

# 대공간 구조물 화재 위험성 평가 적용 사례

## Fire Risk Assessment Application for PBD on the Large Complex Mall



박 준\*  
Park, Jun

### 1. 서론

산업 발전과 인구의 급격한 증가에 따라 도시의 구조물은 아파트, 사무실 및 상가와 같은 단독 기능을 탈피하여 쇼핑몰, 컨벤션센터, 영화관 등을 통합할 수 있는 하나의 복합 대공간(초고층 포함) 구조물로 지어지고 있다. 이는 불특정 다수가 단시간에 밀집될 수 있는 시간과 공간의 특성을 극대화 한다. 따라서 화재발생 시 대피동선 평가의 어려움과 높은 열과 독성연기, 가시도의 저하에 기인하여 짧은 시간에 많은 사상자를 발생시킬 수 있는 위험이 있다.

최근 들어, 대공간 구조물의 화재가 증가하고 있으며 규정위주(법규에 따른)의 방재설계로는 안전을 확보하는데 한계가 있는 것으로 몇몇 사례를 통해 드러났다. 이러한 현실적인 문제의 대안으로 방재 분야에서는 성능위주설계를 도입하여 구조물의 화재 안전성을 확보하는데 많은 노력을 기울이고

있다. 특히 미국을 비롯해 유럽, 홍콩, 일본 등 선진국에서는 이미 2000년대 초반부터 성능위주설계를 실시하고 있으며 이 분야의 기술을 선도하고 있다.

국내에서도 과학적이고 합리적인 소방시스템 구축을 목표로 2011년 7월부터 성능위주 방재설계 기준을 법적으로 정하여 시행하고 있다. 하지만 기술력의 부족으로 이러한 설계의 대부분을 해외에 의존하고 있으며 이로 인해 핵심기술의 확보가 어렵고 기술종속 등의 문제가 발생된다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 국내 실정에 적합한 화재 위험성 평가시스템의 정립이 반드시 필요하기 때문에 당사는 국책과제(초고층빌딩 시공기술 연구단, 국토교통부)와 함께 독자적인 화재 위험성 평가시스템을 2009년 이후로 지속적인 연구개발을 하고 있다. 이를 통해 국내 시공사 중에서는 유일하게 입찰, 설계 및 시공단계까지 화재 위험성 평가시스템을 적용하고 있으며, 그 수준은 선진국의 80% 수준까지 확보하였다. 또한 2015년 과제가 마무리 될 시

\* 정회원·GS건설(주)

점에는 90% 이상의 기술수준을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

본고에서는 초고층 및 대공간 구조물의 화재안전을 위한 화재위험성 평가기법의 개요 및 현장적용 사례를 소개하고자 한다. 특히 대공간에 대한 화재 위험성 평가를 통해 대상 프로젝트에 적합한 성능을 검토하고 이를 통해 현실적인 화재안전 대책을 제안함으로써, 구조물 화재 위험성 평가기술의 우수성을 검증하고 앞으로 나아갈 방향을 제시하는데 그 목적이 있다.

## 2. 성능위주설계

### 2.1 PBD(Performance Based Design)의 정의

성능위주설계는 단순히 법규에 명기된 규제 즉, 최소한의 기능(Function)을 충족하기 위해 제정된 기존의 규정(또는 법규)위주설계 방법과 구분하여 구조물이 갖추어야 할 적정성능(Proper Performance)에 맞추어 최소한의 비용으로 설계하는 일련의 방법으로 정의된다. 특히 달성 성능수준(Level)을 정하기 위해 실물과 동일한 규모의 실험을 수행하거나 신뢰성 있는 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 화재 위험성 평가를 수행하는 것을 의미한다.

### 2.2 국내외 동향

최근까지 국내외 소방설계는 법규의 세부 지침 및 기준에 의한 규정위주설계(Code Based Design)를 통해 이루어졌다. 하지만 대형 구조물 화재가 연이어 발생하면서 기존 규정위주설계 방식의 한계성을 인지하게 되면서 복잡한 대형 구조물(국내는 특정소방대상물)의 방재설계는 정량적인 화재 위험성 평가를 통한 각 대상물의 방재성능설계가 요구되고 있다.

선진국들은 이미 각국의 실정에 적합한 성능위주설계 지침을 법제화하여 설계단계에서부터 정량화



(Fig. 1) Design Trend of Structural Fire Safety

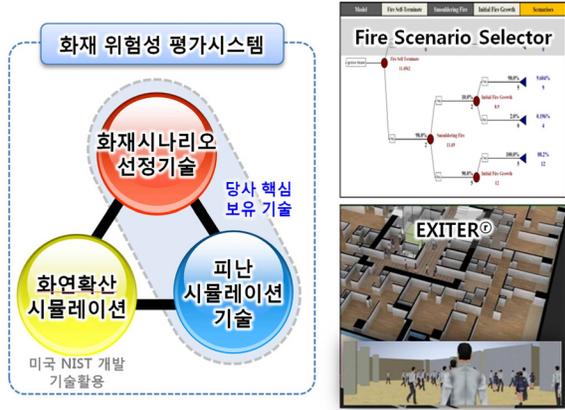
된 화재안전 방안을 적용하도록 제안하고 있으며 이미 기술정립 단계에 이르렀다.

반면 국내 방재설계는 2005년에 ‘소방시설공사업법’을 개정하여 성능위주설계의 법적 근거를 마련하고, 2007년 ‘소방시설공사업법 시행령’을 개정하면서 성능위주설계 대상을 특정소방대상물로 규정하였지만 적용방법 및 지침이 정해진 바가 없어 2011년 7월 1일 소방방재청(National Emergency Management Agency, NEMA) 고시를 통해 ‘소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준’을 고시하였다. 화재 시나리오는 실제 건축물에서 발생 가능한 시나리오를 선정하되, 7가지의 시나리오 중 가장 피해가 클 것으로 예상되는 최소 3개 이상의 시나리오에 대하여 실시하도록 고시하였다.

### 2.3 화재 위험성 평가기법 개발

성능위주설계의 핵심기술은 정량적 화재 위험성 평가를 통해 허용 가능한 수준의 화재 안전을 확보하는 것이다. 이를 위해 설계자들은 예상 가능한 최악의 시나리오를 선정하고, 이를 통해 <Fig. 2>와 같이 시나리오 중심의 방재설계를 수행할 수 있다.

지금까지 화재 시나리오의 선정은 설계자의 경험과 직관에 의한 화재 시나리오를 선정한 후, 화재 위험성 평가를 수행하고 있지만 선정된 화재 시나리오의 명확한 근거를 제시하는 것은 한계가 있다. 예를 들어 동일한 주방에서의 화재 시나리오에서 설



〈Fig. 2〉 Fire Risk Assessment System for PBD

계자A는 식당의 거주자가 많은 일반화재로 간주하지만, 설계자B는 프로판 가스에 의한 급속성장 화재로 시나리오를 선정할 수 있다. 이처럼 국가, 문화, 인종 등 다양한 요건에 따라 화재 시나리오는 각기 달라질 수 있기 때문에 이해 당사자들과 사회 구성원이 공감할 수 있는 시나리오의 선정이 필요한 것이다.

연구에서는 미국 표준기술연구소(National Institute of Standard Technology, NIST)의 화연확산 시뮬레이터인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 활용하여 화재확산을 해석하고 있으며 자체 개발한 대피 시뮬레이션인 'EXITER' 프로그램을 사용하여 피난 시간과 인명피해를 산정할 수 있다. 또한 '초고층빌딩 시공기술 연구단'의 'PBD기반 정립을 위한 화재위험성 평가시스템 개발' 과제를 통해 '초고층 화재시나리오'를 개발하고 이를 손쉽게 선정할 수 있는 시스템의 개발을 수행하고 있다.

### 3. 화재 위험성 평가 개요

#### 3.1 화재 및 피난 시뮬레이션

화재발생의 원인 및 분석을 위해서는 실제 크기의 실험을 통해 위험도 평가를 실시하는 것이 가장 바람직하겠지만 실제 크기의 실험은 엄청난 예산과 시간이 필요할 뿐 아니라, 지극히 제한적인 정보의 획득만 가능하므로 실제 선진국에서는 단순화된 화

재실험에서 획득한 기초자료를 토대로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 화재확산이나 피난특성을 설계에 적극적으로 반영하고 있다.

화재 시뮬레이션에서는 화재의 성장 과정과 발생한 연기의 확산 현상을 예측할 수 있으며 화재시 발생하는 CO, CO<sub>2</sub>뿐만 아닌 연기에 의한 가시거리, 표면온도, 복사열, 대류열 등을 시간에 따라 시각적이며 정량적으로 평가할 수 있다. 또한 피난 시뮬레이션에서는 재실자의 대피시 신체적, 심리적, 경험적 조건을 부여하여 개인별 대피특성을 분석할 수 있으며, 옆걸음 뒷걸음과 같은 대피자와 대피자간의 상호관계, 벽을 인식하여 우회하는 등의 심리적 및 상황적 특성도 부여가 가능하다.

이러한 화재 시뮬레이션과 대피 시뮬레이션 결과를 통해 유독성가스 및 온도와 같은 화재 위험요소가 재실자의 안전성에 어떤 영향을 미칠 수 있는 지 평가할 수 있으며 이를 통해 다중이용시설 및 고층빌딩 등 불특정다수가 이용하는 건축물의 피난 및 방화시설의 적정성을 검토하며 인명피해 최소화를 위한 최적의 피난계획을 수립할 수 있다.

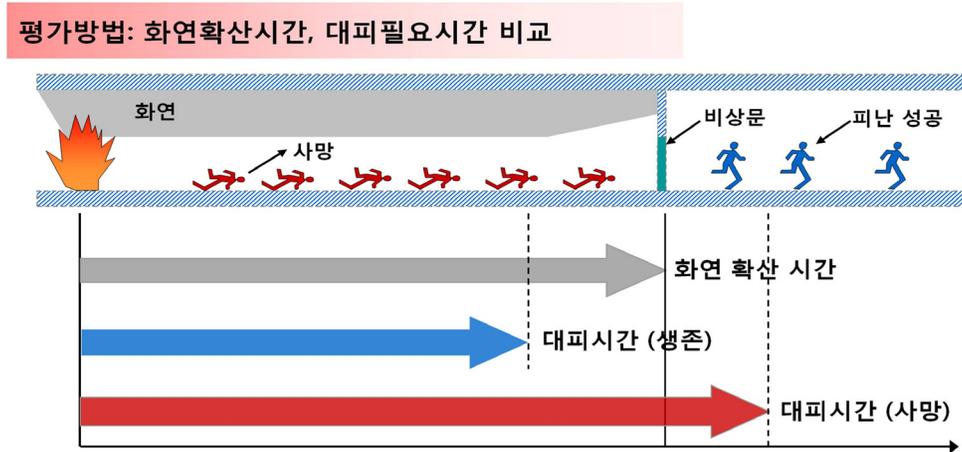
#### 3.2 화재 및 피난 시뮬레이션의 평가 방법

화재 및 피난 안전성 평가는 '소방시설등의 성능위주 설계 방법 및 기준 시행령 별표'에서 제시된 인명안전 기준 및 피난시간 기준을 적용하며 세부적인 평가방법은 미국 SFPE(Society of Fire Protection Engineers: 미국소방기술사회)에서 발간된 'The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering'에서 제시된 방법으로 평가한다.

### 4. 화재 위험성 평가 적용사례

#### 4.1 시뮬레이션 평가 대상

소방시설등의 성능위주 설계 방법 및 기준 별표에서 제시하고 있는 화재 및 피난시뮬레이션의 시나리오 작성기준에 의하면 피난 안전성 평가의 대상을 선정시에 고려해야 할 사항으로 시나리오 적



〈Fig. 3〉 Time Line Assessment

용이 가능한 모든 유형 중 가장 피해가 클 것으로 예상되는 지점이거나 화재발생 빈도가 가장 높을 것으로 예상되는 지점에 대한 피난 안전성 평가를 실시한다.

본 건축물에서는 굴뚝효과에 의한 연기의 상승으로 인해 재실자의 대피에 불리할 것으로 예상되는 지상 1층 의류매장 화재지점으로 설정하여 아래의 시나리오로 화재안전성 평가를 수행한다. 단, 원래 화재 위험성 평가에서 화재 시나리오는 화재실을 중심으로 시나리오를 선정한다. 이는 모든 시나리오는 구획(방화구획, 사무실, 계단실, 복도 등)을 중심으로 선정한다. 하지만 해당 프로젝트의 경우 복합물 내에 아트리움이 존재하여 전층 해석을 수행하였다. 이는 아트리움 제연의 성능을 검증하기 위해서는 전층 화재 시나리오가 요구되었다.

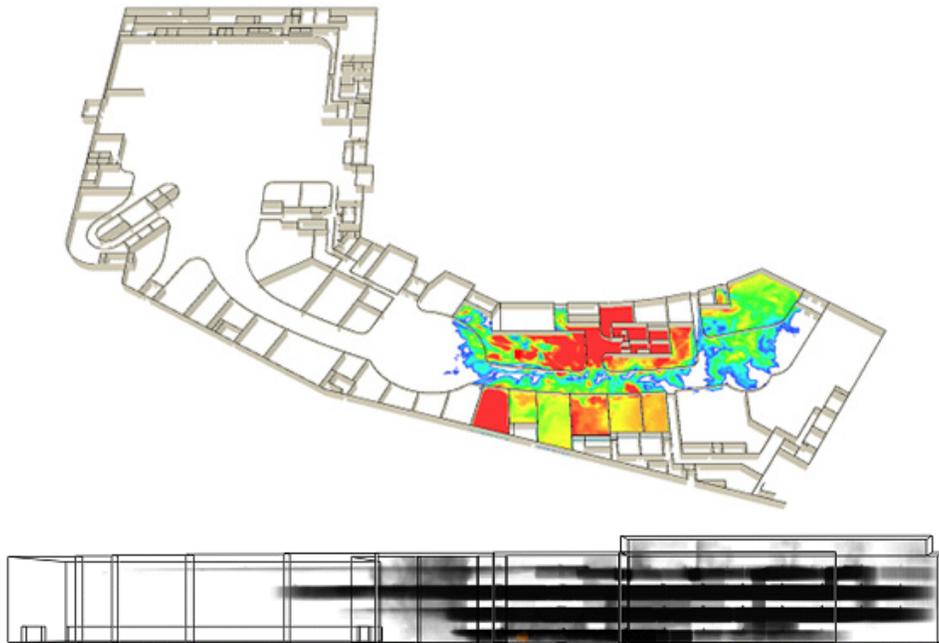
해외 쇼핑센터 프로젝트에서 방재설계의 이슈는 해당 지역(Local)의 관련법을 적용하여 설계를 수행하거나 성능위주설계를 통한 설계가 가능하다는 것이다. 결론부터 논하면 성능위주설계를 통해 방화셔터가 가지고 있는 화재안전 성능 보다 아트리움 즉, 보이드를 이용한 화재안전 성능의 효과가 우수할 것으로 기대하였기 때문이다. 또한 부족한 연기 제어는 중앙의 보이드(Void)를 통해 배출될 수 있도록 설계하여 쇼핑센터의 성능에 맞는 설계가 가능하였다. 〈Table 1〉은 쇼핑센터의 시뮬레이션을 위한 평가 대상 및 화재 시나리오를 정리한 것이다.

〈Table 1〉 Summary for Fire & Evacuation Simulation

구분	내 용		
쇼핑센터	화재위치	Ground floor 의류매장	
	재실자	14,208명 (화재층 4,086명, 화재실 84명)	
	피난 시나리오	화재실	32.5(감지시간)
		비화재실	152.5초 (감지시간+성능위주설계기준)
	화재 시나리오	부주의에 의한 의류 가판대 화재	
해석범위	전층		

#### 4.2 화재 시뮬레이션

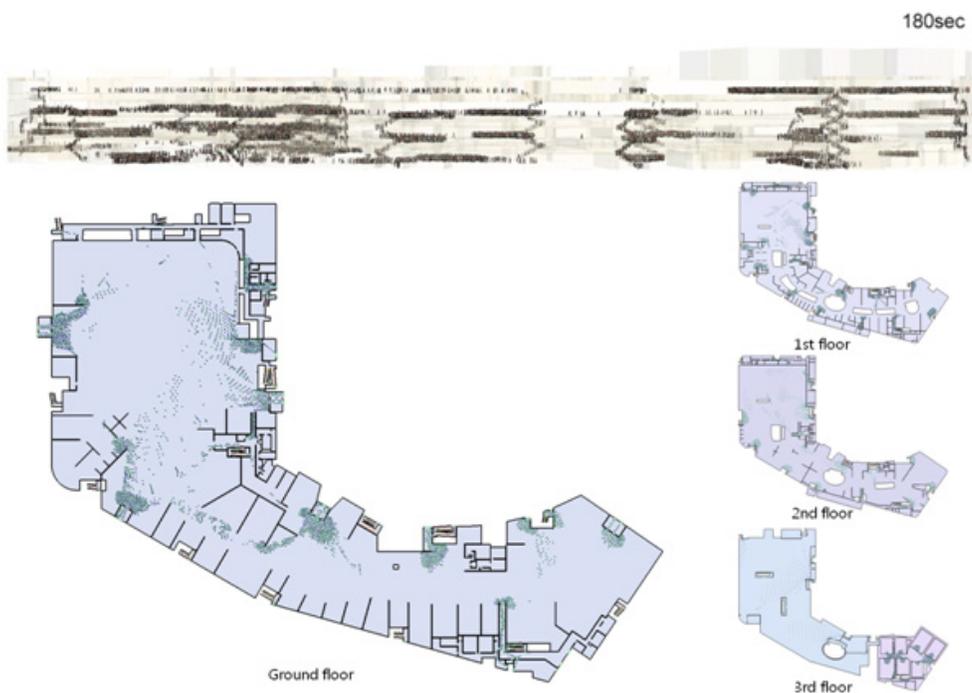
본 시뮬레이션의 시나리오는 가연물이 가장 많은 장소(의류매장)의 일반화재로 선정하였으며, 스프링클러 및 연기제어 시스템 작동하지 않는 최악의 시나리오로 수행하였다. 화재 시나리오 선정의 구체적인 방법은 저자의 다른 기사에서 확인할 수 있다. 〈Fig. 4〉의 화재 시뮬레이션 모델링은 크기가 272.0m × 213.0m × 30.0m이며, 화재해석을 위한 격자수는 11,684,629개로 해석을 위한 병렬 CPU만 128개를 사용하였다. 화연확산 해석을 위한 최대 열방출률은 3.4MW의 급속화재성장으로 선정하였다. 이때 해석 시간의 단축을 위해 한국건설기술연구원의 HPC(High Performance Computer)를 이용하여 해석시간을 종전 수개월에서 1주일 내로 단축할 수 있었다.



〈Fig. 4〉 Complex Mall Model for Fire Simulation

시뮬레이션 대상인 쇼핑몰에 대한 화재 시뮬레이션 결과는 다음 표와 같다. 총 화재 발생 시간은 1시간(60분)으로 계산되었으며, 방화셔터가 없는 상황에서 연기확산을 평가 하였다. 그 결과 중앙의 보이드로 대부분의 연기가 빠져나가고 있는 것을

확인할 수 있다. 실제 보이드 상단은 차단된 형태이나, 개방된 상태와 동일한 성능의 Smoke spill(배연장치)이 6대가 설치되어 이중 1대가 작동하여도 본 시뮬레이션의 가정과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 〈Fig. 4〉의 60분 이후의 각 층의 가시거리 기준



〈Fig. 5〉 Complex Mall Model for Evacuation Simulation

에 대한 계산 결과 7m 이상의 가시거리를 확보 할 수 있으며, 직영매장과 극장가에는 영향이 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 화재 시나리오의 경우 1시간 이내 외부로 탈출한다면 안전할 수 있을 것으로 예상된다.

시뮬레이션 대상인 쇼핑센터 Ground floor 화재 발생에 따른 화재 시뮬레이션 결과를 분석한 결과 피난구별 피난 허용시간(ASET)은 60분 이상 가능한 것으로 계산되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 연기가 충분히 외부로 배출되어 상대적으로 내부 축적 시간이 지연된 것으로 예상할 수 있다. 따라서 복잡한 방화셔터는 연기배출에 있어서 오히려 부정적인 영향을 줄 수 있기 때문에 최소한의 필요한 셔터의 설계가 요구된다.

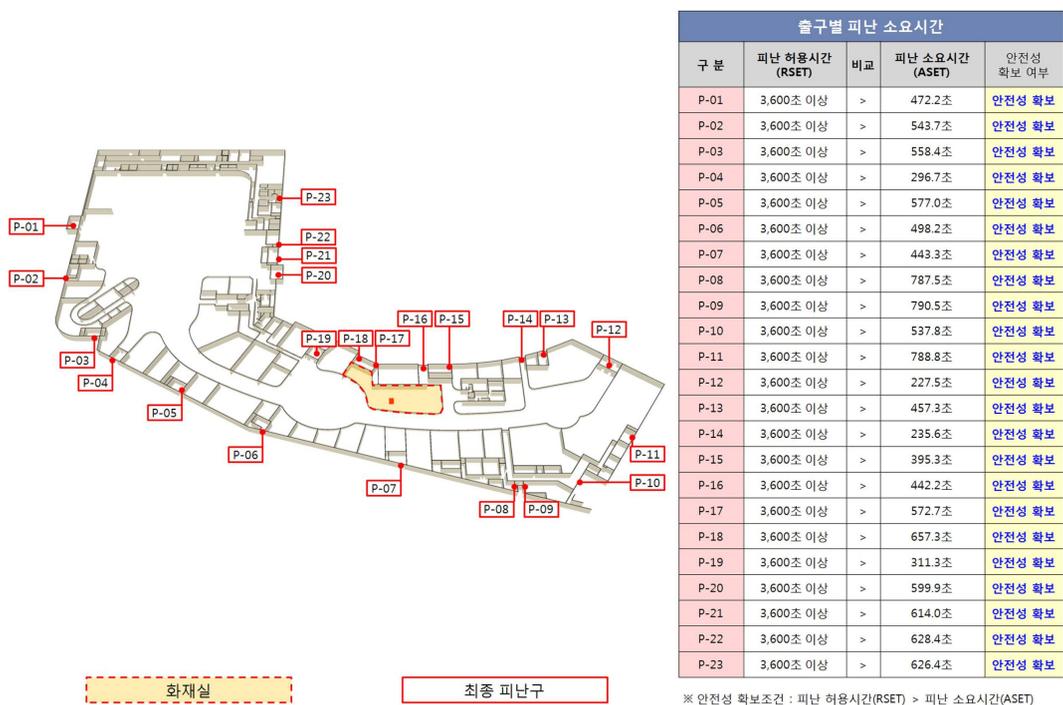
### 4.3 피난 시뮬레이션

그림은 피난 시뮬레이션을 위한 전층 모델링이다. 총 재실자는 14,208명으로 산정하였으며, 외부로 안전하게 탈출할 수 있는 출입문은 23개가 설계되어 있었다. 많은 탈출구는 피난 시간을 단축할 수

있는 주요시설이므로 평소 비상탈출구의 상황을 쉽게 파악할 수 있도록 화재안전 계획이 되어야 할 것이다.

실제 시뮬레이션 시간에서 대피지연시간을 포함한 것이 피난 소요시간(RSET)이 된다. 본 시뮬레이션에서 계산된 감지기 작동시간(32.5초)이 화재실의 실제 피난 시각이고, 비화재실은 이보다 120초 늦은 시간으로 산정하였다.

시뮬레이션 대상인 쇼핑센터 Ground Floor 화재 시나리오의 시간에 따른 재실자 대피 결과는 <Fig. 6>과 같이 나타내어진다. 미리 설정된 비상구를 통해 재실자가 모두 통과한 시간을 산정하여 피난 허용시간(ASET)과 비교한다. 그 결과 피난 시간 657.3초(지연시간 포함)로 나타난 화재 실 부근의 출구가 가장 오랜 시간의 피난 소요시간(RSET)으로 산정되었다. 이는 약 11분으로 ASET과 RSET의 비교법으로 평가할 경우 안전한 것으로 판별이 된다. 재실자의 거동이 최악의 상황(패닉 현상)으로 발전되지 않는다면 충분한 탈출 시간이 확보된 가정이라고 사료된다.



<Fig. 6> Result of Fire Risk Assessment

#### 4.4 화재 위험성 평가 결과

본 보고서는 쇼핑센터 Ground floor 화재 발생에 대비하여, 화재 및 피난에 대한 시뮬레이션을 통해 관계자로 검토 및 화재안전성평가를 수행한 것이다.

Ground floor 화재 대한 안전성 평가를 통하여 화재 발생 시 재실자들의 피난에 대한 안전성 여부를 분석한 결과, 피난 소요시간이 피난 허용시간을 초과하지 않는 것으로 분석됨에 따라 화재 발생시 재실자의 피난 안전성능이 확보되는 것으로 평가되었다. 이상의 시뮬레이션 결과는 안전성을 높이기 위하여 소방설비의 미작동에 근거한 종합안전성 평가로서 화재 발생에 따른 소방설비의 연계로 보다 원활한 피난안전성능이 확보될 수 있음을 의미한다.

## 5. 결 언

현행 국내의 성능위주설계 화재안전계획은 기존의 규정을 만족하고, 추가적인 위험요인을 분석하여 그 결과에 적합한 방재시설을 계획하는 것이 주요내용이다. 이는 설계에 반영된 방재시설 및 화재 안전 계획의 타당성을 시뮬레이션을 통해 확인하고 미흡할 경우 개선안을 설계에 반영하고 있는 실정이다. 하지만 본고의 사례처럼 해외 프로젝트는 성능을 만족하거나 그 이상일 경우, 그 건물에 적합한 성능의 방재시설 설계가 가능하다. 또한 이를 위해서는 발주처, 시공사 및 설계사 모두 그 결과에 대한 합의가 이루어진 것을 전제로 한다. 따라서 본 고를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 화재 위험성 평가 수행 대상은 해외 복합쇼핑몰의 성능위주설계
- 전층 화재확산 및 피난 시뮬레이션 수행(High Performance Computer 이용)
- 방화셔터 제외 여부에 따른 안전성 확인(최소한의 방화셔터 적용가능)
- Void를 통한 연기배출 성능확인(Smoke Spill

System 성능확인)

- 향후 직영매장 및 극장시설에 대한 시나리오에 따른 시뮬레이션
- 구획화재(직영매장, 극장 등)에 대한 화재 위험성 평가 별도 수행

일반적인 화재 위험성 평가에서의 시뮬레이션 범위는 화재실로 제한한다. 재실자가 화재가 발생하였을 경우, 화연의 위험범위를 벗어날 수 있는 안전한 출구까지로 산정하여 다양한 시나리오를 기반으로 평가 및 분석을 하는 것이 일반적이다. 하지만 본 프로젝트는 보이드를 통한 연기이동에 대한 이슈가 평가의 중요한 지표이므로 전 층을 하나의 구획으로 시뮬레이션을 수행하였다.

이는 많은 시간 및 고사양의 컴퓨터가 준비되어 있지 않으면 불가능하다. 다행히 주변의 도움을 받아 성공적으로 프로젝트를 마무리할 수 있었지만, 향후 이러한 프로젝트를 또다시 수행할 경우 주변 환경이 충분히 갖추어져 있어야 할 것이다. 분명한 것은 본 사례를 통해 국내 화재 위험성 평가기술에 대한 수준은 상당히 제고되었고 해외 프로젝트에 대한 좋은 선례로 제시할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 기사는 국토교통부 첨단도시개발사업 의 초고층빌딩 시공기술 연구단 지원에 의한 결과임.

## References

1. 손봉세, “초고층 건축물의 화재안전성능 평가기준 표준화에 관한 기초 연구”, 경원대학교, 2008.
2. 박형주, “소방법규 및 성능위주의 설계를 위한 신건축방재 설계 가이드”, 경원대학교, 2006.
3. 소방방재청 고시 제2011-68호, “소방시설등의 성능위주설계 방법 및 기준 고시”, 2011.
4. NFPA 5000, Building Construction and Safety Code, Chapter 5, 2015 Edition.
5. SFPE Handbook, Society of Fire Protection

- Engineering, 4th Edition.
6. NFPA 101, Life Safety Code
  7. 윤성욱, 박준, 김효근, “성능위주설계를 위한 화재 시나리오 개발 및 적용”, 한국소방안전협회, 소방기술정보지, Vol. 35, 2012.
  8. AM Hasofer, VR Beck, ID Bennetts, “Risk Analysis in Building Fire Safety Engineering”, 1st Edition, 2007.
  9. Ming Chun Luo, “Fire Safety of High Rise Buildings (Part1)”, AFG-HK-894, 2011.
  10. Young Wong, “Fire Safety of High Rise Buildings (Part2)”, AFG-HK-980, 2013.
  11. Young Wong, “Fire Safety of High Rise Buildings (Part3)”, AFG-HK-1047, 2014.