재난 약자시설의 정량적평가에 따른 대피경로 개선방안 연구

A Study on the Improvement of Evacuation Routes according to the Quantitative Evaluation of Fire Disaster Vulnerable Facilities

김형우* · 최인수** · 이동호***

Kim, Hyeongwoo*, Choi, Insu**, and Rie, Dongho***

Abstract

In this study, the available safe egress time of occupants in elderly nursing hospitals was calculated from the ignition time using Fire Dynamics Simulator by considering the evacuation characteristics of the vulnerable. The required safe egress time for each evacuation condition was also calculated using Pathfinder to determine the evacuation time. Finally, the calculated results were used to assess evacuation efficiency according to the performance of the selected evacuation route. FED-based quantitative death prediction indicated that the efficiency of single and distributed evacuation caused minimization of casualties in the event of a disaster. The results collectively justify the need for a ramp in disaster-prone facilities and highlight the importance of managing fire hazards.

Key words : Disaster Vulnerable, Fire and Evacuation Simulation, Death Prediction

요 지

본 연구는 노인 요양병원을 대상으로 피난 약자 대피 특성을 반영하여 FDS를 이용해 발화 시간으로부터 재실자 ASET을 산출하였다. 대피시간은 Pathfinder를 사용해 피난 약자의 대피조건별 RSET을 산출하였다. 결과로부터 피난약자 동반대피를 반영한 대피로 성능에 따른 대피 효율에 대해 검토하였다. 단독 대피와 분산대피 효율은 FED를 기반 정량적 사망자 예측으로부터 재난 시 인명피해의 최소화를 꾀하였다. 그 결과로 재난 약자 시설의 경사로의 당위성과 가연물 관리의 중요성에 대해 밝혔다.

핵심용어 : 재난약자, 화재 및 피난 시뮬레이션, 사망자 예측

1. 서 론

통계청에 따르면 우리나라는 2020년 전체 인구 15.7%가 65세 이상 고령화 사회에 진입했다. 2025년에는 노인 비율이 20%를 넘어 초고령화 사회에 진입할 것으로 예상되고 있다. 이러한 노인 인구의 증가는 주거형 노인요양시설과 요양병원의 증가로 이어진다(Statisticis Korea, 2020).

Table 1은 국내와 해외의 요양 시설에서 발생한 화재사고 사례를 나타낸다.

관련 연구로 Choi and Kong (2021)은 성별과 경사로의 기울

기에 따라 RSET 값을 계산하여 대피 안전성을 평가하였다.

Lee et al. (2020)는 법률에 따라 대피 유도기의 안전성을 판단하기 위해 요양병원의 화재 및 대피 시뮬레이션을 통해 화재경보기나 방송 등 경보설비의 필요성에 대해 보고하였다.

Kim et al. (2010)은 노인 요양 병원을 대상으로 화재시뮬레이션을 적용하여 주야간 방호를 위한 별도의 화재안전기준을 마련함으로써 대피시간을 단축할 수 있다고 보고하였다.

Hong et al. (2015) 위험에 따른 우회 대피를 가능하게 하는 artisoc 시뮬레이션을 이용하여 각 대피자에 대한 대피 경로 및 대피 시작 시간을 설정함으로써 에이전트간 정보 전달

*학생회원, 인천대학교 안전공학과 학부연구생(E-mail: hyeongwoo0117@gmail.com)

Member, Undergraduate Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University

**학생회원, 인천대학교 안전공학과 학부연구생(E-mail: insu.choi1997@gmail.com)

Member, Undergraduate Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University

***교신저자, 정회원, 인천대학교 소방방재연구센터 교수(Tel: +82-32-835-8293, Fax: +82-32-835-0779, E-mail: riedh007@hotmail.com)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Safety Engineering, Incheon National University

Table 1. Examples of Fire Cases from Nursing Facilities

Date	Casualties		Fire Location	Country
	Death	Injury		
10.11.12	10	17	Pohang Indeok Nursing Home	Korea
14.05.28	21	8	Jangseong Hyosarang Nursing Hospital	Korea
15.01.25	38	6	Private Nursing Home	China
16.05.29	17	5	Nursing Home in Kiev	Ukraine
17.11.16	-	20	Barclay Friends Senior Nursing Facility	USA
18.01.26	47	145	Miryang Sejong Hospital	Korea
19.09.24	2	47	Gimpo Nursing Hospital	Korea
21.01.21	15	11	Kharkiv Nursing Home	Ukraine
21.03.24	2	-	New York Evergreen Court Home	USA

Fig. 1. Analysis Flow Chart

기능을 부여하여 ASET과 RSET을 정량적으로 비교하였다. 본 연구에서는 스프링클러, 배연, 제연설비가 미작동되는 최악의 조건에서 피난약자의 인명피해 최소화를 목표로 최적대피로 활용 방안에 대해 규명하였다.

2. 피난 방식에 따른 사망자 예측 해석

Fig. 1은 본 연구에 적용된 연구 흐름도를 나타낸다.

2.1 ASET & RSET의 평가

본 평가에서 Available Safe Egress Time (ASET) 분석은 NIST (2013)에서 개발한 FDS를 사용하였으며, Required Safe Egress Time (RSET) 분석은 Thunderhead Engineering

Fig. 2. Nursing Hospital Layout Plan

Consultants, Inc. (2019)에서 개발한 Pathfinder를 사용하였다. Eq. (1)은 피난자의 무력화 상태를 나타내는 ASET과 RSET의 조건을 나타낸다.

$$ASET - RSET < 0 \quad (1)$$

2.2 대피공간 모델

Fig 2는 요양병원의 평면도를 나타낸다. 연면적은 2,465.35 m²의 4층 건축물로서 화재층을 2층이며, 5인실 15개, 휴게실 2개와 재할실로 구성되어있다.

기존 1층 외부로의 출구는 남과 북으로 연결된 2개의 출입구로 구성되며, 수직 대피로는 Stair 1과 Elevator 1, 중앙 부의 Stair 2와 Elevator 2, 3로 총 5개로 구성되어있다. 본 연구에서는 경사로의 효용성을 파악하기 위하여 건축물 오른쪽에 경사로를 추가하여 2층에서 1층을 거치지 않고 외부로 탈출이 가능하였다.

Table 2는 대피공간 세부조건으로 화재 층 넓이와 각 대피로 조건을 나타낸다.

3. 화재 · 피난 시뮬레이션 조건

3.1 화재 시뮬레이션 조건

모든 문은 개방 조건이며 창문은 폐쇄 조건이다. 소방설비는 작동하지 않는 것으로 가정하였다. 화재 층은 2층으로

Table 2. Spacial Condition

Fire Floor		Area	2,465.35 m ²
Evacuation Route	Elevator 1	Capacity	38 N
		Running Speed	26 sec/round trip
		Width	4 m
		Length	2.7 m
	Elevator 2, 3	Capacity	17 N
		Running Speed	26 sec/round trip
		Width	1.62 m
		Length	3.5 m
	Ramp	Slope	4.76°
		Width	1.5 m
		Length	70.59 m
	Stair	Height	17.9 cm
		Width	1.25 m
		Length	10.1 m

설정하였으며, Fig. 2에 화재 위치를 나타낸다.

화재 시나리오는 침대 화재로 설정했으며, 가연물은 최소 침대 1개, 최대 침대 5개로 설정하였다.

Table 3은 화재로부터의 공간 분포를 분석하기 위한 FDS 화재 시나리오에 적용된 변수값을 나타낸다. 침대의 발열량은 300초에서 최대가 되며, 침대 1개당 발열량은 1,778.95 kW로 설정했으며, 매트리스의 발열량 곡선을 Fig. 3에 나타내었다(Kim et al., 2012).

Table 4는 ‘소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준 (NFA, 2017)’의 별표 1에 의해 적용된 성능설계 기준인 독성가스, 열, 가시거리의 한계값을 나타낸다.

Fig. 3. HRR of Bed Mattress

Table 3. Fire Scenario Parameters

Parameter		Value	Etc.
Fire duration		900 s	-
Initial temp.		20 °C	Air Temp.
Fire Source (Mattress)	Number	1, 5 EA	-
	Size (W × D × H) [mm]	1,090 × 200 × 2,000	-
	Weight (kg)	21.40	-
Heat Release Rate		1,778.95 kW	Max peak at 245 s
Fire source location		Center	-
Analysis area		2,274 m ²	-
Firefighting equipment		Not Working	Ventilation sprinkler

Table 4. Performance Criteria for Life Safety

Evaluation Height		1.8 m from the Floor	
ISO	FED	Less than 0.3	
Domestic	Breath Height Limit	1.8 m from Floor	
	Temperature Limit	Less than 60 °C	
	Allowable Visibility	More than 5 m	
	Allowable Toxicity Limit	CO	Less than 1,400 ppm
		O ₂	More than 15%
		CO ₂	Less than 5%

3.2 피난 시뮬레이션 조건

재실자 조건은 의사, 간호사, 도우미, 걸을 수 있는 환자, 지팡이 등의 보조기구를 쓰는 환자, 도우미가 없거나 도우미 1명이 필요한 휠체어 환자, 도우미 2명이 필요한 침상 환자로 구성하였다. 환자의 수는 국내 보건복지부의 요양병원 입원 환자 분류군의 요양병원 환자 중증도 비율에 따라 배치하였으며 Table 5에 나타내었다(MOHW, 2019).

2층 인원은 Table 5와 재실밀도를 기준으로 배치하였으며 Table 6과 같다.

입원환자들의 중증도 비율에 따라 침상 환자와 도우미가 필요한 휠체어 환자는 Medical Highest + Medical High,

스스로 휠체어를 이용하는 환자는 Medical Middle, 보조 기구와 스스로 걸을 수 있는 환자는 Medical Low + Etc로 하여 2층 입원환자의 종류별 인원수인 Table 7을 구성하였다.

Table 8은 한국인 인체치수조사에서 측정한 재실자의 인체 치수를 나타낸다(Size Korea, 2015).

Table 9는 한국표준협회에서 규정한 휠체어 및 식품의약품안전처에서 규정한 침상의 치수를 나타낸다(KSA, 2018; MFDS, 2019).

Table 10은 재실자 구분에 따른 이동 속도를 나타낸다(Kim et al., 2005; Erica et al., 2013; Choi et al., 2009).

Table 11은 대피로 별 시뮬레이션에 적용된 환자의 장애

Table 5. Number of Patients by Severity

Status	Ratio	The Number of People (N)
Medical Highest	1.8%	1
Medical High	22.9%	17
Medical Middle	24.8%	19
Medical Low	22.8%	17
Etc	27.7%	21
Total	100%	75

Table 6. Number of People from 2F

Occupants	Number of People (N)
Doctor	1
Nurse	6
Caregiver	30
Inpatient	75
Staff	1
Total	113

Table 7. Number of Patient from 2F

Inpatient	Number of People (N)
Walkable	16
Assist Device	22
Wheelchair (Self)	19
Wheelchair (Aid)	12
Bedridden	6
Total	75

Table 8. Human Body Size

Occupants	Shoulder Size (cm)	Height (m)
Non-disabled	32.6~47.9	14.9~1.915
Caregiver	31.1~43.9	1.448~1.874
Inpatient	30.4~42.5	1.354~1.793

Table 9. Wheelchair, Bed Size

Vehicle	Size (m)
Bed	2 × 1 × 1
Wheelchair	1.004 × 0.7 × 0.875

Table 10. Walking Speed of the Occupants

Occupants	Speed (m/s)
Doctor, Nurse, Caregiver, Staff	1.5
Bedridden	1.0
Wheelchair (Aid)	0.91
Walkable	0.87
Wheelchair (Self)	0.83
Walking Assist Device	0.57
Evacuation with Support (At stair)	0.21

Table 11. Evacuation Movement Patterns according to the Degree of Disability

Disability	Horizontal Evacuation		Vertical Evacuation
	Elevator & Ramp & Stair	Elevator & Ramp	Stair
Walkable or Use Assist Device (Cane)
Wheelchair (Self)
Wheelchair (Aid)
Bedridden

정도에 따른 대피 이동 패턴을 나타낸다.

Table 12는 적용된 Case 별 대피방식을 나타낸다. Case 1은 재실자들이 모두 엘리베이터 1~3을 이용해 대피하며, Case 2의 경우 계단만 사용하여 대피하므로 도우미가 필요한 휠체어 환자나 침상 환자의 경우 각각 1명, 2명의 도우미가 병실에서부터 환자와 동반 이동한다. Case 3는 경사로를

통해 대피하며, Case 4는 휠체어 환자 및 침상 환자는 엘리베이터로 대피하도록 하였다. Cases 5, 6, 7과 같이 경사로 또는 엘리베이터로 대피하는 경우 휠체어 환자, 침상 환자는 경사로 및 엘리베이터 대피를 우선으로 설정하였다.

4. 화재 · 피난 시뮬레이션 결과

4.1 화재 시뮬레이션 결과

Table 13은 침대의 연소 개수와 대피시간 경과에 따른 각 대피로 출구에서 높이 1.8 m를 기준으로 인명안전기준 평가 6항목에 대한 실시간 변화값을 나타낸다.

피난허용시간은 가시도에 의해 지배적임을 Table 13으로부터 확인할 수 있으며 침대1개 화재조건에서는 가시도를 제외한 발생인자는 안전기준에 충족한다. Table 14는 대피로 별 침대 1개와 5개의 화재발생조건별 피난허용시간(ASET)을 나타낸다.

4.2 피난 시뮬레이션 결과

Fig 4는 각 대피방식별 이동 모습으로 모든 대피 방식에서 공통적으로 진입구에 병목현상이 발생하는 것이 확인되었다.

Fig. 5(a)는 침대 1개가 연소하는 경우의 RSET을 나타낸다. 피난 시간이 가장 긴 경우는 Case 1의 엘리베이터 전용으로 대피하는 경우로 나타났으며, Case 5인(엘리베이터 + 경사로)의 경우 RSET이 가장 단축되는 것으로 나타났다.

Fig. 5(b)은 침대 5개가 연소하는 경우의 피난시간을 나타낸다. 침대 1개가 연소하는 경우와 동일하게 Case 1에서 가장 피난 소요 시간이 발생하나, Case 6인(계단 + 경사로)에서 피난시간이 가장 빠른 결과로 나타났다. 이러한 결과는 침대 1개가 연소했을 때와 비슷한 경향으로 나타났으나, 전체시간은 더 많이 소요되는 특성으로 나타났다.

다만, Case 7에서 대피로의 수가 증가하여 대피경로가 늘어났으나 재실자들이 엘리베이터를 이용해 대피하는 구간에서 병목현상이 심화되어 피난시간이 더 오래 걸리는 것으로 나타났다.

Table 15는 Case 별로 위험한계 이상으로 노출된 재실자수

Table 12. Case of Evacuation Route

Case No.	Evacuation Route
One Evacuation Route	Case 1 Elevator
	Case 2 Stair
	Case 3 Ramp
Two or more Evacuation Route	Case 4 Elevator + Stair
	Case 5 Ramp + Elevator
	Case 6 Ramp + Stair
	Case 7 Ramp + Stair + Elevator

Table 13. The Result of Graphs for the 1 Bed, 5 Beds

Table 14. ASET by an Evacuation Route

Evacuation Route	ASET (s)	
	1 Bed	5 Beds
Case 1	469	309
Case 2	430	334
Case 3	518	330
Case 4	469	334
Case 5	518	330
Case 6	518	334
Case 7	518	334

Fig. 4. Bottleneck of each Evacuation Route

Fig. 5. Evacuation Time

Table 15. Predicted Number of Fatalities by Case (ASET - RSET < 0)

Case No.	Predicted Number of Fatalities
Case 1	6
Case 2	2
Case 3~7	-

Fig. 6. Comparison of ASET and RSET

를 나타낸다. 침대 1개 화재의 경우, 재실자는 모두 대피 가능하고, 침대 5개 화재 경우에는 분산대피의 경우에 시간 내에 모두 대피 가능하나, Case 1의 경우 가시도에 의한 영향을 가장 크게 받아 113명 중 6명, Case 2는 2명이 대피하지 못하는 결과로 나타났다.

4.3 화재 · 피난 시뮬레이션의 비교

Fig. 6은 침대 1개와 5개의 화재에서 ASET과 RSET의 비교한 결과를 나타낸다.

침대 1개를 연소한 경우 모든 Case에서 ASET > RSET 조건을 만족하므로 안전한 대피결과로 나타났다. 그러나

침대 5개 연소조건에서 ASET < RSET의 Case가 존재하여 사상자가 발생한다. 단독대피인 Case 1, 2, 3 조건보다 분산대피조건인 Case 4, 5, 6, 7은 RSET값을 낮게 유지가능함에 따라 분산대피의 효율적 활용을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 경사로의 효율성을 확인하고자 요양병원을 대상으로 엘리베이터와 계단, 경사로에서의 단독 및 분산대피 시뮬레이션을 비교하여 경사로의 효율성을 판단한 결과는 다음과 같다.

Visibility 기준은 피난 허용 시간에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, Temperature, FED 순으로 영향을 미친다. O₂와 CO₂, CO는 피난 허용 시간 내에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 나타난다.

분산대피 조건인 Cases 4, 5, 6, 7은 단독대피조건 Cases 1, 2, 3보다 피난 시간이 단축됨을 확인하였다. 단독대피 중 Case 3인 경사로의 RSET이 가장 낮은 203초, 210초로 확인되었으며, 침대 1개가 연소조건인 경우 분산대피의 RSET은 Case 5 < Case 6 < Case 4 < Case 7으로 각각 141초, 150초, 202초, 205초이다. 침대 5개가 연소조건인 경우 분산대피의 RSET은 Case 6 < Case 7 < Case 5 < Case 4로, 각각 151초, 215초, 251초, 320초이다.

엘리베이터 대피의 경우 단독대피보다 경사로가 함께 반영된 대피로의 대피시간 단축이 가능함을 밝혔다. 엘리베이터 대피가 가능하더라도 계단과 경사로를 이용하는 것이 피난 시간을 단축할 수 있음을 밝혔다.

경사로 단독대피 또는 분산대피로 활용 시 다른 대피방식에 비해 RSET의 감소에 크게 기여함으로써 요양시설에 필요불가결한 대피로 구조임을 밝혔다.

가연물이 침대 1개인 경우와 5개인 경우를 비교하면 침대 1개를 연소한 경우가 5개를 연소한 것에 비해 ASET값이 작게 나오며, 이를 Pathfinder에 적용해 ASET과 RSET을 비교했을 때, 침대 1개의 연소는 사상자가 발생하지 않았으나, 침대 5개를 연소시켰을 경우 사상자가 발생함에 따라 가연물 관리의 중요성을 밝혔다.

References

Choi, C.J., and Kong, H.S. (2021). Evacuation safety evaluation according to slope of the school ramps. *International Journal of Advanced Smart Convergence*, Vol. 10, No. 1, pp. 184-196.

Choi, J.H., Jeon, E.M., Hong, W.H., and Ryou, H.S. (2009). Calculation of revision coefficient of evacuee's walking speed to operate an evacuation simulator

aiming at a high-rise building. *Journal of The Architectural Institute of Korea*, Vol. 29, No. 1, pp. 649-652.

Erica, K., Richard, P., Emily, W., and Bryan, H. (2013). Stair evacuation of older adults and people with mobility impairments. *Fire Safety Journal*, Vol. 62, Part C, pp. 230-237.

Hong, S.B., Jang, J.S., Park, H.A., and Rie, D.H. (2015). A study on evacuees risk assessment for application of spatial risk information. *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 8-12.

Kim, D.E., Hong, H.R., Seo, D.G., and Kwon, Y.J. (2012). A study on the fire behavior of combustibles for prediction of fire in an apartment house. *Journal of the Architectural Institute of Korean Planning & Design*, Vol. 28, No. 3, pp. 73-80.

Kim, E.S., Lee, J.S., Kim, M.H., You, H.K., Song Y.H., and Min, K.C. (2005). A study on evacuation of patients in hospital: part I. *Fire Science and Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 20-28.

Kim, J.B., Kim, J.O., and Back, E.S. (2010). A study on the evaluation of evacuation safety function of an elderly care hospital. *Fire Science and Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 9-19.

Lee, D.H., Heo, I.W., Khaliunaa, D., Han, S.J., and Kim, K.S. (2020). Performance-based evaluation on egress safety of nursing hospitals considering egress guides and delay time. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 3, pp. 149-157.

MFDS. (2019). *Standard for medical devices*.

MOHW. (2019). *7th Meeting of the Health Insurance Policy Review Committee*, p. 12.

KSA. (2018). *KS P 6113*.

NFA. (2017). *Performance based design methods and standards on fire-fighting system installation act, Annex1*.

NIST. (2013). *Fire dynamics simulator user's guide*.

Size Korea. (2015). *Korean human body index survey*.

Statisticis Korea. (2020). *Statistics for the elderly*.

Thunderhead Engineering Consultants, Inc. (2019). *Pathfinder user manual*.

Received	December 1, 2021
Revised	December 2, 2021
Accepted	December 8, 2021