

건축물 건설공사 시 화재안전계획 수립에 관한 연구

정 명 진* · 이 명 구* · 함 은 구*

*울지대학교 보건환경안전학과

A Study on the Fire Safety Plan for Building Construction

Myeong-Jin Jeong* · Myeong-Gu Lee* · Eun-Gu Ham*

*Department of Environmental Health and Safety, Eulji University

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 to improve fire safety plan, examining the actual fire safety management and understanding fire risk analysis Using Fire Modeling through Computer Simulation. On this study, the permissible evacuation times were estimated for smoke fall, temperature, CO concentration, viability, etc. Fire safety management plans for fire safety were suggested.

Keywords : Building Construction, Fire safety plan, Fire Modeling, Safety management plan

1. 서 론

최근 세계 주요 도시에는 빌딩의 초고층화가 급속하게 진전되고 있어 높이가 이미 800m를 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 500m로 알려져 있으나 과학기술의 진전으로 인하여 종래의 2배의 강도의 고강도강의 개발에 성공하여 약 1,000m 정도의 높이를 갖는 초고층 건축물의 건축도 가능해 졌다.[4] 뿐만 아니라, 건설현장에서 화재로 인한 재해들이 빈번히 발생되고 이로 인하여 중대재해로 연결되어 사회적 논란이 되고 있다. 완공된 건물인 경우에는 소방 관련 법령에 의해 소방 관련 시설기준들이 엄격히 적용되어 소방감지기, 스프링클러, 비상벨, 전관방송 등에 따른 비상사태 대응 시스템이 잘 갖추

어 지게 되지만, 시공 중인 건축물에 대해서는 이와같이 화재에 대한 안전체계가 매우 취약한 실정이다.[2]

또한 완공된 건축물인 경우에는 대기로 노출되는 건축자재를 모두 난연재 또는 불연재를 사용하도록 엄격히 제한하고 있으나 경량칸막이 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 나타났다.

예를 들면 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.

† 본 논문은 2009년도 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

† 교신저자: 이명구, 경기도 성남시 수정구 양지동 212 번지

M · P: 010-5225-1541, E-mail: lmg@eulji.ac.kr

2012년 10월 19일 접수; 2012년 12월 4일 수정본 접수; 2010년 12월 12일 게재확정

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 제어할 수 있는 시스템을 갖추거나 화재발생 시 즉시 피난할 수 있는 경로 또는 비상체계를 갖출 필요가 있다.

따라서 본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 화재 발생으로 인한 위험인자의 확산속도를 분석하고 건축물 공사 현장에서의 화재안전계획 수립에 필요한 기초 자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 개요

본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 건축물 공사 현장에서 화재가 발생하였을 때 발화지점으로부터 화재의 크기 및 유동을 분석하여 인체에 미치는 인자로서 연기의 하강, 온도, 일산화탄소 농도, 가시거리 등이 위험수준까지 도달되는데 소요되는 시간을 예측하였으며, 이에 따라 재해예방을 위한 적절한 대책을 수립하기 위한 자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

화재발생에 따른 인명피해의 발생은 화재 시 신속한 피난이 이루어지지 못하여 일어난다. 이는 발화점에서 인체에 미치는 인자들의 확산속도와 피난에 소요되는 피난시간과 깊은 관계가 있는 것이다. 따라서, 화재시 인명손실은 설계단계에서 반영되는 소방시설과 피난성능들에 크게 좌우된다.

그러므로 화재 시 발생하는 인명피해를 최소화하기 위해서 건물의 설계 단계에서부터 부여되는 피난성능을 필요한 수준으로 계획하기 위하여, 건물 피난성능평가 프로그램을 이용하여 피난 안전성을 확보하고 있는 것이다.[1]

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

따라서 본 연구에서는 화재시뮬레이션을 통하여 실제와 거의 유사하게 화재상황을 구현하여 화재로 인한 피해상황을 예측하고, 그 결과에 따라 건설 공사 중의 화재안전을 위한 제반 기준들을 제안하였다.

2.2 화재 시뮬레이션

화재 시뮬레이션의 목적은 화재 시 화재의 크기 및 유동을 예측하고 연기의 흐름 및 독성물질에 의한 재

실자의 영향을 분석하며, 전실화재(Flash Over)의 발생 조건과 화재의 전파 조건 등을 미리 파악하여 유효한 대책을 마련하는 것으로서 다음과 같은 것이 주된 내용이 된다.

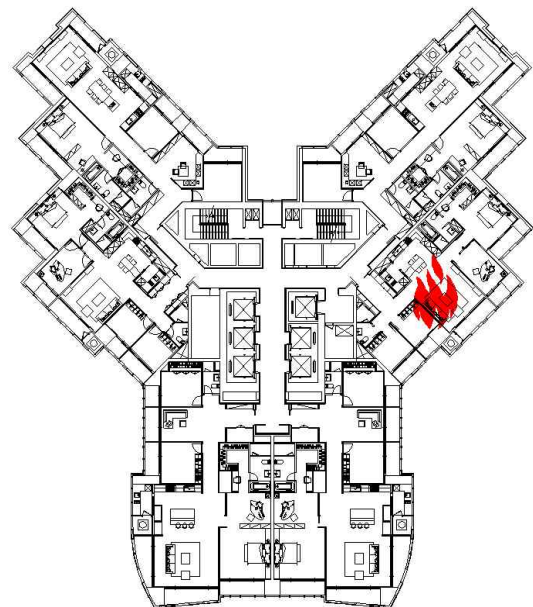
- (1) 화재 시 피해 최소화 대책 마련의 기초자료 제공
- (2) 화재생성물을 파악하여 피난허용시간 파악

화재 시뮬레이션에 사용된 모델 및 소프트웨어는 다음과 같다.

- (1) 화재 분석 모델 : Field Model
- (2) 사용 소프트웨어 : Field Model - FDS 4.03 및 Smokeview 4.0 Zone Model - FAST 3.1.7

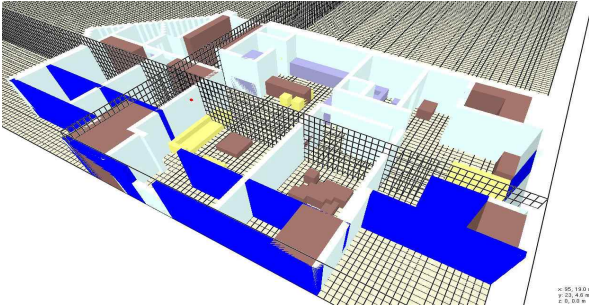
화재 시뮬레이션은 현장 조건을 정확히 반영하여 수행하여야 하기 때문에 현장조건에 따라 그 화재성장 현황은 다소 차이가 있을 수 있으나 본 시뮬레이션에서는 다음 조건을 가정하여 수행하였다.

빌딩공사 중 대부분의 골조공사가 완료된 상태에서 내부 마감공사를 진행하는 아파트 공사를 그 대상으로 설정하였으며, 지상층 어느 한 세대에서 화재가 발생한 경우를 [Figure 1] 및 [Figure 2]와 같이 모델링하였다.



[Figure 1] Location of ignition point

- ① 총 216,000개의 격자수를 가진 1개의 mesh로 구성
- ② 총 계산시간은 600초
- ③ 발화지점 천장에 연기감지기 설치

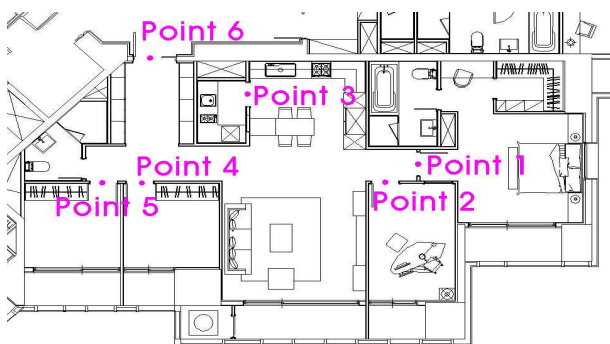


[Figure 2] Configuration of mesh

건설 공사 중에 있는 현장은 대부분 스프링클러가 설치되지 않은 상태에서 진행되기 때문에 스프링클러는 설치하지 않은 것으로 설정하였다. 화재 시뮬레이션에 적용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 위험구역별로 단일구획 내에서 화재가 1건 발생하는 조건(동일시간에 2건 이상의 화재가 발생하지 않는 조건)
- (2) 연기배출설비(제연설비, 배연창 등)는 작동되지 않는 조건으로 수행
- (3) 감지기는 천장(또는 반자)에 설치되어 정상적으로 작동하는 조건으로 수행
- (4) 화원은 미국 NIST 산하 BFRL (Building and Fire Research Laboratory)에서 실시한 거실 마감재료 ($Q_{max} \approx 3.5MW$)의 HRR로 가정
- (5) 초기화재는 거실 마감 자재인 폴리에틸렌에 의한 화재이며, 적재되어 있는 마감 자재 스티로폼 등의 배치로 화재전파가 가능하도록 설정

화재로 인하여 인체에 미치는 위험요소들의 확산속도를 측정하기 위한 측정점은 총 6개소로서 [Figure 3]과 같이 배치하였다. 측정점의 배치는 각 실별 출입문으로서 침실, 서재, 부엌, 작은 방 2개소, 현관문 등 6개소로 구성하였으며, 높이는 호흡안전선 기준이 되는 1.5m로 하였다.



[Figure 3] Location of detecting point

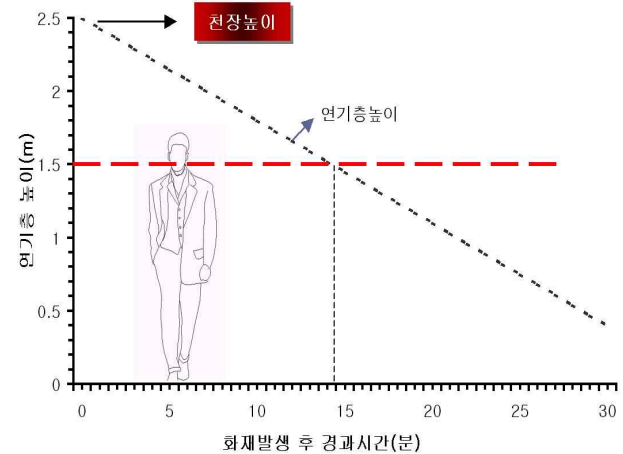
3. 화재 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 평가기준

화재 시뮬레이션에 있어서 거주가능조건(Tenable condition)의 최대 한계시간을 거주가능시간이라고 하며 피난시간은 거주가능조건 내에서 평가가 이루어져야 한다. 거주가능조건에 해당하는 평가기준은 연기에 의한 영향, 열에 의한 영향, 가시도에 의한 영향, 독성에 의한 영향 등이 있으며 이를 거주자 인명안전을 위한 한계가치로 사용하고 있다.[3]

(1) 호흡안전선

화재 시뮬레이션에 의하여 허용피난시간을 구할 때에는 여러 가지 평가요소(criteria)가 있지만 그 중에서 가장 많이 사용하는 것은 호흡안전선에 의한 평가이다. 화재로부터 생성된 독성연기가 사람의 호흡선(바닥에서 1.5m)까지 내려오면 피난하는 사람이 연기를 들며 마시게 된다. 따라서 [Figure 4]와 같이 연기가 호흡선까지 내려오기 전에 모든 사람들은 피난을 완료해야 한다. 본 화재위험성 평가는 호흡안전선 1.5m를 기준으로 하였다.



[Figure 4] Allowance of a safety breath line

(2) 열유체 온도

FRDG(Fire Research and Development Group)의 1997년 “Fire Models Training Manual for FSO’s”에 의하면 인체에 접촉되는 온도층이 100°C 이상 될 때를 안전성 평가 기준으로 판단한다. 한국인의 체형을 고려할 경우 바닥에서 1.8~2.0m를 기준높이(Head Height)로 볼 수 있으며 본 평가에서는 1.8m를 기준으로 가정하였다

(3) 가시도

건물 내부를 잘 알고 있는 사람이 피난할 때 장애를 느끼는 5m를 한계치로 산정하였다.

(4) CO

일산화탄소 농도는 사람이 기절하거나 질식사할 수 있는 농도인 400ppm을 기준으로 하였다.

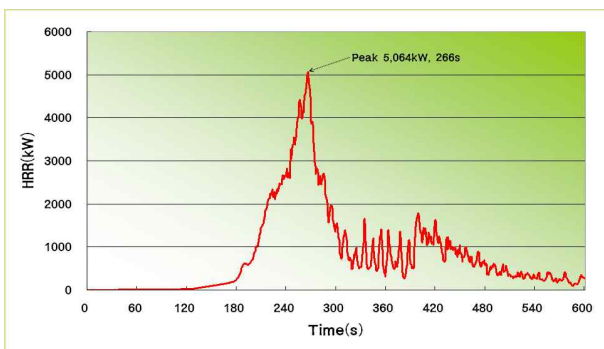
3.2 화재 시뮬레이션 결과

아파트 단위세대 화재에서는 복도와 다른 세대로의 화재 확산 방지가 방재대책의 주안점이 된다. 현재 단위세대는 방화구획과 갑종방화문으로 인접 세대와 구획이 되어 있어, 화재실에서 복도로의 개구부 폐쇄가 이루어진다면 구조상 건물 내부를 통해 복도 또는 다른 세대로의 화재 전파는 어려울 것으로 판단된다. 그러나 세대화재 시 피난시간 이전에 전실화재(Flash Over)가 발생하거나 갑종방화문인 현관문이 계속 열려 있다면 다른 세대 피난에까지 영향을 끼치게 된다.

여기서는 현관문이 닫혀 있고, 스프링클러가 작동하지 않는 것으로 가정하여 시뮬레이션 하였으며 그 결과는 [Figure 5]~[Figure 9]와 같다.

(1) 열 방출율 변화

시뮬레이션 결과 초기화원(폴리에틸렌 마감재)에서 인접 가연물로의 화재전파로 인해 총 열방출율이 급격하게 상승하여 266초에 약 5MW에 이르게 되는 것으로 해석되었다.



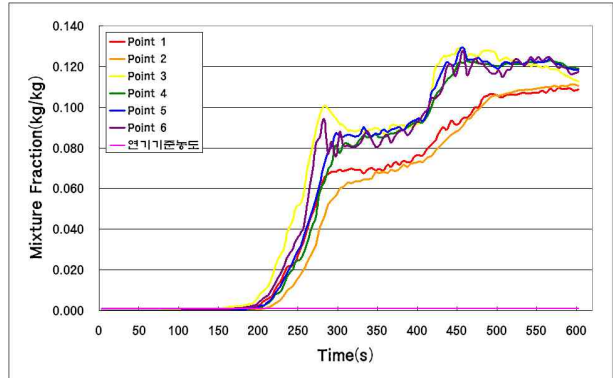
[Figure 5] Change of heat release rate

화재의 전파는 스프링클러가 없는 상태일 때 200초 전후에서 화재전파가 빠르게 일어나는 것으로 나타났다.

(2) 연기층의 하강

시간에 따른 거실의 연기층 하강은 약 200초 후에는 거실 체적 대부분이 연기로 충전되는 것을 알 수 있었

으며, 주출입문인 현관에서는 연기층이 호흡안전선까지 하강하는 시간은 170초로 나타났다. 따라서 세대 내에서는 허용피난시간이 170초임을 알 수 있다.

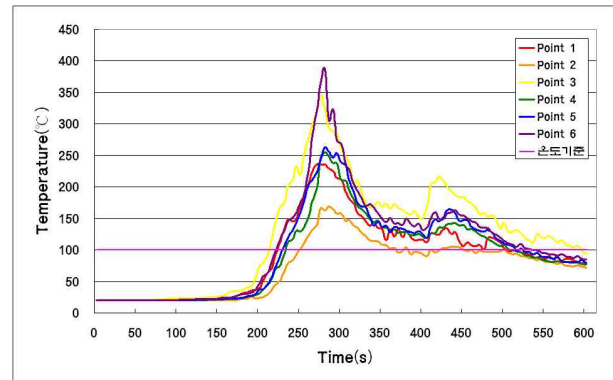


[Figure 6] Change of smoke concentration by measurement point

(3) 화재온도의 변화

주위 공기의 온도가 100℃ 이상이 되면 사람은 치명적인 영향을 받게 되며, 즉시 안전한 곳으로 피난을 하여야 한다. 본 시뮬레이션 결과 발화시점에서 200초 이후 급격히 증가하다가 250초가 경과되면 모든 측정위치에서 100℃를 초과하는 것으로 나타났다.

화재로 인한 온도 상승은 배치된 스티로폼에 급격히 확산되어 순간적으로 온도가 급상승함을 알 수 있었다.



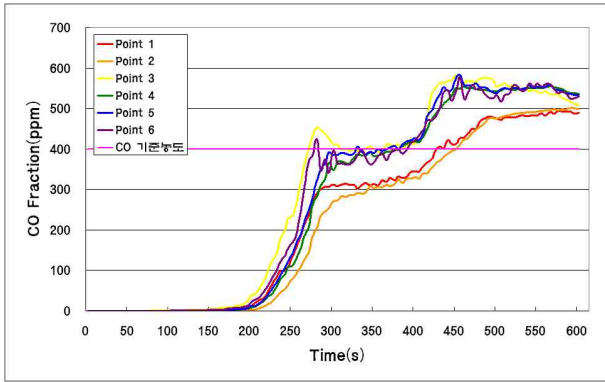
[Figure 7] Change of fire temperature by measurement point

(4) 일산화탄소(CO)의 농도

화재에서 산소 부족으로 인해 인명이 피해를 입는 경우는 극히 드물다. 그러나 일산화탄소 같은 독성 가스의 경우 약간의 흡입만으로도 혈중 산소가 파괴되므로 대단히 위험하다. 화재에서의 인명피해는 화염이나 열에 의한 피해보다 연기에 의한 피해가 대부분인데 그 이유는 연기 중에 독성가스가 다량으로 포함되어

있기 때문이다. 따라서 연소생성가스 중 대표적 독성가스인 일산화탄소의 발생량을 분석하는 것은 대단히 중요하다.

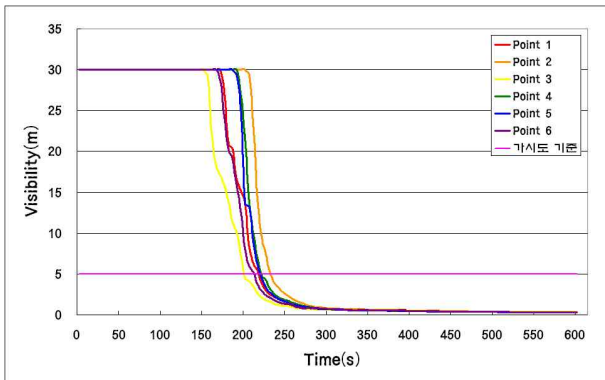
본 연구에서는 400초 이후에 실내의 일산화탄소 농도가 인체의 위험평가기준인 400ppm을 모두 초과하는 것으로 분석되었다.



[Figure 8] Change of CO concentration by measurement point

(5) 가시도

[Figure 9]는 측정위치별 가시도의 변화를 해석한 결과이다. 가시거리 5m를 기준으로 할 때 230초 이후 모든 측정점에서 가시도를 확보하지 못한 상태로 연기층이 형성됨을 알 수 있었다.



[Figure 9] Change of visibility by measurement point

3.3 결과 고찰

화재시뮬레이션 분석결과 각 측정위치별 호흡안전선인 1.5m에 도달되는 연기층 하강, 100℃에 도달되는 온도, 400ppm에 도달되는 일산화탄소 농도, 가시거리 5m에 도달되는 가시도 등을 각각 평가하였으며, 이들 각 위험인자별 인체에 미치는 허용기준에 도달되는 시간인 허용피난시간을 종합적으로 <Table 1>에 정리하였다.

<Table 1> Available safe evacuation time by measurement point

구 분	허용피난시간(초)			
	연기층 하강	온도	CO	가시도
Point 1	175	220	430	215
Point 2	210	250	450	230
Point 3	155	210	360	200
Point 4	190	230	380	220
Point 5	190	230	380	215
Point 6 (현관)	170	220	380	210

허용피난시간은 연기층 하강에 도달되는 시간에 의해 지배적인 것을 알 수 있었으며, 화재온도와 가시도는 비슷한 속도로 확산되지만 가시도의 장애가 근소한 차이로 먼저 도달되는 것을 알 수 있었다. 일산화탄소가 인체의 기절 또는 질식을 유발할 수 있는 농도수준인 400ppm에 도달되는 시간은 연기층 하강시간 보다 약 200초 정도 뒤에 도달됨을 알 수 있었다.

화재발생 시 위험인자별 인체에 미치는 위험도를 종합적으로 평가할 때 일차적으로 호흡안전선 까지 연기가 하강하고 가시도 및 화재온도가 위험수준에 도달되며, 그 다음 일산화탄소에 의한 기절 또는 질식에 도달되는 것을 알 수 있다.

따라서 연기층 하강 이후 200초 이내에 위험지역을 탈출하여야 할 것이나 연기층 하강 이후 20~40초 이내에 가시도가 확보되지 않기 때문에 연기층이 호흡안전선으로 하강한 이후 화재를 인지하고 피난하기에는 충분한 시간이 할애되어 있지 않음을 알 수 있다.

그러므로 건축물공사 현장에서 화재로 인한 재해를 방지하기 위해서는 화재가 발생되지 않도록 하는 것이 가장 중요할 것이나 화재가 발생한 경우에 이를 조기에 진압하거나 근로자들이 허용피난시간 이내에 피난할 수 있는 비상경보장치 및 대피경로의 설치가 필요한 것으로 판단된다.

본 시뮬레이션의 가정은 건설현장에서 많이 사용되고 있는 스티로폼이 주변에 배치되어 있는 상황을 재현한 것이기 때문에 비교적 악조건을 보여주고 있는 것이나, 최근 건설현장의 화재사례와 매우 흡사한 현상을 보이고 있는 것으로 판단된다.

분석결과에서 알 수 있듯이 화재가 발생할 경우에는 155초 이내에 피난할 수 있는 시스템을 갖추어야 한다. 그러기 위해서는 가연성 물질이 많은 공중을 공사할 경우에는 비상경보장치를 갖추거나 안전담당자를 배치하여 신속히 화재발생을 알릴 수 있는 체계의 구축이 필요할 것이며, 허용피난시간 이내에 근로자들이 안전하게 피난할 수 있는 피난경로를 확보하여 줄 필요가

있는 것으로 판단된다.

또한 화재진압설비를 갖춘 경우에는 화재확산 성상이 상당히 다르게 발현될 것으로 생각된다. 이에 대한 것은 추가적인 연구가 있어야 할 것이나 화재에 대한 피해를 예방하기 위해서는 화재의 발생으로 인한 위험도가 높은 개소에는 화재진압설비를 갖추도록 의무화하는 것도 필요할 것으로 사료된다.

화재발생을 원천적으로 억제하기 위해서는 화재발생 3요소인 가연물, 산소, 점화원이 공존하지 않도록 하는 것이 무엇보다 중요할 것이다. 따라서, 점화원(성냥, 라이터 등)의 휴대는 엄격히 제한되어야 할 것이며, 공사 특성 상 용접 등의 작업이 이루어지는 경우에는 가연물이 될 수 있는 건축자재는 반드시 격리시킬 필요가 있다. 또는 건축 현장의 단열재로 많이 사용되는 우레아폼 등의 공사 현장에서는 점화원인 용접작업 등의 수행을 금지하여야 할 것이다.

4. 결 론

건축물인 아파트 공사장의 지상층 어느 한 세대에서 화재가 발생한 경우를 가정한 화재시뮬레이션을 수행하고 각 위험인자인 연기층 하강, 온도, 일산화탄소 농도, 가시도 등을 분석하였다. 일련의 연구과정을 통하여 각 인자별 허용피난시간을 추정하였으며, 건설현장에서 화재로 인한 재해를 원천적으로 방지하기 위한 안전작업 기준을 제안하였다.

- (1) 허용피난시간은 연기층 하강에 도달되는 시간에 지배되는 것을 알 수 있었으며, 다음은 가시도, 온도, 일산화탄소 농도 순으로 나타났다.
- (2) 연기층 하강에 의한 허용피난시간은 한 세대 내에서 170초 내외인 것으로 분석되었으므로 이 기간 내에 피난할 수 있는 화재예방대책의 수립이 필요할 것이다.
- (3) 연기층 하강의 허용피난시간 이후 20~40초의 단시간 이내에 가시도 및 온도의 허용피난시간이 도래하므로 화재의 위험도가 높은 현장에서는 화재감지기를 설치하거나 안전담당자를 배치하여 신속한 피난이 이루어지도록 조치하여야 함을 알 수 있었다.
- (4) 화재로 인한 재해발생을 원천적으로 억제하기 위해서는 화재발생 3요소인 가연물, 산소, 점화원이 공존하지 않도록 하는 것이 무엇보다 중요함을 제안하였다.
- (5) 본 연구결과는 건설현장의 화재예방대책의 수립에 있어서 화재로 인한 위험인자들의 확산속도 대비

피난소요시간 및 경로를 계획하는 것에 유용하게 적용될 것으로 사료된다.

- (6) 마감 및 인테리어 공사의 경우 우레탄폼 등 단열재 설치 공정 간 환기철저, 화기엄금 등의 관리대책이 요구되며 아울러 착공하기 전에 효과적인 화재예방 및 소방계획을 세우는 것이 필수적이며 향후 종합적인 화재안전방안에 대한 연구가 요구된다.

5. 참 고 문 헌

- [1] Eun-Gu Ham 「A study on the safety evacuation design by simulation in the subway station」 Journal of Korea Society of Hazard Mitigation Vol. 1 No. 5 (2010. 10)
- [2] Gyuyeob. Jeon, Wonhwa. Hong, 「Characteristic Changes in an Evacuation of Ecacuees by Using Phosphorescent Guidance Equipment; though the Simulated Escape Experiment」, WCOGI, (2007. 04)
- [3] Junho. Choi, Gyuyeob. Jeon, Wonhwa. Hong, 「A Study on the Analysis of the Evacuation Safety at a High-rise Apt. on Fire」, 4th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (2006. 10)
- [4] Jungwook Suh, Junho Choi, Gyuyeob Jeon, Wonhwa Hong, 「Analysis on How Residents' Evacuation Speed Changes in a High-rise Apartment Building through Field Experiment」, 5th AIUE, (2008)
- [5] Jinwoo Park, Gyuyeob. Jeon, Wonhwa. Hong, 「A Study on Problems of Fire Extinguishing Facilities System through Traditional Market Fire Accidents (with a Focus of Fire at the Seo-Moon Market)」, WCOGI 2007, (2007. 04)
- [6] Myeong-Gu Lee, Hyo-Jin Kim, Myeong-Jin Jeong, Kyu-Dong Kim, Eun-Gu Ham and Bu-Nam Jeon, 「A Study of the Safety Management System and Safety Model of the Skyscrapers」, Occupational Safety & Health Research Institute, (2009)

저 자 소 개

정 명 진



현재 을지대학교 보건환경안전학과 교수로 재직중.
충남대학교 기계공학과 공학박사.
관심분야는 기계안전분야 및 제조업체 안전관리, 산업안전제도, 정책 등.

주소: 경기도 성남시 수정구 양지동 212 을지대학교 보건환경안전학과

이 명 구



현재 을지대학교 보건환경안전학과 교수로 재직중.
한양대학교 토목공학과 공학박사.
관심분야는 건설안전, 산업안전 정책 및 제도, 구조물안전진단기술, 강구조피로해석 등

주소: 경기도 성남시 수정구 양지동 212 을지대학교 보건환경안전학과

함 은 구



현재 을지대학교 보건환경안전학과 강사, 광운대학교 건축공학과 강사
광운대학교 건축공학과 공학박사
관심분야는 도시방재, 건축방재 등

주소: 경기도 구리시 수택동 대림한숲아파트 105동 1603호