

영동지역 관목류 부위별 연소특성에 관한 연구

박영주 · 오진열* · 이시영 · 이해평**

강원대학교 방재전문대학원, 강원대학교 산업과학대학원*, 강원대학교 소방방재학부**

The Characteristics of Combustion for Living Leaves and Branches of Shrubs in Youngdong Areas

Park, Young-Ju · Oh, Jin-youl* · Lee, Si-Young · Lee, Hae-Pyeong**

Professional Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University,
Graduate School of Industry Science, Kangwon National University*
School of Fire & Disaster Prevention, Kangwon National University**

요 약

본 연구에서는 산불발생 시 삼림 내 가연물의 화재강도 및 산불위험성을 예측하기 위하여 영동지역에서 자생하는 관목류 가운데 주요 분포수종으로 생강나무와 초피나무를 대상으로 생엽과 가지부위를 채취하여 착화특성, 화재전파특성, 피난특성을 고찰하였다. 발화온도 범위는 400℃~440℃로 확인되었으며 생강나무의 생엽은 착화가 가장 빠르게 개시되었으며 가지부위는 생엽보다 착화는 늦으나 착화 후 화염유지시간이 길고 비교적 빠른 시간에 많은 열량을 방출하는 것으로 나타났으며 초피나무의 가지부위는 연기방출량과 CO 및 CO₂의 방출량이 많은 것을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

우리나라의 산불은 삼림자원의 증대로 인한 가연성 지피물량의 증가와 사계절의 구별이 뚜렷하여 휴면기에 들거나 건조 기후로 인한 대형 산불이 증가하고 있다. 이러한 대형 산불의 위험성을 예측하기 위해서는 산불의 확산인자인 기상, 지형, 연료와 연계한 유기적인 해석과 연료의 종류 및 습도와 관계와 연소특성 등을 필요로 한다. 세계 각국에서는 이들 확산인자들로 부터 산불위험성예측 프로그램이 많이 실현되고 있으나 우리나라의 경우 지형과 기상에 대한 연구는 많이 진행되고 있으나 삼림 내 연료에 대한 연구는 부족한 실정이다. 삼림 내의 연료로는 낙엽·낙지·초류·임목 등이 있으며 이들 연료들은 산불발생 시 가연물로 작용하여 산소·열과 화합하여 빛을 발생시킨다. 즉 불에 탈수 있는 물질이 산소와 화합하여 열과 빛을 수반하는 화학변화의 현상이 진행되는 것으로¹⁾ 수종별 및 부위별 연소특성에 대한 자료 확보가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 산불발생 시 산림 내 가연물의 화재강도 및 화재전파특성을 예측하기 위한 연소특성자료를 제공하기 위하여 영동지역에서 자생하는 주요 관목류인 생강나무(*Lindera obtusiloba*)와 초피나무(*Zanthoxylum piperitum*)를 대상으로 생엽과 가지부위를 채취하여 발화온도시험, 콘칼로리미터, 연기밀도시험 장비를 이용하여 연소특성으로 착화특성, 화재전파특성, 피난특성 등을 고찰하여 산림 내 가연물의 연소 자료를 확보하는데 목적을 두었다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 실험내용

2.1.1 연료 및 함수율 측정

연료의 선정은 강원도 영동지역에서 자생하는 관목류 가운데 생강나무와 초피나무의 생엽과 가지부위를 대상으로 연소특성 시험을 수행하였다. 연료의 함수율의 측정은 ASTM D2016(American Society for Testing and Material)에 의하여 측정하였으며^{2,3)} 함수율 측정은 3회 측정에 대한 평균치를 결과값으로 얻어 사용하였다. 함수율 측정방법으로는 재료 200g을 취하여 103±2℃에서 온도를 유지하도록 설정한 건조기 내에서 24시간 이상 건조시킨 후 항량이 될 때까지 중량을 측정하여 함수율을 측정하였다. 항량 측정기준은 4시간 간격으로 무게를 측정하였을 때 0.1%의 무게변화가 없을 때까지로 하여 다음 식(1)에 의하여 산출하여 결과 값은 Table 1에 제시하였다. 여기서, MC(moisture content)는 함수율[%], W는 건조 전 시료의 중량[g], W₀은 완전 건조시킨 시료의 중량을 나타낸다. 연료의 채취 시기는 7월~9월 사이 맑은 날이 5일 이상 지속되는 다음날 동일 장소에서 채취하여 연료로 준비하였으며 연료의 형태는 실제 산불발생 시 연료의 형태와 동일한 조건을 적용하기 위하여 원형 상태로 사용하였다. 부위별 연료를 선정함에 있어서 수피부위는 수종의 부위형태의 특성상 동일한 조건의 채취가 어렵고 인위적으로 연료를 가공하여야 하는 문제가 발생하여 실험 시 동일 조건을 적용하기 위하여 연료의 실험대상에서 제외하였다.

$$MC(\%) = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100(\%) \quad (1)$$

Table 1. Percentages of moisture contents for living leaves and branches various shrubs

Species		Moisture Contents(%)
<i>Lindera obtusiloba</i>	living leaves	205.32
	branches	98.23
<i>Zanthoxylum piperitum</i>	living leaves	308.85
	branches	87.5

2.1.2 연소특성 시험

산불발생 시 산림 내 연료의 착화특성, 화재전파특성, 피난특성을 고찰하고자 연소특성 시험을 수행하였다. 착화특성 분석을 위하여 발화온도(IT, Ignition temperature), 착화시간(TTI, Time to ignition), 화염종료시간(FTT, Time to flameout)을 측정하여 분석하였으며 화재전파특성 분석을 위하여 총열방출량(THR, Total heat release), 열방출율(HRR, Heat release rate), 산소소모량(Oxygen concentration) 분석을 하였으며 피난특성 분석을 위하여는 가시거리 예측을 위한 총연기방출량(TSR, Total smoke release), 최대연기밀도(Max. Ds, Maximum Smoke density), 연기온도(Ts, Smoke temperature)를 분석하고 연소생성물로 CO 및 CO₂ 방출농도와 잔류량의 특성을 분석하였다.

2.1 실험방법

2.1.1 착화특성 분석

산림 내 연료의 착화특성 분석을 위하여 일본 Kuramochi사의 모델명 KRS-RG-9000의 Group식 발화온도 시험기⁴⁾와 콘칼로리미터를 사용하여 발화온도와 착화시간 및 화염종료시간을 측정하여 화염유지시간을 분석하였다. 발화온도 측정 시 발염의 확인은 육안에 의해 판단하고, 발화대기 시간은 4s로써 착화원 없이 물질이 자연발화 할 때의 최저온도로 측정되며 발화는 연소의 개시와 관련된 거동의 일부로서 속도제어 메커니즘으로 열의 발생속도와 확산속도가 평형을 나타내는 점으로 정의되며 발화 후 자연소화 되기까지의 화염유지시간은 재료가 복사열에 노출되면서 착화가 일어나는 시간과 착화가 종료될 때의 시간 즉 자연소화될 때까지의 시간을 말하며 화염의 유무를 육안으로 판단하여 분석시스템에 기록하여 확인하였다. 실험조건은 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Experimental conditions of ignition temperature

Items	Contents
Model	KRS-RG-9000
Method of measurement	Group
Weight	20mg
Condition of material	Raw
Waiting time of Ignition(s)	4

2.2.2 화재전파특성 분석

산불발생 시 화재전파특성 분석을 위하여 영국 FTT사의 Dual Cone Calorimeter 시험기⁵⁾를 사용하여 총열방출량, 열방출율, 산소소모량을 분석하였으며 결과 값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 결과값으로 사용하였다. 실험조건은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Experimental conditions of smoke density chamber and cone calorimeter

Items	Contents
Size(mm)	100×100
Weight(g)	50
Heat flux(kW/m ²)	50
Test time(s)	1,800
Material condition	Raw

2.2.3 피난특성 분석

산불발생 시 피난특성을 고찰하기 위하여 영국 FTT사의 Smoke Density Chamber 시험기⁶⁾와 콘칼로리미터를 사용하여 가시거리 확보를 위한 발연량 특성으로 총연기방출량, 최대연기밀도, 연기온도를 분석하고 연소생성물의 CO 및 CO₂ 방출농도와 잔류량 특성을 분석하였으며 결과 값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균치를 결과 값으로 사용하였다. 실험조건은 Table 4에 제시하였다.

Table 4. Experimental conditions of smoke density chamber

Items	Contents
Size(mm)	75×75
Weight(g)	10
Heat flux(kW/m ²)	25
Test time(s)	1,200
Material condition	Raw

3. 결과 및 고찰

3.1 착화특성

Table 5에는 관목류의 생강나무와 초피나무의 생엽과 가지부위의 착화특성을 제시하였다. 발화온도 범위는 400℃~440℃로 확인되었으며 생엽은 가지부위보다 발화온도가 낮게 나타남으로써 부위별 약간의 차이를 확인할 수 있었다. 착화시간은 생엽의 경우 발화온도는 동일한 것으로 나타났으나 생강나무는 41s에 착화가 일어난 반면 초피나무는 착화가 일어나지 않았다. 이러한 차이는 수종간 구성하고 있는 잎의 조직과 수종에 따라 잎의 외부표면(external surface)과 세포간극으로 되어 있는 내부표면(interal surface)의 비가 다르고 수분 함유량에 따른 차이⁷⁾에 기인한 것으로 사료된다. 또한 가지부위는 생강나무와 초피나무 모두에서 착화가 일어났으며 평균 143s 정도에서 착화가 일어나 평균 105s 정도 화염을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 산불발생 시 생강나무의 생엽은 초피나무 생엽보다 착화가 빠르게 개시되어 착화위험성이 클 것으로 사료되며 가지부위는 생엽보다 발화온도는 높고 착화는 늦으나 일단 착화가 개시되면 화염유지시간이 길어 화재에 더 취약할 것으로 사료된다.

Table 5. Characteristics of ignition for living leaves and branches various shrubs

Items	<i>Lindera obtusiloba</i>		<i>Zanthoxylum piperitum</i>	
	living leaf	branch	living leaf	branch
Time to ignition(s)	39	141	not recorded	145
Time to flameout(s)	41	551	not recorded	555
Ignition temperature(°C)	410	440	410	440

3.2 화재전파특성

Figure 1에는 중량 50g의 시료를 대상으로 시간변화에 따라 연소로 인해 방출된 총열방출량 곡선을 나타내었으며 Figure 2에는 시간변화에 따른 열방출율 곡선을 나타내었다. 총열방출량은 시료 표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율을 주어진 시간을 적분하여 누적된 값으로 구하였으며 열방출율은 시료 표면적당 발생하는 열량의 크기로 나타내었다. 또한 최대열방출율은 재료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이다.

생강나무와 초피나무의 부위별 총열방출량은 23~61MJ/m²의 열을 방출하는 것으로 나타났으며 평균열방출율은 13~35kW/m²의 열을 방출하는 것으로 나타났으나 가지부위는 연소초기 600s 전에 열량이 급격히 증가하는 것으로 나타나 생엽과의 차이를 확인할 수 있었다. 이에 대한 결과값들은 Figure 2와 Table 6에 제시하였다. 따라서 가지부위는 생엽보다 비교적 빠른 시간에 많은 열량을 방출하였으며 생엽보다 발열량이 높기 때문에 산발발생 시 주위의 온도를 상승시켜 열확산속도가 빠르게 되어 화재강도 및 화재전파가 가장 빠르게 진행될 것으로 사료된다.

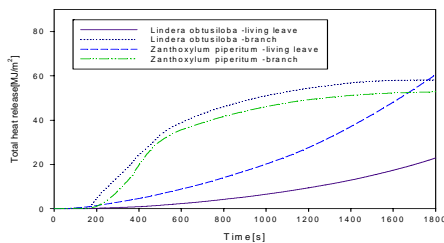


Fig. 2. Total heat release for living leaves and branches of various shrubs.

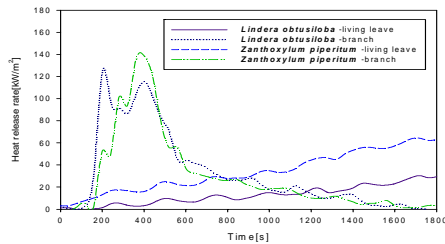


Fig. 3. Heat release rate for living leaves and branches of various shrubs.

Table 6. Characteristics of flame spread for living leaves and branches of various shrubs

Items		<i>Lindera obtusiloba</i>		<i>Zanthoxylum piperitum</i>	
		living leaf	branch	living leaf	branch
Heat release rate	Mean(kW/m ²)	12.95	34.77	33.60	31.76
	Peak(kW/m ²)	31.89	131.31	66.72	146.00
	At time(s)	1,800	195	1,800	375
Total heat release(MJ/m ²)		22.89	57.84	60.52	52.57
Total oxygen consumed(g)		12.87	37.57	34.55	35.61

3.3 피난특성

3.3.1 총연기방출량, 최대연기밀도, 연기온도

Figure 3에는 총연기방출량 곡선을 나타내었으며 Figure 4에는 최대연기밀도 곡선을 나타내었다. Figure 6에는 연기온도를 나타내었다.

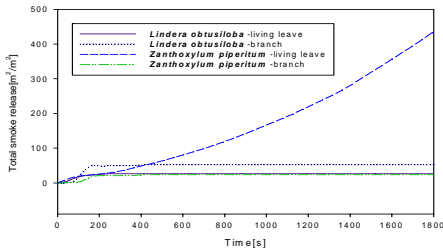


Fig. 4. Total smoke release for living leaves and branches of various shrubs.

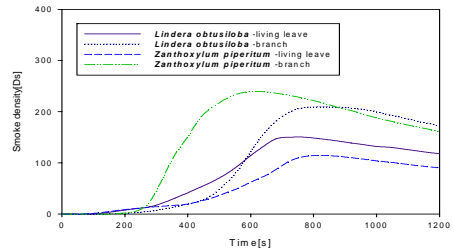


Fig. 5. Smoke density for living leaves and branches of various shrubs.

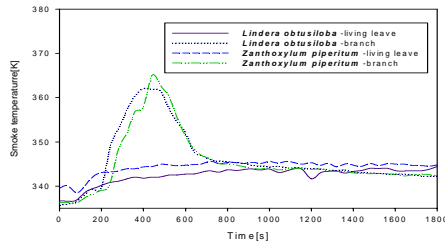


Fig. 6. Smoke temperature for living leaves and branches of various shrubs.

총연기방출량은 중량 50g의 시료에 대하여 부위별 차이를 보였으며 총열방출량이 가장 높은 초피나무의 생엽은 $436\text{m}^3/\text{m}^2$ 로 가장 많은 연기를 방출하는 것으로 나타났다. 최대연기밀도는 가지부위가 대체로 높은 것으로 나타났으며 초피의 가지부위는 비교적 짧은 시간에 가장 많은 연기르르 방출하였고 연기온도는 $344\sim 365\text{K}$ 사이로 나타났다. 이에 대하여 Table 7에 제시하였다. 따라서 산발발생 시 초피나무는 생강나무보다 비교적 연기방출량이 많은 것으로 나타났으며 가지부위가 연소시 많은 연기가 방출되는 것으로 확인되었다. 이와 같은 발연특성은 산발발생시 가지부위 연기노출로부터 시계를 차단하는 요소가 크게 작용하여 가시성과 방향성을 잃게 되어 피난대피의 어려움이 더 클 것으로 사료된다.

Table 7. Characteristics of smoke release for living leaves and branches various shrubs

Items	<i>Lindera obtusiloba</i>		<i>Zanthoxylum piperitum</i>	
	living leaf	branch	living leaf	branch
Total smoke release(m ² /m ³)	22.88	6.04	435.86	10.46
Peak Smoke temp.(K)	344.44	362.13	346.14	365.00
Max. Smoke density(Ds)	151.24	209.78	114.47	239.70
Max. Ds time	760	800	800	600

3.3.2 CO 및 CO₂, 잔류물

Figure 6와 Figure 7에는 수종별 중량 50g의 시료들을 대상으로 착화 후 연소가 지속되는 시간변화에 따른 CO와 CO₂의 방출농도를 나타내고 있다.

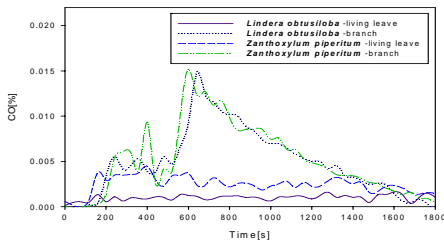


Fig. 6. CO yields for living leaves and branches of various shrubs.

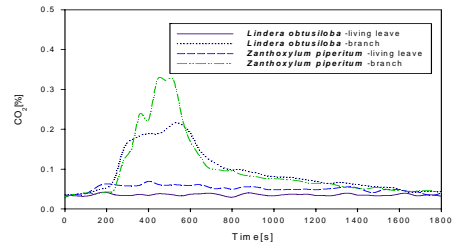


Fig. 7. CO₂ yields for living leaves and branches of various shrubs.

가지부위는 CO와 CO₂의 방출농도가 600s 전·후에서 급격히 증가하는 것으로 나타나 생엽과 비교하여 평균 방출농도가 높은 것으로 나타났다. 이에 대하여 Table 8에 제시하였다. 따라서 산불발생 시 가지부위는 생엽보다 CO와 CO₂에 노출되는 시간이 길어지게 되어 이로 인한 대피능력이 저하될 것으로 사료되며 이러한 연소생성물인 CO와 CO₂ 등은 산불발생 후 2차 피해를 유발⁸⁾할 것으로 사료된다. Figure 8에는 중량 50g에 대한 중량변화 곡선을 나타내었으며 Figure 9에는 중량감소율 곡선을 나타내었다. 열분해에 의한 감량상태를 살펴보면 가지부위는 1,000s 전에서 중량감소가 크게 나타났으며 생엽은 시험 종료시까지 서서히 중량변화를 보이는 것으로 나타났다. 부위별 중량변화에 따른 잔류량의 차이는 가지부위가 잔류량이 많은 것으로 확인되었다. 이러한 잔류물은 고온 조건에서 열분해된 다음 남게 되는 무기화합물로 회분(ash)이라 불리며 회분은 칼슘, 칼륨, 마그네슘, 망간, 규소와 같은 원소를 함유하는 불연성 화합물²⁾로 수종간 구성하고 있는 잎의 외부표면(external surface)과 내부표면(internal surface)의 비가 다르기 때문⁷⁾에 기인한 것으로 사료된다.

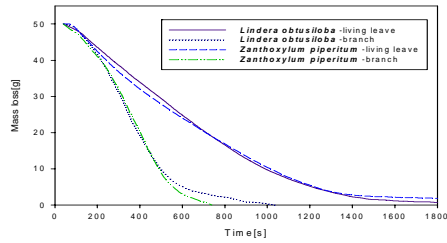


Fig. 8. Mass loss for living leaves and branches of various shrubs.

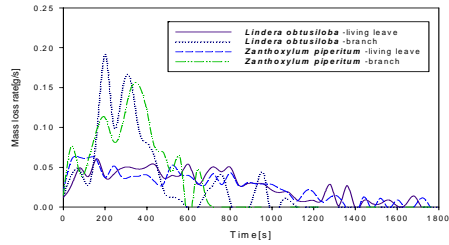


Fig. 9. Mass loss rate for living leaves and branches of various shrubs.

Table 8. Concentrations of the combustion gases for living leaf and branch various shrubs

Items		<i>Lindera obtusiloba</i>		<i>Zanthoxylum piperitum</i>	
		living leave	branch	living leave	branch
CO yields	Mean(kg/kg)	0.0085	0.05	0.0215	0.0529
	Peak(%)	0.0016	0.0149	0.0045	0.0153
	At time(s)	1,280	640	400	600
CO ₂ yields	Mean(kg/kg)	0.4848	1.41	0.6975	1.4978
	Peak(%)	0.0404	0.2154	0.0694	0.3243
	At time(s)	880	520	400	520
Mass loss	Initial mass(g)	50	50	50	50
	Mass loss(g)	47.74	42.14	48.42	41.16
	Final mass(g)	2.3	7.86	1.58	8.84
	Mean MRL(g/s)	0.027	0.025	4.449	0.0249

4. 결론

- 1) 착화특성분석 결과, 발화온도 범위는 400℃~440℃로 확인되었으며 착화시간은 생엽의 경우 발화온도는 동일한 것으로 나타났으나 생강나무는 41s에 착화가 일어난 반면 초피나무는 착화가 일어나지 않았다. 또한 가지부위는 생강나무와 초피나무 모두에서 착화가 일어났으며 평균 143s 정도에서 착화가 일어나 평균 105s 정도 화염을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 산불발생 시 생강나무의 생엽은 초피나무 생엽보다 착화가 빠르게 개시되어 착화위험성이 클 것으로 사료되며 가지부위는 생엽보다 발화온도는 높고 착화는 늦으나 일단 착화가 개시되면 화염유지시간이 길어 화재에 더 취약할 것으로 사료된다.
- 2) 화재전과특성 결과, 중량 50g 시료에 대한 생강나무와 초피나무의 부위별 총열방출량은 23~61MJ/m³, 평균열방출율은 13~35kW/m³의 열을 방출하는 것으로 나타났으며 가지부위는 연소초기 600s 전에 열량이 급격히 증가하는 것으로 나타나 생엽과의 차이를 확인할 수 있었다. 따라서 가지부위는 생엽보다 비교적 빠른 시간에 많은 열량을 방출하였으며 생엽보다 발열량이 높기 때문에 산불발생 시 주위의 온도를 상승시켜 열확산속도가 빠르게 되어 화재강도 및 화재전과가 가장 빠르게 진행될 것으로 사료된다.

된다.

- 3) 피난특성분석 결과, 총연기방출량은 중량 50g의 시료에 대하여 부위별 차이를 보였으며 초피의 가지부위는 비교적 짧은 시간에 가장 많은 연기 방출하였고 생엽은 총연기 방출량이 가장 많은 것으로 나타났다. 연기온도는 344~365K 사이로 나타났다. 따라서 산불발생 시 초피나무는 생강나무보다 비교적 연기방출량이 많아 연기노출로부터 시계를 차단하는 요소가 크게 작용하여 가시성과 방향성을 잃게 되어 피난대피의 어려움이 클 것으로 사료된다.
- 4) 또한, CO 및 CO₂ 방출농도특성 분석 결과, 가지부위는 CO와 CO₂의 방출농도가 600s 전과 후에서 급격히 증가하는 것으로 나타나 생엽과 비교하여 평균 방출농도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 산불발생 시 가지부위는 생엽보다 CO와 CO₂에 노출되는 시간이 길어지게 되어 이로 인한 대피능력이 저하될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호 S210808L0101004)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

인용문헌

1. 강전유 외, (2007). “삼림 환경보전학”, 향문사, pp.339-358.
2. 김현중, 엄영근, 이진제, 정희석, 최인규, (2004). “목재공학개론”, 동화기술, pp.33-34.
3. 심종섭 외, “임산화학”, 향문사, pp.137-145(1994).
4. 홍운명, 정국삼, (1992). “安全工學實驗”, 동화기술, pp.9-11.
5. ISO 5660-1, Reaction to fire part 1, rate of heat release from building products(Cone Calorimeter). Generer.
6. ASTM E 662, Test method for specific optical density of smoke generated by solid materials.
7. 임경빈, (2007). “신고 조립학원론”, 동화기술, pp.61-62.
8. 이규송, (2004). “동해안 산불피해지에서 산불 후 경과 년수에 따른 식생구조의 발달”, 한국생태학회지, Vol. 27, No. 2, pp.99-106.