

개인별 대피경로를 고려한 화재위험성 평가에 관한 연구

이 동 호

인천대학교 안전공학과
(2007. 5. 18. 접수 / 2007. 8. 3. 채택)

A Study on Fire Risk Assessment by the Consideration of Individual Evacuating Path Line

Dongho Rie

Department of Safety Engineering, University of Incheon
(Received May 18, 2007 / Accepted August 3, 2007)

Abstract : In this study, we provided an index for the quantitative and systematic performance based fire risk assessment. A complex cinema was adopted for the fire scenario and the fire simulation was carried out by using FDS. Also evacuation time was calculated by using SIMULEX. We obtained a big different fire risk assessment result by the focus on the between space basis and the time basis. As a result of this study, performance based fire risk assessment should be performed on the basis of individual evacuee's path line.

Key Words : fire, FDS, evacuation, fire risk assessment

1. 서 론

기술의 발달과 이에 따른 삶의 질의 향상으로 효율성과 다양성을 추구한 다용도의 복합건물이 건설되고 있는 것은 세계적인 추세이다. 이러한 삶의 질의 향상은 안전에 대한 의식을 고취시켰으며 실제로 안전성의 추구는 건축물의 설계과정에서 빠질 수 없는 항목이 되었다. 이중 화재에 대한 안전의 유지는 최근 발생한 여러 대형 화재사고와 발맞추어 꾸준히 그 중요성에 대한 인식이 증가됨에 따라 화재 위험성 평가에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 최근 들어 컴퓨터의 발달로 CFD(Computational Fluid Dynamics) Solution tool을 이용한 수치해석이 실제와 가까운 화재 예측을 가능하게 하였으며 이를 기반으로 화재위험성에 대한 정량적분석 기법이 활용되고 있다. 그러나, 기존의 방식은 계산상 편의와 평가의 시간 단축을 위해 위험성 화재공간적 정보값을 대상으로 대피자 중심의 경로 함수로 분석이 이루어지지 않고 있는 문제점이 있다. 따라서, 이러한 평가는 대피자 개개인의 위험도 분석이라기보다는 공간위주의 위험도 분석 중심으로 평가가 수행

되고 있는 현실이다.

본 연구에서는 CFD를 이용한 수치해석 결과를 이용하여 복합상영관 화재시 기존의 화재안전성평가 방식인 공간중심 위험성평가와 대피자중심의 위험성평가의 차이점을 분석함으로써 정량적이고 체계적인 성능위주 화재위험성 평가 지침을 제시하고자한다.

2. 수치해석 조건

2.1. 모델링

본 연구에서는 최근 다양한 복합건물의 기능중 하나인 복합상영관을 대상으로 화재를 모사하여 적용하였다. 복합상영관의 공간상 특징으로 높은 재실 밀도와 용도적 특성상 어두운 주변 환경에 기인한 낮은 가시도 및 대피구역의 한정으로 인한 출구지점의 병목현상으로 대피 속도의 현저한 저하가 예상될 수 있다. 또한 좌석이 방염처리 되지 않은 경우 신속한 화재 확산에 기인한 다량의 연기 및 열기류의 확대 가능성이 매우 높은 특징을 갖는다.

본 수치해석에 적용된 복합상영관의 모델링은 부평역사 다목적 상가 내 복합상영관 중 1개의 상영

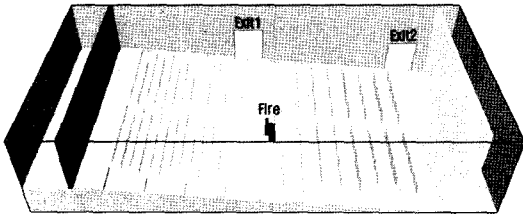


Fig. 1. Simulation modelling(Fire dynamics simulator).

관의 설계 자료를 기준으로 하였다. Fig. 1은 상영관의 세부적 내부 형상을 나타내며 길이 24.0m, 폭 12.0m, 높이 5.0m을 갖는다. 출구는 총 2개소이며 크기는 폭 1.8m 높이 2.2m를 갖는다. 또한 상영관의 특성상 1번 출구는 0.0m 높이에 위치하며 2번 출구는 1번 출구보다 1.0m 높게 위치한다.

2.2. 계산 조건

2.2.1. FDS(Fire Dynamics Simulator)¹⁾

상영관 내부의 시간에 따른 화재 형상 및 열적 유동의 수치해석은 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 CFD 해석프로그램인 FDS(ver 4.07)를 사용하였다. FDS는 화재의 특성 및 유동분석에 뛰어난 평가를 받고 있으며 해석방법은 Smoke View 가시화 틀을 통한 정성적인 평가 방법과 좌표별 ASCII Output Data를 이용한 정량적인 분석방법을 이용하여 평가할 수 있는 특징이 있다.

수치해석에 사용된 격자수는 1,440,000(120 × 240 × 50)^{2,3)}개로 설정하였으며, 격자의 형태는 Hexa로 설정하였다. 화재의 크기 및 성장속도는 SFPE “Principles of Smoke Management”⁴⁾에서 제시하는 sofa with polyurethane foam padding의 화재실험 결과를 기준으로 설정을 하였으며, Reaction material은 FDS에서 제공하는 기본 Database상의 물질인 Polystyrene으로 선정하였다. 또한 화재의 확산을 위해 주변의 자는 Upholstery로 설정하였다.

제연 및 배연을 위한 상영관 내부에서의 제·배연장치는 고려되지 않았으며, 1번 출구와 2번 출구는 Open vent상태로 설정하였다.

2.2.2. 대피시간 산출

화재 시간에 따른 대피자의 위치 파악 및 최종 대피시간 산정을 위해 영국 IES사의 가시화 대피시뮬레이션인 SIMULEX를 사용하였다. SIMULEX는 인원의 특성(크기, 대피속도) 설정, 대피 Delay 설정

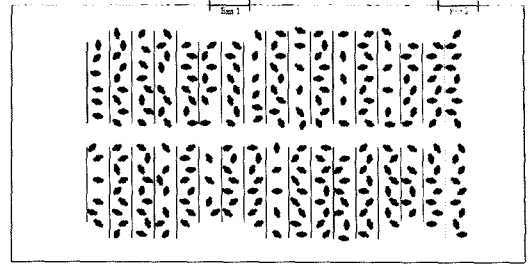


Fig. 2. Simulation modelling(SIMULEX).

및 인원간의 거리 차에 따른 대피 속도 감소 등이 그 특징이라 할 수 있다.

Fig. 2는 복합상영관 내부의 모습이며 1관에서 탈출하는 시간까지의 위치정보 및 시간에 대해 해석하였다. 1관의 총인원은 좌석수 258석이 만석이 되는 기준으로 선정하였으며 대피를 시작하는 시간은 화재 발생 후 인지시간인 30초로 하였다. 성별의 비율은 성인 남성 40%, 여성 60%로 하였으며 좌석 공간에 Random 분포하였다. 대피자의 신체적 특성은 한국표준과학연구소에서 보고된 한국인 체위^{4,5)}를 기준으로 설정하였다.

2.3. 공간위험성 평가 항목

FDS 수치해석 결과로부터 위험성 평가는 대피자의 호흡선 높이인 지상으로부터 1.5m 상부의 대피공간 그리드 좌표를 기준으로 하였으며 이에 따른 평가항목은 다음과 같다.

2.3.1. 연기에 의한 무력화 지수

$F_{IN}^{6,7)}$ (Fractional incapacitating dose for exposures to gases)은 독성가스의 호흡에 따른 시간당 인체유해성 누적값을 합산하여 평가하는 방법으로 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$F_{IN} = \sum_{i=1}^n [(F_{ICO,i} + F_{ICN,i}) V_{CO_2,i} + F_{IO,i}] \Delta t_i \quad (1)$$

$F_{ICO,i}$ = fraction of an incapacitating dose of CO per unit time

$F_{ICN,i}$ = fraction of an incapacitating dose of HCN per unit time

$V_{CO_2,i}$ = factor for CO₂-induced hyperventilation

$F_{IO,i}$ = fraction of an incapacitating dose of low oxygen hypoxia per unit time

F_{IN} 은 CO, HCN, CO₂, O₂의 호흡정도를 시간에

따라 누적하여 인체의 위험도를 나타내며 1.0을 초과하면 일반인이 의식불명 또는 사망하게 되는 것으로 판정한다. 본 연구에서는 대피자의 개인적 차이와 안전계수를 고려하여 평가값이 0.1 이상이 되면 대피에 부적합한 것으로 판단하도록 설정하였다. HCN의 평가지수값인 $F_{KCN, i}$ 은 FDS의 결과값으로 계산되지 않으므로 대기중 평균농도값인 0.0045 min^{-1} 을 적용하여 해석을 수행하였다.

2.3.2. 고열에 의한 무기력지수

F_{th} (Fractional Incapacitating Dose for exposures to Heat source)^{4,5)}는 Convection을 통해 전파되는 온도의 위험도를 시간에 따라 누적하여 평가하는 방법으로 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$F_{th} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{\exp(C_1 - C_2 T_i)} \quad (2)$$

T_i = temperature of air in interval i

$C_1 = 5.185$

$C_2 = 0.0273$

F_{th} 는 F_{IN} 과 동일한 값으로 0.1 이상이 되면 고열 폭로에 의해 대피에 부적합한 것으로 판단하여 계산을 수행하였다.

2.4. 평가 조건

건축물내 위험성 평가를 위해 Table 1과 같이 평가 조건을 선정하였다.

Case 1~4는 단순히 공간적 위험도 분석으로 대피경로를 고려하지 않은 조건하에서 Case 1과 2는 바닥면을 기준으로 높이 1.5m 상부의 공간정보를 평균하여 위험도를 누적하였다. Case 3과 4는 혼잡 지

Table 1. Assessment conditions

Cases	Assessment check area	Assessment high	Note
Case 1	entire Cinema area	1.5m above the ground	only mean value
Case 2	entire Cinema area	2.5m above the ground	only mean value
Case 3	only zone of exit 1	1.5m above the ground	at the gate of complex zone
Case 4	only zone of exit 2	1.5m above the ground	
Case 5	individual path line	1.5m above the ground	under the viewpoint of each person's evacuating root

점인 출구부의 위치좌표를 기준으로 위험도를 누적하였다. Case 5는 SIMULEX를 이용하여 도출된 대피자의 시간에 따른 대상별 위치좌표를 추적하여 FDS 수치해석 결과로 나타난 좌표별 위험도를 누적하여 위험성 분석을 수행한 결과이다. FDS의 수치해석으로 데이터는 10초 간격으로 샘플링 하였다.

3. 수치해석 결과

3.1. 피난 해석 결과

Fig. 3과 4는 2.1.2절의 계산조건을 기준으로 SIMULEX를 이용한 피난해석 결과이다.

대피자 258명이 모두 탈출하는 데 소요된 시간은 총 93.5초로 계산되었으며 공간적 특성으로 Exit1에서의 탈출 인원이 165명으로 93명인 Exit2와 72명의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 Exit1과 Exit2 부근에서 병목현상이 나타났으며 이로 인해 최종탈출 시간이 지연되는 특징을 보였다.

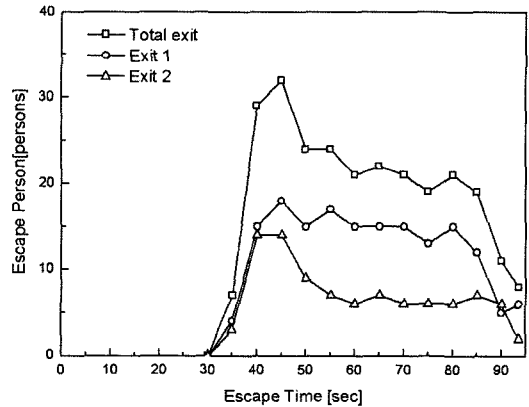


Fig. 3. Escape persons at time intervals(5sec.)

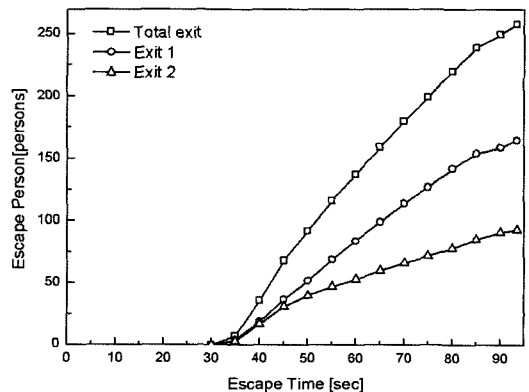


Fig. 4. Cumulative escape persons at time.

3.2. 화재 해석 결과

FDS를 이용한 수치해석 결과로 2.3절의 화재위험성 평가를 기준으로 연기에 의한 위험성평가를 Fig. 5에 나타내며 열에 의한 위험성평가 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

Fig. 5와 6은 연기호흡에 따른 시간별 누적 위험도 F_{IN} 과 발생고열에 의한 시간별 누적 위험도인 F_{th} 를 나타내며 지상 2.5m지점 평균값인 Case 2가 가장 높게 나타났으며 출구2 지점인 Case 4가 가장 낮은 값을 나타냈다. Fig. 6의 Case 2는 173초를 경과하면 위험한게 값인 0.1을 초과하는 것으로 나타났다.

동일높이 조건에서 Case 2와 Case 3, Case 1과 Case 4를 각각 비교하여 보았을 때 F_{IN} 과 F_{th} 는 출구지점이 공간평균에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 화재시 병목현상이 발생하는 출구의 위치 선정이 위험성 평가 결과에 영향을 주는 것으로 나타났다.

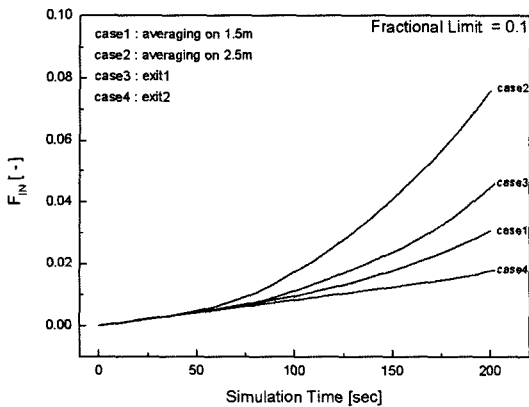


Fig. 5. Damage accumulation over time(F_{IN}).

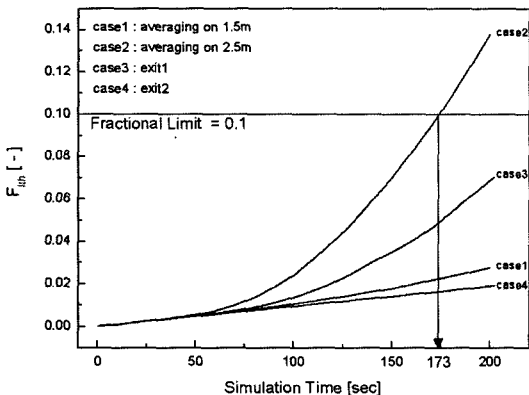


Fig. 6. Damage accumulation over time(F_{th}).

3.3. 화재 위험성 평가 결과

Table 2는 피난 해석결과로 나타난 개인의 시간별 위치정보와 해당하는 시간별 위치의 위험도를 누적하여 나타낸 표이다. 또한 Fig. 7~8에 나타난 그래프는 Table 2의 결과를 도식한 결과이다. 그래프에 나타난 바와 같이 개인별로 위험도의 차이가 크게 나타났다. 이는 각각의 출발 위치 및 최종 도달 탈출구에 따라 차이가 발생하기 때문이다.

Fig. 9, 10은 대피자의 시간에 따른 좌표추적을 통해 나타난 대피자의 개별 위험도를 나타낸다. 대피경로에 따른 위험도 평가 지수값은 각각의 개인별 위치에 따른 결과가 다르게 나타나므로 단순 공간좌표를 기준으로 평가된 Fig. 5, 6과 비교하여 모

Table 2. Personal evacuation time and damage

Order	Evacuation time [sec]	FIN		Order	Evacuation time [sec]	FIN	
		Fth				Fth	
1	33.2	0.002787		140	60.6	0.005704	
		0.003151				0.00666	
10	35.6	0.002955		150	62.8	0.006371	
		0.003323				0.007594	
20	37.2	0.003158		160	65.2	0.005425	
		0.003585				0.006104	
30	38.9	0.003232		170	67.7	0.007278	
		0.003634				0.008969	
40	40.3	0.003345		180	69.8	0.00717	
		0.003762				0.008301	
50	42.2	0.003504		190	72.4	0.007905	
		0.003941				0.009613	
60	44.1	0.003665		200	75.1	0.008932	
		0.004123				0.011896	
70	45.7	0.004224		210	77.5	0.008393	
		0.004872				0.010304	
80	47.6	0.004066		220	80	0.010474	
		0.004595				0.012351	
90	49.6	0.004116		230	82.3	0.006888	
		0.004631				0.007754	
100	51.8	0.004303		240	85.3	0.007088	
		0.004841				0.00798	
110	53.7	0.005012		250	89.6	0.007489	
		0.005758				0.00845	
120	56.3	0.004946		258	93.5	0.013032	
		0.005681				0.016845	
130	58.3	0.005103					
		0.005862					

든 조건하에서 위험하지 않은 것으로 나타났다. 이것은 국지적인 부분이나 전체적 평균을 이용한 화재위험성 평가는 실제 개인의 위험도와 다를 수 있다는 것을 나타내며 기존의 공간중심의 평가에 의해 얻어진 결과는 과대평가 될 수 있음을 의미한다. 따라서 화재시물레이션으로 도출된 공간정보를 활

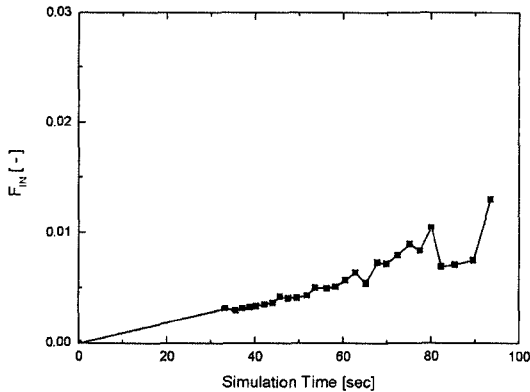


Fig. 7. Personal evacuation time and damage(F_{in}).

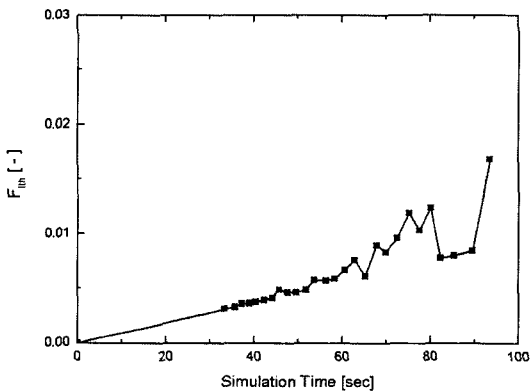


Fig. 8. Personal evacuation time and damage(F_{in}).

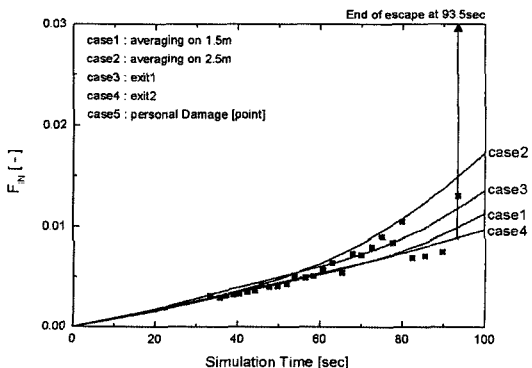


Fig. 9. A comparison between personal and local damage(F_{in}).

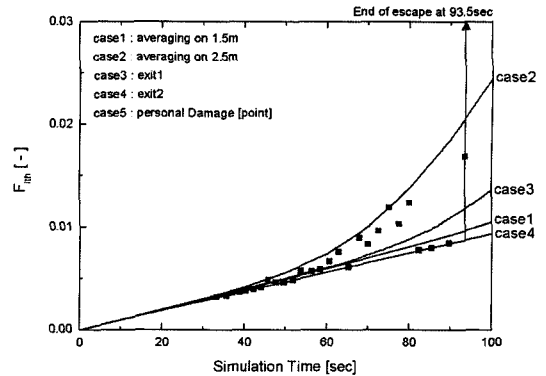


Fig. 10. A comparison between personal and local damage(F_{in}).

용하여 성능위주의 정량적 화재 위험성 평가 방법으로는 대피 경로에 기준한 대피자 개인별 위험성 평가방법이 반드시 적용되어야 한다.

4. 결론

개인별 대피경로를 고려한 화재위험성 평가에 대한 수치해석을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 공간평균 중심의 위험성평가 및 출구중심의 위험성평가는 한계값 0.1을 넘어서는 것으로 나타났다.
- 2) 출구의 위치는 위험성 평가 결과에 영향을 미친다.
- 3) 개인별 대피경로를 고려한 위험성평가 결과 대피자의 위치 및 최종도달 탈출구에 따라 위험도의 차이가 큰 것으로 나타났다.
- 4) 국지적 평가 및 공간평균을 이용한 화재 위험성 평가는 과대평가가 될 수 있다.
- 5) 성능위주의 정량적 화재 위험성 평가방법으로 대피 경로에 기준한 대피자 개인별 위험성 평가방법이 적용되어야 한다.

감사의 글 : 이 논문은 2006년도 인천대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Kevin McGrattan, Glenn Forney, "Fire Dynamics Simulator(Version 4) User's Guide", NIST, 2005.
- 2) T. g. Ma, J. G. Quintiere, "Numerical simulation of

- axisymmetric fire plumes: accuracy and limitations”, *Fire Safety Journal* 38, pp. 467~492, 2003.
- 3) Baum H. R., B. J. McCaffery, “Fire Insuced Flow Field-Theory and Experiment”, *Fire Safety Science Proceedings of the Second International Symposium*, pp. 129~148, 1989.
 - 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 60주년기념 학술발표대회논문집*, pp. 231~234. 2005.
 - 6) John H. Klote, James A. Milke, “Principles of Smoke Management”, ASHRAE, SFPE, 2002.
 - 7) 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.
 - 8) G. W. Mulholland, “The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties”, Third Edition, National Fire Protection Association, pp. 2-265~266. 2002.
 - 9) 이동호, 김하영, “지하철 승강장 형식에 따른 정량적 화재 위험성 평가”, *한국안전학회지*, Vol. 21, No. 6, pp. 1~6, 2006.