피난 시뮬레이션을 통한 아파트 피난 안전성 및 소요시간에 관한 연구

Evacuation Safety and Time in Apartment using Egress Simulation

이재훈* · 원천봉** · 최진석*** · 윤영수****

Lee, Jaehoon* · Yuan, Tian-Feng** · Choi, Jin-Seok*** · Yoon, Youngsoo****

Abstract

The special act for the management of disasters in super high-rise buildings and complex buildings with underground connections included the installation of a certain area of evacuation safety layer within 30 floors for high-rise buildings. However, for high-rise buildings with 30 stories or less, there is no separate regulation for evacuation safety floors. For high-rise apartments with less than 30 stories that do not have regulations for evacuation safety floors, an underground parking lot can be designated as a refuge shelter-in-place (SIP). This study aims to provide an optimal evacuation plan for evacuation simulations in high-rise apartments. This plan will ensure that the occupants are safely evacuated to the refuge SIP within a minimum timeframe. Evacuation simulations are conducted to establish an optimum evacuation plan. This is because there could be delays in the evacuation time as well as human casualties when evacuating to a SIP using stairs for the elderly and the disabled. Therefore, the elderly and the disabled use elevators to evacuate. The scenarios in this study were simulated on the basis of the number of occupants, the speed of the elevator, the number of evacuation stairs as SIP escape routes, and whether the elevator was used.

Key words : SIP (Shelter In Place), Evacuation, Pathfinder, Egress, The Best Location

요 지

초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법이 제정되어 초고층 건축물의 경우 30층 이내마다 일정한 면적의 피난안전 층을 의무적으로 설치하도록 규정하지만, 30층 이하의 고층 건축물의 경우 피난안전 층에 관한 규정이 따로 없다. 피난안전 층에 관한 규정이 없는 30층 이하의 고층 아파트의 경우 지하주차장을 대피 시설(SIP, Shelter In Place)로 지정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고층 아파트로 피난 시뮬레이션을 실행하여 재실자들이 최소한의 시간으로 안전하게 대피시설로 대피하도록 최적의 피난계획을 제시하고자 한다. 피난계획을 수립하기 위해서 피난 시뮬레이션을 진행하는데, 고령자와 장애인의 경우 계단을 이용하여 대피시설로 대피 시 대피 시간의 지연에 따른 인명피해를 초래할 수 있다. 따라서, 고령자와 장애인은 승강기를 이용하여 대피를 진행한다. 본 연구에서 재실자의 인원수, 승강기의 사용 여부, 승강기의 속도 변화와 피난 계단 추가에 따른 SIP 대피 경로 수에 따라 시나리오를 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다.

핵심용어 : 시설물 내 대피시설, 대피, Pathfinder, 피난, 최적 위치

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail: dlwogns1994@korea.ac.kr)

Member, Master's Course, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 미래건설환경융합연구소 연구교수(E-mail: yuantianfeng@korea.ac.kr)

Member, Research Professor, Future and Fusion Lab of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

***정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: radiance@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel : +82-2-3290-3320, Fax : +82-2-3290-5999, E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

1. 서 론

2020년 9월 기준 5층 이상 아파트는 국가통계 포털(KOSIS)에 따르면 138,210채가 준공되어 있으며, 이 중 137,206채가 30층 미만 아파트이다. 하지만 현재 과도한 도심화와 그에 따른 건축물의 고층화와 대형화가 가능하여 30층 이상의 고층 건물이 증가하는 추세다. 이러한 상황에 따라 2012년 3월 초고층 재난관리 특별법이 제정되어 층수 50층 이상, 높이 200 m 이상의 초고층 건물의 경우 30층 이내마다 일정 면적의 피난안전 층 또는 피난안전구역의 의무적으로 설치해야 한다(Park and Lee, 2018; Hyun et al., 2019). 또한, 층수 30-50층, 높이 120-200 m 이상의 준초고층 건축물의 경우 건축물 전체 층수의 2분의 1에 해당하는 층으로부터 상하 5개 층 이내에 1개소 이상 설치하도록 명시되어있다. 초고층과 준고층 건축물의 피난안전구역에 관한 규정은 존재하지만, 30층 미만, 높이 120 m 미만의 고층 건축물의 경우 피난안전 층 또는 피난안전구역에 대한 법적 규제가 없다. 이는 CBRE (Chemical, Biological, Radiological and Explosive) 및 비상 상황 발생 위험성이 존재하는 분단국가인 대한민국에서 고층 건축물에 거주 중인 재실자들이 시설물 내 대피시설(Shelter In Place)로 대피하는 데 큰 어려움을 초래할 것으로 판단된다. 여기서 시설물 내 대피시설(SIP)은 위와 같은 CBRE 및 비상 상황 발생 시 재실자들이 위험으로부터 안전하게 대피하는 장소로 특별한 구조설계기준 없이 60 m² 이상의 면적으로 방송 청취가 가능한 지하 공간으로 규정하고 있다(Kim et al., 2018; Zhao et al., 2019). 따라서 다양한 연령이 거주하거나 일하는 고층 건축물의 경우 시설물 내 대피시설로 피난안전 구역이 따로 지정되어 있지 않다면 지하주차장을 이용할 수 있다. 하지만, 고층 건축물에 재실 중인 재실자들이 지하주차장으로 대피 시 고령자나 장애인의 경우 계단으로 대피가 어렵다. 이러한 상황을 대비해 2018년 건축법 제 64조에서 고층 건축물에 설치되는 승용 승강기 중 1대 이상을 일정 성능을 갖춘 피난용 승강기로 설치하도록 의무화하고 있다.

본 연구에서는 위 내용을 바탕으로 다양한 연령 및 장애 인구가 거주하는 고층 아파트를 모델로 선정하고 피난 시뮬레이션을 진행하고자 한다. 시뮬레이션은 낮 동안에 경제활동 인구를 반영하여 밤과 낮의 상황으로 나눠 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 CBRE 및 비상 상황 발생 시 SIP로 대피 중 이동 경로의 혼잡도를 완화하기 위해 피난 계단 추가에 따른 재실자의 이동 경로 분산, 최적의 SIP 위치선정과 승강기 사용의 필요성에 대해 제시하고자 한다.

본 연구에서는 International Maritime Organization (IMO) 기준을 충족하며, 실제 인간의 움직임을 2D 및 3D로 시각화하여 제공하고 실제 상황과 유사하게 대피 시뮬레이션이 가능한 T사의 Pathfinder를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

2. 피난 시뮬레이션 계획 및 구성

2.1 보행속도

본 연구의 시뮬레이션에서 보행자들의 보행속도는 피난 상황 시 대피 시간에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 하지만 보행속도는 수평 및 수직 방향으로 이동과 키, 몸무게, 다리 길이 등 신체적인 영향에 따라 달라진다. 또한, 성별과 연령에 따라 보행속도가 달라지기 때문에 보행자들의 속도를 정확하게 파악하기는 힘들다. 다음의 연구들은 국내외 보행자들의 이동속도에 관한 것이다.

국내의 경우 Park et al. (2007) 연구에 따르면 다양한 연령의 실험군들은 평행한 실험실에서 보행로의 중앙선을 따라 28 m를 걷는 방식으로 보행속도를 측정했다. 해당 실험에서 각 실험군이 28 m를 걷는데 소요된 시간 및 보폭 수를 3회 측정한 후 SPSS 프로그램을 통해 통계처리를 하여 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Speed on Ages and Gender

Ages	Velocity (m/s)	
	Male	Female
10	1.3	1.4
20-30	1.49	1.35
40-50	1.41	1.41
60	1.61	1.32

국외의 경우 보행자의 다양한 피난 행동 및 특성들을 해석하기 위한 연구들이 많이 진행되고 있다. CFPA Europe (2009)에서는 보행속도를 수평 및 수직 방향으로 나눠서 제시한다. 수평 방향의 경우 보행자가 신체적 결함이 없을 때 인구 밀도가 0.54 persons/m²에서 보행속도를 1.2-1.25 m/s로 규정하며, 인구 밀도가 높아지면 보행속도는 낮아져 인구 밀도 3.8 persons/m²에서 속도는 '0'으로 정한다. 수직 속도의 경우 인구 밀도 0.54 persons/m²에서 0.85-1.1 m/s로 나타내며, 수평 방향에서도 인구 밀도 3.8 persons/m²에서 속도는 '0'으로 정한다. Cabrera et al. (2016)의 연구에서는 60세 이상 고령 인구의 보행속도를 성별에 따라 나눴다. Table 2는 고령의 실험자들의 속도이며, Fig. 1은 인구 밀도에 따른 고령자들의 속도 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

Table 2. Speed of The Elderly (Cabrera et al., 2016)

Range	Mean	Standard	Sample
years	Speed (m/s)	deviation (m/s)	size
60-69	1.15	0.18	120
70-79	1.08	0.2	120
80-90	0.87	0.17	120

Table 3. Result of Meta-Analysis (Bohannon and Andrews, 2011)

Gender	Source articles	Subjects	Gait speed (cm/s)	Grand mean range	Homogeneity Q
Men (20-29)	10	155	135.8 (127.0-144.7)	121.7-147.4	3.255
Men (30-39)	5	83	143.3 (131.6-155.0)	132.0-153.8	1.169
Men (40-49)	4	96	143.4 (135.3-151.4)	127.0-147.0	2.609
Men (50-59)	6	436	143.3 (137.9-148.8)	112.2-149.1	4.721
Men (60-69)	12	941	133.9 (126.6-141.2)	103.3-159.0	15.217
Men (70-79)	18	3671	126.2 (121.0-132.2)	95.7-141.8	12.848
Men (80-99)	10	1091	96.8 (83.4-110.1)	60.8-122.1	4.159
Women (20-29)	11	180	134.1 (123.9-144.3)	108.2-149.9	5.307
Women (30-39)	5	104	133.7 (119.3-148.2)	125.6-141.5	0.785
Women (40-49)	7	142	139.0 (133.9-141.1)	122.0-142.0	5.666
Women (50-59)	10	456	131.3 (122.2-140.5)	110.0-155.5	12.291
Women (60-69)	17	5013	124.1 (118.3-130.0)	97.0-145.0	11.515
Women (70-79)	29	8591	113.2 (107.2-119.2)	83.0-150.0	16.775
Women (80-99)	17	2152	94.2 (85.2-103.4)	55.7-117.0	11.428

Homogeneity Q: the degree to which the effect sizes from contributing studies estimate the same population mean

Fig. 1. Speed of Male and Female Elderly (Cabrera et al., 2016)

Bohannon and Andrews (2011)는 다양한 국적 및 연령의 23,000명 실험군을 대상으로 보행속도를 측정된 41개의 연구 자료를 통합한 연구로 Table 3과 같다. 이를 본 연구의 시뮬레이션 작성 시 보행속도의 기준으로 사용하였다(Kim et al., 2018). 따라서, 본 연구에서는 Table 3에서 각 연령의 보행속도와 Ando et al. (1988)에서 제시한 보행 속도를 적용하였으며, Table 4와 같이 나타내었다.

Table 4. Walking Speed

Age	Male (m/s)	Female (m/s)
0-9	0.670	0.515
10-19	1.501	1.195
20-29	1.358	1.341
30-39	1.433	1.337
40-49	1.434	1.390
50-59	1.433	1.313
60-69	1.339	1.241
70-79	1.262	1.132
80-99	0.968	0.943

2.2 보행자 모드

Pathfinder Manual (Thunderhead Engineering, 2012)에서 Steering Mode, SFPE Mode 2가지 보행자 Behavior Mode를 제공한다. SFPE Mode는 Engineering Guide to Human Behavior in Fire에서 정의한 가정과 수 계산을 사용하기 때문에, 모든 보행자는 서로를 회피하지 않고 투과하게 된다. 따라서, 모든 보행자의 동선이 겹쳐 하나의 동선으로 표시된다. 반면에, Steering Mode에서 모든 보행자는 서로를 인식하고 회피하며 이동한다. 즉, 인간과 유사하게 행동하기 때문에 본 연구에서는 Steering mode를 사용하였다.

2.3 시뮬레이션 인원

2019년 국가통계 포털에 따르면 현재 대한민국의 전체 남성 인구 26,147,926명, 여성 인구 26,359,257명으로 여성 인구가 남성보다 211,331명 더 많다. 이를 연령과 성별에 따라 인구의 비율을 산정하면 Table 5와 같다.

Pathfinder Modeling에서 적용된 인구수는 아파트 모델의 면적에 따라 계산되었다. 아파트는 총 7개 동으로 세대별

Table 5. Population as Gender

Age	Male (%)	Female (%)
0-9	8.16	7.68
10-19	9.65	8.90
20-29	14.32	12.45
30-39	14.59	13.24
40-49	16.21	15.43
50-59	16.50	16.29
60-69	11.54	12.01
70-79	6.02	7.39
80-99	3.01	6.61

면적은 29.299 m², 36.112 m², 45.373 m²로 구성된다. 각 면적에 따라 차례로 1인, 2인, 4인 가구가 거주하도록 설정하였다. 1인 가구의 경우 국가통계 포털에 따르면 2000년에서 2019년도까지 Fig. 2와 같이 63.8% 증가하였고, 2020년에는 전체 가구에 12.6%를 차지한다. 이를 반영하여 1인 가구를 포함하였다. 또한, 시뮬레이션 인원수는 낮과 밤으로 구분하였다. 이는 낮의 경우 통학하는 학생들과 경제활동을 하는 인원들이 낮 동안 아파트 내에 재실 중이지 않기 때문이다. 밤의 경우 모든 인원이 재실 중으로 설정하였다. 마지막으로 장애 인구의 경우 전체 인구 중 등록장애인은 4.92%이며, 이중 중증 정도가 1급인 등록장애인은 7.67%이다. 이에 따라 본 연구의 시뮬레이션에는 Table 5의 성별 및 연령에 따른 비율에 맞춰서 Table 6과 같이 인원수를 산정하였다. 추가로, 장애인 인구는 12명과 각 장애인의 피난을 도와줄 Helper 12명을 배정하였다.

Fig. 2. One-Person Household Growth Trend

Table 6. Population at Night

Age	Night		Day	
	Male	Female	Male	Female
0-9	129	122	129	122
10-19	152	141	0	0
20-29	226	198	97	113
30-39	230	210	99	120
40-49	255	245	110	140
50-59	260	259	112	147
60-69	182	191	78	109
70-79	95	117	95	117
80-99	47	105	47	105

2.4 시뮬레이션 모델 구성 요소 설정

2.4.1 문

재실자들이 SIP로 대피 시 출입문을 지나게 되는데, 이때 문의 폭은 전체 대피 시간에 큰 영향을 미치게 된다.

국내의 경우 건축물의 피난 방화구조 등의 기준에 관한

규칙 제 9조 피난계단 및 특별피난계단의 구조에서는 건축물의 출입구의 유효너비는 0.9 m 이상으로 규정한다.

국외의 경우 NFPA 101 (2012)에서는 문의 폭이 최소 105 cm 이상으로 설정하도록 규정하고 있으며, NFPA 5000 (2015)에서는 Table 7과 같이 문의 유효 폭(Effective Width)을 제시하고 있다.

본 연구에서는 각동에 500명 이상 거주하기 때문에 Table 7에서 Clear Width의 710 mm로 설정하였다.

Table 7. Effective Width (NEPA 5000, 2015)

Capacity (no. of persons)	Nominal Width (mm)	Clear Width (mm)	Effective Width (mm)
1,202	915	710	610
147	1,120	915	810
202	1,420	1,220	1,120
257	1,725	1,525	1,420

2.4.2 계단

국내의 계단에 대한 기준은 주택건설기준 등에 관한 규정 제 16조에서 규정하고 있다. 공동으로 사용하는 계단의 경우 유효 폭은 120 cm 이상, 단 높이는 18 cm 이상, 단 너비 26 cm 이상으로 규정한다.

ICC (2006)와 NIST (2014)에서는 계단의 단 높이를 최소 102 mm 이상 최대 178 mm 이내, 단 너비의 경우 최소 279 mm로 규정한다.

본 연구에서는 위 두 규정에 따라 단 높이와 너비는 175 mm, 260 mm이며, 계단의 유효 폭은 1,250 mm로 설정하였다.

2.4.3 승강기

본 연구에서는 서론에서 언급한 것과 같이 고령자와 승강기를 이용하여 피난계획을 제안하고 한다. 하지만 현재 국내 승강기의 현황에 대해서 국가통계 포털에 따르면 Table 8과 같이 승객용 승강기가 가장 많고 피난용 승강기의 대수는 아직 부족한 실정이다. 이에 따라 피난용 승강기의 대수를 늘리기 위해 2018년 건축법 제 64조에 고층 건축물에 설치되는 승용 승강기 중 1대 이상을 일정 성능을 갖춘 피난용 승강기로 설치하도록 의무화한다. 또한, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 5조에서 승용 승강기의 설치기준을 Table 9와 같이 정의하고 있다. 이때, 승강기의 대수 산정 시 8인승 이상 15인승 이하의 승강기는 1대로 보고, 16인승 이상의 승강기는 2대의 승강기로 본다. 주택건설기준 등에 관한 규정 제15조에서는 승강기를 6층 이상인 공동주택에는 국토교통부령이 정하는 기준에 따라 1대당 6인승 이상의 승용 승강기를 설치하여야 한다. 또한, 10층 이상인 공동주택의 경우 승용 승강기를 비상용승강기의 구조로 하여야 한다.

NFPA 5000 (2015)에 따르면 대피 구역에 있는 승강기는

Table 8. Type of Elevators (KSIS, 2020)

Years	Total	Passenger	Bed	Passenger & Cargo	Fire & Rescue	Egress	The disabled
Before 02	153,452	68,688	1,740	6,548	34,245	0	16,417
'03	27,899	9,876	422	581	4,057	0	9,609
'04	30,376	8,200	443	302	5,904	0	11,922
'05	25,791	5,424	380	281	5,256	0	10,755
'06	23,658	5,588	241	254	4,323	0	9,597
'07	25,731	6,036	203	269	4,872	0	10,453
'08	26,737	7,077	159	236	5,563	0	9,833
'09	25,577	5,948	191	191	5,196	0	10,246
'10	25,012	8,315	257	248	4,591	0	7,693
'11	26,944	10,092	230	323	4,994	0	7,072
'12	29,054	12,605	257	221	4,792	0	7,106
'13	30,260	12,502	234	286	6,755	0	6,762
'14	34,914	14,776	228	288	8,707	2	7,549
'15	38,220	18,280	269	372	8,525	7	7,924
'16	45,122	21,311	289	323	9,344	19	10,114
'17	48,787	19,254	243	271	12,054	23	12,998
'18	50,510	16,902	227	361	14,792	36	14,464
'19	44,642	13,497	212	420	11,671	79	15,053
'20	21,979	9,768	116	537	2,904	25	6,781
Total	734,665	274,139	6,341	12,312	158,545	191	192,348

Table 9. Installation Standard of Elevators (NFPA 5000, 2015)

Building use	Total area of living area on the 6th floor or higher	
	3,000 m ² below	3,000 m ² excess
1. Apartment house	1 unit	The number of units plus one for every 3,000 m ²
2. Educational		
Research facility		
3. Educational		
Welfare facility		
4. Other facility		

화재로 인한 전원 차단 시 발생 가능한 위협으로부터 완전히 보호되어야 하며, 지속적인 동력 공급이 가능하고 연기 유입이 되지 않도록 설치되어야 한다. 이에 2차 대피로로 사용되는 승강기는 점유 인원이 약 90% 이하로 탑승하여야 하며, 승강기의 종류와 관계없이 대피 용량을 별도로 100% 확보되어야 한다.

따라서, 본 연구에 적용된 승강기는 2차 대피로로 사용하며, 15인승 승강기로 고령자와 장애인만 이용하도록 설정하여 점유 인원의 90%만 탑승하도록 하였다. 또한, 승강기의 속도는 KDS 31 65에 따라 30층 이하 건물의 경우 1.5 m/s와 최대 4 m/s까지 속도를 증가시켜 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 3은 KDS 21 65에 따른 승강기 속도 기준에 대한 그래프이다.

Fig. 3. Speed of Elevators (KDS 31 65, 2016)

3. 시뮬레이션 진행 및 분석

3.1 SIP 위치선정

SIP 위치선정은 시뮬레이션 과정에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. FEMA (Federal Emergency Management Agency)에서 SIP 위치와 수용력(Capacity)은 해당 건물 내 재실 중인 인원과 인근 건물 밖의 인원들까지 수용할 수 있도록 정의한다. 또한, 재실자들이 최소한의 이동 시간으로 대피시설에 도착할 수 있어야 하며, 경로는 쉽고 표지판으로 잘 안내되어야 한다. 대피시설의 출입구의 경우 내외부 위협으로부터 떨어진 곳에 설치되어야 한다.

FEMA 453 (2006)에서는 재실자들이 대피시설로 이동 시 출구의 위치를 Fig. 4에 제시하였으며, 출입구의 경우 내부 위협과 반대 방향에 있는 것을 알 수 있다. 또한, Shelter의 공간은 테러와 같은 상황과 내외부 충격에 의한 건물 내 떨어지는 잔해로부터 시설물 내 재실자들이 안전하게 머물 수 있도록 해야 한다.

Fig. 4. Direction of Exit (FEMA 453, 2006)

마지막으로 Shelter 주변 위험 요소로부터 완벽히 보호 가능한 곳이면서, 60 m² 이상의 일정 면적으로 방송 청취가 가능해야 한다. FEMA 453에서는 대피자들이 SIP에 머무는 시간에 따라 인구당 최소 필요면적을 제시하고 있다. 대피자들이 Shelter 재실 시간이 24시간 이상 시 수면이 필요한 최소한의 면적이 필요하므로, 이에 따라 수용력은 줄어들게 된다. 재실 시간이 24시간 이상 시 싱글베드를 기준 최소한의 면적은 5.6 m²/person이고, 이층 침대를 사용한다면 이에 절반인 2.8 m²/person의 면적이 필요하다. 반면 재실 시간 24시간 미만 시 수면이 필요하지 않기 때문에 1.86 m²/person으로 규정하여, 재실자들의 수용력이 보다 향상된다.

본 연구에서는 CBRE 및 비상 상황 시 대피하는 것으로 설정하였으며, SIP에 장시간 머물지 않기 때문에 24시간 미만 수면이 필요하지 않은 상황으로 가정했다. 또한, SIP 위치는 아파트에 재실 중인 모든 인원을 수용할 수 있으며, 외부 위험으로부터 보호받을 수 있는 장소인 지하주차장을 선정하였고 Fig. 5와 같다. 각 SIP 면적과 수용인원은 Table 10과 같다.

Table 10. SIP Area

Type of SIP	SIP area (m ²)
SIP 1	5,898.24646
SIP 2	4,951.680315
SIP 3	3,888.612894
Capacity	7,924 people

(a) SIP 1, 2

(b) SIP 3

Fig. 5. SIP Location

3.2 Scenario 구성

본 연구에서 Scenario 구성은 Table 11과 같으며, 변수로는 낮과 밤의 인구수, 승강기의 사용 여부와 속도 변화, 그리고 피난 계단 추가에 따라 설정하였다. 모든 시뮬레이션 비교는 대피가 완료되기 전 316.2초로 설정하였다.

3.2.1 인구수에 따른 비교

낮과 밤의 인구수는 1,740명과 3,164명으로 밤의 인구가 낮과 비교하면 54.99% 더 많다. Scenario 1의 경우 최소 34.1 m, 최대 316.8 m, 평균 199.2 m를 이동하며, Scenario 8의 경우 최소 31.9 m, 최대 398.3 m, 평균 212.1 m를 이동했다. 시뮬레이션 결과는 Table 12와 같이 Scenario 8의 경우 최대 대피 시간이 37.46% 더 소요되었다. 인구수가 더 많은 밤의 경우 Fig. 6과 같이 SIP로 대피하는 인구가 더 많다. 이는 SIP 출입구에서 정체 현상을 유발하게 되는데, Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. Fig. 7에서 ramp 670, door 467, door 443은 SIP 출입구의 모델 번호이며 그래프는 각 출입구에서 시간에 따른 인구 밀도를 나타낸다.

Table 11. Scenario Chart

Scenario	Time	People	T.D	Ele	Speed (m/s)	E.S	Required Time (s)		Distance (m)		
							Ave	Max	Min	Max	Ave
1	Day	1,740	-	-	-	1	200.1	442.0	34.1	316.8	199.2
2				o	1.5	1	200.8	489.1	22.9	303.9	175.2
3						2	179.1	480.6	22.9	288.5	156.6
4						1	190.4	436.6	35.7	296.7	177.6
5			o	o	1.5	1	205.1	447.6	23.9	494.1	194.2
6						2	181.5	412.6	23.9	475.9	175.2
7						1	204.2	446.3	23.9	331.8	190.6
8	Night	3,164	-	-	-	1	268.6	706.8	31.9	398.3	212.1
9				o	1.5	1	263.6	706.6	33.4	401.1	203.4
10						2	227.0	656.3	38.8	323.9	173.9
11						1	260.8	705.3	42.7	400.3	202.2
12			o	o	1.5	1	273.3	761.2	36.5	595.3	213
13						2	233.1	579.1	37.3	539.4	185.1
14						1	274.0	762.4	44.2	401.9	213.6

* T.D: The Disabled, E.S: Evacuation Stair, Ave: Average, Max: Maximum, Min: Minimum

Table 12. Compare 1 and 8

Scenario	Time (s)	Compare
1	442	-
8	706.8	37.46% increase

(a) Scenario 1

(b) Scenario 8

Fig. 6. Comparing the Spread of Population of 1 and 8

Fig 7. Flow Rate of Doors

3.2.2 승강기 사용 여부에 따른 비교

3.2.2.1 Scenario 1, 2

SIP로 대피 시 승강기를 이용하지 않은 Scenario 1과 고령자와 장애인만 승강기를 이용하는 Scenario 2를 비교하였다. 두 Scenario 결과는 Table 13과 같다. Scenario 2는 Scenario 1과 비교해보면 대피 시간이 47.1초 더 증가하였다. 이는 인구 수가 상대적으로 적은 낮 시간대에서는 SIP 출입구에서의 정체 현상보다 승강장에서 대기시간의 영향이 더 크기 때문이다. 하지만 Fig 8과 같이 고령자와 장애인의 경우 승강기를 이용하여 대피해야 한다. 따라서, 낮의 경우 승강장에서 대기시간을 줄이기 위해 승강기의 속도를 증가시키는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

Table 13. Comparison 1 and 2

Scenario	Time (s)	Compare
1	442	9.62% decrease
2	489.1	-

(a) Using Elevators to Evacuate

(b) Situation in SIP

Fig. 8. Simulation 2

3.2.2.2 Scenario 8, 9

밤 중 승강기의 사용에 따른 비교에서 Scenario 8의 대피자들은 최소 31.9 m, 최대 398.3 m, 평균 212.1 m를 이동하며, 대피 시간은 706.8초가 소요되었다. Scenario 9의 경우 최소 33.4 m, 최대 401.1 m, 평균 203.4 m를 이동하며, 대피 시간은 706.6초가 소요되었다. 두 Scenario를 비교해보면 승강기의 사용 여부에 따른 대피 시간의 차이는 크지 않다. 이는 밤의 경우 낮에 비해 인구수가 많아 SIP 출입구에서의 정체 현상이 심각하기 때문으로 판단된다.

3.2.3 승강기 속도에 따른 비교

3.2.3.1 Scenario 2, 4

Scenario 2와 4의 경우 승강기의 속도를 1.5 m/s와 4 m/s로 시뮬레이션을 진행하였다. 두 Scenario의 결과는 Table 14와 같다. Scenario 4는 Scenario 2와 비교했을 때 12.02% 감소하였다. 이는 낮의 경우 밤과 비교하면 인구수가 적어 SIP 출입구에서의 정체 현상에 의한 영향보다 승강장에서 대기 시간의 영향을 크게 받는다. 따라서 Fig 9와 같이 승강기의 속도가 향상될 경우 Scenario 4는 Scenario 2와 달리 승강장에서 대기시간이 짧아져 대피 속도가 향상될 수 있다.

Table 14. Comparison 2 and 4

Scenario	Time (s)	Compare
2	489.1	-
4	436.6	12.02% decrease

(a) Using Elevators to Evacuate

(b) Situation in SIP

Fig. 9. Simulation 4

3.2.3.2 Scenario 5, 7

Scenario 5에서 대피자들은 최소 23.9 m, 최대 494.1 m, 평균 194.2 m를 이동하며, 총 대피 시간은 447.6초가 소요되었다. Scenario 7의 경우 최소 23.9 m, 최대 331.8 m, 평균 190.6 m를 이동하며 총 대피 시간은 446.3초가 소요되었다. 두 Scenario는 승강기를 이용하며, 승강기의 속도가 1.5 m/s에서 4 m/s로 증가하였다. 하지만 3.2.3.1과 달리 총 대피 시간의 차이는 거의 없다. 이는 상대적으로 이동속도가 느린 고령자와 장애인의 경우 승강기를 이용하여 SIP 층에 도달하더라도 SIP 출입구에서 정체 현상을 유발하기 때문이다.

3.2.3.3 Scenario 9, 11

Scenario 9에서 대피자들은 최소 33.4 m, 최대 401.1 m, 평균 203.4 m를 이동하며 총 대피 시간은 706.6초가 소요되었다. Scenario 11의 경우 최소 42.7 m, 최대 400.3 m, 평균 202.2 m를 이동하며 총 대피 시간은 705.3초가 소요되었다. Scenario 9와 11은 밤중에 상황을 가정하였기에, 인구수가 낮과 비교하면 54.99% 더 많아 SIP 출입구에서의 정체 현상이 더 심각하다. 따라서 기존에 승강기 속도 1.5 m/s에서 4 m/s로 증가하더라도 대피 시 SIP 출입구에서 정체 현상으로 총 대피 시간의 감소는 어렵다고 판단된다.

3.2.3.4 Scenario 12, 14

Scenario 5에서 대피자들은 최소 23.9 m, 최대 494.1 m, 평균 194.2 m를 이동하며 총 대피 시간은 447.6초가 소요되었다. Scenario 7의 경우 최소 23.9 m, 최대 331.8 m, 평균 190.6 m를 이동하며 총 대피 시간은 446.3초가 소요되었다. 두 Scenario의 대피 시간의 차이가 거의 없다. 이는 인구수가 상대적으로 많은 밤 중 상황이며, 3.2.3.2에 서술한 것과 같이 장애인 이동에 따른 SIP 출입구에서 정체 현상이 발생하기 때문이다. 따라서 승강기 속도 증가에 따른 효과를 보기 어렵다.

결과적으로, 승강기 속도에 따른 비교를 통해 상대적으로 인구가 적은 낮의 경우 승강기 속도 향상에 따른 총 대피 시간의 감소가 가능하다. 하지만, 밤의 경우 SIP 출입구에서 정체 현상의 영향으로 승강기 속도 향상에 따른 효과를 보기 어렵다.

4. 피난 계단 추가에 따른 비교 및 제안

위 3에서 실시한 승강기의 속도를 향상하는 경우 SIP 출입구에서 정체 현상으로 인해 전체 대피 시간의 감소 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 결과적으로 SIP 출입구에서의 정체 현상을 완화시키는 것이 전체 대피 시간이 감소될 것으로 판단된다. 따라서, Fig. 10과 같이 추가적으로 피난 계단을 설정하여 대피자들이 SIP로 이동 시 경로를 분산시켜 SIP 출입구에서 정체 현상이 완화되어 전체 대피 시간이 감소되는 것을 목표로 시뮬레이션을 진행하였다.

(a) Detail of Evacuation Stair

(b) Overview of Evacuation Stair

Fig. 10. Figure of Evacuation Stair

4.1 Scenario 2, 3

Scenario 2에서 대피자들은 최소 22.9 m, 최대 303.9 m, 평균 175.2 m를 이동하며 총 대피 시간은 489.1초가 소요되었다. Scenario 3의 경우 최소 22.9 m, 최대 288.5 m, 평균 156.6 m를 이동하여 총 대피 시간은 480.6초가 소요되었다. 위 3.2.3.1에서는 승강기 속도를 1.5 m/s에서 4 m/s로 증가할 경우 대피 시간은 최대 12.04% 감소하지만, 피난 계단을 추가할 경우 Scenario 2와 비교하면 6초의 감소로 효과가 크지 않다. 이는 낮의 경우 밤과 비교하면 정체 현상의 영향이 적고 승강장에서 대기시간이 총 대피 시간에 영향을 크게 미치지 때문이다.

4.2 Scenario 5, 6

Scenario 6은 Scenario 5에서 피난 계단을 추가하여 대피자들의 이동 경로를 분산하였다. Table 15에서 Scenario 6과 Scenario 5를 비교하면 대피 시간이 8.48% 감소하였다. 이는 Fig. 11에서 SIP에 도착한 대피자들의 인원수 차이를 통해 쉽게 알 수 있다. Scenario 6에서 같은 시간에 더 많은 인원이 SIP에 도달한 것을 확인할 수 있다.

따라서, 피난 계단을 추가하는 것은 대피자들의 이동 경로를 분산시키고 대피 시간을 감소하는데 효과적인 것을 알 수 있다.

Table 15. Comparison 5 and 6

Scenario	Time (s)	Compare
5	447.6	-
6	412.6	8.48% decrease

(a) Evacuation of Scenario 5

(b) Evacuation of Scenario 6

Fig. 11. Comparing Simulation 5 and 6

4.3 Scenario 9, 10

Scenario 9에서 대피자들은 최소 33.4 m, 최대 401.1 m, 평균 203.4 m를 이동하고, Scenario 10의 경우 최소 38.8 m, 최대 323.9 m, 평균 173.9 m를 이동하였다. Table 16은 두 Scenario의 대피 시간을 비교한 것으로 Scenario 10은 9와 비교하면 대피 시간이 7.66% 감소하였다. 이는 피난 계단을 추가하여 대피 시 이동 경로가 효과적으로 분산되었기 때문이다. 이는 Fig. 12에서 같은 시간에 SIP에 도달한 대피자들의 차이를 통해 확인할 수 있다.

Table 16. Comparison 9 and 10

Scenario	Time (s)	Compare
9	706.6	-
10	656.3	7.66% decrease

(a) Evacuation of Scenario 9

(b) Evacuation of Scenario 10

Fig. 12. Comparing Simulation 9 and 10

4.4 Scenario 12, 13

Scenario 12에서 대피자들은 36.5 m, 최대 595.3 m, 평균 213 m를 이동하며 총 대피 시간은 761.2초가 소요되었다. Scenario 13의 경우 최소 37.3 m, 최대 539.4 m, 평균 185.1 m를 이동하며 총 대피 시간은 579.1초가 소요되었다. 두 Scenario의 대피 시간 차이는 Table 17에서 나타난 것처럼 Scenario 13은 12와 비교하면 31.44% 감소하였다. 위 3.2.3.4에서 승강기 속도에 따라 총 대피 시간을 비교하였는데, 승강기의 속도가 증가하더라도 장애인의 경우 SIP까지의 이동속도가 늦고, 3.2.1에서 언급된 것처럼 밤의 인구 밀도가 높아 정체 현상을 유발하기 때문에 총 대피 시간이 증가하게 된다. 따라서 3.2.4.4에서는 피난 계단 추가를 통해 SIP로

경로가 추가된다면 위와 같은 상황을 완화할 수 있을 것으로 기대된다. 두 Scenario의 차이는 Fig 13에서 같은 시간에 승강기와 SIP에 있는 대피자들의 차이로 쉽게 확인할 수 있다.

결과적으로 고층에 거주하는 고령자와 장애인의 경우 대피 안전성을 위해 승강기를 이용하여 대피를 진행해야 하지만 이는 SIP 층에서 출입구에서의 정체 현상을 유발하게 된다. 따라서 승강기의 속도를 증가하는 방법보다 피난 계단을 추가하는 방법이 효과적이다. 이는 대피자들의 이동 경로를 분산시키고 가까운 SIP로 유도하여 최대 31.44%의 대피 시간 감소 효과를 보인다. 그러므로, 피난 계단을 추가 설치하는 방법이 가장 효과적이다.

Table 17. Comparison 12 and 13

Scenario	Time (s)	Compare
12	761.2	-
13	579.1	31.44% decrease

(a) Evacuation of Scenario 12

(b) Evacuation of Scenario 13

Fig. 13. Comparing Simulation 12 and 13

5. 결 론

본 연구에서는 CBRE 및 비상 상황에서 SIP로 대피 시 발생하는 정체 현상을 효과적으로 제어하여 최적의 피난계획을 제안하였다. 이를 위해 인구수, 승강기의 사용 여부, 승강기의 속도 변환, 피난 계단 추가에 따라 총 4가지로 구분하여 시뮬레이션을 진행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인구수에 따른 비교는 낮과 밤에 재실자의 차이로 비교하였다. 낮의 경우 1,740명이 재실 중이며 밤의 경우 3,164명으로 낮과 비교하면 54.99% 더 많다. 따라서, 인구 밀도가 상대적으로 더 높은 밤의 경우 SIP 출입구에서의 정체 현상이 심각하며 낮에 비해 264.8초 더 소요되었다.
- (2) 승강기 사용 여부에 따른 비교에서 밤의 경우 SIP 출입구에서의 정체 현상으로 인해 승강기로 해당 SIP 층에 도달하더라도 총 대피 시간에는 변화가 없다. 하지만 낮의 경우 승강기의 속도가 1.5 m/s일 경우 승강장의 대기시간이 길어짐에 따라 총 대피 시간이 증가하였다.
- (3) 승강기 속도에 따른 비교에서 위 3.2.3.1에서 언급된 것처럼 낮의 경우 고령자와 장애인이 승강기를 사용하는 경우 승강장에서 대기시간이 길어져 총 대피 시간이 증가한다. 따라서 SIP 출입구에서 정체 현상의 발생이 적다면, 승강장에서 대기시간의 영향을 크게 받기 때문에 승강기의 속도를 향상하는 것이 효과적이다.
- (4) 피난 계단 추가에 따른 비교에서 대부분의 Scenario에서 총 대피 시간은 감소한다. 이는 대피 경로가 추가됨에 따라 대피자의 이동 경로가 분산되고, SIP 출입구에서의 정체 현상을 완화하기 때문이다. 이에 따라 총 대피 시간의 감소에 가장 효과적이다.

본 연구를 통해서 피난 계단의 추가 설치가 대피 시간의 감소에 가장 효과적인 것을 알 수 있다. 현재 건축물의 고층화가 진행됨에 따라 한 건물에 인구 밀도 또한 높아지고 있다. 하지만, 건축물의 피난 방화구조 등의 기준에 관한 규칙에서 피난 계단의 구조에 관해 규제하고 있다. 건물의 사용 인구에 따라 피난 계단의 설치 대수에 대한 규제가 규정될 경우 대피 시설까지 재실자들이 안전하고 신속하게 대피할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 피난안전층의 경우 고층 건축물 내 특정 층이 1층을 통해 외부로 나갈 수 없을 때 임시로 대피하는 곳이다. 이는, 거동이 불편한 고령자와 장애인, 고층 거주민들이 비상 상황 시 외부 위험으로부터 보호받을 수 있는 중요한 시설이다. 향후 연구에서 피난안전층을 30층 이하의 고층 건축물에 고려할 경우 대피자들의 전체 이동 거리가 감소하고 안전한 대피가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03045059).

References

- Ando, K., Ota, H., and Oki, T. (1988). Forecasting the flow of people. *Railway Research Review*, Vol. 45, Issue 8, pp. 8-14 (in Japanese).
- Bohannon, R.W., and Andrews, A.W. (2011). Normal walking speed: a descriptive meta-analysis. *Physiotherapy*, Vol. 97, Issue 3, pp. 182-189.
- CFPA Europe. (2009). *Fire safety engineering concerning evacuation from buildings*. CFPA-E guideline No. 19:2009F.
- Cabrera, F., Muñoz, F., and Perez, C. (2016). Walking patterns of elderly in a peruvian public space. *Proceedings of the 8th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 12-17.
- FEMA 453. (2006). *Risk management series. Design guidance for shelters and safe rooms*.
- Hyun, E.M., Ahn, K.H., Lee, J.E., and Kim, Y.S. (2019). Improvement of standard by analyzing evacuation plans of domestic high-rise buildings -Focused on domestic and foreign buildings laws and case analysis-. *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 53-62.
- International Code Council (ICC). (2006). *International building code* (pp. 212-213).
- KDS 31 65. (2016). Korea Construction Standards Center.
- Kim, Y., Lee, J., Yuan, T., and Yoon, Y. (2018). A study on selecting the best location of 'Shelter In Place' in light saturation using egress simulation and BIM model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 251-260.
- Korean Statistical Information Service (KSIS). (2020). *Year of installation own status by elevator type*.
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2014). *Movement on stairs during building evacuations* (pp. 34). NIST Technical Note 1839. Gaithersburg, MD, USA.
- NFPA 101. (2012). *Life safety code*. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.
- NFPA 5000. (2015) *Building construction and safety code*. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.
- Park, H.J., and Lee, Y.J. (2018). Study on the shortening effect of the egress travel time based on a escape scenarios by using shuttle elevators for Lotte tall building's evacuation plan. *Fire Science Engineering*, Vol. 32, No. 6, pp. 46-54.

Park, S.J., Lee, J.S., Kang, D.H., Jung, E.H., and Park, S.B. (2007). Study on walking speed and stride of age. *Proceedings of Symposium of the Ergonomics Society of Korea*, pp. 430-434.

Thunderhead Engineering. (2012). *Technical reference manual for pathfinder*.

Zhao, L., Kim, Y., Yu, S., and Yoon, Y. (2019). BIM modelling and VR simulation for optimal design of

sudway-station evacuation facility. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 339-347.

Received	December 29, 2020
Revised	December 29, 2020
Accepted	January 8, 2021