

스프링클러와 배연설비의 통합작동이 수평통로의 연기제어에 미치는 영향

The Effect of the Combined Operation of Sprinkler and Vent Systems on the Smoke Control in a Horizontal Corridor

전홍균[†] · 최영상 · 추홍록 · 장준영*

Heung-Kyun Jeon[†] · Young-Sang Choi · Hong-Lok Choo · Jun-Young Jang*

대구보건대학 소방안전관리과, *대구보건대학 안전디자인과
(2004. 12. 13. 접수/2005. 2. 14. 채택)

요 약

수평통로의 천장 아래로 확산되는 연기의 냉각 및 차단을 위해 설치한 스프링클러와 배연설비의 통합작동이 유동장의 온도 및 연기밀도 분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 20.0 m×4.0 m×3.0 m 크기의 공간에 대해 전산유체역학 프로그램(FDS 4.0.3)의 화재모의실험을 수행하였다. 연기의 냉각 및 차단효과는 스프링클러와 배연설비의 통합작동이 단독작동 보다 더 우수한 것으로 확인되었고, 천장에 설치되는 스프링클러헤드는 천장 길이방향으로의 모서리 효과에 의해 작동 헤드수는 2개로 제한되었으며, 적정 헤드수를 초과한 헤드설치는 오히려 연기냉각 및 차단 효과를 저하시키는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 2개의 헤드설치와 3.0 m³/s의 배연량인 경우 연기의 냉각 및 차단효과가 가장 좋았다. 헤드 작동시 연기 하향끌림 현상이 발생하며, 화재크기의 증가로 연기발생량이 배연량 보다 큰 경우에는 연기 하향끌림 현상이 훨씬 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Fire scenarios in a space 20.0 m × 4.0 m floor and 3.0 m high were simulated by using computational fluid dynamics program (FDS 4.0.3) to investigate the effect of the combined operation of both sprinkler and vent systems, which are installed for cooling and blocking smoke which propagates beneath the ceiling of a horizontal corridor, on the temperature and smoke density of it. It was shown that the combined operation both sprinkler and vent systems was more effective than each operation for cooling and blocking smoke, the number of operating sprinklers was two because of corner effect of wall, and over-installed sprinklers deteriorated the effect of cooling and blocking smoke. This study showed that the case of two sprinklers and vent flow rate 3.0 m³/s in fire scenario was the most effective for cooling and blocking smoke. It was confirmed that the smoke downdrag occurs in operating sprinkler system, and the more smoke droplets produced by increasing fire size, the greater smoke downdrag occurred.

Keywords : Computational fluid dynamics program(FDS 4.0.3), Sprinkler and vent systems, Combined operation, Corner effect, Smoke downdrag

1. 서 론

2003년 2월 18일 대구시 중앙로 역사 지하철 화재 사고는 전동차 실내의 FRP 천장 및 벽면, PVC바닥, 우레탄폼 의자쿠션, 폴리에틸렌 단열재 등의 난연재의 연소로 인해 연기, 가연성 가스, 일산화탄소(CO) 및 유

독가스인 시안화수소(HCN)의 발생량이 매우 많았고, 화재 발생당시 지하철 역사의 환기시스템이 배기방식으로 전환되지 않고 급기방식으로 운전하여 대형 개구부가 있는 장소에서 신속히 연기를 배출시키지 못하였으며, 연기의 이동방향과 피난방향이 같아 연기질식으로 인한 피난자의 인명피해를 더욱 크게 하였다.¹⁾

화재시 연기의 확산은 내부 거실자의 피난시 시야 확보의 약화와 독성가스의 위험을 초래하여 화염의 직접

[†] E-mail: jeonhk@mail.dhc.ac.kr

적인 접촉에 의한 피해보다 더 많은 인명피해를 초래한다. 따라서 화재시 연기에 의한 피해를 줄이기 위해 연기제어 기술에 많은 관심과 연구가 이루어지고 있는 실정이다.

NFPA 204 연기 및 열의 배기 기준에 의하면 스프링클러가 설치된 건물내 연기 및 열 제거는 성능분석(performance analysis)에 기초하도록 권장하고 있다.

배연(vent) 설비는 화재구역에서 진압활동을 하는 소방대원의 안전을 제공하고 화재진압 후 소방대원에 의한 제연작업을 용이하도록 함과 동시에 피난 대피시 재실자가 안전하게 피난할 수 있도록 피난로의 확보와 연기호흡에 의한 독성위험을 감소시키는데 설치의 목적을 두고 있다.

또 일반적으로 위협제어(재산보호, 인명안전)를 위해 스프링클러설비와 배연설비 및 커튼막(curtain boards)의 통합사용에 대한 설계기초는 현재에는 이용하지 않고 있으나, 향후 자동스프링클러설비와 배연설비를 함께 사용하는 것에 대한 이점과 영향을 분석하기 위해 연구가 진행 중에 있다.

과거에는 스프링클러설비가 설치된 방호구역에서 자동 천장배연설비, draft curtains설비 또는 두 가지 설비를 함께 사용하는 것은 스프링클러설비의 성능에 이롭지 않을 수 있다고 알려졌다.

그러나 근래에는 스프링클러설비와 배연설비의 통합기능에 대한 실험을 통해 스프링클러설비의 성능에 미치는 배연구 또는 draft curtains의 영향에 대해 주로 연구가 수행되어져 왔다.

최근에는 McGrattan(1998)은 plastic 적재물과 heptane spray 화재시 스프링클러설비와 천장 배연설비 및 draft curtains의 상호작용에 대해 연구를 수행한 결과, 화재가 배연구 바로 아래에 있지 않은 경우 배연작용은 스프링클러헤드작동에 영향을 미치지 않는다고 하였으며, 또한 draft curtains이 설치된 경우 스프링클러헤드 작동수가 증가한다고 보고하였다.

이러한 연구 결과를 바탕으로 스프링클러설비가 설치된 방호구역에서 자동 배연설비와 draft curtains의 통합 사용에 대해서는 아직도 검토가 진행되고 있는 실정이다.²⁾

박외철은 '대구 지하철역 제연의 문제점과 대책 I(제연방식)'에서 대구지하철역 승강장 계단 주위 10m×3m×5.4m의 공간에 대해 200 kW의 폴리우레탄 화재와 각 급기구와 배기구의 공기유량 0.9 m³/s에 대한 급기방식의 제연성능을 FDS로 모사하여 급기방식 제연의 문제점과 기계제연방식 중 배기방식의 제연성능이 급기방식보다 더 좋음을 밝혔다.³⁾

또 '대구 지하철역 제연의 문제점과 대책 II(배기방식 제연설비의 풍량)'에서 풍량 0.6~2.4 m³/s와 두 화재 크기 200 kW와 2 MW에 대해 동일 공간내 온도와 연기입자의 분포를 조사한 결과 대피로의 온도를 60°C 이하로 유지하기 위해서는 2.4 m³/s 이상의 배기풍량이 필요하다고 하였다.⁴⁾

박의 연구에서는 화재시 연기의 제어를 위해 제연설비만을 작동시켜 배연의 효과를 고려하였다.

그러나 외국의 경우처럼 연기 및 열의 배출은 단지 배연만을 목적으로 하지 않고, 방호구역내에 설치된 스프링클러설비의 성능에 미치는 배연 효과까지 고려하여 연구가 진행되고 있는 실정이다.

현재 대구지하철 화재사고 후 대구지하철 역내 승강장 출입구의 계단통로에는 연기의 냉각 및 차단을 목적으로 제연커튼과 수막설비가 설치되어 있다.

따라서 대구지하철 역내 승강장 출입구의 계단통로에 설치된 제연커튼과 수막설비가 연기냉각 및 차단에 얼마나 효과가 있는지 조사할 필요가 있다.

본 연구는 계단통로의 수막설비 및 배연설비의 연기 냉각, 차단 및 제연효과를 조사하기 위한 예비단계로써 일반 건물의 복도 및 지하상가의 지하통로와 같은 수평통로에서 표준스프링클러설비(sprinkler system)와 배연설비(extraction system)의 단독 및 통합 작동이 천장 아래로 확산되는 연기의 냉각, 차단 및 제연 효과에 미치는 영향에 대하여 미국 NIST에서 개발한 FDS(ver. 4.0.3)을 사용한 컴퓨터 화재모의실험을 수행하여 조사하였다.

본 연구의 목적은 수평통로의 연기 냉각, 차단 및 제연을 위한 표준스프링클러설비와 배연설비의 작동이 유동장의 온도 및 연기밀도 분포에 미치는 영향을 조사하여 수평통로의 효과적인 연기 냉각, 차단 및 제연 방법을 개선하기 위한 대책을 제시하는 것이다.

본 연구에서는 화재 모의실험 조건인 스프링클러헤드의 설치 수, 배연량, 화재열방출률을 각각 변화시켜 전체 16경우에 대하여 화재모의실험을 수행하였다. 또 화재제어(fire control)에 가장 효과적이라고 판단되는 최적 헤드수를 알아보기 위하여 복도의 길이 방향의 일정 지점에 복도 너비 방향으로 헤드 설치수와 부착 위치를 변경하였고, 화재열방출률 변화시 스프링클러설비 및 배연설비의 연기 차단 및 제연효과도 알아보았다.

2. 컴퓨터 화재모의실험

2.1 화재모형

본 연구에 사용되어진 화재모형은 일반건물의 복도

및 지하상가의 지하통로와 같은 수평통로에서 화재시 연기전파 및 거동을 해석하는데 적합하도록 단일통로를 고려하였다.

화재모형의 크기는 가로, 세로, 높이가 20.0 m×4.0 m×3.0 m로써 좌표계의 기준점은 왼쪽 하단 앞 모서리로 하였다.

화원은 연기전파 및 거동에 대한 해석을 용이하게 할 수 있도록 구역 바닥 원점으로부터 X=2.5 m, Y=2.0 m, Z=0.4m에 위치시켰으며, 화재는 프로판 연료의 연소로써 연료의 특성상 화재성장기(fire growth period)는 없으며, 기체와 고체 연기입자(soot) 연소생성물의 혼합물을 생성한다.

열방출율(heat release rate)은 1 MW로 화재초기부터 모의실험이 끝나는 시점(t=60초)까지 일정하게 방출하는 것으로 하였다. 또 화재크기가 제연에 미치는 영향을 알아보기 위하여 열방출율을 2 MW, 3 MW로 증가시켜 화재모의실험을 수행하였다.

본 연구에서는 화재모형을 X, Y, Z방향으로 각각 100, 20, 15개의 균일 격자로 나누어 전체 30,000개의 격자계(grid systems)를 형성하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 컴퓨터화재모형과 전체 격자계를 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

2.2 스프링클러헤드

본 연구의 화재모의실험에 사용되어진 스프링클러헤드는 표준형 헤드로써 헤드작동압력(p) 1.3 bar, 유량계수(K) 363 lpm/bar^{1/2}, 반응시간지수(RTI) 50 m^{1/2}·s^{1/2}, 작동온도(T₀) 74°C이다.

스프링클러헤드의 부착위치는 X=10.0 m 위치에 Y방향으로 화재시나리오 조건에 따라 헤드의 부착위치를 달리하였다. 화재시나리오 조건에 따른 스프링클러헤드 부착 위치는 Table 1과 같다.

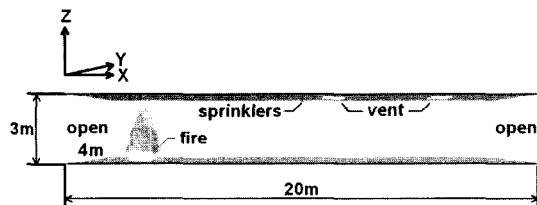


Fig. 1. Fire model.



Fig. 2. Grid systems.

Table 1. The location of sprinklers

The number of installed sprinklers	Spacing of sprinklers (m)	Location of sprinklers (m)
1	4.00	x=10.0, y=2.00, z=2.9
2	2.00	x=10.0, y=1.00, z=2.9 x=10.0, y=3.00, z=2.9
3	1.32	x=10.0, y=0.68, z=2.9 x=10.0, y=2.00, z=2.9 x=10.0, y=3.32, z=2.9
4	1.00	x=10.0, y=0.50, z=2.9 x=10.0, y=1.50, z=2.9 x=10.0, y=2.50, z=2.9 x=10.0, y=3.50, z=2.9

2.3 배연구

본 연구에 사용되어진 배연구의 크기는 ‘NFPA 204 Standard for smoke and heat venting 2002 edition’의 기준을 참조하여 계산하였다.

NFPA 204의 vent 면적 계산은 curtain이 있는 경우로써 화재모형의 양 끝단이 개방된(curtain 깊이=0) 본 연구의 경우와 다소 차이가 있지만, 본 연구에서는 단지 스프링클러설비와 배연설비의 통합 작동이 연기차단 및 제연에 미치는 효과를 알아보기 위한 것이므로 계산방법을 그대로 적용하였다.

또 스프링클러헤드가 없는 경우에 대해 천장아래 형성되어지는 연기층의 높이는 FDS 프로그램을 사용하여 수치계산 하였고, 이 값을 배연구의 크기 계산에 적용하였다.

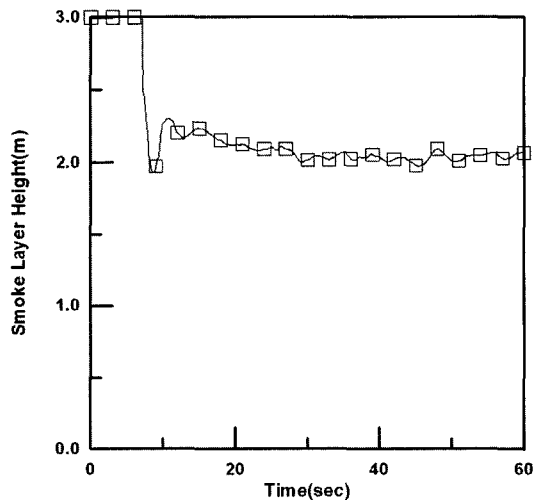


Fig. 3. Height of smoke layer.

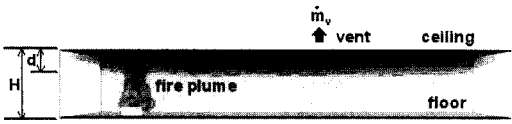


Fig. 4. Fire plume and smoke venting.

Fig. 3은 열방출률 1MW 화재시 헤드살수 또는 배연이 없는 경우에 대한 FDS 화재모의실험 결과로써 천장 아래 연기층 두께가 화재 후 t=10초 이후 약 1.0m 정도로 유지됨을 볼 수 있다.

배연구의 크기 결정은 화재의 열기류(plume)에서 천장아래 연기층으로 유입되는 질량유량률(\dot{m}_p)이 배연구를 통하여 외부로 유출되는 질량유량률(\dot{m}_v)과 같다는 질량보존식을 적용하여 계산하며(Fig. 4 참조), 배연구 크기 계산에 사용되어지는 관계식은 Table 2에 나타내었다.

배연구 입구의 유량계수는 제작회사로부터 주어진 자료를 이용하거나, 또는 자료가 주어지지 않으면 0.61을 적용하고, 제한된 입구면적 A_i 에 대해 수정계수 M 값을 고려한다.

본 연구의 화재모형에서 입구면적은 배연구 면적의 약 8배로 결정하였고, 실제 설치되는 수정 배연구의 면적 A_c 은 기하학적 배연구 면적 A_v 에 수정계수 M 을 곱하여 계산한다.

본 연구의 화재모의실험에 사용된 값을 기초로 위의 관계식으로 부터 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다.

이상의 결과를 근거로 하여 본 연구의 화재모형에서는 전체 배연구 면적을 2.0m²로 결정하였고, 2개 배연구 설치에 대해 1개당 면적을 1.0m²으로 결정하였다. 또 배연구의 위치는 스프링클러헤드 작동시 연기차단과 천장재트 하류 측에 전파된 연기의 배연을 위해 배연구의 중심이 X=11.5 m, Y=2.0 m, Z=3.0 m와 X=16.5

Table 2. The correlations of calculation for vent sizing

Parameters	Correlations
Fire diameter D	$D = \left(\frac{4Q}{\pi Q''}\right)^{1/2}$
Mean flame height L	$L = -1.02D + 0.235Q^{2/5}$
Height of virtual origin above base of fire z_o	$z_o = 0.083Q^{2/5} - 1.02D$
Mass flow rate in plume \dot{m}_p	if $L < z_s$, $\dot{m}_p = [0.071Q_c^{1/3}(z_s - z_o)^{5/3}][1 + 0.027Q_c^{2/3}(z_s - z_o)^{-5/3}]$
	if $L \geq z_s$, $\dot{m}_p = (0.0056Q_c) \frac{z_s}{L}$
Mass flow rate through vents \dot{m}_v	$\dot{m}_v = \frac{C_{d,v}A_v}{\sqrt{1 + \frac{C_{d,v}^2 A_v^2 (T_0)}{C_{d,i}^2 A_i^2 (T)}}} \sqrt{2\rho_0 g d} \sqrt{\frac{T_0(T-T_0)}{T^2}}$
	$\dot{m}_v = A_{va} \sqrt{2\rho_0 g d} \sqrt{\frac{T_0(T-T_0)}{T^2}}$
Smoke layer temperature T	$T = T_0 + \frac{KQ_c}{c_p \dot{m}_p}$
Geometric vent area A_v	$A_v = \frac{A_{va}}{C_{d,v}}$
Correction coefficient M	$M = \left[1 + \left(\frac{A_v}{A_i}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T}\right)\right]^{1/2}$
Corrected actual vent area A_c	$A_c = M \cdot A_v$

Table 3. Results of calculation for vent sizing

Parameters	Calculated Results
Fire diameter D	1.128 m
Mean flame height L	2.57 m
Mass flow rate in plume \dot{m}_p	3.05 kg/s
Smoke layer temperature T	409 K
Aerodynamic vent area A_{va}	1.276 m ²
Geometric vent area A_v	2.09 m ²
Correction coefficient M	1.01123
Vorrected actual vent area A_c	2.11 m ²

m, Y=2.0 m, Z=3.0 m에 각각 위치하였다.

2.4 배연량

본 연구의 화재모의실험에 적용한 배연량은 열기류의 질량유량률(\dot{m}_p) 3.05 kg/s와 동일하게 적용한 후, 열기류로 유입되는 주위공기의 밀도(ρ_0) 1.2 kg/m³로 나눈 체적유량 1.27 m³/s를 화재모의실험의 입력 자료로 사용하였다.⁵⁾

또 배연량의 변화가 유동장의 온도 및 연기밀도분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 배연량을 0.5 m³/s,

2 m³/s 및 3 m³/s에 대해 각각 화재모의실험을 수행하였다.

2.5 화재 시나리오

본 연구에서는 일반건물의 복도 및 지하상가의 지하통로와 같은 수평통로에서 화재시 연기전파 및 거동을 해석하는데 적합하도록 단일통로를 대상으로 스프링클러헤드의 설치 수, 배연량, 화재열방출률을 각각 변화시켰다.

기준화재 1 경우, 헤드만 작동 4 경우, 배연설비만 작동 4 경우, 헤드와 배연구의 통합작동 3 경우, 헤드와 배연구의 통합작동시 배연량 변화 2 경우, 헤드와 배연구의 통합작동시 화재열방출률 변화 2 경우로 각각 구분하여 전체 16 경우에 대하여 FDS 4.03 프로그램을 사용하여 화재모의실험을 수행하였다.⁶⁻⁸⁾

본 연구의 화재 시나리오 조건을 Table 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기준 화재의 온도 및 연기밀도

본 연구의 기준 화재시나리오는 수평통로 천장에 헤드 및 배연구가 없으며, 화재 열방출률이 1 MW로 일정한 경우이다.

Table 4. Conditions of fire scenarios

No.	Model ID.	Fire Scenarios			Note
		Heat Release Rate H[MW]	Sprinklers S[ea]	Flow rate V[m ³ /s]	
1	B.M.	1	-	-	basic fire
2	H1S1V0	1	1	-	only sprinklers
3	H1S2V0	1	2	-	only sprinklers
4	H1S3V0	1	3	-	only sprinklers
5	H1S4V0	1	4	-	only sprinklers
6	H1S0V0	1	-	0.5	only vents
7	H1S0V1	1	-	1.27	only vents
8	H1S0V2	1	-	2	only vents
9	H1S0V3	1	-	3	only vents
10	H1S1V1	1	1	1.27	combined
11	H1S2V1	1	2	1.27	combined
12	H1S3V1	1	3	1.27	combined
13	H1S2V2	1	2	2	combined
14	H1S2V3	1	2	3	combined
15	H2S2V1	2	2	1.27	combined
16	H3S2V1	3	2	1.27	combined

*Model ID. : B.M.-Basic Model / H-Heat release rate / S-Sprinklers / V-Vent

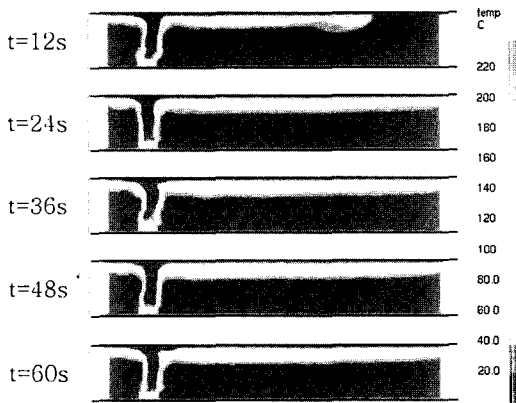


Fig. 5. Smoke temperature(Y=2 m).

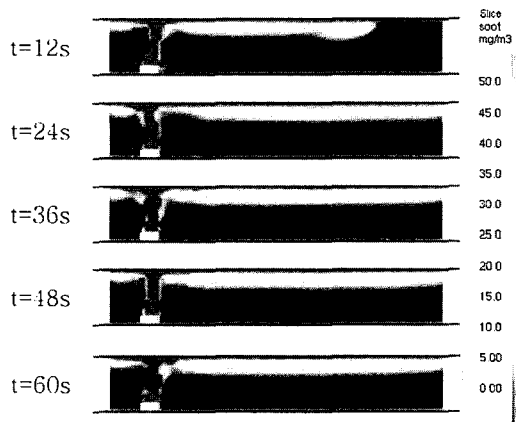


Fig. 6. Smoke density(Y=2 m).

Fig. 5와 Fig. 6은 기준 화재시나리오에 대한 화재모의실험 결과로서 Y=2.0 m 위치에서 온도 및 연기밀도 분포를 각각 나타낸다.

Fig. 5(t=12초)에서 볼 수 있듯이 화원으로부터 발생한 고온의 연소생성물은 부력에 의해 상부로 상승하는 열기류(plume)가 되고, 이 열기류의 상승유동으로 주변의 공기가 흡입되어(entrained) 함께 상승하게 된다. 이 상승열기류는 천장에 부딪히면서 방사형으로 확산되는 천장제트(ceiling jet)를 형성하게 된다. 이때 복도의 폭 방향은 길이 방향에 비해 짧기 때문에 벽에 부딪히면서 일부는 하강 또는 복도길이방향으로 확산되는 벽제트(wall jet)가 형성된다. 복도길이 방향으로 확산하는 연기층은 천장 및 주위 공기로의 열손실로 인해 확산 속도가 점차 감소하게 된다. 그러나 후방에서 계속 확산되어오는 연기로 인해 전방부에서 연기가 누적됨에 따라 전방부의 연기층 두께는 화원 직상부 근처의 연기층 두께보다 더 두껍게 형성된다. 이러한 일정 두께

의 연기층이 천장아래에 형성되면서 복도 길이방향으로 확산되어 가는 것을 볼 수 있다.

t=24초 경과 후 천장아래 전체에 일정 두께의 연기층이 형성되며, 화원으로부터 생성된 고온의 연소생성물이 지속적으로 유입됨에 따라 연기층의 두께가 점차 두꺼워지고, 온도도 상승함을 볼 수 있다. 일정시간 경과 후 연기층의 두께 및 온도는 최대값에 도달되어 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. Fig. 6에서 연기밀도 분포도 유사함을 볼 수 있다. 본 연구에서 계산된 연기층의 최고온도는 약 400 K 정도이며, 연기밀도는 약 35 mg/m³ 정도이다.

3.2 헤드 작동시 온도 및 연기밀도

헤드가 설치된 경우의 온도분포는 헤드 작동 전에는 기준 화재시나리오의 온도분포와 유사하고 헤드작동 후에는 헤드의 작동 수에 따라 다른 온도분포를 나타내었다. 본 연구에서는 헤드가 3개 또는 4개 설치된 경우, 고온의 연기가 모서리부로 몰려 유동하는 모서리 효과(corner effect)에 의해 바깥쪽의 헤드 2개는 작동하고 소화수 살수에 의해 연기층의 온도가 냉각됨에 따라 중앙에 설치된 헤드(1개 또는 2개)는 작동하지 않았다. 화재 시나리오 조건별 헤드작동 후의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다.

헤드의 작동수는 헤드 설치수와 관계없이 복도 폭의 길이에 대한 적정 헤드수가 있음을 알 수 있고, 본 실험에서는 최대 2개의 헤드만 작동하였다.

1개 헤드설치시 헤드 작동 후 온도분포는 헤드로부터 살수되는 소화수에 의해 헤드 좌우 일부 연기가 하향끌림(smoke downdrag) 현상이 일어남을 볼 수 있으며, 헤드 우측에 연기층이 형성되는 것으로부터 연기의 냉각 및 차단 효과가 크지 않음을 알 수 있다.

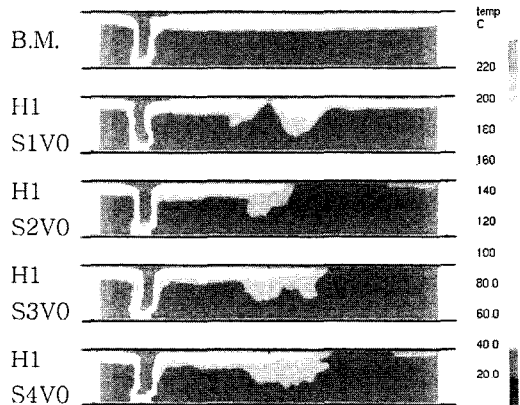


Fig. 7. Smoke temperature(Y=2 m, t=60 s).

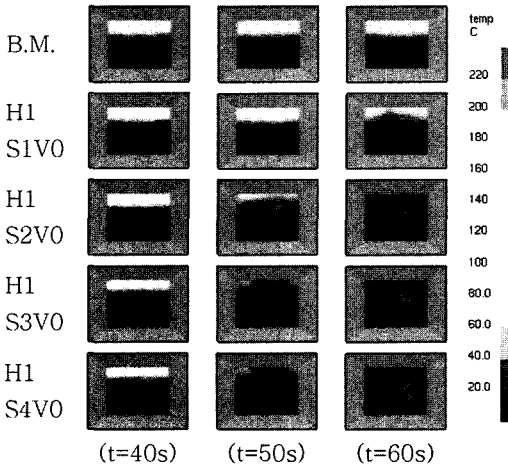


Fig. 8. Smoke temperature(X=14 m).

2개 이상 헤드 설치시 헤드 작동수는 2개으로써 1개 작동보다 더 많은 소화수가 살수됨에 따라 연기의 냉각 및 차단 효과가 좋아짐을 볼 수 있으나, 1개의 경우와 같이 연기의 하향끌림 현상이 발생함을 볼 수 있다.

이때 3개 또는 4개 헤드설치시 작동헤드는 벽면에 가까운 헤드가 작동됨에 따라 중앙(Y=2.0 m)에서의 연기는 우측으로 더 확산되고 동시에 아래로 더 내려와 기준화재시나리오에 비해 연기층이 더 복잡하게 됨을 알 수 있다.

다음은 헤드중심으로부터 좌우 4 m 간격에 대해 헤드 작동 후 온도 분포를 비교하여 연기의 냉각 및 차단효과를 살펴보았다.

Fig. 8은 기준 화재시나리오의 X=6 m, t=60초의 온도분포를 기준하여 각 설치 헤드수에 따라 헤드 작동 후 X=14m에서 t=40, 50, 60초의 경우에 대한 온도분포를 나타낸다.

각 경우에서 헤드에서 살수되는 소화수의 냉각효과로 인해 온도가 감소됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 연기층의 냉각효과가 가장 좋은 경우는 2개의 헤드를 설치한 경우임을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 화재모의실험에서는 2개 헤드설치시 가장 효과가 좋은 것으로 결정하여 배연구와의 통합 작동에 대한 연기 냉각 및 차단 효과의 조사에 2개 헤드 설치를 기준하였다.

다음은 화재시나리오별 연기밀도 분포를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

헤드에서 살수되는 소화수의 연기차단효과로 연기의 밀도가 낮아짐을 확인할 수 있다.

앞의 온도분포 특성과 달리 연기밀도분포는 2개 이

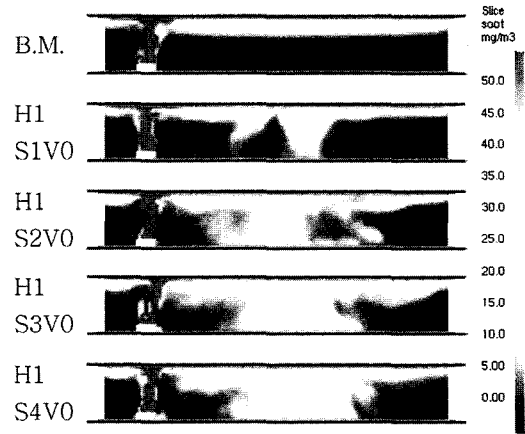


Fig. 9. Smoke Density(Y=2 m, t=60 s).

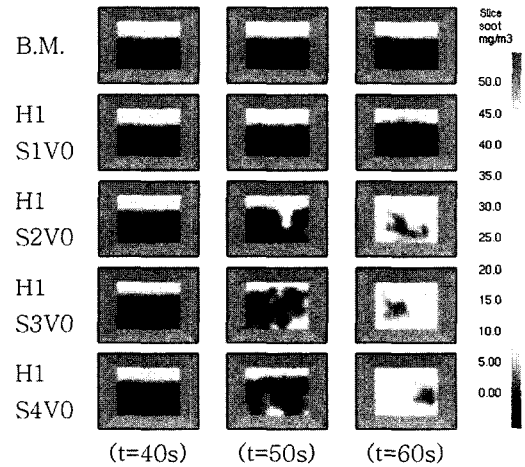


Fig. 10. Smoke density(X=14 m).

상 헤드 설치시 연기하향끌림 현상에 의해 헤드 직하부 바닥 근처에서 연기밀도가 높음을 볼 수 있다. 특히 3개 또는 4개 헤드설치시 바닥 근처로 하향끌림에 의한 연기의 폭이 더 두꺼워짐을 볼 수 있다. 이것은 앞의 설명에서와 같이 벽면에 가까운 헤드가 작동됨에 따라 중앙으로 확산되는 연기를 완전히 차단하지 못한 것으로 생각되어진다. 따라서 앞의 온도분포 특성과 같이 연기의 차단효과가 가장 좋은 경우는 2개 헤드를 설치한 경우임을 다시 확인할 수 있다.

3.3 배연구 작동시 온도 및 연기밀도

본 연구의 기준 배연 화재모형으로서는 전체 배연구 면적을 2 m²로 결정하고, 2개 배연구 설치에 대해 1개 당 면적을 1 m²으로 하였으며, 배연구를 통한 배연량

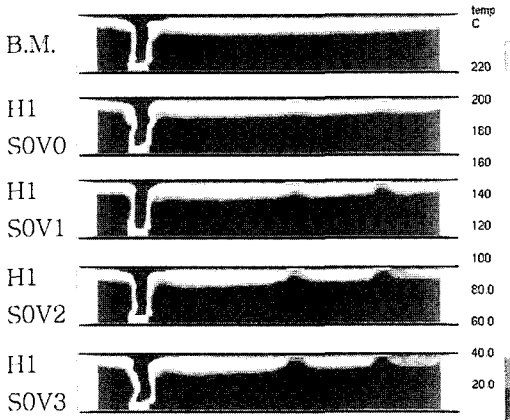


Fig. 11. Smoke temperature(Y=2 m, t=60 s).

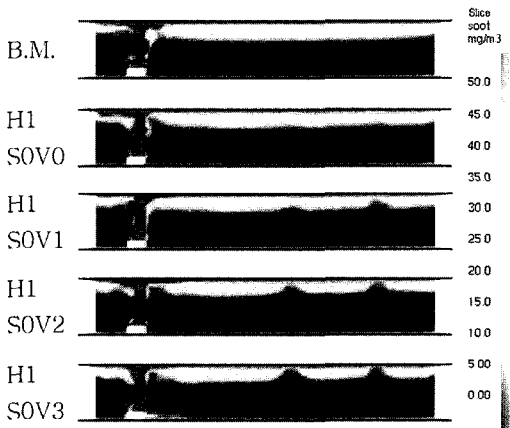


Fig. 12. Smoke density(Y=2 m, t=60 s).

은 열기류의 질량유량률(\dot{m}_p) 3.05 kg/s 값과 동일하게 적용한 후 열기류로 유입되는 주위공기의 밀도(ρ_0) 1.2 kg/m³로 나눈 체적유량 1.27 m³/s을 화재모의실험의 입력 자료로 사용하였다.

1.27 m³/s 기준 배연량에 대해 배연량의 감소 및 증가에 따라 온도 및 연기밀도 분포를 알아보기 위해 0.5 m³/s와 2.0 m³/s, 3.0 m³/s로 배연량을 달리하여 화재모의실험 하였다.

Y=2.0 m, 화재 후 t=60초 시점에서 배연량에 대한 온도 및 연기밀도분포를 기준 화재시나리오와 비교할 수 있도록 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다.

기준 배연량 보다 작은 0.5 m³/s인 경우 온도 및 연기밀도 분포는 기준화재시나리오의 온도 및 연기밀도 분포와 큰 차이가 없으며, 천장 아래 연기층의 확산에 변화가 없음을 확인할 수 있다.

배연량이 기준 배연량인 1.27 m³/s 및 기준 배연량

이상인 2.0 m³/s, 3.0 m³/s의 경우 배연구 하단부의 연기가 배연됨에 따라 배연구 하단부의 연기층의 두께가 점점 더 얇아지며 동시에 배연구 우측부분의 연기층은 기준화재시나리오의 연기층 두께보다 더 얇아짐을 볼 수 있다. 또 배연구 우측부의 온도 및 연기밀도도 기준 화재시나리오 보다 감소되어진 것을 볼 수 있다.

이러한 현상은 화원 직상부의 천장에서 우측으로 확산되는 연기가 배연구로 배연되는 배연량이 증가됨에 따라 배연구 우측으로 확산되어지는 연기량이 점점 더 감소하여 연기층의 두께가 감소되기 때문으로 생각된다.

그러나 배연만으로는 연기확산의 일부만 차단하고 천장 아래 연기층의 두께는 얇아지나 연기 확산은 완전하게 차단시키지 못함을 알 수 있다.

3.4 헤드와 배연구 통합 작동시 온도 및 연기밀도

위의 화재모의실험에서 볼 수 있듯이 헤드 및 배연구 단독 작동으로는 연기의 냉각 및 차단 효과는 그지 높지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 다음은 두 설비의 통합 작동시 연기의 냉각 및 차단에 어느 정도 효과가 있는지 알아보았다.

본 연구에서는 설치헤드수와 배연량의 변화시 온도 및 연기밀도 분포를 알아보기 위해 1.27 m³/s의 배연량에 대해 설치 헤드수를 1개, 2개, 3개, 또 2개의 설치헤드에 대해 배연량을 2.0 m³/s, 3.0 m³/s로 각각 증가시켜 화재모의실험을 수행하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 헤드수 증가와 배연량 증가에 대한 온도 및 연기밀도 분포를 나타낸다.

설치헤드수 1개, 배연량 1.27 m³/s인 경우 연기차단 효과는 배연만의 경우 보다 효과가 좋으나 완전하게 차단하지는 못하는 것으로 나타났다.

배연량이 1.27 m³/s이고 설치헤드수가 2개 이상인 경

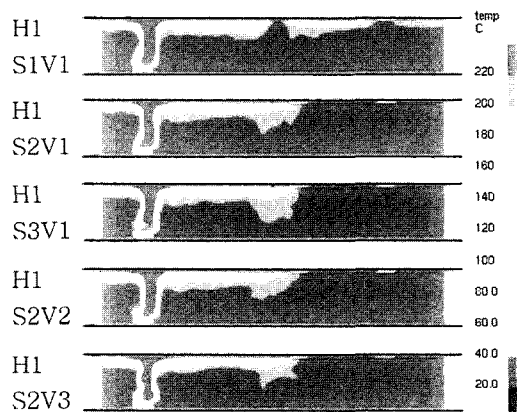


Fig. 13. Smoke temperature(Y=2 m, t=60 s).

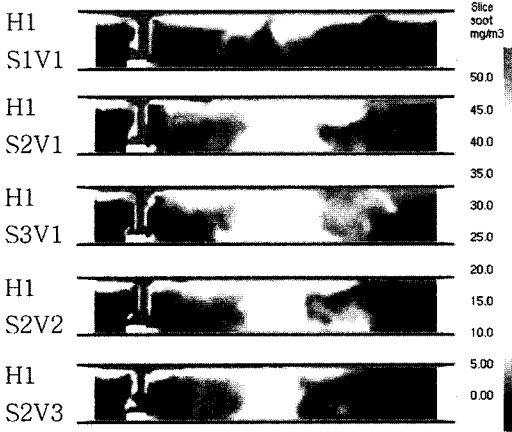


Fig. 14. Smoke density(Y=2 m, t=60 s).

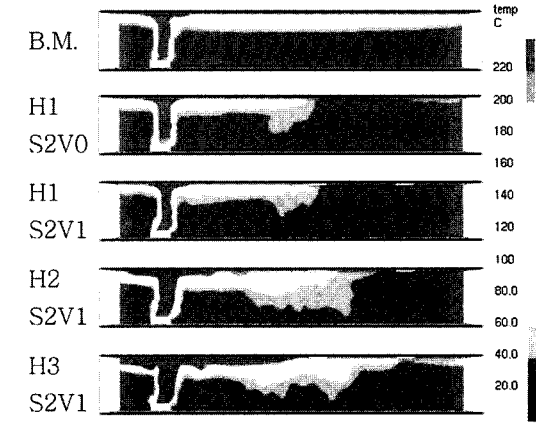


Fig. 15. Smoke temperature(Y=2 m, t=60 s).

우 연기의 냉각 및 차단 효과가 좋을 수 있다. 그러나 설치헤드수가 3개인 경우 중앙헤드의 미작동으로 중앙으로 확산되는 연기의 차단이 제대로 되지 않으며, 헤드살수의 하향 끌림 현상이 크게 나타남을 알 수 있다.

설치헤드수가 2개인 경우 배연량을 2.0 m³/s, 3.0 m³/s로 증가시키기에 따라 배연구 좌측부의 연기층의 두께도 얇아지며, 헤드살수시 연기의 하향끌림현상으로 인해 발생하는 하단부 아래의 연기층의 폭 두께가 배연량의 증가로 인해 얇아지며, 온도 및 연기밀도도 감소되어지는 것을 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 설치헤드수가 2개, 배연량이 3.0 m³/s인 경우가 연기 차단 효과가 가장 좋은 것으로 확인되었다.

3.5 화재크기별 온도 및 연기밀도 분포

본 연구에서는 화재크기에 따라 헤드와 배연구의 통합 작동이 연기차단 효과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 2개 헤드와 기준 배연량 1.27 m³/s인 경우에 대하여 화재 열방출율을 2 MW, 3 MW로 증가시켜 화재 모의실험을 수행하였다.

Fig. 15와 Fig. 16은 화재크기에 대한 온도 및 연기밀도 분포를 나타낸다.

화재크기가 증가할수록 온도 및 연기밀도는 기준 화재의 경우보다 더 증가하였고, 배연구를 지나 우측으로 연기가 더 확산되어 있는 것을 볼 수 있다. 또 헤드 살수로 인한 연기하향끌림 현상이 두드러지게 나타나고 연기의 폭 두께가 더 두꺼워짐을 볼 수 있다.

이때 220°C 이상의 온도 분포와 50 mg/m³ 이상의 연기밀도분포 면적이 앞의 경우보다 훨씬 더 넓게 분포

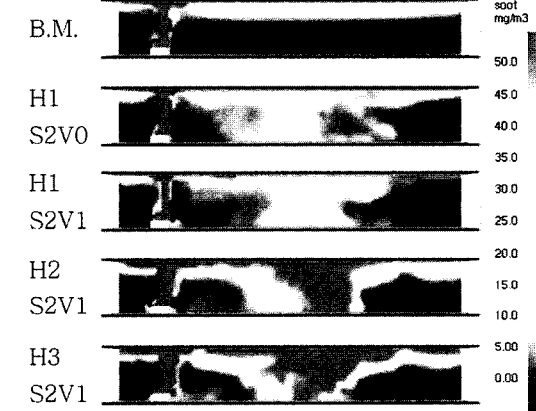


Fig. 16. Smoke density(Y=2 m, t=60 s).

됨을 알 수 있다.

이러한 현상은 화재크기의 증가로 고온의 연기 발생량이 증가하여 천장제트의 온도 및 확산속도가 증가하게 되어 적정 배연량을 초과함에 따라 연기의 냉각 및 차단이 제대로 되지 못한 것으로 생각된다.

따라서 2개의 헤드살수와 기준배연량으로는 기준 화재크기 보다 큰 경우에 발생하는 연기를 효과적으로 냉각 및 차단할 수 없음을 알 수 있다.

또 헤드살수로 인해 유동장의 길이방향으로 고온의 수증기 영역이 크게 형성될 가능성이 높고, 피난시 피난자의 시계 악화와 피부 노출시 화상 위험이 증가될 것으로 예상된다.

이러한 경우 연기의 냉각 및 차단을 위해 화재크기에 따라 헤드살수량과 배연량을 증가시켜야 하며, 이때 헤드의 작동 및 살수에 미치는 복도의 모서리효과도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

수평통로의 천장 아래로 확산되는 연기의 냉각 및 차단을 위해 설치한 스프링클러설비와 배연설비의 통합작동이 유동장의 온도 및 연기밀도 분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 20.0 m×4.0 m×3.0 m 크기의 공간에 대해 전산유체역학 프로그램(FDS 4.0.3)의 화재 모의실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

연기의 냉각 및 차단효과와 피난구역 확보에 있어 스프링클러설비와 배연설비의 통합 작동이 단독 작동보다 더 우수한 것으로 확인되었다.

천장에 설치되는 스프링클러헤드는 천장 모서리 효과에 의해 작동 헤드수가 2개로 제한되며, 적정 헤드수를 초과한 헤드설치는 오히려 연기차단 및 냉각 효과가 떨어짐을 확인할 수 있었고, 본 연구에서는 2개의 헤드설치와 3.0 m³/s의 배연량인 경우가 연기의 냉각 및 차단효과가 가장 좋았다.

헤드 작동시 하향 살수되는 물입자에 의해 주위 연기와 공기의 흐름을 유발하여 살수 주변의 유동장은 난류상태로써 연기 하향끌림 현상(smoke downdrag)이 발생하고, 헤드의 설치위치가 부적당할 경우와 화재크기의 증가로 연기발생량이 배연량보다 큰 경우에는 연기 하향끌림 현상이 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2004학년도 대구보건대학 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

기호표시

A_c	: 수정배연구 면적(corrected actual vent area) [m ²]
A_i	: 입구 면적(inlet area) [m ²]
A_v	: 배연구 면적(geometric vent area) [m ²]
A_{va}	: 공기역학적 배연구 면적(aerodynamic vent area) [m ²]
$C_{d,i}$: 입구 유량계수(inlet discharge coefficient) [무차원]
$C_{d,v}$: 배연구 유량계수(vent discharge coefficient) [무차원]
c_p	: 연기 비열(specific heat of the smoke layer gases) [kJ/kg-K]
D	: 화재직경(fire diameter) [m]

d	: 연기층 두께(smoke layer depth) [m]
g	: 중력가속도(gravity acceleration) [9.81 m/s ²]
K	: 연기층의 대류에너지 비율(fraction of convected energy contained in the smoke layer gases) = 0.5 [무차원]
\dot{m}_p	: 열기류 질량유량률(mass flow rate in the plume) [kg/s]
\dot{m}_v	: 배연 질량유량률(mass flow rate through vent) [kg/s]
Q	: 전체 열방출율(heat release rate) [kW]
Q_c	: 대류 열방출율(convective heat release rate) = 0.7Q [kW]
Q''	: 단위바닥면적당 열방출율(heat release rate per unit floor area) [kW/m ²]
T	: 연기층 온도(smoke layer temperature) [K]
T_0	: 주위온도(ambient temperature) [K]
z_0	: 가상 화점높이(height of virtual origin above the base of the fire) [m]
z_s	: 화원으로부터 연기층 하부까지의 높이(height of the smoke layer boundary above the base of the fire) [m]
ρ_0	: 주위 밀도(ambient density) [kg/m ³]

참고문헌

1. 홍원화, 2.18 대구지하철 화재 연구조사보고서, 경북대학교 건축학부 도시환경설비연구실 방재팀, pp.98-99(2004).
2. James A. Milke, NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting 2002 Edition, NFPA, pp.74-75 (2002).
3. 박외철, “대구 지하철역 제연의 문제점과 대책-I. 제연방식”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 17, No. 4, pp.98-104(2003).
4. 박외철, “대구 지하철역 제연의 문제점과 대책-II. 배기방식 제연설비의 풍량”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 17, No. 4, pp.105-110(2003).
5. John H. Klotz, James A. Milke, Design of Smoke Management Systems, SFPE, pp.110(1992).
6. K.B. McGrattan, Fire Dynamics Simulator(Version4) - Technical Reference Guide, NIST(2004).
7. K.B. McGrattan and G.P. Forney, Fire Dynamics Simulator(Version 4)-User's Guide, NIST(2004).
8. K.B. McGrattan and G.P. Forney, User's Guide for Smokeview Version 4-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NIST(2004).