

## 구획 화재시 창유리 파괴 현상에 관한 실험적 연구

김중훈\*, 이수경\*, 최중운\*\*, 이정훈\*\*\*  
서울산업대학교 안전공학과\*,  
서울산업대학교 재료공학과\*\*, LG 반도체\*\*\*

### 1. 서론

현대사회가 급속한 발전을 이룩하면서 화재의 발생은 증가추세에 있다. 화재의 예방과 진압장비의 개발을 위해서는 실내화재현상에 대한 연구와 이해가 필요하다. 대부분의 실내화재 관련 현상에 대하여서는 많은 연구가 이루어졌고, 이러한 연구를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션과 같은 화재 현상의 예측기법을 발전 시켜 왔으며, 거의 실제에 가깝게 발전하고 있으나, 아직까지도 규명이 확연히 되지 않고 있는 부분은 창유리의 파괴현상이다. 본 연구는 구획화재시 창유리의 파괴 현상을 실제에 근접한 시나리오를 설정한 후 실험을 통해 고찰하고자한다. 또한 파괴시간 예측 프로그램인 BREAK1의 분석 결과와 실험치의 비교도 아울러 실시하여 그 적용성을 판단해보자 한다.

### 2. 화재시 창유리 파괴 현상에 대한 이론적 고찰

창유리의 파괴현상에 대한 열분석 및 파괴시간의 예측을 위하여 미국의 캘리포니아 대학교 기계공학과와 Aruna A. Joshi과 Patrick J. Pagni가 창유리의 구획화염에 대한 열분석(1990)을 실시하여Berkeley Algorithm을 개발하였으며, 이를 토대로 BREAK1이라는 소프트웨어를 개발하였다. 창문의 유리는 창문 바깥쪽의 주변대기로 인한 냉각에 의해 열을 잃는 동안, 내부의 뜨거운 가스층의 대류와 화염의 크기에 의한 복사 등에서 받는 직접적인 가열을 흡수한다. 프레임에 의하여 가려지는 부분에서는 큰 인장응력이 발생한다.

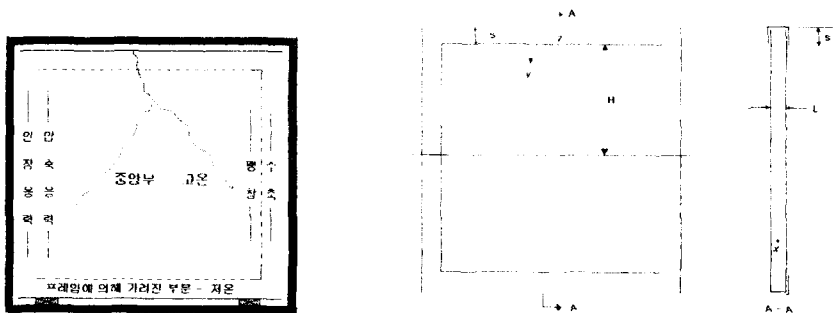


그림 1. 화재시 창문의 응력분포와 창유리와 프레임의 도면

이 인장응력은 창문유리의 가려진 부분과 안 가려진 부분 사이의 온도차이에서의 평균에 정비례한다. 그림 1. 은 화재에 노출된 창문유리의 모형도를 보여준다. 여기서  $L$ 은 유리의 두께이고,  $s$ 는 프레임에 의하여 가려진 창문유리의 길이 이고  $H$ 는 창문의 길이 혹은 넓이의 절반에 해당된다. 화재로 인한 창유리의 파열을 위해 요구되는 응력과 유리의 온도  $\Delta T$ 로의 상승은 다음과 같이 추측된다.

$$\beta \Delta T = \sigma_b / E \quad (1)$$

$\beta$  : 열선형팽창계수 ( Thermal coefficient of linear expansion )

$\sigma_b$  : 항장력 ( Tensile Strength )

$E$  : 영모듈 ( young's Modulus )

이 관계식은 그늘지지 않은 부분의 압축을 설명하기 위해 최근 우측항에 증가 계수  $g(-1)$  (Multiflying factor)가 포함되어 발전되었다.  $g$  값은 판 평면의 끝에서 끝까지의 힘의 균형(force balance)에서부터 얻게되었다. 넓게 그늘이 지고 ( $s/L \geq 2$ ), 빠르게 가열되면 ( $\alpha t/s^2 \leq 1$ , 여기서  $\alpha = k/\rho c$  는 유리의 열 확산율이다. ) 창문 유리의 그늘진 가장자리는 초기 온도  $T_i$ 와 거의 근접한 상태로 남아 있다. 그러므로 유리의 중앙부분의 평균온도 증가로 인한 파괴를 일으키는 온도의 변화  $\Delta T$  는 다음의 공식에 의해 계산된다.

$$\Delta T = (1/L) \int_0^L T(x, t) dx - T_i = g \sigma_b / E \beta \quad (2)$$

그러므로 최종결과를 위해서는 유리의 깊이에 대한 함수  $x$  와 시간함수  $t$  에 비례하여 유리의 넓은 중앙부분의 온도를 계산하는 것이다. 처음 창문유리가 파괴되는 시간은 결정되었다. 모든 창유리가 프레임으로부터 조각나 떨어지게 되는 것에 대한 추가 시간의 문제는 표시하지 않았다. 이 시스템에 대한 지배방정식은 다음과 같다. 여기서  $I(t)$ 는 화재로부터 직접 충분히 짧은 파장의 Incident radiative flux이다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I(t) \frac{e^{-x/l}}{l} \quad (3)$$

### 3. 창유리 파괴현상에 대한 화재 실험

#### (1) 시험 장치

화재실은 철근 콘크리트구조로 된 내화구조이며, 크기는 1.88m(H) × 3.3m(W) × 3.3m(D) 이고, 정면에 폭 1.9m, 높이 1.88m의 개구부가 있으며, 상부를 향해 0.25 m<sup>2</sup> (0.5m × 0.5m)의 개구부가 있다. 그러나 이번 실험에선 상부의 개구부는 폐쇄하였다. 구조물의 전면 개구부에 시험체를 장치하였다. 유리의 전, 후 표면과 화재실 내측에 온도를 측정하기 위하여 열전대(K/A Type 0.65mm, -270℃ ~ 1372℃)을 설치하였다. 열전대의 설치위치와 시험체의 설치위치는 다음의 그림2 과 같다. 열전대의 각 포인트에서 측정된 온도를 TDS-601A Data Logger로 기록하였다. 화재실의 가열물(可熱物)은 가솔린(Gasoline)을 사용하였다. Pool Fire를 만들기 위해 팬(Pan)은 각각 직경 0.57 m, 0.3 m의 철제 제품을 준비하였다. 시험체의 구성 및 특성값은 표 1 과 같다.

구 성	재질 및 크기	비 고
판 유리	맑은 유리 800 × 1600 × 5t	한글라스 맑은 유리 (플로트 유리)
Frame	알루미늄 사시 40 × 50 × 2t	
Putty	실란트(Pensil 100)	

항 목	수 치	
비 중	2.5	
광학적 성 질	굴 절 율	약 1.52
	반 사 율	약 8% (수직입사)
물리적 성 질	압축강도	6,000~12,000 kg/cm <sup>2</sup>
	비 열	0.18 cal/g℃ (0~50℃)
	연화온도	720~730℃
	열전도율	0.65kcal/mhr℃
	열팽창율	8.5×10-6/℃ (상온~350℃)
	포아송비	0.25
	모스경도	약 6.5 도
	표면항장력	약 500 kg/cm <sup>2</sup>
영 율	750,000 kg/cm <sup>2</sup>	

표 1. 시험체의 구성 및 유리의 특성값 (단위:mm)

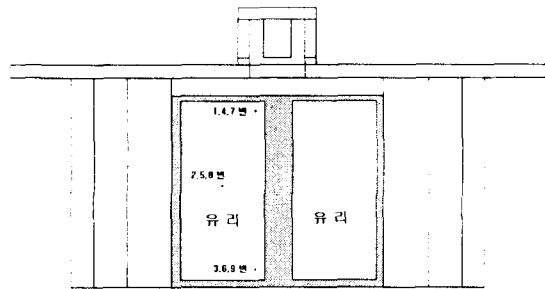
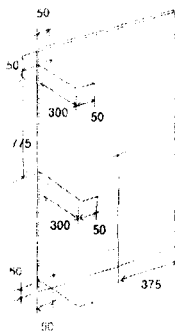


그림 2. 열전대와 시험체의 설치위치

## (2) 시나리오와 조건의 설정

실험은 주택 화재시 창문의 한편이 완전히 개방된 상태와 창문이 폐쇄된 상태, 그리고 창문이 개방 있으며 화원이 창문의 가까이 있는 상태로 나누어 실시하였다. 조건과 설정은 표 2과 같다.

	개구부의 개방정도	판유리 면에서 화원까지의 거리	팬	비 고
실험 1	한쪽을 완전히 개방 (0.8m \ 1.6m)	1.5m	1번만 설치	
실험 2	개방이 거의 없음. (0.03m \ 1.0m)	1.5m	1번,2번 모두 설치	개방된 면적은 틈새면적의 고려임
실험 3	가열물의 연소에 지장이 없는 정도 개방 (0.3m \ 1.0m)	0.05m	1번,2번 모두 설치	

표 2. 각 실험의 조건 비교

### ① 개구부가 개방된 조건의 화재시 창유리 파괴 실험

첫 번째 실험은 화재실의 개구부에 창유리를 설치하고 한쪽면은 개방시켜 놓은

후 창유리에서 1.5m 떨어진 곳에 1번 팬 하나를 설치한 후 가솔린 25ℓ를 채우고 점화하였다. 점화후 39초경에 연기가 개구부의 상부에서 1/3까지 내려와서 방출되는 것이 보였다. 2분후 연기층은 천장면에서 1.24m까지 내려왔으며 연기의 방출과 공기의 흡입이 개구부의 1/2를 중심으로 이루어졌다. 이후 이러한 상태를 유지하다가 화염이 작아지면서 13분 후 진화하였다. 유리면의 온도는 최고가 201.2℃를 기록했지만 파괴가 되지 않았다.

② 개구부가 폐쇄된 조건의 화재시 창유리 파괴 실험

두 번째 실험은 화재실의 개구부 전면에 창유리 2개를 설치하였으며, 틈새면적을 고려하여 약 0.003m<sup>2</sup> 정도를 개방시켰다. 창유리에서 1.5m 떨어진 곳에 팬 2개를 설치한 후 1번 팬에 가솔린 25ℓ를 채우고, 2번 팬에 가솔린 7ℓ를 채운 후 점화하였다. 처음에는 화염이 천장부근까지 솟아오르면서 실내의 온도가 110초까지는 상승하였으나 이후 실내 산소량의 감소로 인하여 온도가 감소하면서 연료인 가솔린은 385초에 완전히 화염이 소멸되는 현상을 보였다. 화염이 소멸될 때까지 유리의 파열이나 균열은 없었다. 창유리 상부(4번)의 온도는 110초에 275.3℃까지 상승했으며, 알루미늄 프레임(flame)안의 유리온도는 160초에 235℃를 기록하였다. 유리 상부의 온도가 최고일 때 프레임 내부 유리면의 온도는 198.8℃로서 76.5℃의 차이를 보였다. 화재의 크기가 523.31(kW) 인데도 불구하고 균열이 일어나지 않았다.

③ 창유리 근접 화재시 유리의 파괴실험.

세 번째 실험은 화재실의 개구부 전면에 2장의 시험체를 설치하였으며, 개구부의 틈새면적은 약 0.3m<sup>2</sup>으로 첫 번째 실험보다 많이 주어 충분한 연소가 일어날 수 있도록 하였다. 열전대는 모두 10곳에 설치하였으며, 팬을 유리면에 가깝게 붙였다. 화재실의 개구부에 창유리를 설치하고 창유리에서 0.1m 떨어진 곳에 직경 57cm의 1번 팬을 설치하고 그 뒤에 직경 30cm의 2번 팬을 놓은 후 점화시켰다. 68초에 처음 유리가 파열되었으며, 2차 파열은 159초에, 3차 파열은 234초에 일어났다. 결국 모든 유리면은 248초에 모두 파열되었다. 파열부위는 1차, 2차, 3차로 가면서 점점 커졌으며 이로 인하여 공기가 충분히 공급되어 가솔린의 연소가 확대되고 실내의 온도는 계속적인 상승을 보였다. 또한 유리의 파단면으로 화염이 분출하여 개구부의 상부로 뿜어져 나오는 결과를 보였다. 파열의 이유는 화염이 거의 접근으로 유리면의 온도가 30초만에 492.7℃까지 급상승하여 파괴에 충분한 열응력을 생겼기 때문이다. 이때의 프레임안의 유리와 내부 중간부분의

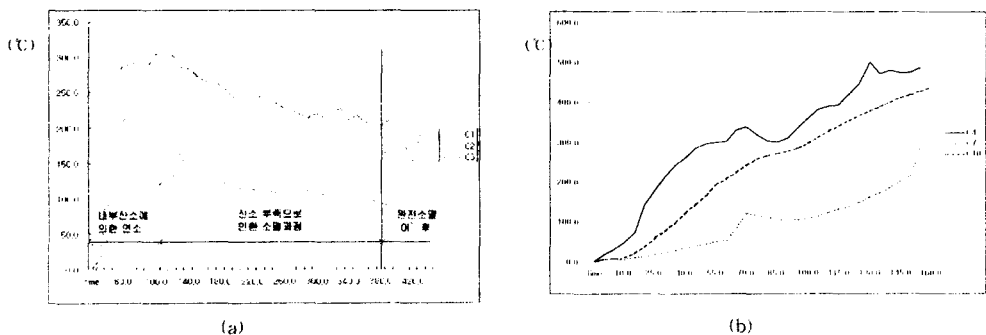


그림 3. 실험 2의 시간에 따른 온도의 변화와 산소부족으로 인한 연소의 소멸 과정(a)와 실험3의 내측 외측 유리면과 프레임 안쪽 유리면의 온도차(b)  
(C4= 내측유리상부, C7은 외측유리면, C10=프레임 안쪽의 유리온도)

온도차( $\Delta T$ )는 223.7°C 였다. 그러나 유리가 파열된다고 해서 한번에 모두 부서지는 것이 아니라 4회에 걸쳐 파괴되었다.

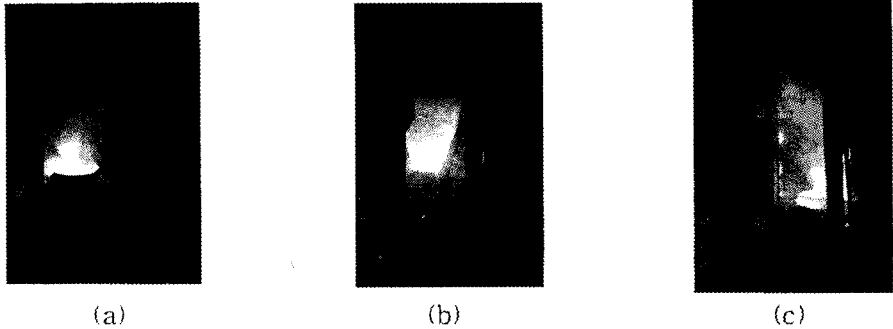


그림 4. 1차 파괴(a), 2차파괴(b), 3차 파괴(c)의 모습

#### 4. 실험 결과의 분석 및 시뮬레이션 결과와의 비교

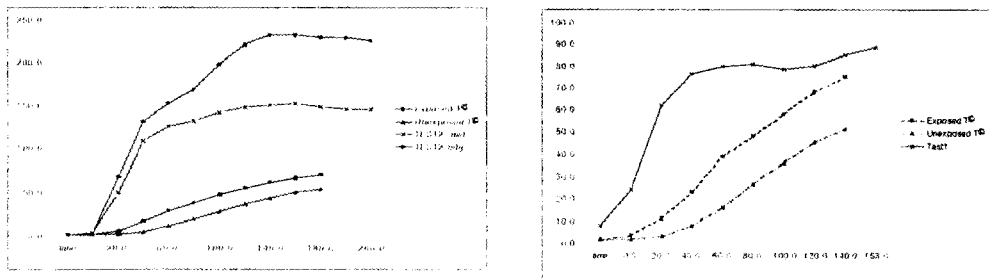
##### (1) 창유리면과 프레임 안의 유리온도 비교 분석

화재시 유리가 파괴되는 것은 열에 의한 응력으로 발생한다. 실험 2와 실험 3에서는 프레임 안의 유리온도를 측정하였다. 실험 2 그래프의 온도 차이보다 유리가 파괴된 실험 3 그래프의 온도차가 더 크다는 것을 알 수 있다. 특히 실험 3의 30초 때 온도차이는 433.4°C를 기록하여 이로인해 발생한 열응력이 유리의 파괴에 영향을 미쳤음을 알 수 있었다.

##### (2) 실험결과와 시뮬레이션 결과와의 비교

###### ① 실험 1과 시뮬레이션의 결과 비교

실험 1의 측정치를 BREAK1에 입력하여 실행하여본 결과, 실험의 결과와는 달리 창유리의 파괴가 153초에 일어나는 결과를 보였다.



(a)

(b)

그림 5. 실험1, 2의 결과와 BREAK1 결과와의 비교

화재실내측 상부 유리면의 온도변화와 BREAK1의 결과중 노출면과 비노출면의 온도변화를 비교하여 그래프로 그림 5 (a)와 같이 나타내었다.

###### ② 실험 2와 시뮬레이션의 결과 비교

실험 2의 측정치를 BREAK1에 대입하여 결과를 알아보았다. 위의 결과와 마찬가지로 실험때는 유리창의 파괴가 없었으나 BREAK1의 결과는 파괴가 일어난

것으로 되어있다. 그림 5 (b)에 실험 2의 결과와 BREAK1의 결과를 비교하였다. 유리 상부의 온도와 프레임안의 유리온도는 시뮬레이션 결과보다 높은 측정치를 나타낸다. 또한 유리가 190 초에 파괴되는 것으로 결과가 나왔다.

### ③ 실험 3과 시뮬레이션의 결과 비교

실험 3은 실험 1, 2와는 달리 유리의 파괴가 일어난 경우로서 측정치를 BREAK1에 대입하여 비교하여 보았다. 실험의 결과는 일차 파괴시간이 68 초였으며, 이 결과를 BREAK1에 입력하여 실행시켜본 결과 71 초로 약 3초의 차이를 보였다. 그러나 유리면 온도에 관한 데이터는 차이가 있는 것으로 나타났다.

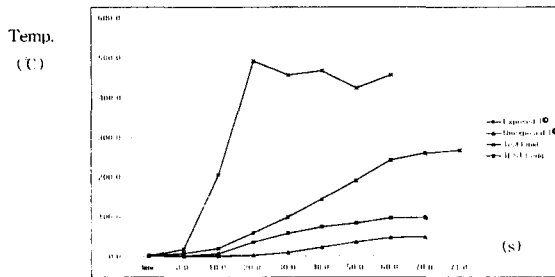


그림 6-5. 실험 3의 결과와 BREAK1 결과와의 비교

## 5. 결 론

화재 발생 시 창유리의 파괴 원인을 규명하기 위하여 실제 화재시 창문의 조건을 예상하여 가상 화재 시나리오를 설정하고 실제 화재실험 및 창문 파괴 software인 BREAK1으로 이론적 분석을 실시하였다.

- (1) 화재시 창유리의 파괴현상은 유리의 가운데 부분과 프레임안에 있는 유리부분의 현저한 온도차이( $\Delta T=433.4^{\circ}\text{C}$ )로 인한 열응력으로 일어남을 확인 했다.
- (2) 523.31 kW 규모의 화재 발생시 플레시오버가 일어나거나 창유리 주변 가연물의 발화로 인하여 화염이 근접하였을 때 유리 표면의 온도가 400~500°C까지 급상승 하므로써 일어난다.
- (3) 창유리는 한번의 파괴로 모두 무너져 개구부가 되는 것이 아니라 3~4회로 나누어 파괴되는 데 먼저 균열이 일어나면서 중심부분의 유리가 먼저 파괴되며, 상부의 유리 조각은 실링제가 녹아 떨어지며, 하부의 유리조각들은 계속적인 가열을 받아 열응력에 의해 파괴되는 것을 관찰할 수 있었다.
- (4) 화재로 인한 창유리 파괴시간 예측 소프트웨어인 BREAK1은 실제 실험시 파괴된 시간인 68초와 3초 정도의 차이인 71초를 보여 비교적 정확하다는 것을 알 수 있었으나, 파괴가 되지 않은 경우의 실험 데이터를 BREAK1에 대입한 경우에도 파괴가 되는 결과를 보이는 문제점이 도출되었기 때문에 실제로 화재 시 시뮬레이션에 적용함에 있어 주의를 해야함을 알았다.

## 참 고 문 헌

1. 한글라스, 건축용 기술자료, 1996. 11.
2. 동경소방청, 개구부 연소 위험성의 실험적 연구, 소방기술정보, 1988. 12.
3. A.A. Joshi, Users' Guide to BREAK1, The Berkeley Algorithm for Breaking Window Glass in a compartment Fire, NIST, 1991.