

대피 및 인명피해 평가 프로그램 개발 및 적용사례

윤성욱^{1)*}, 이동호²⁾

Development and Application of Evacuation and Fatalities Assessment Program

Yoon, Sung-Wook, Rie, Dong-Ho

Abstract Evacuation and Fatalities Simulation is one of the core technologies for performance based design. Recently, developed programs in foreign countries have limitations such as simple fatality calculation and coarse visual interface. This study developed an advanced evaluation program for evacuation and fatalities to overcome limitations of existing programs and improve various applications, i.e., an evacuation algorithm using elevators as well as evacuation stairs. In addition, the evaluation program can let users make a decision of fatalities from fire by coupling with FDS (Fire Dynamics Simulator) from NIST and realizes three-dimensional virtual space using a graphic module.

Key words Evacuation, Fatalities, PBD, Risk, Assessment

초 록 대피 및 인명피해 시뮬레이션 기술은 성능위주 설계의 핵심 기술 중 하나이다. 기존 해외에서 개발된 프로그램들은 단순한 인명피해 계산 방식과 비주얼의 조악으로 한계성을 나타내고 있다. 본 연구에서 개발된 대피 및 인명피해 평가 프로그램은 기존의 프로그램의 한계점을 극복함과 동시에 다음의 관련 기술을 향상시키고 실제 사례에 적용하였다. 첫째, 피난계단 뿐만 아니라 엘리베이터를 이용하여 대피할 수 있는 알고리즘을 적용하였다. 둘째, 미국 표준연구소(NIST)의 화재해석 프로그램(FDS, Fire Dynamics Simulator)과 연계(Coupled)를 통해 화재에 의한 인명피해 발생여부 판단이 가능한 프로그램이다. 마지막으로 그래픽 전용 모듈을 적용하여 현실에 가까운 3차원 가상현실을 구현하였다.

핵심어 대피, 인명피해, 성능위주 설계, 화재위험성, 평가프로그램

1. 서 론

터널, 지하 정거장 등 지하 대공간에서 화재시 이용자의 안전을 위해 가장 중요하게 고려되어야 할 사항 중 하나는 대피이다. 대피 계획은 지하 공간 구조물이 계획 및 설계되는 단계부터 고려되어야 한다.

특히, 최근들어 국내 소방분야에서도 적용되기 시작한 성능위주 소방설계의 핵심은 다양한 화재 조건(시나리오)에서 사람이 대피 가능한지를 따져보는 것이다.

구조물 내 화재 시 대피 성능의 우수성을 판별하는데 있어 중요한 인자는 대피하는데 걸리는 시간과 대피 중 발생하는 인명피해인데 이것들은 대피자의 구성, 구조

물 내부 구조, 화재 시나리오, 화재에서 발생하는 열 및 독성가스, 방재설비 설치 및 작동 여부, 대피자의 대피로 인지상태 등 다양한 변수에 의해 영향을 받는다. 이러한 복잡 다양한 변수를 고려하여 구조물 내에서의 대피 성능을 평가하기 위해 그 동안 국내에서는 SIMULEX (영국)로 대표되는 해외 개발 프로그램을 이용하여 방재설계 등에 적용하여 온 것이 현실이다. 이러한 해외 개발 프로그램들은 대피행동을 모사하는 우수한 알고리즘을 적용하고 있고 사용이 간편하며 그 동안 국내외의 많은 프로젝트들에 적용되어 온 것이 사실이나 다음과 같은 한계점을 가지고 있다.

- 구조물 대피시 층간이동은 대부분 계단만을 이용하도록 되어 있으나 최근 국제적으로 초고층 및 대심도 터널 구조물에서 피난용 엘리베이터의 적용이 고려되고 있어 이에 대한 성능평가방안이 필요하다.
- 시뮬레이션 결과를 2차원으로만 확인할 수 있기 때

¹⁾ GS건설 기술본부 차장

²⁾ 인천대학교 안전공학과 정교수

* 교신저자 : yoonsw@gsconst.co.kr

접수일 : 2011년 8월 11일

심사 완료일 : 2011년 8월 22일

게재 확정일 : 2011년 8월 24일

3.2 이동속도 및 추월 알고리즘

재실밀도에 따른 이동속도 저하 알고리즘은 1995년 영국 Edinburgh 대학의 Thompson과 Marchant¹⁾에 의하여 다음과 같이 처음 제시되었다.

$$v = V_u \times \sin\left\{90 \times \left(\frac{d-b}{t_d-b}\right)\right\} \quad (\text{where } b \leq d \leq t_b)$$

$$v = V_u \quad (\text{where } d > t_d)$$

- v : 저하된 이동 속도
- V_u : 기본적인 이동 속도
- d : 사람 중심에서부터 다른 사람과의 거리
- t_d : 한계거리 1.6 m
- b : 몸의 안쪽 길이 0.3 m

계단을 이용하여 아래층으로 대피하는 경우, 이동 속도 V_u 는 평지에서서의 이동 속도 대비 최대 23%까지 증가하는 것으로 알려져 있다.

재실밀도에 의한 이동속도 저하 이외에도 앞사람을 추월하기 위한 알고리즘이 적용되었는데 이동 중인 사람이 이동 경로를 차단하는 사람을 만나게 되면 그림 2와 같은 행동을 취하게 된다. 즉, 그림 2에서 보면 θ_0 는 최적 이동 방향이고 θ_1 과 θ_2 는 앞 사람을 추월하기 위한 잠재적인 이동방향 이다. θ_1 과 θ_2 같은 경로는 앞에 사람에 대한 최소 거리 50 mm를 유지하도록 되어있다. 이와 같은 방법으로 θ_1 과 θ_2 같은 잠재적인 이동경로를 정하게 되고 본래의 최적 이동경로와 가장 작은 편차를

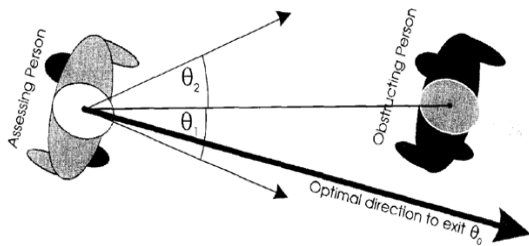


그림 2. 추월 알고리즘

요구하는 경로를 선택하게 된다.

또한 대피자의 움직임 모델은 대피자를 중심으로 주변에 미치는 힘을 아래와 같이 계산하여 본 프로그램에 적용하였다.

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i(t)}{dt^2} = \mathbf{f}_i(t) + \boldsymbol{\xi}(t)$$

m_i : 대피자의 질량

$\frac{d^2 \mathbf{x}_i(t)}{dt^2}$: 대피자의 가속도

$\mathbf{f}_i(t)$: 대피자가 주변에 미치는 힘

$\boldsymbol{\xi}(t)$: 무작위적으로 동요하는 작은 힘

이 때 대피자의 속도를 계산하기 위해서는 대피자의 기본적인 걷기 속도 및 몸 사이즈에 대한 각종 수치는 아래 그림 3 및 표 1과 같이 정리할 수 있다.

위 수식에서 대피자는 주변에 미치는 힘($\mathbf{f}_i(t)$)은 많은 성분으로 이루어져 있기 때문에 본고에서는 자세한 언급은 피한다.

3.3 한계 위험 기준

앞서 2절에서 언급한 사망 여부를 판별하는 세부 기준을 정리하면 표 2와 같다²⁾.

하지만 표 2에 나와 있는 한계 위험도 평가기준은 단순히 절대적인 노출값 또는 복용량만 나타낼 뿐 사람이

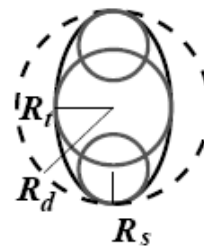


그림 3. 대피자의 몸 사이즈

표 1. 대피자 신체크기에 따른 반경 및 이동속도 변화

Body topy	R_d (m)	R_h/R_d (-)	R_t/R_d (-)	R_s/R_d (-)	Speed (m/s)
Adult	0.255 ± 0.03035	0.5882	0.3725	0.6275	1.25 ± 0.30
Male	0.270 ± 0.020	0.5926	0.3704	0.6296	1.35 ± 0.20
Female	0.240 ± 0.020	0.5833	0.3750	0.6250	1.15 ± 0.20
Child	0.210 ± 0.015	0.5714	0.3333	0.6667	0.90 ± 0.30
Elderly	0.250 ± 0.020	0.6000	0.3600	0.6400	0.80 ± 0.30

표 2. 한계 위험도 평가 기준

기준		Lower Limit	Upper Limit
열에 의한 영향	복사열	2.5 KW/m ²	2.5 KW/m ²
	대류열	65℃	190℃
	상층부 연기층 온도	100℃	200℃
가시거리에 의한 영향	일반공간의 가시거리 확보	2 m	3 m
	대공간의 가시거리 확보	10 m	-
	실내의 연기층 높이	2 or 1.6 × 0.1 H 중 큰 값 이상	-
독성에 의한 영향	CO	1400 ppm	1700 ppm
	HCN	80 ppm	80 ppm
	CO _{Hb}	30%	40%
	O ₂	12%	15%
	CO ₂	5%	6%

이러한 위험 인자에 노출되는 시간은 전혀 고려하고 있지 않다. 일반적으로 화재가 발생하였을 때 인체가 독성가스를 포함한 위험인자에 노출되는 시간이 길어질수록 심각한 피해를 초래하는데 이를 정량적으로 판단하기 위한 계산모델이 있으며 이를 유효복용분량(FED, Fractional Effective Dose)이라고 한다³⁾. FED는 대피자가 일정시간동안 유해가스를 흡입함으로써 무기력 또는 치사상태에 도달하게 되는 복용분량 비로서 정의되는데 구체적으로 사망 판별 기준이 되는 FED 값은 문헌마다 다른 값을 적용하고 있으며 이에 대한 연구는 계속 진행 중에 있다. 본 프로그램에 적용된 FED 모델에 대한 구체적인 내용은 참고문헌에 잘 나와 있으므로 생략하도록 한다.

3.4. 엘리베이터를 이용한 대피 알고리즘

서론에서 언급한 바와 같이 초고층 복합건물, 대형 지하 정거장 등 대규모 구조물에서 총대피시간을 단축하고 노약자, 장애인 등의 대피를 원활하게 하기 위해 최근 국내외에서 대피용 엘리베이터의 적용이 고려되고 있는 점을 감안하여 피난 계단 뿐만 아니라 엘리베이터를 이용해서 대피를 시뮬레이션 할 수 있는 모델을 그림 4와 같이 적용하였다.

3.5 대피 및 인명피해 프로그램 개발

본격적인 대피 및 인명피해 프로그램 개발을 위해 다음과 같은 개발목표가 반영되도록 프로그래밍을 수행하였다.

- 기존 프로그램 대비 동일 또는 우수한 성능의 대피

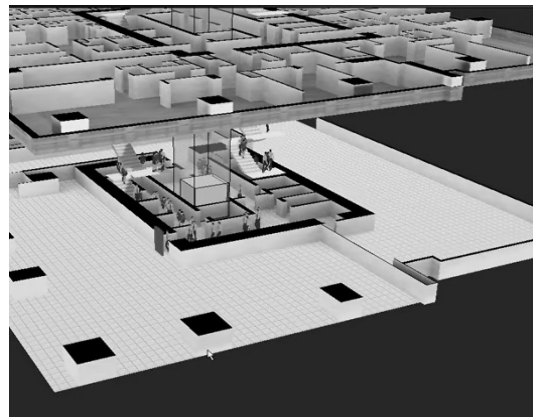


그림 4. 엘리베이터를 이용한 대피모델의 적용

알고리즘 적용

- 엘리베이터를 이용한 대피 알고리즘의 구현
- FDS와 연동된 진보된 인명피해 알고리즘의 적용
- 시뮬레이션 결과의 완벽한 3차원 visualization 구현

특히, 우수한 비주얼을 구현하기 위해서 그래픽 개발툴을 이용하였으며 대피 및 인명피해 프로그램은 그 개발툴 상에서 프로그래밍 되었다. 프로그램의 메뉴 구성 및 초기화면 모습은 그림 5와 같다.

4. 활용사례

개발된 대피 및 인명피해 프로그램의 검증 및 적용성을 평가하기 위해 초고층 복합건물, 터널 등에서 대피 시뮬

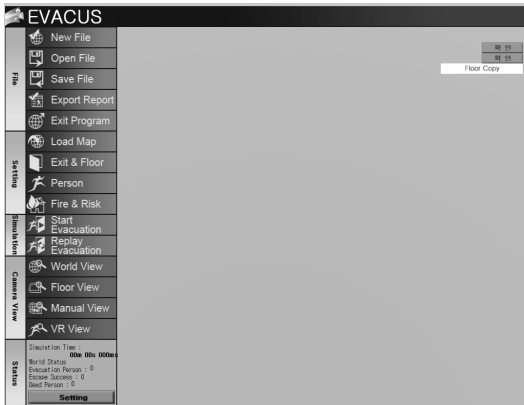


그림 5. 대피 및 인명피해(EVACUS) 프로그램

레이션을 수행하였으며 본고에서는 터널 및 지하 정거장에 적용한 사례에 대해서만 간략하게 소개하고자 한다.

4.1 하저도로터널

해석을 하고자 하는 터널은 실드 TBM 굴착방식에

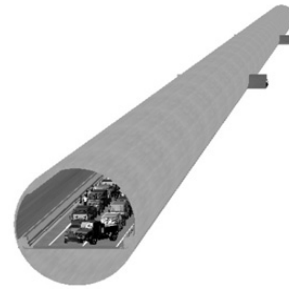


그림 6. 해석대상인 하저 실드터널

의한 Twin tube 형태의 하저터널로서 터널 중간부 약 750 m 구간에 대해 피난해석을 수행하였다(그림 6 및 7). 250 m 마다 터널과 터널 사이를 연결하는 폭 1.35 m, 높이 2 m인 대인용 대피통로가 있으며 특히, 750 m 간격으로는 차량용 대피통로가 위치하고 있는 것으로 하였다(그림 8). 화재는 대인용 대피통로 바로 앞에서 발생한 것으로 하였으며 화재가 발생하자마자 대피자 전원이 차량에서 탈출하여 화재 발생지점 후방 방향의 가



그림 7. 터널 내 차량 배치

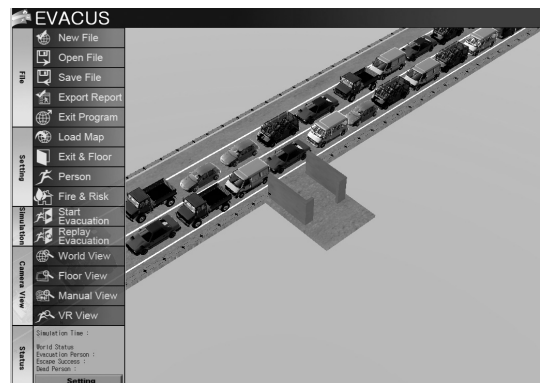
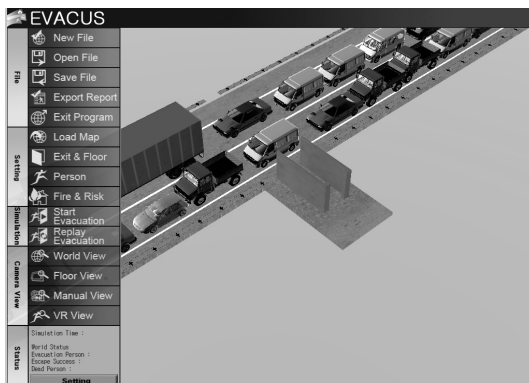


그림 8. 대인용 및 차량용 대피통로(화재발생지점 후방 250 m, 500 m 각각 위치)

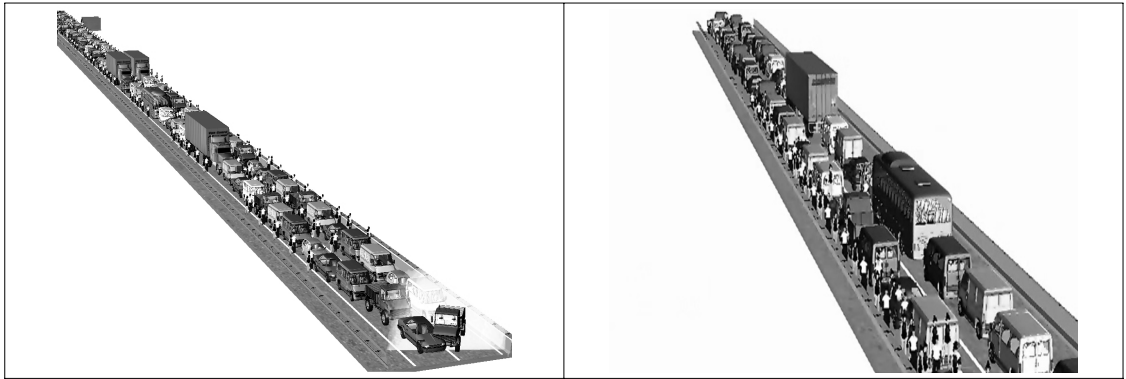


그림 9. 전방 화재에 따른 대피 시뮬레이션 결과

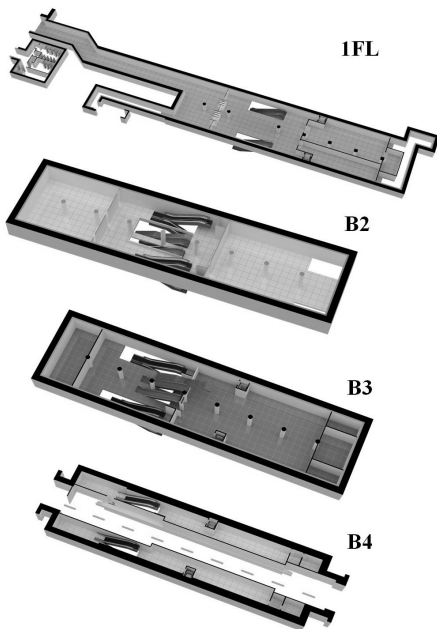


그림 10. 지하 정거장(총4층 규모)

장 가까운 피난통로 방향으로 대피하는 것으로 가정하였다. 이 때, 총 대피인원은 750 m의 해석구간 내에 들어갈 수 있는 차종별 최대 차량 수를 감안하여 결정하였는데, 이 때 운전자 및 탑승자를 포함하여 총 1260명이 대피하는 것으로 산정되었다.

그림 9는 시뮬레이션 수행 결과를 서로 반대되는 각도에서 보여주고 있는 그림이다. 대피자들은 먼저 차량과 차량사이를 지나 피난통로가 위치한 벽면 쪽으로 이동한 뒤 벽면을 따라 피난통로 방향으로 이동하는 현상이 관찰되었다. 총 대피인원이 대피하는데 걸린 시간은

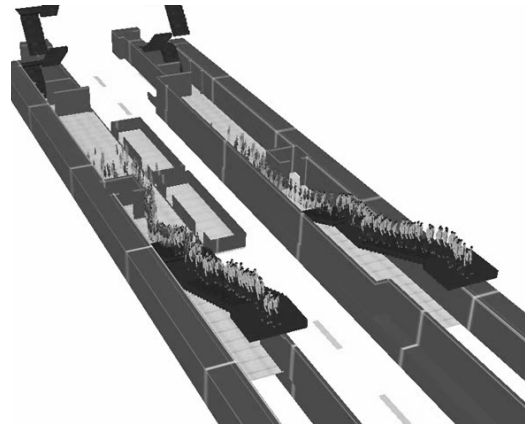


그림 11. 차량탈출 및 승강장에서의 대피모습

약 5분 31초로 계산되었으며 이 결과 값은 영국에서 개발되었으며 국내에서 가장 많은 유지를 확보한 Simulex를 이용하여 독립적으로 계산된 값과 약 5% 이내의 차이를 보였다. 이번에 개발된 프로그램에 적용된 대피 알고리즘과 Simulex에 적용된 알고리즘이 거의 유사한 점을 고려했을 때 개발된 프로그램의 결과가 유효함을 알 수 있다.

4.2 지하정거장

다음은 경전철 운영을 위한 지하정거장에서의 대피 시뮬레이션을 수행한 사례이다. 그림 10에 나타난 것과 같이 해석 대상이 된 지하정거장은 총 4층으로 구성되어 있으며 2개의 계단 및 2대의 에스컬레이터가 운영된다. 현재 지하정거장에서의 대피 계획 및 설계는 국토해양부 고시 제2010-715호 “도시철도 정거장 및 환승, 편의시설 보완 설계 지침⁴⁾”을 따르도록 되어 있는데 이

지침에서는 상행 또는 하행선에서 화재시 승강장으로 부터는 총 4분 이내, 승강장부터 외부까지는 총 6분 이내에 대피가 완료되도록 하고 있다. 상기 지침에 따라 상행 열차에서 화재가 발생했을 경우 대피인원을 산정해 본 결과 상행으로부터는 317명, 하행으로부터는 186명이 대피가 필요하여 총 481명이 대피해야 되는 것으로 계산되었다. 개발된 프로그램으로 대피 시뮬레이션을 수행했을 때의 대피장면은 그림 11에 나타내었다. 대피해석을 수행해 본 결과, 지하정거장에서 대피하는데 소요되는 시간은 전 대피인원이 승강장(지하 4층)을 탈출하는데 2분 40초, 지하역사 전체를 탈출하는 데에는 총 5분 10초가 소요되는 것으로 해석되어 본 정거장의 대피설계가 기준을 만족하는 것으로 판단되었다.

5. 결론

2년간의 산학연구를 통해 대공간에서의 대피 및 화재에 의한 인명피해 예측 프로그램을 개발하였다. 기존 유사 프로그램의 장단점을 분석하여 장점을 계승함과 동시에 화연에 의한 속도저하 알고리즘, 엘리베이터 대피 알고리즘, 진보된 인명피해 알고리즘, 강력한 3차원

visualization 등으로 차별화하였다. 초고층 복합건물, 지하 정거장, 지하 쇼핑몰과 같은 대규모 구조물 방재계획 및 설계를 위해 개발 프로그램 단독 적용이 가능하며 다양한 시나리오의 분석이 필요한 정량적 화재 위험도 평가(Quantitative Risk Analysis) 수행 시에도 상당히 활용도가 높을 것으로 판단된다. 이미 세계적 수준에 뒤지지 않는 것으로 판단되나 향후 지속적인 연구활동을 통해 동 분야 국내 기술 발전에 이바지 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Thompson, P.A. and Marchant, E.W. Testing and Application of the Computer Model 'Simulex', Fire Safety Journal 24, 1995, pp. 149-166.
2. National Fire Protection Engineers (NFPE), Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, 2008.
3. Klote, J.H. and Milke J.A. Principles of Smoke Management, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2002, pp. 36.
4. 국토해양부, “도시철도 정거장 및 환승, 편의시설 보완 설계 지침”, 국토해양부 고시 제2010-715호.



윤성욱

1993년 서울대학교 자원공학과 공학사
1997년 서울대학교 자원공학과 공학석사
2003년 영국 임페리얼 대학교 자원환경공학과 공학박사

Tel: 02-728-1305

E-mail: yoonsw@gsconst.co.kr
현재 GS건설 기술기획팀 차장



이동호

1982년 인하대학교 기계공학과 공학사
1985년 인하대학교 기계공학과 공학석사
1991년 동경농공대학교 기계시스템공학과 공학박사

Tel: 031-903-5326

E-mail: riedh@incheon.ac.kr
현재 인천대학교 안전공학과 정교수