

제주와 강원 지역의 낙뢰특성 및 풍력발전기의 낙뢰피해 비교 연구 A Comparative Study on Lightning Characteristics and Lightning Damage to Wind Turbines of Jeju and Gangwon Region

양달승* · 김경보** · 고경남***†

Dal-Seung Yang*, Kyoung-Bo Kim** and Kyung-Nam Ko***†

(접수일 : 2014년 5월 12일, 수정일 : 2014년 9월 30일, 채택확정 : 2014년 9월 30일)

Abstract: An investigation on lightning characteristics and damage to wind turbines was performed on Jeju and Gangwon regions. The lightning data from January 2010 to September 2013 detected by IMPACT ESP were collected and analyzed in detail. Hangeyong and Seongsan wind farms of Jeju province and Taebaek, Changjuk, Taegisan and Gangwon wind farms of Gangwon province were selected for this study. Lightning rates and lightning damage events at the six wind farms were compared with each other. Lightning maps for the two regions were drawn using lightning frequency data. As a result, lightning frequency of Gangwon region was higher than that of Jeju region, while lightning strength of Gangwon was weaker than that of Jeju. Lightning rates were assessed to be good for all of the six wind farms. No lightning damage to wind turbines occurred at the two wind farms of Jeju, while some lightning damage to wind turbines took place at the four wind farms of Gangwon.

Key Words : Wind Energy, Lightning Frequency, Lightning Map, Lightning Rate

1. 서 론

보다 높은 효율을 얻기 위한 풍력발전기의 대형화가 진행되면서 허브높이가 100 m에 이르는 풍력발전기도 등장하고 있다. 그러나 이러한 대형 풍력발전기는 보통 주변 물체보다 높으므로 낙뢰 피해를 입기 쉽다. 실제로 국내외에서 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해가 계속 보고되고 있다.

미국 국가재생에너지연구소(NREL)에 따르면 100기의 풍력발전기 중 8기는 매년 한 번의 직격뢰를 맞을 것으로 예측하고 있다.¹⁾ Nakao²⁾는 2004년부터 2007년까지 일본에 설치된 풍력발전기 3,618기에 대한 고장 및 사고원인을 조사한 결과 낙뢰로 인한 고장이 가장 많았다고 보고 하였다. 또한 덴마크, 독일, 스웨덴에서의 조사 결과에 따르면 낙뢰가 원인이 되어 발생하는 풍력발전기의

***† 고경남(교신저자) : 제주대학교 대학원 풍력공학부
E-mail : gnkor2@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-4401

*양달승 : 한국남부발전(주) 남제주화력발전소

**김경보 : 제주지역사업평가원

***† Kyung-Nam Ko (corresponding author) : Faculty of Wind Energy Engineering, Graduate School, Jeju National University
E-mail : gnkor2@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-4401

*Dal-Seung Yang : Namjeju Thermal Power Plant Wind Power Mangagement Team, Korea Southern Power Co., LTD

**Kyoung-Bo Kim: Jeju Institute for Regional Program Evaluation

피해 부위는 주로 블레이드, 전력시스템, 제어시스템으로 분류할 수 있었다.³⁾

이러한 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해를 최소화하고 낙뢰보호 기술 표준을 확립하고자 국제전기기술위원회(IEC)에서는 2002년에 낙뢰보호에 관한 기술시방서를 발간하였고, 2010년에는 국제표준인 IEC 61400-24를 제정하였다.⁴⁾

한편, 우리나라에서는 풍황특성⁵⁾, 풍력발전기 구성부품⁶⁾, 풍력단지의 경제성 분석⁷⁾ 등에 관한 연구가 주로 이루어지고 있지만, 풍력발전기에 미치는 낙뢰의 영향 및 그 대책에 관한 연구^{8,9)}는 상대적으로 활발히 이루어지고 있지 않다. 그러나 우리나라의 풍력발전 용량이 2013년 말 기준으로 500 MW를 초과하였고, 풍력발전기의 낙뢰 피해가 계속 보고되면서 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

이 연구에서는 우리나라에서 가장 많은 풍력발전 용량을 보유하고 있는 제주도와 강원도에서의 낙뢰특성 및 이로 인한 풍력발전기의 피해 사례를 비교하고, 나아가 두 지역에서의 낙뢰피해 대책을 세울 때 도움이 되는 분석 결과를 제공하고 자 한다.

2. 낙뢰데이터 및 풍력단지

2.1 낙뢰데이터


Table 1은 기상청에서 운영 중인 낙뢰탐지용 장비인 IMPACT ESP의 외관 및 사양을 나타낸다. 전국 7개소에 설치되어 있는 이 장비의 낙뢰 위치 탐지 정확도는 육상에서 500 m 이내이고, 탐지 효율은 90% 이상이다.¹⁰⁾ 이 연구에서는 이로부터 탐지된 최근 3년 9개월(2010년 1월 ~ 2013년 9월) 동안의 낙뢰데이터를 기상청으로부터 제공받아 분석하였다.

2.2 분석 범위 및 풍력단지

Fig. 1은 본 연구에서 설정한 제주 지역의 범위이며 육,해상을 포함하는 북위 33°06'~33°36', 동경 126°06'~127°00' (면적: 5,574 km²)이다. 제주에서 연구된 한경(HG) 및 성산(SS) 풍력단지를 Fig.

1에 같이 나타내었다.

Table 1 Specification of IMPACT ESP

Manufacturer	GAI, USA	
Detection method	MDF+TOA	
Location accuracy	500m	
Detection efficiency	More than 90%	
Time synchronize	GPS	
Lightning type detecting	Ground to Ground Flash Return Stroke	

이 연구에서 설정된 강원 지역의 범위는 Fig. 2와 같다. 북위 37°00'~37°45', 동경 128°06'~129°06' (면적: 7,351 km²)범위이고, 연구대상 풍력단지들은 강원(GW), 태기산(TGS), 태백(TB) 및 창죽(CJ) 풍력단지를 포함한다.

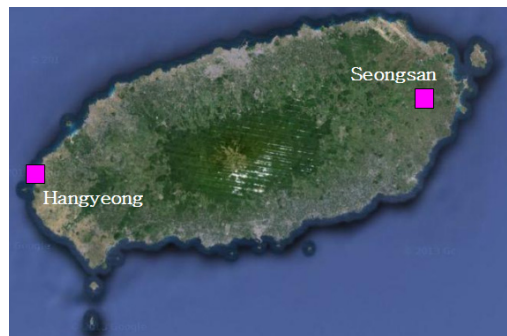


Fig. 1 Studied area and wind farms of Jeju

Fig. 2에는 태백 풍력단지의 낙뢰율 (Lightning rate) 평가를 위한 방법을 한 예로 도시하였다. 낙뢰율은 단위 km² 당 1년에 몇 번 낙뢰가 발생하는지를 나타낸다. 풍력단지의 낙뢰영향범위 설정은 풍력단지에서 동, 서, 남, 북으로 가장 먼 거리에 위치한 풍력발전기를 기준으로 사각형 범위를 만들고, 그 경계선으로부터 풍력발전기의 최고 높이의 3배 떨어진 사각형을 낙뢰율 평가 면적으로 정하였다.⁴⁾

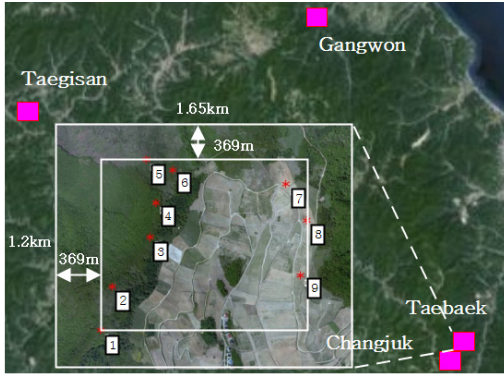


Fig. 2 Studied area and wind farms of Gangwon including an example of the range for lightning rate

Table 2에 낙뢰율 평가를 위한 연구 대상 각 풍력단지 면적을 나타낸다. 태백 풍력단지가 면적이 가장 좁고, 강원 풍력단지가 가장 넓다.

Table 2 Area of studied wind farms

	Jeju (5,574 km ²)		Gangwon (7,351 km ²)			
	HG	SS	TB	CJ	TGS	GW
Area (km ²)	2.73	2.83	2.00	5.91	7.73	35.1

3. 연구결과

3.1 제주 및 강원 지역의 낙뢰 특성

Fig. 3은 제주 지역과 강원 지역에서 발생한 연별 낙뢰횟수를 비교한 것이다. 해에 따라 낙뢰발생 횟수가 불규칙한 경향을 보이고 있다. 제주지역은 3년 9개월 동안 총 25,667회 낙뢰가 발생했으며 강원지역은 총 62,269회 발생하였으므로, 강원도의 면적이 제주도의 1.32배인 것에 비해 발생 횟수는 2.43배인 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 시간대별 낙뢰 발생빈도를 보여준다. 제주 지역에서는 새벽과 오후 시간대에 낙뢰발생 빈도가 낮은 반면 20시 ~ 24시 및 9시 ~ 11시에는 매우 높다. 그러나 강원 지역에서는 20시 ~ 24시 및 9시 ~ 11시에 낙뢰빈도가 매우 낮고, 오후 시

간대 및 4시 ~ 7시에는 높은 낙뢰빈도를 보이고 있다. 즉, 제주와 강원 지역의 시간대별 낙뢰발생 빈도는 대체로 반대 경향을 보이고 있다.

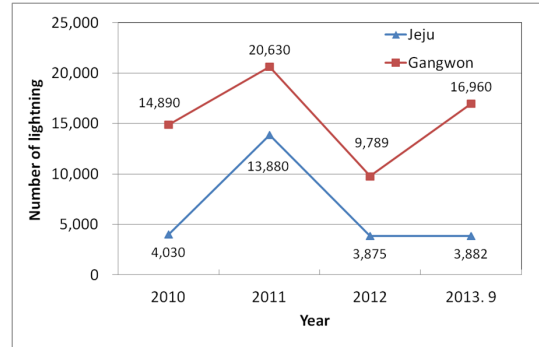


Fig. 3 The number of annual lightning occurrence on Jeju and Gangwon

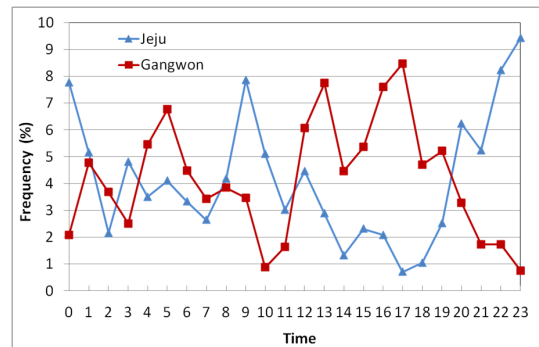


Fig. 4 Lightning frequency with time on Jeju and Gangwon

Fig. 5는 제주와 강원 지역의 등급별 낙뢰 빈도를 보여준다. 낙뢰등급은 낙뢰강도에 따라 -1.6 ~ 1.6 kA인 ±0 등급에서 ±1000 kA 이상인 ±15 등급까지 있고 절대 값이 큰 등급일수록 낙뢰강도가 높다.⁸⁾ 두 지역 모두 정극성(+) 낙뢰에 비해 부극성(-) 낙뢰가 높은 빈도를 보이고 있다. 또한 낙뢰 강도는 정극성과 부극성 모두 제주 지역이 강원 지역보다 높다. 따라서 낙뢰 발생횟수는 강원지역이 제주 지역에 비해 많으나 낙뢰강도는 제주 지역이 강원 지역보다 높다.

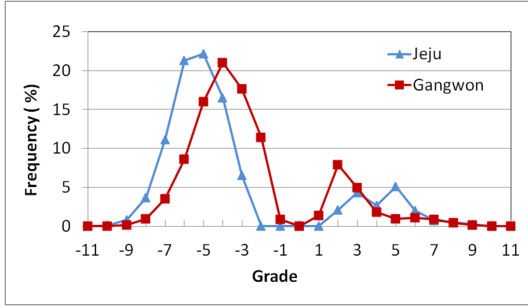


Fig. 5 Frequency of lightning grade on Jeju and Gangwon

Fig. 6은 제주와 강원 지역에서의 월별 낙뢰발생빈도를 나타낸다. 강원 지역에서는 빈도가 가장 높은 8월을 제외하고 4월부터 9월까지 비교적 고른 분포를 보이고 있다. 제주지역에서는 낙뢰가 7, 8, 9월에 집중적으로 발생되고 있고 나머지 월은 5% 이하의 낙뢰 빈도를 보이고 있다.

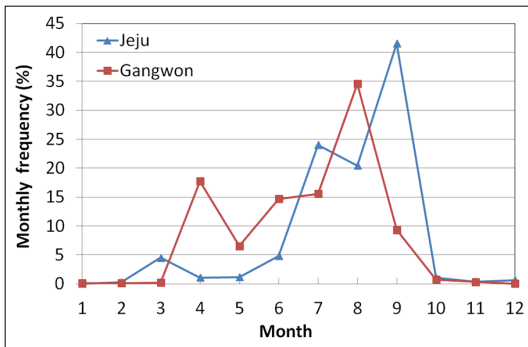


Fig. 6 Comparison of the monthly lightning frequency on Jeju and Gangwon

Fig. 7은 3년 9개월 동안 제주 지역의 낙뢰 횟수 분포를 나타낸다. 제주도 서쪽에서부터 동쪽으로 갈수록 낙뢰 횟수가 점차 많아지는 것을 알 수 있다. 특히 제주도 동쪽 육상 및 해상에서는 낙뢰 횟수가 1,000회 이상 급격히 증가하고 있다. 따라서 향후 제주도 동쪽 지역에 풍력단지를 건설할 경우 낙뢰에 대한 대비를 철저히 해야 할 것이다.

강원 지역의 낙뢰횟수 분포를 Fig. 8에 나타낸다. 제주 지역과는 반대로 동쪽에서부터 서쪽으로

갈수록 낙뢰 횟수가 점차 많아지고 있다. 특히 강원도 서쪽 산악지역에서 낙뢰 횟수가 높게 분포하고 있으며, 태기산 풍력단지가 위치해 있는 지역에서는 약 1000회의 낙뢰가 발생하였다.

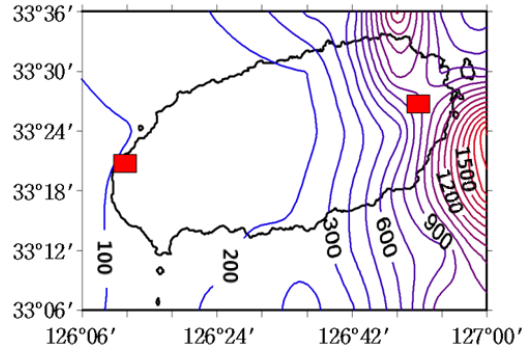


Fig. 7 Distribution of lightning frequency on Jeju

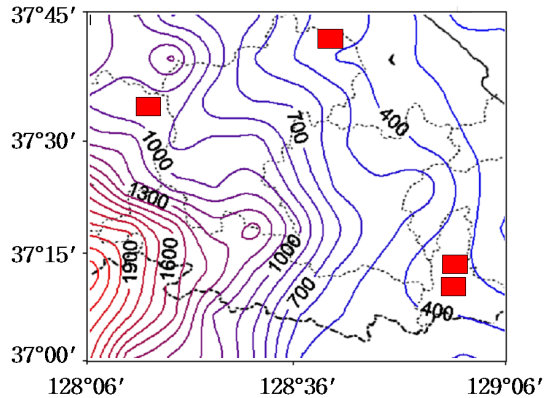


Fig. 8 Distribution of lightning frequency on Gangwon

3.2 풍력단지별 낙뢰율 비교

Table 3에 연구 대상인 6개의 풍력단지의 낙뢰 특성을 나타낸다. 제주 지역에 위치한 한경 및 성산 풍력단지에서의 3년 9개월간 낙뢰횟수는 각각 3회와 22회로 낮다. 강원 지역의 태백 및 창죽 풍력단지는 각각 8회와 18회인 반면, 태기산과 강원 풍력단지는 모두 150회 이상이다. 주의할 점은 강원 풍력단지의 면적이 다른 풍력단지의 약 4.5배에서 17.6배까지 더 넓으므로 이를 고려하여 낙뢰

를 평가해야 한다는 것이다. 즉, 공평한 낙뢰 평가를 하기 위해 면적을 고려할 필요가 있는데, 이를 만족 시키는 것이 낙뢰율 평가이다.

이 연구에서는 풍력단지설계 S/W인 WindPRO 에서 낙뢰율을 평가하는 방식에 따라 낙뢰율이 20을 초과하면 Critical, 10 ~ 20인 경우 Caution, 10보다 작으면 Good으로 평가하였다.¹¹⁾ 이 연구에서 2013년에는 9월까지만 낙뢰 데이터가 취득되었으므로, 부족한 나머지 10월 ~ 12월의 낙뢰횟수는 이전 3년간 같은 달 동안 발생한 낙뢰 비율의 평균으로 보상하여 전체 낙뢰율을 계산하였다. Table 3에서 6개 풍력단지 모두 Good으로 평가할 수 있으며 환경 풍력단지의 낙뢰율이 0.28로 가장 낮고 태기산 풍력단지가 5.00으로 다소 높은 수준임을 알 수 있다. 참고로 Table 3에는 낙뢰일수, 주요 낙뢰등급 및 월이 함께 표시되어 있다.

Table 3 Lightning frequency, number of lightning days and lightning rate on each wind farm

Items		Jeju		Gangwon			
		HG	SS	TB	CJ	TGS	GW
Frequency	2010	0	6	4	3	51	34
	2011	0	7	1	2	42	44
	2012	2	2	2	4	25	67
	2013. 9	1	7	1	9	36	19
	Sum	3	22	8	18	154	164
No of days	2010	0	4	1	3	25	31
	2011	0	3	1	2	27	35
	2012	2	2	2	4	22	47
	2013. 9	1	3	1	9	23	19
	Sum	3	12	5	18	97	132
Most frequent grade	-6	-4	-5	-4	-4	-4	
Most frequent month	7	9	9	6	7	4	
Area (km ²)	2.73	2.83	2.00	5.91	7.73	35.1	
Lightning rate (flashes/km ² /yr)	0.28	1.96	1.01	0.77	5.00	1.17	
Assessment	Good	Good	Good	Good	Good	Good	

3.3 풍력발전기에 미치는 영향 분석

풍력단지별 낙뢰피해 사례를 조사하여 정리한 것을 Table 4에 나타낸다. 제주 지역 풍력단지의

경우는 낙뢰로 인한 피해가 없었고, 강원 지역에서는 연구 대상 풍력단지 모두 낙뢰로 인한 피해가 한 번 이상 발생하였다.

환경 풍력단지는 가장 낮은 낙뢰율 때문에 낙뢰 피해가 없는 것으로 생각되지만, 창죽 풍력단지도 두 번째로 낮은 낙뢰율을 기록하고 있음에도 불구하고 그 피해가 3회이다. 즉, 낮은 낙뢰율을 갖는 풍력단지가 반드시 낙뢰 피해로부터 안전한 것은 아님을 보여주고 있다. 태백 및 강원 풍력단지는 각각 한 번씩 낙뢰로 인한 피해를 보여주고 있다. 태기산 풍력단지는 낙뢰로 인한 피해가 가장 많은 7회를 기록하고 있으며 모두 직격뢰로 인한 블레이드 손상이었다. 이러한 결과는 태기산 풍력단지의 가장 높은 낙뢰율과 무관하지 않은 것으로 생각된다.

Table 4 Damage to wind turbines of studied wind farms

Wind farm	Operation year and month	Capacity and No.	No. of damage	Damage details
HG	1st: 2004. 2 2nd: 2007.12	1.5MWx4 3MWx5	0	N/A
SS	1st: 2009.3 2nd: 2010.9	2MWx10	0	N/A
TB	2012. 5	2MWx9	1	Transformer Controller
CJ	2012. 12	2MWx7	3	Converter Controller Communication module
TGS	2008.11	2MWx20	7	8 blades of 6 wind turbines
GW	1st: 2005.12 2nd: 2006.9	2MWx14 2MWx35	1	1 blade

태백 및 창죽 풍력단지에서 발생한 풍력발전기의 피해 관련 사진을 Fig. 9에 보여준다. 손상된 부분을 분별할 수 있도록 원으로 표시하였다. 왼쪽 사진은 태백 풍력단지에서 발생한 제어가 손상된 경우이고, 오른쪽 사진은 창죽 풍력단지에서 발생한 변환기 모듈이 소손된 경우이다. 이러

한 전기 전자기기의 소손은 주로 유도뢰에 의해 발생되며, 서지보호기(SPD)가 설치되어 있더라도 부적절한 용량 등의 사용으로 인하여 이러한 피해가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 10은 태기산 및 강원 풍력단지에서 발생한 낙뢰 피해 사진이다. 두 풍력단지 모두 직격뢰에 의해 블레이드가 손상되었다. 블레이드에 낙뢰보호장치가 설치되어 있지만, 부적절한 보호장치의 사용으로 블레이드가 소손 또는 파손으로 이어진 것이다. 이러한 블레이드의 피해는 세계적으로 빈번히 발생하고 있으며, 이에 대한 완벽한 대책이 없는 실정이다. 그러나 적절히 작동하는 블레이드의 낙뢰보호장치는 낙뢰피해를 최소한으로 줄여 주고 있다는 데에는 이견이 없다.¹²⁾

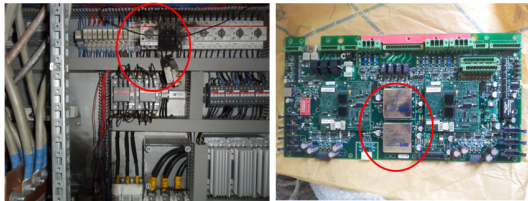


Fig. 9 Damage to electric parts by indirect lightning (Left: TB, Right: CJ)



Fig. 10 Damage to blades by direct lightning (Left: TGS, Right: GW)

4. 결 론

본 연구에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 제주 지역과 강원 지역에서 시간대별 낙뢰 발생비율은 대체로 반대 경향을 보여 주었다. 낙뢰 발생 빈도는 강원 지역이 제주 지역에 비해서 높았으나 낙뢰강도는 제주 지역이 강원 지역 보

다 높았다. 제주도는 동쪽 지역일수록 낙뢰가 많이 발생한 반면, 강원도에서는 서쪽 지역일수록 낙뢰가 많이 발생하였다.

(2) 낙뢰율은 연구대상 6개의 풍력단지 모두 우수한 Good이었다. 제주도의 환경 풍력단지가 가장 낮은 낙뢰율을 보인 반면, 강원도의 태기산 풍력단지가 가장 높은 낙뢰율을 보였다. 제주 지역의 환경 및 성산 풍력단지에서는 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해가 없었고, 강원 지역의 4개 풍력단지에서는 한 번 이상 낙뢰로 인한 피해가 발생하였다. 태기산 및 강원 풍력 발전단지에서는 직격뢰에 의한 블레이드의 손상이 발생하였고, 태백 및 창죽 풍력단지의 경우는 유도뢰에 의한 서지의 영향으로 전기, 전자, 제어, 통신기기의 손상이 발생하였다.

(3) 제주도가 강원도에 비해 낙뢰율이 낮지만 낙뢰피해로부터 안전한 지역이라고 할 수는 없으며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1. B. McNiff, 2002, "Wind Turbine Lightning Protection Project 1999-2001", National Renewable Energy Laboratory, pp.12.
2. Nakao tooru, 2011, Phenomenon of failures and accidents in wind power plant, p.6.
3. Eunshin Byon, Yu Ding, 2010, "Optimal Maintenance Strategies for Wind Turbine Systems Under Stochastic Weather Conditions", IEEE Transactions on Reliability, pp. 4-6.
4. IEC 61400-24, 2010, "Wind Turbine - Part 24: Lightning Protection"
5. K. N. Ko, M. H. Park and J. C. Huh, 2013, "An Analysis of Wake Effect in a Wind Farm", Journal of the Korean Society for Power System

- Engineering, Vol. 17, No. 2, pp.13~20.
6. B. S. Kim, W. J. Kim, S. Y. Bae, J. H. Park and M. E. Kim, 2011, "Aerodynamic Design and Performance Analysis of Multi-mw Class Wind Turbine Blade", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.25, No.8, pp.1~9.
 7. K. H. Lee, J. H. Park, J. W. Jin, K. R. Kwon and K. H. Choi, 2012, "Economic Analysis of Jeju Offshore Pilot Run Wind Farm by Sensitivity Analysis", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 5, pp.13~19.
 8. K. N. Ko, K. B. Kim and J. C. Huh, 2008, "Characteristics of Lightning Occurred over Jeju Island for 2004-2006 and an Effect of Lightning on Wind Turbine Generator System", Journal of the Korean Solar Energy Society, pp. 82~90.
 9. J. H. Han, K. N. Ko and J. C. Huh, 2013, "Lightning Characteristics and Lightning Rate Evaluation of Wind Farm by Lightning of Jeju Island for 2008-2012", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 5, pp. 60~68.
 10. Jung Eun-Sil, Lee Jong-Ho, Kim Byeongsun, Kwon Doosun, 2002, "Characteristics of Total Lightning Detection System and Data Usage Plan", Atmosphere, Vol.12, No.3, pp.580~583.
 11. WindPRO Online help,
<http://help.emd.dk/knowledgebase/>.
 12. D. A. Rivkin and Laurel Silk, 2013, "Wind Turbine Operations, Maintenance, Diagnosis, and Repair", Jones & Bartlett Learning, Massachusetts, pp.139~148.