creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

碩士學位論文

濟州道와 江原道의 落雷特性 및 風力發電機에의 影響 比較

濟州大學校 産業大學院

風 力 工 學 科

梁 達 承

2014 年 2 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州道와
江原道
의

落雷特性

및

風力
發電機
에의

影響
比較

梁

達

承

2
0
1
4

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州道와 江原道의 落雷特性 및 風力發電機에의 影響 比較

指導敎授 高 炅 男

梁 達 承

이 論文을 風力工學科 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 2 月

梁達承의 風力工學科 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____㊞

委 員 _____㊞

委 員 _____㊞

濟州大學校 産業大學院

2014 年 2月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A Comparative Study on Lightning Characteristics and Damage to Wind Turbines of Jeju Island and Gangwon Province

Dal-Seung Yang
(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science

2014. 2.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Byung-Gul Lee, Prof. of Civil Engineering

.....
Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Graduate School of Specialized Wind Energy

.....
Thesis director, Ho-Min Kim, Prof. of Civil Engineering

.....
Date

Department of Wind Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL of INDUSTRY

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

목 차

LIST OF FIGURES ---------- i
LIST OF TABLES ---------- iv
SUMMERY ---------- v
Ⅰ. 서론
1. 연구배경 ---------- 1
2. 연구 동향 ---------- 3
3. 연구 목적 ---------- 5
Ⅱ. 낙뢰의 특성 및 연구방법 ---------- 6
1. 낙뢰의 발생 원리 ---------- 6
2. 풍력발전기의 낙뢰피해 일반 ----------10
1) 뇌격시 풍력발전기의 피해양상 ----------10
2) 풍력발전기에 서지발생 현상 및 종류 ----------11
3) 외국의 풍력발전기 낙뢰 피해 사례 및 낙뢰방지 대책 비교 -------12
4) 연구 대상 풍력발전기 제작사별 풍력발전기 낙뢰 방지 대책 비교 --17
3. 낙뢰 데이터 수집 및 해석 방법 ----------23
1) 관측 장비 ----------23
2) 분석 S/W ----------26
4. 연구 대상 지역 및 풍력단지 ----------28
Ⅲ. 제주도와 강원도의 낙뢰 특성 비교 ----------31
1. 제주도와 강원도의 낙뢰 특성
1) 낙뢰 특성 ----------31
2) 낙뢰 지도 ----------48
2. 제주도와 강원도의 풍력단지별 낙뢰율 비교 ----------54
3. 제주도와 강원도의 낙뢰로 인한 풍력발전기 피해 기록 ----------58
Ⅳ. 결론 ----------63
참고문헌 ----------65

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Frequency of failures and accidents by factors, 2004~2007
Fig. 2 Model of thundercloud
Fig. 3 Diagram showing the luminosity of a downward negative lightning flash to ground containing three strokes and the corresponding current at the channel base
Fig. 4 Lightning discharge phenomena
Fig. 5 The pattern of lightning damage to the wind turbine
Fig. 6 Relative incidence of lightning strikes
Fig. 7 Electronic parts damage from indirect lightning
Fig. 8 Blade damage from direct lightning.
Fig. 9 GMP/Zond Z-40FS grounding and bonding
Fig. 10 KVS-33 grounding scheme.
Fig. 11 Algona Z-50 grounding and bonding profile
Fig. 12 HQ2000 690V Line Surge Arrest & Tower Cable Specification
Fig. 13 Lightning Protection Zone
Fig. 14 The Rolling Sphere method
Fig. 15 Earth system in tubular tower, VCS 2 MW
Fig. 16 lightning detection sensor layout
Fig. 17 Site error estimation and correction for MDF/TOA
Fig. 18 Main page of the lightning data analysis program
Fig. 19 Sample of the result from the lightning data analysis
Fig. 20. Picture of Jeju's range
Fig. 21. Picture of Gangwon's range
Fig. 22 The number of annal lightning occurrence on Jeju and Gangwon
Fig. 23 Evaluation of lightning frequency by time on Jeju and Gangwon
Fig. 24 The frequency of lightning grade on Jeju
Fig. 25 The frequency of lightning grade on Gangwon
Fig. 26 Evaluation of the monthly frequency on Jeju and Gangwon
Fig. 27 The frequency of lightning grade by season on Jeju
Fig. 28 The frequency of lightning grade by season on Gangwon
Fig. 29 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Spring
Fig. 30 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Summer
Fig. 31 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Autumn
Fig. 32 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Winter
Fig. 33 Distribution of lightning frequency on Jeju

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 34 Distribution of lightning days on Jeju
Fig. 35 Distribution of he lightning grade ±8 or more on Jeju
Fig. 36 Distribution of lightning frequency on Gangwon
Fig. 37 Distribution of lightning days on Gangwon
Fig. 38 Distribution of he lightning grade ±8 or more on Gangwon
Fig 39 Blade damage from direct lightning strike on Taegisan wind farm
Fig 40 Blade damage from direct lightning strike on Gangwon wind farm
Fig 41 Electronic parts damage from indirect lightning strike on Teabeak and Changjuk

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF TABLES

Table 1 Lightning class

Table 2 Lightning protection system levels

Table 3 Specification and function of the sensor

Table 4 Area of Jeju and Gangwon

Table 5 Area of each Wind Farm

Table 6 The number of hourly lightning occurrence on Jeju

Table 7 The number of hourly lightning occurrence on Gangwon

Table 8 The number of lightning by grade on Jeju

Table 9 The number of lightning by grade on Ganwon

Table 10 Monthly and Yearly lightning occurrence by polarity on Jeju

Table 11 Monthly lightning occurrence and occurrence rate by polarity on Jeju

Table 12 Monthly and Yearly lightning occurrence by polarity on Gangwon

Table 13 Monthly lightning occurrence and occurrence rate by polarity on Gangwon

Table 14 Evaluation of yearly lightning frequency on Jeju

Table 15 Evaluation of yearly lightning frequency on Gangwon

Table 16 The evaluation of lightning rate by wind farm over Jeju and Gangwon

Table 17 Status of lightning damage by wind farm

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMERY

An investigation on lightning characteristics and damage to wind turbines was performed over Jeju province and Gangwon province. Lightning data from January 2010 to September 2013 was collected from IMPACT ESP and analyzed in detail. The ranges analyzed for the two entire provinces were N33 06 ~ N33 36 and E126 06 ~ E127 00 for Jeju and N37 00 ~ 37 50 and E128 01 ~ E129 01 for Gangwon, respectively. The characteristics on hourly lightning occurrence, the occurrence by lightning grade, monthly and yearly lightning frequency by polarity and seasonal lightning frequency were analyzed for the entire ranges of Jeju and Gangwon.

In order to obtain lightning distribution throughout the two provinces, lightning maps over two provinces were drawn on the basis of lightning data. Furthermore Hankyung and Sungsan wind farms were selected in Jeju province and Taebaek, Changjuk, Taegisan and Gangwon wind farms were chosen in Gangwon province for characterizing them regarding lightning happened and damages to wind turbines. Lightning rate which means annual flashes per unit kilometer squared was calculated for assessing the six wind farms studied. Also, the damage data to wind turbines was collected on the six wind farms during the study period.

The result shows that lightning frequency varies with years in both provinces. Lightning occurred 63% on Jeju and 52% on Gangwon during night time, respectively. The trend of lightning occurrence by polarity was similar on the two provinces. Lightning frequency of Gangwon was higher than that of Jeju, while the lightning grade on Jeju was higher than that on Gangwon. Lightning frequency of Jeju was higher than that of Gangwon during autumn season, while lightning frequency of Gangwon was higher than that of Jeju during spring season. The two wind maps showed that Jeju had high number of lightning in the eastern region, while Gangwon displayed its high number of lightning in the western region. The lightning rates for the six wind farms were all under 5.0, which means Good according to the commercial S/W, WindPRO. The lightning frequency of two wind farms on Jeju are relatively lower than that of four wind farms on Gangwon so that no damage to wind turbines by lightning was found on Jeju, while some damage to wind turbines by lightning was detected on Gangwon.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅰ. 서 론

1. 연구 배경

풍차의 역사는 2000년이 넘는다. 최초에는 곡식을 갈거나 물을 퍼 올리기 위해서 사용되었으나 근래에는 에너지 고갈로 인해 화석연료의 가격상승 및 환경에 대한 부정적인 영향으로 신재생에너지에 투자를 시도하는 국가가 늘고 있다. 풍력에너지는 신재생에너지 중에서 가장 경제적인 에너지원중 하나라고 할 수 있지만, 풍력을 이용하기에 최적인 장소에는 낙뢰 활동지역과 일치하는 경향이 있다. NASA가 만든 지도에서 볼 수 있듯이 풍력밀도가 높은 대부분의 지역에는 일 년에 30번 이상의 낙뢰가 발생한다.[1] 2002년에 작성된 국제 신재생에너지 연합 통계에는 100기의 풍력 터빈중 8기는 매년 한 번의 직격뢰를 맞을 것으로 예상된다고 보고하고 있다.[2] 독일에서 발표한 자료에 의하면 1992년에서 1995년 사이에 풍력터빈에 낙뢰에 의한 손상 사고는 393건에 달하고 그중 직격뢰에 의한 사고는 124건이고 나머지는 전력계통으로 부터의 서지전압에 의한 사고이었다.[3]

전기적 관점에서 보면 대지는 음으로 대전되어 있고 대기상부는 양으로 대전되어 있다. 보통 대기는 두 대전체를 분리시키는 충분한 절연체이나 대지 표면에 폭풍이 일면 적란운에 전하가 땅으로 방전될 수 있다. 이것을 낙뢰라고 한다. 풍력발전기 상부에 위치한 적란운속에는 음극과 양극으로 구분되어있는데 구름의 상부에는 양전위가 있고 구름의 하부에는 음전위가 축적되어 있다. 음전위의 구름 밑의 대지에 두 가지 영향을 미치는데 음전위를 방출하여 양전위를 끌어들이며 대기의 절연이 깨졌을 때는 전하가 낙뢰의 형태로 지상으로 방전된다.

대지는 보통 대기에 대하여 음의 전하로 대전된다. 그러나 지상으로 전하가 방전됨에 따라 구름 하부의 음전하는 지상의 양전하를 모으게 한다. 이 양전하는 나무나 큰 건물과 같은 물체에 집중된다. 구름의 음전하가 지상의 양전하와 충돌될 때 낙뢰가 발생하는 것이다. 풍력발전기는 높은 구조물로서 넓은 평면에 노출되

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

어 있기 때문에 낙뢰가 쉽게 끌리는 지점이 된다.

풍력발전기는 풍력단지 내에 설치되며 해상 뿐 만아니라 육상풍력단지는 좋은 풍속조건을 확보하기 위해서 드넓은 평야지대에 외부와는 독립되어 건설된다. 풍력발전기는 출력을 최대한 확보하기 위해 발전기 높이를 높게 설치한다. 이러한 풍력발전기의 설치 특성이 낙뢰라는 자연현상에 노출되기 쉬운 환경에 위치하게 될 수밖에 없다. 낙뢰는 풍력발전기 고장의 주요 요인이 되고 있는데 신재생에너지로 각광받고 있는 풍력발전기의 확대설치에 걸림돌이 되기도 한다.

낙뢰에 의한 영향은 낙뢰를 직접 맞아서 손상이 되는 경우[5]와 외부 송전선로 계통에 낙뢰가 떨어졌을 경우에 나타나는 과도 이상 전압으로 써지(Surge)가 발생되어 전기, 전자 부품에 손상을 입히는 경우로 크게 나눌 수 있다.[6]

Fig. 1은 일본의 신에너지. 산업기술종합 개발기구(NEDO)에서 일본 내 풍력단지를 대상으로 조사한 결과인데 풍력발전기 3,618기 중 고장 및 사고발생 총 횟수는 498회이다.[7]

그 중에서 고장 발생의 가장 높은 원인이 낙뢰라는 것을 알 수 있다. 일본에서

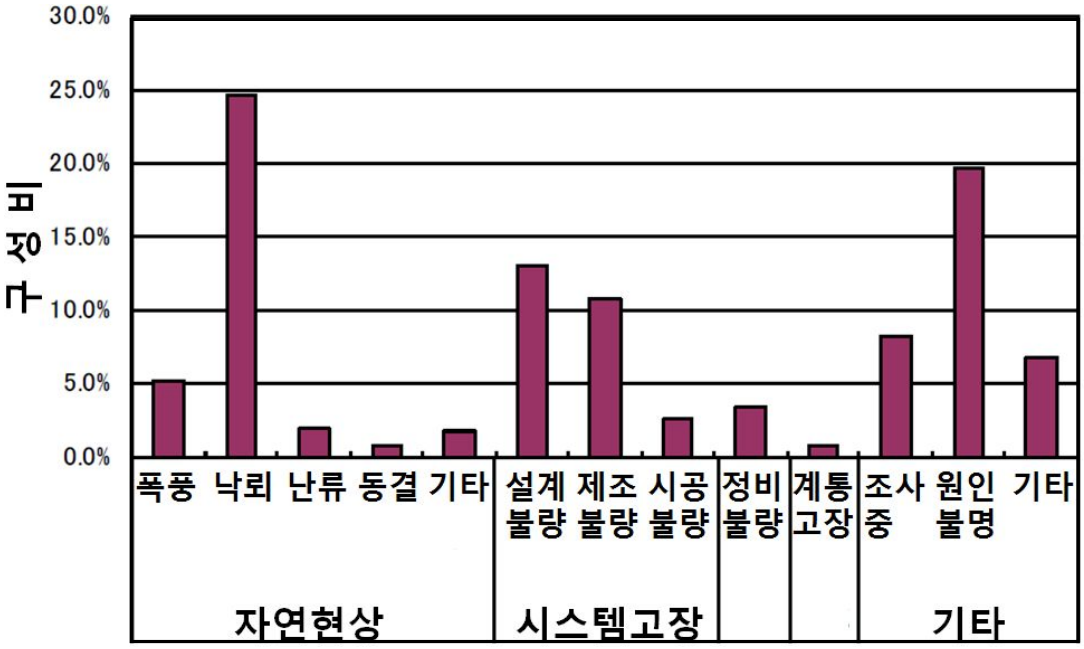


Fig. 1 Frequency of failures and accidents by factors, 2004~2007[7]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

는 지진, 태풍 등의 원인으로 낙뢰발생 빈도가 높아 낙뢰에 의한 고장이 많이 발생되고 있어 낙뢰 대책에 대한 가이드라인을 만들고 낙뢰에 대한 지속적인 연구를 진행하고 있다.

2. 연구동향

풍력산업이 발전하면서 낙뢰가 풍력발전설비에 미치는 영향이 증가하고 있어 이에 관한 영향 및 대책에 대한 연구가 유럽, 일본 등에서 활발히 진행되고 있다. 낙뢰로 인한 설비 피해를 비롯해서, 인체의 안전을 확보하기 위해 각종 피뢰시스템을 강화하고 접지를 강화시키고 있으며 국제표준을 지정하여 요구조건을 만족하여야만 발전기를 제작할 수 있게 하고 있는 추세이다

1) IEC

풍력발전기의 낙뢰대책에 관한 국제 표준 제정 작업은 IEC/TC 88 기술위원회에서 2002년에 TR 61400-24를 제정하고 2010년에 정식 국제표준인 IS IEC 61400-24를 발간하였다. 더불어 고정자재, 시험용 접지단자함 및 접지 전극 수막장치, 낙뢰카운터에 대한 구체적인 상세기술사항을 제공하기 위한 새로운 표준을 제정하였으며 추가적인 신규 표준 제정 작업을 활발히 진행하고 있다.[8]

2) 유럽

유럽 3개국(덴마크, 독일, 스웨덴)에서 낙뢰로 인하여 발생한 풍력발전기의 손상부분을 조사하였다 덴마크의 경우 1990 ~ 1999년 동안 낙뢰에 의해 손상된 풍력발전기 총 900기를 대상으로 분석한 결과 손상된 부분 중에서 내성이 약한 제어시스템 손상이 51%로 가장 큰 비율을 차지하였고, 독일과 스웨덴의 경우 블레이드 손상이 가장 크게 나타났다. 피해조사를 실시한 국가별, 시기별 차이는 있으나 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해는 블레이드, 전력시스템, 제어시스템에서 주로 발생하고 있다. 특히 풍력 발전기가 대형화됨에 따라 블레이드의 높이가 점

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

점 높아지고 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해가 우려되고 있다. 블레이드의 극단적인 피해는 주로 동계상황에 발생하여 보수에 필요한 크레인 등 장비확보, 기상상황으로 인한 문제로 복구시간이 길어지므로 복구비용이 많이 소요됨에 따른 신속한 복구 대책을 마련하는 방안에 대한 연구가 활발하다. [9]

3) 일본

일본은 전기사업이 낙뢰피해 대책을 수립하는데 노력한 결과로 낙뢰 서지 해석기술을 향상시켜 와서 전력계통에 낙뢰가 발생하였을 때 발생하는 현상을 정밀하게 예측할 수 있게 되었고 낙뢰성상 데이터베이스를 확충하여 뇌성상의 지역차, 계절차를 명확하게 함에 따라 지역별로 합리적인 낙뢰대책을 수립하고 있다.

번개가 어디로 떨어질지에 대해 오래전부터 연구해왔으며 데이터 해석을 통해 번개의 진전양상을 조사함으로써 동계 낙뢰 특유의 상향 특성을 밝혀내고 있다. 일본이 경우 낙뢰방지 노력이 결과로 정전횟수와 시간이 급격히 줄고 있는데 단시간 전압저하 대책을 수립하고 있다.

일본은 빈번하면서도 강력한 낙뢰로 인한 문제점이 많다. 특히, 동해 주변의 해안에서 발견되는 악명 높은 겨울철 낙뢰가 유명하다. 일본에 설치된 많은 풍력발전기들이 낙뢰를 맞았으며 전 세계평균 보다 높은 낙뢰강도로 인해 특별한 위협이 되고 있다. 따라서 일본에서는 대책으로 보호에 중점을 두어 대책을 수립해 왔지만 대부분의 낙뢰에 의한 사고가 통신계통과 전자계통을 포함하는 저전압계통에서 발생되고 있다. 따라서 일본에서는 최근에 블레이드로부터 지상까지 낙뢰가 접지되어 흐르는 동안 유도 전류에 의한 저전압 계통의 설비들이 손상되는 것을 방지하기 위한 대책을 연구하고 있다.[10]

4) 우리나라

우리나라의 경우는 풍력단지를 본격적으로 운영하면서 풍력발전기에 대한 낙뢰 보호 대책이 거론되어 왔다. 초창기에는 제주도를 대상으로 낙뢰에 대한 기초연구를 하기 시작하였다.[11] 국내의 풍력발전기 낙뢰피해 사례는 2004년 8월 22

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

일 새벽에 제주도 주변에 강한 낙뢰로 제주행원에 위치한 풍력발전기 2호기가 낙뢰 피해를 입어 가동 중지 된 바 있으며, 이를 계기로 풍력발전기에 대한 낙뢰 보호 대책에 관한 연구가 진행되기 시작하였다. 그러나 유럽이나 일본에 비해서는 연구가 별로 진행되지 않고 있으며 따라서 연구 성과도 미미한 실정이라 할 수 있다

3. 연구목적

풍력산업이 세계적으로 친환경 미래에너지 개발 산업의 핵심중의 하나로써 급성장하고 있는 시점에 대규모 풍력발전단지의 구성을 위해 풍력발전기 설치 수가 증가하고 효율향상을 위해 풍력시스템이 복잡해지고 있을 뿐 아니라 대형화되며 높이가 높아져 풍력발전기의 피해가 급증할 것으로 예상된다.

풍력발전기의 낙뢰피해를 방지하기 위해서는 우선 낙뢰의 일반적인 특성을 조사할 필요가 있다. 또한 풍력발전기의 낙뢰보호 시설이 제각각이어서 낙뢰로 인한 사고도 여러 형태로 집계된다. 낙뢰의 발생빈도나 크기는 지역이나 계절에 따라 크게 다르기 때문에 낙뢰 특성을 전국적으로 일률적으로 한 낙뢰설계는 합리적이라 할 수 없으며 지역특성을 고려할 필요가 있다. 그러나 우리나라에서는 지역별 낙뢰특성 및 풍력발전기의 낙뢰 피해 사례를 비교 연구한 예는 극히 드물다.

본 연구에서는 3년 9개월(2010. 1 ~ 2013. 9)의 낙뢰자료를 바탕으로 풍력발전기가 제일 많이 설치되어있고 풍력발전단지로서 가장 좋은 입지로 평가 받고 있는 제주도와 강원도의 낙뢰특성을 비교하고 풍력발전기에 미친 영향을 분석하고자 한다. 나아가 제주도와 강원도에 분포된 풍력단지에 발생된 낙뢰의 특성과 그로인한 낙뢰피해를 조사하여 낙뢰대책 수립의 기초자료로 활용하고자 한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅱ. 낙뢰의 특성 및 연구방법

1. 낙뢰의 발생 원리

번개가 대기 중의 방전현상(Discharge)이라는 것은 1752년 미국의 두 번째 대통령인 B. 프랭클린의 연 실험에 의해서 확인되었다. 모래폭풍, 화산폭발, 대형화재 등 여러 원인에 의해 뇌가 발생하지만 보통은 상층대기와 하층대기가 불안정한 성층을 구성하고 있는 경우에 발생하는 적란운이 대부분이다. 보통은 공기의 밀도와 온도차에 의해 상층 공기가 가볍고 하층의 공기가 무거우나 반대로 하층의 공기가 너무 가볍거나 상층의 공기가 너무 무거운 경우 그 수직 불안정정도를 해소하기 위해 강한 상승기류가 발생한다. 상승기류를 따라 동반상승하면서 단열팽창된 공기는 온도가 저하하고, 함유된 증기의 응결 및 빙결이 일어나기 때문에 다량의 잠열이 방출되고 상승에 따른 온도 저하률이 적게 되며 대류권 성층 가까운 곳까지 도달하게 된다.

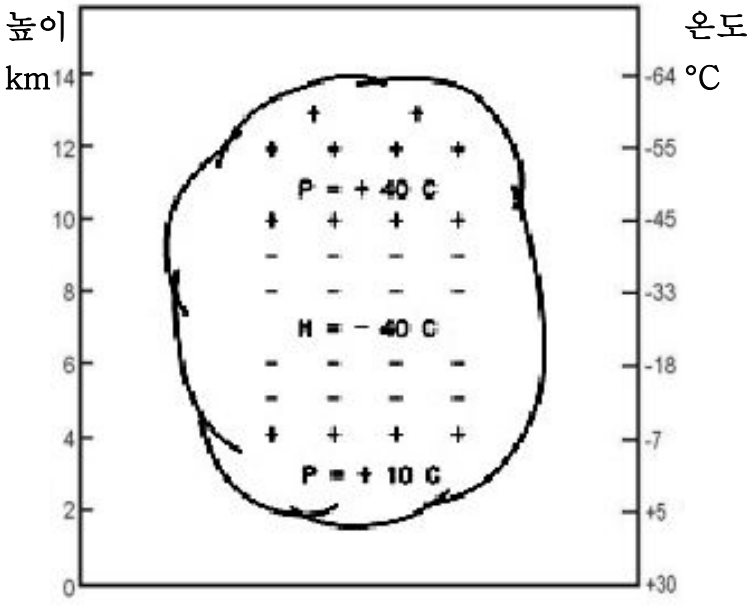


Fig. 7 Model of thundercloud[12]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이 과정에서 고온다습한 수증기가 단열 팽창하여 상부에 차갑고 하부에 따뜻하며 습한 공기를 포함하는 뇌운이 대기 중에 형성된다. 일반적으로 Fig. 2 에서 나타냈듯이 뇌운의 상부는 정이온, 하부는 부이온 으로 대전되며 뇌운과 대지사이의 방전은 뇌운의 정(+), 부(-)전하가 중성이 됨으로써 방전은 종료된다. 이 모든 방전을 플래시(flash)라 하며, 플래시는 여러 가지 방전 성분으로 구성되어 있다.

낙뢰는 뇌우와 대지 사이의 전위차가 수억~수십억 볼트 이상이 될 때 전기적으로 부도체인 공기 속을 번개가 지면을 향해서 약 30 m씩 계단형 선도(Stepped leader)로 진행된다. 이때 선도(leader)의 온도는 2만~3만 ℃ 정도의 높은 열을 지니고 있기 때문에 선도가 진행하면서 주변의 공기를 급격히 팽창시켜 파열음이 발생하게 되는데 이 파열음이 바로 천둥이다. 따라서 번개 현상은 천둥소리보다 먼저 나타난다.

선도가 진행하여 지면 근처에 도달하면 지상의 높은 물체에서 상향의 연결 스트리머(connecting streamer)가 계단형 선도의 선단을 향해서 출발하고, 이들이 서로 접촉하면서 지상에서 선도에 의해 미리 전리된 길(방전로)을 따라 밝은 빛

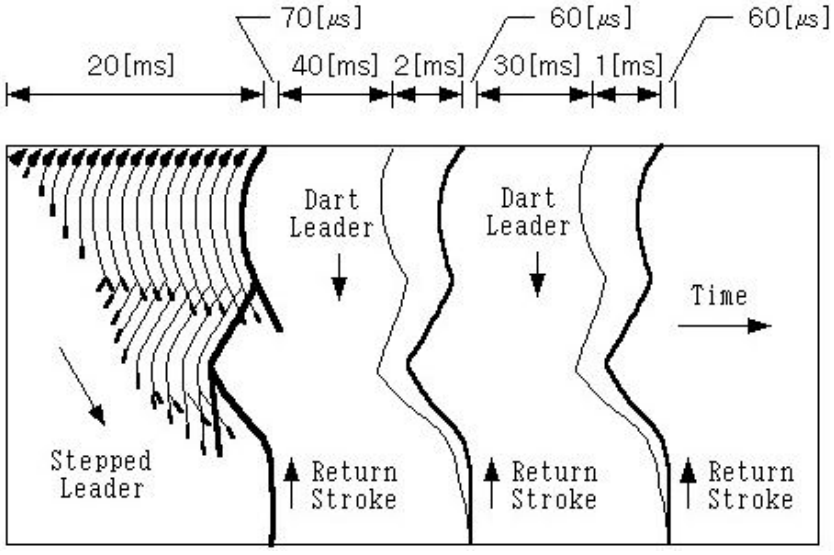


Fig. 3 Diagram showing the luminosity of a downward negative lightning flash to ground containing three strokes and the corresponding current at the channel base[12]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

과 엄청난 소리를 내면서 위로 올라간다. 뇌우는 이 한 번의 귀환내격(return stroke)으로 방전활동을 마치게 된다. [13]

낙뢰 혹은 하나의 구름방전이 발생할 때 나타나는 전기에너지를 전기량으로 환산하면 약 300kWh에 해당한다. 따라서 여름의 격심한 뇌우에서는 10초에 1회 정도로 방전이 일어나기 때문에 이때의 뇌우는 중급 정도 발전소의 발전능력이 있는 셈이다.

Table 1은 낙뢰등급표[14]를 나타낸다. '+'는 정극성, '-'는 부극성이다. 여기서

Table. 1 Lightning class[14]

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	-1,000.0 ~ -630.9
15	1,000.0이상	-15	-1,000.0이하

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

정극성은 구름 밑면이 +이고 대지가 -일 때의 낙뢰이며 반대의 경우는 부극성이라 한다. 등급의 절대 값 숫자가 0에 가까울수록 약한 낙뢰로 분류된다.
낙뢰방전은 대기방전을 일으킬 수 있는 전계를 형성하는 전하 영역에서 일어나며, 다음과 같이 분류할 수 있다. 이들 중 가장 빈번한 뇌방전 현상은 운내 방전이지만 실제 전기·전자기기에 영향을 주는 것은 대부분이 낙뢰이다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 운내 방전(Intra-cloud or cloud discharge)은 동일 뇌운 안에서 정(+), 부(-) 전하간에 발생하는 방전이며 운간 방전(Inter-cloud or Cloud-to-cloud discharge)은 뇌운과 다른 뇌운 사이에서 정(+), 부(-) 전하 간에 발생하는 방전, 대지 방전(Cloud-to-ground discharge or ground discharge)은 뇌운에서 대지에 유도된 전하 간에 발생하는 방전, 대기 방전(Air discharge): 뇌운전하와 주변 대기사이에서 일어나는 방전으로 구분 할 수 있다

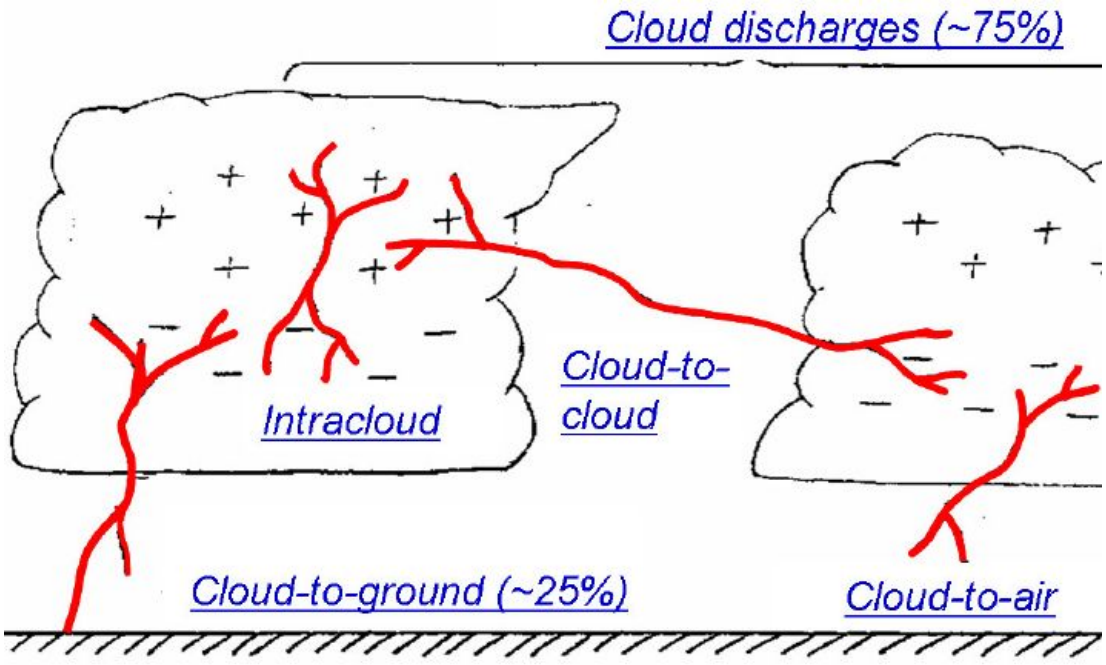


Fig. 9 Lightning discharge phenomena[15]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 풍력발전기의 낙뢰 피해 일반

1) 뇌격시 발전기에의 피해발생 양상

풍력발전기에 뇌격 시에 다양한 양상의 피해가 발생한다. 크게 2가지로 구분할 수 있는데 직격뢰에 의한 피해 및 간접뢰에 의한 피해로 구분 할 수 있다.
직격뢰의 경우는 낙뢰가 직접 블레이드나 나셀에 떨어져서 블레이드나 나셀에 파손을 입힌 것을 말하며 간접뢰에 의한 피해는 송전 계통에 낙뢰가 떨어져서 과도 전류가 돌입되면서 전자기기들이 손상되는 것을 말한다.

Fig. 5는 풍력발전설비의 뇌격시 피해발생 양상을 도식으로 표시한 것이다. 가장 많이 발생되는 직격뢰의 피해는 Receptor의 손상과 블레이드의 파손을 들 수가 있으며 나셀에서는 풍향, 풍속계의 소손을 들 수 있다. 반면 간접뢰에 의한 손상으로는 통신선을 통해 유도되는 서지 전류에 의한 전력제어기기의 손상과

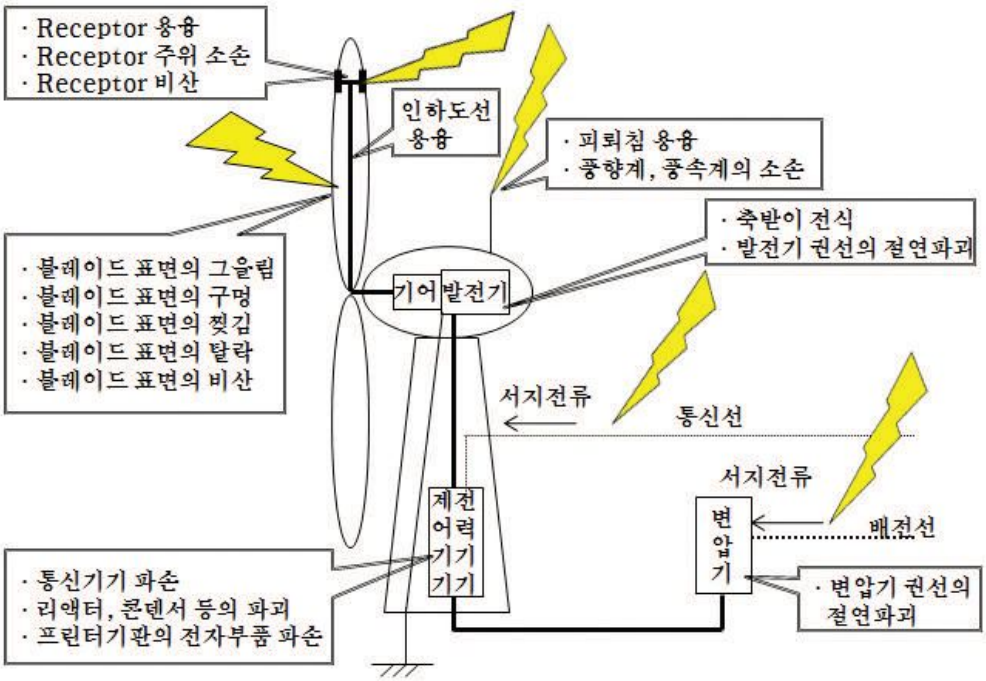


Fig. 5 The case of lightning damage to the wind turbine[16]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

배전선을 통해 돌입되는 서지전류에 의한 변압기 등 전력기기의 손상이 있을 수 있다.[16]

2) 서지 발생현상 및 종류

최근 풍력발전기의 대형화가 진행되고 있고, 또한 고효율화 하기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며 그런 노력들 가운데 반도체와 정보통신 기술의 발달로 거의 모든 전자기기에 첨단 반도체와 소형부품이 사용됨으로써 기기의 소형화 및 자동화가 급진전을 보이고 있다. 그러나 이들 전자부품은 이상 과전압에 대한 내력이 매우 낮으므로 낙뢰 및 서지의 발생 현상을 이해하고 보호대책을 세우는 것은 매우 중요한 사항이다.

서지(surge)란 유도, 방사, 전도 등의 형태로 전력선과 신호 및 통신선로 계통에 유입되어 나타나는 불필요한 잡음의 일종으로 장비에 영향을 주게 된다. 이러한 서지는 일반적인 잡음(noise)과는 다르게 취급하고 있으며 그 발생원인은 크게 자연적인 요인과 인위적인 요인으로 구분할 수 있다. 자연적인 요인으로는 정전기(ESD : Electrostatic Discharge)와 낙뢰서지 (Lightning Surge)로 구분할 수 있으며 인위적인 요인은 각종 차단기를 개폐할 때 발생되는 개폐서지 (Switching Surge)와 스위치에서 발생하는 스파그인 EFT (Electrical Fast Transient) 및 고전력 전자기 펄스 인 NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse)로 구분 할 수 있다.[17]

이들 중에서 전력 통신설비에 유입하는 이상전압의 원인으로는 낙뢰서지, 개폐서지, 지락서지의 발생 등으로 크게 분분할 수 있는데 이들의 서지가 발생하면 뇌격점 또는 지락위치에 대지전위가 상승하여 주변 전가기기들의 파손이나 손상, 오동작의 주원인으로 작용한다.[18] 특히 낙뢰서지는 자연적인 현상에 의해 발생되는 강력한 서지로서 풍력발전기에 많은 고장을 일으키는 요소이다. 이는 뇌방전에 의해 형성되는 것으로서 이에 대한 대비를 위해서는 발생 원리와 방지 대책을 수립할 필요가 있다.[19]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3) 외국의 풍력발전기 낙뢰 피해 사례 및 낙뢰방지 대책 비교

Fig. 6은 IEC/TR 61400-24에 인용된 낙뢰로 인한 사고유형 자료이다. 제어계통의 고장이 50 ~ 70%로 가장 많이 차지하고 있다. IEC/TR 61400-24에는 북유럽에 있는 독일, 스웨덴, 덴마크 3개국에 설치된 전체 풍력발전기의 4 ~ 8%가 매년 낙뢰에 의한 손상을 입고 있다고 보고하였으며 낙뢰강도가 높은 지역은 더 많은 손상을 입고 있다. 일본의 CRIEPI는 36%에 달한다고 보고하였다. [4]
보고서에 따르면 풍력발전기 손상의 7 ~ 10%는 풍력발전기 가격의 약 15 ~ 20%를 차지하는 로타 블레이드이다. 손상되는 풍력발전기의 블레이드는 대부분 구형으로서 낙뢰보호 장치가 설치되지 않은 경우들이다. 더불어 낙뢰피해의 1/3은 직접뢰에 의해 손상을 입었으며 낙뢰피해의 2/3는 전력선이나 통신계통에 낙뢰가 떨어졌을 때 간접뢰에 의해 발생되었다. [4]
아래 Fig. 7은 낙뢰보호설비가 설치되어 있으나 전력선이나 통신계통에 낙뢰가 떨어져서 전자부품이 손상된 사례이다.[21] Fig. 8은 블레이드에 낙뢰가 직접 떨어지면서 블레이드를 손상시키거나 나셀에 화재를 일으킨 사례이다.[22]

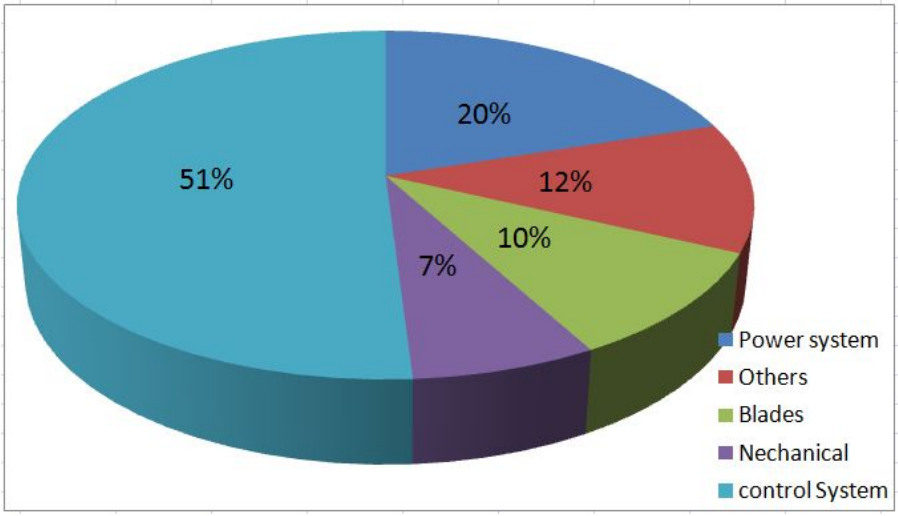
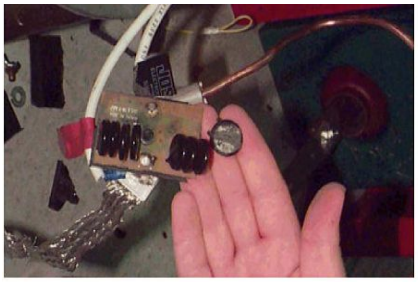
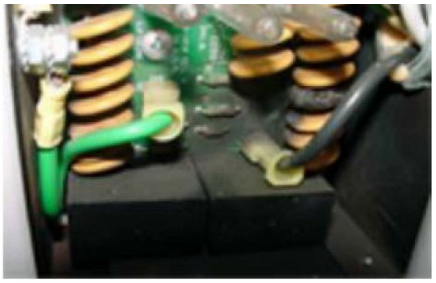


Fig. 6 Relative incidence of lightning strikes[4]

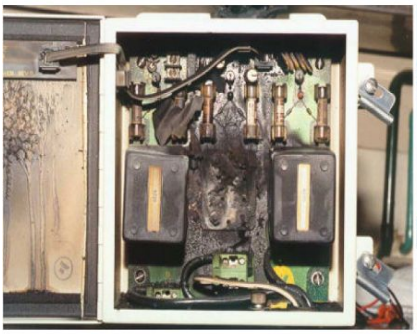
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Exploded multiple-MOV-based SPD module



SPD internal fire



SPD internal fire

Failure of conventional SPD

Fig. 7 Electronic parts damage from indirect lightning[21]

Two of the 25 wind turbine at the Golden Acorn Casino

Characteristic lightning signature to blade tip

Wind turbine reportedly struck by lightning' (Minnesota, USA)a_22may13

STRIKE A LIGHT! MORE VESTAS SMOKERS. (France)

Fig. 8 Blade damage from direct lightning[22]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 9는 미국의 GMP/Zond Z-40FS 풍력단지에 풍력발전기 접지계통을 설명하는 그림이다. 타워 하부에 있는 제어함 내의 접지 Bus는 함에 연결되지 않고 있으며 상부 나셀에 있는 제어함은 구조물에 접촉되지 않는다. 발전기 써지 보호함은 낙뢰써지의 고임피던스 통로가 될 수도 있다.[18]

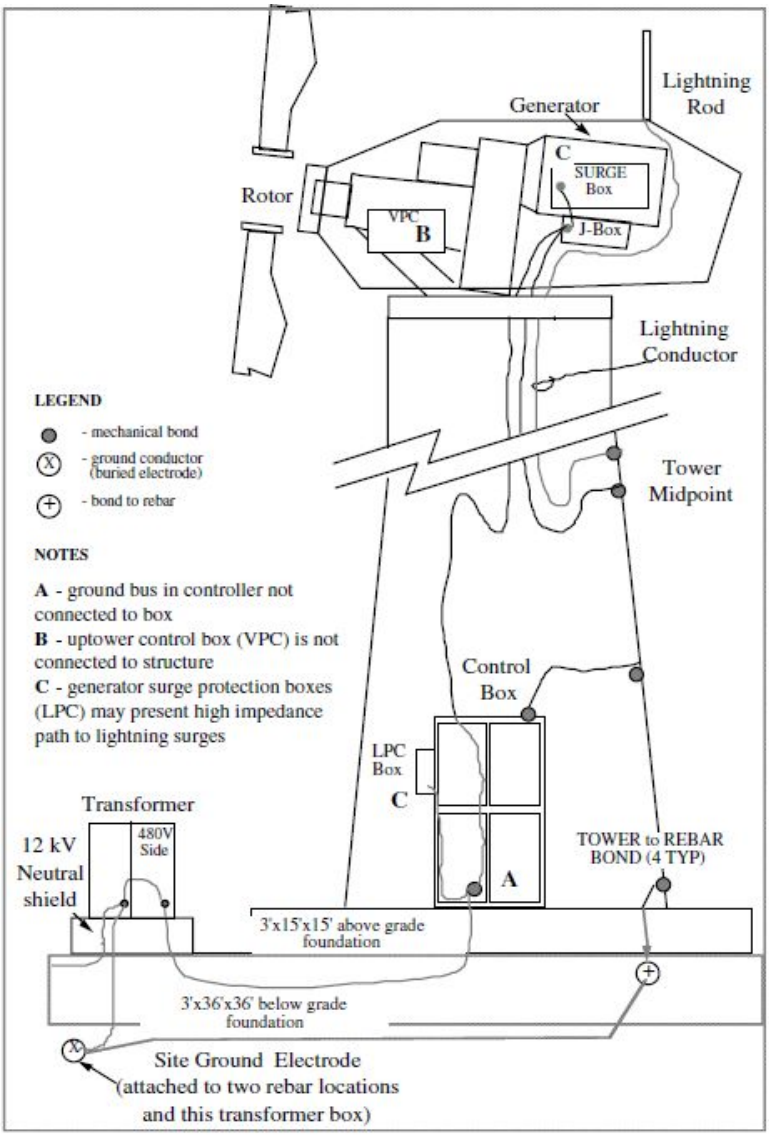


Fig. 9 GMP/Zond Z-40FS grounding and bonding[18]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 10은 미국의 KVS-33이라는 풍력단지의 풍력발전기 접지계통을 설명하는 그림이다. 35kV 전력선이 스파크에 대한 보호설비 없는 상태이며 공통접지선이 35kV 가공지선과 2 feet 이내의 근접거리에 설치되어 있는 상태이다.[18]

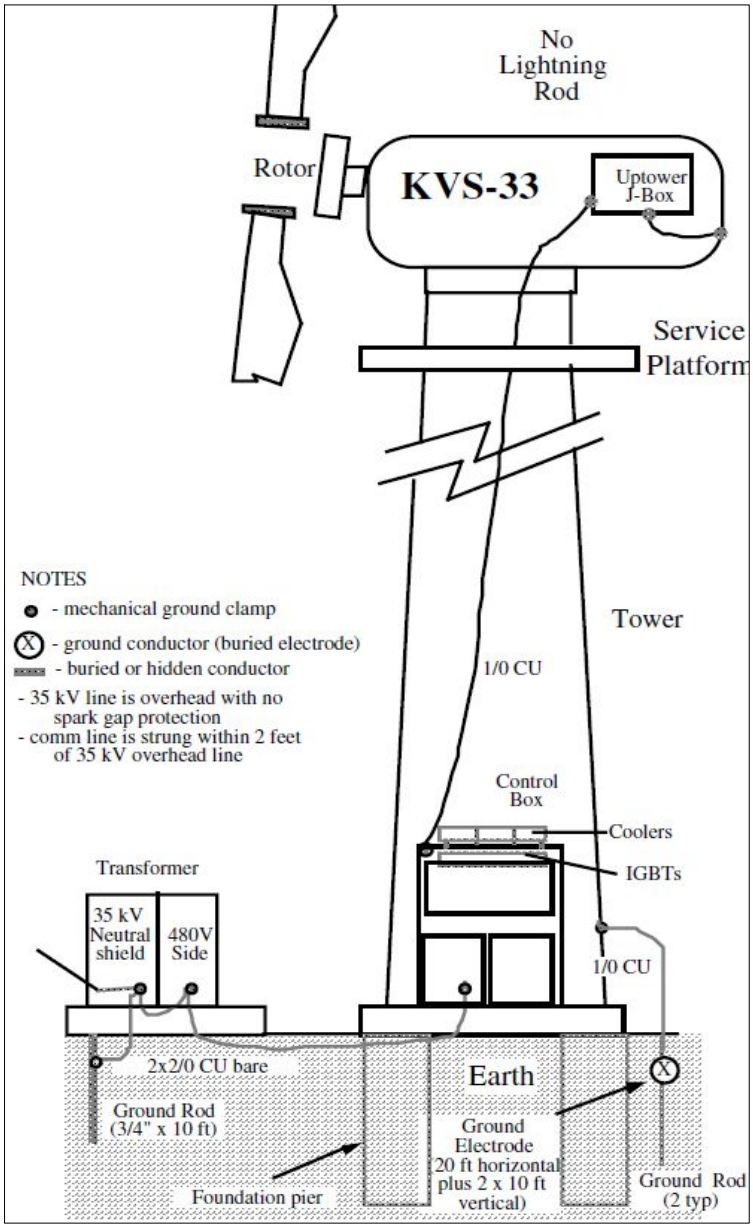


Fig. 15 KVS-33 grounding scheme[18]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 11은 미국의 Algona Z-50 풍력단지의 풍력발전기 접지계통을 설명하는 그림이다. 타워 하부에 있는 제어함 내의 접지 Bus는 함에 연결되어 있으며 상부 나셀에 있는 제어함은 구조물에 접촉되지 않고 있다. 가변피치제어기는 110V 회로의 중성점과 접지와 연결되어 있다.[18]

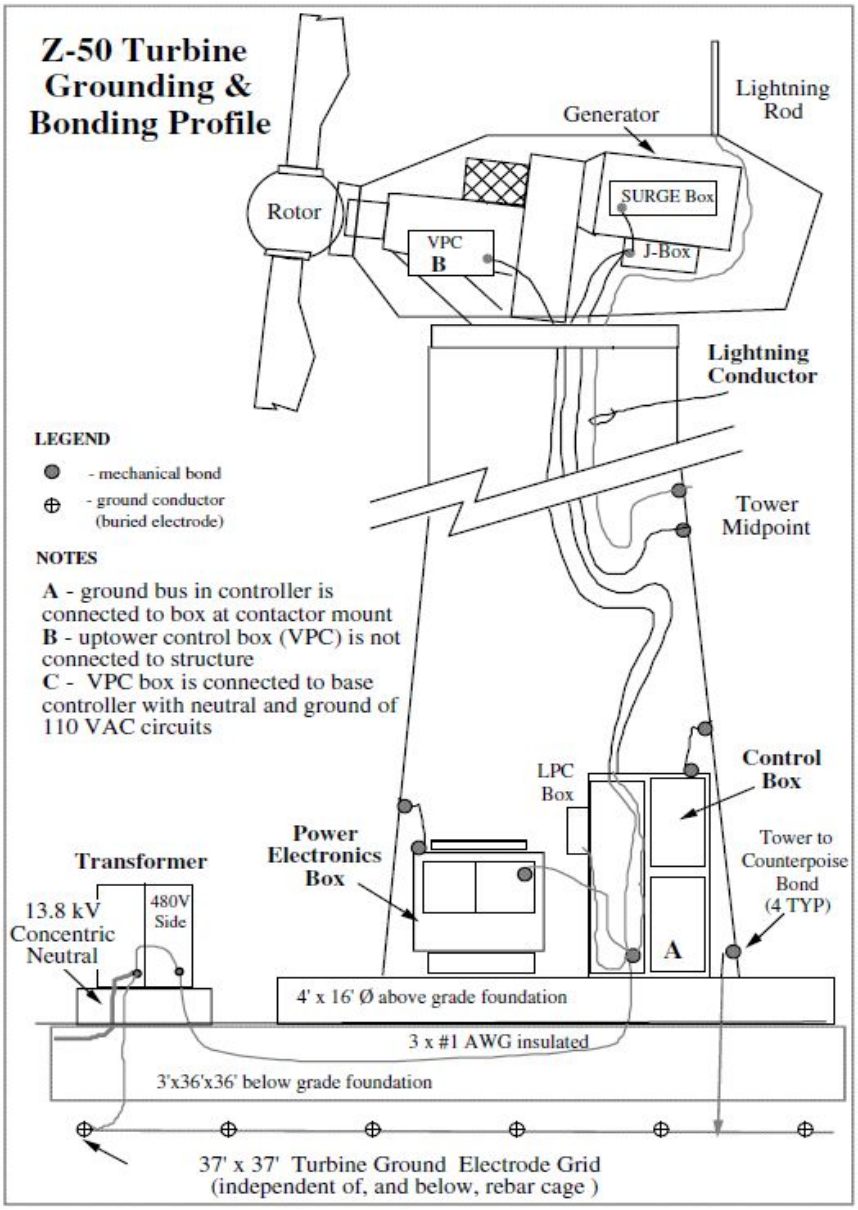


Fig. 16 Algona Z-50 grounding and bonding profile[18]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4) 연구대상 풍력발전기 제작사별 풍력발전기의 낙뢰 방지 대책 비교

(1) 현대중공업 HQ2000 2.0 MW 풍력발전기 낙뢰보호 시스템

현대중공업 HQ2000 풍력발전기의 낙뢰보호 시스템은 직격뢰와 유도뢰에 대한 보호를 목적으로 설계되어있다. 직격뢰에 대한 보호는 Maxwell 방정식을 기초로 하고 있으며 보호하고자 하는 기기의 표면에 몇 개의 케이블을 설치하면 케이블로 둘러싼 내부에는 자계가 영향을 미치지 않거나 그 크기가 감소하게 되며 모든 낙뢰 보호시스템과 최소 두 곳 이상을 병렬로 연결하는 병렬경로 개념을 적용하고 있다. 유도뢰에 대한 보호는 피뢰기를 보호하고자하는 기기에 가능한 가깝게 설치하고 있으며 피뢰기가 고장 날 경우를 대비하여 피뢰기 내부에는 개폐기가 포함되어 있다.

유도뢰에 대한 보호를 위해 전기시스템은 3가지 영역으로 분류하며 외부환경, 타워베이스 및 타워와 나셀, 허브 간 경계지점에는 반드시 피뢰기를 설치하고 있다. 이러한 보호방법은 접지케이블과 광케이블에는 적용되지 않으며 외부와 풍력발전기를 연결하는 지점을 제외한 모든 경계지점은 피뢰기에 의해서 보호된다.

낙뢰보호수준은 IEC 62305-1의 규격에 따라 Table 2에 표시된 Level 1로 설계한다.[23]

Table 2 Lightning protection system levels[23]

Protection Levels	포착효율 Ei	선별효율 Es	효율 E = Ei*Es
1	0.99	0.99	0.98
2	0.97	0.98	0.95

현대 풍력발전기의 낙뢰보호시스템은 5곳에 설치되어 있다. 3개의 로터 블레이드, 나셀커버의 끝단, 풍향계 덮개에 위치한 5개의 보호시스템은 낙뢰를 받아서 전류를 흘려주는 역할을 한다. 로터 블레이드 위에 세 개의 리셉터가 설치되어 있고 리셉터가 낙뢰를 직접 맞음으로써 낙뢰가 블레이드에 직접 떨어지는 것을 막는다. 로터 블레이드와 허브 연결은 피치베어링을 연결하는 본딩이 설치되어 낙뢰전류를 허브로 흘려주는 역할을 한다. 허브와 나셀연결 지점에는 180도 간격

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

으로 두 개의 카본 브러시 슬립링이 설치되어 있으며 등전위를 확보하기 위해 카본 브러시를 포함하고 있다. 나셀 커버 위에는 수뢰부를 연결하기 위해 케이블 케이지가 적용 된다. 70mm^{2}이상의 구리 케이블을 GRP 커버 내에 링 형태로 연결하여 케이블 케이지를 형성 한다. 나셀 내부의 모든 구성품은 EBB(Equipotent Bus Bar, 70mm^{2}이상 구리케이블)에 연결되어 있다.

Fig. 12는 현대 풍력발전기 HQ2000 모델의 690V 계통의 써지 어레스터 및 타워 케이블 규격을 표시한 것이다. 타워는 몇 개의 섹션으로 구성되는데 각 연결 지점에는 120도 간격으로 세 개의 지점에서 낙뢰전류를 흘려주도록 설계되었다.

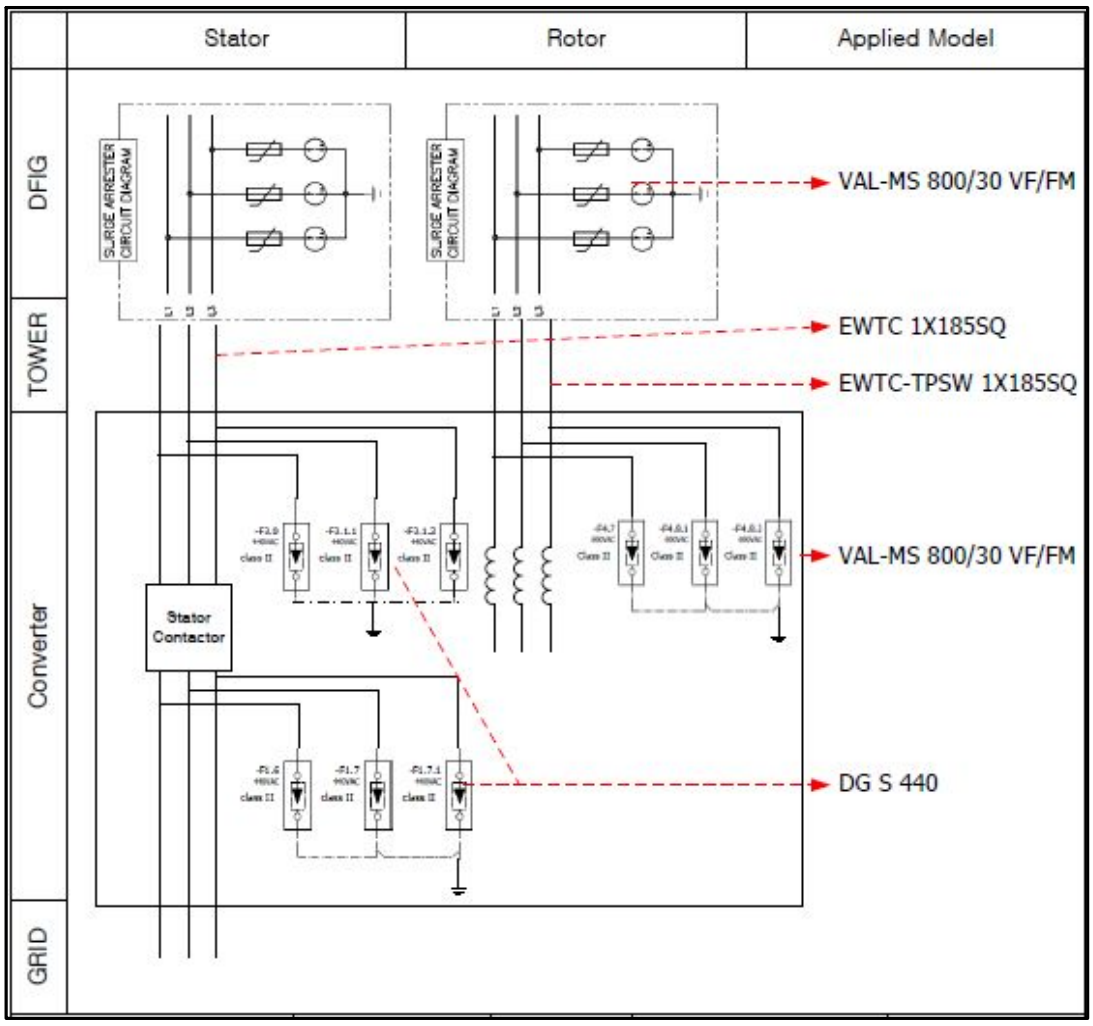


Fig. 12 HQ2000 690V line surge arrester & tower cable specification[24]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

타워 섹션위에 세 개의 금속판이 볼팅 되어 있어 타워를 연결하는 볼트로 낙뢰 전류가 흐르지 않도록 하며 타워 베이스 섹션에 120도 간격으로 세 개의 EBB가 설치되어 있어 대지로 전류를 흐르게 한다.

Fig. 13과 같이 풍력발전시스템은 각 기기에 미치는 낙뢰전류 특성에 따라 피뢰구역을 분류한다. LPZ(Lightning Protection zone)은 낙뢰전류 직접 유입여부 그리고 전자계 현상에 의해서 영향을 받는 정도에 따라 정의되는데 LPZ 0A, LPZ 0B, LPZ 1, LPZ 2로 구분하고 있으며 나셀, 타워, 타워기초, 그리고 변전소

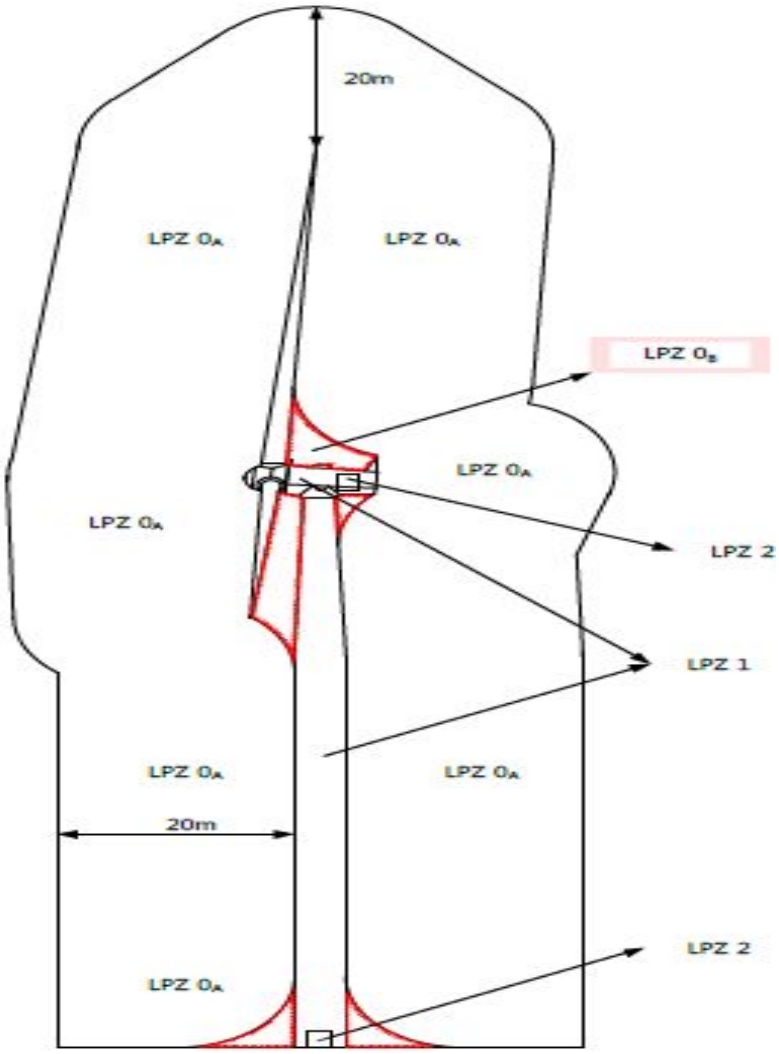


Fig. 13 Lightning Protection zone[24]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

는 LPZ1으로 정의된다. LPZ 2에 위치한 캐비닛 내부 구성품은 LPZ2, 풍향계는 나셀 외부에 있기 때문에 LPZ 0B로 구분한다. 과전압에 대한 보호를 위한 설비는 높은 보호구역에서 낮은 보호구역으로 지나는 케이블에 설치된다.[24]

(2) Vestas 2.0 MW 풍력 발전기 낙뢰보호 시스템

Vestas 2.0 MW 터빈의 낙뢰보호등급은 Level 1 기준이다. 낙뢰보호 장치는 날개와 나셀 지붕에 있는 Receptor와 Conductor system으로 구성되며 블레이드 베어링과 메인베어링, 요기어를 우회하는 방전 시스템으로 구성된다. 날개에 대한 낙뢰보호를 해야 할 위치를 결정하기 위해 Fig. 14처럼 “The Rolling Sphere 방법이 적용된다. 기본원리는 터빈구조물 외부에 20 m 반원의 가상의 공을 굴리는 것이다. 블레이드와 나셀 지붕에서 가상의 볼이 접촉하지 못하는 부분은 낙뢰를 맞을 가능성이 아주 적다는 것이다.

접지는 DEFU의 추천대로 20 m가 넘는 블레이드는 반경 20 m부터 팀까지 매 5 m마다 Lightning receptor를 갖춘다. Lightning receptor는 블레이드 외표면과 같은 위치가 되게 하고 동판에 잘 고정하여 Blade spar에 부착한다. 낙뢰 유도선은 동판에 압착하고 블레이드 Root까지 이어진다. 나셀 뒷부분에 설치된 초음파 풍향풍속계는 둘러싸인 링에 의해 보호되며 낙뢰전류는 링이 설치된 기둥을 통

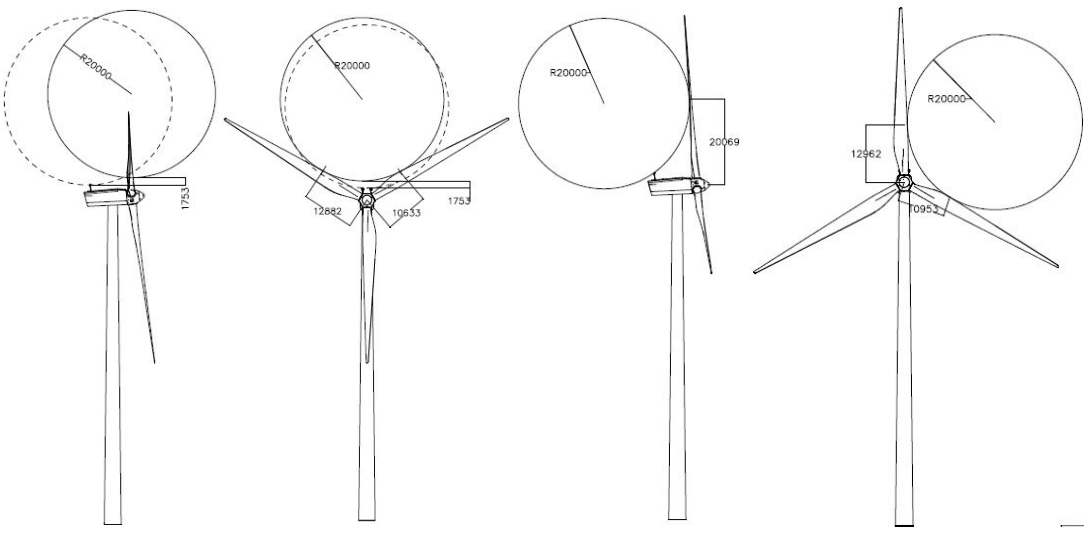


Fig. 14 The Rolling Sphere method[25]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

해 나셀 내부의 철 빔에 연결 된다.

Fig. 15는 베스타스 V80기종의 타워내 접지 시스템 개략도이다. 낙뢰는 블레이드 베어링, 허브, 메인 샤프트와 베어링을 통과하지 않고 대지로 유도되어야

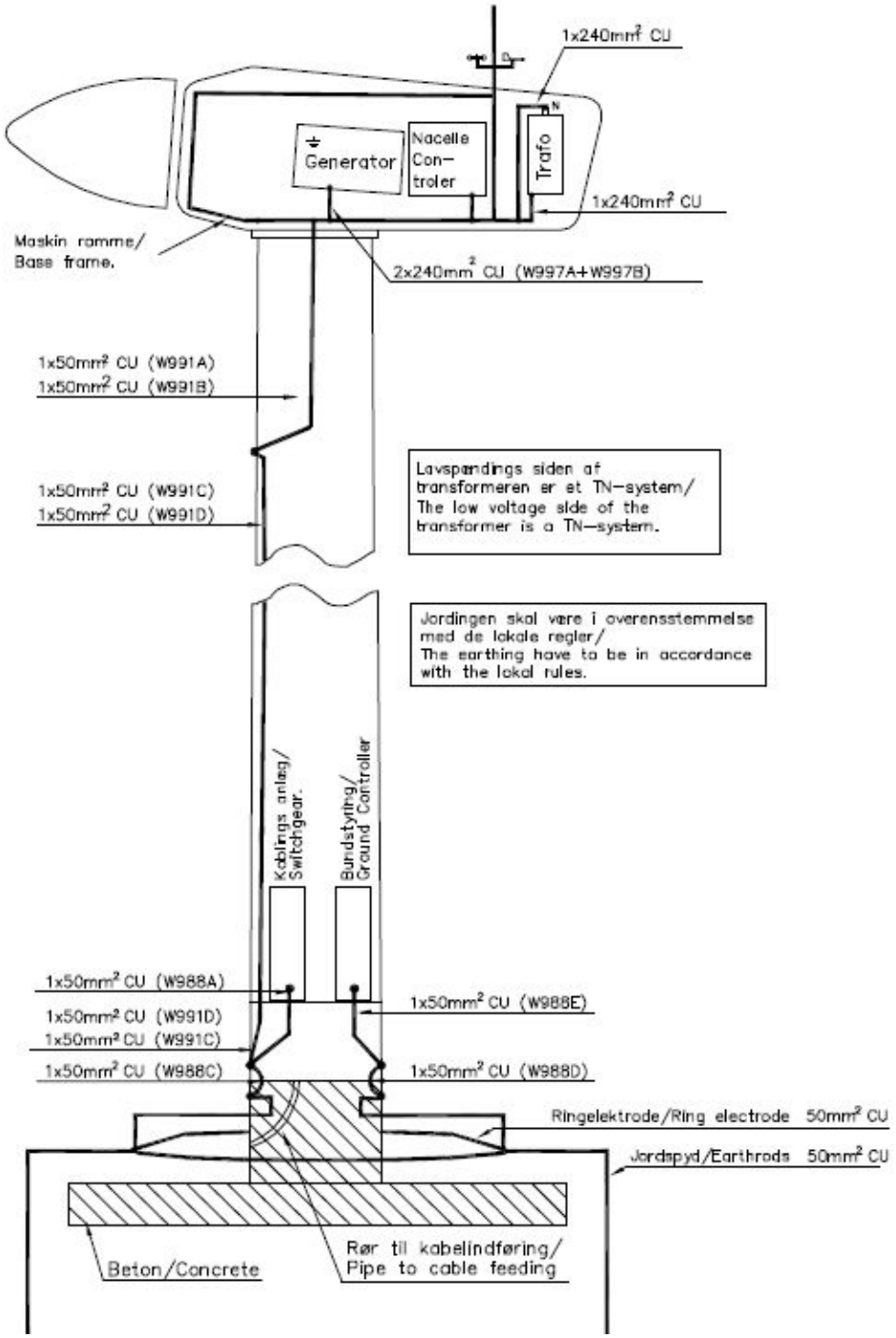


Fig. 15 Earth system in tubular tower, VCS 2 MW[25]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

하므로 Movable Lightning current transfer(LCTU) 가 설치되어 있다.

LCTU는 블레이드 위 금속레일과 나셀 금속면과 전기적 접촉이 되어 중요설비를 위회할 수 있는 구조이다. 나셀로 부터 타워와 기초로의 방전을 위해 요 플렌지에 동편(Bronze piece)가 슬라이딩 판에 박혀있으며 등전위를 위한 2*50 mm^2의 케이블이 타워에 부착되며 타워 기초부의 접지시스템까지 연결되어 낙뢰를 유도하게 되어 있다. 더불어 고압케이블의 보호 유도선이 변압기에 설치된 접지바에 연결되어 있어 낙뢰전류의 일부가 보호 유도선을 통해 흐르게 할 수 있다.

절연대책은 블레이드로부터 유도선과 블레이드 Root부의 절연 수준을 높게 해서 Blade Bearing 및 허브 등으로 낙뢰전류가 흐르지 않게 한다. 발전기 및 고전압기기 보호대책으로는 발전기, 고전압기기 및 터빈 내부 전원공급회로는 Over Voltage에 대한 보호를 하고 있다. 변압기의 저압측 중성점은 접지되고 고압선 단말기는 Over Voltage Conductor를 통해 접지시스템과 중성화 된다. 차폐대책으로는 일부 케이블은 차폐 케이블을 사용한다. 케이블을 정렬하는 방식에 따라 차폐효과를 가질 수 있다. 케이블 트레이를 나셀 금속부에 직접 설치한다. 케이블트레이는 낙뢰전류에서 발생하는 계자를 억제할 수 있는데 차폐되지 않은 케이블에 적용할 수 있다. 더불어 낙뢰가 흐르지 않는 골격부 가까이에 설치한다. 예를 들어 기어박스 등은 낙뢰로 인한 계자가 발생되는 것을 억제하기 때문에 고전압 발생으로 인한 피해를 줄일 수 있는 것으로 평가하고 있다.[25]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3. 낙뢰 데이터 수집 및 해석 방법

1) 관측 장비

이 연구에서는 IMPACT ESP에서 검출한 낙뢰 데이터를 사용하여 분석하였다.

Table 3 Specification and Picture of the sensor[26]

	Specification	Picture
Stands for	IMProved Accuracy from Combined Technology	
제작사	미국 GAI	
낙뢰탐지방식	MDF+TOA	
수신주파수 내역	LF/VLF	
Location Accuracy	500 m	
Detection Efficiency	90% 이상	
Time Synchronize	GPS 부착	
탐측 종류	Ground to Ground Flash Return Stroke	
설치장소	진주, 광주, 인천, 추풍령, 백령도, 동해, 서귀포	

Table 3은 IMPACT ESP 센서의 특징을 보여주고 있다. 낙뢰탐지 방식은 MDF 방식과 TOA 방식을 조합하여 탐지하며 정확도는 500 m 범위이내이다. GPS가 부착되어 있어 낙뢰 발생시간과 위치를 정확히 탐지할 수 있다. 전국에 7개소에 설치되어 있으며 구름과 대지간의 낙뢰를 탐지할 수 있다.

기상청에서 2001년 도입한 TLDS는 센서 부분과 분석기 그리고 표축 부분으로 구성되어 있다. 낙뢰를 감지하는 센서의 종류에는 주로 대지방전(낙뢰)을 탐지하는 IMPACT ESP 센서와 구름방전을 관측할 수 있는 LDARⅡ 센서가 있다 기

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

상청은 IMPACT ESP 센서 7개와 LDARⅡ 센서 17개로 낙뢰 관측장비 네트워크를 구성하고 있다.

Fig. 16은 IMPACT ESP 장비의 배치위치를 보여준다. 분석기에는 낙뢰(Cloud to Ground discharge) 관측 자료를 분석하는 대지방전 분석기(LP200)와 구름방전 관측 자료를 분석하는 구름방전 분석기(LP3000)로 구성되어 있다. 대지방전 분석기에서 수집된 낙뢰관측 자료는 구름방전 분석기로 재입력되어 구름방전 분석기에서 전체 방전자료(구름방전과 대지방전이 모두 포함)가 생성된다.[26]

낙뢰 관측 방법으로는 크게 시간 도달차(TOA: Time-of- Arrival) 방식과 방향 탐지법(MDF : Magnetic Direction Finding) 방식이 있다. 시간 도달차 방식(TOA)은 방전(lightning)이 발생한 후 각 센서에 도달한 시간을 이용하여 낙뢰가 발생한 위치 및 거리를 추정하는 방법이고, 방향 탐지(MDF)법은 방전이 발생한 방향을 이용하여 낙뢰발생 위치 및 거리를 알아내는 방법이다.

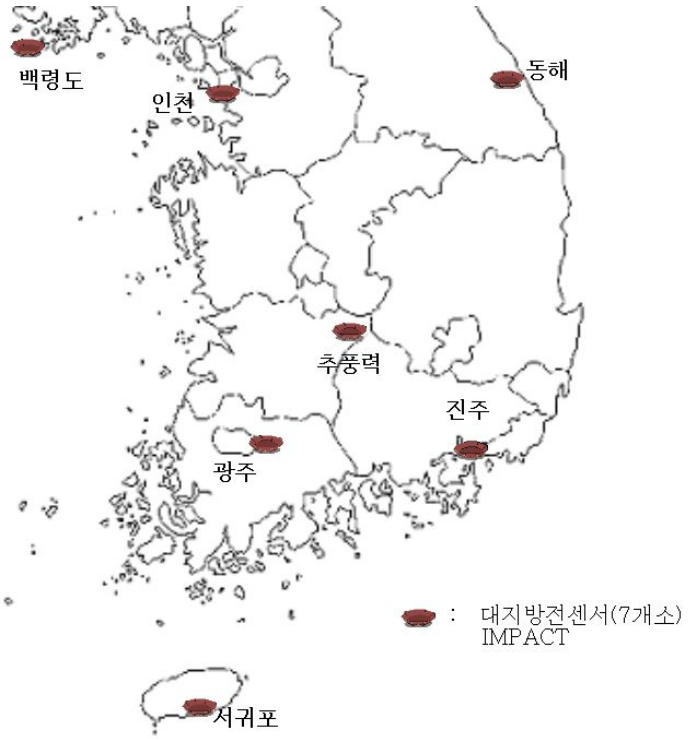


Fig. 16 lightning detection sensor layout[27]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

기상청에서 도입한 IMPACT ESP 센서는 TOA방식과 MDF 방식을 결합한 방식을 이용하여 낙뢰를 탐지하고 있으며, LDARⅡ 센서에서는 TOA 방식을 이용하여 구름방전을 탐지한다. TOA 방식을 이용하여 낙뢰를 탐지할 경우, 최소 3개 이상의 센서에서 동일한 방전을 관측하여야 정확한 방전 위치정보를 얻을 수 있으며, 방향 탐지법을 이용하여 방전의 위치를 결정할 경우 2개 이상의 센서로 정확한 방전의위치가 결정된다. Fig. 17 (a)의 경우, 2개의센서로 TOA 방식만을 이용하여 낙뢰를 탐지하였으며 이 경우에는 실제 낙뢰위치(그림에서 별표)가 아닌 다른 위치(그림에서 X로 표시)를 낙뢰 위치로 잘못 계산하고 있다.[28] 각각의 위치결정방법의 원리에 대하여는 Fig. 17(b)(c)에 설명되어 있다

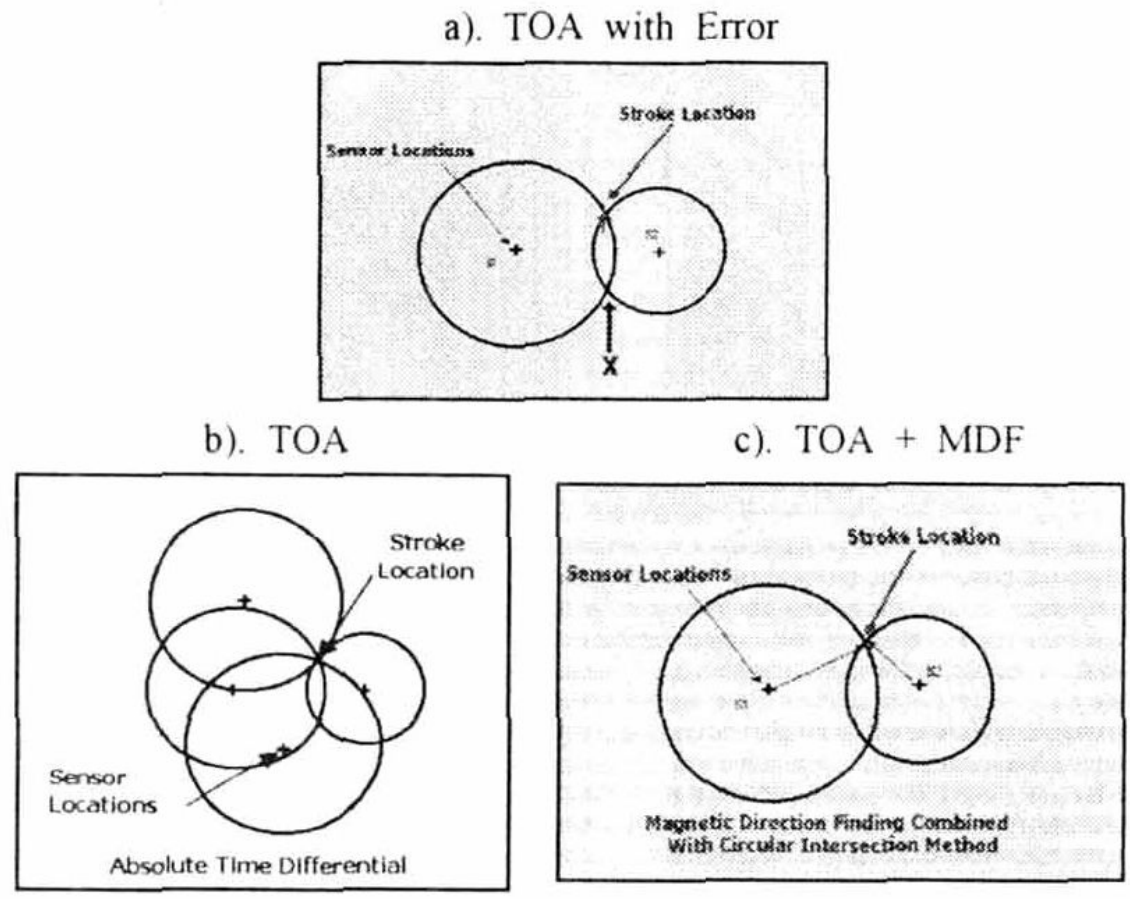


Fig. 17 Site Error Estimation and Correction for MDF/TOA[28]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2) 분석 S/W

낙뢰 데이터 분석용 프로그램은 기상청에서 운영하는 IMPACT ESP를 통해서 수집된 낙뢰자료를 입력 자료로 해서 특정지역에 대한 낙뢰현황을 분석하기 위해 이전 연구[11]에서 개발한 컴퓨터 프로그램이다.

이 프로그램의 메인화면은 아래의 Fig. 18과 같으며 분석 가능한 기능들은 설정 경위도별 낙뢰 일수, 경위도별 낙뢰강도, 경위도별 낙뢰등급, 등급별 계절별 낙뢰횟수, 등급별 낙뢰횟수, 설정 경위도별 낙뢰횟수, 시간별 낙뢰횟수, 월별 낙뢰횟수, 월별극성 낙뢰횟수 등이다

특정지역의 낙뢰를 분석하기 위해서 출력 경위도 설정기능이 있으며 낙뢰데이터 입력을 통해 원하는 기간 동안의 기상청자료를 입력할 수 있다. 데이터 정리를 통해 분석된 데이터가 결과로 아래의 Fig. 19와 같이 출력된다.

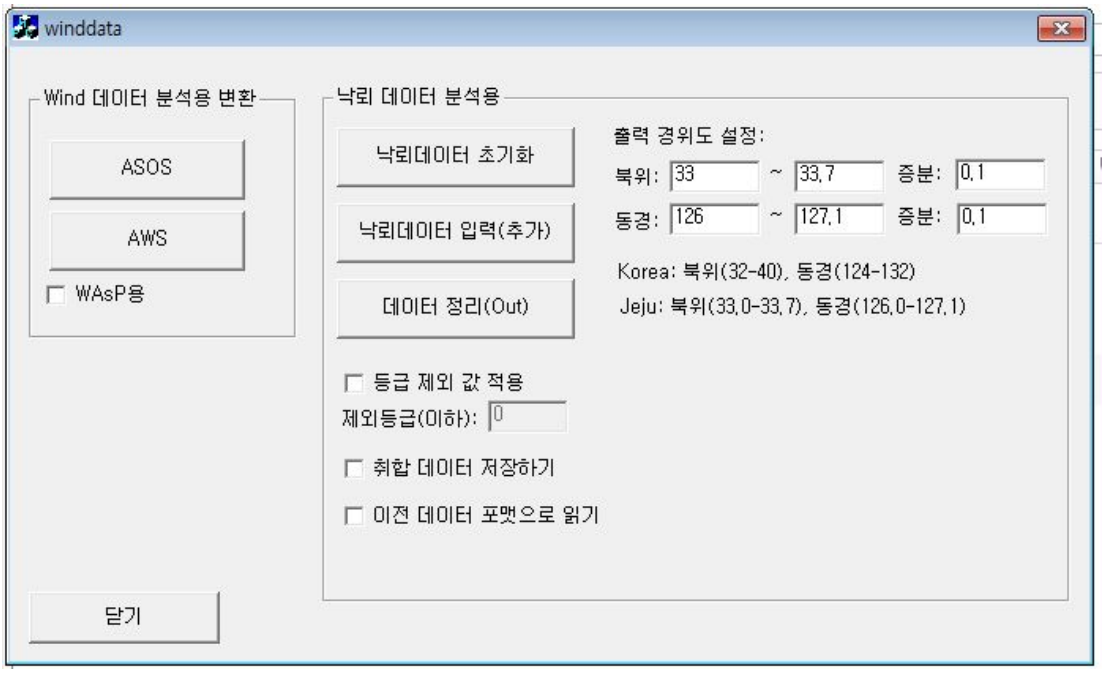


Fig. 18 Main page of the lightning data analysis program[11]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

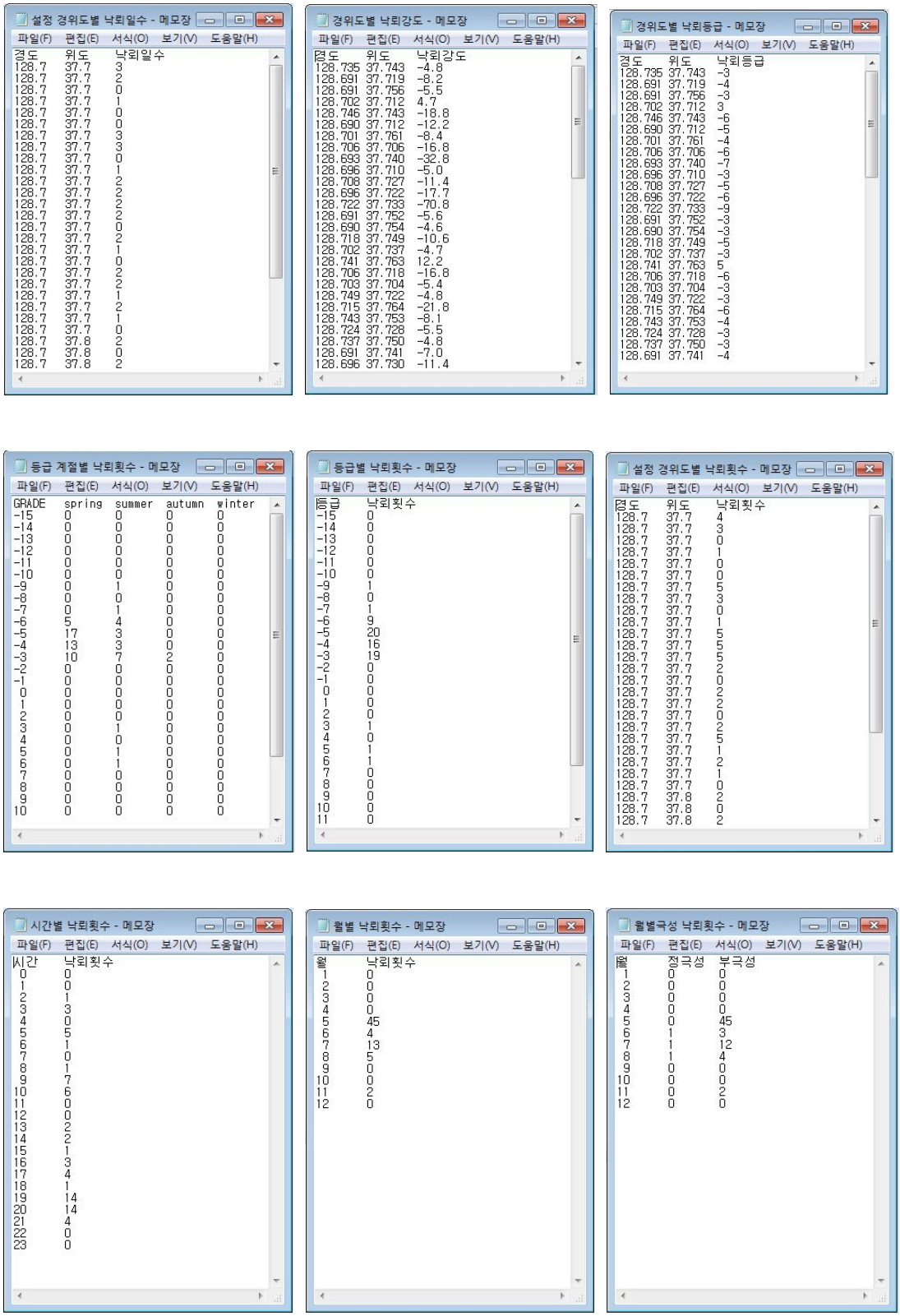


Fig. 19 Sample of the result from the lightning data analysis

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4. 연구대상 지역 및 풍력단지

Fig. 20은 본 연구에서 설정한 제주도의 범위이며 육, 해상을 포함하는 북위 33°06′ ~ 33°36′, 동경 126°06′ ~ 127°00′이다.

위의 Fig. 20에는 본 연구에서 연구 대상 풍력발전단지인 한경풍력발전단지 및 성산풍력발전단지의 위치를 나타내고 있다. 제주도에는 제주도청에서 운영하는 발전기가 29기로서 가시리와 행원, 신창지역일대에 설치 운영 중이고, 남부발전에서 성산 및 한경지역에 19기를 설치 운영하고 있다. 민간 풍력회사 풍력발전단지로는 표선면 삼달리 일대에 3 MW 11기의 삼달풍력발전단지를 비롯하여 9.35 MW 시설이 산업용 및 연구용으로 설치 운영되고 있어 제주지역에는 총 63기 113 MW의 풍력발전기가 운영되고 있다.

기존 제주지역에 분포된 한경, 행원, 가시, 성산, 삼달의 5개 지역에 관하여 낙

Fig. 20 Picture of Jeju's range[11]

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

뢰 특성을 조사한바 있으며 제주도청에서 실시한 육상풍력발전지구 지정 심의결과에 따라 선정된 어음, 상명, 김영, 가시리 네 곳에 대하여 낙뢰특성을 조사한바 있다.[11]

Fig. 21은 본 연구를 위해 설정한 강원도 일부 지역이며 국내 최대 용량 풍력발전단지들인 강원풍력, 태기산풍력, 태백풍력 및 창죽 풍력발전단지를 포함하는 북위 37°00′ ~ 37°50′, 동경 128°01′ ~ 129°01′ 범위 이다.

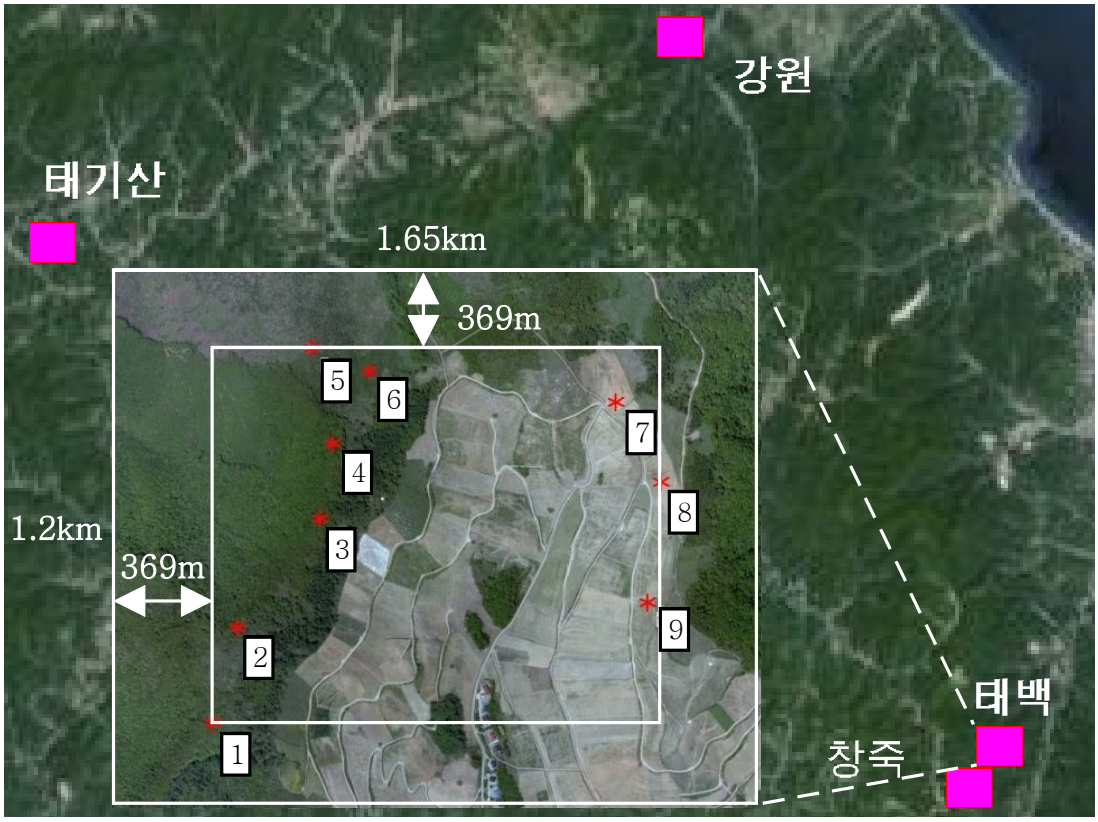


Fig. 21 Picture of Gangwon's range and Wind Farm range studied

Table 4 Area of Jeju and Gangwon

	Jeju	Gangwon
Area (㎢)	5,574	7,351

Table 4에서와 같이 제주도를 포함하는 제주지역의 연구범위 면적은 5,574㎢

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이고 강원도 지역의 연구범위 면적은 7,351 ㎢ 로서 1.32배 이다

태기산 풍력발전단지는 강원도 횡성군 태기리 일대에 Vestas사 V80기종(2 MW) 24기를 2008년 11월부터 설치되어 운영되고 있으며 강원 풍력발전단지는 강원도 평창군 도암면 삼양목장 일대에서 Vestas사 V80기종(2 MW) 49기를 2005년 12월부터 설치되어 운영되고 있다. 태백 풍력발전단지는 강원도 태백시 귀내미마을 일대에 위치하며 현대중공업에서 국내 제작한 HQ2000 기종으로서 2 MW 용량의 발전기가 4기와 효성(주)에서 국내 제작한 HS90기종 5기를 2012년 5월부터 설치되어 운영하고 있다. 창죽 풍력발전단지는 강원도 태백시 매봉산에 위치하며 현대중공업에서 국내 제작한 HQ2000 기종으로서 2 MW 용량의 발전기가 8기를 2012년 12월부터 운영하고 있다.

Fig. 21에는 풍력발전단지의 낙뢰영향범위 설정과정도를 나타내고 있으며 풍력 발전단지에서 동, 서, 남, 북으로 가장 먼 거리에 위치한 풍력발전기를 기준으로 사각형범위를 만들고, 그 경계선으로부터 발전기의 최고높이의 3배를 떨어진 사각형면적을 낙뢰영향 범위로 설정한다. 태백 풍력발전단지의 발전기의 경우 최고 높이 123 m의 3배인 369 m 떨어진 사각형을 낙뢰율 평가 면적으로 정하였으며 나머지 풍력발전단지도 같은 방식으로 평가 면적을 정하였다. 그 이유는 국제표준인 IEC61400 - 24[4]에서 풍력발전기에 직접 영향을 미치는 평균연간 낙뢰빈도를 구할 때, 풍력발전기 최고 높이의 3배에 해당하는 반경을 갖는 원 면적을 수집면적(Collection Area)[11]으로 정하기 때문이다.

Table 5 Area of each Wind Farm

	Jeju		Gangwon			
	Hankyung	Sungsan	Taebaek	Changjuk	Taegisan	Gangwon
Area (㎢)	2.73	2.83	1.99	5.91	7.73	35.1

Table 5는 각 풍력발전단지의 낙뢰율 평가 면적을 정리한 내용이다. 단지별 발전기의 높이와 날개 길이가 각각 다르기 때문에 각 발전단지에 미칠 수 있는 면적이 상이하다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅲ. 제주도와 강원도의 낙뢰 특성 비교

1. 제주도와 강원도의 낙뢰 특성

1) 낙뢰 특성

① 연별 낙뢰발생 횟수 비교

Fig. 22는 제주도와 강원도에서 연간 낙뢰횟수를 비교한 그래프이다. 연구대상의 강원도 면적이 제주도 면적의 1.3배이기 때문에 낙뢰횟수가 많이 나타난다. 2010년에는 강원도에서 14,890회로 제주도에서 4,030회에 비해서 3배 이상의 낙뢰가 발생하였다. 2011년에는 강원도와 제주도에서 동일하게 가장 많은 낙뢰를 기록하였으며 강원도가 20,630회에 비해 제주도는 13,880회로 비율면 에서는 큰 차이가 나지 않는다. 2012년에는 강원도와 제주도에서 동일하게 낮은 낙뢰횟수를 보이지만 비율로는 9,789회 대비 3,875회로 강원도가 3배정도 많이 발생하였다. 2013년에는 강원도에서의 낙뢰횟수가 제주도에서 발생한 낙뢰횟수보다 5배가량 차이를 보이고 있다.

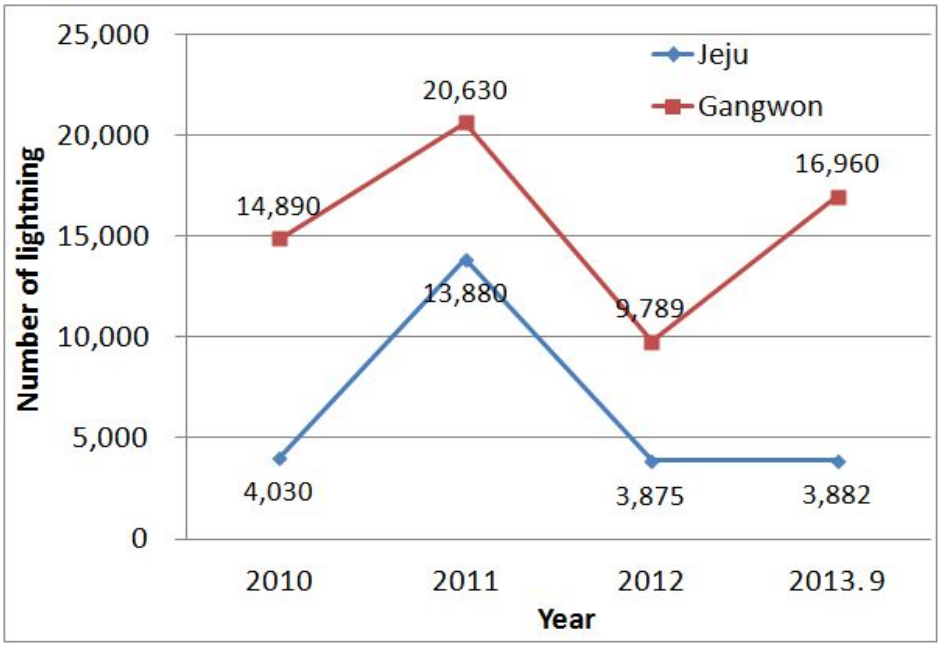


Fig. 22 The number of annual lightning occurrence on Jeju and Gangwon

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

② 시간별 낙뢰발생 횟수 비교

Table 6 The number of hourly lightning occurrence on Jeju

Year / Time	2010	2011년	2012	2013. 9	Total	Ratio (%)	Day/ Night (%)
0	43	1,836	55	59	1,993	7.76	
1	47	1,157	60	58	1,322	5.15	
2	187	239	67	58	551	2.15	
3	776	144	201	113	1,234	4.81	30.8
4	315	251	228	103	897	3.49	
5	351	127	469	105	1,052	4.10	
6	464	44	173	172	853	3.32	
7	196	215	108	159	678	2.64	
8	93	519	74	386	1,072	4.18	
9	181	1,054	68	713	2,016	7.85	
10	73	444	100	691	1,308	5.10	
11	216	109	253	197	775	3.02	
12	92	57	836	160	1,145	4.46	36.5
13	54	24	568	93	739	2.88	
14	41	92	158	48	339	1.32	
15	129	67	197	200	593	2.31	
16	84	90	71	289	534	2.08	
17	72	53	31	24	180	0.70	
18	138	56	21	53	268	1.04	
19	176	426	13	30	645	2.51	
20	120	1,422	26	30	1,598	6.23	
21	86	1,179	38	42	1,345	5.24	32.7
22	48	2,002	21	41	2,112	8.23	
23	48	2,273	39	58	2,418	9.42	
Total	4,030	13,880	3,875	3,882	25,667	100	

Table 6은 기상청에서 운영하는 IMPACT ESP를 통해서 2010년부터 2013년 9월까지 수집된 낙뢰자료를 입력 자료로 해서 연구범위에 해당되는 제주도 지역에 대한 낙뢰현황을 이전연구[11]에서 개발한 컴퓨터 프로그램으로 분석하여 시간대별 낙뢰 발생횟수를 나타낸 것이다. 낮과 밤의 발생률을 비교시 36.5 : 63.5로 밤에 낙뢰 발생률이 높게 나타고 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 7 The number of hourly lightning occurrence on Gangwon

Year / Time	2010	2011	2012	2013. 9	Total	Ratio (%)	Day/ Night (%)
0	280	724	91	202	1,297	2.08	
1	385	1,653	689	244	2,971	4.77	
2	675	974	252	387	2,288	3.67	
3	738	397	150	273	1,558	2.50	29.7
4	1,214	1,657	326	197	3,394	5.45	
5	288	3,158	465	299	4,210	6.76	
6	265	2,225	160	142	2,792	4.48	
7	233	1,528	163	206	2,130	3.42	
8	169	1,511	295	417	2,392	3.84	
9	245	1,617	129	164	2,155	3.46	
10	66	265	63	148	542	0.87	
11	248	164	141	464	1,017	1.63	
12	278	219	132	3,141	3,770	6.05	52.9
13	679	347	896	2,895	4,817	7.74	
14	1,132	580	586	482	2,780	4.46	
15	1,366	407	663	900	3,336	5.36	
16	2,027	735	1,229	740	4,731	7.60	
17	2,180	790	1,242	1,057	5,269	8.46	
18	1,253	359	446	866	2,924	4.70	
19	616	253	461	1,914	3,244	5.21	
20	238	220	612	967	2,037	3.27	
21	182	262	322	311	1,077	1.73	17.4
22	91	357	250	377	1,075	1.73	
23	42	228	26	167	463	0.74	
Total	14,890	20,630	9,789	16,960	62,269	100	

Table 7은 강원도 지역 중 연구범위에 해당되는 북위 37°00′ ~ 37°50′, 동경 128°01′ ~ 129°01′ 범위의 시간대별 낙뢰 발생횟수를 나타낸 것이며 일일 24시

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

간의 시간대별 낙뢰횟수를 구분하여 정리하였다. 2011년도에 20,630회로 다른 해보다 많은 낙뢰횟수를 보여준다. 전체적으로 제주보다는 높은 낙뢰 발생비율을 보이며 낮과 밤의 발생비율은 48 : 52로 낮 시간대에 다소 높게 발생하였다.

Fig. 23은 시간대 별 낙뢰 발생율 그래프를 보여준다. 제주도 지역에서는 새벽과 저녁시간대에는 낙뢰발생률이 낮은 반면 한낮과 한밤에 높게 나타나는 현상을 볼 수 있다. 강원도 지역에서는 새벽 시간대와 저녁 시간대에 높게 발생하였고 한낮과 한밤에는 발생률이 급격히 떨어지는 현상을 발견할 수 있다. 제주도 지역과 강원도 지역에서 시간대별 낙뢰 발생비율이 정반대의 현상을 보여 주고 있다

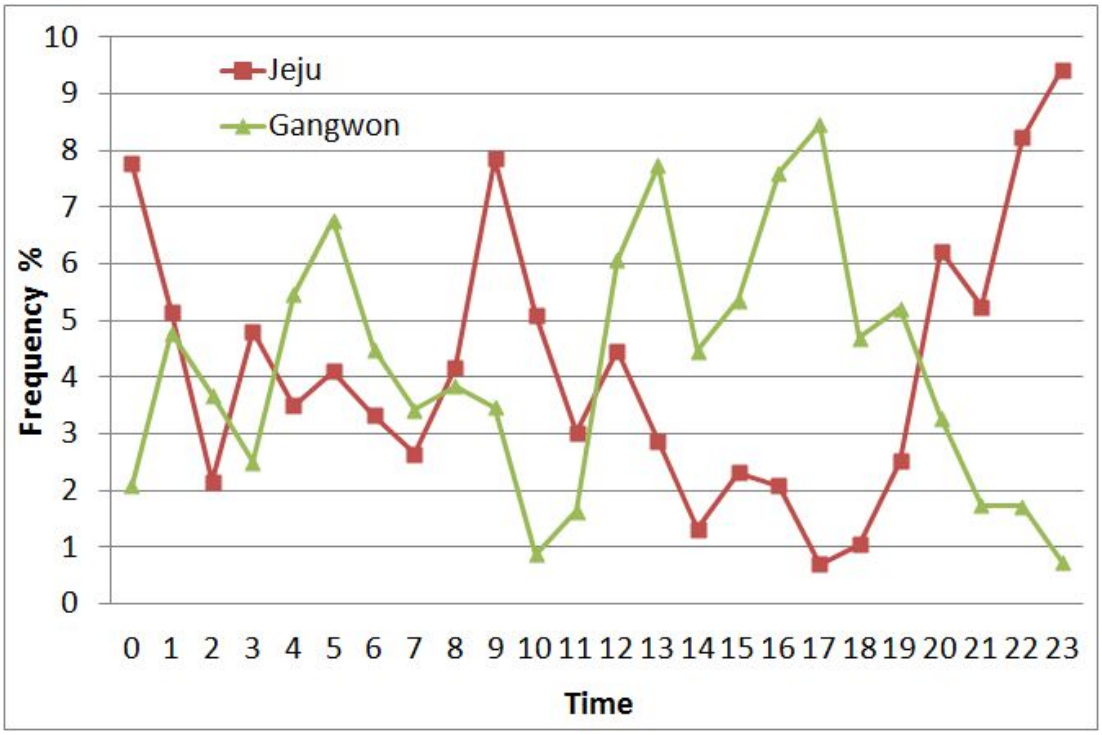


Fig. 23 Evaluation of lightning frequency by time on Jeju and Gangwon

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

③ 등급별 낙뢰발생 횟수

Table 8 The number of lightning by lightning grade on Jeju

Year / Grade	2010	2011	2012	2013. 9
-10	4	6	10	11
-9	41	71	43	52
-8	164	482	163	131
-7	486	1,568	416	384
-6	1,032	2,614	1,000	819
-5	949	3,017	933	788
-4	516	2,925	385	410
-3	209	1,072	154	237
-2	1	6	1	5
-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	31	340	22	150
3	60	803	57	191
4	53	439	75	124
5	201	304	393	411
6	147	135	115	116
7	62	66	40	30
8	53	24	43	11
9	18	6	20	8
10	3	2	5	3
11	0	0	0	0
Total	4,030	13,880	3,875	3,881

Table 8은 제주도지역의 낙뢰현황을 낙뢰등급표에 따라 등급별로 정리하여 낙뢰빈도를 나타낸 것이다. 2011년도에 제주지역의 낙뢰발생 현황은 다른 해에 비

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

해 약 4배 정도 많게 기록되었다. 연도별 발생 낙뢰등급 양상은 비슷하게 나타나고 있으며 부극성 낙뢰 빈도가 20 ~ 25 % 이상으로 정극성 낙뢰 빈도 5 ~ 10 %에 비해서 많이 발생되고 있다.

Fig. 24의 그래프에서 보면 주로 -8 ~ -3등급 사이에서 가장 많은 낙뢰빈도를 보이며 -6등급의 낙뢰가 가장 많이 발생하였고, 정극성에서도 +1 ~ +7등급 사이의 빈도가 분포하며 5등급의 낙뢰가 가장 많이 발생한 것을 알 수 있다. 일반적으로 설비에 영향을 미칠 것으로 예상되는 ±8등급 이상의 낙뢰등급이 차지하는 비율은 전체 낙뢰발생 건수의 1,374회로 5.4%를 차지하여 낙뢰횟수는 적은 반면 낙뢰 강도가 높음을 보여준다.

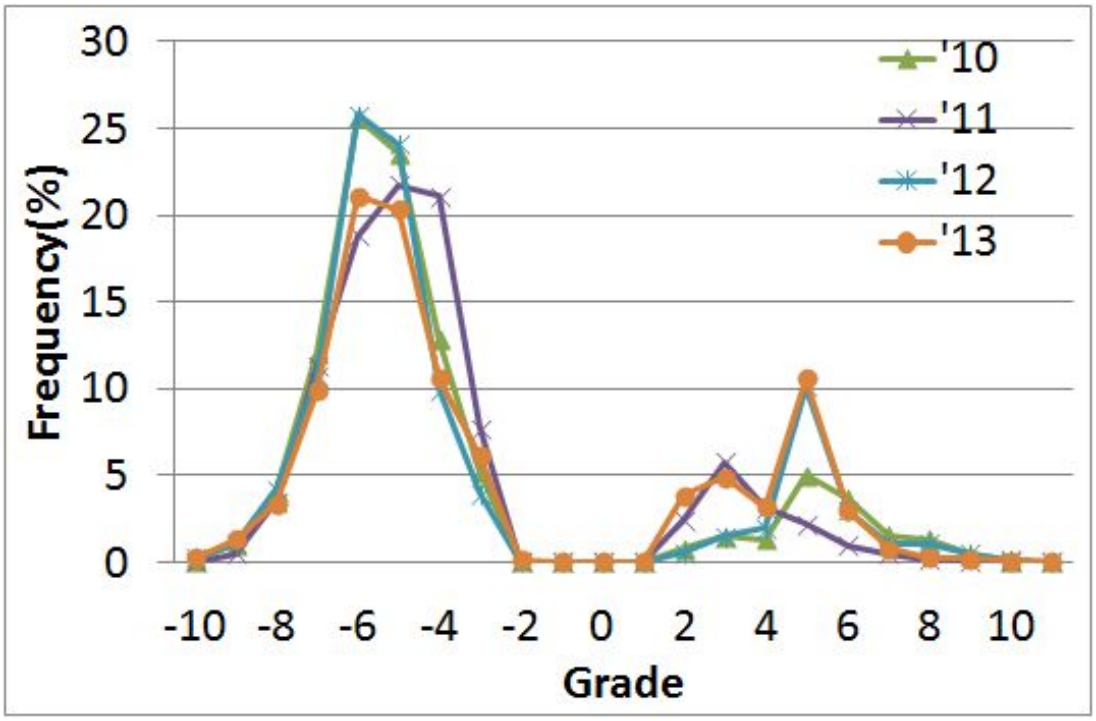


Fig. 24 The frequency of lightning grade on Jeju

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 9 The number of lightning by lightning grade on Gangwon

Year / Grade	2010	2011	2012	2013. 9
-10	3	6	2	2
-9	35	38	15	26
-8	116	275	77	111
-7	485	1,046	258	431
-6	1,172	2,265	688	1,256
-5	2,270	3,657	1,698	2,355
-4	3,229	4,321	2,294	3,224
-3	2,808	3,646	1,823	2,722
-2	1,813	1,970	1,212	2,112
-1	149	132	74	185
0	0	0	0	1
1	176	192	109	376
2	1,156	1,067	663	2,033
3	801	740	374	1,190
4	293	312	135	401
5	133	188	92	187
6	93	381	96	112
7	86	256	83	108
8	54	83	67	87
9	13	43	24	27
10	4	7	4	13
11	1	0	1	1
Total	14,890	20,625	9,789	16,960

Table 9는 강원도 지역에 발생된 낙뢰에 대해 낙뢰등급표에 따라 등급별로 정리하여 낙뢰빈도를 나타낸 것이다. 3년 9개월간의 낙뢰자료를 분석한 결과로는 2011년에 -4등급의 낙뢰 횟수가 4,321번으로 가장 많이 발생했었고 정극성의 경우는 2013년에 +2등급의 낙뢰 횟수가 2,033회로 가장 많이 발생했었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 25는 강원도 지역의 등급별 낙뢰 빈도를 보여준다. 강원도 지역의 낙뢰 발생 유형이 등급별로 낙뢰발생 빈도가 매년 동일한 것을 보여주고 있으며 2012년도에 부극성의 낙뢰빈도가 높고 2013년도에는 정극성의 빈도가 다른 해에 비해서 다소 높게 발생되었다. ±8등급 이상의 낙뢰등급이 차지하는 비율은 전체 낙뢰발생 건수의 총 1,135회로 1.8%를 차지하였다. 주로 -6 ~ -2등급 사이에서 가장 많은 낙뢰빈도를 보이며 -4등급의 낙뢰가 가장 많이 발생하였고, 정극성에서도 +1 ~ +4등급 사이의 빈도가 분포하며 2등급의 낙뢰가 가장 많이 발생하였음을 알 수 있다. 그러나 낙뢰 발생횟수는 제주에 비해서 다소 많으나 낙뢰강도 분포는 낮은 현황이다.

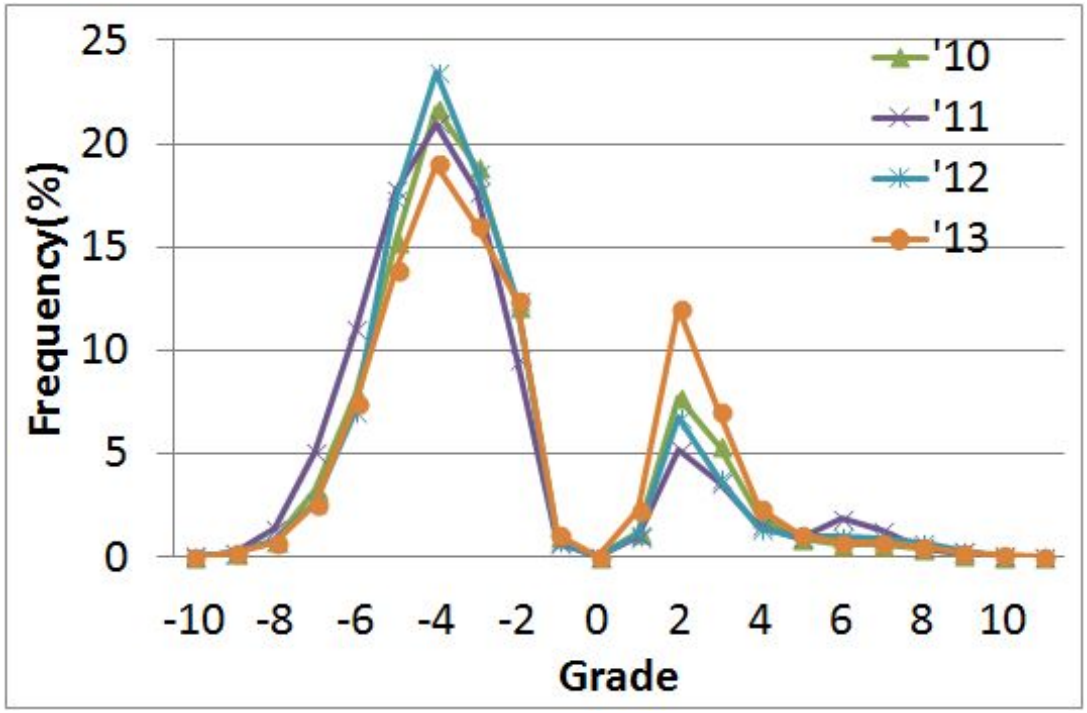


Fig. 25 The frequency of lightning grade on Gangwon

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

③ 극성별 계절 및 월별 발생 횟수

Table 10 Monthly and Yearly lightning occurrence by polarity on Jeju

Month	2010		2011		2012		2013. 9	
	Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity
1	1	9	0	1	0	0	0	0
2	12	19	0	1	3	0	15	32
3	118	712	0	0	13	3	121	4
4	3	4	8	15	109	27	36	6
5	5	22	6	0	74	0	30	8
6	39	207	65	338	39	11	125	101
7	103	407	26	49	360	2,447	452	970
8	188	1,692	68	444	56	341	219	1,684
9	118	303	1,890	10,874	37	85	46	33
10	21	2	13	0	31	150	N/A	N/A
11	16	8	40	37	4	5	N/A	N/A
12	4	17	3	2	44	36	N/A	N/A
Total	628	3,402	2,119	11,761	770	3,105	1,044	2,838

Table 10에서는 제주지역의 년도 별로 월별 극성에 따른 낙뢰횟수를 분석하였다. 모든 달에 부극성 낙뢰가 정극성 보다 높게 나타나며 2010년에는 8월에 부극성의 낙뢰가 1,692회로 가장 많이 발생하였으며 2011년에는 9월에 10,874회의 낙뢰가 발생하여 연구 기간 중 가장 많은 횟수를 차지하였다. 2012년에는 7월, 2013년에는 8월에 가장 많이 부극성 낙뢰가 발생하였다.

평균적으로는 장마철인 초여름보다 여름에서 가을로 변하는 계절인 9월에 낙뢰 발생률이 거의 50%를 차지하여 집중되고 있음을 알 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 11 Monthly lightning occurrence and occurrence rate by polarity on Jeju

Month	Positive Polarity		Negative Polarity		Total	Ratio (%)
	Occurrence	Ratio(%)	Occurrence	Ratio(%)		
1	1	9.1	10	90.9	11	0.0
2	30	36.6	52	63.4	82	0.3
3	252	26.0	719	74.0	971	3.8
4	156	75.0	52	25.0	208	0.8
5	115	79.3	30	20.7	145	0.6
6	268	29.0	657	71.0	925	3.6
7	941	19.5	3,873	80.5	4,814	18.8
8	531	11.3	4,161	88.7	4,692	18.3
9	2,091	15.6	11,295	84.4	13,386	52.2
10	65	30.0	152	70.0	217	0.8
11	60	54.5	50	45.5	110	0.4
12	51	48.1	55	51.9	106	0.4
Total/Ratio	4561	17.8	21,106	82.2	25,667	100.0

Table 11에서는 제주도 지역에서의 월별 극성에 따른 낙뢰횟수를 비율로 비교한 것이다. 모든 달에 부극성 낙뢰가 정극성 보다 높게 나타나며 평균적으로 부극성 비율이 82%를 차지하며 4 ~ 9월 사이에 고르게 분포되고 있으며 월별 비율로 볼 때는 9월에 52.2%의 비율을 차지하며 가장 많이 발생되었다

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 12 Monthly and Yearly lightning occurrence by polarity on Gangwon

Month	2010		2011		2012		2013. 9	
	Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity	Positive Polarity	Negative Polarity
1	1	8	66	0	1	0	0	1
2	2	6	74	0	2	0	0	0
3	7	71	26	0	2	1	0	0
4	1	3	871	9,993	5	22	57	208
5	8	95	68	406	328	4,681	7	91
6	347	4,137	264	944	177	2,541	141	1,743
7	165	1,786	1,005	2,525	589	2,022	767	2,259
8	959	2,887	688	3,533	378	828	3,203	8,572
9	1,115	3,878	80	93	33	55	138	464
10	7	4	104	283	2	56	N/A	N/A
11	53	165	1	1	3	18	N/A	N/A
12	8	17	0	1	2	6	N/A	N/A
Total	2,673	13,057	3,247	17,779	1,522	10,230	4,313	13,338

Table 12에서는 강원도 지역의 연도별 및 월별 극성에 따른 낙뢰횟수를 분석하였다. 대부분 부극성 낙뢰가 정극성 보다 높게 나타나지만 2011년 및 2012년 1, 2, 3월에는 정극성이 많게 나타났다. 2010년도에는 6월에 부극성의 낙뢰가 4,137회로 가장 많이 발생하였으며 2011년에는 4월에 9,993회의 낙뢰가 발생하여 연구범위의 기간 중 가장 많은 횟수를 차지하였다. 2012년에는 5월에 4,681회, 2013년에는 8월에 8,572회 부극성 낙뢰가 가장 많이 발생하였다.

평균적으로는 4월에서 9월까지 고르게 낙뢰가 발생되고 있음을 알 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 13 Monthly lightning occurrence and frequency by polarity on Gangwon

Month	Positive Polarity		Negative Polarity		Total	Ratio (%)
	Occurrence	Ratio(%)	Occurrence	Ratio(%)		
1	68	88.3	9	11.7	77	0.1
2	78	92.9	6	7.1	84	0.1
3	35	32.7	72	67.3	107	0.2
4	934	8.4	10,226	91.6	11,160	16.9
5	411	7.2	5,273	92.8	5,684	8.6
6	929	9.0	9,365	91.0	10,294	15.6
7	2,526	22.7	8,592	77.3	11,118	16.8
8	5,228	24.8	15,820	75.2	21,048	31.8
9	1,366	23.3	4,490	76.7	5,856	8.9
10	113	24.8	343	75.2	456	0.7
11	57	23.7	184	76.3	241	0.4
12	10	29.4	24	70.6	34	0.1
Total/Ratio	11,755	17.8	54,404	82.2	66,159	100.0

Table 13에서는 강원도 지역의 월별 극성에 따른 낙뢰횟수를 분석하였으며 월별 발생비율로 구분하였다. 제주도에서와 마찬가지로 모든 달에 부극성 낙뢰가 정극성 보다 높게 나타났으며 평균적으로 부극성 비율이 82.2%를 차지하고 있다. 발생월 비율로는 8월에 31.8%이나 4월부터 9월까지 15%범위의 고른 분포를 보이고 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

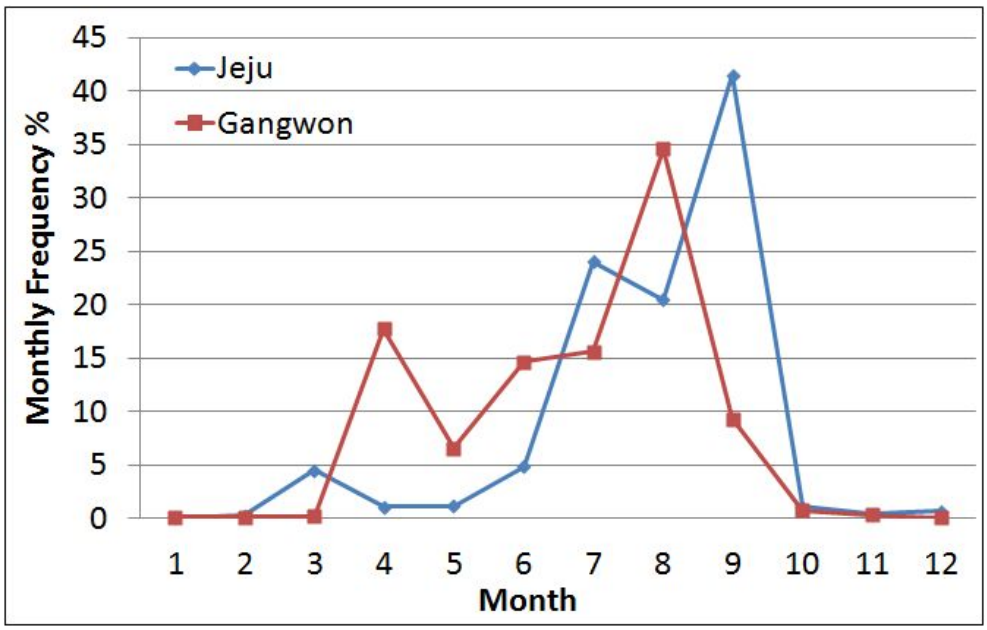


Fig. 26 Evaluation of the monthly frequency on Jeju and Gangwon

Fig. 26에서는 제주도와 강원도 지역에서의 월별 낙뢰 발생률을 비교하였다. 강원도 지역에서는 4월부터 9월까지 고른 분포를 보이며 제주지역에서는 7, 8, 9월에 집중적으로 발생되고 있다

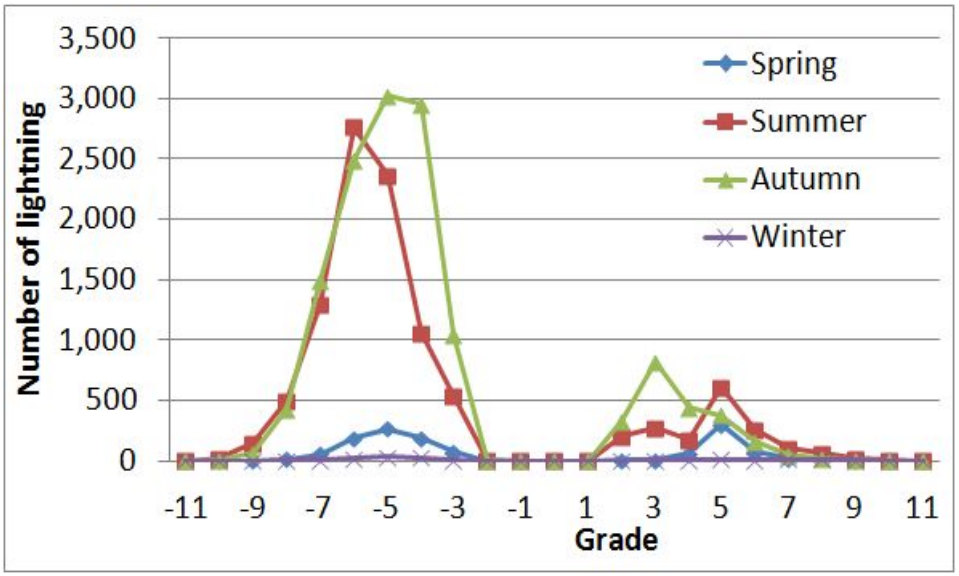


Fig. 27 The frequency of lightning grade by season in Jeju

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 27은 제주도에서의 계절별 낙뢰등급별 횟수를 보여준다. 제주도 지역에서의 낙뢰특성은 계절별로는 여름과 가을에 대부분의 낙뢰가 발생하고 있으며 부극성 낙뢰가 대부분을 차지하나 봄과 겨울에는 정극성 낙뢰가 다소 높은 경향을 보이고 있다. 봄과 가을에는 발생 횟수가 아주 낮은 것으로 나타난다.

Fig. 28은 강원도 지역의 낙뢰횟수를 계절별로 분석하였다. 여름, 봄, 가을, 겨울 순으로 낙뢰가 많이 발생하고 있으며 대부분이 부극성이다. 제주지역과 다르게 봄이 가을보다 많이 발생하고 있음을 알 수 있으며 겨울에는 거의 발생하지 않고 있다

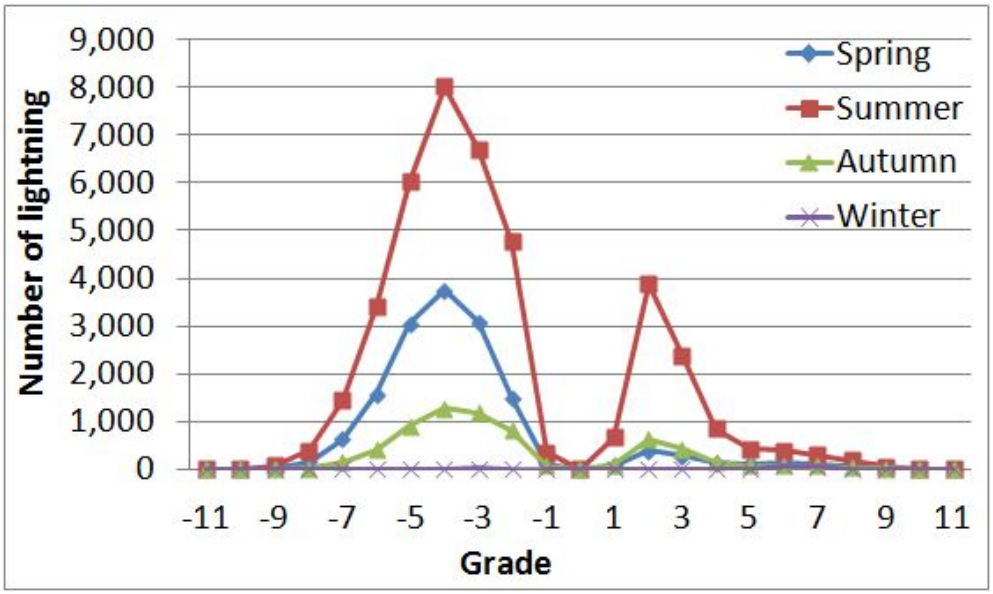


Fig. 28 The frequency of lightning grade by season on Gangwon

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

④ 지역별 계절별 발생분포 비교

Fig. 29는 제주도와 강원도 지역의 봄철에 발생되는 낙뢰 발생률을 비교한 것이다. 강원도 지역은 낙뢰비율의 전형적인 형태의 부극성이 높은 분포를 보이면서 -2 ~ -7 등급의 낙뢰가 1 ~ 6 % 차지하지만 낙뢰등급은 다소 낮은 편이다 반면 정극성의 낙뢰가 거의 발생하지 않고 있다. 제주의 경우는 정극성과 부극성 낙뢰 발생률이 비슷하지만 -7 ~ -3 등급의 부극성이 0.5 ~ 1%를 차지하면서 발생율은 다소 낮은 반면 낙뢰강도는 강원도보다 높은 경향을 보인다.

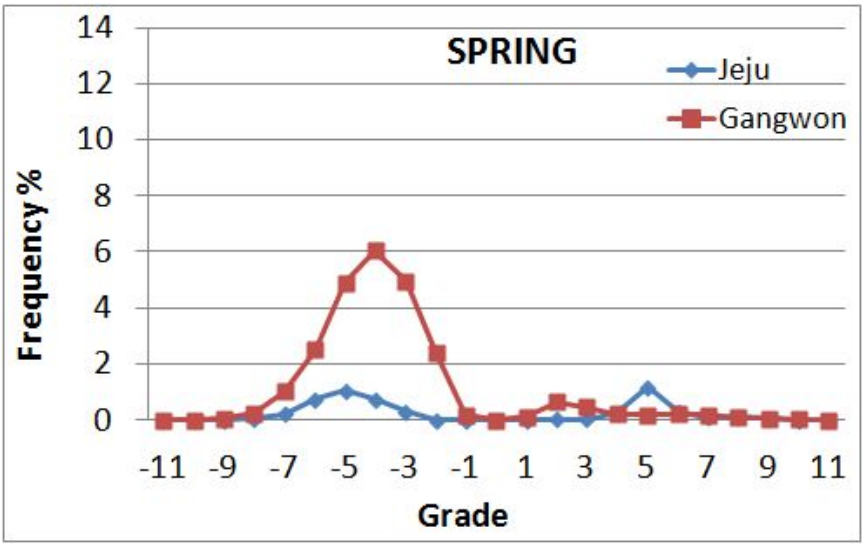


Fig. 29 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Spring

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

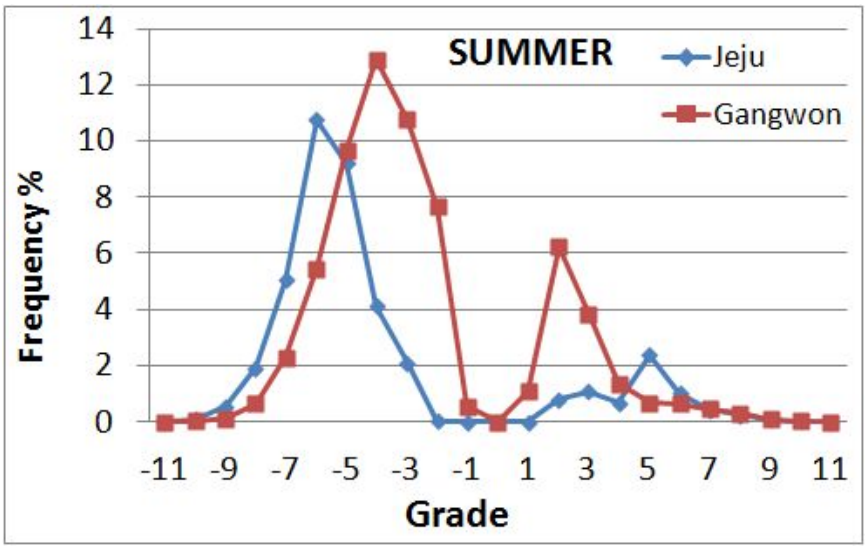


Fig. 30 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Summer

Fig. 30은 여름철의 낙뢰발생률을 비교한 것이다. 제주도 및 강원도 모두 부극성이 많은 분포를 보이고 있으며 강원도 직역에서 발생률 -7 ~ -2등급의 낙뢰가 2 ~ 13 %를 차지하여 낙뢰율이 높은 반면 낙뢰등급은 제주도보다 다소 낮다. 강원도는 정극성의 낙뢰도 다소 많으나 등급은 1 ~ 3등급으로 낮다. 제주도는 발생률은 -8 ~ -3 등급의 낙뢰가 2 ~ 10 %를 차지하여 강원도 보다는 다소 낮으나 낙뢰등급은 높게 나타난다.

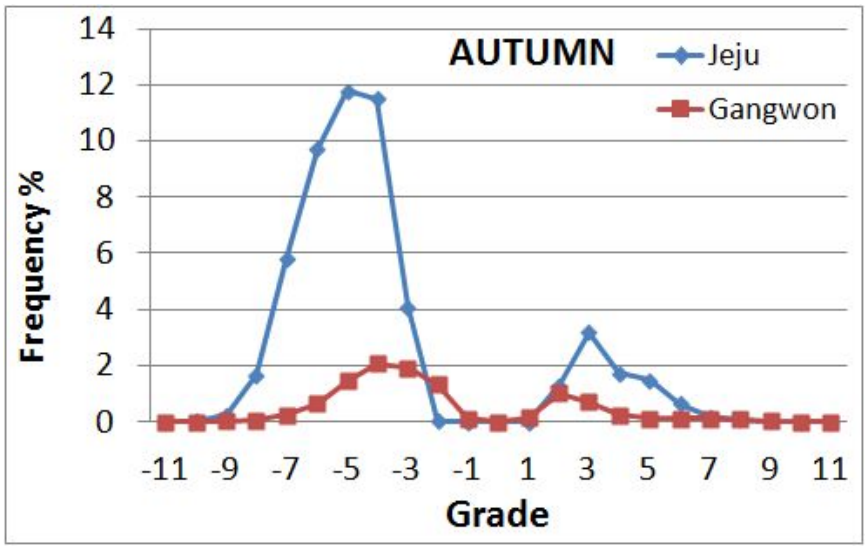


Fig. 31 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Autumn

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 31은 가을철에 낙뢰 발생률을 비교한 것이다. 제주도에서는 -3 ~ 8등급의 낙뢰가 2 ~ 12%정도의 낙뢰율을 보이면서 전체적으로 많은 분포를 보이면서 낙뢰강도도 높게 나타나고 있다. 더불어 정극성의 낙뢰도 2 ~ 8등급에서 2 ~ 3% 정도의 발생률을 보이고 있다 반면 강원도 지역에서는 -2 ~ -6등급에서 2% 이하의 낙뢰율을 차지하는 등 전반적으로 낮은 분포를 보이고 있다.

Fig. 32에서는 겨울철의 낙뢰 발생률이 다른 계절에 비해 1/100로 적어서 그래프의 스케일을 100배 크게 하여 비교하였다. 제주도에서와 강원도에서 동일하게 0.14% 이하로 아주 낮은 분포를 보이며 제주도에서의 낙뢰발생률은 -3 ~ -9등급의 부극성의 낙뢰가 약 0.02 ~ 0.14%의 낮은 분포를 차지하나 낙뢰등급은 높게 나타난다. 더불어 정극성에서의 낙뢰에서도 3 ~ 10등급의 낙뢰가 0.03 ~ 0.06 %로 발생률은 낮으나 낙뢰강도가 높게 나타나고 있다. 강원도의 경우는 내륙지방의 전형적인 특징처럼 정극성 비율이 부극성비율보다 높고 강도도 6등급과 7등급으로 다소 높은 편이다.

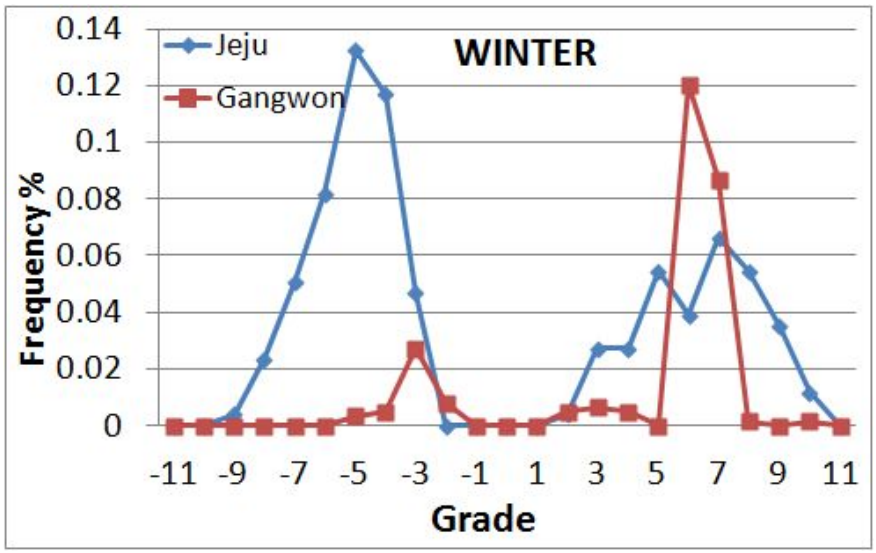


Fig. 32 Evaluation of lightning frequency and grade on Jeju and Gangwon in Winter

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2) 낙뢰 지도

Fig. 33은 제주도 지역별 낙뢰 횟수를 나타낸다. 제주도 서쪽에서부터 동쪽으로 갈수록 낙뢰 횟수가 점차 많아지는 것을 알 수 있다. 특히 제주도 동쪽 육, 해상에서는 낙뢰 횟수가 급격히 증가하고 있다. 성산 풍력발전단지 부근 내륙과 제주도 동쪽 끝 해안에서 낙뢰 횟수가 900회 이상 매우 높은 반면 제주 서부지역에서는 300회 미만으로 낙뢰 횟수가 아주 적다 것을 알 수 있다.

제주도 남북으로는 같은 낙뢰횟수를 보이고 있는 반면 동, 서 방향으로 낙뢰 빈도수가 많은 차이를 보이고 있다.

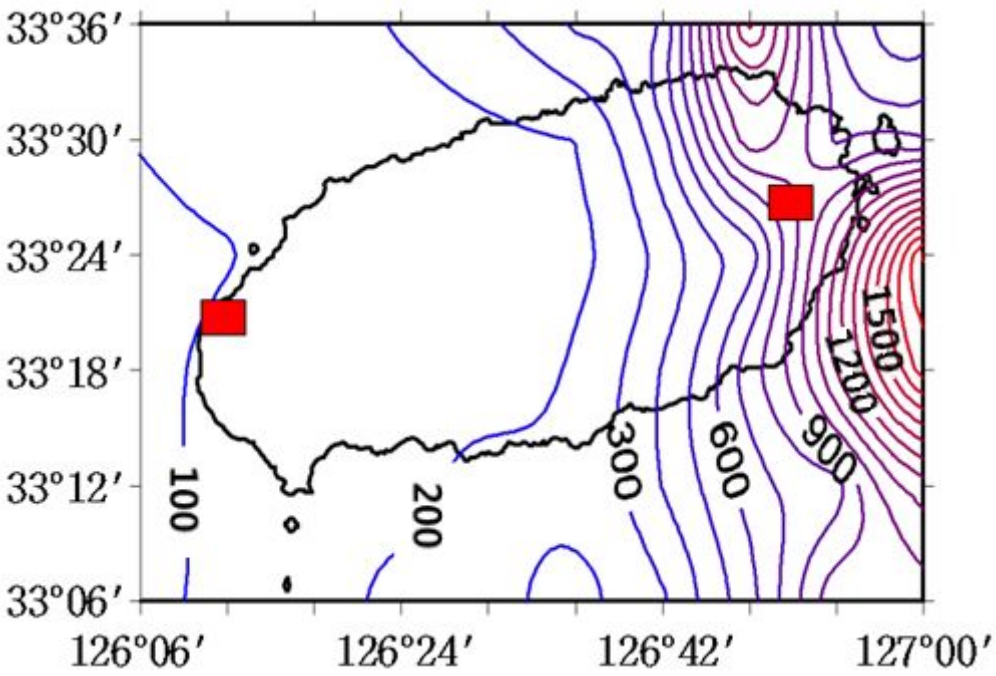


Fig. 33 Distribution of lightning frequency on Jeju and around

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 34는 제주도 지역별 낙뢰 일수 분포를 나타낸다. 낙뢰 일수 분포 또한 횟수 분포와 더불어 제주도 동쪽으로 갈수록 점차 많아지는 것을 알 수 있다. 그러나 낙뢰 횟수와는 다르게 제주도 북동쪽 끝에서 낙뢰 일수가 높다는 것을 알 수 있다. 낙뢰 일수로만 본다면 동쪽과 서쪽 지역의 차이가 연구기간인 3년 9개월간 동안 동부지역에는 82일 이상의 낙뢰가 발생하였고 서부지역에는 42일 이하의 낙뢰가 발생하였다. 낙뢰일수도 남북으로는 비슷한 분포를 보이지만 동서로 많은 차이를 보이고 있다.

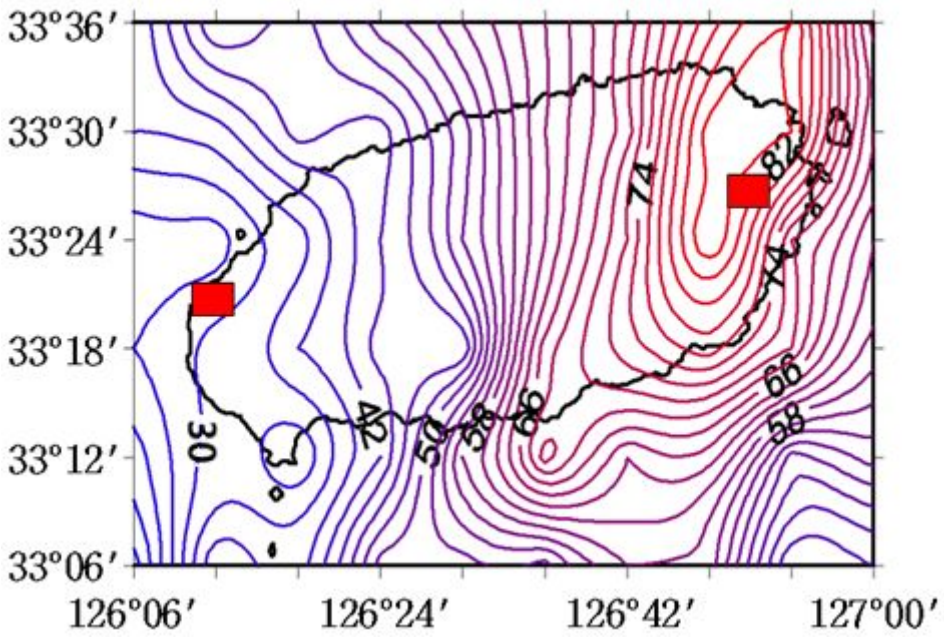


Fig. 34 Distribution of the number of lightning days on Jeju and around

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 35는 ±8이상의 강도를 가진 낙뢰의 분포를 나타내었다. 연구대상 기간 동안 정극성 낙뢰 4,561회, 부극성 낙뢰 21,106회의 낙뢰 발생이 분포되어 있다. 낙뢰횟수 및 낙뢰일수 분포와 마찬가지로 제주도 동부에 부극성 낙뢰가 집중되어 있음을 알 수 있으나 정극성의 낙뢰의 경우는 제주도 전반적으로 고르게 분포되고 있다. 반면 높은 등급의 부극성 낙뢰는 제주도 전반적으로 고르게 분포되어 있다. 한경풍력발전단지가 위치하고 있는 일대에는 +9와 -9등의 낙뢰가 드물게 발생한 기록이 있으며 성산풍력발전단지가 위치한 지역에서는 -8등급 이하의 낙뢰가 아주 많이 발생하였다.

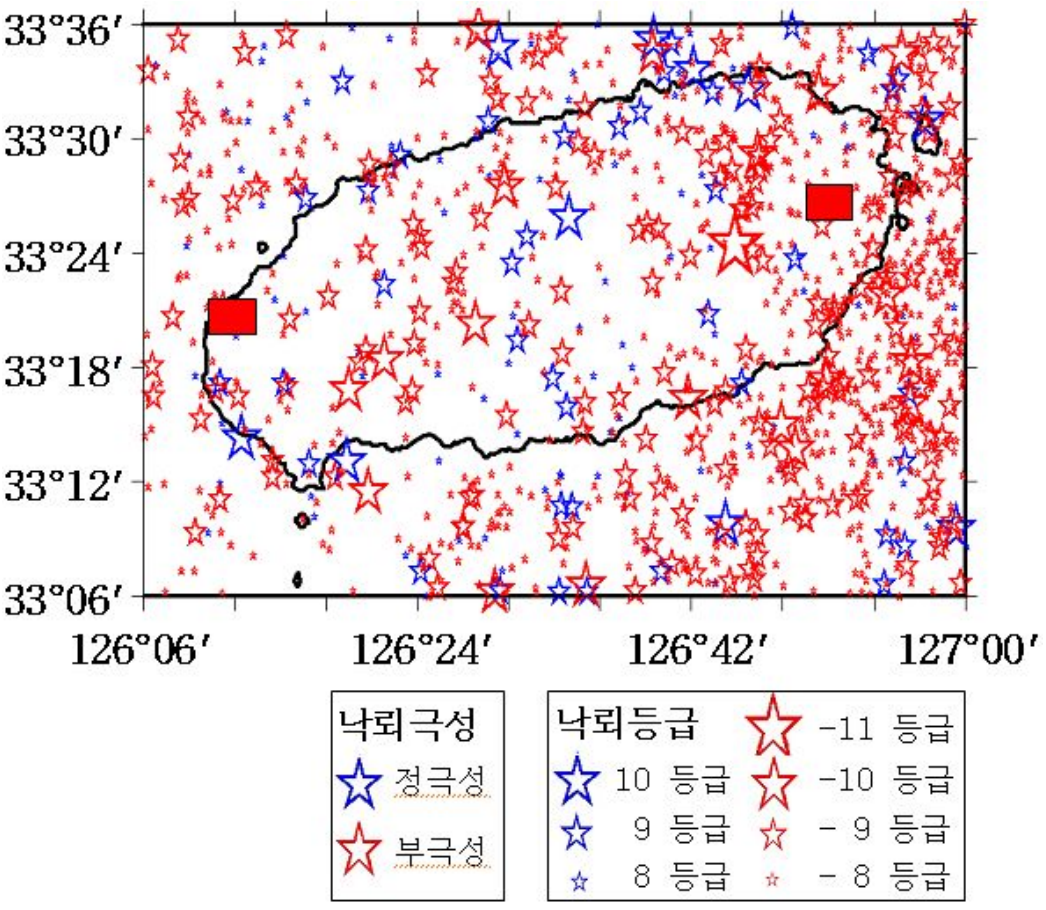


Fig. 35 Distribution of the lightning grade ±8 or more on Jeju and around

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 36은 강원도 지역의 낙뢰 횟수 분포를 나타낸다. 제주도에서의 낙뢰회수 형태와는 반대로 강원도 동쪽에서부터 서쪽으로 갈수록 낙뢰 횟수가 점차 많아지는 것을 알 수 있다. 특히 강원도 서쪽 내륙의 산악지역에서는 낙뢰 횟수가 높게 분포하며 태기산풍력발전단지가 위치해 있는 지역에는 약 1000회가 발생하여 강하게 분포하고 있으며 강원풍력발전단지가 있는 지역에서는 약 450회 정도 낙뢰가 발생되었으며 태백 및 창죽풍력발전단지 지역에는 400회 미만의 낙뢰가 분포하고 있음을 알 수 있다.

강원도의 경우도 남북으로는 유사한 낙뢰 분포를 보이며 동서간의 낙뢰 차가 발생되고 있는 형태이다. 태백산맥이 동해안과 나란하게 남북으로 형성되어 있기 때문에 동서간의 기후차이로 나타나는 현상으로 판단된다.

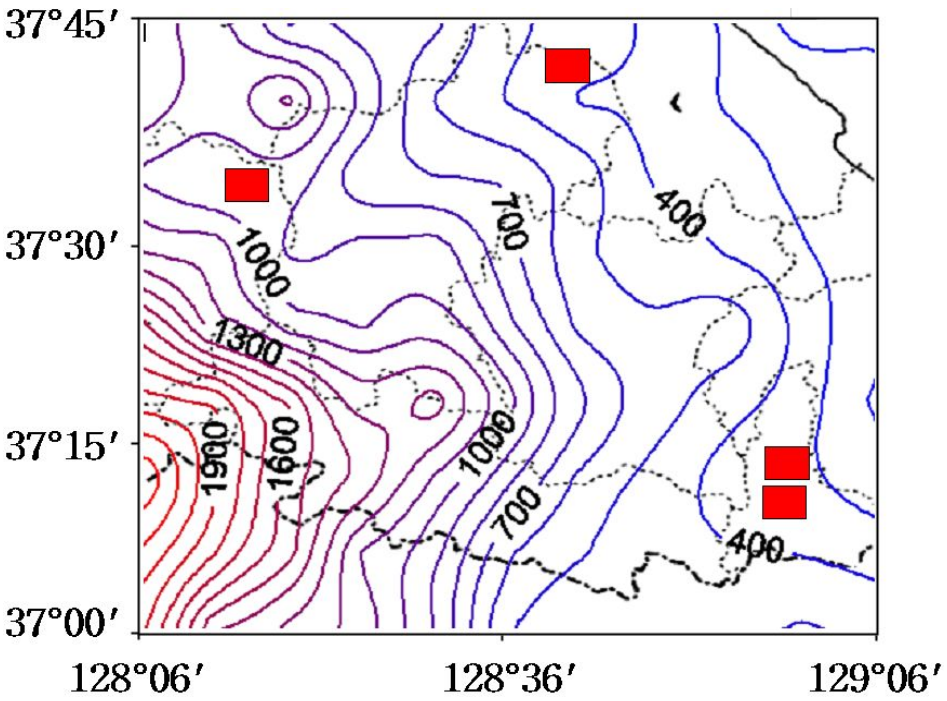


Fig. 36 Distribution of lightning frequency on Gangwon

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 37은 강원도 지역별 낙뢰 일수 분포를 나타낸다. 낙뢰 일수 또한 낙뢰횟수 분포도와 같이 서쪽으로 갈수록 점차 많아지는 것을 알 수 있다. 태백산맥을 기준으로 해안가와 내륙지역간의 발생일수가 많이 차이 남을 알 수 있다. 태기산 풍력발전단지가 위치한 지역에서는 90일 정도의 낙뢰 발생일수를 기록하였으며 강원풍력발전단지가 위치한 지역에서는 60일 정도 낙뢰가 발생하였고 태백 및 창죽 풍력발전단지가 위치한 지역에서도 약 60일 정도의 낙뢰가 발생하였다.

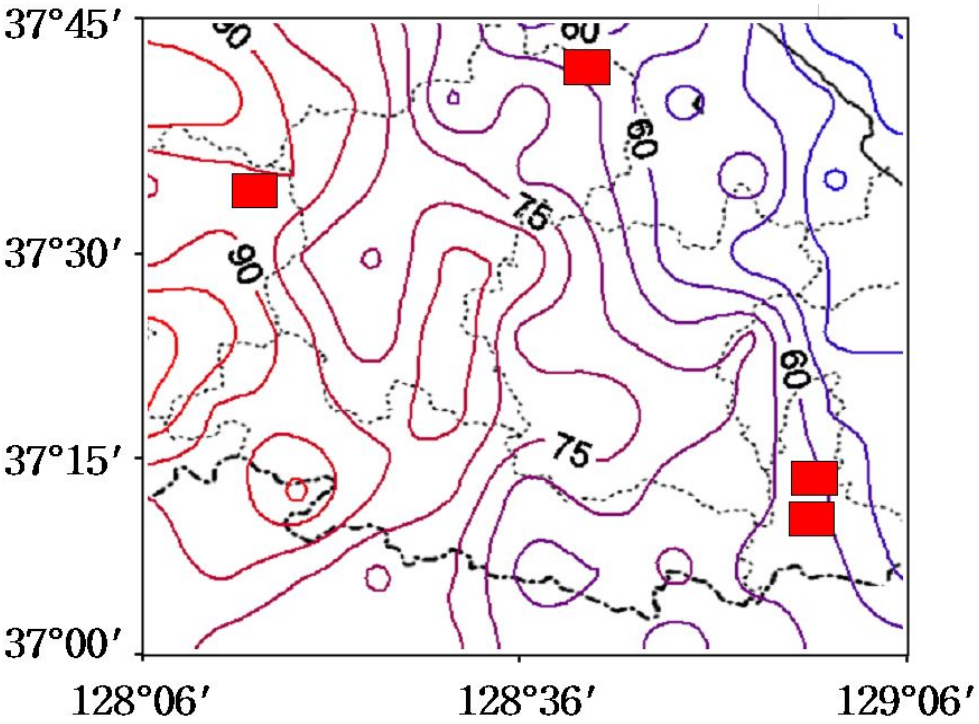


Fig. 37 Distribution of the number of lightning days on Gangwon

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 38은 ±8이상의 강도를 가진 낙뢰의 분포를 나타내었다. 연구대상 기간 동안 정극성 낙뢰 11,755회, 부극성 낙뢰 54,404회의 낙뢰 발생이 분포되어 있다. 강원도 서부에 정극성 및 부극성 낙뢰가 집중되어 있으며 부극성의 경우 낙뢰등급이 높은 낙뢰는 그림의 북서쪽 부근에 집중되어 있는 형태이며 정극성의 경우는 낙뢰등급이 높은 낙뢰가 동서로 고르게 분포되고 있다. 태기산풍력발전단지가 위치한 곳에 +9 및 -9등급의 낙뢰가 많이 발생하였고 +10등급의 낙뢰도 발생하였었다. 강원 풍력발전단지 주변에 +9 및 -9등급이 다소 발생하였으며 태백 및 창죽 풍력발전단지의 경우는 +8 및 -8의 낙뢰가 다수 발생하였었다.

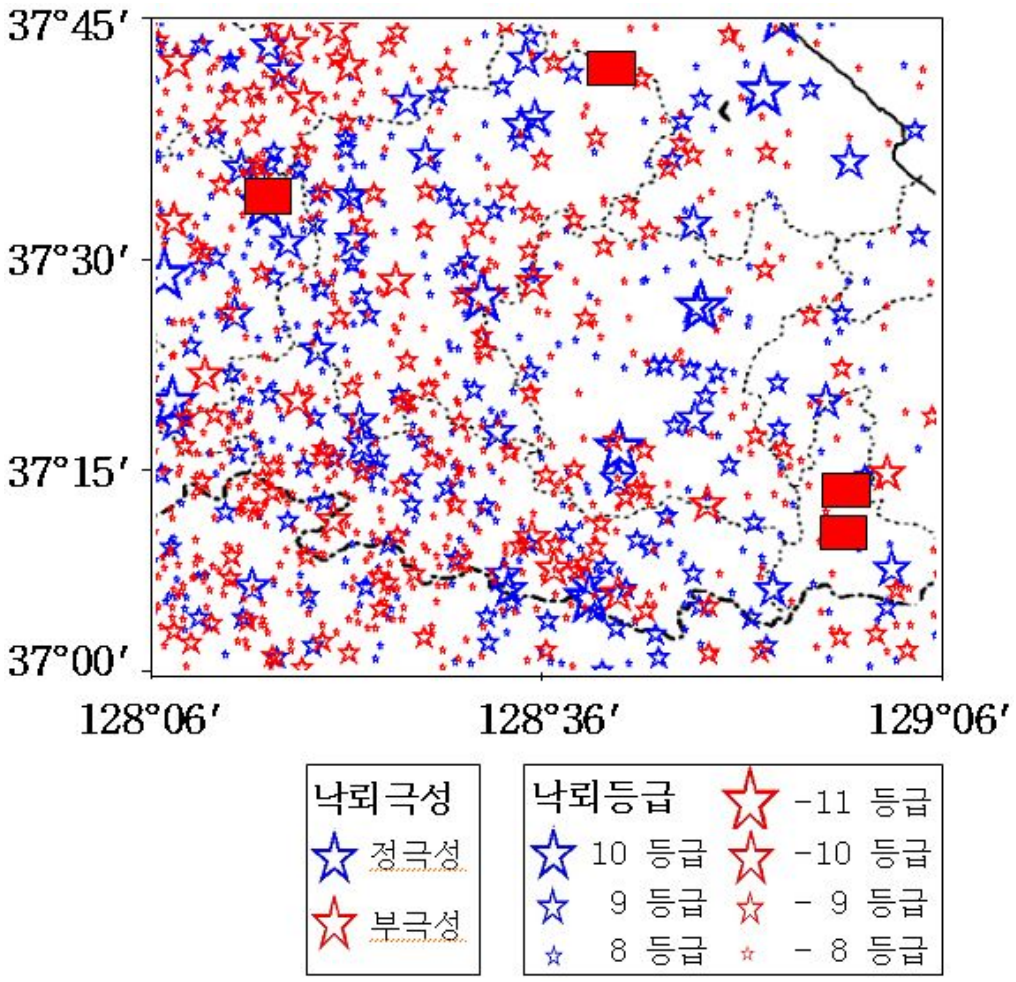


Fig. 38 Distribution of the lightning grade ±8 or more on Gangwon

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 제주도와 강원도의 풍력단지별 낙뢰율 비교

Table 14 Evaluation of Yearly lightning frequency on Jeju

	2010	2011	2012	up to 2013. 9
Lightning Frequency	4,030	13,880	3,875	3,881
Lightning Rate (flashes/㎢/year)	0.72	2.49	0.70	1.67
Average of Lightning Rate	1.39			

Table 14는 제주도 지역의 연간 낙뢰율 변화를 비교 하였으며 보는 바와 같이 제주지역의 낙뢰율은 0.7 ~ 2.49 범위이며 특이하게 2011년에는 다른 년도에 비해서 약 4배의 낙뢰가 발생하였으며 낙뢰율은 2.49를 기록하고 있다

Table 15 Evaluation of Yearly lightning frequency on Gangwon

	2010	2011	2012	up to 2013. 9
Lightning Frequency	14,890	20,630	9,789	16,960
Lightning Rate (flashes/㎢/year)	2.03	2.81	1.33	2.31
Average of Lightning Rate	2.12			

Table 15는 강원도 지역의 연간 낙뢰율 변화 상태를 비교하였으며 대체적으로 1.33 ~ 2.81의 연간 낙뢰율이므로 제주에 비해서 높은 낙뢰율을 나타내고 있으며 제주지역과 마찬가지로 2011년에 2.81의 높은 빈도의 낙뢰가 발생하였다. 평균적으로 강원도가 제주에 비해 낙뢰율 평균이 1.52배 높다

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 16 The evaluation of lightning rate by wind farm over Jeju and Gangwon

Wind Farm		Jeju		Gangwon			
		Hankyung	Sungsan	Taebaek	Changjuk	Taegisan	Gangwon
낙뢰횟수	2010년	0	6	4	3	51	34
	2011년	0	7	1	2	42	44
	2012년	2	2	2	4	25	67
	2013년 9월까지	1	7	1	9	36	19
	합계	3	22	8	18	154	164
낙뢰일수	2010년	0	4	1	3	25	31
	2011년	0	3	1	2	27	35
	2012년	2	2	2	4	22	47
	2013년 9월까지	1	3	1	9	23	19
	합계	3	12	5	18	97	132
정극성	횟수	0	3	0	1	23	10
	평균낙뢰 강도(kA)	-	6.38	-	1.3	9.65	10.09
부극성	횟수	3	19	10	17	120	158
	평균낙뢰 강도(kA)	-23.97	-15.96	-11.2	-10.3	-9.79	-10.33
최다 낙뢰등급		-6	-4	-5	-4	-4	-4
최다낙뢰 발생월		7	9	9	6	7	4
낙뢰율 계산 면적 (㎢)		2.73	2.83	1.99	5.91	7.73	35.1
낙뢰율 평가 * (flashes/㎢/year)		0.28	1.96	1.01	0.77	5.00	1.17
평가결과		Good	Good	Good	Good	Good	Good

* Table 16에 정리된 2013년의 낙뢰횟수 및 낙뢰일수는 9월까지만 자료가 취득되었으므로 1년에 모자란 나머지 3개월간의 낙뢰횟수는 이전 3년간의 제주 및 강원도 지역의 3개월간의 낙뢰발생 비율 평균으로 보상하여 전체 낙뢰율을 계산하였다. 1년 중 10, 11, 12월의 낙뢰발생 비율은 이전 3년 평균은 제주지역이 2%이고, 강원도지역은 1.5%였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 16은 제주도와 강원도 지역에서 현재 운영 중인 6개의 풍력발전단지에 발생한 낙뢰 현황을 조사하여 정리한 것이다.

낙뢰발생건수를 비교할 때 강원 풍력발전단지가 164건, 태기산 풍력발전단지는 154건으로 가장 많고 성산 풍력발전단지가 22건, 창죽 풍력발전단지는 18건이며 태백풍력단지는 8건과 한경 풍력발전단지는 3건순으로 낙뢰횟수가 발생하였다. 하지만 각 발전단지마다 발전기 설치 대수에 따른 면적이 다르기 때문에 단위 면적당의 년 평균 낙뢰 발생률로 낙뢰율을 평가할 필요가 있는 것이다.

낙뢰발생일수를 분석한 결과 강원 풍력발전단지에는 132일로 년 33일씩 낙뢰가 발생한 것으로서 빈도가 높다고 볼 수 있다. 태기산 풍력발전단지에는 97일로서 연평균 24일 낙뢰가 발생하였다. 창죽 풍력발전단지에는 18일로서 년 4.5일 낙뢰가 발생하였고 성산 풍력발전단지에는 년 3일, 태백 풍력발전단지와 한경 풍력발전단지에는 년 1일씩 낙뢰가 발생한 것을 알 수 있다.

낙뢰 극성을 비교한 결과 정극성의 낙뢰가 11%정도 차지하고 부극성의 낙뢰가 89%정도 차지하고 있다.

낙뢰 강도는 한경 풍력발전단지에서 평균 -23.97 kA의 낙뢰가 발생하여 가장 높고 다음으로는 성산 풍력발전단지에서 평균 -15.96 kA의 낙뢰가 발생하였다. 강원도 지역에 위치한 4개의 풍력발전단지에서는 부극성의 경우 평균 -10 kA의 낙뢰가 발생되었고 정극성 낙뢰의 경우는 평균 +10 kA 이하이다.

낙뢰 횟수와 낙뢰강도를 비교하여 봤을 때 강원도 지역의 풍력발전단지에서 낙뢰횟수가 많은 반면 제주도 지역의 풍력발전단지에서는 낙뢰 강도가 높게 나타나고 있다.

낙뢰 발생월은 제주도와 강원도 지역에서 낙뢰 발생월 평가에서와 같이 제주도의 풍력발전단지의 경우에는 가을에 많이 발생되고 있고 강원도 지역의 풍력발전단지에는 봄에서 여름사이에 고르게 발생되고 있다.

낙뢰율(Lightning rate) 평가는 풍력단지설계 S/W인 WindPRO에서 평가하는 방식에 의거하여 구하였다. 즉, 1년간 1㎢의 범위에 발생하는 낙뢰의 수를 파악하여 그 값이 20을 초과하면 Critical, 10~20인 경우 Caution, 10보다 작으면 Good으로 평가하는 방식이다.[31] 따라서 위 6개의 풍력발전단지의 낙뢰율 평가 결과 모두 Good 으로 평가할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주도 지역에 위치한 한경풍력 및 성산풍력발전단지의 낙뢰율 평가한 결과는 Fig. 34에서 낙뢰일수 분포 분석에서 확인된 바와 같이 제주도 동쪽지역에서 낙뢰가 많이 발생하였는데 그 지역에 위치한 성산풍력에서의 낙뢰율 평가가 1.96으로서 낙뢰발생 횟수가 적은 제주도의 서쪽 편에 위치한 한경풍력단지의 낙뢰율 평가 0.27보다 높게 나온다.

강원도 지역에 위치한 4개의 풍력발전단지의 낙뢰율 평가를 분석한 결과는 태백과 창죽 풍력발전단지에서는 1.01과 0.77로 나타났으며 강원풍력발전단지는 1.77의 낙뢰율 평가가 나오고 있다. 낙뢰횟수로는 강원풍력발전단지가 태기산풍력발전단지 보다 높다고 볼 수 있으나 강원 풍력발전단지의 면적이 태기산 풍력발전단지 면적보다 5배가 넓기 때문에 낮게 나타나고 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3. 제주도와 강원도의 낙뢰로 인한 풍력발전기 피해 기록

Table 17 Status of lightning damage by wind farm

	Jeju		Gangwon			
	Hankyung	Sungsan	Taebaek	Changjuk	Taegisan	Gangwon
운전개시	1차:'04.2 2차:'07.12	1차:'09.3 2차:'10.9	'12. 5	'12. 12	'08년 11월	1차:'05.12 2차:'06. 9
용량	1.5MWx4기 3 MWx5기	2 MW x 10기	2 MW x 9기	2 MW x 7기	2 MW x 20기	2 MWx14기 2 MWx35기
낙뢰 피해 건수	없음	없음	1	3	7	1
낙뢰 피해 발견 일자	-	-	①'12.5.17 ②'13.7.15	①'12. 5. 30 ②'13. 7. 1 ③'13. 7. 15	①'10. 8. 17 ②'11. 5. 2 ③'12. 10. 16 ④'13. 10. 3 ⑤'13. 10. 13 ⑥'13. 10. 10	① '12. 6. 4
낙뢰피해 상황	-	-	① #1주변압기 저압 부싱 소손 ② #8 PLC DI/AIO 모듈손상	① #8 CC100 PNL SPD용 Fuse용단 및 Converter손상 ② #4,5 용접지점 하우징 손상 및 Hub 손상, #7PLC CPU손상 ③ #4,5통신 Hub, PLC CPU Module, 보호계전기통신 모듈고장	① #8 Blade손상 ② #20 Blade손상 ③ #4 Blade 손상 ④ #9 Blade 손상 ⑤ #18 BladeA,B손상 ⑥ #17 BladeA,B손상	① #3 Blade C 손상
피해일자에 풍력단지에 발생한 낙뢰 횟수 및 강도	-	-	① 1회 -8.7 kA ② 1회 -4.4 kA	① 1회 - 6.2 kA ② 1회 - 23.6 kA ③ 3회 -18.4/-5.4/-6.9 kA	① '10.8.2 1회 5 kA ② '11.4.30 27회 -17 kA ~ 5 kA ④⑤⑥ '13.9.13. 8회 -24 kA ~ -5 kA	① 5.31일 34회 -21.1 ~ -4.8kA

풍력발전설비는 풍황 조건이 양호한 지역에 설치되기 때문에 평지보다 높은 장소에 설치되는 경우가 많아 낙뢰의 위험에 노출되어 있다. 특히 대형 풍력발전기는 허브 높이가 60 m이상이고 블레이드 길이 40 m이상을 고려하며 100 m이상의 구조물이 되어 낙뢰 피해를 입을 가능성이 높다. 이 연구에서 선정한 제주도와 강원도에 위치한 풍력발전단지에서의 낙뢰로 인한 피해 상황을 Table 17에 나타내었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주지역의 2개 풍력발전단지에는 Vestas사의 NM72C 4기, V90 5기, V80 10기 총 41 MW의 풍력발전기가 2004년 및 2007, 2010년부터 운영되고 있으나 현재까지 낙뢰로 인한 발전기에 손상이 발생된 사례는 발견되지 않았다. 낙뢰율 평가시 한경과 성산 풍력발전단지의 낙뢰율이 아주 낮은 것으로 보아 직격뢰의 영향을 받은 적이 없다고 판단된다. 또한 간접뢰에 의한 영향도 발생되지 않은 것으로 보아 발전기 자체의 낙뢰 보호설비가 안전하게 구성된 것으로 판단된다.

강원도 지역의 풍력발전단지인 태기산 풍력발전단지에는 베스타스사 V80 20기 40 MW가 2008년 8월부터 가동되고 있으며 2010년부터의 낙뢰로 인한 피해기록을 수집한 결과 직격뢰로 인해 6회에 걸쳐 8개의 블레이드 손상이 발생하였다. 2010년 8월에 5 kA 규모의 낙뢰가 1회 발생하였는데 블레이드 1개가 손상을 입었으며, 2011년 4월 30일에 27회에 걸쳐 -17 kA ~ 5 kA 규모의 낙뢰로 인해 블레이드 1개가 손상되었고 2013년 9월 13일 8회에 걸쳐 -24 kA ~ -5 kA 규모의 낙뢰가 발생하여 3대의 발전기에 블레이드 4개가 손상된 사례가 조사되었다.

아래의 Fig. 39는 태기산 풍력발전단지의 풍력발전기 블레이드가 직격뢰로 인한 손상을 입은 사진이다.

Fig. 39 Blade Damage from direct lightning strike on Taegisan wind farm

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

아래의 Fig. 40은 강원풍력발전단지의 발전기가 직격뢰로 인한 피해를 입은 사진이다. 강원풍력 발전단지에는 Vestas사 V80 49기가 2005년 및 2006년 9월에 준공되어 운용되고 있으며 낙뢰로 인한 손상은 2012년 5월 31일에 -21.1 kA ~ -4.8 kA 규모의 낙뢰가 34회 발생하여 블레이드 1개를 손상시킨 사례가 있다.

태백 풍력발전단지는 현대중공업에서 제작한 HQ2000 2 MW 4기와 효성에서 제작한 HS90 2 MW 5기의 발전기로 구성되어 있다. 국산으로 구성된 태백과 창죽 풍력발전단지에서는 블레이드 손상이 없었던 반면 전기계통의 손상이 다발하고 있다. 2012년 5월 17일 8.7 kA 낙뢰가 1회 발생하여 #1 주변압기 저압부싱외 전력기기 및 전자기기의 소손을 입혔으며 2013년 7월 15일 -4.4 kA의 낙뢰가 1회 발생하여 #8호기 PLC DI/AIO 모듈 손상 등 전자기기 손상을 입힌 사례가 조사 되었다.

창죽 풍력발전단지에는 현대 HQ2000 2 MW 7기가 2012년 12월부터 운영되고 있으며 짧은 운영기간동안 3회의 낙뢰로 인한 고장이 발생되었다. SPD용 Fuse 용단 및 Converter가 손상 되었으며 Hub손상 및 PLC CPU손상, 통신Hub, PLC CPU Module 등 보호계전기 통신모듈 고장이 발생된 사례가 있었다.

Fig. 40 Blade Damage from direct lightning strike on Gangwon wind farm

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

아래의 Fig. 41은 태백풍력발전단지 및 창죽풍력발전단지에서 발생된 간접뢰에 의해 전자기기가 손상된 사진이다. 태백 풍력발전단지의 낙뢰보호 시스템을 검토한 결과 타워 하부에 변압기가 설치되어 있는 구조인데 1 차측(발전기)와 2차측(계통)에 서지보호기로 예상되는 장비가 설치되어 있지 않아 이로 인해 피뢰침 및 발전기 블레이드에 직격뢰 타격 시 피뢰 접지로 뇌격전류가 흐르게 된다. 이때 자장이 형성되어 케이블에 유도뢰가 유기될 시 판넬 내부의 장비들이 소손될 수 있는 구조였다.

유도뢰는 8/20 uS의 시간에 의해 유기되는 대전류로서 Fuse의 용단 시간 보다 빠른 에너지이기 때문에 Fuse가 용단되어 전원이 차단되더라도 이미 장비 측에 직접적인 타격을 입었다. 보조전원을 공급하기 위한 설비에 전압계 1차 측에 서지보호기가 용량이 부적적하여 고장이 발생할 가능성이 있는 것으로 평가 되었다. 풍력발전기의 SCADA Sever 및 통신 장비의 소손은 일반적인 뇌격 시 자장에 의해 소손 될 수 있음으로 발전기에 낙뢰가 떨어졌을 경우 통신, 제어 케이블에 유도되어 장비를 소손 시킬 수 있다.

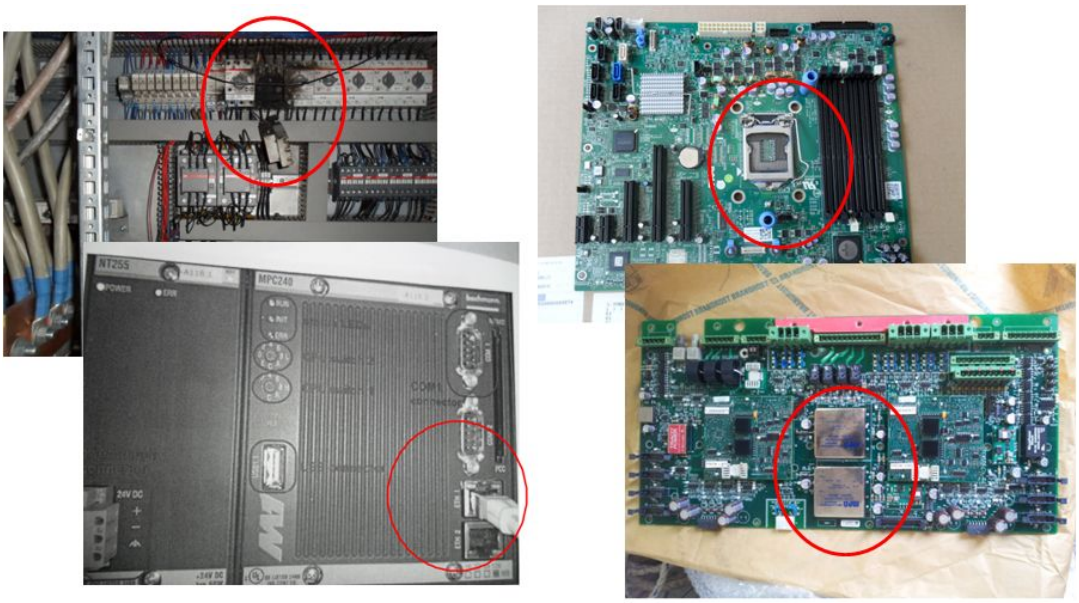


Fig. 41 Electronic Parts Damage from indirect lightning strike on Teabeak wind farm and Changjuk wind farm

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

태백과 창죽 풍력발전단지에서 유도뢰에 의한 손상의 경우에서 보듯이 지역별로 낙뢰의 규모가 다르기 때문에 일반적인 최대방전 전류 내량의 서지보호기를 사용하더라도 그 지역에 주로 발생되는 낙뢰의 세기에 대비하지 못할 경우 서지보호기 역할을 못할 수 있다.

피해 사례들을 종합해 보면 제주지역의 풍력발전기의 경우는 낙뢰율이 낮은 영향으로 발전기에 직접 손상을 입은 사례는 없으나 강원 산간지역의 낙뢰율이 높은 태기산 풍력발전단지에서는 직격뢰에 의해 블레이드가 손상되는 사례가 많이 발생하였다. 태백과 창죽 풍력발전단지는 낙뢰율이 낮아 직격뢰에 의한 블레이드 손상이 적은 반면 간접뢰의 영향으로 외부의 전력계통으로부터 침입하는 낙뢰서지에 의한 전기, 전자기기가 파손되는 경우가 발생하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅳ. 결 론

1. 제주도와 강원도 지역의 낙뢰특성 차이

1) 시간대별 낙뢰발생률 차이

제주도 지역에서는 새벽과 저녁시간대에는 낙뢰발생률이 낮은 반면 한낮과 한밤에 높게 나타났다. 그러나 강원도 지역에서는 새벽시간대와 저녁시간대에 높게 발생하였고 한낮과 한밤에는 발생률이 급격히 떨어지는 현상을 발견할 수 있었다. 제주도 지역과 강원도 지역에서 시간대별 낙뢰 발생비율이 정반대의 현상을 보여 주고 있다

2) 낙뢰등급 분포 차이

제주도와 강원도에서 전반적으로 부극성이 많은 분포를 보이나 제주 지역에서는 주로 -8 ~ -3등급 사이에서 가장 많은 낙뢰빈도를 보이며 -6등급의 낙뢰가 가장 많이 발생하였다. 강원도 지역에서는 주로 -6 ~ -2등급 사이에서 가장 많은 낙뢰빈도를 보이며 -4등급의 낙뢰가 가장 많이 발생하였고, 낙뢰 발생률은 제주에 비해서 높으나 강도는 낮았다.

3) 월별, 계절별 낙뢰 발생률 차이

강원도 지역에서는 4월부터 9월까지 비교적 고른 낙뢰발생 분포를 보이며 제주지역에서는 7, 8, 9월에 집중적으로 발생된다. 즉, 강원도는 봄철에 낙뢰 발생률이 제주보다 높고 제주도는 가을철에 낙뢰 발생률이 강원도보다 높다.

4) 제주도는 낙뢰발생이 동쪽지역에 많은 반면, 강원도는 서쪽지역에 많이 발생하였다.

낙뢰율을 분석한 결과 제주도의 서쪽에 위치한 한경 풍력발전단지에는 낙뢰 발생이 거의 없었으며 낙뢰로 인한 고장발생 건수도 없었다. 제주도의 동쪽에 위치한 성산풍력발전단지의 경우 한경풍력발전단지에 비해 낙뢰율이 다소 높으나 낙뢰로 인한 피해는 발생하지 않았다. 반면 강원도의 경우 동쪽에 위치한 태백, 창죽 풍력발전단지 및 강원풍력발전단지에 비해 서쪽에 위치한 태기산풍력발전단지에는 직격뢰에 의한 날개 손상이 많았음을 알 수 있었다

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 낙뢰율은 연구대상 6개의 풍력단지 모두 우수한 Good 이였다.

낙뢰발생건수를 비교할 때 강원 풍력발전단지가 164건, 태기산 풍력발전단지는 154건으로 가장 많고 성산 풍력발전단지가 22건, 창죽 풍력발전단지는 18건이며 태백풍력발전단지는 8건과 한경 풍력단지는 3건순으로 낙뢰횟수가 발생하였다. 하지만 각 발전단지마다 발전기 설치 기수에 따른 면적이 다르기 때문에 단위 면적당 년 평균 낙뢰 발생률로 낙뢰율을 평가한 결과는 제주도의 한경풍력발전단지가 가장 낮은 낙뢰율을 보인 반면, 강원도의 태기산풍력발전단지가 가장 높은 낙뢰율을 보였다.

3. 제주도 풍력발전단지에서는 낙뢰피해가 없었으나 강원도 풍력발전단지에서는 약간 발생하였다. 낙뢰율이 가장 높은 태기산풍력 발전단지에서는 직격뢰에 의한 손상이 있었던 반면 낙뢰율이 낮은 태백, 창죽 풍력발전단지의 경우는 유도뢰에 의한 서지(Surge)의 영향으로 전자기기의 손상이 많았음을 알 수 있었다. 제주도가 강원도에 비해 낙뢰율이 조금 낮지만 낙뢰피해로부터 안전한 지역이라고 할 수는 없으며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

참고문헌

[1] C. Dodd, T. McCalla, and J. G. Smith : "How to protect a wind turbine from lightning", Nat. Aeronautics Space Admin., pp.2 1983.

[2] B. McNiff : "Wind Turbine Lightning Protection Project 1999-2001", National Renewable Energy Laboratory, pp.12 2002.

[3] M. Durstewitz, C. Ensslin, M. Hoppe-Kilpper, and K. Rohrig : "External conditions for wind turbine operation—esults from the German "250 MWwind programme"." presented at the Eur. UnionWind Energy Conf., pp.2 May 1996.

[4] Bruce Glushakow, Member, IEEE : "Effective Lightning Protection For Wind Turbine Generators", King Mongkuts Institure of thechnology Thornburi, pp.1-2 2008.

[5] Wind Cluster.com : "Surge Protection for Wind Turbine System", Wind Cluster Creating Synergy, pp.2-3 2010.

[6] Ebrahim A. Badran, Noharmmad E. M. Rizk, and Mansour H Abdel-Rahma : "Analysis and Suppressin of Back- flow Lightning Surge in Onshore Wind Farm", Journal of Lightning Research pp.1-2, 2011.

[7] Nakao tooru : "Phenomenon of failures and accidents in wind power plant" pp.6, 2011.

[8] Troelss S. Sorensen : "The Update of IEC 61400-24 Lightning Protection of Wind Turbine", 29th International Conference on Lightning Protection, pp.5 2008.

[9] Eunshin Byon, Member, IEEE, Yu Ding, Member, IEEE : "Optimal Maintenance Strategies for Wind Turbine Systems Under Stochastic Weather Conditions", IEEE Transations on Reliablility, pp.4~6 2010.

[10] Yasuda Yoh : "A New Lightning Protection System for Wind Turbines Using Two Ring-Shaped Electrodes", Institute of Electrical Engineers of Japan, pp.2 2006.

[11] Ko Kyung-Nam, Kim Kyoung-Bo, Huh Jong-Chul : "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, 2008.

[12] Dr. Dieter R. Poelman : "On the Science of Lightning", Royal Meteorological Institute of Belgium, pp.4~7 2010.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

[13] Pape Mormar Lo : "A simplified model for lightning exposure of wind turbines", McGill University, pp.25 2008.
[14] IEC 61400-24 (2010) Wind Turbine - Part 24: Lightning Protection, IEC, pp.33 2002.
[15] V.A. Rakov, University of Florida : "Lightning Phenomenology and Parameters Important for Lightning Protection", Ⅳ International Symposium on Lightning Protection, pp.1~2 November 2007.
[16] 강성만 : "풍력발전시스템의 낙뢰 피해와 피뢰대책 기술", 전기설비, pp .72-79 2012.
[17] Kostas Samaras, Chet Sandberg, Chris J. Salmas and Andreas : "Electrical Surge-Protection Devices for Industrial Facilities-Atutoral Review", IEEE Transanctions on Industry Applications, Vol. 43, No1, January/February 2007, pp.2~3 2007.
[18] B. McNiff " "Wind Turbine Lightning Protection Project 1999-2001", National Renewable Energy Laboratory, p.28-37 2002.
[19] K. Nakada,T. Wakai, H. Taniguchi, T. Kawabata, S. Yokoyama, T. Yokota, A. Asakawa : “"Distribution arrester failures caused by lightning current flowing from customer's structure into distribution lines”", IEEE Transactions on Power Delivery, 14, 4, pp.1527-1532, Oct. 1999.
[20] Vladimir A. Rakov : "Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection Rakov", Journal of Lightning Research, 2012, Volume 4, pp.7 2012.
[21] Kostas Samaras, Chris J.Salmas : "Electrical Surge-Protection Devices for Industrial Facilities", IEEE Transanctions on Industry Applications, Vol. 43, No1, January/February 2007, pp.6~8 2007.
[22] Wind Turbine Safety, http://www.windbite.co.uk/safety.html
[23] IEC 62305-1 Protection against lightning - part1 : General Principles, International Electrotechnical Commission, pp.32 2010.
[24] 현대중공업 Green Energy Devision, "낙뢰보호사양서", pp.2~8 2013.
[25] Vestas System AS, "Lightning Protection V80-2 MW", Vestas, pp.4~33 2006.
[26] Honam Center for Information on Servere Weather, http://hcis.kma.go.kr/hcis2011/
[27] TAO Lu : "Site Error Estimation and Correction for MDF/TOA combined lightning location network", 2012 International conference on Lightning Protection, pp.652 2012.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

감사의 글

산업대학원 풍력공학과 과정을 2년 반 동안 5학기에 걸쳐 마치게 됨을 영광스럽게 여기며 그동안 도움을 주신 분들게 감사드립니다. 제일 먼저 이런 영광스런 교육과정을 마칠 수 있게 기회를 주신 저의 회사 남부발전(주)에 감사드리며 더불어 제주대학 풍력특성화 과정에 대해서도 감사드립니다. 직장을 다니면서 학업을 병행한다는 것은 본인의 의지가 있어야 하겠지만 주변의 도움의 없었다면 쉽지 않은 과정이었을 것입니다.

풍력특성화과정의 고경남 교수님의 논문지도와 방향 설정이 있었기에 본 논문을 무사히 마칠게 되었습니다. 논문작성 경험이 없는 저에게는 교수님의 지도가 큰 도움이 되었고 의지가 되었으며 용기를 가질 수 있는 계기가 되었습니다. 더불어 일반 대학원 학생들에게도 감사드립니다. 학습을 같이 하는 동안에 학생들이 열심히 연구하는 모습에 감동을 받았으며 부끄럽지 않은 나 자신이 되고자 하는 의지를 세울 수 있었습니다. 특히 한지훈군의 도움으로 낙뢰지도를 작성할 수 있어 논문의 질을 높일 수 있었습니다. 회사 직원들에게도 감사를 드립니다.

업무에 지장이 없게 학업 및 논문작성을 하고자 하였으나 본의 아니게 피해를 끼쳤을 수 도 있었는데 불편함을 감수해주신 것에 대해 감사드리고 같이 학업을 수행한 동료들에게도 감사드립니다. 태기산풍력발전소 및 강원풍력발전소에서 적극 지원해준 덕에 수월하게 낙뢰 피해에 대한 자료를 수집할 수 있었으며 국내 풍력산업의 발전을 위해 상호 협력할 수 있는 계기였으면 합니다.

산업대학원 특성상 야간 수업을 들어야 하는 관계로 가정에 소홀할 수밖에 없었던 점 가족들에게 미안하면서도 고맙게 생각하면 평생 동안 간직하려 합니다. 풍력특성화 과정 산업대학원생중 최초로 논문 제출을 마치고 졸업을 할 수 있게 된 점에 대해서도 개인적으로 영광이고 보람이라 생각하면서 옆에서 도와주신 많은 분들께 일일이 감사드리지 못함을 송구스럽게 생각하며 더욱더 발전하고 사회에 보탬이 되는 일원이 되고자 노력하겠습니다.

감사합니다.

2013. 12

양 달 승

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY