

HAZARD I 컴퓨터 프로그램을 이용한 화재 시뮬레이션과 그 응용방안에 대한 고찰

김 원 철 <위험관리부 기사>

1. 화재 시뮬레이션 (Simulation)의 필요성

기계문명의 급속한 발전과 더불어 날로 다변화 되고 있는 현대 산업사회에서 물질문명의 혜택이 하루가 다르게 여러 방면에서 인간에게 주어지고 있으나, 그와는 반대로 재해에 대한 위험은 더욱 다양한 형태로 나타나고 있다. 그 중에서도 특히 생활 주변의 물질들이 대부분 석유화학 원료로부터 생산되어 화재시 열분해하여 다양한 유독성 가스를 배출하는 것은 이미 널리 알려져 있다. 또한 생활 환경의 다변화로 건축물의 구조 및 형태가 날로 변모하고 있어 화재시 심각한 문제를 일으킬 가능성을 내포하고 있음은 주지의 사실이다.

그래서 세계 각국은 화재와 관련된 법률을 보완하여 이에 따라 건축 행위를 하도록 유도하고 있으며 화재시 인명 보호와 재산 손실을 예방 하기 위한 연구에 많은 힘을 기울이고 있다.

그러나 화재시의 화학 및 물리적 상태를 분명히 규명하는 것은 매우 어렵다. 또한 화염 및 연소가스에 대한 인명 안전 기준을 명확화 하는 것도 쉬운 일이 아니고 화재시 인간의 행동 특성을 파악하는 것도 어려운 과제중의 하나이다. 그동안 세계 각국에서는 여러 개의 시험 모델을 선택하여 실험을 실시하였지만 여기에 소요되는 비용이 엄청나 실제 화재 실험을 계속하기에는 많은 어려움이 따르고 있다.

따라서 자연과학의 기본 법칙에 토대를 두고 통계 자료 및 간이 실험을 통하여 실제 화재시의 여러 특성을 예측하는 연구가 컴퓨터를 이용하여 시도되고 건축물의 설계시부터 이러한 화재 시뮬레이션을 고려한다면 불필요한 재정적 손실을 줄일 수 있으며 인명 보호 및 재산 손실 예방이라는 측면에서 획기적인 도움을 줄 수가 있을 것으로 평가되어 이에 대한 필요성이 날로 증가되고 있다.

2. HAZARD I 컴퓨터 프로그램 소개

HAZARD I Computer Software는 미국표준기술연구소 (National Institute of Standards and Technology, NIST)의 화재 연구센터 (Center for Fire Research, CFR)에서 미국내 화재 사례 중 가장 많은 부분을 차지하는 주거 건물에 대한 예방대책으로 개발한 화재 시뮬레이션 컴퓨터 프로그램으로서 화재시 시간 경과에 따른 위험 조건의 변화를 계산하고 건물내 수용인들이 피난하기 위하여 필요한 시간과 화재로 인한 상해 여부를 예측할 수 있다.

HAZARD I 프로그램에서 채택한 화재 시뮬레이션 방법은 다음과 같다.

가. 1단계 : 문제 제기

- 해결하고자 하는 문제 제기
- 시뮬레이션 결과를 적용할 대상 결정

• 시뮬레이션을 채택하는데 어떤 영역을 사용할 것인가의 결정

나. 2단계 : 화재 시나리오 결정

- 유사하거나 관련이 있는 화재 사례를 검토
- 실제 화재시 발생하는 비슷한 환경을 결정
- 화재 시나리오의 적정 여부를 최종 검토

다. 3단계 : 화재로 인한 위험과 결과 계산

이 단계에서 HAZARD I 프로그램을 사용하게 된다.

• 화재 시나리오에서 결정한 화재 모델에 대한 발화원의 물성 자료 계산

• 화재 모델에 대한 건물 및 계산에 필요한 자료를 입력

• 입력 자료를 이용한 계산

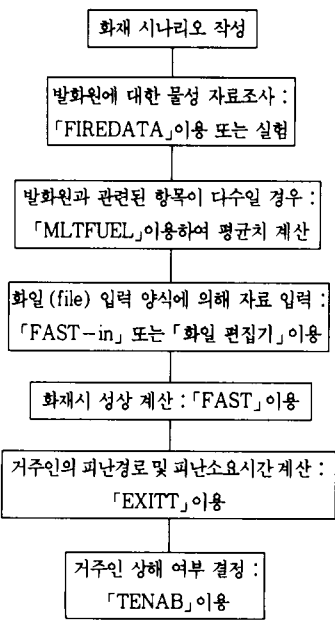
• 화재시 거주자의 행동 및 상해 정도를 예측

• 상기 결과로 얻은 자료를 인쇄

라. 4단계 : 평가

3 단계에서 얻은 자료를 원하는 목적이 달성될 때까지 항목값을 수정하여 3 단계를 반복한다.

HAZARD I 프로그램에서 직접 이용하는 부분은 3 단계뿐이며 나머지는 화재 관련 업무에 종사



<그림 1> HAZARD I 계통도

註 : 「FIREDATA」, 「MLTFUEL」, 「FAST-in」, 「FAST」, 「EXITT」, 「TENAB」는 HAZARD I 프로그램임

하는 실무자에 의해서 판단 및 결정을 할 수 있으며 실제로 HAZARD I 을 이용한 화재 시뮬레이션 방법은 <그림 1>과 같은 방법에 의해 이루어 진다.

3. 화재 시뮬레이션의 예

여기에서는 HAZARD I에 수록된 사례를 하나 선택하여 그 실행에 필요한 자료를 제시하고 계산된 결과치를 검토한다.

가. 화재 시나리오

2층 주택에서 담배불이 소파에 착화, 확산된 화재로서 건물내에는 4사람이 있음.

① 건물

2층 주택

② 수용인

아버지 : 45세, 화재시 1번 침실

에 있음, 충분히 활동 가능함, 수면 중.

어머니 : 40세, 화재시 1번 침실에 있음, 충분히 활동 가능함, 수면 중.

아들 : 16세, 화재시 2번 침실에서 수면 중이나 깨어나기 곤란함.

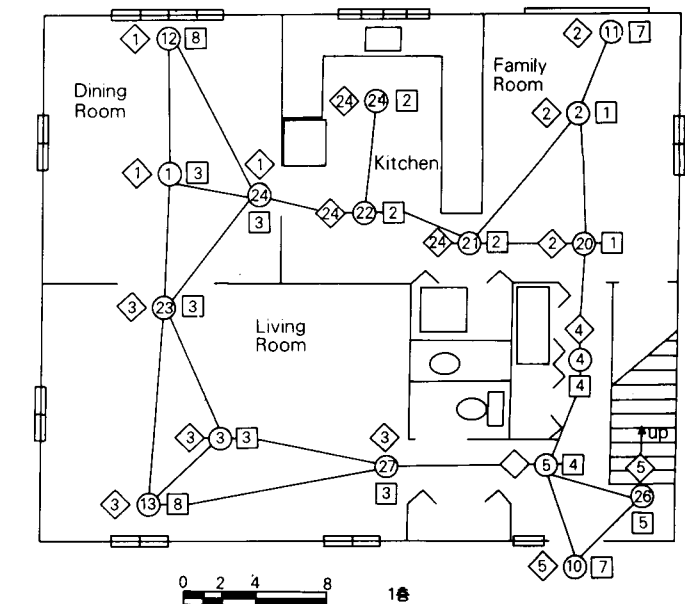
딸 : 14세, 화재시 3번 침실에서 수면 중.

③ 출입문의 개폐 상태

주방, 가족실과 홀 사이의 통로에 이르는 문은 닫혀 있음. 1층의 다른 문은 열려 있음. 2층의 각 침실문은 닫혀 있음.

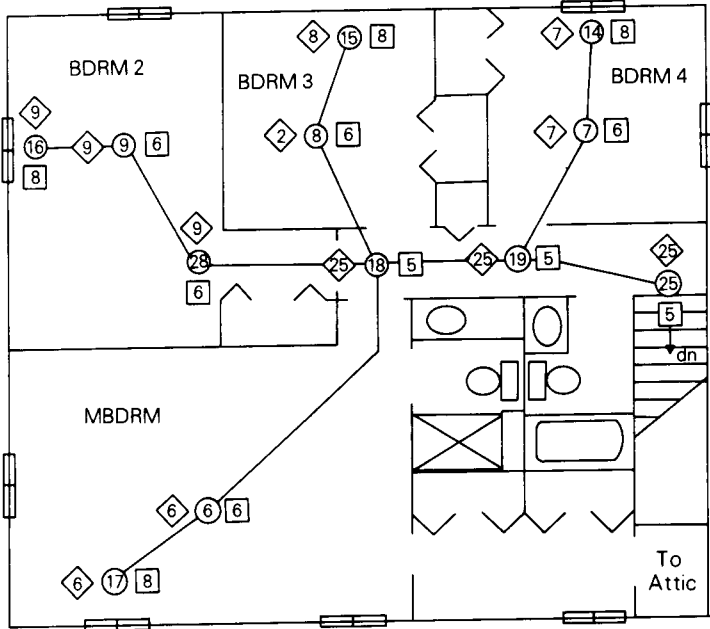
④ 발화

가족실의 소파에 담배불로 인한 화재가 발생 목재로된 벽체로 확산됨.



<그림 2> 건물 평면도와 피난 경로

- ◇ EXITT - room number associated with node
- EXITT - node number
- Fast room number associated node



0 2 4 8

2층

- ⑤ 연료 소파, 벽체 (장식용 목재 벽체)
- ⑥ 천정재 석고보드 (표준품)
- ⑦ 벽체 석고보드 (표준품)
- ⑧ 바닥재 1층은 두께 15cm의 콘크리트 슬라브. 2층은 Douglas산 전나무 합판.

나. 입력에 필요한 자료

- (1) 화재성장 계산에 필요한 자료
 - 내·외부 환경조건 (온도, 압력, 고도, 풍속)

- 방의 폭·길이·높이와 각 실의 바닥 높이
- 각 실과 실 사이 및 각 실과 수평 개구부의 개구율
- 시간에 따른 개구부의 개폐 상태
- 건물내 벽·바닥·천정 마감재
- 연소열, 연료의 분자량, 초기의 상대습도, 최소 산소지수, 연료의 초기 온도, 연료의 착화에 필요한 최소 온도
- 시간 경과에 따른 연소된 연료에 대한 독성 가스 생성량, 탄소에 대한 수소의 질량 비율, 연

료의 연소에 의해 생성되는 CO₂에 대한 CO의 질량 비율, 연료의 연소에 의해 생성된 CO₂에 대한 C의 질량 비율

• 발화실의 위치, 화재 유형, 발화 부위

(2) 거주인의 피난 및 상해 여부를 결정하는데 필요한 자료

- 구획부분의 수
- Node (방, 출입문 또는 창문 사이의 방이나, 어떤 통로 등) 수
- 구획 부분의 실 번호와 피난 노드 사이의 배치 상태
- 피난실 번호와 피난 노드 사이의 배치 상태
- 피난 노드의 상부 높이
- 피난 노드의 바닥 높이
- 각 피난 노드에서의 기본 소음 정도 (decibel)

• 화재감지기가 있으면 감지기의 수, 위치, 경보가 울리는 시간, 경보가 울릴 때 각 피난 노드에서의 들리는 정도 (decibel)

- 피난 노드 사이의 최근접 거리
- 건물내 거주인의 수
- 각 사람에 대한 연령, 성별, 수면 상태 여부, 위치, 대피시 도움 필요 여부, 보행 속도

다. 결과 자료

(1) 화재시 연소 생성물의 변화량 <그림 1>의 「FAST」실행 후 생성된 화일을 프린터로 출력하면 시간 경과에 따른 각 구획부분 (compartment)에서의 다음의 내용을 알 수 있다.

- 실내 윗부분 및 아랫 부분의 온도
- 실내 윗부분의 연기 (독성 가

가스 포함) 축적 상태

- 천정의 온도
- 벽체 윗부분과 아랫부분의 온도

- 검댕의 생성량 (kg/s)
- 열분해 속도 (kg/s)
- 화재 크기 (fire size, Watt)
- 바닥 부분의 온도
- 실내 윗부분 및 아랫부분에서의 연기열 방출량 (Watt)

- 단위 면적당 열 방출량 (Watt/m²)

- 압력
- 실내 윗 부분 및 아랫 부분에서의 N₂, O₂, CO₂, CO, 미연소 가스, H₂O 농도, 연기 시계 농도 (smoke optical density, ℓ/m) 연소 가스 축적량 (연소 가스 농도 × 시간 g.min/3m)

(2) 건물내 주거인의 피난 경로와 피난 시간

<그림 1>의 「EXITT」 실행 후 생성된 화일을 프린터로 출력하면 건물내 각 사람이 시간의 경과에 따라 어떻게 행동하고 어떤 경로를 따라 피난하는가를 알 수 있다.

(3) 거주인의 상해 여부

<그림 1>의 「TENAB」 실행 후 생성된 화일을 프린터로 출력하면 인간의 활동이 곤란한 정도와 치명적인 상태에 직면하는 기준을 제시하고, 건물내 각 사람이 시간 경과에 따라 어느 정도의 위험 상태에 노출 되었는가를 알 수 있다.

라. 결과 자료에 대한 검토

(1) 시간 경과에 따른 실내 물리 ·

<표 1> 150초 부근

항 목	구 획 구 분 (compartment)					
	1	2	3	4	5	6
온도 (K)	429.2	360.6	307.6	296.5	293.3	293.0
화재 크기 (Watt)	145,000	0	0	0	0	0
산소 농도 (%)	18.4	19.1	20.3	20.7	20.7	20.7
일산화탄소 농도 (ppm)	1.49	609	147	23.1	3.11	0.317
수증기 농도 (%)	1.51	1.05	0.254	0.03993	0.00538	0.00056
연기 시계 농도 (ℓ/m)	1.49	1.37	0.590	0.108	0.01473	0.00543
Layer depth (m)	1.3	1.2	0.7	0.7	1.4	0.0

註 : Layer depth-화재모형 중 ZONE모델은 각 실을 두개의 경계면 즉, 윗 부분과 아랫 부분으로 나누어 물리 화학적 특성을 나타내는데 Layer depth란 천정면에서 아래로의 길이를 말함. 즉 화재시 연소생성물이 천정으로 올라가서 윗 부분부터 채우고 아래로 내려오므로 Layer depth가 커질수록 피난하기가 곤란하다.

예) 천정 높이가 2.4m인 실내에서 Layer depth가 2.4m이면 그 부분을 통과하는 것은 불가능하다.

<표 2> 200초 부근

항 목	구 획 구 분 (compartment)					
	1	2	3	4	5	6
온도 (K)	586.4	452.2	339.8	302.5	300.2	293.1
화재 크기 (KW)	47.9	0	0	0	0	0
산소 농도 (%)	15.4	16.8	19.5	20.6	20.5	20.7
일산화탄소 농도 (ppm)	1,990	1,448	464	60.6	78.5	2.19
수증기 농도 (%)	3.44	2.51	0.803	0.105	0.136	0.00379
연기 시계 농도 (ℓ/m)	2.35	2.34	1.36	0.256	0.300	0.00631
Layer depth (m)	1.7	1.5	1.3	1.1	3.7	0.6

화학적 특성값

(가) 최대치

CO : 1,400초에서 2,271 ppm,
미연소 가스량 : 700초에서 76%,
온도 : 250초에서 898.1 K,
화재 크기 : 250초에서 1,503KW,
검댕의 생성량 (0.8749Kg/s)

(나) 최소치

O₂ : 700초에서 2.15%

(2) 화재 발견후 피난 시점까지 시간에서의 중요 특성치

(150초 및 200초 경과 시의 자료는 <표 1><표 2>참조)

(3) 주거인의 피난 경로와 피난 시간

(가) 아버지

- 141초에 화재를 발견
- 148.9초에 아들을 깨우러 감
- 152.7초에 아들을 깨움
- 164.2초에 현관 출입문을 통

하여 피난

(나) 어머니

- 141초에 화재를 발견
- 154.3초에 현관 출입문을 통하여 피난
- (대) 아들
 - 152.7초에 아버지가 깨워서 일어남
 - 166.7초에 현관 출입문을 통하여 피난
- (래) 딸
 - 141초에 화재를 발견
 - 152.8초에 현관 출입문을 통하여 피난
- (4) 거주인의 상해 여부
온가족이 무사히 피난하여 사상자는 없음
- (5) 결과

화재를 141초에 발견하여 모두가 안전하게 옥외로 무사히 대피한 것으로 결과가 나왔다. 하지만 경보설비에 의해 화재를 인식할 수 있었으므로 경보설비가 없었을 경우는 화재 발생 후 상당한 시간이 경과된 뒤에 화재를 발견하게 되므로 피난에 상당한 시간이 소요되고 연소 가스의 확산으로 인하여 2층의 출입문을 열고 계단을 통하여 1층 아래로 대피하는 것은 사실상 불가능하였을 것으로 생각된다. 또한, 부부침실이 1층에 있었다면 2층 침실에서 깊이 잠자고 있는 아들을 대피시키는 데는 상당한 어려움과 시간이 소요되었을 것으로 생각된다. 그리고 2층과 연결된 계단이 1층 거실(구회부분 1번)중앙에서 올라가도록 구조가 되어 있었다면 발화실의 유독성 가스가 2층으로 확산되기가 용이하여 2층의 온가

〈표3〉 건물내 거주인 피난경로 피난 시간

ACTIONS TAKEN BY PERSON 1

NODE	ROOM	TIME	SAVING	SAVED BY	DESTINATION	ACTION
6	6	0.0	-	-	-	INITIAL POSITION
6	6	141.0	-	-	20	INVESTIGATE FIRE
18	5	144.6	-	-	20	ARRIVE AT NEW NODE
19	5	145.9	-	-	20	ARRIVE AT NEW NODE
19	5	146.9	-	-	-	ALERTED BY ANOTHER
						END INVESTIGATION
19	5	148.9	3	-	9	GO TO AWAKEN OTHER
18	5	149.9	3	-	9	ARRIVE AT NEW NODE
28	6	151.6	3	-	9	ARRIVE AT NEW NODE
9	6	152.7	3	-	9	ARRIVE AT NEW NODE
9	6	152.7	3	-	-	AWAKEN OCCUPANT
9	6	155.2	-	-	-	LEAVE BUILDING
28	6	156.2	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
18	5	157.9	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
19	5	158.9	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
25	5	160.2	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
26	5	163.5	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
10	7	164.2	-	-	10	LEAVE BUILDING THROUGH DOOR

ACTIONS TAKEN BY PERSON 2

NODE	ROOM	TIME	SAVING	SAVED BY	DESTINATION	ACTION
6	6	0.0	-	-	-	INITIAL POSITION
6	6	141.0	-	-	20	INVESTIGATE FIRE
18	5	144.6	-	-	20	ARRIVE AT NEW NODE
19	5	145.9	-	-	20	ARRIVE AT NEW NODE
19	5	146.9	-	-	-	ALERTED BY ANOTHER
						END INVESTIGATION
19	5	148.9	-	-	-	LEAVE BUILDING
25	5	150.3	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
26	5	153.5	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
10	7	154.3	-	-	10	LEAVE BUILDING THROUGH DOOR

족이 1층을 통하여 옥외로 피난하기는 곤란하였을 것으로 판단된다.

따라서 건물 설계 단계에서 건

물의 본래 기능을 살리는 것은 물론 화재시 화염 전파, 화재 하중, 내장 재료의 열분해시 물성 특성, 피난에 대한 사항 등을 고

ACTIONS TAKEN BY PERSON 3

NODE	ROOM	TIME	SAVING	SAVED BY	DESTINATION	ACTION
9	6	0.0	-	-	-	INITIAL POSITION
9	6	152.7	-	1	-	BEING AWAKENED
9	6	157.7	-	-	-	LEAVE BUILDING
28	6	158.7	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
18	5	160.4	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
19	5	161.4	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
25	5	162.7	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
26	5	166.0	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
10	7	166.7	-	-	10	LEAVE BUILDING THROUGH DOOR

ACTIONS TAKEN BY PERSON 4

NODE	ROOM	TIME	SAVING	SAVED BY	DESTINATION	ACTION
8	6	0.0	-	-	-	INITIAL POSITION
8	6	141.0	-	-	20	INVESTIGATE FIRE
18	5	142.8	-	-	20	ARRIVE AT NEW NODE
19	5	144.1	-	-	20	ARRIVE AT NEW NODE
25	5	145.8	-	-	20	ARRIVE AT NEW NODE
25	5	145.8	-	-	20	BAD SMOKE CURRENT ACTION STOPPED
25	5	148.8	-	-	-	LEAVE BUILDING
26	5	152.1	-	-	10	ARRIVE AT NEW NODE
10	7	152.8	-	-	10	LEAVE BUILDING THROUGH DOOR

려하여 건물내 수용인들이 옥외로 안전하게 대피할 수 있는 최대한의 시간을 확보할 수 있도록 신중히 고려하여 설계가 이루어져야 하리라 본다.

4. HAZARD I 프로그램의 한계

대부분의 화재시 발화실 이외의 타부분으로 연소 확대가 일어나는 것이 사실이나, 화재가 일어난 발

화실에서만 연소 물질이 타고, 타 부분은 연기(독성 가스 포함)에 의한 전파만 고려하였기 때문에 대부분의 일반 화재에 적용하기에는 가장 중요한 한계가 된다. 또한 주거용 건물을 대상으로 제작되어 구획부분(compartment)이 최대 6개 지역까지만 가능하고, 화재시 건물내 각 사람이 어떤 행동을 취할 것인가를 일률적으로 제시한다는 것이 사실상 어려우며 보행 속도를 단일화한 것은 문제

가 있다고 본다(만일 수용인 중의 한 사람이 보행이 어려운 경우 다른 사람이 부축하여 나갈 경우의 보행 속도는 고려해 보아야 하기 때문이다.)

또한 1차 발화원에 의해 2차 연소 물질이 어느 정도의 시간 경과후에 착화될 것인가를 결정하는 것에 여러 이론이 있지만 사실상 적용하기 어려우며, HAZARD I 프로그램에서 제시하는 물성 자료가 실험실에서 대부분 가스 버너에 의한 착화 실험치이기 때문에 실제 화재와는 상당한 차이가 있다.

그리고 HAZARD I에서 제시하는 화재 물성 자료의 항목이 얼마 안되므로 실험을 통하여 자료를 얻어야 하는 어려움이 따른다.

화재시 소화시설의 작동 여부는 전혀 고려가 되지 않음은 주지해야 할 중요한 제한 사항이 된다.

5. 응용 방안 및 앞으로의 과제

가. 응용 방안

HAZARD I 컴퓨터 프로그램을 현실에 적용하기 위해서는 우선 HAZARD I의 제약 요소중에서 특히 발화실에서 타부분으로 화재가 확산되는 것, 즉 화재성장 모델 이론이 보강되어야 하지만, 주택에만 적용한다면 실제 화재와의 차이점을 어느 정도 인정하고 HAZARD I에서 제시하는 자료를 이용하여 다음 분야에 응용할 수 있다고 판단된다.

(1) 주택 건물의 설계 이용

• 화염 전파와 연기 피해가 최소화 되도록 건축 부재 및 가구류의 선택

예) 불연·준 불연·내장재의 사용, 연소시 독성 가스의 발생률이 낮은 가구(책상, 장식장, 소파, 싱크대, 침대 등)의 사용 등

• 건물내 사람이 피난을 하는데 어려움이 없도록 구조 설계

예) 출입문의 폭, 높이, 창문의 크기, 계단의 구조 및 위치

• 경보설비 중 감지기와 벨의 위치 조정 등

(2) 화재로 인한 분쟁 발생시 이용

• 이 경우는 화재시 발화원, 화염 전파 상황, 발화 시간, 목격자의 증언 등을 토대로 면밀한 분석과 실험을 통하여 시행하여야 함

• 미국의 경우 소송 문제에서 직접 증거 자료로 채택되어 그 자료를 토대로 판결이 이루어진 사례가 최근에 있음

(3) 관계법령 제정시 건의

• 이를 위해서는 화재 시험 자료를 이용한 시뮬레이션 결과와 실제 화재시 인명 및 물적 피해 상황 등의 통계 자료를 고려하여 시행하여야 할 것으로 사료됨

• 미국의 경우 NFPA Code 제정시 참고로 하기 위해 연구중임

나. 앞으로의 과제

위에서 언급한 HAZARD I 프로그램의 한계에도 불구하고 이제까지 발표된 화재 시뮬레이션과 비교할 때, 보다 획기적인 방법으로 화재성상과 인간의 행동 예측 및 상해 여부를 결정할 것으로 평가되며, HAZARD I 프로그램의



제한 요소를 극복하기 위한 연구가 수많은 연구 인력의 투입으로 계속 이루어지고 있음은 높이 평가할만 하다고 하겠다.

화재는 건물 구조와 용도, 건물내 수용인들의 특성 및 수용품의 양상에 따라 천차만별로 다양하므로 사회적인 관심이 있는, 즉 다수의 인명 피해 및 재산 손실이 예상되는 대상체를 중심으로 각각의 모델을 개발하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이를 위해서는 자연과학(물리, 화학, 생물)에 대한 연구와 인간에 대한 심리학 등 관련 학문의 유기적인 공동연구가 병행되어야 하겠고, 이에 소요되는 비용에 대해 행정당국과

관련기관들이 협조를 아끼지 않아 할 것이다.

실제 화재시의 인명 안전 및 연소 확대를 예측하여 보다 나은 안전 기준을 제시하고 화재로 인한 인명 및 재산 보호를 위한 방법의 하나인 화재 시뮬레이션이라는 과제를 갖고 우리가 노력하여 극복해야 할 일들이 수없이 많다고 느껴지지만 HAZARD I 컴퓨터 프로그램을 두고 지속적인 연구와 노력을 경주하여 우리 현실에 부합하는 화재 시뮬레이션을 개발해야 하는 의무가 우리에게 있다고 해야 할 것이다. (●)