한국환경과학회지 제21권(제2호), 145～152, 2012
*Journal of the Environmental Sciences*
http://dx.doi.org/10.5322/JES.2012.21.2.145

# 준복잡지형 대기경계층 저층 풍속분포 특성분석
## - 포항가속기 라이다 원격탐사 캠페인을 중심으로

김 현 구*
한국에너지기술연구원 풍력발전센터
(2011년 5월 2일 접수; 2011년 11월 22일 수정; 2012년 1월 19일 채택)

# Analysis on Wind Profile Characteristics in a Sublayer of Atmospheric Boundary Layer over a Semi-Complex Terrain
## - LIDAR Remote Sensing Campaign at Pohang Accelerator Laboratory

Hyun-Goo Kim*
*Wind Energy Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*
(Manuscript received 2 May, 2011; revised 22 November, 2011; accepted 19 January, 2012)

**Abstract**

The mean wind speed and turbulence intensity profiles in the atmospheric boundary layer were extracted from a LIDAR remote sensing campaign in order to apply for CFD validation. After considering the semi-steady state field data requirements to be used for CFD validation, a neutral atmosphere campaign period, in which the main wind direction and the power-law exponent of the wind profile were constantly maintained, was chosen. The campaign site at the Pohang Accelerator Laboratory, surrounded by 40~50m high hills, with an apartment district spread beyond the hills, is to be classified as a semi-complex terrain. Nevertheless, wind speed profiles measured up to 100m above the ground fitted well into a theoretical-experimental logarithmic-law equation. The LIDAR remote-sensing data of the sub-layer of the atmospheric boundary layer has been proven to be superior to the data obtained by conventional extrapolation of the wind profile with 2 or 3 anemometer measurements.

**Key Words** : Remote sensing, LIDAR, Complex terrain, Atmospheric boundary layer, Power-law, Logarithmic-law

## 1. 서 론

실생활 영역에 해당하는 대기경계층 저층 풍속분포 특성의 정확한 파악은 풍력발전, 대기환경, 풍공학 등 다양한 공학분야의 각종 해석 및 평가시 중요한 관건이 된다. 일반적으로 대기경계층 저층을 이론-실험적 로그법칙 풍속분포로 가정하고, 관측높이 10 m의 기상청 지면기상관측자료를 외삽하여 10 m 이상의 높이에서의 대기유동장 해석 및 평가를 수행한다. 그러나 우리나라와 같은 복잡지형에서는 지형지물 등 지면조건의 직접적인 영향으로 비단조적 풍속분포를 가질 수 있기 때문에 평지에 적용 가능한 로그법칙 풍속분포를 가정할 경우 해석결과에 상당한 오차가 내포될 수 있다(Kathleenr과 Bailey, 2004).

최근 200 m 높이까지 대기경계층 저층의 풍속분포 측정이 가능한 SODAR, LIDAR 등의 원격탐사장비의 보급으로 고품질(연직방향 측정지점수, 측정시간 간격, 측정정확도 측면) 측정자료 확보가 가능하게 되

*Corresponding author : Hyun-Goo Kim, Wind Energy Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea
Phone: +82-42-860-3376
E-mail: hyungoo@kier.re.kr

었으며, 대기유동장의 공학적 해석 및 평가도구인 전산유동해석과 대기경계층 실측자료를 비교·검증함으로써 예측정확도를 대폭 향상시킬 수 있는 계기가 마련되었다(한국에너지기술평가원, 2011).

대기유동장과 연관된 제반 현상의 공학적 해석 및 평가수단으로서 전산유동해석을 활용하기에 앞서 실측자료와의 비교·검증 단계가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 준복잡지형인 포항가속기에서 수행된 LIDAR 원격탐사 캠페인(김 등, 2011b) 측정자료로부터 대기경계층 저층의 풍속분포 특성을 분석하였으며, 준정상상태 중립대기 조건에 부합되는 사례기간의 평균풍속 연직분포가 이론-실험적 로그법칙에 접합되는지를 판단함으로써 최종적으로 전산유동해석과의 비교·검증에 사용하기 위한 참조자료를 생산하였다.

## 2. 재료 및 방법

대기경계층 저층의 풍속분포 측정에 특화된 프랑스 Leosphere사의 WindCube LIDAR를 이용한 (Leosphere, 2008) 원격탐사 캠페인은 포항가속기연구소 내 실험동 옥상(높이 7 m)에서 약 2개월간 수행되었다. Fig. 1의 지형도에서 볼 수 있듯이 포항가속기연구소는 주위에 높이차 50~60 m의 산지로 둘러싸인 분지 내에 위치하고 있다.

원격탐사장비로는 프랑스 Leosphere사의 WindCube LIDAR를 사용하였으며, 포항가속기 원격탐사 캠페인은 측정지점의 연직고도설계를 달리하여 3차에 걸쳐 수행되었다(Table 1). 참고로 WindCube LIDAR는 10개 측정높이의 풍향, 풍속 및 그 표준편차를 1 Hz 샘플링 주기로 동시에 측정한다.

**Table 1.** LIDAR Remote-sensing campaign details.

| Campaign | Measurement period | Measurement heights(a.g.l.)* |
|---|---|---|
| No.1 | Jul. 23 ~ Aug. 9, 2009 | 40~310 m (30 m interval) |
| No.2 | Aug. 10 ~ Aug. 15, 2009 | 40~550 m (50m interval) |
| No.3 | Aug. 17 ~ Sep. 28, 2009 | 40~130 m (10m interval) |

* Building height is not added.

Fig. 2는 캠페인 차수별 바람장미 및 10분-평균 풍속의 시계열 그래프로, 바람장미를 보면 탁월한 주풍

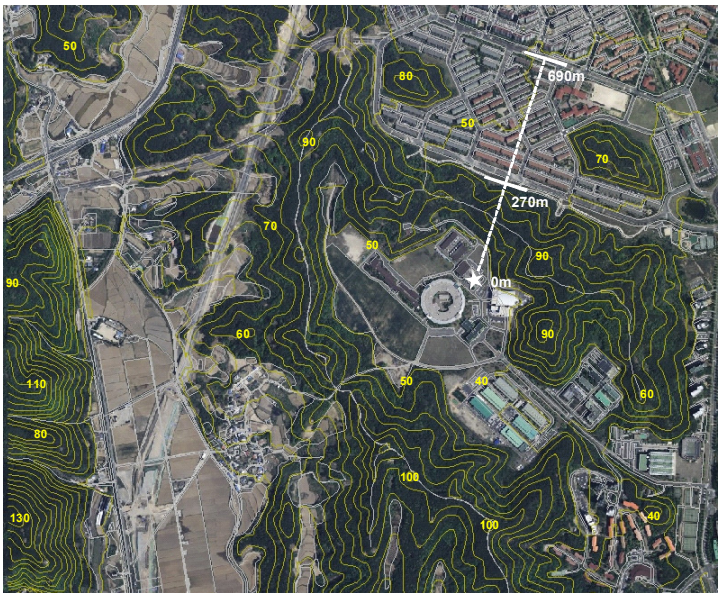
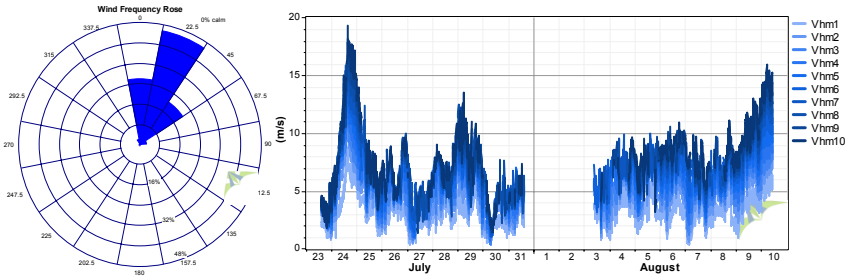
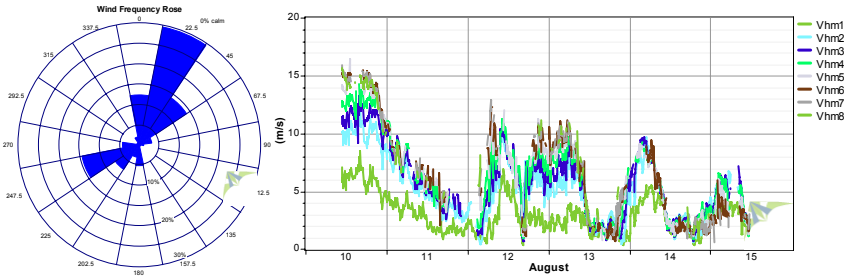


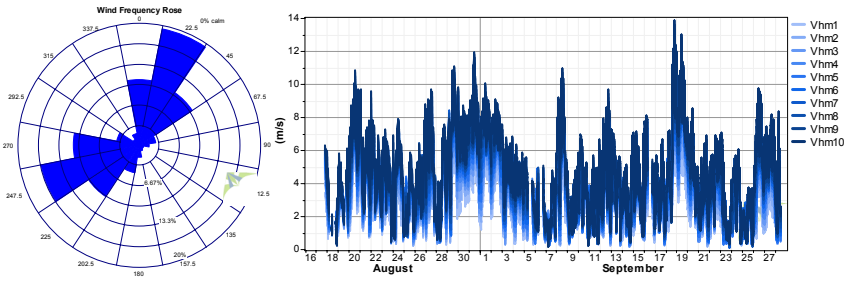

**Fig. 1.** Topography map around the Pohang Accelerator Laboratory (star symbol: remote sensing campaign site).




(1) Campaign #1 (wind rose and wind speed time series at 130 m a.g.l.)




(2) Campaign #2 (wind rose and wind speed time series at 150 m a.g.l.)




(3) Campaign #3 (wind rose and wind speed time series at 130 m a.g.l.)

**Fig. 2.** Wind roses and wind speed time-series graphs by campaign number.

향은 전 캠페인 기간에 걸쳐서 북북동풍으로 나타나고 있으며 제 2 주풍향으로는 남서풍이 나타났다. 관측기간 중 최대풍속은 310 m 높이에서 19.5 m/s로 측정되었다.

풍력발전 또는 풍공학 분야에서는 사업경제성 및 구조안전성과 직결되는 풍속값의 정확도를 최우선으로 요구한다. 특히 풍력발전량은 풍속의 세제곱에 비례하므로 풍속오차에 매우 민감할 수 밖에 없다. 따라서 지형지물에 의한 대기유동장의 변동을 정확하게 예측하기 위한 수단으로써 지형지물을 고해상도의 공간해상도로 수치모의할 수 있는 전산유동해석이 선호된다(김과 황, 2010).

대기유동장은 측정지점을 중심으로 시공간의 함수, 즉 $f(r,\theta,z,t)$이며 실측자료 역시 동일한 형태로 측정된다. 실측의 경우 시시각각으로 변하는 기상상황 및 대기유동의 제어가 불가능하므로 측정에는 필연적으로 수많은 변수요인들로 인한 상당한 불확실성이 포함된다. 따라서 수치모의 계산부하를 경감하는 목적 이외에도 대기유동장의 특성을 선형적으로 이해함으로써 비교검증의 신뢰도를 확보하기 위하여 일차적으로 특정 풍향에서 일정한 풍속이 유지되는 정상상태에 대한 전산유동해석을 수행하게 된다. 그러나 대

기유동은 매우 불규칙적이며 상태 지속성이 단시간이기 때문에 선형적 해석요건을 충족하는 정상상태 또는 준정상상태 실측은 현실적으로 매우 어렵다.

대기경계층 저층의 풍속분포 실측자료가 대기유동장 전산유동해석의 입력자료 또는 비교·검증자료로 활용되기 위해서는 다음과 같은 조건을 고려하여야 할 것이다.

### 3.1. 유동변수

준정상상태 중립대기에서의 평균풍속과 난류강도가 주요 유동변수이나 중립대기가 아닌 경우에는 대기안정도를 정의하기 위한 변수로서 기온 등이 포함되어야 할 것이다. 풍력발전의 경우, 정확한 공기밀도의 산출이 요구되므로, 이상기체 상태방정식을 적용하기 위해서는 기온과 대기압 측정이 요구된다.

### 3.2. 측정불확도

대기경계층 실측은 자연적 불확실성이 높기 때문에 자칫 원격탐사장비의 측정불확도를 간과할 수 있다. 일례로 고층으로 갈수록 자료회수율이 저하됨에 따른 통계적 왜곡을 고려하지 않을 경우 물리현상의 왜곡으로 이어질 수 있음에 주의하여야 할 것이다.

본 연구에서는 프랑스 Remtech사의 PA0 SODAR, 독일 Sintec사의 MPAS SODAR와의 공동관측을 통하여 원격탐사장비간 상호검증(김 등, 2011a; 김 등, 2011b) 및 LIDAR 측정원리에 따른 내재적인 측정불확도의 정량평가 과정을 거쳤다(김과 최, 2010; Bradley, 2008).

### 3.3. 원방상류 참조지점

지형지물에 의한 대기유동장의 변화를 분석하기 위해서는 관심지점과 함께 지형지물의 영향을 받지 않는 원방상류 참조지점에서 동시측정을 이루어져야 한다. 참조지점의 대기유동장은 지형지물에 의한 변동요인이 제거되므로 $f(z,t)$로 표현할 수 있다.

### 3.4. 준정상상태 유동조건

전산유동해석의 정상상태 해석결과와의 비교검증을 위해서는 준정상상태 실측자료가 필요하다. 준정상상태는 관심지점 및 참조지점에서 유동변수가 일정시간동안 일정범위 내에서 균일하게 지속되는 상황으로 정의된다. 준정상상태가 만족될 경우 대기유동장은 $f(r,\theta,z)$로 표현할 수 있다.

### 3.5. 대기유동장 상사성

대기유동의 상사성을 기술하는 무차원수로는 Coriolis 힘에 대한 Rossbi 수, 대기안정도에 대한 Richardson 수, 관성력에 대한 Reynolds 수, 열전달에 대한 Prandtl 수, 공기압축성에 대한 Eckert 수 등이 있다(Plate, 1982).

실생활 적용을 위한 대기경계층 저층에 대한 공학적 해석의 수평공간 규모는 수십 km 이내, 수직공간은 수백 m 이내, 그리고 지형지물의 상세해석을 위해 수십 m 이내의 공간해상도가 요구된다.

따라서 열전달 현상을 제외할 경우 공학적 해석에 있어서 유의한 무차원수는 레이놀즈 수와 리차드슨 수(또는 Monin-Obukhov 길이; 정 등, 2009)이다. 그런데 대기경계층은 기본적으로 지표면이 거칠고 레이놀즈 수가 충분히 큰 난류유동이기 때문에 소위 Townsend의 레이놀즈 수 상사성 가설에 따르면 임계 거칠기 레이놀즈 수 이상에서는 레이놀즈 수에 상관없이 상사성이 유지된다(Townsend, 1976). 따라서 최종적으로 대기안정도에 따른 상사성 문제가 남게 된다.

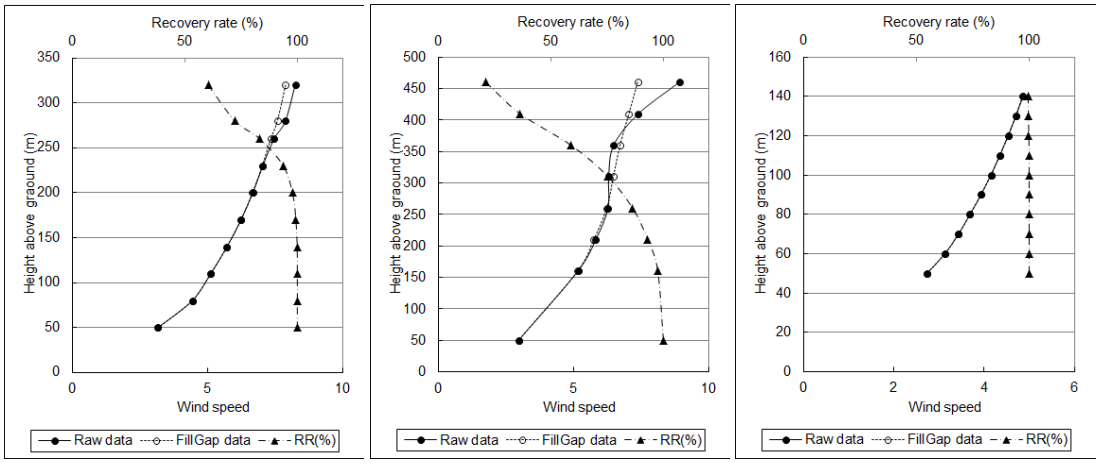
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 측정불확도

포항가속기 원격탐사 캠페인에서 LIDAR는 200 m 이상의 높이부터 자료회수율이 저하되어 350 m 높이에서는 50% 수준으로 저하되었다(Fig. 3).

본 연구에서는 자료회수율 저하에 따른 통계적 왜곡을 상쇄하기 위하여 자기회귀 마코브 사슬(autoregressive Markov chain) 방법으로 결손자료를 채웠다(Kline, 1996). 이 방법은 풍속 및 풍속전단의 일변화 패턴과 자기상관을 이용하여 결손구간의 시계열 풍속을 재현한다.

Fig. 3은 결손자료를 채워 넣기 전후를 비교한 것으로, 자료결손을 채워 넣은 이후의 풍속분포가 이론-실험적 풍속분포에 근접함을 확인할 수 있다.




(a) Campaign #1 (b) Campaign #2 (c) Campaign #3

**Fig. 3.** Comparison of wind speed profiles before and after missing data fill gap.

### 3.2. 원방상류 참조지점

본 연구에서는 관심지점인 포항가속기에서만 실측 캠페인이 수행되었다. 복잡지형에서는 지형지물의 영향을 배제할 수 있는 원방상류를 규정하기 어려울 뿐 아니라 실측비용 등의 이유로 관심지점에서만 불완전한 실측을 수행할 수 밖에 없는 경우가 많다. 전산유동해석에서는 원방상류 참조지점의 측정자료를 계산영역의 경계조건으로 부과하게 되는데, 참조지점 실측이 누락된 경우의 대안으로, 계산영역을 충분히 넓게 설정하여 대기유동이 지형지물에 적응하며 발달하는 충분한 거리를 확보함으로써 경계조건 의존도를 제거하는 방법이 있다. 단, 이 경우 계산영역의 크기변화에 따른 수렴해의 경계조건 민감도를 확인하여야 할 것이다.

### 3.3. 준정상상태 유동조건

#### 3.2.1. 풍향의 준정상상태

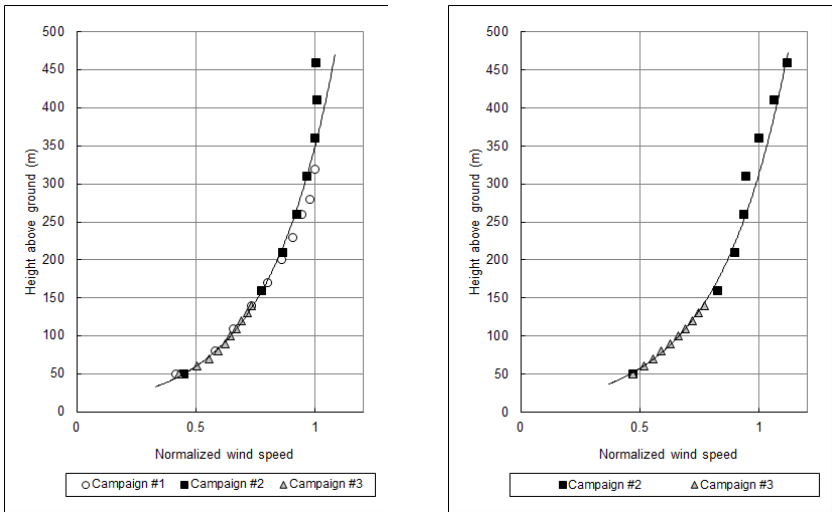
풍향각에 따라 풍상부의 지형 및 지면조건이 상이하며 그에 따른 풍속분포도 상이하게 나타나므로, 최소한 10도 간격으로 세밀한 분석이 필요하며, 풍상부의 지형 및 지면조건이 동일한 풍향구간에서 준정상상태가 만족되어야 한다. 포항가속기 원격탐사 캠페인 기간 중에는 Fig.2과 같이 탁월한 두 주풍향(북북동풍과 남서풍)이 나타났으며, 풍향전환 기간을 제외하면 준정상상태를 만족하였다. 그리고 두 주풍향은 Fig. 1에서 확인되듯이 포항가속기를 둘러싼 산지의 능선과 수직하게 입사하는 풍향이며 그 상부의 지형지물 분포상태도 주풍향의 변동범위 내에서 균일하므로 준정상상태의 가정이 유효하다고 판단하였다.

#### 3.3.2. 풍속의 준정상상태

풍향이 일정하게 유지되는 기간 중에도 풍속은 2~5배 이상의 진폭으로 변동하지만, 타운젠드의 레이놀즈 수 가설에 의해 난류경계층인 대기경계층 저층의 거동은 풍속변화에 무관하게 상사성이 유지된다고 가정할 수 있다. 실제로 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 제 1, 2 주풍향에 대한 3차례 캠페인의 평균 풍속분포는 모두 상사한 것을 확인할 수 있다. 특히 포항가속기 지역이 준복잡지형임에도 불구하고 평균풍속의 연직분포는 단조적인 형태를 보이고 있음에 주목할 필요가 있다.

### 3.4. 대기유동장 상사성

앞서 고찰한 바와 같이 대기유동장 상사성의 문제는 최종적으로 대기안정도의 영향이다. 즉, 주간에는 풍속이 강화되어 대기안정도가 중립상태가 되는 반면, 야간에는 풍속 약화 및 지면냉각으로 안정상태가 되어, 동일 풍향구간에서도 주야간 대기안정도의 변




(a) 1st main wind direction (15°~35°) (b) 2nd main wind direction (235°~255°)

**Fig. 4.** Comparison of mean wind speed profiles in main wind directions by campaign case.

화에 따라 풍속분포 형상 즉 풍속전단이 큰 폭으로 변화하게 된다. 실용적 측면에서 대기안정도 변화특성을 분석하는 효과적인 방법은 멱법칙지수(power-law exponent, $\alpha$)의 거동을 분석하는 것이다.

참고로 멱법칙 풍속분포식은 다음과 같다.

$$U(z) = U_R (z / z_R)^{\alpha} \quad (1)$$

식에서 아래첨자 R은 기준높이를 의미한다.

Fig. 5는 3차 캠페인 사례에 대하여 전 풍향각 자료, 제 1 주풍향 그리고 풍속이 5 m/s 이상인 경우에 대한 멱법칙지수의 일변화를 비교한 그래프이다. 멱법칙지수의 일변화는 전술한 바와 같이 풍속이 강화되는 주간에는 중립대기에 근접하여 풍속전단이 약해지지만 안정대기인 야간에는 풍속전단이 커지는 형태가 뚜렷하게 나타난다. 참고로 풍속 5 m/s 이상으로 준중립대기로 가정할 수 있는 경우의 멱법칙지수는 거의 일변화가 없이 중립대기 멱법칙지수인 0.4를 유지하고 있음도 확인할 수 있다.

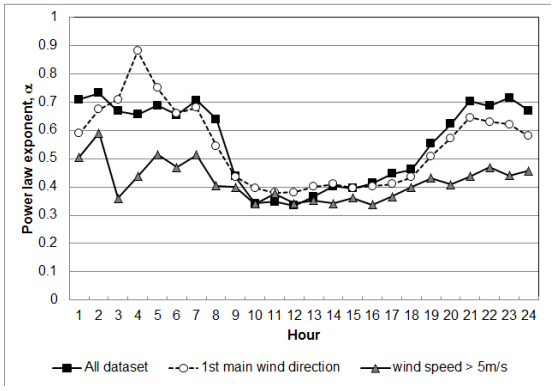



**Fig. 5.** Diurnal variation of power-law exponent for the campaign #3.

추가적으로 3차 캠페인 기간 중 제 1 주풍향을 유지하며 풍속이 5 m/s 이상으로 준중립대기 상태이며 멱법칙지수가 일정하게 유지된 준정상상태 사례기간을 추출하여 비교분석하였다. 즉. 8월 29일 08:30~18:30과 9월 18일 14:00~23:50의 두 사례기간이며, 각각 멱법칙지수는 0.41±0.07과 0.42±0.07로, 50 m 높이에서의 풍속은 5.8±0.8 m/s와 6.6±0.9 m/s로 일정하게 유지되었다.

### 3.5. 풍속분포의 로그법칙 접합

포항가속기 원격탐사 캠페인을 통하여 최종적으로 제 1, 2 주풍향에 대한 중립대기 조건에서의 평균풍속 및 난류강도 연직분포를 전산유동해석의 비교검증 자료로 추출하였다. Fig. 6은 3차 캠페인 전 자료 및 제 1 주풍향 및 풍속 5 m/s 이상의 사례에 대하여 풍속분포를 로그축에서 도시하고 이론-실험적 풍속분포식인 로그법칙으로 접합한 결과를 보여주고 있다.

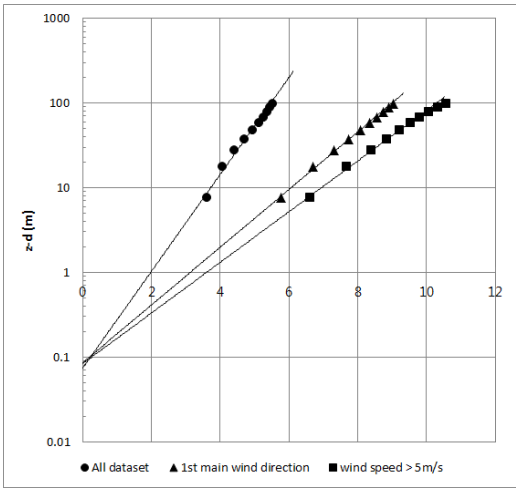



**Fig. 6.** Regression of wind speed profiles by logarithmic-law.

4.3절에서 고찰한 바와 같이 준복잡지형임에도 불구하고 풍속분포는 로그법칙으로 접합될뿐 아니라 모든 경우의 수직축 절편 즉 지면거칠기를 동일하게 접합하고 있어 로그법칙이 유효한 경우임을 입증하고 있다. 참고로 로그법칙 접합의 결정계수는 $R^2$=0.99이다.

중립상태 로그법칙 풍속분포식은 다음과 같이 표현된다.

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right) \tag{2}$$

식에서 $u_*$와 $z_o$는 각각 마찰유속 및 표면조도이고 $d$는 영변위이다. 그리고 카르만(Karman) 상수 $\kappa$는 0.41의 값을 갖는다.

풍속분포의 로그법칙 곡선접합을 위해서는 먼저 마찰유속을 산정하여야 하며, 다음의 난류유속 연직성분과 마찰유속에 대한 실험적 관계식을 이용하였다 (Caughey 등, 1979).

$$\sigma_w = 1.58\, u_* \tag{3}$$

마찰유속이 산정되면 최하단 50 m 및 60 m 높이에서의 풍속 측정값을 이용하여 Eq. (2)로부터 표면조도와 영변위를 산출할 수 있다. 즉, d=42.4 m, $z_o$=0.8 cm가 산출되었다.

Fig. 7은 준정상상태 중립대기 대표일로 선정된 8월 29일과 9월 18일에 대한 평균풍속 및 난류강도 연직분포를 도시한 것이다. 두 사례일 모두 평균풍속 및 난류강도 연직분포는 타운젠드의 가설에 부합되며 이를 통하여 전산유동해석에 사용할 수 있는 비교검증용 측정자료가 도출되었다. 참고로 Fig. 7에서 실선은 매 14:00시의 평균풍속 연직분포로, 도출된 풍속분포가 중립대기 풍속분포임을 재확인하고 있다.

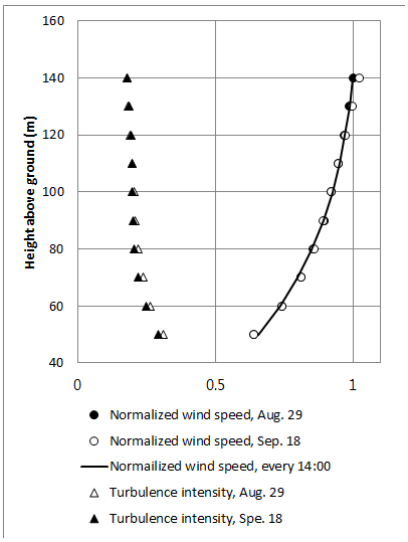



**Fig. 7.** Wind speed and turbulence intensity profiles derived for CFD simulation.

## 4. 결 론

본 연구에서는 포항가속기 원격탐사 캠페인 측정자료로부터 전산유동해석 비교검증용 참조자료를 추

출함에 있어, 대기경계층 저층의 풍속분포 특성분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 원격탐사장비 특성 상 측정고도 상승에 의해 자료회수율이 저하됨에 따라 통계적 왜곡이 발생하는데, 자기회귀 마코브 사슬 방법에 의해 결손자료를 채워 넣음으로써 왜곡을 대폭 완화시킬 수 있었다.

(2) 대기유동장의 핵심 상사성 요인으로서 대기안정도가 고려되어야 하며, 풍향과 멱법칙지수가 일정하게 유지되는 기간을 준정상상태로 판별하여야 함을 고찰하였다. 이에 따라 제 1, 2 주풍향에 대하여 멱법칙지수의 일변화 중 풍속강화에 따라 중립대기가 유지된 주간 시간대를 전산유동해석 비교검증에 적합한 사례기간으로 선정하였다.

(3) 원격탐사가 수행된 포항가속기 분지지형은 높이차 40~50 m의 산지를 넘어가면 아파트단지가 펼쳐진 준복잡지형임에도 불구하고 평균풍속 연직분포는 이론-실험적 로그법칙에 매우 유효하게 접합되었다. 이는 지형지물에 의한 점성저항이 영향을 미치는 대기경계층 저층 하단부를 벗어나면 대기경계층의 발달이 원활하게 이루어져 이론-실험적 로그법칙을 따르게 된 것으로 해석된다.

이러한 사실은 비록 원방상류 참조지점에 대한 동시측정이 누락되었으나 대기경계층의 발달에 지형지물의 비선형적 교란영향이 크지 않았음을 의미하며, 따라서 전산유동해석 계산영역을 충분히 넓게 설정함으로써 원방상류 경계조건의 영향을 배제할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 2~3개 높이에 대한 측정자료로 풍속분포를 외삽예측함에 따라 예측불확도가 높을 수 밖에 없는 풍황탑 측정방식에 비하여 LIDAR 원격탐사는 대기경계층 저층에 대한 월등히 우수한 설명력을 갖는다는 사실을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업 및 한국에너지기술연구원 부처임무사업으로 수행되었으며, 원격탐사 캠페인을 지원하여 주신 포항공과대학교 풍력특성화대학원에 감사를 표합니다.

## 참고문헌

김현구, 최지휘, 2010, 가상적 참값으로써 소다 측정자료를 적용한 라이다에 의한 풍속연직분포 측정의 불확도 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 30(4), 79-85.

김현구, 황효정, 2010, 해외 풍력자원 컨설팅사의 바람지도 서비스 분석, 한국신재생에너지학회지, 6(2), 12-18.

김현구, 김동혁, 전완호, 최현정, 2011a, 풍력자원평가용 윈드큐브 라이다와 씬텍 소다의 비교검증 - 잠실 원격탐사 캠페인, 한국신재생에너지학회지, 7(2), 43-50.

김현구, 정진화, 안해준, 지영미, 2011b, 풍력자원평가용 윈드큐브 라이다와 렘텍 소다의 비교검증 - 포항가속기 원격탐사 캠페인, 한국태양에너지학회 논문집, 31(2), 63-71.

한국에너지기술평가원, 2011, 복잡지형에서의 풍력단지 최적설계 기술개발, 2011년도 에너지 R&D 상세기획보고서, 20.

정태윤, 임희창, 김현구, 장문석, 2009, 월령 연안지역 대기경계층의 유동특성과 대기 안정성에 대한 고찰, 한국환경과학회지, 18(8), 857-865.

Bradley, S., 2008, Wind speed erros for LIDARs and SODARs in complex terrain, Earth and Environmental Science, I, 1-7.

Caughey, S. J., Wyngaard, J. C., Kaimal, J. C., 1979, Turbulence in the evolving stable boundary layer, American Meteorological Soc., 36, 1041-1052.

Kathleen, E. M., Bailey, B. H., 2004, Roughness lengths in complex terrain derived from SODAR wind profiles, 16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Portland, USA.

Kline, J. B., 1996, Review of data reconstruction methods, Report to NREL National Wind Technology Center.

Leosphere, 2008, WindCube User's Manual, LEO/WIND/MAN/010607, 39.

Plate, E., 1982, Engineering meteorology, Elsevier Sci. Pub. Co., 740.

Townsend, A. A. R., 1976, The structure of turbulent shear flow, Cambridge University Press, Cambridge, UK.