creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2022년 02월

석사학위 논문

Douglas-fir 목재 가연물의 반응열과 탄화도가 연소 시 발생하는 열방출율에 미치는 영향에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

이 명 규

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Douglas-fir 목재 가연물의 반응열과 탄화도가 연소 시 발생하는 열방출율에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on Effect of Heat of Reaction and Charring on Heat Release Rate Produced from Burning Douglas-fir wood

2022년 02월 25일

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

이 명 규

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Douglas-fir 목재 가연물의 반응열과 탄화도가 연소 시 발생하는 열방출율에 미치는 영향에 관한 연구

지도교수 박 설 현

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

이 명 규

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이명규의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 곽재복 (인)

위 원 조선대학교 교수 배승용 (인)

위 원 조선대학교 교수 박설현 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES ····· Ⅰ
LIST OF FIGURES ····· Ⅱ
NOMENCLATURE ····· Ⅳ
ABSTRACT ····· Ⅶ

제 1장 서론 ····· 1
1.1 연구 배경 및 필요성 ····· 1
1.2 연구 목적 및 내용 ····· 8

제 2장 실험 장치 및 방법 ····· 12
2.1 ISO 5660-1 콘칼로리미터를 이용한 고체 가연물의 연소 실험 ····· 12
2.1.1 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통한 열방출율 및 유효 연소열 측정 ····· 14
2.1.2 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통한 Soot Yield 측정 ····· 16
2.1.3 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통한 CO Yield 측정 ····· 17
2-2 Douglas-fir 목재의 열물성 측정 및 방법 ····· 18
2.2.1 비열 ····· 18
2.2.2 열전도계수 ····· 19
2.2.3 선인자 계수, 활성화 에너지 ····· 20
2.2.4 탄화도 ····· 21

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3장 FDS 전산 해석 및 방법 ····· 22

3.1 Douglas-fir 목재 가연물의 연소과정 FDS 전산 해석 방법 ····· 22

제 4장 실험과 전산 해석 결과 및 고찰 ····· 29

4.1 Douglas-fir 목재의 열분해 및 열방출율 기초 특성 ····· 29

4.2 Douglas-fir 목재의 반응열이 열방출율 특성에 미치는 영향 ····· 37

4.3 Douglas-fir 목재의 탄화도가 열방출율 특성에 미치는 영향 ····· 45

제 5장 결론 ····· 47

참고 문헌 ····· 50

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLE

Table 1.1 Fire statistics from the national fire agency (2020) ····· 3
Table 1.2 Values for α for different growth rates ····· 6
Table 2.1 Summary of thermal and decomposition properties of douglas-fir & char ····· 21
Table 3.1 Characteristic fire diameter and grid size ratio results ····· 27
Table 4.1 Thermal properties and ignition time of Douglas-fir and PMMA ····· 30

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Figure 1.1 Wooden building construction statistics ····· 1
Figure 1.2 Mjøstårnet wooden building ····· 3
Figure 1.3 Phases of a typical fire ····· 5
Figure 1.4 A graph of defining fire growth rate ····· 6
Figure 1.5 Process for thermal pyrolysis of solid combustible ····· 9
Figure 1.6 Typical HRR curves for different characteristic burning behaviours ····· 10
Figure 2.1 ISO 5660-1 cone calorimeter apparatus ····· 12
Figure 2.2 Effective heat of combustion results obtained from cone calorimeter experiments ····· 15
Figure 2.3 SEA results obtained from cone calorimeter experiments ····· 16
Figure 2.4 Measured CO yield from cone calorimeter experiment ····· 17
Figure 2.5 Measured specific heat as a function of temperature ····· 19
Figure 2.6 Measured $\ln(\beta / T_{max}^2)$ plotted as a function of $1/T_{max}$ ····· 20
Figure 3.1 Comparisons for FDS combustion models ····· 23
Figure 3.2 Boundary conditions for used for calculating an interior temperautre distribution ····· 25
Figure 3.3 Computational domain and mesh generated for the ISO 5660-1 calorimeter experiment ····· 26
Figure 4.1 Thermal thickness evaluation for PMMA & Douglas-fir samples used in the present study. ····· 31
Figure 4.2 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment of PMMA and Douglas-fir ····· 33
Figure 4.3 Comparisons of the HRR & CO yield measured from the cone calorimetery experiment of PMMA & Dougals-fir ····· 36
Figure 4.4 Calculated heat release rate of Douglas-fir specimen as a function of time with the different number of dx ····· 37

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 4.5 Calculated THR of Douglas-fir specimen as a function of time with the different number of dx ····· 38
Figure 4.6 Temperature zones in a solid wood cross-section exposed to fire ····· 39
Figure 4.7 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with base case ····· 41
Figure 4.8 Comparisons of the HRR & CO yield measured from the cone calorimetery experiment and calculated with base case ····· 41
Figure 4.9 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different heat of reactions ····· 43
Figure 4.10 Schematics of biomass pyrolysis process ····· 43
Figure 4.11 Comparisons of the THR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different heat of reactions ····· 44
Figure 4.12 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different charring properties ····· 45
Figure 4.13 Comparisons of the THR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different charring properties ····· 46

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

NOMENCLATURE

ACRONYMS

PBD	Performance based fire protection design
ASET	Available safe egress time
RSET	Required safe egress time
NIST	National Institute of Standards and Technology
FDS	Fire Dynamics Simulator
HRR	Heat Release Rate
PMMA	Poly Methyl Methacrylate
DSC	Differntial Scanning Calorimetery
TGA	Thermogravimetric analysis
LFM	Light Flash Method
DNS	Direct numeriacl simulation
LES	Large eddy simulation
RANS	Renolds averaged navier-stokes
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area
EDC	Eddy Dissipation Concept
THR	Total heat release
D^*	Charateristic fire diameter
NRC	Nuclear Regulatory Commission

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

SYBOLS

α	Fire growth rate $[kW/s^2]$
$\dot{q}(t)$	Heat release rate $[kW]$
$\triangle h_c$	Heat of combustion $[kJ/g]$
r_o	Stoichiometric oxygen/fuel mass ratio $[1]$
C	Orifice flow meter calibration constant $[m^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot k^{1/2}]$
$\triangle P$	Orifice meter pressure difference $[Pa]$
T_e	Absolute temperature of gas in an orifice meter $[K]$
$X_{O_2}^0$	Initial value of oxygen analyzer scale $[1]$
X_{O_2}	Oxygen Analyzer Calibration, Mole Fraction of Oxygen $[1]$
$\dot{q}_A(t)$	HRRPUA $[kW/m^2]$
A_s	Specimen surface area $[m^2]$
$\triangle h_{c,eff}$	Effective heat of combustion $[MJ/kg]$
$-\dot{m}$	Mass loss rate $[kg/s]$
$\triangle t$	sampling time interval $[s]$
m_s	Specimen mass during continuous flame combustion $[g]$
m_f	Specimen mass at the end of the test $[g]$
SEA_{avg}	Specific extinction Area $[m^2/kg]$
K_m	Mass extinction coefficient $[m^2/kg]$
Y_s	Soot Yield $[kg/kg]$
C_p	Douglas-fir Specific Heat $[J/kg \cdot K]$
$C_{p,reference}$	Sapphire Specific Heat $[J/kg \cdot K]$
k	Thermal conductivity $[kW/m \cdot K]$
ρ	Douglas-fir density $[kg/m^3]$
$T_{\max}$	The temperature at which the maximum conversion occurs $[K]$
β	Temperature rise rate $[℃/\min]$
E	Activation Energy $[kJ/mol]$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A	Pre-exponential factor $[1/s]$
R	Gas constant $[8.314\,J/mol \cdot K]$
E	Activation Energy $[kJ/mol]$
H_{reac}	Heat of reaction $[kJ/kg]$
H_v	Heat of vaporization $[kJ/kg]$
w_1	Mass before experiment $[g]$
w_2	Mass after experiment $[g]$
T	Temperature $[K]$
$\nu_{s,i}$	Char ratio $[\%]$
δ_p	Thermal penetration depth $[mm]$
t_{ig}	Ignition time $[s]$
D^*	Charateristic fire diameter $[1]$
ρ_∞	Ambient air density $[kg/m^3]$
c_p	Ambient air specific heat $[kJ/kg \cdot K]$
T_∞	Ambient air temperature $[K]$
g	Gravitational acceleration $[m/s^2]$
t	Time $[s]$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on Effect of Heat of Reaction and Charring on Heat Release Rate Produced from Burning Douglas-fir wood

Lee, Myung-Kyu
Advisor : Prof. Park Seul-Hyun, Ph.D.
Department of Mechanical Engineering,
Graduate School of Chosun University

The heat release rate (HRR) of fires can be determined from the relationship between the thermal pyrolysis rate of combustibles and the effective heat of combustion. To accurately determine the thermal pyrolysis rate of combustibles, it is important to understand the heat of reaction of combustibles. However, this parameter is difficult to measure for combustibles, such as wood, that produce charring during combustion because they undergo a multi-step pyrolysis reaction. In this study, the ISO 5660-1 standard method was used to perform cone calorimetry experiments to understand how the HRR is affected by the heat of reaction heat and charring properties of combustibles. To this end, the HRR calculated using FDS computational analysis was compared to the measured value from the ISO 5660-1 cone calorimetry experiments. A dehydrated Douglas-fir, an evergreen tree of the pine family, was used as a combustible material.

Compared to PMMA which are often used as interior materials for buildings, Douglas-fir wood was found to produce a lower rate of heat release and CO which help to lessen human damage in fire. Results obtained from FDS numerical analysis and ISO 5660-1 cone calorimetry experiments clearly demonstrates that the heat release rate varies depending on the thermal thickness and the presence of charring layer of the combustible material. Unlike PMMA specimen, which do not generate a charring layer during combustion, the charring layer developed for Douglas-fir specimen further increases the thermal thickness, reducing the amount of thermal decomposition and thus the heat release from fire. The total heat release rate calculated reached the maximm as

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

the heat of reaction input in the FDS numerical analysis was approaching the mimunm during computational analysis increased from 2400 kJ/kg to 100 kJ/kg. The cone calorimetry experiment and FDS computational analysis results confirmed that increases in the heat of reaction and charring properties were directly correlated with the decrease in the HRR.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

목재는 자연 친화적이며, 심미성이 뛰어난 재료이다. 또한, 다양한 형태로의 가공이 가능하여, 단열성과 내구성이 뛰어난 기계적 성질을 가지고 있다. 최근 국내의 신축 공동 주택의 90% 이상에 목재 및 목질 재료가 내장재로 사용되고 있으며[1], '국가 법령집의 2013년 발효된 목재의 지속가능한 이용에 관한 법률'을 기반으로 친환경 재료인 목재의 사용이 더욱 증가하고 있다[2]. 또한, 날로 심각해지는 지구 온난화에 따른 기후변화와 건강에 대해 국민들의 관심이 높이지면서 친화경 소재인 목재와 목조건축이 주목받고 있다. Figure 1.1에 도시된 국토교통부의 통계자료에 따르면 지난 20년간 국내 목조 건축물이 10배 이상 증가하는 등 최근 전통 가옥 스타일의 주택과 관련해 목재의 사용이 증가하는 추세이다.

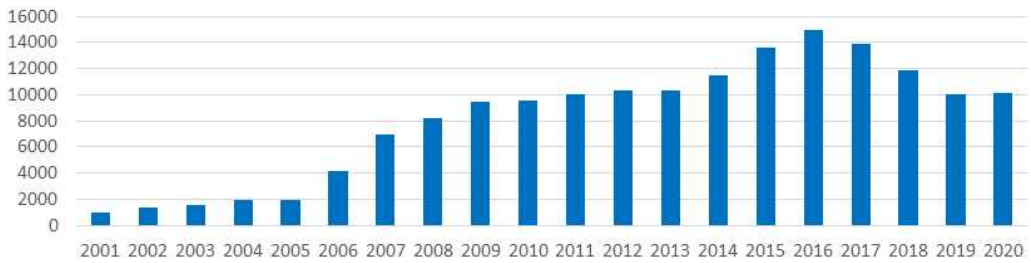


Figure 1.1 Wooden building construction statistics[3]

이렇듯 대한민국에서도 전 세계적인 기후변화 및 에너지 위기와 함께 정부의 저탄소 녹색성장 기조와 맞물려 친환경적인 목조 건축의 활성화가 어느 때보다 활발한 것을 알 수 있다. 또한, 공학목재의 개발로 고층 목조 건축 기술 경쟁이 전 세계적으로 발달하고 있는 추세이다[4].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

실제 캐나다 밴쿠버의 2017년 브리티시 컬럼비아 대학교의 학생 기숙사 '브룩 코먼스 톨우드 하우스(Brock commons tallwood house)' 프로젝트는 높이 53 m, 18층의 목조 건축물의 건설하여 목조 건축의 고층화를 알리는 신호탄이 되었고 지난 2020년도에는 노르웨이 건축그룹 모엔벨(Moelven)은 Figure 1.2와 같이 높이 85.4 m, 지상 18층 다용도 복합건물 미에스토르네(Mjøstårnet)를 착공 완료하여 세계 최고층 목조 건축으로 인정받았고 이후 모엔벨 그룹은 공학목재를 사용하여 150 m 높이의 풍력발전 타워 프로젝트를 추진하고 있다[5]. 국내에서도 2020년도부터 세계적인 고층 목조 건축물의 증가와 국내 목조 건축물 시장 확산 추세에 대응하기 위해 산림청은 '목조 건축 서비스' 자문단을 발족하였고 내년 2021년을 목표로 광명시와 광명동굴 관광지 내에 100 m 규모의 목조 구조의 타워를 만들 예정이다. 또한, 고층 목조 건축 활성화를 위한 제도적 기반도 마련되고 있다. 국토교통부는 그동안 목조 건축물의 높이를 18 m로 제한하고 있는 건축물의 구조 기준에 관한 규칙을 개정하겠다고 발표하는 등 국내에서도 고층 목조 건축물에 대한 경쟁력을 강화하고 있는 추세이다[6].

그러나 이러한 목재가 건물의 내장재 많이 적용되고, 목조 건축이 늘어날수록 우려가 되는 것은 화재에 의한 안전 문제일 것이다. Table 1.1에 정리되어 있는 소방청의 2020년 화재통계연감 자료에 의하면 건축 구조물 화재가 24,629건으로 전체 국내 화재사고의 64.5%를 차지하고 있으며, 사망자 300명(82.2%), 부상자 1,583명(82.6%), 5,328억 원(88.7%)의 재산 피해를 발생시키고 있다. 화재통계를 통해 알 수 있듯이 유형별 화재에 있어 건축 구조물 화재가 매년 가장 큰 인명, 재산 피해 규모에 상당 부분을 차지하고 있다. 이로 인해 건축 구조물의 화재 안전성에 대한 공학적 연구[7]가 활발히 진행되고 있지만 목조 건축물과 건축물의 내장재로 많이 사용되는 목재의 연소 특성과 화재 성장에 관한 기초 연구는 매우 부족한 실정이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 1.2 Mjøstårnet wooden building[5]

Table 1.1 Fire statistics from the national fire agency (2020)[8]

Type of fire	Number of fires	Deaths	Injuries	Property damage
Total	38,659	365	1,917	600,475,432
Architecture, structure(Dwelling)	10,664	201	878	65,147,390
architecture, structure (non-residential)	14,265	99	705	467,606,612
Automobile, Rail Car	4,558	34	139	33,860,796
Dangerous Articles, Gas Works	21	3	6	731,496
Ship, Aircraft	119	3	22	6,390,872
Forest Land	1,619	9	52	20,039,521
etc	7,413	16	115	6,698,745

(Unit: case, person, thousand won)

최근 건축물은 건축 공학의 기술 발전과 토지 이용의 효율성을 높이기 위해 고층화되고 있다. 고층 건물에 화재가 발생하여 성장하는 경우 부력에 의해 화염의 전파가 구조물의 상부로 급속도로 이루어지면서 화기가 건축물 위쪽으로 쉽게 번지는 연돌 효과(Stack effect)에 의해 화재의 진압이 어려운 것으로 알려져 있다. 2020년 소방청 국정감사 때 발표된 박완주 더불어민주당 의원실의 자료에 따르면 전국에 있는 100 m, 30층 이상의 고층 건물들은 4692개에 달하고 지난 3년간 1000개가 늘어났으며[9], 소방청 통계 자료에 따르면 2014년 107건이었던 고층 건축물 화재는 매년 늘어 2017년에는 145건으로 증가하였다[8].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서 최근에는 고층 건축물의 화재로 인한 인적 물적 피해를 최소화하고 해당 건축물의 화재 안정성을 공학적으로 평가하기 위해 성능위주 소방설계(Performance based fire protection design, PBD)가 수행되고 있다. 성능위주 소방설계는 발전된 최신의 방화공학 기술을 이용하여 건축 대상물의 특성에 맞게 소방시설물을 설계함으로써 소방 안전을 최적으로 실현하는 시설 설계를 의미한다[10]. 즉, 성능위주 소방설계를 바탕으로 설치된 시설물이 화재 발생 시 인명을 보호할 수 있도록 충분한 피난시간을 담보할 수 있도록 건축물의 화재 강건성을 확보 하는 공학적인 설계방식이다. 발화 시각으로부터 재실자가 안전한 장소로 탈출을 하기 위해 취하는 행동을 할 수 없을 때까지 계산된 대피 가능 시간인 허용 피난시간(Available safe egress time, ASET)과 재실자가 발화 시간에 있던 장소부터 안전한 장소로 대피하는데 걸리는 시간인 소요 피난시간(Required safe egress time, RSET)의 비교를 통해 건축물의 강건성을 유지하도록 설계한다.[11-13] 국내 성능위주 소방설계에서 화재 발생 시 인명 안전을 위해 시간에 대한 인자 (ASET과 RSET)를 평가하기 위해서 주로 사용되는 방법은 화재 시뮬레이션이며, 특히 미국 국립 표준기술원(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발한 오픈 소스인 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 주로 이용되고 있다.

화재 시뮬레이션을 통해서는 재실자가 안전한 장소로 대피하는 것을 방해하는 여러 가지 위협 인자(열, 연기, 독성가스 등)가 얼마나 빨리 악화 되는가를 결정하기 위해 (시뮬레이션) 계산 결과에서 각 위협 인자와 관련이 있는 물성치나 화화종의 시간 분포를 확인하게 된다. 성능위주 소방설계는 소방 대상물의 특성을 고려한 설계로 소방 시설의 용도, 위치, 구조, 수용인원, 가연물의 종류 및 양 등이 반영하된 사니라오를 바탕으로 화재 시뮬레이션을 수행하게 되므로 위협 인자를 정확히 계산하기 위해서는 화원의 규모 선정이 신중히 이루어져야 한다.

화재성장곡선은 가연물의 연소시 발생되는 열방출율을 시간의 함수로 표시하는 것으로 화원의 규모를 정의하는 데 유용하기 때문에 화재 시뮬레이션의 초기조건으로 많이 사용되며 설계화재 또는 설계화원이라고 한다[14]. 설계화재는 화재의 위험을 평가하는 과정이며 그 위험의 결과 및 대응법을 찾는데 중요한 요소이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

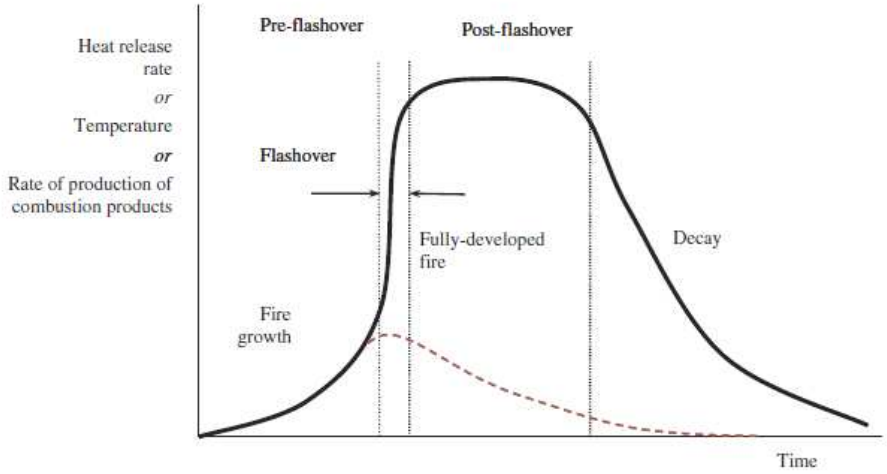


Figure 1.3 Phases of a typical fire[16]

Figure 1.3은 일반적인 화재성장 그래프이다. 그림에 제시된 바와 같이 일반적으로 화재 성장은 4단계의 과정을 거치게 되며 초기단계인 가연물의 점화를 거쳐 본격적인 성장단계로 진입하게 된다. 성장단계는 연료가 본격적인 연소과정에 돌입하여 플래시오버까지 화재가 성장하는 단계이다. 성숙 화재단계에서는 화재가 완전히 성장하여 속도가 일정한 화재의 형상을 보이고 이후 연료가 다 연소하여 화재의 크기가 줄어드는 쇠퇴단계로 나누어진다[15]. 이 과정 중 화재 성능평가에 관한 화재의 단계는 플래시오버까지의 단계이며 이때 설계화재의 결정 과정에서 가장 중요한 요소는 화재성장속도이다[16].

화재성장속도는 Figure 1.3에서 플래쉬오버 단계까지의 기울기를 결정하는 요소이고 일반적으로 t^2화재라고 불려진다[17]. 화재성장속도는 화재의 열방출율이 1 MW에 도달하는데 걸리는 소요시간으로 화재성장속도는 식(1.1)과 같이 표현 할 수 있다. 이때 Q는 최대 열방출율, t는 최대 열방출율에 도달하는 시간, α는 화재성장계수이며 설계 화재에서는 화재성장율로 정의할 수 있다.

$$Q = \alpha t^2 \tag{1.1}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

NPFA 72[18]에서는 이 시간을 초 단위로 구분하여 아래 Figure 1.4와 같이 총 4단계로 구분하고 있다. 화재의 열방출율이 1 MW(1,055 kW)에 가장 빨리 도달하는 순서를 기준으로 Ultrafast, Fast, Medium, Slow와 같이 구분되고 Table 1.2는 NFPE 72에서 정의하는 화재성장율의 단계와 화재성장 계수를 정리하였다.

Table 1.2 Values for α for different growth rates[18]

Fire growth rate	$\alpha\,(kW/s^2)$
Slow	$\alpha \leq 0.0066$
Medium	$0.0066 < \alpha \leq 0.0469$
Fast	$0.0469 < \alpha \leq 0.1876$
Ultra-fast	$\alpha > 0.1876$

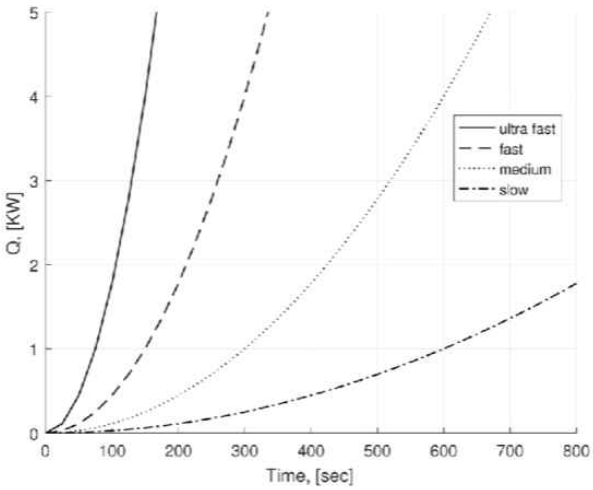


Figure 1.4 A graph of defining fire growth rate [19]

앞서 언급한 바와 같이 화재가 발생하였을 때 화재 위험성을 나타내는 가장 중요한 변수는 화재 성장단계의 열방출율이다. 열방출율이 높을수록 열에너지가 가연물 표면에 빠르게 전달되어 더 많은 가연성 기체를 생성시키고 연소되면서 더 많은 열을 발생시켜 Figure 1.3에 제시된 바와 같이 부산물로써 각종 화학종의 생성율도 급격히 증가한다. 화새 시뮬레이션을 통해 인명의 위협 인자로 계산해 내는 호흡 한계선에서의 온도, CO 가스의 농도, 탈출 시간에 영향을 미치는 가시도 등이 화재의 열방출율과 밀접한 관련이 있는 것을 고려하면 화원의 설계는 성능위주 소방설계에서 화재의 위험성을 평가하는데 핵심적인 요소라고 할 수 있다[20].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

선행연구에 따르면 국내에서 시행된 성능위주 소방설계의 대상이 되는 고층 건축물 대부분이 복합용도 건축물로 보고되고 있다[20]. 복합용도 건축물은 주거공간, 판매, 업무 등의 공간으로 이루어져 있고 이러한 공간의 화원 규모 설계에 있어 중요한 것은 공간 내의 가연물의 양과 종류이다. 업무 공간을 비롯한 주거 공간에 존재하는 다양한 형태의 가구들 대부분이 목재를 주성분으로 하고 있으며 인테리어 시 사용되는 골조 또한 목재가 많이 활용되고 있다. 또한, 목재 공학의 눈부신 발전에 힘입어 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 고층 목조 건축물의 착공이 예정되어 있어 목재와 목조 건축물에 대한 화원 설계가 매우 중요하고 특히 화재 시뮬레이션의 수행하는 엔지니어들에게 목재의 열방출율에 대한 이해도는 반드시 필요한 요소이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2 연구 목적 및 내용

화재 시나리오에서 해석 공간 내 존재하는 화원의 가연물 성분을 바탕으로 성능위주 소방설계 엔지니어가 열방출율을 결정할 수 있는 능력은 앞서 기술한 바와 같이 매우 중요하다. An 등[20]은 지난 5년간의 국내에서 시행된 성능위주 소방설계 평가 보고서를 기준으로 엔지니어에 따라 화재 시뮬레이션의 입력 인자가 갖는 편차를 분석하여 보고하였다. 이 연구 결과에 따르면 동일한 화재 시나리오임(특정 화재공간)에도 불구하고 적용된 열방출율의 편차가 약 35 %에 이르고 있음을 확인하였다. 특히, 특정 공간에 목재와 같이 열분해 진행 과정이 복잡하고 탄화가 발생하는 연료가 다수 존재하는 경우 엔지니어 본인의 주관적 판단에 의존하여 열방출율을 계산할 때 동일한 화재 시나리오에서도 총 열방출율의 계산에 큰 편차가 발생할 수 있다. 따라서 현장의 엔지니어들을 위해 열분해의 매개변수가 달라지는 경우 열방출율이 얼마나 달라질 수 있는지 예측 가능성에 대한 이해도 증진 방안과 가이드 라인 제시가 절실히 필요하다.

목재의 열방출율은 열분해에 의해 생성되는 탄화와 가연성 증기를 발생시킬 때 필요한 반응열에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Hong 등[21]은 목재 가연물의 연소 시 생성되는 탄화가 열분해에 미치는 영향을 콘칼로리미터 실험과 FDS 전산 해석을 통해 목재의 탄화층이 가연물에 열 장벽을 형성해 내부로 열전도를 방해하여 열분해율을 감소시키는 것을 보고하였다. 특히, 목재의 탄화도는 밀도, 탄화층의 두께, 수분 함량, 산소 농도 및 열 노출과 같은 특성의 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있다. 하지만 목재의 부위나 종류, 주위 환경 특성에 대해 달라지는 탄화도에 대해 실험의 결과와 의견들이 연구자들마다 상이하다. 일례로 밀도가 증가함에 따라 탄화도가 감소한다는 것은 연구자들 대부분이 동의하였으나[22] White[23]는 밀도가 증가함에 따라 탄화도가 감소하는 것은 맞지만 활엽수 종에만 해당이 되기 때문에 밀도만으로는 설명할 수 없다고 결론지었고 Harada[24]는 중밀도 목재에만 해당된다고 발표하였다. 이러한 불일치는 결국 각 연구자 별로 목재의 종류가 서로 다르고 시험하는 환경조건이 상이하여 목재의 탄화도의 측정에 대한 표준 방법이 없기 때문이라 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Mikkola[25]는 열분해를 통해 가연성 증기를 발생시킬 때 필요한 반응열(Heat of reaction)의 증감에 따라 열방출율 크게 달라질 수 있다는 사실을 보고하였다. 구체적으로 보고된 목재의 반응열을 살펴보면 Costa와 Sandberg[26]는 100-300 kJ/kg, Tang와 Neill[27]은 613 kJ/kg, Roberts와 Clough[28]는 1680 kJ/kg, Mell 등[29]은 2259 kJ/kg Paker[30]는 2400 kJ/kg 등 문헌에서 보고된 값에 상당한 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 보고된 값들은 실험을 통해 측정이 주로 이루어졌는데 목재의 열분해 과정은 목재의 가열 속도와 총 가열 시간에 의존하는 것으로 알려져 있다[31]. 이로 인해 반응열 측정 시 그 값을 정량화하기 어렵다.

목재의 셀룰로스(Cellulose), 헤미셀룰로스(Hemi-cellulose), 리그닌(Lignin), 수분(Water) 등의 다양한 성분으로 구성되어있으며[32] Figure 1.5와 같이 충분한 반응열이 가해져 분자결합이 파괴되거나 분해되는 과정이 열분해이다. 목재는 열분해 과정에서 타르, 가연성 증기, 탄화 등의 부산물을 생성하게 된다. 이때 생성된 가연성 증기가 공기와 적절하게 혼합되어 자발 발화 온도에 도달하면 연소반응으로 이어지고 화염으로부터 가연물의 표면에 전달되는 열유속에 의해 내부 온도가 상승함으로써 열분해를 급격히 촉진시킨다[33].

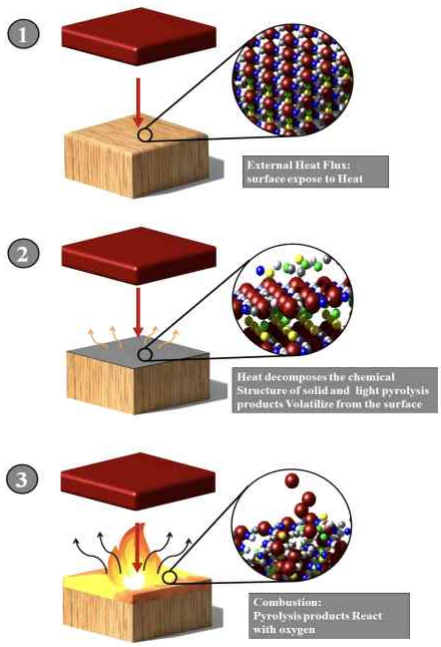


Figure 1.5 Process for thermal pyrolysis of solid combustible

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가연물의 표면에서 내부로 열전도가 지속적으로 이루어지면 가연물의 물리적인 두께와 열전도 계수(Thermal conductivity), 비열(Heat capacity)의 차이에 의해 열유속이 유입되는 표면과 반대면 사이에 온도구배가 결정되고 온도구배의 차이에 의해 열적 침투 두께(Thermal penetration depth)가 결정된다. 열적 침투 깊이가 가연물의 물리적 두께보다 크면 가연물 내부로 빠른 열평형이 이루어져 온도구배가 작은 열적으로 얇은 가연물(Thermally thin)로 분류되고 반대로 열적 침투 깊이가 가연물의 물리적 두께보다 작으면 상대적으로 온도구배가 큰 열적으로 두꺼운 가연물(Thermally thick)로 분류된다[34]. Figure 1.6은 앞서 언급된 열적 두께와 탄화의 영향이 열방출율에 의한 화재성장곡선이 어떻게 달라지는지 도식화된 그래프이다.

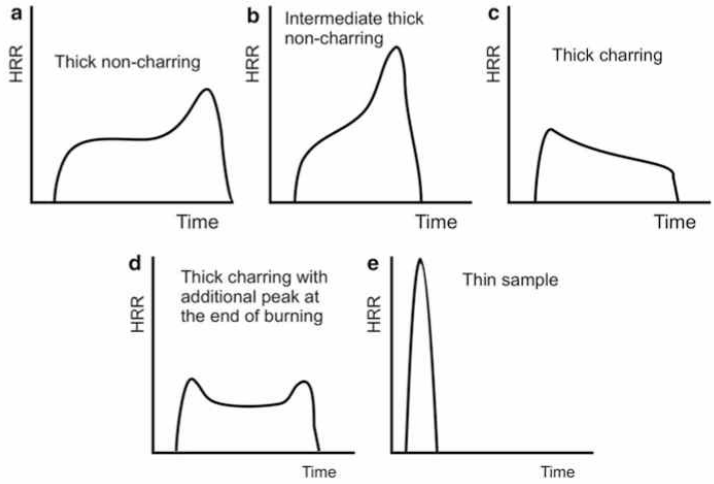


Figure 1.6 Typical HRR curves for different characteristic burning behaviours[35]

Figure 1.6 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 열적으로 두꺼운 비 탄화 가연물은 화재 초기 성장단계에서 연소과정에 돌입하여 열방출율이 급격히 증가하고 이후 성숙화재 단계에서 속도가 일정한 화재의 형상을 보인다. 반면, Figure 1.6 (b)에 제시된 바와 같이 중간 두께의 비탄화 가연물 샘플의 경우 지속해서 열방출이 증가한다. 열적으로 두꺼운 탄화 가연물(Figure 1.6 (c))은 탄화층이 형성되기 전에 열방출율이 초기 증가를 보이며 이후 탄화층이 두꺼워지면서 열방출율이 감소한다. 특히 목재와 같이 열적으로 두꺼운 탄화 가연물(Figure 1.6 (d))은 연소과정에 돌입한 직후 열방출율이 급격히 증가하고 이후 속도가 일정한 화재의 형상을 보인다. 하지만 연소반응이 지속되어 가연물의 질량이 감소하고 열분해가 일어나는 가연물의 표면과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

뒷면이 가까워져 열적 두께가 얇아지면서 열분해가 급격히 촉진되어 2번째 열방출 피크가 발생되는 것을 알 수 있다. 반면에 열적으로 얇은 가연물은 가연물 전체가 동시에 열분해되기 때문에 열방출율의 날카로운 피크로 형성된다. 그림에서 알 수 있듯이 가연물의 열방출율은 탄화도와 열적 두께와도 밀접한 상관성을 갖는 것을 알 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이 사무공간이나 주거공간과 같이 목재를 다수 포함하고 있는 공간을 대상으로 화재 시뮬레이션을 수행해야 하는 경우 신뢰할 만한 해석 결과를 얻기 위해서는 목재의 열방출율 예측이 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 이 연구는 건축물에 많이 사용되는 목재 가연물의 FDS 전산 해석을 위해 선행연구에서 측정된 상이한 열분해 속성(탄화도, 반응열)을 입력 시 FDS 전산 해석에서 열방출율을 얼마나 잘 예측하는지에 대한 데이터를 관련 분야 연구 종사자와 엔지니어에게 제공하는 것을 연구 목표로 설정하였다. 특히 목재 화재의 화원 설계에서 매우 중요한 특성인 탄화가 생성되는 가연물과 비탄화 가연물의 열분해 및 열방출율의 기초 특성을 가연물의 열적 두께와 상관지어 이해해보고자 하였다.

이를 위해 본 연구에서는 연소 시 탄화가 발생하지 않는 PMMA(Poly methyl methacrylate) 가연물과 대표적인 탄화 연소 가연물인 목재실험의 결과를 비교·분석하여 가연물의 열적 두께와 탄화에 의해 달라지는 열분해 및 열방출율의 기초 특성에 대해 알아보았다. 아울러 열방출율에 영향을 줄 수 있는 탄화도과 반응열의 변화가 열방출율에 어떠한 영향을 미치는지 전산 해석을 통해 정량적으로 살펴보았다. 실제 목재의 연소 실험을 반복 수행하여 각 변수별(반응열, 탄화도)로 열방출율의 영향을 정량적으로 분석하기 힘든 한계로 인해 미국 국립 표준기술원(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발한 오픈 소스 화재 시뮬레이션 코드인 FDS 6.7.1를 이용하여 전산 해석을 수행하였다.

또한, FDS 전산 해석의 검증을 위해 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통해 열방출율을 측정하였고, 시차주사열량법(Differntial Scanning Calorimetery, DSC), 열중량분석법(Thermogravimetric analysis, TGA), 섬광법(Light Flash Method, LFM)을 활용하여 전산 해석에 필요한 열물성 및 열분해 물성을 도출하였다. 이후 입력된 탄화도와 반응열의 변수가 열방출율에 어떠한 영향을 미치고 실험 결과와 어떠한 차이를 보이는지 비교·분석하였다. 추가적으로 전산 해석 시 격자 수에 따라 열방출율의 민감도를 분석하였고, 연구에서 사용된 목재 가연물은 건축·토목, 가구재에 널리 사용되는 소나무과에 속하는 상록수인 Douglas-fir를 선정하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 실험 장치 및 방법

2.1 ISO 5660-1 콘칼로리미터를 이용한 고체 가연물의 연소실험

콘칼로리미터는 1980년대에 미국 국립 표준기술원(National Institue of Standards and Technology, NIST)에서 주로 소규모 표본의 열방출율을 측정하기 위한 장치로 개발되었다[36-38]. 이후 안정된 열유속으로 복사 가열될 수 있는 표준화된 테스트 ISO 5660-1 규격으로 발전되었다. ISO 5660-1 콘칼로리미터는 수평 방향의 콘 히터 복사열이 균일하게 시편에 전달되어 연소 생성물의 산소 농도와 산소 소비량을 측정하여 열방출율을 결정해 화재 특성을 측정하는데 널리 사용되고 있다[39].

본 연구에서는 Douglas-fir 목재의 열방출율 전산 해석을 수행하기 위해 ISO 5660-1 콘칼로리미터를 사용하여 시뮬레이션에 필요한 주요 입력 인자를 실험을 통해 도출하였다.

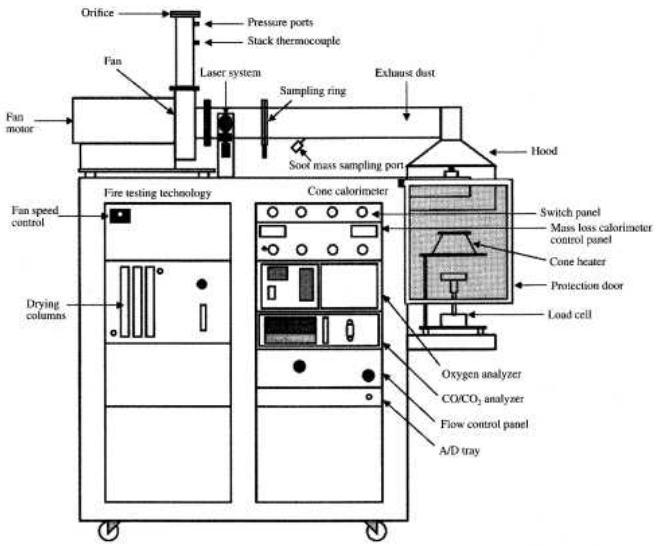


Figure 2.1 ISO 5660-1 cone calorimeter apparatus[40]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ISO 5660-1 콘칼로리미터를 이용하여 Douglas-fir의 연소 실험을 수행하기 전 가연물 시편(100 (W) X 100 (L) X 29 (T) mm)의 함수율에 의한 영향을 최소화하기 위해 ASTM D4442-92 기준[41]을 참고하여 104℃에서 건조를 우선 수행하였다. 또한, 산소 농도 측정기를 보정하고, 시편의 표면 온도는 시편을 고정하는 홀더 중앙에 열전대를 설치하여 데이터를 수집할 수 있도록 작업을 수행하였다.

실험을 수행하기 위해 콘히터의 수직 방향으로 시편 표면에 도달하는 복사 열유속을 50kW/m^2로 설정하였고, 열분해 과정에서 부풀어 올라 시편을 고정하는 홀더에서 사출되는 것을 방지하기 위해 금속 메쉬를 홀더 상단에 고정하였다. 시편과 콘 히터 사이의 간격은 25 mm이고, 적용된 환기 유량은 24 L/s 이다. 콘히터에서 시편 표면에 50kW/m^2의 복사열을 방출하여 자연 착화가 이루어지고 시험의 종료는 화염의 소멸과 시편의 질량 변화가 없는지를 관찰하여 결정하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.1.1 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통한 열방출율 및 유효 연소열 측정

가연물의 열분해 및 연소를 통해 발생하는 열량과 소모되는 산소의 양의 상관관계가 존재한다. Paker[42]는 연소 과정에서 열량과 소모되는 산소의 양의 상관관계를 보고하였고, 이러한 상관관계를 바탕으로 Hugget[43]은 고분자 물질, 유기성 액체 및 천연재료 등 대부분 가연성 물질이 연소반응을 일으켜 산소 1kg이 소모되면 5 % 이내에서 13.1×10^3 kJ의 열량이 방출된다고 보고하였다. 따라서 ISO 5660-1 콘 칼로리미터 실험 시 산소 농도와 유량을 측정하면 식 (2.1)을 통해 열방출율(Heat release rate, HRR), 식(2.2)을 통해 가연물의 단위 면적 당 열방출율 통해 계산할 수 있다[44]. 이때 $\triangle h_c$는 순 연소열, r_o는 양론적 산소/연료 질량비, C는 오리피스 유량계 교정 상수, $\triangle P$는 오리피스미터 압력차, T_e는 오리피스미터 내에서 가스 절대온도, $X_{O_2}^0$는 산소 분석기 눈금의 초기 값, X_{O_2}는 산소 분석기 눈금값, A_s는 시료의 초기 노출면적이다.

$$\dot{q}(t) = (\triangle h_c / r_o)(1.10) C \sqrt{\frac{\triangle P}{T_e}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5 X_{O_2}} \tag{2.1}$$

$$\dot{q}_A(t) = \dot{q}(t) / A_s \tag{2.2}$$

콘칼로리미터 실험에서 얻어지는 유효 연소열은 아래와 같이 질량 감소율의 변화와 열방출율의 변화의 비를 이용한 아래 식 (2.3)을 통해 계산 가능하다. 이때 $\dot{q}(t)$는 열방출율, $-\dot{m}$는 질량감소율 이다.

$$\triangle h_{c,eff} = \frac{\dot{q}(t)}{-\dot{m}} \tag{2.3}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

질량 감소율을 도출하기 위해서는 수학적 미분이 필요하고, 시험 장치 출력값으로부터 얻는 측정값에 비해 노이즈가 많으므로 유효 연소열은 평균값을 계산하는 것이 좋다. 이러한 평균을 얻기 위해서는 식(2.3)에서 비율의 평균을 계산하지 않고 분자와 분모를 개별적으로 계산해야 한다. 전체 시험시간에 대한 유효 연소열은 다음 식 (2.4)와 같이 얻어지고 이때 $\triangle t$는 샘플링 시간 간격, m_s는 유염 연소 시의 시편 질량, m_f는 시험 종료 시의 시편 질량이다. 이후 측정된 값의 노이즈는 로우 패스 필터를 이용하여 FIugre 2.2와 같이 평균값으로 유효 연소열을 구하였다.

$$\triangle h_{c,eff} = \frac{\sum \dot{q}(t) \triangle t}{m_s - m_f} \tag{2.4}$$

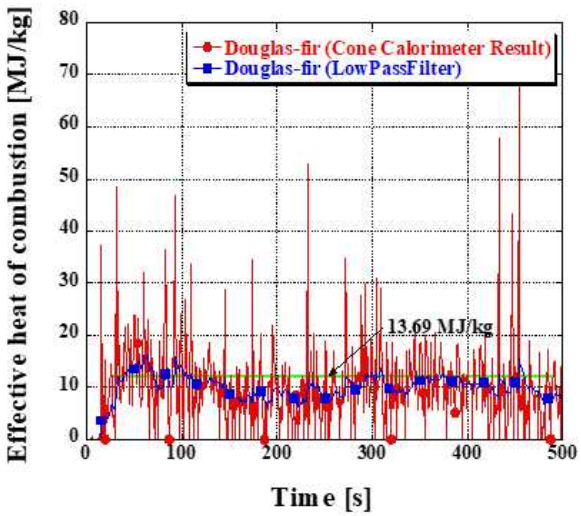


Figure 2.2 Effective heat of combustion results obtained from cone calorimeter experiments

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.1.2 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통한 Soot Yield 측정

콘칼로리미터를 이용한 연기 측정은 일반적으로 연소 생성물을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소하는 Bouguer의 법칙을 기본 원리로 한다[45]. 연소 시 생기는 연기는 콘칼로리미터 실험 장치에 장착된 광 투과율을 측정하는 배기덕트로 흡입되어 질량 소모에 따른 질량비 광소멸계수에 의해 특정 소멸 영역(SEA)를 측정한다. 아래 Figure 2.3은 본 실험에서 측정된 SEA 그래프이다.

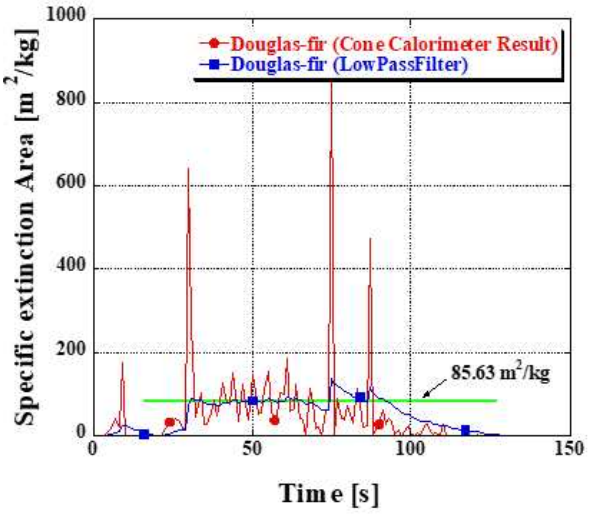


Figure 2.3 SEA results obtained from cone calorimeter experiments

측정된 SEA 값을 바탕으로 Soot Yield는 아래 식 (2.5)과 같이 계산되고, 이때 질량비 광소멸 계수 K_m은 선행연구[46]를 통해 알려진 10,300 m^2/kg을 사용하였다.

$$Y_S = \frac{SEA_{avg}}{K_m} \tag{2.5}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.1.3 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통한 CO Yield 측정

콘칼로리미터 실험 시 CO 분석기에 의해서 실시간 농도를 측정하였고, 이 데이터들은 질량의 감소에 따른 CO Yield를 주요한 데이터로 사용한다[47]. 이 데이터는 수치 미분식으로 얻어진 질량 감소율 사용하여 시간에 따른 변화율에 의미를 두지 않고 아래 그림 Figure 2.4처럼 평균값으로 산출하였고 필터를 활용하여 노이즈를 최소화하였다.

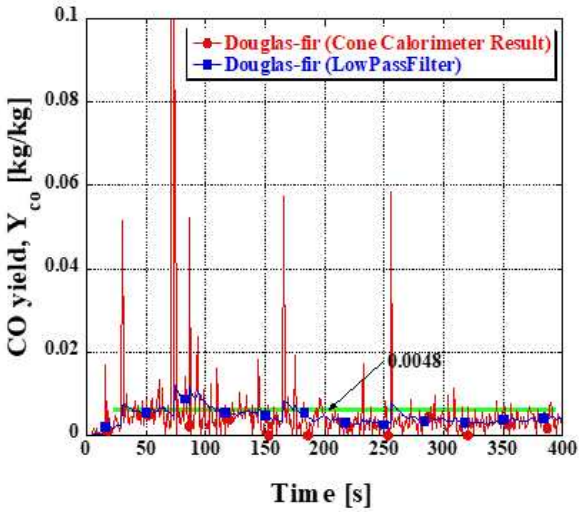


Figure 2.4 Measured CO yield from cone calorimeter experiment

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 Douglas-fir 목재의 열물성 측정 및 방법

2.2.1 비열

FDS 전산 해석을 통해 고체 가연물의 열방출율을 계산하기 위해서는 시편의 질량과 부피를 측정하여 바로 계산이 가능한 밀도 이외에도 비열과 열전도계수 등과 같은 열물성치가 필요하다. 본 연구에서는 시차주사열량법(Differntial Scanning Calorimetery, DSC)을 활용하여 Douglas-fir의 비열을 측정하였다. DSC는 측정 전에 인듐(Indium)을 사용하여 온도와 열량을 보정하였고, 질소 환경에서 20 ℃/min의 승온 속도로 사파이어 샘플의 열량과 Douglas-fir의 열량을 측정한 후 아래 식(2.6)을 이용하여 비열을 측정하였다.

$$C_p = \frac{H}{h} \times \frac{m_{reference}}{m_{sample}} \times C_{p,Reference} \tag{2.6}$$

여기서 C_p는 Douglas-fir의 비열 $C_{p,Reference}$는 사파이어의 비열, m_{sample}은 Douglas-fir의 질량, $m_{reference}$는 사파이어의 질량, H는 샘플과 빈 팬사이의 열량 차이, h는 사파이어와 빈 팬 사이의 열량 차이를 의미한다[34]. Figure 2.5은 DSC로 측정된 Douglas-fir 비열의 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 온도가 상승함에 따라 측정된 비열도 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

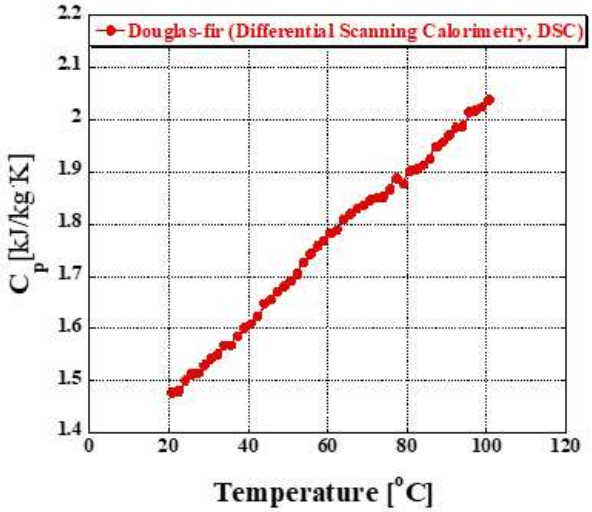


Figure 2.5 Measured specific heat as a function of temperature

2.2.2 열전도계수

고체가연물의 열방출율을 전산 해석 기법으로 계산하기 위해 필요한 주요 인자 중 하나인 열전도계수는 섬광법(Light Flash Method, LFM)을 이용하여 비접촉식으로 측정하였다. Douglas-fir의 상단면에 고출력의 제논램프의 섬광을 조사하여 흡수된 열량이 하단 면으로 전달되면 시간에 따라 온도를 측정한다. 이후 최고 온도에 도달하여 열평형 상태를 이루면 열확산율, α(Thermal Diffusivity)를 측정하였다[34]. 측정된 열확산율로부터 아래 식 (2.7)을 이용하여 열전도계수, k를 역산하였다. 이때 ρ는 Douglas-fir 샘플의 밀도이다.

$$k = \alpha C_p \rho \tag{2.7}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2.3 선인자 계수, 활성화 에너지

열방출율의 전산 해석을 위해 TGA(Thermogravimetric analysis)에서 질량 별 승온율에 따라 각 3회 이상 반복 실험을 수행하였다. 그 결과를 통해 Kissinger 방법과 Flynn & Wall 방법으로 활성화에너지 E, 선인자계수 A를 결정하였다. Kissinger 방법은 분해 거동이 1차 반응식을 따른다고 가정하고, 데이터 해석에 아래 식 (2.7)을 사용하였다[48].

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_{\max}^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E}\right) - \frac{E}{RT_{\max}} \tag{2.7}$$

여기서 $T_{\max}$는 최대 전환이 발생하는 온도 $[K]$, β는 승온속도 $[℃/\min]$, E는 활성화 에너지 $[KJ/mol]$, A는 pre-exponential 인자, R은 기체상수로 $8.314\ J/mol \cdot K$이다. X축을 $1/T_{\max}$, y축을 $\ln(\beta/T_{\max}^2)$로 각각 설정하여 그 결과를 Figure 2.6에 도시 하였고 기울기로부터 E, y 절편 값으로부터 A값을 결정하였다.

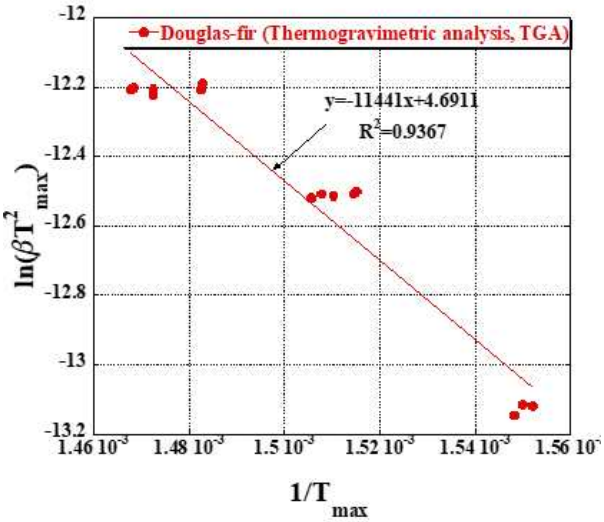


Figure 2.6 Measured $\ln(\beta/T_{\max}^2)$ plotted as a function of $1/T_{\max}$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2.4 탄화도

목재 가연물 탄화도는 콘칼로리미터 연소 실험 전의 Douglas-fir 질량 (w_1)과 연소 후의 질량 (w_2)을 측정하고 식 (2.8)을 이용하여 생성되는 탄화도를 18 %로 결정하였다[49].

$$\text{Charring ratio} = w_2/w_1 \times 100\% \tag{2.8}$$

FDS 열방출율 전산 해석을 수행하기 위해 본 연구에서 사용된 Douglas-fir의 기준 열물성 값은 앞서 기술된 바와 같이 DSC, TGA, LFM 기법 등을 통해 측정하였고 Table 2.1에 정리하였다.

Table 2.1 Summary of thermal and decomposition properties of douglas-fir & char.

Parameter	Unit	Typical Value	
Douglas-fir Thermal Properties			
Density	kg/m^3	474.78	
Thermal Conductivity, k	W/(m·℃)	Temp.	Value
		10 ℃	0.097
		27 ℃	0.100
		42 ℃	0.103
		62 ℃	0.109
Specific Heat, c_p	kJ/(kg·℃)	Temp.	Value
		25 ℃	1.501
		50 ℃	1.693
		75 ℃	1.866
		100 ℃	2.029
Effective Heat of Combustion	MJ/kg	13.69	
Specific extinction Area	m^2/kg	85.63	
CO yield, Y_{co}	kg/kg	0.0048	
Douglas-fir Decompositon Properties			
Activation Energy, E	kJ/kmol	9.51 X 10^4	
Pre-exponetial, A	1/s	1.25 X 10^6	
Char Thermal Properties			
Charring Ratio	%	18	
Density, ρ	kg/m^3	300	
Thermal Conductivity, k	W/(m·K)	0.052	
Specific Heat, c_p	kJ/(kg·K)	Temp.	Value
		27 ℃	0.71
		1724 ℃	2.04

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 FDS 전산 해석 및 방법

3.1 Douglas-fir 목재 가연물의 연소과정 FDS 전산 해석 방법

화재 모델링은 크게 다차원 현상에 대한 고려 유무에 따라 Zone 모델과 Field 모델로 분류된다. Zone 모델은 고온 상층부와 저온 하층부의 균일한 물성치의 가정을 기반으로 경계면을 지나는 열 및 질량 유속을 고려한 무차원 해석이다. 반면 Field 모델은 전산유체역학을 활용하여 3차원 공간의 화재 해석이 가능하며 Navier-Sroke 방정식을 포함한 화재현상의 지배 방정식을 고려하여 시간에 따른 화재 현상의 모델링이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 화재 모델링의 해석 소프트웨어인 FDS(Fire dynamics simulation)는 대표적인 Field 모델로써 미국 NIST에서 개발된 시뮬레이션 프로그램이다.

FDS에서 화재 시 발생되는 가연물의 열방출율을 정확히 해석하기 위해서는 단위 시간당 소모되는 연료의 질량(연료 소모율)과 가연물의 유효 연소열(Effective heat of combustion)의 입력이 필요하며 FDS에서는 열방출율 해석 시 2가지 입력 방식을 지원한다[50]. 일반적인 입력 방법은 시험을 통해 얻은 가연물의 연료 소모율을 미리 입력하는 방식으로 가연물이 점화원에 의해 표면 온도가 점화 온도에 도달하면 정해진 연료를 연소 환경과는 상관없이 소모하게 함으로써 열방출율을 계산하는 단순 모델 (Simple model)과 FDS에 탑재된 열분해 모델을 통해 연료 소모율을 직접 계산하는 방식으로 FDS로 계산된 가연물의 온도를 바탕으로 가연물의 열분해율을 조절함으로써 직·간접적으로 환기 조건과 같은 연소 환경을 반영하여 열방출율을 예측할 수 있는 열분해 모델(Pyrolysis model)이 있다[51].

단순 모델은 연소반응을 직접 고려하지 않기 때문에 해석 시간이 빠르다는 장점이 있으나 선행 실험을 통해서 고체 가연물의 열방출율이나 질량 감소율을 측정하고 데이터베이스화가 필요하다는 단점이 있다. 또한, 연소 반응을 직접 고려하지 않고 입력된 기체 생성율에 따라 연소 과정을 재현하여 연소 환경(복사 열유속, 대류 열전달의 강도, 산소 농도)에 따라 달라지는 열분해 특성을 예측하기 힘든 한계가 존재한다. 이에 반해 열분해 모델의 경우, 열방출율과 질량 감소율을 직접 계산하여 콘칼로리미터 실험이나 TGA (Thermal Gravimetric Analysis) 분석의 선행 실험 없이 연소 과정을 모사를 할 수 있지만, 해석 시간이 단순 모델에 비해 상대적으로

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

많이 소요되는 단점이 있으며 열분해 물성과 열물성치가 부정확한 경우 결과의 신뢰성을 담보할 수 없다. 두 방식의 열방출율 예측 모델 순서도는 다음 Figure 3.1과 같다.

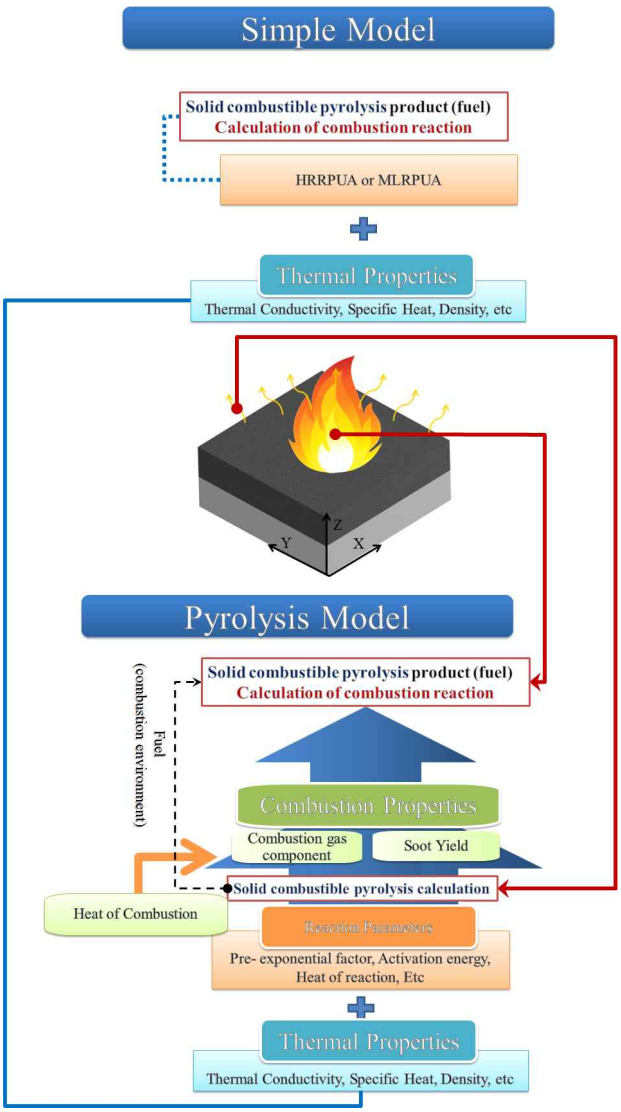


Figure 3.1 Comparisons for FDS combustion models

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Douglas-fir의 열분해 시 생성되는 가연성 증기(연료)가 공기와 반응하여 생성되는 부산물은 그룹화된 화학종을 이용하여 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다[51].

$$C_1H_{1.7}O_{0.74}N_{0.002}+1.034799(O_2+3.76N_2)\overset{yields}{\rightarrow} \\ 1(0.978093CO_2+0.849027H_2O+0.004386CO+0.019469Soot_{C0.9H0.1}+3.891843N_2) \tag{3.1}$$

열분해 과정을 통해 줄어드는 고체 가연물의 단위 면적당 질량 감소율이 가연성 증기의 생성율과 동일하다고 가정하면 단위 면적당 열방출율 (Heat Release Rate Per Area, HRRPUA), $\dot{q}''$는 단위 면적 당 가연성 증기의 생성율, $\dot{m}''$과 유효 연소열 (Effective Heat of Combustion, ΔH_e)의 상관관계를 이용하여 식 (3.2)를 통해 계산할 수 있다.

$$\dot{q}'' = \dot{m}''\Delta H_e = \Delta H_e \rho_0 \int_0^L \sum_i (1-\nu_{s,i}) A_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_0}\right)^{n_i} \exp\left(\frac{-E_i}{RT(x)}\right) dx \tag{3.2}$$

이때 식 (3.2)에서 E는 활성화에너지 (Activation Energy), A는 선인자계수 (Pre-exponential factor), $\nu_{s,i}$는 목재 가연물 탄화도, R은 기체상수, T는 샘플 표면 온도, n_i는 질량 분율을 각각 의미한다.

Douglas-fir 가연물의 내부 온도는 식 (3.4)를 이용해서 예측할 수 있고 Figure 3.2에서 볼 수 있듯이 깊이 방향(x)의 1차원 열전도 방정식을 통해 계산할 수 있다.

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}\right) + \dot{q}'''_{s,r} + \dot{q}'''_{s,c} \tag{3.4}$$

식(3.4)에서 T_s는 가연물의 온도, t는 시간, ρ_s은 가연물의 밀도, $c_{p,s}$는 가연물의 비열, k_s는 가연물의 열전도계수, $\dot{q}'''_{s,r}$와 $\dot{q}'''_{s,c}$은 생성 항을 의미하며 가연물 표면 ($x=0$)과 바닥면 ($x=M$)에 적용된 경계 조건은 각각 식 (3.5), (3.6)과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

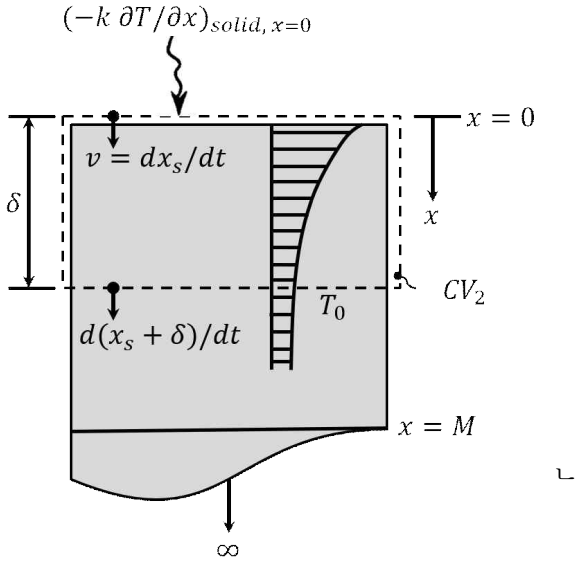


Figure 3.2 Boundary conditions for used for calculating an interior temperature distribution

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}(0,t) = \dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad} - \dot{m}''\triangle H_v \tag{3.5}$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}(M,t) = 0 \tag{3.6}$$

식 (3.6)에서 $\dot{q}''_{rad}$와 $\dot{q}''_{conv}$는 각각 가연물 표면에서 복사와 대류에 의해서 발생되는 열전달율이고, $\dot{m}''\triangle H_v$ 는 가연성 중기생성에 필요한 반응과 관련된 열전달율을 의미한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

FDS 전산 해석은 Figure 3.3과 같이 0.26(W) × 0.26(L) × 0.6(H) m 크기의 해석 공간에서 수행되었으며, Douglas-fir 시편의 하단부는 단열 처리를 하였다. 해석 공간 상단부에는 콘칼로리미터 실험과 동일하게 24 L/s의 유량을 입력하였다. 콘히터는 ISO 5660-1 규격 외경 177 mm, 내경 110 mm에 맞게 모델링하였고 콘히터와 가연물인 Douglas-fir 표면 사이의 거리는 25 mm로 설정하였다.

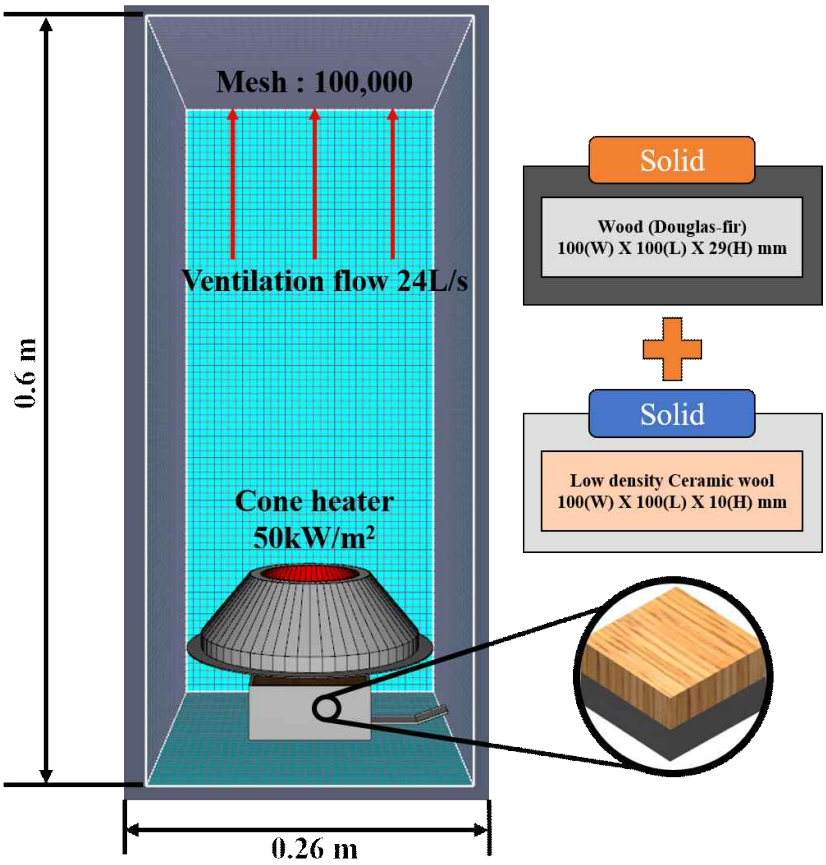


Figure 3.3 Computational domain and mesh generated for the ISO 5660-1 calorimeter experiment

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

FDS 전산 해석 시 적용될 격자 크기를 선정하기 위해 몇 가지 크기의 격자를 계산 후 적합한 격자 크기를 결정하였다. 선행연구에 따르며 본 연구에 적용된 열분해 모델은 연료와 공기의 반응속도가 무한히 빠르다는 가정하에 연료 및 공기의 특성 혼합 시간에 의해 제어되는 개념이 적용되기 때문에 격자의 크기에 영향을 많이 받는다고 알려져 있다[52]. 따라서 해석의 영향을 주지 않는 선에서 격자의 크기를 설정하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 따라서 FDS 전산 해석에 적용될 격자 크기를 선정하기 위해 식 (3.7)의 특성 화재 직경(Charateristic fire diameter, D*)을 이용하여 격자 크기를 결정하였다. 이때 식 (3.7)에서 $\dot{Q}$는 열방출율(kW), ρ_∞는 주변 공기의 밀도(kg/m^3), c_p는 주변 공기의 비열(kJ/kg·K), T_∞는 공기의 주위 온도(K) g는 중력 가속도(m/s^2)이다.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}} \tag{3.7}$$

미국 원자력 규제 위원회(Nuclear Regulatory Commission ,NRC)의 화재 모델의 검증 보고서에 따르면 계산을 통해 나온 특성 화재 직경(D*)을 해석 공간의 격자 크기(dx)로 나눈 무차원 화재 직경의 비가 4~16 사이일 경우 해석에 있어 적절하다고 보고하였다[52]. 본 연구에서는 각각 0.0173 m, 0.0144 m, 0.0093 m, 0.0074 m, 0.0058 m, 0.005 m의 격자 크기를 설정하였고 해석에 사용될 기준 격자를 선택하기 위해 식 (3.7)을 통해 계산된 무차원 화재 직경을 Table 3.1에 도시하였다.

Table 3.1 Characteristic fire diameter and grid size ratio results

Size of mesh, dx	Charateristic fire diameter, D*	D*/dx
0.0173	0.067	3.87
0.0144		4.65
0.0093		7.20
0.0074		9.05
0.0058		11.55
0.0050		13.40

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표에서 알 수 있듯이 본 연구에서는 적용된 각 격자 중 격자 크기 0.0173 m를 제외하고 모두 해석에 적절한 무차원 화재 직경의 범위에 해당하는 것을 확인할 수 있었다. 해석 시간의 효율성을 보다 높이기 위해 실험 결과와 비교 시 합리적인 수준으로 예측하는 격자 크기를 알아보기 위해 각 격자 크기별로 FDS 전산 해석을 수행하였고 그 결과는 4장에 후술하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 실험과 전산 해석 결과 및 고찰

4.1 Douglas-fir 목재의 열분해 및 열방출율 기초 특성

앞서 기술 한 바와 같이 고체 가연물의 열적 두께의 차이와 연소과정 중 발달하는 탄화층은 화염으로부터 가연물 내부로 전달되는 열에너지에 영향을 미칠 수 있으므로 열분해율과 화재 성장에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 연소과정 중 탄화가 생성되는 가연물인 Douglas-fir 목재와 폴리머 계열의 비탄화 가연물인 PMMA(Poly methyl methacrylate)를 비교하여 열분해 및 열방출율의 기초 특성을 가연물의 열적 두께와 상관지어 분석하였고 PMMA 가연물 또한 ISO 5660-1 콘칼로리미터를 활용하여 Douglas-fir 목재와 동일한 실험 조건에서 실험을 수행하였다.

Douglas-fir 목재와 PMMA 시편의 열적 두께는 식 (4.1)에 제시된 열적 침투 깊이 δ_p를 계산함으로써 판별하였다[39].

$$\delta_p = A\sqrt{\frac{kt_{ig}}{\rho c_p}} \tag{4.1}$$

식 (4.1)에서 A는 가연물의 종류에 따라 달라지는 특성 계수로 Douglas-fir 목재의 경우 1.0[53]이고, PMMA의 경우 1.13[39]를 적용하였고, k는 열전도 계수, ρ는 밀도, c_p는 비열을 각각 의미한다. t_{ig}은 ISO 5601 콘칼리미터를 이용하여 시편의 표면에 50 kW/m^2 복사 열유속을 인가한 이후 점화가 발생될 때까지 걸린 시간을 의미한다. 식 (4.1)를 이용하여 계산된 δ_p 가 시편의 물리적 두께보다 큰 경우 열적 두께가 얇은 가연물로, 작은 경우 열적 두께가 두꺼운 가연물로 판별할 수 있다. 식 (4.1)의 계산을 위해 사용된 Douglas-fir 목재와 PMMA 시편의 열물성과 점화 시간은 Table 4.1에 정리하였다.

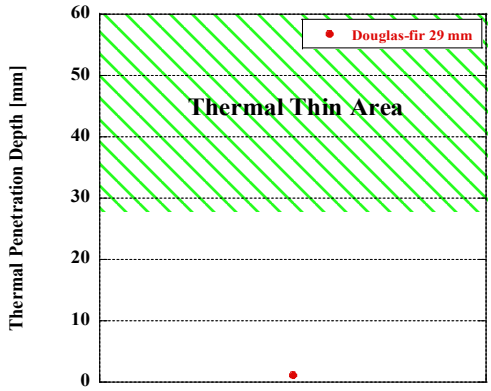
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.1 Thermal properties and ignition time of Douglas-fir and PMMA

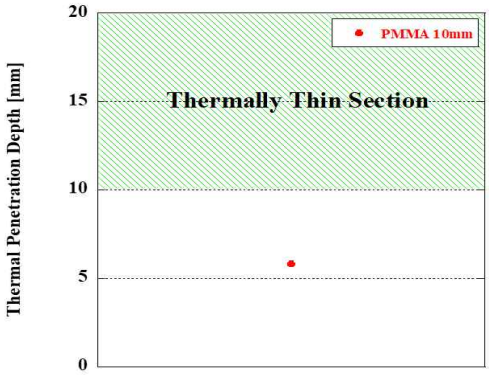
Item	Douglas-fir 29mm	PMMA 5mm	PMMA 10mm
Thermal Condutivity, k	0.109	0.336	
Ignition time , t_{ig}	12	132	126
Specific Heat, c_p	2.029	1.46	
Density, ρ	474.78	1180	

Figure 4.1 (a) ~ (c)는 식 (4.1)을 이용하여 계산한 Douglas-fir 목재 시편과 PMMA 시편의 열적 두께, δ_p를 도시한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 계산된 열적 침투 깊이는 $\delta_{p,\,Douglas-fir} < \delta_{p,\,PMMA\,10mm} < \delta_{p,\,PMMA\,5mm}$ 순으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Douglas-fir 가연물은 물리적 두께 29 mm 보다 열적 침투 깊이가 작아 열적으로 두꺼운 가연물(Thermally thick) 이며, 물리적 두께 10 mm의 PMMA도 동일한 이유로 열적으로 두꺼운 가연물임을 알 수 있었다. 반면 물리적 두께 5 mm PMMA의 경우에는 열적 침투 깊이가 가연물의 물리적 두께보다 커 열적으로 얇은 가연물임을 알 수 있었다.

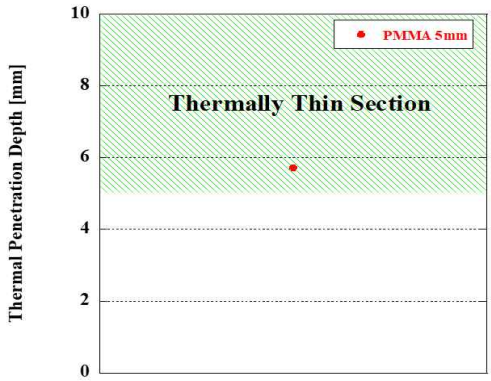
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Thermal thickness of Douglas-fir



(b) Thermal thickness of PMMA 10 mm



(c) Thermal thickness of PMMA 5 mm

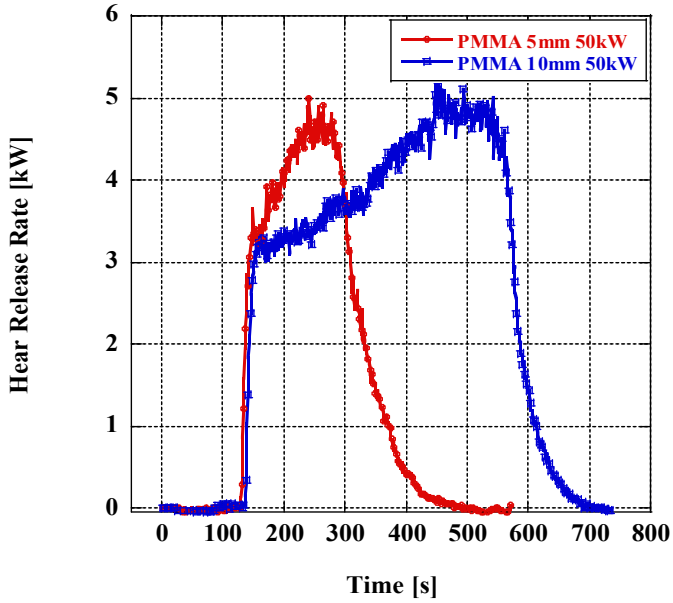
Figure 4.1 Thermal thickness evaluation for PMMA & Douglas-fir samples used in the present study.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

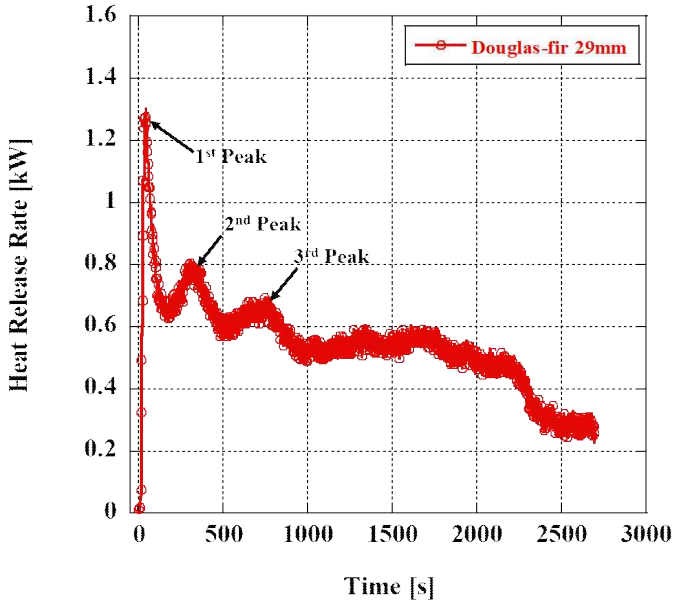
Figure 4.2 (a) ~ (b)는 PMMA 가연물과 Douglas-fir 가연물의 열방출율을 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 물리적 두께 5mm인 PMMA의 경우 콘히터의 복사열(50 kW/m^2)에 의해 약 120초 이후부터 연소되어 급격한 열방출이 이루어진다. 이후 빠른 속도로 약 250초에서 최대 열방출에 도달한 후 화염이 소멸하는 것을 알 수 있다. 이는 열적으로 얇고 탄화가 없는 가연물의 경우 가연물 전체가 동시에 열분해되며, 상대적으로 깊은 열 침투 깊이로 인해 가연물 표면 상단과 하단면까지 열에너지가 빠르게 전도되기 때문이다. 반면 물리적 두께가 10 mm인 PMMA의 경우 약 120초 이후부터 연소반응이 시작되어 화재 초기 성장단계에서 급격한 열방출이 일어나는 것은 동일하였으나 이후 500초까지 지속해서 열방출이 증가하여 최대 열방출 도달 이후 화염이 소멸하였다. 결국 열적 두께로 인해 열분해 속도가 느린 연소 반응이 지속되면서 열적으로 얇은 PMMA 5 mm 가연물보다 최대 열방출에 도달하는 시간이 약 250초 정도 지연되었다. 따라서 가연물에 열적 두께는 최대 열방출에 도달하는 시간 즉, 기울기에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

열적으로 두꺼운 탄화 가연물인 Douglas-fir의 경우 그림에서 알 수 있듯이 콘히터의 복사열(50 kW/m^2)에 의해 Douglas-fir 표면에서 열분해가 발생되고 이로 인한 가연성 증기가 자연 발화점에 도달하여 실험 시작 후 약 12초에 자연 발화되어 빠른 속도로 최대 열방출에 도달하였다. 이후 몇 번의 열방출 피크가 보이지만 열방출이 점차 감소하는 경향을 보인다. 약 2300초 이후에는 화염은 소멸하였지만, 산화 반응에 의한 훈소 연소(Smoldering combsution)가 지속되어 열방출이 이루어지는 것을 알 수 있다. 이는 열적으로 두꺼운 탄화 가연물의 경우 연소 초기에 내부로 열전달이 빠르게 진행되면서 열방출이 급속히 이루지면서 최대 열방출에 도달하지만 열적 두께와 탄화층의 형성이 순수한 목재로의 열전도를 방해하여 열방출이 급속도로 감소한다. 또한, 목재는 비탄화 가연물인 PMMA와 달리 탄화층의 산화 반응과 목재 성분의 열분해가 동시에 진행된다. 이로 인해 탄화층의 균열이나 타르의 2차 반응에 따라 열분해가 재촉진되어 n번째 열방출 피크가 발생할 수 있다[35]. 마지막으로 화염이 소멸된 이후 탄화층의 산화 반응 은 저온의 무의미한 에너지를 방출하지만 결국 훈소 연소에 의해 발화 상태로 이어진다.[54]. 결국 탄화 가연물은 비탄화 가연물과 달리 화염이 소멸되더라도 탄화층의 산화 반응에 의해 발생된 훈소 연소에 의해 낮은 발열량을 지속해서 방출하는 것을 알 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) HRR measured from the cone calorimetery experiment of PMMA



(b) HRR measured from the cone calorimetery experiment of Douglas-fir

Figure 4.2 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment of PMMA and Douglas-fir

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

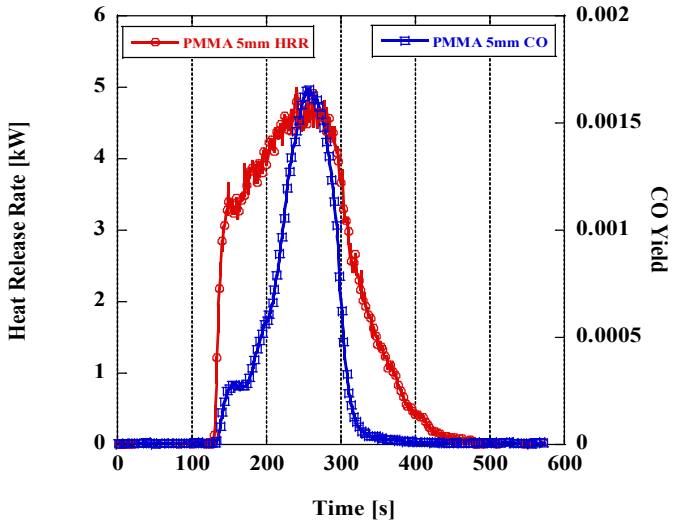
Figure 4.3 (a) ~ (c)는 PMMA 가연물과 Douglas-fir 가연물의 열방출율과 CO Yield의 시간 변화를 도시한 결과이다. 화재의 성능 평가에 있어 열방출율도 중요한 인자이지만 화재 시 발생하는 연기와 CO는 거주자나 소방 인력에게 치명적인 영향을 주는 인자로서 인적 피해를 야기하는 것으로 알려져 있다[55]. 그림에서 알 수 있듯이 PMMA와 같은 비탄화 가연물은 연소 반응 이후 화염이 생성된 유염 연소가 시작되면 열분해율(열방출율)과 함께 CO Yield도 증가한다. 이후 화염의 소멸과 함께 CO Yield도 점차 감소하는 경향을 보인다. 또한, 열적으로 얇은 가연물인 PMMA 5 mm의 경우 최대 CO Yield가 약 0.0015인 반면 열적으로 두꺼운 가연물인 PMMA 10 mm는 최대 CO Yield가 약 0.003까지 도달하여 약 2배 정도의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 열적 두께가 얇은 가연물의 경우 연소 시 상대적으로 깊은 열적 침투 깊이로 인해 가연물 전체가 비교적 빠른 시간에 열분해되기 때문에 가연물의 열분해율이 빠르게 증가하기 때문이고 반면 열적으로 두꺼운 가연물은 화재 초기 급격한 열방출이 일어나는 것은 동일하나 열적 두께로 인해 느린 속도의 열분해가 지속되어 연료의 양이 감소하여 전체 CO 발생량에서 차이가 생겼다고 판단된다. 따라서 비탄화 가연물은 열방출율의 증가에 따라 CO 발생량가 증가하는 경향을 보이지만, 열적 두께의 차이에 의해 열분해율이 달라지고 이로 인해 연료의 열분해율 감소세의 차이로 전체 CO Yield에서 차이가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

반면 탄화층이 존재하는 Douglas-fir와 같은 목재 가연물은 비탄화 가연물인 PMMA와 달리 화염이 생성된 초기의 유염 연소 구간에서는 CO의 생성이 적지만 열분해로 생성된 탄화층에 의해 열적 두께가 더욱 두꺼워져 열방출과 화염이 줄어들때 CO 생성이 늘어나는 경향을 보인다. 특히 약 2300초 이후부터는 훈소 연소가 시작되면서 CO의 생성이 급격히 증가하였다. 선행연구[56]에 따르면 훈소 연소에서는 연료의 질량 감소율은 낮아지며 CO의 생성이 크게 증가된다고 알려져 있다. 일반적으로 CO Yield는 시간 평균된 CO의 질량 유량과 연료의 질량 감소율의 비로 표현됨을 고려할 때 훈소에서의 CO Yield는 연소 초기 유염 연소에 비해 매우 높은 값을 보인다. 따라서 탄화 가연물은 비탄화 가연물과 달리 연료량이 감소함에도 불구하고 탄화층의 산화 반응에 의해 발생된 훈소 연소로 CO가 증가함을 알 수 있다.

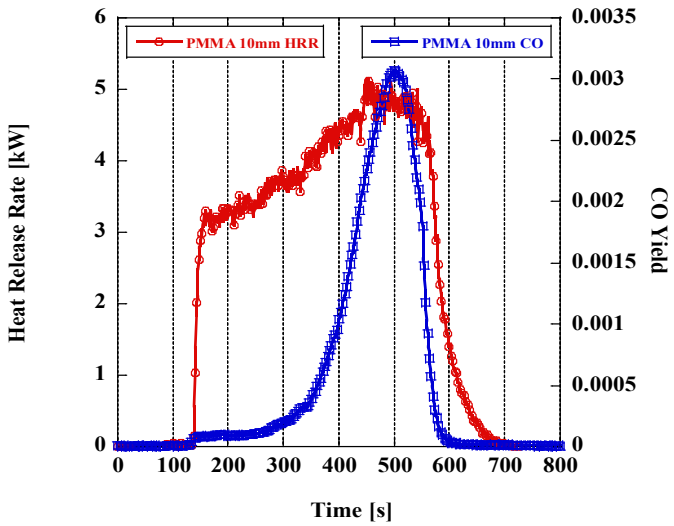
훈소 연소에서는 화염이 있는 유염 연소보다는 산화 반응의 속도가 상대적으로 낮기 때문에 상대적으로 낮은 산소 농도에서도 산화반응이 지속 가능하다. 이로 인

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

해 불완전 연소 반응의 개연성이 증가하면서 CO의 생성도 증가할 수 있다. 따라서 목재와 같이 연소과정에서 탄화가 발생하는 가연물의 경우 유염과 훈소 연소 영역을 구분할 때 CO yield를 기준으로 구분하는 방법은 합리적인 접근법[56]이라고 판단된다.

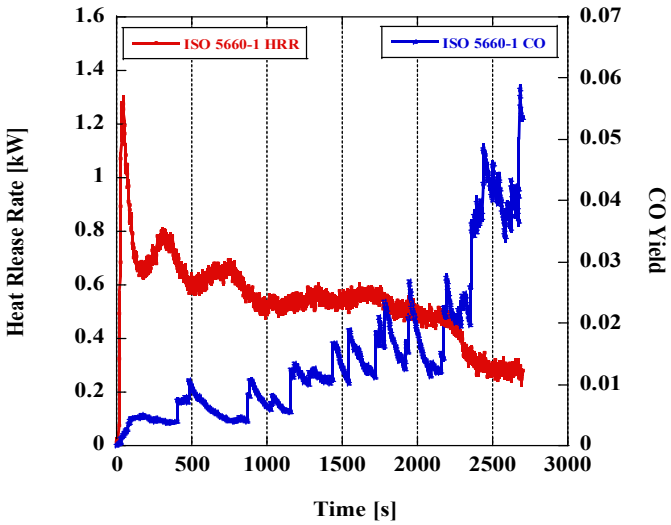


(a) HRR & CO Yield measured from the cone calorimetery experiment of PMMA 5 mm



(b) HRR & CO Yield measured from the cone calorimetery experiment of PMMA 10 mm

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) HRR & CO Yield measured from the cone calorimetery experiment of Dougals-fir

Figure 4.3 Comparisons of the HRR & CO Yield measured from the cone calorimetery experiment of PMMA & Dougals-fir

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.2 Douglas-fir 목재의 반응열이 열방출율 특성에 미치는 영향

Figure 4.4는 3.1절에서 계산된 각 격자 크기별로 Table 2.1의 물성치를 입력하여 FDS를 통해 계산된 Douglas-fir 가연물의 열방출율을 시간의 함수로 도시한 결과이다. 콘 히터로부터 전달된 복사열에 의해 Douglas-fir의 열분해가 촉진되어 자연점화가 일어난 직후 연소 반응과 함께 급격한 열방출이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 그림에서 관찰할 수 있듯이 해석 공간 내 격자 크기가 비교적 작은 0.0173 m, 0.0144 m, 0.0093 m의 경우 계산된 열방출율이 0.0074 m인 경우에 비해 과소 예측되었고 격자 크기가 0.0074 m 이상으로 증가하면 계산된 열방출율이 거의 동일하게 합리적인 수준으로 예측하는 것을 알 수 있다.

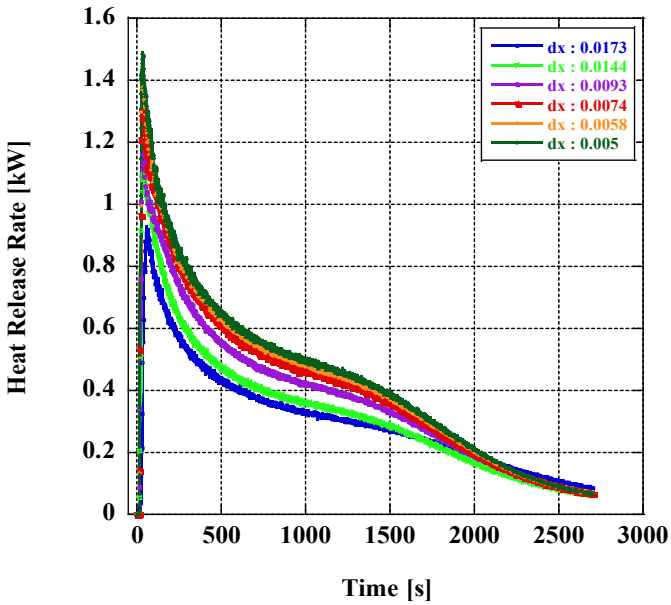


Figure 4.4 Calculated heat release rate of Douglas-fir specimen as a function of time with the different number of dx

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 4.5는 Figure 4.4의 FDS 전산 해석의 결과를 토대로 제시된 결과로부터 2700초까지 방출된 열량을 누적시켜 계산한 총 열방출(Total heat release, THR)을 도시한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 비교적 격자 크기가 작은 0.0173 m, 0.0144 m, 0.0093 m의 경우 격자 크기에 따라 계산된 총 열방출의 변화가 매우 큰 것을 알 수 있다. 반면 격자 크기 0.0074 m, 0.0058 m, 0.005 m의 경우 계산된 총 열방출의 변화가 비교적 작은 것을 알 수 있다. 그러나 변화가 적은 구간의 격자 크기 별로 해석 시간이 각각 7일, 17일, 37일이 소요되어 해석 시간에 큰 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 해석 시간의 효율을 극대화하기 위해 이후 모든 계산에서는 격자 크기 0.0074 m인 균일 격자계를 사용하였고 이 경우 총 격자수는 100,000개이다.

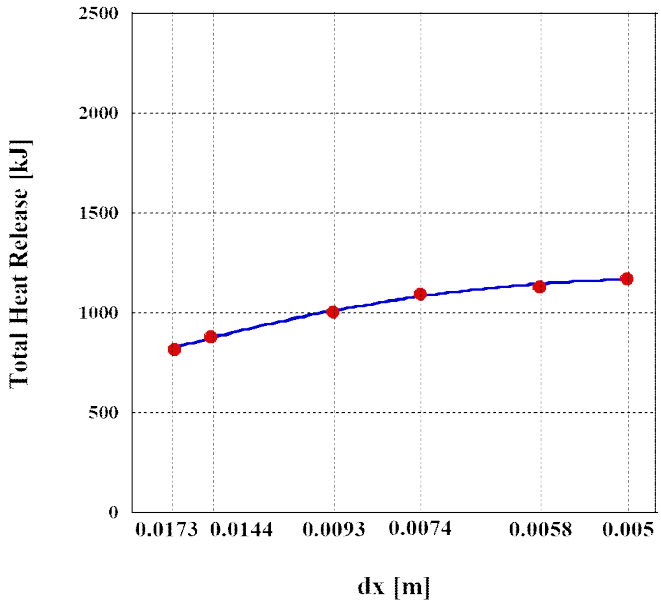


Figure 4.5 Calculated THR of Douglas-fir specimen as a function of time with the different number of dx

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 4.7은 해석 공간 내 격자 크기 0.0074 m인 균일 격자계를 적용하고 Table 2.1에 제시된 Douglas-fir의 물성치를 기준으로 전산 해석을 수행한 결과와 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험의 결과를 비교한 그래프이다. 앞서 기술한 바와 같이 목재 가연물의 연소 현상은 크게 유염 연소(Flaming, Thermal penetration), 훈소 연소(Smoldering Combustion)로 분류할 수 있고 아울러 목재가 연소 시 발생하는 열분해 과정을 크게 4가지의 온도 영역으로 구분지어 설명할 수 있다. Browne[57], Jönsson과 Pettersson[58], Carling[59], White와 Dietenberger[60], Buchanan[61], Mikkola[25] 및 Parker[62]는 이 영역에 대해 Figure 4.6과 같이 분류하였다.

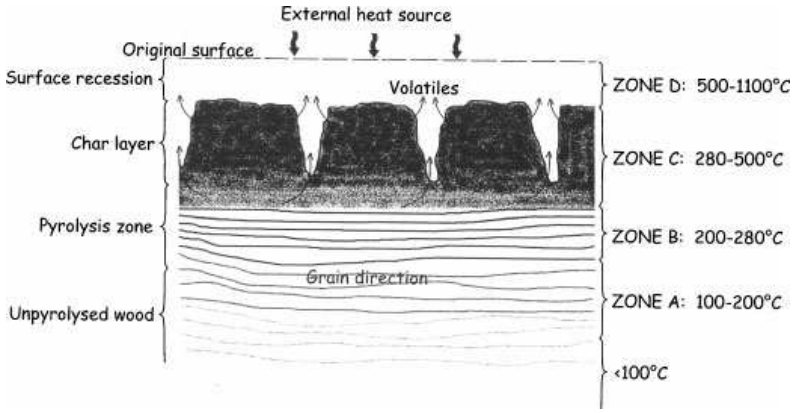


Figure 4.6 Temperature zones in a solid wood cross-section exposed to fire[22]

목재를 가열 시 온도가 100℃(구역 A)를 넘으면 화학적으로 결합되지 않은 수분이 표면에서 탈수된다. 또한, 목재의 주성분인 셀룰로스 및 헤미세룰로스의 분해 속도가 증가하기 시작하여 가연성 증기가 휘발되고 느린 속도로 열분해가 시작된다[59]. 온도가 200℃(구역 B) 이상이 되면 열분해 과정이 빨라지게 되면서 열분해층이 형성이 되며, 질량감소가 이루어지면서 탄소층이 검게 변하면서 가연성 증기가 발생한다. 온도가 300℃(구역 C) 이상의 온도에서는 물리적 구조가 무너지기 시작하여 빠르게 탄화가 진행되어 목재의 밀도가 감소하게 된다. 또한, 결 방향에 수직인 균열이 표면에 나타나며 가연성 증기의 생성이 매우 높아지며[35], 더 빠른 열분해에 의해 인화성이 증가한다. 450℃와 500℃(구역 D) 이상의 온도에서는 휘발성 물질의 생성이 완료되지만, 탄화층에서 계속 연기를 산화되어 CO_2, CO 및 H_2O를 형성하고 추가적인 질량 손실을 발생시킨다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

FDS 해석 시 콘히터의 열유속에 의해 연소 반응이 시작되어 급격한 열방출과 함께 최대 열방출에 도달한 후 생성된 탄화층에 의해 깊이 방향으로의 열전달이 줄어들어 그 결과 열분해를 통한 가연성 증기의 생성 및 열방출율이 감소되는 것을 알 수 있었다. FDS 전산 해석 결과와 콘칼로미터 실험과 비교 시 첫 번째 열방출 피크에 도달하는 유염 연소 구간은 비교적 잘 일치하였다. 하지만 목재의 연소에 의해 탄화층의 생성이 시작되면 Figure 4.6과 같이 목재의 결 방향(Grain orientation)에 수직으로 작은 균열이 나타나는데 이 균열 사이로 고인화성 타르가 포함된 가연성 증기가 쉽게 빠져나와 더 빠른 열분해를 일으켜 발화성이 증가하여 n차 열방출율 피크가 일어날 수 있으나 FDS 전산해석에는 이를 예측하지 못하였다. 또한, 약 2300초 이후에는 실험에서는 산화에 의해 훈소 연소로 돌입한다. 이 훈소 연소에서 낮은 발열량을 유지하면서 열분해가 이루어지지만 전산 해석에서는 훈소 영역에서 낮은 발열량과 Figure 4.8에 도시된 것처럼 전산 해석 시 입력한 식 (3.1)을 정량적으로 계산하여 훈소 연소 이전에 CO의 상승 구간 까지는 비교적 잘 일치하였으나 훈소 연소에 의한 CO의 급격한 증가를 예측하지 못하는 한계가 보인다. 이는 본 연구에서 적용된 FDS 해석 모델 특성상 앞서 언급한 탄화에 의한 자연적인 현상에 대해 수치적으로 모사하지 못하기 때문이라 판단된다. 그럼에도 불구하고 전체적인 반응이나 탄화에 의한 n차 열방출율 피크, 훈소 영역을 빼면 화재 성능평가에 관한 화재 성장단계까지는 FDS 전산 해석 결과와 실험값이 유사함을 알 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

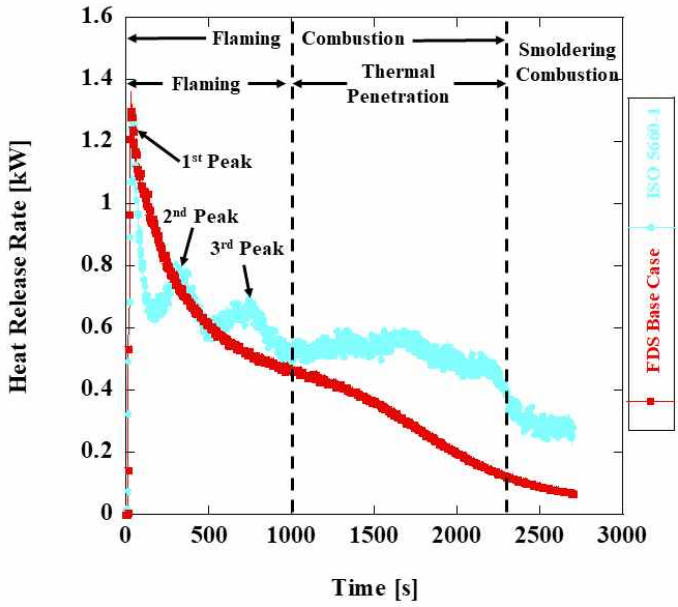


Figure 4.7 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with base case

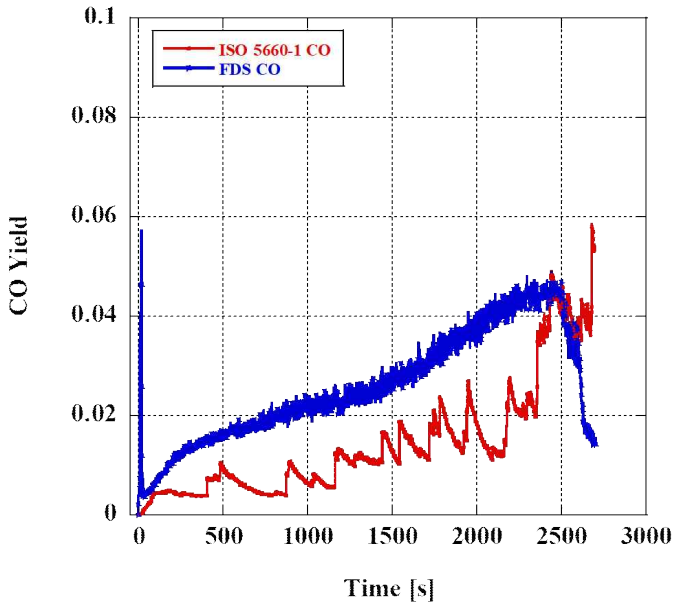


Figure 4.8 Comparisons of the CO yield measured from the cone calorimetery experiment and calculated with base case

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 4.9는 Table 2.1에 제시된 물성치와 목재의 반응열로 보고된 100, 300, 613, 1680, 2259, 2400 kJ/kg[26-30]를 각각 입력하여 계산된 열방출율과 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험의 열방출율을 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 콘칼로리미터 연소실험에 측정된 열방출율과 FDS 전산 해석을 통해 계산된 열방출율 모두 연소반응 직후 급격한 열방출과 함께 최대 열방출율에 도달한다. 이후 열적 두께와 생성된 탄화층이 순수한 목재로의 열전달을 방해하여 열방출이 감소하는 경향을 보인다. 최대 열방출율은 FDS 전산해석 시 입력된 반응열이 100 kJ/kg에서 2400 kJ/kg까지 크게 증감함에 따라 최대 열방출율이 1.36 kW에서 각각 1.23, 1.11, 0.87, 0.77, 0.74 kW로 감소하였다. 즉, 가연성 증기 생성에 필요한 에너지가 클수록 목재의 연소 시 발생하는 열방출율이 감소하는 것을 알 수 있다. 아울러 FDS 전산 해석과 콘칼로미터 실험에서 측정은 화재 초기의 성장단계는 비교적 잘 일치하였으나 탄화와 열적 두께로 열방출율이 감소한 이후부터는 탄화층의 균열이나 타르의 2차 반응에 따라 열분해가 촉진되어 발생된 n차 열방출율 피크와 콘칼로리미터 실험에서의 1000초부터 2000초까지의 낮은 발열량과 2300초 이후부터의 훈소 반응(Smoldering reaction)을 예측하지 못하는 것을 알 수 있다. 이는 FDS 전산 해석에 적용된 열분해 모델의 경우 탄화도를 정량적으로만 고려할 뿐 훈소 반응을 고려하지 못하기 때문이라 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

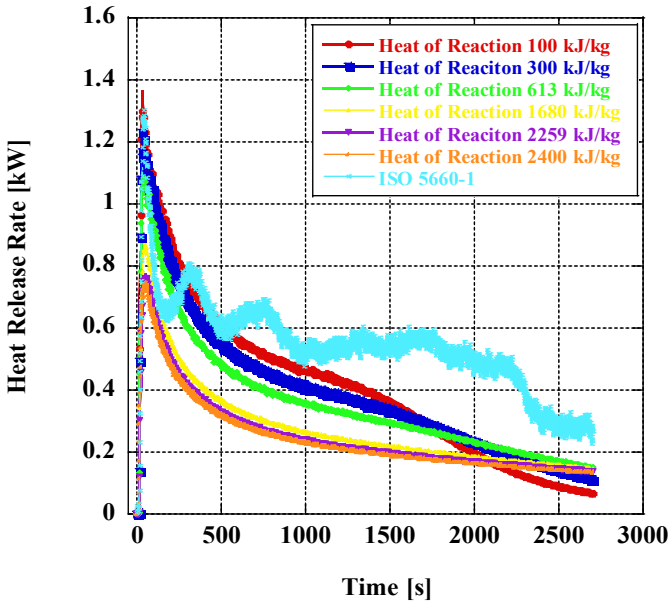


Figure 4.9 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different heat of reactions

목재의 열분해 과정은 Figure 4.10에 도식화를 통해 정리되어 있는 바와 같이 흡열과 발열 반응으로 구성된 탄화-타르 다단계 반응으로 열출입이 복잡하고 계절, 장소, 기후, 가공 및 건조상태에 따라 각기 다른 수분 함량으로 인해 반응열을 정량화하기 힘든 것으로 알려져 있다. 또한, 목재의 수분 함량뿐만 아니라 분해 반응 시 주위의 온도나 목재 결의 방향(Grain orientation) 등도 탄화도에 영향을 주어 이로 인한 반응열이 영향을 받을 수 있는 것으로 보고된 바 있다[63]. 따라서 목재와 같이 측정을 통해 반응열을 정령화하는데 한계가 있는 가연물의 경우 선행연구를 통해 알려진 반응열 중 하나를 인용하여 FDS 전산 해석 결과에서 알 수 있듯이 적절한 값을 차용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

$$\text{wood} \xrightarrow{\text{heat}} \text{char} + \text{tar} + \text{gas}$$

$$\text{tar} \xrightarrow{\text{char}} \text{char} + \text{gas} + \text{heat}$$

Figure 4.10 Schematics of biomass pyrolysis process[63]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 4.11은 Figure 4.9에 제시된 결과로부터 2700초까지 방출된 열량을 누적시켜 계산한 총 열방출(Total heat release, THR)을 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 FDS 전산 해석 시 선행연구[26-30]에서 제시한 반응열 값을 입력하여 계산한 총열방출은 크게 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

콘칼로리미터 실험에서 계산된 총 열방출율이 1455 kJ로 가장 크고 전산 해석 시 입력된 반응열이 100 kJ/kg에서 2400 kJ/kg 로 증가함에 따라 총 열방출율은 1100 kJ에서 658 kJ로 감소하였다. 비교적 낮은 반응열(100, 300 kJ/kg)을 입력 시 실험결과와 비교적 일치하였으나 앞서 언급된 n차 열방출율 피크와 훈소에서의 낮은 발열량을 예측하지 못하는 한계로 인해 콘칼로리미터 실험에서 측정된 총 열방출율과 100 kJ/kg을 반응열을 입력 시 총 열방출율이 355 kJ의 차이가 발생하였다. 결과적으로 콘칼로리미터 실험값과 비교 시 훈소에 의한 열분해 과정을 무시할 수 있다면 Costa와 Sandberg[26]의 100 kJ/kg을 반응열로 적용하여 계산한 경우 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

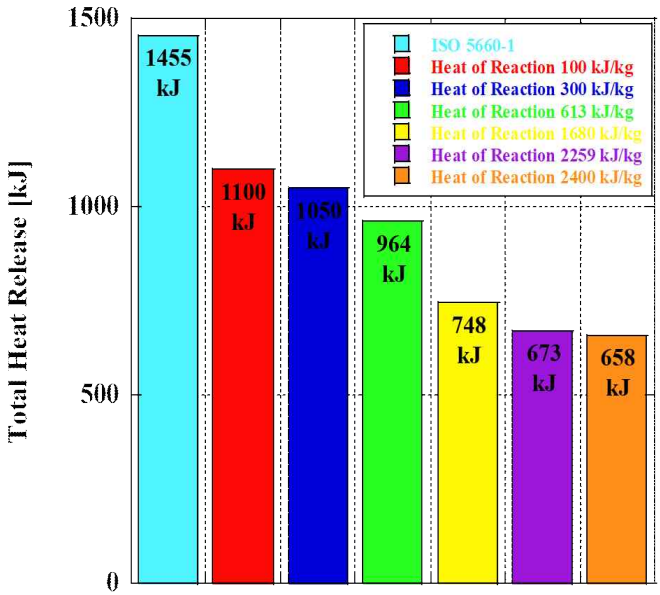


Figure 4.11 Comparisons of the THR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different heat of reactions

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3 Douglas-fir 목재의 탄화도가 열방출율 특성에 미치는 영향

앞서 기술한 바와 같이 목재 가연물 화재의 중요 변수인 탄화도는 반응열과 열분해율에 영향을 미칠 수 있고 열방출율에도 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FDS 전산 해석 시 탄화의 비율을 콘칼로리미터 실험을 통해 계산된 탄화도 18 %(0.18)을 기준으로 전산 해석을 하였고 탄화도 10 %(0.1), 28 %(0.28)를 추가 해석하여 탄화도가 열방출율에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.

Figure 4.12에는 Table 2.1에 제시된 탄화도(18 %)를 입력하여 계산된 열방출율을 기준으로 탄화도 10 %(0.1), 28 %(0.28)를 추가 해석하여 계산된 열방출율을 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 반응열 (100 kJ/kg)을 입력하여 계산한 경우에도 탄화도가 증가함에 따라 열방출율은 급격하게 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

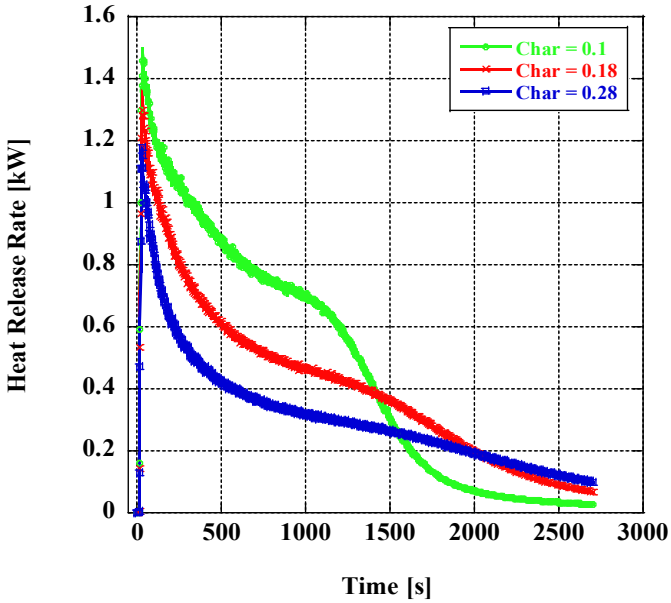


Figure 4.12 Comparisons of the HRR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different charring properties

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 4.13은 Figure 4.12에 제시된 결과로부터 2700초까지 방출된 열량을 누적시켜 계산한 총 열방출율(Total heat release, THR)을 도시한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 탄화 비율의 증감함에 따라 Douglas-fir의 총열방출이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 탄화층이 가연물 내부로의 열전달을 방해하는 열장벽을 형성하여 열분해에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 즉, 탄화도가 큰 경우(0.28) 가연물 표면의 탄화층이 열적 두께를 더욱 증가시켜 가연물 내부로의 열전도를 방해하고 열분해를 억제하여 열방출율이 낮고 이와 반대로 탄화도가 작은 경우(0.1) 탄화층에 의한 열장벽의 효과가 작아 상대적으로 가연물 표면에서 내부로의 열전도가 급격히 증가하여 열분해가 활발히 일어나 더 많은 열방출이 일어나는 것을 알 수 있었다.

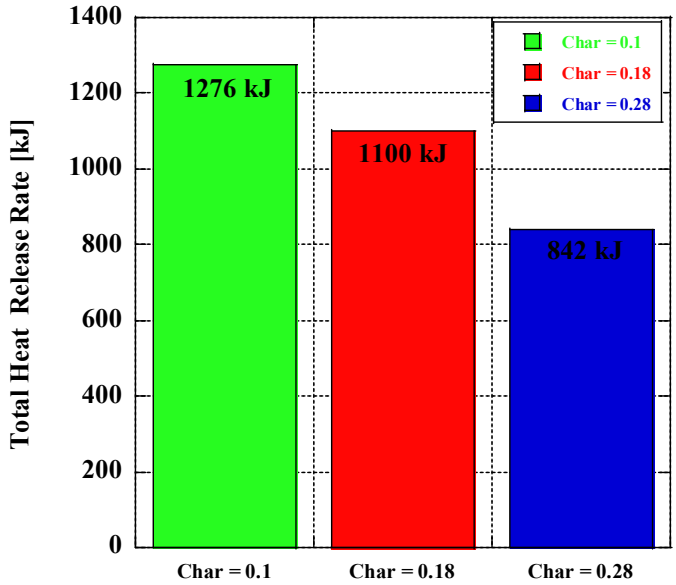


Figure 4.13 Comparisons of the THR measured from the cone calorimetery experiment and calculated with different charring properties

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결론

목질 재료를 건축물에 사용이 증가함에 따라 화재 안전 문제가 늘 제기되어 왔다. 화재 안전은 무엇보다도 열방출율과 밀접하게 관련되어 있다. 목질 재료의 연소 시 생기는 탄화와 가연성 증기 생성에 필요한 반응열은 열방출율에 영향을 미치는 걸로 알려져 있다. 본 연구에서는 측정에 대한 표준화와 그 결과의 정령화가 힘들어 문헌마다 값이 상이하다. 따라서 열분해 매개변수(탄화도, 반응열)의 변화가 열방출율에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 분석하고자 미국 국립 표준기술원(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발한 오픈 소스 화재 시뮬레이션 코드인 FDS 6.7.1(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 열분해 모델이 적용된 전산 해석을 수행하였다. 또한, 전산 해석의 검증을 위해 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험을 통해 열방출율을 측정하였고, 시차주사열량법(Differntial Scanning Calorimetery, DSC), 열중량분석법(Thermogravimetric analysis, TGA), 섬광법(Light Flash Method, LFM)을 활용하여 전산 해석에 필요한 물성치를 도출하였다. 이후 비탄화 가연물인 PMMA와 탄화 가연물인 목재 가연물을 비교하여 열분해 및 열방출율 기초 특성에 대해 분석하였고 전산 해석시 입력된 탄화도와 반응열의 변수가 열방출율에 어떠한 영향을 미치고 실험 결과와 어떠한 차이를 보이는지 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 목질 재료나 목조 건축물의 관심과 사용이 증가함에 따라 화재 안전 문제가 늘 제기되어 왔다. 특히 일반적인 목조 건축물은 화재 시 플래시오버 도달 시간 및 화재 최성기에 도달하는 시간이 일반 건축물에 비해 빠르기 때문에 목조 건축물은 화재에 매우 취약한 것으로 인식되어 있다. 그러나 건축물의 내장재로 많이 사용되는 PMMA와 같은 가연물과 목재 가연물인 Douglas-fir를 콘칼로리미터 실험, FDS 전산 해석을 통해 비교·분석하였을 때 비교적 열방출율이 더 낮고 화재의 인적 피해를 유발하는 CO의 생성은 초기 화재에서는 더 낮은 비율로 생성됨을 알 수 있었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) 가연물의 화재 성장 곡선에서 열방출율의 기울기는 가연물의 열적 두께에 따라 달라지고 열방출율의 성장과 감소는 탄화에 의해 달라지는 것을 알 수 있었다. 즉, 가연물의 열적 두께와 연소과정 중 변화하는 탄화층은 화염으로부터 가연물 내부로 전달되는 열에너지에 영향을 미쳐 열방출율에 영향을 미치는 것을 의미한다. 따라서 탄화가 생성되지 않는 PMMA 가연물과 달리 목재 가연물은 연소 시 탄화층이 생성되고 이 탄화층의 두께가 증가하면서 단열재의 역할을 해 열분해의 양을 줄일 수 있어 목재가 건축물의 구조체 혹은 내장재 측면에서 더 유리한 자재일 수 있다. 하지만 탄화로 인해 복잡한 연소 특성을 가지고 있어 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

(3) FDS 전산 해석 시 목재의 상이한 반응열의 입력에 따라 계산된 열방출율에 상당한 차이를 보였다. 연소반응 이후 급격히 증가하여 최대값에 도달한 뒤 줄어드는 목재의 열방출율을 특성을 FDS 전산 해석을 통해도 비교적 잘 예측할 수 있었다. 하지만, 탄화층의 균열이나, 타르 2차 반응으로 열분해가 촉진되어 발생되는 n차 열방출율 피크와 훈소 영역에서의 낮은 발열량을 표현하지 못하는 기술적인 한계가 있음을 확인하였다. 이를 해결하기 위해서는 열출입이 복잡한 목재의 열분해 과정을 단일 과정이 아닌 1차 반응에서 활성셀룰로스, 2차 반응에서 타르와 탄화, 3차 반응에서 타르 생성물, 탄화 생성물 및 가스로 반응하는 3단계 반응모델을 적용하는 후속 연구를 통해 해결할 수 있다고 판단된다. 아울러, 목재와 같이 연소과정에서 탄화가 발생하는 가연물의 경우 유염과 훈소 연소 영역을 구분할 때 CO yield를 기준으로 구분하는 방법은 합리적인 접근법일 될 수 있음을 확인하였다.

(4) 탄화도 0.18을 기준으로 증감하여 FDS 전산해석을 수행한 결과, 탄화도가 가장 큰 경우(0.28) 가연물의 열적 두께를 더욱 증가시켜 가연물 내부로의 열전도를 방해하고 열분해를 억제하여 열방출율이 줄어들었고, 이와 반대로 탄화도가 가장 작은 경우(0.1) 열장벽의 효과가 줄어들어 상대적으로 열방출이 늘어나는 것을 확인하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(5) 탄화층이 존재하는 목재 가연물의 FDS 전산 해석을 수행 시 열방출율 및 열분해율 결과는 탄화도와 반응열에 따라 상당한 영향을 받을 수 있으므로 적절한 값의 입력이 매우 중요하다고 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참고 문헌】

1. Y. Park, B. Jun, J. Seo and S. Kim, “The Improvement of Thermal Conductivity of wood-based Panel for Laminated Flooring Used the Exfoliated Graphite for Heating Energy Conservation”, Journal of the Society of Living Environmental System Korea, Vol. 18, No. 6, pp. 650-655 (2011).

2. H. J. Seo and D. W. Son, “Combustion Characteristics of Wood for Interior”, Journal of Architecture Institute of Korea, Conference Proceedings, Vol. 35, No. 1, pp. 411-412 (2015).

3. E. S. Lim, “Statistics on Building Permission and Commencement Works”, MOLIT 116005, Statistics System Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

4. N. J. Park, “Emphasis on the role of the Korea Forest Service in the time of transition to wooden construction”, Korea Forest Service, 05-01-2019, https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_1036&mn=NKFS_04_02_01&nttId=3131546

5. G. C. Bae, “85m wooden hotel, 18-story university dormitory stacked like Lego… Architecture is in the ‘tree revolution”, Chosun media, 09-08-2021, https://www.chosun.com/culture-life/archi-design/2021/09/08/FDEVPAE5HVFZLMIWXYGUUEITPM/

6. H. G. Yun, “The 'height limit' of old wooden buildings disappears”, Korean Wood Newspaper, 05-16-2020, https://www.woodkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=46894

7. I. H Yeo, M. O. Yoon, J. B. Yoon, “Burning Behavior of Heavy Timber Subjected to Standard Fire”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.25, No.2 pp. 123-132 (2009).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

8. Y. U. Shin, “Fire Statistical Yearbook”, NFA 11-1661000-000011-10, National Fire Agency (2020).

9. C. B. Kim, “If only there had been a 70m high ladder... Only 10 in the country”, Hankookilbo, 10-09-2020, https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2020100908450003385

10. W. K. Kim, “Concept and design procedure of performance-oriented firefighting design”, Proceedings of 2005 Summer Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 5-21 (2005).

11. K. H. Kim, S. H. Lee, H. Y. Kim, T. H. Song and B. K. Jin,“Establishment of Building Fire Safety System Improvement of Building Fire Safety Regulations”, KICT 2000-082, Korea Institute of Construction Technology, pp. 31-37 (2000).

12. H. S. Han and C. H. Hwang, “Study on the Available Safe Egress Time (ASET) Considering the Input Parameters and Model Uncertainties in Fire Simulation”, Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 3, pp. 112-120 (2019).

13. H. S. Yun and C. H. Hwang, “Analysis of Prediction Results and Grid Size Dependence According to Changes in Fire Area”, Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 9-19 (2019).

14. S. G. Lee et al., “Introduction to fire simulation”, A-Jin, KOR (2008).

15. A. H. Buchanan and A. K. Abu, “Structural design for FIRE SATETY”, John Wiley, & Sons Ltd, USA (2017)

16. D. M. Madrzykowski, “Fire Dynamics: The Science of Fire Fighting”, International Fire Service Journal of Leadership and Management, Vol. 7 (2013).

17. J. G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior", CRC Press Taylor & Francism USA (2016).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

18. W. Y. Walter and W. K. Chow, “A Monte Carlo Approachfor the Design of Thermal Fire Detection System”, NFPA Fire Technology, Vol. 41, No. 1, pp. 93-104 (2005).

19. W. D. Walton and Philip H. Thomas “Estimating Temperatures in Compartment Fires”, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Ed., Section 3, Chapter 6, NFPA, US (2002).

20. 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”, The Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 5, pp. 32-40 (2017).

21. T. K. Hong, M. H. Ryu, J. W. Lee, and S. H. Park, “Effects of Char Produced from Burning Wood Combustibles on Thermal Pyrolysis”, Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 5, pp. 7-12 (2019).

22. K. L. Friquin, “Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber”, Fire and Meterials, Vol. 35, No. 5, pp. 303-327 (2011).

23. R. H. White, “Charring rates of different wood species” Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison: Madison, WI, U.S.A, (1988)

24. T. Harada, “Charring of wood with thermal radiation II Charring rate calculated from mass loss rate”, Mokuzai Gakkaishi, Vol. 42, pp. 194-201 (1996)

25. E. Mikkola, “Charring of Wood Based Materials”, PROCEEDINGS OF THE THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM, FIRE SAFETY SCIENCE, pp. 547-556 (1991).

26. F. S. Costa and D. Sandberg, “Mathematical model of a smoldering log”, Combustion and Flame, Vol. 139, No. 3, pp. 227-238, (2004).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

27. W. K. Tang, and W. K. Neill, “Effect of flame retardants on pyrolysis and combustion of α-cellulose”, Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia, Vol. 6, No. 1, pp. 65-81, (1964).

28. A. F. Roberts, and G. Clough, “Thermal decomposition of wood in an inert atmosphere”, Ninth Symposium (International) on Combustion, Academic Press, pp. 158-167, USA (1963).

29. W. Mell, A. Maranghides, R. McDermott, and S. L. Manzello, “Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees”, Combustion and Flame, Vol. 156, No. 10, pp. 2023-2041 (2009).

30. W. J. PARKER, “Prediction of the Heat Release Rate of Douglas Fir”, Proceedings of the Second International Symposium, Fire Safety Science, pp. 337-346 (1989).

31. C. K. Lee, R. F. Chaiken, and J. M. Singer, “Charring pyrolysis of wood in fires by laser simulation”, Symposium (International) on Combustion,Vol 16, No. 1, pp. 1459-1470, (2007).

32. C. S. Ahn, “A Study of Numerical Combustion Model for Combustion Wood”, Proceedings of 2012 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 577-580 (2012).

33. C. L. Beyler and M. M. Hirschler, “Thermal Decomposition of Polymers”, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Ed., Section 1, Chapter 7, NFPA, US (2002).

34. T. K. Hong, D. P. Seo, and S. H. Park, “Experimental Study on the Effect of Flow around Solid Combustibles and Thermal Thickness on Heat Release Rate Characteristics”, Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 3, pp. 28-34 (2020).

35. B. Schartel, T. R. Hull, “Development of fire-retarded materials−Interpretation of cone calorimeter data”, Fire and Meterials, Vol. 31, No. 5, pp. 327-354 (2007).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

36. V. Babrauskas, “Development of the Cone Calorimeter−A Bench Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption”, Fire and Materials, Vol. 8, No. 2, pp. 81-95 (1984).

37. V. Babrauskas, and S. J. Grayson, “Heat Release in Fires”, E&FN Spon, London, UK (1992).

38. V. Babrauskas, “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering : Chapter 3-3 The Cone Calorimeter”, National Fire Protection Association & Society of Fire Protection Engineers, USA (2002)

39. V. Babrauskas, “Ignition Handbook: Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management and Forensic Science”, Fire Science Publishers, USA (2003)

40. E. Y. Park, and D. S. Park, "Combustion characteristics of car components using cone-calorimeter" Journal of korean society for atmospheric environment, Vol. 25, No. 3, pp. 237-247 (2009).

41. ASTM D 4442, “Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and wood-Base Materials”, American Society for Testing and Materials, USA (2003).

42. W. J. Parker, “Investigation of the Fire Environment in the ASTM E 84 Tunnel Test. Final Report”, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), (1977).

43. 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).

44. KS F ISO 5660-1. Reaction to fire test - Heat release. smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (Cone calorimeter method).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

45. 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”, Fire Science and Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 119-124 (2011).

46. W. Mulholland, and C. Croarkin. "Specific extinction coefficient of flame generated smoke." Fire and Materials, Vol. 24, No. 5, pp. 227-230 (2003).

47. B. W. Shin, D. S. Bang, K. S. Chung, and Y. H. Song, “The Analysis of Smoke Characteristics for Wood Flour-High Density Polyethylene Composites”, Journal of korean society of hazard mitigation, Vol. 12, No. 1, pp. 141-146 (2012).

48. W. I. Kim, S. D. Kim, S. B. Lee, and I. K. Hong, "Kinetic Characterizationof Thermal Degradation Process for Commercial Rubbers", J. Ind. Eng. Chem., Vol. 6, No. 5, 348-355 (2000).

49. C. Anand, B. Shotorban, S. Mahalingam, S. McAllister and R. Weise, “Physics-Based Modeling of Live Wildland FuelIgnition Experiments in the FIST Apparatus” Combustion Science and Technology, Vol. 189, No. 9, pp. 1551-1570, (2017).

50. D. G. Nam, T. K. Hong, M. H. Ryu, and S. H. Park, “Characteristics of Heat Release Rate Predictions of Fire by a Fire Dynamics Simulator for Solid Combustible Materials”, Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 4, pp. 22-28 (2020).

51. K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator User’s Guide”, NIST NSPUE2, National Institute of Standards and Technology (2013).

52. NRC and EPRI, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”, NUREG1824 and EPRI 1011999, Final Report (2007).

53. E. Mikkola and I. S. Wichman, “On the Thermal Ignition of Combustible Materials”, Fire and Materials, Vol. 14, pp. 87-96 (1989).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

54. 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).

55. B. N. Baek, C. B. Oh, C. H. Hwang, and H. S. Yun, “Evaluation of the Prediction Performance of FDS Combustion Models for the CO Concentration of Gas Fires in a Compartment”, Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 7-15 (2018).

56. S. Y. Mun, C. H. Hwang, and S. C. Kim, “CO and Soot Yields of Wood Combustibles for a Kitchen Fire Simulation,” Fire science and engineering, Vol. 33, No. 1. pp. 76-84, (2019)

57. F. L. Browne, “Theories of the combustion of wood and its control a survey of the literature” FPL Report No. 2136. Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA (1958).

58. R. Jönsson, O. Pettersson, “Timber Structures and Fire. A review of the Existing State of Knowledge and Research Requirements”, Swedish Council for Building Research, Vol. D:1985 SWE (1985).

59. O. Carling, “Fire engineering design of timber structures”, The Swedish Institute for Wood Technology Research, Vol. I:9004018 SWE (1990).

60. R. H. White, M. A. Dietenberger, “Wood products: thermal degradation and fire. Encyclopedia of Materials”, Science and Technology, Elsevier Science Ltd, Amsterdam, NLD, pp. 9712-9716. (2001).

61. A. H. Buchanan, and A. K. Abu, “Structural Design for Fire Safety”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK (2001)

62 W. J. Parker, V. Babrauskas, and S. J. Grayson, “Heat Release in Fires”, Taylor & Francis, UK (1990).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

63. S Sinha, A. Jhalani, Ravi M.R. and A. Ray, “Modeling of pyrolysis in wood: A review”, J. Solar Energy Society of India, Vol. 10, pp. 41-62, (2000).