

풍력자원평가용 윈드큐브 라이다와 신텍 소다의 비교·검증 - 잠실 원격탐사 캠페인

김현구*, 김동혁, 전완호, 최현정

Comparative Validation of WindCube LIDAR and Scintec SODAR for Wind Resource Assessment - Remote Sensing Campaign at Jamsil

Hyun-Goo Kim*, Dong-Hyuk Kim, Wan-Ho Jeon and Hyun-Jeong Choi

Abstract

The only practical way to measure wind resource at high-altitude over 100 m above ground for a feasibility study on a high-rise building integrated wind turbine might be ground-based remote sensing. The remote-sensing campaign was performed at a 145 m-building roof in Jamsil where is a center of metropolitan city Seoul. The campaign aimed uncertainty assessment of Leosphere WindCube LIDAR and Scintec MPAS SODAR through a mutual comparison. Compared with LIDAR, the data availability of SODAR was about 2/3 at 550 m altitude while both showed over 90% under 400 m, and it is shown that the data availability decrease may bring a distortion of statistical analysis. The wind speed measurement of SODAR was fitted to a slope of 0.92 and R^2 of 0.90 to the LIDAR measurement. The relative standard deviation of wind speed difference and standard deviation of wind direction difference were evaluated to be 30% and 20 degrees, respectively over the whole measurement heights.

Key words

Ground-Based Remote Sensing(지상기반 원격탐사), WindCube LIDAR(윈드큐브 라이다), Scintec SODAR(신텍 소다), Wind Resource Assessment(풍력자원평가)

(접수일: 2011. 6. 7, 수정일: 2011. 6. 21, 게재확정일: 2011. 6. 21)

* 한국에너지기술연구원 풍력발전센터

■ E-mail : hyungoo@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3376 ■ Fax : (042)860-3543

1. 서론

최근 녹색성장의 한 가지 주목할 만한 현상으로 건축분야에서 신재생에너지를 적극적으로 도입하려는 친환경건축의 바람이 불고 있다. 풍력발전기를 고층건물의 한 부분으로 흡수

함으로써 신재생에너지라는 랜드마크 상징성 뿐만이 아니라 고층건물에 요구되는 엄청난 전력소비량의 일부라도 자급하기 위한 실용적 대안으로서 주목받고 있는 것이다. 즉, 지상보다 우수한 고공의 풍력자원을 이용하기 위하여 고층건물 상부에 풍력발전기를 설치하여 전력을 생산하려는 것이다⁽¹⁾.

고층건물 상부에 풍력발전기를 설치할 때 고려해야 할 주요 사항으로는, 도시건물군에 의해 복잡하게 형성되는 대기유동장 특성을 고려하여 풍력발전에 가장 효과적인 설치위치와 형태를 결정하는 것과⁽²⁾ 극한풍속, 피로파괴 등의 상황에서 풍력발전기 파손에 따른 안전성 문제일 것이다. 따라서 추정자료가 아닌 실측자료에 의거한 설계의 필요성이 매우 높으며, 더욱이 풍력발전사업 타당성 평가 시 설치현장에서의 실측자료를 요구한다는 점에서 현장실측은 필수적이라고 하겠다.

녹색성장의 핵심은 상징적 의미 부여를 위해 경제적 손실을 감수하는 것이 아니라 종합적, 장기적 관점에서 신재생에너지 융복합이 경제적 이득으로 귀결되어야 한다는데 있다. 따라서 추정자료가 아닌 실측자료에 의한 타당성 평가는 필수적이다.

그러나 문제는 도시환경에서 100m 이상의 초고층건물 상부의 풍력자원을 측정한다는 것이 기술적 측면에서 어렵다는데 있다. 현재 이에 대한 유일한 대안은 지상기반 원격탐사 및 수치기상모의로, 풍력자원평가용 라이다 또는 소다를 이용하여 초고층건물이 건설될 현장에서 단기간 고공의 풍력자원조사를 실시하고 이를 수치기상모의와의 상관분석에 의해 장기간보정하는 방법이다. 전세계적으로 지상기반 원격탐사 및 수치기상모의에 의해 작성된 국가바람지도⁽³⁾를 이용하여 초고층건물 복합형 풍력발전의 타당성을 검토한 사례로는 제 2 롯데월드가 유일하다⁽⁴⁾.

본 연구는 대표적인 풍력자원평가용 원격탐사 측정장비인 프랑스 리오스피어사의 윈드큐브 라이다(Leosphere WindCube LIDAR)와 독일 쉐텍의 MPAS 소다(Scintec MPAS SODAR)를 메트로폴리탄 도심인 서울 잠실의 145m 높이 건물 옥상에 설치하여 2개월간 원격탐사 캠페인을 수행하고, 그 측정결과를 상호비교함으로써 지상기반 원격탐사장비간 측정오차를 정량적으로 분석함을 목적으로 한다.

윈드큐브 라이다는 다수의 실측 캠페인에 의해 그 정확도가 충분히 입증된바 있다. 대표적인 사례로서 독일 풍력자원평가 컨설팅사인 윈드가드(WindGuard)가 수년간에 걸쳐 집중 캠페인을 수행한 결과에 의하면⁽⁵⁾, 135m 높이의 풍황탑과 윈드큐브 라이다 측정풍속은 평균편차 -0.03m/s , 곡선접합 기울기 $0.995 \sim 1.004$, 결정계수 $R^2=0.996$ 로 풍황탑과 동일수준의 정확도임이 확인된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 라이다와 소다의 측정결과를 상대편편차로 정량분석하였으나, 잠정적으로 라이다 측정결과에 신뢰도가 높을 것으로 가정하였다.

2. 원격탐사 캠페인

2.1 윈드큐브 라이다

윈드큐브 라이다(LIDAR; LIght Detection And Ranging)는 펄스형 헤테로다인(pulsed heterodyne) 기술을 이용하여 $1.54\mu\text{m}$ 파장의 레이저빔을 원추형으로 회전 방사하며, 90도 간격으로 방사된 4개의 빔라인을 스캔한 후 기하학적 계산에 의해 10개 높이에서 3차원 풍향, 풍속을 산출한다. 빔라인을 따라 구성되는 20m의 검출체적(sampling volume)으로부터 대기유동을 추종하는 미세먼지의 레이저의 도플러 이동(Doppler shift)을 검출하여 풍속벡터를 계산한다⁽⁶⁾.

2.2 쉐텍 소다

쉐텍 MPAS 소다(SODAR; SOnic Detection And Ranging)는 위상배열형(phased array type) 64개 안테나로 구성된 소다로 중심 주파수 2,200Hz, 음향출력 7.5W의 이동 가능한 소형 원격탐사장비이다⁽⁷⁾. 소다로부터 음향 펄스가 대기 중으로 방사되면 대기유동의 열적 난류에디(thermal turbulent eddy)의 도플러 이동에 의해 음파가 산란된다. 후방산란된 음파 에너지의 강도와 진폭은 기온구조변수(temperature structure parameter)에 비례하므로 이러한 특성으로부터 3차원 풍향, 풍속을 계산한다.

국내에서는 한국에너지기술연구원에서 구축한 국가바람지도의 검증에 위해 아시아 최초로 라이다를 도입한 이후⁽⁸⁾, 라이다의 측정원리에 의한 풍속연직분포 측정불확도 평가⁽⁹⁾,

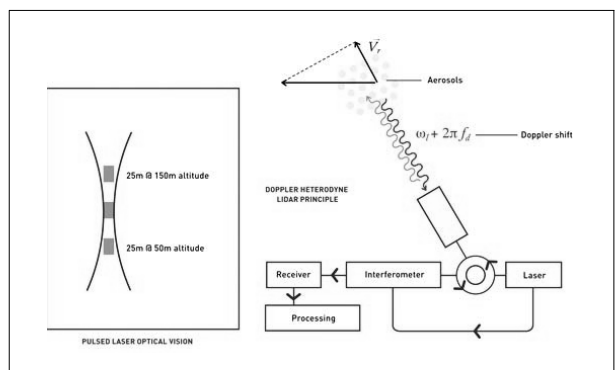


Fig. 1 Principle of wind vector measurement by LIDAR

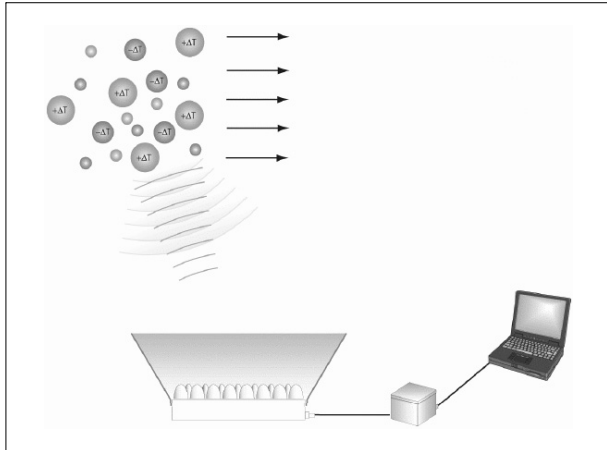


Fig. 2 Principle of wind vector measurement by SODAR

라이다 측정자료 후처리 프로그램 개발⁽¹⁰⁾, 수치기상모의에 의한 풍력자원평가 정확도의 향상을 위한 소다 자료동화,⁽¹¹⁾ 윈드큐브 라이다와 램텍 소다의 비교·검증⁽¹²⁾, 전산유동해석을 이용한 복잡지형에서의 라이다 측정오류 보정⁽¹³⁾ 등의 연구개발이 본격적으로 수행되고 있다.

2.3 원격탐사 캠페인 개요

원격탐사 캠페인은 서울시 송파구 잠실동 도시건물군 내에 위치한 건물 옥상(높이 145m; Figs. 3 & 4)에 소다와 라이다를 설치한 후 2009년 3월 9일부터 4월 27일까지 약 2개월간 수행되었다. 건물 옥상으로부터 40~400m 고도구간을 40m



Fig. 3 Campaign site at Jamsil area in Seoul City and neighboring monitoring sites (stars)

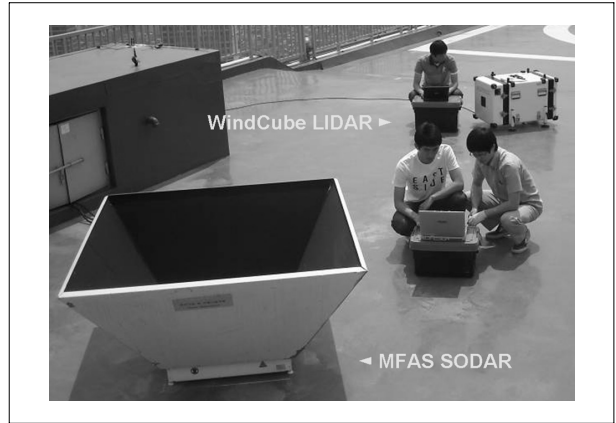


Fig. 4 Campaign photo at a building roof (front: Scintec SODAR, back: WindCube LIDAR)

간격으로, 소다는 30~580m 고도구간을 10m 간격으로 풍속 연직분포를 측정하되 라이다는 10분-평균, 소다는 30분-평균으로 풍향·풍속을 측정하였다.

3. 원격탐사 비교·검증

3.1 자료가용률

라이다의 측정원리는 미세입자의 이동속도를 검출하는 것이기 때문에 강우 시 세정효과로 인해 자료가용률(data availability)이 저하되는 단점이 있으며, Fig. 5는 강우와 라이다 자료가용률의 상관관계를 잘 보여주는 한 예이다.

라이다와 소다의 고도별 자료가용률을 비교한 Fig. 6을 보면, 라이다와 소다 모두 지상 400m까지는 자료회수율이 90% 수준으로 높게 유지되었다. 그러나 소다는 그 이상의 높이에서 급격한 자료가용률의 저하가 진행되어 550m에서는 30%

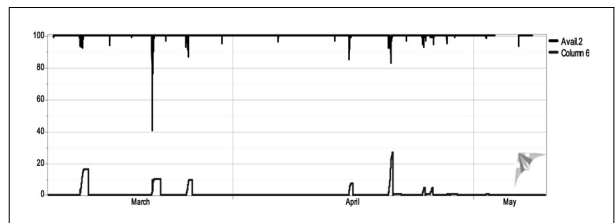


Fig. 5 Time history of precipitation (bottom line) and data availability of LIDAR (top line)

로 내려간 반면, 라이다는 65%로 두 배 이상 높은 수준을 유지하였다(강우일을 포함한 통계결과임).

포항가속기 원격탐사 캠페인에서는 라이다의 자료가용률이 200m까지 90% 수준을 유지하다가 300m에서는 60%로 급격히 떨어진 것에 비하여⁽¹²⁾ 잠실 원격탐사 캠페인에서는 라이다의 자료가용률이 475m까지도 90%로 유지되었다. 그 이유로는 대도시인 서울의 대기 중 미세먼지 농도가 높기 때문인 것으로 판단된다.

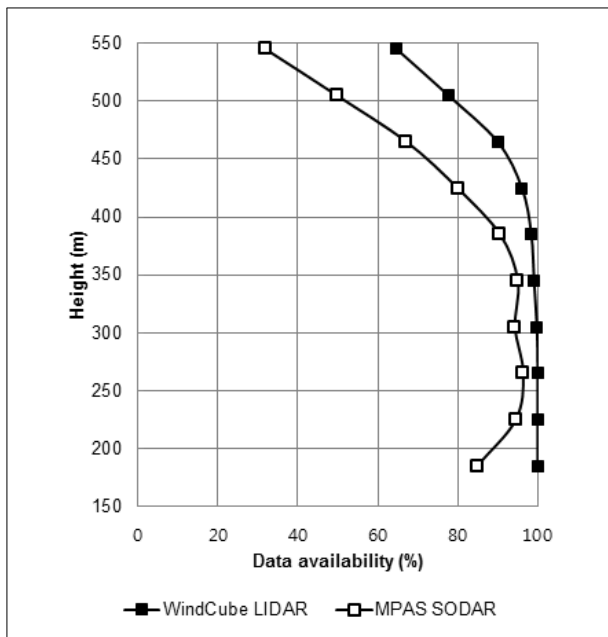


Fig. 6 Data availabilities of SODAR and LIDAR versus height above ground

Table 1. Correlation factor of PM10 concentration and LIDAR data availability

Height above ground	Correlation factor	
	Overall period	Dry period
185m	-0.010	0.001
225m	0.006	0.015
265m	0.077	0.038
305m	0.164	0.060
345m	0.209	0.069
385m	0.249	0.137
425m	0.345	0.294
465m	0.412	0.392
505m	0.450	0.453
545m	0.456	0.473

Table 1은 캠페인 장소 인근의 서울시 환경측정소(송파)에서 측정된 PM10 농도와 라이다 자료가용률의 상관계수로, 측정높이가 높아질수록 상관계수가 높게 나타나며 강우기간을 제외한 기간의 상관계수가 높게 나타난다. 즉, PM10 농도가 강우의 세정효과 등에 의해 낮아질 경우 자료가용률도 저하됨을 의미하며, 라이다 자료가용률에 관련된 요인이 강우와 더불어 미세먼지 농도임을 입증하는 것이다.

3.2 풍향·풍속 상관성

Fig. 7은 원격탐사 캠페인 지점 및 인근의 기상청 송파기상관측소(KMA AWS-403), 서울시 송파 환경측정소, 그리고 해당지점에 대한 한국에너지기술연구원의 고해상도(공간해상도 1km×1km) 국가바람지도의 캠페인 기간에 대한 바람장미를 도시한 것이다.

라이다, 소다 그리고 국가바람지도의 바람장미가 약간의 풍향편차를 가지며 주풍향이 서풍으로 일치함에 반하여 원격탐사 위치로부터 불과 300m 떨어진 송파기상관측소의 바람장미는 완전히 다른 주풍향을 나타내고 있다. 이는 기상관측

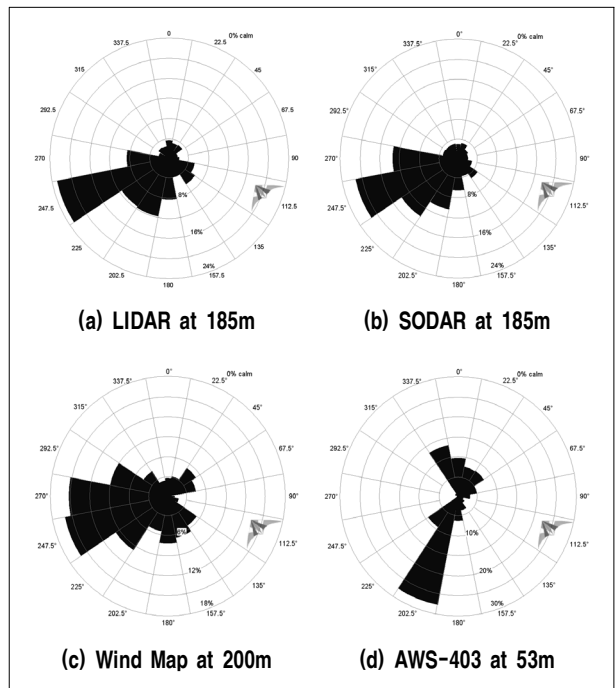


Fig. 7 Wind roses for the campaign period at the campaign site (a, b, c) and KMA AWS site (d)

Table 2. Correlation factor of wind speed between in-situ sites

In-situ site		Correlation factor
LIDAR vs. SODAR		0.873
LIDAR vs.	KMA AWS-403	0.719
	Seoul Env. Songpa	0.544
SODAR vs.	KMA AWS-403	0.655
	Seoul Env. Songpa	0.554

소의 위치가 고층건물에 가려진 건물군 사이에 위치하기 때문인 것으로 확인되었다.

이와 같이 도심지에 설치된 기상관측소는 국지기상 대표성 측면에서 상당한 왜곡을 가져올 수 있기 때문에 도시 풍환경 분석 시 기상관측자료를 활용함에 있어 각별한 주의를 기울일 필요가 있다. 한편 도심지 건물군에 의한 실제 거칠기를 적용한 수치바람모의로⁽¹⁴⁾ 작성된 국가바람지도는 도심지 상공의 국지풍계를 비교적 정확하게 예측하였음을 Fig. 7의 바람장미 비교를 통하여 확인할 수 있다.

Table 2는 풍속 상관성을 분석한 것으로, 라이다와 소다는 0.873의 높은 상관계수를 보였으며 소다 보다는 라이다와 인근의 기상관측소 및 환경관측소와의 풍속 상관계수가 다소 높게 나타났다. 이러한 경향은 서론에서 라이다의 정확도가 소다 보다 높을 것이라는 추론을 부분적으로 뒷받침 해준다. 또한 라이다 상공풍 측정결과와 도심에 위치한 기상관측소의

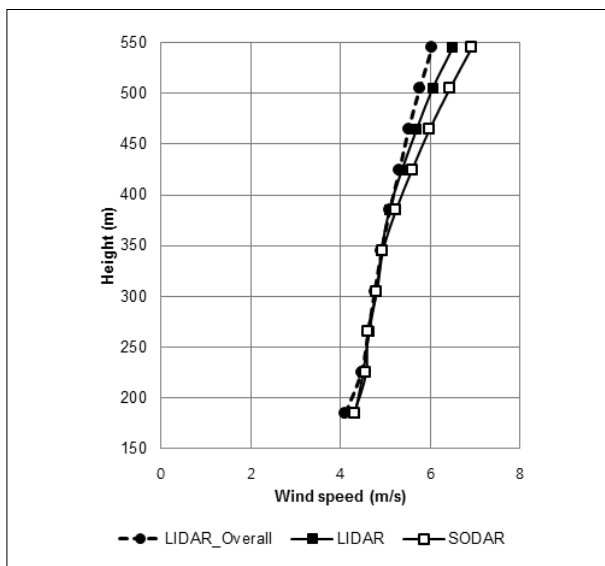


Fig. 8 Comparison of mean wind speed profiles with the overall and concurrent measurement data

측정자료의 상관분석을 통하여 건물군의 차폐영향에 의한 기상관측자료의 풍향 왜곡에 대한 간접적인 확인이 가능하다.

3.3 측정불확도

Fig. 8은 소다 및 라이다에 의한 대기경계층 평균풍속분포 측정결과를 비교한 것으로, 400m 이상에서는 소다가 높은

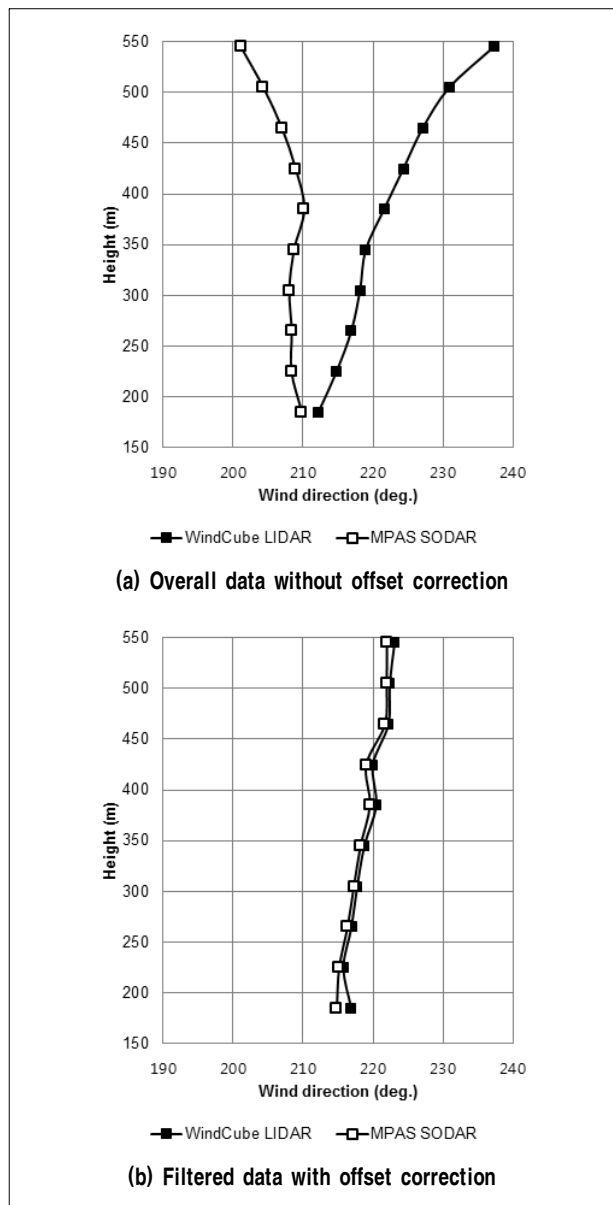


Fig. 9 Comparison of mean wind direction profiles between SODAR and LIDAR measurements

풍속을 보이기 시작하며 고도상승에 따라 풍속차이가 커지는 경향을 볼 수 있다. Fig. 8에서 원과 점선으로 표시된 라이다 전측정자료(LIDAR_Overall)로, 사각형과 실선으로 표시된 소다와 동시측정된 라이다 풍속분포를 비교하여 보면, 400m 이상의 고도에서 풍속차이가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 경향이 의미하는 바는 400m 이상의 측정고도에서 자료회수율이 감소함에 따라 풍속이 과대예측됨을 의미하며, 이로부터 Fig. 8에서 나타난 소다 측정풍속의 과대경향은 낮은 자료이용률에 기인한 통계적 왜곡임을 확인할 수 있다.

풍력자원평가를 위한 통계분석시 주의하여야 할 것은 경우 등의 요인에 의한 자료결손을 고려할지 않을 경우 이와 같은 통계적 왜곡이 발생할 수 있다는 것이다.

Fig. 9는 소다 및 라이다 평균풍향분포를 비교한 것으로, (a) 전측정자료에 의한 비교시 550m 높이에서는 40도로 오차가 벌어지는 경향을 보였지만, (b) 결손기간을 제외한 대하여 Fig. 11에서 확인된 평균풍향편차를 보정함에 따라 매우 좋은 일치치를 보인다. 고도가 높아질수록 풍향이 시계방향으로 바뀌는 것은 코리올리힘에 의한 에크만층(Ekman layer)

효과로 판단된다.

Fig. 10은 라이다 측정풍속 대비 풍속오차($V_L - V_S$; V_L : 라이다 측정풍속, V_S : 소다 측정풍속)의 산포도와 이의 히스토그램을 같이 도시한 것이다. 이로부터 라이다와 소다 사이의 풍속측정 편의오차(bias error)는 고풍속으로 갈수록 미약하게 증가함을 알 수 있다. 참고로 라이다와 소다 측정풍속은 기율기 0.92, 결정계수(R^2) 0.90으로 접합되었다.

Fig. 11은 라이다 측정풍향 대비 풍향오차의 산포도와 이의 히스토그램을 같이 도시한 것으로, 원격탐사장비의 설치 및 진북보정 과정에서 발생한 풍향편차(14.5도)를 확인할 수 있다.

Figs. 10과 11의 히스토그램에 도시한 풍향과 풍속의 오차는 정규분포를 따르지 않는 것으로 검정되었다. 라이다와 소다의 상대적 측정오차를 정량적으로 표현하기 위하여 다음과 같이 측정불확도를 산출하였다.

즉, 측정불확도를 풍속 상대오차의 표준편차, 즉 상대표준편차(RSD; Relative Standard Deviation, %)로 평가하였는데, 풍속 상대오차 $e\%$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$e\%(z) = \left| \frac{V_L(z) - V_S(z)}{V_L(z)} \right| \times 100$$

식에서 $V_L(z)$ 와 $V_S(z)$ 는 각각 지면높이 z 에서의 라이다와

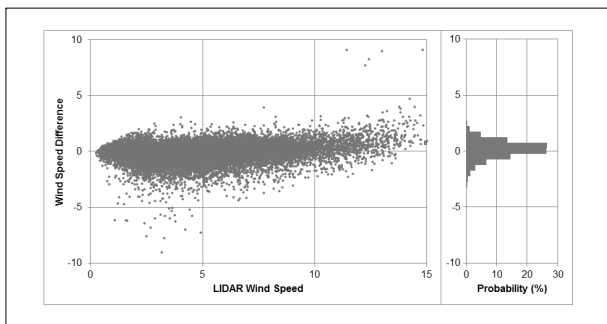


Fig. 10 Scatter plot of wind speed difference between LIDAR and SODAR and its histogram (right)

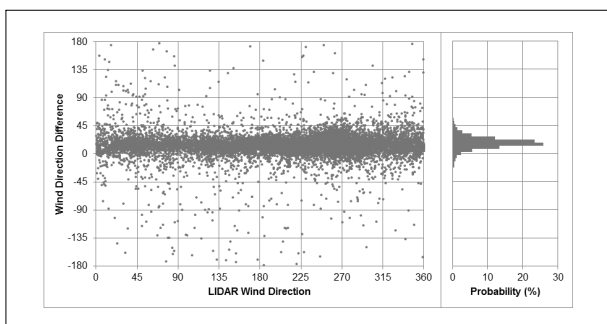


Fig. 11 Scatter plot of wind direction difference between LIDAR and SODAR and its histogram (right)

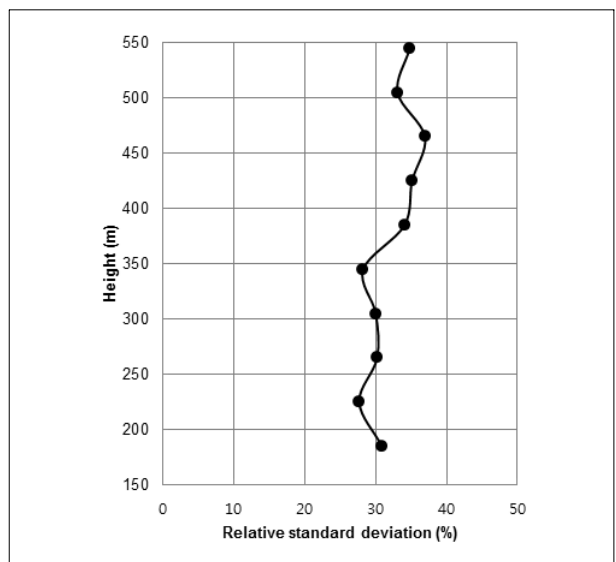


Fig. 12 Relative standard deviation profile of wind speed difference between LIDAR and SODAR

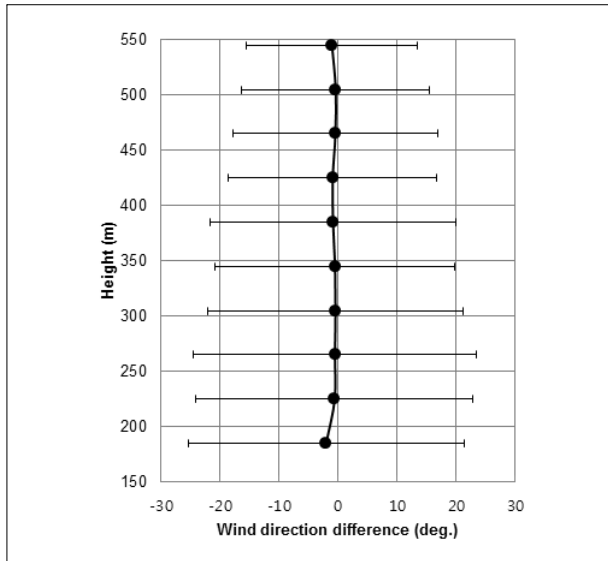


Fig. 13. Mean and standard deviation profile of wind direction difference between LIDAR and SODAR

소다 측정풍속이다. 측정높이별 상대표준편차를 도시한 Fig. 12를 보면 라이다와 소다는 전 높이구간에 대하여 약 30% 내외의 상대적인 측정불확도를 가짐을 알 수 있다.

풍향은 주기적 순환값이기 때문에 상대오차를 정의할 수 없으므로 풍향오차의 표준편차로 측정불확도를 평가하였다. Fig. 13을 보면, 라이다와 소다간의 평균 풍향오차는 거의 없었으며 풍향오차의 표준편차는 약 20도로, 측정높이가 상승할수록 줄어들기는 하지만 그 차이는 3도 이내로 미미한 것으로 분석되었다.

4. 결론

서울 잠실 도심지에서 풍력자원평가용 원격탐사장비인 리오스피어 윈드큐브 라이다와 썬텍 MPAS 소다의 측정불확도 정량평가를 위한 원격탐사 캠페인을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 원격탐사 지점 인근의 기상관측자료와의 상관분석을 통하여 기존 기상관측소는 주변 건물의 차폐요인 등으로 인하여 특히 풍속왜곡이 크게 나타났다. 따라서 고층건물복합 풍력발전의 타당성 평가시 필히 원격탐사를 실시하여

야 할 것으로 판단된다.

- (2) 라이다와 소다 모두 경우에 의한 자료손실이 크게 발생하였으며 라이다는 미세먼지 농도 저하에도 자료손실이 발생함을 확인하였다. 400m 이하의 측정높이에서 라이다와 소다는 각각 99.5%, 92.6%의 자료가용률을 보였지만 그 이상의 고도에서는 각각 82.1%, 57.2%로 자료가용률이 저하되었으며 특히 550m 측정고도에는 소다의 자료가용률이 라이다의 2/3 수준으로 더 큰 낙폭을 보였다. 이러한 원격탐사장비의 특성을 고려할 때 400m 이상 고도에서는 자료가용률 저하에 따른 측정자료의 통계적인 왜곡이 발생할 수 있음도 분석사례를 통하여 확인하였다.
- (3) 라이다와 소다 측정풍속차이의 측정불확도를 평가한 결과, 32%의 상대표준편차를 가지며 측정높이에 따른 차이는 3% 이내로 전 측정높이 구간에 대해 균일한 경향을 가짐을 확인하였다. 라이다와 소다 측정풍속의 직선접합에 의하면 기울기 0.92, 결정계수 0.90으로, 고풍속에서 소다 측정풍속이 라이다에 비하여 과소측정되는 경향을 나타내었다. 측정풍향의 측정불확도를 평가한 결과, 편의오차는 보정을 통하여 상쇄되었으며 풍향오차의 표준편차는 20도 미만으로 측정높이에 따른 차이는 최대 6도 이하인 것으로 산출되었다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 2011년도 산업체기술이전성공화사업의 일환으로 수행되었습니다. 서울시 환경측정소 자료를 제공하여 주신 서울시보건환경연구원과 원격탐사 캠페인 장소를 제공하여 주신 롯데물산(주), 원격탐사 캠페인을 도운 고려대 안해준, 부산대 박순영 이하 여러 연구원들에게 감사를 포함합니다.

References

[1] 윤성욱, 전원호, 김현구, 2009, "풍력발전 복합형 건축물에 대한 고찰", 풍공학회지, Vol. 13, No. 3, pp. 45-51.
 [2] 전원호, 윤성욱, 김욱, 조장형, 2009, "풍력발전기가 설치된

고층빌딩에 대한 전산유체역학적 고찰”, 한국환경과학회지, Vol. 18, No. 8, pp. 919-926.

[3] 김현구, 이상우, 이종혁, 이순환, 2009, “IDL 기반의 국가바람지도 데이터베이스화 및 가시화”, 한국신재생에너지학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 13-21.

[4] 한국에너지기술연구원, 2009, 제 2 롯데월드 풍력발전 적용 가능성 기초연구, 롯데물산(주), 연구보고서, 228p.

[5] Albers, A., Janssen, A. W. and Mander, J., 2009, “German Test Station for Remote Wind Sensing Devices”, European Wind Energy Conference 2009, Marseille, France.

[6] Cariou, J. P., Parmentier, R., Valla, M., Sauvage, L., Antoniou, I. and Courtney, M., 2007, “An Innovative and Autonomous 1.5 μ m Coherent LIDAR for PBL Wind Profiling”, 14th Coherent Laser Radar Conference, Snowmass, Colorado, USA.

[7] Scintec AG, 2008, Flat Array Sodars Hardware Manual SFAS MFAS XFAS (including RASS Extension) Version 0.69b.

[8] 한국에너지기술연구원, 2009, “한반도 해역 고해상도 풍력자원지도 및 단지개발 적합성 평가시스템 개발”, 지식경제부,

신재생에너지기술개발사업, 401p.

[9] 김현구, 최지휘, 2010, “가상적 참값으로써 소다 측정자료를 적용한 라이다에 의한 풍속연직분포 측정의 불확도 분석”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 30, No. 4, pp. 79-85.

[10] 김현구, 정태운, 2010, “KIER-LidarWind를 이용한 라이다 풍향측정 데이터 분석”, 한국풍력에너지학회 추계학술대회.

[11] 이화운, 김동혁, 이순환, 김민정, 박순영, 김현구, 2010, “대기예보모형과 진단모형 결합을 통한 복잡지형 바람장 해석능력 평가”, 한국환경과학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 27-37.

[12] 김현구, 정진화, 안해준, 지영미, 2011, “풍력자원평가용 윈드큐브 라이다와 렘텍 소다의 비교·검증 - 포항가속기 원격탐사 캠페인”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 31, No. 2, pp. 63-71.

[13] Kim, H. G., 2011, “Correction of LIDAR Error by CFD in Complex Terrain of Yangyang”, WindSim User Meeting 2011, Tonsberg, Norway.

[14] 최현정, 이화운, 김민정, 2010, “도심 실제 거칠기 적용과 장래 도심 개발계획에 따른 국지 기상장 변화 수치 모의”, 한국환경과학회지, Vol. 19, No. 6, pp. 703-714.

김 현 구



1997년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사
 1998년 미국 아이오와대학교 IIHR 연구원
 2000년 포항산업과학연구원 책임연구원
 2005년 한국에너지기술연구원 책임연구원

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전센터 책임연구원
 (E-mail : hyungoo@kier.re.kr)

김 동 혁



2003년 부산대학교 대기과학과 이학사
 2005년 부산대학교 대기과학과 이학석사
 2010년 부산대학교 대기과학과 이학박사

현재 부산대학교 박사후연구원
 (E-mail : heakee@pusan.ac.kr)

전 완 호



1999년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학박사
 2004년 LG전자 DA연구소 책임연구원
 2004년 세디주식회사 기업부설연구소 연구소장

현재 세디주식회사 기업부설연구소 연구소장
 (E-mail : whjeon@cedic.biz)

최 현 정



1997년 이화여자대학교 대학원 과학교육과
 1999년 기상청 기상연구소 연구원
 2001년 부산대학교 대기환경과학과 강사
 2006년 부산대학교 대기과학과 이학박사

현재 부산대학교 환경연구원 전임연구원
 (E-mail : costalian@yahoo.co.kr)