

스프링클러 분무가 화재유동특성에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구

김성찬

경일대학교 소방방재학과

A Numerical Study of the Effect of Sprinkler Spray on the Flow Characteristics Induced by Fire

Sung-Chan Kim

Dept. of Fire Safety, Kyungil Univ.

(Received September 7, 2012; Revised October 12, 2012; Accepted October 12, 2012)

요 약

본 연구는 수치적 접근방법을 통해 스프링클러 분무가 화재공간내부 유동특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 화재 유동 및 분무유동장 해석을 위해 적용된 수치해석모델은 FDS 5.5.3이며 격자독립성시험을 통해 최적 격자를 선정하였다. 수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위해 Magnone 등이 수행한 실험결과와 비교 분석을 수행하였으며 FDS 모델에 의해 계산된 화재공간 내부의 온도분포는 실험결과와 비교적 잘 일치하였으나 스프링클러 분사유량이 증가함에 따라 오차는 증가하는 경향을 보였다. 또한 이전 연구와 같이, FDS 계산결과는 스프링클러 분무에 의해 화재실 출입구를 통한 연소생성물의 유출질량유량이 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구는 스프링클러 분무가 포함된 화재유동장에 대한 모델의 타당성을 확보하고 스프링클러 시스템의 최적화에 기여할 수 있다.

ABSTRACT

The present study investigates the effects of sprinkler spray on fire driven flow characteristics in a compartment based on numerical approach. The FDS (Fire Dynamics Simulator), a widely used fire field model, was used to simulate the fire induced flow and sprinkler spray and a series of grid independence tests have been performed to obtain the optimal grid size. In order to validate the result predicted by FDS model, the calculated results were compared with experimental results of Magnone et al.. The FDS model matches quite well to experiments in temperature profile and mass flux through doorway, however, the discrepancy between the FDS model and experiments increases with increasing water discharge rate. As with previous study, the FDS calculation also shows a decrease of mass flow rate of combustion products through doorway due to the sprinkler spray. This study can contribute to optimize the sprinkler system design and verify the validity of the fire field model with sprinkler spray.

Keywords : Fire safety, Sprinkler, Spray, Doorway flow, Compartment fire

1. 서 론

스프링클러 설비는 가장 보편적으로 널리 적용되는 수계소화설비로써 주로 화재의 직접소화, 가연물의 적심효과, 화재공간의 냉각효과를 도모하여 초기에 화재를 진압하는 대표적인 소화설비로 인식되고 있다^(1,2). 또한 스프링클러 분무는 화재공간내의 연기입자를 제거하여 피난경로를 확보하는데 기여할 뿐만 아니라 분무입자에 의한 복사열 차폐효과를 통해 화원으로부터 인접가연물로의 화염전파를 억제하는 기능을 가진다. 최근에는 스프링클러 작동시 출입구를 통해 배출되는 연소가스의 질량유량에 미치는 영

향에 대한 연구에 관심이 증대되고 있다. Crocker⁽³⁾는 구획공간 화재실험에서 출입구의 상세 온도 및 유속 측정을 통해 유출되는 연소가스의 질량유량이 감소한다는 사실을 보고하였으며 이는 스프링클러 분무에 의한 연층냉각에 기인하는 것으로 분석하였다. 추가적인 연구⁽⁴⁾에서 FDS 모델을 이용하여 출입구 유동에 대한 수치해석결과와 실험결과를 비교하였다. Magnone⁽⁵⁾ 등은 Crocker의 실험을 보완하여 동일 구획공간에서 다양한 스프링클러 헤드와 분사조건에 대한 실험을 수행하였으며 냉각효과가 지배적인 경우 출입구를 통한 유출질량유동은 감소하지만 스프링클러 분무에 의해 야기된 유입유동이나 혼합유동이 지

배적인 경우 출입구를 통한 유출질량유동은 증가하는 결과를 얻었다.

그러나, Crocker나 Magnone 등의 실험은 출입구 유동을 측정함에 있어서 동일시간에 대한 출입구 단면에서의 속도를 동시에 측정한 것이 아니라 준정상 상태 화재에 대해 프로브를 이동하면서 측정한 결과이기 때문에 출입구를 통한 질량유량의 산정과정에서 상당한 오류를 포함할 우려가 있다. 또한, 스프링클러 분무에 따른 출입구 유출유량 감소에 관한 물리적 이해를 도모하기 위해서는 스프링클러의 헤드타입, 위치, 분사유량, 화원의 크기 등에 대한 추가적인 확대 연구를 필요로 한다. 한편, Crocker 등이 수행한 수치해석 연구는 격자에 대한 민감도 해석 없이 성긴 격자를 적용하여 해석해에 대한 격자의 독립성이 부족한 상태이며 분무해석조건에 대한 상세한 고려가 부족하여 수치해석 결과의 열 및 물질전달 특성의 타당성을 검증하는데 다소 부족한 면이 있다. 따라서, 스프링클러 작동에 따른 구획공간내 연소가스의 유출특성에 관한 연구는 제한된 범위에서 수행되었으며 추가적인 상세 연구를 통해 물리적 현상에 대한 이해를 도모하고 이를 바탕으로 시스템의 설계기법을 확립 및 최적화를 도모할 필요가 있다.

본 연구는 이러한 과정의 기본 연구로서 대표적인 화재 해석 필드모델인 FDS 모델⁽⁶⁾을 적용하여 스프링클러 화재 제어 과정을 모사하고 기존 연구결과와의 비교분석을 통해 FDS 모델의 타당성을 검증하며 출입구 열유동특성에 미치는 화재크기 및 분사유량의 영향을 분석하고자 한다.

2. 수치해석

해석대상공간은 UL-1626⁽⁷⁾ 주거용 스프링클러 시험에 널리 적용되는 공간으로 Figure 1에서 보는 바와 같이 구획공간의 크기는 4.88 m×9.75 m×2.44 m이며 Magnone 등⁽⁵⁾의 실험에서 천장은 석고보드(gypsum board), 벽면은 내화 코팅된 합판소재, 그리고 바닥면은 콘크리트로 구성된다. 출입구의 크기는 1.04 m×2.24 m이며 화원은 출입구에 대각선 방향에 위치하며 0.46 m×0.46 m 크기의 정방형 프

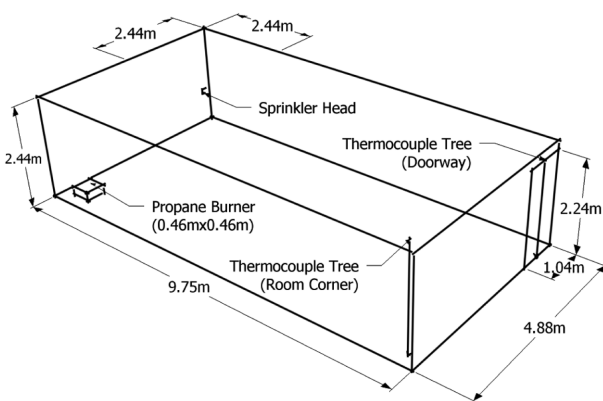


Figure 1. Compartment dimensions and instrument locations.

Table 1. Input Parameters for Spray Calculation

Spray angle [°]	60~160
Median droplet size [μm]	250
Offset distance [m]	0.15
Flow rate [lpm]	30, 50, 80, 112
K factor [lpmbar ^{-1/2}]	43, 70, 115, 161

로판(C₃H₈) 버너로서 화재발열량은 75 kW와 150 kW를 고려하였다. 화원의 한 측면은 벽에서 0.3 m 떨어진 곳에 위치하며 수직방향 온도분포의 모니터링은 화원의 반대쪽 벽면에서 0.3 m 떨어진 위치와 출입구에서 이루어진다. 스프링클러 헤드는 출입구 반대 벽면에서 2.44 m 떨어진 천정부에 위치하는 것으로 가정하며 해석에 적용된 스프링클러의 분무특성은 Table 1과 같다. FDS 계산에 적용된 초기 분무 액적의 크기는 250 μm이며 속도는 7.2 m/s로 가정하였으며 이는 Crocker와 Xiao의 이전연구에서 적용된 값과 동일한 값으로 가정하였다⁽⁴⁾.

스프링클러 해석에서 분무특성과 함께 분무계산조건의 설정은 중요한 인자중의 하나이다. 실제 스프링클러에서 발생한 액적을 모두 추적하며 계산하는 것이 거의 불가능하기 때문에 수치계산에서는 통계적 대표성을 가지는 액적군집(parcel)개념을 적용하여 계산 액적수를 대폭 축소 후 각 액적군집에 대한 운동, 열 및 물질전달 방정식을 해석하게 된다⁽⁸⁾. 스프링클러 소화과정에 대한 이전 연구결과⁽⁹⁾에 따라 이론적으로 방출되는 평균액적수에 대한 수치계산에 적용되는 통계적 액적수의 비가 0.001을 적용하여 계산을 수행하였다.

계산과정은 화재공간의 온도 및 출입구 질량유량이 준정상상태(quasi-steady)에 도달하는 360초까지 스프링클러

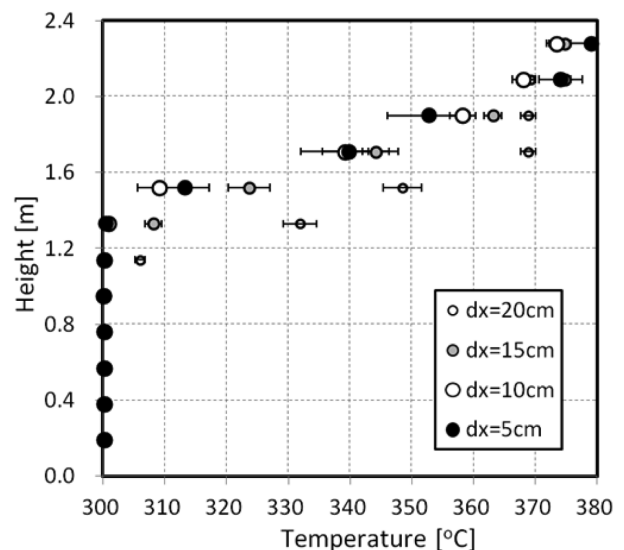


Figure 2. Grid sensitivity of vertical temperature profile at room corner for 150 kW fire.

가 없는 상태의 화재유동장을 계산하며 360초에 스프링클러가 작동하는 것으로 가정하여 재시작 파일로부터 준정상상태의 화재유동장 데이터를 불러온 후 600초까지 스프링클러 분무가 존재하는 경우의 열유동장을 계산하였다.

Figure 2는 150 kW 화재시 격자크기에 따른 출입구의 수직방향 온도분포를 나타낸다. 온도값은 300~360초까지의 평균값이며 오차막대는 표준편차의 2배를 나타낸다. 연층부의 온도는 격자크기에 따라 5°C 이내로 큰 차이를 보이지 않지만 중립높이 부근에서는 격자크기에 따라 큰 차이를 보였다. 전체적으로 격자 크기가 10 cm인 경우와 5 cm인 경우가 유사한 결과를 나타냈으나 본 연구에서는 계산용량과 결과의 해상도를 높이기 위해 5 cm 격자크기를 적용하였으며 계산격자의 수는 약 110만개 정도이다.

3. 해석결과

3.1 구획공간내부 열유동 특성

화재실내부의 온도분포와 출입구를 통한 질량유량에 대한 실험과 수치해석 결과의 비교를 통하여 FDS 해석의 타당성을 검토하였다. Figure 3은 150 kW 화재시 준정상상태에 대한 구획화재 내부의 수직방향 평균온도분포를 비교하여 나타낸다. 상층부에서는 FDS 모델의 예측결과가 약 5°C 정도 높게 계산되었으나 하층부에서는 실험과 FDS 모델이 매우 잘 일치하였다. 중립층의 높이 또한 FDS 모델이 10 cm 정도 낮게 예측하고 있으나 연층의 경계부는 상층부와 하층부의 지속적인 혼합(mixing)이 존재하는 영역으로 평균온도의 표준편차가 가장 큰 영역이기 때문에 이 정도의 오차는 수용할 만한 결과로 판단된다.

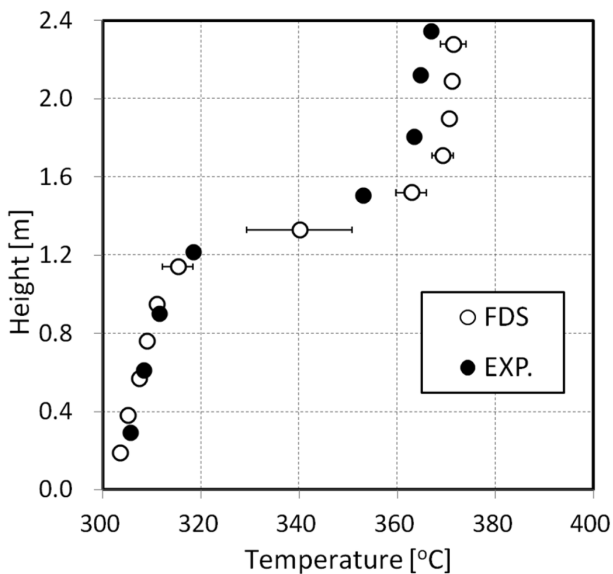
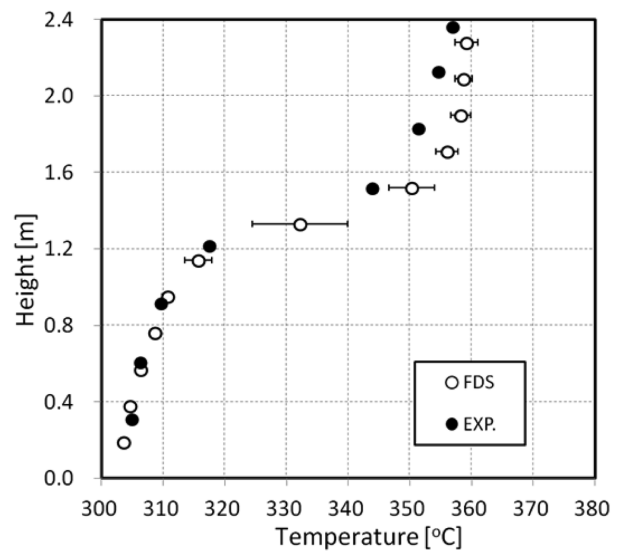
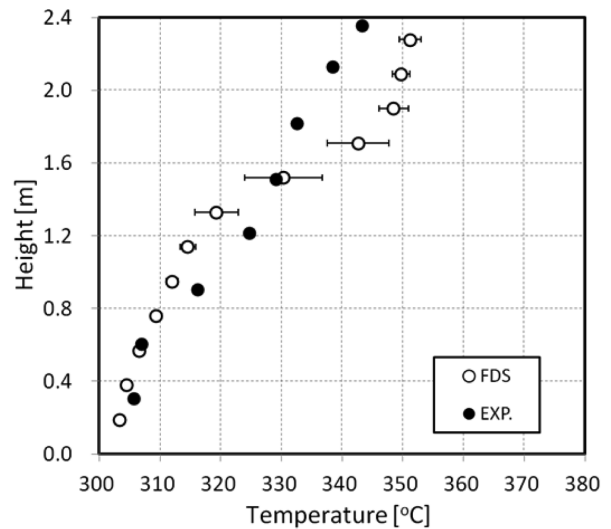


Figure 3. Comparison of vertical temperature profile at the room corner between measurements⁽⁵⁾ and the FDS calculation for 150 kW fire without sprinkler sprays.

Figure 4는 150 kW 화재에 대해 스프링클러의 분사유량이 30 lpm과 80 lpm인 경우 화재실 내부의 수직방향 온도 분포를 비교하여 나타낸다. Figure 4(a)와 같이 분사유량이 30 lpm인 경우 전체적인 온도분포는 스프링클러가 없는 경우와 큰 차이를 보이지 않았으며 연층부의 온도가 전체적으로 약 10°C 정도 하강하는 것으로 나타났다. FDS 모델의 예측결과와 실험에서 측정된 연층온도와 8°C 이내에서 잘 일치하고 있다. 이는 스프링클러에서 분사되는 분무의 유량이 많지 않아 연층의 냉각효과가 상대적으로 미미하고 이로 인해 화재유동이 지배적인 상태가 되어 스프링클러가 없는 경우의 비교결과와 같이 FDS 모델의 결과가 실험결과를 잘 예측하는 것으로 판단된다. 반면에 Figure 4(b)와 같이 분사유량이 80 lpm인 경우 연층부의



(a) 30 lpm



(b) 80 lpm

Figure 4. Comparison of vertical temperature profile at the room corner for 150 kW fire suppressed by sprinkler sprays with water discharge rate of 30 lpm and 80 lpm⁽⁵⁾.

냉각과 함께 스프링클러 분무에 의해 연층부와 하층부의 활발한 혼합이 발생하여 화재 공간내에 수직적 온도분포는 높이에 따라 선형적인 관계를 나타낸다. 그러나 FDS 모델에 의한 계산결과는 연층부의 온도를 최대 20 °C까지 상향예측하고 있으며 연층부의 냉각이 이루어지고 있으나 실험결과와 달리 수직방향으로 선형적인 온도분포를 보이는 것이 아니라 연층부와 하층부가 여전히 구별되는 분포를 나타내고 있다. 화재실 냉각이 지배적인 경우 이러한 FDS 모델의 불일치는 여러 가지 원인이 있을 수 있으나 크게 FDS 모델내 액적증발에 의한 열 및 물질전달을 계산 모델의 부정확함에서 발생할 수도 있고 스프링클러 분무에 의한 연층부와 하층부의 혼합과정을 모사하는 난류모델의 부정확함에서 발생할 수도 있다. 그러나 전체적으로 FDS 해석결과는 실험결과를 잘 따르고 있으며 특히 화재 조건 및 스프링클러 분사유량이 작은 경우 실험결과와 잘

일치하는 경향을 보였다.

3.2 출입구를 통한 열유동 특성

Figure 5는 150 kW 화재시 출입구의 높이에 따른 질량유속(mass flux)의 분포에 대해 실험과 수치해석을 비교하여 나타낸다. 각 위치에서의 질량유속은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_g'' = \text{sign}(V_n) \rho |V| \tag{1}$$

여기서, V_n 는 출입구 수직방향 속도성분, V 는 양방향 속도벡터의 크기, 밀도는 온도의 함수로 계산되며 질량유속이 양(+)의 값을 가지는 경우 유출유동을 의미하고 음(-)의 값을 가지는 경우 유입유동을 의미한다. 전체적으로 출입구의 중립높이 이상의 유출 유동에 대해서 FDS 예측결과는 실험결과와 잘 일치하고 있으나 가장 높은 위치에서 다소 하향 예측된 결과를 보여준다. 중립높이 이하의 유입 유동 구간에서는 FDS 모델의 결과가 실험결과에 비해 다소 하향 예측하고 있으나 전체적인 질량유속에 대한 분포는 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있다. Figure 5(a)와 (b)를 비교하면 스프링클러가 작동되는 경우 실험과 수치해석 모두 출입구의 유출되는 연소가스의 질량유량이 감소하는 경향을 보이고 있다.

Figure 6은 150 kW 화재시 스프링클러 분사유량에 따라 출입구를 통해 유출되는 연소가스의 질량유량 변화를 나타낸다. 상층부는 질량유속이 양의 값인 부분을 의미하며 유출되는 연소가스의 질량유량은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_{out} = \int_{upper} \dot{m}_g'' dA \tag{2}$$

초기 화재이후 유출되는 연소가스의 질량유량은 지속적으로 증가하여 약 200초 이후부터는 0.9 kg/s로 거의 일정

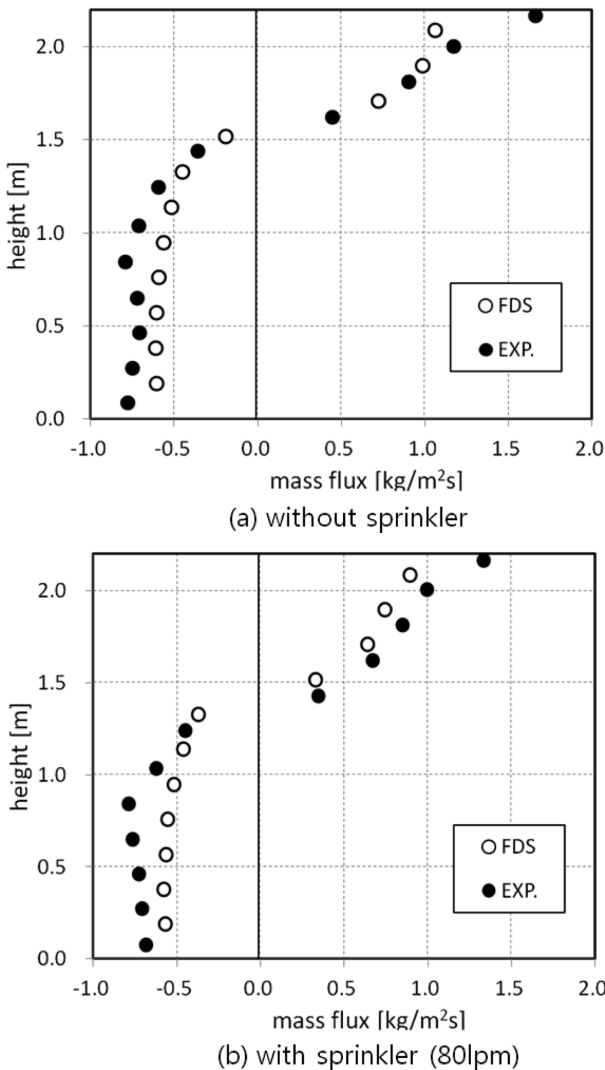


Figure 5. Comparison of vertical mass flux profile through doorway with and without sprinkler sprays for 150 kW and 80 lpm⁽⁵⁾.

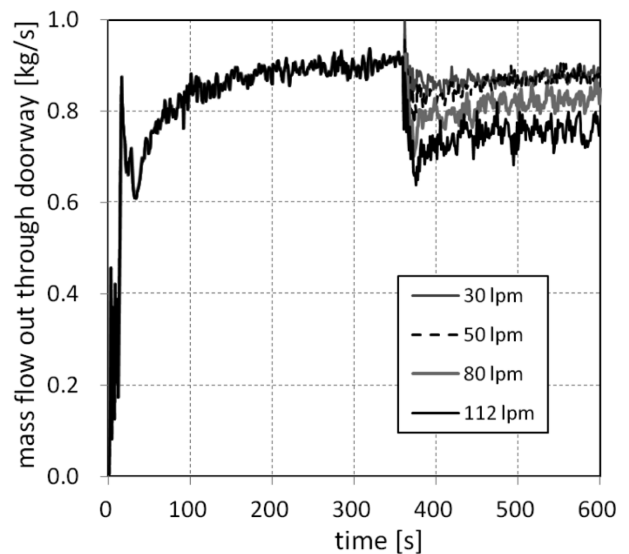


Figure 6. Time history of the mass flow out through doorway with different discharge rate of water for 150 kW fire.

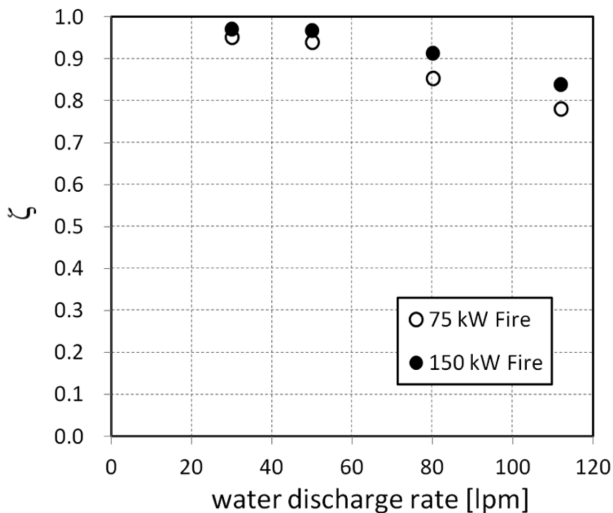


Figure 7. Comparison of mass flow out through the doorway as a function of water discharge rate for 75 kW and 150 kW fire.

하게 유지되나 스프링클러 분무가 시작되는 360초 이후 유출질량유량은 감소하는 경향을 나타내어 계산 종료시간 까지 비교적 일정한 값을 유지한다. 분사유량이 30 lpm과 50 lpm인 경우 분사유량변화에 따라 연소가스의 유출질량 유량의 변화는 거의 변화가 없으나 분사유량이 80 lpm과 112 lpm으로 증가함에 따라 유출질량유량의 변화는 증가하는 것으로 나타났다.

Figure 7은 75 kW 화재와 150 kW 화재시 분사유량에 따른 유출유량의 감소율을 비교하여 나타낸다. 출입구를 통한 유출유량의 감소율은 스프링클러 분무가 없는 경우의 질량유량에 대한 스프링클러 분무가 있는 경우의 질량 유량의 비로 다음과 같이 정의한다.

$$\zeta = \frac{\dot{m}_{\text{out, with sprinkler}}}{\dot{m}_{\text{out, w/o sprinkler}}} \quad (3)$$

유출질량유량의 감소율은 화재의 크기가 작고 분사유량이 증가함에 따라 크게 나타났다. 특히 분사유량이 112 lpm 인 경우 출입구를 통한 연소가스의 유출유량은 약 20 % 정도 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 구획화재시 스프링클러 작동으로 인한 화재실 내부의 열유동특성을 기존 실험결과와 비교분석하고 이를 통해 출입구에서의 유출유동특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 스프링클러가 없는 경우 FDS 모델에 의해 계산된 화재실 내부의 수직방향 온도분포 및 연층높이는 Magnone 등의 실험결과와 잘 일치하였으며 상층부 온도의 경우 약

5°C 정도 상향 예측 하였고, 연층의 높이에 대해서는 약 10 cm 정도 낮게 예측하였다.

- 스프링클러가 있는 경우 FDS 모델에 의해 계산된 화재실 내부의 수직방향 온도분포는 분사유량에 따라 실험 결과와 차이를 보였으며 특히 스프링클러 분무의 냉각효과가 크게 나타나는 경우 오차가 증가하는 경향을 보였다. 이는 FDS 모델내 액적증발에 의한 열 및 물질전달을 해석하는 모델의 부정확함이나 스프링클러 분무에 의한 연층부와 하층부의 혼합과정을 모사하는 난류모델의 부정확성 등 다양한 원인에 기인한 것으로 판단된다.

- 스프링클러 작동시 화재실 출입구를 통해 유출되는 연소가스의 질량유량은 감소하는 것으로 나타났으며 특히 화재크기가 작고 분사유량이 증가함에 따라 유출질량유량의 감소는 크게 나타났다. 이러한 수치해석 결과는 Crocker 등이 제시한 화재실 내의 냉각효과가 지배적인 경우 유출질량유량이 감소하는 실험결과와 잘 일치하고 있으며 본 연구에서는 75 kW와 150 kW 화재에 대해 분사유량이 112 lpm 인 경우 약 20 % 정도의 유출질량유량이 감소하는 것으로 나타났다.

화재발생 공간에서의 스프링클러의 효과적인 적용은 다양한 화재진압효과와 인접공간으로 전파되는 연소가스의 질량유량을 감소시켜 독성가스로 인한 질식과 연기전파 속도를 감소시키는 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 다양한 화원조건 및 스프링클러 작동조건, 구획공간의 기하학적 조건등에 대한 추가적인 연구를 통해 유출유동에 미치는 영향을 정량화하고 이를 바탕으로 스프링클러 시스템의 성능적 설계기법 확립 및 최적화를 도모할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 소방방재청의 차세대핵심소방안전 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. J. J. Jung, D. G. Nam and W. S. Lim, "A Study on the Performance of a Sprinkler System with Direct-Coupled Waterworks by Full-Scale Fire Test", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 39-43 (2011).
2. S. K. Roh, E. G. Ham and D. C. Kim, "The Study of Fire Suppression Capability of Sprinkler System for Wooden Cultural Properties", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 51-57 (2011).
3. J. P. Crocker, "The Effect of Sprinkler Sprays on Fire Induced Mass Flow Rates", Ms. Thesis, Fire Protection

- Engineering, Worcester Polytechnic Institute, US (2008).
4. J. P. Crocker and B. Xiao, "Investigating the Effects of Sprinkler Sprays on Fire Induced Doorway Flows: A Two-Part Study", Technical Report, TYCO Fire Suppression & Building Products (2010).
 5. Z. Magnone, V. Adams, Z. Han, S. Southard, C. Su, N. Dembsey, J. Morgan and P. Beaulieu, "Sprinkler Spray Effects on Combustion Products Leaving a Compartment", SFPE Annual Conference (2011).
 6. K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide", NIST Special Publication 1019-5 (2010)
 7. ANSI/UL 1626, "Standard for Safety of Residential Sprinklers fore Fire Protection Service", UL 1626 Ed. 4 (2008).
 8. S. V. Apte, M. Gorokhovski and P. Moin, "LES of Atomizing Spray with Stochastic Modeling of Secondary Breakup", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 29, No. 9, pp. 1503-1522 (2003).
 9. S. C. Kim, S. W. Lee and W. J. Park, "A Sensitivity Study of the Number of Parcels to the Numerical Simulation of Sprinkler Sprays", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 48-54 (2009).