WFDS를 이용한 소나무 수관화 전이 및 확산 특성 연구

Analysis of Crown Fire Transition and Spread over Various Pine Trees Using Wildland-Urban Interface Fire Dynamic Simulator

권경남* · 김성용** · 이선주*** · 권춘근**** · 서경원***** · 임성균*****

Kwon, Kyeongnam*, Kim, Sungyong**, Lee, Sunjoo***, Kwon, Chungeun****, Seo, Kyunngwon*****, and Im, Seongkyun*****

Abstract

The crown fire of various pine trees was investigated using a wildland-urban interface fire dynamics simulator (WFDS). The effects of wind speeds and the spatial distances between fuels on crown fire ignition and spread were investigated. The average 30-year values of atmospheric conditions in March and April were used as the reference conditions to represent the climatic conditions for the wildfire season. As the wind speed increases, crown fire initiation is promoted, and the intensity and spread rate of the crown fire increase. The effects of the spatial distance on the crown fire depend on the wind speed and fuel conditions. The results show that a computational fluid dynamics tool using physics-based models, such as the WFDS, can predict the crown fire ignition and spread behaviors for domestic pine trees. However, further studies are required for other vegetation and domestic atmospheric conditions to validate the applicability of the WFDS on domestic fuels.

Key words : Crown Fire, Fire Spread Rate, Physics-based Computational Fluid Dynamics

요 지

주요 소나무종의 수관화 확산 유무를 분석하기 위해 WFDS를 이용하여 수관화 전이를 모사하였다. 풍속과 수관 간 거리를 변화시키면서 수관화를 모사하여 기상 및 연료 조건의 수관화 전이에의 영향을 확인하였다. 대기 조건은 주요 산불 발생이 가능한 3, 4월의 30년 평년값을 기준값으로 사용하였다. 풍속의 증가에 따라서 수관화의 강도, 전파 속도가 증가하고, 화염이 수관으로 착화하는 시기가 짧아졌다. 거리 변화의 효과는 풍속 및 수종 조건에 따라 복잡하게 나타났다. 본 연구를 통해서, 물리 기반 모델을 사용한 전산유체역학 모사 도구인 WFDS가 우리나라 주요 소나무종 수관화 전이와 확산에 관한 연구에 적용 가능성이 있음을 확인하였다. 하지만, 본 연구에서는 제한된 수종에 관한 연구만 수행되었기 때문에, 추후 보다 다양한 수종과 국내 기상 조건을 이용한 보완 연구를 수행하여 WFDS의 국내 산불 연구에의 적용 가능성의 추가 검증이 필요할 것이다.

핵심용어 : 수관화, 화염 전파 속도, 물리기반 전산유체역학

*정회원, 고려대학교 기계공학과 석사과정(E-mail: knkwon@korea.ac.kr)

Member, Master Student, Department of Mechanical Engineering, Korea University

**정회원, 국립산림과학원 산림환경보전연구부 산불산사태연구과 연구사, 박사

Member, Ph.D., Researcher, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

***정회원, 국립산림과학원 산림환경보전연구부 산불산사태연구과 연구원, 석사

Member, Researcher, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

****정회원, 국립산림과학원 산림환경보전연구부 산불산사태연구과 연구사, 박사

Member, Ph.D., Researcher, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

*****국립산림과학원 산림환경보전연구부 산불산사태연구과 연구관, 박사

Ph.D., Senior Researcher, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

*****교신저자, 정회원, 고려대학교 기계공학과 부교수(Tel: +82-2-3290-3356, Fax: +82-2-926-9290, E-mail: sim3@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Korea University

1. 서 론

최근 발생하는 우리나라 산불은 사람이 많이 거주하는 지역까지 확산할 우려가 점차 커지고 있다. 통계 자료에 따르면, 최근 10년간 산불 발생 빈도와 산불에 의한 피해 규모가 지속적으로 증가하였고, 2021년 안동, 양양, 예천, 정선 등지에서 대규모 산불이 잇따라 발생하여 산불 발생지역 인근 주거지까지 위협하였다(Korea Forest Service, 2021). 이에 따라 산불로 인한 주거지 피해 우려가 점차 커지는 가운데 산불 진화 등의 재난 대처 연구와 더불어 산불 확산의 예방에 관한 연구의 필요성이 높아지고 있다.

산불 발생 및 확산에는 몇 가지 형태가 있는데, 크게 나무면 낙엽, 낙지 층의 아래에서 발생하게 되는 지중화, 지표의 표면에 드러나 있는 연료에서 연소가 일어나는 지표화, 수관에서 일어나는 수관화, 산불로 인한 강한 상승 기류 및 바람 때문에 가열된 연료가 날아가 전파되는 비산화가 있다. 초대형 산불 발생 시 산불 확산의 주요 기제는 비산화이다. 그러나 초기 산불 발생으로부터 대규모 산불로 이어지는 확산의 기저는 지표화에서 수관화로의 전이 과정이다. 국내외에서 수관화 전이에 관한 많은 연구가 진행되었다. 로지스틱 회귀 분석을 이용한 수관화 확률식이 연구되었고(Ryu et al., 2014), 수관화 전이 예측을 위해 기존 모델을 이용해 노모그래프를 작성하였다(Jang et al., 2016). 국외에서는 이상적인 수관화 전이 모델과 산불 확산 데이터를 이용해 산불 확산 예측을 위한 복합 모델을 개발하였다(Cruz and Alexander, 2017).

수관화 전이에 관한 연구는 주로 경험적 데이터와 실증기반(empirical-based) 상관식을 이용한 연구가 이루어지고 있다. 실증기반 확산 예측은 빠른 계산이 요구되는 산불 발생 현장에 활용하는 것은 적합하지만, 실제 기저가 되는 원리를 구명하고 산불 발생 및 수관화 예방 등에 이용하기에는 한계가 있다. 산불 발생 및 수관화 확산 예방을 위한 기작 구명 연구는 실험 연구가 최선이다. 그러나 실험을 위한 고립된 넓은 장소와 연료 준비 등에 많은 제약이 있고, 산불 행동 예측에 어려움이 따른다. 따라서 기작 구명을 위한 실험 연구는 용이하지 않다. 특히 국내에서는 작은 규모의

실험만 수행되었을 뿐, 실제 수관화 규모의 실험이 수행된 바가 없다. 국외에서도 소수의 실험만 수행되었을 뿐이다(Alexander, 2001).

앞서 언급되었듯이 실험 연구에는 많은 제약이 존재하기에 국내의 산불 연구자들은 실험 연구의 대안으로 산불 행동의 수치해석적 모사에 관한 연구를 수행하고 있다. 특히 국외에서는 산림과 거주지 경계의 산불 전파에 관한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 연구를 활발히 수행 중이다. 전산유체역학을 이용한 연구는 실증기반 모델 뿐만 아니라 물리기반(physics-based) 모델도 활용할 수 있어, 보다 정확한 수관화 및 산불 전파의 예측이 가능하다. 따라서, 전산유체역학의 활용은 산불 행동의 기작 구명 연구에 도움이 될 수 있다. 전산유체역학을 이용한 산불 행동 시뮬레이터 개발 사례로 미국 Los Alamos National Laboratory의 FIRETEC (Hanson et al., 2000)과 미국 산림청의 Wildland Urban Interface Fire Dynamics Simulator (WFDS)가 있다. 국내에서도 최근 전산유체역학을 이용하여 산불 피해의 영향범위를 실험과 물리 모델을 통해 비교하는 등(Kim et al., 2014) 산불 행동 모사에 관심이 증가하고 있다.

본 연구에서는 수목 연료의 연소 계산에 특화되어 있고, 산불 연구에서 지속해서 검증되고 있는 WFDS를 사용하여 국내 주요 소나무종에서의 수관화 전이 및 화염전파 특성을 모사하였다. 수종, 바람, 및 연료 간 거리를 변화시켜가며 수관화 및 화염 확산의 경향성을 획득하고, WFDS의 국내 수종 적용 가능 여부를 확인하고자 하였다. 또한, 본 연구를 통해 국내 소나무종의 수관화 기작 구명 연구에 대한 기초적인 자료를 확보하고자 하였다.

2. 연료 특성과 해석 조건 및 방법

2.1 연료 특성

본 연구에서는 국내 주요 소나무종인 금강송(Kumgang *Pinus densiflora*, KP), 중남부송(Jungnambu *Pinus densiflora*, JP), 리기다소나무(*Pinus rigida*, RG)을 연료로 설정하였다. 연료의 물성치의 경우 Table 1에 보여지는 바와 같이 기존

Table 1. Properties of Pine Tree Fuels

	KumKang Pinus Densiflora	Jungnambu Pinus Densiflora	Pinus Rigida
Low Heating Value, LHV (kJ/kg)	19,417	19,335	19,767
Moisture Content, M (%)	108.8	110.3	107.8
Available Bulk Density, ABD (kg/m ³)	0.187	0.196	0.252
Total Bulk Density, TBD (kg/m ³)	0.373	0.406	0.539
Crown Width, CW (m)	2.4	3.4	2.6
Clear Length, CL (m)	5.5	6.0	4.9
Tree Height, TH (m)	13.3	10.0	12.2
Surface Area to Volume Ratio, SAV (m ⁻¹)	7,255	7,255	6,500

연구로부터 보고된 평균 연료 특성치를 사용하였다(Kim, 2015; Chae et al., 2019). 각 연료의 평균 영급은 각각 금강송 IV급, 중남부송 IV급, 리기다소나무 V급이다(Kim, 2015).

저위발열량(Low Heating Value, LHV)은 실제 효용이 있는 건조 상태 연료의 발열량으로 수중에 관계없이 전체적으로 비슷하다. 함수율(Moisture Content, M)은 Eq. (1)과 같이 연료의 총 중량과 건조 중량을 이용해 정해지는 연료의 수분 함유량이고 수중 별 뚜렷한 차이는 없다.

$$M = \frac{TFM - DFM}{DFM} \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서, *TFM*은 연료의 총 중량(kg), *DFM*은 연료의 건조 중량(kg)을 의미한다.

연료의 체적 밀도(Fuel Bulk Density, BD)는 연소 가능한 연료인 잎과 작은 가지 등의 미세 연료(Fine Fuel)와 연소가 어려운 굵은 가지와 줄기 등 두꺼운 연료(Thick Fuel)를 구분하여, 연소 가능한 연료 체적 밀도(Available Fuel Bulk Density, ABD)와 연소가 어려운 연료도 포함하는 총 체적 밀도(Total Fuel Bulk Density, TBD)로 구분하였다. 연료 체적 밀도는 단위 공간이 포함하고 있는 연료의 중량비로 나타나며 이때 단위 공간은 연료와 공기 등을 모두 포함한 공간이다. 연료 체적 밀도는 동일 종(*Pinus densiflora*)인 금강송, 중남부송의 경우 유사하나, 리기다소나무의 경우 다른 수종에 비해 큰 값을 가지고 있다.

나무의 공간 크기를 나타내는 수관폭(Crown Width, CW), 지하고(Clear Length, CL), 그리고 수고(Tree Height, TH)는 동일종 임에도 생장 지역이 달라 금강송과 중남부송이 형상이 다르게 나타나고, 리기다소나무가 금강송과 형상이 유사하다. 각 명칭이 의미하는 바는 Fig. 1에서 확인할 수 있고 수관의 모양은 원뿔 형태로 가정하였다.

표면적 대 부피 비(Surface Area to Volume Ratio, SAV)는 각 수종에서 솔잎의 부피에 대한 표면적의 비율이다. 앞서 언급하였듯이 금강송과 중남부송은 동일종으로 솔잎이 같아 동일한 SAV 값을 가지고 있다.

Table 1에 나타나 있지는 않으나, 지표 연료량(Surface Fuel Load)은 산림의 영급을 고려하여 모든 경우에서 1.5 kg/m²

로 고정하였다.

각각의 소나무종을 비교하면 연료 특성 유사성과 형상 유사성으로 나눌 수 있다. 금강송과 중남부송은 동일종(*Pinus densiflora*)으로 연료 특성치가 유사하지만, 생장 지역이 달라 형상에 차이가 있다. 금강송과 리기다소나무는 반대로 형상이 유사하지만, 각기 다른 종으로 연료 특성치에 차이가 있다. 따라서, 세 수종의 비교 연구를 통해 연료 특성과 형상 특성이 수관화 및 수관 전파에 미치는 영향을 고찰해보고자 한다.

2.2 해석 조건

본 연구의 목적인 소나무종 및 기상 조건에 따른 수관화 전이 및 화염전파 특성의 경향성 파악을 위해 연료가 한 열로 배열되어 있다고 가정하였다. 연료 간 거리(Spatial Distance)는 각 수목의 CW에 대한 거리 비(Spatial Ratio, SR)를 기준으로 하여, 수관끼리 맞닿는 1, CW만큼의 거리인 2, 그리고 그 중간인 1.5로 설정하였다.

환경 조건은 산불 빈도가 가장 높고 피해 규모가 큰 3월과 4월(Korea Forest Service, 2021)의 2010년까지 30년 평년값 기후 조건(Korea Meteorological Administration, 2021)을 기준으로 하였다. 풍속(Wind Speed, U)의 화염전파 특성에 미치는 영향을 이해하고자 평균값(1.8 m/s)을 기준으로 0.5U, 1U, 2U로 조건에 변화를 주어 결과를 비교하였다.

계산 조건은 Fig. 2에 확인할 수 있는 CFD 공간(domain)에 반영되었다. 점화원은 첫 수목 수관 끝부분에 해당하는 지표 연료 위치에 선형의 화염으로 설정하였다. Table 2에 보여지는 점화 강도는 수종 별 수관화 전이 임계 지표화 강도를 고려하여 결정하였다(Kim, 2015). 점화원과 수직으로 만나

Table 2. Environment and Calculation Conditions

Ambient Temperature (°C)	6
Wind Speed, U (m/s)	1.8
Humidity (%)	60
Heat Release Rate of Ignition (kW)	2,880
Ignition Start Time (s)	0
Ignition End Time (s)	30

Fig. 1. Schematic of Calculation Domain with Dimension of Tree

Fig. 2. Computational Domain for WFDS

는 양쪽 경계면(CFD의 양 옆면)은 대칭 경계 조건을 부여하여, 경계에 의한 간섭을 배제하였다. 남은 경계면은 전부 열린 경계로 설정하고 지정한 풍속의 바람이 화살표 방향으로 불어 들어올 수 있도록 설정하였다.

2.3 해석 방법

WFDS는 NIST에서 개발한 Fire Dynamics Simulator (FDS)의 수목 연료에 특화된 열분해, 열반응, 점성 모델, 부력 모델을 제공하는 확장판으로, 2.1단원에서 언급된 연료의 특성치를 입력하면 추가적인 설정 없이 계산을 진행할 수 있다. WFDS의 자세한 수목 연료 모델은 Mell et al. (2007)의 연구에서 확인할 수 있다.

기능적으로 WFDS는 계산 공간을 격자로 나누어 3차원 육면체 격자에 대한 2차 정확도의 오일러(Euler) 방법을 예측자(Predictor) 수정자(Corrector) 방법으로 보정하여 운동량 방정식, 에너지 방정식 등 지배방정식을 해석하고, Eq. (2)와 같은 1항 와류 점성 모델인 Deardorff 모델을 변형해 이용하는 대 와류모사(LES) 방식의 난류 모델을 사용하여 연료의 혼합과 열전달의 효과가 중요한 난류 화염을 모사할 수 있다.

$$\mu_t = \rho C \Delta \sqrt{k_{sgs}}; k_{sgs} = \frac{1}{2} (\bar{U} - \tilde{U})^2 \quad (2)$$

$$\bar{U} = \frac{U_i - U_{i-1}}{2}; \tilde{U} = \frac{\bar{U} + \bar{U}_{i-1} + \bar{U}_{i+1}}{4} \quad (3)$$

여기서, μ_t 는 와류 점성 계수($N \cdot s/m^2$), ρ 는 밀도(kg/m^3), C 는 Deardorff 상수, Δ 는 격자의 크기(m), $\bar{U}$ 은 격자 중심의 평균 속도(m/s), $\tilde{U}$ 은 인근 격자의 평균 속도(m/s)에 따르는 가중치이다.

열은 방출된 열 에너지가 전도, 대류, 복사를 통해 경계면과 비 연소 장애물, 연료, 공기에 전달되고 각 개체의 성질에 따라 열 에너지를 흡수, 소실시키거나 단열되어서 열 에너지를 저장, 방출하는 형태로 온도가 결정되고, 연소에 의해 발생하는 열이 연소 공간에서 추가적으로 더해진다.

연소 계산은 주요 화학종의 반응만 이용하는 Lumped species 가정을 통해 연료를 하나의 단순 집합으로 이용하여 연소 반응을 가정하며, 주 화학종의 종류와 부 화학종의 비율을 설정하여 공기의 조성에 맞춰 연료와 화학 반응식을 통해 생성물의 화학 반응식이 결정되고 열 방출량을 산정하게 된다. 연료의 연소 속도와 관련된 열분해 반응 속도는 Eq. (4)의 Arrhenius 식을 통하여 결정된다.

$$k = Ae^{(-E/RT)} \quad (4)$$

여기서 k 는 반응 속도 상수, A 는 Arrhenius 상수로 입자의

충돌 빈도와 관련 있으며, E 는 활성화 에너지(kJ/mol), R 은 기체 상수(J/K · mol), T 는 반응 시 절대 온도(K)이다(NIST, 2021).

3. 결과 및 고찰

WFDS를 이용해 소나무종별로, 거리 비와 풍속을 변화시켜 계산을 진행하였다. 계산된 결과는 SmokeView 프로그램을 통해 가시화하여 전체적인 수관화의 진행 경향과 연소 후 상태를 관찰하였고(NIST, 2021), 계산 공간에서 열방출율(Heat Release Rate, HRR)을 계산하였다.

3.1 격자 의존성 확인

계산 결과를 확인함에 앞서 전산유체역학에서 유한 차분, 유한 체적의 계산 방식의 특성상 격자의 크기에 따라 결과가 다르게 나타날 수 있기에 격자 의존성을 확인하였다. 특히 LES 방식은 격자의 크기에 따라 표현할 수 있는 대와류의 크기가 달라지기 때문에 격자 의존성 확인은 중요하다. NIST가 제공하는 가이드에서는 D^*/Δ 에 의한 무차원수로 4~16 정도의 값을 격자의 기준으로 사용하라고 제시하고 있다(NIST, 2021).

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho c_p T_a \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (5)$$

여기서 D^* 는 특성 화염길이(m), $\dot{Q}$ 는 시간당 열 방출율, ρ 는 대기의 밀도(kg/m^3), c_p 는 정압 비열(J/kg · K), T_a 는 대기의 온도(K), g 는 중력가속도(m/s^2)이다.

본 연구에서는 20 cm의 정육면체 격자를 사용하였고, 총 격자의 수는 2,240,000개이다. 계산 결과 수관화 발생 후 열방출율의 최소값 범위는 50 MW~100 MW였다. 이를 이용해 본 연구의 계산에 사용된 D^*/Δ 를 Fig. 3에 나타내었

Fig. 3. Plot of Grid Dependent Criterion

다. 열방출율이 최저값(50,000 kW)일 때 20 이상의 격자 기준값을 확인하였고, 격자 의존성이 크지 않을 것으로 확인하였다.

3.2 열방출율

Fig. 4에는 조건별로 계산된 결과에 대해 최대열방출율(peak HRR)을 시간으로 나타내었다. 여기에서 시간은 점화원이 적용된 시점을 기준으로 사용하였다. 0.5U, 1U, 2U에 대해서 각각 수종별로 SR이 1, 1.5, 2를 나누어 표시하였다.

전반적으로 풍속이 상승함에 따라 최대열방출율이 상승하고, 최대열방출율 시간(HRR peak time)이 짧아졌다. 수종별로는 금강송(KP)의 경우 0.5U에서 다른 수종들과 달리 SR이 증가할수록 정점 도달 시간에 큰 변화가 없었다. 중남부송(JP)의 경우 0.5U에서 SR 2일 때 최대열방출율과 도달 시간이 극단적으로 낮아지고 길어졌다. 그리고 2U의 경우에는 최대열방출율이 SR 1을 제외하면 뚜렷한 상승을 보이지 않았다. 리기다소나무(RG)의 경우 1U에서 SR 1.5가 가장 짧은 정점 도달 시간을 보였으며, 2U에서는 SR 1.5가 가장 높은 최대열방출율을 보였다.

SR이 같을 때 풍속의 증가로 인한 정점 도달 시간 변화가 전반적인 경향성과 다른 조건으로 중남부송 SR 1 (Fig. 4의

붉은 원)의 경우 풍속이 상승할 때 정점 도달 시간이 감소하였다가 다시 증가하였다.

3.3 수관화 착화 거리 및 시간

수관화 전이의 시작을 수관 영역 격자 내 미세 연료가 완전소실된 시점을 기준으로 정의하였다. 점화원에서 수관화 전이 지점까지 거리와 수관화 전이 시점을 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 풍속이 증가함에 따라 수관화 전이 위치는 하류로 이동하고, 수관화 시점은 감소하였다가 다시 증가하는 경향성을 보였다. 특히 수관화 지점의 경우, 수종이나 SR에 상관없이 풍속에 의존하는 모습을 보였다.

수관화 시점의 경우 전반적으로 금강송이 가장 빨랐고, 중남부송과 리기다소나무는 비슷하였다. 수종별로는 0.5U 조건에서 금강송과 중남부송 모두 SR이 증가함에 따라 수관화 시점이 늦어졌으나, SR이 더 증가할 경우 중남부송의 수관화 시점은 다시 빨라지는 것을 확인하였다.

3.4 수관 화염 전파 속도

Fig. 6은 수관 화염 전파 속도를 화염의 계산 공간 끝 도달 시간과 총 화염 진행 거리를 이용하여 계산된 평균값을 보여준다. 화염 전파 속도의 경향을 살펴보면 유속이 증가함

Fig. 4. Plots of Peak Heat Release Rate Against Peak Reaching Time for 0.5U, 1U and 2U

Fig. 5. Plots of Crown Fire Transition Location Against Time for 0.5U, 1U and 2U

에 따라 전파 속도는 상승하는 것을 확인할 수 있다. 수종별로는 금강송과 리기다소나무는 SR 2에서 전파 속도가 가장 낮고 SR 1.5가 SR 1보다 높거나 비슷한 전파 속도를 보였다. 중남부송은 SR이 증가할수록 전파 속도가 낮아지는 것으로 보이고, 0.5U의 저속에서 SR 1.5일 때 전파 속도가 가장 낮은 특이점(abnormality)을 확인할 수 있었다. 최고 전파 속도는 2U 조건에서 SR 1.5의 리기다소나무에서 나타났다.

3.5 가시화 및 분석

앞서 확인한 최대열방출율, 수관화 전이 위치 및 시간 그리고 전파 속도의 경향성에 대해 화염 전파 과정의 가시화를 이용하여 분석하였다. 계산된 조건 중 낮은 풍속과 넓은 거리비 조건에서 수관화가 종식(Extinction)되는 경우들이 존재하였고, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 미세 연료(Fine fuel)는 밝은 초록색으로, 두꺼운 연료(Thick fuel)는 어두운 초록색, 줄기는 갈색으로 가시화하였다.

Fig. 7(a)는 비교를 위해 수관화가 계산 공간 끝까지 도달하

여 종식되지 않고 진행한 모습을 나타낸다. 수관화의 진행에 따라 세 번째 연료부터 하류의 연료들은 미세 연료는 전부 연소 되고 두꺼운 연료들은 완전히 연소 되지 않은 것을 확인할 수 있다. 반면 Figs. 7(b), 7(c), 7(d)에서는 수관화 후에도 미세 연료들이 일부 연소되지 않은 채로 남아있으며 하류에서 수관화가 종식된 모습을 확인할 수 있다(수관의 미세 연료가 연소하지 않음).

금강송의 경우 거리비가 증가함에 따라 열에너지의 전달 거리가 멀어지고, 낮은 풍속(0.5U)으로 인해 대류 열전달이 낮아 수관화가 종식한 것으로 추측된다. 반면 중남부송의 경우 거리비가 SR 2가 되었을 때 SR 1.5 경우보다 상대적으로 수관화가 진행된 것으로 보여진다. 연료 사이의 거리가 멀어짐에 따라 초기에는 에너지의 전달 감소가 지배적이지만, 거리가 충분히 더 멀어지면 유입되는 공기량이 늘어나면서 당량비가 1에 가까워지도록 연소 조건이 변하여, 연소 시 발생하는 에너지가 늘어나게 되어 나타나는 현상으로 보인다. 즉 거리비에 따라 에너지의 소실과 에너지의 발생의

Fig. 6. Fire Spread Rate Chart of Every Cases

Fig. 7. Visualized Data of Crown Fire Extinction Cases

지배적인 영향이 달라짐을 시사한다. 한가지 유의해야 할 점은 중남부송의 경우 수관폭이 넓기에 같은 거리비에서 금강송보다 절대 거리가 멀어지게 된다. 따라서, 같은 거리비 조건에서 금강송의 경우 산화제(공기) 유입이 중남부송보다 적어 연소 현상에 큰 변화 없이 거리가 에너지 전달 감소에 주로 영향을 준다. 이 결과를 통해 금강송 0.5U SR 2의 조건과 중남부송 0.5U SR 1.5의 조건에서 전파 속도가 현저히 낮았던 원인과 금강송과 리기다소나무의 거리비 SR 1.5에서 전파 속도가 가장 빨랐던 이유를 설명할 수 있다. 다만 화염의 전파에서 거리 비에 따르는 지배 효과의 변화 시점이 수종, 풍속에 따라 변할 수 있다는 점은 유의해야 한다.

Fig. 8에는 풍속에 따른 수관화 전 초기 지표화 형상을 나타내었다. 풍속이 증가할수록 화염의 길이가 늘어나는 것을 확인할 수 있고, 화염의 높이는 0.5U와 1U가 유사하나 2U에서는 상대적으로 더 낮아진 모습을 보인다. 수관화 전이 지점과 시점의 경향성은 지표화의 형상과 강도에 관련이 있다. 1U를 기준으로 보면, 0.5U에서 지표화는 강도가 낮고 길이 또한 짧아 수관화 전이 시간이 길어지고 지점이 하류에서 형성된다. 2U에서는 지표화의 강도가 강해지고 길이가 길어지지만 화염 높이가 낮아져 수관화 지점이 하류로 이동하고 수관화 전이 시간이 길어지게 된다. 수종 간 수관화 시점을 비교하면 금강송이 다른 수종보다 먼저 수관 착화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 중남부송은 지하고가 금강송 보다 높아 같은 높이의 지표화에서 늦게 수관이 착화되고, 리기다소나무는 연료량이 많아 같은 화염 강도에서 착화 온도에 도달하기 위해 더 많은 에너지가 필요하기 때문에 수관화 전이에 걸리는 시간이 늘어났다고 추측된다. 전체적인 수관 착화 시간은 풍속에 의존하는 경향성을 따름에도, 몇 가지 조건에서 전반적인 경향성과 다른 이상값을 보였다. 금강송 SR 2와 중남부송 SR 1.5의 경우 거리 비의 증가에 따라 수관으로의 에너지 전달 감소 효과가 지배적이어서 연소가 시작되어도 수관 착화가 진행되지 못하고 사그라드는 것으로 보인다. 중남부송 SR 2의 경우 전파 속도에서 보여진 경향성과 마찬가지로 수관 착화 시간이 다시 짧아진 것을 확인할 수 있다. 반면 리기다소나무의 경우 0.5U SR 2에서도 수관 착화 시간에 큰 차이가 없었는데, 자체 발열량과 연료량이 많아 연소가 시작되면 자발적 발화가 쉬운 것으로 보인다.

0.5U에서 중남부송 SR 2의 경우 다른 수종보다 같은

SR 조건에서 절대 거리가 멀어 초기 수관 착화점으로부터 하류 연료로 화염 전파가 늦어 낮은 최대열방출이 나타났다. 2U에서는 중남부송 SR 1의 경우 다른 SR 조건보다 화염과 하류 연료 거리가 가까워 에너지 전달이 용이해 초기에 강한 화염이 발생하였다. 리기다소나무의 경우 거리비가 SR 1.5일 때 가장 높은 최대열방출을 보였는데 연료 주변 유동에 의한 공기(산화제)의 유입과 화염으로부터의 에너지 직접 전달이 가장 화염 전파에 최적으로 적용된 조건으로 보여진다.

4. 토 의

본 연구의 결과로 수관화 전이에서 수목 종별 특성에 따른 수관화 전이 및 확산 경향성 변화와 풍속과 거리비에 따르는 복합적인 영향을 확인하였다. 특히 초기 수관화 전이에 있어서 지하고와 연료량, 풍속의 영향이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 경험적 데이터에서는 수관화 전이에서 낮은 지하고가 수관화 발생 가능성이 높고 수관화 확산 유지에 연료량이 많을수록 낮은 낮은 확산 속도에서도 쉽게 유지된다(Cruz and Alexander, 2014). 본 연구에서는 중남부 송이 지하고가 높아 지표화가 지연되었고, 리기다소나무의 연료량이 많아 낮은 확산 속도에서도 수관화가 종식되지 않고 유지될 수 있었다. 경험적 데이터와 비교해 보면 수관화의 전이와 확산에 대해 결과의 유사성이 나타났다. WFDS를 이용한 국내 수종의 수관화 전이 및 확산 경향성이 본 연구에 사용된 기상 조건에 한해 기존 연구를 통해 밝혀진 경향성과 유사하다는 것으로 확인되었기에 WFDS의 국내 수종 수관화 연구에의 이용 가능성을 확인하였다고 말할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 제한된 수종 및 기상조건을 이용하였기에 국내 수종의 수관화 기작의 구명을 위해 다양한 수종 및 기상 조건을 고려한 보완 연구가 필요하다고 사료된다. 보완 연구를 통해 WFDS의 국내 수종 수관화 연구에의 적용 검증이 가능할 것이다..

예를 들어, 본 연구에서 검토된 풍속과 SR 조건에서 리기다소나무가 다른 소나무 종에 비해 낮은 지하고와 밀집되기 쉬운 형상으로 인해 초기 발화와 전파가 쉽고 연료량이 많아 화염의 강도가 커서 다른 소나무종보다 높은 위험성을 보였다. 그러나 본 연구의 결과는 Kim (2015)의 연구에 보고된 연료 특성치를 사용하였고, Lee et al. (2009)의 연구에

Fig. 8. Fire Shape with Various Wind Speed, U

서는 다른 특성치가 보고된 것을 고려하면 추후 다양한 연료 조건에서 연구를 진행하는 것이 필요함을 알 수 있다.

5. 결 론

산불 초기 발생 및 확산의 기저가 되는 수관화를 WFDS를 통해 모사하였다. 수종, 거리 비, 그리고 풍속이 수관화와 화염전파에 끼치는 영향을 연구하였다. 수목의 형상과 연료량이 초기 지표화의 수관화 전이에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 수관화의 전파가 단순히 거리비, 풍속 등 한 변수에 의존적이지 않고 복합적인 에너지 소실 및 발생에 영향을 받는 것을 확인하였다. 수종별 기상 및 연료 간격 조건에 따라 수관화 자연 종식 가능성도 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구는 단순화된 연료 모델을 사용하였기 때문에, 다양한 연료 분포 조건의 실제 연료에 연구 결론을 직접 적용하기에는 한계가 따른다. 따라서 추후 지면의 경사도, 수목의 난수화 배치 등 다양한 조건에 관한 계산 연구를 수행하여 연구 결과를 재확인할 계획이다. 또한 국내의 다른 수종 및 기상 조건에 대한 보완 연구를 통해서 WFDS의 전반적인 국내 수종에 관한 적용 가능성을 재차 확인할 것이다. 본 연구를 통해 수관화 전이 기작 연구에 실증 기반이 아닌 물리 기반 모델을 사용 가능성을 확인하였고, 연구 결과를 추후 산불 확산 예측 및 예방에 관한 연구 기반구축의 기초 자료로 활용하는 가능성을 확인하였다.

References

- Alexander, M.E. (2001). *The international crown fire modelling experiment: An overview and summary to-date*. 22nd Tall Timbers Fire Ecology Conference, Kananaskis, Alberta, Canada.
- Chae, H.M., Choi, S.H., Lee, S.H., Cha, S.S., Yang, K.C., and Shim, J.K. (2019). Effect of litter quality on needle decomposition for four pine species in Korea. *Forests*, Vol. 10, No. 5, pp. 371.
- Cruz, M.G., and Alexander, M.E. (2014). The start, propagation and spread rate of crown fires. *Fire Management Today*, Vol. 73, No. 4, pp. 17-23.
- Cruz, M.G., and Alexander, M.E. (2017). Modelling the rate of fire spread and uncertainty associated with the onset and propagation of crown fires in conifer forest stands. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 26, No. 5, pp. 413-426.
- Hanson, H.P., Bradley, M.M., Bossert, J.E., Linn, R.R., and Younker, L.W. (2000). The potential and promise of physics-based wildfire simulation. *Environmental Science & Policy*, Vol. 3, Issue. 4, pp. 161-172.
- Jang, M.N., Kim, S.Y., and Lee, Y.J. (2016). Nomographs for predicting crown fire transition of pinus densiflora stands in central regions of Korea. *The Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 5, pp. 135-141.
- Kim, H.S., Kang, Y.J., Kim, J.H., Kim, K.H., Lee, B.D., and Kim, J.H. (2014). Comparison of experimental and FDS data for calculating heat-affected range in forest fires. *Journal of the Korean Society of Safety, The Korean Society of Safety*, Vol. 29, No. 4, pp. 91-96.
- Kim, S.Y. (2015). *A study on the analysis of fuel characteristics for forest fire hazard assessment*. Ph.D. dissertation, Kongju National University Kongju-si, Chungcheongnam-do, Korea.
- Korea Forest Service. (2021). *2020 Annual Report for Statistics of Forest Fire*.
- Korea Meteorological Administration. (2021). *30 years average Korea weather chart*. Retrieved from <https://www.weather.go.kr/>
- Lee, H.P., Lee, S.Y., and Park, Y.J. (2009). A study on combustion of living leaves for various coniferous trees and broadleaf trees in youngdong areas. *Journal of Korean Society of Safety, Korean Society of Safety*, Vol. 24, No. 4, pp. 96-103.
- Mell, W., Jenkins, M.A., Gould, J., and Cheney, P. (2007). A physics-based approach to modeling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire, International Association of Wildland Fire*, Vol. 16, pp. 1-22.
- National Institute of standards and Technology (NIST). (2021). *FDS-SMV*. Retrieved from <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- Ryu, G.S., Lee, B.D., Won, M.S., and Kim, K.H. (2014). Development of crown fire propagation probability equation using logistic regression model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 17, Issue. 1, pp. 1-12.

Received	June 1, 2021
Revised	June 3, 2021
Accepted	June 9, 2021