

방위별 지면조도에 근거한 누락 풍속자료 복원방법

조경호 · 허종철 · 김건훈*

제주대학교 기계에너지생산공학부, *한국에너지기술연구소 유체기계부

Recovery of Lost Wind Data Based-upon the Directional Ground Roughness

Kyung Ho Cho, Jong Chul Huh and Keon Hoon Kim*

Faculty of Mechanical, Energy and Production Engineering, Cheju National University

*Fluid Machinery Lab., Korea Institute of Energy Research

요 약

풍속자료의 측정이 예기치 못한 원인으로 실패하는 일이 종종 발생한다. 풍속자료의 해석을 위해서는 이렇게 망실된 풍속자료의 복원이 필요하다. 이 경우 유용한 측정자료를 바탕으로 적절한 내삽법 (혹은 외삽법)으로 망실된 풍속자료를 복원하는 것이 일반적인 방법이다. 이때 해당 지역의 지면조도 값이 필요하고, 일반적으로는 상수로 추정된 지면조도 값을 사용한다. 이에 반하여, 본 연구에서는 방위별로 변하는 지면조도의 개념을 새로이 제안하였다. 누락 풍속자료의 복원사례에 적용하여 제안된 방법의 신뢰도를 검토한 바 기존의 지면조도를 일정 값으로 하는 것보다 제안된 방법이 풍속자료의 보정 및 복원을 보다 더 정확하게 할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 방위별 장애물의 편차가 크고, 계절별 풍향의 변화가 심할 경우에는 제안된 지면조도의 개념은 유용한 접근법이 될 것으로 기대된다

Abstract — There may be frequent failures of wind data measurement due to unexpected problems. In these situations, the lost wind data are to be recovered properly for the wind data analysis. The usual way to recover the lost wind data is the interpolation or extrapolation from the available wind data using a constant ground roughness factor. In this study, a new concept of the directional ground roughness factor is proposed to improve the reliability of the recovered wind data. The application of the proposed concept to the field data shows promising results so that the proposed method may be used satisfactorily for the recovery of the lost wind data, especially when the site ground conditions vary greatly depending upon the wind directions and the seasonal wind directions change largely.

1. 서 론

일반적으로 풍속계의 설치 높이와 풍차의 hub 높이는 다르다. 그러나, 풍차의 출력은 대략 풍속의 3제곱에 비례하는 것으로 알려져 있기 때문에 풍차의 출력특성을 정확히 예측 평가하기 위해서는 실측 풍속자료를 이용하여 설치될 풍차의 hub 높이에서의 풍속을 보다 정확히 예측할 수 있어야 한다. 또한, 풍속자료의 측정은 장시간 실외에서 이루어지기 때문에 여러 가지의 요인으로 일정기간의 풍속자료 누락이 발생할 수 있다. 풍속자료의 누락이 있는 경우 대부분의 풍력해석 작업에서

는 풍속자료 결손이 있는 기간을 제외하고 풍속자료의 통계처리 및 풍력에너지 예측 등의 작업을 수행하거나, 적절한 신뢰도로 누락된 풍속자료를 복원하여 전체 풍력해석에 사용하고자 한다. 누락 풍속자료의 복원을 위하여 주로 사용되는 방법으로는 해당지역에서 이미 습득된 여러 측정기간의 풍속자료를 이용하여 적절한 방법으로 결손된 기간의 풍속자료를 복원하는 방법을 사용한다. 이를 위하여 power law model, modified power law model, simlantly model 등과 같은 여러 가지의 풍속보정 모델들이 제안되어 있다¹⁾.

풍속자료의 보간을 위해서는 해당지역의 지면조도

(ground roughness, Z_0) 값이 필요하다. 일반적으로 어느 특정지역에 대한 지면조도 값을 적절히 산출하는 작업은 주로 경험적인 방법에 크게 의존한 바 있다. 지면조도에 대한 보다 이론적인 연구로서, Dixon과 Swift¹²⁾는 공기의 저항계수 Cd와 풍속 V 및 지면조도 Z_0 사이의 상관관계를 심층분석하고 power law model에서의 보정지수 α 를 V의 일차함수로 근사하는 식을 제안하기도 하였다. 그러나, 보다 정확한 지면조도 값을 산출을 위해서는 해당지역에 대한 장기간의 정밀한 풍속자료 측정을 통하여 정확한 지면조도를 산출하거나, 경험에 입각하여 여러 가지의 조도 값을 입력하여 풍력에너지 해석을 수회 반복하고 그 결과를 분석하여 가장 합당하다고 판단되는 값을 선택하여 사용해야 하는 불편이 있어 대부분의 경우 하나의 값으로 고정하여 사용하고 있다.

그러나, 지역에 따라서는 방위별로 주변의 장애물의 차이가 현저한 경우가 있고, 이 경우에는 그 지역의 지면조도 값을 하나의 고정 값으로 사용하는 것은 고도에 따른 풍속자료의 보간에 있어 적지 않은 오차를 가져올 수 있다. 만약 그 지역의 주변 장애물의 방위별 차이가 클 경우 이를 고려한 방위별 지역조도 값을 고려할 수 있다면, 고도에 따른 풍속자료의 보간을 보다 정확히 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 특정지역에 대한 최적의 방위별 지면조도(directional roughness, $Z_0(\theta)$) 값을 자동으로 산출할 수 있는 모뉴올을 개발하여 풍속자료의 보간을 보다 정확히 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 모뉴올의 보완으로 여러 가지 원인으로 계측자료의 누락사고가 발생할 경우에 이들 누락자료를 신뢰도 있게 복원할 수 있게 되었다.

2. 누락 풍속자료의 자동복원 방법

풍력 계측자료 누락의 일반적인 원인으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 동절기의 풍속계 동결(icing)
- 특정 풍속계의 고장(sensor down)
- 낙뢰, 정전 등의 전원 이상(power down)
- 취급 부주의에 따른 계측자료의 망실(human error)
- 기타

위와 같은 풍속계의 이상 여부는 일반적으로 계측자료의 주기적인 분석을 통하여 사후에 감지되고 있는 실정이다. 계측자료의 수집과 분석작업의 주기가 너무 길면 길수록 위와 같은 풍속계의 이상 여부를 감지할 수 있는 기회가 작아져 주요한 풍속자료의 누락을 인지하지 못하고 지나칠 수가 있다. 이에따라 풍속자료의 누락 양이 너무 클 경우에는 이를 추정 복구하는 것이 거의 불가능할 수도 있다. 따라서 계측자료의 수집과 분

석작업을 가능한 수시로 수행하는 것이 측정장비의 유지 보수뿐만 아니라 수집된 계측자료의 신뢰도 제고 측면에서도 바람직하다 하겠다. 참고로, 제주지역 풍력자원 조사작업¹³⁾¹⁴⁾에서 풍속자료의 측정 중에 발생하였던 계측자료의 누락 유형 중 대표적인 경우는

- 15 m, 30 m 고도의 풍속계 중의 어느 한 개가 고장나는 경우(96. 11. 제주 행원지역)
- 15 m, 30 m 고도의 풍속계 모두가 고장나는 경우(97. 3. 제주 추자지역)
- 낙뢰에 의한 자료망실 사고(98. 7.~98. 9. 제주 우도지역)

등이 있다.

2-1. 누락 풍속자료 자동복원의 개요

누락된 계측자료의 복원 혹은 복구는 기본적으로 다음과 같은 접근방법에 따라 이루어진다. 즉, 동일 측정지역의 풍속계 고장 시점으로부터 일정기간 전후의 측정 자료를 이용하여 누락자료를 예측 복원하는 방법을 사용한다. 예컨대, 15 m, 30 m 고도에 설치된 풍속계 중의 어느 하나는 정상적으로 작동되고 나머지 하나가 고장을 일으킨 경우에는 다음과 같은 과정으로 누락정보의 복원이 가능하다.

풍속계 중 어느 하나가 고장나기 전후의 일정기간 동안 두 풍속계가 모두 정상적으로 작동하여 계측된 자료를 이용하여 그 지역의 고도에 따른 최적의 풍속 보정계수를 산출한다. 이렇게 산출된 보정계수를 이용하여 고장기간 동안 정상적으로 작동한 풍속계로부터 계측된 풍속자료를 토대로 내삽 혹은 외삽법을 사용하여 보정 고도에서의 풍속을 추정 복원한다. 이때 사용되는 풍속자료의 고도에 따른 보정계수 산출과정은 다음에 소개되는 이론적 배경에 근거한다.

2-2. 풍속의 고도 보정을 위한 이론적 배경

풍력 발전시스템의 발전특성을 정확히 예측하는데 있어 계측된 풍속자료로부터 높이가 다른 풍차 hub 높이에서의 풍력자원 특성을 유추하는 것은 매우 중요하다. 바람의 유동은 지표면의 거칠기, 주위 장애물의 정도 등의 영향을 크게 받는다. 이러한 영향의 정도를 수치화한 것이 해당지역의 지면조도(ground roughness, Z_0)이다. Z_0 의 단위는 일반적으로 [m]으로서, Z_0 가 클수록 공기흐름에 대한 장애의 정도가 크고 고도별 풍속의 변화도 크게 나타난다. 때문에 일반적으로 도심이나 방풍림 지역에서는 풍속의 고도별 변화가 크게 나타나고 이때의 Z_0 값도 크다. 반면에, 바닷가나 모래밭 등에서는 풍속의 고도별 변화가 크게 나타나지 않고 이때의 Z_0 값 또한 작다¹⁵⁾¹⁶⁾.

본 연구에서는 누락된 풍속자료의 복원 및 풍차 hub 높이에서의 풍속 보간을 위하여 가장 널리 사용되고 다음과 같은 modified power law model¹⁴⁾을 사용하였다.

$$u = u_r (Z/Z_r)^\alpha \tag{1}$$

여기서 Z_r , u_r 는 각각 풍속계의 설치 높이와 측정 풍속이고, Z , u 는 보정하고자 하는 고도와 보정풍속이다. α 는 지면조도 Z_0 에 따라 고도별 풍속변화를 결정하는 보정계수로 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.

$$\alpha = \frac{1}{\ln(Z_r/Z_0)} \frac{0.0881 \ln(u_r/6)}{1 - 0.0881 \ln(Z_r/10)} \tag{2}$$

여기서, $Z_r = \sqrt{10Z}$ 는 식(1)에서 $Z_r = 10$ m와 $Z_r \neq 10$ m 일 때를 관계시키는 경계층상사법칙에서 파생된 계수로서 보통 기하평균 고도(geometric mean height)라 칭한다¹⁴⁾.

2-3. 방위별 지면조도를 이용한 풍속 보정

식(1), (2)의 풍속자료 보정식은 일정한 지면조도 Z_0 값을 사용하는 것으로서 풍향에 관계없이 보정고도 Z 만의 함수이다. 그러나, 방위별 장애물의 정도가 일정치 않은 경우에는 보간된 풍속자료에 오차가 크게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 기존의 상수 값으로 사용되던 지면조도를 풍향(θ)별로 변하는 값으로 확장하여 방위별 지면조도(directional ground roughness, $Z_0(\theta)$) 라는 새로운 개념을 도입하였다. 이렇게 이차원적으로 확장된 지면조도 값을 도입하기 위하여 본 연구에서는 위의 풍속 보간식(1), (2)를 다음과 같이 수정하여 사용한다.

$$u(\theta) = u_r(\theta) (Z/Z_r)^{\alpha(\theta)} \tag{3}$$

$$\alpha(\theta) = \frac{1}{\ln(Z_r/Z_0(\theta))} \frac{0.0881 \ln(u_r/6)}{1 - 0.0881 \ln(Z_r/10)} \tag{4}$$

위의 식(1)-(4)들은 “fully-developed flow 에 가까운 유통흐름”에 적용 가능한 풍속 보정식으로서 동일 지역, 동일 시간에 고도별 풍향의 변화가 심한 경우, 예컨대 돌풍현상이 수반되고 있는 공기의 흐름에 대하여는 적용할 수 없는 식이다. 다행히도, 풍력발전을 위한 입지 선정단계에서 경험적인 판단 혹은 통계자료의 분석 등을 통하여 돌풍현상이 빈번한 지역은 사전에 배제되는 것이 일반적인 상례이다. 이렇게 선정된 지역에서는 일반적으로 고도별 풍향의 급격한 변화 빈도수는 극히 낮고, 이 경우 위의 식(1)-(4)의 적용에 무리가 없을 것으로 평가된다.

3. 방위별 지면조도 $Z_0(\theta)$ 의 결정

우리나라는 대체적으로 계절별 풍향의 변화가 심하게

나타난다. 이 때문에 본 연구에서는 최소한 1년 이상의 풍속자료를 토대로 해당 지역의 방위별 지면조도를 다음과 같은 방법으로 결정하였다.

- 1) 2개 이상의 고도에서 측정된 해당지역의 1년 이상의 풍속자료를 수집하고,
- 2) 수집된 풍속자료를 방위별로 분류한 다음,
- 3) 각 방위별 풍속자료를 이용하여 다음과 같이 설정된 오차함수를 최소화하도록 해당지역의 각 방위별 지면조도 $Z_0(\theta)$ 를 산출한다.

Find $Z_0(\theta)$ (5)
 to minimize $\Phi(Z_0(\theta)) = \sum (u_{30}^o(\theta) - u_{30}^m(\theta))^2$

여기서 $u_{30}^m(\theta)$ 는 30 m 고도에서의 풍향 θ 의 계측풍속(measured wind speed)이고, $u_{30}^o(\theta)$ 는 15 m에서의 풍향 θ 의 계측풍속을 토대로 식(3), (4)를 이용하여 30 m 고도에서 풍향 θ 의 재 계산된 풍속(calculated wind speed)이다.

지면조도를 기존의 방법처럼 상수 값으로 처리하는 경우와 본 연구에서와 같이 이차원적으로 고려하는 경우 풍속자료의 해석에 미치는 영향을 다음과 같은 방법으로 비

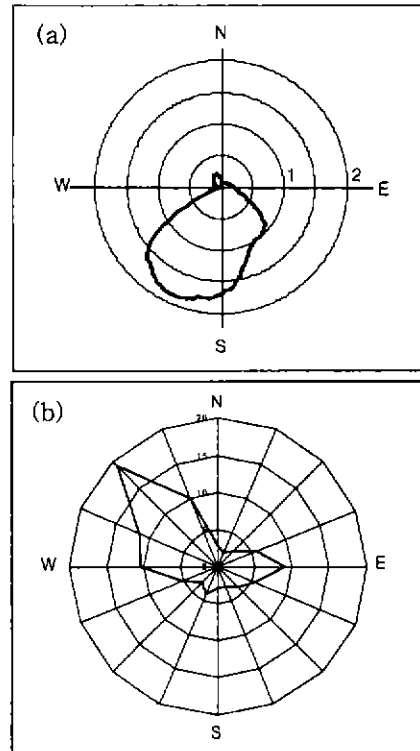


Fig. 1. (a) Directional ground roughness and (b) wind rose diagram in Hengwon region.

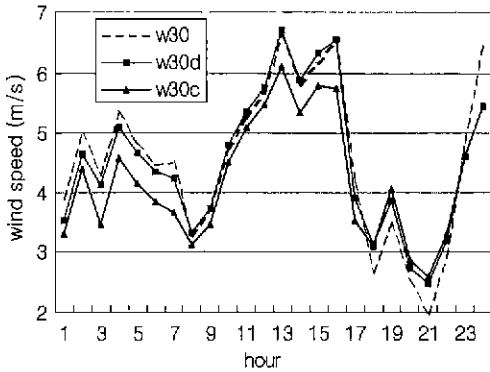


Fig. 2. Recovery of wind data at 30 m height using the data at 15 m height (Hengwon, '96.6.3 00:00~23:00).

교하였다. Fig. 1(a)는 제주도 구좌지역의 행원농공단지 내에서 측정된 풍속자료^[3]를 토대로 이 지역의 방위별 지면지도를 위의 식(5)의 방법으로 추정된 것이다. 그럼에서도 알 수 있듯이 이 지역의 $Z_0(\theta)$ 값은 방위별로 크게 변하고 있음을 보인다. 참고로, 이 지역은 제주도 동북부 해안지역으로 주 풍향은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 NW이다. 이 지역의 북쪽은 바다이고 동서 방향으로 해안선이 있고, 남쪽으로는 얇은 구릉과 초지가 산재하고, 멀리 한라산의 기생화산들이 있다. 특히, 남쪽 300~500 m 거리에는 인공 조형물(양식장 및 어촌)이 있다. Fig. 1(a)에서 $Z_0(\theta)$ 값의 변화는 해당지역의 풍향별 장애의 정도가 매우 큼을 암시하고, 실제로 해당지역의 현장 상황을 비교적 잘 반영하고 있다고 평가된다. 참고로 기존의 방법으로 추정된 이 지역의 지면조도 값은 0.18 이었다^[7].

Fig. 2는 구좌 지역의 행원농공단지 내에서 '96년 6월 3일 0시부터 23시까지의 풍속 측정자료를 근거로 하여 15 m 측정고도에서의 풍속을 이용하여 지면조도 값을 0.18로 고정하고 식(1), (2)를 이용하여 30 m 고도에서의 풍속을 재구성한 경우(w30c)와, 방위별 지면조도 값이 고

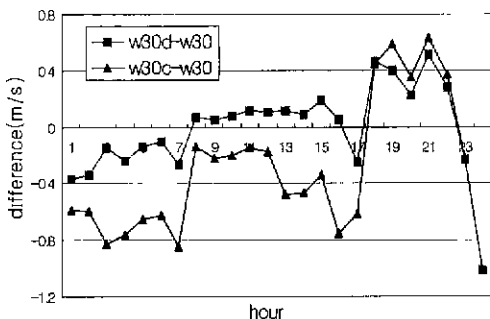


Fig. 3. Wind speed difference shown in Fig. 2.

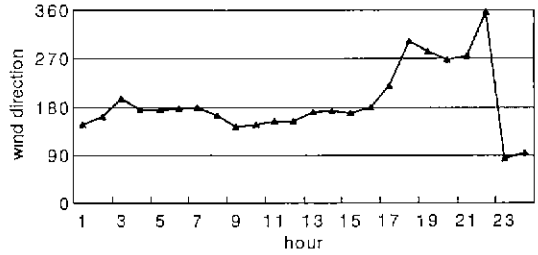


Fig. 4. Wind direction for the data shown in Fig. 2.

Table 1. Average and standard deviation of the measured and recovered wind speed in Fig. 2.

	w30	w30d	w30c
avg. (m/s)	4.54	4.52	4.23
std. (m/s)	1.32	1.20	1.04

려된 식(3), (4)를 이용하여 30 m 고도에서의 풍속을 재구성(w30d) 하여 이를 30 m 고도에서의 실측치(w30)와 비교한 것이다. Fig. 3은 Fig. 2의 두가지 방법으로 재구성된 풍속과 실측치와의 오차를 보인 것이다. Fig. 4는 해당지역의 측정시간별 풍향의 변화이다. 대략 17:00시 이전에는 남풍이었던 풍향이 17:00시 이후에는 북서풍, 북풍, 동풍으로 갑자기 풍향이 크게 바뀌고 있음을 알 수 있다. Fig. 1(a)에 따르면 해당지역의 방위별 지면조도 값은 17:00시 이전의 남풍일 때는 큰 값이 적용되어야 하고, 17:00시 이후의 풍향에 대하여는 매우 작은 크기의 지면조도 값이 적용되어야 함을 보인다 결국 17:00시 이전에서는 두 방법에서 사용하는 지면조도 값의 상대적 차이가 크기 때문에 복원풍속에서의 상대적 편차가 크게 나타나고 17:00시 이후에는 상대적으로 비슷한 지면조도 값을 사용하게 되어 두 복원 풍속 사이의 편차는 작아짐을 Figs. 2, 3에서도 확인할 수 있다.

Table 1은 Figs. 2, 3의 각 경우에 대하여 재구성된 30 m 고도의 실측 풍속과 복원 풍속의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다 두 방법으로 재구성된 풍속의 평균과 표준편차 모두 실측치 보다는 작게 계산되고 있지만 풍향을 고려한 경우(w30d)가 기존의 방법(w30c) 보다 실측치에 가깝게 계산되고 있음을 보인다. 따라서, Fig. 2, 3 및 Table 1의 비교에서도 알 수 있듯이 풍향을 고려한 이차원적 지면지도를 이용하는 것이 기존의 방법처럼 지면조도를 상수로 고정하는 것보다 풍속자료의 보간을 더 정확히 할 수 있게 함을 알 수 있다.

4. 누락자료 자동복구 예

제주지역 풍력자원 조사작업^[8] 중 구좌지역의 행원농

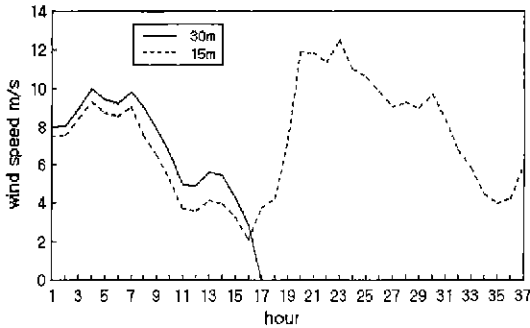


Fig. 5. Example of sensor down (Hengwon, '96.11.8. 11:00~11.9. 23:00).

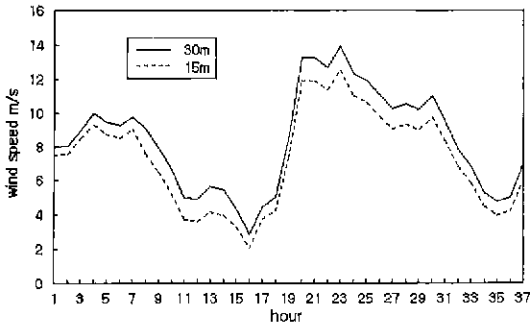


Fig. 6. Wind data recovered using the data at 15 m height in Fig. 5.

공단지에 설치된 30 m 고도 풍속계가 '96.11.8~11.9 동안 원인을 알 수 없는 이유로 고장나서 30 m 고도 풍속자료가 누락되었던 경우가 있었다 이때 동일 측정 위치의 15 m 고도 풍속계는 정상적으로 작동 중에 있었

다 (Fig. 5 참조). 본 연구에서는 앞에서 소개된 복원 방법을 이용하여 이 지역의 30 m 고도의 누락된 풍속자료를 동일기간 동안 정상적으로 계측된 15 m 고도의 풍속자료로부터 외삽법을 이용하여 Fig. 6과 같이 복원하여 풍력 에너지 해석작업에 사용하였다. 이때, 고도 보정을 위한 방위별 지면조도 $Z_0(\theta)$ 는 Fig. 1(a)와 같다.

또한, Table 2는 동일지역에서 '97.12.1~'98.11.30의 기간동안 정상적으로 계측된 15 m, 30 m 고도 풍속자료를 이용하여 본 연구에서 제안하는 방위별 지면조도의 타당성을 검토한 결과이다. 즉, 15 m 고도 풍속자료를 이용하여 동일 지역 동일 시간대의 30 m 고도 풍속을 기존의 일정 지면조도 값에 근거한 보정풍속과 방위별 지면조도 값을 이용한 보정풍속을 30 m 고도 실측치와 비교한 결과이다. 방위별 지면조도를 이용하여 재구성된 풍속자료가 지면조도 값을 일정하게 가정할 때보다 실측치에 가까운 결과를 보임을 알 수 있다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 풍력에너지 해석 과정에서 나타나는 주요 항목에 대한 비교결과, 방위별 지면조도를 고려하는 것이 지면조도를 일정 값으로 하는 것보다 더 정확하게 풍속자료를 재구성 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 방위별 지면조도를 고려한 누락된 풍속자료의 복원방법은 비교적 높은 신뢰도를 갖고 적용될 수 있다고 사료된다.

5. 결 론

풍력자원의 이용을 극대화하기 위해서는 지역별 풍력 자원의 정확한 측정과 분석이 선행되어야 한다. 풍력자원 측정시 발생할 수 있는 여러 형태의 풍력자원 측정

Table 2. Comparison of the measured and recovered wind data (Hengwon, '97.12.1~'98.11.30).

Item	Based on Measured Values	By Existing Mehtod ()*	By Proposed Method ()*	
1	Ground Roughness (m)	-	0.18	see Fig. 1(a)
2	Measuring Height (m)	30.0	15.0	15 0
3	Calibration Height (m)	-	30.0	30.0
4	Mean Wind Speed (m/s)	7.12	7.21 (+1.3%)	7.18 (+0.8%)
5	Standard Deviat. of Wind Speeds (m/s)	4.34	4.36 (+0.5%)	4.35 (+0.2%)
6	Mean Wind Power Density (W/m ²)	483.5	477.4 (-1.3%)	477 4 (-1.3%)
7	Max. Wind Speed (m/s), (Y/M/D/H)	22.3 97/12/22/16	21.5 (-3.6%) 97/12/22/16	21.7 (-2.7%) 97/12/22/16
8	Dominant Wind Direction	NW	NW	NW
9	Weibull Shape Factor, K	1.778	1.811 (+1.9%)	1.802 (+1.3%)
10	Weibull Scale Factor, C (m/s)	8.02	8.08 (+0.7%)	8.05 (+0.4%)

* 괄호 안의 숫자는 측정치에 대한 상대오차임.

자료의 망실 혹은 누락자료 복구의 신뢰도 향상을 위해서, 어느 특정지역의 지면조도 값을 고정된 하나의 값으로 사용하는 대신에, 본 연구에서는 방위별로 변화하는 이차원적인 지면조도 개념을 도입하였다. 제안된 방위별 지면조도 개념을 적용하여 실측자료에 대한 검증 계산을 수행한 결과 기존의 단일 지면조도 값을 사용하는 것보다 방위별 지면조도의 개념을 적용할 경우가 풍력자료 복원과정의 신뢰도가 더 향상될 수 있음을 확인하였다. 따라서, 방위별 장애물의 차이가 현저하고 계절별 풍향의 변화가 심할 경우에는 본 연구에서 제안된 방위별 지면조도 개념의 도입은 풍력자원 조사 및 예측작업의 신뢰도 향상을 위한 유용한 접근법이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 '제주도 내 풍력발전단지 종합건설계획 수립에 관한 연구(1998)'에 대한 제주대학교 산업기술연구소 및 제주도의 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Mikhail A.S and Justus, C.G : "Comparison of Height

Extrapolation Models and Sensitivity Analysis", *Wind Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 91-107, (1981)

2. Dixon J.C. and Swift. R.H : "The Dependence of wind Speed and Weibull Characteristics on Height for Offshore Winds", *Wind Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 87-98, (1984).

3. 허종철 외: 제주도 내 풍력자원 조사에 관한 연구용역(I). 제주도, (1998).

4. 허종철 외: 제주도 내 풍력발전단지 종합건설 계획수립에 관한 연구, 제주도, (1998).

5. Bowden G.J. Barker, P.R., Shestopal. V.O. and Twidell. J.W.: "The Weibull Distribution Function and Wind Power Statistics", *Wind Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp 85-98. (1983).

6. Janardan S.R. and Vaughn Nelso. "Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power", Alternative Energy Institute, West Texas A&M Univ.. (1994).

7. 조경호, 김휴찬: 제주도 내 풍력자원 측정자료의 효율적인 통합 저장관리 프로그램의 개발, 제주도. (1997).