

밀폐된 구획의 창유리 파단시 화재 특성에 관한 수치적 연구

A Numerical Study of Fire Dynamics of The Enclosed Compartment with Window Glass Breaking

전 홍 균*
Jeon, Heung-Kyun
최 영 상*
Choi, Young-Sang

Abstract

The use of computer supported fire safety engineering calculations has grown significantly in recent years and will be increased rapidly.

In this study, in order to examine for fire dynamics of the enclosed compartment with window glass(3mm, 4mm thickness) when the window glass breaks, we conducted numerical computer simulations about foam sofa fire with the zone type computer model, FASTLite package(version 1.1.2) and the Berkeley algorithm for breaking window glass in a compartment fire, BREAK1 program(version 1.0).

The analysis of the results in this paper shows that there are differences of fire dynamics between open- or enclosed-state compartment fire and the enclosed compartment fire with window glass breaking.

It is also shown in this study that backdraft phenomenon occurs due to accumulated unburned combustible fuel when the glass of 4mm thickness breaks, and that temperature differences between the inner- and outer-surfaces of 3mm and 4mm thick glasses are appreciable.

This study will help fire fighter to establish fire suppression or occupant's refuge strategies and fire safety engineer to enhance computer simulation techniques about the fire dynamics of compartment fire.

Key Words : The Enclosed Compartment, Zone Model, Window Glass Breaking, Vitiated Combustion, Backdraft

* 대구보건대학 소방안전관리과

국문요약

최근에 소방안전과 관련된 화재 현상의 수치해석 연구를 위한 컴퓨터의 이용이 크게 증가하고 있는 실정이다.

밀폐된 구획의 창유리(3mm, 4mm 두께) 파단시 화재의 동특성을 조사하기 위하여 zone형 컴퓨터 수치해석 프로그램인 FASTLite(version 1.1.2)와 창유리 파단 시간 계산 프로그램인 BREAK1(version 1.0)을 사용하여 foam sofa 화재에 대한 모의 실험을 하였다.

본 연구를 통하여 개방- 혹은 밀폐-상태의 구획 화재의 동특성과 밀폐된 구획의 창유리 파단시 화재 동특성 사이에 큰 차이가 있음을 확인하였다.

또 4mm 두께 유리의 경우 비정상 연소로 인해 발생·축적된 미연소 가연성 가스에 의해 backdraft 현상이 발생함을 볼 수 있었고, 3mm와 4mm 두께의 유리 내·외면에 온도차가 있음을 확인하였다.

본 연구의 결과는 소방대원의 화재진압 혹은 피난을 위한 소방전술과 소방안전 공학도의 구획 화재 관련 컴퓨터 수치 해석 프로그램의 운영 기법을 향상시키는데 큰 도움이 되리라 생각된다.

1. 서 론

사회가 발전될 수록 건물과 관련 장치의 구조는 매우 복잡하고 다양한 형태로 이루어지게 되며, 이에 따른 화재 발생의 가능성은 더욱더 높아지게 되어, 이로 인한 인간의 화재에 대한 불안은 과거 어느 때 보다 높다고 생각되어진다. 이런 가운데 현대 과학 기술의 발전과 개인 생활의 안정이 어느 정도 실현됨에 따라 인간의 안전에 대한 관심과 욕구는 증가하게 되며, 따라서 소방안전 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음을 볼 수 있다.

화재로 인한 피해는 재산 손실과 정신적 충격이 매우 크며, 도시화와 같은 밀집된 건물에서는 그 특성상 피해가 훨씬 더 크게 나타나고 있음을 짐작할 수 있다. 또 소방대원의 화재 진압 활동 중 화재로 인한 부상 및 사망은 화재의 동특성(backdraft 포함)에 대한 이해의 부족에서 기인되는 경우가 많다¹⁾.

화재로 인한 피해의 최소화는 철저한 화재 예방을 통한 화재의 발생률을 줄이는 것과 동시에 화재시 화재의 동특성을 가장 잘 파악하여 관련 소방 대책을 수립·시행함으로써 그 목적을 이룰 수 있다고 생각되어진다. 일반적인 화재 예방은 소방관서의 경방 활동과 예방 홍보를 통하여 이루어지고 있는 반면, 화재의 동특성 분석에 대

한 연구는 여러 가지 어려움으로 인하여 그다지 많이 이루어져 있지 않은 상태이다.

현재 국내적으로 구획 공간에서의 화재 동특성과 관련된 연구는 많이 이루어져 있지 않은 상태이며, 최근에 이에 대한 관심이 높아져 소방 관련 화재 실험과 컴퓨터 모의실험이 행하여지고 있는 실정이다. 최근에 박진국 외 3인 등은 아파트에 대한 실물 화재와 zone형 모델을 사용한 화재 해석에서 flash-over와 피난 시간 등을 예측하였고²⁾, 노재성 외 6인 등은 아트리움 공간에서 화재 발생시 연기 유입에 대하여 zone형 모델과 field형 모델을 사용하여 연기 유동과 온도 분포에 관한 수치해석적 연구를 수행한 바 있다³⁾.

또 구획화재에 관한 해외의 연구 현황을 살펴보면, 1994년 G.P. Forney, W.F. Moss 등은 zone형 화재 모델링의 알고리즘을 보강하기 위하여 수치해석의 특성 분석과 개발에 관하여 연구⁴⁾를 하였고, 1996년 P.C.R. Collier은 뉴질랜드내 일반 주택 건물에 대한 실물화재의 실험 결과와 CFAST 컴퓨터 모델을 사용한 수치해석 결과와 비교·연구⁵⁾하는 등 실험적 연구와 수치해석적 연구를 병행·진행함으로써 많은 연구 자료가 축적되어져 있는 것으로 판단되어지며, 현재에도 실물 화재 실험과 특히, 컴퓨터 수치해석 분야에 많은 연구가 활발히 진행되어지고 있는 실정이다. 따라서 화재로 인한 피해의 최소화 와 최적의 화재 진압 및 피난 대책 마련을 위하

여 화재의 동특성에 대한 연구를 수행할 필요가 있다고 사료되어진다.

화재의 동특성은 실물 화재 실험을 통하여 파악하는 것이 가장 바람직하고 좋으나 이 방법은 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 어려움이 많이 따른다. 반면 컴퓨터를 이용한 수치 해석적 방법은 그 비용이 저렴하고 화재 동특성 분석에 대한 정확도도 매우 높기 때문에 현재 관련 연구를 위한 프로그램 개발이 많이 이루어지고 있으며, 또 소방 관련 소화설비의 설계와 제연 설비의 설계 및 화재시 피난 등에 관한 소방의 많은 분야에서도 화재시 그 현상에 대한 컴퓨터 수치 해석 프로그램이 많이 개발되어지고 있는 실정이다. 그러나 이러한 프로그램의 개발 추세와 달리 실질적으로 그 프로그램의 사용은 그리 많지 않은 것으로 생각되어지는데, 이것은 프로그램을 사용하고자 하는 사용자로 하여금 소방 안전과 관련된 정확한 전문지식을 요하기 있기 때문인 것으로 생각되어진다.

화재 현상에 대한 많은 수치해석 프로그램 중에서 구획 화재에 대한 여러 가지 현상을 예측하기 위한 방법으로는 zone형 모델링과 field형 모델링의 방법을 사용한 프로그램이 있다. 일반적으로 널리 사용되어지는 2-layer zone형 모델(이하 zone형 모델로 표기)은 관찰하고자 하는 검사영역 혹은 계를 간단히 2개의 뚜렷한 영역, 즉 상부의 고온 가스층과 하부의 찬 공기 층으로 구분하여 화재의 현상을 예측한다. 이때 화재는 에너지와 질량의 공급원으로써 표현되어지며 열기류(plume)에 의해 하부의 찬 공기 층에서 상부의 고온 가스층으로 '흡입'(entrainment)이라는 과정을 통하여 질량을 퍼 올리는 'pump'의 역할을 하게 된다⁶⁾. 이러한 zone형 모델링은 1970년도 중반에 개발되어져 구획 화재의 제 현상에 대한 연구에 많은 도움을 주었다. 그러나 이 모델은 짧은 시간에 화재로 인한 공간내의 물리적 현상을 예측하는데는 유리하지만 공간내의 세부적인 상태를 파악하는 데에는 부족한 점이 있다고 평가되어지고 있다⁷⁾.

이와 반면에 field형 모델링은 관측하고자 하는 검사체적을 무수히 많은 미소 공간으로 나누

어 각 미소 공간에서의 상태량을 계산하는 방법으로써 검사체적내의 상태량을 충분히 또 정확히 계산되지만 시간이 많이 소요되어진다. 그러나 현재에는 컴퓨터의 성능이 좋아진 반면 가격이 많이 낮아져 개인용 컴퓨터의 보급과 더불어 field형 모델링의 방법이 많이 개발되어지고 있다⁸⁾.

본 연구에서는 구획된 공간에서의 화재를 중심으로 컴퓨터 수치해석의 화재 예측 프로그램을 사용하여 화재 동특성 현상을 연구하고자 한다. 지금까지는 구획화재시 제 현상의 분석 모델링으로는 단순히 밀폐 혹은 개방된 상태에서의 zone형 혹은 field형 모델을 사용하여 계산하였다. 그러나 실제 건물을 보면 건물의 한쪽 벽에는 보통 창유리가 있어 화재시 화염과 고온 층의 복사와 대류 열전달로 인하여 유리가 파단(glass breaking) 되는 경우가 많으며, 이런 경우 화재는 발생후 창유리의 파단으로 인하여 화재 상황이 화재 진행 중간에 변하게 되며, 이것은 앞에 언급한 화재 상황과는 상당한 차이가 있게 됨을 짐작할 수 있다. 따라서 이러한 화재 동특성 분석을 위해서는 이와 관련된 프로그램을 상호 복합적으로 사용할 필요가 있다고 판단되어진다.

본 연구에서는 이와 같이 화재 진행 중간에 창유리의 파단으로 인한 화재 현상을 분석하기 위하여 먼저 기본적인 zone형 모델링을 사용하여 입의의 밀폐된 구획(창유리포함)에서 화재로 인한 물리적 상태 변화를 화재 분석 프로그램인 FASTLite(version 1.1.2) 프로그램을 사용하여 계산하고⁹⁾, 이때 생성된 결과를 창유리 파단 분석 프로그램인 BREAK1(version 1.0) 프로그램의 입력 데이터로 사용하여 창유리의 표면 온도와 파단 시간을 계산하며¹⁰⁾, 다시 FASTLite 프로그램의 계산시 창유리 파단 시간에서 개방구의 면적을 변화시켜 줌으로써 실제 화재 상황에 근접한 모의실험을 수행하고자 한다. 이때 컴퓨터 모의실험을 하기 위한 각 프로그램의 화재모델과 입력 자료는 실물의 물리적, 기계적 및 기하학적 특성을 고려하여 선정하였다. 따라서 이러한 방법을 통하여 실제 화재 진행 중에 발생되어지는 제 현상을 컴퓨터 수치해석 프로그램으로

통하여 정확하게 분석되어질 수 있다고 사료되어진다.

본 연구에서는 이러한 수치해석 방법 중 가장 일반적인 건물 구조인 실내 구획 공간에서의 화재시 화재 동특성을 컴퓨터 모의실험을 통하여 살펴보고, 화재로 인한 피해의 최소화와 최적의 화재 진압 및 피난 대책을 마련하는데 그 기초 자료를 제공하고자 하며, 전체적으로 컴퓨터 모의실험의 기술과 기법을 높이고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 이 론

2.1 ZONE형 모델링

2-layer zone형 프로그램은 상대적으로 간단한 단일 실내의 2개의 검사체적(zone) 모델로써, 문 혹은 창의 틈 사이와 개방구로 환기가 되는 실내의 화재 연소에 의한 온도 상승과 연기층의 하강을 예측하는 프로그램으로써 질량보존 법칙과 에너지보존 법칙의 2가지 법칙을 바탕으로 하고 있으며(field형 모델링은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙 3가지를 바탕으로 함.)^{4, 11)} 그 기본 상태를 Fig. 1.에 나타내었다.

여기서 먼저 구획 화재시 질량 보존 식의 내용을 보면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

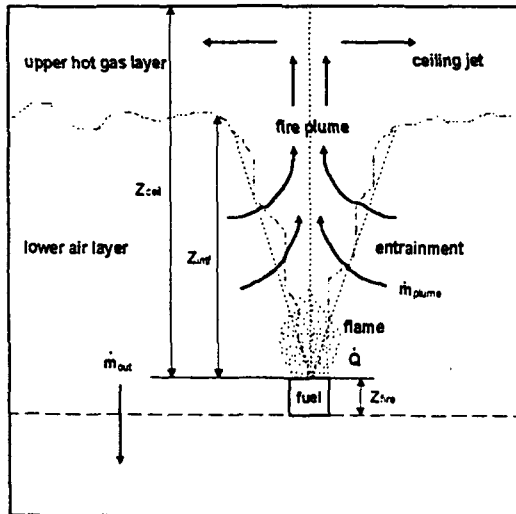


Fig. 1. Elevation Schematic of Zone Model.

$$\dot{m}_i + \dot{m}_g - \dot{m}_{out} - \dot{m}_e = \dot{m}_a \quad (1)$$

즉, 식 (1)은 {검사체적 내부로 유입되는 질량 유량} + {검사체적내의 질량 생성율} - {검사체적 외부로 유출되는 질량유량} - {검사체적내의 질량 소모율} = {검사체적내의 질량 축적율}을 나타내는 것으로써 표시된 순서에 따라 각각의 내용을 살펴보면 다음과 같다.

먼저 검사체적으로 유입되는 질량유량은 유입 환기가 없는 것으로 가정하기 때문에 0이고, 검사체적내의 질량 생성이 없기 때문에 질량 생성율도 0이 된다. 또 검사체적 외부로 유출되는 질량유량은 고온 가스층의 높이에 의존하게 되어 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$z_{inf} > -z_{fire} \text{ 경우, } \dot{m}_{out} = \frac{(1-\lambda_c)\dot{Q}}{c_{p\infty}T_{\infty}} \quad (2.a)$$

$$z_{inf} = -z_{fire} \text{ 경우, } \dot{m}_{out} = \frac{(1-\lambda_c)\dot{Q}}{c_{p\infty}T} \quad (2.b)$$

그리고 고온 가스층의 경계 높이가 연료 높이 보다 위에 있을 경우에는 열기류의 흡입량(plume entrainment)이 외부로 유출되는 질량 유량에 더해져야 하며, 이 열기류의 흡입량은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{plume} = 0.210\rho_{\infty}\sqrt{gz_{inf}}\dot{Q}^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \dot{Q}^* = \frac{(1-\lambda_r)\dot{Q}}{\rho_{\infty}c_{p\infty}T_{\infty}\sqrt{gz_{inf}}}$$

이다.

또 검사체적내의 질량 소모율은 0이 되고, 마지막으로 검사체적내의 질량 축적율은 하부의 찬 공기질량의 시간변화율로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dm_{lowerlayer}}{dt} = \rho_{\infty}A_{floor}\frac{d(z_{ceil}-z_{inf})}{dt} \quad (4)$$

식 (2) - 식 (4)를 이용하여 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 식 (5)을 얻을 수 있다.

$0 < z_{intf} \leq z_{ceil}$ 경우,

$$\rho_{\infty} A_{floor} \frac{dz_{intf}}{dt} = (-\dot{m}_{out} - \dot{m}_{plume}) \quad (5,a)$$

$-z_{fire} < z_{intf} \leq 0$ 경우,

$$\rho_{\infty} A_{floor} \frac{dz_{intf}}{dt} = -\dot{m}_{out} \quad (5,b)$$

$$z = -z_{fire} \text{ 경우, } \rho_{\infty} A_{floor} \frac{dz_{intf}}{dt} = 0 \quad (5,c)$$

위의 식을 무차원 하기 위하여 식 (6)의 무차원 매개변수를 정의하고 이것을 식 (5)에 각각 대입하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\tau = \frac{t}{t_0}, \quad \xi = \frac{z_{intf}}{L_c}, \quad \Phi = \frac{T}{T_{\infty}}, \quad \dot{q} = \frac{Q}{Q_0} \quad (6)$$

$$0 < \xi \leq \xi_{ceil} \text{ 경우, } \frac{d\xi}{d\tau} = -c_1 \dot{q} - c_2 \dot{q}^{\frac{1}{3}} \xi^{\frac{5}{3}} \quad (7,a)$$

$$-\xi_{fire} < \xi \leq 0 \text{ 경우, } \frac{d\xi}{d\tau} = -c_1 \dot{q} \quad (7,b)$$

$$\xi = -\xi_{fire} \text{ 경우, } \frac{d\xi}{d\tau} = 0 \quad (7,c)$$

여기서 식 (7.a)의 첫 번째 항은 연소 열분해에 의한 것이고, 둘째 항은 열기류의 흡입(plume entrainment)에 의한 것이다.

앞의 질량 보존 식의 경우와 같은 방법으로 에너지 보존 식을 정리하면 식 (8)로 나타낼 수 있게 된다.

$0 < \xi \leq \xi_{ceil}$ 경우,

$$\frac{d\Phi}{d\tau} = \frac{\Phi [c_1 \dot{q} - (\Phi - 1) c_2 \dot{q}^{\frac{1}{3}} \xi^{\frac{5}{3}}]}{(\xi_{ceil} - \xi)} \quad (8,a)$$

$$-\xi_{fire} < \xi \leq 0 \text{ 경우, } \frac{d\Phi}{d\tau} = \frac{c_1 \Phi \dot{q}}{(\xi_{ceil} + \xi)} \quad (8,b)$$

여기서

$$c_1 = \frac{(1 - \lambda_c) t_c Q_0}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} A_{floor} L_c}$$

$$c_2 = \left[\frac{0.21 t_c}{A_{floor}} \right] \left[\frac{(1 - \lambda_r) Q_0 g L_s^2}{(\rho_{\infty} c_p T_{\infty})} \right]^{\frac{1}{3}}$$

이다.

이 에너지 보존 식은 상부 고온 가스층의 검사체에 적용되어지며, 여기서 식 (8.a)의 첫 번째 항은 연소 연료로부터 생성되는 것이고, 둘째 항은 열기류로 흡입되어지는 공기(plume-entrained air)에 의한 것이다. 위의 식 (8.a)는 고온 가스층의 하부 경계가 연소되어지는 가연물 보다 높은 위치에 있을 경우에 적용되고, 식 (8.b)는 경계가 가연물 보다 낮은 경우에 적용된다.

이때 식 (7)과 식 (8)은 1차 비선형 상미분 방정식(ODE)으로 ξ 값이 두 식에 존재함으로써 상호 동시에 풀어야 한다¹²⁾.

Fig. 1.에서 나타낸 바와 같이 화재 열기류(plume)는 연소에 의한 열분해 생성물과 주위의 찬 공기를 상부 층으로 흡입(entrainment)한다. 주위의 공기는 열기류의 외곽 경계에서 발생하는 혼합에 의하여 상승하는 열기류 속으로 빨려 들어가게 된다. 이러한 혼합은 주로 마찰 때문에 발생하고 확산에 의해 정도가 약해지며, 이때 와류(eddy/vortex)가 발생하고 순환하는 와류 이후에 형성되는 저압 영역 안으로 주위의 찬 공기가 빨려 들어가게 된다.

열기류가 상승하면서 부력을 갖는 연소 가스 와 주위에서 흡입된 공기가 혼합되어 확산, 냉각되어 속도가 느려지면서 천천히 상승하게 된다. 또 부력 혹은 운동량이 감소하면 유체의 유동은 멈추게 되고, 이와 동시에 흡입과정도 정지하게 된다. 이와 같은 열기류 확산은 흡입(entrainment)이 시작되어지는 위치에서 흡입과 열기류의 상승이 멈추는 곳까지 이르게 된다.

대부분의 구획 화재는 부력에 의한 유체의 유동이 이루어진다고 볼 수 있고, 이러한 흡입과정은 매우 복잡하여 실험에 의한 수정이 이루어지며, 이것은 열기류의 높이에 강하게 의존하게 된다. 열기류 안으로 빨려 들어가는 주위의 공기량은 상승하는 흡입 높이에 5/3승에 비례하기 때문에 흡입 높이(entrainment height)는 화재 모델링에 중요한 인자로써 작용한다¹³⁾.

2.2 창유리 파단 모델링

보통 유리는 잘 깨어지는 물질로써 수정체의

성질과 비슷하며, 그 강도의 범위는 넓은 것으로 알려져 있으며, 파단 응력값 이하의 탄성 영역에서는 외부 하중을 제거하면 원래의 상태로 되돌아간다.

일반적으로 건물은 이런 유리가 실내 한 벽에 창유리로 되어 있는 경우가 많으며, 이런 경우 구획실 내의 화재로 인한 열유속의 크기에 따라 유리가 파단하게 된다. 이때 화재로 인한 창유리의 파단은 화재 특성에 매우 중요한 문제로 대두되어진다¹⁴⁾. 즉, 창은 유리의 파단 전에는 벽으로써 작용하고, 파단 후에는 환기구(vent)로써 작용함으로써 화재 진행 중에 화재의 상태를 상당히 크게 바꾸는 역할을 하게 된다. 따라서 창유리의 파단 시간을 안다는 것은 진행되는 구획화재의 상태를 정확하게 예측하는데 결정적으로 중요하다.

Emmons는 화재시 창유리 파단의 중요성을 강조하였고, 실험을 기초로 하여 유리 파단에 대한 메카니즘으로써 열적으로 야기되는 인장 응력을 제시하였다. 즉, 유리의 파단 시간은 유리의 가려진 테두리에서의 인장응력이 파단응력(breakage stress)에 도달하는데 걸리는 시간으로 정의되어진다.

보통 창유리는 상당히 낮은 열전도체의 불투명한 frame 혹은 gasket에 의해 둘러싸인 테두리로 되어있다. 화재시 창문 유리의 중심부분은 화염의 직접적인 적외선 복사와 연소에 의해 발생된 상부의 고온 층 가스의 대류에 의해 가열되어지고, 반면에 유리의 테두리는 frame에 의해 가려져 있어 초기 상태 정도의 온도로 유지하게 된다. 이때 중심 부분의 열 팽창으로 인하여 가려진 테두리 부분이 인장 하게 되고, 이것이 유리의 파단 응력에 이르게 되면 결국 균열이 일어나게 되고, 이러한 균열은 두 부분으로 갈라지면서 빠르게 전파·파단 되며, 결국 창문은 화재 진행 중에 환기구로써의 역할을 하게 되는 것이다.

본 연구와 관련된 유리의 형상은 Fig. 2.에 나타내었다.

화재시 유리의 파단에 필요한 온도 상승에 관한 단순한 기준은 식 (9)와 같은 Hooke의 법칙

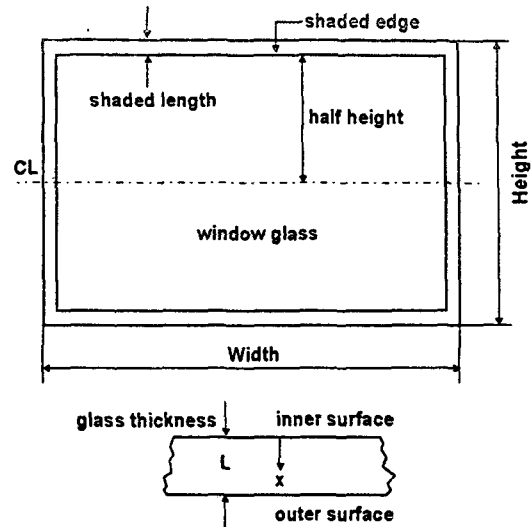


Fig. 2. Window Geometry.

을 따른다.

$$\beta \Delta T = \sigma_b / E \quad (9)$$

여기서 ΔT 는 가열되지 않는 외부 테두리의 초기 온도와 균일하게 가열되어지는 유리 중심부의 순간 온도사이의 온도차를 나타내고, β 는 유리의 열 팽창 계수, σ_b 는 유리의 파단 응력, E 는 유리의 Young 계수를 나타낸다.

또 파단 응력은 4-point flexure 법의 인장강도 실험식으로 쓸 수 있다¹⁵⁾.

$$\rho_b = \frac{3P(c-a)}{2bL^2} \quad (10)$$

여기서 P 는 파단 하중, c 는 시편 지지점 사이의 길이, a 는 하중이 작용하는 두점의 길이, b 는 유리 시편의 폭, L 은 유리 시편의 두께를 나타낸다.

Skelly 등은 유리창을 갖는 구획 내부에 액체 연료의 pool 화재를 일으켜 유리의 온도와 구획 내부의 고온 가스층의 온도를 시간대별로 측정하여 구획 화재에 있어서 유리 파단에 대한 실험적 연구를 수행하였는데, 이 실험을 통하여 식 (9)은 유리 파단시 유리 온도에 대한 합당한 계산이 됨을 지적하였다.

또 유리 중심의 온도 상태, $T(x,t)$ 는 다음과

같은 식으로써 정확하게 계산할 수 있다.

$$\rho_c = \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I(t) \frac{e^{-x/l}}{l} \quad (11)$$

여기서 $I(t)$ 는 화재로부터의 직접적인 입사 복사열유속, l 은 유리내의 감쇠길이를 나타내며, 유리의 초기 및 경계 조건은 다음과 같다.

$$t=0, T=T_i \quad (12)$$

$$x=0,$$

$$\begin{aligned} -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} &= h_2(T_{2\infty}(t) - T(0,t) + \epsilon_{2\infty} \sigma T_{2\infty}^4(t)) \\ -\epsilon \sigma T^4(0,t) &= q_2(t) \end{aligned} \quad (13)$$

$$x=L,$$

$$\begin{aligned} -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} &= h_1(T(L,t) - T_{1\infty}(t) + \epsilon \sigma T^4(L,t)) \\ -\epsilon_{1\infty} \sigma T_{1\infty}^4(t) &= q_1(t) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, 1, 2는 구획실의 외, 내부를 각각 나타낸다.

3. 수치해석

3.1 해석모델

본 연구의 수치해석에 사용한 해석 모델은 1개의 출입구와 한 벽의 일부가 창유리로 되어 있는 일반 소형 사무실을 기준으로 한 것으로써 Fig. 3에 나타나 있다. 구획실은 폭 5m, 길이 7m, 높이 2.44m로, 출입문은 폭 0.91m, 높이 2m로, 창은 폭 4m 높이 1m로 구성하였으며 2가지 유리(두께 3mm와 4mm)에 대하여 각각 모의 실험하였다. 또 밀폐 혹은 개방 상태의 구획 화재의 화재 특성과 비교하기 위하여 화재 초기부터 화재가 끝날 때까지 밀폐 혹은 개방 상태(창)로 하여 동일 화재 열방출율로 각각 실험하였다.

본 수치해석 실험에 사용되어진 열방출율(heat release rate) \dot{Q} 는 시간의 제곱에 비례하는 것으로 하여 foam sofa의 자유 연소(free burn)에서 발생하는 열방출율의 근사식을 이용하였다. 즉 $t=0$ 에서 화재가 시작하여 성장기는 열방출율이 $0.1736t^2$ 에 비례하는 것으로 가정하

여 계산하였다¹⁶⁾. 또 화재의 정상상태와 감쇠기는 모의 실험의 단순화를 위하여 정상상태는 실제 foam sofa 화재시 발생하는 열방출율인 3.18MW에서 시작하며 지속시간은 60초이고, 감쇠기는 성장기와 대칭을 이루고 있다¹⁶⁾.

본 연구에 사용한 화재의 열방출율은 Fig. 4에 나타나 있다.

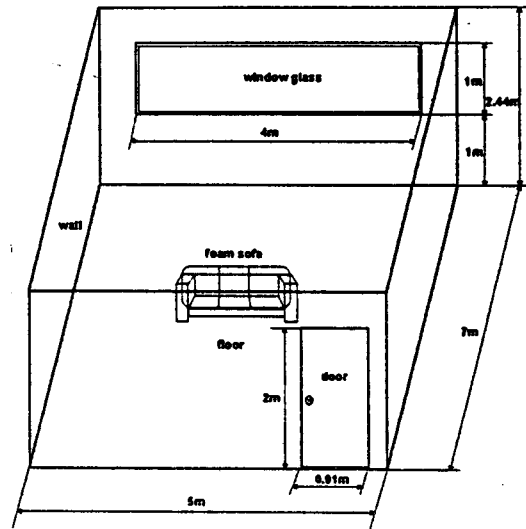


Fig. 3. Compartment Model for Fire Simulation.

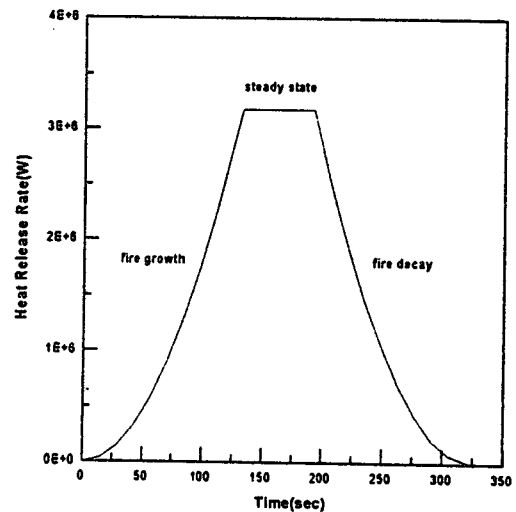


Fig. 4. Heat Release Rate of Foam Sofa(free burn).

3.2 초기 및 경계 조건

본 연구에서 사용되어지는 초기 및 경계 조건은 창유리의 파단 전, 후에 따라 다르게 선정하게 된다.

먼저 창유리 파단 전의 조건에서 구획실내의 초기 온도는 300K, 압력은 101325Pa, 상대습도는 50%이며, 창유리의 파단응력 σ_b 는 47Mpa, 열팽창계수 β 는 $3.6 \times 10^{-6} K^{-1}$, Young 계수 E는 70GPa고, 열전도계수 κ 는 0.76W/m·K, 열확산 계수 α 는 $3.6 \times 10^{-7} m^2/s$, 감쇠길이 l은 1mm이고, 두께 L은 3, 4mm, 가려진 폭 s는 10mm, 반 폭 길이 H는 0.5m, 창유리 외부 대류 열전달 계수 h_1 은 $15.2 W/m^2 \cdot K$, 복사율 $\epsilon_{1\infty}$ 는 0.9로 일정하며, 창유리 내부 대류 열전달 계수는 $t=0$ 에서 $h_2=15.2 W/m^2 \cdot K$, $t=83$ 에서 $h_2=76 W/m^2 \cdot K$ 로 시간에 대하여 선형적으로 증가하며, 복사율 $\epsilon_{2\infty}$ 는 $t=0$ 에서 0.1, $t=100$ 초에서 0.9로 시간에 대하여 선형적으로 증가하는 것으로 취하여 계산을 수행하였다.

고온층의 복사율은 화재 초기에는 고온층의 두께가 얇기 때문에 낮고, 시간이 경과함에 따라 고온층내에 검정땀(soot), 연소생성물(products) 및 열분해물질(pyrolyzates)의 증가로 인하여 복사율은 증가하게 된다. 여기서 h_2 와 $\epsilon_{2\infty}$ 에 대해 시간의 선형적 변화는 $t=0$ 에서 유리의 열전달은 찬 가스의 자연 대류에 의하고, 시간이 경과함에 따라 가스 온도가 상승하여 유리의 열전달은 화재 열기류(fire plume)에 의한 난류 강제 대류에 의한 것을 고려하기 위함이다.

또 상부의 고온 가스층의 에너지 보존 적용 사실내 벽 경계로 전달되어지는 에너지율(rate of energy), 즉 대류와 복사에 의한 에너지 손실률(λ_c, λ_r)은 일정한 것으로 가정한다.

이 비율은 계산 동안 일정한 것으로 간주하며 본 논문에서는 각각 0.65와 0.35로 하여 계산한다.

창유리 파단 후의 조건은 단지 경계 조건의 변화 즉, 개방구의 면적이 $4m^2$ 으로 변하는 것 외는 파단전의 경우와 동일하게 취급하였다.

본 연구에서는 3mm, 4mm 두께의 두 가지 유

리를 사용하여 각각 파단 시점에서 개방구의 면적을 수정하여 계산하였고, 출력 데이터는 5초 간격으로 생성하여 기록하였다.

4. 결과 및 고찰

foam sofa 화재시 밀폐된 구획의 창유리 파단 시간과 이로 인한 화재의 동특성을 알아 보기 위하여 컴퓨터 화재 분석 프로그램인 FASTLite (version 1.1.2)와 창유리 파단 시간 예측 프로그램인 BREAK1(version 1.0)을 사용하여 모의실험 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

4.1 고온 가스층과 하부 공기층의 온도

Fig. 5.는 화재시 창유리 파단이 되지 않은 밀폐 상태의 경우와 창이 완전 개방된 상태 및 3mm, 4mm 유리의 파단 전, 후의 상부 고온 가스층의 온도 상태를 나타낸 그림이다.

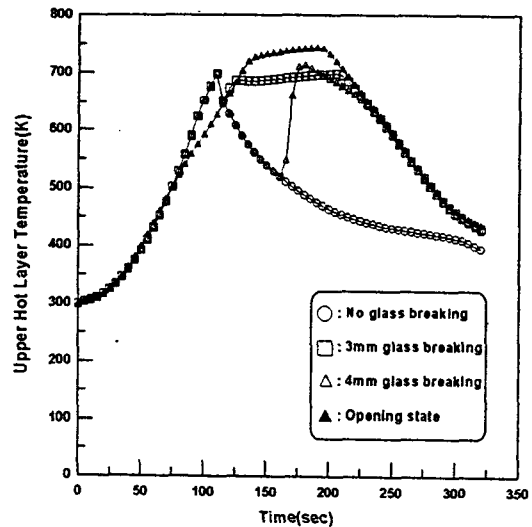


Fig. 5. Upper Hot Gas Layer Temperature.

창유리가 파단 되지 않은 경우에는 시간 $t=110$ 초에서 상부층의 온도는 $T=699K$ 으로 최대로 올라간 후 갑자기 떨어지고 이후 계속 낮아지게 됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 밀폐된 구획실내의 산소가 연소 초기에는 정상적인 공급이 이루어지나 연소 과정 중 산소가 소모되어 부

족하게 됨으로써 정상적인 연소가 이루어지지 않기 때문이다¹⁷⁾. 특히 이런 비정상 연소(vitiated combustion) 과정 중에는 불완전한 연소로 인하여 구획실내에는 비연소 가연성 연료(unburned combustible fuel)가 축적되어진다.

3mm 유리의 경우에는 Fig. 9.과 Fig. 10.에서 보는 바와 같이 t=116초에서 창유리가 파단되어지고, 이후 구획실내의 연소 생성 가스는 창을 통하여 외부로 유출되며, 이와 동시에 창의 하부로 외부의 신선한 공기가 유입하게 되면서 다시 연소가 활발히 진행되어짐에 의해 온도가 재 상승함을 나타낸다. 이때 구획실내에는 비정상 연소가 진행된 후 6초 동안에 축적된 미연소 가연성 연료 량으로 인하여 그림에서 보는 바와 같이 t=120초에서 온도 T=674.7K로 올라간 후 t=205초까지 T=700.1K로 완만히 상승한 후 떨어지게 된다. 이러한 완만한 상승은 창유리 파단이 비정상 연소 초기에 이루어짐으로써 가연물의 연소가 정상적으로 되고, 창의 면적을 통하여 연소 생성 가스의 유출과 외부 신선한 공기의 유입이 평형을 이루면서 진행되면서 가연물의 나머지 량이 연소되어지기 때문인 것으로 생각되어진다.

4mm 유리의 경우에는 Fig. 9.와 Fig. 10.에서 보는 바와 같이 t=162초에서 파단되어지고, 이후 외부의 신선한 공기가 유입되어지면서 연소가 정상적으로 진행되어 온도가 재 상승함을 나타낸다. 이때 비정상 연소가 t=110초에서부터 t=162초까지 약 52초 동안 진행되면서 구획실내에 미연소 가연성 연료가 축적되어 창유리 파단과 동시에 순간적으로 유출되어지면서 외부의 신선한 공기의 유입으로 인하여 연소가 정상적으로 진행되어 구획실내의 열방출율은 3.026MW까지 급상승하게 되고, 고온층의 온도는 t=180초에서 T=713.5K까지 올라가게 된다. 이후 온도는 일정한 영역이 없이 감소하게 되는데 이것은 3mm 유리와는 달리 비정상 연소가 길게 진행되면서 가연물이 많이 연소되어 창유리 파단과 동시에 외부로 열방출율이 많이 방출되어 감소되어졌기 때문인 것으로 생각된다.

처음부터 창의 개방되어진 경우에는 연소 진행 중 산소가 충분히 공급되어지므로 foam sofa가 정상 연소되어 일반적인 온도-시간 곡선에서 나타난 것과 같이 성장기, 정상 상태 및 감쇠기의 영역이 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다¹⁸⁾. 이때 최고 온도는 t=190초 일 때 T=744.4K가 되고, 이후 열방출율이 감소함에 따라 온도는 떨어지게 된다.

Fig. 6.은 구획실내의 하부 공기 층의 온도를 나타낸 그림이다.

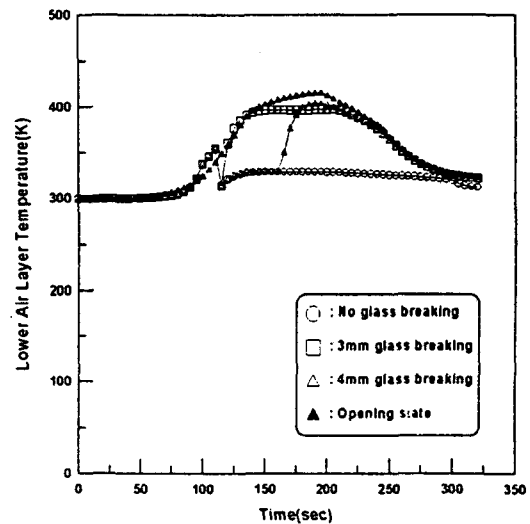


Fig. 6. Lower Air Layer Temperature.

창유리가 파단 되지 않은 경우에는 온도는 t=80초까지는 거의 일정하게 유지되다가 t=110초에서 T=355K까지 상승하고 이후 감소하다가 다시 일정한 온도로 지속됨을 볼 수 있다. 이것은 화재 초기에는 고온 가스층의 두께가 얇아 하부 공기 층으로의 열전달이 많이 이루어지지 않다가, 어느 정도 화재가 성장하면서 고온 가스층의 두께도 두꺼워져 대류와 복사에 의한 열전달이 이루어지면서 온도가 상승하고, 이후에는 비정상 연소로 인하여 온도가 갑자기 감소하다가 구획실내 열평형이 이루어지면서 일정한 온도로 유지되는 것으로 생각된다.

또 3mm, 4mm 유리의 경우에는 각각 파단 시간인 t=116초와 t=162초에서 외부의 공기 유입으로 인하여 정상 연소가 진행됨으로써 하부의

공기 층 온도는 각각 $t=205$ 초에서 $T=398.2K$ 와 $t=180$ 초에서 $T=404.4K$ 로 올라감을 알 수 있다.

창이 개방된 경우에는 정상 연소로 인하여 공기 층의 온도도 성장기, 정상 상태 및 감쇠기의 영역이 뚜렷이 구별되어 나타남을 볼 수 있고, 이때 최고 온도는 $t=190$ 초에서 $T=415.5K$ 가 된다.

고온 가스층과 하부 공기층의 최고 온도 및 도달 시간을 간단하게 표 1.에 나타내었다.

4.2 고온 가스 층의 경계면 높이

Fig. 7은 고온 가스 층의 경계면 높이를 나타낸 그림으로써 유리가 파단되지 않은 경우 고온 층은 화재 후 약 $t=100$ 초에서 거의 바닥까지 내려오게 되고 $t=110$ 초에서 비정상 연소가 진행되면서 순간적으로 높이가 조금 올라가다가 다시 하강하여 일정하게 유지됨을 보여준다.

3mm, 4mm 유리의 경우 각각 $t=116$ 초와 $t=162$ 초에서부터 정상연소와 동시에 파단된 창으로의 고온 가스의 유출로 인하여 고온 가스 층의 높이가 점차 상승함을 볼 수 있다. 이때 3mm 유리의 경우는 $t=150$ 초에서 $t=205$ 까지 약 0.6m로 일정하게 유지되는데 이것은 Fig. 8.(a)에서 나타난 것과 같이 이 시점까지 정상적인 연소에 의해 발생되어지는 열방출율이 일정하게 유지되어지기 때문인 것으로 생각된다. 이후 고온 가스 층의 경계면 높이가 계속 상승하다가 $t=250$ 초에서 1.0m로부터 연소가 끝나는 시점의 2.m까지 5초 혹은 10초 간격으로 계단 모양을 이루는 것을 볼 수 있다. 이것은 창 높이인 1m 위로 고온 가스 층의 경계면 높이가 올라감에 따라 외부로부터 유입되어지는 공기량이 화재의 정상 연소에 영향을 주며, 이때 생성된 고온층의 가스

와 유출되어지는 가스 사이의 상호 관계에서 유출되어지는 가스량 보다 어느 정도 많이 발생하다가 다시 창으로 유출되어지기 때문인 것으로 생각되어진다.

창이 개방된 경우에는 정상 연소가 진행되어 열방출율의 량에 따라 경계면의 높이가 결정됨을 볼 수 있다. 이 경우에도 창을 통한 유출과 유입 과정의 상호 작용으로 인하여 1m와 2m 사이에서는 계단 모양을 이루고 있음을 보여 준다.

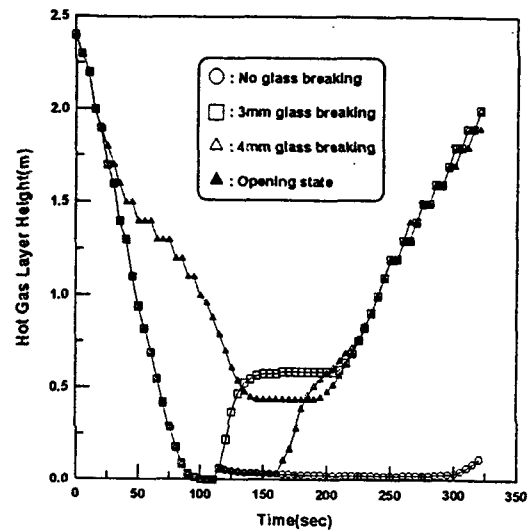


Fig. 7. Hot Gas Layer Height.

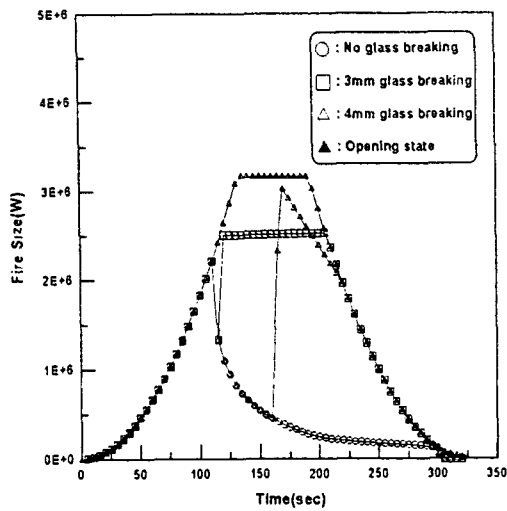
4.3 구획실 내·외부의 화재크기

Fig. 8.(a), (b)은 foam sofa 화재시 구획실 내·외부의 화재 크기를 나타낸다.

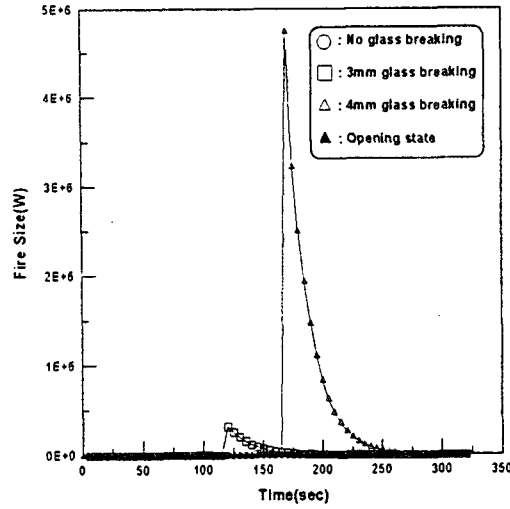
창유리가 파단 되지 않은 경우에는 4.1절의 설명처럼 $t=110$ 초까지 연소가 진행되다가 연소에 필요한 산소가 부족 됨에 따라 그림에서 보는 바와 같이 열방출율이 급속히 감소하게 된다.

표 1. 화재 실험 조건에 대한 상, 하부 층의 최고 온도 및 도달 시간.

실험 조건	실험 결과	최고 온도(K)		도달 시간(초)	창 개방 시점(초)
		상부층	하부층		
밀폐시		699.0	355.0	110	×
3mm유리 파단시		700.1	398.2	205	116
4mm유리 파단시		713.5	404.4	180	162
개방시		744.4	415.5	190	0



(a)



(b)

Fig. 8. Fire Size of Compartment(inside(a), outside(b)).

3mm 유리의 경우에는 창유리 파단과 관련하여 내, 외부의 화재 크기가 증가되고, 이때 내부의 경우는 약 2.5MW의 열방출을 갖는 정상 상태를 유지하다가 다시 감소하게 되고, 외부는 미연소 가연성 연료의 유출과 관련하여 조금 상승하다가 감소하게 됨을 보여 준다.

이때 정상 상태의 시간이 길게 되는 것은 밀폐된 공간에서의 연소시 가연물이 덜 연소되어 있다가 창유리 파단 이후부터 정상적인 연소가 이루어지기 때문으로 생각된다.

반면, 4mm 유리의 경우에는 내부의 화재 크기는 3mm 유리의 경우와 같고, 외부 유출 화재 크기는 앞의 설명대로 창유리 파단과 동시에 비정상 연소에 의해 축적된 미연소 가연성 연료의 순간적인 유출로 연소가 크게 이루어지면서 대용량의 열방출이 발생함을 볼 수 있다. 이때 미연소 가연성 연료의 유출시 창을 통하여 빠져나가는 열방출은 Fig. 8.(b)에서 보듯이 $t=170$ 초에서 순간적으로 약 4.7MW의 큰 열량이 발생하게 된다.

이러한 현상은 축적된 미연소 가연성 연료로 가득 채워진 구획으로 외부의 산소 유입에 의한 급속한 폭염(rapid deflagration)이라고 정의되는 backdraft 현상이라고 볼 수 있으며, 이러한

backdraft 발생시 화염은 창 상부를 통하여 외부로 치솟아 상층으로의 화재 전파 가능성이 높고¹⁹⁾, 특히 화재 진압 작업을 수행하기 위한 소방대원들의 접근시 인명사고 위험 가능성이 매우 높다고 할 수 있다²⁰⁾.

4.4 창유리 내·외면의 온도

Fig. 9.는 창유리의 파단에 이를 때까지 창유리의 내·외부면의 온도 상태를 나타낸다.

3mm 유리의 경우 화재 초기에는 열전달이 많지 않아 일정한 상태를 보이다가 화재의 성장과 함께 파단 시점($t=116$ 초)까지 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이때 내·외면의 온도는 각각 약 489K와 440K로 두 면의 온도차는 약 49K 정도이다.

또 4mm 유리의 경우 먼저 내면의 경우를 보면 화재 초기에는 온도가 일정한 상태로 있다가 화재의 성장으로 $t=110$ 초까지 온도는 460K 정도로 상승한 후 파단 시점($t=162$ 초)까지 거의 일정한 상태로 유지됨을 볼 수 있고, 외면의 경우는 화재 초기와 파단 직전에는 완만하게 올라가고, 성장 중간에는 온도의 상승 기울기가 커짐을 볼 수 있다.

이것은 $t=110$ 초까지 정상 연소가 진행되다가

구획실내의 산소가 부족하게 되어 비정상 연소가 진행되면서 발생되어지는 열방출율이 감소하나 발생된 고온 가스층의 열전달로 인하여 유리면의 온도는 상승하지는 않지만 떨어지지도 않는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 유리의 무차원 온도(θ)와 무차원 시간(τ)의 값을 나타낸 것으로, 그림에서 나타나듯이 3mm, 4mm 유리의 특성 온도 T_c 는 두 경우 모두 158.7K로 같으며 무차원 온도 θ 는 3mm 유리의 표면 평균 온도가 4mm 유리의 표면 평균 온도 보다 높기 때문에 같은 시간에 대하여 더 큰 값을 가짐을 볼 수 있고, 무차원 시간 τ 는 특성 시간 t_c 가 각각 25초, 44.4초로 계산되어져 기울기는 각각 0.04와 0.0225로 나타남을 볼 수 있고, 3mm 유리의 경우가 4mm 유리의 경우 보다 빨리 열확산이 이루어지면서 파단응력에 해당되는 온도에 이르게 되고, 따라서 짧은 시간에 파단 되어짐을 알 수 있다.

이때 유리 온도는 큰 유입 열 유속으로 인하여 θ_{∞} 의 증가와 함께 증가하며, 유리의 최대 온도는 고온층의 가스 온도가 유리 온도보다 높은 경우에는 구획실 내부 쪽의 유리 표면에서 나타나고, 그렇지 않은 경우에는 대류에 의하여 유리 양면에서 열 손실이 일어나게 되며 이때에는 유리 내부에서 최고 온도가 나타난다.

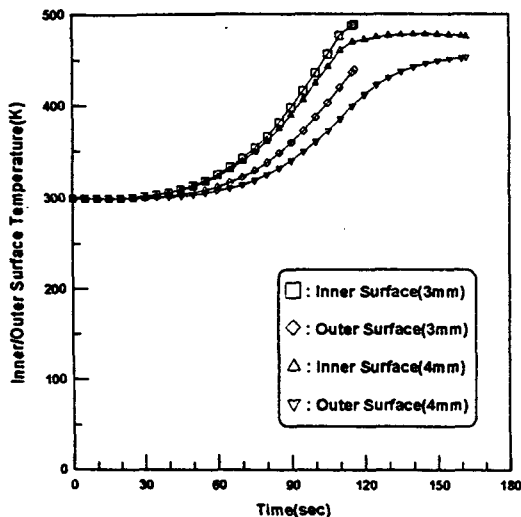


Fig. 9. Glass Temperature(inner, outer surface).

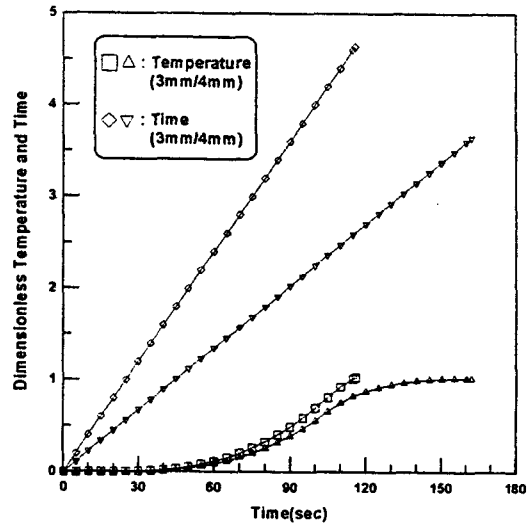


Fig. 10. Dimensionless Temperature and Time.

5. 결 론

밀폐된 구획 화재의 창유리 파단시 화재 특성을 파악하기 위하여 기존의 컴퓨터 화재 분석 프로그램인 FASTLite(version 1.1.2)와 창유리 파단 시간 계산 프로그램인 BREAK1 (version 1.0)을 사용하여 foam sofa 화재에 관한 모의실험을 수행하였다.

구획 화재의 창유리 파단에 관한 모의 실험을 통하여 고온층의 온도, 하부 공기층의 온도, 고온 가스 층의 경계면 높이, 구획실의 내·외부의 화재 크기 및 창유리의 온도 등에 관한 자료를 얻어 화재 특성을 분석하였고, 또 일반적인 구획 화재의 특성과 비교, 검토하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 단일 구획실의 foam sofa 화재시 실내의 상, 하부 층의 최고온도 값은 창유리 파단의 경우가 밀폐의 경우 보다는 높고 정상 자유 연소의 경우 보다 낮게 나타남을 확인할 수 있었다[표 1. 참조].

(2) 화재 진행 중 창유리 파단의 경우 비정상 연소로 인해 발생된 미연소 가연성 연료의 구획실내의 축적량에 따라 외부로 방출되어지는 열 방출율은 3mm, 4mm 유리의 경우 각각 0.318

MW와 4.744MW로 큰 차이가 있었으며, 특히 4mm의 경우 backdraft 현상이 나타남을 확인할 수 있었다[Fig. 8.(b) 참조].

(3) 창유리 파단시 3mm, 4mm 유리의 내, 외부 면의 온도는 각각 488.7K, 439.7K와 476K, 452.4K로 나타났고, 이때 내, 외부 면의 온도차는 각각 49K와 23.6K로 차이가 있음을 확인할 수 있었다[Fig. 9.참조].

참고 문헌

1. R.W. Bukowski, "Applications of FAST-Lite", SFPE & WPI Proceedings, NIST (1996)
2. 박진국, 김충익, 유홍선, 윤명오, "Zone Model을 이용한 아파트에서의 화재 해석", 한국 화재·소방학회지, Vol.11, No.2 pp.25-33(1997)
3. 노재성, 유홍선, 정연태, 김충익, 윤명오, 김진곤, 김명배, "아트리움 공간에 있어서 연기 유동에 관한 수치해석적 연구", 한국 화재·소방학회지, Vol.11, No.4, pp.3-13(1997)
4. G.P. Forney & W.F. Moss, "Analyzing and Exploiting Numerical Characteristics of Zone Fire Models", Fire Science & Technology, Vol.14, No.1 & No.2, pp.49-60(1994)
5. P.C.R. Collier, "Fire in A Residential Building : Comparisons Between Experimental Data and Fire Zone Model", Fire Technology, Vol.32, No.34, pp.195-218(1996)
6. J.G. Quintiere, "Compartment Fire Modeling", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 3-5, NFPA (1995)
7. W.D. Walton, "Zone Computer Fire Models for Enclosures", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 3-7, NFPA(1995)
8. D.W. Stroup, "Using Field Modeling to Simulate enclosure Fires", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 3-8, NFPA(1995)
9. R.W. Portier, R.D.Peacock & P.A. Reneke, "FASTLite : Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport", NIST Special Publication 899(1996)
10. A.A. Joshi & P.J. Pagni, "Users' Guide to BREAK1", NIST-GCR-91-596(1991)
11. W.D. Walton & P.H. Thomas, "Estimating Temperatures in Compartment Fires", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 3-6, NFPA(1995)
12. S. Deal, "Technical Reference Guide for FPEtool Version 3.2", NISTIR 5486-1(1995)
13. B. McCaffrey, "Flame Height", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 2-1, NFPA(1995)
14. A.A. Joshi & P.J. Pagni, "Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass. I -Theory", Fire Safety Journal 22, pp.25-43(1994)
15. A.A. Joshi & P.J. Pagni, "Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass. II -Experiments", Fire Safety Journal 22, pp.45-65 (1994)
16. D.D. Evans, "Ceiling Jet Flows", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 2-4, NFPA(1995)
17. E.K. Budnick, H.E. Nelson & D.D. Evans, "Simplified Fire Growth Calculations", Fire Protection Handbook, 18th Edition, Chapter 11-10, NFPA(1997)
18. T.T. Lie, "Fire Temperature-Time Relations", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 4-8, NFPA (1995)
19. Y. Ohmiya, T. Tanaka & T. Wakamatsu, "A Room Fire in View of Predicting Fire Spread by External Flames", 13th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, Vol.2(1996)
20. C.M. Fleischmann, "Backdraft Phenomena", NIST-GCR-94-646(1994)

NOMENCLATURE

A_{floor} : Floor area
 a : Distance between points of load application in flexure test
 b : Width of glass specimen
 c : Distance between supports in flexure test, Specific heat capacity
 $c_{p\infty}$: Ambient air heat capacity
 E : Young's modulus for glass
 g : Earth's surface gravitational constant
 $h_{1,2}$: Heat transfer coefficient
 ΔH_c : Heat of combustion
 I : Radiant heat flux directly from the flame
 l : Decay length
 L : Thickness of glass
 L_c : Characteristic length
 m : Mass of the lower air layer
 \dot{m}_{exit} : Mass of air exiting the room from the lower air layer
 \dot{m}_{plume} : Mass of air leaving the lower air layer into the plume
 P : Breaking load for glass
 \dot{q} : Nondimensional heat release rate
 \dot{Q} : Fire heat release rate
 \dot{Q}_0 : Initial value of the heat release rate
 t : time
 t_c : Characteristic time
 ΔT : Temperature difference between the glass edge and center
 T : Smoke temperature
 T_∞ : Ambient air temperature
 z : Elevation
 z_{intf} : Elevation change from smoke layer interface to lowest point of burning fuel

z_{fire} : Elevation of the bottom of the fuel flames above the room floor
 z_{ceil} : Elevation of the ceiling above the fuel height

Greek

β : Coefficient of thermal expansion for glass
 ϵ : Emissivity
 ζ : Nondimensional elevation
 κ : Thermal conductivity
 λ_c : Fraction of upper layer energy lost by heat transfer into room barrier surfaces
 λ_r : Fraction of actual heat release rate directed into radiative energy
 ρ_∞ : Ambient air density
 σ_b : Breaking stress for glass
 τ : Nondimensional time
 Φ : Nondimensional temperature

Subscripts

1 : Outside of glass pane
 2 : Compartment side of glass pane
 ∞ : Ambient
 b : Breakage
 c : Characteristic, Convection
 e : Exhaustion
 g : Generation
 i : Initial, Inner
 $intf$: Interface
 r : Radiation

감사의 글

이 논문은 1998년도 대구보건대학 학술연구비 지원 사업에 의한 것으로써 본 연구 수행에 도움을 주신 학교 관계자 여러분께 감사드립니다.