

B-4 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)

박 형 주 김 창 훈 지 남 용
(경원전문대학 교수, 한양대학교대학원 석사과정, 한양대학교 교수)

Park, HungJoo Kim, ChangHun Jee, NamYong
(Kyungwon College Prof., Hanyang Univ. Grad. Student, Hanyang Univ. Prof.)

1. 서론

수세기 전부터 인간은 많은 건축물에 개방감을 주는 유리를 사용하려고 많은 노력을 기울여 왔다. 20세기 들어 건축물이 대형화, 고층화, 첨단화됨에 따라 유리의 사용은 급격하게 증가되어 왔다. 그러나, 유리는 열적 충격(thermal shock)에 상대적으로 약하기 때문에 화염의 확산을 일정시간 동안 저지할 목적으로 설치되는 방화구획을 이루는 벽체로서의 사용이 제한되어 왔다.

이에 유리의 조성을 변화시켜 열적 특성을 강화시킨 방화유리와는 별개로 플로트 유리 표면에 수막(water film)을 형성시켜 화재 시 발생하는 열에 의한 유리 온도의 상승을 억제하여 내화성을 부여하는 기술 개발을 시도하여 왔다.

본 연구는 유리벽체에 내화성능을 부여하기 위하여, 최적의 수막 형성 설비를 고안하여, 시험체에 설치하여 균일하고도 연속적인 수막을 도포 시키는데 중점을 두며, 최종적으로는 이 시스템에 의하여 수막이 형성된 유리벽 시스템을 KS F 2257 건축구조부분의 내화시험방법에 의거하여 가열하므로써 유리표면에 형성되는 수막 형태에 따라 유리벽의 열적 특성이 변하는가를 분석하고 나아가 내화성능에 미치는 영향을 규명하는데 본 연구의 목적을 둔다.

2. 기존 연구의 고찰

유리 벽면에 수막을 형성시켜 열적 특성과 내화성능을 시험한 이전의 연구들은, 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) 화재기술부분의 A.M. Poter와 J.R. Barnfield가 수행한 "유리벽을 화재로부터 방호하기 위한 드렌처의 사용에 관한 연구"는 소형과 대형내화로에서 6mm에서 10mm 두께

를 가진 보통유리와 강화유리에 드렌처를 사용하여 수막의 유무에 따른 유리 벽의 열적 특성을 파악하였다. 시험결과 수막을 형성시키지 않은 유리는 어떤 종류의 유리일지라도 화염에 노출될 경우 파열되는 것을 확인하였다. 또한 1시간 가열시험에서 930℃ 전후를 나타내어야 하는 노내 평균 온도가 600℃를 초과하지 않은 것은 드렌처에서 분사된 물이 내화로의 온도 상승을 억제한 것이라 할 수 있다.

캐나다의 NRCC(National Research Council of Canada)에서 A.K. Kim 과 G.D. Loughheed에 의해 수행된 "근접 설치된 스프링클러 설비에 의한 유리벽의 보호에 관한 연구" 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℃ 내외에서 머무르고 있는 상태에서 유리벽이 2시간을 견딜 수 있다고 보고하였다. 이 연구결과에서도 원도우형 스프링클러에서 분사된 물이 내화로의 온도를 현저하게 낮춘 상태에서 내화성능에 대한 판정결과를 내고 있음을 알 수 있었다.

3. 최적 수막형성 시스템의 개발

열적 반응 특성이 비교적 열악한 재료인 유리를 화염의 확대를 방지할 목적으로 사용하기 위해서는 화재 시 유리표면의 온도상승을 어떠한 상황에서도 억제하여야만 가능할 것이다. 물에 의한 수막도포 방식에서는 화재 시 유리면에 도포된 수막에서 발생하는 잠열에 의해서 유리면의 급격한 온도상승을 방지할 수 있다는 이론이 기존의 연구에서 증명되었다.

건물 내에서 비교적 물의 공급이 가능한 장소에서는 수막을 형성시키는 능동적 시스템(active system)을 유리 벽이라는 수동적시스템(passive system)에 적용하기 위하여 다음과 같은 설계기준을 설정하여 최적 수막형성 시스템을 개발하고자 하였다.

유리 벽 전체에 수막을 효과적으로 형성하기 위해서는 물의 흐름이 상부에서 하부로 아래와 같은 기준에 부합된 조건으로 되어져야 한다.

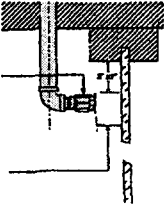
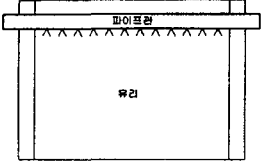
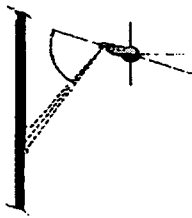
설정기준 I: 유리벽의 수직면 전체에 단절이 없이 연속적으로 일정 두께 이상의 균일한 수막형성이 가능하여야 한다.

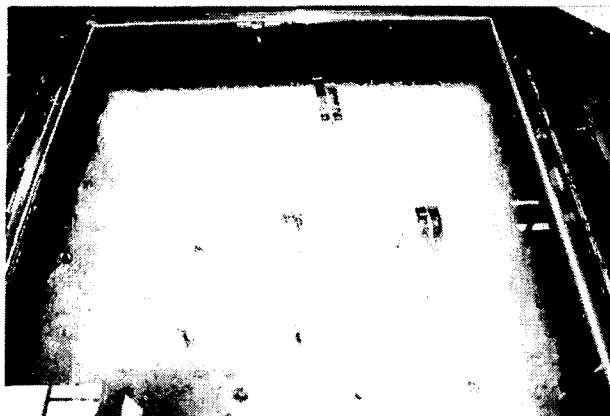
설정기준 II: 유리면에 산포되어 입사하는 물 기둥이 유리면에 접촉한 후 반동에 의해 발생하는 리바운드량이 극소화 되어야 한다.

설정기준 III: 유리면의 전체면에 동일한 수압하에서 일정한 유량으로 산포되어 코너부까지 단절 없는 수막이 형성되어야 한다.

상기의 세가지 기준을 고려하여 표 1과 같은 방안을 선정하였다. 방안 2와 3은 유리면에 수막을 형성시키면서 리바운드량을 최소화 할 수 있기 때문에 금번 시험에 적합한 시스템으로 판단되지만, 설치위치에서 차이를 가지고 있었다. 즉 방안 2는 방안 3에 비해 유리면에 유리면과의 이격거리를 적게 하여야만 리바운드가 없는 수막의 형성이 가능하다. 이 시스템이 내화로 내에 설치될 경우, 파이프가 가열되어 높은 온도의 수막이 형성될 수 있다고 판단되어 방안 3으로 결정하였다.

<표 1> 방안별 설계기준 만족도 현황

구 분	도 해	수막형태의 문제점	설정기준 만족도
방안 1: 드렌처 시스템		-수막 형태가 불규칙하여 좌우코너의 상하부에 수막의 형성이 되지않은 무수막 유리표면이 발견됨 -리바운드량이 큼	설정기준 III을 제외하고는 I과 II 두가지 모두 불만족
방안 2: 유공 파이프관 시스템		-수막 형태가 규칙적으로 형성됨 -리바운드가 없음 -코너부의 수막을 형성하기 위해서는 파이프를 굴곡시켜 설치해야 함	설정기준 II는 완전하게 만족하고 I과 II도 거의 만족스러움.
방안 3: 플러드 노즐 스프레이 시스템		-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



[그림 1] 최적 수막형성 시스템의 실제 작동현황

제반 문제점을 보완하여 고안된 최적의 수막형성 시스템을 시제품으로 제작하여 성능 시험한 결과 리바운드 량이 5%이내로 조사되었으며, 비교적 저압의 수압에서도 양질의 수막형성이 가능하였다. 즉 수압을 0.38kg/cm^2 , 유량을 70 l/분 으로 조절하였을 경우, 폭 2.4m (높이 3m)의 유리벽의 수막을 완벽하게 형성할 수 있는 것으로 조사되었다. 2.4m 폭을 가진 실제 규모의 유리벽을 시

협하기 위한 최적의 수막형성 시스템의 실제 작동현황은 그림 1과 같다.

4. 수막형성 유리벽의 내화성능에 관한 실험

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

수막형성 설비를 시험체 틀 내부에 설치하였다. 대형내화로의 전면을 덮을 수 있도록 2.52m×3.00m 크기의 스테인리스 스틸로 제작된 프레임을 사용하여 2.4m×2.6m 크기의 유리샘플을 설치할 수 있도록 하였으며 프레임의 골격을 이루는 멀리언의 사이즈는 폭 60mm에 깊이 200mm로서 가열면에서 바깥쪽으로 내어 유리가 설치되도록 홈을 만들어 유리샘플을 가열면 이면에서 쉽게 고정시키도록 하였다. 하부 수평 멀리언은 구조안전 상 높이가 250mm 이상 되어야 하므로 이 공간을 물받이로서 이용하였다. 따라서 유리면을 따라 수막을 형성하고 흘러내린 물은 하부의 물받이에 모여져서 드레인으로 배출하도록 하였다.

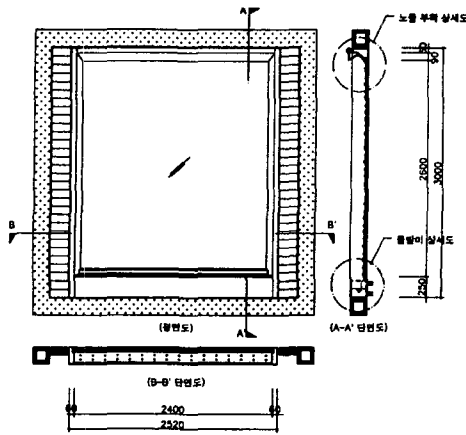
시험체 틀과 프레임 사이의 공간은 내화성능이 높은 ALC 블록과 텀버스톤 블럭(timber stone block)을 사용하여 밀실하게 차단시켰다. 기타 틀과 시험체 사이의 비교적 작은 틈새들은 내화성능이 뛰어난 셀락 울(cellac wool)을 충전하여 내화로 내부의 열량이 외부로 쉽게 빠지는 것을 방지하였다. 유리를 고정시키는 실링재는 방화용 실리콘을 사용하였으며 그 밖의 액세서리는 일반적인 재질의 것을 사용하였다. 실제규격 내화시험용으로 사용한 유리는 강화유리만을 사용하였으며, 두께는 12mm와 15mm를 사용하였으며 시험체 조건은 표 2와 같다.

<표 2> 실제 규격 내화 시험용(Full Scale Test) 시험체의 조건

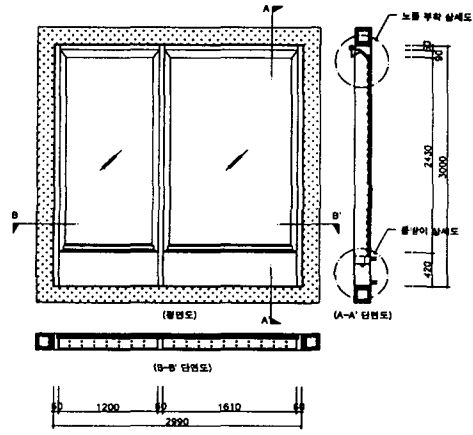
시험체 No.	유리종류 및 두께	수막설비 설치유무	규 격(m)	비 고
실험 F-1	12mm강화유리	설치	2.4×2.4	그림 2 참고
실험 F-2	15mm강화유리	설치	2.4×2.6	그림 2 참고
실험 F-3	12mm강화유리 2매	설치	1.20×2.43	그림 3 참고 (수직멀리언 추가)
			1.61×2.43	

4.1 실험방법

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. 즉, 상부프레임 선에서 최초 수막선까지의 거리를 1.5cm 이내로 하여 수막이 형성되지 않는 부분(유리면에 물이 입사되는 경계선 위의 수막이 형성되기 어려운 간격)을 최소화한 후 실시하였다.



[그림 2] 단일 벽체 프레임을 사용한 수막형성 유리벽 상세도



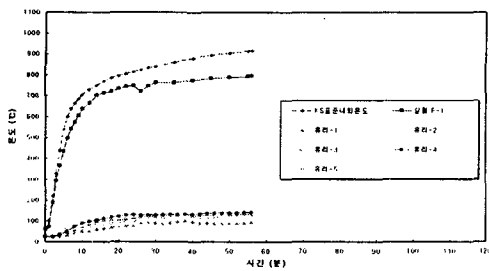
[그림 3] 중앙에 수직멀리언이 설치된 연속벽체의 상세도

4.2 실험결과

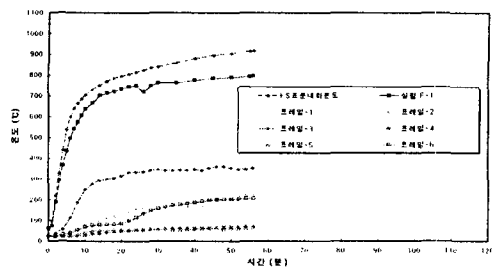
(1) 실험 F-1(12mm 강화유리 단일벽체)

내화로내의 측정된 실제 가열온도는 축소모형 실험과 유사하게 나타났는데 16분경에는 714℃(표준가열온도는 770℃), 30분경에는 763℃(표준가열온도는 840℃) 45분경에는 784℃(표준가열온도는 895℃)를 나타내었다. 57분경이 지나자 유리가 파열되었다. 그 이유는 상부좌측에 있는 수막설비 파이프가 아래로 처지면서 내려앉았는데, 가열에 의해 상부 프레임이 찢어지면서 연결된 노즐 파이프가 주저앉아 수막이 좌측 유리면 상부에서 형성되지 않은 것에 의한 것으로 판단된다.

유리의 이면온도는 최대 143℃를 넘지 않은 상태였다(그림 4참조).



[그림 4] 실험 F-1 시험체의 비가열면 온도곡선(유리)



[그림 5] 실험 F-1 시험체의 비가열면 온도곡선(프레임)

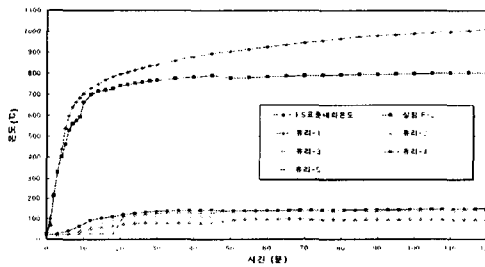
(2) 실험 F-2(15mm 강화유리 단일벽체)

수막형성 시스템을 유리벽체 프레임과 독립시켜 내화로 틀에 직접 매달았다. 즉, 프레임이 열 변형을 일으키더라도 수막을 형성하는 시스템에는 영향을 주지 않도록 하였다. 15mm 두께의 강화유리를 사용하였으며 유리 중앙부에는 피아노 선을 이용한 변위측정 장치를 부착하였다.

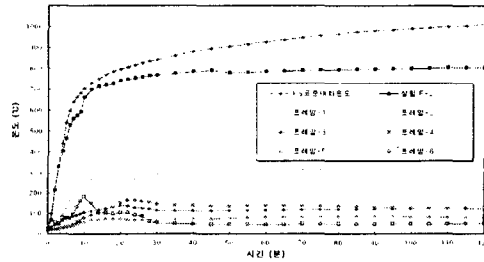
실험 중 로내온도는 1시간 경과 시 784℃(표준가열온도는 925℃), 90분 경과 시 795℃(표준가열온도는 980℃), 120분 경과 시 803℃(표준가열온도는 1010℃)를 나타냈으며, 90분 이후는 로내온도가 그림 6과 같이 완만하게 상승하였다.

비가열측의 유리 온도는 최고 평균온도가 134℃를 넘지 않았으며 국부적으로도 최고 150℃를 넘지 않았다. 다만 60분 경과 시 유리면의 좌측 코너부 아래쪽에서 수막이 형성이 되지 않은 부분이 일부 발생하였는데 이 부분을 실험 중에 이동가능한 열전대를 사용하여 체크한 결과 180℃를 넘지 않았다. 따라서 120분 경이 경과 후까지 유리가 파열되지 않은 이유는 수막이 형성되지 않은 부분이 발생하더라도 그 폭이 30mm이내이거나 길이가 500mm이내이기 때문에 극단적인 온도상승이 발생하지 않았기 때문으로 판단되었다.

비가열측의 프레임 이면온도를 살펴보면 상부 프레임을 제외하고는 200℃를 넘지 않았다. 다만 상부프레임은 일부 300℃를 넘기도 하였지만 큰 변형은 발생하지 않았다. 유리면의 변위를 측정된 결과 유리면은 가열 초기에는 가열측으로 배부름현상(약 12.7mm)이 발생하였지만 유리면의 온도상승과 함께 오히려 비가열측으로 배부름이 최대 2.9mm 발생하였다(그림 10). F-2는 수막형성이 지속되는 한 120분까지 유리가 파열되지 않고 견딜 수 있음을 보여주었다(그림 6~7).



[그림 6] 실험 F-2 시험체의 비가열면 온도곡선(유리)



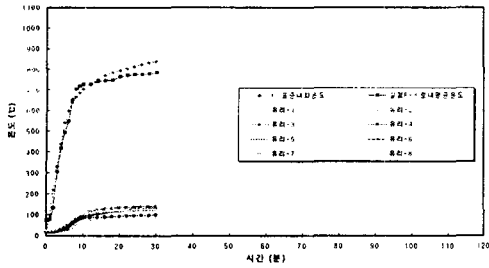
[그림 7] 실험 F-2 시험체의 비가열면 온도곡선(프레임)

(3) 실험 F-3(12mm 강화유리, 중앙 수직 멀리언 설치)

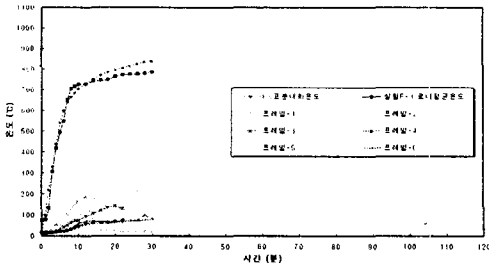
단일 창호가 아닌 두 개이상의 창호가 연속으로 설치되는 경우를 고려하여 시험체 중앙에 수직 멀리언을 설치하여, 그 수직 멀리언이 가열될 경우 수막이나 유리에 영향을 줄만큼 변형이 되는가를 조사하는데 목적을 두고 실험하였다.

유리는 12mm 두께의 강화유리를 사용하였으며 3.0m의 전체 폭을 가진 연속 벽체로써 두 개의 단일 벽을 수직멀리언을 사용하여 연결하였다. 수막형성 시스템은 수직 멀리언으로 인하여 2개의 코너부가 증가되었다. 따라서 코너부 보강용 플렛 노즐을 추가하여 수막을 보강하였다.

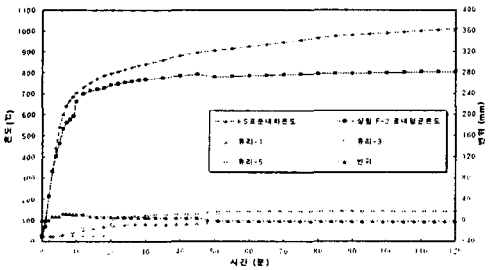
수직 멀리언의 중앙에 변위측정기를 설치하여 가열온도 변화에 의한 수직멀리언의 변형을 측정된 결과, 그림 12에서 보듯이 40mm이상의 배부름이 가열측으로 발생하여 가열 후 20분경에는 코너부의 수막이 갈라지면서 수막이 형성되지 않는 부분이 4개소 발생하였다. 30분 경에는 유리면의 온도차에 의해서 유리가 파열되고 말았다(그림 8). 멀리언의 배부름현상은 유리면에 충격을 줄 수 있을 정도까지 심각한 상태였다. 따라서 유리면의 변형을 방지할 수 없다면 연속벽체의 내화성능은 획득될 수 없을 것으로 판단된다.



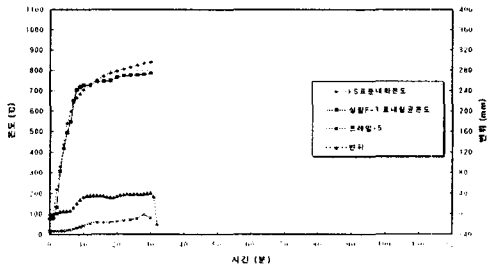
[그림 8] 실험 F-3 시험체의 비가열면 온도곡선(유리)



[그림 9] 실험 F-3 시험체의 비가열면 온도곡선(프레임)



[그림 10] 실험 F-2의 유리면 중앙부의 변위 곡선



[그림 11] 실험 F-3의 수직 멀리언 중앙부의 변위 곡선

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 된다고 할 수 있다.

잠열에 의한 온도저하에 따른 실제의 내화로 온도를 시간대별로 살펴보면 가열 후 30분 경에는 표준가열온도(840°C)보다 70~80°C 정도 낮은 760°C대를 기록하고 있으며, 60분 경에는 표준가열온도인 925°C보다 61°C 정도 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. 따라서 이런 시스템의 내화성능은 잠열에 의한 흡수열에너지의 양을 고려하여 성능이 평가되어야 한다.

5.2 비가열측 유리면과 프레임의 온도변화

앞에서 기술하였듯이 수막을 형성하지 않은 유리는 수 분내에 최고 300°C 에

서 265℃의 온도차이(가열측과 비가열측간의 온도차이를 말함)가 발생하여 파열되지만, 수막이 적절히 형성될 때의 비가열측 표면 온도는 최고 150℃를 넘지 않았음을 확인할 수 있었다. 비가열측의 프레임 표면온도는 일정한 패턴을 보이지 않고 불규칙하였으나, 상부 프레임의 이면온도가 하부 프레임의 이면온도보다 높게 나타났다.

5.3 유리면의 변형에 의한 수막 상태의 변화

유리가 가열중 온도가 상승하면서 처음 가열측, 즉 내화로로 안쪽으로 배부름 현상이 발생하고 시간이 경과함에 따라 비가열측, 즉 외부방향으로 배부름이 발생하였다(그림 10~11). 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.

5.4 중앙수직 멀리언의 변형에 의한 수막상태의 변화

수직 멀리언이 내화로로 가열 측 방향으로 40mm이상 배부름 현상을 나타내었다. 이 배부름 현상이 유리면을 직접적으로 파열시킬 수 있는 응력까지는 도달하지 않은 것으로 판단되지만, 20분 경을 지나면서 수직 멀리언과 유리가 만나는 코너부에 수막이 잘 형성되지 않았으며, 약 30분 경이 되면서 결국 유리가 수막의 형성부와 미형성부사이의 온도차가 커짐에 따라 견디지 못하고 파열되었다.

6. 결론

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(2.4×3.0m)에 특수 고안된 수막형성 시스템에 의하여 유리면 및 프레임 일부면에 적절한 수막을 단절없이 균일하게 도포되어야만 가능하다.
- 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.
- 3) 구조벽의 지지를 받지 못하고 설치되는 수직 멀리언은, 유리의 파열에 직접적으로 영향을 미치지 않지만, 화재 시에 심한 변형이 발생할 우려가 크기 때문에 수막형성에 영향을 미칠 우려가 크다.
- 4) 유리면에 수막이 형성되지 않는 부분이 발생할 경우 10분 이내에 유리면 전체의 파괴에 도달 할 수 있다는 사실을 확인하였다. 또한 유리, 프레임 등의 주재료보다 코킹이나 백업재 등의 부속자재의 열적 거동을 규명하여야만 수막형성 시스템의 실용화가 앞당겨 질 수 있다.