한국동력기계공학회지 제19권 제2호 pp. 5-14 2015년 4월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2015.19.2.005
Vol. 19, No. 2, pp. 5-14, April 2015

리뷰논문

풍력발전기의 낙뢰피해 대책 검토 및 적용방안
An Application Method and Review of Lightning Protection for Wind Turbines

한지훈* · 고경남**† · 허종철***
Ji-Hoon Han*, Kyung-Nam Ko**† and Jong-Chul Huh***

(Received 09 February 2015, Revision received 09 March 2015, Accepted 09 March 2015)

Abstract: This investigation presents reviews of many research results on lightning damage to wind turbines and lightning protection strategies from IEC Standard, Europe, USA, Japan and Korea. There have been few studies on lightning protection of wind turbines in Korea, while various investigations have been performed in the other countries. It is necessary to apply some good lightning protection strategies of IEC Standard and the other countries to Korea. Those are as follows: The guideline for lightning protection of wind turbines should be established based on IEC Standards. It needs to be carried out both development of software and experimental studies for understanding the types of lightning damage to wind turbines and compiling the database. In order to minimize the lightning damage to wind turbines, it is a key factor for wind farm owners and researchers to provide the information about the damage cases and wind farm operation technique.

Key Words : Wind turbine, Lightning protection, Lightning damage measures

1. 서 론

지표면에서 발생된 복사열에 의한 상승기류로 인하여 적난운이 발생하고 구름 속에서 싸라기눈·우박·얼음 알갱이들이 서로 부딪치며 전하분리와 축적이 이루어지면서 생기는 현상을 뇌방전이라고 한다. 뇌방전의 종류에는 구름방전, 대지방전이 있으며 그 중에서 구름에서 대지로 방전되는 현상을 낙뢰라 한다.

이러한 낙뢰는 인명·재산피해로 이어지기도 하는데, 풍력발전 용량이 증가하면서 풍력발전기에 피해를 주는 경우가 증가하고 있다. 낙뢰가 풍력발전기에 미치는 피해양상은 풍력발전기의 일시적인 정지에서부터 화재나 블레이드의 파손까지 다양하다. 우리나라의 경우 주로 통신·제어장치에 대한 고장 및 블레이드 손상이 보고되고 있다.[1,2] 그러나 해외

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

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

의 경우 블레이드의 탈락·파손 등 장기간 풍력발전기의 운전이 불가능한 경우도 있었다.[3-5]

Fig. 1은 2001년도에 미국 NASA에서 작성한 세계 낙뢰밀도 분포를 나타낸다.[6] 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 있지만 우리나라에서는 이에 대한 연구가 충분히 진행되지 않고 있다고 생각된다.

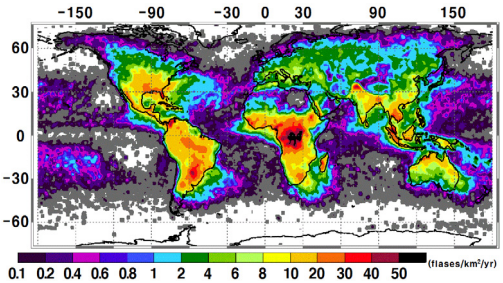

Fig. 1 Would wide lightning strikes[6]

따라서 본 연구에서는 해외의 풍력발전에 관한 낙뢰연구 성과를 파악하고, 나아가 우리나라는 어떻게 이에 관한 연구가 진행되어야 할지를 제안하고자 한다.

2. 낙뢰발생 및 피해 연구동향

국내·외를 막론하고 풍력단지가 운영되기 전부터 낙뢰는 인명 및 재산에 큰 피해를 주어 왔다. 이러한 피해를 최소화하기 위하여 각 국가에서는 기본적인 낙뢰특성이 연구되어왔으며[7-9] 낙뢰피해 조사·분류[10,11] 및 기본적인 접지방법[12] 등에 관한 연구가 진행되어 왔다. 또한 우리나라 기상청에서는 낙뢰연보 등[13,14]의 자료를 배포하고 있다.

2.1 IEC표준

IEC(International Electrotechnical Commission)에서는 기본 낙뢰특성은 물론 풍력발전기에 관련된 낙뢰현상을 정리하고, 이를 통한 낙뢰 노출 평가 방식을 제시한 IEC 61400-24[15]를 발간하였다. 또한 낙뢰보호에 관한 블레이드 실증 테스트 사양, 낙뢰의 영향이 미치는 LPZ(낙뢰 보호 구역)를 등급별로 나누어 그에 맞는 대책방안을 제시하였다. 이와 같이 IEC에서는 낙뢰관련 풍력발전기의 보호방법 등을 부속서에 담아 세계적으로 지속적인 연구와 논의가 가능하도록 하였다.

2.2 유럽

유럽에서는 자연현상을 모델링하고 이를 통한 응용프로그램 개발에 박차를 가하고 있다. 낙뢰 데이터수집과 이에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있으며[16] 낙뢰로 인한 피해 액수 계산식을 도출하였고[17] 해상 풍력발전기의 낙뢰보호를 연구한 바 있다.[18]

Troels 등[16]은 풍력발전기의 구성부품에 대한 고장확률과 수리방법 및 기간에 따라 낙뢰로 인한 피해금액을 계산하는 식을 유도하였다. Bruce[19]는 접지, 인명·재산 피해 등의 자료를 모아서 풍력발전기 낙뢰보호 장치의 성능을 연구하였다.

Farhad[20]는 블레이드에 대한 기하학적, 전기적, 기계적인 낙뢰위험을 평가하였다. Vidyadhar 등[21,22]은 FEA(Finite Element Analysis)소프트웨어를 활용, 구름과 풍력발전기 및 피뢰부 전반을 모델링하여 뇌운과 풍력발전기 사이의 상관관계와 리셉터의 성능을 연구하였다.

2.3 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.[23]

Fig. 2는 미국 Global Atmospherics사에서 작성한 낙뢰율지도를 보여준다.[24] 1993년에 발생한 1년 동안의 낙뢰 데이터를 사용하여 작성한 것으로 미국 중심부는 낙뢰율이 높고 중심부에서 멀어질수록 낮아지는 경향을 보인다.

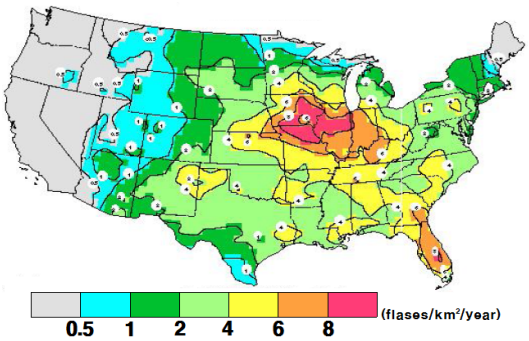

Fig. 2 Distribution of lightning density in the US[24]

Nicholas 등[25]은 실제 풍력발전기의 블레이드 사고사례를 분석한 결과, 공기 혹은 수분 팽창으로 인해 블레이드의 파손이 야기될 수 있음을 보고하였다. 또한 Richard[3]는 낙뢰를 관측하고 이에 따른 풍력발전기의 피해양상을 연구하였다. 이와 같이 미국에서는 실제 낙뢰 데이터를 활용한 연구가 많이 진행되고 있다.

2.4 일본

일본에서는 풍력이 대두되기 전인 1936년도에 미쿠니시험센터를 설립, 뇌격의 양상을 관측하고 인펄스 시험을 진행하였다.[26] 일본은 심한 피해를 야기하는 겨울철 낙뢰가 강한 지역을 낙뢰대책 중점지역으로, 그렇지 않은 지역을 낙뢰대책지역으로 구분하여 낙뢰특성 및 강도에 대한 연구를 진행하고 있다.[5,26-28] 시라이시 등[29]은 로고스키 코일을 사용하여 낙뢰가 발생할 때 접지부위의 피크값과 전류를 측정하였다. 또한 요코야마[30]는 블레이드 익단을 전류에 노출시켜 블레이드의 손상정도를 연구하였다.

Fig. 3은 신에너지·산업기술 총합 개발기구(NEDO)에서 만든 풍력발전기의 낙뢰피해유형을 나타낸다.[31] 각각의 부위에 어떠한 고장이 발생할 수 있는지 상세히 보여주고 있다. 그 대책으로는 나셀 상부나 풍력발전기 자체를 보호하기 위한 피뢰침탑 설치, 전력기기나 제어기기의 보호를 위한 SPD(Surge Protection Device)설치, 블레이드 보호를 위한 리셉터 설치 등을 제시하였다.

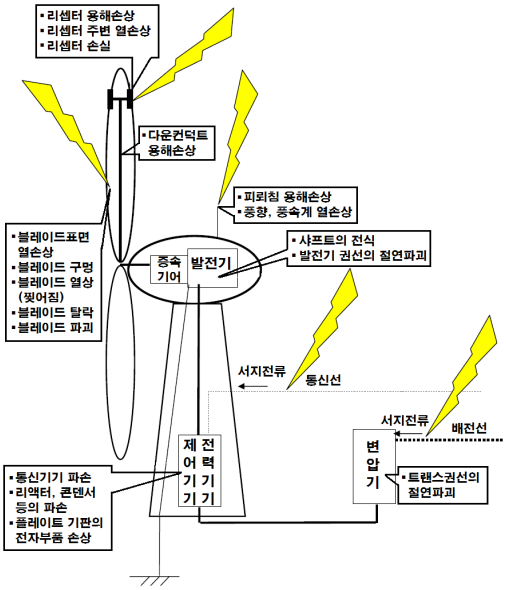

Fig. 3 Cases of lightning damage[31]

NEDO에서는 풍력발전사업자에 대한 앙케트 조사를 통해 풍력발전기의 블레이드, 통신장치 및 제어장치에 주로 낙뢰피해가 발생하고 있음을 밝혔다. 또한 일반 건물 높이에 따른 피뢰율을 사용하여 피해 액수에 대한 대략적인 계산식을 도출하였고, 더욱이 2008년에 풍력발전기 낙뢰대책 가이드라인[31]을 공개하였다. 또한 블레이드의 피뢰영상을 확보하였으며[32] 이를 통해 해당 부위의 보호에 대한 검토와 리셉터의 성능을 시험하였다. 나아가 일본 낙뢰위험지도를 작성하는 등의 연구가 NEDO에서 이루어지고 있다.[33]

2.5 우리나라

우리나라에서는 낙뢰정보를 대중들에게 알리기 위해 낙뢰연보[13], 재난상황 관리정보[14]책자를 발간하고 있다. 풍력산업이 활발한 제주도에서는 낙뢰에 대한 기본적인 연구[34,35] 및 낙뢰의 발생특성[36-38]을 분석한 연구가 진행되었다.

Fig. 4는 제주의 낙뢰빈도분포를 보여주는 예이다.[39] 2008년부터 5년간 발생한 낙뢰데이터를 사용하여 작성하였으며, 동쪽으로 갈수록 낙뢰 빈도가 높아지고, 제주도 북동쪽 끝과 동쪽 해안에서 낙뢰빈도가 높음을 알 수 있다.

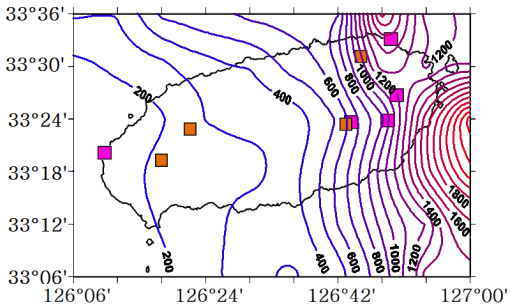

Fig. 4 Distribution of the number of lightning in Jeju[39)]

풍력발전기의 피해양상은 직격뢰에 의한 기계적인 소손보다 유도뢰에 의한 통신 HUB, 다회로 차단기, 케이블 등 전기부품 손상이 주로 발생하였다.[1,40,41)] 제주도의 경우 풍력발전기의 ExEx low voltage 에러로 인한 풍력발전기의 비상정지 상태도 보고된 바 있다.[42)]

3. 낙뢰피해 대책

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.[43-47)]

3.1 IEC표준

IEC에서는 대형 및 소형 풍력발전기에 관한 낙뢰 보호방법을 표준화하였다. 또한 풍력발전기의 낙뢰피해 대책을 제공함과 동시에 설문 조사 방법, 접지 및 낙뢰 모니터링 시스템의 종류 등 광범위한 정보를 제공하고 있다. IEC는 풍력발전기에 대한 낙뢰 대책으로 리셉터의 설치를 권장하고 있다. 그 설치 위치를 정하기 위해 사용되는 방법으로 RSM(Rolling Sphere Method)이 있다. 최소 피크전류를 구하고 그 등급을 LPL(낙뢰 보호수준)에 따라 정하며 각 등급에서 정해진 반경을 원의 반경에 적용하여 리셉터의 위치를 결정·설치하게 된다. 그러나 아직 완벽한 낙뢰피해 대책이 공표되지 않아 이에 관한 연구가 지속되고 있다.

3.2 유럽

유럽의 경우 소프트웨어를 이용하여 낙뢰로 인한 경제적 손실분석 및 위험분석 등을 하고 있다. Fig. 5는 FEM(Finite Element Method) 소프트웨어로 나타낸 적란운의 자기장 3D 모델이다.[48)] 이를 통해 낙뢰 발생과정을 모델링하였으며 풍력발전기의 낙뢰 피해를 예측하고 역으로 풍력발전기의 고장상태를 통해 낙뢰의 특성을 예측할 수 있었다.

또한 Madsen[48)]은 블레이드 위치 및 피치각에 따른 익단의 피뢰특성을 연구하였으며, Casper[49)]와 함께 자기장을 고려한 나셀 모델링 방법을 제안하였다. 그리고 IEC에서 제시하는 방식에 근거하여 낙뢰의 특성을 파악하고 실험을 통해 블레이드에 발생하는 낙뢰특성을 분석하였다.[50)]

카탈로니아 공과대학에서는 낙뢰 자체를 모델링하여 각 모델에 따른 비선형 접지시스템을 연구하였다.[51)] Ian[4)]은 대형 풍력발전기의 블레이드 및 베어링에 대한 낙뢰보호 방법을 연구하였다.

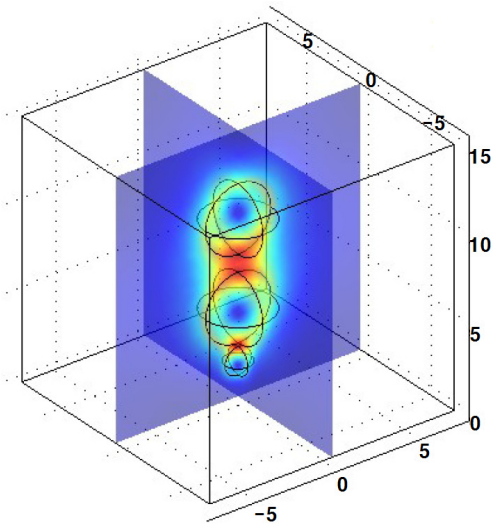

Fig. 5 Model of electric field by FEM[48)]

Rafael 등[52),53)]은 EMTP(Electro-Magnetic Transients Program) 소프트웨어를 이용하여 접지방식 및 낙뢰서지를 연구하였으며 Lorentzou[54)]는 SPD시스템의 이상적인 접지방식을 고안하였다. 또한 Rafael 등[55)]은 RSM을 활용하여 풍력발전기의 낙뢰 위험

분석 및 보호등급에 대해 연구하였다. 그들은 소프트웨어를 통해 풍력발전기와 건물의 낙뢰위험도를 비교하고 그 신뢰도를 검증하였다.[56]

3.3 미국

미국에서는 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.[24),57)] Sagrillo[58)]는 낙뢰피해 대책의 중요성을 인식하고, 낙뢰와 풍력발전에 관한 지식을 일반인들도 이해하기 쉽게 풀어 썼다.

Patterson[59)]은 풍력단지에 미치는 낙뢰의 영향을 최소화하는 방안을 연구하였으며, 풍력발전기의 구성부품에 대한 낙뢰피해 대책 조사 및 IEC표준 분석을 통하여 향후의 연구과제를 제안하였다. Christopher[60)]는 buckypaper를 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)에 부착하여 블레이드의 낙뢰에 대한 저항을 실험하였다. 낙뢰의 실제 데이터베이스를 활용하여 낙뢰를 모델링하였으며 buckypaper의 개수에 따른 피뢰시 저항감소 정도를 보고하였다. Joan[61)]은 풍력발전기를 정지 및 운전상태로 나누고, 블레이드가 피뢰되는 확률을 서로 비교하였다. 이를 통해 정지상태보다 운전상태일 때 전하 밀도가 감소하였고, 그 결과 피뢰확률도 감소함을 보였다.

3.4 일본

일본은 소형 풍력발전기와 블레이드 익단을 활용한 실험을 진행하고 피해액수를 예측하는 계산식을 도출하기 위해 노력하고 있다. 또한 국제표준을 이용하여 일본에 맞는 낙뢰대책을 제시,[31)] 사업자 혹은 일반인에게 정보를 제공할 수 있도록 소프트웨어를 개발하고 있다.[62)]

일본의 코치 공과대학에서는 풍력발전기용 FRP 블레이드를 부분 제작하여 낙뢰피해 양상[63)] 및 그 대책[64)]에 대하여 연구하였다. 칸사이 대학에서는 풍력발전기의 전력계통 모델을 이용하여 낙뢰가 풍력단지의 전력시스템에 미치는 영향을 연구하였다.[65)] 또한 동 대학에서는 접지부분의 전류측정을 통해 낙뢰가 발생할 때의 접지선의 상태를 연구하였다.[29,66)]

Fig. 6은 풍력발전기 상부의 새로운 접지방식을 나타낸다.[67)] (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.

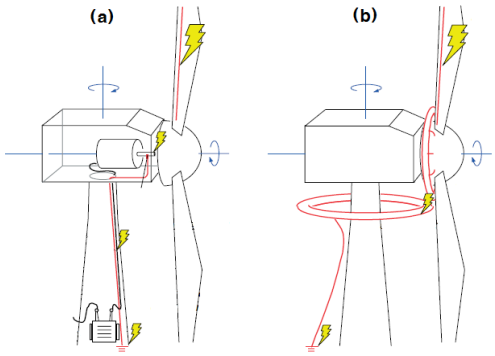

Fig. 6 Lightning protection system for wind turbine[67)]

NEDO에서는 지금까지 축적된 풍력발전시설의 고장·사고에 관한 각종 데이터를 정리하였다. 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.[68)] 토야마 대학에서는 일본 전역에서 발생하는 실시간 낙뢰데이터를 활용하여 컴퓨터 및 휴대전화에서도 볼 수 있는 낙뢰위험지도를 개발하고 있다.[62)]

3.5 우리나라

우리나라에서는 낙뢰로 인한 풍력발전기의 고장을 분석하고 서지보호기의 신설이나 교체 등의 대책을 강구하는 자료[1),40)]는 있었으나 구체적인 연구결과나 그 대책은 보고되지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내·외의 낙뢰에 관한 풍력발전 연구를 IEC 및 국가별로 분류하고 낙뢰 피해양상 및 그 대책에 대해 검토하였다. 그 결과 우리나라의 풍력발전기에 대한 다음과 같은 낙뢰피해 대책을 고려할 수 있을 것이다.

(1) IEC표준에서 제공되는 규정과 실험방식을 활용하여 국내의 낙뢰기술 수준을 파악하고 국내 상황에 맞는 풍력발전기의 낙뢰보호 가이드라인이 제정되어야 한다.

(2) 유럽의 FEM, EMPT와 같이 낙뢰의 특성 및 풍력발전기의 피해양상을 파악할 수 있는 소프트웨어의 연구개발이 필요하다.

(3) 미국과 같이 실제 데이터를 활용한 사례연구가 진행되어야 하고 TVP와 같은 풍력단지 적합성 평가를 지속적으로 수행할 필요가 있다.

(4) 일본의 예와 같이 풍력발전기의 고장·사고에 대한 피해 및 피해상황별 낙뢰보호 사례 등의 정보를 체계적으로 수집하고 신뢰성 있는 데이터베이스를 구축해야 할 것이다. 이를 위하여 사업자와 연구자간에 원활한 정보 공유가 활성화 되어야 한다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(과제번호: 20094020200020) 및 「제주풍력지구에 적합한 육해상 풍력발전단지 최적화 설계기술개발」과제(과제번호: R0001522)의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

References

1. D. S. Yang, 2013, "Comparative study of lightning characteristics and damage to wind turbine in Jeju Island and Gangwon", Conference of the Korean Society for Power System Engineering.
2. D. S. Yang, 2014, "A Comparative Study on Lightning Characteristics and Damage to Wind Turbines of Jeju Island and Gangwon Province", Master thesis, Jeju National University, Jeju.
3. R. Kithil, 2008, "Case study of lightning damage to wind turbine blade", National Lightning Safety Institute, http://www.lightningsafety.com.
4. I. Cotton, N. Jenkins and K. Pandiaraj, 2001, "Lightning protection for wind turbine blades and bearings", Wind Energy, Vol. 4, pp. 23-37.
5. S. Sekioka et al, 2007, "Damages in Japanese Wind Turbine Generator Systems due to Winter Lightning", International Symposium on Lightning Protection.
6. NASA Science, 2001, "Where Lightning Strikes", Science News, http://www.science.nasa.gov.
7. W. Schulz et al, 2005, "Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system", Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), Vol. 110, D9.
8. P. Manoochehrnia et al, 2007, "Lightning Statistics in Switzerland", 9th international Symposium on Lightning Protection.
9. M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou and I. Cotton, 2004, "Key Issues in Lightning Protection of Wind Turbines", WSEAS Transactions on Circuits and Systems, pp. 1408-1414.
10. W. C. Valine and E. P. Krider, 2002, "Statistics and Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning with Multiple Ground Contacts", Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012) Vol. 107, D20, AAC-8.
11. M. S. Park, 2005, "Statistics of Lightning Damages and Lightning Protection Standards in Korea", Master thesis, Inha University, Incheon.
12. Korea Information & Comm, 2004, "Contractors Association, Grounding Method for Information

and Telecom", Korea Information & Comm, Contractors Association Business Development Room Technology Promotion, Korea.
13. Observation-based bureau, 2008, "Lightning yearbook", Korea Meteorological Administration.
14. National Emergency Management Agency, 2014, "Disaster Status Management Information Vol. 9: Lightning Strike", http://www.nema.go.kr.
15. IEC TR 61400-24, 2002, "Wind Turbine Generator Systems-Part24: Lightning Protection".
16. T. S. Sorensen et al, 2008, "The Update of IEC 61400-24 Lightning Protection of Wind Turbines", 29th International Conference on Lightning Protection, 23rd-26th.
17. H. R. A. Wessels et al, 2002 "Lightning damage of OWECS part1: parameters relevant for cost modelling", ECN-C-02-053.
18. T. Sorensen, F. V. Jensen and N. Raben, 2001, "Lightning protection for offshore wind turbines", IEE Conference Publication, Vol. 4, No. 482.
19. B. Glushakow, 2007, "Effective Lightning Protection For Wind Turbine Generators", Energy Conversion, IEEE Transactions on 22.1, pp. 214-222.
20. F. Rachidi et al, 2008, "A Review of Current Issues in Lightning Protection of New-Generation Wind-Turbine Blades", Industrial Electronics, IEEE Transactions on 55.6, pp. 2489-2496.
21. V. Peesapati and I. Cotton, 2009, "Lightning protection of wind turbines - A comparison of real lightning strike data and finite element lightning attachment analysis", In Sustainable Power Generation and Supply, 2009, SUPERGEN'09, International Conference on IEEE, pp. 1-8.
22. V. Peesapati, 2010, "Lightning protection of wind turbines", EWEC 2010.
23. C. W. Dodd, Thomas McCalla Jr. and James G. Smith, 1983, "How to protect a wind turbine from lightning", U.S. government printing office, United States.
24. H. Rhoads et al, 2000, "Lightning activities in the DOE-EPRI turbine verification program", National Renewable Energy Laboratory, United States.
25. N. Wilson et al, 2013, "Lightning attachment to wind turbines in central Kansas", European Wind Energy Association.
26. S. Tsutomu, 2003, "Recent Technique for Lightning Protection", The Japan Electric Association, Korean Electricity Commission Digital Library.
27. M. Ishii and M. Saito, 2009, "Lightning electric field characteristics associated with transmission-line faults in winter", Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on 51.3, pp. 459-465.
28. Y. Yasuda et al, 2008, "Surge analysis on wind farm when winter lightning strikes", Energy Conversion, IEEE Transactions on 23.1, pp. 257-262.
29. Y. Shiraishi and T. Otsuka, 2006, "Direct measurement of lightning current through a wind turbine generator structure", 2006 Source of the Document Electrical Engineering in Japan, Vol. 157, No. 4, pp. 1529-1535.
30. S. Yokoyama, 2013, "Lightning protection of wind turbine blades", Electric Power Systems Research, Vol. 94, pp. 3-9.
31. I. Ushiyama et al, 2008, "Wind Turbine Generator System Guideline in Japan", NEDO.
32. Toyo-sekkei, 2013, "Research and Development of Wind Energy Technic: Lightning Protection", NEDO report of New Renewable Energy.
33. T. Shindo et al, 2012, "Studies of lightning protection design for wind power generation systems in Japan", 44th International conference on large high voltage electric systems.

34. K. B. Kim, K. N. Ko and J. C. Huh, 2007, "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.
35. K. B. Kim et al, 2007, "An Analysis of Lightning Characteristics for Construction of Wind Farm", Proceedings of the Autumn Meeting of The Korean Solar Energy Society, pp. 211-223.
36. J. H. Lee and C. S. Ryu, 2001, "Analysis of Lightning Characteristics in Korea, Journal of atmosphere", Conference Proceedings of Korea Meteorological Society, pp. 255-258.
37. H. S. Eom and M. S. Suh, 2009, "Statistical Characteristics of Recent Lightning Occurred over South Korea", Journal of Korean Earth Science Society, pp. 210-222.
38. H. M. Park, S. H. Jung and G. W. Lee, 2010, "Observed characteristics of lightning occurrence in Korea by KMA lightning observation system 2002-2009", Proceedings of the Autumn Meeting of KMS, pp. 468-469.
39. J. H. Han, K. N. Ko and J. C. Huh, 2013, "Lightning characteristics and wind farm evaluation of lightning of jeju island for 2008-2012", The Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 5, pp. 60-68.
40. Korea Southern Power Company Limited, 2012, "The review report of comprehensive measures caused by lightning damages", http://www.kospo.co.kr.
41. K. N. Ko, K. B. Kim and J. C. Huh, 2008, "Characteristics of Lightning Occurred over Jeju Island for 2004-2006 and an Effect of Lightning on Wind Turbine Generator System", The Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 1, pp. 83-89.
42. K. N. Ko, M. J. Kang and J. C. Huh, 2007, "Analysis of Annual System Operating Characteristics at Hangwon Wind Farm on Jeju Island", The Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 2, pp. 42-49.
43. H. V. Erichsen, 2011, "Lightning protection of wind turbines", http://www.electricon.dk.
44. NEG Micon, 2004, "Technical description: lightning protection system", NEG Micon A/S.
45. W. Fellensiek and A. Böhm, 2007, "Earth and lightning protection system for ENERCON WECs", ENERCON project management, Denmark.
46. Leutron, 2011, "Yellow protects: lightning and surge protection of wind turbines", Leutron GmbH, Germany.
47. DEHN, 2012, "White paper: Lightning and Surge Protection for Wind Turbines", http://www.dehn.de.
48. S. F. Madsen et al, 2006, "Interaction between Electrical Discharges and Materials for Wind Turbine Blades - particularly related to lightning protection", Doctoral dissertation, Technical University of Denmark.
49. S. F. Madsen, C. F. Mieritz and H. dk ApS, 2011, "Current distribution and magnetic fields in complex structures using Comsol multiphysics", Excerpt from the Proceedings of the Comsol conference.
50. S. F. Madsen et al, 2006, "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.
51. D. Romero, J. Montanya and A. Candela, 2004, "Behaviour of the wind-turbines under lightning strikes including nonlinear grounding system", Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality.
52. R. B. Rodrigues, V. M. F. Mendes and J. P. S. Catalão, 2012, "Analysis of transient phenomena

due to a direct lightning strike on a wind energy system", Energies, Vol. 5, No. 7, pp. 2545-2558.

53. R. B. Rodrigues, V. M. F. Mendes and J. P. S. Catalão, 2011, "Lightning surges on wind power systems", Electromagnetic Interference Issues in Power Electronics and Power Systems.
54. M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou and B. C. Papadias, 2000, "Analysis of Wind Turbine Grounding Systems", Electrotechnical Conference, MELECON 2000, 10th Mediterranean, Vol. 3, pp. 936-939.
55. R. B. Rodrigues, V. M. F. Mendes and J. P. S. Catalão, 2008, "A case study of risk analysis due to lightning for wind power plants", International Conference on Renewable Energies and Power Quality.
56. R. B. Rodrigues, V. M. F. Mendes and J. P. S. Catalão, 2009, "Estimation of lightning vulnerability points on wind power plants using the rolling sphere method", Journal of Electrostatics, Vol. 67, No. 5, pp. 774-780.
57. B. McNiff and E. Muljadi, 1999, "Wind turbine lightning protection project", NREL report NREL/SR-500-31115, http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31115. pdf.
58. Mick Sagrillo, 2003, "Small turbine column: residential wind turbines and lightning", Windletter, Vol. 22, No. 11.
59. James W. Patterson, Jr., 2005, "Development of obstruction lightning standards for wind turbine farms", U.S. department of transportation, federal aviation administration, Virginia.
60. C. B. Hill, Y. Wang and O. I. Zhupanska, 2012, "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.
61. J. Montanyà, O. Velde and E. R. Williams, 2014, "Lightning discharges produced by wind turbines", Journal of Geophysical Research, Atmospheres, Vol. 119, No. 3, pp. 1455-1462.
62. Y. Hotta, 2011, "Analysis of information delivery system of lightning hazard map and it's framework", SCOPE accomplishment conference of ICT Innovation Forum.
63. K. Tomohiro, 2002, "Lightning Damage Mechanism of FRP Blade in Wind Turbines", Master thesis, Kochi University of Technology.
64. T. Ryokan, 2004, "Lightning Protection of FRP Blades for Wind Power Generators", Master thesis, Kochi University of Technology.
65. Y. Yasuda, T. Hara and T. Funabashi, 2008, "Analysis of lightning surge propagation in wind farm", Electrical Engineering in Japan, Vol. 162, No. 2, pp. 30-38.
66. Y. Yasuda and T. Funabashi, 2004, "Transient analysis on wind farm suffered from lightning", Universities Power Engineering Conference, 39th International, Vol. 1, pp. 202-206.
67. Y. Yasuda, 2006, "A New Lightning Protection System for Wind Turbines using Two Ring-Shaped Electrodes", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 314-319.
68. New Energy and Industrial Technology Development Organization, http://www.nedo.go.jp.
69. H. Stephen et al, 1997, "Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation: Chapter9 Lightning Protection for Wind Turbine Installations", Research and Development on Wind Energy Conversion Systems, 1st Edition.
70. T. Buston et al, 2001, "Wind energy handbook", John Wiley & Sons, England, pp. 562-568.
71. N. Veritas, 2002, "Guidelines for Design of Wind Turbines", Det Norske Veritas: Wind Energy Department, Ris National Laboratory, pp. 106-114.

72. M. C. Brower, 2012, "Wind resource assessment", John Wiley & Sons, England, pp. 77-80.
73. Korea Meteorological Administration, http://www.kma.go.kr.
74. Korean Meteorological Society, 2009, "Introduction to Atmospheric Sciences", Sigmapress, Korea, pp. 324-330.
75. J. F. Manwell, J. G. Mcgowan and A. L. Rogers, "Wind energy explained: theory, design and application", John Wiley & Sons, England
76. AWS Scientific Inc., 1997, "Wind resource assessment handbook", NREL, United States, pp. 26-27.