

지하공간시설에서의 피난안전대책을 위한 시뮬레이션 해석

김봉찬 · 김세종 · 김경구* · 이주희** · 권영진

호서대학교 소방방재학과 · 인천남부소방서*

호서대학교 혁신기술·경영융합대학원 메카트로닉스공학과 교수**

Simulation analysis for evacuation safety countermeasure in underground facilities.

Kim,BongChan · Kim,SeJong · KimGyeongGu · Lee,JuHee · Kwon,YoungJin

Hoseo University Fire and Disaster Protection Engineering

Incheon Fire Station *

Hoseo University Mechatronic Engineering**

요 약

본 연구에서는 재실자의 밀도가 높은 지하상가는 공간의 특성상 화재가 발생할 경우 다량의 유독가스의 발생 및 연기의 이동경로와 인간의 피난경로 일치로 인하여 피난안전에 큰 위험성이 있다고 사료된다. 이에 지하철 역사와 연결되어 있는 지하상가를 선정 후, 일본 피난안전성평가수법과 FDS(Fire Dynamic Simulator) 및 SIMULEX를 이용하여 비교·분석을 하였으며, 그 결과, 화재발생 후 6분이 경과 시 위험한 것으로 판단되었다. 그에 대한 대책으로 자연 배연구를 설치하여 시뮬레이션 수행을 한 결과 가시도확보 및 각 출구에서의 온도가 하강하는 것을 확인할 수 있었다.

1. 연구 배경 및 목적

최근 경제성장과 더불어 건축물은 생활의 편리성 및 공간의 효율성을 중심으로 발전하여 지하공간은 심층화·대형화되고 있다. 이에 초고층·지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법이 제정되었으며 2012년부터는 시행을 앞두고 있다. 앞으로 지하공간의 활용은 더욱 증가할 것으로 전망되며, 지하공간을 활용한 지하상가는 1967년 서울시를 시작으로 전국 약 80여 개소의 지하상가가 준공되었다. 현재도 지하심층화 된 공간을 이용하여 개발이 지속적으로 진행되어 확장 및 연장공사를 하는 사례가 증가하고 있다.

특히, 하루 평균 승·하차 인원이 3만여 명에 달하는 서울·수도권의 지하철역사와 연결되어 있는 지하상가의 경우는 이에 따른 유동인구를 확보하고 있으며, 최근에는 중대형 쇼핑몰 못지않은 쇼펍타운으로 거듭나고 있다.

그러나 1991년 10월에 준공된 광주시 소재의 지하상가가 2010년 5월 일부 붕괴하는 사

건이 발생하여 유지관리 및 안전관리에 대한 문제점이 노출되었다. 실제로 재실자의 밀도와 적재가연물의 밀도가 높은 지하상가는 공간의 특성상 화재가 발생할 경우, 다량의 유독가스를 발생시키며, 연기의 이동경로와 인간의 피난경로의 일치로 인하여 피난안전에 큰 위험성이 있다고 사료된다.

이에 본 연구에서는 지하철 역사와 연결되어 있는 지하상가를 선정 후, 일본의 피난안전성평가수법을 이용하여 피난완료시간을 산정된 결과 값과 FDS(Fire Dynamic Simulator) 및 SIMULEX를 이용하여 시뮬레이션한 결과의 비교·분석을 통하여 피난안전대책을 위한 피난안전성 검증을 수행하고자 한다.

2. 지하상가의 개요

대상은 인천소재의 한 지하상가의 B구역으로 선정하였다. 선정된 지하상가는 1978년을 시작으로 2000년까지 서로 다른 회사에 의하여 건설이 진행되었으며 전 구역의 통로가 연결되어 있는 상태이다. 또한 지하철 역사와 연결되어 있어 1일당 25만 이상의 유동인구를 확보하고 있다. 현재 4개의 회사에 의하여 관리되고 있으며 그에 따라 각 지하상가의 명칭 또한 서로 별개의 이름을 가지고 있다. 각 지하상가의 개요는 다음 표 1과 같으며, 지하상가의 개별 구분은 그림 1과 같다.

표 1. 지하상가의 개요

구분	준공 (년 월)	면적 (m ²)	길이 (m)	점포수 (개)	천정높이 (m)	통로폭 (m)	1일당 유동인구
A	1978년8월	3,409	124	186	2.7	5	25만 명
B	1986년9월	9,374	352	421	2.7	5	
C	1989년6월	6,164	224	247	2.7	5	
D	2000년4월	7,822	124	209	2.7	5	

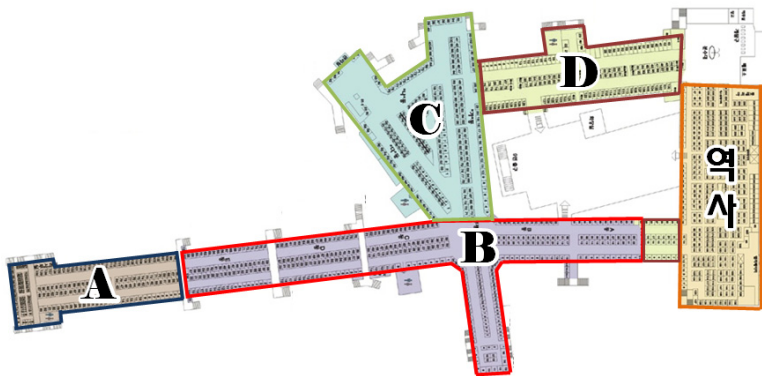


그림 1. 지하상가의 개별구분

3. 피난시간산정 방법 및 시뮬레이션 개요

3.1 피난시간의 산정

피난시간의 산정방법은 표2와 같이 일본 피난안전성평가수법을 이용하였다. 피난시간의 산정을 위하여 지하상가를 하나의 큰 거실피난으로 가정하였으며, 화원에서 가장 가까운 사람의 피난으로 가정하였다. 재실자 밀도와 보행속도는 제시되어있는 값으로 하였으며, 각 수계산 과정에 적용되는 수치는 표 3과 같다. 또한 출구가 10개인 경우와 9개인 경우를 계산하였다.

표 2. 피난안전성평가수법

<p>STEP 1. 피난개시시간의 산정</p> $T_{start} = \sqrt{\Sigma A_{area}} / 30$ <p>㉠ T_{start} : 피난개시시간 (분)</p> <p>㉡ A_{area} : 해당실의 바닥면적 (m^2)</p> <p>STEP 2. 보행시간 산정</p> $T_{travel} = \max(\Sigma \ell e/v)$ <p>㉠ T_{travel} : 재실자가 각 부분으로부터 출구 중 하나에 도달하는데 걸리는 시간 (분)</p> <p>㉡ ℓe : 출구까지의 보행거리 (m)</p> <p>㉢ v : 보행속도 (m/분)</p> <p>STEP 3. 출구 통과시간</p> $T_{queue} = \Sigma P * A_{area} / \Sigma N_{eff} * B_{eff}$ <p>㉠ T_{queue} : 재실자가 해당거실 등의 출구를 통과하는데 필요한 시간 (분)</p> <p>㉡ P : 재실자 밀도 (인/m^2)</p> <p>㉢ A_{area} : 해당실의 바닥면적 (m^2)</p> <p>㉣ N_{eff} : 유효유동계수 (인/분*m)</p> <p>㉤ B_{eff} : 유효출구폭 (m)</p>	<p>STEP 4. 피난시간 산정</p> $T_{escape} = T_{start} + T_{travel} + T_{queue}$ <p>T_{escape} : 해당거실의 행동피난 시간 (분)</p> <p>STEP 5. 연기하강시간의 산정</p> $T_{smog} = A_{room} * (H_{room} - 1.8) / \max(V_s - V_e, 0.01)$ <p>㉠ T_{smog} : 연기하강시간(분),</p> <p>㉡ A_{room} : 해당거실의 면적 (m^2)</p> <p>㉢ H_{room} : 해당거실의 기준점으로부터 평균천정높이 (m)</p> <p>㉣ V_s : 연기발생량 ($m^3/분$)</p> $V_s = 9 * (\delta_r + \delta_m * A_{room})^{1/4} * (H_{low}^{5/3} + (H_{low} - H_{room} + 1.8)^{5/3})$ <p>H_{low} : 해당거실의 가장 낮은 위치로부터 평균천정높이 (m)</p> <p>㉤ V_e : 유효 배연량 ($m^3/분$)</p> <p>STEP 6. 피난안전성 평가</p> <p>㉠ $T_{escape} \leq T_{smog}$ 일 때 : 거실 피난 안전</p> <p>㉡ $T_{escape} > T_{smog}$ 일 때 : 거실 피난 불안전</p>
--	---

표 3. 수계산 적용 수치

구분	수치	구분	수치
해당실의 바닥면적 (m^2)	9,374	유효 출구폭 (m)	21, 19
출구까지의 보행거리 (m)	145	평균천정높이 (m)	2.7
재실자 밀도 (인/ m^2)	0.5	연기발생량 ($m^3/분$)	1127.84
유효 유동계수 (인/분*m)	90	유효배연량 ($m^3/분$)	0

3.2 FDS를 이용한 가시도 및 각 출구 온도 측정

FDS해석을 위하여 선정된 B구역의 정보와 자료를 바탕으로 모델링 하였다. 격자의 크기는 가로·세로·높이 각 50cm, 50cm, 30cm로 설정하였으며, 화원의 설정은 표 4에 따라 임의의 위치에 25MW로 설정하였다. 또한 각 통로의 중앙에 20m의 간격을 두고 38곳의 가시도의 측정을 하였고, 각 출구에 온도측정을 하여 960초 구동하였다. 구역에 대한 개요는 그림 2와 같다.

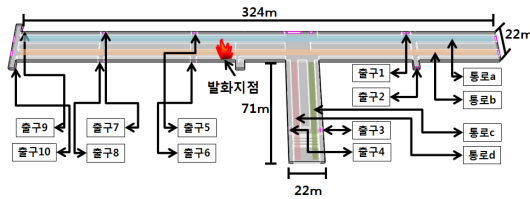


그림 2. B구역의 개요

표 4. 화원조건의 설정

공간용도	발열량	도달시간
일반 사무실	0.3 MW	0~120
	3 MW	120~240
백화점 및 물판점	0.75 MW	0~120
	25 MW	120~320

3.3 SIMULEX를 이용한 피난 해석

FDS의 모델링 조건과 동일하도록 전체적 T형상으로 구성하였으며, 동일한 복도 폭으로 설정하였다. 또한 재실자 밀도는 $2m^2/人$ 으로 한 피난으로 표 5와 같이 설정하고 그림 3과 같이 시뮬레이션을 행하였다. 총 10개의 출구를 이용한 시뮬레이션과 화원과 가까운 6번 출구를 제외한 9개의 출구를 이용하는 시뮬레이션으로 총 2가지 변수로 시뮬레이션을 행하였다.

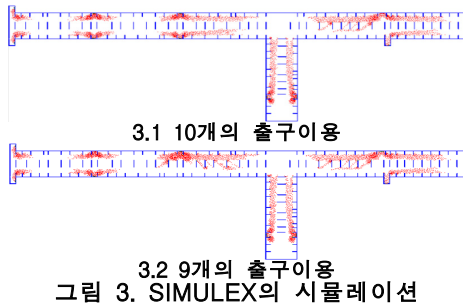


표 5. 시뮬레이션 설정

구분	설정
피난자 수	4687 명
피난자 특성	Commuters
남, 여, 아이 비율	25:65:10
남, 여, 아이 속도	1, 1, 0.6 (m/s)
출구 수	9~10 개

4. 피난시간 산정결과 및 시뮬레이션 비교·분석

4.1 피난시간의 산정결과 및 SIMULEX 결과 비교

위의 3.1에서 제시한 피난시간 산정의 결과와 SIMULEX의 결과는 다음 표 6, 7과 같다. 일본 건축기준법의 피난안전검증법을 이용하여 계산한 결과 출구가 10개인 경우, 피난개시시간은 3.22분, 보행시간 2.42분, 출구통과시간 2.48분, 총 피난시간 8.12분으로 산정되었으며, 출구가 9개인 경우 출구통과시간이 2.74분으로 총 피난시간은 8.38분이 산정되었다. 또한 연기하강시간은 7.48분으로 계산되어 피난안전성평가에 적합하지 않다는 결과가 도출되었다.

SIMULEX의 해석결과는 그림 4와 같으며, 출구가 10개인 경우 4분 18초, 9개인 경우 7분 37초의 결과를 보였다. 피난안전검증법에서 산정된 피난개시시간 3분 12초를 SIMULEX의 결과와 합산을 할 경우 출구가 10개인 경우는 총 7분 30초, 출구가 9개인 경우 10분 49초의 결과값을 나타냈으며, 그림 4를 통하여 각 출구에서의 피난자 수를 피난 개시시간을 포함하여 나타냈다.

표 6. 피난안전성 결과

구분	피난개시시간	보행시간	출구통과시간	총 피난시간	연기하강시간	평가
출구 10개	3.22 분	2.42 분	2.48 분	8.12 분	7.48 분	×
출구 9개	3.22 분	2.42 분	2.74 분	8.38 분	7.48 분	×

표 7. SIMULEX 결과

구분	피난시간 (개시시간포함)
출구 10개	4분 18초 (7분 30초)
출구 9개	7분 37초 (10분 49초)

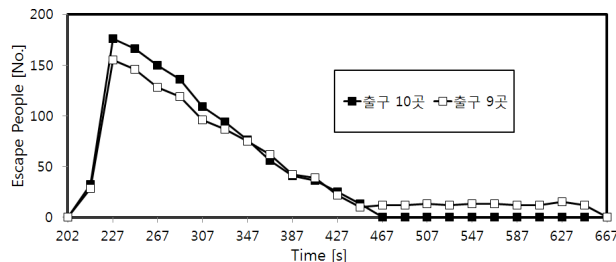
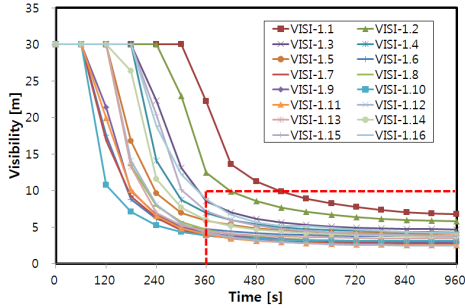


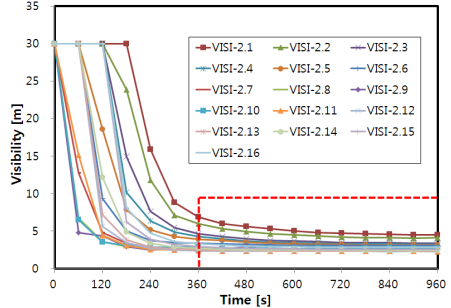
그림 4. SIMULEX 결과

4.2 FDS 해석 결과

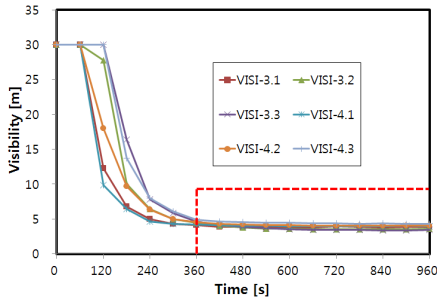
FDS 해석으로 나타난 각 통로별 가시도와 각 출구에서의 온도는 그림 5와 같다.



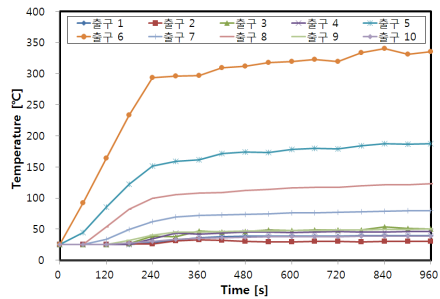
5.1 통로 A 구역



5.2 통로 B 구역



5.3 통로 C 구역



5.4 각 출구별 온도

그림 5. 각 통로별 가시도 및 각 출구별 온도

4.3 해석결과 및 고찰

일본 피난안전성평가수법을 이용한 피난완료시간의 산정 결과 출구가 10개인 경우 약 8분 5초로 나타났으며, SIMULEX를 이용한 피난완료시간과 계산된 피난개시시간의 합은 7분 30초로 나타나 35초의 차이가 발생하였다. 그러나 이에 비하여 출구가 9개인 경우, 피난안전성평가수법을 이용한 피난완료시간은 약 8.24초로 나타났으나 SIMULEX를 이용한 피난완료시간과 계산된 피난개시시간의 합은 10분 49초로 나타나 2분 25초의 시간차이가 발생하는 것으로 나타났다. SIMULEX에서 출구가 9개인 경우, 병목현상이 발생하여 출구가 10개인 조건에 비하여 더욱 많은 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

FDS의 시뮬레이션 결과, 4분이상이 경과하였을 경우 5·6·8번의 출구에서는 약 100°C 이상의 온도가 측정되어 피난경로로서의 역할이 어려울 것으로 판단된다. 또한 가시거리 5m의 경우 건물 내부에 익숙한 사람이 피난할 때 장애를 느끼는 농도²⁾이나, 불특정 다수의 사람들이 모여드는 지하상가의 경우는 가시거리가 10m이하로 나오는 상황에서 피난상이 위험성이 있을 것으로 판단되어, 약 6분 후에는 위험성이 있다고 판단된다. SIMULEX의 결과와 비교하였을 경우 출구가 10개인 경우는 684명, 9개인 경우 1170명이 피난에 위험성이 있다고 판단된다. 이에 대한 대책마련으로 천정에 크기가 가로5m, 세로2m, 높이8m의 자연배연구를 총 6곳에 설치하여 그림 6과 같이 시뮬레이션 하였으며, 가시도 및 온도는 그림 7과 같다.

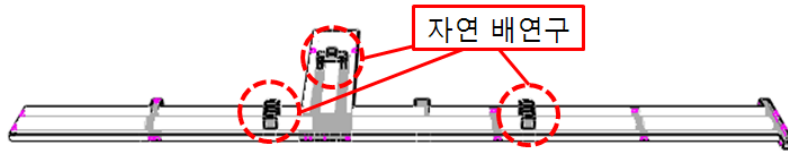
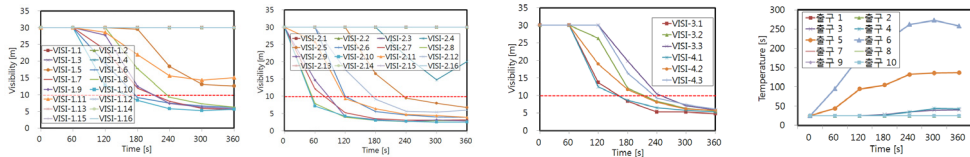


그림 6. 자연배연구를 고려한 시뮬레이션



7.1 통로 A 구역

7.2 통로 B 구역

7.3 통로 C 구역

7.4 각 출구별 온도

그림 7. 각 통로별 가시도 및 각 출구별 온도

자연배연구를 설치한 결과, 자연배연구를 기점으로 화원과 반대되는 부분의 가시도가 확보되는 것을 확인할 수 있으며, 5, 6번 출구를 제외한 나머지 출구로의 피난이 가능할 것으로 사료 된다.

5. 결 론

지하철 역사와 연결되어 있는 지하상가를 선정 후, 일본 건축기준법의 피난안전성평가수법을 이용하여 피난완료시간을 산정하고, FDS(Fire Dynamic Simulator) 및 SIMULEX를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 산정된 시간에 대한 비교·분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 선정된 지하도 상가에 화재의 발생과 동시에 배연 및 방화셔터의 미작동이 발생하는 경우, 연기의 하강속도가 피난완료의 시간보다 각각 38.4초, 52초 빠르게 나타났고 그에 따른 가시도확보가 어려운 것으로 나타나 피난안전에 큰 위험성을 보여 개별의 피난안전구획의 확보가 필요하다고 판단된다.
- 2) 자연 배연구를 설치한 경우, 배연구를 기점으로 가시도 확보 및 각 출구의 온도하강을 확인할 수 있었다. 지하도 상가의 경우 기계적 배연방법과 함께 자연배기의 방법도 고려해야 한다고 판단된다.
- 3) 향후, 국내 실정에 맞는 가연물, 재실자밀도, 피난행동특성, 건축물 용도에 따른 DB의 확보를 통하여 정량화된 피난안전성평가 방법론의 구축이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년 한국 중소기업청 “건축 구조물의 가연물 및 개구부 조건에 의한 화재 성상 예측 시뮬레이션 개발”에 의한 것으로 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 金 京九(2010). “火災科學と都市防災-韓國地下施設の火災危險性” 早稻田大學大學院 修士論文.
2. 황준호 외 2(2008). “3차원 화재시뮬레이션 해설” 동화기술