

건축물 건설공사시 화재피난안전성 평가에 관한 연구

정명진 · 이명구[†] · 함은구

을지대학교 보건환경안전학과

(2014. 11. 18. 접수 / 2014. 12. 17. 수정 / 2014. 12. 19. 채택)

Assessment of Fire Evacuation Safety for Building Construction

Myeong-Jin Jeong · Myeong-Gu Lee[†] · Eun-Gu Ham

Department of Environmental Health and Safety, Eulji University

(Received November 18, 2014 / Revised December 17, 2014 / Accepted December 19, 2014)

Abstract : Recently buildings are constructed in larger and higher scales and becoming more complex. However from small to large scale buildings and on construction sites there still are fire safety accidents that occur continuously. Therefore this study is aimed to assess of evacuation safety for building construction by use of simulation. On this study, the evacuation times required were estimated for the permissible evacuation times in cases. Fire safety management plans were suggested for building construction.

Key Words : building construction, evacuation safety, evacuation simulation

1. 서론

최근 세계 주요 도시에는 빌딩의 초고층화가 급속하게 진전되고 있다. 높이가 이미 800 m를 넘는 빌딩들이 출현하고 있으며, 각 도시들은 앞 다투어 100층 이상의 초고층 건물들을 신축 혹은 계획 중에 있고, 기술의 발전에 따라 고층빌딩의 높이가 계속 증가하고 있으며, 앞으로 이러한 추세는 계속 진행될 전망이다. 지금까지 초고층 건축물에 이용되는 철골의 자중 한계는 이론적으로 500 m로 알려져 있으나 과학기술의 진전으로 인하여 종래의 2배의 강도의 고강도강의 개발에 성공하여 약 1,000 m 정도의 높이를 갖는 초고층 건축물의 건축도 가능해 졌다¹⁾. 초고층 건축물은 일반 건축물과 달리 화재발생시 대규모 피해가 발생되고 이로 인하여 자주 사회적 논란이 되고 있다. 완공된 건물인 경우에는 소방 관련 법령에 의해 소방 관련 시설기준들이 엄격히 적용되어 소방감지기, 스프링클러, 비상벨, 전파방송 등에 따른 비상사태 대응 시스템이 잘 갖추어 지게 될 뿐 만 아니라 건축물의 높이별 중간 대피층 설치, 화재안전시스템 강화방안, 연돌효과 대책 및 고강도 콘크리트의 내화성능향상 등을 통한 초고층 건축물의 화재 안전성 확보 방안 등이 지속적으로 제시

되고 있으나, 시공 중인 건축물에 대해서는 이와같이 화재에 대한 안전체계가 매우 취약한 실정이다²⁾.

또한 완공된 건축물인 경우에는 대기로 노출되는 건축자재를 모두 난연재 또는 불연재를 사용하도록 엄격히 제한하고 있으나 경량간막이 등 내부에 충전되거나 표면에 노출되지 않는 자재들은 이들 규정에 다소 미흡한 자재들이 사용될 수 있는 단점이 있을 수 있다.

따라서, 건설공사가 진행되는 건축물 공사에서는 화재발생으로 인한 안전성이 매우 취약하며 더욱이 피난경로가 제대로 확보되지 않은 폐쇄지역에서의 화재인 경우에는 그 피해정도가 매우 큰 것으로 나타난다.

예를들면 냉동물류창고, 미술관, 지하상가 등 비교적 건축면적이 넓어 내부 칸막이가 완료된 상태에서 건물 밖으로 대피할 때까지 소요되는 시간이 길거나 그 대피경로가 복잡한 경우에는 내부 근로자의 피난소요시간 이내에 화재로 인해 발생하는 연기로 인하여 가시거리가 확보되지 않고 유독가스 및 온도 등으로 인명피해가 발생됨을 보아왔다.

화재의 발생은 가연물, 산소(공기), 점화원(열)의 3요소가 갖추어질 경우에 발생하는 것으로서 이들의 3요소를 격리 또는 제거하여야 화재를 방지할 수 있는 것이며, 그러하지 못할 경우에는 화재발생을 즉시 제어

[†] Corresponding Author : Myeongjin Jeong, Tel : +82-31-740-7188, E-mail : jmj123@eulji.ac.kr

Department of Environmental Health & Safety, Eulji University, 553, Sanseong-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 461-713, Korea

할 수 있는 시스템을 갖추거나 화재발생 시 즉시 피난할 수 있는 경로 또는 비상체계를 갖추는 필요가 있다.

따라서 본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 화재 발생시 건물의 피난 안전성을 분석하므로써 건축물 공사 현장에서의 화재안전계획 수립에 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

2. 피난시뮬레이션

2.1 개요

화재발생에 따른 인명피해의 발생은 화재 시 신속한 피난이 이루어지지 못하여 일어난다. 화재 시 인명의 안전한 피난은 건물이 설계 단계에서 부여되는 피난성능과 소방시설들에 의하여 이루어진다. 그러나 현재 국내의 건물 설계 시 피난에 대한 고려는 건축법에 포함된 한정된 규정만을 적용하여 거주자들의 신속한 대피를 위한 설계의 검토는 어렵다.

그러므로 화재 시 발생하는 인명피해를 최소화하기 위해서 건물의 설계 단계에서부터 부여되는 피난성능을 필요한 수준으로 계획하기 위하여, 건물 피난성능평가 프로그램을 이용하여 피난 안전성을 확보하고 있는 것이다³⁾.

하지만 시공 중에 있는 건축물에 대해서는 이와 같은 소방시설에 대한 기준이 마련되어 있지 못하여 근로자들이 위협에 노출되어 있는 것이다.

따라서 시공 중에 있는 건축물에 대한 피난 시뮬레이션을 통해 실제와 거의 유사하게 상황을 구현하여 화재로 인한 피난상황을 예측하고, 그 결과에 따라, 화재 시 피난 안전성 판단, 피난구 및 계단 등의 적정성 여부 판단, 피난 동선의 원활한 흐름 유도, 병목 및 지체 구간의 가시화를 통한 효과적인 해결책 제시 등 시설비의 방재성능을 최적화할 필요가 있다.

본 연구에서는 화재 시뮬레이션에서 수행된 허용피난시간 분석 결과⁴⁾와 비교를 통한 피난의 적정성을 판단하기 위하여 피난 시뮬레이션을 수행하였으며, 스코틀랜드의 IES사에서 개발한 SIMULEX를 사용하였다.

본 연구에서 수행한 피난시뮬레이션은 저층부(11층)와 고층부(54층)에서 발생한 화재에 대하여 각각 수행하였다.

2.2 피난자의 신체특성

(1) 보행속도는 각 사람들이 아무런 제한 없이 걷는 평균 속도로 표시되며, 여러 사람이 밀집되는 상황에서 줄어드는 경향이 있다. 즉 다른 사람이나 벽 등의 장애물에 의해 속도가 줄어드는 것이다. 본 피난 시뮬

레이션에서는 사람들의 보행속도를 0.8~1.2 m/s로 하여 무작위 배치하였다. 계단에서의 속도는 수평통로와 비교했을 때, 내려가는 계단에서의 속도는 평지속도의 0.5배, 올라가는 계단에서의 속도는 평지속도의 0.35배로 결정된다.

(2) 사람들의 신체적 상태는 수학적으로 3개의 원으로 표현된다.

Fig. 1과 같이 몸통의 반경 $R(t)$, 어깨의 작동반경 $R(s)$ 와 이들 중심간 간격 S 로 표시되며, SIMULEX에서 사용한 재실자의 신체특성은 Table 1과 같다.

(3) SIMULEX는 건물 내의 어느 곳에서든지 가장 가까운 출구까지의 거리를 계산해 주는 Distance map 기능이 있다. 모든 사람들은 가장 가까운 각도와 거리를 따라서 비상구 쪽으로 향하도록 되어 있으며, 1 m 간격으로 표시된다.

그러나 실제 상황에서는 피난자가 최단거리의 피난구만을 이용하지는 않으므로 여러 개의 Distance map을 이용하여 실제상황과 유사하게 피난상황을 유도할 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 실제와 가장 유사하게 피난인원을 각 피난구로 분산시키는 것을 기본으로 하였다.

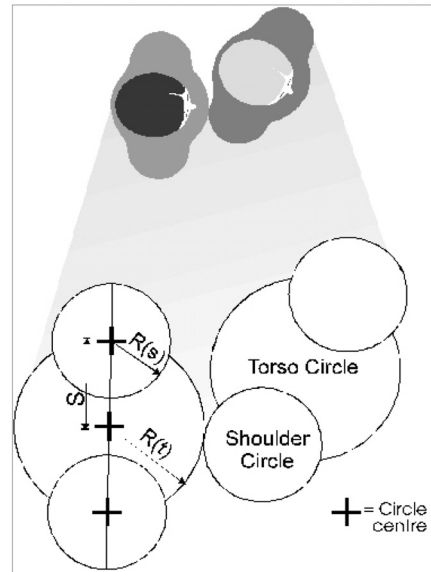


Fig. 1. Evacuee's body size for simulation.

Table 1. Evacuee's body type for simulation

(unit : m)

Physical Category	R(t)	R(s)	S
General	0.25	0.15	0.10
Men	0.27	0.17	0.11
Women	0.24	0.14	0.09
Children	0.21	0.12	0.07

Table 2. Persons component ratio for simulation

Men	Women	Old (more than 65)	Young (less than 14)
90%	10%	0%	0%

(4) 피난자의 성별, 연령별 분포는 건설현장의 특성을 고려하여 Table 2와 같이 적용하였으며, 내부 인테리어공사 중인 상황을 설정하였다.

2.3 화재발생 위치 및 재실자의 분포

(1) 저층부

빌딩공사 중 대부분의 골조공사가 완료된 상태에서 내부 마감공사를 진행하는 아파트 공사를 그 대상으로 설정하였으며, 비교적 저층부인 11층 어느 한 세대에서 화재가 발생한 경우를 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 피난 시뮬레이션은 화재 시뮬레이션과 연동하여 실시

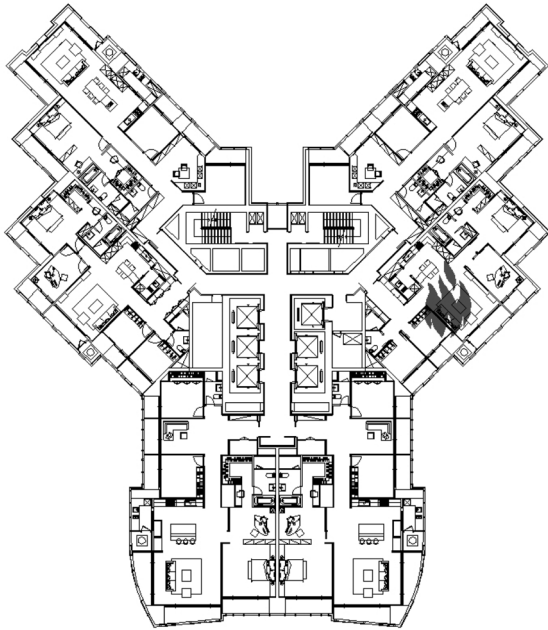


Fig. 2. Location of ignition point on lower floor(11th).

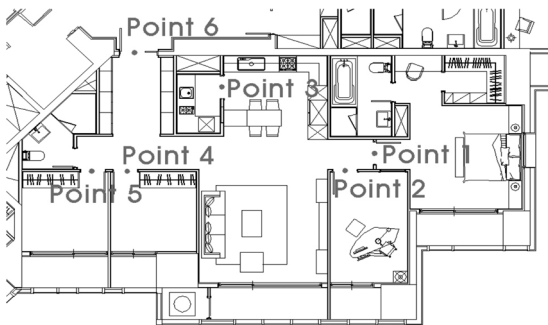
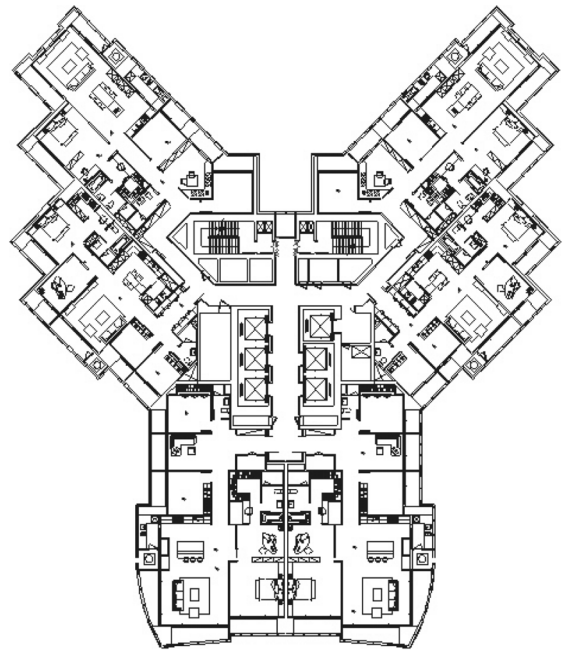


Fig. 3. Detect location of fire diffusion.

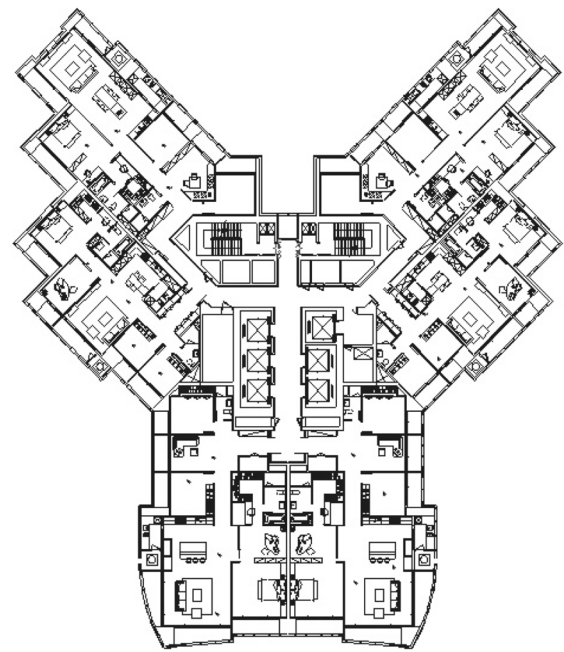
하는 것이므로 기본적인 피난시나리오는 화재 시뮬레이션의 화재 지점이나 상황 등을 고려하여 설정하였다.

Fig. 3은 화재발생 세대 내에서의 인체에 미치는 위험요소들의 확산속도를 측정점을 배치한 것으로서 총 6개소를 설정한 위치이며, Point 6이 세대현관이다.

화재로부터 생성된 독성 연기가 사람의 호흡선인 바닥에서 1.5 m 높이까지 내려오기 전에 모든 사람이 피



(a) 11th floor



(b) 12th floor

Fig. 4. Arrangement of refuse persons(Lower floor).

난하여야 한다. 그러므로 측정의 높이는 호흡안전선 높이인 1.5 m로 하였다.

본 시나리오에서는 화재 정보 방식에 따라 11층 및 12층 2개층 인원이 피난층인 1층까지 피난하는 것으로 가정하였으며, 건축공사중인 것을 감안하여 엘리베이터는 피난소요에서 고려하지 않았다.

화재 당시 마감공사 인력은 총48명이 Fig. 4와 같이 11층과 12층에 분포하여 작업 중인 것으로 설정하였다. 발화실의 피난개시시간(sec)은 다음 식과 같다.

$${}_aT_0 = 2\sqrt{A_1}$$

여기서, A_1 : 발화실의 면적(m^2)

${}_aT_0$: 30초 미만인 경우는 30초

본 시뮬레이션에서는 발화실의 피난개시시간은 30초, 발화층의 발화실 이외와 직상층은 감지기의 작동시간인 146초에 피난을 개시하는 것으로 하였다.

(2) 고층부

고층부는 지상54층 한 세대의 거실을 발화실로 설정하였고, 화재 발생 시 연기층이 세대에서 복도로 전파되는 것을 전제로 하여 Zone을 설정한다. Zone 구성은 Fig. 5와 같이 화재 발생지역이 속한 Zone 1과 속하지 않은 Zone 2, Zone 3로 총 3개의 Zone으로 구성하였다.

본 시나리오에서는 화재 정보 방식에 따라 54층 및 55층 2개층 인원이 피난층인 1층까지 피난하는 것으로

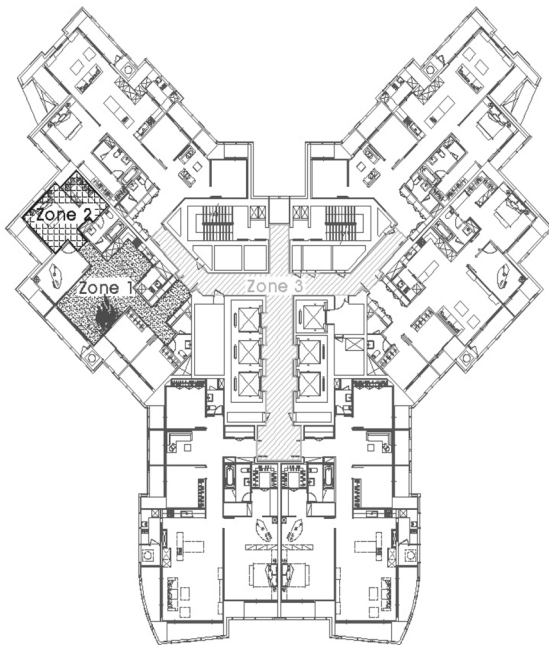
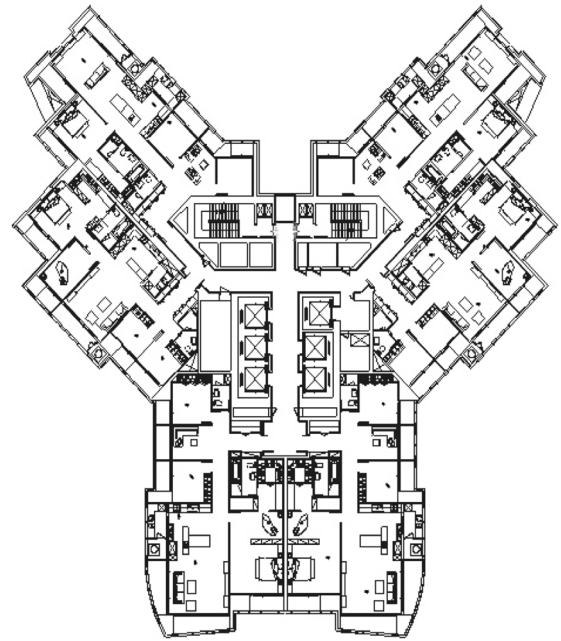
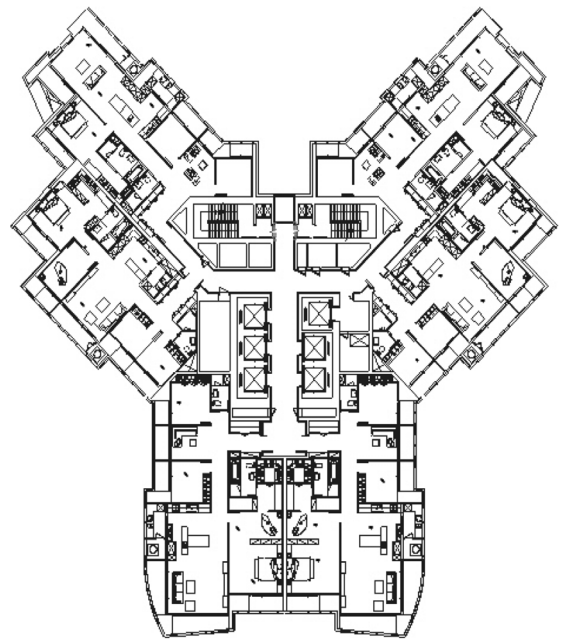


Fig. 5. Location of ignition point on upper floor(54th).



(a) 54th floor



(b) 55th floor

Fig. 6. Arrangement of refuse persons(upper floor).

가정하였으며, 건축공사중인 것을 감안하여 엘리베이터는 피난소요에서 고려하지 않았다.

화재 당시 작업자는 Fig. 6과 같이 54층과 55층에 총 48명이 분포하여 작업 중인 것으로 설정하였다.

피난개시시간은 발화실인 경우에는 30초, 발화실 이외의 발화층 및 직상층은 감지기 작동시간인 50.4초로 하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 저층부

화재 시뮬레이션에 의해 판단된 허용피난시간 내에 건축물에서 작업 중인 작업자의 피난이 가능한지를 평가하였다. 이것은 결과적으로 피난 시뮬레이션에 의해 측정된 피난시간이 화재 시뮬레이션에 의해 산정된 허용피난시간보다 더 작아야 함을 의미한다.

저층부인 지상 11~12층 시뮬레이션 결과는 Table 3과 같다.

Fig. 4와 같이 지상 11~12층 피난인원은 각 세대에 균등하게 분포되어 있으며, 발화실인 세대 재실자들은 30초에 피난을 개시하고, 비발화실 재실자들은 감지기 작동 시간인 146초에 피난을 개시하였다.

시뮬레이션 결과 감지기 작동시간은 146초이고, 41초에 발화세대에서의 피난이 완료되며, 198.5초에 11층 층피난이 완료되고, 186.9초에 12층 층피난이 완료되었으며, 1층까지의 피난완료시간은 576.5초가 소요되었다.

이와같이 저층부 아파트 지상11~12층의 피난·화재 시나리오 하에서 시뮬레이션한 결과, 수용인원 48명 모두 안전하게 층피난 및 1층까지의 피난이 가능한 것으로 판단된다.

화재 시 세대 내에서 피난한계시간은 현관에서 연기가 바닥으로부터 1.5 M(호흡안전선)까지 하강하는 시간인 170초이며, 발화실 내를 완전히 벗어나는데 소요되는 시간이 41초이므로 발화실 세대내의 피난자는 최소한 129초(약 2분) 이내에 피난을 개시하여야 하는 것으로 분석되었다.

발화실 내의 피난자는 피난개시시간이 30초이기 때문에 피난에는 문제가 없는 것으로 판단되나 세대 내의 피난은 화재감지 및 피난개시시각이 주요한 요인이므로 마감공사 등의 작업조건 또는 각 실의 구획에 의

Table 3. Simulation results of lower floor

Classification	Allowable refuge time(sec)				Time required for refuge(sec)	Decision	Remarks
	Smoke descent	Temp.	CO	Viability			
Point 1	175	220	430	215	33.3	OK	The time required to refuge (1st) floor is 576.5sec
Point 2	210	250	450	230	-	OK	
Point 3	155	210	360	200	-	OK	
Point 4	190	230	380	220	33.2	OK	
Point 5	190	230	380	215	-	OK	
Point 6	170	220	380	210	41.0	OK	

* - : 호흡안전선 1.5 m까지 하강하지 않거나, 열유체온도가 한계온도 이상 상승하지 않은 경우

해 피난개시 시각의 지연 등이 있을 수 있으므로 화재 발생 후 최대 129초 이내에 피난개시하여야 인체의 위험요소인 연기하강, 허용온도, 가시거리 등에 의한 영향없이 안전하게 피난할 수 있는 것으로 판단된다.

3.2 고층부

저층부의 시뮬레이션 분석과 마찬가지로 화재시뮬레이션에 의한 허용피난시간보다 피난시뮬레이션에 의한 피난소요시간이 작아야 안전하게 피난자들이 대피할 수 있다.

저층부의 피난시뮬레이션은 인체에 미치는 위험요소인 연기강하, 온도, 가시거리에 대한 측정점을 세대 내에 정하고 세대 내 현관을 빠져나가는 피난시간을 허용피난시간과 비교분석한 것이다.

반면에 고층부의 피난시뮬레이션은 피난 평가 개소를 발화로 인한 연기의 확산을 고려하여 발화세대와 복도 등 3개의 Zone으로 구획하고 Zone별 허용피난시간과 피난소요시간을 비교분석하였다. 또한 스프링클러의 작동여부에 따라 인체에 미치는 위험요소의 저감 여부도 함께 분석하였다.

고층부인 54~55층 시뮬레이션 결과는 Table 4와 같다.

Fig. 6과 같이 지상 54~55층 피난인원은 각 세대에 균등하게 분포되어 있으며, 발화실인 세대 재실자들은 30초에 피난을 개시하고, 비발화실 재실자들은 감지기 작동 시간인 50.4초에 피난을 개시하였다.

시뮬레이션 결과 감지기 작동시간은 50.4초이며, 42.3초에 발화세대인 Zone 1에서의 피난이 완료되고, 98초에 54층 및 55층 층피난이 완료되었으며, 1층까지의 피난완료시간은 1,827.2초(약 30분)가 소요되었다.

Table 4. Simulation results of upper floor

Classification		Allowable refuge time(sec)		Time required for refuge(sec)	Decision	Remarks
		Smoke descent	Temp.			
Case of inoperative sprinkler	Zone 1	145	110	42.3	OK	The time required to refuge (1st) floor is 1,827.2sec
	Zone 2	135	155	32.6	OK	
	Zone 3	160	155	98.3	OK	
Case of operative sprinkler	Zone 1	235	-	42.3	OK	The time required to refuge (1st) floor is 1,827.2sec
	Zone 2	170	-	32.6	OK	
	Zone 3	210	-	98.3	OK	

* - : 호흡안전선 1.5 m까지 하강하지 않거나, 열유체온도가 한계온도 이상 상승하지 않은 경우

이와 같이 피난개시시간이 짧은 경우에는 모든 작업자들이 1층까지 안전하게 피난이 가능하긴 하나 피난 완료시간이 약 30분이나 소요되어 피난하는 과정에서 피난자는 신체적 피로를 느끼게 될 것이고 노약자인 경우에는 피난 도중 제2의 재해를 입을 가능성이 있다. 그러므로 고층인 경우에는 중간 대피층을 확보하고 운영할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Table 4의 결과에서 알 수 있듯이 스프링클러가 작동하는 경우에는 온도의 상승으로 인한 피해는 없을 수 있으며, 연기하강에 의한 허용피난시간도 최대 90초(Zone 1) 정도 증가됨을 알 수 있다.

스프링클러가 작동하지 않는 경우에는 대피경로 상에 있는 복도(Zone 3)에서의 위험요소는 연기하강 보다는 온도가 증가에 의한 위험도가 훨씬 큰 것으로 나타났다.

화재발생층의 경우 56초(약 1분) 이내에 피난개시하여야 하며, 스프링클러가 작동하는 경우에는 111초 이내에 화재층 전 근로자가 피난개시하여야 하는 것으로 분석되었다.

또한 스프링클러가 작동하면 열방출율(Heat Release Rate)에 영향을 주어 화재를 지연시키거나 제어하게 되어, 스프링클러가 설치된 경우에는 연기층 하강이 지연되고, 열유체 온도는 한계온도 이상 상승하지 않으므로 허용피난시간을 크게 확보하게 된다.

그러므로 공사인원이 많이 투입되는 마감 및 인테리어공사 전에 소방설비를 포함한 설비공사가 완비할 필요가 있다.

4. 결론

건축물인 아파트 공사장의 고층부 및 저층부 어느 한 세대에서 화재가 발생하였을 경우를 가정한 피난 시뮬레이션을 수행하고 허용피난시간에 대한 피난소요시간을 비교평가하였다. 일련의 연구과정을 통하여, 건설현장에서 화재로 인한 재해를 원천적으로 방지하기 위한 안전작업 기준을 제안하였다.

(1) 피난 시뮬레이션을 통해 허용피난시간 내에 작업중인 작업자 모두가 안전하게 피난이 가능한가를 분석한 결과, 마감공사 단계에서는 단위세대 내에서의 피난개시시간은 약 2분 이내에 피난을 개시하여야 하

며, 화재 발생층 및 직상층에서는 약 1분 이내에 피난을 개시하여야 안전하게 피난할 수 있는 것으로 평가되었다. 그러므로 신속한 피난을 위한 비상신호시스템을 갖출 필요가 있는 것으로 판단된다.

(2) 방화구획이 갖추어지는 마감공사 단계에서는 더욱 확실한 피난안전성을 확보하기 위해서는 공사소요인원을 많이 필요로 하는 시공단계 이전에 중간대피층을 확보하고 스프링클러 등의 소방설비를 구비하는 것이 중요한 것으로 판단된다.

(3) 50층 이상의 초고층 건축물공사인 경우에는 지상까지 피난함에 소요되는 시간이 약 30분 정도로 장기화되기 때문에 중간에 피난층을 준비하여 두는 것이 필요한 것으로 판단된다.

(4) 본 연구결과는 건설현장의 화재안전대책의 수립에 있어서 화재로 인한 위험인자 대비 피난소요시간 및 경로를 계획하는 것에 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

(5) 건설공사중 마감 및 인테리어 공사의 경우와 같이 수용인원이 많고, 소방시설 및 방재시스템이 가동전인 경우에 대하여서는 더욱 철저한 안전관리대책이 요구되며 아울러 사전에 효과적인 화재예방 및 소방계획을 세우는 것이 필요하다.

References

- 1) J. W. Suh, J. H. Choi, G. Y. Jeon and W. H. Hong, "Analysis on How Residents' Evacuation Speed Changes in a High-rise Apartment Building through Field Experiment", 5th AIUE, 2008.
- 2) G. Y. Jeon and W. H. Hong, "Characteristic Changes in an Evacuation of Evacuees by Using Phosphorescent Guidance Equipment; though the Simulated Escape Experiment", WCOGI, 2007.
- 3) E. -G. Ham, "A Study on the Safety Evacuation Design by Simulation in the Subway Station" Journal of Korea Society of Hazard Mitigation" Vol. 1, 2010.
- 4) M. -J. Jeong, M. -G. Lee and E. G. Ham, "A Study on the Fire Safety Plan for Building Construction", KSMS, Vol. 1, No. 5, 2012.
- 5) M. -G. Lee, H. J. Kim, M. J. Jeong, K. D. Kim, E. G. Ham and B. N. Jeon, "A Study of the Safety Management System and Safety Model of the Skyscrapers", OSHRI, 2009.