

산림 화재감식 응용을 통한 내화림 조성에 관한 연구

박 영 주

강원대학교 화학공학연구소
(2011. 7. 13. 접수 / 2011. 10. 10. 채택)

A Study on the Afforestation of Fire-Resistant Forest through an Application of Forest Fire Investigation

Young-Ju Park

Chemical Engineering Research Center, Kangwon National University

(Received July 13, 2011 / Accepted October 10, 2011)

Abstract : In this study, species resistant to forest fire were extracted from high trees through an investigation of combustion mechanism. Here, the average flameless ignition temperatures of living leaves, branches and barks of oak were respectively, 365°C, 440°C and 435°C, and the average flameless ignition temperatures of living leaves, branches, barks and cones of pine tree were respectively, 320°C, 405°C, 435°C and 363°C. It shows that generally, pine tree has a lower flameless ignition temperature than oak and thus, has a relatively high risk of flameless ignition. When comparing risk of fire depending on ignition characteristics, *Quercus serrata* had a low risk of stem fire, and *Quercus acutissima* and *Quercus serrata* had a low risk of crown fire, as well. When analysing risk of fire depending on a duration of flame, also, *Quercus dentata* had a low risk of stem fire, and *Quercus variabilis Blume* had a low risk of crown fire too. Lastly, when comparing risk of fire, according to heat release rates, *Quercus acutissima* had a low risk of fire, and *Quercus acutissima* and *Quercus dentata* had a low risk of crown fire, as well. In conclusion, it was observed that as fire-resistant species, *Quercus serrata* and *Quercus dentata* have a low risk of ignition, *Quercus variabilis Blume* has a short duration of flame after discharging ignition when a forest fire occurs, and *Quercus acutissima*, *Pinus Rigida* and *Antipathes japonica Brook* have low heat release rates.

Key Words : fire identification, stem fire, crown fire, fire-resistant forest

1. 서론

산불로 인한 사회적, 경제적 피해가 증가하면서 효율적인 산불예방 및 진화정책을 수립하기 위하여 산불의 특성을 파악하는 것이 중요해지고 있다. 산불의 특성을 파악하기 위해서는 산불통계자료를 이용한 산불의 발생특성과 산불의 공간적, 시간적 분석이 요구된다. 산불의 시간적 분석은 월별, 연도별 특성 분석 등이 이루어져야 하며, 공간적 특성 분석은 산불발생 위험인자들이 이용된다¹⁻³⁾. 산림연료, 기상, 지형은 산불발생 위험 인자들로서 이런 인자들에 의해서 화재의 전파 및 전이과정 등이 다르게 나타나며, 연료의 종류 및 형태에 따라 다양한 화재성상과 패턴을 보인다. 화재의 성상과 패턴에 영향을 주는 화재특성으로는 연료의 착

화성 및 연소성, 재료가 타면서 발생하는 열량 및 열량의 방출속도, 연기 및 연소가스의 발생, ash 등이 있으며, 이러한 요소들은 산불의 강도와 전파에 직접적인 영향을 미친다⁴⁾. 따라서 이러한 산불의 확산에 영향을 미치는 인자들을 이용하여 산불의 확산방향과 확산속도를 예측하는 것은 화재확산 메커니즘 규명에 반드시 필요하며⁵⁾, 이러한 화재 확산 메커니즘 규명은 내화림 조성에 효율적으로 적용할 수 있다. 이러한 내화림 조성을 통해서 효율적인 산불관리와 산불로부터 인간의 생명과 재산을 안전하게 보호할 수 있어야 한다.

한국은 전 국토의 65%가 산지이며, 이 중 97%가 임목지이다. 그 가운데 불에 잘 타는 침엽수 임상이 45% 정도로 가장 많고, 잡목이 우거져 있으며, 참나무림은 전국토의 13.6%(산림면적 20.3%)로서 넓게 분포한다⁶⁾. 또한, 참나무류는 한국 활엽수종 중 67%의 분포면적을 차지하고 있으며, 한국

yjpolymer@kangwon.ac.kr

의 고유수종으로서 전국적으로 분포하고 있는데, 산불에 강한 내화수종으로 알려져 한국 산림에서 우점한다⁷⁾. 낙엽성 참나무 수종은 상수리나무, 굴참나무, 갈참나무, 졸참나무, 떡갈나무, 신갈나무의 6종이 기본종으로 분포하며⁸⁻¹⁰⁾, 전체 임목축적량의 약 27%를 차지하여 그 면적은 170만 ha에 달하고 있다^{11,12)}.

본 연구에서는 한국 산림에 우점하고 있는 교목류 가운데 산불에 취약한 수종으로 알려져 있는 소나무류 3가지 수종과 참나무류 6가지 수종을 대상으로 내화성 정도를 비교 분석하고, 한국형 숲가꾸기에 응용 가능한 내화수종을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

우리나라는 겨울의 한냉·건조한 기온과 여름

의 집중강우에 따른 독특한 강수패턴으로 특징지어지는 온대몬순기후지역이다. 또한, 난대림, 온림, 한대림으로 구분하는데 수평적으로 남부지방의 난온대부터 북부지방의 한대에 이르기까지, 수직적으로 낮은 해발고도의 저지대로부터 해발고도가 높은 고산지대에 이르기까지 매우 다양한 자연식생을 관찰할 수가 있다. 지역별 해당기후는 Table 1에 제시하였으며, 기후대별 해당 수종은 Table 2와 같다.

침엽수와 활엽수는 한국산림을 우점하고 있음을 알 수 있으며¹³⁾, 특히, 강원도는 분포지가 가장 넓은 지역에 해당된다. 이에 대하여 Table 3에 지역별 구체적인 산림총계¹³⁾를 제시하였다. Table 4에는 우점 수종들의 임상분포 정보¹⁴⁾를 제시하였다. 소나무림, 참나무림 등은 수관 점유면적 또는

Table 1. The climate of various regions¹⁴⁾

도별/지역별	한대	온대 북부	온대 중부	온대 남동부	온대 남동부	온대 남서부	온대 해안	난대
경기도	-	○	○	-	-	-	○	-
강원도	-	○	-	-	-	-	○	-
충청북도	-	-	○	○	-	-	-	-
충청남도	-	-	○	○	-	-	○	-
전라북도	-	-	○	○	-	-	○	-
전라남도	-	-	-	-	-	○	-	○
경상북도	-	-	○	-	○	-	○	-
경상남도	-	-	○	-	○	-	-	○
제주도	-	-	-	-	-	-	-	○

Table 2. Trees growing in different climatic¹⁴⁾

		특징수종	조립수종	구역
온대림	남부	개비자나무, 대나무류, 해송, 보양목, 산초나무, 사철나무, 굴피나무, 팽나무, 줄사철나무, 백동백나무, 개산초나무, 단풍나무, 개서나무, 서어나무, 소나무 등	소나무, 이깔나무, 낙엽송, 잣나무, 해송, 전나무, 은행나무, 밤나무, 상수리나무, 굴참나무, 떡갈나무, 느티나무, 호두나무, 숲나무, 오동나무, 아카시아, 오리나무류, 포플러, 산딸나무, 들매나무, 물푸레나무, 박달나무, 대나무류, 리기다소나무 등	난대의 끝부터 동부는 북위 38°(강릉 이남)까지, 서부는 37°(충남 중부 이남)까지의 구역
	중부	매죽나무, 졸참나무, 신갈나무, 향나무, 전나무, 물박달나무, 소나무 등		동해안에 있어서는 북위 40°(함남 중부 이남)까지, 중부에 있어서는 38°(강원도, 황해도의 3도)까지, 서해안에 있어서는 39°(평남 중부 이남)까지의 구역
	북부	참피나무, 박달나무, 신갈나무, 거제수나무, 시달나무, 산겨릅나무, 정향나무, 잣나무, 전나무, 이깔나무 등		온대 중부 이북으로 평안도, 함경도의 고지를 제외한 구역
난대림	아왜나무, 밀구슬나무, 후피향나무, 녹나무, 생달나무, 동백나무, 비쭈기나무, 사철나무, 북가시나무, 가시나무, 참가시나무, 돈나무(섬염나무), 감탕나무, 후박나무, 모새나무, 구실갯밥나무, 메밀갯밥나무, 식나무, 산개벚나무, 고채목, 구상나무, 신갈나무, 개서어, 굴거리, 서어나무, 산뽕나무, 단풍나무, 매죽나무, 당단풍, 소나무, 주목, 졸참나무 등	대나무류, 가시나무류, 녹나무, 회양목, 소나무, 해송, 상수리, 느티나무 등	연평균 14℃ 이상 되는 곳으로서 주로 해안에 따른 좁은 지방이며, 제주도 및 그 밖의 섬들이 이에 속함.	
한대림	가물비나무, 분비나무, 이깔나무, 종비나무, 잣나무, 전나무, 누운잣나무 등	-	평지에는 없고 평안도 및 함경도의 고원 및 고산을 차지하는 연평균기온 5℃ 이하의 지역	

Table 3. Forest statistics of different regions¹³⁾

행정구역	총계	침엽수	활엽수	혼효림	죽림	무림목지
계	6,370,304	2,671,924	1,657,271	1,844,205	7,039	189,865
서울특별시	15,733	1,457	7,630	4,585	0	2,061
부산광역시	35,758	14,764	6,864	12,889	5	1,236
대구광역시	48,975	20,830	5,878	22,069	0	198
인천광역시	40,583	7,921	15,454	14,437	0	2,771
광주광역시	19,691	12,855	2,944	3,523	127	242
대전광역시	30,248	15,235	8,720	5,849	0	444
울산광역시	68,840	24,513	20,414	21,477	18	2,418
경기도	525,840	191,804	184,539	129,840	0	19,657
강원도	1,368,523	473,576	469,064	400,043	0	25,840
충청북도	496,255	231,628	125,254	119,659	11	19,703
충청남도	438,673	197,839	115,813	107,291	255	17,475
전라북도	446,684	193,213	151,405	90,548	684	10,834
전라남도	694,963	391,171	126,971	146,862	3,913	26,046
경상북도	1,343,341	560,561	240,855	519,484	30	22,411
경상남도	707,103	310,590	145,514	234,626	1,996	14,377
제주도	89,094	23,967	29,952	11,023	0	24,152

Table 4. Information about the distribution of oaks and pine trees¹⁴⁾

Forest type	Description
소나무림	수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상인 임분
잣나무림	수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상인 임분
낙엽송림	수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상인 임분
참나무림	수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상인 임분
리기다소나무림	수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상인 임분
활엽수림	활엽수(혼효림)의 수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상인 임분
혼효림	침엽수와 활엽수의 수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 각각 25% 이상, 75% 미만인 임분
기타침엽수림	침엽수(혼효림)의 수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상인 임분

입목본수 비율이 75% 이상인 임분을 말한다.

3. 연구내용 및 방법

3.1. 연료선정

연료 대상은 우리나라에서 우점하고 있는 참나무류 6가지 수종(상수리나무: *Q.ac*, *Quercus acutissima*, 굴참나무: *Q.v*, *Quercus variabilis*, 갈참나무: *Q.a*, *Quercus aliena*, 졸참나무: *Q.s*, *Quercus serrata*, 떡갈나무: *Q.d*, *Quercus dentata*, 신갈나무: *Q.m*, *Quercus mongolica*)과 소나무류 3가지(소나무: *P.d*, *Pinus densiflora*, 리기다소나무: *P.r*, *Pinus rigida* Mill., 해송: *A.j*, *Antipathes japonica* Brook)를 선정하여, 각각의 수종에 대한 생엽, 가지, 수피, 솔방울 부위를 실험에 사용하였다.

Table 5. Fuel of experimental

구분	굴참	갈참	졸참	떡갈	상수리	신갈	소나무	리기다소나무	해송
생엽	○	○	○	○	○	○	○	○	○
가지	○	○	○	○	○	○	○	○	○
수피	○	○	○	○	○	○	○	○	○
솔방울							○	○	○

연료의 채취는 대형 산불이 가장 빈번하게 발생하는 강원도 지역을 선정하여 6월 중에 맑은 날이 5일 이상 지속된 다음날 채취하였다¹⁸⁾. 연료의 형태는 실제 산불발생 시의 연료의 형태와 동일한 조건을 적용하기 위하여 원형 상태로 사용하였으며, Table 5에 사용연료에 대하여 구체적으로 제시하였다.

3.2. 함수율 측정

가연물의 가연성은 연료의 함수율과 구성성분 및 조성에 따라 큰 차이를 보인다. 산림 가연물의 함수율은 기상에 따른 상대습도의 영향으로 수분 함유량 정도가 다르다. 따라서 연소실험을 수행하기에 앞서 연료들의 함수율을 측정하였으며, 함수율 측정은 ASTM D 2016(American Society for Testing and Material)에 의해 측정¹⁵⁾된 값으로 3회 측정에 대한 평균값을 결과값으로 사용하였다.

측정 방법은 재료 200 g을 취하여 103±2℃에서 온도를 유지하도록 설정한 건조기(dry oven) 내에서 생엽은 24시간 이상, 가지와 수피는 48시간 이상 건조시킨 후, 항량이 될 때까지 중량을 측정하여 함수율을 측정하였다. 항량 측정기준은 4시간 간격으로 중량을 측정하였을 때 0.1%의 중량 변화가 없을 때까지로 하여 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.

3.3. 화재특성 분석

3.3.1. 무염착화온도 분석

무염착화온도(Non-flame IT, Non-flame Ignition temperature)의 측정은 일본 Kuramochi사의 모델명 KRS-RG-9000의 Group식 자연발화온도시험기¹⁶⁾를 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(무염착화) 할 때의 최저온도를 측정한다.

Table 6. Experimental conditions of ignition temperature

Items	Ignition temperature
Model	KRS-RG-9000
Method of measurement	Group type
Weight(mg)	20±0.01
Condition of material	Raw
Waiting time of Ignition(s)	4

다. 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였으며, 구체적인 실험조건은 Table 6에 제시하였다.

3.3.2. 발염착화시간 분석

초기 화재가 얼마나 빨리 진행되는지를 알아보기 위하여 영국 FTT사의 Dual Cone Calorimeter¹⁷⁾를 사용하여 발염착화시간(Flame ITT, 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 7에 제시하였으며, 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였다.

3.3.3. 발열량 분석

산불연소 메커니즘으로 부터 화염전파특성을 규명하기 위하여 영국 FTT사의 Dual Cone Calorimeter 시험기¹⁷⁾를 사용하여 총열방출량, 열방출율을 분석하였다. 총열방출량은 시료표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율을 주어진 시간에 대해 적분하여 누적된 값으로 구하였으며, 열방출율은 시료의 표면적당 발생하는 열량의 크기로 나타난다. 평균열방출율은 총열방출율을 주어진 시간에 대해 나눈 값으로 표현된다. 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을 사용하였으며, 중량에 대하여 더 이상 중량감소가 없을 때의 시간에서 실험을 종료하여 계산된 값을 사용하였다. 복사열은 화재시나리오 4단계(ignition, growth, fully develop, decay) 중 실제 화재상황과 가장 유사한 단계인 fully develop에 해당된다¹⁷⁾고 제시된 바에 따라 50 kW/m²을 사용하였으며, 구체적인 실험조건은 Table 7에 제시하였다.

3.3.4. 화염지속시간 분석

화염지속시간은 발염착화시간(Flame TTI, Time to ignition) 측정으로부터 소염시간(TTF, Time to flameout)을 측정하여 화염지속시간을 분석하였다. 발염착화 후 자연소화 되기까지의 화염지속시간은 재료가 복사열에 노출되면서 착화가 일어나는 시간과 착화가 종료될 때의 시간 즉 자연소화 될 때까지의 시간(소염시간)을 말하며, 화염의 유무를 육안으로 판단하여 분석시스템에 기록하여 확인하였다. 결과값은 3회 실험하여 측정된 값의 평균값을

Table 7. 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 8. Interpretation of the results for forest fire hazard

Items	Contents
분석항목 및 해석	함수율 특성 착화특성(무연착화온도, 발연착화시간) 화재전과특성(발열량)
제시값	범위, 평균값, 최대값, 최소값
해석	level 3으로 화재특성 분류
내화수종 추출	수간화, 수관화에 따른 수종별, 부위별 내화수종 추출

사용하였으며, 구체적인 실험조건은 Table 7에 제시하였다.

3.4. 화재특성 결과의 해석

Table 8에 화재특성 결과의 해석에 대한 내용을 제시하였다. 산림 연료의 화재특성 대표값으로 부터 수종 및 부위별 범위, 평균값, 최대값, 최소값을 제시하였으며, 이로부터 화재특성을 3단계로 분류하였다. 연료의 화재특성 대표값은 착화에 영향을 미치는 함수율특성과 연소초기단계에 나타나는 무연착화 및 발연착화특성과 발연착화 후 화염지속시간, 발열량에 대한 대표값을 결과로 제시하였다. 또한, level 3으로부터 수종별 내화수종을 추출하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 연소 특성

Table 9에는 한국의 주요 분포수종인 참나무류 6가지 수종(상수리나무: *Q.ac*, *Quercus acutissima*, 굴참나무: *Q.v*, *Quercus variabilis*, 갈참나무: *Q.a*, *Quercus aliena*, 졸참나무: *Q.s*, *Quercus serrata*, 떡갈나무: *Q.d*, *Quercus dentata*, 신갈나무: *Q.m*, *Quercus mongolica*)과 소나무류 3가지(소나무: *P.d*, *Pinus densiflora*, 리기다소나무: *P.r*, *Pinus rigida* Mill., 해송: *A.j*, *Antipathes japonica* Brook) 수종의 부위별(생엽, 가지, 수피, 솔방울) 연소특성을 제시하였다.

임상별 연소특성을 살펴보면, 활엽수종인 참나무류의 경우, 무연착화온도는 325~494℃, 발연착화

시간 11~240초, 화염지속시간 12~1,482초, 총열방출량 18.2~101.52 MJ/m², 평균열방출율 9.58~56.24 kW/m², 발연량 34.1~302.2 m²/m², 중량감소율 0.019~0.052 g/s 구간에서 수종별, 부위별 차이를 보이는 것으로 나타났다.

또한, 침엽수종인 소나무류의 연소특성을 살펴보면, 무연착화온도는 285~431℃, 발연착화시간은 6~350초, 화염지속시간은 33~1,016초, 총열방출량은 20.6~94.4 MJ/m², 평균열방출율 9.58~56.24 kW/m², 발연량 26.5~410.4 m²/m², 중량감소율 0.018~0.158 g/s 구간에서 수종별, 부위별 차이를 보이는 것으로 나타났다. 중량 감소율은 연소의 진행속도를 알 수 있는 척도로 이용이 되며, 중량감소율이 높다는 것은 그만큼 연소의 진행이 빠르게 진행됨을 의미한다. 따라서 임상별 연소의 진행속도를 살펴보면, 모든 수종의 생엽과 수피부위는 큰 차이는 보이지 않으며, 가지 부위는 평균 중량감소율이 대체로 높은 것으로 나타나 연소의 진행이 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 특히, 신갈나무와 떡갈나무의 가지 부위는 상대적으로 평균 중량감소율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 내화수종으로 알려진 참나무 수종은 부위별 큰 차이가 있는 것으로 나타났다.

4.2. 화재특성 결과의 해석

4.2.1. 함수율 특성

Table 9에는 함수율 특성을 제시하였는데 참나무류 생엽은 113~154.84%, 가지 56~108.52%, 수피 27.53~76.65%, 소나무류 생엽은 112.85~164.62%, 가지 53.52~97.00%, 수피 18~24%, 솔방울 26.58~33.38% 범위에서 부위별 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Table 10에는 임상에 따른 부위별 함수율 특성을 분류하여 고탍수율과 저함수율 수종을 선별하여 제시하였다. 부위별 평균함수율을 살펴보면, 생엽의 경우, 참나무류는 139.76%, 소나무류는 142.09% 정도 수분을 함유하는 것으로 나타났으며, 가지부위의 경우, 참나무류는 79.09%, 소나무류는 77.51% 정도 수분을 함유하는 것으로 나타났다. 또한, 수피의 경우, 참나무류는 49.51%, 소나무류 21.60% 수분을 함유하는 것으로 나타났으며, 소나무류의 솔방울은 29.25% 정도의 수분을 함유하는 것으로 나타났다. 따라서 부위별 함수율 차이는 크지 않으나 수피부위의 경우는 임상별 차이가 큰 것으로 나타났다.

Table 9. Result of combustion characteristics of oaks and pine trees

Classification		함수율[%]	무연착화온도[℃]	발연착화시간[sec]	화염지속시간[sec]	총열방출량 [MJ/m ²]	평균열방출율 [kW/m ²]	발연량 [m ² /m ²]	증량감소율 [g/s]	
Oaks	Q.v	Living leaf	121.50	325	38	12	59.3	33.2	302.2	0.027
		Branch	56.00	390	82	588	76.5	44.56	112.9	0.027
		Bark	34.00	355	12	1482	101.52	56.24	184.19	0.028
	Q.d	Living leaf	140.84	382	87	29	18.2	9.58	276.6	0.026
		Branch	85.99	457	217	528	46.3	36.63	104.6	0.041
		Bark	69.50	420	11	130	19	14.81	130.5	0.025
	Q.m	Living leaf	135.29	367	86	29	53.2	27.71	177.5	0.026
		Branch	80.16	392	200	423	43.9	43.4	159.5	0.052
		Bark	76.65	454	21	286	27	26.43	34.1	0.030
	Q.a	Living leaf	148.99	372	85	58	31.2	17.06	424.6	0.026
		Branch	108.52	444	214	368	41.1	28.49	55.6	0.035
		Bark	27.53	396	16	671	50.6	37.2	43.7	0.024
	Q.s	Living leaf	154.84	350	35	28	29.3	16.26	174.9	0.025
		Branch	69.95	494	240	297	54.4	30.44	125.8	0.030
		Bark	54.93	473	69	376	29.5	19.7	114.7	0.019
	Q.ac	Living leaf	113.27	346	51	65	27.8	14.78	191.4	0.025
		Branch	73.72	479	181	375	53.6	42.45	99.4	0.038
		Bark	34.47	432	10	536	42.4	26.19	132.3	0.019
Pine trees	P.d	Living leaf	164.62	285	6	88	63.5	35.27	410.4	0.027
		Branch	53.52	390	350	489	47.4	26.49	40.1	0.028
		Bark	22.81	450	20	1016	67.4	25.97	26.5	0.018
		Cone	27.79	380.7	13	309	41.7	33.61	230.81	0.028
	P.r	Living leaf	148.80	340	35	50	20.6	10.98	293.1	0.026
		Branch	97.00	406	26	613	42.3	21.04	229.5	0.027
		Bark	18.00	431	8	793	44.9	23.08	313	0.025
		Cone	33.38	352.5	17	418	38.85	18.27	59.15	0.019
	A.j	Living leaf	112.85	335	48	44	38.6	21.33	177.7	0.027
		Branch	82.00	420	22	33	42.77	18.49	407.19	0.032
		Bark	24.00	424	6	633	94.4	52.72	56.6	0.027
		Cone	26.58	371.8	33	371	37.21	13.68	78.16	0.158

Table 10. Analysis of moisture contents for the living leaf and branch and bark of oaks and pine trees

Classification		Range[%]	Mean[%]	Max.	Min.
Oaks	Living leaf	113~149	139.76	154.84(졸참)	113.27(상수리)
	Branch	56~108.52	79.09	108.52(갈참)	56.00(굴참)
	Bark	27.53~76.65	49.51	76.65(신갈)	27.53(갈참)
Pine trees	Living leaf	112.85~164.62	142.09	164.62(소나무)	112.85(해송)
	Branch	53.52~92.00	77.51	92.00(리기다)	53.52(소나무)
	Bark	18~24	21.60	24(해송)	18(리기다)
	Cone	26.58~33.38	29.25	33.38(리기다)	26.58(해송)

부위별 함수율은 방울, 수피, 가지, 생엽 순으로 낮게 나타났으며, 부위별 함수율이 낮은 수종으로는 생엽은 상수리나무, 가지부위는 굴참나무, 수피

부위는 갈참나무인 것으로 나타났다. 따라서 산불 발생 시 갈참나무는 나무의 줄기를 태우는 수간화 발생 위험성이 상대적으로 높은 수종인 것으로 나

타났으며, 상수리나무와 굴참나무는 잎과 가지를 태우는 수관화 발생 위험성이 상대적으로 높은 수준인 것으로 나타났다.

비교적 화재에 강한 수종은 수분이 풍부하며 수지가 적고, 수분이 많은 갓난 새싹과 새잎들은 잘 타지 않을 뿐만 아니라 생가지는 수분이 많아서 잘 타지 않는다¹⁸⁾고 알려져 있으며, 생가지의 경우 수분이 많아서 잘 타지 않는다는 것은 발염착화 특성만이 언급된 것으로 사료된다. Table 12에서 알 수 있듯이 생가지의 경우 참나무류는 발염착화가 상대적으로 빠르게 진행되었고, 소나무류는 발염착화가 상대적으로 늦게 진행된 것을 볼 때, 임상별 차이가 큰 것을 알 수 있으나, 생엽과 수피부위보다 중량감소가 대체로 빠르게 진행된 것은 무염착화와 발염착화에 기인한 것으로 사료된다.

4.2.2. 무염착화온도 특성

Table 11에는 임상에 따른 부위별 평균무염착화온도를 나타내었다. 참나무류의 생엽, 가지, 수피부위를 포함한 무염착화는 346~494℃ 온도구간에서 진행 되었고, 소나무류는 285~450℃ 온도구간에서 무염착화되는 것으로 나타났다. 부위별 평균 무염착화온도를 살펴보면, 참나무류는 생엽 365℃, 가지 440℃, 수피 435℃, 솔방울 363℃ 정도에서 무염착화가 진행되었다. Table 9에는 수종별 부위

별 구체적인 무염착화온도 값을 제시하였다.

따라서 소나무류는 참나무류보다 무염착화온도가 대체로 낮은 것으로 나타났으며, 특히, 소나무 생엽은 무염착화온도가 가장 낮아 무염착화 위험성이 가장 높은 것으로 나타났다. 무염착화온도가 낮다는 것은 그만큼 열의 축적이 빨리 이루어져 오랜 시간 가열시 발염착화의 위험성이 크다는 것을 의미한다.

이와 같이 수종에 따라 산불에 대한 취약성의 차이가 생기는 것은 생엽의 발화온도에 차이가 있기 때문인데, 생엽의 발화온도에 대한 연구결과에 의하면, 150~180℃에서 죽고, 200℃에서 탄화되며, 380℃에서 연소화가 되고, 400℃가 넘으면 대체로 발염한다. 이때 발염할 때까지의 지속되는 시간은 잎 내의 함수량 및 잎의 두께와 관계가 있다¹⁸⁻²⁰⁾.

4.2.3. 발염착화시간 특성

Table 11에는 임상에 따른 부위별 평균 발염착화시간에 구체적인 값들을 제시하였다.

임상 부위별 발염착화시간을 살펴보면 참나무류의 경우, 생엽 31~87초, 가지 167~240초, 수피 10~69초 정도에서 발염착화가 진행되었으며, 소나무류의 경우, 생엽 48~35초, 가지 22~350초, 수피 6~20초, 솔방울 13~33초 정도에서 발염착화가 진행되어 임상에 따른 부위별 발염착화 특성은 큰 차

Table 11. Analysis of non-flame ignition temperature for the living leaf and branch and bark of oaks and pine trees

Classification		Range[℃]	Mean[℃]	Max.	Min.
Oaks	Living leaf	346~382	365	382(상수리)	346(신갈)
	Branch	375~494	440	494(굴참)	375(굴참)
	Bark	396~473	435	473(졸참)	396(떡갈)
Pine trees	Conifer	285~340	320	340(리기다)	285(소나무)
	Branch	390~420	405	420(해송)	390(소나무)
	Bark	424~450	435	450(소나무)	424(해송)
	Cone	353~381	363	381(소나무)	353(리기다)

Table 12. Analysis of flame ignition time for the living leaf and branch and bark of oaks and pine trees

Classification		Range[s]	Mean[s]	Max.	Min.
Oaks	Living leaf	31~87	68	87(떡갈)	31(졸참)
	Branch	167~240	203	240(졸참)	167(굴참)
	Bark	10~69	23	69(졸참)	10(상수리)
Pine trees	Living leaf	35~48	42	48(해송)	35(소나무)
	Branch	22~350	133	350(소나무)	22(해송)
	Bark	6~20	11	20(소나무)	6(해송)
	Cone	13~33	21	33(해송)	13(소나무)

Table 13. Flame ignition temperature of living leaves¹⁸⁾

발염착화 온도	수종
440℃	소나무, 구주소나무
460℃	주목
500℃	분비나무, 가문비나무, 굴거리나무, 회양목, 개비자나무
530℃	졸참나무
540℃	은행나무, 상수리나무
550℃	뽕나무, 페르샤호두나무, 마가목, 일본목련, 밤나무, 네군도단풍나무
610℃	피나무, 아까시나무, 은행나무, 가래나무
620℃	가중나무
650℃	일본잎갈나무

Table 14. Analysis result of flame duration time for the living leaf and branch and bark of oaks and pine trees

Classification		Range[s]	Mean[s]	Max.	Min.
Oaks	Living leaf	16~65	42	65(상수리)	16(굴참)
	Branch	297~528	411	528(떡갈)	297(졸참)
	Bark	130~1045	507	1,045(굴참)	130(떡갈)
Pine trees	Living leaf	44~50	47	50(리기다)	44(해송)
	Branch	33~613	374	613(리기다)	33(해송)
	Bark	633~1016	814	1,016(소나무)	633(해송)
	Cone	309~418	366	418(리기다)	309(소나무)

이를 보이는 것으로 나타났다. 평균 발염착화시간을 살펴보면, 참나무류의 경우는 생엽 68초, 가지 203초, 수피 23초에 발염착화 되었으며, 소나무류의 경우는 생엽 42초, 가지 133초, 수피 11초, 솔방울 21초에 발염착화 되었다. 따라서 참나무류와 소나무류 모두 수피부위는 상대적으로 빠르게 발염착화가 진행되었으며, 소나무는 참나무보다 발염착화 위험성이 높은 것으로 나타났다.

Table 13에 제시한 생엽의 발염착화 온도는 소나무는 440℃, 졸참과 상수리는 530~540℃에서 발염착화되는 것을 알 수 있듯이 임내 가연물의 이러한 착화특성 차이는 식물이 생육하고 있는 성장기와 휴면기에 따라 차이가 있으며, 부식의 정도에 따라 차이가 있다. 특히 임내 가연물의 함수율에 따라 다르다¹⁸⁾고 밝히고 있다.

임상별 발염착화시간은 Table 13의 강전유 등¹⁸⁾의 발염착화온도 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다. 소나무(발염착화온도 440℃)는 상수리나무(상수리나무는 540℃)보다 발염착화온도가 상대적으로 낮아 발염착화가 빠르게 진행된 것으로 추측할 수 있다. 또한, 강전유 등¹⁸⁾의 연구에 따른 발염착화온도는 함수율이 높은 초본류의 생엽은 751℃ 이상, 상록활엽수의 생엽은 600~750℃이며, 낙엽

활엽수와 침엽수의 생엽은 451~600℃라고 밝히고 있으나, 위험등급을 세분화하여 내화성 정도를 명확하게 구분할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4.2.4. 화염지속시간 특성

Table 12에는 발염착화 후 화염이 지속되는 시간을 나타내었다. 참나무류의 경우 생엽 16~65초, 가지 297~528초, 수피130~1045초 사이의 시간에서 화염을 지속하였으며, 소나무류는 생엽 44~50초, 가지 33~613초, 수피 633~1016초, 솔방울 309~418초 사이의 시간에서 화염이 지속되는 것으로 나타났다. 따라서 임상에 따른 부위별 화염지속시간 특성은 부위별 시간차이가 크게 다른 것으로 나타났다. 또한, Table 14에 제시한 평균 발염착화시간을 살펴보면, 참나무류 생엽 42초, 가지 411초, 수피 507초 정도 화염을 지속하였으며, 소나무류는 생엽 47초, 가지 374초, 수피 814초, 솔방울 366초 정도 화염을 지속하는 하는 것으로 나타났다.

따라서 수피부위는 가장 오랜 시간 화염을 지속하였으며, 다음으로 가지, 솔방울, 생엽 순인 것으로 나타났다. 또한, 참나무류는 소나무류보다 발염착화온도가 상대적으로 높고, 발염착화가 늦게 진행되어 발염착화위험성은 낮으나 가지부위는 발염

Table 15. Analysis result of heat release for the living leaf and branch and bark of oaks and pine trees

Classification		Range[MJ/m ²]	Mean[MJ/m ²]	Max.	Min.
Oaks	Living leaf	18.2~53.2	29.97	53.2(갈참)	18.2(상수리)
	Branch	41.1~80.3	53.27	80.3(굴참)	41.1(떡갈)
	Bark	19.0~109.5	46.33	109.5(굴참)	19.0(상수리)
Pine trees	Living leaf	20.6~63.5	40.90	63.5(소나무)	20.6(리기다)
	Branch	42.3~47.4	43.53	47.4(소나무)	42.3(리기다)
	Bark	44.9~94.4	68.90	94.4(해송)	44.9(리기다)
	Cone	37.21~41.7	39.25	41.7(소나무)	37.21(해송)

착화 후 화염이 지속되는 시간은 상대적으로 길어 산불발생 시 소나무류보다 수간화에 취약할 것으로 사료된다.

4.2.5. 발열량 특성

Table 15에는 발열량 특성을 제시하였다. 임상에 따른 부위별 발열량 특성을 살펴보면, 총열방출량은 참나무류의 경우 생엽 18.2~53.2 MJ/m², 가지 41.1~80.3 MJ/m², 수피 19.0~109.5 MJ/m² 정도, 소나무류의 경우 생엽 20.6~63.5 MJ/m², 가지 42.3~47.4 MJ/m², 수피 44.9~94.4 MJ/m², 솔방울 37.21~41.7 MJ/m² 정도의 범위에서 열량을 방출하

는 것으로 나타남으로써 평균열방출율과 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 평균 총열방출량을 살펴보면, 참나무류의 경우 생엽 29.97 MJ/m², 가지 53.27 MJ/m², 수피 46.33 MJ/m² 정도, 소나무류의 경우 생엽 40.90 MJ/m², 가지 43.53 MJ/m², 수피 68.90 MJ/m², 솔방울 39.25 MJ/m² 정도 열량을 방출하는 것으로 나타났다.

따라서 소나무류의 생엽과 수피부위, 참나무류의 가지부위의 높은 발열량은 발염착화 후 화염 지속되는 시간이 길거나 연소초기에 함수율에 따른 열의 축적에 기인한 것으로 수관의 형태나 부위별 비중에 따라 차이가 클 것으로 사료된다.

Table 16. Classification for forest fire hazard(stem fire and crown fire) of oaks and pine trees

구분		상대적인 비교	
함수율	수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종	갈참	< 리기다
	수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종	상수리, 굴참	≤ 해송, 소나무
	수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	신갈	> 해송
	수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	줄참, 갈참	≤ 리기다, 소나무
무염착화	수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종	떡갈	> 해송
	수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종	신갈, 굴참	≤ 소나무, 리기다
	수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	줄참	> 소나무
	수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	상수리, 줄참	> 리기다, 소나무, 해송
발염착화	수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종	상수리	< 해송
	수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종	줄참, 굴참	< 소나무, 해송
	수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	줄참	> 소나무
	수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	떡갈, 줄참	> 소나무, 해송
화염지속	수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종	굴참	> 소나무
	수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종	상수리, 떡갈	< 리기다
	수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	떡갈	> 해송
	수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	굴참	> 소나무, 해송
발열량	수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종	굴참	> 해송
	수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종	갈참, 굴참	≤ 소나무
	수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	상수리	> 리기다
	수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종	상수리, 떡갈	≥ 리기다, 해송

Table 17. Selection of fire-resisting forest of oaks and pine trees

화재 특성	활엽수						침엽수		
	굴참	갈참	줄참	떡갈	상수리	신갈	소나무	리기다소나무	해송
고함수율	○					○	○	○	
무염착화 진행 늦음			○		○				
발염착화 진행 늦음			○	○					
화염지속시간 짧음	○			○					
저발열량				○	○			○	○

4.3. 내화수종 추출

Table 16에는 산불발생 시 줄기를 태우는 수간 화와 잎과 가지를 태우는 수관화의 2가지 형태로 분류하여 화재에 취약한 수종과 상대적인 내화수종을 분류하여 제시하였다.

낮은 함수율에 따른 수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종으로는 리기다소나무인 것으로 나타났으며, 해송과 소나무는 수관화의 위험수종으로 분류되었다. 또한, 높은 함수율에 따른 수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종으로는 신갈나무인 것으로 나타났으며, 리기다소나무와 소나무는 수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종으로 분류되었다.

무염착화에 의한 영향으로 수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종은 떡갈나무인 것으로 나타났으며, 리기다소나무와 소나무는 수관화 위험이 상대적으로 낮은 수종으로 분류되었다. 또한 수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종은 줄참나무인 것으로 분류되었으며, 상수리와 줄참나무는 수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종으로 분류되었다.

발염착화에 의한 영향으로 수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종은 해송나무인 것으로 분류되었으며, 소나무와 해송은 수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종으로 분류되었다. 또한 수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종은 줄참나무인 것으로 나타났으며, 떡갈나무와 줄참나무는 수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종인 것으로 분류되었다.

화염지속시간에 의한 영향으로 수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종은 굴참나무인 것으로 나타났으며, 리기다소나무는 수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종으로 분류되었다. 또한, 수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종은 떡갈나무인 것으로 나타났으며, 굴참나무는 수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종으로 분류되었다.

발열량에 의한 영향으로 수간화 위험성이 상대적으로 높은 수종은 굴참나무인 것으로 나타났으며,

며, 소나무는 수관화 위험성이 상대적으로 높은 수종으로 분류되었다. 갈참나무와 굴참나무는 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 수간화 위험성이 상대적으로 낮은 수종은 상수리나무인 것으로 나타났으며, 상수리나무와 떡갈나무는 수관화 위험성이 상대적으로 낮은 수종으로 분류되었다.

Table 17에는 임상별 연소특성을 고찰하여 상대적인 내화수종을 선별하여 제시하였다. 침엽수는 활엽수와 비교하여 일반적으로 수지분이 많고 발열량이 커서 생재라도 발화온도가 낮아 연소의 위험이 있으며, 낙엽활엽수 가운데 줄참나무와 떡갈나무는 착화위험성이 낮고, 산불발생 시 굴참나무는 화염지속시간이 짧으며, 상수리나무, 리기다소나무, 해송은 발열량이 낮은 수종인 것으로 추출되었다. 이러한 맹아력을 가지고 있는 수종들은 산불에 의한 피해를 받는다 하더라도 다시 맹아에 의하여 새로운 임분을 형성한다. 특히, 떡갈나무, 자작나무 등은 수차례의 산불을 만나도 뿌리는 살아 있어 거듭 맹아가 나와서 새로운 임분을 만드는 것으로 알려져 있다¹⁸⁾.

5. 결론

본 연구에서는 산불 메커니즘 규명으로부터 한국 산림의 우점 수종인 소나무류 3수종과 참나무 6가지 수종을 대상으로 부위별 내화성 정도를 분석하여 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 함수율 특성으로 부위별 수분을 함유하는 정도는 생엽의 경우, 참나무류 139.76%, 소나무류 142.09%, 가지부위의 경우, 참나무류 79.09%, 소나무류 77.51%, 수피의 경우, 참나무류는 49.51%, 소나무류 21.60% 정도였으며, 소나무류의 솔방울은 29.25% 정도의 수분을 함유하고 있음을 알 수 있었다. 높은 함수율에 따른 수간화의 위험성이 낮은

수종으로는 신갈나무인 것을 확인할 수 있었으며, 리기다소나무와 소나무는 수관화에 위험성이 낮은 수종인 것을 확인할 수 있었다.

2) 착화특성으로 부위별 평균무염착화온도는 참나무류의 경우, 생엽 365°C, 가지 440°C, 수피 435°C 정도, 소나무류의 경우, 생엽 320°C, 가지 405°C, 수피 435°C, 솔방울 363°C 정도에서 무염착화가 진행됨을 확인할 수 있었다. 따라서 소나무류는 참나무류보다 무염착화온도가 대체로 낮아 무염착화 위험성이 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다. 발염착화 특성으로 참나무류의 경우는 생엽 68초, 가지 203초, 수피 23초에 발염착화 되었으며, 소나무류의 경우는 생엽 42초, 가지 133초, 수피 11초, 솔방울 21초에 발염착화가 진행됨을 알 수 있었다. 따라서 착화특성에 따른 수관화의 위험성이 낮은 수종으로는 졸참나무인 것을 확인할 수 있었으며, 상수리와 졸참나무는 수관화의 위험성이 낮은 수종을 확인할 수 있었다.

3) 화염지속시간 특성으로 참나무류의 경우 생엽 42초, 가지 411초, 수피 507초 정도, 소나무류의 경우 생엽 47초, 가지 374초, 수피 814초, 솔방울 366초 정도 화염을 지속하여 참나무류는 소나무류보다 발염착화온도가 상대적으로 높고, 발염착화가 늦게 진행됨으로써 발염착화 위험성은 낮지만 가지부위의 경우 발염착화 후 화염이 지속되는 시간이 상대적으로 길기 때문에 산불발생 시 소나무류보다 수관화에 취약한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 화염지속시간에 의한 영향으로 수관화의 위험성이 낮은 수종으로는 떡갈나무인 것을 확인할 수 있었으며, 굴참나무는 수관화의 위험성이 낮은 수종을 확인할 수 있었다.

4) 발열량 특성으로 참나무류의 경우, 생엽 29.97 MJ/m², 가지 53.27 MJ/m², 수피 46.33 MJ/m² 정도, 소나무류의 경우 생엽 40.90 MJ/m², 가지 43.53 MJ/m², 수피 68.90 MJ/m², 솔방울 39.25 MJ/m² 정도 열량을 방출하는 것으로 나타났다. 따라서 발열량에 따른 수관화의 위험성이 상대적으로 낮은 수종으로는 상수리나무인 것을 확인할 수 있었으며, 상수리나무와 떡갈나무는 수관화의 위험성이 낮은 수종을 확인할 수 있었다.

5) 본 연구결과로부터 선정된 내화수종인 졸참나무와 떡갈나무는 착화위험성이 낮고, 굴참나무는 화염지속시간이 짧으며, 상수리나무, 리기다소나무, 해송은 발열량이 낮은 수종인 것으로 확인되었다.

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

참고문헌

- 1) Barney, R.J. and Stocks, B.J. "Fire frequencies during the suppression period In : Wein, R. W. and Maclean, D.A., The role of fire in northern circumpolar ecosystems", John Wiley and Sons, New York, pp. 45~62, 1983.
- 2) Kasischke, E.S., Williams, D. and Barry, D., "Analysis of the patterns of large fire in the boreal forest region of Alaska", Internation Journal of Wildland Fire, Vol. 11, pp. 131~144, 2002.
- 3) Van wangner, C.E., "The historical pattern of annual area burned in Canada", The Forestry Chronicle, Vol. 64, pp. 182~188, 1988.
- 4) 현성호, 이창우, 차시환, "방화방폭공학", 신광문화사, pp. 26~33, 2003.
- 5) 이병두, 이시영, 정주상 "2005년 강원도 양양산불 행동 특성", 한국화재소방학회 논문지, 제19권, 제4호, pp. 1~6, 2005.
- 6) 이종수, 이우균, 윤정호, 송철철, "공간통계와 GIS를 이용한 소나무림과 참나무림의 분포패턴", 한국임학회지, 제92권, 제3호, pp. 663~671, 2006.
- 7) 권기원, 최정호, 송호경, "참나무 주요 수종의 갱신전략 수립에 대한 연구 : 신갈나무, 굴참나무와 상수리나무의 맹아 발생, 성장 및 물질생산량", 한국임학회, 학술연구발표논문집, pp. 177~179, 2002.
- 8) Lee, C.B., "Phylogentic study of the subgenus Lepidobalanus of the genus Quercus in Korea", Korean Agr. Soc., Vol. 10, pp. 87~108, 1961.
- 9) Lee, C.B., "Phylogentic study of the subgenus Lepidobalanus of the genus Quercus in Korea(1)", Seoul Uni. J., Vol. 10, pp. 97~141, 1961.
- 10) Kim, Y.S., Ko, S.C. and Oh, B.Y., "Distribution Atlas of Plants of Korea(5)Atlas of Quercus in Korea", Univ. Soul, Korea, pp. 93~133, 1981.
- 11) 심주석, 한상섭, "낙엽성 참나무류의 생리생태적 특성-광도변화에 대한 잎의 광합성 반응", 한국임학회지, 제92권, 제3호, pp. 208~214, 2003.
- 12) 손영모, 이경학, 정영교, 권순덕, "상수리나무 등 4개 참나무류를 일본의 성장 특징 및 모델개발", 한국임학회, 학술연구발표논문집, pp. 71~73, 2003.
- 13) 산림청, 산림통계, 2011.

- 14) 김종원, “녹지생태학”, 월드사이언스, pp. 37~86, 2006.
- 15) 심종섭, 신동소, 이화형, 임기표, 조남석, “임산화학”, 향문사, p. 145, 1994.
- 16) 홍윤명, 정국삼, “안전공학실험”, 동화기술, pp. 9~11, 1992.
- 17) ISO 5660-1, Reaction to fire part 1, rate of heat release from building products(Cone Calorimeter), 2002.
- 18) 강전유, 김상욱, 김영채, 김종갑, 김준선, 박승찬, 박용구, 이수욱, 이시영, 이영신, 이찬호, 이현호, 정상배, 현정호, “삼림환경보전학”, 향문사, pp. 42~69, 1997.
- 19) 이해평, 이시영, 박영주 “영동지역 주요 침엽수종 및 활엽수종 생엽의 연소특성에 관한 연구”, 한국안전학회논문지, 제24권, 제4호, pp. 96~103, 2009.
- 20) 박영주, 이해평 “영동지역 교목 3수종 생엽의 탄소배출량 분석”, 한국안전학회지, 제25권, 제6호, pp. 212~217, 2010.