전통 목조건축물 주요 구조부의 수종에 대한 연소특성

Combustion Properties for Tree Species of Major Structural Components of Traditional Wooden Buildings

이지희* · 김동현**

Lee, Ji-Hee · Kim, Donghyun

Abstract

The wooden buildings in general are always exposed to the fire risks due to a material properties. In the fire risk assessment and the spread simulation for forest fire or common fires as well as the fires in both living and industrial areas, we will be able to elicit more accurate interpretation and results by applying the values of combustion properties according to materials depending upon the species of the trees. Such a combustion property according to each material can be figured out by means of heat release rate, ignition quality, and combustion weight, etc. After distinguished the tree species of major structural components of wooden buildings, the combustion properties of each tree species were measured making use of the Cone Calorimeter(ISO 5660-1). As the species of the trees for pillars, crossbeams, girders, and other supplementary materials of the wooden buildings, *P. densiflora*, *A. holophylla*, *Z. serrata*, *Q. acutissima* were mostly used. Accordingly, we conducted an analysis on the HRR, THR, and TTI, etc. From the results, we learned that there were differences in the combustion properties according to each tree species. And it should be used this database upon combustion properties according to the species of the trees for prediction of forest fire as well as of fire behaviors of traditional wooden buildings.

Key words : Traditional wooden building, Cone calorimeter, Combustion properties, Forest fires, Fires

요 지

목조 건축물은 재료특성상 화재위험에 항상 노출되어 있다. 산불 또는 화재에 대한 위험성 평가 및 확산시뮬레이션 평가에서 각 수종에 따른 물질별 고유 연소특성 값을 적용해야 보다 정확한 해석 결과를 도출할 수 있다. 이러한 물질별 고유의 연소특성은 열방출율, 착화성, 연소중량 등으로 알 수 있다. 목조 건축물의 주요 구조부의 수종을 판별한 후, 각 수종별 연소특성을 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 측정하였다. 목재 건물의 기둥과 보, 도리 부재에서 소나무, 느티나무, 상수리나무, 전나무 수종이 가장 많이 사용된 것으로 나타났다. 따라서 4가지 수종에 대해 열방출율, 총열방출량, 착화온도 등에 대한 분석을 실시하였다. 그 결과 각 수종에 따라 연소특성에 차이가 있음을 알 수 있었고 수종별 연소특성 데이터베이스를 통해 산불로 인한 화재성상 및 목조 건축물의 화재성상 예측에 활용하고자 한다.

핵심용어 : 전통 목조건축물, 콘칼로리미터, 연소특성, 산불, 화재

1. 서 론

2012년 12월 현재, 우리나라 국가지정문화재는 3,460건이며, 이 중 건축문화재는 726건으로 석조문화재와 목조문화재는 각각 559건, 167건이다. 문화재는 재료와 재질을 불문하고 후세에 전해야 하는 귀중한 우리나라의 문화자산이다. 그럼에도 불구하고, 최근 방화(放火)와 부주의로 인한 화재, 지구온난화로 인한 환경변화, 잦은 태풍 등으로 문화재를 둘러싼

각종 위험이 증가하고 있다. 특히 목조건축물은 흰개미로 인한 목부재의 피해와 방화 및 부주의로 인한 가옥화재뿐만 아니라 산불로부터 화재가 전이되어 연소할 위험성을 가지고 있다. 그 대표적인 사례가 2005년 4월 4일 발생한 양양산불로 인한 낙산사 소실이다.

연소물질은 일반적으로 개별적인 연소특성을 가지고 있다. 특히 나무는 단일 재료가 아니라, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌, 다양한 추출물(알콜, 에스테르, 수지), 결합수와

*정희원. 경북대학교 건축토목공학부 연구교수(E-mail: jihee@knu.ac.kr)

Member. Research Professor, School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University

**교신저자. 정희원. 국제응용시스템연구원 생태계서비스관리프로그램 선임연구원, 국립산림과학원 산림방재연구과 연구사
(Tel: +43-2236-807-537, Fax: +43-2236-807-599, E-mail: k3d2h1@forest.go.kr, dhkim@iiasa.ac.at)

Corresponding Author. Member. Researcher, Forest Disaster Department, Korea Forest Research Institute, and Scholar Researcher Ecosystems Services and Management, International Institute for Applied Systems Analysis

복합 세포구조물로 이루어져있다. 여기에 열이 가해지면, 열 분해과정을 거친다. 셀룰로오스($C_6H_{10}O_5$)_n의 고분자화합물로 기타 원소로 결합되어 목재마다 각기 다른 연소특성을 가진다. 따라서 산불 또는 화재에 대한 위험성 평가 및 확산시물 레이션 평가에서 각 수종에 따른 물질별 고유 연소특성 값을 적용해야 보다 정확한 해석 결과를 도출할 수 있다. 이러한 물질별 고유의 연소특성은 열방출율(Heat Release Rate, HRR), 착화성, 연소중량 등으로 알 수 있다.

나무의 열방출율은 화재발생시 공간의 성상을 분석할 때 중요한 고려사항이다. 단위질량당 열방출과 재료의 양은 전체 열방출율을 예측해서, 잠재 플래쉬오버(flashover)를 예측할 수 있다(Babrauskas 1980). 보통 나무의 연소열은 18,700~27,900 kJ/kg이다(Wood Handbook, 1987). 화재발생시 연료 하중의 수종 성분에 따른 열방출율은 입사방사유속(Incident Radiant Flux), 함수율, 두께, 결방향, 대기 중의 산소농도 등에 영향을 받는다. 시공재료와 마감재의 전체 방출율은 실(室)이 플래쉬오버 도달 기능성과 예측시간을 결정하는 중요한 요소이다(McCaffrey et al., 1980). 특히 착화성, 열방출율, 연소중량 등은 화재발생시 중요한 연소특성이다. Babrauskas (2002)는 원목의 발화에 관한 기존의 실험과 이론연구에 관한 리뷰논문에서 수종의 발화온도를 정리하였다. 지금까지 인 화(Piloted Ignition)와 자연발화(Spontaneous Ignition) 온도에 관하여 실험 및 이론연구를 검토하였다. 실험내용은 연구자마다 각기 다른 시료크기(밀도, 수분함유량 등) 및 입사방사유속의 조건에 대한 연구결과를 발표했다. 여전히 수종의 발화온도에 관한 자료는 빈약하다고 지적하였다. 그러나 발화온도는 열유속과 발화 방법의 함수는 분명하지만 보편적이지는 않다고 결론내리고 있다.

이와 같이 수종별 연소특성 즉, 발화, 착화, 발열량 등의 연구 필요성이 절실하며, 전통 목조건축물의 화재위험성 평가 및 안전성 확보를 위해 반드시 필요하다. 본 연구에서는 전통 목조건축물의 범위를 목조문화재 중 국보, 보물, 민속마을로 범위를 설정하고, 주요 부재부의 수종을 판별한 후, 각 수종별 연소특성에 대한 실험을 실시하였다.

2. 전통 목조건축물 수종 분석

본 연구는 전통 목조건축물의 주요구조부의 수종을 판별하기 위하여, 문헌조사와 직접 샘플채취를 병행하였다. 문헌조사는 문화재청에서 수행한 수리조사보고서 중 수종분석이 실시된 국보, 보물 등 81개소를 조사하였다. 샘플채취는 세계문화유산으로 지정된 양동마을의 무첨당과 관가정에서 채취하였다.

2.1 문헌조사에 의한 목재 수종

문화재청의 수리조사보고서(www.cha.go.kr) 중 수종분석이 실시된 국보(13개소), 보물(68개소) 등 81개소를 조사하였다. 건축물 종류별 분포는 사찰건축 59, 관아건축 2, 누각 7, 고가 5, 향교 2, 성곽, 서원, 목조기타, 사묘제실, 궁궐, 사당이 각 1개소이다.

Fig. 1. Species distribution by literature survey

국보 13개소, 보물 68개소에 관한 실측보고서 및 수리조사 보고서의 수종분포를 조사한 결과 다음과 같다(Fig. 1). 소나무류(Pine sp., 31.5%), 느티나무(Z. serrata, 22.2%), 기타 (11.3%), 상수리나무(Q. acutissima, 10.8%), 소나무(P. densiflora, 8.4%), 솔송나무(T. sieboldii Carriere, 4.9%), 전나무(A. holophylla, 4.4%), 미송나무(Douglas fir), 졸참나무(Q. serrata, 2.5%), 잣나무(P. koraiensis S. et Z., 1.5%) 순으로 조사되었다. 따라서, 소나무(P. densiflora)를 포함한 소나무류(Pine sp.)가 가장 많이 이용되었음을 알 수 있다.

이것을 기둥, 보, 도리 부재별로 살펴보면, 기둥 부재는 소나무(P. densiflora) 55.4%, 느티나무(Z. Serrata) 24.5%, 상수리나무(Q. acutissima) 4.7%, 졸참나무(Quercus Serrata) 4.1% 이었으며, 보 부재는 소나무(P. densiflora, 63%) > 느티나무(Z. Serrata, 13%) > 참나무(Quercus Serrata, 11%) 순이었으며, 도리 부재는, 소나무(P. densiflora, 90%) > 느티나무(Z. Serrata, 3%) > 전나무(A. holophylla, 2.9%) 순이었다.

2.2 직접 채취에 의한 목재 수종 판별

직접 샘플채취는 세계문화유산으로 지정된 양동마을의 무첨당과 관가정의 기둥, 보, 도리 부재를 전수 샘플 채취하여 육안적 특성조사법 중 광학현미경을 이용하여 해부학적 특성 조사를 실시하였다. 관가정 목재부재 중 기둥 12점, 도리 3점과 무첨당 목재부재 중 기둥 15점, 도리 3점, 마루 1점 등 총 34점의 시료를 채취하였다.

시험방법은 광학현미경으로 확인하여 정확한 횡단면, 방사단면 및 접선단면이 나오도록 0.2 cm×0.2 cm×0.5 cm의 블록(시편)을 제작하였다. 제작된 시편은 오토클레이브를 이용하여 1~2시간 연화처리를 한 후, 활주식 마이크로톰을 이용하여 단면별로 두께 10~20 μm의 절편을 제작하였다. 이 절편을 사프란린(Safranin)으로 염색한 후, 알코올계열로 탈수처

Table 1. Buildings for analysis of species

Structural parts	Column	Beam	Floor	Total
Muchum-dang	15	3	1	19
Gwanga-jung	12	3	-	15

Fig. 2. Samples for analysis of species (Muchumdang)

Fig. 3. Samples for analysis of species (Gwangajung)

리하고 크실렌(Xylene)으로 치환하였다. 이후 캐나다발삼(Canada Balsam)으로 봉입하여 영구 프레파라트를 제작하였다. 또, 부후상태가 심하여 절편제작이 어려운 시료는 동결 마이크로톰을 이용하여 절편을 제작하고 일시 프레파라트를 제작하여 광학현미경으로 조직적 특징을 관찰하여 수종을 감정하였다. 목재의 조직구조의 특성인 구성세포의 종류, 형태

적 특징을 분석하여 수종을 판별하였다. 경주 무침당, 관가정 목부재 34점에 대한 수종분석 결과 소나무류(*Pinus sp.*) 33점, 수피 1점으로 식별되었다(Fig. 4).

3. 목재 수종의 연소시험

3.1 시험목 준비 및 실험

목조 건축물 구조재 및 부재 수종인 소나무(*P. densiflora*), 느티나무(*Z. serrata*), 전나무(*A. holophylla*), 상수리나무(*Q. acutissima*)를 Dryoven에 80°C 조건으로 5일간 건조시킨 후 대기 중에 2일간 노출시켰다. 일반적으로 목조건축물의 목재는 장기간 공기 중에 노출되어 분해 또는 건조과정이 되풀이되지만 본 연구에서는 수종별 고유 연소특성 값 확보를 위해 건조한 대기 중에 노출시켜 실험을 진행하였다.

각 실험별 공시재료의 수분함유량은 Table 2와 같다. 연소 시험은 KS F ISO 5660-1의 방법으로 실시하였고 방사복사열 50 kW/m² 조건에서 수행하였다. 연소측정을 위한 시료의 크기는 100 mm×100 mm×100 mm이다(Fig. 5). 모든 연소 시험은 동일수종에 관하여 3번씩 반복하여 수행하였다. 콘칼로리미터를 이용하여 착화시간(TTI, Time to Ignition), 유효연소열(Effective Heat of Combustion, EHC), 열방출율(Heat Release Rate, HRR), 총열방출율(Total Heat Release, THR), 질량손실율(Mass Loss Rate, MLR), 자연발화온도 및 시간을 시험하였다. 자연발화 온도 및 시간 측정을 위해 점화원

Fig. 5. Test set-up and test for cone calorimeter

Fig. 4. Three sections of *P. densiflora* Pillar in Gwanga-jung Yangdong villages

Table 2. Test Condition for Cone Calorimeter

Type	Age (years)	Height (m)	Density(kg/m ²)	Moisture content(%)	
				Cone Calorimeter	ISO ignition tester
<i>P. densiflora</i>	42	21	525	2.1	10.3
<i>A. holophylla</i>	37	18	459	4.2	12.2
<i>Z. serrata</i>	48	17	772	10.6	11.5
<i>Q. acutissima</i>	38	18	908	9.8	14.0

이 없는 조건에서 최대 30분까지 측정하였고 30분 이내 착화가 이루어지지 않으면 미발화로 평가하였다. 온도측정은 착화시의 연료표면 온도에 대한 수열부 온도를 측정하였다.

3.2 시편의 물리적 특성

함수율은 시험목을 105°C 건조기에서 장시간 건조시키면서 시험목의 중량을 4시간 간격으로 더 이상 중량변화가 없을때 까지 측정하고 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\omega(\%) = \frac{M_H - M_o}{M_o} \times 100 \quad (1)$$

M_H : 건조 전 중량(g), : 건조 후 중량(g)

시험목은 다음 식 (2)를 이용하여 밀도를 계산하였다.

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (2)$$

m_H : 대기 중 건조질량(kg)

V_H : 대기 중 건조부피(m³)

ρ_H : 대기 중 건조 밀도(kg/m³)

각 수종의 밀도는 시편의 평균값이며, 시편의 밀도와 함수량 측정은 시험 2주전 실시하였다. 시편의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

4. 결과 및 고찰

열방출율(Heat Release Rate, HRR)은 주어진 재료가 어느 정도의 가연성이 있는지를 파악하기 위해 가장 중요한 속성이며 화재위험성을 나타내는 가장 중요한 변수이다(Babrauskas 등 1992). 화재 발생시 첫 번째 질문이 화재의 규모이다. HRR은 바로 그 해답이며, 정확하게 말해서 양적인 규모이다(Fire Protection Handbook, 2008). 물질의 성질은 그것이 연소할 때 열이 물질로부터 방출되어지는 속도, 각 수종에 대한 열 방출량 및 연소중량 분석이며, 이를 분석하기 위해 콘 칼로리미터의 방사 복사열을 50 kW/m²로 설정하였고 20분간 재현성을 위해 3회 반복 측정하였다.

착화시간은 착화원으로부터 전달되는 열전달율의 함수이며, 물리적, 화학적 성질 및 재료의 기하학적 형상의 함수이기도 하다. 이것은 입사열유속(incident heat flux)이 높을수록, 열관성(Thermal Inertia)이 낮을수록, 화학적 결합이 약할수록 Time to Ignition(TTI)은 더 빨라지고, 가연위험성은 더 크다

고 할 수 있다(Fire Protection Handbook, 2008). Time to Ignition(TTI)은 각 수종에 따라 느티나무(*Z. serrata*) 28초, 상수리나무(*Q. acutissima*) 25초, 소나무(*P. densiflora*) 10초, 전나무(*A. holophylla*) 9초를 상수, 열전도도, 체적밀도, 연료의 비열 및 착화온도의 2승에 비례하며, 시험편에 가해지는 열유속의 2승에 반비례하는 것으로 설명된다(Chung and Jin, 2010).

$$t_{ig} = C(kpc) \left[\frac{T_{ig} - T_s}{\dot{q}''} \right]^2 \quad (3)$$

t_{ig} : 착화시간(초)

C : 상수(표면 열손실의 유무에 따라 다름)

k : 열전도율(kW/m²°C)

ρ : 밀도(kg/m³)

T_{ig} : 착화온도, T_s : 불꽃으로부터 직접 영향이 미치지 않는 불꽃 앞쪽 연료온도

$\dot{q}''$: 열유속(kW/m²)

각 수종의 체적밀도는 소나무(*P. densiflora*) 525 kg/m³, 전나무(*A. holophylla*) 459 kg/m³, 느티나무(*Z. serrata*) 772 kg/m³, 상수리나무(*Q. acutissima*) 908 kg/m³로써 상수리나무가 가장 큰 값을 가지지만, 느티나무(*Z. serrata*)의 TTI가 더 큰 값인 것을 고려하면, 느티나무(*Z. serrata*)의 표면 열손실을 추측할 수 있으며, 나머지는 밀도에 의존한 것으로 판단된다.

HRR 커브는 각 수종별 연소특성의 차이를 확실하게 보여 준다(Fig. 6(a)). 3가지 수종 즉, 소나무(*P. densiflora*), 전나무(*A. holophylla*), 느티나무(*Z. serrata*)는 시간이 지남에 따라서 HRR 값이 낮아지는데 비하여, 상수리나무(*Q. acutissima*)는 750초 이후 다시 상승하면서 연소종료 후에 126.5 kW/m² 값으로써 높은 값을 나타내고 있다.

유효연소열(EHC)은 한가지 분해 형태를 갖는 균일한 시편의 연소시간 동안의 상수로써 이론적인 순연소열의 값보다 적다(Jeong et al., 2010). 한가지 이상의 분해형태를 갖는 재료나 복합재료 또는 비균일한 재료의 유효연소열은 반드시 일정하지는 않다. EHC는 소나무(*P. densiflora*, 14.15 MJ/kg), 전나무(*A. holophylla*, 13.09 MJ/kg), 느티나무(*Z. serrata*, 11.59 MJ/kg), 상수리나무(*Q. acutissima*, 11.09 MJ/kg)로써, 각각의 수분함량이 소나무(*P. densiflora*, 2.1%), 전나무(*A. holophylla*, 4.2%), 느티나무(*Z. serrata*, 10.6%), 상수리나무(*Q. acutissima*, 9.8%)의 차이에 의한 것으로 예측된다(Fig. 6(b)).

Table 3. Results of Cone Calorimeter Test in Four Species of Tree

Type	TTI ^a (s)	MLR ^b (g/s)	SMLR ^c (g/sm ²)	EHC ^d (MJ/kg)	Temp (°C)	Time (s)	THR ^e (MJ/m ²)	Burning time (s)	HRR ^f	
Tree species									Peak (kW/m ²)	Mean (kW/m ²)
<i>P. densiflora</i>	10	0.06	6.5	13.3	515	1704	118.36	30	216.63	96.59
<i>A. holophylla</i>	8	0.06	6.6	12.43	480	1567	90.54	20	205.20	88.36
<i>Z. serrata</i>	28	0.08	9.8	11.9	510	1430	136.98	45	227.43	106.57
<i>Q. acutissima</i>	25	0.08	10.1	10.59	510	1628	161.3	40	244.25	100.16

^aTime to ignition, ^bMass loss rate, ^cSpecific mass loss rate, ^dEffective heat of Combustion, ^eTotal heat release, ^fHeat release rate

Fig. 6. HRR curves of wood species at 50kW/m² external heat flux

HRR의 시간에 대한 적분값인 총방출열량(THR)은 상수리나무(*Q. acutissima*, 142.53 MJ/m²), 느티나무(*Z. serrata*, 131.82 MJ/m²), 소나무(*P. densiflora*, 121.88 MJ/m²), 전나무(*A. holophylla*, 98.62 MJ/m²) 순으로 나타났다(Fig. 6(c)). 이것은 수종의 체적밀도 크기에 따라 HRR과 THR 값이 영향을 받음을 알 수 있다.

질량손실율은 열방출율과 관계가 있으며 화재거동 해석에 필요한 연소특성이다. 비질량손실율은 더욱더 정량적으로 화재거동을 파악할 수 있게 해 준다(Table 3, Fig. 6(d)). SMLR은 HRR을 유효연소열로 나눈 값으로 표시된다. 외부 열유속 50 kW/m²에서 소나무(*P. densiflora*)의 SMLR은 6.5 g/sm², 전나무(*A. holophylla*)는 6.6 g/sm², 느티나무(*Z. serrata*) 9.8 g/sm², 상수리나무(*Q. acutissima*) 10.1 g/sm²였다. 100 s 이내 초기 SMLR은 각 수종별로 높게 나타나다가, 600~700초 경 다시 한 번 상승하는 경향을 보인다. 전나무(*A. holophylla*)는 1,050초 이후 EHC 값이 나타나지 않으면서 SMLR도 0 값을 나타낸다. 반면 상수리나무(*Q. acutissima*)는 끝까지 분명하게 유지되는 것을 볼 수 있었다. SMLR 그래프는 각 시험편에 대해 열적과동의 봉우리가 많음을 알 수 있다. 초반의 첫 번째 봉우리는 연소표면 근처에서 숯이 형성되기 전에 발생하며 그 다음은 처음으로 숯층(Charcoal Layer)이 형성된 후 두께로 인한 숯의 단열효과에 의해 시료가 점차적으로 연소하기 때문에 감소되는 경향이 관찰되었다. 다음 봉우리는 열적 과동이 뒀면 절연층에 도달할 때 일어나고 휘발성분이 증가됨으로써 높은 열분해 효과에 의한 것임을 알 수 있다(Spearpoint et al., 2000). 이러한 봉우리가

많다는 것은 이러한 과정을 여러 번 반복하는 것으로 판단된다.

열원 50 kW/m²에서 시험된 4가지 수종의 단위면적당 최대 열방출율(Peak HRR)은 상수리나무(*Q. acutissima*, 283.40 kW/m²), 느티나무(*Z. serrata*, 227.43 kW/m²), 소나무(*P. densiflora*, 216.63 kW/m²), 전나무(*A. holophylla*, 205.20 kW/m²)으로 나타났고 최대 열방출율 도달시간은 각각 40초, 45초, 30초, 20초로 전나무(*A. holophylla*)의 경우 다른 수종에 비해 에너지 값은 적지만 열반응이 빠른 것으로 나타났다(Table 3). 반대로 느티나무(*Z. serrata*)는 45초로 강한 연소 억제성을 가지므로 연소지연효과를 나타내는 것으로 설명된다. 또한 이것은 느티나무(*Z. serrata*)의 수분함량(10.6%)이 전나무(*A. holophylla*)의 수분함량(4.2%) 보다 크므로 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다(Table 2).

각 수종별 ISO 착화성 시험기 5660을 이용하여 복사열 조건 50 kW/m²에서의 자연발화(Spontaneous Ignition) 온도를 알아보기 위하여 실험을 실시하였다.

착화성 시험에서의 착화온도 측정은 발열체 온도를 측정하였다. 시험 결과, 전나무(*A. holophylla*) 480°C(소요시간 1,567초), 느티나무(*Z. serrata*) 510°C(소요시간 1,430초), 상수리나무(*Q. acutissima*) 510°C(소요시간 1,628초), 소나무(*P. densiflora*) 515°C(소요시간 1,704초)로 나타났다. NFPA 921에 의하면 발화온도는 고체 재료가 특정 실험 조건하에서 발화하기 위하여 얻어야하는 최소 온도라고 했다. 일반적으로 발화온도는 재료가 열분해를 시작해서, 많은 증기를 만들어내는 온도범위이다. 착화온도가 낮으면 낮을수록 가연성 위험성

은 더 커진다(Fire Protection Handbook, 2008).

가공재가 아닌 원목의 착화온도에 관한 연구문헌의 조사(Babrauskas 2002)에서는 착화온도는 입사열유속(재료표면에 에너지 전달)에 따라 증가한다. 발화온도는 침엽수의 유도발화는 최소 입사열유속 5 kW/m²일 때 250°C에서 혼소연소를 시작하고, 대략 입사열유속 20 kW/m²일 때 360°C로 된다고 보고하고 있다. 따라서, 착화온도는, 전나무(*A. holophyla*)가 가장 낮으므로 화재위험요소가 높다고 볼 수 있으며, 본 실험에서의 입사열유속은 50 kW/m²이므로, (500°C)±20°C에서 발화된다고 볼 수 있다.

5. 결 론

양양산불로 인해 낙산사의 주요 건축물 소실 및 숭례문 목조구조물 화재사례에서 알 수 있듯이 전통 목조건축물은 방화(放火) 및 부주의, 혹은 산불로부터 화재가 전이되어 연소할 위험성능이 크다. 이러한 위험성을 사전에 예측하기 위해서는 각 수종에 따른 물질별 고유 연소특성 값을 적용해야 보다 정확한 해석 결과를 도출할 수 있다. 따라서 전통 목조 건축물의 주요구조부 수종과 판별된 수종에 대한 목재의 연소특성에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 전통 목조 건축물 주요구조부의 수종분포는 기둥, 보, 도리 부재 모두의 경우, 소나무(*P. densiflora*)가 가장 많이 사용되었다.
- 2) 착화용이성(착화시간, 착화온도)과 열반응 에너지(유효연소열, 발열량)에 관한 연소특성시험 결과, 각 수종에 따라 다른 반응값을 나타내었으며 전체적으로 침엽수가 활엽수에 비해 보다 큰 화재위험성을 가지는 것으로 분석되었다.
- 3) 특히, 세계문화유산으로 지정된 양동마을의 무침당과 관가정의 기둥, 보, 도리 부재의 수종분석 결과 모두 소나무(*P. densiflora*)로 나타났으므로, 잠재위험성이 클 것으로 예측된다. 반대로 느티나무(*Q. acutissima*)는 다른 수종에 비해 강한 연소 억제성을 가지므로 연소지연효과를 나타내는 것으로 설명된다.

본 연구를 통하여 전통 목조건축물의 수종별 연소특성의 차이를 확인할 수 있었으며, 이는 향후, 보다 정확한 확산예측을 위해 각 부재별 착화시간을 적용하여 화재시뮬레이션을 평가해야 할 것으로 판단된다. 더욱 더 많은 수종별 연소특성에 관한 DB를 구축할 필요성이 있는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년 한국연구재단 중견연구지원사업에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다(NRF 2011-0016557). 그리고 목재 수종분석에 대한 지문을 해주신 한국임업진흥원 박병수 박사님께 감사드립니다.

References

- Babrauskas, V. (1980) Estimating Room Flashover, *Fire Technology*, Vol. 16, No.2.
- Babrauskas, V. and Peacock, R.D. (1992) Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard, *Fire Safety Journal*, Vol. 18, pp. 255-272.
- Babrauskas, V. (2002) Ignition of Wood: A review of the state of the art, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 12, pp. 163-189.
- Chung, Y.J. and Jin E. (2010) Combustion Properties of the *Quercus variabilis* and *Zelkova serrata* Dried at Room Temperature(II) *Appl. Chem. Eng.*, Vol. 21, No.4, August, pp. 469-474.
- Fire Protection Handbook (2008) 20th edition, 2-35.
- ISO 5660-1. (2002) Reaction-to Fire Tests Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate(Cone Calorimeter Method).
- Kim, D.H. (2010) Analysis of Yangyang Forest Fire and the Destruction of Historical Naksan Temple in Republic of Korea, 6th international Conference on Forest Fire Research.
- Lee, J.H. (2011) A Study on the Fire Safety Survey for Preservation of the Traditional Village, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 2, pp. 253-261.
- McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G., and Harkelroad, M.F. (1980) Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Data Correlations, *Fire Technology*, Vol. 17, No. 2.
- Spearpoint, M.J. (1999) Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an integral model, 30, NIST GCR 99-775, U.S.A.
- Spearpoint, M.J. and Quintiere, J.G. (2000) Prediction the burning of wood using an integral model, *Combustion and Flame*, Vol. 123 pp. 308-324.
- Wood Handbook (1987) Wood as an Engineering Material, USDA Forest Service Handbook, No. 72, Government Printing Office, Washington, DC.
- www.cha.go.kr

© Received March 29, 2013

© Revised April 12, 2013

© Accepted May 10, 2013