

국지앙상블시스템을 활용한 농경지 바람 및 강풍 예측

강정혁, 김건후, 김규랑*

국립기상과학원 기상응용연구부

(2024년 03월 28일 접수; 2024년 05월 20일 수정; 2024년 06월 04일 수락)

Prediction of Agricultural Wind and Gust Using Local Ensemble Prediction System

Jung Hyuk Kang, Geon-Hu Kim, Kyu Rang Kim*

National Institute of Meteorological Sciences

(Received March 28, 2024; Revised May 20, 2024; Accepted June 04, 2024)

ABSTRACT

Wind is a meteorological factor that has a significant impact on agriculture. Gust cause damage such as fruit drop and damage to facilities. In this study, low-altitude wind speed prediction was performed by applying physical models to Local Ensemble Prediction System (LENS). Logarithmic Law (LOG) and Power Law (POW) were used as the physical models, and Korea Ministry of Environment indicators and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data were applied as indicator variables. We collected and verified wind and gust data at 3m altitude in 2022 operated by the Rural Development Administration, and presented the results in scatter plot, correlation coefficient, Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), and Threat Score (TS). The LOG-applied model showed better results in wind speed, and the POW-applied model showed better results in gust.

Key words: Wind, Gust, Logarithmic law, Power law, Threat score, LENS



* Corresponding Author : Kyu Rang Kim
(krk9@korea.kr)

I. 서론

기상현상은 사회·경제적 창출과 손실 대비에 영향을 준다. 기상현상의 예측은 풍력단지 적정지 선정, 농산물 생산량 예측 등 다양한 분야에 활용되며 극한 기상을 대비한 재난방재적 정보 제공에 간접적으로 영향을 미친다(Kim *et al.*, 2003; Yun *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2016).

우리나라의 농업환경에서 강풍은 낙과, 시설물 파괴 등의 농업환경에 영향을 주는 기상요소이다. 개화에 발생하는 강풍은 개화에 도움을 주는 곤충의 활동을 방해해서 충분한 수분이 이뤄지지 않아 결실이 불량해진다. 농업환경에 영향을 미치는 바람요소는 전국에서 관측이 이루어지고 있으나, 기상청의 풍속 자료는 지표면 10 m 높이의 측정자료로, 농경지의 재배환경을 고려하지 못한다. 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA)에서는 3 m 높이에서 바람을 관측하는 농업기상관측장비(Automated Agricultural Observing System, AAOS)를 전국 일부지점에 설치해서 기상관측자료를 수집하고 있다. 그러나 모든 농업지역에 AAOS가 설치되어 있지 않아 관측 공백지역이 생기는 문제가 있다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서 농경지의 재배환경을 고려한 3 m 고도 풍속 예측기술 개발이 필요하고 농업기상재해 정보 서비스를 위한 강풍 관련 예측자료가 필요하다.

농경지의 재배환경을 고려한 바람 정보는 국소지점에서 측정되는 관측 값을 활용하거나 기상수치모델링의 결과를 활용할 수 있다. Local Ensemble Prediction System (LENS)은 기상청에 구축되어 2012년 5월부터 현업 운영 되고 있다(Kim *et al.*, 2013). 강수, 바람, 강풍 등의 72시간 예보를 수행하고 있으며 한반도 전역 약 2.2 km 공간해상도를 가지고 있다. 물리모델 적용에는 지표면 자료가 들어가고 지표면의 지형적 특성은 바람의 풍속 변화에 영향을 미치는 요인으로 기상수치모델에 적용되는 입력자료에서 중요한 부분이다(Shin *et al.*, 2006). LENS를 활용한 선행연구는 주로 강우 예측, 강우 정보 생산, 비행기 착륙 작업 및 관리에 영향을 미치는 저고도 윈드시어 분석 등에 국한되어 있다(Lee *et al.*, 2020; Ko *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2020).

본 연구에서는 10 m 고도 LENS 바람 예측 자료를 농업환경에서 적용 가능 하도록 물리모델을 적용하여 3 m 고도 LENS 바람 자료를 생산하고, 물리모델에

적용되는 지표면의 영향을 비교하기 위하여 환경부와 MODIS의 토지피복자료를 활용하였다. 최종적으로 물리모델과 토지피복별 3 m 고도 LENS 바람 자료의 검증 결과를 토대로 LENS와 물리모델에 대한 적용가능성을 판단하였다.

II. 연구방법

2.1. Local Ensemble Prediction System (LENS)

기상청에서 구동되는 LENS는 1일 2회 (00, 12 UTC) 구동되는 72시간 시간별 예보 자료이며 모델면, 등압면, 단일면 3개의 연직층 결과를 가지고 있다. 약 2.2 km의 공간해상도를 가지며 기준멤버를 포함한 13개 멤버로 구성되어 있고 72시간 예보되는 앙상블 멤버들은 서로 다른 초기조건들을 이용하여 수치모델 적분을 수행하고 충분한 단일 예보를 수행할 때보다 예측성을 향상시킬 수 있게 된다(Fig. 1). 앙상블 멤버들의 강풍 값을 가지고 강풍 확률에 대해서 계산이 가능하여 본 연구에서는 LENS를 활용하였다.

농촌진흥청에서는 일부 지역에서 농업기상관측장비를 운영하며, 3 m 고도의 바람 관측을 수행한다. 3 m 고도 LENS 바람 및 강풍 검증을 위해서 2022년 시간별 90개 지점 자료를 수집하였다. 바람에 대해서는 산점도, 상관계수(Correlation Coefficient, r), Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)로 검증 결과를 나타내고, 강풍에 대해서는 강풍 기준 값에 대한 Threat Score (TS)를 계산하였다(Eq. 1~4). TS는 강풍 기준에 대한 확률에 대하여 예-아니오를 결정하는 점수이다(Demaria *et al.*, 2009). 검증식에서 f_i 는 예측값, \bar{f} 는 예측값 평균, o_i 는 관측값, \bar{o} 는 관측값 평균, o_{max} 와 o_{min} 은 o_i 의 최대값, 최소값을 의미하고 F는 강풍 기준 값 이상으로 강풍을 예측한 모델 자료의 개수, O는 강풍 기준 값 이상으로 강풍이 관측된 자료의 개수, H는 강풍 기준 값 이상으로 강풍을 예측한 모델과 관측 자료의 개수를 의미한다. 강풍 기준 값을 임의로 3, 5, 8, 10 m s^{-1} 기준으로 각 물리모델에 대해서 적용하였다. 물리모델 적용 전후를 비교하기 위해 10 m 고도 LENS 바람자료에 기상청 AWS의 2022년 시간별 660개 지점 자료로 검증을 진행하였다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}} \quad (\text{Eq. 1})$$

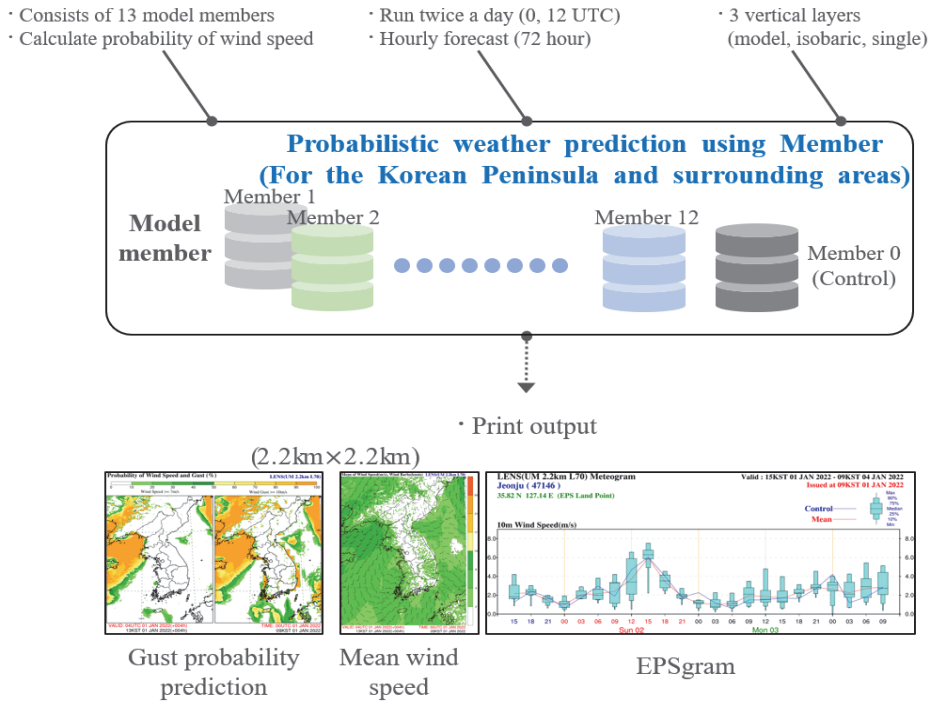


Fig. 1. Brief information of LENS.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$NRMSE = \frac{100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2}}{o_{max} - o_{min}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$TS = H / (F + O - H) \quad (\text{Eq. 4})$$

2.2. 물리모델 적용 지표면 자료 구축

지표면의 특성을 탐색하는 방식은 일반적으로 원격 탐사를 통한 통계적 분류방식이나 현장조사에 의한 직접분류 방식으로 구분된다. 본 연구에서는 한반도를 포함한 LENS의 구동범위에 대한 자료는 공간해상도 500 m 급인 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서 제공하는 MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) MCD12Q1 토지피복자료와 IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) 정의에 따른 17개 분류 기준을 사용하였다. 동시에 남한지역의 지표면 특성 반영을 위하여 GIS 벡터형식인 환경부의 토지피

복도 중분류 자료를 활용하여 GIS Raster 형식으로 변환하였다(Fig. 2, Table 1). 이종데이터의 중첩과정은 LENS의 기하학 구조와 일치시키고 공간해상도, 좌표체계, 지표면 특성의 재분류 과정을 통해 지리적 속성을 일치시키는 과정이다. LENS의 공간해상도로 가공된 토지피복도에 대한 남한지역의 두 자료의 일치하는 정확도(Overall accuracy)는 90%이며, 농업지역의 환경부 토지피복도 및 MCD12 정확도는 각각 79.1%, 72.0%이다(Table 2).

2.3. 3m 고도 바람자료 생산 방법

물리모델인 Logarithmic Law (LOG), Power Law (POW)에 환경부 지표(-L), MODIS 지표(-M)를 적용하는 총 4가지 방법으로 2022년 3m 고도 LENS 자료를 생산하였다. 분류된 토지피복 결과를 이용하여 영면변위(zero-plane displacement)와 풍속전단지수(wind shear exponent)를 결정하는 방법으로 토지피복 자료를 물리모델에 적용하였다(Table 3).

LOG 적용으로 생산되는 고도 z 에서 평균 풍속은 Eq. 5와 같이 정의된다(Blackadar and Tennekes, 1968; Tennekes, 1973; Kent *et al.*, 2018).

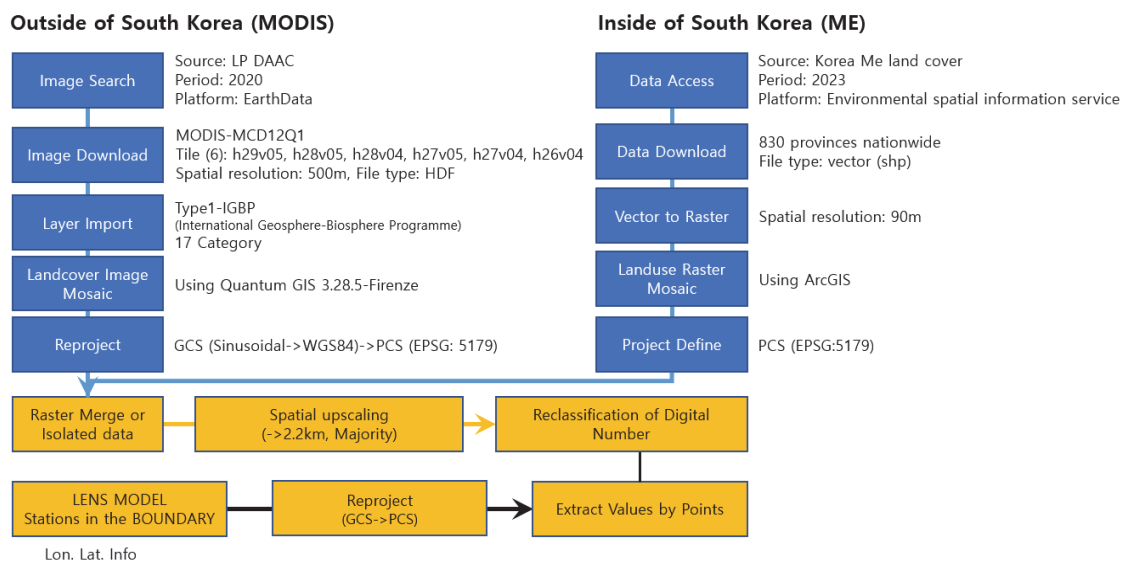


Fig. 2. Reclassification process of land cover data.

Table 1. Reclassification table of Korea ME and MODIS land cover data

	ME Land Cover			MODIS (MCD12Q1)		Reclassification		
Urbanized Dry Area	110	Residential Area	13	Urban and Built-up Lands	100	Urban Area		
	120	Industrial Area						
	130	Commercial Area						
	140	Recreation Area						
	150	Traffic Area						
160	Public Facilities Area							
Agricultural Area	210	Paddy	12	Croplands	200	Agricultural Area		
	220	Field						
	230	Facility Cultivation Area					14	Cropland/Natural Vegetation Mosaics
	240	Orchard						
	250	Etc.						
Forest	310	Broadleaf Forests	1	Evergreen Needleleaf Forests	300	Forest		
	320	Needleleaf Forests	2	Evergreen Broadleaf Forests				
	330	Mixed Forests	3	Deciduous Needleleaf Forests				
			4	Deciduous Broadleaf Forests				
			5	Mixed Forests				
Grass	410	Natural Grasslands	8	Woody Savannas	400	Grass		
	420	Artificial Grasslands	9	Savannas				
			10	Grasslands				
			6	Closed Shrublands				
			7	Open Shrublands				
Wetland	510	Inland Wetlands	11	Permanent Wetlands	500	Wetland		
	520	Coastal Wetlands						
Barren	610	Natural Barren	16	Barren	600	Barren		
	620	Artificial Barren						
Water	710	Inland Water	17	Water Bodies	700	Water		
	720	Ocean Water					15	Permanent Snow and Ice

Table 2. Confusion matrix between Korea ME data and MODIS data

Kor-Boundary	LandUse by ME							Total	User Acc.	
	100	200	300	400	500	600	700			
MODIS (MCD12)	100	1013	127	270	130	8	29	57	1634	62
	200	119	5534	892	276	44	48	83	6996	79.1
	300	22	590	11853	328	14	38	125	12970	91.4
	400	68	1276	2807	1768	53	57	107	6136	28.8
	500	.	5	8	.	20	1	8	42	47.6
	600	6	.	6	100
	700	30	155	257	61	430	43	56682	57658	98.3
Total	1252	7687	16087	2563	569	222	57062	85442		
Producer Acc.	80.9	72.0	73.7	69.0	3.5	2.7	99.3			

*LandUse = Korea ME data, MCD12=MODIS data

Table 3. Typical value of surface roughness length (z_0), wind shear exponent (α) and classification code of land cover

Type of Terrain	Surface roughness length (z_0)	Wind shear exponent (α)
Calm open sea	0.0002	0.1
Sand	0.0005	0.1
Lawn grass	0.01	0.13
Mown grass		
Low grass		
Rough pasture		
Fallow field	0.05	0.18
High grass		
Crops		
Few trees	0.1	0.2
Many trees, hedges, few buildings	0.5	0.24
Forest and woodlands		
Suburbs	2.0	0.35
Centers of cities with tall buildings		

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-z_d}{z_0} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

u_* 는 일정한 값을 가지는 마찰속도, κ 는 von Karman's 상수, z_d 는 영면변위, z_0 는 거칠기 길이 (roughness length)를 의미한다. Garratt(1992)는 풍동 실험을 통해서 $\kappa=0.4$ 를 얻게 되었고 Monteith(1973)은 초목지역에서 z_d 가 대략 2/3이라고 하였고 그 값을 적용하였다. z_0 은 식생, 토지피복도에 따라서 Table 3의 값을 적용하고 10 m 고도에서 3 m 고도 자료로

변환하는 식 Eq. 6을 연구에 적용하였다(Aghbalou *et al.*, 2018; Chavan *et al.*, 2017).

$$\bar{U}(3) = \bar{U}(10) \frac{\ln(3-z_d) - \ln(z_0)}{\ln(10-z_d) - \ln(z_0)} \quad (\text{Eq. 6})$$

POW는 다른 두 고도 z_1, z_2 간의 평균 풍속 사이의 연관성을 보여주며 Eq. 7과 같이 정의된다(Emeis, 2014; Kent *et al.*, 2018).

$$\bar{U}(z_1) = \bar{U}(z_2) \left(\frac{z_1 - z_d}{z_2 - z_d} \right)^\alpha \quad (\text{Eq. 7})$$

식생, 토지피복도에 따라 값이 다르게 되는 α 는 풍속전단지수이고 Table 3의 토지피복 분류에 대한 값을 적용하고 10 m 고도 풍속자료를 입력해서 3 m 고도 바람자료를 얻는 Eq. 8을 연구에 적용하였다 (Aghbalou *et al.*, 2018; Chavan *et al.*, 2017).

$$\bar{U}(3) = \bar{U}(10) \left(\frac{3 - z_d}{10 - z_d} \right)^\alpha \quad (\text{Eq. 8})$$

III. 결과 및 토의

10 m 고도 LENS 멤버들의 바람을 기상청 AWS 시간별 관측자료와 비교하였다. RMSE는 3.3 - 3.4, NRMSE는 7 - 8%로 나타났다(Table A1). Table A1의 기준멤버(oper 00)와 멤버의 평균풍속을 전체자료의 0.01%를 산점도로 나타내었다(Fig. 3). 기준선보다 분포가 위쪽으로 밀집되어 있어서 LENS의 바람이 관측보다 더 강하게 예측함을 확인하였다. Table A2는 Table A1처럼 상관계수를 나타내었고 멤버의 평균풍속 일 때, 상관계수 값이 0.5915로 가장 좋은 결과를 보여주었다.

물리모델과 환경부 지표를 사용한 결과를 각각 LOG_L, POW_L로 표기하고, MODIS 지표를 사용한 결과는 각각 LOG_M, POW_M으로 지정하여 결과에

표기하였다. Table A3은 물리모델이 적용된 LENS의 13개 멤버 풍속과 평균풍속을 농업기상 AAOS 시간별 관측자료와 비교하여 RMSE와 NRMSE를 계산한 결과이다. Fig. 4는 표의 결과들과 10 m 고도 LENS의 비교 결과를 비교하기 위해서 선으로 표현한 결과이다. NRMSE는 물리모델 적용 후 값이 높게 나타났다. 통계적 유의성 분석 결과 네 가지 방법 모두 p -value가 0.0001보다 작았다. Table A4는 물리모델이 적용된 LENS의 13개 멤버 풍속과 평균풍속을 AAOS 시간별 관측자료와 비교한 상관계수를 나타낸 것이다. Fig. 5는 4가지 방법 적용 후 평균 풍속과 RDA의 관측자료 간의 산점도를 나타낸 결과이다. 4가지 방법 모두 비슷한 형태를 띄며 기준선보다 분포가 위쪽으로 밀집되어 있어서 예측 결과가 관측보다 과대 추정하였다. 상관계수는 LOG와 POW를 비교하면 POW가 더 좋은 결과를 보여주었고, 적용된 지표자료를 나눠서 비교하면 MODIS 지표를 적용했을 때 더 좋은 결과를 보여주었다. Fig. 6은 강풍 기준 값에 따른 TS 값을 나타낸 것이다. 강풍 기준이 커질 때 TS 값이 낮아졌고, 방법들을 비교했을 때, POW가 더 좋은 결과를 보여주었고 POW_M, POW_L, LOG_M, LOG_L 순으로 좋은 결과를 보여주었다.

풍속의 RMSE, NRMSE 결과에서는 LOG_L, LOG_M, POW_L, POW_M 순으로 좋은 결과가 나타났으나 강풍의 상관계수, TS에서는 POW_M, POW_L, LOG_M, LOG_L 순으로 좋은 결과를 보여

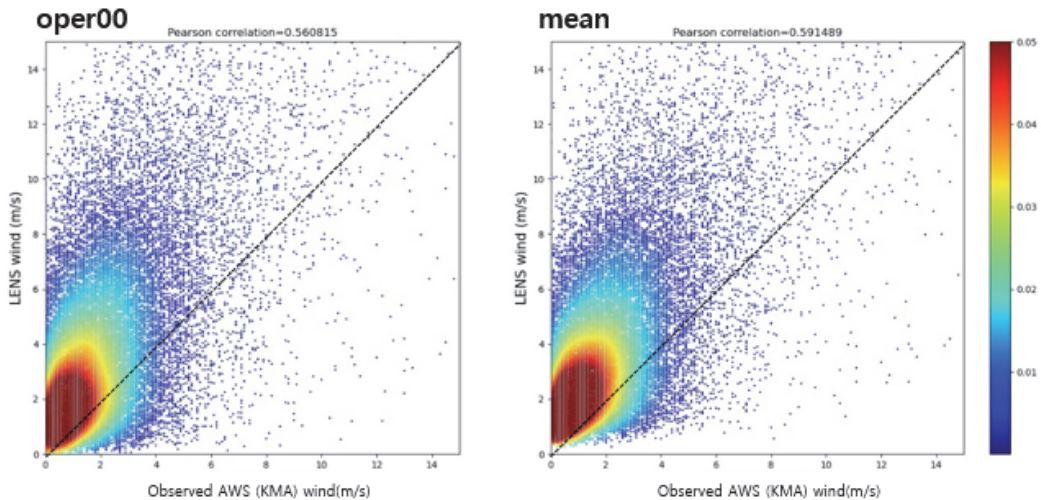


Fig. 3. Scatter plot of 10 m wind speed between LENS model and AWS observation.

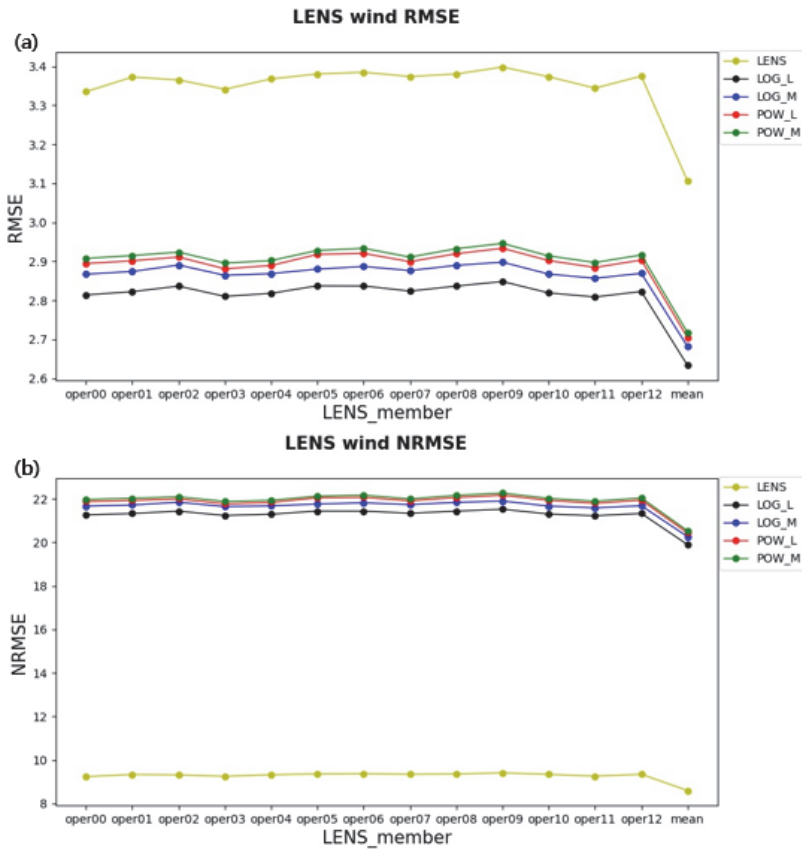


Fig. 4. (a) RMSE, (b) NRMSE of wind speed between LENS model for members and observation (AWS, AAOS).

주었고 산점도의 분포에서는 모두 비슷한 분포를 보여 주었다. 풍속에서는 LOG를 적용하는 것이 가장 좋게 나왔으나 큰 차이를 보여주지 않고 강풍에서는 POW를 적용한 TS 값이 약 0.01 정도 높게 나타났다. 모델이 과대 추정하는 부분이 있어서 풍속의 결과는 위와 같이 나온 것으로 판단되며 더 나은 결과를 나타내기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다. 이상의 연구 결과는 풍속과 강풍예측을 위한 물리모델 방법 선택에 도움을 줄 것이다. 또한 이를 바탕으로 후속 연구로 강풍 기준 값을 입력하여 머신러닝을 활용한 농경지 바람 및 강풍확률 예측 개선 연구를 진행할 수 있을 것이다.

적 요

바람은 농업환경에 주요한 영향을 주는 기상요소이

며, 강풍은 낙과, 시설물 파괴 등의 피해를 일으킨다. 본 연구는 LENS에 물리모델을 적용해서 농경지에 활용될 수 있는 저고도 풍속예측을 진행하였다. 물리모델은 LOG, POW가 사용되었고 지표 변수에 대해서는 환경부지표와 MODIS 지표를 따로 적용하였다. 농촌진흥청에서 운영하는 2022년도 3 m 고도의 바람 및 강풍 자료를 수집하고 검증을 진행하였고 결과를 산점도, 상관계수, RMSE, NRMSE, TS로 나타내었다. 풍속비교 4가지 방법의 결과에서 모델이 관측보다 더 크게 예측하고 있음을 확인할 수 있었다. 강풍 기준 값이 3 m s^{-1} 일 때, TS가 약 0.65 정도로 나타났다. 결과는 RMSE와 NRMSE에서는 LOG_L, LOG_M, POW_L, POW_M 순으로 좋게 나타났고 상관계수와 TS에서는 역순으로 좋게 나타났다. 이러한 결과는 정해진 강풍 기준을 추가하여, 농경지 바람 및 강풍확률 예측 연구에 도움이 될 것으로 기대된다.

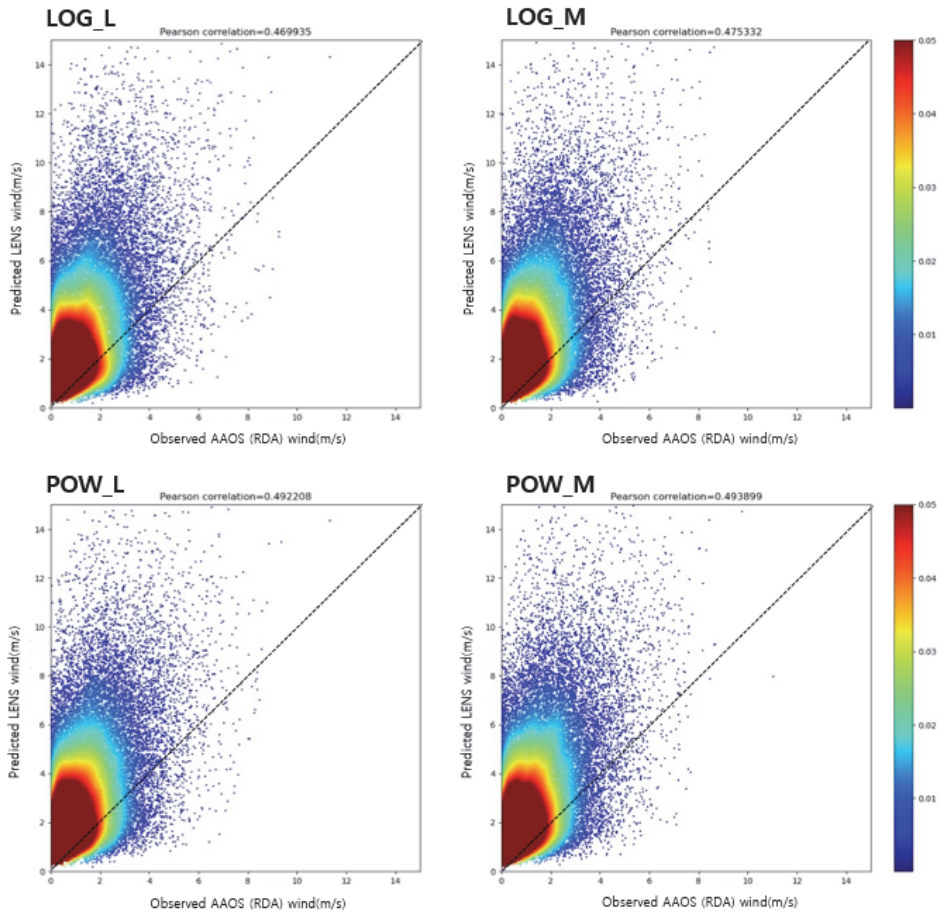


Fig. 5. Scatter plots of 3 m wind speed between LENS model and AAOS observation.

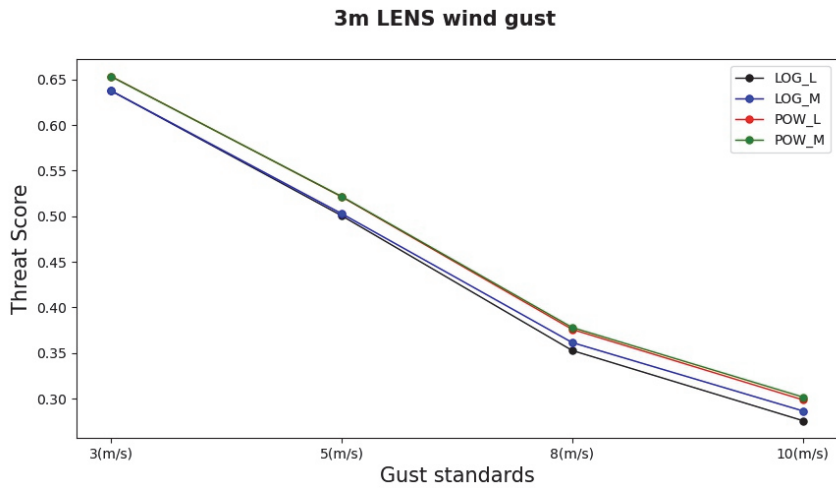


Fig. 6. Threat score of 3 m LENS model for gust standards.

부록 A

Table A1. RMSE and NRMSE of 10 m wind speed between LENS model and AWS observation

	oper00	oper01	oper02	oper03	oper04	oper05	oper06	oper07	oper08	oper09	oper10	oper11	oper12	member mean
RMSE	3.3351	3.3728	3.3652	3.3415	3.3679	3.3806	3.385	3.3742	3.3806	3.3983	3.3734	3.3444	3.3751	3.1056
NRMSE	7.267	7.5084	7.4902	7.5971	7.6851	7.4937	7.0971	7.3801	7.1854	7.207	7.913	7.6377	7.4726	8.9037

Table A2. Correlation coefficient of 10 m wind speed between LENS model and AWS observation

	oper00	oper01	oper02	oper03	oper04	oper05	oper06	oper07	oper08	oper09	oper10	oper11	oper12	member mean
OBS	0.5608	0.5416	0.5411	0.5388	0.5426	0.5404	0.5421	0.5421	0.539	0.5401	0.5421	0.5409	0.5413	0.5915

Table A3. RMSE and NRMSE of 3 m wind speed between LENS model and AAOS observation

	oper00	oper01	oper02	oper03	oper04	oper05	oper06	oper07	oper08	oper09	oper10	oper11	oper12	member mean	
LENS(LOG + ME's land cover) & AAOS	RMSE	2.814	2.8223	2.8365	2.8102	2.818	2.8373	2.8369	2.8238	2.8366	2.8483	2.8191	2.8787	2.8227	2.633
	NRMSE	10.878	11.035	10.593	10.412	10.77	10.485	10.5	10.514	11.112	9.793	10.963	11.395	9.87	11.549
LENS(LOG + MODIS's land cover) & AAOS	RMSE	2.8672	2.874	2.8906	2.8642	2.8686	2.8801	2.8869	2.8764	2.8897	2.8979	2.8673	2.8567	2.8693	2.6812
	NRMSE	11.084	11.107	10.735	10.612	10.837	10.519	10.561	10.71	11.189	9.963	11.022	11.589	10.033	11.614
LENS(POW + ME's land cover) & AAOS	RMSE	2.8944	2.9015	2.911	2.8809	2.8894	2.9179	2.9204	2.8993	2.9195	2.9335	2.902	2.8843	2.9034	2.7042
	NRMSE	9.873	8.142	9.903	10.268	10.981	9.149	9.381	8.902	7.993	8.378	9.2	8.648	9.725	12.136
LENS(POW + MODIS's land cover) & AAOS	RMSE	2.9076	2.9149	2.9237	2.8956	2.902	2.928	2.9335	2.9109	2.9324	2.946	2.914	2.897	2.9164	2.717
	NRMSE	9.918	8.18	9.946	10.321	11.029	9.181	9.423	8.938	8.029	8.414	9.238	8.686	9.768	12.025

Table A4. Correlation coefficient of 3 m wind speed between LENS model and AAOS observation

	oper00	oper01	oper02	oper03	oper04	oper05	oper06	oper07	oper08	oper09	oper10	oper11	oper12	member mean
LENS(LOG + ME's land cover) & AAOS	0.4465	0.4253	0.4285	0.4263	0.4289	0.4277	0.4297	0.4271	0.4244	0.4267	0.4289	0.4257	0.4269	0.4699
LENS(LOG + MODIS's land cover) & AAOS	0.451	0.4305	0.4331	0.431	0.4339	0.4331	0.4345	0.431	0.4284	0.4316	0.4333	0.4305	0.4319	0.4753
LENS(POW + ME's land cover) & AAOS	0.466	0.4437	0.4471	0.4453	0.4478	0.4466	0.4472	0.4452	0.4418	0.4444	0.447	0.4439	0.4456	0.4922
LENS(POW + MODIS's land cover) & AAOS	0.4677	0.4455	0.4487	0.4471	0.4496	0.4488	0.4488	0.447	0.4436	0.4462	0.449	0.4458	0.4475	0.4939

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 “기상업무지원 기술개발연구-생명기상 및 농림기상 기술개발(KMA 2018-00626)”의 지원으로 수행되었습니다. 논문의 가독성 향상에 큰 도움을 주신 심사자 두 분께도 감사드립니다.

REFERENCES

- Aghbalou, N., A. Charki, S. R. Elazzouzi, and K. Reklou, 2018: A probabilistic assessment approach for wind turbine-site matching. *Electrical Power and Energy System* **103**, 497-510.
- Blackadar, A. K., and H. Tennekes, 1968: Asymptotic similarity in neutral barotropic planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Science* **25**, 1015-1020.
- Chavan, D. S., S. Gaikwad, A. Singh, Himanshu, D. Parashar, V. Saahil, J. Sankpal, and P. B. Karandikar, 2017: Impact of vertical wind shear on wind turbine performance. *International Conference on circuits Power and Computing Technologies (ICCPCT), Kollam*, 1-6p.
- Demaria, M., J. A. Knaff, R. Knabb, C. Lauer, C. R. Sampson, and R. T. Demaria, 2009: A new method for estimating tropical cyclone wind speed probabilities. *American Meteorological Society* **24**, 1573-1591.
- Emeis, S., 2014: Current issues in wind energy meteorology. *Meteorological Application* **21**, 803-819.
- Garratt, J., 1992: The atmospheric boundary layer. *Cambridge Atmospheric and Space Science Series*, 444p.
- Kent, C. W., C. S. B. Grimmond, D. Gatey, and J. F. Barlow, 2018: Assessing methods to extrapolate the vertical wind-speed profile from surface observations in a city centre during strong winds. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* **173**, 100-111.
- Kim, H.-G., J. O. Choi, J. B. Son, W. S. Jung, and H. W. Lee, 2003: Analysis of wind environments for siting a wind farm. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **19**(6), 745-756. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., H. M. Kim, J. Gye, and S. Lee, 2013: Construction of ensemble system based on local forecast model. *Atmospheric Sciences, Yonsei University*, 480-481.
- Kim, Y., B. Kim, G. Ko, M. Choi, H. Song, G. Kim, S. Yoo, J. Lim, K. Bok, and J. Yoo, 2016: Design and implementation of a flood disaster safety system using realtime weather big data. *Journal of Korean Contents Association* **17**(1). (in Korean with English abstract)

- Ko, C.-M., Y. Y. Jeong, Y.-M. Lee, and B.-S. Kim, 2020: The development of a quantitative precipitation forecast correction technique based on machine learning for hydrological applications. *Atmospheric* **11**, 111p.
- Lee, S. H., Y. J. Seong, K. Kim, and Y. Jung, 2020: Appraisal of spatial characteristics and applicability of the predicted ensemble rainfall data. *Korea Water Resources Association* **53**(11), 1025-1037. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.-G., S.-B. Ryoo, K. Han, H. W. Choi, and C. Kim, 2020: Inter-comparison of ensemble forecasts for low level wind shear against local analyses data over Jeju area. *Atmosphere* **11**, 198.
- Monteith, J. L., 1973: *Principles of environmental physics*. Elsevier, New York, 241p.
- Shin, S.-H., Y.-S. Lee, and K.-J. Ha, 2006: Effect of direct solar radiation with sloped topography in a mesoscale meteorological model. *Journal of Korean Geographic Information Society* **9**(4), 45-59. (in Korean with English abstract)
- Tennekes, H., 1973: The logarithmic wind profile. *Journal of the Atmospheric Science* **30**, 234-238.
- Yun, J. I. and K. Cho, 2001: Yield, and production forecasting of paddy rice at a sub-county scale resolution by using crop simulation and weather interpolation techniques. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 37-43. (in Korean with English abstract)