

FDS를 활용한 성능위주 화재위험성평가 프로그램개발에 관한 연구

이 동 호

인천대학교 안전공학과
(2007. 9. 4. 접수 / 2008. 9. 9. 채택)

A Study on the Development of Performance Based Fire Risk Assessment Program

Dong-Ho Rie

Department of Safety Engineering, University of Incheon
(Received September 4, 2007 / Accepted September 9, 2008)

Abstract : 'SOS', Simulator Of Safety assessment for fire, was developed to simulate fire safety assessment for a structure which is geometrically complex. The program(SOS) is intended to use for searching as well as designing tools to analyse the evacuation safety through a wide range of structure conditions. The computer program has a function which importing FDS's calculating results to each individual resident in the structure. These attributes include a walking speed reduction by producing visibility reduction for each person on the fire. A* pathfinding algorithm is adopted to calculate the simulation of escape movement, overtaking, route deviation, and adjustments individual speeds in accordance with the proximity of crowd members. This SOS program contributes to a computer package that evaluates the fire safety assessment of individual occupants as they walk towards, and through the exits especially for building, underground spaces like a subway or tunnel

Key Words : PBD, fire, program, FDS, A* algorithm, assessment, building

1. 서론

PBD(Performance Based Design)란 이해당사자들의 의견을 종합하여 방호범위 및 정도를 결정한 후, 방재공학적 분석결과를 토대로 필요한 방재시스템을 구축하는 것으로 관련법규 및 기준을 적용하여 수행하는 기존 CBD(Prescriptive Code Based Design) 설계방식에 비하여 보다 효율적이고 다양하다. 또한, 컴퓨터 고성능화와 더불어 화재위험성평가는 보다 정량화가 가능하여 졌으며 시뮬레이션기술의 발달로 정확도가 날로 높아지고 있다. 따라서 선진 각국에서는 PBD와 관련된 기초분야에 대한 연구를 지속하여 법 제도화를 추진하고 있는 현실이다. 본 연구에서는 FDS¹⁾를 기반으로 성능위주화재위험성평가 프로그램(SOS: Simulator Of Safety assessment for fire) 개발에 따른 활용방안에 대하여 설명하였다. 본 프로그램을 활용하여 정량적 화재위험성평가로 정량적 화재위험도 결정이 가능하다.

2. 위험성 평가 모듈

열환경 및 유해가스가 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 FED(Fractional effective dose) 즉 유효복용분량을 평가하는 방법이 널리 이용되고 있다.

FED는 인간이 열환경이나 유해가스에 노출되어 나타나는 영향을 정량화하여 평가하기 위한 것으로 t시간 동안 인간이 호흡한 유해가스의 누적량(ppm · t)을 특정한 영향(무력화 또는 사망)을 미치는 한계치인 Ct로 나눈 값이다. 일반적으로 치명적인 영향을 미치는 정도를 L(Ct)₅₀을 기준으로 하고 있다¹⁾. 본 연구에서도 화재시 유해가스 및 열환경이 인간에 미치는 영향을 검토하기 위해서 FED Method를 적용하였다. FED 계산을 위한 모델은 PURSER's 모델, N-GAS model, 미국 FAA의 모델 등이 있으며^{2,3)}, 본 연구에서는 FED값을 FAA 모델보다 높게 평가하고 있다. 적용된 위험도 평가 모듈은 위험도 평가에 일반적으로 적용하고 있는 PURSER's 모델을 적용하였으며, 환경 및 가시거

리에 대한 모델²⁾을 추가로 적용하였다. PURSER's 모델의 특징 및 본 연구에 적용한 내용을 기술하면 다음과 같다.

- (a) FDS에서 HCN의 계산이 불가능한 관계로 무시함.
- (b) 이산화탄소 농도에 따른 호흡량 증가는 다음과 같다.

$$V_{CO_2} = \frac{e^{0.2496\%CO_2 + 1.9086}}{6.8} \quad (1)$$

또한, 이산화탄소에 의한 위험도는 식 (2)와 같다.

$$F_{ICO_2} = \frac{t}{e^{(6.1623 - 0.5189\%CO_2)}} \quad (2)$$

- (c) 산소의 저감율의 도입

화재시 산소저감에 의한 영향은 유해가스에 의한 영향과 복합적으로 발생되므로 산소저감에 따른 위험은 식 (3)으로 구한다.

$$F_{IO_2} = \frac{t}{e^{8.13 - 0.54(20.9 - \%O_2)}} \quad (3)$$

여기서, %O₂는 산소의 농도(%)이다.

- (d) CO가스

CO농도 및 노출시간에 따른 혈중 COHb의 농도(%)는 식 (4)로 구한다.

$$\%COHb = 3.317 \times 10^{-5} (\text{ppm CO})^{1.036} \times V \times t \quad (4)$$

CO가스의 흡입이 인체에 미치는 영향은 위험도 F_{ICO}로 나타내며 식 (5)로 위험도를 평가한다.

$$F_{ICO} = \frac{\%COHb}{D} = \frac{8.2925 \times 10^{-4} (\text{ppm CO})^{1.036} t}{D} \quad (5)$$

여기서, F_{ICO} : 의식불명에 이르게 하는 위험도, D : 의식불명에 이르는 COHb농도(%)로 본 프로그램에서는 30%로 설정하였다.

- (5) 화재시 연기의 온도에 의한 영향을 가중하여 FED 값으로 계산한다.

$$F_h = \sum \frac{t}{e^{5.1849 - 0.0273T}} \quad (6)$$

진술한 유해가스 및 열환경에 대한 FED평가는 Purser 식을 사용하였으며 대피자 개인에 대한 인체에 영향을 미치는 각 인자의 시간적 영향은 유해가스 영향평가값과 열환경평가값을 각각 적용하여 식 (6)과 (7)을 최종평가지표로 설정하였다.

$$F_{IN} = \sum(F_{ICO} + F_{HCN}) \times V_{CO_2} + \sum F_{IO} \quad (7)$$

3. 프로그램의 구성

본 연구는 미국표준연구소에서 개발된 화재전용 해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator)는 세계적으로 성능위주 화재위험성평가 프로그램으로서 각광받고 있으며 해석은 사용자의 취향에 따라 정성적 또는 정량적으로 평가되고 있다. 정성적 평가의 경우는 Smokeview라는 가시화 도구를 사용하여 시간 변화에 따른 공간 정보를 temp., soot, CO₂, CO 등과 같은 각각의 parameter를 상대적 가시화로 단순 비교 평가할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 정량적 평가의 경우 fds2ascii를 사용하여 smokeview에서 보여주는 동일한 공간정보를 텍스트로 출력하고 사용자의 의도에 따라 분석하는 것으로 사용자측의 해석에 따라 다양한 결과를 얻어 낼 수 있다.

3.1. 프로그램의 개요

프로그램의 기능별 개요는 다음과 같다.

- (1) FDS의 fds2ascii.exe 출력물 기반의 A* path-finding algorithm 적용
- (2) 건축구조물의 특성값 입력물의 층수를 입력하고 각 층의 높이를 자유롭게 설정 입력가능.
- (3) FDS상 정의된 구조물의 자동 삽입 기능.
- (4) 사람의 삽입 및 성별에 따른 분포 가능.
- (5) 계단의 삽입 및 삭제 기능
- (6) 출구의 삽입 및 삭제 기능
- (7) 대피자 타입별로 사망 기준값 입력 기능
- (8) 결과물의 좌표별 위험정보에 대한 정보 입력 기능
- (9) 줌인, 줌아웃의 5단계 기능
- (10) 결과물에 대한 text문 출력기능

3.2 맵 편집 프로그램(Map editor)

맵 편집 프로그램에서는 건축물 내부의 전체 공간을 셀 단위의 격자 형태로 분할하여 내부 구조를 명확히 명시할 수 있는 기능을 포함하는 프로그램이며 주요 지원 기능은 다음과 같다.

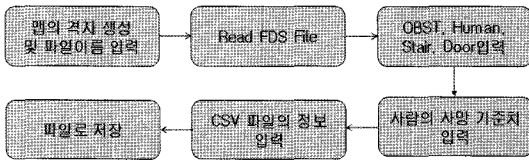


Fig. 1. Sequence of map editing program.

- (1) 층간 구분
- (2) FDS 설정 파일의 맵 자동 구성
- (3) 구성된 맵 도면 데이터를 출력 파일로 저장
- (4) 장애물과 사람 배치
- (5) 각 사람의 타입에 대한 사망 기준치 입력
- (6) 좌표별 위험정보 파일에 대한 정보 저장

Fig. 1은 맵 편집 프로그램의 데이터 입력 및 구동순서를 나타낸다.

3.3. FDS 파일로부터의 맵 구성

FDS의 ascii 변환 파일을 실행하여 얻어진 좌표별 위험정보 결과를 읽어 맵의 격자를 자동 구성하며 입력데이터는 FDS좌표 (x,y,z)에 대응하는 정보값으로 temp(x,y,z), oxygen(x,y,z), carbon dioxide(x,y,z), carbon monoxide(x,y,z)로 구성된다. FDS파일에서 정의된 구조물을 읽어 들일 때의 기준은 사람의 호흡선 높이인 1.5m를 기준으로 설정하였다. 다층의 경우 정의된 구조물의 높이 좌표는 각 층의 바닥기준 1.5m의 높이를 포함하고 있을 경우에 한하여 정의된 구조물을 맵에 위치시키며 대피동선의 정의된 빈 공간은 높이 좌표가 각 층의 바닥면 기준 0m지점에서부터 1.5m까지를 포함할 경우 정의된 빈 공간을 적용하여 정의된 구조물로부터 대피동선이 가능하도록 맵을 구성하였다. Fig. 2는 FDS 파일로부터 맵을 구성한 예를 나타낸다.

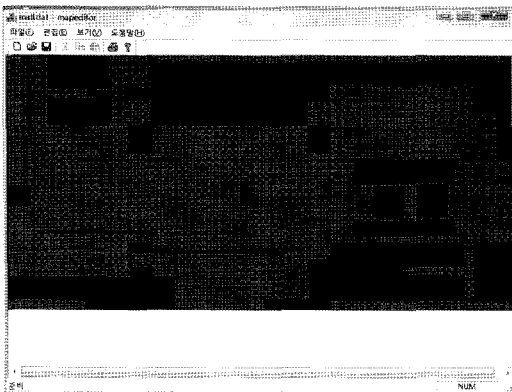


Fig. 2. Example of map which is importing from FDS file.

Table 1. Reference of human dimension

section	shoulder(m)	chest(m)
Mail(Adult)	0.50	0.32
Femail(Adult)	0.44	0.28
child	0.38	0.24
old person	0.46	0.30

3.4. 대피자 배치

본 연구에서는 대피자의 외형에 대한 기준으로 한국표준연구소의 통계를 활용하여 성별, 아이, 노인의 구분에 따라 사람의 실제 크기인 가슴의 두께와 어깨 너비가 적용되었다.

사람의 배치방식은 마우스 오른쪽 버튼의 클릭으로 현재 속성 값에 따라 마우스가 클릭된 지점을 사람의 중심으로 하여 사람을 입력할 수 있고 마우스 왼쪽 버튼의 클릭으로 선택된 사람의 정보를 볼 수 있도록 하였다. 또한, 제공된 공간상에 사람을 입력하는 마우스의 오른쪽 버튼을 클릭할 때 입력된 다른 사람과의 위치 관계를 고려해 사람을 위치시킬 수 있는지 여부에 대한 판별이 가능하다. 또한 배치된 장애물을 고려하여 사람의 중심과 크기로 입력된 사람이 장애물에 겹치지 않는지 검사하여 장애물에 겹치지 않는 경우에 한하여 입력할 수 있다. Table 1은 대피자 별 어깨 폭과 가슴 폭의 기준^{4,5)}을 나타낸다.

3.5. 대피자 유형에 대한 사망 기준치 입력

본 프로그램에서는 향후 독성과 연기와의 연계성을 고려하여 대피자가 열 및 독성가스로 인해 사망하는 기준치를 입력하는 기능을 부가하였다. 성인남성, 성인여성 및 노인과 어린이 각각의 사망 기준치 설정이 가능하도록 하였다.

3.6. 대피 가시화(Map visualizer)

대피 가시화는 Map editor의 입력값을 기준으로 실질적으로 위험도 계산 및 피난 동선의 계산, 결과값 출력 등의 역할을 하는 프로그램이다.

주요 기능은 다음과 같다.

- (1) Map editor의 출력 파일 로드
- (2) 각 셀에 대한 속성 값에 따라 속성에 대한 색상을 가진 큐브 생성 큐브의 높이는 기본적으로 건물의 높이로 생성함
- (3) 사람에 대한 메시 파일을 로드하여 사람의 기본적인 크기인 1.7m로 사람 생성
- (4) 계단과 문에 대한 큐브를 생성



Fig. 3. Sequence of visualization program.

- (5) CSV파일의 정보를 바탕으로 위험도 계산
- (6) 대피 결과를 파일에 기록

Fig. 3은 대피 가시화 프로그램의 구동순서를 나타낸다.

3.7. 3차원 데이터 Rendering 기능 및 FDS 링크

Map Editor의 출력파일을 로드하여 생성된 3차원 데이터들을 Fig. 4와 같이 렌더링 한다. FDS 결과물을 링크하는 것은 결과물에 포함된 일정 시간 간격으로 추출된 데이터를 읽어 들여 사람의 독성가스 및 연기에 대한 위험도, 연기농도에 따른 속도감소를 계산하기 위한 모듈이다. Fig. 5는 FDS 결과물을 링크하여 시뮬레이션 하는 모듈의 전체 흐름도를 나타낸다.

3.8. 대피자의 위험도 계산

화재가 발생하면 사람들은 탐색된 경로를 따라 대피하게 되며 대피에 소요되는 시간이 경과 할수록 사람에게 주어지는 위험도가 증가하게 된다.

위험도가 사람의 사망 기준치에 도달하면 대피 중인 사람은 사망 상태로 전환되며 대피를 중지하게 된다. 사망 기준치는 시뮬레이션 설정 과정에서 통계치에 근거하여 주어진다.

시뮬레이션 환경 설정 과정에서 맵에서의 각 셀은 화재 발생 시점부터 시간의 경과에 따른 위험인자에 대한 오염도 수치를 가지도록 하였다. 오염

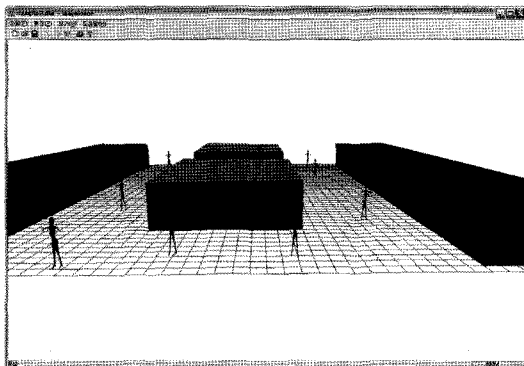


Fig. 4. 3D rendering example from map editing program.

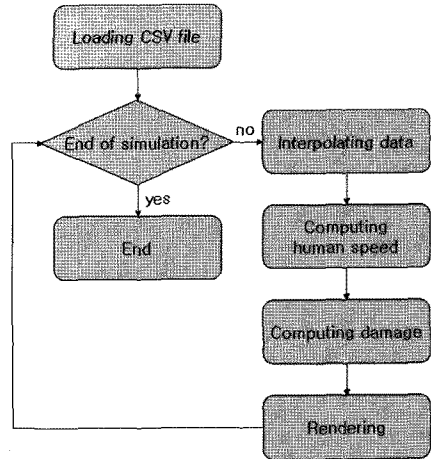


Fig. 5. Total flow chart of FDS result importing.

도 수치는 산소, 일산화탄소, 이산화탄소, 온도, 연기농도 5가지의 변수로 이루어지며 해당 셀을 통과하는 사람에게 변수를 적용 위험성평가 모듈로 계산된 위험도를 가하게 된다. 시뮬레이션에서는 매 시간간격에 대하여 사람이 대피 과정에서의 시간 경과로 인해 위험도의 누적치가 사망 기준치에 도달했는지의 여부를 확인하며 생존일 경우에도 누적 위험도가 일정 수준 이상이면 대피 속도를 감소시키게 된다.

사망 판정을 위한 연기에 의한 위험성 평가 척도인 FED은 초기에 0으로 지정한다. 시간의 경과에 따라서 위험인자인 일산화탄소, 산소, 이산화탄소, 및 온도의 계산값으로부터 시간 경과에 따른 FED의 값은 식 (7)로 계산되었다.

4. 건축구조물 적용사례

4.1. 적용건축물의 제원 및 시뮬레이션 조건

본 개발 프로그램의 유효성을 검증하기 위하여 건축물에 적용하였으며 시뮬레이션 대상인 도서관의 제원을 Table 2에 나타내었다. 또한, FDS의 화재 시뮬레이션 입력조건을 Table 3에 나타내었으며 화재실의 소화설비는 스프링클러 설비가 설치되어 있는 조건으로 설정하였다. Table 4에 스프링클러의 위치 및 작동조건을 나타내었다.

4.2. 위험성 평가

도서관 건물내부의 시간에 따른 화재 형상 및 열적 유동의 수치해석은 미국 NIST에서 개발한 CFD 해석프로그램인 FDS(ver 4.07)를 사용하였다. 수치

Table 2. A sectioned drawing of dormitory

구분	내용
내 부 도	
	제원
	66.0 × 70.8 × 3.4(m ³ m ²)

Table 3. Simulation input parameter(FDS)

초기 설 정 값	Ini.Temp	25 (°C)
	Fire Source	Wood
	Fire Con.	Crib made of geometrically arranged sticks
	HRR	3,600 (kW)
	Simulation Time	300sec
Grid No.	1,985,940개 (330×354×17)	

Table 4. Sprinkler position and its condition

Position			
	도서관 지하 1층		
Dim.	38.0 × 16.6 × 2.4 (m ³)		
condition	No.	56EA(Only at the firing room)	
	Spec.	Direction	downward
		Reacting Temp.	72 °C
		R T I	50sec
		Radius of spread	2.3m

해석에 사용된 격자수는 1,985,940(330 × 354 × 17) 개로 설정하였으며, 격자의 형태는 Hexa로 설정하였다. 화재의 크기 및 성장속도는 SFPE “Principles of Smoke Management”에서 제시하는 Crib made of geometrically arranged sticks의 화재실험 결과를 기

준으로 설정하였다.

정성적인 평가 방법과 좌표별 ASCII Output Data를 이용한 정량적인 분석방법을 이용하여 평가준으로 설정을 하였으며, Reaction material은 FDS에서 제공하는 기본 Database상의 물질인 Wood로 선정하였다.

본 프로그램의 대피자의 위험성평가는 FDS에서 구해진 시간에 따른 대피공간정보값으로 식 (6)과 (7)로서 위험성평가지수로 제공되며 도서관을 대상으로 본 연구에서 개발된 SOS프로그램을 사용하여 대피자의 위험성평가에 대한 결과를 Fig. 6~8에 나타내었다. Table 4는 SOS프로그램에 적용된 설정값을 나타내며 인원의 배치는 NFPA101B에 적용된 용도별 인원밀도로 적용하였으며 화재발생 90초 후 정보와 함께 대피가 시작하는 것으로 설정하였다.

Fig. 6은 시간경과에 따른 재실자의 대피위치를 대피가시화 결과를 나타낸다. 본 위험성평가에서는 대피자의 안전율을 고려하여 Critical Damage를

Table 4. Simulation input parameter(SOS)

Input person No.	1394persons
Response Time	90sec

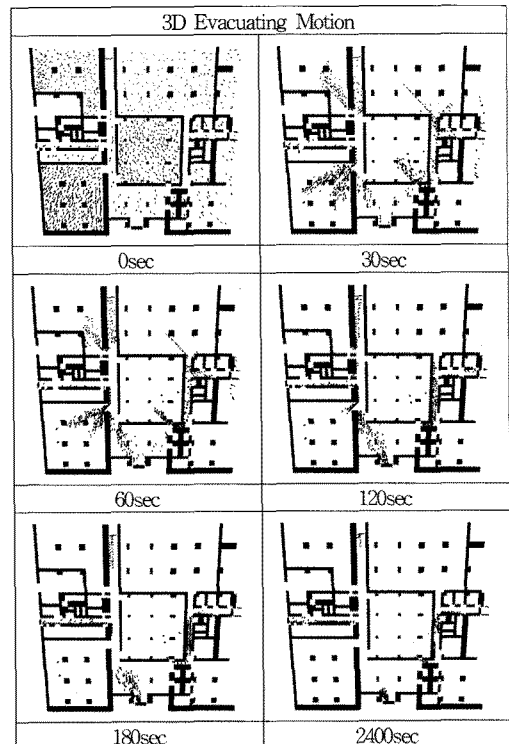


Fig. 6. Evacuee position by the time advance,

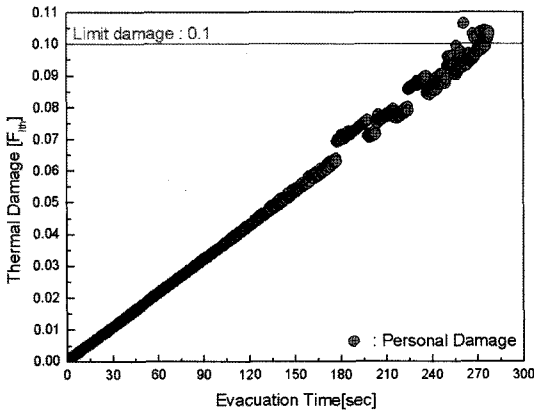


Fig. 7. Personal thermal damage from the result of SOS program by the time advance.

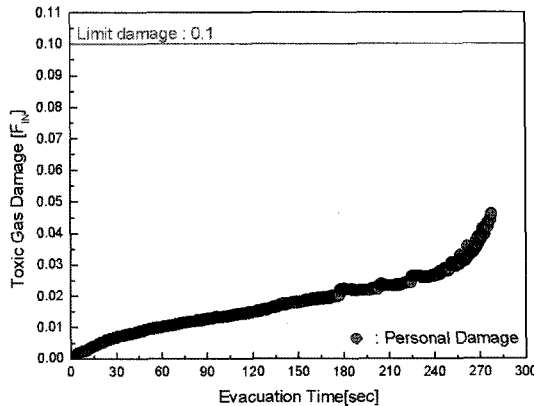


Fig. 8. Personal toxic gas damage from the result of SOS program by the time advance.

0.1로 설정하였으며¹⁾ 이 값을 초과할 경우 사망으로 판단하도록 설정하였다. 이상의 조건을 기준으로 위험성 평가의 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다. Fig. 7은 대피자 대피시간을 기준으로 열적피해에 대한 대피자 위험성 평가지표 값을 나타내며, Fig. 8은 대피자 시간경과에 따른 대피자 개인별 독성가스 위험성 평가지표 값을 나타낸 결과이다. 대상건물을 대피하는 대피자는 온도에 의한 대피 위험도 한계값인 0.1을 넘게 되는 경우가 23명이 발생하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 [2006.2.13 497]의 제14조에 의거 6층 이상의 건축물에는

배연설비의 의무화에 따른 설계시스템구축에 대한 활용이 가능하다.

- 2) 화재시 대피자 개인별 대피 동선의 온도 및 가스분포 값에 따라 정량적 위험성 평가가 가능하며 기존의 공간평가방식에 비하여 개인별 위험성평가가 가능하다.
- 3) 화재현상에 대한 분석과 국내 화재대응/제어 설비의 성능개선을 통하여 화재발생시 인명피해를 최소화함은 물론, 대형화재사고 발생의 방지에 기여가능하다.

감사의 글 : 본 연구는 2007년도 중소기업산학연 컨소시엄 지원 사업으로 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Kevin McGrattan, editor. "Fire dynamics simulator (version 4).technical reference guide", NIST(2005).
- 2) David A, Purser, "The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, chapter Toxicity Assessment of Combustion Products", Third Edition, National Fire Protection Association, pp. 2-83~171, 2002.
- 3) John H. Klote, James A. Milke, "Principles of Smoke Management", ASHRAE, SFPE, 2002.
- 4) 이창민 외 다수, "제5차 한국인 인체치수조사사업 보고서(2차년도 최종보고서)", 산업자원부 기술표준원, 2004.11.
- 5) 박창영 외 2명, "인체 모듈과 특성을 고려한 인간의 피난 행동에 관한 연구", 대한건축학회 창립 60주년 기념 학술발표대회논문집, pp. 231~234. 2005.
- 6) Takashi Nagatani 외 1인, Statistical characteristics of evacuation without visibility in random walk model PHYSICAA, pp. 638~648, 2004.
- 7) A.K. Gupta*, P.K. YadavSAFE-R, a new model to study the evacuation profile of a building, Fire Safety Journal, 39, pp. 539~556, 2004.
- 8) Ryoichi Nagai, Takashi Nagatani, Motoshige Isobe, Taku Adachi, Effect of exit configuration on evacuation of a room without visibility, Physica A 343, pp. 712~724, 2004.
- 9) Tzu-Sheng Shen, ESM: a building evacuation simulation model, Building and Environment 40, pp. 671~680, 2005.