



[2017-6-WD-002]

제주도 지형 조건에 의한 풍력자원의 공간적 특성

김대영¹⁾ · 김연희^{1)*} · 김지희¹⁾ · 김백조¹⁾

Spatial characteristics of Wind Energy Resources Over Terrain in Jeju Island

Dae-Young Kim¹⁾ · Yeon-Hee Kim^{1)*} · Ji-Hee Kim¹⁾ · Baek-Jo Kim¹⁾

Received 15 November 2016 Revised 5 June 2017 Accepted 14 June 2017

ABSTRACT This study examined numerically the spatial characteristics of the wind resource in Jeju Island using Computational fluid Dynamics (CFD). The initial conditions for the numerical simulation were set to varying wind speeds (3, 5, 13 and 25 [m/s]), which corresponded to wind speeds between the cut-in and cut-out for wind turbine operations, and 12 different wind directions. The result shows that the normalized velocity decreases with height, having similar values between 500 m and 1100 m. The normalized velocity also tended to increase at altitudes higher than 1100 m. The blocking effect by Mt.Halla located on the center of Jeju Island generates a massive wake. The wind speed deficits by the wake effects have a large influence on the lee side of Mt.Halla up to more than 10 km. Overall, the averaged values of normalized velocity and turbulence intensity lie in the range, 0.73~0.77 and 0.078~0.083, respectively. Four regions (Eoseoungsaengak, Seongneol, Keunnokkome and Sanbongsan) with severe wind speed reductions were found, and showed 70%, 55%, 50% and 50% wind speed reductions, respectively.

Key words Wind Energy Resources(풍력자원), Complex Terrain(복잡 지형), CFD(전산유체역학)

1. 서론

풍력자원을 효율적으로 활용하기 위해서는 대기하부 경계층 내의 연직 풍속 분포를 분석하는 것이 중요하다. 대기 경계층 내의 바람은 지형효과, 지표마찰, 대기의 안정도에 따라 달라진다. 최근 풍력터빈의 대형화에 따라 로터 면적(Swept area)이 커지고 허브높이가 높아지는 추세이다. 또한 육상 풍력발전단지들은 점점 더 복잡 지형(Complex terrain)에 건설되기 때문에, 더욱더 복잡한 대기경계층

구조에 노출된다.^[1] 이중 지형효과는 지표면 근처의 유동흐름에 가장 직접적인 영향을 발생시키고, 풍력자원 분석 시 고려해야할 중요한 요소이다. 유동흐름에 영향을 주는 지형 효과는 지표면에서부터 높이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고, 특정 높이에 이르면 지형효과는 사라지며 수평적 풍속흐름을 나타낸다. 지형효과에 의한 유동흐름을 이해하기 위해 유럽에서는 이미 많은 프로젝트들이 수행되었다.^[2,3] 다수의 기상탑을 덴마크의 Bolund hill에 설치하여 유동상태를 파악하는 측정 캠페인이 수행되었고^[4], 스코틀랜드에 위치한 해발고도 116m의 Askervein hill에서 10m 높이의 기상탑 50개를 일직선으로 설치하여 풍속 프로파일의 변화를 검증하였다.^[5] 또한 이 프로젝트의 결과

1) Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences

*Corresponding author: yeonheekim@korea.kr

Tel: +82-64-780-6784 Fax: +82-64-738-6515

물을 이용한 유동 모델의 비교검증도 수행되었다.^[6] 전체적으로 유동모델의 모의결과는 언덕의 풍상측에서 관측값과 잘 일치하였고, 풍하측에서 상당한 차이를 보였다. 이중 3D 모델(Three-dimensional model)만이 풍하측의 거동을 모의하였다. 일반적으로 중립대기상태에서 유동박리(Flow separation)는 지형 기울기가 풍상측 22°, 풍하측 17°이상일 때 발생한다고 알려져 있다.^[7] 따라서 평탄지형보다 복잡지형에서 이러한 현상은 빈번하게 발생한다. WASP(Wind Atlas Analysis and Application Program)와 같은 선형모델은 평탄지형의 부착흐름(Attached flow)예측에는 사용할 수 있지만, 유동박리가 발생하는 복잡지형에서는 예측성능의 한계를 보인다.^[8,9] 또한 지형효과는 라이다(LiDAR, Light Detection And Ranging)와 소다(SoDAR, Sonic Detection And Ranging)와 같은 원격탐사(Remote sensing) 장비를 이용한 바람데이터 취득에도 영향을 준다. Bingöl et al.^[9]의 결과 RIX(Ruggedness Index)값이 다른 두 군데 사이트에서 라이다와 기상탑의 풍속데이터는 약 4~7%의 차이를 나타내었다. 또한 Foussekis et al.^[11]의 결과 복잡지형에서 라이다가 약 6%의 풍속저감을 나타내었다. 이는 지형 기복이 심할수록 지형이 유동흐름에 미치는 영향이 크고, 이로 인해 왜곡된 유동이 측정지점에 영향을 미쳐 기준 기상탑과의 상관도 분석 시 상관성 낮아지고 불확도는 상승하는 결과로 이어지기 때문이다. 따라서 신뢰성 있는 풍력자원 활용을 위해, 풍력발전단지 예정지나 관측지점에 대한 지형효과 분석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 전산유동해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 이용하여, 제주도 지형조건에 의한 풍력자원의 공간적 분포 특성을 조사하였다.

2. 분석 개요

2.1 사이트 특성 및 자료

Fig. 1은 본 연구의 분석 사이트인 제주도 전역을 나타내고 있다. 제주도 중심에 해발고도 1950m의 한라산이 위치해있고, 해안가에서부터 중산간까지 약 360여개의 기생화산(오름)이 분포한 화산섬이다. 섬의 전체적인 형태는 동서방향으로 긴 타원형이며, 남북사면은 약 5°의 지형기울

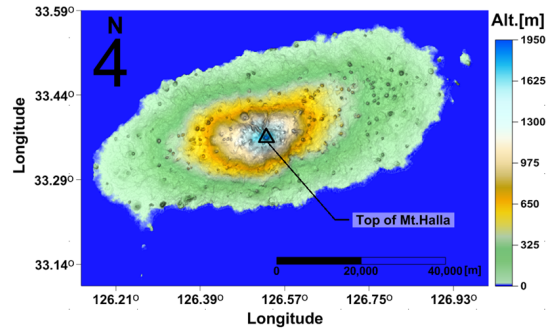


Fig. 1. Topography of Jeju Island

기를, 동서사면은 이보다 완만한 지형기울기를 형성하고 있다. 제주도 지표면은 해발고도가 높아지면서 수풀과 나무로 이루어지고, 한라산 부근은 울창한 숲으로 형성되어 있다. 오름은 해안가보다는 중산간에 다수가 분포해 있으며, 2개 이상의 오름이 중첩된 지역도 있다. 화산섬인 제주도는 이와 같은 환경 아래 다양한 지형기울기가 형성되어 있다.

분석에 사용된 수치표고모델(Digital Elevation Model)은 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)을 통해 제공되는 수평해상도 30m(1 arc second)의 지형데이터이며, 토지 피복도는 유럽우주기구(ESA, European Space Agency)에서 2009년 1월-12월 기간 동안 MERIS 위성 이미지를 사용하여 제작한 300m 해상도의 Glob Cover 2009를 사용하였다^[12,13].

2.1 분석 방법

Table 1은 CFD 분석을 수행하기 위한 검사체적의 구성과 계산영역을 나타낸다. 제주도는 동서방향으로 약 73km, 남북방향으로 약 31km 길이의 타원형으로 이루어져있다.

Table 1. Configurations of computational domains

Parameter		Value
Geometry centre	Latitude	33°36'N
	Longitude	126°55'E
Control volume	Radius [km]	45
	Height [km]	2.5
Mesh resolution	Horizontal [m]	100
	Vertical [m]	70
Vertical expansion factor		1.15
Number of nodes		4462237

이에 따라 제주도 지형에 의한 풍력자원의 특성을 분석하기 위해 제주도 전역 및 인근해상을 포함하는 크기로 검사체적을 구성하였으며 또한 12 방 풍향에 대한 분석을 수행하기 위해 원형으로 구성하였다.

검사체적의 자세한 격자 형태는 Fig. 2에 나타내었다. 지형기울기가 심한 한라산을 중심으로 정사각형의 격자를 형성하고, 이를 중심으로 원형외부 방향(Outer expansion factor)과 내부 방향 확장률(Inner expansion factor)을 모두 1.2로 설정하였다. 전체적으로 O-grid 형태로 구성하였고 지표면 근처 격자는 프리즘 층으로 구성하여 다수의 격자 층이 존재한다.

CFD 계산은 ANSYS CFX ver. 13의 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)방정식을 사용하여 수행하였으며, 난류모델은 Menter^[14]의 전단응력수송(SST, Shear Stress Transport) k- ω 모델을 사용하였다. 이 난류 모델은 복잡한 형상에서 유동박리처리에 장점을 가지고 있다. 입구 경계조건의 입력 프로파일 생성을 위해 아래와 같은 수식을 활용하였다^[15].

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{1}$$

$$k = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}} \tag{2}$$

$$\epsilon(z) = \frac{u_*^3}{K(z+z_0)} \tag{3}$$

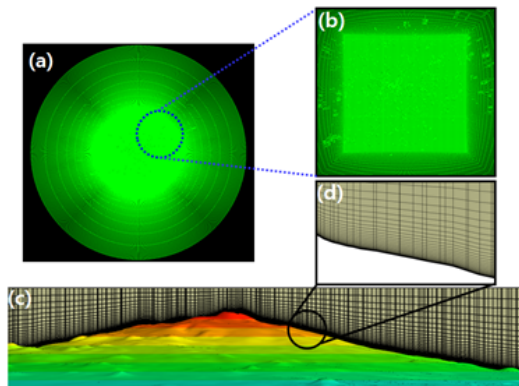


Fig. 2. Computational mesh in (a) the domain, (b) detailed view of the central domain, (c) prism layer element in the vertical section and (d) detailed view of the prism layer near the ground surface

여기서, u_* 은 마찰속도(Friction velocity), k 는 난류운동에너지(Turbulent kinetic energy), ϵ 은 난류소산율(turbulence dissipation rate), K 는 von Karman 상수로 0.41, z 는 지표면에서부터의 높이, z_0 는 조도계수, C_μ 는 표준모델 상수로 0.09의 값을 가진다.

Table 2는 CFD 분석을 수행하기 위한 초기입력 조건을 나타낸 것이다. 무 풍속(0.01 [m/s]) 케이스를 기준으로 4개의 풍속과 12방 풍향에 따라 총 49개 케이스를 분석하였다. 이때 풍력터빈의 시동풍속인 3m/s와 종단풍속인 25m/s 사이의 값을 선정하였고, 3MW 풍력터빈의 허브높이인 80m의 데이터를 산출하여 이후의 분석을 수행하였다.

또한 표준화된 풍속(Normalised velocity)과 난류강도(Turbulence intensity)의 수식은 아래와 같다.

$$V_{normalised} = \frac{V}{V_{ref}} \tag{4}$$

$$TI = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{V} \tag{5}$$

여기서, $V_{normalised}$ 는 표준화된 풍속, V 는 각 위치에서의 풍속, V_{ref} 는 기준풍속을 의미한다.

3. 분석 결과

3.1 48개 케이스 요약 및 분석

Table 3은 전체 CFD 케이스의 결과를 요약한 것으로, 제주도 지표면 80m 높이의 데이터를 활용하여 입력풍속에 따른 각 파라미터의 평균값을 나타낸 것이다. 표준화된 풍속은 무풍상태일 때 0.51의 값을 보이다가 풍속이 증가하면서 0.73~0.77의 값을 보였다. 이는 제주도 지형조건과 지표면 거칠기에 의해 약 23~27%의 풍속 저감이 발생함을

Table 2. Initial conditions for CFD analysis

Parameter	Value
Reference height [m]	80
Wind speed [m/s]	0.01, 3, 5, 13, 25
Wind direction	12 sectors

의미한다. 난류강도 또한 풍속의 증가에 따라 상승하는 경향을 보였다. 하지만 표준화된 풍속과 난류강도는 정격풍속(13m/s)을 전후로 일정한 값을 나타내며 더 이상 증가하지 않는다. 이러한 경향을 좀 더 정확히 파악하기 위해서는 추후 1m/s 구간(bin)의 추가적인 분석이 필요하다.

Fig. 3은 전체 CFD 케이스의 결과를 제주도의 해발고도에 따라 표준화된 풍속과 난류강도 프로파일로 나타낸 것이다. Fig. 3(A)에서 한라산 정상부근(약 1950m)을 제외하고 해발고도가 높아짐에 따라 지형 기울기는 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 해발고도가 낮은 해안가 지역에서 한라산이 위치한 제주도 중심으로 오면서 점점 높은 지형 기울기가 형성되기 때문이다. 이에 따라 표준화된 풍속도 감소하며 약 800m 고도까지 감소하다 그 후 다시 증가하는 추세를 보인다. 정상부근에서는 지형기울기의 감소와 함께 표준화된 풍속이 상당히 가파른 증가 추세를 나타낸다.

Table 3. Wind direction-averaged values of 4 main parameters for different wind speed at 80 m above ground level

Parameter	Wind speed [m/s]				
	0.01	3	5	13	25
Normalised Velocity	0.51	0.73	0.76	0.77	0.77
Turbulence intensity	0.016	0.078	0.081	0.083	0.083
TKE* [m^2/s^2]	0	0.08	0.25	1.77	6.57
Velocity [m/s]	0	2.18	3.78	10.07	19.37

* TKE: Turbulent Kinetic Energy

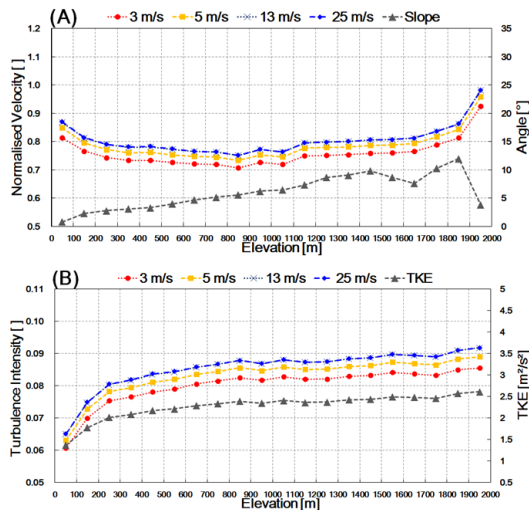


Fig. 3. Profile of normalised velocity (A) and turbulence intensity (B) with 100 m altitude bins

Fig. 3(B)의 난류운동에너지는 전체 케이스의 평균값으로, 표준화된 풍속과 마찬가지로 해발고도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 난류운동에너지의 증가에 따라 난류강도 또한 증가하며, 해발고도 약 800m 까지 뚜렷한 증가 추세를 보이다가 이 이상의 해발고도에서는 소폭의 증가율을 나타내고 있다. 다수의 오름에 의한 지형기울기의 변화는 유동왜곡을 발생시켜 풍속저감과 난류강도 증가의 주된 원인이 된다. 이러한 현상은 해발고도 약 200~700m 구간에서 뚜렷하게 발생하며, 이 구간은 제주도 전체면적의 27.9%로 다수의 오름이 분포해 있는 해발고도이다. 이 이상의 해발고도에서는 오름 분포가 적기 때문에 지형효과에 의한 표준화된 풍속과 난류강도 프로파일의 변화 양상이 크지 않은 것으로 판단된다.

3.2 주 풍향 케이스 요약 및 분석

Table 4는 주풍향(330°) CFD 케이스의 결과를 요약한 것으로, 제주도 지표면 80m 높이의 데이터를 활용하여 입력풍속에 따른 각 파라미터의 평균값을 나타낸 것이다. 전체 케이스를 분석한 Table 3과 비교 시 표준화된 풍속에서 약간의 차이를 보이나, 전체적으로 유효숫자 내에서 큰 차이를 보이지 않는다.

Fig. 4는 주 풍향(330°)과 12방 전체 케이스의 평균값을 해발고도에 따라 비교한 그래프이다. Fig. 4(A)에서 약 300m 지점까지 주 풍향 케이스의 표준화된 풍속이 낮고, 이후 해발고도에서는 높은 값을 나타내고 있다. 이 중 가장 큰 차이를 보인 고도는 1100~1500m 이고, 2~6%의 풍속 저감율 차이를 보인다. 이는 주 풍향일 때 풍속저감이 상대적으로 적다는 것을 의미한다. 난류강도의 경우 두 개 케이스간의 차이는 크지 않았다. 해발고도 200m 이하를 제외하고, 전체적으로 주 풍향 케이스가 조금 낮은 난류강도 경향을 보였다.

Table 4. Prevailing wind direction-averaged values of 4 main parameters for different wind speed at 80 m above ground level

Parameter	Wind speed [m/s]				
	0.01	3	5	13	25
Normalised Velocity	0.51	0.73	0.76	0.78	0.78
Turbulence intensity	0.016	0.078	0.081	0.083	0.083
TKE [m^2/s^2]	0	0.08	0.25	1.77	6.57
Velocity [m/s]	0	2.19	3.79	10.08	19.40

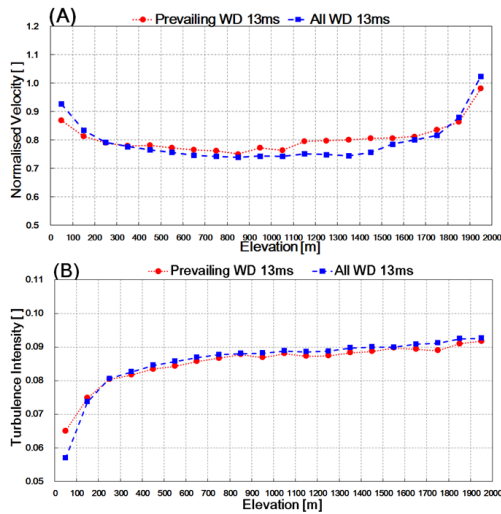


Fig. 4. Comparisons of profiles for normalised velocity (A) and turbulence intensity (B) for prevailing (red) and all wind directions (blue) for 13 m/s wind speed

3.3 풍력자원의 공간분포

Fig. 5는 13m/s 풍속에서 주 풍향 일 때의 표준화된 풍속과 난류강도의 분포도이다. Fig. 5(A)의 표준화된 풍속 분포도에서, 제주도 중심에 위치한 한라산의 높은 해발고도로 인해 풍상측과 풍하측의 뚜렷한 분포차이를 보이고 있다. 해안가에서 내륙방향으로 점점 풍속저감이 증가하고, 중산간에 위치한 오름에 의해 후류발생이 증가하고 있다. 부분적으로 오름에 의한 후류는 중첩되어 더욱더 강해져 약 2~5km 까지 후류가 형성됨을 알 수 있다. 또한 한라산의 블로킹 효과(Blocking effect)에 의한 풍하측 후류는 제주도를 벗어나서도 영향을 미치고, 그 거리는 약 10km 이상임을 알 수 있다. 한라산을 제외하고, 풍속저감이 심하게 발생하는 지역은 크게 4군데로, 중산간에 위치한 어승생악(ES), 성널오름(SN), 큰노꼬메오름(KN)과 유일하게 해안가에 위치한 산방산(SB)이고 각각의 풍속 저감율은 70%,

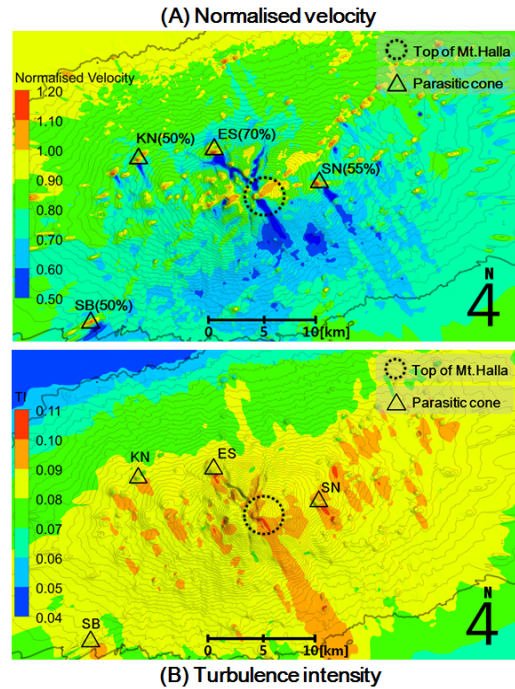


Fig. 5. Spatial distributions of normalised velocity (A) and turbulence intensity (B) for 13 m/s wind speed with 330° direction at 80 m

55%, 50%, 50% 이다. Fig. 5(B)의 난류강도 분포 또한 해상과 육상이 교차하는 연안지역에서 증가하기 시작한다. 해발고도가 높아지면서 그 값이 증가하다, 중산간에 위치한 오름의 후류에 의해 더욱더 높은 값을 나타내고 있다. 풍속저감이 심한 오름들은 해안가에 위치한 산방산을 제외하고, 약 800m 이상의 해발고도에 위치해 있다. 오름 높이 또한 높기 때문에 가파른 지형기울기가 형성되어있고, 풍상·하측에 각각 높은 풍속증가와 감소효과가 발생하고 있다.

Table 5는 풍속저감이 크게 발생한 5군데 지역의 풍향에 따른 표준화된 풍속을 나타내었다. 풍향이 150°일 때 상대적으로 높은 풍속증가를 보였으며, 이 중 한라산과 해안

Table 5. Detailed information of area for the largest wind speed reduction and acceleration

Location	Elevation [m]	Min/Max normalised velocity []							
		60°		150°		240°		330°	
Mt. Halla	1950	0.28	1.05	0.5	1.27	0.74	1.12	0.10	1.12
Keunnokkome (KN)	834	0.64	1.01	0.57	0.97	0.64	1.03	0.50	1.11
Eoseungsaengak (ES)	1169	0.69	1.10	0.67	1.08	0.85	1.10	0.30	1.14
Seongneol (SN)	1215	0.70	1.05	0.57	1.16	0.52	1.06	0.45	1.12
Sanbansan (SB)	395	0.77	0.92	0.77	1.26	0.82	1.03	0.50	1.12

가에 위치한 산방산의 정상에서 약 26%의 풍속증가를 나타냈다. 한라산을 제외하고, 풍하측 풍속저감 차이가 큰 지역은 어승생악으로 풍향(240°-330°)에 따라 약 55% 차이가 발생했다. 또한 풍상측 풍속증가 차이가 큰 지역은 산방산으로 풍향(60°-150°)에 따라 약 34%의 차이를 보였다. 이는 산방산이 제주도 외곽 연안지역에 위치해있어, 지형 영향과 무관한 유동이 해상에서부터 직접 유입되기 때문이다. 특히 남동풍인 150° 풍향과 지형의 영향을 크게 받는 북동풍인 60° 풍향의 경우를 비교할 때 이와 같은 차이가 크게 발생한다.

3.4 한라산의 지형효과

Fig. 6은 제주도의 지배적인 영향을 미치는 한라산의 지형효과를 자세히 알아보고자, 풍상·하측 각각 2군데 모니터링 포인트를 설정하고 이를 분석한 그래프이다. Fig. 6(A)는 모니터링 포인트의 위치와 지표면 10m 높이의 유선(Stream line)을 나타낸 것이다. 풍상측 포인트 1을 기준으로 좌·우 방향 유선이 합류되는데, 이는 한라산 등반로인 어리목 코스(좌)와 관음사(우)코스로서, 계곡을 형성하는

지형조건에 의해 발생하는 유동흐름이다. 풍하측 포인트 3의 유선은 한라산 뒤쪽으로 와류(Vortex) 형태를 보이고 있다. Fig. 6(B)는 모니터링 포인트 4개를 가로지르는 연직단면도로, 높이에 따른 풍속 분포와 벡터표현을 통해 풍속 프로파일의 변화를 나타내고 있다. 포인트 1의 풍속 프로파일은 지형효과에 영향을 받지 않은 일반적인 기울기 형태를 나타내고 있다. 포인트 1을 지나면서 지형기울기에 의해 지표면 근처 풍속저감이 발생하고, 포인트 2에 이러한 영향이 미친 것을 확인할 수 있다. 한라산 정상을 지나면서 유동박리와 함께 강한 풍속저감이 발생하였다. 이때의 지형 기울기는 약 32°이며, 입력된 바람과 반대 풍향이 나타나는 재순환(Recirculation)현상이 지형경사를 따라 약 250~300m의 범위에 걸쳐서 나타났다(Fig. 6(C)). 이러한 재순환 현상은 약 80m 고도까지 나타나며 그 이상의 고도에서는 다시 입력풍향과 동일한 유동흐름이 나타난다. Fig. 6(D)는 포인트 3 부근의 난류강도를 나타낸 것으로 지표면 위 약 70~110m 높이에서 난류강도가 점점 강해지며, 이 지점을 경계로 유동흐름이 바뀌는 형태를 보이고 있다. 각각 모니터링 포인트에서의 표준화된 풍속과 난류운

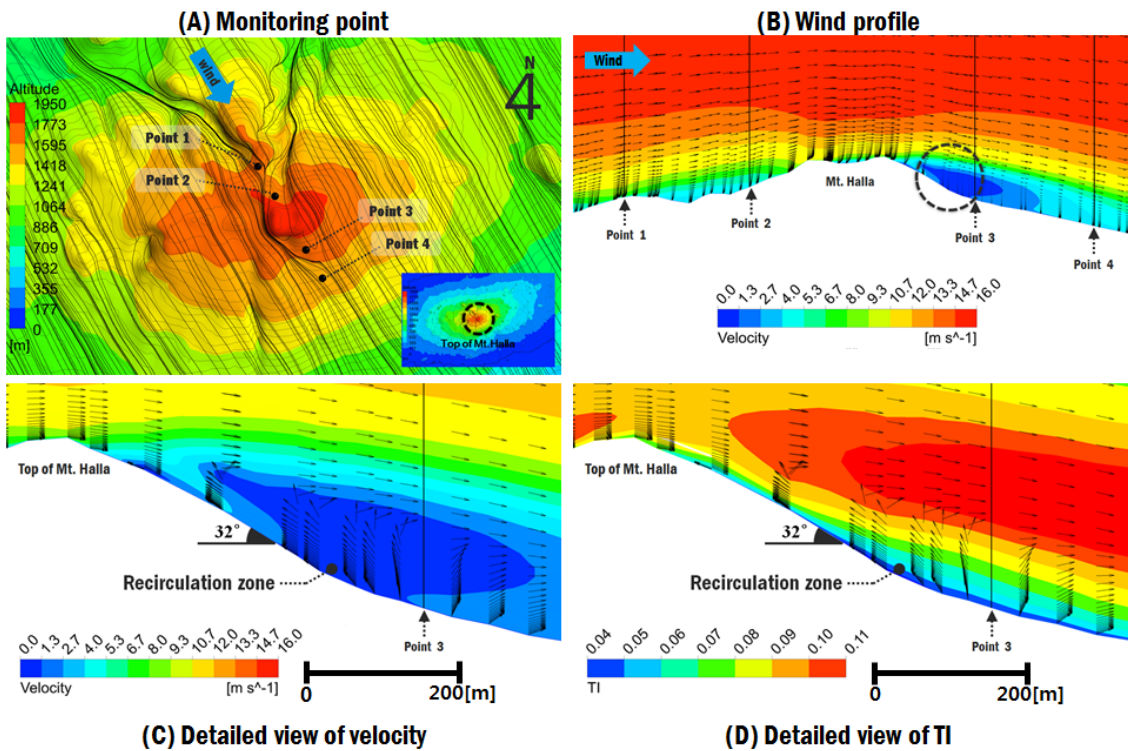


Fig. 6. (A) Locations of four different monitoring points on windward side and lee side of MT.Halla, and (B) vertical wind profile along the points. (C) and (D) show detailed view of wind flow and turbulence intensity around point 3

동에너지, 그리고 난류강도의 연직 프로파일을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 7(A)의 그래프는 표준화된 풍속 프로파일로 한라산의 풍상·하측 지점 구배 차이가 뚜렷하다. 지형조건에 의한 풍속저감은 풍하측 포인트 3이 가장 크고, 프로파일은 역구배를 형성하고 있다. 포인트 4에서 이러한 지형효과가

회복되기는 하나 여전히 한라산 후류의 영향권에 있음을 알 수 있다. Fig. 7(B)의 그래프는 난류운동에너지 프로파일로 풍하측 약 150m 높이에서 가장 큰 값을 나타낸다. Fig. 7(C)의 난류강도는 포인트 3에서 가장 큰 값을 나타내고 있고, 지표면 약 80m 높이에서 최대값을 나타내고 있다. 이에 따라 포인트 3 지역의 지표면 70~110m 고도는 평균 풍속의 구배가 크기 때문에, 난류 생성(Turbulence production)이 큰 지역임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 CFD 분석을 통해 제주도 지형조건에 의한 풍력자원의 공간적 분포 특성을 분석하였다. 풍향(12방)과 풍속(0.01, 5, 13, 25 [m/s])에 따라 총 49개의 다른 바람조건에 대한 수치실험 결과를 분석하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 제주도 지형조건과 지표면 거칠기에 의해 약 23~27%의 풍속 저감율을 보였다. 특히, 제주도 전체면적의 27.9%를 차지하는 해발고도 200~700m 구간에 다수의 오름들이 분포하여 풍속저감과 난류강도 증가의 주된 원인으로 분석된다. 또한 해발고도가 증가하면서 난류운동에너지도 증가하였다. 이를 변수로 하는 난류강도는 해발고도 약 800m 지점 까지 뚜렷한 증가추세를 보이다가 약 900m 지점 이상부터 소폭의 증가율을 나타내었고, 평균적으로 0.078~0.083의 값을 보였다. 제주도 주 풍향 케이스(330°)에 대한 수치실험 결과 풍속저감이 심한 지역은 한라산 및 4개 지점으로 중산간에 위치한 어승생악, 성널오름, 큰노꼬메 오름, 그리고 해안가에 위치한 산방산이었으며, 각각의 풍속 저감율은 70%, 55%, 50%, 50%의 값을 보였다. 한라산의 블로킹 영향에 의한 후류길이는 약 10km 이상으로 제주도를 벗어나서도 그 영향이 미치고 있고, 중산간 오름은 약 2~3km, 중첩되었을 시 3~5km 까지 후류가 형성됨을 알 수 있다. 또한 한라산 풍상·하측 모니터링 포인트 분석결과 풍하측의 지형기울기가 약 32° 지역에서 지형경사를 따라 약 250~300m의 재순환 영역이 발생하였다. 이 재순환 영역은 약 80m 고도까지 이어지며 그 이상의 고도에서 다시 입력풍향과 동일한 유동흐름을 나타낸다. 이 영역은 표준화된 풍속의 연직구배 및 난류강

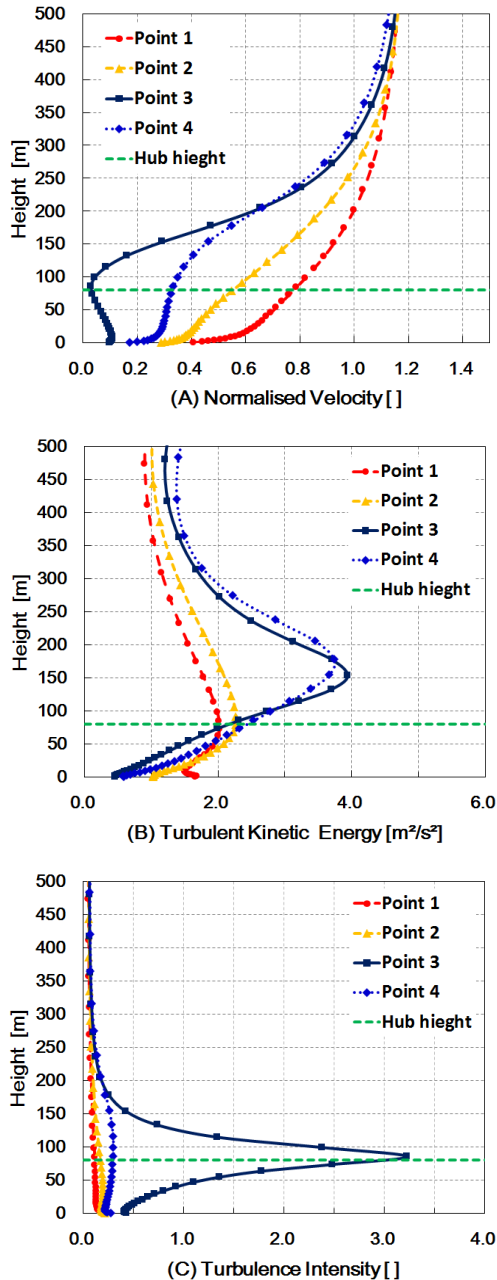


Fig. 7. Vertical profiles of normalised velocity (A), turbulence intensity (B) and turbulent kinetic energy (C) at 4 monitoring points

도가 크기 때문에 난류 생성이 큰 지역임을 확인하였다. 본 연구를 통해 지형효과에 영향을 받은 풍력자원의 공간적 특성을 분석할 수 있었으며, 이를 바탕으로 향후 지표면 격자해상도를 높여 대기하부 경계층내의 연직분포에 대한 좀 더 향상된 모의를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 “기상업무지원기술 개발연구”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Zhang, M.H., 2015, “Wind Resource Assessment and Micro-Siting”, WILEY, pp. 2-9.
- [2] Micke, R.E., Salmon, J.R., Taylor, P.A., 1984, “Kettles Hill’84: velocity profile measurements over a low hill”, Research Report AQRB-84-012-L, Atmospheric Environment Service, Toronto, Canada.
- [3] Mason, P.H., 1987, “Diurnal variations in flow over a succession of ridges and valleys”, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 113, 55-80.
- [4] Bechmaan, A., Johansen, J., Sørensen, N.N., 2007, “The Bolund experiment – design of measurement campaign using CFD”, Risø National Laboratory, Denmark.
- [5] Taylor, P.A., Teunussen, H.W., 1987, “The Askervein Hill Project: Overview and Background Data”, *Boundary-Layer Meteorology*, **1-2**(39), 15-39.
- [6] Taylor, P.A., Walmsley, J.L., 1996, “Boundary-Layer Flow Over Topography: Impacts of the Askervien Study”, *Boundary-Layer Meteorology*, **78**, 291-320
- [7] Wood, N., 1955, “The Onset of Flow Separation in Neutral, Turbulent Flow over Hills”, *Boundary-Layer Meteorology*, **76**, 137-164.
- [8] Bowen, A.J., Mortensen, N.G., 1996, “Exploring the Limits of WAsP, The Wind Atlas Analysis and Application Program”, European Union Wind Energy Conference, Sweden.
- [9] 윤광용, 백인수, 유능수 (2008.10). WAsP을 이용한 복잡 지형의 풍속 예측 및 보정. 『한국신재생에너지학회 학술대회논문집』, 268-273.
- [10] Bingöl, F., Mann, J., Foussekis, D., 2009, “Conically scanning LIDAR error in complex terrain”, *Meteorologische Zeitschrift*, 18(2), 189-195.
- [11] Foussekis, D., Georgakopoulos, T., Karga, I., 2009, “Investigating Wind Flow Properties in Complex Terrain Using 3 LIDARS and a Meteorological Mast”, Proceedings of the EWEA European Wind Energy Conference, Marseille, France.
- [12] Quaiße, T., Cripps E., “Bayesian Analysis of Uncertainty in the GlobCover 2009 Land Cover Product at Climate Model Grid Scale”, *Remote Sens.* 2016, 8(4), 324.
- [13] Bontemps, S., Defourny, P., Van Bogaert, E., Arino, O., Kalogirou, V., Ramosperz, J., 2011, “GLOBCOVER 2009 Product description and validation report”, UCLouvain and ESA, February.
- [14] Menter, F.R., 1994, “Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications”, *AIAA-journal*, **32**(8), 269-289.
- [15] Richards, P.J., Hoxey, R.P., 1993, “Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46 & 47, 145-153.