

구획 화재시 창유리 파괴 현상에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on Window Glass Breakage in Compartment Fires

김준훈*, 이수경*, 최종운**, 이정훈***

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 시켜왔으며, 거의 실제에 가깝게 발전하고 있으나, 아직까지도 규명이 확연히 되지 않고 있는 부분은 창유리의 파괴현상이다. 본 연구는 구획화재시 창유리의 파괴현상을 실제에 근접한 시나리오를 설정한 후 실험을 통해 고찰하고자 한다.

2. 화재시 창유리 파괴 현상에 대한 이론적 고찰

창유리의 파괴현상에 대한 열분석 및 파괴시간의 예측을 위하여 미국의 캘리포니아 대학교 기계공학과 Aruna A. Joshi와 Patrick J. Pagni가 창유리의 구획화염에 대한 열분석(1990)을 실시하여 Berkeley Algorithm을 개발하였으며, 이를 토대로 BREAK1이라는 소프트웨어를 개발하였다.

* 서울산업대학교 안전공학과
 ** 서울산업대학교 재료공학과
 *** LG 반도체

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 1은 화재시 가열된 창문 유리의 응력분포에 관한 개념을 보여준다.

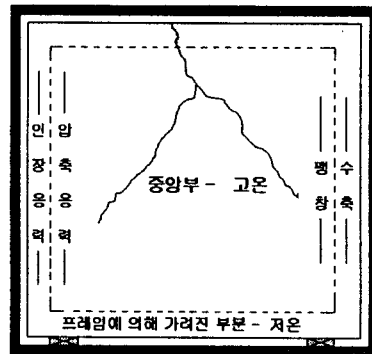


그림 1. Stress distribution in window glass

3. 창유리 파괴현상에 대한 화재 실험

(1) 1 차 창유리 파괴실험

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 m² (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 구성은 표 1 과 같다.

구 상	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)	

표 1. Comparison and size of sample (Unit:mm)

2) 시나리오와 조건의 설정

가) 시나리오와 조건의 설정

실험은 건물의 구획 화재시 창문의 한편이 완전히 개방된 상태와 창문이 폐쇄된 상태, 그리고 창문이 개방되어 있으며 화원이 창문의 가까이 있는 상태로 나누어 실시하였다. 이는 구획 화재시 가연물의 접근 정도와 창문의 개방 정도에 따른 창유리의 파괴 여부 및 온도의 변화 여부를 알아보기 위함이다.

① 실험 1-1 (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 1/3 까지 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.

차	실험	개구부의 개방정도	판유리에서 팬까지의 거리	팬	비 고
		1차	실험 1-1	한쪽을 완전히 개방 (0.8m×1.6m)	1.5m
	실험 1-2	개방이 거의 없음. (0.03m×1.0m)	1.5m	1번,2번 모두 설치	개방된 면적은 틈새면적에 대한 고려임
	실험 1-3	가열물의 연소에 지장이 없는 정도 개방 (0.3m×1.0m)	0.05m	1번,2번 모두 설치	

(1번 팬 : D=0.57m, 2번 팬 : D=0.30m)

표 2. Comparison of each experiment condition.

② 실험 1-2 (개구부가 폐쇄된 조건의 화재시 창유리 파괴 실험)

두 번째 실험은 화재실의 개구부 전면 창유리 2개를 설치하였으며, 틈새면적을 고려하여 약 0.003m² 정도를 개방시켰

다. 창유리에서 1.5m 떨어진 곳에 펜 2개를 설치한 후 1번 펜에 가솔린 25ℓ를 채우고, 2번 펜에 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 실험 1-3 (창유리 근접 화재시 유리의 파괴실험)

세번째 실험은 화재실의 개구부 전면에서 2장의 시험체를 설치하였으며, 개구부의 투사면적은 약 0.3m²으로 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 놓은후 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 계속

적인 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 열용력을 생겼기 때문이다. 이때의 프레임안의 유리와 내부 중간부분의 온도차(ΔT)는 223.7℃였다. 그러나 유리가 파열된다고 해서 한번에 모두 부서지는 것이 아니라 4회에

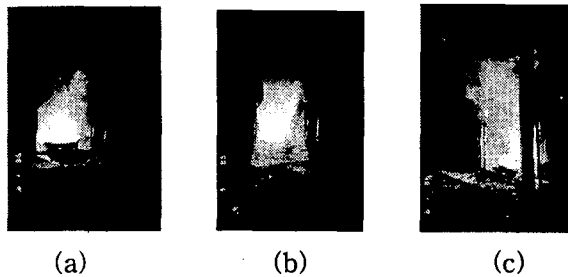


그림 2. The scene of window glass breakage at the first(a), second(b), and third(c)

(2) 창유리파괴실험(2)

1) 실험의 설계

2차 실험의 화재실은 1차 실험시 사용한 것과 같은 것을 사용했다. 실험시 시험장치 내부에는 난연 2급인 석고보드를 벽면에 부착 함으로서 벽을 통한 열손실을 최소화 하였다. 구조물의 전면 개구부에 시험체를 설치한 후, 시험체의 전, 후 표면과 화재실 내측에 온도를 측정하기 위하여 열전대(Thermal Couple)을 설치하였으며, 1차 실험때와 같은 종류이다. 열전대의 설치위치와 시험체의 설치위치는 다음의 그림. 5와 같다. 화재실의 연료로는 헥산(Hexane)을

사용하였다. 또한 Pool Fire를 만들기 위한 펜(Pan)은 1차와는 다른 0.8m(D)×0.15m(H)의 철제 제품을 준비하였다.

2) 실험 방법 및 진행

2차 실험은 건물의 구획 화재시 상부층의 온도상승으로 인한 유리의 열파괴 과정과 시간에 대하여 알아보려고 하였으며, 유리면에서 펜까지의 거리를 변화시켜 실험을 실시하였다. 2차 실험에서는 개구부의 크기는 큰 변화를 주지 않고 실시하였다.

		개구부의 개방정도	판유리면에서 화원까지의 거리	판
2차	실험 2-1	0.32 m ² (0.2×1.6)	150cm	0.8m(D)
	실험 2-2	0.24 m ² (0.15×1.6)	100cm	0.8m(D)
	실험 2-3	0.32 m ² (0.2×1.6)	50cm	0.8m(D)

표 3. Comparison of each experiment condition.

① 실험 2-1 (펜과 실험체와의 거리가 150cm 일때의 실험)

실험 2-1은 화재실의 개구부 전면에 1장의 시험체를 설치하였으며, 개구부의 틈새면적은 약 0.32m² 이었다. 그리고 열전대는 모두 10곳에 설치하였으며, 펜과 유리면 사이에 150cm의 간격을 두었다. 화재실의 개구부에 창유리를 설치하고 창유리에서 1.5m 떨어진 곳에 직경 80cm의 펜을 설치한 후 열전대를 위치시켜놓았다. 또한 계산되지 않은 개구 조건이 생기지 않도록 석고보드(Gypsum Board)와 알루미늄 테이프로 틈새를 모두 막았다. 펜에 핵산 22.6 l 를 채운후 점화시켰다.

이로 인하여 50초에 실험체 전면의 위상부에 균열이 발생하였고, 2차 균열은 실험체의 좌상부에서 1분 16초에 일어났다. 그후 3차 균열은 측면에서 2분 17초에 일어났고, 6분 21초에는 열에 의해 상부 실링제가 녹으면서 상부 유리파편이 떨어졌다. 또 7분 57초 경 상부 유리파편이 떨어졌으며 8분 20초에는 상부에 있는 모든 유리파편이 떨어졌다. 결국 12분 10초경에는 모든 연료의 소멸로 인해 화염이 소멸되었다.



그림 3. The scene of window glass breakage at the third (in the left side, 2'15'')

② 실험 2-2 (펜과 실험체와의 거리가 100cm 일때의 실험)

실험 2-2는 화재실의 개구부 전면에 1장의 시험체를 설치하였으며, 개구부의 틈새면적은 약 0.24m² 이었다. 그리고 열전대는 모두 10곳에 설치하였으며, 펜과 유리면 사이에 100cm의 유격을 두었다. 화재실의 개구부에 창유리를 설치하고 창유리에서 1m 떨어진 곳에 직경 80cm의 펜을 설치한 후 열전대를 위치시켜놓았다. 또한 계산되지 않은 개구 조건이 생기지 않도록 석고보드(Gypsum Board)와 알루미늄

미늄 테이프를 틈새를 모두 막았다. 팬에
 hexan 22.6 l를 채운후 점화시켰다. 이로
 인하여 57초에 실험체 전면의 좌측면에
 균열이 발생하였고, 2차 균열은 실험체의
 좌상부에서 1분 33초에 일어났다. 그후 3
 차 균열은 좌측면에서 1분 51초에 일어났
 고, 6분 02초에는 우측하부에 균열이 발
 생, 그 후 7분 02초 에는 우상부에 유리가
 떨어져내렸다.

③ 실험 2-3 (팬과 실험체와의 거리가
 50cm 일때의 실험)

실험 2-3은 화재실의 개구부 전면에 1장
 의 시험체를 설치하였으며, 개구부의 틈
 새면적은 화재가 발생하였을때에 공기흡입
 과 연기방출이 적절히 이루어질 수 있을
 정도로 계산한 0.32m²정도로 주었고, 열전
 대는 모두 10곳에 설치하였으며, 팬과 유
 리면 사이에 50cm의 유격을 두었다. 화재
 실의 개구부에 창유리를 설치하고 창유리
 에서 50cm 떨어진 곳에 직경 80cm의 팬
 을 설치한 후 열전대를 위치시켜놓았다.
 또한 계산되지 않은 개구 조건이 생기지
 않도록 석고보드(Gypsum Board)와 알루
 미늄 테이프를 틈새를 모두 막았다. 팬에
 hexan 22.6 l를 채운후 점화시켰다. 화재를
 일으킨지 33초만에 우상단의 측면에 균열
 이 발생하였고 1분 35초에는 그 균열이 실험
 체 우측하단에 까지 진행하였다. 그 후
 화재실 내부의 온도는 556.2도까지 상승하
 여 4분 55초에는 균열된 면을 통하여 화염
 이 분출하였고 화재실내의 열기로 말미암
 아 유리를 고정해주었던 실링제가 녹아서
 5분 2초경에는 실험체의 좌상부의 유리가
 떨어졌다. 이후 화재는 계속 진행되어나
 가다가 9분 20초에 연료가 소멸되어 화
 焰은 스스로 소멸되었다.

3. 실험 결과의 비교 분석

(1) 개구부의 개방정도에 대한 분석

화재 발생시 창문을 통한 공기의 유입이
 연소의 발전 및 확대에 큰 기여를 한다는
 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 창문의
 한편이 개방되어 있으면 다른 편의 유리가
 어떠한 영향을 받는지, 또는 닫혀있어 산소
 의 공급을 막으면 창유리가 어떻게 되는 지
 에 대하여서는 연구의 결과를 찾아볼 수 없
 었다. 이러한 사항들이 중요한 의미를 가지
 는 이유는 화재의 성장 및 발전에 큰 영향
 을 미치기 때문이다. 위에서 실시한 1차(3
 회)와 2차(3회)의 실험은 개구조건에 변화
 를 주어 실시하였다. 실험 1-1 의 경우 창
 문의 한편이 개방되어있는데 이로 인하여
 연기의 배출과 공기의 흡입이 일어나게 된
 다. 대체로 개구부의 중간정도에서 흡입과
 방출의 경계가 생기는 데 이때 흡입되는 공
 기로 인하여 실내의 온도가 유리를 파괴시
 킬 만큼 높아지지 않아서 10여분간의 가열
 에도 불구하고 유리의 파괴는 없었다. 실험
 1-2 의 결과를 보면 구획 화재 시 개구부가
 모두 닫혀있는 상태이고 내화구조라면 공기
 의 유입이 충분히 이루어지지 않아 화재의
 성장이 적절히 멈추거나 스스로 소화됨을
 알 수 있었다. 실험 1-3, 2-1, 2-2, 2-3은 모
 두 적절한 개구부를 설정하여 연소에 필요
 한 공기가 공급되어 연소에는 지장이 없었
 으며, 유리가 파괴되는 현상을 보여 주었다.

(2) 가열물의 위치에 대한 비교

실험 1-1과 실험 1-2의 경우는 가열물(加
 熱物)이 유리면에서 1.5m 떨어져있었으며,
 실험 1-3의 경우는 아주 가까이 위치시켜
 놓았다. 또한 실험 2-1, 2-2, 2-3의 경우는

유리면과의 수직거리가 각각 1.5m, 1.0m, 0.5m씩 설정되었다. 실험 1-1과 1-2의 경우는 화재의 크기나 개구조건이 다르지만 초기에 상부층의 온도가 빠른 속도로 상승했음에도 불구하고 창유리의 파괴는 없었다. 그러나 실험 1-3의 경우는 가열물이 근접하여 화염이 거의 닿을 수 있을 만큼 가까웠기 때문에 창유리의 표면온도가 신속히 올라가 457.4℃일 때 파괴가 일어났다. 실험 2-1과 2-2의 경우는 각각 1.5m, 1.0m, 0.5m 떨어진 곳에 위치시켜서 약 1.5kW의 화염을 만들었으며, 이로 인해 상부의 온도가 급격히 상승하여 균열이 생기는 열응력으로 인한 파괴현상을 보여주었다. 그러므로 대류나 복사등에 의한 열전달로는 실내화재시 창유리의 파괴가 일어나기 어려우며, 플래시오버가 일어나거나 창유리앞 가연물의 연소등으로 화염이 직접 유리면에 닿아 급격히 가열이 되는 경우에 창유리의 파괴되어 개구부가 생기게 된다는 것을 알 수 있었다. 그러나 초기에 직접 화염이 닿지않는 경우는 균열이 생기더라도 전면이 떨어져 내려 개구부가 형성되는 일은 없으며, 균열이 가서 떨어지는 경우는 유리 파단면을 잡아주고있던 실란트의 용융으로 인한 것임을 알 수 있었다.

(3) 창유리면과 프레임 안의 유리온도 비교 분석

화재시 유리가 파괴되는 것은 열에 의한 응력으로 발생한다. 이러한 현상에 대하여 중요한 것은 화염에 노출된 유리면과 프레임에 가려져 노출되지 않은 유리면, 그리고 화염에 노출되지 않은 쪽의 유리온도이다. 실험 1-2의 경우는 내측 상부 유리면의 온도와 프레임 내부유리면의 온도차가 작은 것을 그림 11.에서 알 수 있으나, 실험 1-3

의 결과에서 보듯이 프레임 내부와 유리면의 온도차가 233.4℃ 였으며, 실험 2-1은 첫 번째 균열시 온도차가 50초에 138℃, 실험

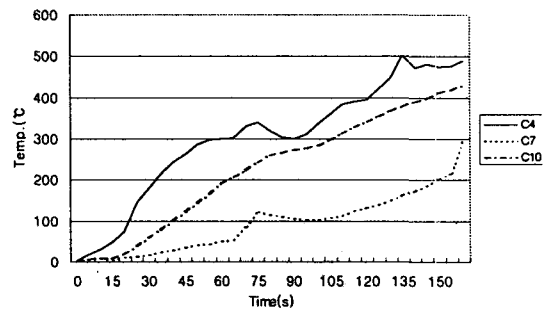


그림 4. Different variation of temperature profile in the fire room between on the middle part of window glass and on the window glass inside the flame (in the test 1-3) (C4:upper point of inside, C7:upper point of outside, C10:Inside point of frame)

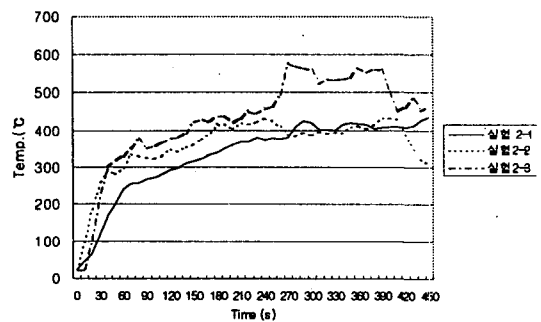


그림 5. Variation of temperature profile. Outside window glass of the upper part (in the test 1-2, 2-2, 2-3)

2-2는 80℃의 차이를 보였다. 파괴 발생 시 실내의 온도는 실험 2-1의 경우 434.4℃, 실험 2-2는 440.6℃, 실험 2-3은 400.9℃를 기록하여 화염이 직접 닿지 않는 경우의 균열은 400~500℃의 온도에서 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

구획의 화재 발생 시 창유리의 파괴 현상에 대한 규명과 시간의 예측을 위한 실험실 시 결과는 다음과 같다.

- (1) 화재시 창유리의 파괴현상은 유리의 가운데 부분과 프레임안에 있는 유리부분의 현저한 온도차이로 인한 열응력으로 일어남을 확인 했다. 실험 1-3은 프레임 내부와 유리면의 온도차가 233.4℃였으며, 실험 2-1은 138℃, 실험 2-2는 83.6℃의 차이를 보였다.
- (2) 파괴 발생시 실내의 온도는 실험 2-1의 경우 434.4℃, 실험 2-2는 440.6℃, 실험 2-3은 400.9℃를 기록하여 화염이 직접 닿지 않는 경우의 균열은 400~500℃의 온도에서 발생한다.
- (3) 523.31kW의 화재 시 창유리(플로팅 유리)는 인접 가연물이 발화가 일어나 화염이 유리의 전면에 닿는 경우 유리의 표면온도가 400 ~ 500℃까지 급상승 함으로서 파괴가 일어난다.
- (4) 화재로 인한 창유리(한글라스 플로팅 유리)는 1541.14 kW의 화재에 노출 되었을 시 열응력에 의한 파괴가 일어나기는 하나 유리면이 파괴에 의해 외부로 낙하하지 않아 1차 파괴시간이 유리가 파괴되어 개구부로 되는 시간으로 볼 수 없다.

■ 참고문헌

- 1.A. Joshi, P.J.Pagni, "Thermal Analysis of a Compartment Fire on Window Glass", NIST, 1990.
- 2.한글라스, "건축용 기술자료", 1996. 11.
- 3."SFPE Hand book of Fire Protection Engineering", SFPE, 1990.4.
- 4.오세중, "건축물에 대한 소방안전 (I)", 소방기술, 통권44호, 1995.5.
- 5.한국 화재·소방학회, "핵심 화재와 소방 기술", 선진기획, 1997.8.
- 6.김원국, "건축물의 창문을 통한 연소확대 방지대책", 소방안전, 통권68호, 1992.
- 7.Kohyu Satoh, "A Numerical Study of Window to Window Propagation in High-Rise Building Fires", ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD, 1997.
- 8.Horst Scholze, "유리공학", 청문각, 1996. 5.
- 9.A. Joshi, P.J.Pagni, "Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass 1 - Theory", Fire Safety Journal, 1994.
- 10.동경소방청, "개구부 연소 위험성의 실험적 연구", 소방기술정보, 1988. 12.
- 11.A.A. Joshi, "Users' Guide to BREAK1, The Berkeley Algorithm for Breaking Window Glass in a compartment Fire", NIST, 1991.
- 12.James G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior", Delmar Publishers, 1997. 7.
- 13.고한목, "방재·소방설비기술 총람(상)", 도서출판 의제, 1997. 10.
- 14.이수경, "연소공학", 서울산업대학교 출판부, 1996. 11.