



[2019-6-WD-002]

# NWP-CFD 축소화에 의한 백아도 풍력자원평가

김현구<sup>1)\*</sup> · 이화운<sup>2)</sup>

## Wind Resource Assessment of Baekado by NWP-CFD Downscaling

Hyun-Goo Kim<sup>1)\*</sup> · Hwa-Woon Lee<sup>2)</sup>

Received 14 November 2018 Revised 25 March 2019 Accepted 9 May 2019

**ABSTRACT** The wind turbines installed in Baekado barely produce power because of the improper wind resource assessment that ignored complex terrain effects. This research proposes a proper wind resource assessment method for a small wind turbine siting based on the Numerical Weather Prediction (NWP) data to Computational Fluid Dynamics (CFD) downscaling. For this, wind speed data from the NWP should be imposed at the boundary layer top where it is far from the local terrain effect, but wind direction data at the ground level from NWP is used considering the wind veer shift. A micrositing wind map produced by NWP-CFD downscaling clearly showed that the current wind farm location at the basin is covered by the separate flow along the steep upslope on the windward side. Consequently, poor a wind resource was inevitable. The present prediction suggested a similar wind speed and capacity factor at the site. For reliable wind resource assessment of small wind turbines, it is important to apply an NWP-CFD downscaling method demonstrated in this research.

**Key words** Wind Resource Assessment(WRA; 풍력자원평가), Numerical Weather Prediction(NWP; 수치기상예측), Computational Fluid Dynamics(CFD; 전산유체역학), Downscaling(축소화), Baekado(백아도)

### 1. 서론

인천시는 2014년에 인천시 소재 도서인 덕적도, 지도, 백아도에 신재생에너지 발전설비를 도입하여 디젤발전 의존도를 낮추는 ‘인천 도시지역 에너지 자립섬 구축사업’을 추진하였다. 그 중 인천 연안에서 100km 떨어진 웅진군 백아도에는 총사업비 42억원을 투입하여 태양광 250kW, 풍력 40kW의 발전설비와 배터리 에너지저장장치 1.1MWh를 설치하였다<sup>[1]</sup>.

그런데 백아도 풍력 발전설비의 가동실적이 풍속 2.32 m/s, 설비이용률 1.08%에 불과하자, 감사원은 2017년에 ‘신성장동력 에너지사업 추진실태’ 공개문을 통해 백아도 탄소제로섬 조성사업이 한국에너지공단의 ‘소형 풍력발전 보급지원 사업’의 규정을 준수하지 않고 현장실적을 생략하였으며 풍력발전 비전문가에게 현장평가를 의뢰하는 등 부적절하게 수행되었으므로 세금 낭비를 줄이기 위해서는 풍력터빈을 적정 위치로 이설하여야 한다고 지적하였다<sup>[2]</sup>.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 백아도에 10kW급 소형 풍력터빈 4기가 설치된 위치는 남쪽을 제외한 삼면이 해발 70m로부터 130m 높이의 산으로 병풍처럼 차폐된 분지이므로 풍력자원이 빈약할 가능성이 높을 뿐 아니라 급한 지형경사로 인하여 와류 발생도 우려되는 상황이다. 더욱이 풍력터빈 북측에 설치한 태양광 발전설비에 풍력터빈에 의한 그림자

1) Principal Researcher, Center Chief, New & Renewable Energy Resource and Policy Center, Korea Institute of Energy Research

2) Professor, Department of Atmospheric Science, Pusan National University

\*Corresponding author: hyungoo@kier.re.kr

Tel: +82-42-860-3376 Fax: +82-42-860-3642



Fig. 1. Landscape view of the Baekado wind and solar farm (from south to north)

영향을 줄이기 위해 풍력터빈 타워높이를 최초 설계안인 18m에서 6m나 줄이는 등 풍력자원평가 과정에 전문성이 결여된 것으로 판단된다.

MW급 대형 풍력터빈의 풍력자원평가에 활용하기 위해 개발된 한국에너지기술연구원의 풍력자원지도인 KIER-WindMap™의 공간해상도는 1km × 1km이므로, 지형지물의 영향이 크게 작용하는 30m 높이 이하의 국소 바람장을 설명하기에는 공간해상도가 충분하지 못하다<sup>[3]</sup>. 따라서 소형 풍력터빈의 풍력자원평가는 현장실측을 수행하거나, 국지적 지형지물이 정확히 표현되는 수준의 공간해상도로 국소배치 수치모의를 수행함이 바람직하다.

최근 풍력터빈의 대형화에 따라 회전자가 대기경계층 하단의 상당 부분을 차지하게 되었고, 이로 인하여 대기안정도, 풍속전단(wind shear), 전향력에 의한 풍향순전(wind veer), 상부 경계조건 등이 실질적 고려요소가 되었다<sup>[4]</sup>. 이에 따라 미시규모(microscale) 국소배치(micrositing)를 위한 유동해석에 필요한 경계조건을 중규모(mesoscale) 기상수치예측(NWP; Numerical Weather Prediction) 결과를 이용하는 축소화(downscaling) 해석법이 주를 이루게 되었다<sup>[5]</sup>.

본 연구는 현재 명확한 기준이 없는 소형 풍력터빈의 풍력자원평가 방법을 제안하고자 한다. 즉, NWP로 구축된 풍력자원지도를 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 미시규모 국소배치로 축소화함으로써 백아도와 같은 복잡지형 내 소형 풍력터빈의 풍력자원평가에 적용 가능한 수준으로 향상시키고자 한다.

## 2. 연구자료 및 방법

### 2.1 수치기상예측 해석자료

한국에너지기술연구원 풍력자원지도는 NWP 모델인 WRF (Weather Research and Forecasting) ARW v3.71을 이용하여 2005년부터 2007년까지는 남한을 3km 공간해상도와 1시간 시간해상도로, 2010년부터 2016년까지는 한반도를 1km 공간해상도와 1시간 시간해상도로 수치모의하였으며, 동기간에 대해 한국전력거래소의 월별 풍력발전량 자료를 이용하여 예측 정확도가 검증되었다<sup>[6]</sup>.

백아도 영역에 대한 지상 10m에서의 평균풍속 예측결과는 Fig. 2와 같다. 실제로 풍력터빈이 설치된(검정색 원) 1km × 1km 격자의 평균풍속은 5.58m/s로 낮은 풍속은 아니다. 이는 중규모 NWP에서 해당격자의 지형고도를 격자영역의 평균고도인 10m로 낮게 모사하였기 때문으로, 중규모 수치기상예측의 공간해상도에 따른 한계인 것이다.

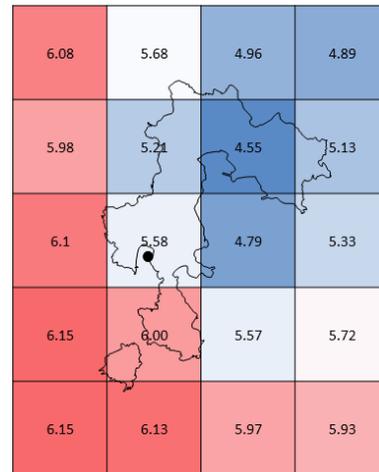


Fig. 2. Mean wind speed of KIER-WindMap at 10 m above sea level (unit: m/s)

### 2.2 재해석자료에 의한 장기간 보정

풍력자원평가는 최소한 20년인 장기간의 설계수명에 대해 수행되어야 한다. 따라서 단기간의 현장 기상탑 측정자료 또는 중기간의 NWP 해석자료는 필수적으로 장기간 측정자료 또는 재해석자료(reanalysis data)를 이용하여 장기간 보정(long-term correction)을 해야 한다. 해상경우에는 지형지물의 영향이 없기 때문에 제3세대 재해석

자료의 신뢰도가 상대적으로 육상보다 높다<sup>[7]</sup>.

Fig. 3은 MERRA 재해석자료와 NWP 해석자료의 풍속에 대한 상관계수(correlation coefficient)를 도시한 것으로, 전반적으로 0.69의 비교적 높은 상관도를 나타내고 있다. 축소화를 수행할 영역의 NWP와 MERRA의 상관계수는 0.70로, 축소화가 가능한 수준임을 확인할 수 있다. 만일 상관계수가 낮다면 해당영역은 국지 바람장의 영향이 강하기 때문에 NWP 해석자료를 기반으로 축소화를 진행할 경우 수치모의 상의 왜곡이 우려되기 때문이다. 재해석 자료 MERRA를 이용하여 풍력터빈이 설치된 격자의 평균 풍속을 20년간으로 장기간 보정하면, 평균풍속은 약 2% 낮은 5.45m/s가 된다.

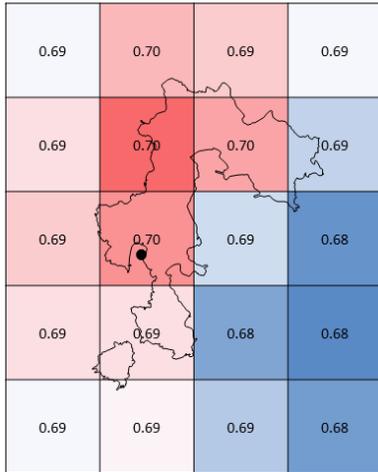


Fig. 3. Correlation coefficients of hourly wind speed between KIER-WindMap and MERRA

참고로 재해석자료의 시계열 풍속( $V_{MERRA}$ )과 NWP의 풍속( $V_{NWP}$ ) 간의 상관도는 다음의 피어슨(Pearson) 상관계수 식으로 산출하였다. 아래 식에서  $cov$ 는 공분산(covariant) 이고  $\sigma$ 는 표준편차이다.

$$R = \frac{cov(V_{MERRA}, V_{NWP})}{\sigma(V_{MERRA}) \cdot \sigma(V_{NWP})} \quad (1)$$

### 2.3 전산유체역학을 이용한 축소화

공간해상도가 1km급인 NWP 해석자료의 설명력을 국소 배치가 가능한 수준의 공간해상도로 축소화하기 위하여

CFD 기반의 국소배치 소프트웨어인 WindSim v9를 이용하였다. 풍력터빈 허브높이 이하의 인근 지형지물이라도 풍력발전에 미치는 영향은 매우 크기 때문에, CFD를 이용하여 국지적인 유동장 변화를 정확히 해석할 필요가 있다<sup>[8,9]</sup>.

일반적으로 국소배치 바람지도(wind map)를 작성할 때는 풍향별로 CFD 해석을 수행한 후 기상탑(meteorological tower) 측정자료를 이용하여 풍속분포와 풍향빈도에 대해 가중평균을 취한다<sup>[10]</sup>. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 실측 자료 대신 NWP 해석결과를 재해석자료를 이용하여 장기간 보정한 후 풍향, 풍속별 가중평균의 빈도자료로 사용하여 축소화를 진행하기로 한다. 이때 고려해야 할 사항은 NWP 해석자료를 입력하는 지점, 높이, 풍향순전 등이다.

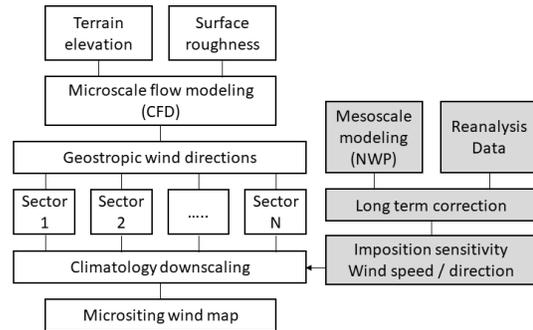


Fig. 4. NWP-CFD downscaling process in complex terrain

NWP는  $1\text{km} \times 1\text{km}$  수평면 격자 내의 변수는 동일함으로 가정하여 지배방정식을 유한차분한다. 따라서 수평면 격자의 중심점에 NWP 해석결과를 위치시키는 것이 바람직하지만 지형변화가 심할 경우 중심점이 해당영역의 기상학적 대표성을 가진다는 보장이 없기 때문에 입력지점에 따른 불확실성이 존재한다. 본 연구에서는 NWP 입력위치에 따른 불확도 평가를 위해 입력지점을 중심점과 사각격자의 네 꼭지점에 위치시키고 축소화를 수행한 후 풍속분포 차이를 분석하기로 한다.

KIER-WindMap은 풍력자원평가에 최적화하여 수직격자를 지상 10, 40, 80, 120, 320m 등으로 설정하였다. 따라서 지상 12 m에 설치한 소형 풍력터빈의 풍력자원평가를 위해서는 NWP 해석결과 중 동일 높이인 지상 10m의 풍향, 풍속을 축소화하는 것이 적합하다고 판단할 수 있다. 그러나 지표면 부근에서는 지형지물로 인한 바람장의 변형

이 매우 심하기 때문에 NWP가 해석하는 지상 10m 높이에서의 바람장과 실제의 바람장은 큰 차이가 있을 가능성이 높다. 따라서 축소화를 위한 풍속은 지표면 지형지물에 의한 바람장 변형효과가 사라지는 경계층 상부인 320m 높이에서의 NWP 해석자료를 입력하는 것이 바람직하다. 반대로 풍향의 경우에는 높은 고도에서는 코리올리 전향력에 의한 풍향순전이 발생하기 때문에 지표면 부근의 NWP 해석자료를 사용하는 것이 바람직하다. Fig. 5의 풍향빈도 비교를 보면, 지상 10m와 320m의 바람장기는 매우 유사하며 다만 지상 10m에 비해 320m에서 약 5도의 풍향순전이 발생하였다.

본 연구는 NWP 해석결과를 입력한 위치의 CFD 해석결과 중 풍향별 풍속분포를 비교하여 지형지물에 의한 바람장의 변형특성을 고찰하기로 한다.

국소배치 축소화를 위해서 필요한 입력자료는 상세 지형고도 및 토지이용도이다. Fig. 6은 국토지리정보원의 1:5,000 수치지형도를 이용하여 5m급 공간해상도로 생성한 지형

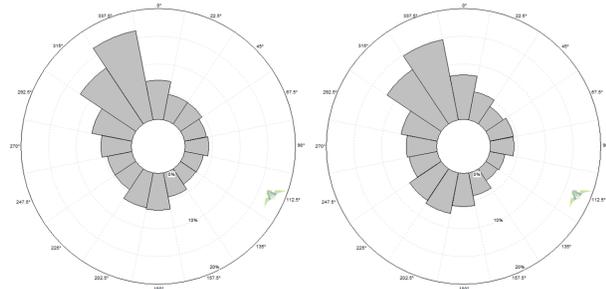


Fig. 5. Wind roses of KIER-WindMap at 10 m (left) and 320 m (right) above sea level

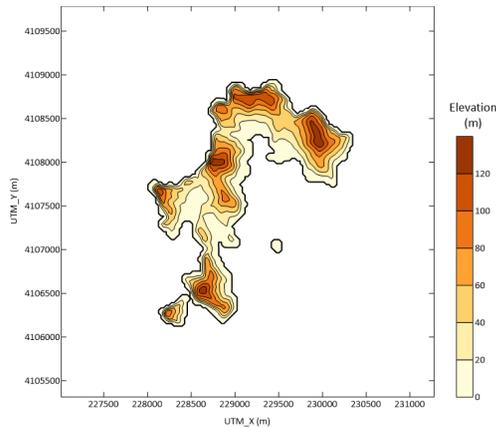


Fig. 6. Terrain elevation map of Baekado

고도이다. 주목할 것은, 주풍향인 북북서풍이 불어오면 섬의 북서쪽 사면의 급경사를 타고 오르며 유동박리(flow separation)가 발생하여 반대편 해안지대에 저풍속 구간이 형성될 가능성이 매우 높다는 것이다<sup>[11]</sup>.

## 2.4 풍력발전량 산정

백아도에는 Fig. 1과 같이 라온테크의 10kW 소형 풍력터빈 GWE-10KU 4기가 설치되어 있으며, 성능곡선(power curve)을 Fig. 7에 제시하였다.

본 연구에서는 현재의 설치위치에서 4기의 풍력터빈에 의한 발전량을 허브높이 12m일 때와 최초 설계안인 18m일 때에 대해 산정하였다. 또한 국소배치 바람지도를 생성한 후 풍력자원이 우수한 능선부로 풍력터빈을 이설할 경우의 발전량을 산정하여(허브높이 12m) 지형효과에 따른 발전량의 변동폭을 분석하기로 한다.

참고로 연간에너지생산량(AEP; Annual Energy Production)과 이용률(CF; Capacity Factor)은 다음 식으로 계산된다.

$$AEP = 8760 \sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{N_T} f_{i,j,k} P_{i,k} \quad (MWh) \quad (2)$$

$$CF = \frac{AEP(MWh)}{Capacity(MW) \cdot 8760(h)} \times 100(\%) \quad (3)$$

위 식에서  $N_V$ ,  $N_D$ ,  $N_T$ 는 각각 풍속구간, 풍향구간 그리고 풍력터빈의 수이다.  $f_{i,j,k}$ 와  $P_{i,k}$ 는 각각 출현빈도 분율과 풍력터빈의 성능곡선이다.

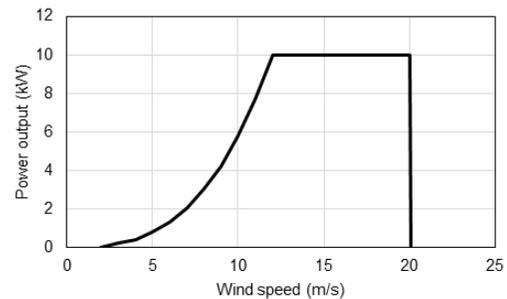
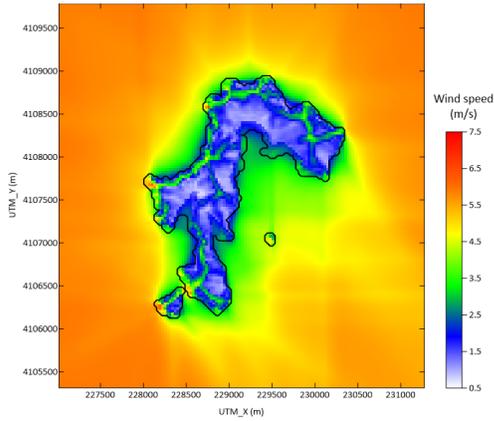


Fig. 7. Power curve of GWE-10KU

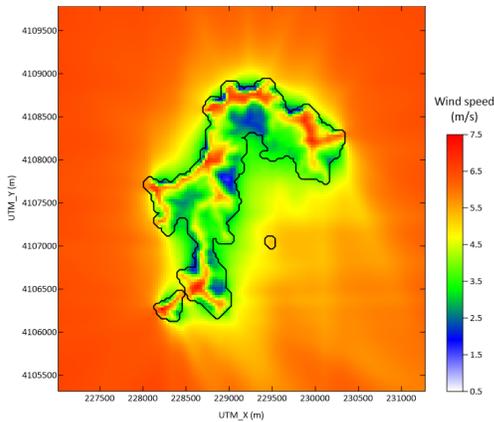
### 3. 연구결과

#### 3.1 국소배치 바람지도

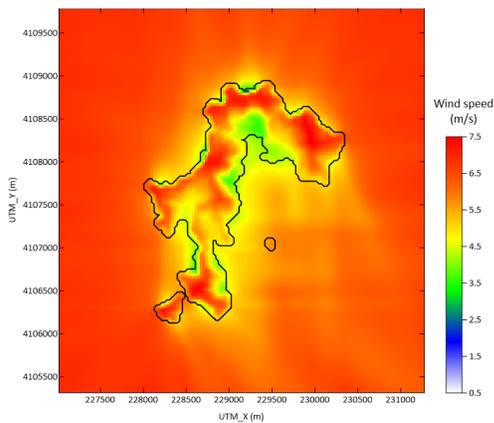
Fig. 8은 WindSim으로 풍향별 CFD 해석을 수행하고



(a) 12 m above sea level



(b) 40 m above sea level



(c) 80 m above sea level

Fig. 8. Mean wind speed plots downscaled by CFD using NWP data

NWP 해석결과로 풍향, 풍속의 가중평균을 적용하여 축소화한 국소배치 바람지도이다. 높이 12m에서는 지형의 영향을 강하게 받아서 북서쪽 급경사와 능선을 따라 고풍속대가 발달하나 그 반대편은 차폐영향으로 저풍속대가 형성된다.

지형지물의 강제력이 강하게 작용하는 지상 12m 높이에서는 평균풍속의 표준편차가 1.27m/s이지만 고도가 높아질수록 지형지물의 영향이 감소하여 40m 높이에서는 0.95m/s, 80m 높이에서는 0.65m/s로 각각 25%, 49%씩 감소한다. 그리고 풍속의 가중평균을 입력한 320m 높이에서는 0.08m/s로 표준편차가 급격히 감소하므로 이 높이를 지형지물의 영향에서 벗어난 경계층 상부라고 판단하였다. NWP-CFD 축소화 과정에서 NWP 해석자료를 부과하는 높이는 이와 같은 과정을 통해서 경계층 상부임을 확인하여야 한다.

Fig. 9는 주풍향인 북북서풍인 경우에 연직방향 풍속의 분포도를 보여준다. 예상대로 북서쪽 급경사 사면을 타고

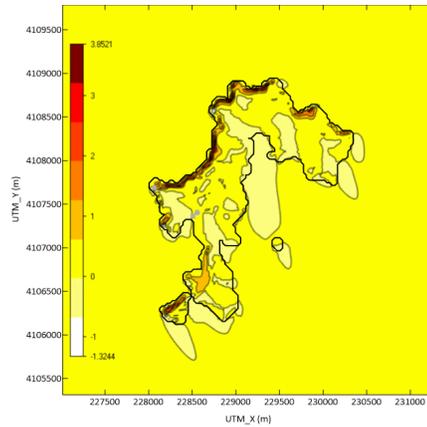


Fig. 9. Vertical wind speed plot downscaled by CFD using NWP data

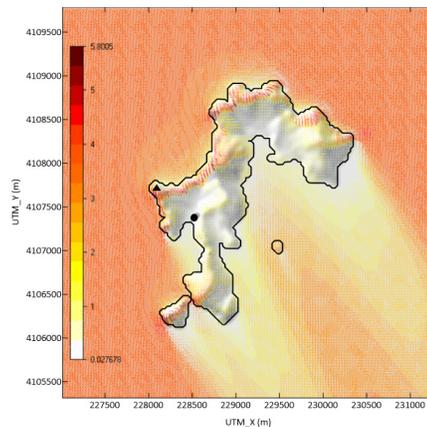


Fig. 10. Wind vector plot downscaled by CFD using NWP data

오르는 강한 상승풍을 확인할 수 있다. Fig. 10은 바람벡터를 도시한 그림으로, 상승풍이 능선에서 박리(separation)가 됨으로써 후면(lee side)에 재순환(recirculation) 영역이 발생하는 것을 잘 보여주고 있다. 이러한 바람장 특성은 지형적 특성으로부터 충분히 유추가 가능하며 NWP-CFD 축소화로도 상세히 재현이 되었다.

### 3.2 축소화 불확도 분석

Fig. 11은 NWP 해석결과의 입력위치에 따른 풍속예측의 불확도를 평가한 결과로, 입력위치를 중심점 대비 격자의 꼭지점으로 707m를 이격했을 때의 풍속차를 비율로 나타낸 것이다. 계산영역 내에서의 최소 및 최대 불확도는 각각 -5.0%, 2.4%이지만 풍력터빈이 설치된 위치(Fig. 9의 검정색 원)에서의 불확도는 0%로 산정되었다. 따라서 축소화를 위한 NWP 해석결과의 입력위치에 따른 불확도는 무시할 수 있는 수준으로 판단된다.

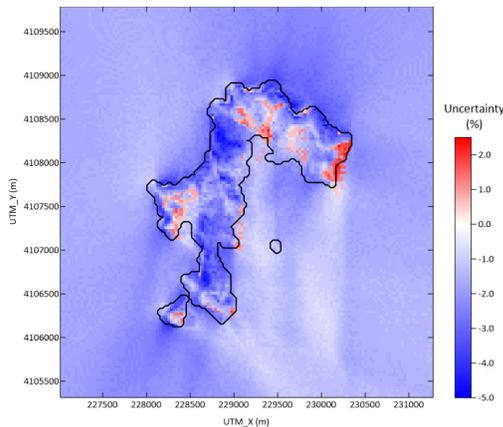


Fig. 11. Wind speed uncertainty by climatology position

### 3.3 풍력발전량 예측

NWP-CFD 축소화로 국소배치 바람지도를 생성한 후 Fig. 7의 풍력터빈 성능곡선을 이용하여 현재의 풍력터빈 설치위치(Fig. 10의 검은색 원) 및 풍력자원이 우수한 새로운 설치위치(Fig. 10의 검은색 삼각형)에서의 연간 발전량을 예측하였다.

Table 1에 정리한 바와 같이 현재의 설치위치인 해안 분지에서 후류손실 등을 고려하지 않았을 때 풍력발전 이용률(capacity factor)은 허브높이 12m와 18m일 때 각각

Table 1. Annual Energy Production (AEP) of the Baekado wind farm

| Location           | Hub height (m) | Wind speed (m/s) | Wind power density (W/m <sup>2</sup> ) | AEP (kWh/y) | Capacity factor (%) |
|--------------------|----------------|------------------|--|-------------|---------------------|
| Seashore (present) | 12             | 2.47             | 46                                     | 3,666       | 4.2                 |
|                    | 18             | 2.56             | 48                                     | 3,785       | 4.3                 |
| Hilltop (new)      | 12             | 5.64             | 357                                    | 20,254      | 23.1                |

4.2%, 4.3%로 거의 유사하다. 그러나 현재 설치위치로부터 550m 북서쪽으로 이격된 풍력자원 우수지역으로 설치위치를 변경할 경우 이용률은 23.1%로 6배 가까이 급상승함을 알 수 있다. 참고로 현재 백아도 풍력발전소의 가동실적에 따르면<sup>[2]</sup> 평균풍속은 2.32m/s, 이용률은 1.1%로 보고되었다. 이는 본 연구에서 예측한 평균풍속 2.47m/s와 매우 유사한 수치이며, 이용률 4.2%가 손실을 고려하지 않은 이론적 최대값임을 고려할 때 유의한 수준으로 예측하였다고 판단된다.

현재의 설치위치에서 이용률이 매우 저조한 원인은 급경사에 의한 유동박리가 분지지형을 덮어버림에 따라 지표면의 풍력자원이 매우 빈약해졌기 때문이며, 이러한 국지 바람장의 특징을 축소화에 의한 국소배치 바람지도로부터 명확하게 확인할 수 있다. Fig. 12는 현재 설치위치에서의 서풍 및 북서풍일 때의 연직방향 풍속분포를 도시한 것으로, 재순환에 의해 풍속분포에 역전이 발생하며 급격히 풍속이 저하됨을 확인할 수 있다.

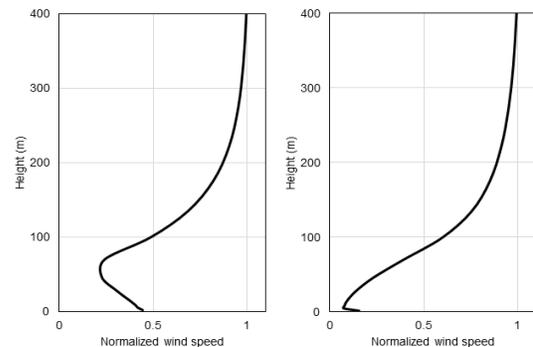


Fig. 12. Normalized wind speed profile at the wind farm location (left: westerly, right: north-westerly wind case)

## 4. 결론 및 제언

한국에너지기술연구원의 풍력자원지도는 공간해상도가 1km급이며 MW급 풍력터빈으로 구성된 풍력단지의 풍력자원평가에 적합하다. 따라서 소형 풍력터빈의 풍력자원평가를 위해서는 지표면 지형지물의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 풍력자원지도를 축소화하여 공간해상도를 수 m 급으로 향상시켜야 한다.

본 연구에서는 소형 풍력터빈의 풍력자원평가를 위한 방법으로 한국에너지기술연구원 풍력자원지도를 이용한 NWP-CFD 축소화를 제안하고, 이를 백아도 풍력발전단지에 적용하여 기술적인 타당성을 입증하였다.

- 1) NWP-CFD 축소화에 있어서 1km급의 NWP 풍력자원지도의 해석결과를 10m급의 CFD 국소배치의 기상자료로 부과하는 위치의 민감도는 크지 않음을 불확도 분석을 통해 확인하였다. 단, NWP 풍속자료를 CFD 공간에 부과하는 높이는 복잡한 국지 바람장이 형성되는 지표면을 벗어난 경계층 상부가 적합하며, 풍향자료는 전향력에 의한 풍향순전을 고려하여 NWP 지표층의 풍향자료를 동일한 CFD 지표층에 부과하여야 한다.
- 2) 백아도는 주풍향인 북북서측에 급경사면에 의해 급격한 상승풍이 형성되며 반대측은 저지대 분지지형이라 풍력자원이 매우 빈약해지는 지형특성을 가진다. NWP-CFD 축소화로 작성된 국소배치 바람지도는 복잡지형인 백아도의 바람장 특성을 명확하게 모사하였다.
- 3) 현재의 풍력발전단지에서의 평균풍속 및 이용률과 본 연구의 예측이 매우 유사하게 평가되었으며 감사원의 지적대로 부적합한 위치임을 확인하였다. 만일 풍력터빈을 국소배치 바람지도를 참조하여 인근의 풍력자원이 우수한 능선부로 이설할 경우 이용률은 20% 이상일 것으로 예측되었다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원에서 주요사업으로 수행한 연구과제의 결과입니다(B9-2414).

우리나라 대기과학 및 풍력자원 분야의 학술발전에 노력해 오신 공동저자, 이화운 교수님의 정년퇴임을 축하드립니다.

## References

- [1] Incheon Technopark, "Energy Independent Island Construction Project for Islands in Incheon", Incheon Metropolitan City, <https://www.itp.or.kr/intro.asp?tmid=384>
- [2] Incheonilbo, "The Baekado wind turbines are not functioning properly", January 1, 2017, <http://www.incheonilbo.com/news/articleView.html?idxno=744935#08hF>
- [3] Kim, H.G., Lee, H.W., and Lee, S.H., 2011, "Development of the Korea wind resource map and suitability assessment system for offshore wind farm", *J. of Wind Energy*, **2**(2), 17-23.
- [4] Duraisamy, V.J., 2014, "Downscaling wind energy resource from mesoscale to local scale by nesting and data assimilation with a CFD Model", Ph.D. Thesis, University of Paris-Est, France.
- [5] Rodrigo, J.S., Arroyo, R.A.C., Moriarty, P., Churchfield, M., Kosovic, B., Rthore, P.E., Hansen, K.S., Hahmann, A., Mirocha, J.D., Rife, D., 2017, "Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation", *WIREs Energy Environment*, **6**, 1-30.
- [6] Kim, H.G., Kang, Y.H., and Kim, C.K., 2017, "Analysis of wind energy status and capacity factor of South Korea by EPSIS wind power generation data", *J. of Wind Energy*, **8**(2), 21-27.
- [7] Kim, H.G., Kim, J.Y., Kang, Y.H., 2018, "Comparative evaluation of the third-generation reanalysis data for wind resource assessment of the southwestern offshore in South Korea", *Atmosphere*, **9**(2), 73.
- [8] Kim, H.G., Jeon, W.H., Kim, S.B., 2013, "Computational flow analysis on wind profile change projected to a wind turbine behind Saemangeum Seawall", *New. Renew. Energy*, **9**(1), 6-11.
- [9] Kim, H.G., Jeon, W.H., Kim, S.B., 2016, "Taguchi Robust Design of a Wind Shear Mitigation Fence to Enhance Wind Turbine Efficiency", *New. Renew. Energy*, **12**(S2), 85-91.
- [10] Kim, H.G., Jeon, W.H., Kim, D.H., 2016, "Wind resource assessment for high-rise BIWT using RS-NWP-CFD", *Remote Sensing*, **8**(12), 2, 1-17.
- [11] Kim, H.G., Patel, V.C., 2000, "Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation", *Boundary Layer Meteorology*, **94**(1), 5-21.