



인간의 체력을 반영한 초고층 빌딩 대피 시뮬레이션

High-Rise Building Evacuation Simulation Based on Physical Stamina of Evacuees

권순조* · 김현철** · 황태환*** · 이재민****

Kwon, Soonjo* , Kim, Hyuncheol** , Hwang, Taehwan*** , and Lee, Jaemin****

Abstract

Currently, high-rise buildings are being continuously constructed, and thus, it is necessary to predict evacuation safety in advance in case of emergency situations in high-rise buildings. However, current studies focus only on the movement of individuals in evacuation situations for predicting the final evacuation time. Therefore, in this study, a simulation of realistic evacuation in high-rise buildings was performed based on characteristics such as the physical stamina of evacuees. The evacuation simulation was performed on the world's tallest high-rise building, Burj Khalifa, and comparative verification was performed with and without consideration of the physical stamina of evacuees. The results of the simulation indicated that the total evacuation time significantly increases when physical stamina is considered. Hence, realistic evacuation in high-rise buildings is possible when the stamina of evacuees is considered.

Key words : Agent-based, Crowd Evacuation Simulation, High-rise Building, Human Physical Stamina

요 지

도시 구조의 고도화 및 인구 집중화로 인하여 초고층 건물이 지속적으로 건설되고 있고 초고층 건물에 비상 상황 발생 시 대피 안전성을 사전에 예측해야하는 필요성 증대되고 있다. 그러나 현재 국내외의 연구에서는 대피 상황에서의 인간의 이동에만 초점을 맞추어 최종 대피시간을 예측하고 있다. 따라서 본 연구에서는 현실적인 초고층 대피 시뮬레이션을 위하여 대피자의 체력 감소와 같은 인간 특성이 반영된 대피 시뮬레이션을 제안하고자 한다. 대피 시뮬레이션은 세계 최고의 초고층 건물인 Burj Khalifa을 대상으로 수행하였으며 체력 감소를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 비교 검증을 수행하였다. 시뮬레이션을 수행한 결과 체력 감소를 고려한 경우에 체력 감소를 고려하지 않은 경우보다 총 대피 시간이 현저하게 증가함이 확인되었다. 인간의 체력 감소를 초고층 건물 대피 시뮬레이션에 적용하면 현실적인 대피 예측이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 에이전트 기반, 군중 대피 시뮬레이션, 초고층빌딩, 인간 체력

1. 서 론

20세기 미국 경제의 성장과 건축술의 비약적 발전을 통해 현대 초고층 건물의 역사가 시작되었다. 이 무렵 준공된 엠파이어 스테이트 빌딩은 여전히 뉴욕의 상징이다. 우리나라

에서는 80년대 이후 초고층 건물이 지어지기 시작했고, 2021년 현재 200 m 이상의 건물이 약 70여 개 존재하며 많은 초고층 건물이 건축 중이거나 계획 중에 있다.

국내 초고층채난관리법에 따르면 초고층 건축물이란 층 수가 50층 이상 또는 높이가 200미터 이상인 건축물을 말한

*정회원, 금오공과대학교 기계시스템공학과 조교수(E-mail: soonjo.kwon@kumoh.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**주식회사 아이캡틴 대표(E-mail: ceo@icaptain.kr)

CEO, i CAPTAIN

***전남대학교 조선해양공학과 학사과정(E-mail: ghkxoghks@naver.com)

Undergraduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University

****교신저자, 정회원, 전남대학교 조선해양공학과 조교수(Tel: +82-61-659-7151, Fax: +82-61-659-7159, E-mail: jae27v@jnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University

다. CTBUH (2021)에서는 15층 이상의 규모를 고층형빌딩, 40-60층 규모를 매머드 빌딩, 100층 이상의 규모를 하이퍼 빌딩, 150층 이상의 규모의 초고층 건축물을 극초고층 빌딩으로 분류하고 있다. 세계 제일의 극초고층 건물인 Burj Khalifa는 163층, 828 m의 높이를 자랑한다.

세계적으로 초고층 건축물의 수가 급격히 늘어나고 있으므로 건물 화재 등의 재난 발생 시 인간의 대피 상황을 고려하여 건축물을 설계하는 것은 매우 중요하다(Back and Shin, 2010).

2018년 4월 건축법 제64조에 의해 고층 건축물에 설치하는 승용 승강기 중의 1대 이상을 일정한 성능을 가진 피난용 엘리베이터로 설치하도록 의무화되어, 재난 시 엘리베이터를 이용한 피난 방법이 제시되기 시작하였다. 123층 높이의 국내 초고층 건축물 롯데월드타워에서는 5개의 피난층(102층, 83층, 60층, 42층, 22층)이 있으며 미국 IBC코드 기준에 따라 59대의 승용 엘리베이터 중 19대가 피난용 엘리베이터로 겸용하여 사용할 수 있도록 설계되어 있다.

초고층 건물에서 피난용 엘리베이터 사용을 통해 피난 소요시간을 줄이고자 하는 노력이 이루어지고 있으나, 여전히 대피 상황에서 계단보행피난 비율이 50% 이상으로 예상된다. 따라서 계단보행피난에 대한 보다 정확한 시간 예측이 필수적이다(Park and Lee, 2018). 초고층 건축물의 경우 가까운 피난층으로 이동하기 위해 계단을 통해 아래에서 위로 대피해야 하는 경우도 발생할 수 있다(Park, 2011).

대부분의 대피 시뮬레이션에서 피난자는 미리 정해진 경로를 통해 이동하며 피난자의 보행속도는 일정하다고 가정한다. 또한, 피난자의 흐름을 저해하는 병목의 위치 및 원인을 찾는 것도 중요하다. 롯데월드타워의 경우 각 재실층에서 피난안전구역까지 23개 층을 7-8분 시간 내 대피가 가능하도록 설치 간격이 고려되었는데(Ko and Yi, 2018), 이 또한 인간의 보행속도가 일정하다고 가정하여 산출된 것이므로 현실적이지 않다.

통상적인 대피 상황에서 피난자가 위 또는 아래 방향으로 이동하며 신체적 피로를 경험하게 되며(Egan, 1986), 피로 누적으로 인해 이동 속도가 감소하고 이로 인해 병목현상이 증대될 것으로 예상된다(Pauls, 1987). 하지만 이러한 영향을 대피 시뮬레이션에 반영한 기존 연구 사례가 없었다.

본 연구에서는 더 현실적인 대피 시간 예측을 위해 대피 시뮬레이션 수행 시 피난자가 느낄 신체적 피로를 고려한 이동 속도 변화를 고려한다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서 초고층 건물 대피 및 보행자 특징 모델에 관한 기존 연구를 분석한다. 3장에서는 피난자의 체력과 이동 속도 간의 상관관계를 고려한 알고리즘을 적용하여 문헌 조사의 실험 내용과 비교 검토하여 그 유효성을 검증한다. 4장에서는 세계 최고의 초고층 건물인 Burj Khalifa를 모델링한 후 제안하는 알고리즘을 적용하기 전, 후 상황에 대해 시뮬레이션을 수행하고

결과를 비교한다. 마지막 5장에서 연구를 요약하고 향후 연구를 소개한다.

2. 관련 연구

2.1 초고층 건물 대피 실험 및 시뮬레이션

초고층 건물의 수가 기하급수적으로 늘어남에 따라 초고층 건물의 재난 발생 상황과 사람들의 대피 특성을 정확히 예측하고 이를 건물의 설계에 반영하기 위한 연구들이 수행됐다.

Joung and Yoon (2015)은 고층 건물에서 반복된 3번의 대피 훈련을 시행하고, 영상분석을 통해 피난 결과를 분석했다. 그 결과 수직 보행속도의 향상보다는 피난지연시간의 단축이 중요하며, 총 피난시간을 단축하기 위한 단계적 피난 절차 수립의 중요성을 보였다.

Back and Shin (2010)은 초고층 건물에서 화재 발생시 비상계단을 이용한 피난의 유형을 6가지로 정하고 각각의 유형별 실증실험을 실시하였다. 실험참가자들은 공통적으로 계단의 폭이 좁아 피난이 힘든 점, 유도등이 시야에 들어오지 않는 점, 안전공간이 필요하다는 점 등을 지적하였다.

Ko and Yi (2018)은 초고층 건물에서의 모의실험 및 설문 조사를 바탕으로 초고층 건축물의 피난대책 가이드라인을 제시했다. 그러나 훈련이라는 가정하에 진행되었기 때문에 심리적 동요가 완화된 측면이 있어 실제 피난 행동과 차이가 있었다.

Ma et al. (2012)은 101층에 달하는 상하이 세계금융센터에서 177명의 피실험자를 대상으로 대피 실험을 시행한 결과 사람들이 모여있는 밀도가 이동 속도에 큰 영향을 미침을 보였다.

이처럼 재난 상황 발생 시 대피 특성을 파악하기 위한 대피 실험 관련 연구들이 다양하게 수행되었다. 그러나 대피 실험이 수행된 건물들은 매우 한정적이며 분석된 대피 특성이 타 건물에 일관되게 적용되기 어렵다는 한계점이 있다.

이를 대체하기 위해서는 정확도가 높은 대피 시뮬레이션 연구가 수행되어야 하는데 시뮬레이션 연구에서는 실제 사람들의 대피 특성을 완벽하게 반영하기에는 현실적으로 여러 가지 한계점들이 존재한다.

2.2 초고층 빌딩 대피 상황에서 인간 보행 특성

일반적으로 보행 거리와 보행 속도가 반비례한다는 것은 잘 알려진 사실이며 이는 대피 시에도 예외일 수 없다. 특히 초고층 빌딩에서는 보통의 경우보다 절대적 대피 거리가 커지므로, 이로 인한 보행 속도 감소의 영향은 더욱 커질 것이다.

Denny (2008)은 피로에 의한 이동 속도 감소율을 얻기 위한 실험을 수행했다. 실험 결과 건강한 사람이 1.5 km 이상 걷게 되면 원래 속도의 65% 수준으로 감소함을 보였다.

하지만 이때 계단 보행을 가정하지 않았다.

Choi et al. (2014)은 대피 상황에서 60명의 사람들이 고층 건물을 오르내리는 속도를 수집하고 분석하였다. 그 결과 계단을 내려갈 때는 약 절반의 사람들이 10% 이내의 속도 감소를 보였고, 계단을 오를 때는 모든 사람들이 약 60% 정도 속도 감소를 보임을 알 수 있었다.

2001년 9월 11일 세계무역센터 테러 사건의 생존자 중 많은 수가 대피 도중 신체적 피로 때문에 적어도 한번은 멈추었다고 답변한 바가 있다(Galea et al., 2010). 또 다른 초고층 건물에서의 대피 실증실험 결과에 따르면 대피자들이 층수를 신경 쓰면서부터 이동 속도가 현저히 감소하였다고 한다(Back and Shin, 2010).

Ronchi et al. (2016)은 계단보행피난 상황에서 보행자의 움직임에 정확히 표현하기 위해 신체적 피로, 생리학적 요소, 인지된 위험 요소를 고려하여 개념적인 fatigue-motivation 모델을 제안하였으나 실험을 통해 모델의 유효성을 입증하지 못했다.

Koo et al. (2014)은 이동 거리 증가에 따른 체력 저하에 의한 이동 속도 감소율 및 패닉 상태 유무를 반영하기 위한 수리적 모델을 제시하고, 이를 고층 빌딩 대피 시뮬레이션에 적용하였다. 그러나 초고층 빌딩에 적용하지 못한 한계가 있다.

기존의 실험들을 통해 대피 상황에서 대피 거리가 길어짐에 따라 보행자들의 속도가 서서히 감소함이 충분히 입증되었으나, 이를 초고층 건물의 대피 시뮬레이션에 적용한 사례는 없었다.

3. 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율 유효성 검증

3.1 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율

2.2장에서 기술한 바와 같이 초고층 빌딩 대피 상황에서 인간 보행의 특성에 대한 다양한 연구가 수행되었으며 대피 거리 증가에 따른 보행자의 속도 감소도 실험적으로 입증되었다. 초고층 건물의 대피 상황에서 보행자의 속도 감소는 피로도 와 같은 체력적인 요인 뿐만 아니라 심리적 요인

Table 1. Reduction of Evacuation Speed According to Travel Distances (Koo et al., 2014)

Distance (A to B) [m]		Ratio [(%)
A	B	
0	100	100.00
101	200	99.85
201	400	89.42
401	800	75.80
801	1,500	69.82
1,501	3,000	65.72

및 외부 환경 등이 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있다(Ronchi et al., 2016).

이번 연구에서는 체력적 요인의 반영 유무가 총 대피 시간에 미치는 영향을 파악하기 위하여 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 적용하였다. 장거리 달리기 코스에서 주자의 달리기 속도 추이를 조사한 Denny (2008)의 연구를 토대로 추정된 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율은 Table 1과 같다(Koo et al., 2014). Table 1의 체력 감소 알고리즘은 주행 거리를 기반으로 피로가 누적되지 않았을 때의 최대 속도 대비 감소율을 나타낸다.

3.2 유효성 검증

개인별 성별, 연령, 키, 몸무게 등의 다양한 신체적 영향으로 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 일관되게 적용하기는 대단히 어려운 문제이다. 특히 실제 대피 상황에서는 3.1절에서 언급한 바와 같이 체력적 요인뿐만 아니라 다양한 요인이 복합적으로 영향을 주기 때문에 기타 외부 요인의 영향을 배제된 실험 사례에 대한 비교 검증이 필요하다. 따라서 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율의 검증을 위하여 Choi et al. (2014)의 실험 결과와 비교 검증을 수행하였다.

Choi et al. (2014)의 실험은 오직 체력 감소 영향만을 보기 위하여 평균 연령 23.4세, 한국인 남녀 각각 30명을 대상으로 50층 주거용 건물에 실험을 수행하였다. 각 참가자는 개별적으로 계단을 이용하여 50층을 오르고 적절한 휴식을 취한 뒤 다시 50층을 내려가는 방식으로 실험이 수행되었다. 실험 결과 남성의 경우 50층에서 1층까지 하강 시간은 평균 468초(7.8분)으로 320초에서 593초의 분포를 보였으며 여성의 경우 평균 508초(8.5분)으로 397초에서 571초의 분포를 보였다. 계단의 경사, 높이 및 이동 경로 등을 고려하여 층간 평균 이동 거리 기준은 7.51 m로 총 49층을 하강하였다. 전체 실험자들의 평균 하강 시간 기준으로 계산된 남녀 각각의 평균 하강 속도는 Table 2와 같다.

또한 Choi et al. (2014)은 층별 도착시간을 비디오 카메라를 활용한 층별 기록을 통해 층별 보행 속도 및 피로가 하강/상승에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 개인의 계단 하강 속도는 층마다 다르며, 경우에 따라 각 층을 이동하면서 무작위로 속도 증가하거나 감소하는 경우도 있는 것으로 파악되었다. 층별로 분석한 실험 결과만으로는 피로가 보행 속도에 영향을 미칠 수 있는지 여부를 판단하기 어려워

Table 2. Average Descent Walk Speeds Derived from Travel Time and Distance (Choi et al., 2014)

Category	Male	Female
Average stair travel time (sec)	468	508
Average stair travel distance (m)	368	368
Average descent walk speeds (m/s)	0.79	0.72

Table 3. Average Descent Walk Speeds Derived from Each Floor's Recorded Data Using Video Cameras (Choi et al., 2014)

Category	Male	Female
First half (50th~25th floor) average descent walk Speeds (m/s)	0.83	0.74
Last half (25th~1st floor) average descent walk Speeds (m/s)	0.81	0.74

Choi et al. (2014)은 초반 25개 층의 하강 속도와 후반 25개 층의 하강 속도를 비교 분석하였다. 하강하는 동안 전체 실험자의 50%에 해당하는 인원이 마지막 25개 층에서 보행 속도가 감소했고 최대 감소치는 약 19% 이었으나 나머지 50%는 이동 속도가 증가하였다. 전체 실험자들의 층별 도착 시간 분석을 기준으로 계산된 남녀 각각의 평균 속도는 Table 3과 같다. Table 2와 Table 3에서 보인 평균 속도의 차이는 측정 방식의 차이로 인해 기인한 것으로 파악된다.

Table 3에서 분석된 바에 따르면, Choi et al. (2014)의 실험 연구에서는 층별 평균 보행 속도를 비교 시 보행 거리 증가에 따른 미비한 속도 감소 경향을 보였다. 이는 실험 대상자들의 평균 연령이 23.4세로 젊으며 표본이 총 60명 밖에 되지 않아서 50층의 높이에서 피로로 인한 체력 감소 효과가 크지 않음을 시사한다고 볼 수 있다. 그러나 Choi et al. (2014)의 실험 조건보다 2배 높은 101층 건물에서 대피 실험을 수행한 Ma et al. (2012)의 연구 결과와 Choi et al. (2014)의 연구 결과를 비교하면 보행 거리 증가에 따른 보행 속도 감소는 유의미하게 발생하는 것을 알 수 있다. Choi et al. (2014)에 따르면, 해당 연구에서 관측된 최고 보행 시간이 Ma et al. (2012)의 연구에서 100층을 하강 시 관측된 보행 시간보다 같은 거리 기준 적용 시 약 35%가 짧은 것으로 분석되었다. 즉, 거리가 충분히 길어지면 이에 따른 평균 보행 속도가 감소한다는 가정을 실제 실험을 통해 유효성을 검증한 사례이다.

따라서 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율의 유효성 검증을 위하여 실제 실험 결과와의 비교 검증을 수행하였다. 먼저 체력 감소가 이뤄지지 않은 초기 속도는 Table 3에 기술된 초반 25층 평균 보행 속도를 기준으로 적용하여 보행 거리에 따른 남녀 별 보행 속도를 산정하였다(Table 4). 이를 토대로 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 적용 시 Table 2에 기술된 실제 평균 보행 시간 값과 비교 검증을 수행하였다(Table 5).

주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 적용하여 실제 실험을 통해 측정된 대피 시간과 비교 시 실제 실험 대비 남성의 경우 0.1%, 여성의 경우 3.5%의 오차를 보였다. 전체 평균 보행 시간 기준으로 보았을 때는 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율이 합리적으로 실제 실험 결과와 유사하다. 비교 검증을 1가지 실험 사례에 대해서만 수행하

Table 4. Reduction of Evacuation Speed According to Travel Distances (Koo et al., 2014)

Distance (A to B) [m]		Ratio	Male	Female
A	B	[(%)]	(m/s)	(m/s)
0	100	100.00	0.830	0.740
100	200	99.85	0.829	0.739
200	400	89.42	0.741	0.661
400	800	75.80	0.562	0.501
800	1,500	69.82	0.392	0.350
1,500	3,000	65.72	0.258	0.230

Table 5. Estimated Stair Travel Time by Applying Reduction of Evacuation Speed Algorithm

Category	Male (m/s)	Female (m/s)
Initial descent walk Speeds (m/s)	0.83	0.74
Estimated stair travel time (sec)	468.5	525.5
Average stair travel time by experiment (sec)	468	508
Error (%)	0.11	3.44

여 체력 감소 알고리즘이 모든 경우에 대해서 타당하게 만족한다고 주장하기는 어렵다. 하지만 다른 요인들을 배제하고 체력 감소만을 고려한 실험 사례가 매우 희귀한 것을 반영할 때 Table 1에 기술된 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율은 대피 시뮬레이션에 적용하기에 충분히 합리적인 것으로 확인된다.

4. 대피 시뮬레이션

4.1 대피 시뮬레이션 모델, 계획 및 구성

본 연구의 목적은 초고층 건물의 대피 시뮬레이션 수행 시 체력 감소의 영향이 실제 총 대피 시간에 유의미한 영향을 주는지 분석함에 있다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 단순화된 초고층 건물의 모델을 구성하고 체력 감소를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우인 2가지 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하여 총 대피 시간에 얼마만큼의 유의미한 영향을 주는지 확인하고자 한다.

대피 시뮬레이션 모델은 국내 대피 관련 연구 논문에서는 거의 다뤄지지 않았던 세계 1위 초고층 빌딩 브루즈 할리파(Burj Khalifa)를 모델로 선정하여 대피 시뮬레이션을 수행하였다. 브루즈 할리파(Burj Khalifa)는 최고층인 163층의 높이는 첩탑을 제외하면 621 m에 달하며 거대한 나선형 모양의 건물로 설계되었으며 각각 별개의 평면 구조를 갖는 Tier Base와 Tier 0~Tier 17으로 구성되어 있다(Fig. 1).

각 Tier 별 평면도를 기반으로 모델을 구성하였고 층별

높이는 각각 3.2 m에서 4.8 m로 모델링을 수행하였다. 계단 모델링은 ICC (2006)과 NIST (2014) 기준에 의거하여 계단의 유효 폭은 1,250 mm, 계단 높이는 175 mm 그리고 계단의 너비는 260 mm로 가정하여 모델링하였으며 본 시뮬레이션에서 문은 고려하지 않았다. Tier Base와 Tier 0부터 Tier 4까지 총 3개, Tier 5부터 Tier 10까지는 2개 그리고 Tier 11부터 Tier 17까지는 총 1개의 피난 계단을 고려하였다.

시뮬레이션 계획 관련해서는, 별도의 피난층은 고려하지 않았으며 대피시설(Shelter In place, SIP)는 1층의 출입구

3군데로 지정하였다. 시뮬레이션 인원은 1,000명을 고려하였으며, 해당 인원은 1층에서 163층까지 무작위로 배치를 하였으며 SIP 도착 기준으로 각각 인원내 대한 대피 시간을 측정하였다. 시뮬레이션 소프트웨어는 C#으로 개발되었으며 재실자(승객) 형상 및 모션은 MAIXAMO Engine을 적용하였고 가시화는 유니티 환경에서 구현 되었다. 탈출 시뮬레이션에 적용되는 input은 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 승객 탈출 분석 지침(MSC.1/Circ.1533)에 의거한 성별, 연령별 개인 특성 및 군중 특성을 반영하였

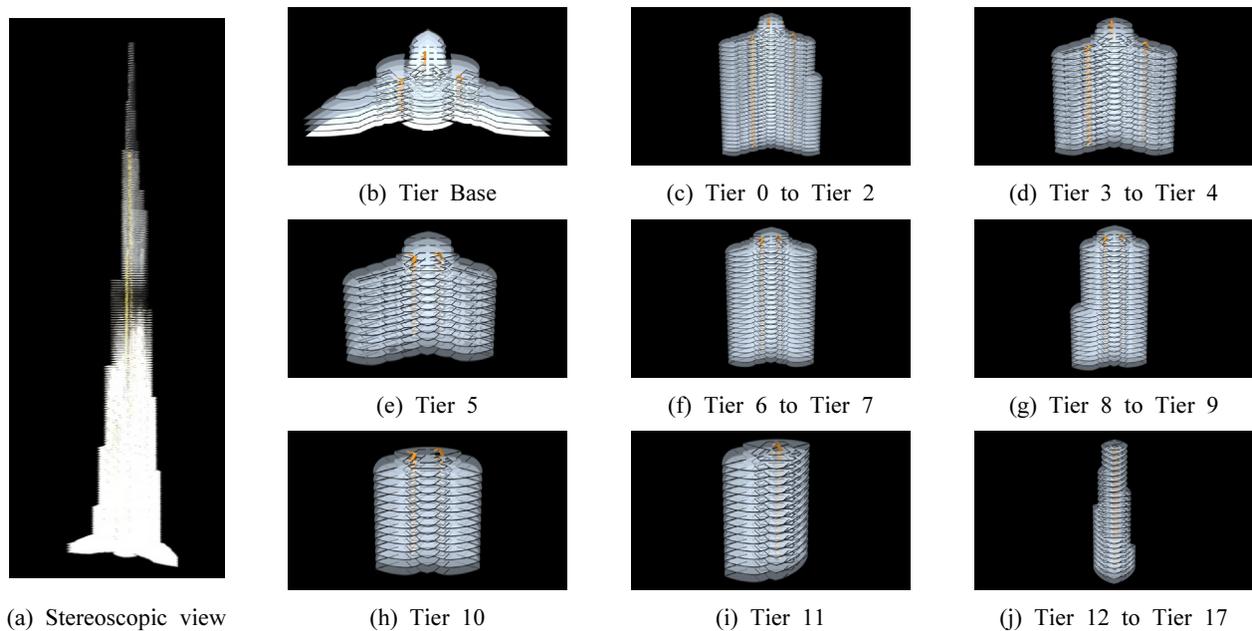


Fig. 1. Simplified Burj Khalifa Model

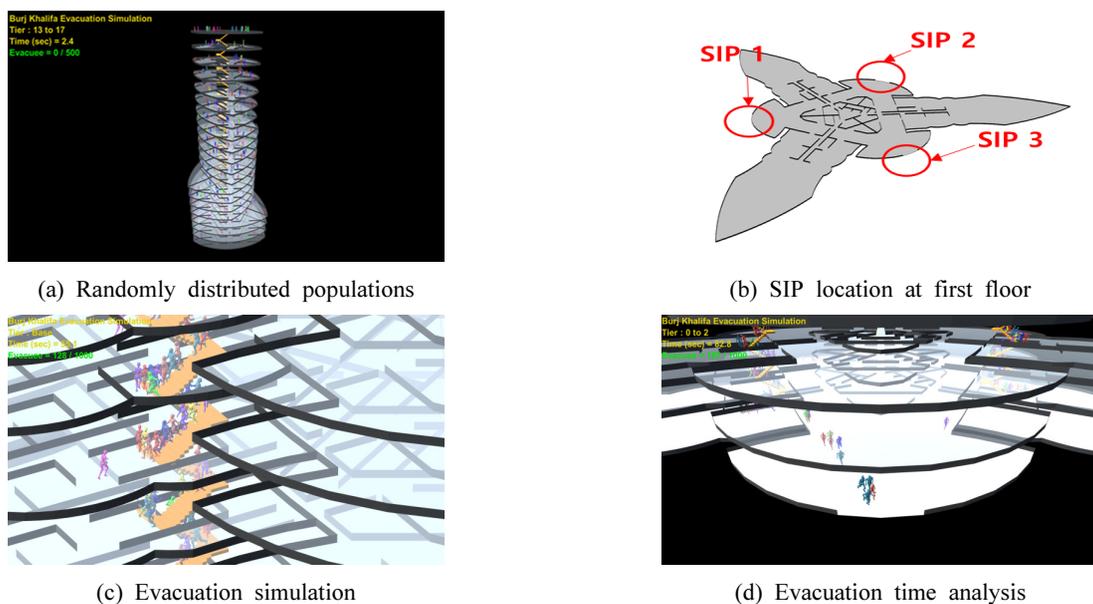


Fig. 2. Schematic of Evacuation Simulation

Table 6. Population's Composition and Walking Speed

Category	Percentage of passengers (%)	Walking speed on stairs (m/s)
Females younger than 30 years	7	0.77
Females 30-50 years old	7	0.65
Females older than 50 years	16	0.60
Females older than 50 years, mobility impaired	20	0.39
Males younger than 30 years	7	1.01
Males 30-50 years old	7	0.86
Males older than 50 years	16	0.67
Males older than 50 years, mobility impaired	20	0.44

Table 7. Scenario Chart

Scenario	Population (person)	Characteristics	Evacuation time (s)			
			Min	Average	Median	Max
1	1,000	Evacuation speed reduction Algorithm considered	5.2	1,083.4	289.6	4,508.8
2		Evacuation speed reduction Algorithm not Considered	5.7	735.6	284.6	3,149.8

다. 이를 통해 확인하고자 하는 output은 재실자의 탈출 소요 시간 및 병목 현상의 확인이다. 시뮬레이션 수행 관련 개략도는 Fig 2와 같다. 인구별 연령대와 성별 구성과 각각의 보행 속도 그리고 인구 밀도에 따른 보행 속도 상세는 Table 6과 같다.

4.2 대피 시뮬레이션 수행 및 분석

본 연구에서 고려한 대피 시뮬레이션의 Scenario는 3.1장에서 소개한 체력 감소 알고리즘을 적용한 경우(Scenario 1)와 적용하지 않은 경우(Scenario 2)로 총 2가지이며 대피 시뮬레이션 수행 분석 결과는 Table 7과 같다. 먼저 최소 대피 시간을 비교하여 보면, Scenario 1과 Scenario 2의 경우 각각 5.2초와 5.7초로 거의 차이가 없다. 이는, 1,000명을 인원을 1층에서부터 163층까지 무작위로 배치하였기 때문에 1층의 SIP 근처에 배치된 인원의 대피 시간으로 파악된다.

또한, 1,000명의 시뮬레이션 인원 중 절반에 해당되는 500명의 인원의 대피 시간에 해당되는 중위값을 비교해보면 각각 289.6초와 284.4초로 2가지 Scenario의 결과 값이 유사하다. 이는 시뮬레이션 모델에서 500명의 인원까지는 체력 감소로 인한 보행 속도가 반영되더라도 실제 총 대피 시간에 유의미한 영향을 미치지 않는다는 의미이다. 무작위로 배치된 인원들 중 주행거리 기반 최대 속도 대비율을 반영하여도 속도 차이가 10% 이내로 나는 0 m~400 m 구간 사이에 전체 인원의 50% 정도가 배치되었기 때문에 중위값의 경우에는 2가지 시나리오의 결과가 유의미한 차이를 보이지 않는 것으로 파악된다. 그러나 1,000명의 시뮬레이션 인원 모두가 대피한 시간에 해당되는 최대 대피 시간을 비교해보면 각각

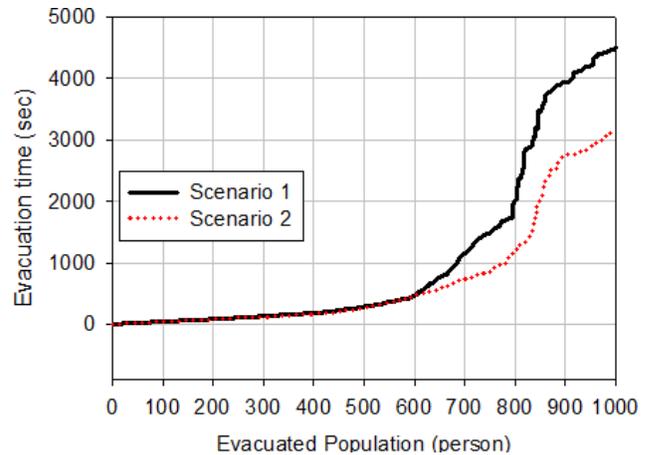


Fig. 3. Total Evacuation Time Comparison

4,508.8초와 3,149.4초로 Scenario 2에 비하여 Scenario 1의 총 대피 시간이 약 40% 이상(22.5분) 증가 되었다(Fig. 3).

층간 평균 보행 거리를 대략적으로 8.0 m로 계산을 하였을 때, 꼭대기 층인 163층에서 1층까지의 총 보행거리는 대략 1,300 m로 계산된다. 시뮬레이션에 고려한 인구별 속도 중 가장 낮은 속도를 갖는 장애가 있는 50세 여성 속도인 0.39 m/s에 속도 감소 알고리즘을 적용하여 총 보행 시간을 계산해보면 4,299.6초로 계산되며 속도 감소를 적용하지 않은 경우 총 보행 시간은 3,343.6초로 계산된다.

이는 Table 6에서 계산된 시뮬레이션 결과와 5% 내외의 오차를 보이는 결과이므로, 병목 현상과 같은 대기 행렬에 의한 효과는 미비한 것으로 해석된다. 따라서 해당 시뮬레이

선 모델에서는 각 시나리오 간의 총 대피 시간의 차이는 체력 감소 알고리즘 적용에 의한 영향이 크며 인구 밀도에 따른 보행 속도 감소 영향은 거의 없는 것으로 파악된다.

5. 결론

본 연구에서는 현실적인 초고층 대피 시뮬레이션을 위하여 대피자의 체력 감소와 같은 인간 특성이 반영된 대피 시뮬레이션을 제안하였다. 기존 연구의 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 적용하여 문헌 조사의 실험 내용과 비교 검토하여 그 유효성을 검증하였다. 대피 시뮬레이션 적용 모델은 세계 1위의 초고층 건물인 브루즈 할리파(Burj Khalifa)를 선정하였다. 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 적용하였을 때와 하지 않았을 경우에 대해서 대피 시뮬레이션을 비교 분석하였고 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 연구의 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 문헌 조사의 실험 내용과 비교하여 그 유효성을 검증하였다. 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 적용한 경우와 실험 연구(Choi et al., 2014)에서 수행한 실험과 총 대피 시간을 비교하였을 때는 합리적인 결과를 보였다.
- 2) 주행거리 기반 최대 속도 대비 감소율을 적용한 Scenario와 속도 알고리즘을 적용하지 않은 Scenario에 대해서 최소 대피 시간은 각각 5.2초와 5.7초, 500명의 대피 시간은 각각 289.6초와 284.6초 그리고 마지막으로 총 대피 시간은 4,508.8초와 3,149.4초로 예측되었다.
- 3) 총 인원은 절반에 해당되는 500명 대피 시에는 2가지 시나리오의 총 대피 시간이 거의 차이를 보이지 않았으나, 1,000명의 인원의 대피 시간은 속도 감소 알고리즘을 적용하였을 경우 그렇지 않은 경우보다 총 대피 시간이 40% 이상 증가되었다.
- 4) 이는 대피 거리 증가에 따른 속도 감소로 인하여, 전체 대피 시간이 늘어난 것으로 파악되며, 본 연구에서 고려한 모델에서는 인구 밀도에 따른 보행 속도 감소 영향은 거의 없는 것으로 파악된다.

본 연구를 통해서 초고층 건물에서 대피 시에는 보행 거리에 따른 속도 감소가 전체 대피 시간에 굉장히 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 보다 현실적인 초고층 건물의 대피 시뮬레이션이 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 브루즈 할리파(Burj Khalifa)를 대상으로 1,000명의 인원만을 고려하여 시뮬레이션을 하였기 때문에 인구 밀도 및 대기 행렬에 의한 영향은 미비 하였다. 그러나, 본 연구는 국내 대피 연구 중 세계 최고층 건물인 Burj Khalifa를 대상으로 체력 감소를 반영하여 대피 시뮬레이션을 수행한 첫 사례로 그 독창성을 가지며 해당 모델에서 체력 감소의 영향이 총 대피 시간에 지배적인 영향을 준다는 것을 확인하였다. 이러한 체력 감소 여부가 대피 시뮬레이션

에 면밀하게 반영이 된다면 대피 시뮬레이션을 통한 국내 초고층 건물 설계의 피난층 배치 검토에 유효하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 시뮬레이션 인구를 추가 고려하여 인구 밀도, 대기 행렬에 대한 영향을 파악할 예정이다. 또한 장애가 있는 인원 고려, 화재 등의 비상 상황에 따른 요인 고려 등 추가적인 요소들을 면밀하게 반영할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-현장맞춤형 이공계 인재양성 지원사업의 연구비지원(No. 2019H1D8A1109673)에 의해 수행되었습니다.

References

- Back, M., and Shin, H. (2010). A study on the emergency stairway evacuation of skyscraper. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 55-61.
- Choi, J.H., Galea, E.R., and Hong, W.H. (2014). Individual stair ascent and descent walk speeds measured in a Korean high-rise building. *Fire Technology*, Vol. 50, No. 2, pp. 267-295.
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). (2021). *TALL BUILDING CRITERIA*. Retrieved Jun 10, 2021, from <https://www.ctbuh.org/resource/height>
- Denny, M.W. (2008). Limits to running speed in dogs, horses and humans. *Journal of Experimental Biology*, Vol. 211, No. 24, pp. 3836-3849.
- Egan, M.D. (1986). *Concepts in building fire safety*. Robert Krieger Publishing Co.
- Galea, E.R., Hulse, L., Day, R., Siddiqui, A., Sharp, G., Boyce, K., et al. (2010). The UK WTC9/11 evacuation study: An overview of the methodologies employed and some preliminary analysis. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, pp. 3-24.
- International Code Council (ICC). (2006). *International building code*, pp. 212-213.
- Joung, S., and Yoon, M. (2015). Vertical evacuation speed in stairwell of a high-rise office building. *Fire Sci. Eng.*, Vol. 29, No. 3, pp. 13-20.
- Ko, S., and Yi, W. (2018). A study on guidelines of evacuation planning for high-rise buildings through simulation and survey analysis. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 1, pp. 35-46.
- Koo, J., Kim, B.I., and Kim, Y.S. (2014). Estimating the

- effects of mental disorientation and physical fatigue in a semi-panic evacuation. *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 5, pp. 2379-2390.
- Ma, J., Song, W.G., Tian, W., Lo, S.M., and Liao, G.X. (2012). Experimental study on an ultra high-rise building evacuation in China. *Safety Science*, Vol. 50, No. 8, pp. 1665-1674.
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2014). *Movement on stairs during building evacuations*. NIST Technical Note 1839. Gaithersburg, MD, USA, p. 34.
- Park, H., and Lee, Y. (2018). Study on the shortening effect of the egress travel time based on an escape scenarios by using shuttle elevators for lotte tall building's evacuation plan. *Fire Sci. Eng.*, Vol. 32, No. 6, pp. 46-54.
- Park, J. (2011). A study on the character and walking velocity of crowd going up stairs. *Fire Sci. Eng.*, Vol. 25, No. 1, pp. 72-77.
- Pauls, J. (1987). Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Saf. J.*, Vol. 12, pp. 213-236.
- Ronchi, E., Reneke, P.A., and Peacock, R.D. (2016). A conceptual fatigue-motivation model to represent pedestrian movement during stair evacuation. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 40, No. 7-8, pp. 4380-4396.

Received	July 13, 2021
Revised	July 14, 2021
Accepted	September 8, 2021