

## 타워 관측 자료를 이용한 연안 대기 경계층 내 바람 자원의 연직 변동 특성

### Characteristics of Vertical Variation of Wind Resources in Planetary Boundary Layer in Coastal Area using Tall Tower Observation

유정우 · 이화운\* · 이순환<sup>1)</sup> · 김동혁<sup>1)</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>부산대학교 환경연구원

(2012년 9월 7일 접수, 2012년 11월 14일 수정, 2012년 11월 15일 채택)

Jung-Woo Yoo, Hwa-Woon Lee\*, Soon-Hwan Lee<sup>1)</sup> and Dong-Hyeok Kim<sup>1)</sup>

*Division of Earth Environmental System, Pusan National University*

<sup>1)</sup>*Institute of Environmental Studies, Pusan National University*

(Received 7 September 2012, revised 14 November 2012, accepted 15 November 2012)

#### Abstract

Analysis of wind resources in Planetary Boundary Layer (PBL) using long term observation of tall tower located near coast line of the Korean Peninsula were carried out. The data observed at Pohang, Gunsan and Jinhae are wind, temperature and relative humidity with 10 minute interval for one year from 1 October 2010.

Vertical turbulence intensity and its deviation at Pohang site is smaller than those of other sites, and momentum flux estimated at 6 vertical layers tend to show small difference in Pohang site in comparison with other sites. The change of friction velocity with atmospheric stability in Pohang is also not so great. These analysis indicate the mechanical forcing due to geographical element of upwind side is more predominant than thermal forcing. On the other hand, wind resources at Gunsan and Jinhae are mainly controlled by thermal forcing.

**Key words** : PBL, Tower data, Wind resources, Wind shear, Instability index

#### 1. 서 론

화석연료의 지속적인 소비와 그에 따른 지구온난화 등의 기후변화 문제로 인하여 청정 대체에너지에

대한 필요성이 급격하게 증가하고 있다. 특히 석유계열 에너지의 전량을 수입하는 등 에너지 수입의존도가 높은 한반도의 경우 신재생에너지의 발굴은 자원의 자립화와 에너지 자원 다변화 측면에서 매우 중요하다. 또한 정부는 2012년부터 RPS (Renewable Energy Portfolio Standard)제도를 도입하여 신재생에너지의 공급에 힘쓰고 있다(Kim and Cho, 2010).

특히 풍력에너지는 다른 신재생에너지에 비하여

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

기술적인 성숙도가 높고, 에너지 생산단가가 낮기 때문에 독일, 덴마크 등 많은 나라에서 집중적으로 육성하고 있다 (Lee *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2006). 국내에서는 대관령, 영덕 등 상업용 육상 풍력 발전 단지가 운용 중에 있으며, 지식경제부에서는 해상풍력 추진 로드맵을 발표하여 2011년부터 9년간 총 9.2조 원을 투자하여 2019년까지 총 2.5 GW의 해상풍력 단지를 건설할 계획이며, 현재 전북 군산 새만금지구, 경남 거제 등 연안 지역에서의 풍력 단지 조성이 계획 중이다.

현재 정부차원에서 다양한 풍력 자원의 기초연구를 통하여 국가 바람자원지도를 작성하여 한반도 전체의 풍력자원 분포를 파악하고 있다. 그러나 바람자원 분포를 평가하는데에 다양한 접근 방법이 사용되는데 주로 수치모형을 이용한 물리적인 방법이 사용된다. 그러나 한반도는 산악구조와 복잡한 해안선을 가진 반도라는 지리적 특성 때문에 풍력자원을 정확히 평가하는 것은 어렵다. 따라서 풍력발전기가 설치되는 고도의 관측이 반드시 요구된다 (Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2010).

또한 풍력 자원의 산정 기술 뿐 아니라 다양한 공학적인 산업 기술이 유기적으로 결합되어야 효율적인 풍력자원의 확보가 가능하다. 특히 풍력자원을 직접적으로 생산하는 발전기와 블레이드의 설계기술은 매우 중요하다. 풍력발전기에 사용되는 블레이드 길이가 10% 증가할 때, 출력이 21% 증가하며 길이가 길어질수록 효율이 증가한다 (Shim *et al.*, 2007). 이러한 이유로 최근에는 풍력 발전의 발달과 함께 중·대형급 풍력 발전기 시스템이 개발되면서 발전용량이 급격히 증가하고 있다 (Jeong *et al.*, 2009; Shin, 2009).

이러한 중·대형급 발전기 개발에는 풍력타워 구조의 안정성과 풍력 발전 효율성 측면에서 많은 연구가 필요하다. 특히 블레이드의 길이가 80 m 이상으로 증가하기 때문에 블레이드에 의한 공진현상을 정확히 파악하여야 한다. 중·대형 풍력 발전기의 경우, 고도에 따른 기상학적인 풍속의 차이로 상하부 블레이드의 추력 변동이 발생하며, 이러한 추력 변동은 발전기 구조물의 안정성 뿐 아니라 블레이드의 저차 진동으로 인한 공진현상이 발생하여 풍력에너지 발생의 효율을 감소시킨다. 이러한 연직 풍속차이에 따른 공진 현상을 저감시키기 위하여 블레이드

회전속도를 조절하여야 하며, 이는 에너지 손실로 이어진다. 따라서 풍력 발전 단지를 선정하는 기초자료로 연직 방향의 바람장 시어를 정확히 평가할 필요가 있다.

또한 이러한 시어의 발생조건과 특성을 분석하여 난류에 의해 발생하는 연직 방향의 운동량 플럭스를 평가하여야 한다. 이러한 운동량 플럭스는 대기의 중관 안정도와 밀접하게 관계하는데, 현재 우리나라에서는 고산, 광주, 백령도, 속초, 오산, 포항에서 고층기상관측이 실시되고 있다. 오산과 광주는 1일 4회, 나머지 지역에서는 1일 2회 관측이 실시되고 있다. 최근 이런 고층기상관측 자료를 이용하여 한반도의 대기불안정 지수를 산출하여 한반도의 악기상과 뇌우 예보에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다 (Choi, 2008; Park *et al.*, 2006; Jeon, 2003; Son *et al.*, 2003).

따라서 본 연구는 풍력발전단지 개발가능성이 높은 해안지역의 세 곳(포항, 군산, 진해지역)에 설치된 80 m 고층 타워 관측자료를 바탕으로 대기 경계층 내부의 고도별 바람의 변동성을 정량적으로 분석한다. 특히 경계층 내 블레이드가 위치하는 80 m 이내에서 발생할 수 있는 상하간의 바람 변동성 차이를 연직시어와 운동량 플럭스를 통하여 살펴보고, 고층 자료를 이용한 종관적인 안정도자료를 바탕으로 안정도에 따른 바람장의 연직분포 특성을 분석한다.

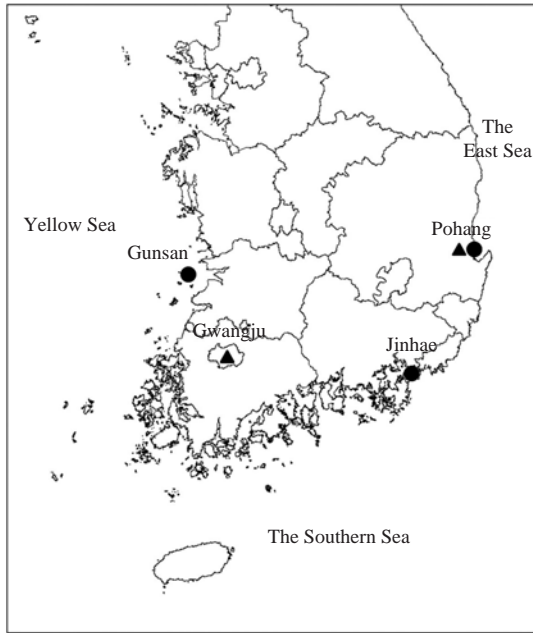
## 2. 관측자료 및 안정도 분류

### 2.1 관측자료

관측자료는 80 m 높이의 기상타워에서 생산된 기상학적인 자료로, 관측지점은 각각 동해, 서해, 남해의 해안지역에 위치한 포항, 군산, 진해지역으로 각 해안의 바람 자원 분포 특성을 분석한다. 우선, 포항 지점 (PH)은 경북 포항시 영일만항(36° 6'N, 129° 25' E) 인근에 위치하며 지상 4 m에 기상관측타워가 설치되었다. 기상관측타워가 설치된 위치의 주변지형은 동쪽으로는 영일신항만이 위치해 있으며, 종관 규모 상 풍상측에 해당하는 서쪽에는 낮은 언덕이 위치한다. 두 번째로, 군산지점 (GS)은 전북 군산 새만금지구 (35° 47'N, 126° 24'E) 인근에 위치한 무너도이며 지상 18 m에 기상관측타워를 설치하였다. 기상관측

**Table 1. Summary of tower observation in 3 region.**

Site	Period	Location		Altitude
Pohang (PH)	2010. 10. 17~2011. 11. 03	36° 6'34.23"N	129° 25'55.99"E	4 m
Gunsan (GS)	2010. 11. 17~2011. 11. 28	35° 47'53.81"N	126° 24'52.37"E	18 m
Jinhae (JH)	2010. 11. 02~2011. 11. 15	35° 3'48.62"N	128° 45'51.77"E	78 m



**Fig. 1. Location of tall tower observation sites (●) and radio sonde observation sites (▲).**

타워 주변은 낮은 고도에 잡목들로 둘러싸여 있지만 지표면 부근을 제외하고 지형적인 영향을 받지 않는 지역이다. 세 번째로, 진해지점 (JH)은 경남 창원 진해 연도에 (35° 3'N, 128° 45'E) 위치하며 지상 78 m에 설치하였다. 기상관측타워의 동남방향으로 25 m 높이의 등대가 위치해 있어 낮은 높이에 설치된 풍속센서는 이러한 장애물의 영향을 받을 것으로 생각되지만, 주변에 위치한 섬들의 고도가 낮기 때문에 그 외에는 지형적 영향을 받지 않을 것으로 생각된다.

타워관측에 사용된 계측 장비로는 풍속계 (NRG #40 Anemometer) 는 80 m, 70 m, 60 m, 50 m, 40 m, 10 m 총 6개 층에 설치하였으며, 78 m와 38 m에는 풍향계 (200P Wind Direction Vane) 를 설치하였다. 또한 2 m 고도에서 온도와 기압, 습도를 측정하였다. 관측평

균시간은 10분 간격이며, 총 관측기간은 세 관측지점에서 거의 1년을 관측하였으나 (표 1), 관측기간이 약간 상이하기 때문에 분석에 사용된 기간은 세 지점에서 공통관측이 이루어진 2010년 11월 18일~2011년 11월 2일 총 350일이다.

**2. 2 안정도 분석방법**

연안지역 대기경계층 내 바람은 대기안정도와 밀접하게 관계하기 때문에 대기안정도에 따른 분석이 필수적이다. 따라서 본 연구는 현재 기상청 고층관측이 실시되고 있는 관측지 중 한반도 남부지역의 중관 기상안정도를 대표할 수 있다고 판단되는 포항, 광주 고층기상자료의 대기 연직프로파일을 이용하여 강수일을 제외한 142일에 대하여 대기의 안정도를 판단하였다.

중관규모의 대기의 안정도를 판단하는 지수로 SSI (Showalter Stability Index), KI (K-Index), LI (Lifted Index) 등이 있으며 본 연구에 사용된 지수 각각은 다음과 같이 정의된다.

$$LI = T^{500} - T^{\text{lifted from surface}} \tag{1}$$

$$KI = (T^{850} - T^{500}) + T_d^{850} - (T^{700} - T_d^{700}) \tag{2}$$

$$KO = 0.5 \times (\theta_e^{500} + \theta_e^{700} - \theta_e^{850} - \theta_e^{1000}) \tag{3}$$

여기서 T와 T<sub>d</sub>, θ<sub>e</sub>는 각 고도의 기온과 이슬점 온도, 상당온위를 나타낸다. T<sup>lifted from surface</sup>는 지표 공기괴가 500 hPa까지 단열적으로 상승했을 때 기온을 나타내며, 상당온위는 고층기상자료 각 층에서의 기온과 이슬점 온도를 이용하여 상대습도를 계산한 후, Bolton (1980)이 제시한 다음의 방정식을 사용하여 계산한다.

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T_k - 55} - \frac{\ln\left(\frac{RH}{100}\right)}{2840}} + 55 \tag{4}$$

**Table 2. Criterion of stability indices.**

KI	Thunderstorm potential	LI	Instability	KO	Thunderstorm potential
< 15	0%	0~3	Stable	> 6	No potential risk thunderstorms
15~20	< 20%	-3~0	Marginally unstable	2~6	Small potential risk for thunderstorms
21~25	20~40%	-6~-3	Moderately unstable	< 2	Potential risk for thunderstorms
26~30	40~60%	-9~-6	Very unstable		
31~35	60~80%		Extremely unstable		
> 36	80~100%	< -9			

$$\theta_e = \left( T_k \frac{1000}{P} \right) \times \exp \left[ \frac{3.376}{T_L} - 0.00254 \times r (1 + 0.81 \times 10^{-3} r) \right] \quad (5)$$

위 식에서  $T_L$ 은 상승응결고도에서의 절대온도이며,  $T_k$ 는 절대온도, RH는 상대습도, r은 혼합비이며  $T_L$ 값을 계산하여 상대온위를 계산한다.

LI (Lifted Index)는 500 hPa의 실제기온과 지표공기가 500 hPa까지 단열상승했을 때 나타나는 기온의 차를 나타내는 지수로써 낮을수록 불안정하다. KI (K-Index)는 연직 기온 감률과 대기하층의 습기의 양, 습기의 연직 분포를 나타내는 지수로써 대류성 구름의 발달정도를 예측하는 안정도 지수이며, KO (KO index)는 KI와 같은 개념으로, 지상기압이 1000 hPa 보다 높은 지역에서만 계산할 수 있다. 각 안정도지수 값에 대한 불안정도의 기준은 표 2에 나타내었다.

본 연구에 사용된 대기안정도 지수는 종관 자료를 바탕으로 계산되었기 때문에 지상 관측을 통한 대기안정도와 약간의 차이가 나타날 수 있지만, 대기안정도의 발생 빈도보다는 대기안정도가 발생했을 때의 연직 바람의 분포를 보이는 것이 주요 목적이다.

### 3. 대기 경계층 내 평균바람분포 분석

일반적으로 대기 경계층은 지표 마찰에 의한 기계적 강제력과 지표면 가열 등에 의한 열적 강제력이 동시에 존재한다. 따라서 풍력 발전기와 블레이드가 위치하는 대기 경계층 하부의 바람자원 산출은 매우 어렵다. 본 연구에서는 관측 타워를 통한 기상 자료를 직접 생산하기 때문에 매우 신뢰도가 높은 바람자원 분포 특성을 분석할 수 있다.

먼저 풍력 에너지가 실질적으로 발생하는 고도인

80 m 부근에서 측정된 풍속과 풍향 자료를 바탕으로 각 지역의 평균 풍력 자원을 분석하였다. 그림 2는 80 m 고도 바람자료를 바탕으로 작성한 바람장미를 나타낸다. 각 지역별 80 m 고도의 연간 평균 풍속은 각각 포항 5.99 ms<sup>-1</sup>, 군산 5.79 ms<sup>-1</sup>, 진해 5.11 ms<sup>-1</sup>이다. 일반적으로 야간동안 대기가 안정해지면서 약한 풍속이 나타난다는 점을 고려하면 풍력자원의 확보 가능성이 높다고 볼 수 있다. 그리고 최대풍속은 포항 28.2 ms<sup>-1</sup>, 군산 33.0 ms<sup>-1</sup>, 진해 28.5 ms<sup>-1</sup>로 여름철 저기압이 나타날 때 측정되었다. 이러한 최대 풍속 자료는 블레이드와 발전타워 건설에 중요한 자료가 된다. 또한 지역별 주풍향은 전반적으로 북풍 또는 북서풍 계열이 강하게 나타나는데 이는 한반도가 종관학적으로 편서풍대에 위치하기 때문이다.

그림 3은 풍향에 따른 풍속의 일변화를 원그래프로 나타낸 것이다. 원그래프 내 방향은 풍향을 나타내며, 각 풍향에 대한 풍속을 나타낸다. 왼쪽 그림은 80 m에서 측정된 각 풍향에 대한 풍속의 일변화를 나타낸 그림이며, 오른쪽 그림은 풍속의 일변화를 나타내는데, 중앙에 위치할수록 1시와 1월의 값을 의미하고 멀어질수록 23시와 12월의 값을 의미한다.

먼저 일변화(그림 3 왼쪽)를 살펴보면 군산과 진해는 8시에서 18시 사이에서 바람이 강했고, 포항에서는 주풍향인 북풍에서 지속적으로 강한 바람이 부는 것을 확인할 수 있다. 특히 진해의 경우 8시에 평균풍속이 4.49 ms<sup>-1</sup>로 가장 낮으며, 15시에 5.57 ms<sup>-1</sup>로 가장 높게 나타나며 매우 뚜렷한 일변화를 보이고 있다.

일변화(그림 3 오른쪽)를 보면, 포항과 군산에서는 계절적인 풍속의 차이가 크게 나타나지만 진해는 계절별 풍속의 차이가 뚜렷하지 않다. 특히 군산은 겨울철 시베리아 기단에 의하여 매우 강한 서풍이 나타난다. 각 지역의 월별 평균풍속은 포항에서 9월

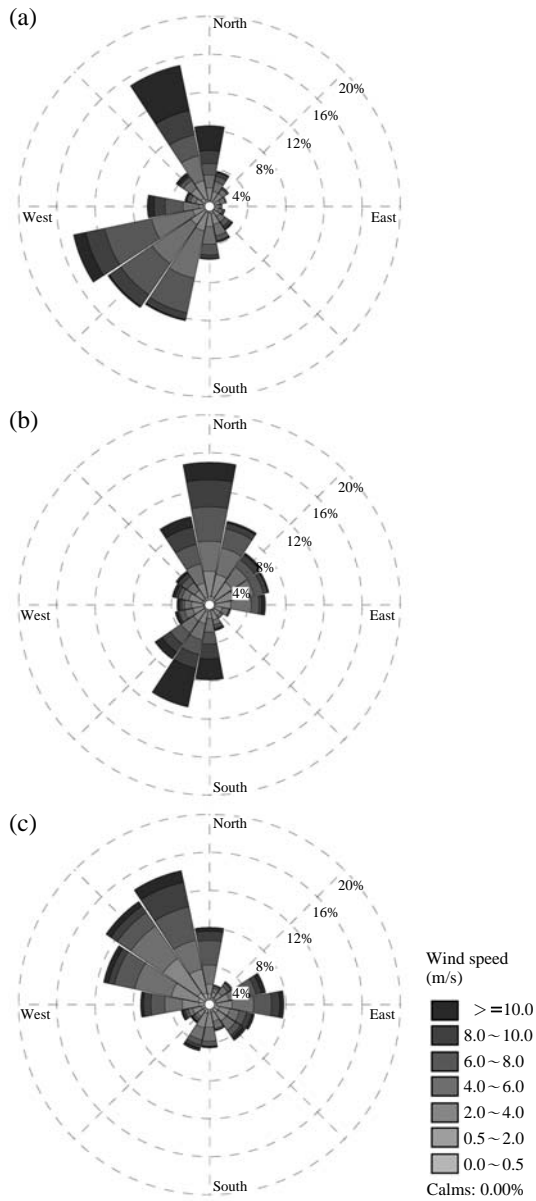


Fig. 2. Wind rose of annual wind data at (a) PH, (b) GS and (c) JH.

(7.16 ms<sup>-1</sup>), 군산은 12월 (7.49 ms<sup>-1</sup>), 진해는 1월 (6.46 ms<sup>-1</sup>)에 최대를 나타내고, 포항은 8월 (4.96 ms<sup>-1</sup>), 군산은 2월 (4.72 ms<sup>-1</sup>), 진해는 10월 (4.06 ms<sup>-1</sup>)에 가장 약한 풍속이 나타난다. 진해의 경우 그래프와 달리 1

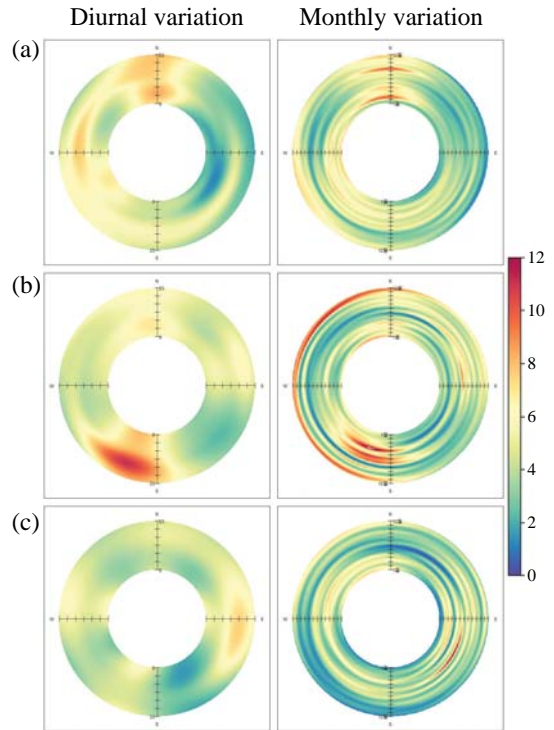


Fig. 3. Diurnal and monthly variations of wind speed and wind direction in (a) PH, (b) GS and (c) JH.

월의 풍속이 가장 강한 이유는 월평균 값이기 때문이다.

계절별 평균풍속은 모든 지점에서 겨울철에 가장 강한 풍속이 나타났으며, 진해와 군산은 가을철에, 포항의 경우는 여름철에 가장 약한 풍속을 나타내고 있다. 이러한 월별 풍속 분포는 한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터 (KIER: Korean Institute of Energy Research, 2011)에서 제시한 지역적 풍속 분포와 매우 유사하게 나타난다.

그림 4는 각 지점의 타워에서 관측한 겨울과 여름의 70 m와 40 m, 40 m와 10 m 사이의 풍속 차이를 나타낸 그림이다. 본 연구에서 발전기가 위치하는 하층에 대한 분석을 위하여 80 m 외에도 연직방향 풍속이 대수적으로 증가하는 것을 고려하여 70 m, 40 m, 10 m 고도에 대해 분석하였다.

모든 관측지점에서 타워 하층의 풍속 차이가 크게 나타나고 그에 비해 타워 상층의 풍속 차이는 크지

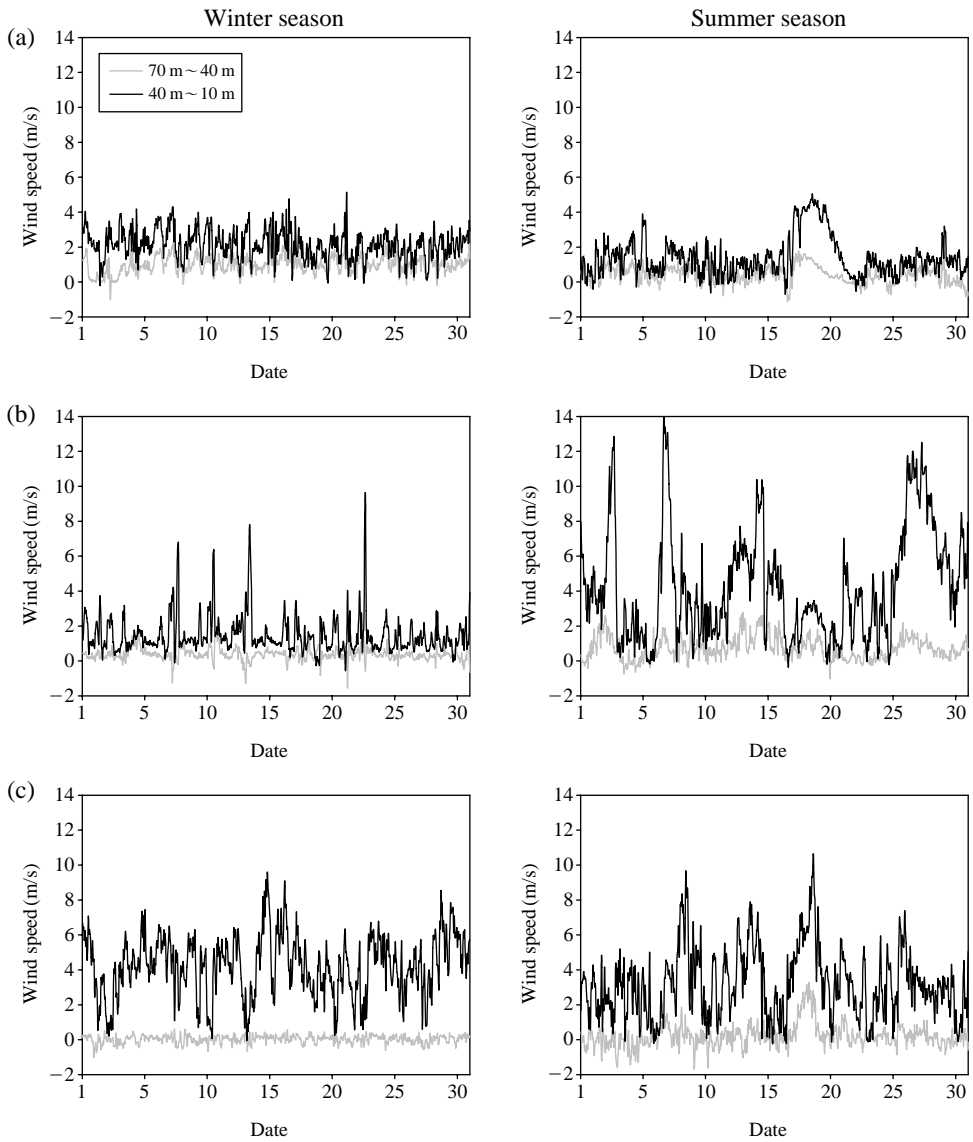


Fig. 4. Time series of the difference upper and lower level wind speed on winter season and summer season at (a) PH, (b) GS and (c) JH.

않다. 즉, 타워 하층에서 바람의 변동이 급격하게 나타나며, 다양한 기상학적인 요인에 대한 변화가 민감하다는 것을 의미한다. 이는 대기경계층의 일반적인 특성으로 보인다.

그러나 지역별로는 다르게 나타난다. 특히 포항의 경우, 다른 지역보다 40 m~10 m 사이의 풍속 차이가

매우 작게 나타나며, 상층의 변동성도 다른 지역에 비해 작게 나타난다. 이러한 풍속의 연직 변동 특성은 각 관측지역의 지역적인 환경 차이에 기인한다고 생각되며, 풍력발전량 예측 정확도에 영향을 미칠 수 있다.

#### 4. 대기 경계층 내 바람자원의 연직바람분포

블레이드의 크기가 커짐에 따라 풍력에너지의 발전량은 증가한다. 반면 블레이드 상하간의 풍속의 차이가 커지기 때문에 이들에 의한 블레이드 자체의 진동 현상이 발생하고 이는 발전기의 내구성에 영향을 미친다. 따라서 수평풍속의 연직 변화를 정확히 파악하여야한다. 따라서 타워 관측자료를 바탕으로 대기 경계층 내 풍속시어를 분석하였다.

풍속시어는 두 고도 사이의 풍속의 차이로 정의되며 다음과 같다.

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad (6)$$

여기서  $u_2, u_1$ 은 두 고도  $z_2, z_1$ 에서 각각의 풍속을 의미하고 시어파라메타  $\alpha$ 로 연직 시어를 표현한다. 즉  $\alpha$ 가 클수록 두 고도의 풍속의 차이가 크다는 의미이며, 이는 풍력에너지 가용성에 영향을 미친다.

그림 5는 각 지역별 70 m와 10 m 고도의 풍속을 이용하여 계산한 풍속시어 파라메타의 시간변화를 나타낸 것이다.

먼저 진해를 제외한 군산과 포항은 일출 후부터 낮아지기 시작하여 12시와 18시 사이에 최저값을 나타낸다. 이는 태양 복사에너지에 의한 대기 경계층의 성장으로 난류가 강해지면서 상하층간의 풍속차이가

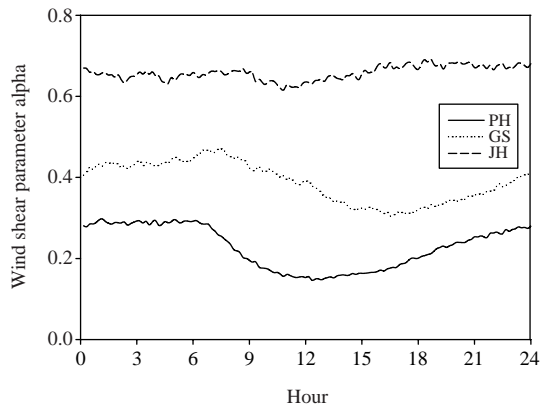


Fig. 5. Diurnal variations of wind shear parameter alpha at PH, GS and JH.

감소하기 때문이다. 그러나 낮 동안 강한 난류에 의해 억제된 바람시어가 지표면이 냉각되는 야간에 연직 혼합과 난류생성이 감소하여 풍속시어가 커진다.

반면 진해지역의 풍속시어는 일중 변화가 크지 않다. 이는 진해지역에 설치된 타워설치 지형의 고도가 섬의 상부에 위치하고 있으며, 주변 해양의 영향으로 일중 변동성이 크기 때문으로 판단된다.

두 번째 시어의 절대량을 보면, 진해지역 시어파라메타 평균치가 0.65로 가장 크고, 포항지역이 0.21로 가장 작게 나타난다. 이는 진해지역은 상하층간의 풍속차이가 크고 지표면에 의한 마찰의 영향이 매우 제한적으로 작용하고 있음을 의미한다. 반면 포항지역은 지표면의 마찰 효과가 70m까지 작용하고 있음을 나타낸다.

대기경계층내의 연직 풍력자원은 연직난류 강도를 정량적으로 분석하여 평가할 수 있다. 연직난류강도는 연직풍속의 변동량( $\sigma_w$ )을 풍속으로 나눈 값으로 무차원 변수로 표현되며, 경계층 내에서 다양한 요인에 의하여 발생하는 난류의 변동성 강도를 나타낸다. 본 연구에서는 연직풍속( $w$ )을 명시적으로 관측하지 않았기 때문에 마찰속도를 바탕으로 연직난류강도를 다음과 같이 계산한다.

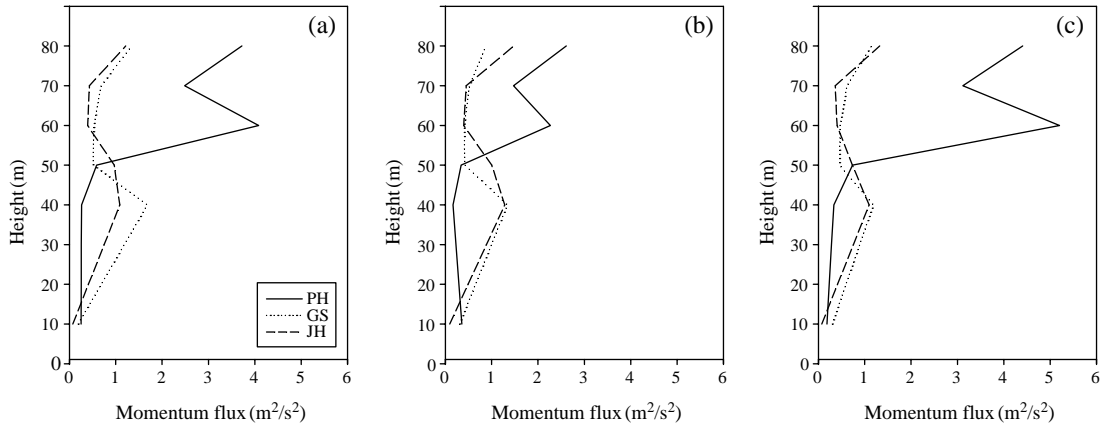
$$\sigma_w = C_w u_* \quad (7)$$

여기서  $u_*$ 는 마찰속도로 직접관측이 되지 않아 풍속 프로파일을 통해 간접적으로 추정하였으며 (Businger *et al.*, 1971),  $C_w$ 는 전달계수로써 근중립 안정도 하에서 Pond (1975)가 제시한  $1.2 \times 10^{-3}$  값을 사용하였다.

표 3은 각 지역에서 관측된 10 m 고도의 계절별 평균 연직난류강도와 변동량의 값을 나타낸 것이다. 포항지역은 겨울철의 난류강도가 0.321로 다른 계절보다 높게 나타난다. 또한 계절별 편차가 다른 지역에 비하여 크지 않다. 군산과 진해지역은 여름철에 각각 1.610과 1.501로 최대를 나타내고 겨울철에 0.352와 0.771로 최소를 나타낸다. 이러한 특성은 지역적 발생 강제력의 차이에 의한 것으로 판단된다. 포항 지역은 지속적으로 작용하는 기계적 난류의 영향이 강하게 작용하여 강한 풍속이 발생하는 겨울철에 상대적으로 난류 생성이 용이하며, 군산과 진해 지역은 평균 풍속이 약한 여름철에 난류 생성이 활발한 것은 강한 태양 복사에너지에 의하여 발생하는

**Table 3. Results of calculated seasonal average intensity of turbulence instability and standard deviation.**

	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	$\sigma_w$	Sd.	$\sigma_w$	Sd.	$\sigma_w$	Sd.	$\sigma_w$	Sd.
PH	0.321	0.237	0.227	0.248	0.225	0.267	0.243	0.304
GS	0.352	0.638	0.908	1.141	1.610	1.302	0.357	0.640
JH	0.771	0.252	0.947	0.755	1.501	1.213	1.310	1.121



**Fig. 6. Momentum flux profile for (a) daily mean, (b) day time and (c) night time.**

열적 난류가 지배적으로 작용하기 때문이다.

또한 계절적인 변동성을 보면 포항과 진해에 비하여 군산의 난류생성의 계절 변동성이 크게 나타난다. 즉, 진해와 포항은 난류를 발생시키는 강제력이 지속적으로 작용하는 반면 군산 지역은 여름철은 높고, 겨울철은 낮아 계절적으로 난류생성의 변동성 차이가 크게 나타난다. 또한 계절내의 편차 역시 군산이 크게 나타난다. 따라서 풍상측에 위치한 서해안 지역에서 난류생성 변동성이 계절적으로 크게 나타날 가능성이 높다.

경계층 내 운동량 플럭스 변화는 지표면의 영향을 받아 생성되는 기계적 요인과 대기 안정도에 따라 생성되는 열적 요인을 복합적으로 평가할 수 있는 지표가 된다. 따라서 본 연구는 각 고도별 운동량 플럭스의 변동을 살펴보았다. 운동량 플럭스( $\overline{uw}$ )는 앞서 구한 마찰속도를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\overline{uw} = u_*^2 \tag{9}$$

그림 6은 각 지역의 측정된 운동량 플럭스의 고도

별 분포를 연간 평균과 주간, 야간 평균으로 나타낸 것이다. 먼저 포항의 경우 50m 고도까지 운동량 플럭스의 변화가 매우 작다. 그러나 고도 50m와 60m 사이에서 급격한 운동량 플럭스변화가 관측된다. 이러한 변화는 야간에 매우 뚜렷하게 나타난다. 이는 풍상측의 지형적인 요인에 의해 기계적인 난류가 발생하며 이러한 난류는 50m 이하 고도에서 지속적으로 나타나고 60m 이상에서는 급격한 풍속의 증가가 나타난다고 볼 수 있다.

반면, 군산과 진해는 40m 고도까지 지속적으로 운동량 플럭스가 증가한다. 이들 지역은 운동량이 지표면 근처에서 영향을 받아 변동이 생김, 이러한 지표면의 열적 요인들이 하층 풍속에 영향을 미친다고 생각된다. 그러나 50m 이상의 경우 이러한 열적인 요인들의 영향이 줄어들면서 운동량의 변동성이 줄어든다.

이러한 특징은 주간과 야간에 서로 다르게 나타나는데 기계적인 요인이 강한 포항의 경우 주간과 야간의 대기 안정도 차이에 의해 기계적 요인에 의한 난류 생성이 크게 나타나며, 열적인 요인이 강하게



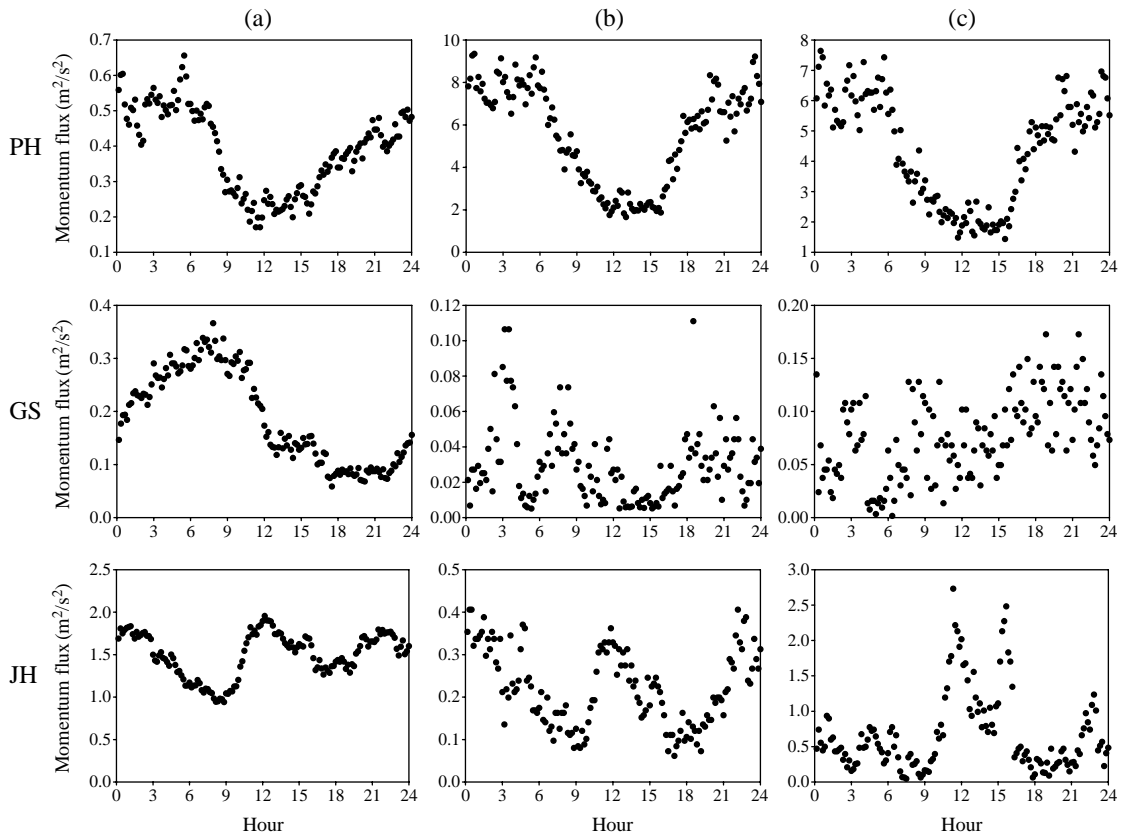


Fig. 7. (a) 40 m~10 m, (b) 60 m~50 m and (c) 80 m~70 m of the momentum flux difference.

작용하는 군산과 진해는 주간엔 운동량 플럭스의 변동성이 더욱 커진다.

각 지점별 세 층에서 대기가 안정한 겨울철 평균 운동량 플럭스의 시간변동을 살펴보았다(그림 7). 고도별 운동량 플럭스의 분포를 보면 포항과 다른 지역에서 패턴의 차이가 크게 나타난다. 포항에서는 고도에 따라 운동량 플럭스의 절대량은 다르지만, 시간에 따른 패턴은 크게 차이가 나지 않는다. 그러나 군산과 진해에서는 지표 부근에서는 운동량 플럭스의 변화가 명확하게 나타나지만 고도가 증가함에 따라 플럭스의 일변화가 모호해진다. 이는 그림 6에서 설명한 바와 같이 열적 강제력이 강하게 작용하는 군산과 진해지역의 대기 경계층 난류는 하층에 집중적으로 작용하지만, 포항의 경우 타워의 상층까지 작용하기 때문이다.

Table 4. Instability indices according to the stability.

	Stable	Weak unstable	Unstable
Lifted Index	$\geq 0$	$-6 < LI < 0$	$\leq -6$
K-Index	$\leq 15$	$15 < KI < 26$	$\geq 26$
KO Index			$< 2$

### 5. 안정도에 따른 바람의 변동성

포항, 군산, 진해지역은 연안지역이라는 공통점을 가지고 있지만 동해, 서해, 남해라는 지역적 차이와 관측지형 등에서 나타나는 차이로 인한 평균풍속과 마찰속도가 어떤 관계를 가지는지에 대해 분석하였다. 안정도에 따른 차이를 보기 위해 2.2에서 언급한 바와 같이 안정도지수를 산출하여 안정, 약한 불안정, 불안정으로 나누어 안정도 별로 대표되는 10개의

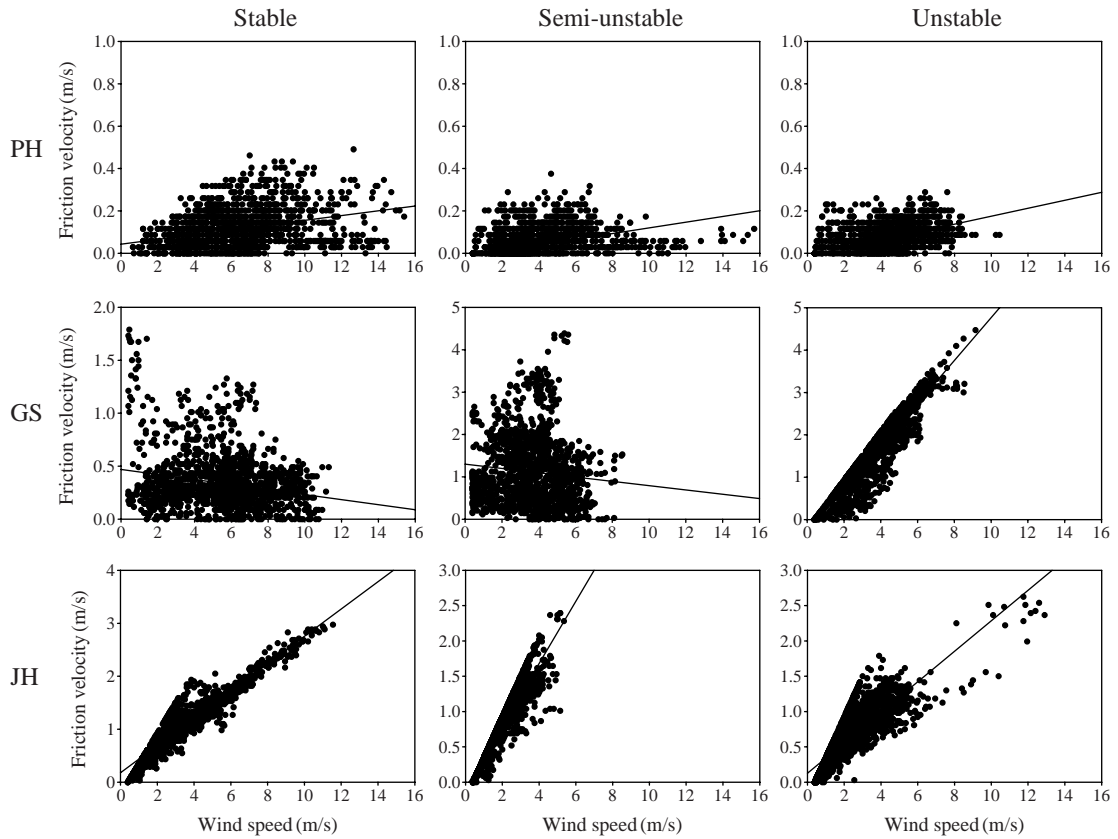


Fig. 8. Comparison between wind speed and friction velocity according to the stability.

사례일을 선정하여 풍속과 마찰속도의 관계를 살펴 보았다. 안정도를 나눈 기준은 표 4에 나타내었다. LI와 KI값들은 모든 사례일에서 안정도 기준을 만족하였지만 KO 기준은 불안정일 때를 제외하고는 안정도 기준을 만족하지 못하는 사례일이 발견되었다. 이는 KO의 경우 미국의 시카고와 같이 기온이 낮고 다습한 지역에서 주로 사용되며 1000 hpa보다 높은 지역에서 사용되는 안정도 지수로써 한반도 내륙지역에 적용하기 위해서는 검증이 필요할 것으로 생각된다.

그림 8은 40 m~10 m에서의 풍속과 마찰속도의 관계를 안정도에 따라 분류한 것이다. 40 m~10 m의 그림을 제시한 이유는 40 m와 10 m가 상대적으로 지표면에 영향을 더 많이 받기 때문에 풍속과 마찰속도의 관계를 더 잘 나타내며, 풍력자원 특성상 블레

이드 하부에서의 변화가 중요하기 때문이다. 그림을 제시하지는 않았지만 70 m~40 m에서는 상관성을 판단하기 힘든데, 이는 지표면의 영향을 적게 받는 40 m 이상의 고도에서는 상관성이 적기 때문이다.

우선, 포항에서는 대기의 안정도와 관계없이 마찰속도가 낮게 나타나는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 대기의 열적인 안정도와 상관없이 기계적인 요인이 강하게 작용하기 때문이다. 군산에서는 약한 풍속일 때 난류의 단속성이 증가하여 상관관계가 낮지만, 풍속이 강해질수록 높은 상관관계를 나타낸다. 또한 불안정일 때 높은 상관관계를 보였다. 이는 앞서 말한 지역별로 강제력의 차이로 인해 나타나는 특징이다. 진해에서는 대기가 안정할 때 가장 높은 상관관계가 나타나지만, 모든 안정도에서 모두 높은 상관관계를 보인다.

이는 군산의 경우, 대기가 안정한 경우 기계적인 요인에 의한 영향력이 나타나지만 진해의 경우 대기 안정도와 상관없이 지속적으로 열적요인이 강하게 나타난다. 이는 표 3에 제시한 바와 같이 군산 지역의 계절적인 난류 강도의 변동성이 크게 나타나는 것과 일치한다. 즉, 대기가 상대적으로 불안정한 여름철의 경우 열적강제력이 대기 경계층에 지배적이지만, 종관 기압계가 안정화되는 겨울철에는 열적강제력에 의한 지배력이 약화되기 때문에 마찰속도와 풍속의 상관성이 떨어진다. 따라서 한반도 해안지역의 대기 경계층 내의 바람장은 동해, 서해, 남해에서 각각 서로 다른 강제력이 작용하는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 한반도내의 풍력자원이 풍부하며 풍력발전단지 개발 가능성이 높은 연안지역 중 동, 서, 남해안에 위치한 포항, 군산, 진해 3지역에서 관측한 타워자료를 바탕으로 각 지역의 연직바람분포와 특징을 살펴보았다. 평균 풍속은 포항이 가장 강했으며, 진해에서 가장 뚜렷한 일변화를 볼 수 있었다. 군산과 진해와 달리 포항은 연직시어와 연직 난류강도, 운동량 플럭스 등의 변동이 주·야간, 계절별로 가장 뚜렷하게 나타났다. 이는 포항은 기계적인 강제력에 의해 난류가 발생하고, 섬지역인 군산과 진해에서는 열적인 강제력에 의해 난류가 발생하는 것이 주요인으로 나타난다. 또한 군산지역의 경우, 열적인 강제력이 강하게 나타나지만 종관 기상장이 안정해지는 겨울철의 경우 이러한 경계층 내의 열적 강제력의 작용이 약화되는 특징을 보인다.

이러한 동해, 서해, 남해 경계층 내의 강제력 차이는 풍력발전에 중요한 경계층 내 바람 분포에 직접적으로 영향을 미친다. 또한, 주변의 고층자료를 이용한 안정도 분류 결과에서도 이러한 지역별 강제력의 차이가 지표면 부근 마찰 속도에 미치는 영향을 볼 수 있었다.

또한, 플럭스 관측에 사용되는 고가의 기기를 사용하지 않고 각 층의 풍속자료를 바탕으로 연직 바람 분포와 마찰속도의 연직변동 등을 보임으로써 향후 한반도 지역 내 풍력에너지의 생성 및 이용가능성, 발전단지 조성 등을 지역별로 평가하는 기초자료로

활용될 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A3014517).

## 참 고 문 헌

- 한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터 <http://www.kier-wind.org/>
- Bolton, D. (1980) The computation of equivalent potential temperature, *Monthly Weather Review*, 108, 1046-1053.
- Businger, J.A., J.C. Wynaagard, Y. Izumi, and E.F. Bradley (1971) Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 181-189.
- Choi, S.J. (2008) Analysis of stability index during severe weather (Thunderstorm), M. S. dissertation, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Korea, 43p.
- Farrugia, R.N. (2003) The wind shear exponent in a Mediterranean island climate, *Renewable Energy*, 28, 647-653.
- Fox Neil, I. (2010) A tall tower study of Missouri winds, *Renewable Energy*, 36, 330-337.
- Kim, H.G., Y.S. Lee, and M.S. Jang (2010) Cluster analysis and meteor -statistical model test to develop a daily forecasting model for Jeju wind power generation, *Journal of the Environmental Sciences*, 19(10), 1229-1235. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.J. and G.L. Cho (2010) Economic impacts of renewable portfolio standard on domestic industry, *Environmental and Resource Economics Review*, 19(4), 805-828.
- Lee, H.W., D.H. Kim, S.H. Lee, M.J. Kim, S.Y. Park, and H.G. Kim (2010) Skillful wind field simulation over complex terrain using coupling system of atmospheric prognostic and diagnostic models, *Journal of the Environmental Sciences*, 19(1), 27-37. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., H.W. Lee, D.H. Kim, M.J. Kim, and H.G. Kim (2011) Analytic study on the variation of regional

- wind resources associated with the change of El Nino/La Nina intensity, *Journal Korean Earth Science Society*, 32(2), 180-189. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., H.W. Lee, D.H. Kim, M.J. Kim, and H.G. Kim (2009) Numerical study on the impact of the spatial resolution of wind map in the Korean peninsula on the accuracy of wind energy resources estimation, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(8), 885-897. (in Korean with English abstract)
- Lim, H.C. and T.Y. Jeong (2010) Wind energy estimation of the Wol-Ryong coastal region, *Energy*, 35, 4700-4709.
- Mahrt, L. and D. Vickers (2002) Contrasting vertical structures of nocturnal boundary layers, *Boundary-Layer Meteorology*, 105, 351-363.
- Mitra, A.K., A.K. Sharma, I. Bajpai, and P.K. Kundu (2012) An atmospheric instability derived with MODIS profile using real-time direct broadcast data over the Indian region, *Natural Hazards*, 63, 1007-1023.
- Park, S.H., B.J. Son, E.S. Chung, and M. Koenig (2006) Estimating stability indices from the MODIS infrared measurements over the Korean Peninsula, *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(6), 469-483. (in Korean with English abstract)
- Pond, S. (1975) The exchanges of momentum, heat and moisture at the ocean-atmosphere interface. *Numerical Models of Ocean Circulation*. National Academy of Science, Washington, DC.
- Shim, H.J., K.M. Kang, and D.F. Lee (2007) Aerodynamic analysis of wind turbine blade and wind tunnel experiment method, *Wind Engineering Institute of Korea*, 11(1), 115-120. (in Korean with English abstract)
- Shin, H.K. (2009) A review of CFD potentiality for HAWT blade design, *Wind Engineering Institute of Korea*, 13(3), 52-57.