

사무소 건물의 거주밀도 분포와 피난시간 예측

A Occupant Load Density and Computer Modelling of Evacuation time in Office Buildings

김운형* · Hu Rui** · 김 홍**

Abstract

A occupant load density of contemporary office buildings were surveyed by a building walk through procedure in Korea. The survey results of ten office buildings are range from 13.14 m²/person (141.4 ft²/person) to 22.69 m²/person (244.34 ft²/person) with 95% confidence level and the mean occupant load density is 17.92 m²/person (192.87 ft²/person). The impacts of occupant load on evacuation flow time was analyzed by applying time-based egress model, SIMULEX with various occupant load densities from previous studies.

In order to demonstrate the validation of egress modeling method, fire evacuation exercise and computer simulation were used to simulate the actual evacuation plan for a high-rise office building. An analysis and comparison of the results of these approaches was made to illustrate the influence of model limitations on the result of prediction.

The result of the study shows that the introduction of occupant load concept in building code of Korea is essential to achieving resonable building life safety design in future.

국문 요약

건물 화재 시 인명안전설계의 목표는 피난에 필요한 최소한의 시간을 확보하는 것이다. 본 논문에서는 적정 피난 설계를 위하여 다음과 같은 내용을 연구하였다.

- 국내 사무소 건물의 거주밀도 분포를 조사 분석하였다.
- 고층 사무소 건물에서 대피훈련을 시행하여 예상 피난시간을 관측하였다.
- 피난전용 프로그램의 하나인 SIMULEX를 적용하여 컴퓨터 피난모델의 특성과 적용상의 한계를 연구하였다.
- 거주밀도와 피난시간과의 상관성을 분석하였다.

연구 결과 국내 사무소 건물의 거주밀도는 총 바닥면적(Gross Area)기준으로 13.14m²/인 - 22.69m²/인이며 평균 19.72m²/인 (193ft²/인)으로 조사되었다. (95% 신뢰도 기준) 또한 고층 사무소 건물의 대피훈련과 SIMULEX 모델 결과를 비교하여 피난시간에 큰 차이가 나타나 현 모델의 가정과 계산 방법에 한계가 있음을 보여주었다. 한편, 거주밀도와 피난시간과의 분석 결과, 동일용도에서도 차이를 보이고 있어 용도별 거주밀도 기준 마련이 시급한 것으로 판단된다.

* 경민대학 소방안전관리과

** 호서대학교 산업안전공학과

1. 서론

건물화재 시 인명안전설계의 목표는 적정 피난시간을 확보하여 안전한 장소(Safe area)로 거주자를 이동시키는 것이다. 이를 위하여 설계자는 피난에 필요한 최소 시간(Required safe egress time, RSET)을 예상하고 여기에 안전을 고려한 적정 피난시간(Available safe egress time, ASET)을 결정하게 된다.

피난시간에 영향을 주는 주 요소는 다음과 같다.

- 예상 피난인원
- 계단, 복도 등 건물 안의 피난 수단
- 거주자의 피난 특성 (이동 속도, 밀도, 유동 속도 등)

여기서 예상 피난인원을 결정하는 거주자 수는 일반적으로 거주밀도(Occupant load)로 나타낸다. 거주밀도는 예상 평균 거주자 수를 바닥면적(Gross area)으로 나눈 값 ($\text{ft}^2/\text{인}$ 또는 $\text{인}/\text{ft}^2$)으로 건물의 용도와 면적에 따라 결정된다. 예로서 1935년 미국의 Life Safety Code²⁾에서는 사무소 건물은 $100 \text{ ft}^2/\text{인}$ (Gross)으로 규정하고 각 용도별로 거주밀도를 제시하여 피난인원을 기준으로 한 새로운 피난 설계방법을 도입하였다. 사무소 건물의 거주밀도는 1934년 미국 National Bureau of Standards (NBS)의 John H. Courtney와 Harry B. Houghton에 의해 최초로 제시된 이후 많은 연구가 진행되었다. 표 1은 현재까지의 각국의 사무소 건물의 거주밀도 연구결과를 나타내며 시대적 흐름에 따라 그 결과가 다름을 알 수 있다.

한편 현재 피난시간은 크게 수리학적 모델 (Hydraulic Flow Modeling)과 컴퓨터 프로그램을 이용한 설계방법으로 구분할 수 있다. Paul의 Effective-Width Model은 대표적인 Hydraulic Model이다. 그는 고층 사무소 건물을 대상으로 피난 시 실제 사용되는 통로

유효 폭, 밀집도, 이동 속도, 단위 유효 폭, 단위시간 당 유동인원 및 실험 결과에 따른 최대 Fs값을 기준으로 단위 시간당 피난통로의 유동인구와 피난통로 이동시간을 계산하는 Hydraulic 모델을 제안하였으며 보다 자세한 설명은 Paul의 관련문헌에 있다.⁽⁷⁻⁸⁾

표1. 각국의 거주밀도 분석

연구자	거주밀도($\text{ft}^2/\text{인}$) (Gross)	조사연도	비고
1) NBS	87	1934	미국
2) Nelson	150	1969	미국(관공서)
3) BOMA	160-275	1966, 1990	미국
4) Johnson & Pauls	243-278	1977	캐나다(고층건물)
5) Cormier, et al.	220-230	1977	캐나다
6) Bourdeau	175-200	1992	미국(대학건물)
7) Caro & Milke	214-254 (관공서건물) 246-310 (일반건물)	1996	미국
8) 일본	0.16 $\text{인}/\text{m}^2$ (자사건물) 0.25 $\text{인}/\text{m}^2$ (임대건물)		건축방재계획지침 (높이 45m 미만)

이와 함께 컴퓨터 프로그램은 다양한 용도와 설계조건에 부합하며 대피 훈련 방법이 갖는 한계를 극복할 수 있는 실용적이고 경제적인 대안으로 인식되면서 점차 널리 사용되고 있다.

현재 개발된 피난모델은 전세계적으로 20여 개가 넘으며 다음과 같이 대분할 수 있다.

- 최적화 (Optimisation) 모델 : 개인의 행태는 무시하며 동질의 군집이동을 해석함.(예: Evacnet⁺)
- Simulation 모델 : 피난 행태나 이동경로, 의사결정 등을 고려한다. (예: Exit89, Exodus, Simulex 등)
- 위험성 평가 (Risk Assessment) 모델 : 피

난 위험도의 정량화 (예: Crisp II)

본 논문에서는 Simulation 모델의 일종인 SIMULEX 프로그램을 선정하여 피난모델의 적용 가능성과 한계 등을 연구 분석하였다. 아울러 고층 사무소를 대상으로 실제 피난상황을 분석하기 위한 대피훈련을 시행하였다. 한편 현재 국내 사무소 건물의 거주밀도 분포를 조사하였으며 이를 기준으로 거주밀도와 피난시간과의 상관성을 분석하였다.

본 연구 결과는 현행 시방규정 중심의 법규의 한계를 검토하고 거주밀도를 기준으로 한 적정 피난시간 및 피난용량 산정을 위한 기초자료로 이용될 수 있다.

II. 거주밀도 분포 조사

2.1 조사 개요

조사대상은 서울 강남에 위치하는 14개의 건설 관련 사무소 건물을 계층적 표본으로 추출하여 직접 방문조사가 가능한 10개 사무소를 분석 대상으로 하였다. 건물층수는 전체 피난(Total Evacuation)한계를 고려하여 8층에서 15층 사이로 제한하였다. 현장조사시 거주자의 출장, 외근 등 장기부재나 외출, 화장실 이용 등 일시적인 부재, 외부 방문객 등을 구분하기 위해 사전 교육된 조사원이 건물 관리자 또는 근무자의 도움을 받아 진행하였다. 조사결과는 전체바닥 면적(Gross Area)과 계단, 복도 등 비 주거면적을 제외한 순수 바닥면적(Net Area)으로 구분하여 각각의 거주밀도 분포를 제시하였다. 각 층 바닥면적은 건축도면을 기준으로 하고 순 사무면적은 직접 실측하였다.

2.2 조사결과

조사대상은 10개 사무소 51개의 층이며 총

거주자 수는 2,462명, 바닥면적은 39,844m²이다. 조사 결과는 통계적 방법 (T-Distribution Curve)을 이용하여 거주밀도 분포를 산출하였으며 그 결과는 표2와 같다.

2.3 결과 분석

조사결과, 거주밀도는 95% 신뢰도 기준으로 총 바닥면적 당 13.14 m²/인-22.69 m²/인 (141-244 ft²/인), 평균 19.72 m²/인 (193ft²/인), 순 바닥면적 당 9.18m²/인-15.18 m²/인 (98-163ft²/인), 평균 12.18m²/인 (131.1ft²/인)이다. 이는 가장 최근에 조사된 Caro & Milke의 214-254 ft²/인 (관공서 건물)이나 Bourdeau의 175-200 ft²/인 (대학의 사무동 건물)과 평균 거주밀도에서 유사한 분포를 보여 사무소 건물의 경우 한국과 미국간에 큰 차이가 없음을 보여준다. 다만 Nelson이나 NBS 등 1970년대 이전의 조사결과와는 큰 차이가 있어 공간 기능의 변화에 따라 거주밀도도 변화함을 알 수 있다. 한편, 미국 Life Safety Code (LSC)의 100 ft²/인 과는 평균 거주밀도에서 거의 2배 차이가 있다. 총 바닥면적에 대한 순 바닥면적의 비율은 46%에서 83%까지 편차가 크게 나타났으며 평균 68.93 %로서 공간의 약 30%정도가 비 거주면적으로 조사되었다.

표2. 거주밀도 분포

		거주밀도 분포 m ² /인 (ft ² /인)			
		Min.	Max.	Mean	Std. Dev.
Gross Area	90%	14.04 (151.1)	21.79 (234.6)	19.72 (192.8)	6.68
	95%	13.14 (141.4)	22.69 (244.3)		
	99%	11.05 (118.9)	24.79 (266.8)		
Net Area	90%	9.75 (104.9)	14.61 (157.3)	12.18 (131.1)	4.18
	95%	9.18 (98.9)	15.18 (163.3)		
	99%	7.88 (84.8)	16.48 (177.4)		

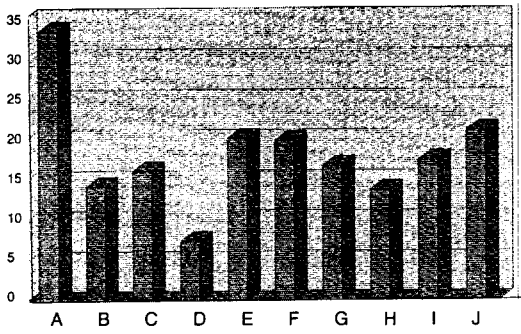


그림1. 거주밀도 분포

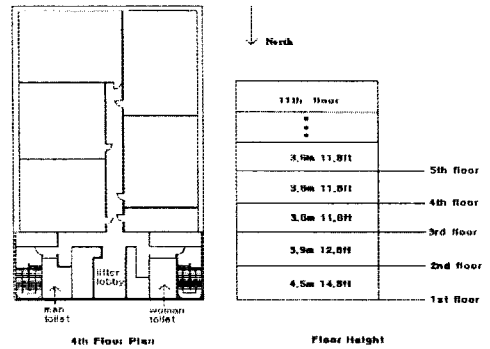


그림2. 모델 건물

III. 사례분석

고층 사무소 건물을 선정하여 실제 대피훈련을 시행하고 피난시간을 측정하였으며 이를 컴퓨터 프로그램의 예측 결과와 비교 분석하였다. 또한 표1.의 거주밀도 분포 평균값을 적용하여 거주밀도와 피난시간의 상관성을 조사하였다.

여기서 피난시간(Evacuation time)은 거주자가 화재감지 후 체류장소에서 안전한 장소 또는 건물 외부로 이동하는 경과시간으로서 인간의 행동 특성에 따른 피난개시 이전의 거주자의 대응시간 (Pre-movement time)과 행동결정 시간 그리고 피난통로의 이동(Travel time) 및 통과시간(Flow time)으로 구성된다.

3.1 모델 건물

모델 건물은 00시에 소개한 11층 사무소 건물이며 층고는 3.6m, 지상 각층의 바닥면적은 522m² (26.85m x 19.45m)이다. 각 층의 피난계단은 2개씩 있으며 단 높이가 18cm, 단 너비 28cm, 계단 폭 1.2m, 계단참의 폭은 2.5m x 2m 이다. 1층 로비의 주 출입구는 3.9m x 1.8m 이며 계단 입구의 방화 문은 1.0m 이다. 중복도의 길이는 35m, 폭은 1.7m 이다. 각 사무실의 출입문은 총 6개이며 폭은 90cm 이다.

3.2 피난시간 측정

화재 시 건물 내 거주자의 반응, 피난통로의 선정과정, 피난 행태 등의 분석 및 피난시간의 예측을 위하여 실제 대피훈련을 실시하였다. 피난시간은 비상방송과 경종이 발생한 즉시 거주자가 각 층의 복도와 피난계단을 통하여 1층의 주 출입구를 통과하는 시간을 측정하였다. 훈련시간은 최대 거주밀도에 따른 군집이동 특성을 분석하기 위하여 평일(화요일) 오전에 시행하였다. 화재 시 단계적 피난 (Staged Evacuation)조건을 가정하여 안전구역까지의 이동거리가 가장 먼 중간 층인 4, 5층을 선정하였다. 훈련에는 총 172명이 참가하였으며 이중 남성은 1명이고 나머지는 여성이었다. 법적 기준에 의하여 승강기 사용은 고려하지 않았으며 훈련일정은 안전상 미리 통고하였다. 따라서 실제 화재 시 거주자의 특성을 모두 반영할 수는 없다고 보여지나 이러한 문제는 컴퓨터 모델을 통하여 반영되었다.

3.3 측정 결과 및 분석

대피훈련은 오전 10:30분에 시작하였다. 4.5층 거주자는 회의 중이었으며 비상방송과 경보설비에 의하여 대피하였다. 170명은 서쪽

계단을, 2명은 동쪽 계단을 선택하였다.
시간대별 상황은 아래와 같다.

- 10:30 (오전) : 경종 울림, 거주자 대피시작
- 51초 후 : 서쪽계단을 통한 최초 대피자가 1층 계단 실 입구에 진입
- 58초 후 : 서쪽계단을 통한 최초 대피자가 1층 주 출입구를 통과하여 건물을 벗어남
- 2분 15초 후 : 동쪽계단을 통한 최초 대피자가 1층 계단 실 입구에 진입
- 2분 20초 후 : 동쪽계단을 통한 최초 대피자가 1층 동쪽 주 출입구를 통과하여 건물을 벗어남
- 7분 36초 후 : 마지막 대피자가 1층 서쪽 계단 실 입구에 진입
- 7분 45초 후 : 마지막 대피자가 1층 서쪽 주 출입구를 통과함

연기발생이나 가시거리의 제한 등 실제 화재상황과는 다른 피난훈련으로 인하여 방송 즉시 대피하지 않는 사람도 있었다. 따라서 복도나 계단에서 기대하였던 연속흐름보다는 단절된 군집이동이 발생하였으며 결과적으로 피난시간의 지연을 초래하였다. 한편 여성이 남성보다 보다 신속한 대피경향을 갖는다는 연구결과 (Wood, 1972)등을 고려할 때 90% 이상이 여성인 성별구조 역시 피난시간에 영향을 주었다고 판단된다.

한편, 2 개의 피난계단 중 피난자가 한쪽으로 편중된 배경에는 여성 화장실의 위치가 서쪽에 있어 일상적인 동선으로 인식된 영향으로 판단된다. 실제로 대피요원이 동쪽 계단의 사용을 유도하였으나 대다수의 여성은 이를 무시하고 서쪽계단 방향을 선택하였다. 결과적으로 현재 피난계단의 배치는 비효율적이며 화재 시 피난시설의 균등한 사용을 기대하는 것은 이상적인 가정임을 알 수 있다.

IV 컴퓨터 모델 해석

4.1 모델 개요

SIMULEX 는 다층건물에서 다수의 거주자가 피난하는 상황을 분석 평가하는 피난 전용 프로그램으로 윈도우 95와 8 Mb 이상의 RAM 을 갖는 개인용 컴퓨터에서 사용한다. 1995년 영국 Edinburgh 대학의 Dr. Thompson 과 Dr. Marchant 가 개발하였으며 피난 시 타인의 접근으로 인한 앞지르기, 몸의 회전, 피난통로 찾기 등 개인적인 특성을 반영하면서 통로를 찾아가는 전체 피난과정을 사용자에게 시각적으로 보여준다. 다만 대부분의 피난모델과 같이 화재 시 연기가 피난시간에 미치는 영향을 반영하지 못하는 한계가 있다. 모델의 주요 입력 자료 및 가정은 아래와 같다.

- 평면도 : CAD 도면으로 작성된 1,4,5 층의 평면도를 입력하였다.
- 피난계단 : 보행속도가 감소된 2차원의 복도 개념으로 보며 3차원의 실제 길이와 폭을 계산하여 입력하였다. 대피훈련의 결과를 고려하여 서쪽 계단만을 사용한다고 가정하였다.
- Links : 피난통로에서 평면과 계단을 연결하는 출구이다.
- 보행거리도 (Distance map) : 건물 내 피난거리를 분석하며 0.2 m x 0.2m 크기의 블록에서 최단 거리의 출구를 계산한다.
- 최종 출구 : 거주자의 피난이 완료되는 기준 지점으로 1층에 있는 2개의 주 출입구를 지정하였다.
- 보행속도 : 일상적인 보행속도는 0.8 - 1.7 m/s 이며 보행밀도가 높아지면 감소한다.
- 신체치수 : 4가지 종류 중 여성의 신체치수를 사용하였다.
- 경보대응시간 : 경보와 거의 동시에 피난개시를 가정하였으며 거주자의 반응시간은

0.5-1.5초이다.

- 대피인원 : 4, 5 층의 거주자 170명 (각 층 85명 가정)

4.2 시뮬레이션 및 결과분석

최종 거주자가 건물을 벗어난 시간은 201초 (4분 01초)이며 주요 시간별 대피상황은 다음과 같다.

- 12 초 경과 : 5층에서 최초 대피자 계단실 도착
- 15 초 경과 : 4층에서 최초 대피자 계단실 도착
- 1 분 6초 경과 : 최초 대피자 계단실 벗어남
- 1 분 14초 경과 : 최초 대피자 건물 벗어남
- 1 분 30초 경과 : 모든 거주자 5층에서 대피 완료
- 2 분 경과 : 최종 대피행렬 4층에 도착
- 2 분 15초 경과 : 모든 거주자 4층에서 대피 완료
- 3 분 47초 경과 : 최종 대피행렬 1층에 도착
- 4 분 1초 경과 : 최종 대피자 건물 벗어남

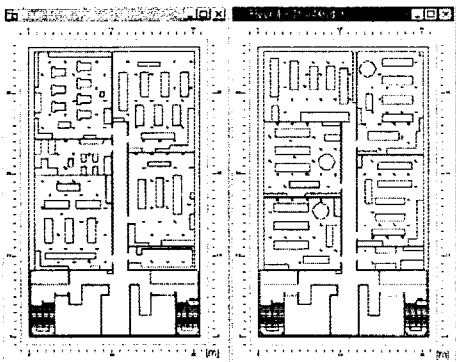


그림 3. 거실의 피난 유동

표 3에서 보듯이 피난시간에 적지 않은 차이를 보이고 있다. 대피훈련을 통하여 거주자는 화재상황을 간접체험 하거나 군집 유동 특성 등을 파악할 수 있었다. 그러나 실제 연기나 열에 노출되지 않은 조건에서 관찰된 거주자의 느린 반응 등을 고려할 때 실제 예상되는 피난시간은 위의 결과보다 짧을 것으로 예상된다.

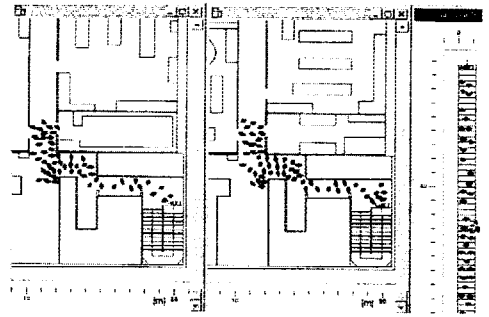


그림 4. 계단실의 피난 유동

표 3. 피난시간 비교

모델방법	피난시간	피난 유동율 (인/s/m)	피난자 특성
대피훈련	7분 45초	0-1.3	비활동적
컴퓨터모델	4분 01초	0.9-1.6	활동적

한편 SIMULEX에서 계단실 입구에서의 단위 폭 당 유동비율이 0.9 -1.6 인/s/m 로 계산되어 상대적으로 피난시간이 단축된 것으로 판단된다. 즉 피난 시 상대방을 앞지르기, 몸의 회전 등 개인적인 대응은 실제 화재 상황에서 항상 일정한 반응으로만 나타나지 않으므로 실제 예상되는 단위 폭 당 유동비율 보다 초과한 범위를 기준으로 예측한 결과로 볼 수 있다. 피난 유동율은 1층 서쪽 계단에서 비디오를 이용하여 5초 간격으로 측정하였다. 모델의 경우 피난 유동율의 분포가 최대 1.6-1.8 인/s/m 로 계산되어 대피훈련 시 측정결과와 큰 차이를 보였다. 계단 폭이 1.0m임을 고려할 때 이는 실제 화재 시 유동율에 비하여 매우 높은 분포라고 볼 수 있다. 따라서 모델에 Overtaking에 관한 현실적인 예측 자료가 보완되어야 한다.

또한 모델의 예측결과는 피난개시 이전의 대응시간을 0.5-1.5초 사이로 가정하였으며 항상 가까운 쪽의 계단을 선택한다는 가정

하에 피난 중에 발생하는 행동 결정시간을 고려하지 않고 피난통로 유동시간(Flow time, Travel time)을 기준으로 한 최소 피난시간으로 볼 수 있다. 따라서 실제 피난시간은 SIMULEX에 의한 결과보다는 길 것으로 예상 할 수 있다.

4.3 거주밀도와 피난시간

거주자 수가 피난시간에 미치는 영향을 분석하기 위하여 표 1에서 제시된 다양한 거주밀도 분포를 기준으로 사례분석과 동일하게 4,5층 거주자가 1층까지 피난통로를 이용하여 1층계단을 통과하는 피난 시간을 SIMULEX 프로그램을 이용하여 계산하였다. 피난시간은 동일한 용도에서도 거주밀도 분포차이에 따라 2분 05초에서 2분 47초까지 다르게 나타났다.

표 4에서 보듯이 건물의 용도별 거주밀도 산정은 예상되는 최대 거주자 수에 따른 적정한 피난용량을 확보하는 데 필수적이다. 그러므로 건물의 거주자 수를 예상하는 것은 피난설계의 가장 중요한 기준이 된다. 부적절한 거주밀도 적용에 따른 피난설계는 불필요한 계단의 수를 증가시키거나 그 폭을 크게 하여 결국 비경제적인 설계에 따른 손실이 불가피하게 된다.

표 4. 거주밀도 분포에 따른 피난시간

연구자	거주밀도 (ft ² /person)	거주 인원	피난 시간
Japan	67	78	2'47"
NBS	87	60	2'32"
Nelson	150	35	2'10"
Bourdeau	187	28	2'07"
BOMA	217	24	2'05"
Cormier, et al.	225	23	2'05"
Caro & Milke	234	22	2'05"
Johnson & Paul	260	20	2'05"

따라서 용도별로 적정 거주밀도의 기준을 정하여 이에 필요한 적정 피난수단 용량을 결정하는 설계 기준이 국내 관련 법규에 도입되어야 하며 이를 통하여 설계자는 피난에 필요한 최소 시간 (RSET)을 기준으로 적정 피난시간(ASET)을 결정할 수 있게 된다.

V. 결론

적정 피난설계를 위한 거주밀도 분포 조사 및 대피훈련 시행을 통한 피난 모델 (SIMULEX)의 검증 결과는 다음과 같다.

- 1) 현재 국내 사무소 건물의 거주밀도는 총 바닥면적(Gross Area)기준으로 13.14m²/인-22.69m²/인 (141ft²/인-244 ft²/인), 평균 19.72m²/인 (193ft²/인)이며 순 바닥면적(NetArea)기준으로 9.18m²/인-15.18 m²/인 (98ft²/인-163ft²/인), 평균 12.18m²/인 (131.1ft²/인)으로 조사되었다. (95% 신뢰도 기준)
- 2) 대피훈련과 SIMULEX 모델과의 피난시간 차이는 짧은 거주자 대응시간 (0.5초-1.5초) 가정과 일반적인 피난모델의 안전율 2.0을 고려하더라도 피난 시간에 적지 않은 차이를 보이고 있다. 따라서 모델 사용자는 입력자료에 관련되는 가정과 계산과정의 명확한 이해와 그 결과에 대한 공학적인 해석 능력이 필요하다.
- 3) 적정 피난설계를 위하여 피난시간에 중요한 영향을 미치는 피난통로상의 연기 유동 및 거주자의 피난 행태에 관한 요소가 모델에 반영되어야 한다.
- 4) 거주밀도와 피난시간과의 분석 결과, 동일 용도에서도 차이를 보이고 있다. 따라서 적정 피난용량의 산정을 위한 용도별 거주밀도기준이 관련 법규에 마련되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 한국화재보험협회. 건축방재계획지침.
한국화재보험협회 위험관리정보센터. 1997.
2. Life Safety Code. NFPA 101. Quincy.
MA. NFPA. 1994.
3. Harold E. "Bud" Nelson and Hamish A.
Maclennan. "Emergency Movement"
SFPE Handbook of Fire Protection
Engineering. Sec.3 Chp.14, 2nd Edition.
NFPA. USA.1995
4. Jake Pauls. "Movement of People" SFPE
Handbook of Fire Protection Engineering.
Sec. 3 Chp. 13. 2nd Edition. NFPA.
USA. 1995.
5. O' Leary, T.J., and Gratz, J. M., "An
Analysis of Fire Evacuation Procedures
Using Simulation," Fire Journal Vol. 76,
No.3, May 1982, pp. 119-121
6. Smith, J.M., "An Analytical Queuing
Network Computer Program for the
Optimal Egress Problem," Fire
Technology, Vol. 18, No. 1. Feb. 1982,
pp. 18-33.
7. Peter Thompson, Jianhua Wu & Eric
Marchant, "Modeling Evacuation in
Multi-storey Buildings with Simulex",
Fire Engineers Journal, November 1996,
pp. 7-11.
8. Peter A. Thompson & Eric W.
Marchant, "A Computer Model for the
Evacuation of Large Building
Populations", Fire Safety Journal 24,
1995, pp. 131~148.