

[Research Paper]

화재·피난시물레이션의 커플링방식별 인명안전성평가 결과 비교에 관한 연구

구현모 · 오륜석* · 안성호** · 황철홍*** · 최준호****†

한국소방안전원 경기북부지부 교수, *부경대학교 대학원 박사과정, **부산해운대소방서 소방행정담당,
대전대학교 소방방재학과 교수, *부경대학교 소방공학과 교수

A Study on Comparison of Life Safety Assessment Results according to Three Coupling Methods of Fire and Evacuation Simulation

Hyun-Mo Koo · Ryun-Seok Oh* · Sung-Ho An** · Chul-Hong Hwang*** · Jun-Ho Choi****†

Professor, Korea Gyunggi-bukbu Branch, Fire Safety Institute,

*PhD Student, Graduate School, Pukyung National Univ.,

**Administrative Section Chief, Haeundae Fire Station, Busan,

***Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon Univ.,

****Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyung National Univ.

(Received October 23, 2017; Revised January 25, 2019; Accepted January 30, 2019)

요 약

현재 우리나라에서는 성능위주설계 시 시물레이션을 통한 인명안전성평가를 의무적으로 수행해야한다. 일반적으로 시물레이션을 통한 인명안전성평가 방식에는 3가지 종류가 있다. ①화재·피난시물레이션을 각각 독립수행하여 특정지점에서의 ASET과 RSET을 비교하는 논커플링방식(non-Coupling)과 ②화재·피난시물레이션의 결과값의 화면을 겹쳐보는 세미커플링방식(semi-Coupling), ③화재시물레이션의 결과인 화재의 영향을 피난시물레이션에서 연동하여 수행하는 커플링수행방식(Coupling)이다. 이 중 현재까지 국내 모든 설계자들은 논커플링방식을 사용해왔다. 논커플링방식은 특정지점에서 ASET과 RSET을 비교하는 방법인 만큼 특정지점의 위치를 설정하는 것이 중요하다. 하지만 특정지점위치설정에 대한 별다른 규정이 없어 설계자의 경험과 지식을 바탕으로 정해지고 있다. 즉, 설계자에 따라 특정지점의 수, 위치가 달라져 인명안전성평가의 결과가 달라질 수 있다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 논커플링방식, 세미커플링방식, 커플링수행방식 3가지의 방법으로 인명안전성평가를 진행하여 결과를 비교하여 그 차이점을 파악하고, 시물레이션 수행 방식에 있어 개선방안을 제안하고자 한다.

ABSTRACT

In Korea, life safety assessment through simulation are mandatory in performance-based design. Generally, there are three types of methods for simulation-based life safety assessments: the non-coupling method that compares available safe egress time (ASET) and required safe egress time (RSET) at a specific point through conducting fire and assessment simulations independently; the semi-coupling method that compares fire and evacuation simulation results by overlaying the result screens; and the coupling method that compares the results of fire effect simulation to an evacuation simulation. Of these methods, all designers in South Korea have used the only non-coupling method. In the non-coupling method, it is important to determine the location of a specific point to compare ASET and RSET. However, without any defined regulation, setting the location is determined based on the designer's experience and knowledge. The number of specific locations and the locations themselves differ with each designer, which can produce contrasting results in a life safety assessment. Therefore, this study conducted a life safety assessment based on the three methods (non-coupling, semi-coupling and coupling) and compared each of the results. Furthermore this study suggests a improvement way in particular for the computer simulation.

Keywords : Fire simulation, Evacuation simulation, Coupling, Life safety assessment, Performance-based design

† Corresponding Author, E-Mail: jchoi@pknu.ac.kr, TEL: +82-51-629-7830, FAX: +82-51-629-7078

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

우리나라에서는 2009년 이후 건축허가를 신청하는 대통령령으로 정하는 특정소방대상물에 대해 그 용도, 위치, 구조, 수용인원, 가연물의 종류 및 양 등을 고려하여 해당 건축물의 안전성을 평가하는 성능위주설계(Performance Based Design, PBD)를 도입하였으며, 이를 법제화하여 당시 「소방시설공사업법」에 명시하였다. 또한 2011년 7월 1일 당시 소방방재청고시 제2011-68호 「소방시설등의 성능위주 설계 방법 및 기준」이 최초 공표된 이후 설계자인 소방기술사들은 동 고시 별표1의 「화재 및 피난시물레이션의 시나리오 작성기준」에 의거 인명안전성평가(Life Safety Assessment)를 수행해오고 있다.

건축물의 설계단계에서 인명안전성평가를 위한 실험 실험은 윤리적으로나 비용적으로 사실상 불가능하며, 하물며 축소실험을 통하여 건축물의 형태를 계속 바꾸어 가며 인명안전성평가를 진행하더라도 규모에 의한 피난행동의 제한이나 연돌효과 저감 등의 현실적 한계에 직면하게 된다. 이러한 이유로 인해 성능위주설계 시 인명안전성평가는 컴퓨터 시물레이션을 이용하는 경우가 일반적이다. 그리고 현재까지 컴퓨터 시물레이션을 통한 분석 방법을 대체할 더 효율적이고 합리적인 대안이 없기 때문에 사실상 현존하는 유일한 평가방법이라 판단해도 무방하다.

한편, 컴퓨터 시물레이션을 통한 인명안전성평가 방법⁽¹⁻²⁾에는 국내외에서 주로 사용되고 있는 ‘논커플링(Non-Coupling)’ 방식과 구미(歐美) 등 일부 지역에서 화재 및 피난시물레이션을 연계하여 결과를 도출하는 ‘세미커플링(Semi-Coupling)’ 방식 및 ‘커플링(Coupling)’ 방식이 있다.

논커플링은 현재 국내 모든 설계자들이 사용하고 있는 방식으로 화재시물레이션과 피난시물레이션을 각각 수행하여 ‘특정지점’에서의 Available Safety Egress Time (ASET, 가용 피난안전시간)과 Required Safety Egress Time (RSET, 소요 피난안전시간)을 각각 도출하여 인명안전성평가를 진행한다.

그러나 설계자가 지정한 특정지점에서의 ASET과 RSET을 비교하는 방식(이하 ‘논커플링방식’으로 칭함)은 이 특정지점을 정하는데 있어 별도의 설정기준이 없기 때문에 Kim et al.⁽⁴⁾의 연구에서와 같이 주로 설계자의 개인적인 지식과 경험을 바탕으로 두고 있는 실정이다. 그렇기에 설계자의 지식수준이나 경험에 따라 특정지점의 수와 위치는 달라질 수밖에 없으므로 인명안전성평가의 결과 또한 이 조건의 변화에 따라 달라진다.

이에 본 연구에서는 인명안전성평가를 특정지점에서 ASET과 RSET을 비교하는 논커플링방식, 화재시물레이션의 결과를 피난시물레이션에 불러와 전체 지오메트리에서

시간의 흐름에 따라 인명안전기준 및 에이전트의 위치를 한눈에 파악이 가능한 세미커플링방식, 화재시물레이션의 결과 값이 피난시물레이션 구동 시 에이전트 피난에 영향을 주는 커플링방식 등 총 3가지 시물레이션 수행법에 따라 동일한 대상지 지오메트리를 토대로 동일한 시나리오와 시물레이션 입력조건 하에서 각각의 결과를 비교·분석하고, 향후 컴퓨터 시물레이션을 통한 인명안전성평가의 수행에 있어 개선할 사안을 제안하고자 한다.

2. 인명안전성평가를 위한 화재·피난시물레이션 수행방식의 종류

2.1 논커플링방식

Ahn⁽³⁾의 연구에서 확인한 바와 같이, 국내 모든 설계자가 사용하는 논커플링방식에서는 설계자가 특정지점을 지정한 후, 화재 및 피난시물레이션을 독립적으로 수행한다. 화재 시물레이션의 결과값이라 할 수 있는 ASET과 피난 시물레이션의 결과값이라 할 수 있는 RSET을 각각 도출한다. 이후 도출된 ASET과 RSET을 설계자가 직접 비교, 판단하여 인명안전성평가를 수행한다. 이러한 방식은 설계자가 자신의 지식과 경험을 기반으로 설정한 특정지점에서만 ASET과 RSET을 비교하기 때문에 에이전트의 전체 피난동선 상에서 발생하는 크리티컬한 이벤트(critical events)⁽²⁾들의 반영이 불가능하다.

논커플링방식에서는 주로 대표적 화재시물레이션 툴인 FDS⁽⁵⁾를 기반으로 한 Pyrosim⁽⁶⁾이나 Smartfire⁽⁷⁾를 이용하여 ASET을 도출하고, Simulex, Pathfinder⁽⁸⁾ 또는 buildingEXODUS⁽⁹⁾ 등의 피난시물레이션 툴을 이용하여 RSET을 도출하는 것이 일반적이다.

2.2 세미커플링방식

2014년 당시 업데이트 되어 출시된 Pathfinder (ver.2014.3.1016)는 FDS Slice 결과 값을 피난 시물레이션의 지오메트리 상에서 동시에 물리적으로 중첩하여 볼 수 있게 되면서 이른바 세미커플링이 가능해졌다. 이는 특정지점에서 ASET과 RSET을 설계자가 단순히 수치적으로 비교하는 논커플링방식과는 대조적이다. 즉, 화재발생 이후 동일한 경과시간 상에서 같은 지오메트리 위에 화재시물레이션과 피난시물레이션의 결과를 동시에 확인하며 인명안전성평가를 진행할 수 있다. 그러나 세미커플링방식에서는 중첩된 시물레이션 결과 레이어를 결국 설계자가 시각적으로 검토하여 에이전트의 생사여부를 판단, 결정하므로 논커플링방식에 비해 특정지점 설정에 대한 타당성을 검증하고 시각적으로

1) Ahn⁽³⁾의 연구에 의하면 국내 성능위주설계도서를 전수조사한 결과 모든 설계자들이 논커플링방식의 화재 및 피난시물레이션을 수행하여 인명안전성평가를 수행한 것으로 조사됨. 또한 실제 국내 설계자들은 일반적으로 이 특정한 지점을 ‘포인트(point)’라 표기하고 있음.

2) ‘크리티컬 이벤트’의 가장 대표적인 예는 에이전트가 화원 위를 그대로 통과하는 행위임.

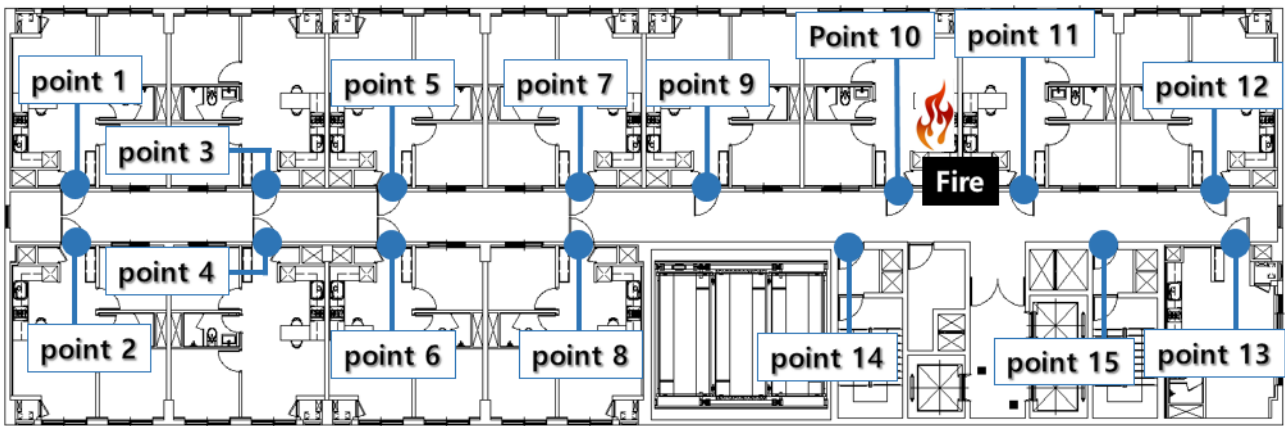


Figure 1. Location of the specific points on the floor plan of the studio flat.

동시에 확인할 수 있다는 것에만 그 의의를 가진다. 즉, 지오메트리상의 에이전트가 화원을 그대로 통과하거나 국내 인명안전기준상 사망할 수 있는 60 °C 이상의 복사열 측정영역 또는 5 m 미만의 가시거리 미확보 영역을 자유보행으로 무사통과할 수 있다는 것은 여전히 한계로 나타난다.³⁾

2.3 커플링방식

커플링은 영어로 ‘연결’ 또는 ‘결합’이라는 의미로, 쉽게 말해 화재시물레이션과 피난시물레이션을 물리적, 화학적으로 결합하여 인명안전성평가를 수행하는 방식이다.

대표적인 커플링 시물레이션 툴로 핀란드의 VTT가 개발한 FDS + EVAC⁽¹⁰⁾이나 영국 University of Greenwich의 Fire Safety Engineering Group (FSEG)이 개발한 Smartfire와 buildingEXODUS 등이 있다. 특히, buildingEXODUS는 NIST가 개발한 존 모델 화재시물레이션인 CFAST⁽¹¹⁾와도 커플링이 가능하다.

커플링 방식은 연기의 농도, 연소생성물, 복사열 등 화재로 인한 해저드가 에이전트 피난에 영향을 미치는 것이 특징이다. 복사열이나 유독가스, 연기의 농도 등 해저드 환경에 따라 에이전트의 보행속력이나 이동방식 등이 변하여 보행속력이 변하고, 특히 buildingEXODUS⁽¹²⁾에서는 Purser⁽¹³⁾의 FED모델이나 RMV (Respiratory Minute Volume, 분당 호흡량 L/min)을 고려하여 독성의 흡입량이나 노출온도에 따라 에이전트가 사망하기도 한다. 따라서 커플링 방식은 기타 분석방식에 비해 현실성이 높다고 할 수 있다.

3. 대상지 개요 및 시나리오 설정에 따른 화재·피난시물레이션 입력조건

3.1 대상지의 개요

본 연구에서는 과거 B도시지역에서 실제 진행되었던 성

Table 1. Area and Household Numbers of the Studio Flat

Type	Area	Household Numbers
A	40.0 m ²	12
B	26.9 m ²	1

능위주설계 소방대상물 가운데 1개소를 무작위로 선정하여 해당 건축도면 등 지오메트리 정보를 인용하였다. 또한 소방청고시 제2017-1호의 「소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준」의 ‘별표1. 화재 및 피난시물레이션의 시나리오 작성 기준’에 따라 시나리오 1에 나타나있는 “건물용도, 사용자 중심의 일반적인 화재를 가정”에 의거, 대상물 내 업무시설(오피스텔)에서 화재가 발생하는 것을 시나리오로 설정하였다.

대상지로 설정한 오피스텔 기준층의 세대수 및 면적은 Table 1과 같이 총 13세대 중 12세대는 40.0 m²으로 면적과 구조가 같았으며, 나머지 1세대는 26.9 m²으로 다른 세대들보다 면적이 작았다. 한편 해당층의 층고는 모두 3.0 m로 동일하였다.

본 연구에서는 특정지점(point)들을 설정해야 하는 논커플링방식을 진행하기 위하여 대상지에 특정지점을 Figure 1과 같이 화재가 발생하지 않은 세대의 최종출입구(Point 1~9, Point 11~13) 12곳, 화재가 발생한 세대의 최종출입구(Point 10) 1곳, 계단실 전실입구(Point 14~15) 2곳 총 15 곳을 선정하였다.

3.2 화재시물레이션의 입력조건

본 연구에서는 앞서 언급한 3가지 화재·피난시물레이션 수행방식에 따라 화재시물레이션 툴과 피난시물레이션 툴로 Table 2와 같은 소프트웨어들을 사용하였다.

논커플링방식을 통한 시물레이션 수행을 위해 Pyrosim과

3) Manually Coupling FDS and Pathfinder to Respond to Smoke, Since 2018. 11. 7.: 최신 Pathfinder (ver. 2018.4.1210)에서는 FDS의 가시거리 계산결과에 따른 에이전트의 보행가속도 변화를 수동적 커플링으로 반영하고 있음.

Table 2. Fire and Evacuation Models used in this Study

Type	Fire Model	Evacuation Model
None-Coupling	Pyrosim (FDS)	Pathfinder
		buildingEXODUS
Semi-Coupling	Pyrosim (FDS)	Pathfinder
Coupling	Smartfire	buildingEXODUS

Pathfinder, Pyrosim과 buildingEXODUS 두 가지의 시뮬레이션 조합으로 각각 진행하였다. 또한 Pathfinder (ver. 2016.1.1006)는 2014년 이후 버전으로 FDS 결과를 오버레이할 수 있게 제공해주므로 Pyrosim (ver. 2016.2.0922, FDS ver .6.4.0)을 세미커플링에 함께 사용하였으며, 커플링을 위해서는 Smartfire (ver. 4.3)와 buildingEXODUS (ver.6.3)을 사용하였다. 한편, 세미커플링이나 커플링방식에서는 논커플링방식에서 피난시뮬레이션의 결과를 불러오는 이른바 ‘import’의 형식을 취하므로 별도의 화재시뮬레이션 수행절차가 필요하지 않다.

앞서 대상지로 선정된 오피스텔 화재시나리오의 설정을 위해 본 연구에서는 해당 설계도서에 표기된 바와 같이 발화가능성이 높은 주방용 싱크대에 의한 화재로 가정하였고, 화원인 싱크대의 크기 또한 0.5 × 2.0 × 1.5 m로 지정하였다. 이 때, 열방출율(HRR)은 Kweon et al.⁽¹⁴⁾의 연구에 의거하여 2,400 kW로 설정하였다. 그러나 싱크대의 물질 조성에 대한 데이터가 존재하지 않기 때문에 독성물질인 Polyurethane forms 중 독성물질의 함유량이 높아 싱크대 화재에 적용한 사례가 있는 물질인 Polyurethane forms-GM21를 적용하였다. 또한 화재성장속도는 Medium으로 설정하여, 300 s에 1055 kW까지 도달하게 하였다. 본 화재 시나리오의 화원에 대한 입력값은 Table 3와 같다. 끝으로 화재시뮬레이션 수행시간은 400 s였다.

또한 격자의 설정 시 Pyrosim은 기하학적 구조가 격자에 맞추어진다. 따라서 Pyrosim의 격자는 열방출율에 따라 산정이 되는 McCaffery의 적정그리드 산정 방정식에 따라 그리드의 범위를 구하여 설정하였다. 본 해당 오피스텔 지오메트리에서는 0.2 × 0.2 × 0.2 m로 총 378,658개가 나왔다. 하지만, Smartfire의 격자는 Pyrosim과 대조적으로 실제 기하학적 구조에 따라 격자가 설정이 된다. 따라서 Smartfire에서와 Pyrosim과의 격자는 다르게 설정하였다. Smartfire에서 해당 오피스텔의 격자는 X축 261개, Y축 100개 Z축 18개 총 469,800개로 설정하였다. Pyrosim과 Smartfire 각각의 격자 구성은 Table 4와 같았다.

3.3 피난시뮬레이션의 입력조건

본 절에서는 앞서 언급한 피난시뮬레이션 툴인 Pathfinder와 buildingEXODUS를 대상으로 해당 설계도서에 나타난 동일한 시나리오를 토대로 두 가지 프로그램 모두 입력값을 똑

Table 3. The Condition of Fire Simulation

Title	Descriptions
The Size of Fire	0.5 m × 2.0 m × 1.5 m
Rate of Fire Growth	Medium Growth Rate
Heat Release Rate (HRR)	2.4 MW
Fuel Composition Ratio	Polyurethane forms-GM21 (Flexible) (C = 1.00, H = 1.80, O = 0.30, N = 0.05, CO YIELD = 0.01, SOOT YIELD = 0.131) HEAT_OF_COMBUSTION = 2.62 × 10 ⁴ kJ/kg

Table 4. Fire Model vs. Mesh Configuration

Model	Coordinate System	Applied Mesh Size	Number of Mesh
Pyrosim	X	0.2 m	259
	Y	0.2 m	86
	Z	0.2 m	17
	Total Number		378,658
Smartfire	Coordinate System		Number of Mesh
	X		261
	Y		100
	Z		18
	Total Number		469,800

Table 5. Age Ranges of Occupant’s Generation

Generations	Age Range [year]
Children	2 to 10
Teenager	10 to 20
Adults	20 to 60
Senior citizens	Older than 60

같이 설정하였다. 대상 건축물 거주자들은 한국건설기술연구원⁽¹⁵⁾의 연구결과에 따라 연령을 Table 5와 같이 4가지 그룹으로 구분하였다.

이 때 B도시의 2016년말 기준 당시 행정자치부의 주민등록인구통계⁽¹⁶⁾에 따라 Table 6과 같이 각각 다른 성별 연령별 에이전트 비율을 적용하였다. 그리고 에이전트의 신체특성은 국가기술표준원⁽¹⁷⁾의 한국인 인체치수조사(Size Korea) 통계 보고서를 인용하였다. 적용한 연령별 신장은 Table 7, 연령별 어깨너비는 Table 8과 같았다.

이 때, 에이전트의 보행속력은 한국건설기술연구원⁽¹⁵⁾의 연구결과에 의거, 모든 시뮬레이션 수행방식에서 성별, 연령별로 동일하게 적용하였으며 그 내용은 Table 9과 같다.

또한 오피스텔의 수용인원은 업무용도 기준(1인당 9.3

Table 6. The Proportion of Population by Gender and Age

[%]	Children	Teenagers	Adults	Seniors
Male	3.2	5.0	30.9	10.2
Female	3.1	4.6	30.4	12.6

Table 7. Generation vs. Average Height

[mm]		Avg.	Std.	Min.	Max.
Children	M	1,285.2	73.8	1,047	1,475
	F	1,267.5	73.6	1,057	1,476
Teenagers	M	1,726.7	55.8	1,548	1,907
	F	1,596.9	51.3	1,412	1,768
Adults	M	1,724.3	69.7	1,277	1,915
	F	1,589.2	57.2	1,403	1,776
Senior Citizens	M	1,653.7	58.6	1,354	1,793
	F	1,528.8	47.7	1,394	1,656

Table 8. Generation vs. Average Shoulder Width

[mm]		Avg.	Std.	Min.	Max.
Children	M	276.6	21.5	208	344
	F	276.0	19.5	210	341
Teenagers	M	353.6	39.4	233	451
	F	337.0	26.4	231	442
Adults	M	395.0	20.1	321	483
	F	354.2	18.4	298	447
Seniors	M	378.8	18.6	329	422
	F	349.8	18.7	284	398

Table 9. Gender vs. Average Walking Speed

[m/s]	Children	Teenager	Adults	Senior Citizens
Male	1.0	1.3	1.2	0.7
Female	1.0	1.3	1.1	0.97



Figure 2. Geometry and Agent Location Setup for Evacuation Simulation using Pathfinder

m²)을 각 세대마다 적용하여 40.0 m²인 12세대에는 각 실당 4명씩, 26.9 m²인 1세대에는 3명을 적용하여 총 51명으로 산정하였다. 오피스텔에 적용한 실제 남·녀 연령별 비율별 적용인원은 Table 9와 같으며, Pathfinder 지오메트리 상에서 에이전트 배치는 Figure 2와 같았다.

그리고 에이전트의 반응시간(Response time)은 화재시물레이션 수행 시 화원 위 층고에 맞게 설정한 온도 DEVC가 74 °C에 도달하는 시간을 측정하여 적용하였다. 특히 오피스텔에서는 Baek et al.⁽¹⁸⁾의 연구에 따라 화재가 발생한 세대(화재실)와 화재가 발생하지 않은 세대(비화재실)를 구분

하여 반응시간을 적용하였다. 열감지기⁴⁾ 역할의 온도 DEVC가 74 °C에 도달하는 시간은 42.44 s였는데, 이 값은 설계도서에 따라 이를 화재가 발생한 세대의 에이전트의 설정조건⁵⁾으로 입력하였다.

화재가 발생하지 않은 세대의 에이전트에 대한 반응시간은 소방청고시 2017-1호에 의거, 대상 건축물에 방재센터 등 CCTV설비가 갖춰진 통제실이 있고, 방송을 통해 육성 지침을 제공 할 수 있다고 판단하여 동 고시 별표 1의 업무시설 피난개시 지연시간 중 ‘W1’를 적용한 102.44 s로 설정하였다. 이상에서 언급한 바와 같이 피난시물레이션

4) 자동화재탐지설비 및 시각경보장치의 화재안전기준(NFSC 203) 제7조에 따라 오피스텔에는 연기감지기를 적용해야 하나 본 연구에서는 동일 시나리오와 조건 상에서 시물레이션 모델과 커플링 방식에 따른 결과를 비교함에 초점을 맞추고 있기에 이를 무시함.
 5) 실제 피난모델링에서는 이 감지기 작동시간에다 인간이 그 알람을 감지하고 의사결정을 하는 pre-movement time까지도 반영해야 하지만 본 연구에서는 각 시물레이션 툴 간의 비교가 우선적인 목표이므로 이는 제외하였음. 실제 이 값까지 반영하였다면 RSET이 커지게 되므로 위험성 또한 이에 따라 더욱 더 커지게 됨.

Table 10. Number of Agents by Gender

	Children	Teenager	Adults	Senior Citizens
Male	2	3	16	5
Female	1	2	16	6

Table 11. Response Time Set Value

Condition		Response Time
Fire Area	Fire detector actuation time : 42.44 s	42.44 s
Non Fire Area	42.44 s + 60 s (W1, Office)	102.44 s

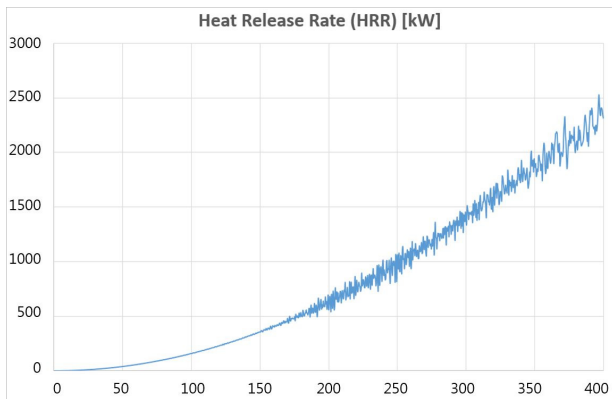


Figure 3. Time (s) vs. heat release rate (HRR, kW).

수행을 위한 각 해당실들의 반응시간은 Table 11과 같다.

4. 커플링방식별 인명안전성평가 결과 비교

4.1 논커플링방식의 결과

본 연구에서 Pyrosim으로 수행한 화재시물레이션의 열 방출율 그래프는 Figure 3과 같다. 그리고 특정지점들에서의 ASET은 소방청고시 2017-1호 내 별표 1의 인명안전기준에 따라 온도 60 °C 이상, 가시거리 5 m 이하, 일산화탄소 1400 ppm 이상, 이산화탄소 5% 이상이 되는 시점을 기준으로 산출하였다. 그리고 피난시물레이션 상에서는 각 특정지점에 에이전트가 마지막으로 지나간 시점을 RSET 이라고 도출하였다.

그 결과 오피스텔에서의 각 특정지점에서 도출된 ASET 은 모두 가시거리에 의하여 도출이 되었으며, Pyrosim과 Pathfinder를 이용하여 도출된 ASET과 RSET으로 인명안전 성평가를 한 결과는 Table 12, Pyrosim과 buildingEXODUS 를 이용하여 도출된 ASET과 RSET으로 인명안전성평가를 한 결과는 Table 13와 같았다.

Pathfinder와 buildingEXODUS를 통해 도출된 RSET값은

Table 12. Results of Life Safety Assessments using Pyrosim and Pathfinder

[s]	ASET	RSET	Result
Point 1	149.23	109.9	SAFE
Point 2	149.60	112.2	SAFE
Point 3	176.42	114.6	SAFE
Point 4	174.83	112.2	SAFE
Point 5	187.20	112.4	SAFE
Point 6	185.62	114.0	SAFE
Point 7	202.80	113.4	SAFE
Point 8	203.21	111.7	SAFE
Point 9	214.03	114.5	SAFE
Point 10	80.45	52.6	SAFE
Point 11	127.22	112.7	SAFE
Point 12	107.20	108.7	NOT SAFE
Point 13	100.82	110.3	NOT SAFE
Point 14	171.63	152.5	SAFE
Point 15	118.01	117.6	SAFE

Table 13. Results of Life Safety Assessments using Pyrosim and buildingEXODUS

[s]	ASET	RSET	Result
Point 1	149.23	108.3	SAFE
Point 2	149.60	108.6	SAFE
Point 3	176.42	111.6	SAFE
Point 4	174.83	112.1	SAFE
Point 5	187.20	109.7	SAFE
Point 6	185.62	109.9	SAFE
Point 7	202.80	110.6	SAFE
Point 8	203.21	109.6	SAFE
Point 9	214.03	110.6	SAFE
Point 10	80.45	49.2	SAFE
Point 11	127.22	108.3	SAFE
Point 12	107.20	108.5	NOT SAFE
Point 13	100.82	109.1	NOT SAFE
Point 14	171.63	151.8	SAFE
Point 15	118.01	116.4	SAFE

다르지만, 두 가지의 시물레이션 조합 모두 Point 12, Point 13에서 ASET 보다 RSET이 크게 도출되었고, 확인결과 각각 약 5명, 약 4명의 사망자가 발생하는 것으로 나타났으며 그 외의 특정지점들에서는 모두 ASET이 RSET보다 크므로 안전하다고 판단되었다. Figure 1, Table 12, 및 Table 13을 보면 Point 14가 화재발생지점과 더 가까움에도 불구하고 Point 12, Point 13 보다 ASET이 더 큰 것을 확인할 수 있었는데 화재시물레이션 확인 결과, 화원으로부터 발생한 연

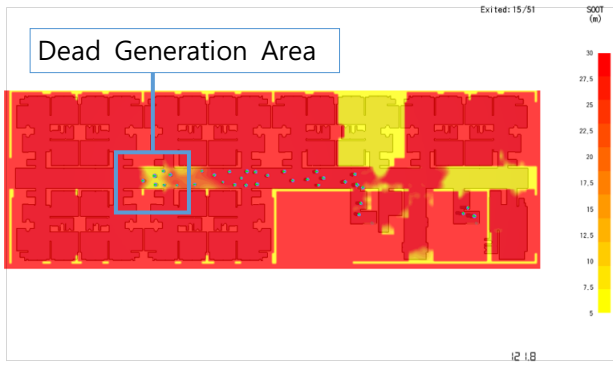


Figure 4. New areas where additional casualties occurs.



Figure 5. A Scene of Fire and Evacuation Coupling Simulation (T=150 s, 18 agents finished).

기가 천장으로 상승하고, 천장에 축적된 연기가 천장을 따라서 복도로 확산된 후에 복도의 끝쪽부터(Point 12, Point 13 부근) 연기층이 하강하기 때문이었다.

4.2 세미커플링방식의 결과

Pyrosim과 Pathfinder의 세미커플링방식에서는 논커플링방식과 같은 시물레이션 파일로 진행하였다. 그러나 Pathfinder에서 FDS의 결과를 오버레이할 수 있기 때문에 Slice 결과 범례구간의 기준값을 국내 인명안전기준에 따라 가시거리 최소 5 m, 온도 최대 60 °C로 바꾸어 진행하였다.

그 결과, Figure 4와 같이 화재발생 약 121 s 후 논커플링방식에서 위험지점으로 판정한 Point 12와 Point 13을 제외한 또 다른 지점에서 ASET보다 RSET이 커져 3명의 사망자가 추가적으로 더 발생하는 것으로 나타났다. 해당 추가 사망자 3명의 판단방법은 세미커플링의 결과값이라 할 수 있는 시물레이션 비디오 분석을 통해 이루어졌다. Figure 4를 참고하면 추가적으로 “사망자 발생구역”이 생성되는 것을 확인할 수 있었는데 이에 따라 해당 구역을 통과하게 되는 에이전트 3명을 사망한 것으로 판단하였다.

이에 또 다른 관점에서 접근하면, 그동안 국내 설계자가 수행한 논커플링방식에서 ASET과 RSET을 측정하기 위해 설정한 이른바 ‘POINT’의 위치에 대한 신뢰성 평가를 적어도 이러한 세미커플링방식이라도 검증해야만 한다는 주장을 제기할 수 있다. 왜냐하면 논커플링방식이나 세미커플링방식은 동일한 화재 및 피난시물레이션 툴을 사용함에도 불구하고 해당 툴의 기술적 업데이트나 커플링 매뉴얼 등을 무시하고 과거 설계자들이 해오던 방식으로 무의식적

로 설계를 수행하기 때문이다. 뿐만 아니라 화원이나 가시거리가 확보되지 않은 지역을 에이전트가 아무렇지도 않게 통과하는 오류도 자주 발생하지만 원천적으로 무시되기 때문에 시물레이션 결과에 대한 신뢰성을 담보할 수 없다.

4.3 커플링방식의 결과

Smartfire와 buildingEXODUS 커플링수행방식은 피난시물레이션 상에서 에이전트가 화재로 인해 발생하는 해저드의 영향을 받기 때문에 인명안전기준에 도달하게 된다면 에이전트가 그 자리에서 사망하게 된다. 하지만 buildingEXODUS에서는 단지 가시거리가 1~2 m 정도인 감광계수(Depreciation coefficient) 1.0 m⁻¹에서도 에이전트가 사망하지 않고 기어가며(crawling) 이동하기 때문에 상대적으로 보행속력이 느려져 총 피난시간은 늘었지만 국내에서 다루는 가시거리 인명안전기준에 의해서는 사망자가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

이는 영국 등 유럽에서 호흡선이라 할 수 있는 1.8 m 높이에 가시거리가 확보되지 않더라도 독성가스가 없거나 또는 어느 수준의 노출시간 이하 동안에는 사망 등 에이전트의 피난에 위협을 가하지 않는다는 것을 전제로 하고 있기 때문이다¹⁹⁾. buildingEXODUS의 시물레이션 결과 출력문서를 살펴보면, 에이전트별 독성가스의 흡입량이 없다는 것 또한 알 수 있었다. 만약 화원의 정보를 입력할 때 독성물질 정보를 알고 반영하였다면 유독가스에 의한 사망자가 발생할 수는 있으리라 예측되나 설계자가 현실적으로 발화원의 화학·독성물질조성정보를 알기가 쉽지 않은 현실에서 사실상 이를 반영하여 실제 에이전트의 독성물질 흡입량 등 해저드 정보를 입력하기에는 불가능한 실정이다.

Ahn³⁾의 연구조사 결과에 따르면, 현재 우리나라 성능위주설계 시 소방청고시에 나타난 인명안전기준에 의해서 인명안전성평가를 수행하면 에이전트들이 대부분 가시거리로 인해 사망한 것으로 나타났는데, FED모델 등을 반영한 buildingEXODUS 등에서는 가시거리에 따라 에이전트의 사망여부를 판단하지 않고 HCN이나 HCl 등 FDS에서 반영하지 않는 독성가스 등에 의하여 사망여부를 판단하기 때문에 지금까지 국내 설계자들이 수행해온 방식과 전혀 다른 결과가 도출될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 성능위주설계를 수행한 특정소방대상물 1개소를 대상지로 설정하여 한 대상지에서 논커플링방식(Pyrosim과 Pathfinder, Pyrosim과 buildingEXODUS), 세미커플링방식(Pyrosim과 Pathfinder), 커플링방식(Smartfire와 buildingEXODUS) 총 3가지의 방식으로 성능위주설계의 인명안전성평가를 진행하였다.

논커플링방식에서는 Point 1~15까지의 특정지점 15곳을 설정하여 Pyrosim과 Pathfinder, Pyrosim과 buildingEXODUS 두

가지의 시뮬레이션 조합으로 인명안전성평가를 진행하였다. 그 결과 두 가지의 시뮬레이션 조합 모두 2곳의 지점 Point 12, Point 13에서 RSET이 가시거리로 도출된 ASET보다 크게 도출되어 각각 약 5명, 약 4명의 사망자가 발생하는 것으로 나타났다.

세미커플링방식에서는 논커플링방식에서 지정한 특정지점 15곳 이외의 1개소 구역에서 121.8 s가 되는 시점에 RSET이 ASET보다 높은 지점이 도출되어 3명의 사망자가 추가적으로 더 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 논커플링에서 간과했었던 추가 사망자를 찾아냄에 따라 논커플링방식에서 사용하는 특정포인트 설정위치의 적절성 및 화원이나 해저드 구간을 통과하는 에이전트의 발생여부에 대한 검증 또한 적어도 세미커플링방식을 통해 이루어져야 한다는 사실을 확인하였다.

하지만 Smartfire와 buildingEXODUS로 진행한 커플링수행방식의 결과는 감광계수 1.0 m⁻¹(가시거리 1~2 m)에서 에이전트가 기어가는 현상을 보이지만 화원의 독성정보가 입력되지 않아 결국 모든 에이전트가 피난에 성공하였다. 그러나 이 감광계수 1.0 m⁻¹은 국내에서 사용하고 있는 인명안전기준(가시거리 5 m)에 적용하면 에이전트가 사망하는 걸로 판단할 수 있는데, 이는 소방청고시 제2017-1호에서 정하는 화재 및 피난시뮬레이션 수행기준이 FDS기반의 논커플링방식만을 반영하고 있어 Smartfire 및 buildingEXODUS의 커플링방식을 반영하고 있지 못해 발생한 결과라 할 수 있다.

그러나 Smartfire 및 buildingEXODUS 커플링 시뮬레이션 모델 상 에이전트의 사망여부는 가시거리 등의 계산을 통한 ASET과 RSET에 의해 판단하지 않고 동일 타임라인을 사용하며 모든 지오메트리에서 독성가스나 노출된 복사열의 양 등에 의하여 보호능력의 변화로 에이전트의 사망 또는 부상여부를 판단한다. 그러므로 설계자가 각 화원의 물질정보를 구체적으로 입력하지 않아 어떤 독성가스가 발생하는지 등을 구체적으로 계산할 수 없었기에 소방청이 주도적으로 화재조사나 연소실험 등을 통해 주요 화원물질에 대한 화학적 구성이나 물성 데이터 등에 관한 정보를 지속적으로 구축하여 설계자들에게 제공해야 한다.

또한, 설계자들은 공개버전이기 때문에 널리 쓰이고 있는 FDS를 사용하더라도 FDS+EVAC과 같은 FDS기반의 화재 및 피난시뮬레이션 커플링 모델이나 Pathfinder의 세미커플링 기능 또한 존재하기 때문에 이에 대한 기준 개정 또한 뒤따를 필요가 있다. 뿐만 아니라 현재 전 세계에 출시되어 있는 다양한 화재 및 피난시뮬레이션 툴의 특성을 골고루 파악, 반영한 이후 성능위주설계를 위한 시뮬레이션 수행기준을 새로이 보완하여 성능위주설계기준을 고시해야 한다.

후 기

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원

으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1A2B3005951).

참 언

이 논문은 제1저자의 부경대학교 대학원 공학석사학위 청구논문⁽¹⁾ 및 2017년 한국화재소방학회 춘계학술발표대회 발표원고⁽²⁾를 일부 발췌한 후 수정, 보완하여 작성되었음.

References

1. H. M. Koo, "A Study on Improvements Performance-Based Design Standards through a Comparison of Life Safety Assessment Results according to Three Coupling Methods of Fire and Evacuation Simulation", Master's thesis, Graduate School of Pukyong National University (2017).
2. H. -M. Koo, R. -S. Oh, S. -H. Lee, S. H. Ahn, C. H. Hwang and J. H. Choi, "A Comparative Study on Life Safety Assessment Results depending on Whether Coupling of Fire & Evacuation Simulation for Performance Based Design", Proceedings of 2017 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 47-48 (2017).
3. S. H. Ahn, "Study on the Improvement of Performance-Based Design (PBD) through the Analysis of the Whole PBDs", Ph.D. Dissertation, the Graduate School of Daejeon University (2018).
4. H. -J. Kim, S. -H. Lee, I. -H. Kim and W. -H. Hong, "A Study on the Evaluation Index through Weight Analysis of Fire and Egress Scenario Factors - Focused on High-rise Mixed-use Apartment", Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 28, No. 12, pp. 371-378 (2012).
5. NIST FDS's Official Webpage, <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Release-Notes>, Accessed on 15th of March (2017).
6. Thunderhead Engineering's Pyrosim Official <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/news/releasenotes>, Accessed on 15th of March (2017).
7. FSEG, Univesity of Greenwich's Smartfire Official Webpage, https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/smartfire_registered_visitors.html, Accessed on 15th of March (2017).
8. Thunderhead Engineering's Pathfinder Official Webpage, <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder/news/releasenotes>, Accessed on 15th of March (2017).
9. FSEG, Univesity of Greenwich's buildingEXODUS Official Webpage, <https://fseg.gre.ac.uk/fire/news.html#SoftwareNews>, Accessed on 15th of March (2017).

10. VTT's FDS+EVAC Official Webpage, http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/examples_fds6.html#version, Accessed on 15th of March (2017).
11. NIST CFAST Official Webpage, <https://pages.nist.gov/cfast/downloads.html>, Accessed on 15th of March, (2017).
12. E. R. Galea, P. J. Lawrence, S. Gwynne, L. Filippidis, D. Blackshields and D. Cooney, "buildingEXODUS v6.3 User Guide", Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich (2017).
13. D. A. Purser, "Modelling Time to Incapacitation and Death from toxic and Physical Hazards in Aircraft Fires", In: Conference Proceedings No. 467, Aircraft Fire Safety. NATO-AGARD, Sintra, Portugal, pp. 41-1-41-13.
14. O. -S. Kweon, Y. -H. Yoo, H. -Y. Kim and Y. -S. Lim. "The Study on Fire Characteristics of Furniture", Proceedings of 2009 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 379-384 (2009).
15. Korea Institute of Construction Technology (KICT), "Development of Fire Spread Prevention and Escape Safety Design Technique According to Standard Fire Model," Ministry of Construction & Transportation's Research Report (2009).
16. Ministry of the Interior and Safety (MIS), "Resident Registration Demographics of B Metropolitan City" (2016).
17. Korea Agency for Technology and Standards (KATS), "Korean People's Body Size Survey (SIZE KOREA) Report" (2015).
18. S. Baek, J. -H. Choi, W. -H. Hong and J. -J. Jung. "A Study on Required Safe Egress Time (RSET) Comparison and Error Calculation in Relation to Fire Room Range Set Conditions of Performance Based Fire Safety Designers", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 73-78 (2016).
19. Society of Fire Protection Engineers (SFPE), "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", pp. 2-88, (2008).