

ARTICLE

## 목조건축물 방염처리 화재확산 자연효과 화재시뮬레이션 분석

김동현\*

## Fire Simulation Analysis on the Effect of Delaying Fire Spread of Flame Flame-Resistance Treatment for Wooden Building

Kim, Donghyun\*

### 요지

우리나라 목조건축물은 1986년 금산사, 2003년 구룡사, 2005년 낙산사, 2006년 창경궁, 2007년 불국사, 2008년 숭례문 등 국보 문화유산에서 끊임없이 화재로 인한 소실사례가 발생하고 있어 높은 화재위험성을 보인다. 화재에 취약한 목조건축물에 대한 화재확산 예방의 차원에서 소화관련 자동화 설비 뿐만 아니라 목재재료의 화재확산을 자연시키는 방법에 대해 더욱 적극적인 실행도구가 필요하다. 본 연구에서는 화재시뮬레이션을 통해 화재확산에 취약한 구조부를 확인하고 이 구조부의 방염처리 효과에 대해 개방형과 밀폐형 목조건축물인 숭례문과 불국사 대웅전에 대해 평가하였다. 그 결과, 방염처리한 불국사 대웅전과 숭례문 모두 플래시오버는 발생되지 않았으며 발화 후 200초 경과지점에서 불국사 대웅전은 50MW 이하, 숭례문에서는 10MW급 이하로 방염처리 전에 비해 3.4~6.44배 낮은 화재강도를 나타내었고 최대 온도는 800°C 이하로 나타나 화염성장이 제어되는 것을 확인하였다.

**핵심용어:** 화재시뮬레이션, 목조문화유산, 문화유산, 화재, 방염처리

### Abstract

As for the fire hazard of cultural properties of wooden structures in Korea, there have been continuous cases of fire loss in national treasures such as Geumsansa Temple in 1986, Guryongsa Temple in 2003, Naksansa Temple in 2005, Changgyeonggung Palace in 2006, Bulguksa Temple in 2007, and Sungryemun in 2008. In this study, structural parts vulnerable to fire spread were identified through fire simulation tool, and the fire hazard in the structural parts before and after flame-retardant treatment was evaluated for Sungnyemun and Bulguksa Daeungjeon, which are open and closed wooden structures, respectively. As a result, no flashover occurred in both Daeungjeon of Bulguksa and Sungnyemun, which had been treated with flame retardant treatment. At 200 seconds after ignition, Daeungjeon of Bulguksa was less than 50MW and that of Sungnyemun was less than 10MW, which was 3.4~6.44 times lower than before flameproofing, and the maximum temperature was below 800 °C, confirming that flame growth was controlled.

**Keywords:** Fire Simulation, Wooden Cultural Property, Fire, Fire-proofing

\* 정회원, 전주대학교 소방안전공학과 교수, 국제응용시스템분석연구원 수석연구원(E-mail: 72donghyunkim@jj.ac.kr)

Member. Professor, Department of Fire and Safety Engineering, Jeonju University, Research Scholar, International Institute for Applied Systems Analysis



## 1. 서론

우리나라는 1986년 12월 6일 금산사 방화, 2003년 9월 30일 구룡사 누전화재, 2005년 4월 5일 낙산사 산불소실, 2006년 4월 26일 창경궁 화재, 2007년 4월 20일 불국사 화재, 2008년 2월 10일 승례문 화재 등으로 인해 국보 문화유산 소실과 문화유산 건축물 피해가 끊임없이 발생하고 있다. 세계문화유산 종교건축물인 노틀담 대성당에서 2019년 4월 15일 보수 공사 중 전기적인 원인으로 화재가 발생하였다. 노틀담 대성당은 석조구조물인 외벽과 기둥을 제외한 지붕 전정부와 3층 높이 이상 부위의 마감재는 주요 재료가 목재로 되어 있어 급속히 화재확산으로 이어져 소실되고 지붕이 붕괴된 바 있다. 이와 같이 목재로 이뤄진 건축물 구조는 화재에 취약한 재료의 특성으로 인해 최성기 이전 초기화재 진압이 이뤄지지 않으면 소실되고 붕괴되는 결과를 가져온다.

전통 방식의 목구조는 부재의 크기나 내·외부 개구부의 크기, 목조 결구 특성, 지붕 적심상태 및 주변 여건에 따른 풍속 등 다양한 조건에 의하여 동일한 화원으로 인한 화재라 할지라도 그 양상은 매우 다르게 나타난다(Kim, 2020). 건축물의 주요구조부 내화성능 또는 화재에 취약한 요인으로는 일반적 요인, 구조적 요인, 열적 요인으로 정리된다(KICEBT, 2020). 목조건축물 화재는 수직과 수평면의 연속된 목재재질의 구조부의 편면연소 형태를 나타내는데 이때 열전달 에너지가 일시적으로 체류하며 모이는 곳은 수직연소에서 수평연소로 이어지는 모서리 부분과 천정부인 특성에서 구조적 요인과 열적 요인이 결합되어 있다. 연료하중에 따른 열적 화재 취약성 연구에서는 건조된 목재의 평균 발열량 약 4,500kcal/kg을 적용한 목조문화유산 건축물의 단위 면적당 화재하중이 총 368kg/m<sup>2</sup>로 조사·연구된 바 있다(Kim, 2008). 일반적 요인에서 내화벽이 없고 화재시 창문과 출입문이 목재 및 종이재질의 가연물질로 되어 있어 화재초기에 외부의 공기 유입의 용이성으로 인한 화재의 급속한 확산이 일어날 수 있다. 불국사 대웅전 화재시뮬레이션 화재위험성 평가 선행연구에서도 화재발생 후 2분 내·외에 천정부 목재가 발화할 수 있는 온도환경에 도달한 것으로 밝혀진 바 있다(Kim, 2020).

기존 연구에서는 목재의 열적 특성에 대해 분석하였다. 목재 건축물의 능동적인 화재확산 방지대책 마련을 위해서는 이를 바탕으로 목조건축물의 화재발생시 취약부위를 확인하고 이에 대한 화재확산 대응을 위한 방법으로 방염처리를 통한 효과유무를 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 화재시뮬레이션 적용을 통해 대표적인 우리나라 개방형과 밀폐형 목재건축물인 승례문과 불국사 대웅전에 대해 화재취약성을 분석하고 취약부위에 방염처리 후의 화재확산 저감효과에 대한 분석을 실시하였다. 본 연구에서 제시한 방법을 통해 화재실험을 하지 않고서도 목조건축물의 화재확산 위험성 평가와 확산 위험 부위의 방염처리에 따른 화염확산 방지효과 분석을 실시할 수 있는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 연구수행 방법

### 2.1 화재 조건

대표적인 목재건축물인 불국사 대웅전과 승례문에 대해 화재시뮬레이션 적용을 위한 모델링을 실시하였다. 화재시뮬레이션 모델링은 미국 국립표준기술연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)의 Fire Dynamics Simulator(FDS, Ver. 6.7.5)을 이용하였다.

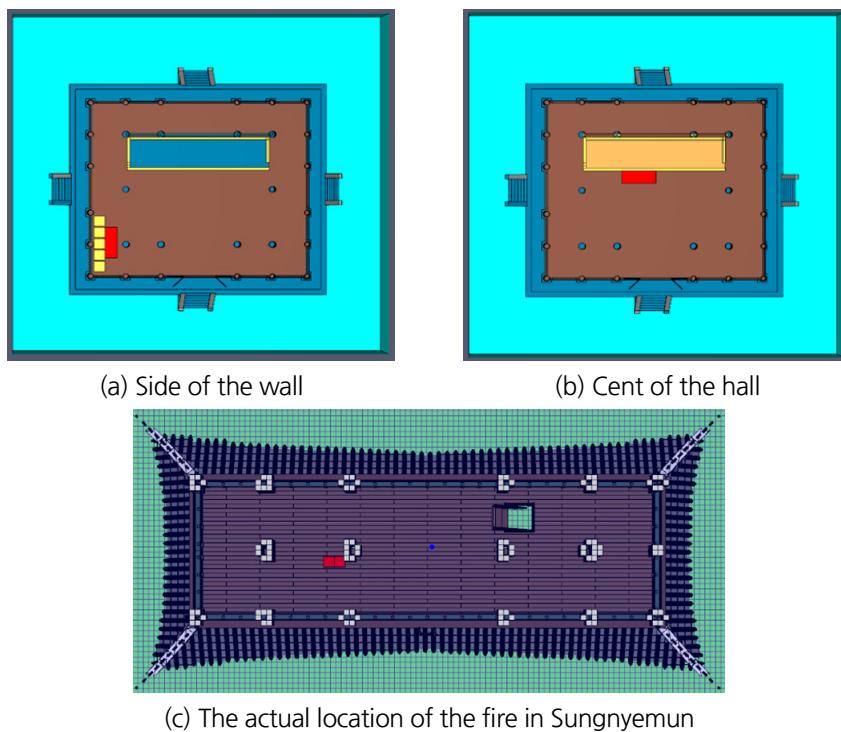
#### 2.1.1 발화원 및 발화위치

화재시뮬레이션 적용을 위한 화재시나리오 발화원은 Table 1과 같이 등유인 Kerosen 액체가연물 14.719kg을 이용하여 건축물 바닥면에 Liquid Pool Fire를 형성하는 것으로 하였다. Pool Fire가 형성되는 면적은 2.54m<sup>2</sup>이며 이에 따른 화재강도는 등유의 단위발열량 43.100kJ/kg(SFPE, 2016)을 적용하여 약 2,715kW/m<sup>2</sup>의 열을 방출한다.

불국사 대웅전 화재의 성상은 발화원의 위치에 따라 화염길이에 영향을 주고 모서리나 벽면에 위치할수록 화염의 길이가 길어지는 특성이 있다. 대웅전의 경우 가연물의 위치는 불단이 위치한 중앙부와 방석 등을 비치한 벽면 또는 모서리에 위치하므로 이러한 위치 특성을 반영하여 다음 그림과 같이 발화원의 위치를 가정하였다. 숭례문 화재시나리오는 실제 사건을 기반으로 분석하였으므로 실제 발화위치인 서측 중앙부 화재를 적용하였다. 숭례문의 경우 숭례문화재조사보고서(2008)에 기록된 최초발화지인 서측 중앙기둥 주변을 발화위치로 하였다.

**Table 1.** Fire Source and Pool Fire Condition

Items	Condition and Information	
	Factor	Value
Fire Source	Initial mass in vessel	14.719kg
	Total mass released	14.719kg
	Time needed to empty vessel	11s
	Maximum mass flow rate	2.6169kg/s
	Representative outflow duration	2.479kg/s
	Representative outflow duration	6sec
	Corresponding vessel pressure	1.0413bar
Pool Fire Condition	Equivalent diameter poolfire	1.7664m
	Calculated pool surface area	2.4506m <sup>2</sup>
	Combustion rate	0.15438kg/s
	Duration of fire	95.338sec
	Surface emission power flame	45.723kW/m <sup>2</sup>



**Fig. 1.** Fire Ignition position of Daeungjeon Hall of Bulguksa Temple (a, b) and Sungnyemun (c)

### 2.1.2 가연물

해당 대상 건축물인 목조건축물의 주요 재료인 소나무와 불국사 대웅전의 특성상 절 방석 가연물에 대해 Table 2의 조건을 적용하였다. 사찰의 방석 가연물은 현재 판매되고 있는 제품을 기준으로 조사하였으며 길이, 두께, 체적, 무게를 각각 측정하였다. 각 재질의 화염전파속도는 다음 수식 (1)에 따라 계산되는 것을 적용하였다.

**Table 2.** Fire Specifications of Flammable Materials

Properties	Materials		Condition and Information	
	Temple floore cushion	Wood ( <i>Pinus densiflora</i> )		
Conductivity (kW <sup>2</sup> s/m <sup>4</sup> K <sup>2</sup> )	0.035 <sup>1</sup>	0.147 <sup>2</sup>		
Specific Heat (kJ/KG-K)	1.3 <sup>1</sup>	2.8 <sup>2</sup>		
Densitity (kg/m <sup>3</sup> )	14.4 <sup>3</sup>	640 <sup>2</sup>		
Heat Release Rate (kW/m <sup>2</sup> )	385 <sup>4</sup>	216		
Flame Spread Velocity (m/s)	0.00292 <sup>5</sup>	0.000813 <sup>6</sup>		
Remarks	Superscripts Data from: 1,2: Insulation Materials _Department of Energy, 3: Measured data, 4: SFPE Handbook Table 3-1.3, 5: Study on upward flame spread of cotton fabrics with moisture regain, Case studies in Thermal Engineering, Vol.21, OCT. 2020, 6: SFPE Handbook Table 2-12.2			

$$V = \frac{\psi}{k\rho c(T_{ig} - T_s)^2} \quad (1)$$

여기서,  $V$ : 화염전파속도(m/s),  $\psi/k\rho c$ : 화염전파변수,  $T_{ig}$ : 점화온도(°C),  $T_s$ : 표면온도(°C)이다.

따라서 주 가연물인 소나무와 절 방석의 소재인 면화의 화재전파속도를 Table 3과 같이 산출하였다.

**Table 3.** Fire Specifications of Flammable Materials

Materials	Fire specification		$T_{ig}$	$T_s$
	$V(m/s)$	$\psi/k\rho c$		
Wood	0.000813	43	385	155
Cotton Cushion	0.00292	29.2	435	335

### 2.1.2 방염제

화재시뮬레이션에서의 방염제 처리는 국내에서 목재에 가장 많이 사용되는 에멀젼 수지를 주성분으로하는 방염도료로 처리면적은  $6.5m^2/l$ 의 사용량을 적용하였다. 사용한 방염제는 복사열 30kW 이하에서는 착화지연 효과를 적용하였고 30kW 이상에서는 착화지연 효과를 기대할 수 없는 실험데이터에 근거하여 방염조건을 설정하였다(Kim, 2009).

## 2.2 화재시뮬레이션 모델링

### 2.2.1 환기조건

시뮬레이션을 위해 적용한 환기조건은 연료지배형 화재를 기본으로 가정한다. 그 이유는 목조문화유산 화재 시 개구부인 출입문 및 건물의 통기성이 뛰어나며, 화재 시 문에 부착된 종이류 등의 연소는 쉽게 일어나 개방되는 것으로 판단하였

으로 문은 모두 개방된 상태로 적용한다.

### 2.2.2 공간격자의 구성

불국사 대웅전과 승례문에서의 화재시뮬레이션을 위한 격자계는 Table 4와 같이 생성하였다.

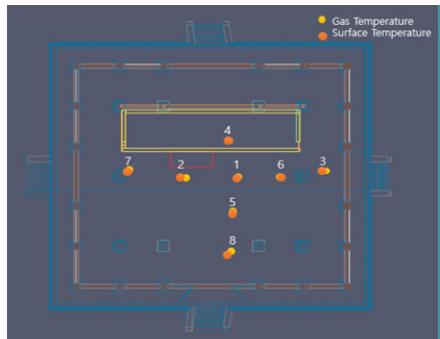
불국사 대웅전의 격자는 0.3m 간격으로 설정하였으며 전체 격자는 405,000개로 설정하였다. 승례문의 격자는 0.25m 간격으로 설정하였으며 전체 격자는 307,200개로 설정하였다.

**Table 4.** Spatial grid configuration for Daeungjeon Hall of Bulguksa Temple (a) and Sungnyemun (b)

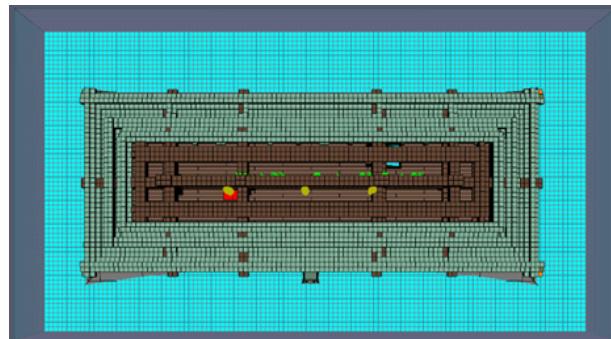
Grid Shape		Axis Items	X	Y	Z
(a)		Coodinates	30~57m	-4.5~22.5m	0~15m
		Grid number	90	90	50
		Interval	0.3	0.3	0.3
		Total Number of grid	90×90×50 = 405,000개		
(b)		Coodinates	8~38m	7~23m	11~21m
		Grid number	120	64	40
		Interval	0.25	0.25	0.25
		Total Number of grid	120×64×40 = 307,200개		

### 2.2.3 화재특성 측정 지점

불국사 대웅전과 승례문에서의 화재시뮬레이션 결과에 대한 온도측정 지점 좌표는 Fig. 2와 같이 각각 불국사대웅전 RT-02 (X: 40.7, Y: 8.5, Z: 8.0), 승례문 West-01(X: 18.5, Y: 14.35, Z: 14.0)이다.



(a) Side of the wall



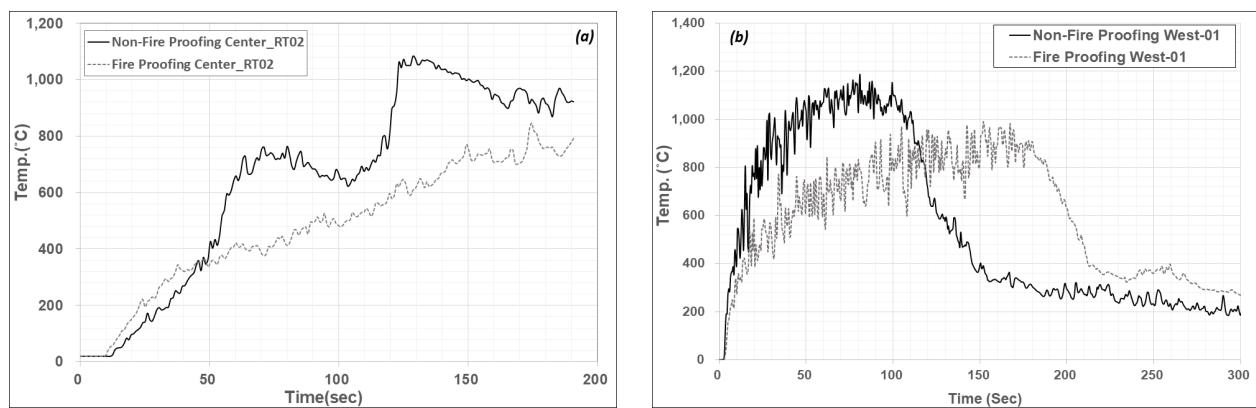
(b) The actual location of the fire in Sungnyemun

**Fig. 2.** Temperature measurement locaton of Daeungjeon Hall of Bulguksa Temple (a) and Sungnyemun (b)

## 4. 결과

### 4.1 온도 변화

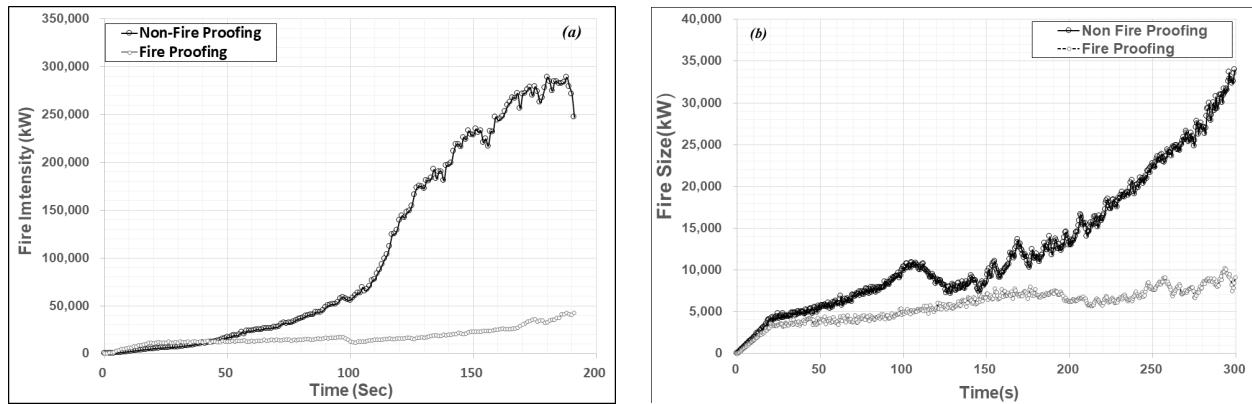
화재시뮬레이션 온도 분석 결과 Fig. 3과 같이 불국사 대웅전 내부 목재에 방염처리가 되지 않은 상태에서 RT-02지점에서 측정한 온도변화는 60초 후 600°C 이상 급격히 화재가 성장하였고 120초 경과에서 최대 1,040°C에 도달하였다. 방염처리 후의 온도변화에서는 방염처리하지 않은 상태에 비해 약 40% 낮은 온도 성장곡선을 유지하면서 1,750초 경과시 최대 820°C에 도달하였고 이후 온도가 하강하였다. 숭례문 내부 목재에 방염처리가 되지 않은 상태에서 West-01지점에서 측정한 온도변화는 15초 후 800°C 이상 급격히 화재가 성장하였고 80초 경과에서 최대 1,200°C에 도달하였다. 방염처리 후의 온도변화에서는 방염처리 전에 비해 약 35% 낮은 온도 성장곡선을 유지하면서 150초 경과 후 약 1,000°C에 도달했으며 180초 이후 급격히 온도가 하강하였다.



**Fig. 3.** Fire Temperature Change for Non Flame-Resistance and Flame-Resistance; at Point RT02 of (a) Daeungjeon in Bulguksa Temple and (b) at Point West-01 of Sungnyemun

### 4.2 화재강도

화재시뮬레이션 화재강도 분석 결과, Fig. 4와 같이 불국사 대웅전의 경우, 내부 목재에 방염처리가 되지 않은 상태에서 화재강도는 30초 이후 30MW 열방출율을 나타내며 성장하다 180초 지점에서 최대 290MW로 화재가 최성기에 이르렀다. 방염처리된 상태에서의 화재발화시에는 90초대에 최대 20MW 열방출율을 나타내었지만, 화재가 급격히 성장하지 않고 190초에서 최대 45MW로 나타났다. 방염처리 하지 않은 상태와 한 상태에서 45MW에 도달한 시간은 각각 80초, 190초가 걸려 방염처리 목재에서는 약 2.4배 지연되는 효과를 나타내었고 최대 화재강도는 각각 290MW, 45MW로 약 6.44 배 화재강도가 낮게 측정되었다. 숭례문의 경우, 내부 목재에 방염처리가 되지 않은 상태에서 화재강도는 30초 이후 4MW 열방출율을 나타내며 급격히 성장하다 화재시뮬레이션 최대 분석 시간인 300초 지점에서 최대 34MW로 화재가 최성기에 이르렀다. 방염처리된 상태에서의 발화시에는 30초대에 3MW 열방출율을 나타내었지만 화재가 급격히 성장하지 않고 290초에서 최대 10MW로 나타났다. 방염처리하지 않은 상태와 한 상태에서 10MW에 도달한 시간은 각각 100초, 290초가 걸려 방염처리 한 목재에서 약 2.9배 지연되는 효과를 나타내었고 최대 화재강도는 각각 34MW, 10MW로 약 3.4 배 화재강도가 낮게 측정되었다.



**Fig. 4.** Fire Intensity (kW) of Daeungjeon in (a) Bulguksa Temple and (b) Sungnyemun

## 5. 결론

본 연구에서는 수행한 목조건축물 문화유산에 대한 방염처리 전과 후의 화재확산 및 강도에 대한 화재시뮬레이션 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 방염처리하지 않은 불국사 대웅전에서의 화재성장은 일반적인 건축물에서의 플래쉬오버는 최소 300초, 평균 420초에 발생하는 것보다 2배 이상 빠른 화재성장을 나타내었다. 이 결과의 원인은 산소공급이 용이한 개구부 구조와 내부 전체가 목재로 구성되어 있어 가연물 연속성이 높기 때문이다. 승례문에서의 화재 성장은 발화 후 천천히 화재가 성장한 후 300초 지점에서 35MW급 화재로 성장하였다. 승례문에서는 플래쉬 오버는 발생하지 않았다. 이는 승례문 목재건축물의 특성상 벽체가 존재하지 않고 바닥과 기둥, 천장으로 이뤄진 구조로 벽면의 수직연소를 통한 화재확산 단계가 이뤄지지 않았고 4면 개방형 구조로 열손실이 발생하였기 때문으로 해석된다.
2. 방염처리한 불국사 대웅전에서의 화재확산 이후 화재강도가 강한 부위에 방염처리한 후의 화재성상은 플래쉬오버 현상이 발생하지 않았으며 발화 후 200초 경과에서도 50MW이하로 6.44배 낮은 화재강도를 나타내었다. 방염처리 전, 후의 120초 경과 후 지점에서의 온도는 각각 1,000°C 이상, 800°C 이하로 나타나 화염성장이 제어되는 것을 확인할 수 있었다. 승례문의 화재강도에서 방염처리하였을 경우 최대 10MW로 3.4배 이상 화재강도가 낮은 것으로 분석되었다.
3. 따라서 본 연구에서는 활용한 화재확산시뮬레이션을 이용한 목조건축물의 화염확산 취약부위의 확인과 방염처리 효과에 대한 평가 등의 과정을 통해 국내 목조문화유산에 대한 전체 화재위험성 분석과 함께 화재확산 위험성을 낮추기 위한 선별적 방염처리 기술을 적용하는 방법을 제시하였다.

앞으로 화재에 취약한 목구조의 건축물에 대해 목구조의 훼손 및 기능을 저해하지 않는다면 화재시뮬레이션 결과에 따른 화재확산 취약지점에 방염처리를 실시하여 화재확산을 자연시켜 위험성을 낮추는 방안을 적극 도입할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서 해결하지 못한 방염처리 경과 일수에 따른 실물 화재실험 및 주요 목조건축문화유산에 대한 건축구조별 화재위험 부위평가에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 소방청의 실감기반 첨단소방훈련체계연구사업(200008389)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

## References

- Corentin Macqueron (2014). "Computational fluid dynamics modeling of a wood-burning stove-heated traditional Sauna using nist's fire dynamics simulator." Corentin Macqueron, Computational Fluid Dynamics Engineer, pp.1-9.
- Gyeongju-si (2017). "Report on the painting pattern and precise survey about Daeungjeon-hall of Bulguksa temple" Gyeongju-si Service Report, p.633.
- Kang, S.-H. (2001). "Computer aided reconstruction of a destroyed ancient building : Daewoongjun in Bulguk-temple-" Paper for Master Degree, Ewha University, p.92.
- Kim, D.-H., et al. (2006). "A Study of Calory Analysis Methods about Surface Fire Fuel." J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.22, No.3, pp.258-264.
- Kim, D.-H., Jo, S.-S., Kim, S.-H., Lee, S.-G. (2020). "A Study on Fire Vulnerability Analysis of Wooden Cultural Property Using Fire Simulation - For Bulguksa Temple -." Journal of the Society of Cultural Heritage Disaster Prevention, Vol.5, No.3, pp.233-242.
- Kim, H.-J., Oh, K.-H., Lee, S.-E. (2009). "A Study on the Flame Resistance Performance with the Flame-Resistance Paints Treatment of the wood." Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Spring Conference, pp.396-403.
- Kim, S.-Y., Shin, Y.-J., Park, Y.-J., Lee, H.-P. (2008). "A Study on Fire Risk Assessment of the Temple Using Fire Loads." Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference, pp.409-415.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICEBT) (2020). The Development of Fire Risk Assessment Method with Fire Vulnerability of Building (2/3), KICT Report KICT 2020-116, pp.73-75
- Seoul Metropolitan Fire & Disaster Headquarters (2008). -Seoul Sungryemun- Arson Investigation Report, pp.1-56.
- SFPE (2016). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th edition, p.3493.
- Song, Y.-J., Gu, S.-H. (2016). "A Study on the Fire Alarm System of Vertical Fire Spread Structure by Using FDS." J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.30, No.5, pp.100-107.