

[Research Paper]

화재성장시나리오에 따른 스프링클러 헤드의 작동조건

김성찬

경일대학교 소방방재학과 교수

Activation Conditions of Sprinkler Head Considering Fire Growth Scenario

Sung-Chan Kim

Professor, Department of Fire Safety, Kyungil Univ.

(Received August 13, 2020; Revised August 20, 2020; Accepted August 21, 2020)

요 약

본 연구에서는 스프링클러 헤드의 해석모델을 통해 화재성장모드별 스프링클러 작동시 연충기류의 열유동조건을 파악하고자 한다. 화원은 최대발열량 3 MW의 시간제곱의 화재성장을 가정하였다. 시험대상 스프링클러헤드는 작동 온도 65~105 °C, RTI 25~171 m^{1/2}s^{1/2} 범위의 표준형과 조기반응형 8종을 대상으로 한다. 연충기류의 온도와 감열부의 온도차는 화재성장이 느리고 스프링클러 헤드의 RTI값이 작을수록 감소하는 경향을 보였다. 스프링클러 헤드 작동 순간의 연충 기류 온도와 속도조건은 전체적으로 시험기준의 범위와 비교적 잘 일치하고 있으나 저성장 화재에서는 최저시험기준 이하의 온도와 속도조건에서 작동이 이루어질 수 있음을 파악하였다. 본 연구는 스프링클러 헤드의 작동에 대한 기초연구로서 시험기준의 신뢰성을 향상시키는데 기여할 수 있다.

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the gas temperature and velocity during sprinkler activation considering the fire growth scenario based on the thermal response model of the sprinkler. The fire source is assumed to have time square fire growth scenarios with a maximum heat release rate of 3 MW. Eight types of standard and fast-response sprinkler heads with an operating temperature range of 65–105 °C and a response time index range of 25–171 m^{1/2}s^{1/2} were adopted. The temperature difference between the gas stream and the sensing element of the sprinkler head decreased as the fire growth slowed down, and the RTI value decreased. The overall gas temperature and velocity conditions predicted using the FDS model at sprinkler activation were in reasonable agreement with those of standard test conditions of the sprinkler head response. However, the sprinkler head could be activated at lower limits of gas temperature and velocity under the current test conditions for a slowly growing fire scenario.

Keywords : Sprinkler, Fire growth, RTI, Activation temperature, Fire dynamics simulator

1. 서 론

스프링클러나 물분무시스템은 대표적인 수계소화설비 (Water based fire suppression system)로서 화재의 감지와 소화기능을 동시에 갖춘 능동형 화재방호수단(Active fire protection method, AFP)으로 인식되고 있다. 이들 시스템은 가압장치와 분사헤드를 통해 분무를 형성하며 용도에 따라 개방형 헤드나 폐쇄형 헤드가 적용된다. 폐쇄형 헤드의 작

동은 화재발생으로 인한 고온 기류로부터 헤드 감열부로의 열전달을 통해 감열부의 파손이나 용융이 발생하고 오리피스의 개방을 유도하여 2차 측의 유체를 방사하는 구조로 이루어진다. 따라서 분사헤드 감열부 주위의 열유동 조건에 따른 열전달 특성이 스프링클러 헤드 작동을 결정하는 가장 중요한 요소로 인식되며 열적 반응특성을 평가하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁻⁴⁾. 일반적으로 스프링클러 헤드의 감열부 열적특성은 기본적으로 작동온도 이의

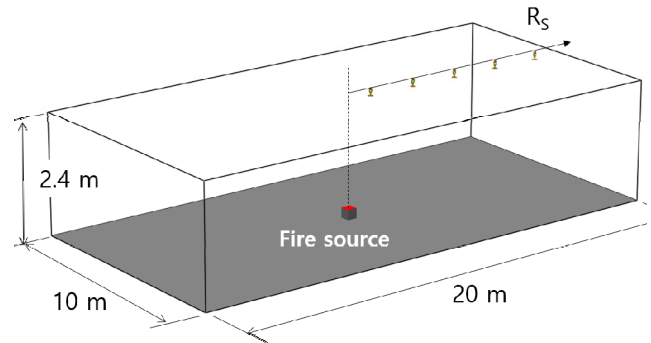
Table 1. Range of Plunge Test Conditions at Test Section

Nominal operating temperatures [°C]	Air temperature range [°C]		Air velocity range [m/s]	
	Std. Response	Fast Response	Std. Response	Fast Response
55~77	191~203	129~141	2.4~2.6	1.65~1.85
79~107	282~300	191~203		
121~149	382~432	282~300		
163~191	382~432	382~432	3.4~3.6	

에 반응시간지수(Response time index, RTI)를 통해 정량화되며 스프링클러 헤드의 반응특성에 관한 표준시험은 ISO-6182-1⁽⁶⁾이나 「스프링클러헤드의 형식승인 및 검정기술기준」 등과 같이 주로 플런지시험(Plunge test)이라는 고온기류에 노출된 헤드의 반응시간을 평가하여 이루어지며 이때 고온기류조건은 헤드 설치위치에서의 기류온도와 속도가 기본 인자가 된다. 국내의 경우 Table 1과 같이 헤드의 표시온도에 따라 표준반응(Standard response, SR), 특수반응(Special response), 조기반응(Fast response, FR) 등으로 구분하여 기류속도와 온도조건하에서 RTI를 평가하고 있다. 특수반응 헤드의 경우 시험온도범위는 조기반응헤드의 시험조건과 동일하고 속도는 2.4~2.6 m/s 범위를 공통으로 적용한다. 시험 진행 동안 온도는 129~141 °C 조건의 경우 ±1 °C, 그 외의 경우 ±2 °C 이내의 정확도를 가져야 하며 기류속도에 대해 3.4~3.6 m/s의 경우 ±0.04 m/s, 그 외의 경우 ±0.03 m/s의 정확도로 시험이 진행되어야 한다.

그러나 일반적으로 천정아래 설치된 스프링클러가 작동하는 조건은 화재로부터 발생된 부력유동과 천정제트의 열유동 조건에 의해 지배적인 영향을 받게 되며 이러한 조건은 화재성장특성과 외기조건 등에 따라 변화하기 때문에 위의 표준시험조건과 다소 차이가 있을 수 있다. 특히 Pepi⁽⁶⁾, Heskestad와 Bill⁽⁷⁾은 낮은 유속조건에서 스프링클러의 헤드프레임, 배관, 가압유체등으로의 열손실의 중요성을 제시하였으며 특히 헤드몸체와 감열체사이의 단열체가 있는 플러쉬형 헤드의 설계에서 열손실의 중요성을 보고하였다. Chow와 Ho⁽⁸⁾는 유리벌브형 헤드에 대해 1 m/s이하의 저속 고온 유동장하에서 측정된 RTI 값이 유속에 따라 차이를 보였으며 이러한 영향이 고온기류로부터의 대류열전달의 영향에 비해 배관으로의 열손실의 영향이 상대적으로 커지기 때문임을 제시하였다. Choi와 Yoon⁽⁹⁾은 저성장 화재에서 플러쉬형 헤드의 비정상적인 동작특성을 확인하였고 화재성장조건이나 헤드주위의 기류의 속도 및 온도 등의 상세조건에 대한 정량적인 분석은 미흡한 점이 있으나 스프링클러 헤드작동에 있어서 구조적인 문제와 시험기준의 개선이 필요함을 보고하였다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 화재성장모드별 천정아래 연층의 기류조건을 정량적으로 파악하고 스프링클러 헤드의 해석모델을 적용하여 헤드작동조건에서 열유동조건을 파악하여 현재 플런지시험에서 적용하고 있는 기류조건

**Figure 1.** Dimensions of the computational domain and sprinkler head locations.

의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 해석모델

2.1 감열부 작동모델

스프링클러 헤드의 작동모델은 주로 대류열전달을 고려하고 감열부의 균일 등방성을 가정한 집중열용량법(Lumped heat capacity method)을 적용한다. 여기서 고려하는 열전달 인자에 따라 1변수모델, 2변수모델, 3변수모델로 크게 구분되며 이에 대한 상세모델은 이전연구를 참고한다^(2,4,7). FDS 모델에서는 기존의 2변수모델을 기반으로 기류 내 존재하는 액적 등의 냉각효과를 고려한 해석모델을 적용하고 있다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\sqrt{|\mathbf{u}|}}{RTI} (T_g - T_i) - \frac{C}{RTI} (T_i - T_m) - \frac{C_2}{RTI} \beta |\mathbf{u}| \quad (1)$$

여기서 T 는 온도(°C), RTI는 반응시간지수($m^{1/2}s^{1/2}$), \mathbf{u} 는 기류속도(m/s), C 는 보통 C-factor로 불리는 열손실계수, C_2 는 실험상수, β 는 기류는 액적의 체적분율을 의미하고 하첨자 l, g, m 은 감열부, 기류, 마운트부를 각각 의미한다. FDS모델에서 스프링클러 헤드의 작동시간은 T_i 가 스프링클러 감열부의 작동온도에 도달한 시간으로 정의된다.

2.2 해석조건

스프링클러 작동예측과 기류 유동 해석에 적용된 프로그램은 FDS 버전 6.7.4이다. Figure 1에서 보는 바와 같이

Table 2. Thermal Properties of the Ceiling and Floor Material

Material	Density [kg/m ³]	Thermal conductivity [W/mK]	Specific heat [kJ/kgK]
Concrete	2,000	1.20	0.88
Gypsum board	1,440	0.48	0.84

Table 3. Summary of Activation Time and RTI for the Tested Sprinkler Heads

No	Manufacturer	Type	Activation Temperature [°C]	RTI [(m.s) ^{1/2}]
1	A	SR	68	104.5
2		FR	68	32.8
3	B	SR	72	110.4
4		FR	72	45.5
5	C	SR	93	91.8
6		FR	93	24.9
7	D	SR	105	171.3
8		FR	105	55.8

해석영역의 크기는 20 m × 10 m × 2.4 m이며 바닥과 천정면을 제외하고 모두 개방된 단일 개방공간으로 설정하였다. 해석격자의 크기는 0.1 m 정방형 격자를 적용하였으며 화재의 특성길이에 대한 격자크기의 분해능을 나타내는 화재해상도지수(Fire resolution index)는 15정도이다. 화원은 구획공간의 정중앙에 위치하며 한 변의 길이가 0.4 m 인 정방형 화원으로 연료는 n-Heptane을 가정하였다. 화원의 최대발열량은 3,000 kW이고 최대발열량에 도달하기 전까지 t² 화재성장을 따르며 slow (α = 2.93 W/s²), medium (α = 11.72 W/s²), fast (α = 46.89 W/s²), ultra-fast (α = 187.56 W/s²) 모드로 성장하는 것을 가정하였다.

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \tag{2}$$

바닥면과 천정면은 콘크리트와 석고보드로 각각 가정하였으며 해석에 적용된 재료의 열물성은 Table 2와 같다⁽¹¹⁾.

스프링클러 헤드는 천정아래 2 cm, 화원의 중심으로부터 R_s만큼 떨어져 있으며 R_s = 1, 3, 5, 7, 9 m 위치에 동일 장치물성을 가진 스프링클러 헤드를 배치하여 화원으로부터 거리에 따른 영향을 파악하였다.

본 연구에서는 스프링클러 헤드의 작동에 대해서만 고려하기 때문에 분사되는 유량은 0으로 설정하였으며 스프링클러 헤드의 작동이 화재유동장에 미치는 영향은 없다.

2.3 스프링클러 헤드

해석에 적용된 스프링클러 헤드는 일반형과 조기반응형

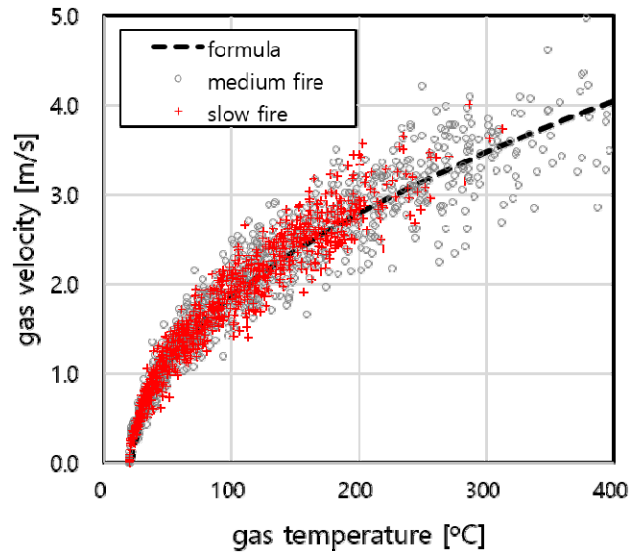


Figure 2. Relationship between gas temperature and velocity at R_s = 3 m for medium and slow fire.

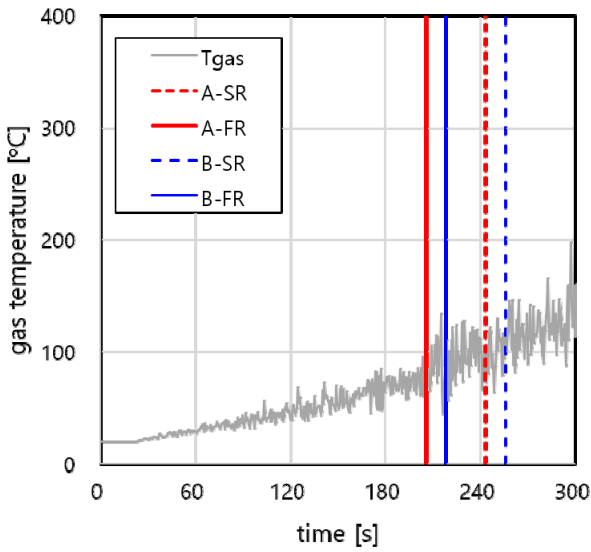
에 대해 각각 4종을 고려하였다. 스프링클러의 작동온도는 제조사의 사양에서 제시된 값을 이용하였고 RTI값은 제조사에서 직접 제공하지 않아 플런지시험을 통해 RTI 값을 직접 평가하여 적용하였다. Table 3은 화재해석에 적용된 스프링클러 헤드의 작동온도와 RTI값을 나타낸다.

3. 결 과

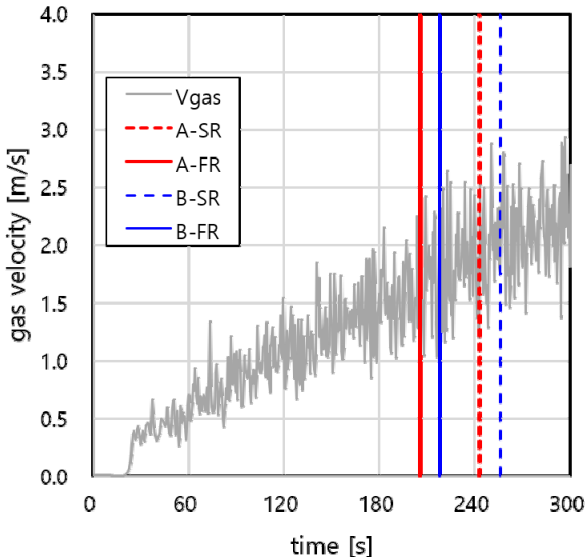
식 (1)에서 RTI값이 주어진 경우 스프링클러 작동과 관련된 핵심인자는 스프링클러 헤드 위치에서의 기류 속도와 온도가 된다. 연층의 기류 온도와 속도는 화재발열량, 천정 높이, 화원 중심축으로부터의 거리, 주변으로의 열손실 등 여러 가지 인자에 의해 영향을 받으며 다양한 경험식이 제시되어 있으나 기본적으로 연층의 속도와 온도 관계는 화재유동을 지배하는 무차원수인 Froude수에 의한 상관관계를 가진다.

$$\frac{u}{\sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T_\infty}\right)gH}} = f(r/H) \tag{3}$$

Heskestad와 Delichatsios⁽¹²⁾는 t² 화재성장에 대해 식 (2)와 유사한 형태의 경험식을 제시하였으며 동일 위치의 경우 우변은 상수가 되며 연층의 온도와 속도는 무차원 화재성장시간에 대해 일정한 관계를 보였다. Figure 2는 medium과 slow화재시 FDS 모델의 스프링클러 헤드 설치위치에서 계산된 온도와 속도관계와 식 (2)의 우변항의 무차원수가 0.2인 경우를 비교하여 나타낸다. 전체 화재성장단계에서 초기화재성장은 상대적으로 저온 저속의 연층 기류를 형성하



(a) gas temperature

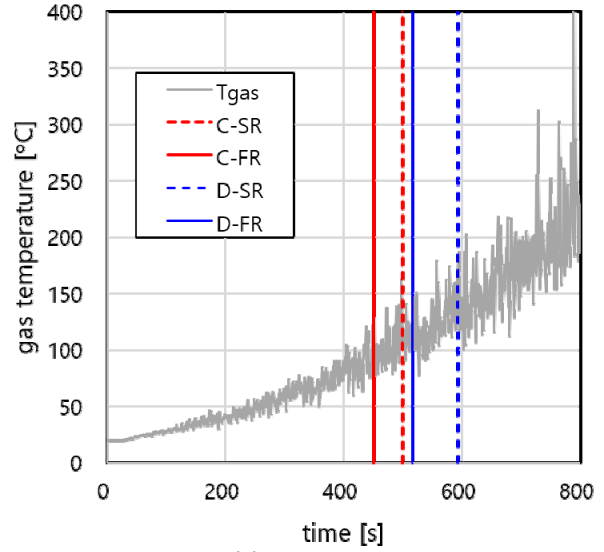


(b) gas velocity

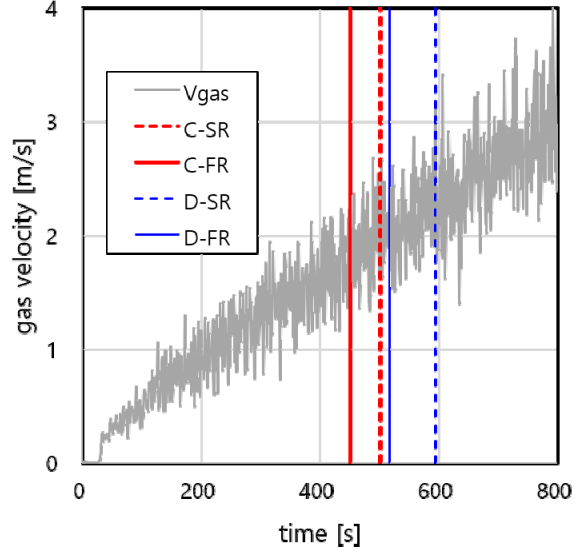
Figure 3. Time history of gas temperature and velocity at $R_s = 3$ m and predicted times of sprinkler activation for medium fire growth scenario.

며 비교적 섭동이 크지 않고 화재성장모드에 따른 편차가 크지 않다. 그러나 화재성장이 빠를수록 화재발열량의 섭동이 증가하고 이로 인해 연층부의 온도와 속도의 섭동값이 증가하게 된다. 전체적으로 FDS모델에서 예측된 연층부의 속도 온도관계는 상관식을 잘 따르고 있음을 보여주고 있다.

Figure 3은 medium 화재성장시 $R_s = 3$ m인 스프링클러 설치위치에서 연층 기류 온도와 속도의 시간에 따른 변화를 보여주고 있으며 동시에 A와 B사의 일반형(SR)과 조기반응(FR)형 스프링클러 헤드의 예측 작동시간을 나타낸다. A헤드의 작동온도는 B헤드에 비해 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 정도 낮고 RTI는 일반형의 경우 A 헤드가 약 5%, 조기반응형의 경우 28% 정



(a) gas temperature



(b) gas velocity

Figure 4. Time history of gas temperature and velocity at $R_s = 3$ m and predicted times of sprinkler activation for slow fire growth scenario.

도 낮기 때문에 상대적으로 빠른 작동을 예상할 수 있다. 조기반응형의 경우 작동되는 평균온도는 약 $70\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$, 평균속도는 $1.5\sim 1.6\text{ m/s}$ 이나 일반형의 경우 평균온도 $90\sim 110\text{ }^\circ\text{C}$, 평균속도 $1.7\sim 2.1\text{ m/s}$ 범위에서 작동이 예측되었다.

Figure 4는 slow화재 성장시 $R_s = 3$ m인 스프링클러 설치위치에서 연층기류의 온도와 속도의 시간변화를 나타내고 있으며 C, D 스프링클러 헤드의 일반형과 조기반응형 헤드의 예측 작동시간을 동시에 비교하여 나타낸다. D헤드는 C헤드에 비해 작동온도가 $12\text{ }^\circ\text{C}$ 높을 뿐만 아니라 RTI 값이 거의 두 배 정도 크기 때문에 일반형과 조기반응형 모두 C헤드가 D헤드에 비해 빨리 작동되고 있다. 일반적으로 화재성장이 빠른 경우 연층의 기류온도 상승에 비해 감

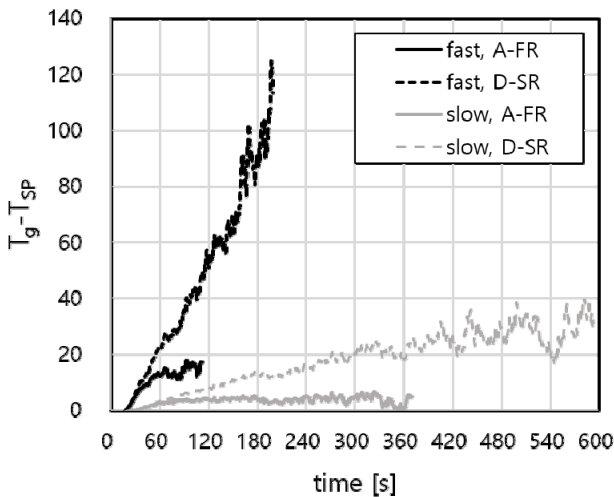


Figure 5. The predicted temperature difference between gas stream and sprinkler sensing element according to the sprinkler head type and fire growth scenario ($R_s = 3$ m).

열부의 온도상승이 상대적으로 느리기 때문에 스프링클러 헤드가 작동하는 순간의 감열부와 기류의 온도차는 상대적으로 크게 나타난다.

Figure 5는 시험대상 스프링클러 헤드 가운데 RTI값이 가장 작은 A-FR헤드와 RTI값이 가장 큰 D-SR헤드를 대상으로 스프링클러 헤드 작동직전까지 기류 평균온도와 감열부 온도차를 fast와 slow 화재성장시나리오에 대해 비교하여 나타낸다. 여기서 기류의 평균온도는 해당 시간을 기준으로 ± 2 s 동안의 이동 평균값으로 계산하였다. 일반형 헤드인 D-SR 헤드의 경우 fast성장화재에서는 헤드작동시간 최대 100 °C 이상의 온도차를 보였으나 slow성장화재에서는 40 °C 이내의 온도차를 보였다. 조기반응형 헤드인 A-FR 헤드의 경우 fast성장화재에서는 20 °C 이내의 온도차를 보였으나 slow성장화재에서는 5 °C 이내로 가장 작은 온도차

를 보였다. 따라서 화재성장이 느리고 RTI값이 작을수록 헤드작동순간의 감열부와 기류의 온도차는 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 6은 slow 성장 화재시나리오에 대한 스프링클러 헤드의 작동시간과 연층 기류온도 및 속도의 관계를 설치 위치별로 정리하여 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 헤드 작동순간의 온도는 화재성장이 느릴수록 낮게 나타났으며 slow화재성장에서 작동순간의 연층 기류온도가 가장 낮게 나타났다. 화원에서 멀어짐에 따라 스프링클러 헤드의 작동시간 범위는 증가하고 연층 기류온도와 속도의 범위는 감소하는 경향을 보인다. 반면 화원에 가까울수록 스프링클러 헤드들의 작동시간 범위는 감소하고 연층 기류온도와 속도 범위는 증가하는 경향을 보였다. 즉 스프링클러 작동시 연층 기류 온도와 속도에 대한 헤드의 작동시간 관계는 주어진 온도조건에 대한 헤드들의 민감한 정도를 의미하고 화재성장이 느리고 화원으로부터 거리가 멀어질수록 스프링클러 헤드 열적 반응성의 영향이 증가함을 보여준다.

Figure 7은 $R_s = 1, 3, 5$ m 위치에서 스프링클러 헤드 작동순간의 연층 기류 온도와 속도의 상관관계를 화재성장시나리오별로 나타내며 오차막대는 ± 2 s 동안의 표준편차를 의미한다. 화재성장이 느릴수록 스프링클러가 작동되는 연층 기류온도는 감소하는 경향을 보이고 있으며 이에 따른 기류의 평균속도도 감소하는 경향을 보이고 있다. 4가지 화재성장시나리오에 대해 연층 기류의 최소온도와 속도값은 slow 화재성장에서 72.5 °C와 1.4 m/s로 각각 평가되었으며 최대온도와 속도값은 ultra-fast화재성장에서 368 °C와 4.4 m/s로 평가되었다. 이는 작동시간에 차이는 있으나 스프링클러 헤드의 작동을 결정하는 연층 기류의 온도와 속도 범위가 화재성장 정도에 따라 매우 폭넓은 범위에서 존재함을 보이고 있다. Table 1과 같이 스프링클러 헤드의 시험조건과 비교해보면 연층 기류의 속도는 시험기준인 1.65~3.6 m/s의 범위에서 전반적으로 화재성장에 따른 기류

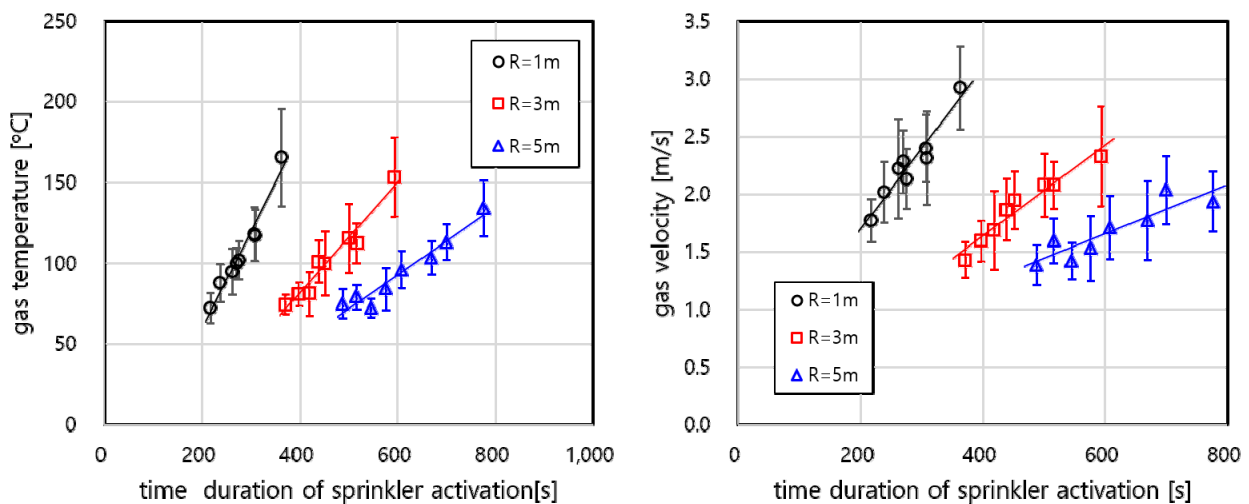


Figure 6. The predicted gas temperature and velocity according to the time of sprinkler activation for slow fire growth scenario.

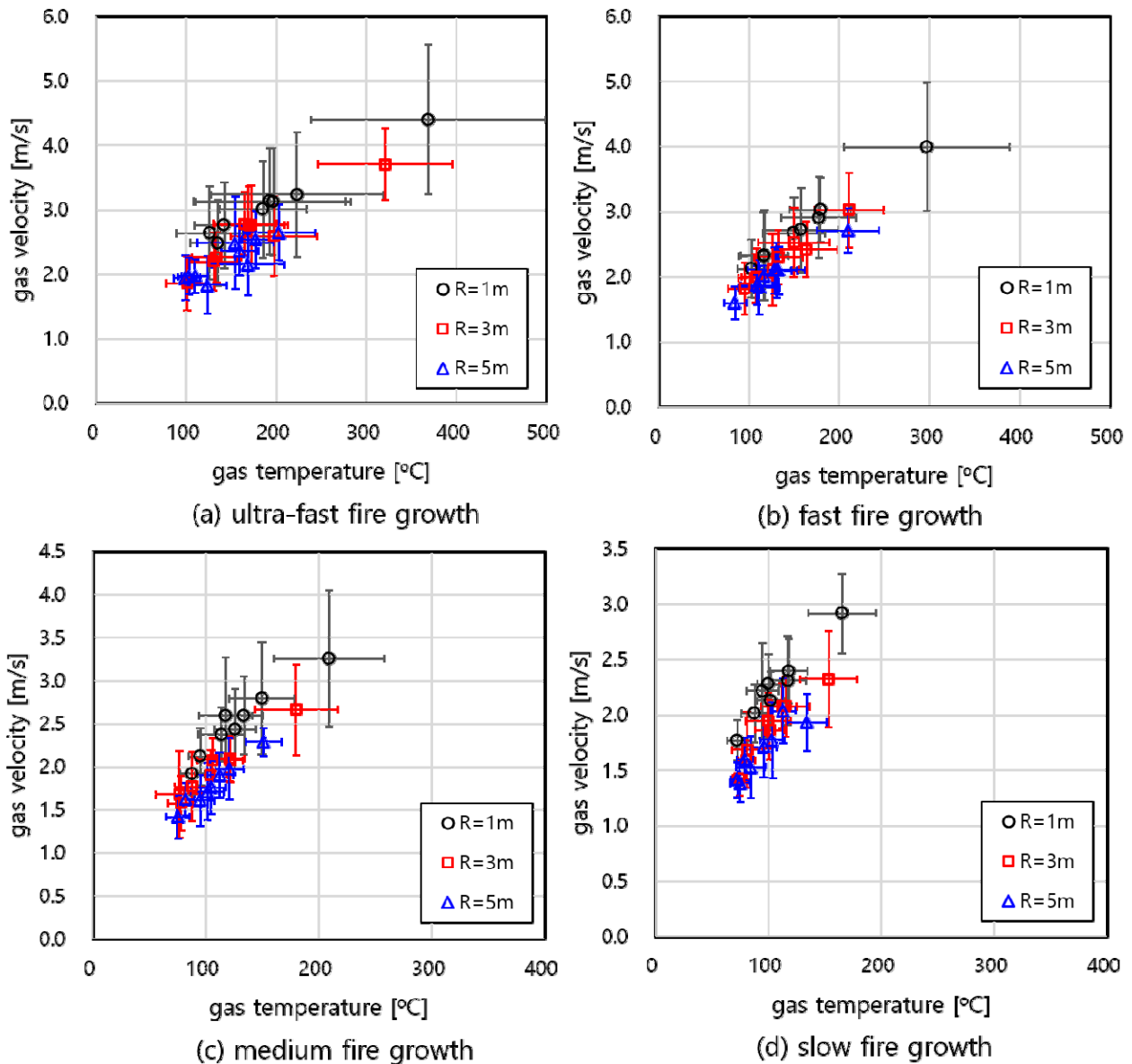


Figure 7. Relationship between gas temperature and velocity at the time of sprinkler activation.

속도범위 내에 존재하지만 medium 이하의 저성장 화재시나리오에서는 이보다 낮은 연층 기류 속도가 존재할 수 있음을 보여준다. 한편 연층기류 온도의 경우 시험기준인 129~432 °C 범위 내에 있으나 A-FR헤드의 경우 4개 화재성장 시나리오 모두 이보다 낮은 온도에서 작동이 이루어질 수 있는 것으로 평가되었다.

4. 결 론

본 연구는 화재성장 시나리오에 따른 스프링클러 헤드의 작동 시 열유동 조건을 파악하기 위해 화재해석 전용 프로그램인 FDS 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

천정아래 연층 기류의 온도와 속도와의 상관관계는 측정 위치나 화재성장시나리오별로 섭동의 일부 차이는 있으나 전체적으로 Heskestad 등이 제시한 Froude 무차원수 모델을 잘 따르고 있으며 특히 본 연구의 관심 대상인 medium이나 slow 화재의 경우 섭동값의 범위가 상대적으로 작게 나타났다.

화재성장이 상대적으로 느리고 스프링클러 헤드의 RTI 값이 작을수록 연층 기류의 온도와 감열부의 온도차는 감소하는 것으로 나타났으며 slow 화재성장 시나리오에서 조기반응형 헤드의 경우 5 °C 이내의 연층과 감열부의 온도차를 보였다.

현재 스프링클러 헤드의 시험기준은 4가지 화재성장 시나리오에 대해 스프링클러 작동시 연층 기류의 온도와 속

도 범위를 전체적으로 잘 포함하고 있으나 일부 저성장 화재에서는 이보다 낮은 연층기류의 온도와 속도 범위가 존재할 수 있음을 파악하였다. 따라서 스프링클러 헤드의 작동 신뢰성을 높이기 위해서는 시험기준에 대한 보다 명확한 근거의 확보와 함께 저성장 화재조건에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 화재시나리오에 따른 열유동과 스프링클러 헤드 작동에 관한 기초연구로 수치해석을 통해 기본적인 화재조건을 파악하였으며 추가적으로 저성장 화재조건에 대한 플런지 시험을 통해 스프링클러 헤드의 작동조건을 실험적으로 파악하여 스프링클러 헤드의 작동 신뢰성을 높이는데 기여하고자 한다.

후 기

본 연구는 2020년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. G. Heskestad and H. F. Smith, "Plunge Test for Determination of Sprinkler Sensitivity", Report FMR J 71 3A1E 2RR, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA (1980).
2. C. R. Theobald, "Thermal Response of Sprinklers. Part 1. FRS Heated Wind Tunnel", Fire Safety Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 51-63 (1987)
3. C. R. Theobald, S. A. Westley and S. Whitbread, "Thermal Response of Sprinklers. Part II. Characteristics and Test Methods", Fire Safety Journal, Vol. 13, No. 2, pp. 99-114 (1987).
4. 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", Fire Science and Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 79-84 (2012).
5. ISO 6182-1, "Fire Protection - Automatic Sprinkler Systems - Part 1: Requirements and Test Methods for Sprinklers", International Standard Organization (2014).
6. J. S. Pepi, "Design Characteristics of Fast Response Sprinklers", Grinnell Fire Protection System Co., Providence, RI (1986).
7. G. Heskestad and R. G. Bill, "Conduction Heat-Loss Effects on Thermal Response of Automatic Sprinklers", FMRC J. I. OMOJ5.RU, Factory Mutual Research Corp., Norwood, MA. (1987).
8. W. K. Chow and P. L. Ho, "Thermal Response of Sprinkler Heads in Hot Air Stream with Speed Less Than 1 m/s", Fire Science and Technology, Vol. 12, No. 1, pp. 7-22 (1992).
9. Y. S. Choi and J. C. Yoon, "An Experimental Study on Characteristics of Sprinkler Head Activation in Low Growth Rate Fire", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 5, pp. 26-35 (2016).
10. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd and M. Vanella, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model", NIST Special Publication 1018-1, 6th Ed. (2019).
11. J. G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior", 2nd Ed., CRC Press (2016).
12. G. Heskestad and M. A. Delichatsios, "The Initial Convective Flow in Fire", International Symposium on Combustion, Vol. 17, No. 2, pp. 1113-1123 (1979).