초고층 건물 아트리움 공간에서의 제연구획에 따른 시뮬레이션 연구

Simulation Study of Smoke Control Accordance with Zoning in the Atrium Space of High-rise Buildings

류형규(Hyungkyou Ryu)[†], 배상환(Sanghwan Bae), 이병석(Byungseok Lee)

대림산업 기술개발원

Technology Research and Development Institute, Daelim Industrial Co., Ltd., Korea

(Received April 16, 2014; revision received May 27, 2014; Accepted: May 28, 2014)

Abstract The big issue in fire and life safety protection in atriums is that hot smoke can spread vertically via the atrium openings, and impact atrium floors remote from the fire. Three different strategies to provide fire and life safety protection for atrium space were evaluated in this study, using the FDS model. Strategy A is the atrium protection approach addressed in the Korean Building Fire Protection Code, where atria are required to be enclosed with fire shutters from the 2nd floor to the atrium top, and the ground floor is allowed to open to the atrium; in this case, no smoke control is required. Strategy B is the atrium protection approach, with smoke control provided in accordance with NFPA 92B; in this case, no atrium floor is enclosed. Strategy C is the atrium protection approach, in which some of the upper atrium floors are enclosed (the case of the top atrium floor being enclosed is evaluated in this study), and atrium smoke control is also provided to protect the lower atrium floors.

Key words High-rise Buildings(초고층건물), Atrium(아트리움), Smoke Control(제연), FDS(Fire Dynamic Simulator; 동적 화재 시뮬레이션 프로그램)

[†] Corresponding author, E-mail: yhk2006@daelim.co.kr

1. 서 론

최근 많은 건축물에서 자연적인 요소의 적극적인 도입과 새로운 형태의 추구를 목적으로 저층부를 아트리움과 같은 대공간 도입 사례가 증가하고 있다.⁽¹⁾ 그러나 아트리움과 같은 대공간은 화재가 발생하였을 경우 재실자의 안전 및 수직, 수평적 연기확산에 의한 화재 안전성능이 중대한 문제로 대두된다. 건축물의 화재안전에 관한 건축법과 소방법의 규정은 계속 강화 정비되어 왔지만, 아트리움과 같은 특수한 형태의 공간설계에는 적절히 대응하지 못하고 있는 실정이다. 즉, 획일적이고 사양 위주의 방재기준 적용에 따라 화재안전성의 효과가 의문시되는 과중한 방재투자를 요구하는 경우가 빈번하여 설계자의 설계 자유도를 제한할 뿐만 아니라 안전을 크게 훼손하는 원인이 되기도 한다.

본 연구에서는 초고층 건축물 아트리움 공간의 화재특성을 고려하여, 현재 일반적으로 설계가 이루어지고 있는 아트리움의 제연구획(방화셔터) 조건과 배기

팬과 같은 제연시스템을 고려한 설계방안에 대한 제연 성능 평가를 수행⁽²⁾하였고, 이를 통해 아트리움 공간의 성능기반 제연설계방법을 제시하였다.

2. 이론 고찰

2.1 아트리움 공간의 화재 특성과 문제점⁽³⁾

아트리움과 같이 대규모 공간 내부의 제연은 구획 화가 잘 이루어진 공간과는 확연히 다르다. 즉, 아트리움은 복수 층이 서로 접속해 있기 때문에 제연의 기본 원리인 구획화에 의해 화염이나 연기가 발화층에서 다른 층으로 확대되는 것을 막기가 어렵다. 이러한 일반 건축공간과 다른 방재상의 특성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 아트리움이 상하를 관통하는 경우 수직적인 방화계획이 어려우므로 화재 시 위험에 노출될 가능성이 많다. 즉, 아트리움으로 화재가 급속히 확산되거나 연기가 외부로 빠지지 않고 내부로 확산될 수 있다.

수평방향으로의 화염확대는 그다지 급격하지 않으나, 수직방향으로의 화염확대는 연소를 촉진하기 때문에 매우 급격하게 화재가 성장한다. 둘째, 화재의 연기가 atrium 전체에 확산되므로 구획설정이거나 연기제어 시스템이 적절하지 못하면 건물 전체가 연기로 가득하게 될 우려가 있다. 셋째, 화재발생 정보가 각층에서 쉽게 파악되기 때문에 각층에서 동시에 피난하는 혼란을 초래할 수도 있으며, atrium을 구성하고 있는 유리파손으로 인한 재해도 발생할 수 있다. 마지막으로, atrium은 천정이 높기 때문에 통상의 자동화재감지설비나 스프링클러 설비로는 충분히 그 기능을 발휘하지 못할 수 있다. 이러한 특징으로 인해 atrium 공간과 같은 경우, 실제 화재안전성능(제연성능)을 고려한 설계가 이루어져야 할 것이다.

그러나, 현재 국내 화재안전기준에서는 atrium공간에 대한 화재안전기준은 세분화 되어 있지 않은 상황으로, 방화구획상 필요한 방화셔터 설치 및 가연물을 atrium 내에 배치하지 않는 수준의 계획이 이루어지고 있다. 반면, NFPA 92B 등에서는 atrium의 형태 및 규모에 따른 제연시스템 설계기준(권고)과 영향인자에 대해 세부적인 기준을 정립하고 있다.

2.2 화재 부하 및 화재 설계

일반적으로 atrium에서의 연소 부하는 다양한 제품들의 혼합으로 이루어져 있다. 화재설계 시 열방출율에 가장 큰 영향을 주는 변수는 연소 가능한 제품들의 종류와 양이다. 재료의 열함유량, 연소 속도, 노출된 표면의 면적, 그리고 그 재료들이 물과 어떻게 반응하는지에 대한 것들이 화재 방지 요구사항들을 결정한다. 실내 재료들의 화재 위험성은 연소열(kJ/kg)과 연소율(kg/sec)로 곱으로 표현되는 그 재료의 열방출율(kW)과의 함수이다.

화재 모델로 중에서 가장 이상적인 모델은 t-square (t^2) 화재 모델이다. 이 모델에서 화재 시의 열방출율은 시간의 제곱에 비례하며, 아래와 같이 표현 된다.

$$Q = at^2$$

여기서, Q = 화재의 열방출율(kW)
 a = 변수의 화재 강도(kW/s^2)
 t = 성장시간(second)

성장시간 t 는 점화 시간과 열방출율이 1,055 kW에 도달하기까지의 시간 간격을 의미한다. “Fast” 화재성장 설계는 천 소재로 이루어진 가구보다 극심한 악조건의 상황을 가정할 때 사용한다. Fig. 1은 일반적인 t-square 화재 곡선을 나타낸 것이다. 이는 천 등의 재

료로 구성된 가구, 책상 그리고 화분 등이 atrium 내부에 있는 것을 가정한 것이다.⁽⁴⁾

2.3 모델에 사용된 화재 곡선

본 연구에서 연소 부하 설계는 건물 로비 내에 열방출율이 가장 큰 재료인 천 소재로 이루어진 가구가 있는 것으로 가정하였다. 천 소재로 이루어진 가구가 포함된 화재는 “Middle” 화재 성장 곡선을 따르는 것으로 예상되지만, 화재 추정을 보수적으로 하기 위하여 “Fast” 화재 성장곡선으로 분석하였다. NIST에서 수행한 몇 가지 가연성 가구의 최대 열방출율을 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 바와 같이 단일 물품의 최대 열방출율은 atrium 로비 내에서 2 MW를 초과하지 못한다. 그러나 본 연구에서는 보다 보수적인 가정을 위하여 atrium 바닥의 중앙에서 화재가 5 MW까지 도달하고 이후 시뮬레이션 종료시까지 5 MW를 꾸준히 유지하는 것으로 가정하였다(Fig. 2).

Fig. 1 Fire Growth Rate Model(t^2).⁽⁴⁾

Fig. 2 5 MW Fast Growth Fire.

Table 1 Peak Heat-release Rates for Various Combustible Commodities

Commodity	Peak Heat-release Rate [MW]
Upholstered Chair	2
Display Kiosk	2
Wastebasket	0.3
Data and Television Sets	0.4

2.4 연소 모델

연소 모델은 자연적으로 산소를 연소하고, 혼합물 분할로 알려진 상수 스칼라 양 방정식을 푸는 종합적인 방법론을 사용하였다. 여기서 혼합물 분할은 가연물에서 기인한 유동장 내의 주어진 지점에서의 가스의 비율로 정의된다. 이 모델은 가연물이 혼합 조절이 가능하고 연료와 산소의 반응이 무한히 빠른 것으로 가정한다. 이러한 삼차원적인 가연물을 넘어서는 상세한 화재 성장과 확산은 본 연구에서 사용한 FDS 프로그램에서 검증되지 않았으며, 본 연구의 분석에서 필수적인 조건은 아니므로 제외하였다. 가연물은 부피를 기준으로 50%의 섬유질 재료(나무, 종이, 보드류 등)와 50%의 합성 재료(플라스틱, 고무, 폴리에틸렌 폼 등)로 이루어진 것으로 가정하였다. 이 가연물의 조합은 일반적인 마감 재료들을 대표할 수 있다. 이러한 재료를 바탕으로 평균적인 매연 산출물은 약 0.05 g/g, 평균 연소열은 18.70 kJ/g으로 추정할 수 있다.⁽⁵⁾

2.5 허용 기준

화재 시 연소로 인해 발생하는 연기가 재실자에게 노출되는 허용 기준은 열적인 측면, 호흡적인 측면, 가시적인 측면에서 고려되어야 한다. 본 분석에서는 화재 시 단기간 동안의 독성 물질에 의한 노출 효과만을 고려하였으며, 장기간 동안의 측면은 고려하지 않았다.⁽³⁾ 다음의 Table 2에서 제시한 허용 기준 세 가지는 본 연구에서 제시한 각각의 전략을 비교하기 위해서 사용되었다. 각 기준은 CO, Visibility 및 화재온도이며, 각각 750 ppm, 10 m 및 60℃를 허용치로 제한하였다.

Table 2 Tenability Criteria

Toxicity	Carbon Monoxide(CO) :
	750 parts per million(ppm) or 0.00075 volume fraction
Temperature	60℃ maximum
Visibility :	10 m minimum at 2 m above the walking surface

3. 시뮬레이션 모델링

3.1 시뮬레이션 대상 건축물 개요

평가대상 건축물은 Fig. 3과 같이 고층 건축물의 atrium 공간을 대상으로 하였고, 대상공간은 26 m(W)×12 m(D)×27 m(H)의 약 310 m³ 규모이다. 화재하중은 5 MW로 설정하였고, 화재성장은 ‘Fast’로 가정하였다. atrium내의 소방설비는 스프링클러 등이 가동되지 않는 조건에서 Fig. 4와 Table 3과 같이 세 가지 경우를 대상으로 화재안전성능 평가를 수행하였다.

전략 A는 국내 기준에 따라 지상 로비층을 제외한 전 층이 제연구획(방화셔터)이 되어 있으며, 제연설비는 갖춰져 있지 않은 경우이다. 전략 B는 NFPA 92B 기준에 따라 600,000 m³·h 용량의 배기팬을 갖추고, 로비층을 포함하여 각 층에 제연구획이 없는 경우이다. 전략 C는 425,000 m³·h 용량의 배기팬이 설치되어 있고, 최상층에만 제연구획이 되어 있는 경우이다. 배기시 보충공기는 atrium 로비에서 자연적으로 보충되

(a) First Floor Plan (b) Section
Fig. 3 The Atrium Modeled in the Analysis.

Fig. 4 Atrium Fire Protection and Safety Case.

Table 3 Simulation Strategy

Strategy A :	All atrium floors, except the ground floor are enclosed with fire shutters per the requirement in the Korean Code;
Strategy B :	All atrium floors are open to the atrium space, smoke exhaust and make-up air are provided accordingly;
Strategy C :	The top atrium floor is enclosed with fire shutters, the other floors are open, smoke exhaust and make-up air is provided accordingly;

는 것으로 하였다. Fig. 5는 Fig. 4와 Table 3의 시뮬레이션 전략을 구체화 시킨 것이다. 평가는 NIST에서 개발한 FDS 프로그램을 활용하였으며, 전략 A는 1층을 기준으로 하였으며, 전략 B는 atrium과 인접한 최상층(지상 5층), 전략 C는 제연구획이 되지 않은 지상 4층을 기준으로 하였다.

3.2 시뮬레이션 모델링

평가대상 공간에 대한 모델링은 Fig. 6과 같이 약 15

Fig. 5 Mechanical Smoke Exhaust and Fire Shutter Layout.

Fig. 6 FDS Model of the atrium.

Fig. 7 Fire Locations.

cm 간격의 격자를 형성하여 약 2,500,000개의 mesh를 구성하였고, 발화점의 위치는 Fig. 7과 같이 atrium 기준층 로비 중앙으로 설정하였다. 건물 atrium 공간 내부 파티션과 실내 표면은 불연재로 설정하였으며, 바닥은 불연재 또는 난연재로 하였다. 천장, 벽 그리고 바닥은 불활성 표면으로 간주하였는데, 이는 불활성 표면은 열을 흡수하지 않아 시뮬레이션 시 높은 온도를 이끌어 낼 수 있기 때문이다. atrium 상부에는 연기 감지기가 설치된 것으로 설정하였으며, 화재 시 배기팬이 작동되는 것으로 설정하였다. CO, 화재 온도 및 Visibility를 측정 센서는 각 층의 바닥 위 2 m에 설치된 것으로 설정하였으며, 광 스모크 센서는 atrium 천장 0.6 m 아래에 두 개가 설치된 것으로 설정하였다. 각 센서의 위치는 Fig. 8과 같다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 시간은 공간 내에서 화재가 정상 상태로 도달되는 시간인 약 20분(1,200초) 동안 진행하였다. 분석은 각각의 전략마다 2, 4, 6, 8, 20분의 CO 농도, 화재 온도, 가시거리를 평가하였다. 제연방식별 화재안전성능 시뮬레이션 결과를 요약하면, 현재 일반적으로 적용되고 있는 방식으로 방화셔터만을 적용하는 경우 1층 2 m 높이를 기준으로 Visibility 및 화재온도가 화재발생 후 약 270~400초 경과 시 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 반면, 방화셔터를 상부 2개층에 적용하고 제연설비를 계획한 경우(B)와 제연설비만을 적용한 경우(C)에는 화재발생 20분 후에도 관련 기준치를 모두 충족하는 것으로 나타나, 화재안전성능에서 보다 효과적인 것으로 평가되었다. Table 4에 각 전략에 대한 내용을 정리하였다. 현재 분석조건은 5 MW의 화재하중을 고려한 분석조건으로써 제연설비 용량이 다소 크게 계획되

Fig. 8 TC and Beam Detectors.

어야 하나, atrium 공간이 가연물을 배치하지 않은 것을 고려하여 보다 현실적인 제연설비 용량 적용으로 atrium 공간의 실질적인 화재안전성능 확보가 가능할 것으로 사료되며, 향후 PBD 설계를 위한 화재하중지침 등도 수립이 필요한 것으로 판단된다. 다음은 각 시뮬레이션 결과에 대한 상세 분석을 나타낸 것이다.

4.1 전략 A 시뮬레이션 결과

4.1.1 CO 농도

전략 A에서는 1층을 제외한 모든 층이 셔터로 막혀 있어 주로 1층이 연기와 온도의 영향을 받으므로 1층을

주 분석 대상으로 하였다. Fig. 9와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 1층 바닥 위 1.8 m 높이에서 시뮬레이션 종료 시까지 기준치 이하로 유지되는 것으로 나타났다.

4.1.2 화재 온도

Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 기준층 로비에서 화재 시작 약 5~6분경에서 부터 60℃를 넘는 온도가 나타나기 시작했으며, 20분에는 기준층의 대부분이 허용 온도를 넘는 것으로 나타났다.

4.1.3 가시거리

Fig. 13과 Fig. 14에서 보는 바와 같이 가시거리는

Table 4 Analysis Results Summary

Strategy	Benefits	Potential Issues
Strategy A : Fire shutters on all atrium floors, except the ground; No smoke control	Fire shutters separate the upper floor areas from the atrium space.	Ground floor lobby blocked by the hot and heavy smoke when atrium volume is small; Floor may fail if one of the fire shutters on this floor fails
Strategy B : No fire shutters on all atrium floors; Smoke control	Hot smoke evacuated from the atrium space; Atrium floors, including the ground floor maintained tenable.	Large capacity of exhaust and supply make-up air; Difficult to provide adequate exhaust and supply make-up air in tall and narrow atria.
Strategy C : Fire shutters on upper atrium floors; Smoke control	Combination of A and B; Smoke control capacity reduced.	Floor may fail if one of the fire shutters on this floor fails

Fig. 9 Strategy A, CO concentration at 1.8 m above the Ground Floor(Point 1).

Fig. 10 CO Concentration at the Ground Floor(Point 1).

Fig. 11 Strategy A, Temperature at 1.8 m above the Ground Floor(Point 1).

Fig. 12 Temperature at the Ground Floor(Point 1).

화재 시작 5분경에서 허용 가능한 기준의 한계를 넘어서 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 5분 이후에는 출구 중의 하나가 연기에 완전히 휩싸인 것으로 나타났다. 특히 Fig. 12에서 보는 바와 같이 화재 시작 약 4분 이후에는 가시거리가 1 m 남짓으로 로비층에서 재실자의 시야가 확보되지 못하여 대피가 불가능한 상황이 나타날 수 있다.

4.2 전략 B 시뮬레이션 결과

4.2.1 CO 농도

전략 B에서는 모든 층에 셔터가 없는 상황으로 상층부까지 연기와 온도의 영향이 미치므로 5층을 주 분석 대상층으로 하였다. Fig. 15와 Fig. 16에서 보는 바와 같이 5층 바닥 위 1.8 m 지점에서 시뮬레이션 종료 시까지 허용 기준 이하로 유지되고 있는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 14에서 보는 바와 같이 각층에서도 전략 A와 비교하여 매우 현저히 낮은 CO 농도를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

4.2.2 화재 온도

Fig. 17과 Fig. 18에서 보는 바와 같이 모든 층에서 허용 온도인 60℃를 넘지 않았다.

Fig. 13 Strategy A, Visibility at 1.8 m above the Ground Floor(Point 1).

Fig. 14 Visibility at the Ground Floor(Point 1).

4.2.3 가시거리

Fig. 19와 Fig. 20에서 보는 바와 같이 연기제어 시스템은 5층 출구를 약 5분 동안 만족할 만한 조건을 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

4.3 전략 C 시뮬레이션 결과

4.3.1 CO 농도

전략 C에서는 최상층인 5층에만 셔터가 설치된 상황으로 4층을 주 분석 대상층으로 하였다. Fig. 21과 Fig. 22에서 보는 바와 같이 전략 C의 4층의 CO 농도는 시뮬레이션 종료 시까지 기준치 이하로 유지되고 있으며, 전략 A와 비교하여 각층에서 매우 현저히 낮은 CO 농도를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

4.3.2 화재 온도

Fig. 23과 Fig. 24에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 종료 시까지 모든 층에서 허용 온도인 60℃를 넘지 않았다.

4.3.3 가시거리

Fig. 25와 Fig. 26에 나타난바와 같이 연기제어 시스템은 4층 출구를 약 5분 동안 만족할 만한 조건을 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 15 Strategy B, CO concentration at 1.8 m above the 5th Floor(Point 5).

Fig. 16 CO Concentration at Point 1~5.

Fig. 17 Strategy B, Temperature at 1.8 m above the 5th Floor(Point 5).

Fig. 18 Temperature at Point 1~5.

Fig. 21 Strategy C, CO concentration at 1.8 m above the 4th Floor(Point 4).

Fig. 22 CO Concentration at Point 1~4.

Fig. 19 Strategy B, Visibility at 1.8 m above the 5th Floor (Point 5).

Fig. 20 Visibility at Point 1~5.

Fig. 23 Strategy C, Temperature Concentration at 1.8 m above the 4th Floor(Point 4).

Fig. 24 Temperature at Point 1~4.

Fig. 25 Strategy C, Visibility concentration at 1.8 m above the 4th Floor(Point 4).

Fig. 26 Visibility at Point 1~4.

5. 결 론

본 연구에서는 고층 건축물의 화재안전을 위한 연기제어를 위하여 초고층 건축물 등에 적용이 확대되고 있는 아트리움 공간에 대해 성능기반 제연성능 개선방안으로 제연시스템을 계획한 경우와 일부 층에만 방화셔터를 적용하고 제연설비를 복합적으로 적용한 경우의 연기거동평가를 수행함으로써 아트리움 공간의 연기제어 성능개선방안을 도출하고자 하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전략 A는 1층을 주 분석 대상층으로 하였으며, CO 농도는 1층 바닥 위 1.8 m 높이에서 시뮬레이션 종료 시까지 기준치 이하로 유지되었다. 화재온도는 기준층 로비에서 화재 시작 약 5~6분경에서 부터 60℃를 초과하기 시작했으며, 20분에는 기준층의 대부분이 허용 온도를 초과하였다. 가시거리는 화재 시작 5분경에서 허용 가능한 기준 한계를 넘어서 현저히 떨어졌으며, 5분 이후에는 출구 중의 하나가 연기에 완전히 휩싸였다. 특히 화재 시작 약 4분 이후에는 가시거리가 1 m 남짓으로 로비층에서 재실자의 시야가 확보되지 못하여 대피가 불가능한 상황이 나타날 수 있다.
- (2) 전략 B는 최상층인 5층을 주 분석 대상층으로 하였

으며, CO 농도는 5층 바닥 위 1.8 m 지점에서 시뮬레이션 종료 시까지 허용 기준 이하로 유지되었으며, 각층에서도 전략 A와 비교하여 매우 현저히 낮은 CO 농도를 나타내었다. 화재온도는 모든 층에서 허용 온도인 60℃를 넘지 않았다. 가시거리는 연기 제어 시스템에 의해 5층 출구를 약 5분 동안 만족할 만한 조건을 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

- (3) 전략 C는 4층을 주 분석 대상층으로 하였으며, CO 농도는 시뮬레이션 종료 시 까지 기준치 이하로 유지되고 있으며, 전략 A와 비교하여 각층에서 매우 현저히 낮은 CO 농도를 나타내고 있다. 화재온도는 시뮬레이션 종료 시까지 모든 층에서 허용 온도인 60℃를 넘지 않았다. 가시거리는 연기 제어 시스템에 의해 4층 출구를 약 5분 동안 만족할 만한 조건을 유지할 수 있는 것으로 나타났다.
- (4) 따라서, 방화셔터를 일부 층에 적용하고 제연설비를 계획한 경우와 제연설비를 적용한 경우에는 화재발생 20분 후에도 관련 기준치를 모두 충족하는 것으로 나타나, 화재안전성능에서 보다 효과적인 것으로 평가되어, 성능중심의 설계를 통해 화재안전 성능(제연성능)을 개선할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 일환으로 한국건설교통기술평가원이 관리하고 있는 초고층빌딩 시공기술연구단의 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사를 드립니다.

References

1. Park, R., Yang, J. S., and Ha, H. L., 2011, A study on air conditioning, ventilating analysis of atriums, Proceedings of the SAREK 2011 Summer Annual Conference, Vol. 2011, No. 7, pp. 1337-1342.
2. Bae, S. H., 2013, A study of vertical airflow and smoke control technique for high-rise building, Daelim Technical Review.
3. Bae, S. H. and Lee, B. S., 2013, A study on atrium smoke control performance evaluation and improvement based on PBD, Proceedings of the KIFSE 2013 Spring Annual Conference, pp. 119-120.
4. Bukowski, R. W., 2003, NFPA Fire protection handbook "Fire hazard analysis", 19th ed., NFPA, Quincy, Massachusetts, Vol. 1, pp. 3-107.
5. Dinunno, P. J. (ed), 2002, SFPE Handbook of fire protection engineering "Table 3-4.14", 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.