

서해 해상 환경에서 선박형 부유식 라이다의 Carbon Trust OWA Stage 2 국내 인증 사례에 대한 고찰

강용수* · 장동찬* · 양수인* · 이백범**

A study on a Carbon Trust OWA Stage 2 Domestic Verification Case
in the Yellow Sea

Yong-Soo Gang*, Dong-Chan Chang*, Su-In Yang* and Baek-Bum Lee**

Key Words : Floating LiDAR System (부유식 라이다 시스템), Wind Resource measurement (풍황계측), Validation Campaign (비교검증), OWA Stage 2 (준 상업적 단계)

ABSTRACT

Floating LiDAR systems provide significant savings in cost and time compared to the fixed meteorological mast measurement type, and have the advantage of being able to be deployed in various locations due to less restriction on the depth of the installation site. However, to use the wind data collected by a floating LiDAR system commercially, verification procedure is required to ensure that the collected data have sufficient availability. The Carbon Trust OWA roadmap presents guidelines in three stages for the reliability of the wind data collected using a floating LiDAR system. Companies developing wind farms are requesting at least Stage 2 (pre-commercial stage) presented by OWA, and many overseas companies are leading the domestic and overseas markets. In this paper, we introduce the case of OWA Stage 2 certification for the commercial operation of floating LiDAR systems.

1. 서론

해상풍력발전기의 대형화에 따른 발전 용량의 증가와 함께 발전사업에 대한 경제성이 증가하면서 해상풍력발전단지 조성이 지속적으로 증가하고 있다. 발전단지의 수익성 평가를 위해서는 AEP(Annual Energy Production)의 산출이 중요하며 설치 지역에서 직접 계측된 풍황에 대한 자료는 AEP 산출에 중요한 기초

자료로 활용되고 있다.

풍황 자원은 필수적으로 풍력터빈의 허브 높이에 상응하는 높이까지 계측이 되어야 하며 최근에는 풍력터빈이 대형화됨에 따라 180 m 높이까지 계측이 요구되고 있다. 이에 따라 기존의 기상탑을 이용한 풍황 계측 방식은 경제적, 시간적 및 공간적 제약이 발생하였고 이것을 해결하기 위한 방안으로 라이다(LiDAR, Light Detection And Ranging) 기술이 적용되기 시작하였다.

풍력 발전단지가 점차 육상에서 해상으로 이동됨에 따라 고정식 해상 플랫폼 상부에 기상탑 및 라이다를 이용한 계측이 이루어졌으나 고정식 해상 플랫폼의 설치 환경 및 시간과 비용에 대한 제약으로 부유식 플랫폼을 이용한 부유식 라이다 시스템(FLS, Floating LiDAR System)이 개발되었다. 부유식 라이다 시스템

* ㈜ 씨텍

** ㈜ 씨텍(교신저자)

E-mail : bblee@sea-tech.kr

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2024.15.1.006>

Received : November 29, 2023, Revised : March 26, 2024

Accepted : March 26, 2024

은 부이와 같은 부유식 플랫폼에 라이다 시스템을 탑재하여 해상에서 풍황을 계측하므로 라이다 시스템의 설치 및 회수가 고정식 구조물보다 용이하고 설치에 대한 시간적, 공간적 제약이 적기 때문에 비용 절감 측면에도 이점을 가지고 있다.

하지만 부유식 라이다 시스템은 계류라인을 통해 해상에 부유하고 있으므로 태풍과 같은 극한 환경조건에서도 견딜 수 있도록 설계되어야 하며 해상에서 발생하는 6 자유도 운동에도 충분히 신뢰성 있는 풍황 자료를 수집해야 하는 등 육상 또는 고정식 구조물에서 운용되는 조건보다 더욱 많은 부분이 고려되어야 하므로 상업적 이용을 위해서는 계측 자료에 대한 신뢰성이 검증되어야 한다.

유럽에서는 2013년도부터 OWA(Offshore Wind Accelerator)의 로드맵에 따라서 부유식 라이다 시스템에 관한 연구를 시작하였으며 라이다 시스템에 대한 상업적인 사용을 위해 3개의 단계(stage) 개발 성숙도로 구분하여 제시하고 있다. [1]

본 논문에서는 국내의 부유식 라이다 시스템 상용화를 위해 OWA에서 제시하고 있는 권고 기준을 바탕으로 군산 해역에 2단계(stage 2) 인증을 위한 부유식 라이다 시스템과 고정식 라이다 시스템을 설치하여 6개월 동안 비교 계측을 시행하였다. 계측된 데이터는 3차 검증 기관(UL)을 통해서 평가를 시행하였으며 이러한 평가 진행 과정에 대한 고찰을 통해서 국내 부유식 라이다 시스템의 상업적 활용을 위한 중요 기준을 확인하고 아울러 3단계(stage 3) 인증을 받기 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

2. OWA 권고 기준 및 부유식 라이다 실증

OWA에서는 부유식 라이다 시스템을 상업적으로 적용하기 위한 개발 성숙도를 3단계로 분류하였고 각 단계에 대한 가이드라인은 총 8개 장으로 구성되어 있으며 120개의 권고 사항과 40개의 노트를 통해서 제시하고 있다. 2, 3장은 부유식 라이다 시스템의 구성에 대한 기술적 요건이 기술되어 있으며, 4장부터는 프로젝트 타임라인에 따라 부유식 라이다 시스템의 설치 장소, 실증, 풍황 분석에 대한 가이드라인을 제시하였다. [2] 아래의 Fig. 1은 타임라인 별로 부유식 라이다의 풍황 분석 절차를 어떻게 OWA에서 각 장별로 구성하고 있는지 나타내는 그림이다.

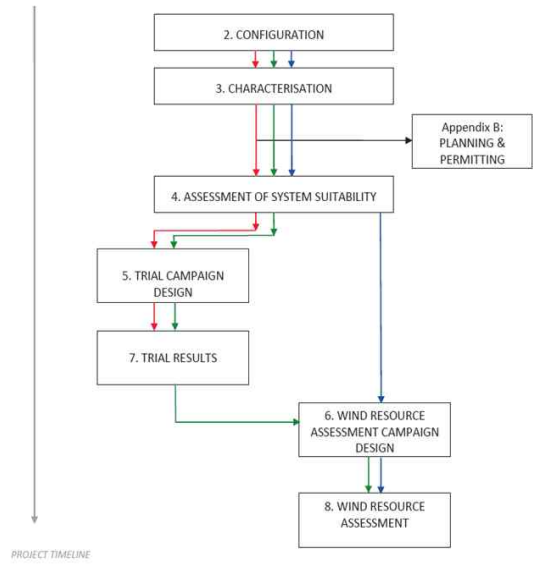


Fig. 1 Layout for Guideline for Floating LiDAR System

2.1 구조적 시스템 적합성

시스템 적합성은 부유식 라이다 시스템이 풍황 계측에 적합한지를 평가하는 단계로 부유식 라이다 시스템의 구성 및 특성에 대한 평가와 함께 극한 환경조건에서 시스템의 운용을 위한 부유체의 구조적 평가와 위치 유지를 위한 계류 시스템에 대한 설계적 기준이 서술되어 있다.

우리나라 해역은 연간 4~5회 태풍의 직접적인 영향을 받으며 여름철에는 고온 다습하고, 겨울철에는 저온 건조하는 등 환경적 변화량이 매우 크다고 볼 수 있다. 또한 서해와 남해는 얇은 수심으로 하루 2차례 조석에 의한 강한 조류가 발생하고 동해는 깊은 수심에 외해에 의한 높은 파도가 발생하는 등 다양한 환경적 요소를 모두 포함하고 있다. 이러한 환경적 요소로 인하여 본 논문의 부유식 라이다 시스템은 다양한 환경에서 운용이 가능한 6 m 노마드(Nomad) 타입의 선박형 라이다 시스템을 사용하였다. 라이다 시스템의 사양은 아래 Table 1과 같다.

부유체는 Fig. 2와 같이 크게 마스트(Mast), 선체(Hull), 요크(Yoke) 세 부분으로 구성되어 있다. 풍황 계측을 위한 라이다는 선체의 상부에 위치해있으며 파랑에 의한 선박의 동요에 따른 라이다 관측의 영향을 최소화하기 위해 무게중심 상부에 배치하였다.

프로젝트의 요구 조건에 따라 1년 또는 10년이나 25

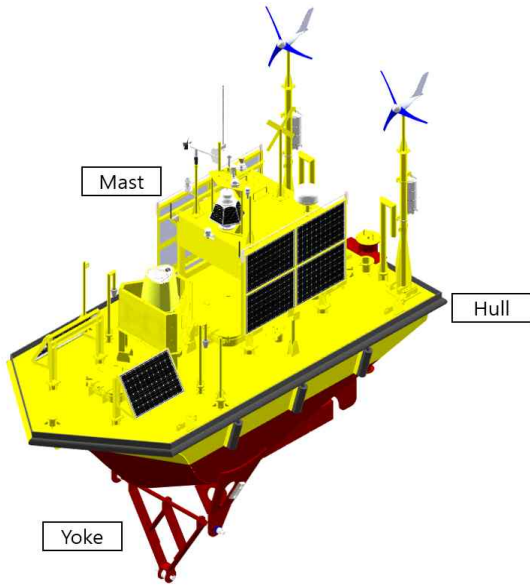


Fig. 2 6m nomad LiDAR System

Table 1 LiDAR system specification

LiDAR system specification	
Material	Aluminum
Length	6.4 m
Width	3.1 m
Height	7.7 m
Weight	Abt. 5.6 tonf
Buoyancy	Abt. 10 tonf

년 주기의 극한 환경조건을 구조 설계 및 계류 설계 시에 요구하기도 하며 ABS [3] 및 DNV [4]에서는 50년 또는 100년 주기의 환경조건을 적용하는 것이 요구되고 있으며 운용된 부유식 라이다 시스템의 구조 설계는 Table 2와 같이 50년 주기에 해당하는 환경조건을 반영하였다.

구조적 적합성을 판단하기 위해 구조해석은 MIDAS를 이용하여 전체 부이 구조의 강도에 대한 무결성을 중심으로 평가를 진행하였다. 파랑에 의한 하중을 산정하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 파랑의 영향을 받는 부력체의 면적이 파장에 비해 매우 작고($\lambda > 5D$) 상대적으로 얇은 부재로 간주하므로 가느다란 고정식 구조물에 적용하는 Morison's equation을 통해 도출하였다.[5]

Table 2 Design environmental Condition

Design environmental conditions	
Wind	75 m/s above
Current	4 knot above
Wave	20 m wave height above

2.2 계류 시스템 적합성

국내에서는 해상에 설치되는 모든 구조물에 대해 해양수산부의 허가를 받아야 하며 해양수산부에서는 해상항로표지에 대해 항로표지업무편람 [6]의 기준을 만족하도록 규정하고 있다. 또한, 풍력 발전단지를 조성하고자 하는 개발사는 동적 해석을 통해 부유식 라이다 시스템의 안정성 및 계류 시스템에 대한 적합성 입증을 요구하고 있다.

OWA에서는 RP20을 통해서 계류 시스템 설계에 대한 표준 및 가이드라인을 Table 3과 같이 제시하고 있다. 본 연구의 부유식 라이다 시스템의 계류 시스템은

Table 3 List of applicable guideline and standard for design of mooring system

Guidelines and Standards	Year of Publication
ABS	
Publication 39 Certification of Offshore Mooring Chain	2014
Publication 90 Application of Fiber Rope for Offshore Mooring	2014
Publication 194 Thruster-Assisted Mooring (TAM, TAM [Manual]) for Mobile Mooring Systems	2014
Publication 205 Pre-Laid Position Mooring Systems	2013
American Petroleum Institute	
API RP 25K Recommended Practice for the Design and Analysis of Station-keeping Systems for Floating Structures	2008
API RP 21 In-Service Inspection of Mooring Hardware for Floating Structures, Ed.3	2008
API RP 25M Design, Manufacture, Installation and Maintenance of Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring.	2014
Bureau Veritas	
Classification of Mooring Systems for Permanent and Mobile Offshore Units	2015
DNV offshore service specifications, offshore standards and rules	
DNV-OS-E301 Position Mooring	2010
DNV-OS-E302 Offshore Mooring Chain	2009
DNV-OS-E303 Offshore Mooring Fibre Ropes	2013
DNV-OS-E304 Offshore Mooring Steel Wire Ropes	2009
IALA	
Design of Floating Aid to Navigation Moorings, ID 1066, Ed. 1.1	2010
INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CLASSIFICATION SOCIETIES	
Requirements concerning Mooring, Anchoring and Towing	2014
NOAA	
NDBC Buoy Mooring Design Manual	2014
UK-HSE	
Research Report 219 Design and integrity management of mobile installation moorings	2004
Offshore Information Sheet No 4/2013 Offshore installation moorings	2013
HSE Safety Notice 3/2005 Floating Production Storage and Offloading (FPSO) - Mooring Inspection	2005
WMO	
GUIDE TO MOORED BUOYS AND OTHER OCEAN DATA ACQUISITION SYSTEMS by A. Meindl, DBCP Technical Document No. 8	1996

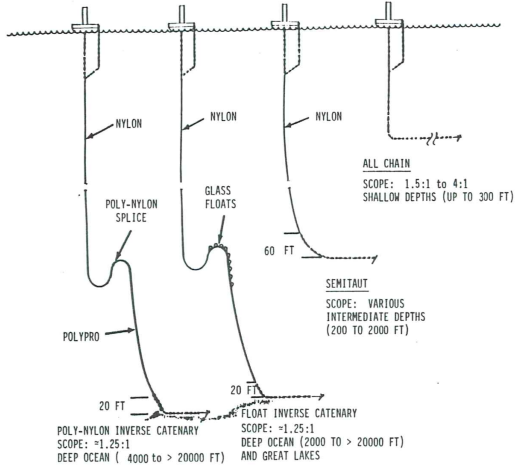


Fig. 3 NDBC standard mooring system

Fig. 3과 같이 NOAA의 NDBC Buoy Mooring Design Manual [7]을 기준으로 기본 설계를 진행하였으며 Orcina, Ltd 에서 개발한 OrcaWave와 OrcaFlex를 통해 시간 영역에서의 계류라인 해석을 진행하였다.

본 논문의 부유식 라이다 시스템은 군산의 한국전력공사 전력연구원에서 운영 중인 해모수 2호기 고정식 기상탑을 기준지점으로 500 m 인근에 설치되었다.

계류 시스템에 대한 안정성 평가에서는 전국 심해설계파 산출보고서[8]의 자료를 토대로 부유식 라이다 시스템의 50년 재현주기의 환경조건(풍속, 파고/주기)이 적용되었으며(Table 4 참조)설치 현장의 최대 조류 유속은 군산항의 유속 데이터를 참고하여 1.24 m/s(2.4 knots) 가 적용되었다. [9]

Table 4 Coordinate and environmental conditions of floating LiDAR system installation

Latitude	35° 49' 41.70" N
Longitude	126° 12' 30.20" E
Depth	25 m
Wind speed(U10)	24.7 m/s
Significant Wave Height (Hs)	7.4 m
Peak wave period(Tp)	13.5 s
Current Speed	1.24 m/s(2.4 knots)

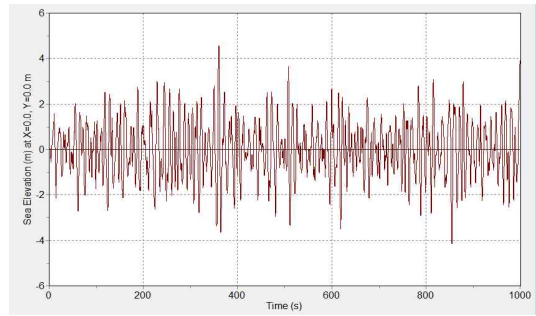


Fig. 4 TMA spectrum time series of input waves generated by orcaflex

일반적으로 불규칙 파랑에 대한 심해파의 파랑 환경은 JONSWAP 스펙트럼을 사용하나 설치 해역에 대한 실측을 통해서 수심이 25m의 얕은 수심으로 확인되어 얕은 수심에서 적용 가능한 TMA 스펙트럼을 사용하여 해석을 실시하였다. Fig. 4에 TMA 스펙트럼에 의한 입사파 시계열을 나타내었다. [10]

부유체에 대한 안정성은 DNV [11]를 기준으로 시뮬레이션을 진행하였으며 선박형 부유체로 파향에 대해서 Weathervaning이 발생함을 고려하여 선수 방향의 파향만 고려하여 바람과 파랑의 조합에 대한 안정성을 평가하였다. 환경하중에 의해 발생하는 장력은 Fig. 5와 같다.

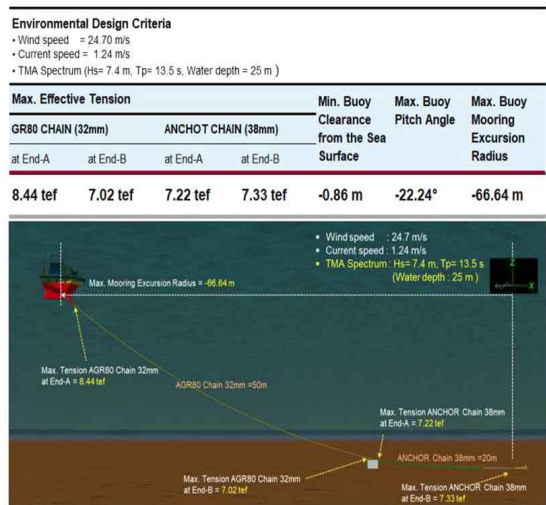


Fig. 5 Dynamic analysis for floating LiDAR system

앵커 시스템의 경우 일반적으로 싱커 또는 클럼프를 이용한 중력식 앵커 시스템이 주로 사용되고 있다. 부유식 라이다 시스템이 위치 이탈되어 풍향 계측 자료의 손실이 발생할 경우 손실된 데이터만큼 추가로 계측 기간이 연장되어야 하는 위험이 있으므로 충분한 파주력을 가질 수 있도록 효율적인 앵커 시스템을 구성하는 것이 필요하다. 본 논문에서 적용한 앵커 시스템은 앵커의 앞단에 싱커 또는 체인 앵커와 같은 중력식 앵커가 배치된 혼합 방식(Fig. 6)을 사용하였다. [12] 수심 대비 계류라인 길이가 충분히 길지 않을 경우 앵커점에서 수직 방향의 장력에 의한 Up-lifting 현상이 발생하는데 전방의 중력식 앵커를 통해서 수직 방향의 장력을 상쇄하여 후방의 앵커가 충분한 파주력을 가질 수 있도록 설계하였다. Fig. 7은 환경 하중에 대해 계류라인의 형상을 최대, 평균, 최소로 나타낸 그래프이다. 계류라인이 최대로 이출 되었을 때, 앵커점에서의 수직 위치변화가 없는 것으로 나타나므로 수직 장력에 충분히 저항할 수 있는 것으로 보인다.

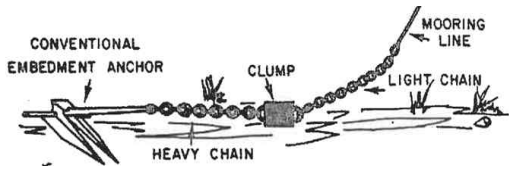


Fig. 6 Embedment anchor and deadweight anchor

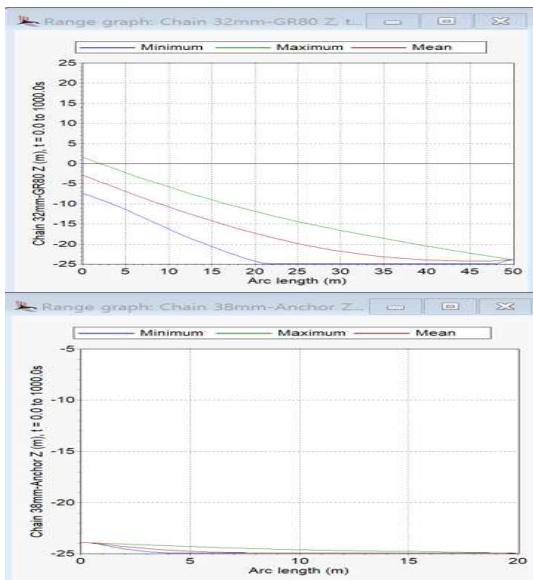


Fig. 7 Line configure for mooring line

2.3 비교 검증(Trial Campaign)

OWA의 2단계(stage 2) 인증을 위해서는 고정식의 검증된 라이다 시스템과 부유식 라이다 시스템 간의 비교 검증 과정을 거쳐야 한다. 비교 검증을 위한 현장 설계는 OWA의 권고 기준 RP 73~88을 기준으로 설계하여 진행하도록 제시되어 있다.

고정식 라이다 시스템의 운영에 대한 간섭을 최소화하기 위해 고정식 구조물로 접근을 위한 방위에는 부유식 라이다 시스템의 배치를 제한하도록 RP 76에서 명시하고 있으며 고정식 라이다가 설치된 구조물의 후류에 의한 영향을 최소화하기 위해 설치 해역의 주 풍향 방향과 같은 방향으로 반경 500 m 이내에 설치 되도록 RP 78을 통해서 권고하고 있다. 아래의 이미지 Fig. 8, 9는 이러한 내용을 도식화하여 나타낸 것이다.

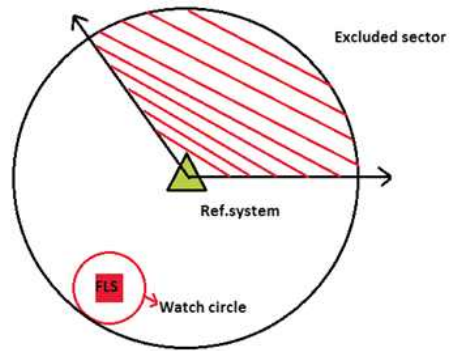


Fig. 8 Floating LIDAR system deployment avoiding excluded sector

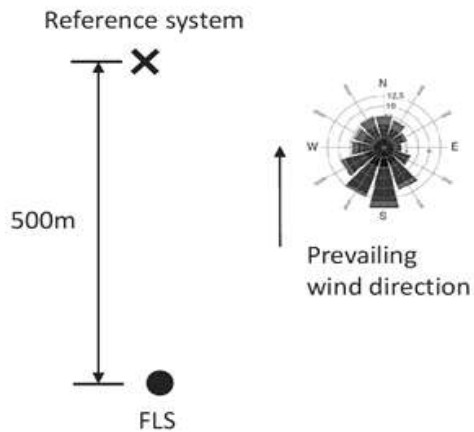


Fig. 9 Recommended setup of floating LIDAR system with reference system

고정식 및 부유식 라이다 시스템에서 사용되는 라이다 장비는 수집 자료의 정확성을 검증하기 위해 IEC-61400-12-1 [13] 기준을 통해서 사전 검정을 받은 제품을 사용하여 비교 검증을 진행하도록 RP77에서 제시하고 있다.

그리고 RP 94에서는 고정식 및 부유식 라이다 시스템은 제품의 제작 및 설치에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 UL과 같은 인정받은 기관을 통해서 FAT (Factory Acceptance Test) 및 SAT(Site Acceptance Test)를 실시해야 하며 수집된 데이터에 대한 신뢰성 분석이 진행되어야 함을 제시하고 있다.

2.4 수집 자료 검증

OWA에서는 부유식 라이다 시스템의 계측 자료에 대해 3개의 단계(stage)로 나누어 상업적 사용에 대한 구분을 하고 있다. 2단계(stage 2)는 제한된 환경조건에서 부유식 라이다 시스템 운용에 대해 검증된 단계로 비교 검증된 환경조건과 유사한 조건에서 계측된 자료의 상업적 이용이 가능하다. 3단계(stage 3)는 다양한 환경조건에 걸쳐서 운영 및 검증이 축적되어 시스템에 대한 완전한 상업적 사용이 입증된 단계를 말한다.

고정식 라이다 시스템과 부유식 라이다 시스템 간의 자료 비교 검증은 동일한 높이에 대해 비교하며 Table 5와 같이 각 상용화 단계의 KPI(Key Performance Indicator)와 AC(Acceptance Criteria)가 만족되어야 다음 단계로 인정되며 가용성(availability), 데이터 정확도(accuracy), 자료 획득 요건(data coverage)에 대해서 RP 100~116까지 기준이 제시되어 있다.

Table 5 Summary of requirements of KPIs / ACs

Maturity Level	FL Type Verification ¹ (1 long trial)	FL Unit Verification ² (3 long and 3 short trials)	FL Offshore Classification ³ (3 long trials)	Early Commercial Project Deployments
Stage 1	Not required.	Not required.	Not required.	Not required.
Stage 2	Number: At least 1. Duration: At least 6 months. Continuous single campaign. Availability KPIs: - meet Stage 2 AC. - Data Accuracy KPIs meet minimum AC.	Not required.	Not required.	Not required.
Stage 3	Stage 2 Type Verification completed. May count as 1 of 3 long trials if KPIs meet: - Stage 3 AC for availability. - Stage 2 best practice AC for data accuracy. May count to classification trials.	Number: 6 (minimum 3 short and 3 long). Duration: At least 3 months for long trials. Continuous single campaign. Availability KPIs: - meet Stage 3 AC. - Data Accuracy KPIs: meet Stage 2 best practice AC. May count to classification trials.	Number: At least 3. Duration: At least 3 months (typically). 2 individual units are trialled at the same test site. One unit trialled at two different test sites. May count towards long trials if KPIs meet: - Stage 3 AC for availability. - Stage 2 best practice AC for data accuracy.	Number: At least 5. Duration: At least 12 months. Continuous single campaign.

3. 비교 검증 결과

비교 검증은 기준이 되는 고정식 라이다와 해상에 설치된 부유식 라이다 시스템 간의 수집된 데이터에 대한 검증을 통해서 진행된다. 본 연구에서는 한국 전력 연구원에서 운용중인 고정식 플랫폼 해모수 2호기에 고정식 라이다 시스템을 설치하여 검증을 실시 하였으며 부유식 라이다 시스템 간의 자료 비교는 MSL 기준으로 높이 50 m, 80 m, 100 m, 120 m 구간에서 수집된 데이터를 대상으로 검증이 이루어졌다.

3.1 가용성 (Availability)

가용성에 대한 평가는 시스템에 대한 가동률과 수집한 풍향 자료의 후처리 된 자료에 대한 이용률로 나누어서 각 단계에 필요한 AC가 제시되어 있다.

본 연구의 부유식 라이다 시스템은 Table 6에서 나타난 것과 같이 6개월의 검증 기간 동안 100% 시스템 가동률을 보였다. 후처리 된 자료에 대한 이용률은 4개의 기준 높이 별로 월간 및 전체 검증 기간으로 나누어 평가가 진행되었으며 각 50 m 높이에서 최대 자료 이용률을 보였으며 전체적으로 97.8% 이상의 높은 자료 이용률을 확인할 수 있었다.

후처리 수행 후의 전체 기간에 대한 높이별 데이터의 가용성은 Table 7과 같이 나타났고, 월별 전체 기간 데이터 기준으로는 Table 8과 같이 나타났다.

이러한 이용률은 현재 상업적 이용이 가능한 3단계 수준의 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

Table 6 Monthly / overall system availability

Period	BS-100	
	MSA _{1M} [%]	OSA _{CA} [%]
01.06.2022 – 31.06.2022	100	100
01.07.2022 – 31.07.2022	100	
01.08.2022 – 30.08.2022	100	
01.09.2022 – 31.09.2022	100	
01.10.2022 – 30.10.2022	100	
01.11.2022 – 31.11.2022	100	

Table 7 Overall post-processed data availability

Height [m]	Spd Valid #	Spd OPDA _{CA} [%]	Dir Valid #	Dir OPDA _{CA} [%]
50	26179	99.3	26179	99.3
80	25888	98.2	25888	98.2
100	25767	97.8	25767	97.8
120	25519	96.8	25519	96.8

Table 8 Monthly post-processed data availability

Height [m]	Spd Valid #	Spd MPDA ₁₀ [%]	Dir Valid #	Dir MPDA ₁₀ [%]	Spd Valid #	Spd MPDA ₁₀ [%]	Dir Valid #	Dir MPDA ₁₀ [%]
June 2022								
50	4202	97.3	4202	97.3	4444	99.6	4444	99.6
80	3967	91.8	3967	91.8	4426	99.1	4426	99.1
100	3929	90.9	3929	90.9	4389	98.3	4389	98.3
120	3826	88.6	3826	88.6	4335	97.1	4335	97.1
July 2022								
50	4459	99.9	4459	99.9	4315	99.5	4315	99.9
80	4425	99.1	4425	99.1	4312	99.8	4312	99.8
100	4391	98.4	4391	98.4	4306	99.7	4306	99.7
120	4361	97.7	4361	97.7	4298	99.5	4298	99.5
August 2022								
50	4443	99.5	4443	99.5	4315	99.9	4315	99.9
80	4440	99.5	4440	99.5	4317	99.9	4317	99.9
100	4439	99.4	4439	99.4	4312	99.8	4312	99.8
120	4421	99.0	4421	99.0	4278	99.0	4278	99.0
September 2022								
50	4443	99.5	4443	99.5	4315	99.9	4315	99.9
80	4440	99.5	4440	99.5	4317	99.9	4317	99.9
100	4439	99.4	4439	99.4	4312	99.8	4312	99.8
120	4421	99.0	4421	99.0	4278	99.0	4278	99.0
October 2022								
50	4443	99.5	4443	99.5	4315	99.9	4315	99.9
80	4440	99.5	4440	99.5	4317	99.9	4317	99.9
100	4439	99.4	4439	99.4	4312	99.8	4312	99.8
120	4421	99.0	4421	99.0	4278	99.0	4278	99.0
November 2022								
50	4443	99.5	4443	99.5	4315	99.9	4315	99.9
80	4440	99.5	4440	99.5	4317	99.9	4317	99.9
100	4439	99.4	4439	99.4	4312	99.8	4312	99.8
120	4421	99.0	4421	99.0	4278	99.0	4278	99.0

3.2 자료 획득 요건 (Data coverage)

OWA RP 97에 대한 기준에 따라서 유효한 상관분석을 위한 데이터 획득의 최소 요건은 2~12 m/s 사이의 풍속에서는 1 m/s 당 최소 40개 이상, 12~16 m/s 사이에서는 2 m/s 당 최소 40개 이상의 자료가 요구된다.

아래의 Table 9는 비교 검증 기간 동안 부유식 라이더 시스템에서 측정한 자료를 풍속 구간별로 분류하여 기준 높이 별로 빈도를 정리한 것이다. OWA에서 제시한 권고 기준에 따라 분류된 풍속 구간에서 녹색으로 표시된 모든 영역에서 풍속 빈이 최소 40개 이상 필요하므로 비교 검증 기간 동안 충분한 수의 자료가 획득되었으므로 풍속과 풍향에 대한 정확도 평가를 진행할 수 있었다.

Table 9 Wind speed data coverage per wind speed bin

ST-100 - 01.06.2022-30.11.2022	Spd bin [m/s]	50 m	80 m	100 m	120 m	
	0	1	543	509	495	481
	1	2	1659	1595	1581	1540
	2	3	2820	2668	2613	2591
	3	4	3454	3221	3103	2975
	4	5	3302	3025	2973	2893
	5	6	2715	2524	2411	2286
	6	7	2178	2148	2086	2058
	7	8	1781	1678	1685	1660
	8	9	1410	1403	1419	1497
	9	10	1317	1168	1221	1206
	10	11	1108	964	959	949
	11	12	1017	965	872	852
	12	14	1410	1515	1603	1639
	14	16	705	780	844	842
16	18	246	547	606	572	
18	20	37	133	276	389	
20	22	10	15	38	92	
22	24	41	31	26	29	
24	26	14	20	24	27	
26	28	9	15	11	12	
28	30	0	1	8	9	

3.3 풍속 정확도 (Wind speed accuracy)

OWA에 따르면 풍속에 대한 정확도는 기준이 되는 고정식 라이더와 부유식 라이더 시스템 간 아래의 풍속 구간에서 수집된 10분 평균 자료 간 동일한 시간대에서 상관분석을 수행해야 한다.

- 4~16 m/s의 구간
- 2 m/s 이상의 모든 구간

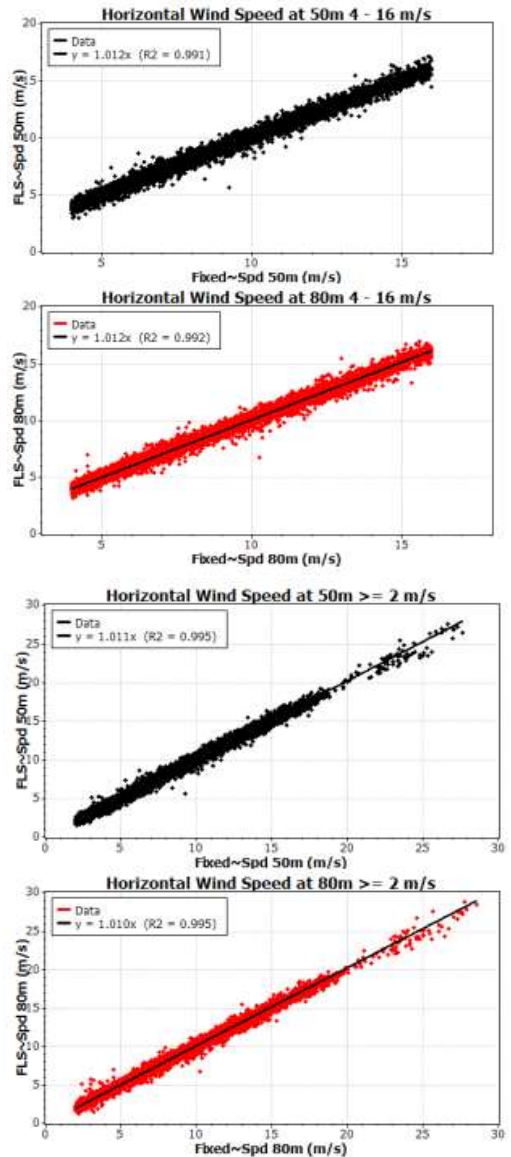


Fig. 10 Wind speed linear correlations of reference LiDAR and floating LiDAR system at 50 m, 80 m

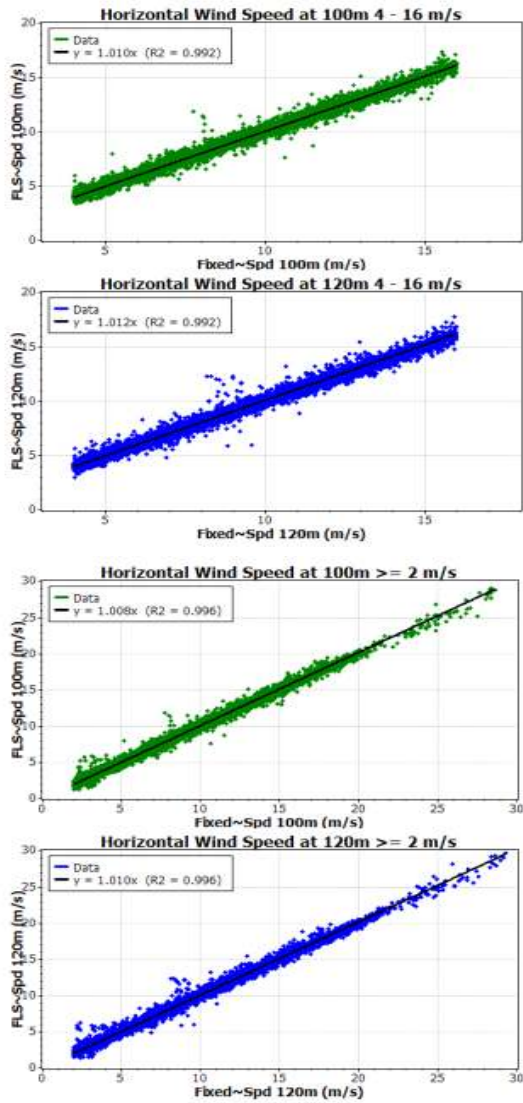


Fig. 11 Wind speed linear correlations of referenceLiDAR and floating LiDAR system at 100 m, 120 m

Table 10 Overview of linear regression analysis for wind speed

Height	N° data	m	R ²	Spd _{mean} Ref [m/s]	Spd _{mean} FLS [m/s]	(Spd _{FLS} /Spd _{ref})-1 [%]
Spd ∈ [4-16] m/s						
50	16943	1.012	0.991	7.88	7.99	1.3
80	16170	1.012	0.992	8.00	8.10	1.3
100	16073	1.010	0.992	8.07	8.16	1.2
120	15882	1.012	0.992	8.12	8.23	1.3
Spd > 2m/s						
50	23574	1.011	0.995	6.76	6.84	1.3
80	22821	1.010	0.995	7.05	7.13	1.1
100	22778	1.008	0.996	7.25	7.32	1.0
120	22578	1.010	0.996	7.38	7.47	1.2

Fig. 10, 11의 선형 그래프는 Table 10.의 데이터를 그래프화 한 것으로 모든 구간의 R2 값이 0.99 이상으로 3단계 수준을 만족하는 AC에 속한다는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 풍향 정확도 (Wind direction accuracy)

풍향에 대한 정확도도 풍속에 대한 정확도와 유사한 방법으로 기준 라이다와 부유식 라이다 시스템에서 계측된 자료를 비교하여 선형성이 확인되어야 하며 풍향 상관관계 값 R2의 값이 명확하게 표현되어야 한다. 50m부터 120m까지 20m 간격으로 획득한 데이터에 대해 각 R2를 Table 11과 같이 도출하였으며 각 데이터를 그래프화 하면 아래의 Fig. 12 및 13과 같다. 4개의 높이에서 모두 0.98 이상의 정확도를 확인할 수 있었다.

Table 11 Overview of linear regression analysis for wind direction

Height	N° Data	m	b [°]	R ²	Dir _{mean} Ref [°]	Dir _{mean} FLS [°]
ST-100 (Spd > 2m/s)						
50	23614	0.995	2.32	0.988	197.04	198.29
80	22869	0.995	2.27	0.988	195.90	197.11
100	22828	0.994	2.44	0.987	194.80	196.01
120	22653	0.992	2.70	0.984	194.27	195.49

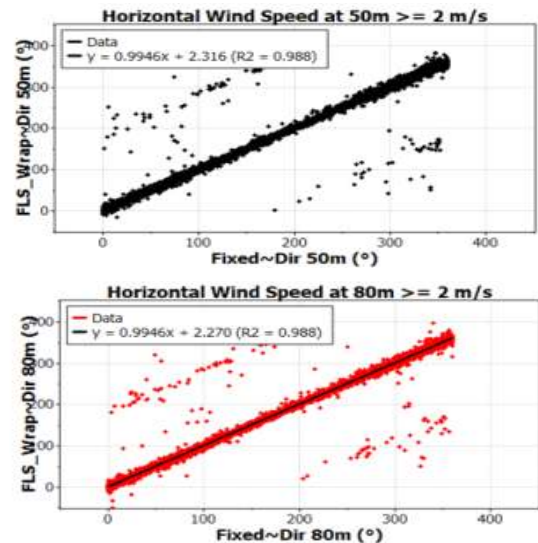


Fig. 12 Wind direction linear correlations of reference LiDAR and floating LiDAR system at 50 m, 80 m

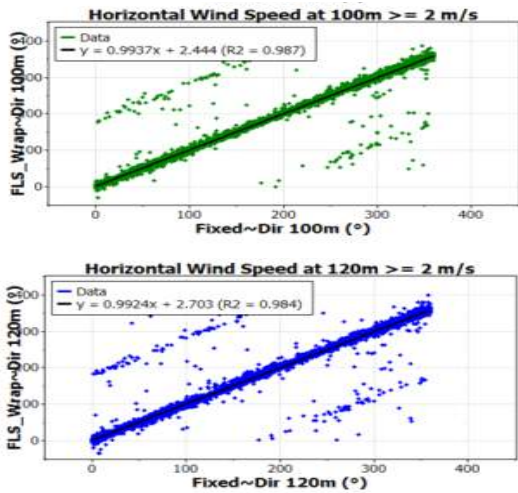


Fig. 13 Wind direction linear correlations of reference LiDAR and floating LiDAR system at 100 m, 120 m

4. 결론

풍력발전단지의 구성에 있어 풍황 자원에 대한 사전 평가는 필수적으로 진행이 필요하며 이러한 이유로 지속적으로 성장하고 있는 풍황 계측 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해서는 Carbon Trust OWA 기준에서 상업적 이용이 가능한 2단계 수준 이상이 요구된다.

본 논문에서는 군산 해역에서 고정식 플랫폼을 활용하여 부유식 라이다 시스템에 대한 비교 검증을 실시하고 수집된 풍황 자료에 대한 상업적 사용 가능성에 대한 검증을 진행하였다. 검증에 대한 과정은 UL을 통해서 시스템 자체에 대한 검증 및 설치에 대한 검증과 더불어 수집된 자료에 대해서 OWA에서 제시하고 있는 기준을 만족할 수 있는지에 대해 진행하였다.

부유식 라이다 시스템을 통해서 수집된 자료는 시스템 및 자료에 대한 가용성, 데이터 취득에 대한 기준을 충분히 만족할 수 있었으며 고정식 라이다와 부유식 라이다 시스템 간의 풍황 계측 자료에 대한 선형 회귀분석 결과 평균 R2 값이 0.977 이상으로 상업적 적용이 충분히 가능함을 확인할 수 있었다.

다만 본 연구에서는 서해 군산 해역을 대상으로 진행이 되어 서해에 국한된 환경조건에 대한 성능이 입증되었으며 동해의 너울성 파랑과 태풍의 직접적 영향권에서의 평가 및 검증은 기존과 다른 특성을 내포할 수 있으므로 더욱 많은 비교 검증과 실험을 통해서 진행되어야 할 것으로 판단된다.

차후 연구는 국제 상업적으로 완전히 활용이 가능한 3단계의 성숙도를 위한 고도화된 연구와 다양한 환경 사례를 적용함으로써 국내 부유식 라이다 시스템에 대한 완성도를 높이는 것이 필요하다고 판단된다.

후기

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 개원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : 20215610100030)

참고 문헌

- [1] CARBON TRUST, 2018, Carbon Trust Offshore Wind Accelerator Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology, Version 2.0
- [2] CARBON TRUST, 2016, Offshore Wind Accelerator Recommended practices for Floating LiDAR Systems, Issue 1.0
- [3] ABS, 2022, Rule for Building and Classing Mobile Offshore Unit, Part 3 Hull Construction and Equipment
- [4] DNVGL, 2016, Structural design of offshore units - WSD method, DNVGL-OS-C201
- [5] Kim Tae-Woo, Keum Dong-Min, Han Dae-Suk, Lee Won-Boom, and Jee Hae-Myung, 2009, Design of Oceanograph buoy-Part 1: Structural Integrity of Hull, Journal of Ocean Engineering and Technology 23 (1), 81-88
- [6] Ministry of Oceans and Fisheries, 2015, Manual for Aids to Navigation,
- [7] NDBC, 1989, NDBC Mooring Design manual
- [8] Ministry of Oceans and Fisheries, 2019, Korea Deep Sea Wave Report
- [9] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2020, Tidal forecast at the Gunsan Port, Available online: <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/gis/category/observe/observeSearch.do?type=EYS#none>
- [10] DNV, 2014, Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205
- [11] DNVGL, 2015, Stability and watertight integrity,

DNVGL-OS-C301

[12] Berteaux, H. O., 1976, Buoy Engineering, Wiley-
Inter Science Publication

[13] IEC, 2017, Wind energy generation systems- Part
12-1: Power performance measurements of electrical
producing wind turbines, IEC-61400-12