

C-04

화재영향평가작성기준에 관한 연구(II) - 결정론적방법

김환진, 김원국, 조재형*, 이정구*,

서울대학교 화재안전공학센터

*삼성물산 건축부문 건축사업본부 건축기전팀

A Study on the Guideline for Performance-Based Fire Risk Assessment - Deterministic Analysis

Hwan Jin Kim, Won Kook Kim, Jae Hyoung Cho*, Jung Goo Lee*

Seoul National University Fire Safety Engineering Center

*Samsung Engineering & Construction Corporation

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

성능위주 소방설계는 최근 화재안전분야에서 가장 활발히 논의되고 있는 분야 중 하나이다. 이 성능위주의 소방설계의 방식에는 Top down 방식과 Bottom up의 두가지의 방식이 있다. Top down 방식은 건축물의 설계 초기에서부터 명확하게 설정한 목표와 목적을 가지고 PBD (Performance-Based Design)를 적용하여 현장에 맞는 화재크기를 예측하고, 설정된 목표와 목적을 만족시키는 설계안을 도출하여 설계에 반영하는 방법이며, Bottom up 방식은 설계가 되어진 건축물의 상황을 PBD로 적용하여 화재영향평가를 수행하여 화재 위험을 평가하는 방법이다. 소방선진국에서는 이미 오래 전부터 이러한 방식들을 도입하여 적용하고 있다. 이에 국내에서도 성능위주에 따른 건축물 화재영향평가를 목적으로 실무에 적용할 수 있는 절차 및 기준서를 만드는 연구가 올해 초부터 서울대학교와 삼성건설 산학협동으로 시행되어왔다. 이에 관한 일차적 연구 결과로 지난 하계학술 논문발표회에서 각 선진국들이 사용하는 성능기준(Performance Criteria)의 범위를 조사 발표하였으며 이번 추계학술논문발표에서는 이러한 기준을 바탕으로 건축물 화재영향평가방법 중 결정론적 분석방법을 발표하고자 한다. 이에 초안으로 작성된 건축물 화재영향평가기준서의 성능위주 화재영향평가 기준 중 결정론적 분석방법 기준에 대한 검증용을 위해 실제 하나의 건축물을 대상으로 화재영향평가를 실행하여 그 결과 및 기준서의 유용성을 보고자한다.

1.2 연구 방법 및 범위

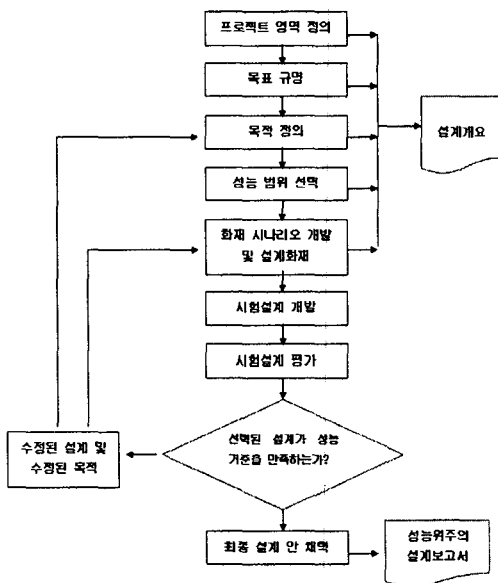
본 연구는 계획 설계된 ABC 주상복합건축물을 대상으로 결정론적 분석방법에 따라 성능위주의 화재영향평가를 수행한다. 이 화재영향평가는 인명안전에 관한 성능평가에 한하며 절차는 [그림-1]에 준한다. 성능위주의 화재영향평가를 위해 화재 및 피난 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하며 설정된 목표를 만족시키지 못하는 경우 대안 시뮬레이션을 통한 위험감대책을 제시한다.

2. 결정론적 분석

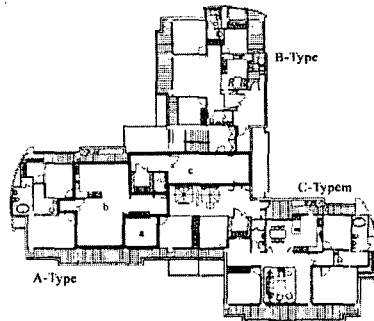
2.1 프로젝트 영역정의

이 프로젝트의 영역은 현재 법규로 설계되어 신축되어질 주상복합건축물 ABC 빌딩의 안전성을 성능위주의 화재영향평가 중 결정론적 방법으로 평가해보는 데 있다. 이 프로젝트의 수행 절차는 [그림-1]의 절차에 따르며 이 분석을 수행하기 위한 화재시뮬레이션 프로그램은 CFAST를 피난 시뮬레이션 프로그램으로는 Simulex를 사용한다.

[그림-1] 성능위주 화재영향평가 수행절차¹⁾



[그림-2] 거주층 빌딩 평면



프로젝트를 수행할 건축물에 관한 개요는 [표-1]에 정리되어 있고 건축 평면은 [그림-2]에 나타나 있다.

[표-1] ABC 빌딩 건축개요

구분		내용
건축물 규모		지하2층 + 지상 37층, 4개 타워
면적	전체면적	95,542m ²
	지상면적	69,722m ²
	A Type 세대	147.65m ² , 거주인원 7명
사용용도		주차장 (B1~B2), 상업용도 (1F~2F), 주거용도 (3F~37F)
구조		철근콘크리트 구조
방화시스템		각 층 스프링클러, 연기감지기, 알람시스템설치

2.2 목표규명

이 프로젝트의 화재안전을 위한 목표는 주거공간에서의 거주자의 인명안전에 있다. 따라서 화재로 인한 부상 및 생명의 손실을 최소화 하는데 목표가 있다.

2.3 목적정의

현행 국내법에서는 각 층과 각 세대간의 방화구획이 되어있는 상태이다. 프로젝트영역과 목표를 만족시키기 위한 목적으로, 스프링클러가 성능을 정상적으로 발휘할 때, 거주인원이 가장 많은 A Type 세대 구성원들이 각 실에서 거주 가능할 수 있는 시간을 계단실까지 피난하는 시간 보다 많이 확보하는데 있다.

2.4 성능범위 선택

화재시물레이션 평가를 위한 성능범위는 열에 의한 기준, 가시거리에 의한 기준, 그리고 독성에 의한 기준으로 평가하며 각 기준들은 [표-2]에 정리했다.

[표-2] 인명안전 화재영향평가를 위한 성능기준³⁾

목적	구분		성능기준	
인명안전	열에 의한 기준	연기층높이가 2.1m 보다 높을때 상층부 온도	200℃	
		연기층높이가 2.1m 보다 낮을때 상층부 온도	100℃	
		복사열	2.5kW/m ²	
	가시거리 기준	OD (Optical Density)		0.5 [1/m]
		가시거리		2m
		연기층 높이		1.6+0.1*H* [m]
독성기준	CO		1400ppm	
	O ₂		15%	
	CO ₂		5%	

* H는 바닥에서 천정까지의 높이

2.5 화재시나리오개발 및 설계화재

2.5.1 화재시나리오개발

화재시나리오개발을 하기 위해 이전의 미국의 NFPA 고층아파트의 화재통계자료를 조

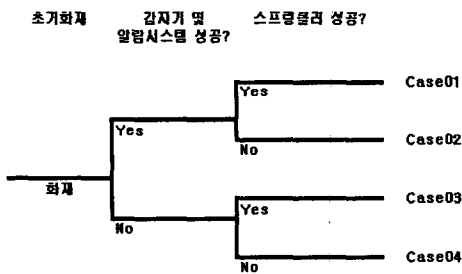
사하여 [표-3]에 가장 빈번한 화재장소와 인명 및 재산손실을 정리하였다.⁴⁾ 결과를 분석하여 보면 화재건수는 부엌에서 가장 빈번하게 일어나나 인명손실이 가장 많이 일어나는 화재는 침실에서 일어나는 것을 알 수 있다. 건물전체의 화재 위험을 평가하기 위해서는 거주형태 유형 및 화재 발전특성에 따라 화재 시나리오를 설정한 후 분석해야 하지만, 본 연구에서는 가장 위험하다고 판단되는 침실화재시나리오를 선정하였다.

[표-3] 미국 고층아파트 주요화재발생장소에 따른 화재건수 및 인명·재산피해 연 평균 값 - (1994~1998년)⁴⁾

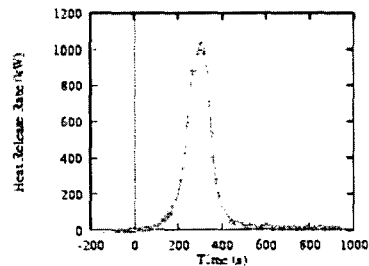
주요화재장소	화재건수	인명손실	재산손실 (in Millions)
부엌	5,110 (58.7%)	7 (14.9%)	\$6.0 (19.7%)
침실	800 (9.2%)	16 (35.6%)	\$8.0 (26.5%)
거실	410 (4.7%)	12 (27.6%)	\$6.2 (20.4%)

감지기 및 스프링클러의 작동에 따른 결과 값을 비교하기 위하여 [그림-3]과 같은 Event Tree 분석으로 4개의 화재시나리오를 개발한다.

[그림-3] Event Tree 분석



[그림-4] 구석에 배치된 매트리스 HRR



2.5.2 설계화재

침실화재를 설계하기 위하여 이 연구에서는 방 한쪽 구석에 배치된 침대에서 화재가 발생한 것으로 가정하고, 초기 열 방출(HRR)의 화재성장을 [그림-4]의 매트리스 화재와 같다고 설정 하였다. 이 매트리스화재의 성장 그래프는 NIST에서 실험한 실물화재로 화재크기 HRR이 최대 1.1MW까지 성장하는 실험 자료이다.⁵⁾ 이는 화재성장이 t^2 로 성장한다고 가정할 때 Medium 화재로 간주된다.

2.6 시험설계 개발

시험설계를 위한 우리의 관심영역의 공간은 화재성장과 피난통로로 사용되는 공간 즉 [그림-2]와 같이 3개의 실로 보며 각 실의 치수 및 건축물의 재료는 [표-4]에 정리했다.

[표-4] 각 실의 치수 및 건축재료

실	치수	재료
실-a (침실)	3.5m*3.0m*2.7m	벽:콘크리트, 천정:Gypsum 바닥:plywood
실-b (부엌, 내부복도, 거실)	4.9m*12m*2.7m	"
실-c (복도, 홀)	3.0m*10m*3.0m	벽·천정·바닥: 콘크리트

화재는 실-a에서 시작한다고 보았다. 이는 실-a가 침실 중에서 피난을 할 수 있는 출입구와 가장 근접하여 있으므로 피난영향에 미치는 최악의 상황이 연출 될 수 있기 때문이다. 발화물질은 침대, 컴퓨터, 의자, 휴지통으로 가정한다.

2.7 시험설계 평가

2.7.1 화재시뮬레이션

화재시뮬레이션을 수행하기 위하여 몇 가지의 가정을 하였으며 내용은 다음과 같다.

- 모든 문과 창문은 오픈 되어 있다.
- 각방의 스프링클러는 3.2m 간격으로 배치되어있다.
- 상온은 20℃ 이며 연기감지기는 작동온도는 상온보다 12℃ 높게 설정되어있다.
- 스프링클러 작동온도는 72℃, 살수 밀도는 7×10^{-5} m/s, RTI=260 (m*s)^{1/2}

화재시뮬레이션에 관한 결과 즉 설정된 각 실에서의 거주가능 시간은 스프링클러 작동 할 때와 미 작동할 때 각 기준의 최소 값을 채택하여 [표-5]에 정리했으며 이러한 결과들의 최소 값이 각 실에서 거주가 가능한 시간이다.

[표-5] 거주가능 시간

분류	스프링클러 작동시			스프링클러미작동시		
	실-a	실-b	실-c	실-a	실-b	실-c
열에 의한 기준	140초	-	-	140초	-	-
가시거리 기준	30초	145초	200초	30초	145초	200초
독성기준	-	-	-	255초	330초	-

시뮬레이션 결과에 따르면 연기감지기는 31.2초에 스프링클러는 199.5초에 작동한다. 스프링클러가 작동 시 화재는 최대 450kW의 화재크기까지, 스프링클러가 미 작동 시에는 3MW의 화재크기까지 성장하였으며 화재전파는 일어나지 않는 것으로 판단된다. 이 시뮬레이션의 결과를 살펴보면 설정된 시나리오에 따른 화재크기 및 스프링클러의 작동 여부를 떠나 거주가능 시간이 같은 것을 알 수 있다. 이는 스프링클러가 설치 되어있음에도 불구하고 그 성능을 효과적으로 발휘 하지 않음으로 스프링클러가 화재위험의 경감에 아무런 영향을 미치지 않는 것이다. 따라서 설계의 변경이 요구된다.

2.7.2 피난시물레이션

피난 시물레이션을 수행하기 위해 다음과 같은 몇 가지 가정을 한다.

- 거주자는 모두 정상인이다.
- 연기감지기와 알람설비는 연동되어있다.
- 연기감지기 작동시 피난을 시작하기까지의 반응시간은 60초, 스프링클러만 작동시 반응시간은 스프링클러작동 시간과 150초 중 작은 값, 연기감지기 스프링클러 모두 미작동시 반응시간은 스프링클러만 작동하는 반응시간+30초
- 화재가 발생하는 장소 재실자의 감지시간은 0초 반응시간은 10초

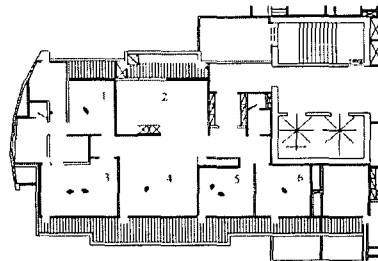
피난 시물레이션은 Simulex 프로그램을 사용하였으며 거주자의 배치와 입력 자료는 [그림-5]와 [표-6]에 정리되어 있고 총 피난 시간은 다음과 같이 정의한다.

$$t_{\text{피난시간}} = t_{\text{감지시간}} + t_{\text{반응시간}} + t_{\text{이동시간}}$$

[표-6] 거주자 입력자료

실 번호	재실자	속도
1	여자어른 1명	0.96m/s
2	-	-
3	남자어른 2명	1.33m/s, 1.35m/s
4	남자어른 1명	1.28m/s
5	아이 2명	1.07m/s, 0.69m/s
6	남자어른 1명	1.3m/s

[그림-5] 거주자의 배치



Simulex에 의한 시물레이션 결과, 총 이동시간은 28.6초이고, 화재 시물레이션에 의한 연기 감지기 감지시간과 가정에 따르는 반응시간 및 총 피난 시간은 [표-7]과 같다.

[표-7] Case별 총 피난시간

Case	감지시간	반응시간	이동시간	총 피난시간
Case01	31.2초	60초	28.6초	119.8초
Case02	31.2초	90초	28.6초	149.8초
Case03	-	150초	28.6초	178.6초
Case04	-	180초	28.6초	208.6초

2.7.3 결과분석

화재 시물레이션의 결과 값과 피난 시물레이션의 결과 값을 시간에 따른 분석으로 비교하여 보면 [표-8]과 같이 정리된다.

[표-8] Case별 총 사망인원

Case	사망인원	비 고
Case01	0	감지기 및 스프링클러작동
Case02	1	감지기만 작동
Case03	5	스프링클러만 작동
Case04	5	감지기, 스프링클러 미작동

결과 값을 분석해 보면 이 값은 설정한 목적, 즉 스프링클러가 작동 할 때 모든 거주자의 안전을 보장한다는 목적에 만족하지 못하므로 설계의 수정이 필요하다. 또한, 설계화재과정에서 설정한 화재가 초기에 빠른 성장과 많은 연기량으로 인해 미처 스프링클러가 작동하기도 전에 각 실의 거주가 불가능한 조건에 이르게 했다. 이는 스프링클러가 작동 하던 하지 않던 화재 시뮬레이션에 의한 거주가능시간이 같다는 것을 보면 알 수 있다.

2.8 수정 설계 개발 및 평가

설계의 목적을 만족시키기 위해 2.5항의 화재 시나리오 중 스프링클러의 성능 기준 중에서 RTI (Response Time Index)와 스프링클러 작동 온도를 변경하여 3가지 수정 설계안으로 화재영향평가를 재 수행 했다. 스프링클러는 반응센서에 따라 반응 속도에 차이가 발생하며, 이때 반응특성을 결정짓는 인자를 RTI라 한다. 일반적인 스프링클러에서 설정되는 RTI값의 범위는 $100 \sim 400 \text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ 범위를 가지고 있으며, $25 \sim 55 \text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ 사이의 RTI값을 갖는 스프링클러는 빠른 반응을 보이는 스프링클러라고 볼 수 있다. 기존 설계안과 수정 설계안들의 수정된 스프링클러의 조건들은 [표-9]에 정리하였으며 그에 따른 화재 시뮬레이션의 결과는 [표-10]에 정리 비교 하였다.

[표-9] 기존설계안과 수정설계안 스프링클러 설정 조건

Case	기존설계안	수정설계안01	수정설계안02	수정설계안03
RTI / T _a	$260 \text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2} / 72^\circ\text{C}$	$50 \text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2} / 72^\circ\text{C}$	$50 \text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2} / 65^\circ\text{C}$	$100 \text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2} / 65^\circ\text{C}$

*T_a: 스프링클러 작동온도

Top down 방식의 성능위주의 소방설계 적용의 경우에는, 거주가능시간을 증가해 줄 수 대안뿐 아니라, 피난시간을 줄일 수 있는 예를 들면 피난동선단축, 계단이나 비상구 같은 피난구 폭 증가, 혹은 피난계단 증설 등의 방안과 성능의 효율성을 피난 시뮬레이션을 통해 증명하고 설계에 반영할 수 있는 대안을 도출해야 하나 이 연구에서는 다루지 않기로 한다.

[표-10] 기존설계안과 수정설계안 화재시뮬레이션 결과

Case	기존설계안		수정설계안01		수정설계안02		수정설계안03	
	t_d/t_s	HRR _{max}	T_d/T_s	HRR _{max}	T_d/T_s	HRR _{max}	T_d/T_s	HRR _{max}
Case01	$t_d=31.2$ $t_s=199.5$	450kW	$t_d=31.2$ $t_s=135$	120kW	$t_d=31.2$ $t_s=124.3$	83kW	$t_d=31.2$ $t_s=150$	180kW
Case02	$t_d=31.2$	3MW	$t_d=31.2$	3MW	$t_d=31.2$	3MW	$t_d=31.2$	3MW
Case03	$t_s=199.5$	450kW	$t_s=135$	120kW	$t_s=124.3$	83kW	$t_s=150$	180kW
Case04	-	3MW	-	3MW	-	3MW	-	3MW

* t_d : 연기감지기 감지시간(초), t_s : 스프링클러 작동시간(초), HRR_{max}: 최대화재크기

수정된 설계안에 따른 거주가능 시간의 결과 값은 [표-11]에 기존 설계안과 비교하여 정리했다.

[표-11] 거주가능 시간

설계안	스프링클러 작동시			스프링클러미작동시		
	실-a	실-b	실-c	실-a	실-b	실-c
기존설계안	30초	145초	200초	30초	145초	200초
수정설계안01	30초	145초	200초	30초	145초	200초
수정설계안02	30초	155초	255초	30초	145초	200초
수정설계안03	30초	145초	200초	30초	145초	200초

총 피난 대피시간은 앞의 2.7.2장 피난시뮬레이션 과정에 나온 방법과 동일하며, 수정 설계안 화재시뮬레이션의 결과 값에 따른 피난 출발시점 및 총 피난시간과 사망자 수를 함께 [표-12]에 정리하였다.

[표-12] 기존설계안 및 수정설계안의 피난출발시점, 총 피난시간 & 사망자수

Case	기존설계안		수정설계안01		수정설계안02		수정설계안03	
	출발시점/ 총피난시간	사망자수	출발시점/ 총피난시간	사망자수	출발시점/ 총피난시간	사망자수	출발시점/ 총피난시간	사망자수
Case01	91.2초/ 119.8초	0	91.2초/ 119.8초	0	91.2초/ 119.8초	0	91.2초/ 119.8초	0
Case02	121.2초/ 149.8초	1	121.2초/ 149.8초	1	121.2초/ 149.8초	1	121.2초/ 149.8초	1
Case03	150초/ 178.6초	5	135초/ 163.6초	0	124.3초/ 152.9초	0	150초/ 178.6초	5
Case04	180초/ 208.6초	5	165초/ 193.6초	5	154.3초/ 182.9초	5	180초/ 208.6초	5

위의 결과를 보면 기존설계안 및 수정설계안03은 이 프로젝트에서 설정한 목적에 맞지 않다는 것을 볼 수 있으며 스프링클러 성능의 효율이 화재에 제대로 대응하지 못하고 있다는 것을 알 수가 있다. 반면 수정설계안01과 수정설계안02는 설정한 목적을 만족하고 있다. 수정설계안01은 각 실의 거주가능시간을 증가 시키지는 못하나 Case03의 경우 스프링클러의 빠른 반응에 의해 피난출발시점의 시간을 감소시켜 프로젝트의 목적을 충족시

킨다. 반면 수정설계안02의 경우에는 거주가능시간을 효율적으로 증가시키고, 또한 피난출발시점 역시 효과적으로 감소시켜 프로젝트의 설정 목적을 충족시킨다. 따라서 이 프로젝트의 목적을 위해 수정설계안02를 선택하는 것이 이 건축물의 인명안전성을 합리적으로 증대시키는 방안이라고 판단된다.

또 다른 결과로 이 프로젝트에서 설정한 화재에 대한 스프링클러의 기본 설정값 중 스프링클러 작동온도 보다는 RTI 값에 더 민감하게 반응 한다는 것을 알 수가 있다. 이는 수정설계안01과 수정설계안03의 최대 화재크기와 이 두 설계안의 case03의 결과 값을 비교분석 하면 알 수 있다. 수정설계안03과 수정설계안01은 모두 거주가능시간을 효과적으로 증가시키지 못하지만, 수정설계안01은 피난출발시점을 효과적으로 감소시키는데 반하여 수정설계안03은 피난출발시점을 효과적으로 감소시켜주지 못한다는 결과로부터 알 수가 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 Case Study를 통해, 올해 초부터 서울대학교 삼성건설이 산학협동으로 소방안전국들이 실행하고 있는 성능위주의 화재영향평가를 건축물 인명안전 목적으로 기 준화하여, 실무에 적용하기 위한 검증의 차원으로 주상복합건축물의 하나의 계획 설계안 을 건축물 화재영향평가서기준서의 성능위주 화재영향평가 방법 중 결정론적 분석방법의 절차에 따라 화재영향평가를 수행해 보았으며, 그 결과 본 연구는 다음과 같은 결과를 얻 어 낼 수가 있었다.

1. 건축물 화재영향평가기준서의 성능위주 화재영향평가기준 중 결정론적 방법에 따른 평가는 법적으로는 밝혀낼 수 없는 실제 상황의 화재에 대응방법으로 화재위험경감 방안 도출하는 데 있어 구체적이고 효과적인 것을 알 수 있었다.
2. Case Study를 통해 스프링클러의 설정 값에 따라 단지 스프링클러의 설치와 작동 여 부만으로는 인명안전에 효과적일 수가 없을 수도 있다는 것을 알 수 있었다.
3. Case Study에서 설정된 화재 시나리오와 화재의 크기에서는 스프링클러의 RTI값이 스프링클러의 작동온도보다 민감한 인명안전인자임을 알 수 있었다.
4. 이 연구에서 다루어진 Case의 화재 시나리오는 간단하게 하나의 시나리오만으로 검 토했다. 하지만 건축물 화재영향평가를 제대로 수행하기 위해서는 여러 가지 다른 시나리오에 대한 검토가 필요하며, 문제점이 도출되었을 때 그에 따른 대안과 위험 경감대책이 필요하다.
5. 향후 건축물 화재영향평가기준서가 몇 차례의 검증 과정을 통하여 완성된다면 기준 의 법규위주만의 화재영향평가보다 합리적이고 효율적으로 화재 대응이 가능할 것 으로 기대가 되며, 이는 건축물에서의 화재위험의 예방과 억제에 크게 기여할 것으 로 사료된다.

참고문헌

1. "SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection", SFPE, 2000
2. Richard D. Peacock 외 4명 "A User Guide for Fast", NIST, 2000
3. 김환진, 김원국의 3명, "성능위주의 설계를 위한 성능기준에 관한 연구", 한국화재소방학회 하계 학술논문발표회 논문집, 2004
4. John R. Hall, Jr., "High-Rise Building Fires", NFPA, 2003
5. <http://www.fire.nist.gov/fire/fires/fires2.html>
6. "건축물 화재영향평가기준서", 서울대학교/삼성건설, 2004
7. Guylene Proulx "Movement of People: The Evacuation Timing", SFPE Handbook 3rd Edition, 2002
8. Ron Cote "Life Safety Code", NFPA, 2003