

화재모델링을 이용한 입출력 변수의 민감도, 상관계수 분석과 주성분 분석

남기태*† · 김정진** · 윤석표*** · 김준경****

Analysis of Sensitivity, Correlation Coefficient and PCA of Input and Output Parameters using Fire Modeling

Gi Tae Nam*† · Jeong Jin Kim** · Seok Pyo Yoon*** · Jun Kyoung Kim****

†Corresponding Author

Gi Tae Nam

Tel : +82-43-649-1787

E-mail : gogo7263@semyung.ac.kr

Received : July 9, 2019

Revised : August 22, 2019

Accepted : August 26, 2019

Abstract : Even though the fire performance-based design concept has been introduced for various structures and buildings, which have their own specific fire performance level, the uncertainties of input parameters always exist and, then, could reduce significantly the reliability of the fire modeling. Sensitivity analysis was performed with three limited input parameters, HRRPUA, type of combustible materials, and mesh size, which are significantly important for fire modeling. The output variables are limited to the maximum HRR, the time reaching the reference temperature(60°C), and that to reach limited visible distance(5 m). In addition, correlation coefficient analysis was attempted to analyze qualitatively and quantitatively the degree of relation between input and output variables above. Finally, the relationship among the three variables is also analyzed by the principal component analysis (PCA) to systematically analyze the input data bias. Sensitivity analysis showed that the type of combustible materials is more sensitive to maximum HRR than the ignition source and mesh size. However, the heat release parameter of the ignition source(HRR) is shown to be much more sensitive than the combustible material types and mesh size to both time to reach the reference temperature and that to reach the critical visible distance. Since the derived results can not exclude the possibility that there is a dependency on the fire model applied in this study, it is necessary to generalize and standardize the results of this study for the fire models such as various buildings and structures.

Key Words : HRRPUA, combustible material, mesh size, sensitivity analysis, correlation coefficient, PCA

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

구조물 및 건축물은 각각 다른 화재성능을 가지고 있고 각각의 화재성능에 적합한 설계를 위하여 화재성능기준설계 개념이 도입되었다. 또한 최근 국내 관련 법령에서도 요구하고 있어 최근 성능기준설계를 위한 화재모델링에 대한 수요가 대폭 증가하고 있는 실정이다. 이러한 성능기준을 고려한 화재모델링을 통해 다

양한 건축물의 화재 위험성 평가 및 화재대응 체계 등이 보다 효율적으로 구축이 가능하다¹⁾.

특히 원자력발전소의 경우 심층 화재방호 요소는 원자력발전소 관련 시설의 통합적인 확률론적 안정성 분석 (PSA, probabilistic safety analysis)에서 대단히 중요한 요소로 기여하고 있고, 특히 원자력분야에서 개발되어 화재관련 검증 및 확인에 사용되는 다양한 지침서 NUREG-1824²⁾, NUREG-6850³⁾는 현재 원자력 시설

*세명대학교 소방방재공학과 석사과정 (Department of Fire & Disaster Prevention, Semyung University)

**세명대학교 소방방재공학과 석사 (Department of Fire & Disaster Prevention, Semyung University)

***세명대학교 바이오환경공학과 교수 (Department of Environmental Engineering, Semyung University)

****세명대학교 소방방재공학과 교수 (Department of Fire & Disaster Prevention, Semyung University)

의 심층화재방호 관련 표준으로 활용되고 있다⁴⁾.

특히 열방출량과 같은 주요 입력인자와 주요 출력인자 상호간의 경험적 관계식들은 화재특성에 대한 개관적인 이해 뿐 만 아니라 물론 한계점은 다소 존재하지만 입력 및 출력인자 상호간의 불확실성 정도를 제어하는 수단이 되기도 한다. 특히 NUREG-1824이 제시한 열방출율의 변화에 따른 주요 출력변수 물리량들의 거듭제곱의 의존도 관계식은 예측된 출력인자들의 불확실성 정도에 대해 개괄적으로 그리고 매우 간단하게 평가를 가능하게 하는 주요 기준으로도 이용된다.

임의 건축물 및 구조물에 대해 화재모델링이 가진 불확실성 정도는 건축물 및 구조물 화재를 모델화하는 단계에서 발생하는 불확실성과 연결되는 화재모델링을 위한 입력인자의 불확실성 등을 포함하여 여러 분야로 분류할 수 있다.

첫째, 화재모델화 과정에서 모델에 대한 부정확한 지식으로부터 정량화, 단순화 및 수식화 과정과 같은 일련의 연속과정에서 야기되는 불확실성 정도를 말한다. 또한 수식화 이후에 복잡한 화재현상을 지배하는 여러 개의 복잡한 지배방정식의 해를 수치 해석적으로 해를 구하는 과정에서도 역시 야기된다. 이러한 불확실성은 개념적으로 동일하게 설정된 건축물 및 구조물 모델에 대한 수치 해석적 결과와 실제 실험결과의 비교를 통해 불확실성 정도를 상대적으로 유추할 수 있다.

또한 화재모델링을 위한 입력인자의 불확실성은 화재모델링을 위해 필요한 다양한 물리적 및 화학적인 불확실성에 의하여 야기된다. 입력인자의 불확실성은 설정된 화재모델에 대한 실제 실험을 통해 얻어진 결과와 비교분석을 통해 역시 불확실성을 정량화할 수 있다. 하지만 실험 자체가 가지고 있는 내재적인 불확실성으로 역시 상당한 불확실성을 갖는 것으로 알려져 있다.

많은 공학 분야에서 입력인자에 의한 결과의 불확실성 특성을 정량화 가능한 방법으로 민감도 분석(sensitivity analysis)이 일반적으로 활용되고 있다. 따라서 화재모델링을 수행할 경우 결과의 신뢰도 향상을 위해 다양한 입력인자의 불확실성이 수치해석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가 가능한 민감도 분석이 필요하다. 화재모델링의 민감도분석과 관련하여 Corches et. al⁵⁾, Brohus et. al⁶⁾, Pachera et. al⁷⁾ 등에 의한 연구가 있으며 국내의 관련 연구는 Jee et al.,⁸⁾, Kim et al.,⁹⁾, Mun et al.,¹⁰⁾ 등이 있다.

본 연구는 대표적 화재해석 모델인 FDS (Fire Dynamics Simulator)을 수행하였고 민감도분석을 효과적으로 위해 우선 상대적으로 중요하다고 알려져 있는 점화원 열방출

Table 1. Igniter Type, size, and Heat Release Rate Per Area (kw/m²) for the room fire of this study

Igniter type	Size(m)	Heat release rate per area(kw/m ²)
Burner	0.468 × 0.468	400.0
		500.0
		600.0

량(HRRPUA, heat release rate per unit area), 가연물 종류 및 격자크기 등 3개로 제한하였다. 또한 밀접한 상관관계를 가지고 있는 출력변수로서 최대 열발생률(HRR, heat release rate), 기준온도 도달시간 및 한계가시거리 도달시간 등 3개로 제한하였다. 또한 입력 및 출력 변수 상호간 정성적 및 정량적인 관련성 정도를 분석하기 위해 상관계수 분석을 시도하였다. 그리고 민감도분석을 효과적으로 수행하기 위해 임의로 선정된 3개의 입력변수의 값 상호간의 관계 bias의 유무 및 bias가 존재한다면 bias 정도 등을 체계적으로 분석하기 위해 주성분 분석(PCA, principal component analysis)을 수행하였다. 화재수치해석을 위한 대상 모델은 기존에 Thunderhead Engineering 가 제시한 다수의 화재모델 가운데 대표적인 room fire model을 채택하여 민감도분석, 상관계수 분석 및 주성분 분석을 시도하였다.

2. FDS를 이용한 화재모델링

2.1 FDS 화재모델 및 입력 및 출력변수 설정

여러 가지 입력변수 중에서 상대적으로 중요한 점화원의 열 발생률, 가연물의 종류와 모델링을 위한 mesh 개수 등 모두 3가지 변수를 고려하였다. 우선 주요한 입력변수 가운데 하나인 점화원의 단위면적당 열 발생률(HRRPUA)¹¹⁾을 고려하기 위해 Table 1에 제시된 바와 같이 500 kw를 기준으로 ±25%까지 고려하여 400 kw 및 600 kw 설정하여 결과값들의 정량적 변화를 분석하였다.

FDS 화재모델링을 위한 가연물은 Reaction과 같은 FDS 내부 명령어로 제어되고 가연물 종류는 Table 2에 제시된 바와 같이 가장 일반적으로 사용되는 polyurethane을 포함하여 GM21 및 GM29 등 3가지 물질을 고려하였고 SFPE Handbook¹²⁾의 데이터를 참고하였다.

NUREG-1934¹³⁾에서는 특성 화재직경 내부에 4~16개 격자가 적용될 때 신뢰성 있는 예측이 가능하다고 제시하고 있다. 이를 적용하여 16개의 격자를 설정하였고 보다 세밀한 분석을 위하여 Table 3에서 제시된 바와 같이 2가지 경우를 추가하여 각각 25 및 36으로 설정하고 이에 대해서도 분석하여 비교하였다.

Table 2. Reaction Material and Chemical Formula for the room fire of this study

Reaction material	Chemical formula	Foams
polyurethane	C _{6.3} H _{7.1} O _{2.1} N	-
GM 21	CH _{1.8} O _{0.3} N _{0.05}	Flexible polyurethane foams
GM 29	CH _{1.1} O _{0.23} N _{0.1}	Rigid polyurethane foams

Table 3. Mesh, Cell Size and Number of cells for the room fire of this study

Mesh	Cell size	Number of cells	
16	0.1182 × 0.1174 × 0.1200	44 × 46 × 20	40,480
25	0.1 × 0.1 × 0.1	52 × 54 × 24	67,392
36	0.0776 × 0.0771 × 0.0774	67 × 70 × 31	145,390

본 연구에서 사용한 화재모델에서 다른 가연물에 대한 열 특성에 대한 상세 내용은 FDS Userguide¹⁴⁾와 FDS Technical Reference Guide¹⁵⁾에서 제시된 값을 참고하였다.

민감도 분석을 위한 주요 출력변수는 앞서 제시된 바와 같이 최대열발생률, 화원으로부터 1.6 m 이격된 지점에서 기준온도 도달시간, 그리고 마지막으로 높이 1.8 m에서 특정된 가시한계거리 도달시간 등을 선정하였다.

본 연구는 보다 일반적이고 평범한 화재모델 선택을 위해 Thunderhead Engineering 가 제시한 여러 가지 실내 화재모델 가운데 Room Fire model¹⁶⁾을 이용하여 분석하였고 동일 화재모델을 이용하여 분석한 결과를 참조하였다¹⁷⁾.

Fig. 1(a) 및 1(b)에서 제시된 바와 같이 5.2 m × 5.4 m의 면적을 갖는 높이 2.4 m의 화재 모델을 적용하였

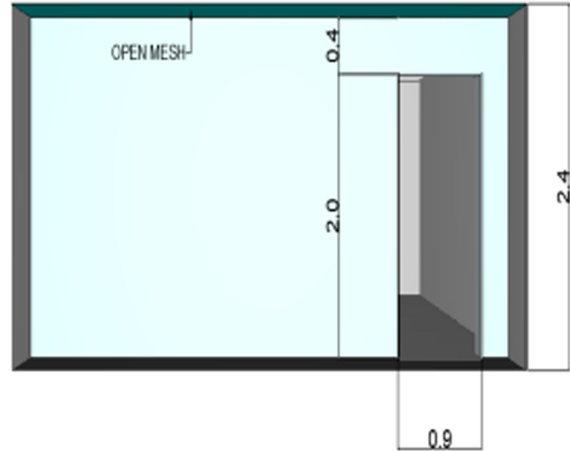


Fig. 1. Section view for fire modeling of room fire using FDS(b).

다. 내부 가구로는 sofa 2개와 pad 1개가 위치되어 있으며 각 구획의 바닥과 벽은 Yellow Pine 및 석고를 사용하였다. 거실과 통로를 연결하는 출입구는 너비 0.9 m와 높이 2.4 m로 구성되었으며 완전 개방된 상태이다. 통로의 전면부와 천장은 외기와 완전 개방되어 있으며 그 외의 부분은 외기와 차단되어 있는 밀폐상태이다.

2.2 수치해석 방법 및 조건

FDS에서는 난류모델에 대하여 Navier-Stokes 방정식으로 수치 해석을 수행하고 LES(Large Eddy Simulation) 기법이 적용된 수치해석 방법을 사용한다. 수치해석을 위해 난류확산 계수와 난류점성을 필요로 하는데 본 연구는 FDS의 Default 값인 프란틀 값은 PR = 0.5, 슈미트 값은 SC = 0.5 값을 각각 이용하였다. 난류점성의 경우 Deardorff's Model을 이용하였으며 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\mu_t = \rho C_V \Delta \sqrt{k_{sgs}} \tag{1}$$

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} ((\bar{u} - \hat{u})^2 + (\bar{v} - \hat{v})^2 + (\bar{w} - \hat{w})^2)$$

$$\bar{u}_{ijk} = \frac{u_{ijk} + u_{i-1,jk}}{2},$$

$$\hat{u}_{ijk} = \frac{\bar{u}_{ijk} + \bar{u}_{i-1,jk} + \bar{u}_{i+1,jk}}{4}$$

여기서 \bar{u} 는 그리드셀 중심에서의 u의 평균값이며, \hat{u} 는 인접셀에 대한 u의 가중 평균치이며 k_{sgs} 서브 그리드스케일 운동에너지 값이다. 이때 C_s 값은 0.1로 일정한 값을 갖는다.

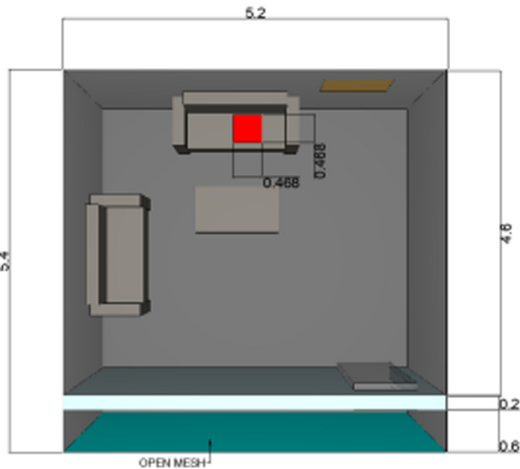


Fig. 1. Plan view for fire modeling of room fire using FDS(a).

3. 민감도 분석

3.1 최대열방출율

화원의 열 발생률, 가연물의 종류 및 모델링을 위한 mesh 개수 등 모두 3가지 입력 변수가 우선 최대열방출율에 변화에 대한 민감도를 분석하였고 결과는 Table 4 및 Fig. 2에 제시되어 있다. 3가지 종류의 입력 변수의 변화를 동시에 표현할 경우 야기되는 분석의 혼돈을 피하기 위해 우선 mesh 숫자를 25로 한정하였고, mesh 숫자의 변화에 대한 분석은 다음 절에 제시된 상관관계 분석에서 다시 검토하였다. Fig. 2에서 점화원의 열방출량(가로축) 각각에 대해 가연물 물질의 변화에 따라 최대열방출량(세로축)을 나타내고 있다.

polyurethane 가연물의 경우 점화원 열량 500 kw의 경우와 같은 극히 일부 예외를 제외하면, 동일한 가연물일 경우 점화원의 열방출량 (가로축) 증가에 따라 최대열방출율(세로축)은 일반적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 400 kw를 기준으로 할 경우 polyurethane, GM21 및 GM29 각각에 대해 600 kw에서 각각 약 8.35%, 16.35 및 14.7%의 변동을 보여 주었다.

또한 Fig. 2에서 일정한 점화원 열방출량으로 고정할 경우 각각의 가연물질의 종류에 따라서 최대열방출량의 크기가 역시 체계적으로 차이가 있음을 명확하게 보여주고 있다. 구체적으로 400 kw, 500 kw 및 600 kw 각각에 대해 polyurethane이 가장 작은 값을 보여주고 있고 이 물질을 기준으로 할 경우 GM29의 최대열방출량이 12.9%, 25.7%, 19.6%의 변동을 보여주고 있다. 따라서 가연물 종류에 의한 최대열방출량의 변동성이 보다 민감하게 작용하고 있으며 점화원의 열방출량 증가에 따른 변동 보다 상대적으로 큰 것을 보여주고 있다. 이들의 상호관계는 상관관계 분석에서 다시 검토될 예정이다.

Table 4. Maximum HRR(kw) for all the 27 cases of 3 input parameters combinations

HRRPUA	Material	Mesh #		
		16	25	36
400	polyurethane	4170.57	3998.90	4013.86
	GM21	4787.59	4360.84	4462.37
	GM29	4923.99	4515.76	4351.50
500	polyurethane	4060.32	3904.01	3894.39
	GM21	4649.46	4722.98	4272.66
	GM29	4482.49	4908.42	4933.35
600	polyurethane	4987.23	4330.04	4346.77
	GM21	4686.22	5072.33	4168.23
	GM29	4920.74	5177.15	4719.69

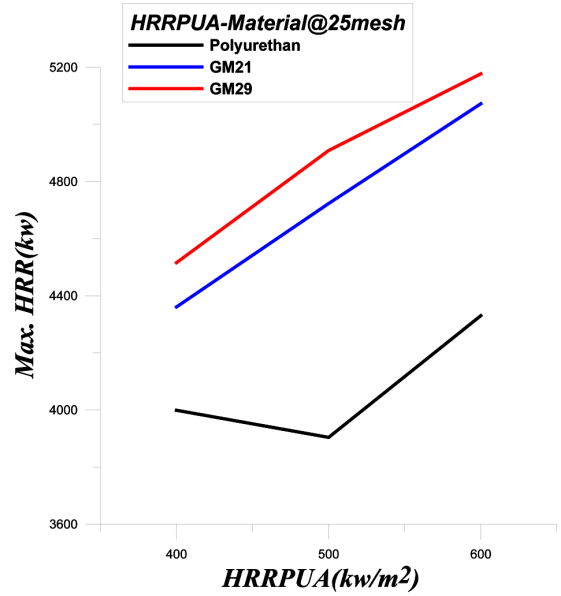


Fig. 2. Maximum HRR(kw)s in response to the change of mesh numbers and materials.

3.2 기준온도(60°C) 도달시간

3가지 입력변수가 1.8 m 높이에서 인간의 생명과 직결된 기준온도(60°C)에 도달하는 시간에 대한 민감도 분석을 수행하였고 Table 5 및 Fig. 3에 각각 제시되어 있다. Fig. 3에서 점화원의 열방출량(가로축) 각각에 대해 가연물 물질의 종류에 따라 기준온도 도달시간(세로축)을 나타내고 있다.

동일한 가연물일 경우 점화원의 열방출량 증가(가로축)에 따라 대해 기준온도에 도달시간이 전체적으로 감소하고 있어 실제 화재현상과 매우 유사하게 일치하고 있음을 보여주고 있다. mesh 숫자를 25로 한정하여 분석 할 경우 특히 400 kw에서는 3가지 가연물 모두 거의 유사한 도달시간이라는 특징을 보여주고 있으나

Table 5. Thresholds elapsed time (sec) to reach reference temperature(60°C) at measurement height (1,8 m) for all the 27 cases of 3 input parameters combinations

HRRPUA	Material	Mesh #		
		16	25	36
400	polyurethane	16.70	17.74	18.41
	GM21	16.89	17.57	18.62
	GM29	11.41	17.83	18.45
500	polyurethane	9.90	13.45	10.35
	GM21	9.65	12.33	12.33
	GM29	9.76	11.99	15.25
600	polyurethane	9.44	10.70	9.20
	GM21	9.62	9.18	9.26
	GM29	9.91	8.97	9.07

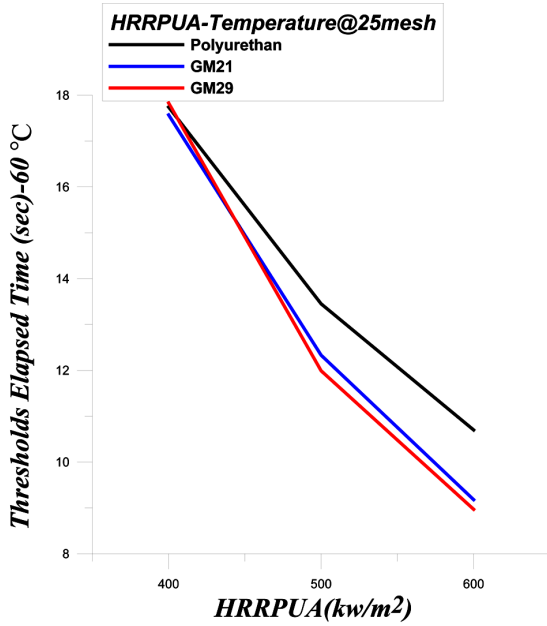


Fig. 3. Thresholds elapsed time (sec) to reach reference temperature(60°C) in response to the change of mesh numbers and materials.

점화원 열방출량이 증가할수록 3가지 가연물 상호간 기준온도 도달시간의 차이가 증가하고 있다. 400kw 기준으로 할 경우 polyurethane, GM21 및 GM29 각각에 대해 600 kw에서 각각 약 -39.68%, -47.75% 및 -49.69%의 변동을 보여주고 있다.

또한 그림에서 일정한 점화원의 열방출량에서 각각의 가연물질의 종류(세로축)에 따라서 기준온도에 도달시간의 크기가 역시 체계적인 차이가 있음을 보여주고 있다. 구체적으로 400 kw, 500 kw 및 600 kw 각각에 대해 다소 차이가 있지만 polyurethane이 가장 작은 값을 보여주고 있고 이를 기준으로 할 경우 GM21의 기준온도 도달시간이 약 +0.51%, -10.86%, -16.17%의 변동을 보여주고 있다. 따라서 최대열방출량에 대한 민감도 특성과 달리 Fig. 3 및 Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 점화원의 열방출량 변수가 가연물 종류에 비해 보다 훨씬 더 민감하게 기준온도(60°C)에 도달하는 시간에 작용한다는 것을 보여주고 있다.

3.3 한계가시거리 도달시간

3가지 입력변수와 화원으로부터 1.6 m 지점에서 화재발생시 피난계획과 직결되는 한계가시거리에 도달하는 시간에 대한 민감도 분석을 시도하였고 Table 6 및 Fig. 4에 각각 제시되어 있다. Fig. 4에서 점화원의 열방출량 각각에 대해 가연물 물질의 종류에 따라 한계가시거리에 도달시간(세로축)을 나타내고 있다. 기준

온도(60°C)에 도달시간과 비교할 때 한계가시거리에 도달하는 시간이 상대적으로 훨씬 작아서 화재모델링에 대단히 역시 중요한 출력변수임을 보여주고 있다.

동일한 가연물질 경우 점화원의 열방출량 증가(가로축)에 따라 한계가시거리 도달시간이 전체적으로 감소하고 있음을 보여주고 있다. 하지만 400 kw, 500 kw 및 600 kw 모두에 대해 3가지 가연물 모두 거의 유사한 도달시간의 특징을 보여주고 있다. 400 kw 기준으로 할 경우 polyurethane, GM21 및 GM29 각각에 대해 600 kw에서 각각 약 -015.31%, -015.96% 및 -017.55%의 변동을 보여주고 있다.

Table 6. Thresholds elapsed time (sec) considering visibility distance (5 m) for all the 27 cases of 3 input parameters combinations

HRRPUA	Material	Mesh #		
		16	25	36
400	polyurethane	10.58	10.38	10.54
	GM21	10.63	10.46	10.60
	GM29	10.79	10.60	10.82
500	polyurethane	9.56	9.51	9.94
	GM21	9.40	9.79	9.99
	GM29	9.41	9.59	9.99
600	polyurethane	9.18	8.79	8.80
	GM21	9.27	8.79	9.14
	GM29	9.56	8.74	8.95

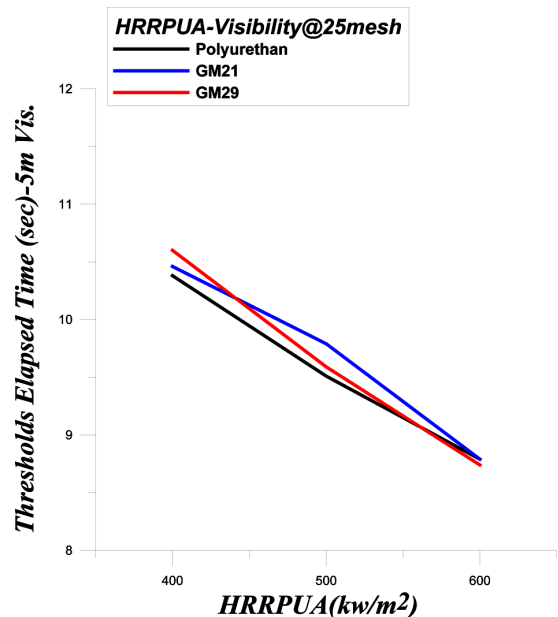


Fig. 4. Thresholds elapsed time (sec) considering visibility distance (5 m) in response to the change of mesh numbers and materials.

또한 Fig. 4에서 주어진 일정한 점화원 열방출량에서 각각의 가연물질의 종류에 따라서 구체적으로 400 kw, 500 kw 및 600 kw 각각에 대해 약 +2.12%, 0.84%, -0.57%의 변동을 보여주고 있어 한계가시거리 도달시간의 차이가 거의 없는 특징을 보여주고 있다.

따라서 Fig. 4 및 Table 6에서 알 수 있는 바와 같이 점화원의 열방출량 변수가 상대적으로 가연물 종류에 비해 보다 훨씬 더 민감하게 한계가시거리에 도달하는 시간에 작용한다는 것을 보여주고 있다. 따라서 기준 온도(60°C)에 도달시간 민감도 분석결과 동일한 경향을 보여주고 있다.

4. 상관관계 분석

입력 및 출력변수 상호간 정성적 및 정량적인 관련성 정도를 분석하기 위해 상관관계 분석을 시도하였다. 변수 상호간의 상관관계 분석을 위해 민감도 분석과 동일하게 3개의 입력변수 및 3개의 출력변수에 대해 분석하였다.

다만 상관관계 분석의 특성을 고려하여 3개의 출력변수 각각을 분리하여 분석하였다. 상관관계분석은 1개 또는 다수의 독립변수의 변화에 대한 종속변수의 변화의 정도를 분석을 통하여 변수간의 관계성을 파악하는 것이다. 따라서 회귀분석이 입력 및 출력 변수 상호간의 인과성을 검증하기 위하여 수행하나 이에 비하여 상관분석은 변수간의 상호 관계성만을 파악하는 분석방법이다¹⁸⁾.

점화원의 열 발생률, 가연물의 종류 및 모델링을 위한 mesh 개수 등 모두 3가지 입력 변수와 3개 출력 변수 중에서 우선 최대열방출률 상호간의 상관관계를 분석하였고 결과는 Table 7에 제시되어 있다. 점화원의 열 발생률, 가연물의 종류 및 모델링을 위한 mesh 개수 등이 내재적으로 지니고 있는 값들의 상대적인 크기 및 각 입력변수들의 단계의 간격 등에 의한 영향은 각각 변수의 분산값에 의해 상쇄되어 지기 때문에 표준화와 같은 동일한 효과를 나타낸다. 따라서 가연물의 종류를 정량화하기 위해 다양한 크기 및 단계별 차이

Table 7. Corelation coefficients between maximum HRR(kw) and 3 input parameters (HRRPUA, Material, and Mesh #)

	HRRPUA	Material	Mesh #	Max. HRR
HRRPUA	1	-	-	0.30
Material	0	1	-	0.29
Mesh #	0	-3E-17	1	0.22
Max. HRR	0.30	0.29	0.22	1

등에 다양한 정량적인 값을 부여하여 상관관계분석을 시도하였고 다양하게 부여된 절대 값 및 단계 값에 대해서 거의 동일한 상관관계 분석결과 값을 보여주고 있어 상관관계 분석결과 신뢰성을 높여 주었다.

Table 7이 제시한 바와 같이 각 변수들의 자체 상관계수는 대각선 항에 주어져 있는 바와 같이 1을 보여주고 있고, 또한 3개 입력변수 상호간에는 극히 작은 값이거나 0을 나타내고 있어 분석이 정확하게 이루어졌음을 보여주고 있다. 3개 입력변수 중 Mesh 숫자가 상대적으로 가장 작은 상관계수를 보여주고 있고(0.22) 또한 다른 2개 입력변수는 최대열방출량에 대한 상관계수가 0.29 및 0.3의 값을 보여주고 있어 최대열발생률과 3개 입력변수 상호간에는 거의 유사하고 낮은 정도의 상관정도를 보여주고 있다.

다음으로 위에서 제시된 3가지 입력 변수와 출력변수 중 기준온도(60°C) 도달시간 상호간의 상관관계를 분석하였고 결과는 Table 8에 제시되어 있다. 3개 입력변수중 점화원 열방출율과 Mesh 개수와 같은 변수는 유사한 크기의 값을 보여주고 있으나 가연물의 종류는 비록 대단히 작은 값 (약 -0.13)이지만 음의 상관계수를 보여주고 있다.

이는 정량적 상관분석을 위해 polyurethane, GM21 및 GM29의 순서대로 증가하는 값을 부여하였기 때문에 앞서 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 polyurethane, GM21 및 GM29의 순서대로 기준온도(60°C) 도달시간이 체계적으로 감소하는 결과와 대단히 잘 일치하고 있다. 따라서 GM29 가연물질이 다른 물질에 비해 상대적으로 짧은 시간에 많은 열방출량을 배출하여 빠르게 기준온도에 도달하는 것으로 해석된다. 다른 2개 입력변수는 상관계수가 약 0.23 및 0.22 정도 값을 보여주고 있어 기준온도(60°C) 도달시간 상호간에는 거의 유사하고 낮은 정도의 상관정도를 보여주고 있다.

Table 8. Corelation coefficients between Thresholds elapsed time (sec) to reach reference temperature(60°C) and 3 input parameters (HRRPUA, Material, and Mesh #)

	HRRPUA	Material	Mesh #	Thresholds elapsed time (sec) to reach reference temperature(60°C)
HRRPUA	1	-	-	0.23
Material	0	1	-	-0.13
Mesh	0	-3E-17	1	0.22
Thresholds elapsed time (sec) to reach reference temperature(60°C)	0.23	-0.13	0.22	1

Table 9. Correlation coefficients between Thresholds elapsed time (sec) considering visibility distance (5 m) and 3 input parameters (HRRPUA, Material, and Mesh #)

	HRRPUA	Material	Mesh	Thresholds elapsed time (sec) considering visibility
HRRPUA	1	-	-	-0.01
Material	0	1	-	0.80
Mesh #	0	-3E-17	1	-0.03
Thresholds elapsed time (sec) considering visibility	-0.01	0.80	-0.03	1

마지막으로 3가지 입력 변수와 한계가시거리 도달 시간 상호간의 상관관계를 분석하였고 결과는 Table 9에 제시되어 있다. 3개 입력변수 중 점화원 열방출율과 Mesh 개수는 아주 작아서 거의 상관관계가 약하다는 것을 보여주고 있지만 음의 값을 보여주고 있다. 하지만 음의 상관관계는 점화원 방출열의 크기가 증가하면 도달시간이 짧아진다는 것을 보여주고 있어 실제 화재 현상과 매우 잘 부합하고 있다.

그리고 가연물의 상관계수는 0.80와 같이 대단히 높은 값을 보여 주고 있어 한계가시거리 도달시간과 대단히 밀접한 양의 상관관계를 보여주고 있다. 이러한 특징은 Fig. 4에서 특히 400 kw에서 가연물의 종류와 한계가시거리 도달시간과 관계를 통해 아주 선명하게 보여주고 있으며 500 kw와 600 kw에서 한계가시거리 도달시간의 값의 변화가 가장 심하다.

따라서 상관관계 계수의 크기와 음양의 부호를 통하여 입력 및 출력변수 상호간의 정성적인 그리고 정량적인 관련성 정도를 분석가능하다고 할 수 있다.

4.1 주성분 분석(Principal Component Analysis; PCA) 결과

본 논문에서 수행된 화재시뮬레이션 3개 입력변수의 입력자료 자체의 내적 편향성 구조를 분석하기 위하여 주성분 분석(PCA)¹⁹⁾을 시도하였다. 우선 변수 상호간의 크기에 대한 가중치를 평준화하기 위해 표준화 과정을 수행하였다. 정보의 손실을 최소화 하면서보다 보다 적은 수의 요인 또는 변수로 요약하고자 할 경우 즉 HRRPUA, 가연물 종류 및 Mesh 개수 등 3개 변수 각각의 고유값이 가장 커다란 변수부터 크기 순서대로 분석한 후 상대적으로 고유값이 작은 즉 상대적 중요성이 작은 변수를 감소시켜 차원을 감소시키는 효과를 줄 수도 있다.

Table 10에서 제시된 바와 같이 주성분 분석 결과에

Table 10. Variable proportion and cumulative proportion of 3 input parameters (HRRPUA, Material, and Mesh #) in PCA

Loadings	PC(1)	PC(2)	PC(3)
Variance	1.00	1.00	1.00
Proportion	0.33	0.33	0.33
Cum. proportion	33.3%	66.7%	100.0%

의하면 HRRPUA, 가연물 종류 및 Mesh 개수 등 3개 변수 가운데 어느 특정한 변수에 치우치지 않고 약 0.33 (합할 경우 1.0)과 같이 균등한 가중치(weighting)를 가지고 분포하고 있다. 즉 주성분을 구성하는 요소는 3개 변수가 상호 균등하게 기여하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 3개 변수를 고유 값이 월등하게 커다란 1개 또는 2개의 입력변수로 차원 감소를 하거나 또는 1개 또는 2개의 변수로 대표할 수 있는 입력 자료의 구조가 아님을 보여주고 있다. 따라서 3개 변수의 입력자료 각각은 강한 독립성을 가지고 있음을 보여주고 있고, 이는 각각의 변수에 대한 값을 무작위적으로 측정된 자료가 아니라 화재모델링을 효과적으로 수행하기 위해 입력변수 각각에 대한 값을 이미 알고 있는 일반적인 범위 내에서 인위적으로 입력 자료를 아주 양호하게 제어한 결과이며 이미 예상된 바와 같다.

5. 결론

FDS를 이용하여 화재모델링을 수행하였고 수행한 결과 다음의 결론으로 요약가능하다.

1. 민감도 분석에 의하면 가연물의 종류가 점화원의 열방출량 보다 민감하게 최대열방출량에 대해 작용하고 있다는 것을 보여주었다. 하지만 기준온도(60℃)에 도달하는 시간 및 한계가시거리 도달시간에 대해서는 점화원의 열방출량 변수가 상대적으로 가연물 종류 보다 훨씬 더 민감하게 작용한다는 것을 보여주고 있어 기준온도(60℃)에 도달하는 시간과 한계가시거리 도달 시간과 같은 2가지 출력변수 상호간 유사한 민감도 경향을 보여주었다.

2. 입출력 변수간의 상관관계 분석에 의하면 우선 3개 입력변수와 최대열방출량과 상관계수는 모두 약 0.3정도 값을 보여주고 있어 최대열방출량과 3개 입력 변수 상호간에는 거의 유사하지만 비교적 낮은 상관정도를 보여주고 있다. 특히 가연물 종류와 기준온도(60℃) 도달시간과 상관관계는 비록 대단히 작은 값이지만 음의 상관관계를 보여주고 있어 polyurethane, GM21 및 GM29의 순서대로 기준온도(60℃) 도달시간이 체계

적으로 감소하는 결과와 대단히 잘 일치하고 있다. 또한 한계가시거리 도달시간의 경우 GM29와 같은 가연물이 가장 짧은 시간 내에 soot 등과 같은 물질 등을 다량으로 배출하고 GM21과 polyurethane 등의 순서이고 이는 민감도 분석결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 상관관계 계수의 상대적인 크기와 음양의 분석을 통해 입력 및 출력변수 상호간의 정성적 그리고 정량적인 관련성 정도를 충분히 분석 가능하였고 민감도분석 결과 얻어진 결과와 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 민감도 및 상관관계 분석 등 2가지 분석을 동시에 병행할 경우 보다 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 물론 향후 연구에서는 3개 출력변수 상호간의 독립성 정도에 대한 엄밀한 분석도 필요하다고 판단된다.

4. 주성분 분석결과 3개 입력변수가 변수 상호간 균등하게 기여하고 있음을 보여주고 있어 본 연구에서 설정한 3개 입력변수를 1개 또는 2개의 입력변수로 차원 감소를 하거나 또는 1개 또는 2개의 변수로 대표할 수 있는 입력 자료의 구조가 아님을 보여주고 있다. 따라서 3개 변수의 입력자료 각각은 강한 독립성을 가지고 있어 연구결과에 대한 신뢰성을 제고시켜 주었고 향후 다양한 화재모델링을 수행을 위해 각각 입력변수 값의 정량적인 범위를 설정 시 필요하다고 판단된다.

5. 다만 상관관계 분석결과가 일반적인 정량적 및 정성적인 의미를 갖기 위해 향후 연구는 점화원 열방출량, 가연물질 종류 및 mesh size 등을 포함한 입력변수에 대한 주성분 분석을 포함하여 치밀한 정량적이고 정성적인 사전 분석 등 보다 엄밀한 통계적 유의성 분석과정이 필요하다. 따라서 민감도분석, 상관분석과 주성분 분석 등을 이용한 결과들을 적절하게 활용한다면 다양한 화재모델링 결과에 대해 보다 심층적이고 의미 있는 분석이 가능하고 불확실성 감소에도 기여할 것으로 판단된다.

6. 본 논문에서 도출된 결과는 적용된 화재모델 자체에 대한 종속성이 있을 가능성을 전혀 배제할 수 없기 때문에 향후 매우 다양한 건축물 및 구조물과 같은 화재모델에 대한 연구를 통해 연구결과의 일반화 및 표준화가 반드시 필요하다.

References

1) S. H. Ahn, 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" J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 5, pp. 32-40, 2017.

2) NRC, U. S and EPRI, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1824/EPRI 3002002182, Final Report, 2016.

3) NRC, U. S and EPRI, "Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities Volume 1: Summary & Overview", NUREG/CR-6850/EPRI 1011989, Final Report, 2005.

4) M. H. Ji and B. K. Lee, "Application for Fire Protection Regulation based on Risk-Informed and Performance-Based Analysis" Journal of Disaster Management, Vol. 20 No. 3, pp. 65-70, 2006.

5) A. M. Corches, L. Ulriksen and G. Jomaas, "FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies", In Proceedings of the 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, pp. 34-35, 2014.

6) B. H. Henrik, N. Peter V, Peter, A. J Petersen and S. L Kim, "Sensitivity Analysis of Fire Dynamics Simulation." INTERNATIONAL CONFERENCE; 10th, Air distribution in rooms; Roomvent, Vol. 2, No. 4, pp. 431-440, 2007.

7) M. Pachera, X. Deckers and T. Beji, "Capabilities and Limitations of the Fire Dynamics Simulator in the Simulation of Tunnel Fires with a Multiscale Approach", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1107. No. 4, 2018.

8) M. H. Jee, B. K. Lee and R. H. Jeoung, "Sensitivity Analysis for Fire Risk Conditions of Fire Area at Nuclear Power Plant with Performance-based Fire Model (FDS)", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 21, No. 2, 98-104, 2007.

9) Y. T. Kim, C. H. Lee, H. S. Yang, H. K. Kam, H. G. Kwon and S. C. Kim, "Grid Sensitivity Analysis of FDS Calculation for a Residential Building Fire" Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 2015, No. 11, pp. 239-240, 2015.

10) S. Y. Mun, C. H. Park and C. H. Hwang, "Sensitivity Analysis on the Pyrolysis Properties of Power Cable" Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 2018, No. 4, pp. 247-248, 2018.

11) J. H. Cho, C. H. Hwang, J. S. Kim, and S. K. Lee, "Sensitivity Analysis of FDS Results for the Input Uncertainty of Fire Heat Release Rate," J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 1, pp. 25-32, 2016.

12) J. Philip et al., "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition", National Fire Protection Association, pp. 642-680, 2005.

- 13) NRC, U. S and EPRI, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines", NUREG-1934 and EPRI 102359, Final Report, 2012.
- 14) K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator (Version 6): User's Guide", NIST SP 1019, NIST, Gaithersburg, MD, 2019.
- 15) K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator (Version 6): Technical Reference Guide", NIST SP 1019, NIST, Gaithersburg, MD, 2019.
- 16) "Thunderheadeng and Support for Pyrosim", 2018, Oct 20, https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/fundamentals/#room_fire
- 17) J. J. Kim "Sensitivity Analysis of Major Input Parameters of FDS" M.S. Semyung University Graduate School, Jecheon, 2019.
- 18) N. K. Sung, "SAS/STAT Regression Analysis 3rd Edition", Freedom Academy, pp. 198-235, 2004.
- 19) W. Richert, L. P. Coelho "Building Machine Learning Systems with Python", Packt Publishing Ltd, pp. 233-240, 2013.