

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.2.443>

JCCT 2021-5-53

## 재선충 감염 소나무와 비 감염 소나무의 수분함유율에 따른 연소열 실험

### Heat of Combustion Experiment Based on the Ratio of Moisture Content of Infected and Non-Infected Bursaphelenchus Xylophilus

권 혁\* · 공하성\*\*

Hyuk Kwon\* · Ha-Sung Kong\*\*

**요약** 이 연구는 재선충 감염 소나무와 비 감염 소나무의 수분함유율에 따른 연소열 실험을 통해 열적특성을 비교 분석하였다. 실험 결과는 다음과 같다. 수분 함유율 분석 결과는 재선충 감염 소나무의 경우 평균 19.92%, 비 감염 소나무는 26.27%로 화재 시 전도, 대류, 복사열 크기가 커질수록 수분 함유량이 감소한다. 수분 함유량의 기화가 가속되면 평형 수분 함유율에 도달하고 수분 함유율이 15%이하에서는 열원에 의하여 착화되지 않는다는 목재의 열적 특성에 상반되는 결과이다. 연소열 분석 결과는 재선충 감염 소나무와 비 감염 소나무는 연소열은 약 3%로 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 연소열이 다른 수종에 비해서는 높은 수치를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 전도, 대류, 복사열의 증가에 따른 수분 함유율의 감소가 착화에 직접적인 원인 중 하나이며 수분 함유량이 감소할 수록 화재 확산 속도도 빨라진다는 것을 알 수 있었다.

**주요어** : 재선충 감염 소나무, 비 감염 소나무, 수분 함유율, 연소열, 열전달 인자

**Abstract** This study compared and analyzed the thermal characteristics based on the ratio of moisture content of infected and non-infected Bursaphelenchus Xylophilus by heat of combustion experiment. The experiment results are as follows. The analysis result of the ratio of water content shows that 19.92% on average for infected Bursaphelenchus Xylophilus and 26.27% for non-infected which decreases water content as the size of conduction, convection, and radiant heat increases in case of fire. As the vaporization of the moisture content accelerates, the average moisture content is reached, and the result is contrary to the thermal characteristics of the wood that the moisture content is not ignited by a heat source when the moisture content is under 15%. The combustion heat analysis result showed that infected and non-infected Bursaphelenchus Xylophilus had no significant difference in combustion heat at about 3%. However, it shows that combustion heat is higher than other species. In conclusion, decreasing in moisture content based on the increasing conduction, convection, and radiant heat is one of the direct causes of ignition, and the lower the moisture content, the faster the fire spreads.

**Key words** : Infected Bursaphelenchus Xylophilus(IBX), Non-Infected Bursaphelenchus Xylophilus(NBX), the Ratio of Moisture Content, Forest Fire, Heat of Combustion, Heat Transfer Factor

\*우석대학교 일반대학원 소방방재학과 대학원생 (제1저자)

\*\*우석대학교 소방방재학과 교수 (교신저자)

접수일: 2021년 4월 22일, 수정완료일: 2021년 5월 3일

게재확정일: 2021년 5월 9일

Received: April 22, 2021 / Revised: May 3, 2021

Accepted: May 9, 2021

\*Corresponding Author: 119wsu@naver.com

Dept. of Fire and Disaster Prevention, Woosuk Univ, Korea

## I. 서 론

1996년, 2019년, 2020년 3차례의 고성지역 산불로 인한 경제적, 사회적 피해는 물질적 가치로 산정 할 수 없으며 한국의 편종된 침엽수 군락, 그중에서도 소나무 군락의 산림 분포가 피해를 키웠다.

녹색연합은 “지난 30년 가까이 계속된 소나무, 잣나무, 리기다소나무 등 침엽수 위주의 조림 정책이 숲을 재해에 취약하게 만들었다.”고 주장했다. 산림청 임업 통계연보에 따르면 1985년도에는 전체 산림의 50.22%에 달하던 침엽수림이 2000년에는 42.22%, 2010년에는 40.52%까지 줄었으나 여전히 활엽수림, 혼합림, 죽림보다 높은 비율을 유지하고 있다. 2010년 기준 수종별 산림 면적은 침엽수 258만1,000ha, 활엽수 171만9,000ha, 혼합림 186만5,000ha, 죽림 20만4,000ha이다. 2012년 환경부가 발표한 ‘한국의 생물 다양성 보고서’에 따르면 침엽수인 소나무는 국내 산림 면적의 23%를 차지해 단일수종으로는 가장 넓은 면적에 분포하고 있다.[1]

이 연구는 재선충 감염 소나무의 수분함유율에 의한 연소열과 생목 비 감염 소나무 수간 부의 수분 함유율에 의한 연소열 연소실험의 비교분석을 통한 대형 산불화재 확산으로부터 화재안전을 확보하기 위한 연구이다.

소나무 재선충 적치 감염 피해목과 소나무의 부위별 열적특성에 관한 선행연구를 분석하면 이병두 외(2001)[2]는 GIS 응용에 의한 2000년 삼척 산불의 확산 속도 분석을 연구하였으며 강성철, 외(2016)[3]는 사례 분석을 통한 소나무림에서의 풍속과 실효습도 변화에 의한 대형산불 위험예보를 연구하였고 김동현 외(2010)[4]는 뒷불 특성에 관한 실험방법 연구 연구하였으며 김성용 외(2016)[5]는 경사와 풍속 변화가 소나무림 내 산불행동에 미치는 영향을 이예은 외(2020)[6]는 경사조건에 따른 소나무 지표층의 연소특성에 관한 실험적 연구를 하였으며 김유승 외(2015)[7]는 우리나라 주요 침엽수종의 산불 연료형 구분 리기다소나무와 잣나무 대상으로 연구하였고 김동현 외(2009)[8]는 낙엽층의 화염높이 산정에 관한 연구를 박영주 외(2010)[9]는 복사열 증가에 따른 소나무 생명의 열적특성 분석을 연구하였으며 염찬호 (2019)[10]는 산림인접 시설물들의 산불방지에 관한 연구를 김동현 외(2008)[11]는 산불 지표화의 1차원 화염전파 모델의 수치해석 연구

를 평지조건 기반에서 하였으며 이해평 외(2017)[12]는 산불연료의 연소특성을 활용한 산불위험지도 작성에 관한 연구 강원도 삼척시를 중심으로 연구하였고 이시영 외(2009)[13]는 산불지역에서 숲 가꾸기 실행 유무와 산불위험성 비교 분석하였고 오진열 외(2010)[14]는 소나무 솔방울의 수종별 연소특성에 관한 연구를 하였으며 김성용 외(2015)[15]는 소나무림과 잣나무림의 산불 잠재위험성 비교를 연구하였고 김종원 (2005)[16]은 소나무재선충과 동해안 산불을 통해서 본 우리나라의 소나무, 무엇이 문제인가를 연구 하였다. 그리고 김다희 외(2015)[17]는 송진 및 꽃가루 분진 폭발의 물리적 위험성 특성에 관한 연구를 하였으며 이병두 외(2008)[18]는 한국의 생태지역별 산불특성과 임상분포 패턴과의 관계 연구를 하였고 이시영 외(2006)[19]는 한국의 산불발생 실태분석 연구를 하였다.

지금까지 선행연구는 소나무 재선충 감염 확산 방지, 재선충의 방제, 방충에 대한 연구와 적치 형태나 산재 형태에 관한 연구가 다수이지만 산야에 적치된 재선충 감염 피해목과 비 감염 소나무 수간 부의 열적 특성의 비교분석을 통한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 이 연구의 목적은 감염 소나무와 비 감염 소나무의 열적특성을 비교 분석하고 감염 소나무의 연소열과 비 감염 소나무 수간 부의 연소열 차이와 송진에 포함된 20%의 테레빈유 성분을 내재한 감염 소나무와 비 감염 소나무의 수분함유율에 따른 연소열 실험을 하고자 한다.

## II. 이론적 고찰

### 1. 재선충 감염 소나무

감염 소나무 처리방법은 훈증, 파쇄, 소각, 매몰, 박피, 그물망 피복 등이 있으며 그중 가장 많이 사용하는 처리방법인 훈증처리는 감염목 및 감염 우려했을 벌목하여 1~2 m<sup>3</sup> 크기로 쌓은 후 재선충과 매개충인 솔수염하늘소 등 해충의 유충을 죽이는 효과가 인정된 다이메틸다이설파이드(dimethyl disulfide)등의 약제를 넣은 후 비닐덮개로 밀봉하는 것으로 파쇄, 소각, 매몰이 어려운 지역에서 처리하는 방법이다.

훈증처리 후 적치, 방치된 감염 산물의 현황에 대하여 경기도 일대의 소나무 재선충 병 방제 지역을 찾아 직접 훈증 처리 실태를 점검한 결과, 산림청의 재선충

병 훈증 관리가 불량인 것으로 나타났으며 "훈증 처리는 피복제가 훼손돼 피해 고사목이 노출되거나 피해목이 무단으로 반출되면 소나무 재선충병이 확산될 우려가 있어 사후관리가 중요하다"고 지적하였다.[20]

또한 훈증 처리 후 재선충 감염 소나무의 수분함유율이 감소하여 착화되어 말화가 쉽고 산불화재 발생 시 확산 속도가 빠르다.

## 2. 수분 함유율

목재는 대부분 수분을 함유하고 있다. 목재가 수분을 함유하고 있는 비율을 수분함유율(MC: moisture content)이라고 하며, 식(1)에 의해서 구할 수 있다.

$$MC(\%) = W_1 - \frac{W_0}{W_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

여기서, MC : 수분함유율[%], W1 : 건조 전 시료의 중량[g], W0 : 건조 후 시료의 중량[g]

일반적으로 목재의 수분함유율이 15%이상이면 고온에 장시간 접촉해도 착화하기 어렵다고 한다.[21]

## 3. 연소열

연소열은 어떤 물질이 완전히 산화되는 과정에서 발생하는 열 즉, 가연물이 연소반응에 의해 발생한 열로서 일반적으로 연소열이라고도 한다. 연소열이란 단위 중량당 가연물의 완전 연소시 발생하는 열량으로 정의하며, 단위는 [kcal/kg] 등으로 나타낸다.

연소열에 영향을 주는 인자는 열전달 요소인 전도, 대류, 복사이다. 전도는 고체내부의 열이동의 형태를 말한다.[22] 전도는 고체 또는 정지상태 유체의 Fourier 열전달 법칙에 따른 것으로 식(2)와 같이 나타낸다.

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{l} \quad \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

$Q$ : 열량 [W],  $k$ : 열전도도 [W/(m·°C)],  
 $A$ : 표면적 (m<sup>2</sup>),  $T_1 - T_2$ : 온도차 [°C],  
 $l$ : 물질두께 (m)

대류관 공기나 연기 등의 유체의 이동에 따라 나타나는 열 이동을 말한다. 대류는 고체와 유

동 유체 사이의 Newton의 냉각법칙에 따른 것으로 식(3)과 같이 나타낸다.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) [W] \quad \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

$\dot{Q}_{conv}$ : 열량 [W],  
 $h$ : 열전달계수 [W/(m<sup>2</sup>·°C)],  
 $A_s$ : 표면적 (m<sup>2</sup>),  
 $T_s - T_{\infty}$ : 온도차 [°C] 고체 표면온도 (고체온도에 영향을 받지 않는 유체의 온도)

복사는 고체표면의 사이 또는 매연입자나 가스와의 사이에서 전자파에 의해 열에너지가 이동하는 현상을 말한다. 복사는 전자기파에 의한 Stefan Boltzmann법칙에 따른 것으로 식(4)와 같이 나타낸다.

$$Q = \sigma \cdot \alpha \cdot A \cdot T^4 \quad \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

$Q$ : 열량 [W],  $\sigma$ : 방사율 [W/(m<sup>2</sup>·°C)],  
 $A$ : 표면적 (m<sup>2</sup>)  
 $\alpha$ : Stefan Boltzmann상수  $5.67 \times 10^{-8}$ ,  
 $T$ : 절대온도 (273+t°C)

식 (2),(3),(4)에서 표면적과 물질두께가 전도, 대류, 복사에 의한 수분 함유율에 영향을 주는 중요한 인자이다. 활엽수종은 가을부터 겨울 초입 모든 잎을 떨어뜨리고 열전달을 받는 인자인 수관 부의 두께와 표면적을 최소화 한다.

한국 산림의 23%이상인 침엽수 군락 그 중에서도 발열량이 큰 소나무는 일정한 수관 부의 표면적을 유지하고 전도, 대류, 복사열을 전달 받는 인자인 수관 부 표면적은 열원에 노출되면 착화가 용이하며, 비점이 150~180°C, 인화점이 32.2~46.1°C로 소나무가 20%정도를 함유하고 있는 테레빈유와 바람이 화재 확산의 촉매제 역할을 한다. 소나무는 화재에 취약한 수종이며 수분 함유율 감소에 영향을 주는 인자인 솔잎, 결가지의 수관 부 표면적이 커질수록 소나무의 특성상 수관 부의 표면적은 연중 일정한 생체 부위별 수분함유율 감소가 열원에 의한 빠른 착

화, 연소열의 증가로 대형 산물로 화재 확산의 원인으로 분석되었다.

### III. 측정기기 및 실험조건

#### 1. 측정기기의 제원

##### (1) 수분함유율 측정기기

수분함유율 측정방법 중 전건법은 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 목재의 수분함유율 표준 측정법이고 여러 수분함유율 측정방법 중에 상대적으로 정확하게 측정할 수 있는 이점이 있다. 일정 크기의 시험편을 100~105℃ 정도 함량이 될 때까지 건조해 전건 무게를 측정해서 계산하며 Figure 1과 같다.



그림 1. 수분함유율 측정기기  
Figure 1. Measuring equipment of water content

Table 1은 수분함유율 측정기기의 제원을 나타낸 것으로 시료의 열 변형 실험 및 강화실험 시료 내의 수분 제거 등 다양한 용도로 사용, 빠른 열 확산과 우수한 온도분포를 나타내며 소음과 진동이 없으며 단열효과 및 내부 모니터링이 쉽다.

표. 1 수분함유율 측정기기의 제원

Table 1. Specification of water content measuring equipment

구분	제원
허터 용량	1.4KW
유형	강제 대류형
온도 범위	200 ~ 250 ℃
온도 조절기	SSR 제어기
팬 모터 용량	1/16 HP
전원	단상 AC 220V, 50/60 Hz
외형 (W×D×H)	670×660×1070 mm

##### (2) 연소열 측정기기

연료의 연소는 발열반응이다. 따라서 연료는 열 에너지의 공급원으로 이용되며, 이러한 열에너지 공급능력을 흔히 반응열(heat of reaction)이라고도 표현한다. 연소열은 발열량계로 부르는 장치에서 측정한다. 정적발열량을 측정할 수 있는 흔히 Bomb calorimeter라고 부르는 정적열량계를, 정압발열량을 측정하는 정상유동열량계를 사용한다. 일반적으로, 고체연료의 연소열은 정적열량계로 측정하고, 기체연료는 정상유동열량계로 측정하며, 액체연료는 앞의 두 가지 열량계로 측정이 가능하다. 측정기기는 Figure 2와 같다.



그림 2. 연소열 측정기기  
Figure 2. Calorimeter

Table 2는 연소열 측정기기의 제원을 나타낸 것으로 Bomb Calorimeter는 석유, 석탄, 코크스, 식료품 및 바이오매스 제품을 포함한 고체 및 액체 가연성 물질의 연소열을 측정하는 데 사용되며 발전소, 석탄 광산, 야금, 화학 산업, 상업 검사, 과학 연구 등에 사용된다. bombe 열량계는 반응물질이 들어있는 용기를 물에 넣고 반응시키면 흡수하는 열량 때문에 물의 온도가 올라가거나 내려가는데 이때 반응 전 물의 온도와 반응 후 물의 온도 차이에 의해 반응열을 측정하는 장치이다.

표 2. 연소열 측정기기의 제원

Table 2. Specification of calorimeter

구분	제원
측정범위	0~40MJ/kg
분해 온도	0.0001℃
점화 방식	레이저 방식
산소 충전	자동
중량	103kg
외형(L×W×H)	480mm×500mm×420mm

2. 실험조건

수분함유율 건조실험은 ISO 18134-1, 연소열 연소실험은 ISO 18125의 실험조건을 따른다. 측정기기 주변에 실험에 영향을 주는 간섭요인을 제거하여 측정 오류를 최소화하였고 각 시료의 분석 정확도를 위해 시료 채집, 파쇄, 분쇄 작업을 2일 이내에 완료하고 수분함유율 측정기기, 연소열 측정기기에 의한 생목 소나무 수간 부, 내화성이 상대적으로 취약한 곁가지 및 솔잎 각각 100g씩 동일한 중량으로 계측하여 각각의 시료를 1일에 수분함유율 측정과 연소열 측정 실험을 3회 실행하였고 3회 측정 평균값을 사용하여 오차를 최소화하였으며 3일 동안 실시하였다. 이 연구에서는 한국에서 가장 많이 분포하는 수종으로 산불에 취약한 침엽수종 대표수종인 소나무를 선정하였다. 시료의 채취는 적치 재선충 감염 피해목과 생목 소나무 수간 부를 산불 발생 빈도가 높은 4월 중순에 채취하여 사용하였

으며 소나무 곁가지와 솔잎 등은 산불화재 시 전도, 대류, 복사열과 접염에 의한 착화, 전이 연소 위험인자로 소나무 수간 부로의 급속한 확산 영향 인자로 참조하였다. 산불의 영향을 주는 인자들로는 임상과 지형상태, 기상상태가 주요 요인으로 작용하며 이들 세 가지 인자들 가운데 임상의 요인들로는 연료의 수종, 밀도, 깊이, 수분 함유율, 생 연료와 마른 연료의 양 등이 있으며, 이런 요소들에 의해 열전달량이 결정된다. 열전달량은 연소의 속도와 방향에 따라 강도가 달라질 뿐만 아니라 산불의 확산에 영향을 미치게 된다. 또한, 이러한 산불의 확산에 영향을 주는 인자들은 복사열 크기에 관여하게 되며, 효율적으로 산불을 진화하고 산불로부터 인간의 생명과 재산을 안전하게 보호하기 위해서는 산불의 확산에 영향을 주는 인자들을 이용하여 산불의 확산방향과 확산속도를 예측하는 것이 중요하다.[23]



(a) 1년 미만

(b) 1년 이상 2년 미만

(c) 2년 이상 3년 미만



d) 3년 이상 4년 미만

(e) 4년 이상 5년 미만

그림 3. 적치 연한별 감염 소나무

Figure 3. Infected pine trees by piling up terms

소나무의 열적특성을 고찰하고자 감염 소나무와 비 감염 소나무 수간 부의 수분 함유율 특성, 연소열 특성이 산불화재 확산에 영향을 미치는 위험인자로의 비교분석하여 산불화재 예방의 기초자료 확보에 주안점을 두었다.

야산에서 채집한 감염 소나무와 비 감염 소나무를 각각 1 kg의 시료를 Figure 3, Figure 4와 같이 채취하고 수분함유율과 연소열 측정을 위한 실험 분석 정확성을 위해 각 시료를 채집 원형이 아닌 파쇄, 분쇄 후 미세분말로 수분 함유율과 연소열을 측정하였다.



그림 4. 비 감염 소나무  
Figure 4. Non-infected pine

#### IV. 실험 및 고찰

감염 피해목과 비 감염 소나무 생목 수간 부의 수분 함유율 측정값을 얻기 위해 수분 함유율 및 연소열 실험을 진행하였다. 감염 피해목과 비 감염 소나무 생목 수간 부의 수분함유율 측, 생목의 수분 함유율과 연소열은 계절, 수종, 산지 등 다양한 요소에 의하여 차이가 존재하며, 연소열은 수분함유율 고저에 직접적인 영향을 받으며 소나무 부위별 내화력 측정 기준이 된다. 다음은 감염 피해목과 비 감염 소나무 생목 수간 부의 수분함유율 및 연소열 분석 결과이며 Table 3과 같다.

Table 3의 수분 함유율 실험 분석에 의하면 감염 소나무 수분 함유율은 19.92%, 비 감염 소나무 수분 함유량은 26.27%로 분석 되었다. 비 감염 소나무의 수분 함유율이 적은 가연물인 감염 피해목과 차이를 보이지 않는 이유는 4월과 5월의 나무는 수분과 양분을 잎에 집중시켜 성장을 촉진하고 자체 내화성능을 강화시키는 15%이상의 수분 함유량에서는 열원에 착화되지 않는 목재의 열적 특성은 이 연구의 실험에서의 결과와 일치하지 않는다.

Table. 3의 연소열 실험 분석에 의하면 감염 소나무의 평균 발열량은 4,861.87 kcal/kg, 비 감염 소나무 5,017.33 kcal/kg로 분석 되었으며, 전체 연소열 평균 4,939.60 kcal/kg는 평균 침엽수 발열량을 상회하며 4월 중순에 채취한 시료의 수분 함유량이 건기 대비 높아지는 시기에서의

표 3. 적치 연한별 수분함유율 및 연소열  
Table. 3 Water content and calorific value by piling up terms

구 분		수분함유율(%)				연소열(kcal/kg)			
		1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균
감염 소나 무	1년 미만	19.1	18.4	17.3	18.27	4,810	4,811	4,805	4,808.67
	1년 이상 2년 미만	23.7	22.9	22	22.87	5,343	5,334	5,336	5,337.67
	2년 이상 3년 미만	25.2	23.4	23.1	23.90	4,783	4,781	4,777	4,780.33
	3년 이상 4년 미만	18.4	18.2	17.8	18.13	4,688	4,684	4,674	4,682.00
	4년 이상 5년 미만	16.8	16.4	16.1	16.43	4,711	4,701	4,690	4,700.67
	소계				<b>19.92</b>				<b>4,861.87</b>
비 감염 소나무		27.1	26.1	25.6	<b>26.27</b>	5,012	5,024	5,016	<b>5,017.33</b>

높은 연소열 분석 값으로 선행 연구에서와 같이 소나무 균락이 산불화재의 확산 인자로 직접적 영향이 있고 수분 함유율과 연소열과의 상관관계를 알 수 있다.

Table 3의 감염 소나무와 비 감염 소나무의 수분함유율 및 연소열 분석에서 산야에 적치된 감염 소나무와 비 감염 소나무의 평균 수분 함유율은 산불화재 시 감염 소나무와 비 감염 소나무는 열원에 노출되면 결국 착화되고 그 연소열 방출에 의한 복사열이 화원의 주변 생목 소나무에 무염착화(기화열에 의한 수분 함유량의 증발) 후 급속한 발염착화의 속도와 시간이 대형화재로 확산되는 경향을 보인다. 그러므로 죽은 가연물과 생재의 연소특성을 분석하여 화재성상 특성을 고려해야 한다. 목재는 연소 시 저온에서 완만하게 열분해 되어 탄소, 물 산화된 가스 등을 생성하지만 고온에서는 급격하게 열분해 되어 저온에서 생성되는 분해물과는 다른 물질을 생성하며[24], 일반적인 열분해 반응은 3단계의 과정을 거치게 된다. 1단계는 휘발성 물질과 목탄이 생성되는 열분해, 2단계는 휘발성 물질의 열분해, 3단계는 목탄의 열분해 반응으로 나누어지게 되며 열분해에 의해 생성된 물질은 결국 휘발성 물질과 목탄으로 구별되며  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , 그리고  $CH_4$  가스 등의 혼합물로 구성되어 있으나 구성비에 따라 차이가 있다.[25] 이러한 구성비에 따른 화재특성으로 화염의 크기가 작을 때는 통상적으로 10 cm 이하, 주위로의 열전달이 주로 대류나 전도 열전달에 의하여 일어나지만 화염의 크기가 커지면 20 cm 이상 복사열 전달에 의한 비중이 급격히 상승하게 된다. 따라서 실질적인 화재에서는 복사 열전달이 화염의 전파에 직접적인 영향을 미치게 된다. 화염에서의 복사열 전달량에 대한 예측을 통하여 산림에서는 화재가 더 이상 퍼지는 것을 막아주는 안전지역의 크기를 설정하기도 한다.[26] 복사열 크기가 클수록 연소열이 높다는 것은 열을 발하는 반응에서 촉매적작용을 가진 물질이 존재하게 되어 그만큼 반응이 가속되어 열의 축적이 크게 되어 열분해 반응이 빠르게 진행된 것으로 사료되며, 이에 따른 결과로 무염착화

시간이 짧게 나타난 것으로 사료된다. 착화에 영향을 주는 인자들로는 열의 축적, 열전도율, 연소열, 습도, 표면적 등이 있다.[27]

## V. 결론

이 연구에서 산불화재 시 연소열에 의한 전도, 대류, 복사열에 의한 감염 소나무와 비 감염 소나무의 기화에 수분 함유율 감소에 의한 착화가 생목 소나무의 무염착화, 발염착화의 속도와 시간에 영향을 주어 대형화재로 확산되는 경향을 보인다. 따라서 죽은 가연물과 생재의 연소특성을 분석, 화재성상을 고찰하고 산불발생 시 수분 함유율과 연소열에 의한 산림연료의 열적특성을 고려하기 위하여 침엽수 대표수종인 감염 소나무와 비 감염 소나무 등을 대상으로 수분 함유율에 의한 착화특성, 연소열에 의한 전도, 대류, 복사열 전달량에 영향을 주는 인자들을 분석하고 감염 소나무의 수분 함유율과 연소열을 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

### (1) 수분함유율 분석

평균 19.92% 수분을 함유한 감염 소나무와 26.27% 수분 함유율의 비 감염 소나무는 화재 초기 발염착화는 나타나지 않으며 화원 주위의 가연물인 감염 소나무, 숲 가꾸기 부산물 등 죽은 연료 등으로 먼저 착화되고 화재 성장기가 되면 높은 연소열에 의한 전도, 대류, 복사열 크기가 커질수록 생재의 부위별 수분 함유량이 급격히 감소하여 착화되면 화원은 대형화 한다. 따라서 산불 발생 시 전도 대류 복사열에 의한 착화의 순서는 두께 직경 1~2 mm이내인 솔잎과 두께가 직경 20 mm이내인 겉가지 그리고 수간 부로 착화되고 생재의 부위별 수분 함유량의 급격한 기화가 가속되면 수분 함유율에 의한 내화력은 더 이상 건조되지 않는 단계인 평형 수분 함유율에 도달하고 수분 함유율이 15% 이하에서는 열원에 의하여 착화되지 않는다는 목재의 열적 특성에 반하는 결과이다. 산림 전체 화재 확산의 속도가 빠르게 진행 될 것으로 사료된다.

## (2) 연소열 분석

감염 소나무는 평균 4,861.87 kcal/kg, 비 감염 소나무는 5,017.33 kcal/kg로 감염 피해목과 비 감염 소나무 관계없이 높은 수치를 보였다. 감염 소나무 대비 비 감염 소나무의 연소열이 높은 이유는 생체에 내재된 테레빈유의 성분 때문으로 추정되며 산불화제 시 소나무 수관 부와 수간 부의 두께와 표면적에 전도, 대류, 복사열 전달량의 증가에 따른 수분 함유율의 감소가 착화에 직접적인 원인이 된다는 것을 알 수 있었다.

향후 적치된 감염 소나무의 사후 처리방안을 강구하여 화재 확산 요인을 제거하는 방안을 추가로 연구할 필요가 있다.

## References

- [1] <https://hankookilbo.com/News/Read/> 2015.04.05. 17:37.
- [2] Byung-doo Lee, Hyung-ho Kim, Si-Young Lee.(2001). Analyzing Spread Rate of Samcheok Forest Fire Broken out in 2000 Using GIS. Jour. Korean For. Soc. 90(6), 781-787.
- [3] Sung-Chul KANG, Myoung-Soo WON, Suk-Hee YOON. (2016). Large Fire Forecasting Depending on the Changing Wind Speed and Effective Humidity in Korean Red Pine Forests Through a Case Study. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 19(4), 146-156.  
<https://doi.org/10.11108/kagis.2016.19.4.146>
- [4] Dong-Hyun Kim, Jang-Hwan Kim, Eung-Sik Kim, (2010). The Study on Experimental Method of Smoldering Ground Fire in Forest Fire. J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 24(6), 1-6.
- [5] kim sung yong, Hee young Ahn, Chun Geun Kwon, Byung-doo Lee. (2016). The Effect of the Changes in Wind Velocity and Slope on Forest Fire Behavior in *Pinus densiflora* Stands. Crisisonomy 12(11), 27-36.
- [6] Ye-eun Lee, Jeong-Ki Kim, Cheol-An Bang, Song-Hee Han, Chun-Geun Kwon. (2020). An Experimental Study on the Combustion Characteristics of *Pinus densiflora* Surface Layer by Slope Condition. Crisisonomy. 16(6), 85-95.
- [7] Y. S. Kim, M. S. Won, S. H. Youn. (2015). Fuel Type Classification of *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis* Forest Stand in South Korea, Center for Forest & Clim, 121-125.
- [8] Kim, Dong Hyun, Takeyoshi Tanaka Lee Myung Bo, Kim, Kwansil Il. (2009). Study on the flame height definition in Forest. Fire Science and engineering, 365-371.
- [9] Park, Young-Ju-Lee, Hae-Pyeong. (2010). Thermal Characteristics of Living Leaves in *Pinus densiflora* with Heat Flux. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 10(5), 75-82.
- [10] Chan-Ho Yeom, "A Study on prevention of Forest Fires of Adjacent Forest Facilities." Doctoral Dissertation in Korea, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 2019. 27-30
- [11] Kim, Dong Hyun, Takeyoshi Tanaka, Keisuke Himoto, Lee Myung Bo, Kim, Kwansil Il. (2008). A Numerical Study of 1-D Surface Flame Spread Model - Based on a Flatland Conditions - J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng, 22(2), 63-69.
- [12] Haepyeong Lee, Youngju Park. "A Study on Mapping Forest Fire Risk Using Combustion Characteristic of Forest Fuels : Focusing on Samcheok in Gangwon-do." Journal of The Korean Society of Disaster Information 13.3 (2017): 296-304.  
<https://doi.org/10.15683/kosdi.2017.09.30.296>
- [13] Si-Young Lee, Myung-Woog Lee, Chan-Ho Yeom, Chun-Geun Kwon, Hae-Pyeong Lee, (2009). Comparative Analysis of Forest Fire Danger Rating on Forest Characteristics of Thinning Area and Non-thinning Area on Forest Fire Burnt Area. J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 23(4), 32-39.
- [14] Oh, Jin Youl, Park, Young Ju, Lee Si-Young, Lee, Hae-Pyeong,(2010) A Study on the Combustion Characteristics for Pine Cones by Species. Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference 2010, 429 - 432.
- [15] Sung Yong Kim , Suk-Hee Yoon, Lee Byungdoo, Young Jin Lee. Mina Jang, YouSeung Kim(2015). Comparison of Forest Fire Potential Hazards for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* Stands. Crisisonomy. 11(11), 261-276.
- [16] Kim Jong-won. (2005). What is the problem with pine nematodes and pine trees in Korea seen through forest fires on the east coast. Journal of Ecology and Environment, 28(2),



- 113-120.
- [17] Dahee Kim, Seojin Kim, Chaewon Kim, Eunjoung Nam, Hyungwhan An, (2015). A Study on a Physical Hazardous Properties for Flammable Flower and Resin powder. The Korean Institute of Gas, 132-132.
  - [18] Byungdoo Lee, Jungeun Song, Myungbo Lee, Joosang Chung, (2008) The Relationship between Characteristics of Forest Fires and Spatial Patterns of Forest Types by the Ecoregions of South Korea. Jour. Korean For. Soc. 97(1), 1-9.
  - [19] Lee Si-Young, Lee, Hae-Pyeong. (2006). Analysis of Forest Fire Occurrence in Korea. J. of Korean Institute of Fire Sci, 20(2), 54-63.
  - [20] Newsis 2016.10.09
  - [21] Ha-Sung, Kong, Choi Young-young, Fire Protection Theory, Yes Media (2018), 2-15.
  - [22] Youngjin Kwon And 5 others, Architecture and fire, assimilation technology (2006), 167
  - [23] Byungdoo Lee, Si-Young Lee, Joo-Sang Chung, (2005) The Behavior Characteristics of the 2005 Yangyang Forest Fire, J. of Korean Institute of Fire Sci., 19(4), 1-6.
  - [24] Hong-Keung Song, Jae-Kwang Kim, (1994)Essential Oil Components of Leaves and Resins from Pinus densiflora and Pinus koraiensis. Journal of the Korean wood science and technology. 22(3), 55-67.
  - [25] Lee Byeong-geun (2005) New Forest Engineering. Yeungnam University Press
  - [26] Chung-Ik Kim, (1998) Study on the radiant heat transfer of fire, Fire protection technology, 25, 13-17.
  - [27] Sungho Hyun, Changwoo Lee, Sihwan Cha (2003) Fire Protection Explosion Protection Engineering. Shinkwang Cultural History 10-47.