

풍력자원평가용 윈드큐브 라이다와 렘텍 소다의 비교·검증 - 포항가속기 원격탐사 캠페인

김현구*, 정진화**, 안해준***, 지영미**

*한국에너지기술연구원, **포항공과대학교 풍력특성화대학원, ***한국에너지기술연구원, **고려대학교

Comparative Validation of WindCube LIDAR and Remtech SODAR for Wind Resource Assessment - Remote Sensing Campaign at Pohang Accelerator Laboratory

Kim, Hyun-Goo* Chyng, Chin-wa** An, Hae-Joon*** Ji, Yeong-mi**

*Korea Institute of Energy Research,
**Graduate School of Wind Energy, Pohang University of Science and Technology,
***Korea Institute of Energy Research, **Korea University

Abstract

The remote-sensing campaign was performed at the Pohang Accelerator Laboratory where is located in a basin 6km inland from Yeongil Bay. The campaign aimed uncertainty assessment of Remtech PA0 SODAR through a mutual comparison with WindCube LIDAR, the remote-sensing equipment for wind resource assessment. The joint observation was carried out by changing the setup for measurement heights three times over two months. The LIDAR measurement was assumed as the reference and the uncertainty of SODAR measurement was quantitatively assessed. Compared with LIDAR, the data availability of SODAR was about half. The wind speed measurement was fitted to a slope of 0.94 and R^2 of 0.79 to the LIDAR measurement. However, the relative standard deviation was about 17% under 150m above ground level. Therefore, the Remtech PA0 SODAR is judged to be unsuitable for the evaluation of wind resource assessment and wind turbine performance test, which require accuracy of measurement.

Keywords : 지상기반 원격탐사(ground-based remote sensing), 윈드큐브 라이다(WindCube LIDAR), 렘텍 소다(Remtech SODAR), 풍력자원평가(wind resource assessment)

1. 서 론

최근 풍력발전기의 대형화에 따라 MW급 풍력발전기의 허브 높이는 60~80m, 블레이드 회전영역은 40~120m의 폭넓은 높이구간을 차지하게 되었다.

현재까지는 풍력자원평가 또는 풍력발전기 성능평가 시 풍황탑(meteorological tower)을 이용하고 있지만 지상기반 원격탐사장비를 도입함으로써 다음과 같은 부가이익을 얻을 수 있다.

첫째, 풍황탑의 고도제한을 극복하여 풍력발전기 블레이드 회전면 전체에 대한 풍황측정이 가능하다.

둘째, 수평풍만이 아니라 수직풍, 풍속전단(wind shear)¹⁾ 등 풍력발전기 피로파괴 분석에 필요한 풍황정보를 획득할 수 있다.

셋째, 풍속계 설치위치에서의 지점풍속(point wind speed)이 아닌 체적풍속(volume wind speed)을 측정함으로써 풍속 측정값의 물리적 대표성이 강화된다.

넷째, 풍속계의 기술적 한계, 즉, 난류효과에 의한 풍속 과대측정, 풍황탑 차폐영향 등을 극복할 수 있다.

일반적으로 50m 높이 풍황탑의 지지와이어를 설치하기 위해서는 직경 100m의 넓은 부지가 필요하며, 따라서 평평한 부지확보가 어려운 복잡지형에서는 풍황탑 설치높이의 고도제한을 받게 된다. 한편 많은 원격탐사 실측캠페인 결과가 보여주고 있는 사실은 지상으로부터 약 100m까지의 대기경계층 저층(sublayer)을 넘어서면 더 이상 로그법칙(logarithmic-law) 풍속분포가 유지되지 않는다는 것이다. 특히 복잡지형에서는 저층에서도 지형영향에 의한 심한 변곡이 발생하기 때문에 고도제한 풍황탑 측정을 외삽(extrapolation) 보정하여 풍력발전기 블레이드 회전영역의 대기유동장 특성을 파악하는 것은 분명한 한계를 가지게 된다. 현재 풍력분야에서는 이러한 한계를 원격

탐사 측정장비인 소다, 라이다를 이용하여 극복하려는 시도가 매우 활발하게 이루어지고 있다.

본 연구는 50m 이상의 높이차를 가지는 산지 지형으로 둘러싸인 복잡지형 내 분지에 위치한 포항가속기연구소 부지에서 대표적인 풍력자원평가용 원격탐사 측정장비인 프랑스 리오스피어사의 윈드큐브 라이다(Leosphere WindCube LIDAR)와 프랑스 램텍사의 PA0 소다(Remtech PA0 SODAR) 공동 원격탐사 캠페인을 수행하고 그 측정결과를 상호 비교·검증함으로써 지상기반 원격탐사 측정장비의 측정불확도를 정량적으로 파악하고자 한다.

그런데 윈드큐브 라이다는 이미 측정정확도가 여러 원격탐사 캠페인을 통하여 충분히 입증된바 있다. 현재 라이다 제작사들은 라이다를 풍력발전기 성능곡선 검증용²⁾ 위한 성능평가 공인장비로 인정받기 위하여 풍황탑과 라이다의 비교·검증 캠페인을 적극 지원하고 있으며, 그 중 대표적인 사례로서 독일 풍력자원평가 컨설팅회사인 윈드가드(WindGuard)가 수년간에 걸쳐 수행한 집중적 라이다 비교·검증 캠페인을 들 수 있다.³⁾ 비교·검증 결과에 의하면 윈드큐브 라이다의 경우 평균편차 -0.03m/s , 곡선집합 기울기 $0.995\sim 1.004$, 결정계수 $R^2=0.996$ 이상으로, 라이다가 풍황탑 측정결과와 동일한 정확도임이 확인되었다.

한편 램텍 라이다는 현재 전세계에 400여기가 보급되었고 국내에는 한국에너지기술연구원, 포항공과대학교 풍력특성화대학원 그리고 서울대학교에서 운용 중에 있지만, 라이다에 비하여 주목할만한 비교·검증 캠페인 등이 수행되지 못하였기에 문헌상으로 램텍 소다의 신뢰도 및 측정정확도를 확인하기가 어렵다. 이에 라이다-소다 동시측정 캠페인을 실시하고 윈드큐브 라이다 측정결과를 참조값으로 설정하여 램텍 소다의 측정불확도를 비교·검증함을 본 연구의 목적으로 정하였다.

2. 원격탐사 캠페인

2.1 원격탐사 측정장비 개요

(1) 윈드큐브 라이더

윈드큐브 라이더(LIDAR; LIght Detection And Ranging)는 펄스형 헤테로다인(pulsed heterodyne) 기술을 이용하여 1.54 μ m 파장의 레이저빔을 원추형으로 회전 방사하며, 90도 간격으로 방사된 4개의 빔라인을 스캔한 후 기하학적 계산에 의해 10개 높이에서 3차원 풍향, 풍속을 산출한다. 빔라인을 따라 구성되는 25m의 검출체적(sampling volume)으로부터 대기유동을 추종하는 미세먼지에 의한 레이저의 도플러 이동(Doppler shift)을 검출함으로써 벡터를 계산하여 낸다.⁴⁾

국내에서는 국가바람지도 검증을 위해 한국에너지기술연구원에서 아시아 최초로 풍력자원평가용 라이더를 도입하였으며,⁵⁾ 라이더 관측방식에 의한 측정불확도 평가,⁶⁾ 라이더 측정자료 후처리 프로그램 개발⁷⁾ 등 풍력자원평가 목적 이외에도 다양한 응용분야 연구개발이 진행 중에 있다.

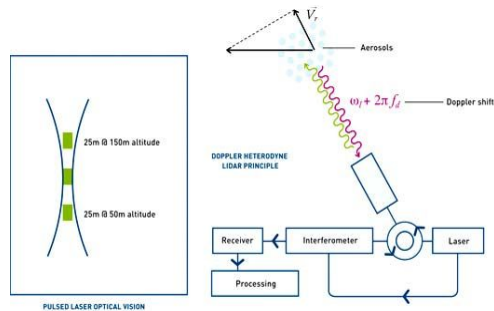


그림 1. 라이더의 풍속벡터 측정원리

(2) 램텍 소다

램텍 PA0 소다(SODAR; SOnic Detection And Ranging)는 단일 안테나, 위상배열형(phased array type) 소다로 중심 주파수 3,500Hz, 음향출력 3W의 이송이 간편한 소형 원격탐사 장비이다.⁸⁾ 소다로부터 음향 펄스가 대기 중으로 방사되면 대기 흐름의 열적인

난류에디(turbulent eddy)의 도플러 이동에 의해 음파가 산란된다. 후방산란된 음파 에너지의 강도와 진폭은 기온구조변수(temperature structure parameter) C_T^2 과 비례하므로 이러한 특성으로부터 3차원 풍향, 풍속을 계산한다. 참고로 그림 3은 소다의 측정원리를, 그림 3의 그래프는 본 캠페인에서 획득한 C_T 와 기온의 상관성을 보여준다.

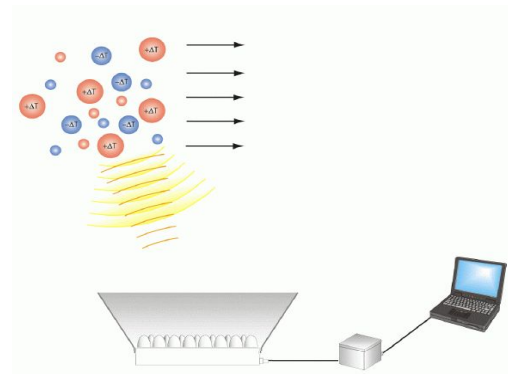


그림 2. 소다의 풍속벡터 측정원리

2.2 원격탐사 캠페인 개요

원격탐사 캠페인은 포항가속기연구소 내 실험동 옥상(높이 7m)에 소다와 라이더를 설치한 후 약 2개월에 걸쳐서 수행되었다. 그림 4의 전경사진(역립한 윈추의 꼭지점이 원격탐사 장비 설치위치)과 그림 5의 포항지역 입체 지형도에서 볼 수 있듯이 포항가속기는 영일만 해안으로부터 내륙으로 6km 후방, 해발고도 40m의 분지에 위치하고 있으며 주위에 높이차 50m의 산지(해발 100m)가 둘러싸고 있는 지형이다.

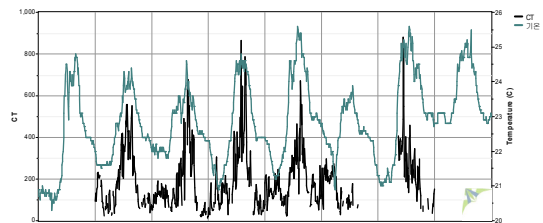


그림 3. 기온과 기온구조변수 비교그래프



그림 4. 포항가속기내 원격탐사 측정장비 스캔지점

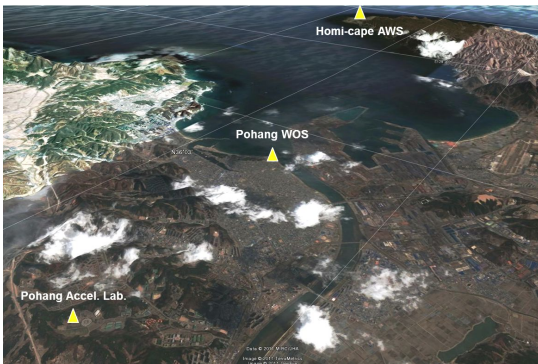


그림 5. 포항지역 위성사진 및 기상관측지점

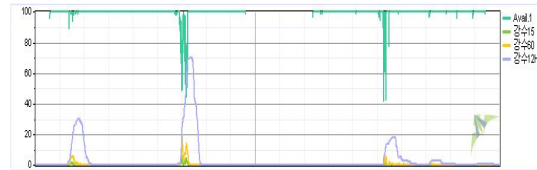
원격탐사 캠페인은 측정지점의 연직고도설계를 달리하여 3차에 걸쳐 수행되었으며 그 자세한 사항은 표 1과 같다.

표 1. 지상기반 원격탐사 캠페인 개요

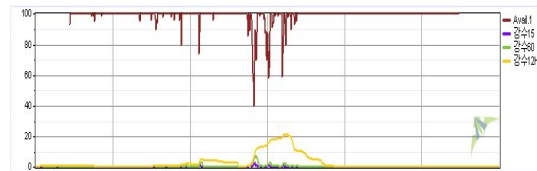
	1st campaign	2nd campaign	3rd campaign
Period	2009.7.23. ~ 8.10. (19 days)	2009.8.10. ~ 8.16. (6 days)	2009.8.17. ~ 9.29. (44 days)
Rain	6 days	4 days	9 days
Remote sensing	LIDAR SODAR	LIDAR	LIDAR SODAR
Height (interval)	40~310m (30m)	40~550m (50m)	40~130m (10m)

1차와 3차 원격탐사 캠페인은 라이다와 소

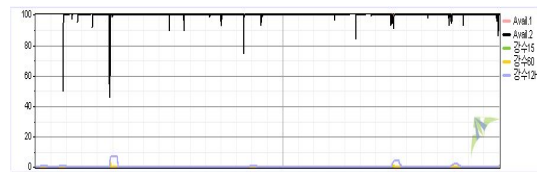
다 공동관측으로 수행되었으며 각각의 캠페인에서 연직고도설계 및 그에 따른 최대 관측 고도가 상이하게 설정되었다. 단, 라이다와 소다 모두 10분평균 측정자료를 획득하도록 설정하였다.



(a) 1차 캠페인



(b) 2차 캠페인



(c) 3차 캠페인

그림 6. 강우와 라이다 자료가용률의 상관성

3. 원격탐사 비교·검증

3.1 자료가용률

라이다의 풍속 측정원리는 레이저 파장과 동일한 미세입자의 이동속도를 검출하는 것이다. 따라서 강우가 발생하면 대기 중 미세 먼지의 세정효과로 인하여 자료가용률(data availability)이 떨어지게 된다. 그림 6은 강우와 라이다 자료가용률의 상관관계를 보여주는 그래프로, 그래프 하단의 강우 그래프(15분, 1시간 및 12시간 누적)와 상단의 자료가용률의 상관성을 살펴보면 강우시 자료가용률이 떨어지는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 강우시 측정자료는 자료결손에 의한 통계적 왜곡을 가져올 수 있음을 주지하여야 할 것이

다. 참고로 소다 역시 기종간 비교분석 캠페인 연구결과에 의하면⁹⁾ 램텍 소다는 강우에 의한 자료손실이 50% 이상으로 매우 큰 것으로 보고되었다.

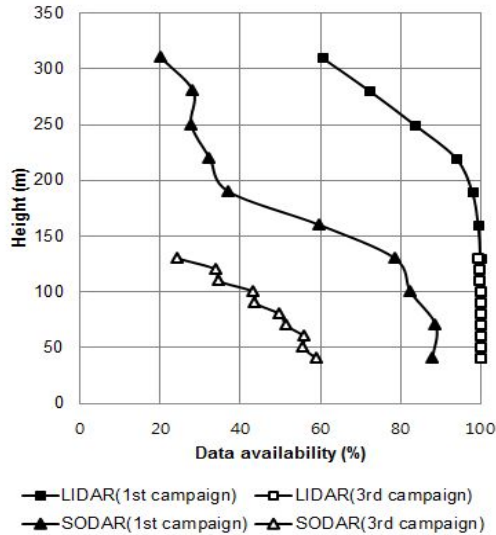


그림 7. 라이다와 소다의 자료가용률 비교

라이다와 소다의 고도별 자료가용률을 비교한 그림 7을 보면 소다의 경우 측정고도의 증가에 따라 급격하게 자료가용률이 저하함을 볼 수 있다. 반면 라이다는 지상 190m까지는 거의 100%의 자료가용률을 보이다가 그 이상의 고도에서는 미세먼지 농도가 얼어짐에 따라 자료가용률이 감소하여 300m 높이에서는 60% 수준으로 떨어지는 경향을 보였다. (강우일을 포함한 통계결과임) 평균 자료가용률은 라이다는 96%, 소다는 50%로 약 두 배의 차이를 보였다.

3.2 풍향·풍속 상관성

그림 8은 캠페인 차수별 바람장미를 도시한 것으로, 포항가속기 바람장미(좌측)와 동시점에 포항기상대(중앙) 및 호미곶 자동기상관측소(AWS; 우측) 바람장미를 비교한 것이다. 1차 및 2차 캠페인 기간의 탁월한 주풍

향은 북북동풍으로 나타나고 있으며 포항기상대 및 호미곶측정소는 포항가속기 지점과는 약간의 풍향편차를 보이고 있다.

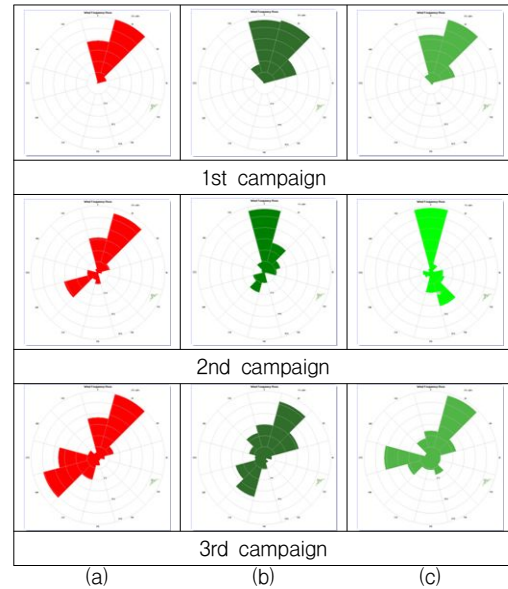


그림 8. 측정지점별 바람장미: (a) 포항가속기 캠페인 (b) 포항기상대 (c) 호미곶측정소

이러한 풍향편차에 대한 체계적 이해를 위하여 한국에너지연구원에서 구축한 고해상도(공간해상도 1km × 1km) 국가바람지도로부터⁵⁾ 상기 세 지점의 3년간 풍향자료를 추출하여 지점간 평균적 풍향편차를 계산한 결과, 포항가속기 대비 포항기상대는 반시계 방향으로 17도, 호미곶측정소는 반시계 방향으로 10도의 풍향편차값이 산출되었다.

그림 8에 도시된 실측자료에 의한 바람장미에서도 수치기상모의에 의한 국가바람지도와 동일한 수준의 풍향편차가 확인된다. 이는 그림 5에서 보듯이 호미곶 선단에 위치한 호미곶 자동기상관측소와 영일만 평지해안에 위치한 포항기상대의 풍향편차는 7도 이내로 미소한 반면, 해안으로부터 6km 후방에 100m 높이의 산지 내에 위치한 포항가속기 지점은 지형적 변곡요인으로 인해 포항기상

대와는 평균 17도의 풍향편차를 갖는 것으로 해석된다.

표 2는 풍속상관성을 분석한 결과를 종합한 것이다. 라이다와 소다는 1차 및 3차 캠페인에서 각각 0.74와 0.93의 상관계수를 보였는데, 1차의 경우 연직고도 설계가 최대 310m인 관계로 고도증가에 따라 소다 자료가 용률이 저하됨에 따라 풍속의 상관계수도 저하된 것으로 판단된다.

표 2. 측정지점간 시계열 풍속의 상관계수

		1st campaign	3rd campaign
LIDAR vs. SODAR		0.74	0.93
LIDAR	Pohang WOS	0.71	0.67
	Homi-cape AWS	0.68	0.61
SODAR	Pohang WOS	0.60	0.58
	Homi-cape AWS	0.54	0.37

포항가속기 원격탐사 지점과 포항기상대 및 호미곶측정소 간의 풍속상관성을 분석한 결과를 보면, 라이다의 경우 포항기상대와는 평균 0.69, 호미곶측정소와는 평균 0.65의 비교적 높은 상관계수를 보였으나 소다의 경우 각각 0.59, 0.46으로 라이다 보다는 낮은 상관도를 나타내었다.

3.3 측정불확도

그림 9는 라이다와 소다로 측정된 대기경계층 평균풍속 연직분포를 비교한 것으로, 전반적으로 소다가 낮은 풍속을 보이고 있으며 고도가 높아질수록 라이다 풍속과의 차이가 커지고 있다. 반면 그림 10은 이상치를 제거하고 라이다 및 소다 동시측정이 이루어진 시점만을 선별하여 풍속분포를 비교한 것이다. 그림 9와는 달리 동시점 측정자료는 라이다와 소다가 거의 동일함을 알 수 있으며, 이로부터 그림 9에서 나타난 소다 측정풍속의 과

소경향은 낮은 자료가용률에 기인한 통계적 왜곡임을 알 수 있다. 특히 램텍 소다는 7m/s 이상의 고풍속 영역으로 갈수록 편의 오차(bias error)가 증가하는 것으로 보고된 바 있으며⁹⁾ 그림 10에서도 이러한 경향이 나타난다.

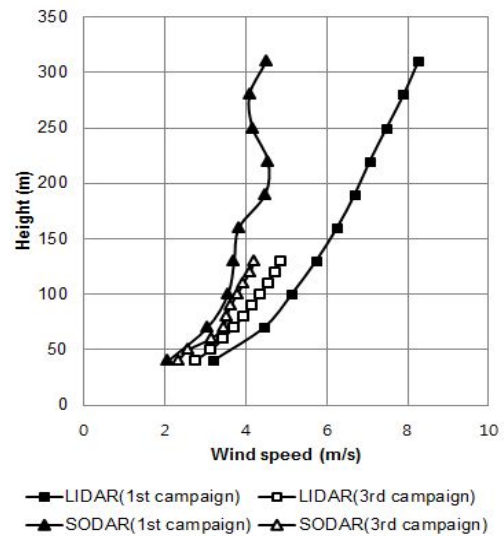


그림 9. 평균풍속 연직분포도 (필터링 미적용)

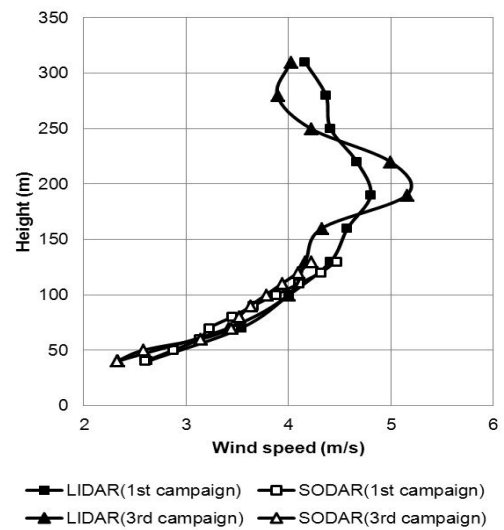
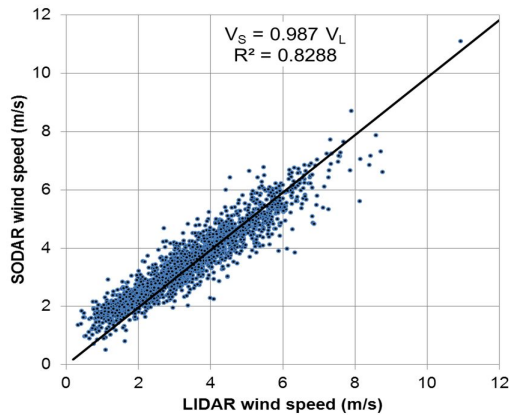


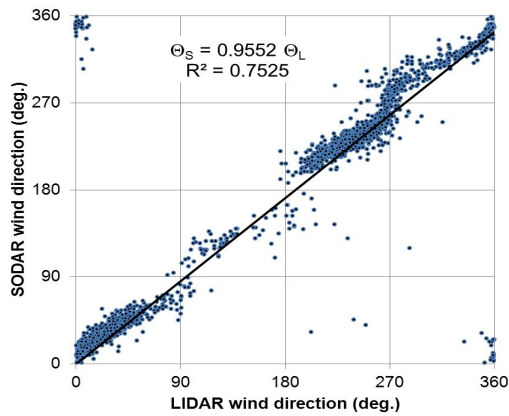
그림 10. 평균풍속 연직분포도 (필터링 적용)

그림 11은 3차 캠페인의 라이다 및 소다 풍

향풍속 측정자료를 비교한 것으로, 곡선접합 결과 풍속은 기울기 0.94, $R^2=0.79$, 풍향은 기울기 0.9, $R^2=0.71$ 로 나타났다.



(a) 풍속 산포도



(b) 풍향 산포도

그림 11. 라이더와 소다의 풍향, 풍속 측정자료 산포도

그림 12와 13은 각각 풍속 및 풍향에 대하여 소다의 측정불확도를 평가한 것이다. 서론에서 설명한 바와 같이 많은 비교·검증 캠페인을 통하여 풍황탐 수준의 측정정확도를 갖는 것으로 확인된 라이더 측정자료를 소다의 측정불확도 정량평가를 위한 참조값으로 사용하였다.

측정불확도는 풍속 상대오차의 상대표준편차(RSD; Relative Standard Deviation, %)로 평가하였는데, 풍속 상대오차 $e\%$ 는 다음과

같이 정의하였다.

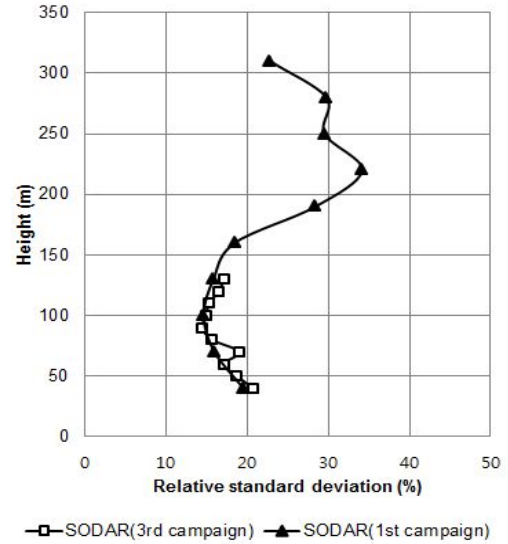


그림 12. PA0 소다의 풍속 측정불확도: 상대 표준편차

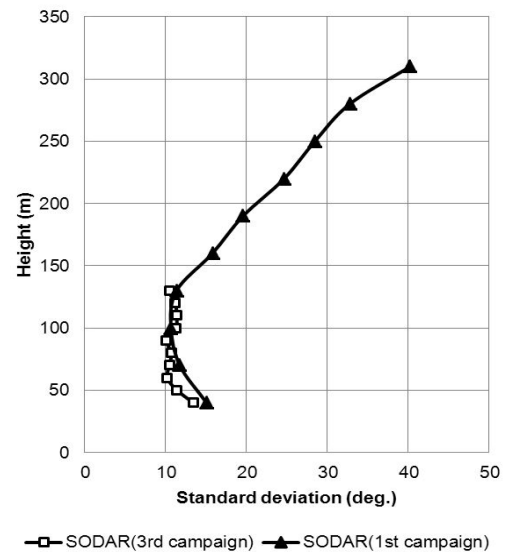


그림 13. PA0 소다의 풍향 측정불확도: 표준편차

$$e\%(z) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(\frac{V_L(z) - V_S(z)}{V_L(z)} \right) \times 100 \quad (1)$$

식에서 N 은 10분평균 풍속자료의 총개수

이며 $V_L(z)$ 와 $V_S(z)$ 는 각각 지면높이 z 에서의 라이다와 소다 측정풍속이다. 측정높이별 상대편차차를 도시한 그림 11을 보면 소다는 전 높이구간에 대하여 약 20% 내외의 측정불확도를 보이고 있으나, 150m 이하에서는 17% 수준의 불확도를 보이고 있다.

풍향은 주기적 순환값이기 때문에 상대편차를 산출할 수 없는 관계로 그림 13에는 소다 풍향 측정불확도를 표준편차로 도시하였다. 라이다 측정 유효구간으로 볼 수 있는 지면 200m 이하에서는 소다 풍향 측정불확도가 10도 내외인 것으로 평가되었다.

4. 결 론

집중적 비교·검증 캠페인을 통하여 정확도가 검증된 윈드큐브 라이다를 이용하여 램텍 PA0 소다의 측정불확도를 정량평가하기 위한 원격탐사 캠페인을 준 복잡지형인 포항가속기 부지에서 수행하였으며, 결과분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 원격탐사 캠페인이 수행된 포항가속기 인근 포항기상대 및 호미곶 AWS 측정자료를 이용하여 측정자료의 기상학적 상관성을 고찰한 결과, 유의한 상관성이 있음을 확인하였으며, 고해상도 국가바람지도의 분석결과에서도 동일한 상관성을 확인하였다. 따라서 본 원격탐사 캠페인은 기상학적으로 포항 영일만 권역내 동일풍계에서 수행된 것임을 확인하였다.
- (2) 10분평균 자료측정시 윈드큐브 라이다에 비하여 램텍 소다의 자료가용률은 절반 수준으로 현격히 낮았으며, 두 원격탐사 장비 모두 강우에 의한 자료가용률 저하가 뚜렷하게 나타났다. 라이다의 경우에는 미세먼지 농도가 열리는 200m 이상의 고층부로 올라갈수록 자료가용률이 저하되기 시작하여 300m에서 약 60%로 낮아졌다. 이러한 원격탐사장비의 특성을

고려할 때 200m 이상 고도에 대한 측정시 자료가용률 저하에 따른 측정자료의 통계적인 왜곡이 발생할 수 있음을 염두에 두고 분석을 수행하여야 할 것이다.

- (3) 윈드큐브 라이다 측정자료를 참조값으로 설정하여 램텍 PA0 소다의 측정불확도를 정량평가한 결과, 풍속은 기울기 0.94, $R^2=0.79$, 풍향은 기울기 0.95, $R^2=0.71$ 로 접합되었으며 풍속의 상대편차는 150m 이하에서 약 17%, 풍향의 표준편차는 약 10도인 것으로 평가되었다. 따라서 램텍 PA0 소다는 정량적 수치의 정확도를 요구하는 풍력자원평가 및 풍력발전기 성능평가 용도로 활용하기에는 부적합한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(신재생에너지기술개발사업)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. 포항가속기 원격탐사 캠페인은 포항공과대학교 풍력특성화대학원 원격탐사 하계강좌의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Moore, K. and Bailey, B., Sodar Measurements to Reduce Shear Extrapolation Uncertainty, WindPower 2009, Chicago, Illinois, USA, 2009.
2. Wachter, M., Gottschall, J., Rettenmeier, A. and Peinke, J., Power Curve Estimation Using LIDAR Measurement, European Wind Energy Conference 2009, Marseille, France, 2009.
3. Albers, A., Janssen, A. W. and Mander, J., German Test Station for Remote Sensing Devices, European Wind Energy Conference

- 2009, Marseille, France, 2009.
4. Cariou, J.P., Parmentier, R., Valla, M., Sauvage, L., Antoniou, I. and Courtney, M., An Innovative and Autonomous 1.5 μm Coherent LIDAR for PBL Wind Profiling, 14th Coherent Laser Radar Conference, Snowmass, Colorado, USA, 2007.
 5. WindTech International, Lidar-aided Site Assessment, Vol.5, No.2, 2009.
 6. 김현구, 최지휘, 가상적 참값으로써 소다 측정자료를 적용한 라이다에 의한 풍속연직 분포 측정의 불확도 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 30권, 4호, pp.79-85, 2010.
 7. 김현구, 정태운, KIER-LidarWind를 이용한 라이다 풍황측정 데이터 분석, 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 2010.
 8. Kanhanala, P. K. R., Doppler SODAR Observations of the Winds and Structure in the Lower Atmosphere over Fairbanks, Alaska, Master thesis, Univ. of Alaska Fairbanks, USA, 74pp., 2007.
 9. Dupont, E. and Flori, J.P., Comparison of SODARs with Ultrasonic and Cup Anemometers for Wind Energy Applications, European Wind Energy Conference 2007, Warsaw, Poland, 2007.