

C-6

성능 위주 설계를 위한 피난 시간 계산

정수영 · 김태현*

서울대학교 전기컴퓨터공학부, *명지전문대학 전기과

Evacuation Time for Performance Based Design

Jung, Soo Young · Kim, Tae Hyun*

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul Nat'l Univ.

*Department of Electrical Engineering, Myongji College

요 약

성능 위주 피난 설계에 있어서 요구피난시간(RSET)을 위한 Simulex 등 피난 시뮬레이션 툴이 사용하고 있는 근본적인 데이터베이스, 즉, 시설 및 군중 조건에 따른 이동 변수, 최대 비유동률(Maximum Specific Flows) 및 경계폭(Boundary Layer Width)을 살펴보고, 트래픽 방정식(Traffic Equation)을 통한 계산 사례 즉, 피난자의 이동 속도 계산 사례, 최소 피난 시간 계산 사례 및 총 유동 용량(Flow Capacity) 수식과 계산 사례를 살펴본다.

1. 서 론

최근에 초고층 건축물의 증가로 인한 화재 시 대형 인명 피해로 직결된다. 이에 안전 피난의 중요성의 대두로 소방 분야의 선진 기술인 성능 위주 설계(performance based design)에 대한 국내외 관심이 높아지고 있다[1-3]. 그러나 국내에는 아직 데이터베이스 부재 및 소방 엔지니어의 공학적인 교육의 미흡으로 실제 성능 위주 피난 설계에 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 미국방재협회 NFPA 101 피난 설계 코드의 성능 위주 설계[4]에서 언급하고 있지 않은 공학적인 측면의 인간의 행동 특성(human behavior)을 고려한 성능 위주 피난 설계[5]에 대해서 살펴보고, 추후 한국 소방 화재 안전 기준 NFSC(National Fire Safety Code)을 반영한 국산 피난 설계 소프트웨어 원천 기술 개발을 위한 관련 수식, 데이터 및 계산 사례를 통한 미국 소방 성능 위주 피난 설계 이해에 도움이 되고자 한다.

2. 연구 범위

초고층 건축물에 있어서 성능 위주 설계 시, 그림 1의 피난 시간선에서 유효피난시간

ASET(available safe escape time)이 요구피난시간 RSET(required safe escape time)보다 커야 된다. 단, 그림 1에서 요구피난시간(RSET)은 화재의 발화 시간(ignition time)에서 피난자의 피난 완료 시간(evacuation completed time)까지를 말한다[5].

또한, 유효피난시간(ASET)은 발화(ignition)시점부터 인간이 견딜 수 있는 한계 시간(tenability limit) 로 컴퓨터 시뮬레이션 시 연기 층의 높이, 독성, 열 노출 해석 등이 반영되어야 한다. 반면, 요구피난시간(RSET)은 발화 시점부터 피난완료 시간으로 화재 인지, 판단, 피난 행동 시간을 말한다. 이 논문에서는 요구피난시간(RSET) 중 인간 행동의 특성 이해를 기반으로 피난 시간(evacuation time)을 보다 정확히 구하기 위한 실제 피난 시간(movement time)의 기본적인 이론, 수식 및 계산 사례를 살펴보고자 한다. 단, 여기서 피난 시간(evacuation time)이란 그림 1에서 피난을 위한 준비 시간(delay time to start)과 실제 피난 시간(movement time)을 합을 말한다.

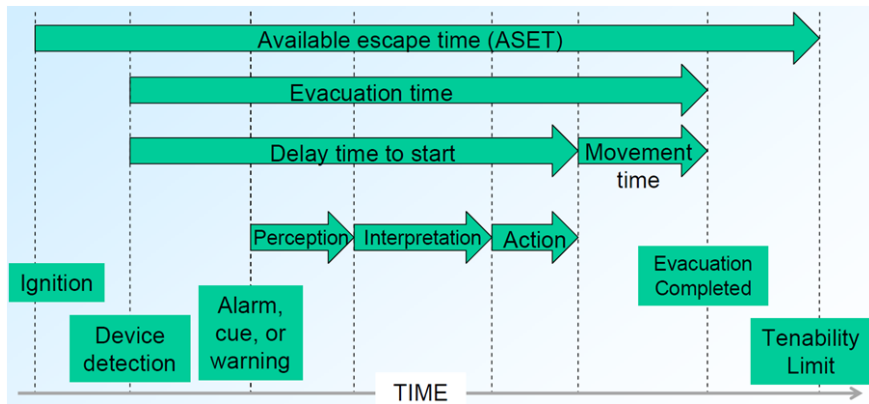


그림 1. 피난 과정의 시간선^[8]

2.1 시간 위주의 피난 설계 (Time Based Egress Analysis)

트래픽 방정식은 아래와 같이 정의 된다[7].

$$\text{인구 유동(Flow)} = \text{이동 속도(Speed)} \times \text{인구 밀도(Density)} \times \text{통로 폭(Width)} \quad (1)$$

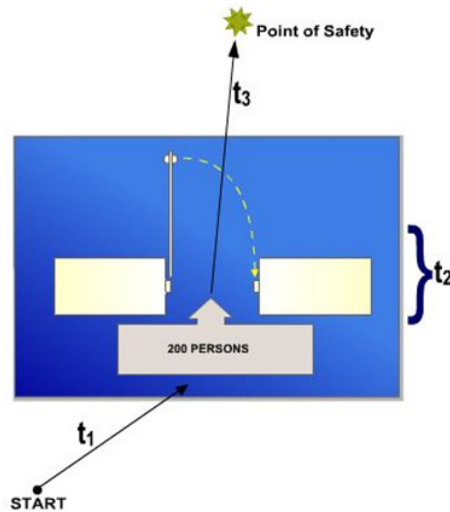
이 방정식은 이동 속도와 인구 밀도 사이에는 독립적이라고 가정한다. 그러나 실제 상황은 그렇지 않다. 이동 속도는 피난 요소에 따라 변한다.

이동 속도, 밀도, 인구유동을 합리적으로 예측하기 위해서는 아래 표 1을 이용할 수 있다[6]. 여기서, 실제 참고 자료[6]에서는 속도(speed), 밀도(density) 및 폭(width) 단위는 피트(ft) 기준이지만, 약간의 오차가 발생이 불가피하나, 국내 소방 엔지니어들의 직감력을 높이는 목적으로 국내에서 사용하는 미터(m) 단위를 환산하여 표들을 재구성하였다. 그러나 결론적으로는 최종 피난 설계 시간 분 단위 계산에는 큰 오차가 없음을 계산 사례를 통해서 확인하였다.

표 1. 시설 및 군중 조건에 따른 이동 변수^[6]

시설	군중 조건(Crowd Condition)	밀도(명/m ²)	속도(m/min)	인구유동, Flow(min/m)
계단	Moderate (적정)	1.08	37	46
	Optimum (최적)	2.04	29	59
복도	Moderate	1.08	61	66
	Optimum	2.15	37	79
출입구	Moderate	1.08	52	
	Optimum	2.37	37	

총 피난 최소 시간(minimum total evacuation time)은 출입구에 가장 가까운 첫 번째 사람이 그들의 위치로부터 안전한 장소 또는 대피 공간 까지 이동 시간으로 다음과 같이 표현된다.

그림 2. 총 피난최소시간 개념도^[8]

즉, 그림 2에서의 총 피난 이동 시간(total movement time)은 다음 수식으로 표현된다[7].

$$t = t_1 + t_2 + t_3 \quad (2)$$

여기서,

t_1 : 첫 번째 사람이 지배인자(controlling component) 도달하는데 소요되는 시간

t_2 : 사람들이 지배인자(controlling component) 통과하는데 소요되는 시간

t_3 : 지배인자(controlling component)를 통과하는 마지막 사람이 무사히 안전한 장소 또는 대피 장소로 이르는 시간을 말한다.

이때, 지배인자(controlling component)란 피난 시 지연을 일으키는데 가장 영향을 미치는 중요 인자라고 정의할 수 있다. 일반적으로, 그림 2에서 통로의 폭이 좁아지는 장소와 관련된 t_2 가 가장 피난 이동 시간에 큰 영향을 미친다. 일반적으로, 복잡도가 높은 초고층 건축물에서 오피스텔과 같이 낮은 밀도의 용도 공간에서 t_1 변수는 피난 시 큰 장애가 되지 않으므로 피난 설계 시 총 피난 시간에서 영향을 크게 미치지 못하므로 무시한다.

2.2 표 1을 이용한 이동 속도 계산 사례

군중이 적정(moderate) 상태일 때, 1.2[m] 출입구를 통과하는 사람의 유동률(flow rate)은 표 1을 이용하면 식 (1)은 다음과 같다.

$$\text{인구유동률(flow)} = \text{밀도} \times \text{속도} \times \text{폭} = 0.01[\text{명}/\text{m}^2] \times 52[\text{m}/\text{min}] \times 1.2[\text{m}] = 68[\text{명}/\text{min}] \quad (3)$$

2.3 최소 피난 시간 계산 사례

실예 200[명]이 머물고 있다. 출입문에 가장 가까운 사람이 문으로부터 15[m] 떨어져 있다. 1번째 피난자의 이동 속도는 75[m/min] 이라고 가정한다. 군중이 최적(optimal) 조건을 가정할 때, 0.9[m]폭의 출입문을 통해서 실예에 있는 모든 피난자가 피난 할 수 있는 최소시간을 구하면 다음과 같다.

$$\text{첫 번째 사람이 출입문에 도달하는 시간 } t_1 = 15[\text{m}] \times \frac{1}{75[\text{m}/\text{min}]} = 0.2[\text{min}] \quad (4)$$

$$\text{인구유동률(flow)} = 2.37[\text{명}/\text{m}^2] \times 37[\text{m}/\text{min}] \times 0.9[\text{m}] = 79[\text{명}/\text{min}] \quad (5)$$

$$\text{유동 시간(flow time) } t_2 = \frac{200[\text{명}]}{79[\text{명}/\text{min}]} = 2.5[\text{min}] \quad (6)$$

$$\text{최소 피난 시간(minimum evacuation time) } t = 0.2[\text{min}] + 2.5[\text{min}] = 2.7[\text{min}] \quad (7)$$

2.4 총 유동 용량 (Flow Capacity)

군중 조건(crowd condition)을 구체적으로 제시할 수 없는 사항에서 피난 시간 추정을 위한 유동 용량(flow capacity)은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$F_c = F_s \times W_e \quad (8)$$

여기서, 비유동(specific flow) F_s 는 다음과 표 2와 같이 주어진다[7].

유효폭(effective width) W_e 은 그림 2에서 빗금 부분을 제외한 폭 즉, 전체 통로폭(clear width)에서 경계층(boundary layer) 폭을 빼줘야 한다[9]. 이 때 경계층 폭은 표 3과 같다[7].

2.5 표 2와 표 3을 이용한 총 유동 용량 계산 사례

실예 200[명]이 머물고 있다. 0.9[m]인 출입문의 폭(clear opening)을 통과하는데 소요되는 시간을 추정하면 다음과 같다.

표 2에 의해서 비유동 F_s 는 단위 유효폭당 1.32[명/sec-m]이다. 경계폭은 표 3에 의해서 15[cm]이다. 따라서 문의 양쪽 모두를 고려하면 유효폭 W_e 는 식 (9)와 같다.

$$W_e = 90[\text{cm}] - 15[\text{cm}] - 15[\text{cm}] = 60[\text{cm}] = 0.6[\text{m}] \quad (9)$$

식 (8) 에 의한 총 유동 용량은 식 (10)과 같다.

$$F_c = F_s \times W_e = 1.32[\text{명/sec-m}] \times 0.6[\text{m}] = 0.79[\text{명/sec}] \quad (10)$$

따라서 사람들이 출입문을 통과하는데 소요되는 시간 t_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_2 = \frac{200[\text{명}]}{0.79[\text{명/sec}]} = 253[\text{sec}] = 4.22[\text{min}] \quad (11)$$

표 2. 최대 비유동 (Maximum Specific Flows)^[7]

피난 요소(Egress Component)		F_s [명/sec-m of Effective width, W_e]
복도, 통로, 경사로, 출입구		1.32
계단의 수직면, Riser(cm)	계단의 수평면, Tread(cm)	
19	25.4	0.94
27.2	27.9	1.01
16.5	30.5	1.09
16.5	30.5	1.16

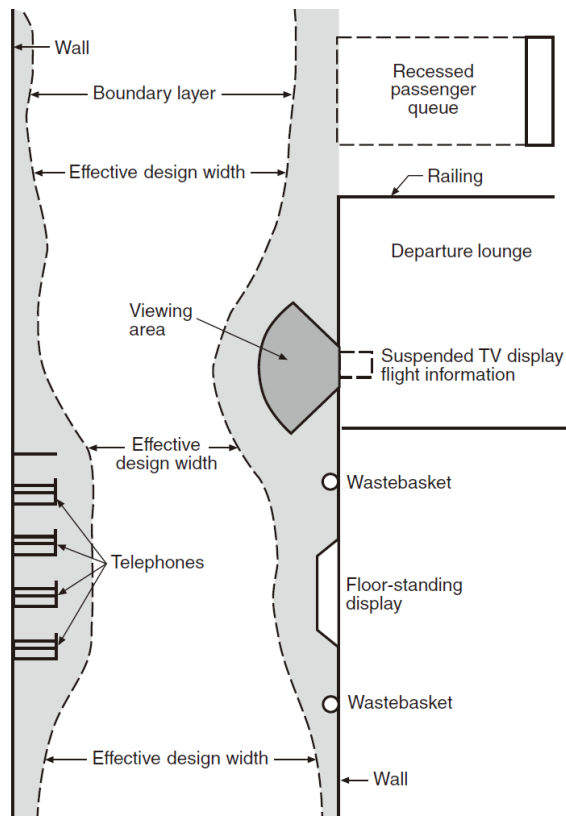


그림 3 유효폭 W_e 개념도^[8]

표 3. 경계폭 (Boundary Layer Width)¹⁷⁾

요소(Component)	경계층, Boundary Layer[cm]
난간(handrails)	8.9
계단, 문	15
복도	20

3. 결 론

성능위주설계에 있어서 아직까지는 국내 실정에 맞는 데이터베이스 부재로 외산 소프트웨어인 화재 시뮬레이션 툴인 FDS 및 피난 시뮬레이션 툴로서는 Simulex 등이 대표적으로 사용되고 있다[3]. 이 논문에서는 Simulex 등 피난 시뮬레이션 툴이 피난 요구시간(RSET)를 구해내는데 있어서 근거로 사용되고 있는 공학적인 데이터와 수식을 이해함으로써 보다 효율적으로 외산 소프트웨어를 국내 기준에 맞게 적용할 수 있는 안목을 기르는데 목적을 두었다.

감사의 글

본 연구는 2010년 일등고시학원 원내 카페(<http://cafe.daum.net/fppe2>) 연구비 지원 사업으로서, 한국소방 성능위주설계 원천기술 개발의 일환으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 학원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이종영, 백육선, “성능위주소방설계의 법적문제 및 개선 방안,” 한국화재소방학회 논문지, vol.24, no.1, pp. 54~63, 2010년 2월.
2. 박동하, “성능위주설계를 위한 화재감지기배치의 공학적 연구,” 한국화재소방학회 논문지, vol. 24, no. 1, pp. 15~23, 2010년 2월.
3. 박창복외 6인, “A 호텔 & 카지노 아트리움의 화재 및 피난 시뮬레이션을 통한 성능위주설계 사례 연구,” 한국화재소방학회 논문지, vol. 23, no. 2, pp. 13~19, 2009년 4월.
4. Ron Cote, Gregory E. Harrington, "Life Safety Code Handbook, 10th Edition," NFPA, pp. 55~90, 2006
5. Jeffrey S. Tubbs, Brian J. Meacham, "Egress Design Solution: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning, Arub,", John Wiley, pp. 265~330, 2007
6. DiNunno, P. J., "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition," SFPE and NFPA, 3-342~3-380, 2002
7. Daniel O' Connor, “Engineering Guide to Human Behavior in Fire,” SFPE, pp. 11~39, 2003
8. Jim, Amy, "Fire Science and Human Behavior," SFPE, pp. 20~39, 2008
9. Cote. E. "The NFPA Fire Protection Handbook, 20th Edition," NFPA, vol. 1, pp. 4-59, 2008