

학교건물에서 피난훈련과 시뮬레이션을 통한 피난안전성 평가 Safety Assessment of the Evacuation at School Building by Escape Training and Simulation

정무현 · 이병곤[†]

Jeong Mu-heon · Lee, Beong-gon[†]

충북대학교 안전공학과
(2007. 9. 14. 접수/2008. 9. 11. 채택)

요 약

본 연구는 청주소재 ○○ 고교 교직원 휴게실에서 화재상황을 가정하여 FDS와 CFAST 화재모델을 이용하여 화재특성을 분석하였으며, 전교생을 대상으로 실제피난훈련을 실시하고, 피난프로그램 Simulex를 수행한 자료와 비교하여 피난안전성을 평가하였다. 그 결과, 실제피난훈련은 8%가 피난에 실패하였고 Simulex에서는 40%가 피난에 실패한 것으로 평가되었다. Simulex는 피난경로, 피난집결지 등 실제피난훈련의 특성을 반영하지 못한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In this study, the evacuation training were performed in a high school building in Cheong-Ju and compared with the simulation program (Simulex). Also numerical analysis of room fire in school building was conducted by fire model (FDS, CFAST) and evaluated the available safe egress time for the safety assessment. As a result, the 8% of total egress persons were failed to escape at evacuation training and 40% of total egress persons were failed to escape at Simulex simulation. Simulex program was not reflected the real escape conditions, such as evacuation route, refuge place, etc.

Keywords : Escape, Simulex, FDS, CFD simulation, Life safety

1. 서 론

지난 2003년, 192명이 사망한 대구지하철화재참사를 비롯하여 과거의 대형화재 사건들을 살펴보면, 건축물에서 화재발생 시 인명피해의 발생은 신속한 피난이 이루어지지 못하여 일어남을 알 수 있다.

지난 2003년 제정된 공공기관의방화관리에 관한규정에 의해 대부분의 초·중·고교에서는 의무적으로 소방교육훈련을 연 2회 하게 되었다. 안전에 대한 체계적인 교육과정이 전혀 이루어지지 않는 국내 현실을 비추어볼 때 공공기관에서의 방화관리규제가 강화된 것은 매우 적절한 조치이며 매우 긍정적인 현상이라 볼 수 있다.

본 연구는 공공기관인 학교건물에서 피난훈련의 실시와 시뮬레이션을 통해 화재·피난분석을 하여 피난

안전성을 평가하는데 목적이 있다. 그간 국내에 실제 대규모 피난훈련과 피난시뮬레이션을 통한 피난안전성 평가가 부족한 실정에 본 연구는 시기에 적절한 연구라 판단된다.

연구방법은 다음과 같이 하였다.

첫째 피난훈련 시행 시 피난상황을 파악, 분석하였다. 학교에서 피난 집결지를 운동장으로 정하여 운동장으로 향해 있는 3곳의 피난구에서 피난상황을 파악하였다. 피난상황은 전체 피난인원 피난종료시간과 3곳의 피난구에서 단위시간별 피난인원현황을 파악하였다.

둘째 ○○ 고교 건물에 대한 피난시뮬레이션(Simulex)¹⁾을 수행하여 피난상황과 비교·평가를 하였다. 피난시뮬레이션을 수행 시 대상학교의 피난계단, 피난구수를 조정하여 피난시간에 어떤 영향이 있는지를 파악하였다. 그리고 남문, 중앙문, 동문에서의 시뮬레이션상황을 실제 피난훈련 자료와 비교하였다.

셋째 화재시뮬레이션(FDS)²⁾을 이용하여 화재상황분

[†] E-mail: bklee@chungbuk.ac.kr

석을 하고 이를 통한 피난안전성을 평가하였다. 화재실은 1층의 교직원 휴게실로 정하였고 실제 실내 가구류를 실측하여 화재시뮬레이션에 적용하여 화재특성을 분석하였다. 그리고 실내에 열감지기를 설치하였고, 복도에는 연기감지기를 설치하여 감지기의 작동시간을 파악하였다. 파악된 감지기의 작동시간을 이용하여 피난훈련에 대한 피난안전성평가를 수행하고, 피난시뮬레이션에 대한 피난안전성평가도 실시하였다.

2. 실제피난훈련

2.1 피난훈련조건

피난훈련의 대상은 충북 청주 소재 ○○ 고교 재학생들을 상대로 2005년 10월에 실시하였고 대피훈련 인원수는 교직원을 포함하여 총 1,031명이다. 이중 교직원 수는 65명으로 남직원 35명, 여직원 30명이며, 학생 수는 966명으로 570명이 여학생, 396명이 남학생으로 구성되었다. 대상학교는 4층 건물로서 Figure 1은 1층의 평면도이다. 피난구는 동문, 남문, 중앙문과 Exit 1, 2, 3, 4의 총 7개와 북쪽계단이 있으며, 피난집결지는 동문, 남문, 중앙문 사이에 있는 운동장이다. 이 중에서 중앙문은 주로 교직원들이 주로 이용하여 학생들은 많이 이용하지 않는다. 본 연구에서는 운동장쪽으로 향해 있는 동문, 남문, 중앙문 3개의 피난구에서 단위시간별 피난학생수를 조사하였으며, 전체출입구에 대한 전체 학생들의 피난완료시간을 조사하였다.

2.2 피난훈련 결과

전체출입구에 대한 최초 피난자는 1층 복도에 있던 피난자가 방송 즉시 피난하여 화재경보후 10초만에 피난하였고, 최종피난자는 244초 만에 피난하여 전체 피

난인원 1,031명의 피난완료시간은 244초이었다. 이와 같이 1000명이 넘는 인원이 비교적 짧은 시간에 피난을 완료한 것은, 훈련 실시 전 훈련상황을 방송하여 학생들에게 알렸고, 교사들이 담당 학급의 학생들에 대해 대피 안내를 신속하게 진행한 것이 피난시간을 줄이는데 큰 기여를 한 것으로 파악되었다.

동문에서의 피난자는 391명이고, 피난시간은 190초가 소요되었다, 남문에서의 피난자는 173명, 피난시간은 90초이었으며, 중앙문에서의 피난자는 20명, 피난시간은 60초이었다. 동문, 남문, 중앙문 세 군데 피난구를 이용한 총 인원은 584명으로, 전체 피난인원 1,031명 중 56.6%이었다. 피난구 7개 중 세 개의 피난구에서 반 이상의 피난자가 피난한 것은 세 개의 피난구 방향이 학교 운동장을 향하는 방향에 있었기 때문으로 생각된다. Figure 2는 동문, 남문, 중앙문의 피난속도를 나타낸 그림으로, 동문에서의 평균피난속도는 2.1명/초로 비교적 고르게 나타났으며, 남문에서는 1.9명/초이며 피난개시 후 60초에서 가장 크게 나타났다. 교직원들이 주로 이용하는 중앙문의 경우는 20명이 피난하여 0.3명/초이었다. 세개 피난구의 합산 평균피난속도는 3.1명/초이다.

2.3 Simulex를 이용한 피난시뮬레이션

피난시뮬레이션 프로그램은 대표적인 프로그램인 Simulex 5.0¹⁾을 사용하였다. Simulex의 피난원칙은 최단거리의 피난구를 이용하는 것이며, 재실자의 보행속도, 피난로의 설정을 조정할 수 있으며, 피난구 및 계단의 피난자수와 피난시간을 계산할 수 있어 널리 사용되고 있으나, 화재시의 연기와 온도 등이 고려되지 않는 단점이 있다.

실제피난훈련과 같이 3개층의 각 교실과 1층의 교직

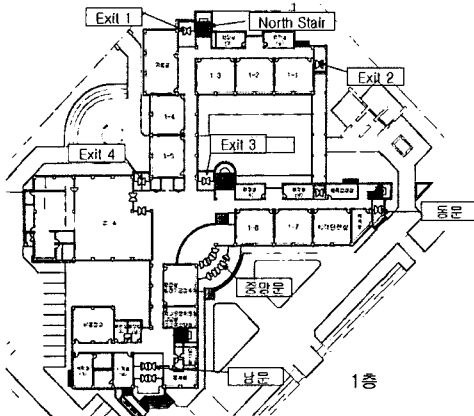


Figure 1. Exit position and North stair in first floor.

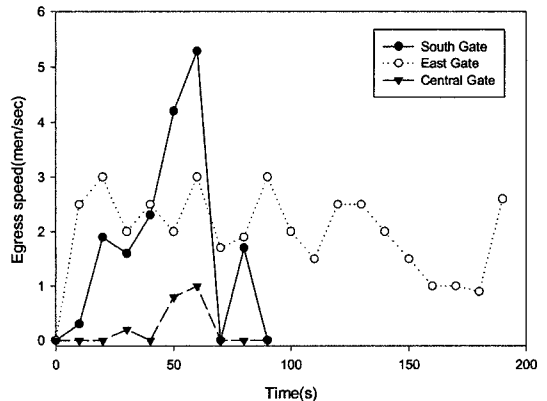


Figure 2. Egress speed at south exit, east exit, central exit.

원실에 총 1031명을 배치하고, 건축도면에 피난구를 만들어 시뮬레이션을 수행하였다. 피난인의 신체특성은 simulex에서 평균값(Average)으로, 유형은 Office staff으로 설정하였다. Figure 3은 Simulex 시작 후 50초에서의 3층에서 중앙계단과 북쪽계단, 남쪽계단을 통해 피난자가 대피하는 장면이다.

Figure 4는 동문, 남문, 중앙문을 통한 실제피난훈련과 Simulex의 누적피난인원을 비교한 것이다. 동문에서의 실제피난훈련에서는 190초에 391명이 피난하였으나, 피난시뮬레이션에서는 200초에 121명이 피난하여, 피난시간은 유사하나, 피난인원은 3배 이상 차이가 났다. 반대로 남문에서는 실제피난훈련이 90초에 173명, 피난시뮬레이션에서는 310초에 240명이었다. 실제 피난훈련에서 동문의 피난자가 남문보다 많은 것은, 동문의 경우 1층부터 4층까지 교실이 배치되어 있어 학생수가 많고, 남문 1층에는 행정실, 상담실 등으로 대

피난원이 상대적으로 적으며, 동문 쪽이 피난집결지인 운동장 중앙까지의 거리가 남문보다 가깝기 때문에 분석된다. 그러나 피난시뮬레이션인 Simulex에서는 최단거리의 피난구를 이용하여 피난하고, 피난집결지를

Table 1. The number of accumulate egress person in each exit [단위 : 명]

시간 (초)	남문		중문		동문	
	시뮬레이션	피난 훈련	시뮬레이션	피난 훈련	시뮬레이션	피난 훈련
10	0	0	0	0	0	0
20	0	3	0	0	0	25
30	3	22	2	0	2	55
40	6	38	4	2	12	75
50	14	61	4	2	22	100
60	17	103	5	10	32	120
70	23	156	5	20	41	150
80	28	156			46	167
90	45	173			54	186
100	57	173			58	216
110	68				68	236
120	81				83	251
130	91				89	276
140	104				94	301
150	120				99	321
160	134				108	336
170	142				111	346
180	150				112	356
190	159				116	365
200	169				121	391
210	175					
220	183					
230	194					
240	204					
250	208					
260	218					
265	224					
270	228					
280	230					
290	235					
300	243					
310	245					

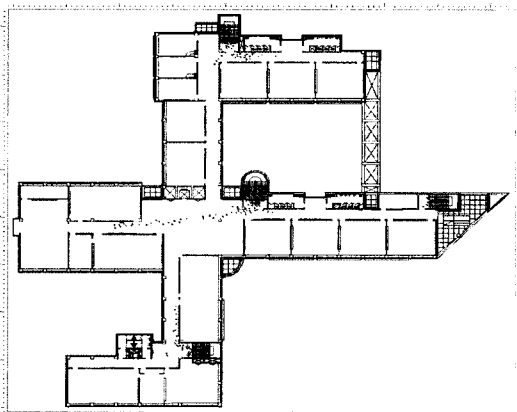


Figure 3. Simulation scene at 50 sec in third floor.

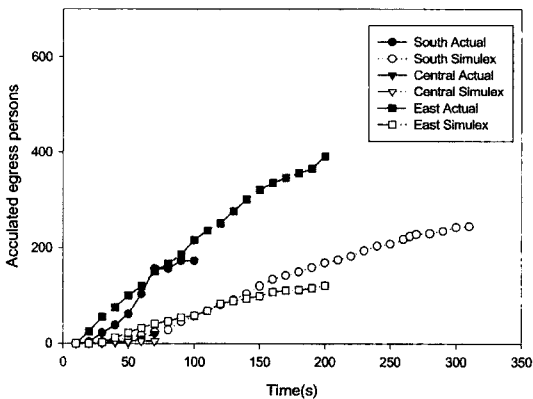


Figure 4. Accumulated number of egress person from 3 gate (south, central, east).

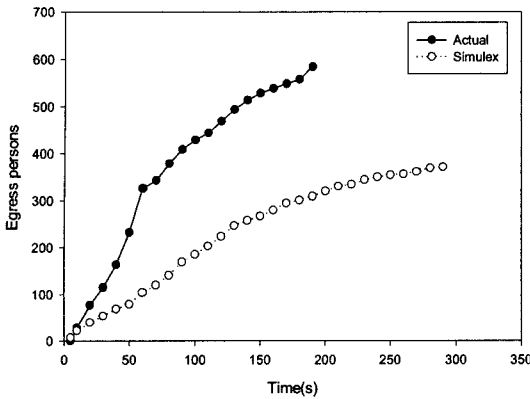


Figure 5. Comparison of accumulate egress person in Simulex and actual at 3 gate (south, central, east).

고려하지 않기 때문에 동문보다 남문으로 2배나 많이 피난하는 결과를 보였다.

Table 1은 각 피난구별 피난훈련과 시뮬레이션을 통한 누적 피난인원을 나타낸 표이다.

Figure 5는 동문, 남문, 중앙문 세 문에서의 실제피난훈련과 Simulex에서의 누적피난인원으로, 실제피난훈련의 피난자는 총 584명이었으나, Simulex에서는 총 371명으로 실제피난인원의 64%이었다. 실제피난인원이 더 많은 이유는 피난 집결지가 운동장이어서 운동장으로 향해 있는 동문, 남문, 중앙문을 많이 사용하였으나, Simulex에서는 이런 피난특성은 반영되지 않고 피난구의 최단거리로만 계산한 결과로 분석된다. 피난 시간에서도 실제 피난훈련에서는 190초에 피난하였으나 Simulex에서는 310초에 크게 예측되었는데, 이것은 피난훈련 전에 방송안내와 교직원의 피난독려의 결과로 분석된다.

3. 화재수치해석

3.1 화재모델 프로그램

화재해석은 열, 연기유동을 지배하는 미분방정식들을 수치해석하여 국부적인 유동을 해석할 수 있으나, 방대한 계산이 필요한 field model과 화재실을 고온의 상층부와 저온의 하층부로 나누어 간단한 대수식으로 해석하여 국부적인 해석은 못하나 계산이 간편한 zone model로 분류된다. FDS²⁾는 대표적인 field model로서 CFD를 이용하여 화재시 열, 연기확산을 시간에 따라 나타내고, Smokeview 프로그램⁴⁾을 이용하면 시각적으로 볼 수 있는 장점이 있다. 또한, CFAST⁷⁾는 zone model의 대표적 프로그램으로 비교적 간단하게 화재실의 온도 등을 예측할 수 있다.

3.2 화재특성 해석조건

본 연구에서는 교직원 휴게실의 화재를 가정하고 FDS를 이용하여 해석하였다. 화재실은 교직원 휴게실과 동일조건인 실내 크기인 105.34 m³(7.5 m × 5.3 m × 2.65 m)로 설정하였고 실내 가구배치도 실측하여 동일하게 하였다. 화재실내의 격자수는 많을수록 정확하나 계산시간이 약 1주일씩이나 걸려서 격자수를 줄이면서 해의 정확성을 비교하여 373,248개로 설정하였다.

교무실 및 교직원 휴게실의 출입문은 개방된 상태로 설정하였고 복도에 있는 교실의 문도 개방된 상태로 가정하였다. 교직원 휴게실에 설치된 열감지기와 복도에 설치된 연기감지기는 실제 위치와 동일하게 설치하였다. 발화지점은 교직원휴게실 내의 3인용 소파의 좌측 부분에서 발화하는 것으로 가정하였고 초기 열방출율은 2000 kw/m²로 설정하였다. 소파의 재료는 폴리우레탄이며 다른 의자 및 가구류의 연소반응은 NIST에서 제공하는 FDS의 database 자료를 적용하여 시뮬레이션을 실행하였다.

Figure 6과 7은 학교의 1층 평면도에서 화재특성 계

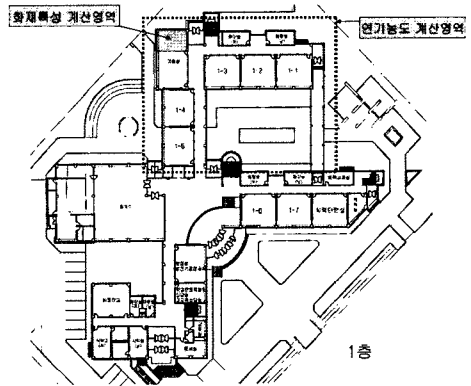


Figure 6. The computational boundary and fire place in first floor.

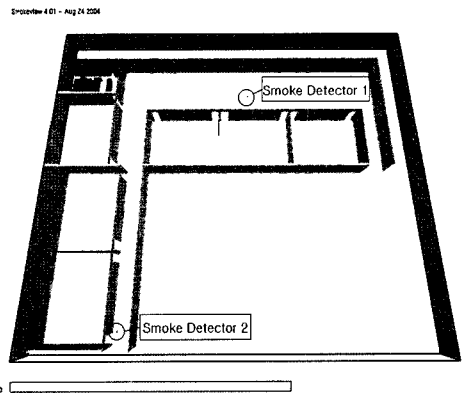


Figure 7. Smoke spread test in corridor

산영역과 연기농도 계산영역을 나타낸 그림이다. 화재 지점은 1층의 교무실내 휴게실로 정하였고 점선으로 구획한 부분은 연기유동을 파악하기 위한 부분이다. 이 부분에는 복도가 2개가 있는데 각 복도에 연기감지기를 설치하여 작동시간을 구하였다. 연기감지기는 피난자가 주로 고등학생인 점³⁾을 감안, 바닥에서 1.5 m 높이에 설치하였다. 화재시물레이션에서 위험시간을 연기가 호흡안전선인 바닥에서 1.5 m 높이까지 내려오는 시간으로 설정하여 이 시간에 피난안전성을 평가하였다.

3.3 화재특성해석 결과

3.3.1 화재실에서의 화재특성결과

Figure 8은 화재실에서의 가구 및 가연물전체의 연소로 인한 열방출을 그림이다. 열방출율은 화재발생 후 70초 정도에서 급격하게 열방출율이 증가하여 101초에서 최고치를 나타내 2,200 Kw를 나타내고 있다. 그러나 화재실에서 Flash Over는 발생하지 않았다.

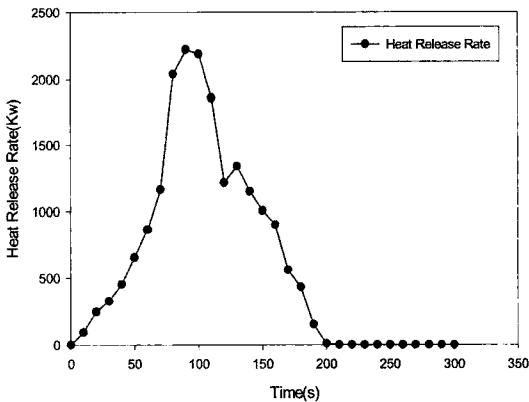


Figure 8. Heat release rate of fire place.

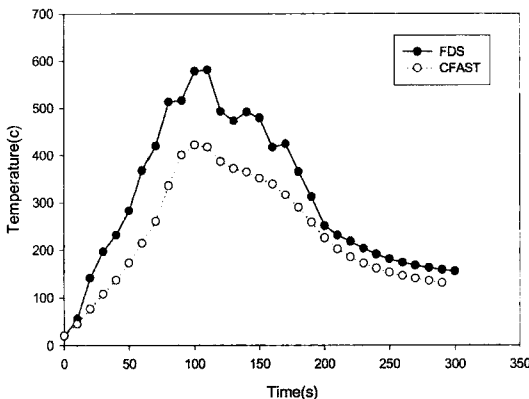


Figure 9. Temperature of ceiling in fire room by FDS and CFAST.

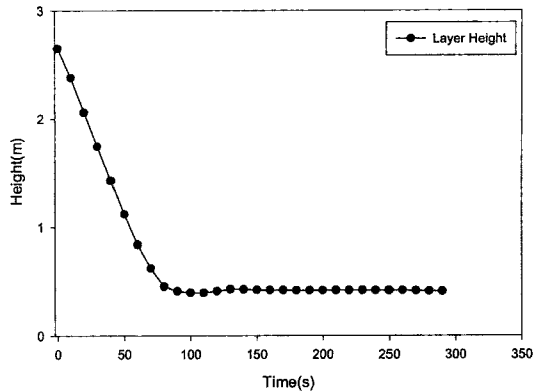


Figure 10. Layer height in fire room by CFAST.

Figure 9는 FDS와 CFAST를 이용하여 화재실내 중앙부 천정에서 온도를 나타낸 그림이다. FDS를 이용한 결과는 110초에서 581°C까지 증가하였으며 300초에서는 156°C까지 감소하였다. CFAST를 이용한 결과는 FDS를 수행하여 얻은 열방출율값을 CFAST에 입력하여 얻은것이다. 온도는 FDS 대비 73%의 정확도를 가지고 있으며, 100초에서 427°C까지 올라가 FDS를 이용한 결과와 154°C의 차이가 난다. 이것은 CFAST가 FDS에 비해 간단한 대수식으로 평균온도를 계산하여 차이가 나는 것으로 해석된다.

Figure 10은 CFAST를 이용하여 화재실의 연기층 높이를 나타낸 그림이다. 35초에서 연기가 바닥에서 1.5 m 높이까지 내려온다. 90초를 지나서는 바닥에서 0.4 m 정도로 유지된다.

3.4 감지기 작동시간

FDS 해석결과 화재실내 차동식소프트형 열감지기의 작동시간은 44.5초이다. 연기감지기를 각 복도에 설치하여 작동상황을 파악한 것으로 연기감지기 2가 196.7초만에 먼저 작동하였고 연기감지기 1은 227.15초만에 작동하였다. 거리상으로는 연기감지기 1이 화재실에서 더 가까우나 넓은 복도이기에 좁은 복도에 설치한 연기감지기 2가 먼저 작동한 것으로 분석된다.

4. 피난안전성평가

4.1 유효안전피난시간

피난안전성평가는 건축설계단계에서 피난설계의 적정성을 검토하기 위해서 수행되나, 기존 건축물의 피난안전성 검증과 안전성능 향상을 위한 계획수립에도 적용된다. 본 연구에서는 Cooper의 식에 의해 평가하였고, 피난자가 안전하게 피난할 수 있는 유효안전피

난시간(ASET : Available Safe Egress Time)⁶⁾은 위험발생시간(T_{haz})에서 화재감지시간(T_{det})을 뺀 시간으로 다음 식으로 표시된다.

$$\text{ASET} = T_{\text{haz}} - T_{\text{det}} \quad (4-1)$$

위험발생시간(T_{haz})은 단일 밀폐구획실내에서는 연기층이 일정한 높이 이하로 내려오는 시간이나, 연기층이 일정한 온도 이상이 되는 시간으로 한다. 본 연구에서는 여러 개의 구획된 실과 복도로 이루어진 복합물로서 3.4절에서의 연기감지기 2가 작동되는 시간을 위험시간으로 정하여 196.7초로 하였다. 화재감지시간(T_{det})은 화재실내 열감지기 작동시간으로 44.5초이다. (4-1)식에 따라 유효안전피난시간을 구하면 152.2초이다.

4.2 실제피난훈련에 대한 안전성평가

실제피난완료시간 244초에 피난개시시간(화재감지시간) 44.5초를 합하면 실제피난훈련의 대피시간은 총 288.5초로서 유효안전피난시간 152.2초 보다 136.3초가 초과하였다. 유효안전피난시간 152.2초의 시간에서는 동문, 남문, 중앙문 3개 피난구에서 총 584명중 539명(92%)이 피난 완료하고, 45명(8%)은 피난에 실패한 것으로 조사되었다. 이러한 정량적인 안전성평가에 의하여, 피난안전성에 문제가 있는 것으로 나타났으며 이에 따른 대책이 요구된다.

4.3 Simulex를 통한 안전성 평가

Simulex를 이용한 동문, 중앙문, 남문의 피난자 371명의 피난완료시간은 360초로서, 유효안전피난시간 152.2초보다 207.8초가 초과하였다. 유효안전피난시간까지는 224명(60%)이 피난에 성공하였고, 147명(40%)이 피난에 실패한 것으로 나타났다. 또한, Simulex를 이용한 총 인원의 피난완료시간은 399.5초로서, 유효안전피난시간보다 247.3초가 초과되며, 유효안전피난시간까지는 총 1,031명 중 645명(63%)이 피난에 성공하고 386명(37%)이 피난에 실패하였다. 이러한 Simulex를 이용한 피난안전성 평가결과는 매우 부적합한 것으로 나타났다.

5. 결 론

이 연구는 한 사례에 대하여 유효안전피난시간을 구하여 피난안전성평가를 한 것으로 일반적으로는 적용할 수 없으나 수치해석결과를 이용하여 유효안전피난시간을 정량적으로 구할 수 있음을 보인 연구다. 연구청주소재 H 고교에서 전교생을 대상으로 실제피난훈련을 하였고, 피난해석 프로그램 Simulex를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 비교하였다. 또한 교직원 휴게실에서 화재상황을 가정하고 FDS와 CFAST 화재모델을 이용하여 화재특성을 분석하였다.

1. 유효안전피난시간을 FDS 수치해석 원리를 이용하여 정량적으로 구할 수 있음을 확인하였다. 이에 실제피난훈련과 Simulex 프로그램을 이용한 피난안전성을 평가하였다. 그 결과, 실제피난훈련은 8%가 피난에 실패하였고 Simulex에서는 40%가 피난에 실패한 것으로 평가되었다.

2. Simulex는 실제피난훈련의 특성을 반영하지 못하여 피난인원은 실제피난인원의 64%로 적게, 피난시간은 실제피난시간의 163%로 길게 예측하였다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Intergrated Environmental Solutions Ltd., "Simulex User Guide" 2003.
2. Nist, "Fire Dynamics Simulator(Version 4.0) User Guide" 2004.
3. 산업자원부 기술표준원, "제5차 한국인인체치수조사사업보고서" 2005.
4. Nist, "User's Guide For Smokeview Version 4" 2004
5. 日本建築技術者指導センター, "基本建築關係法令集", 上卷[法令編], 2001.
6. David M. Birk, "An Introduction to Mathematical Fire Modeling", 33p, 1991.
7. Nist, "A User Guide for CFAST Version 3.17" 2001.