화재 시 유리의 파손에 관한 고찰

방재기술

화재 시 유리의 파손 여부 및 시기는 중대한 결과를 초래한다. 이 글에서는 유리 파손에 대한 이론적인 연구뿐 아니라 일부 실험적인 연구 내용을 소개한다.

1. 배 경

화재의 크기(기술적인 용어로, 열 방출률)는 가용 산소량에 의해 제한된다. 아주 특별한 경우를 제외하면, 많은 경우 대부분의 산소는 개방된 문 또는 창문을 통하여 실내로 유입되며, 기계적 환기 설비와 건물의 틈새를 통하여 일부 소량이 유입된다. 그러나, 일단 화재가 진행되면서 처음에는 밀폐되었던 창문은 크랙이 발생되어 파손되거나 그렇지 않을 수 있다. 흔히 화재의 결과는 창문의 파손 여부에 따라 크게 달라진다. 그러므로, 화재 시 유리가 파손될 것인지, 파손된다면 언제 파손될 것인지를 예측할 수 있다는 것은 아주 중요한 의미를 갖는다.

일반적인 플로트 유리(float glass)는 열을 받아 150~200℃에 이르면 크랙이 발생된다. 최초의 크랙은 모서리 부분에서 발생되어 판유리 전체로 진행되지만 이 시점까지는 화재에 이용될 수 있는 환기에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 유리에 크랙이 생길 뿐만 아니라 큰 조각 또는 여러 조각이 탈락되어야 공기 유동에 영향을 줄 수 있다.

실제적으로 어느 부분에서 탈락이 발생되는 조건을 이해하는 것은 화재와 관련된 많은 사람들에게 중요한 관심사이다. 화재 모델을 이용하기 위해 환기 개구부 조건이 파악되어야 하므로 화재 모델링을 실행하는 사람들에게 유리의 파손은 중요한 관심사가 되어왔다. 이러한 이유로 다수의 이론적이고 단순화된 연구 뿐 만 아니라 일부 실험적인 연구가 수행되었다.

화재와 관련하여 유리가 열에 노출되는 대표적인 두 가지 형태는 다음과 같다.

1. 창문이 화재 발생 실내에 있는 경우이며,

창문의 한쪽 면은 화재발생 지점으로부터의 집중열에 노출된다. 실내 가스의 온도와 복사열은 유사하다. 실의 상부와 하부 사이의 온도와 열 유속은 위에서 아래로의 (-)기울기를 갖는다.

2. 창문이 황무지 또는 산림화재와 같은 외부화재에 노출되는 경우이다. 이 경우 창문의 상부와 하부는 일반적으로 동일한 조건으로 노출된다. 창문은 주로 복사열에 의해 가열된다. 가스 온도는 주위의 공기온도와 유사한데 이는 화염이 직접 창문을 가열하지 않고 창 표면을 따라 냉각 대류가 발생하기 때문이다.

2. 화재 시 유리의 크랙에 관한 이론적, 실험적 연구

Keski-Rahkonen은 최초로 화재 시 유리의 크랙에 관한 종합적인 이론적 해석을 제시하였다. 그는 화재에 노출된 유리 면과 창틀에 의해 보호된 유리 사이의 온도 차이가 크랙을 조정하는데 중요한 역할을 한다는 것을 확인하였다. 그의 이론은 화재에 노출된 유리 면과 창틀에 의해 보호된 유리 사이의 온도 차이가 80 ℃가 되면 크랙이 발생되기 시작한다는 것을 예견하였다.

Pagni와 Joshi는 이러한 이론을 발전시켜 열역학과 유리의 열적 성질까지 포함하는 이론으로 확대하였다. 그들은 58℃ 온도차를 크랙 발생 시점으로 제시하였다. 이러한 온도 차이는 주로 유리의 열적, 기계적 성질에 기인하는 것으로 추정된다.

Skelly는 특수하게 축소한 실을 모델로 하여 일련의 화재실험을 수행하였다. 그의 실험에서 특이한 것은 실의 상부와 하부간의 수직적인 온도차를 두지 않았다는 것이다. 그는 얼마의 유리조각의 탈락을 보고했지만 유리를 파손시키는 조건을 규명하는데 필요한 지침이나 도식은 제시하지 못했다.

Mowrer는 최신의 실험 연구결과를 발표하였는데 그는 복사 패널이 있는 크고 작은 시험체에 열을 가하여 외부의 노출에 대한 영향에 대해 실험하였다. 최대 열 유속 16kWm^{-2}에서 크랙은 많이 발생했지만 창문은 파손되지 않았고, 일 방향 강화유리(Single-strength glass)는 4~5kWm^{-2}에서 크랙이 발생되었다. 방충망이 있는 유리창은 검정이든 밝은 색이든 열 유속이 21% 증가되어야 크랙이 발생되었다. 그는 또한 일 방향 강화유리에 조사되는 복사량의 33% 정도가 유리를 통과하는 것을 발견했다. 이러한 자료는 외부 복사열로 인한 건물 내부의 발화를 추정하는 데 이용될 수 있다.

캐나다의 국립연구 위원회(NRCC)는 유리를 방호하는 스프링클러를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 이 연구의 일부로 스프링클러가 설치되지 않은 상태에서의 실험이 다수 수행되었다. 일반적인 상업용 건물에서 주로 사용되는 6mm 두께의 강화유리를 실험실 화재에 노출시키는 실험을 실시하였는데 아주 흥미로운 결과를 얻었다. 강화유리는 초기에 크랙이 발생함과 동시에 산산조각이 났지만 초

기의 크랙은 상당히 높은 온도에서 발생하였다. 화재에 노출된 표면의 온도는 290~380℃였고 비노출 면은 이보다 100℃ 정도 낮았다. 이러한 유리 온도는 일반적으로 실의 플래시오버(flash-over)가 발생되기 전까지는 도달하지 않는다.

이후의 연구에서 NRCC는 복사열을 사용하여 유리를 실험하였다. 이 실험에서 평판 유리는 노출된 유리 면의 온도가 150~175℃, 비노출 면은 75~150℃에 도달했을 때 파손되었다.

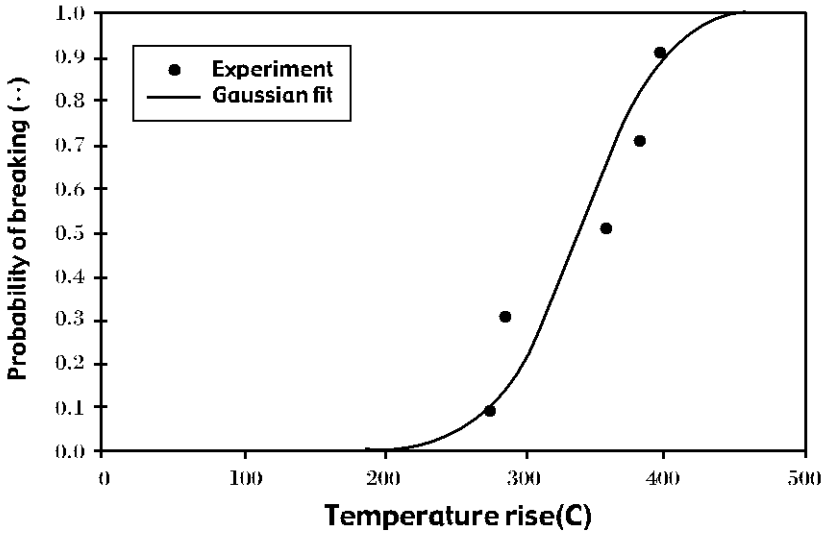
3. 화재 시 유리의 파손에 관한 실험과 지침

발표된 문헌 중 화재 시 유리의 파손시점에 관한 최초의 지침은 러시아 연구원 Roytman이 제시했는데 그는 실내 가스온도가 300℃에 도달해야 유리의 크랙이 발생한다고 언급하였다. 그러나 이 연구의 기초는 원자력이었다.

Hassani, Shields, Silcock은 1/2 크기로 축소한 모형실에 0.9m×1.6m 크기의 유리창 한 개를 설치하여 일련의 실험을 수행하였는데, 실과 유리의 상부에서 하부까지 온도의 구배가 있도록 모형을 제작하였다.

4 또는 6mm 두께의 유리에서 첫 번째 크랙이 발생한 시점에 상부의 가스온도는 323~467℃에 이르렀으며, 20분이 경과한 실험 말기에는 가스 온도가 500℃에 이르렀다. 하지만 6차례의 실험 중 단 한 차례만 유리가 파손되었다. 화재에 노출된 유리면과 창틀에 의해 보호된 유리면 간의 온도차가 125~146℃에서 최초의 크랙이 발생되었다. 이러한 온도차이는 수직적인 온도 구배를 적용하지 않은 이론에서 예견된 온도의 두 배였다.

이들은 유리가 파손된 시점의 실험실의 정확한 온도는 모르지만 431℃(크랙 발생시점)보다는 높고 450℃(실험의 말기)보다는 낮은 온도라고 하였다. 이러한 자료를 함께 고찰해 보면 실의 가스 온도가 450℃정도일 때 유리가 파



손될 확률은 1/6이라는 결론을 내릴 수 있다.

이들은 또한 6mm 두께의 2개의 유리창을 설치하여 더 진전된 실험을 수행하였다. 두 번의 실험에서 유리 근처의 온도가 400~500℃에서는 유리가 파손되지 않았다. 세 번째 실험에서 가스온도가 500℃에서 유리창 하나가 파손되었다. 두 번째 유리창이 파손된 시점의 가스온도도 또한 약 500℃였지만 이 온도에서 8분 30초 동안 노출된 후에 파손되었다.

일정한 고온에 노출된 유리에 관한 최근의 실험결과는 일본의 건축연구소에서 발표하였다. 이 연구에서 연구원들은 대형 간접 가열식 로와 유사한, 고온에서 문을 통한 누설량을 실험하는 대형 장치를 이용하여 3mm 두께의 한 개의 창만을 대상으로 연구하였다. 그러나 이러한 종류의 유리에 대해서 다수의 실험을 반복하여 확률 도표를 만들 수 있었다.

이러한 연구결과는 앞의 도표와 같이 '주위 온도의 상승에 따른 유리의 파손확률' 의 함수로 발표되었다.

이 자료를 상호 관련시킬 수 있는 정규분포도(Gaussian fit)를 작성하면 평균온도는 340℃이며 표준편차는 50℃가 된다.

그러므로 일본건축연구소의 결과는 앞에서의 두 가지 수치와 거의 일치한다.

영국의 LPC(Loss Prevention Council)는 다층 구조 건물이 화재에 노출되는 경우의 실화재를 연구하였다. 각 유리판의 두께가 6mm인 이중 창문을 실험하였다.

열 방출량이 3MW인 통나무 화재를 이용하여 실험한 결과 적어도 8~10분 동안 600℃ 온도가 유지되어야 유리가 파손되기 시작하여 통기가 발생한다는 것을 확인하였다. 그러나, 모든 집기류가 비치된 사무실을 이용한 실험에서는 발화 후 5분만에 유리가 파손되었다. 이 실험에서도 유리가 파손된 온도는 600℃였지만 이 온도에 도달하자마자 유리가 파손되었다. 이러한 실험결과에서 6mm 두께의 이중 창문은 600℃에서 파손되며, 화재하중이 큰 경우에는, 최초 600℃에 도달하는 즉시 파손될 것이라는 결론을 얻을 수 있다.

Shields, Silcock, Hassani는 크기가 다른 두 개의 이중 창(각 유리판의 두께는 6mm)을 실 화재에 노출하는 실험을 하였다.

이 실험에서는 실 온도가 최고 750℃에 도달했지만 어느 창도 파손되지 않았다. 그러나 세 번의 실험 중 한 번은 발화된 지 21분이 지난 후, 실 온도가 500℃로 떨어진 감쇄기에 큰 창문(0.8m×1.0m)의 안쪽 유리가 파손되었다.

큰 유리창의 바깥쪽 유리와, 작은 창문(0.8m×0.5m)은 전혀 파손되지 않았으며, 나머지 두 번의 실험에서는 어느 것도 파손되지 않았다.

이들은 후에 1.5m×1.5m 크기의 12개의 이중 창을 설치하여 실험하였다. 이 실험의 기록은 아주 간단한데 유리가 최초로 파손된 것은 가스 온도가 350℃라고 지적하였다. 그러나

그 다음 유리창의 파손은 어느 온도에서 발생하는지는 명확하게 언급하지 않았다.

복사열에 노출되는 경우에 대해서, Cohen과 Wilson은 외부 화재에 노출되는 일련의 흥미로운 실험결과를 발표하였다. 그들은 작은 창문(0.61m×0.61m)과 큰 창문(0.91m×1.5m), 일면 창과 이중창을 실험하였다. 그들은 또한 강화유리와 이중 강화유리에 대해서도 실험을 계속하였다.

작은 창문의 경우는 열 유속이 최소 9.3kW㎡에 도달할 때 모든 창문에 크랙이 발생했으나 파손되지는 않았다. 심지어 최고 17.7kW㎡의 열 유속에서도 파손되지는 않았다.

큰 창문의 경우에는, 16.2~50.3kW㎡의 열 유속에서 적어도 세 번의 실험에서 한 번은 파손되었다.

이와는 대조적으로, 강화유리는 큰 창문에서도 29.2kW㎡의 열 유속에서도 크랙이 발생되지 않았다.

이들은 또한 이중 창문에 대해서도 실험하여 더 진전된 결과를 얻었다. 큰 이중 창문(강화유리는 아님)의 실험을 통하여 이중창이 파손되기 위해서는 20~30kW㎡의 열 유속이 필요하다는 것을 확인하였다.

Harada 등은 실험로에서 3mm 두께의 플로트 유리(시료크기 0.5m×0.5m)를 다양한 열 유속에서 실험하였다. 8kW㎡ 미만의 유속에서는 심각한 파손이 발생되지 않았지만 9kW㎡의 유속에서는 시료면적의 8~24%가 파손되었다. 가장자리 고정물은 결과에 영향이 없었다.

NRCC 보고서의 추가적인 자료를 보면, 열처리 강화유리와 강화유리(두께 자료는 없음)는 43kW㎡의 열 유속에도 파손되지 않았다. 이러한 열 유속은 노출 유리 면의 온도 350℃, 비노출 유리 면의 온도 300℃에 해당한다. 그러므로 이를 통하여 언제 실제적으로 강화유리가 파손되는지는 규명할 수 없지만, 강화유리가 파손되지 않는 열 유속은 Cohen의 자료인 29.2kW㎡보다 높은 43kW㎡로 확대할 수 있다.

4. 기타 유리

출판된 연구 보고서들은 주로 열처리 또는 강화된 얇은 소다 유리(soda glass)를 다루었다. 그러나 고려해야 할 다른 많은 종류의 유리가 있다. 많은 상업용 건물에는 두꺼운 유리가 사용되고 있다. 6mm 두께의 평판 유리는 복사 열 유속이 23kW㎡에서 상당한 시간(7분) 후에 파괴되는 것으로 확인되었다. 다른 종류의 경우에는 유리의 성능을 확인할 수 있는 자료가 충분하지 않다. 자동차 유리는 체계적으로 연구되지 않은 분야 중 하나이다.

최종적으로 다양한 종류의 내화 유리들이 있다. 망입 유리는 이것의 가장 오래된 형태이다. 최근에는 망입 유리 외에 몇 종류의 특허 받은 내화유리가 있다. 이들은 보통 다층 구조를 가지며, 일반적으로 안에 고분자 층을 포함하고 있다. 내화 유리의 파손시간은 일반적으로 내화시간에 관한 시험소의 보고서를 따른다. 이런 유리는 파손되는 내화시간 전까지는 유리파

손에 의한 통기는 발생하지 않는다고 추정할 수 있다.

5. 창문틀의 종류에 따른 영향

실제적으로 창문 유리의 파손은 또한 창문틀의 재질에 영향을 받는다. Mowrer는 플라스틱 창틀은 대부분의 유리가 파손되기 전에 파괴(예; 창틀 전체의 붕괴)되는 경향이 있음을 발견하였다. 열 유속이 8~16kWm²인 범위에서 플라스틱 창틀은 붕괴되는 것으로 관측되었다. 그러나, 이와 대조적으로 McArthur는 알루미늄 창틀 창문의 유리가 재래식의 나무 창틀의 유리보다 더 오래 견딘다는 것을 발견하였다.

6. 결 론

언제 유리의 크랙이 발생하는지를 예측하는 이론들이 있지만 이것이 직접적으로 화재실의 환기와 연관되는 것은 아니다. 위에서 관련 보고 문헌들을 간략하게 검토한 바와 같이, 사실상 실제 화재에서 언제 유리가 파손될 것인지를 예측하는 것은 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 러시아에서 발표한 300℃는 파손의 하한치로서 적정한 것으로 볼 수 있다. 일본의 새로운 연구결과를 적용하면 3mm 두께의 유리는 340℃ 근처에서 파손될 것이라는 것을 알 수 있다.

더 두꺼운 4-6mm 두께 유리의 평균 파손 온도는, 비록 얇고 두꺼운 유리의 차이가 생각보다 크다고 할지라도, 450℃를 초과할 것이다. 6mm 두께의 유리판을 이용한 이중창은 약 600℃에서 파손될 것으로 예측할 수 있다.

강화 유리는 실의 화재가 플래시오버에 도달한 후까지는 거의 파손되지 않을 것이다.

외부 화재의 경우, 몇몇 실험결과를 통하여 9kWm²의 열 유속에서 일반적인 유리는 심각하게 파손될 수 있음을 알 수 있다. 다른 연구들에서는 더 높은 열 유속이 요구되었으므로 9kWm²는 실제적인 하한선으로 볼 수도 있다.

이중 창문은 대략 25kWm²까지는 파손되지 않고 견딜 수 있으며, 강화유리는 적어도 몇몇 조건에서는 43kWm²까지 견딜 수 있었다.

창문의 크기, 창틀의 종류, 유리 두께, 유리의 결함과 수직적인 온도 구배와 같은 인자들은 모두 유리의 파손에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 가스의 폭발로 인한 과압은 명백하게 유리를 파손시키는 메카니즘이다. 그러나, 일반적인 화재에서 압력의 변화가 생기며 이것이 잠재적으로 유리의 파손에 영향을 줄 수 있다. 위의 연구들은 유리의 파손이 화재실의 환기에 미치는 영향에 대해서만 고찰하였다. 화재를 연구하는 사람에게는 유리의 파손에 대한 다른 많은 방면들이 중요하다. 이러한 모든 인자들은 유용하고 정량적인 지침을 얻기 위하여 더 깊이 연구할 가치가 있다.

〈참고문헌〉

○ Keski-Rahkonen, O., Breaking of Window Glass Close to Fire, Fire and Materials 12, 61~69 (1988).

○ Pagni, P. J., and Joshi, A. A., Glass Breaking in Fires, pp. 791~802 in Fire Safety Science-Proc. Third Intl. Symp., Elsevier Applied Science, London (1991).

○ Skelly, M. J., Roby, R. J., and Beyler, C. L., An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires, J. Fire Protection Engineering 3, 25~34 (1991).

○ Roytman, M. Ya., Principles of Fire Safety Standards for Building Construction, Construction Literature Publishing House, Moscow (1969). English translation (TT 71-580002) from National Technical Information Service (1975).

○ Hassani, S. K., Shields, T. J., and Silcock, G. W., An Experimental Investigation into the Behaviour of Glazing in Enclosure Fire, J. Applied Fire Science 4, 303~323 (1994/5).

○ Tanaka, T., et al., Performance-Based Fire Safety Design of a High-rise Office Building, to be published (1998). ets.

※ 본 내용은 Fire Science and Technology Inc.의 Dr. Vytenis Babrauskas의 보고서 (1997.4.28)를 번역, 요약한 것임.

— 정리: 연구컨설팅부 대리 사공람

◆ 국 제 회 의 안 내 ◆

개최일자	회 의 명 (개최장소 · 연락처 등)
2003년	
1월 27~28	9th International Fire and Materials Conference (美國 · http://intercomm.dial.pipex.com)
4월 18~19	AITES-ITA World Tunnel Congress (Holland · http://www.betonvereniging.nl/wtc2003/)
5월 8~10	Conference on Tall Buildings-Strategies for Performance in the Aftermath of the World Trade Center(Malaysia · http://www.cibklutm.com)
6월 8~13	3rd Mediterranean Combustion Symposium (Morocco · http://combustioninstitute.it)
17~19	8th International Congress on Toxic Combustion By-Products (Sweden · http://www.PICCongress.isu.edu)
24~27	1st International NAISO Symposium on ITEE' 2003 (Poland · http://www.icsc-naiso.org/conferences/itee2003/information.html)
8월 20~22	Second International Conference in Predestrain and Evacuation Dynamics (UK · http://www.fseg.gre.ac.uk/ped2003/)
9월 8~12	4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards (UK · http://www.engj.ulster.ac.uk/4thisfeh)
30~10/2	ASCE/SFPE Specialty Conference on Designing Structures for Fire (美國 · email: sdavis@asce.org)