

밀폐된 구획 내 복합소재 고체 가연물의 연소시 열방출률의 FDS 예측 특성

홍터기¹, 노범석², 박설현^{3*}

¹조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과, ²한국해양수산연구원, ³조선대학교 기계공학과

A Study on the Characteristics of FDS Heat Release Rate Predictions for Fire involving Solid Combustible Materials in a Closed Compartment

Ter-Ki Hong¹, Beom-Seok Roh², and Seul-Hyun Park^{3*}

¹Department of Mechanical System & Automotive Engineering, Graduate School of Chosun University

²Education & Operation Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

³School of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun University

요약 ISO 9705 룸코너 시험을 통해 복합소재 고체 가연물의 화재발생시 발생하는 열방출률을 측정하고 화재성장율을 계산하여 Fire Dynamics Simulator (FDS)에서 제공하는 열방출률 예측 모델을 사용자가 시험을 통해 얻어진 질량 소모율을 직접 입력하고 점화원에 의해 가연물의 표면 온도가 점화 온도에 도달하게 되면 정해진 연료를 소모하게 됨으로써 열방출률이 계산되는 단순 모델 (Simple model)과 질량 소모율을 직접 계산하는 방식으로 고체 가연물의 온도를 계산하고 고체 가연물의 열분해율을 조절하여 직접 열방출률을 계산하는 열분해 모델 (Pyrolysis model)로 구분하고 각각의 열방출률 모델에 필요한 입력 인자를 적용하여 동일한 조건에서 밀폐된 구획 환경에 따라 FDS 전산 해석을 수행하였다. 복합소재 고체 가연물로는 PU 폼과 PP, 철재로 대부분 구성되어있는 영화관 의자를 선정하였다. 동일한 조건에서 밀폐된 구획 환경에 따라 각각의 열방출률 예측 모델을 해석한 결과, 밀폐된 구획에서 단순 모델을 통해 예측된 열방출률과 화재성장율이 열분해 모델을 이용하는 경우에 비해 다소 과예측되는 것을 확인 할 수 있었다.

Abstract The heat release rate (HRR) and fire growth rate of fire for the solid combustibles consisting of multi-materials was measured through the ISO 9705 room corner test, and the computational analysis in a closed compartment was performed to simulate a fire using the heat release rate prediction model provided by a Fire Dynamics Simulator (FDS). The method of predicting the heat release rate provided by the FDS was divided into a simple model and a pyrolysis model. Each model was applied and computational analysis was performed under the same conditions. As the solid combustible consisting of multi-materials, a cinema chair composed mostly of PU foam, PP, and steel was selected. The simple model was over-predicted compared to the predicted heat release rate and fire growth rate using the pyrolysis model in a closed compartment.

Keywords : Fire Safety, Fire Protection, Disaster Prevention, Fire Suppression, Fire Science

본 연구는 한국항공우주연구원 (과제번호:171111560)의 지원과 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002092, 2020년 산업혁신인재성장지원사업)

*Corresponding Author : Seul-Hyun Park(Chosun Univ.)

email: isaac@chosun.ac.kr

Received September 21, 2020

Revised October 21, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

산업 발전으로 인한 도시의 발달과 인구 밀집도의 증가로 인해 화재 발생의 위험성은 점차 증가하고 있다. 특히, 인구 밀집도가 높아지면서 화재로 인한 인명 및 재산 피해도 더불어 증가하고 있다. Fig. 1은 지난 15년간 국내에서 발생한 화재 발생 건수와 인적·물적 피해를 정량화한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 최근 8년간 평균 42,935건의 화재가 발생하였으며, 이로 인한 인명피해는 사망 304명, 부상 1,835명, 재산피해는 397,014 백만원으로 조사되었다. 이는 그 이전 15년 평균치에 비해 화재 발생 건수는 약 1.2배, 인적·물적 재산 피해는 2.2배 증가한 수치이다. 이렇듯 화재로 인해 직접적으로 발생하는 인적·물적 피해는 국가 기간산업 시설의 마비, 각종 자료 및 정보의 손실, 기업 경제활동의 휴지, 사회적 불안감 증대를 통해 국가 경제와 산업에 큰 영향을 미칠 수 있다[1].

성능위주설계는 화재 위험성이 높은 건축물에 대하여 화재 시나리오를 설정하고 소요피난시간 (Required safe egress time, RSET)이 허용피난시간 (Available safe egress time, ASET)에 초과하지 않도록 설계하는 방법으로 피난 안전성을 예측하기 위해 화재 시 발생하는 열방출률 (Heat Release Rate, HRR)의 입력을 필요로 한다[2]. 주어진 화재 시나리오에서 열방출률의 예측은 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 통해 이루어지고 있다[3-4].

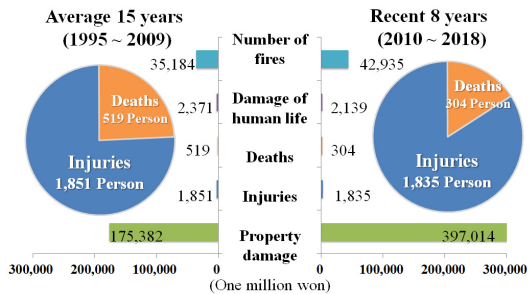


Fig. 1. Civilian deaths, injuries, and property damages caused by fires[1].

열방출률의 정확한 예측을 하기 위해서는 단위 시간당 소모되는 연료의 질량 (질량 소모율)과 연료의 유효 연소열 (Effective heat of combustion)의 입력이 필요하며 FDS에서는 Fig. 2와 같이 2가지의 입력 방식을 지원

한다[5, 6]. 일반적으로 사용되는 방법은 사용자가 시험을 통해 얻어진 질량 소모율을 직접 입력하고 점화원에 의해 가연물의 표면온도가 점화온도에 도달하게 되면 정해진 연료를 소모하게 됨으로써 열방출률이 계산되는 단순 모델 (Simple model)과 질량 소모율을 직접 계산하는 방식으로 연료의 온도를 계산하고 연료의 열분해율을 조절하여 열방출률을 계산하는 열분해 모델이 (Pyrolysis model) 있다[6]. 이렇듯 단순 모델의 경우에는 주변 연소 환경을 고려하지 않고 정해진 연료 소모율로 열방출률을 계산하기 때문에 연료 소모율을 직접 계산하는 열분해 모델에 비해 분명한 차이가 존재하게 된다. 특히 화재 시 발생하는 열방출률을 예측하기 위해 사용자가 고체 가연물 연료의 소모율을 정의하는 경우 대부분 공기가 충분한 시험조건 (Well-ventilated condition)에서 측정된 결과를 바탕으로 입력된 경우가 대부분이므로 밀폐되거나 환기 부족 (Under-ventilated condition) 화

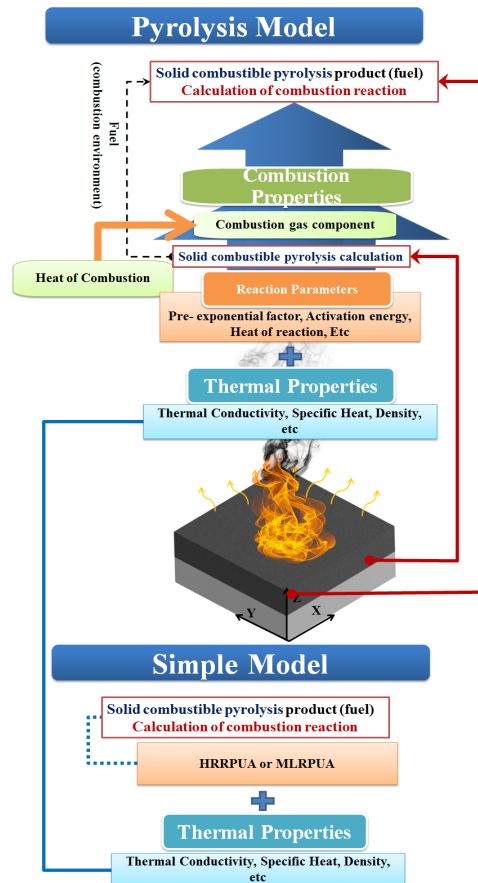


Fig. 2. Comparisons for FDS for heat release predictions models

재 시나리오에 적용되는 경우 화재의 성장이나 최대 열 방출률 관점에서 확연한 차이를 보일 수 있다[7].

이렇듯 FDS에서 지원하는 열방출률 예측 모델에 따라 환기 부족 시나리오 예측이 상이할 수 있지만, 열방출률 예측 모델 상호 간의 차이점을 고찰한 연구는 매우 제한적인 실정이다. 따라서 본 연구에서는 ISO 9705 룸 코너 시험 장치를 이용해 열방출률을 측정하고 FDS에서 제공하는 2가지 가연물의 열방출률 예측 모델을 동일한 조건에 적용하여 공기가 충분한 조건의 화재시나리오와 비교하고 환기 부족 화재 시나리오의 화재 성장 특성을 열방출률의 관점에서 고찰해 보고자 하였다. 이를 위해서 가연물로는 서로 다른 소재로 구성된 영화관 의자를 선정하였고 FDS 열방출률 모델로 계산된 결과와 비교 분석하였다.

2. 실험 및 전산 해석 방법

2.1 ISO 9705 실험 방법

ISO 9705 룸 코너 시험 장치는 2.4 m×3.6 m×2.4 m 크기로 구획 내부에서 가연물의 화염 전파[8] 및 환기 조건에 따른 가연물의 연소 특성[9]을 측정할 수 있도록 설계되어있다. 하지만 본 연구에서는 복합소재 고체 가연물인 영화관 의자의 화재 시 발생하는 열방출률을 측정하기 위해 개방된 환기 조건에서 구획 내부가 아닌 구획 외부 사각 배기 후드 하단에서 실험을 진행하였다[10].

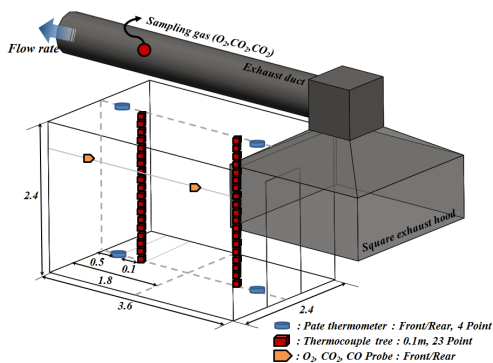


Fig. 3. ISO 9705 Room corner tester[10]

복합소재 고체 가연물로는 Fig. 4 (a)에 총 질량 약 33 kg인 영화관 의자를 사용하였다. 영화관 의자는 대부분 PU (Polyurethane) 폼과 PP (Polypropylene)로 구성되어있는 복합 고체가연물로 헵탄(C7H16) 풀(Pool)

버너 (표면적이 0.1 m × 0.1 m)를 영화관 의자 아래에 설치하고 풀버너를 점화하여 영화관 의자에 화염전파가 발생하도록 하였다 (Fig. 4 (b)). 화재 시 발생하는 열방출률은 배기 후드 덕트에서 산소농도를 측정하고 산소 1kg이 소모될 때 13.1 MJ/kg의 열량을 발생한다는 기본 원리를 가지는 산소 소모열량법[11]을 이용하여 계산하였다.

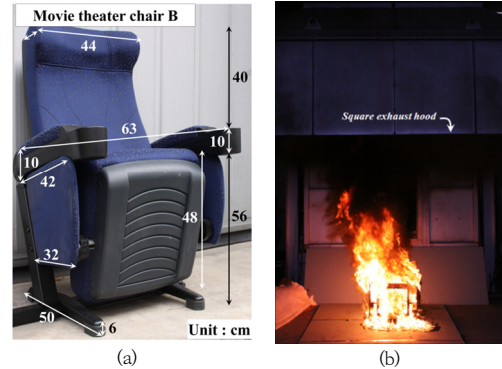


Fig. 4. ISO 9705 Room corner test of cinema chair[10] (a) Schematic of cinema chair used in this study (b) Combustion experiment of cinema chair

2.2 FDS 전산 해석 방법 및 조건

FDS 전산 해석은 Figure 3에서 제시되어있는 바와 같이 2,000 (W) × 2,000 (L) × 2,500 (H) mm 크기의 해석공간에서 ISO 9705 룸 코너 시험과 동일하게 40 kW급 헵탄 풀 버너를 점화원으로 지정하였다. 해석 공간의 격자는 특성 화재 직경[10, 12] (Characteristic fire diameter)을 이용하여 계산하였으며 FDS User's Guide[12]에서는 4~16으로 권장하고 있다. 본 연구에서는 15.6으로 열방출률 예측 모델에 동일하게 적용하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 저자의 선행 연구[10]에서 ISO 9705 룸 코너 시험을 모사하기 위한 개방된 (Open) 구획 화재 시나리오와는 반대로 밀폐된 (Closed) 구획을 모사하기 위해 각 벽면은 단열 상태로 적용하였다. 아울러 본 연구에서는 영화관 의자의 구성 소재 중, 대부분을 차지하는 PP와 PU 폼, 철재를 단순화하여 실제 질량인 32.85 kg과 근접한 32.50 kg로 모델링을 구성하여 해석을 진행하였다.

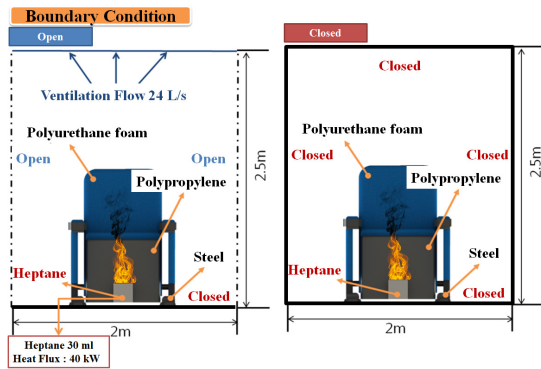


Fig. 5. Open and closed computational domain for the FDS simulation

앞서 언급한 바와 같이 FDS 전산 해석을 통해 복합소재 고체 가연물의 연소로 발생하는 열방출률을 예측하는 모델은 2가지의 입력 방식을 지원한다. 우선 열분해 모델은 가연물의 활성화 에너지 (Activation Energy), E와 선인자 계수 (Pre-exponential factor), A를 Thermal Gravimetric Analysis (TGA) 분석 혹은 마이크로 칼로리미터 등을 이용하여 획득하고 Eq. (1)과 Eq. (2)을 통해 계산하는 방법이다[12]. 즉, 복합소재 고체가연물을 구성하는 각각의 소재에 대해 획득된 A와 E를 입력하여 고체 가연물의 열분해를 통해 생성된 단위 면적 당 가연성 가스 발생 질량을 (\dot{m}'')을 계산하고 유효 연소열 (ΔH_c)의 곱으로 단위 면적당 열방출률 (\dot{q}'')을 계산한다.

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

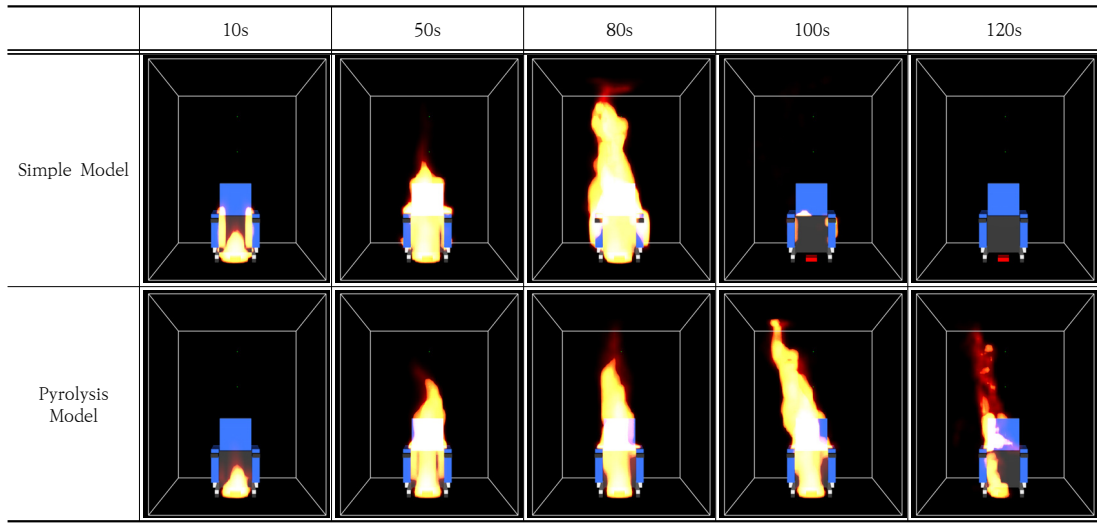
$$\dot{m}'' = \rho A_{solid} \exp\left(-\frac{E_{solid}}{RT_s}\right) \quad (2)$$

반면 다른 예측 방법인 단순 모델의 경우에는 ISO 5660 콘칼리미터 시험을 통해 측정된 고체가연물의 단위 면적당 열방출률 또는 질량감소율, 점화 온도 (Ignition Temperature), 유효 연소열을 복합소재 고체 가연물을 구성하는 각각의 소재에 대해 입력하고 가연물의 점화 온도에 도달하는 시점부터 FDS에서 정의한 화염 소멸조건[12]에 도달하는 순간까지 입력된 열방출을 지속하는 방식이다. 아울러 FDS 열방출률 전산 해석에 적용된 복합소재의 열물성치를 비롯한 열분해 물성 값은 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. Thermal and pyrolysis properties of PU foam & PP used in this study[13]

Material Thermal Properties :					
	PU foam	PP	Steel		
Thermal conductivity, k (W/m·°C)	0.03	0.22	45.8		
Specific heat, C _p (kJ/kg·°C)	1.47	1.92	0.46		
Density, ρ (kg/m ³)	17	950	7,850		
Material Decomposition Properties :					
Simple Model	Heat of combustion, ΔH _{comb} (kJ/kg)	PU foam		PP	
		20,040		28,914	
	Ignition Temperature (°C)	203.1		433.4	
		Heat Release Rate per Area (kW/m ²)	Time (s)	Value	Time (s)
	0		0	0	0
	8		2.1	77	23.6
	11		85.5	144	274.4
	15		158.6	356	490.2
	18		187.9	443	519.4
	21		164.0	500	637.3
	28		70.6	623	777.5
	40		35.8	656	940.8
	60		10.1	700	994.7
108	0		800	462.6	
		932	118.3		
		1170	0		
Pyrolysis model	PU Foam		PP		
	Activation Energy ,E (kJ/kmol)	1.49 × 10 ⁵		1.78 × 10 ⁵	
	Pre-exponential factor, A (1/s)	1.1 × 10 ¹⁰		3.04 × 10 ¹⁰	

Table 2. Sequential images of burning cinema chairs obtained from each of the FDS model analysis



3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 저자의 선행 연구[10]에서 PU 폼과 PP로 구성된 영화관 의자의 실제 ISO 9705 룸 코너 시험의 열방출률과 동일한 점화와 격자 조건을 개방된 구획에서 계산된 FDS의 단순 모델과 열분해 모델의 열방출률을 도시한 결과이다. Fig. 4 (b)에서 볼 수 있듯이 같이 ISO 9705 룸 코너 시험 중에 고체 가연물은 화재 진행 과정에서 소재의 일부가 본 가연물에서 이탈되어 바닥에 떨어지므로써 열방출률이 줄어들 수 있다. 반면 FDS 전산 해석에서는 이러한 현상을 재현할 수 없기에 실제 ISO 9705 룸 코너 시험 장치로 측정된 최대 열방출률에 비해 과다 예측하고 있지만 총 열방출 (Total Heat Release, THR)은 비교적 시험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구[10]에서 FDS의 열방출률 모델 (단순 모델, 열분해 모델)에서 얻어진 열방출률이 실제 ISO 9705 룸 코너 시험의 열방출률과 비교적 동일하다는 가정하에 FDS의 열방출률 모델에 Table 1의 각각 동일한 입력 인자를 입력하고 각 벽면을 단일 조건으로 Table 2의 밀폐된 구획 화재를 모사하였고 Fig. 7은 Table 2의 전산 모사결과를 열방출률로 도시한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 FDS 전산 해석 결과, 단순 모델이 열분해 모델에 비해 초기 화재 성장이나 다소 빠른 것을 확인할 수 있으며 최대 열방출률이 열분해 모델에 비해 과다 예측하는 것을 확인할 수 있다.

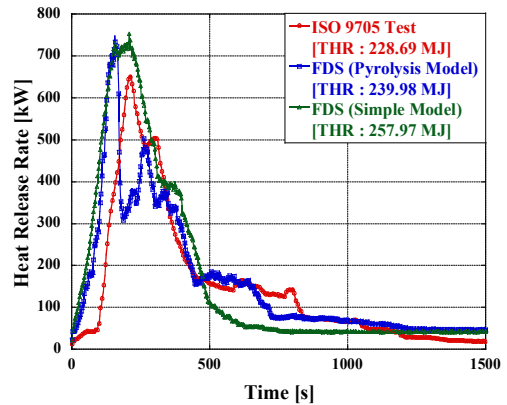


Fig. 6. Measured and calculated HRR of open compartment plotted as a function time and

뿐만 아니라 최대 열방출률 이후 구획 내부의 산소 공급이 부족하게 되어 화염의 소멸이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이때, 단순 모델의 경우에는 점화 초기 시 화염으로부터 발생된 높은 열유속에 의해 순간적으로 PU 폼과 PP 소재의 점화 온도에 도달하고 이후 정의된 열방출(연료 소모)에 의해 열방출률을 예측하며 FDS에서 정의한 화염 소멸조건[12]에 도달하게 되면 화염이 바로 소멸하는데 반에 열분해 모델의 경우에는 각 소재별 열분해 물성이 반영되고 주변의 산소 농도와 가연물의 표면 온도에 따라 열분해 속도가 조절되기 때문에 열분해율이 점차 낮아져 열방출률이 비교적 천천히 줄어드는 것으로 판단된다. 즉, 앞서 언급한 바와 같이 열분해 모델은 가연

물 주변의 영향을 고려하여 직접 열분해율에 관여하지만 단순 모델의 경우에는 정의된 열방출(연료 소모)에 따라 화재 현상을 예측하기 때문에 정밀한 화재 모사에 대한 열방출률을 정확히 예측하는데 한계가 존재한다. 뿐만 아니라 단순모델의 총 열방출이 약 23.02 MJ로 열분해 모델의 총 열방출인 18.88 MJ에 비해 약 4.2 MJ이 높은 것을 볼 수 있다. 이는 약 100 초 동안의 짧은 시간을 고려한다면 총 열방출에서도 과다 예측하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 기술한 FDS의 열분해 모델이 단순 모델의 차이를 잘 반영한 결과이다.

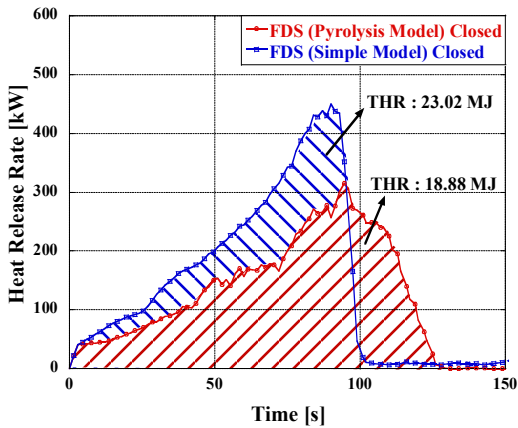


Fig. 7. Calculated HRR and THR of closed compartment plotted as a function time

Fig. 7로부터 밀폐된 구획에서의 화재 성장이 FDS 열방출률모델에 따라 상이한 것을 볼 수 있었다. 이에 따라 FDS 열방출률에 따라 정확한 화재 성장 속도를 계산하기 위해서 Fig. 8에 제시된 화재성장률로 화재 성장속도를 판별하였다. 화재 성장률은 가연물의 열방출률 곡선에서 점화 시점 (t_0)을 원점으로 하여 최대 열방출률을 연결하는 근사 곡선으로 정의할 수 있다[14]. 이때 최대 열방출률 (Q), 는 최대 열방출률에 도달 시간 (t_{peak})을 의미하고 α 는 화재성장 계수로 화재 시나리오에서 화재성장률을 정의할 수 있다. NFPA 72에서는 착화가 발생하는 시점부터 열방출률이 약 1 MW까지 성장하는 걸리는 시간 (t_g)을 이용해 화재성장률을 분류한다[15]. Table 3에는 NFPA 72에서 정의하는 각 단계별 화재성장률과 화재성장 계수를 정리하였다.

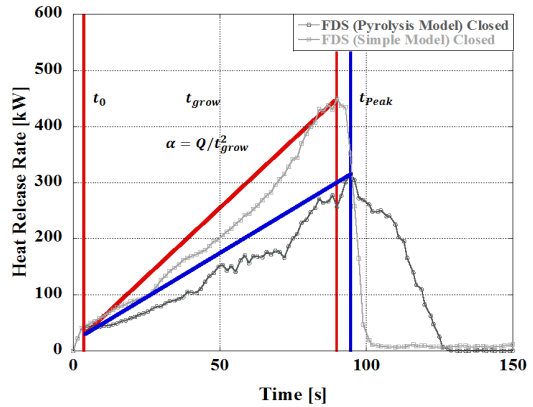


Fig. 8. Classification of Fire Growth Rates

Table 3. Values for α and t_g for different growth rates[15]

Fire Growth Rate	NFPA 72	α (kW/s^2)
Slow	$t_g \geq 400$ sec	$\alpha \leq 0.0066$
Medium	$150 \leq t_g < 400$ sec	$0.0066 < \alpha \leq 0.0469$
Fast	$t_g < 150$ sec	$0.0469 < \alpha \leq 0.1876$
Ultra-fast	$t_g \leq 75$ sec	$\alpha > 0.1876$

Fig. 9는 NFPA 72의 화재성장률 분류 방법을 기준으로 밀폐된 구획에서의 FDS 열분해 모델 및 단순 모델의 열방출률 계산 결과를 화재성장곡선으로 도시하여 비교한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 FDS 열분해 모델에서의 화재 성장은 Medium 영역에 속하는 반면 단순 모델은 Fast 영역에 속하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 단순 모델을 이용하여 계산한 화재성장 계수 (0.056)도 열분해 모델을 이용하여 계산한 결과 (0.035)에 비해 약 1.6배가량 비교적 높은 것을 확인할 수 있었다.

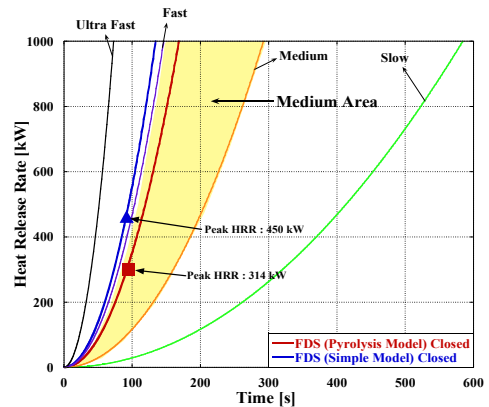


Fig. 9. Calculated fire growth curves based on HRR results from each model

4. 결론

본 연구에서는 선행 연구[10]에서의 ISO 9705 룸 코너 시험 장치를 이용하여 PU 폼과 PP, 철재로 구성된 복합소재 고체 가연물인 영화관 의자의 화재 시 발생하는 열방출률을 개방된 구획의 FDS 전산 해석 결과로부터 밀폐된 구획에서의 FDS 열방출률 모델에 따라 영화관 의자의 열방출률을 계산한 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 복합소재 고체 가연물인 영화관 의자의 화재를 FDS 단순모델과 열분해 모델로 동일한 조건에서 전산 해석한 결과 단순 모델을 통해 예측된 열방출률이 열분해 모델을 이용하는 경우에 비해 과예측하는 것을 확인 할 수 있었다.
- 2) 아울러 밀폐된 구획의 열분해 모델은 화재성장곡선이 Medium 영역에 속하는 것에 반에 단순 모델은 Fast 영역에 속하는 것을 볼 수 있고 화재성장율도 열분해 모델에 비해 약 1.6배 과다 예측하는 것을 볼 수 있다.
- 4) 결국, 각 소재별 열분해 물성이 반영되고 가연물 주위의 산소 농도와 가연물의 표면 온도에 따라 열분해 속도를 조절하는 열분해 모델이 단순 모델에 비해 밀폐된 구획 화재 모사에서 비교적 잘 예측할 것으로 판단된다.

References

- [1] 2013 Statistical Yearbook of Fire and Disaster Management, National Emergency Management Agency, Publication No. 11-1660000-000717-14.
- [2] W. Jahn, G. Rein and J. Torero, "The Effect of Model Parameters on the Simulation on Fire Dynamics", *Fire Safety Science-Proceedings of the Ninth International Symposium*, pp. 1341-1352, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-1341>
- [3] K. H. Jang, "Proposals on the Input Data Standardization Needs of Fire and Evacuation Simulation in Performance Based Design", *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 5, pp. 18-25, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.5.018>
- [4] H. Y. Jang, C. H. Hwang, C. B. Oh and D. G. Nam, "Evaluation of Design Fire Curves for Single Combustibles in a Cinema Complex", *Fire Science and Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 18-27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.191778b8>
- [5] T. K. Hong, "A Study of Thermal Pyrolysis and Burning Characteristics of Non-charring Solid Combustible with a Cone Calorimeter", Master's Thesis, Chosun University, Gwangju, Korea, pp. 7-8, 2008.
- [6] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model", NIST SP 1018-1, NIST, Gaithersburg, MD 2015. DOI : <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>
- [7] 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. DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.c4fb1b16>
- [8] ISO/TC 92, "Reaction to Fire Tests - Room Corner Test for Wall and Ceiling Lining Products - Part 1: Test Method for a Small Room Configuration", ISO 9705-1:2016(en), 2016.
- [9] NFPA 921, "Fire and Explosion Investigation Guide", National Fire Protection Association.
- [10] 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. DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.7c07b15d>
- [11] C. Huggett, "Estimation of the Rate of Heat Release Rate by Means of Oxygen Consumption", *Journal of Fire and Flammability*, Vol. 12, pp. 61-65, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.810040202>
- [12] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST SP 1019, Sixth Edition., NIST, Gaithersburg, MD, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>
- [13] Fire Technology Solution DB, Available From: <http://www.kfiredb.com> (accessed Sept. 14, 2020)
- [14] Society of Fire Protection Engineers, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 3-347, 2010.
- [15] NFPA 92B, NFPA72, National fire Alarm Code, Second Revision, NFPA, Quincy, MA

홍 터 기(Ter-Ki Hong)

[준회원]



- 2018년 2월 : 조선대학교 대학원 기계시스템공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 기계시스템·미래자동차공학과 박사과정

<관심분야>

연소공학, 화재

노 범 석(Beom-Seok Roh)

[정회원]



- 2010년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (공학박사)
- 1996년 10월 ~ 2002년 9월 : 한진해운 선박기관사
- 2003년 3월 ~ 2007년 3월 : SK해운 기관사/과장
- 2007년 4월 ~ 현재 : 한국해양수산연수원 교수

<관심분야>

친환경선박, 대기오염

박 설 현(Seul-Hyun Park)

[정회원]



- 2001년 2월 : 조선대학교 대학원 정밀기계학과 (공학 석사)
- 2007년 6월 : Drexel 대학교 대학원 기계공학과 (공학 박사)
- 2007년 7월 ~ 2010년 6월 : 미국 국립표준기술원 연구원
- 2010년 9월 ~ 2013년 8월 : 한국항공우주연구원 선임연구원
- 2013년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

연소공학, 우주공학