

영동지역의 주요 수종별 낙엽과 생엽의 열적특성 및 발화특성에 관한 연구 A Study on Thermal Characteristics and Ignitability of Dead Leaves and Living Leaves for Main Species of Trees in Youngdong Areas

이해평 · 이시영* · 박영주*[†]

Hae-Pyeong Lee · Si-Young Lee* · Young-Ju Park*[†]

강원대학교 소방방재학부, *강원대학교 방재기술전문대학원
(2008. 8. 1. 접수/2009. 2. 13. 채택)

요 약

본 연구에서는 임내 연료의 산불 위험성을 판단하기 위하여 영동지역에 자생하는 주요 7가지 수종의 낙엽과 생엽을 대상으로 TG/DTA와 발화점 시험기를 이용하여 열적특성과 발화특성을 고찰하였다. 가열속도 변화에 따른 열중량변화를 분석한 결과, 가열속도가 증가할수록 열적 지연현상이 나타났지만 중량감소율에 따른 잔류량은 차이가 없는 것으로 나타났다. 수종별 온도변화에 따른 열중량분석 결과, 낙엽과 생엽 모두 침엽수가 활엽수보다 총중량감소율이 큰 것으로 나타났다. 발화특성에 대한 분석결과로는 낙엽과 침엽수의 자연발화온도가 낮고 열에 대한 저항성이 낮기 때문에 생엽과 활엽수보다 발화 위험성이 높은 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In order to inspect the danger of forest fires, the thermal characteristics and the ignitability of the dead leaves and the living leaves for the main species of trees in Youngdong areas have been studied by the TG/DTA and the group flammability tester. From this work, the thermal delay has been increased with the increase of the heating rate. The fractions of the thermal weight loss for the dead leaves and the living leaves of the coniferous trees were higher than those of the broadleaf trees. Also, it was confirmed that the ignitable dangers of the dead leaves and the coniferous trees were higher than those of the living leaves and the broadleaf trees, due to the low auto ignition temperature and thermal resistance.

Keywords : Living leaves, Dead leaves, Moisture content, Thermal characteristics, Ignitability

1. 서 론

우리나라의 산불은 계절풍의 영향을 많이 받는 3월과 4월에 가장 많이 발생하는데 이는 건조한 날씨가 지속되고 바람이 많이 불어 산림 내의 가연물이 건조해지기 때문이다.¹⁾ 특히, 강원도 영동지역은 태백산맥을 넘은 건조한 편서풍이 급격히 하강하면서 와류가 생기고, 매끄러운 표면을 가진 동해와 접촉하여 풍속이 급격하게 증가함으로써 산림 내 연소물의 함유량이 10% 이하로 매우 낮아질 뿐만 아니라 모든 식물들과 지면에 쌓여 있는 낙엽 및 가지 등과 같은 가연물들은

성냥불 정도의 작은 착화원만으로도 발화되기 쉽다.²⁾ 또한, 건조한 날씨가 지속되면 낙엽 층이 쌓이게 되고, 강풍을 동반할 경우, 산불은 쉽게 지표화로부터 수관화로 확산된다. 지난 2000년에 발생했던 동해안 대형산불의 경우, 당해 년 2월 19일부터 4월 19일까지 2개월 동안 산불위험경보에 이르는 최악의 기상 상태가 계속되었으며, 서고동저의 지형적 영향과 높새바람으로 인하여 건조기후가 계속되는 가운데 낙엽뿐만 아니라 나무자체가 매마른 상태였기 때문에 산불이 더욱 확산되었다.³⁾ 산불의 확산에 영향을 주는 인자들로써 임상과 경사, 사면의 장, 해발고 등의 지형상태와 풍향, 풍속, 상대습도 등의 기상상태 그리고 임내 연료의 수종, 밀도, 깊이, 함유율, 생 연료와 마른 연료의 양 등

[†]E-mail: yjpolymer@kangwon.ac.kr

이 있으며, 이런 요소들에 의해 연소의 속도와 방향에 따라 산불의 강도가 달라질 뿐만 아니라 산불의 확산에 영향을 미치게 된다.

산불이 발생했을 경우, 효율적으로 산불을 진화하고 산불로부터 인간의 생명과 재산을 안전하게 보호하기 위해서는 산불의 확산에 영향을 주는 인자들을 이용하여 산불의 확산방향과 확산속도를 예측하는 것이 중요하며, 산불 초기에 지표화의 거동에 대한 예측·분석이 기본적으로 요구된다.⁴⁾ 그러나 산불은 충분한 양의 공기가 공급되고 제한되지 않은 공간상의 다양성을 지니므로 실제 산불 발생 시, 산불의 확산을 예측하는 것이 어려운 문제이며, 지표 가연물의 양이 많을 경우에는 수관화로 전이되기 때문에 산불현장에서 인력과 장비의 접근이 매우 어려워진다. 따라서 실내 실험을 통하여 자료를 취득하는 것이 일반적인 상황이다.⁵⁾ 외국에서는 지표화 연료의 위험성 예측을 위하여 BEHAVE 산불형태 프로그램에서 산불강도를 단위면적당 발생열량으로 정의하여 수량화하는 방법을 제시하는 등의 연구가 수행되고 있으며, 연료의 위험성을 예측하기 위한 각 국의 기준은 산림지역의 식생분포와 종류에 따라 다르게 적용되고 있다.^{5,7)} 이들은 자국 산림의 식생, 지형, 기상 등의 산불관련 인자들을 조사·분석하고 실내의 실험을 통한 기초 자료를 축적함으로써 체계적이고 과학적인 산불방지기술을 정립해가고 있다.^{8,9)} 최근 국내에서도 임내 가연물의 연소특성에 관한 연구를 비롯하여 산불발생 위험분석을 위한 독립변수로서 온도와 습도를 분리하는 단순회귀분석 연구들¹⁰⁻¹²⁾이 수행 중이지만 기초 자료가 너무나 부족한 실정이며, 산불의 연소특성을 보다 체계적으로 확인하기 위해서는 각 지역별로 임상에 따른 연료의 연소특성과 기상 및 지형 특성에 대한 검토들이 종합적으로 병행되어야 할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 지난 2000년 4월초 대형 산불이 발생했던 강원도 영동지역에서 자생하는 주요 수종들 가운데 소나무(*pinus densiflora*), 잣나무(*pinus koraiensis*), 리기다소나무(*pinus rigida*), 해송(*pinus thunbergii*) 등 침엽수종 4가지와 굴참나무(*quercus variabilis*), 졸참나무(*quercus serrata*), 떡갈나무(*quercus dentata*) 등 활엽수종 3가지를 선정하여, 수종별 낙엽과 생엽에 대한 열적특성(thermal characteristics)과 발화특성(ignitability)을 분석함으로써 지표화 연료의 산불 위험성을 판단할 뿐만 아니라 강원도 영동지역의 임내 연료의 산불초기 발화 위험성을 평가하기 위한 기준을 수립하는데 활용될 수 있는 기초자료를 얻는데 목적을 두었다.

Table 1. Percentages of Moisture Content for Dead Leaves and Living Leaves

Species		Moisture Contents [%]	
		Dead Leaves	Living Leaves
Coniferous Trees	<i>Pinus Densiflora</i>	1.43	5.79
	<i>Pinus Koraiensis</i>	1.10	13.67
	<i>Pinus Rigida</i>	1.18	14.64
	<i>Antipathes Japonica</i>	0.88	5.61
Broadleaf Trees	<i>Quercus Variabilis</i>	4.82	11.74
	<i>Quercus Serrata</i>	2.80	9.66
	<i>Quercus Dentata</i>	4.37	8.28

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구에서는 영동지역에서 자생하는 수종들 가운데 7가지 수종을 대상으로 선정하고, 낙엽과 생엽을 채취하여 시료로 준비하였으며, 시료들에 대한 열적특성 및 발화특성을 분석하기에 앞서 채취한 시료들의 함수율을 측정하여 그 결과를 Table 1에 제시하였다. 함수율을 측정하기 위해서 원형의 재료 200g을 취하여 105°C 온도를 유지하도록 설정한 건조기 내에서 72시간 동안 건조시킨 후 중량을 측정하였으며, 건조시간은 예비실험을 통하여 시료의 중량 변화가 나타나지 않는 시간을 반복 측정하여 선정된 값이다. 함수율은 다음 식(1)에 의하여 산출하였다.

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

여기서, MC(moisture content)는 함수율[%], W는 건조 전 시료의 중량[g], W₀은 완전 건조시킨 시료의 중량을 나타낸다.

2.2 실험방법

본 연구에서 선정한 7가지 시료를 대상으로 수종별 낙엽과 생엽의 열적특성을 고찰하고자 TG/DTA 장비를 이용하여 가열속도에 따른 열중량분석 및 시차열분석을 수행하였으며 또한, 수종별 낙엽과 생엽의 발화특성을 고찰하기 위하여 발화점 시험기를 이용하여 자연발화온도 및 발화지연시간을 측정하였다.

2.2.1 열적특성 분석

수종별 낙엽과 생엽의 온도변화에 따른 열적특성을

Table 2. Experimental Conditions of TG/DTA

Items	Experimental Conditions
Sample Weight (mg)	20 ± 0.01
Carrier Gas/flow Rate	Air, 20ml/min
Heating Rates (°C/min)	10, 20, 30
Maximum Temperature (°C)	1,000

고찰하기 위하여 독일 NETZSCH사의 모델명 STA 409 PC/PG의 TG/DTA장비를 이용하여 열중량분석(TGA, thermogravimetric analysis)과 시차열분석(DTA, differential thermal analysis)을 수행하였으며, 실험조건은 Table 2에 제시하였다. 일반적으로 산불발생 시 연소 온도는 800~1,000°C 정도이며, 지표온도는 410~809°C 정도이지만 연료의 양에 따라 1,000°C를 초과할 수도 있는 것으로 보고¹³⁾ 된 바가 있으므로 장비의 여건을 고려하여 최대 온도를 1,000°C로 설정하였다. 또한, 공기 분위기에서 1,000°C까지 승온시킬 때 가열속도에 따른 시료의 열적특성을 고찰하기 위하여 소나무 낙엽을 대상으로 가열속도를 10°C/min, 20°C/min, 30°C/min의 3가지로 변화시키면서 열중량분석과 시차열분석 실험을 수행하였다. 이와 같은 가열속도 변화에 따른 실험 결과를 바탕으로 7가지 수종별 생엽과 낙엽을 대상으로 열적특성을 고찰하기 위한 실험에서는 열적지연 현상이 중간 값에 해당하는 가열속도인 20°C/min으로 선정하여 1,000°C까지 가열하는 방법을 선택하였다. 해당 실험에서는 1,000°C까지 20°C/min의 가열속도로 승온시키는 동안 시료의 중량변화, 분해개시온도, 잔류물의 발생량 등의 열중량분석을 고찰하였고, 아울러 시료의 발열개시온도, 발열최고온도, 발열종료온도, 연소열량 등의 시차열분석을 고찰하였다.

2.2.2 발화특성 분석

산불초기 임내 연료들의 발화 위험성을 평가하기 위한 실험으로서 7가지 수종에 대한 낙엽과 생엽의 발화 특성 분석을 수행하였으며, 일본 Kuramochi사의 모델명 KRS-RG-9000의 Group식 발화점 시험기를 사용하였다. 측정원리는 대기압에서 시험편을 가열로(furnace) 내에 넣으면 발열하기 전까지 처음에는 천천히 질량이 감소되며, 주위로부터 열을 빼앗아 열분해로부터 발생된 휘발성 물질과 수분이 방출되고 순간적으로 착화 분위기가 형성된 부분에서 착화되어 작은 화염이 형성되는 것¹⁴⁾으로서 발염은 육안에 의해 수행하고 발화대기 시간은 4s로써 이때가 열의 발생속도와 확산속도가 평형일 때인데 발화온도는 착화원 없이 물질이 자연발

Table 3. Experimental Conditions of Ignition Temperature Analysis

Items	Experimental Conditions
Method of Measurement	Group Type
Weight [mg]	20 ± 0.01
Delay Time of Ignition [s]	4

화 할 때의 최저온도를 측정하게 된다. 실험은 온도조절기의 설정온도를 설정한 후, 상승과 하강스위치를 사용하여 온도지시계의 온도와 용기의 사용온도에 도달할 때 전압을 조절하고, 시료를 가열로의 투입구에 투입함과 동시에 타이머로 발염까지의 대기시간을 측정하는 발화온도 시험방법에 의하여 수행하였으며, 시험조건은 Table 3에 제시하였다.

발화특성을 분석하는데 있어서 목재의 경우, 고온으로 건조시키는 과정에서 어느 정도 가열시간이 경과하여야만 자연발화 후에 착화되므로 다양한 온도에 따른 시간적 의미를 부여하는 것이 합리적인 것으로 보고¹⁵⁾ 된 바가 있으므로 이에 따라 발화지연시간을 측정하였다. 실험방법은 자연발화온도(AIT, auto ignition temperature)의 측정방법과 동일하며, 220~350°C의 온도범위에서 발화지연시간(delay time of ignition)을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 강원도 영동지역의 임내지표화 연료의 산불 위험성을 판단하고 연료의 산불초기 발화 위험성을 평가하기 위하여 자생하는 주요 수종들 가운데 소나무, 잣나무, 리기다소나무, 해송 등 침엽수종 4가지와 굴참나무, 졸참나무, 떡갈나무 등 활엽수종 3가지를 선정하여, 수종별 낙엽과 생엽의 열적특성과 발화특성을 각각 고찰하였다.

3.1 가열속도의 변화에 따른 열적특성

영동지역의 대표 수종 가운데 하나인 소나무의 낙엽을 대상으로 가열속도의 변화에 따른 열적특성을 고찰하였다. TG/DTA 장비를 이용하여 산소분위기에서 가열속도를 각각 10°C/min, 20°C/min, 30°C/min으로 달리 하면서 1,000°C 온도까지 가열하는 동안 온도변화에 따른 중량변화를 측정함으로써 분해개시온도와 잔류물의 발생량과 같은 열중량분석을 고찰하였으며, 아울러 온도변화에 따른 열량변화를 측정함으로써 발열개시온도, 발열최고온도, 발열종료온도와 연소열량과 같은 시

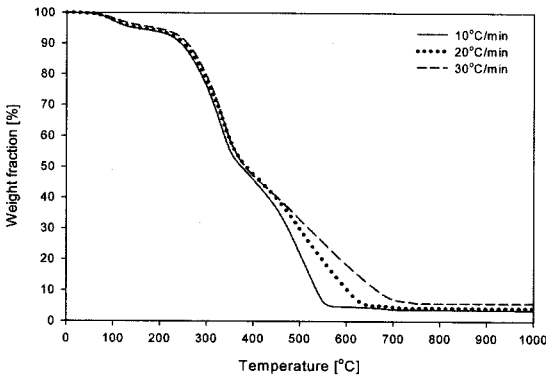


Figure 1. TGA curves for dead leaves of pinus densiflora at various heating rates.

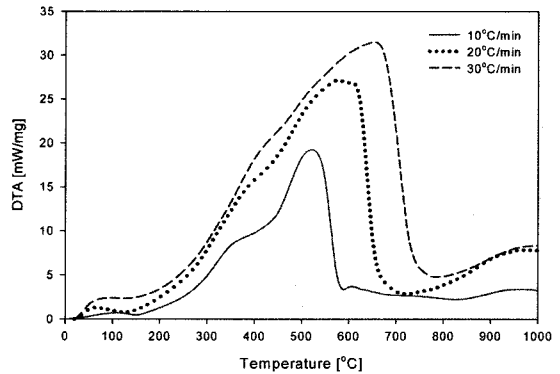


Figure 2. DTA curves for dead leaves of pinus densiflora at various heating rates.

차열분석을 살펴보았다.

3.1.1 열중량분석

Figure 1은 소나무 낙엽을 대상으로 TGA를 이용하여 가열속도를 각각 10°C/min, 20°C/min, 30°C/min으로 달리하면서 최종온도를 1,000°C까지 가열하는 동안 온도변화에 따른 중량변화를 나타낸 중량변화곡선이다.

그림에서 볼 수 있듯이 모든 가열속도에서 3단계에 걸친 중량감소가 일어났으며, 중량감소가 급격하게 일어난 구간을 온도별로 살펴보면 모든 가열속도에서 1단계 중량감소는 250°C까지의 온도구간에서 나타났으며, 열분해가 가장 활발하게 진행되어 총중량의 90% 정도에 해당하는 중량감소가 나타나는 2단계 중량감소는 구간의 시작온도가 250°C 정도로서 모든 가열속도에서 유사하지만 구간의 종료온도는 가열속도 10°C/min에서는 550°C, 가열속도 20°C/min에서는 650°C 그리고 가열속도 30°C/min에서는 700°C 정도로서 가열속도에 따라 약간씩 차이가 나타났다. 또한, 가열속도가 증가할수록 중량감소곡선이 고온 쪽으로 전이하며 열적 지연현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 열적 지연현상은 TGA 장비의 기계적 특성에 따른

것으로서 열전대가 감지하는 측정온도와 시료의 실제 온도가 가열속도에 따라 차이가 발생하기 때문이다. 가열속도가 클수록 열전대가 위치한 시료의 표면을 비롯한 시료 주위 온도보다 시료 내부의 온도가 더 낮은 온도차이가 발생하므로 시료의 표면으로부터 내부까지 열이 전달되는 과정에서 발생하는 저항에 따른 것^{16),17)}으로서 이에 따른 열분해 온도가 지연되는 것으로 사료된다. 이와 같은 2단계 중량감소가 일어나는 온도구간에서의 활발한 열분해 반응은 Figure 2에 제시한 DTA 분석결과에서도 확인할 수 있으며, 3단계 중량감소는 2단계 중량감소가 끝나는 시점부터 실험종료 온도인 1,000°C까지 서서히 중량감소가 일어나는 것으로 나타났다. 가열속도의 변화에 따른 열적 지연현상이 나타나기는 했지만 모든 가열속도에서 중량감소 곡선이 변곡점을 갖는 3단계 기울기를 갖는 형태인 것으로 보아 온도구간별로 각기 다른 성분의 열분해 생성물이 방출된 것으로 사료되며, 본 실험에서는 정량분석에 주안점을 두고 실험을 수행하였기에 각 온도구간별 생성물에 대한 정성분석은 확인하지 못하였다.

Table 4에는 가열속도에 따른 소나무 낙엽의 온도구간별 중량감소와 총중량감소 그리고 잔류량에 대한 결

Table 4. Weight Loss Fractions for Dead Leaves of Pinus Densiflora at Various Heating Rates

Heating Rates	Items	1 Step	2 Step	3 Step	Total Weight Loss Rate [%]	Residue [%]
10°C/min	Weight Loss Rate [%]	9.97	93.55	96.49	96.49	3.51
	Interval Ending Temperature [°C]	240	550	1,000		
20°C/min	Weight Loss Rate [%]	9.80	94.76	95.69	95.69	4.31
	Interval Ending Temperature [°C]	250	650	1,000		
30°C/min	Weight Loss Rate [%]	8.57	92.94	94.15	94.15	5.85
	Interval Ending Temperature [°C]	255	700	1,000		

Table 5. Differential Thermal Analysis for Dead Leaves of *Pinus densiflora* at Various Heating Rates

Heating Rates	Temperature of Exothermic Starting [°C]	Temperature of Exothermic Maximum [°C]	Temperature of Exothermic Ending [°C]	Caloric Value [J/g]
10/min	104.0	522.7	575.0	13,322
20/min	124.8	580.1	675.0	13,193
30/min	125.8	646.1	725.0	12,956

과를 제시하였다. 3회 반복실험을 한 결과, 총중량감소율과 잔류량은 오차범위 내에서 가열속도에 따라 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

이와 같이 가열속도가 증가함에 따라 중량감소를 나타내는 곡선들의 열적분해가 나타나는 부분이 고온쪽으로 이동하는 현상이 나타나는데 이와 같은 결과는 가열속도가 증가할수록 열적지연현상이 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 가열속도의 차이에 따른 총중량감소율은 차이가 없는 것으로 나타났으며, 3회 반복실험한 결과, 오차범위 내에서 중량감소에 따른 잔류량은 거의 동일한 것으로 확인되었다.

3.1.2 시차열분석

Figure 2는 소나무 낙엽을 대상으로 DTA를 이용하여 가열속도를 각각 10°C/min, 20°C/min, 30°C/min으로 달리하면서 최종온도를 1,000°C까지 가열하는 동안 온도변화에 따른 열방출을 나타낸 시차열분석 곡선이다. 각각의 곡선은 가열속도 변화에 따른 단위질량당 소나무 낙엽의 열방출을 특성을 나타내고 있으며, 가열속도 변화에 따른 열방출 특성은 열중량분석과 마찬가지로 가열속도가 증가할수록 발열개시온도, 최고 발열온도, 발열종료온도가 고온쪽으로 이동하며 열적지연현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. Table 5에는 가열속도별로 분석한 발열개시온도, 최고발열온도, 발열종료온도 그리고 발열량 등을 제시하였다. 결과를 살펴보면, 모든 가열속도에서의 발열최고온도는 열중량분석에서 급격한 중량감소가 발생한 2단계 중량감소의 온도구간인 250~700°C에서 나타났으며, 가열속도의 변화에 따른 발열량은 10°C/min에서는 13,322J/g, 20°C/min에서 13,193J/g, 그리고 30°C/min에서는 12,956J/g로 나타났으며, 오차범위 내에서 차이가 거의 없는 것으로 사료된다.

3.2 수종별 열적특성

강원도 영동지역에서 자생하는 주요 수종들 가운데 7가지를 선정하여 해당 수종의 낙엽과 생엽을 대상으로 열적특성을 고찰하기 위하여 TG/DTA를 이용하여

가열속도는 20°C/min으로 고정하고 최종온도 1,000°C까지 가열하면서 온도변화에 따른 각 수종별 생엽과 낙엽의 중량변화를 측정하였다. 해당 실험에서는 수종별 열분해 개시온도와 총중량감소율에 따른 잔류물의 발생량과 같은 열중량분석과 발열개시온도, 최고발열온도, 발열종료온도 그리고 연소에 따른 발열량과 같은 시차열분석을 수행하였다.

3.2.1 열중량분석

Figure 3은 4가지 수종의 침엽수와 Figure 4는 3가지 수종의 활엽수의 낙엽을 대상으로 TGA를 이용하여 가열속도 20°C/min로 최종온도 1,000°C까지 가열하면서 온도변화에 따른 수종별 낙엽의 중량변화 곡선을 나타낸 것이며, Figure 5는 4가지 수종의 침엽수와 Figure 6은 3가지 수종의 활엽수의 생엽을 대상으로 TGA를 이용하여 가열속도 20°C/min로 최종온도 1,000°C까지 가열하면서 온도변화에 따른 수종별 생엽의 중량변화 곡선을 나타낸 것이다.

Figure 3~6에서 보는 바와 같이 수종별 낙엽과 생엽의 온도변화에 따른 중량변화를 살펴보면, 수종에 따라 곡선의 구배가 일정하지 않은 변곡점들이 여러 곳에서 나타나는 것을 알 수 있지만 개략적인 구분에 따르면 대부분의 경우 3단계에 걸쳐 중량감소가 일어나

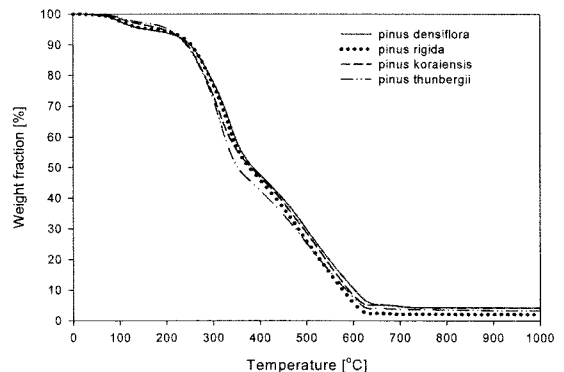


Figure 3. TGA curves of dead leaves of coniferous trees at heating rate of 20°C/min.

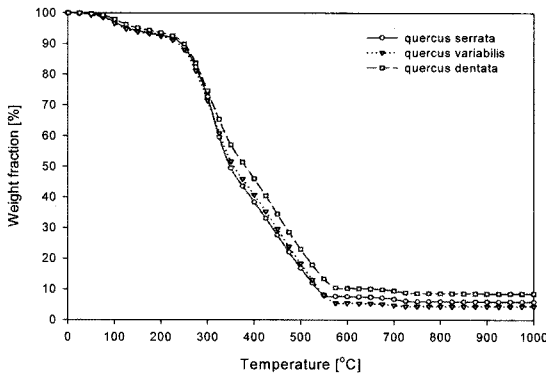


Figure 4. TGA curves of dead leaves of broadleaf trees at heating rate of 20°C/min.

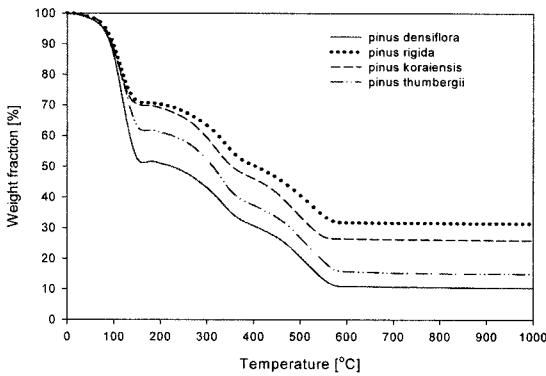


Figure 5. TGA curves of living leaves of coniferous trees at heating rate of 20°C/min.

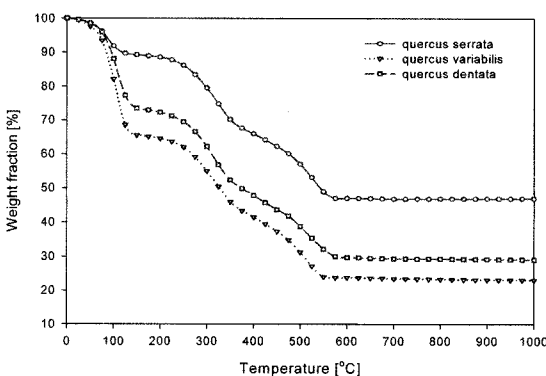


Figure 6. TGA curves of living leaves of broadleaf trees at heating rate of 20°C/min.

는 것을 확인할 수 있다.

수중별 낙엽의 경우, Figure 3과 4는 1단계 중량감소

의 구간종료 온도는 수중에 따라 약간의 차이는 있으나 대략 240~250°C 정도인 것으로 나타났으며, 9.13~11.10% 정도의 중량감소가 나타났다. 2단계 중량감소의 구간종료 온도는 545~625°C 정도인 것으로 나타났으며, 89.25~97.02%의 누적중량감소와 79.91~87.64% 구간중량감소를 나타내고 있다. 그리고 마지막 3단계 중량감소는 최종온도 1,000°C까지로서 총중량감소율은 91.53~97.80%이고 이에 따른 잔류물의 양은 2.20~8.47% 정도인 것으로 나타났다.

수중별 생엽의 경우, Figure 5와 6은 1단계 중량감소의 구간종료 온도는 130~150°C 정도인 것으로 나타났으며, 10.49~47.40% 정도의 중량감소가 나타났다. 2단계 중량감소의 구간종료 온도는 545~560°C 정도인 것으로 나타났으며, 52.43~87.93%의 누적중량감소와 38.68~45.24% 구간중량감소를 나타내고 있다. 그리고 마지막 3단계 중량감소는 최종온도 1,000°C까지로서 총중량감소율은 53.05~89.32%이고 이에 따른 잔류물의 양은 10.68~46.95% 정도인 것으로 나타났다. Table 6에는 가열속도에 따른 7가지 수종의 낙엽과 생엽의 온도구간별 중량감소율과 총중량감소율 그리고 잔류량에 대한 결과를 제시하였다.

7가지 수중별 온도변화에 따른 중량변화에 대한 결과를 살펴보면, 낙엽의 경우, 7가지 수종 모두 유사한 중량감소 유형을 나타내고 있지만 2단계 중량감소 구간의 후반부가 시작되는 350°C 부근에서는 졸참나무와 굴참나무와 같은 활엽수종에 비하여 소나무나 잣나무와 같은 침엽수종은 중량감소 곡선이 고온쪽으로 이동된 것을 알 수 있으며, 떡갈나무, 리기다소나무, 해송 등은 중간 정도를 유지하는 것으로 나타났다. 최종온도인 1,000°C에서 잔류물의 양을 살펴보면, 활엽수종의 경우에는 4.50~8.47% 정도의 잔류물이 발생한 반면에 침엽수종의 경우에는 2.20~4.31% 정도의 잔류물이 발생함으로써 침엽수종이 활엽수종에 비해서 상대적으로 적은 양의 잔류물이 발생하는 것으로 나타났다.

생엽의 경우, 낙엽과는 달리 7가지 수중별 온도변화에 따른 중량감소의 유형이 매우 차이가 큰 것으로 나타났다. 졸참나무의 경우에는 다른 수종과 달리 2단계에 가까운 중량감소 형태로서 46.95% 정도의 잔류량이 발생할 정도로 총중량감소율이 매우 작을 뿐만 아니라 다른 수종들에 비하여 동일한 양의 중량감소 시, 고온 쪽으로의 이동현상이 심한 것으로 나타났다. 이와는 대조적으로 소나무의 경우에는 다른 수종들과 유사한 중량감소 형태를 나타내고 있지만 총중량감소율이 가장 크게 나타남으로써 잔류량도 10.68% 정도로서 가장 적은 것으로 나타났다.

Table 6. Weight Loss Fractions for Dead Leaves and Living Leaves of 7 Species of Trees at Heating Rate of 20°C/min

Species	1 Step		2 Step		3 Step		Total Weight Loss Rate [%]	Residue [%]	
	Weight Loss Rate [%]	Temperature of Interval Ending [°C]	Weight Loss Rate [%]	Temperature of Interval Ending [°C]	Weight Loss Rate [%]	Temperature of Interval Ending [°C]			
Dead Leaves	Pinus Densiflora	9.13	245	92.58	625	95.69	1,000	95.69	4.31
	Pinus Koraiensis	9.90	245	94.51	620	95.84	1,000	95.84	4.16
	Pinus Rigida	9.38	250	97.02	620	97.80	1,000	97.80	2.20
	Pinus Thunbergii	10.28	245	95.28	620	96.71	1,000	96.71	3.29
	Quercus Variabilis	11.10	245	94.60	570	95.50	1,000	95.50	4.50
	Quercus Serrata	10.15	240	91.35	545	94.06	1,000	94.06	5.94
	Quercus Dentata	9.34	245	89.25	570	91.53	1,000	91.53	8.47
Living Leaves	Pinus Densiflora	47.40	150	87.93	560	89.32	1,000	89.32	10.68
	Pinus Koraiensis	29.40	145	72.41	545	73.94	1,000	73.94	26.06
	Pinus Rigida	28.36	145	67.04	560	68.48	1,000	68.48	31.52
	Pinus Thunbergii	36.92	150	82.16	560	84.68	1,000	84.68	15.32
	Quercus Variabilis	34.14	140	75.69	545	76.54	1,000	76.54	23.46
	Quercus Serrata	10.49	130	52.43	560	53.05	1,000	53.05	46.95
	Quercus Dentata	26.34	145	68.99	560	70.54	1,000	70.54	29.46

기타 나머지 수종들의 경우, 소나무와 유사한 형태를 나타내고 있지만 1,000°C까지의 총중량감소율의 차이에 따른 잔류량의 차이가 나타났다. 전반적으로 침엽수종이 활엽수종에 비하여 상대적인 총중량감소율이 크기 때문에 잔류물의 양도 적은 것으로 나타났지만 굴참나무, 떡갈나무, 잣나무, 리기다소나무 등의 경우에는 일관성이 없는 것으로 나타났다.

따라서 수종에 따른 총중량감소율은 생엽의 경우 일부 예외적인 수종들이 있지만 일반적으로 낙엽과 생엽 모두 활엽수보다 침엽수가 큰 것으로 나타났으며, 침엽수가 활엽수보다 연소가 용이한 것으로 나타났고 수종별 총중량감소율의 크기는 낙엽의 경우, 리기다소나

무>해송>잣나무>소나무>굴참나무>졸참나무>떡갈나무의 순으로 나타났으며, 생엽의 경우, 소나무>해송>굴참나무>잣나무>떡갈나무>리기다소나무>졸참나무의 순서인 것으로 나타났다.

동일 수종의 낙엽과 생엽의 열중량분석 결과를 살펴보면, 침엽수종의 경우에는 낙엽보다 생엽이 1단계와 2단계의 구간종료 온도가 각각 80°C와 40°C 정도 낮은 온도에서 나타났으며, 1,000°C의 최종온도에서 잔류물의 양도 낙엽보다 생엽이 6.37~29.32%P(포인트) 정도 많은 것으로 나타났다. 활엽수종의 경우도 침엽수종과 마찬가지로 낙엽보다 생엽이 1단계와 2단계의 구간종료 온도가 각각 100°C와 20°C 정도 낮은 온도

에서 나타났으며, 1,000°C의 최종온도에서 잔류물의 양도 낙엽보다 생엽이 18.96~41.01%P(포인트) 정도 많은 것으로 나타났다.

하지만 Figure 5와 6에서 알 수 있듯이 1단계 중량 감소 구간에서는 생엽의 중량감소율이 낙엽보다 1.79~13.00배 정도 높은 것으로 나타났는데 생엽은 낙엽과 달리 조직 내에 다량의 수분을 포함하고 있기 때문에 수분의 증발량에 기인하여 초기 중량감소가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 또한, 최종온도인 1,000°C에서 수종별 최종 잔류물뿐만 아니라 낙엽과 생엽의 최종 잔류물의 차이가 발생하는 이유는 수종에 따른 수분을 포함하고 있는 함유량의 차이와 잎을 구성하고 있는 조직, 성분 및 밀도의 차이에 기인한 것으로 사료된다.¹⁴⁾

건조한 낙엽보다 수분을 많이 함유한 생엽의 잔류량이 2.48~14.33배까지 높은 것으로 나타났으며, 침엽수보다 활엽수의 잔류물 발생량이 낙엽은 1.8배 정도 많고, 생엽은 1.2배 정도 많은 것으로 나타남으로써 내화수종인 활엽수종과 생엽에서 잔류물의 발생량이 많은 것을 확인할 수 있었다.

3.2.3 시차열분석

Figure 7은 침엽수 4수종, Figure 8은 활엽수 3수종의 낙엽을 대상으로 DTA를 이용하여 가열속도 20°C/min로 최종온도 1,000°C까지 가열하면서 온도변화에 따른 수종별 낙엽의 열방출을 곡선을 나타낸 것이며, Figure 9는 침엽수 4수종, Figure 10은 활엽수 3수종의 생엽을 대상으로 DTA를 이용하여 가열속도 20°C/min로 최종온도 1,000°C까지 가열하면서 온도변화에 따른 수종별 생엽의 열방출을 곡선을 나타낸 것이다. 열방출을 곡선에서 최대열방출율이 높은 수종으로는 침엽수종은 소나무와 잣나무, 활엽수종은 굴참나무와 졸참

나무가 대체로 높은 것으로 나타났다. Table 7은 7가지 수종의 낙엽과 생엽에 대한 시차열분석 결과를 나

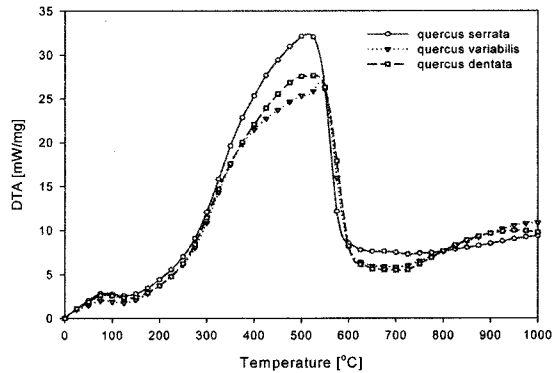


Figure 8. DTA curves of dead leaves of broadleaf trees at heating rate of 20°C/min.

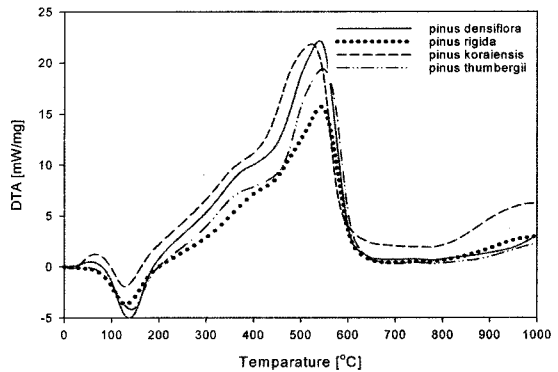


Figure 9. DTA curves of living leaves of coniferous trees at heating rate of 20°C/min.

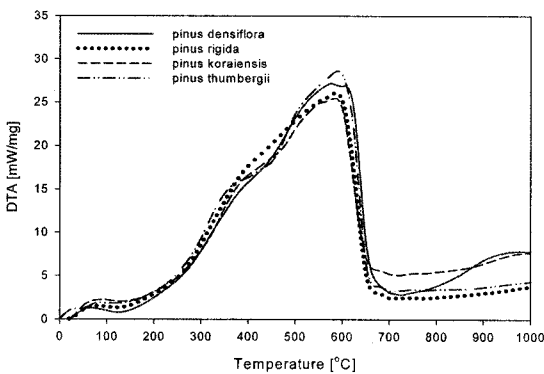


Figure 7. DTA curves of dead leaves of coniferous trees at heating rate of 20°C/min.

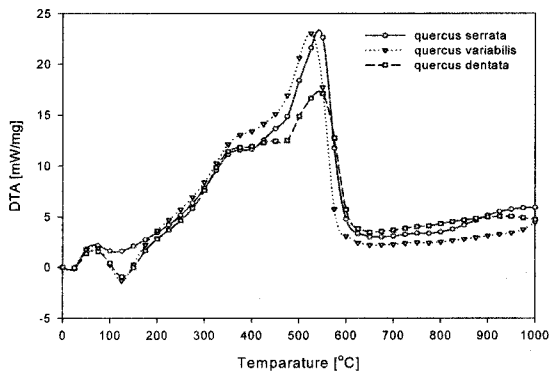


Figure 10. DTA curves of living leaves of broadleaf trees at heating rate of 20°C/min.

Table 7. Differential Thermal Analysis for Dead Leaves and Living Leaves of 7 Species of Trees at Heating Ate of 20°C/min (TEM: Temperature of Endothermic Maximum, EV: Endothermic Value)

Species	Temperature of Exothermic Starting [°C]		Temperature of Exothermic Maximum [°C]		Temperature of Exothermic Ending [°C]		Caloric Value [J/g]		Living Leave	
	Dead Leave	Living Leave	Dead Leave	Living Leave	Dead Leave	Living Leave	Dead Leave	Living Leave	TEM [°C]	EV [J/g]
Pinus Densiflora	125	137.2	580.1	539.2	725	650	13,105	10,592	137	519
Pinus Koraiensis	121	131.0	571.7	522.8	675	725	13,063	10,969	131	209
Pinus Rigida	121	133.2	582.4	544.6	700	650	13,314	7,955	133	335
Antipathes Japonica	123	141.3	589.9	547.3	675	650	14,570	10,258	141	318
Quercus Variabilis	122	125.0	548.9	531.4	650	625	11,849	11,388	125	172
Quercus Serrata	120	111.9	513.9	546.6	625	625	13,649	11,011	112	80
Quercus Dentata	122	129.7	514.3	543.7	650	625	13,104	9,169	130	180

타낸 것으로서 발열개시온도, 최고발열온도, 발열종료 온도, 발열량 그리고 생엽의 최고흡열온도 및 흡열량 등에 대한 결과값을 제시하였다. Table 7의 낙엽의 발열량을 살펴보면, 7가지 수종에 대한 고위발열량의 범위는 11,849~14,570J/g 정도였으며, 해송은 14,570J/g로서 가장 큰 값을 나타냈고, 굴참나무는 11,849J/g로서 가장 작은 값을 나타냈다. 하지만 7가지 수종의 고위 발열량을 크기순으로 나타내면 해송>줄참나무>리기다소나무>소나무>떡갈나무>잣나무>굴참나무의 순으로 나타나는데 이와 같은 결과로부터 낙엽의 경우, 활엽수종과 침엽수종간에 발열량에 대한 일관성은 없는 것으로 나타났다.

Table 7의 생엽의 발열량을 살펴보면, 7가지 수종에 대한 고위발열량의 범위는 7,955~11,388J/g 정도로서 낙엽보다 작은 값을 나타내고 있으며, 낙엽의 경우 가장 작은 발열량을 나타냈던 굴참나무의 발열량은 11,388J/g로서 가장 큰 값을 나타냈고, 리기다소나무의 발열량은 7,955J/g로서 가장 작은 값을 나타냈으며, 이 결과를 Table 7에 제시하였다. 7가지 수종의 발열량을 크기순으로 나타내면 굴참나무>잣나무>소나무>줄참나무>해송>떡갈나무>리기다소나무의 순으로 나타나는데 생엽의 경우에도 낙엽과 마찬가지로 활엽수종과 침엽수종간에 발열량에 대한 일관성은 없는 것으로 나타났다.

3.3 발화특성

강원도 영동지역의 주요 수종들 가운데 선정한 7가지 수종의 낙엽과 생엽의 발화특성을 고찰하고자 발화점 시험기를 이용하여 자연발화 할 때의 최저온도를 측정하고, 온도에 따른 발화지연시간 특성을 살펴보았다.

3.3.1 자연발화온도 분석

Table 8에는 7가지 수종의 낙엽과 생엽에 대하여 착화원 없이 자연발화 할 때의 최저온도를 제시하였다. 자연발화온도는 수종에 따라 약간의 차이가 있는 것으로 나타났지만 낙엽의 경우에는 227~280°C 온도구간

Table 8. Ignition Temperatures for Dead Leaves and Living Leaves of 7 Species of Trees

Species	Living Leaves [°C]	Dead Leaves [°C]
Pinus Densiflora	227	270
Pinus Rigida	248	305
Antipathes Japonica	258	313
Pinus Koraiensis	260	320
Quercus Dentata	280	321
Quercus Variabilis	288	325
Quercus Serrata	291	343

에서 나타났고, 생엽의 경우에는 270~343°C 온도구간에서 나타났는데 낙엽이 생엽보다 37~60°C 정도 낮은 것으로 나타났다. 따라서 낙엽은 생엽보다 발화위험성이 높은 것으로 판단되며, 이러한 발화특성은 식물이 생육하고 있는 성장기와 휴면기에 따른 차이와 부식의 정도에 따라서도 차이가 있으며, 특히 임내 연료의 수분 함유량에 따라 서로 다른 발화특성 및 연소특성이 나타나는 것으로 보고^{5,18)}된 바와 같이 낙엽은 생엽과 비교하여 함유율이 낮기 때문에 발화시간이 빠르고 화염유지시간이 길어지며, 화재가 발생할 경우, 연소가 빠르게 진행되는 것으로 사료된다. 또한, 침엽수는 활엽수에 비해서 자연발화온도가 낮은 것으로 나타나기 때문에 침엽수가 활엽수보다 발화위험성이 높은 것으로 판단되며, 침엽수는 일반적으로 활엽수보다 수지 성분이 많고 발열량도 크기 때문에 생재라도 발화온도가 낮아 연소위험성이 있으며, 수종에 따른 발화온도 차이는 수엽의 발화온도에 차이가 있기 때문인 것¹⁹⁾으로 사료된다.

3.3.2 발화지연시간 분석

Table 9는 수종별 낙엽의 발화지연시간을 나타낸 도표로서 220~300°C 온도구간에서 측정된 결과값들을 나

타내었다. 수종별 발화지연시간이 다소 차이는 있을지라도 활엽수종인 굴참나무, 졸참나무, 떡갈나무는 침엽수종인 소나무, 잣나무, 리기다소나무, 해송보다 동일 온도에서의 발화지연시간이 길게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Table 10은 수종별 생엽의 발화지연시간을 나타낸 도표이며, 270~350°C 온도구간에서 측정된 결과값들을 나타내었다. 생엽의 경우도 낙엽의 경우와 마찬가지로 활엽수가 침엽수보다 동일 온도에서의 발화지연시간이 길게 나타났으며, 이러한 수종별 차이와 임상에 따른 발화지연시간의 차이는 연료의 수분함유량에 따라 발화특성에도 영향을 받을 뿐만 아니라 활엽수가 침엽수보다 내열성이 강하기 때문이라는 연구 결과^{5,18)}가 보고된 바 있다.

또한, 생엽에 대한 일반적인 발화온도에 대한 연구 결과¹⁹⁾에 따르면 대부분 150~180°C에서 죽고, 200°C 정도에서 탄화되며, 380°C 부근에서 연소되는데 400°C가 넘으면 대개는 발염하며, 발염할 때까지의 지속되는 시간은 임분 내 함유량 및 두께와 관계가 있으며, 이에 대한 가연물의 발화특성 예측은 반드시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

Table 9. Delay Yime of Ignition for Dead Leaves of 7 Species of Trees

Temperatures [°C]	Delay Time of Ignition [s]						
	Pinus Densiflora	Pinus Koraiensis	Pinus Rigida	Antipathes Japonica	Quercus Variabilis	Quercus Serrata	Quercus Dentata
220	6.15	7.19	10.99	11.94	15.67	16.59	17.77
225	5.18	5.93	8.81	10.83	13.29	15.63	16.93
230	4.30	5.44	8.07	8.26	12.61	14.12	15.18
235	3.81	5.21	7.49	8.03	11.96	12.26	14.23
240	3.44	4.78	7.82	6.45	10.88	11.87	14.09
245	2.91	4.16	7.04	6.07	10.11	11.06	13.23
250	2.44	3.84	6.57	5.88	10.01	9.26	11.03
255	2.11	3.09	4.84	5.47	9.12	8.98	10.64
260	2.01	3.08	4.04	4.23	8.35	8.56	10.21
265	1.87	2.84	3.5	3.12	6.49	8.09	9.66
270	1.53	2.4	3.32	2.01	6.03	7.22	8.24
275	1.26	2.21	2.63	2.11	5.09	6.47	7.91
280	1.19	2.19	2.58	2.08	4.00	5.43	6.78
285	0.97	1.94	2.19	1.87	3.53	4.83	5.47
290	0.91	1.83	2.07	1.62	3.09	4.17	4.03
295	0.85	1.77	1.89	1.48	2.72	3.68	3.78
300	0.76	1.58	1.65	1.33	2.29	3.00	2.28

Table 10. Delay Time of Ignition for Living Leaves of 7 Species of Trees

Temperatures [°C]	Delay Time of Ignition [s]						
	Pinus Densiflora	Pinus Koraiensis	Pinus Rigida	Antipathes Japonica	Quercus Variabilis	Quercus Serrata	Quercus Dentata
270	4.08	6.18	7.29	6.78	11.66	12.39	12.98
275	3.98	5.54	6.88	5.93	9.13	9.96	11.12
280	3.74	5.13	5.86	5.59	7.41	8.11	8.57
285	3.71	4.36	5.13	5.46	6.28	7.36	7.96
290	3.68	4.41	5.08	4.69	5.96	6.58	6.69
295	3.47	4.19	4.37	4.57	5.12	6.17	6.23
300	3.10	4.16	4.31	4.49	4.77	5.59	5.72
305	2.76	4.00	4.26	4.13	4.49	5.09	5.66
310	2.61	3.45	4.18	4.27	4.37	5.01	5.18
315	2.49	3.43	3.94	4.12	4.18	4.73	4.84
320	2.41	3.06	3.25	3.59	4.08	4.26	4.66
325	2.38	3.03	3.11	3.54	3.90	4.01	4.47
330	2.25	3.01	3.03	3.27	3.83	3.88	4.44
335	1.99	2.21	2.56	3.29	3.64	3.65	4.26
340	1.83	2.18	2.22	3.11	3.61	3.59	4.03
345	1.45	2.14	1.93	2.20	3.58	3.11	3.79
350	1.08	1.57	1.87	2.11	3.47	3.13	3.47

4. 결 론

본 연구에서는 강원도 영동지역에서 자생하는 주요 수종들 가운데 7가지 수종을 대상으로 선정하고, 낙엽과 생엽에 대한 열적특성과 발화특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 가열속도의 변화에 따른 열중량분석 결과, 가열속도가 증가할수록 열적 지연현상이 나타났으며, 총중량감소율에 따른 잔류물의 발생량은 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 가열속도의 변화에 따른 시차열분석 결과를 살펴보면, 가열속도가 증가할수록 열적 지연현상에 기인하여 발열개시온도, 발열최고온도, 발열종료온도가 고온 쪽으로 이동하는 것으로 나타났다.

2) 수종별 온도변화에 따른 열중량분석 결과, 낙엽과 생엽 모두 침엽수가 활엽수보다 총중량감소율이 큰 것으로 나타났으며, 동일 수종에서는 낙엽보다 생엽의 잔류량이 2.48~14.33배까지 높은 것으로 나타났는데 침엽수보다 활엽수의 잔류량이 낙엽은 1.8배 정도 많고, 생엽은 1.2배 정도 많은 것으로 나타났다. 수종별 시차열분석 결과를 살펴보면, 생엽과 낙엽 모두 활엽수종과 침엽수종간에 발열량에 대한 일관성은 없는 것으로

나타났으며, 수종별 발열개시는 비교적 낮은 온도구간에서 시작되었으며, 최고 발열량이 발생하는 온도는 500~600°C 온도범위에서 나타났다.

3) 발화특성 분석결과를 살펴보면, 낙엽의 자연발화 온도는 227~280°C, 생엽의 자연발화온도는 270~343°C에서 나타남으로써 낙엽이 생엽보다 37~60°C 정도 낮은 것으로 나타나 낙엽은 생엽보다 발화위험성이 높은 것으로 나타났으며, 침엽수는 활엽수보다 발화위험성이 높은 것으로 나타났다. 또한, 발화지연시간은 활엽수가 침엽수보다 동일온도에서 발화지연시간이 길게 나타났다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 이시영, 한상열, 안상현, 오정수, 조명희, 김명수, “강원도지역 산불발생인자의 지역별 유형화”, 한국농림

- 기상학회지, Vol.3, No.3, pp.135-142(2001).
2. 임주훈, 이병두, 정주상, “동해안 지역의 산불기상”, 한국농림기상학회 춘계학술발표대회 논문집, pp.119-122(2001).
 3. 정광수, “산불진화 및 예방대책”, 한국임학회 하계학술발표대회 논문집, pp.21-30(2000).
 4. 이병두, 이시영, 정주상, “2005년 강원도 양양산불 행동 특성”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.19, No.4, pp.1-6(2005).
 5. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, “지표물진 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 한국방재학회 춘계학술발표대회 논문집, pp.379-384(2006).
 6. 채희문, 이찬용, “산불 확산에 영향을 미치는 임지내 산림연료와 경사도에 관한 연구”, 한국농림기상학회지, Vol.5, No.3, pp.179-184(2003).
 7. 정주상, 이병두, 김형호, “GIS 및 판별분석에 의한 삼척산불지역의 소나무임분 피해도 추정”, 한국임학회지, Vol.91, No.3, pp.355-361(2002).
 8. 이병두, 정주상, 김형호, 이시영, “GIS 응용에 의한 2000년 삼척산불의 확산속도 분석”, 한국임학회지, Vol.90, No.6, pp.781-787(2001).
 9. 이시영, “외국의 산불방지시스템” 국립방재연구소 방재연구, Vol.6, No.4, pp.25-33(2004).
 10. 김관수, 장인수, 박인돈, 김수정, “고온로의 가열온도에 대한 리기다소나무와 일본 잎갈나무 생엽과 생지의 연소온도 변화”, 한국생태학회지, Vol.18, No.3, pp.333-340(1995).
 11. 김동현, 고재선, 최세환, 김광일, “고성산불지역에서의 화재조사와 주요수목의 열량분석에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, Vol.13, No.1, pp.31-36(1999).
 12. 박형주, 김용식, 김장환, 김동현, “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.3, pp.41-46(2007).
 13. H. Vasander and T. Lindholm, “Fire Intensities and Surface Temperatures During Prescribed Burning”, Silva Fenn, Vol.19, pp.1-15(1985).
 14. 김춘중, “목재의 연소특성, 질량감소와 착화지연”, 한국연소학회지, Vol.4, No.2, pp.11-22(1999).
 15. 이덕준, 왕남용, “ISO 5657에 의한 목재의 착화성능 측정”, 방재시험연구원 방재기술, Vol.8, pp.9-12(1993).
 16. 홍순정, 오세천, 이해평, 김희택, 류경옥, “PVC의 열분해 특성에 관한 연구”, 화학공학, Vol.37, No.4, pp.515-521(1999).
 17. 김기홍, 전상철, 류경옥, “폐플라스틱의 열분해를 통한 자원회수”, 한국폐기물학회지, Vol.13, No.4, pp.504-513(1996).
 18. 임홍순, “ISO착화성 시험방법에 의한 목재시료의 착화특성연구”, 방재시험연구원 방재기술, Vol.14, pp.16-17(1993).
 19. 강전유, 김상욱, 김영채, 김종갑, 김준선, 박승찬, 박용구, 이수옥, 이시영, 이영신, 이찬호, 이현호, 정상배, 현정호, “산림환경보전학”, pp.39-58, 향문사(1997).