지하철 객차 내 환기 속도가 고압 미세물분무 화재제어 시스템의 성능에 대한 실험평가

An Experimental Evaluation for the Effect of Ventilation Velocity in Subway Train on Performance of a High Pressure Water Mist Fire Suppression

김동운* 배승용* 유홍선**† 김동석*** 박원희****

Kim, Dong-Woon Bae, Seung Yong Ryou, Hong-Sun Kim, Dong-Suk Park, Won-Hee

ABSTRACT

This experiments are performed to investigate the effect of ventilation velocity on a high pressure water mist fire suppression in subway train. The experiment is conducted in half scale modeled train of a steel-welled enclosure (8.0m*2.4m*2.1m). The ventilation velocity is controlled by the ventilation duct through an inverter in the range of 0 to 2 m/s. The coverage-radius and an injection angle of an high pressure water mist system are measured. The mist nozzle with 7-injection holes is operated with pressure 80 bar. The heptane pool fires are used. The fire extinguishment times and the temperatures are measured for the ventilation velocities. In conclusion, because the momentum of injected water mist is more dominant than that of ventilation air, the characteristics of water mist, the fire extinguishment times and the temperatures are affected very little by ventilation velocity.

1.서론

지하철은 시민들에게 이동의 편리함을 제공하는 대표적인 도심의 대중교통수단이다. 사용 인구가 많은 이와 같은 공공 시설물에서의 화재사고는 짧은 시간에 많은 인명과 엄청난 경제적 손실로 이어질 수 있다. 이러한 이유로 최근에 들어서 화재사고 방지를 위한 방재기술 및 안전에 큰 관심을 두고 있다. 지하철은 그 특성상 공간적 제약이 매우 커 거의 밀폐공간과 유사하며 이와 같은 공간에서 화재 발생 시, 초기 화재진압이 이루어지지 않으면 객차 내부에서 연소된 유독가스와 열기에 의해 자칫 대형사고로 이어진다. 지하철 화재사고의 대표적인 사례로는 1995년 10월 25일 아제르바이잔의 수도 바쿠시에서 지하철 객차 전기 합선으로 인한 화재가 발생하여 300여명이 사망한 대형 화재사고가 있었고 국내에선 2003년 2월 18일 대구지하철 1호선 중앙로역에서 불특정 다수에 대한 방화로 지하철 객차 내 화재가 발생하여 191명이 사망하였다.

현재 국내에서 운영되는 지하철 객차 내 화재진압을 위한 재래식 소화 장비가 객차 마다 2개씩 설치되어 있다. 그러나 지하철 객차 내 화재 발생 시 초기 화재진압을 실패하였다면 재래식 소화 장비로는 역부족일 것이다. 따라서 현재 운영되는 지하철 객차 내 소화 시스템보다 더 좋은 화재진압 효율과 안

* 중앙대학교 기계공학부 대학원, 비회원

** 중앙대학교 기계공학부 교수, 정회원

†교신저자 E-mail :cfdmec@cau.ac.kr

TEL : (02)813-3669 FAX : (02)813-3669

*** 방재시험연구원 소화연소팀, 정회원

**** 철도기술연구원 공기유동연구그룹, 정회원

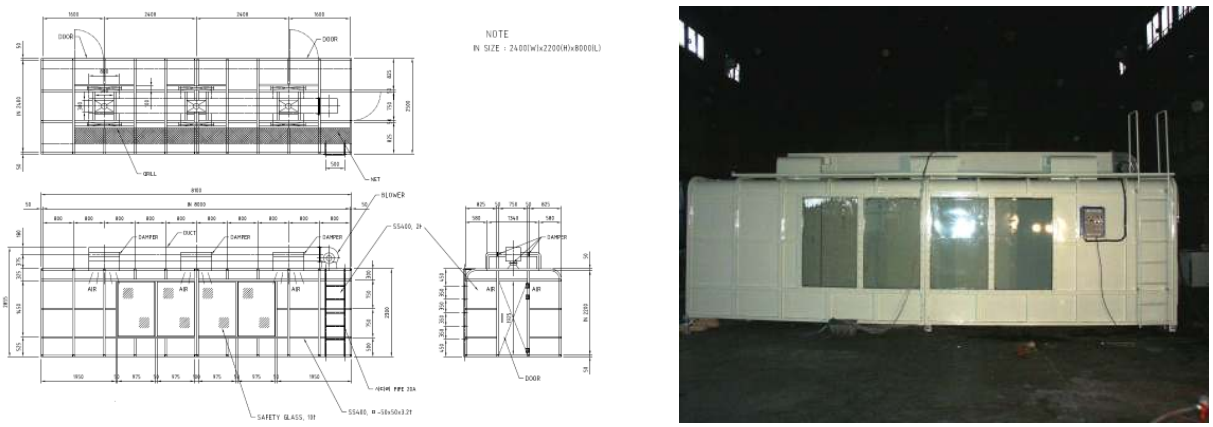
정성을 확보하기 위해서 통합된 화재 감지 및 자동소화시스템 구축이 중요하다. 밀폐된 공간과 유사한 지하철에서의 소화 시스템 중, 이미 NAF S-III나 Inergen, FM 200등의 청정 가스계 소화설비가 상용화 되었지만, 소화설비가 복잡하고 가격이 비싸며 주로 산소차단에 의한 화재진압으로 효율적인 면이 떨어진다. 또한 청정 가스계 소화액 중, 비록 하론 1301 소화액 보다 낮은 수치를 보이지만 오존 파괴지수와 독성을 가지고 있고 대기에 잔존하는 시간이 길어 환경적인 측면에서도 문제가 대두되고 있다. 최근에는 이러한 가스계 소화설비의 문제점에 대한 대안으로 환경친화적이며, 기존의 스프링클러 시스템의 물 소비량의 약 10%정도의 물을 사용한다는 장점을 가지고 있는 고압 미세물분무에 의한 화재진압 장치가 도입되었다. 예로 스페인 마드리드 지하철에서는 전동차에 미세물분무 장치 및 CCTV 카메라와 흡연식 연기감지기가 장착되어 있다

고압 미세물분무에 의한 화재진압 장치는 지하철 객차 내 천정부에 설치된 노즐에서 분무되어지는 미세 액적이 화염 및 플럼(plume)의 열을 흡수하여 화원의 온도를 떨어뜨리는 냉각 효과와 그 열을 흡수함으로서 액적의 증발에 따른 체적 팽창으로 생기는 질식에 의한 산소 차단 효과로 화재를 억제한다. 그러므로 화원에 대한 노즐에서 분무되어지는 고압 미세 액적의 거동이 매우 중요하다. 현재 국내에서 운영 중인 지하철 차량에는 냉난방 시스템 및 공조 장치가 천정부에 설치되어 있다. 고압 미세 액적의 방호반경 및 액적의 거동과 분무압력은 지하철 객차 내 화재진압에 있어서 중요한 변수이다. B. Yao[1] 등은 제한된 공간에서의 물분무 화재 시험에서 충분한 유량과 환기량이 적을수록 소화 효과가 증가한다고 하였고, M. Morita[2] 등은 화재 진압요소 중에 연료 냉각효과가 증발잠열과 산소 차단효과 등의 다른 요소보다 상대적으로 작다는 사실을 제시하였다. 국내 연구로는 김성찬[3]등과 노재성[4] 등 미세물분무의 실험과 수치해석적 연구를 하였으나 지하철 환기 속도에 따른 고압 미세물분무 현상에 대한 연구는 아직도 미흡한 실정이다. 따라서 화재 발생 시 지하철 객차 내 환기 속도가 고압 미세물분무 화재진압 장치에서 분무되어지는 방호반경 및 액적의 거동과 특히 화원의 소화시간에 영향이 미칠 것으로 사료되어 본 실험을 실시하였다. 따라서, 본 연구는 지하철 객차 내 냉난방 및 공조 시스템의 환기 장치에서 환기 속도 변화에 따른 고압 노즐에서 분사되어지는 고압 미세 액적의 분사각도(방호반경)의 변화와 화재 실험을 통하여 화재 진압성능을 파악하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

지하철 객차 실내 환기 속도에 의한 고압 미세물분무 화재진압 성능을 파악하기 위해 그림1과 같이 실제 지하철 객차를 모형 제작하여 환기 속도의 영향에 의한 화재실험을 실시하였다. 제작된 모형 객차는 실제 지하철 객차의 길이를 1/2로 축소하여 길이 8m, 폭 2.4m 높이 2.2m로 둘러싸여진 강철 프레임과 판으로 제작되었다. 그림2는 실험장치의 개략도이다.



(a)실험장치 설계도 (b)실험장치 사진

그림1. 실험장치 설계도와 사진

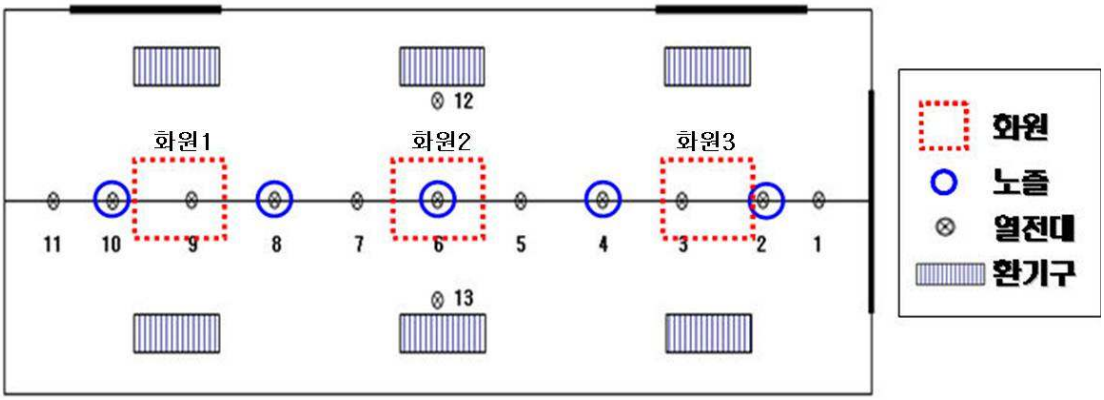


그림2. 실험장치의 개략도

그림2에서 보는 바와 같이 모형 객차 실내 천정 부에 80cm×50cm의 환기구 6개가 설치되어 있다. 외부에 설치된 제어기로 모형 객차의 상부에 설치된 휀을 작동시켜 환기 속도를 변화시켰다. 모형 객차 실내로 유입되는 공기는 중앙덕트를 거쳐 실내 각 환기덕트로 보내진다. 각 환기덕트 내 덤퍼를 조절하여 각각 동일한 풍량으로 제어하였다. 환기 속도에 의한 고압 미세물분무 화재실험에서 모형 객차 실내 온도 분포 측정은 K-type 열전대를 사용하였으며 그림2에서 보는 바와 같이 설치하였고 열전대에 의한 온도 측정 범위는 -20 ~ 1250℃이다. 열전대로부터 측정된 신호는 Agilent 34970 data acquisition unit를 통해 수집되었으며 RS-232 케이블을 통해 PC로 전송되었다.

2.2 고압 미세물분무 화재실험

본 실험은 실제 국내에서 운영되어지는 지하철 객차를 그림1과 같이 모형을 제작하여 환기 속도에 대한 고압 미세물분무 화재진압 성능을 파악하기 위하여 환기 속도를 변화하여 각각의 경우에 따른 소화시간을 측정하였다. 실험의 오차를 줄이기 위해 각각의 경우를 4회 반복 실험을 실시하였고 실험간 시간을 두어서 모형 객차 실내 환경을 초기 동일한 조건으로 주었다. 고압노즐에서 분무되어지는 미세 액적의 분사각 변화를 파악하기 위하여 화원 없는 경우에서 환기 속도를 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5 및 2 m/s로 변경하여 사진 측정하였다. 화재실험은 모형 객차 실내 3개의 Pan을 동시에 점화하여 각각의 환기 속도에 따른 모형 객차 실내의 온도를 측정하여 13개의 열전대 중에서 하나의 열전대 온도가 72℃에 도달하면 이 시점으로부터 10초(반응시간)후에 고압 미세물분무 시스템 장치가 작동하도록 하였다.

2.3 화원

화원으로는 0.3×0.3m의 pool fire 3개를 사용하였으며, 모형 객차 내 중앙위치의 화원을 기준으로 양방향으로 2m 간격을 두고 설치하였다. 실험에 사용된 연료는 헵탄이며, 발열량 산정은 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c \qquad (1)$$

$\dot{Q}$ 은 발열량, A는 화원의 면적을 나타내며, ΔH_c는 연소열, $\dot{m}''$는 연소율을 각각 나타낸다. 헵탄의 경우 ΔH_c는 44.6MJ/kg이며, 위 식에 의하여 발열량을 구하였으며, 연소효율은 0.7[5]로 하였다. 따라서 발열량은 79.77kW이다.

도표1. 고압노즐 사양

1m 하에서의 분무액적의 크기(SMD)	약 60μm
1m 하에서의 분무액적의 속도	중앙부 17m/s
	외곽부 30m/s
분사각	약 100°
1m 하에서의 분사반경	약 2.2m
k-factor	1.6
제원	0.8mm 7구경
분사유량	14.31 lpm
작동 압력	80 bar

2.3 고압노즐

모형 객차 실내 바닥으로부터 상부로 2m 위치에 고압노즐을 설치하였고 모형 객차 중앙위치에서 설치된 고압노즐을 기준으로 양방향으로 1.5m 간격을 두고, 총 5개의 고압노즐을 설치하였다. 실험에 사용된 고압노즐은 표1과 같이 직경 0.8㎜의 7구경과 작동 압력은 80bar로 공급하였다.

3. 실험결과

3.1 분사각 측정

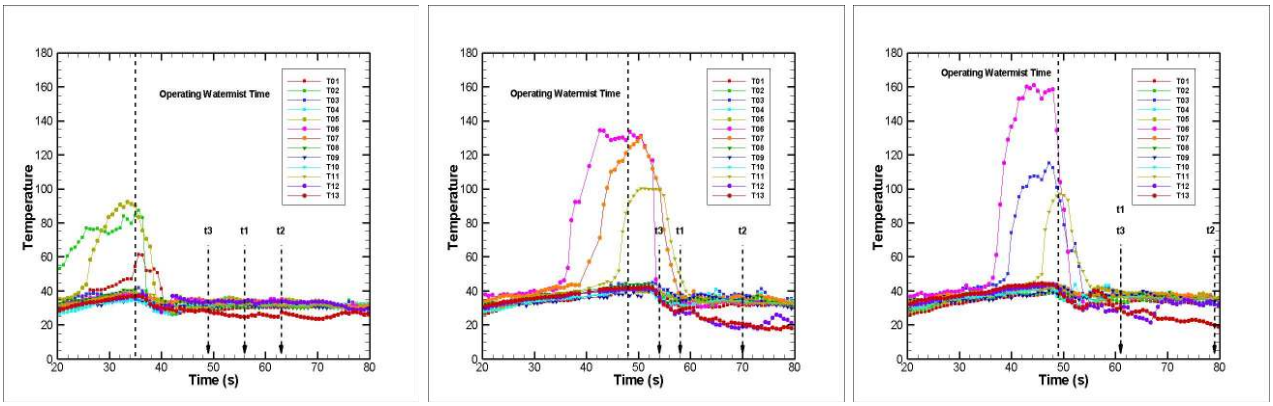
미세물분무 분사각 측정은 동일한 지점에서 사진 측정하여 육안 판별하였고 그림3은 각 환기 속도에서의 측정값이다. 환기 속도가 증가함에 따라 미세 액적의 분사각이 감소하였지만 환기 속도 0 m/s와 최대 2 m/s의 분사각 차이는 약 8% 이내로 환기 속도의 영향이 크지 않았다. 이와 같은 이유는 고압노즐의 특성상 노즐 외곽부 1m아래에서의 분무액적의 속도 30m/s는 최대 환기 속도 2m/s 일 때와 비교해 보아도 상당히 높음을 알 수 있다. 따라서 약간의 실험 오차가 발생 할 수 있지만, 분무되어지는 물의 운동량이 공기의 운동량보다 상대적으로 높아 환기 속도에 의한 미세액적의 분사각의 변화 효과가 작음을 알 수 있다.

3.2 소화작용

일반적으로 물분무 화재 제어시스템의 소화현상은 연료의 냉각효과와 증발된 미세액적의 체적팽창에 의한 산소 차단 효과가 지배적이다. 환기 시스템이 있는 경우, 미세액적의 분사각 감소와 산소 차단 효과가 낮아질 것으로 예상되어 속도가 없는 경우와 단계적으로 환기 속도를 증가하여 화재실험 시 온도분포와 소화시간을 측정하였다. 본 연구에서는 소화시간을 72℃도달시간, 반응시간, 점화 후 총 소화시간 및 고압 미세물분무 작동 후 소화시간으로 분류하여 분석하였다. 그림4는 환기 속도에 따른 온도분포를 나타낸다.

0 m/s 0.5 m/s 1 m/s 1.5 m/s 2m/s

그림3. 환기 속도의 영향에 의한 분사각도



0 m/s　　1.0 m/s　　2.0 m/s

그림4. 환기 속도에 따른 온도분포

도표2. 72도 도달시간과 소화 시간

화 재 크 기	화 재 위 치	휀 속 도 (m/s)	72도 도달시간 (s)	물분무 작동시간(s)	총 소화 시간(s)			소화 시간 (s)		
					t1	t2	t3	t1	t2	t3
30cm	중앙 에서 양쪽 2m 간격	0.0	25	35	56	63	49	21	28	14
		0.5	34	44	65	64	65	24	20	21
		1.0	38	48	58	70	54	10	22	6
		1.5	20	30	54	49	41	24	19	11
		2.0	39	49	61	76	61	12	30	12

고압 미세물분무 시스템 작동 후 약간의 지연을 두고 온도가 떨어짐을 알 수 있다.[3] 도표2는 소화 시간을 측정한 값이다. 각 환기 속도에 따라 72℃도 도달시간은 다르지만, 고압 미세물분무 시스템 작후 실제 소화시간은 20~30(s)임을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 2m/s 이하의 환기 속도는 고압으로 분사되는 미세액적의 분사각과 거동에 크게 영향을 주지 않기 때문이다.

. 결론

본 연구는 환기 속도에 의한 고압 미세물분무의 화재 성능을 파악하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

환기 속도를 0과 2 m/s로 변경시키면서 화재실험을 한 결과, 고압노즐에서 분사되는 미세액적의 분사

15s　　30s(분사)　　40s　　50s　　소화

그림3. 소화과정 (환기 속도 1.5 m/s)

각의 변화는 환기 속도가 커질수록 작아지지만 그 차이는 8%이하의 수치를 보이고 있다. 또한 이러한 환기 속도에 의해 분사각의 변화는 소화시간에도 큰 영향을 주지 않는다.

후 기

본 연구는 건설교통부 국가 교통 핵심 기술 개발사업 (03 - 안전 -22) 지원으로 수행되었으며 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. Yao, B., Fan, W. and Liao, G. (1999), "Interaction of Water Mists with a Diffusion Flame in a Confined Space", Fire Safety Journal, Vol. 33, pp. 129-139
2. Morita, M., Minami, T. and Kikkawa, M. (2000), "Suppression Mechanism of Water Mist for Pool Fire", 15th Meeting of the UJNR Pannel on Fire Research and Safety, Vol. 1, pp.273-279
3. 김성찬, 박현태, 유홍선(2003), “물분무를 이용한 화재 제어에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회 논문집 B권, 제 27권, 제 3호, pp. 367-373
4. 노재성, 양승신, 유홍선, 김동현, 정우성, 장용준(2006), “중저압 물분무를 이용한 객차내 화재진압에 관한 실험 및 수치해석적 연구
5. 고승우, 고권현, 유홍선(2006) “액적분열을 고려한 미세물분무 화재제어에 대한 수치해석”, 한국철도학회논문집, 제9권, 제3호, pp. 291-297