

[Research Paper]

## 주방 화재시뮬레이션을 위한 목재 가연물의 CO 및 Soot Yields

문선여 · 황철홍<sup>\*†</sup> · 김성찬<sup>\*\*</sup>

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, <sup>\*</sup>대전대학교 소방방재학과 교수, <sup>\*\*</sup>경일대학교 소방방재학과 교수

### CO and Soot Yields of Wood Combustibles for a Kitchen Fire Simulation

Sun-Yeo Mun · Cheol-Hong Hwang<sup>\*†</sup> · Sung-Chan Kim<sup>\*\*</sup>

Graduate Student, Dept. of Disaster Prevention, Daejeon University,

<sup>\*</sup>Professor, Dept. of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University,

<sup>\*\*</sup>Professor, Dept. of Fire Safety, Kyungil University

(Received January 30, 2019; Revised February 8, 2019; Accepted February 8, 2019)

#### 요 약

성능위주설계(PBD)의 주방 화재시뮬레이션을 위해 요구되는 목재 가연물의 CO 및 Soot yields 정보를 제공하기 위하여, 개방 콘 칼로리미터를 활용한 실험이 수행되었다. 싱크장 제작에 널리 사용되는 MDF와 PB를 대상으로 함수율, 표면 가공처리 방식 및 색상에 따라 총 8가지의 시편이 검토되었다. 주요 결과는 다음과 같다. 동일 두께의 시편이라도 표면 가공처리 방법에 따라 깊이 방향으로의 화재확산과 관련된 열적 관통시간에 상당한 변화가 발생됨이 확인되었다. MDF와 PB series의 CO yield는 유염 연소 구간에서 연소 모드별 그리고 표면 가공처리 방식에 따라 큰 변화가 없다. 그러나 유염 연소모드에 비해 훈소 모드에서는 약 10배의 높은  $y_{CO}$ 가 측정되었다. 반면에 Soot yield는 연소 모드와 표면 가공처리 방식에 따라 상당한 차이를 보였다. 특히 유염 연소모드와 표면이 가공 처리된 시편에서 보다 높은  $y_{soot}$ 가 확인되었다. 마지막으로 PBD의 주방 화재시뮬레이션을 위하여 측정된 MDF와 PB의  $y_{CO}$  및  $y_{soot}$  적용 방안이 논의되었다.

#### ABSTRACT

Experimental studies using an open cone calorimeter were conducted to provide information on the CO and soot yields of wood combustibles required for a kitchen fire simulation of PBD. A total of eight specimens were examined for medium density fiberboard (MDF) and particle board (PB), which are used widely in kitchen furniture production, depending on the water content, surface processing method, and surface color. The thermal penetration time related to the fire spread rate in the depth direction differed significantly according to the surface processing treatment method, even for a specimen of identical thickness. The CO yield ( $y_{CO}$ ) of the MDF and PB series did not change significantly according to the combustion mode and surface treatment process in flaming mode. On the other hand,  $y_{CO}$  was approximately 10 times higher in smoldering mode than in flaming mode. The soot yield ( $y_{soot}$ ), however, varied considerably depending on the combustion mode and surface treatment process. In particular, a higher  $y_{soot}$  was found in flaming mode and in the surface-treated specimens. Finally, the  $y_{CO}$  and  $y_{soot}$  of MDF and PB measured for the kitchen fire simulation of PBD were applied.

**Keywords** : Performance based design (PBD), Fire simulation, Kitchen fire, CO yield, Soot yield

#### 1. 서 론

성능위주설계(Performance-based design, PBD)는 기존의

획일적인 법규위주설계(Prescriptive-based design) 문제점을 보완하기 위하여, 특정 소방대상물의 다양한 화재환경을 고려한 공학기반의 화재안전 성능평가 기법이다. 최근 5년

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [chehwang@dju.ac.kr](mailto:chehwang@dju.ac.kr), TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

간(2011년 8월~2016년 3월) 국내 PBD 시행 현황을 살펴보면<sup>(1)</sup>, PBD가 시행된 건축물 중에 복합용도 건축물이 85%를 차지하고 있다. 일반적으로 복합용도 건축물은 업무, 판매 및 주거공간이 포함되어 있으며, 화재 발생 빈도 및 피해 규모를 고려할 때 이들 공간 화재는 위험성 평가가 요구되는 대표적인 시나리오에 포함되고 있다. 특히 주거공간(공동주택)의 경우는 침대 매트리스 화재와 더불어 주방 가구(싱크대 또는 싱크장) 화재가 가장 많이 고려되고 있다.

대부분의 주방 가구에는 원목 가공과정에서 발생하는 파쇄편이나 절삭편 등의 폐 조각(또는 톱밥 등)을 합성수지 접착제와 함께 고온-고압으로 압착 가공된 중밀도 섬유판(Medium density fiberboard, MDF)과 파티클 보드(Particle board, PB)가 널리 사용된다. 참고로 입자가 작아 단단하게 결합되어 강도가 높은 MDF는 싱크장의 문에 활용되고, 비교적 입자가 커서 강도가 약한 PB는 내부 몸체에 주로 활용되고 있다. 또한 습기에 대한 저항력, 내구성, 광택 및 외관(Appearance)을 개선시키기 위하여, 도료 및 시트지를 활용하여 표면이 가공 처리된 MDF와 PB가 널리 사용되고 있다.

PBD에서 주방 화재에 대한 위험성 평가는 주로 Fire Dynamics Simulator (FDS)와 같은 화재모델<sup>(2)</sup>을 통해 수행되고 있으며, 시물레이션 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 정확한 물리적 입력인자의 정보가 필수적으로 요구된다. 구체적으로 화재 성장률(Fire growth rate) 및 최대 열발생률(Heat release rate, HRR)이 포함된 화재성장곡선(Fire growth curve), 그리고 연료의 연소열(Heat of combustion), CO 및 Soot yields 등의 정보가 요구된다.

화재 및 피난시물레이션을 이용한 안전성 평가는 허용 피난시간(Available safe egress time, ASET)과 요구피난시간(Required safe egress time, RSET)의 비교를 통해 수행된다. 최근 5년간의 국내 PBD 보고서에서 화재 안전성을 결정짓는 가장 중요한 인자는 가시도》온도  $\geq$  CO의 순서를 보인다<sup>(3,4)</sup>. 따라서 화재성장곡선과 더불어 CO 및 Soot yields의 입력인자 정확성은 PBD 결과의 신뢰성을 결정하는 가장 핵심적인 인자라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 주방 가구를 구성하는 MDF와 PB의 CO 및 Soot yields 정보는 충분하지 않은 실정이다. Table 1에 제시된 바와 같이 국내 PBD에서 가장 많이 인용되고 있는 SFPE Handbook<sup>(5)</sup>의 결과를 살펴보면, MDF와 PB의 Soot yields는 아직까지 제공되지 않고 있다. 그 결과 주방 화재시물레이션을 위해 적송(Red oak)이 적용되거나, 위험성 평가의 보수적인 관점에서 비교적 높은 CO와 Soot yields를 생성하는 Polyurethane (PU)이 대안으로 적용되고 있다. 그러나 PU 역시 가공방법 및 용도에 따라 매우 다양한 화학식을 갖기 때문에, PBD를 수행하는 엔지니어에 따라 매우 넓은 범위의 물성 값이 적용되고 있는 실정이다<sup>(1)</sup>.

목재 가연물의 화재특성에 관한 연구결과를 살펴보면, Shin 등<sup>(6)</sup>은 합성목재, 적송 및 방부목에 대한 콘 칼로리미

**Table 1.** CO and Soot Yields of Polyurethane and Wood Combustibles Presented in the SFPE Handbook<sup>(5)</sup>

Combustibles	$Y_{CO}$	$Y_s$
Flexible Polyurethane Foam (GM21)	0.010	0.131
Rigid Polyurethane Foam (GM29)	0.031	0.130
Wood (Red Oak)	0.004	0.015
Medium Density Fiberboard (MDF)	0.015	N/A
Particle Board (PB)	0.004	N/A

터 실험을 통해 CO 및 CO<sub>2</sub> yields를 제시하였으며, 주로 목재에 따른 연기밀도 차이(Smoke density)에 초점을 두었다. Kim 등<sup>(7)</sup>은 건축 마감용으로 사용되는 3종 목재를 대상으로 점화시간, HRR, 그리고 CO 및 CO<sub>2</sub>의 측정값을 보고하였다. Woo 등<sup>(8)</sup> 역시 건축용 목재들을 대상으로 최대 및 총 HRR, 유효 연소열 그리고 화재성능지수와 화재성장지수에 대한 정량적 실험결과를 제시하였다. 이들 연구들은 ISO 5660-1의 기준 시험법<sup>(9)</sup>을 활용하여, 합성목재 및 건축용 목재에 대한 점화 및 열적 특성 그리고 CO yield에 대한 정보를 제공하고 있다. 그러나 주방 가구를 구성하는 MDF와 PB에 대한 연구는 매우 제한적이다. 최근 Kim 등<sup>(10)</sup>은 MDF, PB 그리고 합판(Chip board)을 대상으로 시편의 두께에 따른 HRR, CO 및 CO<sub>2</sub> yields를 보고하였다. 표면 점화 및 화재성장으로 1차 HRR의 최고점이 발생되고, 깊이 방향으로 열적 관통(Thermal penetration) 또는 화재확산이 이루어지면서 최종 바닥면의 점화로 2차 HRR의 최고점이 관찰되었다. 이와 같은 유염(Flaming) 연소에 비해 추가적으로 발생하는 훈소(Smoldering) 연소에서는 연료의 질량 감소율은 낮아지고, CO의 생성율은 크게 증가된다. 일반적으로 CO yield는 시간 평균된 CO의 질량유량과 연료의 질량 감소율의 비로 표현됨을 고려할 때, 훈소에서의 CO yield는 유염연소에 비해 매우 높은 값을 보인다. 따라서 유염과 훈소 영역을 구분하여 CO yield를 제시한 것은 상당히 합리적인 접근이라 판단된다.

본 연구에서는 주방 화재시물레이션을 위해 요구되는 MDF와 PB를 대상으로 CO 및 Soot yields의 DB 제공을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 ISO 5660-1 기준에 근거한 실험이 수행되었다. 실제 주방 가구에 적용되고 있는 표면 가공처리된 다양한 MDF와 PB Series가 검토되었다. 또한 초기 점화에서 훈소에 이르기까지 4단계의 현상에 따른 연소 모드를 구분하고, 이들에 대한 CO 및 Soot yields가 각각 측정·분석되었다. 마지막으로 PBD의 주방 화재시물레이션을 위한 MDF와 PB의 CO 및 Soot yields의 활용 방안이 논의되었다.

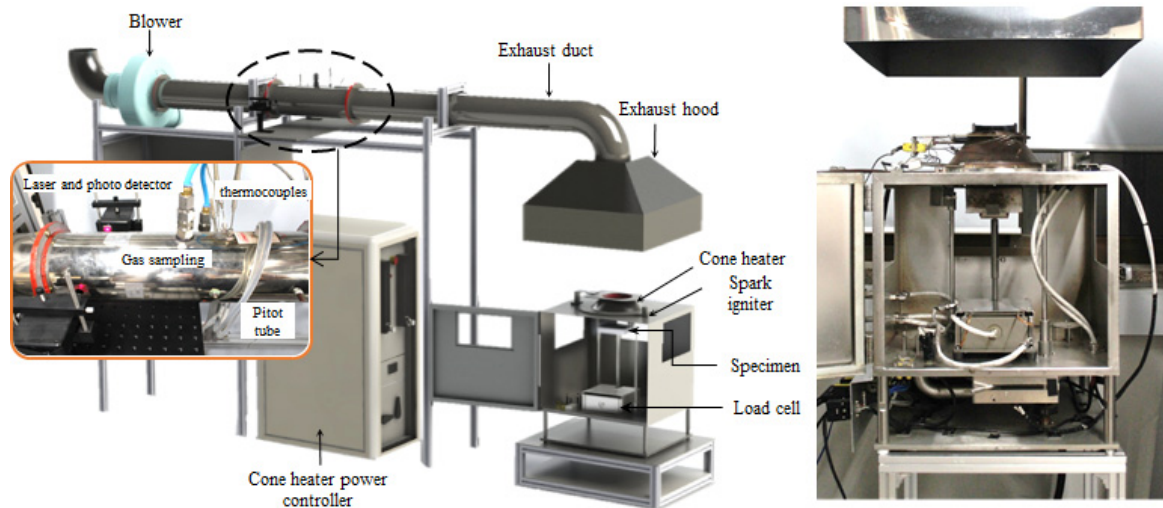


Figure 1. Schematic and photos of open cone calorimeter based on ISO 5660-1 standard.

## 2. 실험방법 및 조건

### 2.1 콘 칼로리미터 시험 및 시편의 선정

주방 가구를 구성하는 MDF와 PB의 CO 및 Soot yields를 측정하기 위하여, ISO 5660-1의 국제 기준<sup>(9)</sup>에 근거한 개방 콘 칼로리미터(Open cone calorimeter) 시험장치가 제작되었다. 본 장치는 산소 농도에 따른 고체 가연물의 점화특성을 검토할 수 있는 밀폐형 콘 칼로리미터(Controlled atmosphere cone calorimeter, CACC)<sup>(11)</sup>로도 활용될 수 있도록 설계되었으며, 정면과 측후방 면의 개방을 통해 개방 콘 칼로리미터의 기능이 동시에 가능하다. 본 장치의 신뢰성은 표준 시편(PMMA)을 대상으로 측정된 HRR, 점화시간 및 Yields와 기존 연구결과와의 비교를 통해 충분히 검토되었다. 또한 실험 및 수치해석 연구를 통해 부분적인 개방으로 인한 외부 공기유입의 제한은 위의 측정값에 전혀 영향을 미치지 않음을 확인하였다<sup>(12,13)</sup>. HRR은 산소소모법(Oxygen consumption method)에 의해 측정되었으며, 프로판 연료를 사용하여 8 kW 범위까지 보정되었다. 가연물의 질량 감소율은 로드셀(Load cell)을 통해 측정되었다. 이때 열에 의한 로드셀의 오차를 최소화시키기 위하여, 로드셀 설치 공간 외부 용기에 냉각수가 공급되었다.

후드 및 콘 히터 하단에서 시편 표면까지의 거리는 각각 250 mm와 25 mm이다. 콘 히터에서 시편에 가해지는 복사 열유속은 KS 연소 성능 시험 기준(KS F ISO 5660-1)에 의하여 50 kW/m<sup>2</sup> 적용하였으며, 덕트의 흡입 유량은 24 L/s로 일정하게 유지되었다. 본 연구는 점화 이후의 CO 및 Soot yields에 관심을 갖기 때문에 스파크 점화(Spark ignition) 방식이 적용되었다. 모든 시편의 표면 크기는 10 cm × 10 cm이며, 시편 홀더로 인하여 복사열을 받는 실제 표면적은 88.4 cm<sup>2</sup> (9.4 cm × 9.4 cm)이다. 1-2차 HRR의 최대값, 열 및 화염이 깊이 방향으로 관통되는 시간 그리고

CO yield는 시편의 두께에 의해 큰 영향을 받는다<sup>(10)</sup>. 따라서 모든 시편의 두께는 실제 싱크장에서 가장 많이 사용되고 있는 1.8 cm로 고정되었다. 각 시편에 대한 실험은 3회 이상 반복되었다.

### 2.2 선정된 MDF 및 PB series

Figure 2는 본 연구에서 검토된 MDF와 PB series의 실험 전후 사진이 제시된 것으로, 주방 가구에 가장 많이 사용되는 표면 가공 처리된 시편이 선택되었다. MDF로는 표면 가공 처리가 되지 않은 것(이하, MDF로 명명)과 UV(Ultraviolet) 특수 도료의 표면 코팅을 통해 광택을 갖도록 하는 하이그로시(High glossy)가 선정되었다. 이때 가공 표면의 색상과 따른 방사율(Emissivity)의 차이가 점화 및 연소특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 흰색(High glossy white, HGW)과 갈색(High glossy brown, HGB)이 각각 고려되었다. 마지막으로 접착제 없이 멜라민 수지(Melamine resin)를 고온 압착한 Low pressure melamine (LPM)이 선정되었다. PB series 역시, 가공되지 않은 PB(이하, PB), 접착제를 사용하여 흰색과 갈색의 시트지를 부착한 Film-faced white (FW)와 Film-faced brown (FB) 그리고 멜라민수지를 고온 압착한 LPM이 선정되었다. 또한 함수율의 영향을 확인하기 위하여, 표면 가공처리가 되지 않은 MDF와 PB를 대상으로 103 °C 이상의 고온 환경에서 24 h 이상의 건조를 통해 함수율이 0%가 된 시편<sup>(14)</sup>에 대한 실험이 추가되었다.

### 2.3 CO 및 Soot yields의 산출

목재 가연물의 점화 이후, Figure 1에서와 같이 실시간으로 측정된 가연물의 질량 감소율, 그리고 배기 후드에서 측정된, 온도(혼합기의 밀도), 체적 및 질량유량, CO의 체적분율( $X_{CO}$ )을 통해 CO yield가 산출되었다. 이때 CO yield는

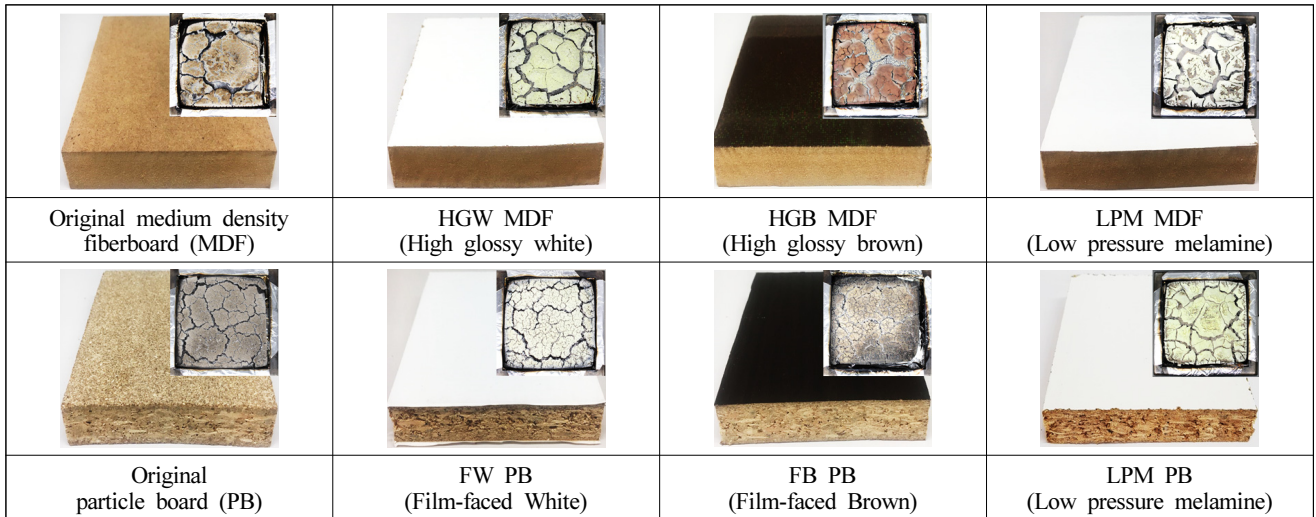


Figure 2. Photographs of the specimen before and after experiment for the MDF and PB series.

식(1)에서와 같이  $t_1$ 에서  $t_2$ 까지의 시간구간 동안 평균된 CO의 질량유량( $\overline{m}_{CO}$ )과 가연물의 질량 감소율( $\overline{m}_f$ )의 비로 표현되었다.  $\overline{m}_f$ 는 시간구간 동안의 질량 변화( $\Delta m_f$ )를 통해 식 (2)와 같이 산출되었으며,  $\overline{m}_{CO}$ 는 식 (3)으로 표현되었다.

$$y_{CO} = \overline{m}_{CO} / \overline{m}_f \quad (1)$$

$$\overline{m}_f = \Delta m_f / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$\overline{m}_{CO} = \int_{t_1}^{t_2} Y_{CO}(t) \dot{m}_e(t) dt / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

여기서,  $Y_{CO}$ 는 CO의 질량분율을 의미하며,  $X_{CO} MW_{CO} / MW_{air}$ 에 의해 환산되었다.  $\dot{m}_e$ 는 배기 덕트 내의 질량유량을 의미하며,  $\rho_e A_D V_D$ 를 통해 계산되었다. 참고로  $MW$ ,  $A_D$  및  $V_D$ 는 각각 분자량, 배기 덕트의 면적 및 평균 유속을 나타낸다.

Soot yield의 산출과 관련하여, 연기 생성율은 Bouguer's 법칙에 의해 광소멸 상수(Light extinction coefficient,  $k$ )는 광경로 거리( $L$ )과 투과율에 대하여 식 (4)와 같은 관계를 갖는다<sup>(15)</sup>.

$$k(t) = -\ln(I(t)/I_0) / L \quad (4)$$

여기서  $I_0$ 와  $I$ 는 점화 전과 후의 광 수광부의 신호 강도(Voltage)를 의미한다. 이때 연기의 질량농도( $m_{soot}$ )는 식 (5)과 같다.  $k_m$ 은 질량비 광소멸계수(Mass specific extinction coefficient)로서 연료에 의존하며 탄화수소계일 경우 8.4 그리고 목재의 경우는 7.6의 값을 갖는다고 알려져 있다<sup>(16)</sup>. 이후 연기의 질량유량( $\dot{m}_{soot}$ )은 식 (6)과 같이 덕트 내부의 체적유량( $\dot{V}_e$ )의 곱으로 표현된다. 최종적으로 Soot yield ( $y_{soot}$ )는 식 (7)에 의해 산출되었다.

$$m_{soot}(t) = k(t) / k_m \quad (5)$$

$$\dot{m}_{soot}(t) = m_{soot}(t) \dot{V}_e(t) \quad (6)$$

$$y_{soot} = \overline{m}_{soot} / \overline{m}_f = \left( \int_{t_1}^{t_2} \dot{m}_{soot}(t) dt / (t_2 - t_1) \right) / \overline{m}_f \quad (7)$$

### 3. 결과 및 검토

목재 가연물의 점화 이후 유염 및 훈소 연소에 대한 현상을 고찰하기 위하여, Figure 3은 표면 가공처리가 되지 않는 PB를 대상으로 50 kW/m<sup>2</sup>을 공급된 시간( $t = 0$  s) 이후부터 단위 면적당 열발생률(Heat release rate per unit area, kW/m<sup>2</sup>)을 도시한 것이다. 점화 초기에 표면의 화재확산을 통한 HRR의 1차 최고점이 발생(1<sup>st</sup> peak)되며, 이때 화염 높이는 후드 하단부에 근접 또는 통과할 만큼 긴 화염(Flaming 1, F1으로 명명)이 형성된다. 이후 생성된 숯층 및 재(Char layer and ash)로 인하여 깊이 방향으로의 열전달율이 저하되며, 그 결과 열분해를 통한 가연성 기체의 공급 및 HRR이 감소되는 것으로 판단된다. 이때 화염은 표면 근처에만 존재하거나, 간헐적으로 표면에서 확인되지 않는다. 즉, 균열된 표면 사이의 깊이 방향으로 열 또는 화염이 통과되는 시점이라 할 수 있으며, 본 논문에서는 열적관통(Thermal penetration, TP) 모드라 명명하였다. 약 900 s가 지난 시점에서 다시 HRR이 증가되는 현상은 수직 표면을 따라 열 및 화염이 바닥면까지 관통됨에 따라 2차 유염연소(Flaming 2, F2)가 발생된다. 참고로 TP는 간헐적으로 화염이 관찰되지만, F1~F2의 구간에 포함된 유염연소 모드로 분류하였다. 이후 화염이 관찰되지 않고 표면반응에 의해 연소가 지속되는 훈소(Smoldering, S) 모드가 발생됨을 볼 수 있다. 이러한 현상들은 유염과 무염연소로 분리하여 CO yield를 제시한 선행연구<sup>(10)</sup>에서도 동일하게 확인된 바 있



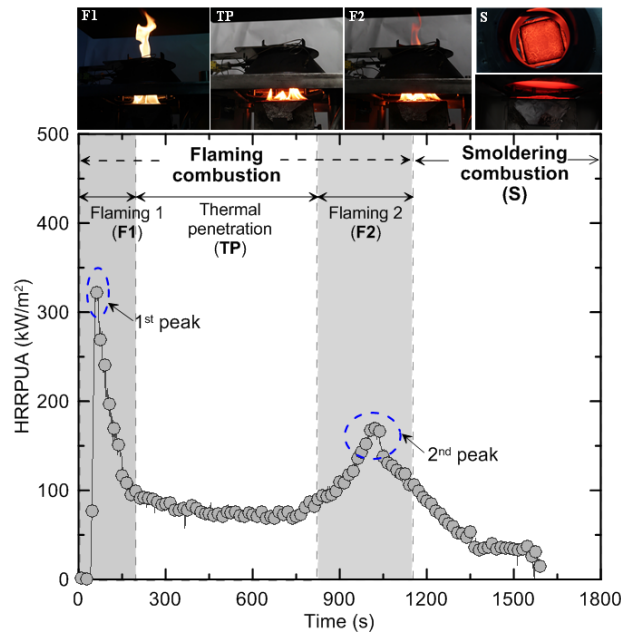


Figure 3. Time history of heat release rate and change in combustion phenomena for the original PB.

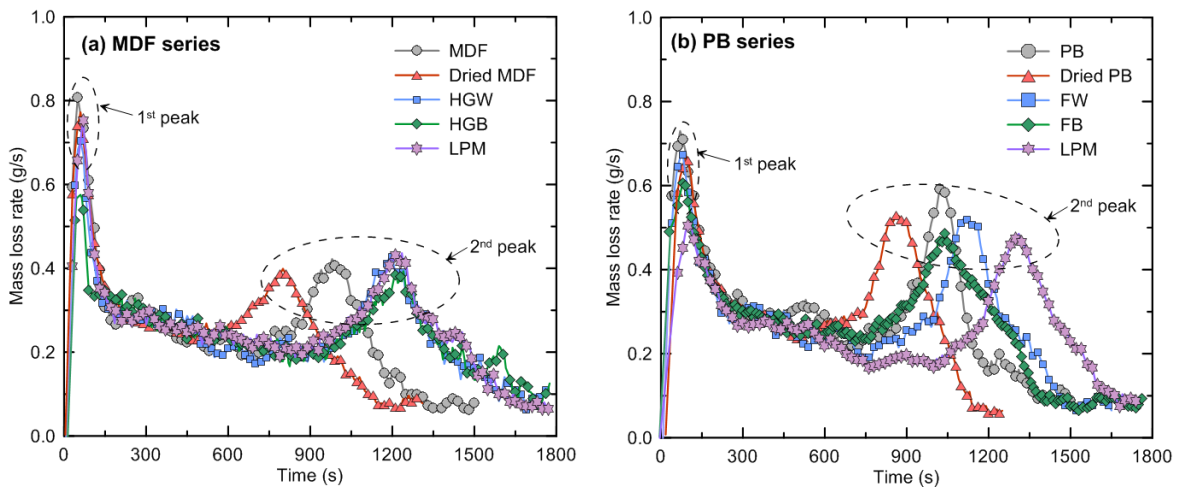


Figure 4. Comparisons of mass loss rate for the MDF and PB series.

다. 그러나 기체 및 액체 연료와는 다르게 정상상태가 존재하지 않는 목재 화재의 경우, 세부적인 유염연소 모드(F1, TP 및 F2)에서도 연료의 질량 감소율뿐만 아니라 CO 및 Soot 생성량에 상당한 변화가 발생할 수 있다. 따라서 유염연소 영역을 보다 구체화시켜 현상별 CO 및 Soot yields를 확인하는 것은 타당한 접근이라 판단된다. 참고로 기존 SFPE Handbook<sup>(5)</sup>에서와 같이 유염과 훈소의 차이에 대한 명확한 정보 제공없이 특정 가연물 별 Yields를 제시하는 것은, 훈소 영역의 포함 여부 또는 포함된 훈소 시간에 따라 최종 Yield는 매우 큰 차이를 보일 수 있다.

Figure 4는 MDF 및 PB series에 대한 시간에 따른 질량 감소율을 비교·도시한 것이다. 먼저 MDF series (Figure 4(a))를 살펴보면, F1 구간에서는 큰 차이를 확인할 수 없으며,

TP 구간을 거쳐 F2가 발생하는 시점은 Dried MDF이 MDF보다 약 150초 이상 빠르게 나타난다. 이는 MDF가 갖는 함수율에 의한 효과라 할 수 있다. 반면에 하이그로시 및 멜라민 수지로 표면 처리된 HGW, HGB 및 LPM은 F2의 발생 시기가 MDF보다 느리며, 정량적 질량 감소율은 매우 유사하다. 특히 하이그로시의 표면 색상이 다른 HGW와 HGB 결과가 매우 동일하다는 것은, 본 실험에서 적용된 높은 열유속 조건(50 kW/m<sup>2</sup>)에서 표면 방사율이 미치는 효과가 크지 않음을 의미한다. PB Series (Figure 4(b))를 살펴보면, Dried PB, PB 그리고 LPM의 경향은 MDF Series의 질량 감소율과 유사하다. 그러나 시트지가 부착된 FW와 FB는 표면처리가 되지 않은 PB와 큰 차이를 보이지 않는다.

Figure 5는 Figure 4의 질량 감소율과 동일한 조건에서

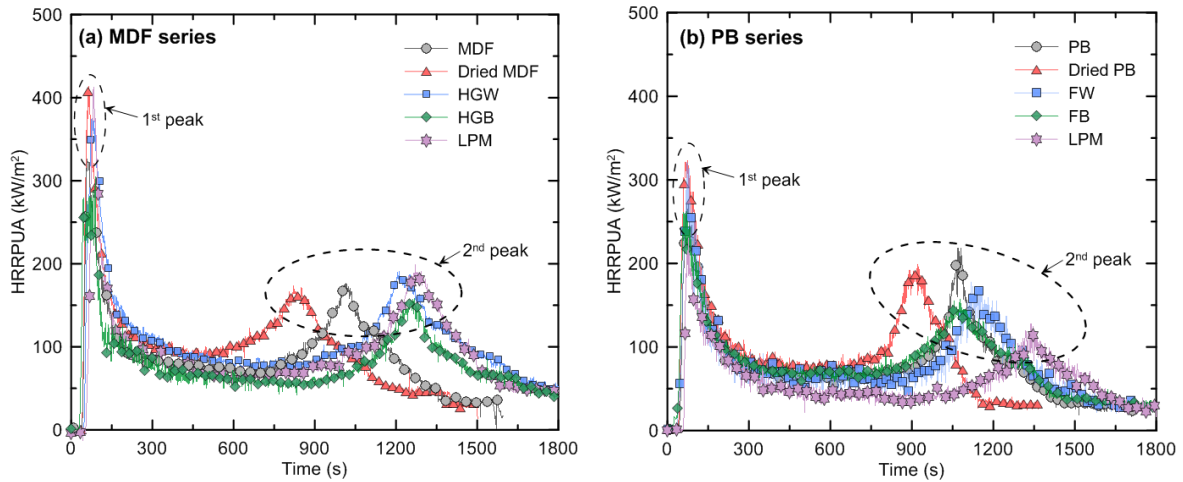


Figure 5. Comparisons of heat release rate for the MDF and PB series.

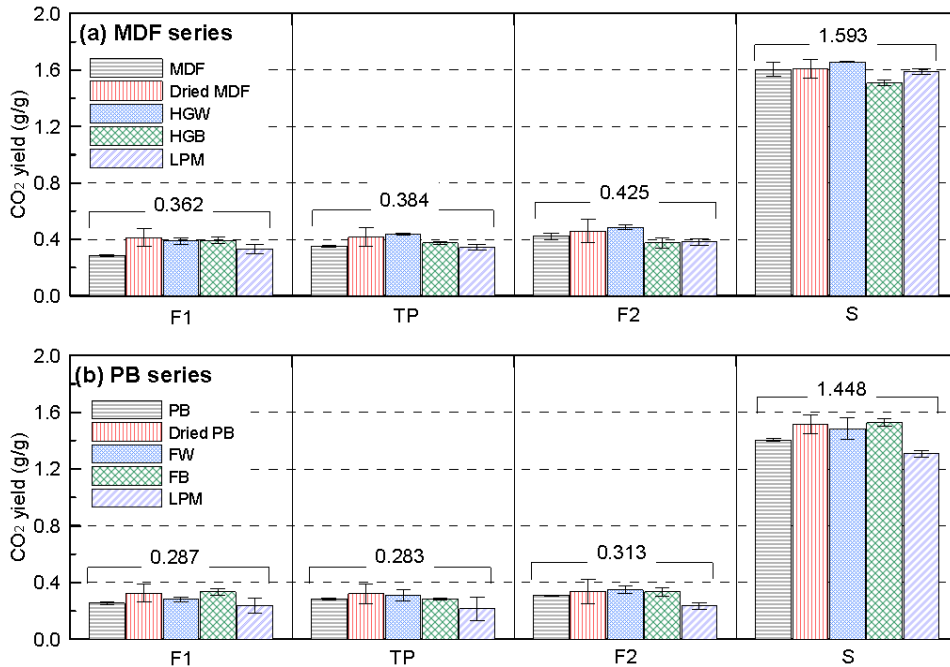


Figure 6. Comparisons of CO<sub>2</sub> yield for the MDF and PB series.

HRRPUA를 도시한 것이다. 각 연소 모드의 발생시점 및 정량적 HRRPUA 값은 질량 감소율과 매우 유사한 경향을 보이고 있다. Figures 4와 5를 통해 확인될 수 있는 중요한 현상은 MDF와 PB의 표면 처리에 따른 TP 구간의 지속시간 또는 2차 HRR의 최고점이 발생하는 시간의 변화이다. Palmer<sup>(17)</sup>의 연구결과에 따르면, 1차 점화 이후 깊이 방향으로 열이 관통되는 시간은 두께의 제곱에 비례한다고 알려져 있다. Kim 등<sup>(10)</sup>의 연구에서도 표면 처리가 되지 않은 MDF, PB 및 Plywood를 대상으로 목재 종류에 상관없이 두께에 따른 관통시간의 관계식이 존재함이 확인되었다. 그러나 본 연구에서 확인되었듯이, MDF와 PB에 하이그로시, 멜라민 수지 또는 시트지를 활용하여 표면 가공처리한 경

우, 동일한 시편 두께에도 불구하고 열적 관통시간에 상당한 변화가 발생된다. 하이그로시와 멜라민 수지를 이용한 표면 가공처리는 F2의 발생 시점을 지연시키지만, 시트지를 활용한 PB의 표면 가공처리는 시간에 따른 질량 감소율 및 HRR에 큰 영향을 주지 못하였다.

Figure 6은 MDF와 PB series에 대하여 F1, TP, F2 및 S 연소 모드별 CO<sub>2</sub> yield( $y_{CO_2}$ )를 비교·도시한 것이다. 반복 실험을 통한 표준편차는 수직 에러 바를 통해 제시되었다. 각 연소 모드별  $y_{CO_2}$ 를 비교해보면, 표면 가공처리 여부 및 방식에 따른 큰 차이를 확인하기 어렵다. 따라서 검토된 5개 시편에 대한 평균값을 그림에 삽입하였다. MDF 및 PB series 모두 F1→TP→F2의 유염 연소과정 동안 평균  $y_{CO_2}$ 가

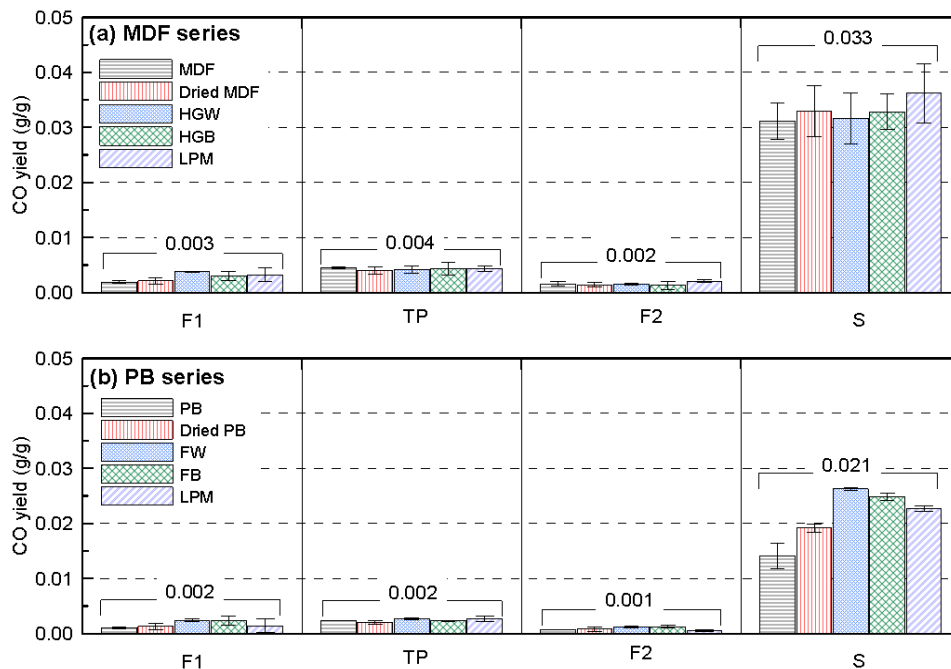


Figure 7. Comparisons of CO yield for the MDF and PB series.

점차적으로 증가되지만, 그 정량적인 변화량은 크지 않다. 반면에 훈소(S) 모드에서는 F1 모드에 비해 MDF와 PB series는 각각 4.4배와 5.1배의 급격한 증가를 볼 수 있다. 이러한 결과는 훈소 모드에서의 연료의 질량 감소율이 유염연소에 비해 급격히 낮기 때문에 야기된 것으로 판단된다.

Figure 7은 MDF와 PB series의 연소 모드별 CO yield ( $y_{CO}$ )를 비교·도시한 것이다. PB series의 훈소 모드를 제외하고, CO<sub>2</sub>와 유사하게 표면 처리에 따른  $y_{CO}$ 의 큰 변화가 발생되지 않는다. 각 유염 모드별 평균  $y_{CO}$ 를 살펴보면, TP 구간에서 비교적 높은 CO가 측정되었다. 이는 TP가 비록 유염연소 모드에 포함되었지만, 시편 표면에서의 화염 발생이 간헐적이기 때문에 부분적인 훈소 모드가 영향을 미친 것으로 예측된다. 가장 주목할 점으로, MDF와 PB series 모두 유염 연소구간의 최대  $y_{CO}$ 를 기준으로, 훈소 모드에서는 각각 8.3배와 10.5배의 높은  $y_{CO}$ 를 보이고 있다.

Figure 8은 MDF와 PB series의 연소 모드별 Soot yield ( $y_{soot}$ )를 도시한 것이다. 먼저 MDF series를 살펴보면,  $y_{soot}$ 와는 다르게  $y_{soot}$ 는 연소 모드 그리고 표면 가공처리 여부에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 실제 현장에서 주방 가구의 함수율은 명확하지 않기 때문에, 표면 처리가 되지 않은 Dried MDF와 MDF의 평균값 그리고 표면 처리된 3개 시편 결과의 평균값이 그림에 삽입되었다. 모든 연소 모드에서 표면 처리된 시편은 처리되지 않은 시편에 비해 높은  $y_{soot}$ 를 보이고 있다. 연소 모드별  $y_{soot}$ 의 차이로서, 표면에 명확한 화염이 생성되는 F1과 F2의 구간에서 가장 높은  $y_{soot}$ 를 보이고 있으며, TP와 S 모드는 상대적으로 낮은  $y_{soot}$ 를 갖는다. 이러한 결과는 고온과 상당한 체류시간이 요구되는

Soot의 생성특성을 고려할 때 충분히 예상될 수 있다. Figure 8(b)의 PB series 역시 MDF와 정성적 및 정량적으로 매우 유사한 결과를 보이고 있다. 결론적으로 주방 가구에 주로 적용되고 있는 MDF와 PB series의 CO yield는 표면 처리 여부보다는 유염 및 훈소 모드에 의해 더 큰 영향을 받는다. 정량적으로, 훈소 모드가 유염 모드에 비해 약 10배 정도의 높은  $y_{CO}$ 를 갖는다. 반면에, Soot yield는 연소 모드 및 표면 처리에 따라 큰 변화가 발생되며, 주로 유염 연소와 표면 처리가 된 시편에서 가장 높은 값이 측정되었다.

주방 가구의 화재 시, 유염과 훈소 영역은 화재확산 속도에 따른 화염면의 위치에 의해 결정될 수 있으며, 본 연구에서와 같이 명확하게 구분되기 보다는 동일한 시간대에 공존하게 된다. 따라서 실제 싱크장의 화재에서 정확한 CO 및 Soot yields를 산출하기 위해서는, 수평 및 수직 화재확산 속도에 따라 실시간으로 변화되는 연소 모드(유염과 훈소) 면적이 가중 평균에 고려되어야 할 것이다. 그러나 이러한 접근은 현실적으로 거의 불가능에 가깝다. Table 2는 MDF와 PB series를 대상으로 유염 및 훈소 모드에서의 측정된 최대  $y_{CO}$  및  $y_{soot}$ 를 재정리한 것이다. Figures 7-8에서 확인되었듯이, 유염과 훈소 모드에서  $y_{CO}$  및  $y_{soot}$ 는 정량적으로 서로 상반된 경향을 보이고 있으며, 유염과 훈소 모드에서의 각각의 Yield 값 차이는 매우 크게 발생된다. 따라서 주방 화재시물레이션을 위해 요구되는 MDF 및 PB의  $y_{CO}$  및  $y_{soot}$ 는 특정 연소 모드의 값을 선택하기 보다는, 유염과 훈소 모드에 상관없이 최대값(수치에 밑줄 표기)을 적용하는 것이 화재 위험성을 평가하기 위한 보수적 관점에서 타당할 것으로 판단된다.

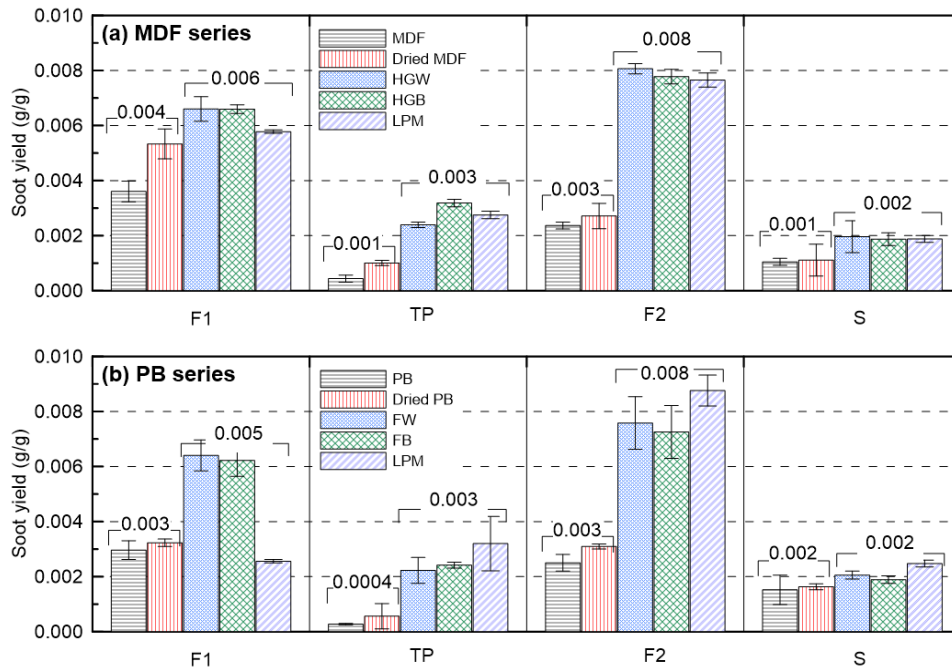


Figure 8. Comparisons of soot yield for the MDF and PB series.

Table 2. CO and Soot Yields for the MDF and PB Series Proposed in the Present Study

	$y_{CO}$		$y_{soot}$	
	Flaming	Smoldering	Flaming	Smoldering
MDF Series	0.004	<b>0.033</b>	<b>0.008</b>	0.002
PB Series	0.002	<b>0.021</b>	<b>0.008</b>	0.002

#### 4. 결론

성능위주설계(PBD)의 주방 화재시물레이션을 위해 요구되는 목재 가연물의 CO 및 Soot yields 정보를 제공하기 위하여, 개방 콘 칼로리미터를 활용한 실험이 수행되었다. 싱크장 제작에 널리 사용되는 MDF와 PB를 대상으로 합수율, 표면 가공처리 방식 및 색상에 따라 총 8가지의 시편이 검토되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

목재 가연물의 연소현상은 크게 유염연소(Flaming 1, F1), Thermal penetration (TP), Flaming 2 (F2)의 3단계 그리고 훈소연소(Smoldering, S)로 분류되었다. 표면 가공처리되지 않은 MDF를 기준으로, 하이그로시(HGW, HGB) 및 멜라민 수지(LPM)로 표면 처리된 시편은 HRR의 2차 최고점이 다소 늦게 발생되었다. 그러나 하이그로시 색상에 따른 차이점은 확인되지 않았다. PB의 경우에 시트지가 부착된 FW와 FB는 표면 가공처리되지 않은 PB와 유사한 화재확산 현상을 보였으며, LPM은 다소 늦은 HRR의 2차 최고점이 관찰되었다. 위 결과로부터, 동일 두께의 시편이라

도 표면 가공처리 방법에 따라 깊이 방향으로의 열 및 화염의 관통시간에 상당한 변화가 발생됨이 확인되었다.

CO yield는 유염 연소 구간에서 연소 모드별 그리고 표면 가공처리 방식에 따라 큰 차이가 확인되지 않았다. 그러나 MDF와 PB series 모두 유염연소 모드의 최대  $y_{CO}$ 를 기준으로 훈소 모드에서는 각각 8.3배와 10.5배의 높은  $y_{CO}$ 를 보이고 있다. 반면에 Soot yield는 연소 모드와 표면 가공처리 방식에 따라 상당한 차이를 보인다. 특히 F1과 F2와 같은 유염연소 모드 그리고 표면이 가공 처리된 시편에서 보다 높은  $y_{soot}$ 가 확인되었다.

실제 주방의 싱크장 화재에서 유염과 훈소는 동일한 시간대에 공존하며, 유염과 훈소 모드의 면적은 화재확산에 따른 화염면의 위치에 따라 결정된다. 따라서 유염 및 훈소 면적에 따른 연소 모드별  $y_{CO}$  및  $y_{soot}$ 의 가장 평균의 도입은 현실적으로 불가능에 가깝다. 또한 유염과 훈소 모드에 따른  $y_{CO}$ 와  $y_{soot}$ 는 서로 상반된 경향을 보이고 있다. 이러한 상황을 고려할 때, 유염과 훈소 모드에 상관없이 최대값을 갖는  $y_{CO}$ 와  $y_{soot}$ 를 적용하는 것이 화재 위험성 평가를 위한 보수적 접근으로 타당하다고 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 소방청 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 관계제위께 감사드립니다.



## References

1. S. H. An, S. Y. Mun, I. H. Ryu, J. H. Choi and C. H. Hwang, "Analysis on the Implementation Status of Domestic PBD (Performance Based Design) - Focusing on the Fire Scenario and Simulation", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 5, pp. 32-40 (2017).
2. K. B. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator (Version 6): Technical Reference Guide", NIST SP 1018-1 6th edition, National Institute of Standards and Technology (2016).
3. H. Y. Jang and C. H. Hwang, "Revision of the Input Parameters for the Prediction Models of Smoke Detectors Based on the FDS", *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 44-51 (2017).
4. J. H. Choi, S. Y. Mun, C. H. Hwang and S. H. Park, "Influence of the Dimensionless Light Extinction Coefficient on Visibility for the Evacuation", *Proceedings of 2018 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 121-122 (2018).
5. P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, L. P. Richard, J. R. Hall and J. M. Watts, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Third Edition)", National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers (2002).
6. A. Tewarson, "Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Ed., Section 3, Chapter 4, NFPA, US (2002).
7. B. W. Shin, Y. H. Song, D. H. Rie and K. S. Chung, "A Study on the Analysis of Smoke Density Characteristics for Wood-Plastic Composites", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 119-124 (2011).
8. J. B. Kim, Y. J. Park and S. Y. Lee, "Star Building Materials Study on Wood Structure and Combustion Characteristics", *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 5, pp. 60-66 (2016).
9. T. Y. Woo, E. Jin and Y. J. Chung, "A Study on the Heat Hazard Assessment of Building Wood", *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 5, pp. 6-14 (2018).
10. ISO 5660-1, "Rate of Heat Release of Building Products (Cone Calorimeter)", International Standards Organization, Geneva, Switzerland (1992).
11. 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).
12. V. Babrauskas, W. H. Twilley, M. L. Janssens and S. Yusa, "A Cone Calorimeter for Controlled- Atmosphere Studies", *Journal of Fire and Materials*, Vol. 16, pp. 37-43 (1992).
13. J. H. Cho, "An Experimental Study on the Ignition Characteristics of Solid Combustibles in Simulated Fire Environment", Master Thesis, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University (2016).
14. B. J. Kim, "Study on Ignition Characteristics of Solid Flammables Using Open and Controlled Atmosphere Cone Calorimeter", Master Thesis, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University (2017).
15. J. C. Walker, "Primary Wood Processing : Principles and Practice", Springer & Business Media (2006).
16. K. K-Höinghaus and J. B. Jeffries, "Applied Combustion Diagnostics", *Combustion: An International Series*, Taylor & Francis, New York (2002).
17. G. W. Mulholland, "Smoke Production and Properties", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Ed., Section 2, Chapter 13, NFPA, US (2002).
18. K. N. Palmer, "Smoldering Combustion in Dusts and Fibrous Materials", *Combustion and Flame*, Vol. 1, No. 2, pp. 129-154 (1957).