



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](#)

석사학위논문

풍력발전시스템 나셀 내부
화재조기감지 및 위치 판별 방법에
관한 연구

제주대학교 대학원

풍력공학부 풍력기계시스템 전공

김 다 희

2015年 8月

풍력발전시스템 나셀 내부
화재조기감지 및 위치 판별 방법에
관한 연구

指導教授 林 鍾 桓

金 茶 喜

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 6 月

金茶喜의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

최경철

委 員

임동환

委 員

강철우

濟州大學校 大學院

2015 年 6 月

A Study on the Early Fire Detection and
Fire Position Determination
inside the Nacelle of Wind Turbine

Dahee Kim
(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

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

2015. 6.

This thesis has been examined and approved.

.....
허 중 철

Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

.....
임 동 환

Thesis director, Jong-Hwan Lim, Prof. of Mechatronics Engineering

.....
강 철 응

Thesis director, Chul-Ung Kang, Prof. of Mechatronics Engineering

.....
Date

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

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLE	iii
LIST OF FIGURES	iv
Abstract	vi
I. 서 론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 동향	3
3. 연구 목적	7
II. 나셀 화재	9
1. 화재의 분류	9
2. 나셀 화재 분석	10
III. 나셀 환경 분석	12
1. 나셀 환경 데이터 수집	12
2. 분석 결과	13
1) 조도 분석 결과	13
2) 연기농도 분석 결과	16
3) 온도 분석 결과	18
IV. 화재 감지	21
1. 화재 감지용 센서 특성	21
1) 연기센서	21
2) 온도센서	22
2. 화재 감지 알고리즘	23
1) 화재 감지 변수 선정	23
2) 화재 조기감지 및 위치 판별	25

V. 실험 및 결과	28
1. 화재 감지 시뮬레이터 구성	28
2. 실험과정	32
3. 실험 결과	32
1) 전기화재 실험 결과	32
2) 유류화재 실험 결과	35
3) 종합 결과	38
4. 화재 조기감지 시스템 설계	39
VI. 결론	43
참고 문헌	45

LIST OF TABLE

Table 1	Support information on the selection of fire detectors	5
Table 2	Classification of fire	9
Table 3	Fire type of wind turbines nacelle	10
Table 4	Fire location of nacelle	11
Table 5	Features of smoke sensor	22
Table 6	Features of temperature sensor	23
Table 7	Characteristics of Nacelle Environment	24
Table 8	Early fire detection algorithm	26
Table 9	Result of electrical fire	33
Table 10	Detection time according to distance for electrical fire	34
Table 11	Result of oil fire	36
Table 12	Detection time according to distance for oil fire	37
Table 13	Detection time according to distance	39
Table 14	Time difference between sensor 1 and the other sensor positions	39

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Fire incidents	1
Fig. 2	Jeju wind turbine fire	2
Fig. 3	Yeongheung wind turbine fire	3
Fig. 4	Yeongheung fire extinguishing system	4
Fig. 5	Fire protection	6
Fig. 6	Passive fire protection system	7
Fig. 7	Data collection system diagram	12
Fig. 8	Monitoring system	13
Fig. 9	Maximum illumination	14
Fig. 10	Minimum illumination	14
Fig. 11	Daily average illumination	15
Fig. 12	Maximum rising rate of illumination	15
Fig. 13	Maximum smoke density	16
Fig. 14	Minimum smoke density	16
Fig. 15	Daily average smoke density	17
Fig. 16	Maximum rising rate of smoke density	17
Fig. 17	Maximum temperature	18
Fig. 18	Minimum temperature	18
Fig. 19	Daily average temperature	19
Fig. 20	Maximum rising rate of temperature	19
Fig. 21	Response characteristics of smoke sensor	22
Fig. 22	Response characteristics of temperature sensor	23
Fig. 23	Rising rates of temperature and smoke density (electric fire)	25
Fig. 24	Rising rates of temperature and smoke density (oil fire)	25
Fig. 25	Fire simulator	28

Fig. 26	Simulator diagram	28
Fig. 27	Fire sensors	29
Fig. 28	Location of sensors	29
Fig. 29	Simulator algorithm	30
Fig. 30	Fire detector program	31
Fig. 31	Fire detection simulation	32
Fig. 32	Result of electrical fire	35
Fig. 33	Result of oil fire	38
Fig. 34	Circuit diagram of fire detection system	40
Fig. 35	Fire detector system	41
Fig. 36	Fire detection system installation	42

Abstract

Self fire suppression for a nacelle of wind turbine generator system is inevitable because the location of wind farm is generally far from the fire station and the position of the nacelle is too high for firefighting equipment to reach it.

The thesis presents a method of early fire detection and fire position determination inside the nacelle. The main variables for fire detection can be illumination, temperature and smoke density, so that the environmental characteristics inside is very important. Thus, we analyzed the characteristics of the nacelle environment that is dependent upon the heat generated by various apparatus of the nacelle and the change of outside environments according to the seasons.

By analyzing the nacelle environment, we found that the absolute values of temperature and smoke density are not suitable as a fire detection variable because they vary depending on seasonal changes. Illumination is also not suitable for fire detection because the absolute value and the rate of change of it is very high, so that it is very difficult to distinguish whether it is fire or not. Therefore, we developed a method of an early fire detection and fire position determination based on the rising rates of temperature and smoke density that are independent from the seasonal changes.

The performance of the method was tested in situation of electric and oil fire that are the most common types of fire inside the nacelle. The results showed that the method is very fast and reliable for fire detection and fire position determination enough to be applied to the actual wind turbine generator system.

I. 서론

1. 연구 배경

풍력발전은 여러 가지 신재생에너지 분야 중 하나로 정부의 신재생에너지 보급 확대 정책에 따라 발전량 증가를 위하여 풍력발전단지가 급속히 확대되고 시스템의 규모도 대형화되고 있다.[1],[2] 이에 따라 화재 및 구조적 결함 등 사고 발생 가능성도 증가 하고 있다. Caithness Windfarm Formation Forum에서 조사한 통계결과에 따르면 70년대부터 2013년까지 보고된 사고 총 1,505의 사건 중 화재사건은 224건으로 전체의 약 15%정도를 차지하고 있으며, Fig. 1과 같이 매년 꾸준히 발생하는 것을 알 수 있다.

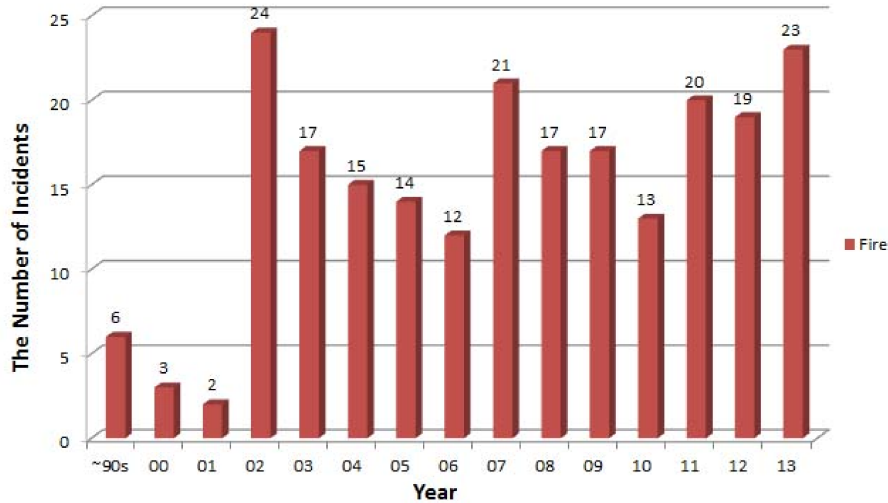


Fig. 1 Fire incidents

풍력발전시스템 화재사고는 블레이드 고장사고에 이어 두 번째로 빈번히 발생하는 사고이지만, 풍력발전시스템의 경우 시설물로 분류되기 때문에 소방시설 설치 대상이 아니다.[3] 풍력발전단지는 대체적으로 소방서와 먼 거리에 위치하

고 있고, 풍력발전시스템에서 가장 중요한 부분인 나셀의 내부에는 인화성 물질과 전기 및 기계 부품이 설치되어 있어 화재 발생 가능성이 높고, 지상에서 높은 위치에 있어 초기 화재 진압이 어려운 특징을 가지고 있다.[4]

우리나라에서는 2건의 풍력발전시스템 화재사고가 발생하였다. 2010년 10월 제주 김녕 풍력발전단지 내 600kW급 풍력발전시스템에서 발생한 화재는 정비를 위하여 정지시켜 놓은 풍력발전시스템이 강풍에 의해 블레이드가 과회전되어 브레이크 시스템의 디스크와 패드간의 마찰에 의하여 불꽃이 발생하여 브레이크 시스템 주변의 가연성 물질을 발화시켰다. Fig. 2는 당시 화재 모습이며, 자연 진화된 이후에도 과도한 블레이드의 회전으로 인하여 타워가 전도되어 인근 양식장 발전실이 완파되고 수도관이 파손되는 등의 피해가 발생하였다.[5],[6]



Fig. 2 Jeju wind turbine fire

또한 2010년 11월 인천 영흥풍력발전단지 내 2MW급 풍력발전시스템에서 발생한 화재는 발전기 자체 결함으로 인해 전력변환장치 인입부에서 강력한 아크 발생 후 단락이 발생하여 과전류가 흘러 전력변환장치내의 화재 및 폭발로 이어져 전소된 것으로 추정하였다. Fig. 3은 당시 사고기 모습으로써 발전기에서 떨어진 불꽃이 인근 야산으로 옮겨 붙어 잡목 1200m²가량이 소실되는 추가 피해가 발생하였다. 두 화재 모두 인근 소방서에서 소방차가 출동하였으나 화재가 발생한 지점이 높기 때문에 전소되어 자연 진화될 때까지 화재 위치에 접근조차 할 수 없었다.[7]



Fig. 3 Yeongheung wind turbine fire

이처럼 풍력발전시스템의 화재는 발전기의 파손뿐만 아니라 블레이드 및 구성장치 등의 추락 및 타위가 쓰러져서 주위가 파괴되거나 불이 붙은 파편이 바람에 의해 넓은 지역으로 분산되어 주위의 화재로 이어지는 등의 2차 사고로 인하여 주거 공간의 인명피해 및 재산피해가 큰 특징이 있다.[8]

2. 연구 동향

현재 국내에서의 화재가 발생한 이후 나셀 내부에 소화액이 흐르는 호스인 소화설비를 임시적으로 구축하여 운영하고 있다. Fig. 4는 영흥 풍력발전단지에 설치되어있는 소화시스템이다. 이 방식은 화재 발생시 열과 복사에너지로 인해 호스가 파열되면 그 부분에서 소화액이 분사되어 화재를 진압하는 방식으로 무전원 상태에서도 화재를 진압할 수 있는 장점이 있지만, 나셀의 부품을 수리하거나 교체할 경우 이 호스를 제거한 후 재설치해야하는 불편함이 있고, 화재가 어느 정도 진행된 이후 호스를 녹여야 화재가 진압되므로 조기 감지 및 진압이 어려운 단점이 있다. 또한 넓은 나셀 공간에 CCTV를 설치하여 화재를 확인하고

수동으로 진압하는 방식이 있는데 야간 및 새벽 시간대에도 상주 근무자가 상시 모니터링을 실시해야 하며 모니터링이 늦어질 경우 화재 초기진압이 어려운 단점이 있다.

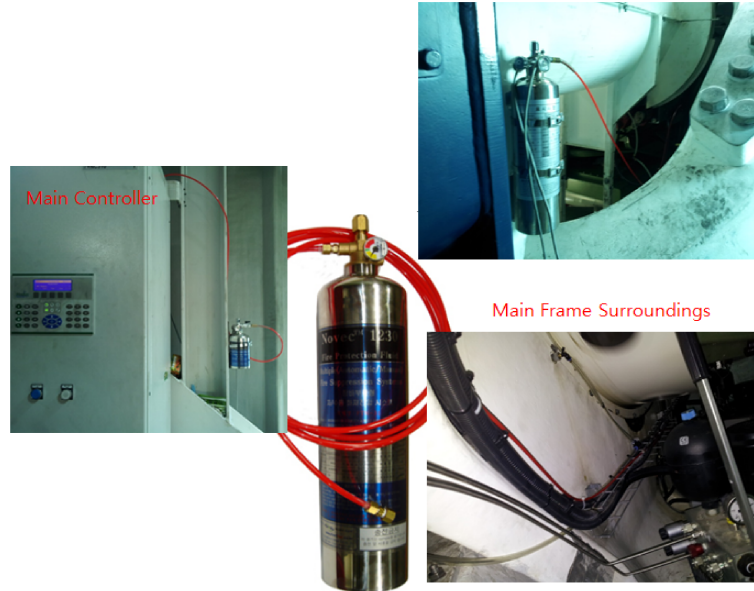


Fig. 4 Yeongheung fire extinguishing system

유럽의 경우 유럽소방협회연합(CFPAE)에서 풍력발전시스템 소방지침을 만들어 풍력발전시스템 내부에 화재 감지시스템을 설치하여 초기에 진화를 하고 있다. Table 1은 이 소방지침에서 언급된 풍력발전시스템에 적용가능한 감지기에 대하여 나타낸 것이다. 풍력발전시스템의 각각의 공간을 분류하여 화재 감지기 종류인 연기감지기, 온도감지기, 불꽃감지기, 다중센서 연기 감지기 등의 설치 적합 여부를 나타낸다.[9-11]

Table 1 Support information on the selection of fire detectors for monitoring rooms and installations

Type of detector Room/Installation	Smoke detector			Heat detector		Flame detector		Multi-sensor smoke detector	
	Point-shaped	Multi-point-shaped	Linear	point-shaped	Linear	IR	UV	Smoke and heat	Smoke and CO
	Scattered light	Aspirating	Light beam						
Nacelle with transformer, including hub and raised floor	×	○	×	×	×	×	×	×	×
Central electric power substation, switch cabinet rooms	○	○	○	○	○	×	×	○	○
Tower base/platform with available installations, if applicable	×	○	×	○	×	×	×	×	×
Switchgear cabinets	○	○	×	×	×	×	×		×
Hydraulic systems	×	○	×		×	×	×	×	×
Transformer	×	○	×	Buchholz relay		×	×	×	×

국내·외에서 출원된 특허로써 Aloys[12]와 Lee[13]는 풍력발전시스템 내부의 산소농도를 줄이고 불활성 기체의 농도를 높임으로써 화재 방지 및 진압하는 방법을 제안하였다. Fig. 5와 같이 풍력발전시스템 타워 아래 부분에 불활성 기체를 공급하는 기계를 설치하고, 풍력발전시스템을 밀폐하여 불활성 기체를 주입하여 불활성 기체 농도를 높임으로써 화재의 발생 가능성을 낮추는 방식이다. 이 방법은 풍력발전시스템의 내부를 완전히 밀폐시켜야 하며, 나셀 내부에 진입하여 유지보수 등의 작업을 하기 위해서는 진입 전에 불활성 기체의 농도를 줄이고 산소농도를 높이기 위하여 환기가 필요하며 수리 후 불활성 기체의 충전이 요구된다.

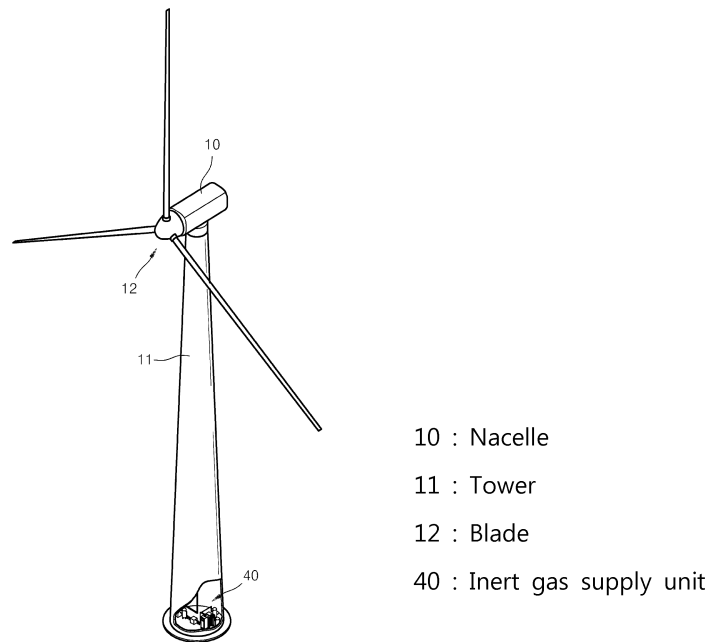


Fig. 5 Fire protection

Alejandra[14]는 화재 발생 가능한 지역을 격벽으로 분리하여 화재 범위를 한정시켜 확산을 막는 방식을 제안하였다. Fig. 6과 같이 나셀의 뒷부분인 변압기 주위를 분리시켜 단열재로 감싸는 방식으로써, 변압기 화재시 화재의 확산을 제한시키는 방법이다. 그러나 이 방법은 변압기 이외의 다른 화재의 확산은 고려하지 않았으며, 설계 초기부터 격리되게 설계하는 방식으로써 이미 설치된 풍력 발전시스템에 적용은 적합하지 않다.

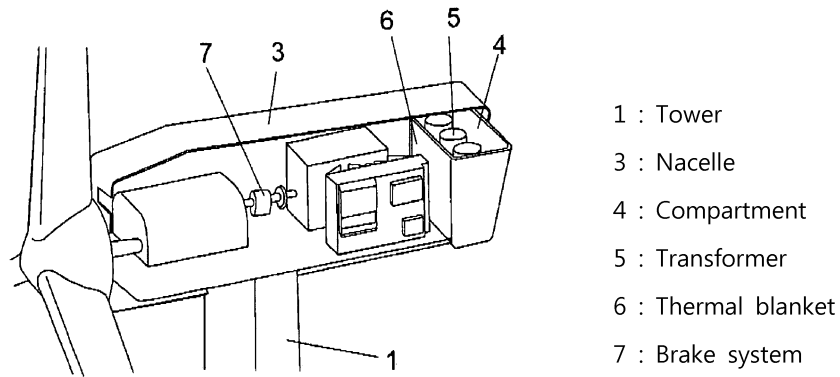


Fig. 6 Passive fire protection system

3. 연구 목적

풍력발전시스템의 나셀은 거의 밀폐된 공간이고, 나셀 내부에 설치된 로터에 의해 얻은 회전력을 전기 에너지로 변환하기 위하여 발전기, 증속기, 유압시스템, 브레이크 디스크 및 요 시스템 등 다양한 장치들이 설치되어 있어, 전기 에너지를 얻기 위하여 작동 시 많은 열이 발생된다.[15] 계절, 외부 날씨 및 운전여부에 따라 내부 환경은 일반 환경과는 차이가 있으므로 화재 감지 성능을 위하여 이러한 변수를 고려하며 적용해야 한다.[16] 또한 지상에서 약 40m 이상 공중에 위치하여 운전하므로 다른 지상에 고정된 설비와는 달리 고려할 부분이 많다. 풍력발전단지는 일반적으로 소방서와 비교적 먼 거리에 위치해 있으며, 해상풍력일 경우에는 화재시 접근성이 현저하게 떨어지기 때문에 일반적인 화재진압의 방법을

적용시킬 수 없다. 따라서 대형화재를 미연에 방지할 수 있는 조기 감지 후 자동 진압의 개념이 매우 중요하다.

풍력발전시스템에서의 화재를 조기감지하면 초기 진압이 가능하고, 조기감지된 부분을 중심으로 국소 진압이 가능하여 나셀 내부 기기의 피해를 최소한으로 줄일 수 있다. 또한 타워가 쓰러지는 사고를 방지하여 2차 피해 및 재산피해를 방지할 수 있기 때문에 화재에서의 조기감지는 중요하다.

따라서 본 논문에서는 화재를 조기감지하기 위하여 나셀 내부의 환경 특성을 분석하고, 이를 적용하여 화재를 감지하고 화재 위치를 판별하는 방법을 연구하였다. 환경특성을 분석하기 위한 변수로는 조도, 온도 및 연기농도 등이 있다. 분석된 나셀 내부의 환경특성을 최대한 고려하여 온도 및 연기농도 상승률을 기반으로 화재 조기감지 및 화재 발생 위치를 판별하는 방법을 개발한다.

II 장에서는 화재를 분류하고, 실제 풍력발전시스템 나셀 화재의 유형과 위치에 대하여 분석한다. III 장에서는 나셀 내부의 환경을 분석하고 IV 장에서는 III 장에서 분석된 환경 데이터 결과를 토대로 화재 감지 알고리즘을 제안한다. V 장에서는 화재 감지 알고리즘을 이용하여 실험을 수행하고 그 결과를 분석한다.

II. 나셀 화재

1. 화재의 분류

화재란 고열 및 빛을 동반하는 급속한 연소 산화현상으로 인간의 의도와 반대로 확대되거나 방화에 의하여 발생된 소화의 필요성이 있는 연소현상으로써 이것을 진화하기 위해서 소화설비나 이와 같은 성능을 가진 도구나 장비의 사용을 필요로 하는 불을 뜻한다. 화재의 원인 물질에 따라 화재의 특징과 소화 방법이 다르므로 Table 2와 같이 A급에서 D급 화재로 분류한다.

Table 2 Classification of fire

Class A	General fire	나무, 천, 종이, 고무, 플라스틱 등의 일반 가연물의 화재
Class B	Oil fire	가연성의 액체, 가스 및 유류 등의 화재
Class C	Electrical fire	통전중인 전기기기가 관련된 화재
Class D	Metal fire	마그네슘 나트륨, 칼륨, 지르코늄과 같은 화재

A급 화재는 나무나 종이 등으로 인한 일반 가연물의 화재로 다른 화재에 비해 발생 빈도가 높고 생활주변에서 흔히 볼 수 있는 화재로써 소화가 가능하며 타고 난 후 재가 남는다. B급 화재는 유류 및 가스 화재로 가연성 액체인 유류는 가연성 고체보다 비교적 연소속도가 빠른 특징이 있으며 소화하기 위하여 공기의 차단을 이용한 질식소화가 효과적이고, 가스화재는 밸브를 잠그거나 차단시키는 제거소화가 효과적이며 물은 효과가 없고 토사나 소화기로만 소화가 가능한 특징이 있다. C급 화재는 전기 스파크, 단락, 과부하 등으로 전기에너지가 불로 전이된 전기화재로 발생형태가 다양하고 원인 규명이 곤란하며, 전기 자체적인 원인 보다는 기기의 구조적 결함과 사용자의 부주의로 인하여 화재가 발생한다. 이 등급의 화재는 질식소화와 특수 소화기로 소화하는데 물을 사용할 경우

감전의 위험이 있다. D급 화재는 금속화재로 마그네슘, 나트륨, 칼륨 등 금속물질에 의한 화재로써 금속가루의 경우 폭발을 동반하기도 한다. 물을 사용할 경우 폭발한 위험이 있으므로 마른 모래의 질식, 특수소화기를 이용하여 소화한다.[17]

2. 나셀 화재 분석

풍력발전시스템의 화재 발생원인으로는 기계장치의 화재발생, 윤활제에 의한 화재발생 및 외부환경에 의한 화재 발생 등이 있다. 기계적 장치에 의한 화재발생은 장치 결함으로 과전류가 발생하거나, 비상 브레이크 동작 및 발전기의 고장 등으로 전기 스파크가 발생하는 경우, 그리고 나셀 내부 하우징들이 스파크나 과열된 기계장치에 의해 점화되는 경우 등이다. 또한 기계장치 주변은 기계 내부에서 누출된 윤활유 및 고압으로 작동하는 유압 시스템에서 분출된 오일 등으로 항상 오염되어 있는 상태이므로 기계장치의 과열이나 전기 스파크 등으로 인해 오염된 오일이 점화되어 화재가 발생한 가능성이 크다. 외부환경에 의한 화재는 낙뢰가 유입되거나 종단풍속 이상의 풍속으로 풍력발전시스템이 과속되어 장치들의 고장을 유발시켜 기계들의 과열로 발생한다.[11]

풍력발전시스템에서 화재가 발생할 경우 대부분 완전히 전소하기 때문에 어느 위치에서 화재가 발생하였는지 원인을 규명하는 것은 어렵다. 최근 5년간 국내·외에 보고된 화재 중 나셀에서 발생한 화재의 화재 유형을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Fire type of wind turbines nacelle

Fire type	Oil	Spark	Light	Unknown
Number of occurrence	9	5	1	2

풍력발전시스템 고속 혹은 기계 결함 등으로 인하여 발전기나 디스크 브레이크 등이 과열됨에 따라 나셀 내부에 있던 잔존오일이 점화되어 발생한 윤활유 화재가 9건으로 가장 많았다. 전기장치 고장, 과전류 및 합선 등으로 인하여 전기스파크가 발생하여 발화된 화재가 5건이 발행하였고, 낙뢰에 의해 발전기가 파괴되어 발생한 화재가 1건, 그리고 정확한 원인이 불분명한 화재가 2건 발생하였다. 따라서 나셀 내부 화재는 장치의 과열에 의한 유류화재 및 과전류나 합선에 의한 전기화재로 분류 될 수 있다.

Table 4는 풍력발전시스템에서 발생한 화재의 위치를 나타낸다. 17건의 화재 중에서 발전기 부분이 4건으로 가장 많았고, 디스크브레이크와 컨트롤박스 부근이 3건, 로터 블레이드와 기어박스 주변이 2건 그리고, 나셀에서 화재가 발생하였지만 어디서 발화되었는지 위치를 파악하기 어려운 사고는 3건이 발생하였다.[18-24] 디스크 브레이크는 기어박스 바로 뒷부분에 설치하므로 화재의 빈번한 발생 위치는 발전기 부분, 기어박스과 디스크 부분, 컨트롤박스 부분, 블레이드 부분으로 총 4부분으로 구분하였다.

Table 4 Fire location of nacelle

Location	Generator	Disk brake	Electronic control	Rotor blade	Gearbox	Unknown
Number of occurrence	4	3	3	2	2	3

III. 나셀 환경 분석

1. 나셀 환경 데이터 수집

풍력발전시스템 나셀 내부 환경 특성을 분석하기 위하여 나셀 내부에 조도센서 2개, 온도센서 4개, 연기센서 1개를 설치하였다. 설치한 위치는 실제 화재사례 및 유럽 화재 가이드라인[11]을 참고하여 열이 많이 발생하며 화재가 발생하기 쉬운 부분에 설치하였다. Fig. 7은 풍력발전시스템 내부에 설치한 센서의 간략한 정보와 설치 위치에 대한 구성도이다.

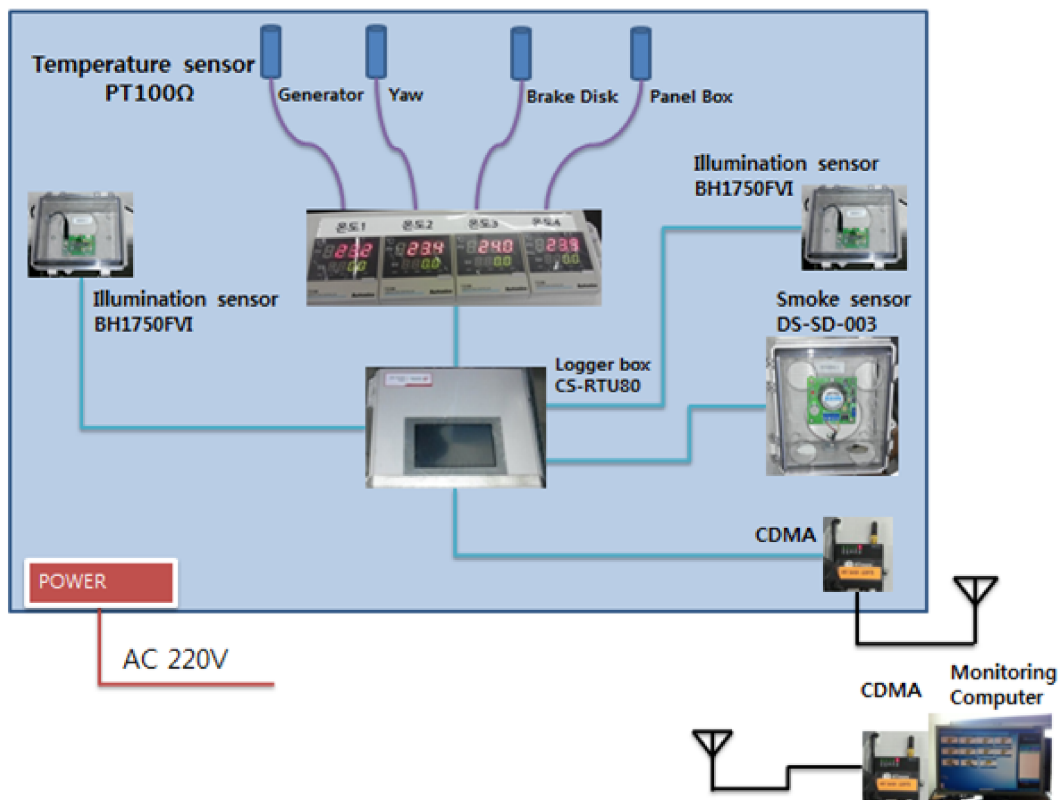


Fig. 7 Data collection system diagram

조도센서는 CDS센서인 GL5549모델을 사용하였으며 발전기를 기준으로 왼쪽과 오른쪽에 설치하였고, 온도센서인 삼선식 PT100 Ω 을 발전기 부분, 요 부분, 브레이크 디스크 부분, 판넬박스 안에 각각 설치하였다. 그리고 연기센서는 이온화식 센서인 DS-SD-003모델을 사용하였으며 발전기 윗부분에 설치하였다. 출력된 값을 저장하기 위한 로거박스는 CS-RTU80을 이용하였다. 조도센서는 I2C통신, 그리고 온도센서와 연기센서는 RS485통신으로 나셀 내부의 로고박스에 저장되고, 매 20분마다 지상에 설치되어있는 환경 모니터링 서버에 CDMA통신으로 수신되어 저장된다. Fig. 8은 모니터링 화면으로써 센서 별로 수신된 데이터 값을 출력하고, 수신된 시간과 데이터 값이 저장된다.

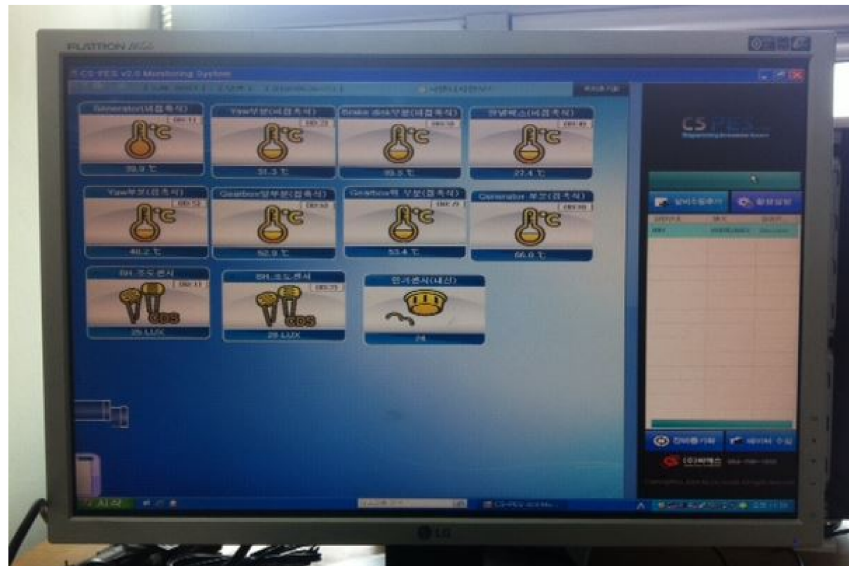


Fig. 8 Monitoring system

2. 분석 결과

1) 조도 분석 결과

Fig. 9와 Fig. 10은 발전기의 좌·우에서 측정된 조도의 일일 최댓값의 월별 최댓값과 최솟값을 나타낸다. 최댓값은 8월에 발전기 오른쪽에서 23153lux로 관

측되었다. 이와 같이 조도의 최고값이 높은 이유는 나셀이 완전히 밀폐된 공간이 아니므로 자연광이 유입되기 때문이다. 최솟값의 최댓값은 8월에 오른쪽에서 172lux로 관측되었으며 일반적으로 왼쪽이 더 낮게 관측 되었다. 다른 계절에 비해 여름철에는 비교적 최솟값이 높게 관측이 되었다. 안개나 황사 등으로 인하여 흐린 날씨에는 하루 동안 낮은 값이 관측되므로 이와 같은 날씨의 영향 등으로 인하여 일별 최댓값의 월별 최댓값과 최솟값의 편차가 큰 것으로 분석되었다.

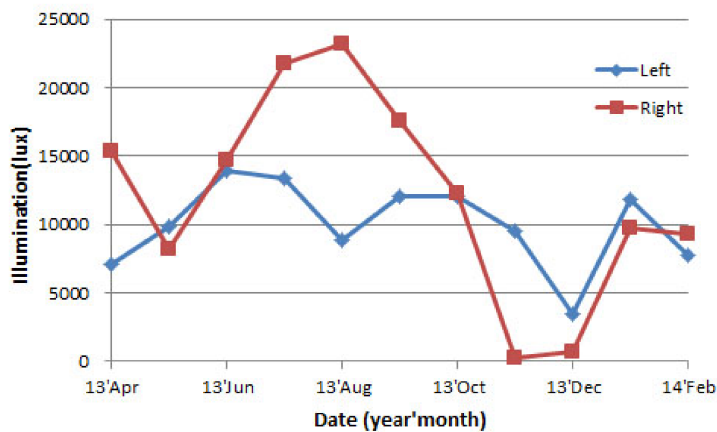


Fig. 9 Maximum illumination

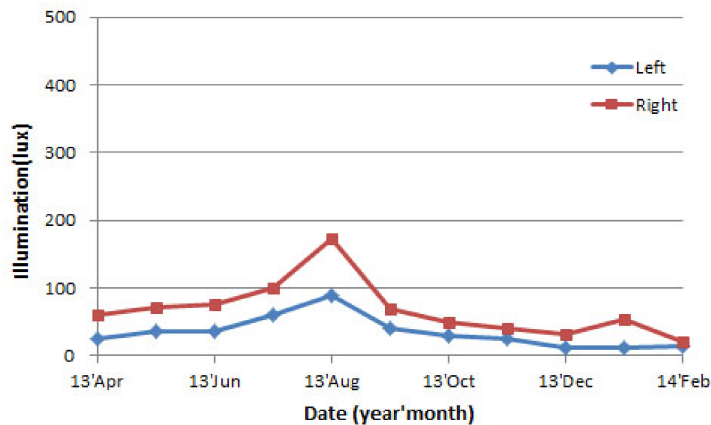


Fig. 10 Minimum illumination

Fig. 11은 일 평균값의 월별 최댓값을 나타낸다. 일평균의 최댓값은 7월에 오른쪽에서 7295lux로 관측되었다. 일평균의 최댓값은 대체적으로 왼쪽이 더 큰 것으로 측정되었으나 최댓값은 오른쪽에서 관측되었다. 이것은 일반적으로는 왼쪽

의 일사량이 더 많았지만 일시적으로 7월과 8월에 오른쪽의 하루 일사량이 더 많았던 것으로 분석된다.

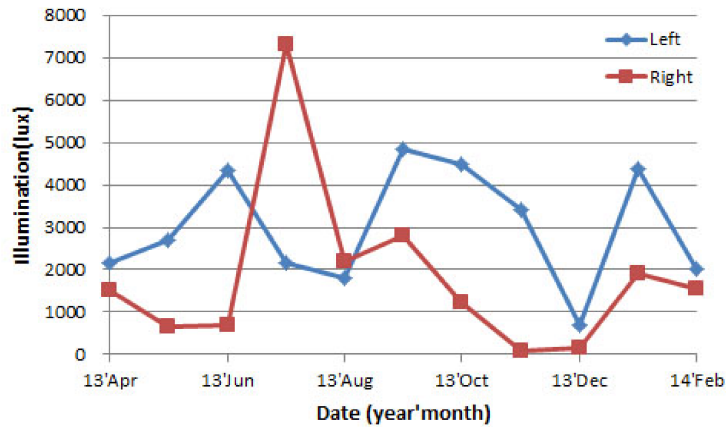


Fig. 11 Daily average illumination

Fig. 12는 월별 조도의 최대 상승속도를 나타낸다. 최대 상승속도는 20876lux/s로 분석되었다. 주풍향에 따라서 나셀의 왼쪽에 빛이 더 많이 들어와서 왼쪽이 조도값이 더 크지만, 나셀이 바람의 방향에 따라 요 운동을 하므로 나셀 방향에 따른 그림자 및 반사빛으로 인하여 상승속도는 오히려 오른쪽이 더 큰 것으로 분석되었다. 또한 태양광이 직접 유입되거나 반사광에 의한 순간 조도 상승 혹은 구름, 블레이드의 그림자 등으로 인하여 조도의 변화가 심하여 조도 상승속도가 일반적으로 큰 것으로 분석되었다.

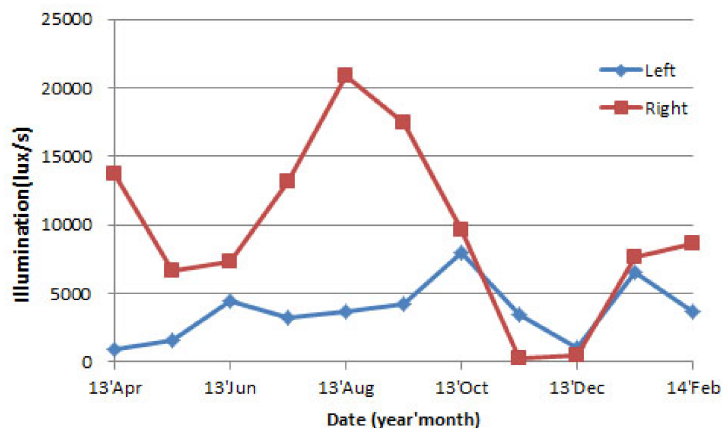


Fig. 12 Maximum rising rate of illumination

이와 같이 조도는 주간외 비화재시에도 절댓값이 크고 상승속도 또한 매우 크기 때문에 실제 화재시의 조도값과 구별이 어려워 화재 감지 변수로 이용하기에는 부적합한 것으로 판단된다.

2) 연기농도 분석 결과

Fig. 13과 Fig. 14는 일일 최대 연기농도의 월별 최댓값과 최솟값을 나타낸다. 연기 농도는 낮은 수치를 일정하게 유지하였으며 최고값은 10월에 6.2%/foot로 측정되었다. 10월은 다른 달에 비해 연기농도 값이 높게 측정되었는데, 이것은 먼지나 안개에 의한 것으로써, 이 값은 실제 화재시의 연기농도 보다 훨씬 낮은 값이다. 최솟값은 월별 차이가 거의 없었으며, 최댓값은 2.4%/foot로 측정되었다.

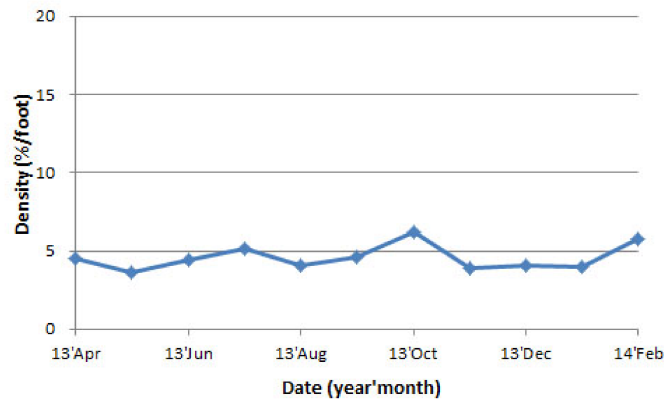


Fig. 13 Maximum smoke density

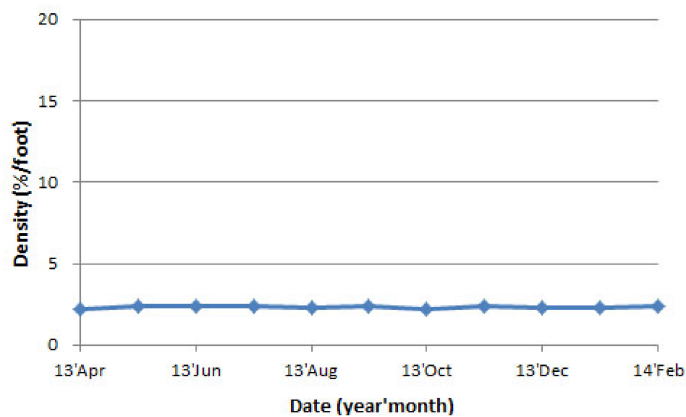


Fig. 14 Minimum smoke density

Fig. 15는 일 평균값의 월별 최댓값을 나타낸다. 연기농도는 계절에 상관없이 거의 2%/foot정도를 유지했으며, 최댓값은 안개나 먼지 등의 요인으로 인하여 10월에 3.0%/foot으로 다른 월에 비해 약간 높게 측정되었다.

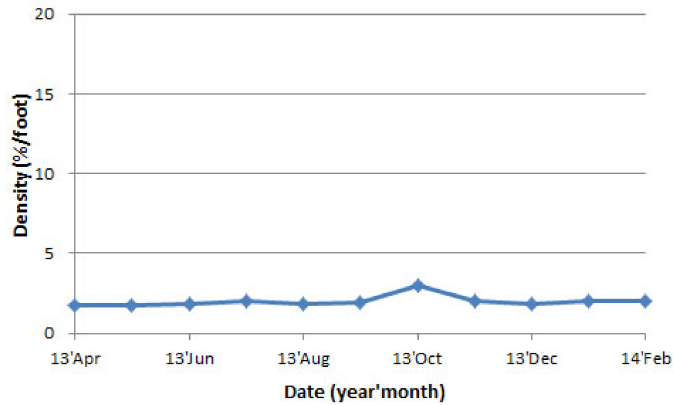


Fig. 15 Daily average smoke density

Fig. 16은 월별 연기농도의 최대상승속도를 나타낸다. 연기농도는 변화가 거의 없으므로 상승속도는 거의 0에 가까운 것으로 분석되었다. 상승속도의 최댓값은 0.0038%/(foot·s)으로 분석되었다.

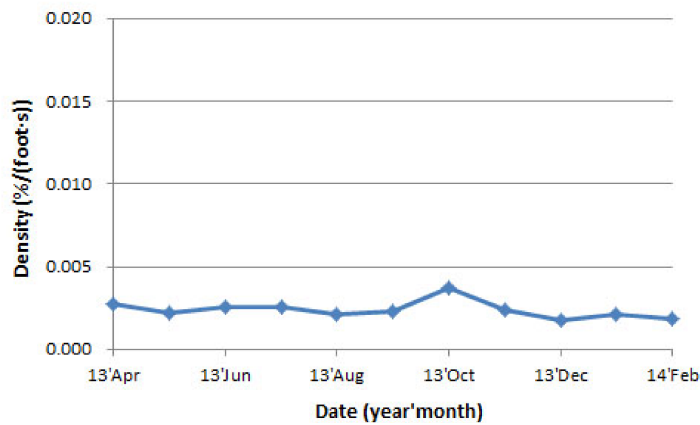


Fig. 16 Maximum rising rate of smoke density

연기농도는 계절의 영향보다는 안개나 먼지 등의 영향을 약간 받으며, 비화재시 나셀 내부의 연기 농도는 거의 일정하며 변화량 또한 매우 작은 것으로 분석되었다. 따라서 화재 감지 변수로의 사용이 충분한 것으로 사료된다.

3) 온도 분석 결과

Fig. 17은 발전기, 요, 브레이크 디스크, 판넬박스 부근의 월별 온도 최고값을 분석한 결과이다. 최댓값은 발전기 부분에서 4월에 47.7℃로 측정되었다. 풍력발전시스템이 운전시 발전기에서 열이 많이 발생하기 때문에 주로 발전기 부근에서 높은 온도 값이 측정되었다.

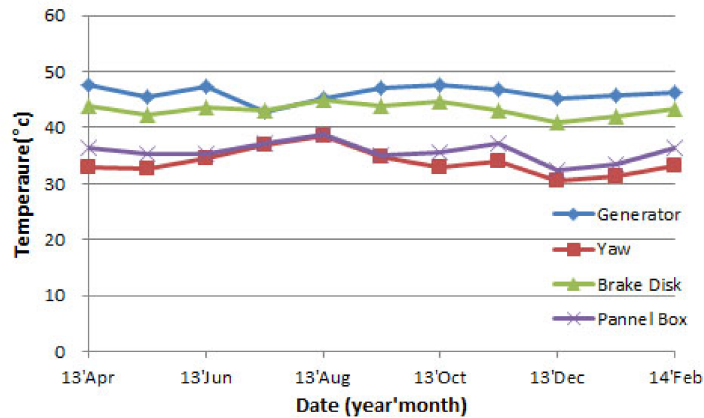


Fig. 17 Maximum temperature

Fig. 18은 일일 최댓값의 월별 최솟값을 나타낸다. 최솟값은 위치에 따른 차이가 거의 없었으며 계절의 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다. 겨울철에는 풍속이 중단풍속을 넘는 경우 발전을 멈추게 되는데 이때는 열이 발생하지 않고, 외부의 차가운 공기에 의해 나셀 내부의 온도가 내려가므로 다른 계절에 비해 낮은 값이 측정되는 것으로 분석되었다.

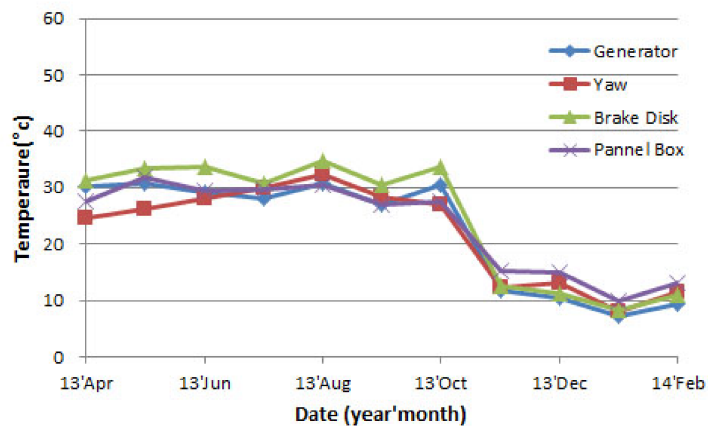


Fig. 18 Minimum temperature

Fig. 19는 일 평균값의 월별 최댓값을 나타내는데, 발전기와 브레이크 디스크 부분이 높게 관측되었으며 요 부분은 다른 곳에 비해 계절의 영향을 많이 받아서 겨울철에는 낮은 값이 관측되었다. 그리고 나셀 내부의 온도는 겨울철에도 20도 이상을 유지하는 것으로 분석되는데, 이는 발전기 내부 장치에서 발생하는 열 때문으로 분석된다.

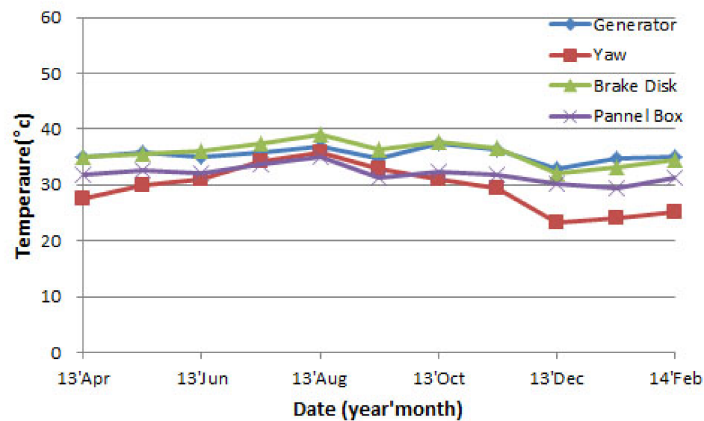


Fig. 19 Daily average temperature

Fig. 20은 월별 최대상승속도 결과를 나타낸다. 상승속도의 최고값은 0.97°C/s 이었다. 또한 여름철보다 겨울철의 상승률이 높게 나타났는데, 이는 겨울철에는 밤에 기온이 급격히 떨어지고 낮에는 햇빛으로 온도가 급격히 올라가 일교차가 여름보다 크기 때문이다.

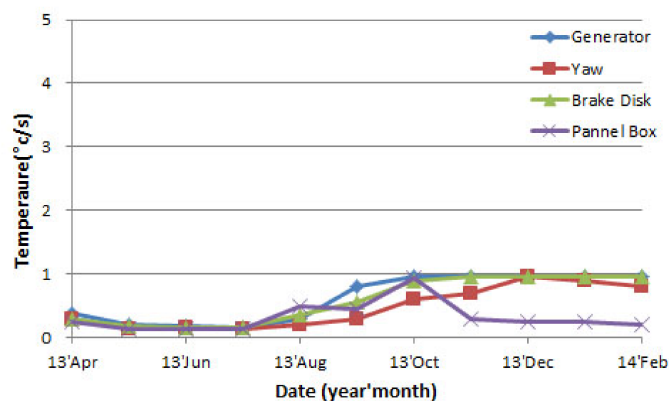


Fig. 20 Maximum rising rate of temperature

나셀 내부의 온도는 발전기 부근에서 높은 온도가 측정되었으며, 발전기나 증속기 등에서 열이 발생하기 때문에 운전시에는 겨울철에도 영상의 온도를 유지하는 것으로 분석되었으며, 상승속도는 계절의 영향을 많이 받지만, 1℃/s 이하인 것으로 분석되었다.

IV. 화재 감지

1. 화재 감지용 센서 특성

1) 연기센서

연기센서는 기체 속에서 완전 연소하지 않는 가연물인 고체 및 액체 미립자가 공기 중에 부유하고 있는 것을 검출하는 장치로써 열 감지기보다 우수한 화재반응도를 가진다. 일반적인 연기센서는 이온전류의 변화를 이용한 이온화식 연기센서와, 광전소자에 비추는 광선의 양이 변화하는 것을 이용한 광전식 연기센서 등이 있으며 연기센서는 동작반응시간이 상당히 빨라 초기화재의 조기감지 이점이 있다. 또한 축적형과 비축적형의 두 가지 방식이 있는데, 이 두 방식은 원리적으로는 같으나 비축적형은 연기의 순간적인 농도를 검출하여 작동하는데 비해 축적형은 연기를 어느 시간만큼 축적하였을 때 작동하는 것으로 보통 20초에서 30초가 경과한 후에 작동하도록 되어 있으며, 감도에 따라 1종에서 3종으로 나누어진다.[25]

화재 감지를 위한 연기센서는 이온화식 연기센서인 DS-SD-003모델을 사용하였다. 이온화식 연기센서는 공기 속에 포함된 이온에 의해 전류가 흐르는데 화재가 발생하면 연기에 의해 센서 공간에 미립자가 들어가서 이온을 흡착하여 전하를 뺏기 때문에 흐르던 전류가 감소된다. 이 전류의 변화를 검출하는 것이 이온화식 연기센서의 원리이며 연기의 색상에는 영향을 받지 않는다.

Table 5는 연기센서의 특성을 나타내고, Fig. 21은 일정 연기농도가 유지되는 공간에 연기센서를 투입하여 측정된 응답 특성을 나타내는데, 상승시간은 약 5.45초이며 상승속도는 약 6.4%/(foot · s)정도로 연기센서 중에는 응답속도가 빠른 편이다.

Table 5 Features of smoke sensor

Supply voltage	9 V	
Current consumption	15 ± 2 pA	
Output in clean air	5.5 ± 0.5 V	
Smoke sensitivity	1.2 ± 0.3 V	
Temp. & humidity operation	Temperature	-10~+60℃
	Humidity	Less than 95%RH

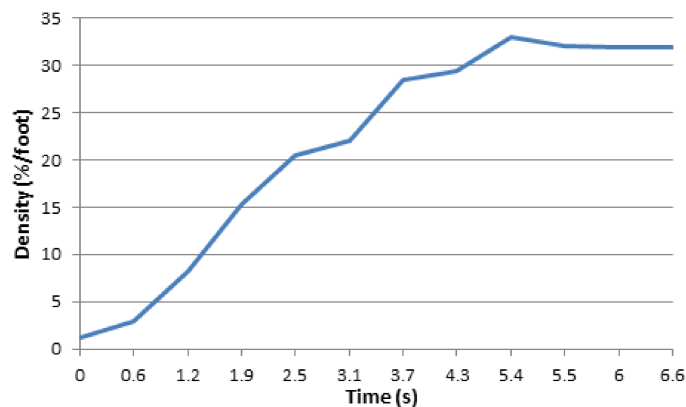


Fig. 21 Response characteristics of smoke sensor

2) 온도센서

화재 감지를 위한 온도센서는 Table 6과 같은 Thermocouple K-type을 사용하였다. 열전대는 두 종류의 금속선 양단을 전기적으로 접속시키고 이 양단에 온도차를 주면 회로 중에 전류가 흐르는 지백 효과를 이용한 것으로 기준 접점의 온도를 일정온도로 유지하고, 두 종류의 서로 다른 도체나 반도체의 두 끝을 접합하여 2접점을 다른 온도로 유지할 때 회로에 새기는 기전력인 열기전력의 수

치를 측정함으로써 다른 접점의 온도를 알 수 있는 원리를 이용한 것이다.[26] Fig. 22는 100℃로 끓는 물을 이용한 온도센서의 응답특성을 나타낸다. 최대 상승속도는 243.3℃/s정도 이며 상승시간이 0.41초 정도이므로 응답특성이 상당히 양호한 특성을 보인다.

Table 6 Features of temperature sensor

Type	K
Positive	Chromel
Negative	Alumel
Temperature range	-200~+1250℃
Diameter	0.5∅

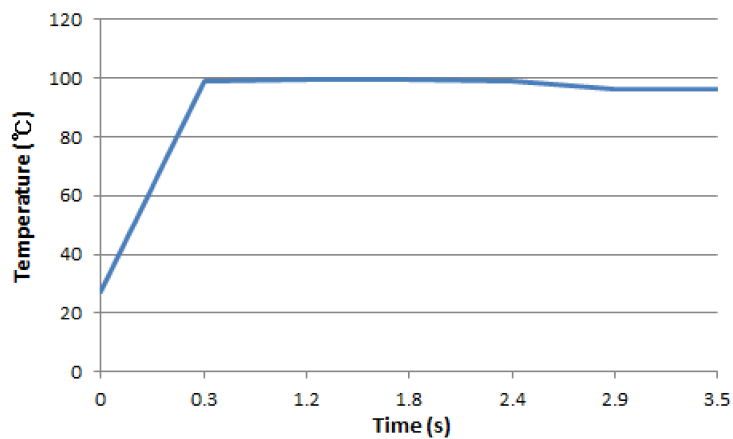


Fig. 22 Response characteristics of temperature sensor

2. 화재 감지 알고리즘

1) 화재 감지 변수 선정

일반적으로 화재가 발생하면 변화하는 변수는 크게 온도, 산소농도, 연기농도, 그리고 조도 등이 있다. Table 7은 III 장에서 분석한 나셀 내부 환경특성 분석결과를 나타내며 이 결과를 이용하여 화재를 조기에 감지하기 위한 변수를 선

정하였다. 나셀 내부 환경특성을 분석한 결과 온도 및 연기농도의 절댓값과 상승률은 비교적 작은 값이지만 조도의 경우에는 절댓값 및 상승률이 대단히 큰 것으로 분석되었다.

Table 7 Characteristics of Nacelle Environment

	Temperature	Smoke density	Illumination
Maximum Value	47.7°C	6%/foot	23,153lux
Maximum rising rate	0.97°C/s	0.0038%/(foot · s)	20,876lux/s

온도의 경우는 화재 발생 시 초기부터 온도가 꾸준히 상승하는 경향을 보이므로 온도의 절댓값으로 화재를 판단할 수 있다. 그러나 여름철과 겨울철의 주변 환경온도는 큰 차이를 보이므로, 여름철을 기준으로 온도의 절댓값으로 화재를 판단할 경우 겨울철에는 설정한 온도에 도달하기까지의 시간이 여름철 보다 길기 때문에 화재의 조기감지가 어려울 수 있다. 따라서 온도의 절댓값보다는 온도 상승률을 기반으로 화재를 감지함으로써 계절에 따른 주변 환경 온도의 영향을 최소화 할 수 있다.

연기농도의 경우는 비화재시에 나셀 내부의 농도가 3~6%/foot 정도로 변하고 있으므로 그 값은 작지만 두 배 이상의 변화폭을 보이고 있다. 또한 연기농도 역시 황사나 안개 등으로 인해 날씨에 따라 큰 차이를 보이므로 온도와 마찬가지로 그 절댓값으로 화재를 판단하기보다는 상승률로 판단함으로써 외부 환경 영향을 최소화 할 수 있다.

조도의 경우는 온도 및 연기농도와 달리 그 절댓값 및 상승률의 변화폭이 매우 클 뿐만 아니라 잦은 변화를 보이는 특징을 나타낸다. 따라서 조도는 외부 빛이 차단된 환경에서는 화재발생 변수로 가장 효과적이지만 나셀 환경과 같이 외부 빛이 유입되는 환경에서는 조도의 절댓값 및 조도 상승률이 크므로 초기 화재에 의한 조도 및 조도상승률과 구별이 쉽지 않기 때문에 화재 조기감지 변수로 적합하지 못하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 비화재보를 최소화하기

위해서 안전한 온도와 연기농도의 상승률을 화재 감지 변수로 선정하여 이를 바탕으로 화재 조기감지 및 화재 위치 판별 방법을 연구하였다.

2) 화재 조기감지 및 위치 판별

Fig. 23과 Fig. 24는 전기화재 및 유류화재시의 온도 및 연기농도 상승률을 알아보기 위해 예비실험을 수행 한 결과이다. 실험은 발화지점으로부터 0.3m 떨어진 지점에서 측정된 시간에 따른 온도 상승률 및 연기농도 상승률을 나타낸다.

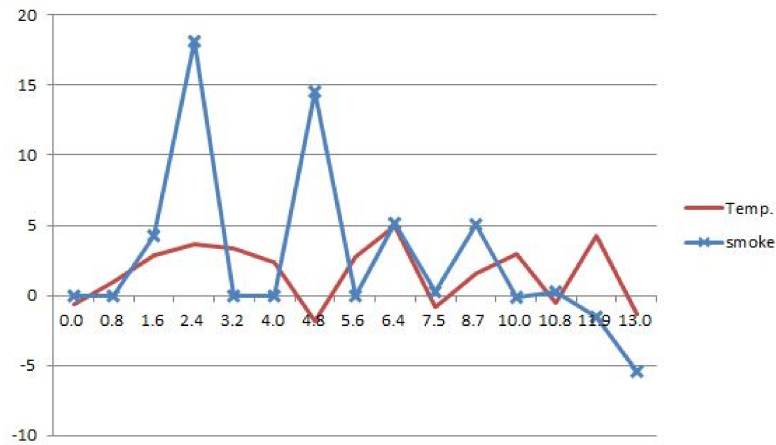


Fig. 23 Rising rates of temperature and smoke density (electric fire)

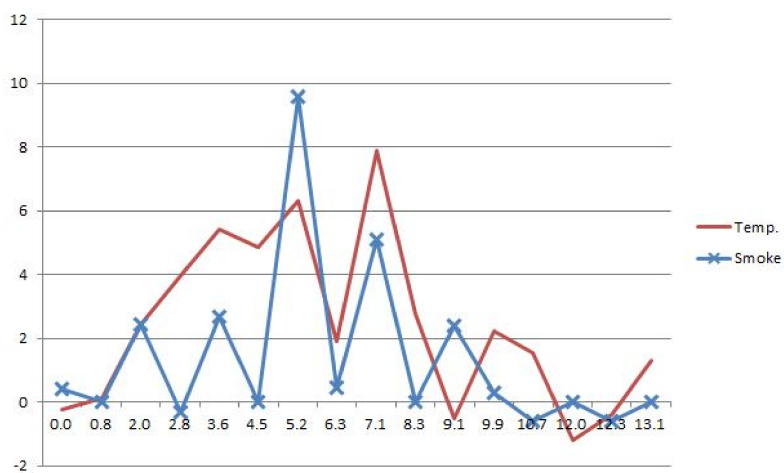


Fig. 24 Rising rates of temperature and smoke density (oil fire)

발화 후 1.6초 후에는 온도 및 연기농도 상승률이 2.9°C/s 및 4.2%/((foot · s)에 달하는 것을 알 수 있다. 상승률의 변화가 심한 것은 화재 발생시에 화원의 크기가 수시로 달라지고, 불규칙한 대류가 발생하여 센서에 도달하는 공기의 온도 및 연기농도가 심하게 변화하기 때문이다. 초기에 온도의 상승률 및 연기농도 상승률은 화재 종류에 따라 다소 차이가 있지만, 두 경우 모두 초기에는 온도의 상승속도가 연기농도의 상승속도보다는 큰 것을 나타낸다.

화재 조기감지를 위해서는 온도 상승률만으로도 가능하지만, 나셀 내부에는 고가의 장치가 다수 설치되어 있기 때문에 화재가 아님에도 화재로 감지될 경우 화재 진압을 위한 방제액이나 가스 분출로 인하여 장비에 막대한 손실을 유발할 수 있다. 따라서 화재 감지의 신뢰성을 높이고, 비화재보를 최소화하기 위하여 온도 상승률 및 연기농도 상승률을 동시에 고려하여 Table 8과 같은 화재 조기 감지 알고리즘을 설정하였다. T_f 는 온도상승률의 화재 발생 기준값이며 S_f 는 연기농도 상승률의 화재 발생 기준값을 나타낸다. 온도상승률과 연기농도 상승률 중 하나가 설정된 기준값 이상이 되면 화재주의를 발령하고, 이후 나머지 하나의 변수가 기준 값 이상이 되면 화재경보로 판단한다.

Table 8 Early fire detection algorithm

Fire warning	$T_f=ON$ and $S_f=OFF$
	$T_f=OFF$ and $S_f=ON$
Fire	$T_f=ON$ and $S_f=ON$

T_f 와 S_f 는 Table 7의 나셀 환경특성 결과와 화재 예비실험으로부터 설정하였다. 화재 시의 최소 온도 및 연기농도 상승률보다 작은 값일수록 감지시간이 빠르겠지만 전술한 바와 같이 비화재보에 의한 장비손실을 최소화하기 위하여 기준값들은 화재시 최소 온도 상승률 및 연기농도 상승률 보다는 약간 높은 값이며, 나셀 내부 환경의 비화재시 최대 온도상승률 및 연기농도 상승률보다는 크도록 온도상승률은 3°C/s, 연기농도 상승률은 4.5%/((foot · s)로 설정하였다.

나셀 내부는 공간이 비교적 넓으며 피해를 최소화 하기위해 화재 조기에 감지하여 진압해야한다. 화재 다발 지역마다 화재 감지 센서를 설치하면 화재가 발

생해서 화재 감지된 구역에만 방제액을 분사함으로써 조기진압이 가능한 동시에 방제액으로 인한 다른 장비의 손상이 최소화 될 수 있다. 그러므로 화재 조기감지 뿐만 아니라 화재가 발생한 위치를 판단할 필요가 있다. 화재발생 위치는 화재 발생시에 여러 위치에 설치된 센서들의 화재 감지 시간차로부터 판단한다. 즉 화재 발생시에 열기나 연기는 화재 발생위치로부터 거리가 멀어질수록 전달이 늦어지기 때문에 화재발생 위치에 가장 가까운 센서가 가장 먼저 감지하며, 거리 순으로 감지 시간이 늦어진다. 따라서 가장 먼저 화재 주의를 발령한 위치를 화재 발생 위치로 판단한다.

V. 실험 및 결과

1. 화재 감지 시뮬레이터 구성

Fig. 25는 나셀 화재 시뮬레이션을 위해 제작한 시뮬레이터의 외부와 내부 모습이다. 시뮬레이터의 크기는 가로 2m, 세로 1.4m, 높이 0.9m로 제작하였다.



Fig. 25 Fire simulator

Fig. 26은 제작한 시뮬레이터의 구성도이며, 시뮬레이터 내부에는 가스버너와 스토브 같은 화재 발생장치들을 설치하였고, 정확한 화재 시점을 알기 위하여 화재 발생장치 제어기를 설계하여 데이터 수집용 컴퓨터와 연결하였다.

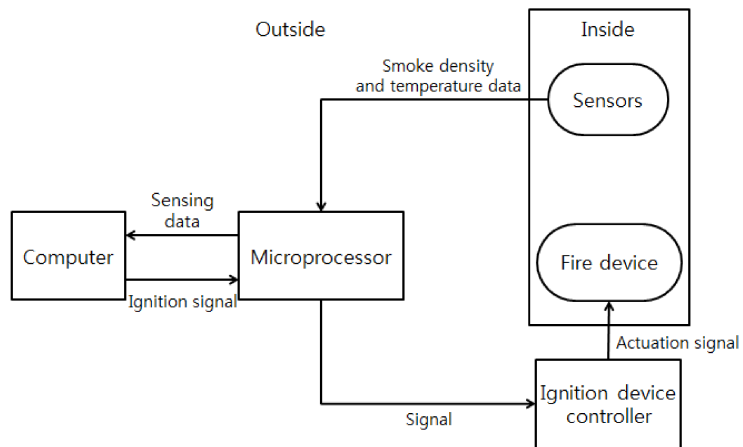


Fig. 26 Simulator diagram

Fig. 27은 화재 감지용 센서부로써 연기센서와 온도센서로 구성되어 있고, Fig. 28은 화재 감지용 센서부의 설치도이다. 화재를 거리별로 분석하기 위하여 가스버너 직상단에 감지기 1을 설치하였고 그로부터 0.5m, 1m, 1.5m로 거리를 두고 감지기 2~4를 설치하였다. 컨트롤 박스와 센서부들은 마이크로컨트롤러 ATmega128을 통해 컴퓨터로 연결되어 화재 감지 프로그램을 구동하여 화재 발생장치들의 제어 및 데이터통신이 가능하게 구성하였다. 데이터는 컴퓨터에 전송되어 화재 감지 및 위치를 판단하고 저장할 수 있다.

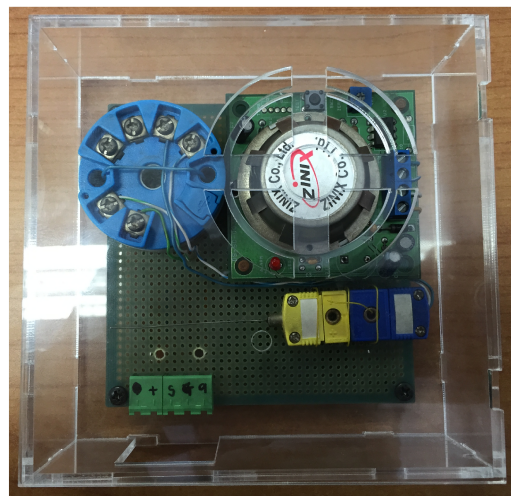


Fig. 27 Fire sensors

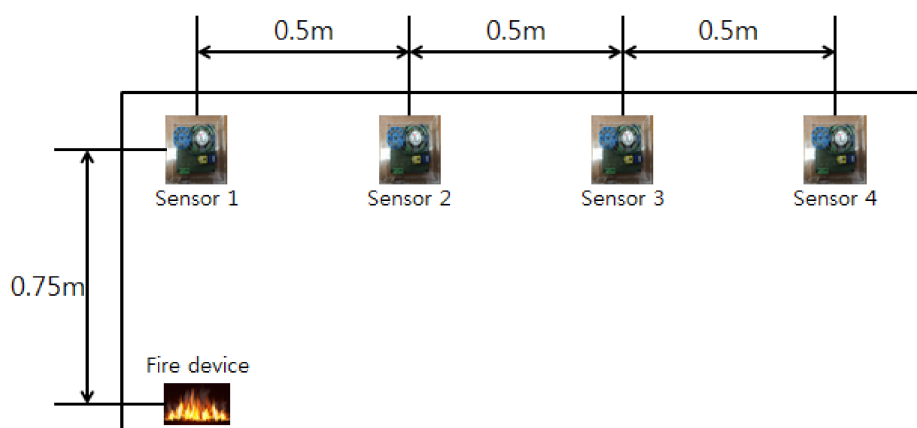


Fig. 28 Location of sensors

Fig. 29는 시뮬레이터 내부에 설치한 센서와 통신하고 데이터를 저장하기 위해 작성한 프로그램의 알고리즘이다. 컴퓨터에서 마이크로프로세서의 AVR포트와 통신 속도를 설정하고 시리얼 통신을 연결하면 센서들에게 전원이 연결되며, 데이터를 마이크로프로세서에 전송하기 시작한다. 마이크로프로세서에서는 이 데이터들을 A/D변환하고, 값을 보정하기 위하여 16번 수신된 데이터의 평균값을 계산한다. 이 값들은 컴퓨터로 보내지고, 각각의 센서별로 단위환산을 통하여 화면에 송출되고 데이터는 저장한다.

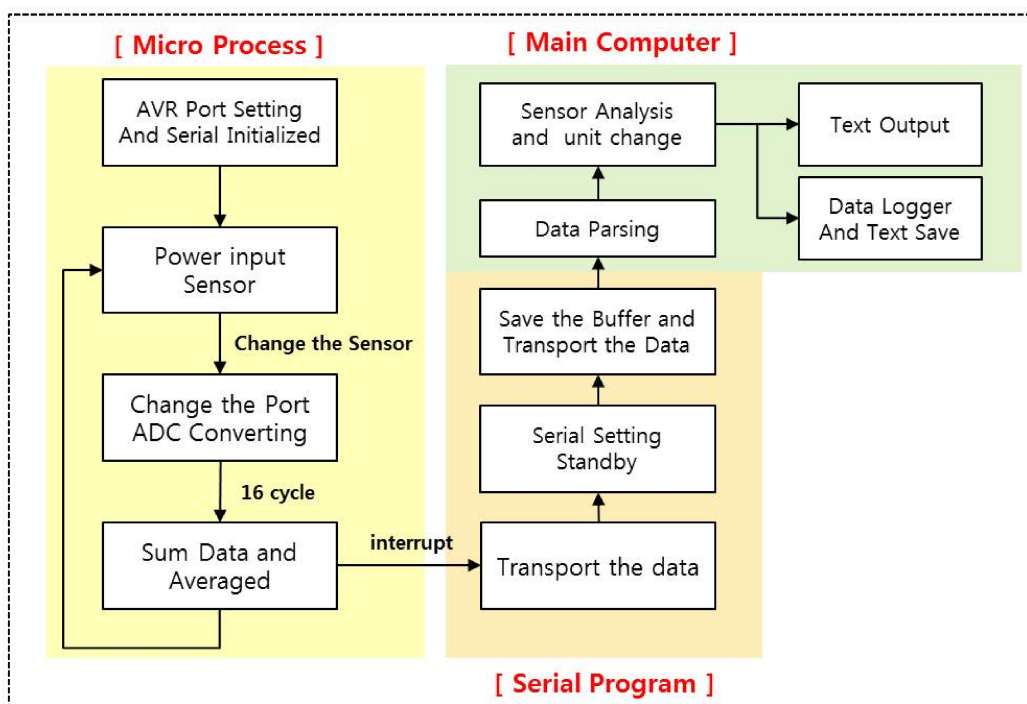


Fig. 29 Simulator algorithm

Fig. 30은 화재 감지 프로그램을 구동시킨 화면이다. connect 부분에서 포트와 속도를 설정한 후, open 버튼을 클릭하면 시리얼통신이 시작되며 화면에 데이터 값이 나타난다. 불꽃 시간은 가스버너가 점화된 후 화재를 유지하는 시간으로 시간을 설정한 이후 불꽃 버튼을 클릭하면 가스버너가 점화하게 된다. 실험의 다양한 조건을 만들기 위하여 설치한 열 발생기와 포그머신을 작동시키기 위한 열과 연기 버튼이 있으며, 화재 점화 후 화재주의나 화재가 감지되면 불꽃을 점화 시킨 시점부터 경과된 시간을 계산하여 화면에 표시하고 해당 체크박스가 체크된다. 또한 화재의 위치 판단도 화면에 표시되며 모든 정보는 시리얼 통신이 시작된 시점부터 자동 저장된다.



Fig. 30 Fire detector program

2. 실험과정

실험은 실제 풍력발전시스템 나셀 화재 분석 결과를 토대로 나셀에서 빈번히 발생하는 전기화재와 유류화재로 구분하여 수행하였다. 전기화재는 시뮬레이터 내부의 점화원인 가스버너로부터 0.02m 높이에 가연물 PVC전선 $2.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ 을 설치한 뒤 시스템을 작동시켜 가연물을 점화시켰다.

유류화재는 전기화재와 마찬가지로 점화원으로부터 0.02m 높이에 가연물인 윤활유를 적신 종이를 설치하여 실시하였다. 유류화재가 발생하는 원인은 주로 유류장치 외부에 오염되거나 유출된 유류에서 전기장치 등의 과열로 인하여 유류 점화되는 경우가 많기 때문에 과열을 모사하기 위하여 스토브를 일정시간 작동시켜 내부의 온도를 꾸준히 상승시킨 다음 점화원을 작동시켜 가연물을 연소시켰으며 점화원을 작동한 시점부터 화재를 감지한 시간을 측정하였다. Fig. 31은 전기화재와 윤활유화재의 실험장면이다.



Fig. 31 Fire detection simulation

3. 실험 결과

1) 전기화재 실험 결과

Table 9는 각각의 위치에 설치된 4 세트의 화재 감지기에서 전기화재를 감지한 결과를 나타낸다. 화재는 감지기 1 위치 부근에서 발생시켰다. 화재주의

(warning)는 온도 상승률이나 연기농도 상승률이 최초로 기준값에 도달하기까지의 시간을 나타내며, 화재경보(fire)는 나머지 변수가 화재 발생 기준값에 도달한 시간을 나타낸다. 전기화재 실험결과 모두 실제 화재 발생 위치 부근인 감지기 1에서 먼저 화재 주의 및 경보가 발령되었다.

Table 9 Result of electrical fire (unit: sec)

NO.	Detector 1		Detector 2		Detector 3		Detector 4		Fire position
	Warning	Fire	Warning	Fire	Warning	Fire	Warning	Fire	
1	2.5	2.5	6.8	7.6	7.6	8.5	10.2	11.0	1
2	2.5	3.4	5.9	8.5	5.9	9.7	11.5	16.7	1
3	3.4	3.4	5.9	9.5	5.9	9.5	8.3	16.7	1
4	3.4	3.4	5.9	6.8	5.9	10.4	8.0	15.0	1
5	2.5	3.4	4.2	6.9	5.1	7.6	8.5	8.5	1
6	3.0	4.2	6.8	6.8	8.0	3.2	10.0	15.0	1
7	2.5	3.4	5.9	7.6	6.8	7.6	9.9	10.2	1
8	1.7	2.5	4.2	5.4	6.8	6.8	9.3	10.2	1
9	2.2	2.2	4.7	4.7	4.7	6.4	7.3	9.8	1
10	2.5	2.5	5.9	5.9	5.9	7.8	7.8	11.9	1
Average	2.6	3.1	5.6	7.0	6.3	8.6	9.1	12.5	1
Maximum	3.4	4.2	6.8	9.5	8	11.2	11.5	16.7	1
Minimum	1.7	2.2	4.2	4.7	4.7	6.4	7.3	8.5	1

감지기 1 위치에서의 화재주의는 평균 2.6초였고, 화재경보는 평균 3.1초, 최대가 4.2초였다. 감지기 2 위치에서의 화재주의는 평균 5.6초, 화재경보는 평균 7.0초, 최대가 9.5초였고, 감지기 3 에서의 화재주의는 평균 6.3초, 화재경보는 평균 8.6초, 최대가 11.2초였다. 감지기 4 위치에서의 화재주의는 평균 9.1초, 화재

경보는 평균 12.5초, 최대가 16.7초였다. 실험 결과 화재 위치에서부터 거리가 멀어질수록 화재주의와 화재경보 시간차이는 점점 벌어지는 것으로 나타났다. 이는 거리가 멀어질수록 연기 상승률이 천천히 기준값에 도달하기 때문이다.

Table 10은 전기화재 실험의 분석 결과로 감지기 1 위치로 부터의 시간차이를 나타낸다. 화재 발생 위치인 감지기 1 위치로부터 최소거리인 감지기 2 위치 사이의 최소 감지 시간차는 2.5초, 최대 감지 시간차는 6.1초 평균 감지 시간차는 3.9초인 것으로 분석되었다.

Table 10 Detection time according to distance for electrical fire (unit: sec)

No.	Detector 2	Detector 3	Detector 4
1	5.1	6.0	8.5
2	5.1	6.3	13.3
3	6.1	6.1	13.3
4	3.4	7.0	11.6
5	3.5	4.2	5.1
6	2.6	7	10.8
7	4.2	4.2	6.8
8	2.9	4.3	7.7
9	2.5	4.2	7.6
10	3.4	5.3	9.4
Average	3.9	5.5	9.4
Maximum	6.1	7.0	13.3
Minimum	2.5	4.2	5.1

Fig. 32는 전기화재 실험의 대표적인 실험결과로 Table 9에서 첫 번째 실험의 결과를 나타낸 것이다. 실선은 연기센서를 점선은 온도센서를 뜻하며 감지기 위치는 표식으로 구분하였다. 화재발생 이후 2.5초 후에 감지기 1 위치에서 온도 상승률과 연기농도 상승률이 기준값을 넘어서 화재주의와 화재경보를 발령하였으며, 6.8초 후에 감지기 2 위치에서 온도 상승률이 기준값을 넘어 화재주의를 발령하였다. 이후 7.6초 후에 나머지 변수인 연기농도 상승률이 기준값을 넘어 감지기 2 위치에서 화재경보가 발령 되었고 감지기 3 위치에서 온도 상승률이 기준값을 넘어 화재주의를 발령하였다. 또한 8.5초 후에 연기농도 상승률이 기준값을 넘어 감지기 3 위치에 화재 경보를 발령하였고, 10.2초에 온도 상승률이 기준값을 넘어 감지기 4 위치에 화재 주의를, 11.0초에 연기농도 상승률이 기준값을 넘어 화재 경보를 발령하였다. 이와 같이 전기화재는 온도 상승률이 먼저 기준값 도달하는 것을 알 수 있다.

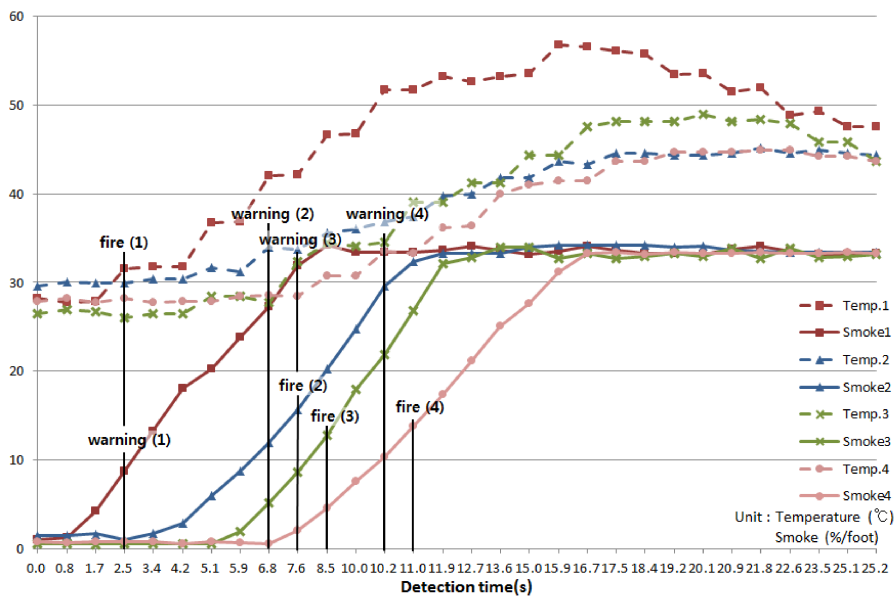


Fig. 32 Result of electrical fire

2) 유류화재 실험 결과

Table 11은 유류화재의 실험결과를 나타낸다. 유류화재 실험결과 모두 실제 화재 발생 위치 부근인 감지기 1에서 먼저 화재 주의 및 경보가 발령되었다. 감

지기 1 위치에서의 화재주의는 평균 2.7초였고, 화재경보는 평균 3.6초, 최대가 5.9초였다. 감지기 2 위치에서의 화재주의는 평균 4.7초, 화재경보는 평균 6.0초, 최대가 6.5초였고, 감지기 3 에서의 화재주의는 평균 5.9초, 화재경보는 평균 6.8 초, 최대가 7.6초였다. 감지기 4 위치에서의 화재주의는 평균 7.4초, 화재경보는 평균 8.3초, 최대가 9.3초였다. 실험 결과 유류화재는 전기화재와는 달리 연기가 많이 발생하였으며 그 결과 연기 상승률이 빠르게 감지가 되어서 거리에 따른 화재주의 및 화재경보 시간차이는 비슷하였고, 거리가 먼 센서까지 빠르게 감지가 되었다.

Table 11 Result of oil fire (unit: sec)

NO.	Detector 1		Detector 2		Detector 3		Detector 4		Fire position
	Warning	Fire	Warning	Fire	Warning	Fire	Warning	Fire	
1	2.5	4.0	4.9	5.7	5.7	6.5	7.4	8.2	1
2	1.7	4.0	4.0	5.4	5.7	5.7	7.4	7.4	1
3	4.0	4.0	4.9	5.7	5.7	7.4	7.4	8.3	1
4	2.5	4.0	4.9	6.5	4.9	6.5	7.4	7.4	1
5	3.0	3.0	4.6	6.3	6.3	6.3	7.1	8.7	1
6	1.7	2.5	4.9	5.7	6.4	7.4	7.4	9.1	1
7	2.5	2.5	4.9	6.5	6.5	6.5	7.4	7.4	1
8	3.0	3.0	3.9	5.5	6.4	7.2	7.2	8.1	1
9	1.7	3.0	4.7	6.4	4.7	6.4	7.3	8.9	1
10	4.2	5.9	5.5	6.7	6.7	7.6	8.4	9.3	1
Average	2.7	3.6	4.7	6.0	5.9	6.8	7.4	8.3	1
Maximum	4.2	5.9	5.5	6.5	6.7	7.6	8.4	9.3	1
Minimum	1.7	2.5	3.9	5.4	4.7	5.7	7.1	7.4	1

Table 12는 유류화재 실험의 분석결과로 감지기 1 위치로 부터의 시간차이를 나타낸다. 화재 발생위치인 감지기 1 위치로부터 최소거리인 감지기 2 위치 사이의 최소 감지 시간차는 0.8초, 최대 감지 시간차는 4초 평균 감지 시간차는 2.5초 인 것으로 분석되었다.

Table 12 Detection time according to distance for oil fire (unit: sec)

No.	Detector 2	Detector 3	Detector 4
1	1.7	2.5	4.2
2	1.4	1.7	3.4
3	1.7	3.4	4.3
4	2.5	2.5	3.4
5	3.3	3.3	5.7
6	3.2	4.9	6.6
7	4.0	4.0	4.9
8	2.5	4.2	5.1
9	3.4	3.4	5.9
10	0.8	1.7	3.4
Average	2.5	3.2	4.4
Maximum	4.0	4.9	6.6
Minimum	0.8	1.7	3.4

Fig. 33은 유류화재 실험의 대표적인 실험 결과로 Table 11에서 첫 번째 실험 결과를 나타낸 것이다. 화재발생 이후 2.5초 후에 감지기 1 위치에서 온도 상승률이 기준값을 넘어서 화재주의를 발령하였으며, 4.0초 후에 나머지 변수인 연기농도 상승률이 기준값을 넘어 감지기 1위치에 화재경보를 발령하였다. 4.9초 후에 감지기 2위치에서 연기농도 상승률이 기준값을 넘어 화재주의를 발령하였다. 이후 5.7초 후에 나머지 변수인 온도 상승률이 기준값을 넘어 감지기 2 위치

에서 화재경보가 발령되었고 감지기 3 위치에서 온도 상승률이 기준값을 넘어 화재주의를 발령하였다. 이후 6.5초에 연기농도 상승률이 기준값을 넘어 감지기 3 위치에 화재경보를 발령하였고, 7.4초에 연기농도 상승률이 기준값을 넘어 감지기 4 위치에 화재주의를, 8.2초에 온도 상승률이 기준값을 넘어 화재경보를 발령하였다. 유류화재는 전기화재보다 먼 곳까지 화재가 빠르게 감지되며, 화원의 크기가 커서 첫 번째 위치에 설치한 감지기 1에서 온도가 급격히 상승하는 것으로 보이고, 또한 연기가 많이 발생하여 온도 상승률보다 연기농도 상승률이 먼저 기준값에 도달하는 것으로 분석되었다.

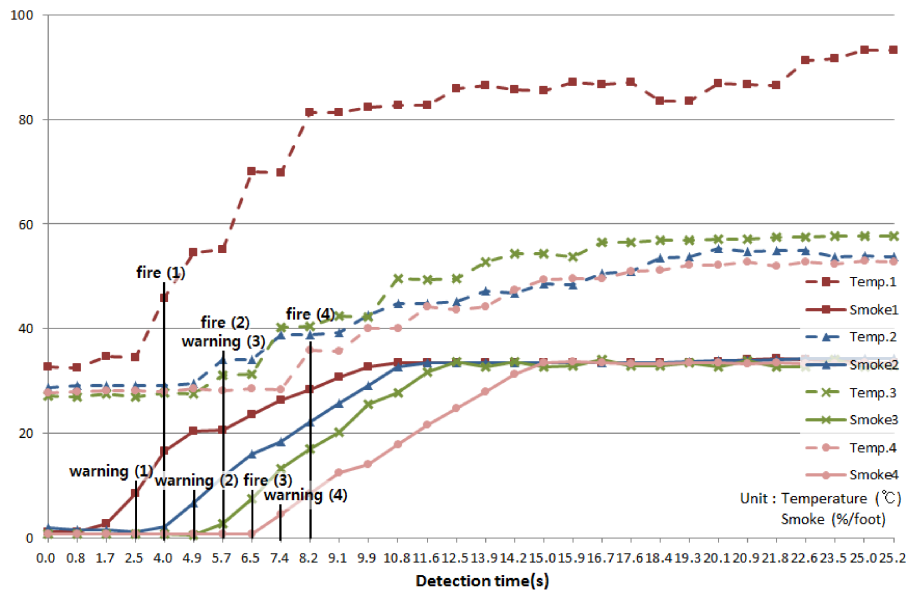


Fig. 33 Result of oil fire

3) 종합 결과

Table 13은 전기화재와 유류화재를 통합한 각 위치에서의 화재 감지 시간 특성을 나타낸다. 화재 발생 위치인 감지기 1 위치에서 최소 감지시간은 2.2초, 최대 5.9초, 그리고 평균 3.3초로써, 제안된 방법으로 화재를 감지할 경우 화재 발생 5.9초 이내에 화재를 감지 할 수 있음을 나타낸다. 실제 풍력발전시스템의 나셀은 화재 시뮬레이터보다 공간이 넓기 때문에 화재 감지시간이 더 길어질 수 있으나, 나셀 내부에 화재 다발 지역 직상단에 센서를 설치할 경우 실제 화재 발

생 위치와 센서 위치 사이의 거리가 대략 1m 이내가 될 것으로 예상되기 때문에 최악의 경우 5.9초 이내에는 화재를 감지할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 13 Detection time according to distance (unit: sec)

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Minimum	2.2	4.7	5.7	7.4
Maximum	5.9	9.5	11.2	16.7
Average	3.3	6.5	7.7	10.4

Table 14는 전기화재와 유류화재를 통합한 거리별 화재 감지 시간차를 나타낸다. 화재 발생위치인 감지기 1 위치에서 가장 인접한 위치인 감지기 2 위치의 화재 감지 최소 시간차는 0.8초, 최대 6.1초 그리고 평균 3.2초임을 나타낸다.

Table 14 Time difference between sensor 1 and the other sensor positions (unit: sec)

Sensor position	2	3	4
Minimum	0.8	1.7	3.4
Maximum	6.1	7.0	13.3
Average	3.2	4.3	7.1

실제 나셀에 화재 다발구역에 센서를 설치할 경우 센서간의 거리는 본 연구에서의 거리차인 0.5m보다 클 것이다. 따라서 센서간의 감지되는 시간차는 더욱 벌어질 것으로 예상되기 때문에 화재 위치 판별 역시 신뢰성이 클 것으로 판단된다.

4. 화재 조기감지 시스템 설계

개발된 화재 조기감지 및 화재 위치 판별 방법을 바탕으로 실제 풍력발전시스템 나셀에 설치하기 위한 화재 감지 시스템을 설계하였다. Fig. 34는 설계된

시스템의 회로도이다. 마이크로프로세서는 실험에서 사용한 모델과 동일한 모델인 ATmega 128을 이용하였다. 이 시스템은 컴퓨터와의 연결이 불필요하기 때문에 마이크로프로세서에서 A/D변환뿐만 아니라 단위 환산과 화재 감지 및 위치를 판단하도록 프로그램을 수정하였다. II장에서의 분석 결과에서 화재 다발구역은 총 4 부분으로 구분 되었지만, 나셀의 크기에 따라 센서의 설치 개수를 설정할 수 있도록 1개에서 4개까지 센서의 개수를 설정하는 덤스위치를 구성하였다. 또한 진압 시스템과의 연동을 위하여 화재가 감지되고 위치가 판단되면 그 위치에 신호를 보내는 방식으로 진압연동이 가능하도록 설계하였다. 입력 커넥터를 통하여 들어온 화재 감지 센서의 데이터 값은 ATmega 128에서 A/D변환하고 단위환산을 하여 LCD창에 표시하게 된다. 화재가 감지되면 출력포트로 신호를 주며, 화재 위치정보가 LCD창에 나타나게 된다.

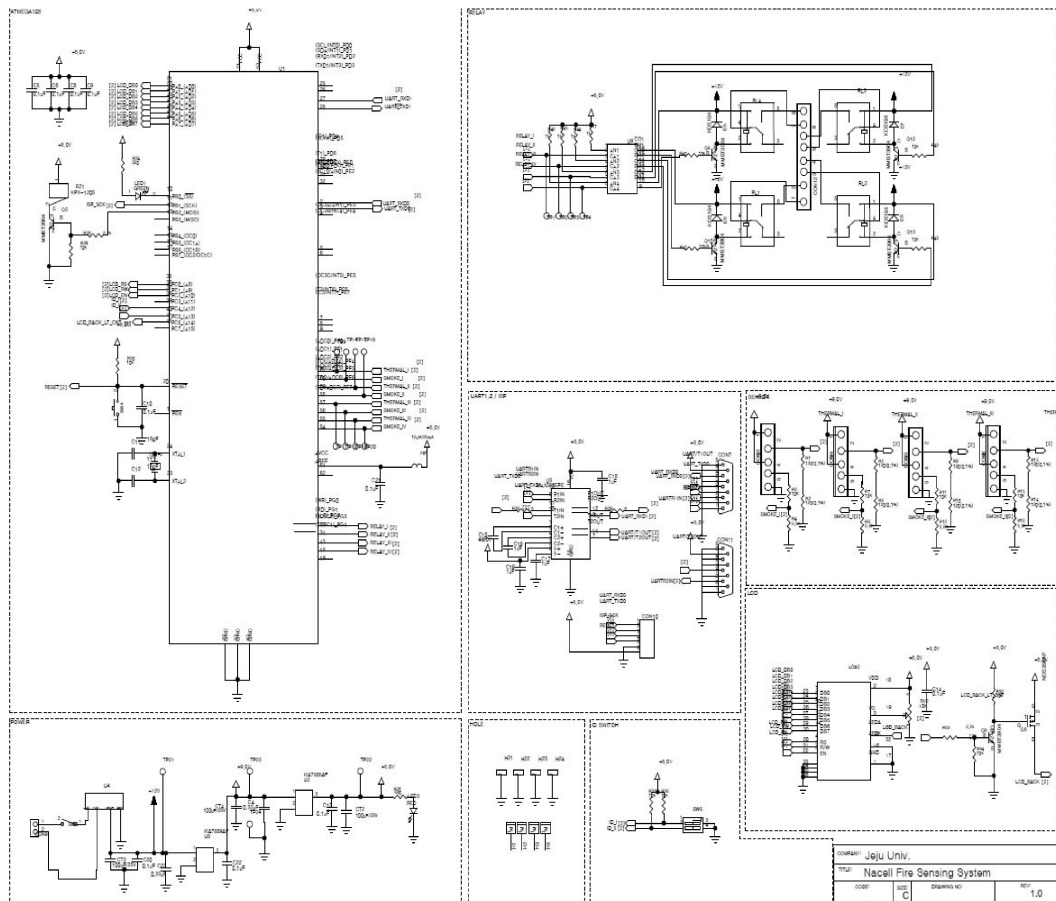


Fig. 34 Circuit diagram of fire detection system

Fig. 35의 (a)는 제작된 화재 조기감지 시스템의 모습이다. 외부에는 그림 (b)와 같이 센서부와 연결하는 입력 커넥터 4개와 화재 진압부분에 연결하는 출력 커넥터 4개가 구성되어있다. 전원 스위치 옆에는 그림 (c)와 같이 센서부의 개수를 1개에서 4개까지 설정 가능한 덤스위치가 있다. 센서 개수 설정 후 전원을 켜면 센서 감지가 시작되며, 데이터 값과 화재 감지 및 화재 위치정보는 LCD 창을 통하여 확인할 수 있다.



(a) Fire detection module



(b) Output and input connectors



(c) Serial ports and dip switch

Fig. 35 Fire detector system

Fig. 36은 실제 풍력발전시스템 나셀에 화재 감지모듈을 설치한 모습이다. 2015년 4월 말부터 Vestas사 풍력발전시스템 660kW급인 V47모델 나셀 내부에 화재 감지 모듈을 설치 완료하여 운영하고 있다. 센서는 나셀 내부에 컨트롤 박스와 발전기 부근에 2개를 설치하였다.



Fig. 36 Fire detection system installation

VI. 결 론

본 연구에서는 풍력발전시스템 나셀 내부의 환경특성을 분석하고 그 결과를 바탕으로 화재 조기감지기 및 화재 위치 판별 방법을 개발하였다. 제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이터를 제작하여 화재 종류별 및 거리 별로 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 나셀 내부의 환경을 분석한 결과 조도는 값이 크고, 변동이 심하며, 주간의 값이 실제 화재시의 값보다 크기 때문에 화재 감지를 위한 변수로는 적합하지 않았으며, 온도는 발전기 부근이 높은 온도를 갖고 겨울철에도 20도 이상을 유지하였다. 연기농도는 변화가 거의 없는 것으로 분석되었다.
- (2) 나셀 화재 분석결과 유류화재가 가장 많이 발생하였으며 그다음 전기화재였다. 또한 위치별로는 발전기, 브레이크 디스크와 컨트롤 박스의 순으로 화재가 자주 발생하는 것으로 분석되었다.
- (3) 계절 변화 및 환경 변화에 따른 영향을 최소화하기 위해 연기농도와 온도 상승속도를 이용하여 화재 조기감지 및 화재 위치 판별 알고리즘을 개발하였다. 실제 실험을 통해 개발된 화재 감지 방법의 성능을 실험한 결과 주변 환경 변화에도 불구하고 신뢰성이 있음이 입증되었다.
- (4) 전기화재 및 유류화재 실험 결과 주로 온도가 먼저 화재 기준값에 도달하는 경향이 있으며, 유류화재의 경우 연기가 많이 발생하여 먼 거리에서는 전기화재보다 유류화재가 더 빠르게 감지되는 것으로 분석되었다.

(5) 개발된 화재 조기감지 및 위치 판별 방법은 나셀 내부의 환경특징을 최대한 반영함으로써 비화재보의 가능성을 최소화 하였다. 이 방법을 화재진압 시스템과 연동하면 무인 자동 방재가 가능하며 이미 설치되어있는 풍력발전시스템에도 구조변화 없이 적용 가능하다. 거리에 따른 화재 경보 감지 시간차를 이용한 화재 위치 판별함으로써 화재다발구역에 센서들을 설치하면 화재 발생시 화재 위치에 국소적인 조기 화재진압이 가능하여 장비 손상이 최소화 될 것으로 예상되며 대형 화재로 발전하기 전에 조기 진압이 가능할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] New and renewable energy center, <http://www.energy.or.kr>, 2015 renewable energy policy, 2015.
- [2] Lim, J. H., “Optimal Combination and Sizing of a New and Renewable Hybrid Generation System,” *Int. J. of Future Generation Communication and Networking*, Vol.5, No.2, pp.43-60, 2012.
- [3] 국민안전처, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률 시행령
- [4] CWIF, <http://www.caithnesswindfarms.co.uk>, Summary of Wind Turbine Accident Data to 30 June 2014.
- [5] NEWSIS, http://www.newsis.com/ardetail/view.htmlcID=&arid=NISX20101026_0006500459
- [6] Jejusori, <http://www.jejusori.net/news/articleView.html?idxno=95864>
- [7] YTN, http://www.ytn.co.kr/_ln/0103_201011030408203044
- [8] Energy korea, <http://energykorea.co.kr>
- [9] National Fire Protection Association “Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations,” 2010.
- [10] Vertrauen durch Sicherheit, “Wind Turbines, Fire Protection Guidelines VdS 3523en,” 2008.
- [11] CFPA Europe, “Wind Turbines Fire Protection Guideline,” 2012.
- [12] Aloys, W., “Fire Protection,” KOR Patent, No.7010855, 2004.
- [13] Lee, J. H., “Wind Turbine Generator Having Fire Detection Method,” KOR Patent, No. 0074401, 2013.
- [14] Alejandra, E., “Passive Fire Protection System for Wind Turbines,” EP Patent, No. EP2273110 A2, 2011.
- [15] Lim, J. H., “Optimal Capacity Design and Economic Evaluation of

- Hybrid Generation Systems based on Load Characteristics,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 10, pp. 1103-1109, 2013.
- [16] Kim, D. H. and Lim, J.H., “A Study on the Early Fire Detection based on Environmental Characteristics inside the Nacelle of Wind Turbine Generator System,” Int. J. Korean Soc. Precis. Eng., Bol.31, No.9, pp.847-854
- [17] “화재의 분류” , 산업안전대사전
- [18] European Platform Against Windfarms, <http://www.epaw.org>
- [19] L'union, <http://www.lunion.com>
- [20] NewScientist, <http://www.newscientist.com>
- [21] EAST COUNTY MAGAZINE, <http://www.eastcountymagazine.org>
- [22] Natinal Wind Watch, <http://www.wind-watch.org>
- [23] KCET, <http://www.kcet.org>
- [24] MINT, <http://www.kimt.com>
- [25] doopedia, <http://www.doopedia.co.kr>, thermo couple
- [26] doopedia, <http://www.doopedia.co.kr>, smoke detector

감사의 글

어느덧 2년여 시간이 흘러 석사과정을 마무리하고, 그동안의 공부 결과를 모아 학위논문을 발표하게 되었습니다. 저에게 대학원은 도전이자 큰 기회였습니다. 석사과정을 무사히 마무리하는 데에는 주변 많은 분들의 도움이 있었기에 짧은 글로나마 감사의 마음을 표합니다.

부족한 저에게 하나하나 꼼꼼히 지도해주신 임종환 교수님 진심으로 감사합니다. 기대에 미치지 못한 것 같아 죄송합니다. 언제나 학생들이 발전하도록 연구에 매진할 수 있도록 힘써주시는 허종철 교수님, 항상 감사한 마음입니다. 마이크로프로세서를 다룰 수 있도록 흥미롭게 강의해주신 강철웅 교수님, 풍력에 대하여 열정적으로 지도해주시는 고경남 교수님, 친근하게 상담해주시며 조언해주는 김범석 교수님, 공업 수학을 다시 기초부터 쌓을 수 있도록 강의해주신 조경호 교수님, 바쁘신 와중에도 프로그램에 많은 도움을 주신 양경부 선생님, 그리고 풍력공학부의 행정실 선생님들 감사합니다.

같이 연구실 생활을 하진 않았지만 만나 뵈 때마다 제 미래에 대하여 조언해주는 지능로봇 연구실의 많은 선배님들, 같이 석사 생활을 하며 조언도 해준 정훈오빠, 실험하는 데에 많은 도움을 주고 함께 고생해준 학부생들과 프로그램에 대하여 하나도 모르던 저를 기초부터 알려주신 상섭오빠, 동진오빠와 정규오빠, 덕분에 많은 도움이 되었습니다.

저에게 지표가 되어주시는 풍력공학부 선배님들, 같이 수업 받으면서 힘든 생활을 같이 나눈 동기들에게도 감사를 전합니다.

프로젝트와 논문과정에서 소중한 데이터를 받을 수 있도록 도움을 주신 제주에너지공사와 (주)케이렘에게도 감사드립니다. 이 외에도 도움을 주신 많은 분들께 고마움을 전합니다.

마지막으로 저의 어떠한 선택에도 믿고 지지해주시는 부모님과 항상 힘이 되는 친구 같은 자매 언니와 동생에게 감사의 마음을 바칩니다.

2015. 6

김다희 올림

