

풍력단지 설계를 위한 풍황자원의 측정방법 연구

한성민* · 김건웅** · 김상만*** · 문채주****

A Study on Measuring Method of Wind Resources for Wind Farm Design

Sung-Min Han* · Geon-Ung Gim** · Sang-Man Kim*** · Chae-Joo Moon****

요약

현재 기상관측에 사용되는 대표적인 장비는 기상탑과 윈드라이다가 사용되고 있다. 국제 규정에 의하면 기상탑은 단독 측정이 가능하나 윈드라이다 경우 40m 기상탑 혹은 풍력발전기 블레이드 최하단의 높이에 맞는 기상탑을 필수로 설치하고 측정데이터를 보정하여야 한다. 난류는 특성상 100m 이하의 고도에서 빈번하게 발생하며 기상탑 보다는 윈드라이다가 난류의 영향을 많이 받는다. 그럼에도 불구하고 기상탑에 대한 난류 강도는 국제 규정에 명시되어 있으나 윈드라이다 대해서는 별도로 명시하지 않고 있다. 본 연구는 동일한 조건에서 기상탑과 윈드라이다에서 측정된 데이터를 수집하고 불확도 및 난류 강도 비율을 분석한다. 데이터를 분석한 결과 난류 강도 비율이 3%를 초과하는 구간이 부분적으로 존재한다. 따라서 윈드라이다에 대한 난류강도 오차율을 국제 규정에 명시할 것을 제안한다.

ABSTRACT

The representative equipments currently used for weather observations are meteorological masters and wind lidars. According to international regulations, meteorological masters can be used for standalone measurements, but in case of wind lidars, it is mandatory to install a meteorological master that matches the height of the bottom of the wind turbine blade or a 40m meteorological masters and correct the measurement data. Turbulence flow occurs frequently at altitudes below 100m due to its nature, and wind lidars are more susceptible to the effects of turbulence than meteorological masters. However, while the turbulence intensity for meteorological masters is specified by international regulations, there is no separated specification for wind lidars. This study collected data measured under the same conditions using both meteorological masters and wind LiDARs, analyzed the uncertainties and turbulence intensity ratio. The analysis of the data showed that there were partial sections where the proportion of turbulent flow intensity exceeded 3%. Therefore, it is suggested to include a specification for the turbulence intensity error rate for wind LiDARs in the international regulations.

키워드

Error Rate, International Regulation, Meteorological Master, Turbulence Flow, Wind LiDAR
오차율, 국제 규격, 기상탑, 난류, 윈드 라이다

* 국립목포대학교 대학원(hans1250@gmail.com)

** 비전플러스(yncms@naver.com)

*** (사)에너지밸리산학융합원(smkim@eiuca.or.kr)

**** 교신저자 : 국립목포대학교 해상풍력산업연구원

· 접수일 : 2023. 03. 22

· 수정완료일 : 2023. 05. 02

· 게재확정일 : 2023. 06. 17

· Received : Mar. 22, 2023, Revised : May. 02, 2023, Accepted : Jun. 17, 2023

· Corresponding Author : Chae-Joo Moon

Offshore Wind Industry Institute, Mokpo National University

Email : cjmoon@mokpo.ac.kr

1. 서 론

탄소중립을 중심으로 전세계 에너지 패러다임이 급격하게 변화하고 있으며, 풍력에너지는 RE100, 파리후변화협약 성과 달성의 가장 중요한 역할을 하게 될 지속가능한 친환경적 에너지로 각광받고 있다. 풍력발전단지는 풍력터빈 허브고도 기준 2/3 높이에서의 최소 1년 이상의 실제 관측자료를 기반으로 한 경제성 분석결과가 포함된 사업타당성 평가에 의해 사업의 성패 여부가 결정된다. 최근 풍력발전은 복잡한 발전설비 설치과정, 높은 투자비용에 따른 리스크, 환경문제 및 주민 수용성 등 각종 사회적 이슈로 인해 태양광 발전에 비해 상대적으로 활성화되지 못한 측면이 있다. 육지에 설치된 풍력발전 설비는 일정 기준 이상의 바람 조건이 확보되어야 하는 지리적인 문제뿐만 아니라 소음, 환경과과 등과 같은 사회적인 문제도 동반하기 때문이다. 풍력발전 단지설계는 발전단지의 입지를 선정하고 풍력터빈 최적 배치에 따른 연간발전량을 산출하여 이를 기반으로 경제성을 평가한다[1-3].

우리나라는 500m×500m의 바람자원 지도가 구축되어 있으며, 발전단지 바람자원 해석 프로그램 상에 가상적으로 풍력터빈을 배치함으로써 후류 효과를 감안한 연간발전량 및 이용률을 산정하게 된다. 이와 같은 일련의 과정은 상용 풍력자원 해석 및 단지설계 프로그램인 WASP, Windfarmer, WindPRO, WindSim 등이 많이 사용되고 있다. 하지만 이와 같은 프로그램들의 경우, 국내 여건을 고려한 풍력단지의 경제성 해석을 위해서는 상용 프로그램을 이용한 연간발전량 예측수행 이후에 기 개발된 In-house 경제성 분석 프로그램을 이용하여 B/C ratio, IRR 등의 경제성 분석이 수행된다[4-5].

풍력발전단지를 조성하기 위한 풍황자원조사는 현재까지는 주로 기상탑을 세우고 설계에 기반한 고도를 결정하고 풍황센서를 부착하여 자원을 측정한다. 설치위치가 산악지역이나 해상인 경우는 높이 100m에 설치된 다수의 계측센서를 운영해야 하지만 해상환경의 영향으로 필요시 관측자료의 품질확보가 쉽지 않다. 특히 풍황 관측에 일반적으로 사용되는 풍속계와 풍향계는 물리적 구동방식으로 해상환경에서는 염해로 인하여 장기간 사용이 어려워 장기 관측

품질 확보가 더욱 어려운 실정이다. 최근 라이다(LiDAR; light detection and ranging) 방식의 원격 관측장비의 발달로 기상탑을 이용한 높이별 직접 관측 방식이 점차 지상에 장비를 설치하여 레이저 광원을 이용한 원격관측으로 대체되는 추세이다. 사업 인증 또는 타당성 평가시 요구하는 풍황관측 IEC-61400-12-1(IEC, 2005) 또는 Measnet(Measnet, 2016)과 같은 국제 기준을 준용해야 하는데, IEC-61400-12-1에서는 기상탑과 컵 풍속계 등에 의한 관측기준으로 제시되어 있으며, Measnet에서는 관측장비를 사용할 경우 검증절차를 거치도록 제시하고 있다[6-8].

국내에서는 해모수 기상탑과 신규 라이다의 관측 결과를 상호 비교하여 각 관측결과의 정확도를 교차 검증하였으며, 고정식 라이다가 아닌 부유식 적용을 위한 라이다 부유체를 개발하는 등 관련 연구가 진행되었다. 국외의 경우 기상탑, 부유식 라이다, 나사의 기상데이터를 비교하여 풍력발전량을 계산한 경우 약 9%의 연간 발전량 차이가 발생함을 제시하거나 복잡지형에 라이다를 적용하여 측정된 풍속자료는 4-16m/s의 경우 비교적 난류강도 변화가 적다는 것을 제시하는 등 다양한 연구가 진행되었지만 국내에서는 아직 라이다 장비에 대한 오차율 검증사례와 실제 사업적용 사례가 부족한 실정이다 [9-11].

지금까지 연구는 기상탑과 윈드라이다를 동일한 조건에서 풍황데이터를 수집하여 비교 및 평가 그리고 교정에 대해서만 다루고 있다. 그러므로 윈드라이다를 보조 기상탑 없이 단독으로 사용하기 위한 방법이나 난류조건에 대한 연구 결과가 부족하며, 기상탑과 윈드라이다에서 측정된 풍속데이터의 오차에 대하여 난류 강도가 끼치는 영향 등 관련 연구가 수행되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 기상탑과 윈드라이다에서 측정된 풍황자료를 기반으로 풍력단지 설계에 반영할 수 있는 오차율을 분석하여 기초자료로서 연구 결과를 제시하고자 한다. 제2장에서는 본 연구에서 적용하는 풍력에너지 이론을 기술하고, 제3장은 시험에 사용되는 풍황측정기기를 선정하며, 4장은 풍황을 측정하고 분석하여 5장에서 결론을 맺었다.

II. 풍력에너지 이론

2.1 운동량 이론

무게 m 을 가진 공기가 속도 v 로 움직일 때 운동 에너지는 식(1)과 같다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \dots (1)$$

공기가 속도 v 로 이동하며, 풍력터빈 블레이드의 단면을 A 로 가정하면 식(2)와 같이 질량 유동속도 $\frac{dm}{dt}$ 은 공기밀도 ρ 와 공기의 이동속도 v 의 함수로 주어진다.

$$\frac{dm}{dt} = \rho v A \quad \dots (2)$$

따라서, 유동의 단위 시간당 운동에너지, 즉 출력은 식(3)으로 주어지고, 단위 시간당 단면 A 를 지나는 에너지양으로 표시되는 에너지는 출력 P 는 식(4)와 같다.

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad \dots (3)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \dots (4)$$

순간풍속을 $v(t)$ 라고 하고 평균 풍속을 v_a , 일정한 시간 T 상태에서 평균 풍속의 변동값을 $v'(t)$ 라고 하면 순간풍속은 식(5)로 표시되고, 평균 풍속 v_a 는 식(6)과 같이 나타난다.

$$v(t) = v_a + v'(t) \quad \dots (5)$$

$$v_a = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad \dots (6)$$

2.2 난류강도

난류의 생성요인에는 기계적 난류와 열적 난류가 있다. 기계적 난류는 수평 연직의 윈드시어(shear)로

발생되고, 기압경도의 차이 지형적 장애물, 또는 전선면 시어에 의해 발생된다. 지면이 거칠거나 장애물이 많을수록 마찰저항이 크므로 풍속 차이가 크게 나타난다. 상하층 윈드시어로 인하여 평균 류가 난류 운동에너지로 전환되어 난류가 생길 수 있는 항이다. 이는 수평 방향으로 평균장이 균일 혹은 침강이 약하다고 가정해야 하며 연직 윈드시어 강도에 비례한다. 난류강도는 평균풍속에 대한 변동풍속의 표준편차와의 비율로 정의 무차원값을 나타낸다.

2.3 레이놀즈 수

레이놀즈 수는 동적 상사성을 판별할 수 있는 여러 무차원수 중 하나이고 표 1과 같이 어떤 유체 흐름이 층류인지 난류인지를 판별하는 데 사용된다.

표 1. 레이놀즈 수의 크기에 따른 대기의 상태
Table 1. The state of the atmosphere according to the size of the Reynolds number

Reynolds number	Conditions
Reynolds number < 2000	Laminar flow
2000 ≤ Reynolds number < 4000	Transitional conditions resulting in laminar or turbulent flow (limit Reynolds number)
Reynolds number ≥ 4000	Turbulence flow

2.4 리차드슨 수

리차드슨 수(R_i)는 대류의 난류를 기계적인 난류로 전환하는 비율을 측정하는 값이다. 대기의 동적 안정도를 나타내고 지구 경계층에서 기류 안정도를 나타내는 척도로 이용하고 R_i 가 큰 음의 값을 가지면 대류가 지배적이며 바람이 약하게 되어 강한 수직 운동이 발생한다.

2.5 난류강도 기준

국제규격인 IEC 61400-12-1 Ed. 2에 의하면 난류강도는 풍력터빈 전력 곡선 측정에 영향을 준다. 전력 곡선 데이터를 구할 시에 기준 난류 강도로 정규화하여 측정 시 제거하는 것이 좋으며 달리 정규화하지 않는 경우 10%의 기준 난류 강도를 적용한다. 난류 강도 측정간 원격 감지 장치로 측정된 난류는 음과 또는 컵 풍속계로 측정된 난류와 크게 다르고 이에 따른 추가 불확실성이 생긴다. 이때 컵

형 풍속계 위치에서 풍속의 축 방향 난류 강도는 2% 미만이어야 한다[12].

III. 풍향측정 기기

3.1 기상탑

풍력단지 개발을 위한 기상탑은 형상에 따라 튜블라형, 래티스 고정형, 래티스 자립형 등 3종류로 구분하며, 터빈 인증사이트인 경우 래티스 자립형을 사용한다. 설치비용으로 구분하면 튜블라형이 가장 저렴하며 래티스 고정형, 래티스 자립형 순서로 가격이 높다.

튜블라형은 가장 저렴하고 시공 시 안전에 대한 위험이 적은 반면 센서의 고장 발생 시 수리가 어렵고 풍향계의 정북 방향의 설정이 힘들다는 단점이 있으며, 가장 넓은 공간을 필요 하며 기상탑 중심에서부터 각 지지점까지 장애물이 존재시 시공이 불가능하다.

래티스 고정형은 기초 부분과 지지점 방향별로 180도 간격의 직선 부분만 장애물이 없으면 시공이 가능하고 산악지역의 경우 넓은 공간이 없는 경우가 대부분이므로 상대적으로 좁은 지역에 기상탑을 설치하기에 편리한 래티스 고정형이 유리하다.

래티스 자립형은 기상탑 지지를 위한 와이어를 사용하지 않고 기상탑 자체의 하중과 지지력으로 기상탑이 지지되는 구조물의 특성을 가지고 있다. 와이어가 없어 설치 면적을 가장 적게 사용하나 기상탑을 구성하는 파이프 직경이 증가하며 기상탑을 설치하는 경우 대형 크레인이 이용해야 한다는 단점이 있다. 이때 제어 풍속계가 필요한 경우 주 풍속계에 근접하여 설치하여 성능 평가 기간 중 상호 간 양호한 상관관계가 구축되어야 하며 이는 측정 기간 중 주 풍속계의 보정 특성이 유지됨을 입증하는 자료로 활용될 수 있다. 그러나 제어 풍속계는 주 풍속계에 간섭 영향을 미치지 않도록 해야 한다. 본 연구에서 사용한 기상탑은 영광 풍력시스템 평가센터에 설치된 와이어를 사용한 래티스 자립형을 이용하였다.

3.2 풍향센서

기상탑에는 IEC 61400-12-1 Ed. 2 규정에 맞게

센서가 설치되어 운영되어야 한다. 기상탑에 장착되는 측정 기기류의 적절한 설치 위치 선정에 대하여 IEC 61400-12-1 Ed. 2에 명시되어 있다. 컵형 풍속계는 허브 높이의 $\pm 2.5\%$ 이내로 지상에 설치된 기상탑에 설치되어야 하고 이때 설치 위치는 기상탑의 최상단이며 주변에 다른 기기가 설치되지 않아야 한다. 사용된 풍속계의 규격은 표 2와 같이 3점 풍속계 9개를 사용하였다. 풍속계는 보정에 사용된 것과 동일한 외경을 갖는 수직 튜브에 장착되어야 하며 연결되는 케이블류는 튜브 내부를 통해서 외부 장치와 연결하여야 한다. 튜브의 수직 방향 허용 설치 오차는 $\pm 2^\circ$ 이며 경사계를 이용하여 그 설치 각도를 측정하는 것이 좋다. 튜브의 직경은 풍속계 본체의 직경보다 작거나 같아야 하며 풍속계 컵이 기상탑으로부터 최소 0.75m 떨어진 위치에 고정될 수 있어야 한다. 풍속계 이외의 다른 측정 기기는 풍속계 컵보다 최소 1.5m 아래에 설치되어야 하며 이들 측정 기기의 보조 지지대는 1:5 원추형 범위를 벗어날 수 있다.

표 2. 풍속계의 규격
Table 2. Specification of anemometer

Items	Basic standards
Heating method	Self-heating
Measurement range	0.3~75m/s
Resolution	0.05m/s
Measurement uncertainty	0.3~50m/s, 1% of meas. Value or <0.2m/s
Class B classification under wind speed conditions	Less than 3.0
Class A classification under wind speed conditions	Less than 2.4

풍향계는 측정과 관련하여 보정, 작동 및 설치 각도와 관련된 복합 불확도가 5° 이내의 것을 사용하여야 한다. 복잡한 지형에서는 정확도 1° 이내의 풍향계 사용을 권장하고 풍향계는 풍속계 아래쪽의 풍속계와 같은 방향으로 설치하여 상호 간의 간섭을 최소화한다. 풍향계는 주 풍속계의 최소 1.5m 아래, 허브 높이의 10% 범위 내에 위치하여야 하며, 측정 방위 각에 미치는 유동 왜곡의 영향이 최소화 되도록 설치 한다. 관측에 사용된 풍향계의 규격은 표 3과 같이 표시되며 총 5개를 사용하였다.

표. 3 풍향계의 규격
Table 3. Specification of windvane

Items	Basic standards
Measurement range	0°~360° without north gap
Heating method	Self-heating
Measurement accuracy	0.25%(1°)
Survival wind speed	85m/s to 0.5h
Measurement resistance range	High quality potentiometer 0~2kΩ
Protection	EMV EN61000-6-2:2001 EN 55022:2001 Class B
Starting threshold	<0.5m/s at 10 deg. amplitude

3.3 데이터 로거

데이터 로거는 풍황센서 및 다수의 전자장치 신호를 환산하여 데이터로 기록하며 저장하는 장치이며 대표적인 기능으로는 1초 단위로 실시간 데이터 취득 및 10분 평균 데이터를 연속적으로 기록해야 하며 메모리 용량은 최소 1년분 이상의 데이터 저장용량을 갖추어야 한다. 또한 내부식성, 방수기능이 있어야 하며 독립전원으로 활용할 수 있도록 저전력이며 모뎀을 통한 실시간 모니터링 및 제어를 할 수 있어야 한다. 또한 IEC 61400-12 Ed. 2 규정을 고려하여 데이터 로거는 Meteo40을 사용하였으며 규격은 표 4와 같다.

표 4. 데이터로거 Meteo40의 규격
Table 4. Specification of data logger Meteo40

Items	Basic standards
Anemometer/Frequency	12 channels, 16 bit counter
Windvane/Resistance	Channel 8
Normal voltage input	12 channels, 12 bit AD converter
Digital contact / Status	Channel 8
Internal memory	2GB
Scan Interval	1...9999
Data output	GSM-TC35, MODBUS, RS485 for SCADA input
Statistics	Real-time maximum, minimum, mean, standard deviation calculation.
Wind direction Calculation	Auto
Online communication	Remote monitoring and data collection
Data Logger Enclosure	IP65 Waterproof

3.4 윈드라이다

라이다는 레이저 펄스를 발사하고, 그 빛이 주위의 대상 물체에서 반사되어 돌아오는 것을 받아 물체까지의 거리 등을 측정함으로써 주변의 모습을 정밀하게 그려내는 장치이다. 라이다는 대상 물체까지의 거리뿐만 아니라 움직이는 속도와 방향, 온도, 주변의 대기 물질 분석 및 농도 측정 등에 쓰인다. 자외선, 가시광선, 근적외선 등을 사용하여 금속성이 아닌 바위나 구름, 빗방울, 에어로졸 등을 감지할 수 있어서 기상 관측에 이용되고, 지형을 정밀하게 그려내거나, 비행체의 착륙 유도나 자율 주행차의 주변 인식 장치로 사용되며, 또한 분자마다 산란시키는 빛의 파장이 다른 현상을 이용하여 공기 중에 섞여 있는 기체의 화학적 조성을 알아내는 데 쓰이기도 한다.

본 논문에서는 프랑스 Leosphere사의 Windcube Lidar를 사용하여 실험을 진행하였으며, 규격은 표 5와 같다.

표 5. Windcube의 규격
Table 5. Specification of Windcube

Items	Basic standards
Measurement range	40 to 200m
Accumulation time	0.5 s
Data output frequency	1 Hz 1s/1, 2, 5, 10min averaged (user-defined)
Probed length	20m
Scanning cone angle	~30°
Speed accuracy	0.2m/s
Speed range	Up to 60m/s
Direction accuracy	2°
Date availability	95% up to 150m
Laser wavelength	1,54μm
Pulse energy	10 μJ
Eye safety	IEC 60825-1
Temperature range	-10 to +40°C with temperature control unit
Operation humidity	IP 65
Rain protection	Wiper(With water pump), rain detector
Weight	55 Kg
Dimensions	900 × 550 × 550mm with temperature control unit
Electric power supply	24DC
Power consumption	120W/300W with temperature control unit

IV. 시험 및 분석

4.1 풍황측정 방법

기상탑과 윈드라이다의 풍황조건 비교시험을 위하여 전라남도 영광 백수에 위치한 테스트 베드에 서 표 6과 같은 조건에서 풍황을 측정하고 그 자료를 수집하였다.

표. 6 풍황자원 시험조건
Table 6. Test conditions of wind resources

Site	Youngkwang wind power testbed
Test Period	2022. 2. 18 ~ 2022. 5. 17
Test method	Data Acquisition of wind tower and windcube
Test requirements	IEC 61400-12-1 Ed. 2
Test height	45m, 75m, 119m

4.2 측정데이터

기상탑과 윈드라이다에서 측정한 3개월 풍속데이터를 비교한 결과 그림 1은 45m 높이의 풍속이고, 그림 2는 75m, 그림 3은 119m에서 측정한 풍속을 각각 나타낸 것이다. 계절의 변화에 따라서 밤 시간 때가 아닌 낮 시간 때 풍속이 증가하는 형태를 보이고 있으며 최대 풍속은 기상탑 기준 119m에서 5.77m/s가 발생하며 최대 오차는 75m에서 3.58%를 나타낸다.

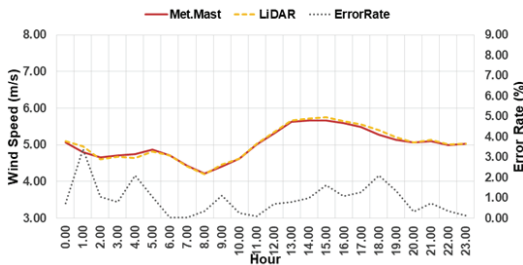


그림 1. 기상탑 45m 높이에서 측정한 풍속
Fig. 1 Wind speed of meteorological master at 45m

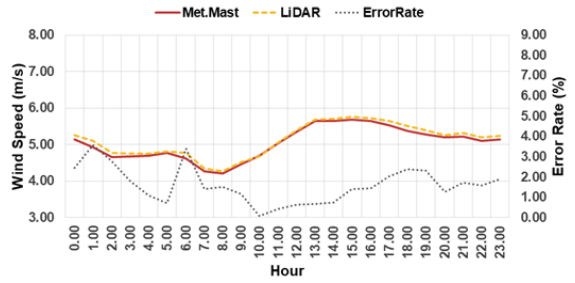


그림 2. 기상탑 75m 높이에서 측정한 풍속
Fig. 2 Wind speed of meteorological master at 75m

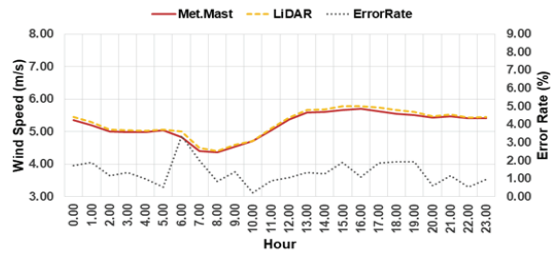


그림 3. 기상탑 119m 높이에서 측정한 풍속
Fig. 3 Wind speed of meteorological master at 119m

4.3 난류강도 분석

난류 강도 오차율은 평균 풍속에 표준 풍속 편차를 나누어 계산하였다. 그래프에서 볼 수 있듯 일출 시간인 6시경부터 라이다의 난류 강도가 높아지기 시작하였고 정오부터 오차율이 가장 높게 발생하고 나서 점진적으로 감소하는 형태를 보이고 있다. 또한 기상탑 보다 윈드라이다가 난류 강도에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 풍속에 따른 난류 강도 변화는 45m, 75m, 119m 높이 풍속을 기준으로 그림 4, 5, 6에 각각 표시하였다.

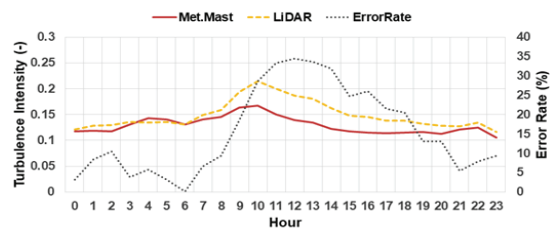


그림 4. 기상탑 45m 높이의 난류강도
Fig. 4 Turbulence intensity of meteorological master at 45m

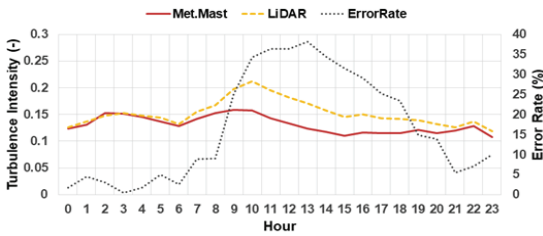


그림 5. 기상탑 75m 높이의 난류강도

Fig. 5 Turbulence intensity of meteorological master at 75m

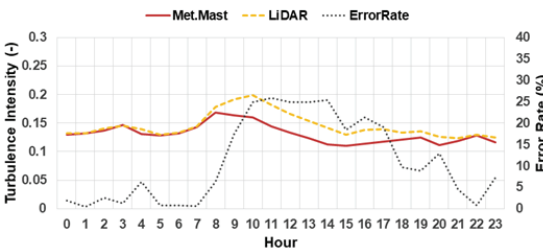


그림 6. 기상탑 119m 높이의 난류강도

Fig. 6 Turbulence intensity of meteorological master at 119m

4.4 기상탑과 윈드라이다 상관관계

기상탑과 윈드라이다의 상관관계를 그림 7, 8, 9에 각각 나타냈다. 상관관계 R^2 의 값이 45m에서는 0.4741, 75m에서는 0.4105, 119m에서는 0.5368로 계산되었다. 전체적인 상관관계 및 산점도가 겹치는 부분으로 인해 뚜렷하게 드러나지 않아 그림의 오른쪽 상단에 산점도를 추가하였다.

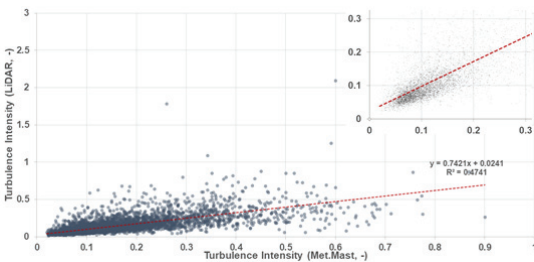


그림 7. 45m 높이의 기상탑과 윈드라이다의 상관관계
Fig. 7 Correlation between met. master and windlidar at 45m high

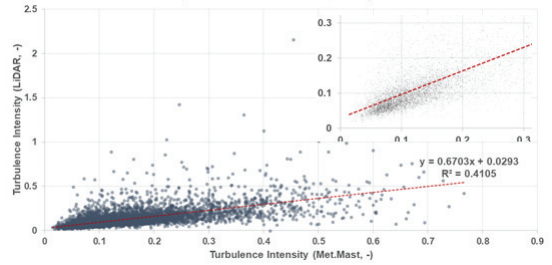


그림 8. 75m 높이의 기상탑과 윈드라이다의 상관관계
Fig. 8 Correlation between met. master and windlidar at 75m high

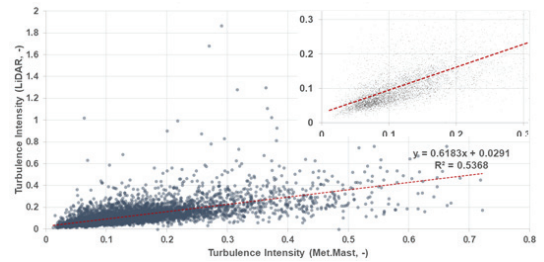


그림 9. 119m 높이의 기상탑과 윈드라이다의 상관관계

Fig. 9 Correlation between met. master and windlidar at 119m high

4.5 기상탑과 윈드라이다 풍속별 난류 빈 비율

기상탑과 윈드라이다의 풍속별 난류 빈 분포 (TI:Turbulence Intensity)는 기상탑을 기준으로 그림 10, 11, 12에 각각 나타냈다. 기상탑 45m와 75m의 풍속 1m/s 지점에서 기상탑과 윈드라이다의 난류 빈 비율이 1.7~2.3로 차이가 높게 발생하는 것을 확인하였으며 그 구간을 제외하고는 0.8~1의 분포를 보여주고 있다.

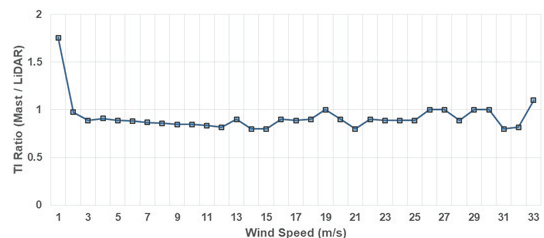


그림 10. 45m 높이의 기상탑과 윈드라이다의 빈 비율
Fig. 10 Binned ratio of TI data between met. master and windlidar at 45m high

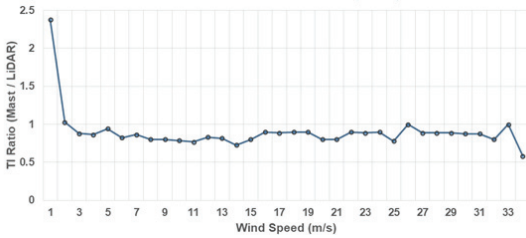


그림 11. 75m 높이의 기상탑과 윈드라이다의 빈 비율
Fig. 11 Binned ratio of TI data between met. master and windlidar at 75m high

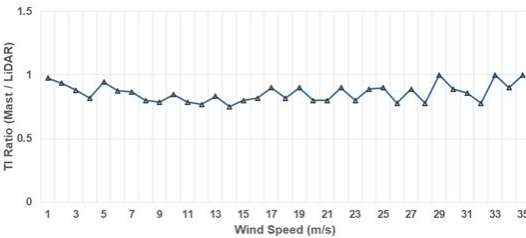


그림 12. 119m 높이의 기상탑과 윈드라이다의 빈 비율
Fig. 12 Binned ratio of TI data between met. master and windlidar at 119m high

4.6 난류강도에 대한 고찰

기상탑을 기준으로 윈드라이다의 측정 오차를 측정하였으며 측정 결과를 보면 45m에서 최대 오차 3.4%로 나타나며 75m에서 최대 오차 3.58%이고 119m에서 최대 오차 3.37%가 발생하였다. 윈드라이다의 오차에 영향을 주는 요인으로 난류 강도, 유동 경사, 윈드 시어 등이 있으며 이 중에서 영향을 많이 주는 난류 강도에 대해서도 높이별 데이터를 비교하였다. 여기서 기상탑과 라이다의 상관관계에 대해서 확인하기 위해서 R^2 의 값이 1에 가까울수록 상관관계가 큰 것으로 간주한다. R^2 의 값이 45m에서는 0.4741, 75m에서는 0.4105, 119m에서는 0.5368이며, 최대 오차가 119m, 45m, 75m의 순서로 낮게 나타나므로 상관관계의 크기는 반대로 높아지는 것을 알 수 있다.

기상탑과 윈드라이다의 전체 풍속데이터를 비교한 결과 IEC 61400-12-1 Ed. 2의 규정이 제시하는 3%의 오차율을 넘기는 데이터가 존재하였으나, 빈도수가 높은 구간을 확인한 결과 전체 데이터의 6%만 해당하였고 나머지 94%의 데이터는 3% 미만의 오차율을 가지고 있는 것으로 확인하였다.

V. 결론

본 연구는 최근 우리나라에서 관심이 집중되고 있는 해상풍력발전과 단지를 조성하기 위하여 풍황자원을 조사하는 기초연구이다. 기상탑과 윈드라이다의 45m, 75m, 119m 높이에서 풍속을 측정하고 이를 분석하였다.

기상탑을 기준으로 윈드라이다의 풍속데이터를 비교한 결과 최대 오차 범위는 75m 높이에서 발생하였다. 상관관계 밀접도를 확인할 수 있는 R^2 의 값이 45m에서는 0.4741, 75m에서는 0.4105, 119m에서는 0.5368로 난류 강도의 상관관계가 각각 계산되었다.

이를 통해 119m에서 상관관계 밀접도가 가장 강하고 45m, 75m 순으로 상관관계의 강도가 높게 나타났다. 이는 최대 오차율의 순서와 동일하게 난류 강도의 상관관계가 일치하였고 이를 통하여 난류 강도가 기상탑과 라이다의 풍속 측정에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

측정된 풍속데이터는 IEC 61400-12-1 Ed. 2의 규정이 제시하는 3% 오차율 범위를 유지하여야 한다. 시험자료를 보면 일부 데이터는 이를 만족하나, 빈도수가 높은 구간을 확인한 결과 전체 데이터의 6%는 오차율을 만족하지 못하였다. 나머지 94%의 데이터는 3% 미만의 오차율을 가지고 있는 것으로 확인하였다.

따라서, 기상탑을 기준으로 규정에 맞는 윈드라이다 풍속측정데이터가 전체 데이터의 94% 이상을 나타내므로 윈드라이다만을 활용한 풍황 측정이 가능할 것으로 보인다. 이러한 기초분석 연구결과를 국내 해상풍력발전단지 최적지 입지분석에 적용한다면 현장에 더 유용한 연구결과로 활용할 수 있다.

현재 풍력발전시스템에 관한 규정인 IEC 61400-12-1 Ed. 2에는 기상탑 풍속 데이터의 난류 강도에 대한 기술은 있으나 윈드라이다 풍속데이터에 대해서는 언급이 없다. 최근 빈번하게 사용하고 있는 윈드라이다의 경우 오차에 영향을 미치고 있는 난류 강도가 큰 풍황조건에서의 오차 보정에 관한 연구가 필요하며, 본 연구의 결과가 매우 유용할 것으로 판단된다.

향후 장기적인 측정에 의한 풍속변동 분석 및 지역별 난류강도 분포도를 확인하는 연구가 요구된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-002)

References

[1] S. Kim, G. Ryu, Y. Kim, S. Kim, and C. Moon, "Sensitivity analysis of wake diffusion patterns in mountainous wind farms according to wake model characteristics on computational fluid dynamics," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 2, 2022, pp. 265-278.

[2] S. Kim, G. Ryu, Y. Kim, S. Kim, and C. Moon, "Selecting the geographical optimal safety site for offshore wind farms to reduce the risk of coastal disasters in the southwest coast of south Korea," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 5, 2022, pp. 1003-1012.

[3] S. Kim, G. Ryu, Y. Kim, H. Son, and C. Moon, "A study on the optimal site selection by constraint mapping and park optimization for offshore wind farm in the southwest coastal area," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 6, 2022, pp. 1145-1156.

[4] Y. Song, C. Kim, I. Paek, and H. Kim, "Evaluation of implementation potential of offshore wind farm capacity in Korea using national wind map and commercial wind farm design tool," *J. of the Korean Solar Energy Society*, vol. 36, no. 5, 2016, pp. 21-29.

[5] M. Kim, T. Song, and I. Paek, "Development of an in-house code to predict annual energy production and economic analysis of wind farms using CFD results," *J. of Wind Energy*, vol. 11, no. 3, 2020, pp. 23-30.

[6] J. Kim and M. Kim, "A comparison of offshore met-mast and LiDAR wind measurements at various heights," *J. of Korean Society of Coastal and*

Ocean Engineers, vol. 29, no. 1, 2017, pp. 12-19.

[7] U. Bunse and H. Mellinshoff, "Assessment of wind profile effects for a set of site calibration measurements following IEC 61400-12-1," *DEWI-Magazin*, J. Issue 32, 2008, pp. 27-31.

[8] P. Sharma, V. Warudkar, and S. Ahmed, "Application of lidar and measure correlate predict method in offshore wind resource assessments," *J. of Cleaner Production*, vol. 215, 2019, pp. 534-543.

[9] J. Lee, S. Kang, G. Lee, H. Kim, S. Kim, Y. Ahn, and N. Kyong, "Validation of floating LiDAR system for development of offshore wind farms," *New & Renewable Energy*, vol. 16, no. 3, 2020, pp. 485-492.

[10] T. Kogaki, K. Sakurai, S. Shimada, Y. Otake, K. Kondo, and E. Fujita, "Field measurements of wind characteristics using LiDAR on a wind farm with downwind turbines installed in a complex terrain region," *Energies*, vol. 13, article 5135, 2020, pp. 1-24.

[11] C. Yue, Y. Chiu, C. Tu, and T. Lin, "Evaluation of an offshore wind farm by using data from the weather station, floating LiDAR, Mast, and MERRA," *Energies*, vol. 13, article 183, 2020, pp. 1-20.

[12] B. Hwang, *Understanding Modern Wind Turbine*. Seoul: Ajin, 2010.

저자 소개

한성민(Seong-Min Han)



2000년 조선대학교 공학사
 2016년 뉴욕주립대 Stonybrook
 기술경영석사
 2022년~현재 목포대학교 대학원
 신재생에너지협동과정
 2021년~현재 한국전력 해상풍력
 사업단 기술실장

※ 관심분야: 풍력발전시스템, 풍력단지 건설 및 O&M, HVDC, 전력계통보호시스템, 경제성평가



김건웅(Geon-Ung Gim)

2020년 목포대학교 공학사,
2022년 목포대학교 대학원 공학
석사
2022년 ~ 현재 비전플러스(주)
사원

※ 관심분야 : 초대형 풍력발전시스템, 해상 풍력
발전, 계측기(라이다)



김상만(Sang-Man Kim)

2011년, 2014년 및 2022년 목포대
학교 공학사, 공학석사, 공학박사
2013년~2021년 (주)해바람에너지
2021년~2022 목포대학교 스마트
리드 연구소 전임연구원
2023년~현재 에너지밸리산학융합
원 전임연구원

※ 관심분야 : 마이크로그리드, 태양광발전시스템,
소형풍력발전시스템, 계측기(라이다), 해양구조물



문채주(Chae-Joo Moon)

1981년, 1983년 및 1994년 전남대
학교 공학사, 공학석사, 공학박사
1997년~현재 목포대학교 공과대학
진기및제어공학과 교수
2017년~현재 (사)에너지밸리산학
융합원장

한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼
니스트, 전력전자학회 부회장, 이투뉴스 및 한국전기
신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원장
역임

※ 관심분야: 풍력발전 및 전력변환시스템, 전력시
스템, 에너지정책