

## 스프링클러설비에 의한 연기제어효과 고찰

차 중 호, 윤 명 오\*, 최 춘 배\*\*, 이 선 경\*\*\*

(주)건원엔지니어링 소방사업팀, \*서울시립대학교 도시방재연구소,

\*\* (주)건일엠이씨, \*\*\* (주)용도엔지니어링 방재연구팀

### A Brief Study on Smoke Suppression Effects by Sprinkler Spray System

Jongho Cha, Myung O Yoon\*, Chun Bae Choi\*\*, Sun Kyung Lee\*\*\*

Professional Engineer, Kunwon Engineering Co., Ltd.

\*Professor, Ph.D, University of Seoul

\*\*Professional Engineer, Kunil M.E.C Co., Ltd.

\*\*\*Professional Engineer, Ungdo Engineering Co., Ltd

**ABSTRACT:** 스프링클러설비는 능동적 소화시스템 중 가장 효과적이며 신뢰성이 높은 시스템이다. 또한 스프링클러설비를 설치함으로써 방화구획을 완화할 수 있으며, 특별피난계단의 부속실 및 비상용승강기의 승강장의 급기가압시스템에서 차압을 12.5Pa(스프링클러설비가 설치되지 않은 경우 25Pa)으로 할 수 있으므로 경제적인면도 고려되어질 수 있다.

이에 관한 보다 상세한 내용을 별도의 논문으로 다룰 것이다.

Sprinkler system is the most effective fire suppression with high confidence among active fire extinguishing systems. According to the installation of the related system on buildings, more separation area of fire protection can be considered to the fire protection design, and also lower differential pressure (12.5 Pascal) is permitted on lobby of fire escape stairs and emergency elevator (25 Pascal shall be considered for none sprinkler system) with economic factor. More details will be handled on the related studies.

### 1. 개요

스프링클러설비를 이용한 화재의 억제에는 고층 건물의 재관자의 인명을 지키는데 매우 효과적이다. 스프링클러설비는 방출하는 물이 화재구획의 연기높이를 내리게 하는 점에서는 부적절하지만, 연기를 냉각하거나 화재의 사이즈를 줄일 수가 있어 스프링클러설비가 없는 경우보다는 구획 내의 사람이 장시간 그곳에 머무를 수 있도록 하는 효과가 있다. 스프링클러설비는 화염가스를 냉각하고 화염의 크기와 연기를 줄이므로 연기제어의 유효한 수법으로 생각해도 좋다.

국내에서 스프링클러설비가 설치되지 않은 경우 최소차압을 40Pa, 스프링클러설비가 설치된 경우의 최소차압을 12.5Pa로 정하였으나 이에 대한 구체적인 내용이 밝혀진 바가 없으므로 스프링클러 설치여부에 따른 설계 압력차를 정리하고자 한다.

### 2. 스프링클러설비에 의한 연기제어효과

#### 2-1 차단된 화염 실험

불이 무언가에 뒤덮여져 있어 스프링클러의

살수가 도달하지 않는 화염을 '차단된 화염' 이라고 한다.

Mawhinney와 Tamura는 스프링클러의 살수가 있으면서 화염이 무언가로 차단될 화염의 실험을 NRCC의 실내화재 실험시설에서 이루어졌다. 화재가 차단될 가능성이 있는 장소의 한 예로 파일 수납을 위한 소형가동 유닛이나 책상, 테이블 밑, 의장 케이스 등을 생각 할 수 있다.

실험은 압력, 온도, 가스분석장치를 장비하였다. 스프링클러설비가 있는 1층건물의 실험실에서 이루어졌다. 스프링클러설비로 살수한 화염에서의 방열량은 연소생성물 수집기를 이용하여 측정하였다(산소측열법) 화염이 장기간 지속하도록 건조한 스트로브 소나무 545kg으로 만든 목재 클립을 사용하고, 스프링클러설비의 물이 클립 안으로 살포되는 것을 막기 위하여 제일 위쪽 열에는 다른 열의 두 배가 되는 재목을 사용하여 완전하게 차폐하고, 또 그 위를 합판으로 덮었다. 실험은 화재타워(10층 건물)의 7층에서도 이루어졌다. 이 경우 목재클리브는 1층 건물의 실험실에서 사용한 것의 약 반 정도의 크기의 것으로 하였다.

이 실험에서 화재 시의 온도, 압력, 산소, 이산화탄소, 일산화탄소의 레벨, 존 연기제어시스템의 성능에 주는 스프링클러설비의 영향을 조사하였다.

## 2-2 차폐된 화염에서의 방열량

실험결과에 의하면 스프링클러설비는 차폐된 화염이라도 방열량을 매우 감소시킨다는 것을 알았다. 1층 건물의 실험에서 사용한 차폐된 클리브의 방열량은 주로 ① 클리브의 크기 ② 환기량 ③ 스프링클러의 살수밀도 라는 세가지 요인으로 결정된다. 산소측열법에 따라 연소과정에서 소비되는 산소량을 측정하고 그것을 토대로 방열량을 계산하였다. 칼로리미터에 의한 측정결과와 클리브의 질량변화에서 얻은 연소열량의 관계를 구하였다.

실험은 스프링클러설비가 없는 것, 화염차폐가 있는 것, 화염차폐가 없는 것의 3가지에 대해서 하였다.

스프링클러설비가 없는 실험을 1층 건물의 실

에서 하면 환기를 0.472m<sup>3</sup>/s로 제한한 조건 하에서조차 클리브의 연소는 2,000kW 이상의 방열량에 달하였다. 그리고 환기량을 0.71m<sup>3</sup>/s로 증가시키면 방열량은 3,000kW로 늘어났다.

10종류의 차폐 클리브의 실험을 하여, 살수밀도를 늘리면 화염강도가 감소하는 것을 찾아내었다. 살수밀도를 4.91ℓ/min.m<sup>2</sup> 이라고 하면 화염 방열량은 스프링클러설비가 없을 경우의 약 50%까지 감소하였다. 살수밀도가 4.91ℓ/min.m<sup>2</sup> 보다 낮게 되면 화염의 제어는 한계에 달하였다. 이하에서는 화염의 제어가 불충분하게 되고, 살수 밀도에 하한이 존재한다는 것을 알았다. 살수 밀도를 스프링클러설비 기준인 NFPA13이 요구하고 있는 최소한의 수치보다 크게 하면 자연 진화된다. 화재를 간신히 제어할 수 있을 정도의 낮은 살수밀도일 때, 화염으로의 환기량을 늘리면 방열량이 증가하였다. 그러나 살수밀도가 높고 화염이 충분히 억제되어 있으면 환기량을 늘려도 그다지 불은 강해지지 않았다.

스프링클러설비의 효과, 환기량, 화염강도의 관계는 살수 되어 있는 화염이나 차폐되어 있는 화염이 화염층으로 유입하는 신선한 공기와 어떻게 대응할 것인가라는 것과 밀접하게 관계한다.

NFPA13은 스프링클러설비 시스템이 화염의 크기를 제한하고 방열량을 감소시켜, 천정의 온도를 제어할 수 있을 때에 화재억제가 달성되었다고 간주하고 있다. 이 기준에서는 위험도가 낮은 건물용도의 스프링클러설비 시스템에서는 4.1ℓ/min.m<sup>2</sup> 라는 살수밀도를 권장하고 있다. 실제의 살수밀도가 4.941ℓ/min.m<sup>2</sup> 이상이 되면 화염은 억제된다. 가연물이 25kg/m<sup>2</sup>이내의 위험도가 낮은 건물용도의 경우, 차폐된 화염에 의한 방열량은 500kW 이상이 되지 않을 것이다. 가연물이 58kg/m<sup>2</sup>정도로 많고 설계 살수 밀도보다 살수량이 적은 경우에는 1,000kW 나 미치는 강력하고 계속적인 방열량이 되는 일도 있다.

Morgan 과 Hansel 가 하였던 스프링클러가 있는 화재에 관한 통계적 조사에 의하면 스프링클러설비가 설치된 오피스빌딩에 화염강도는 300~3,000kW의 범위이고 대부분은 작은쪽으로 집중되고 있는 것을 알 수 있다.

실제실험에서 '차폐된 화염에서의 방열량은 30

0~1,000kW 이다'라고 추정되었다. 이 실험에서 사용한 목재 클리브는 이상적인 연소를 하도록 설치되어 있어 스프링클러설비에 의한 살수가 있는 경우의 화재로서는 필시 최대의 것일 것이다.

차폐되어 있지 않은 화염의 스프링클러설비 실험은 스프링클러설비가 소화에 유효하다는 것을 나타내었다. 그러나, 차폐된 화염의 스프링클러설비 실험에 의하면 화염은 억제되지만 대량의 연기를 발생하고 연기제어시스템이 없으면 연기가 세로 샤프트나 상층까지 확산해 버린다는 것을 알았다.

### 2-3 주위로의 열류

스프링클러설비가 화염강도를 억제하는 메카니즘의 하나는 화재구획 내의 방사열에너지를 감소시키는 것이다. 스프링클러설비가 없는 화염에서는 화염이나 실의 상부에 성장하는 고온가스층에서 열이 방사된다. 이 방사열은 주위벽으로 반사하여 다시 화원으로 돌아가 연소를 가속한다. 이 열류가 어느 정도 이상이 되면 가연성 물질이 발화하거나 창문과 같은 약한 부위가 파괴되거나 한다.

Alpert 와 Ward 의 보고에 의하면 20kW/m<sup>2</sup>의 방사열이 있고 게다가 조그마한 화원이라도 있으면 대개의 가연성물질은 수분 이내로 발화한다. 어떤 플라스틱은 더욱 방사열의 레벨이 낮아도 발화한다. 보통 유리는 고온가스층의 10kW/m<sup>2</sup>의 열류로 수분 이내로 깨지고, 40kW/m<sup>2</sup>에서는 1분 이내로 깨진다. 열강화유리나 내열유리는 43kW/m<sup>2</sup>의 정상적인 방사열에 견딜 수 있지만 이 상태에서 물이 뿌려지면 유리는 산산조각이 된다. 따라서, 화재구획의 방사열에너지의 강도를 줄이는 것은 중요하다. 스프링클러설비가 없는 경우, 화재의 방사열은 목재 클리브에서 2m 떨어진 위치 및 천정높이 1/2의 높이에서 약 12.5kW/m<sup>2</sup>였다. (단, 이것은 재료를 즉시 발화시킬 만큼 충분한 열류는 아니다.) 스프링클러의 살수가 있으면 벽으로의 방사열 에너지는 65%이상 감소하고, 방사열은 4.8kW/m<sup>2</sup>이하가 되었다. 열류를 줄이는 효과가 현저한 것은 살수밀도 3.7ℓ/min.m<sup>2</sup>가 화염의 발열량을 억제하는데 필요한 4.5 ℓ/min.m<sup>2</sup> 보다 작다는 것은 흥미롭다. 다시 말해,

'스프링클러의 살수는 가연물의 연소를 억제하는 작용보다도 방사열을 해(害)가 없는 레벨로 억제하는 작용쪽이 크다' 라는 것이다.

스프링클러설비가 창문유리의 파괴를 줄이는 작용을 지닌 것은 연기제어시스템의 설계에 중요한 관계가 있다. 창문이 깨지고, 화재층의 외벽에 큰 개구가 생기면 화재층은 외부압력에 직접 노출되고, 바람과 연돌효과에 의해 화재층, 세로샤프트 벽에 상태가 안 좋은 압력차가 생긴다. 또한, 화재층의 외벽에 생긴 큰 개구에서 외벽을 따라 화염이 위로 퍼지고 층에서 층으로 잇달아 연소할 우려가 있다.

### 2-4 증기의 급격한 팽창

차폐된 화염에 관한 문제의 한 가지는 화재의 초기단계에서 물을 고온가스에 스프레이 하기 때문에 증발에 의한 급격한 압력상승이 일어날 가능성이 있다는 것이다. 그러나, 스프링클러설비가 작동하는 보통상황에서는 스프링클러설비는 화염에서 상승하는 고온가스에 의해 작동하므로 기체는 대량의 물을 순간적으로 증발시킬 만큼 뜨겁지 않다. 실험에서 얻어진 압력차 ΔP와 시간과의 관계를 그래프로 나타내보면 스프링클러설비의 기동에 의해 연소생성물의 온도가 갑자기 내려가고, 압력도 바로 저하하였다. 그 압력저하는 스프링클러설비의 소량의 물이 급속하게 증발하여 생긴 압력상승을 상쇄하는데 충분하였다. 이와 같이 증기의 급속한 팽창으로 생기는 압력증가는 연기제어시스템의 설계에 있어서 무시해도 좋다.

### 2-5 가스농도에 미치는 스프링클러설비의 효과

스프링클러설비가 없는 경우에는 화재가 확대하여 장시간 계속되기 때문에 산소의 소비량도 많아 일산화탄소나 이산화탄소의 생성량이 상당히 많아진다.

화재실험 타워의 화재층(7층)의 차폐된 화염에서의 가스농도는 산소 : 17%이산화탄소 : 9%, 일산화탄소 : 10,000~15,000ppm이었다. 이와 같이 스프링클러의 살수를 동반하는 차폐된 화염은 엄청난 고농도의 일산화탄소를 계속 생성하였다. 이것은 환기가 제한되고 충분한 양의 가연물이

공급되는 화염일 때에 자주 있는 것이다. 환기를 지배하는 화염은 1시간 이상에 걸쳐 불완전연소하고 일산화탄소가 높은 다량의 연기를 발생한다. 차폐된 화염도 동일한 높이레벨의 일산화탄소, 이산화탄소를 생성하였다. 통계적으로 보면, 스프링클러설비가 설치된 건물의 경우, '화염이 열을 계속해서 조금씩 방출한다' 라는 상황은 오피스빌딩에서 일어나기 쉽다.

이와 같은 화재는 가연물에 스프링클러설비의 살수가 직접 가하지 않고, 완전한 소화를 할 수 없을 때에 일어난다. 스프링클러설비는 가스의 온도를 저하시켜 화염주위의 가연물을 적셔 차폐된 범위에서 불이 확대되는 것을 막는다.

불은 완전히 다 타던가 아니면 소화되기까지 차갑고 축축한 상태로 계속 탄다. 단, 불완전연소가 되기 때문에 연소생성물은 고농도의 일산화탄소를 포함한다. 이와 같이 장시간 계속 차폐된 화염에서 발생하는 연기는 소중한 생명을 위협하게 한다.

## 2-6 연기의 확산

차폐되지 않은 목재 클리브를 이용한 실험에서 화재는 바로 소화되었다.

소량의 연기가 존 사이의 틈새를 통하여 화재층에서 상층으로 확산하고 문이 열려있는 경우는 계단에도 확산하였다. 단시간 화재에서 발생한 연기의 전체양은 적고, 화재층 이외에서는 온도나 가스농도가 위험한 수준으로는 이르지 않았다. 차폐되지 않은 화염의 경우에는 다른 연기제어시스템이 없어도 스프링클러설비가 연기제어의 수단으로서 유효하게 작용하였다.

살수의 차폐가 있는 목재 클리브를 이용한 실험에서 연기의 중대한 문제가 지적되었다. 목재 클리브의 연소가 지연되기 때문에 대량의 연기가 발생하고 연기는 일산화탄소를 다량으로 포함하여 매우 위험하였다. 연기는 틈새에서 화재층의 상층으로 번지고 문이 열려 있으면 계단으로 번졌다. 계단은 문이 열리고 몇 분 만에 연기로 가득 채워져 완전하게 시야를 잃게 되고 온도도 65℃를 넘었다. 이 상태에서 생명의 안전은 유지할 수 없다. 소화활동 중과 같이 화재층으로 향해 문이 열리면 화재층에 연기를 몰아 넣을 수

있는 방책이 없는 한 연기는 건물 중으로 특히 계단으로 확산한다.

## 3. 필요한 압력차의 달성

기계에 의한 연기제어시스템은 연돌효과, 바람의 작용, 화염에서 발생하는 연기의 부력 등에 따라 적정 또한 최소의 압력차를 유지하도록 요구된다. 또한, 이 시스템은 고온가스가 열팽창에서 발생하는 압력이나 엘리베이터의 이동에 의한 피스톤효과에서 발생하는 압력에도 대응하지 않으면 안된다. 단, 이 압력은 단시간밖에 작용하지 않기 때문에 이 영향으로 방호해야 할 공간으로 유입한 연기는 대부분의 경우 희석 공기에 의해 처리할 수 있다.

### 3-1 필요한 최소 압력차

기계연기제어시스템을 유지해야 하는 필요한 최소압력차는 계단이나 엘리베이터 샤프트 등의 모든 문이 닫힌 상태에서 화재층의 세로샤프트 구획벽에 발생하는 압력차로 결정된다. 만일, 연기제어시스템이 세로샤프트로 고온가스가 유입하는 것을 막기만 한다면 화재의 부력에서 발생하는 압력차는 화재층의 어느 위치라도 동일하므로 필요한 최소 압력차는 층에 의한 차이는 없다. 그러나, 다량의 고온가스가 세로샤프트로 들어가 샤프트가 가열되어 연돌과 같게 된다면 필요최소 압력차는 1층에서 발생한다.

겨울철에 연돌효과에서 발생하는 압력을 고려한 필요최소 압력차는 외벽에 큰 개구가 생기는 1층의 압력이다. 한편, 화재층의 바람이 불어오는 쪽 외벽에 큰 개구가 있으면 바람 작용에 의해 발생하는 압력 때문에 필요최소 압력차는 화재층보다 위층의 바람에 직면하는 층에서 발생한다. 스프링클러설비를 완비한 건물에서 화재층의 유리창문이 깨져 외벽에 큰 개구가 생길 가능성이 낮고, 연돌효과나 바람의 작용에서 발생하는 압력의 영향은 적기 때문에 필요한 최소 압력차는 상당히 작다.

### 설계압력차 [Pa]

설계압력차(Pa)= 화재압력+연돌효과압력+바람작용압력			
건물화재	연돌효과	바람	NFPA 92A*
스프링클러설비가 없을시			
14.9	$\delta P_s^+$	$C_p P_v^{**}$	25
스프링클러설비가 있을시			
7.5	$(1-\gamma)\delta P_s^{**}$	0	12.5
* 참고문헌 천정고 3.5m			
* 겨울철 1층(화재층)의 연돌효과			
** 설계풍속하의 풍압 천정고 2.74m			
# 스프링클러설비가 작동된 화재			
** 1층(화재층), 겨울철 설계온도에서 층 외벽이 파손될 시의 연돌효과로 인한 압력차 ( 추정치 $\gamma = 0.8$ )			

스프링클러설비가 있으면 창유리가 깨지기 어렵게 되고 화재층이 외부의 압력에 노출되는 일이 적다. 화재층의 외피(외장)가 파괴되지 않으면 연직방향의 연기유동에 대한 바람의 영향은 거의 없다. 표준적인 열 드래프트 계수  $\gamma$ 를 0.8 이라고 한다면 세로샤프트의 벽의 압력차는 연돌효과에 의해 생기는 압력차에 대해 불과 20%정도 밖에 되지 않는다. 한편, 건물에 스프링클러설비가 없으면 유리창문은 필시 Flashover 에 의해 깨진다. 바람이 불어오는 쪽의 외벽에 큰개구가 생기면 연기는 풍압에 의해 세로샤프트나 상층으로 흘러간다. 더욱이 세로샤프트의 벽은 연돌효과에 의한 압력차에 정면으로 노출되며 이 상태에서는 화재층의 열 드래프트 계수가 대체로 0이 된다.

### 3-2 연돌효과

연돌효과에 의한 압력차의 산정은 북 아메리카 각 도시나 세계주요도시에서 동기.하기의 HVAC 시스템 설계용 온도 데이터(ASHRAE 편람기초편) 을 이용할 수 있다.

각 지점에 2종류의 빈도레벨이 주어져 있지만 이것들은 겨울철·여름철의 적산시간에 대한 99%이상, 또는 97.5% 이하의 빈도로 대응하는 온도이다. 단, 캐나다의 겨울철 설계치는 가장 추운 1월의 데이터만 기초로 하고 있다.

### 3-3 바람의 작용

ASHRAE 편람의 기초편에는 97.5% 기준의 겨울철 설계온도로 동시에 발생하는 탁월풍(일정기간의 바람을 평균해 볼 때 특정 풍향의 출현빈도가 높은 바람, 우세풍이라고도 한다) 의 풍향과 평균속도에 대해서 기록되어 있다. 바람의 작용이 연기확산에 미치는 영향은 유리창문의 파손으로 생기는 개구의 장소와 풍향에 따라 유리하게 되기도 불리하게 되기도 한다. 화재층의 외벽에 큰 개구가 생기지 않으면 바람의 영향은 작다. 바람의 작용은 팬의 성능에도 풍향과 팬의 방향에도 관계한다. ASHRAE의 매뉴얼은 연기관리시스템을 바람의 영향이 최소로 되도록 설계해야 한다고 서술하고 있다.

### 4. 결론

- 1) 스프링클러설비는 연기제어효과에 중요한 역할을 한다.
- 2) 즉 스프링클러설비가 설치됨으로서 화재실의 압력, 연돌효과 및 바람에 의한 압력차를 줄여줌으로서 연기의 제어에 효과적이다.
- 3) 또한, 현재 국내에서 스프링클러설비가 설치되지 않은 경우 40Pa로 NFPA92A(25Pa)에 비해 과도하므로 화재시 안전성과 경제성을 고려하여 적절한 설계압력차를 실험을 통해 재설정이 요구된다.
- 4) 국내에서 차압의 기준치에 대해 의견이 통일되지 못하고 있으나 여기서 제시된 설계압력치는 이미 화재실의 압력상승까지 고려된 값으로 화재실의 압력치는 아니다. 그러나 여러 가지 조건을 고려하여 (외기온도 등) 기준치가 설정되어야 한다.

본 자료에서 언급된 상기 내용은 별도의 논문으로 추후 상세히 다룰 것이다.

### 참고문헌

1. Klote, J.H., "Fire Experiments of Zoned Smoke Control at the Plaza Hotel in Washington, DC," ASHRAE Transaction,

- 96(2), 1990, pp.399 ~ 416
2. Mawhinney, JR, and Tamura, G.T "The Effect of Automatic sprinkler Protection on Smoke Control Systems," ASHRAE Transaction, 100(1), 1994, pp.494 ~ 513
  3. Lougheed, G.D., Mawhinney, J.R and O'Neill, J., "full-scale Tests and the Development of Design criteria for Sprinkler protection of Mobil Shelving Units," Fire Technology, vol. 30, No.1 , 1994, pp.98 ~ 133
  4. Morgan, H.P., and Hansell, G.O., : Fire Sizes and Sprinkler Effectiveness in Offices - Implication for Smoke Control Design,"Fire Safety Journal, vol.2, No.2, Apr., may, June 1990, pp 49 ~ 59
  5. Alpert, R.L., "Calculated Interaction of Sprays with Large Scale Buoyant Flows," Journal of Heat Transfer, Vol. 106 , No.2, May 1984, pp.310 ~ 317
  6. Walton, W.D., "Suppression of Wood Crib Fires With Sprinklers and Technology, Gaithersburg,MD.
  7. NFPA 92A, Recommend Practice for Smoke-Control System, National Fire Protection Association, Quincy, MA,1993.