

# 화재조사 지표로서 유리파괴 분석의 법공학적 가치

글 이승훈 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발조사팀



## 1. 머리말

유리는 현대에 들어 주택이나 사무실, 상가 등을 막론하고 대부분의 인간이 거주하는 공간에 많은 용도로 사용되는 건축재료이다. 유리는 건물의 외부는 물론 건물 내부의 인테리어, 장식, 액자, 식탁, 책상, 테이블 등을 보호하기 위해 다양한 용도로 사용된다. 유리의 파괴는 충격, 열, 압력 등의 외력에 의해 발생하며 각 외력에 대한 파괴의 형상이 다르기 때문에 파괴된 유리의 분석을 통해 화재현장의 다양한 정보를 얻을 수 있다.

서울지방경찰청 화재폭발조사팀에서 조사하였던 방화현장의 사례를 중심으로 검토해 보았다. 출입문이나 창문에 사용되는 유리가 화재이전 충격에 의해 파괴되었다는 분석결과는 화재직전 외부인의 침입여부를 증명하는 것에 있어서 매우 비중이 큰 증거로 채택되었으며, 실내 테이블의 보호유리가 화재이전 충격에 의해 파괴되었다는 분석결과는 인간의 통제되지 못한 분노, 흥분 상태에서 일어나는 방화범죄를 증명하기 위한 정황증거로써 채택되었다. 검토된 바에 의하면 화재현장에서의 유리파괴에 대한 분석은 여러 단편적 사실에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 목격자의 진술, 여타 증거와 함께 종합적으로 해석하였을 때 더욱 높은 가치의 정보를 얻을 수 있어 활용가치가 매우 높은 것으로 평가되었다.

우리의 환경에 일상적으로 존재하는 판유리의 파괴형태를 통해 충격이나 열, 압력 등 유리의 파괴를 초래하였던 외력을 구분 및 증명할 수 있는 법공학적 분석은 화재사건의 재구성에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 유리파괴의 원인에 대한 단순한 평가에서 유리파편의 그을음 부착이나 연소흔적 등을 검토하여 화재사건과 유리파괴 이벤트의 선후 관계를 확인할 수 있고, 목격자, 기타 증거와 함께 해석하였을 때 더욱 가치가 높아질 수 있을 것이다. 그러나 현재 우리는 일선 화재조사지들로부터 증명 가치에 대하여 적절하게 평가되지 않고 있으며, 발굴과정에서 발견되는 유리의 파괴된 잔해는 그 의미가 적절하게 검토되지 않은 상태로 다른 연소잔해와 함께 쉽게 버려지고 있는 실정이다. 현재까지 유리의 파괴에 대한 연구는 각 파괴에너지의 종류별로 발생하는 파괴잔해의 형상학적 연구, 파괴온도, 시간 등의 연구가 주를 이루었으며, 화재현장에서 파괴된 유리를 분석하여 유의미한 정보를 도출하는 논리에 대한 연구는 시도되었던 바가 없다. 이 글에서는 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발 조사팀에서 임장하였던 여러 사례 중 유리의 파괴분석이 화재사건을 재구성하는 데에 있어서 비중이 높은 증거로 채택되었던 사례를 통해 해석적 가치를 높이기 위한 논리를 검토하고자 한다. 이러한 시도는 실무적으로나

학문적으로 의의가 있을 것으로 사료되며, 이를 계기로 화재현장을 조사하는 데에 있어서 파괴된 유리 분석의 중요성과 해석적 가치를 높이기 위한 논리의 모델이 계속해서 개발되기를 기대해 본다.

## 2. 유리

흑요석과 같이 자연적으로 생긴 유리질 광석은 석기시대부터 쓰였다. 인류가 유리를 만들기 시작한 것은 기원전 15세기 이집트에서부터였다. 12세기부터는 스테인드글라스가 쓰였고, 15세기에는 유럽으로도 스테인드글라스가 전파된 것으로 알려져 있다. 과거에는 유리는 매우 귀한 물질로 귀족들의 장신구 등 전유물로 평가되었으나 18세기에 식염에서 소다를 제조하는 방법이 발명된 후, 18세기 말부터 19세기 전반에 걸친 소다유리의 공업적 생산 방법의 확립으로 사용이 가능하게 되었다. 19세기에 연속식 탱크 가마, 20세기에 연속식의 각종 제판기가 개발되어 판유리와 각종 유리제품의 대량 생산이 가능하게 되고, 가격도 비교적 저렴해져 유리의 사용이 일반화되었다<sup>1)</sup>. 현대에 와서는 인간생활과 밀접한 대부분의 환경에서 흔하게 유리를 사용하고 있으며, 이 글의 주제인 판유리는 주로 건물의 외벽에서부터 실내의 액자 또는 책상이나 테이블의 보호용으로 깔려 대부분의 생활환경에 존재한다.

## 3. 유리의 성질과 구조

유리의 주성분은 이산화규소( $\text{SiO}_2$ )이며, 여기에는 석영이나 규사가 사용되는데, 두 가지 모두 거의 순수한  $\text{SiO}_2$ 로 이루어진 광물이다. 여기에 붕사·석회석·탄산나트륨 등을 가하여 녹기 쉽도록 하며, 강도나 내약품성을 높이기 위해 산화알루미늄·탄산바륨·탄산칼륨을 가하기도 하며, 굴절률을 높이기 위해 산화납 등을 가하기도 한다.

유리의 독특한 구조 때문에 고체인가 액체인가를 간단히 말하기는 어렵다. 유리는 냉각함에 따라 점점 점성이 증가하여, 결정을 이루지 않은 채 고체가 되는 물질이다. 일반적인 액체에서 각 원자는 움직이기 쉬우며 무질서하게 배열하고 있으며, 일반적인 고체의 결정에서는 원자가 질서 있게 배열되어 있다. 따라서 액체가 고체로 되려면 원자가 질서 있게 배열되어야 한다. 그런데 유리의 경우 용해된 물질이 점성이 높아 원자가 움직일 수 없으며, 무질서한 배열이 변경되지 않은 채 굳어 버린다. 그 때문에 유리는 일정한 용점이 없다. 유리는 원자가 유동되기 어렵고 액체의 성질을 나타내지 않으므로 액체는 아니다. 그렇다고 해서 고체라고도 할 수 없는 것은, 원자가 무질서하게 배열되었고 열을 가하면 물렁물렁해지기 때문이다. 즉 어떤 면으로는 고체, 어떤 면으로는 액체의 성질을 띠며 양자간의 명확한 구분이 어려운 물질이라고 볼 수 있다.<sup>2)</sup>

유리는 원료와 제작공정에 따라서 매우 다른 성질을 나타내며, 용도에 따라 파괴강도, 열내성 등 다양한 성질로 제작할 수 있다. 창문 등에 사용되는 판유리의 일반적인 성질은 <표 1>과 같다.

## 4. 판유리의 파괴

판유리는 위 <표 1>에서 알 수 있듯이 압력에는 매우 강한 물질이지만 장력에는 매우 쉽게 파괴된다. 판유리의 파괴를 원인에 따라 유형별로 충격에 의한 파괴, 열에 의한 파괴, 압력에 의한 파괴로 크게 분류할 수 있다. 유리는 각 외력에 대하여 파괴의 형상이 다르게 나타나므로 파괴된 유리의 관찰은 사고현장의 진실에 접근해 가는 데에 매우 효과적이며, 객관적인 법공학적 근거될 수 있다. 이와 관련하여 John D. Dehaan은 그 저서에서 "유리는 사실상 모든 건물에서 사용되는 재료이며 조사관들이 사용하기에 매우 유용한 지표로서의 특징을 지닌다"<sup>6)</sup>고 적시한 바 있다. 각 외력에 의한 파괴의 형상은 다음과 같다.

<표 1> General property of window Glass<sup>3)</sup>

| 항목        | 수치                         |                                       |
|-----------|----------------------------|---------------------------------------|
| 비중        | 2.5                        |                                       |
| 광학적<br>성질 | 굴절율                        | 약 1.52                                |
|           | 반사율                        | 약 8% (수직입사)                           |
| 물리적<br>성질 | 압축강도                       | 6,000 - 12,000 kg/cm <sup>2</sup>     |
|           | 비열                         | 0.18 cal/g°C (0-50°C)                 |
|           | 연화온도                       | 720 - 790 °C                          |
|           | 열전도율                       | 0.65kcal/mhr°C                        |
|           | 열팽창율                       | 805*10 <sup>-6</sup> ~6°C (상온- 350°C) |
|           | 포아송비                       | 0.25                                  |
|           | 모스경도                       | 약 6.5                                 |
|           | 표면항장력                      | 약 500 kg/cm <sup>2</sup>              |
| 영율        | 750,000 kg/cm <sup>2</sup> |                                       |

### 가. 충격에 의한 파괴

유리는 압력에는 강하지만 장력에는 약한 물질이다. 유리의 일면에 충격이 가해지면 판유리는 충격의 반대방향으로 휘어지는 데 이 때 충격을 받는 면에는 압력이 가해지고, 반대면에는 장력이 발생하여 결국 장력이 발생하는 충격의 반대면부터 부서지고, 파괴선의 형태는 충격지점을 중심으로 방사형 파손과 방사형 파손형태를 횡으로 잇는 동심원 파손이 발생하고, 파손면에는 물결모양의 리플마크가 관찰된다<sup>5)</sup>. 리플마크는 방향성을 가지기 때문에 유리의 파괴가 시작된 지점과 충격의 방향을 알 수 있는 지표가 된다. 또한 유리의 충격이 총알과 같이 빠른 속도의 물체가 관통하였을 때에는 충격부위에만 부분적인 파괴가 이루어지는데 이때 충격 지점에서 보이는 Hertzian cone에 의한 원추형 파손형태도 충격의 방향을 식별하는 데에 매우 유용하다.

### 나. 열에 의한 파괴

구획실의 창문에 설치되는 유리는 테두리가 창틀에 보호되기 때문에 직접적으로 복사열에 의해 영향을 받는 중앙부와 온도차가 발생할 수 있으며, 관련된 연구결과에 따르면 복사열을 받는 중앙부와 창틀에 보호되는 부분의 온도차가 약 70 °C가 되면 금이 가기 시작한다<sup>6)</sup>.

열에 의한 판유리의 유형은 1) 창틀에 고정되어 있을 경우 유리와 창틀의 서로 다른 열팽창, 2) 직접적으로 화염을 받는 내측과 그렇지 않은 외측의 서로다른 열팽창, 3) 화염이 미친 부분과 미치지 않은 주변의 서로 다른 열팽창 등으로 구분<sup>7)</sup>될 수 있다. 판유리가 열에 노출되었을 때 파괴의 선은 불규칙하고 완만한 곡선형태의 파손이 발생하며, 파손면에는 리플마크가 관찰되지 않는 특징을 보인다<sup>8)</sup>.

### 다. 압력에 의한 파괴

일반적으로 건물 안에서 화재로 인해 생성된 압력만으로는 유리창을 파괴하거나 창틀에서 유리에 힘을 가하는 데는 불충분하다. 화재로 인한 압력이 대략 0.014kPa~0.028kPa 인데 비해 보통의 창 유리를 파괴 하는데 필요한 압력은 대략 2.07kPa~6.90kPa이다<sup>9)</sup>. 폭발에 의한 압력은 구획실 내의 외벽이나 창문, 출입문의 유리에 압력에 의한 파괴를 초래할 수 있다. 압력에 의한 파괴의 형상은 대부분 방사형 보다는 평행선에 가까운 모습으로 균열이 가며 파괴되고, 충격에 의한 판단시 발생하는 비교적 균일한 동심원 형태의 파단은 일어나지 않으며 각 파편이 단독적으로 파괴된다<sup>10)</sup>.

## 5. 사례의 법공학적 분석과 고찰

판유리의 파괴는 위와 같이 각 외력의 종류에 따라서 독특한 형태를 나타내기 때문에 이들의 외형관찰을 통해 외력의 종류를 알 수 있으며, 파괴되어 떨어져버린 또는 압력에 의해 비산된 파편을 관찰하여 열에 의한 변형흔적과 그을음 등 연소잔해의 부착여부를 통해 판유리의 파괴와 화재 중 어떤 이벤트가 선행되었는지에 대하여 판단할 수 있고 이들 각 분석 자료는 각 조합하여 해석되었을 때 더욱 많은 객관적 정보를 얻을 수 있다. 서울지방경찰청 화재폭발조사팀의 사례를 통해 고찰해 보고자 한다.

### 가. 사례 1<sup>1)</sup>

2012. 7.00. 00:00경 서울 서초구 00동 00 아파트 내에서 원인미상의 화재가 발생하였던 것으로 내부를 관찰하였을 때 거실의 응접테이블에 다음과 같은 흔적이 관찰되었다. 테이블 위에는 보호용 유리가 깔려있었던 상태이다. 유리가 깔려있던 테이블에 남아 있는 연소흔적을 살펴보면 유리가 깨져 금이 나있는 사이에 열기가 미쳐 부분적으로 탄화된 모습을 나타내고 있다. 화재이전 유리가 파괴되었다고 볼 수 있다. 파괴된 선을 따라서 탄화된 모양이 파괴기점(A, B)으로 집중되는 방사형 파손과 동심원 파손 형태의 모습을 나타내고 있다. 위 사진에 촬영된 흔적으로는 명확히 관찰되는 최소2개소 지점(A, B) 이상이 화재이전 충격에 의해 파손되었다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 화재 직전 합리적으로 설명되지 않는 파괴의 흔적은 제어되지 못한 인간의 과격한 행동에 의한 것이며 격심한 흥분상태였다는 것을 추정해 볼 수 있다<sup>2)</sup>. 이 사건에서 테이블 위의 이러한 흔적은 방화의 정황을 설명하기에 매우 가치가 높은 증거자료가 되었다.



[그림 1] 테이블 위의 연소 흔적 : 충격에 의해 파괴된 후 화재가 발생하였다는 것을 알 수 있다.

### 나. 사례 2<sup>3)</sup>

2012. 5. 00. 00:00경 서울 양천구 00동 00빌라 반지하에서 크게 다투는 소리가 난 후 '핑'하는 소리



와 함께 화재가 발생한 것으로 안방 창문으로 화염이 분출되어 있고, 창문이 깨져 있으며, 창문으로부터 약 3m 지점인 화단에서 발견된 유리창문의 파편은 압력에 의해 파괴된 형태이며, 유리파편 내, 외측에 그을음이나 열변형 흔적이 관찰되지 않는 점으로 보아 폭발 후 화재가 발생한 것으로 판단되었다. 여기서 우리는 폭발과 화재의 선후관계를 명확히 해줄 수 있는 객관적인 증거자료로 사용되었으며, 현장 조사과정에서도 폭발 후 화재를 동반할 수 있는 원인으로서 화학적 폭발에 대한 가능성에 포커스를 맞춰 조사할 수 있어 조사에 필요한 노고를 줄일 수 있었다.



[그림 2] 안방 창문 : 창문을 통해 화염과 그을음이 분출되었으며 창문으로부터 3m 가량 떨어진 화단에서 창문의 유리파편이 발견됨

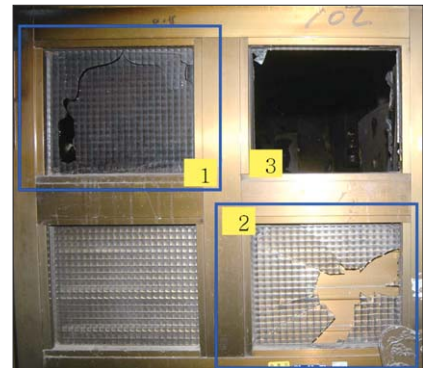


[그림 3] 위 사진 화단에서 발견된 유리파편 : 압력에 의해 파괴된 형태이며, 내외 측에 그을음 등 연소의 흔적이 식별되지 않음

#### 다. 사례 3<sup>4)</sup>

2007. 5. 00. 00:00경 서울 구로구 00동 00빌라에서 원인미상의 화재가 발생한 건으로 현장을 조사하였을 때 출입문의 유리는 다음 그림과 같은 형태로 파괴되었다. 내부에서는 서랍이 꺼내어져 있고, 장롱을 물색한 흔적이 있어 화재는 절도 피의자의 증거인멸을 위한 방화에 의해 발생한 것으로 판단할 수 있었다. 이 사례는 유리의 파괴형태를 떠나서 이미 다른 증거를 통해 방화사건인 것을 입증할 수 있으나 유리의 파괴분석만을 통해서도 외부의 침입이 시도되었던 점을 알 수 있으며, 다른 사건에서도 화재 직전 외부의 침입은 방화의 가능성이 매우 높은 것으로 평가된다. 이 사례의 경우 외부침입의 흔적과 함께 여타의 증거가 함께 발견되므로 매우 신뢰할 수 있는 판단 결과를 도출할 수 있다.

이 현장의 유리 파괴형태는 절도 피의자의 행동을 재구성해 볼 수 있는데 유리파괴 순서에 대하여 다음과 같이 해석할 수 있는 매우 유용한 정보의 가치가 있다.



[그림 4] 출입문 유리의 파손 흔적

- 1) 출입문 잠금장치를 해제하기 위해 2번 유리를 충격하여 깨뜨린다.
- 2) 2번 유리의 뒤편이 금속판으로 막혀 있자 3번 유리를 깨뜨린다.
- 3) 3번 유리를 통해 잠금장치를 해제하기 위해 유리창틀에 남아 있던 파편을 모두 뽑아내었다.
- 4) 1번 유리는 화재 진행과정에서 열에 의해 파손되었다.

## 6. 맺음말

서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발조사팀에서 실시한 현장조사결과를 검토해 보았을 때 유리파괴의 분석은 이미 화재가 진화된 후 발화과정 또는 진행과정에서 발생하였던 여러 이벤트를 평가하는 데 있어서 매우 객관적인 직접적 증거로 제시될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 단순히 유리파괴에 대한 분석뿐만 아니라 이벤트의 선후관계, 목격자의 진술, 당시의 정황, 기타 또 다른 증거와 함께 입체적, 종합적으로 검토하였을 때에는 얻을 수 있는 정보를 배가시켜 해석적 가치가 높아질 수 있을 것이다. 이는 사건 발생 초기에 분석되었을 때 화재조사자들의 효율적인 업무 진행과 수사적 측면에서 귀중한 증거자료가 될 것으로 평가된다. ☞

### [참고문헌]

1. 화염 및 파기에 의한 유리 파손 형태 연구저자명 (발표자명)홍지호문서유형학술발표자료학술행사한국화재감식학회 학회지발행 정보한국화재감식학회 |2010년 |한국 |한국어 주제분야공학 > 공학일반 서지링크학술교육원
2. <http://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%9C%A0%EB%A6%AC> . 2012. 8. 24. 검색
3. 이수경, 김종훈, 최종운, 이정훈. 구획 화재시 창유리 파괴 현상에 관한 실험적 연구. 火災·消防. 12,3(98,9) pp.21-30 재인용. 한글라스 "건축용 기술자료" 1996. 11.
4. John D. Dehaan. 2007. Kirk's Fire Investigation Sixth edition, Pearson Education Inc. p268
5. 문용수, 사상열, 최민석, 최재호, 김용수. 한국화재조사학회 논문지 | 3권 1호 | pp.12-15 | 2003년 10월 | 한국화재조사학회
6. NFPA921 2007 edition. p45. 6.2.13.1 Breaking of Glass
7. 이승훈. 2009. 화재조사이론과실무. 동화기술 p60
8. John D. Dehaan. 2007. Kirk's Fire Investigation Sixth edition, Pearson Education Inc. p270
9. 홍지호. 2010. 화염 및 파기에 의한 유리 파손 형태 연구. 한국화재감식학회. 한국화재감식학회 학회지 2권 2호 2010년 12월, pp.47-51 한국화재감식학회
10. 이승훈. 2009. 화재조사이론과 실무. 동화기술 p62
11. 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발 조사팀 현장조사 자료. 2012. 7.
12. 이승훈. 2009. 화재조사이론과 실무. 동화기술 p194
13. 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발 조사팀 현장조사 자료. 2012. 5.
14. 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발 조사팀 현장조사 자료. 2007. 5.