

가상적 참값으로써 소다 측정자료를 적용한 라이다에 의한 풍속연직분포 측정의 불확도 분석

김현구*, 최지휘**

*한국에너지기술연구원(hyungoo@kier.re.kr), **충남대학교 물리학과

Uncertainty Analysis on Wind Speed Profile Measurements of LIDAR by Applying SODAR Measurements as a Virtual True Value

Kim, Hyun-Goo* Choi, Ji-Hwi**

*Korea Institute of Energy Research(hyungoo@kier.re.kr),

**Department of Physics, Chungnam National University

Abstract

The uncertainty in WindCube LIDAR measurements, which are specific to wind profiling at less than 200m above ground level in wind resource assessments, was analyzed focusing on the error caused by its volume sampling principle. A two-month SODAR measurement campaign conducted in an urban environment was adopted as the reference wind profile assuming that various atmospheric boundary layer shapes had been captured. The measurement error of LIDAR at a height z was defined as the difference in the wind speeds between the SODAR reference data, which was assumed to be a virtually true value, and the numerically averaged wind speed for a sampling volume height interval of $z \pm 12.5m$. The pattern of uncertainty in the measurement was found to have a maximum in the lower part of the atmospheric boundary layer and decreased with increasing height. It was also found that the relative standard deviations of the wind speed error ratios were 6.98, 2.70 and 1.12% at the heights of 50, 100 and 150m above ground level, respectively.

Keywords : 원격탐사(Remote sensing), 라이다(LIDAR), 소다(SODAR), 불확도(Uncertainty), 풍력자원평가(Wind resource assessment)

1. 서론

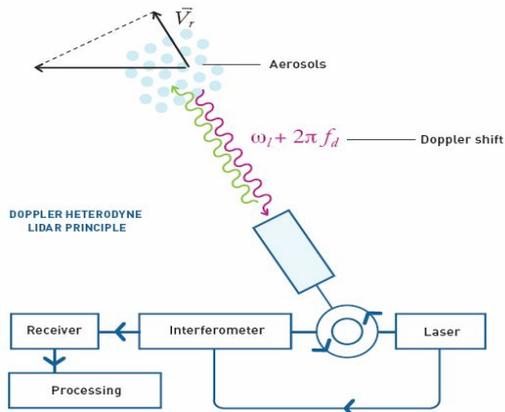
원격탐사(remote sensing)란 관측 대상과
의 접촉 없이 멀리서 정보를 얻어내는 기술을

말한다. 기상관측 분야에서는 이미 소다 장
비가 폭넓게 사용되어 왔으나 최근 풍력자원
평가(wind resource assessment)에 소다와
더불어 라이다가 본격적으로 활용되기 시작

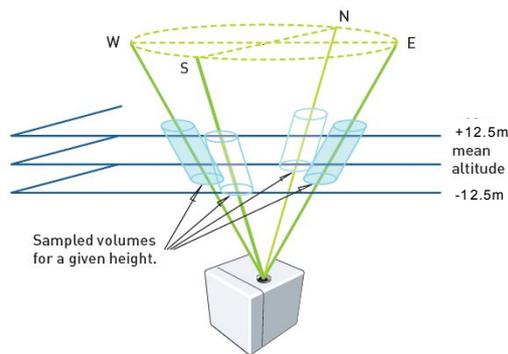
투고일자 : 2010년 7월 12일, 심사일자 : 2010년 7월 20일, 게재확정일자 : 2010년 8월 17일
교신저자 : 김현구(hyungoo@kier.re.kr)

하고 있다.

소다(SODAR; SOnic Detection And Ranging)는 지상에서 음파를 발생시키고 상공의 대기 유동에 의해 산란 반사된 에코(echo)를 수신하여 진동수 변화와 반사에코 강도를 측정하고 방위별 에코자료를 벡터 합성함으로써 풍향 및 풍속을 산출하는 원리이다. 라이다(LIDAR; Light Detection And Ranging)는 비교적 최근에 풍황측정 용도로 개발된 레이저 탐지에 바탕을 둔 원거리 센서로, 미세한 공기입자(먼지, 수증기, 구름, 안개, 오염물질 등)에 의해 산란된 레이저 발산의 도플러 이동(Doppler shift)을 검출하여 상공풍의 풍향, 풍속을 산출한다(그림 1 (a) 참조).



(a) Doppler shift principle



(b) Vertical scanning principle

그림 1. Remote sensing principles of LIDAR

풍력발전량은 풍속의 세제곱에 비례하므로, 풍력발전사업 타당성 판정을 위한 풍력자원 평가 시 요구되는 풍속측정의 정확도 수준은 기상자료를 활용하는 응용분야 중 가장 높다. 풍력자원평가를 위한 풍속계측의 신뢰도를 확보하기 위해서는 MEASNET (International Measuring Network of Wind Energy Institute) 절차에 따라 풍속계를 교정하고, IEC(International Electrotechnical Commission)의 풍력발전기 성능평가 표준인 IEC61400-12-1¹⁾의 지침을 최대한 준수하여 풍력발전기 허브높이(hub height)의 최소 2/3 이상이 되는 풍황탑(met-tower) 또는 풍황-마스트(met-mast)를 설치하여 풍속 측정을 실시하되 측정과 관련된 제반 불확도(uncertainty) 분석 및 평가를 수행하여야 한다.²⁾

지난 수년간 풍력발전기는 급속하게 대형화되었다. 현재 유럽에 보급되는 주력기종인 2MW급 풍력발전기의 경우 허브높이는 78m, 블레이드(blade) 직경은 80m에 이르며³⁾, 이에 해당하는 블레이드의 회전영역은 지상 40~120m 높이구간이다. 풍력발전기의 발전량 및 구조적 하중에 직접적인 영향을 미치는 블레이드의 회전구간이 높아지고 넓어짐에 따라 회전구간 내 대기경계층 풍속분포도의 정확한 파악이 중요한 관건이 되었다. 즉, 회전구간의 확대에 따라 대기경계층 풍속분포의 변화폭도 커지게 되어 이전과 같이 풍력발전기 허브높이에서의 대표 풍속만으로 풍력발전기의 발전량 및 구조하중을 예측할 경우 발생하는 오차를 더 이상 무시할 수 없게 되었다.

상기 이유로 블레이드 회전영역을 모두 포함하는 고층 풍황탑(met-tower)의 설치가 불가피하지만 기술적, 경제적인 이유로 풍황탑의 설치높이는 상당한 제약을 받게 된다. 풍력자원평가 시 가장 큰 오차요인은 풍력발전기 허브높이보다 낮은 풍황탑 측정결과를 허브높이로 외삽보정하는 과정이다.⁴⁾

현재 유럽에서는 라이다를 IEC의 풍력자

원평가 및 풍력발전기 성능평가용 표준장비로 인정받기 위하여 다양한 실측검증을 수행하고 있다.⁵⁾ 참고로 풍력자원평가 시 원격탐사는 전술한 장점 이외에도 이동 및 설치의 용이성, 높은 표본화 속도(sampling rate)에 의한 난류구조 파악 등 부가적인 이점이 있다.

라이다 측정불확도에 대해서는 이미 다수의 검증 캠페인이 수행되었으며, 이 중 독일 135m 풍향탑과의 비교검증 결과에 의하면⁹⁾ 라이다 측정값은 상관도 $R^2=0.996$ 의 매우 높은 수준의 신뢰도를 갖는 것으로 평가되었다.

한국에너지기술연구원에서는 2008년말 국내 최초로 풍력자원평가 라이다인 프랑스 레오스피어(Leosphere) 윈드큐브(WindCube) 라이다를 도입하여 운용 중에 있으며, 국가바람지도 검증, 도심 풍속연직구조 관측⁶⁾, 복잡지형 풍력자원평가⁷⁾, 해상풍 제트구조 관측⁸⁾ 등 다양한 연구를 수행하고 있다.

윈드큐브 라이다의 풍속연직분포 측정원리를 도시한¹⁰⁾ 그림 1 (b)를 보면, 1Hz 주기로 원추 경로를 따라 시계방향으로 회전하며 N-E-S-W 4 방위지점으로 레이저빔을 주사하여 스펙트럼을 측정한 후 기하보정으로 풍속연직분포를 산출한다. 이러한 원추 스캔(conical scanning) 방식은 원추각(cone angle)에 의해 고층으로 갈수록 4개의 측정지점 사이의 이격거리가 멀어지게 된다.

평지지형에서는 원추각 30도의 프리즘을, 복잡지형에서는 15도의 프리즘을 사용하지만 자료회수율이 높은 30도 프리즘을 사용하는 경우를 가정할 때, 2MW급 풍력발전기 블레이드 끝단인 120m 높이에서의 측정지점 간 이격거리는 138.6m가 된다. 지표상태 및 지형변화가 불균일한 복잡지형에서는 이러한 측정지점 간 이격거리 내에서의 풍향·풍속 변동을 무시할 수 없으며, 실제로 측정오차가 10% 수준으로 평가된 바 있다.¹¹⁾ 이에 일차적으로 윈드큐브는 수평면 상에서의 복잡지형 오차를 보정할 필요성이 있다.

윈드큐브의 또 다른 측정불확도 요인으로는 풍속연직분포의 불균일성(irregularity)이 존재한다. 즉, 그림 1 (b)에 도시된 바와 같이, 설정고도에서의 풍속을 측정함에 있어 25m 높이의 검출 체적(sampling volume)의 스펙트럼 평균값을 사용한다. 따라서 25m 높이구간 내에서 풍속연직분포의 불균일한 비선형성(nonlinearity)이 큰 경우 선형적 평균화(linear averaging)에 따른 측정오차가 발생하게 된다.

본 논문에서는 윈드큐브를 이용하여 풍속연직분포를 측정할 경우, 25m 검출 체적 내 풍속분포 비균일성에 의한 측정오차를 참값이라고 가정된 참조자료를 이용하여 정량적으로 분석하는 가상적 평가법을 제안하고자 한다. 또한 풍속연직분포의 변곡특성이 잘 관찰된 소다 원격탐사 측정자료를 참조자료 즉 참값으로 이용함으로써 라이다에 의한 풍속연직분포 측정의 불확도를 제안된 가상된 평가법에 따라 정량적으로 평가하고자 한다.

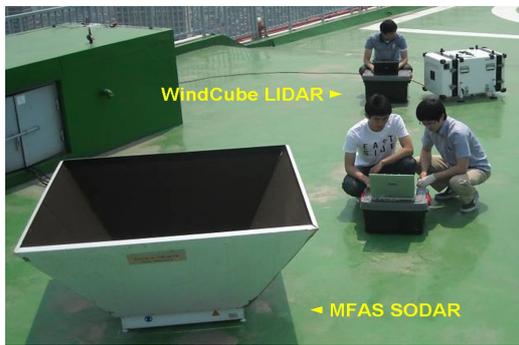
2. 연구자료 및 방법

본 연구에서는 윈드큐브의 풍속연직분포 측정방식에 따른 오차를 평가하기 위한 풍속연직분포 참조자료로 서울 잠실의 도심에서도 대기경계층 측정을 위한 실측캠페인의 소다 측정자료를 채택하였다.⁶⁾

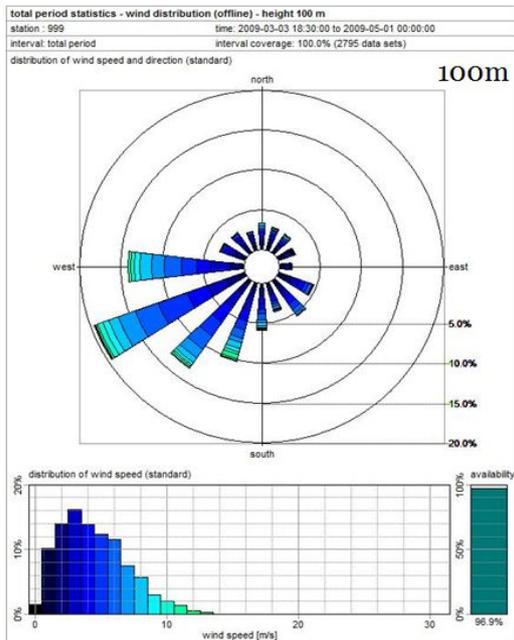
실측캠페인은 서울 잠실의 지면고도 140m 인 건물옥상에서 2009년 3~4월 2개월간 수행되었으며(그림 2 참조), 소다를 이용한 원격탐사 연직설계는 지면고도 180~680m의 500m 구간에 대하여 10m 간격으로 30분 평균자료가 생성되었다.

이 자료를 풍속연직분포 측정불확도 평가를 위한 참조자료로 선택한 이유는 첫 번째로 실측캠페인에 사용된 신택(Scintec) MFAS 소다의 정확도가 검증되었기 때문이다. 즉, 컵형 풍속계(cup anemometer)를 장착한 풍향탑과의 비교검증 결과에 의하면 보정불확도(calibration

uncertainty)가 $\pm 0.1\%$, 측정고도에 따른 불확도는 $\pm 0.3\%$ 로 보고되었다.¹²⁾ 두 번째 이유로는 상기 실측캠페인이 대도시 중심지에서 수행되었기 때문에 복잡한 도심 건물군의 영향으로 풍속연직분포의 불균일도가 평지지형에 비하여 상대적으로 크게 나타남에 따라 라이다의 선형적 평균화 산출방식의 오차를 분명하게 파악할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다.



(a) Photograph of the campaign site



(b) Wind rose during the campaign period

그림 2. Remote sensing campaign performed at a building roof in metropolitan area

본 연구에서는 소다 측정자료를 참값, 즉 실제 대기경계층의 풍속연직분포로 가정하여 참조자료로 사용하였기 때문에 소다의 측정오차는 논외가 된다. 즉, 라이다 풍속연직분포 측정불확도 평가를 위해서는 불균일한 풍속연직분포를 가지는 실제 대기경계층 측정자료가 요구되며, 소다 원격탐사 측정자료가 이러한 요구사항을 충족하므로 이를 가상의 참값으로 채택한 것이다.

기대한 바와 같이 소다 실측캠페인을 통하여 다양한 형태의 풍속연직분포가 측정되었으며,⁶⁾ 이에 소다 측정자료를 참값으로 가정하되 10m 간격의 측정값을 곡선접합을 통하여 2.5m 간격의 참조자료로 재생산하였다.

라이다 측정불확도를 평가함에 있어 연직분포에 대한 오차분석 및 시계열 자료에 대한 오차분석을 수행하였다. 즉, 지면고도 180~580m 높이구간에 대한 다양한 시간대에 다양한 형태의 풍속연직분포를 보인 1개월간의 경우에 대하여 라이다 연직측정의 오차를 분석하였으며, 지면고도 190m, 240m, 290m 세 가지 경우에 대해서는 측정기간인 2개월간의 시계열 자료에 대한 오차분석을 수행하였다. 참고로 세 지면고도는 건물옥상으로부터 각각 50m, 100m, 150m 높이에 해당한다.

윈드큐브 라이다 측정에 따른 풍속오차 e 는 참값으로 가정한 참조풍속과의 차이로 정의하였다. 즉,

$$e(t, z) = U_L(t, z) - U_R(t, z) \quad (1)$$

위 식에서 U_L 과 U_R 은 각각 시각 t , 측정고도 z 에서의 라이다 측정풍속과 참조풍속이며, 라이다 측정풍속 U_L 은 다음 식과 같이 설정고도로부터 $\pm 12.5m$ 높이구간의 평균값으로 라이다 측정원리와 동일한 방식으로 산술적으로 계산하였다.

$$U_L(t, z) = \frac{1}{25} \int_{z-12.5}^{z+12.5} U_R(t, z) dz \quad (2)$$

라이다 측정불확도는 풍속 상대오차의 상대 표준편차(RSD; Relative Standard Deviation)로 평가하였는데, 풍속 상대오차 $e\%$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$e\% = \frac{U_L - U_R}{U_R} \times 100 \quad (3)$$

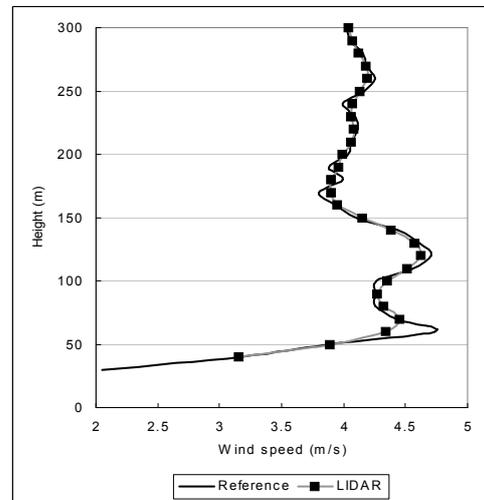
3. 연구결과 및 고찰

윈드큐브 라이다의 풍속연직분포 측정오차를 잘 보여주는 분석사례를 그림 3에 제시하였다. 그림 3 (a) 2009년 4월 3일은 대기경계층 하층부에서 제트가 발달함에 따라 풍속분포가 매우 불균일한 분포를 보인 경우로, 풍속분포의 구배가 커지거나 변곡이 생기는 구간에서 라이다 측정오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 3 (b) 2009년 4월 5일은 건물옥상으로부터 50m 높이에서의 제트에 의한 변곡을 제외하면 상층부의 완만한 풍속분포 구간에서는 라이다 측정오차가 거의 없음을 확인할 수 있다.

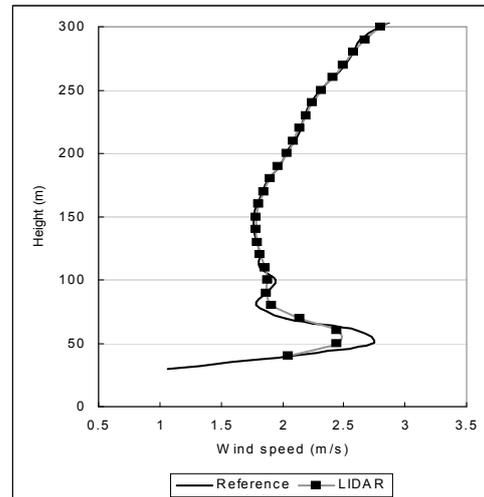
그림 4는 2009년 3월 10일 하루 동안 지상 고도 190m 또는 건물옥상으로부터 50m 높이에서의 풍속변동을 보여주는 것으로, 실선은 참조풍속자료이고 사각형은 라이다 측정방식으로 산출된 시계열 풍속이며 막대그래프는 풍속오차이다. 시간에 따른 풍속변화는 오후 시간에 풍속이 증가하는 서울지역의 풍속변화 특성을 잘 보여주고 있다. 평균풍속 변화폭이 1~7.5m/s로 폭넓게 나타났으며 풍속오차는 최대 1.3m/s로 모든 시간대에서 0.2m/s 이상의 풍속오차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 1개월간의 풍속연직분포에 대한 측정불확도 통계분석 결과로, 풍속 상대오차의 상대표준편차(이하 RSD) 그래프이다. 일반적으로 대기경계층은 하단부에서 급한 풍속구배를 가지며 더욱이 도심 대기경계층은 하단부의 변동이 심하기 때문에 RSD가 대기경계층 하단으로 내려갈수록 커지는 양상을

확인할 수 있다. 그림 5에서 삼각형으로 표시된 RSD는 각각 건물옥상 50m, 100m, 150m 높이에서 2달간의 사례기간에 대한 시계열 풍속 오차분석 결과이다. 각각의 측정고도에 대하여 6.98%, 2.70%, 1.12%의 RSD를 보였으며 1개월간의 풍속연직분포 통계분석결과와 일치하는 경향 및 오차범위를 보였다.



(a) 2009-04-03 14:30



(b) 2009-04-05 04:00

그림 3. Comparisons of wind speed profile between reference data and WindCube measurements (note: height above the building roof)

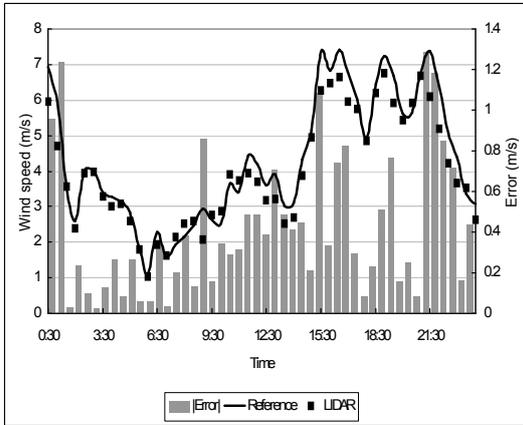


그림 4. Comparison of wind speed time variation on 2009-03-10 between reference data and WindCube measurements at 50m above the building roof

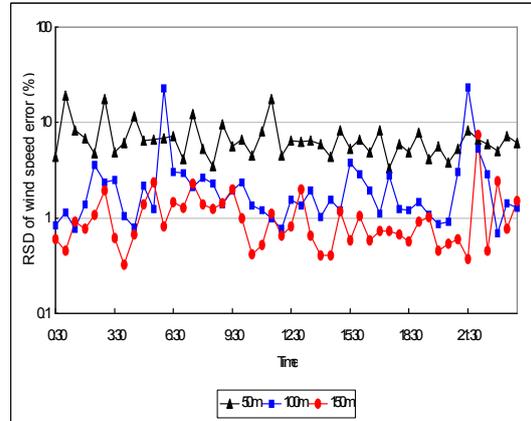


그림 6. Diurnal variation of relative standard deviations at 50m, 100m and 150m above the building roof

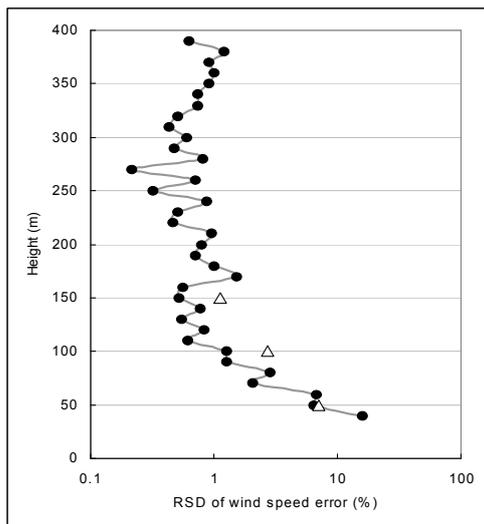


그림 5. Relative standard deviation profile of wind speed relative error e% (triangles are e% RSDs of time-series analysis)

그림 6은 세 높이에서의 풍속 상대오차 RSD의 일중 변화를 보여주는 그래프로, 대기경계층 하부로 갈수록 RSD가 커질뿐 아니라 그 변동폭도 커지는 것을 확인할 수 있으며, 그 이유는 전술한 바와 같이 대기경계층의 구배가 큰 구간이기 때문인 것으로 설명된다.

4. 결 론

본 논문에서는 윈드큐브 라이다를 이용하여 풍속연직분포를 측정할 경우, 25m 검출체적 내 풍속분포 비균일성에 의해 선형적 평균화 방식으로 산출된 풍속연직분포에 내포되는 측정 불확도를 정량적으로 분석하는 가상적 평가법을 개발하였다. 또한 도심에서 소다 원격탐사로 획득한 대기경계층 풍속분포를 참조자료로 이용함으로써 가상적 평가법에 의해 윈드큐브 라이다의 풍속연직분포 측정 불확도를 정량 산출하였다. 이를 통하여 최종적으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 풍속구배가 커지는 대기경계층 하층부에서 측정오차가 발생하였으나 상부로 갈수록 수렴 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 2개월간의 소다 측정기간에 대하여 측정 불확도를 정량 평가한 결과에 의하면, 지면고도 50m, 100m, 150m에서 각각 풍속 오차 상대표준편차가 각각 6.98%, 2.70%, 1.12%인 것으로 산정되었다.
- (3) 따라서 대기경계층 하층부에서는 라이다 측정불확도를 저감시키는 측정방법 또는 보정방법이 고안될 필요성이 있다고 사료되며, 측정결과를 활용함에 있어서도

본 연구에서 평가된 측정불확도를 참조하여 해석하여야 함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(신재생에너지기술개발사업)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

참 고 문 헌

1. IEC(International Electrotechnical Commission), IEC61400-12-1, Power performance measurements of grid connected wind turbines, 2004.
2. 김용환, 임희창, 육상 풍력발전단지 개발 및 에너지생산량 예측기법에 대한 고찰, 한국풍공학회논문집, 14권, 1호, pp.9-17, 2010.
3. EWEA(Europeam Wind Energy Association), Wind Energy in Facts and Figures, 2009.
4. 김현구, 포항지역 풍속전단 형태분석과 측정-상관-예측법의 응용, 한국신재생에너지학회지, 1권, 2호, pp.26-33, 2005.
5. Faghani D., Desrosiers E., Ait-Driss B., Poulin M., Use of Remote Sensing in Addressing Bias & Uncertainty in Wind Measurements, AWEA Wind Resource & Project Energy Assessment Workshop, 2008.
6. 김동혁, 이화운, 김현구, 김민정, 박순영, 전원배, 차영민, 이순환, 지상기반 원격탐사장비를 이용한 대도시 고층바람 특성 분석, 한국기상학회 추계학술대회, 2009.
7. 지영미, 김현구, 정진화, 한경섭, 박현철, SODAR와 LIDAR를 이용한 포항지역 풍속 측정, 한국신재생에너지학회 추계학술대회, 2009.
8. 김현구, 정태윤, 정재근, 신안 비금도 라이다 측정자료를 이용한 특성난류강도 분석, 한국환경과학회 대기분과워크샵, 2010.
9. Albers A., Janssen A.W., Mander J., Comparison of Lidars, German Test Station for Remote Wind Sensing Devices, Deutsche WindGuard Consulting GmbH, European Wind Energy Conference 2009.
10. Leosphere, WindCube User's Manual, p.39, 2008.
11. Bingol F., Mann J., Foussekis, D., LiDAR error estimation with WASP Engineering, Earth and Environmental Science, Vol.1, pp.1-9, 2008.
12. Bradley S., Behrens P., Hunerbein S.V., Piper B., Precision wind profiling using new acoustic technologies, European Wind Energy Conference 2008.