

## 방위별 지면 조도를 고려한 누락 풍속자료의 자동복구에 대한 연구

조경호\*·허종철\*\*·김건훈\*\*\*

### A Study on the Automatic Recovery of Lost Wind Data Considering the Directional Ground Roughness

Kyung-Ho Cho\*, Jong-Chul Huh\*\* and Kun-Hun Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

There are frequent chances that the measuring of wind data fails due to unexpected several factors. In these situations, the lost data are to be recovered properly for the further wind data analysis. The conventional method of wind data recovery 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 can be successfully used for the recovery of the lost wind data.

**Key Words :** Data recovery, wind data, ground roughness factor

#### 1. 서 론

일반적으로 풍속계의 설치 높이와 풍차의 hub 높이는 다르다. 참고로, 풍차의 출력은 대략 풍속의 3 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 풍차

의 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 작업에서는 풍속자료 결손이 있는 해당 기간을 제외하고 풍속자료의 통계처리 및 풍력 에너지 예측 등의 작업을 수행하거나, 적절한 신뢰도로 누락된 풍속자료를 복원하여 전체 풍력해석에 사용하고자 한다. 누락 풍속자료의 복원을 위하여 주로 사용되는 방법으로는 해당지역에서 이미 습득된 여러

\* 제주대학교 에너지공학과, 산업기술연구소  
Dept. of Nuclear and Energy Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 기계공학과, 산업기술연구소  
Dept. of Mechanical Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

\*\*\* 한국에너지기술연구소 유체기팀  
Dept. of Fluid Machinery Lab. KIER

측정기간의 풍속자료를 이용하여 적절한 방법으로 결손된 기간의 풍속자료를 복원하는 방법을 사용한다. 이를 위하여는 일반적으로 내삽(interpolation) 혹은 외삽(extrapolation) 법을 이용한 풍속자료의 보간이 사용된다<sup>1)</sup>.

풍속자료의 보간을 위해서는 해당지역의 지면조도(ground roughness) 값이 필요하다. 일반적으로 어느 특정지역에 대한 지면조도 값을 적절히 산출하는 작업은 주로 경험적인 방법에 크게 의존한 바 컸다. 보다 정확한 지면조도 값의 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 scalar으로 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 지역 조도 값을 고려할 수 있다면, 고도에 따른 풍속자료의 보간을 보다 정확히 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 특정지역에 대한 최적의 방위별 지면조도(directional roughness factor) 값을 자동으로 산출할 수 있는 모듈을 개발하여 풍속자료의 보간을 보다 정확히 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 모듈의 보완으로 여러 가지 원인으로 계측자료의 누락사고가 발생할 경우에 이들 누락자료를 신뢰도 있게 복원할 수 있게 되었다.

## II. 본 론

풍력 계측자료 누락의 일반적인 원인으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 동절기의 풍속계 동결(icing)
- 특정 풍속계의 고장(sensor down)

- 정전 등의 전원 이상(power down)
- 낙뢰
- 취급 부주의에 따른 계측자료의 망실(human error)
- 기타

위와 같은 풍속계의 이상 여부를 사전에 감지할 수 있는 방법은 어렵고, 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. 이에 따라 풍속자료의 누락량이 너무 클 경우에는 이를 추정 복구하는 것이 거의 불가능할 수도 있다. 따라서 계측자료의 수집과 분석작업을 가능한 수시로 수행하는 것이 측정장비의 유지 보수뿐만 아니라 수집된 계측자료의 신뢰도 측면에서도 바람직하다 하겠다. 참고로, 현재 제주대에서 수행하고 있는 제주지역 풍력자원 조사용역<sup>2)</sup>에서 풍속자료의 측정 중에 발생하였던 계측자료의 누락 유형 중 가장 심각한 경우는

- 15m, 30m 고도의 풍속계 중의 어느 한 개가 고장나는 경우(96. 11. 행원)
  - 15m, 30m 고도의 풍속계 모두가 고장나는 경우(97. 3. 추자)
  - 낙뢰에 의한 자료망실 사고(98. 7. ~ 98. 9. 우도)
- 등이 있다.

## III. 누락 자료의 자동복구 방법

### 3.1 누락자료 자동복구의 개요

누락된 계측자료의 보완 혹은 복구는 기본적으로 다음과 같은 접근방법에 따라 이루어진다. 즉, 동일 측정지역의 풍속계 고장 시점으로부터 일정기간(1-3개월) 전후의 측정 자료를 이용하여 누락자료를 예측-복원하는 방법을 사용한다. 예를 들어, 15m, 30m 풍속계 중의 어느 한 개는 정상적으로 작동되고 나머지 한 개가 고장을 일으킨 경우에는 다

음과 같은 과정으로 누락정보의 복원이 수행된다.

풍속계 중 한 개가 고장나기 전후의 일정기간 (1-3개월) 동안 두 개의 풍속계가 정상적으로 작동하여 계측된 자료를 이용하여 그 지역의 고도에 따른 최적의 풍속 보정계수를 산출한다. 이렇게 산출된 보정계수를 이용하여 고장기간 동안의 누락된 계측자료를 동일기간 동안 정상적으로 계측된 풍속자료를 내삽 혹은 외삽법을 사용하여 추정 복원한다. 이때 사용되는 풍속자료의 고도에 따른 보정계수 산출과정은 다음에 소개되는 이론적 배경에 근거한다.

### 3.2 풍속의 고도 보정을 위한 이론적 배경

풍력 발전시스템의 발전특성을 정확히 예측하는데 있어 계측된 풍속자료로부터 높이가 다른 풍력 발전시스템의 철탑 높이에서의 풍력자원 특성을 유추하는 것은 매우 중요하다. 바람의 유동은 지면 조도의 영향을 크게 받기 때문에 일반적으로 지면 조도가 큰 도심이나 방풍림 지역에서는 풍속의 고도별 변화가 크게 나타나는 반면, 바닷가나 모래밭 등에서는 풍속의 고도별 변화가 크게 나타나지 않는다<sup>3),4)</sup>.

본 연구에서는 누락된 풍속자료의 복원 및 풍자 hub 높이에서의 풍속 보간을 위하여 가장 널리 사용되고 다음과 같은 power law model을 사용하였다<sup>5)</sup>.

$$u = u_a(Z/Z_a)^{\alpha_p} \quad (1)$$

여기서  $Z_a$ ,  $u_a$  는 각각 풍속계의 설치 높이와 측정 풍속이고,  $Z$ ,  $u$  는 보정하고자 하는 고도와 보정풍속이다.  $\alpha_p$ 는 지면조도  $Z_0$ 에 따라 고도별 풍속변화를 결정하는 지수로 이것은 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.

$$\alpha_p = \frac{1}{\ln(Z_g/Z_0)} - \frac{0.0881 \ln(u/6)}{1 - 0.0881 \ln(Z_a/10)} \quad (2)$$

여기서,  $Z_g = \sqrt{10Z}$ 는 기하평균 고도이다.

이상의 풍속자료의 보간식은 일정한 지면조도  $Z_0$  값을 사용하는 것으로서 방위별 장애물의 정도가 일정치 않은 경우에는 보간된 풍속자료에 오차가 크게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보

완하기 위하여 기존의 상수 값으로 사용되던 지면조도를 풍향 ( $\theta$ )별로 변하는 값으로 사용하도록 방위별 지면조도(directional ground roughness,  $Z_0(\theta)$ )라는 새로운 개념을 도입하였다. 이렇게 이차원적으로 지면조도 값을 확장할 경우 위의 풍속 보간식 (1)-(2)는 다음과 같이 수정된다.

$$u = u_a(Z/Z_a)^{\alpha_p(\theta)} \quad (3)$$

$$\alpha_p(\theta) = \frac{1}{\ln(Z_g/Z_0(\theta))} - \frac{0.0881 \ln(u/6)}{1 - 0.0881 \ln(Z_a/10)} \quad (4)$$

### IV. 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) 해당지역의 1년 이상의 풍속자료를 수배하고,
- (2) 수배된 풍속자료를 방위별로 분류한 다음,
- (3) 각 방위별 풍속자료를 이용하여 다음과 같이 최소오차승법을 이용하여 각 방위별 최적의 지면조도  $Z_0(\theta)$ 를 결정한다.

Find  $Z_0(\theta)$

to minimize  $\sum (u_{30}^c - u_{30}^m)^2$

여기서  $u_{30}^m$  은 각각 30m 고도에서의 실측 풍속이고,  $u_{30}^c$ 은 15m에서의 실측 풍속을 토대로 식 (3), (4)를 이용하여 30m 고도에서 재 계산된 풍속이다.

지면조도를 기존의 방법처럼 상수 값으로 처리하는 경우와 본 연구에서와 같이 이차원적으로 고려하는 경우 풍력해석에 미치는 영향을 다음과 같은 방법으로 비교하였다. Fig. 1은 제주도 구좌지역의 행원농공단지 내에서 측정된 풍속자료<sup>2)</sup>를 토대로 이 지역의 방위별 지면조도를 본 연구의 방법으로 추정한 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 이 지역의  $Z_0(\theta)$  값은 방위별로 크게 변하고 있음을 보인다. 참고로 기존의 방법

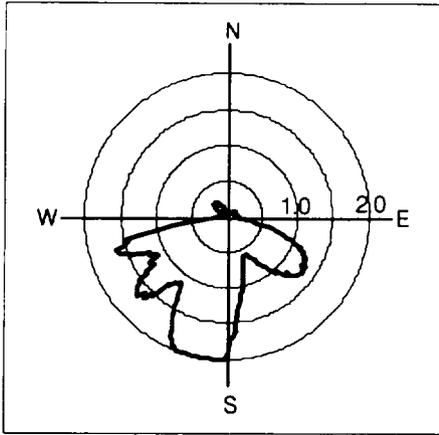


Fig. 1 Directional ground roughness in Hendwon region

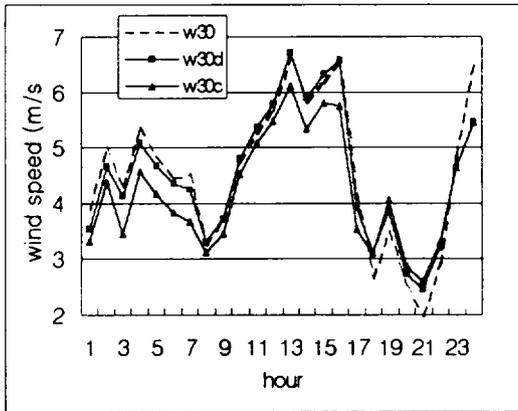


Fig. 2 Recovery of wind data at 30m height using the data at 15m height

으로 산출한 이 지역의 지면조도 값은 0.18 이었다<sup>6)</sup>.

Fig. 2는 구좌 지역의 행원농공단지 내에서 1996년 11월 7일 0시부터 23시까지의 풍속 측정자료를 근거로 하여 15m 측정고도에서의 풍속을 이용하여 30m 고도에서의 풍속을 지면조도 값을 0.18로 고정하고 식 (1), (2)를 이용하여 재구성한 경우와, 방위별 지면조도 값이 고려된 식 (3), (4)를 이용하여 재구성하여 이를 30m 고도에서의 실측치와 비교한 것이다. 두가지의 풍속 복원 방법 모두 대략 3m/s 이하의 풍속에 대하여 복원 풍속은 다소 크게 계산되

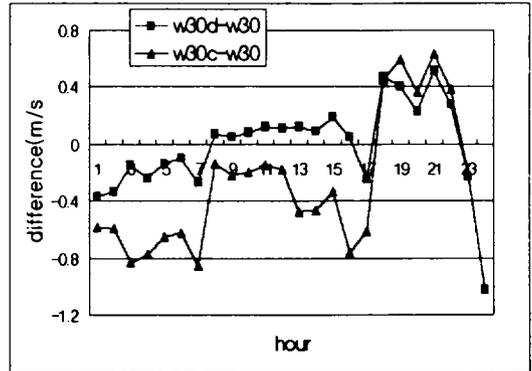


Fig. 3 Difference between the wind speed shown in Fig. 2 and the measured wind speed

Table 1 Average and standard deviation of the measured and recovered wind speed

	w30	w30d	w30c	w30d-w30	w30c-w30
avg.	4.54	4.52	4.23	-0.01	-0.31
std.	1.32	1.20	1.04	-0.12	-0.28

고, 그 이상의 풍속에 대하여는 다소 작게 계산되는 경향을 보임을 알 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2의 두가지 방법으로 재구성된 풍속과 실측치의 오차를 보인 것이다. Table 1은 Fig. 2, 3의 각 경우에 대하여 재구성된 30m 고도의 실측 풍속과 복원 풍속의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 여기서, w30은 30m 실측풍속을, w30d는 방위별 지면조도가 고려된 30m 복원풍속을, w30c은 일정 지면조도로 가정한 경우의 30m 복원풍속을 나타낸다. 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 보인다.

## V. 누락자료 자동복구 예

본 과제 수행 중 행원 농공단지 내에서 30m 고

도의 풍속계가 '96. 11. 9 ~ '96. 11. 27 동안 원인을 알 수 없는 이유로 고장나서 30m 고도의 풍속자료가 누락되었던 경우가 있었다. 이때 동일 측정 위치의 15m 고도 풍속계는 정상적으로 작동 중에 있었다.(Fig. 4 참조)

본 연구에서는 앞에서 소개된 복원 방법을 이용하여 이 지역의 30m 고도의 누락된 풍속자료를 동일 기간 동안 정상적으로 계측된 15m 고도의 풍속자료로부터 외삽법을 이용하여 Fig. 5와 같이 복원하여 이 지역의 풍력 에너지 해석작업을 위해 사용하였다.

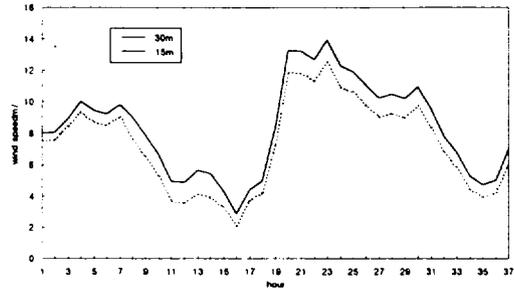
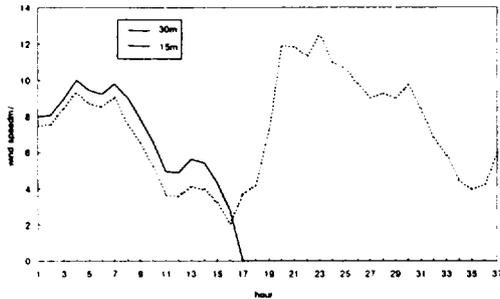


Fig. 4 Example of sensor down (Hengwon, 96. 11. 8. 11:00 ~ 96. 11. 09. 23:00)

Fig. 5 Wind data recovered using the data at 15m height in Fig. 4

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

	Item	Measured Values	By Existing Mehtod		By Proposed Method	
			Calculated Values	Relative error (%)	Calculated Values	Relative error (%)
1	Site Name	Hengwon	Hengwon	-	Hengwon	-
2	Ground Roughness (M)	-	0.18 (constant)	-	variable	-
3	Measuring Height (M)	30.0	15.0	-	15.0	-
4	Calibrated Height (M)	31.5	31.5	-	31.5	-
5	Wind Turbine	VESTAS 225kW	VESTAS 225kW	-	VESTAS 225kW	-
6	Mean Wind Speed (M/S)	7.12	7.21	+1.3	7.18	+0.8
7	Standard Deviat. Of Wind Speeds	4.34	4.36	0.0	4.35	0.0
8	Mean Wind Power Density (W/M <sup>2</sup> )	483.5	477.4	-1.3	477.4	-1.3
9	Max. Wind Speed (M/S), Date (Y/M/D/H)	22.3 96/12/22/16	21.5 96/12/22/16	-3.6	21.7 96/12/22/16	-2.6
10	Dominant Wind Energy Direction	NW	NW	0.0	NW	0.0
11	Weibull Shape Factor, K	1.778	1.811	+1.9	1.802	+1.3
12	Weibull Scale Factor, C(M/S)	8.02	8.08	+0.7	8.05	+0.4
13	Capacity Factor (%)	33.4	33.7	+0.8	33.5	+0.3
14	Overall Efficiency (%)	27.1	27.7	+2.2	27.6	+1.8

이때, 고도 보정을 위한 최적의 방위별 지면조도  $Z_0(\theta)$ 는 Fig. 1과 같다. 참고로, 기존의 방법으로 지역 지면조도를 상수로 추정할 경우 그 값은 0.18 이었다.

또한, Table 2는 동일지역에서 1996년 10월 및 1996년 12월의 두 달 동안 정상적으로 측정된 30m 고도 풍속자료를 이용하여 3개의 풍력발전기에 대하여 풍력에너지 특성을 해석한 것과, 같은 기간에 대하여 Fig. 5와 같은 방법으로 재구성된 30m 고도 풍속자료를 이용하여 풍력에너지 특성을 해석한 것을 비교한 것이다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 풍력에너지 해석결과에서 주요 항목에 대한 비교결과, 실제 측정자료와 방위별 지면조도를 고려하는 것이 지면조도를 일정 값으로 하는 것보다 보다 더 정확하게 풍속자료를 재구성 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 확립한 누락된 풍속자료의 복원방법은 비교적 높은 신뢰도를 갖고 적용될 수 있음을 알 수 있다.

### III. 결 론

풍력자원의 이용을 극대화하기 위해서는 지역별 풍력자원의 정확한 측정과 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 풍력자원 측정시 발생할 수 있는 여러 가지 형태의 풍력자원 측정자료의 망실 혹은 누락자료의 복구를 효과적으로 할 수 있는 방법의 하나로 어느 특정지역의 지면조도 값을 현재의 고정된 하나의 스칼라 값을 사용하는 대신 방위별로 변화하는 이차원적인 지면조도 개념을 도입하였다. 제안된 방위별 지면조도 개념을 적용하여 실측자료에 대한 검증 계산 결과 기존의 단일 지면지도 값을 사용하는 것보

다 방위별 지면조도의 개념을 적용할 경우가 풍력자료 복원과정의 신뢰도가 더 향상될 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 제주도가 지원한 '제주도 풍력발전기의 실용화 보급방안에 관한 연구'의 일환으로 수행되었음.

### 참고문헌

- 1) 박경호 외, 풍력발전단지 건설을 위한 풍력자원 정밀조사, 한국에너지기술 연구소, 1993
- 2) 허종철 외, 제주도 풍력발전기의 실용화 보급방안에 관한 연구, 제주도, 1997
- 3) Bowden G. J. et al, "The Weibull Function and Wind Power Statistics," *Wind Engineering*, Vol. 7, No. 2, 1983
- 4) Janardan S. Rohatg and Vaughn Nelso, "Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power," *Alternative Energy Institute*, West Texas A&M Univ., 1994
- 5) Mikhail A. S. and C. G. Justus, "Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis," *Wind Engineering*, Vol. 5, No. 2, 1981
- 6) 조경호, 김휴찬, 제주도내 풍력자원 측정자료의 효율적인 통합 저장-관리 프로그램의 개발, 제주도, pp. 21-25, 1997