

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.12.935>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

풍력발전기 나셀 내부 화재 조기감지 및 화재 위치 판별 방법

김 다 희* · 임 종 환**†

* 제주대학교 대학원 풍력공학부 , ** 제주대학교 메카트로닉스공학과

Methods for Early Fire Detection and Fire Position Determination Inside the Nacelle of Wind Turbine Generator System

Da Hee Kim* and Jong Hwan Lim**†

* Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechatronics, Jeju Nat'l Univ.

(Received June 11, 2015 ; Revised September 17, 2015 ; Accepted September 19, 2015)

Key Words: Wind Turbine(풍력발전기), Nacelle(나셀), Early Fire Detection(화재 조기감지), Fire Position Determination(화재 위치 판별)

초록: 본 논문에서는 풍력발전기 나셀 내부의 화재 조기감지 및 화재발생위치를 판단하는 방법을 제안한다. 화재감지 변수로는 온도와 공기 혼탁도 상승률을 이용하는데, 이것은 온도와 혼탁도의 절대 값과 상관 없이 화재를 감지할 수 있기 때문에 비화재보를 최소화 할 수 있는 방법이다. 화재발생위치는 다수의 화재감지 센서들의 거리에 따른 화재감지 시간차를 이용하였다. 또한 다양한 실험을 통하여 개발된 방법의 성능을 테스트하였다.

Abstract: This paper presents a method for early fire detection and fire position determination inside the nacelle of wind turbine generator system. The rising temperature and obscuration rates inside the nacelle were used as parameters for fire detection, which can minimize the possibility of a fire detection malfunction because these rising rates do not depend on the absolute values of temperature and obscuration. The fire position was determined using the time difference among various sensor positions for fire detection. The performance of the method was tasted using sets of experiments in a nacelle simulator.

1. 서 론

풍력발전기는 정부의 신재생에너지 보급 확대 정책에 따라 시스템의 규모가 대형화 되어가는 추세에 있으며 풍력 발전 단지 또한 급속히 확대되고 있는 실정이다.⁽¹⁻³⁾ 이에 따라서 풍력 터빈의 사고도 증가하고 있다. Caithness Windfarm Information Forum의 조사 결과에 따르면 풍력 터빈의 화재사고는 80년대부터 2014년까지 보고된 풍력 터빈 사고 1662건 중 241건으로 이는 블레이드 고장 사고 309건에 이어 두 번째로 빈번히 발생하는 사고이다.⁽⁴⁾ 풍력 터빈의 화재는 일반적

으로 기계 장치들이 집약되어 있는 나셀에서 발생할 가능성이 높으며 나셀은 지상으로부터 높은 위치에 있기 때문에 화재가 발생하면 발생장소까지 진입이 불가능하기 때문에 소화가 어려워 전소된다.

우리나라에서는 현재까지 2건의 풍력 터빈 화재사고가 발생하였다. 2010년 10월 제주 김녕에서 발생한 화재는 공력 브레이크 고장이 발생하여 블레이드가 과회전을 하였고 이로 인해 기계 브레이크에서 금속마찰로 인하여 불꽃 점화된 것으로 추정되었다. 이 화재로 풍력 터빈의 타워가 파손되어 인근 양식조합 발전실이 완파되고 수산양식장 한 개동의 주급수관이 파손되는 피해를 입었다.^(5,6) 또한 2010년 11월 인천 영흥도에서 과

† Corresponding Author, jhlim@jejunu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

부하로 인하여 발생한 것으로 추정되는 화재는 발전기에서 떨어진 불꽃이 인근 야산으로 번져 산림 1200m²가량이 소실되는 피해가 났다.⁽⁷⁾ 이처럼 풍력 터빈의 화재는 발전기의 파손뿐만 아니라 타워가 쓰러져서 주위가 파괴되거나 화재파편들로 인하여 주위의 화재로 이어지는 등 2차 사고가 발생할 가능성이 있기 때문에 대형사고로 발전하기 전에 화재를 빠르게 감지하여 소화로 이어지도록 하는 것이 중요하다.

풍력 터빈 나셀 내부에는 바람에서 얻은 에너지를 전기에너지로 변환하기 위한 여러 가지 기계장치들이 설치되어있다. 또한 나셀내부는 자연광이 유입되며 계절에 따라 온도 편차가 클 뿐만 아니라 내부 장치들의 운전 여부에 따라 온도 편차가 더욱 커지므로 일반 환경과는 상이하다.^(8,9) 따라서 일반적인 화재발생 기준 값을 적용하면 조기감지가 되지 않거나 비화재보의 가능성이 크기 때문에 나셀 화재의 초기 진압을 위해서 나셀의 환경특성을 고려해야 한다.⁽¹⁰⁾

기존에 온도, 연기 및 불꽃감지기 등 다양한 종류의 화재감지기가 개발되어있다. 그러나 불꽃감지 방식은 나셀 환경이 자연광이 유입되므로 조도 편차가 커 화재감지 신뢰성이 떨어지며 기존 온도감지기는 주변 환경의 온도 편차가 크지 않아야 할 뿐만 아니라 감지속도도 비교적 느리며 서로 다른 감지기를 복합적으로 연동시키기가 어렵기 때문에 나셀 환경에서의 화재조기 감지기로는 적합하지 않다.

본 논문에서는 나셀 내부의 화재조기 감지법과 화재발생위치 판별 방법을 제안한다. 이를 위해 나셀 내부 환경을 모니터링하고 그 결과를 분석하여 화재감지에 적합한 환경 파라미터를 선정하고 이를 바탕으로 화재 조기 감지 및 화재위치판별 방법을 도출한다. 또한 나셀 화재 특성을 분석하여 화재 유형별로 실제 실험을 통하여 조기 감지 및 화재위치판별 성능을 분석한다.

2. 나셀 환경 특성

2.1 환경데이터 측정 센서

풍력 터빈 나셀의 환경을 분석하기 위하여 환경 특성 변수를 조도, 공기 혼탁도(이하 탁도) 및 온도로 설정하여 센서를 풍력 터빈 나셀 내부에 설치하였다. 설치위치는 실제 화재 발생 사례 및 유럽 화재 가이드라인을 참고하여 화재가 발생하

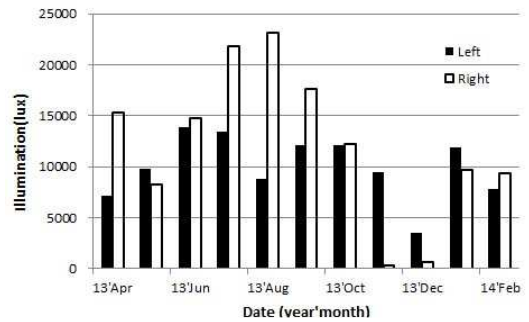


Fig. 1 Maximum illumination inside the nacelle

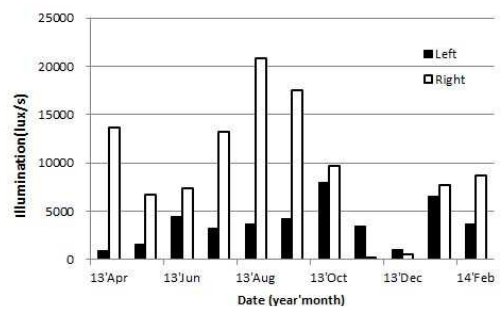


Fig. 2 Maximum rising rate of illumination inside the nacelle

기 쉬운 부분인 발전기, 브레이크디스크, 기어박스 및 요(yaw) 부분에 설치하였다.

조도센서는 CDS센서로 GL5549모델을 사용하였고, 탁도 센서는 이온화식 센서로 DS-SD-003모델을, 온도센서는 삼선식 PT100Ω을 사용하였다. 각 데이터는 나셀 내부에 설치된 데이터 로거에 저장되고, 매 20분마다 CDMA통신으로 지상에 설치된 모니터링 서버로 수신되어 저장된다.

2.2 조도 분석 결과

Fig. 1과 2는 각각 발전기 좌·우측 부근에 설치한 조도 센서의 월간 최대 조도 값 및 최대상승속도를 나타낸다. 최대 조도는 8월에 발전기 오른쪽에서 23153lux가 관측 되었으며 최대 상승률 역시 8월에 20876lux/s로 분석되었다. 이와 같이 조도의 변화가 심한 이유는 태양광이 직접 유입되고 구름, 블레이드의 그림자, 반사광 등으로 인하여 외부 빛의 유입 변화가 심하기 때문이다. 또한 오른쪽의 조도가 전체적으로 높은 것은 주 풍향 및 나셀의 구조특성 때문이다.

2.3 공기 혼탁도 분석 결과

Fig. 3은 나셀내부 월별 최대 탁도를 나타내며,

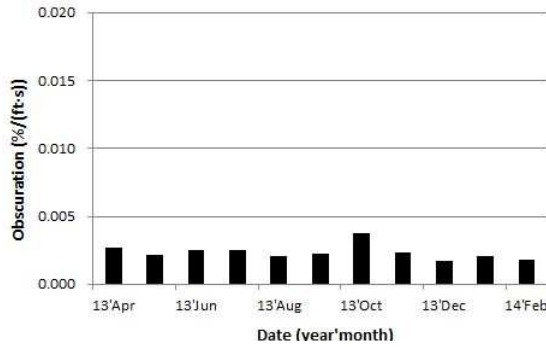


Fig. 3 Maximum rising rate of obscuration inside the nacelle

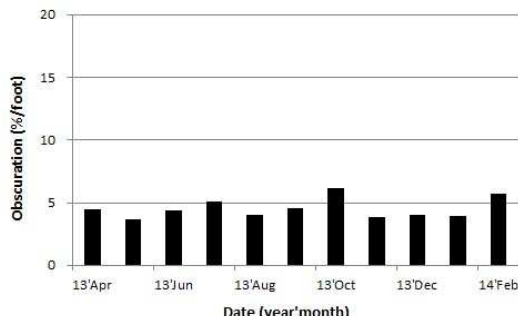


Fig. 4 Monthly maximum obscuration

Fig. 4는 탁도의 최대 상승속도를 나타낸다. 탁도는 계절별로 변화가 없이 거의 일정하였으며 최댓값은 10월에 6.0%/ft로 측정되었는데, 이 시기의 안개나 먼지 등에 의한 영향으로 분석된다. 또한 탁도 상승속도는 거의 0에 가까웠으며 최댓값은 0.0038%/ (ft·s)로 분석되었다.

2.4 온도 분석 결과

Fig. 5는 발전기, 요, 브레이크디스크, 그리고 판넬 박스 부근의 월별 온도 최댓값을 분석한 결과이다. 최댓값은 발전기 부분에서 6월에 47.7℃로 측정되었다. 풍력 터빈 동작 시 발전기에서 열이 많이 발생되기 때문에 주로 발전기부분에서 높은 온도 값이 측정되었다. Fig. 6은 월별 온도의 최대 상승속도를 나타내는데, 최대는 12월에 브레이크 디스크 부근에서 0.97℃/s로 관측되었다. 이것은 겨울철 돌풍으로 인해 과회전이 발생할 때 브레이크에서 열이 심하게 발생하였기 때문으로 분석된다. 온도 상승률은 여름철보다 겨울철의 일교차가 크기 때문에 겨울철이 더 높게 나타났다. 또한 나셀 내부의 발전기나 증속기 등에서 열이 발생하기 때문에 운전 시에는 겨울철에도 나셀 내부는 20℃ 이상을 유지하는 것으로 분석되었다.

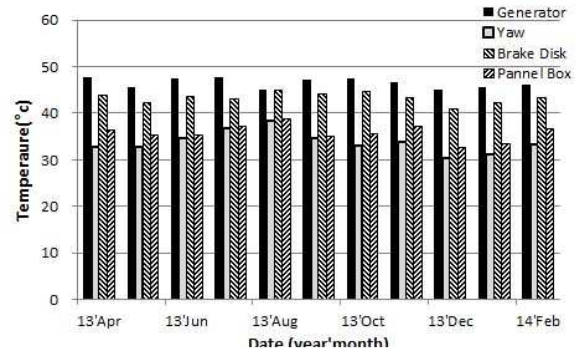


Fig. 5 Monthly maximum temperature

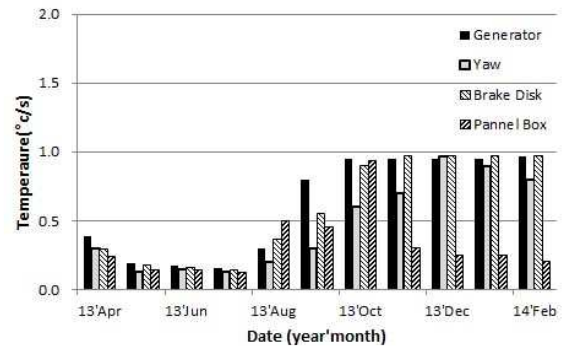


Fig. 6 Monthly maximum rising rate of temperature

3. 나셀 화재 특성

풍력 터빈 화재 원인으로서는 내부적 원인과 외부환경에 의한 원인으로 구분된다. 내부적 원인으로서는 주로 기계적 장치의 결함으로 과전류가 발생하거나, 비상 브레이크 동작 및 발전기의 고장 등으로 전기 스파크가 발생하는 경우, 그리고 나셀 내부 하우징의 윤활유가 전기 스파크나 과열된 기계장치에 의해 점화되는 경우 등이다.⁽¹¹⁾

나셀 내부 기계장치 주변은 기계내부에서 누출된 윤활유 및 고압으로 작동하는 유압 시스템에서 분출된 오일 등으로 항상 오염되어 있는 상태이므로 기계장치의 과열이나 전기 스파크 등으로 인해 오염된 오일에 점화되어 화재가 발생할 가능성이 크다. 외부 환경에 의한 화재는 낙뢰가 유입되거나 종단풍속 이상의 풍속으로 풍력 터빈이 과속되어 장치들의 고장을 유발시켜 기계들의 과열로 발생한다.

화재유형별로는 과전류로 인하여 피복이 녹아 합선이 되어 스파크가 일어난 뒤 화재로 발전하는 전기화재와 윤활제 등이 과열된 기계장치 표면에 접

촉하여 화재가 발생하는 윤활유 화재형태이다.

풍력 터빈에서 화재가 발생 시 대부분 전소하기 때문에 화재의 원인이나 위치를 추정하는 것은 어렵다. Table 1은 최근 5년간 국내·외 인터넷 신문기사 분석을 통해 수집된 풍력발전기 화재유형을 나타낸다. 풍력 터빈 과속이나 기계결함 등으로 인하여 나셀 내부 잔존 오일에 점화되어 발생한 윤활유화재가 9건으로 가장 많았고, 전기장치 고장, 과전류 및 합선으로 인하여 전기 스파크가 발생하여 발화된 화재가 5건, 낙뢰에 의한 발전기 고장으로 인한 화재 1건, 원인 불명인 화재가 2건 발생하였다.

Table 2는 풍력 터빈에서 발생한 화재의 위치를 나타낸다. 총 17건의 화재 중에서 발전기 부분이 4건으로 가장 많았고, 디스크브레이크와 컨트롤박스 부근이 3건, 로터 블레이드와 기어박스 2건이 있었고, 발화 위치를 파악하기 어려운 사고는 3건이 발생하였다.

4. 화재감지 알고리즘

4.1 화재감지 센서 특성

나셀 내부의 화재를 조기에 감지하기 위해서는 무엇보다도 응답특성이 양호한 센서의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 다양한 온도 및 연기농도 센서 중 응답속도가 가장 빠른 센서를 화재감지 센서로 선정하였다.

온도 센서로는 Thermocouple K-type을 사용하였다. 온도 센서의 측정범위는 -200~1250℃이다. Fig. 7은 100℃로 끓는 물을 이용한 온도 센서의 응답특성을 나타낸다. 화재감지를 위한 탁도 센서로는 DS-SD-003 모델을 사용하였다. 이 공기 탁도 센서는 이온화식 으로서 공기에 포함된 부유물에 의한 이온전류 변화를 검출하여 동작하게 된다. Fig. 8은 일정 연기 농도가 유지되는 공간에 탁도 센서를 투입하여 측정한 응답 특성을 나타낸다.

4.2 화재감지 변수 선정

화재가 발생하면 변화하는 변수는 크게 온도,

Table 1 Fire types of wind turbines

Fire type	oil	spark	Lighting	Unknown
Number of occurrence	9	5	1	2

산소농도, 연기농도, 그리고 조도 등이다. 본 연구에서는 2절에 분석한 나셀 내부 환경 특성결과를 이용하여 화재를 조기에 감지하기 위한 변수를 선정하였다. Table 3은 분석된 나셀 내부 환경 변수특성을 나타낸다. 온도 및 탁도의 절대 값과 상승률은 비교적 작은 값이지만 조도의 경우는 절댓값 및 상승률은 대단히 크다.

온도의 경우 화재 시 초기부터 온도가 꾸준히 상승하는 경향을 보이므로 온도의 절대 값으로 화재를 판단 할 수 있다. 그러나 이 경우 주변 환경 온도에 따라 조기감지가 어려울 수 있다.

Table 2 Fire locations of a nacelle fire

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

Table 3 Characteristics of Nacelle Environment

	Temperature	Obscuration	Illumination
Maximum value	47.7℃	6%/ft	23,153lux
Maximum rising rate	0.97℃	0.0038%/(ft·s)	20,876lux/s

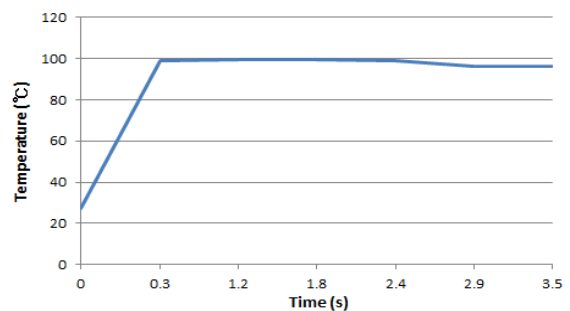


Fig. 7 Response characteristics of temperature sensor

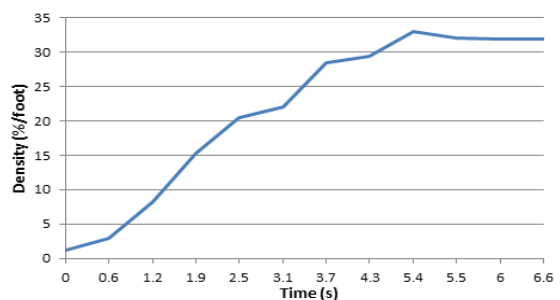


Fig. 8 Response characteristics of smoke sensor

예를 들어 겨울철과 여름철은 주변 온도의 차이가 크기 때문에 온도의 절대 값으로 화재를 판단하는 경우 겨울철에는 일정한 온도에 도달하기 까지 요구되는 시간이 여름철 보다 길기 때문에 조기 감지가 어려울 수 있다. 따라서 온도의 절대 값보다는 온도 상승률을 기반으로 화재를 감지함으로써 계절에 따른 주변 환경 온도의 영향을 최소화 할 수 있다.

공기 탁도의 경우는 비화재시에 나셀 내부의 농도가 3.0~6.0%ft 정도 변하고 있으므로 그 값은 작지만 두 배 이상의 변화폭을 보이고 있다. 또한 탁도 역시 황사나 안개 등으로 인해 계절별로 큰 차이를 보이므로 온도와 마찬가지로 그 절대 값으로 화재를 판단하기보다는 상승률로 판단함으로써 외부 환경 영향을 최소화 할 수 있다.

조도의 경우는 온도 및 탁도와는 달리 그 절대 값 및 상승률의 변화 폭이 매우 클 뿐만 아니라 잦은 변화를 보이는 특징을 나타낸다. 따라서 외부 빛이 차단된 환경에서는 화재발생 변수로 조도가 가장 효과적이지만 나셀 환경과 같이 외부 빛이 유입되는 환경에서는 조도의 최대 값 및 조도 상승률이 커 초기 화재에 의한 조도 및 조도상승률과 구별이 쉽지 않기 때문에 화재 조기 감지 변수로 적합하지 못하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 비화재보를 최소화하기 위해서 안정적인 온도와 탁도의 상승률을 화재감지 변수로 선정하여 이를 바탕으로 화재 조기감지 및 화재위치 판별방법을 연구하였다.

4.3 조기감지 및 위치판별 알고리즘

Fig. 9와 10은 전기화재 및 유류화재시의 온도 및 연기농도 상승률을 알아보기 위해 예비실험한 결과로써 발화지점 0.3m 떨어진 지점에서 측

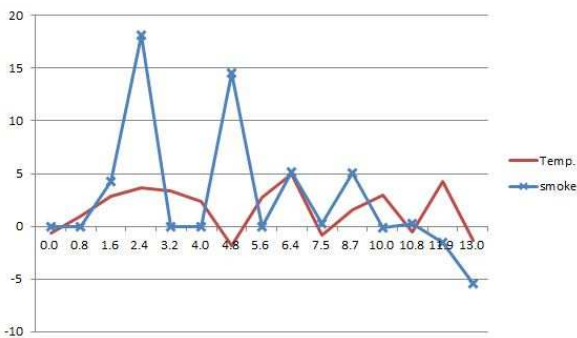


Fig. 9 Rising rates of temperature and smoke density (electric fire)

정된 시간에 따른 온도 상승 및 탁도 상승률을 나타낸다. 발화 후 1.6초 후에는 온도 및 탁도 상승률이 2.9°C/s, 및 4.2%/(ft·s)에 달한다는 것을 알 수 있다.

상승률의 변화가 심한 것은 화재 발생 시에 화원의 크기가 수시로 달라지면 불규칙한 대류가 발생하여 센서에 도달하는 공기의 온도 및 공기 탁도가 심하게 변화하기 때문이다.

초기에 온도의 상승률 및 공기 탁도 상승률은 화재 종류에 따라 다소 차이가 있지만 두 경우 모두 초기에는 온도의 상승속도가 탁도 상승속도 보다는 큰 것을 나타낸다. 화재조기 감지는 온도 상승률만으로도 가능 하지만 나셀 내부에는 고가의 장치가 다수 설치되어 있기 때문에 비화재보가 발령될 경우 화재가 아님에도 불구하고 방재액이나 가스를 분출함으로 인해 장비에 막대한 손실을 유발 할 수 있다. 따라서 화재감지의 신뢰성을 높이고 비화재보를 최소화하기 위해 온도 상승률 및 탁도 상승률을 화재변수로 동시에 고려하여 Table 4와 같은 화재 조기 감지 알고리즘을 설정하였다.

표에서 T_f 는 온도상승률의 화재 발생 기준 값, 그리고 S_f 는 탁도 상승률의 화재발생 기준 값을 나타낸다. 측정된 온도 상승률 또는 탁도 상승률 중 하나가 설정된 기준 값 이상이 되면 화재주의를 알리고 이후 나머지 하나의 변수가 기준 값에

Table 4 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 $S_f=ON$

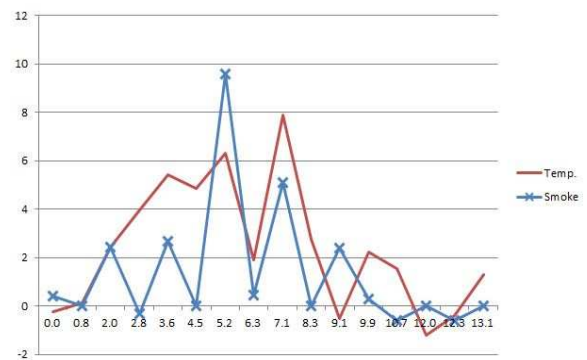


Fig. 10 Rising rates of temperature and smoke density (oil fire)

도달하면 화재로 판단한다.

T_f 와 S_f 는 Table 3의 나셀 환경 특성 결과와 화재 예비실험 결과로부터 설정하였다. 이 기준 값들은 나셀 내부 환경의 비 화재 시 최대 온도 상승률 및 탁도 상승률 보다 크고 화재 시 최소 온도 및 연기농도 상승률보다는 작은 값일수록 감지시간이 빠르겠지만 전술한 바와 같이 비화재 보에 의한 장비손실을 최소화하기 위해서 화재 시 최소 온도상승률 및 연기농도 상승률 최소 값 보다는 약간 높도록 온도상승률은 3°C/s, 탁도 상승률은 4.5%/(ft·s)로 설정하였다.

나셀 내부는 공간이 비교적 넓으며 조기에 화재를 감지하여 진압하여야 하므로 화재 다발 지역마다 화재감지 센서를 설치하여 화재가 발생한 구역에만 방제 액을 분사함으로써 조기진압을 가능케 함과 동시에 방제 액으로 인한 다른 장비의 손상을 최소화해야한다. 따라서 화재 조기감지뿐만 아니라 화재가 발생한 위치를 판단할 필요가 있다.

화재발생위치는 화재 발생 시에 여러 위치에 설치된 센서들의 화재감지 시간차로부터 판단한다. 즉, 화재 발생 시에 열기나 연기는 화재발생 위치로부터 거리가 멀어질수록 전달이 늦어지기 때문에 화재발생위치에 가장 가까운 센서가 가장 먼저 감지하며 거리 순으로 감지 시간이 늦어진다. 따라서 화재감지가 가장 빠른 위치를 화재발생위치로 판단하며 거리에 따른 감지 시간차는 실험을 통하여 규명한다.

5. 실험 결과

5.1 실험 방법

나셀 화재를 시뮬레이션하기 위하여 Fig. 11과 같은 가로 0.8m, 세로 1.8m, 높이 0.9m의 화재발

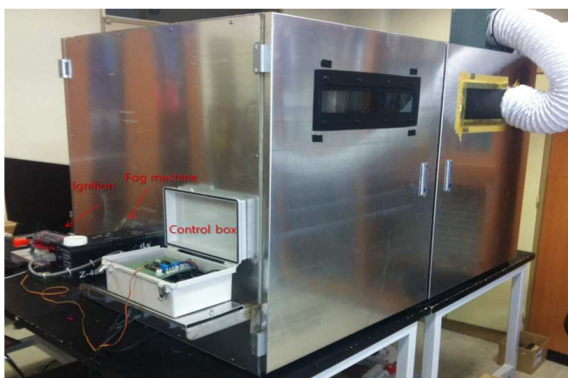


Fig. 11 Fire simulator

생 시뮬레이터를 제작하였다. 시뮬레이터 내부에 화재발생용 소형 가스버너가 설치되어있으며 외부의 컨트롤러에 의해 화재를 발생시킨다. 가스버너 직 상단에 1번 화재감지센서 모듈을 설치하고 1번 모듈로부터 0.5m 간격으로 각각 3개의 센서 모듈이 추가로 설치되어있다. 화재 발생장치용 컨트롤러와 센서 모듈들은 ATmega128을 통해 컴퓨터에 연결되어 화재 발생 및 각 센서들의 데이터를 수신하여 처리한다.

나셀에서 주로 발생하는 화재인 전기화재와 유류화재를 발생시켜 감지 및 위치판단 실험을 실시하였다. 전기화재는 0.2m 길이의 PVC 전선 2.5x10⁻⁴m³을 가스버너로 발화시켜 실험하였고, 유류화재는 윤활유를 묻힌 0.4m x 0.04m의 종이를 가스버너로 점화시켜 실험하였다.

5.2 실험 결과

Table 5는 각각의 위치에 설치된 4세트의 화재 감지 센서에서 전기화재를 감지한 결과를 나타낸다. 화재는 감지기1 위치 부근에서 발생시켰다. 화재주의(warning)는 온도상승률이나 탁도 상승률이 최초로 기준 값에 도달하기까지의 시간을 나타내며, 화재경보(fire)는 나머지 변수가 화재 발생 기준값에 도달한 시간을 나타낸다. 전기화재 실험결과 감지기 1위치에서의 화재경보는 평균 2.6초였고, 화재감지 시간은 최소 2.2초, 최대 4.2초, 그리고 평균3.1초였다. 또한 1위치와 2위치의 화재 감지시간 차는 최소 2.5초, 최대 6.1초, 그리고 평균 3.9초였다.

Fig. 12는 전기 화재 실험의 대표적인 실험결과로서 Table 4에서 첫 번째 실험결과를 그래프로 나

Table 5 Results of electrical fire detection (W: fire warning, F: fire, unit : s)

Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4	
W	F	W	F	W	F	W	F
2.5	2.5	6.8	7.6	7.6	8.5	10.2	11.0
2.5	3.4	5.9	8.5	5.9	9.7	11.5	16.7
3.4	3.4	5.9	9.5	5.9	9.5	8.3	16.7
3.4	3.4	5.9	6.8	5.9	10.4	8.0	15.0
2.5	3.4	4.2	6.9	5.1	7.6	8.5	8.5
3.0	4.2	6.8	6.8	8.0	11.2	10.0	15.0
2.5	3.4	5.9	7.6	6.8	7.6	9.9	10.2
1.7	2.5	4.2	5.4	6.8	6.8	9.3	10.2
2.2	2.2	4.7	4.7	4.7	6.4	7.3	9.8
2.5	2.5	5.9	5.9	5.9	7.8	7.8	11.9

타낸 것이다. 실선은 탁도 상승률, 점선은 온도상승률을 나타내며 괄호 안의 숫자는 센서 위치를 나타낸다. 화재발생 이후 2.5초 후에 센서1에서 온도상승률과 탁도 상승률이 동시에 T_f 와 S_f 에 도달하여 화재 주의와 화재발생을 동시에 발령하였으며, 6.8초 후에 센서 2위치에서 온도상승률이 T_f 에 도달하여 화재 주의를 발령하였다.

이후 7.6초 후에 나머지 화재감지 변수인 탁도 상승률이 S_f 에 도달하여 센서 2에서도 화재가 발령 되었고 동시에 센서 3위치에서 온도상승률이 T_f 에 도달하여 화재주의를 발령하였다. 이후 8.5초에 3 위치의 센서에서 측정된 탁도 상승률이 T_f 에 도달하여 3위치에 화재감지를 발령하였으며, 10.2초에 4 위치에서 온도상승률이 T_f 에 도달하여 화재주의를, 11.0초에 탁도 상승률이 S_f 에 도달하여 4위치에서도 화재를 발령하였음을 나타낸다. 또한 전기화재의 경우는 온도상승률이 탁도 상승률보다 먼저 기준 값 도달하는 경향이 있었다.

Table 6은 유류화재 10회 실험결과를 나타낸다. 유류화재 실험결과 감지기 1위치에서의 화재경보는 평균 2.7초였고, 화재감지 시간은 최소 2.5초, 최대 5.9초, 그리고 평균3.9초였다. 또한 1위치와 2위치의 화재 감지시간 차는 최소 0초, 최대 4초, 그리고 평균 2.6초였다. 유류화재는 전기화재와는 달리 탁도 상승률이 빨라 거리에 따른 화재주의 및 화재 감지 시간차이가 비슷하였으며 거리가 가장 먼 4위치의 센서에서도 전기화재시보다 화재 감지가 빨랐다.

Fig. 13은 전기 화재 실험의 대표적인 실험결과로 Table 5에서 첫 번째 실험결과를 나타낸 것이다. 화재발생 이후 2.5초 후에 1위치에서 온도상

승률이 T_f 에 도달하여 화재경보를 발령하였으며, 4.0초 후에 나머지 변수인 탁도 상승률이 S_f 에 도달하여 1위치에서 화재를 발령하였다. 2 위치에서는 화재발생 4.9초 후에 탁도 상승률이 S_f 에 도달하여 화재경보를 발령하였으며, 이후 5.7초 후에 나머지 변수인 온도상승률이 T_f 에 도달하여 화재를 발령하였다.

같은 시간에 3위치에서 온도상승률이 T_f 에 도달하여 화재경보를 발령하였으며, 6.5초에 탁도 상승률이 S_f 에 도달하여 화재를 발령하였음을 나타낸다. 이후 7.4초에 탁도 상승률이 S_f 에 도달하여 4위치에 화재경보를, 그리고 8.2초에 온도상승률이 T_f 에 도달하여 화재를 발령하였다.

유류화재는 전기화재보다 연기발생이 심하여 온도상승률보다 탁도 상승률이 먼저 화재기준 값에 도달하는 경우가 있으며 전기 화재보다 먼 곳까지 화재가 빠르게 감지되는 경향을 보이는데 이것은 연기발생이 전기화재보다 심하기 때문으로 분석된다.

Table 6 Result of oil fire detection(W: fire warning, F: fire, unit : s)

Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4	
W	F	W	F	W	F	W	F
2.5	2.5	4.9	6.5	6.5	6.5	7.4	7.4
1.7	4.0	4.0	5.4	5.7	5.7	7.4	7.4
4.0	4.0	4.9	5.7	5.7	7.4	7.4	8.3
2.5	4.0	4.9	6.5	4.9	6.5	7.4	7.4
3.0	3.0	4.6	6.3	6.3	6.3	7.1	8.7
1.7	2.5	4.9	5.7	6.4	7.4	7.4	9.1
2.5	4.0	4.9	5.7	5.7	6.5	7.4	8.2
3.0	3.0	3.9	5.5	6.4	7.2	7.2	8.1
1.7	3.0	4.7	6.4	4.7	6.4	7.3	8.9
4.2	5.9	5.5	6.7	6.7	7.6	8.4	9.3

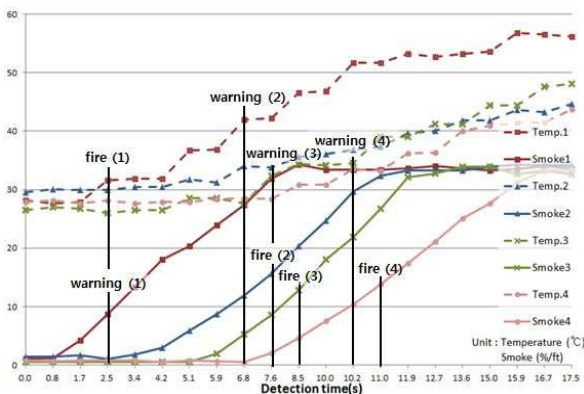


Fig. 12 Results of detection time for electric fire

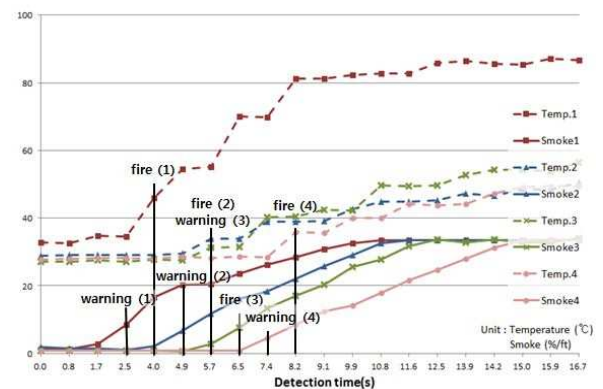


Fig. 13 Results of detection time for oil fire

Table 7 Detection time according to distance (unit :s)

	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 8 Time difference between sensor 1 and the other sensor positions (unit : s)

Sensor positions	2	3	4
Minimum	0.8	1.7	3.4
Maximum	6.1	7	13.3
Average	3.2	4.3	7.1

Table 7은 전기화재 및 유류화재를 통합한 각 위치에서의 화재감지 시간 특성을 나타낸다. 화재발생위치(1위치)에서의 최소 감지시간은 2.2초, 최대 5.9초, 그리고 평균 3.3초로서 제안된 방법으로 화재를 감지할 경우 화재발생 5.9초 이내에 화재를 감지할 수 있음을 나타낸다. 실제 풍력발전기 너셀은 화재 시뮬레이터보다 공간이 넓기 때문에 화재감지 시간이 더 길어질 수 있으나 나셀 내부에 화재다발 지역 직 상단에 센서를 설치할 경우 실제 화재발생 위치와 센서 위치사이의 거리가 대략 0.5m이내가 될 것으로 예상되기 때문에 최악의 경우 5.9초 이내에는 화재를 감지할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8은 전기화재 및 유류화재를 통합한 거리별 화재감지 시간차를 나타낸다. 화재발생위치 1과 가장 인접한 위치 2의 화재감지 최소 시간차는 0.8초, 최대 6.1초, 그리고 평균 3.2초임을 나타낸다. 실제 너셀에 센서를 설치할 경우 센서 간의 거리차가 본 연구에서의 거리차인 0.5m보다 클 것이므로 센서 간에 감지되는 시간차가 더욱 클 것으로 예상되기 때문에 화재위치판별 역시 신뢰성이 클 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 풍력 터빈 나셀 내부의 환경특성을 분석하여 온도 및 탁도 상승률을 기반으로 화재를 조기에 감지하고, 화재 위치를 판단하는 방법에 관하여 연구하였다. 개발된 조기감지방법을 시뮬레이션으로 검증한 결과 화재 조기 감지가 가능함을 확인하였다. 또한 거리에 따른 화재

감지 시간차를 이용한 화재 위치 판별 방법으로 화재의 위치를 조기에 판단 할 수 있음을 확인하였다.

이 방법은 나셀 내부의 환경 특징을 최대한 반영한 것으로 화재 감지의 신뢰성이 높고, 비화재보의 가능성을 최소화할 것으로 사료된다. 또한 화재다발구역에 센서들을 설치하여 거리에 따른 감지 시간차 실험결과를 적용하여 화재 위치를 판별함으로써 발생한 화재 위치에 국소적인 조기 화재진압이 가능하여 대형화재로 발전하기 전에 초기에 진압이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Lim, J. H., 2012, "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.
- (2) Lim, J. H., 2015, "Analysis of Size and Economic Sensitivities According to Changes in Component Replacing Costs of Renewable Hybrid Generation System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.39, No.1, pp.71~78.
- (3) Lim, J. H., 2013, "Optimal Capacity Design and Economic Evaluation of Hybrid Generation Systems Based on Load Characteristics," *J. of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 30, No.10, pp. 1103~1109.
- (4) CWIF, "Summary of Wind Turbine Accident Data to 30 June 2014," <http://www.caithnesswind-farms.co.uk/AccidentStatistics.htm> (Accessed 21 August 2014)
- (5) NEWSIS, http://www.newsis.com/ardetail/view.html?cID=&arid=NISX20101026_0006500459 (Accessed 28 May 2014)
- (6) Jejusori, <http://www.jejusori.net/news/articleView.html?idxno=95864> (Accessed 28 May 2014)
- (7) YTN, http://www.ytn.co.kr/_ln/0103_201011030-408203044 (Accessed 28 May 2014)
- (8) Ko, K. N. and Huh, J. C., 2006, *Introduction to*

- Wind Engineering*, Munundang Co., 1st Ed., pp. 151~178.
- (9) Jang, J. H., 2010, *Fundamentals of Wind Turbine*, GS Intersivision Co., 1st Ed., pp. 33~54.
- (10) 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," *J. of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 31, No. 9, pp. 847~854.
- (11) Vertrauen Durch Sicherheit, 2008, *Wind Turbines Fire Protection Guidelines VdS 3523en*, German Insurance Association, pp. 1~19.