

WFDS를 이용한 풍속에 따른 산림화재 복사열 강도 평가

송동우 · 이수경[†]

서울과학기술대학교 에너지환경대학원

Evaluation of the Radiant Heat Effects according to the Change of Wind Velocity in Forest Fire by using WFDS

Dong-Woo Song · Su-Kyung Lee[†]

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National Univ. of Science & Technology

(Received December 12, 2012; Revised June 13, 2013; Accepted June 14, 2013)

요 약

전 세계적으로 기후변화 등의 원인으로 산림화재가 대형화되고 있다. 산림이 국토의 약 63.7%를 차지하며, 산림에 인접해서 산업시설 등의 주요시설들이 많은 국내의 경우에는 산림화재가 대형재난으로 확산될 가능성이 매우 높다. 이에 본 연구에서는 수관화로 발달한 산림화재에서 화염의 복사열이 미치는 피해영향거리를 풍속의 변화에 따라 분석하였다. 또한, 영향거리를 분석하기 위하여 주변시설에 미칠 수 있는 복사열의 안전기준을 조사하였으며, 기준 복사열로 5 kW/m²와 12.5 kW/m², 37.5 kW/m²를 제시하였다. 산림화재 피해영향평가를 위해 FDS의 산림화재 확장 프로그램인 WFDS를 활용하였고, 해석조건으로 국내에 일반적으로 분포가 높은 산림조건에 대해 조사하여 이를 적용하였다. 그 결과는 풍속에 따른 복사열 최대영향거리로 제시하였다. 풍속 0~10 m/s에 있어서 풍속의 증가에 따라 영향거리도 증가하는 경향이 있으며, 풍속 8 m/s에서 영향거리가 최대가 되었다. 또한, 최대 영향거리는 수목 연료의 함수율 증가에 따라 크게 감소하는 것을 확인하였다. 본 연구는 산림화재로 인한 주변시설의 피해영향을 정량적으로 평가하는데 기여할 수 있다.

ABSTRACT

The wildland fire intensity and scale are getting bigger owing to climate change in the world. In the case of domestic, the forest is distributed over approximately 63.7% of country and the main facilities like a industrial facility or gas facility abuts onto it. Therefore there is potential that the wildland fire is developed to a large-scale disaster. In this study, the effect distances of the radiant heat flux from the crown fire are analysed according to the change of wind velocity. The safety criteria concerning the radiant heat flux to influence on the surrounding were researched to analyse the effect distances. The criteria of radiant heat flux were chosen 5 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m². WFDS, which is an extension of NIST's Fire Dynamics Simulator, was used to consequence analysis of the forest fire. In order to apply the analysis conditions, it is researched the forest conditions that is generally distributed in domestic region. As the result, the maximum effect distances by radiant heat were showed at the horizontal and vertical direction. When the wind velocity varied from 0 to 10 m/s, the maximum effect distance increased as the wind velocity increases. Interesting point is that the maximum effect distance were shown at the wind velocity of 8 m/s. The maximum effect distance was decreased according as the fuel moisture of trees increase. This study can contribute to analyse quantitative risk about the damage effect of the surrounding facilities caused by wildland fire.

Keywords : Wildland fire, WFDS (Wildland-urban interface fire dynamic simulator), Consequence analysis

1. 서 론

우리나라는 국토면적의 약 63.7%(6,369 천ha)가 산림으로 이루어져 있으며, 이는 OECD 국가 중 네 번째로 산림 비율이 높은 것이다. 국내에서는 고성산불, 동해안산불, 양양산불 등의 대형산불로 인해 가옥, 축사, 산림 그리고 문

화재 등이 소실되는 위험을 경험함으로써 산림화재에 대한 피해 심각성을 인식하고 있다. 특히 최근 미국, 그리스, 러시아 등 전세계 각지에서 기후변화 등의 원인으로 초대형 산림화재가 자주 발생하여 산림화재가 범국제적 재난으로 부각되고 있는 실정이다.

이처럼 산림화재의 발생은 산림의 피해뿐만 아니라 인

[†]Corresponding Author, E-Mail: lsk@seoultech.ac.kr
TEL: +82-2-970-6374, FAX: +82-2-977-9303

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.3.001>

명사고 발생, 문화재, 주택, 축사, 창고, 기타 공공시설 등 많은 재산피해를 유발시킬 수 있다. 뿐만 아니라 군사시설, 정유시설, 핵시설, 산업시설 등의 주변에서 일어나는 산림 화재는 국가적인 피해를 발생시킬 수 있다. 이에 따라 산림에 인접한 시설에 대해서는 산림화재로부터의 위험성을 평가하기 위한 노력이 지속적으로 이루어져야 한다.

최근에 화재의 위험성을 평가하기 위한 수단으로 수치 해석을 통한 예측이 활발히 이루어지고 있다. 산림화재와 관련하여 국내에서 연구되어진 내용으로 배송용 등⁽¹⁾은 초본의 높이가 화염전파에 미치는 영향에 대해 수치해석적으로 연구하였다. 그들은 수치해석프로그램인 WFDS를 이용하여 초본의 높이와 바람 속도의 변화가 화염전파속도에 어떠한 영향을 주는지 분석하였다. 김동현 등은 산불 지표화에서의 화염 열전달 수치해석 및 실험을 통해 화염 확산을 예측하였으며, 바람에 의한 화염각 변화에 대한 실험과 Froude number에 기초한 준-수치해석 결과를 통해 화염각 변화를 예측하는 등 산불 지표화의 화염확산에 대한 연구를 활발히 하였고^(2,3), 풍속 및 경사 조건에 따른 지표화 화염의 복사열 영향에 대한 수치해석 연구를 통해 방화선 구축을 위한 거리를 제시하였다⁽⁴⁾. 그리고 수관화에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며 Russell A. Parsons 등은 수치해석 모델을 활용하여 수관화의 화재특성에 대해 연구를 하였다^(5,6).

본 연구의 주요 관심은 산림화재가 지표면을 따라 수관화로 발달한 상황을 가정하였을 때 주변 환경에 미칠 수 있는 피해영향범위를 예측하는 것이다. 화재에 의해 피해를 미칠 수 있는 주요 요인으로는 전도, 대류, 복사 그리고 비산물(불씨의 비산)에 의한 영향이 있다. 그 중 복사열은 여러 기관에서 피해영향평가를 위한 기준으로 사용하고 있기에 본 연구에서는 화재 시 발생하는 복사열을 조사함으로써 피해영향범위를 예측하였다. 또한, 복사열은 수관화의 크기에 의존하며, 수관화의 크기는 산림의 연소특성에 의해 결정되어진다. 본 연구에서는 연소특성에 크게 영향을 미칠 것이라 생각되어지는 나무의 함수율에 따른 피해영향범위의 의존성도 함께 검토하였다.

이와 같은 연구는 산림과 인접한 지역에 있는 주요시설의 위험을 예측 가능하게 함으로써 산림화재로부터 안전을 확보할 수 있는 방안을 제시하기에 도움이 될 수 있을 것이다.

2. 수치해석모델

산림화재 영향평가를 위한 수치해석 프로그램으로 NIST의 FDS(Fire Dynamics Simulator)에 식물연료의 해석을 포함한 확장된 버전인 WFDS(Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator)가 있다. WFDS는 식물연료의 열분해, 열전달, 연소, 부력장에 대한 지배방정식을 전산유체역학적(CFD)으로 해석하는 모델이다. WFDS는 고체 연

료가 열분해되어 기체 상태의 연소성 가스를 발생하고 공기 중의 산소와 반응하는 것을 고려하며, 본 연구에서 모사하는 나무는 연료 요소(Fuel element)로 모사된다. 나무를 모사하는 구성요소는 2가지로 분류되는데 첫째는 나무 줄기(trunk) 부분이고 두 번째는 가지를 포함하는 나뭇잎 부분이다⁽⁷⁾. WFDS를 사용한 화재 해석은 모델의 신뢰도를 확보하기 위해 여러 검증 연구가 진행되고 있다. WFDS 프로그램을 개발한 미국의 NIST에서 수행한 대표적인 검증 연구로 바람이 부는 초기에서의 실험 결과를 WFDS로 모사한 결과를 비교한 것이 있으며⁽⁸⁾. 또한 본 연구에서 모사한 것과 같은 수관화에 대한 검증 연구로 William Mell 등은 2.4 m 크기의 *Douglas fir*의 연소실험을 통하여 복사열유속 및 질량감소속도의 측정값을 WFDS의 시뮬레이션과 비교한 결과를 제시하고 있다⁽⁹⁾. 이에 본 연구에서는 산림화재 영향을 평가하기 위해 WFDS를 활용하였다.

3. 연구방법

3.1 격자 독립성 및 해석영역

일반적으로 수치계산을 수행할 때에 격자의 크기는 작을수록 좋지만, 격자가 작게 되면 계산에 방대한 시간을 소유하므로 적절한 격자크기를 선택하는 것은 중요하다. 본 WFDS 모델에서도 격자의 크기에 따라 해석 대상의 결과값이 차이를 보인다. 그러므로 모델링을 위해서는 격자의 독립성 평가가 이루어져야 한다. 격자 독립성 평가는 무차원특성길이(D^*)와 격자크기(δx)의 비의 값을 활용한 방법이 주로 사용되고 있으며, D^* 는 식(1)과 같다⁽¹⁰⁾.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right) \quad (1)$$

여기서 \dot{Q} 는 열방출율(kW), ρ_{∞} 는 대기밀도(kg/m³), T_{∞} 는 대기온도(K), C_p 는 비열(kJ/kg·K), g 는 중력가속도(m/s²)를 나타내며, 무차원특성길이는 주로 해석영역의 전체 열방출률(\dot{Q})에 따라 결정되어진다.

NUREG 1824에서는 적절한 해석을 위하여 4에서 16 사이의 $D^*/\delta x$ 의 값을 제시하고 있다⁽¹¹⁾. 그러나 최근 컴퓨터 계산능력의 향상으로 인해 계산시간이 단축되고 있으므로, 본 연구에서는 적절한 격자크기를 선택하기 위해 격자크기에 따른 열방출량의 변화를 검토하였다. 다양한 $D^*/\delta x$ 에 있어서의 열방출량의 변화를 Figure 1에 나타낸다. $D^*/\delta x$ 의 증가, 다시 말해, 격자의 감소에 따라, 열방출량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, $D^*/\delta x$ 가 30 이상에서 열방출량이 약 150 MW로 유사한 경향을 보이고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 약 36의 격자해상도를 가지는 0.2 m의 정방형 격자크기를 선택하였다.

Table 1에 계산격자, 경계조건을 포함한 입력 파라미터를 나타낸다. 직교 육면체 격자 시스템을 사용하여 27 m×8 m×45 m의 계산영역에 0.2 m×0.2 m×0.2 m 크기의 정방

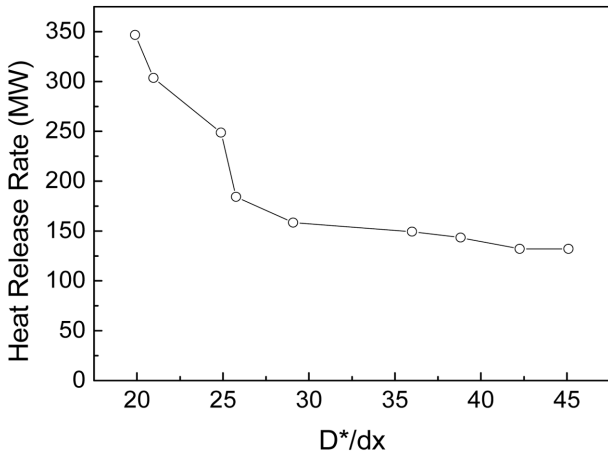


Figure 1. Comparison of heat release rate according to the grid resolution.

Table 1. Basic Input Parameters for Computational Domain

Input Parameter	Value
Mesh	One mesh
Domain size (m)	27×8×45
Cell size (m)	0.2×0.2×0.2
Device quantity	Radiative flux gas, Temperature
Device amount	924
Simulation time (s)	50

형 격자를 생성하여 전체 격자수를 1,215,000개로 분할한 해석영역을 모델링하였다. Figure 2는 해석영역을 시각화한 것으로 계산영역 내부에 나무연료를 가로세로 3그루씩 총 9그루의 나무를 배치하였으며 수평방향의 영향 거리 (W), 수직방향의 영향거리(H)와 함께 착화위치를 나타내고 있다. 착화는 말단의 나무에서 화재가 발생하여 화염이 전파해 나가는 것을 계산하였다.

3.2 입력변수 인자

산림화재 발생 시 화재확산에 따른 복사열이 미치는 거리를 계산하는데 필요한 매개 변수들을 산출하기 위해서, 연료조건, 기상조건 및 지형조건에 대해 시뮬레이션 구동에 사용할 변수를 도출하였다.

산림화재에 대한 연료조건은 산림지역 별로 매우 다양하기 때문에 피해영향평가 시 대상의 지역의 특성에 맞는 조건을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 국내에 일반적으로 분포가 높은 소나무를 가정하여 적용하였다. 국내 임상 분포에서는 침엽수림이 40.5%로 가장 많은 분포를 차지하고 있으며⁽¹²⁾, 2005년 발생한 양양산불 피해 시 피해지의 95% 이상이 소나무 단순림으로 구성되어 있었다⁽¹³⁾. 또한 강원도 영동지역에서 자생하는 주요 교목류, 관목류, 초본류에 대한 화재전파특성 실험 결과, 소나무가 연소 시 가장 많은 열량을 방출하였기 때문에 평가 대상을 소나무

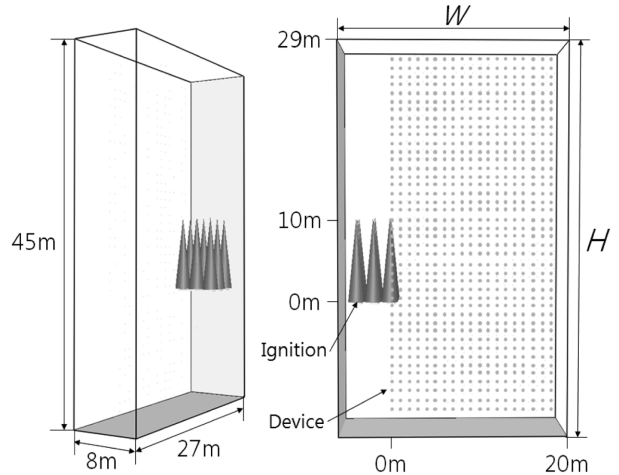


Figure 2. Computational domain using WFDS.

로 선정하였다⁽¹⁴⁾. Figure 2에서 확인되는 것과 같이 본 계산에서는 소나무는 높이 10m, 폭 2m, 나무 간격은 2m로 가정하였다.

연소특성으로 연료의 체적당 표면적(VEG SV), 탄화율(VEG CHAR FRACTION), 용적밀도(VEG BULK DENSITY), 최대연소속도(VEG BURNING RATE MAX), 연소열(HEAT OF COMBUSTION) 등은 국외의 *Douglas fir* 연소실험을 참고로 하였다⁽¹⁵⁾. *Douglas fir*의 입력조건은 국내의 소나무 연료조건과 다소 차이는 있으나 유사한 조건을 입력하기 위하여 활용하였다.

소나무에 대한 연소특성에 큰 영향을 미치는 요인 중에 하나인 함수율의 경우, 종래의 연구에서 함수율의 증가에 따라 열방출율이 크게 감소한다고 보고되고 있다⁽¹⁶⁾. 또한, 화재의 성장에 관한 연구에서는 여러 조건에 맞추어 함수율을 6%부터 90%까지 다양한 함수율을 제시하고 있다⁽¹⁴⁻¹⁶⁾. 본 연구에서는, 사고의 위험성을 평가할 때 최악의 사고 시나리오를 상정하는 것이 일반적이기 때문에, 최악의 조건, 다시 말해 최대 열방출율을 가정하기 위해 함수율을 6%로 가정하여 복사열에 의한 피해영향을 평가하였으며, 함수율에 따른 피해영향거리의 변화도 검토하였다.

기상조건 변수로는 바람의 속도, 온도, 습도를 선정하였다. 월별 산림화재 발생현황을 보면 봄철(3월~5월)에 가장 많은 산림화재가 발생하기 때문에 봄철의 온도, 습도를 적용하였고⁽¹⁷⁾, 바람의 속도가 변화함에 따라서 산림화재 확산의 영향을 분석하였다. 산림화재 발생위험도 분석 결과 평균온도가 6~14°C에서, 평균습도는 전반적으로 고르게 분포하나 60~67% 구간에서 60% 이상에서 산림화재가 발생하였기에⁽¹⁸⁾, 본 연구에서는 평균값을 시뮬레이션에 적용하였다.

본 연구에서 변수로 둔 풍속의 경우에는 산림화재로 인한 화염의 복사열의 거리에 많은 영향을 준다. 이에 따라 풍속이라는 변수의 영향을 분석하기 위하여 풍속에 변화를 주어 해석하였다. 풍속 변수에 대해서 H가 0m 이상의

Table 2. Input Parameters for Vegetation Fuel Element

Input Parameter	Value
VEG INITIAL TEMPERATURE (°C)	10
VEG SV, Surface-to-volume ration of the vegetation element (m ⁻¹)	3940 ⁽¹⁵⁾
VEG MOISTURE, Fraction of moisture on a dry mass basis (mass of moisture in vegetation/dry mass of vegetation)	0.06 ⁽¹⁴⁾
VEG CHAR FRACTION, Fraction of virgin dry virgin vegetation that becomes char	0.25 ⁽¹⁵⁾
VEG DENSITY, Density of vegetative fuel (kg/m ³)	514 ⁽¹⁵⁾
VEG BULK DENSITY, Bulk density of vegetation (kg/m ³)	2.2 ⁽¹⁵⁾
VEG BURNING RATE MAX, Maximum value allowed for the rate that fuel gases can be created per unit volume in a grid cell(kg/m ³ s)	0.4 ⁽¹⁵⁾
VEG DEHYDRATION RATE MAX, Maximum value allowed for the loss of moisture during the thermal degradation of the vegetation (kg/m ³ s)	0.4 ⁽¹⁵⁾
FUEL GEOM, Declares the shape of the bulk volume containing the vegetation	CONE
CROWN WIDTH (m)	2
CROWN BASE HEIGHT (m)	0
TREE HEIGHT (m)	10
TEMPERATURE (°C)	10
HUMIDITY (%)	63.5 ⁽¹⁷⁾
HEAT OF COMBUSTION (kJ/kg)	17700 ⁽¹⁵⁾

고도에서 최대 10 m/s까지 2 m/s씩 증가시키면서 풍속의 변화에 따른 복사열의 영향거리의 변화를 살펴보았다. 본 연구에서 풍속에 대한 변수 입력은 대기 상에서 고도에 따른 풍속변화를 고려하였다.

지형조건은 본 연구가 경사에 따른 화염의 전파를 분석하는 것이 아닌 식물연료의 주변으로 복사열이 미치는 분포를 확인 하는 것이므로 지형조건의 변수에 대해서는 시뮬레이션에서 고려하지 않았다. 설정한 연료조건과 기상조건의 데이터는 Table 2와 같다.

3.3 복사열 피해강도기준

본 연구에서 산림화재로부터 인명, 설비 등에 피해를 줄 수 있는 영향거리를 제시하기 위해서 복사열로 인한 영향 기준을 조사하여 적용하였다. 피해영향평가를 위한 복사열에 대한 기준은 여러 기관에서 제시하고 있다. 복사열의 기준을 위해 KOSHA CODE P-31-2001 사고피해예측기법⁽¹⁹⁾, NFPA 59A⁽²⁰⁾, HSE(Fire and explosion strategy, Issue 1)⁽²²⁾, EN 1473⁽²²⁾, NFPA 921⁽²³⁾ 등을 검토해 보았으며, Table 3은 검토한 복사열 기준을 정리한 것이다. 국

Table 3. Effect of Radiant Heat Flux

Heat Flux	Reference	Condition
5 kW/m ²	NFPA 59A Standard	A property line can be built upon for ignition of design spill
		The nearest point located outside the owner's property line that, at the time of plant siting, is used for outdoor assembly by of 50 or more persons for a fire in an impounding area
	HSE	Escape from exposure to this level of thermal radiation
12.5 kW/m ²	EN 1473, European Standard	Industrial areas not under control of the operator/occupier of the LNG facilities
	HSE	Fatalities from exposure to this level of thermal radiation within minutes
	NFPA 921 Standard World Bank	Wood volatiles ignite with extended exposure and piloted ignition
37.5 kW/m ²	HSE	Instantaneous death from exposure to this level of thermal radiation over a very short duration
	World Bank	Damage of devices and equipment

내 산업안전보건공단의 KOSHA CODE P-31-2001에서는 복사열에 의하여 근로자 또는 주변기기에 미치는 영향을 판단할 수 있는 기준을 5 kW/m²의 복사열이 미치는 거리로 제시하고 있으며, 국외 대부분의 기준에서도 약 5 kW/m²의 복사열에 대한 영향을 안전기준으로 제시하고 있다. 그리고 수분 내에 사상자를 발생시키고 목재의 착화를 유도할 수 있는 12.5 kW/m², 노출 시 즉시 사망할 수 있으며 장치를 손상시킬 수 있는 37.5 kW/m²의 복사열에 대한 영향을 보았다. 이에 따라 본 연구에서는 복사열 5 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m²에 대한 피해영향 기준을 설정하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 풍속에 따른 최대영향거리

결과의 예로 Figure 3에 풍속의 변화에 따른 5 kW/m² 또는 12.5 kW/m²의 복사열이 도달하는 최대 영향거리를 수평거리(W)와 수직거리(H)로 확인할 수 있도록 등고선으로 나타내고 있다. 기준 복사열이 낮아짐에 따라 영향거리가 멀어지는 것을 알 수 있고, 또한 바람의 증가에 따라 영향거리(W)가 증가하며, 수직방향에서는 상층부는 낮아지고 하단부로의 영향거리가 증가하는 것을 알 수 있다.

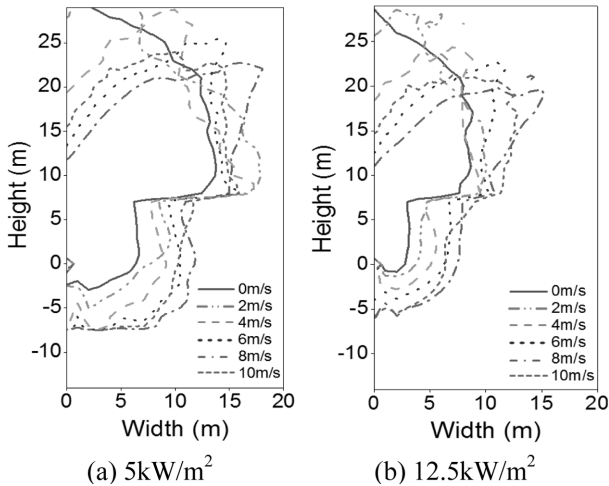


Figure 3. Contour of radiant heat flux according to wind velocity.

수관화로 발달한 산림화재의 해석조건에서 풍속의 변화에 따라 화염의 복사열이 미치는 영향을 두가지 관점에서 해석하였다. 하나는 수평거리(W)를 분석함으로써 산림화재가 주변시설에 미치는 최대영향거리를 알 수 있고, 또 하나는 하단부로의 수직거리(H)를 분석하여 수관화가 지표의 낙엽에 착화를 유도할 수 있는 영향거리를 검토하였다. 복사열의 최대영향거리는 Figure 2에서 제시한 수직과 수평방향 0 m 지점으로부터의 거리를 측정하였다.

첫째로 주변시설에 미치는 최대영향거리를 분석하기 위해 Figure 4에 풍속의 증가에 따른 각 복사열의 수평방향의 최대영향거리($W_{m,r}$)를 나타내었다. 이때의 수직방향의 높이(H)는 Figure 3에서 확인되는 것처럼 일정하지 않고, 8~20 m의 높이에서 나타나고 있다. 풍속의 증가에 따라 최대영향거리가 증가함을 알 수 있다. 이는 화염이 기울어짐에 따라 복사열측정위치에서 보았을 때의 화염면적의 증가를 형성하기 때문에 복사열이 미치는 거리도 증가하

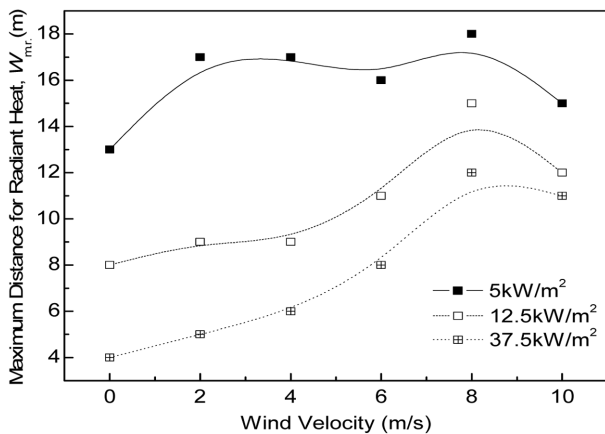


Figure 4. Comparison of maximum horizontal distance according to wind velocity.

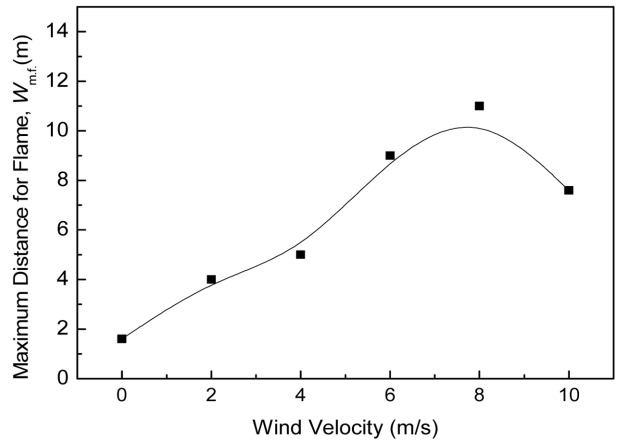


Figure 5. Maximum distance of flame according to wind velocity.

는 것으로 볼 수 있다. 또한, 기준 복사열이 낮아짐에 따라 최대영향거리는 증가하지만, 그 증가량은 감소하는 경향이 확인 되었다. 게다가, 풍속 10 m/s에서가 아니라, 8 m/s에서 최대 영향거리를 나타내고 있다. 이것은 높은 풍속으로 인해 층류에서 난류확산화염으로 천이되었기 때문이라 판단된다. 풍속의 증가에 따른 화염의 위치변화(수평방향으로의 화염도달거리, $W_{m,f}$)를 검토한 결과를 Figure 5에 나타내었다. 화염의 위치 또한 10 m/s가 아닌 8 m/s에서 수평방향으로의 화염의 이동거리가 최대가 됨을 알 수 있다.

둘째, 낙엽, 나뭇가지와 같은 화염의 전파에 큰 영향을 미치는 물질이 존재할 가능성이 있는 수관의 하단부분으로 복사열이 미치는 최대수직거리($H_{m,r}$)로 영향거리를 평가하였다. 풍속의 증가에 따른 수직방향의 최대영향거리를 그래프로 나타내면 Figure 6과 같다. 풍속이 증가할수록 $H_{m,r}$ 가 증가하는 경향을 보이며 일정한 값에서 수렴하는 것이 확인된다. 이러한 경향은 수평방향의 최대영향거리($W_{m,r}$)로 정리한 것과 유사한 경향을 가진다.

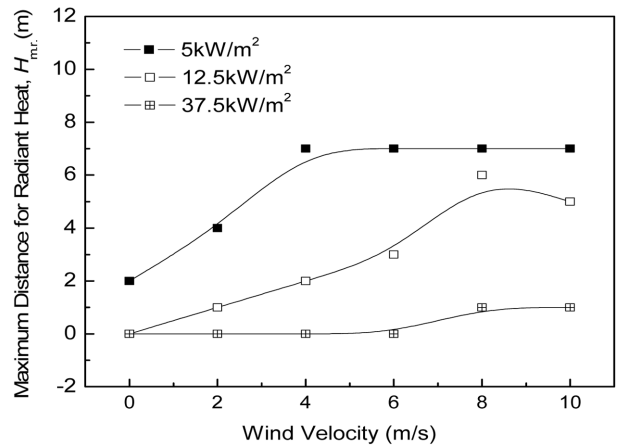


Figure 6. Comparison of maximum vertical distance according to wind velocity.

4.2 함수율에 따른 최대영향거리

본 연구에서는 Table 2에 제시한 계산 조건에 따른 결과를 분석하여, 풍속에 따른 복사열의 최대영향거리를 확인해 본 결과, 복사열이 5 kW/m²일 때 18 m, 12.5 kW/m²일 때 15 m, 37.5 kW/m²일 때 12 m가 산정되었다. 하지만 이러한 결과는 입력조건에 따라 차이가 있으며, 특히 연소특성 중 함수율은 열방출율에 큰 영향을 미친다⁽¹⁵⁾. 따라서, 본 연구에서는 함수율이 6%에서 90%로 증가함에 따른 열방출율의 감소와 최대영향거리를 검토하였다.

Figure 7은 함수율의 증가에 따른 열방출율을 나타내고 있다. 함수율 6%에서 증가함에 따라 초기에는 급격한 감소를 하다가 점차적으로 완만한 감소를 하며, 90%에서는 6%의 열방출율보다 수분의 일로 감소하는 것이 확인되었다. 이러한 경향은 Elisa Schulz Baker⁽¹⁵⁾의 실험결과에서 지수함수적으로 감소한다는 경향과 동일한 경향을 나타내고 있다.

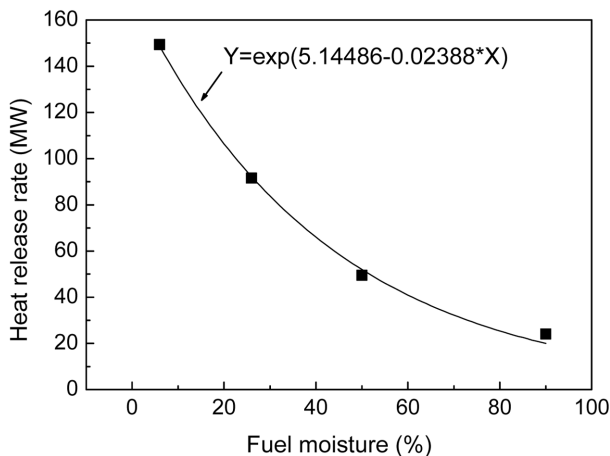


Figure 7. Heat release rate according to fuel moisture.

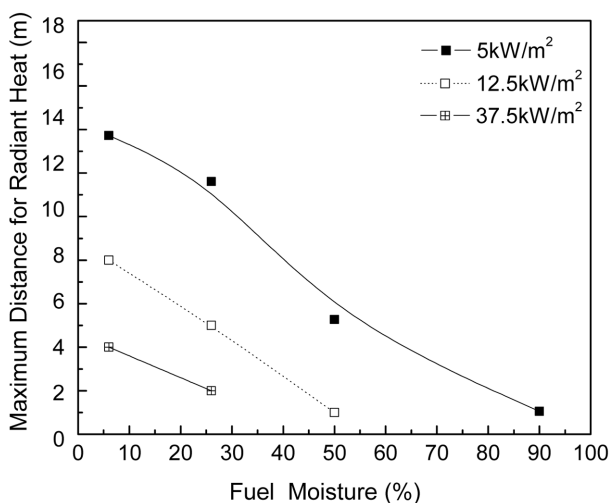


Figure 8. Maximum distance for radiant heat according to fuel moisture.

Figure 8은 함수율의 증가에 따라 각 기준 복사열이 미치는 수평방향의 최대영향거리($W_{m,r}$)를 나타내고 있다. 함수율의 증가에 따라 $W_{m,r}$ 이 감소하고 있음이 확인되었기에, 산림화재의 피해영향은 산림의 함수율에 크게 의존한다고 결론지어진다.

마지막으로, Figure 7과 8의 결과를 자세히 보면, 열방출율과 최대영향거리가 함수율의 증가에 따라 감소하는 경향은 같으나, 열방출율은 지수함수적으로 감소하는 것과는 달리, 최대영향거리는 거의 직선적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 본 계산에 있어서 주된 원인은 함수율의 증가에 따른 수분의 증발로 인한 화염의 온도의 감소, 화염 전파속도의 감소에 의한 화재 규모의 축소 등이 영향을 미치고 있다고 생각되어진다.

5. 결 론

산림화재 시 주변시설 및 환경에 피해를 미치는 영향범위를 평가하기 위해 수치해석기법을 활용하였다. 수관화로 발달한 산림화재에서 화염의 복사열이 미치는 영향거리를 0~10 m/s로 풍속 변화에 따른 복사열의 영향을 조사하였다. 복사열은 안전기준으로 설정되고 있는 5 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m²에 대해 검토하였다. 주변에 영향을 미치는 수평방향 최대영향거리를 검토한 결과, 풍속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나, 풍속 10 m/s가 아닌 풍속 8 m/s에서 영향거리가 최대가 되었다. 또한, 수관으로부터 하단부의 수직방향 영향거리를 검토한 결과 풍속이 증가할수록 최대영향거리가 증가하며 일정한 값에서 수렴하는 등 수평방향과 유사한 경향이 확인되었다.

함수율이 6%에서 90%로 증가함에 따른 열방출율과 최대영향거리에 미치는 영향을 검토한 결과, 함수율의 증가로 인해 값이 수분의 일로 감소하는 것이 확인되었다. 함수율은 산림화재의 피해영향을 예측함에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 산림화재로 인한 주변시설의 피해영향을 정량적으로 평가하는데 활용할 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 함수율에 따른 결과값의 차이를 비교한 것처럼 입력값이 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 입력값에 대한 신중한 판단이 있어야 하며, 더욱 정확하고 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해서 국내에서 자생하는 다양한 연료에 대한 연료조건과 온도, 습도, 풍속 등의 기상조건 및 방위, 고도, 지세 등의 다양한 지형조건을 고려한 산림화재의 위험성에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. S. Y. Bae, D. H. Kim, H. S. Ryou and S. H. Lee, "A Numerical Study on the Effects of the Wind Velocity and Height of Grassland on the flame Spread Rate of Forest Fires", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 252-257 (2008).
2. D. H. Kim, T. Tanaka, K. Himoto, M. B. Lee and K. I. Kim, "A Numerical Study of 1-D Surface Flame Spread Model - Based on a Flatland Conditions - ", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 63-69 (2008).
3. D. H. Kim, "Semi-numerical Study on the Flame Tilt Equation due to Wind on the Surface Fire in Forest Fire", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 90-95 (2009).
4. D. H. Kim, M. B. Lee and T. Tanaka, "Estimation of Surface Firebreak through Mathematical Method for Radiative Heat Transfer", *Proceedings of 2010 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 144-147 (2010).
5. Russell A. Parsons, Jeremy Sauer and Rodman R. Linn, "Crown Fuel Spatial Variability and Predictability of Fire Spread", *VI International Conference on Forest Fire Research* (2010).
6. Russell A. Parsons, William Mell and Peter McCauley, "Modeling the spatial distribution of forest crown biomass and effects on fire behavior with FUEL3D and WFDS", *VI International Conference on Forest Fire Research* (2010).
7. W. E. Mell, "User Guide to WFDS - this is a work in progress", NIST, US (2010).
8. W. E. Mell, M. A. Jenkins, J. Gould and P. Cheney, "A Physics-based approach to Modelling Grassland Fires", *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 16, pp. 1-22 (2007).
9. W. E. Mell, A. Maranghides, R. McDermott and S. L. Manzello, "Numerical Simulation and Experiments of Burning Douglas Fir Trees", *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 10, pp. 2023-2041 (2009).
10. Kevin McGrattan, Randall McDermott, Simo Hostikka and Jason Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", National Institute of Standards and Technology (2010).
11. K. Hill, J. Dreisbach, F. Joglar, B. Najafi, K. McGrattan, R. Peacock and A. Hamins, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. NUREG 1824", United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (2007).
12. "Statistical Yearbook of Forestry", Korea Forest Service (2012).
13. D. H. Kim, M. S. Won and M. B. Lee, "A Case Study of Forest Fire Spread in Yangyang", *Annual Conference, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, No. 2, pp. 109-113 (2005).
14. Y. J. Pack, "A Study on Forest Fire Risk in Youngdong Areas Through Combustional Characteristics of Forest Fuel", Kangwon National University (2009).
15. W. E. Mell, S. L. Manzello and A. Maranghides, "Numerical Modeling of Fire Spread through Trees and Shrubs", *International Conference on Forest Fire Research, ICFFR* (2006).
16. Elisa Schulz Baker, "Burning Characteristics of Individual Douglas-Fir Trees in the Wildland/Urban Interface", Worcester Polytechnic Institute (2011).
17. "2010 Statistical Yearbook of Forest Fire", Korea Forest Service (2011).
18. M. S. Won, K. S. Koo and M. B. Lee, "An Analysis of Forest Fire Occurrence Hazards by Changing Temperature and Humidity of Ten-day Intervals for 30 Years in Spring", *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 8, No. 4, pp. 250-259 (2006).
19. KOSHA CODE P-31-2001, "Technique for Damage Assessment", Korea Occupational Safety & Health Agency (2001).
20. NFPA 59A, "Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)", National Fire Protection Association (2009).
21. HSE, "Fire and Explosion Strategy, Issue 1", Heath and Safety Executive, <http://www.hse.gov.uk/offshore/strategy/effects.htm>.
22. EN 1473, "Installation and Equipment for Liquefied Natural Gas - Design of Onshore Installations", European Standard (2007).
23. NFPA 921, "Guide for Fire and Explosion Investigations", National Fire Protection Association (2008).