

건조기 소나무 수관부 부위별 연소특성에 관한 연구

권혁¹ · 이종호^{2†}

A Study on the Combustion Characteristics of the Crown of Pine Trees in the Drying Season

Hyuk Kwon¹ · Jong Ho Lee^{2†}

[†]Corresponding Author

Jong Ho Lee

Tel : +82-63-850-6986

E-mail : yijho@naver.com

Received : June 1, 2023

Revised : July 27, 2023

Accepted : August 17, 2023

Abstract : Pine trees, which account for 23% of the forested area of the Republic of Korea, are highly vulnerable to fire in comparison to broad-leaved trees due to the presence of consistent water tube sections throughout the year and resin that is composed of approximately 20% oil. In addition, the pattern of forest fires is determined by weather, topographic conditions, and fluctuation in moisture content. Therefore, when fire breaks out in pine tree forests during the dry season (January to March), it is difficult to extinguish, and it quickly spreads. In this study, the combustion characteristics of pine needles, pine cones, and pine branches in the water tube sections of living pine trees were compared and analyzed in accordance with the moisture content as per the ISO 5660-1. The monthly moisture content was analyzed from January to March, and it was found to be the lowest in March, with 53.6% for pine needles, 51.9% for pine branches, and 10.9% for pine cones. In particular, pine cones were more vulnerable to fire as compared to pine needles and pine branches because their moisture content was more than five times lower than that of pine needles and branches. The ignition time, which affects the speed of flame propagation, was the most rapid in March, and the fastest ignition time was for pine cones, at 19 seconds, followed by 34 seconds for pine needles, and 256 seconds for pine branches. The pine branches were the last to be ignited due to the effect of density, according to the thickness and specific gravity of the specimen. The peak heat release rate, which is a measurable index of fire intensity, was analyzed for pine cones and found to be 184.28 kW/m², while the mean effective heat of combustion was 19.79 MJ/kg, and the total heat release rate was 39.7 MJ/m², and these values were higher than those of pine branches and pine needles. Thus, we determined that the flame propagation speed and fire intensity according to the moisture content can be used to evaluate the risk of fire to the water tube section of pine trees. It is suggested that because of the combustion characteristics of the pine cone in March, that is when the forest is most vulnerable to fires.

Key Words : pine tree, crown fire, moisture content, combustion characteristics

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

최근 빈번하게 발생하는 동해안 지역의 산불은 점차 대형화되고 피해 규모도 커지고 있다. 한국의 국토는 산불에 취약한 63.5%의 산지로 구성된 동고서저(東高西低)의 지형 특성이 동해안 지역에 집중되어 있다. 이중 96%가 잠재적인 산불피해를 볼 수 있는 소나무 단

순림으로 조성된 임목지의 비율이 국내 산림면적의 23%를 차지해 단일수종으로는 분포 면적이 매우 높다. 또한, 경사가 급한 산지가 많아 산불이 확산되기 쉬우며, 대형산불이 발생할 가능성이 점차 커지고 있다¹⁾. 우리나라의 겨울철과 봄철에 최저 상대습도의 감소와 기온상승도 매년 산불 발생 요인이 되고 있다.

산불은 지중화(Ground fire), 지표화(Surface fire), 수

¹원광대학교 소방행정학과 박사과정 (Department of Fire Administration, Wonkwang University, Iksan)

²원광대학교 소방행정학과 교수 (Department of Fire Administration, Wonkwang University, Iksan)

간화(Stem fire), 수관화(Crown fire) 등 네 가지 유형으로 구분된다. 산불 유형 중 대형산불은 수관화와 관련이 있다. 수관화는 3차원 연소 현상으로 확산 속도가 빠르고 화염 강도가 높은 특성을 보인다. 또한, 강풍에 의한 비화(Spot fire)를 양산하여 큰 피해를 입힌다^{2,3)}. 수관화 확산에 영향을 미치는 요소로는 지형, 기상, 임산 연료가 있으며, 서로 복합적이고 유기적으로 작용한다⁴⁾. 우리나라 대표 침엽수종인 소나무는 잎과 가지에 테르핀 등 정유 물질을 함유하고 있어 수관화로의 전이 및 확산이 쉽다. 산불확산에 영향을 미치는 요소는 기상, 지형 및 연료가 있으며, 특히 연료는 기상과 지형과는 다르게 유일하게 인위적인 관리와 제어가 가능하다⁵⁾. 연료는 산불이 확산할 때 연소 물질을 제공한다는 관점에서 중요한 산불 인자로 대형산불 확산의 원인과 위험성을 평가하기 위하여 수관층 연료특성에 대한 다양한 연구를 진행하였다⁶⁾. 또한, 함수율 감소에 가장 큰 영향을 주는 인자인 기상은 강수, 건조 현상에 의한 연료의 수분량 증감과 풍속에 따른 전도, 복사 가속화 현상으로 대형산불 확산 인자로 밀접한 관련성을 갖는다. 연료는 형태, 크기, 배열, 밀도, 상태로 정량적으로 표현되는데, 연소 시에는 이 요소들이 동시에 복합적으로 작용한다. 세 가지 인자 중 임목 연료는 사람이 관리하여 형태 및 구조를 제어할 수 있기 때문에 연료의 구조와 특징 분석이 수관화의 위험성과 확산 형태를 분석을 위해 중요하다⁷⁾. 특히, 수관 화재는 한 번 일어나면 소화가 힘들어 큰 손실을 주기 때문에 가장 무서운 산불이다. 수관화의 연소 속도는 보통 1시간에 2~4 km/h로 진행하며 강풍의 경우에는 1시간에 15 km까지 확산된다⁸⁾. 따라서 소나무 수관부의 솔잎, 솔방울 및 측지의 수분함량에 따른 연소 특성을 분석하여 산림화재 안전 확보를 위한 기초자료를 마련할 필요성이 있다.

국내의 산불 선행연구는 Park 등⁹⁾은 소나무 생엽을 대상으로 복사열을 변수로 25 kW/m², 50 kW/m², 75 kW/m² 연소특성 실험을 수행하였다. Kim 등¹⁰⁾은 침엽수종 잣나무림과 소나무림을 대상으로 잠재적 수관화 산불확산 위험성을 비교하였다. 수관화 전과 결정 확산 속도, 화염 길이, 강도 모두 잣나무림이 높은 결과치로 분석되었다. Kim 등¹¹⁾은 강원도 고성군에서 굴참나무와 소나무에 대한 열량 실험과 현장 조사에서 산불의 확산에 영향을 주는 주된 3가지 요인은 크게 지형, 기상, 연료로 구분하여 제시하였다. Kim 등¹²⁾은 산불의 확산 특성은 가연물의 특성, 바람, 지형 조건과 같은 기상 상태 등과 연관되어 있다고 제시하였다. Park 등¹³⁾은 참나무류의 대표 수종인 굴참나무의 생엽을 대상으로 6월~10월 함수율에 따른 연소특성을 고찰하였다. Kang

등¹⁴⁾은 대형산불 위험지역에 대해 주변 소나무림 간 최대 이격공간과 평균풍속이 대형산불의 연관성을 제시하였다. Kim 등¹⁵⁾은 산불 시 소나무의 복사열이 연소실험 및 화재 시뮬레이션 FDS 측정을 통해 화재가 발생될 경우 열유속 및 발열온도의 영향을 평가하였다. Kang 등¹⁶⁾은 산림 내의 수종 대부분이 침엽수로 구성이 산불의 대형화되는 문제점을 제시하였다.

선행연구는 산불 관련 연구는 다수이나 소나무림 수관화재 위험성에 따른 솔잎, 솔방울 및 측지의 건조기 수분함유율에 따른 연소특성 선행연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산불에 취약한 우리나라 침엽수 대표수종인 건조기(1~3월) 소나무(학명: *Pinus densiflora*) 수관부의 솔잎, 솔방울 및 측지를 대상으로 연소실험을 하였다. 콘칼로리미터(Cone Calorimeter)장비를 사용하여 Heat Flux(50 kW/m²)를 가하는 연소실험에서 화재강도와 화염전파특성을 분석하였다. 수분함유율에 따른 기간별 소나무 수관부 연소특성을 비교·분석하여 산림 화재안전 확보를 위한 기초자료를 제공하고 소나무림의 산불 취약성을 제시하고자 한다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 시료

소나무의 주성분은 셀룰로오스 50%, 헤미셀룰로오스 20%, 리그닌 30%이고, 소량의 회분, 수지, 유지, 정유, 타닌, 색소 등을 함유하고 있다¹⁷⁾. 연소실험에 앞서 살아있는 소나무 수관부의 솔잎, 솔방울 및 측지 등 원형 상태의 시료를 정량화, 균일화하기 위하여 고정용 홀더(가로 100 mm × 세로 100 mm × 높이 25 mm)를 스테인리스 스틸 재질로 제작하여 일정한 실험 결과를 도출하였다. 또한, 시편 홀더의 상단에 격자형 금속 메쉬를 부착하였다. 실험 중 시편의 수분 감소에 따른 수축과 부풀림으로 인한 원추형 히터와 시편 사이의 균일한 가열을 위하여 동일한 간격을 유지하고 시편의 이탈을 방지하여 측정 변수를 제거하였다. 23년 01월부터 03월까지 매월 중순 같은 시간(13시~15시), 전북 지역의 같은 장소(10 m × 10 m) 및 같은 조건(맑은 날이 연속 5일 경과 후)에서 채취하였다. 시료 채취일 기상 조건은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Sampling date weather conditions

Items	Jan	Feb	Mar
Temperatures(°C)	5	5.9	19
humidity(%)	47	45	28
Wind speed(m/s)	2	3.3	4



Fig. 1. Fixed holder specimen of pine needle, pine cone and pine branch.

실험에 사용된 살아있는 소나무 수관부의 솔잎, 솔방울 및 측지는 가공하지 않은 원형 그대로 사용하였다. 시편은 솔잎 두께 1~2 mm, 솔방울 원뿔 밑 부분 직경 25 mm, 측지 두께 10 mm로 균일화하였다. 매일 솔잎, 솔방울 및 측지 각각의 수분함유율 실험 3회, 콘칼로리미터 연소실험 4회를 실시하여 실험 평균값을 사용하였다.

2.2 함수율 측정

함수율 실험방법은 목재제품의 규격과 품질기준(ISO 18134-1¹⁸)에 따른 소나무 수관부의 솔잎, 솔방울 및 측지 300 g을 트레이(tray)에 넣고 계량 건조기를 이용하여 105°C에서 16시간 이상 시료 건조 후 건조기에서 트레이를 꺼낸 후 무게를 측정하여 다음의 식에 의해 함수율을 계산하였다. 시료 당 3회 반복 분석하여 분석 오차를 최소화하였다.

$$MC(\%) = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100(\%)$$

참고로, MC(moisture content)는 함수율[%], W는 건조 전 시료의 중량[g], W₀은 완전 건조시킨 시료의 중량을 나타내며 수분을 전혀 지니지 않는 목재의 무게에 대한 백분율로 표시된다.

2.3 실험장비 및 실험방법

본 연구에서는 월별 수분함유율에 따른 소나무 수관부의 솔잎, 솔방울 및 측지의 연소특성 실험을 위하여 영국 FTT사(Fire Testing Technology Co.)의 dual-Cone Calorimeter를 사용하여 국제규격(ISO 5660-1¹⁹)의 실험방법에 따랐다. 콘칼로리미터는 산소 소비원리를 이용한 실험 장비로 고분자재료, 건축재료, 항공기 및 선박용 내장재 등의 연소특성 평가에 사용된다.

실험 장치는 시편에 수평, 수직 방향으로 열을 방사하는 원추형 히터(Cone Heater), 시편 질량 변화를 측정하기 위한 로드셀, 산소농도 측정 및 유량측정을 위한 로드셀, 산소농도 측정 및 유량측정을 위한 배출설비,

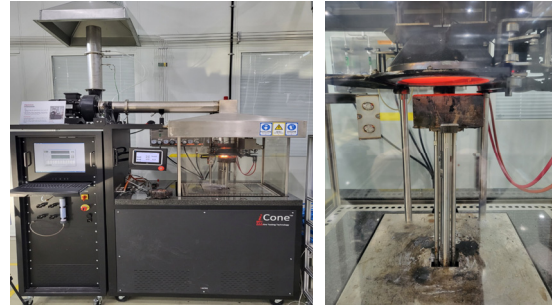


Fig. 2. Cone calorimeter equipment.

Table 2. Experimental conditions of cone calorimeter

Items	Cone calorimeter
Size(mm)	100×100
Weight(g)	32
Heat flux(kW/m ²)	50
Test time(s)	600
Material condition	Raw

산소분석기 등의 분석시스템 및 실험 데이터를 자동으로 수집 처리할 수 있는 데이터 수집분석시스템, 연기 발생을 측정하기 위한 헬륨-네온 레이저 연기측정시스템 등으로 구성되어 있다.

연소특성으로 착화시간(TTI : Time to Ignition, s), 화재의 크기를 정량적으로 표현 할 수 있는 핵심 특성으로 열방출률(HRR : Heat Release Rate), 최대 열방출률(pK HRR : Peak rate of heat release kW/m²), 평균 열방출률(M HRR : Mean Heat Release Rate, kW/m²), 총방출열량(THR : Total Heat Release Rate, MJ/m²), 평균 유효연소열(M EHC : Mean Effective Heat of Combustion, MJ/kg), 질량감소율(MLR : Mass Loss Rate, g/s)을 측정하여 분석하였다.

발열량(HRR)은 재료의 연소 시 소비되는 산소소비를 측정하여 HRR을 역으로 계산한 것으로 산소 1 kg당 약 13 MJ의 열방출을 한다고 가정하여 계산한다. 1~3월 실험실 내부 온도는 16°C, 습도 50%로 같았다. 실험조건은 Table 2에 제시하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 솔잎 연소특성 분석

1월, 2월 및 3월의 솔잎 수분함유율은 58.4%, 57.7%, 53.6%로 측정되었다. 1월 기준 2월 1.2%, 3월 8.22% 감소하였다. 착화시간은 38 s, 37.33 s, 34 s로 분석되었고, 1월 기준 2월 1.75%, 3월 10.53% 감소하였다. 솔잎의 1~3월의 수분함유율 감소에 따른 착화시간은 감소

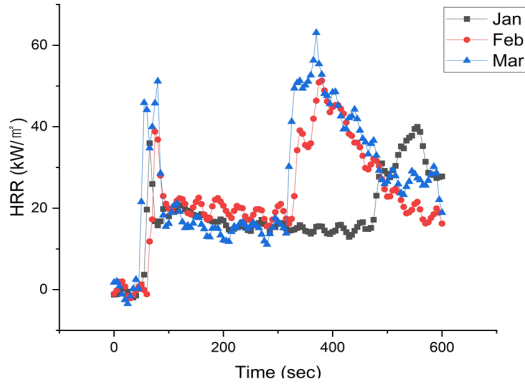


Fig. 3. HRR curves of pine needle by period.

하고 열방출률, 유효연소열 및 총방출열량은 상승 곡선의 추세를 보였다. 따라서 솔잎의 수분함유율 감소에 따른 연소특성은 3월이 화재에 가장 취약한 분석 결과를 보였다.

Fig. 3은 솔잎의 1~3월의 열방출률을 나타낸 것이다. 최대열방출률은 1월의 42.6 kW/m² 기준 2월은 47%, 3월은 50.14% 증가하였다. 평균열방출률은 1월의 19.99 kW/m² 기준 2월은 30.72%, 3월은 46.47% 증가하여 3월의 열방출률 상승 폭이 가장 컸다. 솔잎은 30 s 대 착화 후 300 s에서 급격하게 상승하고 400 s에서 최대 열방출률을 보였다. 소나무 수관부 분포 면적이 가장 큰 솔잎이 수관화재의 초기 성장 속도 및 크기에 영향을 줄 것으로 추론할 수 있는 분석결과를 보였다.

Fig. 4는 솔잎의 1월, 2월 및 3월의 유효연소열을 나타낸 것이다. 평균 유효연소열은 1월의 4.69 MJ/kg 기준 2월은 47.33%, 3월에는 63.11% 증가하였다. 솔잎의 연소시 발생하는 유효연소열은 1월에 500 s, 2월과 3월은 300 s에서 급격하게 상승하여 600 s에서 최대 유효연소열에 도달하였다. 1월의 수분함유율과 2월, 3월의 수분함유율 감소 폭에 따른 최대 유효연소열에 이르는 시간은 약 200 s의 차이를 보였다.

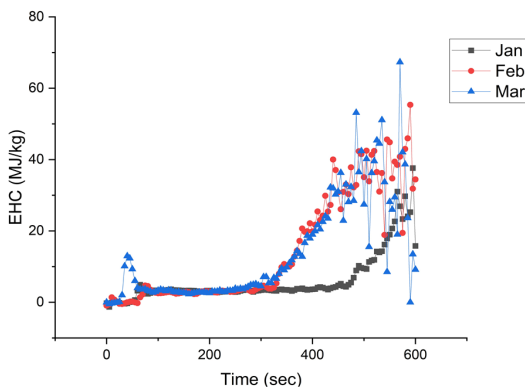


Fig. 4. EHC curves of pine needle by period.

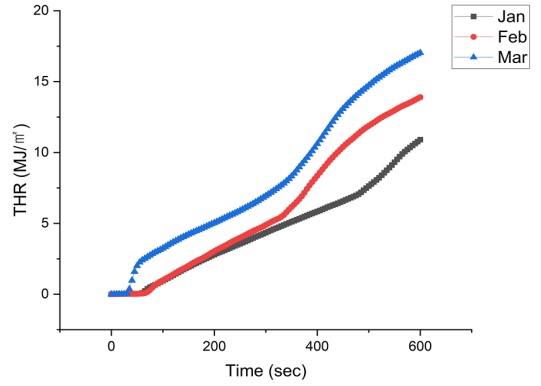


Fig. 5. THR curves of pine needle by period (Jan, Feb, Mar).

Fig. 5는 솔잎의 총방출열량을 나타낸 것이다. 1~3월 모두 30 s대 착화 후 600 s까지 증가 추세를 보였다. 1월 기준 2월의 총방출열량은 300 s~600 s 구간에서 증가하였고, 3월은 34 s에서 착화 후 600 s까지 1월, 2월 대비 약 3 MJ/m²가 높았다. 화재강도와 화염전파 속도 측정지표인 HRR, EHC 및 THR은 수분함유율 감소와 연소시간 경과에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2 솔방울 연소특성 분석

1월, 2월 및 3월의 솔방울의 수분함유율은 각각 16.16%, 13.9%, 10.9%로 1월 기준 2월은 14% 3월에는 32.55%로 3월에 급격하게 감소하였다. 착화시간은 28 s, 24 s, 19 s로 분석되어 1월 기준 2월은 14.29%, 3월에는 32.14% 감소하여 1월 기준 3월에 1.5배, 솔잎보다 3배 이상 착화가 빠르게 진행되었다. 솔방울의 1~3월 수분함유율 감소 추세에 따른 착화시간 감소와 열방출률, 유효연소열 및 총방출열량은 증가 추세를 보였다. 따라서 솔방울의 수분함유율에 따른 연소특성은 1~3월 모두 화재에 취약하였다.

Fig. 6은 솔방울의 1~3월의 열방출률을 나타낸 것이다. 최대열방출률은 1월 161.67 kW/m² 기준 2월은

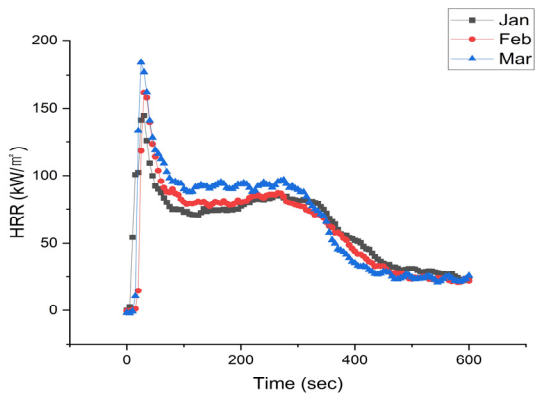


Fig. 6. HRR curves of pine cone by period (Jan, Feb, Mar).

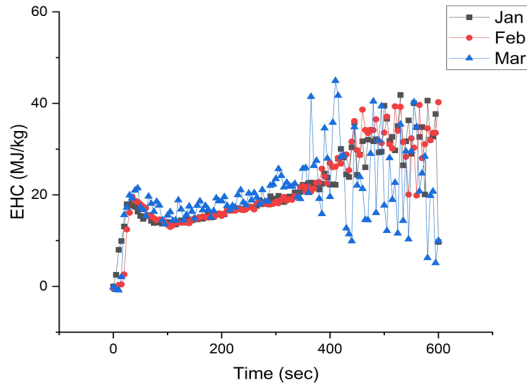


Fig. 7. EHC curves of pine cone by period (Jan, Feb, Mar).

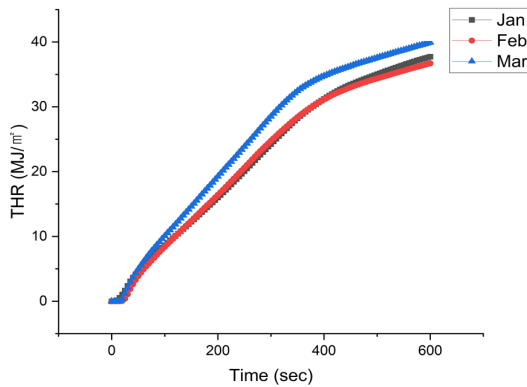


Fig. 8. THR curves of pine cone by period (Jan, Feb, Mar).

2.96%, 3월에는 13.99% 증가하였다. 평균열방출률은 1월 62.72 kW/m² 기준 2월은 1.18%, 3월에는 8.31%로 증가하였다. 20 s대에서 착화 후 급격하게 상승하여 30 s에서 순간 최대 열방출률을 보였다. 월별 열방출률은 유사한 분석결과를 보였다. 솔방울과 솔잎은 소나무 수관화재의 초기 성장 속도 및 크기에 영향 주며 솔방울이 가장 높은 열방출률을 보였다.

Fig. 7은 솔방울의 1~3월의 유효연소열을 나타낸 것이다. 평균 유효연소열은 1월 17.98 MJ/kg 기준 2월은 0.72%, 3월에는 10.07%로 증가하였다. 1~3월 솔방울의 유효연소열은 유사한 분석결과를 보였다.

Fig. 8은 솔방울의 1~3월의 총방출열량을 나타낸 것이다. 총방출열량은 1월 36.32 kW/m² 기준 2월은 2.59%, 3월에는 9.31% 증가하였다. 1~2월은 같은 추세로 20 s대에서 착화 후 600 s까지 상승 추세를 보였다. 3월에는 1~2월 대비 증가하였으며 화재강도와 화염진파속도 측정지표인 HRR, EHC 및 THR은 월별 유사한 분석결과를 보였다.

3.3 측지 연소특성 분석

1월, 2월 및 3월의 측지 수분함유율은 각각 52.28%,

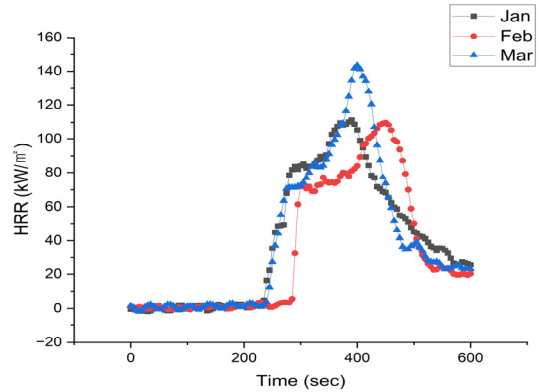


Fig. 9. HRR curves of pine branch by period (Jan, Feb, Mar).

52.9%, 51.9%로 1월 기준 2월은 1.19% 증가, 3월에는 0.73% 감소하였다. 솔잎과 솔방울 수분함수율 감소 대비 측지의 수분함유율 변화는 미미했다. 이에 따른 착화시간도 각각 273.66 s, 291.66 s, 256 s로 1월 기준 2월은 6.58% 증가, 3월에는 6.45% 감소하였다. 솔잎은 36 s, 솔방울은 24 s 평균 착화시간 대비 측지의 착화시간은 평균 273.78 s로 약 9배 이상 착화가 느리게 진행되었다. 측지는 모든 측정지표에서 솔잎, 솔방울의 수분함유율 감소에 따른 증가 추세에 역행하였다. 따라서 측지의 1월, 2월 및 3월의 연소특성은 솔잎, 솔방울 대비 월별 화재 취약성은 유사한 분석결과를 보였다.

Fig. 9는 측지의 1~3월의 열방출률을 나타낸 것이다. 최대열방출률은 1월 113.48 kW/m² 기준 2월은 8.08%, 3월에는 29.2% 증가하였다. 1월과 2월 열방출률 대비 3월에는 증가하였고, 1월과 3월은 250 s에서 400 s 구간에서 급격하게 상승하였다. 수분함유율이 높은 2월은 400 s에서 500 s 구간에서 상승하였다. 솔잎과 솔방울은 소나무 수관화재의 초기성장속도 및 크기에 영향 주고 측지는 수관화재 중기 성장속도와 크기를 주도할 것으로 분석할 수 있다.

Fig. 10은 측지의 1~3월의 유효연소열을 나타낸 것

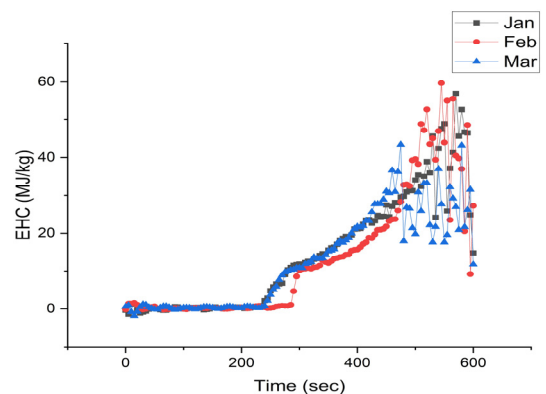


Fig. 10. EHC curves of pine branch by period (Jan, Feb, Mar).

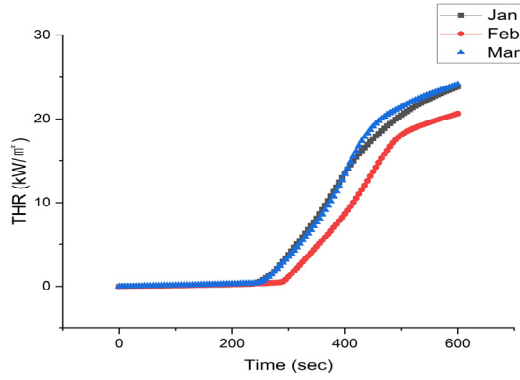


Fig. 11. THR curves of pine branch by period (Jan, Feb, Mar).

이다. 평균 유효연소열은 1월 18.02 MJ/kg 기준 2월은 2.28%, 3월에는 1.66% 감소하였다. 측지는 1월과 3월 수분함유율 52%에서 260 s에서 착화후 600 s까지 유효연소열이 증가하였고 2월에는 291 s에서 착화후 600 s까지 증가하는 1~3월 유사한 분석결과를 보였다. 표준편차 ±0.5의 수분함유율에 변화에 따른 유효연소열의 변화를 또한 유의미하지 않았다.

Fig. 11은 측지의 1~3월의 총방출열량을 나타낸 것이다. 총방출열량은 1월 23.43 kW/m² 기준 2월은 14.43% 감소하였고 3월에는 0.94% 증가하였다. 측지는 1월과 3월 260 s에서 착화후 600 s까지 총방출열량이 증가하였다. 2월에는 291 s에 착화후 600 s까지 1~3월 유사한 분석결과를 보였다.

3.4 소나무 수관부 월별 비교·분석

Table 3은 소나무의 솔잎, 솔방울 및 측지의 1월 연소특성을 비교·분석하여 제시하였다. 1월의 소나무 솔잎, 솔방울 및 측지의 연소특성 분석결과 솔방울이 최대열방출률 161.67 kW/m², 총방출열량 36.32 MJ/m²으로 가장 높았다. 평균열방출률 67.97 kW/m², 유효연소열은 18.02 MJ/kg으로 측지가 가장 높게 분석되었다. 또한, 중량감소율은 2월과 3월 각각 1월 0.037 g/s 기준 8.82% 감소하였다. 따라서 화염전파속도는 솔방울이 가장 우세하며 화재강도는 솔방울과 측지가 유사한 분석 결과였다.

Table 3. Comparative analysis of combustion characteristics in January

Items	Pine needle	Pine cone	Pine branch
pK RHR(kW/m ²)	42.6	161.67	113.48
M HRR(kW/m ²)	19.99	62.72	67.97
THR(MJ/m ²)	10.80	36.32	23.43
M EHC(MJ/kg)	4.69	17.98	18.02
MLR(g/s)	0.037	0.031	0.032

Table 4. Comparative analysis of combustion characteristics in February

Items	Pine needle	Pine cone	Pine branch
pK RHR(kW/m ²)	61.75	166.45	122.65
M HRR(kW/m ²)	26.13	63.46	65.04
THR(MJ/m ²)	13.34	37.26	20.05
M EHC(MJ/kg)	6.91	18.11	17.61
MLR(g/s)	0.034	0.030	0.032

Table 4는 소나무의 솔잎, 솔방울 및 측지의 2월 연소특성을 비교·분석하여 제시하였다. 2월의 소나무 솔잎, 솔방울 및 측지의 연소특성 분석결과 솔방울이 최대열방출률 166.45 kW/m², 유효연소열 18.11 MJ/kg, 총방출열량 37.26 MJ/m²으로 가장 높았다. 평균열방출률은 65.04 kW/m²으로 측지가 가장 높게 분석되었다. 또한, 중량감소율은 2월 3.23% 감소하고 3월은 12.9% 증가하였다. 따라서 2월의 연소특성은 측지의 평균열방출률을 제외한 모든 측정지표에서 솔방울이 화염전파속도와 화재강도가 가장 우세한 분석결과였다.

Table 5는 살아있는 소나무의 솔잎, 솔방울 및 측지의 3월 연소특성을 비교·분석하여 제시하였다. 3월의 소나무 솔잎, 솔방울 및 측지의 연소특성 분석결과 솔방울이 최대열방출률은 184.28 kW/m², 유효연소열 19.79 MJ/kg, 총방출열량 39.7 MJ/m²으로 가장 높았다. 평균열방출률은 68.07 kW/m²로 측지가 가장 높게 분석되었다. 또한, 중량감소율은 1월 0.032% 기준 3월에만 6.25% 증가하였다. 따라서 3월의 연소특성에서 측지의 평균열방출률을 제외한 모든 측정지표에서 솔방울이 화염전파속도와 화재강도가 가장 우세한 분석결과로 2월과 유사하였다.

시료 채취일 기상 조건은 1월 대비 3월에 기온 280% 상승, 습도 67% 감소 및 풍속은 100% 증가하였다(Table 1). 이러한 기상 조건에 의한 함수율 변화는 비중의 차이를 나타내고 비중이 달라지면 열전도도 값이 변하는데 이것은 공극 중에 존재하는 건조 공기의 열전도율이 세포벽의 열전도율에 비하여 작기 때문이다²⁰⁾. 함수율 변화에 따라 연료의 조직 및 밀도 차이가

Table 5. Comparative analysis of combustion characteristics in March

Items	Pine needle	Pine cone	Pine branch
pK RHR(kW/m ²)	63.06	184.28	146.62
M HRR(kW/m ²)	29.28	67.93	68.7
THR(MJ/m ²)	16.84	39.7	23.65
M EHC(MJ/kg)	7.65	19.79	17.72
MLR(g/s)	0.034	0.035	0.034

달라짐으로써 저밀도의 연료는 고밀도 연료보다 더 낮은 온도에서 착화 되는 차이를 보인다. 연소 시 가연성 기체의 농도비에 의해 연소 속도 등에 영향을 받아 발열량 특성이 다르게 나타난다²¹⁾. 분석 결과에 따르면 솔잎, 솔방울 및 측지의 함수율 증감을 결정하는 매개 변수는 수없이 많으나 크게 내적 요인과 외적 요인으로 구분할 수 있다. 외적 요인은 나무의 생장기와 휴면기의 기간에 따른 요인과 월별 기온, 습도 및 풍속에 의해 결정된다. 또한, 내적 요인은 나무의 형태에 따른 두께와 조직, 밀도의 고저에 의한 변수가 함수율, 즉 불에 견디는 정도인 내화력을 결정한다. 내화력은 각각의 수관부 연소특성인 화염전파속도와 화재강도에 관여한다. 실험 결과 솔잎은 함수율과 두께가 밀도에 우선하여 빠른 화염전파속도의 차이를 결정한다. 측지는 솔잎과 비슷한 함수율에서 함수율보다 밀도가 우선하여 화염전파속도보다 화재강도의 차이를 결정한다. 낙과 전의 솔방울은 함수율이 가장 낮으며 부피가 크고 저밀도로 화염전파속도와 화재강도에서 솔잎이나 측지보다 화재에 가장 취약하였고 비화의 요인으로 분석되었다. 비화는 산불 진행 방향의 급변 및 수 km까지 넓게 발생하여 근접 지역으로 산불 확대의 위험성, 산불의 대형화를 유발시킨다²²⁾.

우리나라와 같은 온대지방의 수목은 겨울에는 휴면 상태로 들어가고 봄이 되면 생장을 시작한다. 1월에서 3월까지의 소나무는 기후나 시기적으로 이러한 생장 차이에서 내화력의 척도인 함수율, 비중, 밀도가 급격하게 감소한다. 실험 분석 결과를 통한 함수율은 3월이 급격하게 감소하였고 그로 인한 화염전파 속도와 화재강도 측정지표들이 3월에 최고점에 도달했다. 소나무가 대형산불의 원인으로 제기되고 우리나라의 지형, 기후 등도 소나무의 생장에 부적합한 조건으로 변화하고 있다. 대형산불의 위험성을 방지를 위해 경제적 수목으로의 수종 변화와 더불어 산림 생물다양성이 요구된다.

4. 결론

우리나라의 소나무는 상록 침엽 교목으로 연중 일정한 수관부의 면적과 수액인 송진이 가연성 테레빈유로 불에 취약한 성질이 있다. 더불어 소나무 편중 임목형태, 산악지형 및 이상기온으로 건조기인 1월~3월에는 산불 발생 빈도와 규모도 커진다. 본 연구는 1~3월의 솔잎, 솔방울 및 측지 등 소나무 수관부를 구성하는 부위별 수분함유율에 따른 연소특성을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 솔잎은 3월 함수율이 가장 낮았으며 평균 56.56%로 분석되었다. 화재강도와 화염전파특성 지표인 열방출률, 유효연소열 및 총방출열량은 솔방울과 비교하여 3배, 측지보다 2배 낮았다. 착화시간은 평균 35 s로 측지 평균 274 s보다 약 8배 빠른 착화시간 분석결과를 보였다. 지표화에서 전파된 열 유속은 표면적이 가장 큰 솔잎에 확산되어 소나무 수관부의 초기 화재 성장 속도와 크기를 주도할 것으로 분석되었다.

둘째, 솔방울은 원뿔 형태로 1~3월 함수율 분석결과 솔잎, 측지와 비교하여 가장 낮은 13% 평균 함수율과 가장 빠른 평균 착화시간(24 s)으로 분석되었다. 또한, 화재강도 측정지표인 열방출률, 유효연소열 및 총방출열량이 가장 높았다. 따라서 지표화에서 수관으로 화염이 전파되면 솔방울이 수관화재의 초기 성장 속도와 크기를 결정하고 화재의 성장기를 주도할 것으로 분석되었다. 또한, 솔방울은 솔잎, 측지와 비교하여 부피 대비 가볍고 열 축적은 커서 바람에 의한 화원의 원거리 이동인자인 불티와 불씨로 산림화재의 확산의 주된 요인이 될 것으로 분석되었다.

셋째, 측지는 50% 이상의 함수율에 따른 착화시간이 솔잎과 솔방울에 비교하여 약 9배 이상 늦어 화염전파 특성이 가장 낮았다. 화재강도 측정지표에서는 솔방울 대비 최대열방출률 25.1%, 유효연소열 4.56%, 총방출열량 40.73% 낮았으며 평균 열방출률만 4.17% 높게 분석되어 수관화재의 중기 성장 속도와 크기를 주도하여 수관화재에 영향을 끼칠 것으로 분석되었다.

향후 연간 소나무 수관부의 솔잎, 솔방울 및 측지의 수분함유율과 연소특성 실험으로 기초자료를 구축하고, 산불화재 시 수관부 화재 확산 연소특성에 따른 산불예방 및 대응에 필요한 최적의 산불 진압을 위한 다양한 소방력 투입방안을 제시하고자 한다.

Acknowledgement: This paper was supported by Wonkwang University in 2022.

References

- 1) MOIS, Gangwon East Coast Forest Fire White Paper, 2019.
- 2) M. E. Alexander, "Crown Fire Thresholds in Exotic Pine Plantation of Australasia", Australian National University, 1998.
- 3) I. D. Mitsopoulos and A. P. Dimitrakopoulos, "Allometric Equation for Crown Fuel Biomass of Aleppo Pine(*Pinus halepensis* Mill.) in Greece", International Journal of

- Wildland Fire, Vol. 16, No. 5, pp. 642-647, 2007.
- 4) M. G. Cruz, M. E. Alexandre and R. H. Wakimoto, "Assessing Canopy Fuel Stratum Characteristics in Crown Fire Prone Fuel Types of Western North America", *Journal of Wildland Fire*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-50, 2003.
 - 5) S. J. Pyne, P. L. Andrews and R. D. Laven, "Introduction to Wildland fire", John Wiley & Sons, p. 769, 1996.
 - 6) P. L. Andrews, "BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN subsystem, Part 1", Rocky Mountain Research Station, 1986.
 - 7) S. J. Lee, "A Study on the Management of Pinus Densiflora Forests by Spatial Scale to Prevent the Spread of Crown Fires", Domestic Doctoral Dissertation Kongju National University, 2021.
 - 8) J. Y. Kang, S. W. Kim, Y. C. Kim and J. G. Kim, "Forest Environmental Conservation", pp. 39-58, 1997.
 - 9) Y. J. Park, J. Y. Oh, S. Y. Lee and H. P. Lee, "The Characteristics of Combustion for Living Leaves in Quercus Variabilis with Monthly Seasonal Variations", *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 3, pp. 85-90, 2010.
 - 10) S. Y. Kim, S. H. Yoon, Y. S. Kim, B. D. Lee, Y. J. Lee and M. N. Jang, "Comparison of Forest Fire Potential Hazards for Pinus Densiflora and Pinus Koraiensis Stands", *Crisisnomy*, Vol. 11, No. 11, pp. 261-276, 2015.
 - 11) D. H. Kim, J. S. Ko, S. H. Choi and K. I. Kim, "A Study on Fire Investigation & Calorie Analysis of Main Trees in Go-sung Wildfire Land", *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 31-36, 1999.
 - 12) D. H. Kim, Takeyoshi Tanaka, Keisuke 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 and Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 63-69, 2008.
 - 13) Y. J. Park and H. P. Lee, "Characteristics of Combustion for Living Leaves in Pinus Densiflora with Heat Flux", *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 75-82, 2010.
 - 14) S. C. Kang, M. S. Won and S. H. Yoon, "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*, Vol. 19, No. 4, pp. 146-156, 2016.
 - 15) H. S. Kim, Y. J. Kang, J. H. Kim, K. H. Kim, B. D. Lee and J. H. Kim, "Comparison of Experimental and FDS Data for Calculating Heat-Affected Range in Forest Fires", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 29, No. 4, pp. 91-96, 2014.
 - 16) S. Y. Kang, J. Y. Lee and H. Kim, "The Study of Burned-Area Analysis Method for Forest-fire Damaged Area(Investigation for ImSil County, Gyeongju City)", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 27, No. 3, pp. 176-181, 2014.
 - 17) S. H. Lee, "Fire Investigation Theory and Practice", pp. 24-25, 2019.
 - 18) ISO 18134-1, Solid Biofuels Determination of Moisture Content-oven Dry Method - Part 1 : Total Moisture-reference Method.
 - 19) ISO 5660-1, Reaction-to-fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate(Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate(dynamic measurement).
 - 20) H. J. Kim, Y. G. Eum, Y. J. Lee, H. S. Jeong and I. G. Chol, "Introduction to Wood Engineering", 2004.
 - 21) S. H. Hyun, C. W. Lee and S. H. Cha, "Fire Protection Explosion Protection Engineering", pp. 10-47, 2003.
 - 22) S. Y. Lee and H. P. Lee, "Analysis of Forest Fire Occurrence in Korea", *Fire Science and Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 54-63, 2006.