

D-9

**수막보호 유리벽의 가열면 온도변화에 따른
급냉파열특성에 관한 연구**

박형주, 지남용*, 김창훈**

경원전문대학 소방학과 교수, *한양대학교 교수, **한양대학교 박사과정

**A Research on Glass Breakage Vs. Surface Temperature on Fire Exposed
Glass for The Water Film Cooling-down Glazing System**

Park, HungJoo, Jee, NamYong*, and Kim, ChangHun**

Kyungwon Col. Prof., *Hanyang Univ. Prof., **Hanyang Univ. Grad. Student

요약

본 연구는 내화성능을 가진 수막보호유리벽을 실제 건축물에 적용하는 데 있어서 필수적으로 고려해야할 가상시나리오 중에서 수막이 유리면을 보호하기 이전에 유리면에 근접되어 있는 화염으로부터 방출되는 복사열이 유리면이 가열된 상태에서 수막이 형성될 경우 유리면의 온도가 급속히 냉각됨으로서 발생할 수 있는 급냉파열특성을 규명하기 위해 실험한 연구로서 가열면온도범위에 따라 유리면에 수막접촉시 파열가능한 온도범위를 파악할 목적으로 실험하였다. 실험에 의해 강화유리는 유리의 가열면온도범위가 150℃ 이상 250℃ 이하에서 수막이 형성될 경우 급냉파열은 일어나지 않았으나, 일반유리는 100℃ 이상 150℃ 이하에서 급냉파열이 일어남을 확인하였다. 즉, 방화구획벽에 적용가능한 수막형성유리벽의 유리가 강화유리인 점을 착안하면, 수막의 도포이전에 강화유리면의 온도가 250℃까지 올라가기 전에는 수막을 유리면에 접촉하여도 유리면의 급냉파열이 일어나지 않음을 확인할 수 있었다. 이점은 일정한 구획내에서 유리면의 직근에 설치된 감지기에 의해 수막형성시스템의 가동을 할 경우 급냉파열현상이 발생하지 않는 온도범위를 설정할 때 중요한 데이터로 활용가능하다. 결과적으로 국부복사열에 의하여 유리면의 온도가 급냉파열현상을 일으키는 한계온도에 이르기 전에 유리벽체 상부의 감지기의 작동이 필수적으로 일어날 수 있음을 증명한다면 수막을 이용한 유리벽체를 일정시간이상의 내화성능이 요구되는 방화구획의 수직부재로 활용하는 데 있어서 걸림돌이 되는 급냉파열에 대한 우려를 종식시키는 데 이바지할 수 있다.

1. 연구의 배경 및 필요성

건축물의 대규모, 초고층화가 급격히 진행됨에 따라 건축물의 방재계획에 있어, 화재

확산방지에 대한 새로운 기술개발에 대한 요구가 증가하고 있다. 화재확산방지기술 중 가장 기본적이고 핵심적인 요소기술은 방화구획의 적절한 설정이라 할 수 있다. 이러한 방화구획의 구성은 콘크리트, 벽돌, 블록 또는 석고보드 등 시각적인 개방감이 없는 불연재료를 사용하는 재료의 사용에 전적으로 의존하고 있는 것이 현실이다.

선진국의 경우, 수년 전부터 아트리움이나 출입구 홀 등 건물 내의 개방성이 요구되는 공간 또는 지하상가의 쇼 윈도우 등의 통행이 빈번한 통행로에 인접된 공간에는 평상시 쾌적하고 개방된 환경을 가짐과 동시에, 기존 방화구획이 갖는 시각적 폐쇄성의 해소가 가능한 재료인 유리를 사용하여 방화구획으로 사용하는 요구가 증가하여 내열유리의 개발이 촉진되었다. 현재는 유리 자체의 내열성을 강화한 실리보케이트(silibocate) 유리가 개발되어 적용되고 있으나, 기존의 강화유리(toughened glass)에 비해 경제성이 크게 떨어져 사용이 제한되어 왔다.

따라서, 고가인 내열유리대신 상대적으로 열에 약한 강화유리벽체에 스프링클러나 드렌처설비를 이용한 액티브시스템(active system)을 적용시켜 화재시 유리표면에 수막을 형성시켜 내화성을 확보하려는 시도가 국내외적으로 활발히 진행되어 이미 국내에서는 국제적으로 공인된 시험기관의 내화성을 획득하여 실용화하려는 연구가 진행되어 왔다(한국화재·소방학회 논문집 제13권 제4호, 박형주·지남용저 「대규모 아트리움에 적용되는 수막형성 유리벽의 열적특성 및 내화성능에 관한 연구」 참조).

이처럼 강화유리와 수막전용설비의 조합에 의한 방화구획용 유리벽체 시스템이 실용화하는 단계에서 이런 복합적인 시스템이 필수적으로 확보하여야 할 특성은 내화성능과 급냉파열방지능력이다. 여기서 내화성능은 「대규모 아트리움에 적용되는 수막형성 유리벽의 열적특성 및 내화성능에 관한 연구」(한국화재·소방학회 논문집 제13권 제4호)에서 도출된 결과에 따라 수막형성이 균일하게 이루어질 경우 ISO인정 벽체용 내화로에서도 표준가열온도곡선에 따라 가열할 경우, 2시간까지 파열되지 않았음을 제시하여 내화성능의 확보가 가능함을 제시하였다.

단, 내화성능과는 별개로 실제 화재시나리오에서 수막의 형성이 이루어지지 않은 상태에서 국부적으로 유리면을 가열할 경우 더워진 유리면에 상온의 수막형성용 물이 접촉함에 따라 급격한 온도의 저하로 인한 파열이 일어날 수 있다. 즉 실제화재시나리오를 가상하여보면 유리면에 인접한 화원에서 발생하는 복사열에 의해 유리면이 가열되고, 유리벽체면 상부에 설치된 감지시스템이 화재의 발생을 지각하여 수막형성 시스템을 작동시키는 것이 일반적이다. 그러므로 유리면에 수막이 형성되기 전에 유리면이 가열될 수 있는 가능성이 크다.

이런 가상시나리오를 고려하여 유리면의 온도범위가 어느 정도일 때 급냉파열이 일어나는 가를 조사하여 그 메커니즘을 규명할 필요가 있으며, 또한 급냉파열이 일어나는 시점의 유리표면온도를 정확히 조사하여 내화로에서 공식적인 내화성능시험을 수행하는데 필수적으로 확보하여야 할 요인이다.

2. 연구의 목적 및 목표

본연구는 수막형성 유리벽체의 인근에서 발생한 화원에서 방출되는 복사열에 의해 유리면이 가열된 상태에서 수막 접촉시 파열되는 현상을 고찰하기 위한 목적으로 수행

한다.

상기 목적을 달성하기 위해서는 본 연구에서는 내화성능의 획득이 가능한 최적의 수막형성시스템을 강화유리창문에 적용시켜 국부화원에 의한 복사열을 가하여 유리표면을 가열한 후 일정온도범위에서 수막을 형성시켜 급냉과열이 일어나는 범위를 규명하고 이를 근거로 향후 적용할 감지시스템의 감지시간의 설정에 활용하는 데 본 연구의 목표를 두며, 궁극적으로는 방화구획에 적용가능한 유리벽체시스템을 구축하는데 필요한 최적의 감지시스템의 개발에 활용하는 데 본 연구의 목표를 갖는다.

3. 국부가열에 의한 화재시나리오 고찰

3.1 화재시나리오 설정

건축물내의 개방감 있는 방화구획 벽체가 필요한 용도는 거실부내부나 피난계단실과 거실부가 만나는 샤프트구획벽(shaft compartmentation), 또는 쇼핑몰(shopping mall)등에서 통행로와 소매상점의 경계부를 이루는 쇼윈도우(show windows)이기 때문에 이 용도를 중심으로 화재시나리오를 가상설정하는 것이 타당하다. 이 중에서 가연물이 많고 직근에 위치한 용도인 쇼윈도우창에 설치되는 구획벽이야말로 가장 크리티칼(critical)한 시나리오를 설정가능하다.

상기 용도에서는 많은 가연물이 쇼윈도우창에 인접하여 있으므로 가장 극단적인 시나리오를 기준으로 실험하는 것이 안전성을 확보하는 방법이다. 이 경우 크게 화재시나리오의 설정 범위를 다음과 같이 크게 3가지로 요약 할 수 있다.

- (1) CASE 1 : 방화유리벽이 설치된 거실부의 중앙에서 어느 정도 이격되어 화원이 형성되는 경우
- (2) CASE 2 : 방화유리 벽이 설치된 거실부에서 벽체와 비교적 가까운 위치(약 0.5~1m 정도)에서 화원이 형성되는 경우
- (3) CASE 3 : 방화유리벽에 아주 가까운 곳(0.5m 이내)에서 화원이 형성되는 경우

3.2 화원의 규모설정

개방감 있는 방화구획 벽체가 사용 가능한 공간의 용도를 고려하면 500Kw에서 10 Mw의 큰 규모의 화재까지도 설정 가능하다. 그러나 국부가열에 의한 유리면의 파열을 일으킬 수 있는 화원의 규모는 인접하여 위치하고 있는 쇼파등의 가구나 상점에 전시품으로 내걸은 의류품등이 주종을 이루므로 유리면을 단시간내에 복사열을 줄수 있는 규모가 적정하다. 그러나 유리의 표면 온도변화와 수막접촉에 의한 파열 여부를 확인하기 위한 목적으로 실시하는 실험에서는 유리면의 온도를 올리는 것이 주목적이므로 Case3 과 같이 직근에 위치한 가연물이 연소하는 경우를 가정하는 것이 실제 발생가능한 화재 시나리오 중에 가장 크리티칼한 시나리오이다. 따라서 유리면 중앙부에 화원을 인접시켜 출화화염이 직접 유리면에 접촉하도록 함으로써 유리 표면온도를 단시간내에 파열 가능한 온도로 올리는 경우를 가장 최악의 조건으로 설정하였다.

4. 시험체 및 실험조건

4.1 시험체 구축방법

실험에 사용한 시험체는 규격 1m×1m 크기의 유리가 설치되는 유리벽체 프레임으로서 한쪽면에 수막형성을 하기 위한 수막시스템이 설치되어 유리면 전면에 균일한 수막을 형성하도록 하였다[그림 1].

- 유리재질 및 두께 : 강화유리 10mm
- 프레임 재질 : 강판 1.2mm
- 수막시스템 : SST PIPE ϕ 15mm 및 수막전용 플러드 노즐2개

4.2 출화방법

발화원으로는 풀팬을 이용하여 필요한 열량 및 발열속도에 적합한 액체 연료(저유황 경유 사용)를 배출할 수 있는 깊이 100mm인 사각 형태(바닥면적 0.36m²)의 철판으로 만든 팬을 사용하여 점화하는 방식을 사용하였다[그림 2]. 연료저장 탱크는 직경이 큰 파이프를 길게 잘라서 연료를 담을 수 있도록 하였으며 출화 후 시간별로 연료의 사용량을 측정할 수 있도록 추를 달아 추의 높낮이에 의해 연료사용량을 계측 할 수 있도록 제작하였다.

4.3 계측기기 구축방법

실험에 사용한 계측기는 유리면의 온도와 주위온도와 수막형성시간의 연관성을 측정하기 위해 필수적인 열전대와 열전대의 온도변화를 측정기록하기 위해 데이터 로거(data logger)를 사용하였다. 열전대 설치위치는 [그림 3]과 같이 유리면의 중앙부와 중앙부를 기점으로 상하 좌우면에 설치하여 유리면의 가열측 표면온도를 측정하도록 하였으며 유리면의 상부지점에 유리면에서 약 10cm의 이격거리를 두고 열전대를 설치하여 유리벽체 상부의 온도를 측정하도록 하였다.

- 열전대의 온도 감지범위 : -200 ~ 1370℃
- 열전대의 종류 : K타입(CA-크로멜-알루멜)

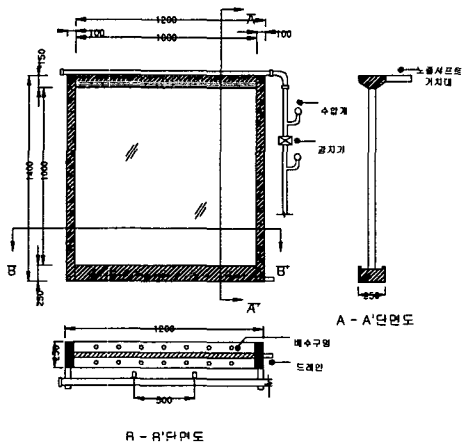


그림 1. 수막장치 설치 프레임

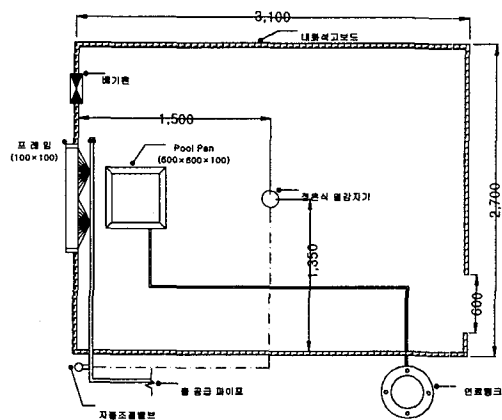


그림 2. 장치배치도

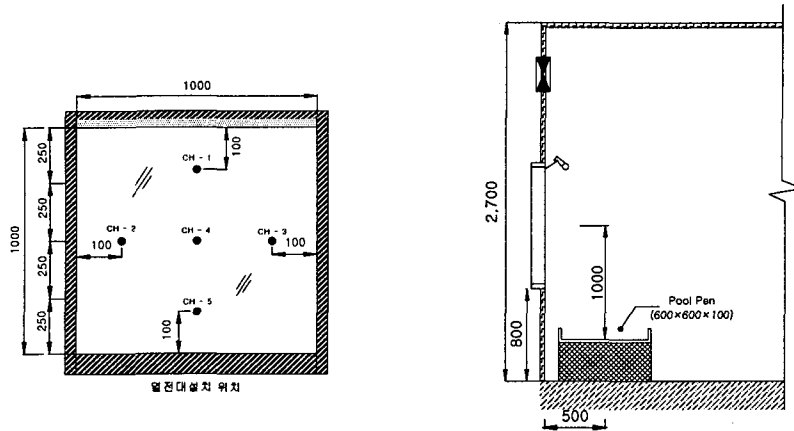


그림 3. 열전대 위치 및 장치단면도

- 데이터로거의 제원 : Tokyo Sokki Kenkyujo 社の TDS-601A

5. 실험방법 및 절차(Scheme)

실험진행 순서는 실험세부 목적에 따라 구분하여 실시하였다. 풀펜의 의하여 점화된 화원에서 발생하는 복사열을 이용하여 강화유리면의 표면온도를 상승시킨후 수동조작에 의해 수막을 형성시켜 유리면의 급냉과열발생여부를 검증하는 실험을 실시하였다. 이 실험은 강화유리와 일반유리를 구분하여 각각 파열이 되는 온도범위를 획득할 때까지 진행하였다. 마지막으로 급냉과열시험을 실시한 동일한 실의 천정부에 정온식 열감지기를 설치한후 수막시스템과 연동시켜 감지기연동에 의한 수막형성시스템이 동일한 화재시나리오시에 대응할 수 있는 대응시간감지시험을 실시하여 온도범위를 대비하였다.

표 1. 실험 scheme

실험명	사용유리	실험방법	비고
수막접촉실험-1	강화유리 10mm	유리면의 가열면온도가 100°C~300°C 범위내에서 50°C 구간별 수막접촉	
수막접촉실험-2	보통유리 6mm	유리면의 가열면온도가 50°C~150°C 범위내에서 수막접촉	
감지대응실험	강화유리 10mm	천정부감지기의 작동시 유리면의 가열면온도 계측	정온식감지기 (72°C 센서)



그림 4. 플랜에 의한 연소시스템



그림 5. 유리면의 온도측정용 열전대위치

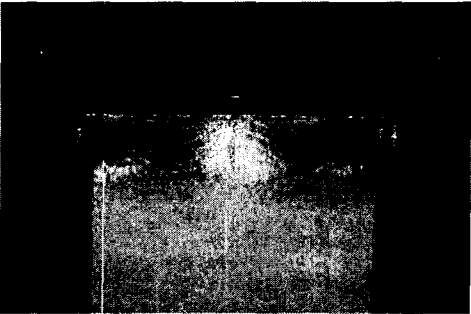


그림 6. 수막형성된 유리면 전경

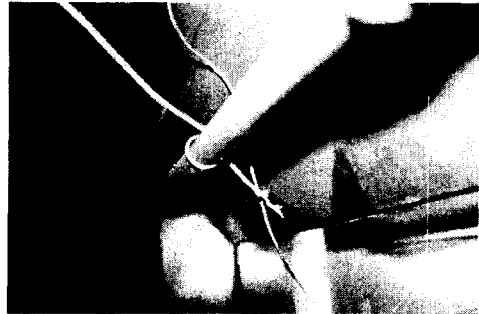


그림 7. 수막형성파이프라인 및 열전대

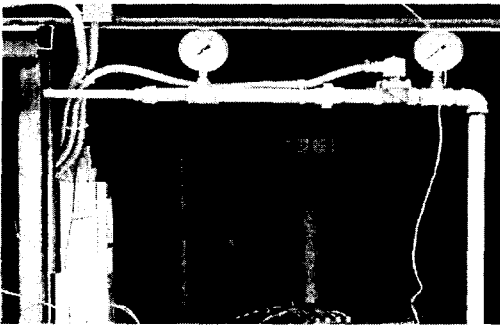


그림 8. 수막시스템용 수공급라인의 압력계



그림 8. 유리면 가열시험 내부전경

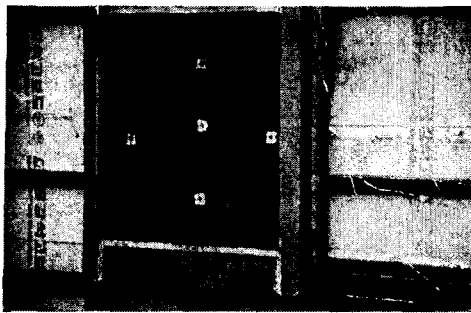


그림 9. 유리면 가열시험의 외부전경

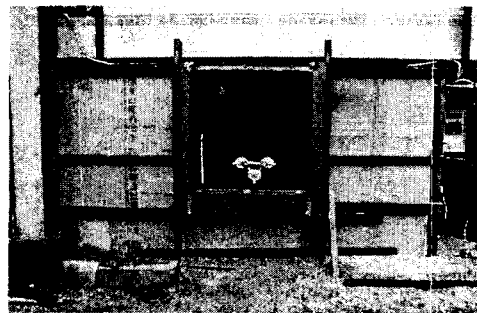


그림 10. 수막형성시스템 가동시의 외부전경

6. 실험결과 및 고찰

6.1 수막접촉실험-1

플펜에 의한 복사열을 줄 수 있는 화원을 만들어 유리면 가열측 표면온도가 최고 250℃에 도달하였을 시점까지 가열하였으며 이때 수동조작에 의하여 수유리면의 가열면에 수막을 형성하였다. 이 온도에서의 급냉파열은 발생하지 않았으며 수막 또한 단절 없이 균일하게 형성되었다. 즉 유리면 가열측 표면부의 50% 이상이 250℃를 상회하는 경우에도 유리의 파열이 일어나지 않았음을 보여 주었다. 따라서 유리면의 가열측 온도가 최소한 250℃ 이내 범위에서는 수막접촉에 의한 급냉파열현상은 일어나지 않음을 입증할 수 있었다.

그러나 유리면의 온도를 300℃ 이상 올린 후에 수막을 형성시킨 결과 수막의 접촉이 유리면에 일어나지 말자 순식간에 유리가 파열되었다. 유리면의 최고온도가 300℃를 넘는 때의 유리면상부 노즐파이프가 위치하고 있는 주위온도는 330℃을 나타내었다. 이때의 이면온도는 약 170℃ 정도로서 가열면과 이면과의 온도차이가 130℃를 나타내어도 유리의 파열은 발생하지 않았지만 수막접촉에 의해 급냉파열은 내외부 온도차이와는 별개로 발생함을 알 수 있었다. 따라서, 유리면의 가열면 표면온도가 300℃에 도달한 경우에는 수막이 접촉에 의한 급냉파열이 발생기 때문에 유리표면에 정상적인 수막형성이 불가능함을 확인 할 수 있었다.

결과적으로 유리면의 가열측 온도범위가 250℃ 이하일 경우에만 차가운 물의 유리표면 접촉에 의한 급냉파열은 발생하지 않음을 보여주고 있으므로 최소한 유리면 온도가 250℃까지 상승할 때까지 감지기 등의 연동에 의한 수막형성시스템이 작동할 경우 급냉에 의한 강화유리면 파열은 막을 수 있음을 확인하였다.

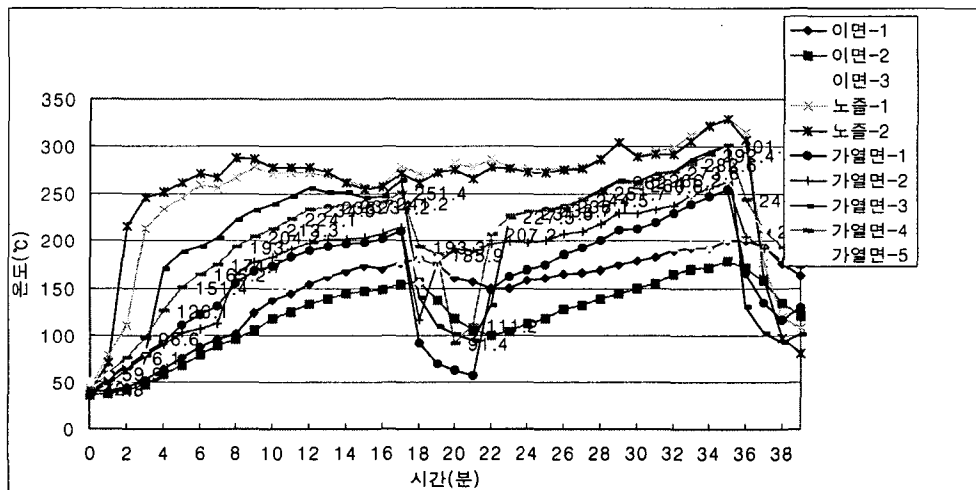


그림 11. 유리면 온도변화에 따른 급냉파열(강화유리)

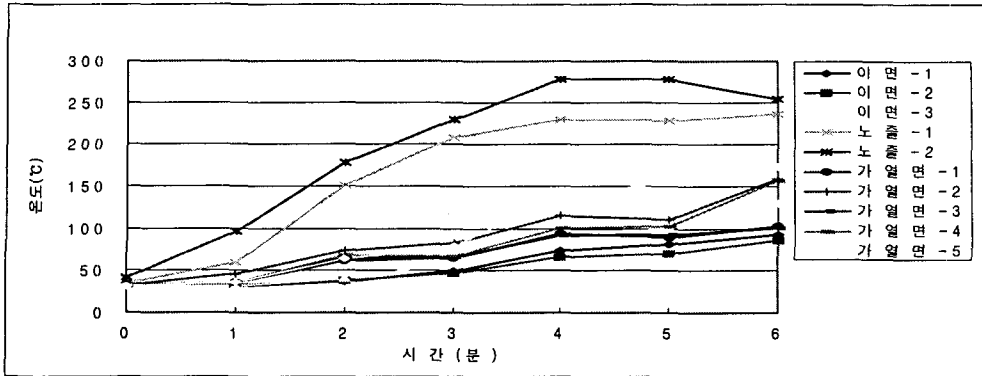


그림 12. 유리면 온도변화에 따른 급냉파열특성(보통유리)

6.2 수막접촉 실험-(2)

강화유리 대신에 보통유리(6mm)를 끼우로 급냉파열실험을 실시한 결과 유리면의 가열면 온도가 약 150°C 이상 올린 후 수막을 형성시키자 말자 강화유리처럼 일순간에 파열은 일어나지 않았지만 유리면의 가로방향으로 커다란 금이 가기 시작하였다. 비록 강화유리처럼 유리면 구성체가 무너져 내려 수막의 형성자체가 불가능하지는 않았지만 커다란 균열의 발생으로 인하여 수막의 형성이 되지 않는 상태가 발생하였다. 따라서 보통유리를 사용한 수막형성유리벽은 내화성능상의 문제 뿐 아니라 국부복사열에 의한 급냉파열 현상도 강화유리에 비하여 현저히 낮은 온도범위에서 발생함을 확인하였다.

6.3 감지대응실험

이번 실험은 앞의 수막접촉실험과는 달리 감지기에 의한 대응가능시간을 측정하기 위한 실험으로서 실약 1분 30초경이었으며, 이 시간까지의 유리표면온도의 변화는 거의 없었으나 1분30초를 지나면서 유리표면온도는 최고 70°C(ch4) 최저 28°C(ch3)를 나

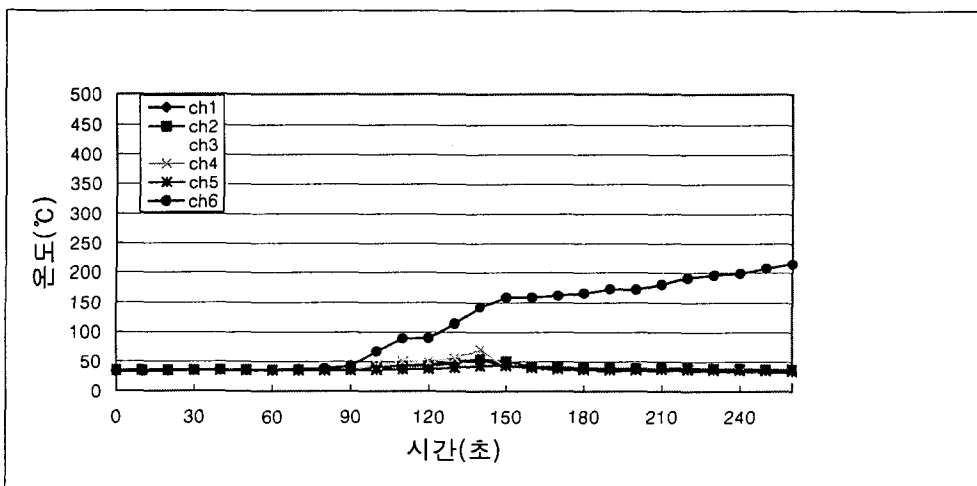


그림 13. 감지기의 대응시간 및 유리면온도변화

타내어 중앙부의 화염이 연기의 흐름방향(FAN 출구)으로 치우치면서 좌측부(ch4)의 유리면 표면 온도가 급격히 상승하여 2분 30초 경까지 상승하였다. 그러나 2분 30초경 화재실험실내 천정부 감지기가 작동하면서 작동 후 약 10초 내에 수막이 형성되었다. 그래서 유리면 온도는 40℃ 내외로 하강하였다. 이때의 유리벽체 프레임 상부(약 5cm 이격)의 공기온도는 150℃ 정도였으며 수막시스템이 가동한 후 계속 상승하여 4분경에서 200℃를 상회하였다.

따라서, 일반적인 열감지기를 실내에 사용하여 수막시스템과 연동하여 작동을 시킬 경우 2분 30초 내에 감지기가 정상적으로 감지하여 가동시킬 경우 유리면의 온도가 100℃ 이하인 조건일 때 수막이 형성됨을 보여 주었다

7. 결론

향후 건축물의 방화구획에 수막형성유리벽을 적용시 발생가능한 화재시나리오인 국부가열에 의한 수막접촉에 의한 급냉파열현상을 앞에서 고찰한 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 강화유리를 적용한 수방형성유리벽에서는 유리면 가열온도가 최대 250℃를 넘지 않는 범위에서는 상온의 온도를 갖는 수막의 접촉이 일어나도 급냉파열은 발생하지 않는다는 점을 확인하였으며 다시 말하면 250℃를 초과하는 온도범위에서는 급냉파열은 발생할 가능성이 크다는 사실을 입증하였다.

2) 일반유리를 적용하는 유리창인 경우에는 유리면 가열면온도가 150℃ 정도에서 급냉파열이 발생하기 때문에 소형창에서도 보통유리의 사용은 안전성을 보장할 수 없다는 결론에 도달하였다.

3) 따라서 감지기의 대응시간을 설명하면 대응시간이 가장 늦은 정온식 열감지기에 의한 대응시간이 약 2분 30초인 점을 감안할 때 유리면의 표면온도는 150℃를 넘지 않을 것으로 판단되어 감지기 연동에 의한 시스템구성을 하여도 국복사열에 의한 급냉파열은 일어나지 않음을 예측가능하다.

참고문헌

1. Kumar S. and Cox G., Effect of Radiation on the Fluid Dynamics of Compartment Fires. In Proc. 3rd International Symposium on the Fire Safety Science, Edinburgh, Scotland, p. 345, (1991)
2. Kumar S. and Yehia M., Mathematical Modelling of Transient Ceiling Characteristics in Fires. In Proc. 1st ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference and 12th National Heat and Mass Transfer Conference, Bhabha Atomic Research Centre, Bombay, India, p. 771, (1994)
3. The National Building Code of Canada Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, (1985)

4. "Fire Resisting Glazing - Clear Borosilicate Glass" FPA Information Sheet B17 Fire Protection Association, London, January, (1985)
5. Malcomson R.W., "Report on Window Sprinkler Systems," Underwriters Laboratories Inc, Report No. NC529, Northbrook, IL, (July 1969)
6. Moulen, A. W., and Grubits. S. J., "Water Curtains to Shield Glass from Radiant Heat from Building Fires." Technical Record 44/153/422, Experimental Building Station, Department of Housing and Construction, Australia, (July 1975)
7. Moulen, A. W. and Grubits, S. T., "Water Drenching of Tempered Glass Used to Attenuate Radiant Heat", Technical Record 498, Experimental Building Station, Department of Housing and Construction, Australia, (July 1983)
8. Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials (CAN4-S101-M82), Underwriters' Laboratories of Canada, Toronto, (December 1982)
9. Law, M., "Safe Distances from Wired Glass Screening a Fire", I.F.e. Quarterly, Vol.29, No.73, pp. 62-70, (March 1969)
10. McGuire, J. H., "Ignition of Materials behind Common 1/8-inch Thick Window Glass", Technical Note 456, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Ottawa, (September 1965)
11. "Fire-resisting glazing-clear borosilicate glass", FPA Information Sheet B17, Fire Protection Association, London, U.K, (January 1985)
12. Richardson, J. K. and Oleszkiewicz, I., "Fire Test on Window Assemblies Protected by Automatic Sprinklers", Fire Technology, 23, 2, pp. 115-132, (1987)
13. Beason, D., "Fire Endurance of Sprinklered Glass Walls", Fire Journal, pp. 43-45, (July 1986)
14. 조중달, "유리블럭벽의 내화성능에 대한 고찰", 방재기술 제7호.
15. 김화중, "방화 구획과 수막 설비", 한국화재학회지 4권 2호 /통권 제9호, (1996. 6)
16. 김동석, "속동형 스프링클러를 중심으로 한 NFPA 설치기준 변화", 방재기술 제22호.
17. 박형주, 지남용 ; "대규모 아트리움에 적용되는 수막형성 유리벽의 열적 특성 및 내화성능에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문, (1999. 10)
18. 松藤泰典編, "新建築學シリーズ4(建築材料・材料設計)", 朝倉書店, (1998. 3)
19. 池内清治, "ガラス素材の種類と特性", 建築技術 第550号, pp. 56-67, (1996. 1)
20. 高橋一郎, "機能性とデザイン性に優れたガラスの安全區劃", 建築技術 第569号, pp. 195-201, (1997. 8)