

2004-2006년에 발생한 제주지역의 낙뢰 특성 및 풍력발전기에 미치는 낙뢰의 영향

고경남*, 김경보**, 허종철***

*제주대학교 청정에너지실증연구센터(gnkor2@cheju.ac.kr),
**제주대학교 기계공학과 대학원(kbkim@kma.go.kr),
***제주대학교 기계에너지시스템공학부(jchuh@cheju.ac.kr)

Characteristics of Lightning Occurred over Jeju Island for 2004-2006 and an Effect of Lightning on Wind Turbine Generator System

Ko, Kyung-Nam*, Kim, Kyoung-Bo**, Huh, Jong-Chul***

*Test & Evaluation Research Center for Clean Energy Development, Cheju National University(gnkor2@cheju.ac.kr),
**Dept. of Mechanical Engineering, Graduate school, Cheju National University(kbkim@kma.go.kr),
***Faculty of Mechanical Energy System Engineering, Cheju National University(jchuh@cheju.ac.kr)

Abstract

This paper presents the characteristics of lightning over Jeju island and a case of emergency stop of a wind turbine due to lightning. Using the IMPACT ESP sensor to detect lightning, the data on lightning frequency, lightning strength, regional lightning event were obtained and analyzed in detail. The measurement period was for 3 years from 2004 to 2006. As a result, lightning occurred the most frequently in July and August. As for lightning strength, lightning with grades -4 to -6 and +3 to +5 occurred more frequently. The eastern part of Jeju island had much more lightning frequency compared with the western part of it. Lightning with high grade occurred mainly in offshore site and the coastal region. Furthermore, the data on wind turbine stop caused by lightning was analyzed. Although wind turbine lightning damage was not much in this study, the investigation on lightning damage or lightning faults to a wind turbine should be conducted in Korea to increase availability of wind turbine.

Keywords : 풍력터빈(Wind turbine), 낙뢰빈도(Lightning frequency), 낙뢰강도(Lightning strength), 낙뢰지도(Lightning map)

1. 서 론

적란운이 발달하면서 구름내부에 분리되어

축적된 음전하와 양전하 사이 또는 구름 속의 전하와 지면에 유도되는 전하와의 사이에서 조건이 적당하면 불꽃방전이 발생한다.

전자를 구름방전이라 하고, 후자를 대지방전 또는 낙뢰(lightning)라고 한다¹⁾. 낙뢰로 인하여 전자기기의 고장, 시설물의 파손, 나아가 동물, 사람의 생명에도 영향을 미칠 수 있다.

풍력관련 산업이 발전하면서 낙뢰가 풍력발전설비에 주는 영향 및 그 대책에 관한 연구가 유럽, 미국, 일본 등에서 활발히 이루어지고 있다. 특히 일본에서는 2004년과 2005년 풍력발전기의 고장, 사고발생의 원인을 조사한 결과, 낙뢰가 가장 많은 원인을 차지하였다고 보고하고 있다²⁾. 이 보고에 따르면, 1년 중 8월에 낙뢰피해가 가장 많았으며, 고장 부위는 블레이드, 제어장치 순으로 많았다고 밝히고 있다.

그림 1은 일본의 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO)에서 보고한 2005년도(2005년 4월~2006년 3월) 풍력발전기의 고장원인을 나타낸다³⁾. 총 1,053기(약 1,080 MW)의 일본 내에 설치된 거의 모든 풍력발전기를 대상으로 실시한 조사결과로, 고장원인 중 낙뢰가 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 이 그림에서는 낙뢰로 인하여 풍력발전기의 블레이드 파손, 제어기기, 전기 계통, 통신선 등의 고장으로 3일 이상 풍력발전기가 가동을 중단했을 때, 낙뢰로 인한 고장으로 분류하고 있다.

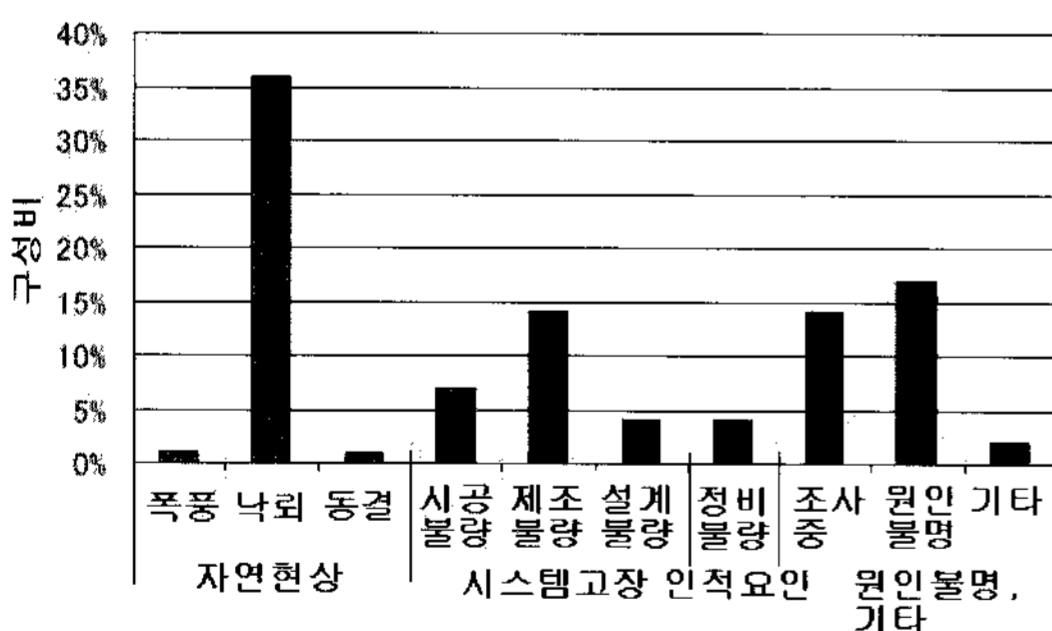


그림 1. 일본에서의 2005년도 풍력발전기의 고장원인³⁾

국제사회에서도 아직 Technical Report (TR) 이지만 TR IEC 61400-24⁴⁾에서 풍력발전기에 대한 낙뢰보호 규정을 정하고 있다.

우리나라에서는 낙뢰로 인한 기상측정마스트의 데이터로거 등의 고장으로 기상데이터가 손실되는 사례⁵⁾가 있었고, 최근 풍력발전기가 비상정지한 원인 중 하나가 낙뢰 때문이었다는 보고⁶⁾가 있었다. 그러나 풍력기술 선진국들과 비교해 보면, 아직 우리나라는 낙뢰를 풍력발전설비와 연계하여 연구한 예가 드문 것이 현 상황이라 할 수 있다.

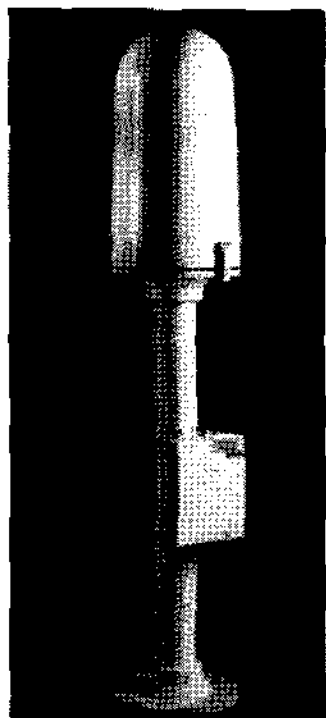
본 연구에서는 전국에 7대가 설치된 기상청 낙뢰관측시스템인 IMPACT ESP로부터 2004년부터 2006년까지 3년간 관측된 낙뢰데이터를 수집하였고, 제주지역의 낙뢰발생 특성을 파악하고자 북위 33°06' ~ 33°36', 동경 126°06' ~ 127°00'의 범위내의 낙뢰데이터를 분석하였다. 또한 제주 행원 풍력발전단지에서 가동 중인 2호기 풍력발전기를 대상으로 낙뢰의 영향을 분석하였다.

2. 제주지역의 낙뢰발생 특성

2.1 낙뢰발생 빈도 분석

제주도는 한반도의 남쪽에 위치한 사면이 바다로 둘러싸인 섬으로서 한라산이 원추형의 지형을 이루고 있어 고도에 따라 현저하게 다른 기후대가 형성되는 기상학적 특징을 가지고 있다. 천둥과 번개를 동반하는 뇌우(雷雨)의 발생 조건이 불안정한 대기, 상승작용, 높은 습도임을 감안하면, 제주도는 낙뢰가 발생하기 쉬운 지역적인 특성을 갖고 있다고 할 수 있다.

그림 2는 이 연구에서 낙뢰데이터를 수집하기 위하여 사용한 기상청 낙뢰관측시스템인 IMPACT ESP 센서의 외관을 보여준다⁷⁾. 이 센서는 전·자기장을 이용하여 낙뢰를 탐지하고, 낙뢰탐지방식은 MDF(Magnetic Direction Finding)와 TOA(Time-Of-Arrival)방식을 합성한 것으로서 TOA방식만 사용했을 때 발생할 수 있는 위치부정확성을 방지할 수 있다. 기타 수신주파수 대역, 탐지효율, 탐지정확도 등은 표와 같다.



제작회사	미국 GAI
낙뢰 탐지 방식	MDF + TOA
수신주파수 대역	LF/VLF
Detection efficiency	90%이상
Detection accuracy	250km 이내, 0.5km
Time Synchronize	GPS 부착
탐측 종류	cloud - ground flash Return Stroke

그림 2. IMPACT ESP 외관 및 특성⁷⁾

표 1은 2004년~2006년간 발생한 제주지역 낙뢰의 월별, 극성별 횟수 및 비율을 나타낸다. 정극성은 구름 밑면이 양전하(+)를 띠고 대지가 음전하(-)로 대전된 경우이며, 반대로 부극성은 구름 밑면이 음전하(-)를 띠고 대지가 양전하(+)로 대전된 경우이다. 3년간 총 18,037번 낙뢰가 발생하였고, 정극성 및 부극성 낙뢰가 각각 11%와 89%였다. 비율을 보면, 12월, 1월, 2월에만 부극성 보다 정극성 낙뢰 빈도가 높고, 나머지 달은 모두 부극성 낙뢰가 더 많은 빈도를 보이고 있다. 또한 극성에 관계없이 7월과 8월에 전체의 약 77%의 낙뢰가 발생했음을 보이고 있다.

표 1. 월별, 극성별 낙뢰의 발생횟수 및 발생비율

월	정극성		부극성		총횟수	비율 (%)
	횟수	비율 (%)	횟수	비율 (%)		
1	7	78	2	22	9	0.05
2	51	69	23	31	74	0.41
3	21	32	44	68	65	0.36
4	84	16	426	84	510	2.83
5	117	28	305	72	422	2.34
6	78	22	269	78	347	1.92
7	462	10	4,343	90	4,805	26.64
8	860	9	8,285	91	9,145	50.70
9	195	12	1,380	88	1,575	8.73
10	11	46	13	54	24	0.13
11	78	8	948	92	1,026	5.69
12	22	63	13	37	35	0.20
합계/비율	1,986	11	16,051	89	18,037	100

그림 3은 제주지역의 시간에 따른 낙뢰발생 횟수를 보여준다. 해에 따라 발생한 낙뢰 횟수는 차이가 크지만, 그 경향은 비슷함을 알 수 있다. 평균값으로부터 400회 이상인 낙뢰가 23시~0시, 3시~6시, 11시~12시에 발생했음을 알 수 있다.

그림 4는 제주지역의 연별, 월별 낙뢰발생 횟수를 나타낸다. 연별로 약간의 변동은 있지만, 대체로 7월~9월에 낙뢰발생 횟수가 많고, 10월, 12월~3월에 낙뢰발생 횟수가 적음을 보여준다. 특히 7월과 8월에 낙뢰가 많이 발생한 이유는 6월 중순부터 장마전선이 활동하면서 전선낙뢰가 증가하고, 북태평양 고기압이 확장하면서 기단낙뢰가 증가하기 때문으로 생각된다.

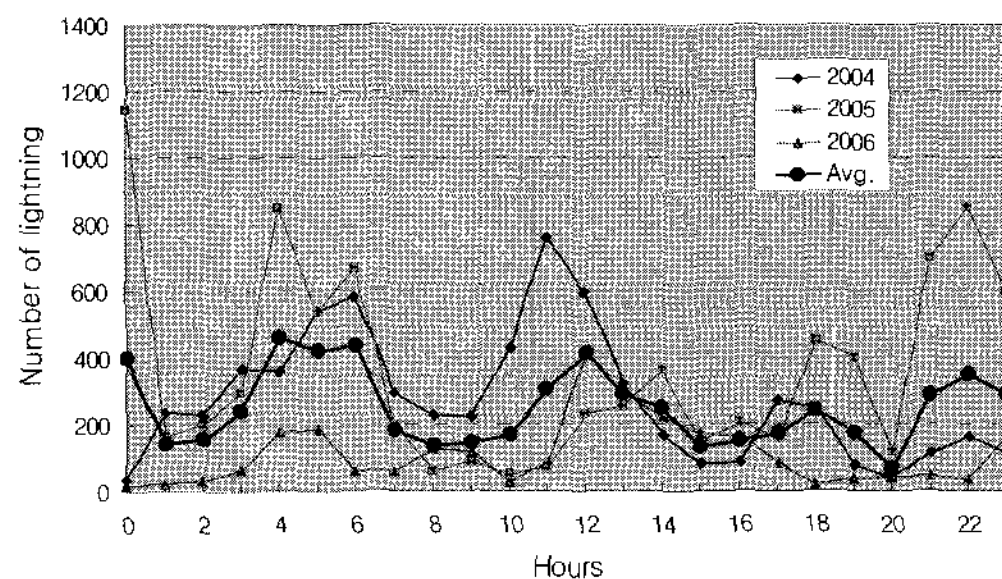


그림 3. 시간에 따른 낙뢰발생 횟수

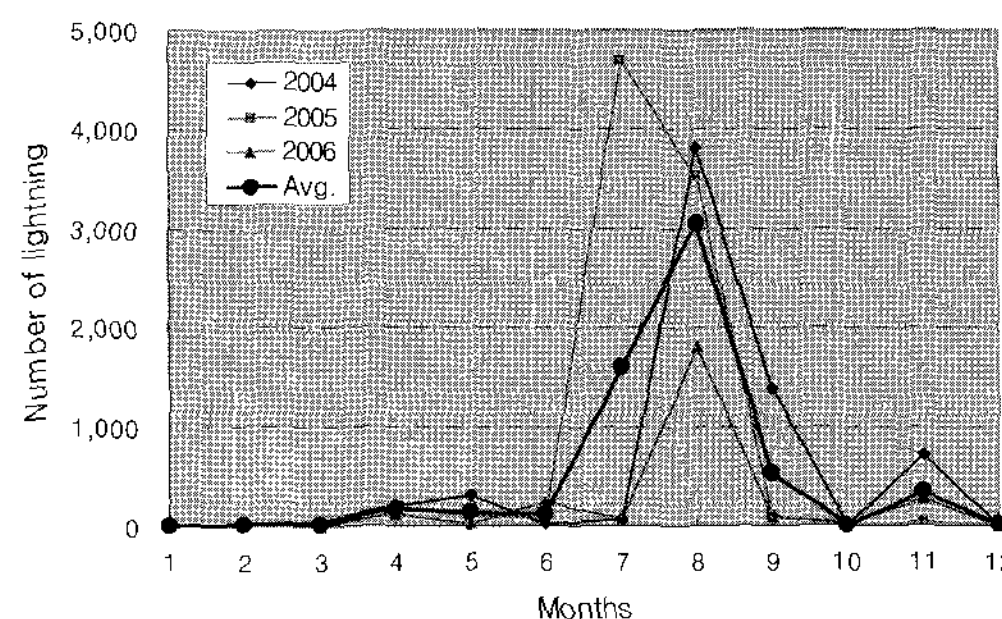


그림 4. 연별, 월별 낙뢰발생 횟수

2.2 낙뢰강도 분석

제주지역의 낙뢰강도 특성을 파악하기 위하여 표 2⁸⁾와 같이 강도를 ±15등급으로 나누

어 분석하였고, 낙뢰강도의 단위는 kA (Kiloampere)이다.

표 2. 낙뢰강도 등급⁸⁾

등급	낙뢰강도(kA)	등급	낙뢰강도(kA)
0	-1.6~1.6	0	-1.6~1.6
1	1.6~2.5	-1	-2.5~-1.6
2	2.5~4.0	-2	-4.0~-2.5
3	4.0~6.3	-3	-6.3~-4.0
4	6.3~10.0	-4	-10.0~-6.3
5	10.0~15.8	-5	-15.8~-10.0
6	15.8~25.0	-6	-25.0~-15.8
7	25.0~39.8	-7	-39.8~-25.0
8	39.8~63.1	-8	-63.1~-39.8
9	63.1~100.0	-9	-100.0~-63.1
10	100.0~158.5	-10	-158.5~-100.0
11	158.5~251.2	-11	-251.2~-158.5
12	251.2~398.1	-12	-398.1~-251.2
13	398.1~630.9	-13	-630.9~-398.1
14	630.9~1000.0	-14	-1000.0~-630.9
15	1000.0이상	-15	-1000.0이하

표 3은 3년간 계절별 낙뢰강도 등급 분포를 나타낸다. 3년간 -11등급 이하, -1~1등급 및 13등급이상은 없었다. -4등급~-6등급 및 +3등급~+5등급 사이의 낙뢰가 전체의 75%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 또한 낙뢰발생 빈도는 여름철에 가장 높고, 겨울철에 가장 낮다. 특히 부극성 낙뢰에는 없는 등급인 11등급 이상인 정극성 낙뢰의 발생 횟수가 5회인 것은 정극성 낙뢰는 그 빈도는 낮지만, 강도가 높다는 일반적인 사실을 확인시켜준다.

그림 5는 3년간 해에 따른 낙뢰강도의 빈도를 보여준다. 분석결과 2004년, 2005년, 2006년에 발생한 낙뢰 횟수는 각각 6,574회, 8,789회, 2,674회 였다. 즉, 낙뢰발생 횟수는 해에 따라 매우 큰 편차를 갖는다. 그러나 해에 따라 발생한 등급별 낙뢰 빈도를 보면, 그 경향이 비교적 일정함을 알 수 있다.

연별, 월별 낙뢰일수를 표 4에 나타낸다. 연별 낙뢰일수를 보면, 특이하게 낙뢰 횟수가 가장 적었던 2006년에 가장 많은 낙뢰 일수를 보이고 있다. 3년 동안 264일 낙뢰가 발생하였으므로, 약 4일에 하루는 낙뢰가 발생했

음을 알 수 있다. 월별 낙뢰일수는 월별 낙뢰 횟수와 마찬가지로 여름철에 많고 겨울철에 적었다.

표 3. 계절별 낙뢰강도 등급 분포

등급	봄	여름	가을	겨울	계
-11이하	0	0	0	0	0
-10	4	10	5	0	19
-9	11	118	30	1	160
-8	36	459	93	3	591
-7	79	1,312	241	1	1,633
-6	172	2,772	451	6	3,401
-5	217	3,560	607	7	4,391
-4	186	3,268	669	12	4,135
-3	68	1,389	242	8	1,707
-2	2	9	3	0	14
-1~1	0	0	0	0	0
2	5	115	13	0	133
3	34	476	93	3	606
4	71	482	95	22	670
5	47	171	37	20	275
6	23	62	17	10	112
7	19	37	13	6	75
8	16	36	10	5	67
9	7	17	5	7	36
10	0	2	1	4	7
11	0	2	0	1	3
12	0	0	0	2	2
13이상	0	0	0	0	0
계	997	14,297	2,625	118	18,037

2.3 지역별 낙뢰분포

그림 6은 2004~2006년 동안 제주도의 지역별 낙뢰횟수 분포, 즉, 제주도의 낙뢰지도를 보여준다. 그림으로부터 제주도 동부지역이 서부지역보다 낙뢰횟수가 약 2배~4배 정도 더 많다. 그 이유는 제주도 동부지역에 넓게 분포한 크고 작은 110여개의 오름(작은 산)에 근거한다고 생각된다. 즉, 동부지역은 많은 오름이 분포하는 복잡지형을 형성하고 있으므로, 낮 동안에 부분적으로 강한 일사를 받아 지면 부근의 습한 공기가 가열되어 오름을 따라 상승하면서 낙뢰발생 원인이 되는 적란운을 보다 쉽게 형성하기 때문으로 생각된다⁹⁾.

제주도 서부지역 중에서 다시 남부와 북부

지역으로 나누어서 낙뢰발생 빈도를 비교하면, 북부지역이 남부지역 보다 약 2배 정도 더 높다. 한편, 제주도 남서쪽에 위치한 가파도와 마라도 부근은 낙뢰 빈도가 제일 낮은 반면, 제주도 동쪽에 위치한 우도 부근은 낙뢰 빈도가 제일 높은 것을 알 수 있다. 따라서 향후 제주도에 풍력발전단지를 조성할 때, 동부지역과 우도 부근은 사업 초기 단계에서부터 낙뢰피해 대책을 확실히 세우고 추진해 나가야 할 것이다.

은 낙뢰 횡수가 적은 곳이므로, 제주도 남부 연근해는 낙뢰 횡수는 적지만, 낙뢰 일수는 많은 특징을 갖는다고 할 수 있다.

그림 8은 제주도의 지역별 ±8 등급 이상인 낙뢰의 분포를 보여준다. 낙뢰등급의 절대값이 클수록 풍력발전기에 대한 피해가 클 것으로 생각되어 ±8등급 이상 데이터만 표현하였다. 이 그림에는 부극성 낙뢰 770개, 정극성 낙뢰 115개, 총 885개의 낙뢰 데이터가 포함되어 있다.

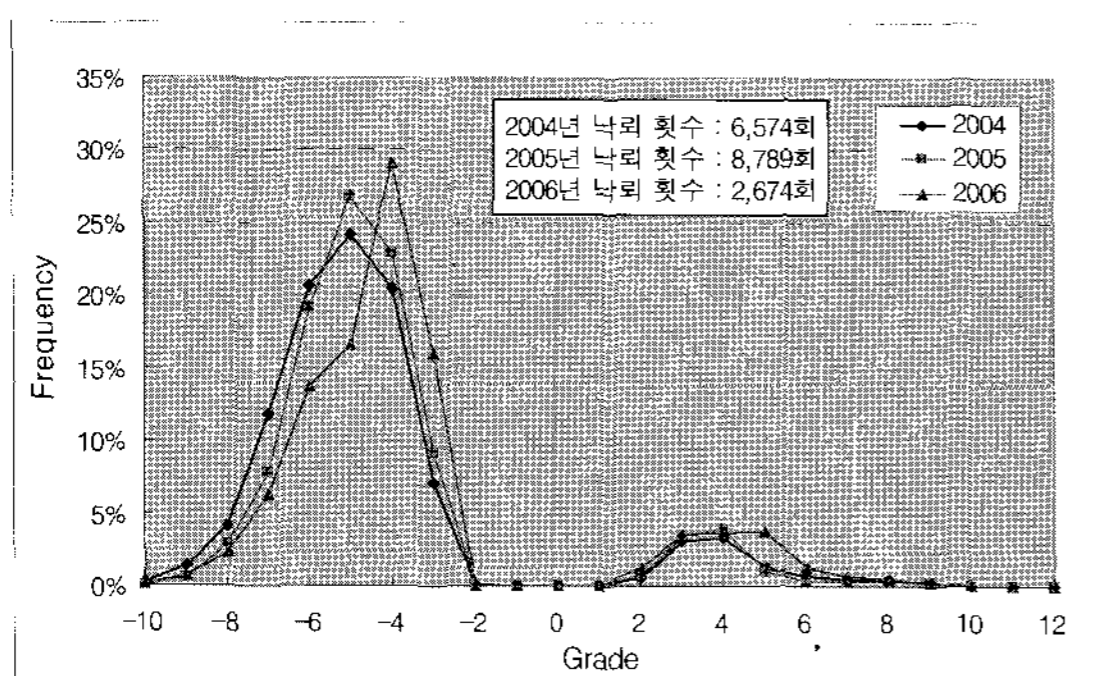


그림 5. 연별, 등급별 낙뢰 빈도

표 4. 연별, 월별 낙뢰일수

월 \ 년	2004	2005	2006	합계
1	2	1	2	5
2	2	2	2	6
3	3	2	5	10
4	4	3	9	16
5	8	9	14	31
6	8	10	11	29
7	12	14	11	37
8	19	19	22	60
9	12	8	12	32
10	2	5	3	10
11	7	3	7	17
12	2	6	3	11
합계	81	82	101	264

제주도의 지역별 낙뢰일수 분포를 그림 7에 나타낸다. 그림 6과 마찬가지로 제주도 동부지역에 많은 낙뢰일수를 보이고 있지만, 제주도 남부 연근해에서도 낙뢰발생 일수가 많다. 그림 6에서 확인되는 것처럼 그 지역

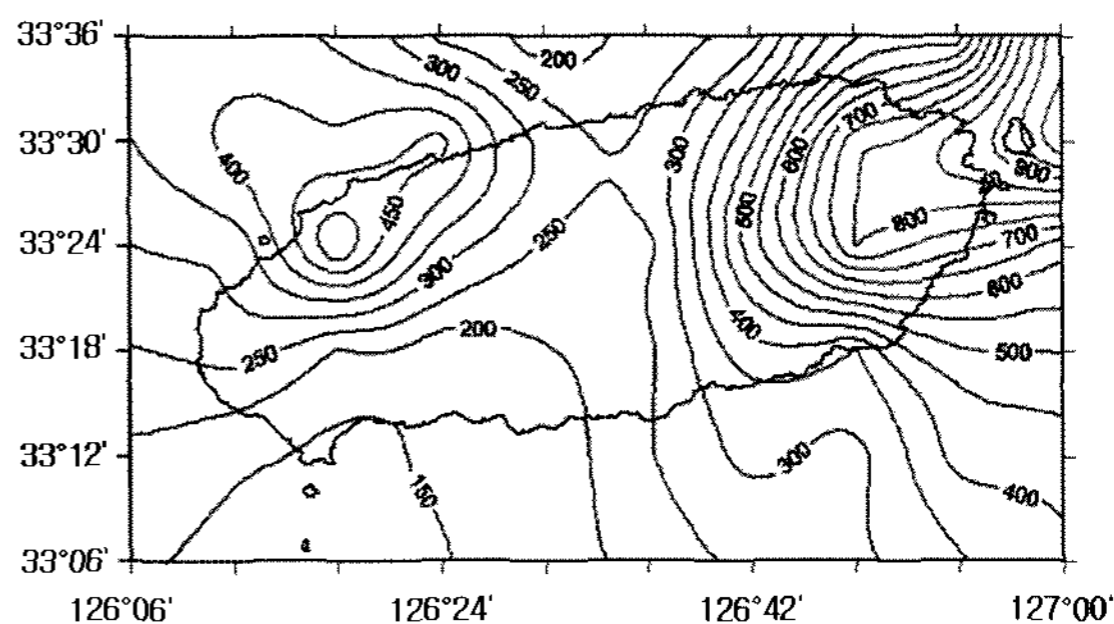


그림 6. 낙뢰횡수 분포

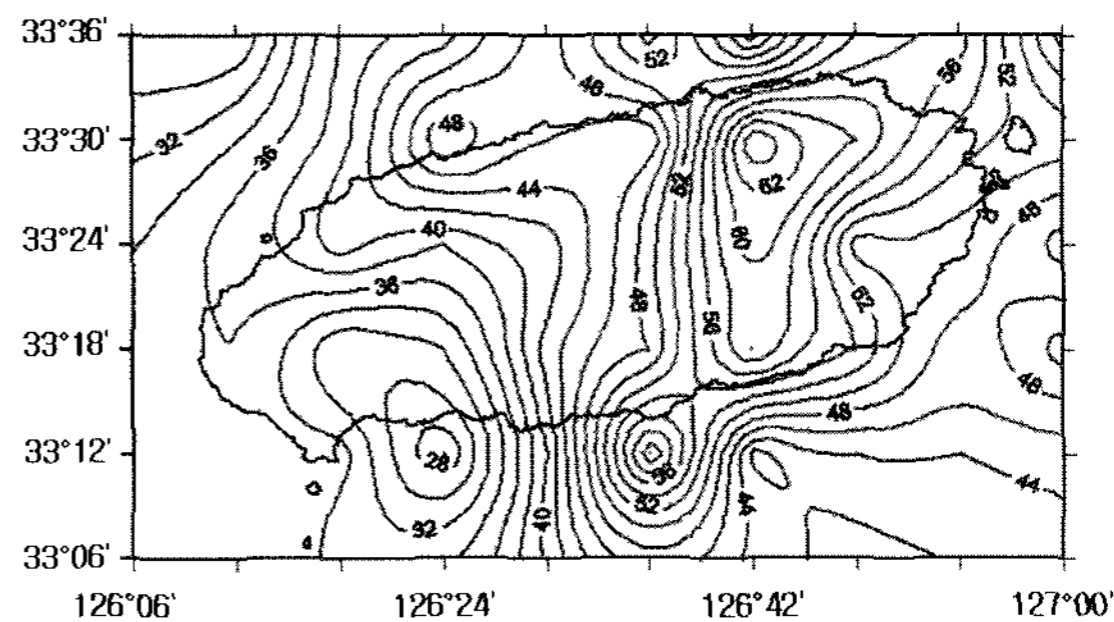


그림 7. 낙뢰일수 분포

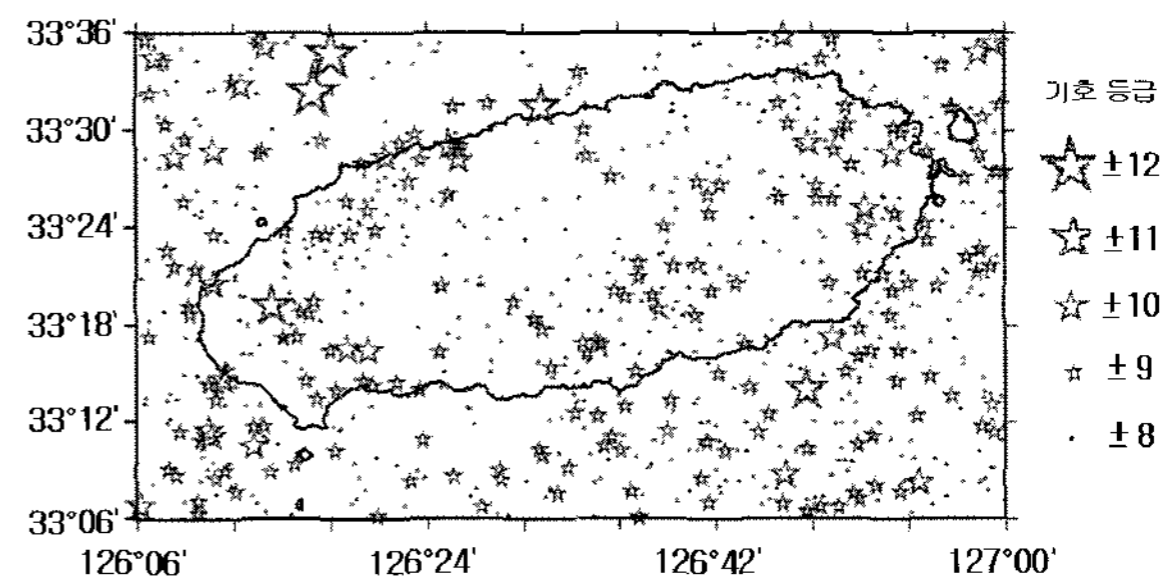


그림 8. ±8등급 이상인 낙뢰의 분포

육상과 해상으로 구분하여 ±8등급 이상 낙뢰의 분포를 조사하여 보면, 육상보다 해상에서 등급값이 더 큰 낙뢰가 분포하고 있음을 볼 수 있다. 또한 해안지방에 비교적 강도가 큰 낙뢰가 발생한 반면, 중산간 지역은 ±10등급 이상의 낙뢰는 거의 발생하지 않았다. 현재 제주도에 조성된 풍력발전단지들은 주로 해안가에 위치해 있으므로 강도가 센 낙뢰에 대한 대책을 마련해야 할 것이다. 나아가 제주도 연근해에 해상 풍력발전단지를 조성할 경우에도 강도가 센 낙뢰에 대한 대책이 강구된 기종을 선정하여야 할 것이다.

3. 풍력발전기에 대한 낙뢰의 영향

낙뢰에 대한 기초연구로서, 제주도의 북동쪽에 위치한 제주 행원 풍력발전단지에서 낙뢰로 인한 풍력발전기의 영향을 조사하였다. 선행 연구⁶⁾에 의하면, 낙뢰로 인하여 행원단지 내의 Vestas 풍력발전기가 비상 정지하는 거동을 보였다. 이때의 에러내용은 'ExEx low voltage'로 계통의 한 상이 80ms 동안 공칭전압의 25%이상 떨어졌을 때에 발생한다. 즉, 낙뢰의 영향으로 계통이 불안정해지자 안전을 위하여 풍력발전기가 비상정지한 것이다. 그로부터 보통 10분정도 후에 풍력발전기는 자동으로 재가동 된다.

이 연구에서는 행원 단지 내의 2호기인 Vestas V42 (600kW) 풍력발전기에 대하여 2004년 1월 1일부터 2006년 10월 23일까지 시스템 정지 에러를 조사하였다. 여러 종류의 에러들 중 낙뢰의 영향으로 밝혀진 'ExEx low voltage'에 대하여 에러 횟수, 시스템 정지시간 등을 표 5에 나타낸다. 이 표는 그림 1에 나타낸 일본의 낙뢰로 인한 시스템 고장과는 다른 시스템 정지 상황을 나타내고 있다. 표로부터 'ExEx low voltage'로 인한 시스템 정지시간은 2006년이 가장 길고, 2004년이 가장 짧다.

'ExEx low voltage' 에러는 낙뢰가 발생하

였을 때만 나타나는 것이 아니라, 계통을 불안하게 할 수 있는 다른 요인들에 대해서도 이 에러가 기록되면서 시스템은 비상정지할 수 있다. 'ExEx low voltage' 에러로 인하여 시스템이 정지한 시간 중에서 낙뢰로 인한 시스템 정지시간은 표에서 나타내는 바와 같다. 낙뢰로 인한 시스템 정지시간과 총 시스템 정지시간의 비를 보면, 2005년이 약 88%로 가장 크다. 이 비율의 평균값은 약 60%임을 알 수 있다. 또한 낙뢰로 인하여 시스템이 비상정지 한 달은 4월~9월 사이였다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 11월은 예외이지만, 다른 달에 비하여 4월~9월은 낙뢰발생 빈도가 높은 달이므로, 이러한 결과가 나왔다고 생각된다.

그러나 낙뢰로 인한 시스템 정지 횟수의 평균은 약 6회이고, 시스템 정지 시간 평균은 약 2시간 정도이다. 이 값들은 평균 모니터링 기간이라 할 수 있는 약 1년에 비하여 매우 적은 값들이므로, 풍력발전단지를 운영하는 데 큰 문제는 없다고 할 수 있다. 'ExEx low voltage' 에러는 풍력발전시스템의 안전을 위하여 작동하는 제어방식이라고 볼 수 있으므로, 오히려 낙뢰가 발생했지만 별다른 거동을 보이지 않는 것이 더 위험할 수 있다고 판단된다.

표 5. 2호기(Vestas V42)의 'ExEx low voltage' 에러

항목 \ 년	2004	2005	2006 (10월23일까지)	평균
횟수	12회	6회	16회	약 11회
시간	2:16:42	3:12:07	4:10:19	3:13:03
낙뢰로 인한 에러 횟수	5회	3회	9회	약 6회
낙뢰로 인한 에러 시간	0:46:58	2:48:35	2:08:53	1:54:49
낙뢰로 인한 에러 비율	약 34%	약 88%	약 52%	약 60%
발생한 달	4,8,9월	5,7월	6,7,8월	

2호기의 경우는 모니터링 기간 동안 모든 에러 발생일과 낙뢰 발생일을 비교하였지만, 'ExEx low voltage'에러 외에는 특별한 에러가 발생하지 않았음을 확인하였다. 그러나 제주도 전지역, 나아가 우리나라 전 지역에서 운전 중인 풍력발전기의 고장 원인을 조사해 본다면, 낙뢰로 인한 고장이 많을 것으로 추측된다. 우리나라도 앞으로는 이러한 풍력발전기의 고장 원인을 조사하여 공개하고, 낙뢰로 인한 고장에 대비하여야 할 것이다.

4. 결 론

이 연구에서는 제주지역의 낙뢰발생 특성을 파악하기 위하여 2004년부터 2006년까지 기상청 낙뢰관측시스템으로부터 수집한 낙뢰데이터를 분석하였다. 또한 낙뢰로 인한 풍력발전기의 정지사례를 조사하였다. 그 결과, 낙뢰가 비교적 높은 빈도로 발생한 시간대는 오전 3시~6시 사이였고, 1년 중 7월과 8월에 가장 많은 낙뢰 횟수를 보였다. 또한 낙뢰강도를 분석한 결과, -4등급~-6등급 및 +3등급~+5등급 사이의 낙뢰가 전체의 75%를 차지하며 가장 높은 빈도를 보였다. 낙뢰 빈도는 해에 따라 큰 편차를 보였으나, 등급별 낙뢰 빈도는 비교적 일정하였다. 제주도의 지역별 낙뢰빈도는 동부지역이 서부지역보다 약 2~4배 정도 높았다. 또한 해상 및 해안지방에 강도가 센 낙뢰가 발생했음을 알 수 있었다. 더욱이 실제 풍력발전기를 대상으로 낙뢰의 영향을 조사한 결과, 낙뢰로 인하여 시스템 정지를 확인 할 수 있었으나, 그 횟수가 적고 정지 시간도 길지 않았다. 그러나 일본의 예를 보면, 낙뢰로 인한 고장이 풍력발전기의 고장 원인들 중 가장 높은 비율을 차지하고 있으므로, 우리나라도 낙뢰로

인한 전반적인 풍력발전기의 피해상황 조사가 이루어져야 할 것이고, 이를 공개하여 그 대책을 마련해야 할 것이다.

후 기

이 연구를 위해 도움을 주신 제주특별자치도 청정에너지과 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김광식, 기상학사전, 향문사, 1992.
2. Kato K. et al., Trend Analysis of Results Based on Location of Failure/Breakdown of Wind Power Plants, Japan Wind Energy Association, The 28th Wind Energy Symposium, 2006, pp.212~215.
3. NEDO, 平成17年度 風力發電利用率向上調査委員會および故障・事故等調査委員會報告書, 2006.
4. IEC, TR IEC61400-24 Wind Turbine Generator Systems - Part 24 Lightning Protection, 2002.
5. 조경호, 허종철, 김건훈, 방위별 지면조도에 근거한 낙뢰 풍속자료 복원방법, 한국에너지공학회논문집, 제9권 1호, 2000, pp.76-81.
6. 고경남, 강문종, 허종철, 행원 풍력발전단지에서 풍력발전시스템의 운전특성, 한국태양에너지학회논문집, 제 27권 1호, 2007, pp.1-9.
7. 기상청, 낙뢰연보, 2005.
8. 기상청, www.kma.go.kr.
9. 기상청, http://web.kma.go.kr/gw.jsp?to=/edu/edu_main.html.