

영동지역 관목류 및 초본류의 연소특성에 관한 연구

박영주 · 이시영 · 김수영 · 원윤범* · 한태진* · 이해평*

강원대학교 방재기술전문대학원, 강원대학교 소방방재학부*

The Characteristics of Combustion for Various Shrubs and Herbs in Youngdong Areas

Park, Young Ju · Lee, Si Young · Kim, Su Young · Won, Youn Bum* · Han, Tae Jin* · Lee, Hae Pyeong*

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

1. 서 론

일반적으로 산불피해지역은 산불 전 식생의 종류와 관리방법, 산불 피해강도, 입지조건 등이 복잡하게 작용하며 모자이크상의 재생패턴을 보인다(심중섭, 1994). 산불 피해강도를 예측하기 위한 방안의 일환으로 산불발생 시 대부분의 임내 가연물들은 충분한 에너지를 갖는 열원에 노출되면 결국 착화되므로 여러 가지 열원에 의한 재료의 연소특성을 고려해야 한다. 목재의 열화는 화염 속에서 연료가 연소되어 발생된 고온의 가스와 입자들이 존재하여 복사, 흡수, 산란, 반사 등을 통하여 전체 복사에너지를 결정하게 되며 열분해생성물 중에서 중요한 가연성물질은 메탄 일산화탄소, 수소, 탄소 등이다. 따라서, 산불 발생 후 산림자원의 손실을 가져올 뿐만 아니라 2차 재해를 유발하기도 한다(이규송, 2004).

따라서 본 연구에서는 산불피해강도 예측을 위한 임내가연물의 연소특성을 고찰하고자 산불 다발지역인 강원도 영동지역에서 자생하는 관목류와 초본류를 대상으로 생엽을 선정하여 콘칼로리미터시험과 연기밀도시험, 발화온도시험 장비를 이용하여 화염전파특성과 가시거리 예측을 위한 발연량 특성, 연소생성물, 착화 특성을 분석하여 산불피해강도 예측을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 재료

본 연구에 사용된 연료는 영동지역에서 자생하는 수종들 가운데 관목류의 산초나무와 개암나무, 초본류의 칩과 엉겅퀴를 대상으로 생엽을 선정하여 채취하였으며 선정기준은

주요 분포 수종으로서 채취 후 함수율을 측정하여 Table 1에 제시하였다. 연료의 형태는 실제 산불발생 시 연료의 연소특성과 동일한 조건을 적용하기 위하여 원형상태로 사용하였다.

Table 1. Moisture Contents of Various Shrubs and Herbs

Species		Moisture Contents(%)
관목류 (Shrubs)	산초나무(<i>Zanthoxylum schinifolium</i>)	287.94
	개암나무(<i>Corylus heterophylla</i> var. <i>thunbergii</i>)	151.62
초본류 (Herbs)	쑥(<i>Pueraria thunbergiana</i>)	285.81
	영경귀(<i>Cirsium japonicum</i> var. <i>ussuriense</i>)	201.35

2.2 실험방법

2.2.1 함수율 측정

연료의 함수율 측정은 다음 식(1)에 의하여 산출하였으며(ISO 5660-1, 1993) 여기서 MC(moisture content)는 함수율[%], W는 건조 전 시료의 중량[g], W0은 완전 건조시킨 시료의 중량[g]을 나타낸다. 함수율을 측정하기 위하여 생연료 200g을 취하여 105℃ 온도를 유지하도록 설정한 건조기 내에서 24시간 이상 건조시킨 후, 항량이 될 때까지 중량을 측정하여 함수율을 측정하였으며, 항량 측정 기준은 4시간 간격으로 무게를 측정하였을 때, 0.1%의 무게변화가 없을 때로 하여 측정하였다.

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

2.2.2 가시거리 예측, 화염전파특성, 연소생성물 분석

산불발생시 가시거리 예측과 화재강도를 예측하기 위한 연료에 대한 기초실험을 수행하기 위하여 영국 FTT사의 Dual Cone Calorimeter Tester(ASTM E 662)와 Smoke Density Chamber Tester(홍윤명, 1992)를 사용하여 영동지역에서 자생하는 주요 관목류 2가지 수종인 산초나무, 개암나무와 초본류 2가지 수종인 쑥, 영경귀를 선정하여 가시거리 예측을 위하여 총연기방출량, 최대연기밀도, 연기온도를 분석과 화염전파특성 분석을 위하여 총열방출량, 열방출율, 산소소모량을 분석, 연소생성물을 분석하였다. 실험조건은 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Experimental Conditions of Cone Calorimeter and Smoke Density Chamber

Items	Cone calorimeter	Smoke density chamber
Size(mm)	100×100	75×75
Weight(g)	50	10
Heat flux(kW/m ²)	25, 50, 75	25
Test time(s)	1,800	1,200
Material condition	Raw	Raw

2.2.3 착화특성 분석

산불 초기 착화위험성 예측을 위하여 착화특성으로 발화온도와, 착화시간, 화염유지시간을 분석하였으며 실험방법으로 일본 Kuramochi사의 모델명 KRS-RG-9000의 Group식 발화점 시험기(홍윤명, 1992)와 Cone calorimeter tester를 적용하였다. 발화는 연소의 개시와 관련된 거동의 일부로서 속도제어 메커니즘으로 발화온도는 열의 발생속도와 확산속도가 평형을 나타내는 점으로 정의된다. 실험조건은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. 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

3. 결과 및 고찰

3.1 화염전파 특성

3.1.1 발열량 분석

Fig. 1에는 관목류와 초본류의 열방출율 곡선을 나타내었으며, Fig. 2는 총열방출량을 나타내었다. Fig. 1의 최대열방출율은 수종간 큰 차이는 없으나 관목류의 개암나무가 1,695s에 21.42kW/m²로 가장 높은 것으로 나타났으며 산초나무는 395s에 21.07kW/m²의 최대열방출율을 보였다. 최대열방출율에 도달하는 시간이 짧다는 것은 화재 발생시 단시간에 화염전파가 용이하다는 것을 의미한다. 또한 평균열방출율은 초본류의 칩이 15.32kW/m²로 가장 높은 것으로 나타났으며 총열방출량은 17W/m²~28W/m² 사이의 열을 방출하는 것으로 나타났다. 총열방출량이 많은 순서로는 초본류는 칩이 27.58W/m²로 영경귀 22.74W보다 높게 나타났으며 관목류는 개암나무 23.2W/m²가 산초나무 17.00W/m²보다 높은 것으로 나타났다. 이에 대하여 Table 4에 제시하였다.

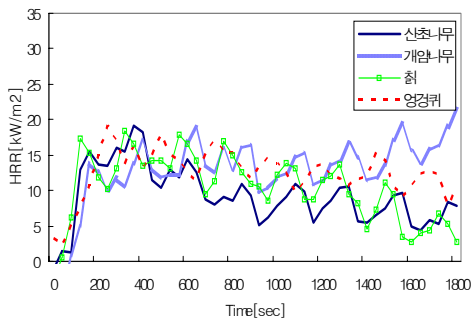


Fig. 2. Heat release rate of various shrubs and herbs.

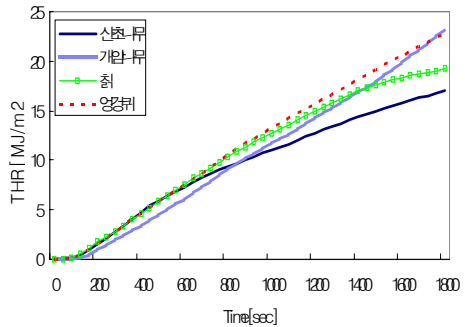


Fig. 3. Total heat release of various shrubs and herbs.

3.1.2 산소소모량, 유효연소열량 분석

Fig. 3에는 각 수종에 대한 산소소모량을 나타내었으며 Fig. 4에는 총산소소모량을 나타내었다. Fig. 3의 산소소모량은 연소초기 400s 이전에 급격하게 산소를 소모하는 것으로 나타났으며 총산소소모량은 관목류의 산초 11.1g, 개암 15.5g, 초본류의 칩 17.39g, 영경귀 14.51g의 산소가 소모되는 것으로 나타나 총열방출량이 가장 높은 초본류의 칩이 17.39g 으로 산소소모가 가장 많았으며 유효연소열량 또한 4.96MJ/kg으로 가장 높은 것으로 나타났다. 이에 대하여 Table 4에 제시하였다.

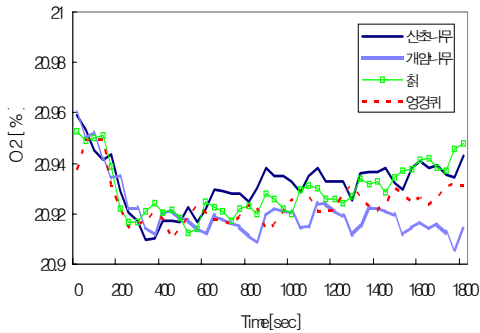


Fig. 4. Oxygen concentration of various shrubs and herbs.

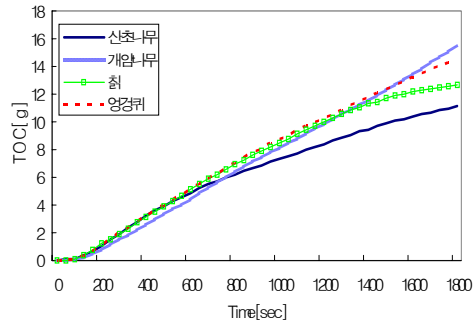


Fig. 5. Total oxygen consumption amount of various shrubs and herbs.

Table 4. Characteristics of Flame Spread for Living Leaves of Various Shrubs and Herbs

Items		관목류		초본류	
		산초	개암	칩	영경귀
Heat release rate	Mean(kW/m ²)	9.43	12.79	15.32	12.61
	Peak(kW/m ²)	21.07	21.42	21.15	19.57
	At time(s)	395	1,695	650	825
Total heat release(MJ/m ²)		17.0	23.2	27.58	22.74
Oxygen concentration Peak(%)		20.90	20.90	20.91	20.91
Total oxygen consumed(g)		11.1	15.5	17.39	14.51
Effective Heat of Combustion (MJ/kg)	Mean	3.13	4.30	4.96	4.37
	Peak	70.09	59.82	71.76	77.89
	at time	395	1,765	1,755	1,430

3.2 발연량 특성

Fig. 5에는 수종별 총연기방출량을 나타내었으며 Fig. 6에는 최대연기밀도를 나타내었다. Fig. 5의 총연기방출량은 관목류의 칩 71.4m³/m², 개암 76.8m³/m², 초본류의 칩 221.46m³/m², 영경귀 51.3m³/m²로 나타나 수종간 차이를 보였으며 초본류의 칩은 다른 수

중에 비하여 연기노출에 대한 위험성이 가장 높은 것으로 나타났다. Fig. 6의 최대연기밀도는 관목류의 산초나무는 960s에 116.04Ds, 초본류의 엉겅퀴는 720s에 89.62Ds로 나타났다. 이처럼 최대연기밀도가 짧은 시간에 도달하는 것은 산불발생 시 가시거리 확보가 어렵고 피난대피시간이 짧다는 것을 의미한다. 이에 대한 결과를 Table 5에 제시하였다.

Table 5. Characteristics of Smoke Release for Living Leaves of Various Shrubs and Herbs

Items	관목류		초본류	
	산초	개암	쑥	엉겅퀴
Total Smoke Release(m ³ /m ²)	71.4	76.8	221.46	51.30
Peak Smoke Temp.(K)	339.99	338.45	334.73	337.62
Max. Smoke Density	116.04	78.61	55.31	89.62
Max. Ds Time	960	960	1,200	720

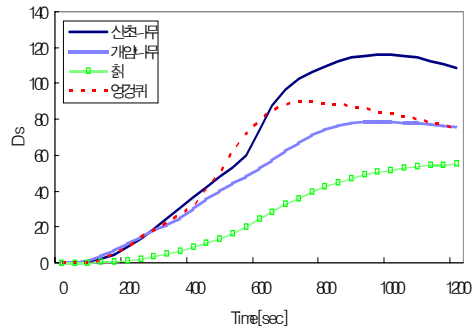
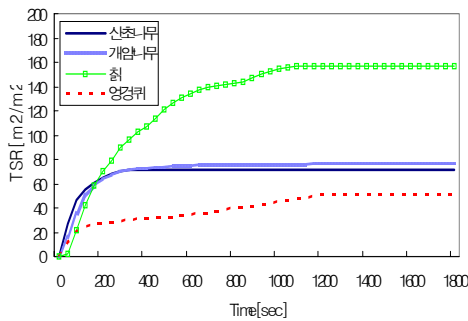


Fig. 6. Total smoke release of various shrubs and herbs.

Fig. 7. Smoke density of various shrubs and herbs.

3.3 연소생성물 특성

3.3.1 CO, CO₂ 분석

Fig. 7과 Fig. 8에는 수종별 생엽의 중량 50g에 대한 시간변화에 따른 연소생성물인 CO와 CO₂의 방출농도를 나타내고 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 관목류의 개암나무가 CO와 CO₂ 방출농도가 대체로 높은 것으로 나타났으며 평균 평균방출농도를 살펴보면 CO는 관목류의 산초 0.01kg/kg, 개암 0.04kg/kg, 초본류의 쑥 0.02kg/kg, 엉겅퀴 0.02kg/kg로 나타났고 CO₂는 관목류의 산초 0.85kg/kg, 개암 0.89kg/kg, 초본류의 쑥 0.79kg/kg, 엉겅퀴 0.88kg/kg으로 나타났다. 이에 대하여 Table 6에 제시하였다. 또한, 중량 50g에 대한 열분해에 의한 감량상태를 살펴보면 총중량감소량은 관목류의 산초 47.9g, 개암나무 47.3g, 초본류의 쑥 49.16. 엉겅퀴 45.91g의 중량감소를 보였으며 초본류의 쑥이 49.16g으로 중량감소가 가장 큰 것으로 나타났다. 이에 대하여 Table 6에 제시하였다.

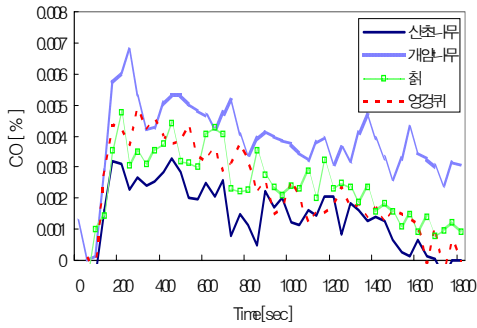


Fig. 8. Oxygen concentration of various shrubs and herbs.

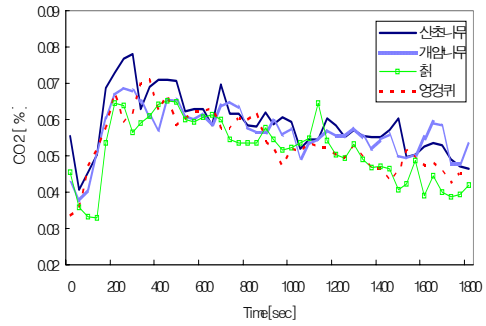


Fig. 9. Total oxygen Consumption amount of various shrubs and herbs.

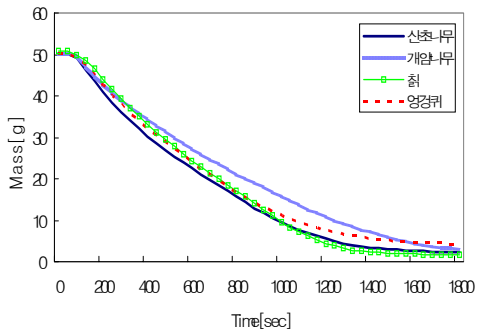


Fig. 9. Mass loss of various shrubs and herbs.

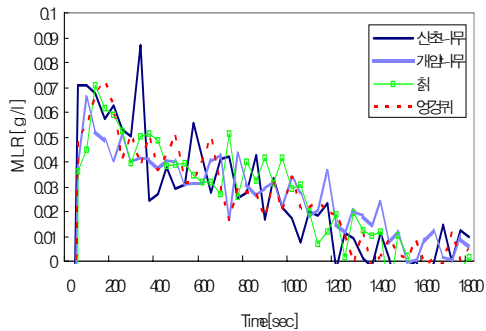


Fig. 11. Mass loss rate of various shrubs and herbs.

Table 6. Concentrations of the Combustion Gases for Living Leaves of Various Shrubs and Herbs

Items		관목류		초본류	
		산초	개암	칩	영경귀
CO yields	Mean(kg/kg)	0.01	0.04	0.02	0.02
	Peak(kg/kg)	0.89	4.45	108.58	2.64
	At time(s)	1,790	1,565	1,640	1,540
CO2 yields	Mean(kg/kg)	0.85	0.89	0.79	0.88
	Peak(kg/kg)	901.34	151.86	8132.74	345.829
	At time(s)	1,790	1,565	1,540	1,540
Mass loss	Initial mass(g)	50	50	50	50
	Mass loss(g)	47.90	47.30	49.16	45.91
	Final mass(g)	2.1	2.7	0.84	4.09
Mass Loss Rate	Mean(g/s)	0.027	0.026	0.027	0.025
	Peak (g/s)	0.087	0.105	0.082	0.079
	At time(s)	320	25	5	10

3.4 착화 특성

Table 7에 관목류 2가지 수종(산초나무, 개암나무)과 초본류 2가지 수종(쑥, 엉겅퀴)에 대한 착화특성을 제시하였다. 발화온도는 관목류의 산초 380℃, 개암 380℃, 초본류의 쑥 420℃, 엉겅퀴 425℃로 나타나 관목류의 산초나무와 개암나무는 초본류의 쑥과 엉겅퀴에 비하여 발화온도가 낮게 나타남으로 착화위험성이 큰 것으로 나타났으며 모든 수종에서 착화는 일어나지 않음을 알 수 있다.

Table 7. Characteristics of Ignition for Living Leaves of Various Shrubs and Herbs

Items	관목류		초본류	
	산초	개암	쑥	엉겅퀴
Time to ignition(s)	-	-	-	-
Time to flameout(s)	-	-	-	-
Ignition temperature(℃)	380	380	420	425

4. 결 론

- 1) 화염전파특성의 발열량 분석결과, 최대열방출율은 수종간 큰 차이는 없는 것으로 나타났으나 도달시간에서 개암나무와 산초나무는 1,300s의 시간 차이를 보였다. 이와 같이 도달시간이 짧다는 것은 화재 발생 시 단시간에 화재가 커질 수 있다는 것을 의미한다. 또한 총열방출량은 17W/m²~28W/m² 사이의 열을 방출하는 것으로 나타났으며 초본류는 쑥이 27.58W/m²로 방출열량이 가장 높은 것으로 나타났고 총산소소모량 또한 총열방출량이 가장 높은 초본류의 쑥이 17.39g으로 산소소모가 가장 많았으며 유효연소열량 또한 4.96MJ/kg으로 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 2) 가시거리 예측을 위한 발연특성 결과, 총연기방출량은 관목류의 쑥 71.4m³/m², 개암 76.8m³/m², 초본류의 쑥 221.46m³/m², 엉겅퀴 51.3m³/m²로 나타나 수종간 차이를 보였으며 초본류의 쑥은 다른 수종에 비하여 연기노출에 대한 위험성이 가장 높은 것으로 나타났으며 엉겅퀴는 최대연기밀도에 도달하는 시간이 가장 짧은 것으로 나타났다.
- 3) 중량 50g에 대한 연소생성물 CO와 CO₂의 방출농도 분석결과, 관목류의 개암나무가 의 CO와 CO₂ 방출농도가 대체로 높은 것으로 나타났으며 평균방출농도를 살펴보면 CO는 관목류의 산초 0.01kg/kg, 개암 0.04kg/kg, 초본류의 쑥 0.02kg/kg, 엉겅퀴 0.02kg/kg로 나타났고 CO₂는 관목류의 산초 0.85kg/kg, 개암 0.89kg/kg, 초본류의 쑥 0.79kg/kg, 엉겅퀴 0.88kg/kg으로 나타났다.
- 4) 착화특성 분석결과, 발화온도는 관목류의 산초 380℃, 개암 380℃, 초본류의 쑥 420℃, 엉겅퀴 425℃로 나타나 관목류의 산초나무와 개암나무는 초본류의 쑥과 엉겅퀴에 비하여 발화온도가 낮게 나타남으로 착화위험성이 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 심종섭, 신동소, 이화형, 임기표, 조남석 (1994). “임산화학”, pp.137-145, 향문사.
2. 이규송, 정연숙, 김석철, 신승욱, 노찬호, 박상덕 (2004). “동해안 산불피해지에서 산불 후 경과 년수에 따른 식생구조의 발달”, 한국생태학회지, 27(2), pp.99-106.
3. ISO 5660-1 (1993). “Reaction to Fire Part 1, Rate of Heat Release from building products(Cone Calorimeter)”, Generer.
4. ASTM E 662, “Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials”.
5. 홍윤명, 정국삼 (1992). “安全工學實驗”, pp.9-11, 동화기술.