

A-12 화재 모델링을 이용한 스프링클러 반응시간예측에 관한 연구

김종훈, 이수경
서울산업대학교 안전공학과

A Study on the Prediction of Sprinkler Response Time using Fire Modelings

Kim, Jong Hoon, Lee, Su Kyung
Seoul National University of Technology, Department of Safety Engineering

1. 서론

현재 소방분야의 세계적 관심사는 성능기준화재안전규정(Performance-Based Fire Safety Code)에 관한 것이라 할 수 있다. 이는 화재안전과 관련된 문제의 해결을 위하여 명확한 성능수준을 제시하고 이에 도달하기 위하여 공학적 수단을 사용하는 방식이다.¹⁾ 이 규정의 도입은 적용대상의 화재에 대한 안전성을 극대화하며, 동시에 경제적인 효율성을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 이미 영국, 스웨덴, 뉴질랜드, 호주 등의 국가에서는 도입이 완료되었고, 미국, 일본, 캐나다 등은 도입을 준비하고 있다.²⁾ 기존의 사양기준규정의 형태에서 성능기준화재안전설계(Performance-Based Fire Safety Design)을 기반으로 하고있는 성능기준규정의 구현이 가능하게 된 원인은 지금까지 화재와 소방에 관하여 선진 각국에서 많은 연구와 노력을 해왔기 때문이다. 특히 화재의 발생과 이로 인한 여러 가지 현상에 대하여 실제에 근접하게 예측할 수 있는 기술은 많은 발전을 이룩하였으며, 이를 토대로 화재의 진행과 전파, 그리고 소화설비에 의한 진압 및 제실자의 피난까지 예측할 수 있는 모델링 기술이 개발되었다. 화재와 피난 모델링은 성능기준구현에 핵심기술이며, 이를 토대로 대상물의 화재관련 시설에 대한 설계를 공학적인 근거를 토대로 정확히 구현할 수 있는 것이다.³⁾ 소화설비 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 단연 스프링클러 설비이다. 스프링클러의 반응시간 예측은 방호대상물에 대한 소방시스템의 설계에 많은 영향을 미칠수있으며, 특히 성능기준규정의 적용시 성능수준이 제시될 경우 이에 대한 도달여부 판정에 매우 중요한 기술이 된다.

미국에서는 스프링클러의 반응시간예측에 대한 많은 연구가 진행되었으며, 예측모델로는 1989년 미국의 Davis 등에 의하여 발표된 LAVENT³⁾가 있고, 1999년에 미국 NIST의 Davis가 발표한 JET⁴⁾라는 모델이 있다. 국내에서는 이 부분에 관하여 “구획화재에서의 스프링클러 작동시간예측에 관한 예측 연구”라는 제목으로 Zone Model을 이용한 예측 연구가 한국화재소방학회지에 발표된 바가 있다.

Zone Model을 사용한 스프링클러 반응시간예측의 타당성에 대한 연구는 이미 진행되었으므로, 본 연구는 화재 시 스프링클러의 반응 시간에 관한 실험을 실시하고 이 결과를 화재 전용 Field Model인 SMARTFIRE와 작동시간예측공식을 사용하여 예측된 결과를 함께 비교하였다. 이를 통하여 구획화재 시 스프링클러 반응시간에 대한 Field Model 적용예측방식에 관한 비교분석 및 평가를 실시하였다.

2. 스프링클러 반응시간 예측 이론과 관련 화재 모델

2.1 스프링클러 헤드의 반응시간 예측이론

스프링클러의 화재 감지특성은 헤드의 감열부와 헤드자체의 열적 특성에 의하여 결정하게 된다. 특히 헤드의 민감도를 나타내는 척도로 반응시간지수(RTI : Response Time Index)를 사용한다. RTI는 FMRC(Factory Mutual Research Corporation)의 연구진에 의하여 개발되었으며, 스프링클러의 민감도를 측정하기 위하여 개발되었다. 또한 RTI는 천장의 높이, 화원에서 헤드나 감지기까지의 방사상 거리, 화원에서 발생하는 열등과 연동되어 스프링클러와 열감지기의 반응시간을 예측하는 컴퓨터 프로그램 개발에 도입되었다.⁵⁾

화재에서 발생하는 열은 대류, 복사에 의하여 헤드의 열감지부에 전달되며, 전달된 열은 스프링클러의 프레임과 연결부, 그리고 파이프에 있는 물로 전도되어 손실된다. 이를 기초로 다음과 같은 식을 세울 수 있다.⁶⁾

$$mc \frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) + \dot{q}_r - C'(T_e - T_0) \quad (1)$$

여기서 m , c , T_e , t , h , A , T_g , \dot{q}_r , C' , T_0 는 각각 열감지부의 질량, 열감지부의 비열, 열감지부의 온도, 시간, 대류열전달계수, 열감지부 표면적, 상승기류의 온도, 복사 열전달량, 스프링클러 전도열전달계수, 스프링클러설비의 주위온도 이다.

그러나 열감지부에 전달되는 열은 주변에 흐르는 고온의 Ceiling Jet에 의한 대류 열전달이 대부분이며 화염에서 전달되는 복사에 의한 열과 전도에 의한 손실은 대류에 비하여 작은 값을 가진다. 그러므로 식(1)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$mc \frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) \quad (2) \quad \frac{d(\Delta T_e)}{dt} = \frac{1}{\tau}(\Delta T_g - \Delta T_e) \quad (3)$$

이식을 주위의 온도 T_0 를 기준으로 하는 온도 차이의 형태로 정리하면 다음 식(3)과 같다.⁷⁾ 여기서 $\Delta T_e = T_e - T_0$, $\Delta T_g = T_g - T_0$, $\tau = mc/hA$ 이다.

$RTI = \tau\sqrt{U}$ 이므로 이를 식(3)에 대입하면 다음과 같은 식이 나오며, 이 식을 적분하여 정리하면 다음의 식(5)와 같다.

$$\frac{d(\Delta T_e)}{dt} = \frac{\sqrt{U}}{RTI}(\Delta T_g - \Delta T_e) \quad (4) \quad RTI = - \frac{t \cdot \sqrt{U}}{\ln\left(1 - \frac{\Delta T_e}{\Delta T_g}\right)} \quad (5)$$

여기서 t 를 구하면 스프링클러의 반응시간을 알 수 있다. 이 식에 Zone Model이나 Field Model을 이용한 화재 시뮬레이션에서 나온 결과를 대입하여 스프링클러 반응시간을 예측할 수 있다.

2.2 Field Model SMARTFIRE

화재에 대한 예측 모델은 크게 Zone Model과 Field Model로 구분된다. Zone Model은 화재실내에서 생성되는 연기와 열을 예측하는 경험식을 근본으로 하며, Field Model은 유체역학의 기본적인 원리에서 유래된다. 이는 화재구획내부의 고온의 난류 화재가스의 흐름을 예측과 설명하기 위한 CFD (Computational Fluid

Dynamics)를 사용하고 있다. Field Model은 많은 이점이 있는 반면 단점도 가지고 있어 그 사용이 Zone Model에 비하여 드문 편이다. 그 이유는 Field Model이 Zone Model보다 좀더 고성능의 컴퓨터를 필요로 하고 또한 가격이 매우 비싸며, CFD에 관계된 지식의 전문적인 이해와 화재역학에 대한 이해가 요구되기 때문이다. 그러나 성능기준의 도입으로 Field Model의 필요성은 더욱 증가되었으며, 이에 대하여 소방관, 소방엔지니어, 소방규정 제정 위원등과 같은 비 CFD전문가가 Field Model을 사용할 수 있도록 하기 위하여 화재전용 CFD 모델인 SMARTFIRE가 영국 Greenwich Univ.에서 개발되었다.⁸⁾ SMARTFIRE는 세가지 중요 요소로 구성되어 있다. 사용자의 설정환경부분, 전문가 시스템, CFD Code 등이다. 사용자가 기하학적 정보를 입력하면 SMARTFIRE의 전문가 시스템(knowledge Based System)은 사용자와의 대화(Interactive)를 통하여 셀수를 결정하고 격자망을 형성하여 주며 이를 토대로 CFD Code를 수행한다. 이 모델에 대한 검증은 동일 대상에 대한 실제 실험 및 기존의 CFD 프로그램인 PHOENICS와 FLOW3D의 결과와 SMARTFIRE의 적용 결과와의 비교검토를 통하여 이루어졌다.⁹⁾ SMART-FIRE에서 사용되는 기본적인 해석모델의 지배방정식은 다음과 같다.

질량 보존식(Mass Conservation) 운동량 보존식(Momentum Conservation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \qquad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + (\mu_{eff} \text{grad} u_i) + S_{u_i}$$

에너지 보존식

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} h) = \text{div}\left\{ \left(k + \rho \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}\left(\frac{h}{c_p} \right) \right\} + S_h$$

한편 난류의 계산을 위해서는 k-ε 모델을 사용하였으며 이와 관련된 지배방정식은 다음과 같다.

난류운동에너지 전달방정식

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} k) = \text{div}\left[\left(\mu_{tm} + \frac{\rho \nu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right] + P + G - \rho \epsilon$$

SMARTFIRE는 위의 지배방정식을 해석하기 위하여 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 방법을 사용한다. 또한 초기조건과 경계 조건은 사용자의 입력과 전문가시스템에서 처리한다.

3. 스프링클러 반응시간 측정 실험

3.1 실험의 설계 및 방법

본 실험은 구획내부에서 화재 시 스프링클러의 반응 시간과 Ceiling Jet의 온도를 알아보기 위하여 수행하였다. 실험은 2.4 m(W)×3.6m(D)×2.4m(H) 크기의 구획에서 이루어졌으며, 벽면은 내화벽돌로 되어있고, 천장은 석고보드, 바닥은 철판으로 되어있다. 개구부는 0.2m(W)×1.8m(H)로 설정하였다. 개구부의 반대편

벽에서 1m 떨어진 거리에 직경 0.4m 펜을 설치하였다. 이 펜의 열방출률(Heat Release Rate)은 385.3 kW이며, 연료는 Hexane을 사용하였다. 헤드로부터 개구부 방향으로 1m와 1.5m에 각각 스프링클러 헤드(Fusible-Link)를 설치하였으며, 천정부에서 0.28m 정도 떨어져 있다. 헤드의 작동온도는 72℃로 표시되어 있다. 헤드 감열부 주변 가스의 온도를 알기 위하여 각각에 K-type 열전대를 설치하였다. 구획과 열전대의 설치에 대한 것은 다음 Fig. 1. 와 같다.

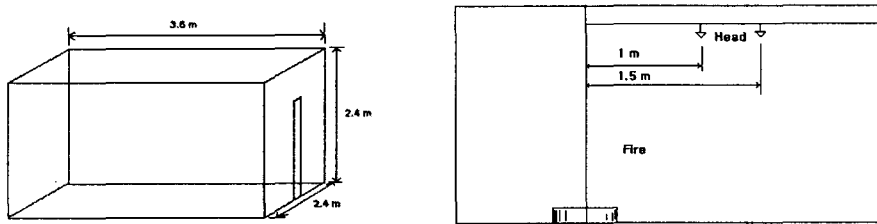


Fig. 1. A drawing of Test Room and Installation Point of Sprinkler Head

3.3 실험의 진행 및 결과

실험은 1회 진행되었다. 실험의 실내의 초기온도는 15℃였으며, 펜에 헥산(Hexane)을 주입하고 점화를 하였다. 각 헤드의 반응시간은 다음과 같다.

Table 1. Response Time of Sprinkler Head on Experiment

	1번 헤드	2번 헤드
반응시간	2분 35초	2분 55초

4. 모델링에 의한 예측결과와 실험 결과와의 비교분석

위와 같은 실험의 조건을 Field Model SMARTFIRE를 통하여 분석하였으며, SMARTFIRE의 결과는 식(5)에 대입하여 반응 결과를 예측해 보았다. 단, RTI값은 “구획화재에서의 스프링클러 작동시간에 대한 연구”에서 김명배, 한용식이 실시한 일련의 실험을 바탕으로 사용되었던 평균값인 $150 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ 을 사용하였다. 특히 Mock-up Test의 화재실 크기나 화원의 직경등이 본 실험과 조금 차이가 있으며, 헤드의 열감지부가 Fusible-Links로 같다.^{6) 7)} SMARTFIRE는 위의 조건을 대입하여 헤드 주변의 온도를 예측해본 결과와 실측치와의 비교는 다음과 Fig. 3.과 같다. 여기서 CJ1과 CJ2는 각각 실험의 1m와 1.5m 떨어진 거리의 헤드 주변의 온도이고 SM.P1과 SM.P2는 SMARTFIRE의 예측 결과이다. 초기에는 두 결과 그래프가 비슷한 결과를 나타내고 있으나 110초 이후부터 차이가 나기 시작하고 있다. SMARTFIRE에서 예측된 온도와 유속을 식(5)에 대입하여 해석해 보았다. 유속 $U=0.3738 \text{ m/s}$ 이고, 107초일 때 화원에서 1m 떨어진 헤드가 작동온도 72℃에 도달한다. 이 때를 스프링클러 반응시간이라고 할 수 있다. 그러나 실험시에 스프링클러의 감열부는 이 시간대에 반응하지 않았으며, 각각이 155

초와 175초에 반응하였다. 155초의 경우 헤드의 온도는 실측의 경우 126℃를 나타내었으며, 예측치는 118.6℃로 나타났다. 또한 175초의 경우 실측은 120℃를, 예측치는 126℃ 인 것으로 나타났다.

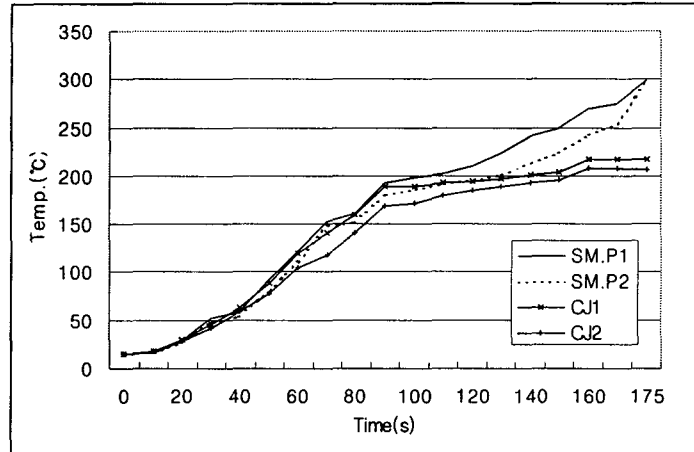


Fig. 4. Validation Profile of Gas Temperature using SMARTFIRE

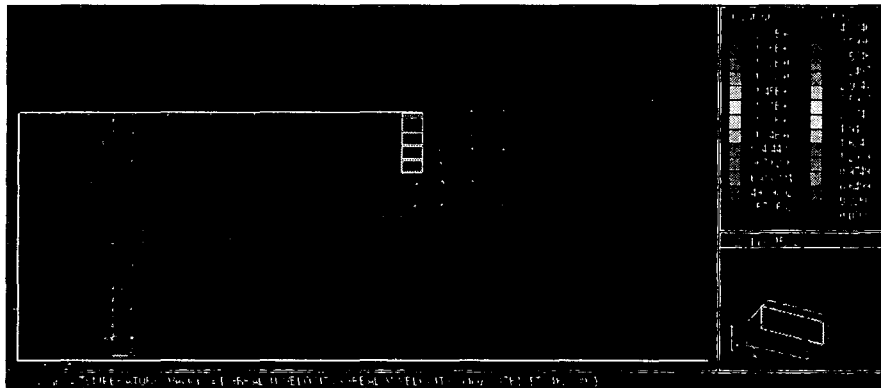


Fig.10. SMARTFIRE Temperature Contours

5. 결론

스프링클러 반응시간 예측을 위하여 Field Model을 적용하여 본 결과와 실험 치와의 비교 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험의 실시결과 화원 직상부에서 반경 1m 떨어진 헤드의 경우 155초에 1.5m 떨어진 헤드의 경우 175초에 반응한 것으로 나타났다.
2. 이때 1m 부분의 주위온도는 209.5℃였으며, 헤드의 감열부는 126.3℃를 나타내었다. 1.5m 떨어진 헤드의 주위온도는 207℃를 감열부의 온도는 120℃를 기록하였다.

3. SMARTFIRE를 사용하여 온도를 예측한 결과 초기에는 실험치와 차이가 많지 않으나, 110초 이후부터 차이가 발생하였으며, 헤드의 반응시간인 155초에 예상된 감열부의 온도는 1m의 경우 118.6℃였으며, 175초에 반응한 1.5m의 경우 126℃를 나타내 각각 7.4℃와 6℃의 차이를 보이고 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) Davis, W. D., Cooper, L. Y., "Estimating the Environment and the Response of Sprinkler Links in Compartment Fires with Draft Curtains and Fusible Link-Actuated Ceiling Vents : User Guide for the Computer Code LAVENT," NIST Publication, 1989.
- 4) Davis, W. D., "The Zone Model Jet: A Model for the Prediction of Detector Activation and Gas Temperature in the Presence of a Smoke Layer", NIST Publication, 1999.
- 5) Russell P. Fleming, "Theory of Automatic Sprinkler Performance", Fire Protection Handbook 18th edition, National Fire Protection Association, 1997.
- 6) 방재시험연구소, "소화용 스프링클러의 신기술 및 적용", 한국화재보험협회, 1996.
- 7) 김명배, 한용식, 윤명오, "스프링클러의 열응답성", 한국화재소방학회지, 1996. 9.
- 8) E. R. Galea, J. Ewer, M. K. Patel, "SMARTFIRE : An Intelligent CFD Base Fire Model", Journal of Fire Protection Engineering, 1999.
- 9) E. R. Galea, J. Ewer, M. K. Patel, "SMARTFIRE V 2.01 : User Guide and Technical Manual", Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, 1999.