

[Research Paper]

구획 화재에서 스프링클러 열 손실계수 변화에 따른 작동 시간 분석

유우준

동양대학교 건축소방안전학과 교수

Analysis on the Effects of the Heat Loss Coefficient on the Operation Time of Sprinkler in Compartment Fire

Woo Jun You

Professor, Department of Architecture & Fire Safety, Dong Yang University

(Received September 20, 2018; Revised October 4, 2018; Accepted October 8, 2018)

요 약

본 연구에서는 구획 공간 화재 시 발열량이 급격히 변하는 조건에서 스프링클러헤드의 손실인자 변화에 따른 작동시간을 분석하였다. 이를 위해서 내화보드로 구성된 구획 공간의 크기가 폭 0.3 m, 세로 0.5 m, 길이 3.0 m인 구조물을 제작하고 헵탄(n-Heptane) 풀 화재 실험을 수행하여 구획 공간 내부의 온도 분포, 헵탄의 질량감소율 그리고 발열량을 산출하였다. 또한, Fire Dynamics Simulator (FDS) Version 6.5를 사용하여 실험 조건과 동일한 발열량을 가정하고 스프링클러헤드의 설치위치 및 손실인자(C-factor) 변화에 따른 작동 시간을 분석하였다. 그 결과 반응시간지수(Response Time Index, RTI)가 100 (m·s)^{0.5}이고 작동온도가 72 °C인 스프링클러는 화원 상층부의 기류 온도가 100 °C에서 300 °C로 상승하고, 기류의 속도가 약 0.7 m/s인 경우 C-factor = 0과 1일 때 스프링클러의 작동시간은 최소 30 s~60 s, C-factor = 3일 때 62 s에서 최대 92 s, C-factor = 5일 때 120 s 이상으로 나타났다.

ABSTRACT

In this study, the experiment conditions for the variation of heat release rate in compartment space were constructed to analyze the effects of fire spread and the operation time of sprinkler in accordance with the heat loss of the sprinkler's heat element. The compartment composed of fire board (width = 0.3 m, height = 0.5 m, length = 3.0 m), are manufactured to measure the temperature distributions in the inner space, the mass loss rate and heat release rate during the experiment of N-heptane pool fire test. Also, the operation time of sprinkler is analyzed with the installation of sprinkler and C-factor using Fire Dynamics Simulator Ver.6 under the experiment conditions. The results show that the operation time of sprinkler, which has RTI 100 (m·s)^{0.5} operating temperature 70 °C, is 30 s~60 s for C-factor = 0 and 1, 62 s~92 s for C-factor = 3, and 120 s over for C-factor = 5, respectively.

Keywords : Sprinkler, C-factor, Operation time, Responsive time index, Heat release rate, Pool fire

1. 서 론

스프링클러 설비는 화재를 조기에 진압할 수 있는 가장 전형화된 소화설비 중 하나이다⁽¹⁻³⁾. 하지만 화재가 발생하였을 때 스프링클러의 작동이 지연되는 경우 발화 지점에서 지속적으로 생성되는 열 및 연기에 의해서 주위 온도가 상승하게 되어 주변의 가연물로 화재 확산이 급격히 이루어 질 수 있다⁽¹⁻⁵⁾. 따라서 스프링클러의 작동 시간은 화재

진압 유무를 결정지을 수 있는 매우 중요한 인자 중 하나이다. 특히, 스프링클러의 작동은 화원에서 발생한 열원에 의해서 감열부가 이탈 또는 용융되어 유수로가 개방되고 작동 유체인 물이 방사되는 구조로 구성되어 있다^(6,7). 이러한 이유로 국내를 포함한 유럽 및 아시아 등 세계 여러 국가에서는 감열부의 열전달 현상을 고려한 반응시간지수(Response Time Index, RTI)에 의해서 스프링클러의 감도시험을 적용하고 있다⁽⁶⁻¹⁰⁾. 하지만, 반응시간지수는 감열부가

등방성을 갖고 주위로 열손실이 없는 상태를 가정하여 유도된 관계식이기 때문에 스프링클러와 같이 배관 또는 작동 유체인 물과 접합되어 설치된 경우 접합부로 열 손실일 발생하여 작동 시간이 지연되는 현상이 나타날 수 있다^(1,8,9).

스프링클러의 감열부 열손실에 관한 연구로 Heskestad⁽⁸⁾은 기류의 온도와 속도를 일정하게 증가시키면서 감열부의 반응성을 고려한 반복시험에 의해서 수정된 반응시간지수(RTI_v)를 제시하였으며, 손실인자인 C-factor를 산출하기 위한 방안은 현재 FM Class 2000의 스프링클러 시험기준에 적용하고 있다⁽⁶⁾. Gustafsson⁽¹¹⁾는 스프링클러헤드 접합부에서의 열손실을 고려한 상변화인자(Change of Phase Parameter, CHP)를 적용하여 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 제시하였으며, Fire Research Station (FRS)에서는 단위시간당 온도상승률에 의해서 손실계수의 추정값을 적용하고 있다⁽¹²⁾. 하지만, 실제 화재 현상에서는 천장 기류의 온도가 실시간 변하는 조건에서 스프링클러 감열부로부터 접합부로 손실되는 열이 발생하기 때문에 작동시간을 정확히 예측하는 데에는 한계가 발생할 수 있다. 또한, 발열량이 급격히 증가하는 구획 화재에서 손실 계수가 매우 큰 스프링클러의 경우 작동 시간이 지연되어 화재가 확산되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구획 공간에서 헵탄 가연물을 사용하여 발열량이 급격히 증가하는 실험 조건을 구성하였으며, 국내의 시험기준에서 범용화된 기존 모델식(RTI, RTI_v)과 Fire Dynamics Simulator (FDS) Version 6.5 해석 프로그램을 사용하여 손실계수 변화에 따른 스프링클러의 작동시간에 관한 기초 연구를 수행하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론 정리

스프링클러 내부 감열부의 열전달 현상은 Figure 1과 같으며, Heskestad & Smith는 스프링클러헤드의 감열부가 균질 및 등방성을 갖고 열손실이 없다는 가정으로부터 전달 방정식 식 (1)에서 전도항을 생략하고 집중열용량법(Lumped Heat Capacity Method)을 사용하여 식 (2)의 RTI를 최초 제시하였다⁽⁶⁻⁹⁾.

$$mC_p \left(\frac{dT}{dt} \right) = hA(T_g - T) - t_r u^{1/2} \quad (1)$$

$$RTI = \frac{1}{\ln[1 - (\Delta T_{ca} / \Delta T_g)]} \quad (2)$$

여기서 m , C_p , h , A , T_g , T , RTI , t_r , u , ΔT_{ca} 그리고 ΔT_g 는 각각 감열부의 질량, 비열, 대류열전달계수, 기류에 접하는 감열부의 면적, 기류온도, 감열부 온도, 열반응지수, 작동시간, 기류속도, 초기온도와 작동 온도차 그리고 기류 온도 차이를 의미한다. 하지만, 식 (2)는 열손실 인자를 고려하지 않은 관계식으로 스프링클러헤드 접합부 전도에 의한 손실을 1차원 계수로 적용하여 표현하면 식 (3)과 같으

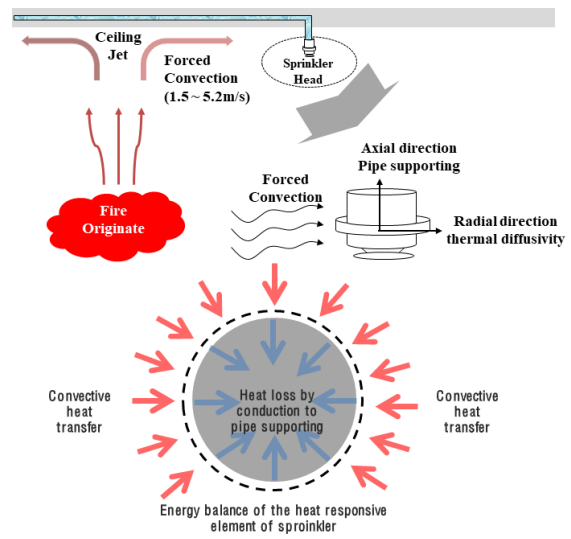


Figure 1. Schematic diagram of the heat transfer of the sprinkler.

며 Heskestad에 의해서 C-factor를 고려한 관계식은 최종 식 (4)와 같다⁽⁶⁾.

$$mC_p \left(\frac{dT}{dt} \right) = hA(T_g - T) - C'(T - T_0) - t_r u^{1/2} \quad (3)$$

$$RTI_v = \frac{RTI}{\left(1 + \frac{C}{u^{1/2}}\right) \ln[1 - \Delta T_{ca} \left(1 + \frac{C}{u^{1/2}}\right) / \Delta T_g]} \quad (4)$$

여기서 C' 는 형상 인자에 따라서 일정한 값을 갖는 상수이고 C 는 손실인자(C-factor)이다. 본 연구에서는 축소 실험 장치를 제작한 후 발열량이 급격히 증가하는 조건을 구성하여 시간 변화에 따른 온도 분포와 발열량을 측정하고 FDS를 사용하여 실험 조건과 동일한 상태에서 식 (2)로부터 RTI의 값이 $100 (m \cdot s)^{0.5}$ 이고 작동온도 $72 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 스프링클러헤드에 대해서 식 (4)의 RTI로부터 C-factor의 크기를 고려하여 스프링클러가 작동하는 시간과 화재가 확산될 수 있는 조건을 분석하였다.

2.2 실험장치 구성 및 실험 조건

Figure 2는 폭 0.3 m, 세로 0.5 m 그리고 길이 3.0 m의 축소형 구획 공간에서의 화재 실험 과정을 나타낸 것으로 외벽의 열전도 계수는 $0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인 내화보드를 사용하였으며, 가연물은 팬의 크기가 15 cm이고 순도 99%인 헵탄(n-Heptane)을 사용하였다.

Figure 3은 시간 변화에 따른 헵탄의 질량 감소율을 나타낸 것으로 연소시작 시간에서부터 120 s까지 연료의 질량 감소율은 $1.81 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 로 일정한 상태를 유지하고 있지만 그 이후 $7.13 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 로 연소율이 급격히 증가하였다. 이러한 결과는 구획 공간을 구성하고 있는 열전도 계수가 매우 작은 경우 벽면에서의 온도가 증가하여 구획 공간 내부로 방사되는 복사열전달의 크기가 증가하게 되고 주위의

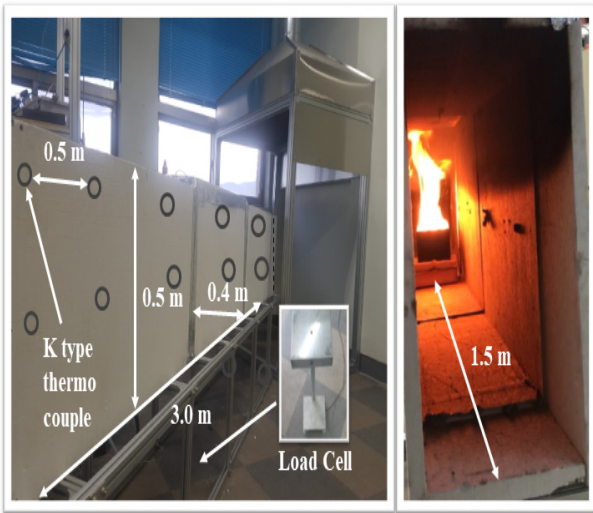


Figure 2. A picture of heptane pool fire experiment conditions in a compartment space.

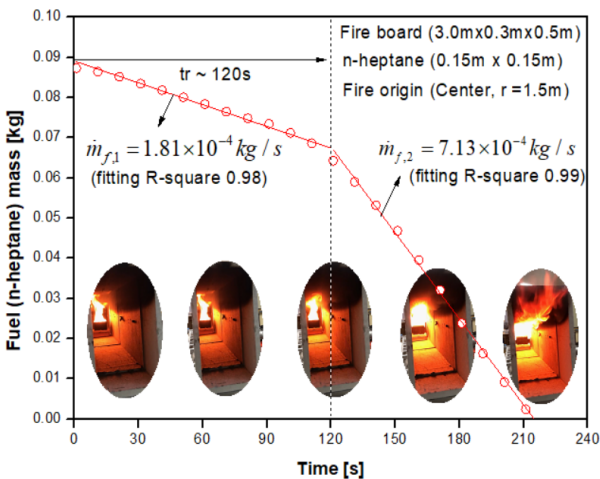


Figure 3. Fuel mass loss in a compartment space.

온도가 상승함에 따라서 나타난 결과로 판단된다⁽¹³⁾.

Figure 4는 발열량이 급격히 변하는 실험 결과를 검증하기 위해서 시간 변화에 따른 질량소모법과 산소소모지수법에 의한 콘칼로리미터의 발열량 산출한 값을 비교한 결과이다. 본 연구에서 사용한 콘칼로리미터의 주요 계측장비 사양으로 산소분석기는 지멘스 Ultramat OXY3690MP, 배기 덕트에서 질량 유속을 측정하기 위한 bi-directional 차압 센서는 dwyer MS311 그리고 진공 펌프는 DOA-P704-AC를

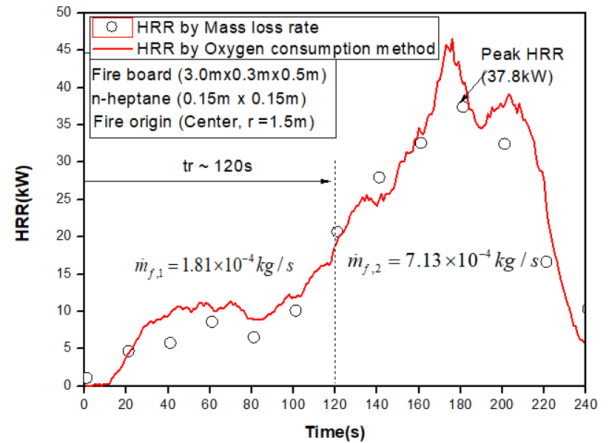


Figure 4. Heat release rate in a compartment space.

설치하였으며, 배기 덕트의 형상으로 인해서 내부 유동의 불안정성이 증가하여 측정 불확도 인자는 약 25% 정도로 계측된 발열량의 신뢰도는 다소 낮은 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구의 주요 목적은 발열량이 급격히 증가되는 실험결과를 화재 해석 입력 값으로 가정하여 스프링클러 감열부의 열적 특성을 분석하기 위한 것으로 Figure 3에서 헵탄의 질량이 감소되는 120 s 이후 구간과 Figure 4에서 발열량이 비례하여 증가되는 경향이 더욱 중요한 것으로 사료된다. 식 (5)와 식 (6)은 질량감소율과 발열량의 관계식을 나타내고 있으며, Table 1은 Figures 2~4로부터 도출한 본 연구의 실험 조건을 나타내고 있다.

$$\dot{Q} = \Delta h_c \times \dot{m} \times \eta \quad (5)$$

2.3 FDS 해석 조건

스프링클러의 C-factor 변화에 따른 작동시간을 분석하기 위해서 FDS 해석 프로그램을 사용하여 실험 조건과 동일한 상태를 모사하였다. 해석 공간의 격자 크기를 선정하기 위한 특성 화재직경의 관계식 및 선정 조건은 식 (6)과 같다⁽¹⁴⁾.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right) \quad \text{where } (10 \leq D^* \leq 20) \quad (6)$$

여기서 D^* , \dot{Q} , g , ρ_∞ , C_p , T_∞ 는 특성 화재직경, 최대 발열량, 중력가속도, 주변 공기의 밀도, 비열, 온도를 각각 의미하며, 적정 격자의 크기는 D^* 의 값이 10~20 범위임을

Table 1. The Obtained Conditions for Experiment of the Sprinkler's C-factor

Model Size [m]	Pool Size [m]	Fuel [-]	Experiment Time [s]	Mass Loss Rate [kg/s]	Maximum Heat Release Rate [kW]
0.3 × 0.5 × 3.0	0.15 × 0.15	N-heptane	0~120	1.81×10^{-4}	37.8
			120~210	7.13×10^{-4}	

Table 2. Input Values of C-factor and HRR

CASE Num.	FDS Input Parameter																																				
	C-factor	Transient Time	Peak HRR	HRRPUA	History of HRR																																
CASE01	0	tr = 120 s	37.8 kW	1680 kW/m ²	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>F [-]</th> <th>Time [s]</th> <th>F [-]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0.00</td> <td>142</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>0.11</td> <td>160</td> <td>0.87</td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>0.16</td> <td>180</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>64</td> <td>0.23</td> <td>200</td> <td>0.88</td> </tr> <tr> <td>82</td> <td>0.18</td> <td>220</td> <td>0.45</td> </tr> <tr> <td>102</td> <td>0.27</td> <td>240</td> <td>0.17</td> </tr> <tr> <td>120</td> <td>0.56</td> <td>260</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>	Time [s]	F [-]	Time [s]	F [-]	0	0.00	142	0.75	20	0.11	160	0.87	45	0.16	180	1.00	64	0.23	200	0.88	82	0.18	220	0.45	102	0.27	240	0.17	120	0.56	260	0.00
Time [s]	F [-]				Time [s]	F [-]																															
0	0.00				142	0.75																															
20	0.11				160	0.87																															
45	0.16				180	1.00																															
64	0.23	200	0.88																																		
82	0.18	220	0.45																																		
102	0.27	240	0.17																																		
120	0.56	260	0.00																																		
CASE02	1																																				
CASE03	3																																				
CASE04	5																																				

Defaults for Sprinkler : RTI 100 (m·s)^{1/2}, Operation Temperature 72 °C,

* No flow characteristics : Flow rate, Particle Velocity, Droplet diameter, Spray Angle, etc.

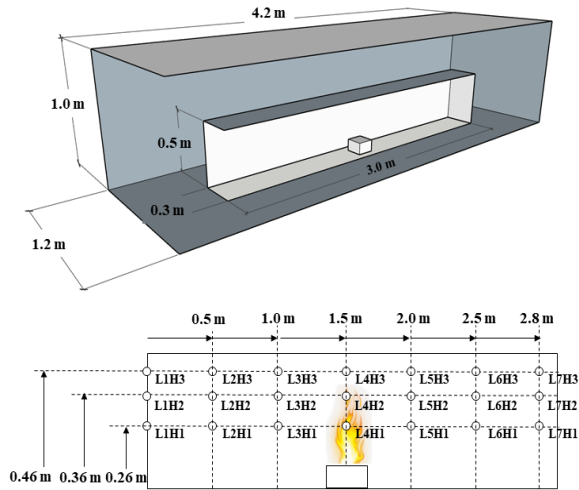


Figure 5. Modeling of the n-heptane (center) pool fire test with sprinkler in compartment.

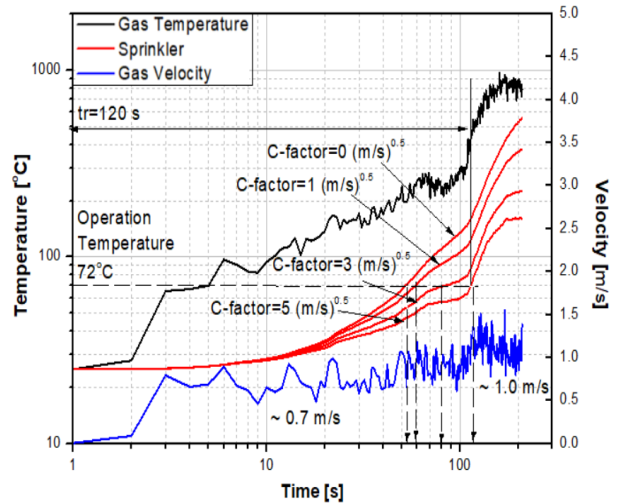


Figure 6. The results of gas temperature, velocity, C = 0, 1, 3, and 5.

의미한다⁽¹⁶⁾. 최대 발열량(\dot{Q})은 Table 1의 실험조건으로부터 $\dot{Q} = 37.8 \text{ kW}$ 를 적용하여 식 (6)의 무차원 격자 크기의 값에 대한 타당성(10~20)과 격자 의존성 평가를 수행한 결과 최종 격자의 크기는 2 cm로 하여 총 630,000개의 격자에 대한 해석을 수행하였다. 해석 장치의 사양은 Intel(R) Core i7-8770K @ 3.70GHz CPU를 갖는 PC에서 6개의 코어를 이용하여 Message Passing Interface (MPI) 병렬계산을 적용하였으며, 해석 모델은 Figure 5와 같다.

Table 2는 C-factor 변화에 따른 FDS 해석 Case를 나타낸 것으로 본 연구에서는 2.2절의 실험조건과 식 (2)와 식 (4)를 고려하여 스프링클러가 작동하기 이전까지의 결과를 분석하고자 한다.

2.4 결과분석

Figure 6은 Table 2의 해석 조건을 고려하여 화원 중심의 천장부($h = 0.46 \text{ m}$)에서 기류의 속도, 온도 및 C-factor 값에 따른 스프링클러의 온도를 나타낸 결과이다. 본 연구에서 고려한 스프링클러의 경우 RTI (C-factor = 0)는 $100 \text{ (m}\cdot\text{s)}^{0.5}$ 이고 작동온도 72 °C이며, 그림에서 보듯이 연소시간 10 s부터 연소율이 급격히 변하는 120 s 이전까지 기류의 온도는 약 100 °C에서부터 300 °C까지 상승하며, 기류의 속도는 약 0.7 m/s인 것을 확인할 수 있다. 또한, 구리, 주석 등의 혼합물질로 구성된 감열체의 열전도 계수(k , [W/m·K])와 원형의 감열체 형상에서 유속 0.7 m/s인 공기에 대한 대류 열전달 계수(h , W/m²·K)는 $O(\sim 10)$ 정도이며, 감열체의 크기는 일반적으로 0.1 m이하로 특성 길이(L)가 0.1 m보다 작기 때문에 Biot 수(hL/k)가 0.1보다 작게 되어 RTI 관계식

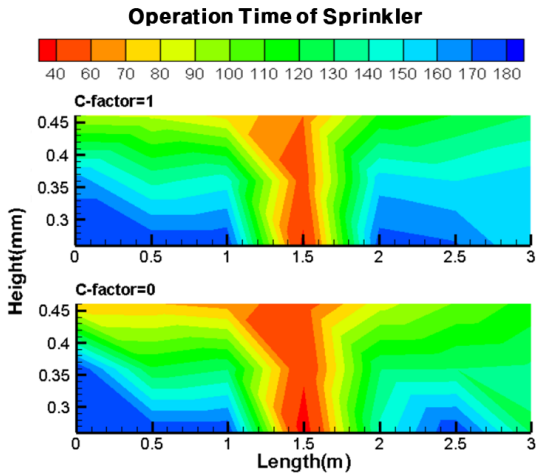


Figure 7. The results of operation time of sprinkler for C-factor = 0 and 1.

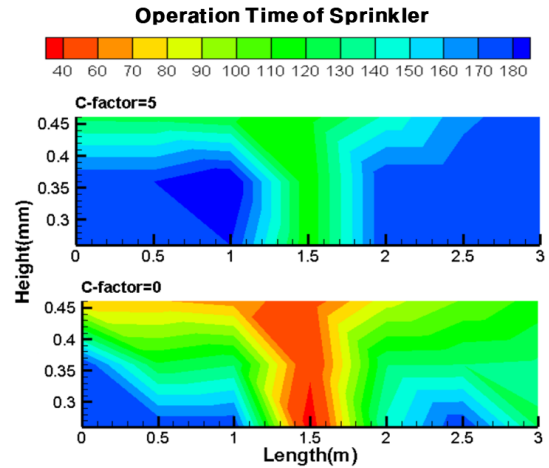


Figure 9. The results of operation time of sprinkler for C-factor = 0 and 5.

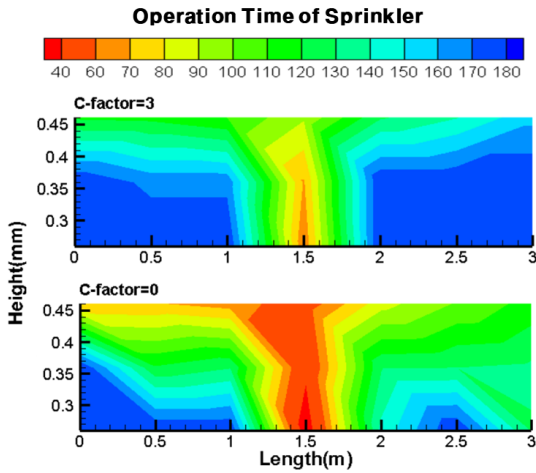


Figure 8. The results of operation time of sprinkler for C-factor = 0 and 3.

을 이용한 분석 방법의 타당성을 확인하였다^(1,15). 이러한 조건에서 FDS 해석결과 C-factor의 값이 0, 1, 3, 그리고 5인 각각의 경우에 대해서 스프링클러의 작동시간은 52 s, 60 s, 80 s 그리고 120 s 정도로 나타났다. 특히, C-factor의 값이 5인 경우 연소율이 급격히 증가한 시간과 동일하여 주위의 온도가 상승할 수 있기 때문에 화재 확산을 조기에 진압하기 위한 스프링클러 설비의 효율이 감소될 수 있는 것으로 사료된다.

Figure 7은 Table 2의 해석 조건에 대해서 Figure 5와 같이 구획 공간의 길이 및 높이 방향으로 각각의 지점에서 C-factor의 값이 0과 1인 경우 스프링클러의 작동시간을 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 C-factor 값이 0과 1인 경우 모두 화원 중심부에서의 평균 작동 시간은 40~90 s 정도이며, 화원 중심에서 멀어질수록 작동시간이 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 두 경우 모두 상층부에서의 작동 시간은 120 s 미만으로 연소율이 급격히 증

가하기 전에 물이 방사되어 주위의 온도를 감소시킬 수 있는 결과를 예측할 수 있다.

Figures 8, 9는 C-factor = 0에 대해서 C-factor = 3과 5 각각의 경우 스프링클러의 작동 시간을 비교하여 나타낸 것으로 Figure 7과는 상이한 결과를 보여주고 있다. 즉, 화원 근방 0.5 m를 제외하고 모든 구획공간에서 120 s 이후 스프링클러가 작동하는 것으로 예측되었으며, Figure 8의 화원 중심부의 작동시간은 최소 62 s에서 최대 92 s까지로 나타났다. Figure 9의 경우 화원 근방에서도 스프링클러의 작동 시간이 120 s 이상 소요되었으며, 이러한 결과는 스프링클러의 접합부에서 열 손실이 증가할수록 C-factor의 크기가 증가하게 되고 그 결과 스프링클러가 작동되는 시간이 지연됨에 따라서 주변으로 화재가 확산될 수 있는 가능성이 높아지는 것을 의미한다. 하지만, 본 연구는 스프링클러가 작동되기 이전의 분석 결과로 화재 확산 유무를 보다 정확히 판단하기 위해서는 향후 스프링클러의 분사 특성을 고려한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 구획 공간 화재 시 발열량이 급격히 변하는 조건에 대해서 스프링클러의 열 손실 계수인 C-factor 변화에 따른 작동시간을 분석하였다. 그 결과 내화보드로 구성된 구획 공간의 길이 3 m, 폭 0.3 m, 높이 0.5 m에 대해서 가연물인 헵탄을 사용하여 연소시간 120 s 이후 최대 발열량이 37.8 kW로 증가하는 실험 조건에 대해서 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 발열량 산출값을 적용하여 FDS 화재해석을 수행한 결과 RTI 100 (m·s)^{0.5}이고 작동온도 72 °C인 스프링클러는 기류의 온도가 100 °C에서 300 °C까지 증가하고 기류의 속도는 약 0.7 m/s 정도인 경우 화원 중심부에서 높이 0.46 m인 천장 지점에 대해서 C-factor의 값이 0, 1, 3, 그리고 5

일 때 작동시간은 52 s, 60 s, 80 s 그리고 120 s 정도로 나타났다.

둘째, FDS 해석결과로부터 구획 기류 온도 및 속도 조건에서 구획 공간의 길이 및 높이 방향을 고려하여 스프링클러의 C-factor 변화에 따른 작동시간을 분석한 결과 C-factor = 0과 1의 경우 화염 중심부에서 스프링클러의 작동시간은 최소 30 s에서 최대 60 s 정도로 유사한 결과를 나타낸 반면 C-factor = 3일 때 화염 중심부에서 스프링클러의 작동시간은 최소 62 s에서 최대 92 s, C-factor = 5인 경우 120 s 이상 소요되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 C-factor의 크기 변화에 따라서 스프링클러가 작동되는 시간을 정량화한 결과로 향후 스프링클러의 분사 특성을 고려하여 화재 확산 가능성을 판단하기 위한 기초 연구 자료의 활용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2017년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. W. J. You, G. H. Ko and H. S. Ryou, "Investigation of the Thermal Characteristics of a Circular Fusible-Type Sprinkler Using the Energy Transport Equation", *Fire Technology*, Vol. 52, No. 5, pp. 1409-1425 (2016).
2. W. J. You, H. J. Moon, M. C. Youm and H. S. Ryou, "An Investigation on the Thermal Characteristics of Heat-Responsive Element of Sprinkler Head", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 79-84 (2012).
3. Society of Fire Protection Engineers, "SFPE handbook of fire protection engineering", 4th edn, Chapter 2. National Fire Protection Association, Bethesda (2008).
4. V. Motevalli and S. Riahi, "Transient Ceiling Jet Temperature and Velocity Profiles in the Presence of an Upper Layer: Comparison with Predictions by LAVENT and JET Computer Fire Models", *Journal of Fire Sciences*, Vol. 26, No. 2, pp. 109-131 (2008).
5. T. Chen, H. Yuan, G. Su and W. Fan, "An Automatic Fire Searching and Suppression System for Large Space", *Fire safety Journal*, Vol. Vol. 39, No. 4, pp. 297-307 (2004).
6. FM Approval, "Approval Standard for Automatic Control Mode Sprinklers for Fire Protection", FM Class Number 2000 (2000).
7. Underwriters Laboratories, Standard for Automatic Sprinklers for Fire-protection Service, 8th edn, UL 199, Underwriters Laboratories 10. National Emergency Management Agency (2012) Standards of Model Approval and Inspection Technology for Sprinkler Head. Notice No. 2012-63 (1992).
8. G. Heskestad and R. G. Bill, "Quantification of Thermal Responsiveness of Automatic Sprinklers Including Conduction Effects", *Fire Safety Journal*, Vol. 14, No. 1-2, pp. 113-125 (1988).
9. J. S. Pepi, "Design Characteristics of Quick Response Sprinklers", Grinnel Fire Protection Systems Company (1986).
10. G. Heskestad and H. F. Smith, "Investigation of a New Sprinkler Sensitivity Approval Test: Plunge Test", FMRC 22485, Factory Mutual Research Corporation
11. N. E. Gustafsson, "A Three Parameter Model for Characterizing Sprinkler Sensitivity and Predicting Sprinkler Activation Times. Part 1 and 2", C.E.A Subcommittee (1988).
12. C. R. Theobald, "Thermal Response of Sprinklers Part 1. FRS Heated Wind Tunnel", *Fire Safety Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 51-63 (1987).
13. James G. Quintiere, "Principle of Fire Behavior", Delmar Publishers, pp. 2-3 (1998).
14. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Winschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST Special Publication 1019, p. 20 (2013).
15. T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt and A. S. Lavine, "Fundamentals of heat and mass transfer", John Wiley & Sons (2011).