목재 종류별 연소특성 비교 및 데이터베이스 구축 연구

Study on Comparison and Database for Combustibility of Various Wood Materials

박원희* · 조영민** · 김창용*** · 나승은**** · 이덕희*****

Park, Won-Hee*, Cho, Youngmim**, Kim, Chang-Yong***, Na, Seungeun****, and Lee, Duckhee*****

Abstract

As the domestic production of wood materials continues to increase, the risk of fire by wood is also steadily increasing. In this study, combustibilities of wood used as building material in Korea were investigated. We reviewed the pyrolysis model for creating a combustibility database of wood. Among them, necessary properties were selected to use simple pyrolysis model which can be used for fire safety design of the building and safety analysis of the railway. The purpose of this study is to compare the characteristics of fire safety according to the type of wood by measuring the heat release rate, effective heat of combustion, maximum heat release rate, specific heat, and thermal conductivity coefficient by using cone calorimeter, differential scanning calorimeter, and thermal conductivity meter. The results of this study are expected to be an important factor in predicting future fire simulations and fire safety.

Key words : Cone Calorimeter, Differential Scanning Calorimeter, Thermal Conductivity Meter, Wood Specimen, Combustibility

요 지

국내 목재 생산량의 지속적인 증가에 따라 목재에 의한 화재 위험성도 지속적으로 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 국내에서 건축자재로 사용되고 있는 목재를 선정하여 연소특성을 알아보았다. 목재의 연소특성 DB를 작성하기 위한 열분해모델을 검토하였으며 그중 건축물의 성능위주 소방설계 및 철도분야 안전성 분석 등에 활용 가능한 간단한 열분해 모델을 이용하여 이를 위해 필요한 물성을 선정하였다. 콘칼로리미터, 시차주사열량 측정계, 열전도계수 측정기 등을 사용하여 열방출률, 유효연소열, 최대 열방출률, 비열, 열전도 계수 등을 측정함으로써 목재의 종류에 따른 화재 안전도 특성 등을 종합적으로 비교할 수 있도록 하고자 하였다. 본 연구 결과는 향후 화재 시뮬레이션 및 화재 강안전도 예측에 중요한 인자로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 콘 칼로리미터, 시차주사열량 측정계, 열전도계수 측정기, 목재 시편, 연소 특성

*교신저자, 정회원, ¹ 한국철도기술연구원 책임연구원

² 한국과학기술연합대학원대학교 교수(Tel: +82-31-460-5358, Fax: +82-31-460-5279, E-mail: whpark@krii.re.kr)

Corresponding Author, Member, ¹ Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

² Professor, University of Science & Technology

**정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

***한국철도기술연구원 학생연구원

Student, Korea Railroad Research Institute

****한국철도기술연구원 학생연구원

Student, Korea Railroad Research Institute

*****한국철도기술연구원(한국건설기술연구원) 책임연구원

Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

1. 서 론

국내 목재 생산량은 목재가격 하락에 따른 수확벌채 기피 및 벌채에 따른 환경파괴 우려와 같은 부정적인 인식 등으로 어려운 여건임에도 불구하고 꾸준히 증가하고 있다. 한국산림청의 2016년 입목벌채허가 및 용도별 목재공급실적에 따르면 2015년 4,914천 m³이던 목재 생산량이 2016년에는 5,151천 m³로 전년도 대비 4.8% 상승한 것으로 나타났으며 (Korea forest Service Corporation, 2016), 2017년에도 친환경 목재 선호 및 RPS정책에 따라 총 목재수요량은 증가할 것으로 예상된다. Park et al.(2011)은 국내의 신축 공동 주택의 약 95%가 목재를 내장재로 사용하는 등 목재가 광범위하게 사용되고 있음을 조사하였다. 이와 같이 목재수요량의 증가되면서 목재에 의한 화재의 위험성 또한 매우 높아지고 있다.

소방청의 최초착화물별 화재원인 통계에 따르면 2015년 목재 및 합판의 화재 건수가 1449건인데 반하여 2016년에는 1467건으로 18건이 증가하는 추세를 보였다(Korea National Fire Agency, 2015). 국내에서 이처럼 증가하고 있는 목재에 의한 화재 위험성을 낮추기 위해서 목재의 연소 특성을 비롯한 다양한 화재 특성에 대한 연구가 필요하다.

Brenden(1977)는 6종의 목재에 대하여 연소 특성과 최대 열방출속도(Heat Release Rate; HRR) 및 화재 지속 시간 등에 대하여 제시하였으며, Chamberlain(1983)은 다양한 목재를 대상으로 발화시간, 최대 HRR, 시간대별 평균 HRR 등을 보고한 바 있으며, Janssens(1991)은 22종의 목재에 대해서 연소특성을 제시한 바 있다. Kim et al.(2002)은 일반 가정에서 사용하는 가구에 대한 열방출율 표준곡선을 제시하였으며, 미국소방기술사회(The Society of Fire Protection Engineers, SFPE)의 핸드북(Hurley et al., 2008)에서는 다양한 재료에 대한 폭넓은 DB가 작성된바 있다. Chow et al.(2004)은 가구에 대한 HRR, 열유속 및 온도 등을 보고하는 등 목재 화재의 위험성에 대한 전반적인 연구를 수행하였다. 또한 목재와 같은 가연물의 화재관련 물성 DB는 NIST의 FDS(Fire Dynamics Simulator) (McGrattan et al., 2017)와 같은 수치해석을 통해 고체재료의 화염전파를 보다 정확히 예측하기 위한 자료로 활용될 수 있다.

이에 본 연구에서는 목재의 연소특성 DB를 작성하기 위한 열분해모델을 검토하였으며 그중 건축물의 성능위주 소방설계 및 철도분야 안전성 분석 등에 활용 가능한 간단한 열분해 모델을 이용하여 이를 위해 필요한 물성을 선정하였다. 콘칼로리미터, 시차주사열량 측정계, 열전도계수 측정기 등을 사용하여 열방출률, 유효연소열, 최대 열방출률, 비열, 열전도 계수 등을 측정함으로써 목재의 종류에 따른 화재 안전도 특성 등을 종합적으로 비교할 수 있도록 하고자 하였다.

2. 연소특성 선정 및 실험

2.1 연소특성 선정

고체의 연소(열분해) 특성은 매우 다양하다. 본 연구에서는 고체 재료의 화염성장 및 전파의 모델링 현상에 관여하는 물성(특성)에 한정하여 고려하기로 한다. Park et al.(2016)은 간단한 열분해 모델의 물성은 고체표면이 발화온도에 도달하면 주어진(또는 측정된) 열방출률로 에너지를 발생시키도록 설정하여 고체화재의 발화 및 화염전파를 예측하는 모델을 연구하였으며, 이를 위하여 필요한 물성은 고체 재료의 열물성(열전도계수, 비열, 밀도 등)이며, 열방출률과 발화온도 및 유효 연소열이 필요하다. 본 논문에서는 목재의 연소특성 및 데이터베이스 구축을 위하여 앞에서 언급한 물성들을 주로 활용한다.

2.2 실험재료

본 연구에서는 낙엽송(Larch), 멀바우(Merbau), 마사란두바(Massaranduba), 부켈라(Burckella), 더글라스(Douglas-fir), 말라스(Malas), 카플(Kapor), 켐파스(Kempas), 큐링(Keruing) 등 총 12종의 목재 시료를 대상으로 연소특성을 알아보았다.

2.3 유효연소열, 최고 열방출률, 발화온도 측정

유효연소열, 최고 열방출률과 발화온도는 콘 칼로리미터 방법 ISO 5660-1(2015)를 이용하여 측정하였다. 목재 시료를 가로와 세로 각각 100 mm 크기로 자른 후에 KS A 0006(2001)에 따라 온도(23±2)℃, 상대 습도 (50±5)%R.H.의 조건에서 항량이 될 때까지 항온항습기에서 조습 처리하였다. 이렇게 처리한 시료를 홀더 위에 올려놓고 콘 히터와 시편과의 거리는 25 mm를 유지하였다. 콘 히터를 통해 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m², 60 kW/m², 70 kW/m²의 복사 에너지를 가하여 연소가 일어날 수 있도록 하였으며, 연소 과정 중의 질량 및 온도는 각각 ISO 5660-1(2005) 규격에 맞는 로드셀(load cell)과 K타입 열전대(thermocouple)을 이용하여 측정하였다. 각 시험 조건별로 2번씩 실험을 평균값을 취하였다.

발화온도는 Park et al.(2017)에서 연구한 콘 히터 열유속별 발화시간, 열방출률 측정 결과를 이용하여 Eq. (1)을 통해 발화온도를 계산하는 발화온도 산출 프로그램을 사용하여 산출하였다. Fig. 1은 발화온도 산출 프로그램의 초기화면 및 입력/결과 화면이다.

$$\dot{eq}_{cr} = h_c (T_{ig} - T_{\infty}) + \varepsilon \sigma (T_{ig}^4 - T_{\infty}^4) \quad (1)$$

여기서 ε 는 시편 표면에서의 방사율(0.88로 가정)이며 $\dot{q}_{cr}$ 는 임계열유속이다. h_c 는 표면에서의 대류열전달계수(0.0135 kW/m²)이고, σ 는 스테판 볼츠만상수 (5.67 × 10⁻¹¹ kW/m²·K²)이며, T_{∞} 는 주변온도 (20℃)이다(Janssens et al., 1997).

Table 1. Wood Materials Before/After the Cone Calorimeter Tests

Wood	Before Combustion	After Combustion	Wood	Before Combustion	After Combustion
Hem-fir			Red Pine
Ipe			Larch
Merbau			Massaranduba
Burckella			Douglas-fir
Malas			Kapor
Kempas			Keruing

Fig. 1. Ignition Temperature Calculation Program Used in this Study

2.4 비열 측정

각 목재 시료별 비열은 Kim et al.(1993)에서 검토된 바 있는 형태의 시차주사 열량계(NETZSCH, DSC 214)를 이용하여 측정하였다. 우선 목재 시료를 70℃ 오븐에서 1시간 동안 건조한 후에 시편의 질량이 10~13 mg이 되도록 한 후에 시차주사 열량계에 넣었다. 승온 속도는 5 K/min으로 하였고, 측정 온도 범위는 20~110 ℃로 하여 비열을 측정하였다.

2.5 열전도계수 측정

각 목재 시료별 열전도계수는 ASTM C518-98 (2001), ISO 8301 (1991), JIS A1412-2 (1999)의 시험이 가능한

Fig. 2. Measure and Time-linearized HRR for Red Pine

Fig. 3. Measure and Time-linearized HRR for Burckella

Fig. 4. Measure and Time-linearized HRR for Ipe

Fig. 5. Measure and Time-linearized HRR for Merbau

열전도계수 측정기(EKO/HC-074)를 이용하여 상판 열유량, 하판 열유량, 상하판 온도차이를 측정하여 Eq. (2)를 이용하여 산출하였다.

$$\lambda = \frac{Q_{Upper} + Q_{Lower}}{2} \times \frac{L}{\Delta T} \quad (2)$$

여기서 L , Q_{Upper} , Q_{Lower} , ΔT 는 각각 시편두께, 상판 열유량, 하판 열유량, 상하판 온도차이다. 본 시험에서는 0~20℃, 20~35℃, 35~50℃, 50~75℃ 구간 등 총 4개의 온도구간에서 열전도계수를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 실험 목재에 대한 콘 칼로리미터 실험 전후의 사진을 Table 1에 나타내었다. 사진에서 알 수 있는 바와 같이 연소 후에는 각 목재 시료별로 연소 후 생성물의 모습이 다름을 확인할 수 있는데 이러한 현상은 열분해시 나무 원재료의 밀도 및 상태에 따라 축소 및 부풀음에 상이하여 차(char)가 갈라지는 양상이 재료별로 서로 다르기 때문이다(Zeng et al., 2005).

콘 칼로리미터를 이용하여 측정한 평균 유효연소열, 최고 열방출률 및 이를 이용하여 산출한 발화온도는 Table 2와 같다. 여기서 헴퍼(Hem-fir), 적송(Red Pine), 이페(Ipe) 등은 측정자료가 없는데 이 목재들의 경우 열방출값만 측정되었다. 본 연구에 사용한 목재 시료의 밀도는 474~1046 kg/m³이었는데, 목재의 종류에 따라 그 밀도가 2배 이상 차이가 나타났다. 헴퍼, 레드파인, 낙엽송, 더글라스 등은 밀도가 상대적으로 낮았고, 이페, 마사란두바, 말라스, 카플 등은 상대적으로 밀도가 높았다. 본 연구에서 사용된 목재시료의 발화온도는 가장 낮은 켄파스가 364.9℃, 가장 높은 이페가 481.3℃로 나타나 목재 시료 간의 발화온도 차이는 최대 116.4℃에

달했다. 발화온도가 높을수록 화재로 이어질 가능성이 더 낮아지는 만큼 발화온도가 높은 이페, 낙엽송, 더글라스 등이 발화온도가 낮은 켄파스, 카플, 부켄라 등에 비하여 고온 상황에서 화재로 이어질 가능성은 상대적으로 더 낮음을 확인할 수 있었다. 유효연소열이 가장 작은 멀바우가 5.85 MJ/kg, 유효연소열이 가장 큰 헴퍼가 13.31 MJ/kg으로 나타나 유효연소열도 목재 시료에 따라 2배 이상 차이가 있음을 볼 수 있었다. 일반적으로 유효연소열이 작은 목재일수록 화재 발생시에 더 적은 열을 방출하므로 유효연소열이 낮은 멀바우, 말라스 등의 목재가 유효연소열이 큰 헴퍼나 이페 등에 비하여 이미 화재가 발생한 상황에서는 화재시에 연소에 의한 피해가 상대적으로 더 적을 수 있음을 알 수 있다.

최고 열방출률도 목재 시료에 따라 크게 달라졌는데, 멀바우와 레드파인 등이 상대적으로 낮았고, 이페와 더글라스 등이 상대적으로 높았다. 화재가 발생한 경우에는 최고 열방출률이 낮을수록 화재에 의한 위험도가 다소 낮아질 수 있다고 판단가능하므로 멀바우나 레드파인 등의 목재시료가 이페나 더글라스 등에 비해서는 화재가 발생한 경우의 위험도가 낮음을 알 수 있었다. 멀바우는 앞서 살펴본 바와 같이 유효연소열도 본 연구에서 사용된 목재 시료 중 가장 낮아, 화재가 발생한 경우의 위험도는 가장 낮은 것으로 보인다.

수치해석을 위한 열방출율 DB구축을 위하여 n개의 선행 구간을 나누어 고려하여 데이터베이스와 하였다. 각 구간별 HRR과 시간을 이용하여 마지막 점 즉, HRR이 0이 되는 지점의 시간을 산출하였다. 산출을 위해서는 Eqs. (3), (4)를 사용하였다.

$$\rho \Delta H_{eff} \cdot T = \text{area of HRR graphy} \quad (3)$$

$$A = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\left(\frac{1}{2} |h_{i+1} - h_i| + |h_{i+1}, h_i|_{\min} \right) (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (4)$$

Table 2. Thickness, Density, Ignition Temperature, Effective Heat of Combustion, and Peak HRR of Tested Wood Pieces

Wood	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Ignition point (°C)	Effective Heat of Combustion (MJ/kg)	Peak HRR (kW/m ²)
Larch	20	595.2	466.1	10.10	134.2
Merbau	37	805.4	435.8	5.85	77.8
Massaranduba	21	1045.8	453.1	10.78	141.4
Burckella	19	640.4	391.7	10.06	117.2
Douglas-fir	29	474.8	468.7	11.55	159.2
Malas	30	836.1	417.7	8.32	131.5
Kapor	19	820.7	383.7	10.78	131.7
Kempas	19	750.5	364.9	11.12	132.1
Keuring	19	741.8	420.0	11.56	148.3
Average	23.7	671.4	422.4	10.01	117.5

Table 3. Peak Values of HRR for Tested Wood Samples in this Study

Wood Type	Incident heat flux					
	25 kW		35 kW		50 kW	
	t_{peak} (s)	h_{peak} (kW/m ²)	t_{peak} (s)	h_{peak} (kW/m ²)	t_{peak} (s)	h_{peak} (kW/m ²)
Hem-fir	29	114.3	33	116.5	23	132.5
Red Pine	20	92.4	20	106.9	44	139.8
Ipe	30	118.9	65	138.0	48	151.0
Larch	12	120.5	19	130.3	21	148.8
Merbau	82	51.0	30	76.2	22	124.6
Massaranduba	25	126.0	43	112.1	47	149.9
Burckella	42	102.4	42	118.9	33	141.2
Douglas-fir	14	107.2	24	127.7	30	130.3
Malas	65	62.2	59	140.0	93	186.2
Kapor	21	124.0	28	118.8	38	152.5
Kempas	32	123.0	48	120.1	34	153.4
Keuring	42	104.7	44	109.3	41	165.8

여기서 ρ 는 밀도, ΔH_{eff} 는 유효연소열, T 는 목재의 두께, A 는 그래프의 총면적, h_i 는 i 시간에서의 열 방출율, t_i 는 시간을 나타낸다. Figs. 2-5는 목재 시료별로 콘 칼로리미터를 이용한 연소 특성 실험 결과 중 레드파인, 부켈라, 이페, 멀바우 등의 결과를 나타낸 것으로 다양한 복사열 조건 하에서 시간에 따른 열방출률 변화를 나타낸 것이다. 여기서 Avg는 입사열유속별 결과에 대한 평균값이다.

실험결과, 모든 목재 시료에서 공통적으로 초기 1분 내에 열 방출률이 최대에 이르는 것을 볼 수 있었다. 이는 목재 시료들의 발화점이 낮으므로 쉽게 착화가 되고, 초기에 가장 많은 열을 방출함을 의미한다. 위 실험을 통해 얻은 최대 열방출률이 발생하기까지 걸린 시간과 이 때의 열방출률 Table 3에 나타내었다. Table 3에서는 콘히터에서 시편에 입사되는 열유속별 결과가 도시되어 있는데, 최대 열방출량에 도달하는 시간은 목재 종류에 따라 달랐는데, 낙엽송, 레드파인, 더글라스, 카플 등은 상대적으로 짧은 시간 경과 후에 최대 열방출량에 도달한 반면에, 이페, 부켈라, 말라스, 큐링 등은 상대적으로 긴 시간 경과 후에 최대 열방출량에 도달하는 것을 볼 수 있었다. 그러나, 모든 목재 시료가 2분 이내에 최대 열방출량에 도달함을 볼 수 있다.

위와 같이 최대 열방출률에 도달한 이후에는 열방출률이 점차 감소하다가 5~20분 가량 경과한 후에는 다시 증가하였다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있었는데, 켄파스, 카플, 햄퍼, 레드파인 등의 일부 목재 시료에서는 위와 같은 증가가 1회 또는 그 이상 반복해서 발생하는 것을 볼 수 있었는데, 이는 목재 시료마다 연소특성이 다양함을 의미한다. 이후 열방출률은 지속적으로 감소하는데, 본 실험조건에서는 콘히터를 통해 지속적으로 복사열이 가해지는 상황이었기

때문에 열방출률이 급격하게 감소하지 않고 서서히 감소하였다.

시차주사열량계로 측정한 본 연구에 사용된 목재 시료의 비열을 Table 3에 나타냈다. 비열은 모든 목재시료에서 25℃에서 가장 낮아서 대략 1.2~1.6 J/g·K 정도로 나타났고, 50℃에서는 그보다 약간 높은 1.4~1.8 J/g·K 범위였으나, 75℃에서는 1.5~1.9 J/g·K, 100℃에서는 1.6~2.5 J/g·K까지 나타났다. 목재의 경우 온도가 올라감에 따라 열전도계수가 올라가는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 물의 비열이 4.18 J/g·K, 벤젠의 비열이 1.73 J/g·K, 철의 비열이 0.46 J/g·K, 금의 비열이 0.13 J/g·K 임을 보면 목재의 비열은 물에 비해 절반 이하로 매우 작으나 철에 비해서는 2배 이상으로 높음을 알 수 있었다. 비열이 클수록 발화온도에 도달하기 위해 필요한 열량이 크므로 화재에 대해 상대적으로 위험성이 더 낮으므로 마사란두바, 더글라스, 말라스 등과 같이 비열이 높은 목재 시료가 낙엽송, 큐링, 부켈라 등의 비열이 낮은 목재에 비해 상대적으로 화재 위험성이 다소 낮을 것으로 기대된다.

열전도계수 측정기로 측정한 열전도 계수를 Table 4에 나타내었다. 열전도 계수도 온도에 따라 달라졌는데, 온도가 높을수록 열전도 계수도 증가하는 것을 볼 수 있었다. 열전도 계수는 목재의 종류에 따라 크게 달라졌는데, 특히 말라스의 경우 열전도 계수가 다른 시료의 10% 수준에 불과할 정도로 매우 낮게 나타났다. 이는 말라스가 다른 목재에 비하여 단열 성능이 우수하고, 동시에 화재 위험성도 상대적으로 낮음을 의미한다. 반면에 마사란두바의 열전도 계수는 상대적으로 매우 높게 나타났는데, 이는 마사란두바는 열전달이 매우 잘 되어 화재에 대한 위험성도 상대적으로 높음을

Table 4. Specific Heat of Tested Wood Samples in this Study

Wood Type	Specific Heat (J/g·K)			
	25 °C	50 °C	75 °C	100 °C
Hem-fir	1.311	1.469	1.587	1.690
Red Pine	1.418	1.562	1.827	2.500
Ipe	1.471	1.677	1.830	2.038
Larch	1.266	1.434	1.546	1.703
Merbau	1.490	-	-	1.980
Massaranduba	1.521	1.706	1.867	2.067
Burckella	1.287	1.463	1.575	1.753
Douglas-fir	1.501	1.693	1.866	2.029
Malas	1.525	1.731	1.898	2.249
Kapor	1.366	1.521	1.677	1.835
Kempas	1.393	1.570	1.712	1.872
Keuring	1.274	1.440	1.568	1.717

Table 5. Thermal Conductivity of Wood Samples Tested in this Study

Wood Type	Thermal Conductivity (W/m·K)			
	0~20 °C	20~35 °C	35~50 °C	50~75 °C
Larch	0.1184	0.1232	0.1276	0.1348
Merbau	0.1655	0.1707	0.1762	0.1814
Massaranduba	0.2135	0.2196	0.2265	0.2340
Burckella	0.1145	0.1184	0.1223	0.1281
Douglas-fir	0.0973	0.1005	0.1039	0.1090
Malas	0.0128	0.0132	0.0136	0.0143
Kapor	0.0907	0.0953	0.1060	0.1143
Kempas	0.1191	0.1233	0.1280	0.1359
Keuring	0.1306	0.1349	0.1394	0.1454

의미한다. 본 연구에 사용된 모든 목재 시료에서 공통적으로 온도가 높아질수록 열전도 계수가 증가하였는데, 이는 기온이 높아질수록 열전도가 잘 이루어지므로 화재의 위험성도 동시에 증가함을 의미한다. 반면 온도가 증가할수록 비열도 같이 증가하므로 열전도계수를 밀도와 비열의 곱으로 나눈 열확산계수를 검토하여 목재별로 비교하여야 상대적인 화재의 위험도를 종합적으로 판단할 수 있다.

4. 결 언

본 연구에서는 다양한 목재 시료를 대상으로 열방출률, 유효연소열, 비열, 열전도 계수 등의 연소 특성을 알아보았다. 콘칼로리미터로는 열방출율, 유효연소열을 측정하였으며 이 결과를 이용하여 발화온도를 산출하였다. 또한 시차주사열량계를 이용하여 비열을 열도계수 측정장비로 열전도 계수를 측정하였는데, 실험결과 발화온도와 평균 Peak HRR

이 가장 높은 것은 이페, 평균 유효연소열이 가장 높은 것은 햄퍼였다. 또한, 평균 비열이 가장 높은 목재는 멀바우이고 평균 열전도 계수가 가장 높은 목재는 마사란두바이였다. 목재의 종류에 따른 화재 안전도 특성 등을 종합적으로 비교할 수 있도록 하고자 하였으며, 실험을 통하여 얻은 목재 별 화재 DB와 연소 특성은 목재가 사용된 건축물 등에 대한 FDS 해석 및 열발생을 예측 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(“MPSS-소방안전-2015-66”) 및 국가과학기술연구회 MDCO 연구단의 지원을 받아 수행되었으며 관계 제위께 감사드립니다.

References

- ASTM C518-98 (2001) Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 4, No. 6, pp. 174-185.
- Brenden, J.J. (1977) *Measurements of Heat Release Rates on Wood Products and an Assembly*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wis.
- Chamberlain, D.L. (1983) *Heat Release Rate Properties of Wood-Based Materials*. Commerce Department, National Institute of Standards and Technology, NBSIR 82-2597.
- Chow, W.K., Han, S.S., Dong, H., Gao, Y., and Zou, G.W. (2004) 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.
- Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall Jr, J.R., Harada, K., Kuligowski, E.D., Puchovsky, M., Torero, J.L., Watts Jr, J.M., and Wieczorek, C.J. (2008) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*.
- ISO 5660-1 (2015) *Reaction to Fire Part1, Rate of Heat Release from Building Products*.
- ISO 8301 (1991) *Thermal Insulation-determination of Steady-state Thermal Resistance and Related Properties-heat Flow Meter Apparatus*.
- Janssens, M. (1991) Rate of Heat Release of Wood Products. *Fire Safety Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 217-238.
- Janssens, M.L., and Grenier, A.T. (1997) An Improved Method for Analyzing Ignition Data of Composites. *Proceedings of 23rd International Conference on Fire Safety Millbrae, California*, pp. 253-264.
- JISA 1412-2 (1999) *Test Method for Thermal Resistance and Related Properties of Thermal Insulations-Part 2: Heat Flow Meter Apparatus*.
- Kim, H.J., and Lilley, D.G. (2002) Heat Release Rates of Burning Items in Fires. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 4, pp. 866-870.
- Kim, Y.B., and Song, S.J. (1993) Principles and Application of Thermal Analysis: DSC, DTA, TGA, TMA. *Polymer Science and Technology*, Vol. 4, No. 5, pp. 387-397.
- Korea Forest Service Corporation (2016) *Report on Allowable Timber Supply Performance by Logging Permit (Registration) and Usage of Timber*.
- Korea National Fire Agency (2015) *Fire Cause Statistics by Fire Source*.
- KS A 0006 (2001) *Standard Atmospheric Conditions for Testing*. KS A 0006.
- McGrattan, K.B., and Forney, G.P. (2017) *Fire Dynamics Simulator (Version 6.5.3) Users' Guide*. NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Park, W.H., Cho, Y.M., and Kwon, T.S. (2017) Development of Program for Ignition Temperature and Its Applications. *Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, Vol. 7, No. 4, pp. 243-250.
- Park, W.H., Kim, C.Y., and Yang, S.J. (2016) Numerical Analysis of a Railway Passenger Car Sensor Using a Simple Pyrolysis Model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 119-127.
- Park, Y., Jun, B., Seo, J., and Kim, S. (2011) The Improvement of Thermal Conductivity of wood-based Panel for Laminate Flooring Used the Exfoliated Graphite for Heating Energy Conservation. *J. Korean Soc. Living Environ. Sys*, Vol. 18, No. 6, pp. 650-655.
- Zeng, D., Clark, M., Gunderson, T., Hecker, W.C., and Fletcher, T.H. (2005) Swelling Properties and Intrinsic Reactivities of Coal Chars Produced at Elevated Pressures and High Heating Rates. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2213-2221.

Received	August 22, 2017
Revised	August 29, 2017
Accepted	September 28, 2017