해수면 온도에 따른 연안지역 연직풍속전단 변화 연구

Analysis for Vertical Wind Shear Change at Coastal Area according to the Sea Surface Temperature

류건화* · 고주석** · 백명기*** · 장종경****

Ryu, Geon Hwa*, Ko, Joo Suk**, Baek, Meung Gi***, and Jang, Jong Kyung****

Abstract

This study is to analyze the effect of the sea surface temperature (SST) on the distribution of vertical wind speed in the atmospheric boundary layer of coastal area. It is generally known that coastal areas are more susceptible to various weather factors due to interannual variation of sea surface temperature than inland areas. Therefore, the goal of this study is to analyze the relationship between sea surface temperature using the Era-interim reanalysis data and wind speed data based on the meteorological tower data of Hovsore, wind power test bed area in the Danish coastal area. Furthermore, the possibility of disaster caused by vertical wind shear due to sea surface temperature change is discussed.

As a result of correlation analysis between the wind data of the meteorological tower and the sea surface temperature of the reanalysis data, the wind speed and the vertical wind shear from the sea are stronger than those from the inland and they are sensitive to the seasonal sea surface temperature changes.

Key words : Sea Surface Temperature, Wind Shear, Era-Interim Reanalysis Data, Wind Shear Coefficient, Wind Shear Warning

요 지

본 연구는 해수면 온도가 연안지역의 대기경계층 내 연직풍속의 분포에 주는 영향을 분석하기 위한 연구이다. 일반적으로 내륙지역에 비해 연안지역은 해수면 온도의 경년 변동에 의해 다양한 기상요소가 민감한 반응을 보인다고 알려져 있다. 이에 덴마크 연안지역의 풍력발전 테스트베드 지역인 Hovsore의 기상관측탑 자료와 Era-interim 재분석자료를 기반으로 해수면 온도와 풍속 분포의 관계를 분석하고자 하였다. 이와 관련하여 해수면 온도변화에 의한 연직풍속전단이 가져다 줄 수 있는 재해 발생의 가능성을 논의하고자 하였다.

기상관측탑의 풍향 및 풍속자료와 재분석자료의 해수면 온도를 분석한 결과 내륙보다 해상에서 불어오는 바람의 풍속 및 연직풍속전단의 크기가 강했고 이는 계절에 따른 해수면 온도의 변화에 민감하게 반응함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 해수면 온도, 풍속전단, Era-Interim 재분석자료, 풍속전단계수, 윈드시어 정보

1. 서 론

대기와 해양의 상호관계는 지금까지 보고되어 왔듯이

해양과 대기의 특성 변화를 유도하고 단기적으로는 국지적인 기상현상부터 장기적으로 기후 변동성에도 영향을 준다. 그 중 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)의 변화는

*정회원, 미래기술에이원(주) 공공사업팀 주임(E-mail: bommot@naver.com)
Member, Assistant Manager, Public Project Team, Future Technology A1 Co., Ltd.

**정회원, 미래기술에이원(주) 공공사업팀 대리
Member, Assistant Manager, Public Project Team, Future Technology A1 Co., Ltd.

***부산광역시청 서부산개발본부 도로계획과 팀장
Head of Team, Busan Metropolitan Government

****교신저자, 정회원, 미래기술에이원(주) 공공사업팀 부장(Tel: +82-51-517-6971, Fax: +82-51-747-7652, E-mail: jkcopyleft@ftaone.com)
Corresponding Author, Member, General Manager, Public Project Team, Future Technology A1 Co., Ltd.

수증기의 열 플럭스 교환에 영향을 주어 해양 및 연안지역 대기 경계층(Atmospheric Boundary Layer, ABL) 내 변화를 일으키게 된다(Liu et al., 2007). 특히, 여름철 해수의 표층 수온 증가는 대기 하층에서 수증기의 수렴을 야기하고 이는 대기를 불안정하게 만드는 요인이 되어 연안지역의 기상현상과 기후를 변화시킬 수 있다. 이와 관련해 Fan et al. (2016)은 열대해역의 해수면 온도 아노말리(Anomalies)가 여름철 아시아의 몬순에 영향을 주어 강수의 형태를 결정지을 수 있다고 했으며, Qu et al.(2012)은 북대서양진동(The North Atlantic Oscillation, NAO)이 그린란드 주변 해역의 해수면 온도, 바람, 해빙의 면적과 유의한 상관성을 가짐을 밝혔다.

이러한 대기와 해양의 상호관계는 내륙보다 연안지역에서 더 활발히 작용될 수 있는데 이로 인해 연안지역 대기경계층 내 대기의 유동성이 환경에 따라 단기간 내에 급격하게 변화할 수 있다. 특히 대기 중 수증기량이 상대적으로 적은 내륙지역에 비해 연안 및 해상에서는 다량의 수증기 유입으로 인한 잦은 안개 발생, 잠열의 지속적인 공급으로 인한 태풍의 피해 또는 많은 강수량으로 연중 내내 풍수해에 의한 일상생활의 제약을 받게 된다. 무엇보다도 활발한 대기와 해양의 상호작용은 대기의 유동과 직접적인 관련이 있는 바람의 직·간접적 피해에 쉽게 노출될 수 있음을 의미하게 된다.

복잡한 산악지형이나 연안지역의 경우 대기경계층 내 상·하층의 큰 풍속차이로 인해 연직방향으로 강한 풍속전단(Wind Shear)이 발생할 수 있는데 이는 대기 중 짧은 수평·수직거리 내에서 풍향과 풍속이 변하는 현상을 말한다. 일반적으로 풍속전단은 상층의 제트기류(Jet Stream) 부근이나 대류권계면 고도 부근에서 발생하지만 대기 하층에서 기단이 만나는 전선면 또는 상층의 강한 풍속으로 인해 강한 하강기류를 동반할 때 나타나는 경우도 많다. 풍속전단은 부유하는 대기오염물질을 빠르게 확산시켜 대기 중 농도를 희석시켜 주기도 하지만 경우에 따라 강력한 기상재해의 출현, 건물붕괴 등의 물리적 피해를 가져다준다.

Ashok(2002)는 연안지역에서의 연직풍속전단의 움직임이 활발한 경우 대기 중 오염물질의 농도가 빠르게 희석될 수 있다고 했지만 Klotz and Jiang(2017)에 따르면 풍속전단의 방향과 규모에 따라 열대성 저기압의 이동속도 및 풍속의 세기가 결정될 수 있다고 했다. 또한 Wen et al.(2017)은 연직풍속전단이 강해짐에 따라 풍력터빈의 발전량이 감소하며 블레이드에 하중도 강력하게 전달되어 터빈의 수명이 짧아질 수 있다는 결과를 밝히기도 했으며, Hunter et al. (2001) 역시 강한 연직풍속 전단이 발생했을 때 풍력발전량이 40% 이상 감소한다는 결과를 발표했다. Golding(2005)은 지표면 근처 저층에서의 연직풍속전단은 항공기의 이·착륙에 큰 장애를 주어 매년 전 세계적인 항공사고의 주요

원인으로 손꼽히고 있다고 했다. Dennis and Kumjian(2017)에 따르면 풍속전단이 증가함에 따라 폭풍우의 상승기류가 강해져 우박의 양과 질량, 대기 중 잔류시간이 길어질 수 있다는 연구내용을 밝혔고 Shen et al.(2013)은 연직풍속전단이 두꺼운 대기혼합층을 발달시켜 초여름 중국 남부의 강우 시스템을 교란시키는 것과 더불어 대규모 폭우현상에 기여한다고 했다.

이처럼 연안지역 부근에서 쉽게 발생할 수 있는 연직풍속전단은 상황에 따라 재해로 연결되어 대규모 피해를 가져다 줄 수 있다. 특히, 해수면 온도에 따라 난류의 형성 및 분포가 결정되고 이는 곧 연직풍속전단의 규모를 결정해서 짧게는 수시간, 길게는 수개월간 지속될 수 있다고 알려져 있으며(Yoo et al., 2014), 우리나라 역시 남동 연안지역에서 발생하는 냉수대가 해풍순환 및 풍속변화와 밀접한 관련이 있다고 했다(Ji et al., 2014).

국내의 연안지역 기상관측탑 자료가 제한적이기에 본 연구에서는 덴마크 연안지역인 Hovsore의 풍력발전 테스트 베드에서 운영 중인 기상관측탑의 고도별 풍향·풍속자료를 제공받아 이를 Era-interim 재분석자료의 해수면 온도분포와 분석하여 그 연관성을 알아보고자 하였다. 또한 강한 풍속전단이 발생하는 사례분석을 바탕으로 연안지역에서의 바람과 관련된 재해의 원인분석방법을 향후 국내 사례에도 적용시켜 재난예방 및 피해최소화에 기여함을 목적으로 한다.

2. 연구대상지역 및 자료

연구대상지역은 덴마크의 DTU (Denmark Technical University) 풍력연구소에서 운영하는 풍력발전 테스트 단지를 포함한 영역이며 해당지역의 기상관측탑 자료를 제공받아 분석을 실시하였다. 제공받은 풍속자료는 10 m, 40 m, 60 m, 80 m, 100 m, 116.5 m의 총 6개 고도이며 2014년 1월 1일부터 12월 31일까지 1시간 단위의 풍속, 풍향이 분석되었다. 테스트 단지는 Fig. 1에 나타나 있듯이 덴마크 서쪽해안가에 위치하고 있으며 해안으로부터 약 1.7 km 떨어져 있다. 주변지형은 해발고도 3 m 정도의 평탄한 지형이며 넓은 초지로 구성되어 있다. 남북방향으로 총 5개의 풍력 터빈이 위치하며 120 m 높이의 기상관측탑(56.44°N, 8.15°E)이 자리하고 있다. DTU 풍력연구소에서는 2004년 3월 1일부터 풍속·풍향·기온·기압·상대습도·강수량을 측정하고 있다.

해수면 온도는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 Era-interim (ECMWF ReAnalysis Interim)(Dee et al., 2011) 재분석자료로부터 추출하였다. 자료기간은 관측자료와 동일한 2014년 1월 1일부터 12월 31일까지이며 해상도는 0.75° × 0.75°로 중위도에서 약 80 km에 해당한다.

Fig. 1. Domain of Study Area

3. 결과분석

덴마크 Hovsore지역 기상관측탑의 고도별 풍속자료 및 Era-interim 재분석자료를 이용한 해수면 온도 및 해상풍속 자료에 대한 시계열변화 추이를 살펴보고자 한다.

3.1 기상탑 관측자료 분석

기상관측탑의 6개 고도 풍속의 일변화를 살펴보았을 때, 최하층인 10 m 풍속의 경우 정오를 기준으로 풍속이 가장 높은 형태를 보였다(Fig. 2(a)).

하지만 상층으로 올라갈수록 하층과는 다른 일변화 양상을 보였는데 정오 부근 시간대에 낮은 풍속값을 보이고 야간으로 갈수록 풍속이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 지표 근처의 경우, 주간에 증가하는 지표면 열 플럭스(Surface Heat Flux)가 강한 난류를 형성시켜 풍속을 증가시켜주지만 고도가 증가할수록 지표면에서 방출되는 열 플럭스가 도달하지 못해 풍속 증가에 영향을 주지 못하기 때문이다. 결과적으로 주간에는 상·하층 풍속차이가 작아지고 야간으로 진행될수록 풍속차이가 증가하여 연직풍속전단이 성장할 수 있는 환경조건이 갖추어질 수 있게 된다. 고도별 풍속의 차이는 월변화 추이에서도 동일한 패턴으로 나타났다(Fig. 2(b)).

태양복사에너지에 의한 지표면 열 플럭스의 교환이 활발하게 일어나는 여름철의 경우 연직으로의 대기혼합의 움직임이 많아짐에 따라 하층과 상층의 모멘텀(Momentum) 교환에 의해 풍속차이가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 한편 겨울철에는 열 플럭스 교환의 감소로 인해 경계층 내 혼합층의 성장이 약해짐에 따라 상·하층 풍속차이가 커지는 양상을 보였다. 연직 풍속 프로파일을 확인해 보았을 때도 여름철

에는 약한 풍속과 함께 고도별 풍속차이를 나타내주는 기울기 또한 겨울철에 비해 작음을 보였다(Fig. 2(c)).

Fig. 2. Time Series Graphs using Observation Data. (a) Diurnal Variation of Wind Speed, (b) Monthly Variation of Wind Speed, (c) Vertical Wind Profile.

해상과 육지에서 각각 불어오는 바람의 풍속분포 특성을 알아보기 위해 기상관측탑의 풍향별 풍속을 나타내보았다(Fig. 3). 풍력터빈과 기상탑이 설치되어 있는 남북방향의 경우 터빈의 후류효과(Wake Effect)에 의해 바람자료가 왜곡될 수 있기에 해상에서 불어오는 방향($225^{\circ} \sim 315^{\circ}$)과 육지에서 불어오는 방향($45^{\circ} \sim 135^{\circ}$)만을 분석하였다. 10 m 바람의 분석결과, 해상에서 불어오는 바람의 평균 풍속은 6.86 ms^{-1} 인 반면 육지에서 불어오는 바람은 평균 5.12 ms^{-1} 을 보였다(Fig. 3(a)). 100 m 고도 바람도 동일한 양상을 보였는데 해상에서 불어오는 바람의 평균 풍속이 9.88 ms^{-1} 에 달했고 육지에서 불어오는 바람의 평균 풍속은 8.12 ms^{-1} 을 나타냈다(Fig. 3(b)). 고도에 상관없이 해상에 비해 육지풍속이 낮은 값을 보였는데 이는 육지의 큰 지표면 거칠기로 인한 마찰작용이 바람에 영향을 주기 때문이다.

Fig. 3. Wind Speed Scatter Plots According to the Wind Direction.
(a) 10 m, (b) 100 m.
Blue(from sea), Red(from land)

Fig. 4에 고도별 풍속자료를 이용한 풍속전단계수(Wind Shear Coefficient, α)의 월변화 시계열 분포를 나타내었다. 일반적으로 풍속전단계수는 열적인 요인을 배제한 대기안정도(Atmospheric Stability)를 나타내는 지표로 활용되며 상·하층 풍속의 증감비율을 나타낸다. 멱법칙(Power law)이라고 불리는 아래의 Eqs. (1)과 (2)를 통해 특정 두 고도와 각 고도에서의 풍속을 알면 풍속전단계수를 산출할 수 있다. 멱법칙을 통한 풍속의 연직분포는 고도에 따른 풍속의 변화가 일률적인 대기경계층의 하부에서만 적용할 수 있다

Table 1. Stability Classification with Wind Shear Coefficient

Stability Class	Boundary Layer Properties	Wind Shear Coefficient
Strongly Stable	Highest shear, Nocturnal LLJ, Little turbulence	$\alpha > 0.3$
Stable	High wind shear, Low turbulence	$0.2 < \alpha < 0.3$
Near-Neutral	Logarithmic wind profile	$0.1 < \alpha < 0.2$
Convective	Low shear, High turbulence	$0 < \alpha < 0.1$
Strongly Convective	Very little shear, Highly turbulence	$\alpha < 0$

(Wagner et al., 2009). $U(h_1)$, $U(h_2)$ 는 각각 고도 h_1 과 h_2 에서의 풍속을 의미한다. 풍속전단계수에 따른 대기안정도와 경계층 내 기본적인 특성변화에 대해 Table 1에 나타내었다 (Wharton and Lundquist, 2012). 풍속전단계수가 양의 값을 나타낼 경우 고도에 따라 풍속이 증가함을 의미하고 음의 값을 나타낼 경우 고도 증가에 따른 풍속 감소가 일어남을 의미하며 이는 대기의 강한 불안정 상태를 나타낸다.

$$U(h_2) = U(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$\alpha = \ln \left(\frac{U(h_2)}{U(h_1)} \right) / \ln \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad (2)$$

10 m와 60 m, 60 m와 116.5 m, 10 m와 116.5 m의 풍속을 각각 이용한 풍속전단계수의 월평균변화 추이를 확인한 결과(Fig. 4), 전체적으로 2월을 중심으로 겨울철에 풍속전단계수가 높은 값을 나타내면서 중립 및 안정한 대기조건을 형성하였다. 반대로 여름철에는 약 0.1의 풍속전단계수를 나타내며 불안정한 대기임을 보였는데 낮은 풍속전단계수는 고도가 증가함에도 불구하고 풍속증가가 크게 나타나지 않음을 의미한다. 이는 앞서 Figs. 2(b)와 2(c)에서 확인할 수 있듯이 여름철에는 활발한 대기혼합작용에 따른 고도별 풍속차이가 크게 나지 않기 때문이다.

Fig. 4. Monthly Variation of Wind Shear Coefficient

Fig. 5에 해상과 육지에서 각각 불어오는 10 m, 100 m 바람에 대해 풍속전단계수를 산출해서 나타내었다. Fig. 3에서 확인하였듯이 해상에서 불어오는 바람의 경우 상층의 풍속이 강하기 때문에 평균 0.283의 풍속전단계수를 보여 0.166을 나타낸 육지에 비해 상대적으로 큰 기울기를 보였다.

Fig. 5. Wind Shear Coefficient Scatter Plot According to the Wind Direction. Blue(from sea), Red(from land)

3.2 Era-Interim 재분석자료 분석

육지에 비해 해상에서 불어오는 바람의 풍속전단계수가 더 큰 값을 나타냄에 따라 지면 거칠기 뿐만 아니라 해상과 육지의 기압배치, 해수면 온도분포 등의 영향이 작용된 것으로 판단되어 Era-Interim 자료를 이용해서 Hovsore 관측지역 부근 해수면 온도와 해상 풍속의 월평균 변화추이를 Fig. 6에 나타내었다. 해수면 온도의 경우 7월과 8월 사이에 20℃를 넘어서는 모습을 보였고 2월과 3월 사이에 가장 낮은 값을 나타냈다. 해상풍속(10 m 고도)의 경우 전체적으로 육지보다 높은 풍속값을 보였고 여름에 가장 낮은 풍속, 겨울에 가장 높은 풍속을 보이는 패턴은 동일하게 나타났다. 주목할 점은 해수면 온도와 해상풍속의 변화 패턴이 반대로 나타난다는 것이었는데 이는 여름철 해수면 온도가 최고치를 보이는 반면 해상풍속은 최저치를 보이고 겨울철에는 서로 반대의 양상을 보인다는 점에서 확인할 수 있다.

Figs. 7과 8에 각각 연구대상지역을 포함한 영역의 월평균 해수면 온도와 해상풍속 분포를 나타내었다. Fig. 7의 1월과 2월, 3월을 중심으로 북해와 발트 해를 끼고 있는 대륙의 연안 중심으로 낮은 해수면 온도 분포를 보였고 먼 해상으로 진행될수록 온도가 높아지는 양상을 보였다. 이는 저위도의 따뜻한 해상에서 난류성 북대서양 해류가 유입되기 때문에 연안지역에 비해 대륙에서 떨어진 먼 해상의 해수면 온도가 높은 것으로 판단된다. 전체적으로 겨울에 낮은 해수면 온도,

여름에 높은 해수면 온도분포를 보였다. Fig. 8에 나타난 해상풍속의 결과는 해수면 온도와 반대의 양상을 보였는데 겨울철에 내륙에서 떨어진 북해 먼 해상을 중심으로 남풍계열의 강한 풍속구간을 형성했고 여름철에는 북풍 또는 서풍 계열의 약한 풍속대를 나타냈다.

Fig. 6. Daily Mean Sea Surface Temperature and Offshore Wind Speed Near Hovsore Observation Site using Era-Interim Reanalysis Data

3.3 풍속전단계수에 따른 위험도 분석

일반적으로 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)에 의하면 연직 및 수평풍속전단은 풍속 및 풍향이 급격하게 변화하는 경우로 정의하고 있으며 윈드시어의 강도에 따른 정보기준을 제시하고 있다(Table 2).

Table 2. Wind Shear Warning Standard Manual

Intensity	Variation of wind
Light	0-4 kt per 100 ft
Moderate	5-8 kt per 100 ft
Strong	9-12 kt per 100 ft
Severe	Above 12 kt per 100 ft

이에 기상관측탑의 고도별 관측풍속을 ICAO 정보기준에 유사하게 적용시켜 정보기준발령에 적합한 사례를 분류해 보았다. 이에 인간의 일반적인 생활고도에 해당하는 10 m와 60 m 고도 풍속간의 풍속변화가 5 ms⁻¹를 초과하는 사례들을 선정하고 그 때의 평균 풍속전단계수를 산출하였다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 정보기준에 적합한 사례는 2014년 연중 57시간에 해당했으며 겨울철에 대부분 편중되고 해당시기의 평균 풍속전단계수는 0.301로 나타났다. 선정된 사례들이 해상과 육지에서 불어오는 바람 중 어떠한 환경에서 주로 발생하는지 알아보기 위해 사례별 풍향분포를 확인한 결과 모두 해상에서 바람이 불어오는 경우에 해당했다(Fig. 9).

Fig. 7. Monthly Averaged Sea Surface Temperature Distribution Over North Sea using Era-Interim Reanalysis Data. Black Square includes the Observation Site

Fig. 8. Monthly Averaged Offshore Wind Speed Distribution and Wind Vectors Over North Sea using Era-Interim Reanalysis Data. Black Square Includes the Observation Site

Table 3. Case of Wind Shear Warning in Hovsore

Item	Properties			
Criteria	Above 5 ms^{-1} gap between 10 m and 60 m			
Number of cases	57 hours (8760 hr)			
Season	spring	4%	summer	7%
	autumn	0%	winter	89%
Averaged wind shear coefficient	0.301

Fig. 9. Wind Shear Coefficient Scatter Plot of Wind Shear Warning Cases using Meteorological Tower Data

Fig. 10. Mean Sea Level Pressure Distribution According to Cases of Weak Vertical Wind Shear (a) and Strong Vertical Wind Shear Event (b). Black Square includes the Observation Site (unit: hpa)

3.4 해수면 온도에 의한 풍속전단계수 변화 사례분석

강한 풍속전단을 일으키는 사례가 해상에서 불어오는 바람에 국한되어 있기에 고도별 풍속차가 갑자기 증가하는 사례를 선정하여 해당시기의 해면기압 배치 및 해수면 온도 변화를 분석해보았다. 사례일로 선정된 2014년 12월 3일 06LST에는 10 m와 60 m 고도의 풍속차이가 1.8 ms^{-1} 에 불과했지만 12시간이 지난 18LST에 4.5 ms^{-1} 로 증가했으며 23LST에 5.3 ms^{-1} 의 차이를 보이며 짧은 시간동안 큰 변화를 보였다. 관측지점 주변 해역 기압배치를 확인해본 결과 강한 풍속전단이 발생하기 전(Fig. 10(a))에 비해 발생 시점(Fig. 10(b))에 기압이 다소 낮아지는 경향을 보였으나 전체적인 기압배치 형태에는 큰 변화가 없었다. 기압배치 변화에 의한 영향이 미비하다고 판단되어 해수면 온도변화가 강한 풍속전단 형성에 기여한 영향을 평가하고자 해수면 온도분포 변화를 분석하였다(Fig. 11). 강한 풍속 전단이 발생하기 전 Fig. 11(a)의 파란 사각형으로 표시된 지역의 해수면온도가 11°C 이상으로 높은 분포형태를 보였다. 반면 강한 풍속 전단이 발생하던 시기인 Fig. 11(b)의 경우 관측지점 주변 해역의 해수면 온도가 평균 1.2°C 가량 낮아지는 양상을 보였다. 해수면 온도가 높아지면서 해수면 근처 대기의 활발한 연직혼합작용에 의해 상·하층 풍속이 유사해졌고 이에 약한 풍속전단이 형성되었다. 하지만 야간에 이르러 해수면 온도가 낮아짐에 따라 경계층 내 연직방향으로의 혼합작용이 약화되면서 고도별 풍속대가 뚜렷하게 구분 형성되었으며 이에 따라 상층의 강한 풍속과 하층의 약한 풍속으로 인해 강한 연직 풍속 전단이 형성된 것으로 판단된다. 또한 앞서 확인하였듯이 강한 풍속 전단 사례가 겨울철에 집중

Fig. 11. Sea Surface Temperature Distribution According to Cases of Weak Vertical Wind Shear (a) and Strong Vertical Wind Shear Event (b). Black Square includes the Observation Site (unit: $^{\circ}\text{C}$)

분포된 것 역시 낮은 해수면 온도로 인한 연직대류가 약해짐에 따른 것으로 추측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 덴마크 연안지역인 Hovsore 풍력테스트 단지에 위치한 기상관측탑의 풍향·풍속자료와 Era-Interim 재분석자료의 해수면 온도분포를 활용하여 강한 풍속전단이 발생하는 사례에 대한 분석을 실시하였다. 고도별 바람 관측 자료를 분석한 결과 지표면과 대기의 열 플럭스 교환이 활발하게 일어나는 주간 및 여름철에는 고도별 풍속 차이가 크게 나지 않았으며 이는 대기경계층 내 활발한 연직 대류혼합작용에 따른 결과이다. 반면 야간 및 겨울철에는 연직혼합작용이 약해지면서 고도에 따른 풍속 차이가 커지게 되었고 이는 강한 풍속전단이 쉽게 발생할 수 있는 환경이 조성되는 결과를 가져왔다.

강한 풍속전단 사례는 국제민간항공기구(ICAO)의 윈드시어 경보기준에 유사하게 적용하여 선정하였으며 연중 총 57시간의 사례가 발생하였다. 이 때 평균 풍속전단계수는 0.301에 해당했으며 총 선정 사례의 89%가 겨울철에 국한되어 있었다. 강한 풍속전단이 발생한 사례 중 특정 하루를 선정하였고, 연안지역의 풍속과 풍향에 가장 많은 영향을 주는 기압배치와 해수면 온도의 분포를 확인하고자 Era-Interim 재분석자료를 활용한 결과, 강한 풍속전단이 발생한 시기에 기압배치의 변화는 크지 않았지만 해수면 온도분포의 큰 변동이 나타남을 확인할 수 있었다. 강한 풍속전단이 발생하기 전에는 해수면 온도가 상대적으로 높게 분포하였으며 이로 인해 해수면 부근에서 강한 연직혼

합작용이 발생하여 상·하층 풍속차이가 작아지게 되었다. 반면 강한 풍속전단이 발생한 시간대에는 해수면 온도가 낮아지는 양상을 보였고 이는 연직혼합작용의 약화로 인해 고도별 바람이 서로 독립적으로 증별화 되는 결과를 가져다 주었다. 따라서 상층의 높은 풍속과 하층의 낮은 풍속에 의해 강한 풍속전단이 발생할 수 있었다.

연안지역에서 활발히 일어나는 대기과 해양의 상호작용으로 인해 대기 및 해양경계층 내 기상요소가 급격하게 변화할 수 있으며 이에 따라 국지성 악기상 출현, 국지기후변화, 폭풍우 등의 피해에 쉽게 노출될 수 있다. 본 연구에서 분석된 연안지역의 강한 풍속전단 발생과 같은 재해를 예방하고 피해를 최소화하기 위해 해당 재해에 대한 이해가 선행되고, 발생 시기 및 체계적인 관련 기후요소 분석연구 등 다양한 국내외 풍수해 사례를 통한 평가가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MOIS-재난-2015-03].

References

- Ashok, K.L. (2002) The Influence of Vertical Wind Direction Shear on Dispersion in the Convective Boundary Layer, and Its Incorporation in Coastal Fumigation Models. *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 102, No. 1, pp. 1-38.

- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poil, P., Kobayashi, S., et al. (2011) The Era-interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 137, No. 656, pp. 553-597.
- Dennis, E.J., and Kumjian, M.R. (2017) The Impact of Vertical Wind Shear on Hail Growth in Simulated Supercells. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 74, pp. 641-663.
- Fan, L., Shin, S.I., Liu, Z., and Liu, Q. (2016) Sensitivity of Asian Summer Monsoon Precipitation to Tropical Sea Surface Temperature Anomalies. *Climate Dynamics*, Vol. 47, No. 7-8, pp. 2501-2514.
- Golding, W.L. (2005) Low-level Windshear and Its Impact on Airlines. *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 35-45.
- Hunter, R., Pedersen, T.F., Dunbabin, P., Antoniou, I., Frandsen, S., Klug, H., Albers, A., and Lee, W.K. (2001) *European Wind Turbines Testing Procedure Developments. Task 1: Measurement Method to Verify Wind Turbine Performance Characteristics*. Risoe-R, No. 1209 (EN), Riso National Laboratory.
- Ji, H.E., Lee, S.H., Park, C.H., and Lee, H.W. (2014) A Case Study on Sea Breeze Circulation and Ozone Concentration due to the Effect of Cold Water in the Southeastern Coastal Area of Korea. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 2, pp. 261-274.
- Klotz, B.W., and Jiang H. (2017) Examination of Surface Wind Asymmetries in Tropical Cyclones. Part I : General Structure and Wind Shear Impacts. *Monthly Weather Review*, Vol. 145, pp. 3989-4009.
- Liu, W.T., Xie, X., and Niler, P.P. (2007) Ocean-Atmosphere Interaction over Agulhas Extension Meanders. *Journal of Climate*, Vol. 20, pp. 5784-5797.
- Qu, B., Garbrić, A.J., Zhu, J., Lin, D., Qian, F., and Zhao, M. (2012) Correlation between Sea Surface Temperature and Wind Speed in Greenland Sea and Their Relationships with NAO Variability. *Water Science and Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 304-315.
- Shen, X.Y., Qing, T., Huang, W.Y., and Li, X.F. (2013) Effects of Vertical Wind Shear on the Pre-summer Heavy Rainfall Budget: A Cloud-resolving Modeling Study. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 44-51.
- Wagner, R., Antoniou, I., Pedersen, S.M., Courtney, M.S., and Jorgensen, H.E. (2009) The Influence of the Wind Speed Profile on Wind Turbine Performance Measurements. *Wind Energy*, Vol. 12, No. 4, pp. 348-362.
- Wen, B., Wei, S., Wei, K., Yang, W., Peng, Z., and Chu, F. (2017) Power Fluctuation and Power Loss of Wind Turbines due to Wind Shear and Tower Shadow. *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 321-332.
- Wharton, S., and Lundquist, J.K. (2012) Atmospheric Stability Affects Wind Turbine Power Collection. *Environmental Research Letters*, Vol. 7, No. 1, Article ID 014005, pp. 1-9.
- Yoo, J.W., Lee, S.H., and Lee, H.W. (2014) Numerical Study on the Characteristics of TKE in Coastal Area for Offshore Wind Power. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 9, pp. 1551-1562.

Received	November 7, 2017
Revised	November 9, 2017
Accepted	November 27, 2017