

구획 공간에서 스프링클러의 방사각도 및 소화계수를 고려한 열손실계수와 온도분포 기초 연구

박소현*, 신연제*, 유우준**

*동양대학교 건축소방안전학과

† Corresponding author. Email: wjyou@dyu.ac.kr

A Fundamental Investigation on C-factor and Temperature Distribution Considering Droplet Size, Extinction Coefficient, and Discharging Angle of Sprinkler in Compartment Fire

Park So Hyeon*, Yeon-Je Shin*, Woo-Jun You**

*Dept. of Architecture&Fire Safety, Dong-Yang University

요약

본 연구에서는 구획 공간에서 스프링클러의 방사각도 및 소화계수를 고려한 손실인자와 온도분포 변화에 관한 해석 연구를 수행하였다. 이를 위해서 스프링클러 감열체의 열전달 현상과 액적의 크기 분포에 관한 Rosin-Rammler-Lognormal 관계식을 분석하여 주요 입력 변수를 선정하였다. 해석 공간은 폭 1.2m, 높이 1.0m 그리고 길이 4.2 m로 구성을 하였으며, 헵탄 풀화재 37 kW 조건을 구성하였으며, 액적의 평균 크기가 1,000 μm 로 일정한 조건에서 구획 공간에서 온도분포 크기 변화에 관한 주요 인자를 도출하였다. 하지만, 액적의 초당 발생되는 미립자 개수는 5,000/s로 실제 열전달 현상과는 차이가 발생할 수 있는 것으로 판단되며, 보다 정확한 원인을 도출하기 위해서는 액적 크기분포에 관한 기초 연구가 필요한 것으로 사료된다.

1. 서론

스프링클러 소화설비는 화재가 발생하였을 때 감열체에 의해서 화재를 감지하고 진압하는 가장 전형화된 소화설비이다[1-3]. 국내외의 스프링클러는 반응시간지수 (Response Time Index, RTI)에 의해서 감도시험을 적용하고 있다[4-8]. 하지만 반응시간지수는 감열부의 열전달 현상을 고려하지 않은 관계식이기 때문에 스프링클러의 열손실에 의하여 작동시간이 지연이 될 수 있다[1,5,6]. 이러한 문제점으로 인해 G. Heskestad 등은 스프링클러헤드 감열부의 열전달 현상에 적용할 수 있는 수정된 RTI_v의 개념을 제시하였으며[7], Gustafsson N. E는 스프링클러 접합부의 열손실을 고려한 유한요소법을 제시하였다[8]. 하지만 기류의 속도와 온도가 실시간으로 변하는 실제 화재 현상에서 접합부의 열손실 현상이 작동시간에 미치는 관계를 명확히 규명하는데 한계가 있는 것으로 사료된다. 또한 구획 공간에서 손실계수가 큰 스프링클러를 사용하였을 때 스프링클러의 작동이 지연되어 화재의 확산이 일어날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FDS(Fire Dynamics Simulation)모델링과 RTI 모델식을 사용하여 스프링클러의 살수 각도와 손실계수에 따른 작동시간에 관한 기초연구를 수행하고자 한다.

2. 본론

2.1 이론정리

화재발생시 스프링클러 헤드의 영향을 주는 열전달은 Figure 1에서 보듯이 등방성을 갖는 조건을 적용할 수 있으므로 식(1)과 같이 열전달 방정식을 단순화할 수 있다. Heskestad & Smith는 식(1)에서 집중열 용량 방정식을 사용하여 식(2)의 RTI를 제시하였다.

$$mC_p \left(\frac{dT}{dt} \right) = hA(T_g - T) \quad (1)$$

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

여기서 m , C_p , h , A , T_g , T , RTI , t_r , u , ΔT_{ea} 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 G. Heskestad는 접합부의 열손실을 고려하여 식 (3)과 같은 지배방정식을 제시하였다.

$$mC_p \left(\frac{dT}{dt} \right) = hA(T_g - T) - C'(T - T_0) \quad (3)$$

여기서 C' 은 손실인자를 고려한 계수를 나타내며,

$$\frac{dY}{dt} + YB(1+D) - BD \times \Delta T_g = 0 \quad (4)$$

여기서 $D = \frac{C'}{hA}$, $\frac{u^{0.5}}{RTI} = B$ 그리고 $\Delta T_g - \Delta T = Y(t)$ 을 각각 의미하며, 식 (4)는 비제차 선형미분 방정식의 형태 이므로 시간에 대해서 상미분을 하게 되면 아래와 같이 정리된다.

$$Y(t) = \frac{D \times \Delta T_g}{1+D} + C_1 \times e^{-(1+D)Bt} \quad (5)$$

식 (5)에서 경계조건 $t=0 \rightarrow Y(0)=0$ 을 적용하게 되면 C_1 은 식 (6)과 같다.

$$C_1 = \frac{\Delta T_g(1+D)}{1+D} - \frac{D \times \Delta T_g}{1+D} = \frac{\Delta T_g}{1+D} \quad (6)$$

치환상수 Y , B , 그리고 C 에 물리변수를 대입해 주고 식 (5)를 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{\Delta T_g - \Delta T}{\Delta T_g} = \left(\frac{1}{1+D} \right) (D + e^{-(1+D)\frac{u^{0.5}}{RTI}t}) \quad (7)$$

식 (7)을 RTI에 대해서 정리하면 식 (8)과 같이 정리된다.

$$\frac{\Delta T_g - \Delta T}{\Delta T_g} = \left(\frac{1}{1+D} \right) (D + e^{-(1+D)\frac{u^{0.5}}{RTI}t}) \quad (8)$$

여기서 D 는 $C'/(hA)$ 이고 대류열전달 계수는 유속의 0.5 지수승의 크기를 가지므로 식 (9)와 같다.

$$D = \frac{C'}{hA} \rightarrow \frac{C'}{hA} \equiv \frac{C}{u^{0.5}} \quad (9)$$

여기서 C 는 C-factor를 의미하며, 최종 식 (8)은 식 (10)과 같이 정리된다.

$$RTI_v = \frac{RTI}{(1 + \frac{C}{u^{1/2}})} = \frac{-t_r u^{1/2}}{\ln[1 - \Delta T_{ca} \left(\left(1 + \frac{C}{u^{1/2}} \right) / \Delta T_g \right)]} \quad (10)$$

스프링클러 방사각도와 손실계수 변화에 대한 구획공간 온도분포를 정확히 예측하기 위해서는 액적의 분포 특성과 소화계수를 FDS의 입력 변수로 결정해 주어야 한다. 특히, 노즐에서 물을 분사할 때 서로 다른 크기를 가진 액적으로 분열되며, 액적의 크기는 노즐의 형상에 따라 달라진다[10]. 따라서 각 노즐에서 분사되는 액적의 크기를 분석하기 위해서는 대표 입자의 크기를 결정해 주어야 하며, FDS에서는 중간 체적 입경(Median Volumetric Diameter, MVD)을 사용하거나, 액적의 크기분포모델로 Log-normal(LN) 및 Rosin-Rammler (RR) 그리고 RRLN 분포함수인 입경 분포 함수(Size

Distribution Function, SDF)를 사용한다[10,11]. LN 및 RR 분포함수는 다음 식과 같이 표현된다[11].

$$F(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^D \frac{1}{\sigma D'} \exp\left(-\frac{[\ln(\frac{D'}{D_{V,0.5}})]^2}{2\sigma^2}\right) dD' \quad (11)$$

$$F(D) = 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{D}{D_{V,0.5}}\right)^\gamma\right) \quad (12)$$

여기서 D 는 액적의 입경, $D_{V,0.5}$ 는 MVD, γ 과 σ 는 각 분포함수의 너비(폭)를 나타내며 실험상수이다. 또한 LN은 $D > D_{V,0.5}$, RR은 $D \leq D_{V,0.5}$ 이다. 그리고 RRLN 분포에서 σ 는 $\sigma = 2/(\sqrt{2\pi}(\ln 2)^\gamma) = 1.15/\gamma$ 의 관계를 가진다.

스프링클러의 화재 진압 예측을 위한 소화계수는 Yu et al.[12]에 의해서 제시되었으며, 물 분사 후 열 방출률은 다음 식과 같다.

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \exp[-k(t-t_0)] \quad (13)$$

여기서 $\dot{Q}(t)$ 는 물 분사 후 시간(t)의 열 방출률이며, \dot{Q}_0 는 물 분사 시점의 발열량이다. k 는 실험 상수이며, 단위 면적당 분사되는 물의 양인 \dot{m}_w'' [kg/m^2]에 함수이다. 총 열량이 보존되기 때문에 k 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \frac{\alpha(\dot{m}_w'' Q_w - \beta \dot{m}_f'' \Delta H_c + \dot{m}_f'' Q_p)}{\rho_f C (T_p - T_\infty)} \quad (14)$$

여기서 ρ_f , C , T_∞ 는 각각 연료의 밀도, 비열, 초기온도이며, T_p 는 연소 과정 중 연료층의 평균 온도이다. β 는 연료 표면에서 전달 되는 열방출률의 비율이며, \dot{m}_f'' 는 단위 연소 표면 적당 연소 속도이며, \dot{m}_w'' 는 연료 표면에 도달하는 단위 면적당 소화수의 질량이다. Q_p 는 연소 시 열량이며, Q_w 소화수의 증발잠열이다. Hamins 등은 FDS에서 소화 계수를 적용하기 위하여 식 13을 다음과 같은 수정 식을 제시하였다[12].

$$\dot{m}_f''(t) = \dot{m}_{f,0}''(t) e^{-\int k(t)dt} \quad (15)$$

여기서 $\dot{m}_f''(t)$ 는 물 사용 후 연료의 국부 질량손실률이며, $\dot{m}_{f,0}''(t)$ 는 물 사용 전 임의로 지정한 단위 면적당 연소율이다. 실험 상수 k 는 다음 식과 같이 시간의 함수로 표현할 수 있다 [13].

$$k(t) = E_COEFFICIENT \dot{m}_w''(t) \quad 1/s \quad (16)$$

여기서 $E_COEFFICIENT$ 는 소화계수 [$\text{m}^2/\text{kg} \cdot \text{s}$]이며, \dot{m}_w'' 는 단위 면적당 물의 질량이다. 소화 계수는 실험을 통해서 도출하여야 한다.

2.2 모델링 및 해석 조건

스프링클러의 C-factor 변화에 따른 작동시간을 분석하기 위해서 FDS 해석 프로그램을 사용하여 실험 조건과 동일한 상태를 모사하였다. 해석 공간의

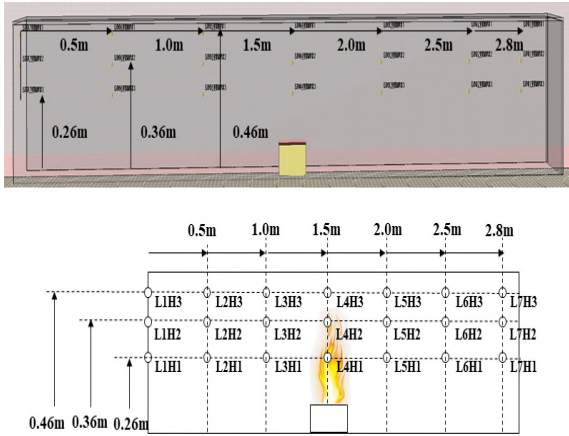


Figure 1. Modeling of the n-heptane(center) pool fire test with sprinkler in compartment.

격자 크기를 선정하기 위한 특성 화재직경의 관계식 및 선정 조건은 식 (11)과 같다[11].

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

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 의미한다[11]. 최대 발열량(\dot{Q})은 $\dot{Q} = 37.8 \text{ kW}$ 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 1과 같다.

Table 1은 스프링클러의 방사각도, 열손실계수(C-factor) 그리고 소화계수 변화에 따른 FDS 해석 조건과 주요 입력값을 나타내었다.

2.3 결과분석

Figure 2는 Rosin-Rammler-Lognormal 함수를 사용하여 분포상수 σ 와 γ 의 변화에 따라서 누적 체적 분율(Cumulative Volume Fraction)의 변화를 FDS를 사용하여 나타낸 결과이다. $D_{v,50} = 1,000 \mu\text{m}$, 체적유량(Q)= 80 L/min, 액적의 초기 유속(u_0) = 14 m/s 그리고 방사각도 Table 1. Numerical Conditions and Input values

Numerical Conditions			FDS Input Parameter		
C-factor	Extinction Coefficient	Spray Angle	Sprinkler Information	Heat Release Rate	Modeling
0	2 /s	0 ~ 30	Q=80 L/min Particle Velocity = 14 m/s $D_{v50}=1,000 \mu\text{m}$ Gamma_D=3.6 Sigma_D=1.92 Operation Temperature 72°C,	Peak HRR 37.8 kW HRRPUA 1680 kW//m ²	Domain 1.2m x 1.5 m x 4.2 m Cell Size : 2cm x 2cm x 2cm Fuel : N-Heptane Pool Size : 15 cm x 15 cm x 10cm Heat of Combustion : 44,600 kJ/kg
1	8 /s	0 ~ 60			
3	16 /s	0 ~ 90			
5	20 /s	0 ~ 120			

Defaults for Sprinkler : RTI 80(m·s)^{1/2}, Particle per second 5,000, (Θ)= 0° ~ 80°로 일정하게 설정해 주었으며, 그림에서

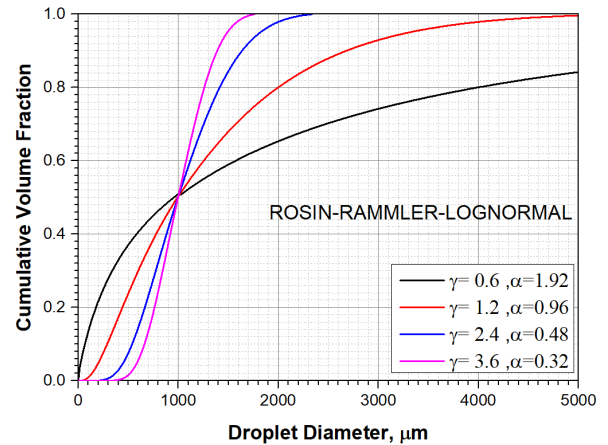


Figure 2. The Effects of Distribution Coefficients on the Cumulative Volume Fraction.

보듯이 γ 의 크기가 증가함에 따라서 보다 넓은 액적의 크기분포가 형성되는 것을 확인할 수 있다. σ 는 $1.15/\gamma$ 의 관계를 가지므로 γ 에 반비례하여 감소하게 되며 초당 발생하는 액적의 개수는 5,000으로 FDS의 default 값을 설정하였다. 따라서, 초당 동일한 액적이 분포된다는 가정을 하였을 때 γ 가 증가하게 되면 증위값인 1,000 μm 에 보다 많은 액적의 크기가 존재하게 되므로 화재 진압의 효과는 더욱 향상될 수 있는 것으로 판단된다. 화재가 진압되는 현상에 대해서 발열량 감소 분율을 결정해 주는 소화계수의 크기는 10 s^{-1} 로 동일하여 본 연구에서 도출한 결과는 실제 화재 현상과는 상이할 것으로 사료된다. 하지만 본 연구는 액적의 분포 특성이 동일하고 소화계수와 방사각도가 일정한 조건에서 손실계수 변화에 따른 구획 공간 내부의 온도분포가 해석 조건에 따라서 증감되는 효과를 기초 분석 하는데 보다 중요한 목적을 갖고 있다. 따라서 Table 1과 같은 해석 조건을 선정하여 손실계수가 0, 1, 3, 그리고 5인 조건에서의 내부 온도 변화의 크기를 나타내고자 한다.

Figure 3은 C-factor가 3이고 액적의 크기분포 및 유동 조건이 Table 1과 같을 때 FDS에서 스프링클러가 방사되는 현상을 나타낸 결과이다. 분포상수 Gamma_D=3.6

이고 Sigma_D=0.32인 범위에서 액적의 크기는 500 μm ~

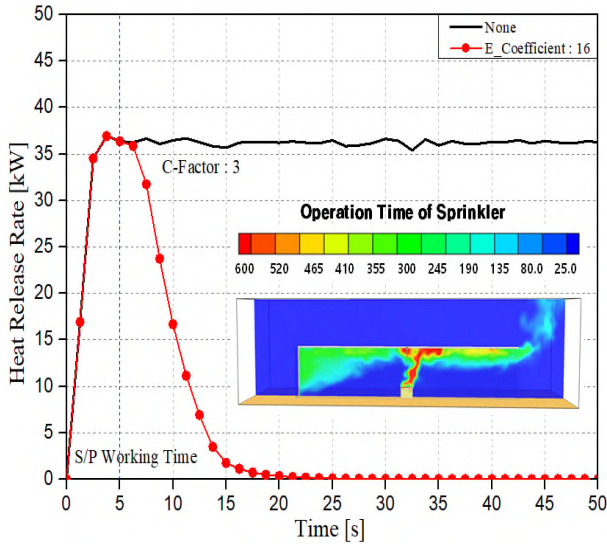


Figure 3. The Contour of the Temperature Distributions and the Flow Phenomenon of the Sprinkler at C-factor = 0, E_ccoefficient=2, and Spray Angle 0° ~ 80°.

1,500 μm로 분포되며, 그림에서 스프링클러는 화원의 상부에 있기 때문에 RTI=80에 도달하는 시간은 5~7초 정도로 계산되었다. 따라서 Table 2의 손실계수와 방사각도 그리고 소화계수 변화에 따른 FDS의 해석결과와 실화재 현상과의 차이점을 분석하기 위한 기초 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(19CTAP-C151893-01)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2018R1C1B5045686)입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

[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 HeatResponsive 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] FM Approval, “Approval Standard for Automatic Control Mode Sprinklers for Fire Protection”, FM Class Number 2000 (2000).

[5] 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).

[6] J. S. Pepi, “Design Characteristics of Quick Response Sprinklers”, Grinnel Fire Protection Systems Company (1986).

[7] G. Heskestad and H. F. Smith, “Investigation of a New Sprinkler Sensitivity Approval Test: Plunge Test”, FMRC 22485, Factory Mutual Research Corporation.

[8] 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).

[9] W. J. You, Y. J. Shin, J. W. Park, “Analysis of Correlations between Flow Rate, Pressure and Average Size of Droplet with Hydraulic Diameter of Water Curtain Nozzle”, vol.21,no.4,pp. 317-323 (7 pages) (2020)

[10] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model (Version 6.5.2)”, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA (2016).

[11] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator User’s Guide (Version 6.5.2)”, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA (2016).

[12] Yu, H.Z., Lee, J.L. and Kung, H.C, “Suppression of Rack-storage Fires by Water”, In: *Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium, International Association For Fire Safety Science*, pp. 901-912. (1994).

[13] Hamins. A., McGrattan. K.B, “Reduced-scale experiments on the water suppression of a rack-storage commodity fire for calibration of a CFD fire mode”. In: *Fire Safety Science. Proceedings of the Seventh International Symposium, International Association for Fire Safety Science*, pp. 457-468, 2002.