산불에 따른 참나무의 화염확산 메커니즘 규명 및 화재조사에 관한 연구

A Study on Fire Investigations and Identification of Flame Spread Mechanism of the Oaks according to Forest Fire

박영주* · 이해평**

Park, Young Ju · Lee, Hae Pyeong

Abstract

In this study, we considered the mechanism of the flame spread and the fire investigation for oaks by forest fire. Cone calorimeter and ignition temperature tester were used as the equipments for this study. The temperature range of non-flame ignition was 346~382°C for living leaves, 375~494°C for branches, and 396~473°C for barks, respectively, which showed the difference by kind of trees. Thus, it was confirmed that the green leaves with high moisture content had relatively high risk of non-flame ignition. Also, the time of flaming ignition was 67 sec for living leaves, 203 sec for branches, and 23 sec for barks measured, respectively. Accordingly, it was confirmed that bark part with very low moisture content was flamingly ignited in a shorter time and its flame persisted for the longest time after ignition. And, it was shown that total thermal emission was 18~53 MJ/m² for living leaves, 41~80 MJ/m² for branches, and 19~110 MJ/m² for barks, which were quite different by kind of trees. Further, it could be confirmed that the oaks was a kind of tree mostly with high thermal emission by part. Thus, it is determined that its community complex has high thermal emission and large fire load so that it can be a critical clue to understand fire path and a useful clue to forecast flame spread and fire intensity by its classification into the area of greatest fire density.

Key words : Fire investigations, Forest fire, Flame spread, Initial combustion, Oaks

요 지

본 연구에서는 참나무류를 대상으로 산불에 따른 화염확산 메커니즘과 화재조사를 고찰하였다. 측정 장비로는 콘칼로리미터와 발화온도시험기를 이용하였다. 부위별 무염착화가 진행된 온도범위는 생엽의 경우, 346~382°C, 가지 375~494°C, 수피 396~473°C 온도 구간에서 수종별 차이가 있었고, 함수율이 높은 생엽은 무염착화위험성이 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 발염착화가 진행된 시간을 살펴보면, 생엽 67초, 가지 203초, 수피 23초로서 함수율이 현저히 낮은 수피부위는 빠른 시간에 발염착화 되었으며, 착화 후 가장 오랜 시간 화염이 지속되는 것을 알 수 있었다. 총열방출량은 생엽의 경우 18~53 MJ/m², 가지부위 41~80 MJ/m², 수피부위는 19~110 MJ/m² 정도 범위에서 수종별 발열량 차이가 크게 다른 것으로 나타났으며, 굴참나무는 부위별 발열량이 비교적 높은 수종인 것을 확인할 수 있었다. 따라서 산불발생 시 굴참나무 군락지는 발열량이 높기 때문에 높은 화재강도에 따른 화재경로를 파악하는데 중요한 단서가 될 수 있을 뿐만 아니라 최대 화재 밀도지역으로 구분하여 화염확산 및 화재강도 예측에 있어서도 유효한 단서가 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 화재감식, 산불, 화염확산, 초기연소, 참나무

1. 서 론

한국의 산불은 계절풍의 영향을 많이 받는 3월과 4월에 가장 많이 발생하며, 전국적으로 대형 산불이 증가하는 추세이다(임주훈, 2001). 산불화재의 위험성은 산림연료, 기상, 지형 인자에 의해 화재의 전파 및 전이과정 등이 다르게 나타나며, 연료의 종류 및 형태에 따라 다양한 화재성상과 패턴을 보인

다. 화재의 성상과 패턴에 영향을 주는 화재특성으로는 연료의 착화성 및 연소성, 재료가 타면서 발생하는 열량과 열량의 방출속도, 연기 및 연소가스의 발생, ash 등이 있으며, 이러한 요소들은 산불의 강도와 전파에 직접적인 영향을 미친다(현성호, 2003). 산불이 발생하였을 경우, 효율적으로 산불을 진화하고 산불로부터 인간의 생명과 재산을 안전하게 보호하기 위해서는 산불의 확산에 영향을 주는 인자들을 이용

*정회원 · 강원대학교 화학공학연구소 연구교수(E-mail : yjpolymer@kangwon.ac.kr)

**정회원 · 강원대학교 소방방재학부 교수(교신저자)

하여 산불의 확산방향과 확산속도를 예측하는 것이 중요하며(이병두, 2005), 이들 요소들을 고려한 화재조사가 반드시 이루어져야 한다. 따라서 산불에 따른 화재감식 및 화재확산 메커니즘을 규명하기 위해서는 총체적이고 다양한 많은 실험 데이터가 축적되어 있어야 하며, 산림연료, 기상, 지형 특성을 고려한 종합적인 연구가 이루어져야 한다.

산불은 제반 산림환경 인자들로 부터 산불의 형태가 결정된다. 즉, 발화지역의 연료, 기상 및 지형조건 등에 의해 진행 방향이나 화두의 발전 형태가 결정되어 지표화, 수관화 등으로 구분되며, 주위 환경인자들의 상호작용을 통해 산불의 강도 및 진행속도 등이 결정된다. 또한, 이러한 연료, 기상, 지형조건 가운데 한 요소의 변화는 매우 갑작스럽고 빠르게 산불 확산속도와 형태에 영향을 주게 되며, 특히 연료는 경가연물, 중가연물, 녹색가연물 등에 따라 다양한 형태로 산불이 확산된다(정주상 등, 2002). 한국은 국토의 약 65% 정도가 산악지역이다. 그 가운데 참나무림은 한국의 고유 수종으로서 활엽수종 가운데 67%를 차지하며, 전국적으로 넓게 분포한다(Lee et al., 2006). 참나무 수종은 산불에 강한 내화수종으로 알려져 한국 산림에서 우점하며(Kwon et al., 2002), 해당 수종은 상수리나무(*Quercus acutissima*), 굴참나무(*Quercus variabilis*), 갈참나무(*Quercus aliena*), 졸참나무(*Quercus serrata*), 떡갈나무(*Quercus dentata*), 신갈나무(*Quercus Tschonoskii*)의 6종이 기본종으로 분포하며(Lee, 1961a; Lee, 1961b; Kim et al., 1981) 전체 임목축적량의 약 27%를 차지하고, 그 면적은 170만 ha에 달하고 있다(심주석 등, 2003; 손영모 등, 2003).

산림연료 부분의 연구 분야는 생장(서정호 등, 2001; 손영모 등, 2000; 이우균 등, 1994), 분포(환경부, 1997; Lee et al., 2003), 갱신(김성덕 등, 1995), 형태(이우균, 1994; 함보영 등, 2004; Lee et al., 2006) 등 다양한 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 참나무를 대상으로 기상과 생장의 관계를 분석한 연구들(Pekka & Pertti, 2001; Du et al., 2007)도 있지만 실질적인 연소실험을 기반으로 한 분석 연구는 극히 미미한 실정이므로 산불의 확산 및 강도를 예측하기 위한 연소특성 데이터로 부터 산불 화재감식에서의 다양한 접근이 필요하다.

산불 화재감식의 기능은 단순히 발화원을 밝혀내는 것이 아니라 화재를 발생시킨 원인에서 시작하여 화재진압에 이르는 일련의 과정을 밝히고, 출화원인, 연소확대 요인, 사상자 발생 및 피해의 원인을 규명하는 것이다. 이러한 체계적이고 과학적 방법에 접근하기 위해서는 화재발생 과정의 모든 데이터가 분석되어야 한다(NFPA 921, 2011). 이 방법은 성공적인 화재 조사에 필요하며 바람직한 조직적·분석적인 처리 절차를 제공한다. 따라서 화재발생 전 과정의 분석에 있어서는 가연물을 대상으로 실질적인 연소실험에서 확보된 자료를 이용한 화재특성을 고려할 필요가 있으며, 이를 위해서는 많은 연소실험을 바탕으로 한 연소특성 관련 데이터의 제공이 필요하다. 또한, 산불에서의 화재감식 및 화염확산 메커니즘 규명을 위해서는 실제 산불에서의 연소 환경과 동일한 조건의 산소 공급이 이루어지는 상태에서 산불화재 초기 단계의

착화특성과 착화 후 화염확산 단계의 검증을 필요로 한다. 하지만, 산불은 지형, 연료, 기상인자와 산불자체의 상호작용으로 인하여 복잡하게 전개되므로 산불의 발생 메커니즘을 해석하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다(이병두 등, 2005). 따라서 산불의 확산에 영향을 주는 인자들을 이용하여 발화, 확산 및 진화 등에 관한 체계적인 연구가 절실히 필요하다(안상현 등, 2005).

산불발생 시 대부분의 산림 내 가연물들은 높은 에너지를 갖는 열원에 노출되면 착화되며, 착화 후 발생한 화염이 주변의 연료에 열을 전달하여 연료의 표면온도를 상승시킨다. 연료의 표면온도가 발화온도보다 높아지면 급격한 열분해가 일어남으로써 연료가스가 발생하게 되고 많은 열량을 방출하는 화염의 전파로 화재가 성장하게 된다. 화재의 전파는 화염부로 얼마나 많은 공기가 유입되는가에 따라서 결정되며, 이들의 방출 특성은 충분한 공기 유입에 따라 연소물질로부터 열을 수반하게 되어 고온의 휘발성·가연성 증기와 가스 성분을 방출하게 된다(Hirschler, 1990).

2. 연구내용 및 방법

2.1 연료 선정

가연물은 크게 지상 가연물(ground fuels)과 공중 가연물(aerial fuels)로 구분된다. 이들 가연물의 발화는 수분함유량, 배열, 조밀성, 부피에 따라서 평가된다. 임야에서는 가연물의 특성에 매우 큰 차이가 있으며, 수목이 쌓인 낙엽, 새로 떨어진 낙엽, 수풀, 떨어진 나뭇가지, 쓰러진 통나무, 키작은 관목, 상록수 가지, 매달려 있는 이끼, 꺾어진 가지, 그리고 기타 여러 물질들이 각각 다르다. 이들 각 물질들은 독특한 연소특성이 있다(NFPA, 2011). 따라서, 본 연구에서는 지상가연물을 대상으로 하였다. 내화수종으로 우점하고 있는 참나무류인 상수리나무(*Quercus acutissima*), 굴참나무(*Quercus variabilis*), 갈참나무(*Quercus aliena*), 졸참나무(*Quercus serrata*), 떡갈나무(*Quercus dentata*), 신갈나무(*Quercus Tschonoskii*)를 선정하였으며, 6가지 참나무 수종의 생엽, 가지, 수피 부위를 실험 연료로 사용하였다. 채취 대상지는 대형 산불이 많이 발생하는 지역인 강원도 삼척시 소재의 미로면을 선정하였다. 연료의 채취 시기는 참나무류의 개엽시기인 6월에 채취하였으며, 맑은 날이 5일 이상 지속된 다음날 채취하였다. 참나무류의 시료의 형태는 실제 산불발생 시 연료의 형태와 동일한 조건을 적용하기 위하여 원형 상태로 사용하였다.

2.2 함수율 측정

연소실험을 수행하기에 앞서 연료들의 함수율을 측정하였다. 함수율 측정은 ASTM D 1616 (American Society for Testing and Material)(심중섭, 1994)에 의해 측정된 값으로 3회 측정에 대한 평균값을 결과값으로 사용하였다.

측정 방법은 재료 200 g을 취하여 103±2°C에서 온도를 유지하도록 설정한 건조기(dry oven) 내에서 생엽은 24시간, 가지와 수피는 48시간 이상 건조시킨 후, 항량이 될 때까지 중량을 측정하여 함수율을 측정하였다. 항량 측정기준은 4시

간 간격으로 중량을 측정하였을 때 0.1%의 중량 변화가 없을 때까지로 하여 식 (1)에 의하여 산출하였다. 여기서, MC(moisture content)는 함수율[%], W는 건조 전 시료의 중량[g], W0은 완전 건조시킨 시료의 중량을 나타낸다.

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

2.3 착화특성 분석

2.3.1 자연발화온도 측정

자연발화온도(IT, Ignition temperature) 측정(홍윤명, 1992)은 일본 Kuramochi사의 모델명 KRS-RG-9000의 Group식 시험기를 이용하였다. 발화는 연소의 개시와 관련된 거동의 일부로서 속도제어 메커니즘으로 열의 발생속도와 확산속도가 평형을 나타내는 점으로 정의된다. 발화온도 측정 시, 발염의 확인은 육안에 의해 판단하고, 발화대기 시간은 4초로서 착화원 없이 물질이 자연발화 할 때의 최저온도를 측정한다. 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였으며, 구체적인 실험조건은 Table 1에 제시하였다.

2.3.2 발염착화시간 측정

초기 화재가 얼마나 빨리 진행되는지를 알아보기 위하여 영국 FTT사의 Dual cone calorimeter(ISO 5660-1, 2002)를 사용하여 발염착화시간(Flame TTI, Time to ignition)을 측정하였다. 측정된 발염착화시간은 수종별 대표값으로 화재 조건에서의 착화시간의 계산을 가능하게 함으로써 초기화재 대응에 유효한 값이 될 수 있을 것으로 사료된다. 구체적인 실험조건은 Table 2에 제시하였으며, 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였다.

2.4 화염전파특성 분석

2.4.1 발열량 특성 실험

산불발생 시 화염전파특성을 분석하기 위해서 영국 FTT사의 Dual cone calorimeter 시험기(ISO 5660-1, 2002)를 사용하여 총열방출량과 열방출율을 분석하였다. 총열방출량은

Table 1. Experimental conditions of ignition temperature

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

Table 2. Experimental conditions of cone calorimeter

Items	Cone calorimeter
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

시료 표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율을 주어진 시간에 대해 적분하여 누적된 값으로 구하였으며, 열방출율은 시료 표면적당 발생하는 열량의 크기로 나타내고 평균열방출율은 총열방출율을 주어진 시간에 대해 나눈 값으로 표현된다. 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 결과값으로 사용하였으며, 더 이상 중량감소 변화가 없을 때의 시간에서 실험을 종료하여 계산된 값을 사용하였다. 복사열은 화재시나리오 4단계(ignition, growth, fully develop, decay) 중 실제 화재상황과 가장 유사한 단계인 fully develop에 해당되는 50 kW/m²(ISO 5660-1, 2002)을 사용하였다. 구체적인 실험조건은 Table 2에 제시하였다.

2.4.2 화염지속시간 특성 실험

착화시간(TTI, Time to ignition)과 화염종료시간(TTF, Time to flameout)을 측정하여 화염지속시간을 분석하였다. 발염착화 후 화염지속시간은 재료가 복사열에 노출되면서 착화가 일어나는 시간과 착화가 종료될 때의 시간 즉 자연소화 될 때까지의 시간(소멸시간)까지 화염이 지속되는 시간을 말하며, 화염의 유무를 육안으로 판단하여 분석시스템에 기록된 시간을 확인하여 계산하였다. 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였으며, 구체적인 실험조건은 Table 2에 제시하였다.

화재조사 시 과학적인 판정을 위하여는 화재조사에서 얻은 각종 자료에 근거하여 추정된 발화원의 화재발생 가능성 등에 대하여 과학적인 입증수단인 재현실험을 실시하고, 그 결과를 참조하여 판정자료로 한다. 그러나 화재발생에 대하여는 과학적이고, 이론적으로 미해명부분이 많다는 것을 유의해야 하며, 재현실험에 있어 발화원인과 관련한 재현실험재료는 ① 화재 당시와 동일한 것을 선택할 것, ②화원 주변의 착화가 연물의 재질, 규격, 경과시간 등이 가능한 화재 당시와 동일한 것을 선택할 것, ③ 발화부의 주변온도, 습도, 보온 및 축열조건 등의 환경조건이 가능한 화재당시와 동일하게 할 것, ④ 재현 실험장소는 주변의 환경조건을 가능한 화재당시의 기상조건과 동일하게 하여야 한다(NFPA, 2011). 따라서, 본 연구에서는 실제 산불발생 조건을 최대한 적용하고자 실험 조건은 대기 중 충분한 산소공급의 조건에서 생연료를 그대로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 함수율 특성

Table 3에는 참나무 6가지 수종(굴참, 갈참, 상수리, 신갈, 졸참, 떡갈나무)의 부위별(생엽, 가지, 수피) 함수율 특성을 제시하였다. 부위별 함수율 특성을 살펴보면, 생엽의 경우 굴참나무 145.34%, 떡갈나무 140.84%, 신갈나무 135.29%, 갈참나무 148.99%, 졸참나무 154.84%, 상수리나무 113.27%로 측정되어 생엽은 113~149% 범위에서 수분을 함유하는 것으로 나타났다. 생엽의 수분함유량은 수종간 차이가 나타났으며 상수리나무의 생엽은 113.27%의 가장 낮은 함수율을 나타낸 수종이었으며, 졸참나무의 생엽은 상수리나무 보다 1.37배 높

Table 3. Results of moisture contents for the living leaves and branches and barks of oaks

Oaks		Moisture contents [%]
굴참나무 (<i>Quercus variabilis</i>)	living leaves	145.34
	branches	56.00
	barks	34.00
떡갈나무 (<i>Quercus dentata</i>)	living leaves	140.84
	branches	85.99
	barks	69.50
신갈나무 (<i>Quercus Tschonoskii</i>)	living leaves	135.29
	branches	80.16
	barks	76.65
갈참나무 (<i>Quercus aliena</i>)	living leaves	148.99
	branches	108.52
	barks	27.53
졸참나무 (<i>Quercus serrata</i>)	living leaves	154.84
	branches	69.95
	barks	54.93
상수리나무 (<i>Quercus acutissima</i>)	living leaves	113.27
	branches	73.72
	barks	34.47

은 수분을 함유하는 것으로 나타났다.

가지의 경우, 굴참나무 56.00%, 떡갈나무 85.99%, 신갈나무 80.16%, 갈참나무 108.52%, 졸참나무 69.95%, 상수리나무 73.72%로서 가지부위의 함수율은 56.00~108.52% 범위인 것으로 나타났다. 가지부위 또한 수종간 함수율 차이는 큰 것으로 나타났는데 가지부위의 함수율이 가장 낮은 수종은 굴참나무이고, 갈참나무는 굴참나무보다 1.94배 높은 수분을 함유하는 것으로 나타났다.

수피부위의 경우, 굴참나무 34.00%, 떡갈나무 69.50%, 신갈나무 76.65%, 갈참나무 27.53%, 졸참나무 54.94%, 상수리나무 34.47%로서 수피부위는 27.53~76.65% 범위에서 수종간 함수율 차이를 나타냈다. 수분을 가장 적게 함유하는 수종은 갈참나무이며, 신갈나무는 갈참나무보다 2.78배 높은 수분을 함유하는 것으로 나타났다.

따라서 부위별 평균함수율을 살펴보면, 생엽 139.76%, 가지 79.09%, 수피 49.51% 정도로서 부위별 함수율의 차이가 큰 것으로 나타났다. 수피부위는 함수율이 상대적으로 낮은 부위로 나타났으며, 생엽보다 2.82배 정도 낮았다. 또한, 상수리나무는 부위별 함수율이 대체로 낮은 것으로 나타났는데 Table 4에는 이에 대한 구체적인 값들을 제시하였다.

가연물의 수분함유량은 발화성과 화재확산속도를 결정짓는데 있어 중요한 역할을 한다. 식물(가연물)이 건조되면서 발

화성이 더 높아지고 더 심하게 탈 수 있으며, 초록잎을 가진 식물이나 수분 함유량이 많은 식물은 발화하기 더 어렵고 식물 내의 수분이 증발하면서 열을 흡수하여 더 천천히 타게 된다. 일단 수분이 없어지고 나면 온도는 계속 상승하여 가연물의 발화온도에 도달하게 된다(NFPA, 2011). 또한, 산림 연료는 기상학에 따른 상대습도의 영향으로 수분 함유량이 다르며, 수종별 수분 함유량 및 구성성분과 조성에 따라 화재 특성은 큰 차이를 보인다. 따라서, 임내 가연물의 발염온도와 발염시간은 식물이 생육하고 있는 휴면기에 따라 차이가 있고, 고사한 것은 부식의 정도에 따라 차이가 있으며, 특히 임내 가연물의 함수율에 따라 다르며 연소의 용이성은 수분 함유량의 다소와 큰 관계가 있다.

또한, 임내 가연물의 함수량과 산불발생 가능성과의 관계는 수종에 따라 산불에 약하거나 강한 차이가 생기는 것은 수엽의 발화온도에 차이가 있기 때문인데, 생엽은 150~180°C에서 죽고, 200°C에서 탄화되며, 380°C에서 연소회화되고, 400°C가 넘으면 대개는 발염한다. 이때, 발염할 때 까지 지속되는 시간은 앞내의 함수량과 잎의 두께와 관련이 있다(강전유 등, 2002). 또한, 이러한 가연물에서 중요한 요소는 건조의 정도이다(NFPA, 2011).

수분을 함유하는 3가지 형태는 수분이 세포와 세포사이에 들어 있는 형태, 수분이 세포 속에 들어 있는 형태, 그리고 수분이 결정수가 되어 함유되는 형태로 나타나는데 건조한 연료는 생장이 불규칙해 지면서 세포형태 변화에 따라 수분 함량이 변화한다(임경빈, 2007). 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 상수리나무는 산불발생 시 착화위험성이 상대적으로 클 것으로 사료되며, 특히, 수피부위는 빠르게 착화됨으로써 연소가 빠르게 진행될 것으로 사료된다.

3.2 착화특성

3.2.1 자연발화온도 특성

Table 5에는 참나무 6가지 수종에 대한 부위별 무염착화온도를 제시하였다. 부위별 무염착화온도를 살펴보면, 생엽의 경우 굴참 362°C, 떡갈 372°C, 신갈 346°C, 갈참 367°C, 졸참 359°C, 상수리 382°C에서 무염착화가 진행되었으며, 가지부위는 굴참 375°C, 떡갈 444°C, 신갈 479°C, 갈참 392°C, 졸참 494°C, 상수리 457°C에서 무염착화가 진행되었다. 수피부위는 굴참 437°C, 떡갈 396°C, 신갈 432°C, 갈참 454°C, 졸참 473°C, 상수리 420°C에서 무염착화가 일어났다.

Table 5의 부위별 자연발화온도 범위는 생엽 346~382°C,

Table 4. Analysis of moisture contents for the living leaves and branches and barks of oaks

Classification		Range[%]	Mean[%]	Max.	Min.
Oaks	living leaves	113~149	139.76	154.84(졸참)	113.27(상수리)
	branches	56~108.52	79.09	108.52(갈참)	56.00(굴참)
	barks	27.53~76.65	49.51	76.65(신갈)	27.53(갈참)

Table 5. Analysis of non-flame ignition temperature for the living leaves and branches and barks of oaks

Classification		Range[°C]	Mean[°C]	Max.	Min.
Oaks	living leaves	346~382	365	382(상수리)	346(신갈)
	branches	375~494	440	494(줄참)	375(굴참)
	barks	396~473	435	473(줄참)	396(떡갈)

가지 375~494°C, 수피 396~473°C 온도범위에서 무염착화가 진행되어 평균 자연발화온도는 생엽 364.67°C, 가지 440.17°C, 수피 435.33°C인 것으로 나타났다. 따라서 생엽은 가지와 수피보다 상대적으로 무염착화 위험성이 큰 것으로 나타났다.

무염착화에 영향을 주는 인자들로 열의 축적, 열전도율, 발열량, 습도, 표면적 등이 있으며, 열을 방출하는 반응에서 촉매작용을 가진 물질이 존재하면 반응은 가속되어 열의 축적이 증가하여 자연발화 되기 쉬운 것으로 알려져 있다. 또한, 자연발화온도는 화재 초기단계에서 진행되며, 오랜 시간 무염착화의 진행은 열의 축적으로부터 수분 증발로 인한 발염착화의 진행이 용이하게 된다(현성호 등, 2003).

또한, 자연발화에 관계가 있는 반응의 거의 모두에 촉매로서 작용하는 것은 수분이며, 수분은 그 반응의 활성화 에너지를 낮게 하고 반응속도를 촉진시킨다. 따라서, 수분이 존재하는 것은 자연발화의 조건을 좋게 하지만, 그 양적 관계는 명확하지 않다(김태석, 2009).

하지만, 실질적인 연소실험 데이터를 바탕으로 가연물의 가연성 정도 및 화재특성 분류를 통해 발화성에 영향을 미치는 가연물의 요소를 확인할 수 있으며, 가연물이 적절하게 분류되면 지형과 기상요소를 고려한 다음, 해당 가연물에서 화재의 확산 속도 및 일반적인 거동을 판별할 수 있다(NFPA, 2011).

또한, 연소의 용이성은 목재의 구성성분에 따른 구성에 영향을 받는다. 주요 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% 정도 인 것으로만 밝히고 있어(심종섭, 1994) 본 연구에서는 생엽, 가지, 수피

부위별 명확한 구성성분의 구성에 따른 차이는 밝힐 수 없었다. 하지만, Fig. 1(이필우, 1997)의 참나무류의 조성차이는 수종 간 명확히 구분됨에 따라 산발발생 시, 수종별 연소특성은 다를 것으로 사료된다.

또한, Fig. 1에서와 같은 참나무류의 조성차이는 각각 다른 물리적 성질을 갖게 되는데, 물리적 성질은 다음 세가지 성질에 의해 주로 결정되어 진다. 첫째, 밀도의 측정에 의해 추정될 수 있는 공극률, 즉 공극의 부피 비율, 둘째, 세포벽의 미세구조 및 세포의 종류와 그 구성 비율을 포함한 해부학적 구조(해부학적 구조는 주로 수종 고유의 특성임), 셋째, 함수율이 바로 그것이다. 이러한 물리적 성질은 산발발생 시, 목재의 연소특성에 영향을 미치며, 참나무 수종은 산발발생 시 산발에 강한 수종으로 알려져 있다(김현중, 2004). 하지만, 산발의 형태는 지표에 태우는 지표화, 줄기를 태우는 수간화, 공중연료인 생엽과 가지를 태우는 수관화 등으로 구분함에 따라 연료를 분류하여 연소특성을 이해할 필요가 있다.

3.2.2 발염착화시간 특성

Table 6에는 참나무 6가지 수종(굴참, 갈참, 상수리, 신갈, 줄참 떡갈나무)의 부위별(생엽, 가지, 수피) 발염착화 후 화염이 지속되는 시간 및 화염지속시간을 제시하였다. 부위별 발염착화가 진행되는 시간을 살펴보면, 생엽의 경우 굴참나무 66초, 떡갈나무 87초, 신갈나무 86초, 갈참나무 85초, 줄참나무 31초, 상수리나무 51초에 발염착화가 일어남으로써 수종별 차이를 나타냈으며, 생엽은 31~87초 시간 범위에서 발염착화 되는 것으로 나타났다. 따라서 줄참나무의 생엽은 가장 빠른 시간인 31초에 발염착화 되었으며, 다음은 상수리나무, 굴참나무 순으로 나타났다. 발염착화 후 화염 지속 시간을 살펴보면, 굴참나무 16초, 떡갈나무 29초, 신갈나무 29초, 갈

Fig. 1. A : 상수리나무 *Quercus acutissima* 횡단면(×100), B : 굴참나무 *Quercus variabilis* 횡단면(×100), C : 떡갈나무 *Quercus dentata* 횡단면(×100), D : 신갈나무 *Quercus Tschonoskii* var. *eximia* 횡단면(×100), E : 줄참나무 *Quercus serrata* 경단면(×100), F : 떡갈나무 *Quercus dentata* 축단면 (×100)

Table 6. Analysis of flame ignition time for the living leaves and branches and barks of oaks

Classification		Range[sec]	Mean[sec]	Max.	Min.
Oaks	living leaves	31~87	68	87(떡갈)	31(줄참)
	branches	167~240	203	240(줄참)	167(굴참)
	barks	10~69	23	69(줄참)	10(상수리)

참나무 58초, 줄참나무 55초, 상수리나무 65초 동안 화염을 지속하는 것으로 나타났다. 따라서 생엽의 경우, 줄참나무와 상수리나무는 대체로 발염착화는 빠르게 진행되었으나, 발염착화 후 화염이 지속되는 시간은 상대적으로 짧은 것으로 나타났다. 굴참나무, 떡갈나무, 신갈나무는 발염착화는 늦게 진행되었지만 상대적으로 오랜 시간 화염을 지속하는 것으로 나타났다.

가지부위의 경우 발염착화시간을 살펴보면, 굴참나무 167초, 떡갈나무 217초, 신갈나무 200초, 갈참나무 214초, 줄참나무 240초, 상수리나무 181초에 각각 발염착화 되어 167~240초 시간 범위에서 수종별로 차이가 나타났으며, 가장 빠른 시간에 발염착화가 진행된 수종은 굴참나무이고 다음은 상수리나무, 신갈나무, 갈참나무와 떡갈나무, 줄참나무의 순으로 나타났다.

수피부위의 수종별 발염착화 시간을 살펴보면, 굴참나무 12초, 떡갈나무 11초, 신갈나무 21초, 갈참나무 16초, 줄참나무 69초, 상수리나무 10초로서 수피부위는 10~69초 시간 범위에서 발염착화가 일어났으며, 수피부위 또한 수종별 발염착화시간의 차이가 나타났다. 상수리나무, 떡갈나무, 굴참나무는 상대적으로 빠른 시간에 발염착화 되었으며, 상대적으로 늦게 발염착화 된 수종은 줄참나무인 것으로 나타났다. 또한, 참나무 6가지 수종의 부위별 발염착화시간에 대한 평균값을 살펴보면, 평균 발염착화시간은 생엽 68초, 가지 203초, 수피 23초인 것으로 나타남으로써 부위별 발염착화의 위험성은 큰 차이를 보였다. 일반적으로 직경이 50 mm(20in) 이하인 경우에는 가는 고목으로 분류된다. 이들 가는 고목 지상 가연물은 숲 지역에서의 화재확산속도 및 일반화재 거동에 많은 영향을 끼치는 가장 중요한 물질들 중의 하나이다. 가는 고목은 쉽게 발화하고 한 지역에서 다른 지역으로 불길이 이동하는 주요 통로가 되는 경우가 많으며, 더 크고 무거운 가연물의 점화물이 된다. 또한 가는 고목이 많이 있는 지역에서 화재는 엄청난 열을 빠르게 할 수 있다(NFPA, 2011).

이러한 착화시간의 차이는 잎이 수분을 함유하는 함수율의 영향에 그치지 않고, 시기 변화에 따른 잎의 조직 및 성분변화와 이에 따른 연소 시 발생하는 휘발성분비의 차이에 따라 착화현상에 영향을 미치는 것(현성호 등, 2003)으로 알려져 있으며, 주요 성분인 셀룰로오스($C_6H_{10}O_5$)는 약 50% 가량 이상을 차지하고 있으며, 물분자량 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 산소 농도가 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(이승훈, 2009).

착화시간이 빠르다는 것은 그만큼 연소가 빠르게 진행되어 화재발생 시, 연소의 확대가 빠르게 진행된다는 것을 의미하며(강성동, 2002), 수종에 대한 부위별 착화특성은 산불화재 조사에서의 연소의 이동경로 추정에 유용한 정보로 활용될 것으로 사료된다.

3.3 화재전파특성

3.3.1 화염지속시간

Table 7에 발염착화 후 화염이 지속되는 시간을 나타내었는데, 부위별 발염착화 후 화염이 지속되는 시간을 살펴보면, 생엽은 굴참나무 16초, 상수리나무 58초, 신갈나무 65초, 갈참나무 29초, 줄참나무 55초, 떡갈나무 29초 동안 화염이 지속되는 것으로 나타났으며, 16~65초 시간 범위에서 수종별로 차이가 나타났고, 신갈나무, 상수리나무, 떡갈나무는 대체로 오랜 시간 화염을 지속하는 수종임을 알 수 있었다. 또한, 가지부위는 굴참나무 474초, 떡갈나무 528초, 신갈나무 423초, 갈참나무 368초, 줄참나무 297초, 상수리나무 375초 동안 화염이 지속되는 것으로 나타났으며, 297~528초 시간 범위에서 수종별 차이가 나타났다. 발염착화 후 가장 긴 시간 화염이 지속되는 수종은 생엽과 마찬가지로 떡갈나무였으며, 줄참나무는 화염지속 시간이 상대적으로 짧은 것으로 나타났다.

수피부위는 굴참나무 1,045초, 떡갈나무 130초, 신갈나무 286초, 갈참나무 671초, 줄참나무 376초, 상수리나무 636초 동안 화염이 지속되는 것으로 나타났고 굴참나무의 가지부위는 상대적으로 가장 빠른 시간에 발염착화가 진행되었으며, 가장 오랜 시간 동안 화염을 지속하는 것으로 나타났다. 수피부위의 발염착화 위험성은 상대적으로 가장 높았고, 다음은 생엽, 가지 순으로 나타났다. 평균 화염지속시간은 생엽 42초, 가지 411초, 수피 507초였으며, 수피부위는 발염착화 후 가장 긴 시간 동안 화염을 지속하는 것으로 나타났는데 이에 대하여 Table 8에 제시하였다. 따라서 산불발생 시 수피부위는 발염착화가 빠르게 진행되어 연소 속도가 빠를 것으로 판단되며, 발염착화 후 화염지속시간이 길어서 복사열 증가의 원인이 되어 화재전파에 직접적인 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한, 생엽, 가지, 수피부위의 연소특성을 고려할 때 수간화 형태 파악 등 참나무 개체의 화재감식 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

또한, 화염의 지속되는 시간은 화재확산의 지표가 될 수

Table 7. Combustion characteristics for the living leaves and branches and barks of oaks

Oaks		Non-flame ignition temperature [°C]	Flame ignition time [sec]	Flame out [sec]	Flame duration time [sec]	Total heat release [MJ/m ²]	Mean heat release rate [kW/m ²]
굴참나무 (<i>Quercus variabilis</i>)	living leaves	362	66	82	16	24.5	13.4
	branches	375	167	641	474	80.3	42.5
	barks	437	12	1057	1045	109.5	63.7
상수리나무 (<i>Quercus acutissima</i>)	living leaves	372	85	143	58	31.2	17.1
	branches	444	214	582	368	41.1	28.5
	barks	396	16	687	671	50.6	37.2
신갈나무 (<i>Quercus Tschonoskii</i>)	living leaves	346	51	116	65	27.8	14.8
	branches	479	181	556	375	53.6	42.5
	barks	432	10	546	536	42.4	26.2
갈참나무 (<i>Quercus aliena</i>)	living leaves	367	86	115	29	53.2	27.7
	branches	392	200	623	423	43.9	43.4
	barks	454	21	307	286	27	26.4
줄참나무 (<i>Quercus serrata</i>) 줄참나무	living leaves	359	31	86	55	24.9	13.3
	branches	494	240	537	297	54.4	30.4
	barks	473	69	445	376	29.5	19.7
떡갈나무 (<i>Quercus dentata</i>)	living leaves	382	87	116	29	18.2	9.6
	branches	457	217	745	528	46.3	36.6
	barks	420	11	141	130	19	14.8

Table 8. Analysis of flame duration time for the living leaves and branches and barks of oaks

Classification		Range [sec]	Mean [sec]	Max.	Min.
Oaks	living leaves	16~65	42	65(상수리)	16(굴참)
	branches	297~528	411	528(떡갈)	297(줄참)
	barks	130~1,045	507	1,045(굴참)	130(떡갈)

있으며, 화재확산은 부분적으로 탄 가연물과 비가연성 물체에 나타난다. 이러한 시각적인 지표들에는 남아있는 미연소 가연물의 여러 가지 손상, 탄화 패턴, 변색, 탄소 얼룩, 모양, 위치, 상태 등이 포함된다. 특정 지역에서 여러 가지 지표에 의해 나타난 방향의 패턴을 분석하면 그 지역의 화재 확산 경로를 확인할 수 있으며, 화재의 진행을 역추적하기 위해 체계적 방법을 적용하여 화재의 경로를 되짚어감으로써 발화 지점까지 이를 수 있다. 이 절차는 임야화재 조사에서 인정하고 있는 기준 기법이다(NFPA, 2011).

3.3.2 발열량 특성

Table 9에는 부위별 발열량 특성을 분석한 결과를 제시하였다. 부위별 총열방출량을 살펴보면, 생엽은 18~53 MJ/m² 정도 범위에서 수종별로 차이가 있으며, 평균 총열방출량은 30.0 MJ/m² 정도인 것으로 나타났다. 신갈나무의 생엽은 상대적으로 발열량이 높게 나타났으며, 평균열방출을 또한 동일한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 가지부위의 경우 41.1~80.3 MJ/m² 정도 범위에서 수종별로 차이를 보이며, 평균 총열방출량은 53.3 MJ/m² 정도로 나타났는데 굴참나무는 상대적으로 발열량이 높게 나타났다. 수피부위는 19.0 ~ 109.5 MJ/m² 정도 범위에서 수종별로 차이를 나타냈으며, 평균 총열방출량은 46.3 MJ/m² 정도였다. 굴참나무의 수피부위는 109.5 MJ/m² 정도로서 발열량이 상대적으로 높게 나타났

는데 이는 초기에 열분해가 급격하게 진행되어 많은 양의 열을 방출하면서 연소하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 굴참나무는 부위별 발열량이 높게 나타남으로써 산발발생 시 높은 발열량에 의해서 주위의 온도를 상승시켜 복사열로 인한 열확산속도가 빠르게 진행될 것으로 사료되며, 빠른 열확산으로 화재전파 또한 빠르게 진행될 것으로 사료된다. 목재의 일반적인 열분해 반응을 살펴보면, 100°C정도의 가열에서는 흡착수가 증발되지만 100°C가 넘으면 구조적인 흡착수가 방출되면서 열분해가 서서히 시작되고, 150°C에서는 분해속도가 빨라지며, 180~300°C에서는 hemicellulose가 급속도로 분해되고, 240~400°C에서는 cellulose, 그리고 280~550°C에서는 lignin 이 분해되면서 250°C, 300°C, 400°C 부근에서 각기 발열 피크를 나타낸다. 이때, 왕성하게 분해됨과 동시에 발열반응(exothermic reaction)을 일으킨다. 500~1,000°C에서는 3가지 주요 성분의 탄화물로부터 수소가 분리되어 목탄이 완성되는데 700°C 부근에서의 목가스생성의 리크는 주로 수소생성에 의한 것이다(심중섭, 1994).

임야화재에서 화재 확산은 대류열 및 복사열의 영향을 받는다. 대류열로 인해 높이가 낮은 풀과 낙엽 더미로부터 더 높은 가지와 산의 정상으로 화재가 확산된다. 이후 화재가 바깥쪽으로 진행되면서 복사열이 주요 열전달 수단이 된다. 복사열은 평형한 표면에서 관목과 풀로 이루어진 더 낮은 높이의 가연물의 주요 열전달 방법이다. 따라서, 화재거동을 좀

Table 9. Analysis of heat release for the living leaves and branches and barks of oaks

Classification		Range [MJ/m ²]	Mean [MJ/m ²]	Max.	Min.
Oaks	living leaves	18.2~53.3	30.0	53.2(갈참)	18.2(상수리)
	branches	41.1~80.3	53.3	80.3(굴참)	41.1(떡갈)
	barks	19.0~109.5	46.3	109.5(굴참)	19.0(상수리)

더 정확하게 분석하려면 임야화재 가연물의 변화를 세심하게 관찰해야 한다(NFPA, 2011).

열방출률은 가연물이 타는 시간의 길이만큼 손상의 정도에 많은 영향을 끼칠 수 있다. 광범위한 손상이 일어난 지역은 해당 위치에 중요한 가연물이 있었다는 것을 의미한다. 이때 가연물 하중이 다른 곳으로 부터 어떻게 화재가 확산되었는지의 여부를 고려하는데 중요한 의미를 갖는다(NFPA, 2011).

또한, 높은 발열량은 주변의 온도를 높이고 다량의 연기를 생성함과 동시에 복사열의 영향으로 화재가 급속하게 성장하게 되며, 이러한 높은 열방출률로 인한 화염, 복사, 고온가스, 연기 등에 의한 화재의 성장형태는 조사관이 화재의 발화원 또는 발화부가 어디인가를 알 수 있게 하는 소잔형태를 발생 시키며(김태석, 2009), 연소의 확대경로를 추정할 수 있는 단서가 된다.

연소의 확대경로는 확실하게 진행방향에 수반되는 연기와 화염의 확대방향을 나타내는 것으로서 화류는 여러 조건에 좌우되면서 종방향과 횡방향으로 변화되어 연소한다. 따라서 화류의 경로 즉, 연소경로에 있는 각종재료는 연기와 화열에 의해서 변화한 상태로 소잔되어 있다. 종방향과 횡방향으로 확산되는 각각의 화류는 그 경로와 맞닿는 부분에서 물리적인 영향을 나타내며, 특히 연소가 정지된 부분에서 그 방향성이 현저하게 나타난다. 따라서 화류의 의한 물리적 현상이 남기는 흔적 즉, 연소경로를 분명하게 조사해 가면서 얻은 결론을 역으로 추적해 가면 궁극적으로 발화부위 및 발화지점에 도달할 수 있으므로, 수중에 따라 고려하여 연소경로를 추적하고 연소방향을 고찰한다(김태석, 2009).

4. 결 론

본 연구에서는 산불확산 메커니즘 규명 및 화재조사를 위하여 참나무 수종을 대상으로 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1. 한국의 참나무 수종은 부위별로 생엽 139.76%, 가지 79.09%, 수피 49.51% 정도의 수분을 함유하고, 상수리 나무는 부위별 함수율이 비교적 낮은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 수피부위는 상대적으로 함수율이 낮고, 생엽보다 2.82배 정도 함수율이 낮았는데 수종별·부위별 함수율은 산림 화재 시 연소 초기의 착화특성과 산불형태에 영향을 주는 요인으로서 건조한 연료는 착화위험성이 크며, 화재가 빠르게 확산된다. 따라서 부위별 함수율이 상대적으로 낮은 상수리나무는 산불발생 시 착화위험성이 클 것으로 사료되며, 특히, 수피부위는 빠르게 착화된 후 연소도 빠르게 진행될 것으로 사료된다.
2. 부위별 무염착화온도를 살펴보면, 생엽 346~382°C, 가지

375~494°C, 수피 396~473°C의 온도 범위에서 무염착화가 진행되어 평균 무염착화온도는 생엽 364.67°C, 가지 440.17°C, 수피 435.33°C 정도인 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 함수율과 직접적인 관련이 있으며, 생엽은 상대적으로 함수율이 높아서 다량의 수분에 의한 열전달이 용이하여 낮은 온도에서도 무염착화가 용이하므로 산불발생 시 생엽은 가지와 수피보다 무염착화의 위험성이 상대적으로 클 것으로 판단된다. 또한, 부위별 발염착화시간은 생엽 67초, 가지 203초, 수피 23초로서 함수율이 현저하게 낮은 수피부위는 착화 후 가장 오랜 시간 화염이 지속되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 수피부위는 상대적으로 발염착화가 빠르게 진행되어 연소초기의 화재위험성이 크고, 연소 후 가장 오랜 시간 화염이 지속되어 화재전파 및 화재강도가 클 것으로 판단된다.

3. 발염착화 후 화염이 지속되는 시간을 살펴보면, 생엽 42초, 가지 411초, 수피 507초로서 수피부위는 발염착화 후 가장 긴 시간 화염이 지속되었고, 산림 화재 시 수피부위는 발염착화 후 화염지속시간이 길어서 복사열 증가로 인해 화재전파에 직접적인 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한, 참나무 개체는 부위별 연소특성을 고려할 때, 수간화의 화재감식 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다. 발열량 특성을 살펴보면, 생엽의 평균 총열방출량은 30.0 MJ/m², 가지부위는 53.3 MJ/m², 수피부위는 46.3 MJ/m² 정도인 것을 알 수 있었다. 따라서 굴참나무는 부위별 발열량이 비교적 높게 나타남에 따라 산불발생 시 높은 발열량으로 주변의 온도를 상승시켜 열확산속도가 빠르며, 빠른 열확산으로 화재전파 또한 빠르게 진행될 것으로 사료된다.
4. 참나무 수종의 부위별 착화특성 및 화염전파특성 자료는 산불화재 조사에서의 착화원인 및 화염확산 규명에 중요한 자료로 활용이 가능하며, 또한 산불발생에 따른 연소의 확대 및 이동경로 예측에 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 학사경비보조금 재원으로 강원대학교의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

강성동, 이창우, 현성호, 윤명오 (2002) 다중이용시설 바닥마감재의 연소가스 독성평가에 관한 실험 연구, 한국화재소방학회

논문집, 한국화재소방학회, 제16권, 제1호, pp. 20-21.

강전유, 김상욱, 김영채, 김종갑, 김준선, 박승찬, 박용구, 이수욱, 이시영, 이영신, 이찬호, 이현호, 정상배, 한정오 (2002) **산림환경보존학**, 향문사.

김성덕, 송호경 (1995) 경북 불영계곡 소나무(*Pinus densiflora*)림의 재생과정에 관한 연구, **한국임학회 논문집**, 한국임학회, 제84권, 제2호, pp. 258-265.

김태석, 김유식, 윤충국, 정영진 (2009) **화재조사길잡이**, 기문당.

김현중, 엄영근, 이진제, 정희석, 최인규 (2004) 목재공학개론, 선진문화사.

권기원, 최정호, 송호경 (2002) 참나무 주요 수종의 갱신전략 수립에 관한 연구-신갈나무, 굴참나무와 상수리나무의 맹아 발생, 생장 및 물질생산량-, **한국임학회 2002년도 학술연구 발표논문집**, pp. 177-179.

서정호, 이우균, 손요환, 함보영 (2001) 안면도 소나무 임분의 동적 생장모델, **한국임학회 논문집**, 한국임학회, 제90권, 제6호, pp. 725-733.

손영모, 이경학, 이우균, 권순덕 (2000) 우리나라 주요 6수종의 수간곡선식, **한국임학회 논문집**, 한국임학회, 제91권, 제2호, pp. 213-218.

손영모, 이경학, 정영교, 권순덕 (2003) 상수리나무 등 4개 참나무류를 임분의 생장 특징 및 모델개발, **한국임학회 2003년도 학술연구 발표논문집**, pp. 71-73.

심종섭, 신동소, 이화형, 임기표, 조남석 (1994) **임산학학**, 향문사.

심주석, 한상섭 (2003) 낙엽성 참나무류의 생리, 생태적 특성(3)-광도변화에 대한 잎의 광합성 반응, **한국임학회 논문집**, 한국임학회, 제92권, 제3호, pp. 208-214.

이병두, 이시영, 정주상 (2005) 2005년 강원도 양양상불 행동 특성, **한국화재소방학회 논문집**, 한국화재소방학회, 제19권, 제4호, pp. 1-3.

이승훈 (2009) **화재조사 이론과 실무**, 동화기술.

이우균 (1994) Spline 함수와 선형방정식을 이용한 수간 및 임분간곡선 모델, **한국임학회 논문집**, 한국임학회, 제83권, 제1호, pp. 63-74.

이필우 (1997) **한국산 목재의 성질과 용도 (I) 목재의 구조 및 성질과 용도**, 서울대학교출판부.

임경빈 (2007) **신고조림학원론**, 향문사.

임주훈 (2001) **동해안 대형산불과 산불피해지의 식생회복, 숲과 문화 기획연구**, 산림과학원, 제10권, 제2호, pp. 22-23.

안상현, 원명수, 김동현, 강영호, 이명보, 이시영 (2005) 의성군지역 산불발생 및 대형화 위험지역 구분, **한국지리정보학회 논문집**, 한국지리정보학회, 제8권, 제2호, pp. 117-124.

정주상, 이시영, 강영호 (2002) GIS 및 판별분석에 의한 삼척산 불지역의 소나무임분 피해도 추정, **한국임학회 논문집**, 한국임학회, 제91권, 제3호, pp. 355-361.

함보영, 이우균, 정재서, 이준학 (2004) IKONOS 영상과 GIS를

이용한 참나무류의 공간분포 및 출현확률추정, **한국산림측정학회 논문집**, 한국산림측정학회, 제7권, 제1호, pp. 74-84.

현성호, 이창우, 차시환 (2003) **방화방곡공학**, 신광문화사.

홍윤명, 정국삼 (1992) **安全工學實驗**, 동화기술.

환경부 (1997) **금강소나무 분포 정밀조사 결과보고서 : 경북 내륙 지역 중심으로**, p. 91.

ISO 5660-1 (2002) *Reaction to fire part 1, rate of heat release from building(cone calorimeter)*.

Kim, Y.S., Ko, S.C. and Oh, B.Y. (1981) *Distribution Atlas of Plants of Korea(5) Atlas of Quercus in Korea*, Univ. Korea, Seoul, Korea, pp.93-133.

Lee, C.B. (1961a) *Phylogentic study of the subgenus Lepidobalanus of the genus Quercus in Korea(1)*, Korean Agr. Soc. pp. 87-108.

Lee, C.B. (1961b) *Phylogentic study of the subgenus Lepidobalanus of the genus Quercus in Korea(1)*, Seoul Uni. J., Vol. 10, pp. 97-141.

Lee, C.S., Lee, W.K., Yoon, J.H., Song, C.C. (2006) *Distribution Pattern of Pinus densiflora and Quercus spp. Stand in Korea Using Spatial Statistics and GIS*. J. Korean For. Soc. Vol. 95, No. 6, pp. 663-671.

Lee, J.H., Lee W.K., Jun, E.J., Kim, S.W. and Kwak, D.A. (2003) *Regional Level Impact of Global Warming on the Distribution of Oak Stands In Cental Korea*. The Korean Journal of Qustermary Research(4th) Vol. 17, No. 2, pp. 135-138.

Lee, W.K., Biging, G.S., Son, Byun, Y.H., Lee, K.H., Son, Y.M. and Seo, J.H. (2006) *Geostatistical analysis of regional differences in stem taper from of Pinus densiflora in central Korea*, Ecological research, Vol. 21, pp. 513-525.

Hirschler, M.M. (1990) *Fire hazard and toxic potency 0.1 the smoke from burning materials*, Advance In Combustion Toxicology, pp. 229-230.

NFPA 921 (2011) *Guide for fire & explosion investigation*.

Pekka W.K., and Petti, H. (2001) *The effect of temperature on the radial growth of Scots pine in nortnenmost Fennoscaldia, Forest Ecology and Management*. Vol. 142, pp. 65-77.

Du, S., Yamanaka, N., Yamamoto, F., Otsuki, K., Wang, S. and Hou, Q. (2007) *The effect of climate on radial growth of Quercus liaotungensis forest trees in Loess Plateau, China*. Dendrochronologia Vol. 25, No. 1, pp. 29-36.

◎ 논문접수일 : 11년 07월 12일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 07월 22일
 ◎ 심사완료일 : 11년 11월 01일