

행동모드 변화 모델링에 따른 피난시간 비교분석과 활용방안 연구: 지하 주차장 사례를 중심으로

A Study on the Comparative Analysis and Utilization of Evacuation Time according to Variation of Modelling of Behavior Modes: Focusing on the Case of Underground Parking Lot

구기경*

Gi-gyeong Koo*

Doctor's Course, Department of Industrial Engineering, Sunmoon University, Asan, Republic of Korea

*Corresponding author: Gi-gyeong Koo, goodosa1@kakao.com

ABSTRACT

Purpose: Compared to general fires of the same size, underground parking lot fires are more likely to cause human and property damage and are not easy for firefighters to extinguish fire and save lives. This study attempted to find out how to secure the evacuation safety of parking lot users based on changes in the evacuation simulation behavior mode applied to evaluate the evacuation safety of the object. **Method:** Simulation for each CASE was performed using the Pathfinder program. **Result:** it was found that the higher the reference value, the higher the evacuation time, and Behavior showed an increase in time in SFPE mode rather than Steering mode. Priority was able to confirm an increase in time in priority designation rather than non-priority designation. **Conclusion:** The Required Safe Egress Time (RSET) for evaluating the evacuation safety of underground parking lots and the building evacuation design to ensure evacuation safety should be evaluated and reflected separately from Simulation's Behaviour Mode and Priority.

Keywords: Underground Parking Lot, RSET, Evacuation Stairs, Simulation, Evacuation Safety

요약

연구목적: 지하 주차장 화재는 동일 규모의 일반화재에 비하여 인명 및 재산피해의 우려가 크고 소방관의 소화활동 및 인명구조가 용이하지 않는 특성이 있다. 본 연구에서는 대상물의 피난안전성 평가를 위해 적용되는 피난 Simulation 행동모드의 변화를 기반으로 주차장 이용자의 피난안전성 확보방안에 대하여 알아보려고 하였다. **연구방법:** Pathfinder 프로그램을 사용하여 CASE 별로 Simulation을 수행하였다. **연구결과:** 기준값이 높아질수록 피난시간이 증가되는 것을 알 수 있었으며, Behavior는 Steering Mode 보다는 SFPE Mode에서 시간증가를 나타냈다. Priority는 무순위 지정보다는 우선순위 지정에서 시간증가를 확인할 수 있었다. **결론:** 지하주차장의 피난안전성 평가를 위한 피난소요시간(RSET)과 피난안전성 확보의 건축물 피난설계는 Simulation의 Behavior Mode와 Priority를 구분하여 평가·반영되어야 한다.

핵심용어: 지하주차장, 피난소요시간, 피난계단, 시뮬레이션, 피난안전성

Received | 28 February, 2024

Revised | 18 March, 2024

Accepted | 26 March, 2024

 OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

서론

연구배경 및 필요성

현대 도시는 급격한 도시화에 따른 대도시권의 인구밀도 증가와 함께 건축물은 고층화·심층화가 심화되면서 지하공간의 활용이 요구되고 있다. 특히 아파트 선호중심의 주거문화에 따라 지하공간을 주차장으로 이용하면서 지하주차장은 가장 보편적인 주차장의 형태로서 설치되고 있다. 지상 공간의 공원화, 지하 연결통로, 차량 이용의 편리성 등 여러 유리한 측면으로 인하여 지하 주차장은 계속 증가하고 있으며 그만큼 주차장화재 또한 증가추세에 있다.

Table 1은 2019년~2023년 사이 주차장화재 통계를 나타낸 것으로, Fig. 1과 같이 화재는 매년 증가하면서 재산피해도 증가하고 있는 것을 알수 있다. 이 통계는 소방청 국가화재정보시스템의 차량화재 장소에 따른 주차장화재 통계를 나타낸 것으로 발화지점이 차량 이외의 경우를 포함한다면 수치는 더욱 증가할 것이다.

Table 1. State of fire in parking lot for the past 5 years (2019-2023)¹⁾

구분	화재건수	사망	부상	재산피해(천원)
2019년	725	3	25	5,386,982
2020년	759	2	24	5,380,918
2021년	765	6	21	5,276,040
2022년	836	3	33	6,915,572
2023년	836	3	23	8,757,668



Fig. 1. Fire trends in parking lots in the last 5 years

건축물이나 공원 등의 지하에 위치하는 지하주차장은 지하라는 공간적 특수성으로 인하여 화재 발생시 심각한 인명 및 재산피해를 야기할 수 있다. 2022년 9월 27일 오전 7시 39분 대전 유성구 용산동 소재의 현대프리미엄아울렛 대전점 지하 1층 주차장에서 화재가 발생하여 7명이 사망하고 1명이 부상을 당하는 대형화재가 발생하였고, 2021년 8월 11일 오후 11시 9분 충남 천안시 서북구 불당동 소재의 주상복합아파트인 불당 지웰시티 푸르지오차 지하주차장에서 출장 세차 차량의 영업용 LPG 가스통에서 누출된 가스가 폭발하면서 발생한 화재로 차량 666대가 손실되면서 60억원 가량의 피해액이 발생하였다.

이와같이 지하주차장 화재는 동일 규모의 일반화재에 비하여 인명 및 재산피해의 우려가 크고, 주차장 이용자의 피난안전

1) 소방청 화재통계연감(2019~2023년 통계자료)

이나 소방관의 인명구조 및 소화활동을 위협하는 장애요인으로 작용하고 있다. 이로 인하여 National Fire Agency ‘성능위주설계 평가운영 표준 가이드라인(National Fire Agency, 2023)’에서는 일정용도 특정소방대상물의 경우 지하 주차장을 대상으로 반드시 시뮬레이션을 수행하도록 규정하고 있다.

연구 목적 및 범위

피난이란 위험한 장소로부터 안전한 장소로의 대피를 말한다. 따라서 피난계획은 화재와 같은 예상치 못한 상황에서 점유자가 피난이 가능하도록 건축설계를 구체화하는 것으로 화재 발생시 안전한 장소로 대피하기 위한 중요한 계획이다. Table 2는 최근 5년간 화재시 사상자의 행동현황을 나타낸 표이다. 사상자 중 32.2%에 해당하는 3,885명은 화재진압 과정에서 발생하였고 다음으로 전체 사상자의 27.7%인 3,341명은 화재 피난 중 발생하였다. 따라서 인명안전을 위해서는 화재진압 보다 피난을 우선적으로 고려되어야 할 것이다.

Table 2. Current status of casualty behavior over the past five years (2019-2023)²⁾

구분	합계	피난중	구조요청중	화재진압중	화재현장 재진입	행동불가능	비이성적 행동	미상	기타 행동
사망(명)	1,551 (100%)	236 (15.2%)	20 (1.3%)	62 (4.0%)	16 (1.0%)	258 (16.6%)	41 (2.6%)	800 (51.6%)	118 (7.6%)
부상(명)	10,517 (100%)	3,105 (29.5%)	712 (6.8%)	3,823 (36.4%)	116 (1.1%)	332 (3.2%)	165 (1.6%)	771 (7.3%)	1,493 (14.2%)
사상자(명)	12,068 (100%)	3,341 (27.7%)	732 (6.1%)	3,885 (32.2%)	132 (1.1%)	590 (4.9%)	206 (1.7%)	1,571 (13.0%)	1,611 (13.3%)

지금까지의 선행연구 논문들을 살펴보면, 신속한 피난을 위하여 재난정보와 재실자 특성 간의 관계에서 피난시간을 연구(Gi, 2018)하거나 피난계단 폭과 피난시간의 관계(Oh, 2022), 출입문 유효너비와 피난시간에 미치는 영향(Seon, 2023)을 통하여 피난시간을 도출하였다. 또한 Steering 기준으로 시뮬레이션을 수행하여 피난시간을 도출하는 연구(Han, 2018)가 있었다. 이에 본 연구에서는 신속한 피난을 위한 피난시간 도출을 위하여 Behavior Mode에 따라 Simulation을 수행하였다. 이를 통하여 Behavior Mode와 피난완료시간과의 상관관계를 분석하였고 Priority를 점유자 집단별로 구분하여 피난완료시간을 비교·평가하였다. 이를 근거로 소방시설등 성능위주설계의 피난안전성 평가요소인 피난소요시간(RSET)의 산정방안과 건축물 피난설계의 원활한 피난안전성 확보방안을 제시하고자 한다.

본론

피난 Simulation (Pathfinder)

피난 Simulation으로 사용한 Pathfinder는 미국의 Thunderhead Engineering에서 개발한 프로그램으로 Steering Behavior을 모델 재실자 이동에 이용하는 에이전트 기반의 피난 시뮬레이터이다. 이 프로그램에서는 재실자의 행동을 SFPE Mode와

2) 소방청 화재통계연감(2019~2023년 통계자료)

Steering Mode, 두 가지 방식으로 Simulation이 가능하다. Steering Mode는 피난자가 지정된 경로를 따라 이동할 경우 변화하는 환경에 대해 반응하는 이동을 구현하지만, SFPE Mode는 SFPE 방화공학 Handbook에서 제시된 비상시 이동을 반영하여 수력학적 피난 계산방식 또는 흐름기반 피난 모델링 기법을 사용하여 모델링을 구현할 수 있다.

Simulation 수행 Model

지난 2022년 대전 현대프리미엄아울렛의 지하 주차장 화재와 유사한 용도의 판매시설이 있는 대상물 중 인천시에 소재하는 지상12층/지하2층 건축물의 지하2층 주차장을 Simulation 수행 Model로 임의 선정하였다. Fig. 2는 수행 Model인 지하2층 평면도면을 나타낸 것으로 바닥면적 28,300㎡ 중 판매시설의 용도 7,200㎡와 창고·Fan Room·Core의 면적 6,550㎡를 제외한 주차만을 위한 14,550㎡를 대상면적으로 하였다. Fig. 3의 Geometry 공간에 있어서는 재실자가 이동할 수 없는 순수 주차공간을 제외하였다.

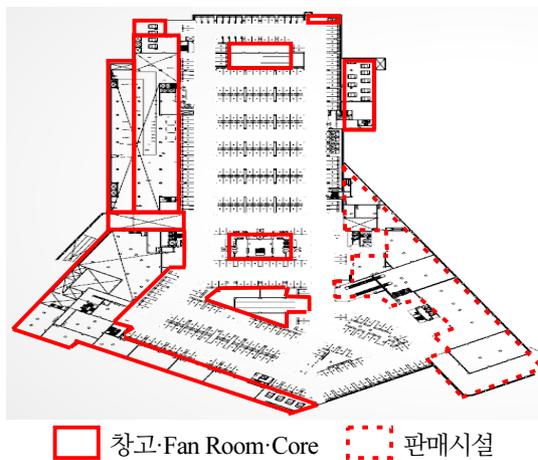


Fig. 2. A floor plan of two basement levels

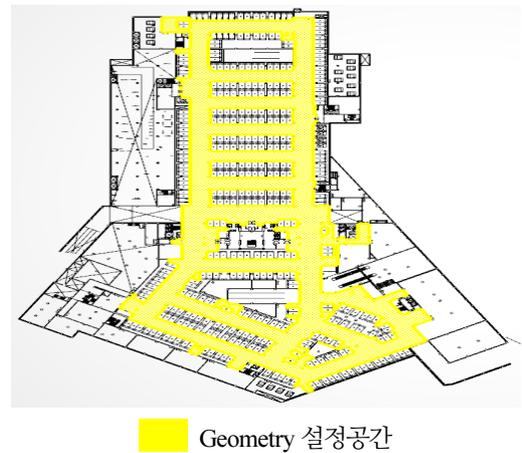


Fig. 3. Geometry settings space

본 연구에서는 Table 3과 Fig. 4와 같이 주차장의 각 부분으로부터 피난출구까지의 이동거리를 총 6개의 Case로 구분하였고 각 Case 별로 피난 Simulation을 수행하며 비교·분석하였다. 또한 수행 결과값의 신뢰성 확보를 위하여 Simulation을 각 10회 씩 수행한 후 그 평균치를 결과값으로 산출하였다.

Table 3. Application case by moving distance

구분	Moving Distance	Exit
Case 1	20m	26개
Case 2	40m	13개
Case 3	60m	8개
Case 4	80m	5개
Case 5	100m	4개
Case 6	120m	3개

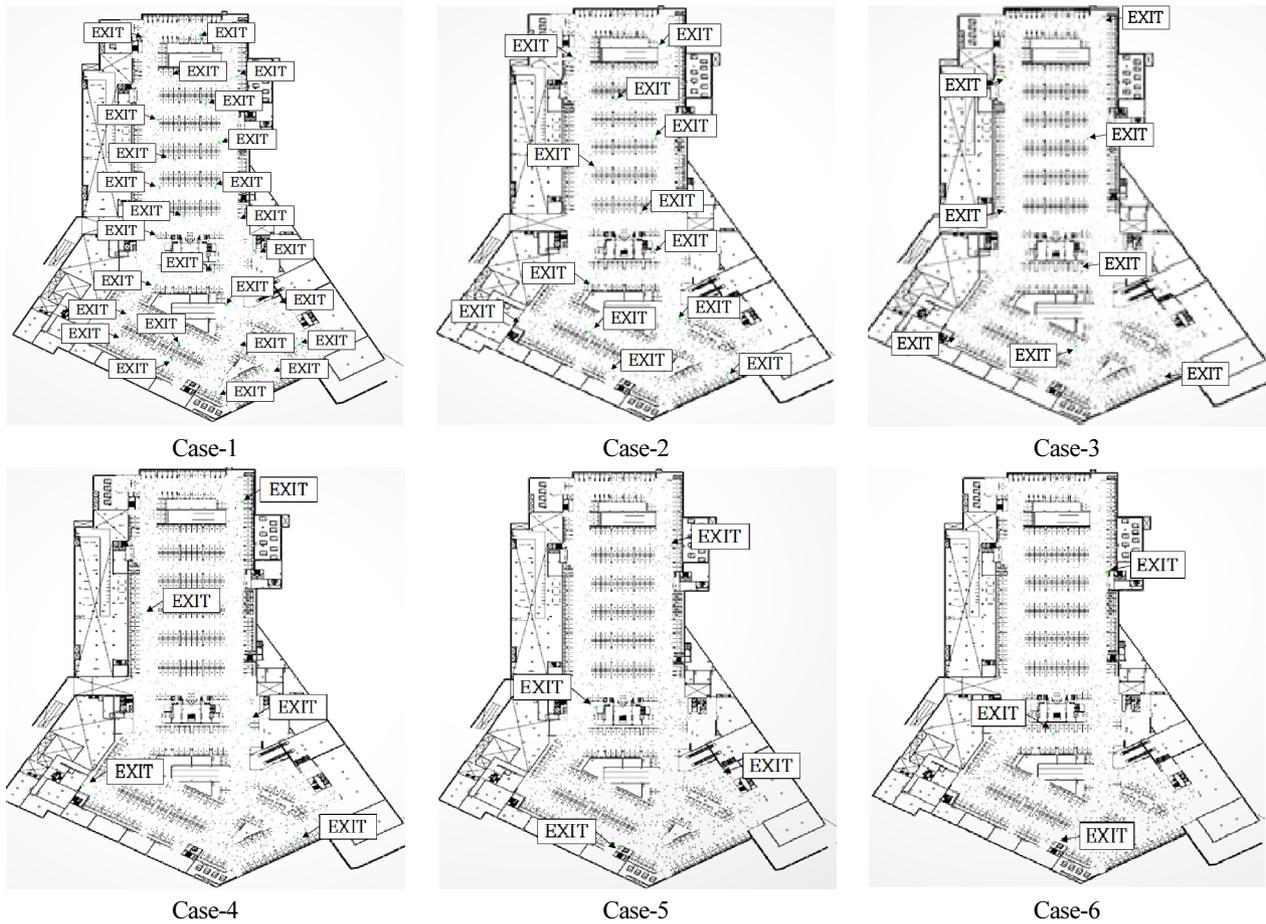


Fig. 4. Application cases by exit

Simulation Input 자료

국내 기준에는 주차장 용도에 대한 수용인원 산정기준이 없다. 따라서 일반적으로 사용되는 해외 기준³⁾을 근거로 18.56 (m²/명)을 적용하였고 수용인원 산정을 위한 주차장의 면적산출은 지하 2층 바닥면적 중 주차장만을 고려한 면적 14,550m²을 적용하여, 수용인원 784명이 산정되었다.

Table 4는 수용인원의 보행속도와 신체치수를 나타낸 표이다. 보행속도는 건설기술연구원의 연구보고서⁴⁾를 참조하여 적용하였고, 신체 치수는 국가기술표준원의 Size Korea에서 조사한 제8차 인체치수조사(2020~2023)에서 나온 결과를 참조하여 적용하였다. 그리고 수용인원의 구성비율은 인천광역시 총 2,948,375명(남자 1,476,373명, 여자 1,472,002명)의 「통계청」 2050년 추계인구(2023)의 연령별 및 성별 인구비율을 준용하여 Table 5와 같이 적용하였다. 피난출구의 폭은 ‘건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙’ 제9조(피난계단 및 특별피난계단의 구조)의 유효너비 0.9m 이상의 기준을 준용하여 일반적인 방화문의 폭 1.0m을 적용하였다.

3) The United States, International Building Code (IBC), Section 1004 Occupant Load, Table 1004.1.2 Maximum Floor Area Allowances Per Occupant
 4) Development of Fire Spread Prevention and Escape Safety Design Technique According to Standard Fire Model, (2009.12)

Table 4. Profile of occupancy

구분	Child (9세 이하)		Junior (10~19세)		Adult (20~59세)		Elderly (60세 이상)	
	M	F	M	F	M	F	M	F
Speed(m/s)	1.0	1.0	1.3	1.3	1.2	1.1	0.7	0.97
Diameter(cm)	33.6	33.6	44.7	42.8	48.5	46.1	46.5	44.6
Height(cm)	133.2	130.5	172.7	164.8	178.6	163	168.9	160.1

Table 5. Proportion by occupant group

구분	Child Group		Junior Group		Adult Group		Elderly Group	
	M	F	M	F	M	F	M	F
Proportion (%)	3.8	3.6	4.7	4.5	31	29.5	10.6	12.3
Count (person)	30	28	37	35	244	231	83	96

수행 결과

Table 6은 Simulation을 수행하였을 때 점유자 집단별 피난완료시간을 나타낸 표이다. 이동거리가 증가할수록 피난완료 시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 집단별 증가량을 비교하면, Junior Group < Adult Group < Child Group < Elderly Group 순으로 나타냈으며 이는 타 집단과의 상호작용에도 불구하고 보행속도가 늦을수록 피난완료시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 보행속도가 가장 늦은 노인집단의 경우에는 이동거리가 증가할수록 피난완료시간의 증가율이 다른 집단보다 크게 나타났다.

Table 6. Average evacuation completion time by occupant group

구분	Adult Group		Elderly Group		Child Group		Junior Group	
	M	F	M	F	M	F	M	F
Case 1	16.1	14.1	21.4	15.3	12.4	15.1	11.3	12.8
Case 2	29.9	29.0	37.5	25.7	25.8	26.0	21.6	20.9
Case 3	47.2	45.8	51.8	43.6	41.8	41.2	28.5	30.4
Case 4	71.1	78.8	82.7	56.4	61.5	57.5	55.6	51.5
Case 5	98.2	92.7	109.3	71.5	94.6	65.2	66.2	60.9
Case 6	120.9	109.1	146.9	96.2	109.4	89.8	84.7	71.5

Table 7은 점유자 집단별로 우선순위를 지정하였을 때 전체 집단(Entire Group)의 피난완료시간을 나타낸 표이다. 보행속도가 가장 빠른 성인 집단을 우선(Priority) 피난으로 지정하는 경우 무순위(Random) 피난에 비하여 전체 집단은 각 Case 별로 0.4~4.8s 감소하면서 평균 3.1s의 시간단축을 나타냈다. 보행속도가 가장 늦은 노인 집단의 경우에는 전체 집단이 각 Case 별로 0.7~3.8s 증가하면서 평균 1.8s의 시간증가를 나타냈지만, Table 8과 같이 노인 집단의 평균 피난완료시간은 Case 1 : 3.8s~ Case 6 : 60.7s 감소하면서 이동거리가 증가할수록 감소 폭도 증가하였다.

Table 7. Average completion time for the entire group due to priority group (s)

Priority Group	Random	Adult Group	Elderly Group	Child Group	Junior Group
Case 1	15.4	15.0	16.7	15.6	15.9
Case 2	28.8	26.6	30.8	29.1	30.1
Case 3	44.8	41.9	46.7	45.6	46.6
Case 4	70.3	66.2	71.0	71.0	72.8
Case 5	89.2	85.3	89.9	89.1	90.7
Case 6	111.7	106.9	115.6	115.5	117.9

Table 8. Average comparison of evacuation completion time between random and first place by case (s)

Moving Distance		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Elderly Group	M	21.4 → 16.7	37.5 → 26.7	51.8 → 32.3	82.7 → 44.7	109.3 → 58.0	146.9 → 72.1
	F	15.3 → 12.3	25.7 → 18.8	43.6 → 27.6	56.4 → 34.2	71.5 → 39.8	96.2 → 49.5
Entire Group		15.4 → 16.7	28.8 → 30.8	44.8 → 46.7	70.3 → 71.0	89.2 → 89.9	111.7 → 115.6

Table 9는 재해약자인 노인 그룹과 어린이 그룹을 순차적으로 Ranking 화(化)하여 순위지정을 하였을 때 피난완료시간의 결과를 나타낸 표이다. Ranking 지정시 평균 피난완료시간은 무순위(unranked) 지정시 평균 피난완료시간과 비교할 때, 1순위(노인 그룹) 지정의 경우 평균 1.7s 증가, 1순위(노인 그룹)·2순위(어린이 그룹) 지정의 경우 평균 1.4s 증가, 1순위(노인 그룹)·2순위(어린이 그룹)·3순위(청소년 그룹)지정의 경우 평균 2.2s 증가를 나타냈다.

Table 9. Average completion times of all behaviors according to ranking (s)

Priority Ranking Level	1st	Unranked	Elderly Group	Elderly Group	Elderly Group
	2nd	Unranked	-	Child Group	Child Group
	3rd	Unranked	-	-	Junior Group
	4th	Unranked	-	-	Adult Group
Case 1		15.4	16.7(△1.3)	16.7(△1.3)	16.7(△1.3)
Case 2		28.8	30.8(△2.0)	30.3(△1.5)	30.8(△2.0)
Case 3		44.8	46.1(△1.3)	46.0(△1.2)	46.5(△1.7)
Case 4		70.3	71.3(△1.0)	71.0(△0.7)	72.8(△2.5)
Case 5		89.2	89.9(△0.7)	89.6(△0.4)	90.8(△1.6)
Case 6		111.7	115.6(△3.9)	115.0(△3.3)	116.0(△4.3)
Average			(△1.7)	(△1.4)	(△2.2)

Table 10은 Simulation Parameters의 Behavior Mode을 구분하여 수행하였을 때 전체 그룹에 대한 결과를 나타낸 표이다. Steering Mode 보다는 SFPE Mode가 최대 피난완료시간에서는 Case 1 : 7.9s~Case 6 : 76.2s 증가하면서 평균 27.1%의 증가율을 나타냈으며, 평균 피난완료시간에서는 Case 1 : 3.5s~Case 6 : 35.9s 증가하면서 평균 27.4%의 증가율을 나타냈다.

Table 10. Completion times by behavior mode (s)

Behavior Mode		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Steering Mode	Max.	38.7	74.0	104.4	163.4	203.9	250.7
	Avg.	15.4	28.8	44.8	70.3	89.2	111.7
SFPE Mode	Max.	46.6	92.5	133.6	209.1	267.1	326.9
	Avg.	18.9	36.4	57.1	90.1	114.3	147.6

결론

본 연구에서는 피난 Simulation (Pathfinder)을 활용한 평가를 통하여 지하 주차장의 피난안전성 확보방안을 각 Case 및 점유자 집단별로 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. Priority Level을 점유자 집단별 우선순위로 지정하였을 때에는 성인 그룹의 우선순위 지정의 경우 무순위 지정시 보다 각 Case 별로 0.4~4.8s 감소하면서 평균 3.1s의 시간 감소가 있었으며, 이외 그룹에서는 시간이 모두 증가되는 것으로 확인되었다.
2. Priority Level을 재해약자(노인, 어린이) 중심의 Ranking 순위로 지정하였을 때에는 1순위(노인 그룹)·2순위(어린이 그룹) 지정의 경우 평균 1.4s 증가로 가장 낮은 증가율을 보였다. 따라서 피난대피훈련에서는 노인(Elderly) 우선피난 보다는 노약자(Elderly, Child) 우선피난이 유리할 것으로 판단된다.
3. Behavior Mode의 SFPE Mode의 경우 평균 피난완료시간이 Steering Mode 보다 Case 1 : 3.5s~Case 6 : 35.9s 증가하면서 평균 27.4%의 증가율을 나타냈다.

소방시설등 성능위주설계의 피난안전성평가 핵심요소인 피난소요시간(RSET, Required Safe Egress Time)을 산정하는 경우 피난 Simulation의 Behavior Mode을 Steering Mode 설정하고, 우선순위(Priority)를 무순위(Random) 배치하여 Simulation을 수행하는 것이 RSET 단축에 있어서 유리할 것이다. 하지만 건축법령의 피난계단, 출구 폭 등 건축물의 피난계획에 있어서는 피난안전성을 확보하기 위해서는 Behavior Mode를 SFPE Mode로 설정하거나 Steering Mode의 우선순위(Priority)를 재해약자(노인, 어린이) 중심의 Ranking 순위로 배치하여 피난설계에 반영되어야 할 것이다. 향후 이와 같은 연구 결과를 활용한 추가적인 분석을 통하여 ‘성능위주설계 평가 운영 표준 가이드라인’ 개정이 이루어진다면, 보다 원활한 건축물의 피난설계와 점유자의 피난안전성이 유효하게 확보될 것으로 여겨진다.

References

- [1] Gi, D.H. (2018). “Analysis on disaster information effect process to occupant behaviour: Focusing on relationship to egress time.” Korean Journal of Construction Engineering and Management, Vol.19, No. 3, pp. 11-22.
- [2] Im, S.H. (2021). “A study on the travel distance and exit width for securing efficient evacuation.” Journal of The Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 45-52.
- [3] Jeong, G.S. (2009). “Quantitative evaluation of escape safety considering extension of escape time by escape

- distance and escape barrier.” Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 9, No. 5, pp. 1-8.
- [4] National Fire Agency (2019~2023). Fire Statistical Yearbook.
- [5] National Fire Agency (2023). Standard Guidelines for Evaluation and Operation of Performance-oriented Designs such as Fire Fighting Facilities.
- [6] Oh, S.C. (2022). “Analysis of evacuation time according to variation of evacuation stairs’ width in large-scale goshiwons.” The Journal of the Convergence on Culture Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 641-651.
- [7] Seo, D.G.(2021). “ A study on the safety of evacuation according to evacuation delay time and fire door openness: Based on residence types.” Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 156-165.
- [8] Seon, Y.J. (2023). “Effect of the effective clear width of door in a modular classroom on evacuation time.” Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 23, No. 5, pp. 63-69.
- [9] The United States, International Building Code (IBC), Section 1004 Occupant Load, Table1004.1.2 Maximum Floor Area Allowances Per Occupant.
- [10] Yoo, Y.H. (2009). Development of Fire Spread Prevention and Escape Safety Design Technique According to Standard Fire Model. 1415091720, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do, Korea, pp. 175-176.