385	태백	0.70275	영덕	0.78755
서울	1.03941	광주	0.7537	제천	0.63072	의성	0.79013
인천	0.75361	부산	0.78717	보은	0.57937	구미	0.648
원주	0.7819	통영	0.75881	천안	0.75103	영천	0.7109
수원	0.5871	목포	0.67696	보령	0.47478	거창	0.7373
영월	0.69182	여수	0.96659	부여	0.54513	합천	0.75737
충주	0.76447	흑산도	0.93201	금산	0.52309	밀양	0.64037
서산	0.73464	완도	1.01854	부안	0.38422	산청	0.66879
울진	1.01601	진도	0.89959	임실	0.57466	거제	0.56444
청주	0.63415	제주	0.93255	정읍	0.52636	남해	0.60601
대전	0.88021	고산	1.12839	남원	0.61807	-	-

4. 인자보정법의 유용성평가

수치기상모의풍속의 품질관리 및 보정에 개발된 인자보정법을 사용하기 위해서는 그것이 유용한 것인지 평가하는 작업이 필요하다. 유용성 평가의 기준은 다음과 같이 정의되는 i 지점과 j 번째 월의 지상 h 미터 시간별 풍속에 대해 보정 전과 보정 후의 (root mean square difference)을 계산하고 비교하여 본 연구에서 개발한 보정법의 유용성을 평가하고자 한다.

$$\text{보정 전: RMSD}(h)_{\text{전}ij} = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{t=1}^{n_j} (v_{ij}(h, t) - V_{ij}(h, t))^2}, \quad (4.1)$$

$$\text{보정 후: RMSD}(h)_{\text{후}ij} = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{t=1}^{n_j} (v_{ij}(h, t) - V_{ij}^{\text{Tune}}(h, t))^2}, \quad (4.2)$$

$n_j = j$ 번째 월에 포함된 시간의 수, $v_{ij}(h, t) = i$ 번째 지점의 지상 h 미터에서 관측된 지점 t 의 TMY 풍속, $V_{ij}(h, t) =$ 보정 전 t 시점의 수치기상모의풍속(지상 h 미터), $V_{ij}^{\text{Tune}}(h, t) =$ 보정 후 t 시점의 수치모의풍속(지상 h 미터).

그림 4.1과 그림 4.2는 대관령 기상관측소지점의 지상 80미터에 대해 1월(31일×24시점)의 보정 전 시간별 수치기상모의풍속과 보정인자법(TF = 0.78639)으로 계산된 보정 후 수치기상모의풍속을 실제 TMY 풍속과 함께 각각 작성한 시도표(time series plot)들이다.

위 두 그림은 수치기상모의풍속과 실제 TMY 풍속간의 간극이 수치기상모의풍속을 보정 한 후에 더욱 좁아진 것을 나타내고 있다. 또한 그림에 나타난 보정 전과 후의 풍속의 RMSD 값은 각각 $\text{RMSD}(80)_{\text{전}} = 2.16599(m/sec)$ 와 $\text{RMSD}(80)_{\text{후}} = 1.86004(m/sec)$ 로 계산되어, 본 논문에서 제안한 보정 인자법이 대관령지역의 1월에 대한 수치기상모의풍속의 보정에 유용한 것으로 나타났다. 한편 인자보

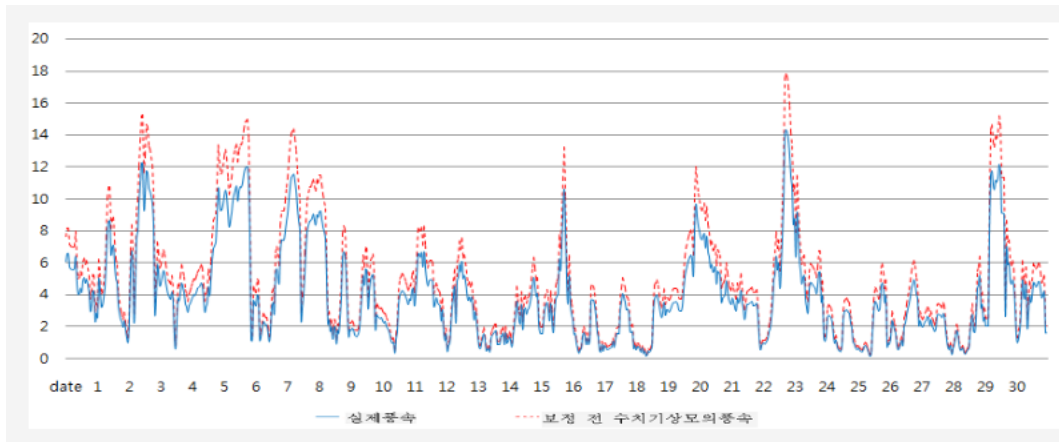


그림 4.1. 대관령 1월의 실제풍속과 보정 전 수치기상모의풍속 (지상 80미터)

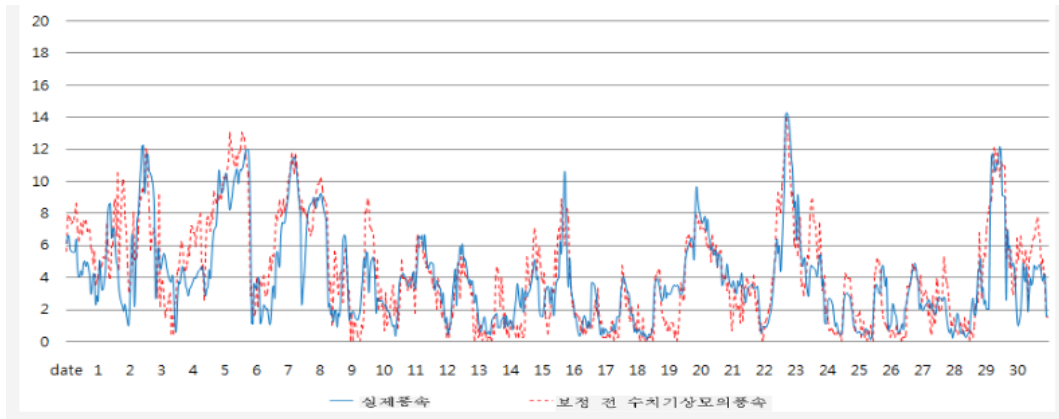


그림 4.2. 대관령 1월의 실제풍속과 보정 후 수치기상모의풍속 (지상 80미터)

정법이 $1km \times 1km$ 격자지점의 수치기상모의풍속의 보정에 일반적으로 사용될 수 있는 것임을 보이기 위해, 실제로 풍속이 관측된 75개 기상관측소지점(대관령지점 포함)의 지상 80미터 풍속을 대상으로 보정 전과 후의 수치기상모의풍속의 RMSD값들을 월별로 계산하였다. 표 4.1은 이들 중에서 1월에 해당되는 보정 전과 후의 RMSD계산 결과를 지점별로 대비시킨 것이다. 표 4.1에 의하면 두의 차이가 거의 없는 세 개 지점(울진, 완도, 영주)을 제외한 모든 기상관측소지점에서 $RMSD(80)_{후}$ 가 $RMSD(80)_{전}$ 보다 작으며, 백령도와 포항지점 등에서는 두의 비($RMSD(80)_{전}/RMSD(80)_{후}$)가 2를 넘기고 있어 인자보정법에 의한 보정효과가 큼을 나타내고 있다. 1월에 대한 수치기상모의풍속보정 결과는 다른 달(2월~12월)의 계산 결과와 유사하게 나타나, 개발된 인자보정법이 풍력-기상자원지도의 정확성 향상을 위한 수치기상모의풍속의 보정에 유용하게 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문은 기상청의 중규모기상모형으로부터 계산된 수치기상모의풍속의 품질관리를 위해 인자보정법

표 4.1. 기상관측소지점의 보정 전과 보정 후의 수치기상모의풍속(80미터)의 RMSD(1월)

지점명	RMDS _전	RMDS _후	지점명	RMDS _전	RMDS _후	지점명	RMDS _전	RMDS _후	지점명	RMDS _전	RMDS _후
속초	2.7788	2.2565	추풍령	2.4123	2.0491	성산	4.2312	1.6366	장수	1.9678	1.7144
철원	1.8282	1.5305	안동	1.9291	1.2468	서귀포	2.4309	2.3360	순천	1.9853	1.3165
동두천	1.5517	1.4891	상주	1.8455	1.4809	진주	3.0480	1.3474	장흥	2.1823	2.0573
문산	2.0125	1.3110	포항	4.0314	1.5101	강화	2.9001	1.7416	해남	2.8180	1.6642
대관령	2.1660	1.8600	군산	3.5249	1.9576	양평	2.7247	1.1251	고흥	3.0728	1.8546
춘천	1.9001	1.1352	대구	1.8431	1.3031	이천	1.9090	1.0612	봉화	2.7405	2.2182
백령도	5.2760	1.8747	전주	1.5837	1.2843	인제	2.0892	1.7783	영주	2.4449	2.4687
강릉	2.4943	2.4903	울산	2.9464	1.7545	홍천	1.6878	1.1041	문경	2.5887	1.7273
동해	2.6178	2.3929	마산	2.7480	1.6763	태백	3.2014	2.0389	영덕	2.5604	2.3582
서울	1.5103	1.5531	광주	1.8595	1.4969	제천	2.4661	1.4157	의성	1.7534	1.4689
인천	1.9347	1.3556	부산	3.2848	2.3199	보은	2.0365	1.4393	구미	2.5174	1.6248
원주	1.3427	1.0354	통영	2.5436	1.7664	천안	1.6608	1.3041	영천	2.2557	1.4991
수원	2.0139	1.0237	목포	3.0344	1.8676	보령	3.2410	1.4468	거창	2.0994	1.5288
영월	2.2138	1.4502	여수	2.3584	2.2588	부여	2.1630	1.2690	합천	1.9449	1.4052
충주	1.8949	1.4865	흑산도	3.0540	2.4685	금산	2.0493	0.9986	밀양	2.4255	1.3685
서산	2.1606	1.4216	완도	2.6928	2.6939	부안	3.8968	1.3187	산청	2.2950	1.5179
울진	1.9642	1.9797	진도	2.7803	2.6778	임실	2.2240	1.3916	거제	3.1185	1.6177
청주	1.9037	1.0146	제주	2.0301	1.8211	정읍	2.5549	1.1772	남해	3.0161	1.7828
대전	1.4450	1.2091	고산	3.8925	3.2599	남원	2.4969	1.4842			

을 개발하였다. 개발된 보정법은 통계적 바람장모형으로부터 추정된 남한지역의 바람장(1km × 1km 해상도)을 식 (3.1)의 보정인자 계산식에 적용시켜 월별/격자지점별 보정인자를 계산하고, 이를 식 (3.2)의 풍속보정식에 적용시켜 수치기상모의풍속(1시간 또는 10분 간격의 풍속)을 격자지점별/월별로 보정하는 절차로 이루어졌다. 75개 기상관측소지점에서 계산된 수치기상모의풍속에 대해 인자보정법을 적용하여 계산한 보정 후 풍속의 RMSD(2)와 보정 전 풍속의 RMSD(1)를 비교함으로써 제안된 보정법의 유용성을 평가하였다. 평가결과에 의하면, 대부분의 격자지점별/월별 비교에서 RMSD(2)가 RMSD(1)보다 작은 값을 가져, 인자보정법이 한반도 풍력-기상자원지도의 정확도 향상에 유용한 수치기상모의풍속 보정법인 것으로 나타났다. 본 논문에서는 1km × 1km 격자지점의 수치기상모의풍속에 대한 보정에 초점을 두고 인자보정법을 개발하였으나, 이 보정법은 초고해상도의 격자지점(100m × 100m 격자)의 수치기상모의풍속뿐 아니라 강수량과 태양광 등 다른 기상요소들의 수치기상모의값에 대한 보정에도 응용이 가능할 것이다.

참고문헌

권진욱, 강부식 (2008). 시공간적 random cascade 모형을 이용한 한반도지역 기후모의 상세화기법, <한국수자원학회 학술발표회 논문집>, 120-124.

기상청 국립기상연구소 (2009). 한반도 풍력자원지도.

기상청 국립기상연구소 (2010). 기상자원지도 및 국지기상분석개발.

김혜중, 박화륜, 최영진, 변재영 (2010a). 로그정규풍속모형에 의한 풍력자원의 특성추론 및 응용에 관한 연구, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, **9**, 2761-2772.

김혜중, 김현식, 최영진, 변재영 (2010b). 통계적 바람장모형에 고해상도(1km × 1km)풍력에너지지도 작성에 관한 연구, <응용통계연구>, **23**, 1137-1167.

김혜중, 정선, 최영진, 김규량, 정영림 (2009). 한반도 바람자원의 TMY(typical meteorological year) 구축 알고리즘에 관한 연구, <응용통계연구>, **22**, 943-960.

대기환경연구회 (2003). <대기환경개론>, 신광문화사, 179-181.

서은경, 윤준희, 박영산 (2009). 북한 지역에서의 30년 동안의 평균바람지도, *Journal of the Korean Earth Science Society*, **30**, 845-854.

- Benth, J. S. and Saltyte, A. (2011). Spatial-temporal model for wind speed in Lithuania, *Journal of Applied Statistics*, **38**, 1151–1168.
- Leung, L. R., Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P. and Kumar, A. (1999). Simulations of the ENSO hydroclimate signals in the Pacific Northwest Colombia River Basin, *Bulletin of American Meteorological Society*, **80**, 2313–2328.
- Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A. and Lettenmaier, D. P. (2002). Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **107**, 4429.

A Statistical Tuning Method to Improve the Accuracy of $1Km \times 1Km$ Resolution-Wind Data of South Korea Generated from a Numerical Meteorological Model

Hea-Jung Kim¹ · Hyun-Sik Kim² · Young-Jean Choi³ · Seong-Woo Lee⁴ · Beom-Keun Seo⁵

¹Department of Statistics, Dongguk University-Seoul

²Department of Statistics, Dongguk University-Seoul

³Meteorological Application Research Lab, National Institute of Meteorological Research

⁴Meteorological Application Research Lab, National Institute of Meteorological Research

⁵Meteorological Application Research Lab, National Institute of Meteorological Research

(Received August 2011; accepted October 2011)

Abstract

This paper suggests a method for tuning a numerically simulated wind speed data, provided by NIMR(National Institute of Meteorological Research) and generated from a numerical meteorological model to improve a wind resource map with a $1Km \times 1Km$ resolution. To this end, "tuning factor method" is developed that consists of two procedures. First, estimate monthly wind fields based on a suitably designed statistical wind field model that covers 345,682 regions obtained by $1Km \times 1Km$ lattice sites in South Korea. The second procedure computes the tuning factor and then tunes the generated wind speeds of each month as well as each lattice site. The second procedure is based on the wind fields estimated by the first procedure. The performance of the suggested tuning method is demonstrated by using two wind data(both TMY and numerically simulated wind speed data) of 75 weather station areas.

Keywords: Tuning factor method, numerically simulated wind speed data, statistical wind field model, TMY wind data, Meteorological resource map, tuning of wind speed.

This research was supported by the grant Hydrometeorological Monitoring Network and Study of Meteorological Modeling for Pilot Areas, 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