

# 화재컴퓨터 시뮬레이션 이해와 동향

— 미국 메릴랜드대학교 연수내용을 중심으로 —

임 홍 순

(방재시험연구소 방화구조부 선임연구원)

## 1. 머리말

이번 미국 연수는 화재현상에 대한 전반적인 이론적 근거를 찾아 다양한 관련분야에 과학적인 접근을 가능하게 하고, 첨단 기술에 보다 신속한 대응을 할 수 있는 능력을 배양함과 아울러, 컴퓨터 시뮬레이션의 선진 운영기법을 습득하여 고부가가치 성 업무를 개발함으로써 방재 전문기관으로의 위상을 확고히 하고자 하는데 있었다.

연수 교육기간은 1997년 6월 7일부터 7월 2일까지 약 25일간 일정으로 미국의 메릴랜드 주립대학교 공과대학 방화공학과에서 이루어졌으며, 화재이론 및 컴퓨터 시뮬레이션 응용에 관한 강의와 관련 주요 연구기관의 실험실 견학을 통해 화재 컴퓨터 시뮬레이션 연구의 절차와 이론적 배경을 이해하는데 도움을 받았다.

이 소고에서는 화재 컴퓨터 시뮬레이션의 이론적 배경을 이루고 있는 화재역학의 기본적 개념과 컴퓨터 시뮬레이션의 절차와 미국내 화재연구동향 등을 간략히 기술하고자 한다.

## 2. 화재역학(Fire Dynamics)의 개념적 이해

화재라는 하나의 현상을 물리 역학적 이론에 근거하여 수학적으로 해석하고자 하는 것이 화재역학이다.

다음에 언급된 사항들은 화재현상을 수치적으로 분석하기 위해서 알아야 될 기본 도구로서 이미 이론식들이 정립되어 화재시뮬레이션 등에 적용되고 있으며, 필요한 화재특성값들은 SFPE Handbook 등에 수록되어 있어 우리는 다음의 이론적 개념을 이해하면 필요로 하는 곳에 이용할 수 있을 것이다.

더우기 모든 화재이론 및 화재 DATA는 컴퓨터 시뮬레이션 응용에서 수없이 언급되는 부분들로 충분한 이해가 필수적이다.

### 가. 연소(Combustion)란?

화재 또는 연소는 에너지를 수반하는 화학적 반응으로서 빛의 형태 즉, 불꽃이라는 형태로 나타난다.

이러한 화재는 반드시 연료와 산소와 에너지가 결합되어 일어나며 결합상태에 따라 순간연소, 혼소, 불꽃 연소 등 여러가지 형태를 가지며, 각 연소과정(Process)을 이해함으로써 화재 기본개념을 현상적인 측면에서 파악하는데 도움을 준다.

### 나. 열전달(Heat Transfer)이란?

열은 온도차이에 기인한 에너지의 이동이라는 정의에 기초한다. 즉, 뜨거운 곳에서 차가운 곳으로 에너지가 이동하는 것을 말하며, 이것을 열전달이라고 한다. 열전달은 단위시간당 이동되는 열 에너지 즉, J/s 또는 W로 표현하며 전도, 대류,

복사 등의 전달경로를 통해 나타난다.

이미 잘 알려진 물리이론에 의해 우리는 어떤 재질의 열저항만 알아도 그 재질을 투과하는 열전달을 계산할 수 있으며, 어떤 유체의 열관류율만 알면 그 유체를 투과하는 대류에 의한 열전달을 역시 계산할 수 있다.

또한, 화재시 가장 큰 열전달 경로로 판단되는 복사에너지 전달은 복사체의 크기·형태와 온도, 측정지점의 거리를 알면 열전달 영향을 계산할 수 있으며, 이미 측정되어 있는 재료의 연소열 방출을 data와 측정지점 거리만 알면 역시 열전달을 계산할 수 있다. 그러므로 화재시 열에너지의 흐름 및 크기를 예측하기 위해서는 이 개념을 충실히 이해하여야 하겠다.

#### 다. 착화(Ignition)란?

어떤 고체, 액체, 기체 등 재질표면의 온도상승은 노출된 열에너지량에 근거하며, 재질표면이 가열되면 가연성 열분해가스가 재료표면의 근접부근에 생성축적되며, 이 표면 근접부근의 열분해가스의 농도가 연소범위에 들면 불꽃 연소현상을 나타낸다.

이를 착화라고 하며 우리는 이미 이론화된 착화 이론식에 의해 재질면에 피폭되는 열복사량과 재질의 밀도, 비열, 두께 또는 열저항만 알면 재질표면의 착화온도에 근거하여 착화시간을 계산할 수 있다. 이 착화시간은 건물 화재시 플래시 오버 현상을 예측하는데 하나의 요소가 된다.

#### 라. 화재전파(Flame Spread)란?

어떤 액체 또는 고체 표면에서 가연성 가스 생성과 열분해 착화가 연속적으로 이루어지며 이동해 가는 현상을 말하며, 건축 내장재 표면연소에 의한 화재확대특성을 결정한다.

그러므로 화재전파 특성은 이론식에 의해 앞서 언급한 내장재 등 재질의 착화특성을 알면 화재확대 속도를 계산할 수 있게 된다.

#### 마. 연소속도(Burnig Rate)란?

어떤 액체 또는 고체연료에 가연성 가스가 생성하여 연소되는 과정에서 단위면적의 단위시간에

따른 질량의 변화를 나타내며, 이 연소속도는 재료의 연소성장을 결정하는 하나의 화재 특성값으로 재료별 실험 data값이 SFPE Handbook 등에 수록되어 있어 필요시 이를 참고할 수 있으며, 화원의 열에너지 방출량을 계산하는데 이용된다.

#### 바. 화재플룸(Fire Plume)이란?

화재플룸은 화원이 발생하여 그 상부로 뜨거운 연소생성물과 화염의 부력에 의해 생성되는 불기둥이라 말할 수 있다. 이 플룸은 대략 1피트 정도 성장되면 난류를 형성, 격렬한 기류의 변화를 나타낸다. 이러한 화재 플룸의 크기와 변화를 많은 연구자들의 실험을 통해 화염원의 직경에 따라 난류의 변화주기를 계산할 수 있게 되었고 따라서 화염원의 직경에 의해 플룸의 높이를 계산, 예측할 수 있다. 이는 SFPE Handbook 등을 참고하여 적용할 수 있다.

#### 사. 연소 생성물(Combustion Products)

화재시는 열에너지 방출과 함께 많은 양의 화학적 연소 생성물을 배출한다. 이 성분들 중에서 이산화탄소, 연기입자, 일산화탄소가 주류를 이루고 있으며 이들은 호흡관과 시야거리 감소 등으로 화재시 대피 등 인명손실의 주된 원인이 되고 있다. 이에 많은 연구자들이 각 재료별 연소생성 특성 한계값을 통해 이미 정형화된 data를 SFPE Handbook 등에 규정하고 있으며 연기입자에 의한 가시거리 감소특성은 빛의 투과 특성이론을 이용하여 규정할 수 있다.

#### 아. 건물화재 특성(Compartment Fire)

일반적인 건물내 화재시 초기에는 실내구획 조건에 크게 영향을 받지 않으나 산소농도가 저하되고 화재실내온도가 상승함으로써 구획조건은 화재성상에서 중요한 변수요인이 된다.

실내 화재시 화재단계를 보면 착화에 의한 초기 출화단계를 거쳐, 급격한 화재성장효과 즉, 플래시 오버 현상을 나타내며, 최성기 화재단계로 성장하게 된다.

특히, 초기출화 단계와 최성기 단계를 연결하는 플래시 오버 단계를 이해하는 것은 건물화재 특성

을 이해하는데 필요하다.

플래시 오버는 구획된 실내복사열 증가에 의한 착화 및 화염전파에 이어 가연성 가스가 축적된 상태에서 갑작스런 공기에 노출이 될 때 실내 전체로 화염이 급속하게 확장되는 현상이다.

그러므로 실내의 내장재료의 화재 물성 및 실의 크기, 환기 조건 등에 의하여 플래시 오버를 예측할 수 있다.

### 3. 화재 컴퓨터 시뮬레이션이란?

미국에서는 연간 새로운 건설에 7000억불을 쓰고 있으며, 이중 약 20%는 보험비용 등을 포함하여 화재 안전분야에 사용된다. 이러한 많은 비용을 감소시키기 위하여 건물 등에 방화제품, 첨단 화재감지장치, 소화설비 등을 도입하고 있다. 다만, 이들 방화제품 및 방화설비시스템이 적정한 성능을 가지고 있는지를 검증하기 위한 방법 즉, 성능중심의 화재기준(Performance-Based Fire code)으로의 채택 추세에 맞추어, 성능있는 제품들 사이에서 과도하지도 부족하지도 않는 적정 방화성능의 시스템을 채용하여 설계 및 건축비용을 줄이고자 하고 있다.

이러한 성능 검증 예측에는 실대 규모의 실험을 하여야 하나 막대한 비용이 필요하며 현실적으로 불가능하다. 이에 대응하여 컴퓨터를 이용한 가상 실험 계산 프로그램을 가동시켜 결과를 나타내는 방법이 있는데 이를 화재 컴퓨터 시뮬레이션이라 하며, 이에 필드모델(Field Model) 및 존모델(Zone Model) 해석방법이 있다.

필드모델은 화재의 모든 경계조건(변수요인)을 감안한 엄청난 많은 수의 고차원 수치해석 방법을 동원하여 풀어야 하기 때문에 고성능의 대형 컴퓨터 등을 사용하며 많은 입력변수가 필요하기 때문에 전문가가 필요하며 많은 비용이 든다.

반면, 존모델은 주변 경계조건(변수요인) 중에서 무시할 수 있는 것들을 제거 또는 단순화시킨 수치해석 모델로서, 구입가격이 저렴하거나 무료로도 배포된다. 이는 국가 방재적 측면에서 누구나 저렴하고도 사용하기 쉬운 효율적인 평가도구

가 필요하기 때문에 국가기관인 NIST(미표준연구소)을 통해 FASTLite/CFast/HAZARD 등의 Zone Modeling 프로그램을 배포하여 건축가, 엔지니어, 기타 연구자들에게 화재에 대한 검증도구로서 사용토록 하여 국가적인 효율적 비용을 줄이고자 하고 있다.

이러한 의미에서 존(Zone)모델은 편리성과 경제성, 대중성 있는 화재평가도구로서 인정받고 있으며 점차 이용이 확대되어 일부 화재엔지니어링 회사에서 용역보고서 등에 인용한 사례를 볼 수 있었다.

다만, 존모델은 주어진 한계성이 많기 때문에 사용상의 평가오류를 범할 위험성이 높다. 가령, 존모델이 건물내 평가할 수 있는 실의 수는 연속된 3개 정도이며, 건물의 최대 크기가 제한되어 있는 등 존모델 개발자들이 실제 실험을 통해 차이를 나는 부분들을 한계조건하에서 이용할 수 있도록 하고 있다.

그러나 존모델의 한계는 어디까지나 초대형 건물, 과격적인 형태의 신공법 건물에 있어서 해당되는 문제로, 보편적인 건물에 있어서는 이용 범주내에 든다고 판단된다.

이번 연수과정에서의 존모델 프로그램으로는 FASTLite 및 CONTAM이었으며 이 프로그램들은 미국내에서 많이 사용되고 있는 것들로서 소개하면 다음과 같다.

#### 가. FASTLite(Fire growth and Smoke Transfer)

화재 및 연기유동 예측을 위해 미국표준연구소(NIST)에서 최근 개발된 컴퓨터 화재모델로서 특히, 건물화재 예측에 유용한 도구로 사용되고 있다.

이 프로그램은 도스체계에서 운영되며, 누구나 쉽게 입력 및 출력할 수 있는 그래픽 메뉴방식으로 그 절차개요는 <그림 1>과 같다.

#### 나. CONTAM

1994년 미국표준연구소(NIST)에서 실내 환기량 예측을 위해 G. Walton에 의해 개발된 것으

로, 화재시 연기 및 공기유동 예측에 사용되고 있다.

화재시 연기는 구획상호간의 압력차이에 의해 개구부 등 연결통로를 통해 이동된다. 이러한 연기 확산 이동을 차단하기 위해서는 개구부를 충분히 밀폐시키거나 화재실의 압력보다 타실부분의 압력이 높도록 인위적으로 가압하여 연기를 제어해야 한다.

이러한 건물조건에 따라 주어지는 구획실간의 압력차를 컴퓨터를 통해 계산, 예측하여 효율적

연기유동 대책을 강구하고자 하는 것이다.

이 프로그램은 도스체계에서 운영되며, 그래픽 메뉴방식으로 그 절차개요는 <그림 2>와 같다.

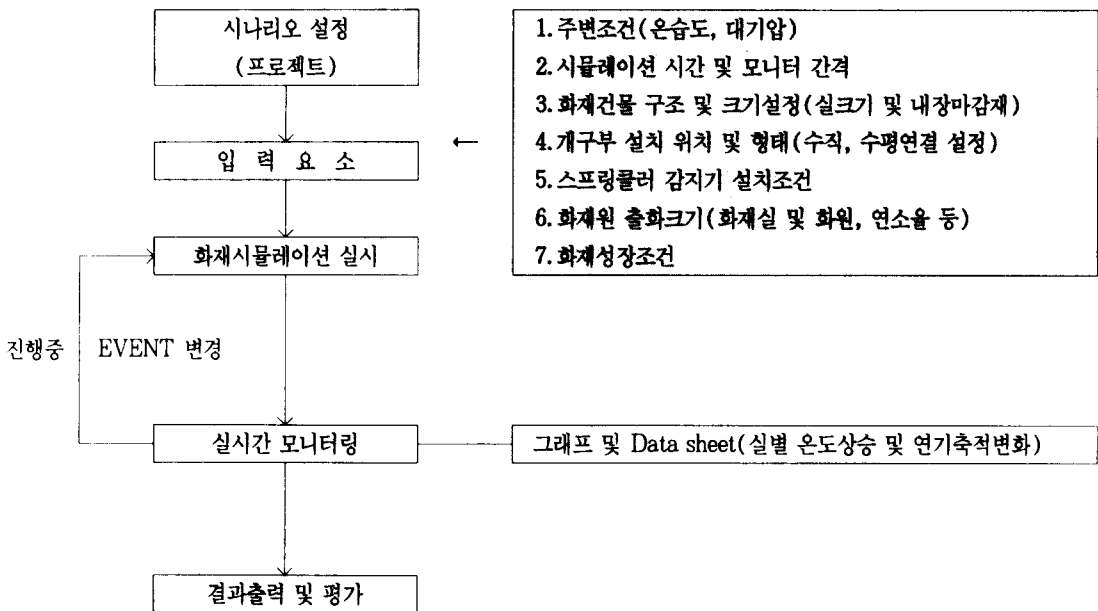
#### 4. 미국의 첨단 화재연구 및 컴퓨터 시뮬레이션 동향

##### 가. 화재역학과 관련한 첨단 연구분야

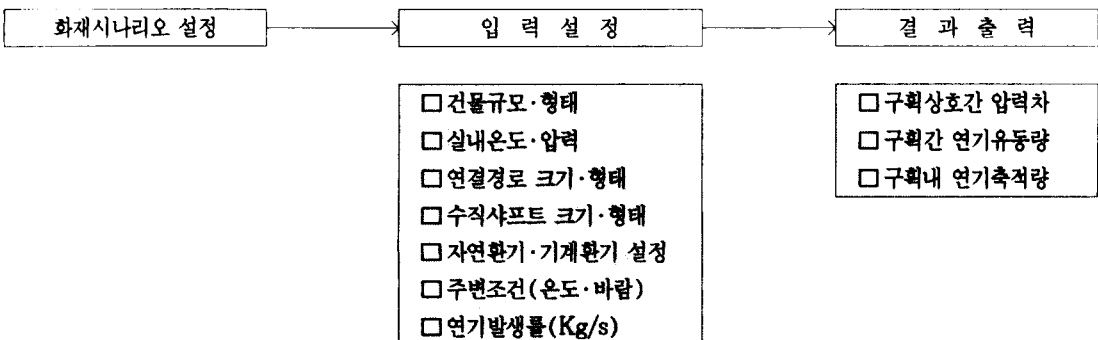
(1) Interaction between a fire plume and the droplet from a sprinkler

스프링클러의 소화능력은 살수분포, 수적(물입

<그림 1> FASTLite 절차 개요도



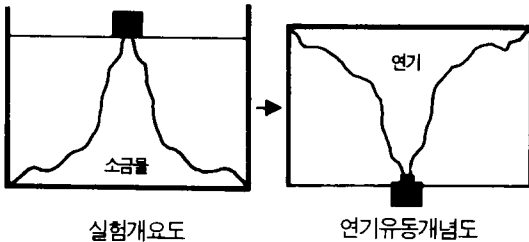
<그림 2> CONTAM 절차 개요도



자, droplet)의 크기, 그리고 화재에 작용되는 수적운동량과 직접적으로 관련이 있다. 수적의 크기 및 운동량은 화재시험으로 평가하여 왔으나 최근에는 직접 해석하고자 하는 신연구 분야이다.

(2) Salt-Water Analogy

소금물과 물의 밀도차를 이용하여 축소모형에서 연기유동을 해석하는 기법이다.



(3) Hot Smoke Test

제연설비는 수력학과는 달리 해석이 거의 불가능하다. 따라서 설치된 현장에서 안전한 연기를 발생시키는 방법과 제연설비의 실제 성능을 평가하는 시험방법으로 특수공간에 대하여 적용되는 신기술이다.

(4) Scaling Law

화재는 다른 물리적인 현상에 비하여 다양하고 규모가 상대적으로 크다. 따라서 화재발생 현상을 실제크기로 시험하기는 어렵기 때문에 과학적인 해석과 평가를 통해 축소모형을 이용하여 화재관련 연구를 수행하고자 하는 방법론에 대한 연구이다.

나. 미국의 컴퓨터 시뮬레이션 동향

미국 국립표준연구소(NIST)에서는 FASTLite 등 Zone modeling 프로그램의 배포를 통해 경제적이고 효율적으로 화재설계·검증을 할 수 있도록 하고 있으며 이와 관련, 다음과 같은 연구를 수행하고 있다.

- (1) FASTLite 등 Zone modeling 프로그램을 사용하여 현행 기준규정이 건물에 대해 방화성능 적용이 적정한지를 판단하기 위한 시스템
- (2) 화재모델링을 위한 통신형 컴퓨터설계 시스템

지역과 거리에 관계없이 여러 사람이 인터넷 등 온라인 상태에서 성능기준 적용을 위한 콘소시엄을 형성, 모델링 검증방법을 개발하는 것이다. 즉 건축가, 엔지니어가 혁신적 설계형태의 건물 또는 신소재를 적용할 때 현행 기준에 맞추어 한 사람이 검토하기에는 부적절한 경우가 많아 이를 효율적으로 대처하고자 하는 것이다.

다. 미국의 화재예측 프로그램의 주요 활용

NIST 등 주요 연구기관들의 각종 화재예측 프로그램의 보급에 힘입어 건축설계회사, 엔지니어링회사 등의 용역 보고서에 Zone Model 화재프로그램을 인용하여 결론을 유도해 보는 경향을 나타내고 있으며 그 활용분야는 다음과 같다.

- (1) 피난시간(Egress Time) 예측
- (2) 스프링클러/감지기 대응특성 예측
- (3) 화재성장(Fire Growth) 예측
- (4) 연기유동(Smoke Movement) 예측
- (5) 플래시오버 현상 예측
- (6) 적용 내화성능 결정

라. 미국의 화재관련 대학교육과정(커리큘럼)

미국내 화재관련 대학교육기관은 메릴랜드주립대학 방화공학과가 유일하며, 1956년 개설되어 1962년에 첫 졸업생을 배출하였다.

현재 100여명이 전공하고 있고 학부와 대학원 과정(표 1-표 3 참조)을 두고 있으며, 교수진들은 화재연구분야에서 국제적인 연구경력을 가지고 있었다.

5. 맺는 말

메릴랜드 주립대학 방화공학과에서의 연수과정과 미국 NIST 등 주요 화재 연구기관 방문 등의 경험을 통해 다음과 같은 몇가지 결론에 도달하였다.

가. 화재이론의 중요성

국내에서는 화재현상에 대한 물리적인 이해보다는 법 또는 규정에만 의존하여 방화대책을 수립하고 있다.

최근에는 대형 복합건물 그리고 호텔에 아트리움과 같은 대공간이 존재한다. 이러한 대공간에 기존 건축법 또는 소방법에 의하여 피난설계, 소화설비 및 제연설비를 설치할 경우에는 실제 목적

에 부합하지 않아서 대형 화재사고가 발생할 가능성이 높다.

한 예로서 소화설비 중 가장 중요한 스프링클러의 경우에는 너무 높은 곳에 설치하면 화재가 발

〈표 1〉 방화공학부 커리큘럼 현황

| 학 년 | 과 목 명                  | 강 의 시 간 |     | 비 고       |
|-----|------------------------|---------|-----|-----------|
|     |                        | 1학기     | 2학기 |           |
| 1   | 교 양 과 목                | 3       | 6   |           |
|     | 일 반 화 학                | 4       | (4) |           |
|     | 분 석 수 학 (1) (2)        | 4       | 4   |           |
|     | 공 학 설 계 개 론            | 3       | —   |           |
|     | 통 계 학                  | —       | 2   |           |
|     | 일 반 물 리 학              | —       | 3   |           |
|     | 소 계                    | 14      | 15  |           |
| 2   | 교 양 과 목                | 3       | 3   |           |
|     | 선 형 대 수 학, 분 석 수 학 (3) | 4       | —   |           |
|     | 미 분 방 정 식              | —       | 3   |           |
|     | 일 반 물 리 학              | 4       | 4   |           |
|     | 재 료 역 학                | 3       | 3   |           |
|     | 방 화 공 학 개 론            | 3       | —   |           |
|     | 방 화 시 스템 설 계 (경 보 설 비) | —       | 3   |           |
| 소 계 | 17                     | 16      |     |           |
| 3   | 교 양 과 목                | 3       | 6   |           |
|     | 컴 퓨 터 응 용 분 석          | 3       | —   |           |
|     | 방 화 유 체 역 학            | 3       | —   |           |
|     | 방 화 시 스템 설 계 (소 화 설 비) | —       | 3   |           |
|     | 방 화 열 전 달              | —       | 3   |           |
|     | 화 재 평 가 기 법 및 실 험      | 4       | —   |           |
|     | 열 역 학                  | —       | 3   |           |
|     | 선 택 과 목                | 3       | —   |           |
| 소 계 | 16                     | 15      |     |           |
| 4   | 교 양 과 목                | 3       | —   |           |
|     | 방 화 구 조 학              | —       | 3   |           |
|     | 화 재 위 험 평 가            | —       | 3   |           |
|     | 화 재 연 소 학              | 3       | —   |           |
|     | 사 고 분 석 및 계 획          | —       | 3   |           |
|     | 안 전 및 위 험 분 석          | 3       | —   |           |
|     | 선 택 과 목                | 6       | 3   |           |
|     | 세 미 나                  | —       | 1   |           |
|     | 소 계                    | 15      | 13  |           |
| —   | 총 강 의 시 간              | —       | —   | 121-125시간 |

생하여도 감열체의 파괴가 일어나지 않아서 무용지물이 될 가능성이 많으며, 제연설비의 경우도 공조시스템과 같은 부대시설과 상호작용하여 설계의도에 부합하지 않을 수가 있다.

그러나 선진국에서는 기존 규정이나 법이 합리적이지 못한 경우에는 화재이론적 배경을 근간으로 하는 과학적인 기술을 통하여 이러한 문제를 해결하고 있다.

그러므로 모든 화재관련 분야에 종사하는 사람이라면 화재에 대한 과학적인 지식의 습득은 필수적이라 하겠다. 특히, 최근에는 새로운 건축물이 대두되고 있어 기존의 건축법, 소방법만으로는 화재에 대한 대책수립이 불가능하여 화재에 대한 이

론적 배경을 충실히 이해하는 것이 필연적이다.

#### 나. 체계적인 화재연구과정을 갖춘 대학원 수준 교육기관 육성 필요

현재 국내에는 소방안전학과가 있으나 기능적 교육에 치중하는 경우가 많고, 고급 연구자를 양성하는 일은 미흡한 실정이다.

더우기 화재는 종합 학문이 결합된 시스템공학 분야이므로 기계, 전기, 화학, 건축, 전자, 산업공학, 물리학, 통계, 수학 등 유수 공학분야를 전공한 사람들을 화재이론 연구와 관련된 전문 연구과정을 통해 기초과학에 충실한 고급 전문가를 배출토록 하여야 하겠다.

#### 다. 화재 컴퓨터 시뮬레이션의 필요성

미국에서는 건물 화재설계시 낭비적인 요소를 제거한 적정성능의 시스템 도입을 위해 화재 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하고 있다.

그러나 국내에서는 건물 방재 설계시 소방법과 경험에 의존하는 경우가 많은 실정이다. 이는 법 적용의 경직성과 과다 안전설계의 낭비적 요소를 가지고 있으므로, 성능있는 제품들 사이에서 과도하지도 부족하지도 않는 적정 방화성능의 시스템을 채용하여 설계 및 건축비용을 줄이기 위해서는 효율적인 평가 예측도구가 필요하다.

그러므로, Zone Modeling 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램 이용 확산을 통해 건축가, 엔지니어, 기타 연구자들에게 화재에 대한 검증기준을 제시하고 비효율적 비용을 줄이는 효과를 볼 수 있을 것이다.

#### 라. 화재모델링 보급과 협회의 역할

외국에서 이미 연구 개발된 표준적인 선진 화재 모델링 기술을 도입, 학계와 공동으로 방재시험연구소에서 대규모 모형 실험 등의 검증절차를 거친 후, 방재관련 다수 이용자들에게 화재모델링 기술 정보를 제공하여 국내 건물 화재설계의 효율화에 협회의 역할을 제고하기 위함이다.

(표 2) 대학원 커리큘럼 현황

| 분 야                      | 세 부 전 공   | 비고 |
|--------------------------|-----------|----|
| 화재모델링<br>(Fire Modeling) | 분석공학및수치해석 | FM |
|                          | 열 공 학     |    |
|                          | 재 료 공 학   |    |
| 위험분석<br>(Risk Analysis)  | 신 리 도 공 학 | RA |
|                          | 수 치 연 산   |    |
|                          | 통 계 분 석   |    |

(표 3) 대학원 전공과목 현황

| 과 목 명           | 강의시간 | 비고 |
|-----------------|------|----|
| 방 화 위 험 분 석     | 3    | 공통 |
| 화 재 역 학         | 3    | "  |
| 인 명 안 전 분 석     | 3    | RA |
| 방 화 공 학 주 제     | 3    | 공통 |
| 신 리 도 및 위 험 분 석 | 3    | RA |
| 입 자 및 유 체 전 파   | 3    | FM |
| 독 성 평 가 분 석     | 3    | RA |
| 피 난 성 상 및 계 획   | 3    | RA |
| 전 공 세 미 나       | 1    | 공통 |
| 화 재 역 학 실 험     | 3    | FM |
| 방 화 구 조 분 석     | 3    | FM |
| 방 화 공 학 위 험 분 석 | 3    | 공통 |
| 사 고 분 석         | 3    | "  |
| 화 재 모 델 링 기 법   | 3    | FM |
| 방 화 공 학 주 제 토 론 | 3    | 공통 |
| 주 제 연 구         | 3    | "  |