



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

陸上風力發電團地의 防災管理 매뉴얼  
開發을 위한 方案

濟州大學校

産業大學院 風力工學科

高 禎 晚

2016 年 6月

# 陸上風力發電團地の 防災管理 매뉴얼 開發을 위한 方案

指導教授 高 旻 男

高 禎 晩

이 論文을 風力工學科 碩士學位 論文으로 提出함

2016 年 6月

高 禎 晩 의 風力工學科 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

김보성



委 員

김정남



委 員

이정환



濟州大學校 産業大學院

2016 年 6月

# A study on disaster prevention manual development for onshore wind farm

Jeong-Man Ko  
(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

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

2016. 6.

This thesis has been examined and approved.

허정철

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

Kyungnam Ko

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

Bumsuk Kim

Thesis director, Bum-Suk Kim, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

2016. 6. 15

Date

Department of Wind Energy Engineering

Graduate School of Industry

Jeju National University

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	i
LIST OF TABLES .....	ii
SUMMARY .....	iii
I. 서 론 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 목적 .....	3
3. 논문의 구성 .....	5
II. 제주도 풍력발전 설비현황 .....	6
1. 풍력발전설비 설치현황 .....	6
2. 풍력발전단지별 발전기 노후정도 분석 .....	8
III. 육상풍력발전기의 사고사례 분석 및 방재매뉴얼의 필요성 .....	11
1. 세계적 풍력발전기 재난사고 현황 .....	11
1) 화재사고 .....	13
2) 전도 및 전단사고 .....	14
2. 제주도 행원풍력발전기 사고사례(화재 후 타워 전도사고) .....	15
1) 개 요 .....	15
2) 원인분석 .....	16
3. 제주도 김녕풍력발전기 사고사례(풍력발전기 화재사고) .....	18
1) 개 요 .....	18
2) 원인분석 .....	19
4. 방재매뉴얼의 필요성 .....	21

IV. 제주도 풍력발전기 방재 관리 매뉴얼에 대한 제언 .....	22
1. 풍력발전기 자동소화설비에 대한 매뉴얼 개발 방안 .....	23
1) 설치기준 .....	24
2) 점검기준 .....	30
3) 정비관리기준 .....	31
2. 풍력발전기 재난사고에 대한 예방 매뉴얼 .....	33
1) 피해가능 ZONE 설치이유 .....	33
2) 피해가능 ZONE 운영 매뉴얼 .....	36
3) 피해가능 ZONE을 활용한 재난훈련 실시 매뉴얼 .....	39
3. 풍력발전기 재난사고의 처리후 후속조치에 대한 매뉴얼 .....	42
V. 결    론 .....	46
참고문헌 .....	48

# LIST OF FIGURES

- Fig. 1 Annual and cumulative world wind power capacity (2000~2015) [2]
- Fig. 2 Annual number of accident wind turbine (1996~2015) [3]
- Fig. 3 Annual new installed wind capacity in Jeju Island, South Korea [4]
- Fig. 4 Onshore wind farm on Jeju Island, [10]
- Fig. 5 Wind power capacity with year [12]
- Fig. 6 The age of wind turbines on Jeju Island,[4]
- Fig. 7 The cost trend for O&M according to wind turbine operating time  
(Source: KOSPO)[14]
- Fig. 8 World wide Annual wind turbine accident (CWIF)[15]
- Fig. 9 Aftermath of Danish wind turbine structural failure [16]
- Fig. 10 Wind turbine accident at Haengwon wind farm[18]
- Fig. 11 Pitch control system of wind turbine[19]
- Fig. 12 The mechanism of wind turbine accident in Haengwon wind farm
- Fig. 13 Wind turbine accident of Gimnyeong wind farm [21]
- Fig. 14 The basic manual for handling an accident
- Fig. 15 The base elements for prevention of wind turbine accident
- Fig. 16 The automatic fire suppression system of wind turbine [26]
- Fig. 17 The install state of automatic fire suppression system inside of wind turbine nacelle [28]
- Fig. 18 The automatic fire detection system of wind turbine in Hankyeong wind farm [26]
- Fig. 19 Wind turbine fire at Ardrossan wind farm, U. K. [24]
- Fig. 20 The boundary of fire damage for No. 3 wind turbine in Gasiri wind farm
- Fig. 21 The fire lane of Gasiri wind farm [33]
- Fig. 22 The process of training for preventing disaster[8]
- Fig. 23 The subsequent process after reinstatement

# LIST OF TABLES

- Table 1 State of wind turbines on Jeju Island,[4]
- Table 2 World wide Annual wind turbine accident (CWIF)[15]
- Table 3 Gimnyeong wind turbine Unit 1 fire-related error information [22]
- Table 4 The applicability of fire suppression for wind turbine[25]
- Table 5 The applicability of fire detection system for wind turbine [30]
- Table 6 The inspection standard for automatic fire suppression system [31]
- Table 7 The inspection and maintenance standard for automatic fire suppression system[31]
- Table 8 The consideration for installing possible damage zone
- Table 9 Establishment and action guide for possible zone
- Table 10 The regulation for preventing disaster[34]
- Table 11 Action plan for nacell fire of windterbine
- Table 12 Expert group for investigation for wind turbine accident [6]
- Table 13 Subsequent process of accident

# SUMMARY

As wind power capacity increases, the accident such as a turbine fire and structural failure of wind turbines also increases in the world. Over the past few years, there were also some wind turbine accidents in Jeju Island. However there is no manual or guideline for preventing wind turbine accidents in South Korea. In order to provide guideline for disaster prevention manual development for onshore wind farms, this study was performed. Many Korean laws such as Fire Services Act and Emergency Safety Management Act were reviewed for deriving appropriate action plans for preventing turbine accidents.

As a result, the fire detection system and automatic fire suppression system should be installed in wind turbine nacelle in accordance with the turbine nacelle type and structure, which should be checked regularly. The possible boundary for wind turbine fire damage should be estimated for contingency plan, which should be advised by various experts of wind turbines, fire protection control, etc. In particular, the experiment of turbine parts dropping was recommended for obtaining practical data for the development of disaster prevention manual of wind turbines. The subsequent process after reinstatement of turbine accidents is also important for not repeating the similar turbine accidents, which was proposed in this thesis. Additionally, the training for preventing disaster at wind turbines is necessary for safety first principle, whose ways and procedure were also suggested in this thesis.

# I. 서 론

## 1. 연구 배경

현재 전 세계적으로 풍력발전기의 발전용량은 점진적으로 증가하는 추세를 보여주고 있다. Fig. 1은 세계 풍력발전기 발전용량의 점차적인 증가추이를 나타낸다. 이는 2010년 197,946MW 였던 발전용량이 2015년 말 기준 432,883MW로 급속하게 증가하고 있다.[1]

이러한 글로벌한 현상은 특히 2015년도에는 전년대비 17% 정도의 발전용량의 증가를 보여주며 향후 더 많은 용량의 증가를 예상할 수 있게 한다.[1]

그 원인을 살펴보면 풍력발전단지의 증가 영향도 있겠지만 풍력터빈의 발전용량 대형화 및 유지관리 기술의 비약적인 발전영향도 충분히 있다고 역추론할 수 있다.

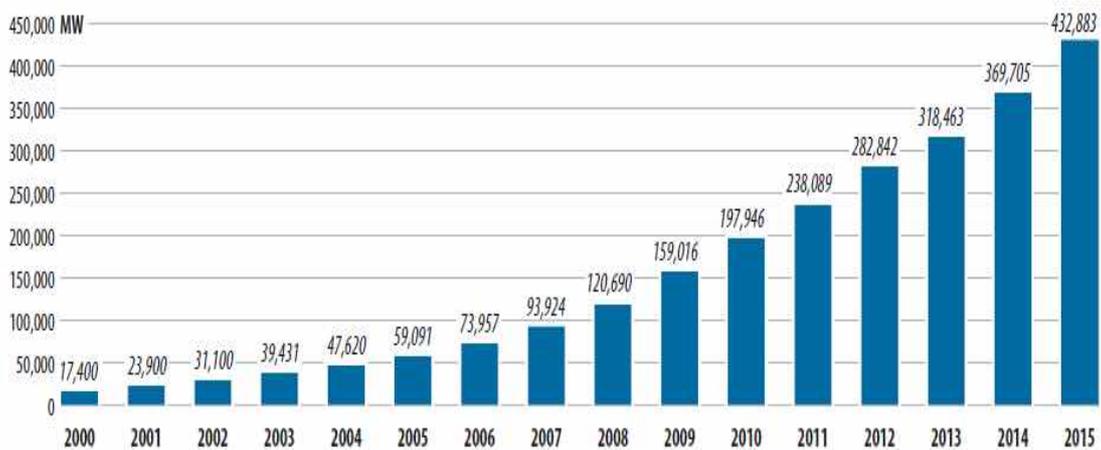


Fig. 1 Annual and cumulative world wind power capacity (2000~2015) [2]

그러나 이같이 풍력발전기의 설치량이 증가함과 동시에 체계적이고 지속가능한 유지관리방안이 미비함에 따라 발전기의 안전사고를 비롯한 대형 재난사고가 빈번하게 발생하고 있고, 제주도에 설치된 풍력단지들 역시 이런 현상을 피해갈 수 없다고 생각된다.

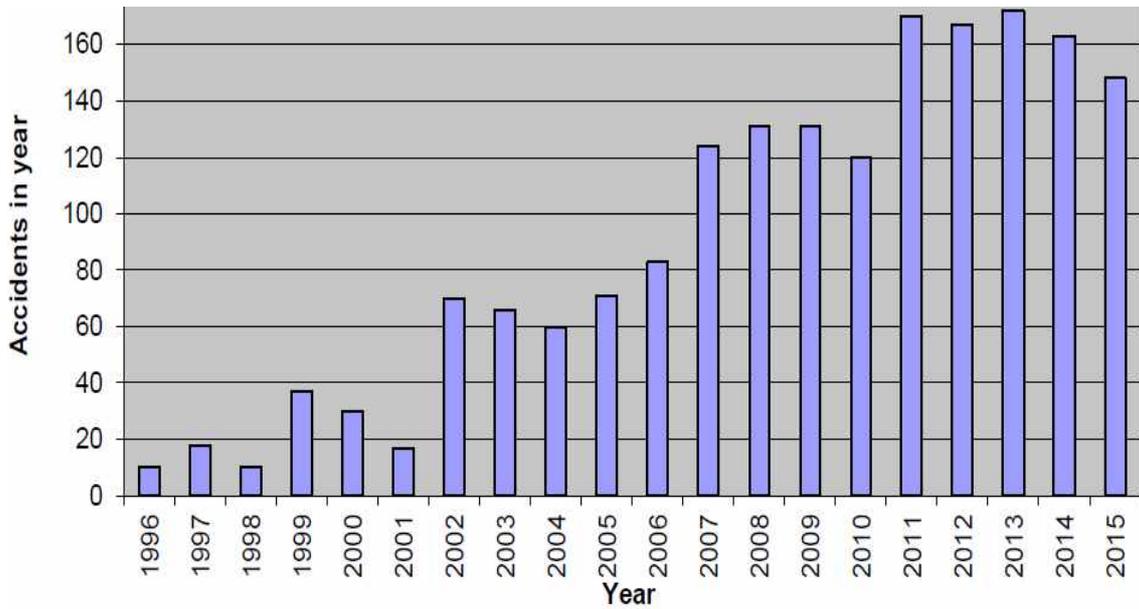


Fig. 2 Annual number of accident wind turbine (1996~2015) [3]

Fig. 2는 북동부 스코틀랜드에 풍력발전 관련단체 CWIF(Caithness Wind farm Information Forum)가 발표한 연도별 풍력발전기사고의 점증적인 발생건수이다.

2010년도 이후 사고 건수가 급격히 증가함은 위의 Fig. 1의 추세와 견주어 볼 때 밀접한 관계가 있다. 2002년과 2007년, 2011년에 급격히 사고가 증가하고 그 이후 3~4년은 비교적 안정적인 발생빈도를 나타내고 있다.

이런 사고건수의 추세를 볼 때 발전기의 설치량이 증가함에 따라 사고 건수도 증가하지만 사고발생 후 원인 분석하여 피드백 과정을 거쳐 어느 기간정도는 적절한 유지관리가 되고 있다고 분석되어진다. 그러므로 조금 늦은 감은 있지만 현시점이 풍력발전기의 지속가능하고 안정적인 매뉴얼의 체계적 확립이 필요한 시점이라고 사료된다.

## 2. 연구 목적

기존 제주도에 설치된 풍력발전기의 노후도가 증가함에 따라 안전사고 및 재난사고가 종종 발생하고 있고, 이에 제주도 풍력발전단지들 역시 향후 그 위험에서 절대적으로 자유롭지 못한 실정이다.

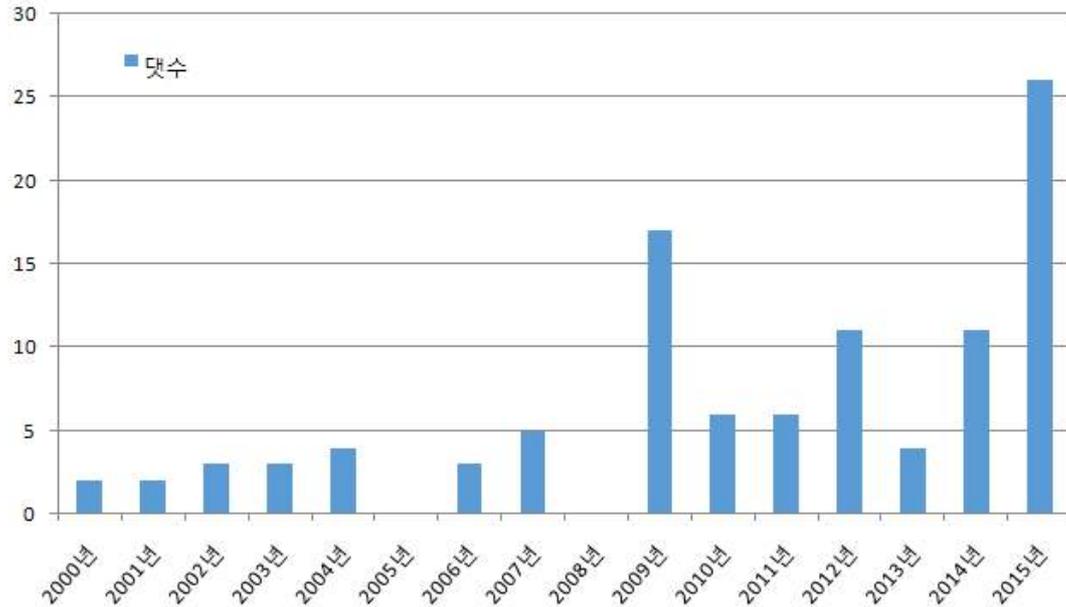


Fig. 3 Annual new installed wind capacity in Jeju Island, South Korea [4]

Fig. 3은 제주도 내 설치/운영 중인 풍력발전기의 설치년도를 나타낸다. 제주도 풍력발전기의 설치기수가 증가하고 설치년도도 참고해볼 때 설치 후 10년 이상 된 풍력발전기가 10기 이상 가동되고 있고[4], 이에 대한 운영관리 차원의 대책도 필요하다.

2009년 이후 제주도에 설치되어지는 풍력발전기의 수는 급격히 증가되고 있다. Fig. 2의 세계적인 사고 발생현황과 견주어 살펴보면 제주도 풍력발전기 역시 설치 수 증가와 발전기의 노후로 인하여 향후 사고발생확률이 증가할 수밖에 없을 것으로 예상된다. 따라서 이 연구에서는 이에 대해 풍력발전기 운영 시 예상되는 문제점을 미리 파악하고 그에 맞는 지속가능한 매뉴얼작성을 위한 기준을 제시하고자 한다.

그리고 제주도의 과거 2015년 7월 7일 발생한 김녕 풍력발전실증단지 내 750 kW 급 풍력발전기의 너셀과 블레이드 일부에 발생한 화재사고를 분석한다. 또한 2010년 10월 25일 행원 풍력발전단지 내 600 kW급 풍력발전기의 너셀 화재 및 타워의 전도사고에 대한 원인분석을 함과 동시에 세계적인 풍력발전기 사고현황을 분석하여 제주도지역에 맞는 매뉴얼을 개발의 방안을 제시하고자 한다. 특히 한국소방산업기술원(KFIS)의 고체에어로졸 자동소화장치 인정기준[5]과 강원도 지진피해 원인조사단 구성 및 운영에 관한조례[6], 소방법에세 명시된 주요법률, 주식회사 만서기업의 소방관련매뉴얼[7], 그리고 소방방재청 재난대비 역량훈련센터에서 연구 발간한 재난대비 훈련매뉴얼[8], VDS의 Wind turbines Fire protection guideline[9] 등을 참고하여 제주도 지역에 맞는 풍력발전기의 체계적이고 지속가능한 매뉴얼 개발 방안의 제시함을 연구목적으로 한다.

### 3. 논문의 구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 2장에서는 제주도 풍력단지에 설치된 풍력발전기 현황 및 장비들의 노후정도에 대하여 분석하였고, 그로인한 안전사고 및 각종 재난사고의 위험성을 설명하였다.

3장에서는 세계적인 풍력발전기의 사고빈도 및 사고현황을 분석하고 제주도 풍력발전기의 향후 유지관리 및 매뉴얼 개발에 도움을 주고자 하며, 특히 제주도 풍력발전기의 대표적인 사고인 행원 풍력발전기의 화재에 의한 전도사고, 김녕 풍력발전기의 화재사고를 중점적으로 살펴보고 그에 대한 원인을 분석 하였다.

4장에서는 앞에서 거론하였던 사고 원인분석을 기본으로 한 매뉴얼 작성, 그리고 그동안 간과하였던 풍력발전기 운영 시 피해가능 ZONE의 설치 및 그에 대응하는 매뉴얼부분까지 안전하면서도 지속가능한 방안을 제시하였다. 또한, 재난훈련의 근거법과 방법을 제시하고 이에 대한 적절한 매뉴얼 역시 제시하였다. 그리고 재난복구 후 후속조치에 대하여 투명하고 신뢰성 있는 프로세스 및 매뉴얼을 작성하여 제주도 풍력발전기를 적용하여 이에 맞는 매뉴얼개발 방안을 제시하였다.

5장 결론에서는 제주도 풍력발전단지들의 매뉴얼의 작성 및 사용의 미비함을 한번 더 상기시키고 향후 근로자들의 안전과 민원의 최소화 그리고 풍력발전기의 성능을 지속가능하게 하는 유지관리 매뉴얼의 중요성을 다시 한번 강조하였다.

## II. 제주도 풍력발전기 설치현황

### 1. 풍력발전설비 설치현황

#### 1) 제주 육상풍력발전단지 현황

제주지역에서 설치가동 되고있는 풍력발전기의 운영대수는 총103기으로써.(실증단지 포함) 대표적인 운영사 별로 구분하면 제주에너지공사 43대, 한국남부발전 19대, 김녕풍력발전회사 10대, SK D&D 10대, 한신에너지 10대, 기타 운영회사가 10대를 가동하고 있다. 그리고 현재 한국중부발전 10대, 한국남동발전 10대가 설치 중에 있으며 해상풍력 및 기타 몇몇 단지가 인허가를 취득하여 건설 준비 중에 있다.[4]



Fig. 4 Onshore wind farm on Jeju Island, [10]

Fig. 4 는 제주지역 풍력발전설비 현황을 운영회사별로 구분하여 나타내고 있다. 위에 나타난 풍력발전단지 내 설비들은 운전가능 년수를 대부분 20년을 기준으로 하고 있으며 유지관리 및 경제성분석 역시 그 기준을 따르고 있다.[11]

이처럼 다수의 풍력발전단지에서 각각의 발전기가 운영되고 있고 시간이 지남에 따라 노후화 역시 진행되어 가고 있다.

## 2) 풍력발전기의 규모의 이해

최근 풍력발전기의 발전용량이 많아지고 양질의 풍력을 사용하기 위하여 설비의 규모가 대형화 되고 있으며 특히, 발전기의 타워 높이 및 블레이드의 길이가 비약적으로 커지고 있는 실정이다.

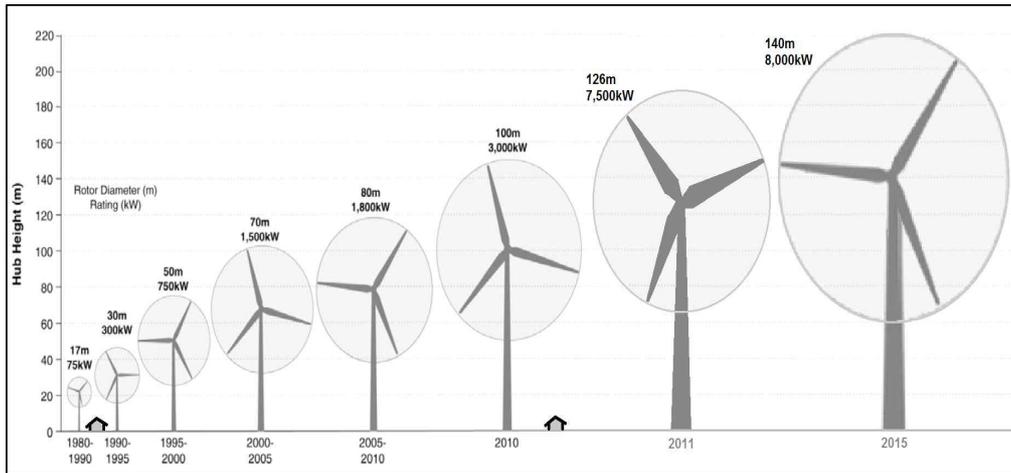


Fig. 5 Wind power capacity with year [12]

Fig. 5는 1980년대부터 현재까지 풍력발전기의 허브높이와 블레이드의 길이, 그리고 발전용량이 점차적으로 대형화되는 과정을 보여준다. 예컨대 제주도에서도 2015년에 준공되어 운영되고 있는 김녕 풍력발전단지에 설치된 풍력발전기의 제원을 살펴보면 Alstom사의 3MW급, 타워높이 90m, 블레이드길이 53.2m이며 블레이드 회전 시 가장 높은 위치에 있을 경우 약 140m에 이른다.[13]

이처럼 타워 및 블레이드의 제원이 급격히 대형화되면서 이로 인해 발생되어질 수 있는 재난상황을 고려한 매뉴얼이 작성되어야 하며 특히 점진적인 대형화 추세에 맞춘 장기적이고 안정된 요소를 특히 감안하여야 할 것이다. Fig. 5에 보여지는 풍력발전기의 변화는 풍력발전단지의 경제성 평가에서부터 운영관리 재난관리 등 전반적인 요소에 적극 반영해야 할 것이다.

가령 타워, 블레이드를 합한 높이가 50m의 풍력발전기와 150m 높이의 두 개의 풍력발전기에 운영 중 타워의 전도사고가 발생할 경우 피해지역은 높이에 비례 할 것으로 예상되나 화재사고가 발생하여 화재로 인한 파편이 주변에 비산낙하 한다고 가정했을 경우, 그로인해 발생된 피해지역범위는 상당한 차이를 보일 것이다.

## 2. 풍력발전단지별 발전기 노후정도 분석

Table 1 State of wind turbines on Jeju Island,[4]

발전단지	용량 (MWh)	대수	제조사	준공년도	총용량 (MWh)
동북풍력	2	15	한진	2015	30.00
김녕풍력	3	10	Alstom	2015	30.00
김녕풍력 (실증단지)	2	1	STX	2012	2.00
	3	1	두산	2012	3.00
	5	1	효성	2013	5.00
	5.5	1	현대	2013	5.50
월정풍력	1.5	1	한진	2006	1.5
김녕국산화풍력	0.75	1	유니슨	2010	0.75
월정마을풍력	3	1	두산	2015	3.00
SK가시리풍력	3	10	지멘스	2014	30.00
가시리국산화풍력	1.5	7	한진	2012	10.50
	0.75	3	유니슨	2011	2.25
	0.75	3	효성	2011	2.25
한경풍력	.5	4	NEG Micon	2004	6.00
	3	5	Vestas	2007	15.00
제주월령풍력	2	1	Vestas	2010	2.00
신창풍력	0.85	2	Vestas	2006	1.70
성산풍력	2	6	Vestas	2009	12.00
	2	4	Vestas	2010	8.00
행원풍력#1	0.75	1	NEG Micon	2000	0.75
	0.75	3	NEG Micon	2002	2.25
	0.66	2	Vestas	2001	1.32
	0.66	3	Vestas	2003	1.98
행원풍력#4	2	1	유니슨	2012	2.00
행원풍력#5	1.5	1	한진	2012	1.50
행원풍력 #16	1.65	1		2013	1.65
행원풍력 #17	3	1	두산	2014	3.00
행원풍력#3	0.66	1	Vestas	2000	0.66
행원마을풍력	2	1	STX	2013	2.00
삼달풍력	3	11	Vestas	2009	33.00
총 계		103			220.56

Table 1은 제주도에 현재 운영되고 있는 풍력발전기들의 준공년도, 발전용량 및 제조사 등을 풍력단지별로 구분하여 나타낸다.

풍력발전기의 사고 원인은 기계적 결함이거나 전기적 결함일 경우가 지배적이고, 그 결함 역시 발전기의 노후정도에 따라 발생빈도가 증가한다. Table 1은 제주도 풍력발전기의 노후정도를 파악할 수 있고, 이를 활용한 통합 안전기준 및 안전하고 지속가능한 적정 매뉴얼을 작성하는데 참고가 될 수 있다. 특히 사고발생의 피해정도와 빈도가능성이 노후정도와 연관성을 고려하여 운영한다면 제주도 풍력발전기의 내구성향상에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

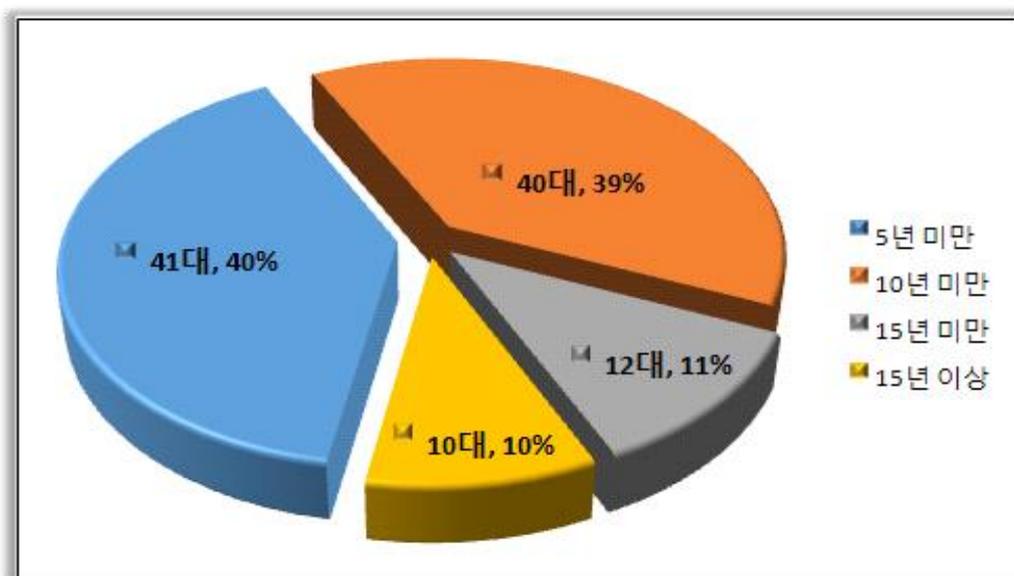


Fig. 6 The age of wind turbines on Jeju Island,[4]

Fig. 6은 제주도에 설치되어 운영되는 풍력발전기들의 경과년도를 5년 단위로 구분하여 나타낸 것이다.

Table 1과 Fig. 6을 조합하여 보면 최근 2015년도 이후 27기의 풍력발전기가 설치 운영되고 있는 것을 알 수 있고 전체적으로 제주도의 풍력발전기의 노후된 정도가 대수롭지 않게 보이지만 행원 풍력단지의 풍력발전기(2000년 설치)를 비롯한 22대가 사용년수 10년 이상이고, 전체 설치대수에 20% 이상을 차지하고 있어 부분적으로는 노후정도가 심각하다고 생각된다.

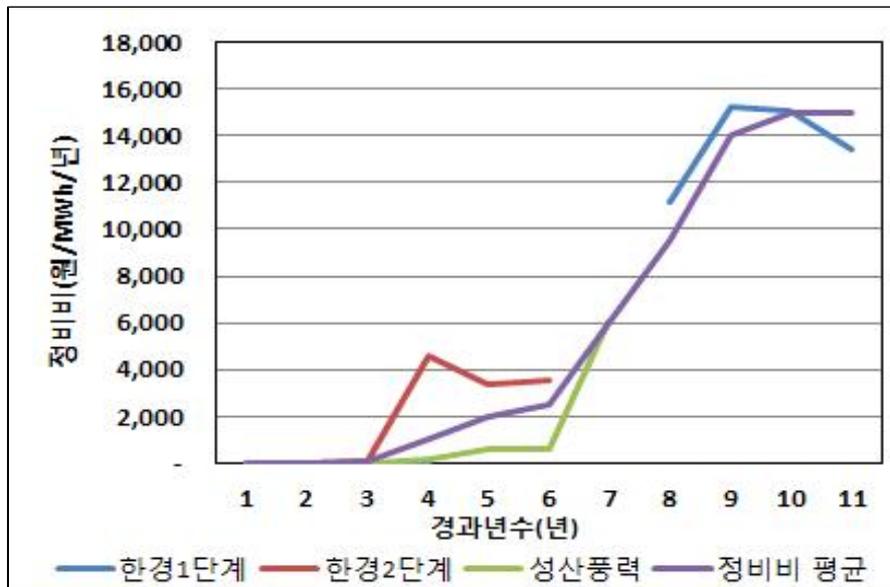


Fig. 7 The cost trend for O&M according to wind turbine operating time (Source: KOSPO)[14]

Fig. 7은 제주 남부발전에서 운영 중인 풍력발전기들의 설치경과 연수와 소요된 평균 수리비의 상관관계를 나타낸다.[14] 이같이 풍력발전기가 설치하여 5년 이상이 될 경우 정비비용 및 정비횟수가 늘어나고 점차적인 설비의 노후화가 진행된다. 그러므로 제주도 풍력발전기 설치운영현황을 볼 때, 노후정도에 따라 유지관리 매뉴얼에 차이를 두어 관리가 이루어져야 되고 이에 맞는 매뉴얼개발이 필요하다.

### Ⅲ. 육상풍력발전기의 사고분석 및 방재 매뉴얼의 필요성

#### 1. 세계적 풍력발전기 재난사고 현황

세계 풍력발전기의 발전용량은 앞에서 서술한 바와 같이 2015년 기준 432,883 MW로 급속히 증가하고 있으며, 이에 따라 운영관리 중 발생하는 사고들도 여러 형태로 발생하고 있다.

Table 2는 CWIF에서 보고된 전 세계적 풍력발전기의 사고를 종합하여 사고발생 형태와 년도별 발생건수를 나타낸 자료이다.

Table 2 World wide Annual wind turbine accident (CWIF)[15]

구 분	80s	90s	00'	01'	02'	03'	04'	05'	06'	07'	08'	09'	10'	11'	12'	13'	14'	15'	16'
치명적 사망사고	9	15	3	0	1	4	4	4	5	5	11	8	8	15	15	4	2	5	0
부주의에 의한 부상		5	4	1	2	2	2	6	10	16	16	9	14	12	15	9	7	6	3
건강장애 소음피해														6	27	19	13	3	
블레이드 결함		35	4	6	15	13	15	12	17	22	20	26	20	20	28	35	31	19	7
화재사고		6	3	2	24	17	16	14	12	21	17	17	13	20	19	23	19	18	4
구조적 결함	1	14	9	3	9	7	4	7	9	13	9	16	9	12	10	14	12	11	3
얼음 낙하사고		9	0	0	2	2	4	4	3	0	3	4	1	1	1	0	1	1	0
수송중 사고					4		3	6	6	19	10	11	11	24	17	11	17	14	3
환경피해 조류피해		1	0	1	1	8	1	6	5	10	21	13	19	20	20	16	21	18	5
기타		13	7	4	12	13	11	12	16	18	24	27	25	43	36	33	33	42	9
합계	10	98	30	17	70	66	60	71	83	124	131	131	120	170	167	172	163	146	37

Table 2에는 제주도의 풍력발전기 화재 및 전도사고는 포함되어 있지 않은 데이터이며 실제 현실의 풍력발전단지에서 발생하는 사고들은 이보다 더 많은 데이터가 존재할 수 있다.

Table 2와 같이 재난사고의 발생종류에는 여러 가지가 있으나 사건빈도나 피해규모, 2차 피해가능성을 감안할 때, 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

첫째, 사고발생시 복구비용 부담이 큰 화재사고와 둘째 인접토지 및 민원발생소지가 큰 타워의 전도와 블레이드 절단사고이다. 제주도에서도 이런 형태의 사고가 발생한 바 있으며 이에 대한 매뉴얼은 아직까지 작성되지 않고 있는 실정이다. 이에 따라 풍력발전사업의 경제성 하락과 사회비용증가 및 민원발생의 증가가능성이 예상된다. 그러한 의미에서 화재발생과 타워의 전도 및 블레이드 결함에 의한 피해 ZONE의 설정과 그에 대한 매뉴얼작성에 대해서 중점적으로 서술하고자 한다.

## 1) 화재사고

풍력발전기의 화재사고는 중대 재난사고의 시발점이라 할 수 있다. 육상풍력발전기 설치비의 비중을 보면 풍력발전기의 구입비가 큰 비중을 차지하는 것은 부인할 수 없는 사실이다. 화재사고는 이러한 터빈의 기능을 상실시킬 뿐만 아니라 부속의 탈락, 낙하 등 제 2의 사고를 유발할 수 있는 한 원인이 되기도 한다. 그러기에 화재사고 매뉴얼의 정립이 필요하다.

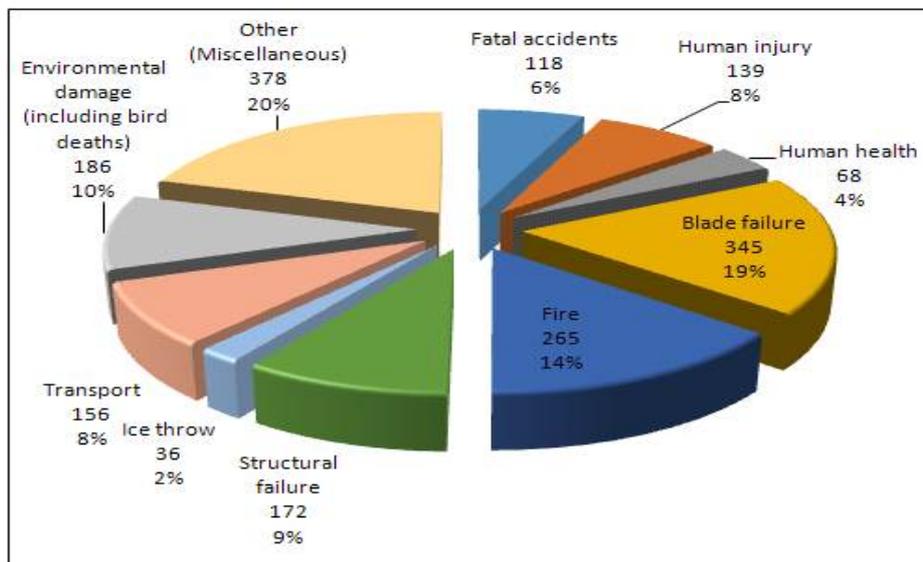


Fig. 8 World wide Annual wind turbine accident (CWIF)[15]

Fig. 8은 세계적으로 보고된 풍력발전기의 운영 중 발생한 사고를 사고형태를 나타낸다. Fig. 8에서 보이는 것과 같이 블레이드고장에 의한 사고발생률이 가장 커 보이거나 실제 블레이드 수리비용과 두 번째 사고발생률을 보이는 화재사고에 의한 수리비용을 감안해 볼 때 화재사고에 대한 사고예방의 중요도는 상당히 중요하다.

그리고 실제 위 그래프에서 조사된 세계적 사고발생현황은 전반적인 사고들을 전부 포함하지 않은 데이터이며 실제 발생하는 사고건수를 포함하면 발생건수가 급격히 증가할 것으로 판단된다.[15] 제주도 역시 재난사고를 종합해볼 때 화재사고가 그 주를 이루었으며 그에 대한 매뉴얼 작성과 이행이 중요하다고 할 수 있다.

## 2) 전도 및 절단사고

풍력발전기의 구조적 결함으로 인한 사고 중 하나인 전도 및 절단사고는 발생확률은 세계적으로 Fig. 7에서 보여지는 것과 같이 9%의 발생현황을 나타내고 있다.[15]

이는 블레이드 결함이나 화재사고의 발생빈도 보다 적은 수치지만 피해주체가 풍력 사업자만이 아니라 사고발전기 주변의 토지 및 주택 그리고 인근주민이 될 수 있어 운영관리 시 매우 유의해야 할 사항이다.



Fig. 9 Aftermath of Danish wind turbine structural failure [16]

Fig. 9는 풍력발전기의 타워가 절단되고 블레이드가 탈락되어 인근토지에 피해를 가져온 해외(덴마크)사례로서 풍력발전사업자가 아닌 인근 토지주 및 주민들에게 피해를 줄 수 있는 사고임을 보여주는 사진이다. 절단 및 전도사고를 방지하기 위해서는 설계에서부터 시공, 유지관리까지 전반적인 사항들을 관리해야하며 이를 위해 전문적인 기술자들이 설계에서부터 참여해 향후에 안전하고 지속가능한 풍력발전기의 운영관리를 해야 한다.

그리고 사고발생 후 피해범위 별, 사고형태 별 등 대처매뉴얼을 현장실정에 맞게 여러 형태로 작성하여 이에 따라야 한다. 이를 위하여 반드시 현장관리자들이 참여하여 매뉴얼을 작성해야하고 협력업체 및 인근마을 주변 주민들에게도 숙지시키고 행동할 수 있게 교육시켜야 할 것이다.

## 2. 제주도 행원풍력발전기 사고사례 (화재 후 전도사고)

### 1) 개요

Fig. 10는 행원 풍력발전기가 2010년 10월15일 화재사고 후 편하중에 의해 타워가 절단되어 인근주변에 피해를 입힌 사진이다.

제주도 행원리 풍력발전기 화재사고가 발생한 것은 2010년 10월 25일 오후 3시정도 였다. 600kW급 풍력발전기 2호기 (덴마크 베스타스사, 42-600모델)의 회전날개에서 화재가 발생했다. 화재는 3시 50분정도에 자연 진화되었고, 제어기능을 상실한 블레이드가 아무런 제어 없이 회전하면서 오후 9시 35분쯤 지상 10m 높이의 타워 하단 부분이 절단되면서 인근 시설물을 덮치는 2차 사고로 이어졌다.[17]



Fig. 10 Wind turbine accident at Haengwon wind farm[18]

이처럼 행원풍력발전기의 화재 및 전도사고는 인근주변의 피해를 입힌 제주도 풍력발전기의 최초사고이며 여러 문제점이 복합적으로 발생한 사고이다.

### 2) 원인분석

한국기계연구원 부설 재료연구소 핵심기술연구센터의 원인분석 자료를 확인해보면 최초 회전속도 조절을 위해 블레이드의 각도를 제어(pitch control)하는 유압시스템이 노후되었던게 사고발생 이유였다.



Fig. 11 Pitch control system of wind turbine[19]

Fig. 11는 풍속에 대하여 블레이드의 각도를 제어하는 피치제어의 기본개념을 나타낸다. 피치제어 시스템의 노후화로 인해 공력브레이크가 기능을 발휘하지 못하고 그로인해 블레이드가 회전 모드로 빠져 정지상태의 블레이드가 회전하게 되었다.

이어 블레이드의 회전력 보조 장치인 기계브레이크가 감당하지 못하고 패드의 마모, 금속 간 마찰에 따른 불꽃 점화로 인해 발화되었던 것이 주 원인이었다.

또 블레이드의 파손은 제어가 불가능한 상태에서 과회전에 의한 블레이드의 진동과 흔들림에 의한 고유 진동수와 일치 때문이라고 진단했다. 특히, 사고당시 평은 고탄성 특성을 지닌 블레이드 소재의 파손에서 발생한 파열음이었다.[20] 그 후 타워의 전단 및 전도사고는 제어기능을 상실한 블레이드의 회전, 화재로 인한 발전기 설비의 전소후 탈락, 발전기 추락 등으로 너셀의 무게 중심을 잃고 타워에 전체의 편하중이 생겨 발생했다.

그리고 사고풍력발전기는 1997년 설치되어 사고발생일 까지 13년간을 운영하였던 설비로서 기계의 노후화, 그리고 운영관리기술의 미비 등 여러 문제가 복합적으로 작용하여 발생한 사고라고 할 수 있다.

특히 1차 화재발생 후 2차 추가피해를 줄이기 위한 매뉴얼의 부재가 2차 전도사고로 이어진 원인이 되었던 것이라 할 수 있고, 이런 재난사고의 피해 ZONE에 대한 방재매뉴얼을 사전에 만들지 않았던 자체가 더 큰 피해를 입었던 이유이다.



Fig. 12 The mechanism of wind turbine accident in Haengwon wind farm

Fig. 12는 행원풍력발전기의 사고발생 매커니즘을 나타낸 것으로서 장비의 노후화 및 운영관리의 미비가 최초 원인임을 나타낸다.

### 3. 제주도 김녕 풍력발전기 사고사례 (풍력발전기 화재사고)

#### 1) 개 요

Fig. 13은 2015년 7월7일 발생한 김녕 풍력발전기의 화재사고 사진이다.

2015년 7월 7일 오후 1시쯤 제주시 구좌읍 김녕리 한국에너지연구센터 옆에 세워진 풍력발전기 750kW급(제작사 유니슨)에서 화재가 발생하였고 풍력발전기 블레이드 중심 부분에서 화재가 시작되고 나중에 전소되었다. 화재는 너셀에서 발생하였으며 내리는 비로 인하여 자연 진화되었다.[21]



Fig. 13 Wind turbine accident of Gimnyeong wind farm [21]

사고 풍력발전기는 2010년 세워진 750kW급으로 높이는 72m 가량으로서 설치된지 5년이 지난 풍력발전기였다.

사고 당시 비 날씨가 아닌 건조하고 강한 바람이 불고 있었다면 인근 주변의 2차 화재발생이 우려되는 상황이었으며, 이 사고 역시 사고형태별 피해 ZONE에 대한 매뉴얼을 사전에 만들지 않아 인근지역에 더 큰 2차 피해가 날 수 있었음을 보여주고 있다.

2)원인 분석

Table 3 Fire-related error information at Gimnyeong wind turbine Unit 1 [22]

시 간	에 러 명	설 명
2015-07-07 12:58:41	INV DC Link Over OLT(H/W)	직류 캐퍼시터(DC Capacitor)의 전압이 1600V 이상일 경우
2015-07-07 12:58:41	Safety loop open	안전회로(Safety loop)가 개방(open)된 경우
2015-07-07 12:58:41	CONV DC Link Over VOLT(H/W)	컨버터 직류 링크(Converter DC Link) 전압이 1600V 이상 이 되면 발생
2015-07-07 12:58:41	Over speed detector active	로터 오버스피드 감지기(Rotor over speed detector) 동작이 감지된 경우
2015-07-07 12:58:41	INV DC Link Over OLT(S/W)	인버터 직류 링크(Inverter DC Link) 전압이 1550V 이상이 되면 발생
2015-07-07 12:58:41	CONV DC Link Over VOLT	컨버터 직류 링크(Converter DC Link) 전압이 1600V 이상 이 되면 발생
2015-07-07 12:58:43	Rotor over speed 2	로터회전 센서(Rotor rpm sensor) 값이 30[rpm] 이상인 경우
2015-07-07 12:59:01	Rotor Brake Fail	에러 5, 6 정지 절차(Error 5, 6 stop procedure)에서 유압 로 터브레이크 압력이 10[bar] 이상인 상태에서 11[sec] 이후에 로터속도가 10[rpm]을 초과하는 경우
2015-07-07 12:59:43	DB Operation Over Time	DB(PCS 내부부품) 동작이 1sec 이상이 되면 발생
2015-07-07 13:00:47	Rotor brake pad wear	로터브레이크 마모센서(Rotor brake wear sensor)가 감지된 경우
2015-07-07 13:01:09	DBR TEMP High(DI)	DBR(PCS 내부부품) 온도가 80[°C] 이상일 경우
2015-07-07 13:01:25	Communication error CTL-INV	전력변환장치 통신에러가 발생했을 경우 (획득된 카운터(received data)가 3초 이상 계수되지 않는 경우 또는 컨버터/인버터 획득 데이터가 2.5초 이상 변하지 않는 경우)
2015-07-07 13:07:19	Cooling water temp. from gen. high	제너레이터로부터의 냉각수 온도센서가 정상상태(1sec 평균 값 -100~200[°C] 범위 이내)에서 냉각수 온도센서(1sec 평균 값)의 온도 값이 70[°C] 초과하는 경우
2015-07-07 13:07:19	Cooling water temp. from PCS high	전력변환장치 냉각수 온도 센서가 정상상태(1sec 평균값 -100~200[°C] 범위 이내)에서 전력변환장치 냉각수 온도 센 서(1sec 평균값)의 온도 값이 70[°C] 초과하는 경우
2015-07-07 13:07:21	Both cooling water temp. sensor from gen. and PCS defect	제너레이터 및 PCS 냉각수 온도 센서 (1sec평균값이 "-100~200"[°C] 범위 내에서 벗어나는 경우
2015-07-07 13:07:43	Turbine Status[Offline]	

Table 3은 김녕 1호기 원인조사 후 배포된 자료로서 화재사고발생시 모니터링 된 에러의 형태와 발생시간을 나타낸다. 제주에너지공사는 위 Table과 기타 여러 화재 현장을 바탕으로 풍력발전 및 재난안전 전문가로 합동 조사단을 구성해 구좌읍 김녕 풍력단지에 있는 풍력발전 1호기를 조사한 결과 브레이크 시스템이 불완전하게 작동하며 과열돼 화재가 발생한 것으로 추정된다고 보고하였고 더 정확하게는 로터 축에 달린 브레이크 디스크와 마찰패드를 잡아주는 캘리퍼가 붙어 있는 상태에서 로터가 계속 돌아가 마찰열로 불이 났다고 발표했다.[23]

합동조사단의 원인분석 자료로는 명확한 원인이 무엇인지 모호했으며 Table 3을 참고자료로 배포하였으나 사고의 정확한 원인분석은 이루어지지 않았다. 그리고 그 원인의 발생주체가 인적 원인인지 물적 원인인지, 불가항력의 환경적 원인인지도 명확하게 지적하지 않은채 조사보고가 마무리 되어졌다.

2010년 행원풍력발전기의 사고가 있었음에도 불구하고 풍력발전기의 노후정도에 따른 매뉴얼 및 운영관리에 대한 지침이 없고 원인조사 및 조사단 구성원칙도 없었기 때문에 이러한 사고가 재발된 것으로 생각되며, 이 논문에서 이러한 방재매뉴얼 개발 방안을 제시하고자 한다.

#### 4. 방재매뉴얼의 필요성

위 사고의 원인을 바탕으로 문제점을 다시 살펴보면 사고처리 후 원인조사 및 보고 등의 사후조치사항에 대한 문제점이 있는 것으로 보인다. 화재사고 처리 후 원인조사단구성에 있어 조사 시기 및 범위가 매뉴얼 내용에 포함되어야하고 구성원 역시도 사전에 선정되어 있어야 하며 그 결과 역시 어느 범위까지 배포하여야 하는지를 사후조치 매뉴얼에 정확히 명시되어야 한다. 그리고 그 매뉴얼의 적절하게 이행됨으로서 제주도 풍력발전단지의 신뢰도 향상에 좋은 영향을 줄 것이다.

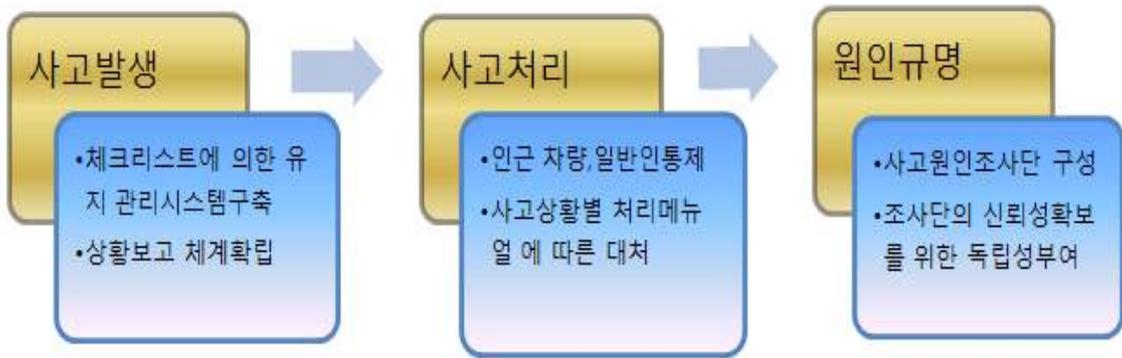


Fig. 14 The basic manual for handling an accident

Fig. 14은 사고발생에서부터 처리까지의 프로세스를 나타내고 있다.

제주도의 풍력발전단지가 점차적으로 많아지고 있는 현상은 확실한 사실이며 그에 비례해서 유지관리비용과 관련기술 그리고 이 모든 것을 관리제어할 수 있는 기술자가 더 많이 필요한 것은 확실한 사실이다. 하지만 제주도에 풍력발전기 설치가 늘어나면서 그에 비례하여 재난사고가 더 많이 발생해서는 안된다.

제주도에서 발생한 재난사고와 유럽 등 해외에서 발생된 각종 재난사고를 참고하여 우리 제주도에 맞는 매뉴얼을 작성하는 것이 필요한 시점이다.

#### IV. 제주도 풍력발전기 방재 관리 매뉴얼에 대한 제언

풍력발전기의 일반적인 화재원인은 낙뢰에 의한 화재이거나 마찰열 또는 전기적 스파크에 의해 인화물질이 반응하여 화재가 발생하는 경우가 대부분이다.[23]

화재사고의 문제점을 사전에 인식하고 매뉴얼화하여 현장에서 사용한다면 풍력발전사업의 경제성과 사회적비용의 절감효과를 가져올 수 있다.



Fig. 15 The base elements for prevention of wind turbine accident

Fig. 15는 풍력발전기의 방재매뉴얼 개발에 필요한 기본요소들을 나타낸다. 위에서 말한 방재매뉴얼 개발을 위해 한국소방산업기술원(KFIS)의 고체에어로졸 자동소화장치 인정기준[5]과 강원도 지진피해 원인조사단 구성 및 운영에 관한조례[6], 소방법에서 명시된 주요법률, 주식회사 만서기업의 소방관련 매뉴얼[7] 그리고 소방방재청의 재난사고방재 매뉴얼[8], VDS의 Wind turbines Fire protection guideline [9]을 바탕으로 하고 나아가 제주도 풍력발전단지의 현장 운영 관리자들의 의견을 종합 분석하여 제주도에 설치 운영되고 있는 풍력발전기의 방재매뉴얼 개발 방안을 제시하고자 한다.

## 1. 풍력발전기 자동소화설비에 대한 매뉴얼 개발 방안

풍력발전기의 원리는 바람에너지를 이용하여 기계운동에너지를 만들고 이를 전기 에너지로 만들어내는 것으로서 기계운동을 하거나 전기에너지를 발생시킬 때 발열 현상은 불가피하게 발생한다. 이런 상황에서 화재사고를 예방하려면 사전 화재감지 기능과 자동소화설비의 설치 및 관리가 중요하다, 이에 대한 자동소화설비의 설치 기준 및 운영관리에 대한 매뉴얼에 대하여 위에서 말한 근거, 법 규정 및 현장관리자들의 의견을 종합하여 제주 서부에 위치한 한경풍력발전단지의 자동소화설비시설에 대한 방재매뉴얼의 개발 방안을 아래와 같이 제시한다. 특히 화재 예방에 100년 이상의 경험을 보유하고 있고, 화재 보호 및 보안을 위한 독일의 독립 테스트 기관 중 하나인 VDS 사에서 제시한 Wind turbines Fire protection guideline[9]의 내용을 기본으로 소화설비 및 화재감지기의 설치기준을 제시한다.

1)설치 기준

(1) 자동소화설비장치

풍력발전기 내의 자동소화설비장치 설치기준이 아직까지 정립되어 있지는 않으나 발전기 내 주요부품의 온도변화와 소화설비의 소화가능 범위를 고려하여 설치위치 및 수량을 제시하고 제품 사용지침 및 관련법에 의하여 운영관리 매뉴얼을 작성하였다.

Table 4는 VDS의 Wind turbines Fire protection guideline 내용 중 풍력발전기의 공간과 시설을 고려한 소화설비의 적용성을 나타낸다.

Table 4 The applicability of fire suppression for wind turbine[25]

공간/시설	소화설비		수계소화설비				다른소화설비	
	이산화탄소(고압)	가스주입	스프링클러	위터스프레이	파인스프레이	폼	파우더	에어로졸
공간 보호								
발전기, 변압기, 유압장치, 기어박스, 브레이크, 방위각 구동장치가 있는 나셀	+	+	+	+	+	-	-	-
피치감속기 및 발전기	+	+	+	+	+	-	-	-
운할유고이개 및 케이블이 있는 이중바닥 및 전기시설	+	-	+	+	+	+	-	-
중앙전력변전소, 개폐기어실(변압기가 없는)	+	+	-	-	+	-	-	-
가능한 시설의 탑기초/플랫폼	+	+	+	+	+	-	-	-
시설 보호								
제어,역변환 장치, 개폐기어실(LV/MV), 폐쇄	+	+	-	-	+	-	-	-
변압기	+	-	-	+	+	-	-	-
제어,역변환 장치, 개폐기어실(LV/MV), 오픈	+	-	-	+	+	-	-	-
유압장치, 오픈	+	-	+	+	+	+	-	-
※ 적합함 -부적합함 , VDS : 독일기업,국제적 시설물 화재,보완 시스템 인증시험기관								

백그라운드	소화약제	위 치	수 량	비 고
FM-200	HFC-227eaHP (6 lbs)	Generator, Yaw Gear, Gearbox, 너셀 전기 Panel	4/호기	100°C이상시 열팽창 튜브 분사
고체에어로졸	탄산칼륨 (850 g, 50 g)	너셀 천장, 너셀 전기Panel 타워하부 전기Panel	12/호기	95°C 이상시 고체에어로졸 분사

Fig. 16 The automatic fire suppression system of wind turbine [26]

Fig. 16은 한경 풍력발전기 너셀 내 자동소화설비 설치위치 및 설비 종류, 설치 수량을 나타낸다.

자동소화설비장치의 설치기준은 Table 4의 내용을 바탕으로 제시한다. Table 4에서는 가스계 소화설비 설치와 스프레이형태의 수계소화설비를 권장하고 있다.

그러나 너셀의 공간이 협소하고 소화약제 및 소방수의 공급 등의 여건을 고려해 볼때 열감지 튜브를 이용한 소공간 자동소화설비가 가장 유리하다. [27] 그리고 설치위치는 발전기 운영 시 온도변화가 심한 기계설비와 전기설비 그리고 현장여건을 고려하여 마찰열 및 기타 다른 원인으로 인하여 화재가 발생할 수 있는 설비의 주변에 설치하는 것을 원칙으로 하며 설치 시 고정상태를 반드시 확인해야 한다.

한경풍력발전기인 경우 우선 Generator, War Gear, Gearbox, 너셀 천정, 전기 Pannel의 화재예방을 위해 섭씨 100도시 이상 시 열감지 튜브가 팽창하여 분사하는 FM-200 소공간 자동소화장치를 각각의 설비근처에 고정설치하고 풍력발전기 너셀의 전체적인 설비공간에 고체에어로졸 분사식 자동소화설비 설치한다. 그리고 특히 화재 위험성이 많은 너셀전기 판넬에는 자동소화설비를 추가 설치한다. 그리고 타워하부에 분말소화기의 여유분을 반드시 비치하여 초기 화재 발견 시 운영관리자가 조기에 소화할 수 있게 하여야 한다.

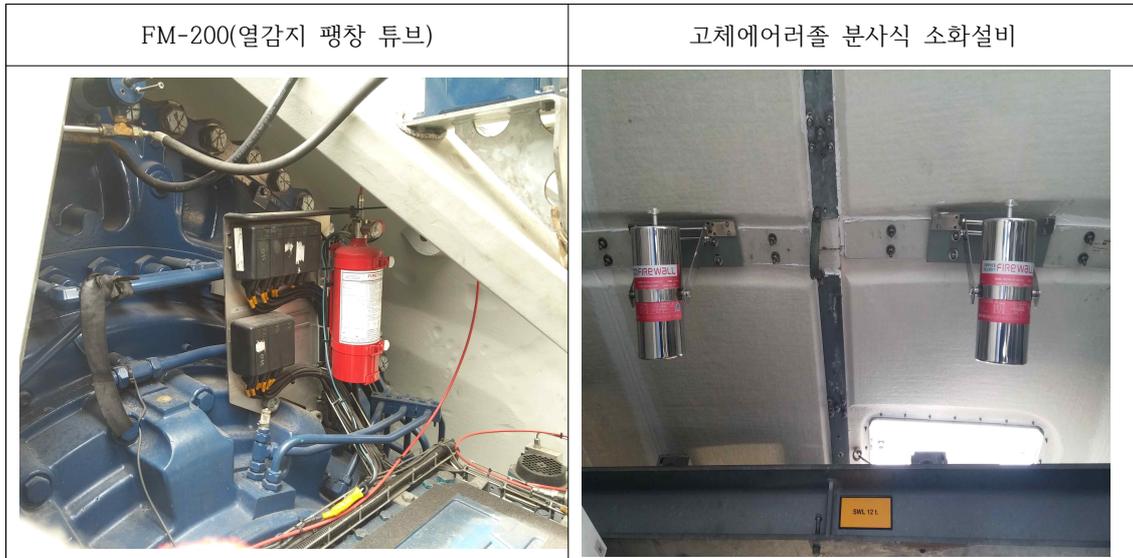


Fig. 17 The install state of automatic fire suppression system inside of wind turbine nacelle [28]

Fig. 17 는 한경풍력발전기(3.0MW)에 설치된 자동소화설비의 모습이다. 이 같은 자동소화설비는 정기적으로 고정상태 및 열팽창 튜브의 고정상태, 외관상태 등을 점검해야 하고 특히 열감지 튜브의 길이가 길 경우 열감지 반응상태가 좋지 않을 수 있으므로 10m 이내 설치를 기준으로 하며 외관상태 및 설치일자를 참고하여 반드시 교체해 주어야 한다.[29]

그리고 모든 소화설비 설치에 대한 사항은 소방전문가와 운영관리자의 현장여건을 고려한 회의를 반드시 거쳐 운영 중이나 화재발생시 최대한 신속하고 정확한 방재가 될 수 있을 정도의 소방설계를 하여야 하고 이에 대한 점검 역시 소방전담부서와 운영관리자 모두가 정기적으로 점검해야 한다.

(2) 화재감지 설비

풍력발전기의 화재예방을 위해서는 자동소화설비의 설치와 운영 관리자의 교육 및 적절한 유지관리 시스템의 확보가 반드시 필요하다. 그리고 혹시 발생할 수 있을지 모를 화재에는 발생 열과 연기 그리고 화재발생을 감지할 수 있는 모니터링 시스템의 체계적인 구축이 중요하다.

Table 5 The applicability of fire detection system for wind turbine [30]

화재탐지기	연기탐지기			열탐지기		화염탐지기		멀티센서 연기탐지기	
	포인트형	멀티포인트형	라이너	포인트형	라이너형	적외선	자외선	연기 및 열	연기, 일산화탄소
	산란광	흡입형	라이트 빔형						
공간/시설									
변압기가 있는 나셀 (허브 및 이중바닥포함)	-	+	-	-	-	-	-	-	-
중앙전력변전소, 전환캐비닛룸	+	+	+	+	+	-	-	+	+
가능한 시설의 탐기초 / 플랫폼	-	+	-	+	-	-	-	-	-
전류 개폐기 캐비닛	+	+	-	-	-	-	-	+	-
유압장치	-	+	-	+	-	-	-	-	-
변압기	-	+	-	부호홀츠 계전기		-	-	-	-

※ 적합함 -부적합함, VDS : 독일기업,국제적 시설물 화재,보완 시스템 인증시험기관

Table 5는 VDS의 Wind turbines Fire protection guideline 내용 중 풍력발전기의 공간과 시설을 고려한 화재감지기의 적용성을 나타낸다. 화재감지 설비의 종류에는 열화상카메라, 열감지기, 연기감지기 그리고 Ark Detector 등이 있고 열과 연기를 종합적으로 감지할 수 있는 멀티센서 연기 감지기 등이 있다. 이와 같은 화재감지 설비 등은 풍력발전기의 화재가능성이 많은 부위에 고정 설치하여 정기적으로 점검해야 한다.

설비	위치	용도	수 량	비 고
열화상 카메라	너셀	너셀 내부 온도 변화 확인	9	호기별 1대
CCTV	너셀	너셀 내부 실시간 확인	9	호기별 1대
SMOKE 감지기	너셀	너셀 내부 저압판넬 화재 감지	5	호기별 1대
Ark Detector	너셀	너셀내부 고압판넬 화재 감지	20	호기별 4대



Fig. 18 The automatic fire detection system of wind turbine in Hankyeong wind farm [26]

Fig. 18는 한경 풍력발전단지 내 발전기내의 화재감지 시스템이 모니터링 되는 상황과 호기별 화재사전감지기의 설치현황을 보여준다. Fig. 18의 한경풍력발전기 3MW급에 설치되어있는 화재감지 설비현황과 Table 5의 내용을 바탕으로 풍력발전기내 화재 감지설비 설치기준을 제시한다.

풍력발전기 내의 화재감지는 연기감지기와 열감지기를 중복 설치하여 화재초기의 정확한 감지를 권고하고 있으며, 연기감지기는 멀티 포인트형을 사용하여 여러 설비주변을 동시에 감지할 수 있도록 권장하고 있다.[29] 열감지기 역시 라인형 감지기 보다 포인트형 감지기를 선호하고 있고 그 이유는 정확한 화재예측과 신속한 소화설비의 반응을 하기 위해서 이다. 이 밖에도 열과 연기를 동시에 감지할 수 있는 멀티감지기사용도 권고하고 있으나 열과 연기감지기의 별도사용을 권장하고 있다.

이러한 모든 화재감지설비 역시 풍력발전기의 내부공간의 크기 및 설비의 종류 등에 따라 반드시 풍력발전기 운영관리자와 소방기술자간의 의견을 종합하여 각각의 풍력발전기마다 적합한 소방설계가 이루어져야 한다. 소방설계에 기준으로 자동소화설비의 설치 및 화재감지기의 설치가 이루어지고 관련법규 및 규정, 현장 운영

관리자들의 노하우 등을 고려한 설비의 운영매뉴얼이 작성되어야 된다.

현재 한경풍력단지의 화재감지시스템은 열 감지, 연기감지기는 물론이고 열화상 카메라, CCTV, Ark Detector등을 추가 설치 운영하여 사전 화재예방에 대하여 체계적인 시스템 운영을 하고 있다.

2) 점검 기준

풍력발전기 내부에 설치된 자동소화설비시설은 정기적인 점검과 정비가 이루어져야 하며 점검에 대한 매뉴얼과 그에 대한 담당주체 즉 담당부서 신설이 필요하다.

Table 6 The inspection standard for automatic fire suppression system [31]

구 분	점 검 주 기	점 검 주 체
외 관 점 검	일일, 월간	운 영 관 리 부 서
기 능 점 검	1회/년, 상반기실시	운영관리부서, 소방부서 합동점검
정 밀 점 검	1회/년, 하반기실시	운영관리부서, 소방부서 합동점검
<p>○ 운 영 관 리 부 서 : 간단한 조정, 전문업체 정비작업 감독, 확인 및 안전지도</p> <p>○ 소 방 담 당 부 서 : 교체, 충약 전문업체의 정비 행정처리(외주가능)</p>		

Table 6은 소방법을 기준으로 안전한 소방방재를 위한 풍력발전기의 소방점검운영매뉴얼을 보여준다.[31] 풍력발전기의 운영관리자를 소방업무의 일반적인 사항들을 교육시켜 일일, 월간 정기점검을 실시하고 소방시설의 고정상태 외관의 이상여부, 특히 열 감지 튜브의 위치고정, 외부훼손 여부를 점검하여 예방한다. 그리고 반드시 소방담당부서를 신설하여 소방 관리의 업무분장과 임무를 분담하게하고 정기적으로 1회/년 전문기관의 소방교육을 수료하여 전문성을 확보할 수 있도록 한다.

관리자 증원이 어려울 경우 소방전문기관의 의뢰하여 1회/6개월, 소방시설에 대하여 기능점검 및 정밀점검을 실시토록 해야한다. 그리고 점검사항을 모니터링하여 그에 맞는 교체 및 시설의 보완이 반드시 필요하며 이러한 사항들의 확인 역시 매뉴얼에 포함되어야 한다.

3) 정비 관리기준

Table 7은 풍력발전기 너셀내 자동소화설비의 정검 및 정비기준을 나타낸다.

Table 7 The inspection and maintenance standard for automatic fire suppression system[31]

기기명	검		정	
	점검부서	검	설비부서	정
		검		정
		검		정
소화기	외관점검 (운영부서)	1. 정위치 비치 및 청결상태 2. 외부부식 및 마모상태 3. 봉인탈락여부 및 방출소화기 비치 여부 4. 분말소화기 커버 균열여부	운영부서	청소 정위치고정
	정밀점검 (소방담당부서)	1. 약제충진 상태 2. 밸브작동 상태 3. 분말약제 응고 상태 ※ 점검시 운전부서 입회	소방담당 부서	부품교체 충약
자동 소화 설비	외관점검 (운영부서)	1. 전류의 접촉부의 접촉불량 여부확인 2. 먼지, 습기, 곤충 등에 의한 기능 이상여부 확인 3. 약제 충진상태 4. 제위치에 고정설치여부 5. 수신반등 각종램프 점등상태 6. 각종밸브 누수상태 7. 감지기, 분사헤드, 부착상태 8. 열감지튜브의 고정상태 9. 동결여부(동절기)	운영부서	청소 정위치고정
			외주의뢰	설비: 기동스위치, 튜브, 각종 부품 수리 및 교체
	기능 및 정밀점검 (운영, 소방합동)	1. 수동작동장치의 확인여부 2. 제어반 작동상태 3. 기동스위치 작동상태 4. 감지기헤드 작동상태 5. 분사헤드 작동상태 6. 튜브의 노화상태 7. 에어로졸 등 소화약제 제품상태 ※ 교체에어로졸 자동소화장치의인정기준 (KFIS 026) 참고	소방담당 부서	헤드,제어반, 감지기, 약제교체 및 제어반 교체

소방설비의 정비관리 기준은 크게 소화기 관리와 자동소화설비의 관리로 나눌 수 있다. 소화기 관리기준은 소방법 및 소화기 관리치침을 참고하여 비치수량, 약제충진, 청소상태등 정비항목을 운영부서와 소방담당부서로 나누어 항목을 정하고 주기적으로 점검하여야 한다. 자동소화설비의 관리기준은 소방법 및 자동소화장치의 인정기준(KFIS 026)을 참고하여 감지기, 제어반의 작동상태, 열감지 튜브의 고정상태, 튜브의 노후화 상태등을 주기적으로 점검하고 소방전문가의 특별점검을 실시하여 자동소화설비의 오작동 가능성을 최대한 배제하여야 한다.

## 2. 풍력발전기 재난사고에 대한 예방 매뉴얼

### 1) 피해가능 ZONE 설치 이유

위에서 서술한 행원풍력발전기의 화재사고 후 전도, 절단된 사고를 살펴보면 사고발생시 사고수습에만 주력했을 뿐 인근토지 및 건물 기타 그 지역을 통과하는 주민들의 피해가능성에 대해서는 고려하지 않았다. 이런 실례를 보면 향후 풍력발전기의 화재 및 기타 재난사고가 발생하거나, 발생가능성이 보일 때 즉각적으로 시행되어야 할 매뉴얼이 반드시 필요하다고 판단된다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 풍력발전기는 점차적으로 대형화가 되어가고 그 높이도 높아져가고 있다. 그런 점을 감안해 볼 때 매뉴얼 작성 시 향후 Repowering 할 경우를 대비하여 피해 ZONE을 설정하는 것도 고려 할 사항이다.

이런 현실을 고려하여 앞에서 제시한 근거, 법 규정 및 현장관리자들의 의견을 종합하여 제주 동부에 위치한 가시리 풍력발전단지내의 피해가능 ZONE에 대한 방재 매뉴얼의 방안을 아래와 같이 제시한다.

Table 8은 풍력발전기의 사고발생형태에 따른 피해가능 ZONE의 내용과 범위를 보여준다.

Table 8 The consideration for installing possible damage zone

구분	내용	범위	비고
전도	풍력발전기의 넘어짐사고	타워,블레이드높이 고려	
절단	블레이드 및 타워절단사고	타워, 블레이드높이, 블레이드 회전력 고려한 파편이동거리,반동에 의한 파편이동거리 고려	
화재	블레이드 및 너셀구조물의 화재사고	화재파편의 바람에 의한 이동거리, 주변 2차 화재발생 환경고려	
낙하물	유지관리,보수 및 기타 부착물의 낙하에 의한 사고	보수작업시 높이,낙하물무게,낙하시 반동고려	

전도사고는 절대 발생되어서는 안되는 재난사고이지만 행여 발생시 2차피해로 발생되어서는 더더욱 안되는 일이며 피해 ZONE 설치 시 타워높이와 블레이드의 직경을 고려하여 정하여야 한다. 절단사고 역시 전도사고와 비슷하지만 블레이드의 절단 시 회전가속도를 반영하여 그 범위를 정한다. CWIF에서는 블레이드 파편과 화재파편의 피해범위는 강한바람의 영향으로 2km이상 이동하고 그 영향으로 풍력발전기 주변 2km이상의 2차 화재 피해가능성이 있는 것으로 보고되고 있다. [23]

그러나 제주도 풍력단지의 실제 지형은 국부적으로 변화가 심하고 풍속역시 그 지형에 영향을 받아 일정하지 않으므로 그 주변지역이 불규칙한 오름 지역이거나 피해규모가 클 수 있는 주택가인 경우에는 2차 화재발생을 감안하여 풍력발전기 운영관리자 및 소방전문가의 실물낙하시험을 실시하여 풍속별 피해가능 ZONE의 범위를 정하여 매뉴얼화 한다.



Fig. 19 Wind turbine fire at Ardrossan wind farm, U. K. [24]

Fig. 19는 강풍에 화재파편이 주변지역에 낙하되면서 2차 화재를 발생시키는 사진이다. 실제 강풍이 발생할 시기에 화재파편인 무게와 동일한 가상의 물체를 낙하하여 시뮬레이션을 실시하고 그 범위를 정하는 것이 가장현명한 방법이라 할 수 있다. 낙하물에 의한 사고인 경우 풍력발전기 유지보수 시 의도하지 않은 낙하물에 의한 안전사고를 예방하는 차원에서 피해 ZONE을 정하는 것으로 일반적으로 그 대책은 안전휀스 설치 및 방호울을 설치하여 피해를 없애는 방법이 있다. 위 사항들을 고려하여 제주도 동부지역의 가시리 풍력단지의 예를 들어 매뉴얼 작성방안을 제시하고자 한다.

2) 피해가능 ZONE 운영 매뉴얼

Table 9는 제주 가시리 풍력단지 3호기를 가정하여 피해가능 ZONE의 설치운영 매뉴얼 개발방안을 나타낸다.

Table 9 Establishment and action guide for possible zone

제주 가시리 풍력단지 3호기 적용 모델명 : HX-50 750kw 제 원 : Rotor Diameter 50.0m , Hub Height 50.0m		
구 분	점 검 항 목	행 동 용 령
전 도	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 타워높이와 블레이드 반경을 고려하여 전도 사고발생 피해가능 지역과약 → 75.0m</li> <li>2. GPS측량 후 반경 75m경계점을 확인할 수 있도록 표시함.</li> <li>3. 1회/년, 표시점의 소실여부 확인.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 범위 내 토지주, 경작주 및 건물주의 연락처 확인, 보유</li> <li>2. 사고가능성 확인 시 즉시연락 후 대피지시</li> <li>3. 사고발생 후 신속한 사고보고</li> <li>4. 외부인 접근금지 및 차량통행/우회 표지판 제작보관</li> </ol>
절 단	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 타워높이와 블레이드 반경, 2차 낙하반동을 고려하여 절단사고발생 피해가능 지역과약 → 75m+50m=125m</li> <li>2. GPS측량후 반경 125m경계점을 확인할 수 있도록 표시함.</li> <li>3. 1회/년, 표시점의 소실여부 확인.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 범위 내 토지주, 경작주 및 건물주의 연락처 확인,보유</li> <li>2. 사고가능성 확인 시 즉시연락 후 대피지시</li> <li>3. 사고발생 후 신속한 사고보고</li> <li>4. 외부인 접근금지 및 차량통행/우회 표지판 제작보관</li> </ol>
화 재	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 타워높이와 블레이드 반경, 강풍을 고려하여 화재파편의 이동가능거리 과약 (시뮬레이션을 실시하여 이동거리산출) → 500m(가정)</li> <li>2. GPS측량후 반경 500m경계점을 확인할 수 있도록 표시함.</li> <li>3. 1회/년, 표시점의 소실여부 확인.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 범위 내 토지주, 경작주 및 건물주의 연락처 확인,보유</li> <li>2. 사고가능성 확인 시 즉시연락 후 대피지시</li> <li>3. 가능범위 산정하여 소방수확보 및 소방가능단체 연락망 구축</li> <li>4. 소방차의 진입로 확보</li> <li>5. 외부인 접근금지 및 차량통행/우회 표지판 제작보관</li> <li>6. 사고발생 후 신속한 사고보고</li> </ol>
낙하물	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 타워높이와 낙하반동거리를 고려하여 낙하물 사고발생 피해가능 지역과약 → 30m</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 범위 내 안전휀스 및 방호울을 설치하여 작업실시</li> <li>2. 사고가능성 확인시 즉시 대피지시</li> <li>3. 외부인 접근금지 및 차량통행/우회 표지판 제작보관</li> <li>4. 사고발생 후 신속한 사고보고</li> </ol>

풍력발전기의 제원과 주변의 환경, 그리고 사고발생가능성을 고려하여 피해범위를 정하고 사고형태별 점검항목 및 행동요령을 발전기 운영관리자와 방재전문가의 의견을 참고로 하여 매뉴얼을 작성하여야 한다.

Fig. 20은 제주 가시리 풍력단지 3호기의 피해가능 ZONE 범위를 나타낸다.



Fig. 20 The boundary of fire damage for No. 3 wind turbine in Gasiri wind farm

풍력발전기 3호기 주변에는 판매시설, 관리동 등 건축물이 있고 풍력발전기 1호기와 2호기가 설치되어 있다. 그리고 북측에는 대록산과 새끼오름이 자리잡고 있어 풍력발전기의 화재사고시 2차피해가 예상되는 지역이다.

다음은 제주 가시리 풍력발전단지 3호기의 피해가능 Zone에 대한 행동지침을 Table 9.를 참고하여 제시한다.

- 전도피해가능 ZONE의 토지 및 경작주의 연락처를 확보하고 발생가능한 사고를 대비하여 경계를 표시한다.
- 절단피해가능 ZONE의 토지 및 경작주의 연락처를 확보하고 주변 건축물내 관련자, 관리 사무소의 직원들의 대피요령 및 연락망을 작성 비치한다.
- 화재피해가능 ZONE의 토지 및 경작주의 연락처를 확보하고 풍력발전기 좌측에 위치한 “유채꽃 프라자” 건물의 직원 및 방문자들에게 방재매뉴얼에 맞춘

행동요령을 교육전파시킨다. 그리고 풍력발전단지 내 1, 2, 5, 8, 11호기가 화재피해가능 ZONE에 위치함으로 화재발생시 발전기의 가동중단 행동요령을 교육하고 기타 재난교육을 실시한다.

- 상단 좌, 우측에 대륙산과 새끼오름이 위치하여 있으므로 화재파편에 의한 2차 산불발생을 유념한 소방활동 및 소방설비 등을 설치/배치 한다. 특히 화재파편에 의한 산불발생은 인근 지역으로 확산우려가 있고, 화재진압의 어려움이 있으므로 인근 마을 소방서 및 리사무소 등 여러 연락망을 구축하고 있어야 한다. 산불 진화에 어려움이 있어 소방헬기가 동원 될 때를 대비하여 소방수 비축 및 인근 수원지 역시 고려해봐야 할 사항이며, 소방수 수량 산정 시 소방전문가의 조언을 필수로한 적정한 소방수의 확보가 필요하다.
- 화재피해가능 ZONE의 소방차의 진입가능여부를 파악하여 가능하게하며 정기적인 교육으로 인하여 누구나 쉽게 소방차 진입을 유도할 수 있도록 한다.

Fig. 21은 가시리 풍력발전기 화재발생시 소방차의 신속하고 정확한 진입방향을 나타낸다.



Fig. 21 The fire lane of Gasiri wind farm [33]

3) 피해가능 ZONE을 활용한 재난훈련 실시 매뉴얼

피해가능 ZONE을 운영관리자 및 그 범위내의 관련자들에게 숙지시키고 혹시 발생할 수 있는 재난사고에 대비하여 재난사고별 훈련을 실시해야 한다.

Table 10 은 재난훈련의 프로세스별 관련내용과 법적근거를 나타낸다.

(1) 법적근거

Table 10 The regulation for preventing disaster[34]

구분	근거 및 주요내용
기획 설계	○ 훈련에 포함할 사항(법 제73조제4항) - 법 54조에 따른 긴급구조대응계획과 법 제74조에 따른 표준화된 재난관리에 관한 사항
	○ 훈련 통보(영 제82조제3항) - 재난대비훈련을 실시하는 경우에는 훈련일 15일전까지 훈련실시, 훈련장소, 훈련내용, 훈련방법, 훈련참여 및 인력 및 장비 그밖에 훈련에 필요한 사항을 훈련참여기관의 장에게 통보하여야 한다.
	○ 훈련을 위한 교육 실시(영 제82조제5항) - 재난대비훈련 수행에 필요한 능력을 기르기 위하여 재난대응훈련을 실시하기 전에 사전교육을 하여야 한다.
실시	○ 재난대비훈련(법 제73조제1항/법 제73조 제2항) - 안전행정부장관, 시·도지사, 시장·군수·구청장과 긴급구조기관의 장은 대통령령으로 정하는 바에 따라 정기 또는 수시로 재난관리책임기관·긴급구조지원기관 및 군부대 등 관계 기관과 합동으로 재난대비훈련을 실시할 수 있다. - 재난대비훈련에 참여할 것을 요청받은 기관의 장은 특별한 사유가 없으면 요청에 따라야 한다.
	○ 훈련 횟수(영 제82조제1항 및 제2항) - 관계기관과 합동으로 참여하는 재난대비훈련을 각각 소관 분야별로 주관하여 연1회 이상 실시 - 자체훈련은 수시로 실시
	○ 훈련 참여(법 제73조제2항) - 재난대비훈련에 참여할 것을 요청받은 기관의 장은 특별한 사유가 없으면 요청에 따라야 한다.
	○ 훈련 비용의 부담(영 제82조제6항) - 재난대비훈련에 참여하는 데에 필요한 비용은 참여하는 기관이 부담 함. 다만, 민간 긴급구조지원기관에 대하여는 훈련을 실시하는 기관에서 부담할 수 있다.
평가	○ 훈련의 평가 실시(영 제83조제1항) - 시장·군수·구청장과 긴급구조기관의 장은 다음 각 호의 평가항목 중 훈련특성에 맞게 평가항목을 선정하여 법 제73조제4항에 따른 재난대비훈련평가를 실시하여야 한다.
환류	○ 훈련 평가결과의 통보 및 조치(영 제83조제2항) - 시장·군수·구청장 및 긴급구조기관의 장은 제1항에 따라 실시한 재난대비훈련평가의 결과를 훈련 실시일부터 30일 이내에 재난관리책임기관의 장 및 관계긴급구조지원기관의 장에게 통보하여야 하고 - 통보를 받은 재난관리책임기관의 장 및 긴급구조지원기관의 장은 평가 결과에 따른 재난관리에 필요한 조치를 하여야 한다.

이처럼 정부산하기관 및 일정규모의 건물이나 기업체등은 재난 및 안전관리 기본법에 의거하여 재난훈련을 시행하여야 하고 제주도의 풍력발전단지 역시 재난대처방안을 키우기 위해 재난훈련을 실시해야 한다.

○ 재난훈련 프로세스

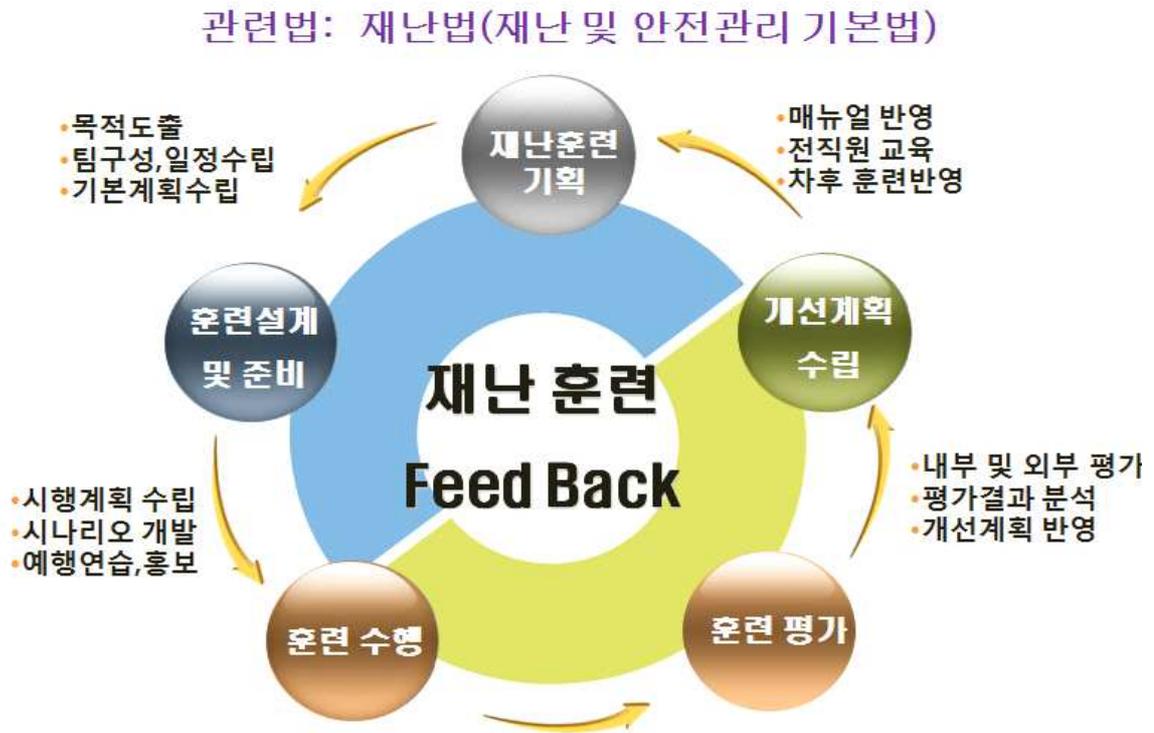


Fig. 22 The process of training for preventing disaster[8]

Fig. 22는 재난훈련의 Feedback의 중요성과 훈련 프로세스를 보여주고 있다. 훈련기획단계에서는 전문가를 포함한 여러 방면의 재난 시나리오의 개발이 중요하다. 특히 시나리오 개발 시 풍력발전기 운영관리자와 재난관리 기술자 그리고 지역주민을 참여시키는 것과 여러 방면의 재난상황을 고려하여 많은 수의 시나리오를 개발하는 것이 중요하다.

Table 11은 앞에서 설명한 자료를 가지고 가시리 풍력발전단지 3호기를 대상으로 화재사고발생 시나리오를 가상하여 소방훈련 및 재난사고 시 처리 매뉴얼을 작성한 것이다. 소방훈련 이 외에도 전도사고 및 기타 여러 재난상황을 예상하여 시나리오를 작성하고 그에 맞는 매뉴얼을 개발 적용해야한다. 재난훈련의 실시빈도는 연 2회 이상 훈련을 반드시 실시하고, 특별재난 훈련이 필요하다고 판단되면 소장 재량으로 실시한다.

Table 11 Action plan for nacell fire of windterbine

재난사고 유형 : 3호기 너셀 화재		
구분	업 무 분 장	주요 조치내용
임무		○ 신속히 진압하여 인명 및 재산 피해를 최소화함 ○ 복구시기를 앞당겨 운영정상화 시간단축
대상		○ 운영관리업체, 인근소방서, 병원, 인근주민등
보고계통		○ 최초발견자→소방담당자→발전소 소장→사장 ※ 화재의 규모를 신속히 판단하여 소방서연락
응급조치	최초발견자	○ 신속한 상황전달보고 ○ 소화기 및 자동소화설비 작동 ○ 자체진압 불가시 인근소방서 신고
	소방관리담당자	○ 인근소방서 신고확인 ○ 2차피해대비 전기전원차단 ○ 전 직원 비상소집 연락 ○ 화재의 인근주변 발화여부 예상판단
	운영관리팀장	○ 화재로 인한 피해 ZONE내의 토지주 연락 ○ 주변 풍력발전기의 운영중지명령 ○ 피해 ZONE의 소방인력제외한 인력통제 ○ 소방차 및 구급차 진입안전유도지시
	운영관리자	○ 소방차 및 구급차 진입 안전유도 ○ 협력업체 및 주변 마을에 연락, 지원요청 ○ 화재피해 ZONE 내 차량 및 인원통제 ○ 화재진행별 사진촬영실시 ○ 주변 풍력발전기 운영중지
대피	운영관리자	○ 화재피해 ZONE 내 판매점, 숙박시설 관계자 대피
세부 조치사항	사장	○ 사고대책본부 운영(필요시) ○ 화재작전 진두지휘/감독
	소장	○ 이사 및 사장보고 ○ 사고대책본부 운영준비 ○ 소방소 및 인근주민대표 협조협의
	소방관리담당자	○ 사고보고서 준비 및 보고 ○ 주풍향 및 풍속고려한 주요소방지역확인 ○ 인근지역 산불방지를 위한 주민지원 요청 ○ 전직원의 소방업무의 지원 요청
	협력업체	○ 인력 및 장비지원

### 3. 풍력발전기 재난사고의 처리후 후속조치에 대한 매뉴얼

재난사고는 사전에 예방하는 것이 가장 바람직하지만 혹시 사고가 발생하더라도 적절한 매뉴얼에 의하여 처리하고 그에 대한 원인분석을 철저히 함으로써 재발 가능성이 있는 재난 사고에 한층 더 완벽히 대비할 수 있을 것이다.

지난 2015년 7월에 발생한 김녕 풍력단지 화재사고를 예를들어 서술하면 화재사고 후 사고난 너셀 구조물의 제거 등 현장조치는 우수하다 할 수 있다. 하지만 현장조치 후 후속조치 즉, 사고원인분석 및 그 원인에 대한 피드백 하는 과정이 필요하고 후속조치 프로세스와 매뉴얼 업데이트가 필요하다.

그런 이유로 앞에서 제시한 근거, 법 규정 및 현장관리자들의 의견을 종합하여 제주도 풍력발전기 재난사고처리 후 후속조치에 대한 방재매뉴얼의 방안을 아래와 같이 제시한다.

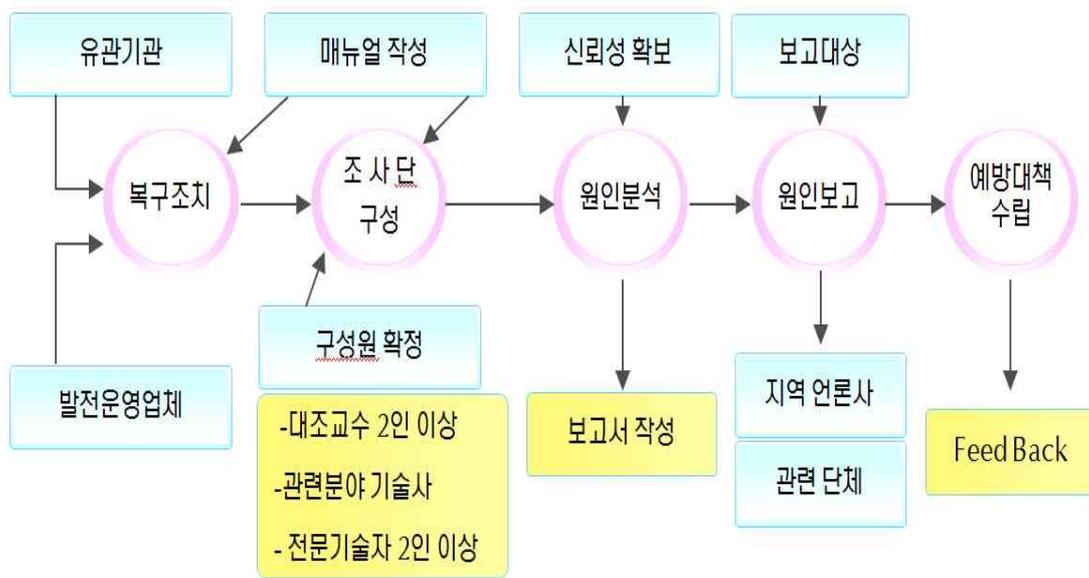


Fig. 23 The subsequent process after reinstatement

Fig. 23은 재난사고 복구조치 후 신뢰성을 바탕으로 한 원인조사단을 구성하고 투명하게 보고서를 작성하여 지역 언론사 및 관련단체에게 원인보고하는 후속조치 프로세스를 나타낸 것이다.

지난 김녕 풍력발전기 화재사고 후 전소된 너셀 시설물을 제거한 이유는 화재 시 여러 부속이나 시설물이 전소후 탈락하거나 추락하여 전체적인 균형을 잃고 편하중이 발생하여 전도의 가능성이 높기 때문이다. 이처럼 사고 후 매뉴얼이 없어도 2010년 행원풍력발전기의 타원절단, 전도사고를 겪으면서 몸소 익혀진 지식으로, 위와 같은 사고처리능력이 생긴 것이라 할 수 있다. 여기서 사고발생 후 후속조치가 얼마나 중요한지를 알 수 있다.

Fig. 23에서 표현한 것과 같이 사고원인을 정확히 조사하고 그 원인을 피드백하는 것은 당연하며 더 나아가 이 후속조치에 대한 정보는 우리나라 풍력발전단지들의 매뉴얼작성에 도움이 되도록 공유해야 된다.

그리고 사고원인조사 역시 전문적인 기술을 갖춘 지식인으로 원인에 대하여 정확하고 투명성 있게 조사할 수 있는 조사단을 구성해야 한다. 방재매뉴얼에 사고조사에 대한 내용이 반드시 포함되어야 하며 재난사고별 구성원의 규정 및 관련 부서, 단체 등을 미리 정해놓아야 차후 문제점이 없을 것이다

Table 12 Expert group for investigation for wind turbine accident [6]

구 분	규 정	관련 학·협회	비 고
화 재	- 대학교수 2인 이상 - 관련분야 기술사 등 전문기술자 2인 이상	- 한국소방협회 - 한국기계연구원 - 한국에너지기술연구원 - 한국전기안전공사 - 관련소방서 전문가 등	.재난사고가 발생하여 재 난피해 원인조사단 가동이 필요할 경우, 각 학·협회 별로 편성 기준상 인력이 즉시 동원될 수 있도록 사 전에 인력풀 구성·관리  .전문기술자인 경우 사업 자가 1인 추천, 원인조사 단의 합의하에 1인추천
전 도	- 대학교수 2인 이상 - 관련분야 기술사 등 전문기술자 2인 이상	- 대한토목학회 - 한국기계연구원 - 한국에너지기술연구원 - 한국지반공학회 등	
블 레 이 드 절 단	- 대학교수 2인 이상 - 관련분야 기술사 등 전문기술자 2인 이상	- 산업안전관리공단 - 한국에너지기술연구원 - 한국기계연구원 등	
인사 사고	- 대학교수 2인 이상 - 관련분야 기술사 등 전문기술자 2인 이상	- 산업안전관리공단 - 한국에너지기술연구원 - 노동부산하 기관 - 한국기계연구원 등	

Table 12는 정확하고 투명한 사고원인조사를 하기 위해서 원인조사단을 구성하기위한 매뉴얼을 강원도 지진원인 조사단 구성 및 운영에 대한조례 [6] 에 근거하여 제주도의 현실에 맞게 작성한 것이다.

여기서 중요한 점은 어떤 상황이 발생하여도 즉시 조사단을 구성할 수 있게 인력풀을 사전에 구성 관리하는 것이다. 그러기 위해서는 협력기관과의 관계, 전문 기술자들과의 사전교류 등이 중요하다. 그리고 조사단의 투명성을 확보하기 위해서 전문기술자 2인중 1인은 풍력발전기 운영업체에서 추천하고 나머지 1인은 시민단체나 원인조사단에서 추천하는 기술자를 선정하는 방식을 고수하여야 사고원인규명의 투명성을 확보할 수 있다.

Table 13은 풍력발전기 화재사고처리 후 신속하고 투명한 후속조치에 대한 업무분장 매뉴얼의 제시안이다.

Table 13 Subsequent process of accident

내용 : 너셀 화재조치 후 후속조치		
구분	업 무 분 장	주요 조치내용
후속조치	소장	<ul style="list-style-type: none"> <li>○원인규명 조사단 구성</li> <li>-조사단 구성시 투명성확보를 위하여 사전에 조사단을 구성하여 피해발생시 곧바로 조사할 수 있도록 하여야 한다.</li> <li>○피해종합보고 및 관련기관보고</li> <li>○복구수립계획/보고</li> <li>-피해정도 및 복구예산등</li> <li>○후속조치 후 전직원 토의주최</li> <li>향후 화재예방에 대한 문제점 및 대책강구</li> <li>○원인조사 후 언론사,관련단체 보고</li> </ul>
	소방담당자	<ul style="list-style-type: none"> <li>○피해정도 및 복구예산 파악</li> <li>○관련기관 재해발생보고,인명피해시 노동부보고</li> <li>○재발방지계획 수립/보고</li> </ul>
	운영관리팀장	<ul style="list-style-type: none"> <li>○화재관련 원인조사를 위한 언론사 보도문건 작성</li> </ul>
	감사팀	<ul style="list-style-type: none"> <li>○원인조사분석문서 확인 및 검토</li> </ul>

풍력발전사업자 및 운영관리자를 비롯한 각 부서에서 재난훈련 및 기타 전문가들의 조언, 운영관리자의 현장노하우를 바탕으로 정확하고 세분화하여 업무를 분담하고 재난훈련을 통해 미비한 사항들을 Feedback하여 지속적인 매뉴얼 개발을 해야 한다.

특히 풍력발전소장의 주요조치내용들은 풍력발전소장의 의지없이는 어려운 사항들로서 평소 사고처리 후 후속조치의 투명성 확보가 중요하다는 소장의 확고한 의지가 있어야 한다. 이와 같은 풍력발전소장 및 임직원들의 재난사고대응행동에 대한 의식전환도 앞에서 제시한 재난훈련 및 교육을 통해 변모해 나아가야 한다.

## V. 결 론

이 연구에서는 육상풍력발전기의 재난사고의 유형을 분석하고 그 원인을 파악하여 제주도 풍력발전기의 안전하고 지속가능한 방재매뉴얼의 개발방안을 제시하였으며 그 결과 다음과 같은 주요 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 풍력발전기의 재난사고 중 가장 중요시 되는 것은 화재사고 및 발전기의 전도 및 블레이드 절단사고이며 이 사고들에 대한 적절한 방재매뉴얼을 반드시 현 장여건에 맞게 작성하여 실행하여야 한다.
- 2) 풍력발전기의 화재에 대한 매뉴얼은 발전기 각각의 형태 및 내부구조에 따라 화재감지설비 및 자동소화설비를 적절히 배치하고 점검하는 내용을 관련법에 근거하여 제시하였다.
- 3) 재난사고의 유형에 따라 피해가능 ZONE을 결정하고 재난사고 발생시 인명 및 재산피해를 줄이기 위해 사고형태별 매뉴얼을 제시하였다. 특히 피해가능 ZONE 결정을 위해서는 풍향풍속별 실물낙하실험을 통하여 그 범위를 결정하여야 하고 낙하물의 형태에 따라 각계각층의 전문가 및 지역주민들이 참여한 매뉴얼 작성이 필요하다고 할 수 있다.
- 4) 풍력발전기 운영사는 재난 및 안전관리 기본법에 의거하여 재난방재를 위한 사전 재난훈련을 실시해야하며 재난훈련의 중요성 및 시나리오 작성방법 그리고 훈련시행을 위한방안을 제시하였다.

- 5) 재난사고처리 후 후속조치에 대하여 적절한 프로세스 및 방재 매뉴얼을 제시 하였고 사고원인분석의 투명성을 고려한 사고원인조사단의 구성원의 인력풀 확보와 구성원칙을 제주도 여건에 맞춰 제시하였다.
- 6) 위에서 제시한 매뉴얼을 기본으로 하여 제주도, 그리고 각각의 현장여건에 맞게 방재매뉴얼을 작성하고 시행하는 것이 제주도의 신재생에너지산업이 지속 가능하게 할 수 있는 원동력이 될 수 있고 과거 발생했던 제주도 풍력발전기 사고의 교훈을 잊지 않고 Feedback하여 향후 풍력발전기운영기술에 집중한다면 풍력발전사업의 미래는 한층 더 나아질 것이다.

## 참고문헌

- [1] Global Status of Wind Power in 2015 : global wind report, GWEC 2015.
- [2] GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2000-2015: global wind report, GWEC 2015.
- [3] Summary of Wind Turbine Accident data to 31 March 2016, CWIF(Caithness Windfarm Information Forum), 2016.
- [4] 제주지역 풍력발전 현황 및 ESS 연계관련 보고 : 남부발전, 2016.
- [5] 고체에어로졸 자동소화장치의 인정기준 제정(안), KIF(한국소방산업기술원)
- [6] 강원도 지진피해 원인조사단 편성 기준, 강원도, 2014.
- [7] 소방시설 정비, 점검관리, 매뉴얼 . 만서기업.
- [8] 재난대비 훈련 매뉴얼, 소방방재청, 재난대비역량훈련센터, 2013.
- [9] Wind turbines Fire protection guideline, VDS (Germany's leading independent testing institutions for fire protection and security), 2008
- [10] 부준호 : “분산형전원을 허브변전소 계량방식 개선에 관한 연구”, 2015
- [11] “Wind Energy- The Facts Vol.2 Costs & Price”, EWEA, 2003.12.
- [12] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File: “Wind\\_turbine\\_size\\_increase\\_1980-2015.png”](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_size_increase_1980-2015.png)
- [13] ECO 100 wind turbine platform - Alstom, 2014.
- [14] 김태완 : “風力發電機 故障 趨勢 分析”, 2016.
- [15] The state of annual wind turbine accident (Global), CWIF (Caithness Wind farm Information Forum), 2016.
- [16] <http://www.snopes.com/photos/accident/windmill.asp>.
- [17] <http://www.jejusori.net/news/articleView.html?idxno=90024>
- [18] <http://www.yonhapnews.co.kr/local/2011/02/22/0812000000AKR20110222113500056.HTML>
- [19] <https://www.funnyjunk.com/Too+windy+for+the+windmill/hdgifs/5686376/31>
- [20] <http://m.jejusori.net/?mod=news&act=articleView&idxno=95864>
- [21] [http://www.ohmynews.com/NWS\\_Web/View/at\\_pg.aspx?CNTN\\_CD=A0002125200](http://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002125200)

- [22] 보도자료 : “제주에너지공사, 풍력발전 및 재난안전 전문가와 함께 김녕 풍력발전기 화재발생 합동 조사실시”, 에너지공사 전략기획팀, 2015
- [23] <http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2015/07/16/0200000000AKR20150716181000056.HTML>
- [24] solomon uadiale<sup>1</sup>, évi urbán<sup>1</sup>, ricky carvell<sup>1</sup>, david lange<sup>2</sup>, and guillermo rein<sup>3</sup> : “overview of problems and solutions in fire protection engineering of wind turbines”
- [25] European Guideline, Wind tubines fire protection guideline : “Table 3”, CAPAEUROPE. 2014.
- [26] “환경풍력 소화설비현황”, 남제주화력발전소 풍력 운영팀, 2015.
- [27] European Guideline, Wind tubines fire protection guideline : “5.2.2 Fire fighting”, CAPAEUROPE. 2014.
- [28] The install state of automatic fire suppression system inside of wind turbine nacelle in Hankyeong wind farm, 2015.
- [29] “자동소화장치(열감지튜브형)규격서”, 화동화력본부 1 발전기팀, 2013.
- [30] European Guideline, Wind tubines fire protection guideline : “5.2.1 Fire detection”, CAPAEUROPE. 2014.
- [31] “소방시설 정비, 점검관리, 매뉴얼”, 주식회사 만서기업, 2007
- [32] “소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률“, 약칭 소방시설법, 2015
- [33] “비상사태 대응절차서”, 에스케이디앤디 (주) 가시리 풍력발전소 2016.
- [34] “재난 및 안전관리 기본법”[시행 2016.1.25.] [법률 제13440호, 2015. 7. 24, 타법개정]

## 감사의 글

처음 대학원 면접 보러 오던 날, 낯설게만 느껴지던 풍력공학과 연구실이 지금은 어느덧 2년 6개월이 지나 이젠 편안한 장소로 남아 있습니다.

20여 년 동안 오로지 토목 관련 일만 해오던 제가 풍력공학과 산업대학원에 등록한 것은 큰 도전이었습니다. 그동안 부족한 저를 잘 적응하게 하고 많은 지식을 얻을 수 있도록 물심양면으로 도움을 주신 여러분들에게 감사한 마음을 전합니다.

부족한 저를 항상 믿음으로 대해주시고 인자한 웃음으로 반겨주시는 고경남 교수님, 교수님의 저에 대한 믿음이 있었기에 끝까지 놓지 않고 논문을 마무리 할 수 있었습니다. 넓은 아량과 부드러움을 지니신 허종철 교수님, 적극적이면서도 내심 순진무구한 마음을 지니신 김범석 교수님 감사합니다.

2년 반 동안 집안 형님같이 우리들 곁에 서 있어주신 고승훈 센터장님 그리고 큰 일 작은일 마다하지 않고 잘 따르고 같이해준 대원이랑 창협이, 우리 동기들 덕분에 인생의 한 자락의 추억을 가슴 한 구석에 기분 좋게 담았습니다.

그리고 논문 쓰면서 배움의 정을 느끼게 해준 용혁이와 민상이, 논문 쓰는 동안 정말 고맙습니다. 수업 받으면서 서로 돕고 위하며 같이 보냈던 영근이,인욱이,보민이,태훈이형님,승호,용규형님,영철이, 여러 학우님들 정말 고맙습니다.

마지막으로 뒤에서 오랜 시간 지켜봐주신 어머니 그리고 야간대학 편입하고 공부하면서 2년, 기술사 공부하면서 2년, 대학원 다니면서 2년 6개월, 결혼12년 동안 반이상을 공부 바라지 한 우리 현민희 아내에게 진심으로 고맙다는 마음을 전합니다.

2016. 06.

고 정 만 올림