

복잡지형에서의 Wind Shear Exponent 예측

김현기*, 김병민*, 김진한*, 백인수**, 유능수***

*강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과(kimhk@kangwon.ac.kr),
*강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과(rhapsodist@kangwon.ac.kr),
*강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과(mkjh@kangwon.ac.kr),
**강원대학교 기계메카트로닉스공학과 조교수, 공학박사(paek@kangwon.ac.kr),
***강원대학교 기계메카트로닉스공학과 정교수, 공학박사(yoonesoos@kangwon.ac.kr)

Prediction of Wind Shear Exponent in Complex Terrain

Kim, Hyeon-Gi* Kim, Byeong-Min* Kim, Jin-han* Paek, In-Su** Yoo, Neung-Soo***

*Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Graduate School, Kangwon National University(kimhk@kangwon.ac.kr, rhapsodist@kangwon.ac.kr, mkjh@kangwon.ac.kr),
**Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Assistant professor, Ph.D(paek@kangwon.ac.kr),
***Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Professor, Ph.D(yoonesoos@kangwon.ac.kr)

Abstract

In this study, we found a relationship between wind shear exponent, α , and a few factors such as the wind speed, V , ruggedness index(RIX), and the Weibull shape parameter, k of sites in complex terrain in Korea. Wind shear exponents in main wind directions were calculated using wind speed data measured for one year from various heights of eleven meteorological masts in Gangwon province. It was found from the analysis that the reciprocal of the wind shear exponent can be expressed by an exponentially decaying function with respect to a multiple of V , RIX and k . This result is considered useful to be used to characterize wind characteristics of specific sites in complex terrain in Korea with limited information.

Keywords : 풍속전단지수(Wind Shear Exponent), 복잡지형(Complex Terrain), 와이블 형상계수(Weibull Shape Factor)

1. 서론

에너지 소비의 증가 및 화석에너지의 고갈

로 인해 세계 여러 국가들은 친환경적인 신재생에너지원의 개발 및 보급에 전력을 기울이고 있는 추세이다. 그 중에서도 풍력발전은

투고일자 : 2012년 1월 27일, 심사일자 : 2012년 2월 1일, 게재확정일자 : 2012년 4월 12일
교신저자 : 백인수(paek@kangwon.ac.kr)

신재생 에너지원 중 발전단가가 상대적으로 낮기 때문에 세계적인 관심을 받고 있다.

최근 풍력발전기에 대한 기술 발전으로 인해 풍력발전기의 규모가 점점 대형화 되고 있으며 그 결과 풍력발전단지의 규모가 점점 커지고 있다[1].

우리나라는 전체 국토면적 중 산지 지형이 차지하는 비율이 매우 높으며 산지에서의 바람자원이 풍부하기 때문에, 산지 지형에 많은 풍력발전 단지가 건설되어 있다[2]. 특히 우리나라에서 강원도 산간지방은 풍력자원이 풍부하지만 백두대간 보호 등의 이유로 단지 개발이 제한되어 있다. 하지만, 향후 제한이 완화 된다면 풍력 단지 건설이 더욱 활성화 될 것으로 예상된다.

산지로 이루어진 복잡지형의 경우 바람은 평지 또는 해상에 비해 지형에 의한 영향을 크게 받게 되므로 평지와는 다른 Wind Shear 를 보이게 된다. 또한 복잡지형에서의 풍력 자원 예측에 있어서 일반적으로 풍력발전기의 허브높이보다 낮은 높이에서 측정된 풍속을 풍력발전기 허브높이의 풍속으로 보정하여 연간 발전량을 예측하게 되고, 많은 경우에 있어, 평지에서 적용 가능한 지표거칠기에 의한 대수법칙이 풍속의 높이 보정에 적용된다. 하지만, 복잡지형에서는 평지와는 달리 Wind Shear 가 지형의 영향을 크게 받게 되기 때문에 이에 적합한 복잡지형에서의 Wind Shear의 형태를 정확히 파악하는 것이 정확한 발전량 예측 및 이를 바탕으로한 경제성 판단을 위해 매우 중요하다.

하지만, 현재 문헌상에 제시되고 있는 복잡지형에 대한 연구들은, 복잡지형에서의 비선형 유동예측을 위한 CFD 프로그램의 적용이나 [3, 4], 풍향 오차에 의한 복잡지형 풍속 예측 오차의 영향[5], 복잡지형 형상에 따른 풍속 분포 특성[6, 7], 그리고 복잡지형에서의 풍속 예측 보정[8]에 국한되어 있으며, Wind Shear 의 정확한 예측을 위한 상관관계식에

대한 연구는 미흡한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 복잡지형에서의 풍향 특성을 기술하기 위하여 복잡지형에서의 연직 풍속 분포 특성을 나타내는 Wind Shear Exponent 값을 평균풍속, 지형의 복잡도를 나타내는 RIX , 와이블 형상계수 k 를 이용하여 정량화 하고자 하였다.

이를 위해 국내 복잡지형에 위치한 11곳의 실측지점에서 측정된 높이별 실측자료를 이용하여 주풍향에 대한 Wind Shear Exponent 값을 산출하였고, 그 결과와 지형의 복잡도를 나타내는 RIX , 연평균 풍속, 그리고 와이블 계수값중 풍속의 출현율에 영향을 미치는 형상계수 k (shape parameter)의 상관관계를 살펴보았다. 그리고, MATLAB 프로그램을 이용하여 회귀분석(Regression Analysis)을 수행함으로써, 각 인자들과 Wind shear Exponent 의 상관관계를 수식으로 도출하였다.

2. 평균풍속 및 지형의 복잡도 그리고 형상계수에 따른 높이별 풍향특성 분석

2.1 연구방법

본 연구에서는 풍속의 연직분포(Wind Shear)를 결정하는 α (Wind Shear Exponent)값을 지형의 복잡도를 나타내는 RIX , 평균풍속 V , 그리고 와이블 계수 중 형상계수(Shape Parameter) k 를 이용하여 상관관계(식 1)를 분석하였다. 또한 상관관계식을 찾아내기 위해서 MATLAB 을 이용하여 회귀분석을 수행하였다.

$$\alpha = f(RIX, k, V) \quad (1)$$

2.2 실측지점 현황

본 연구에 필요한 실측지점의 풍향 자료는 강원도 복잡지형에 위치한 11개 지점에서 측정된 풍향 자료를 이용하였다. 각 실측 지점의 위치는 그림 1에서 알 수 있듯이 남북방향으로 길게 위치하고 있다. 풍향 자료는 11곳

의 실측지점에 40m 높이의 기상계측타워를 설치하고 20m~40m 측정높이에서 1년간 측정하여 얻었다.



그림 1. Measurement Sites

표 1. Description of Measurement Site

지점	측정기간	측정높이 [m]	평균풍속 [m/s]	고도 [m]	주풍향
A	07.10.21 ~ 08.10.20	40,30,20	4.03	1,198	서, 서북서
B	07.10.22 ~ 08.10.21	40,30,20	5.00	1,100	남남서
C	09.12.26 ~ 10.12.25	40,30,20	7.38	1,375	서남서
D	08.11.04 ~ 09.11.03	40,30,20	3.72	1,146	서남서,서
E	08.04.25 ~ 09.04.24	40,30,20	6.49	850	서북서
F	08.11.04 ~ 09.11.03	40,30,20	3.90	877	남남서, 서남서
G	08.11.04 ~ 09.11.03	40,30,20	4.64	1,150	서북서
H	08.10.22 ~ 09.10.21	40,30,20	3.18	725	남남서, 서남서,서
I	09.04.12 ~ 10.04.11	40,30,20	5.01	800	서
J	09.12.10 ~ 10.12.09	40,30	7.48	700	서
K	09.12.10 ~ 10.12.09	40,30	7.88	725	서

표 1에서 알 수 있듯이 각 실측지점에서의 주풍방향은 남남서(210°) ~ 서북서(300°)계

열이 우세하였으며 그중에서 서풍(270°)이 가장 우세하게 나타났다. 또한 각 지점의 40m 높이에서 측정된 1년간의 평균 풍속은 표 1에 제시된 바와 같이 약 3m/s ~ 7m/s의 분포를 보이고 있다.

2.3 주풍방향의 높이별 풍속

본 연구에서 Wind Shear Exponent를 산출하기 위해 사용된 각 실측지점의 주풍방향에 대한 높이별 평균풍속을 표 2에 나타내었다. 높이별 풍속은 각각 40, 30, 20m에서 측정된 풍속자료가 사용되었으며 J지점 및 K지점은 20m 높이에서 풍속의 측정이 이루어지지 않았기 때문에 40m와 30m의 풍속자료만을 사용하였다.

표 2. Mean Wind Speed of Prevailing Wind Direction with Measurement Height

지점	주풍향	측정높이별 평균풍속 [m/s]		
		40m	30m	20m
A	서	4.47	3.15	2.04
	서북서	4.13	2.83	1.78
B	남남서	5.48	5.15	4.54
C	서남서	8.95	8.83	8.44
	서	4.95	4.43	4.48
D	서남서	4.82	3.99	4.06
	서	4.82	3.99	4.06
E	서북서	9.08	9.08	8.83
	남남서	4.32	4.02	3.22
F	서남서	4.53	4.1	3.26
	서북서	5.31	5.1	3.64
G	남남서	3.94	3.73	3.02
	서남서	4.33	4.13	3.4
H	서	3.81	3.6	2.83
	서	5.76	5.59	4.78
J	서	11.08	10.74	-
K	서	10.62	10.26	-

2.4 Ruggedness Index (RIX)

지형의 복잡한 정도는 RIX(Ruggedness Index)값을 이용하여 나타내었다. RIX 값은 구하고자 하는 대상지점을 중심으로 반경 3.5 km인 원으로 이루어진 영역의 12개 방위에 대하여 경사도가 16.7°이상인 영역의 비율을 각 섹터별로 나타낸 값으로 값의 크기에 따라

지형의 복잡도를 나타내게 된다. 즉 RIX 값이 0일 경우 평지에 해당하며, 0~0.1은 복잡지형, 0.1이상은 산지와 같은 매우 복잡한 지형에 해당한다[9].

본 연구는 선형 해석 프로그램인 WAsP을 사용하여 RIX 값을 계산하였으며 그림 1의 총 11곳의 실측 지점별 주풍 방향(12방위)에 대한 RIX 값을 표 3에 나타내었다. 표 3에 제시된 11개 지점은 0.283~0.509의 섹터별 RIX 값에서 알 수 있듯이 주풍방향에 해당하는 영역이 매우 복잡한 지형임을 알 수 있다.

표 3. RIX value of Measurement Sites

지점	주풍향	RIX
A	서(270°)	0.509
	서북서(300°)	0.437
B	남남서(210°)	0.307
C	서남서(240°)	0.376
D	서남서(240°)	0.283
	서(270°)	0.295
E	서북서(300°)	0.364
F	남남서(210°)	0.417
	서남서(240°)	0.489
G	서북서(300°)	0.344
H	남남서(210°)	0.422
	서남서(240°)	0.481
	서(270°)	0.402
I	서(270°)	0.390
J	서(270°)	0.428
K	서(270°)	0.396

2.5 Wind Shear exponent α

풍속의 연직분포인 Wind Shear의 형태는 대수법칙(logarithmic law) 또는 멱법칙(power law)을 통하여 수학적으로 나타낼 수 있다. 멱법칙은 식(2)에 주어진 함수로 표현될 수 있으며, 식(2)에서 U 는 지상으로부터의 높이 z 에서의 평균풍속 (m/s), z_0 는 지상으로부터의 높이(m), β 는 상수, 그리고 α 는 wind shear exponent를 각각 나타낸다.

$$U(z) = \beta z^\alpha \quad (2)$$

각 실측지점에서 측정된 높이별 평균풍속과 식(2)를 이용하여 α 값을 산출하기 위해서 식(2)의 양변에 자연로그를 취하면 식(3)을 얻게 된다.

$$\ln(U(z)) = \alpha \ln(z) + \ln(\beta) \quad (3)$$

식(3)은 1차함수의 형태이므로 x - y 평면에서 x 축은 $\ln(z)$, y 축은 $\ln(U(z))$ 의 함수로 나타내고 그 값들을 최소자승법을 이용하여 기울기 및 y 절편 값을 구하면 Wind Shear Exponent인 α 값과 계수 β 값을 구할 수 있게 되며 따라서 각 지점별 Wind Shear의 형태 또한 산출할 수 있다. 이와 같은 방법으로 각 실측지점의 주풍방향별 α 값을 계산하고 그 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4를 살펴보면 α 값은 0.108~1.211의 다소 넓은 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

표 4. Shear Exponent(α) of Measurement Sites

지점	주풍향	α
A	서(270°)	1.128
	서북서(300°)	1.211
B	남남서(210°)	0.274
C	서남서(240°)	0.086
D	서남서(240°)	0.133
	서(270°)	0.228
E	서북서(300°)	0.042
F	남남서(210°)	0.432
	서남서(240°)	0.481
G	서북서(300°)	0.564
H	남남서(210°)	0.440
	서남서(240°)	0.393
	서(270°)	0.357
I	서(270°)	0.277
J	서(270°)	0.108
K	서(270°)	0.120

2.6 지점별 와이블 형상계수

실측 풍황 자료를 사용하여 각 지점별 주풍 방향에 대한 와이블 분포를 계산하였으며, 와이블 분포계산 방식은 식(4)와 같다

$$f(V) = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad (4)$$

식 (4)를 통해 얻은 형상계수 k 는 표 5에 정리하였으며 각 지점의 형상계수 분포는 1.4~2.71의 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

표 5. Shape Parameter of Measurement Sites.

지점	주풍향	k
A	서(270°)	2.39
	서북서(300°)	2.71
B	남남서(210°)	1.95
C	서남서(240°)	1.73
D	서남서(240°)	1.59
	서(270°)	2.17
E	서북서(300°)	1.58
F	남남서(210°)	2.04
	서남서(240°)	1.99
G	서북서(300°)	2.35
H	남남서(210°)	1.65
	서남서(240°)	1.42
	서(270°)	1.55
I	서(270°)	1.97
J	서(270°)	1.98
K	서(270°)	1.96

2.7 α 값에 따른 각 Parameter의 관계

α 값과 각 지점별 주풍방향에서의 평균풍속 V , 지형의 복잡도를 나타내는 RIX , 그리고 형상계수 k 값을 Plot한 결과를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 알 수 있듯이 α 값은 RIX 및 형상계수 k 가 증가함에 따라 대체로 증가하는 경향을 보이며, 평균풍속 V 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 따라서 각 인자들의 관계를 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha \propto \frac{RIX \times k}{V} \quad (5)$$

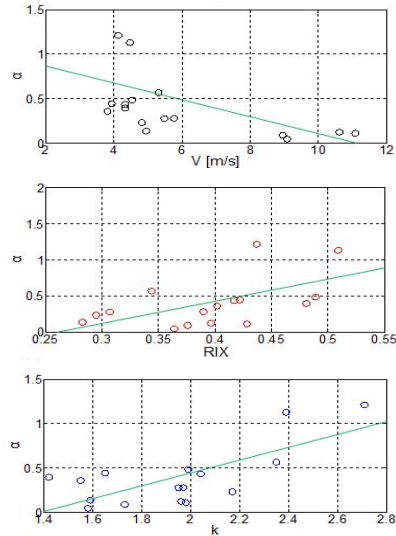


그림 2. α vs. RIX , k , and V

3. 해석결과

앞서 기술하였듯이 산출한 11개의 실측지점의 주풍방향에 대한 RIX , 평균풍속 V 그리고 형상계수 k 값과 α (Wind Shear Exponent)의 관계를 그림 3에 나타내었다.

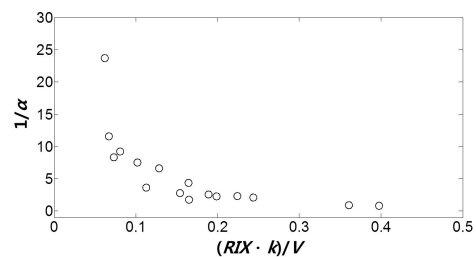


그림 3. Variation of $1/\alpha$ with RIX , k and V

그림 3에서 알 수 있듯이 α 는 RIX , 형상계수 k 및 평균풍속 V 로 나타낸 인자에 대하여 지수함수적인 형태를 보이고 있다. 따라서 그림 2에서 나타난 각 변수들과 α 와의 상관관계를

지수함수로 가정하고, 그 계수를 도출하기 위해 MATLAB을 이용하여 회귀분석(Regression Analysis)을 수행하였다. 회귀분석 결과는 그림 4와 같다.

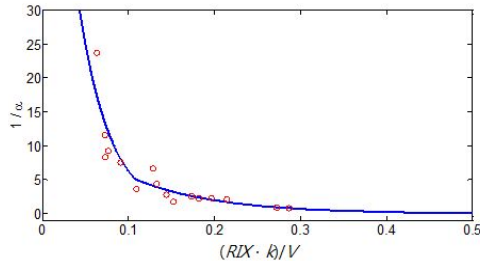


그림 4. Result of Regression Analysis

회귀분석을 통한 각 인자들과 α 의 상관관계는 식(6)와 같이 나타낼 수 있으며, 식(6)에서, V 는 m/s의 단위가 사용되었다.

$$\frac{1}{\alpha} = 99.3e^{-27.6x}, x \geq 1.08 \quad (6)$$

$$= 15.4e^{-10.3x}, x < 1.08$$

$$x = \frac{RIX \cdot k}{V}$$

4. 토 의

본 연구 결과에서 얻어진 RIX , 와이블 형상 계수 k , 그리고 평균풍속 V 를 이용한 α 의 상관관계식을 문헌상에 제시된 Justus와 Counihan의 α 에 대한 상관관계식과 비교하였다. Justus는 풍속과 지면으로부터의 높이와 α 의 상관관계식을 제안하였고[10], Counihan은 지표 거칠기와 α 의 상관 관계식을 제안 하였다[11]. 식(7)과 식(8)은 각각 Justus 와 Counihan의 상관관계식을 나타낸다.

$$\alpha_{Justus} = \frac{0.37 - 0.088 \ln(V)}{1 - 0.088 \ln(h/10)} \quad (7)$$

$$\alpha_{Counihan} = 0.096 \log_{10} z_0 + 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad (8)$$

위 식에서 V 는 풍속 (m/s), h 는 지면으로부터의 높이 (m), 그리고 z_0 는 지표거칠기 (m)를 각각 나타낸다. 각 실측지점의 지표거칠기 z_0 는 그림 5에서 알 수 있듯이 각 실측지점 별 복잡지형에 해당하는 0.4m의 값을 적용하였다.

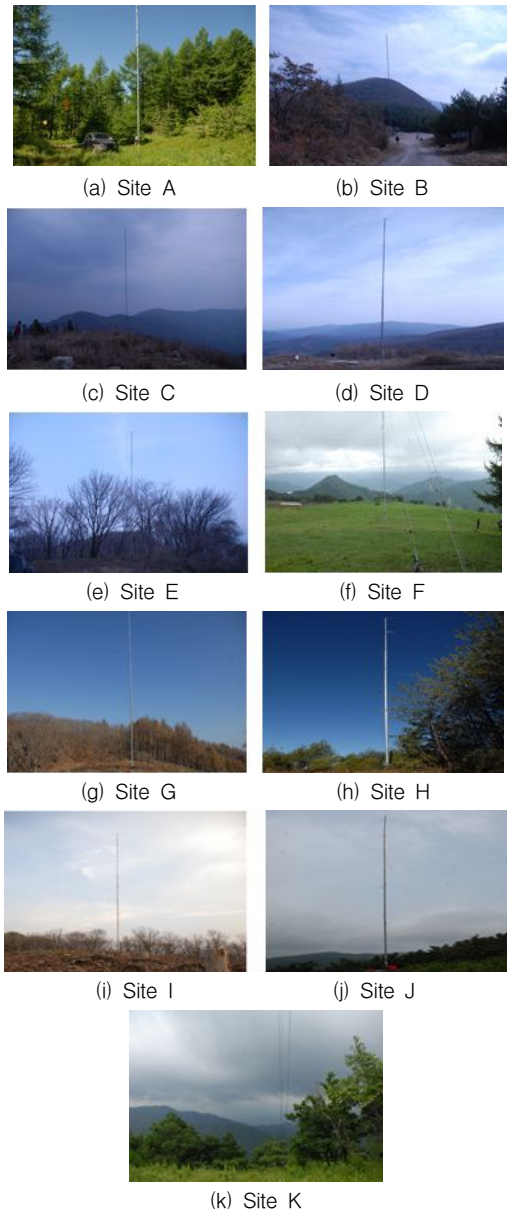


그림 5. View of measurement sites

그림 6은 본 논문에서 사용된 강원도 복잡 지형에서 측정된 높이별 풍속 자료와 식 (2)를 이용하여 계산한 실측 α 값과 Justus 와 Counihan 의 상관 모델, 그리고 본 논문에서 제시하는 상관관계식인 식(6)에 의한 예측 α 값의 결과를 보여준다.

그림 6에서 알 수 있듯이, Justus 와 Counihan 의 상관모델은 강원도 복잡지형에서의 α 값을 예측하는데 다소 큰 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 복잡지형에서는 평지와 달리, RIX 와 같은 지형적 특성이 α 값에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

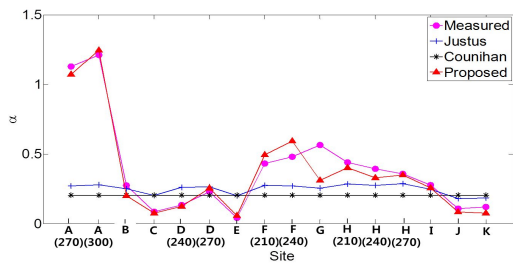


그림 6. Results of each models

표 6. Prediction errors from various correlations

지점	주풍향	α	Error(%)		
			Justus	Counihan	Proposed
A	서	1.128	-75.9	-81.9	-5.0
	서북서	1.211	-76.9	-83.1	2.8
B	남남서	0.274	-8.4	-25.4	-27.0
C	서남서	0.086	134.6	137.6	-13.0
D	서남서	0.133	96.3	53.6	-6.9
	서	0.228	15.7	-10.4	11.9
E	서북서	0.042	376.9	386.5	37.7
F	남남서	0.432	-36.4	-52.7	14.2
	서남서	0.481	-43.9	-57.5	23.4
G	서북서	0.564	-55.0	-63.8	-44.8
H	서	0.357	-35.5	-53.6	-8.9
	남남서	0.440	-30.1	-48.0	-16.1
	서남서	0.393	-19.5	-42.8	-2.0
I	서	0.277	-11.2	-26.2	-7.5
J	서	0.108	67.0	89.2	-22.9
K	서	0.120	53.8	70.3	-36.8

표 6은 그림 6의 상관모델의 예측값과 각 지점 주풍방향의 α 값의 상대오차(%)를 보여 준다. 오차에서 ‘+’ 는 과 예측, ‘-’ 는 소 예측을 각각 의미한다. 표 6에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 제안된 상관관계식을 이용하게 될 경우 다른 두 상관 모델과 비교하여 보다 정확하게 α 값을 예측하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 복잡지형 상에 위치한 11 곳의 실측지점의 높이별 풍향데이터를 이용하여 Wind Shear Exponent, α 값을 산출하였으며, α 값에 영향을 미치는 요소를 지형의 RIX 값과 평균풍속 V , 그리고 형상계수 k 의 세가지로 국한하여 상관관계를 밝히고자 하였다. 지형의 복잡도를 대표하는 RIX 값과 평균풍속 V , 형상계수 k 와 α 값의 관계 및 그에 따른 α 의 변화를 MATLAB 을 이용한 회귀분석을 통해 관계식을 도출하였다. α 값의 변화는 평균풍속에 반비례하며, RIX 및 형상계수 k 값에는 비례하는 추세를 보였으며 결과적으로 $1/\alpha$ 를 지수함수의 형태로 가정하여 회귀분석하였다. 또한 본 논문에서 제안하는 α 의 상관관계식과 문헌상의 상관관계식 그리고 실측 α 와 비교하여, 본 논문에서의 상관 관계식이 강원도 복잡지형에서 보다 정확히 α 값을 예측하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과를 종합하여 볼 때 복잡지형에서 RIX 및 평균풍속 그리고 형상계수에 따라 높이별 풍속분포를 보다 정확히 유추할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 본 연구결과는 본 논문에서 사용한 강원도 산간지역 11곳의 실측지점의 풍향자료만을 이용하였으므로, 더 많은 실측지점의 풍향자료를 확보하여야 더욱 일반적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2011(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20093021020030)

참 고 문 헌

1. EWEA, Wind in power-2010 European statistics, 2011
2. 장문석, 풍력발전기술의 현황 및 전망, 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회논문집, pp.3~29, 2009
3. Jaekyoon Woo, Hyeonggi Kim, Byeongmin Kim, Insu Paek, Neungsoo Yoo, AEP Prediction of Gangwon Wind Farm using AWS Wind Data, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No 2, pp. 72~81, 2011
4. 김석우, 김현구, 남극 세종기지의 전산유동 해석에 의한 풍력자원 평가, 한국 태양에너지학회논문집, 제27권, 제3호, pp. 29~35, 2007
5. 김현기, 김병민, 백인수, 유능수, 김현구, 풍향의 변동성에 따른 연간에너지발전량의 변화, 한국태양에너지학회논문집, 제31권, 제5호, pp. 1~8, 2011
6. 이성우, 김동우, 이석중, 하영철, 2차원 산지형의 풍속분포 특성에 관한 실험적 연구, 한국풍공학회지, 제4권, 제1호, pp. 67~73, 2000
7. 정의현, 문채주, 김의선, 장영학, 복잡지형 형상에 따른 풍력자원 보정에 관한 연구, 한국태양에너지학회논문집, 제29권, 제6호, pp. 62~68, 2009
8. 김현구, 윤정은, 경남호, 이영섭, 지역별 풍속전단 형태분석에 관한 연구, 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, pp. 111~112, 2005
9. WAsP 9.0, WAsP 9 Help Facility and On-line Documentation.
10. C.G. Justus, Winds and wind system performance, Franklin Institute Press, Philadelphia, PA, 1978.
11. J. Counihan, Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data collected from the period 1880-1972, atmospheric environment, Vol. 9, pp. 871-905, 1975.