



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](#)

碩士學位論文

風力發電機의 落雷被害 對策 檢討 및  
2003-2012年の 濟州地域 風力團地의  
落雷 評價



濟州大學校 大學院

風力工學部  
風力機械시스템專攻

韓 知 勳

2015年 2月

風力發電機의  
落雷被害  
對策  
檢討  
및  
2003-2012年の  
濟州地域  
風力團地の  
落雷  
評價  
韓  
知  
勳  
2015



# 風力發電機의 落雷被害 對策 檢討 및 2003-2012年の 濟州地域 風力團地의 落雷 評價

指導教授 許 鐘 哲

韓 知 勳

이 論文을 風力工學部 碩士學位 論文으로 提出함



韓知勳의 風力工學部 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

이 병길

委 員

員

고 경남

委 員

員

최 김현



濟州大學校 大學院

2015 年 2月



A Review of Lightning Protection Methods for Wind  
Turbines and Evaluation of Lightning Damage to  
Wind Farms of Jeju Island for 2003-2012

Ji-Hoon Han  
(Supervised by professor Jong-Chul Huh)

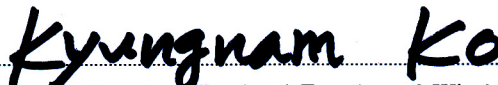
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the  
degree of Master of Science

2015. 2.

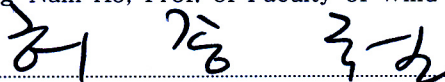
This thesis has been examined and approved.

  
.....

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

  
.....

Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

  
.....

Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. of Mechanical Engineering

.....  
Date

Major of Wind Power Mechanical System Engineering  
Faculty of Wind Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES	-----	ii
LIST OF TABLES	-----	iv
SUMMARY	-----	1
I. 서론	-----	2
1. 연구배경	-----	2
2. 연구 목적	-----	5
II. 국내·외 풍력발전기에 대한 낙뢰 연구동향 및 적용방안	-----	7
1. 연구동향	-----	8
1) IEC	-----	8
2) 유럽	-----	9
3) 미국	-----	12
4) 일본	-----	15
5) 우리나라	-----	19
2. 적용방안	-----	20
III. 제주도의 낙뢰 특성 및 풍력단지의 낙뢰율	-----	22
1. 낙뢰자료 수집 및 연구 방법	-----	22
1) 낙뢰자료 수집	-----	22
2) 분석 범위 및 S/W	-----	25
2. 제주도의 낙뢰 특성	-----	30
1) 낙뢰 특성	-----	30
2) 낙뢰 지도	-----	36
3) 제주도내 풍력단지의 낙뢰율	-----	38
IV. 풍력발전기에서의 낙뢰 측정	-----	46
1. 낙뢰카운터 설치	-----	46
2. 결과 분석	-----	49
V. 결론	-----	54
참고문헌	-----	56
부록	-----	63



# LIST OF FIGURES

- Fig. 1 Rate of lightning strike to tower.
- Fig. 2 Occurrence of thundercloud and lightning.
- Fig. 3 Would wide lightning strikes.
- Fig. 4 Effect of lightning strike.
- Fig. 5 Single-point ground system.
- Fig. 6 Rolling Sphere Model.
- Fig. 7 Model of electric field by FEM.
- Fig. 8 EMTP-RV circuit with Surge Protect Device.
- Fig. 9 Result of RSM simulation with LPS 2008 for level of protection.
- Fig. 10 Distribution of lightning density in the US.
- Fig. 11 Field test sensors.
- Fig. 12 stationary and rotating wind turbines beneath a thundercloud.
- Fig. 13 Cases of lightning damage.
- Fig. 14 Lightning damages during 2008~2011 in Japan.
- Fig. 15 Lightning protection system for wind turbine.
- Fig. 16 Research concept in 2008: Flowchart for research of accident and failure.
- Fig. 17 Research flowchart of accident and failure.
- Fig. 18 Location of lightning detection sensor.
- Fig. 19 Contents of lightning data observed by TLDS.
- Fig. 20 An example of collected lightning data.
- Fig. 21 Study range and positions of wind farms of Jeju Island.
- Fig. 22 Study area of a wind farm.
- Fig. 23 Main page of the lightning data analysis program.
- Fig. 24 Sample of the result from the lightning data analysis.
- Fig. 25 Surfer 8 S/W.
- Fig. 26 Graph of number of lightning in decade.
- Fig. 27 Graph of lightning days in decade.
- Fig. 28 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2003~2012.
- Fig. 29 Distribution of the number of lightning in 2003~2012.
- Fig. 30 Distribution of lightning days in 2003~2012.
- Fig. 31 Number of lightning data of each wind farm.
- Fig. 32 Lightning days data of each wind farm.
- Fig. 33 Number of lightning data of each scheduled wind farm.
- Fig. 34 Lightning days data of each scheduled wind farm.

Fig. 35 Hangwon wind farm.  
Fig. 36 Samdal wind farm.  
Fig. 37 Appearance and install procedure of Lightning counter.  
Fig. 38 The seven turbines of Gasiri wind farm where lightning counters were installed.  
Fig. 39 Installation of lightning counter.  
Fig. 40 Number of collected data at each wind turbines.  
Fig. 41 Daily number of collected data.  
Fig. A-1 Distribution of lightning days in 2003.  
Fig. A-2 Distribution of lightning days in 2004.  
Fig. A-3 Distribution of lightning days in 2005.  
Fig. A-4 Distribution of lightning days in 2006.  
Fig. A-5 Distribution of lightning days in 2007.  
Fig. A-6 Distribution of lightning days in 2008.  
Fig. A-7 Distribution of lightning days in 2009.  
Fig. A-8 Distribution of lightning days in 2010.  
Fig. A-9 Distribution of lightning days in 2011.  
Fig. A-10 Distribution of lightning days in 2012.  
Fig. A-11 Distribution of the number of lightning in 2003.  
Fig. A-12 Distribution of the number of lightning in 2004.  
Fig. A-13 Distribution of the number of lightning in 2005.  
Fig. A-14 Distribution of the number of lightning in 2006.  
Fig. A-15 Distribution of the number of lightning in 2007.  
Fig. A-16 Distribution of the number of lightning in 2008.  
Fig. A-17 Distribution of the number of lightning in 2009.  
Fig. A-18 Distribution of the number of lightning in 2010.  
Fig. A-19 Distribution of the number of lightning in 2011.  
Fig. A-20 Distribution of the number of lightning in 2002.  
Fig. A-21 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2003.  
Fig. A-22 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2004.  
Fig. A-23 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2005.  
Fig. A-24 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2006.  
Fig. A-25 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2007.  
Fig. A-26 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2008.  
Fig. A-27 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2009.  
Fig. A-28 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2010.  
Fig. A-29 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2011.  
Fig. A-30 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2012.

# LIST OF TABLES

- Table 1 Maximum values of lightning parameters and related rolling sphere radius corresponding to Lightning Protection Level
- Table 2 Number of failure and time of shut down of each wind turbine systems
- Table 3 Research of accident and failure by cases
- Table 4 Appearance and characteristics of IMPACT ESP
- Table 5 Lightning class
- Table 6 The number of lightning occurrence and typhoon's name in each year
- Table 7 Yearly number of lightning and lightning rate by each hour
- Table 8 Frequency of Seasonal lightning occurrence and occurrence rate by lightning level
- Table 9 Frequency of yearly lightning occurrence by lightning level
- Table 10 Monthly lightning occurrence and occurrence rate by polarity
- Table 11 The evaluation of lightning rate for existing wind farms
- Table 12 The evaluation of lightning rate for scheduled wind farms
- Table 13 Damage to wind turbines by lightning over study area of existing wind farms for the study period
- Table 14 Specifications of lightning counter
- Table 15 Measurement range of lightning counter
- Table 16 Period of collected data at each wind turbines
- Table 17 Record of lightning counter of number 11 in Ga-si wind farm
- Table 18 Record of lightning counter of number 7 in Ga-si wind farm
- Table 19 Record of lightning counter of number 9 in Ga-si wind farm
- Table 20 Record of lightning counter of number 10 in Ga-si wind farm
- Table 21 Record of lightning counter of number 12 in Ga-si wind farm
- Table 22 Record of lightning counter of number 13 in Ga-si wind farm

# SUMMARY

In order to minimize the lightning damage to wind turbines, lightning protection strategies for wind turbines from IEC Standard, Europe, USA, Japan and Korea were reviewed and the strategies available in Korea were proposed in this work. Also the lightning characteristics of the established and the scheduled wind farms of Jeju Island as well as entire Jeju Island were analyzed in detail. The lightning data for 10 years from 2003 to 2012 was obtained from IMPACT ESP which detects lightning. Lightning frequency, lightning strength and regional lightning events were analyzed in detail, and then the lightning maps of Jeju Island were created. The evaluation of lightning rate was made for all the wind farms of this study. The lightning damage cases to wind turbines were investigated in the existing wind farms of Jeju Island. Furthermore, lightning counters were installed in wind turbines to detect electrical surge by lightning strike. The results obtained are as follows:

First, it is necessary to apply some good lightning protection strategies from IEC Standard and other countries to Korea. Those are as follows: The guideline for lightning protection for wind turbines should be established based on IEC Standards. Both development of software and experimental studies should be conducted for understanding the types of lightning damage to wind turbines and compiling the database. For minimizing the lightning damage to wind turbines, it is a key factor for wind farm owners and researchers to open the information about the damage cases and wind farm operation technique to the public.

Second, the eastern part of Jeju Island had more lightning frequency than the western part of the Island. Also, the evaluation of lightning rate was good for all the established and the scheduled wind farms of Jeju Island. Hankyung wind farm is the best place for lightning safety, while precaution should be taken against lightning damage in Samdal wind farm. There were two lightning damage reports at Haengwon and Samdal wind farms, which were the damage to wind turbine blades and the electric device of a turbine.

Finally, the electrical surges were detected in seven wind turbines of Gasi wind farm by lightning counters. However, the surges were not caused by lightning strike to the wind turbines.

# I. 서론

## 1. 연구 배경

풍력발전은 신·재생에너지의 한 종류로 1970년 세계적인 오일쇼크로 인하여 미국과 유럽에서 각광받기 시작하였다. 특히 1990년대 이후로 활발한 연구가 이루어지고 있으며 국내의 대학, 기업 및 연구소에서 다양한 연구가 이루어지고 있다.

풍력발전기는 풍황조건이 좋은 위치에 설치되기 때문에 평야지대 혹은 민가와 독립된 지역에 건설한다. 또한 풍력발전기의 대형화를 통해 더 많은 전기를 생산할 수 있기 때문에 발전기의 타워 높이가 높아지고 있다. 이러한 특성에 의하여 풍력발전기는 필연적으로 낙뢰에 노출될 가능성이 높아지게 된다.

Fig. 1은 풍력발전기의 타워 높이에 따른 피뢰확률을 나타낸다.[1] 타워의 높이가 높아질수록 피뢰확률 또한 높아지는 것을 알 수 있다.

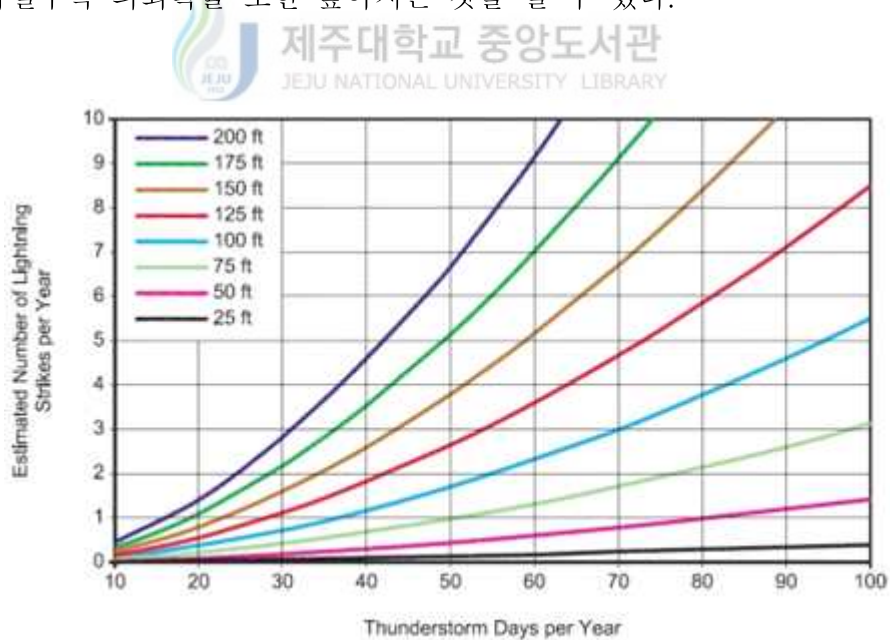


Fig. 1 Rate of lightning strike to tower.[1]

이에 대한 대책으로 IEC(International Electro-technical Commission)에서는

국제 표준 제정 작업을 통해 2002년에는 TR(Technical Report) 61400-24를, 2010년에는 정식으로 IS IEC 61400-24를 발간하였다.[2] 또한 추가적인 신규 표준 제정 작업을 위해 꾸준한 활동을 하고 있다. 해외 각국에서도 낙뢰에 대한 연구를 통해 그 지역의 낙뢰특성을 분석하고 그 대책에 대해 지속적인 연구를 진행하고 있다. 우리나라에서도 2001년부터 기상청에서 도입한 최첨단 신 낙뢰관측 시스템(TLDS, Total Lightning Detection System)을 운영하기 시작했으며[3] 이로 인하여 낙뢰특성을 연구한 바[4] 있다. 특히 풍력발전사업이 활발하게 이루어지고 있는 제주도에서는 낙뢰에 대한 기초 연구 조사를 한 예[5,6]도 있다.

Fig. 2는 낙뢰의 발생 과정을 나타낸다.[7] 그림에서 (a)는 지표면에서의 복사열에 의한 상승기류에 의해 적란운이 발생하는 과정이다. (b)는 싸라기눈·우박·얼음 알갱이들이 서로 부딪쳐서 전하분리와 축적이 이루어지는 과정이며, (c)는 여러 형태의 뇌방전이 발생하여 전하가 소멸되는 과정을 나타낸다. 적란운이 발달하면서 구름내부에 분리되어 축적된 음전하와 양전하 사이 또는 구름 속의 전하와 지표면에 유도되는 전하와의 사이에서 조건이 적당하면 불꽃방전이 발생하는데, 전자의 경우는 구름 내에서 발생하는 운내방전과 구름 사이에서 발생하는 운간방전이라 하고, 후자를 대지방전 또는 낙뢰라고 한다. 이 외에도 지표면에 도달하지 않는 대기방전이 있다.

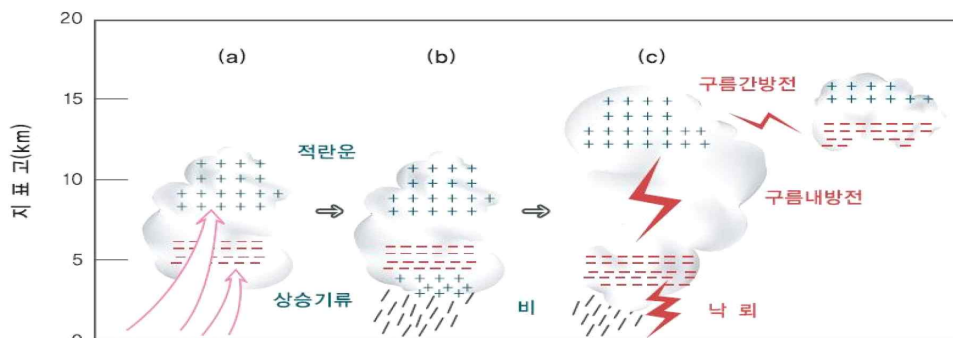


Fig. 2 Occurrence of thundercloud and lightning.[7]

방전 중에서 낙뢰는 특히 지표면에 접촉하는 것이기 때문에 전자기기의 고장, 시설물의 파손, 나아가 동물, 사람의 생명에도 영향을 미칠 수 있으며 낙뢰피해의 유형은 크게 직접적 피해와 간접적 피해로 나눌 수 있다. 직접적 피해는 낙뢰 감



전사고, 가옥과 산림화재, 건축물과 설비의 파괴 등이 있고 국소적으로 발생하므로 피해확산의 우려는 없다. 파괴침을 설치하거나 낙뢰발생 영역내의 사람이 스스로 주의하면 피해경감이 가능하다. 간접적 피해는 낙뢰에 의해 발생하는 2차적 피해로 전력설비의 정전, 통신설비의 두절, 철도 등 교통시설의 불통, 공장과 빌딩의 조업중단 등으로 시설의 기능상실로 인한 피해, 그 여파가 광범위한 지역, 막대한 사회·경제적 손실, 사회혼란, 치안붕괴도 야기될 수 있다.

Fig. 3은 낙뢰가 발생하였을 때 그 주위에 발생하는 간접적인 영향을 보여준다.[8] 낙뢰강도에 따라 다르지만 낙뢰가 발생할 경우에는 10km까지도 낙뢰의 영향력이 미칠 수 있음을 나타낸다. 낙뢰가 떨어진 지점의 반경 20m이내는 일반적으로 순간적으로 높은 전압 및 고온의 열이 발생하므로 심각한 인명피해 및 시설손상도 예상할 수 있다. 또한 유도뢰로 인한 전기적인 문제가 발생할 수 있다.

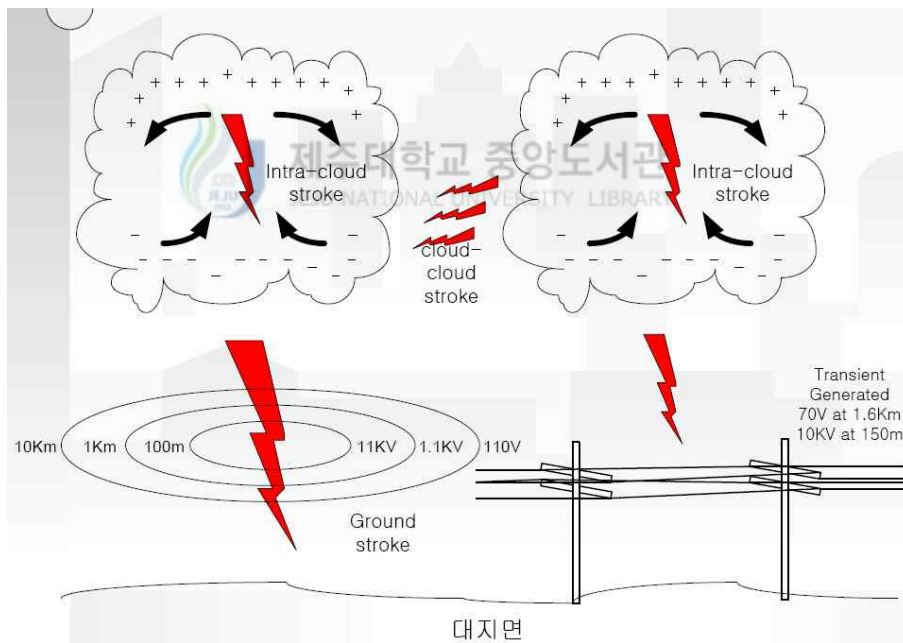


Fig. 3 Effect of lightning strike.[8]

낙뢰의 종류로는 여름철 바람이 약하고 일사량이 강한 날 지면 부근이 습한 오후~저녁사이에 자주 발생하는 열뢰, 따뜻한 공기 밑으로 찬 공기가 스며드는 전선부근에서 발생하는 계뢰, 발달한 저기압이나 태풍 등의 중심부근에서 주위로

부터 불어드는 기류가 강한 상승기류를 일으켜 발생하는 와뢰, 그리고 열뢰와 계뢰가 같이 발생하는 열계뢰가 있다.

## 2. 연구목적

Fig. 4는 2001년도에 미국 NASA에서 작성한 세계 낙뢰밀도 분포를 나타낸다.[9] 적도 지역에서 높은 낙뢰밀도를 보이고 있고, 우리나라는 낙뢰밀도가 비교적 높지 않음을 알 수 있다. 그러나 우리나라에서 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해가 꾸준히 보고되고 있음을 감안한다면 낙뢰피해 대책은 중요한 연구 분야라고 할 수 있다. 또한 해외에서는 풍력발전기의 낙뢰피해 및 그 대책에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

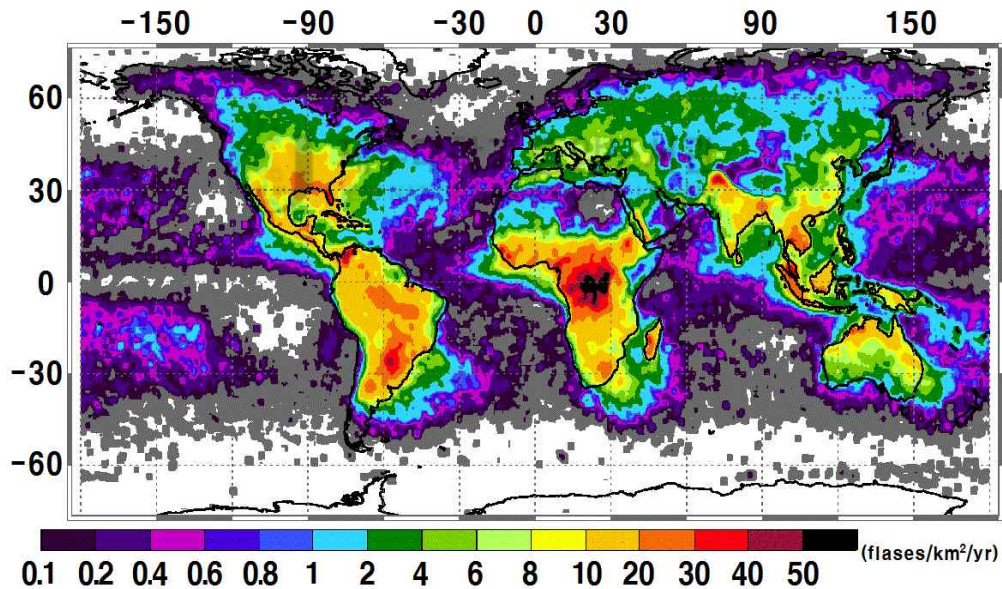


Fig. 4 World wide lightning strikes.[9]

우리나라의 경우는 풍력단지를 운영하면서 비로소 낙뢰문제를 인식하고 그 대책을 세우고 있다. 영월 풍력단지에서 2009년 8월과 2010년 11월 두 차례 낙뢰피해가 발생하여 가동 중지 및 보수를 실시하고 대형 피뢰침 설치 등의 낙뢰 예방 공사를 추진하였다. 그러나 낙뢰에 대한 연구가 매우 중요함에도 불구하고, 해외

에 비해서 우리나라의 낙뢰 연구성과는 아직 미미한 수준이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 해외의 풍력발전에 관한 낙뢰연구 성과를 IEC, 유럽, 미국, 일본 및 우리나라로 구분하여 파악하고 우리나라 풍력발전의 낙뢰대책 연구 방향을 제안함과 동시에 10년간(2003~2012)제주도의 낙뢰자료를 바탕으로 제주도의 낙뢰 현황 및 기존 풍력단지과 건설 예정인 풍력단지의 낙뢰 특성을 조사 및 평가하고자 한다. 또한 제주도 풍력단지에 낙뢰가 미치는 영향을 파악하기 위하여 가시리 풍력발전단지에 낙뢰카운터를 설치하고 풍력발전기의 접지선에서 발생하는 서지를 측정하였다.



## II. 국내·외 풍력발전기에 대한 낙뢰 연구동향 및 적용방안

국내·외를 막론하고 풍력단지가 운영되기 전부터 낙뢰는 인명 및 재산에 큰 피해를 주어 왔다. 이러한 피해를 최소화하기 위하여 각 국가에서는 기본적인 낙뢰특성이 연구되어왔으며[10,11,12] 낙뢰피해 조사·분류[13,14] 및 기본적인 접지방법[15] 등에 관한 연구가 진행되어 왔다. 또한 우리나라 기상청에서는 낙뢰연보 등[7,16]의 자료를 배포하고 있다. 풍력발전기의 낙뢰피해 대책은 대체로 국제표준에 맞는 접지 조치를 기본으로 한다. 따라서 산업체에서는 국제표준에 맞는 접지 및 시험방식에 따라 검증된 자사 낙뢰보호 장치와 기술시방서를 공개하고 있다.[17,18,19,20,21]

Fig. 5는 일반적인 풍력발전기의 낙뢰 대책을 나타낸다.[22] 블레이드 및 나셀에서부터 타워 하단까지 이어지는 전선은 피뢰시에 전류가 흐를 수 있는 통로가 된다. 따라서 타워 하단에 접지봉을 설치하여 낙뢰로 인한 피해를 최소화한다.

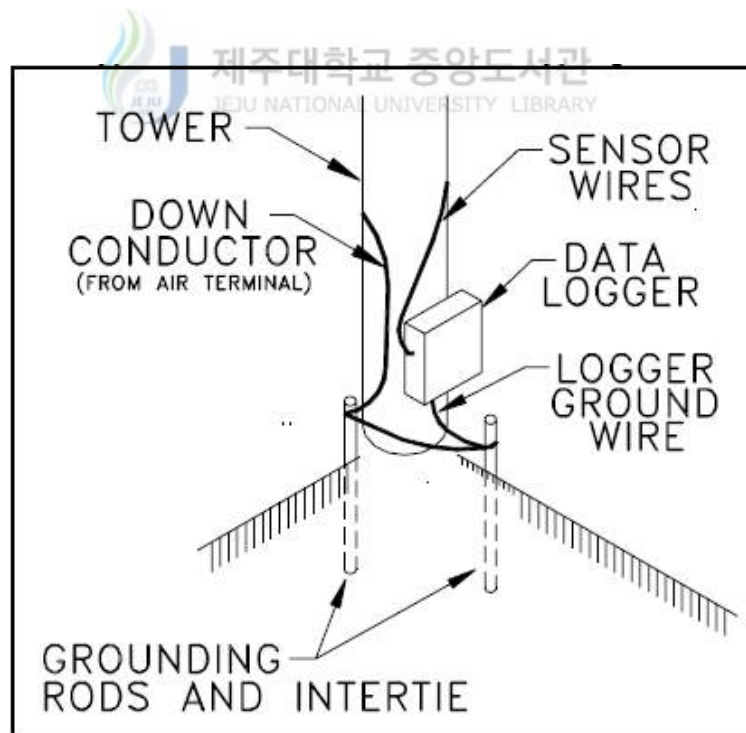


Fig. 5 Single-point ground system.[22]

풍력단지의 경우에는 모든 풍력발전기의 전선을 한 곳에 모아서 접지봉을 설치하는 것도 한 방법이다. 그러나 풍력발전기는 후류의 영향 등을 고려하여 이격 거리를 유지해야 하기 때문에 각각의 풍력발전기에 그림과 같은 접지방식을 사용하기도 한다.

## 1. 연구동향

### 1) IEC

IEC에서는 기본 낙뢰특성은 물론 풍력발전기에 관련된 낙뢰현상을 정리하고, 이를 통한 낙뢰 노출 평가방식을 제시한 IEC 61400-24[2]를 발간하였다. 이를 통하여 대형 및 소형 풍력발전기에 관한 낙뢰 보호방법을 표준화하였다. 또한 낙뢰 보호에 관한 블레이드 실증 테스트 사양, 낙뢰의 영향이 미치는 LPZ(낙뢰 보호 구역)를 등급별로 나누어 그에 맞는 대책방안을 제시하였다. 이와 같이 IEC에서는 풍력발전기의 낙뢰피해 대책을 제공함과 동시에 낙뢰관련 풍력발전기의 보호 방법, 설문 조사 방법, 접지 및 낙뢰 모니터링 시스템의 종류 등 광범위한 정보를 부속서에 담아 세계적으로 지속적인 연구와 논의가 가능하도록 하였다.

Table 1은 최소 피크전류를 통해 반경을 구하는 표이다.[2] IEC는 풍력발전기에 대한 낙뢰 대책으로 리셉터의 설치를 권장하고 있다. RSM(Rolling Sphere Method)은 리셉터 설치 위치를 정하기 위해 사용되는 방법으로 표에서는 최소 피크전류를 측정하여 LPL(낙뢰 보호 수준)을 파악하고, RSM에 적용할 반경을 구하게 된다.

Table 1 Maximum values of lightning parameters and related rolling sphere radius corresponding to LPL[2]

Interception			LPL			
	Symbol	Unit	I	II	III	IV
Minimum peak current		kA	3	5	10	16
Rolling sphere radius		m	20	30	45	60

Fig. 6은 RSM의 적용방법을 나타내고 있다.[2] 그림에 나타낸 원의 반경은

Table 1을 통해 정하며 각 등급에서 정해진 반경을 적용하여 리셉터의 위치를 결정·설치하게 된다. 그러나 아직 완벽한 낙뢰피해 대책이 공표되지 않아 이에 관한 연구가 지속되고 있다.

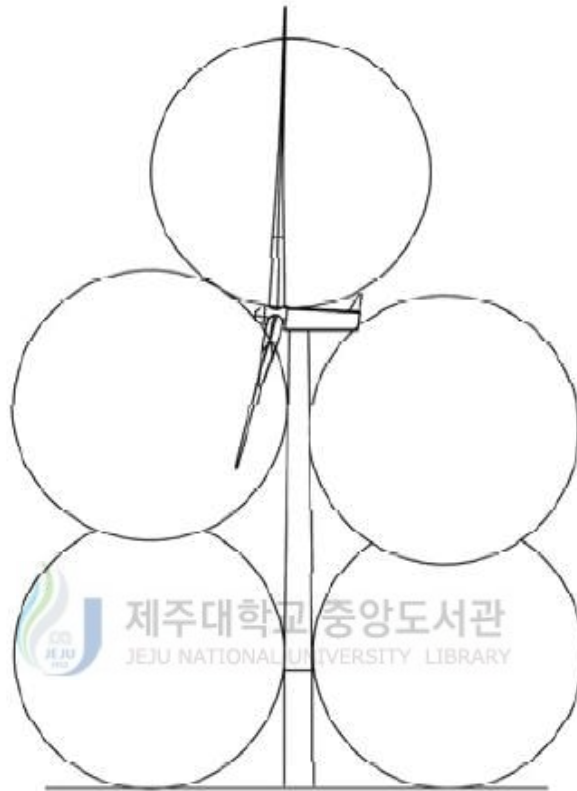


Fig. 6 Rolling Sphere Model.[2]

## 2) 유럽

유럽에서는 자연현상을 모델링하고 이를 통한 응용프로그램 개발에 박차를 가하고 있다. 낙뢰 데이터수집과 이에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있으며[23] 낙뢰로 인한 피해 액수 계산식을 도출하였고[24] 해상 풍력발전기의 낙뢰보호를 연구한 바 있다.[25]

Troels 등[23]은 풍력발전기의 구성부품에 대한 고장확률과 수리방법 및 기간에 따라 낙뢰로 인한 피해금액을 계산하는 식을 유도하였다. Bruce[26]는 접지, 인명·재산 피해 등의 자료를 모아서 풍력발전기 낙뢰보호 장치의 성능을 연구하였다.

Farhad[27]는 블레이드에 대한 기하학적, 전기적, 기계적인 낙뢰위험을 평가하였다. Vidyadhar 등[28,29]은 FEA(Finite Element Analysis)소프트웨어를 활용, 구름과 풍력발전기 및 피뢰부 전반을 모델링하여 뇌운과 풍력발전기 사이의 상관관계와 리셉터의 성능을 연구하였다.

Fig. 7은 FEM(Finite Element Method) 소프트웨어로 나타낸 적란운의 자기장 3D 모델이다.[30] 이를 통해 낙뢰 발생과정을 모델링하였으며 풍력발전기의 낙뢰 피해를 예측하고 역으로 풍력발전기의 고장상태를 통해 낙뢰의 특성을 예측할 수 있었다.

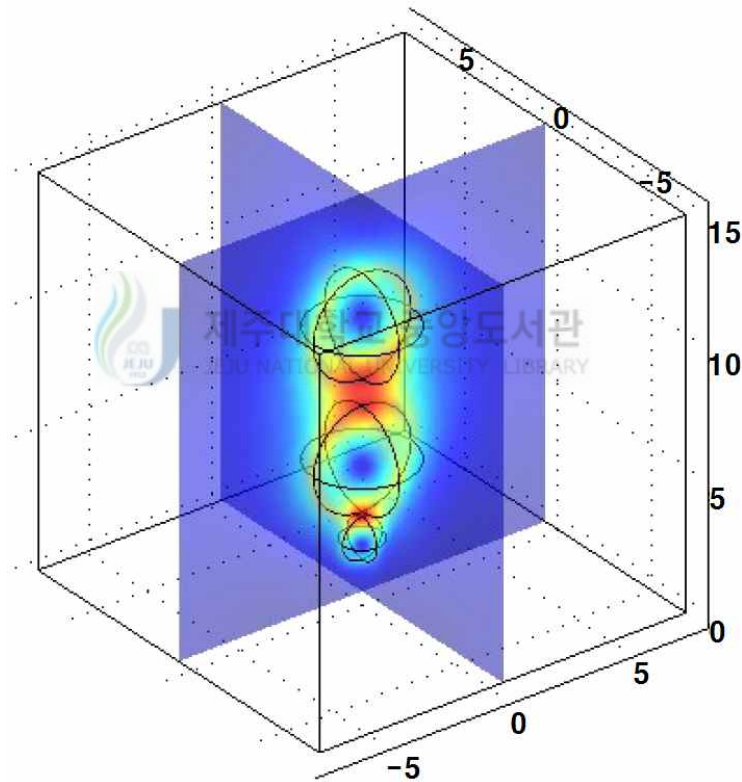


Fig. 7 Model of electric field by FEM.[29]

또한 Madsen 등[30]은 블레이드 위치 및 피치각에 따른 익단의 피뢰특성을 연구하였으며, Casper[31]와 함께 자기장을 고려한 나셀 모델링 방법을 제안하였다. 그리고 IEC에서 제시하는 방식에 근거하여 낙뢰의 특성을 파악하고 실험을 통해 블레이드에 발생하는 낙뢰특성을 분석하였다.[32]



카탈로니아 공과대학에서는 낙뢰 자체를 모델링하여 각 모델에 따른 비선형 접지시스템을 연구하였다.[33] Ian[34]은 대형 풍력발전기의 블레이드 및 베어링에 대한 낙뢰보호 방법을 연구하였다.

Fig. 8은 EMTP-RV(Electro-Magnetic Transients Program Restructured Version)을 활용하여 모델링한 풍력발전시스템을 나타낸다.[35] 이를 통해 Rafael 등[35,36]은 EMTP를 이용하여 접지방식 및 낙뢰서지를 연구하였으며 Lorentzou[37]는 SPD시스템의 이상적인 접지방식을 고안하였다.

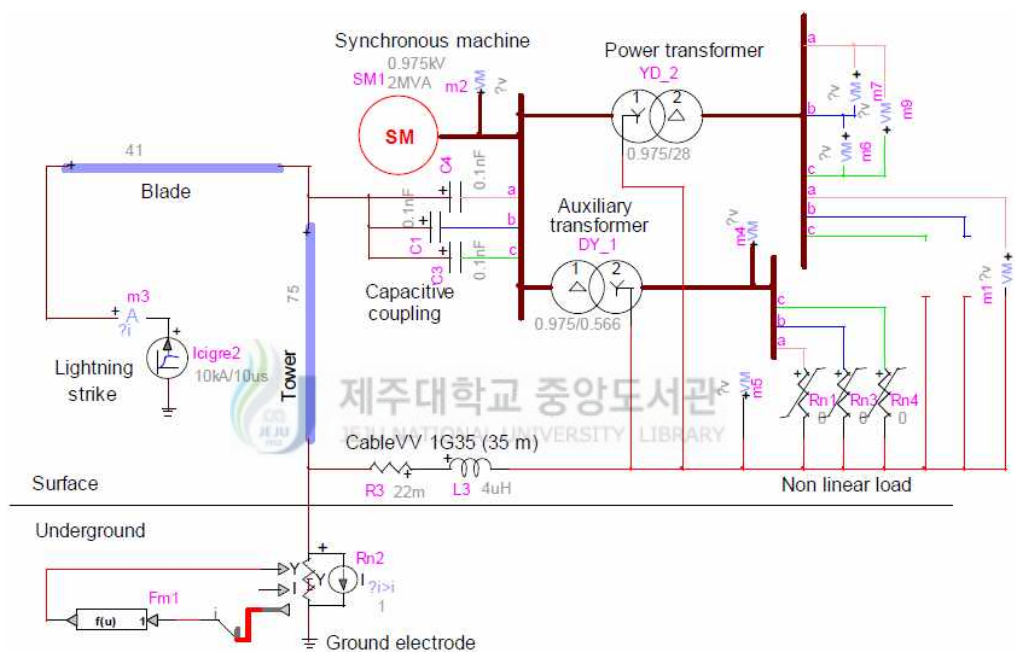


Fig. 8 EMTP-RV circuit with Surge Protect Device.[35]

Fig. 9는 소프트웨어인 LPS 2008을 사용하여 RSM을 고려한 풍력발전기의 LPZ를 나타낸다.[38] 그림에서 풍력발전기 주변으로 그려진 붉은색 실선은 낙뢰의 전자기장에 의해 내부시스템이 피해를 입을 수 있는 범위의 최대한도를 나타낸다. 이를 통해 풍력발전기의 낙뢰 위험분석 및 보호등급에 대해 연구하였다. 또한 그들은 소프트웨어를 통해 풍력발전기와 건물의 낙뢰위험도를 비교하고 그 신뢰도를 검증하였다.[39]



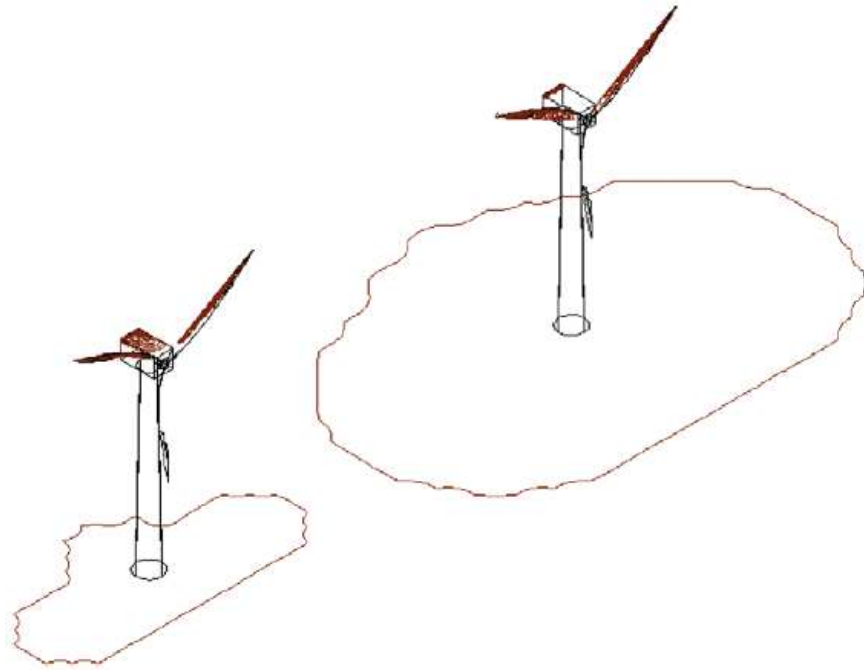


Fig. 9 Result of RSM simulation with LPS 2008 for level of protection.[38]

### 3) 미국

미국에서는 1970년대부터 풍력발전기에 미치는 낙뢰의 영향을 지속적으로 연구하고 있다. 또한 낙뢰 관측과 함께 실제 풍력발전기의 피해사례를 중심으로 낙뢰 특성 및 피해양상을 연구하였고 이에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 이를 활용하여 NASA에서는 낙뢰의 특성 및 접지방식에 대해 연구하였으며 발전기, 전기설비 및 블레이드에 대한 낙뢰보호 방식을 정립하였다.[40]

Fig. 10은 미국 Global Atmospherics사에서 작성한 낙뢰율지도를 보여준다.[41] 1993년에 발생한 1년 동안의 낙뢰 데이터를 사용하여 작성한 것으로 미국 중심부는 낙뢰율이 높고 중심부에서 멀어질수록 낮아지는 경향을 보인다.

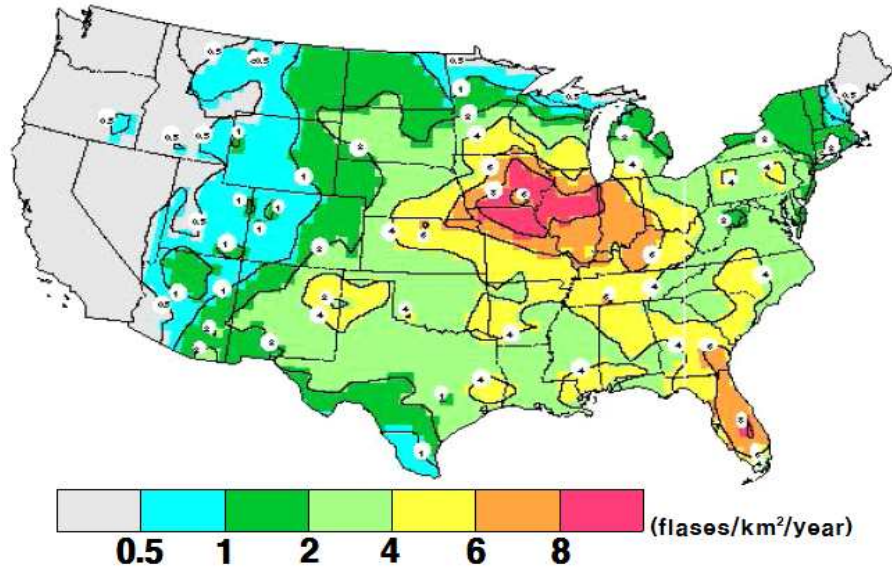


Fig. 10 Distribution of lightning density in the US.[41]

Nicholas 등[42]은 실제 풍력발전기의 블레이드 사고사례를 분석한 결과, 공기 혹은 수분 팽창으로 인해 블레이드의 파손이 야기될 수 있음을 보고하였다. Richard[43]는 낙뢰를 관측하고 이에 따른 풍력발전기의 피해양상을 연구하였다. 이와 같이 미국에서는 실제 낙뢰 데이터를 활용한 연구가 많이 진행되고 있다.

미국에서는 낙뢰피해 대책으로 낙뢰보호 과정의 실험·평가, 피뢰시 저항을 감소시키는 실험 등 실제 실험을 중심으로 연구를 진행하고 그 대책을 강구하고 있다.

미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서는 1995년에 시작한 TVP(풍력발전기 실증 사업)를 통해 각 지역별 풍력단지에서의 사고 현황 및 낙뢰율을 조사하고, 풍력발전기의 접지방식을 포함한 전반적인 풍력단지 적합성 평가를 실시한 바 있다.[41,44]

Fig. 11은 TVP에서 사용된 센서의 설치위치를 보여준다.[44] 유도분류센서, 분할 변류기, 중성 변류기를 각각의 풍력발전기에 설치하고 낙뢰를 관측함과 동시에 낙뢰로 인해 변동되는 전류의 특성을 분석하였다.

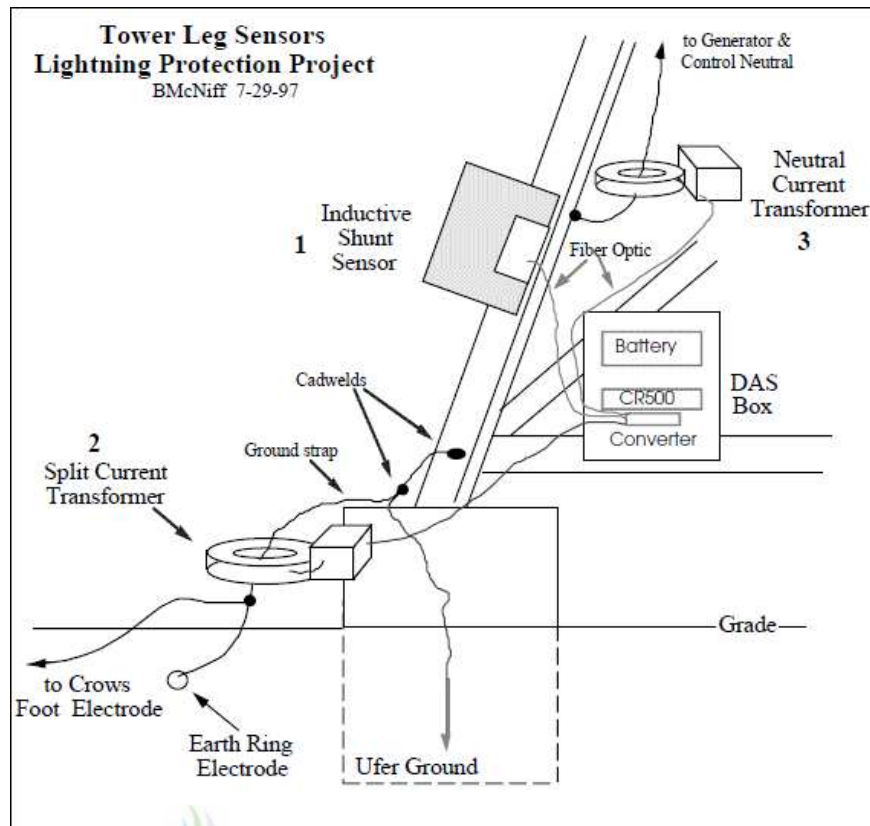


Fig. 11 Field test sensors.[44]

Sagrillo[45]는 낙뢰피해 대책의 중요성을 인식하고, 낙뢰와 풍력발전에 관한 지식을 일반인들도 이해하기 쉽게 풀어 썼다. Patterson[46]은 풍력단지에 미치는 낙뢰의 영향을 최소화하는 방안을 연구하였으며, 풍력발전기의 구성부품에 대한 낙뢰피해 대책 조사 및 IEC표준 분석을 통하여 향후의 연구과제를 제안하였다. Christopher[47]는 buckypaper를 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)에 부착하여 블레이드의 낙뢰에 대한 저항을 실험하였다. 낙뢰의 실제 데이터베이스를 활용하여 낙뢰를 모델링하였으며 buckypaper가 없는 경우와 4개, 7개의 경우로 구분하여 개수에 따른 피뢰시 저항감소 정도를 연구하였다.

Fig. 12는 블레이드의 정지 및 운전상태에서의 피뢰확률 계산법을 나타낸다.[48] 이를 통해 정지상태보다 운전상태일 때 전하 밀도가 감소하였고, 계산식을 구하였으며 그 결과 피뢰확률도 감소함을 보였다.

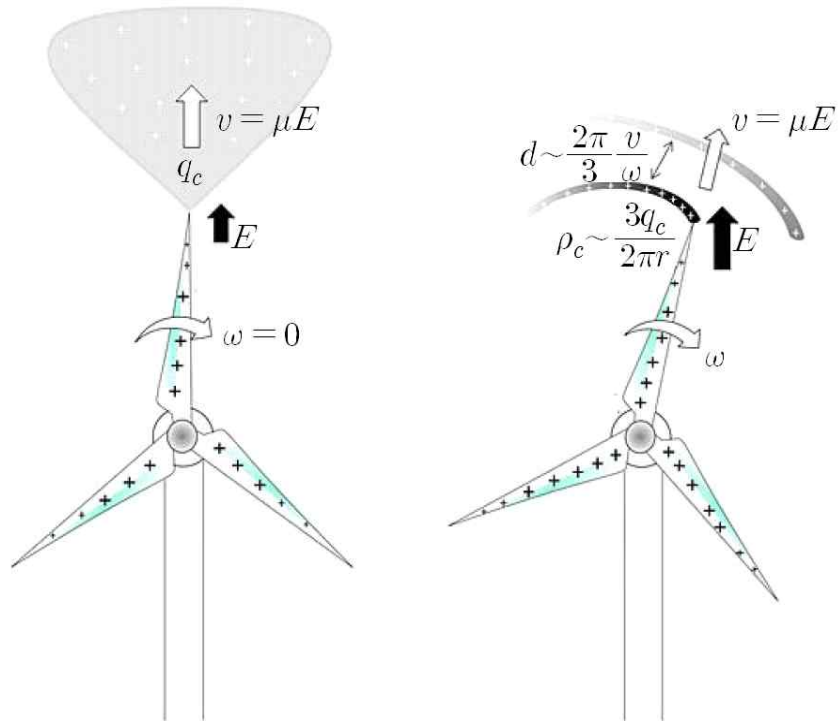


Fig. 12 stationary and rotating wind turbines beneath a thundercloud.[48]

#### 4) 일본



일본에서는 풍력이 대두되기 전인 1936년도에 미쿠니시험센터를 설립, 뇌격의 양상을 관측하고 인펄스 시험을 진행하였다.[49] 일본은 심한 피해를 야기하는 겨울철 낙뢰가 강한 지역을 낙뢰대책 중점지역으로, 그렇지 않은 지역을 낙뢰대책지역으로 구분하여 낙뢰특성 및 강도에 대한 연구를 진행하고 있다.[49,50,51,52] 시라이시 등[53]은 로고스키 코일을 사용하여 낙뢰가 발생할 때 접지부위의 피크값과 전류를 측정하였다. 또한 요코야마[54]는 블레이드 익단을 전류에 노출시켜 블레이드의 손상정도를 연구하였다.

Fig. 13은 신에너지·산업기술 종합 개발기구(NEDO)에서 만든 풍력발전기의 낙뢰피해유형을 나타낸다.[55] 각각의 부위에 어떠한 고장이 발생할 수 있는지 상세히 보여주고 있다. 그 대책으로는 나셀 상부나 풍력발전기 자체를 보호하기 위한 피뢰침탑 설치, 전력기나 제어기기의 보호를 위한 SPD(Surge Protection Device)설치, 블레이드 보호를 위한 리셉터 설치 등을 제시하였다.

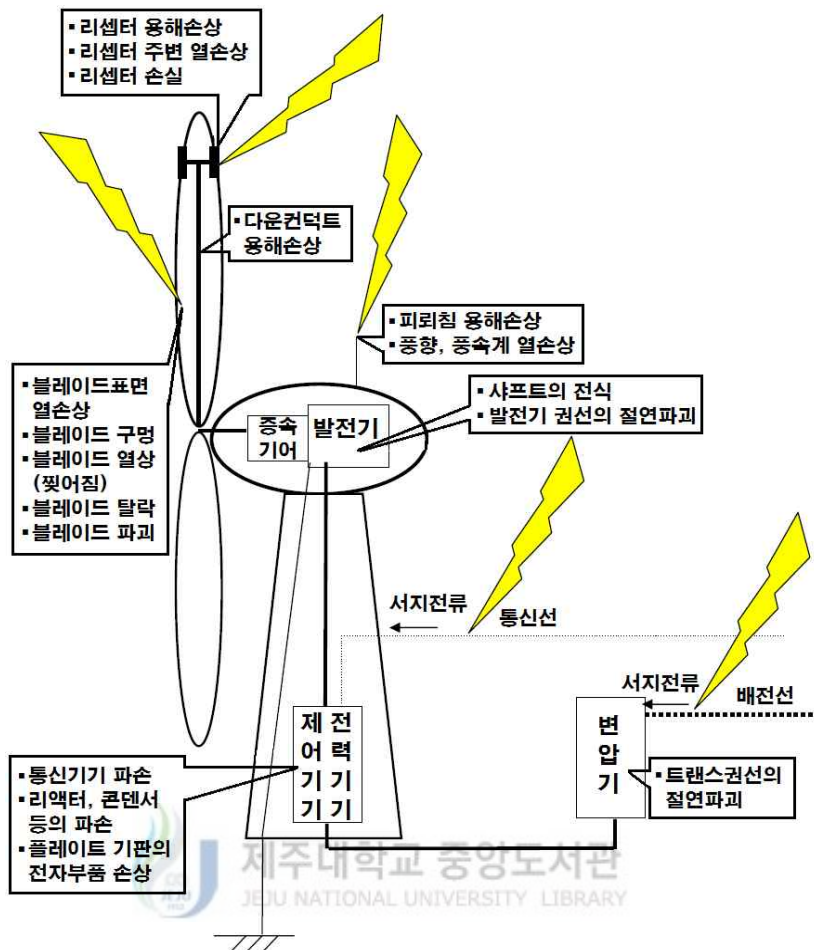


Fig. 13 Cases of lightning damage.[55]

Fig. 14는 2008년부터 4년간 풍력발전사업자에게 실시한 앙케트 조사결과를 보여준다.[56] 이를 통해 풍력발전기의 블레이드, 통신장치 및 제어장치에 주로 낙뢰피해가 발생하고 있음을 밝혔다. 일반 건물 높이에 따른 피뢰율을 사용하여 피해 액수에 대한 대략적인 계산식을 도출하였고, 더욱이 2008년에 풍력발전기 낙뢰대책 가이드라인[55]을 공개하였다. 또한 블레이드의 피뢰영상을 확보하였으며 [56] 이를 통해 해당 부위의 보호에 대한 검토와 리셉터의 성능을 시험하였다. 나아가 일본 낙뢰위험지도를 작성하는 등의 연구가 NEDO에서 이루어지고 있다.[57]

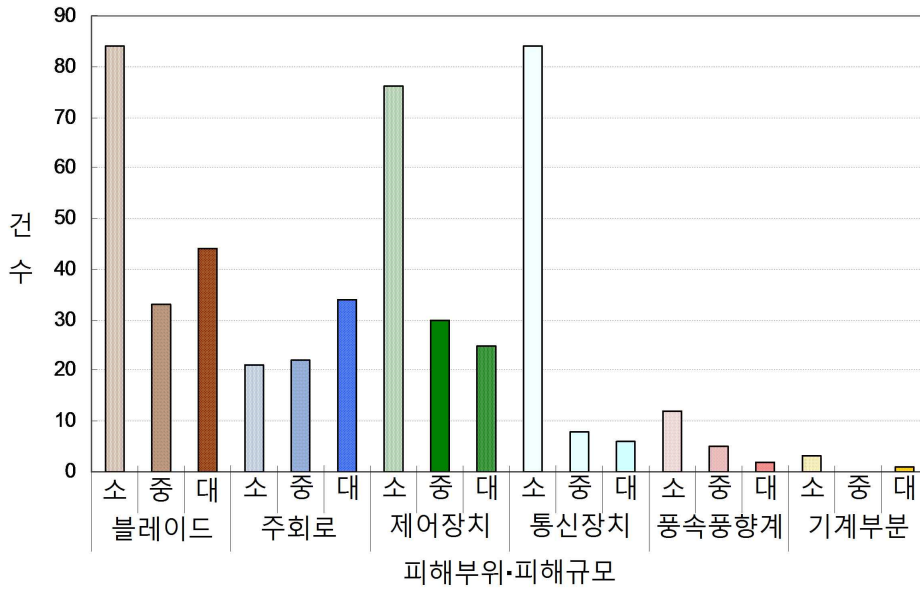


Fig. 14 Lightning damages during 2008~2011 in Japan.[56]

낙뢰피해 대책으로 일본은 소형 풍력발전기와 블레이드 익단을 활용한 실험을 진행하고 피해액수를 예측하는 계산식을 도출하기 위해 노력하고 있다. 또한 국제표준을 이용하여 일본에 맞는 낙뢰대책을 제시하였으며[55], 사업자 혹은 일반인에게 정보를 제공할 수 있도록 소프트웨어를 개발하고 있다.[58]

일본의 코치 공과대학에서는 풍력발전기용 FRP 블레이드를 부분 제작하여 낙뢰피해 양상[59] 및 그 대책[60]에 대하여 연구하였다. 칸사이 대학에서는 풍력발전기의 전력계통 모델을 이용하여 낙뢰가 풍력단지의 전력시스템에 미치는 영향을 연구하였다.[61] 또한 동 대학에서는 접지부분의 전류측정을 통해 낙뢰가 발생할 때의 접지선의 상태를 연구하였다.[53,62]

Fig. 15는 풍력발전기 상부의 새로운 접지방식을 나타낸다.[63] (a)는 기존 풍력발전기의 접지방식이며 (b)는 허브를 통하지 않고 타워 외부로 접지가 이루어질 수 있도록 타워 및 로터에 보조적인 구조물을 설치해 낙뢰피해를 감소시킬 수 있는 방식이다. 실제 소형 풍력발전기에 적용한 결과 나셀 내부의 피해가 감소함을 보였다.



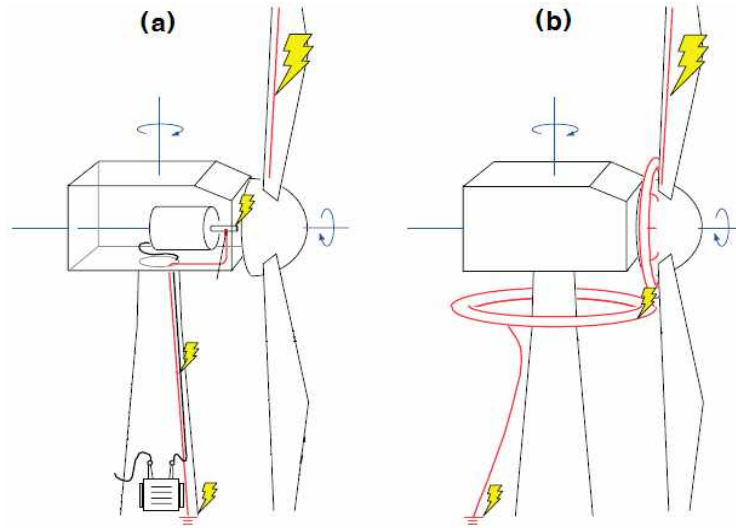


Fig. 15 Lightning protection system for wind turbine.[63]

Fig. 16은 이제까지 축적된 풍력발전시설의 고장·사고에 관한 각종 정보를 정리하여 사업자와 연구자가 이용하기 쉬운 형태로 데이터베이스를 구축하는 방법을 찾기 위한 전체적인 프로세스를 나타낸다.[64] 또한 고장·사고가 발생할 경우 피해상황에 따른 구체적인 낙뢰보호 방안 소개, 그리고 소프트웨어를 통한 해석 등의 대책을 강구할 수 있도록 데이터베이스를 구축하기 위해 노력하고 있다.

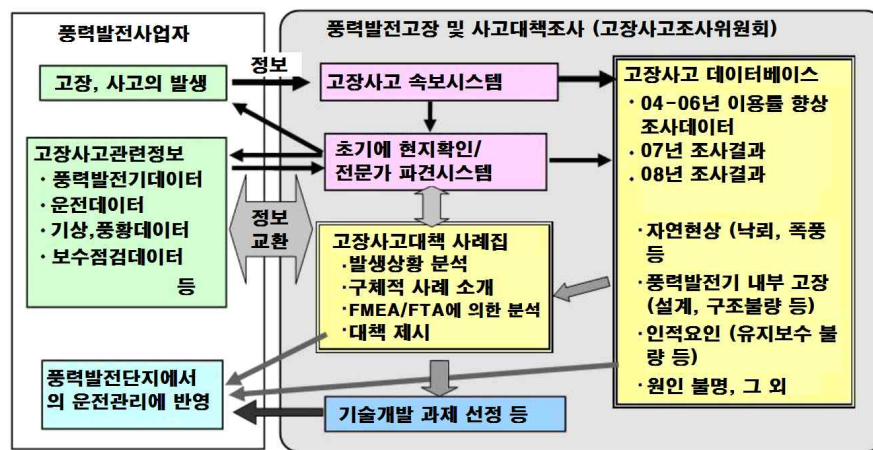


Fig. 16 Research concept in 2008: Flowchart for research of accident and failure.[64]

위와 같은 정보교환의 일환으로 토야마 대학에서는 연구만을 위한 것이 아닌

풍력발전사업자와의 정보공유를 통해 일본 전역에서 발생하는 실시간 낙뢰데이터를 활용하여 컴퓨터 및 휴대전화에서도 볼 수 있는 낙뢰위험지도를 개발하고 있다.[58]

### 5) 우리나라

우리나라의 경우 낙뢰정보를 대중들에게 알리기 위해 낙뢰연보[16], 재난상황관리정보[7]책자를 발간하고 있다. 풍력산업이 활발한 제주도에서는 낙뢰에 대한 기본적인 연구[65,66] 및 낙뢰의 발생특성[4,67,68]을 분석한 연구가 진행되었다. 풍력발전기의 피해양상은 직격뢰에 의한 기계적인 소손보다 유도뢰에 의한 통신 HUB, 다회로 차단기, 케이블 등 전기부품 손상이 주로 발생하였다.[8,68,69]

Table 2는 제주도 행원 풍력단지에서 발생한 고장상황을 나타낸다.[71] ExEx low voltage 예러로 인한 풍력발전기의 비상정지 상태도 보고된 바 있다.

Table 2 Number of failure and time of shut down of each wind turbine systems[71]

Error text	Wind turbine system							
	V42 1호기(98.02)		V42 2호기(98.02)		V47 4호기(99.03)		V47 15호기(03.04)	
	No.	Error Time	No.	Error Time	No.	Error Time	No.	Error Time
Top CT__ missing (pos._)					1	(*):0:30:32		
CT3220 initial. error pos. _					1	0:30:33		
Extr. low voltage L_:__V	1	0:02:20	1	0:02:26	1	0:18:40		
ExEx low voltage L_:__V	3	3:11:47	3	2:48:35	2	17:56:57	6	3:12:38
Thermoerror yawmotor F__	2	25:58:49						
Low oil-level, hydraulic					1	88:24:05		
Thermoerror hydraulicmotor			1	58:21:56				
Hydr. Temperature high : __℃	1	(*):95:12:34						
Max. Windspeed acc.____m			1	54:07:42			1	11:58:42
Low gear oil pressure	11	208:57:36						
High gear temperature: __℃	145	63:08:12			21	180:16:05		
Feedback = _, Brake	1	(*):78:03:15						
Error temp.sensor R____℃					11	92:39:06		
Feedback = _, Bypass contactor			1	0:28:38				
RCC timeout							1	0:01:00
Too many auto-restarts: __	4	(*):33:20:31			7	(*):87:08:01		
Emergency circuit open			2	70:38:27 (*):1:10:27				
External 24V power supply eq.			1	0:07:39				
WATCHDOG was not triggered							2	0:07:39
Trip Q_Feedback error			5	140:09:08				
Total	168	301:18:44	14	326:44:27	45	380:05:26	10	15:19:59



이와 같이 우리나라는 낙뢰로 인한 풍력발전기의 고장을 분석하고 서지보호기의 신설이나 교체 등의 대책을 강구하는 자료는 있었으나 아직 해외의 경우와 같은 구체적인 연구결과나 그 대책은 보고되지 않았다.

## 2. 적용방안

Table 3은 본 논문의 참고문헌에서 나타난 고장·사고를 풍력발전기의 낙뢰피해 종류에 따라 분류한 것이다. 국내·외를 나누고 국내를 다시 제주도와 그 외 지역으로 나누어 국내 및 제주도의 낙뢰로 인한 풍력발전기의 고장·사고 특성을 파악할 수 있게 하였다.

Table 3 Research of accident and failure by cases

고장·사고 분류		해외 발생 수	국내	제주도
리셉터	용해손상			
	주변 열 손상	2		
	손실	2		
다운컨덕트	용해손상			
블레이드	표면 열손상	2		2
	구멍	1		
	열상(찢어짐)	1	1	
	탈락	3		
나셀 내부	파괴	10		
	샤프트의 전식			
나셀 위	발전기 권선의 절연파괴			
	피뢰침 용해손상			
제어기기 및 전력기기	풍향·풍속계 열손상			
	통신기기 파손	2	2	1
	리액터, 콘덴서 등의 파손	3	3	
변압기	플레이트 기관의 전자부품 손상	4		
	트랜스권선의 파괴			

표에서는 참고문헌을 통해 조사한 것으로 국내·외의 동향을 완전히 파악했다고는 할 수 없으나 실제 국내의 사례 전체를 모아서 분류하고 우리나라 풍력발전단지 고장·사고 데이터베이스를 구축할 수 있을 것이라 사료된다.

Fig. 17은 풍력발전기의 낙뢰에 의한 고장·사고 데이터베이스를 구축하기 위한

방안이다. Fig. 16을 참고하여 작성하였으며, 상자의 색으로 사업자, 정보교환시스템, 연구자 및 국가의 역할을 분류하였다. 고장·사고가 발생했을 경우에 인터넷 접속을 통한 설문조사를 하고, 이를 통해 연구자를 파견하거나 대책에 관한 사례를 제시함으로써 풍력발전단지의 원활한 관리를 지속할 수 있을 것이라 생각된다. 또한 국가의 기술개발 과제 선정을 통해 우리나라에 적합한 풍력발전기의 낙뢰 보호규정을 제정할 수 있으며, 낙뢰보호 소프트웨어 개발에 박차를 가할 수 있을 것으로 사료된다.

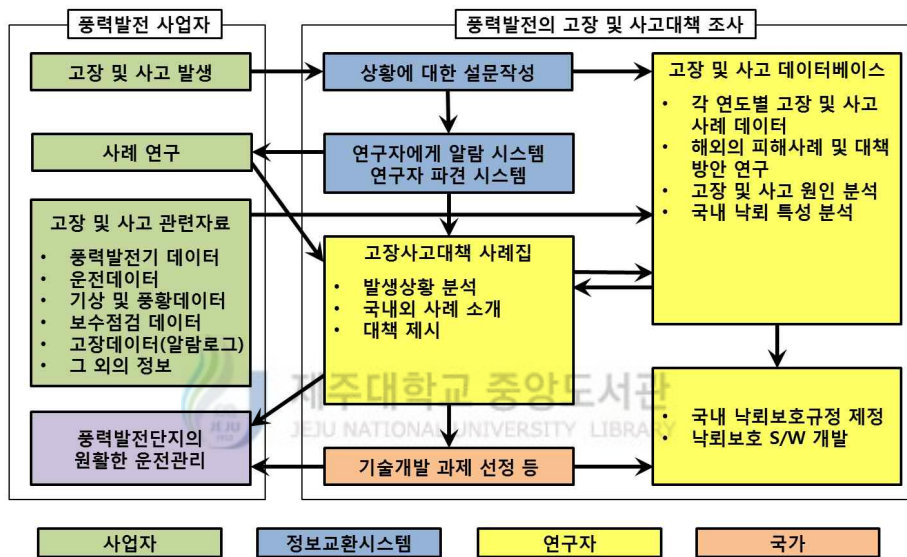


Fig. 17 Research flowchart of accident and failure.

기본적으로 풍력발전기의 낙뢰에 대한 대책을 중점적으로 고려하여 작성하였으나, 이 외에도 고장·사고 발생 상황을 통합적으로 관리하고 위의 과정을 지속적으로 수정하여 보완한다면 낙뢰만이 아닌 전반적인 고장·사고 대책을 충분히 모색할 수 있을 것이라 판단하였다.

### Ⅲ. 제주도의 낙뢰 특성 및 풍력단지의 낙뢰율

#### 1. 낙뢰자료 수집 및 연구 방법

##### 1) 낙뢰자료 수집

기상청에서 운영 중인 IMPACT ESP는 낙뢰탐지용 장비로서, 이 연구에서는 이로부터 탐측된 낙뢰자료를 활용하였다.

Fig. 18은 IMPACT ESP가 설치된 지역을 나타낸다.[3] 이 장비는 백령도, 인천, 동해, 추풍령, 광주, 진주, 서귀포로 전국 7개소에 설치되어 있다. 그림에서 LDARⅡ는 Lightning Detection and Range Ⅱ로 구름방전을 주로 관측하는 장비이며, 전국 17개소에 설치되어 있다.

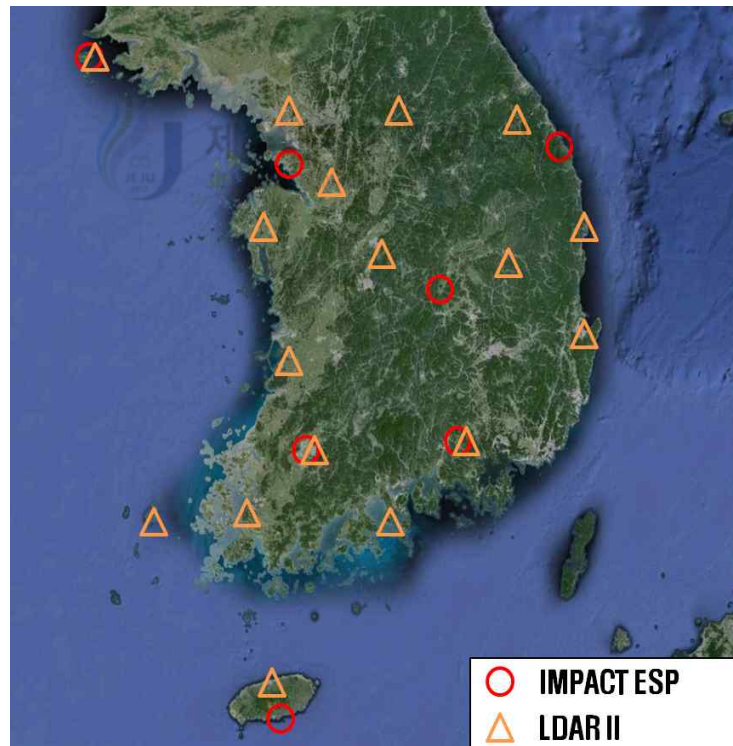


Fig. 18 Location of lightning detection sensor.[3]

Table 4는 IMPACT ESP의 외관과 특성을 나타낸다. 표에서 MDF와 TOA는

각각 방향탐지방식(Magnetic Direction Finding)과 도달 시간차 방식(Time Of Arrival)의 약자이다.

Table 4 Appearance and characteristics of IMPACT ESP

	제작회사	미국 GAI
	낙뢰 탐지 방식	MDF + TOA
	수신주파수 대역	LF/VLF
	감지효율	90%이상
	감지범위	250km 이내, 0.5km
	시간 동기화	GPS 부착
	탐측 종류	Cloud - Ground Flash Return Stroke

2개 이상의 감지기를 50~300km 간격으로 배치하여 낙뢰의 주방전에 의해 생성된 전자파를 감지하여 측정하고 각 수신기에서 서로 다른 시간에 수신된 신호가 수신기에 도착하는 시간을 GPS 신호에 동기화시켜 피뢰 위치를 감지하는 방식이다. LF(Low Frequency)와 VLF(Very Low Frequency)의 주파수를 수신하며 낙뢰의 복귀뇌격(Return Stroke)을 탐지하는 방식으로 낙뢰를 탐측한다. 여기서 복귀뇌격은 선도뇌격이 지면과 만나는 시점에 구름을 향해 상승하는 밝고 빠른 방전을 의미한다.

Fig. 19는 낙뢰자료에 기입된 수치의 의미를 설명하는 파일이다. 2001년부터 도입되었기 때문에 2002년부터 파일이 수거되었으며, 날짜에 관한 자료가 '월/일/년'의 순으로 저장되어 있는 것이 특징이다. 연구에서 주로 사용한 데이터는 날짜와 시간, 경위도, 강도, 낙뢰종류이다.

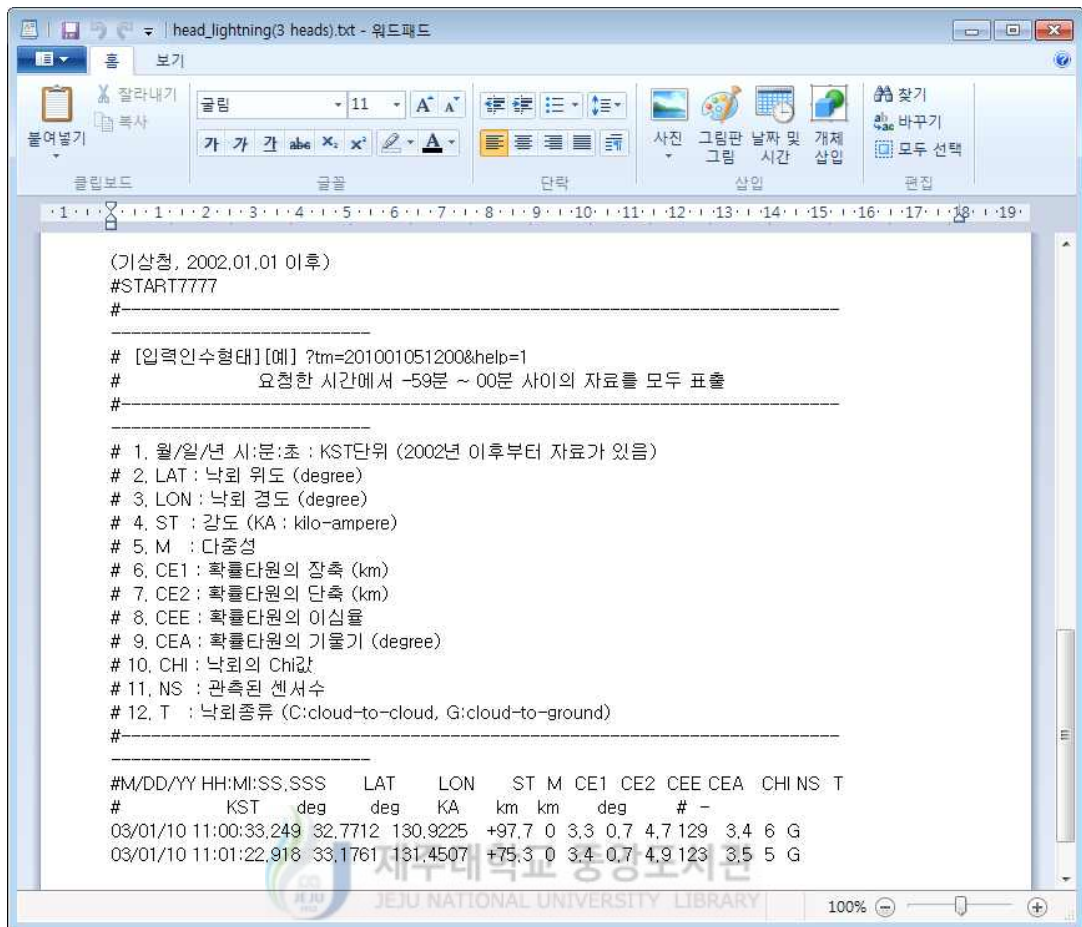


Fig. 19 Contents of lightning data observed by TLDS.

Fig. 20은 위의 IMPACT ESP에 관측된 각각의 낙뢰자료를 취합한 파일을 나타낸다. 각 연도의 한 달 간격으로 데이터가 저장되어 있다. 낙뢰자료는 아스키 방식으로 저장되어 있다.

파일(F)	편집(E)	서식(O)	보기(V)	도움말(H)									
2001-01-03	48:02.6	33.8758	133.8526	83.4	0	20.9	1.4	14.9	118	2.3	4	G	
2001-01-03	51:55.0	36.3871	130.9784	151.4	0	6.4	0.8	8	96	2.9	4	G	
2001-01-03	25:05.9	36.0429	134.8237	-29.7	0	36	1.8	20	93	0	2	G	
2001-01-03	25:06.2	36.2764	131.7453	-39.2	0	7.7	0.8	9.6	93	2.3	7	G	
2001-01-03	19:21.5	35.4055	131.3459	139.7	0	6.5	0.8	8.1	111	2.7	4	G	
2001-01-03	20:51.2	35.3189	131.3275	-25.7	0	4.2	0.6	7	98	5.5	3	G	
2001-01-03	20:51.2	35.2236	130.9511	96	0	6.5	0.7	9.3	86	2.4	3	G	
2001-01-03	28:34.0	35.4567	131.1342	66.6	0	6.5	0.8	8.1	110	5	3	G	
2001-01-03	16:10.7	34.0707	133.9298	-61.8	0	22.4	1.3	17.2	116	2.7	4	G	
2001-01-03	20:39.1	35.4916	131.3475	21.1	0	7.3	0.8	9.1	108	7.4	3	G	
2001-01-03	23:51.2	33.7768	134.0167	47.4	0	28.9	1.7	17	119	3.7	3	G	
2001-01-03	53:47.5	34.8667	131.9737	77.7	0	20.7	1.5	13.8	109	1	5	G	
2001-01-03	49:50.0	36.1868	132.1447	41.8	0	17.2	1.1	15.6	95	4.1	3	G	

Fig. 20 An example of collected lightning data.

2) 분석 범위 및 S/W

Fig. 21은 본 연구에서 설정한 제주도의 범위를 나타낸다. 그 범위는 육·해상을 포함하는 북위 33°06'~33°36', 동경 126°06'~127°이다. 그림에 제주도내 기존 및 건설 예정 풍력단지의 위치도 함께 나타내었다. 이 논문에서 기존의 풍력단지인 한경, 행원, 가시, 성산, 삼달 5개 풍력단지는 실제 위치를 바탕으로 지역을 설정하였으며 건설예정 풍력단지인 한림, 어음, 상명, 김녕, 동북, 가시 6개 풍력단지는 제주도청[72]에서 2013년부터의 고시를 확인하여 위치를 설정하였다. 모든 풍력단지는 제주에너지공사[73] 등의 자료를 통해서 20MW 이상인 풍력단지에 대해서만 선정하였고 낙뢰율을 평가하였다.



Fig. 21 Study range and positions of wind farms of Jeju Island.

기존 풍력단지 5개 지역과 건설예정 풍력단지 6개 지역에 관하여 낙뢰의 특성을 조사하였다. 또한 각각의 단지에 발생된 낙뢰 횟수를 풍력단지설계 소프트웨어인 WindPRO의 Site compliance모듈에서 사용되는 평가기준에 따라 해당 풍력단지의 낙뢰에 대한 평가를 실시하였다.[74]



Fig. 22는 풍력단지의 낙뢰영향 범위 설정과정을 나타낸다. 기존 풍력단지 중 가장 큰 면적을 차지하는 행원 풍력단지에서 동·서·남·북으로 가장 먼 거리에 위치한 풍력발전기를 기준으로 사각형 범위를 만들고 낙뢰가 항상 수직으로만 발생하지 않음을 고려하여 사각형의 중심을 기준으로 9배의 면적으로 설정하였다. 이는 국제표준인 IEC에서 풍력발전기 하나당 낙뢰의 영향을 받을 수 있는 길이를 풍력발전기 높이의 세배로 설정한 것에 따른 면적이며 이 면적을 연구에서 평가되는 모든 풍력단지에 적용하여 보다 공정한 평가를 하고자 하였다. 본 연구에서는 가로 4.9km, 세로 4.13km로 면적이 20.237km<sup>2</sup>인 범위로 설정하였다. 또한 건설예정인 풍력단지는 아직 풍력발전기를 설치하지 않았기 때문에 주소를 통해 경위도를 대략적으로 파악하였으며, 파악된 경위도를 중심으로 설정하였다.



Fig. 22 Study area of a wind farm.

Table 5는 낙뢰등급표를 나타낸다. ‘+’는 정극성, ‘-’는 부극성이다. 여기서 정극성은 구름 밑면이 +이고 대지가 -일 때의 낙뢰이며 반대의 경우는 부극성이라 한다. 등급의 절대값 숫자가 0에 가까울수록 약한 낙뢰로, 등급의 절대값이 높을

수록 강한 낙뢰로 분류된다. 낙뢰방전은 대기방전을 일으킬 수 있는 전계를 형성하는 전하 영역에서 일어난다. 이 중에서 가장 빈번하게 발생하는 현상은 운내방전이지만, 실제로 풍력발전기에 직·간접적으로 영향을 미치는 것은 대부분이 낙뢰이다.

Table 5 Lightning class

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

Fig. 23은 기상청에서 운영하는 IMPACT ESP에 수집된 낙뢰자료를 분석하기 위해 사용한 소프트웨어이다. 이전의 연구[5]를 위해 개발한 것으로 경위도를 설



정할 수 있으며 Fig. 13의 낙뢰자료를 입력값으로 하고 경위도별로 낙뢰강도, 낙뢰등급, 낙뢰일수와 낙뢰횟수를 출력한다. 이 외에도 등급별, 등급 계절별, 시간별, 월별, 월별 극성별 낙뢰횟수를 제공한다.

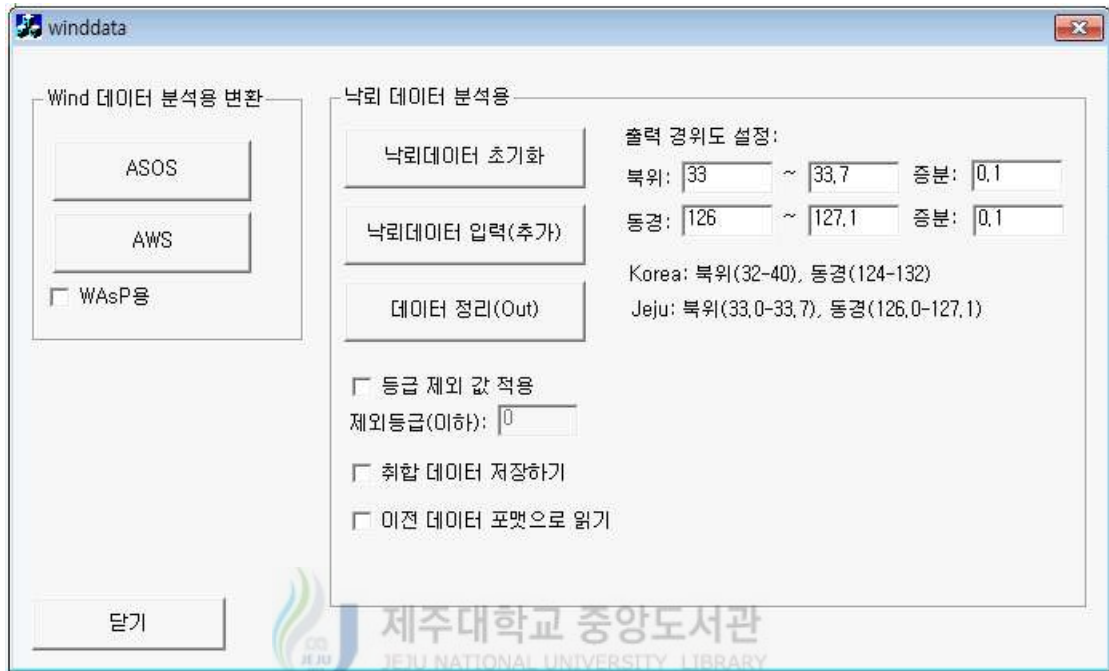


Fig. 23 Main page of the lightning data analysis program.

Fig. 24는 Fig. 23의 소프트웨어를 통해 출력되는 자료이다. 경위도는 십진법에 따라 표기되며 설정 경위도별 낙뢰일수 및 낙뢰횟수는 설정된 증분에 따라 자료가 취합된다. 경위도별 낙뢰강도 및 낙뢰등급은 증분에 따라 분류되지 않으며 각 낙뢰자료의 경위도가 소수점 3자리까지 표기된다. 등급별 낙뢰횟수는 경위도별 낙뢰등급을 등급에 따라 다시 분류하여 표로 나타낸 것이며, 등급 계절별 낙뢰횟수는 등급별 낙뢰횟수를 계절별로 세분화하여 표로 나타낸 것이다. 월별 낙뢰횟수 및 월별 극성별 낙뢰횟수 또한 우선 월별로 분류하여 표로 나타내고서, 다시 극성별로 분류하여 매월마다의 낙뢰양상을 보여준다. 시간별 낙뢰횟수는 낙뢰가 발생한 시간을 1시간씩 구분하여 나타낸다.



Fig. 24 Sample of the result from the lightning data analysis.

Fig. 25는 낙뢰지도를 만들기 위해 사용된 소프트웨어 Surfer 8이다. 낙뢰일수와 낙뢰횟수를 나타내는 지도는 Kriging method를 이용하였다. Kriging method는 Interpolation 기법의 하나로 전산실험 계획으로 얻어진 정보를 바탕으로 다음과 같이 전역 모델과 국부편차의 합으로 구성된다.

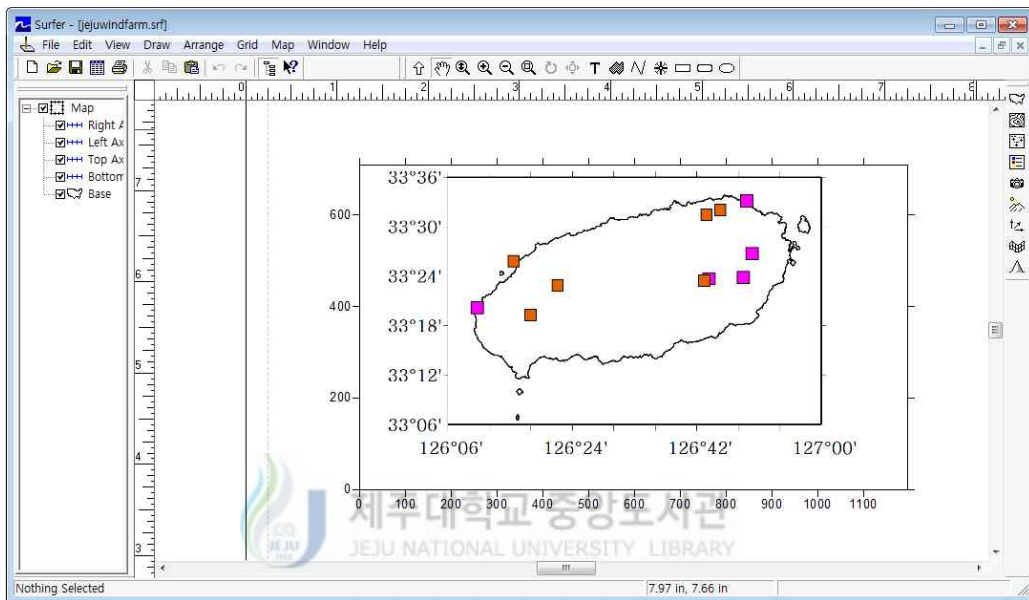


Fig. 25 Surfer 8 S/W.

## 2. 제주도의 낙뢰 특성

### 1) 낙뢰 특성

Fig. 26은 각 연도의 낙뢰 횟수를 나타낸다. 이전의 연구[4]에서는 IMPACT ESP의 낙뢰 탐지효율이 90%인 점을 고려하여 보정계수 1.11을 곱하였으나, 본 논문에서는 낙뢰 탐지효율이 90% 이상인 점을 고려하여 보정계수를 생략하였다. 2003년에 낙뢰가 가장 많았으며 2012년에 낙뢰가 가장 적었음을 알 수 있다. 낙뢰연보[16]에서는 우리나라의 낙뢰가 격년으로 증가한다고 하였으나 제주도는 그러한 경향을 찾을 수 없었다.

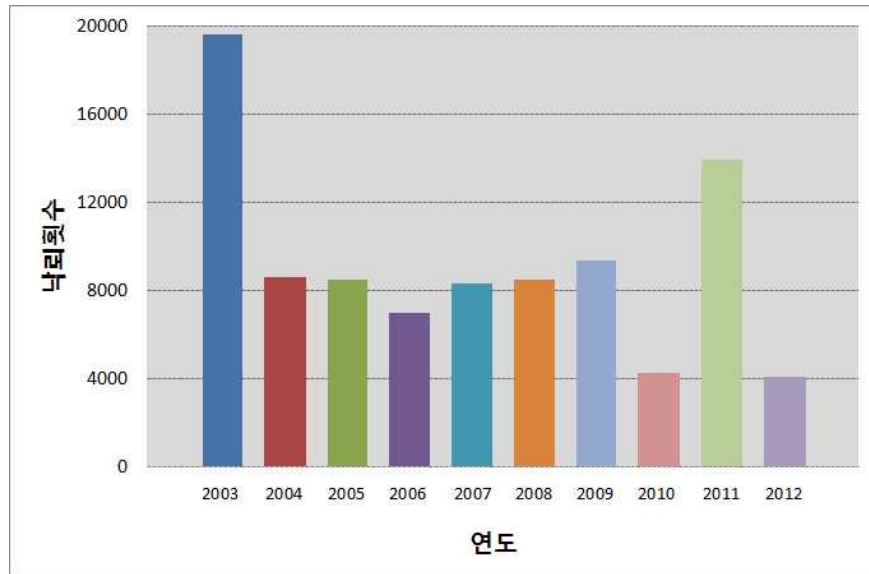


Fig. 26 Graph of number of lightning in decade.

Fig. 27은 각 연도의 낙뢰 일수를 나타낸다. Fig. 26과 비교하면 2003년의 경우 낙뢰 횟수는 가장 높지만 낙뢰 일수는 3번째로 높은 것을 알 수 있으며, 2007년에는 낙뢰 일수가 가장 높았으나 낙뢰 횟수는 적은 편에 속하는 것을 알 수 있다. 그 외에도 전체적으로 낙뢰 횟수와 낙뢰 일수의 상관성이 높지 않은 결과임을 알 수 있다.

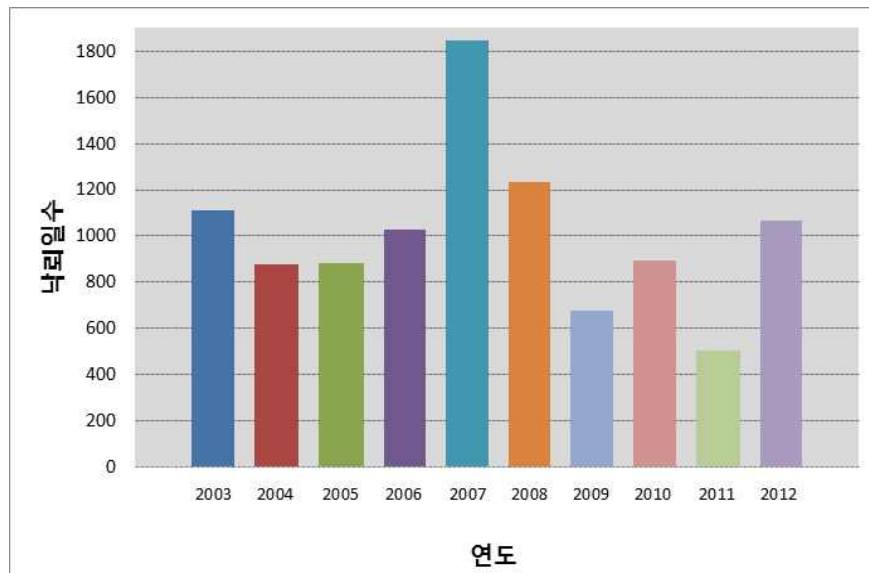


Fig. 27 Graph of lightning days in decade.

Table 6은 설정된 제주도의 범위에 따라 각 연도에 낙뢰가 발생한 횟수 및 태풍명이다. 2003년은 사우델로스, 매미 2개의 태풍이 지나갔으나 가장 많은 낙뢰가 발생하였으며 2007년부터 3년간은 태풍이 한 차례씩 발생했지만 낙뢰는 2010년에 비해 두 배 이상 발생하였다. 2012년에는 덴빈, 블라벤, 산바 등 5개의 태풍이 지나갔으나 낙뢰 발생 횟수는 가장 적었다. 결과적으로 태풍의 발생횟수는 낙뢰의 발생과 큰 연관이 없다고 판단된다.

Table 6 The number of lightning occurrence and typhoon's name in each year

	낙뢰횟수	발생한 태풍명
2003년	19608	사우델로스, 매미
2004년	8621	민들레, 메기, 송다
2005년	8460	나비, 카눈
2006년	6955	에위니아, 우콩, 산산
2007년	8285	나리
2008년	8476	갈매기
2009년	9347	모라꽃
2010년	4239	덴무, 곤파스
2011년	13942	메아리, 무이파
2012년	4067	카눈, 담레이, 덴빈, 블라벤, 산바

Table 7은 시간대별 낙뢰 발생횟수를 나타낸 것이다. 2008년과 2011년의 최다 낙뢰발생 시간대는 23시이나 2009년 최소 낙뢰발생 시간대 역시 23시이다. 또한 14시도 2009년 최다 낙뢰발생 시간대인 반면 2010년과 2011년에는 매우 적은 횟수임을 알 수 있다. 이 외에도 각 연도마다 시간대의 발생 빈도를 비교한 결과, 이전의 연구[66]에서는 낙뢰의 발생은 시간대에 의존한다고 했으나 본 연구의 결과에서는 상관성이 크지 않았다.

Table 7 Yearly number of lightning and lightning rate by each hour

시간	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	합계	비율 (%)
0	4527	57	1226	250	344	242	70	44	1839	55	8654	9.41
1	770	299	163	233	308	146	257	59	1160	60	3455	3.76
2	232	400	279	82	279	347	300	201	240	78	2438	2.65
3	573	563	355	108	288	817	741	798	145	212	4600	5.00
4	356	498	512	218	419	536	819	333	280	268	4239	4.61
5	384	854	342	130	563	669	132	369	132	483	4058	4.41
6	1954	738	368	62	416	341	44	472	48	174	4617	5.02
7	2569	344	151	139	545	246	101	215	215	122	4647	5.05
8	800	422	71	203	473	420	65	107	519	75	3155	3.43
9	356	256	108	234	472	169	50	197	1055	68	2965	3.22
10	429	459	74	181	402	162	52	75	444	106	2384	2.59
11	166	911	138	131	279	245	96	225	109	295	2595	2.82
12	195	648	291	481	490	479	89	124	59	841	3697	4.02
13	608	342	266	456	262	562	337	55	26	573	3487	3.79
14	993	206	211	353	514	578	2094	42	93	164	5248	5.70
15	1092	176	110	833	318	218	1495	131	69	216	4658	5.06
16	269	188	236	599	527	48	817	85	92	71	2932	3.19
17	172	337	204	322	235	101	764	72	54	32	2293	2.49
18	90	279	467	404	97	239	182	141	56	23	1978	2.15
19	58	91	424	170	89	225	205	182	426	14	1884	2.05
20	1337	49	141	464	92	190	284	123	1422	29	4131	4.49
21	959	162	712	446	139	102	246	89	1180	45	4080	4.43
22	147	185	862	206	276	441	82	49	2004	22	4274	4.65
23	572	157	749	250	458	953	25	51	2275	41	5531	6.01
합계	19608	8621	8460	6955	8285	8476	9347	4239	13942	4067	92000	100

Table 8은 낙뢰등급표에 따라 등급별·계절별로 발생한 낙뢰빈도를 나타낸 것이다. 여름이 겨울에 비해 110배 이상으로 낙뢰가 많이 발생하며, 가을도 겨울에 비해 50배 정도 낙뢰가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 각 계절마다의 낙뢰 횟수는 큰 차이를 보이지만 등급에 따른 낙뢰 빈도의 경향은 -7~-3등급 사이에 가장 많아 전체적으로 매우 유사하다 판단된다.

Table 8 Frequency of Seasonal lightning occurrence and occurrence rate by lightning level

등급	봄	여름	가을	겨울	합계	비율(%)
-12 이하	0	0	0	0	0	0
-11	0	10	4	0	14	0.015
-10	9	119	34	0	162	0.176
-9	28	730	225	5	988	1.074
-8	101	2692	962	10	3765	4.092
-7	249	6973	2743	27	9992	10.861
-6	576	13078	4821	55	18530	20.141
-5	808	14656	6160	105	21729	23.618
-4	770	12880	5786	92	19528	21.226
-3	250	5049	1875	37	7211	7.838
-2	3	70	18	1	92	0.1
-1~0	0	0	0	0	0	0
1	0	15	0	0	15	0.016
2	17	532	367	2	918	0.998
3	73	1296	1004	15	2388	2.596
4	286	1184	658	39	2167	2.355
5	463	1178	513	48	2202	2.393
6	171	514	258	26	969	1.053
7	94	341	113	28	576	0.626
8	95	259	89	27	470	0.511
9	50	117	32	19	218	0.237
10	7	33	2	10	52	0.057
11	3	4	0	5	12	0.013
12	0	0	0	2	2	0.002
13 이상	0	0	0	0	0	0
합계	4,053	61,730	25,664	553	92000	100

Table 9는 등급별·연도별로 발생한 낙뢰횟수를 나타낸다. 각 연도에 따른 낙뢰 분포는 대체로 유사한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 또한 Table 8과 마찬가지로 주로 -7~-3등급 사이에서 가장 많은 낙뢰빈도를 보이며, 정극성에서도 3~6등급 사이의 빈도가 높음을 알 수 있다. 반면에 절대값이 13 이상인 낙뢰와



0등급의 낙뢰는 발생하지 않았다.

Table 9 Frequency of yearly lightning occurrence by lightning level

등급	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
-12이하	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-11	1	0	0	0	7	5	1	0	0	0
-10	20	17	8	8	47	20	21	4	6	11
-9	152	149	66	37	163	142	112	45	74	48
-8	702	416	262	117	456	509	447	188	491	177
-7	2447	1121	716	361	768	903	1117	528	1585	446
-6	4617	1925	1664	964	1067	1286	2231	1090	2621	1065
-5	4705	2112	2242	1699	1572	2070	2358	979	3021	971
-4	3942	1628	1831	1839	2409	2506	1541	520	2925	387
-3	1434	507	735	996	697	586	814	211	1074	157
-2	19	3	9	7	4	6	36	1	6	1
0~-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0
2	146	42	52	54	34	47	146	32	342	23
3	426	226	268	157	93	79	219	60	803	57
4	302	245	338	251	283	84	92	53	444	75
5	230	97	111	286	413	52	86	212	308	407
6	155	54	45	83	131	45	161	139	125	
7	129	37	40	35	69	26	73	68	43	
8	109	27	42	38	44	56	25	58	27	44
9	54	12	23	17	21	28	14	21	6	22
10	17	1	6	2	7	6	0	3	2	8
11	1	0	2	4	0	4	1	0	0	0
12	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
13이상	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 10은 10년간 월별 극성에 따른 낙뢰횟수를 나타낸다. 일반적으로 뇌운의 하부에 음전하의 중심이 있기 때문에 모든 달에서 부극성 낙뢰가 정극성 낙뢰보다 많이 발생하고 있다. 낙뢰가 적은 달에서의 정극성 낙뢰는 높은 비율을 보이지만 합계에서 정극성 낙뢰의 비율은 약 11%이다. 또한 7월, 8월, 9월에 낙뢰가 많이 발생하며, 이는 전체 낙뢰 횟수의 80% 이상임을 알 수 있다. 또한 12월, 1월, 2월에 낙뢰가 적게 발생하며, 전체 낙뢰 횟수의 0.6%로 우리나라 전체의 낙뢰특성을 분석한 이전의 연구[4]와 유사한 결과가 나왔다.

Table 10 Monthly lightning occurrence and occurrence rate by polarity

월	정극성		부극성		합계	
	횟수	확률(%)	횟수	확률(%)	횟수	확률(%)
1	22	30.14	51	69.86	73	0.08
2	90	46.88	102	53.13	192	0.21
3	235	21.00	884	79.00	1119	1.22
4	377	23.70	1214	76.30	1591	1.73
5	647	48.18	696	51.82	1343	1.46
6	597	11.65	4529	88.35	5126	5.57
7	2202	9.19	21763	90.81	23965	26.05
8	2674	8.19	29965	91.81	32639	35.48
9	2508	13.64	15880	86.36	18388	19.99
10	214	5.32	3806	94.68	4020	4.37
11	314	9.64	2942	90.36	3256	3.54
12	109	37.85	179	62.15	288	0.31
합계	9989	10.86	82011	89.14	92000	100

2) 낙뢰 지도

Fig. 28은 낙뢰 등급이  $\pm 9$ 이상의 강도를 가진 낙뢰의 분포를 나타낸다. 낙뢰 지도는 연구범위에서 제시한 기존 풍력단지과 건설예정 풍력단지의 위치를 표기하였다. 모든 등급을 전부 표기하기에는 발생한 낙뢰가 너무 많아 특성을 파악하기 어려울 것으로 판단되었고, 등급의 절대값이 높아질수록 더 큰 피해가 일어날 것으로 생각되었기 때문에 절대값이 8이하의 등급에 포함되는 낙뢰는 제외하였다. 이 그림에서는 10년간 정극성 낙뢰 218회, 부극성 낙뢰 890회의 데이터가 분포되어있다. 상대적으로 제주도 동쪽에  $\pm 9$ 등급 이상의 낙뢰가 많이 발생하였다. 그러나 Fig. 29 및 Fig. 30을 통해 알 수 있듯이, 낙뢰가 제주도 서쪽보다는 동쪽에서 더 많이 발생하는 것을 고려한다면  $\pm 9$ 등급 이상의 낙뢰 발생은 비교적으로 균등하며, 제주도 서쪽에서 강도가 더 높은 낙뢰의 발생이 빈번하다고 할 수 있다. 추가적으로 육상과 해상에서의 낙뢰 발생분포 또한 균등하다고 판단된다.

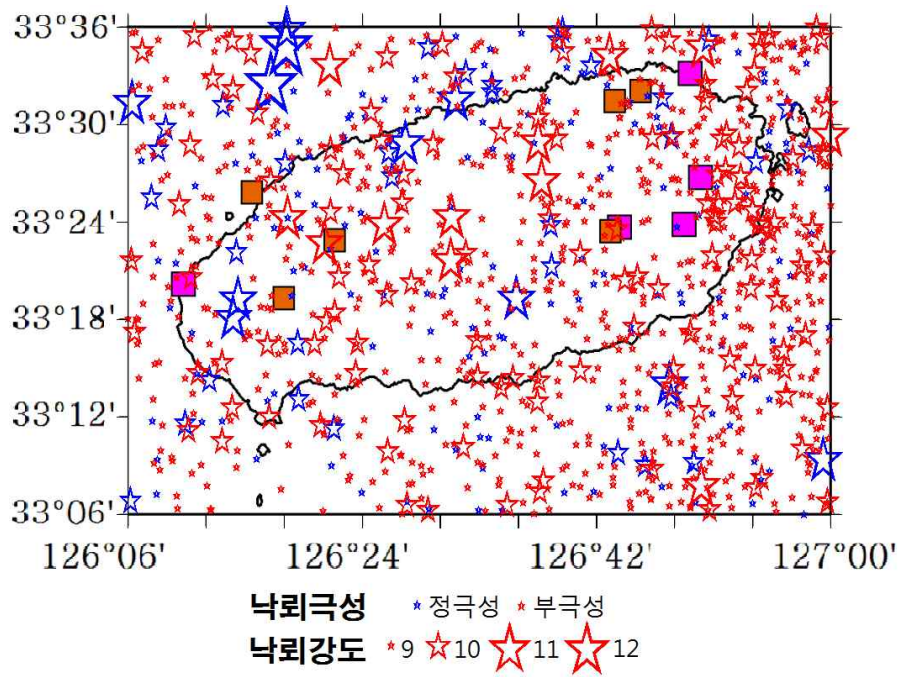


Fig. 28 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2003~2012.

Fig. 29는 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. 행원 풍력단지 부근 해안과 제주도 동쪽 끝 해안에서 낙뢰 횟수가 매우 높은 것을 알 수 있다.

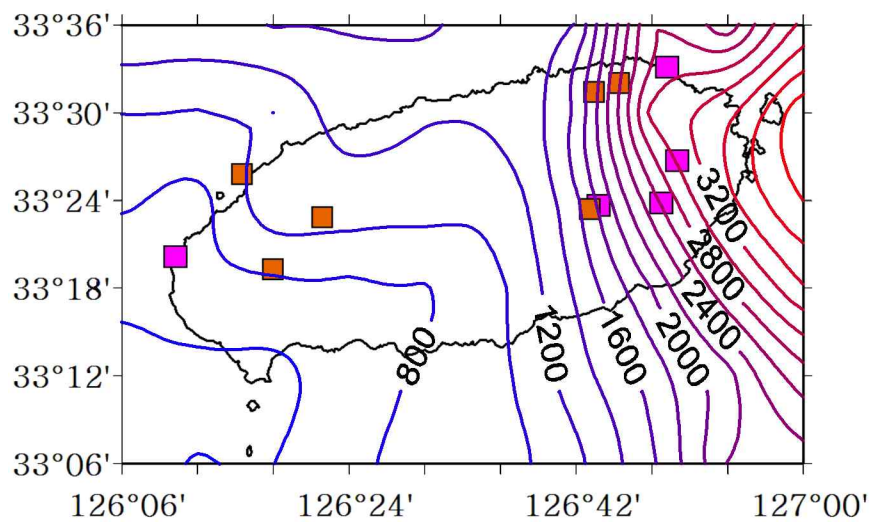


Fig. 29 Distribution of the number of lightning in 2003~2012.

Fig. 30은 제주도 지역별 낙뢰 일수를 나타낸다. 낙뢰 일수 또한 횡수와 같이 동쪽으로 갈수록 점차 많아지는 것을 알 수 있다. 그러나 낙뢰 횡수와는 다르게 제주도 북동쪽 끝과 제주도 남쪽 해안에서 낙뢰 일수가 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 29와 Fig. 30에서 낙뢰 일수는 동쪽과 서쪽 지역의 차이가 10년간 120일 정도이지만, 낙뢰 횡수로는 약 6배의 차이를 보이고 있다.

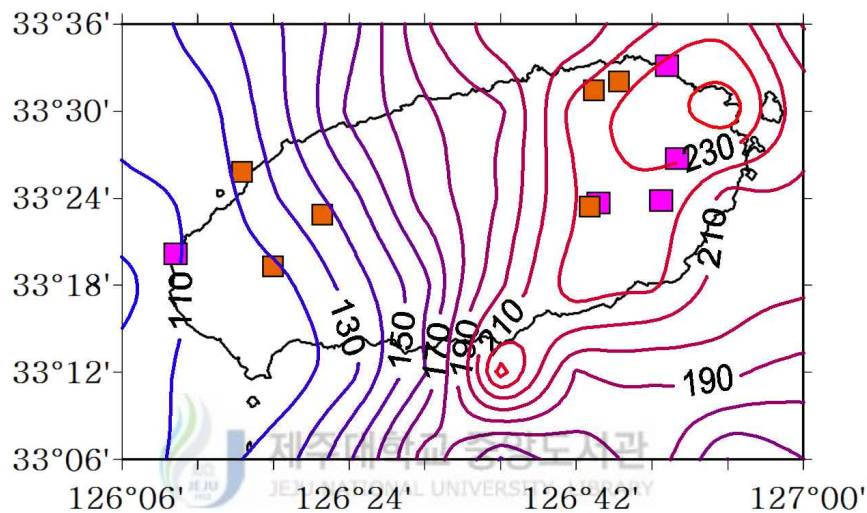


Fig. 30 Distribution of lightning days in 2003~2012.

### 3) 제주도내 풍력단지의 낙뢰율

Fig. 31 및 Fig. 32는 설정된 범위에 따른 각 기존 풍력단지의 낙뢰횡수와 낙뢰일수를 나타낸다. 삼달의 경우 2005년 180회로 가장 많았으며 전체 합계 또한 773회로 가장 많았다. 가시 풍력단지는 삼달과 같이 2005년에 가장 많은 낙뢰가 발생하였다. 행원은 2011년에 낙뢰횡수가 138번인 반면 낙뢰일수는 5일로 가장 큰 격차를 보였다. 제주도 서쪽에 위치한 한경의 경우 낙뢰횡수에서 타 풍력단지보다 매우 낮은 낙뢰횡수를 보였으며 낙뢰일수 또한 매우 낮음을 알 수 있다.

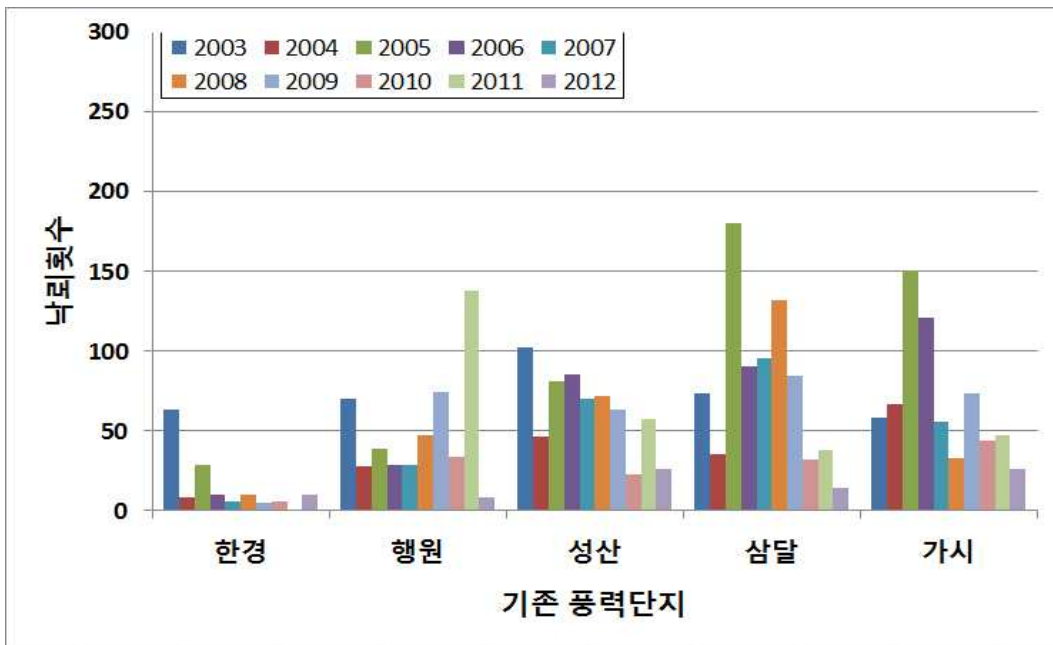


Fig. 31 Number of lightning data of each wind farm.

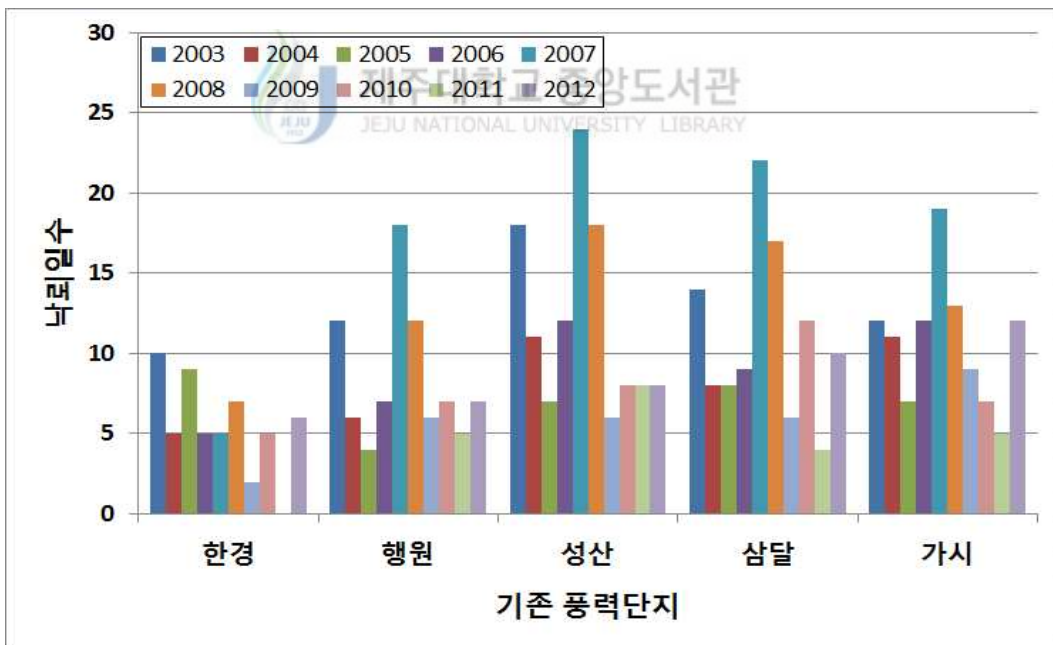


Fig. 32 Lightning days data of each wind farm.

Table 11에 제주도에서 현재 운영 중인 5개의 풍력단지에 발생한 낙뢰를 Fig. 22에 나타난 범위에 맞춰 낙뢰 특성을 나타내었다.

한경은 2011년에 낙뢰횟수가 0이다. 또한 평균 낙뢰강도가 -17.6kA로 다른 동쪽의 풍력단지보다 6kA이상 큰 절대값 수치를 보인다. 또한 최다 낙뢰등급도 -5로 다른 지역보다 절대값이 높은 편에 속하지만 낙뢰율 평가로는 가장 안전한 지역이다. 행원의 낙뢰율은 2.45로 우수하다. 성산은 2003년에 가장 많은 낙뢰가 발생하였다. 낙뢰 일수는 가장 높았으나 낙뢰 횟수로는 높은 편이 아닌 것을 알 수 있다. 낙뢰율은 3.09로 우수하다. 삼달과 가시는 2005년에 가장 많은 낙뢰가 발생하였다. 낙뢰율은 각각 3.82, 3.36로 다른 풍력단지에 비해서 높지만 우수하다고 볼 수 있다. 최다 낙뢰 발생월은 한경이 7월에 많았던 것을 제외하고 모두 8월에 많았다.

Table 11 The evaluation of lightning rate for existing wind farms

	한경	행원	성산	삼달	가시
평균낙뢰강도 (kA)	-17.6	-10.9	-11.7	-11.7	-11
최다 낙뢰등급	-5	-5	-4	-4	-4
최다낙뢰 발생월	7월	8월	8월	8월	8월
낙뢰율 평가 (flashes/km <sup>2</sup> /year)	0.73 (GOOD)	2.45 (GOOD)	3.09 (GOOD)	3.82 (GOOD)	3.36 (GOOD)

표에서 낙뢰율(Lightning rate) 평가는 풍력단지설계 소프트웨어인 WindPRO에서 평가하는 방식에 의거하여 구하였다. 즉, 1년간 1km<sup>2</sup>의 범위에 발생하는 낙뢰의 수를 파악하여 그 값이 20을 초과하면 Critical, 10~20인 경우 Caution, 10보다 작으면 Good으로 평가하는 방식이다.

Fig. 33 및 Fig. 34는 설정된 범위에 따른 각 건설예정 풍력단지의 낙뢰횟수와 낙뢰일수를 나타낸다. 낙뢰일수에서는 큰 차이를 보이고 있지 않으나 제주도 서쪽에 위치한 어음, 상명, 한림의 경우 타 풍력단지에 비하여 낙뢰횟수가 낮은 것을 알 수 있다. 김녕의 경우 기존 및 건설예정 풍력단지 중 2011년에 가장 높은 낙뢰횟수를 보인다.



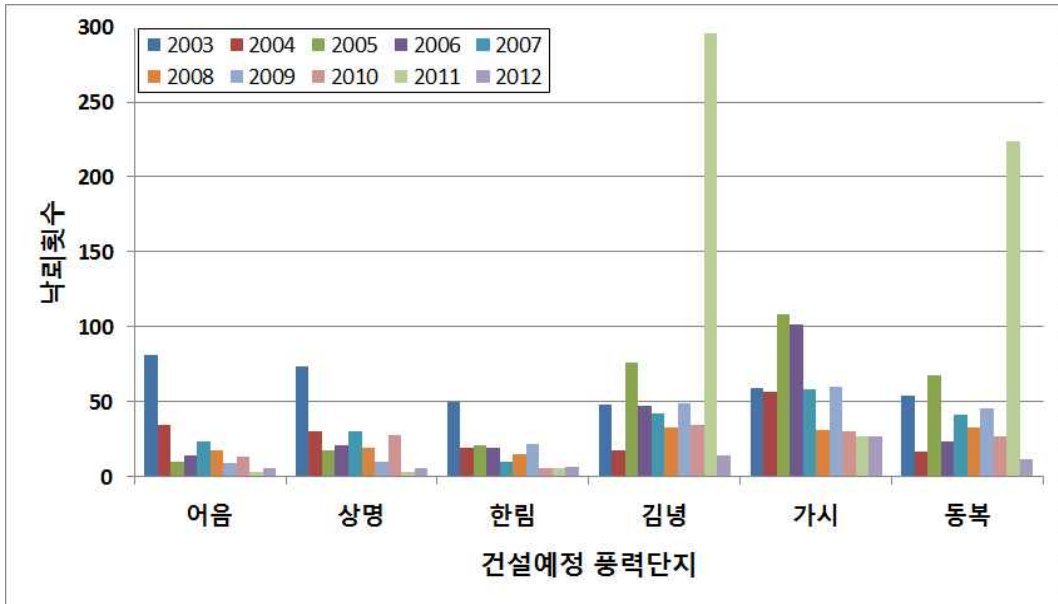


Fig. 33 Number of lightning data of each scheduled wind farm.

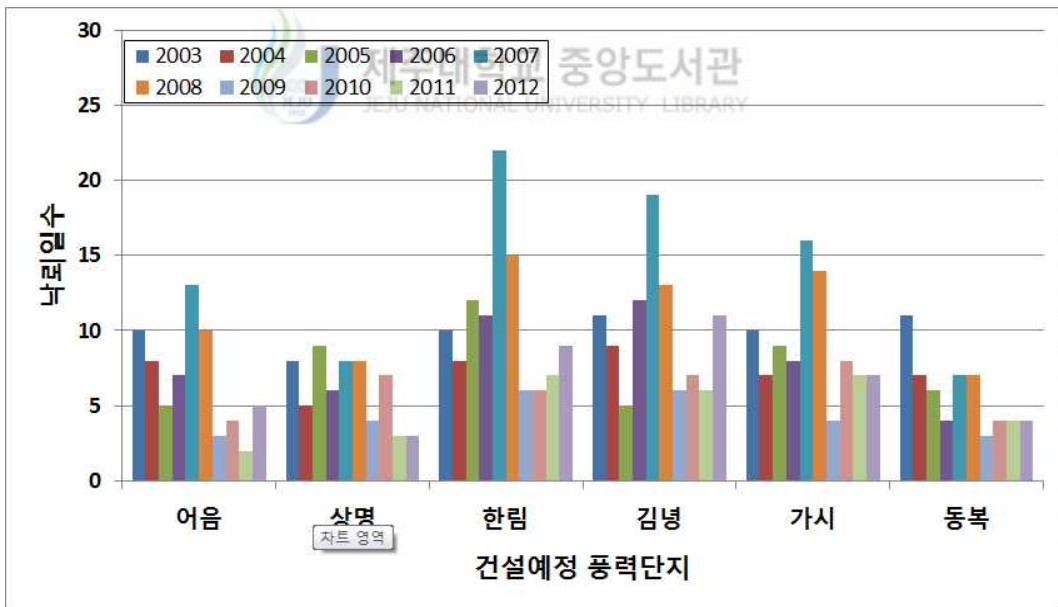


Fig. 34 Lightning days data of each scheduled wind farm.

Table 12는 예정된 풍력지구에 대하여 그 위치를 파악하고 기존 풍력단지에 적용한 것과 같은 범위를 설정하고, Table 11과 같은 형식의 자료를 도출하였다.



Table 12 The evaluation of lightning rate for scheduled wind farms

	어음	상명	한림	가시	동복	김녕
평균낙뢰강도 (kA)	-16.4	-13.7	-13.1	-11.3	-11.2	-10.6
최다 낙뢰등급	-5	-5	-4	-4	-6	-5
최다낙뢰 발생월	8월	7월	8월	8월	9월	9월
낙뢰율 평가 (flashes/km <sup>2</sup> /y ear)	1.05 (GOOD)	1.18 (GOOD)	0.86 (GOOD)	2.76 (GOOD)	2.7 (GOOD)	3.25 (GOOD)

예정 풍력단지들 중 어음의 낙뢰강도가 -16.4로 가장 강하였고, 상명은 같은 제주도 서쪽임에도 평균 낙뢰강도가 비교적 낮았다. 그러나 두 지역 모두 낙뢰 횟수와 낙뢰 일수가 낮고 낙뢰율도 대략 1로 비교적 안전한 사이트라고 판단된다. 김녕의 경우에는 평균 낙뢰강도는 가장 낮지만 낙뢰 횟수와 낙뢰율은 가장 높은 결과가 나왔다. 낙뢰율 평가는 'Good'이지만 다른 곳보다 높은 빈도수를 고려하여 김녕 풍력단지를 건설할 때에는 다른 곳보다 낙뢰 피해에 대하여 더 철저한 대비가 필요하다고 생각된다. 예정 사이트인 가시와 동복은 최다 낙뢰등급과 최다낙뢰 발생월은 차이를 보였으나 낙뢰 횟수, 평균낙뢰강도 및 낙뢰율이 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 특히 예정 사이트인 가시의 경우 기존의 가시 풍력단지와 약 1.38km가 떨어져 있는 가까운 곳임에도 낙뢰 횟수가 100개 이상 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 그러나 낙뢰율을 제외하고 그 이외에는 대체로 유사한 경향을 보인다. 한림의 경우에는 건설예정 풍력단지 중에서 가장 낮은 낙뢰 횟수와 가장 안전한 낙뢰율을 보인다. 또한 제주도 서쪽의 특성에 부합되게 평균 낙뢰강도는 -13.1이다. 최다낙뢰 발생월은 7~9월에 분포하였다.

Table 13은 연구기간 동안 기존 풍력단지에서의 낙뢰로 인한 풍력발전기의 피해 현황을 보여준다. 행원은 연구기간인 2003~2012년 동안 단계적으로나마 운전 중이었고, 한경은 2004년부터 계속 운전되어왔다. 성산, 삼달, 가시는 2008년이 지나고서 운전이 개시되었다. 즉, 행원은 연구기간인 10년간의 낙뢰피해 상황이

고 다른 지역은 운전개시일로부터의 낙뢰피해 상황이다.

한경, 성산은 남부발전에서 관리하는 풍력단지로 1, 2차로 나누어 계획적으로 풍력단지를 조성하였다. 행원 풍력단지는 제주도 최초의 풍력단지이며, 풍력발전기의 종류가 다양하다. 삼달은 민간사업자가 운영하고 있는 곳이며, 가시는 제주 에너지공사에서 국내 풍력발전기만을 설치한 지역이다. 낙뢰피해 건수의 경우 한경, 성산, 가시는 풍력발전기에 대한 낙뢰피해가 없었다. 그러나 행원과 삼달이 각각 1회씩 낙뢰로 인한 피해가 발생했음을 알 수 있다.

Table 13 Damage to wind turbines by lightning over study area of existing wind farms for the study period

	한경	행원	성산	삼달	가시(기존)
운전 개시 달	1차: 2004.2 2차: 2007.12	1998.2~2003.4까지 단계적 운전 개시	1차: 2009.3 2차: 2010.9	2009.9	2012.3
풍력발전기 개수 및 용량	1차: 1.5MW 4기 2차: 3MW 5기	225kW 1기 600kW 2기 660kW 7기 750kW 5기	1차: 2MW 6기 2차: 2MW 4기	3MW 11기	750kW 6기 1.5MW 7기
낙뢰피해 건수	없음	1건	없음	1건	없음
낙뢰피해 일자	-	2009.8.27	-	2011.8.1	-
낙뢰피해 상황	-	블레이드 파손 및 통신 CT3514 손상	-	블레이드 손상	-
피해일자에 각 풍력단지에 발생한 낙뢰횟수 및 낙뢰강도	-	19회 평균: -18.1kA 최소값: -4.3kA 최대값: -43.9kA	-	1회 -8.3kA	-

Fig. 35는 행원 풍력단지 전경의 일부이다. 행원은 제주도 북동쪽 바닷가에 위치하고 있으며 기존 풍력단지 중에서 평균 낙뢰강도가 가장 약한 곳이다. Table 13에서 행원은 블레이드 파손 및 통신 CT3514가 손상되었다. 피해 날짜에 발생한 낙뢰는 행원은 19회로, 평균 낙뢰강도는 -18.1kA이다. Table 11에서 행원의 2009년 낙뢰횟수는 총 74회로, 그 중 19회가 피해날짜에 발생하였다.



Fig. 35 Hangwon wind farm.

Fig. 36은 삼달 풍력단지 전경의 일부이다. 삼달은 제주도 동쪽에 위치하고 있으며 기존 및 건설예정 풍력단지 중에서 10년간 낙뢰횟수가 가장 많은 지역이다.


 제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Fig. 36 Samdal wind farm.

삼달은 낙뢰로 인하여 블레이드가 손상되었다. 삼달의 경우에는 피해날짜에 단 1회의 낙뢰가 발생하였고, 낙뢰강도도 별로 높지 않은 -8.3kA이다. 단 1회의 별로 높지 않은 낙뢰에도 블레이드가 손상될 수 있다는 것을 보여주는 예라고 할 수 있다.

기존 5개의 풍력단지에서 2건의 낙뢰피해가 발생한 것은 생각보다 적다고 할 수 있을 것이다. 이 결과는 그만큼 낙뢰로부터 풍력발전기가 잘 보호되도록 제조되고 있다고 할 수도 있지만, 여전히 낙뢰피해로부터 자유로울 수 없고, 이에 대한 대책이 필요함을 보여주고 있다.



## IV. 풍력발전기에서의 낙뢰 측정

### 1. 낙뢰카운터 설치

실제 풍력발전기에 일어나는 낙뢰의 영향을 알아보기 위해서 가시리 풍력발전단지에서 운전 중인 총 13기 중 7기의 풍력발전기에 낙뢰카운터(Lightning Counter)를 설치하였다. 낙뢰카운터란 직·간접뢰, 유도뢰 및 스위칭에 의한 서지(Surge)를 측정하는 장비이다.

Fig. 37은 낙뢰카운터의 외관 및 설치방법을 나타낸다. 그림에서와 같이 풍력발전기의 접지선에 설치하여, 로고스키코일을 관통하도록 하며, 충격전류가 접지선에 흐를 때 로고스키코일에 자기가 유기되면서 전류가 발생하고, 그 전류 값을 데이터화하여 카운팅하는 방식으로 측정하게 된다. 낙뢰로 인한 서지가 아니어도 측정되기 때문에 서지카운터로 부르기도 한다. 서지란 전선 또는 전기 회로를 따라 짧은 시간에 급속히 증가하는 전력의 과도 파형을 의미한다. 추가적으로 자체 서지보호기능이 내장되어 있다.

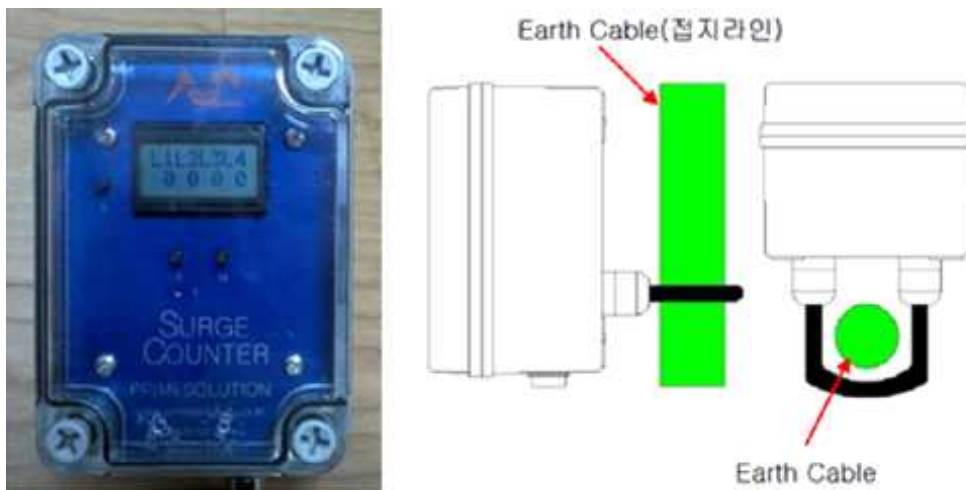


Fig.37 Appearance and install procedure of Lightning counter.

Table 14는 낙뢰카운터의 제원을 나타낸다. 서지의 인입을 날짜와 시간, 서지의 크기를 판별하여 기록한다.

Table 14 Specifications of lightning counter

제조사	Primesolution
크기	80*110*65(mm)
케이스	PC
중량	120( )
전원	DC 12
전력량	50 ~ 60(mA)
인터페이스	RS485, 9600 bps
디스플레이	LCD 20*2
보호등급	IP66

Table 15는 낙뢰카운터의 측정범위를 나타낸다. 전류의 변동을 측정하기 때문에 정극성과 부극성의 구분이 없다.



Table 15 Measurement range of lightning counter

	측정범위(kA)	해당 낙뢰등급
L1	0.5~1	0등급
L2	1~2	0~1등급
L3	2~3	1~2등급
L4	3 이상	2등급 이상

Fig. 38은 가시리 풍력발전단지에서 낙뢰카운터가 설치된 풍력발전기를 나타내며, Fig. 39는 낙뢰카운터가 실제 설치된 모습을 보여준다. 낙뢰카운터를 설치한 풍력발전기는 모두 한진 HJWT1500기종으로 정격출력이 1.5MW이며 허브높이는 70m이다.



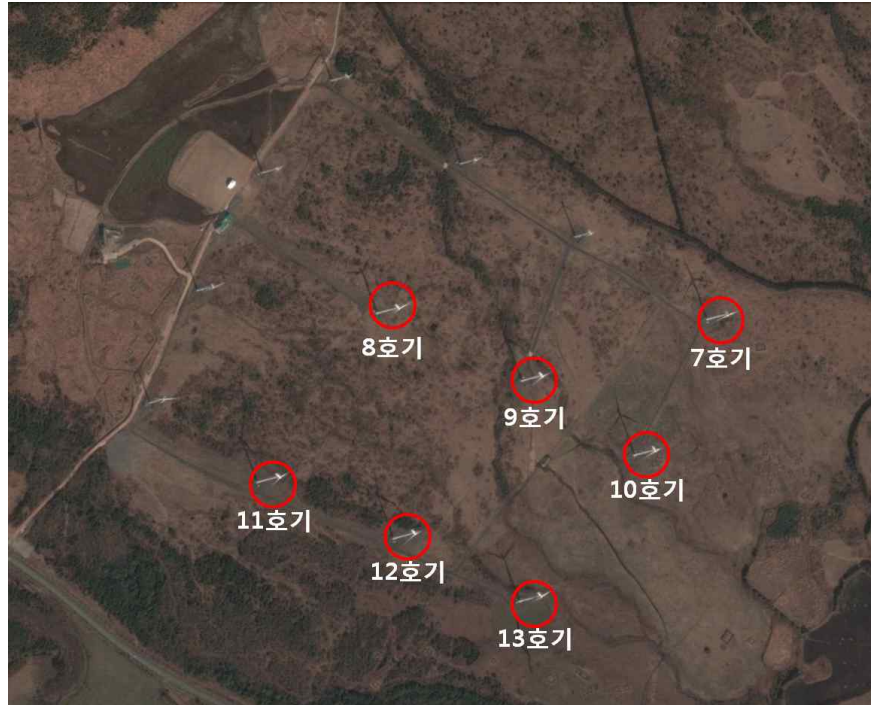


Fig. 38 The seven turbines of Gasiri wind farm where lightning counters were installed.

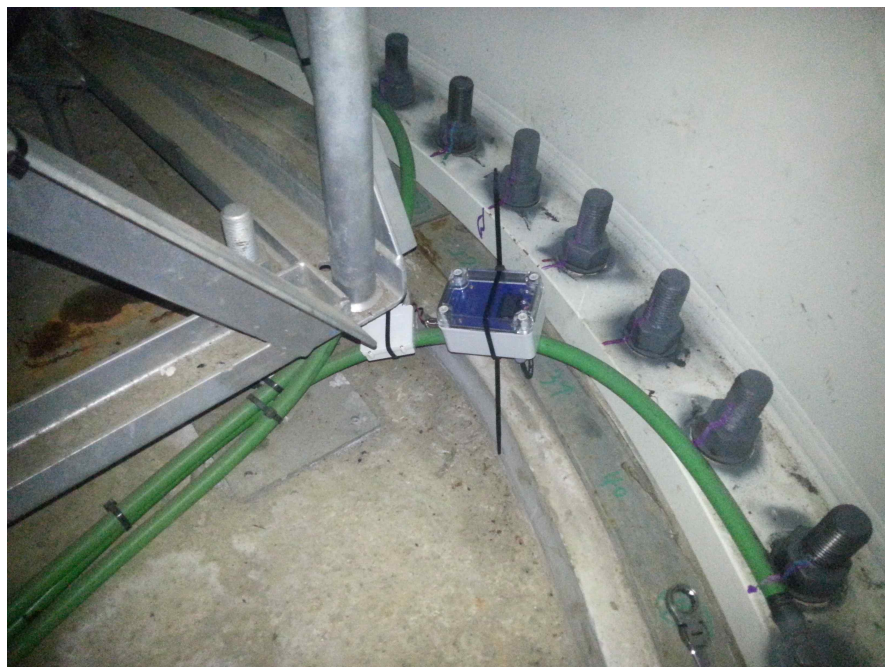
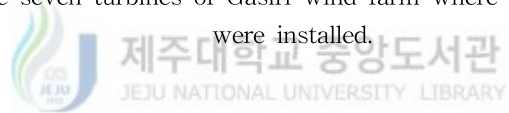


Fig. 39 Installation of lightning counter.



Table 16은 각각의 낙뢰카운터를 설치한 날짜와 수집기간을 나타낸다. 측정기간은 실험적으로 가장 먼저 측정하기 시작한 11호기가 약 5.5개월인 것을 제외하면 다른 낙뢰카운터는 전부 같은 날짜에 설치되었으며 그 기간은 약 3개월이다.

Table 16 Period of collected data at each wind turbines

호기	설치날짜	최종 데이터 수집일	데이터기간
7	2014.07.24.	2014.10.25	약 3개월
8	2014.07.24.	2014.10.25	약 3개월
9	2014.07.24.	2014.10.25	약 3개월
10	2014.07.24.	2014.10.25	약 3개월
11	2014.05.10.	2014.10.25	약 5.5개월
12	2014.07.24.	2014.10.25	약 3개월
13	2014.07.24.	2014.10.25	약 3개월



## 2. 결과 분석

Table 17은 11호기에 설치한 낙뢰카운터에서 측정된 데이터를 나타낸다. 5월 30일에서 다음날까지 발생한 데이터는 기상청 홈페이지[3]를 통하여 확인한 결과, 낙뢰가 발생한 시간대와 많은 차이를 보이고 있어 낙뢰로 인한 서지가 아니라고 판단되었다. 또한 기록 오류로 인하여 카운팅은 되었으나 날짜 및 시간이 표기되지 않은 경우도 있었다.

Table 17 Record of lightning counter of number 11 in Ga-si wind farm

등급	연	월	일	시	분	비고
L3	14	05	30	23	54	
L3	14	05	30	23	55	
L3	14	05	30	23	55	
L3	14	05	30	23	56	
L3	14	05	30	23	56	
L3	14	05	30	23	56	
L3	14	05	30	23	56	
L3	14	05	30	23	57	
L3	14	05	30	23	59	
L4	14	05	31	00	02	
L4	14	05	31	00	02	
L4	14	05	31	00	03	
L4	14	05	31	00	03	
L4	14	05	31	00	03	
L4	14	05	31	00	03	
L4	14	05	31	00	04	
L4	14	05	31	00	04	
L3	14	05	31	00	05	
L3	14	05	31	00	05	
L3	00	00	00	00	00	기록오류
L3	00	00	00	00	00	기록오류
L3	14	07	10	20	27	
L3	14	07	10	20	33	
L3	14	07	10	20	53	
L3	14	07	10	20	57	
L3	14	07	24	18	54	
L3	14	07	24	18	54	
L3	14	07	24	18	55	
L4	14	07	24	18	57	
L3	14	07	24	18	57	
합계						31회

Table 18부터 Table 22까지는 각각 가시리 풍력발전단지의 7, 9, 10, 12, 13호기에 관한 낙뢰카운터의 측정기록이다.

Table 18 Record of lightning counter of number 7 in Ga-si wind farm

등급	연	월	일	시	분	비고
L2	14	08	11	04	37	
L3	14	08	11	04	42	
L4	14	08	11	04	53	
합계						3회

Table 19 Record of lightning counter of number 9 in Ga-si wind farm

등급	연	월	일	시	분	비고
L1	14	07	27	12	42	
L4	14	07	27	12	57	
L4	14	07	27	12	58	
합계						3회

Table 20 Record of lightning counter of number 10 in Ga-si wind farm

등급	연	월	일	시	분	비고
L4	14	07	27	00	31	
L4	14	07	27	00	35	
L4	14	07	27	00	37	
L4	14	07	27	00	55	
합계						4회

Table 21 Record of lightning counter of number 12 in Ga-si wind farm

등급	연	월	일	시	분	비고
L3	14	07	26	22	39	
L4	14	07	26	22	41	
L4	14	07	26	23	07	
합계						3회

Table 22 Record of lightning counter of number 13 in Ga-si wind farm

등급	연	월	일	시	분	비고
L4	14	08	11	11	11	
L4	14	08	11	11	28	
L4	14	08	11	11	43	
L4	14	08	11	11	52	
L4	14	08	11	13	57	
L4	14	08	11	14	46	
L4	14	08	11	14	51	
L4	14	08	11	14	56	
합계						8회

다른 낙뢰카운터 또한 Table 17과 같이 서지는 측정되었으나 낙뢰에 의한 서지는 아닌 것으로 판단되었다. 8호기에 설치한 낙뢰카운터는 측정된 서지가 없어서 여기서는 제외하였다. Table 17에서 Table 22까지의 데이터에서는 서지는 단발적이 아닌 일정 기간에 걸쳐 여러 번 발생하는 경향을 보였다. 그러나 본 측정 조사에서는 풍력발전기에 어떠한 이상상태로 서지가 인입되었는지는 알아낼 수 없었다.

Fig. 40은 각 호기별로 낙뢰카운터로 수집된 데이터 개수를 나타낸다. 2014년 7월 24일부터 동년 10월 25일까지 모든 낙뢰카운터를 동일한 기간으로 설정한 것으로 특히 13호기에서 서지가 8건으로 가장 많이 발생하였으며 8호기는 한 건도 측정되지 않았다.

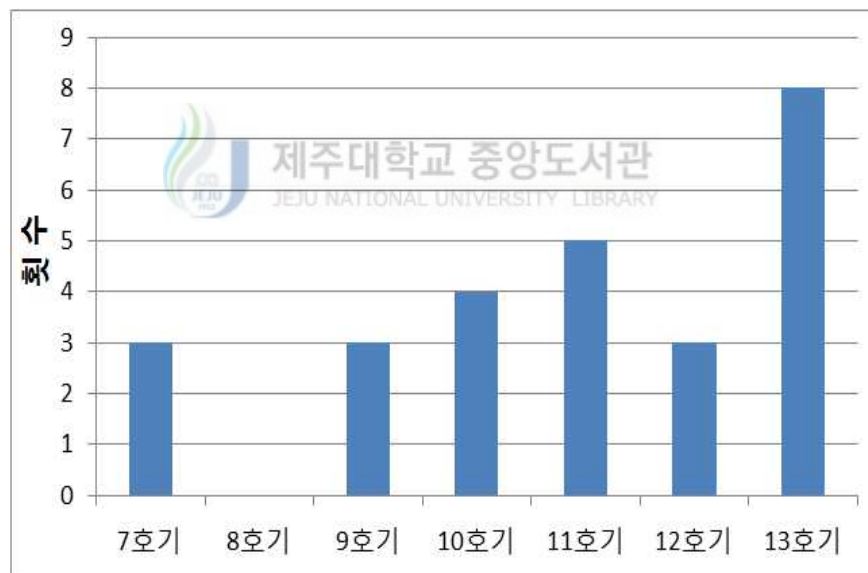


Fig. 40 Number of collected data at each wind turbines.

Fig. 41은 월별 낙뢰카운터 데이터 개수를 나타낸다. Fig. 40과 마찬가지로 기간은 모든 낙뢰카운터에 동일하게 적용하였다.

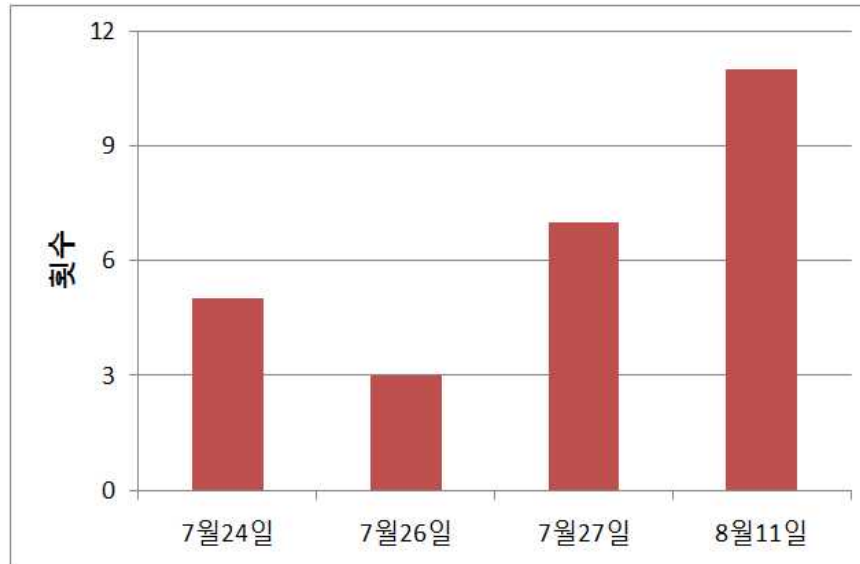


Fig. 41 Daily number of collected data.

7월 말에 집중적으로 발생하였고 8월은 11일 하루 동안 2기의 풍력발전기에서 서지가 측정되었다. 그러나 9월과 10월에는 한 건도 측정되지 않았다.

현재 낙뢰카운터를 통한 데이터 분석은 측정 기간이 짧아서 낙뢰에 의한 영향 유무를 판단하기에 어려움이 있었으며 그 신뢰성 또한 확보되었다고 할 수 없는 실정이다. 따라서 향후 낙뢰카운터 설치 지역을 확장하고 지속적인 측정을 통해 장기간의 낙뢰카운터 데이터를 수집한다면 낙뢰로 인한 풍력발전기의 고장·사고에 대해 더 다양한 조사가 이루어질 수 있을 것으로 생각된다.

## V. 결 론

풍력발전기의 위치 및 구조적인 특징에 의하여 낙뢰피해는 해마다 발생하고 있으나 아직 우리나라는 그에 대한 대책이 해외에 비해 미미한 실정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 우선 국내·외의 낙뢰에 관한 풍력발전 연구를 광범위하게 조사하였다. 낙뢰규정의 표준이라 할 수 있는 IEC 61400-24에서 추천하는 낙뢰 방지 대책을 검토하였다. 그리고 해외의 경우 낙뢰연구의 선진국이라 할 수 있는 유럽, 미국, 일본으로 나누었으며 각각 낙뢰 피해양상 및 그 대책에 대해 검토하였다.

또한 제주도의 범위를 설정하고 기상청 낙뢰관측 시스템에서 관측된 10년간 (2003~2012년)의 낙뢰자료를 바탕으로 제주도의 낙뢰 특성을 분석하고 낙뢰지도도를 작성하였다. 기존 풍력단지에 대하여 같은 면적으로 낙뢰율을 평가하였으며, 나아가 건설예정인 풍력단지의 낙뢰율을 평가하였다. 또한 낙뢰카운터를 통해 직접 풍력발전기에의 피뢰 측정을 시도하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 우리나라에는 아직 풍력발전기의 낙뢰보호에 관한 규정이 제정되지 않았다. 따라서 IEC표준에서 제공되는 규정과 실질적인 사례연구, 전체적인 풍력단지 적합성 평가 사업과 같은 여러 실험방식을 활용하여 국내의 낙뢰 특성 및 낙뢰 기술, 낙뢰대책에 관한 수준을 파악하고 국내 상황에 맞는 풍력발전기의 낙뢰보호 가이드라인이 제정되어야 한다.

둘째, 풍력발전기의 고장·사고에 대한 피해 및 피해상황별 낙뢰보호 사례 등의 정보를 체계적으로 수집하고 신뢰성 있는 데이터베이스를 구축하여야 한다. 또한 연구자와 사업자 간의 충분한 교류가 이루어져야 하고, 이를 활용하여 낙뢰의 특성 및 풍력발전기의 피해양상·대책을 파악할 수 있도록 소프트웨어 혹은 애플리케이션 개발이 필요하다.

셋째, 제주도의 낙뢰 발생 월별 분포는 7월에서 9월까지 집중되어 있으며 정극

성이 전체 낙뢰에서 11%였다. 또한 극성에 따른 낙뢰 발생도 -7~-3등급 사이에서 가장 높은 빈도를 보인 것은 선행 연구와 대체로 일치하였다. 그러나 시간대에 따른 낙뢰분포의 일관적인 경향이 없었고 태풍과의 연관성도 미미하였다.

넷째, 기존의 풍력단지에 대한 낙뢰율 평가는 우수하며 특히 한경 풍력단지는 낙뢰 피해로부터 가장 안전한 지역으로 평가되었다. 그러나 삼달 풍력단지는 가장 높은 3.5 이상의 낙뢰율을 보여 다른 풍력단지보다 더 철저한 낙뢰피해 대책이 필요하다고 생각된다. 또한 제주도에 건설예정인 6개의 풍력지구에 대한 낙뢰율 평가는 모두 우수한 것으로 나타났다. 어음, 상명의 낙뢰율은 대략 1에 가깝고 특히 해상 풍력단지인 한림의 경우 낙뢰율이 1보다 낮기 때문에 낙뢰의 피해로부터 안전한 지역이라고 생각된다. 그러나 김녕은 다른 건설예정 풍력단지에 비해 높은 낙뢰율을 보였고 이에 대한 대비가 필요하다고 생각된다.

다섯째, 제주도 낙뢰지도와 낙뢰율 표를 종합하여 낙뢰 특성을 분석하면, 제주도 서쪽은 낙뢰율이 낮은 반면 평균 낙뢰강도가 높은 편이었고 동쪽은 평균 낙뢰강도가 낮지만 낙뢰율이 높았다. 기존 풍력발전단지에서의 낙뢰피해는 총 2회로 비교적 적게 발생하였다. 따라서 풍력발전기 각각의 낙뢰보호시스템은 잘 작동하는 것으로 생각되지만 여전히 완벽한 낙뢰보호시스템이라 할 수 없으며, 이에 대한 대책이 필요하다.

여섯째, 실제 풍력발전기에 발생하는 낙뢰의 영향을 알아보기 위하여 가시리 풍력발전단지에 낙뢰카운터를 설치하여 풍력발전기의 피뢰상황을 측정하였다. 그 결과 전기적인 서지는 측정되었지만 낙뢰로 인한 서지라고는 할 수 없었다. 서지의 발생은 7월 말에서 8월 초에 집중적으로 발생하였으며 그 이후로는 측정되지 않았다. 향후 피뢰상황을 파악하기 위하여 낙뢰카운터를 통한 지속적인 측정 및 서지 원인분석이 이루어져야 할 것이다.



## 참고문헌

- [1] Solacity Inc., <http://www.solacity.com/lightning.htm>
- [2] IEC 61400-24. Wind Turbine Generator Systems-Part24: Lightning Protection, 2002.
- [3] Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/>
- [4] Eom Hyo-Sik, Suh Myoung-Seok, Statistical Characteristics of Recent Lightning Occurred over South Korea, Journal of Korean Earth Science Society, pp.210~222, 2009.
- [5] 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, The Korean Solar Energy Society v.28 n.1, pp.83~89, 2008.
- [6] Ko Kyung-Nam, Kang Mun-Jong, Huh Jong-Chul, Analysis of Annual System Operating Characteristics at Hangwon Wind Farm on Jeju Island, The Korean Solar Energy Society v.28 n.2, pp.42~49, 2007.
- [7] Disaster Status Management Information V.9: Lightning Strike, National Emergency Management Agency, 2014.
- [8] Korea Southern Power Company Limited, the review report of comprehensive measures caused by lightning damages, 2012.
- [9] NASA Science, Where Lightning Strikes, Science News, 2001.12.05.
- [10] W. Schulz, K. Cummins, G. Diendorfer, M. Doring, Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system, Journal of Geophysical Research v.110, 2005.
- [11] P. Manoochehrnia, F. Rachidi, M. Rubinstein, W. Schulz, Lightning Statistics in Switzerland, IX International Symposium on Lightning Protection, 2007.
- [12] M.I. Lorentzou, N.D. Hatziargyriou, I. Cotton, Key Issues in Lightning Protection of Wind Turbines, WSEAS international conference, pp.1408~1414, 2004.
- [13] William C. Valine, E. Philip Krider, Statistics and Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning with Multiple Ground Contacts, Journal of Geophysical Research v.107, AAC-8, 2002.
- [14] Park Man-Sik, Statistics of Lightning Damages and Lightning Protection Standards in Korea, Master thesis, Inha University, 2005.

- [15] Korea Information & Comm, Contractors Association, Grounding Method for Information and Telecom, Korea Information & Comm, Contractors Association Business Development Room Technology Promotion, 2004.
- [16] Lightning yearbook, Korea Meteorological Administration, 2008.
- [17] Hans V. Erichsen, Lightning protection of wind turbines, The Swiss Electromagnetics Research and Engineering Centre, 2011.
- [18] NEG Micon, Technical description: lightning protection system, 2003.
- [19] W. Fellensiek, A. Bohm, Earth and lightning protection system for ENERCON WECs, ENERCON, 2007.
- [20] Leutron, yellow protects: lightning and surge protection of wind turbines, Leutron GmbH, 2011.
- [21] DEHN, White paper: Lightning and Surge Protection for Wind Turbines, www.dehn.de, 2012.
- [22] Tony Buston, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, Wind energy handbook, Wiley, pp.562~568, 2001.
- [23] Troels S. Sorensen, The Update of IEC 61400-24 Lightning Protection of Wind Turbines, International Conference on Lightning Protection, 2008.
- [24] ECN, Lightning damage of OWECs part1-parameters relevant for cost modelling, ECN-C-02-053, 2002.
- [25] Sorensen T., Jensen F.V., Raben, N., Lightning protection for offshore wind turbines, IEE Conference Publication n.482 v.4, 2001.
- [26] Glushakow Bruce, Effective Lightning Protection For Wind Turbine Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, pp.214~222 2007.
- [27] Rachidi Farhad, A Review of Current Issues in Lightning Protection of New-Generation Wind-Turbine Blades, IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.2489~2496 2008.
- [28] Peesapati V. Cotton I., Lightning protection of wind turbines - A comparison of real lightning strike data and finite element lightning attachment analysis, 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, pp.1~8, 2009.
- [29] Vidyadhar Peesapati, Lightning protection of wind turbines, EWEC, 2010.
- [30] Madsen Søren Find, Holbøll Joachim, Henriksen Mogens, Sørensen Troels, Interaction between Electrical Discharges and Materials for

- Wind Turbine Blades - particularly related to lightning protection, Ph.D thesis, The Technical University of Denmark, 2006.
- [31] Madsen F. Søren, Casper F. Mieritz, Current distribution and magnetic fields in complex structures using Comsol multiphysics, Comsol conference, 2011.
- [32] Madsen Søren Find, Holbøll Joachim, Henriksen Mogens, Bertelsen Kim, Erichsen H.V., New test method for evaluating the lightning protection system on wind turbine blades, Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection, pp.18~22 2006.
- [33] Romero D., Montanya J., Candela A., Behaviour of the wind-turbines under lightning strikes including nonlinear grounding system, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2004.
- [34] Cotton Ian, Jenkins Nick, Pandiaraj Krishnan, Lightning protection for wind turbine blades and bearings, Wind Energy Vol. 4, pp.23~37, January 2001.
- [35] Rodrigues R.B., Mendes V.M.F., Analysis of transient phenomena due to a direct lightning strike on a wind energy system, Energies, pp.2545~2558, 2012.
- [36] Rodrigues R.B., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S., Lightning surges on wind power systems, Proceedings of the 11th Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering-11, 2011.
- [37] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou, B. C. Papadias, Analysis of Wind Turbine Grounding Systems, Electrotechnical Conference, pp.936~939, 2000.
- [38] Rodrigues R.B., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S., A case study of risk analysis due to lightning for wind power plants, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2008.
- [39] Rodrigues R.B., Estimation of lightning vulnerability points on wind power plants using the rolling sphere method, Journal of Electrostatics, pp.774~780 2009.
- [40] Curtis W. Dodd, Thomas McCalla Jr., James G. Smith, How to protect a wind turbine from lightning, U.S. government printing office, 1983.
- [41] McCoy T., Rhoads H., Lisman. T., Lightning activities in the DOE-EPRI turbine verification program, NREL, August 2000.
- [42] Nicholas Wilson, Jackson Myers, Dr. Kenneth Cummins, Matt

- Hutchinson, Lightning attachment to wind turbines in central Kansas, EWEA, 2013.
- [43] Richard Kithil, Case study of lightning damage to wind turbine blade, National Lightning Safety Institute, 2008.
- [44] McNiff B., Wind turbine lightning protection project 1999-2001, EWEC conference, 2002.
- [45] Mick Sagrillo, Small turbine column: residential wind turbines and lightning, Windletter v.22 n.11, 2003.
- [46] James W. Patterson, jr., Development of obstruction lightning standards for wind turbine farms, U.S. department of transportation federal aviation administration, 2005.
- [47] Hill C. B., Wang Y., Zhupanska O. I., Effects of Carbon Nanotube Buckypaper Layers on the Electrical and Impact Response of IM7/977-3 Composite Laminates, American Society for Composites 27th Annual Technical Conference, 2012.
- [48] Joan Montanyà, Velde Oscar, Earle R. Williams, Lightning discharges produced by wind turbines, Journal of Geophysical Research, Atmospheres, pp.1455~1462 2014.
- [49] Sakai Tsutomu, Recent Technic for Lightning Protection, The Japan Electric Association, Korean Electricity Commission Digital Library, 2003.
- [50] S. Sekioka, K. Yamamoto, M. Minawa, S. Yokoyama, Damages in Japanese Wind Turbine Generator Systems due to Winter Lightning, International Symposium on Lightning Protection, 2007.
- [51] Ishii M., Saito M., Lightning electric field characteristics associated with transmission-line faults in winter, 2009 Source of the Document IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 51(3 PART 1), pp. 459~465, 2009.
- [52] Yasuda Y., Uno N., Kobayashi H., Funabashi T., Surge analysis on wind farm when winter lightning strikes, 2008 Source of the Document IEEE Transactions on Energy Conversion 23 (1), pp. 257~262, 2008.
- [53] Shiraishi Y., Otsuka T., Direct measurement of lightning current through a wind turbine generator structure, 2006 Source of the Document Electrical Engineering in Japan, v.157 n.4, pp.1529~1535, 2006.
- [54] Shigeru Yokoyama, Lightning protection of wind turbine blades,

- Electric Power Systems Research v.94, pp.3~9, 2013.
- [55] NEDO, Wind Turbine Generator System Guideline in Japan, NEDO, 2008.
- [56] Touyousekkei Inc., Research and Development of Wind Energy Technic: Lightning Protection, NEDO report of New Renewable Energy, 2013.
- [57] Shindo T. Sekioka S., Studies of lightning protection design for wind power generation systems in Japan, 44th International conference on large high voltage electric systems, 2012.
- [58] Hotta Yasuhiro, Analysis of information delivery system of lightning hazard map and it's framework, ICT Innovation Forum, 2011.
- [59] Konayagi Tomohiro, Lightning Damage Mechanism of FRP Blade in Wind Turbines, Master thesis, Kochi Univ. of Technology, 2002.
- [60] Takebayashi Ryokan, Lightning Protection of FRP Blades for Wind Power Generators, Master thesis, Kochi Univ. of Technology, 2004.
- [61] Yasuda Y., Hara T., Funabashi T., Analysis of lightning surge propagation in wind farm 2008 Source of the Document Electrical Engineering in Japan, v.162 n.2, pp.709~716, 2008.
- [62] Yoh Y., Toshihisa F., Transient analysis on wind farm suffered from lightning, International universities power engineering conference, pp.202~206, 2004.
- [63] Yasuda Yoh, A New Lightning Protection System for Wind Turbines using Two Ring-Shaped Electrodes, IEEJ, pp.314~319, 2006.
- [64] New Energy and Industrial Technology Development Organization, <http://www.nedo.go.jp>.
- [65] Kim Kyung-Bo, Ko Kyung-Nam, Huh Jong-Chul, Characteristics of Lightning Occurred around Jeju Island and Analysis of Damage Case in Wind Turbine Generator System, Proceedings of the Autumn Meeting of The Korean Solar Energy Society, pp.176~181, 2007.
- [66] Kim Kyoung-Bo, Yang Kyung-Boo, Ko Kyung-Nam, Huh Jong-Chul, An Analysis of Lightning Characteristics for Construction of Wind Farm, Proceedings of the Autumn Meeting of The Korean Solar Energy Society, pp.211~223, 2007.
- [67] Lee Jong-Ho, Ryu Chan-Su, Analysis of Lightning Characteristics in Korea, Journal of atmosphere, Korea Meteorological Society, pp.255~258, 2001.
- [68] Park Hung-Mok, Jung Sung-Hwa, Lee Gyu-Won, Observed

- characteristics of lightning occurrence in Korea by KMA lightning observation system 2002-2009, Proceedings of the Autumn Meeting of KMS, pp.468~469, 2010.
- [69] Dal-Seung Yang, Comparative study of lightning characteristics and damage to wind turbine in Jeju Island and Gangwon, Conference of the Korean Society for Power System Engineering, 2013.
- [70] Dal-Seung Yang, A Comparative Study on Lightning Characteristics and Damage to Wind Turbines of Jeju Island and Gangwon Province, Master thesis, Jeju National University, 2014.
- [71] Mun-Jong Kang, Kyung-Nam Ko, Jong-Chul Huh, Error Analysis for Wind Turbine Generator Systems of Hangwon Windfarm in Jeju Island, Proceedings of the Spring Meeting of The KWEA, 2006
- [72] 제주도청 홈페이지, <http://www.jeju.go.kr>
- [73] 제주에너지공사, <http://www.jejuenergy.or.kr/>
- [74] WindPRO2.8 Online help, <http://help.emd.dk/knowledgebase/>
- [75] DNV, Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd edition, pp.106~114, 2002.
- [76] Michael C. Brower, Wind resource assessment, Wiley, pp.77-80, 2012.
- [77] Korean Meteorological Society, Introduction to Atmospheric Sciences, Sigmappress, 2009.1, pp.324~330.
- [78] Manwell J.F., MCGowan J.G., Rogers A.L., Wind energy explained: theory, design and application, 2nd edition, Wiley, 2009.
- [79] AWS Scientific, Inc., Wind resource assessment handbook, NREL, pp.26~27, 1997.
- [80] Nakao tooru, Phenomenon of failures and accidents in wind power plant, NEDO, p.6, 2011
- [81] Yuukou Horita, Tajima Masato, Miyakosi Takasi, Kenji Shibata, Okino Kouji, Study of the information delivery and presentation system of lightning hazard map and its framework, ICT Innovation Forum, 2011.
- [82] David A. Rivkin, Laurel Silk, Wind turbine operation Maintenance, Diagnosis and repair, Jones&Bartlett Learning, p.4, 2012
- [83] Kim Kyoung-Bo, Yang Kyung-Boo, Ko Kyung-Nam, Huh Jong-Chul, An Analysis of Lightning Characteristics for Construction of Wind Farm, Journal of the Korean Solar Energy Society, pp.211~217, 2007
- [84] H. Stephen, G. Emilio, M. Eduard, P. Aage, S. Hans, W. Johs, Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation:

Chapter9 Lightning Protection for Wind Turbine Installations, 1st Edition, Research and Development on Wind Energy Conversion Systems, 1997.





부 록

부록 A 각 연도별 낙뢰일수 지도

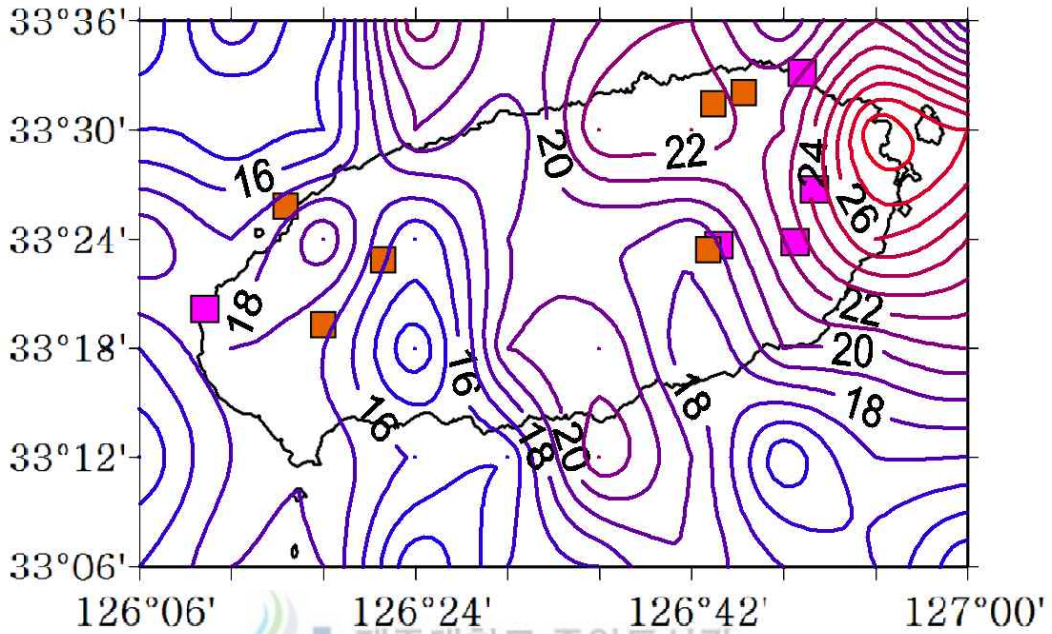


Fig. A-1 Distribution of lightning days in 2003.

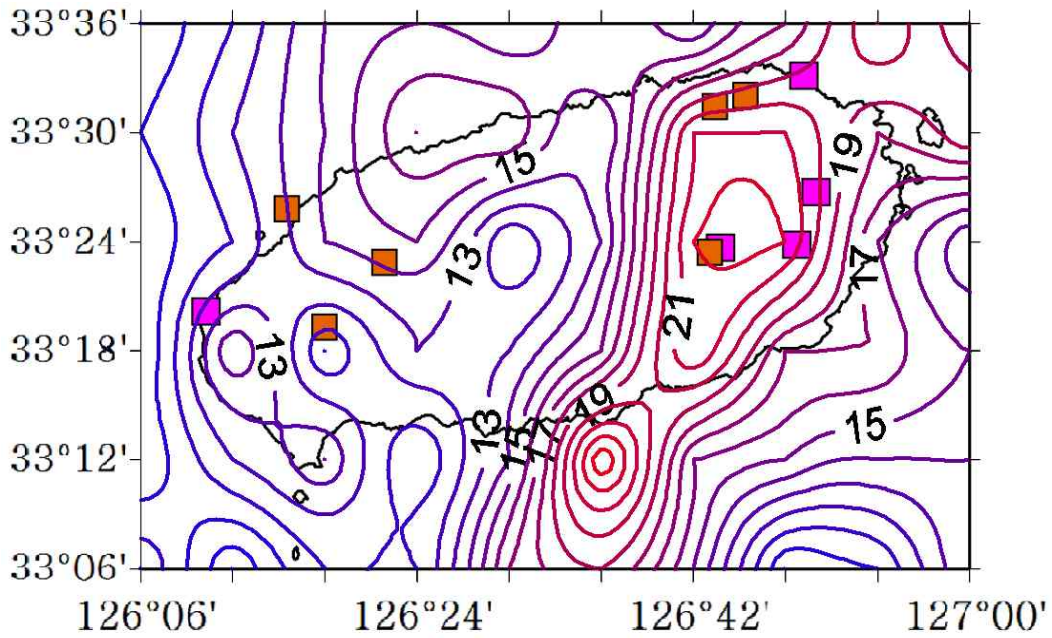


Fig. A-2 Distribution of lightning days in 2004.

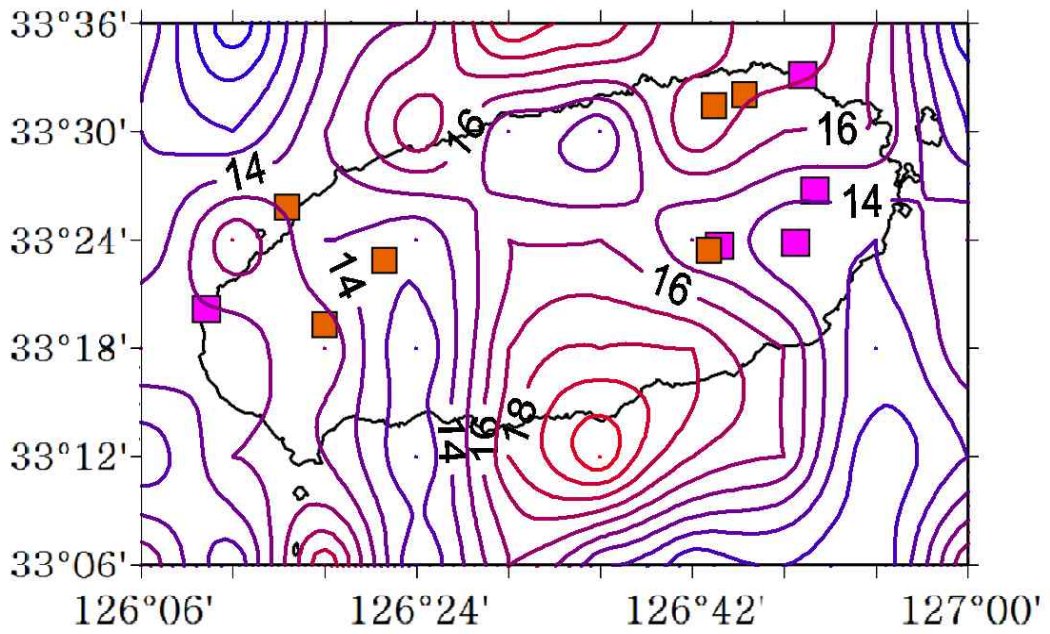


Fig. A-3 Distribution of lightning days in 2005.

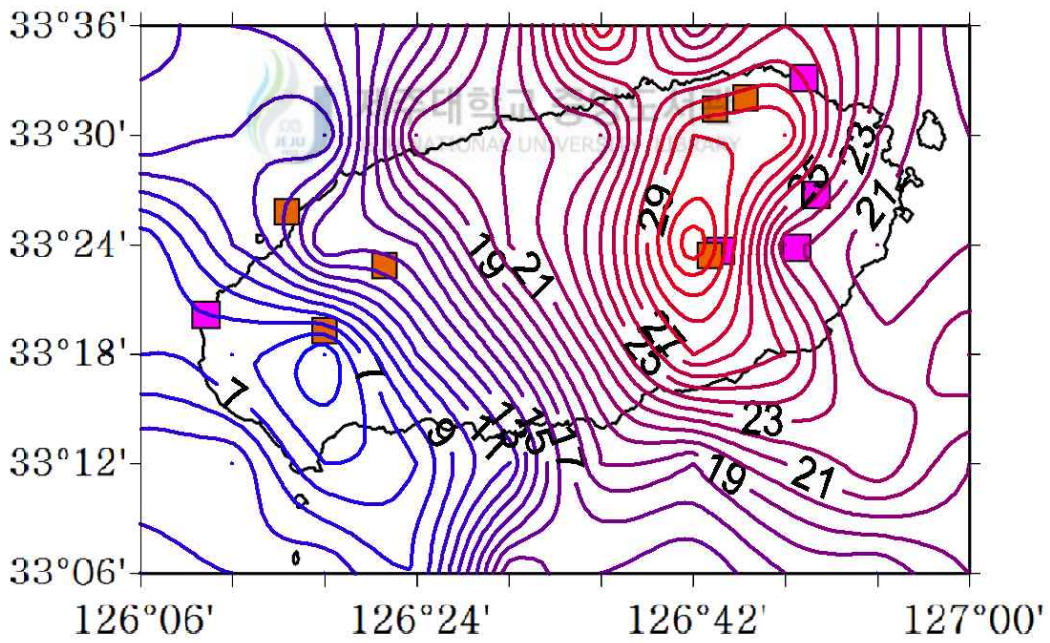


Fig. A-4 Distribution of lightning days in 2006.



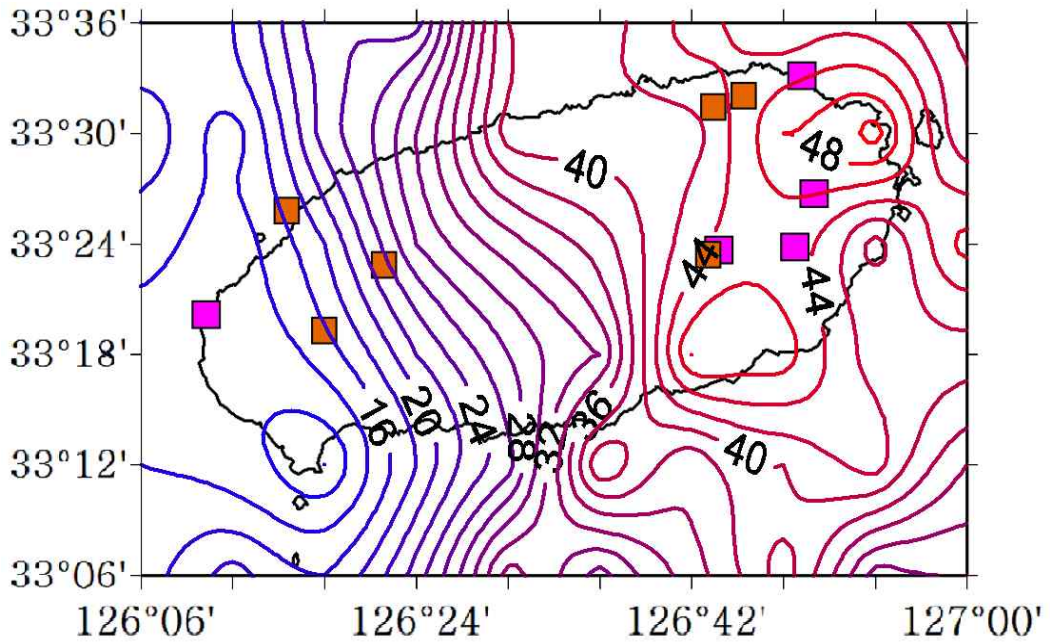


Fig. A-5 Distribution of lightning days in 2007.

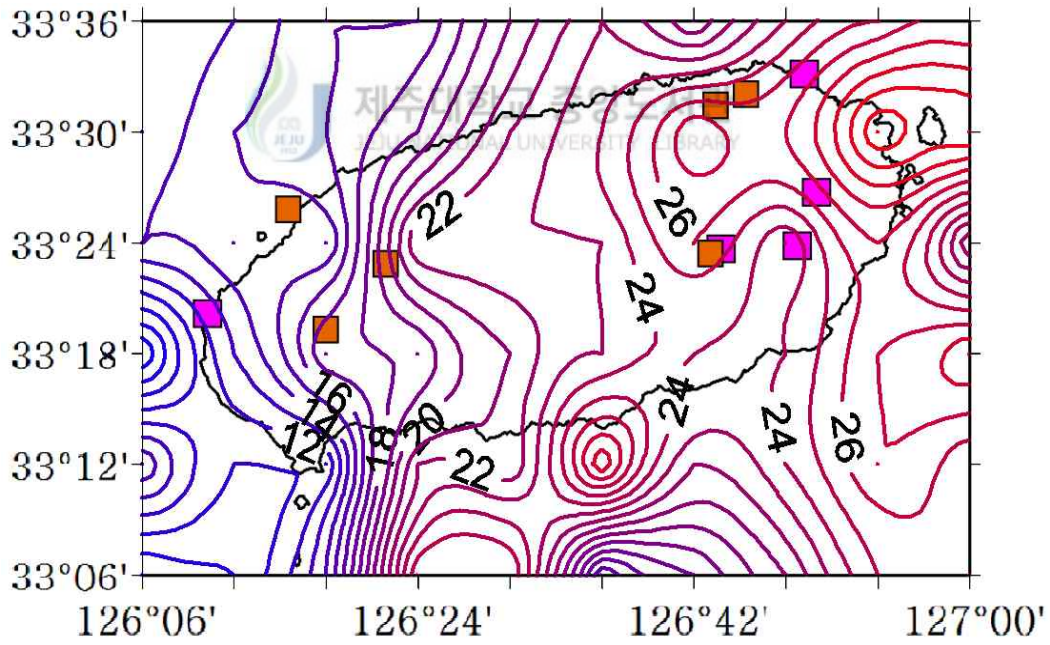


Fig. A-6 Distribution of lightning days in 2008.

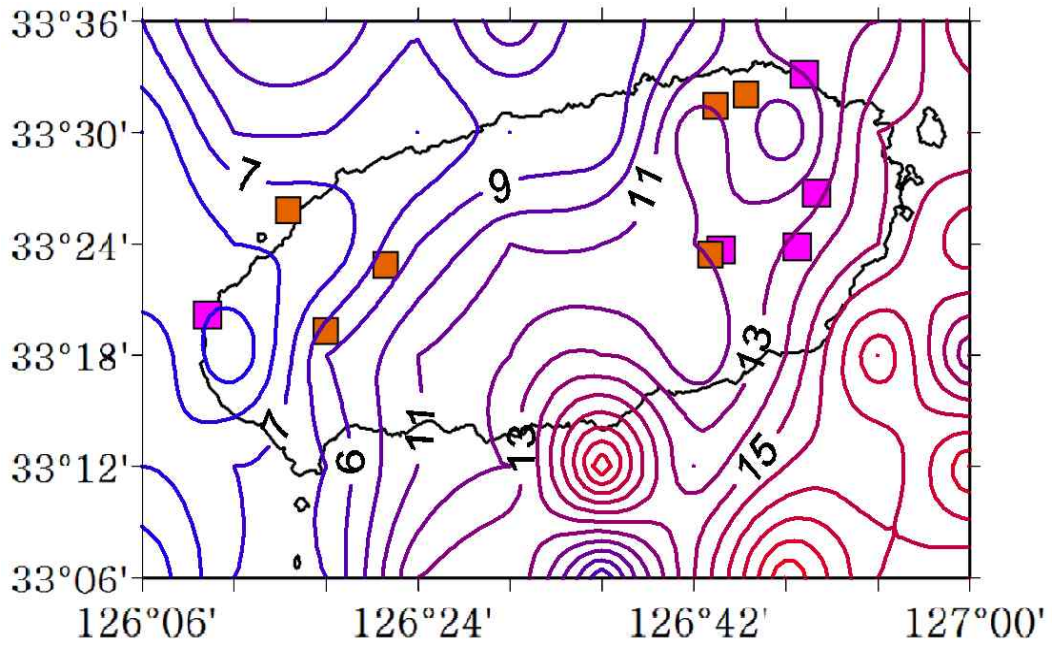


Fig. A-7 Distribution of lightning days in 2009.

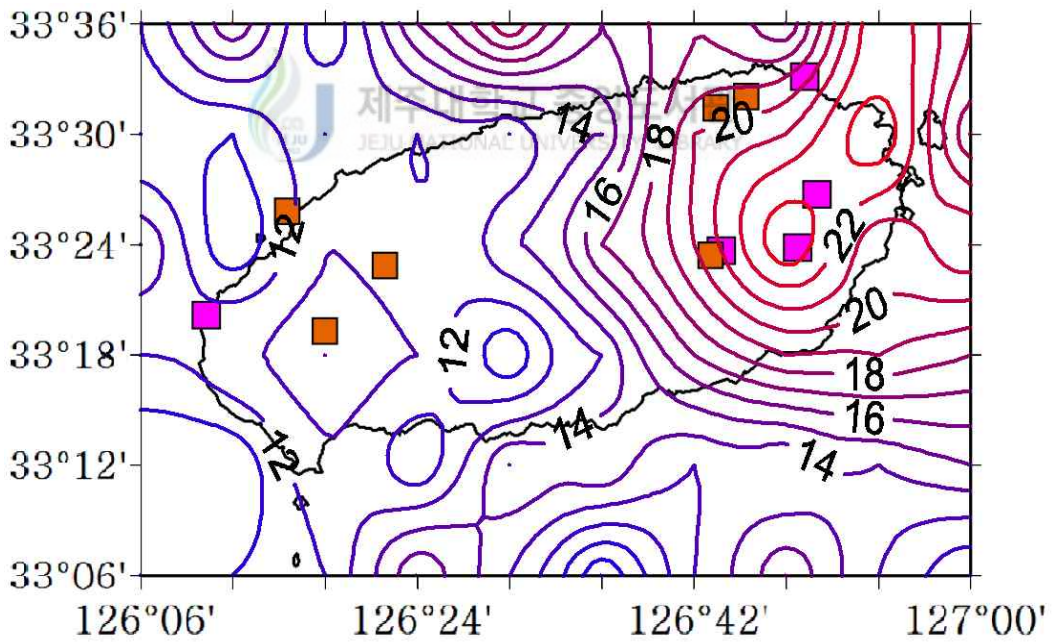


Fig. A-8 Distribution of lightning days in 2010.



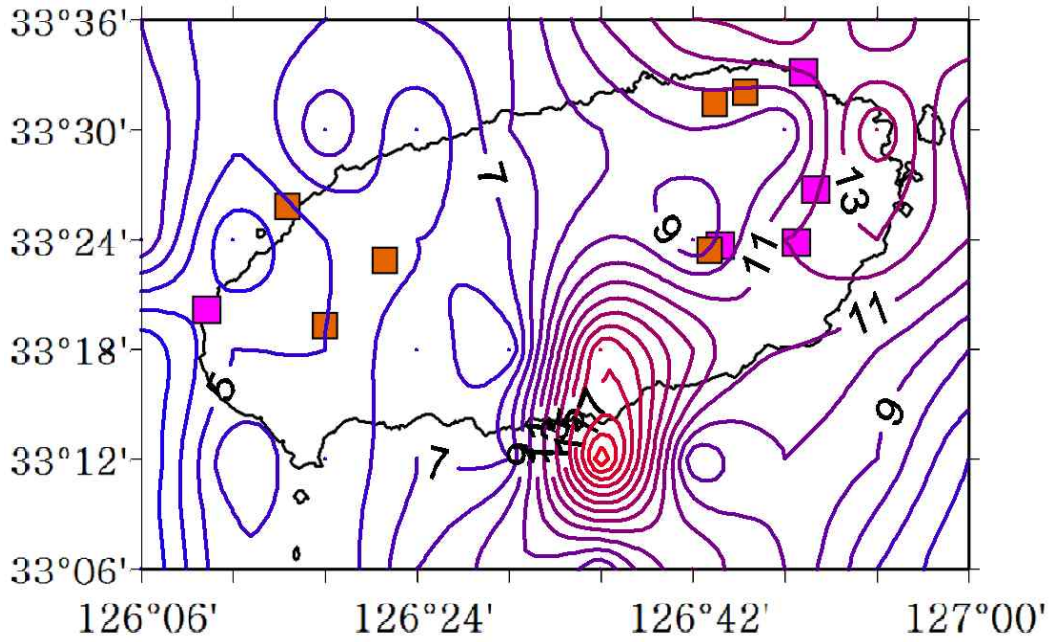


Fig. A-9 Distribution of lightning days in 2011.

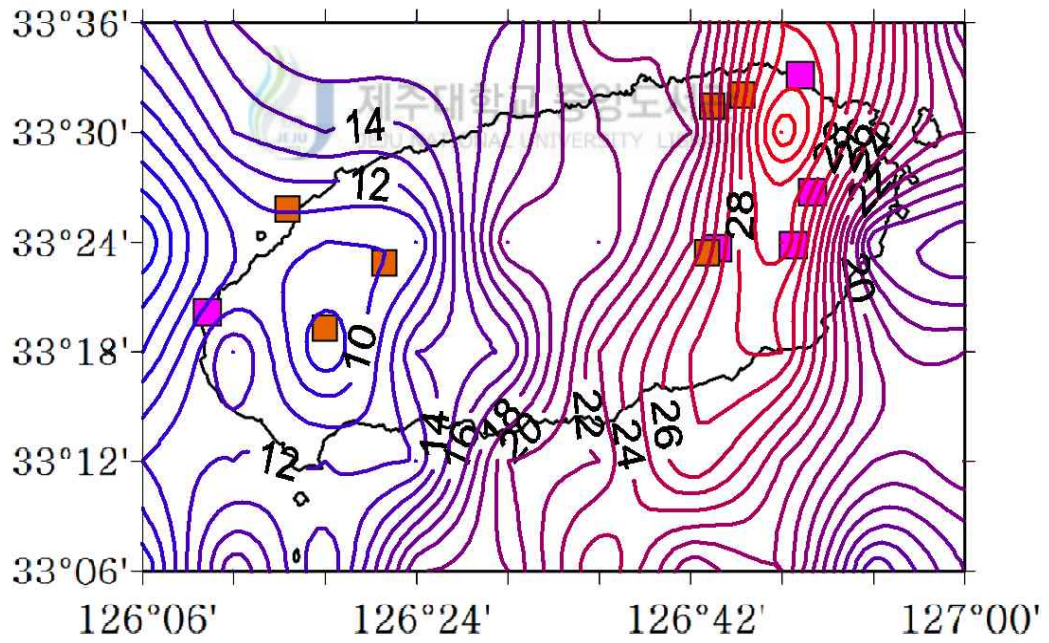


Fig. A-10 Distribution of lightning days in 2012.

부록 2. 각 연도별 낙뢰횟수 지도

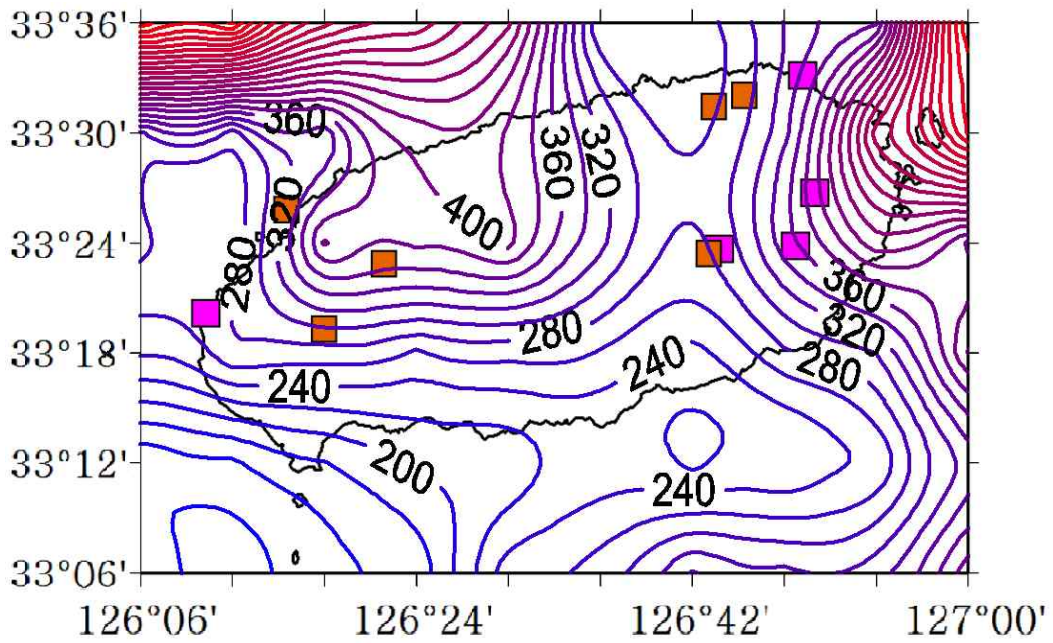


Fig. A-11 Distribution of the number of lightning in 2003.

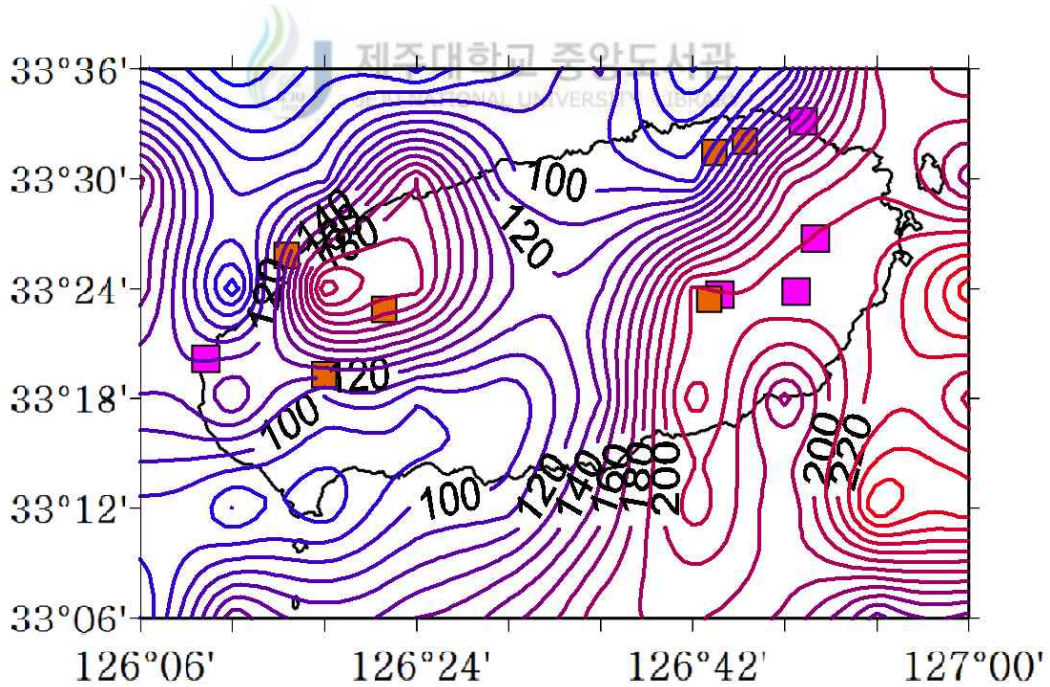


Fig. A-12 Distribution of the number of lightning in 2004.



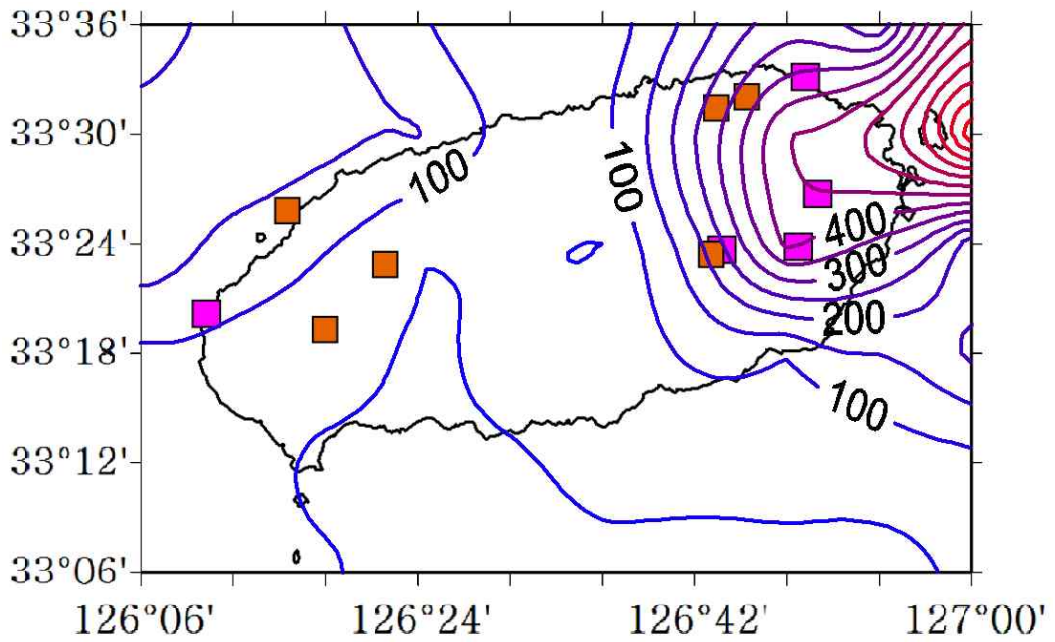


Fig. A-13 Distribution of the number of lightning in 2005.

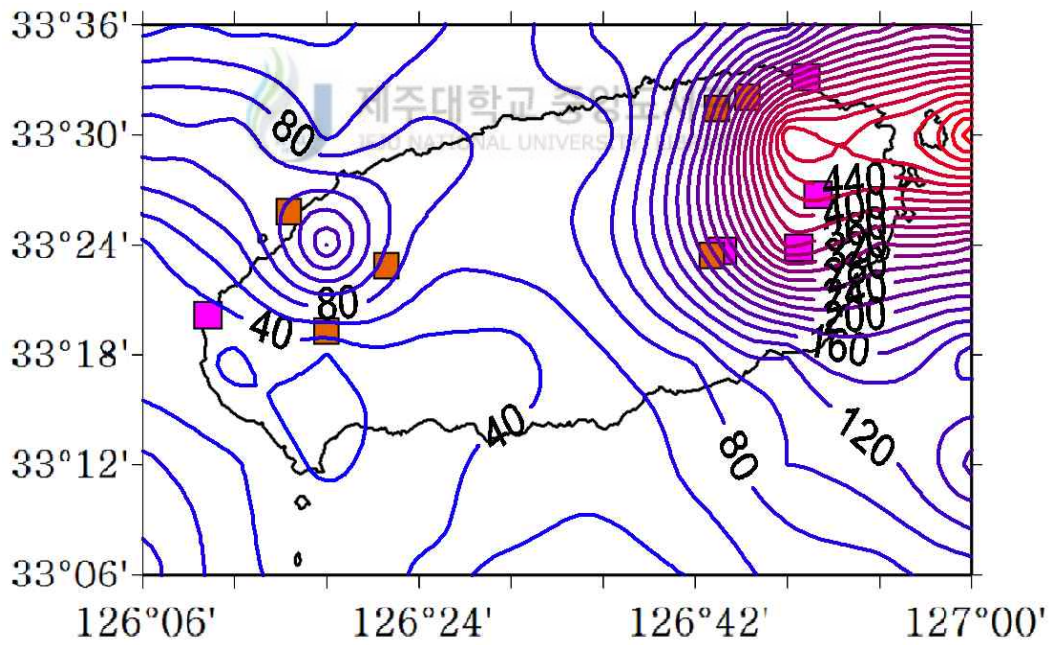


Fig. A-14 Distribution of the number of lightning in 2006.



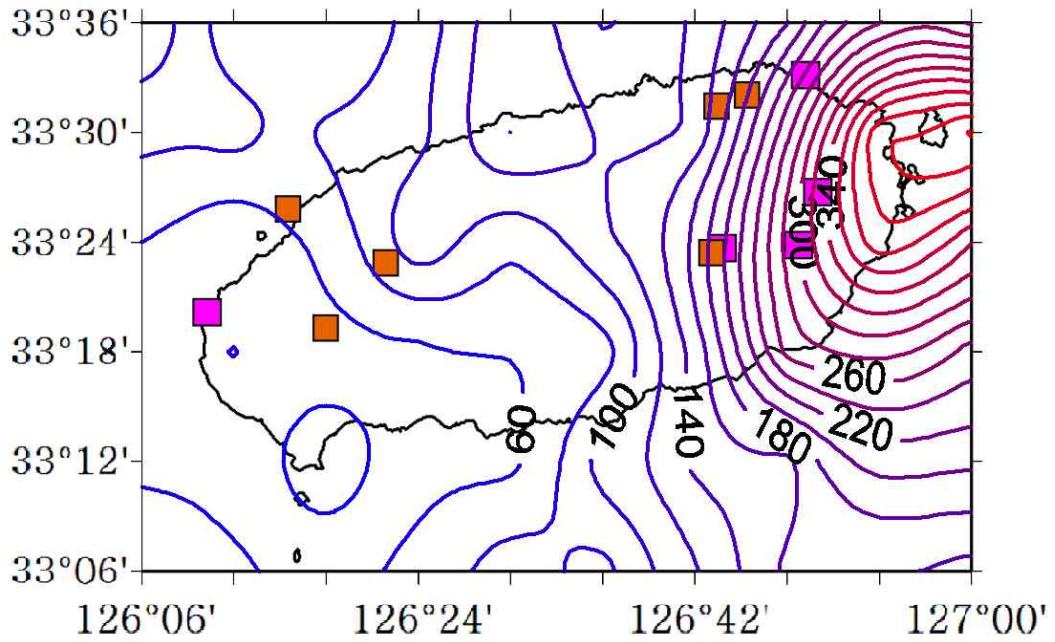


Fig. A-15 Distribution of the number of lightning in 2007.

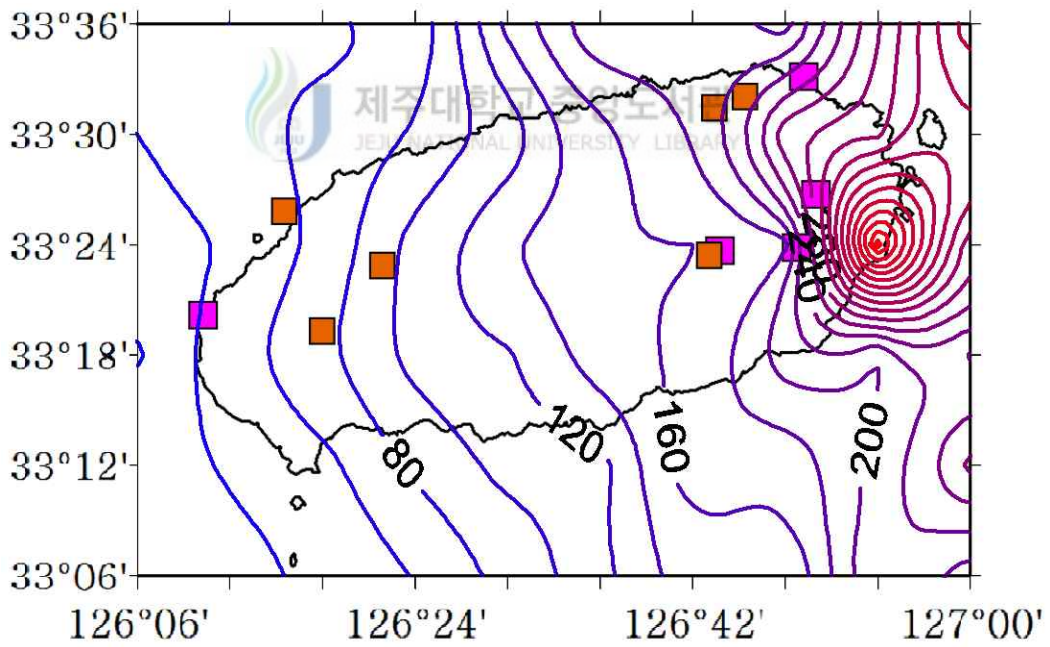


Fig. A-16 Distribution of the number of lightning in 2008.

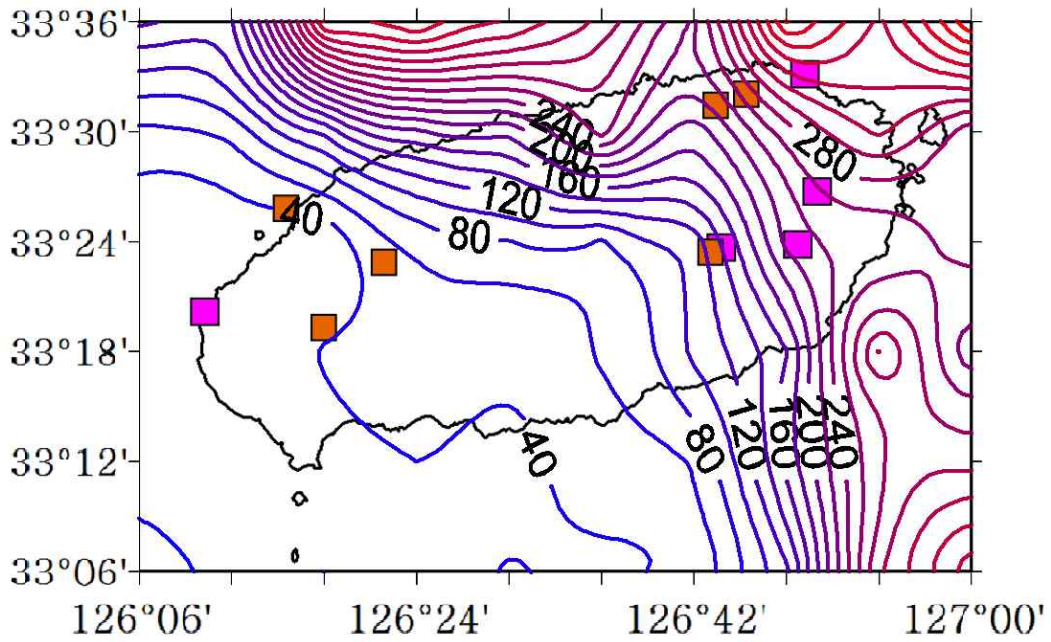


Fig. A-17 Distribution of the number of lightning in 2009.

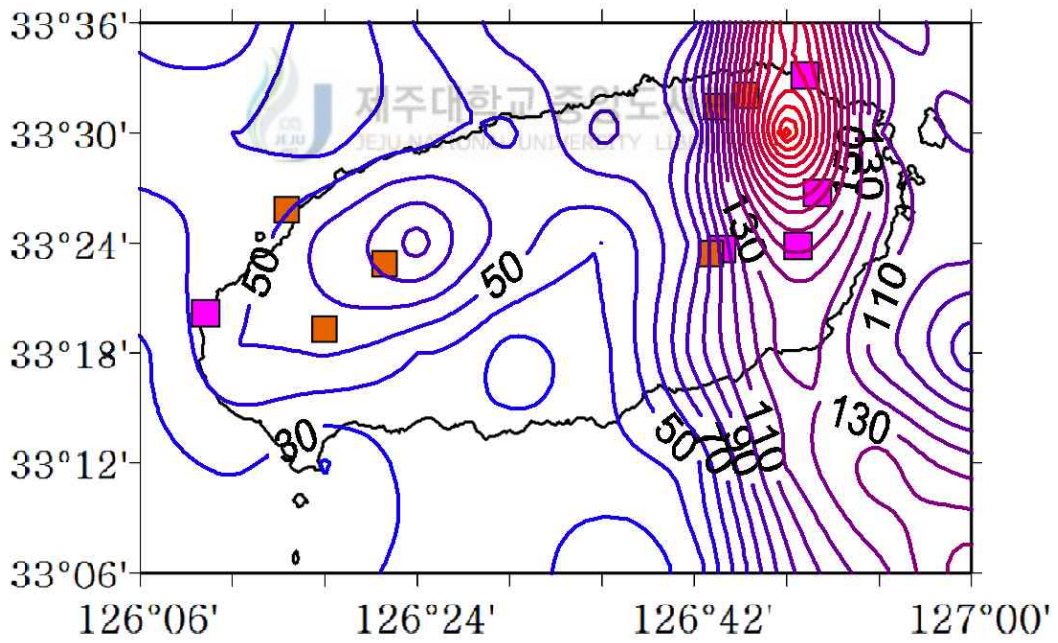


Fig. A-18 Distribution of the number of lightning in 2010.

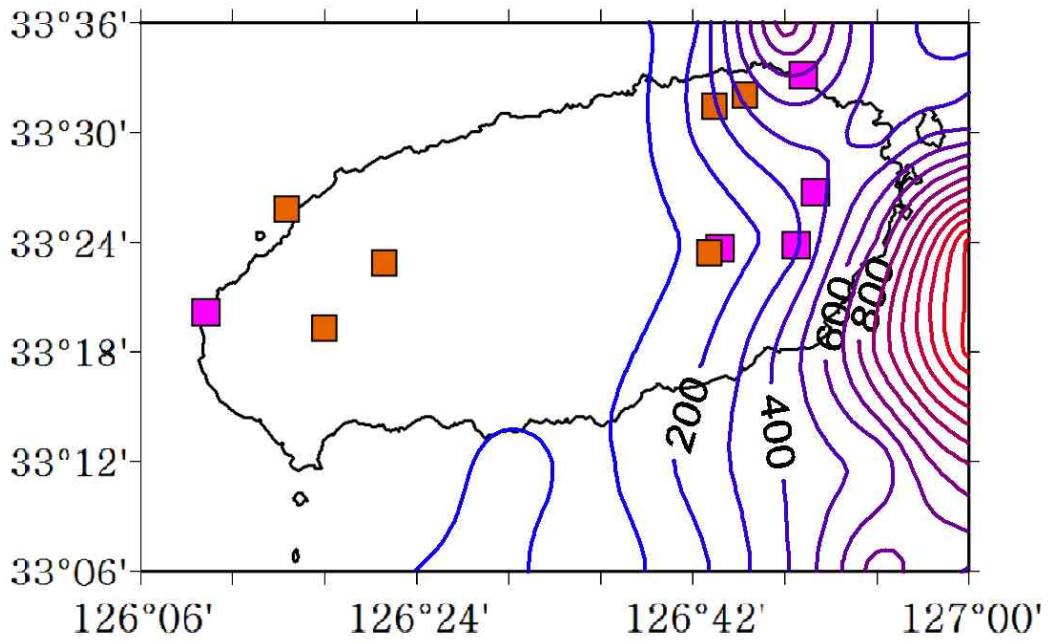


Fig. A-19 Distribution of the number of lightning in 2011.

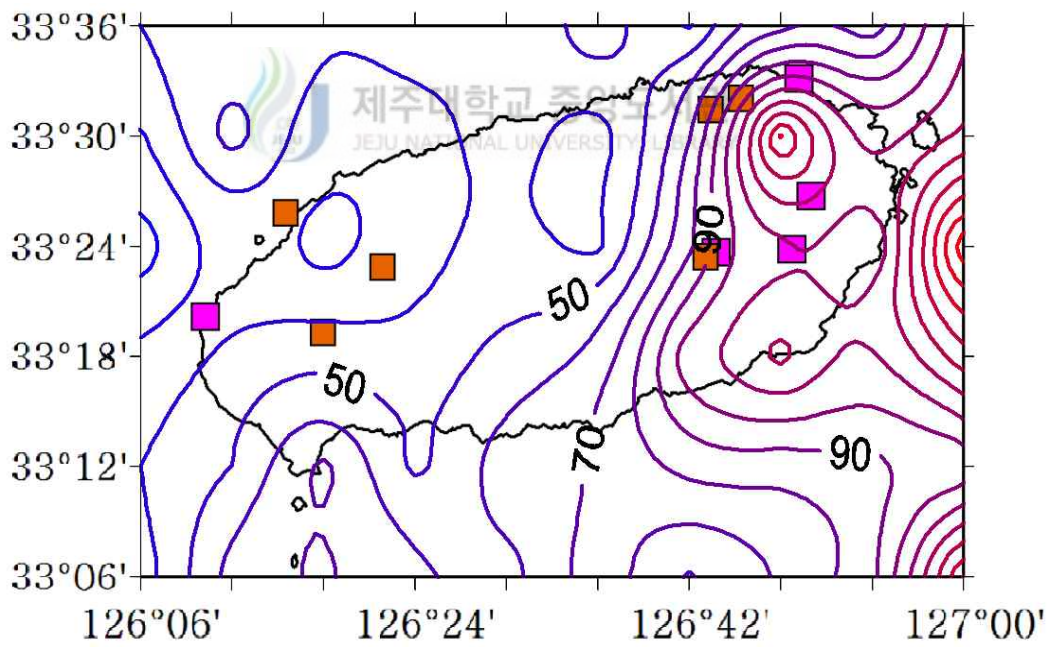


Fig. A-20 Distribution of the number of lightning in 2012.



부록 3. 각 연도별 낙뢰강도 지도

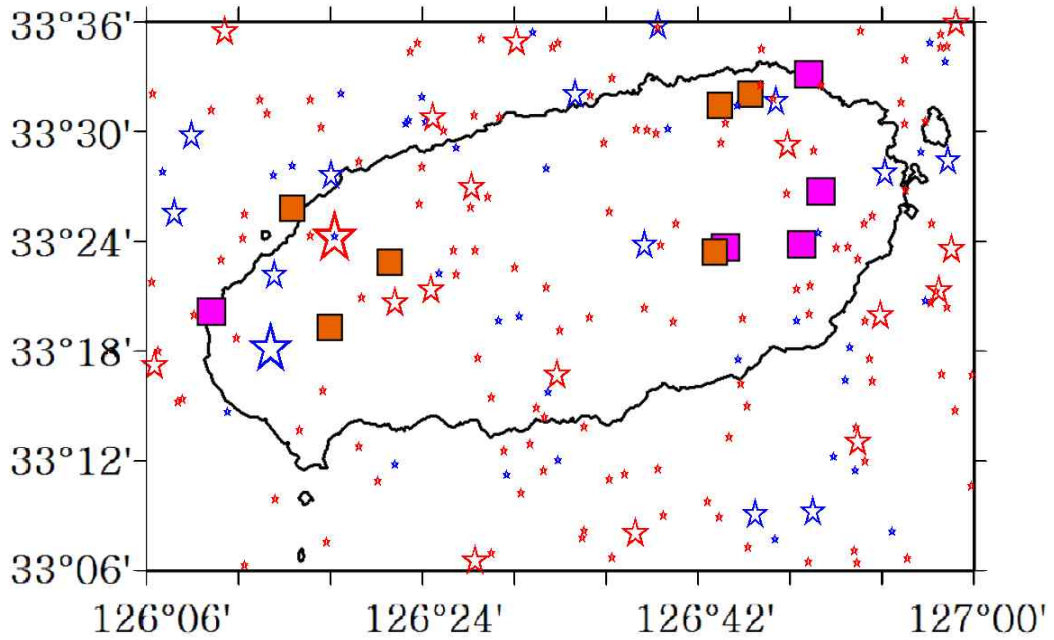


Fig. A-21 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2003.

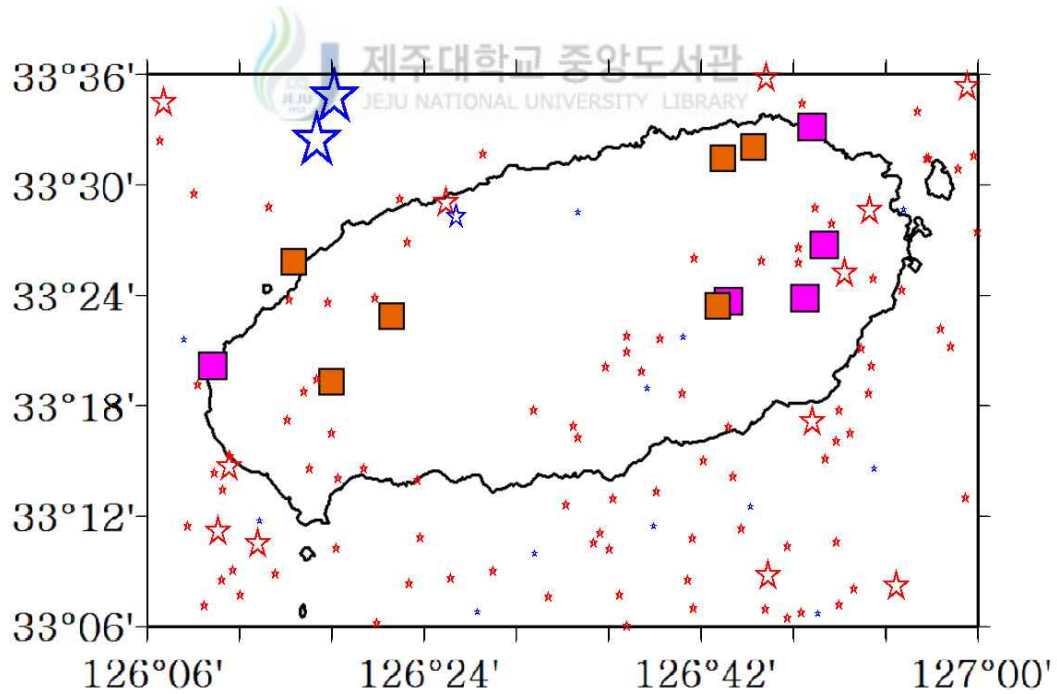


Fig. A-22 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2004.

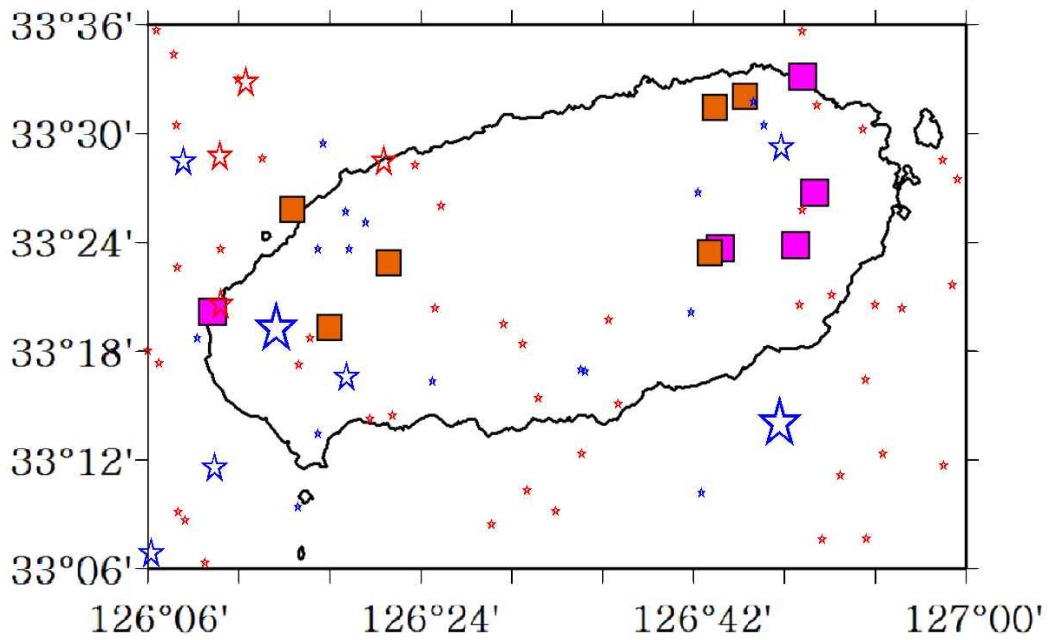


Fig. A-23 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2005.

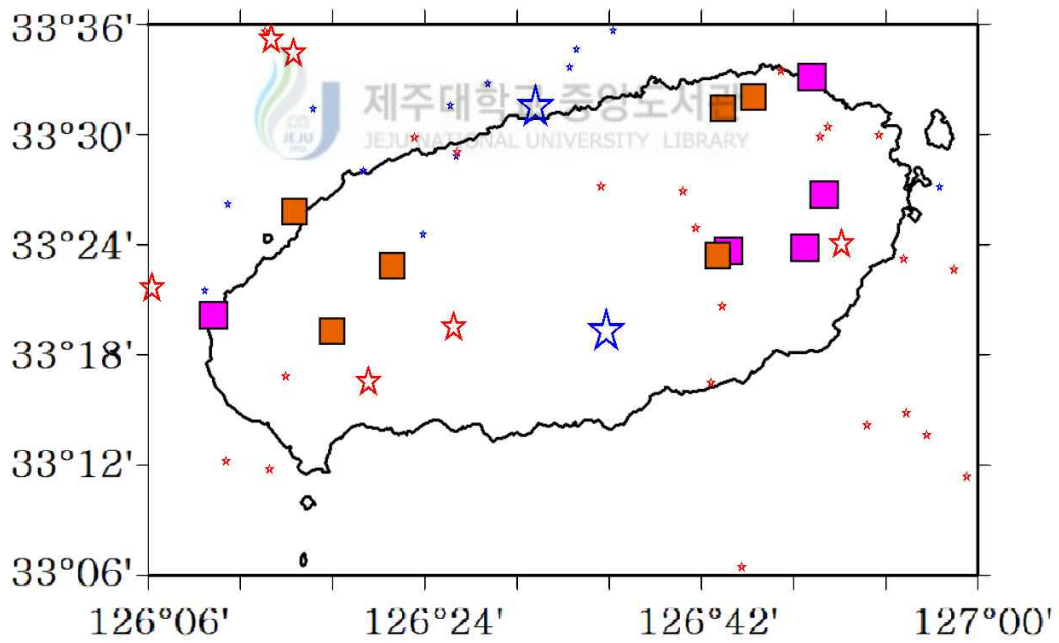


Fig. A-24 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2006.

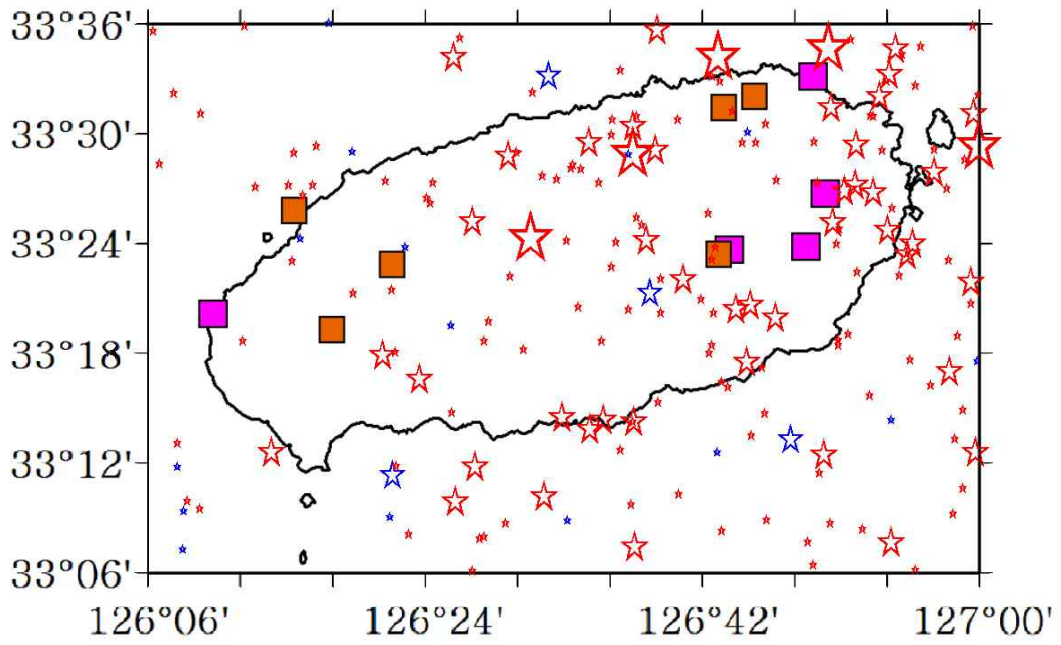


Fig. A-25 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2007.

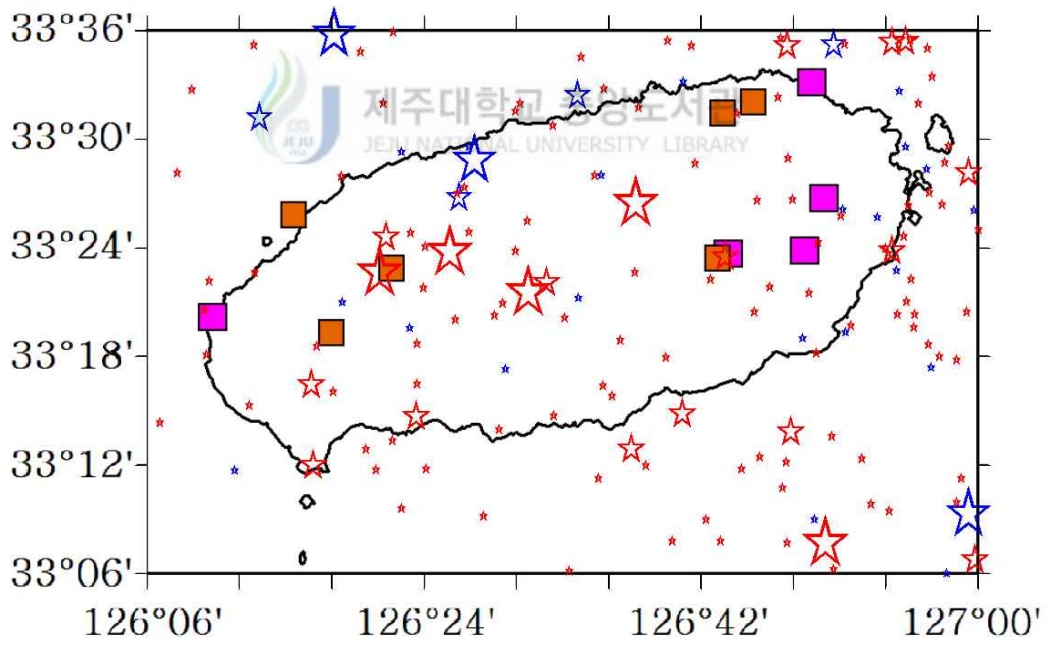


Fig. A-26 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2008.

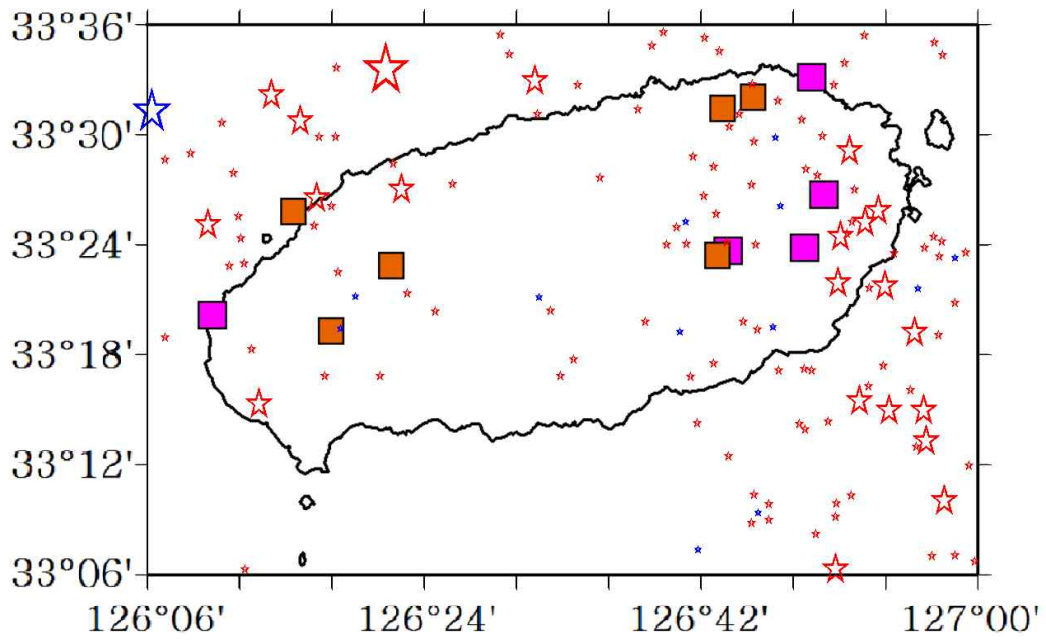


Fig. A-27 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2009.

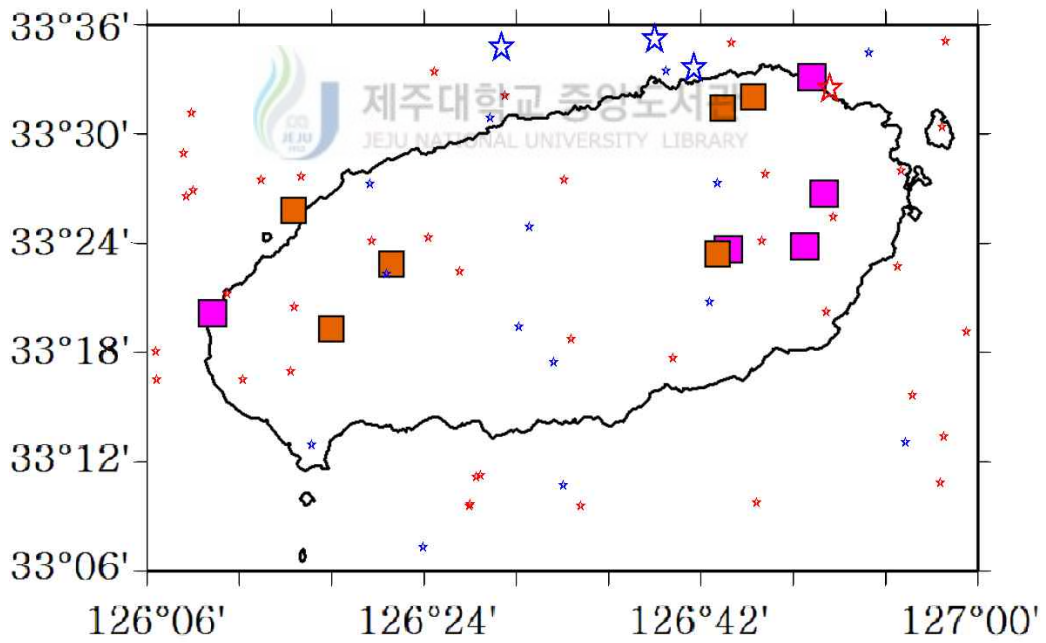


Fig. A-28 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2010.



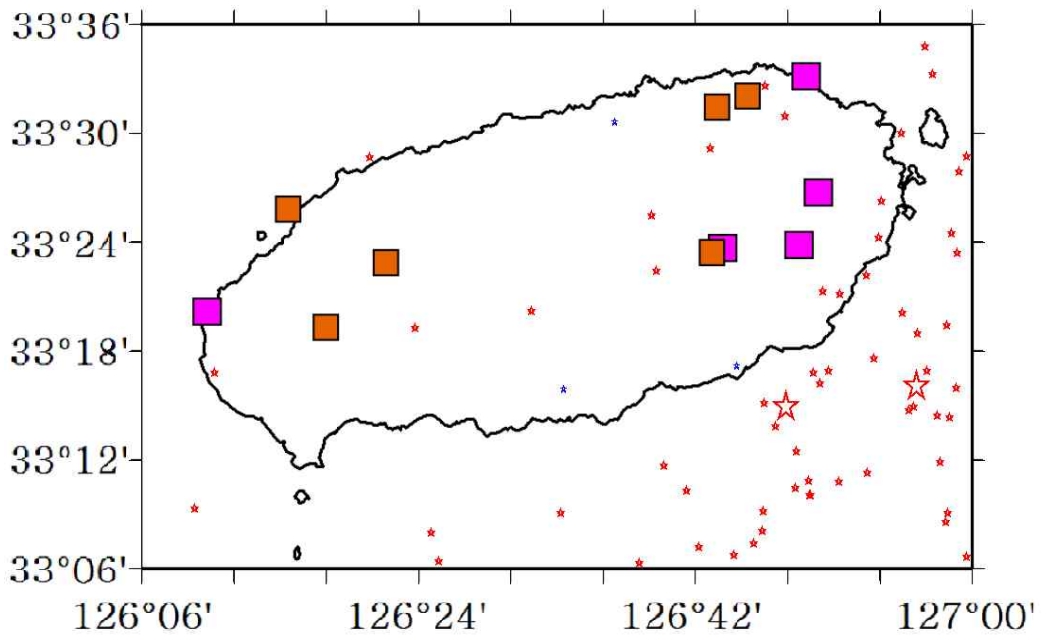


Fig. A-29 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2011.

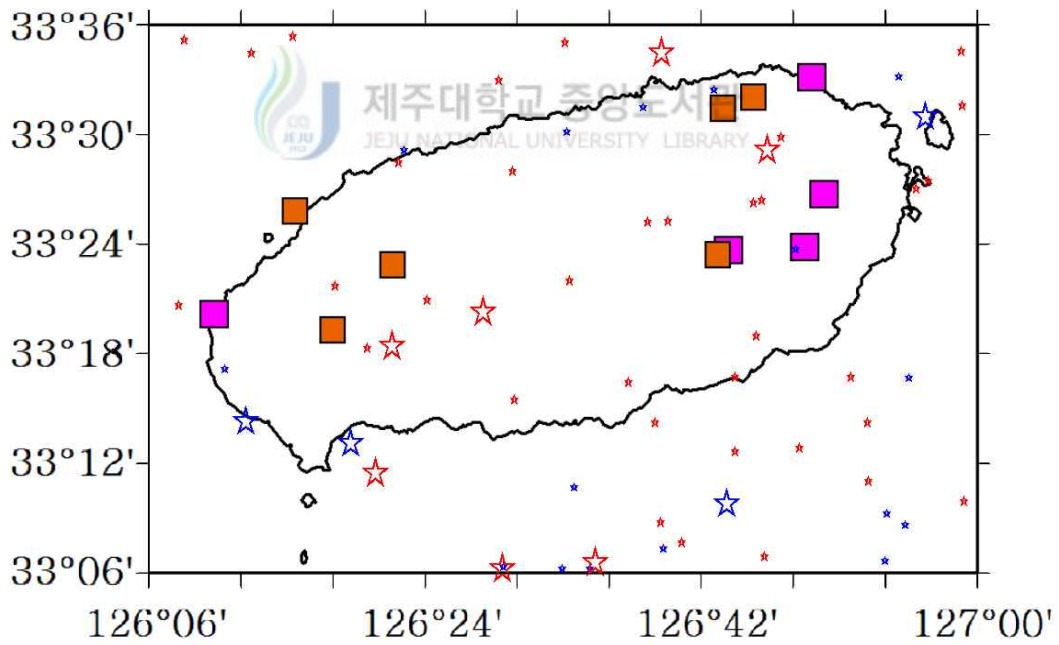


Fig. A-30 Distribution of lightning grades  $\pm 9$  or more in 2012.

## 감사의 글

2년이 조금 넘는 시간이 흘렀고, 드디어 석사과정을 마무리할 시간이 되었습니다. 이제껏 많은 공부를 했다고 자부하지는 못하지만 그래도 공부한 것들을 조금씩 모아서 학위논문을 발표하게 되었습니다. 많은 분들의 도움을 받아서 만들었음에 이 면을 빌려 감사의 마음을 전합니다.

공부할 수 있는 최선의 여건을 마련해주시고 공부에 대한 열정을 일깨워주신 허종철교수님, 투고논문을 쓸 때마다 열정적인 지도와 많은 조언을 해주신 고경남교수님, 학생들에게 친근하게 대해주시는 김범석교수님, 어려운 부분이 나올 때마다 인문대 출신인 것을 항상 배려해주시고 쉽게 설명해주신 이병걸교수님, 박상렬교수님, 임중환교수님, 조경호교수님, 이 논문에 기본이 되는 데이터 정리를 프로그래밍하신 양정부선생님, 행정실의 김봄솔선생님, 송정화선생님 감사합니다.

힘들 때마다 더 열심히 공부할 수 있도록 상담해주신 일어일문학과 김승한교수님, 김난희교수님, 일본에서의 교환학생 생활을 도와주신 아시카가 공과대학 우시야마교수님, 카니에교수님, 나카조교수님 등, 가끔씩 실험실에 찾아와 공부는 잘 되가는지 늘 묻고 조언해주신 졸업선배 문종이형, 경일이형, 준철이형, 승건이형, 현석이형, 치훈이형, 미호형, 현우형, 실험실 생활에 금방 적응할 수 있게 도와주신 양기호선생님, 상현이형, 수영이형, 동기이자 같은 인문대 출신으로 항상 같이 공부한 효정이누나, 많은 조언을 해주고 싶었지만 그러지 못해 미안한 실험실 후배 동범이형, 동현, 범철, 지영, 대영이형, 진석, 실험실 학부생 기훈, 희전, 인섭, 현수, 동훈, 성건, 감사합니다.

그리고 함께 공부했던 풍력공학부 선배, 동기, 후배, 프로젝트를 통해 더 많은 것을 배울 수 있게 해주신 도암, 남부발전 등 모든 분들에게 감사드립니다.

끝으로 제가 풍력공학부를 들어올 수 있도록 제 진로를 상담해주신 장훈형님과 집안일에 무신경했던 장남을 너그럽게 이해해준 가족에게 감사의 말씀드립니다.

2014.12.

한 지 훈 올림