



해상풍력단지 개발을 위한 부유식 라이다 검증

이진재¹⁾ · 강승진²⁾ · 이광세^{3)*} · 김홍우²⁾ · 김성원⁴⁾ · 안유옥⁵⁾ · 경남호⁵⁾

Validation of Floating LiDAR System for Development of Offshore Wind Farms

Jin-Jae Lee¹⁾ · Seung-Jin Kang²⁾ · Gwang-Se Lee^{3)*} · Hong-Woo Kim²⁾ · Sung-One Kim⁴⁾ · You-Ock Ahn⁵⁾ · Nam-Ho Kyong⁵⁾

Received 25 June 2020 Revised 12 August 2020 Accepted 26 August 2020 Published online 18 September 2020

ABSTRACT In this study, a floating LiDAR system (FLS) is investigated through a field test involving two steps. First, correlations among wind speeds, measured using the met mast and two LiDARs, are computed to analyze the acceptance criteria of LiDAR for measuring wind speed. The results of the analysis show that the slopes of single variant regression between mean wind speeds are below 1.03 and the coefficient of determination is above 0.97. Next, correlations among wind speeds measured using the FLS and a fixed LiDAR are determined through a field test carried out in Doomi-doo, Tong-young, Gyeongsangnam-do. The FLS is installed 300 m away from the fixed LiDAR on the ground. The results show that the slope of single variant regression is approximately 1.0275 and the coefficient of determination is above 0.971. According to the IEA/wind 18 recommendation, it is found that the developed FLS measures valid wind speeds to assess wind resources for the development of offshore wind farms.

Key words Floater(부유체), Pitching/rolling/yawing(요동), LiDAR(라이다), Validation(검증)

1. 서론

일반적으로 풍력발전단지를 건설하기 전에, 풍력발전기 나셀 높이 정도에 기상탑을 설치하여 약 1년 이상 풍황을 측정해야한다. 기상탑의 여러 높이에서 측정된 풍속, 풍향 및 풍속구배 등을 통해 풍황을 통계적으로 모델링하고, 연간 에너지 발전량(AEP, annual energy production)을 추정하여, 풍력단지 개발에 관한 경제성 여부를 가늠할 수

있다. 해상풍력 개발 시, 각 풍황 자료는 AEP 예측에 중요한 매개변수일 뿐 아니라, 측정된 파랑과 함께 해상 기초 구조물의 설계의 핵심 데이터로 활용된다^[1~2].

2000년대에 들어 전통적인 기상탑을 대체할 수 있는 원격 측정장비(RSD, Remote Sensing Device)인 라이다(LiDAR, light detection and ranging) 등이 등장하면서 이 풍황 측정의 패러다임이 변화하기 시작하였다. 라이다의 측정 정확성이 지속적으로 입증되어 왔고^[3~4], 최근에는 높은 측정 정확도가 요구되는 국제 표준의 출력 성능평가나 이중 측정 국제표준에서 저고도 기상탑과 라이다를 복합하여 적용하는 경우에 사용을 허가할 정도로 그 정확성이 인정받고 있다^[2].

근래 해상용 풍력발전기의 설치 대상 수심이 깊어지면서, 수심 50 m 이상에서의 해상 풍황 측정이 요구되고 있는 실정이나, 이 경우 약 100억 원대에 이르는 해상 기상탑

1) Engineer, Korea Institute of Energy Research

2) Senior Engineer, Korea Institute of Energy Research

3) Senior Researcher, Korea Institute of Energy Research

4) Principal Engineer, Korea Institute of Energy Research

5) Principal Researcher, Research Institute, WEBONS Ltd.

*Corresponding author: lgs@kier.re.kr

Tel: +82-64-800-2335 Fax: +82-64-805-2203

의 설치 비용이 발생한다. 이에 해상 풍력단지 개발 및 보급 확산을 위해 해상 기상탑을 활용하는 방법론은 풍력단지 개발 시 적용하기 어려운 상황이 되었다^[3]. 그 대안으로 10여 년 전부터 유럽에서 부유식 라이다(FLS, floating LiDAR system)에 대한 연구 개발을 시작하였으며, 부유식 라이다의 정확성을 밝히기 위한 연구가 진행되어 그 결과가 발표되기 시작하였다^[4~6]. 그 이후 부유식 라이다에 대한 기대로 유럽에서는 2015년 이후 해상 기상탑을 거의 설치하지 않은 것으로 알려져 있다.

국내에서도 2011년 첫 해상풍력발전 실증단지가 조성^[7]된 이후 서해를 중심으로 대규모 해상풍력발전단지 개발이 계획되었으며, 최근 제8차 전력수급기본계획^[8]에서, 또 제9차에서도 재생에너지 확대를 계획하고 있다. 이 중 해상 풍력발전이 핵심적인 기여를 할 것으로 예상되고 있다.

우리나라의 해역에서의 해상풍력발전단지 개발 및 보급을 촉진하기 위해서는 대단위 해상풍력 단지 발굴이 동시에 다발적으로 수행되어야 하며, 점진적으로 수심이 깊은 해역으로 해상풍력단지가 개발될 것이다. 허나 앞서 언급한 바와 같이, 해상 기상탑을 설치할 경우 단지 발굴에 큰 비용이 발생하므로, 부유식 라이다의 적극적인 도입 필요한 실정이다.

본 논문에서는, 최근 개발된 LiDAR 탑재를 위한 부유식 기상 부이를 활용하여^[9], 국산 FLS 개발하고 실제 해역에서 실증한 연구 결과를 기술하였다. 제주 월정리의 기상탑을 활용하여 취득한 풍향을 두 종류의 라이다로 측정한 데이터와 비교 분석을 하였다. 기상탑 측정 데이터와의 상관성 분석을 통해, 두 라이다들을 통한 풍속 데이터 측정의 유효성을 검증한 후 경상남도 통영시 두미도의 북부 실해역에서 실증을 수행하였다. 유효성이 검증된 라이다들 중 하나가 설치된 국내 최초 FLS를 통해 실해역에서 풍향 및 파랑 데이터를 취득하였고, 다른 하나의 라이다를 인근 육상에 고정하여 부유식 라이다와 동시에 풍향을 측정하였다. 육상 고정식 그리고 부유식 라이다로 측정된 풍속 간 상관성을 비교 분석하였으며, 부유식 라이다를 활용한 풍속 취득의 유효성을 검증하였다.

2. 부유식 라이다 구성

바람과 파도 및 조류에 따른 동적 응답으로서 부유체는

6-자유도 운동을 하며^[10], 일반 소형 부표 등의 경우처럼 부유체에 지나친 경사각이 발생하면, 풍향 측정의 신뢰성과 시스템의 안전에 문제가 발생할 수 있다. 사전에 수치 계산뿐만 아니라 수조 실험을 수행하여 개발한 부유식 기상 부이를^[9] 활용하여, FLS를 개발하였다. 또한 기상탑에 사용하는 컵 풍향/풍속계 등에 비해 전력 소모가 심한 라이다에 사용할 독립 전원을 풍력/태양광/연료전지 복합 전원으로 구성하였다.

2.1 부유식 기상 부이

본 논문 내 부유식 기상 부이는^[9] 고유 진동 주기가 3.07 초에 불과하여 큰 파도의 빈도가 높은 주기에서 벗어나고

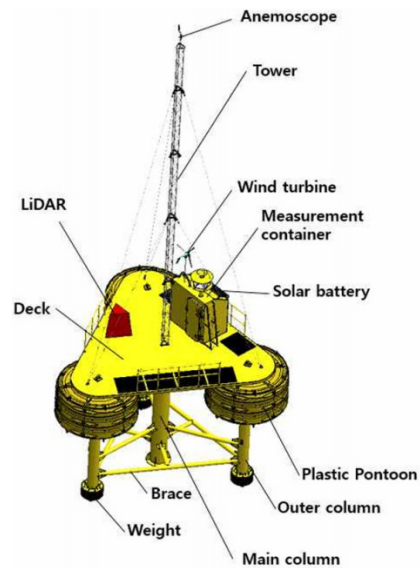


Fig. 1. Floating buoy for LiDAR^[9]

Table 1. Floating buoy characteristics

Characteristics	Unit	Present
Buoy mass	kgf	15,708
Centroid	m	0.013
Volume of displacement	m ³	15.3
Center of buoyancy	m	0.27
Distance to metacenter from center of buoyancy	m	7.17
Distance to metacenter from centroid	m	7.39
Natural oscillation period	sec	3.07
Slope due to wind	deg.	3.75
Slope due to current	deg.	0.51
Slope due to wave	deg.	11.89

있다. Outer column을 플라스틱으로 사용하면 관성 모멘트가 현격히 줄어들어서 고유진동 각속도가 줄어든다. 바람과 파도가 동일한 방향이라 하더라도 부유체의 최대 경사각은 15° 정도로 우수한 특성을 가지고 있다. 본 논문에서 활용한 부이의 형태와 특성은 각각 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

2.2 부유식 라이다용 전원 구성

일반적으로 기상, 대기오염 및 라이다 측정에서는 태양광과 연료전지로 구성된 복합 전원을 사용하고 있다. 풍력발전 단지 개발을 위한 장소는 대부분 바람이 강한 곳이므로, 개발 해상에서 풍력발전기의 단위면적당 전력 발생량이 많다. 이에 따라, 풍력발전 단지 개발 해역의 풍황 조사를 위한 부유식 라이다의 전원은 태양광/연료전지에 소형 풍력발전기를 추가하여 복합적으로 구성할 수 있다.

Figure 2는 부유식 라이다에서 활용한 독립전원의 개념도로, 태양광 약 900 W, 110 W 메탄올 연료전지(DMFC) 2기, 풍력 160 W 3기로 구성되었다. 두 부분은 정상적으로 전원을 공급하도록 되어 있고 나머지 한 부분은 정상 전원에 문제가 발생했을 때 비상시에 사용할 수 있도록 구성 되어 있다.

Figure 3은 3개월간 전압 변화 결과를 보여주고 있는

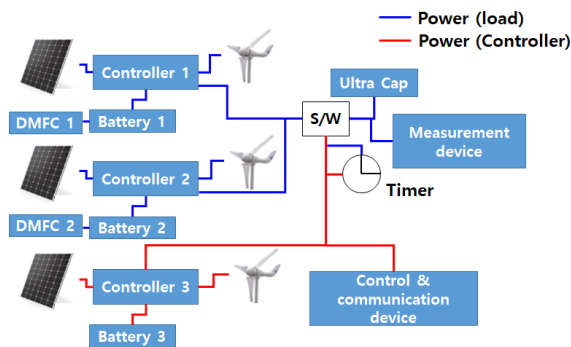


Fig. 2. Schematic hybrid power supply description

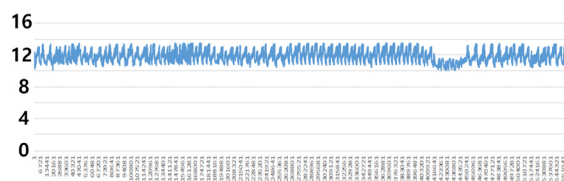


Fig. 3. Voltage history of hybrid power supply for 3 months

데, 후반부에 라이다 작동 한계인 10 V까지 전압이 강하한 적은 있으나 대체로 안정된 전원을 공급하고 있다는 것을 알 수 있다.

3. 부유식 라이다 검증

3.1 기상탑 대비 라이다 풍속 측정 검증

Figure 4와 같이, 한국에너지기술연구원의 제주글로벌 연구센터 인근의 100 m 높이의 육상 기상탑과 150 m 떨어진 부지에 별도의 독립 전원을 설치하였다. 총 2기의 라이다를 통해 측정한 데이터와 기상탑을 통해 취득한 풍속 데이터의 상관성 분석을 수행하였다. 2기의 라이다 중 하나는 부유식 라이다 시스템에서 활용하고, 다른 하나는 실증시 대상 해역 인근 육상에 고정하여 부유식 라이다와 상대 비교를 수행하는 라이다이다.

라이다와 기상탑에서 측정한 자료를 선형회귀분석 해보면, Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 단, 선형회귀분석 시, 기상탑 풍황이 0 m/s일 경우 라이다 풍황 또한 0 m/s 일 것을 구속하기 위해, single-variant 회귀분석을 수행하였다.

주변의 건물이나 풍력발전기 방면에서 불어오는 바람을 포함하면 측정의 불확실성이 발생하므로 이 방향을 제외하고 유효각을 바다 쪽으로만 제한하여 분석을 수행하였다. 선형 회귀분석 시 라이다와 기상탑으로부터 획득한 풍속 간 상관성 오차는 3% 이내이며 결정계수는 0.97 이상으로 확인되어, 높은 상관성과 선형회귀 분석의 적절성을 확인할 수 있다.

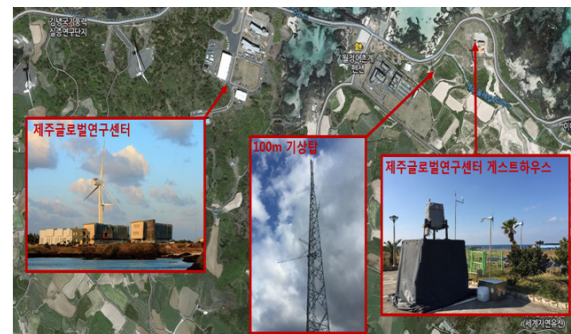
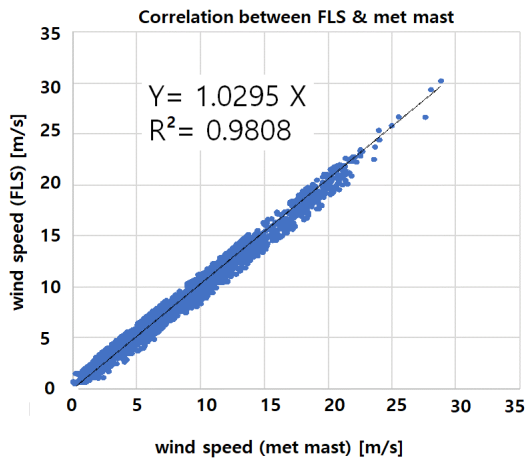
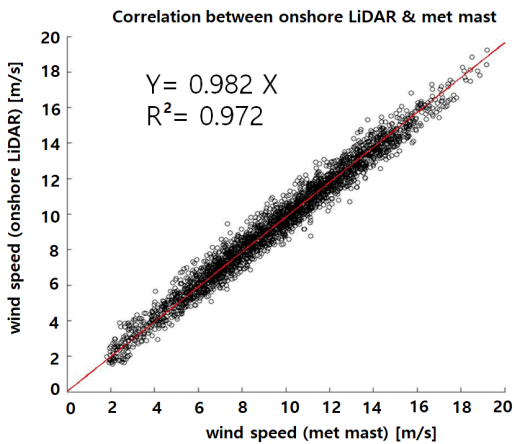


Fig. 4. Met mast and LiDAR location in verification



(a)



(b)

Fig. 5. Wind correlation analysis with met mast data: (a), floating LiDAR, (b): fixed LiDAR

3.2 부유식 라이다 실해역 설치

현장 시험을 위한 해역은 여러 후보지들 가운데 주민들이 우호적이었고 활용 가능한 콘크리트 접안 시설이 있는 두미도 해역으로 결정하였다. 해상의 부유식 라이다와 육상의 고정식 라이다에 의한 측정치를 비교하기에 가장 적합한 장소로 판단되었다. Figure 6과 7은 실험에 활용된 기상 및 파고 부이의 위치와 FLS의 실해역 설치 과정을 나타낸다.

실해역 실증실험 장소가 경상남도 통영시 두미도 북부 해역으로 선정된 이후, 설치해역의 경사진 해저면의 특성을 설계에 반영하기 위하여 경사진 해저면에 대한 계류-앵커 시스템 설계가 재수행 되었다. 기상부이 후면부의 계류라인은 상대적으로 수심이 얇은 곳에 위치하고, 계류라인



Fig. 6. Location of coastal wave and LiDAR buoy



Fig. 7. Floating LiDAR system field test

에 비교적 작은 장력이 걸리므로 길이를 18 m로 정하였고, 수심이 깊은 전면부에 위치한 두 개의 계류라인의 길이를 두 가지(43 m, 60 m)로 정하여 길이에 따른 기상 부이의 운동, 계류 강도 및 위치 유지에 필요한 앵커 블록의 최소 중량을 계산하여 비교하였다. 두 가지 계류라인 모두 주어진 환경 조건에서 ABS(American Bureau of Shipping) 설계 기준을 만족하였다. 계류라인의 길이가 증가함에 따라 앵커에 작용하는 장력은 작아지므로 필요한 앵커 블록의 중량도 따라서 감소하였다. 계류라인의 길이가 43 m일 때의 앵커 중량은 약 26 ton이며, 계류라인의 길이가 60 m일 때는 앵커 중량은 20 ton으로 산출되었다.

3.3 실해역 파랑 측정

Figure 8과 같이, 부유식 라이다 시스템이 설치되고 난 이후 2018년 2월의 평균 유의파고는 0.55 m로 낮은 파고 값을 보였다. 2018년 2월 14에 약 0.9~1 m의 다소 높은 유의파고가 관측되었다. 이는 측정된 날짜 중에는 다소 높

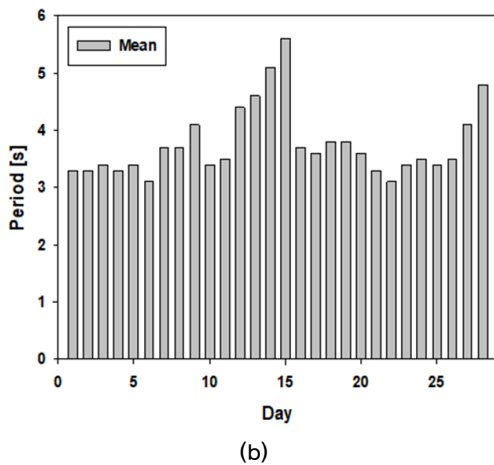
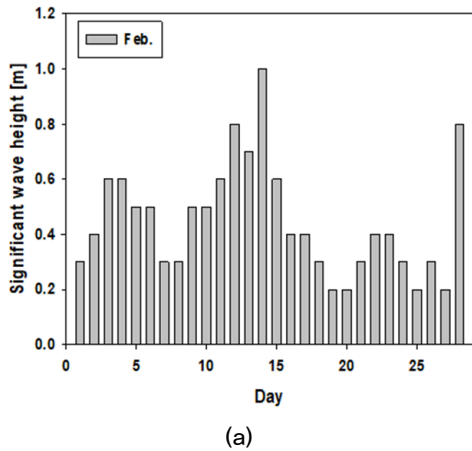


Fig. 8. Wave characteristics: (a), wave heights; (b), daily mean wave period

은 파고에 속한다. 유의 파고가 높아짐에 따라 평균파 주기 또한 다소 커지는 경향을 보였다.

파랑 산포도를 통하여 측정 기간 동안 파랑의 특성을 분석하였다. 2017년 12월 25일부터 2018년 4월 30일까지 측정된 매시간 파랑 자료를 이용하여 파랑 산포도를 작성

Table 2. Wave scatter diagram

		wave height [m]								
		-0.3	0.3-0.6	0.6-0.9	0.9-1.2	1.2-1.5	1.5-1.8	1.8-2.1	2.1-	sum
mean wave period [s]	~2.5	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	2.5-3.0	5	209	9	0	0	0	0	0	223
	3.0-3.5	53	562	182	1	0	0	0	0	798
	3.5-4.0	78	384	143	19	0	0	0	0	624
	4.0-4.5	103	208	97	29	8	0	0	0	445
	4.5-5.0	91	121	52	23	2	0	0	0	289
	5.0-5.5	28	74	37	28	8	2	0	0	177
	5.5-6.0	13	76	39	23	10	1	0	0	162
	6.0-6.5	1	48	12	10	10	2	4	0	87
	6.5-7.0	0	15	11	3	7	6	6	0	48
	7.0-7.5	0	14	1	0	4	6	3	1	29
	7.5-8.0	0	3	5	0	0	2	0	4	14
	8.0~	0	0	1	0	0	0	0	5	6
	sum	372	1715	589	136	49	19	13	10	2903

하여 Table 2에 나타내었다. 분석된 파랑산포도를 살펴보면, 두미도 인근 해역에 대해서 가장 빈번하게 발생하는 유의파고는 0.3~0.6 m 이며, 평균 파주기는 3~3.5 임을 알 수 있다. 외해의 파랑자료와 비교하여 내만에 위치하였기 때문에 굴곡된 해안선과 섬들이 자연 방파제 역할을 하여 매우 낮은 파랑 특성을 보이고 있다.

3.4 실패역 부유식 라이다 검증

Figure 9와 같이, 실증 대상 해역에 부유식 라이다를 설치 한 후 측정 자료의 검증을 위하여 인근 육상(두미도 내 방파제)에 고정식 라이다를 설치하였다. 부유식 라이다와 약 300 m 이격 거리를 유지하고 고정식 라이다를 설치하였다. 고정식 라이다는 인근 주택에서 전원 및 통신선을 연결하여 안정적인 환경에서 운용되었으며, 측정된 데이터는 수시로 전송받아 부유식 해상 풍향측정시스템의 데이터와 비교하며 실증시스템의 이상 유무를 확인하는 역할도 수행하였다.

Figure 10은 실증 기간 동안 종 운동에 따른 부유식 라이다 기울기 각도와 부유식 라이다와 고정식 라이다가 측정한 풍속 간 상관관계를 나타낸다.

앞선 3.2절에서와 제시한 바와 같이, 기상부이 설치해역의 유의파고는 비교적 낮은 편에 속했다. 이에, 실패역 실증실험 기간 동안 비교적 낮은 파랑 특성으로 인해 부유체의 횡 운동과 종 운동은 지속적으로 크게 발생하지 않았다.

기울기 각도가 10° 이상일 때는, 폰튼 설치로 인한 예비부력의 증가로 장주기 영역에서 기상 부이가 파를 따라 운



Fig. 9. Fixed LiDAR away from floating LiDAR system (distance 300 m)

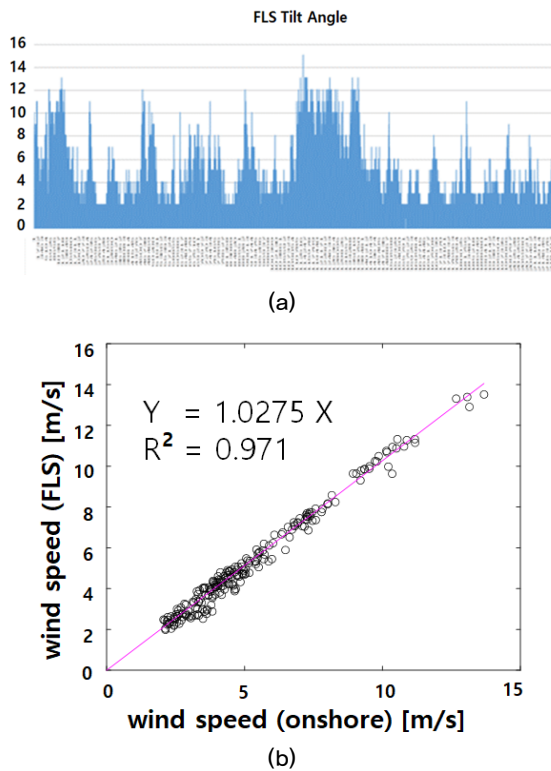


Fig. 10. Floating LiDAR data analysis: (a), FLS tilt angle; (b), wind speed correlation with fixed LiDAR

동하였기 때문에 간주한다. 즉, 장주기 영역에 속하는 파가 입사할 때 높은 파고로 인하여 파의 기울기가 커지면서 기상부이의 종 운동이 커져 부유체 기울기 각도가 상승한 것으로 고려한다.

실증 기간 내 풍속 측정 시 유효방위각의 제한으로, 부유식 및 고정식 라이다를 통해 측정된 풍속 데이터는 3~8 m/s에 범위에 집중되었다. 기상탑과의 데이터 비교 시 8 m/s를 기준으로 그 이하와 이상의 풍속 범위에서의 상관관계가 큰 차이를 보이지 않는 점을 고려하면, 부유식 라이다를 통해 취득한 풍속이 고정식 라이다를 통해 얻은 데이터와 높은 상관성을 보이는 것으로 간주할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 LiDAR 장비를 활용하여 풍력단지개발에 활용하기 위해, 적은 무게의 제작비용이 낮으며 동적응답이 우수한 폰톤형 기상 부이를 활용한 FLS를 실증하였다.

라이다, 기상탑, 요동 측정기, 전원, 파랑 등의 다양한 측정을 위한 자료 수집시스템을 설계하였고 그에 적합한 통신 시스템으로는 LTE를 이용하였다. 이 시스템과 등명기를 가동하기 위한 독립형 전원은 연료전지, 풍력, 태양광을 전원으로 구성하였으며 제주 현장에서 오랜 기간 실증을 거쳐 부유체에 장착되었다.

부유식 라이다와 육상의 고정식 라이다를 이용하여 동시 측정된 풍속 자료를 비교한 결과, 선형회귀분석 기울기가 0.97~1.03 내 포함되어, 풍속에 관하여 IEA/wind 18의 권고 사항을 충족하는 것을 확인하였다.

실증 시 평균적으로 낮은 파고임에도, 간헐적으로 발생한 높은 파고로 부유체의 기울기 각도가 10도 이상되는 경우가 발생하는 것을 확인하였다. 이에, LiDAR 장비를 가지고 보다 양질의 바람 데이터를 지속적으로 얻기 위해서는 기상 부이의 운동에 대한 모니터링이 필요하며, 유효한 운동 한계를 벗어난 구간에서는 풍속 데이터의 보정하여 데이터 품질을 높이는 방안의 개발이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 KETEP/ 산업자원부의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: 201430302130).

References

- [1] Korean Standards Association, 2013, "KS C IEC 61400-3, Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines".
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC), 2017, "IEC 61400-12-1, Power performance measurements of electricity producing wind turbines".
- [3] Smith, M., 2012, "An insight into lidars for offshore wind measurements", Presented at Deepwind 2012 Conference, Trondheim, Norway.
- [4] Hsuan, C.Y., Task, Y.S., Ke, J.H., Prahmana, R.A., Chen, K.J., and Lin, T.H., 2014, "Validation and measurement of floating LiDAR for nearshore wind resource assessment".

- application”, *Energy Procedia*, **61**, 1699-1702
- [5] International Electrotechnical Commission (IEC), 2017, “IEA wind RP18 Floating lidar systems”.
- [6] Carbon Trust Offshore Wind Accelerator (OWA), 2018, “Roadmap for the commercial acceptance of floating LIDAR technology”, <http://version2.accurasea.com/wp-content/uploads/2019/10/roadmap-carbontrust-2.0.pdf>
- [7] Kim, S.O., Kim, H.W., Ko, C.B., and Kyong, N.H., 2011, “2MW offshore wind turbine construction”, *Journal of Wind Energy*, **2**(2).
- [8] MOTIE, 2017, Announcement No. 2017-611, “The 8th basic plan for long-term electricity supply and demand”, http://www.motie.go.kr/motie/ne/announce2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=6&biz_anc_yn_c=Y&bbs_seq_n=64603
- [9] Kim, J., Lee, H., Cho, I.H., Kim, N.H., and Boo, S.Y., 2017, “Conceptual design of moored floating meteorological buoy with LiDAR”, *J. Ocean Eng. Technol.*, **31**(5), 325-334.
- [10] Jo, M., and Park, S., 2015, “Design of control algorithm for floating offshore wind turbines”, *New. Renew. Energy*, **11**(2), 3-11.