한국화재·소방학회, 제15권 제2호, 2001년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 15, No. 2, 2001

스프링클러 반응시간 예측에 대한 화재모델의 비교

A Comparison of the Prediction of Sprinkler Response Time Applying Fire Models

김종훈† · 김운형 · 이수경*

Jong-Hoon Kim† · Woon-Hyung Kim · Su-Kyung Lee*

경민대학 소방안전관리과
*서울산업대학교 안전공학과

(2001. 05. 24 접수/2001. 05. 31 채택)

요 약

실내 공간에서의 스프링클러 반응시간 측정을 위한 화재실험을 실시하고, 현재 발표되어있는 화재모델링 프로그램 중 내부에 반응시간예측부분이 있는 존모델(Zone Model) FASTLite와 필드모델(Field Model) FDS(Fire Dynamic Simulator), 그리고 필드모델 SMARTFIRE의 데이터와 해석프로그램을 이용한 예측을 수행하여, 각 결과를 비교, 분석함으로서 모델의 적응성을 평가하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다. 먼저 2.4 m×3.6 m×2.4 m의 공간에서 100.3 kW 규모의 화원이 설정된 화재실험의 결과, 화원 직상부에서 1 m 떨어진 스프링클러헤드(작동온도 72°C)는 198초에 작동되었다. 실험의 결과에 대한 화재모델링의 예측시간은 FASTLite가 209초, SMARTFIRE가 183초, FDS가 192초로 나타나 실험결과와 각각 +11, −15, −6초의 차이를 보였다. 3개의 분석대상 화재 모델중 FDS가 가장 실험결과에 근접하였으나 다른 모델의 예측도 큰 차이를 보이지 않아 각 모델의 적응성이 입증되었다.

ABSTRACT

To evaluate the usability of compartment fire models for predicting sprinkler response time, fire experiment was conducted and measured sprinkler response time. The experimental data was compared with zone model "FASTLite" and field model "FDS" and field Model "SMARTFIRE". A Compartment fire conducted in a 2.4 m by 3.6 m by 2.4 m ISO 9705 room and measured H.R.R was approximately 100.3 kW. In test, Sprinkler activation temperature used is 72 °C and responded at 198s. The output of FASTLite, SMARTFIRE and, FDS for this fire scenario were 209s, 183s, and192s, respectively. As a results, prediction using FDS model approached to that of test very closely andother models showed good approximated results also.

Keywords : Sprinkler response time, FASTLite, SMARTFIRE, FDS models

1. 서 론

현재 소화 설비 중 가장 널리 사용되는 스프링클러에 대한 반응시간 예측은 방화시스템의 선정과 설계상 중요한 시간요소로서 특히 최근 국내에서도 관심이 증가되고 있는 성능기준 화재안전설계(Performance-Based Fire Safety Design)의 구현을 위한 기본 인자가 된다.[1,2]

스프링클러 설비의 반응시간 예측을 위하여 오랫동안 선진 각국에서 많은 연구가 진행되어 왔으며, 그 연구결과는 현재 공간화재모델들과 통합되고 있다. 이러한 예측식의 실제 사용을 위한 검토와 분석, 그리고 적용성에 대한 검증의 실시는 최적 스프링클러 시스템 설계에 필수적이며 적용을 위한 여러 가지 데이터를 제공한다는 점에서 중요하다고 할 수 있다.

본 연구는 ISO 9705 기준의 공간에서 스프링클러 반응시간 측정을 위한 화재실험을 실시하고, 현재 사용 중인 화재 모델 중 프로그램에 반응시간예측 분야가 통합되어있는 존모델(Zone Model) FASTLite와 필드모델(Field Model) FDS(Fire Dynamic Simulator),

† E-mail: akiraya@netian.com

그리고 필드모델 SMARTFIRE의 적용을 통하여 그 결과를 비교 분석함으로서 각 모델의 예측성능에 대한 적응성을 평가하였다.

2. 스프링클러 반응시간 측정 실험

2.1 실험개요

본 실험은 구획내부에서 화재 발생 시 스프링클러 헤드의 반응시간과 열감지부 주변의 온도를 알아보기 위하여 실시되었다. 실험은 2.4 m(W)×3.6 m(D)×2.4 m(H) 크기의 구획된 공간에서 실시되었다. 천장과 벽면은 석고보드, 바닥은 철판으로 마감되었으며 측면에 0.6 m×0.4 m의 개구부를 정면에 0.2 m×1.8 m의 개구부를 설치하였다. 화원은 직경 0.4 m의 철제 팬을 사용하였으며, 연료는 헥산(Hexane) 1.25 l를 사용하였다. 헤드는 S사의 Fusible-Link 형이며 작동표시온도는 72°C이다. 헤드는 압력 배관용 강관(25 mm)를 사용하여 배관하였고, 내부에 물을 주입했으며 화원 직상부에서 1 m 거리에 설치하였다. 측정장치는 TDS-601A Data Logger를 사용하여 기록하였으며, 센서는 K-Type으로 0.65 mm이며 온도의 측정범위는 −270°C ~ +1372°C이다. 센서는 헤드에서 우측 0.05 m 이격된 거리에 설치하였다. 시간은 스톱워치로 측정하였으며, 차후의 분석을 위하여 0.6 m×0.4 m의 개구부에 환기에 주는 영향이 적은 지점을 선택하여 C.C. TV 카메라를 설치하여 실험의 진행과 스프링클러의 작동 모습을 녹화하여 차후 분석에 참고하였다.

2.2 실험 결과

스프링클러의 화재 시 반응시간 측정 실험은 1회 진행하였다. 실험 시 초기온도는 13°C이다. 화재실의 후면에서 1 m 떨어진 부분에 설치된 팬의 연료는 1.25 l이고 실험 전 AG 204 전자저울로 측정결과 780 g인 것으로 나타났다. 연료는 실험 시작 후 341초에 모두 연소되었다. 화원에서 1 m 떨어진 헤드는 점화 후 3분 18초에 반응하였다.

3. FASTLite의 반응시간 예측

3.1 예측 이론

미국 NIST 산하의 BFRL에서 개발되었으며, FASTLite는 내부에 Zone Model인 CFAST와 소방엔지니어를 위한 도구 모음인 FIREFORM로 이루어져 있다.[3] FASTLite는 화재모델의 사용부분에 스프링클러와

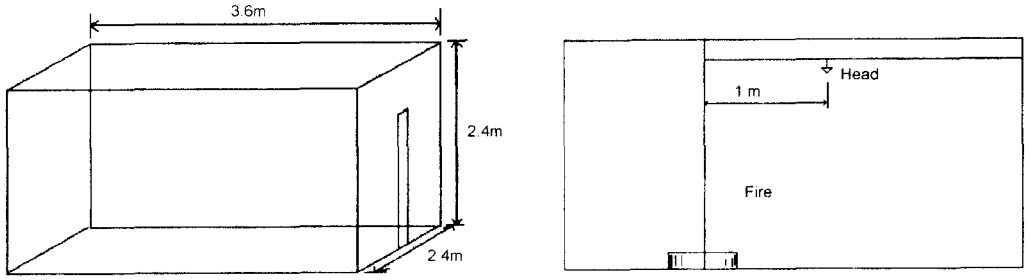

그림 1. 화재실의 도면과 스프링클러의 설치 위치

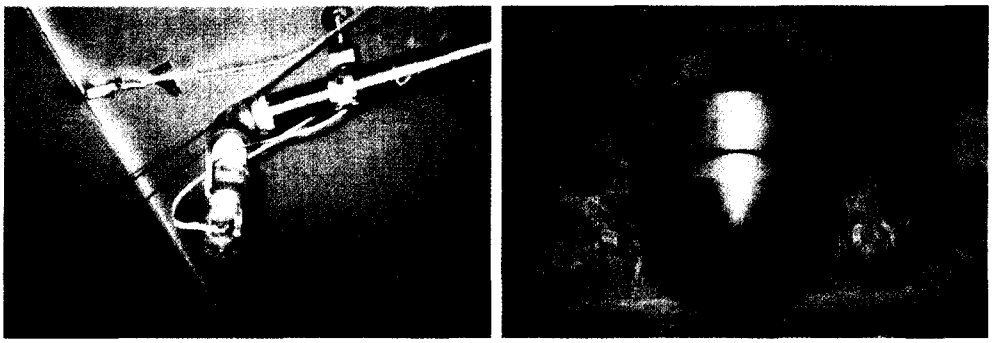

그림 2. 스프링클러와 팬의 설치 모습

감지기에 대한 작동시간 계산이 하나의 루틴(Routine)에 포함이 되어있어, 사용자가 설정을 할 경우, 시뮬레이션 진행 도중 감지기의 작동여부와 스프링클러의 작동여부를 알려준다.

CFAST의 내부에서 스프링클러의 작동시간을 계산하기 위한 식은 FMRC에서 G. Heskestad가 수행한 연구의 결과 식 (1)을 사용하였으며 다음과 같다.[4)]

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{\sqrt{S(t)}}{RTI}(T_g(t) - T_L(t)) \quad (1)$$

여기서, T_L은 감열체의 온도, T_g는 열기류의 온도, S는 열기류의 유속, RTI(Response Time Index)를 나타낸다. 이 미분방정식을 해석하면 다음과 같은 식 (2)가 나오며, 이는 공간화재 모델링의 수행 중에 발생되는 스프링클러의 반응시간 예측에 사용된다.

$$T(t) = T_g + e^{-\sqrt{S(t)(t-t_0)}/RTI}(T_0 - T_g) \quad (2)$$

3.2 반응시간 예측 수행

공간은 화재실의 크기인 2.4 m(W)×3.6 m(D)×2.4 m(H)로 설정하였으며, 개구부는 틈새면적을 고려하여 1.9 m×0.25 m와 0.6 m×0.4 m로 가정하였다. 이는 화재실험 시 관찰된 연기의 누출에 대한 손실을 고려하기 위하여 설정되었다. 그리고 벽면과 천장면, 바닥면에 대한 재료설정은 실제와 동일하다. 실험 시 사용된 연료는 780 g으로 341초 동안 연소하였으므로 $\dot{m}$(질량손실률)=2.29 g/s, Hexane의 유효연소열(Effective Heat of Combustion)은 43.8(kJ/g)이므로, 다음 식 (3)과 같이 계산하여 Steady 조건하에 100.3 kW로 설정하였다.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H_C = 2.29(g/s) \times 43.8(kJ/g) = 100.3(kW) \quad (3)$$

스프링클러 작동온도는 72°C로 지정했으며, RTI(Response Time Index)는 국내에 생산되는 스프링클러의 Plunge Test를 수행하여 얻은 결과 중 T_g의 범위 80°C~130°C, 유속 3.4 m/s~6.6 m/s에서 RTI 평균값인 150 $m^{1/2}s^{1/2}$을 인용하였다.[5,6)]

위의 조건하에서 FASTLite의 시뮬레이션 수행결과 헤드는 209초에 반응하는 것으로 예측되었다.

4. SMARTFIRE의 반응시간 예측

4.1 모델 개요

SMARTFIRE는 영국 University of Greenwich의 Fire Safety Engineering Group에서 화재분야 종사자중 CFD 분야의 비전문가들도 Field model을 사용할 수 있도록 하기 위해서 개발된 프로그램이다. SMARTFIRE는 화재전용으로 개발되었으며, 사용환경이 사용자에게 매우 편리하게 구성되어있고, Grid의 생성이 KBS(Knowledge Based System)이라는 전문가 시스템에 의하여 이루어지며, FORTRAN Code를 C++로 이식한 CWNN++라는 내부 엔진이 모델의 지배방정식을 해석한다. 이 코드는 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 비정상난류, 정상상태의 층류 흐름 등을 해석할 수 있다. 그러나 SMARTFIRE의 내부에는 스프링클러의 반응시간에 대한 예측부분이 없다.[7,8)]

4.2 예측이론

스프링클러의 반응시간은 헤드의 감열부와 헤드자체의 열적 특성에 의하여 결정된다.

화재 시 발생하는 열은 헤드의 열감지부에 전달되며, 전달된 열은 스프링클러의 프레임과 연결부, 그리고 배관 내 물로 전도되어 손실된다. 이를 기초로 다음의 식을 세울 수 있다.[9)]

$$mc\frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) + \dot{q}_r - C'(T_e - T_0) \quad (4)$$

여기서, m은 열감지부의 질량(g), C는 열감지부의 비열(kJ/kg K), T_e는 열감지부의 온도(°C), h는 대류열전달계수(W/m^2 · K), t는 시간(s), A는 감지부의 면적(m^2), T_g는 상승기류의 온도(°C), $\dot{q}_r$는 복사열전달량(kW), T_0는 스프링클러설비의 주위온도(°C), C'는 스프링클러 전도열전달계수(W/m^2 · K)를 나타낸다.

그러나 열감지부에 전달되는 열은 주변에 흐르는 고온의 열기류(Ceiling Jet)에 의한 대류열전달이 대부분이며 복사에 의한 열전달과 전도에 의한 열손실은 매우 작으므로 식 (5)와 같이 간단히 할 수 있다. 또한 이 식을 주위의 온도 T_0를 기준으로 하는 온도 차이의 형태로 정리하면 다음 식 (6)과 같다.[6)] 여기서 $\Delta T_e = T_e - T_0$, $T_g = T_g - T_0$, $\tau = mc/hA$이다.

$$mc\frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) \quad (5)$$

$$\frac{d(\Delta T_e)}{dt} = \frac{1}{\tau}(\Delta T_g - \Delta T_e) \quad (6)$$

이 식을 적분하여 정리하면 식 (7)과 같게 된다.

$$T_e = T_g - (T_g - T_0)EXP\left[-t \cdot \frac{\sqrt{U}}{RTI}\right] \quad (7)$$

이 식 (7)에서 주어진 시간(t) 내에 각 변수(T_g, RTI, $\sqrt{U}$)는 하나의 값을 대입할 수 있다. 이는 플런지 테스트(Plunge Test)처럼 일정한 온도와 일정한 속도의 공기를 계속 공급되는 조건에 적합하며, 실제 화재발생 시에는 스프링클러 헤드 감열부의 주변을 흐르는 가스의 온도가 상승하게 된다. 그러므로 시간 t에 따른 온도 T_g, T_e의 변화는 임의의 시간의 구간 $[t_i, t_{i+1}]$에서 감열부 온도 T_e를 $T_{e,i}$, $T_{e,i+1}$라고 할 수 있다. 그러나 식 (7)에서 T_g는 구간내에서 일정한 값을 가져야 하나 $T_{g,i}$에서 $T_{g,i+1}$에서는 일정한 값이 아니므로 이를 해결하기 위해서 식 (8)과 같이 평균값 T_g^*을 만들어 이를 식 (7)에 대입하여 식 (9)를 유도할 수 있다. 임의의 시간 구간 $[t_i, t_{i+1}]$에서 T_g에 의하여 변화된 $T_{e,i+1}$, 즉 최종 감열부의 온도를 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$T_g^* = \left(\frac{T_{g,i+1} - T_{g,i}}{2}\right) + T_{g,i} \quad (8)$$

$$T_{e,i+1} = \left\{T_g^* - (T_g^* - T_{e,i}) \cdot EXP\left[-t \cdot \frac{\sqrt{U}}{RTI}\right]\right\} \quad (9)$$

4.3 SMARTFIRE와 계산식을 적용한 반응시간 예측

SMARTFIRE에 FASTLite와 동일한 입력 조건을 넣어 시뮬레이션을 수행하였다. SMARTFIRE는 자체적으로 스프링클러의 반응시간을 예측할 수 있는 부분이 없어서, 헤드 설치위치에 있는 셀(Cell)에서 시간당 데이터(온도, 유속)를 추출하여 이를 이론식 (9)에 대입하여 수행하였다. 이론식의 사용하기 위한 계산프로그램을 별도로 제작하여 사용하였으며, 초단위로 최대한 72°C에 가까운 시간을 결과로 선택하도록 작성하였다.

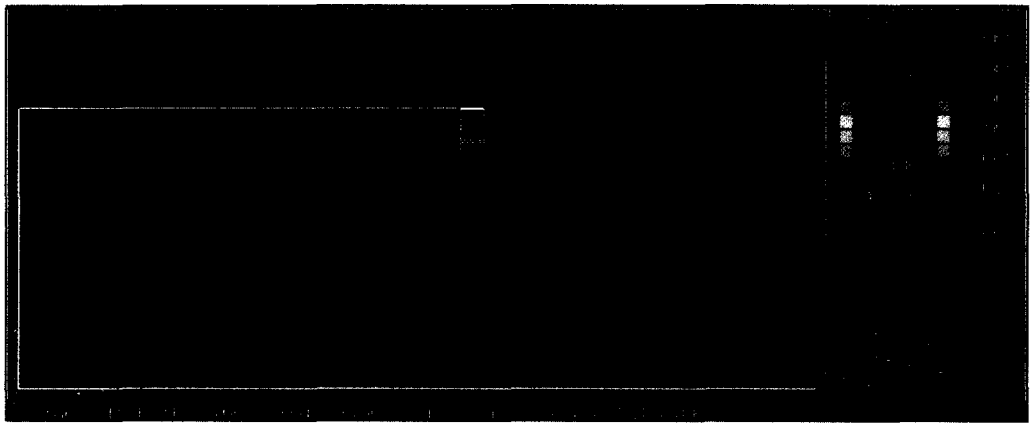

그림 3. 150초경의 온도분포(X-Y 단면)

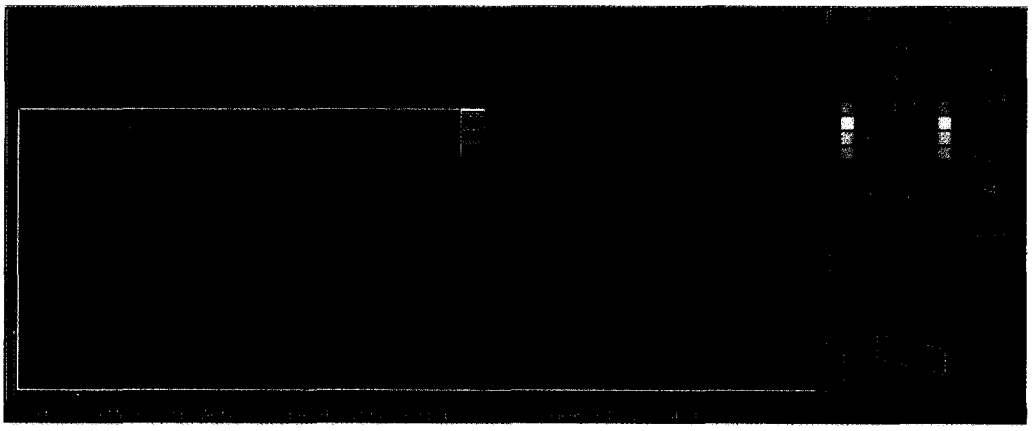

그림 4. 250초의 온도분포(X-Y 단면)

데이터를 예측 식에 대입하여 계산한 결과 열 기류의 온도가 206.24°C, 유속 0.18 m/s인 조건에서 헤드 열감지부의 온도가 72.13°C로 계산되어 반응시간이 183초인 것으로 예측되었다.

5. FDS의 반응시간 예측

5.1 모델 개요

미국 NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamic Simulator)는 화재에 의한 유체의 흐름을 해석하는 CFD Model이다.[10] FDS는 내부의 CFD Code가 화재현상 예측에 최적화되어 있으며, LES(Large Eddy Simulation) 모델은 화원 주변 대기에 있는 연소생성물과 기화된 연료가 혼합된 난류를 해석하고 묘사하는데 매우 적합하다고 할 수 있다. 특히 FDS는 여러 가지 화재분야에서 중요하게 쓰이는 데이터들을 손쉽게 추출할 수 있으며, 감지기와 스프링클러의 성능을 평가할 수 있는 부분이 통합되어있다.

FDS에서 사용되는 스프링클러의 반응시간 예측식(10)은 Heskestad의 연구결과를 사용한다.

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{|u|}}{RTI}(T_g - T_l) - \frac{C}{RTI}(T_l - T_m) - \frac{C_2}{RTI}\beta|u| \quad (10)$$

여기서, T_l은 감열부의 온도, T_g는 열기류의 온도, T_m은 스프링클러 프레임부분의 온도이며, C는 스프링클러의 전도열전달계수, u는 열기류의 유속, β는 열기류 내의 물 또는 액체의 체적비등이며, C_2는 DiMarzo의

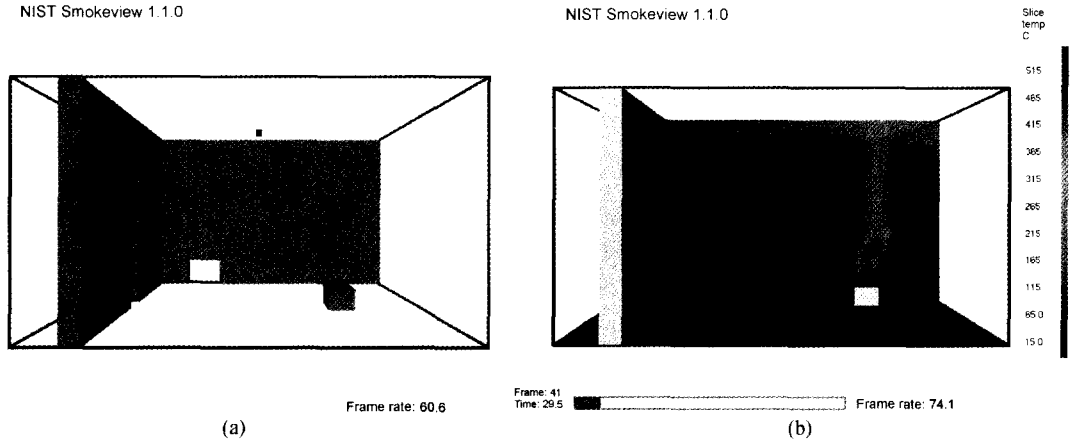

그림 5. FDS의 화재실 설정 모습(a)과 화재초기의 온도분포(b)

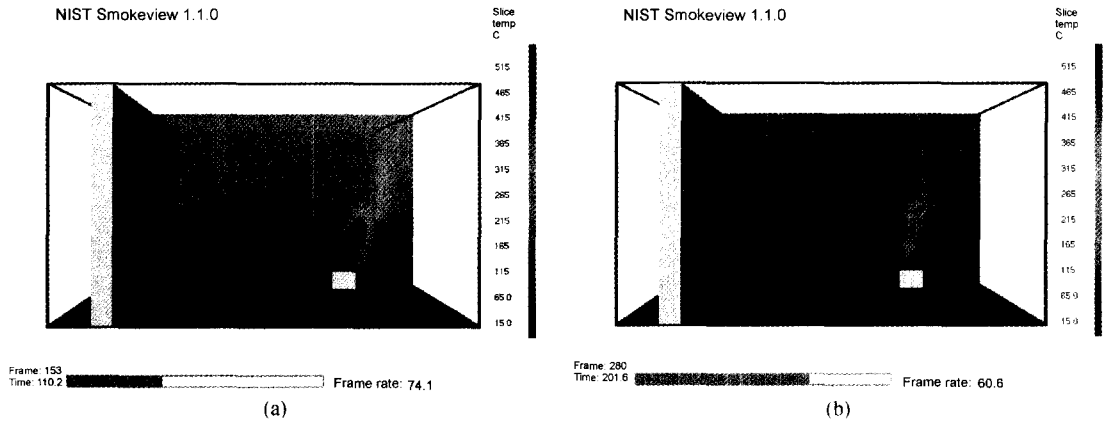

그림 6. 스프링클러 작동 전(a)과 작동 후(b)의 온도분포 변화

연구에 의한 상수 6×10^6 K/(m/s)$^{1/2}$를 나타낸다.[11]

5.2 예측수행

FASTLite와 SMARTFIRE의 경우와 동일한 입력 값으로 적용하였다. 화재는 Steady 조건으로 100 kW를 설정하였으며, 상부에 스프링클러 헤드를 설정하였다. 스프링클러의 설정 값은 위와 동일하다. FDS의 시뮬레이션을 수행한 결과 192초에 작동하는 것으로 예측되었다.

6. 모델의 비교분석

스프링클러의 반응시간 예측에 대한 화재모델링의 비교를 하기 위해 화재실험을 실시하였으며, 이 결과를 토대로 화재모델링 수행결과들과 표 1에서 비교해 보았다. 실험에 가장 근사한 예측결과를 나타낸 것은 FDS로 나타났으며, 이외 모델들도 11초, 15초 정도의 차이를 보여, 대체로 근사한 결과를 나타내었다. 그러므로 대상공간과 같은 소규모 공간에서는 각 모델의 예측을 실시하고 그 결과를 사용하는 데에 문제가 없다고 할 수 있다. 실험과 모델링의 예측결과와의 차이는 우선 각 모델에서 사용하는 스프링클러 반응시간 예측공식의 차이에 기인한다. FASTLite와 SMARTFIRE에서는 전도 열손실을 고려하지 않으나, FDS는 전도 열손실을 고려하고 있다.

표 1. 실험결과와 각 모델의 예측결과와의 비교

비교대상	반응시간(s)	실험과의 차이(s)
실 험	198	–
FASTLite 모델	209	+11
SMARTFIRE 및 계산 식	183	−15
FDS 모델	192	−6

또한 각 모델의 특성에 다른 화재현상 예측결과의 차이도 생각해볼 수 있다. 그림 5처럼 스프링클러 헤드의 주변을 흐르는 열 기류의 온도에 대한 SMARTFIRE의 예측결과가 측정치에 비하여 높게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 헤드의 작동시간에도 영향을 미치며 결과적으로 실험결과에 보다 15초정도 빠르게 작동된다는 예측결과를 나타내었다.

화재에 대한 설계, 즉 화원의 열방출율에 대한 설정도 고려할 필요가 있다. 그림 5(b)의 온도상승에서 알 수 있듯이 실험 측정온도의 상승세가 초기에는 모델링의 결과보다 완만한 것을 알 수 있다. 이는 화원의 열방출율이 Steady한 조건으로 연료가 모두 소모될 때까지 일정하다고 간주하나 실제 연료의 연소는 일정하게 소모되는 것이 아닐 것이므로, 이에 대한 정확한 측정을 바탕으로 화재의 입력 값을 결정한다면 좀더 정밀한 예측결과를 얻을 수 있을 것이다.

7. 결 론

공간화재 시 스프링클러반응시간에 대한 화재모델의 예측성능 평가를 위한 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 2.4 m×3.6 m×2.4 m의 공간에서 100.3 kW 규모의 화원이 설정된 화재실험의 결과, 화원 직상부에서 1 m 떨어진 스프링클러헤드(작동온도 72°C)는 198초에 작동되었다.

2. 실험결과에 대한 화재모델링의 예측결과는 FASTLite가 209초, SMARTFIRE가 183초, FDS가 192초를 기록하였으며, 이는 각각 실험결과와 +11, −15, −6초의 차이를 보였다.

3. 이러한 예측시간 차이는 각 모델에 적용된 반응시간 예측 식의 상이, 화재모델 자체의 온도예측 특성 등으로 보여지며 따라서 모델 적용 시 이러한 사항에 대한 충분한 고려가 필요하다.

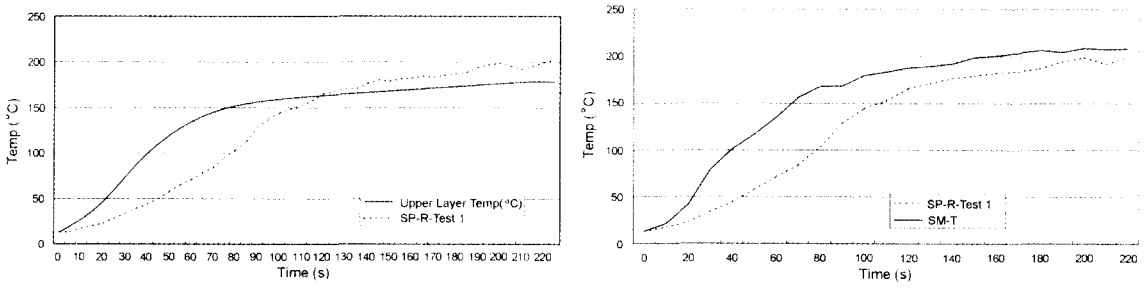

그림 7. (a) 실험결과와 FASTLite의 상부 층 온도 비교, (b) 실험결과와 SMARTFIRE에서 예측된 감열부 근처의 온도(SM-T)와의 비교

4. 분석 대상 모델 중 FDS모델이 가장 실험결과에 근접한 값을 나타냈으나, 다른 모델의 예측도 큰 차이를 보이지 않아 각 모델들은 본 연구의 실험조건에 대하여 충분한 적응성이 있는 것으로 판단된다.

향후 스프링클러의 사용에 제한이 되는 장애물이 있는 공간, 대규모 공간, 그리고 제어가 어려운 대규모 화재 조건 시에 대한 화재모델링의 예측 성능평가가 지속될 필요가 있다.

참고문헌

1. Brian J. Meacham, "Assessment of The Technological Requirements for the Realization of Performance-Based Fire Safety Design in the United states", National Institute of standards and Technology, NIST Publication(1998).
2. Brian J. Meacham, "The Evolution of Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods", National Institute of standards and Technology, NIST Publication(1997).
3. Rebecca W. Portier, Richard D. Peacock, and Paul A. Reneke, "FASTLite : Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport", Building and Fire Research Laboratory, NIST, pp.1(1996).
4. Richard D. Peacock, Walter W. Jones, "A Technical Reference for CFAST", Building and Fire Research Laboratory, NIST, pp.69-72(1996).
5. 김명배, 한용식, 윤명오, "스프링클러의 열응답성", 한국화재소방학회지(1996).
6. 김명배, 한용식, "구획화재에서의 스프링클러 작동시간 예측연구", 한국화재소방학회지(1996).
7. E. R. Galea, J. Ewer, and M. K. Patel, "SMARTFIRE : An Intelligent CFD Base Fire Model", Journal of Fire Protection Engineering (1999).
8. R. Galea, J. Ewer, and M. K. Patel, "SMARTFIRE V 2.01 : User Guide and Technical Manual", Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich(1999).
9. Russell P. Fleming, "Theory of Automatic Sprinkler Performance", Fire Protection Handbook 18th edition, National Fire Protection Association (1997).
10. Kevin B. McGrattan, Glenn P. Forney, "Fire Dynamic Simulator - User's Manual", Building and Fire Research Laboratory, NIST, pp. 1(2000).
11. Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum, Glenn P. Forney, "Fire Dynamic Simulator - Technical Reference Guide", Building and Fire Research Laboratory, NIST, pp. 11-14(2000).