화재에 의해 발생하는 복사열이 재실자의 피난거동에 미치는 영향에 관한 연구

배승용 · 김정엽* · 신현준* · 유홍선†

중앙대학교 기계공학부, *한국건설기술연구원 화재안전연구센터

A Study of Effect of the Radiative Heat Flux on the Evacuation of Agents

Sungryong Bae · Jung-Yup Kim* · Hyun-Joon Shin* · Hong-Sun Ryou†

Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.

*Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

(Received December 16, 2013; Revised February 17, 2014; Accepted February 17, 2014)

요 약

최근 건축물의 화재 및 피난안전성능을 향상시키기 위한 성능위주설계가 법제화됨에 따라 다양한 피난해석 프로그램을 이용한 안전성 평가가 이루어지고 있다. 일반적으로 피난해석 프로그램의 경우, 연기농도에 따른 이동속도변화 및 유독가스에 의한 독성효과를 적용함으로써 화재 시 재실자의 피난특성 분석이 가능하다. 하지만, 화재에 대한 임의의 설정을 하지 않는 경우 화재주변에서 피난을 하지 않거나 화재 위로 이동을 하는 등의 비현실적인 결과를 예측한다. 그러므로 본 연구에서는 화재로부터 발생하는 복사열에 의해 피난자가 화재를 피해 이동할 수 있도록 복사열 반발력을 정의하였다. 또한 복사열 반발력을 고려할 수 있도록 Helbing의 이동모델을 개선함으로써 기존 이동모델과 비교하였다. 수치해석결과 모든 피난자가 복사열 반발력에 의해 화재를 우회하여 이동하고, 한계 복사열유동의 최대값인 2.4 kW/m^2 에 도달하지 않는 것을 통해 개선모델의 신뢰도를 확인하였다.

ABSTRACT

Recently, the safety assessments with using the various evacuation programs are performed for improving the performance of fire and evacuation safety in the building. Generally, the evacuation programs can simulate the human behavior in fire situation by applying the variation of the movement speed and Fractional Effective Dose (FED) index in the smoke. However, if the simulation is performed without optional setting around the fire, the agents do not avoid the fire and they move through the fire. Therefore in this study, we define the radiative repulsion force which exists between the fire and the agents. Moreover, we modify the Helbing's movement model by adding the radiative repulsion force. As a result of the modified movement model, all agents move around the fire and they do not enter the upper bound area of radiative heat flux, 2.4 kW/m^2 . From these results, we verified the reliability of the modified movement model.

Keywords : Human-fire interaction, Radiative repulsion force, Gradient of radiative heat flux, Evacuation

1. 서 론

도시 내 건축물의 대형화, 고층화, 지하시설의 활용 등을 통하여 도시의 공간적 효율성 증가 및 국민의 생활수준 향상을 이루었지만 안전의식 부재 및 방심 등에 의한 재난이 증가하는 추세이다⁽¹⁾. 특히, 수직적 공간을 활용하여 축조된 초고층 건축물 및 지하시설 등에서 화재가 발생하는 경우 연기의 이동경로와 피난경로가 겹치게 되어 재실자의 피난안전성능이 낮아진다⁽²⁾.

초고층 건축물 및 지하시설의 대표적인 화재사례로는 2010년 해운대 우신골드스위트 화재⁽³⁾와 2003년 대구지하철 화재⁽⁴⁾가 있다. 두 화재사례 모두 제어하지 못한 유독가스가 피난경로로 유입됨에 따라 원활한 피난활동이 이루어지지 못하였다. 우신골드스위트 화재의 경우 입주민들이 출근한 이후에 발생한 화재로써, 건물 내 재실자의 수가 많지 않아 인명피해는 경미하였다⁽⁵⁾. 하지만 대구지하철 화재의 경우 많은 시민들이 이용하는 지하철에 발생한 화재로써, 승객들이 차량내부 및 역사에서 원활하게 피난

†Corresponding Author, E-Mail: cfdmec@cau.ac.kr
TEL: +82-2-820-5280, FAX: +82-2-813-3669

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.1.031>

을 하지 못하여 많은 사상자가 발생하였다⁽⁴⁾. 이와 같은 초고층 건축물 및 지하시설에서의 인명피해를 저감하기 위하여 화재 및 피난 해석을 통한 건축물의 피난성능 평가 및 설계가 필요하다⁽⁶⁾.

피난성능평가 및 설계에 사용되는 모든 피난해석 프로그램은 Helbing⁽⁷⁾의 이동모델 및 화재가 사람에게 미치는 영향⁽⁸⁻¹⁰⁾을 적용하여 화재 시 재실자의 피난특성을 분석할 수 있도록 개발되었다. 하지만 각 프로그램에 적용되어 있는 화재가 사람에게 미치는 영향은 연기농도에 따른 이동속도 변화^(8,9) 및 유독가스에 의한 독성효과^(10,11)에만 국한되어 있다. 즉, 현재 개발되어 있는 피난해석 프로그램들은 개별적인 설정을 하지 않는 경우 화재주변에서 피난을 하지 않거나 화재 위로 이동을 하는 등의 비현실적인 결과를 예측한다.

그러므로 본 연구에서는 화재를 피해 피난하는 것을 모사할 수 있도록 피난자가 화재로부터 방출되는 복사열에 의해 받는 힘을 정의하였다. 또한 Helbing의 이동모델에 피난자가 화재에 의해 받는 복사열 반발력을 추가함으로써 화재가 피난에 미치는 영향을 직접적으로 고려할 수 있도록 하였다. 최종적으로 화재와 피난을 동시에 해석함으로써 화재특성 정보를 직접적으로 활용할 수 있는 FDS + Evac⁽¹²⁾에 개선된 이동모델을 적용하여 화재 시 피난자의 거동특성을 분석하였다.

2. 피난해석 모델

2.1 사람의 이동모델

FDS + Evac에서는 Helbing이 제안한 이동모델을 이용하여 피난자의 이동속도를 계산하며, 아래의 식으로 표현된다⁽⁷⁾.

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{m_i}{\tau_i} (v_i^o - v_i) + \sum_{j \neq i} (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^c + f_{ij}^{at}) + \sum_w (f_{iw}^{soc} + f_{iw}^c) + \sum_k f_{ik}^{at} + \xi_i(t) \quad (1)$$

여기서, $x_i(t)$ 는 해석 대상인원의 위치벡터를 나타내고 $\xi_i(t)$ 는 해석대상자가 다른 사람과의 충돌을 방지하기 위해 사용되는 임의의 힘(random force)이다. 또한 v_i^o 는 해석대상자의 지향속도, v_i 는 실제속도, f^{soc} , f^c , f^{at} 는 각각 사회작

용력(social force), 접촉력(contact force), 집단응집력(attraction force)를 나타내며, 피난자 간에 작용하는 힘의 정의를 Figure 1에 도식화 하였다.

2.2 화재의 영향

FDS + Evac에서는 연기에 의한 사람의 이동속도 변화 및 독성효과를 이용하여 화재가 피난자의 거동특성에 미치는 영향을 적용하였다. 연기농도에 따른 이동속도의 변화는 Frantzich와 Nilsson⁽⁹⁾이 제시한 실험식을 적용하였으며, 아래와 같이 정의 된다.

$$v_i^o(K_s) = \frac{v_i^o}{\alpha} (\alpha + \beta K_s) \quad (2)$$

여기서, K_s 는 피난자 위치의 흡광계수(extinction coefficient)를 나타내며, 계수 α 와 β 는 각각 0.706 m/s, -0.057 m²/s의 값을 갖는다⁽¹²⁾.

또한, 연기의 농도가 높은 환경에서 피난자가 이동능력을 잃거나 호흡곤란에 의한 사망 등의 효과를 고려하기 위하여 Purser⁽¹⁰⁾가 제시한 흡입량분율(FED) 모델을 적용하였으며, 아래와 같이 정의된다.

$$FED_{tot} = FED_{CO} \times HV_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (3)$$

여기서, FED_{CO} 는 일산화탄소에 의한 독성효과를 나타내며, FED_{O_2} 는 산소부족에 의한 질식효과를 나타낸다. 또한, HV_{CO_2} 는 이산화탄소의 농도를 통해 도출되는 과호흡 계수를 나타낸다.

2.3 복사열 반발력

FDS + Evac에서는 해석도메인의 포텐셜 유동장(potential flow field)을 이용하여 피난 대상자의 지향방향을 결정한다⁽¹²⁾. 즉, 화재에 관련한 설정없이 유동장을 계산하는 경우, 화재를 통과하는 유동이 생기게 되어 피난 대상자가 화재를 향해 피난하는 것으로 해석한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 화재로부터 발생하는 복사열과 피난 대상자 사이에 복사열 반발력이 작용한다고 가정하였다. 복사열 반발력의 방향은 피난 대상자 위치에서의 복사열유동(Radiative heat flux) 구배를 이용하여 정의하였다. Figure 2는 임의의 위치에서 복사열유동 구배를 계산하는 방법을 나타내고 있으며, 피난 대상자의 위치를 중심으로 네 방향(-x, +x, -y, +y)에 대하여 정의된 구배의 평균값으로 정의한다. 또한 피난 대상자가 벽면 또는 모서리 부근에 있는 경우, 벽 부분의 구배를 제외하고 정의하였으며, 복사열 반발력은 아래와 같이 정의하였다.

$$f^{rad} = \alpha_{rad} \frac{\nabla \dot{q}_{rad}}{|\nabla \dot{q}_{rad}|} \quad (4)$$

여기서, α_{rad} 는 복사열 반발력 계수를 나타내며, 사람의 심리상태에 영향을 주는 한계 복사열유동(1.6~2.4 kW/m²)⁽¹³⁾

Figure 1. The schematic of interaction forces between each agent (Social force, Contact force).

Figure 2. The method for calculating the radiative gradient around agent.

에 도달하기 전에 피난경로를 변경할 수 있도록 0.05 m · sec로 설정하였다.

이를 통해 계산된 복사열 반발력을 식(1)에 적용하여 이동모델을 개선하였으며, 개선된 이동모델은 아래와 같다.

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{m_i}{\tau_i} (v_i^o - v_i) + \sum_{j \neq i} (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^c + f_{ij}^{at}) + \sum_w (f_{iw}^{soc} + f_{iw}^c) + \sum_k f_{ik}^{at} + \xi_i(t) \quad (5)$$

3. 수치해석 결과 및 토론

3.1 수치해석 조건

Figure 3은 본 연구에서 사용된 화재 및 피난해석 도메

인을 나타낸 것으로써, 전체 계산 영역은 길이 32 m, 폭 10 m, 높이 2.8 m의 임의의 복도로 설정하였다. 화재는 소형 소파에서 발생한 것으로 가정하여 크기를 1.0 MW로 설정하였으며, 복사열 반발력의 영향을 분석하기 위하여 연기발생이 없다고 가정함으로써 피난대상자의 이동속도 변화, 유독가스에 의한 질식효과는 무시하였다. 또한 해석 시간의 단축을 위하여 화재성장은 고려하지 않았다. 성인으로 구성된 200명의 피난 대상자를 좌측 끝에 위치시켰으며, 복도의 중앙에서 화재가 발생함에 따라 화재를 즉각 감지하고 우측 출구를 향해 피난을 개시하는 것으로 가정하였다.

본 연구에서 제시한 복사열 반발력을 적용하기 위하여 사용된 FDS + Evac은 해석도메인의 포텐셜 유동장을 이용하여 피난 대상자의 지향방향을 결정한다⁽¹²⁾. 즉, 화재주

(a) computational domain for fire and evacuation simulation

(b) flow field around the fire [case 1, 3] (c) flow field around the fire [case 2]

Figure 3. The computational domain and the flow field around the fire.

Table 1. The Simulation Conditions

	Movement Model	Flow Field
Case 1	Original Helbing	No obstacle around fire
Case 2	Original Helbing	Obstacle around fire
Case 3	Modified Helbing	no obstacle around fire

변을 장애물과 같이 설정하여 유동장을 변경시킴으로써 피난 대상자가 화재를 통과하여 피난하는 것을 방지할 수 있다(Figure 3(c), (d)). 그러므로 본 연구에서는 피난 대상자의 이동경로 변경에 영향을 주는 요소들을 변경함으로써, 복사열 반발력을 이용하여 개선된 이동모델을 기존 모델과 비교분석하였다(Table 1).

3.2 결과 및 토론

Figure 4는 각각의 조건에 대한 시간경과에 따른 피난특성을 나타내고 있다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이, 화재 관련 설정 없이 기존 이동모델로 피난해석을 수행한 case 1의 경우 일부 피난 대상자들이 화재를 통과하여 피난하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 출구까지 직선으로 형성된 유동장에 의해 피난 대상자들은 피난경로 상에 화재가 있음에도 불구하고 경로를 변경하지 않고 진행하는 것이다. 또한, 피난해석에서 열에 의한 사망을 무시하고 있기 때문에 모든 피난대상자가 피난을 완료하지만, 한계 복사열유동이 넘는 구역(검정색 부분)을 통과하여 피난하는 일부 피난 대상자들은 화상에 의한 사망으로 간주할 수 있다.

Case 2는 화원 주변에 장애물을 설치함으로써 유동장을 변경하여 피난 대상자가 화재를 피해 이동할 수 있도록 하였으며, 장애물의 크기는 한계 복사열유동의 크기에 맞추어 설정하였다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 피난 대상자는 장애물에 의해 형성된 유동장(Figure 3(c))을 따라 이동하고 있으며, 이를 이용하여 피난 대상자가 화원 및 한계 복사열 유동을 피해 피난경로를 변경하는 것과 같은 효과를 만드는 것이다. 하지만, 장애물의 크기는 임의로 설정하는 것으로써, 이에 대한 기준이 명확하지 않은 경우 피난해석 결과에 대한 정확도의 판단이 불가능하다. 또한 복사열유동의 크기는 화재조건에 따라 달라지기 때문에 피난해석의 정확도를 향상시키기 위해서는 피난해석을 수행하기 전에 화재해석을 통한 복사열유동의 크기가 결정되어야 한다.

Case 3는 화재관련 설정을 제외함으로써 case 1과 동일한 유동장을 기반으로 피난해석을 수행하였으며, 기존 이동모델에 복사열 반발력을 추가함으로써 피난 대상자가 화재를 피해 이동할 수 있도록 하였다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이, 유동장이 출구까지 직선으로 형성되어 있음에도 불구하고, 피난 대상자들은 화원 및 한계 복사열유동을 피해 피난경로를 변경하여 이동하고 있다. 이는 화원과 피난 대상자 사이의 거리가 짧아짐에 따라, 지향방향 및

Figure 4. The characteristics of evacuation as time elapsed (10 s, 20 s, 40 s from top).

Figure 5. Number of evacuated people as time elapsed.

속도에 의해 산출되는 motive force (식(1) 우변 첫 번째 항)보다 복사열 반발력이 높아지게 되어 피난 대상자들이 이동경로를 변경할 수 있는 것이다. 또한 화원주변에 장애물을 설정한 결과에 비하여 한계 복사열유동이 넘는 구역 안으로 들어가는 피난 대상자의 수가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

Figure 5는 시간경과에 따른 피난자의 수를 나타내고 있으며, 모든 조건에 대하여 최초 피난 완료시간은 약 20초로 비슷하게 예측하고 있다(Table 2). 이는 Figure 4를 통해서도 확인할 수 있듯이, 벽면부근에 위치한 피난 대상자에게

Table 2. First, Last and, Total Evacuation Times

	1st evacuation time	last evacuation time	Evacuation time
Case 1	19.4 s	40.0 s	20.6 s
Case 2	18.7 s	49.8 s	31.1 s
Case 3	18.5 s	80.5 s	62.0 s

유동장 및 복사열 반발력의 영향력이 낮게 작용하기 때문에 조건에 상관없이 모두 비슷한 결과를 예측하는 것이다.

하지만 각 조건에 따라 최종 피난완료시간 및 총 피난시간은 많은 차이를 보이고 있다. 화원주변의 유동장을 변경함으로써 화원을 우회하는 효과를 만들어준 case 2의 경우, 이동경로 중간에 위치한 장애물에 의하여 발생하는 병목현상에 의해 총 피난시간이 증가한다. 하지만, 피난 대상자들이 화재를 통과한 직후 유동장을 따라 복도의 중앙으로 이동하기 때문에 화재주변의 정체현상을 낮추게 되어 총 피난시간의 증가율(150%)이 case 3에 비하여 낮게 예측된 것이다.

복사열 반발력에 의하여 경로를 변경하는 case 3의 경우, 화재주변을 이동하는 피난 대상자의 이동속도는 motive force와 복사열 반발력의 합력에 의해 감소하게 된다. 또한 한계 복사열유동을 회피하여 이동하기 때문에 이동경로의 폭이 감소하게 되어 화재주변에서 극심한 정체현상이 발생한다. 이로 인하여 화원의 상류부분에서는 병목현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 화재주변에서 발생하는 병목현상 및 정체현상에 의하여 300%의 높은 총 피난 시간 증가율을 보이고 있다.

Figure 6. The characteristics of human behavior around the fire (left: 20 s, right: 25 s).

일반적으로 공황상태에 빠진 피난 대상자는 집단행동을 통해 피난을 하게 되지만⁽¹³⁾, 기존 해석방법(case 2)은 피난 대상자들이 유동장을 따라 이동함에 따라 이러한 피난특성을 고려하지 못하고 있다. 하지만, 개선된 이동모델을 이용하는 경우(case 3) 화재를 통과한 이 후 피난 대상자들이 벽면에 모여 출구까지 이동하고 있으며, 화재의 하류부분에서 산개하여 이동하는 기존 해석방법에 비하여 현실성 있는 결과를 도출하고 있다. 하지만 화재를 통과한 이후에도 복사열 반발력의 영향을 받게 됨에 따라 모든 피난 대상자들이 벽면 부분으로 몰리는 경향이 발생하고 있으며, 이에 대한 추가적인 고찰 역시 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 피난 대상자가 화재의 영향을 직접적으로 받음으로써 화원을 우회하여 피난경로를 변경도록 만들어 주는 힘인 복사열 반발력을 정의하였다. 또한 정의한 복사열 반발력을 이용하여 Helbing의 이동모델을 개선하였으며, 임의의 복도 내 화재발생 시 피난 대상자들의 거동특성을 분석함으로써 기존이동모델 및 해석방법(장애물 설정)과 비교분석하여, 아래와 같은 결과를 도출하였다.

1. 화재에 관련한 설정 없이 기존 이동모델을 이용하여 피난해석을 수행하는 경우 피난 대상자들은 화재를 인식하지 못하고 화원 및 한계 복사열유동이 넘는 구역을 통과하여 피난한다. FDS + Evac의 경우 화재주변에 장애물을 설정함으로써 포텐셜 유동장을 변경하여 피난 대상자가 화원을 피해 이동하는 효과를 만들 수 있지만, 장애물의 크기설정이 잘못되는 경우 해석의 신뢰도가 낮아지는 단점을 가지고 있다.

2. 복사열 반발력을 적용하는 경우, 피난 대상자가 화원과 가까워짐에 따라 화재를 통과하여 이동하려는 motive force에 비해 복사열 반발력이 높아지게 되어 화원을 우회하여 경로를 변경한다. 또한, 화원주변에서의 이동속도 및 이동경로의 크기가 감소함에 따라 화재주변에 병목현상 및 정체현상이 발생하게 되어 총 피난시간이 기존 이동모델(case 1)에 비해 약 3배 증가한다.

3. 개선된 이동모델을 적용하는 경우 화재의 하류부분에서 피난 대상자들이 무리지어 이동하는 집단 행동특성을 확인할 수 있다. 이를 통해 개선된 이동모델이 기존의 해석방법에 비하여 현실성이 높은 결과를 예측하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 모든 피난자들이 벽면부분으로 몰리는 경향에 대해서는 추가적인 고찰이 필요한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 첨단도시개발사업의 일환으로 국토과학기술진흥원이 관리하고 있는 초고층빌딩 시공기술연구단의 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사드립니다.

References

1. K. H. Ahn, "A Study on Establishment of Safety Culture Against Disaster", The Graduate School of Public Administration, Hanyang University (2007).
2. S. Bae, K. C. Ro and H. S. Ryou, "Numerical Study on the Effect of Fire Growth on the Evacuating Characteristics in the Carriage Fire", Proceedings of 2009 Autumn Annual Conference, The Korean Society for Railway, pp. 881-886 (2009).
3. Y. Choi, "Haeundae Woosin Golden Sweet Fire!", Fire Prevention News (2010).
4. Y. J. Jang, C. H. Lee, W. H. Park and W. S. Jung, "The Comparative Analysis of Passenger Evacuation Results Using CFAST and FLUENT", Proceedings of 2007 Autumn Annual Conference, The Korean Society for Railway, pp. 1348-1355 (2007).
5. S. Bae, G. H. Ko, C. W. Lee and H. S. Ryou, "A Network-based Smoke Control Program with Consideration of Energy Transfer in Ultra-high-rise Buildings, CAU-ESCAP", Building Simulation, Vol. 6, No. 2, pp. 173-182 (2013).
6. H. S. Hwang, J. H. Choi and W. H. Hong, "Simulation Modeling of High-rise Apartment Evacuation Scenario Comparing with Full-scaled Experiment's", Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 25, No. 9, pp. 125-132 (2009).
7. D. Helbing, I. Farkas and T. Vicsek, "Simulating Dynamical Features of Escape Panic", Nature, 407(6803), pp. 487-490 (2000).
8. T. Jin, "Visibility through Fire Smoke", Journal of Fire & Flammability, Vol. 9, pp. 135-155 (1978).
9. H. Frantzich and D. Nilsson, "Utrymning Genom tät rök: Beteende Och Förflyttning", Report 3126, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden (2003).
10. D. A. Purser, "Toxicity Assessment of Combustion Products", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA (1995).
11. H. J. Kim, S. Bae, A. Burakov, Y. K. Choi and H. S. Ryou, "Investigation of Effect of Improved on the Evacuation of the Fractional Effective Dose (FED)", Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Korean Society for Computational Fluids Engineering, pp. 227-232 (2012).
12. T. Korhonen and S. Hostikka, "Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS + Evac Technical Reference and User's Guide (FDS 5.4.3, Evac 2.2.1)", VTT Technical Research Centre of Finland (2009).
13. T. Jin, "Visibility and Human Behavior in Fire Smoke", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA (2002).