

화재·피난 시뮬레이션을 통한 청소년 수련관 시설의 피난 안정성 검토

최창호[†], 조민관*

광운대학교 건축공학과, *강남대학교 건축공학과

An Evaluation on Evacuation Safety in Training Facilities For Young People based on Fire and Evacuation Simulation

Chang-Ho Choi[†], Min-Kwan Cho*

Department of Architecture Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

**Department of Architecture Engineering, Kangnam University, Youngin 446-702, Korea*

(Received October 21, 2008; revision received November 17, 2008)

ABSTRACT: The Purpose for this study was to analyze the evacuation behavior of a training facilities for young people in case of fire emergency. It is necessary to study for fire safety design of the training facilities. The study carried out two different simulations on the training facilities. The results were divided into two groups by using Simulex, FDS. By comparing those two different outputs, we were able to verify the problems of existing training facilities. The results have shown that there was a need for a greater structural design in these training facilities.

Key words: Fire(화재), Evacuation(피난), Training-facilities(청소년 수련관), FDS(피난시뮬레이션), Simulex(화재시뮬레이션)

기호설명

안전구획까지의 이동시간.

REST : 피난소요시간

t : 시간

1. 서 론

최근 화재공학의 발전에 의해 가능해진 화재 안전설계(performance-based fire safety design)는 새로운 건축 재료의 도입과 공간 구성을 위한 설계 유연성을 제공할 뿐만 아니라, 건축 비용 절감 및 화재 위험에 대해 구체적이고 적극적으로 대처하는 것을 가능하게 만들었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 피난 안정성 평가는 피난 시간의 확보 여부 및 피난 경로와 피난 출구 위치의 적정성 등을 종합적으로 판단할 수 있는 중요한 수단이 되었다.

본 연구는, 피난 및 화재 시뮬레이션을 병행

하첨자

- | | |
|------------------|--|
| <i>s tart</i> | : 피난개시시간으로(start time)
점유자가 피난을 개시하기까지
필요로 하는 시간. |
| <i>m ovement</i> | : 피난출구(exit)로의 보행시간
및 출구통과시간으로 화재발
생시의 위치에서 가장 가까운 |

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-940-5566; fax: +82-2-940-5566

E-mail address: choi1967@kw.ac.kr

실시하여 건축물 내부에서의 피난경로와 화재성상을 비교하여 실제적이고도 구체적인 피난 안정성을 평가하였다.

시뮬레이션 대상은, 어린이 또는 청소년들이 주로 사용하는 수련관 건물을 선정하였는데, 이들은 화재 발생 시 대처능력이 떨어지기 때문에 대형 사고로 발전할 가능성이 크기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 청소년 수련관을 대상으로 화재 발생시 피난 적정시간을 파악하고 화재의 발전을 지연시킬 수 있는 방안을 모색하고자 하였다.

구체적인 연구방법으로는, Simulex를 통하여 피난상황을 분석하고 FDS로 화재시 발생하는 CO농도량, 가시거리, 온도 등을 시간별로 파악하여 적정 피난시간을 도출하고 시뮬레이션의 결과를 비교·분석하여 기준의 문제점을 검토하였다. 또한, 화재 발생단계 중 플래시오버(flash over)를 방지하여 화재의 확산 속도 및 CO농도 등에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 피난 안정성 평가의 개요

피난 안정성 평가는 일반적으로 피난 소요시간(RSET, required safe egress time)과 피난 가능시간(ASET, available safe egress time)을 비교하여 이루어지는데, 피난 소요시간이 피난 가능시간을 초과하지 않는가를 확인하는 과정이라 할 수 있다. 피난 소요시간은 수용인원의 연령층과 남녀구성과 같은 개인별 특성과 주위사람들과 밀집상태에 따른 보행속도 변화, 건물의 기하학적 형태, 피난 경로의 효율성, 안전구획까지의 거리 등과 같은 요소들에 의하여 계산된다. 따라서 피난 가능시간은 화재 시나리오에 의해 산출된 플래시오버 시간이나, 설계 목적에 따라 요구되는

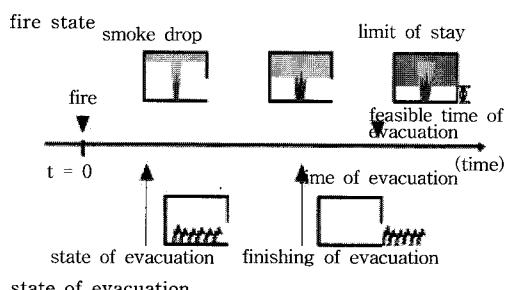


Fig. 1 Evaluation concept of evacuation safety.

특정한 높이까지의 연기층 하강시간 등 성능기준에 의해 결정된다.

Fig. 1은 화재안전설계법에서 사용하고 있는 피난 안정성의 평가개념을 나타낸 것이다.

2.1 피난 소요시간 및 가능시간 예측 방법

(1) 피난 소요시간 예측

피난 소요시간(RSET)을 예측하는 방법은 수계산에 의한 방법과 피난모델링에 의한 방법이 있다. 피난 소요시간은 일반적으로 피난 개시시간과 피난 이동시간의 합으로 산출되며, 건물 화재시 피난에 필요한 시간은 다음과 같다.

$$RSET = t_{start} + t_{movement} \quad (1)$$

(2) 피난 가능시간 예측

피난 가능시간(ASET)의 예측은 수계산이나 화재 모델링을 통하여 가능하다. 그러나 수계산은 개략적인 방법에 의존하고 있어 복잡한 공간에서의 실제적용은 어렵다는 것이 일반적인 견해이다. 또한 화재는 근본적으로 실제실험이 어렵다는 측면에서 화재모델링을 통하여 피난 가능시간을 산출하는 방법이 성능위주의 화재안전설계법에서는 권장되고 있다.

한편, 화재모델은 결정론적 방법과 확률론적 방법이 있으나, 확률론적 방법은 통계값에 의해 파라메터를 추정하는 방법으로서, 본 연구는 시뮬레이션에 의한 피난 안전성평가에 관한 것이므로 제외하였다. 결정론적 방법에는 존모델, 필드모델 등이 있다. Table 1은 존모델과 필드모델의 차이를 나타낸 것이다. 존모델은 계산속도가 빠르고 결과의 해석이 쉽기 때문에 여러 변수에 대한 감응도 분석에 유리하며, 필드모델은 주어진 공간을 수천분의 1의 용적으로 분할하고 있기 때문에 결정론적 모델에 대한 가장 정밀한 예측을 제공할 수 있다.

(3) 성능기준의 설정

성능기준(performance criteria)은 주어진 설계 상황에 대해서 설계안을 평가하기 위하여 사용되는 한계값과 범위를 말한다. 성능기준에는 물질의 온도, 가스 온도, 연기의 농도 또는 연기의 높이, 복사열의 세기 등이 사용될 수 있다. Table 2

Table 1 Comparison of model between zone and field

	Zone model	Field model
Applicable	After spread of fire	Beginning and spread of fire
Analysis description	Macro-description	Micro-description
Principle of conservation	Conservation of energy Conservation of mass	Conservation of energy Conservation of mass(Heat flux, Component) Conservation of momentum
Equation	Ordinary differential equation	Partial differential equation
Calculation tool and time required	PC(some minutes)	Work Station(some hours~few days)

Table 2 Performance criteria

Suggested performance criteria		Lower limit	Upper limit
convection heat(°C)		65	190
Radiation heat(kW/m ²)		2.5	2.5
oxygen(%)		10	15
carbon monoxide(ppm)		1400	1700
carbon dioxide(%)		5	6
hydrogen cyanide(ppm)		-	80
upper gas layer temperature(°C)		183	200
visibility(m)	primary fire compartments	2	3
	other rooms	10	-

는 성능위주의 화재안전설계에서 사용되는 성능 기준 범위를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 재실 인원이 청소년인 점을 감안하여 성능기준을 하한값 중에서 가장 많이 선택되는 대기온도(convective heat)가 65 °C일 때, 산소량이 10%일 경우와 가시거리가 2m일 경우로 설정하였다.

3. 피난·화재 시뮬레이션의 개요

상술한 바와 같이 피난안정성 평가 대상건물은 청소년 수련관의 속소동으로서 지하 1층, 지상 4층으로 구성되어 있으나, 시뮬레이션 대상은 3층으로 발화지점 및 피난 동선은 Fig. 2와 같다.

3.1 피난 시뮬레이션

본 연구에 사용된 피난 시뮬레이션 프로그램은 영국 Edinburgh 대학에서 개발한 SIMULEX로서 고충건물 및 특수 장소 등 다수의 인원이 존재하는 곳에서 화재발생시 피난 상황에 대한 정보를

동영상으로 제시하는 프로그램이다.

Table 3 Summary of simulated building

Building	A training facilities for young people
Site Area	180,097 m ²
Total area	3421.4 m ²
Building Area	2458.93 m ²
Floors	B1F and 4th Floors

(1) 대상 공간분석

대상 공간분석을 위해 Drawplan과 Gridform을 이용하였다. Drawplan은 공간을 평면분할하여 피난자의 위치, 비상구 및 계단의 위치를 지정하는데 사용되며, Auto-CAD에서 DXF 파일의 형태로 저장하여 Simulex의 건물 입력 테이터로 사용된다.

Fig. 3에 표현된 Drawplan은 각 실에 7~8명의 재실자를 배치하였으며 비상구는 평면상에서 피난 계단실인 3개소가 있는 것으로 설정하였다.

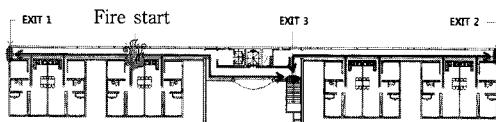


Fig. 2 Fire point and evacuation path.

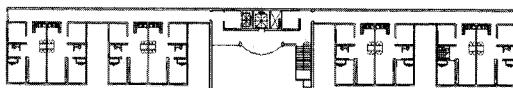


Fig. 3 Drawplan of simulated space.



Fig. 4 Gridform of simulated space.

Gridform은 대상공간의 특정지점으로부터 비상구까지의 거리를 계산하여 피난경로를 결정하기 위하여 대상공간을 $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 격자로 분할하여 거리지도를 작성하는데 사용된다. Fig. 4에 표현된 Gridform은 각각의 피난계단실을 중심으로 거리에 따른 거리지도로 표현한 것이다.

(2) 재설자의 특성

상술한 바와 같이 재설인원은 7~8명으로서 총 60명이며 실내 이동속도는 0.9 (m/sec) 로 하였다. 재설자가 화재를 인식하고 피난을 개시하기 시작하는 시간은 화재발생 후 5초로 설정하였으나, 화

재발생지점에서 벌어질수록 각각 15, 20, 25, 30, 35초로 하였다.

3.2 화재 시뮬레이션

화재 시뮬레이션은 가상공간을 구성하여 실제 화재시와 동일한 입력변수를 부여하고 시뮬레이션을 실시하여 화재에 대한 피해 정도를 사전에 예측하는 프로그램이다.

FDS는 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)에서 개발되었으며 Solver인 FDS와 post process인 Smokeview로 구성되어 있다. FDS는 난류 모델로 Large Eddy Simulation(LES) Model을 사용하여 3차원 비정상 화재모델의 사용으로 개발되어 화재나 연기의 이동에 효과적으로 적용할 수 있다.

(1) 화재 시뮬레이션 계산조건

화재시 피난자에게 가장 위험한 것은 옆에 의한 영향보다는 초기 화재시 불완전 연소에 의해 발생되는 유해가스에 의한 영향이 가장 크다. 그러므로 화재 시나리오에 따른 온도변화 및 유해가스의 거동을 살피는 것이 화재 시뮬레이션의 중요한 목적이 된다.

시뮬레이션은 3회에 걸쳐 실시하였는데 첫 번째는 3층 전체를 대상으로 하였고 두 번째와 세 번째는 발화실을 대상으로 하였다. 시뮬레이션 시간은 100(s)로 설정하였고, 최초 실내온도는 20°C , 발열량은 3000 kW/m^3 으로 하였으며, 발화재료는 나

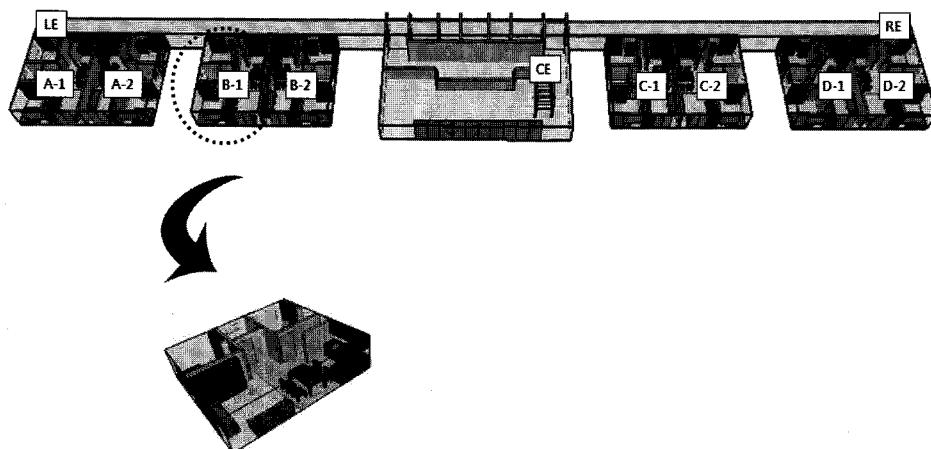


Fig. 5 FDS modelling and layout of furnitures in firing room.

무로 가정하였다. 또한 실제의 화재와 유사한 시뮬레이션을 위하여 화재가 천장으로 확산이 가능하도록 설정하였다.

Fig. 5는 FDS를 이용한 모델링으로 각 실별로 A-1, A-2, B-1, B-2, C-1, C-2, D-1, D-2로 구분하여 나타내었다. 발화실은 B-1이고 측정 위치는 각 실의 중앙과 출구로 하였으며 재실자들의 호흡역인 바닥면으로부터 1.5m지점으로 하였다

4. 수치 해석 결과

4.1 피난 시뮬레이션의 결과

대상건물의 피난 시뮬레이션 결과, 화재발생 후 30초가 경과한 후에, 최초 피난자가 발생하였다. 이후 최종 피난자가 피난하기까지 69.6초가 소요되었다.

Fig. 6은 시간경과에 따른 피난상황을 나타낸 것으로, 화재발생 10초 후 발화실로부터 피난자가 탈출하는 것을 알 수 있고 20초 경과 후에는

인근실에서도 피난을 시작하는 것을 알 수 있었다. 30초 후에는 발화실에 인접한 모든 실에서 대부분의 피난자가 나오는 것을 알 수 있다. 55초 후에는 EXIT1으로 피난하는 모든 피난자가 피난을 완료하는 것을 알 수 있다. 다수의 피난자로 인한 병목현상은 없었다.

Fig. 7은 화재가 발생 후 경과시간에 따른 피난자의 수를 누적치로 나타낸 것이다. 이를 통해 최초 피난자 발생이후 35~60초 사이에 대부분의 피난이 이루어짐을 알 수 있다. Table 4는 개구부의 위치에 따른 피난 인원으로 각 출구별로 적절한 인원이 분배된 것을 알 수 있다. Fig. 8은 각 실별로 피난하는데 걸리는 시간으로 화재가 발생한 실에서 피난하는데 25초가 소요되었다.

4.2 화재 시뮬레이션의 결과

Fig. 9는 시간에 따른 화재 및 연기 분포도를 나타낸 것이다. 화재발생 10초 후에는 발화실의 거실전체에 연기가 퍼지는 것을 알 수 있으며 20

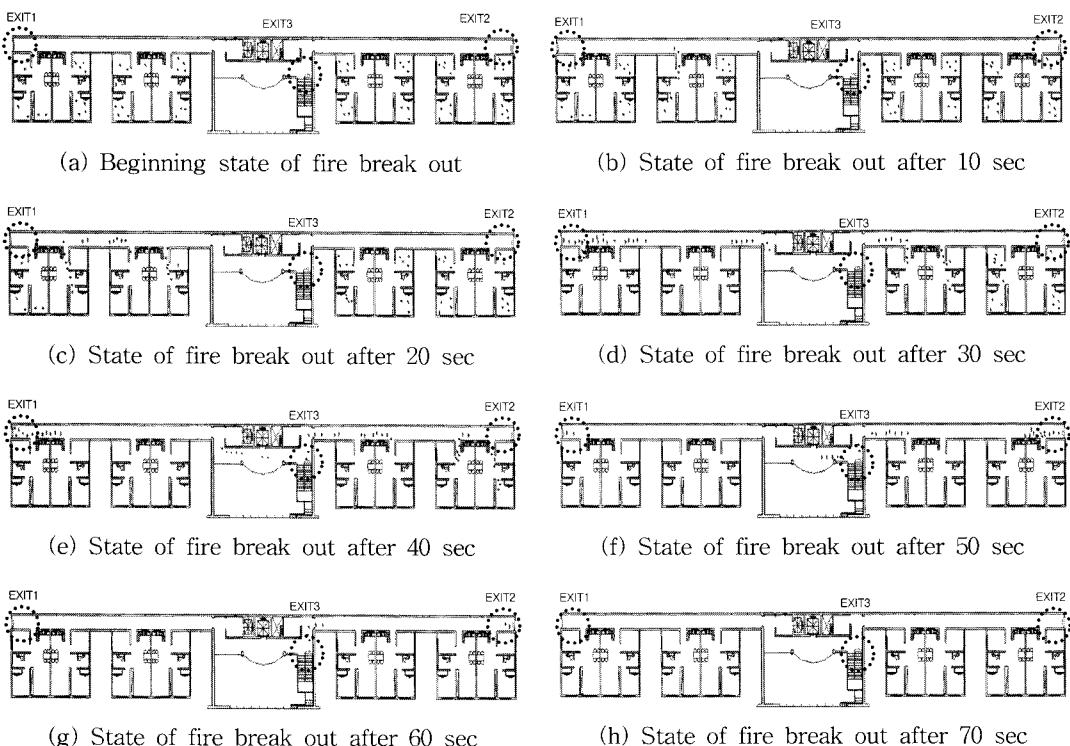


Fig. 6 Hourly number of persons(Simulex).

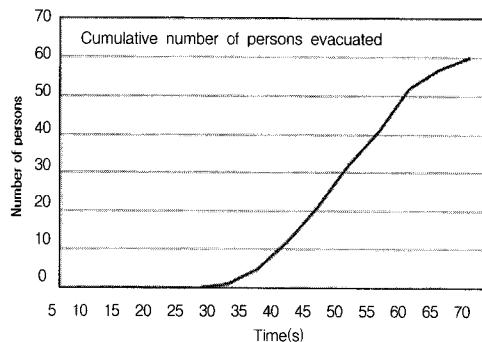


Fig. 7 Cumulative number of persons by time of fire.

초 후에는 발화실의 거실 및 양쪽 방에까지 불이 확산되며 유리창을 뚫고 복도로 불길이 치솟는

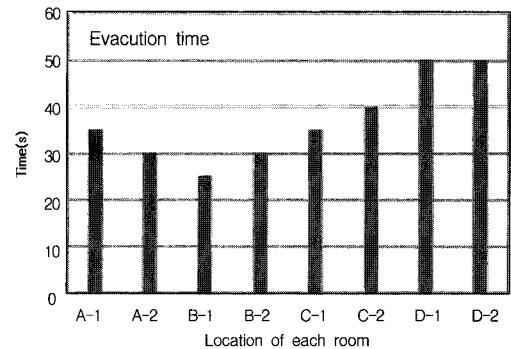


Fig. 8 Evacuation time in each room.

것을 볼 수 있다. 화재발생 30초 후에는 발화실 전체에 화재가 번지고 연기가 가득 찬 것을 알 수 있다. 또한 복도에도 많은 불이 번져있으며

Table 4 Number of persons evacuated by location of exit

Exit \ Time	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	Number of persons evacuated
EXIT1	0	0	0	0	0	1	4	6	6	3	3	0	0	0	23
EXIT2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	5	3	0	15
EXIT3	0	0	0	0	0	0	0	1	3	4	3	6	2	3	22

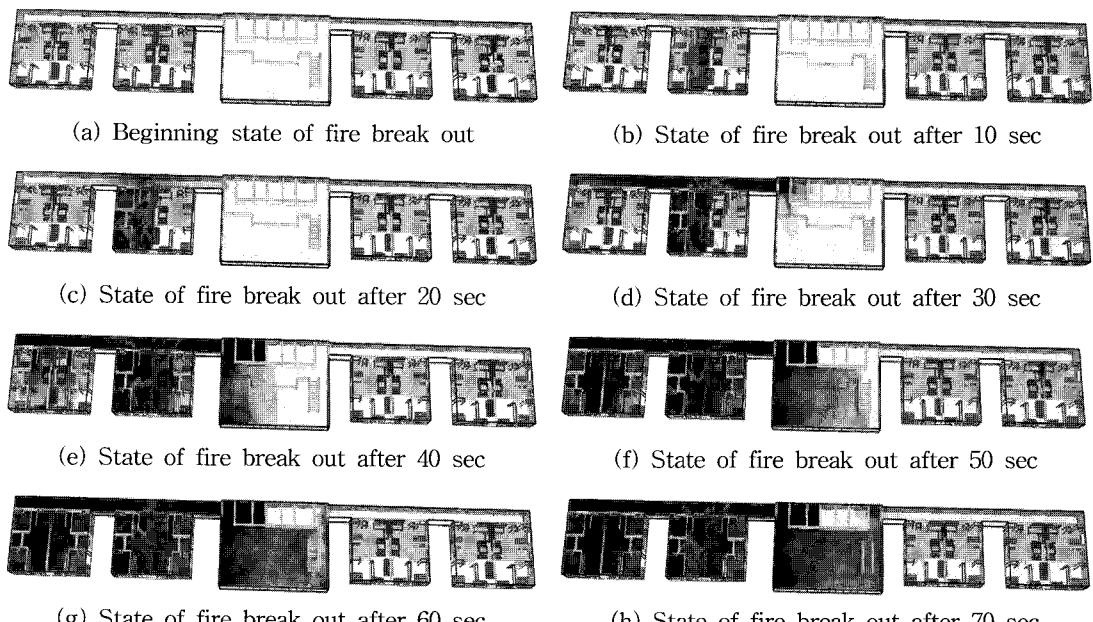


Fig. 9 State of flame and smoke by time(FDS).

연기가 퍼져나가는 것을 알 수 있었다. 40초 이후에는 왼쪽 복도 전체에 연기가 가득 찬 것과 다른 실에도 연기가 퍼져나가는 것을 알 수 있다. 인근 실보다 복도가 더 빠르게 연기가 확산되는 것은 직선거리로 되어 있어 연기를 막을 수 있는 장애물이 없기 때문으로 판단된다.

50초 이후로는 발화실과 인근한 실 전체에 연기가 확산되어 중앙 EXIT2까지 연기가 널리 흩어져 60초 이후로는 좌측의 모든 실들과 중앙 홀이 연기가 가득 찬 것을 알 수 있고 오른쪽 실들은 70초 이후에도 거의 영향이 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 10~Fig. 12는 각 지점별 시간경과에 따른 온도, 산소 및 가시거리를 나타낸 것이다. 피난 가능시간은 온도, 산소, 가시거리 중에서 성능기준 하한값에 가장 먼저 도달한 시간을 대상으로 하였다. 발화실에서 65 °C에 도달한 시간은 14초이고, 산소는 31초에 10%에 도달 후 급격하게 0%로 떨어진다. (화살표 참조)가시거리는 19초 만에

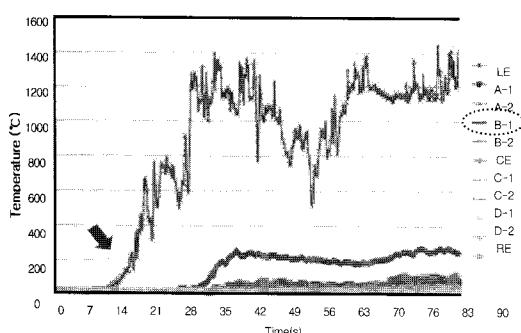


Fig. 10 Temperature variation in each points by time.

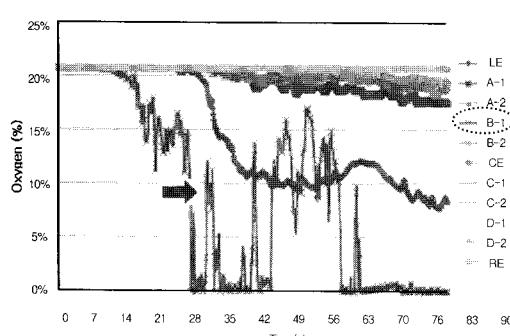


Fig. 11 Amount of oxygen in each points by time.

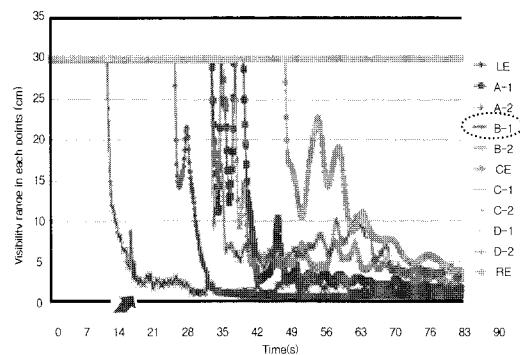


Fig. 12 Visibility range in each points by time.

Table 5 Time to performance criteria in principal points

Factors	Time to performance criteria(s)		
	Temperature (65 °C)	Oxygen (10%)	Visibility range(2m)
Room B-1	14	31	19
EXIT 1	34	49	35

2m에 도달하므로 가장 먼저 하한값에 도달한 온도가 피난 가능시간이 된다. 이 실에서의 온도는 급격히 상승하여 최고 1400 °C까지 도달하는 것을 볼 수 있다. 두 번째로 높은 온도상승을 보이는 구간은 EXIT1으로 65 °C도달시간은 34초이다. Table 5는 화재에 의한 피해가 가장 큰 곳의 성능기준 도달 시간을 나타낸 것이다.

4.3 화재·피난 시뮬레이션에 대한 고찰

Table 6은 화재 및 피난 시뮬레이션을 통한 각 실과 층의 피난 안정성 평가결과를 나타낸 것이다. 피난 시뮬레이션을 통해 발화실에서 재실자가 피난하는데 걸리는 시간은 25초 정도였음을 알 수 있었다. 그러나 화재 시뮬레이션을 통한 피난 가능시간은 14초이므로 재실자는 화재에 대한 위험에 노출되어 있음을 알 수 있다. 또한 EXIT1에서의 피난 시뮬레이션의 피난시간은 55초가 소요되나 화재 시뮬레이션을 통한 허용 피난시간은 34초가 걸린다. 이는 B-1실, EXIT1에서 화재의 위험에 노출되어 있는 것을 나타낸다. 따라서 이에 대한 적절한 보완책을 수립해야 할 필요가 있다.

Table 6 Evaluation result of evacuation safety

Points	Occupants	Evacuation · Fire Simulation		Judge
		RSET(s)	ASET(s)	
Room evacuation	A-1	7	35	46
	A-2	8	30	55
	B-1(Fire point)	8	25	14
	B-2	7	30	46
	C-1	8	35	-
	C-2	7	40	-
	D-1	8	50	-
	D-2	7	50	-
Floor evacuation	EXIT1	23	55	34
	EXIT2	15	65	-
	EXIT3	22	70	-

4.4 화재 예방 대책

(1) 플래시오버에 대한 고찰

화재 시뮬레이션과 피난 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 청소년 수련관에서 화재가 발생하였을 경우 재실자들은 화재에 대한 위험에 노출되어 있음을 알 수 있었다. 이를 방지하기 위해서 화재 발생단계 중 플래시오버를 예방함으로써 그 피해를 최소화 하자 하였다.

플래시오버(flash over)는 화재발생 초기단계에 발생하는 현상으로 건축물의 실내에서 화재가 발생하였을 때 발화로부터 화재가 서서히 진행하다가 어느 정도 시간이 경과함에 따라 대류와 복사현상에 의해 일정공간 안에서 열과 가연성가스가 축적되면서 발화온도에 이르게 되면 일순간에 폭발하여 전체가 화염에 휩싸이는 화재현상을 말한다. 플래시오버를 방지하기 위한 대책은 다음과 같다.

1. 천정 및 측벽을 불연화하여 화재의 발전을 지연시킨다.
2. 건물 내에 가연물이 많으면 단시간에 연소하고 다른 가연물의 연소매체가 되기 때문에 실내의 가연물질을 제한하고 수용가연물을 불연화, 난연화한다.
3. 개구부가 작으면 Flashover의 발생시기가 늦어지므로 개구부의 크기를 제한하여 Flash over를 지연시킨다.

본 연구에서는 발화실(B-1)을 대상으로 천장과

측벽의 불연화(케이스 1)와 발화실 내 가연물질을 제한(케이스 2)하여 적용한 후의 변화를 살펴보았다.

(2) 플래시오버 방지대책을 위한 입력조건

1) 케이스 1 : 가연물의 불연화, 난연화

가연물을 불연화하기 위하여 화재 발생 주변의 물건(천정, 테이블, 의자, 쇼파)들을 석고보드로 교체하였다. 나머지 조건은 기존과 동일하게 하였다.

2) 케이스 2 : 천정의 불연화

발화실의 천정만을 불연재료(석고보드)로 교체하였다. 나머지 조건은 기존과 동일하게 하였다.

(3) 플래시오버 방지대책 후 결과

Fig. 13~Fig. 15는 케이스 1, 2의 결과를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 온도, 가시거리, 산소량의 변화폭이 매우 작음을 알 수 있다. 온도는 최고 60 °C까지 상승하나 평균온도는 40 °C정도에서 일정하며, 산소량 역시 큰 변동이 없었다. 가시거리 또한 최고 12m정도였다. 두 경우 모두 성능기준 하한값에 도달하지 못하였기 때문에 적정피난 시간을 확보할 수 있었다.

1) 케이스 1

화재 발생주변의 가연물을 불연화 하였을 경우 불이 주변으로 확산되지는 않았다.

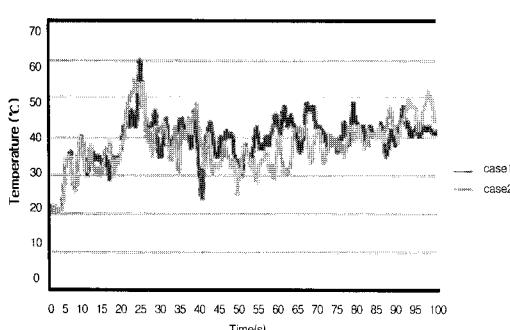


Fig. 13 Temperature variation after flash over.

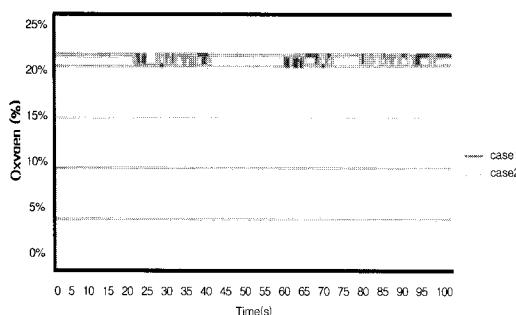


Fig. 14 Oxygen variation in fire broken out room after flash over.

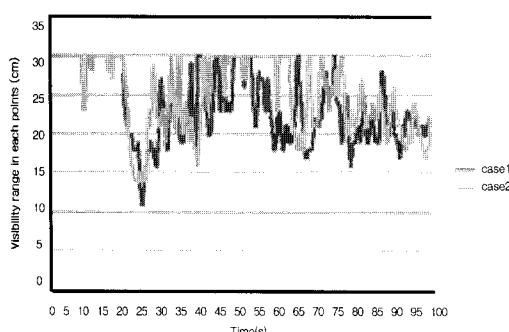


Fig. 15 Variation of visibility range in fire broken out room after flash over.

2) 케이스 2

천정만을 불연화하였을 경우에도 불이 주변으로 확산되지 않았다. 이는 플래시오버를 방지함으로써 불이 천정을 통하여 이동을 할 수가 없기 때문에 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 청소년 수련관을 대상으로 화재 발생에 따른 피난안정성을 피난·화재시뮬레이션을 통하여 정량적으로 분석하였고, 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) 피난 시뮬레이션을 통해 실별로 피난안정성을 검토한 결과 화재발생 지점인 B-1실과 출구 EXIT1에서 피난안정성이 위험수준임을 알 수 있었다. B-1실에서의 피난시간은 25초이나 화재 시뮬레이션을 통한 피난 가능시간은 14초였다. 출구 EXIT1에서의 피난 시뮬레이션을 통한 피난 시간은 55초이고 화재 시뮬레이션을 통한 허용 피난시간은 35초가 걸렸다. 즉, B-1실, EXIT1에서의 화재 안정성 평가는 부적절하였다.

(2) 화재 시뮬레이션을 통해 발화실에서의 플래시오버 단계를 예방하고자 발화실 주변 가연물질을 불연화하는 경우와 천정만을 불연화 하는 경우로 분석하였다.

두 경우 모두 화재가 확산되지 않았고 화재 성능 기준 요소인 온도, 가시거리, 산소량이 각각 60 °C, 12 m, 18%로 한계값인 65 °C, 10 m, 2%에 도달하지 못하여 화재 안정성 평가를 만족하였다.

청소년이나 어린이가 주로 사용하는 청소년 수련원에서 화재가 발생할 경우에는 대규모 인명사고로 발생할 확률은 매우 높다. 이를 사전에 예방하고 화재발생시 그 피해를 최소화하기 위한 방법이 필요하다.

본 연구에서는, 시뮬레이션을 통하여 화재·피난 안정성을 검토하고 취약점 개선을 위한 기초데이터를 제공하였다. 금후에는 본 연구결과를 바탕으로 실제의 화재실험을 행하여 데이터의 검증을 할 예정이다.

후 기

이 논문은 2008년도 광운대학교 교내학술연구비지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- Kim, K. R., Park, S. H., Yoo, H. C., 2006, The Effect of Balcony Remodeling on Building Performance in Apartment, Architec-

- tural Institute of Korea, pp. 733-736.
2. Hwang, E. K., Kim, D. H., Cho, J. H., Hwang, K. S., 2007, A Study on the Analysis of the Problems between Building's Evacuation laws, Architectural Institute of Korea, pp. 733-736.
 3. Fire Protection Handbook, 1997, 18th edition, NFPA.
 4. SIMULEX Evacuation Modeling Software Integrated Environmental Solutions, Ltd. 1996.
 5. Richard L. P. Custer and Brain J. Meacham, 1997, Introduction to Performance Based Fire Safety, NFPA.
 6. Jha, A. K. and Akiyama, J. Ura, M., Numerical Model Based on FDS for 2D Flood Flows, Japan Society of Civil Engineers.
 7. Patrick M. Kennedy, 2003, CFEI, CFPS, A Discussion of the Practical Use of Flashover In Fire Investigation.