

## 지하공간의 피난안전성평가시스템 개발에 관한 연구

# A Study on the Development of Evacuation Safety Assessment System on Underground Space

김진수 · 박종근\*† · 노삼규\*\*

Jin-Su Kim · Jong-Keun Park\*† · Sam-Kew Roh\*\*

하나ENL, \*벽성대학 건설안전과 교수, \*\*광운대학교 건축공학과 교수  
(2003. 8. 5. 접수/2003. 11. 11. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 지하가의 피난 안전성 평가 모델의 기반을 제시하고 그에 따른 프로그램을 개발하였다. 또한, 피난 안전성 평가에 필수적인 각종 자료들을 통합형 데이터베이스 기반으로 구축하여 적은 시간과 인력으로 효율적인 피난 안전성 평가를 수행할 수 있는 모델 제시 및 시스템을 구축하였고, 국내 지하가의 사례연구를 토대로 피난안전성평가시스템의 현장 적용성 및 신뢰성을 검증하였다.

### ABSTRACT

In this study, the evaluation system models for evacuation safety assessment of underground malls were presented and related software program was developed. In addition, database was built integrating various data which were essential to evacuation safety assessment and enabling effective safety assessment with low cost and time. As a results of case study in local underground malls, the evacuation safety assessment system has examined in terms of field applicability and reliability.

**Keywords :** Underground Space, Evacuation, Risk Assessment, System, Fire

## 1. 서 론

최근 도시의 구조는 산업의 발전과 경제 성장에 따라서 새로운 기능과 활동에 적합한 공간과 시설을 필요로 하게 되었다. 도로, 주차장, 상업·업무 시설, 문화·여가 시설 등 도시기반 시설을 포함한 공공시설 확충에 대한 수요가 늘어나면서, 이러한 도시 문제를 해결하고자 도시공간의 고도화, 입체화를 추구하여 왔다. 그러나 도시의 과밀화, 지가의 상승, 평면적 토지공간이 부족하게 됨에 따라 도시기능의 일부를 지하공간으로 흡수하고자 하는 노력이 발생하게 되었고, 이에 대한 사회의 관심이 높아지고 있다. 국내에서도 급속한 도시화에 따라 도시공간의 효율적인 이용이 요구되면서 지하공간의 활용이 증가되는 추세이다. 그러나, 불특정 다수인이 많이 이용하는 폐쇄적 공간이라는 특

성 때문에 화재·폭발 등이 발생할 경우 지상에서와 같이 순간적으로 현재의 위치나 비상구를 찾는 방향 감각을 갖기가 어려워 사고 발생시 대형 재해의 위험이 대두되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 지하가에 적용되고 있는 방화대책의 실태 조사를 통하여 지하가의 잠재적인 화재 확대 위험성을 확률론적인 입장에서 평가하는 것을 전제로 피난 가능 인구 비율 예측치를 지표로 산출하고, 각 대책의 효과를 상대적으로 비교 평가할 수 있는 비상대응정보시스템을 개발하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 피난 안전성 평가 요소 도출

지상건축물에서도 대형재해의 위험을 안고 있는 화재가 지하공간 건축물에서 발생했다고 할 때 위험성은 본질적으로 차이가 있다. 화재 초기의 연소는 지상의

† E-mail: jkpark@mail.byuksung.ac.kr

성상과 같은 양상을 나타내나 시간의 경과에 따라서 여러 특성에 의해 문제점이 발생한다. 그 특성의 주된 항목은 연소 특성, 피난 및 소방활동상의 곤란성 등이다.

지하공간의 피난안전성 평가 요소는 과거의 화재사례로부터 화재확산의 진전에 큰 영향을 미치는 요소를 도출하였다. 지하공간의 화재 확산으로 인하여 피난안전성에 영향을 미치는 평가요소는 환경적 요소, 공간적 요소, 설비적 요소, 인적요소로서 다음과 같이 설정하였다.

- ① 환경적 요소 : 내장재, 화재하중 및 화재성상 변수, 출화면적
- ② 공간적 요소 : 구획의 내화 특성, 방화문 폐쇄 상황
- ③ 설비적 요소 : 소방용설비 등의 설치 상황, 유지관리 상황, 건축설비
- ④ 인적요소 : 방재 의식, 초기대응행동실시 상황, 초기대응자수, 초기 대응 능력

2.2 피난안전성 평가기법

화재 확산은 구획되어 있는 공간을 단위로 하여 단계적으로 확대하는 것을 기초로 하고, 연기도 화재의 확대와 같이 구획되어 있는 공간을 단위로 설정하여 단계적으로 전파하는 것으로 가정하였다. 본 논문에서는 연기확산을 모델화 하기 위하여 연기확산 상태를 정의하였다. 연기 확산의 진행 모델은 총 I~V 단계로 분류하였다.

2.2.1 연기 확산 I

연기확산 I은 출화에서 소화기에 의한 초기소화가 불가능한 단계로 정의하였고, 연기확산 I의 진행 조건은 Fig. 1과 같다. 또한, 소화기의 사용 한계는 화원 모델의 발열 속도가 950 kw가 되는 시간, 연기층이 출화실의 가운데 초기 소화 활동 종사자의 머리의 앞(1.6+0.1×(천정높이))까지 강하하는 시점을 한계 시간으로 고려하였다.

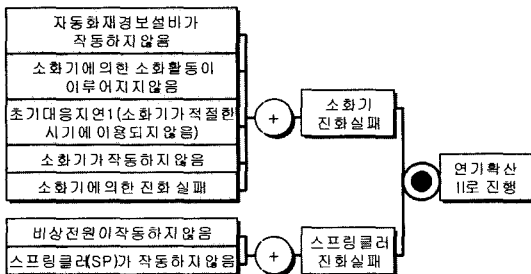


Fig. 1. Process concept of smoke dispersion I.

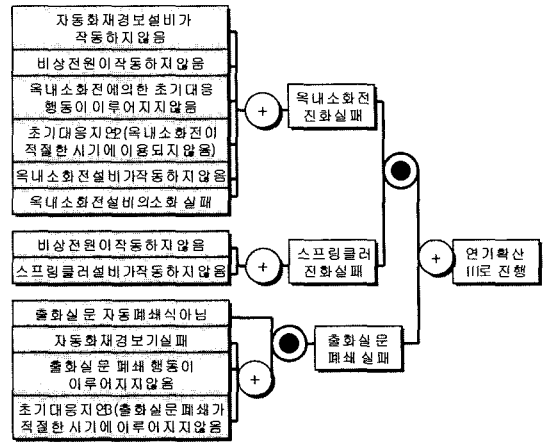


Fig. 2. Process concept of smoke dispersion II.

$$T_{sph1} = \min(t_{950}, t_{R\_height}, t_{R\_185}) \tag{1}$$

단  $t_{950} = \sqrt{\frac{950}{\alpha}} + t_{fa}$      $S_1 = 1.6 + 0.1H_{room}$

$$t_{R\_height} = \left[ \frac{5 \rho_s A_{room}}{2 k \alpha^{1/3}} \left( \frac{1}{S_1^{2/3}} - \frac{1}{H_{room}^{2/3}} \right) \right]^{3/5} + t_{fa}$$

$$t_{R\_185} = \left[ \frac{(185 - T_{\alpha}) H_{room} \cdot A_{room}^{3/4}}{1.25\alpha} \right]^{2/5} + t_{fa}$$

2.2.2 연기 확산 II

연기확산 II는 연기층의 강하에 의해 출화실에서 초기대응행동이 불가능한 단계로 정의 하였고, 연기확산 II의 진행 조건은 Fig. 2와 같다. 또한, 연기확산 II은 소화기의 사용 한계에서 출화실의 피난 한계까지이고, 한계 시간은 다음 식에 의해 구한다.

$$T_{sph2} = \min(t_{R\_height}, t_{R\_185}) \tag{2}$$

연기확산 II에 있어서는 배연설비 기동에 의한 연기층 강하의 억제를 고려하고, 연기층 높이가 1.6 + 0.1 H<sub>room</sub>에 도달했던 시점에 배연설비가 기동되었던 경우와 기동되지 않은 경우로 구분하고, t<sub>R<sub>height</sub></sub>을 산출하는 것으로 한다.

2.2.3 연기 확산 III

연기확산 III는 출화실의 연기로 인해, 제1차 안전구획(복도)이 피난한계가 되는 단계로 정의 하였고, 연기확산 II의 진행 조건은 Fig. 3과 같다. 또한, 연기확산 III는 출화실의 피난 한계에서 연기가 복도에 전파하고 복도가 피난한계가 될 때까지로 하고, 한계 시간

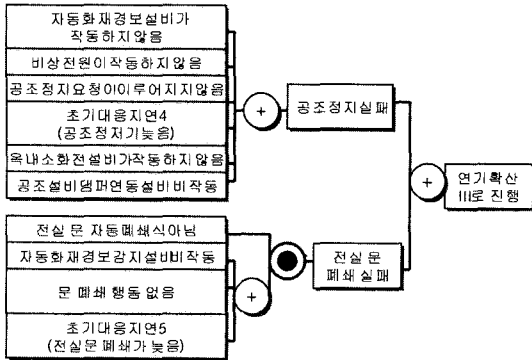


Fig. 3. Process concept of smoke dispersion III.

은 출화실의 인접공간에 연기 유출 있는 경우의 연기 층 강하 예측식이다.

$$T_{sph3} = t_{c\_height} \quad (3)$$

$$\text{단 } t_{c\_height} = \left[ \frac{5\rho_s A_{corridor}}{2k (r_1 \cdot \alpha)^{1/3}} \left( \frac{1}{S_2^{2/3}} - \frac{1}{H_{corridor}^{2/3}} \right) \right]^{3/5} + t_{fa} + t_{D1}$$

$$t_{D1} = \left[ \frac{5\rho_s A_{room}}{2k \alpha^{1/3}} \left( \frac{1}{H_{D1}^{2/3}} - \frac{1}{H_{room}^{2/3}} \right) \right]^{3/5}$$

$$r_1 = 3.3 \cdot A_{room}^{1/3} \left[ \frac{H_{room}}{H_{D1}} \right]^{-1/4}$$

$$S_2 = 1.6 + 0.1H_{corridor}$$

연기확산 II와 같이 연기확산 III에 있어서도, 배연설비 기동에 의한 연기층 강하의 억제를 고려하고, 연기층 높이가  $1.6 + 0.1H_{corridor}$ 에 도달했던 시점에 배연설비가 기동되었던 경우와 기동되지 않았던 경우로 구분하고,  $t_{c\_height}$ 을 산출하는 것으로 한다.

또한, 배연설비는 연기층 온도가  $280^{\circ}\text{C}$ 로 되었던 시점에 정지하는 것으로 하고, 연기층 온도의 산출은

$$\left\{ t_{R-185} = \left[ \frac{(185 - T_{\alpha}) H_{room} \cdot A_{room}^{3/4}}{1.25\alpha} \right]^{2/5} + t_{fa} \right\} \text{에 의해}$$

산출된다.

### 2.2.4 연기 확산 IV

연기확산 IV는 제2차 안전구획(전실)이 피난한계가 되는 단계로 정의 하였고, 연기확산 IV의 진행조건은 Fig. 4와 같다.

연기확산IV은 복도의 피난 한계에서 연기가 전실에 전파하여 전실이 피난한계가 될 때까지로 하고, 한계 시간 산출식은 다음과 같다.

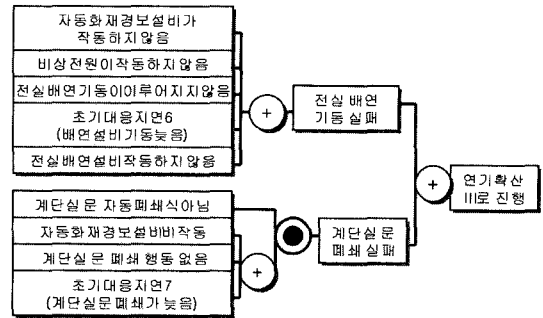


Fig. 4. Process concept of smoke dispersion IV.

$$T_{sph4} = t_{L\_height} \quad (4)$$

$$\text{단 } t_{L\_height} = \left[ \frac{5\rho_s A_{lobby}}{2k (r_1 \cdot r_2 \cdot \alpha)^{1/3}} \left( \frac{1}{S_3^{2/3}} - \frac{1}{H_{lobby}^{2/3}} \right) \right]^{3/5} + t_{fa} + t_{D1} + t_{D2}$$

$$t_{D2} = \left[ \frac{5\rho_s A_{corridor}}{2k (r_1 \cdot \alpha)^{1/3}} \left( \frac{1}{H_{D2}^{2/3}} - \frac{1}{H_{corridor}^{2/3}} \right) \right]^{3/5}$$

$$r_2 = 3.3 \cdot A_{corridor}^{-1/3} \left[ \frac{H_{corridor}}{H_{D2}} \right]^{-1/4}$$

$$S_3 = 1.6 + 0.1H_{lobby}$$

### 2.2.5 연기 확산 V

연기확산 V는 전실에서 계단실에 연기가 유입하는 단계로 정의하였고, 연기 확산 V는 연기확산 I~IV의 연기확산 방지대책이 실패한 경우로 계단실에 연기가 유입하는 것으로 해석하고, 연기 확산 I~IV까지 사상이외의 나머지 사상과 위치, 한계 상황으로서의 한계는 설정하지 않기로 하였다. 본 논문에서는 연기확산 IV와 연기확산 V의 적합성을 도식하기 위해서 연기확산 IV의 한계시간을 이용하여 연기확산 V로 진행한다 고 가정하였다.

## 3. 지하공간의 위험관리정보시스템

지하공간의 화재 위험 요인은 지상과 차이가 없다고 생각되나 지하공간의 특성에서 알 수 있듯이 밀폐공간에서의 화재확산으로 인한 열과 연기의 독성에 의한 질식, 피난, 소방대응/복구에 있어서 위험성이 크기 때문에 이중안전(fail-safe)적인 예방측면뿐만 아니라 종합적인 피난 대책을 수립할 수 있는 지하공간의 피난안전성평가시스템을 구축하고자 한다. Fig. 5는 지하공간의 피난안전성평가시스템의 레이아웃(layout)을 묘사한

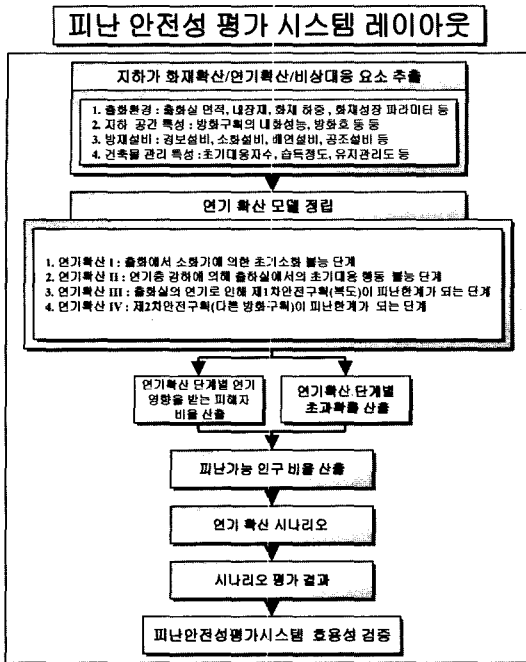


Fig. 5. Layout of evacuation safety assessment system.

그림이다.

본 논문에서는 피난안전성평가시스템을 이용해서 본 평가시스템이 갖는 특징을 명확하게 함과 동시에 본 평가방법에 설정되어있는 데이터의 특성을 파악하는 것을 목적으로 국내 A 지하가를 선정하여 사례연구를 수행하였고, 연구 과정은 현장을 탐방 조사하여 얻은 결과를 토대로 수행하였다.

3.1 사례연구 대상 지하가

A 지하가는 서울 중심에 위치해 있고 상점의 점포

Table 1. Fact of A underground shopping mall

분류		A 지하가
일반 사항	점포수	244
	점포종류	8(옷가게, 잡화점, 약세서리, 가방가게, 화장품, 이동통신대리점, 주방용품, 완구점)
	점포 구획	불연칸막이벽
소방 설비	SP설비	유
	소화기	유(84)
	옥내소화전	유(8)
	배연설비	기계배연
	방재센터요원	2명(현장, 센터)

수와 유동인구(1일 50만명 추정)가 상당히 높고, 점포의 대부분이 의류를 판매하고 있기 때문에 가연밀도가 높아 본 연구의 사례연구지역으로 선정하였다. A 지하가의 배치도와 현황은 Fig. 6 및 Table 1과 같다.

3.2 A 지하가 피난안전성 평가

본 연구에서 구축한 위험관리정보시스템의 서브시스템인 피난안전성평가시스템을 이용하여, A 지하가에서 화재 발생시 연기확산 I~IV의 한계시간 및 초과확률을 산출할 수 있다.

3.2.1 연기확산 I 평가

연기확산 I의 한계시간은 화원의 발열속도와 연기층 하강시간과 연기층 온도가 185°C가 되는 시간 중에서 최소값을 연기확산 I의 한계 시간으로 정의하였으며, Fig. 7과 같이 연기확산 I의 한계시간은 120초로 평가되었다. 즉, 120 초 이내에 초기소화활동에 실패할 경우에는 연기확산 II로 진행할 것이다. 또한, 연기확산 II로 진행할 초과확률은 0.03으로 산출되었다.

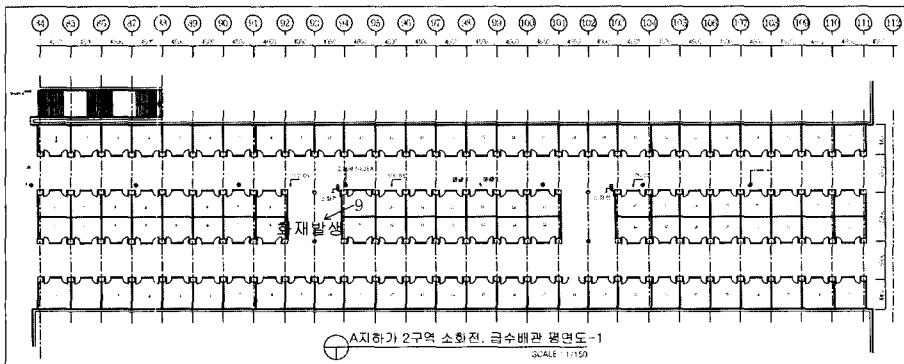


Fig. 6. Arrangement of A underground shopping mall.

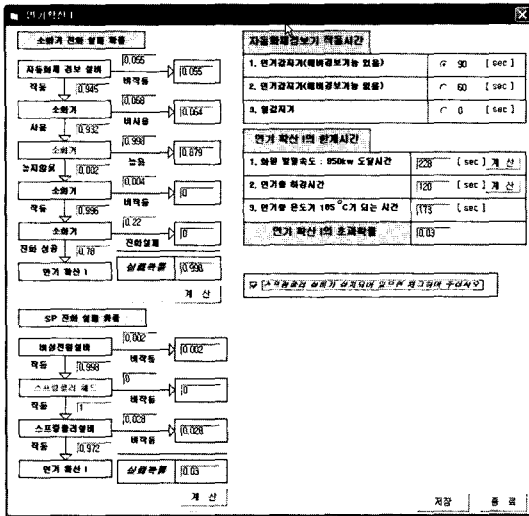


Fig. 7. Smoke dispersion I assessment.

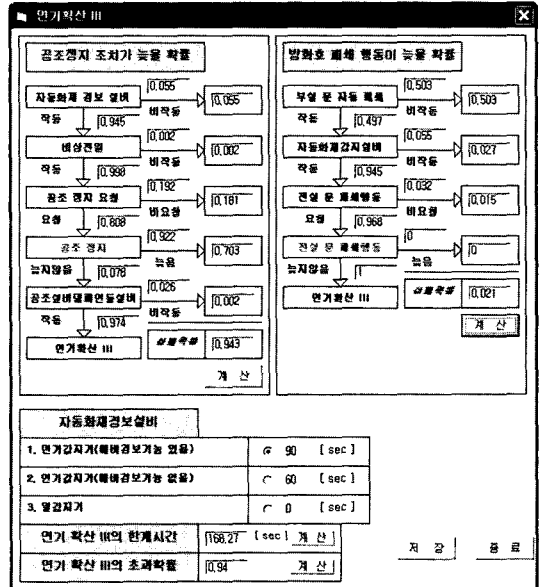


Fig. 9. Smoke dispersion III assessment.

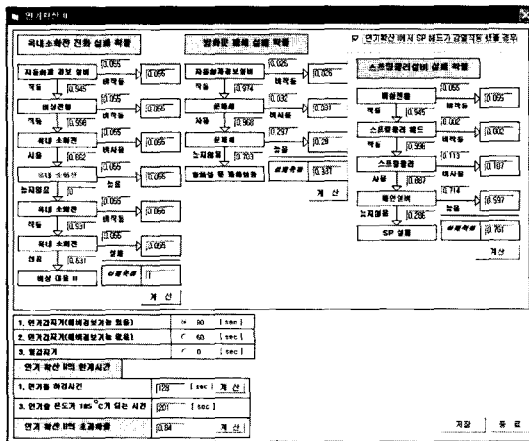


Fig. 8. Smoke dispersion II assessment.

3.2.2 연기확산 II 평가

연기확산 II의 한계시간은 연기층 하강시간과 연기층 온도가 185°C가 되는 시간 중에서 최소값을 연기확산 II의 한계시간으로 정의하였으며, Fig. 8과 같이 연기확산 II의 한계시간은 128초로 평가되었다. 즉, 128초 이내에 초기소화활동(옥내소화전 소화, 방화문 폐쇄)에 실패할 경우에는 연기확산 III로 진행할 것이다. 또한, 연기확산 III로 진행할 초과확률은 0.84로 산출되었다.

3.2.3 연기확산 III 평가

연기확산 III의 한계시간은 출화실의 연기로 인해 제1차 안전구획이 피난한계가 되는 시간을 연기확산 III의 한계시간으로 정의하였으며, Fig. 9와 같이 연기확

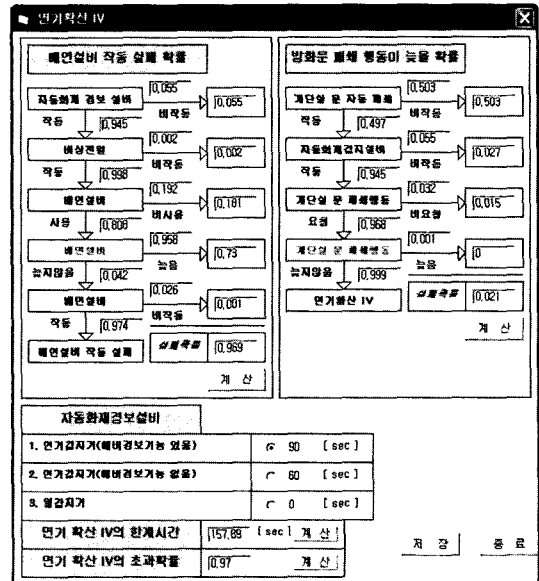


Fig. 10. Smoke dispersion IV assessment.

산 III의 한계시간은 168.27초로 평가되었다. 즉, 168초 이내에 초기소화활동(공조정지, 방화문 폐쇄)에 실패할 경우에는 연기확산 IV로 진행할 것이다. 또한, 연기확산 IV로 진행할 초과확률은 0.94로 산출되었다.

3.2.4 연기확산 IV 평가

연기확산 IV의 한계시간은 제2차 안전구획이 피난한계가 되는 시간을 연기확산 IV의 한계시간으로 정의하

였으며, Fig. 10과 같이 연기확산 II의 한계시간은 157.89초로 평가되었다. 즉, 157.89초 이내에 초기 소화활동에 실패할 경우에는 2차 안전구획으로 진행 할 것이다. 또한, 2차 안전 구획으로 진행할 초과확률은 0.97로 산출되었다.

3.2.5 출화 점포 피난가능자 산출

출화 점포 피난가능자 산출은 출화 점포 피난에 영향을 미치는 연기확산 III의 결과를 이용하여 피난가능자를 산출한다. 출화 점포의 피난자수를 알고있을 경우에는 “출화실 피난자수” 항목에 피난자수를 입력하고, 확실하지 않을 경우에는 인구밀도를 선택한 후 출화실 면적을 입력하면 출화실 피난자수가 입력된다. 그리고, 나머지 변수를 입력한 후 “계산”버튼을 클릭하면, 출화점포에서 화재 발생시 피난가능자를 산출할 수 있다. Fig. 11은 연기확산 III의 한계시간이 128초 이었을 경우 12명의 피난자가 모두 한계시간 내에 피난할 수 있는 것으로 산출되었다.

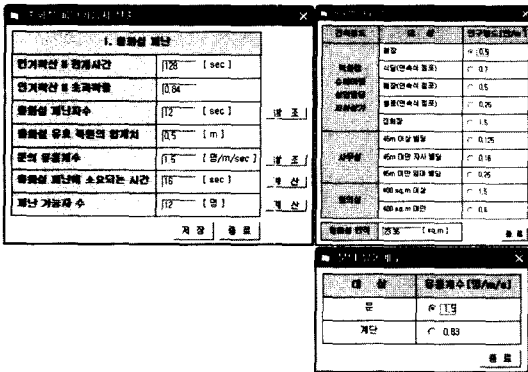


Fig. 11. Possible evacuee from fire place.

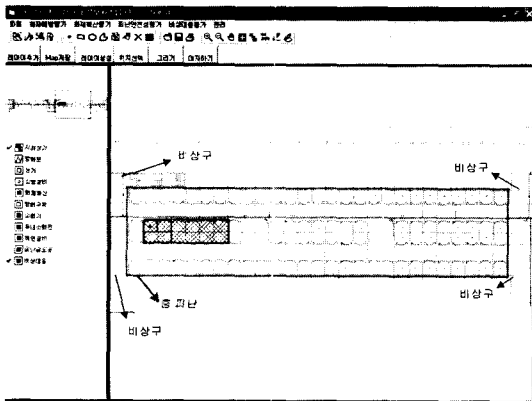


Fig. 12. Fire floor.

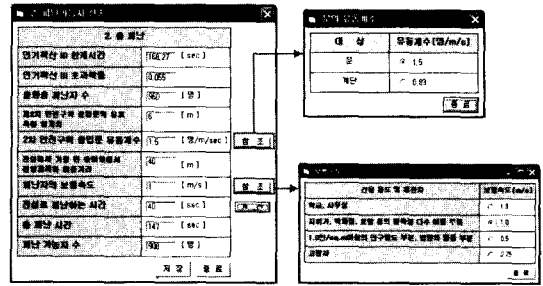


Fig. 13. Possible evacuee from fire floor.

3.2.6 출화층 피난가능자 산출

출화층 피난가능자 산출은 출화층(Fig. 12 참조) 피난에 영향을 미치는 연기확산 III의 결과를 이용하여 피난가능자를 산출한다. 출화층 피난가능자 산출은 Fig. 13과 같이 “출화층피난자수”, “유동계수”, “이동거리”, “보행속도”의 변수를 이용하여 산출한다. Fig. 13의 점포 및 통로의 피난자는 960명이고, 2차 안전구획 출입문의 유효 폭원의 합계치는 6m이다. 즉, 960명이 층 피난에 걸리는 시간은 147초이고, 전실로 피난하는 시간은 40초, 960명 중에서 피난 가능한 인구는 908명으로 산출되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하가의 피난안전성평가 모델의 기반을 제시하고 그에 따른 프로그램을 개발하였다. 또한, 피난 안전성 평가에 필수적인 각종 자료들을 통합형 데이터베이스 기반으로 구축하여 적은 시간과 인력으로 효율적인 위험성 평가를 수행할 수 있는 모델 제시 및 시스템을 구축하였고, 국내 지하가의 사례연구를 토대로 피난안전성평가시스템의 현장 적용성 및 신뢰성을 검증하였다. 화재 발생시 연기확산으로 인한 피해를 입지 않고 피난 가능 인구를 산출할 수 있는 피난 안전성평가 시스템을 통하여 출화장소 피난층의 피난가능자를 산출할 수 있으며, 피난에 소요되는 시간 산출이 가능하게 되었다.

또한, 본 연구 결과를 토대로 향후 더 연구 보완되어야 할 사항으로는, 피난안전성평가시스템에서 제시한 각 소방설비의 작동 확률 데이터가 국내 데이터 부족으로 인해 일부 해외 확률데이터를 도입하였으나, 국내 소방설비 작동 확률 데이터를 적용하여 보다 국내 현실에 가까운 피난안전성평가시스템으로 개선해야 할 것이다. 아울러, 국내 지하상가와 연결되어있는 고층 빌딩이 다수 존재하고 있다. 따라서, 지하상가의 화재

로 인하여 고층빌딩으로 화재확산되는 모델제시 및 시스템 구축을 통하여 지하 및 지상에 대한 종합적인 위험성 평가 수행이 필요하다.

$H_{\text{lobby}}$  : 부실의 천정 높이(m)  
 $S_3$  : 부실의 피난 한계 높이(m)

**기호설명**

- $t_{950}$  : 발열속도가 950 kw가 될 때까지의 시간(sec)
- $t_{R\_height}$  : 연기층 높이가  $S_1$ 의 높이까지 강하는 시간(sec)
- $t_{R_{185}}$  : 연기층온도가 185°C가 되는 시간(sec)
- $A_{\text{room}}$  : 출화실의 면적( $m^2$ )
- $\rho_s$  : 연기의 밀도( $kg/m^3$ ) ( $\rho_s=1.2$ )
- $k$  : 플럼계수( $kg/s/m^{5/3}/kw^{1/3}$ )
- $S_1$  : 출화실부분의 피난한계연기층 높이(m)
- $\alpha$  : 화재성장 파라메타
- $t_{fa}$  : 화재모델 원점과 자동화재경보설비 작동의 시간의 차(sec)
- $H_{\text{room}}$  : 출화실의 천장높이(m)
- $A_{\text{room}}$  : 출화실의 면적( $m^2$ )
- $t_{D1}$  : 연기층이 출화실문 상단까지 도달하는 것에 걸리는 시간(sec)
- $H_{D1}$  : 출화실창의 높이(m)
- $A_{\text{corridor}}$  : 복도부분의 면적( $m^2$ )
- $H_{\text{corridor}}$  : 복도의 천장 높이(m)
- $S_2$  : 복도부분의 피난 한계 높이(m)
- $t_{D2}$  : 연기층 높이가 복도부분의 개구부 상단에 도달할 때까지의 시간(sec)
- $H_{D2}$  : 복도와 부실을 연결하는 개구부의 높이(m)
- $A_{\text{lobby}}$  : 부실의 면적( $m^2$ )

**참고문헌**

1. 박종근, 노삼규, 지하공간의 위험성평가 수법에 관한 연구, 한국화재·소방학회, 제15권, 제4호(2001).
2. 박종근, 노삼규, 서영민, 지하공간의 위험성평가 시스템에 관한 연구, 한국화재·소방학회, 제16권, 제2호(2002).
3. 박종근, 노삼규, 지하공간의 위험관리정보시스템에 관한 연구, - 화재확산평가시스템중심으로-, 한국화재·소방학회(2002. 12).
4. 박종근, 노삼규, 지하공간의 위험관리정보시스템에 관한 조사 연구, - 지하가의 화재예방평가시스템 중심으로- 한국도시방학회(2002. 12).
5. 日本火災學會誌 “火災” Vol. 41, No. 5 「都市の地下空間における施設の防火安全対策の在り方について」 pp. 28-34(1991).
6. 社団法人日本トンネル技術協會, 「都市トンネル工事に係る安全評價に関する研究報告書」平成6年3月.
7. 社団法人日本損害保險協會, 「地下空間の安全防災対策に関する調査・研究報告書 = 地下空間の安全性評價研究 =」, 平成5年 3月.
8. 社団法人日本損害保險協會, 「地下空間の安全性評價に関する研究報告書 (地下空間の安全性評價研究)」, 平成3年11月.
9. John Carmody, Raymond Sterling, “Life Safety in Large Underground Building : Principles and Examples”, Tunnelling and Underground Space Technolgy, Vol. 9, No. 1, pp.19-22(1994).
10. Watanabe, L., “Safety and Disaster prevention measure for Underground Space an Anaysis of Disaster Cases”, Tunnelling and Underground Space Technolgy, Vol. 7, No. 4(1992).