[Research Paper]

합판류 목재의 두께별 입사열유속에 따른 연소특성 비교 연구

황선우 · 박원희^{*,**†} · 김창용

한국철도기술연구원 철도안전연구팀 학연학생, *한국철도기술연구원 철도안전연구팀 책임연구원,

**과학기술연합대학원대학교 교통시스템공학 교수

Analysis of Fire Characteristics based on the Thickness and Incident Heat Flux of Wood

Sun-Woo Hwang · Won-Hee Park^{*,**†} · Chang-Yong Kim

Student Researcher, Railroad Safety Research Team, Korea Railroad Research Institute,

*Principal Researcher, Railroad Safety Research Team, Korea Railroad Research Institute,

**Professor, Transportation System Engineering, Korea University of Science and Technology (UST)

(Received July 28, 2020; Revised August 3, 2020; Accepted August 10, 2020)

요 약

본 연구에서는 건축내장용 합판류 목재를 대상으로 목재의 두께별 다양한 입사열유속에 따른 연소특성 측정 실험을 수행하였으며, 측정된 연소특성은 EHC, HRR peak 및 도달시간, MARHE, 인화온도이다. 실험에 사용된 목재 시편은 4.8~18 mm 두께, 목재 시편에 유입되는 입사열유속은 25, 35, 50 및 60 kW/m²을 적용하였으며, 목재 시편의 종류는 MDF 2종, 파티클 보드, 일반 합판이다. 종합적인 비교를 통하여 연소특성별 각각의 목재에 해당하는 화재패턴을 분석하여 화재에 대한 위험성을 검토하였다. 파티클 보드의 경우 화재 위험성이 높게 나타났으며, 제시한 연소특성 정량화 결과는 복합 가연물의 화재하중 산정에 중요한 입력 요소로 기여될 수 있다.

ABSTRACT

This study tested the wood used in building interiors; each type had various incident heat fluxes based on their thickness. The combustion characteristics measured were effective heat of combustion, heat release rate peak and arrival time, maximum average rate of heat emission, and piloted ignition temperature. The wood specimens used in the experiment were 4.8 to 18 mm thick. 25, 35, 50, and 60 kW/m² were applied to the incident heat flux that the wood specimens were exposed to. The wood specimens tested were two types of medium-density fiberboard (each with a different density), treated red pine, particle board, and plywood. A comprehensive comparison of different fire characteristics was conducted to analyze the fire patterns corresponding to each type of wood in this way, the risk of fire was studied. The risk of fire was particularly high for particle board. The results of quantifying the fire characteristics of the types of wood studied could function as important input data with which to calculate the fire load of composite combustibles.

Keywords: Fire characteristics, Wood fire, Heat release rate, Maximum average rate of heat emission, Piloted ignition temperature

1. 서 론

목재는 오래전 한옥과 같이 전통 목조 가옥에서부터 현대 건축물에 이르기까지 건축 내·외장재로써 역사적으로 쓰임이 활발했으며, 전통문화 보존과 관광객 유치 목적으로 개발되는 한옥마을 건축 등 앞으로 친환경적, 시각적인 매력을 가진 건축내장재로 목재의 활용이 점차 늘어날 것으로 판단된다. 이렇듯, 목재의 수요가 늘어남에 따라 건축내장재

로서의 목재 활용이 늘어날 것이고, 목재 건축물 화재의 위험성도 지속적으로 증가할 것이다. 2010년부터 2019년까지 10년간 소방청에서 조사한 화재원인 통계에 따르면, 최초 착화물로써 원목, 합판류를 포함한 목재의 연간 화재 건수는 1400여 건이며, 재산 피해액은 연간 79억 원에 이른다. 또한, 목재의 경우 일반적으로 쓰이는 콘크리트 등 타 건축 자재보다 화재에 매우 취약한 성질을 보이기 때문에, 현재까지도 목재 건축물 화재 방지를 위한 시공 등에 대한 적

[†] Corresponding Author, TEL: +82-31-460-5358, FAX: +82-31-460-5579, E-Mail: whpark@krii.re.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

Table 1. Thickness and Density of Wood Specimens

Wood type	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]	Wood type	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]
Low density MDF	6, 9, 12, 15, 18	614.8	High density MDF	12, 15, 18	715.3
Particle board	12, 15, 18	754.3	Plywood	4.8, 8.5, 11.5, 14.5, 17.5	599.3

합한 기술기준이 부족한 실정이다. 화재 방지를 위한 시공 기술기준을 마련하기 위해서는 화재 위험성이 있는 가연물의 화재하중을 예측, 평가하는 것이 기본이 된다. 하지만, 일상에서 쓰이는 가구, 건축 마감재 등 보통의 가연물의 경우 대부분은 목재, 플라스틱 등의 복합소재로 되어있는 경우가 많아 화재하중 예측에 상당한 어려움이 따른다. 이러한 화재하중 예측은 실물화재 실험을 통한 방법과 화재해석 시뮬레이션 프로그램인(Fire dynamics simulator, FDS)을 통한 방법이 있다. FDS를 이용하는 방법은 가연물의 밀도, 열방출률, 유효연소열 등의 연소 특성치 입력이 중요한 인자로 작용하며, 이는 연소와 화재 전파 시뮬레이션 등 화재전체 시스템에 중요한 영향을 끼칠 수 있다. 선행연구로 문헌조사를 통하여 산정한 열방출률 값과 시편의 화재 측정을 통한 열방출률 값, 실물화재 측정을 통한 열방출률 값을 비교하여 화재하중을 분석한 연구를 진행한 결과, 실물화재 대비 문헌조사를 통하여 산정한 열방출률 값은 6~120%, 시편 측정을 통한 열방출률 값은 20%의 오차를 보였다⁽¹⁾. 이는 문헌조사를 통한 값보다 실제 시편 측정을 통한 열방출률 값이 더 신뢰성 있는 값으로 볼 수 있다는 결론이며, 화재 위험성이 있는 모든 가연물 모두를 실물화재를 통하여 연소특성을 측정할 수 없기에, 비교적 간단한 방법으로 볼 수 있는 시편 화재 실험을 통한 가연물의 연소특성 연구로 오차 범위를 줄이는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 또한, 실물화재 측정 대비 FDS의 연기 밀도 및 화재 생성물 등 화재 예측 결과를 비교 분석한 연구가 진행되었고, FDS의 화재 예측값이 상당 부분 차이를 보이는 것으로 나타났다⁽²⁾. 가구 등 복합 가연물의 열방출률을 측정하기 위한 연구가 수행되었으며^(3,4), 또한, Tran과 White⁽⁵⁾는 다양한 원목의 연소특성을 정리한 바 있다. Park 등^(6,7)은 원목의 발화온도, 열방출률 등 연소특성을 정량화하여 데이터 베이스 구축에 대한 연구를 수행한 바 있다. Kim과 Nam⁽⁸⁾은 목재의 두께에 따라 화염 및 훈소 상태에서의 연소특성을 분석을 수행하였다⁽⁸⁾. 이처럼, 가연물의 연소특성이 중요하게 인식됨에 따라, 목재 등 다양한 재료의 연소특성을 분석하는 연구가 진행되었다⁽⁹⁾. 더 나아가 신뢰성 높은 재료의 연소특성 DB를 구축하기 위해서는 다양한 재료에서, 다양한 조건을 고려하여, 연소특성 측정이 이뤄져야 한다고 사료된다. 이에, 본 논문은 실생활에서 많이 쓰이는 목재 시편을 선별 후, 두께별로 다양한 입사열유속 하에서의 연소특성을 측정하여, 종합적으로 비교가 가능한 연소특성 정량화 결과를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험 시편

연소특성 측정을 위한 콘칼로리미터 실험에 사용된 목재 시편의 종류는 일반적으로 가구나 건축 마감재에 비교적 많이 쓰이는 Medium density fiberboard (MDF / 밀도별 2종), 일반 합판(Plywood), 파티클 보드(Particle board, PB)의 4가지 목재를 선정하였다. 목재의 두께별 연소특성을 고려하기 위하여, Table 1과 같이 각각 종류별로 저밀도 MDF 6, 9, 12, 15, 18 mm, 고밀도 MDF 12, 15, 18 mm, 파티클 보드 12, 15, 18 mm, 일반 합판 4.8, 8.5, 11.5, 14.5, 17.5 mm를 사용하였다. 각각의 목재 시편의 종류별 밀도는 저밀도 MDF 614.8 kg/m³, 고밀도 MDF 715.3 kg/m³, 파티클 보드 754.3 kg/m³, 일반 합판 599.3 kg/m³이다. 실제 실험에서 입사열유속의 영향을 받는 시편 윗부분 실험면적은 88.36 cm²로 각각 가로, 세로 길이 9.4 cm × 9.4 cm의 시편을 사용하였다. 또한, 목재는 고분자 수지 등 다른 가연물에 대비하여 연소특성 실험 시 수분 함유율이 큰 영향을 미치므로, 23 ± 2 °C 온도와 50 ± 5% 상대 습도 조건의 항온항습기에서 조습 처리하였다.

2.2 목재시편 실험

Figure 1은 합판류 목재 시편의 연소특성 측정 실험 과정을 나타낸다. 본 논문에서는 ISO-5660-1 방법을 준수하여 목재별 두께와 입사열유속에 따른 연소특성 측정 시험을 수행하였다. 시편의 수직방향에서 입사열유속을 가하는 콘 히터와, 자연발화(Spontaneous ignition)가 아닌 인화(Piloted ignition)를 유도하는 점화 장치(Igniter)가 부착된 콘칼로리미터를 사용하였으며, 콘 히터와 목재 시편 사이의 거리는 25 mm로 유지하였고, 콘 히터에서 목재 시편으로 가해지는 입사열유속은 25, 35, 50 및 60 kW/m²로 각각 적용하였다⁽¹⁰⁾. 콘 히터의 입사열로 인하여 열분해가 진행되는 시편은 가연성의 연소가스를 생성하며, 생성된 연소가스는 콘 히터 상부에 설치되어있는 후드로 인하여 취합된다. 이 과정에서 대기 중 산소의 농도 대비 및 연소로 인하여 줄어드는 산소의 농도를 비교하게 되고, 후드를 통과하는 산소가스를 포함한 공기의 유량을 이용하여 열방출률을 분석할 수 있으며, 이러한 방법을 산소소모량법이라고 한다^(11,12). 또한, 일반적으로 콘칼로리미터 실험 시, 시편에 가해지는 입사열유속이 증가 하게되면 시편의 열분해 정도가 증가하여, 연소 현상의 가속화로 이어져 연소특성의 변화를 관찰할 수 있다. 목재 시편의 인화온도를 측정하기 위하여

Figure 1. Fire characteristics measurement.

Figure 1에서 Measuring point로 나타낸 것과 같이, 시편 정 가운데에 열전대를 부착하여 인화온도를 측정하였다. 모든 연소특성 측정 실험은 정확한 데이터 비교를 위하여 목재 시편에 화염 착화가 일어난 후, 점화된 후부터 전소할 때까지 화염 발생 구간의 데이터 값을 바탕으로 분석을 수행하였다. 목재 시편의 표면 온도 측정에 사용한 열전대는 K-Type 열전대로 $-200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (측정 오차 $\pm 2\%$)까지 측정이 가능하다.

2.3 실험 결과

4.8~18 mm 두께, 4종류 합판류 목재에 대하여 총 164번의 콘칼로리미터 실험을 수행하였고, Table 2는 실험에 사용된 합판류 목재별로 앞서 언급한 콘칼로리미터 실험에 대한 전·후 결과를 나타낸다.

화재에 영향을 미칠 수 있는 중요한 인자로 작용하는 고체 가연물의 연소특성에는 열방출률(Heat release rate, HRR),

질량감소율(Mass loss rate, MLR), 유효연소열(Effective heat of combustion, EHC), 최대 평균 열방출률(Maximum average rate of heat emission, MARHE), 인화온도(Piloted ignition temperature) 등이 있다. 식 (1)은 열방출률을 구하는 방정식으로, 질량감소 유동과 유효연소열 및 가연물 시편의 넓이를 조합하여 구할 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c \quad (1)$$

여기서, HRR의 경우 $\dot{Q}$ 는 가연물에서 방출되는 에너지량 kW/m^2 으로 정의하며, 화재하중 및 규모에 직접적인 영향이 있다. $\dot{m}''$ 은 질량감소 유동으로, 가연물이 초당 감소되는 질량을 나타내는 질량감소율 $\dot{m}$ 에 면적을 나눈 값으로 정의하며, $\text{g/s}\cdot\text{m}^2$ 단위로 나타낸다. ΔH_c 는 유효연소열로 가연물이 질량당 방출할 수 있는 유효한 에너지량을 정의하며, 단위는 MJ/kg 이다.

Table 2. Before / After Fire Tests of Wood Specimens

Combustion status	Wood type			
	Low density MDF	High density MDF	Particle board	Plywood
Before
After

Figure 2. Peak HRR and MARHE measurement in HRR graph.

MARHE는 평균 열방출률의 최대값이다. HRR의 상승 시점부터 HRR Peak 시점까지의 구간에서 발생한 HRR의 평균값으로, 시간에 따라 오차 값을 보정하여 안정적인 측정값을 제공한다. AHRE는 식 (2)와 같이 나타내며, MARHE는 AHRE 값 중 최대값으로 표현된다.

$$AHRE(t_n) = \frac{\sum_{n=1}^n (t_n - t_{n-1}) \times \frac{\dot{Q}_n + \dot{Q}_{n-1}}{2}}{t_{n-1}} \quad (2)$$

여기서, AHRE는 (Average rate of heat emission) 평균 열방출률을 나타내며 단위는 kW/m², t 는 실험 시간으로 단위는 s, $\dot{Q}$ 은 HRR을 나타낸다. MARHE는 HRR과 같이 철도 차량 기술기준 등에서 화재 위험성을 판단할 수 있는 중요한 인자로 사용되고 있다.

Figure 2는 저밀도 MDF의 목재 시편의 HRR 그래프 결과를 나타내며, 앞서 언급한 연소특성 중 HRR Peak와 MARHE 측정에 대한 개략도를 도시한다. 또한, 앞서 언급한 연소특성 외에 원목, 고분자 수지 등 복합 가연물의 구

Table 3. Thickness by Fire Characteristics of Wood (Incident Heat Flux - 50 kW/m²)

Wood type	Thickness [mm]	HRR peak time [s]	HRR peak [kW/m ²]	MARHE [kW/m ²]
Low density MDF	6	61	187.3	115.0
	9	47	233.6	120.0
	12	47	218.9	117.5
	15	58	244.6	134.6
	18	52	232.2	126.0
High density MDF	12	62	225.0	116.1
	15	56	204.1	116.2
	18	82	253.5	138.0
Particle board	12	58	240.8	145.2
	15	64	236.8	129.1
	18	64	239.8	135.1
Plywood	4.8	36	155.1	93.4
	8.5	70	224.3	123.0
	11.5	65	200.8	117.7
	14.5	54	181.1	109.8
	17.5	62	186.5	116.1

성 종류별로 화재 발생 시 시각적으로 피난을 방해하는 연기 밀도, 인체에 해를 가할 수 있는 유해가스 생성을 등의 연소특성이 있지만, 본 논문에서는 가연물의 화재하중 설정에 중요한 인자로 적용될 수 있는 EHC, HRR Peak와 도달시간, MARHE, 인화온도만을 고려하여, 합판류 목재의 종류별 연소특성을 제시하였다.

국토교통부에서 고시한 건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준에 따르면 콘칼로리미터를 이용한 준불연재료, 난연재료에 대한 평가를 수행할 시, 시편에 적용되는 가열강도를 50 kW/m² 입사열유속으로 제시하고 있다. 따라서, 본 논문은 목재 시편의 두께별 연소특성 비교에서 입사열유속 50 kW/m²를 적용하여 측정 실험을 수행하였다.

2.4 두께 / 열유속별 연소특성

Table 3은 50 kW/m²의 기준 입사열유속에 대하여, 합판류 목재 시편의 두께별 연소특성 측정 결과를 나타낸다. HRR Peak에 도달하는 시간의 경우 저밀도 MDF는 9, 12 mm, 고밀도 MDF는 15 mm, 파티클 보드는 12 mm, 일반 합판은 4.8 mm의 두께에서 HRR Peak 도달 시간이 가장 이른 것으로 나타났다. 또한, HRR Peak와 MARHE의 경우 저밀도 MDF는 15 mm, 고밀도 MDF는 18 mm, 파티클 보드는 12 mm, 일반 합판은 8.5 mm의 두께에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 모든 연소특성에서 두께별로 일정한 수치를 나타내지 않았다. 따라서, 입사열유속 50 kW/m²을 기준으로 목재의 두께별 연소특성 측정 결과를 분석해보면, 두께 20 mm 이하의 목재에서의 연소특성은 시편의 두께별로 뚜렷한 경향성을 나타내지 않는 것으로 판단할 수 있다.

Table 4는 본 논문에서 선정한 실험 시편인 저밀도 MDF 6, 9, 12, 15, 18 mm, 고밀도 MDF 12, 15, 18 mm, 파티클 보드 12, 15, 18 mm, 일반 합판 4.8, 11.5, 14.5, 17.5 mm에 대하여 25, 35, 50 및 60 kW/m²의 입사열유속을 적용했을 때의 연소특성 측정 결과를 나타낸다. 대부분의 목재에서 목재 시편에 적용되는 입사열유속이 증가할수록 HRR Peak에 도달하는 시간이 짧아지는 결과를 나타냈다. 파티클 보드의 결과에서 입사열유속 60 kW/m²의 결과가 50 kW/m²를 적용했을 때보다 HRR Peak에 도달하는 시간이 4 s 가량 지연됐으나, 급격한 차이를 나타내지는 않았다. HRR Peak와 MARHE의 경우 모든 목재 시편에서 입사열유속이 증가할수록 비례하게 증가하는 경향성을 나타냈다.

Figure 3은 Table 4의 연소특성 측정 데이터를 바탕으로 HRR Peak와 MARHE에 대한 결과를 도시한다. 여기서, Figure 3(a)의 경우 열유속에 따른 HRR Peak, Figure 3(b)의 경우 열유속에 따른 MARHE의 변화를 나타낸다. HRR Peak 측정 결과인 Figure 3(a)에서 입사열유속 1 kW/m²가 증가할수록 파티클 보드는 3.83 kW/m², 고밀도 MDF의 경우 3.32 kW/m², 저밀도 MDF의 경우 2.57 kW/m², 일반 합판의 경우 2.12 kW/m²씩 증가하는 경향성을 나타냈다. 또한, MARHE 측정 결과인 Figure 3(b)에서 입사열유속 1 kW/m²가 증가할수록 파티클 보드는 2.95 kW/m², 고밀도 MDF의 경우 2.27 kW/m², 저밀도 MDF의 경우 2.04 kW/m², 일반 합판의 경우 1.92 kW/m²씩 증가하는 경향성을 나타냈다. HRR Peak 및 MARHE의 연소특성에서 파티클 보드의 경우가 다른 목재 시편에 대비하여 비교적 크게 증가하는 경향성을 나타냈으며, 일반 합판의 경우가 비교적 작게 증가하는 경향성을 나타냈다.

Table 4. Incident Heat Flux by Fire Characteristics of Wood

Wood type	Incident heat flux [kW/m^2]	HRR peak time [s]	HRR peak [kW/m^2]	MARHE [kW/m^2]
Low density MDF	25	115	145.2	67.6
	35	86	174.4	87.5
	50	53	223.3	122.6
	60	49	230.7	136.9
High density MDF	25	154	143.4	70.6
	35	102	172.4	86.2
	50	66	227.5	123.5
	60	55	257.3	148.7
Particle board	25	153	149.7	71.9
	35	102	184.5	93.8
	50	62	239.2	136.4
	60	66	285.1	175.9
Plywood	25	180	133.9	60.2
	35	105	147.3	81.1
	50	57	189.5	112.0
	60	57	208.6	123.9

(a) HRR Peak value

(b) MARHE value

Figure 3. HRR Peak and MARHE according to incident heat flux.

2.5 인화온도 측정 방법 및 기준

서론에서 언급했듯이 복합 가연물의 화재하중을 산출하기 위해서는 각각에 해당하는 가연물의 연소 특성치가 중요한 인자로 작용하며, FDS에서는 가연물의 인화온도를 입력하여 더 정확한 화재해석 시뮬레이션 수행이 가능하다. 하지만, 콘칼로리미터를 이용하여 측정이 가능한 다른 연소특성과는 다르게 인화온도는 측정에 비교적 어려움이 있다. 콘히터에서 가해지는 입사열유속의 적용 결과로 목재 시편 표면에 화염이 발생한다고 하여도, 열전대가 화염의 온도를 측정할 수 있는 범위는 한정되어있기 때문에 정확한 인화온도를 측정하기에는 어려움이 있다. 즉, 시편에서 화염이 발생하는 위치와 열전대가 온도를 측정하는 위

치가 상이할 경우, 화염은 발생하였으나, 열전대가 측정하는 온도가 상승하지 않는 경우가 발생할 수 있으며, 시편 전체에 화염이 옮겨붙어 열전대 측정 범위에서 온도가 기록되어도 1~2 s의 시간 동안 온도 측정에 대한 실험 오차를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 실험 중 실험자가 열전대의 온도 측정 범위의 화염 발생 여부를 판단하여 인화온도를 측정하는 방법이 있으나, 국소적인 위치에서 불규칙하게 발생하는 화염을 관찰해야 하는 만큼 실험의 불확실성이 높아진다. 발화온도(Spontaneous ignition temperature)에 대한 선행 연구로 김형석 등은 시료의 중심온도가 설정온도에 급격하게 상승하는 기준으로 발화를 판단하였다⁽¹³⁾. 본 논문에서는 시편 표면에 화염이 발

Figure 4. Surface temperature of wood specimens over time.

생한 시간과 열전대로 측정한 시편 표면온도 그래프를 분석하여 화염 발생에 따른 인화온도를 판단하였다. Figure 4는 인화온도 판단 기준 선정 예시로, 시간에 따라 열전대로 측정한 시편 표면온도 그래프 결과를 나타내며, 1 s 이상의 측정시간 동안 시편의 표면 온도가 15 °C 이상 증가하였을 경우를 화염 발생 기준으로 선정하여 인화온도를 측정하였다.

2.6 종류별 연소특성 비교

Table 5는 목재의 종류별로 연소특성인 EHC, HRR Peak 및 도달 시간, MAHRE 및 인화온도 측정 데이터 결과를 나타내며, 표의 내용 중 괄호안의 값은 평균에 대한 표준 오차를 나타낸다. 인화온도를 제외한 HRR Peak 등의 연소특성은 본 논문에서 제시한 두께별 모든 합판류 목재 시편을 대상으로 각각의 입사열유속을 적용하였을 때의 결과를 산술평균화한 값이며, 인화온도는 목재 시편의 두께 15 mm (일반 합판의 경우 14.5 mm)에 열전대를 부착하여 Figure 4에서 제시한 인화온도 선정 기준과 같이 화염발생 여부에 따라 인화온도를 측정한 결과를 나타낸다.

유효연소열의 경우 저밀도 MDF (11.97 MJ/kg), 파티클 보드(11.87 MJ/kg), 일반 합판(11.61 MJ/kg), 고밀도 MDF (11.59 MJ/kg)의 순으로 높게 나타났으며, 평균 11.76 MJ/kg으로 다른 연소특성에 비하여 비교적 큰 차이를 나타내지는 않았다. HRR Peak에 도달하는 시간의 경우 저밀도 MDF (73 s), 고밀도 MDF (94 s), 파티클 보드(95 s), 일반 합판(105 s)의 순으로 짧았다. 측정 결과를 분석하였을 때, 저밀도 MDF로 이루어진 가연물에 화재가 발생할 경우 다른 목재에 대비

하여 비교적 이른 시간에 화재 최성기에 도달할 가능성이 높을 것으로 판단된다. HRR Peak의 경우 파티클 보드 (214.6 kW/m²), 고밀도 MDF (200.2 kW/m²), 저밀도 MDF (195.9 kW/m²), 일반 합판(167.1 kW/m²)의 순으로 높았으며, 이와 마찬가지로 MARHE의 결과도 파티클 보드(119.5 kW/m²), 고밀도 MDF (107.2 kW/m²), 저밀도 MDF (105.5 kW/m²), 일반 합판(91.9 kW/m²)의 순으로 높았다. HRR Peak와 MARHE에 대한 결과를 종합적으로 비교해보았을 때, 합판류 목재의 종류별로 측정한 두 연소특성이 비슷한 경향성을 나타냈다. 이를 수치가 높은 순으로 Figure 5와 같이 도시하였으며, 여기서, PB는 파티클 보드, MDF (H)는 고밀도 MDF, MDF (L)은 저밀도 MDF, Plywood는 일반 합판이다. 해당 결과를 바탕으로 분석하였을 때, 가장 높은 수치를 나타내고 있는 파티클 보드와 가장 낮은 수치를 나타내고 있는 일반 합판과의 HRR Peak 차이는 46.0 kW/m², MARHE 차이는 24.7 kW/m²으로 파티클 보드로 이루어진 가연물에서 화재가 발생할 경우에 화재 위험성이 가장 큰 것으로 판단되며, 일반 합판으로 이루어진 가연물에서 화재가 발생할 경우에는 비교적 화재 위험성이 적을 것으로 판단된다.

인화온도의 경우 저밀도 MDF (299.9 °C), 고밀도 MDF (322.4 °C), 파티클 보드(328.0 °C), 일반 합판(346.6 °C)의 순으로 낮은 결과를 나타냈다. 인화온도가 낮을 경우, 가연물 주변에 점화원이 존재함에 따라 이른 시간에 점화된다는 의미를 가진다. 따라서, 주변 온도가 인화온도와 근접하고, 점화원이 존재하는 환경에서는 인화온도가 낮은 저밀도 MDF가 다른 목재들보다 비교적 화재 가능성이 높다는 의

Figure 5. HRR Peak and MARHE by wood type.

Table 5. Comparison of HRR Peak, Time, MARHE Value and Ignition Temperature by Type of Wood

Wood type	EHC [MJ/kg]	HRR peak time [s]	HRR peak [kW/m²]	MARHE [kW/m²]	Ignition temperature (piloted ignition, thickness 14.5~15 mm) [°C]
Low density MDF	11.97 (± 0.14)	73 (± 4)	195.9 (± 6.3)	105.5 (± 4.6)	299.9 (± 4.9)
High density MDF	11.59 (± 0.26)	94 (± 8)	200.2 (± 10.3)	107.2 (± 6.9)	322.4 (± 15.4)
Particle board	11.87 (± 0.23)	95 (± 8)	214.6 (± 11.0)	119.5 (± 8.4)	328.0 (± 19.7)
Plywood	11.61 (± 0.22)	105 (± 13)	167.1 (± 6.5)	91.9 (± 4.6)	346.6 (± 6.5)

미로 판단할 수 있다.

본 논문에서는 콘칼로미터를 이용하여 합판류 목재의 연소특성을 측정하였으며, 각각의 연소특성 수치에 따라 목재의 종류별 화재패턴 분석을 수행하였다. 목재의 종류별 유효연소열은 큰 차이를 나타내지 않았다. 저밀도 MDF가 쉽게 화재 최성기에 도달하며, HRR Peak와 MARHE 수치가 가장 높은 파티클 보드의 화재 위험성이 가장 크다고 판단할 수 있다. 또한, 파티클 보드와 저밀도 MDF의 인화온도가 다른 목재에 대비하여 낮았으므로, 점화원이 존재할 경우 비교적 화재 가능성이 높을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문은 실생활에서 많이 쓰이고, 건축 내·외장용 재료로 사용 빈도가 높은 합판류 목재를 선정하여 콘칼로미터를 통한 두께별 입사열유속에 따른 연소특성 측정 실험을 수행하였다. 연소특성으로는 EHC, HRR Peak time, HRR Peak, MARHE, 인화온도를 측정하였다. 선정된 합판류 목재 시편은 저밀도 MDF 6, 9, 12, 15, 18 mm, 고밀도 MDF 12, 15, 18 mm, 파티클 보드 12, 15, 18 mm, 일반 합판 4.8, 11.5, 14.5, 17.5 mm이며, 연소특성 측정 실험을 위한 입사열유속은 각각 25, 35, 50 및 60 kW/m²를 적용하였다.

목재의 두께별 연소특성은 50 kW/m²의 기준 입사열유속을 적용하여 각각에 해당하는 두께의 목재를 대상으로 측정하였으나, 20 mm 이하의 두께를 가진 목재 시편의 경우 두께의 변화에 따라서 연소특성의 경향성을 나타내지 않았다. 25, 35, 50 및 60 kW/m²의 입사열유속을 적용했을 때의 연소특성 결과에서 목재 시편에 적용되는 입사열유속이 증가할수록 대부분의 목재에서 HRR Peak에 도달하는 시간이 짧아지는 경향성이 나타났다. 또한, 모든 목재에서 입사열유속에 비례하여 HRR Peak와 MARHE가 증가하는 경향성을 나타냈으며, 파티클 보드의 결과에서 비교적 높은 증가율을 보였다. 인화온도의 경우 목재 시편에 열전대를 부착한 후, DAQ 모듈을 이용하여 측정하였으며, 1 s 이상의 측정시간 동안 시편의 표면 온도가 15 °C 이상 증가하였을 경우를 화염 발생 기준으로 선정하여 인화온도를 측정하였다. 앞서 제시한 두께별 연소특성, 입사열유속별 연소특성, 인화온도 측정 결과를 바탕으로 종합적인 비교가 가능한 합판류 목재의 연소특성 결과를 제시하였다. 본 논문에서는 종합적인 결과를 바탕으로 각각의 연소특성에 대한 수치를 분석하여 목재별로 화재에 대한 위험성, 가능성 등의 화재패턴을 분석하였다. 또한, 본 논문에서 제시한 합판류 목재의 연소특성 정량화 결과는 FDS 화재해석 시뮬레이션, 복합 가연물의 화재하중 산정 및 화재 발생 시 가연물의 화

재 패턴 예측에 적용될 수 있다. 차후, 합판류 목재의 연소 특성뿐만 아니라, 다양한 고체 가연물의 연소특성 정량화 연구를 수행하여 종합적인 비교가 가능한 연소특성 DB 구축에 기여하고자 한다.

후 기

본 논문은 소방청의 “화재안전성능평가기법의 신뢰성 확보를 위한 실물화재 실험 및 검증연구” 및 철도연 주요 사업인 “철도차량 내 ESS (Li-ion 전지)단위 화재안전 향상 기술개발” 과제의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계 제위께 감사드립니다.

References

1. S. Y. Choi, J. Y. Kim, D. G. Nam and S. C. Kim, “Comparative Study on the Estimation Method of Fire Load for Residential Combustibles”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 38-43 (2013).
2. S. C. Kim, G. H. Ko and S. H. Lee, “On the Reliability of the Computational Fire Model Based on the Yield Rate Concept of Combustion Gases”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 130-136 (2009).
3. J. J. Brenden, “Measurements of Heat Release Rates on Wood Products and an Assembly”, U.S. Dept. Forest Service Research Paper, FPL 281 (1977).
4. W. K. Chow, S. S. Han, H. Dong, Y. Gao and G. W. Zou, “Full-Scale Burning Tests on Heat Release Rates of Furniture”, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Vol. 6, No. 3, pp. 168-180 (2004).
5. H. C. Tran and R. H. White, “Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter”, *Fire and Materials*, Vol. 16, pp. 197-206 (1992).
6. W. H. Park, Y. M. Cho, C. Y. Kim, S. E. Na and D. H. Lee, “Study on Comparison and Database for Combustibility of Various Wood Materials”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 207-214 (2018).
7. W. H. Park, Y. M. Cho and T. S. Kwon, “Development of Program for Ignition Temperature and Its Applications”, *Asia-Pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, Vol. 7, No. 4, pp. 243-250 (2017).
8. S. C. Kim and D. G. Nam, “Fire Characteristics of Flaming and Smoldering Combustion of Wood Combustibles Considering Thickness”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 67-72 (2015).
9. S. C. Kim, “A Study on Fire Characteristics of Solid Combustible Materials Based on Real Scale Fire Test”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 62-68 (2011).
10. ISO 5660-1, “Reaction to Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 1 : Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)” (2002).
11. C. Huggett, “Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements”, *Fire and Materials*, Vol. 4, No. 2, pp. 61-65 (1980).
12. W. K. Chow and S. S. Han, “Heat Release Rate Calculation in Oxygen Consumption Calorimetry”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 304-310 (2011).
13. H. S. Kim, Y. J. Choi, J. H. Kim, P. H. Jeong and J. W. Choi, A Study on the Ignition Temperature and Ignition Induction Time According to Storage Amount of Wood Pellets, *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 7-14 (2019).