

A-02

## 초고층 건물의 엘리베이터 피난 대책에 대한 연구

황현수\*, 윤아영\*, 최두찬\*, James H. Antel\*\*

\*(주)한국방재엔지니어링, \*\*Rolf Jensen & Associate

### A Study of Elevator Assisted Evacuation for Super High-rise Building

Hyun-Soo Hwang\*, A-Young Yun\*

Doo Chan Choi\*, James H. Antel\*\*

#### 요 약

과거 수년간 엘리베이터를 이용한 피난은 지속적인 논쟁의 대상이었으며, 일반적으로 대부분의 국가에서는 화재 시 엘리베이터의 이용을 금지하고 있는 실정이다. 그러나 WTC 사고 이후 초고층건물에서 엘리베이터를 이용한 피난대책이 계획되고, 일부는 채택되고 있는 상황이다.

본 연구는 초고층 건물에서 엘리베이터를 이용한 피난이 얼마나 피난시간을 단축하는 지에 대하여 실제 건물 설계 사례를 중심으로 연구해 보고자 한다.

#### ABSTRACT

Using elevators for emergency evacuation has been a controversial topic during the past few years. Generally, elevators are not allowed to be used in the event of a fire or emergency situations all around the world. However elevators assisted emergency evacuation procedures are considered and some of the plans are developed and accepted by the building management and local authorities after 9/11 WTC tragedy.

The aim of this study is to quantify the benefit of elevator assisted emergency evacuation based on an actual super high-rise building design.

#### 1. 서 론

과거 수년간 엘리베이터를 이용한 피난은 지속적인 논쟁의 여지가 있는 연구 과제였다. 현재까지도 대부분의 나라들에서는 엘리베이터를 이용한 피난을 금지하고 있고, 단지 피난계단을 통한 거주자의 피난을 그 기본으로 명시하고 있다. 그러나 최근 건물은 초고층화 추세에 있으며, 이에 따른 위험의 종류도 다양해지고 그 영향 또한 증대되고

있다. 우리는 이미 미국의 'WTC' 참사를 통해 초고층 건물에서 계단만을 이용한 거주자 피난은 비효과적이고 한계가 있음을 알고 있다. 이에 앞서 역시 같은 건물인 'WTC'에서 1993년 폭탄테러 사고 시 거주자의 피난시간이 3시간을 초과하였다는 연구 결과가 있다. 일반적으로 법규에 의해 피난계단이 2 - 3시간의 내화구조로 구획되어 있다는 사실을 감안하면 이는 피난시간의 단축이 요구됨을 반증하는 연구결과이다. 이러한 사례 및 연구를 토대로 초고층 건물에서 엘리베이터를 이용한 피난대책이 계획되고, 채택되는 프로젝트가 늘고 있다. 실제로 현재 세계에서 가장 높은 건물(160층)로 기록된 '버즈 두바이(Burj Dubai)' 빌딩의 경우, 엘리베이터를 이용한 피난 대책이 계획되어 비상대응 대책의 중요한 부분으로 명시되어 있다.

엘리베이터를 이용한 피난은 성능위주설계(Performance based design)의 한 부분으로 간주되어야 하며, 거주자의 전체 피난(Total evacuation)이 요구되는 초고층건물에 대해서는 제도적으로 허용할 수 있는 절차가 수립되어야 할 것이다.

국내에도 '초고층 붐' 이라고 표현할 만큼 여러 100층 이상 또는 그에 준하는 초고층 건물 프로젝트가 진행되고 있다. 특히 이들은 지금까지 국내 초고층 건물 중 많은 수를 차지하고 있는 거주용도 위주의 주상복합건물이 아닌 오피스, 위락, 호텔, 판매 등의 용도로 불특정다수의 인원이 거주하게 되어 그 위험도가 더욱 증가된 복합건축물의 형태를 가지고 있다. 따라서 국내에서도 이러한 초고층 건물에서의 피난 및 비상대응의 연구와 대책 수립이 필요하다. 본 연구에서는 초고층 건물의 엘리베이터를 이용한 피난과 피난용 엘리베이터 설계에 대한 기본 개념을 정리하고 실제 초고층 건물의 피난 시뮬레이션을 기반한 피난시간의 수치적 비교를 통해 엘리베이터를 이용한 피난의 필요성을 입증하는데 그 목적이 있다.

## 2. 엘리베이터 비상 피난의 종류

미국의 '고층건물 도시환경협회 (The Council on Tall Buildings and Urban Habitat : CTBUH)'에 의하면 엘리베이터를 이용한 비상 피난은 다음 세 가지로 분류할 수 있다.

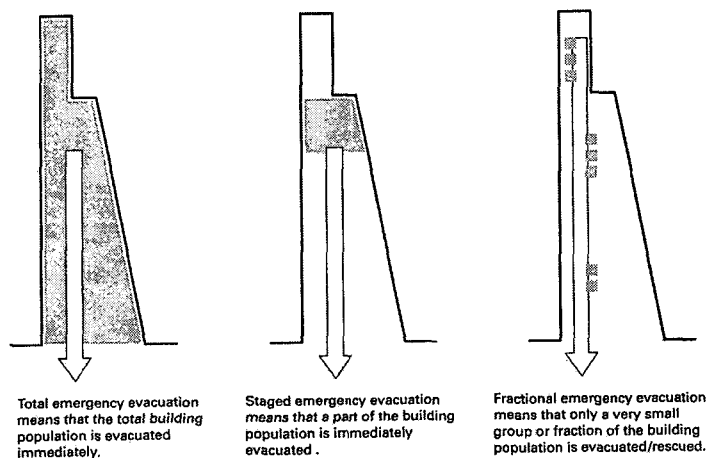


Figure 1. Generic Emergency Types

### 2.1 전체 비상피난(Total Emergency Evacuation)

전체 비상피난(Total Emergency Evacuation)은 건물의 전체 거주자들이 건물로부터

의 완전한 피난을 목적으로 하는 비상피난의 단계이다. 전체피난은 극히 드문 경우이지만 건물 설계팀은 반드시 고려해야 하는 여러 가지 가능한 시나리오의 경우에 고려될 수 있다. 예로 건물 내부 또는 건물 주위에서의 대형 화재, 폭탄테러, 생화학적 공격 위협, 기상이변 또는 천재지변에 의한 자연재해 위협 등의 경우에 전체피난이 요구될 수 있다. 이외에도 건물 전체의 정전, 단수 등의 사용제한과 대피가 요구되는 상황에서도 전체피난을 고려할 수 있다. 전체 피난의 목적은 건물의 전체 거주자들의 즉각적인 피난이므로 피난 시 이용가능한 모든 엘리베이터가 사전에 계획되어 건물 비상대응대책에 명시되어야 한다.

## 2.2 단계적 비상피난 (Staged Emergency Evacuation)

단계적 비상피난 (Staged Emergency Evacuation)은 건물의 일부분의 거주자의 피난 또는 안전한 지역으로의 이동을 목적으로 하는 비상피난의 단계이다. 일반적인 화재나 기타 재해 위협 등이 이 경우의 가능한 시나리오이다.

## 2.3 부분적 비상피난 (Fractional Emergency Evacuation)

부분적 비상피난은 건물의 특정 거주자 그룹의 피난 또는 안전한 지역으로의 이동을 목적으로 하는 비상피난의 단계이다. 이 단계에서의 엘리베이터는 노약자나 장애인으로 이루어진 그룹의 피난과 소방대원과 같은 비상대응반의 건물로의 진입 시에도 활용되어 질 수 있다.

# 3. 엘리베이터의 디자인

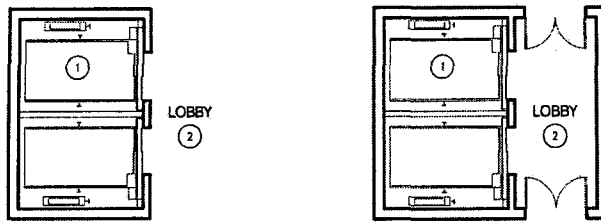
일반적으로 초고층 건물에서 엘리베이터의 형태는 일반(Standard), 강화(Enhanced) 그리고 방호(Protected) 엘리베이터 세 가지로 분류할 수 있다.

## 3.1 일반 엘리베이터 (Standard Elevator)

일반 엘리베이터는 로비가 각층에서 개방되어 있고 어떠한 방화구획이나 제연구획이 되어 있지 않은 엘리베이터 로비를 포함하고 있는 형태이다. 이 같은 일반 엘리베이터는 기상이변이나 정전 등과 같은 엘리베이터 시스템에 어떠한 위험도 없는 비화재 시나리오의 경우에 일부 사용되어 질 수 있다. 일반 엘리베이터는 소방대원 또는 건물 비상대응반의 판단에 의해 제한적으로 비상 피난에 이용될 수 있다.

## 3.2 강화 엘리베이터 (Enhanced Elevator)

강화 엘리베이터는 일반 엘리베이터와 유사하지만 일부 엘리베이터 시스템과 승강로(Hoistway)의 디자인에서 강화된 부분을 가지고 있다. 강화 엘리베이터는 로비가 방화문을 포함한 제연벽으로 구획되어 있다. 초고층 건물의 연돌효과(Stack effect)와 연기의 자연 부력(Natural Buoyancy)에 의한 엘리베이터 승강로를 통한 연기의 이동이 엘리베이터 시스템에 대한 대표적인 위험과 손상의 원인이기 때문에 로비에 대한 분리 및 구획이 요구된다. 이같은 강화 엘리베이터는 화재 또는 비화재 시나리오 모두의 경우에 사용되어 질 수 있다. 강화 엘리베이터는 열 및 연기 센서를 장착하고, 또한 비상 운전 모드의 설정이 필요하며, 리모트 콘트롤 기능과 모니터링 시스템 역시 필요하다.



**Standard elevator**

1. Elevator car in standard hoistway
2. Unenclosed elevator lobby

**Enhanced elevator**

1. Hoistway improved with sensors, heat and water resistance of electrical components.
2. Lobby provided with smoke stop doors.

**Protected elevator**

1. Pressurized elevator car in a hoistway improved with sensors, heat and water resistant electrical components, pressurization and blast resistant walls.
2. Lobby provided with two-hour rated fire doors.
3. fire pressurization shaft and direct access to
4. emergency stairs within a separate fire and blast protected compartment.
5. Standpipe and hoses would be in the lobby.

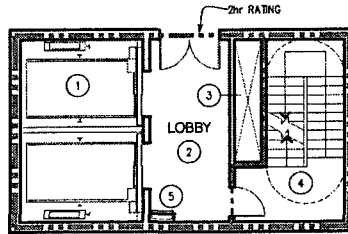


Figure 2. Three Basic Elevator Design Approach

**3.3 방호 엘리베이터 (Protected Elevator)**

방호 엘리베이터는 다양한 위험요소로부터 보호할 수 있는 추가적인 보호수단이 설치된 엘리베이터이다. 방호 엘리베이터는 비상피난 시와 소방대원의 화재진압 시에 가장 효과적인 형태의 엘리베이터이다. 현재 여러 초고층 건물 프로젝트에서 비용문제로 제한된 수의 방호 엘리베이터를 설치하고 사용하는 계획을 가지고 있다. 가장 잘 알려진 방호 엘리베이터의 개념은 ‘유럽 연합(EU)’의 엘리베이터 기준 EN81-72이다.

엘리베이터 승강기와 승강로는 가압되어 보호되고 벽체는 폭발에 견디어 낼 수 있는 구조로 되어 있다. 각종 센서의 장착과 모든 전기적 시스템은 방수 및 내열구조로 되어 있다. 엘리베이터 로비는 모든 거주 공간, 기계 및 전기실 등과 최소 2시간 이상의 방화구조로 구획되어야 한다. 로비는 충분한 공간이 확보되어야 하며, 화재진압을 목적으로한 무선통신 보조설비 및 비상시 통신수단이 설치되어 있어야 한다. 방호 엘리베이터는 일반 전기시설 외에도 충분한 비상발전시설에 의해 작동되어 질 수 있어야 한다. 엘리베이터 기계실은 방화구획되어야 하고 자동 소화설비가 설치되어야 한다.

**3.4 방호 엘리베이터 시스템**

앞서 언급했듯이 방호 엘리베이터의 모든 전기적, 기계적, 화재경보, 안전, 통신 설비는 화재, 폭발, 지진 및 자연 재해 시에도 그 기능을 충분히 발휘할 수 있는 강화된 성능을 갖추어야 한다. 엘리베이터의 승강로, 로비, 기계실 등에서의 화재감지 시에는 계획된 층으로의 엘리베이터가 자동으로 리콜되는 ‘1 단계 엘리베이터 리콜(Phase I Elevator Recall)’과 소방대원이나 비상대응반의 비상작동을 위한 ‘2 단계 엘리베이터 작동(Phase II Elevator Operation)’ 모두 요구되어 진다. 방재센터에는 엘리베이터를

모니터링 하고 작동을 제어할 수 있는 제어반이 설치되어야 하고 관련된 화재경보, 제연, 가압설비의 감시 및 제어 그리고 엘리베이터의 자동, 수동제어 역시 가능해야 한다.

엘리베이터 작동을 위한 100%의 비상전원이 준비되어 있어야 한다. 일반적으로 건물의 전체 피난시간을 고려하여 1~2시간 이상 용량의 비상전원을 필요로 한다.

엘리베이터 로비에는 자동화재탐지설비, 소방대원용 통신장비와 거주자용 전화설비, 방재센터에서의 감시를 위한 CCTV 설비가 제공되어야 한다. 이 같은 설비는 비상피난시 사용될 방호 엘리베이터 승강기 안에도 역시 제공되어야 한다.

현재까지 엘리베이터의 수용인원에 대한 국제적 규격은 정해져 있지 않다. 각 지역별로 정해진 수용 무게제한은 유럽엘리베이터 코드 'EN81-72'의 경우 630kg, 미국의 'ADA'은 950kg 이상, 모스크바 기준에서는 1000kg 이상으로 규정되어 있다.

#### 4. 엘리베이터 피난 시간의 계산

본 장에서는 실제 초고층 건물 연구사례로서 피난계단만을 이용한 피난시간과 엘리베이터를 함께 이용한 피난시간의 비교 분석을 통하여 엘리베이터 피난의 필요성에 대해서 이론적으로 검토 및 고찰해보고자 한다.

일반적으로 엘리베이터 피난시간을 계산하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 다음의 수식(1)을 이용한 계산방법이 있다.

$$t_e = t_a + t_o + \frac{(1+n)}{J} \sum_{j=1}^m t_{r,j} \quad (1)$$

$t_e$  : 피난 시간

$t_{r,j}$  : 엘리베이터 RTT (Round-Trip Travel Time)

$t_a$  : 엘리베이터 피난 시작 시간

$t_o$  : 거주자의 로비에서 외부로의 이동(Travel) 시간

J : 엘리베이터 수

n : 엘리베이터 효율 계수

두번째는 컴퓨터 피난 시뮬레이션 모델을 이용한 계산 방법이 있다. 본 연구에서는 피난 시뮬레이션을 이용하여 피난시간을 계산하였다. 피난시뮬레이션 모델은 미국 'Rolf Jensen&Associates (RJA)'사가 개발한 'PathFinder'을 사용하였다. 'PathFinder'은 미국 'Society of Fire Protection Engineers(SFPE)'의 핸드북의 'hydraulic flow' 피난 공식에 기반한 최적화 피난 시뮬레이션 모델이다. 이같은 시뮬레이션 안의 공식들은 거주자의 수, 허용 피난로 등의 요소를 기반으로 시간 대 거리 원칙에 준한 피난 시간을 결정한다.

연구 대상인 건물은 국내에서 진행되고 있는 112층의 'L'빌딩이다. 이 빌딩은 업무, 판매, 호텔/주거 등의 복합용도의 건축물로서 상당수의 불특정인이 거주하게 될 예정이다. 112층의 건물 높이에 따른 안전 특성상, 일반 화재의 경우에는 3개층의 피난을 피난대책의 기본 개념으로 하고 있다. 또한 이러한 비상대응대책에서는 일차적인 피난수단으로 특별피난계단을 이용하는 것을 원칙으로 한다. 즉 일반 화재시 화재층과 그 상, 하층의 거주자 만 피난계단을 통하여 피난층 또는 계획된 'Area of Refuge'로 대피하는 것을 의미한다. 'Area of Refuge'에 도착한 거주자들은 소방대원 또는 건물내부의 훈련된 비상대응반의 지시에 따라 피난층으로의 피난을 계속하거나 대기할 수 있다. 건물의

모든 피난계단은 건물의 15, 43, 75, 107층에 위치한 'Area of Refuge'로 향한다. 'Area of Refuge'는 2시간의 방화구조로 구축되어 있고 가압설비 등이 설치되어 연기의 유동으로부터 최대한 보호될 수 있는 구조로 되어있다.

본 연구에서는 그 목적상, 전체 피난시의 상황을 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 시나리오는 다음의 두가지이다.

- Scenario T-1/ Base Condition - 거주자는 특별피난계단만을 이용하여 피난층으로 대피한다. 'L'빌딩에는 2개소의 특별피난계단이 계획되어 있다.
- Scenario T-2/ Alternate Condition - 일부 거주자는 특별피난계단을 통하여 피난층으로 대피하고 나머지 거주자들은 'Area of Refuge'로 피난 후 그곳에서 비상대응반에 의해 운행되는 엘리베이터를 이용하여 피난층으로 이동한다. 총 20개의 피난용 엘리베이터가 계획되어 있다.

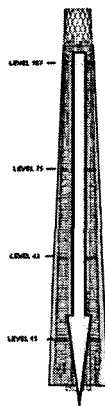
거주자의 수는 'International Building Code'의 용도별 면적에 따른 거주자 분포도와 각층의 실제 내부 사용계획에 기반하여 결정하였다. 'L'빌딩의 총 거주자 수는 21,209 명으로 가정하였다.

#### 4.1 시나리오 T-1: 피난계단 2개소

총 21,209 명의 피난 시뮬레이션을 실시하였다. 피난 시뮬레이션이 시작되면 거주자는 가장 가까운 거리에 있는 계획된 계단을 향하여 움직인다. 시나리오 T-1의 결과는 다음의 Table 1과 같다. 총 피난시간이 약197분으로 3시간을 초과했음을 알 수 있다.

Table 1.

Scenario T-1 / Base Condition Pathfinder Results		
<i>Number of Occupants Using Stairs</i>	Evacuation Simulation Time (min:sec)	Average Flow Rate
21,209	197:16	107.9 persons/min



Total Emergency Evacuation	
Scenario T-1	Two Exit Stairs
Scenario T-2	Two Exit Stairs and Twenty Express Elevators

Figure 3. Two Scenarios for Elevator Assisted Evacuation

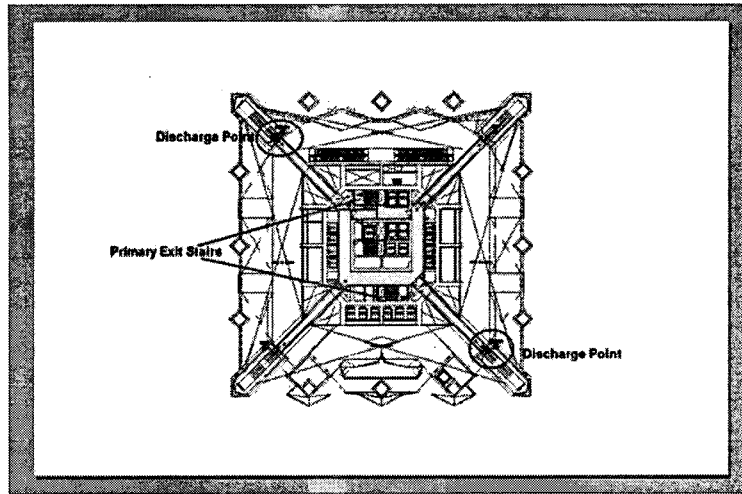


Figure 4. PathFinder Egress Modeling/Exit Stairs

4.2 시나리오 T-2: 피난 계단 2개소와 20개의 피난 엘리베이터

시나리오 T-1과 똑같은 총 21,209 명의 피난 시뮬레이션과 계산을 실시하였다. 엘리베이터를 이용한 피난시간을 산정하기 위해서는 각 엘리베이터의 최대수용인원과 왕복 이동시간인 Round-Trip Travel Time(RTT)의 산정이 필요하다. 다음의 Table 2는 엘리베이터 컨설턴트의 자료에 기초하여 산정된 RTT와 최대수용인원을 나타내고 있다.

Table 2.

Elevator Description	No. of Cars Operating	RTT (sec)	Total Number of Occupants	Average Flow Rate
OBX-1,2 Ob-Deck Express	2 cars	106.9	54 (27 per Car)	30.3 persons/min
HX-1,2,3,4,5,6 Hotel Express	6 cars	109.9	198 (33 per Car)	108.1 persons/min
OX-B1,2,3,4,5,6 Office Group B Express	6 cars	91.1	198 (33 per Car)	130.4 persons/min
OX-A1,2,3,4,5,6 Office Group A Express	6 cars	76.9	198 (33 per Car)	154.5 persons/min
			<i>Total:</i>	<i>423.3 persons/min</i>

계산된 Flow rate를 통해서 시나리오 T-2의 총 피난시간을 다음과 같이 계산 및 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Stair Flow Rate} + \text{Combined Elevator Flow Rate} &= \text{Total Flow Rate} \\ 107.9 \text{ persons/min} + 423.3 \text{ persons/min} &= 531.2 \text{ persons/min} \\ \text{Total Number of Occupants} / \text{Total Flow Rate} &= \text{Total Evacuation time} \\ 21,209 \text{ occupants} / 531.2 \text{ persons/min} &= 40 \text{ minutes} \end{aligned}$$

Flow rate의 비교와 계산된 피난시간을 통해서 엘리베이터를 이용하게 되는 인원의

수를 다음의 Table 3을 통하여 가정할 수 있다.

Table 3에서와 같이 16,932명의 거주자가 엘리베이터를 이용하고 4,277명이 피난계단을 이용한다는 가정 하에 다시 PathFinder 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 3.

Elevator Description	Average Flow Rate	Calculated Evacuation Time (min)	Number of Occupants Evacuated by Elevators
OBX-1,2 Ob-Deck Express	30.3 persons/min	40	1,212
HX-1,2,3,4,5,6 Hotel Express	108.1persons/min	40	4,324
OX-B1,2,3,4,5,6 Office Group B Express	130.4 persons/min	40	5,216
OX-A1,2,3,4,5,6 Office Group A Express	154.5 persons/min	40	6,180
		<i>Total</i>	<i>16,932</i>

Table 4.

Scenario T-2 / 11 Elevators - 2 Ob-Deck Express, 6 Hotel Express and 12 Office Express Elevators				
Number of Occupants Using Stairs	Number of Occupants Using Elv.	Evacuation Simulation Time	(min:sec)	Average Flow Rate
4,277	16,932	65:46		94.1 persons/min
Total	21,209			

### 4.3 피난 시뮬레이션 결과

각각의 피난시뮬레이션 결과는 다음의 Table 5에 요약되어 있다. 피난 시 엘리베이터를 함께 이용하면 약 67%의 시간 단축을 기대할 수 있다. 또한 피난계단만을 이용 시 피난계단은 2 -3시간 내화구조인데 반해 그 피난 시간이 3시간을 초과하여 거주자의 위험을 초래할 수도 있다고 판단된다. 위의 연구는 Flow Rate, 즉 비율의 차이를 통한 비교분석을 기반으로 하고 있다. 또한 Path Finder 모델은 거주자의 움직임에 기반을 둔 모델이기 때문에 비상시 인간의 행동변화에 대한 영향은 판단이 불가능하다. 이러한 불확실성의 요소들과 안전율(A Factor of Safety)을 감안한다면 시뮬레이션 시간에 다소 차이가 있을 수 있다. 그러나 엘리베이터를 이용한 피난대책의 이점과 필요성을 증명하기에는 충분한 자료임을 알 수 있다.

Table 5.

Scenario	Number of Occupants Evacuated by Elevators	Simulated Evacuation Time (min)	Percent Reduction in Base Condition Evacuation Time
T-1 / Base Condition	0	197:16	-
T-2 / Alternate Condition	16,932	65:46	67%



## 5. 결 론

이상에서 고찰해 본 바와 같이 다수의 인원이 거주하는 초고층 건물에서의 전체 피난시에는 피난계단만으로는 허용피난 시간 내에 거주자 전원이 피난하는 것은 무리가 있기 때문에 엘리베이터를 이용한 피난시간의 단축을 계획하여야 함을 알 수 있었다.

따라서 최근 초고층 건물의 경향에 부합하는 기준의 제정이나 성능위주의 설계에 기초한 연구 결과를 바탕으로 초고층 건물에서 엘리베이터를 이용한 피난을 예외적으로 수용할 수 있는 제도적 절차가 도입되어야 할 필요성이 있다.

다만 피난용 엘리베이터는 초기 건물의 설계 단계에서부터 계획되어야 하고, 적절한 시공이 필요하며, 화재 시 엘리베이터의 적정한 운영을 위하여 평상시 종합적인 매뉴얼에 근거한 적절한 유지관리가 필요하다.

또한 실제 비상 상황에서 피난용 엘리베이터의 이용에 성공하기 위해서는 거주자에 대한 교육과 훈련이 반복적으로 지속되어야 할 것이다.