화재 시뮬레이션(FDS)을 이용한 이중외피 구조의 화재 특성에 관한 연구

구선환 · 김현호 · 송영주*†

동신대학교 대학원 소방학과, *동신대학교 소방행정학과

A Study on Fire Features of Double-Skin Facade Structure by Using Fire Simulation (FDS)

Seon-Hwan Gu · Hyun-Ho Kim · Young-Joo Song*†

Graduate School of Fire Department, Dongshin Univ.

*Dept. of Fire Administration, Dongshin Univ

(Received October 23, 2013; Revised January 20, 2014; Accepted February 14, 2014)

요 약

본 논문은 화재 시뮬레이션 프로그램(FDS)을 기반으로 만들어진 PyroSim 프로그램을 이용하여, 이중외피 구조를 중공층의 구획과 자연환기의 방법에 따라 4가지(박스형, 샤프트-박스형, 복도형, 전면형)로 분류하고, 각 구조의 화재 특성을 수치적으로 비교 분석하였다. 이를 위해 4층 건축물로 모델링하였으며, 동일한 제반 조건을 갖추고 이중외피 구조를 다르게 하였다. 또한 각 구조별 화재 특성을 확인하기 위해 연기 거동, 연기 밀도, 연기 감지장치, 가시거리를 비교 분석하였다. 그 결과, 박스형 이중외피 구조는 화재실외에는 크게 영향을 미치지 않았고, 복도형 이중외피 구조는 연기가 화재실 옆으로 이동하는 수평적인 영향이 크게 나타났다. 또한 샤프트-박스형 이중외피 구조는 샤프트를 통한 연기의 수직 상승 현상이 가장 빠르게 나타났고, 수직 상승된 연기가 차고 내려와 기타실에도 영향을 미쳤으며, 전면형 이중외피 구조도 연기의 수직 상승과 함께 기타 구획실에도 큰 영향을 미쳤다.

ABSTRACT

This study aims to address the fire characteristics of Double-skin facade using the Fire Dynamics Simulator (FDS). To end this, Double-skin facade was classified into the four structures, that is Box, Shaft-box, Corridor, Multistory, through PyroSim program which was based on FDS, and further each structure of fire characteristics were analyzed numerically as well as comparatively in the current study. This study also examined smoke movement, smoke density, smoke detectors, and visibility in order to closely identify the each structure of fire characteristics. The results of the study discovered that the Box structure did not significantly affect smoke which was rising in the other rooms, except for the fire room whereas the Corridor structure had positive effects on Double-skin facade horizontally. In addition, the Shaft-box structure showed the fastest vertical movement by means of the shaft, on the other hand, rising smoke influenced the other rooms as well. The Multistory structure along with rising smoke had a great impact on the other divided rooms in a vertical way.

Keywords : FDS, Double-skin Facade, Box, Shaft-box, Corridor, Multistory

1. 서 론

현재 인류는 사회 전반에 걸쳐 자연 친화적인 자원의 개발과 자연 자원의 재사용, 자연 에너지의 활용등을 통해 앞으로 닥쳐올 환경 재앙과 자원의 고갈 등을 대비하고 있다. 이러한 노력은 건축물에도 영향을 미쳐 최근 에너지 절약형 건축물이 들어서고 있고, 많은 연구가 진행 중에 있다.

에너지 절약형 건축물은 자연 부하에 적응하고, 친환경 에너지 사용하며 한번 사용한 에너지를 자원화하여 재사용 하는 친환경적인 건축물이다. 이렇게 자연과 조화로

움을 추구하고 환경문제 해결에 한발 앞장서는 건축물의 구조중 하나가 이중외피 구조가 적용된 건축물이다.

이중외피 구조는 두 개의 외벽을 갖는 구조로서 건축물의 미관 향상은 물론 내피와 외피 사이의 공간(중공층)을 이용하여 외부에 대한 자연환기, 차음성능 향상, 냉·난방 에너지 절감 등의 장점을 갖고 있다⁽¹⁾. 그러나 이중외피 구조는 화재 시 중공층을 통해 상층부로의 연기 및 화재 확산의 위험이 크고, 굴뚝효과가 더해져 그 위험성은 대단히 높다고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 화재 시뮬레이션 프로그램(FDS)을 기

† Corresponding Author, E-Mail: dewangel1@dreamwiz.com
TEL: +82-61-330-3563, FAX: +82-61-330-356

반으로 만들어진 PyroSim을 이용하여, 앞서 선행되었던 커튼월 구조와 일반 건축물의 화재 특성을 파악한 “화재 시뮬레이션(FDS)을 이용한 커튼월 이중외피 구조의 화재 확산에 관한 연구”에서 연구의 범위를 확대시켜 동일한 제반 조건과 이중외피 구조부를 중공층의 구획과 자연환기의 방법에 따라 4가지 구조(박스형, 샤프트-박스형, 복도형, 전면형)로 나누어 각 구조별로 연기 거동, 연기 밀도, 연기 감지장치, 가시거리를 통하여 화재 시 특성을 수치적으로 비교 분석하고자 한다.

2. 이중외피 구조

2.1 이중외피 구조의 개요

이중외피 구조는 외부 환경부하를 최소화시키고, 자연환경조건을 다시 이용하여, 재생 가능한 에너지를 사용함으로써 건물의 에너지 절약은 물론 인간의 쾌적한 생활을 영위하기 위한 친환경적 건축 구조이다.

이중외피 구조는 외피(내측 외피)에 또 다른 외피(외측 외피)가 덧대어져 있는 형태로서 그 사이에는 중공층이 존재하고, 중공층에는 차양을 위한 블라인드가 설치되는 경우도 있으며, 각 외피에는 개구부가 설치되어 있다.

이중외피 구조 중 외측 외피는 자연환경과 가장 근접해 있는 구조물로서 외부 환경의 부하를 가장 먼저 완충하는 역할을 하며, 자연채광, 조망확보, 외부소음 차단 등의 기능을 하게 된다. 외측 외피와 내측 외피 사이에는 빈 공간이 생기는데 그 공간을 일반적으로 중공층이라 칭하며, 중공층에서는 외부에서 또는 내부에서 발생하는 열에 의한 환경적인 조건으로 공기의 밀도차가 생기며, 밀도차에 의

한 굴뚝효과를 통해 공기의 유동을 형성한다. 이러한 공기의 유동을 원활히 하기 위해 각 외피에 개구부가 존재하고, 개구부 조절을 통해 공기 유동을 조절 할 수 있다. 겨울철의 경우 개구부를 폐쇄하여 열 환경적인 조건을 통해 데워진 따뜻한 공기를 중공층에 머물게 하여 외부의 차가운 환경으로부터 건물을 보호하게 되고, 여름철의 경우 개구부를 개방하여 중공층의 데워진 공기를 배출함으로써 시원한 공기 흐름을 형성하게 된다. 이때 중공층에 설치되어있는 블라인드를 통해 외부의 차양을 조절하게 되면 효율적인 열 · 빛 에너지 관리가 가능하게 된다⁽²⁾.

2.2 이중외피 구조의 종류 및 특징

이중외피 구조는 외피(내측 외피)와 외피(외측 외피) 사이에 중공층의 구획과 자연 환기의 방법에 따라 4가지(박스형 구조, 샤프트-박스형 구조, 복도형 구조, 전면형 구조)의 종류로 구분할 수 있다⁽³⁾.

이중외피 구조의 종류에는 중공층의 구획 방법과 자연 환기의 방법에 따라 하나의 유닛이 하나의 이중 외피를 구성하는 박스형 이중외피 구조, 박스형의 변형 형태로 수개층에 걸쳐 샤프트와 박스형의 교차된 형태의 샤프트-박스형 이중외피 구조, 중공층이 각 층별로 구획 되어 있는 복도형 이중외피 구조, 수개의 층이 공간의 구분 없이 하나의 유닛으로 구성 되어 있는 전면형 이중외피 구조로 구별할 수 있으며, 이중외피 구조의 종류와 각 각의 구조도를 나타내면 Figure 1과 같다⁽⁴⁾.

2.2.1 박스형 이중외피 구조

하나의 유닛이 하나의 이중외피를 구성하는 형태로 하

Classification		Type	Front view	Sectional view
Mono-layer	Box			
	Corridor			
Mult-story	Shaft-box			
	Multistory			

Figure 1. The types of Double-skin Facade structure and the structure.

나의 유닛이 하나의 창에서 구성될 수도 있으며, 소규모로 구획되어 하나의 유닛을 통해 구조가 구성될 수도 있다. 또한 하나의 유닛에 유입구와 배출구 역할을 하는 개구부가 존재하며, 이 개구부를 통해 중공층의 공기 순환을 돕는다. 또한 하나의 유닛이 구획하고 있는 범위가 좁기 때문에 시공이 용이하고, 사생활 보호 측면에서 유리하며, 외부의 소음 또는 층간 소음이나 냄새의 확산 등에 대해서 장점을 갖는다.

2.2.2 샤프트-박스형 이중외피 구조

박스형 이중외피에서 변형된 형태로 수개층에 걸친 샤프트형 이중외피와 박스형 이중외피가 교차되어진 형태를 갖고 있다. 샤프트형 이중외피 구조의 특징은 굴뚝효과가 커서 높은 배기 효율을 가진다는 점이며, 이를 위해 최상부와 최하부에 개구부가 존재한다.

원활한 공기 순환을 위해 박스형의 하부에 급기를 위한 개구부가 존재하며, 상부에는 샤프트 이중외피의 높은 배기 효율을 위해 샤프트 이중외피로 통하는 개구부를 두어 신선한 공기를 공급하게 된다. 또한, 샤프트형과 박스형에 대한 서로의 단점을 보완한 구조로써 외부 소음차단 면에서 유리하고 충분한 환기량을 확보 할 수 있지만 샤프트 이중외피로 인한 조망확보가 어렵고 공기역학적 설계를 고려해야하는 단점이 있다.

2.2.3 복도형 이중외피 구조

중공층이 각 층별로 구획되어 있고, 박스형 이중외피와 마찬가지로 중공층의 공기 순환을 위한 개구부가 각 구획의 상부와 하부에 존재하고, 하층부의 상부 개구부에서 배출되는 공기가 해당층 또는 상층부의 유입구로 유입되는 것을 방지하기 위하여 유입구와 배출구를 엇갈리게 배치하는 것이 유리하다.

복도형은 하나의 층마다 수평으로 구획되므로 해당 층간 소음 및 냄새확산과 사생활 보호 측면에서 단점이 있지만, 중공층을 복도로 이용하거나 발코니, 휴식공간 등으로 사용할 수 있는 장점이 있다.

2.2.4 전면형 이중외피 구조

수개의 층이 공간의 구분 없이 하나의 유닛이 건물의 전면에 구성되어 있다. 중공층의 환기를 위하여 유닛의 하부와 상부에 개구부가 있어 공기의 유입과 배출을 하게 된다. 난방 기간에는 태양 에너지로부터 데워진 공기를 저장하기 위하여 상부와 하부의 개구부를 폐쇄하고, 냉방기에는 개구부를 개방하여 공기의 유동을 일으킴으로써 찬공기의 유입을 유도하여, 계절에 따른 냉·난방 에너지를 절약하는 역할을 한다.

중공층이 건물의 전면에 구성되어 있으므로 층간 소음에 큰 영향을 미치며 화재 시 굴뚝효과에 의한 연기의 이동통로가 되므로 화재 시 연기확산에 의한 피해가 가장 큰

구조이다.

2.3 이중외피 구조의 굴뚝 효과

굴뚝효과란 건물 내부와 외부의 온도차에 의해 공기의 밀도차가 생기는데 그 밀도로 인한 압력차가 발생하여 공기의 흐름이 생겨 지표면상에서 건물로 들어오는 공기가 상부로 이동하는 현상으로써 굴뚝효과 또는 굴뚝효과라고 한다. 굴뚝효과는 특히 건물 내부와 외부의 온도차가 큰 겨울철에 상대적으로 크게 나타나며, 여름철에는 외부의 공기가 더 따뜻하여 건물 상부로 유입되는 반대의 현상이 나타나기도 하는데 이를 역굴뚝 효과(Reverse stack effect)라고 부른다⁽⁵⁾. 굴뚝 효과로 인한 온도차에 의한 압력차를 식(2-1)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = 3,460 \times h \times \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (2-1)$$

여기서, ΔP = 내, 외부의 압력차[Pa], Stack Effect,

h = 중성대로부터 건물높이(m)

T_o = 외기온도[K], T_i = 실내온도[K]

이중외피 구조에서는 화재 시 연소가스와 연기 등의 확산을 돕는 구조와 역할을 하게 되므로 화재로 인한 인명피해 및 재산피해에 크게 영향을 미친다. 이중외피 구조가 친환경 에너지 절약형 건축물로써 미래 지향적인 건축물임에는 틀림이 없지만, 화재 시에 대한 대처 방안을 확실히 마련하지 않는다면 재실자의 안전을 보장하기가 어렵다.

3. 화재 시나리오 설정

3.1 화재 시뮬레이션 프로그램(PyroSim)

PyroSim 프로그램은 미국 국립 표준 기술 연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발한 것으로써 FDS를 기반으로 Smokeview 프로그램과 합쳐져 사용자가 편리하게 사용하기 위해 만들어졌다. FDS는 Navier-Stokes Equations을 수치적으로 연산된 결과를 연기와 온도등의 유동등을 평가할 수 있다. 일반적으로 FDS의 지배 방정식은 질량보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙, 에너지 보존의 법칙, 이상기체 법칙을 바탕으로 실행되고, 식(1), (2), (3), (4)와 같다^(6,7). 또한 Smokeview 프로그램을 통해 가시화되어 보다 더 편리하고 빠른 결과 도출에 도움을 줄 수 있는 프로그램이다⁽⁸⁾.

$$\text{연속식(질량보존의 법칙)} : \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = m_b''' \quad (1)$$

운동량 방정식(운동량 보존 법칙) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \nabla P = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

에너지 방정식(에너지 보존 법칙) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{v} = \frac{DP}{Dt} + q''' - q_b''' - \nabla \cdot \mathbf{q}'' + \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{이상 기체 법칙} : P = \frac{\rho RT}{W} \quad (4)$$

여기서, ρ : 밀도, t : 시간, ∇ : 방향 벡터, $\mathbf{v}$: 속도 벡터,
 m_b''' : 입자증발 속도, P : 압력, g : 중력가속도,
 $\mathbf{f}_b$: 외부힘 벡터, τ_{ij} : 전단응력,
 h_s : 온도변화에 따른 엔탈피,
 q''' : 단위부피당 열방출속도, q_b''' : 입자 열 방출속도,
 $\mathbf{q}''$: 전도, 복사에 의한 열 유동, ε : 소산율,
 R : 기체상수, W : 기체분자량

이러한 결과를 통해 건물의 화재 위험 요소들을 미리 예측하고 평가하여, 설계에 반영함으로써 화재로 인한 안전한 대책을 수립 하는데 큰 역할을 한다.

본 연구에 사용된 PyroSim 2012는 FDS v5.5.3을 지원하며 FDS와 Smokeview 프로그램을 포함하고 있다.

3.2 화재 시뮬레이션 대상 건축물의 구조

동일한 제반 조건을 갖고 있는 기본적인 건축물의 모양

은 동일하다. 하지만 이중외피 구조 부분은 중공층의 구획과 환기 방법과 환기 방법에 따라 크게 4가지(박스형, 샤프트-박스형, 복도형, 전면형)로 분류하여 실험하였다.

3.2.1 제반 조건

시뮬레이션 대상물은 가상의 건축물로 지상 4층 건물이며, 연면적은 1,184 m²이다. 기본적인 건축물의 모양은 동일하지만, 이중외피 구조 부분은 중공층의 구획과 환기 방법에 따라 크게 4가지(박스형, 샤프트-박스형, 복도형, 전면형)로 분류하여 실험하였으며, 건축물의 크기는 가로 20 m, 세로 14.8 m(중공층 0.8 m 포함), 높이 12 n(4층)로 구성하였다. 내피에는 한 실 당 두 개의 창문이 있고, 길이는 3 m, 높이는 1.5 m로 구성하였다.

발화원은 1층, Room 1의 정중앙에서 발화한 것으로 가정하였다. 정중앙으로 발화점을 설정한 이유는 화재 시 연소 생성물의 고른 분포와 확산을 통해 정확한 결과 데이터를 얻기 위해서이다. 발열량은 Polyurethane의 발열량을 적용하였으며, 그 값은 3,000 kW로 설정하였고, 시뮬레이션 시간은 1,200 s, 셀수는 656,000개, 셀 하나의 크기는 0.2 m × 0.2 m × 0.15 m로 설정하였다. 또한 연기 밀도, 연기 감지 측정장치 및 가시거리를 측정하기 위한 장치들은

Table 1. The Conditions of Simulation

Classification	Contents	
Architectural scale	4 floors above ground	
Floor plan
Plane size (m)	20 × 14.8 × 12 (Floorage 296 m ²)	
Inner skin window (m)	3 × 1.5	
Cells	0.2 × 0.2 × 0.15 (Number of cells for mesh : 656,000)	
Set point	Combustible	Urethane Sofa
	Reactions Species	C = 6.3, H = 7.1, O = 2.1, N = 1.0, SOOT_yield = 0.227, CO_yield = 0.031
	Heat release rate	Polyurethane (3,000 kW)
	Time	0~1,200 s
Devices	Smoke Movement, Soot Density, Visibility, Smoke Detector ($\alpha_e = 2.5$, $\beta_e = -0.7$, $\alpha_c = 0.8$, $\beta_c = -0.9$, Obscuration Specification = 3.28%/m)

Figure 2. The Position of exhaust and supply of each Double-skin Facade.

각 실의 정중앙의 높이 1.5 m에 설치하였으며, 동일한 제반조건의 구성을 나타내면 Table 1과 같다.

이중외피 구조의 개구부 면적의 총 합은 8 m²로 모두 같고 자연환기 방식이며, 급기구와 배기구 역할을 하는 개구부는 Figure 2와 같다.

3.2.2 시나리오

이중외피 구조의 각 구조별(박스형, 샤프트-박스형, 복도형, 전면형) 연기 거동, 연기 밀도, 연기 감지장치, 가시거리를 수치적으로 측정하여 화재 특성을 평가한다.

4. 고 찰

4.1 층간 연기 거동

Figure 3은 이중외피의 구조별 층간 연기 거동 현상을 Smokeview로 시간에 흐름에 맞춰 나타낸 것이다. Figure 3의 첫 번째 행은 박스형 이중외피 구조 일 때의 연기 거동을 나타낸 것으로 화재 초기부터 시뮬레이션이 종료되는 시점까지 연기의 형태가 Room 1의 1층(화재실)에서만 머무르고 있으며, 화재실의 개구부를 통한 상층부로의 연기확산을 보이고는 있지만 이는 외피 밖에서의 연기 이동이고, 화재실의 상층부 또는 기타 층의 실의 연기 거동 현상을 파악해 보았을 때, 화재실을 제외하고 상층부나 기타 실로의 연기 이동에 의한 영향이 적은 것을 알 수 있다.

샤프트-박스형 이중외피 구조의 연기 거동을 분석해 보았을 때, 샤프트를 통한 연기의 수직 이동 현상이 매우 빠르게 일어났음을 파악 할 수 있었다. 또한 화재 시작과 동시에 샤프트를 통해서 연기가 이동했다. 시간이 흐를수록 최상층에서부터 연기가 차고 내려오는 현상을 파악할 수 있었고, 샤프트-박스형 이중외피 구조의 경우 샤프트로 통한 연기 이동이 최상층으로 가장 빠르게 이동 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 Room 2에서도 최상층부터 연기가 차고 내려오는 현상을 볼 수 있었으며, 샤프트를 통한 연기 이동이 화재실의 상층부의 층뿐만 아니라 기타층에도 큰 피해를 주는 것으로 나타났다. 이는 샤프트 구조에서의 굴뚝효과가 연기의 수직 상승을 조장하여 상층부로의 연기 확산이 매우 빠르게 진행됨을 알 수 있는 부분이다.

복도형 이중외피 구조에서는 화재 시 복도형 이중외피 구조만의 특징을 찾을 수 있다. 화재 발생 후 연기 거동은 화재실의 상층부위가 아니라 화재실의 바로 옆의 Room 2의 1층으로 이동하는 현상을 파악 할 수 있다. 또한 시간이 흐를수록 상층부로 연기의 수직 이동은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보이며, 연기의 수평 이동에 의한 동일층에 가장 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

전면형 이중외피 구조에서는 다른 구조와 비교하여 화재로 인한 피해가 전반적으로 넓다는 것을 알 수 있다. 또한 굴뚝효과에 의한 연기의 수직 이동이 빠르게 진행되고, 최상층에 도달한 연기는 중공층을 통해 기타 다른 층에도 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 화재 시작 약

Figure 3. The spread of smoke movement by time at each Double-skin Facade.

200 s 만에 중공층에 연기가 가득차 건물내 모든 실로 연기가 유입되어 연기가 가득 찼음을 파악할 수 있다. 이는 전면형 이중외피 구조가 전반적으로 연기의 이동 범위가 넓게 형성되는 것을 알 수 있는 거동현상이다.

4.2 연기 밀도

Figure 4는 이중외피의 구조별 연기 밀도를 나타낸 것이다. 박스형 이중외피 구조의 연기 밀도를 분석해 보면 화재실인 Room 1의 1층에서 화재 시작 약 100 s까지 매우 빠른 속도로 높아졌고, 약 150 s에서 연기 밀도가 급격히 낮아진 이후, 다시 연기 밀도가 증가하였으며, 다른 실과 비교하여 화재 시작과 동시에 연기 밀도가 가장 빠르고 높게 나타났다.

각 실의 가장 높은 연기 밀도를 순서대로 나타내어 보면 화재실인 Room 1의 1층에서 약 $2.04 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$, 2층에서 약 $4.86 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, 3층에서 약 $1.35 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, 4층에서 약 $1.09 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 의 순서로 나타났으며, Room 2의 모든 실에서는 연기 밀도가 측정되지 않았다. 이는 일반적인 화재 시 건축물의 최상층이 연기 밀도가 가장 높은 것과 비교하여 박스형 이중외피 구조에서는 화재 직상층

이 가장 위험함을 나타내었고, 최상층에서는 가장 낮은 연기 밀도를 나타내었다. 이는 연기 밀도의 평균값과 비교하여 보았을 때에도 같은 위험 순위를 나타내므로, 이것은 박스형 이중외피 구조에서 화재 시 나타나는 특징이라 할 수 있다.

샤프트 박스형 이중외피 구조의 연기 밀도를 분석해 하였을 때 그래프로 확인한 연기밀도의 증가율이 높은 실과 연기 밀도가 높은 실의 순서는 Room 1의 1층, 4층, 3층, Room 2의 4층, 3층, Room 1의 2층, Room 2의 2층으로 나타났다. 연기 밀도의 평균값 또한 위의 순서와 같다.

화재 시작 후 화재실인 Room 1의 1층에서 약 50 s 일 때 약 $1.07 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 로 가장 높게 나타났으며, 기타 실에서는 시뮬레이션 종료 시간인 1,200 s 일 때, Room 1의 4층에서 약 $9.84 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, 3층에서 약 $9.18 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, Room 2의 4층에서 약 $8.66 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, 3층에서 약 $6.88 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, Room 1의 2층에서 약 $4.38 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, Room 2의 2층에서 약 $7.85 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, 마지막으로 Room 2의 1층에서 약 $3.61 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 로 나타났다. 이는 샤프트-박스형 이중외피 구조에서의 화재 특성을 보여주는 것으로 샤프트를 통해 최상층에 도달한 연기는 최상층

Figure 4. The smoke density of each Double-skin Facade.

부터 차기 시작하여 다시 샤프트를 통해 기타 실로 연기를 이동시키는 역할을 한 것이다.

복도형 이중외피 구조의 연기 밀도를 나타낸 그래프를 분석해 보면 복도형의 특성상 Room 1과 Room 2의 1층에서 연기 밀도가 높게 형성 되었다. 연기 밀도의 최고값과 평균값 순위 또한 같은 것으로 나타났다.

화재 시작 후 가장 높은 밀도를 나타낸 곳은 화재실이었으며, 시뮬레이션 종료 시간인 1,200 s에서 $2.04 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 의 밀도를 나타내었다. 이후 복도형의 수평적 구획 특성상 Room 2의 1층에서 화재실을 제외한 가장 높은 밀도로 약 800 s 일 때 $1.17 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 를 나타내었다.

기타 실에서의 연기 밀도는 Room 2의 최상층인 4층에서 약 1,150 s 일 때 약 $6.02 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, Room 1의 4층에서 1,150 s 일 때 약 $5.95 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, 3층에서 1,200 s 일 때 약 $5.38 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, Room 2의 3층에서 1,200 s 일 때 약 $4.52 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, 2층에서 1,200 s 일 때 약 $2.51 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, Room 1의 2층에서 800 s 일 때 약 $1.42 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 로 나타났다. 최고값을 비교 하여 보았을 때 먼저 화재실 옆실에 가장 큰 피해를 미치며, 이후 최상층으로 이동한 연기가 서서히 차고 내려오는 현상을 나타내었지만 화재실과 같은 층의 연기 밀도보다 현저히 낮은 수치를 나타내는 것으로 보아 수평적인 피해 확대가 가장 큰 것을 확인 할 수 있다.

전면형 이중외피 구조의 연기 밀도 특성을 파악해 본 결과 단연 화재실이 가장 빠른 수치 상승과 함께 높은 수치를 나타내었고, 다른 구조와는 다르게 각 실별로 최대값과 평균값의 순위에서 차이를 보이고 있다.

화재실을 제외하고 두 번째로 연기 밀도의 증가 속도가 가장 큰 곳은 그래프로 확인 했을 때 Room 1의 4층이었으며, 1,200 s 일 때 최대값은 약 $4.97 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 을 나타내었다. 최대값으로는 Room 2의 4층(약 $5.06 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)에 비해 낮지만 약 1,050 s까지 연기 증가량이 더 높게 나타나 평균값에서는 약 $4.00 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 로 두 번째로 높게 나타났다. 그 다음 세번째로는 Room 1의 3층이 약 $3.50 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 로 평균값이 높게 나타났고, 최대값은 1,200 s 일 때 약 $4.88 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 로 네 번째로 나타났다. Room 2의 4층은 최대값으로 보았을 경우 1,200 s 일 때 약 $5.06 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 로 화재실을 제외한 두 번째 높은 연기 밀도를 나타내었지만, Room 1의 3층과 4층에 비해 연기 증가 속도가 적어 평균값으로는 네 번째로 높은 양을 나타내었다. 또한 Room 1의 2층에 비해 약 300 s까지는 연기 밀도가 낮게 나타났지만 약 200 s 이후에 증가 속도가 높아져 다시 연기 밀도가 높아지는 현상을 나타내었다. Room 1의 2층은 Room 2의 3층과 비교하여 약 600 s까지는 높은 연기 밀도를 형성하다가 이후 Room 2의 3층에서 조금 더 높은 연기 밀도를 형성하였다. Room 1의 2층은 1,200 s 일 때 약 $4.12 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, Room 2의 3층은 1,200 s 일 때 약 $4.71 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 으로 약간 낮은 값을 나

타내었다. Room 2의 2층에서 7번째로 연기 밀도 증가량을 나타내었으며, 1,200 s 일 때 약 $3.12 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 로 최대값을 나타내었고, 마지막으로 Room 2의 1층에서 1,200 s 일 때 약 $3.36 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 으로 가장 낮은 밀도를 나타내었다. 전면형 이중외피 구조의 위험도를 나타내 보면 화재실에서 가장 위험하였고, Room 1의 4층, Room 1의 3층, Room 2의 4층, 약 600 s까지는 Room 1의 2층, 이후로는 Room 2의 3층, Room 2의 2층, Room 2의 1층의 위험순위를 나타내었다. 이는 평균값과 비교하였을 때 거의 일치하는 것으로 나타났다.

4.3 연기 감지장치

Figure 5는 연기 감지장치를 통해 각 구조별 위험성을 수치적으로 나타낸 것으로 매 시간마다 얼마만큼의 연기가 차게 되는지를 수치적으로 그래프와 함께 나타내었다.

박스형 이중외피 구조의 연기 감지장치를 통한 특성을 파악해 보면 화재실의 경우 화재 시작 약 50 s 만에 약 94 %/m, 약 100 s 이후에는 약 100 %/m를 나타내어 화재 시작과 동시에 매우 위험함을 알 수 있었다. 화재실을 제외하고는 Room 1의 2층에서 약 350 s 이후에 급격히 증가하여 1,200 s 일 때 약 98 %/m로 나타났으며, Room 1의 3층에서는 약 450 s 이후 증가한 연기는 1,200 s 일 때 약 65 %/m, 4층에서는 약 500 s 이후에 증가하여 1,200 s 일 때 약 58 %/m로 나타났다. 또한 Room 2의 모든실에서는 연기가 검출되지 않았으며, 이는 연기 밀도와 비교 하였을 때 동등한 위험도를 나타내었다.

샤프트 박스형 이중외피 구조에서도 화재실의 경우 박스형 이중외피 구조와 비슷한 수치를 나타내었다. 그러나 Room 1의 2층, 3층, 4층, Room 2의 4층에서 약 200 s 일 때 연기가 약 100 %/m에 도달하였다. Room 2의 4층의 경우 타 구조와 비교하여 가장 빠르게 약 100 %/m(전면형의 경우 약 400 s 일 때)에 도달 하였고, 이는 샤프트를 통해 최상층에 도달한 연기가 최상층에 옆의 실에 매우 민첩한 영향을 주는 것을 알 수 있다.

기타 실의 경우 Room 2의 3층에서도 약 200 s 일 때 94 %/m, 400 s 일 때 약 100 %/m의 수치를 나타내고 있고, Room 2의 2층에서도 약 1,000 s 이후에 약 95 %/m 이상의 수치를 나타내고 있는 것으로 보아 샤프트를 통한 연기가 타 실에도 매우 위험하게 작용하는 것으로 나타났다.

복도형 이중외피 구조의 화재실에서는 상기의 구조들과 동등한 수치를 나타내었다. 복도형 이중외피 구조는 수평적인 구획을 갖고 있으므로 구조 특성상 화재실의 바로 옆실인 Room 2의 1층 에서 약 50 s 이후에 급격히 증가하였고, 약 100 s 이후로는 100 %/m로 연기가 가득 찼다. 이외의 다른 실에서는 모두 1,200 s 일 때 가장 높은 농도를 나타냈으며, 그 수치는 Room 2의 4층에서 약 41 %/m, Room 1의 4층에서 약 3 %/m, 3층에서 약 34 %/m, Room 2의 3층에서 약 30 %/m, 2층에서 약 10 %/m, Room 1의

Figure 5. The smoke detectors of each Double-skin Facade.

2층에서 약 5 %/m로 나타났다.

전면형 이중외피 구조에서는 화재실을 제외하고 Room 1의 4층에서 가장 빠르게 약 100 %/m에 도달했으며, 이는 다른 구조와 비교하여 가장 빠른 시간이기도 하다. 또한 약 50 s 일 때 타 구조에서는 거의 연기가 검출되지 않았던 점과 비교 하여 약 10 %/m의 농도를 나타냄으로써 전면형 이중외피 구조가 상층부로의 연기 확산 현상이 가장 빠른 것으로 판단할 수 있다.

다른 실의 경우 Room 1의 3층에서 약 100 s 일 때 약 92 %/m, 약 200 s 일 때 약 100 %/m로 나타났으며, Room 1의 2층 또한 약 200 s 일 때 약 100 %/m를 나타내었다. Room 2의 4층과 3층, 2층의 경우 약 400 s 일 때 약 100 %/m에 도달하였고, 1층의 경우 약 100 %/m까지 도달하지 않았으나 1,200 s 일 때 약 95 %/m에 도달하였다.

전면형 이중외피 구조는 상층부로의 연기의 확산이 매우 빠른편이며, 또한 중공층을 통한 연기의 확산이 다른 구조와 비교하여 매우 넓은 범위에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.4 가시거리

화재 시 발생하는 연소 생성물중 하나인 연기는 매우 위험한 독성을 포함하고 있는 가스를 갖고 있어 인체에 위험한 결과를 초래하고 피난에 필요한 시야 확보를 어렵게 하여 피난을 매우 어렵게 함과 동시에 심리적으로 매우 불안한 상황에 이르게 한다. 이렇게 가시거리를 확보하지 못할 경우 피난에 장애를 주어 가장 큰 인명 피해의 주범이 되기도 한다.

연기로 인해 사람이 목표물을 식별할 수 있는 거리를 가시거리라 하며, 가시거리 약 20 m~30 m는 연기 감지기가 작동하거나 건물내 미숙지자의 피난 한계농도에 해당한다. 또한 가시거리가 약 5 m 이내인 경우 건물에 익숙한 사람조차 피난에 지장을 느끼며, 약 3 m 이내의 경우 손으로 더듬어 피난을 해야 하는 정도의 농도이다⁷⁾.

본 논문에서는 각 구조의 구획실별 가시거리를 건물내 미숙지자의 피난 한계농도에 해당하는 약 5 m를 기준으로 어느 실에서 가장 빠르게 도달 하는 시간으로 그 실의 위험성을 분석해 보았고, 그 결과는 Figure 6과 같다.

복도형 이중외피 구조에서의 가시거리는 화재실인

Figure 6. The visibility of each Double-skin Facade.

Room 1의 1층의 경우 화재 시작 약 50 s 만에 가시거리 5 m 이하로 낮아져 약 1 m의 가시거리를 나타내었고, 이후로는 가시거리가 약 0 m로 나타났다. 그 다음으로 Room 1의 2층에서 약 400 s 일 때, 3층과 4층에서 약 1,000 s 일 때 가시거리 약 5 m 이하를 나타내었다. 반면 Room 2에서는 어느실에서도 가시거리가 줄어들지 않았다. 샤프트-박스형 이중외피 구조의 가시거리 특성은 Room 1의 1층의 경우 박스형과 비슷하게 나타났다.

기타 실의 경우 Room 1의 4층에서 화재 시작과 함께 중공층(샤프트)을 통해 빠르게 상승한 연기로 인하여 급격하게 줄어든 가시거리가 약 100 s 일 때 약 0 m로 나타났으며, 기타 다른실(Room 1의 2층, 3층, Room 2의 4층)에서도 매우 빠르게 가시거리가 줄어들어 약 200 s 일 때 가시거리가 약 0 m로 나타났고, Room 2의 3층에서 약 1 m를 나타내었다. Room 2의 2층에서는 약 600 s 일 때 약 3 m를 나타내었다.

복도형 이중외피 구조의 화재실의 경우 상기의 실과 비

슷한 가시거리를 나타내었다. 그러나 다른 실과는 다르게 구조적 특성상 화재실의 바로 옆실인 Room 2의 1층에서 약 200 s 일 때 가시거리 약 0 m를 나타내었다.

전면형 이중외피 구조의 화재실에서도 상기실과 비슷한 가시거리를 나타내었고, Room 1의 4층에서 샤프트-박스형과 마찬가지로 화재 시작과 동시에 중공층을 통해 상층부로 이동한 연기로 인하여 약 100 s 일 때 가시거리 약 0 m를 나타내었다. 또한 상층부로 빠르게 이동한 연기가 최상층부터 차고 내려오는 속도가 빠름으로써 약 200 s 일 때 Room 2의 1층을 제외(Room 1의 2층, 3층, Room 2의 2층, 3층, 4층)에서 가시거리가 모두 약 5 m 이하를 넘어 약 0~2 m의 가시거리로 나타났다. Room 2의 1층에서는 약 400 s 일 때 약 5 m의 가시거리를 나타내었다.

5. 결 론

본 논문은 이중외피 구조를 중공층의 구획과 자연환기

의 방법에 따라 4가지(박스형, 샤프트-박스형, 복도형, 전면형)로 구분하여 화재 시 발생하는 연기에 의한 특성을 각 각 수치적으로 비교 분석하였다. 이를 위해 화재 시뮬레이션 프로그램(Fire Dynamics Simulator: FDS)을 기반으로 사용자가 편리하게 이용할 수 있도록 만들어진 PyroSim 프로그램을 이용하여 가상의 4층 건축물로 모델링 한 후 동일한 제반 조건을 갖추고, 이중외피 구조의 중공층 부분을 4가지로 나누어 실험하였다. 각 구조별 화재 특성은 연기 거동, 연기 밀도, 연기 감지장치, 가시거리를 통해 비교 분석하였다.

(1) 박스형 이중외피 구조의 경우 화재실의 바로 직상층에서 연기가 먼저 차기 시작하였다. 다른 구조의 경우 중공층을 통해 상승한 연기가 최상층에서 먼저 차고 내려오는 현상과 상반된 결과가 나타났으며, Room 2의 모든실에서는 화재로 인한 특별한 영향은 없었다. 박스형에서의 화재 시 최상층이 아닌 직상층에 가장 큰 영향을 미쳤으므로 향후 박스형 이중외피 구조의 건축물을 제작할 경우 직상층에 소화와 안전을 위한 대책이 마련되어야 할 것이다.

(2) 샤프트-박스형 이중외피 구조는 박스형의 변형 형태로 수 개층에 걸친 샤프트와 박스형이 교차되어진 형태로써, 화재 시 발생하는 연기가 샤프트를 통해 최상층으로 가장 빠르게 상승하는 특징과 최상층에 가장 높은 연기량을 나타내었다. 이는 전면형과 비교하여 보아도 매우 높은 수치였다. 또한 샤프트를 통해 상승한 연기가 최상층에 도달한 후 그 샤프트를 통해 하층부는 물론 다른 실까지 크게 영향을 나타내었는데, 전면형과 비교하여 상층부에서 더 많은 연기가 밀집되는 현상을 나타내었다. 샤프트-박스형의 설계시 화재 발생 후 샤프트의 중공층에 대한 수평 또는 수직 구획을 통해 상층부의 연기 및 화재 확산을 막을 수 있는 설계와 대책이 필요하다.

(3) 복도형 이중외피 구조는 구획이 수평으로 구획되어 있는 특징을 갖고 있다. 이는 화재 시 발생하는 특징에 크게 영향을 미쳐, 화재 시 발생하는 연기가 수직으로 이동하는 것에 비해 매우 많은 양이 수평적으로 이동하여 화재실의 바로 옆 실인 Room 2의 1층에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(4) 전면형 이중외피 구조의 경우 각 실과 층이 공간의 구분이 없이 하나의 유닛으로 된 특징을 갖고 있는 구조로 화재 시 최상층으로의 연기 상승현상이 나타났다. 샤프트-박스형 이중외피 구조와 비교하여 상승되는 연기의 양과 속도는 양간 적거나 느렸지만, 최상층으로 상승된 연기는 중공층을 통해 최상층에서부터 차고 내려와 최하층부까지 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 논문은 화재 시뮬레이션(FDS)를 통하여 이중외피 구조를 종류별로 구분하여 화재 시 발생하는 위험성과 특성에 대하여 연구해 보았다. 동일한 제반 조건과 각 구조별 특성을 모두 갖추려 했지만 실제 건축물과는 분명한 차이가 발생할 것이다. 그러나 본 연구를 통해 이중외피 구조

에서 화재가 발생할 경우 각 구조마다 그 특성이 확연히 구별되고 있고, 그에 대한 설계 시 고려사항이나 연소방지 대책 또는 피난 대책 등을 수립하기위한 자료로 활용될 수 있을 것이며, 화재 시 발생할 수 있는 문제점을 파악하는데 충분한 자료로 활용될 것이라고 사료된다.

References

1. S. J. Park, J. H. Jo, T. H. Ahn, M. S. Yeo, H. T. Seok and K. W. Kim, "A Study on the Application of the Double-Skin Facade to Apartment Buildings", Architectural Institute of Korea, Vol. 22, No. 1 pp. 453-456 (2002).
2. K. W. Kim, "Overview of Recent Developments of Double-Skin Facade System", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 47, No. 9, pp. 28-33 (2003).
3. J. H. Lee, "A Box Window for the Control of Indoor Environment of Korean High-Rise Residential Complex", Yonsei University, Korea (2006).
4. J. H. Cho, "A Study on Effective Application of Double Skin System for Energy Saving", Kon-Kuk University, Korea (2004).
5. Y. B. Lee, "A Study on Decrease and Improvement Plan by Stack Effect in Skyscrapers", Ykong-Gi University, Korea (2008).
6. J. S. Yoon, "Fire Analysis for High-rise Apartment Building By Fire Simulation Program", Chungbuk National University, Korea (2010).
7. Y. S. Sonh, S. K. Dan, B. W. Lee, S. P. Kwon, D. I. Shin and T. O. Kim, "Simulation of Heat and Smoke Behavior for Wood and Subway Fires by Fire Dynamics Simulator (FDS)", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 14, No. 6, pp. 31-37 (2010).
8. ThunderHead Eng, "PyroSim User Manual", The RJA Group Inc, Chicago, USA (2011).
9. H. T. Seok, "Characteristics and Application of Double Skin Curtain Wall System", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 47, No. 9, pp. 34-39 (2003).
10. D. W. Kim and C. S. Park, "Energy Performance Assessment of a Double Skin System for Various Configurations", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 379-387 (2010).
11. Y. B. Bae, S. H. Ryu, Y. I. Kim, S. K. Lee, O. H. Keum and S. K. Park, "Validation of FDS for the Pool Fires within Two Rooms", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 60-67 (2010).
12. Y. T. Huh, C. B. Park, J. S. Sung and M. O. Yoon, "Analysis for Fire Spread through Double Skin Facade System with FDS", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 110-116 (2009).
13. S. Y. Mun, J. H. Cho, C. H. Hwang and S. H. Park, "Sensitivity Analysis of Soot Yield on Fire Characteris-

- tics in the Fire Modeling using FDS”, Proceedings of 2012 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 573-576 (2012).
14. K. H. Kim and C. H. Hwang, “Measurement of the Device Properties of a Ionization Smoke Detector to Improve Predictive Performance of the Fire Modeling”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 27-34 (2013).
15. G. P. Forney, “Smokeview User’s Guide”, Fire Research Division, Building and Fire Research Laboratory, NIST, USA (2007).
16. K. McGrattan, R. McDerMott, S. Hostikka, J. Floyd. “Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide”, NIST SP 1019-5, NIST, USA (2010).
17. ThunderHead Eng, “PyroSim User Manual”, The RJA Group Inc, Chicago, USA (2011).
18. T. T. Lie, “Fire Protection Handbook”, Applied Science Publishers Ltd., London, UK (1997).
19. National Fire Service Academy, “Fire Protectiong Simulation”, National Fire Service Academy, Korea (2009).
20. National Fire Service Academy, “Fire Science”, National Fire Service Academy, Korea (2009).