

## 센서연동 시뮬레이션을 이용한 화재 예측

구성한\* · 스티븐 웰치\*\*

\* BRE Global, Watford, Hertfordshire WD25 9XX, United Kingdom

\*\* University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JL, United Kingdom

### Predicting fire development using sensor-linked simulation

Koo, Sung-Han · Stephen Welch

#### 요 약

컴퓨터 시뮬레이션과 건물의 센서를 접목한 센서연동 화재모델을 개발하였다. 화재 발생 시 건물 내 상태를 센서로 측정하며 이는 실시간으로 화재모델에 주입이 된다. 모델이 도출하는 시나리오와 센서 측정값을 비교분석하여 모델의 입력 변수를 조율하며 궁극적으로 모델이 실제 화재와 유사한 시나리오를 도출할 수 있도록 한다. 실제 규모의 화재 실험을 실시하였고, 센서연동 화재모델이 화재의 시작위치와 건물 내 출입문의 개폐 상태를 추정할 수 있음을 보였다.

#### 1. 연구의 배경 및 목적

최근 지어지는 건물에는 실내 쾌적 환경이나 보안 유지 등의 이유로 온도 센서에서부터 연기 감지기 등에 이르기까지 다양한 종류의 센서가 설치되고 있다. 센서는 끊임없이 건물의 상태를 관찰하고 온도 등을 측정하고 있는데, 이러한 정보는 화재와 같은 비상사 안전환 소방 활동과 거주자의 대피에 도움을 줄 수가 있어 이를 활용한 각종 시스템이 많이 개발되고 있다. 본 연구는 센서 데이터를 이용하여 화재의 현재 상태를 파악하는 단계에서 한 발짝 더 나아가 이를 컴퓨터 시뮬레이션에 주입하고 이를 바탕으로 화재 모델을 조율함으로써 궁극적으로 화재의 현 상태 뿐만 앞으로의 진행 양상을 추측할 수 있는 재난대응시스템을 개발하고자 한다. 그 첫 번째 단계로서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 건물에서 실시간으로 측정되는 온도 정보만을 가지고도 화재의 발생 위치와 출입문의 개폐 여부를 추정할 수 있음을 본 논문에서 보이고자 한다.

#### 2. 센서연동 화재모델 개발 과정

일반적으로 컴퓨터를 이용한 화재 시뮬레이션에 사용되는 입력 변수는 법규 등에 명시

된 기준을 이용하거나 사용자의 경험에 따라 정해지는 경우가 많다. 하지만 이런 경우 실제 발생하고 있는 화재를 실시간으로 재현하는 것에는 어려움이 있으며 시시각각 변화하는 화재의 상태를 반영하는 것에 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션이 실시간으로 주입되는 센서 정보를 바탕으로 입력 변수를 변경할 수 있도록 기존과는 다른 접근 방식을 제안한다. 우선 입력 변수를 무작위화(randomization)하여 모델에 유연성을 부여하였고, 이로부터 도출된 시나리오와 센서 측정값과의 비교를 통하여 입력변수를 조절할 수 있도록 하였다.

## 2.1 입력 변수의 무작위화

화재 시나리오를 도출할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델에는 여러 가지 종류가 있으나, 실시간으로 발생하는 화재를 분석하기 위해서는 각 모델의 여러 특징 중에서도 특히 계산 속도가 모델 선정의 중요한 요소가 된다. CRISP<sup>[1]</sup>은 영국 BRE(Building Research Establishment)가 개발한 화재 위험도 평가 및 피난 분석을 위한 도구이며 존 모델(zone model)을 기반으로 하고 있어 계산 속도가 매우 빠르다. 또한 정밀한 피난 분석 알고리즘을 포함하고 있어 향후 피난을 위한 시스템으로 쉽게 확장할 수 있다는 점을 고려하여 본 연구의 기본 도구로 선정하였다.

CRISP이 다양한 화재 시나리오를 도출할 수 있도록 입력 변수를 기존의 고정 상수 형태에서 확률의 형태로 변경하였다. 건물 내 특정 실에서의 화재 발생 여부나 출입문의 개폐 상태와 같은 변수는 확률(백분율)로 입력할 수 있게 하였으며, 화재 부하와 같은 물리적 속성에 대해서는 평균과 표준편차로 정의하는 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function)로 정의할 수 있도록 하였다. 출입문의 개폐상태를 예로 들면, 각 출입문에는 “출입문이 열려 있을 확률(%)”이라는 변수를 부여하여 초기값으로 50%를 부여하고 모델은 매번 시나리오를 제작하기 전에 그 확률을 바탕으로 문의 상태를 임의로 설정하고 시뮬레이션을 실행한다.

## 2.2 적합도 검정을 이용한 모델의 조율

알려지지 않은 변수를 추정하는 통계학 방법에는 여러 가지가 있으니 그중에서도 베이즈 추론(Bayes' Inference)은 확률값을 바탕으로 입력된 정보에 따라 확률을 조절하여 대상 변수값을 추정해나가는 방법이어서 본 연구의 기본 분석 방법으로 선택하였다.

베이즈 추론의 기본 공식을 일련의 사건에 대한 공식으로 변경하면 아래와 같다.

$$P(A_j|B_i) = \frac{P(B_i|A_j) \cdot P(A_j)}{\sum_k P(B_i|A_k) \cdot P(A_k)} \quad \{1\}$$

여기서 우항의  $P(A_j)$ 를 제외한 나머지 부분을 우도함수  $L(B_i|A_j)$ 로 묶을 경우, 위의 식은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$P(A_j|B_i) = L(B_i|A_j) \cdot P(A_j) \quad \{2\}$$

식 {2}는 곧 사후확률(*a posteriori*),  $P(A_j|B_i)$ 를 우도함수(*likelihood function*),  $L(B_i|A_j)$ 와 사전확률  $P(A_j)$ 로 정리한 형태로 베이즈 추론의 기본 개념인 ‘사후확률 = 사전확률×우도함수’를 나타낸다.

베이즈 추론을 쉽게 이해할 수 있도록 아래의 예를 들어보자.

하나의 방에 화재가 발생하였고, 인접한 복도에 연기 감지기가 설치되어 있다고 가정하자. 방과 복도 사이에는 출입문이 하나 있고, 출입문이 열린 상태에서 센서가 연기를 감지할 확률은 50%, 출입문이 닫혀있더라도 틈새를 통하여 연기가 새어나가는 것을 고려하여 이 경우 감지 확률을 1%로 가정하자. 계산식에서  $A_1 =$  "출입문 열려있음",  $A_2 =$  "출입문 닫혀있음",  $B_1 =$  "연기 감지됨",  $B_2 =$  "연기 감지 안 됨"을 의미한다. 출입문이 열리거나 닫혀 있을 확률에 대하여 초기값으로 50%를 부여하며 이는  $P(A_1) = P(A_2) = 0.50$ 으로 표현할 수 있다 이제 연기의 감지 여부에 따라 베이즈 추론을 사용하여 출입문의 개폐 여부를 추정해보고자 한다. 먼저 출입문이 열려 있을 때 연기가 감지되는 경우의 우도함수  $L(B_1|A_1)$ 은 식 {1}에 의하여  $0.50 / (0.50 \times 0.50 + 0.01 \times 0.50)$ 이며 그 값은 1.96, 즉 98%가 된다. 반대로 출입문이 열려 있을 때 연기가 감지되지 않을 경우에 대한 우도함수는  $0.50 / (0.50 \times 0.50 + 0.99 \times 0.50)$ 이 되며 그 값은 0.67이다. 따라서 이를 식 {2}에 대입하면  $P(A_1)$ 의 사후확률은 33%가 된다. 지금까지의 계산 과정은 출입문이 열려 있을 초기 확률 50%가 연기의 감지 여부에 따라 그 값이 변하는 과정을 보여주며 이러한 과정의 반복을 통하여 출입문의 개폐 상태를 추정할 수 있게 된다.

위에서 언급한 예의 경우 연기의 감지 여부를 각각 1과 0("감지"/"미감지")으로 나타낼 수 있어 우도함수 계산이 용이하지만, 열전대로 측정하는 온도의 경우 이를 0과 1(혹은 "따다"/"틀리다")로 표현할 경우 두 온도 값이 정확하게 일치하는 경우는 거의 0%에 가까울 것이다. 이 경우 두 값이 얼마나 근접한지를 좀 더 자세하게 평가하여 백분율 등으로 평가할 필요가 있는데 이를 위해서 카이 제곱( $\chi^2$ )을 기반으로 하는 적합도 검정 결과를 우도함수를 계산하는 도구로 사용하였다. 센서가 측정하는 각 실의 온도와 모델의 시나리오 내에 같은 위치에서의 온도값을 대상으로 적합도 검정을 실시한 후 아래의 식을 통해 우도함수  $L(B|A_j)$ 를 계산하였다.

$$L(B|A_j) = \frac{\sum_{k=1}^{N(A_j)} \alpha_k(B|A_j) / N(A_j)}{\sum_{n=1}^{N_{tot}} \alpha_n(B) / N_{tot}} \quad \{3\}$$

여기서  $\alpha_k(B|A_j)$ 는  $k$ 번째 시나리오가 변수  $A_j$ 값을 사용한 경우의 적합도 검정 결과값이며,  $\alpha_n(B)$ 는  $n$ 번째 시나리오의 적합도 검정 결과값이다.

### 2.3 실제 규모 화재 실험을 통한 모델의 테스트

센서연동 화재모델을 테스트하기 위하여 BRE 내에 위치한 Burn Hall 화재 시험소에서 실제 규모의 건물에 대한 연소 실험이 행해졌다. 실험체는 작은 규모의 주택을 재현한 3개의 방과 복도로 이루어졌고 그 평면을 그림 1에 나타내었다.

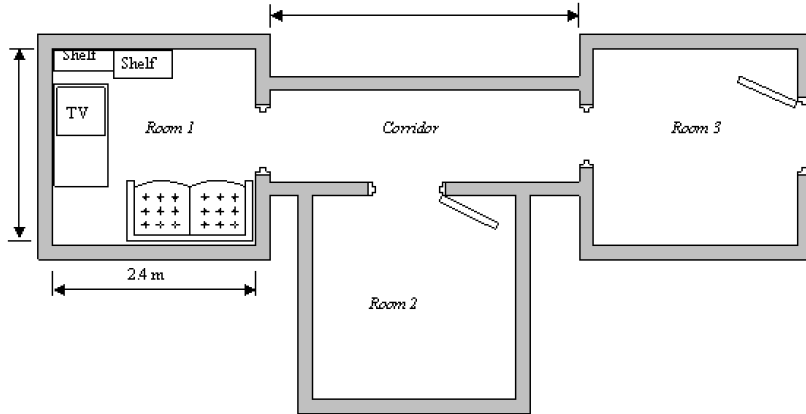


그림 1. 실험체의 평면과 Room 1의 가구 배치

복도를 제외한 모든 방은 안목치수  $2.4 \times 2.4\text{m}$  크기의 정사각형 형태이며, 복도는  $3.6 \times 1.2\text{m}$ 의 직사각형 형태이다. 모든 실의 천정고는  $2.4\text{m}$ 이다. 모든 출입문의 크기는  $0.8 \times 2.0\text{m}$ 이며, 실험체를 구성하는 벽은  $12.5\text{mm}$  두께의 석고보드 두 장 사이에  $100\text{mm}$  두께의 단열재가 부착되어있는 출입문을 제외한 환기구는 설치하지 않았다. 소파와 텔레비전, 그리고 작은 탁자와 책장 등의 가구는 화재가 시작될 Room 1에만 설치하였으며, 실험 결과의 비교 검토가 용이하도록 기존 연구<sup>[2]</sup>에서 사용된 것과 같은 종류의 가구를 선택하였다.

화재모델은 시험소에서 멀리 떨어져있는 University of Edinburgh의 Edinburgh Parallel Computing Centre (EPCC)의 Eddie 슈퍼컴퓨터에 설치하여 원격에서 화재를 분석하도록 하였다.

### 3. 센서연동 화재모델의 예측 결과

실험은 약 1-2 MW 규모의 화재로 계획이 되었으며, Room 1에 설치한 소파에 발화를 하는 것으로 시작됐다<sup>[3]</sup>. 발화한지 약 4분 정도가 지났을 때 실내는 연기로 가득 찼지만, 여전히 사물을 식별할 수 있을 정도의 가시거리는 확보할 수 있었다. 하지만 불의 크기는 휴대용 소화기로 제압하기에는 무리가 있을 정도로 확대되었고, 연기층은 바닥으로부터 약  $1.2\text{m}$  높이 정도까지 내려앉은 상태였다. 화염은 그 후 약 10분 동안 소파로 번져나갔고, 발화로부터 약 30분 정도 경과하였을 때는 주변의 가구(TV와 선반)로 옮겨 붙었다. 그로부터 약 2분 후, 불꽃은 천정 높이에 다다르게 되었고, 1분 정도 후에 Room 1의 대부분의 가구들이 동시에 발화하는 플래시오버(flashover)가 발생하였다. 플래시오버 이후에

는 모든 가구를 포함한 벽체에까지 연소가 진행되었고, 실험체 자체의 안전을 고려하여 발화로부터 약 47분 후에 소화 작업이 실시되었다.

화재 예측 모델을 포함한 시스템 전체는 화재의 감지 이후 즉각 실행되었고, 슈퍼컴퓨터의 비교적 적은 자원(4개의 CPU 프로세서)만을 사용하면서도 30초에 약 500개 이상의 시나리오를 도출할 수 있었다. 또한 각각의 새로운 센서 정보가 주입되기 전에, 시나리오의 비교 분석 및 베イズ 추론에 이르기까지의 모든 “조율” 과정을 무리 없이 수행할 수 있었다. 화재의 시작 위치와 출입문의 개폐 상태는 컴퓨터 모델에 알리지 않은 상태로 시작하였으며, 모델의 예측 능력을 평가하기 위하여 실험에서 발화를 일으킨 *Room 1*의 온도 데이터는 모델의 입력변수에서 제외하였다. 다시 말하여 화재 모델은 *Room 2*와 *Room 3*, 그리고 복도의 온도 데이터만을 가지고 화재의 발화 위치와 각 출입문의 개폐 상태를 추정하게 하였다.

각 방에서 화재가 시작될 초기 확률은 각각 30%, 복도는 10%로 설정이 되었는데 그림 3에서와 같이 시간의 흐름에 따라 초기 확률이 변화함을 알 수 있다. *Room 1*을 제외한 나머지 실의 온도만을 가지고도 모델은 화재가 *Room 1*에서 발생하였음을 추정할 수 있었고, 시간에 흐름에 따라 *Room 1*에서 화재가 발생할 확률값을 초기 30%에서 90% 이상으로 상향 조정하였다.

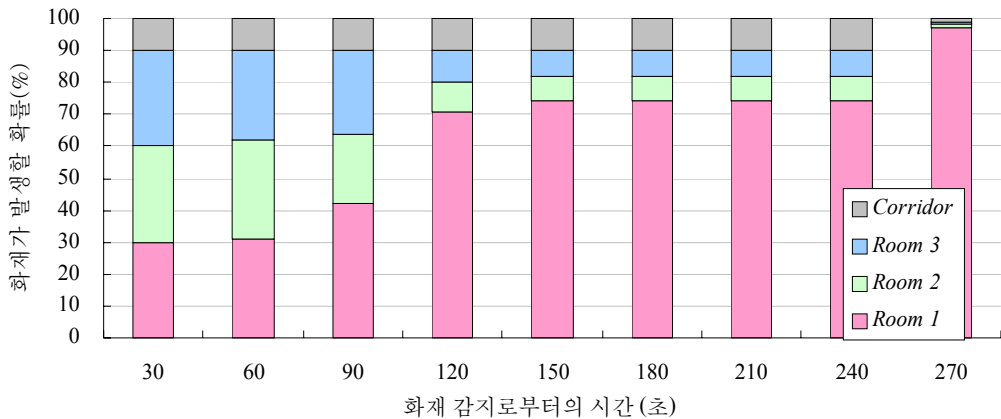


그림 3. 시간에 따른 각 실에서 화재가 발생할 확률값의 변화

각 출입문이 열려 있을 확률은 초기값을 50%로 설정하였는데, 그림 4는 이 값들이 시간이 흐름에 따라 어떻게 변화하는지를 보여준다. 화재의 시작 위치를 알기 전에 출입문의 상태를 추정하는 것에는 의미가 없으므로 우선 모델은 그림 3에서 본 화재 발생 위치 변수가 비교적 명확하게 추정되기까지는 출입문 상태에 대한 확률값을 변경하지 않는다. 화재 발생 위치가 알려지는 약 330초 정도부터 출입문의 개폐 확률 변수를 조율하기 시작하며 *Room 1*의 출입문을 제외한 나머지 출입문에 대해서 개폐 상태를 쉽게 추정해낼 수 있다. 다만 *Room 1* 출입문의 경우 *Room 1*의 실내 온도를 모델에 주입하지 않았기 때문에 전반적인 온도가 낮은 초기에는 *Room 1* 출입문의 개폐 상태를 추정하는데 어

려움을 겪었지만, 전체적인 온도가 증가함에 따라 곧 출입문이 열려있음을 추정할 수 있게 된다.

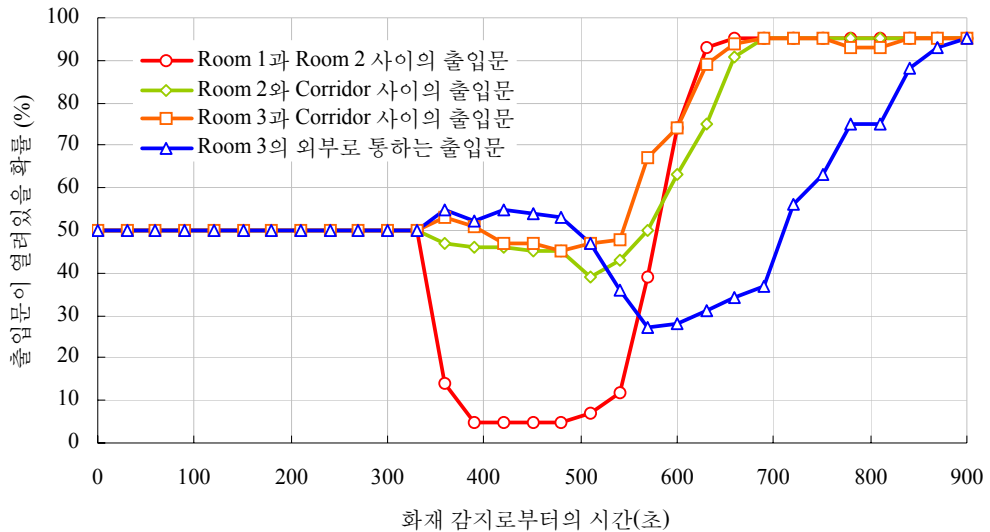


그림 4. 시간에 따른 출입문이 열려 있을 확률값의 변화

#### 4. 결론

건물에서 실시간으로 주입되는 센서 정보를 이용하여 화재의 진행을 예측할 수 있는 센서연동 화재모델을 개발하였다. 실제 규모 화재 연소 실험을 통해 실제 화재와 유사한 상황에서 모델이 문제없이 작동함을 확인하였고 실시간 예측 정보를 제작할 수 있을 정도의 빠른 속도로 시나리오를 도출할 수 있었다. 실험을 통해 화재 모델은 온도 센서로부터 얻어진 데이터만으로도 출입문의 개폐 상태, 화재의 발생 위치 등을 추정할 수 있음을 보였다. 본 연구에서의 화재 예측 모델의 결과는 향후 ‘소방 정보 시스템’이나 ‘대피 안내 시스템’등과 같은 네트워크 시스템과 결합하여 소방관과 대피자에게 화재의 위험에 대한 정보를 실시간으로 전달하여 효과적인 소방 활동과 안전한 대피활동에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Fraser-Mitchell, J.N., CRISP (Computation of Risk Indices by Simulation Procedures) user manual, BRE Global
2. Rein, G., Abecassis-Empis, C., Carvel, R. (eds) (2007), The Dalmarnock fire tests: experiments and modelling, ISBN: 978-0-9557497-0-4.
3. Koo, S.-H., Fraser-Mitchell, J.N., Welch, S. (2010), Sensor-steered fire simulation, Fire Safety Journal 45 (3), pp.193-205.