

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 25, No. 1, 2005

선형이론에 의한 복잡지형 내 난류 특성의 예측

윤정은, 경남호, 김성완

한국에너지기술연구원 (yje0920@kier.re.kr, nhkyong@kier.re.kr, kso@kier.re.kr)

A Prediction of Turbulent Characteristics in a Complex Terrain by Linear Theory

Yoon, J.-E., Kyong, N.-H., Kim, S.-W.

Korea Institute of Energy Research (yje0920@kier.re.kr, nhkyong@kier.re.kr, kso@kier.re.kr)

Abstract

The external conditions for estimating dynamic wind loads of wind turbines, such as the turbulence, the extreme wind, the mean velocity gradients and the flow angles, are simulated over GangWon Wind Energy Test Field placed in one of the most complex terrain in Korea. Reference meteorological data has been gathered at a height of 30m from 2003 to 2004 with a ultrasonic anemometer. The absolute value of the spectral energy are simulated and the verification of this prediction has been carried out with comparing to the experimental data. The most desirable place for constructing new wind turbine are resulted as Point 2 and Point 3 due to the lower value of Turbulence Intensity and the higher value of wind resource relatively.

Keywords : WAsP Enginccring, Turbulence, Complex Terrain, Mean Velocity Gradients

기 호 설 명

KE : Kinetic Energy [m^2/s^2]

- U : Mean Wind Speed [m/s]
- E : Power Density [W/m^2]
- A : Scale Parameter of Weibull Distribution [m/s]
- k : Shape factor of Weibull Distribution [-]

1. 서 론

풍력발전기의 발전량은 발전단지의 지형적인 특성에 의해 영향을 받는다. 따라서 풍황에 대한 다양한 실측과 예측, 분석을 통하여 보다 나은 풍황에

너지를 갖는 지점을 찾는 노력이 이어지고 있으며, 풍력발전단지 선정 이후에도 제한된 단지에서 최대 발전량을 이끌어 내기 위한 최적의 설치 지점을 찾는 노력은 계속되어진다. 그러나 이러한 설치 지점의 선정 과정에서 풍력발전단지가 복잡지형에 위치할 경우 최대 풍황 에너지뿐만 아니라 풍력발전기에 발생하는 피로의 원인인 dynamic wind loads에 대한 분석이 요구된다. 즉, 풍력발전단지의 지형적인 특성과 장애물 분포, 지표 거칠기와 같은 공간적인 특성에 의해 발생하는 유동 특성(극한풍속, 전단 유동, 유동의 방향 변화, 난류강도 등)을 함께 고려하여 풍력 발전기의 설치지점을 선정하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 현재 구 대관령 휴게소에 위치한 풍력발전실증단지에 대하여 복잡지형과 장애물에 의해 발생하는 유동의 특성에 관한 예측과 분석을 수행하였으며, 이는 최적의 풍력발전기 설치 지점 선정에 중요한 지표로 사용되었다.

2. WAsP Engineering의 소개

WAsP Engineering은 건축물과 풍력발전기와 같은 구조물에 대한 부하를 형성하는 유동특성에 대한 정보를 예측하기 위한 프로그램으로, 복잡지형에 적용 가능하도록 개선된 Fourier simulation model (Mann, 2000)⁽¹⁾을 사용하며, 난류에 의한 수면과 지표 거칠기의 변화와 복잡지형에서의 50년 극한풍속을 산출하기 위한 알고리즘을 포함하고 있다.

이 모델의 모체가 되는 선형 유동 모델은 Jackson and Hunt (1975)⁽²⁾에 의해 처음으로 소개되었으며, Troen(1986)⁽³⁾에 의해 언덕 지형의 중립적 안정 유동을 위한 상대적으로 간단한 모델로 발전하게 된다. 이후, 중립 성층 대기 하의 다양한 지표 거칠기와 지형의 영향을 고려하는 유동 예측 모델 (Astrup(1997))⁽⁴⁾로 확장되었다. 이 모델은 지표 가까이의 유동은 지표 거칠기와 평형을 이룬다는 가정을 바탕으로 하며, 이후 수직전단 du/dz 과 같은

평균바람장의 공간적 미분을 계산할 수 있도록 확장되어 사용되고 있다.

3. 풍력자료의 측정 및 분석 결과

풍력발전실증단지 내 2003년 9월부터 2004년 9월까지 1년의 기간 동안 30m 높이의 측정 pole을 설치, 운영하였다. 10분 평균의 풍속, 풍향 데이터를 사용하여 일반적인 풍황 특성(표 1과 표 2)과 예측에 사용된 대표 풍황을 얻는데 사용되었다.

그림 1은 풍력발전실증단지의 전경을, 그림 2와 그림 3은 각각 예측에 사용된 총 계산 영역과 예측 지점의 세부적인 위치를 나타낸다. 풍황의 측정은 2번 지점에서 이루어졌으며, 7번 지점에는 프랑스 Jeumont사 750kW 풍력발전기가 설치, 운영되고 있다.

풍황 발생빈도는 서풍인 270°에서 약 50% 이상의 빈도를 가지며 평균풍속과 풍력밀도의 분포도 유사한 경향을 가져, 단지 내의 풍황 에너지 분포가 서풍에 집중되어 뚜렷한 주풍향을 보이고 있다. 이는 그림 3에서 볼 수 있듯이 지형적인 영향으로 인해 발생하는 언덕효과에 의한 것으로 유추해볼 수 있다.

4. 시뮬레이션

4.1 제반 데이터

풍력발전실증단지내의 난류분포를 예측하기 위해서는 건물과 식생에 의해 결정되는 지표 거칠기와 후류효과를 발생시키는 장애물과 지형에 대한 정보가 요구된다.

그림 4는 단지 내 장애물의 분포도이며 표 3은 이들 장애물의 높이, 폭 그리고 공극률과 같은 공간적인 정보를 나타낸다.

본 연구에 적용된 지표 거칠기는 아스팔트 포장도로 0.01m, 잔디와 같은 작은 식생의 분포 영역 0.1m, 수목 0.3m를 적용하였다. 지형에 대한 정

표 1 측정된 풍황의 특성

측정 기기의 모델	Ultrasonic 81000
측정 기간	2003. 09 ~ 2004. 09
측정 고도	828.5 m
측정 높이	30 m
평균 풍속	6.67 m/s
풍력 밀도	465.30 W/m ²
최대 풍속	25.3 m/s (2003.11.15)
A	7.6 m/s
K	1.61

표 2 측정된 바람장미

발생빈도 [%]	평균풍속 [m/s]	풍력밀도 [W/m ²]
60	10	800
30	5	400
0%	0	0

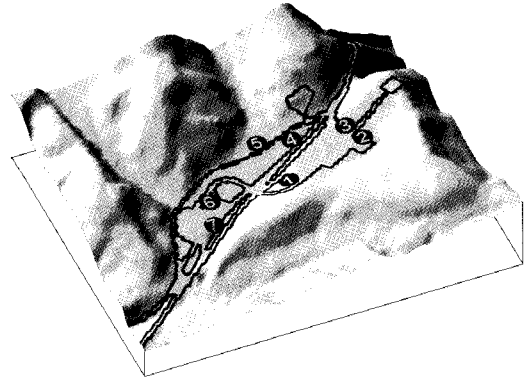


그림 3. 풍력발전실증단지내의 예측분석지점

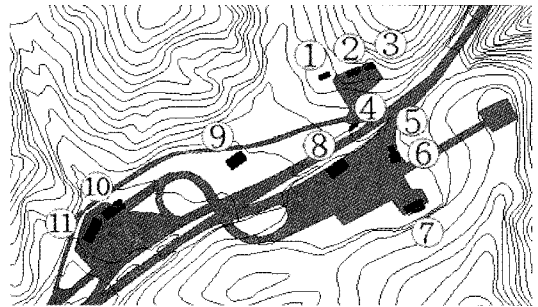


그림 4. 풍력발전실증단지 내 장애물 분포도

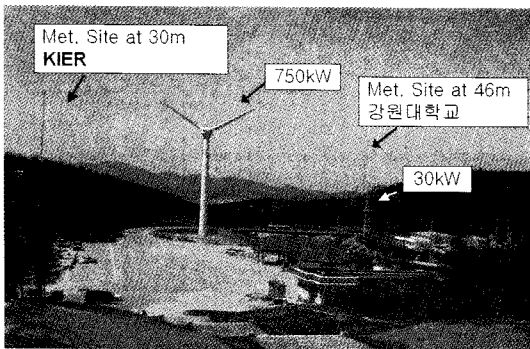


그림 1. 풍력발전실증단지내의 전경

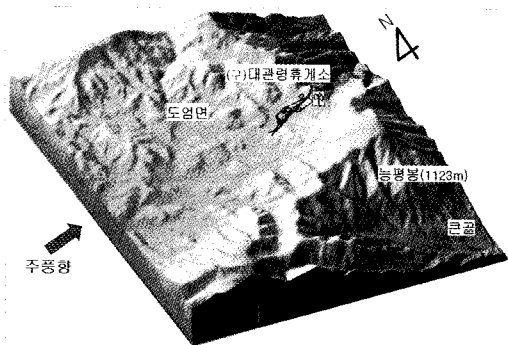


그림 2. 풍력발전실증단지내의 공간도

표 3. 풍력발전실증단지 내 장애물 목록

장애물	폭 [m]	높이 [m]	공극률
1	4	6.3	0
2	4	10.2	0
3	4	10	0
4	4	13.8	0
5	4	8.2	0
6	4	14.3	0
7	4	15.8	0
8	4	17	0
9	10	28	0
10	4	15	0
11	4	14	0

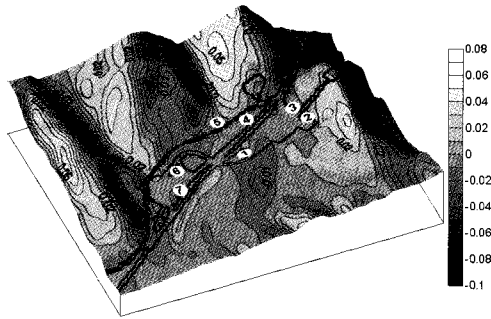


그림 5. du/dx [1/s]

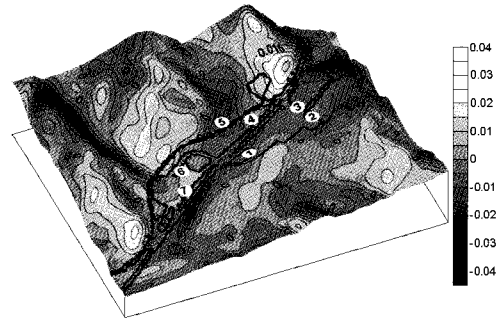


그림 6. du/dy [1/s]

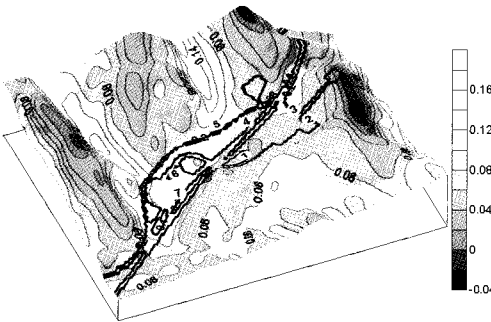


그림 7. du/dz [1/s]

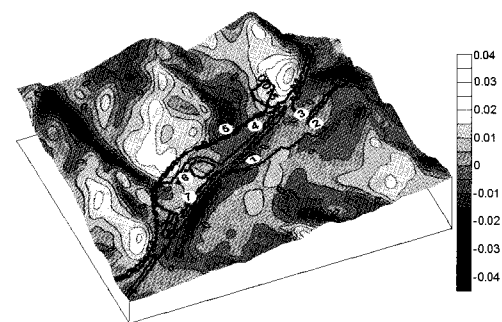


그림 8. dv/dx [1/s]

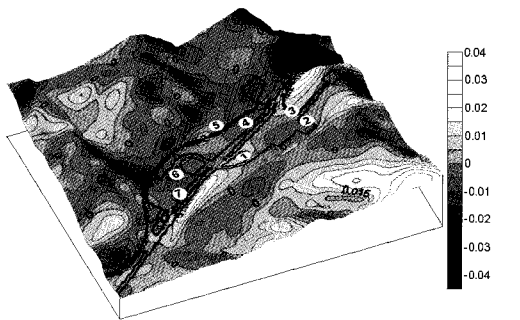


그림 9. dv/dy [1/s]

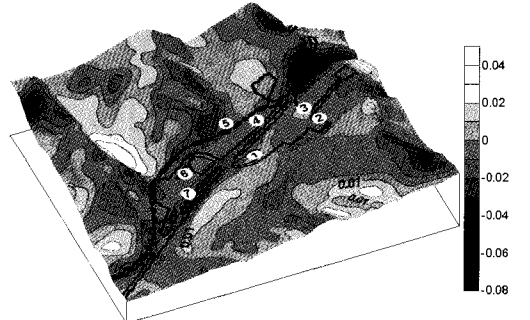


그림 10. dv/dz [1/s]

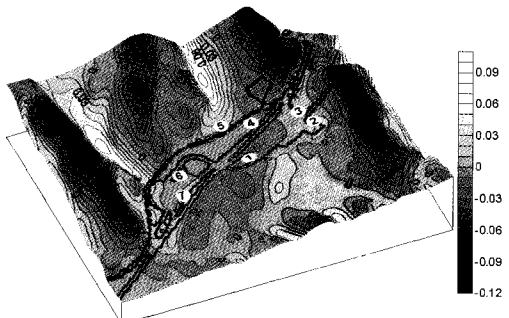


그림 11. dw/dx [1/s]



그림 12. dw/dy [1/s]

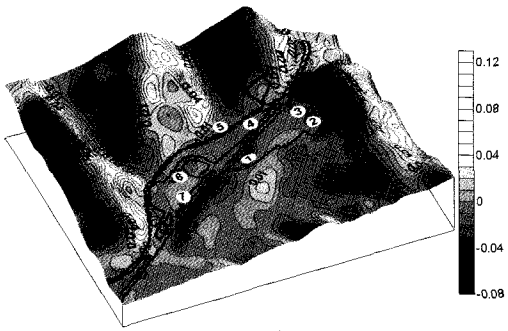


그림 13. dw/dz [1/s]

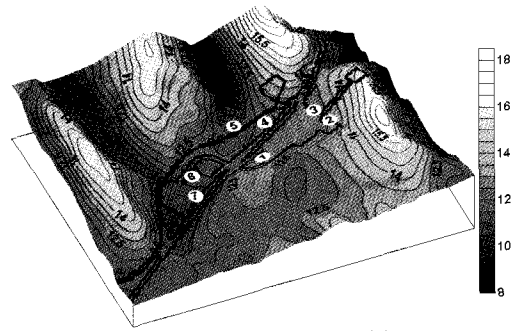


그림 14. Wind speed [m/s]

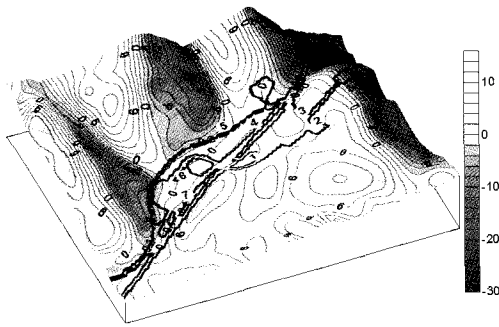


그림 15. Velocity tilt [°]

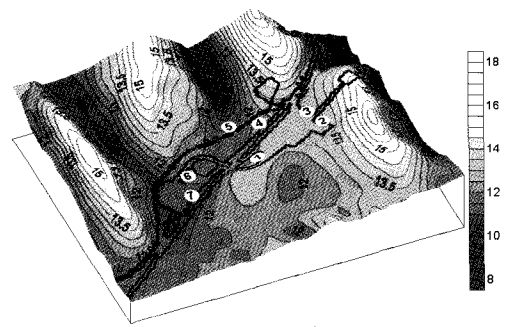


그림 16. u [m/s]

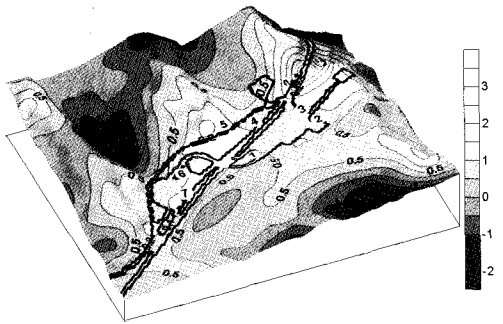


그림 17. v [m/s]

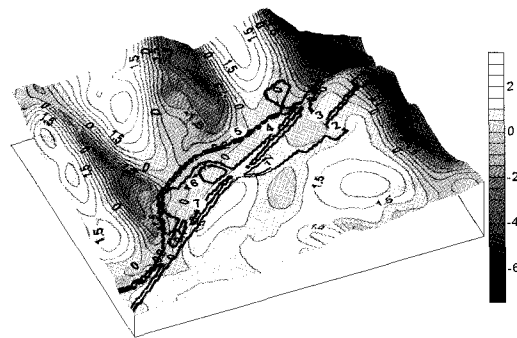


그림 18. w [m/s]

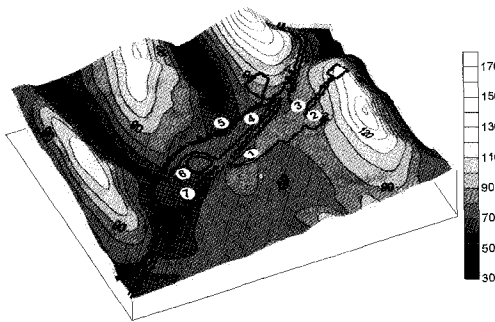


그림 19. KE [m^2/s^2]

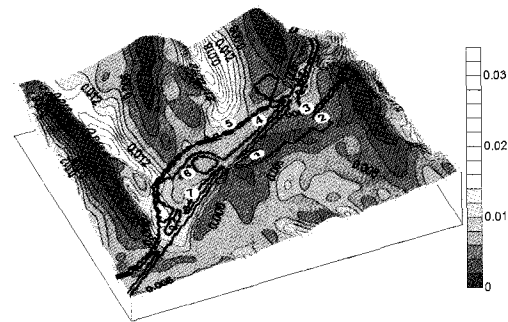


그림 20. S [1/s]

표 4. 풍황 특성의 예측 결과

Site	Mean speed [m/s]	Velocity tilt [°]	S [1/s]	KE [m ² /s ²]	u [m/s]	v [m/s]	w [m/s]	Standard deviation [m/s]			Turbulence intensity [%]		
								u	v	w	u	v	w
								1	12.58	4.34	0.065	79.1	12.53
2	13.00	2.98	0.072	84.5	12.96	0.87	0.68	1.9	1.4	1.0	14.8	10.8	7.8
3	12.76	2.47	0.080	81.3	12.71	0.95	0.55	2.0	1.5	1.1	16.0	11.8	8.7
4	12.24	1.54	0.082	74.9	12.21	0.84	0.33	2.1	1.6	1.1	17.4	12.8	9.3
5	11.42	-1.58	0.098	65.1	11.35	1.19	-0.31	2.3	1.6	1.1	19.9	14.0	9.7
6	11.69	0.20	0.084	68.3	11.66	0.83	0.04	2.2	1.6	1.1	18.9	13.5	9.3
7	11.27	2.11	0.094	63.5	11.21	1.14	0.42	2.3	1.6	1.1	20.2	14.0	9.8

Site	50yr wind [m/s]	u [1/s]			v [1/s]			w [1/s]		
		d/dx	d/dy	d/dz	d/dx	d/dy	d/dz	d/dx	d/dy	d/dz
1	39.24	0.0065	-0.0076	0.0648	-0.0060	0.0074	0.0041	-0.0013	0.004	-0.0139
2	39.46	0.0065	-0.0026	0.0728	0.0016	-0.0007	-0.0018	0.0087	-0.0019	-0.0058
3	39.11	0.0057	-0.0018	0.0797	0.0014	0.0065	0.0007	0.0042	0.0008	-0.0122
4	38.08	0.0104	-0.0020	0.0820	-0.0002	-0.0052	-0.0031	0.0004	-0.0029	-0.0052
5	35.45	0.0039	-0.0117	0.0981	-0.0108	-0.0010	-0.0097	0.0144	-0.0094	-0.0028
6	36.32	0.0028	0.0052	0.0846	0.0062	-0.0030	-0.004	0.0056	-0.0041	0.0002
7	34.81	-0.0008	0.0071	0.0947	0.0064	-0.0058	-0.0116	0.0143	-0.0115	0.0066

보는 국립지리원의 수치지도(Numerical map)를 적용하였으며, 총 계산 영역은 가로 4.5km, 세로 5.5km, 등고선의 간격은 5m이다.

강원 풍력발전실증단지에서 발생할 수 있는 유동 전반에 관한 예측은 2번 지점의 30m 높이에서 측정된 풍황 특성을 바탕으로 주풍향인 270°의 풍향과 일반적인 풍력 발전기의 정격풍속인 13m/s 풍속을 적용하였다.

4.2 예측 결과

강원 풍력발전실증단지 내의 유동에 대한 예측 결과는 그림 5에서부터 그림 20까지이며, 측정 지점(2번 지점)의 270° 풍향의 13m/s의 바람에 대해 계산 영역 내 지표로부터 30m 높이를 가지는 모든 지점의 풍황 특성들에 대한 예측결과를 이미지화한 것이다. 단지 내의 풍력발전기의 예상 설치지점인 일곱 개의 지점에 대한 수치적 비교는 표 4에 나

타내었다.

풍력발전기의 블레이드를 지나는 전단유동(그림 5에서 그림 13까지)의 값이 클 경우, 즉 블레이드가 다양한 풍속을 가지는 공간을 지나가게 될 경우 블레이드에 작용하는 피로와 부하 변동분은 증가한다. 전단 유동은 x, y, z의 세 방향에 대한 풍속의 u, v, w의 변화량으로 나타내며, 이들 전단유동 중 풍속 u 성분의 수직 변동분인 du/dz(그림 8)의 경우, 산 정상에서 지형이 급격히 변하는 경우를 제외하면 지표에서 높아질수록 u 속도는 증가하는 profile을 가진다. 예측 지점 중 1, 2, 3번 지점은 0.08이하의 값을 가져 상대적으로 완만한 profile을 가진다.

풍속(그림 14)은 언덕효과에 의해 산의 정상으로 갈수록 증가함을 보이며, 예측지점 중 5, 6, 7번 지점은 근접한 산에 의한 영향을 벗어나지 못해 상대적으로 낮은 풍속을 가짐을 확인할 수 있다.

유동의 방향변화(그림 15)는 수평에 대한 풍속 벡터의 방향을 의미하며, 변화 값이 양수일 경우 백

터가 위를 가리킨다. 5번 지점이 유일하게 음의 값 -1.58°를 가져, 전체적으로 지형을 따라 상승하는 유동과 달리 북서에 위치한 산의 후류로 인해 하강하는 유동을 가짐을 알 수 있다.

풍속의 u, v, w 성분 중 u 성분(그림 16)은 풍속과 비슷한 분포를 가져 언덕효과에 의해 산의 정상에서는 높은 값을, 계곡에서는 낮은 값을 가진다. v 성분(그림 17)의 경우 단지 내에서는 ±1m/s 이하의 값을 가지나 산의 정상과 계곡에서는 y 방향의 풍속이 크게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 5번 지점과 7번 지점에 1m/s 이상의 값을 가져 근접한 산의 영향으로 y축의 유동이 다른 지점보다 크게 나타난다. w 성분(그림 18)은 산에 의한 하강, 상승 유동을 뚜렷이 나타내며, 예측 지점 중 5번 지점의 경우 w 성분이 유일하게 (-)값을 가져 서쪽에 근접한 산에 의해 발생하는 하강 유동의 영향에서 벗어나지 못함을 보여준다.

난류 운동에너지 KE(그림 19)는 아래의 식과 같이 표현되며, 2번 지점과 3번 지점은 80m²/s²이상의 값을 가져 다른 지점보다 큰 운동에너지를 가지는 것으로 나타났다.

$$KE = \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \dots\dots\dots (1)$$

풍력 발전기의 출력 성능은 각 방향의 풍속 구배와 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 이를 S(식 (2), 그림 20)로 나타내었다.

$$S = \sqrt{\left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \left(\frac{du}{dy}\right)^2 + \left(\frac{du}{dz}\right)^2} \dots\dots\dots (2)$$

이는 소산율에서 낮은 차원의 변동분을 제외한 것으로 그 값이 클수록 와류의 수명이 짧은 것을 의미한다. 산의 정상보다 계곡에서 높은 값을 가지며, 와류의 수명이 짧아 에너지가 급속히 사라짐을 의미한다. 예측 지점 중 1, 2, 3번 지점이 0.08/s 이하

의 값을 가져 와류의 수명이 긴 것으로 예측되었다.

풍속의 표준 편차(표 4)는 풍속의 변화의 정도를 나타내는 척도로서, 각 풍속 성분에 따른 표준 편차는 1, 2, 3번 지점이 다른 지점에 비해 상대적으로 적은 값을 가진다. 표준편차가 큰 값을 가진다는 것은 유동 중 난류의 비가 큰 것을 의미하며, 따라서 난류 강도의 수치도 표준편차와 유사한 경향을 가짐을 확인할 수 있다. 단지 내 예측 지점이 서로 근접함에도 불구하고 지형에 의한 유동의 변화가 급격하고, 난류 강도의 큰 차이를 가지는 것으로 나타났다.

50년 풍속은 1, 2, 3번 지점이 39m/s 이상의 값을 가지는 것으로 나타났다.

4. 결 론

강원 풍력발전실증단지 내 실측을 통하여 풍황의 특성을 분석하고, 주풍향인 270°의 풍향과 풍력발전기의 일반적인 정격 풍속 13m/s에 대해 발생하는 유동의 특성과 그 분포를 예측, 분석하였다. 현재 풍력발전기가 가동되고 있는 지점을 포함하여 총 7개의 지점들에 대한 극한풍속, 전단유동, 유동의 방향 변화, 난류강도, 풍속의 u, v, w 성분 등의 예측치를 비교, 분석하였다.

풍력발전실증단지 내 새로운 풍력발전기 설치 예상 지점 중 주풍향에 위치한 산과의 거리가 상대적으로 먼 곳에 위치한 지점(1번 지점, 2번 지점, 3번 지점)이 보다 높은 풍황 에너지와 낮은 난류 강도를 가져 풍력발전에 적합한 것으로 판단되었다. 그렇지 못한 지점(5번 지점, 6번 지점, 7번 지점)에서는 단지의 입구에 위치한 낮은 산과 서풍을 중심으로 좌우에 위치한 산에 의해 형성되는 후류의 영향을 확인할 수 있었다. 4번 지점은 모든 풍황 특성에서 나머지 지점들의 평균적인 수치를 기록했다.

이러한 유동 특성의 예측은 풍력발전기 설치지점 선정과 함께 풍력 발전기에 발생하는 피로 예측과 발전량 예측과 같은 또 다른 정보를 위한 바탕으로 사

용될 수 있다. 본 연구의 예측 결과를 바탕으로 현재 가동되고 있는 1번 지점을 제외한 지점 중 풍력발전기 설치에 바람직한 지점은 2번과 3번 지점으로 판단된다.

Rapid distortion theory를 사용하는 선형이론을 바탕으로 하는 WAsP Engineering에 의한 예측은 지형의 기울기가 20° 이상인 복잡 지형에서의 경우, 평균 풍속 구배의 다양성과 매우 짧은 와류의 수명으로 인해 실제보다 적은 난류를 예측할 수 있다. 강원 풍력발전실증단지 내의 지형의 기울기는 30°까지 나타나고 있어 여기에서 예측된 값은 실측 데이터를 바탕으로 한 난류 분석 결과와의 비교가 요구되지만, 그럼에도 불구하고 상대적인 난류 강도와 분포를 통하여 앞으로의 풍력 발전기 설치 지점을 선정하는 하나의 지표로서 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Mann J, The spectral velocity tensor in moderately complex terrain, *Jnl. of wind engineering & industrial aerodynamics*, 88: (2-3) 153-169 2000.
2. Jackson P S, Hunt J C R, Turbulent flow over a low hill, *Q. J. of royal met. society*, 101 929-955, 1975
3. Troen I, de Baas A, A spectral diagnostic model for wind flow simulation in complex terrain, *Proceedings of the European Wind Energy Association Conference & Exhibition, Rome*, 37-41, 1986
4. Astrup P, Mikkelsen T, A fast model for mean and turbulent wind characteristics over terrain with mixed surface roughness, *Radiation Protection Dosimetry*, 73 (1-4) 257-260, 1997
5. Charnock H, Wind stress on a water surface, *Q. J. of royal met. society*, 81 639-640, 1955
6. Dyrbye C, Hansen S O, *Wind loads on structures*, 1997, John Wiley & Sons
7. Kristensen L, Rathmann O, Hansen SO, Extreme winds in Denmark, *Jnl. of wind engineering & industrial aerodynamics*, 87: (2-3) 147-166 2000
8. Mann J., Ott S., Jørgensen B.H., Frank, H.P., *WAsP Engineering 2000. Risø-R-1356(EN)* (2002)