

제주도 풍력발전단지 설계를 위한 조도계수 산정에 대한 연구

The Study on Assessment of Roughness Coefficient for Designing Wind Farm in Jeju Island

고정우* · 권혁춘** · 이병걸***

Ko, Jung-Woo · Quan, He Chun · Lee, Byung-Gul

要 旨

지면위의 풍속의 변화를 높이별 풍속변화(wind shear)라고 한다. 풍력자원 평가 분야에서 전통적으로 이런 높이별 풍속 변화특성을 수학적으로 두 가지 방법으로 분석한다. 이를 대수법칙(Lograthmic law)과 멱법칙(Power law)이라 한다. 대수법칙은 표면 거칠기를 파라미터로 멱법칙의 경우 멱지수를 파라미터로 사용한다. 높이별 풍속변화는 여러 가지 인자에 의하여 영향을 받는다. 대부분은 대기의 안정도와 주변의 지형에 의한 거칠기에 현저한 영향을 받는다. 대기안정도는 계절적, 하루의 시간 변화나 기상학적 변화에 의한 영향을 받는다. 표면의 거칠기와 멱지수 역시 시간의 변화에 따라 변화하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 제주 평대와 한동 지역의 풍황 관측데이터를 이용하여 메트랩과 windograper를 이용하여 조도 길이와 멱지수를 계산 하였다. 이 결과는 참조데이터들과 유사한 결과를 보이긴 했지만 범위는 차이를 보이고 있었다. 선행 연구와 비교한 결과 해양의 경우 비슷한 결과를 보였지만 농작지의 경우 보다 높은 범위를 농촌마을이 경우 보다 낮은 범위를 보이고 있었다.

핵심용어 : 조도길이, 멱지수, 높이별 풍속변화

Abstract

The variation in the wind speed with height above ground is called the wind shear profile. In the field of wind resource assessment, analysts typically use one of two mathematical relations to characterize the measured wind shear profile: the logarithmic profile (log law) and the power law profile (power law). The logarithmic law uses the surface roughness as a parameter, and the power law uses the power law exponent as a parameter. The shape of the wind shear profile typically depends on several factors, most notably the roughness of the surrounding terrain and the stability of the atmosphere. Since the atmospheric stability changes with season, time of day, and meteorological conditions, the surface roughness and the power law exponent also tends to change in time. For this study, Using the observed data from Met-mast, located in Pyeongdae, Handong in Jeju. we used the matlab and windograper to calculate roughness length and the law exponents. These calculations are similar to reference the data, but they have different ranges. In the ocean case, each reference data and calculated data was the same, but the crop area is higher than the earlier studies. In addition, the agricultural village is lower than the earlier studies.

Keywords : Log Law Terran Roughness, Power Law Exponent, Wind Shear

1. 서 론

풍력발전단지를 조성함에 있어 단지의 타당성 분석 평가와 함께 정역학적 하중계산, 동역학적 하중계산, 공진현상에 대한 블레이드와 타워의 하중계산을 위해 풍속의 높이변화(wind shear)에 따른 바람의 세기를 평가하는 것은 매우 중요한 과정이다. 높이에 따른 바람의 세기(wind shear)를 수학적인 모델로 나타내는 방법

에는 대수법칙(Lograthmic law)과 멱법칙(Power law)이 있다. 이 각각의 공식에서 지형, 육풍, 해풍 등의 영향의 정도를 나타내는 계수로는 대수법칙의 조도 길이(Roughness length)와 멱법칙의 멱지수(Hight exponent)가 있다. 이런 조도계수를 계산하기 위해서는 같은 지점에서 높이가 다른 두 개 이상의 풍속센서의 자료가 필요하다. 지형적인 영향에 의한 조도계수 값의 범위에 대해서는 유럽의 경우 이런 연구 성과들을 정리 하여

2012년 4월 10일 접수, 2012년 5월 16일 채택

* 정희원 · 제주대학교 대학원 풍력특성화 협동과정 박사과정(tuba1215@hanmai.net)

** 교신저자 · 정희원 · 중국 연변대학교토목공학과 교수, 공학박사(qhchun@hanmail.net)

*** 정희원 · 제주대학교 해양과학대학 토목공학과 교수, 공학박사(leebg@empas.com)

The guideline for assigning roughness length value (European Wind Atlas, 1989) 발표 하였고 우리나라의 경우 제주서광지역에 대한 풍력에너지 장기간(10년) 특성(고경남 등, 2008)과 기상데이터와 웨이블 파라미터를 이용한 풍력에너지 밀도분포비교(황지욱 등, 2010)등 선행 연구가 진행되었다. 그러나 이러한 국내 연구들은 지형 분류를 고려하지 않고 조도계수를 산정함에 따라 지역특성을 고려한 조도계수 값을 제시하지 못하고 있다. 고도에 따른 풍속예측의 불확실성은 지표 조도에 영향을 받으며 지형의 분류에 의한 특성 뿐 아니라 육풍과 해풍의 영향, 계곡풍과 같은 지역의 높이 특성에 따라 같은 지형적 분류를 보이더라도 지역마다 차이를 보이게 된다. 또한 계절적 요인으로 인한 식물의 식생에 생육 등의 영향에 따라 변화하게 되면 같은 지형이라도 지역에 따라 차이를 보이게 된다. 외국의 선행 연구의 경우 이런 지형적 특성이외의 요인 때문에 우리나라 지역에 적합한 조도계수를 산정할 필요가 있다.

우리나라의 경우 신재생에너지 자원 데이터센터, 한국에너지 기술연구원의 풍력자원 분석 사이트를 통하여 관측 지역의 조도계수와 먹지수를 보여 주고 있지만 센서의 높이는 15m와 30m이고 실제 풍력발전기의 허브 높이인 80m 이상을 예측하기에 무리가 있으며 지형적 분류에 대한 조도계수 값의 범위 지정이 문제가 있다. 본 연구는 지역특성에 맞는 조도계수를 산정하기 위해 제주지역의 평대와 한동 지역의 풍향 관측탑 자료를(Met Mast Data) 이용하여 60m, 58m, 50m, 40m, 30m의 풍속데이터와 그 지역의 지형적 특성을 고려한 지형 분류를 이용하여 조도계수를 계산함으로써 제주 지역에 알맞은 조도계수의 범위를 제시 하였다.

2. 현장관측자료

2.1 관측위치

본 연구에 이용된 바람의 관측 지점은 제주도 북동부

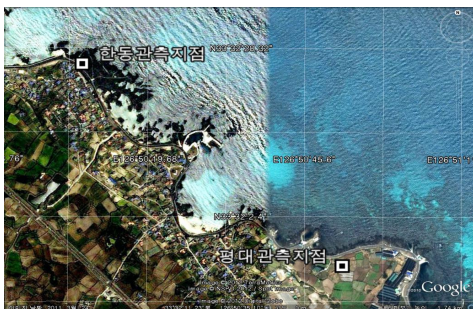


Figure 1. Met-mast, located in Pyeongdae, Handong in Jeju

지역의 평대와 한동리 지역이다. 그 위치는 WGS타원체를 기준으로 각각의 경위도 좌표계는 한동(N33° 31'55", E126°50'52"), 평대(N33°31'55", E126°50'52")이며, 한동과 평대사이의 거리는 1.4km 정도 떨어져 위치하고 있다.

2.2 풍향 관측탑(met-mast)

북동부 지역의 평대와 한동리의 풍향 관측탑에는 60m, 58m, 50m, 40m, 30m에 풍속계가 설치되어 있고, 60m, 40m에 풍향계가 설치되어 있으며 2m 높이 지점에 온도와 압력센서가 각각 부착되어 있다.



Figure 2. Met-mast, located in Pyeongdae, Handong in Jeju

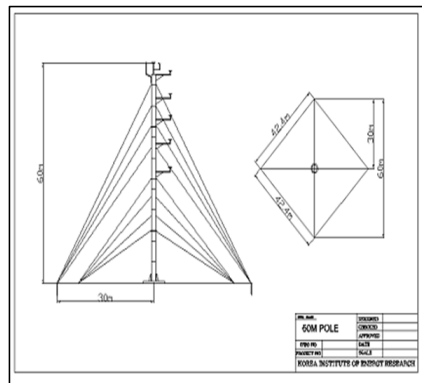
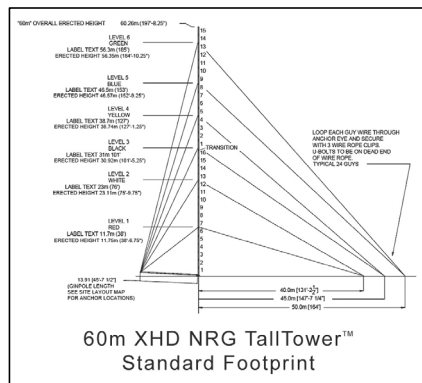


Figure 3. Met-mast drawing

3. Wind Shear 모델링

Wind Shear란 지표면 위의 높이에 대한 풍속의 변화를 말하며 Wind shear profile이라고도 말한다. 이런 높이에 따른 풍속의 변화에 대한 Wind Shear모델링을 하기 위한 수학적 방법은 대수법칙(logarithmic profile (log law))과 멱법칙(power law profile (power law))이 있다. 이러한 수학적 방법을 이용한 Wind Shear 모델링을 제시하기 위해서는 최소한 지표면 위 높이가 다른 풍속 센서에서 관측된 두 개 이상 자료를 가지고 있어야 한다.

3.1 대수법칙(Logarithmic profile using Karman's constant)

아래의 (1) 식은 대수 법칙을 나타내는 식이다.

$$V_z = V_h \left(\ln \frac{z}{z_0} / \ln \frac{h}{z_0} \right) \quad (1)$$

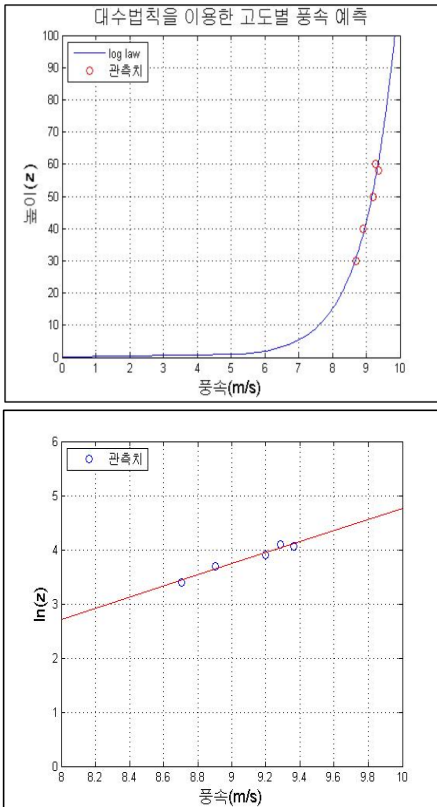


Figure 4. Mean wind speed at each height, along with the logarithmic law profile

관측된 wind shear로부터 고도에 대하여 자연로그를 취해준 후 선형 최소 제곱근을 이용하여 조도 길이를 구할 수 있다. 여기서 V_z, V_h 는 지상에서 부터의 z 및 h 에서의 풍속이고 z_0 는 조도 길이 이다. 아래 Figure은 대수법칙의 조도 길이(Roughness length)를 구하는 과정이다. 먼저 관측 기간 동안의 60m, 58m, 50m, 40m, 30m 평균 풍속을 구한다.

Figure 4는 높이별 관측된 풍속을 도식화 하였다. 각각 평균을 취하게 되면 근중립계층층 상태가 되며 높이에 자연로그를 취하면 아래쪽 Figure과 같은 선형 그래프가 된다.

$$b = \frac{\sum \ln(z)_i - a \sum v_i}{N}, \quad z_0 = \exp(b) \quad (2)$$

여기서 N 은 관측 높이의 계수이며 a 는 높이에 자연로그를 취하였을 때 오차를 최소화한 기울기이며 b 는 그 기울기가 X 축과 만나는 지점의 Y 값이다. 즉 b 는 다시 말해 풍속이 0이 되는 지점을 $\ln(z)$ 값을 의미하며 $\ln(z)$ 값을 풀어 주면 그 값이 조도 길이 값이 된다. 이렇게 계산된 조도 길이를 이용하여 관측 지점 중 한 곳의 풍속을 대수법칙에 대입 하여 그린 그래프가 위쪽 Figure의 곡선 그래프이다.

3.2 멱법칙(Power Law)

아래의 식(3)은 멱법칙을 나타내는 식이다.

$$V_z = V_h \left(\frac{z}{h} \right)^{1/n} \quad (3)$$

이 식을 이용하여 관측된 60m, 58m, 50m, 40m, 30m 평균 풍속을 구한다. 고도와 풍속에 대한 대하여 자연로그를 취해준 후 선형 최소 제곱근을 이용하여 조도계수를 구할 수 있다. 여기서 V_z, V_h 는 지상에서 부터의 z 및 h 에서의 풍속이고 n 은 멱지수이다.

Figure 5는 높이별 관측된 풍속 도식화 하였다. 각각 평균을 취하게 되면 근중립계층층 상태가 되며 높이와 풍속에 자연로그를 취하면 아래쪽 Figure과 같은 선형 문제가 된다. 이후 최소 제곱근을 이용하여 얻은 직선 방정식의 기울기 a 값을 취한다.

$$a = \frac{\frac{\sum \ln(v)_i \sum \ln(z)_i}{N} - \sum \ln(z)_i \ln(z)_i}{\frac{\sum \ln(v)_i \sum \ln(v)_i}{N} - \sum \ln(z)_i^2} \quad (4)$$

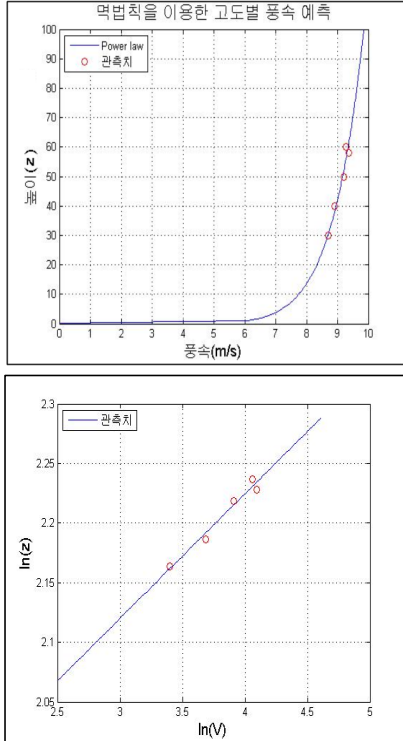


Figure 5. Mean wind speed at each height, along with the power law profile

식에 따라 멱지수 n 으로 나타내기도 하고 α 로 나타내기도 하는데 n 과 α 의 관계는 아래와 같다.

$$1/n = \alpha = a \tag{5}$$

이렇게 계산된 멱지수를 이용하여 관측 지점 중 한 곳의 풍속을 대입한 후 멱법칙을 이용하여 그린 그래프가 위쪽 Figure의 곡선 그래프 이다.

4. 제주북부지역 조도계수 계산 및 비교

4.1 영상에 의한 지형 분류

Figure 6의 영상을 바탕으로 바람의 방향은 8개 방향으로 나누어 분류하였고, 지형은 해양, 공유수면, 농촌 마을, 농작지로 각각 분류 하였다.

평대 지역의 경우 1번, 2번은 해양지역으로 3번, 8번 지역은 공유수면으로 4번, 5번, 6번 지역은 농작지로 7번은 농촌 마을로 분류 하였다. 한동 지역의 경우 1번, 2번, 3번, 4번, 8번 지역은 공유수면으로 5번, 6번 7번 지역은 농촌마을로 분류 하였다. 공유수면의 경우 만조 시에는 해양적 특성을 보이나 간조 시에는 육상 지형특

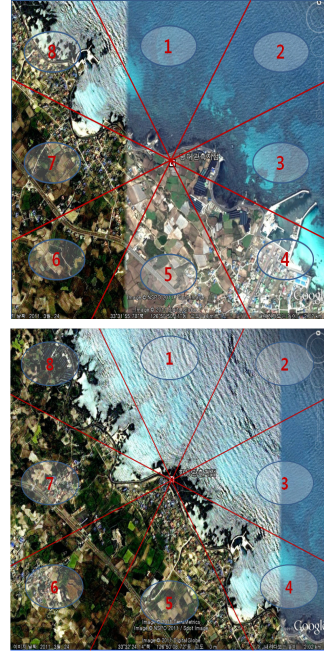


Figure 6. Met-mast, located in Pyeongdae, Handong in Jeju(wind direction)

성이 보인다. 이럴 경우 대기안정도에 의한 영향뿐만 아니라 표면의 거칠기의 변화 영향도 나타나게 된다. 일반적으로 공유 수면의 경우 해양으로 분류하고 있으므로 해양으로 분류하는 것이 타당한지를 확인하기 위하여 분류하여 계산 하였다.

4.2 관측 지역의 조도계수 계산 결과

평대와 한동 지역의 풍향 관측탑 데이터를 바탕으로 풍향을 8방향으로 나누어 각 높이별 평균을 취하여 대

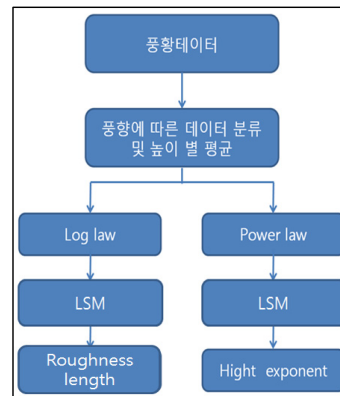


Figure 7. Calculated the wind shear, each wind direction sector flow chart

Table 1. Wind shear coefficient located in Pyeongdae

	분류번호	Direction sector Midpoint	Average Value(m) (조도길이)	Average Value (떡지수)	지형분류
평대	1	337.5°~22.5°	0	0.0426	해양
	2	22.5°~67.5°	0	0.0724	해양
	3	67.5°~112.5°	0.0202	0.130	공유수면
	4	112.5°~157.5°	0.259	0.195	농작지
	5	157.5°~202.5°	0.402	0.214	농작지
	6	202.5°~247.5°	0.589	0.233	농작지
	7	247.5°~292.5°	1.27	0.284	농촌마을
	8	292.5°~337.5°	0.0161	0.127	공유수면

Table 2. Wind shear coefficient located in Handong

	분류번호	Direction sector Midpoint	Average Value(m) (조도길이)	Average Value (떡지수)	지형분류
한동	1	337.5°~22.5°	0.000251	0.0871	공유수면
	2	22.5°~67.5°	0	0.0645	공유수면
	3	67.5°~112.5°	0.000119	0.0817	공유수면
	4	112.5°~157.5°	0.0547	0.164	공유수면
	5	157.5°~202.5°	0.0284	0.148	농촌마을
	6	202.5°~247.5°	-	-	농촌마을
	7	247.5°~292.5°	1	0.327	농촌마을
	8	292.5°~337.5°	0.167	0.203	공유수면

수법칙과 떡법칙을 이용하여 조도 길이와 떡지수를 Matlab을 이용하여 계산 하였다. 그리고 상용 프로그램인 Windographer를 이용하여 확인 한 결과 비슷한 값이 나왔으므로 신뢰할 수 있는 계산임을 알 수 있다. Matlab 계산의 flow cart는 Figure 7과 같다.

Table 1과 2을 보면 조도 길이의 경우 소수점 7째 자리 이하의 값은 0으로 보았으며 해양 공유수면 농작지, 농촌마을 순으로 값이 증가 하는 것을 보이고 있으며, 앞에서 언급된 선행연구들과도 유사한 경향을 보

이고 있으나 값에는 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 한동의 6번째 지역의 경우 높은 지역이 풍속이 낮은 지역 풍속 보다 조도계수 값이 작은 현상이 나타났고 조도계수는 시간에 따른 육풍과 해풍의 영향의 정도와 대기의 안정도에 따라 변화하며 그 평균을 이용하였다. 아래 Figure은 시간별 조도 길이와 떡지수 값의 변화 패턴 Windograper를 이용하여 분석한 Figure이다. 계산된 조도계수를 지형별로 분류한 것은 Table 3과 같다.

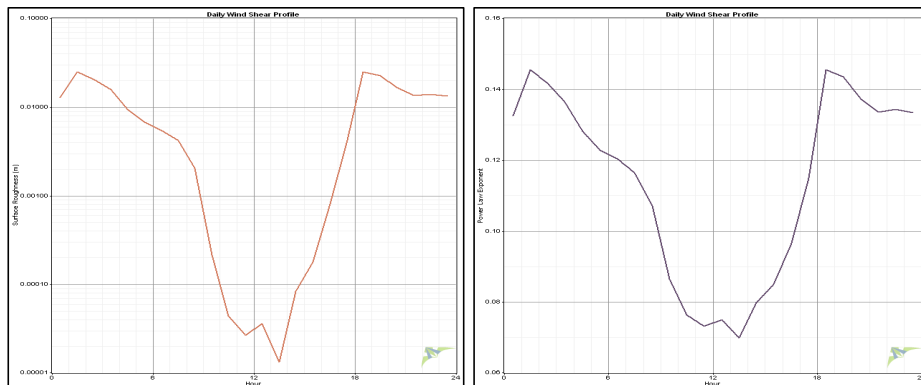


Figure 8. Wind shear versus time of day

Table 3. Wind shear coefficient each land cover

지형분류	조도 길이 z_o (m)	멱지수 (α)
해양	0	0.0426~0.0724
공유수면	0.000119~0.0202	0.0817~0.13
농작지	0.259~0.589	0.195~0.233
농촌마을	0.0284~1.27	0.148~0.233

관측 지형의 분류에 의한 조도계수 분류시 공유수면으로 생각한 지역은 예상과 같이 해양 보다 높은 조도계수 값을 보이고 있었으며 참고문헌과의 비교시 상대적으로 참고문헌보다 높은 조도계수 경향을 보이고 있었다. 농작지의 경우 1m의 높은 조도계수를 확인 할 수 있었다.

4.3 기존연구의 조도계수와 계산 결과 비교

Wind Energy Explained(J .F.Manwell and J.G. McGowan, 2002)와 풍력공학입문 (고경남등, 2007)은 제시된 조도계수와 비교해 본 결과 제주지역의 경우 해양의 경우 조도 길이는 0.00001~0.0005m, 멱지수는 0.1의 값을 나타냈지만, 계산 결과 조도 길이는 해양의 경우 0m의 조도 길이와 0.0426~0.0724멱지수 범위로 좀 더 작게 나타났으며, 농작지 경우 기존 연구에서는 조도 길이는 0.01~0.04m 멱지수는 0.14 값의 범위를 보이고 있었으나 계산 결과 조도 길이는 0.259~0.589m범위를 멱지수는 0.195~0.233 값의 범위를 보이고 있었다. 기존 연구에서 농촌마을은 조도 길이 1m, 멱지수 0.33의 값을 보이고 있었고 계산 결과 조도 길이는 0.259~0.589m, 멱지수는 0.195~0.233를

Table 4. Wind shear coefficient in Wind Energy Explained

Terrain description	z_o (mm)	z_o (m)
Very smooth, ice or mud	0.01	0.00001
Calm open sea	0.20	0.0002
Blown sea	0.50	0.0005
Snow surface	3.00	0.003
Lawn grass	8.00	0.008
Rough pasture	10.00	0.01
Fallow field	30.00	0.03
Crop	50.00	0.05
Few trees	100.00	0.1
Many trees, hedges, few building	250.00	0.25
Forest and woodlands	500.00	0.5
Suburbs	1500.00	1.5
Centers of cities with tall buildings	3000.00	3

Table 5. Wind shear coefficient in Wind Energy Explained

지표상태	z_o (cm)	z_o (m)
눈 위	0.1~	0.001~
짧은 초지	1~	0.01~
긴 초지, 보리밭	4~	0.04~
높이 10m의 잡목림	50~	0.5~
교외	100~	1~
도시 내	100~	1~
해면(파도 상태에 따름)	0.001~	0.00001~

지표상태	n	α
매우 평탄한 면, 조용한 해면	10	0.1
평야 초원	7	0.14
산림 높은 건물이 없는 시가지	4	0.25
대도시의 교외 주변	3	0.33
대도시 중심부근	2	0.5

보이고 있었다. 농작지의 경우는 제시된 값 보다 높은 범위의 값을 보이고 있었고 농촌마을은 적은 값의 범위를 보이고 있었다.

4.4 조도계수범위에 따른 높이별 풍속의 변화예측

관측된 지역의 지형별 분류에 의해 관측된 조도계수의 범위와 참고문헌의 자료를 바탕으로 지형분류에 따른 값을 비교한 Table는 아래 Table 6, 7과 같다.

Table 6. The best-fit surface roughness for each land cover in the reference

지형분류	조도 길이 z_o (m)	
	참고문헌자료	관측 후 계산
해양	0.0002	0
농작지	0.05	0.259~0.589
농촌마을	1	0.0284~1.27

Table 7. The best-fit power law exponent for each land cover in the reference

지형분류	멱지수 (α)	
	참고문헌자료	관측 후 계산
해양	0.1	0.0426~0.0724
농작지	0.14	0.195~0.233
농촌마을	0.33	0.148~0.233

공식 (1)과 (3)에 의하여 참조지역의 높이 10m이고 그 높이의 풍속이 5m/s라고 가정 하였을 경우 3MW 풍력발전기의 허브 높이에서의 풍속을 예측 비교한 값은 아래의 Table 8, 9와 같다.

Table 8. Mean wind speed estimate using logarithmic law in 90m height

지형분류	참고문헌자료	관측 후 계산
해양	6.02 m/s	5.43 m/s
농작지	7.08 m/s	8.59 m/s
농촌마을	10.21m/s	9.58 m/s

Table 9. Mean wind speed estimate using power law in 90m height

지형분류	참고문헌자료	관측 후 계산
해양	6.23 m/s	5.67 m/s
농작지	6.80 m/s	8.00 m/s
농촌마을	10.32 m/s	9.59 m/s

조도계수의 범위로 보았을 경우 큰 차이는 없어 보이지만 이를 이용하여 90m의 풍속을 예측시 많은 차이를 보이고 있으며 이를 이용하여 풍력 에너지 지도를 생성시 에너지는 풍속의 3승임으로 그 차이는 더 많을 것으로 그 지역에 맞는 조도계수 산정이 필요하다.

5. 결론

바람의 높이별 풍속은 지형의 거칠기와 육상과 해양의 상태에 따라서 영향을 받는다. 이런 높이별 풍속변화는 대수법칙(Lograthmic law)과 멱법칙(Power law)의 수학적 모델로 나타낼 수 있다. 대수법칙의 경우 지형적인 요소의 영향정도는 조도 길이(Roughness length)로 나타낼 수 있고, 멱법칙의 경우는 멱지수(Hight exponent)로 나타낼 수 있다. 지금까지 제주지역의 높이별 풍속을 예측하는 경우 외국에서 지형분류에 따라 통계적으로 계산된 조도 길이와 멱지수 값들을 그대로 사용하고 있다. 따라서 지형적 특성이 다른 외국에서 사용된 조도 길이와 멱지수의 값들은 제주지역에 적합하지 않다. 이에 제주 북동부 지역의 평대와 한동 지역의 실관측 풍향 데이터(Met Mast Data)를 이용하여 조도계수(조도 길이와 멱지수)의 범위를 계산 하여, 외국에서 사용된 조도 길이와 멱지수의 값들과 비교해 보았다. 조도계수 계산을 위해 관측 지역을 8방위로 나누고 지형을 해양, 공유수면, 농작지, 농촌마을로 분류하였다. 조도계수는 Matlab을 이용하여 대수법칙과 멱법칙의 수학적 모델을 개발하였다. 그 결과를 상용프로그램인 Windographer를 이용하여 검증한 결과 유사한 값을 보여 주고 있었다. 이 연구에서

개발된 Matlab을 이용한 조도 길이는 해양 0m, 공유수면 0.000119~0.00202m, 농작지 0.259~0.589m, 농촌마을 0.0284~1.27m의 범위의 값을 보였다. 멱지수는 해양 0.0426~0.0724, 공유수면 0.0817~0.13, 농작지 0.195~0.233, 농촌마을 0.148~0.231 범위를 보였다. 외국의 조도계수의 참고자료로 ‘Wind Energy Explained’와 ‘풍력공학입문’을 이용하여 계산 결과와 비교 하였다. 참고문헌의 해양의 경우 조도 길이 0.00001~0.0005m, 멱지수 0.1, 농작지의 경우 조도 길이 0.01~0.05m, 멱지수 0.14, 농촌마을의 경우 조도 길이 1~1.5, 멱지수 0.33을 보여주고 있다. 외국의 참고자료와 비교한 결과 제주지역의 계산된 조도계수 값은 해양의 경우와 농촌마을의 경우는 작은 경향을 보였으나, 농작지의 경우는 큰 경향을 보였다. 특히 농촌마을의 조도 길이의 범위가 광범위하게 나타났다. 이런 이유로 인해 해외에서는 영상에 의한 지형분류에 의한 그 지역에서 계산된 조도계수들을 사용하여 풍력발전단지의 경제성 평가를 수행하고 있다. 제주 지역에 이런 해외의 조도계수 값을 차용하여 풍력발전 단지를 설계에 있어 되면, 지형에 따라 풍력발전기의 기대수명과 수익성을 과대 예측 혹은 과소 예측을 할 가능성이 있다. 조도계수의 범위는 지형적 영향 외에도 육풍과 해풍의 영향, 계곡풍등의 영향의 정도는 지역마다 다르므로 지역에 따라서도 조도계수의 범위에 차이를 보이게 된다. 이에 본 연구에서 제시된 조도계수의 범위들은 제주 전 지역이 보다 정확한 경제성 평가에 적용가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

(NO.20094020200020)

본 연구는 2012년 국토해양부의 재원을 받아 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO.20090217)

참고문헌

1. 고경남, 허종철, 2007, 풍력공학입문, 문운당, pp.49-51
2. 김현구 등, 2002, Calculation of Wind Profile Exponent in Pohang Area, 한국풍공학회, pp47~52
3. Manwell JF, McGowan JG, and Rogers AL, 2002, Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Limited.

- pp.33-39.
4. Wind Energy Resource Atlas of the United States, <http://redc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/tables/A-8T.html>
 5. IEC Standard 61400-1 3rd Edition, 2005, Wind turbine generator systems - Part 1: Design requirements.
 6. Wind Energy Reference Manual at windpower last accessed April 30, 2008 <http://www.windpower.org>
 7. The guideline for assigning roughness length value, 1989, European Wind Atlas.