

터널 화재시 물분무노즐에 의해 형성되는 제연수막의 연기층 확산방지성능에 관한 실험적 연구

Experimental Research on Effects of Water Sprayed Curtain On Anti-diffusion of Fire Gases in Case of Tunnel Fire

박형주* **최영상**** **지남용*****
Park, Hyungjoo Choi, Youngsang Jee, Namyong

Abstract

In case of a fire in road or railway tunnel it is always necessary to keep the escape condition as good as possible. Most of the victims of major fires in tunnels are because they couldn't leave the tunnel in time and were trapped by smoke, or rescue teams couldn't reach the place of the accident due to low visibility and high temperature.

In spring 2003 a comprehensive field experiment was undertaken in a large scaled tunnel in Youngin City to test the effectiveness of a new water spray curtain system, designed to the air quality inside of a tunnel in case of fire during passenger's escape to safe routes. In order to control the smoke propagation, fixed water sprayed nozzles were used to make water curtain system, which can be installed or hanging water piping line below ceiling.

The experiment was accompanied by an extensive measurement campaign in order to measure temperature dropping effect and flow conditions as well as CO concentration for various water sprayed curtains produced by sprinkler heads or water spray nozzle.

Eventually comparison analysis were undertaken to investigate the performance of water curtains under fixed water pressure. Therefore most effective water curtain system was presented on the basis of water droplet size in long tunnel.

키워드 : 스프링클러헤드(표준형 또는 주거형), 물분무노즐, 터널화재, 제연수막, 연기조기강하, 실물화재실험, 물입자의 입경
key word : Sprinkler head(Normal and Residential). Water Spray Nozzle, Tunnel Fire, Water Curtain, Down-drag Effects on Fire Gases, Large-Scaled Test, droplet 's size, Smoke Curtain

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

터널 내를 운행하는 차량이나 열차는 화재 발생시 화염을 초기에는 차량 및 열차외부로 발생시키지 않는 화재특성을 보이는 것이 일반적인데 대다수 차량의 내용물이 탄화수소 혼합물(hydrocarbon compounds)이기 때문에 연소 시 비화염성(inflammable) 연소특성을 나타내는 것이 상례이다. 이런 연소특성은 터널내 유독성 연기의 집적을 빠르게 촉진시키므로 터널에서 대피중인 피난자에게 위험을 줄 가능성이 크다.

고속철도의 건설에 따라 5km를 넘는 장대터널의 건설이 증가하고 있어 차량이나 열차가 터널 내에서 추돌이나 충돌 또는 전기적, 기계적 결함에 의해 화재가 발생할 확률이 크게 증가하고 있다. 특히 대규모의 화재일 경우 높은 온도를 가진 연기가 터널내부에 확산되어 피난자에게 위험을 줄 수 있는 환경이지만, 현재의 국내 터널은 연기의 확산을 일정시간동안

차단할 수 있는 시스템이 없는 것이 현재의 실정이다.

따라서, 터널내 화재시 유독성 연기가 터널 상층 천정부를 따라 입출구 방향으로 급격히 확산할 경우 많은 인명피해의 발생이 예상된다. 이런 급속한 연기확산을 방지하기 위해 별도의 터널 연기제어 시스템의 적용이 필요한데 최근에 환기 팬을 적용하여 연기의 역류를 방지하는 시스템과 함께 수막을 형성하여 연기의 확산을 방지하는 기술의 개발이 시급한 실정이다. 이런 시스템은 차량이나 사람의 통행을 원활하게 하면서 터널 천정을 따라 급격히 확산되는 고온의 연기층을 차단하거나 조기에 강하(drag-down)시켜 터널내 상존하는 피난자의 대피시간동안 연기의 오염을 방지할 수 있는 시스템으로서 그 효과에 대한 정량적인 데이터 구축이 시급하다.

1.2 연구의 목표 및 범위

본 연구에서는 터널 화재시 발생하는 고온의 유독성 연기가 필수적으로 갖고 있는 온도, 유속 및 독성가스의 량 등의 기본요소에 대하여 물입자의 산포에 의한 수막의 띠를 형성시켜 각각의 요소별로 제어 가능한 범위를 규명하는데 연구의 목표를 둔다.

터널내의 방호수막(water curtain)에 의해 형성되어지는 물

* 경원전문대학 소방시스템과 교수
** 대구보건대학 소방학과 조교수
*** 한양대학교 건축공학부 부교수, 공학박사

입자의 크기 및 수막형성 방법에 따라 수막의 띠를 통과하면서 감쇄되는 연기 층의 차단효과에 대한 성능을 온도 (temperature), 유속(velocity) 및 Co가스량(co concentration)의 인자로 정량화 하는 것을 본 연구의 범위로 한다.

2. 수막시스템에 의한 터널화재 연기제어

2.1 터널내 연기확산을 방지를 위한 수막차단 개념

터널 내에 진입한 차량에서 화재가 발생하여 터널 내에 화염과 연기가 확산되는 것을 방지할 목적으로 적절한 물입자의 방사에 의해 터널의 한쪽단면을 완전히 막을 수 있는 수막의 띠(water curtain, 수막 또는 수벽이라고 칭함)를 형성함으로써 화원이 있는 구역의 연기를 집적시키고, 또한 수막을 통과한 연기층의 온도를 냉각수에 의해 저하시킴으로서 연기층이 갖고 있는 고유성질인 부력을 잃게 만들어 멀리 이동하지 못하고 조기에 하강시킬 목적으로 고안된 일종의 연기층 확산방지 시스템개념이다.

이 수막에 의한 연기층 확산방지개념을 구체화하는 데 필요한 핵심기술은 터널의 횡단면방향으로 수막을 틈새 없이 형성하는 기술로서 특히 터널의 횡단면과 같은 넓은 공간을 가진 면적을 완전하게 커버하기위해 주로 어느 정도의 방호 면적을 가질 수 있는 것으로 입증된 스프링클러헤드나 연기입자와의 친화성을 강화시킨 물분사 분사특징을 가진 특수노즐을 적용하는 방법이 가장 경제성 있는 기술로서 연구되어 왔다.

일정한 형태의 수막에 의한 방호벽이 터널의 종방향으로 확산하는 연기층을 효과적으로 차단할 수 있는지 여부는 수막을 형성하는 미분부수 입자(water mist droplet)또는 물분무수입자(water spray droplet)의 형상 등에 따라 많은 차이를 보일 것으로 예측되므로 실험에 의해 정량화할 필요가 크며 향후 수막시스템의 효과가 입증되어 실용화 될 경우 터널내 화재시 피난안전성을 확보하는 데 있어서 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.



그림 1. 터널화재시 수막에 의한 연기확산방지시스템의 기본구성도

2.2 물분무헤드에서 방사되는 분무수 사양비교

터널과 같은 장대형의 튜브(tube)구조물에서 본 실험에서 적용하는 수막의 형성을 위해 사용한 물분무헤드는 크게 3가지를 사용하였는데 스프링클러의 헤드 2가지 종류와 제연용으로 개발된 물분무노즐을 사용하였다. 세부사양은 아래 표 1에서 정리하였으며 각각의 수분무헤드를 터널시험장에 설치

된 파이프에 연결한 후에 수막을 형성하도록 시스템을 구성하였다.

- 표준형 스프링클러 헤드
- 주거형 스프링클러헤드
- 5구형 물분무노즐

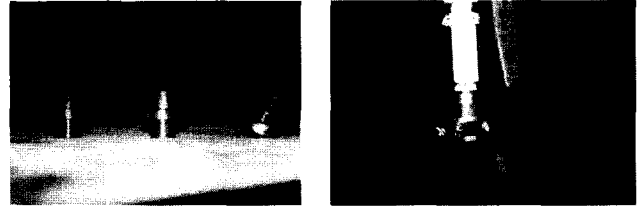


그림 2. 주거형 스프링클러헤드 및 물분무노즐(5구형)

표 1. 물분무헤드의 작동온도 및 구경비교

종 류	표준형 스프링클러헤드	주거형 스프링클러헤드	제연수막용 물분무노즐
구경(orifice size)	11.3 mm	10.5 mm	5구형
작동온도	72 ℃	72 ℃	68 ℃
비고	폐쇄형으로 그라스벨브 또는 퓨저블링크 부착형		개방형으로 열감지기 연동

상기 3가지 타입의 헤드별로 일정한 방수압 하에서 레이저를 이용한 측정법을 사용하여 다음 표 2과 같은 입경을 가지고 있는 것으로 조사 되었는데 유량차이와 관계없이 표준형 스프링클러에서 방사되는 물입자의 크기가 가장 컸으며 물분무노즐에 의해 형성되는 수막을 구성하는 물입자의 크기가 제일 작은 것으로 도출되었다. 물 입경을 측정하는 방법은 카메라에 의한 사진판독법이나 레이저의 투과방법에 의한 방법이 있는데 본 실험에서는 후자를 사용하였다.

표 2. 헤드별 방사압력에 따른 분사입자경과 유량비교

헤드종류	표준형 스프링클러헤드		주거형 스프링클러헤드		제연수막전용 물분무노즐
방사압력	1 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	1 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²
입자경	421.02 μm	390.22 μm	308.57 μm	267.93 μm	190 μm
유량	66.5 l/분	127.5 l/분	48 l/분	92.5 l/분	50 l/분

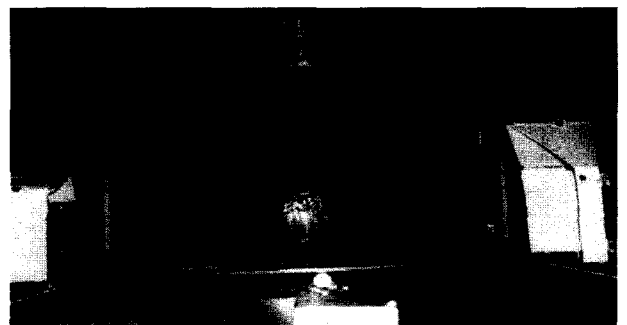


그림 3. 레이저에 의한 표준형스프링클러의 입경 측정

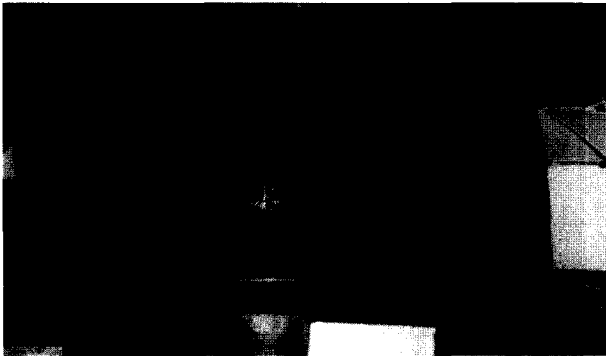


그림 4. 레이저에 의한 주거형스프링클러의 입경 측정

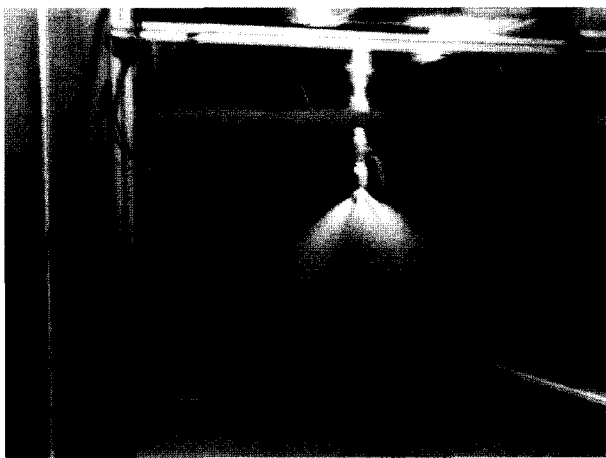


그림 5. 레이저에 의한 물분무노즐의 입경 측정

3. 터널수막의 성능분석을 위한 실물화재실험

3.1 실험개요

본 연구를 위해 사용된 실험장으로는 폭 6m, 높이 5m의 단면을 가진 사각형태의 총길이 21m 크기인 실물모형터널이며, 벽체 및 천장의 재료는 체치장 콘크리트구조체 바탕에 노출면 보호를 위해 석고보드를 사용하여 마감하였으며 본 실험에서 사용된 터널 실험장의 평면 및 단면은 그림 6과 그림 7과 같다.

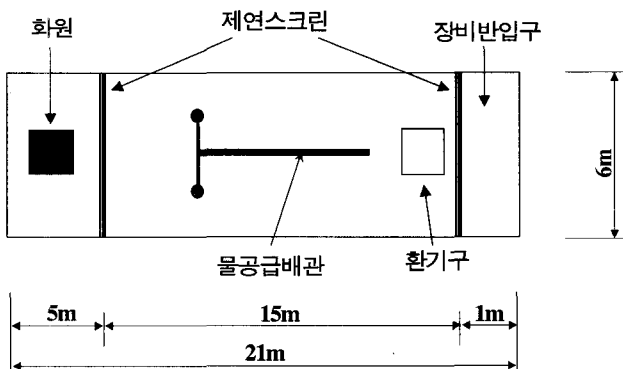


그림 6. 실물모형터널내 물공급배관 평면도

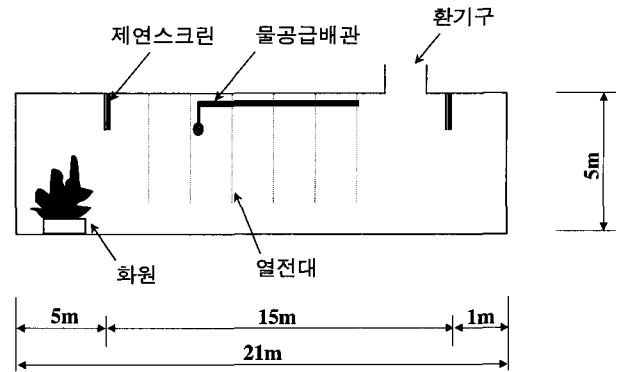


그림 7. 실물모형 터널내 물 공급배관 중단면도

3.2 실험장 및 측정방법

1) 실험장 구축개요

터널 내부의 천장에는 화원의 중앙부에서 2.5km떨어진 거리에 유효층 0.9m의 제연스크린이 설치되어 화원의 상부로 스프링클러 및 물분무 시스템에서 방사되는 물입자가 직접 도달하지 않도록 하고, 출구 쪽의 장비 반입구 전면에 동일한 크기의 제연스크린을 설치하여 화열과 연기가 제연구역 끝단에 위치한 환기구를 통하여 외부로 배출되도록 설계하였다.

터널의 중앙부에는 물 공급이 가능한 주배관을 천장상부에 고정시켜 0.5m 간격으로 가지배관이 연결되도록 하였으며, 가지배관의 끝단부에는 스프링클러 및 물분무 노즐을 부착할 수 있도록 설치하였다.

표 3. 실물모형터널 내에 설치된 측정기기 사양

구분	품명	규격	단위	수량
물분사 노즐 및 배관	스프링클러헤드	일반형	EA	30
		주거형	EA	30
	물분무노즐	1/2(5구형)	EA	12
	배관	pipe Ø50	SET	1
연소 장비	①화재접시	1m×1m	EA	1
	경유	CO측정용	ℓ	40
	②화재접시	1.5m×1.5m	EA	1
	알코올	온도유속측정용	ℓ	200
	연기생성기	무독성, 온도180℃	SET	2
측정 장비	CO측정장치	비분산 정필터형 적외선 가스 분석	SET	1
	열전대	고온	EA	108
		저온	EA	60
	스위치box (tokyo sokki`s)	ASW-50C-05	EA	3
	메이터로그 (tokyo sokki`s)	TDS-303용	EA	2
	입자경측정기	레이저측정기	SET	1
	컴퓨터	SONY PCG-NV7EL	EA	3

2) 화원

실험에 사용된 화원의 위치는 터널 내부 단면의 중앙에 설치하였고 사용한 화원은 폭 1m, 길이 1m에 높이 0.3m의 스테인리스 스틸로 제작된 화재접시(pool pan)에 가연물질인 공업용 에탄올(IMS)을 사용하여 터널실험장 바닥에서 15cm 정도 높이에 설치하였으며, 총발열량이 약 0.6MW정도 되도록 사용하였다.

화재접시(pool pan)에 에탄올을 담아 착화시켰으며 에탄올은 완전 연소하는 특성이 있기 때문에 연소시 이산화탄소와 수증기만을 생성한다. 따라서 시각적으로 연기의 발생을 보여주기 위해 연기생성기(smoke generator)를 사용하여 오일안개(oil mist)연기를 화재접시 직근에서 푸름(flume)상부로 분출하여 화재시 발생하는 실제연기와 연기와 거의 동일한 효과를 내도록 하였으며 유독성 가스농도의 차단효과를 측정하기 위한 실험에서는 경유를 사용하여 차량의 화재시의 연기특성과 유사한 효과를 내었다(그림 8 참조).



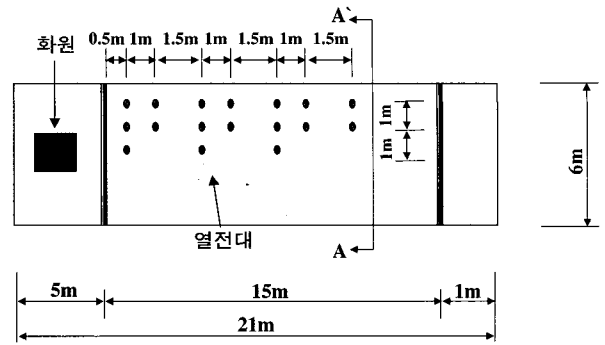
그림 8. 터널 내 연소장치 및 무독성연기발생장치 설치전경

3) 측정방법

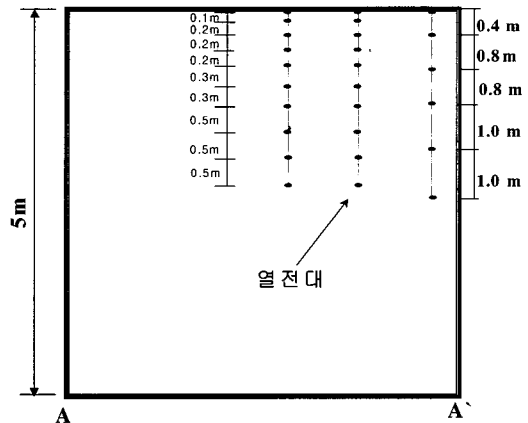
(1) 온도변화

본 실험의 측정항목으로 연소생성물의 수벽 통과량 측정을 화재시 정상지표를 나타내는 공기온도, 유속, 가스농도(CO가스)를 인자로 하였으며 터널 내에서 측정인자를 정확히 측정하기 위해 터널내 열기류의 이동성상을 정확히 파악할 수 있는 지점에 측정인자의 변화를 감지할 수 있도록 하였다.

터널 내부에서의 온도변화를 측정하기 위해 0.32mm 두께의 T-type(측정범위:-270~400℃)과 K-type 열전대를 설치하였다. 화원과 가까운 위치에는 640℃의 고온출력이 가능한 K-type 열전대 108회선을 화원과 비교적 먼 위치에는 T-type 열전대 60회선을 사용하여 총 168회선의 열전대를 데이터로거에 연결하여 온도변화를 측정하였으며 열전대의 위치는 그림 9와 같다.



(a) 열전대봉 배치평면



(b) 열전대봉 배치단면(A-A')

그림 9. 터널 내의 열전대 위치

(2) 유속변화

터널 내부의 유속측정은 프로펠러의 가동으로 유속의 변화를 감지하고 온도센서를 통한 환기구로 나오는 연기의 온도를 동시에 기록할 수 있는 포터블 유속측정계(0 to $\pm 200\text{cm/sec}$)를 사용하였으며, 환기구로 배출되는 연기의 유속을 수막 시스템의 가동에 따라 유속변화를 전과 후로 구분하여 측정하였다(그림 10 참조).

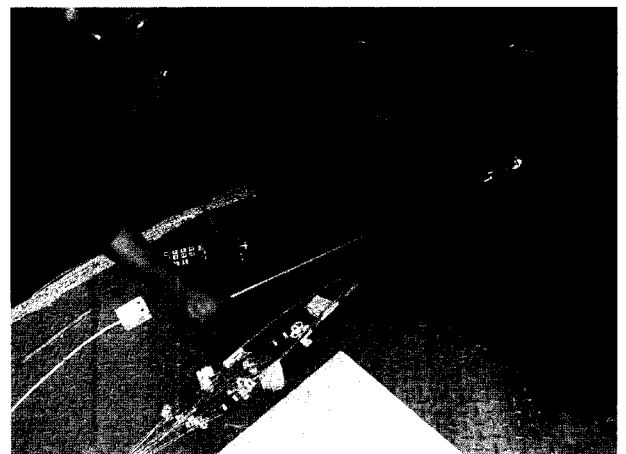


그림 10. 터널 환기구에서의 이동형 유속계에 의한 유속측정

(3) CO농도변화

일산화탄소의 수벽 통과량을 측정하기 위해 수벽이 형성되는 지점의 전·후에 포집기를 설치하여 비분산 정필터형 적외선 가스 분석법을 사용하여 일산화탄소의 농도를 수벽 통과 전과 통과후의 농도(PPM)을 비교하는 방법으로 측정하였으며, 측정에 사용된 측정기기들의 사양과 사진은 표 3과 그림 11과 같다.

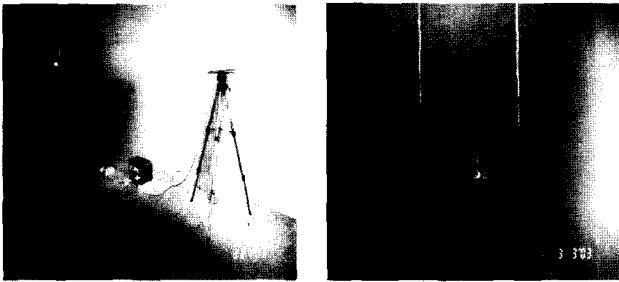


그림 11. 터널시험장내 Co채집장비 및 연소시험 전경

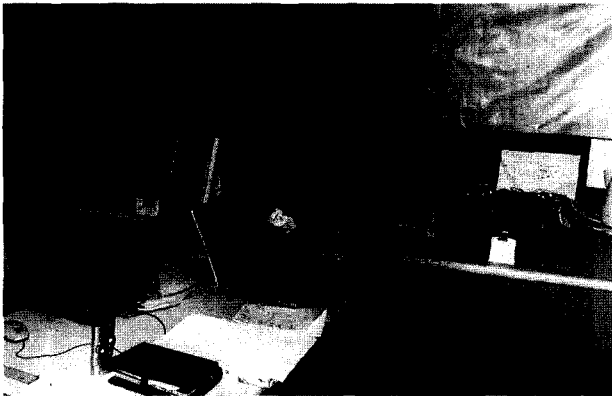


그림 12. 터널시험장 내 온도데이터 기록장치

4. 연기확산방지 실험결과 및 분석

4.1 연기층의 온도변화분석

1) 터널화재시 일반적인 온도분포현황

터널 내에서 에탄올에 의한 완전연소를 시킨 후, 터널의 전면 방연스크린으로부터 후면의 방연스크린까지의 온도분포를 살펴보면 화재접시 내 에탄올 착화 후 약100초가 지나면 터널상부의 최대온도는 150℃ 까지 상승하고 하단부로 내려올수록 온도대는 낮아지면서 바닥면에서 1m 높이의 온도대는 40℃를 나타내는 것으로 측정되었으나 시간이 지날수록 고온의 연기가 터널 내에 축적됨에 따라 점점 상승하는 추세를 보이고 있으나 환기구로 많은 연기가 배출됨에 따라 많은 온도상승은 일어나지 않는 것으로 측정되었다.

2) 수막형성에 따른 터널내 연기층의 온도변화

(1) 표준형 스프링클러헤드에 의한 수막형성시 온도

표준형 스프링클러헤드의 작동시간은 에탄올 착화후 약 12분경으로 나타났으며 터널상부의 온도가 110~120℃ 정도인

경우에 그라스벨브가 파열되면서 수막이 형성되고, 시간별 온도변화를 살펴보면 스프링클러헤드에서 물이 방사되었음에도 불구하고 헤드 전면부 중앙높이에서만 온도대가 일부 저하되었을 뿐, 천정 하단면을 포함한 대부분의 열전대의 온도 저감율이 적은 것으로 측정되었다.

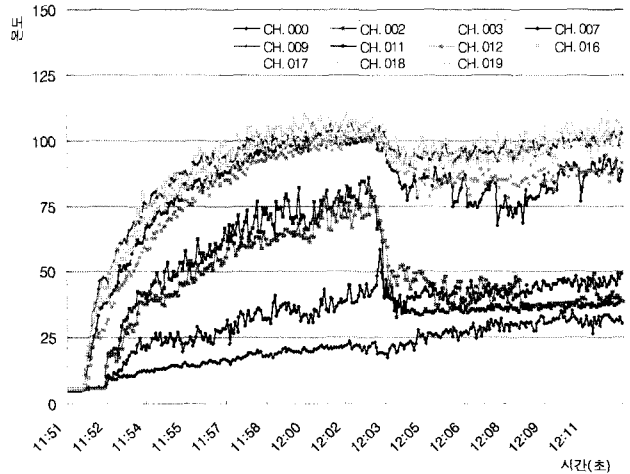


그림 13. 표준형 스프링클러헤드에 의한 수막형성시 온도변화

(2) 주거형 스프링클러헤드에 의한 수막형성시 온도

주거형 스프링클러헤드의 작동시간은 속도형(quick response) 퓨저블링크가 장착되어 있기 때문에 표준형스프링클러의 그라스벨브작동시간보다 약 3분여가 빠른 착화 후 8분 만에 퓨저블링크가 파열되어 수막이 형성되고, 시간대별 온도변화는 스프링클러헤드 개방 후 대부분의 온도는 50℃ 이내로 떨어졌으나 천정면 직하부의 온도는 상대적으로 높은 온도대(약 60℃~80℃)를 나타내는 것으로 측정되었다.

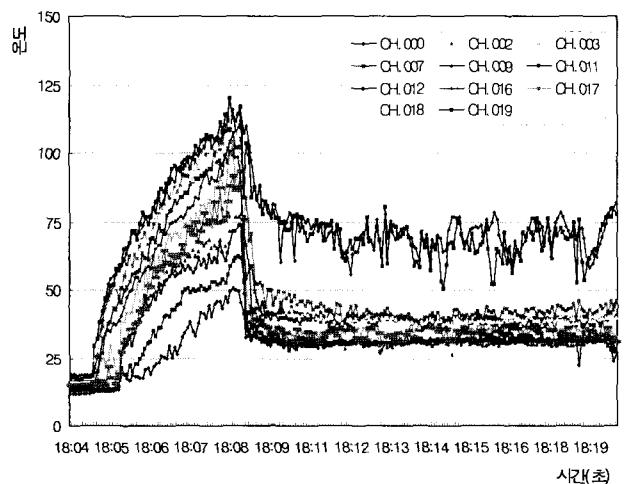


그림 14. 주거형 스프링클러헤드에 의한 수막형성시 온도변화

(3) 제연수막용 물분무노즐에 의한 수막형성시 온도변화 분석

입경이 약 150μm~250μm인 물입자를 분사하도록 고안된 노즐의 작동시간은 착화 후 10분경에 수막이 형성되도록 수동으로 조작하여 맞춤으로 써 다른 헤드의 작동시간과 형평을

맞추었고, 150℃ 이상 고온의 연기층이 수막을 통과하고 난 후에는 거의 대부분이 50℃ 미만의 온도를 가진 연기층으로 변화하였으며 천정부 직하부의 온도도 시간이 지나면서 50℃미만인 중저온의 기류로 변하는 패턴을 보였다.

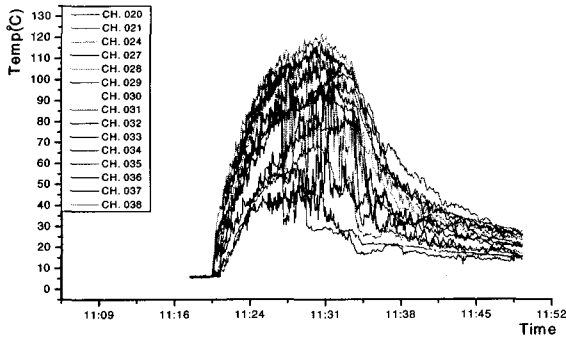


그림 15. 제연수벽용 물분무 노즐에 의한 수막형성시 온도분포

3) 소결론

터널화재시 수분포타입별 헤드에 의한 연기층의 온도변화는 표준형 스프링클러헤드의 경우 헤드 전면부 중앙높이에서의 온도대가 평균 30℃ 정도만 저하되었을 대부분의 열전대가 100℃를 상회하고 있는 것으로 분석되었으나 주거형 헤드와 물분무 노즐의 경우는 전체적인 지역의 온도대가 50℃ 이내로 떨어짐을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 특히 물분무 노즐에 의한 수막인 경우 가장 온도저감율이 높은 것으로 결과가 도출되었다.

4.2 터널내 환기구를 통한 배출연기의 유속분석

1) 수막의 형성방법에 따른 유속변화 비교분석

수막 분포타입별 방사압력에 따른 입자경과 유량에 따라 측정된 결과 유속변화의 결과는 아래와 같다.

(1) 표준형 스프링클러헤드 설치시 유속분포

환기구에서 분출되는 연기의 유속은 0.5m/s에서 서서히 증가하여 2.5m/s까지 상승한 후 거의 변화가 없이 지속되었으며 오히려 시간이 경과함에 따라 약간 상승하는 추세를 보였다.

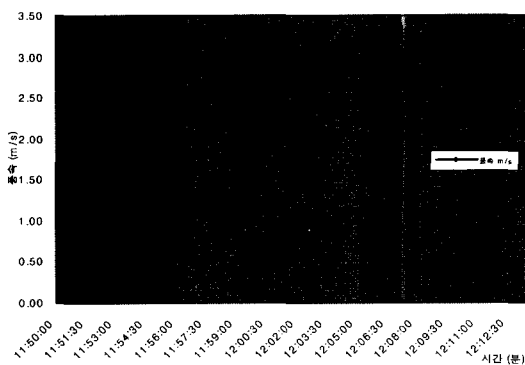


그림 16. 표준형 스프링클러헤드에 의한 수막형성시 환기구 배출연기의 유속변화

(2) 주거형 스프링클러헤드설치시 유속분포

주거형 스프링클러헤드는 퓨저블링크라는 속동형 반응타입이라 환기구에서 분출되는 연기의 유속이 1.0m/s정도에 조기 작동함으로써 수막을 통과한 후의 연기층이 완만한 온도저하를 보임에 따라 배출연기의 유속도 약 0.6 m/s정도를 유지하는 것으로 측정되었다.

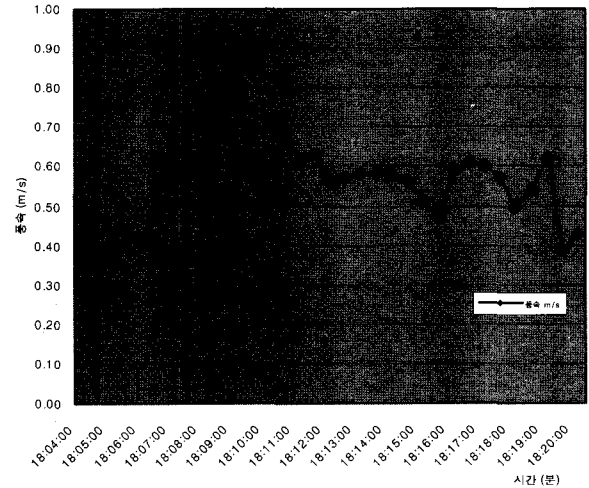


그림 17. 주거형 스프링클러헤드에 의한 수막형성시 환기구 배출연기의 유속변화

(3) 물분무 노즐에 의한 수막형성시 유속변화

노즐이 분사되기 전의 유속은 3m/s까지 일정하게 증가하는 경향이 나타나다가 물분무 노즐에 의한 제연수막이 형성된 시점부터는 급격하게 감소하여 공기유속이 0.5 m/s 까지 저하되는 것을 알 수 있었다. 또한 터널 내 기류의 영향을 받아 유속이 재상승하기도 하되 결과적으로 1.75m/s 이상은 상승하지 못하고 다시 0.6m/s 이하로 내려가는 경향을 보였다.

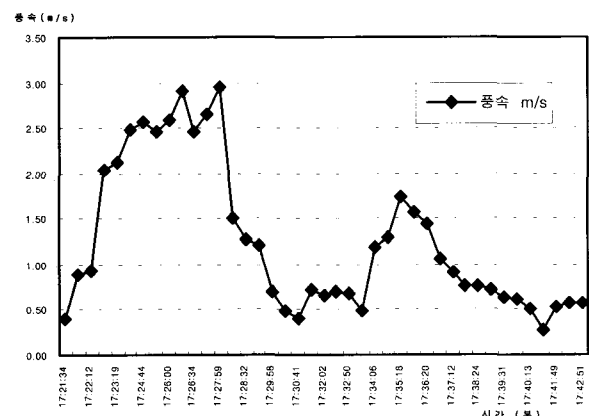


그림 18. 물분무 노즐에 의한 수막형성시의 환기구 배출연기의 유속변화

2) 소결론

물분무수의 입경과 유량이 각각 상이한 3가지 종류의 물분무 헤드를 사용하여 형성한 수막은 연기층의 온도를 모두 저감시키는 효과를 나타내고 있지만 입자경과 유량에 따라 큰

차이를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

400 μ m이상의 물분무수의 입경을 보이는 표준형 스프링클러 헤드를 사용한 수막은 연기층의 온도를 거의 저감시키지 못하는 것으로 조사된 반면에, 300 μ m이하의 입경을 가진 물입자를 분사하는 주거형 스프링클러와 물분무 노즐을 사용한 수막인 경우 연기층의 온도저감효과가 커 터널내 연기층의 유속 또한 현저하게 떨어뜨리는 것으로 분석되었다.

특히 200 μ m미만의 입경을 가진 물입자를 5개의 베인(Vain)을 통해 입체적으로 수막을 형성시키는 물분무 노즐을 사용할 경우 그 효과는 가장 탁월한 것으로 조사되었다. 결과적으로 연기층의 조기저하능력은 물입자의 입경이 200 μ m이하의 수막에서 효과가 탁월한 것으로 도출되었다. 또한 주거형스프링클러헤드와 물분무노즐의 분사유량이 표준형스프링클러헤드에 비하여 30%이상 적음에도 불구하고 연기층 조기저하능력이 현저히 높은 것으로 입증됨에 따라 연기의 온도저하를 통한 연기층 조기저하능력(drag-down ability)은 물의 분사량보다는 분무수의 입경과 분포형태에 따라 좌우되는 것으로 결론을 내릴 수 있었다.

4.3 연기층의 CO농도 변화분석

터널 화재시 발생하는 연기 중에는 많은 유독성 가스가 많이 포함되어 있지만 가장 많이 포함된 가스는 일산화탄소를 대표적으로 들 수 있는데 이런 가스가 수막을 통과한 후의 변화여부를 규명하기 위해 수행되었다. 연소매체로서 경유를 연소시킨 후 수막 통과전의 연기 중 CO함유량과 통과후의 함유량을 각각의 포집제에 채집하여 실험실에서 분석하는 방법을 적용하였다.

CO량을 정확히 측정하기 위해 제연수막이 형성되는 노즐 설치 지점의 전·후 5m 거리에 각각의 포집기를 설치하여 연기를 채집한 후 비분산 정필터형 적외선 분석기를 사용하여 그 농도를 측정하였다, 측정된 결과 수막의 통과 전 채집된 연기층인 경우 CO농도가 약 77.3PPM으로 조사된 반면에, 연기층이 수막을 통과한 후에는 51.6PPM으로 감소한 것으로 분석되었다 따라서 CO 농도는 수막에 의해 약 35%정도의 감소가 발생한 것으로 판단되어 터널내의 피난자에게 유독성 가스에 의한 피해를 어느 정도 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

5. 맺음말

터널내 횡단면을 가로지르는 제연수막이 적절하게 설치될 경우 연기의 확산을 저지할 수 있는 효과를 실험에 의해 정량적으로 입증함에 따라 일정한 간격으로 수막을 복수로 터널내 설치할 경우 연기의 급격한 확산을 방지하여 터널내의 피난자가 대피 중에 연기에 의한 피해위험을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 특히 실험결과에 의해 확인된 사실, 즉, 200 μ m미만의 입경을 가진 물입자를 5개의 베인(vain)을 통해 입체적으로 수막을 형성시키는 물분무 노즐에 의해 수막을 형성하여 터널의 전체단면을 완벽히 차단한다면 다음과

같은 효과를 보임으로 써 연기층의 확산을 차단할 수 있음을 확인하였다.

- 1) 150 $^{\circ}$ C이상의 고온의 연기층이 수벽을 통과하고 난 후에는 50 $^{\circ}$ C미만의 온도를 가진 연기층으로 변화하여 대피하는 피난자에게 위해를 주지 않는 중저온의 기류로 변질되는 효과를 보인다.
- 2) 연기가 수막을 통과할 경우 온도저하에 의한 부력상실이 급속히 일어나 유속이 2.5m/s에서 0.6m/s정도까지 거의 3/4이상 감소하는 효과를 보임에 따라 조기에 하강하여 피난자의 후면을 따라 확산하지 못할 것으로 확신가능하다.

따라서, 입자가 비교적 큰 일산화탄소입자는 수막을 통과하는 하지만 약 30%정도까지 물분무수가 갖고 있는 모멘텀(momentum)에 의해 바닥으로 떨어짐에 따라 유독가스를 어느 정도 거를 수 있을 것으로 확신가능하다.

참 고 문 헌

1. Arvidson, M., "Fixed Fire Suppression Concepts for Highway Tunnels", Tunnel Management International, March 2000, pp. 9-14.
2. Grant, G. & Southwood, P. 1999 Development of an Onboard Fire Suppression System for Eurotunnel HGV Shuttle Trains. Conference Proceedings: Interflam '99, Eighth International Fire Science & Engineering Conference, 29th June-1st July, Edinburgh Conference Centre, Scotland, Interscience Communications Ltd., pp. 651-662