FDS_EVAC에 적용된 독성가스모델(FED)이 피난에 미치는 영향 분석 및 개선에 대한 연구

김홍진 · 배승용 · 최영기 · 홍기배* · 유홍선*

중앙대학교 기계공학부 · *한국교통대학교 에너지시스템공학과
(2012. 1. 16. 접수 / 2013. 1. 8. 채택)

Numerical Analysis on the Effect of Improved Fractional Effective Dose(FED) for Evacuation by FDS_EVAC

Hong Jin Kim · Sung-yong Bae · Young Ki Choi · Ki Bae Hong* · Hong Sun Ryou*

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation

(Received January 16, 2012 / Accepted January 8, 2013)

Abstract : When fire occurs in complex or building, toxic gas is important factor for evacuation because it cause death of evacuees. The effect of toxic gas which effects human motion is calculated using Purser's Fractional Effective Dose(FED). The FDS_EVAC is used for evacuation. However, FED of FDS_EVAC has some problem of application because it dose not considers evacuees's gender and age groups but using single subject. In this study, numerical analysis using modified FED which considers gender and age group of evacuees was performed. We investigate the effect of improved FED on the evacuation. We applied evacuation analysis to exhibition centre where the evacuees was set one thousand five hundred people. The FED is increasing with children 2%, male 17%, female 4%, adult 13% and elderly people 22%. Fatality is increasing due to increased FED.

Key Words : FED, evacuation, FDS

1. 서론

최근 국내의 건축물은 집중화와 이용형태의 다양함 등으로 인하여 대형화, 고층화, 복합화로 되어 가면서 대규모의 복잡한 형상을 가진 초고층 구조물이 건축되고 있다. Fig. 1¹⁾과 같이 초고층 건축물들은 점점 증가하고 있지만, 화재나 재난에 대한 위험성도 같이 증가하고 있다. 해외에 발생한 초고층 건축물 사고사례는 2001년 미국 World Trade Center에서 발생한 9.11 테러는 2500~3000명의 엄청난 인명 피해가 발생했으며, 2004년 베네수엘라에서 발생한 56층 빌딩 화재로 16개 층이 전소하였으며, 2010년 상하이에서 발생한 고층건물 화재로 53명이 사망하였다. 국내에서는 1971년 서울에서 발생한 대원각 호텔 화재는 약 200명의 인명피해가 발생하였으며, 2010년 부산에서 발생한 고층건물 화재는 인명 피해는 없었지만 약 54억의 재산피해가 생겼다. 이와 같이 초고층 건축물의 화재는 많은 인명 및 재산 피해가 발생하였지만 최근까지 국내 소방시설 설계는 사양중심(Prescriptive Based)로 법의 세부적인 지침과 기술, 고

Fig. 1. Increase of building over 31 stories in Korea.

시에 의해서 설계를 하여 화재특성을 고려하지 않은 획일적이며 경험적이었다. 이러한 설계에 반하여 2011년도에 시행된 성능 위주 설계(Performance-Based Fire Design)²⁾은 사양중심으로 설계된 화재안전성능 보다 동등 이상의 화재안전성능을 확보토록 설계를 하는 것으로 모델링(Modeling)과 시뮬레이션 등의 공학적 도구와 연구를 바탕으로 화재안전성능을 확보를 요구하고 있다. 현재 건축물의

*Corresponding Author: Hong Sun Ryou, Tel : +82-2-820-5280, E-mail : cfdmec@cau.ac.kr
Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University, 84, Heukseok-ro, Dongjak-Gu, Seoul 156-756, Korea

피난 · 방화구조 등의 기준³⁾에 대한 화재안전성능을 평가
를 위해서 화재 및 피난시물레이션을 사용되고 있으며 현
재 많은 연구가 진행되고 있다.

Fluent와 EXODUS를 사용하여 대구지하철 화재사고에
대해 피난 안전성을 분석하여 승객 피난 통로의 최적설계
등에 활용하였으며⁴⁾, EXODUS를 사용하여 신체 및 심리적
변수가 피난소요시간에 미치는 민감도를 분석하고, 민감하
게 반응하는 주요 변수를 추출하여 군중행동 수치 모델에
반영하였다⁵⁾. SIMULEX와 EXODUS의 피난 알고리즘에
적용된 서브모델(재실자 타입, 이동, 심리적 특성)에 대해
심층 비교 분석하였다⁶⁾. 피난 프로그램을 국내 고유의 사
정 및 한국인의 특성에 맞는 Human Model 알고리즘 개발
계획을 하였다⁷⁾. 보행속도가 피난 안전에 미치는 영향을
개인의 이동, 단체 이동, 문 통과 실험 등을 진행하여 시
물레이션과 비교하였다⁸⁾. FDS+EVAC의 사람 이동 모델의
주요 인자들인 초기 속도, social force, relaxation time 등을
변경하여 시물레이션 수행하여 문, 복도 통과 속도를 비
교하였다⁹⁾.

피난 프로그램은 화재로부터 생성되는 열, 독성가스, 연기
등의 정보를 받아 피난 안전성에 영향을 준다. 하지만 지금까
지 수행된 연구는 독성 가스가 피난 시물레이션 시 피난에 주는
영향에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구
에서는 피난 대상에 적합한 독성효과(Fractional Effective
Dose)¹⁰⁾를 적용하여 피난 소요시간이나 사망시간 등의 피난
특성을 파악하고자 한다. 또한 기존의 독성효과와 수정된 독
성효과가 적용된 시물레이션 결과와 비교 분석하여 피난 프
로그램의 독성 영향에 대한 개선 방향을 제시하고자 한다.

2. 본 론

본 연구에서는 화재와 피난 과정을 동시에 계산하는
피난 해석 프로그램인 FDS_EVAC¹¹⁾을 사용하여 대형 공
간에서 화재 시 피난 대상의 계층별, 나이, 성별 등에 따
라 적합한 FED를 적용하여 수치해석을 수행한다.

Fig. 2. The shape of the human body is approximated by a com-
bination of three overlapping circle.

Table 1. Unimpeded walking velocities and body dimension in FDS+
Evac($d_s = R_d - R_s$)

Body type	R_d (m)	R_f / R_d (-)	R_s / R_d (-)	d_s / R_d (-)	Speed(m/s)
Adult	0.255±0.035	0.5882	0.3725	0.6275	1.25±0.30
Male	0.270±0.020	0.5926	0.3704	0.6296	1.35±0.20
Female	0.240±0.020	0.5833	0.3750	0.6250	1.15±0.20
Child	0.210±0.015	0.5714	0.3333	0.6667	0.9±0.30
Elderly	0.250±0.020	0.6000	0.36000	0.6400	0.80±0.30

Fig. 3. The concept of the social force in FDS_EVAC.

2.1. 피난해석 모델

2.1.1. 인간 이동 모델

FDS_EVAC는 2차원 피난 격자를 사용하여 개별 피난
자의 움직임을 계산한다. 피난 대상의 크기는 Simulex 프
로그램¹²⁻¹⁵⁾ 및 MASSEgress 프로그램¹⁶⁾ 그리고 CrowdDMX
모델^{17,18)}에서 제안한 Fig. 2와 같이 사람 몸의 모양을 모
방한 3개의 동심원에 의해 표현된다. FDS_EVAC에서 피
난 대상에 따른 신체의 크기와 보행속도는 Table 1과 같다.
성인남성(Male), 성인여성(Female), 어린이(Child), 노인(El-
derly)의 신체 크기와 보행속도 분포는 Simulex와 동일하게
주어진다. 성인(Adults)은 성인남성과 성인여성의 분포를 중
첩하였다. 피난 인원의 움직임 및 작용 힘은 Fig. 3과 같이
간단하게 묘사되어 있다. 피난 인원의 이동 모델은 Hel-
bing¹⁹⁾이 제안한 아래의 식으로 표현된다.

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i(t)}{dt^2} = \mathbf{f}_i(t) + \boldsymbol{\xi}_i(t) \quad (1)$$

여기서, 식 (1)의 $\mathbf{x}_i(t)$ 는 시간이 t일 때 피난인원의 위치벡
터를 나타내고, $\boldsymbol{\xi}_i(t)$ 는 피난인원 간의 충돌을 방지하기 위
해 사용되는 random force를 나타내며, $\mathbf{f}_i(t)$ 는 각각의 피난인
원이 다른 인원과 벽 등으로 받는 힘을 나타낸다.

$$\mathbf{f}_i = \frac{m_i}{\tau_i} (\mathbf{v}_i^0 - \mathbf{v}_i) + \sum_{j \neq i} (\mathbf{f}_{ij}^{soc} + \mathbf{f}_{ij}^c + \mathbf{f}_{ij}^{at}) + \sum_w (\mathbf{f}_{iw}^{soc} + \mathbf{f}_{iw}^c) + \sum_k \mathbf{f}_{ik}^{at} \quad (2)$$

여기서, 식 (2)의 $\mathbf{v}_i^0$ 는 각 피난인원의 특성 보행속도, $\mathbf{v}_i$ 는
실제속도, $\mathbf{f}^{soc}$ 는 social force, $\mathbf{f}^c$ 는 contact force, $\mathbf{f}^{at}$ 는 at-
traction force를 나타낸다. 우변의 첫 번째 항은 피난하는
피난인원의 동기력(motive force)를 나타내며, 두 번째 항
은 피난인원 간의 상호작용을 나타내며, 세 번째 항은 피
난인원과 벽과의 상호작용을 나타내며, 네 번째 항은 화
재와 피난인원 간의 반발작용을 나타낸다.

2.1.2. 독성 모델

FDS_EVAC은 화재 생성물의 독성 영향을 Purser의 FED¹⁰⁾
를 이용하여 계산한다. FED계산을 위해 중독성 가스 CO,
CO₂, O₂의 농도를 사용한다.

$$FED_{tot} = (FED_{CO} \times HV_{CO_2}) + FED_{O_2} \quad (3)$$

$$FED_{CO} = \frac{3.317 \times 10^{-5} \times V \times C_{CO}^{1.036}}{D} \quad (4)$$

$$HV_{CO_2} = \frac{\exp(0.1903 \times C_{CO_2} + 2.0004)}{7.1} \quad (5)$$

$$FED_{O_2} = \frac{1}{60 \times \exp[8.13 - 0.54(20.9 - C_{O_2})]} \quad (6)$$

여기서, RMV(Respiratory minute volume)는 분당 호흡량(L/min), C_{CO} 는 CO의 농도, C_{CO_2} 는 CO₂의 농도, C_{O_2} 는 O₂의 농도를 나타낸다.

각 FED_{CO} , HV_{CO_2} , FED_{O_2} 를 계산하여 피난인원의 FED_{tot} 값이 1이 넘을 때 무능력화 되어 속도 v_i^0 는 0이 되어 주위 환경, 다른 피난인원과의 상호작용을 하지 않는다.

위의 식 중 FED_{CO} 의 RMV는 나이, 키, 몸무게, 성별, 상태 등의 조건에 따라 달라진다. 현재 FED_EVAC에서 RMV 상태는 가벼운 운동 상태로 가정하여 25 L/min로 항상 일정한 값으로 계산된다. 하지만 실제 피난자의 성별 및 연령층이 다양하여 일정한 RMV를 적용하는 것은 문제가 된다. 따라서 본 연구에는 RMV에 대한 이론적 배경과 수정된 RMV를 제시하였다.

피난 대상의 연령층은 5~16세까지 어린이, 17~70세까지 성인남성과 성인여성, 성인은 성인남성과 성인여성의 평균, 70세 이후는 노인으로 구분하여 각 연령층 및 성별에 맞는 RMV를 적용하였다.

RMV는 아래의 식으로 계산된다.

$$RMV(L/min) = Respiratory Rate(breaths/min) \times Tidal volume(L) \quad (7)$$

나이, 성별 및 상태에 따른 분당 호흡수(Respiratory rate)와 일호흡용적(Tidal volume)을 피난 대상의 연령층 및 성별로 각 그룹을 나누어 그룹별로 평균을 내어 Table 2²⁰⁾의 분당 호흡수와 Table 3²⁰⁾의 일호흡용적과 같이 주어진다.

본 논문에서 FDS_EVAC에 적용된 조건은 가벼운 운동 상태이기 때문에 Table 4²⁰⁾와 같이 가벼운 운동 상태 일때의 분당 호흡수와 일호흡용적을 FDS_EVAC의 function code를 수정하여 적용하였다.

FDS_EVAC을 이용하여 코엑스의 전시장을 대상으로

Table 2. Respiratory rate in human body

Body type	Respiratory Rate(breaths/min)	
	Rest	Light work
Adult	16	23.6
Male	16	23.6
Female	16	23.6
Child	22	33.6
Elderly	20	38.2

Table 3. Tidal volume in human body

Body type	Tidal volume(Liter)	
	Rest	Light work
Adult	0.628	1.4
Male	0.715	1.59
Female	0.541	1.21
Child	0.377	0.84
Elderly	0.587	1.31

Table 4. Respiratory minute volume in human body(light work)

Body type	RMV
Adult	32.25
Male	37.25
Female	28.22
Child	28.28
Elderly	38.21

Fig. 4. Computational domain, fire source and exit.

하였다. Fig. 4와 같이 2개의 전시장이 있으며 총 4곳의 출입구가 존재한다. 각 전시장안의 부스를 고려하여 피난 대상이 이동할 수 있는 통로의 거리는 3.2 m로 설정하였다. 출입구의 경계 조건은 압력 경계 조건을 사용하였고, 출입구를 제외한 모든 공간에 대해서는 벽으로 설정하여 점착 조건을 사용하였다. Grid sensitivity test를 수행하여 본 연구에서는 0.2 m의 격자 크기를 설정하였다.

화재 시나리오는 Fig. 4와 같이 A 전시장의 가운데에 화원을 설정하였다. 화원의 연료는 의자 등 사무용품 등에 광범위하게 많이 사용되는 폴리우레탄(Polyurethane)으로 하였으며, 최악의 경우를 고려하여 화재 성장속도는 Ultra-fast, 발열량은 10MW로 설정하였다. 폴리우레탄의 연기와 CO 수율은 각각 0.1, 0.031로 설정 하였다²¹⁾.

피난 시나리오는 A 전시장에 1000명, B 전시장에 500명 총 1500명의 피난인원을 설정하였다. 피난 대상 별로 RMV 값이 다르고 기존의 FDS_EVAC에 적용된 RMV와 개선된 RMV의 결과를 비교하기 위하여 피난 대상을 각각 성인, 성인남성, 성인여성, 어린이, 노인으로 총 5 가지 경우를 수행하였다. 화재감지는 대상인원의 위치에서 연기밀도(mg/m³)와 화재감지기의 감지 시간을 이용하여 피난 시작시간을 설정하였다. 화재 감지 후 피난 인원은 가장 가까운 출입구

를 향해 피난을 시작한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연기의 이동 및 Visibility

Fig. 5는 화재 발생 이후 경과시간에 따른 연기의 이동을 나타냈다. 연기는 천장을 따라 전파되어 약 300초 후 A 전시장 전체로 전파되었으며, 천장부터 연기가 축적되어 약 440초 후에 A 전시장 안의 연기는 바닥까지 가득 차게 되어 A 전시장 안의 시야(visibility)가 감소하게 된다. 가득 찬 연기가 출입구를 통해 외부로 향하는 통로까지 전파되어 통로의 시야 역시 감소하게 된다.

이러한 시야의 감소는 피난인원의 보행속도를 감소시켜 피난 시간을 증가시키는 원인이 된다.

FDS에 적용된 보행속도와 시야는 다음 식과 같다.

$$v_i^0(K_s) = \text{Max} \left\{ v_{i,\min}^0, v_i^0 \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} K_s \right) \right\} \quad (8)$$

$$S = C/K \quad (9)$$

여기서 K_s 는 감광계수이고, α 와 β 는 각각 0.706과 -0.057이다²²⁾. C 는 물체의 형태에 따른 무차원 특성 상수이며, K 는 광소멸 계수(light extinction coefficient)이다.

Fig. 5. The smoke propagation in exhibition.

Fig. 6. The visibility at the distance from the fire.

계산된 시야는 Fig. 6에 나타났다. Fig. 6은 연기층의 호흡안전선 1.6 m 높이에서 화원으로부터 거리에 따른 A 전시장 안의 시야를 나타냈다. 화원으로부터 가장 가까운 1 m 거리에서 시야는 화재에 의한 부력 때문에 값의 변동이 심하게 나타났지만 시야가 가장 빠르게 감소하였다. 화원으로부터 거리가 멀어질수록 시야의 감소가 느리지만 연기가 하강하는 300초 이후 A 전시장 안의 모든 시야가 2 m 이하로 감소하였다. A 전시장 안에 연기가 가득 차는 약 440초에 모든 시야가 1 m 이하로 감소되어 피난 소요 시간을 증가시켰다.

3.2. 온도 분포

Fig. 7은 1.6m 높이에서 화재 발생 이후 경과시간에 따른 온도분포를 나타냈다. 초기 전시장 안의 온도는 20℃를 유지하지만 화재 발생 이후 화재에 의한 열기로 인하여 화원 주변부터 온도가 빠르게 상승하여 최고 120℃까지 올랐으며, 화재시 열 노출로 인한 기도화상이 발생할 수 있는 거주한계온도인 60℃는 400초 이후에 도달하여 피난대상이 고온의 열기로 인한 화상의 위험성이 있는 것으로 나타났다.

3.3. 피난 시간

Fig. 8는 각 사례별 피난소요시간을 나타낸 것이다. 성

Fig. 7. The temperature distribution in exhibition.

Fig. 8. The evacuation time in exhibition.

인은 화재 발생 후 300초 경과시 전체 피난인원의 33%가 피난을 완료하였고, 500초 후에는 94%, 경과 시간 867초 후에 1500명 전원이 피난을 완료하였다.

성인남성은 화재 발생 후 300초 경과시 전체 피난인원의 30%가 피난을 완료하였고, 600초 후에는 94%, 800초 후에는 93%, 경과 시간 860초 후에 1500명 전원이 피난을 완료하여, 성인보다 7초 단축되는 것으로 나타났다.

성인여성은 화재 발생 후 300초 경과시 전체 피난인원의 25%가 피난을 완료하였고, 500초 후에는 94%, 경과 시간 889초 후에 1500명 전원이 피난을 완료하여, 성인보다 32초 증가, 성인남성보다 39초 증가 되는 것으로 나타났다.

어린이는 화재 발생 후 300초 경과시 전체 피난인원의 7%가 피난을 완료하였고, 500초 후에는 69%, 경과 시간 930초 후에 1500명 전원이 피난을 완료하여, 성인보다 63초 증가, 성인남성보다 70초 증가, 성인여성보다 41초 증가 되는 것으로 나타났다.

노인은 화재 발생 후 300초 경과시 전체 피난인원의 9%가 피난을 완료하였고, 500초 후에는 68%, 경과 시간 991초 후에 1500명 전원이 피난을 완료하여, 성인보다 124초 증가, 성인남성보다 131초 증가, 성인여성보다 102초 증가, 어린이보다 61초 증가 되는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 피난대상의 이동속도 차이로 인하여 이동속도가 가장 빠른 성인남성이 가장 빠르게 피난을 완료하였으며, 이동속도가 가장 느린 노인이 피난 시간도 가장 느렸다. 또한 화재 발생 초기에는 연기에 의한 시야 감소 영향이 적어 피난이 신속하게 이루어지지만 초기 이후 연기가 전시장 전체로 전파되어 이동속도를 느려지게 하여 피난시간이 증가하였다.

기존의 FED와 개선된 FED의 총 피난소요시간은 차이가 거의 없다. FED값이 1 이하일 경우 보행속도에 영향을 주지 않기 때문이다.

3.4. Fractional Effective Dose 및 사망자

Fig. 9. Comparison of improved FED and previous FED on adult.

Fig. 10. Comparison of improved FED and previous FED on male.

Fig. 11. Comparison of improved FED and previous FED on female.

Fig. 9~13는 기존의 FED와 개선된 FED의 결과를 비교한 것이다. 개선된 성인의 FED는 기존의 FED보다 약 13% 증가하였으며, 최초 사망자는 811초에 발생하였다. 사망자 수는 Table 5와 같이 2명 발생하였다. 기존의 RMV와 개선된 RMV의 차이가 큰 만큼 FED 결과 역시 큰 차이가 발생하였다. 하지만 FED의 차이에 비하여 사망자 수는 차이가 거의 발생하지 않았다. 이는 최초 사망자가 발생한 시간과 최종 피난시간의 차가 짧기 때문이다. 피난 시간이 지연됐다면 사망자 수도 많은 차이가 발생했을 것이다.

개선된 성인남성의 FED는 기존의 FED보다 약 17% 증가하였으며, 최초 사망자는 766초에 발생하였다. 사망자 수는 Table 5와 같이 13명 발생하였다. 성인남성 역시 기존의 RMV와 개선된 RMV의 차이가 큰 만큼 FED도 많이 증가하였으며 사망자 수 또한 차이가 많이 발생하였다.

Fig. 12. Comparison of improved FED and previous FED on child.

Fig. 13. Comparison of improved FED and previous FED on elderly.

개선된 성인여성의 FED는 기존의 FED보다 약 4% 증가하였으며, 최초 사망자는 840초에 발생하였다. 사망자 수는 Table 5와 같이 2명 발생하였다. 개선된 성인여성의 RMV는 기존의 RMV와 차이가 미비하여 FED의 차이도 미비하게 나타났으며, 사망자 수 또한 차이가 거의 없다.

개선된 어린이의 FED는 기존의 FED보다 약 2% 증가하였으며, 최초 사망자는 894초에 발생하였다. 사망자 수는 Table 5와 같이 1명 발생하였다. 개선된 어린이의 RMV 역시 기존의 RMV와 차이가 미비하여 FED의 차이도 미비하게 나타났으며, 사망자 수 또한 차이가 없다.

개선된 노인의 FED는 기존의 FED보다 약 22% 증가하였으며, 최초 사망자는 834초에 발생하였다. 사망자 수는 Table 5와 같이 14명 발생하였다. 개선된 노인의 RMV와 기존의 FED와 차이가 가장 큰 만큼 FED도 가장 많이 증가하였으며, 사망자 수도 가장 큰 차이가 발생했다.

Table 5. The number of deaths in exhibition

Body type	Deaths	
	Previous FED	Improved FED
Adult	1	2
Male	1	13
Female	1	2
Child	1	1
Elderly	1	14

기존의 FED는 Table 5와 같이 모든 경우에서 사망자 수가 1명 나타난다. 이에 반해 개선된 FED는 각 경우 별로 사망자 수가 다르게 나타난다. 향후 피난 시뮬레이션을 수행할 때 개선된 FED를 적용한다면 피난 대상에 따라 좀 더 정확한 결과를 낼 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 피난 해석 프로그램인 FDS_EVAC을 사용하여 대형 공간(코엑스 전시장)에서 화재 시 피난 대상의 계층별, 나이, 성별 등에 따라 적합한 Fractional Effective Dose(FED)를 적용하여 수치해석을 수행하였다.

1) 화재가 발생 약 400초 이후에는 거주한계 온도인 60 °C에 도달하여 피난 대상이 고온의 열기로 화상의 위험성이 발생할 수 있는 것으로 나타났으며, 약 440초 이후 전시장 안에 연기가 가득 차게 되어 전시장 안의 모든 시야가 1 m 이하로 감소하여 피난 소요 시간 증가의 가장 큰 요인으로 나타났다.

2) 성인남성은 피난하는데 총 860초가 소요되었지만, 이에 반해 노인은 성인남성보다 131초 증가한 991초가 소요되었다. 피난 시간 결과로 병원, 요양소 등의 노약자 대상의 시설물에 대해 좀 더 엄격한 화재안전기준이 요구되어야 한다. 기존의 FED와 개선된 FED의 총 피난소요시간은 차이가 거의 없는 것을 확인하였다. FED값이 1 이하일 경우 보행속도에 영향을 주지 않기 때문이다. 하지만 사망자수가 많이 발생하게 된다면 피난 소요시간에 차이가 발생했을 것이다.

3) 기존의 RMV와 개선된 RMV의 차이 만큼 모든 사례에서 FED의 차이가 비례하게 발생하였다. FED의 차이 만큼 사망자 수 또한 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 향후 개선된 FED를 이용하여 성능위주설계의 화재안전성능 평가를 위한 피난 시뮬레이션 수행 시 건물용도, 건물사용자의 특성 등을 고려하여 좀 더 정확한 평가를 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글: 본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) “Present Condition in level-structure”, National Statistical

- Office, 2011.
- 2) "Performance-Based Fire Design", National Emergency Management Agency, 2011.
- 3) "Regulation for Evacuation, Fire-protection Structure, in Building", Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2005.
- 4) Y. J. Jang, C. H. Lee, W. H. Park and W. S. Jung, "The Passenger Evacuation Simulation using Fluent and EXODUS", Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 1, pp. 95~100, 2008.
- 5) S. H. Yoon, J. J. Lee and M. J. Lee, "Sensitivity Analysis of Physical and Psychological Attributes of Activity Based Models for Evacuation Simulations, using Building EXODUS", Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 9, pp. 347~355, 2009.
- 6) H. J. Yoon and Y. K. Hwang, "Studies in Comparative Analysis on Algorithm of EXODUS and SIMULEX for the Evacuation Simulation Program Development", Conference on J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., pp. 46~51, 2009.
- 7) H. J. Yoon, Y. K. Hwang and J. H. Kim, "Development of Human Model for the Egress Simulation", Conference on J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., pp. 526~529, 2010.
- 8) D. Lee et al., "A Study on Experiment of Human Behavior for Evacuation Simulation", Ocean Engineering, Vol. 31, pp. 931~941, 2004.
- 9) K. Timo and H. Simo, "Intergration of an Gent Based Evacuation Simulation and the State-of-the-art Fire Simulation", Asia- Oceania Symposium on Fire S. T., pp. 20~22, 2007.
- 10) D. Purser, "Behavioural Impairment in Smoke Environments," Toxicology, Vol. 115, pp. 25~40, 1996.
- 11) K. Timo and H. Simo, Fire Dymanics Simulator with Evacuation: FDS+EVAC, VTT, 2010.
- 12) Simulex: Evacuation Modelling Software, User's Guide, Integrated Environmental Solutions Ltd., pp. 48, 1996.
- 13) P. A. Thompson and E.W. Marchant, "A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations", Fire Safety Journal, Vol. 24, No. 2, pp. 131~148, 1995.
- 14) P. A. Thompson and E. W. Marchant, "Testing and Application of the Computer Model Simulex", Fire Safety Journal, Vol. 24, No. 2, pp. 149~166, 1995.
- 15) P. A. Thompson et al., "Simulex: Analysis and Changes for IMO Compliance", Proceedings of 2nd International Conference: Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp. 173~184, 2003.
- 16) X. Pan, "Computational Modeling of Human and Social Behaviors for Emergency Egress Analysis", PhD Thesis, Stanford University, CA, pp. 127, 2006.
- 17) P. A. Langston, R. Masling and B. N. Asmar, "Crowd Dynamics Discrete Element Multi-circle Model", Safety Science, Vol. 44, No. 5, pp. 395~417, 2006.
- 18) A. Smith et al., "Modelling Contra-flow in Crowd Dynamics DEM simulation", Safety Science, Vol. 47, No. 3, pp. 395~404, 2009.
- 19) D. Helbing and P. Molnar, "Social Force Model for Pedestrian Dynamics", Physical Review E, Vol. 51, No. 4, pp. 4282~4286, 1995.
- 20) L. A. Philip et al., HANDBOOK OF RESPIRATION, W. B. SAUNDERS COMPANY, pp. 12~98, 1958.
- 21) G. James, "Principles of Fire Behavior," Quintiere, pp. 101~127, 1998.
- 22) H. Frantzich and D. Nilsson, "Utrymning Genom tät rök: beteende och förflyttning," Department of Fire Safety Engineering, pp. 75, 2003.