산불화재 감식을 위한 연소생성물의 응용에 관한 연구

박영주 · 이해평[†*]
강원대학교 화학공학연구소 · [*]강원대학교 소방방재학부
(2011. 5. 28. 접수 / 2011. 8. 5. 채택)

A Study on Application of Combustion Products for Forest Fire Investigation

Young-Ju Park · Hae-Pyeong Lee[†*]
Chemical Engineering Research Center, Kangwon National University
[*]School of Fire & Disaster Prevention, Kangwon National University
(Received May 28, 2011 / Accepted August 5, 2011)

Abstract : This study was designed to provide basic data applicable to fire investigation through consideration of combustion products and propose vulnerability of combustibles through analysis of CO_2 emission. In order to achieve these research objectives, characteristics of combustion products such as smoke release rate of each part(raw leaves, branches and barks), CO_2 emission and ash production were considered targeting on 6 oak species(*Quercus variabilis Blume, Quercus aliena Blume, Quercus serrata, Quercus mongolica Fisch, Quercus dentata Sapling* and *Quercus acutissima*) using cone calorimeter and smoke density tester. As a result, it was found that raw leaves release smoke more relatively than branches and barks, when they burn, and that *Quercus variabilis* Blume has the highest smoke density. Also, *Quercus acutissima* released CO and CO_2 which are respectively, 6.67 times and 1.43 times more than *Quercus variabilis* Blume with low CO_2 emission. In addition, branches released CO and CO_2 more relatively. There was a big difference in ash production among raw leaves(3.1 g), branches(10.5 g) and barks(16.43 g). It was identified that *Quercus serrata* produces ashes which are nearly 9.95 times more than *Quercus variabilis Blume*. It demonstrates that *Quercus serrata* contains relatively higher minerals and that *Quercus variabilis Blume* can leave lots of traces like stain and carbonization, as it releases smoke a lot and it's difficult to predict visibility, when a forest fire breaks out in its community area. It is also considered that smoke particles containing oil in the air leave strain on the surface of a tree, and that CO and CO_2 emission increases, when crown fire to burn branches breaks out.
Key Words : fire investigations, *quercus*, smoke release, carbon dioxide, carbon monoxide, ash

1. 서 론

임야화재는 건축물 등의 실내 화재와는 달리 제한된 공간의 화재가 아니므로 산소부족으로 인한 연소현상은 나타나지 않으며, 충분한 산소공급의 연소 환경이 제공된다. 산불에서의 화재감식은 개방된 공간에서의 가연물의 다양성과 지형 및 기상에 따른 연소 환경이 고려되어야 하므로 메커니즘 규명에 어려움이 따른다. 이를 위해서는 많은 연소실험 바탕의 데이터가 제공되어야 하며, 특히, 산불화재 초기단계에서는 착화특성과 착화 후 화염확산 단계의 검증이 반드시 필요하다. 하지만, 산불은 지형, 연료, 기상인자와 산불자체의 상호작용으로 인하여 복잡하게 전개되므로 산불의 발생 메커니즘을 해석하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다[1].

산불발생 시 대부분의 산림 내 가연물들은 높은 에너지를 갖는 열원에 노출되면 착화되며, 착화 후 발생한 화염이 주위의 연료에 열을 전달하여 연료의 표면온도를 상승시킨다. 연료의 표면온도가 점화온도보다 높아지면 급격한 열분해가 진행되어 가스가 발생하게 되고 많은 열량을 방출하여 화염의 전파로 화재가 성장하게 된다. 화재의 전파는 화염부로 얼마나 많은 공기가 유입되는가에 따라서 결정되며, 산림 내 가연물들의 방출 특성은 충분한 공기 유입에 따라 연소물질로부터 열을 수반하게 되어 고온의 휘발성 · 가연성 증기와 가스성분을 방출하게 된다[2].

또한, 산림은 연소되기 전까지는 산림에 의해 이

[†] To whom correspondence should be addressed.
crelab@kangwon.ac.kr

산화탄소가 재 흡수되고 대기 중의 온실가스 농도를 높이지 않는 탄소 중립적인 연료이며, 동시에 산불로 인한 산림자원의 연소는 화석연료 연소에 따른 탄소배출량의 2배를 넘는다는 보고가 있어 지구온난화에 악영향을 미치는 온실가스의 배출원이 된다[3].

따라서, 본 연구에서는 산림 내 가연물을 대상으로 연소생성물을 고찰하여 화재감식에 응용 가능한 기초자료를 제공하고자 하며, 산불발생에 따른 탄소배출량 분석으로부터 연소생성물의 취약성을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 산불의 종류 및 가연물

산불의 종류는 산불의 연소상태 및 연소부위에 따라 지표화, 수간화, 수관화, 지중화의 4가지 종류로 분류된다. 실제 산불이 발생할 때에는 4종류의 화재가 동시에 일어나 연소할 수 있으며, 우리나라와 같이 경사가 급하고 구릉지가 많으며 수고가 그리 크지 않은 지형에서는 산불은 대부분이 산록 하단부에서 지표화로 시작되지만 산정부에서는 수관화로 이어지는 특징을 가지고 있다[4].

1) 지표화 : 산불 가운데 가장 많이 발생하는 화재로서 지표에 쌓여 있는 낙엽, 낙지, 지피물, 지상관목물, 갱신치수 등이 불에 타는 화재를 말한다.

2) 수간화 : 나무줄기가 타는 불로써 지표화로부터 연소되는 경우가 많고, 노령림의 고사목 또는 수간의 공동부를 볼 수 있는 임령에서 일어나기 쉽다.

3) 수관화 : 지표화로부터 발생하여 수간에서 수관으로 강한 화세로 퍼져 가는 것으로서 임목은 그 열로 고사하게 되는데, 흔히 수지가 많은 소나무 삼나무 등의 침엽수림에서 많이 발생한다.

4) 지중화 : 낙엽층 밑에 있는 Hesselman의 AF층, 즉 낙엽이 조금 분해되어 그 본래의 조직을 현미경에 의해 알아볼 수 있는 유기물층과 SH 층, 즉 낙엽이 분해되어 현미경에 의해서도 알아볼 수 없게 된 유기물층 또는 이탄층이 타는 산불로서 산소의 공급이 막혀 연기도 적고 불꽃도 없이 연소하기 때문에 발견하기가 어려우며, 지중화에서 지표화로 이어질 수 가 있다.

2.2. 목재의 주요 성분

나무의 성분은 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌이 주성분이고, 소량의 회분, 수지 유지, 정유, 탄닌, 색소 등이 함유되어 있으며, 함유율에 있어 셀룰로오스는 침엽수와 활엽수 모두 50%, 헤미셀룰로오스는 침엽수 20%, 활엽수 30%, 리그닌은 침엽수 30%, 활엽수 20% 정도이다.

식물체에서 셀룰로오스가 차지하는 비율은 1/2~1/3인데 주트(jute, 황마의 줄기에서 얻는 섬유)에서는 65%, 아마에서는 80%, 무명에서는 98%, 면섬유는 거의 100% 셀룰로오스로 이뤄져 있다.

활엽수, 침엽수 모두 약 50% 가량 이상은 셀룰로오스가 차지하고 있으며, 이 셀룰로오스의 화학식은 $C_6H_{10}O_5$이다. 셀룰로오스의 몰분자량 162 g에는 탄소 72 g, 수소 10 g, 산소 80 g으로 구성되어 있다.

쉽게 보면 나무는 절반가량이 셀룰로오스로 이루어져 있고, 질량으로 보았을 때 이 셀룰로오스의 절반가량은 산소로 이루어져 있다. C, H는 그 자체만으로도 연소가 잘 이루어지는 물질이며, 셀룰로오스의 열분해 시 발생하는 O는 대기중의 산소농도가 16% 이하로 낮아지더라도 C와 H의 연소를 도와 계속해서 연소가 이루어질 수 있다. 산소가 충분하지 못하므로 활발한 연소는 진행되지 못하지만 불꽃 없는 화학반응(훈소)이 계속된다. 훈소는 목재뿐만 아니라 면과 같은 식물섬유나 종이 등 천연 고분자물질을 이용한 가연물의 경우 모두 해당된다[5].

2.3. 목재의 열분해

목재는 저온에서 완만하게 열분해 되어 탄소, 물, 산화된 가스 등을 생성하지만, 고온에서는 급격하게 열분해되어 저온에서 생성되는 분해물과는 다른 물질을 생성한다[6].

1) 200℃ 이하 : 탈수반응을 일으키며, 주로 목재의 표면으로부터 수산기가 생성되고, 그밖에 소량의 이산화탄소, 초산 등이 생성된다.

2) 200~280℃ : 200℃ 이하일 때의 반응이 목재의 내부로 확대된다.

3) 280~500℃ : carbon oxide, methan, formaldehyde, 초산(醋酸), methanol, 목탄(木炭) 등이 생성된다.

4) 500℃ 이상 : carbon dioxide, carbon monoxide (물과 탄소로부터 생성), 수소, formaldehyde 등이 생성된다.

2.4. 가연물이 되기 쉬운 조건

가연물의 연소는 삼림내의 낙엽, 낙지, 임목, 초

류 등의 가연물질이 산소와 열과 화합하여 열과 빛을 발생시키는 산화반응을 말한다. 산화반응이 일어나기 위해서는 가연물의 존재와 산소의 공급원, 착화에 필요한 에너지인 화원이 가장 직접적인 원인이 된다. 화원에 의한 가연물은 생육하고 있는 성장기와 휴먼기에 따라 차이가 있으며, 고사한 연료는 부식의 정도에 따라 차이가 있다. 특히, 가연물의 낮은 함수율은 초기 화재에서의 얼마나 화재가 빨리 진행되는가를 알 수 있는 인자로 착화에 직접적인 영향을 미친다[4].

가연물이 되기 쉬운 조건으로는 열전도율이 적을수록, 활성화에너지가 적을수록, 발열량이 클수록, 산소와 친화력이 클수록, 표면적이 클수록, 주위온도가 높을수록 가연물이 되기 쉽다.

2.5. 연소생성물 흔적

목재의 연소생성물은 완전연소와 불완전 연소에 의한 고온의 가스, 연기발생, 탄소배출량 등이 있으며, 무기물 성분 연소로 남게 되는 ash량 발생 등으로 토양에 대해서도 취약한 영향을 미친다. 산불은 낙엽층과 부식층을 태우므로 임상이 노출되어 토양침식이 일어나 수기능을 저하시키는 등 간접피해가 매우 크다.

2.6. 화재조사

2.6.1. 화재조사의 개념

화재조사는 화재의 원인과 화재 또는 소화로 인하여 생긴 손해에 대한 조사로 정의할 수 있으며, 일반적으로 화재원인 조사와 화재피해조사로 나누어진다. 화재조사의 목적은 첫째, 화재에 의한 피해를 알리고 유사화재의 방지와 피해의 경감에 이바지한다. 둘째, 발화원인을 규명하고 예방대책상의 자료로 활용한다. 셋째, 연소확대 및 연소원인을 규명하고, 예방 및 진압대책의 자료로 활용한다. 넷째, 사상자의 발생원인과 방화관리상황을 규명하여 예방 및 진압대책상의 자료로 활용한다. 다섯째, 화재의 발생상황, 원인, 손해상황 등을 통계화 함으로써 소방 정보를 수집하고 행정시책의 자료로 활용한다[7].

2.6.2. 화재원인조사의 기능

화원원인조사의 기능은 단순히 발화원을 밝혀내는 것이 아니라 화재를 발생시킨 원인에서 시작하여 화재진압에 이르는 일련의 과정을 밝히고, 출화원인, 연소확대요인, 사상자 발생의 원인을 규명하는 것이다. 첫째, 출화원인 조사에서는 출화건물 부위를 판정하며 출화부위에 존재하였던 발화원을 규명하고 어떤 경로를 거쳐 착화하였는가 하는 화재발생의 과정을 과학적으로 입증한다. 둘째, 연소확대의 원인조사에서는 출화부터 시작하여 성장과정, 즉 수평 및 수직방향으로의 연소확대를 가능케 한 방화문, 내장재, 등을 포함한 건축구조, 방화관리, 지리적 요건 등 인적, 물적 자연조건을 밝혀낸다. 셋째, 사상자 발생원인의 조사에서는 사상자의 발생이 출화원인, 연소확대 원인과 관련하여 건축재료, 피난방법 등 물적, 인적 환경과의 관계를 고찰한다[7].

3. 연소생성물 응용 연구

3.1. 연소생성물 특성 실험

3.1.1. 실험연료 대상

연소생성물 분석을 위하여 Table 1과 같은 참나무 6가지 수종(상수리나무 *Quercus acutissima*, 굴참나무 *Quercus variabilis*, 갈참나무 *Quercus aliena*, 졸참나무 *Quercus serrata*, 떡갈나무 *Quercus dentata,* 신갈나무 *Quercus mongolica*)의 부위별(생엽, 가지, 수피부위) 연료를 사용하였다. 부위별 평균 함수율은 생엽 139.76%, 가지 79.09%, 수피 49.51% 정도

Table 1. Percentages of moisture contents for the living leaf and branch and bark of *Quercus species*

Quercus species		Moisture contents[%]
Quercus variabilis	living leaf	145.34
	branch	56.00
	bark	34.00
Quercus dentata	living leaf	140.84
	branch	85.99
	bark	69.50
Quercus mongolica	living leaf	135.29
	branch	80.16
	bark	76.65
Quercus aliena	living leaf	148.99
	branch	108.52
	bark	27.53
Quercus serrata	living leaf	154.84
	branch	69.95
	bark	54.93
Quercus acutissima	living leaf	113.27
	branch	73.72
	bark	34.47

Table 2. Experimental conditions of cone calorimeter

Items	Contents
Size(mm)	100×100
Weight(g)	50
Heat flux(kW/m^2)	50
Test time(s)	time until there was no more weight decrease
Material condition	Raw

Table 3. 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

인 것으로 측정되었다. 연료의 채취 시기는 참나무류의 개엽시기인 6월에 채취하였으며, 맑은 날이 5일 이상 지속된 다음날 강원도 영동지역에서 채취하였다.

3.1.2. 연소생성물 분석

산림 가연물의 연소에 따른 연소생성물 분석을 위하여 영국 FTT사의 Dual Cone Calorimeter(ISO 5660-1)[8] 시험기와 영국 FTT사의 Smoke Density Chamber(ASTM E 662)[9]를 이용하였다. 분석항목은 총연기방출량(TSR, Total smoke release), 최대연기밀도(Max. Ds, Maximum Smoke density), 이산화탄소 및 일산화탄소 배출량, 연소 후 남게 되는 ash 발생량 등을 분석하였다. 실험 조건은 Table 2와 3에 제시하였으며, 결과값은 3회 반복 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였다.

함유되는 형태로 나타나는데 건조한 연료는 생장이 불규칙해 지면서 세포형태 변화에 따라 수분함량이 변화한다.[10] 이러한 연료의 건조도는 산불발생 시 연소 초기의 착화특성과 산불형태에 영향을 주는 요인이며, 건조한 연료의 경우, 발염착화가 빠르게 진행되어 연소의 진행속도에도 영향을 미치고 화재가 빠르게 확산된다. 따라서 함수율이 대체로 낮은 수피부위는 상대적으로 빠른 시간에 착화가 진행될 것으로 사료되며, 상수리나무와 굴참나무는 산불발생 시 수관화에 취약할 것으로 사료된다.

4.2. 연소생성물 특성

4.2.1. 총연기방출량 특성

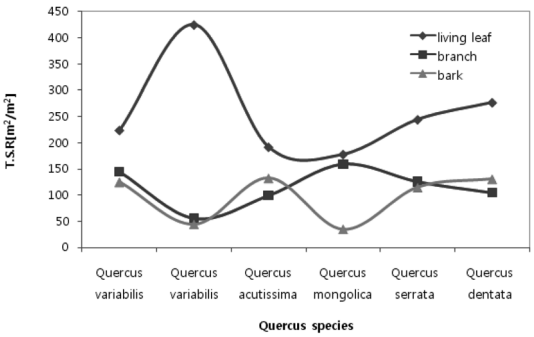

Fig. 1. Total smoke release for the living leaf and branch and bark of *Quercus* species.

Fig. 1에는 참나무 6가지 수종(굴참나무, 갈참나무, 졸참나무, 떡갈나무 신갈나무, 상수리나무) 부위별(생엽, 가지, 수피부위) 총연기방출량 곡선을 나타내었다. 부위별 총연기방출량은 생엽은 191.4~424.6 m^2/m^2, 가지 55.6~159.5 m^2/m^2, 수피 43.7~132.3 m^2/m^2 범위에서 연기를 방출하는 것으로 나타나 부위별 차이를 보였으며, 평균 연기 방출량은 생엽 256.3 m^2/m^2, 가지, 114.92 m^2/m^2, 수피96.68 m^2/m^2 정도 방출하는 것으로 나타났다. 따라서, 생엽은 가지와 수피부위 보다 상대적으로 많은 연기를 방출하는 경향을 보였으며, 수피보다 2.65배 많은 연기를 방출하는 것으로 나타났다. 이는 연료 내 포함하고 있는 함수율 차이에 따른 결과로 수분을 많이 함유하는 생엽의 경우 완전연소 되기까지 수분의 영향으로 대기시간이 길어지기 때문인 것으로 판단된다. 불완전 연소로부터 방출된 연기입자들 내 공중에 떠있던 기름 입자 성분들은 사물의 표면에 붙어 얼룩을 남긴다. 탄화 그을음도 물체에 대해 마찬가지 현상을 일으키지만 이는 불완전 연소 및 일부 식물에 있는 천연 오일 함유량에 의해 발생한다[11].

4.2.2. 연기밀도 특성

Fig. 2에는 참나무 6가지 수종(굴참나무, 갈참나무, 졸참나무, 떡갈나무 신갈나무, 상수리나무) 부위별(생엽, 가지, 수피부위) 최대연기밀도 곡선을 나타내었다. 부위별 최대연기밀도를 살펴보면, 생엽은 176.59~364.86 Ds, 가지 294.05~452.37 Ds, 수피 367.55~543.27 Ds 사이의 값을 보였으며, 평균 생엽은 232.27 Ds, 가지, 408.59 Ds, 수피 440.24 Ds 정도인 것으로 나타났다. 최대연기밀도가 높은 부위는 수피부위인 것으로 나타났으며, 생엽과 비교하여 1.84배 정도 높은 것으로 나타났다. 또한, 연

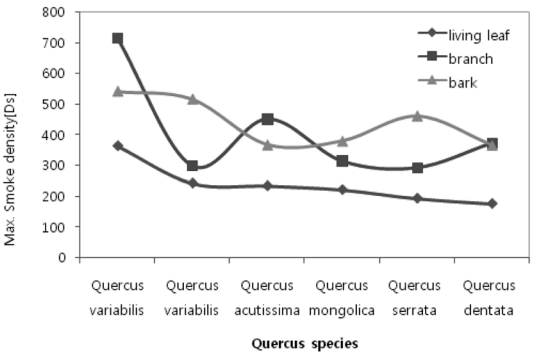

Fig. 2. Max. smoke density for the living leaf and branch and bark of *Quercus* species.

기밀도가 높은 수종으로는 굴참나무인 것으로 나타났다. 따라서, 굴참나무 군락지는 산불발생 시 순간적으로 발생하는 연기발생량이 많아 가시거리 예측이 상대적으로 어렵고, 얼룩, 탄화 등의 흔적을 많이 남길 수 있는 수종으로 구분할 필요가 있다.

4.2.3. Carbon dioxide(CO_2) 배출량 특성

Fig. 3에는 중량 50 g 연료기준에 대한 부위별 이산화탄소 총배출량을 나타내었다. 부위별 평균배출량은 생엽 72.10 g, 가지 101.88 g, 수피 86.46 g 정도인 것으로 나타나 가지부위는 생엽과 수피부위보다 상대적으로 많은 이산화탄소 배출하는 것으로 나타났으며, 생엽보다 1.41배 정도 높은 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타나 났다. 이에 대하여 Table 4와 8에 부위별 평균 CO_2 배출량을 구체적으로 비교하여 제시하였다.

이산화탄소(CO_2) 배출량의 차이는 같은 수종 내에서도 개체와 채취부위에 따라서 그 조성이 다르기 때문에 부위별 조성에 따른 차이는 다소 있을 것으로 사료된다. 하지만, 이러한 가스의 발생은

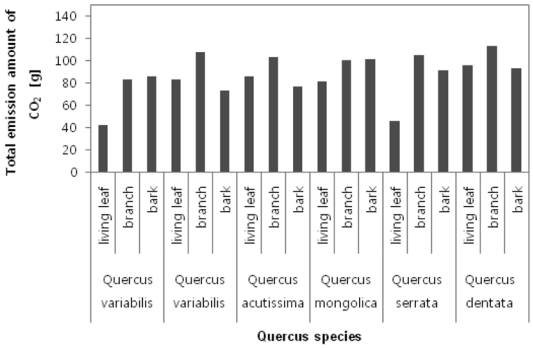

Fig. 3. Total amount of emissions of carbon dioxide for *Quercus* species.

Table 4. Analysis of carbon dioxide emission for living leaves, branches, barks in *Quercus* species

Classification		Range [%]	Mean [%]	Max.	Min.
Quercus	Living leaf	42.382~ 95.413	72.10	95.413 (상수리)	42.382 (굴참)
	Branche	82.92~ 113.10	101.88	113.1 (상수리)	82.92 (굴참)
	Bark	72.64~ 100.70	86.46	100.7 (갈참)	72.64 (떡갈)

Table 5. Analysis of total carbon dioxide emission for living leaves, branches, barks in *Quercus* species

Quercus species	Total emission amount of carbon dioxide[g]
Quercus variabilis	210.723
Quercus dentata	262.96
Quercus mongolica	264.54
Quercus aliena	281.958
Quercus serrata	241.387
Quercus acutissima	301.033

연소의 메커니즘을 역으로 추적하여 발화부를 추적할 수 있는 단서가 될 수 있다[5].

Table 5에는 생엽, 가지, 수피부위를 합산한 수종별 CO_2 배출량을 제시하였다. 수종별 이산화탄소 배출량을 살펴보면, 굴참나무 210.723 g, 떡갈나무 262.96 g, 신갈 264.54 g, 갈참 281.958 g, 졸참 241.387 g, 상수리 301.033 g 정도 배출하는 것으로 나타났다.

따라서, 상수리나무는 이산화탄소 배출량이 상대적으로 높은 수종으로 나타났으며, 굴참나무보다 1.43배 높은 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 따라서, 임야화재 시 상수리나무는 참나무 수종 가운데 상대적으로 많은 이산화탄소를 배출할 것으로 사료되며, 이산화탄소의 배출은 온실가스의 주범으로 산불에 따른 2차 피해를 유발할 것으로 사료된다.

4.2.4. Carbon monoxide(CO) 배출량 특성

Fig. 4에는 중량 50 g 연료기준에 대한 참나무 6가지 수종 부위별 CO 총배출량을 나타내었으며, 이에 대하여 Table 8에 구체적으로 제시하였다. Table 6에는 부위별 평균이산화탄소 배출량을 비교분석하여 제시하였다. 생엽 10.80 g, 가지 12.51 g, 수피 11.33 g 정도 배출하는 것으로 나타났다. 가지부위는 생엽과, 수피부위보다 상대적으로 일산화탄소 배출량이 많았으며, 생엽보다 1.16배 높은 일산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 다음으로는 수

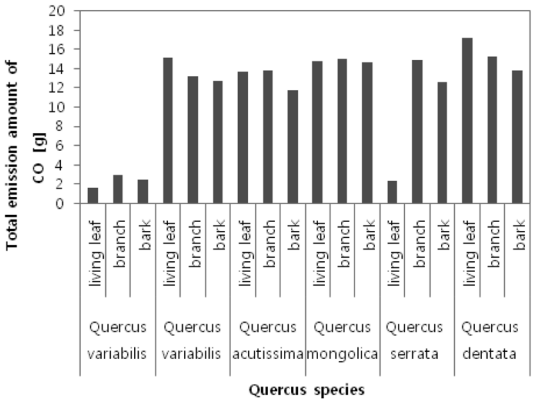

Fig. 4. Total amount of emissions of carbon monoxide for *Quercus* species.

Table 6. Analysis of carbon monoxide emission for *Quercus* species

Classification		Range [[g]	Mean [[g]	Max.	Min.
Quercus	Living leaf	1.6217~ 17.2710	10.80	17.2710 (상수리)	1.6217 (굴참)
	Branch	2.8597~ 15.2410	12.51	15.2410 (상수리)	2.8597 (굴참)
	Bark	2.4618~ 14.6930	11.33	14.6930 (갈참)	2.4618 (굴참)

피, 생엽 순으로 나타났다.

일산화탄소(CO)는 거의 모든 화재에서 일정 수준 발생된다. 탄소 함유 가연물은 불완전 연소할 경우 일산화탄소를 생성시킨다. 유기연료를 연소시키는 동안 일산화탄소는 초기에 생성된 후 산화되어 이산화탄소(CO_2)가 된다. 산불과 같이 개방된 연소에서는 생성된 일산화탄소의 양은 몇 백 ppm (0.2%)으로 거의 발생되지 않는다. 하지만 산소가 잘 공급이 되지 않거나 훈소 또는 플래시오버 후 (postflashover) 화재에서는 1~10% 정도(10,000~100,000 ppm)의 일산화탄소가 발생된다.

Table 7에는 중량 50 g 연료기준에 대한 생엽, 가지, 수피부위를 합산한 수종별 일산화탄소 배출량을 제시하였다. 수종별 일산화탄소 배출량을 살펴보면, 굴참나무 6.9432 g, 떡갈나무 41.068 g, 신갈 39.314 g, 갈참 44.523 g, 졸참 29.7507 g, 상수리 46.301 g 정도 배출하는 것으로 나타났다. 따라서, 상수리나무는 일산화탄소 배출량이 가장 높은 수종인 것으로 나타났으며, 굴참나무보다 6.67배 높은 일산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다.

따라서, 임야화재 시 상수리나무는 참나무 수종 가운데 상대적으로 많은 이산화탄소와 일산화탄소를 배출할 것으로 사료되며, 특히, 줄기와 수피를 태우는 수간화나 잎을 태우는 지중화 보다 나무의 가지를 태우는 수관화로 화재가 전이될 때 탄소배출량은 더 많을 것으로 사료된다.

산불발생시 상수리나무의 연소는 상대적으로 많은 이산화탄소와 일산화탄소를 배출할 것으로 사료되며, 특히, 나무의 가지를 태우며 연소되는 산불의 수관화 형태에서 탄소배출량이 많을 것으로 사료된다. 연소생성물은 가연물 패키지가 타는 시간의 길이만큼 흔적의 정도에 많은 영향을 끼칠 수 있다. 광범위한 손상이 일어난 지역은 해당 위치에 중요한 가연물 패키지가 있었다는 것을 의미할 수 있다. 이때 가연물 하중이 적은 다른 곳으로부터 이러한 곳으로 화재가 확산되었는지의 여부를 고려하는데 중요한 의미를 갖는다[11].

Table 7. Analysis of carbon monoxide emission for *Quercus* species

Quercus species	Total emission amount of carbon monoxide[g]
Quercus variabilis	6.9432
Quercus dentata	41.068
Quercus mongolica	39.314
Quercus aliena	44.5230
Quercus serrata	29.7507
Quercus acutissima	46.3010

Table 8. Total emission amount of carbon dioxide and carbon monoxide in *Quercus* species

Quercus species		CO_2 [g]	CO [g]
Quercus variabilis	living leaf	42.382	1.6217
	branch	82.918	2.8597
	bark	85.423	2.4618
Quercus dentata	living leaf	82.51	15.12
	branch	107.81	13.268
	bark	72.64	12.68
Quercus mongolica	living leaf	85.493	13.731
	branch	102.64	13.809
	bark	76.407	11.774
Quercus aliena	living leaf	81.489	14.829
	branch	99.779	15.001
	bark	100.69	14.693
Quercus serrata	living leaf	45.326	2.2647
	branch	104.99	14.917
	bark	91.071	12.569
Quercus acutissima	living leaf	95.413	17.271
	branch	113.12	15.241
	bark	92.5	13.789

4.2.5. Ash 발생량 특성

Fig. 5에는 50 g 중량 기준에 대한 참나무 6가지 수종 부위별 연소 후 ash량을 제시하였다. 생엽의 ash 발생량은 굴참 2.6 g, 떡갈 1.7 g 신갈 4.0 g, 갈참 2.8 g, 졸참 4.1 g, 상수리 3.4 g 정도였으며, 1.7~4.1 g 범위에서 수종별 잔류량 차이를 보이는 것으로 나타났다. 연소 후 ash 발생량이 상대적으로 많은 수종으로는 졸참나무와 신갈나무인 것으로 나타났으며, 떡갈나무는 ash 발생량이 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 생엽의 평균 ash 발생량은 3.1 g 정도인 것으로 나타났다.

가지부위의 ash량은 굴참 1.0 g, 떡갈 12.2 g, 신갈 13.6 g, 갈참 15.5 g, 졸참 18.2 g, 상수리 2.5 g 정도였으며, 1.0~18.2 g 범위에서 수종별 잔류량 차이를 보이는 것으로 나타났다. ash 발생량이 상대적으로 많은 수종으로는 졸참나무인 것으로 나타났으며, 굴참나무는 가장 ash량이 작은 수종인 것으로 나타났다. 평균 ash량은 10.5 g 정도인 것으로 나타나 가지부위는 생엽보다 3.39배 높은 무기물을 함유하는 것으로 나타났다.

수피부위의 ash량은 굴참 0.9 g, 떡갈 19.3 g, 신갈 19.9 g, 갈참 17.8 g, 졸참 20.7 g, 상수리 20 g 정도였으며, 0.9~20.7 g 범위에서 수종별 차이를 보였다. 졸참나무는 ash 발생량이 상대적으로 높은 수종인 것으로 나타났으나, 상수리나무, 신갈나무, 떡갈나무와 큰 차이는 보이지 않았으며, 굴참나무의 수피는 ash량이 가장 많은 졸참나무보다 23배 낮은 차이를 보였다. 또한, 수피부위의 평균 ash 발생량은 16.43 g 정도인 것으로 나타나 생엽보다 5.3배

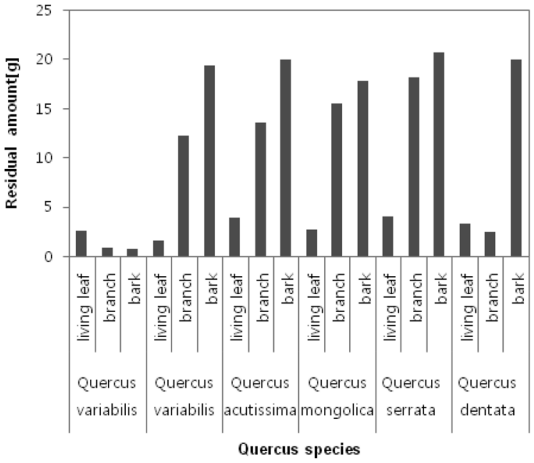

Fig. 5. Total ash amount for living leaves, branches, barks in *Quercus* species.

Table 9. Total ash amount for living leaves, branches, barks in *Quercus* species

Classification		Range [[g]	Mean [[g]	Max.	Min.
Quercus	Living leaf	1.7~4.1	3.1	4.1 (졸참)	1.7 (떡갈)
	Branch	1.0~18.2	10.5	18.2 (졸참)	1.0 (굴참)
	Bark	0.9~20.7	16.43	20.7 (졸참)	0.9 (굴참)

높은 무기물을 함유하는 것으로 나타났다. 따라서, 부위별 ash 발생량이 많은 부위는 수피부위인 것으로 나타났으며, 다음으로 가지, 생엽 순으로 나타났다. 이에 대하여 Table 9에 제시하였다.

이러한 잔류량의 차이는 수종에 따라 잎의 외부표면과 세포간극으로 되어 있는 내부표면의 비가 달라 수종 간 구성하고 있는 잎의 조직과 수분 함유량에 따른 차이[10]와 주요 구성 성분 차이로 나타나며, 주요성분으로는 Cellulose, Hemicellulose, Lignin과 10% 정도의 추출성분, 1% 미만의 회분 등으로 구성되어 있다[12,13]고 밝히고 있다.

고온조건에서 열분해 된 다음 남게 되는 회분(ash)에서는 Ca와 K 함량이 매우 높고[12,14], 마그네슘, 망간, 규소와 같은 원소를 함유하는 불연성 화합물이 생성되는 차이를 보인다.

회분(ash)은 연속적으로 연소되고 있는 가연물에는 발견되지 않는다. ash의 패턴이 발견되면 바람의 방향을 알 수 있다. 남아 있는 재의 양으로 상당히 정확하게 가연물의 부피를 재구성할 수 있다. 또한 화재 후에 남는 물질들은 화재가 어떻게 탔는지에 대한 단서를 남겨준다. 또한, 불연성물질 위에 남은 그을음 자국을 통해 화재가 얼마나 극심했는지, 그리고 어떤 방향으로 이동했는지를 알 수 있다[11].

Table 10에는 생엽, 가지 수피부위를 합산한 수종별 50 g 중량에 대한 ash 발생량을 산출하여 제시하

Table 10. Analysis of total ash amount for living leaves, branches, barks in *Quercus* species

Quercus species	Total residual amount[g]
Quercus variabilis	210.723
Quercus dentata	262.96
Quercus mongolica	264.54
Quercus aliena	281.958
Quercus serrata	241.387
Quercus acutissima	301.033

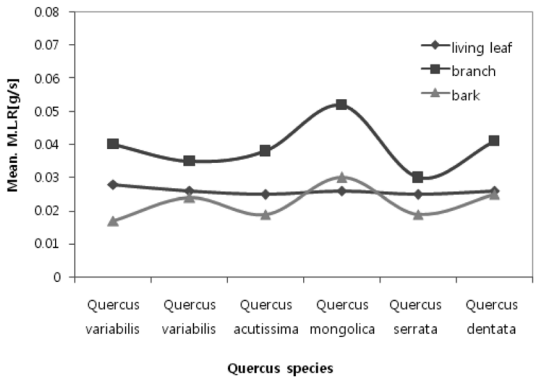

Fig. 6. Mean mass loss rate for living leaves, branches, Barks in *Quercus* species.

였다. 수종별 ash 발생량은 굴참나무 4.5 g, 떡갈나무 33.2 g, 신갈 37.5 g, 갈참 36.1 g, 졸참 43.00 g, 상수리 25.9 g 정도 발생하는 것으로 나타났다. 졸참나무는 굴참나무보다 ash 발생량이 9.55배 높은 수종으로 나타나 6가지 참나무 수종 가운데 무기물 함량이 상대적 높을 것으로 사료되며, 졸참나무 군락지는 산불발생 후 2차 피해가 더 클 것으로 사료된다.

4.2.6. 중량감소 특성

Fig. 6에는 참나무 6가지 수종 부위별 평균 중량감소율 곡선을 나타내었다.

갈참나무는 중량감소율이 상대적으로 높아 연소 시 질량 손실이 빠르게 진행되는 것을 추측할 수 있으며, 특히, 가지부위는 생엽과 수피부위보다 중량감소가 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 물질은 가열되면서 물리적 변화가 발생한다. 일반적으로 나무나 다른 가연성 표면이 탈 때에는 물질 및 질량이 손실된다. 남은 가연성 물질의 모양과 양으로 경계선이 만들어지고 결과적으로 분석되어야 할 화재 패턴이 생성된다[11].

5. 결 론

본 연구에서는 화재감식에 응용 가능한 기초자료를 제공하고자 산불에 따른 산림연료의 연소생성물 분석으로부터 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 참나무 수종 부위별 수분을 함유하는 정도는 생엽 139.76%, 가지 79.09%, 수피 49.51% 정도인 것을 알 수 있었으며, 상수리나무는 부위별 함수율이 대체로 낮은 수종임을 확인할 수 있었다. 따라서, 부위별 함수율이 대체로 낮은 상수리나무는 착화위험성이 상대적으로 클 것으로 사료되며, 특히, 수피부위는 대체로 빠른 시간에 착화된 후 연소 또한 빠르게 진행될 것으로 사료된다.

2) 발연량특성으로 생엽은 가지와 수피부위보다 상대적으로 많은 연기를 방출하는 것을 알 수 있었다. 이는 연료 내 포함하고 있는 함수율 차이에 따른 결과로 수분을 많이 함유하는 생엽의 경우 완전연소 되기까지 수분의 영향으로 대기시간이 길어지기 때문인 것으로 판단된다. 최대연기밀도가 높은 수종으로는 굴참나무인 것을 확인할 수 있었으며, 굴참나무 군락지는 산불발생 시 가시거리 예측이 상대적으로 어렵고 많은 연기방출로 얼룩, 탄화 등의 흔적을 많이 남길 수 있는 수종으로 구분할 필요가 있다.

3) 탄소배출량 특성 결과, 중량 50 g 기준에 대하여 부위별 CO_2 총배출량은 생엽 72.10 g, 가지 101.88 g, 수피 86.46 g 정도 배출하는 것을 알 수 있었으며, CO 배출량은 생엽 10.80 g, 가지 12.51 g, 수피 11.33 g 정도 배출하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 가지부위는 생엽과 수피부위보다 CO_2 총배출량과 CO 배출량이 각각 1.41배, 1.16배 많은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 참나무 6가지 수종 가운데 CO_2 및 CO를 상대적으로 많이 배출하는 수종으로는 상수리나무인 것을 알 수 있었으며, 상수리나무는 CO_2 및 CO 배출량이 작은 굴참나무와 비교하여 CO_2 1.43배, CO 6.67배 정도 높은 것을 확인할 수 있었다.

4) 잔류량 특성 결과, 중량 50 g 기준에 대한 부위별 ash 발생량은 생엽 3.1 g, 가지 10.5 g, 수피 16.43 g으로 나타나 부위별 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한, 졸참나무는 ash 발생량이 상대적으로 많은 수종임을 알 수 있었으며, 굴참나무보다 9.55배 정도 잔류량이 많은 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 졸참나무는 6가지 참나무 수종 가운데 무기물 함량이 상대적 높아 산불화재 후 2차 피해에 주는 영향이 더 클 것으로 사료된다.

감사의 글 : 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 2011-0005926).

참고문헌

1) 이병두, 이시영, 정주상, “2005년 강원도 양양산

불 행동 특성", 한국화재소방학회 논문지, 제19권, 제4호, pp. 1~6, 2005.
2) Marcelo M. Hirschler, "Fire hazard and toxic potency 0.1 the smoke from burning materials", Advance In Combustion Toxicology, pp. 229~230, 1990.
3) Washington Associated Press "California forest fire, Large quantity emission of greenhouse gases emission", Younhap News Agency, http://www.2006un.org/8756, Accessed on 2 November, 2007.
4) 강전유, 김상욱, 김영채, 김종갑, 김준선, 박승찬, 박용구, 이수욱, 이시영, 이영신, 이찬호, 이헌호, 정상배, 현정호, "삼림환경보전학", 향문사, pp. 42~69, 1997.
5) 이승훈 "화재조사 이론과 실무", pp. 23~86, 동화기술, 2009.
6) 이춘하, 권오한, 남상화, "화재조사 및 수사업무의 실태분석과 개선방안", 한국화재소방학회 논문지, 제15권 1호, pp. 116~126, 2001.
7) 신동소, 이화형, 임기표, 조남석, 조병욱, "임산화학", pp. 34~62, 향문사, 1994.
8) ISO 5660-1, "Reaction to Fire Part 1, Rate of Heat Release from building products(Cone Calorimeter)", Generer, 1993.
9) ASTM E 662. 2003. Test method for specific optical density of smoke generated by solid materials.
10) 임경빈, "신고 조림학원론", 향문사, pp. 120~174, 2007.
11) NFPA 921, 2011, Guide for fire & explosion investigation.
12) 김현중, 엄영근, 이전제, 정희석, 최인규, "목재공학개론", 선진문화사, pp. 33~34, 2004.
13) 조재현, 황병호, 이현종, 족구란, 강하영, 유순히, "신기능성 물질 탐색을 위한 주요 소나무류 잎의 특수성분 분석에 관한 연구" 한국목재공학회, 추계학술대회 발표논문집, pp. 130~135, 1997.
14) 서형훈, 박진모, 이명욱, 김진수, 김승수, "굴참나무 잎의 열분해 및 연소 특성 연구", 한국공업화학회 논문지, 제 21권, 제 5호, pp. 575~585, 2010.