

대규모 아트리움에 적용되는 수막형성 유리벽의 열적 특성 및 내화성능에 관한 연구

A Research on Thermal Properties & Fire Resistance of A Water Film Covered Glazing System for Large Atrium Space

박형주[†] · 지남용*

Park, HungJoo[†] · Jee, NamYong*

[†]경원전문대학 소방안전학과

*한양대학교 공과대학 건축공학부

요 약

열적특성이 비교적 열악한 재료인 유리를 내화성능이 요구되는 방화구획을 이루는 비내력벽에 사용하려는 시도가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있는 중에서, 본 연구는 유리표면에 수막을 형성시켜 구획화재시 유리벽이 파열되지 않고 견딜 수 있는 성능을 자질 수 있는 초점을 맞추어 단계적인 실험을 실시하였다. 먼저 수직고가 3M 이상인 유리벽에 균일하고도 단질이 없는 수막을 형성할 수 있는 시스템을 고안하여 대형내화로내에서 화염의 세기를 줄이지 않는, 즉 리바운드량이 거의 없는 수막을 형성시킬수 있도록 제작한 후, 이 시스템을 사용하여 수막이 형성된 유리벽의 열적 특성을 확인하는데 중점을 두고 실험하였다. 다음에는 고안된 시스템을 소형과 대형의 유리벽에 적용시켜 우선적으로는 소형내화로에서 가열하여 기초적인 열적 특성을 조사한 후에 여기서 얻은 데이터를 근거로 실제규모의 실험이 가능한가를 판단한 후에 최종적으로는 2.4M×3M크기의 대형의 유리벽에 수막을 형성한 플러드 노즐형 수막형성유리벽체를 대형내화로내에 거치하여 KS F2257에 의하여 가열하는 내화성능실험을 수행하였다. 실험결과 수막이 완벽하게 유리면을 도포된 상태에서만 유리가 파열되지 않았으며 이런 수막을 계속적으로 유지하는 데는 많은 변수가 있다는 것을 발견하였으며 또한 수막도포상태의 변화는 내화성능을 보유하는데 있어서 핵심적으로 작용한다는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In order practically to use fire-defective glazing materials for the compartment wall where a fire-protection rating is mandated, there have been many trials internationally. This research focuses on a feasibility that, if certain water film covered all surface of glass, the glazing system can endure without breaking out under the compartment fire. First of all, a water film spray system was specially designed to wet the entire surface of the glass and also to have tiny small amount of water rebounded from the surface after emitted from nozzles. After this system has proven to have perfect performance, small-scale tests were done to find out if the water film covered glazing system react to the high temperature curve in a small furnace room. Finally, on basis of the obtained data, full-scale experiments were done so that water-film covered glazing system can pass the Korean Standard (KS) test for fire resistance, KS F2257.

Keywords : 수막 (Water Film), 수직창문형 드렌쳐시스템 (Drenched Glazing System), 플러드노즐형 수막형성시스템 (Flood-Nozzled Glazing System), 내화등급 (Fire Protection Rate), 실제규모 또는 축소모형시험 (Full or Small Scale Test)

1. 연구의 배경 및 목적

수세기 전부터 인간은 많은 건축물에 개방감을 주는

유리를 사용하려고 많은 노력을 기울여 왔다. 20세기 들어 건축물이 대형화, 고층화, 첨단화됨에 따라 유리의 사용은 급격하게 증가되어 온 것이 사실이다. 일반적으로 건축물의 벽체를 구성하는 벽돌, 경량 파티션 패널과는 달리, 유리는 시야를 확보하여 줄 뿐이 아니라

[†] E-mail : Firepark@kyungwon-c.ac.kr

채광까지도 확보할 수 있는 장점이 있기 때문에 외부는 물론, 내부의 칸막이 벽으로도 사용되어 왔다.

반면에, 유리는 충격에 약하고 크기의 제한이 커서 사용이 제한되는 결점이 있으며, 특히 열적 충격(thermal shock)에 상대적으로 약하기 때문에 화염의 확산을 일정시간 동안 저지할 목적으로 설치되는 방화구획을 이루는 벽체로서의 사용이 제한되어 왔다.

수십 년 전부터 방화·소방 기술자는 화재에 비교적 견딜 수 있는 유리재료로서 망입유리(wire-mesh glass) 외에 시야확보의 장점이 큰 투명한 플로트 유리(float glass)를 사용하기 위하여 많은 노력을 기울여왔다.

최근 유리의 조성을 변화시켜 열적 특성을 강화시키는 방화유리와는 별개로 플로트 유리 표면에 수막(water film)을 형성시켜 화재 시에 발생하는 열에 의하여 상승되는 유리표면온도를 저하시켜 내화성을 부여하는 기술의 개발이 시도되어 왔다.

이는 건축설계에 있어서 설계자의 자유로운 발상과 건축물의 질적 향상을 유도하기 위하여 필요한 새로운 시스템의 개발과 관계가 깊은 것이라 할 수 있다. 따라서 유리표면에 형성되는 수막이 화재 시에 어떤 특성을 가지고 유리표면온도에 어떤 영향을 미치는가를 고찰할 필요가 크다.

본 연구는 유리면에 수막을 균일하게 형성시킬 경우, 유리벽의 열적 특성을 조사하여 궁극적으로 내화성능을 가질 수 있는 가를 규명하는데 목적을 둔다. 따라서 본 연구의 설정목표는, 최종 목적인 유리벽체의 내화성능을 확보하는데 필수적인 최적의 수막 형성 설비를 고안한 후 실제 크기의 유리벽을 재현한 시험체에 설치하여 균일하고도 연속적인 수막을 도포 시키는 데 중점을 두며, 최종적으로는 이 시스템에 의하여 수막이 형성된 유리벽 시스템을 KS규격(KS F 2257 건축구조부분의 내화시험방법)에 의거하여 실제 화재의 세기를 동일하게 나타낸 표준온도가열곡선에 따라 가열하여 유리표면에 형성되는 수막 형태에 따라 유리벽의 열적 특성이 변하는가를 분석하고 나아가 내화성능에 미치는 영향을 규명하는데 본 연구의 목표를 둔다.

2. 유리의 열적 특성에 관한 이론적 고찰

2.1. 화재에 노출된 유리의 열적 특성에 관한 고찰

화재에 노출된 유리에서는 멤브레인응력(membrane stress)과 휨응력(bending stress)의 두가지 응력이 발생한다. 여기서 멤브레인응력은 유리면에서 평면상의 온도차가 생길 경우 발생하는 응력이며, 휨응력은 유

리면의 두께방향의 온도차에 의해서 발생하는 응력을 말한다. 따라서 유리면에 발생하는 평면방향의 응력과 두께방향으로 발생하는 응력을 합한 것이 최대 응력이 된다.

유리패널에 평면상 커다란 온도차가 발생할 경우, 멤브레인응력에 의하여 유리의 끝단에서 다른 끝단까지 균열이 발생한다. 일반적으로 화재 시에는 유리의 끝단을 감싸고 있는 프레임이 유리 끝단에 도달되는 복사열을 차단시키고 큰 열흡수체로서 작용하기 때문에 유리패널의 중앙부에는 압축응력이 발생하고 외각부에는 인장응력이 작용한다. 이 두 응력의 차이가 클 경우, 즉 파괴응력을 초과하는 응력이 발생하면 유리는 파열된다.

또한, 유리패널의 한쪽 면이 접하는 공기온도가 급격히 상승할 경우, 유리면의 두께방향으로 휨응력이 발생되어 파열시키기도 한다. 실제화재 시에는 화재실의 공기온도가 급격히 상승하는 반면에 인접실의 공기층 온도는 상온과 비슷하기 때문에 경계부에 있는 유리패널은 휘게 되므로 어느 정도의 휨응력에 도달하면 유리는 파열한다.

또한, 복층 유리처럼 중간에 밀폐된 공기 층이 존재할 경우, 이 공기 층이 어떤 이유로 가열된 경우 발생하는 압력차에 의해서 유리 전체에 휨응력을 발생시키기도 한다. 그러나 화재시 화재실과 인접공간과의 압력 차는 그다지 크지 않기 때문에 특수한 공간을 제외하고는 일반적으로 유리를 파열시키는 데까지는 영향을 미치지 않는다고 한다.

강화유리는 비교적 보통유리보다는 열응력에 대한 저항이 크다. 그 이유는 보통유리를 열처리하여 만든 것이 강화유리이기 때문인데 유리제조회사가 시험한 시험 자료에 의하면 아래와 같은 높은 온도까지는 견딜 수 있다는 것을 의미한다. 이 온도는 강화유리가 계속적이고도 일반적인 화재에 노출될 경우에 견딜 수 있는 최대온도이지만 일시적으로는 더 높은 온도에서도 견딜 수 있는 것으로 알려져 있다.

• 최대 온도 : 300°C

• 최대 온도차 : 265°C (유리패널의 중앙부와 가장자리와의 온도차 또는 유리면의 두께방향의 온도차를 말함)

유리벽을 화재에 노출시킬 경우, 특히 방화구획의 경계벽으로 설치할 경우에는 다음의 두가지의 문제점을 고려하여야 한다.

첫째, 열응력에 의한 파열로 인접공간으로의 화염확대와 연기전파를 초래할 가능성

돌재, 유리면을 통하여 전달되는 복사열에 의하여 화재실의 가열면 이면의 온도를 연소에 충분한 온도까지 상승시키므로써 이면에 부착된 가연물을 연소시킬 가능성이

이러한 문제점을 사전에 방지하기 위한 조치로서 건축·소방 관련법에서는 방화구획을 구성하는 부재는 일정 기준이상의 내화성능을 보유하도록 의무화하고 있다. 이 내화성능의 보유한다는 것은 여러 화재 상황에서 유리가 파열되지 않을 경우, 구획 벽으로서의 역할을 충실히 수행할 수 있다는 사실을 실험적으로 입증하는 것을 말한다.

유리벽의 화재발생시의 열적 특성을 아래의 가상 시나리오를 들어서 설명할 수 있는데, 이와 같은 상황에서 성능을 직접적으로 보장하는 방법은 현재로서는 내화시험에 의한 내화성능의 입증이 현재로서는 가장 타당하다.

(1) 만일에 유리면에 강렬한 화염이 국부적으로 접촉하여 가열하는 경우 8~10분 안에 온도차에 의하여 파열된다.

(2) 만약 유리를 300°C까지 가열되어진 상태에서 스프링클러 등의 수계소화설비에서 분사되는 온도가 비교적 낮은 물이 직접 유리면에 닿을 경우 열충격에 의하여 파열될 것이다.

(3) 만약에 유리의 온도가 250°C가 되기 전에 스프링클러 등의 수계소화설비가 작동하여 유리면의 전체 온도를 균일하게 250°C 이하로 유지시킬 수 있다면 유리는 파열되지 않을 수 있다.

이상과 같은 가상 시나리오를 종합하면, 유리면의 온도를 250°C 이하로 유지시키는 것이 가능할 경우 유리는 파열되지 않을 수 있다고 할 수 있다. 따라서 유리면에 적절한 수막을 형성시켜 유리면의 온도가 전술한 것 이상으로 상승되지 않도록 한다면 유리벽체는 내화성능을 가질 수 있다는 예측도 가능하다.

2.2. 내화시험의 목적 및 방법

각 나라의 모든 건축·소방법규에서는 건축물의 규모에 따라 건축물의 부재에 대한 내화성능(fire resistance ability), 즉 화재시 부재가 가열에 견디는 성능의 기준을 정하고 있다. 하나의 부재가 이 기준을 만족할 경우 이 부재는 내화구조로 인정을 받아 일정기준이상의 내화성능을 필요로 하는 부분에 사용된다.

내화시험이란 일반적인 건물화재에 견디는 성능을 내화로에서 시험하는 것으로 일반적인 화재폭로 기준을 아래 그림의 표준온도가열곡선으로 정의한다.

이 곡선은 건물의 실내 화재의 세기를 시간의 경과

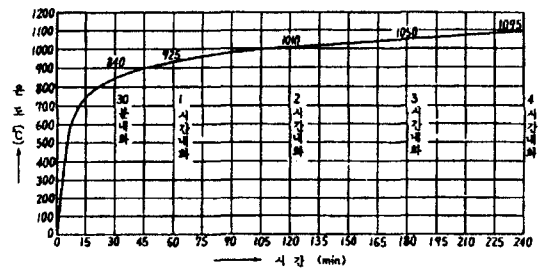


그림 1. KS의 표준온도가열 곡선.

에 따라 나타내는 곡선으로, ISO, ASTM, JIS, BS 등에서 정하는 곡선과 거의 동일한 패턴을 나타내고 있다.

본 연구에서 시험대상으로 하는 부재는 유리 벽으로서 구조부재가 아닌 비구조 부재의 범주에 들어간다. 따라서 KS F 2257 기준에 의한 가열시험의 결과, 시험체가 다음의 조건에 적합한 것을 내화시험 시의 판정조건으로 한다.

- 가열 중, 내화 상 또는 구조강도 상 해롭다고 인정되는 변형파괴탈락 등의 변화가 생기지 않을 것.
- 불꽃을 통과하는 갈라짐이 없을 것.
- 가열면의 이면온도가 260°C를 넘지않을 것

상기와 같이 내화시험시의 판정조건은 전에서 기술한 예상 화재 시나리오에서 설정한 모든 조건을 극복할 수 있는 전제조건이다. 따라서 유리벽을 내화로에서 가열하여 상기 판정조건을 충족하기 위하여, 수막설비를 사용하여 가열면에 적절한 수막을 형성할 수 있도록 하여야 한다.

국내의 평가기준은 일본 JIS기준과 거의 동일하며 실험부재가 비구조벽이기 때문에 실험중에 하중을 가할 필요가 없었으며, 부재규격은 ISO기준에서 정립된 규격을 사용하였다. 다만 실험중의 주수여부는 실험대상에서 제외하였는데 가열중에 주수 즉 열충격하의 주수 시험을 이번 보고서와 별도로 진행할 계획에 있어 이번 보고서에는 제외하였다.

2.3. 기존의 연구

유리면에 수막을 형성시켜 유리벽의 열적 특성과 내화성능을 시험한 이전의 연구들을 종합하면, 일반적으로 드렌처(drencher)나 윈도우형 스프링클러(window sprinkler)를 사용하는 드렌처 타입의 수막형성설비에 의하여 수막을 형성시켜 시험하는 연구가 대부분을 차지하고 있다. 이와 같은 연구는 주로 영국과 캐나다를 비롯하여 미국, 호주 등에서 실시된 것으로 조사되었다.

영국의 런던 카운슬 과학 연구소(London Council Science Institute)의 화재기술부분에서 시행된 “유리

벽을 화재로부터 방호하기 위한 드렌처의 사용에 관한 연구”는 A.M. Poter와 J.R. Barnfield에 의해 보고되었다. 이 연구는 소형내화로와 대형내화로에서 8번의 조합된 시험체를 가지고 시험하였는데, 주로 6 mm에서 10 mm 두께를 가진 보통유리와 강화유리에 드렌처를 사용하여 수막을 형성시켜 시험하거나 수막없이 유리를 가열하여 어떤 특성을 보이는가를 조사하였다. 시험결과 강화유리가 보통유리보다 열적 응력에 강하다는 것을 입증하였으며, 수막이 형성되지 않은 유리는 어떤 종류의 유리일지라도 화염에 노출될 경우 파열되는 것을 확인하였다. 여기서 주목할 만한 결과는 실제 규모의 내화시험에서 시험한 드렌처에 의한 수막 형성 유리창의 1시간 내화성능 시험인데 여기서 나타난 내화로의 노내 평균 온도가 최고 600°C밖에는 내지 못하고 있다는 점이다. 이 사실은 드렌처에서 분사된 물이 내화로의 온도를 현저하게 낮추었다는 점을 보여주었다.

캐나다의 NRCC(National Research Council of Canada)에서 수행된 “근접 설치된 스프링클러 설비에 의한 유리벽의 보호에 관한 연구”로서 A.K. Kim 과 G.D. Lougheed에 의해 보고되었다. 이 연구의 결과는 어떤 이상적인 조건하에서 원도우형 스프링클러에 의하여 근접 보호되는 창호가 2시간의 내화등급을 가질 수 있다는 것을 증명하는 시험이었다. 이때의 내화로의 노내 평균온도가 1시간 경과 후에도 계속 400°C내외에서 머무르고 있는 상태에서 유리벽이 2시간을 견딜 수 있다고 보고하였다. 이 연구결과에서도 원도우형 스프링클러에서 분사된 물이 내화로의 온도를 현저하게 낮춘 상태에서 내화성능에 대한 관정결과를 내고 있음을 알 수 있었다.

3. 최적 수막형성 시스템의 개발

3.1. 수막형성 시스템의 설치환경 분석

전장에서 열적 반응 특성이 비교적 열악한 재료인 유리를 화재 시 유리표면의 온도상승을 어떠한 상황에서도 억제하여야만 한다. 물에 의한 수막도포 방식에서는 화재 시 유리면에 도포된 수막에서 발생하는 기화열에 의해서 유리면의 급격한 온도상승을 방지할 수 있다는 이론이 기존의 연구에서 증명되었다. 물은 유리표면의 온도 상승을 가장 경제적이면서 쉽게 저하시킬 수 있는 재료이다.

유리면의 수막형성시스템을 효과적으로 고안하기 위해서는 무엇보다도 수막형성 유리벽이 설치되는 대상

공간의 환경을 파악해야만 한다. 즉 수막형성유리벽체를 필요로 하는 공간의 특성을 알아야만 최적의 시스템의 고안이 가능하다.

엘리베이터 홀 등의 소규모 공간에서 상가의 쇼윈도 우까지 대규모 공간을 구획하는 구획 벽에서 수막형성 유리벽의 사용이 이루어질 것이라는 예측이 가능하므로 일반 구획 벽의 환경을 살펴본다. 일반적으로 건물의 방화구획을 이루는 수직구획 벽의 주위에서는 물을 용이하게 공급받을 수 있는가가 가장 중요하다. 다음은 설치대상 공간의 환경을 분석한 내용들이다.

(1) 방화구획 벽이라서 비교적 대규모 건물 즉 현행 소방법규 상 스프링클러 등의 수계 소화설비가 구비된 공간이 대부분이라 물을 비교적 용이하게 공급받을 수 있다.

(2) 구획 벽 중에서도 수직하중을 부담하지 않는 비구조 벽으로서 유리가 사용되므로 수평면으로는 기둥과 기둥사이, 수직면으로는 상부 슬래브에서 하부 바닥면을 전체적으로 구획되므로 9.0 m 이하의 폭과 3.2 m 이하의 높이 내에서 유리벽의 크기가 제한되는 특징이 있다.

(3) 스프링클러 설치 대상 건축물이 아니라 활자라도 상수도 라인 등에 연결 파이프를 설치하면 연결 시 수량을 확보가 불가능하지 않는 편이다.

이와 같이 설치환경이 분석되어 건물내에서는 비교적 물의 공급이 가능한 장소에서는 수막을 형성시키는 능동적시스템(active system)을 유리벽이라는 수동적시스템(passive system)에 혼용 할 수 있다는 결론에 도달 할 수 있다. 따라서 제한된 면적을 가진 수직 유리면에 수막을 용이하게 형성하는데 필요한 요소들을 설정하였다.

3.2. 설계기준의 설정

유리 벽 전체에 물의 흐름을 상부에서 하부로 균일하고도 연속적인 형태로 이루어기 위해서는 유리면으로 낙하된 물이 중력에 의하여 자연스럽게 유리면에서 이탈하지 않고 흘러야 한다. 따라서 수막형성 시스템의 공간을 이루는 수(水) 분사장치가 보유하여야 하는 성능설정기준은 아래와 같다.

3.2.1. 설정기준 I

유리 벽의 수직면 전체에 단절이 없이 연속적으로 일정 두께 이상의 균일한 수막 형성이 가능하여야 한다.

3.2.2. 설정기준 II

소량의 수량으로 수막을 형성하여야 하고 수막과 무관하게 버려지는 잉여수가 내화로의 연소를 저해하지 않도록 유리면에 산포되어 입사하는 물 기둥이 유리면

에 접촉한 후 반동에 의해 발생하는 리바운드량이 극소화 되어야 한다.

3.2.3. 설정기준 III

적어도 일정 길이 이내(최대 9m 길이)에 연속한 유리면 전체면에 동일한 수압하에서 일정한 유량으로 산포되어 코너부까지 단절 없는 수막이 형성되어야 한다.

이상과 같은 성능을 100% 만족시키는 수(水) 분사헤드를 선정하기 위해서 여러 헤드를 각각의 성능별로 체크하는데 지침으로 사용한다.

3.3. 최적 수(水)분사시스템의 선정 방안

수(水) 분사장치가 보유하여야 할 기준을 어느 정도 만족할 수 있다고 판단되는 여러 종류의 시스템을 선정하여 나열하여 보면 아래 표 1에서와 같이 3가지의 시스템을 제시할 수 있다.

내화로는 화재시의 온도를 재현하기 위해 표준가열 온도곡선에 의해 내부온도가 상승되도록 프로그램 되어 있으며, 내부의 온도를 올리는데 사용되는 버너의 불꽃 사출구가 시험체와 1.5m이내의 거리를 두고 있다. 따라서 내화로 안에 수막형성을 할 때 발생하는 잉여수 즉, 리바운드 되어 튀는 물이 내화로 내부에 침입하지 않아야 하는 점이다. 즉, 내화로의 내부에 침입수가 많을 경우 가열된 내화로의 벽면에 차가운 물이 직접 닿으면서 급격한 온도변화를 주어 내화로 내부의 마감재에 균열을 일으킬 뿐 아니라 과도한 침입수는 과도한 수증기를 발생시켜 내화로 내부버너의 노즐을 손상시킬 수 있기 때문이다. 따라서 금번 시험을 위하여 선택할 방안에서 리바운드량이 많은 방안은 제외

될 수밖에 없었다.

상기 3개의 방안 중에서 방안 II와 III은 유리면에 수막을 형성시키면서 리바운드량을 최소화 할 수 있기 때문에 금번 시험에 적합한 시스템인 점은 분명하지만 설치위치에서 차이를 가지고 있었다. 즉 방안 II는 방안 III에 비해 유리면에 더욱더 근접시켜야 유리면과의 이격거리를 적게 하여야만 리바운드가 없는 수막의 형성이 가능하기 때문에 내화로 내에 설치될 경우 파이프의 높은 온도가 유리면에 도달할 수도 있다고 판단되어 방안 II는 방안 III보다 부적절하였다.

따라서 최종적으로 설정된 시스템은 방안 II로서 노즐의 분사구로부터 유리면까지 최소 5cm이상을 이격시켜야만 수막의 형성이 가능하다는 점에서 내화로 내에서 수막을 형성하더라도 가열된 파이프의 열이 유리

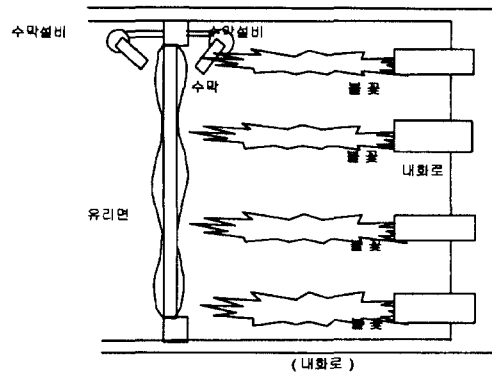


그림 2. 수막형성 유리벽의 내화시험 개략도.

표 1. 방안별 설계기준 만족도 현황

구분	도해	수막형태의 문제점	설정기준 만족도
방안 1: 드렌처 시스템		- 수막 형태가 불규칙하여 좌우코너의 상하부에 수막의 형성이 되지 않은 무수막 유리 표면이 발견됨 - 리바운드량이 큼	설정기준 III을 제외하고는 I과 II 두가지 모두 불만족
방안 2: 유공과이프관시스템		- 수막 형태가 규칙적으로 형성됨 - 리바운드가 없음 - 코너부의 수막을 형성하기 위해서는 파이프를 굴곡시켜 설치해야함	설정기준 II는 완전하게 만족하고 I과 II도 거의 만족스러움.
방안 3: 플러드 노즐스프레이시스템		- 수막 형태가 규칙적으로 형성됨 - 리바운드가 있지만 약 5%이내임 - 균일한 간격으로 노즐을 배치하면 균일한 수압유지 가능 - 코너부의 수막이 비교적 잘 형성됨	설정기준 I과 III은 거의 만족스러우며 II도 95% 정도 만족함

면에 직접영향을 주지 않는 장점이 있어 물 분사 헤드 로 가장 적합하였다.

3.4. 플러드 노즐 스프레이 시스템의 설계 및 제작

3.4.1. 노즐간의 거리

2개의 플러드 노즐을 연속적으로 배열하면 플러드 노즐과 인접노즐이 만나는 경계부에서 수막이 어느 정도 겹쳐져야 단락 되지 않는 수막을 형성할 수 있었다. 다만 2개의 수막이 겹치는 폭을 크게 할 경우 수막은 겹쳐지지 않고 오히려 경계부에서 물기둥을 만들면서 흘러내리는 현상이 발생하였다. 따라서 겹치는 폭을 최소화하면서 균일하고도 단락이 없는 수막을 형성시킬 수 있는 노즐과 인접 노즐간의 거리(D)를 실험한 결과 약 420 mm가 가장 적당한 간격으로 판명되었으며, 최대 450 mm까지도 커버할 수 있는 것으로 판명되었다.

3.4.2. 노즐과 유리표면과의 이격거리와 분사각도는 플러드 노즐에 의해 스프레이 되는 수막과 유리면과의

이격거리는 유리면에 접촉한 수막이 유리면을 따라 수직으로 자연스럽게 하강하는데 결정적인 역할을 한다. 즉 부채꼴 형상으로 노즐에서 분사되는 수막은 유리면에서의 입사각도와 유리면과 노즐간의 이격거리에 따라 수막의 품질이 결정되었다. 수막의 각도와 수압에 따라 리바운드량이 좌우되기 때문에 리바운드량이 가장 적은 수압을 먼저 설정하여 놓는 것이 필요하였다. 시험결과 0.38 kg/cm²가 가장 적절한 수압으로 판명되었으며, 그 수압하에 형성되는 수막을 기준으로 유리면에 폭 420 mm의 수막이 형성 가능한 이격거리를 실험하였다. 실험결과, 유리면과의 분사각도가 25°, 유리면과의 이격거리가 약 90 mm일 때가 리바운드량이 가장 적은 것으로 조사되었다. 이를 구현할 수 있는 시제품의 초기 모형을 아래와 같이 설계하여 제작하였다.

3.4.3. 코너부의 수막 보강

플러드 노즐에 의해 수막을 형성시키는 방법이나 다른 어떤 방법이라도 유리면과 프레임의 좌우벽면이 직각으로 만나는 부분에서는 수막의 형성이 원활하게 이루어지지 않는 경향이 크다는 점을 발견되었다. 축소 모형 시험용 프레임에 부착된 유리 벽은 높이가 1 m 내외이기 때문에 상부에서부터 시작된 수막이 프레임과 유리가 직각을 이루며 만나는 우각부에 수막이 극히 일부(약 5 mm 이하의 틈을 말함)에서 형성되지 않는 부분이 있더라도 하부까지는 그 틈이 별다른 변화 없이 일직선을 이루지만, 실제규격시험용 유리 벽에서는 그 높이가 2.5 m 이상이기 때문에 하단부에서 100 mm 이상의 수막 틈이 발생하는 것은 흔한 경우이었다. 이런 큰 폭의 수막 틈이 내화로의 가열면에 노출될 경우에 있어서 그 부분의 유리온도가 급격히 상승하여 유리의 파열이 우려되므로 이에 대한 대책이 필요하였다.

이 코너부의 결점을 보완하기 위해 노즐을 코너부에

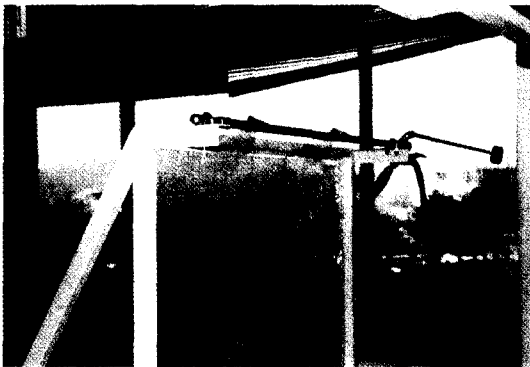


그림 3. 플러드 노즐간의 거리와 수막형태의 조사.

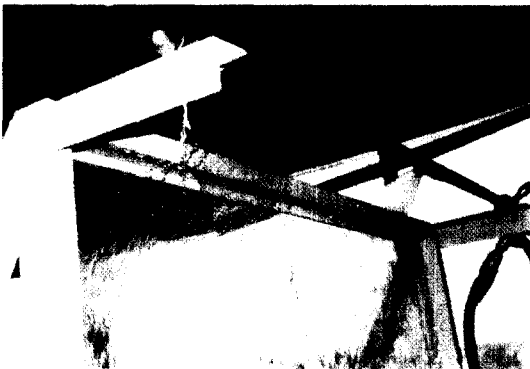


그림 4. 플러드 노즐과 유리면과의 이격거리에 따른 수막조사.

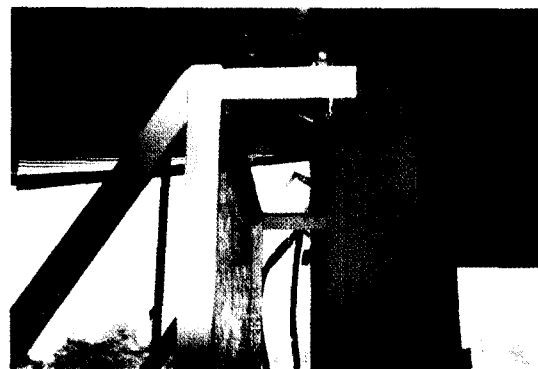


그림 5. 최소 리바운드량 형성을 위한 분사각도 설정.

추가로 설치하여 코너부의 수막을 늘였다. 코너부에서 유리면에만 유량을 증가시킬 경우에도 수막은 여전히



수막 상부

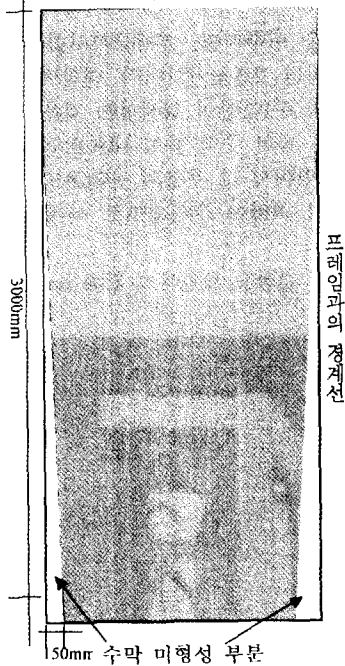


그림 6. 플러드 노즐에 의한 코너부 수막 미형성부의 개략도 및 형상.

한국화재·소방학회, 제13권 제4호, 1999년

프레임과 유리면이 만나는 접합부에서 잘 형성이 되지 않아 미 수막 틈이 계속 관찰되었다. 즉 유리면을 따라 아래로 낙하하는 물은 표면장력에 의해 서로 잡아당기는 특성이 있고 노즐에서 수막이 코너부에 접촉한 후에 약간의 반동에 의하여 프레임으로 물이 퍼지지 못하고 다시 유리쪽으로 쏠리는 현상을 보였다. 이 현상을 제거하기 위해서 코너부에는 플러드 노즐보다 유량이 크고 초기의 수막 두께가 큰 플랫 노즐(flat nozzle)을 사용하여 수막의 초기 접촉면을 유리면보다는 프레임쪽으로 늘려서 투사해 보니 오히려 유리면에 투사하는 것보다 코너부의 수막이 완벽하게 형성되었다. 상부에서 프레임으로 투사된 물줄기는 각도가 프레임 방향에서 코너의 유리면으로 향하고 있으므로 유리면에 직각으로 입사하여 플러드 노즐에서 분사되는 물줄기와 부딪히며 균형을 이루며 하강하였다. 이렇게 코너부의 미 수막현상을 해결한 노즐의 형태를 그림 7에 나타낸다.

이상과 같이 프레임과 유리면이 직각으로 만나는 프레임 코너부를 보강한 수막설비를 정리하면 플러드 노즐과 코너부 경계선까지의 거리를 200mm로 설정할 경우, 플러드 노즐에서 분사된 수막이 상부 우각부는 커버할 수 있지만, 그 사이 즉, 맨 가장자리에 위치한 플러드 노즐과 코너 경계부 사이의 중앙에 플랫 노



그림 7. 코너부의 수막보강용으로 사용된 플랫노즐의 예.

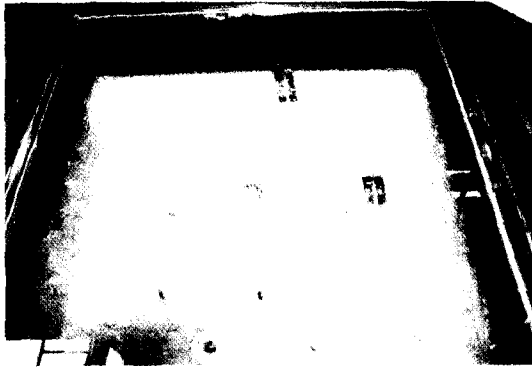


그림 8. 최적 수막형성 시스템의 실제 작동현황.

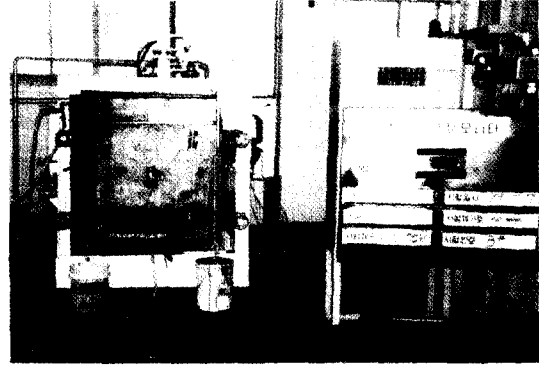


그림 9. 축소모형 시험체틀 및 실험 장면.

즐을 추가로 설치하는 형태로 구성된다. 다만 코너부 보강용 플레이트 노즐은 입사 방향을 유리면 보다는 프레임 측으로 하는 것이 코너 수막을 양호하게 형성하는데 도움이 되었다. 그 이유는 프레임에 입사된 물줄기가 유리면에 부딪히면서 코너의 수막이 형성되지 않은 부분을 커버하기 때문이었다. 따라서 코너부 수막 보강용 플레이트 노즐의 입사각도를 적절히 조절하기 위하여 플레이트 노즐의 연결부에 노즐의 회전을 자유롭게 하는 회전링을 부착하였다.

3.4.4. 최적 수막형성 시스템의 세부 상세도

이상과 같은 제반 문제점을 보완하여 고안된 최적의 수막형성 시스템을 시제품으로 제작하여 성능 시험한 결과 리바운드 량이 5%이내로 조사되었다. 뿐만 아니라 비교적 저압의 수압에서도 저압에서 양질의 수막형성이 가능하였다. 즉 수압이 0.38 kg/cm²일 때 유량을 70l/분으로 조절하였을 경우 폭 2.4m(높이는 3m)의 유리벽의 수막을 완벽하게 형성할 수 있는 것으로 조사되었다.

2.4m 폭을 가진 실제 규모의 유리벽을 시험하기 위한 최적의 수막형성 시스템의 실제 작동현황이 그림 8에 보여진다.

4. 수막형성 유리벽의 내화성능에 관한 실험

4.1. 축소모형 내화실험(Small Scale Fire Resistance Test)

축소모형 시험은 실제규모의 화재시험에 들어가기 전에 필수적으로 실시하여야 할 기본적인 중요한 시험이다. 이 시험은 일종의 예비시험으로서 실제규모의 화재시험을 계획하기 전에 참고로 할 여러 요소를 소

규모의 내화로에서 미리 실시하여 그 특성을 파악하여 실제규모의 화재시험을 실시할 때 필히 반영하여야 시행착오를 줄일 수 있기 때문이다.

수막이 형성된 유리면을 수막이 존재하는 면에서 가열 시 수막의 뒤에 위치하고 있는 유리가 어떤 열적 특성을 보이는지 확인할 목적으로 소형내화로의 가열면에 수막형성 시스템을 설치하고 별도로 고안된 스틸 프레임에 유리를 설치한 후에 KS F 2257의 표준가열 온도곡선에 따라 가열 시험을 아래와 같이 실시하였다.

본 실험에서는 그림 9의 한국건설기술연구원의 소형 가열로를 사용하였다.

4.1.1. 시험체 거치 프레임의 규격 및 시험체의 종류
소형내화로(규격, W×D×H = 0.96 m×0.965 m×0.9 m)의 전면을 덮을 수 있도록 제작된 스틸 프레임을 사용하여 0.96 m×0.96 m 크기의 유리샘플을 설치할 수 있도록 하였으며 유리면의 안쪽 상부에 깊이 0.2m의 공간을 두어 전장에서 제작된 시험용 플러드 노즐 시스템을 장착할 수 있도록 하였다. 하부에는 유리면을 따라 수막을 형성하고 나서 흘러내린 물을 외부의 드레인으로 원활히 배출시키도록 호스를 연결하여 인접 드레인과 연결하였다. 축소모형내화시험에 사용하기 위하여 제작된 시험체 거치 프레임의 세부도면은 그림 9에 나타내었다. 축소모형 시험용 시험체의 조건은 아래 표 2와 같다.

4.1.2. 실험 방법

소형내화로를 점화하기 전에 수막을 먼저 형성시켰다. 사전에 수막의 형성상태가 양호한가를 점검하여 수막이 형성되지 않는 틈이 발생하지 않도록 하였으며, 또한 유리면에 수막이 입사 되는 경계선 위의 수막이 형성되기 어려운 간격, 즉 상부프레임 선에서 최초 수막선(initial water-film line)까지의 거리는 1.5 cm 이내

표 2. 축소모형 시험용 시험체의 조건

시험체 No.	유리종류 및 두께	수막설비 설치유무
S-1	15mm 강화유리	설치
S-2	10mm 강화유리	설치
S-3	6mm+6mm 강화 유리 접합	설치
S-4	10mm 보통유리	설치

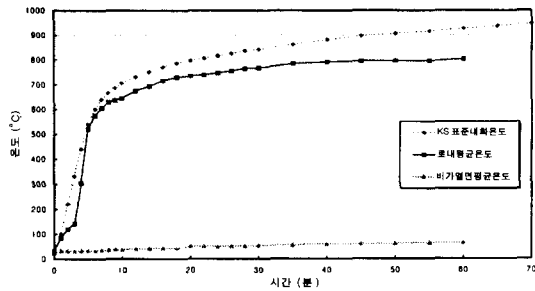


그림 10. 축소모형 실험 S-1의 실험결과.

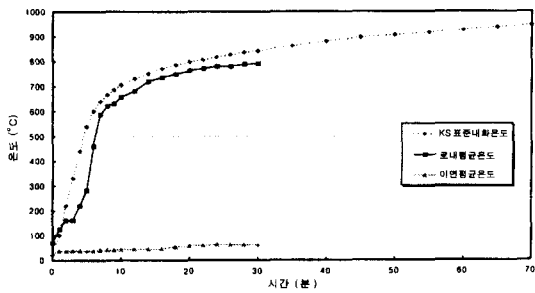


그림 11. 축소모형 실험 S-2의 실험결과.

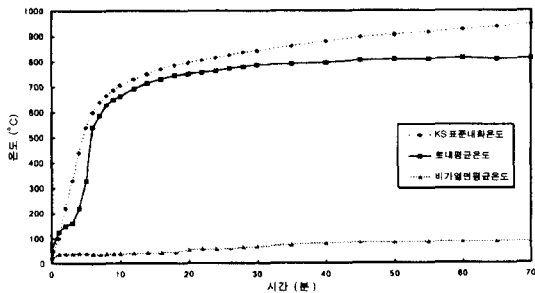


그림 12. 축소모형 실험 S-3의 실험결과.

로 하여 수막이 형성되지 않는 부분이 거의 없도록 하고 시험하였다.

비가열면의 유리표면온도(가열면 이면온도를 말함)

한국화재·소방학회, 제13권 제4호, 1999년

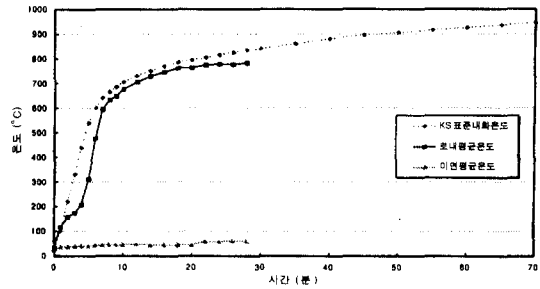


그림 13. 축소모형 실험 S-4의 실험결과.

를 측정하기 위해 유리표면에 CA열전대를 부착하였으며 프레임에는 별도의 열전대를 부착하지 않았다.

4.1.3. 실험 결과

축소 모형실험결과는 그림 10-13와 같다.

(1) 실험 S-1(15mm 강화유리)

가열 개시 후 10분간은 수막이 조금씩 얇아지는 것 같이 관찰되었으나, 유리표면에 크랙이나 어떤 특별한 변화도 발생되지 않았다. 35분 경과 후 좌측 프레임에서 수증기가 새어 나오기 시작하였으나, 유리면과 수막 모두에서 별다른 변화가 관측되지 않았다. 51분 경부터 프레임 상단부의 틈으로 다량의 수증기가 관측되었지만 수막이나 유리면에 별다른 이상을 발견할 수 없었다. 가열면 이면의 유리표면온도는 가열 후 1분만에 37~38°C를 나타내었으며 시간에 따라 계속 증가하여 1시간 후에는 85~97°C까지 증가하였다. 1시간이 지난 후의 내화로 온도는 814°C를 보였는데 이 온도는 표준온도가열의 965°C보다 약 151°C 정도 낮은 온도이었다. 시험은 2시간까지 계속 진행되었으며 이때까지 크랙이나 유리면에는 어떤 변화가 관측되지 않았으며, 비가열면인 이면온도도 99°C를 넘지 않았다. 또한 내화로의 온도도 817°C정도로 1시간일 때의 온도와 큰 차이는 보이지 않았다.

(2) 실험 S-2(10mm 강화유리)

유리 두께를 얇게 바꾸어 시험한 이유는 동일한 조건하에서 유리두께가 얇을 경우 가열 중에 수막의 변화나 이면 온도가 다를 것으로 예상하였기 때문이었다. 실험 결과 내화로를 가열 후 4분까지는 실험 S-1과 비슷하게 아무런 변화도 발견되지 않았으며 이때의 내화로 내부온도는 평균 631°C를 나타내고 있었다. 그러나 4분이 지나자 실험 S-1에서 관찰되지 않았던 좌측 코너부의 하단에서 수막이 형성되지 않는 틈이 관찰되었다. 비록 수막이 형성되지 않은 코너부 틈이 10mm정도의 폭을 가진 것으로 측정되었지만 2시간이 지날 때까지 파열되지 않았다.

가열면 이면의 유리표면온도는 15 mm 두께의 강화유리를 사용한 실험 S-1보다 조금 높은 경향을 나타내었지만 2시간이 지나도 최고 95°C를 넘지 않았다. 내화로 온도도 실험 S-1과 비슷하게 측정되었으며 1시간이 지날 때 802°C를 나타내었다.

(3) 실험 S-3(6 mm+6 mm 강화접합유리)

강화유리 대신에 6 mm두께의 강화유리 2개를 라미네이트 필름을 넣어 접착시킨 강화접합유리를 사용하였다. 강화유리를 강화접합 유리로 변경하여 시험한 이유는 이전의 시험에 의하여 가열면 이면의 온도가 100°C내외로 측정되었기 때문에 접합유리만이 갖는 라미네이트 필름이 어떤 열적 변화를 나타낼지 추측하기 힘들었기 때문이었다. 시험결과 실험 S-1이나 실험 S-2의 결과와 거의 비슷한 수치를 나타내었으며 유리면에 크랙이나 어떤 특별한 변화도 발생하지 않았다. 또한 내부 라미네이트 필름에 열에 영향을 받을 경우 흔히 나타날 수 있는 색깔변화도 보이지 않았다. 시험은 120분간 진행되었으며 그때까지 어떠한 파열이나 균열이 관찰되지 않았다.

(4) 실험 S-4(10 mm 보통유리)

가열 개시 후 9분간은 강화유리면과 같이 유리면에 크랙이나 수막 형성 상태에서 변화가 없었지만, 9분이 지나면서 유리좌측 하단면에 수막이 형성되지 않는 틈이 발생하였다. 9분 30초가 지나자 갑자기 좌측 하단부에서 찻하는 소리와 함께 유리면에 크랙이 발생하였으며 서서히 우측으로 균열이 진행되는 것이 관찰되었다. 진행된 균열길이는 11분 경에는 14 cm정도까지 진행되었으며 시간이 지남에 따라 계속 확대되어 갔다. 17분 경에는 최초의 균열이 발생한 지점보다 아래쪽에 새로운 균열이 발생하였으며 26분 후에는 중앙하부에서도 균열이 발생하였다. 27분 경에는 균열이 사방으로 확대되었다. 비록 유리가 파열되어 형상을 유지하지 못하고 분쇄되지는 않았지만 발생한 균열사이로 물이 밖으로 새어 나오기 때문에 가열을 중지하였다. 즉 수막이 형성되지 않는 틈이 있을 경우 보통유리는 강화유리보다도 열 충격에 약한 면을 보인 것으로 추정되었다.

4.2. 실제규격 내화시험(Full Scale Fire Resistance Test)

축소모형실험 결과, 실제규모의 화재시험을 하는 데 필요한 자료가 수집되었다고 판단되었기 때문에 대형내화로에서의 실험을 준비하였다. 소형내화로에서의 시험은 일종의 예비시험이기 때문에 여러 종류의 유리를 사용하여 보았지만 실제규모의 시험은 빌딩에서 실제

로 사용 가능한 유리로서 국한하였다. 빌딩에서 구획의 경계부에 사용 가능한 유리는 강화유리를 끼운 스틸이나 스테인레스 스틸 프레임의 조합으로 구성된 유리벽체가 대부분을 점하고 있는 것으로 조사되었다. 특히 주로 사용하는 강화유리는 두께가 12 mm에서 15 mm로 국한되고 있다.

따라서 실제규격의 내화시험용 시험체는 강화유리를 끼운 스틸이나 스테인레스 스틸 프레임에 축소모형시험에서 사용한 수막형성설비를 설치한 시스템의 조합으로 결정하였다. 가열면에 위치한 수막이 유리면에 어떤 열적 특성을 보이는 가는 축소모형시험에서 어느 정도 입증되었기 때문에 대형내화로(크기 3 m×3 m)에도 동일하게 설치하여 KS에 따라 가열 시험을 실시하였다.

본 실험에서는 그림 14의 방재시험연구소 벽용 가열로를 사용하였다.

4.2.1. 실제규격 내화 시험용(Full Scale Test) 수막형성 유리벽 시험체

내화로의 시험체 거치용 틀 전면으로 수막형성설비를 내어 설치하지 않고 틀 안쪽에 실제 크기의 수막형성설비가 구비된 유리벽체 프레임을 직접 설치하였다. 소형내화로에서의 실험 결과 본 시험을 위해서 제작한 수막형성설비의 작동 시 리바운드되는 수량이 거의 발생하지 않았기 때문에 내화로 내부로 물이 침입할 우



그림 14. 실제 규격 내화시험용 가열로 및 실험 F-1종료 장면.

려가 없다고 판단되어 시험체를 틀 내부로 설치하였다. 대형내화로의 전면을 덮을 수 있도록 2.52 m × 3.00 m 크기의 스테인리스 스틸로 제작된 프레임을 사용하여 2.4 m × 2.6 m 크기의 유리샘플을 설치할 수 있도록 하였으며 프레임의 골격을 이루는 멀리언의 사이즈는 폭 60 mm에 깊이 200 mm로서 가열면에서 바깥 쪽으로 내어 유리가 설치되도록 홈을 만들어 유리샘플을 가열면 이면에서 쉽게 고정시키도록 하였다.

프레임의 안쪽상부에는 대형내화로용 시험을 위하여 특별히 제작한 수막형성설비를 장착하여 유리면의 상부 끝단부터 수막이 형성할 수 있도록 조정하였다. 하부 수평 멀리언은 구조안전 상 높이가 250 mm 이상은 되어야 하므로 이 공간을 물받이로서 이용하였다. 따라서 유리면을 따라 수막을 형성하고 흘러내린 수량은 하부의 물받이에 모여져서 드레인으로 배출하도록 하였다. 드레인은 호스를 연결하여 외부로 배출하였다.

실험체 틀과 시험체 프레임 사이의 공간은 내화성능이 높은 ALC 블록과 팀버스톤 블록(timber stone block)을 사용하여 밀실하게 차단시켰다. 기타 틀과 시험체 사이의 비교적 작은 틈새들은 내화성능이 뛰어난 셀락 울(celac wool)을 충전하여 내화로 내부의 열량이 외부로 쉽게 빠지는 것을 방지하였다. 유리를 고정시키는 실링재는 방화용 실리콘을 사용하였으며 그 밖의 액세서리는 일반적인 재질의 것을 사용하였다. 실제 규격 내화시험용으로 사용한 유리는 강화유리만을 사용하였으며, 두께는 12 mm와 15 mm를 사용하였으며 그 세부사양은 표 3과 같다.

4.2.2. 시험방법

3가지 시험에서 적용시킨 수막은 소형내화로의 경우와 같이 대형내화로를 점화하기 전에 수막을 먼저 형성시켜 놓고 사전에 수막의 형성상태가 양호한가를 점검하여 수막이 형성되지 않는 틈이 발생하지 않도록 하였다.

수막을 형성시키는데 필요한 충분한 수량을 확보하여 시험기간 중에 수량이 공급되지 않도록 하였으며 또한 유리면에 수막이 입사 되는 경계선 위의 수막이 형성되지 어려운 간격, 즉 상부프레임 선에서 최초 수

막선까지의 거리는 1.5 cm 이내로 하여 수막이 형성되지 않는 부분을 최소화한 후 실시하였다(그림 15).

대형내화로의 가열 조건도 소형과 같이 건축물의 실제 화재의 온도변화를 비슷하게 재현한 KS F 2257에 따랐다. 비가열면의 시험체 표면온도를 측정하기 위하여 유리표면과 프레임에 CA열전대를 설치하였다.

실제규격시험에서는 유리의 크기가 소형과는 달리 대형이라 가열 시 일시적으로 휨 변형이 일어날 수 있다고 판단되어 유리면의 중앙부에 피아노선을 설치하여 변형량을 측정하였다. 따라서 내화로의 평균온도의 변화에 따라 휨 변형이 어떤 상상을 보이며 휨 변형이 수막의 형성상태에 영향을 미치는 가를 육안으로 관측하였다.

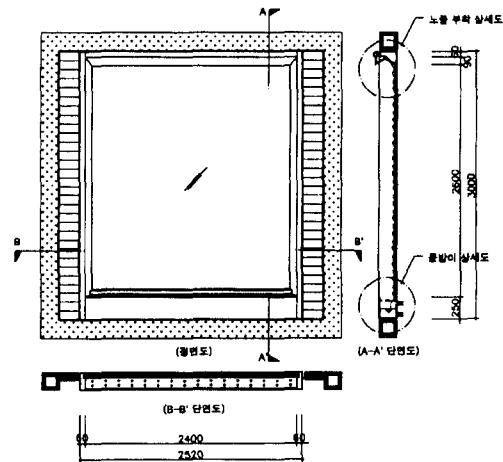


그림 15. 단일 벽체 프레임을 사용한 수막형성 유리벽 상세도.

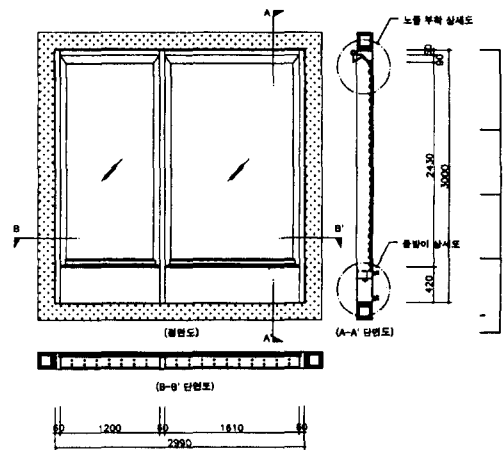


그림 16. 중앙에 수직멀리언이 설치된 연속벽체의 상세도.

표 3. 실제 규격 내화 시험용(Full Scale Test) 시험체의 조건

시험체 No.	유리종류 및 두께	수막설비 설치유무
실험 F-1	12mm강화유리	설치
실험 F-2	15mm강화유리	설치
실험 F-3	12mm강화유리 2매	설치

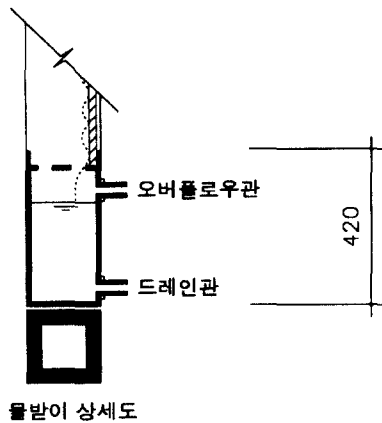
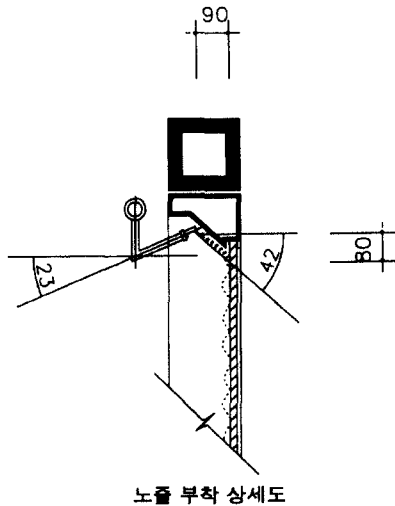


그림 17. 시험체 각 부분의 단면 상세도.

4.2.3. 실험결과

(1) 실험 F-1(12 mm 강화유리 단열벽체)

12 mm 강화유리를 프레임에 걸고 내화로가 점화되기 전에 수막을 형성시킨 후 실험을 진행하였다. 하단부의 버너라인에서 점화가 되기 시작하였으며 5분경이 지나면서 전체버너에서 연소가 진행되었다. 10분경이 지날 경우 수막의 상태를 살펴보았으나 특별한 변화는 보이지 않았다. 30분경이 지나면서 하부의 드레인 파이프의 틈새에서 다량의 수증기가 발생하였으나 유리면과 수막 모두 별다른 변화가 관측되지 않았다.

내화로내의 측정된 실제 가열온도는 축소모형 실험과 유사하게 나타났는데 16분경에는 714°C(표준가열온도는 770°C), 30분경에는 763°C(표준가열온도는 840°C) 45분경에는 784°C(표준가열온도는 895°C)를 나타내었

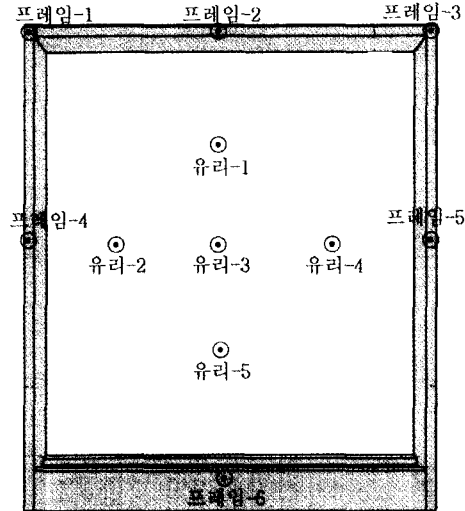


그림 18. 실험 F-1, 실험 F-2의 비가열면 온도측정위치.

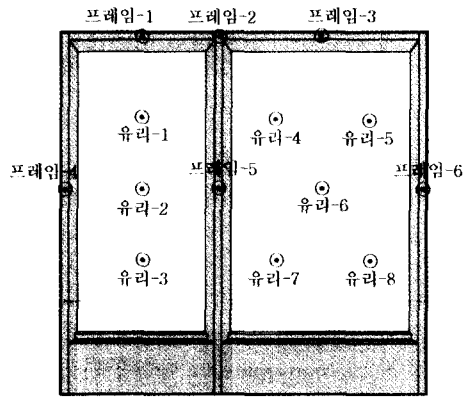


그림 19. 실험 F-3의 비가열면 온도측정위치.

다. 57분경이 지나자 갑자기 퍽 소리와 함께 유리가 파열되었는데 버너를 끄고 살펴보니 상부좌측에 있는 수막설비 파이프가 아래로 처지면서 발생한 돌발적인 실수로 판명되었다.

노즐이 부착된 공급파이프를 유리벽체용 프레임의 상부에 앵글을 설치하여 연결하였는데 가열에 의해 상부 프레임이 찢어지면서 파이프가 주저 않아 수막이 좌측 유리면 상부에서 형성되지 않아 발생한 사건으로 판명되었다.

유리의 이면온도를 살펴보면 56분경에 평균적으로 127°C를 보이고 있었으며 최대 143°C를 넘지 않은 상태였다(그림 20). 내화로의 온도가 800°C를 넘는 상태에서 돌발적인 파이프의 이탈이 발생하면 수막의 형성

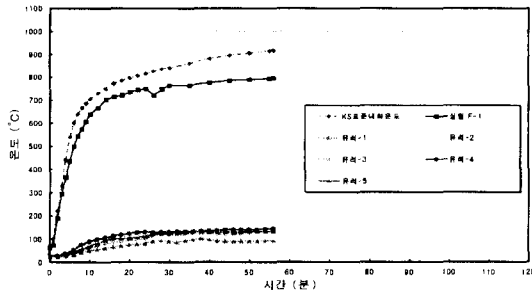


그림 20. 실험 F-1 시험체의 비가열면 온도곡선(유리).

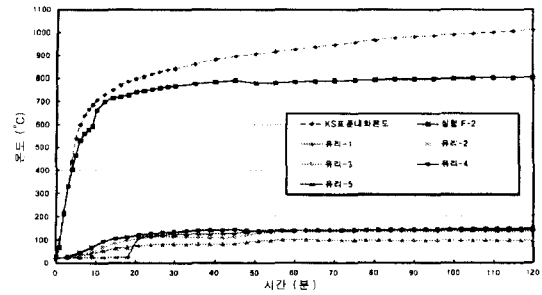


그림 22. 실험 F-2 시험체의 비가열면 온도곡선(유리).

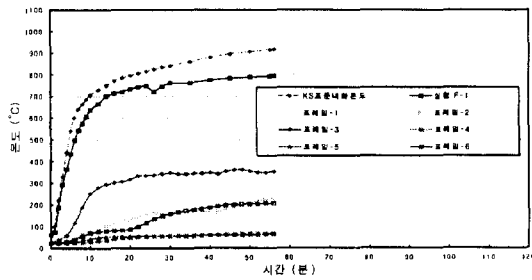


그림 21. 실험 F-1 시험체의 비가열면 온도곡선(프레임).

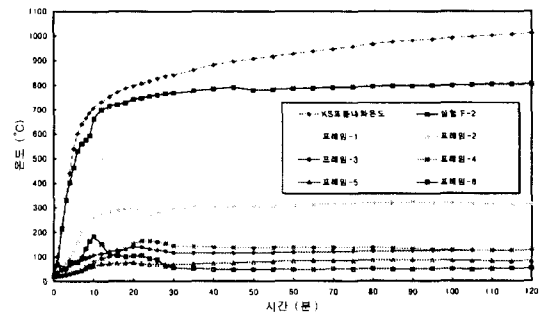


그림 23. 실험 F-2 시험체의 비가열면 온도곡선(프레임).

이 끊긴 부분에서부터 온도가 상승하면서 극단적인 온도차이를 발생시켜 유리가 파열한 것으로 판명되었다.

이때까지의 비가열측의 프레임온도를 그림 20에서 살펴보면 상부프레임의 온도가 수직프레임보다 높았지만 하부프레임의 중앙부의 온도도 비교적 높은 상태를 보여 주었다.

(2) 실험 F-2(15 mm 강화유리 단일벽체)

실험 F-1에서 발생된 문제점을 보완하기 위하여 수막형성시스템을 유리벽체 프레임과 독립시켜 내화로 틀에 직접 달아 프레임이 열에 의해 변형시 수막형성 시스템에는 영향을 주지 않도록 하였다. 유리는 15 mm 두께의 강화유리로 변경하여 변형률 줄여보기로 하였다. 이 변형은 유리중앙부에는 피아노선에 의한 변위 측정장치를 부착하였다.

실험 중 내화로의 로내 가열온도는 실험 F-1과 거의 동일한 형태를 보이며 상승하였다. 1시간경에는 784°C(표준가열온도는 925°C), 90분경에는 795°C(표준가열온도는 980°C)를 보이며 120분경에는 803°C(표준가열온도는 1010°C)를 보이며 90분경부터는 실제의 로내온도가 그림 22과 같이 아주 완만하게 상승하였다.

비가열측의 유리온도를 살펴보면 최고 평균온도가 134°C를 넘지 않았으며 국부적으로도 최고 150°C를 넘지 않았다. 다만 60분경 유리면 좌측 코너부 아래쪽에

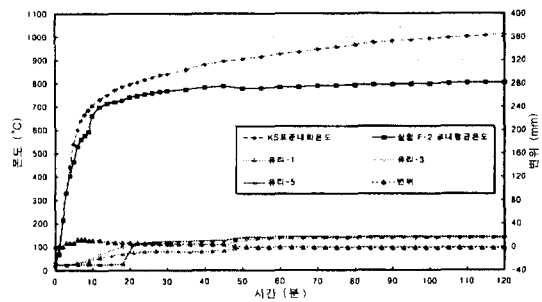


그림 24. 실험 F-2의 유리면 중앙부의 변위 곡선.

서 수막이 갈라지는 부분이 일부 발생하여 간이 개인용 열진대를 사용하여 체크한 결과 180°C를 넘지 않았다. 따라서 120분경이 경과 후까지 유리가 파열되지 않았는데 갈라진 폭이 30 mm이내이거나 길이가 500 mm이내이면 온도상승이 크지 않았다.

비가열측의 프레임 이면온도는 상부프레임을 제외하고는 200°C를 넘지 않았다. 다만 상부프레임은 일부 300°C를 넘기도 하였지만 큰 변형은 발생하지 않았다.

유리면의 변위를 측정된 결과 유리면은 가열 초기에는 가열측으로 배부름현상(약 12.7 mm)이 발생하였지

만 유리면의 온도상승과 함께 오히려 비가열측으로 배부름이 최대 2.9mm 발생하였다(그림 24). F-2는 수막형성이 지속되는 한 120분까지 유리가 파열되지 않고 견딜 수 있음을 보여주었다(그림 25).

(3) 실험 F-3(12mm 강화유리, 중앙 수직 멀리언 설치)

단일 창호가 아닌 두 개 이상의 창호가 연속으로 설치되는 경우를 고려하여 시험체 중앙에 수직 멀리언을 설치하여, 그 수직 멀리언이 가열될 경우 수막이나 유리에 영향을 줄만큼 변형이 되는가를 조사하는데 목적을 두고 실험하였다. 실험 F-2에서 보듯이 강화유리면에 수막을 완벽하게 형성시키는 조건하에 단일 창호는 내화성능을 보유할 수 있을 것으로 판단되나, 연속벽체인 경우 만에 하나 프레임이 변형되어 수막이나 유리면에 영향을 미친다면 진정한 내화성능을 보유하고 자신할 수 없을 것이다.

유리는 12mm 두께의 강화유리를 사용하였으며 3.0m크기의 연속 벽체로써 두 개의 단일 벽을 수직멀리언을 사용하여 연결하였다. 다만 수직 멀리언은 열에 의한 변형을 최소화하기 위해서 자르지 않고 이어서 제작하였다. 유리설치 방법은 방화실리란을 사용하

여 고정시켰으며 다른 부속자재는 일반적인 재질을 사용하였다.

수막형성 시스템은 수직 멀리언으로 인하여 2개의 코너부가 증가되었다. 따라서 코너부 보강용 플랫 노즐을 추가하여 수막을 보강하였다.

수직 멀리언의 중앙에 변위측정기를 설치하여 가열 온도 변화에 의한 수직멀리언의 변형을 측정 한 결과, 그림 26에서 보듯이 40mm이상의 배부름이 가열측으

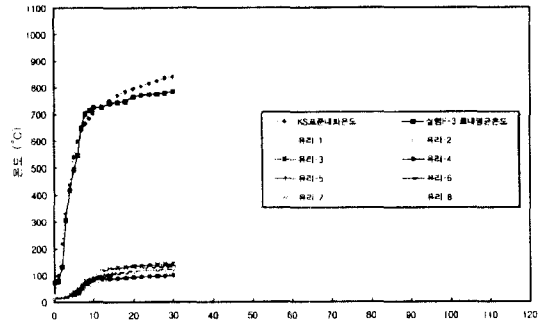
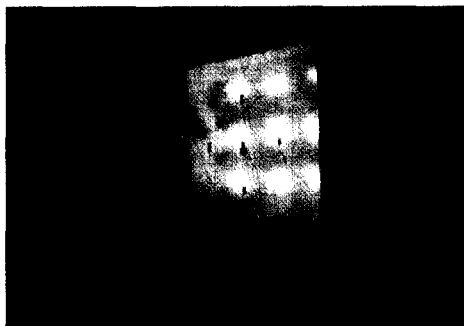
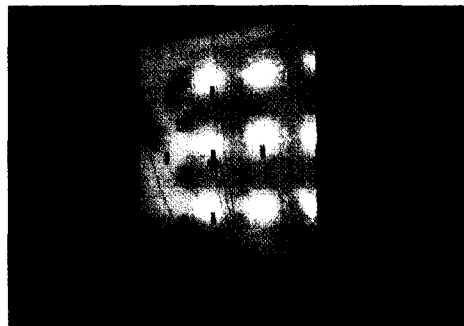


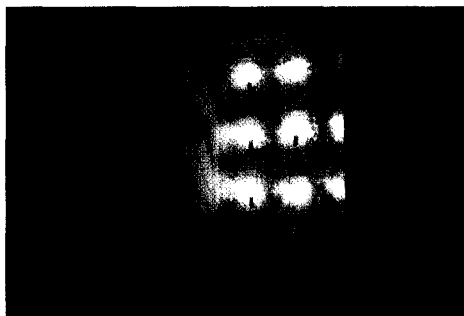
그림 26. 실험 F-3 시험체의 비가열면 온도곡선(유리).



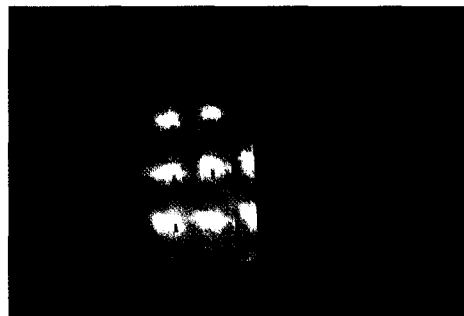
(a) 내화로 가열 후 30분 경과



(b) 내화로 가열 후 1시간 경과



(c) 내화로 가열 후 1시간 30분 경과



(d) 내화로 가열 후 2시간 경과

그림 25. 실험 F-2의 시간별 실험 장면.

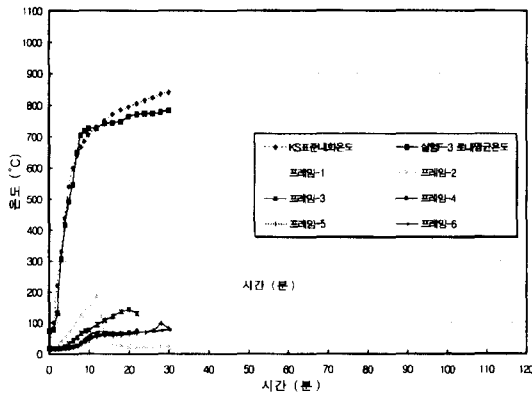


그림 27. 실험 F-3 시험체의 비가열면 온도곡선(프레임).

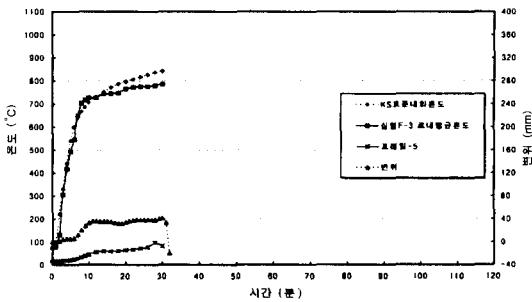


그림 28. 실험 F-3의 수직 멀리인 중앙부의 변위 곡선.

로 발생하여 가열 후 20분경에는 코너부의 수막이 갈라지면서 수막이 형성되지 않는 부분이 4개소 발생하였다. 30분 경에는 유리면의 온도차에 의해서 유리가 파열되고 말았다(그림 26). 멀리온의 배부름현상은 유리면에 충격을 줄 수 있을 정도까지 심각한 상태였다. 따라서 유리면의 변형을 방지할 수 없다면 연속벽체의 내화성능은 획득될 수 없을 것이다.

5. 실험결과 분석 및 검토

5.1. 내화로의 평균가열온도에 수막이 미치는 영향

유리면에 형성되는 얇은 수막은 가열면에서 발생하는 열에너지를 일부 흡수하면서 기화하는데 이때 흡수되는 열을 잠열이라 한다. 잠열은 열에너지를 흡수하면서 공기 중으로 사라지기 때문에 내화로의 로내 가열온도를 표준온도가열곡선(KS F 2257 time-temperature curve)에 맞도록 버너의 열 효율을 맞추어 가열하더라도 실제의 로내온도(actual furnace temperature)는 표준보다 낮은 온도를 나타내게 된다

고 할 수 있다. 잠열이 내화로의 가열온도에 영향을 미치는 시간을 극명하게 볼 수 있는 시점은 가열 후 5분이 경과하는 순간이었다.

잠열에 의한 온도저하에 따른 실제의 내화로 온도를 시간대별로 살펴보면 가열 후 30분 경에는 표준가열온도(840°C)보다 70~80°C정도 낮은 760°C대를 기록하고 있으며, 60분 경에는 표준가열온도인 925°C보다 61°C정도 낮은 784°C를 나타내고 있다. 즉 잠열에 의한 가열온도의 저하 폭은 시간이 경과함에 따라 약간씩 증가하는 추세를 보이며 표준가열온도에 대한 실제 감소 폭이 점차 증가함을 알 수 있다.

실험 F-2의 결과에서 보듯이 60분이 경과한 시점의 감소 폭은 10%내외지만 120분이 경과한 후에는 약 15%까지 증가됨을 알 수 있다.

본 연구에서와 같이 수막의 형성에서 의해 발생하는 로내온도의 저하는 전술한 바와 같이 잠열에 의한 것으로 설명할 수 있으며, 이는 본 시험에 사용된 수막 형성시스템의 리바운드 수량이 3% 이내인 점을 고려할 때 대부분의 온도저하가 유리면에 직접 형성되는 수막의 표면에서 발생하는 것이라 할 수 있다.

따라서 이런 시스템의 내화성능은 잠열에 의한 흡수열에너지의 양을 고려하여 성능이 평가되어야 한다.

5.2. 수막의 형성에 의한 비가열측(이면) 온도변화

5.2.1. 비가열측 유리면의 온도변화

제 2장에서 기술하였듯이 수막을 형성하지 않은 유리 수 분내에 최고 300°C에서 265°C의 온도차이(가열측과 비가열측간의 온도차이를 말함)가 발생하여 파열되지만, 수막이 적절히 형성될 때의 비가열측 표면온도는 최고 150°C를 넘지 않았음을 확인할 수 있었다. 따라서 비구조벽체의 내화성능 판정기준의 하나인 비가열측의 표면 온도가 260°C보다는 현저하게 낮음을 보여주고 있다.

열전대의 위치에 따른 온도차이를 살펴보면, 유리 상부보다는 하부로 내려갈수록 비가열측 표면온도가 높은 경향을 나타내고 있다. 즉, 동일 수직선상에 위치한 지점이라 할지라도 상부보다는 하부지점의 비가열측면이 더 높은 경향을 나타내고 있는데 이것은 상부의 차가운 물이 하부로 흘러내리면서 더욱 뜨거워지기 때문인 것으로 판단된다. 즉 상부의 수막 온도가 하부보다 더 낮은 점이 이 현상을 초래하였을 것으로 판단된다.

5.2.2. 수막의 형성에 의한 비가열측 프레임의 온도변화

비가열측의 프레임 표면온도는 일정한 패턴을 보이지 않고 불규칙하였으나, 상부 프레임의 이면온도가 하

부 프레임의 이면온도보다 높게 나타났다. 이는 상부 프레임에는 수막이 전혀 형성되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 하부 프레임에는 물받이가 들어 있기 때문에 상대적으로 낮은 온도를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 수직 멀리언의 경우에는 유리면과는 반대로 하부로 내려갈수록 낮은 온도를 보이는 점이 하부에서 물이 드레인될 때 일시적으로 고임에 따른 현상에 의한 것으로 추정된다.

5.3. 기타 수막의 형성에 미치는 요소

5.3.1. 유리면의 변형에 의한 수막 상태의 변화

축소모형 시험과는 달리 실제 규격 시험에서는 유리 패널이나 프레임의 길이나 높이가 크기 때문에 실험 중 일부 변형이 발생하였는데, 이 변형이 수막을 형성하는데 일부 지장을 초래하였는지의 여부는 본 시험만 가지고는 판단하기 어려웠다. 다만 코너부의 수량이 적을 경우에는 유리의 배부름 현상에 따라 수막의 두께 등에 변화가 있음을 관찰할 수 있었다. 유리가 가열중 온도가 상승하면서 처음 가열측, 즉 내화로의 안쪽으로 배부름 현상이 발생하고 시간이 경과함에 따라 비가열측, 즉 외부방향으로 배부름이 발생하였다(그림 29).

유리면의 변형이 비교적 크지 않기 때문에 유리의 배부름이 발생할 때 가열 측에 형성되는 수막은 두께가 얇아지거나 두꺼워지는 경향을 보였지만 수막이 완전히 단절되는 부분은 발견하지 못하였다. 다만 유리면의 변형에 의해 유리면과 프레임이 접하고 있는 접착부에 삽입된 방화실리콘이 벌어지거나 튀어 나와 수막의 자연낙하를 방해하여 코너부의 수막이 조금씩(약 30mm)하부에 형성되지 않는 현상이 일부 관측되었다. 이런 수막이 형성되지 않는 유리면의 비가열측 온도를 수동으로 체크하였으나 180°C를 넘지 않았다. 즉 그다지 폭이 넓지 않는 또한 길이가 1m내외의 짧은 수막이 형성되지 않는 면의 유리면은 유리가 파열될 정도의 시험체 온도상승이 일어나지 않았다.

5.3.2. 중앙수직 멀리언의 변형에 의한 수막상태의 변화

실험 F-3의 결과를 보면, 전장에서 서술한 유리면 자체의 변형보다 가열 시 프레임의 변형이 유리면에 형성되는 수막 형태의 영향을 줄 것이라는 예측이 틀리지 않았다는 것을 보여주었다. 실험F-3에서는 약 32분 만에 유리면이 파열되었는데, 이때의 프레임 변형은 중앙에 설치한 수직 멀리언이 내화로의 가열 측방향으로

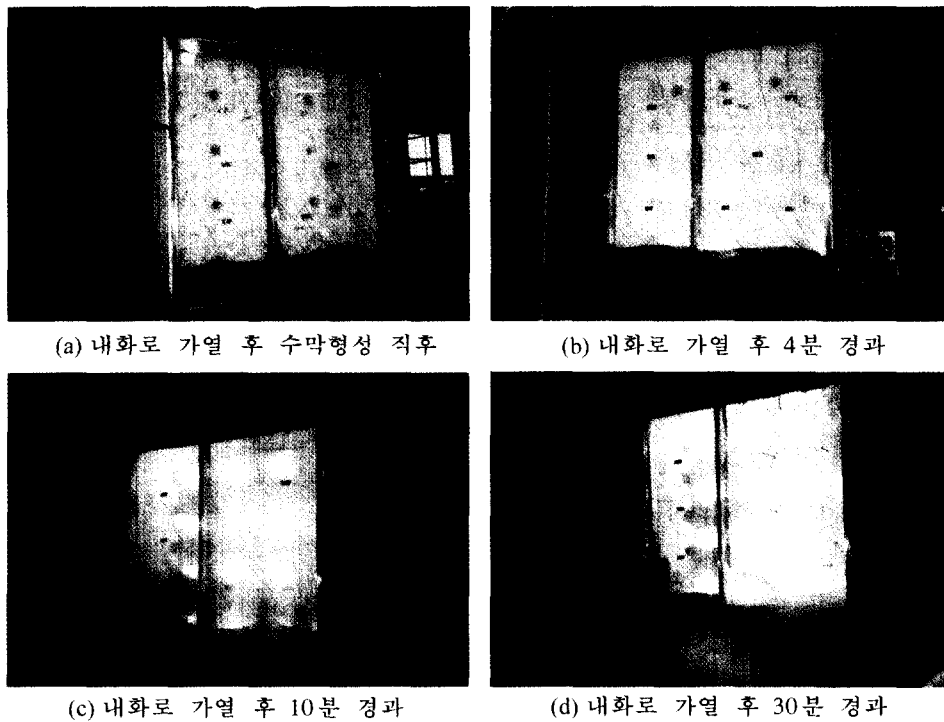


그림 29. 실험 F-3의 시간별 실험 장면.

40 mm 이상 배부름 현상을 나타내었다. 이 배부름 현상이 유리면을 직접적으로 파열시킬 수 있는 응력까지는 도달하지 않은 것으로 판단되지만, 20분 경을 지나면서 수직 멀리온과 유리가 만나는 코너부에 수막이 잘 형성되지 않았으며, 약 30분 경이 되면서 결국 유리가 수막의 형성부와 미형성부사이의 온도차가 커짐에 따라 견디지 못하고 파열되었음을 보여주었다. 따라서, 수막에 의해 보호되지 않는 프레임의 변형이 클 경우에는 프레임의 변형에 의해 수막이 형성되지 않을 우려가 크므로 무엇보다도 프레임의 변형을 방지할 수 있는 시스템이 고안되어 수막설비와 조합되어 사용되어야만 실질적으로 유리벽의 내화성능을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

5.3.3. 실리콘이 수막형성에 미치는 영향

유리를 프레임에 고정시키기 위해서 필수적으로 사용되는 재료는 셋팅 블록 등의 유리 고정 액세서리와 충전제인 코킹이다. 물론 최근에는 습식재료인 코킹보다는 건식공법을 선호함에 따라 가스킷이 사용이 증가되는 추세이다. 이러한 액세서리아말로 내화성능을 확보하는데 중요한 역할을 한다. 이제까지의 실험에서 보듯이 가열에 의해 변형되는 프레임이나 유리면은 프레임의 유리 고정면에 삽입되는 코킹 등에 변형을 일으켜 코너부의 수막 낙하시 결정적으로 장애를 줄 수 있다. 유리면의 온도차이를 크게 하여 파열을 유도하는 역할을 한다. 따라서 이런 변형에 의해 영향을 받지 않는 재료로 대체하여야만 소요의 내화성능을 보유하는 수막형성 유리벽을 만들 수 있다. 근래에는 고온에서 변형되지 않으면서 유리면의 충격을 주지 않는 내열 가스킷이 선진국에서 개발되어 사용됨에 따라 이런 우려를 제거할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

수막을 형성한 상태의 유리벽을 내화로에서 KS F 2257의 표준가열온도곡선곡선에 의하여 실험한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 본 실험은 플러드 노즐 스프레이 시스템을 이용하여 단일 유리벽체 전체에 완벽하게 수막을 형성시킬 경우 2시간까지 내화성능을 확보할 수 있음을 입증하였다. 이 연구보고서에서 사용된 시스템은 수막의 형성 시스템, 유리의 두께, 유리의 크기 및 종류, 프레임의 재질 및 형상의 사용에 한하여 국한된다는 점을 아래에 명기한다.

- 실제규격의 유리벽(2.4 M×3.0 M)에 특수 고안된 수막형성 시스템에 의하여 유리면 및 프레임 일부면에

적절한 수막을 단절없이 균일하게 도포되어야만 가능하다.

- 단일 고정창을 가진 벽체로서 유리는 12 mm 이상의 강화유리를 사용하여야 하며 프레임은 1.6 mm 두께의 스테인레스 스틸을 사용하여 개방된 공간이 없는 하나의 각형 통으로 이어 열에 의한 변형을 최소화시켜야 한다.

2. 본 실험에 의하여 유리면 전체에 수막을 도포된 상태에서 가열 시 실제의 내화로 내부온도가 건물의 실내화재시의 열에너지 발현을 나타내는 KS의 표준온도가열곡선의 평균 온도보다 약 10~15%정도 낮게 나타났으며, 이는 수막이 형성되는 유리면 직근의 공간에서 수증기가 열을 빼앗아 가는 잠열에 의해 발생하는 것으로 입증되었다. 이 사실은 실제의 화재 시에도 동일하게 반복될 수 있다는 점을 의미하는 것이므로 내화성능 평가 시 필히 고려되어야 한다.

- 내화로 내부의 가열온도 저하가 수막의 표면에서 발생하는 잠열로 인하여 발생하여야 하며, 수막형성 과정 중에 부수적으로 발생하기 쉬운 리바운드 량(튀어서 내부 바닥으로 떨어지는 잉여수)으로 인한 온도저하는 내화성능의 구비 목적(스프링클러가 작동하여도 최성기에 도달한 경우를 상징)에 부합되지 않으므로 반드시 구별되어야 한다.

3. 구조벽의 지지를 받지 못하고 설치되는 수직 멀리온은, 유리의 파열에 직접적으로 영향을 미치지는 않지만, 화재 시에 심한 변형이 발생할 우려가 크기 때문에 수막형성에 영향을 미칠 우려가 크다. 따라서, 연속적인 벽체의 설치를 고려할 경우 실제 화재에서는 변형되지 않는 멀리온이 설치될 경우에 한하여 1시간 이상의 내화성능 확보가 가능할 것으로 판단된다.

4. 수막이 유리면 뿐 아니라 멀리온 내부에서도 형성 가능하다면 금속제의 열전달을 고려할 때 변형을 최소화 수 있을 것으로 판단되어 좀더 세밀한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 유리면에 수막이 형성되지 않는 부분이 발생할 경우 10분 이내에 유리면 전체의 파괴에 도달 할 수 있다는 사실을 확인하였다. 따라서 드렌처나 윈도우 스프링클러 등 전용적으로 수막을 형성하지 못하고 입증되지 않은 수막형성 시스템을 사용하여 내화성능을 확보하려면 반드시 설치 전에 지정된 내화로에서 내회시험을 필히 거쳐서 사용하여야 한다.

6. 수막의 형성에 영향을 주는 요인은 유리, 프레임 등의 주재료보다 코킹이나 백업재 등의 부속자재일 경우가 더 크기 때문에 이런 부속자재에 대한 열적 거동을 선행하여 규명하여야만 자유로운 수막형성 시스템의

실용화가 앞당겨 질 수 있다.

참고문헌

1. A. K. Kim, B. C. Taber, and G. D. Lougheed, "Sprinkler Protection of Exterior Glazing", *Fire Technology*, Vol. 34, No. 2, pp. 116-135 (1998).
2. Shelly Reese, "Decisions," *NFPA Journal*, 11/12, pp. 76-79 (1998).
3. Boston-Providence Turnpike, "Research Examination of Sprinkler Protected Glazing Systems for Central Sprinkler Company 451 N. Cannon Avenue Lansdale, PA 19446", *Factory Mutual Research*, 23, pp. 1-6, 1995. 5.
4. A. K. Kim and B. C. Taber, "The Effects of Sprinkler Location and Activation Time on the Protection of Glazing Systems", *Institute for Research in Construction*, National Research Council of Canada, Ottawa, 1, pp. 1-18 (1989).
5. Moule, A. W, and Grubits, S. J., "Water Drenching of Tempered Glass Used to Attenuate Radiant Heat", *Technical Record 498*, Experimental Building Station, Department of Housing and Construction, Australia, 1983. 7.
6. Ferguson, A., "New Standard for Atrium Building", *Fire Prevention*, No.184, London, 1985 11.
7. Law, M., "Safe Distance from Wired Glass Screening a Fire", *I.F.E Quarterly*, Vol. 29, No. 73, pp. 62-70 1969. 3.
8. 김종훈, 이수경, "구획 화재시 창유리 파괴현상에 관한 실험적 연구", *한국산업안전학회 논문집*, pp. 101-106, 1998. 5.
9. 松藤泰典, "新建築學 シリ-ズ4, 建築材料・材料設計"

씨랜드 및 인천 호프집 화재현장 조사를 통한 다중시설에 적합한 화재안전방안의 제시

Introduction to Proper Alternative for Fire Safety of Korean Multi-Occupancy Buildings through Investigations on Both Hwasung SEA LAND Recreational Assembly Facility Fire and Incheon Pub Restaurant Building Fire, Korea

특집개요

20세기 말의 1999년도에 국내에서 발생한 화재는 우리에게 커다란 슬픔과 함께, 화재·소방에 관련된 모든 사람에게서 부끄러운 자화상을 보여주었다. 비단 이 화재의 구조적 원인이 사회의 전반적인 구조적 모순에 의한 것이었지만 적절한 화재안전대책이 사전에 구비되었더라면(예를 들어, 피난문 등을 말함) 대형의 인명피해방지가 가능하였다는 점에서 아쉬움이 큰 것은 부인할 수 없는 사실이다. 이와 같이 불특정 다수가 이용하는 다중시설인 경우, 특히 유소년이나 청소년등이 출입하는 유흥시설의 화재로 인한 대형인명사고는 21세기를 맞이하는 올해도 계속 일어날 가능성이 크다는 점에서 되새겨볼 필요가 크다. 따라서 현재 국내의 관/산/학/연의 여러 화재·소방 관련기관에서는 급변하는 건물의 이용도(Occupancy)에 맞는 적절한 화재안전계획과 소방·방재 시설이 의무적으로 구비될 수 있도록 법령의 개정이 필요하다는 점에서, 특히 다중용도의 건물에서는 피난활동에 필수적인 시설들과 대형의 인명피해를 줄이기 위하여 연기를 적절히 제어할 수 있는 시설이 구비되어야 한다는 공감대가 형성되고 있다.

무엇보다도 1999년도에 국내에서 일어난 화재를 조사한 보고서를 보면 국내의 화재안전대책의 수준을 평가할 수 있으며 향후 화재·소방관련 법령이나 기술이 나아갈 방향을 예측할 수 있다. 따라서 한국화재·소방학회에서는 금번 『화재·소방』 학술지에 “씨랜드와 인천 호프집 화재 조사를 통한 다중시설에 적합한 화재·안전(방재) 기술의 제시”라는 제목의 특집을 마련하여 다중시설의 화재안전대책에 관한 사례를 소개함으로써 화재·소방학회 회원 및 소방·방재 관련 기술자들이 소방·방재 설계나 계획 기술의 확립에 도움을 주고 향후 소방관련산업의 발전에 조금이나마 기여하고자 한다.

(특집주관: 朴 炯 柱, 경원전문대학 소방학과 교수)