

객차내 환기속도가 고압 미세물분무 화재제어 시스템 성능에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

김동운 · 배승용 · 유홍선[†]

중앙대학교 기계공학부

(2007. 6. 14. 접수 / 2008. 7. 2. 채택)

An Experimental Study for the Effect of Ventilation Velocity on Performance of a High Pressure Water Mist Fire Suppression System

Dong-Woon Kim · Seung-Yong Bae · Hong-Sun Ryou[†]

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received June 14, 2007 / Accepted July 2, 2008)

Abstract : This experiments are performed to investigate the effect of ventilation velocity on a high pressure water mist fire suppression in train. The experiment is conducted in half scale modeled train of a steel-welld enclosure (5.0m×2.4m×2.2m). The ventilation velocity is controlled by the ventilation duct through an inverter in the range of 0 to 3m/s. The coverage-radius and an injection angle of an high pressure water mist system are measured. The mist nozzle with 5-injection holes is operated with pressure 60bar. The heptane pool fires are used. The fire extinguishment times and the temperature 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 temperature are affected very little by ventilation velocity.

Key Words : water mist, suppression system, ventilation velocity

1. 서론

공공 시설물 중 지하철 화재는 짧은 시간에 열기와 유독가스에 의해 대형사고로 이어질 가능성이 매우 높아 많은 인명 피해 및 막대한 경제적 손실을 야기한다. 대표적인 지하철 화재 사례로는 1995년 10월 25일 아제르바이잔의 수도 바쿠시에서 지하철 객차 전기합선으로 화재가 발생하여 300여명이 사망한 대형 화재사고가 있었다. 국내에선 2003년 2월 18일 대구지하철 1호선 중앙로역에서 방화로 인한 지하철 객차내 화재가 발생하여 191명이 사망하였고, 2년 후에는 철산역에서 온수역으로 운행하는 7호선 객차에서도 화재가 발생하여 객차 3칸이 전소되는 사례가 있었다.

사례에서 보는 바와 같이 이러한 대형사고의 원인으로서는 화재 초기에 정확한 판단과 신속한 진압이 미흡했던 것이 대부분이다. 또한 지하철 화재는

공간적 특성상 소화 및 인명구조를 위한 접근이 어렵다. 따라서 지하철 객차내 화재발생시 직접 화재를 진압할 수 있는 시스템이 필요하며 이를 위해서는 화재진압 효율과 안정성 확보를 위한 통합된 화재 감지 및 자동 소화시스템의 구축이 중요하다. 화재진압 소화시스템 중, 현재 가장 많이 사용하는 할론은 몬트리올 협정에 의해 오존 파괴물질로 지정되었고 이미 생산 중단을 협약하였다. NAF S-III, Inergen 및 FM 200 등의 청정 가스계 소화설비도 있지만, 소화설비가 복잡하고 가격이 비싸며 주로 산소 차단에 의한 화재진압이므로 효율적인 면이 떨어진다. 또한, 청정 가스계 소화액 중에는 할론 1301 소화액 보다 낮은 수치를 보이지만 오존 파괴지수와 독성을 가지고 있고, 대기에 잔존하는 시간이 길어 환경적인 측면에서도 문제가 대두되고 있다. 최근에는 이러한 가스계 소화설비의 대안으로 환경친화적이고 기존의 스프링클러 시스템의 약 10% 정도의 물을 소비하며 화재진압 물질로 물을 사용하기 때문에 독성이 없으며, 화재진압시 연기를 제거

[†] To whom correspondence should be addressed.
cfdmcc@cau.ac.kr

하여 신속한 피난 유도를 할 수 있는 등의 장점을 가진 미세물분무를 이용한 화재진압 장치에 대한 관심이 높아지고 있다. 선진국에서는 1990년 초반부터 미세물분무를 이용한 소화설비 개발을 시작으로 이미 상용화하는 추세이며, 그 예로 스페인 마드리드 지하철에서는 전동차에 미세물분무 장치 및 CCTV 카메라와 흡연식 연기감지기가 장착되어있다.

미세물분무에 의한 화재진압 장치는 지하철 객차내 천정부에 설치된 노즐에서 분무되는 미세액적의 화염 및 플룸(plume)의 열을 흡수하여 화원의 온도를 떨어뜨리는 냉각효과와 그 열을 흡수함으로써 액적의 증발에 따른 체적팽창으로 생기는 질식에 의한 산소차단 효과로 화재를 억제한다. 그러므로 화원에 대한 노즐에서 분무되는 미세액적의 거동이 매우 중요하다. B. Yao¹⁾ 등은 제한된 공간에서의 객차내 화재시험에서 충분한 유량과 환기량이 적을수록 소화효과가 증가한다고 하였고, M. Morita²⁾ 등은 화재진압 효과 중에 연료의 냉각효과가 증발잠열과 산소차단 등의 다른 효과보다 상대적으로 작다는 사실을 제시하였다. H. Brarrow³⁾ 등은 미세액적의 직경이 증가할수록 분사되는 거리가 증가한다고 하였고 J. Liu⁴⁾ 등은 PVC 고체연료를 이용한 미세물분무 화재실험에서 단일 노즐에서 분무되어지는 미세액적의 크기와 속도의 관계 및 복사열에 의한 재발화 연구를 하였다. K. C. Adiga⁵⁾ 등은 노즐을 사용하는 대신에 초음파를 이용하여 20 μ m 이하의 미세액적의 화재진압 실험을 하였다. 국내 연구로는 김성진⁶⁾ 등과 노재성⁷⁾ 등은 미세물분무의 실험과 수치해석적 연구를 비교 분석하였으나 제한된 공간에서의 미세물분무 화재진압 특성에 관한 연구를 하였을 뿐, 지하철과 같은 중요한 시설물에서의 미세물분무를 이용한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

현재 국내에서 운행 중인 지하철 차량에는 냉난방 시스템 및 공조장치가 천정부에 설치되어 있다. 미세액적의 거동, 분사각 및 분사압력은 지하철 객차내 화재진압에 있어서 중요한 변수이기 때문에 미세물분무를 이용한 화재진압 장치를 객차내 적용에 있어서 공조 시스템의 환기와의 영향이 분명히 규명되어야 한다. 최근, 고승우⁸⁾ 등은 객차내 공조 시스템에서의 미세물분무 현상을 시뮬레이션을 통해 환기속도가 증가할수록 분무반경은 작아진다고 하였으나 화원이 없는 조건에서 실시하였고 실험을 통한 검증이 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구는 객차내 화재발생시 공조시스템의 환기가 고압 노즐에서 분무되어지는 미세액적의

거동 및 분사각에 영향을 미칠 것으로 판단되고, 이로 인해 소화시간 또한 변화할 것으로 예상되어 이에 대한 실험을 수행하여 객차내 미세물분무 화재진압 성능을 파악하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

객차내 환기속도에 의한 고압 미세물분무 화재진압 성능을 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 모형을 제작하여 환기속도의 영향에 의한 화재실험을 실시하였다. 제작된 모형객차는 길이 5m, 폭 2.4m 높이가 2.2m로 둘러싸여진 강철 프레임과 판으로 제작되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 모형객차 실내 천정부에 80cm×10cm의 환기구 4개가 설치되어 있다. 모형객차 외부에 설치된 제어기로 상부에 설치된 휠을 작동시켜 실내로 유입되는 환기속도를 0~3m/s로 변화시켰다. 객차 실내로 유입되는 공기는 중앙 덕트를 거쳐 각 환기 덕트로 보내지고 환기 덕트의 덤퍼를 조절하여 각각 동일한 풍량으로 유입되도록 제어하였다. 환기속도의 영향에 대한 고압 미세물분무 화재진압 실험시 실내 온도분포 측정은 K-type 열전대를 사용하였으며 Fig. 1과 같은 위치에 설치하였다. 사용한 열전대의 온도 측정범위는 -20~1250℃이며, 측정된 신호는 Agilent 34970 data acquisition unit를 통해 수집되었고 RS-232 케이블을 통해 PC로 전송되었다.

2.2. 노즐

모형객차내 바닥으로부터 상부로 2m 위치에 고압 노즐을 설치하였고 모형객차 중앙 위치에서 설치된 고압 노즐을 기준으로 양방향으로 1.5m 간격을 두고 총 3개의 고압 노즐을 설치하였다. 실험에

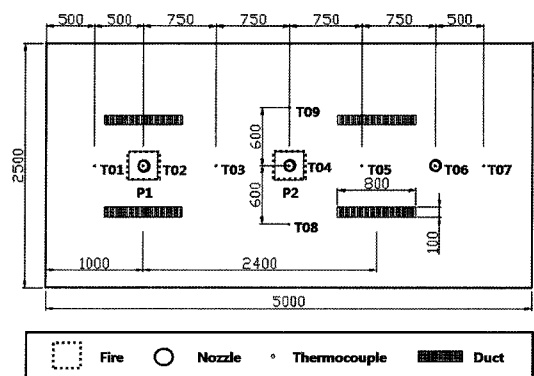


Fig. 1. Schematic of the experiment device.

Table 1. The specifications of high pressure nozzle

Droplet size(1m below)	SMD about 70 μ m
Droplet velocity(1m below)	Center about 15.2m/s
	Outside about 26.5m/s
Injection angle	About 95°
Coverage-radius(1m below)	About 2m
k-factor	1.14
Nozzle type	0.8mm 5-holes
Flow-rate	8.90lpm
Operating pressure	60bar

사용된 고압 노즐은 Table 1과 같이 직경 0.8mm의 5구경이고 작동압력은 60bar로 공급하였다.

2.3. 화원

화원으로는 0.3×0.3m의 Pool Pan 2개와 헵탄을 사용하였다. 헵탄은 발열량이 높고, 고체 화재등과 같은 다른 화재들에 비해 연소면적이 일정하기 때문에 발열량 산정이 용이한 장점이 있다. 화원의 위치는 객차내 천정부에 설치된 노즐 아래 지점(Fig. 1 참고)에 설치하였고 발열량 산정은 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \eta m'' A \Delta H \quad (1)$$

\dot{Q} 은 발열량, η 는 연소효율, m'' 은 연소율, A 는 화원의 면적을 나타내며, ΔH 는 연소열을 각각 나타낸다. 헵탄의 경우, m'' 는 75g/m²-s이고 ΔH 는 44.6MJ/kg⁹이다. 위 식 (1)에 적용하여 발열량을 구하였으며 연소효율은 0.7¹⁰로 하였다. 따라서 발열량은 210.74kW이다.

2.4. 고압 미세물분무 화재실험

본 실험은 모형객차를 제작하여 환기속도의 영향에 대한 고압 미세물분무 화재진압 성능을 파악하기 위하여 각각의 환기속도의 변화에 따른 분사각, 온도분포 및 소화시간을 측정하였다. 환기의 영향을 파악하고자 화원이 없는 상태에서 환기속도를 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3m/s씩 단계적으로 증가시키면서 고압 노즐에서 분무되는 미세액적의 분사각 변화를 측정하였다. 화재실험은 모형객차 실내 2개의 Pan을 동시에 점화하여 각각의 환기속도 조건에서 실내온도를 측정하였다. 화재실험시 T02, T04번(Fig. 1 참고) 위치 열전대 온도가 72℃에 도달한 시점으로부터 10초(반응시간)후에 고압 미세물분무 화재진압 장치를 작동시켰다. 화원 위치

는 미세물분무 소화설비 테스트 시나리오를 적용하여 노즐 아래 위치에서만 실험을 수행하였다¹¹⁾. 매번 실험의 오차를 줄이기 위해 반복실험과 실험간 시간을 두어서 모형객차내 환경조건을 동일하게 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분사각 측정

각 환기속도의 영향에 대한 미세액적의 분사각 측정은 동일한 지점에서 실시하였고 Table 2는 실험에 의한 측정값을 나타낸 것이다. 환기속도가 증가함에 따라 미세액적의 분사각이 감소하였지만 환기속도가 없을 경우와 최대 환기속도인 3m/s의 분사각 차이는 약 7.4% 이내로 환기속도에 의한 영향이 크지 않았다. 본 실험에서 약간의 오차가 발생할 수 있지만, 사용된 고압 노즐의 특성상 노즐 외곽부 1m 아래에서 분무액적의 속도는 약 26m/s 이므로 최대 환기속도 3m/s일 때와 비교해 보아도 상당히 높다. 또한, 물의 밀도는 공기의 밀도에 약 1,000배 정도이다. 그러므로 고압 노즐에서 분무되어지는 물의 운동량이 공기의 운동량보다 상대적으로 크기 때문에 환기속도가 증가하여도 환기되는 공기에 의한 간섭효과가 작아 미세액적의 분사각은 크게 변화가 없다고 유추된다.

3.2. 소화작용

일반적으로 미세물분무 화재제어 시스템의 소화 현상은 미세액적 의한 화염 및 플럼의 직접적인 냉각효과와 미세액적의 증발로 액상에서 기체 상태로 체적팽창하면서 상대적으로 주위의 산소 농도를 희박하게 하는 질식효과가 지배적이다. 만약 동일 분무조건 하에서 화원의 소화시간은 발열량과 화원 주변 산소농도에 크게 영향을 받는다. 환기 시스템이 있는 경우, 환기의 영향으로 노즐에서 분무되어지는 미세액적의 분사각 감소와 화원 주위의 산소 농도에 영향을 미칠 것으로 예상되어, 환기가 없는 경우에서부터 환기속도를 단계적으로 증가시켜 화재실험을 실시하였고 각 실험시 온도 분포와 소화시간을 측정하였다.

Table 2. Injection angle as the effect of ventilation velocity

0m/s	0.5m/s	1.0m/s	1.5m/s	2.0m/s	2.5m/s	3.0m/s
135°	129°	129°	127.5°	126.5°	127°	125°

Fig. 2는 환기의 영향이 가장 큰 지점인 열전대 T02 위치(Fig. 1 참고)에서 환기 영향에 대한 온도 분포이다. 환기속도가 증가할수록 객차내 산소농도가 증가하여 온도분포는 더 높게 측정될 것으로 판단하였으나 오히려 환기속도가 높을수록 낮았다. 이것은 열전대 설치위치가 화원으로부터 충분히 멀리 있고 또한, 화원으로 발생된 연기가 열전대로 이동하면서 환기구에서 배출되는 공기에 의해 냉각되는 효과로 파악된다. 객차내 환기속도가 없는 0m/s와 최대 환기속도인 3m/s일 때의 온도 차이는 약 20°C가 발생하였다.

Fig. 3은 가장 먼저 72°C에 도달한 열전대의 온도 분포이다. 열전대 T02, T04 위치는 화원 바로 위

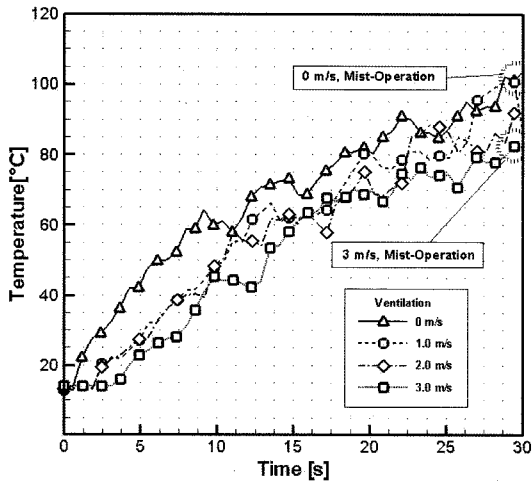


Fig. 2. Difference of T02 temperature on variable ventilation velocities.

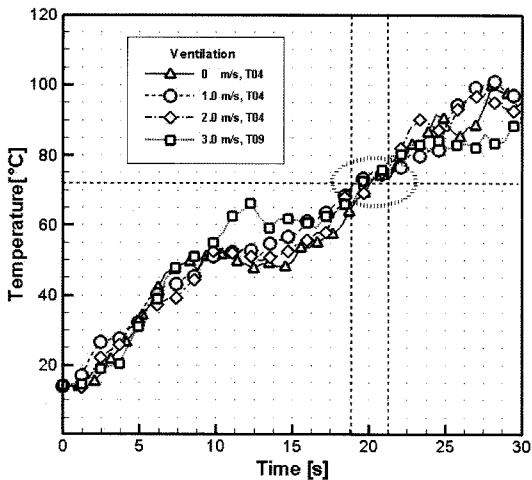


Fig. 3. Temperature distribution of Thermocouples at 72°C.

에 위치하기 때문에 다른 위치보다 먼저 72°C에 도달할 것으로 예상하여 72°C 도달시간은 두 개의 열전대 T02, T04 중 먼저 72°C까지 도달한 열전대를 선택하였다. 환기 효과가 큰 열전대 T02의 온도분포와 다르게 열전대 T04의 온도분포는 환기구와 다소 떨어진 지점이므로 비록 환기속도가 증가하여도 환기의 간섭효과가 적어 모든 환기속도에 대해 유사한 경향을 보이고 이로 인해 72°C 도달시간 또한 20초 이내로 큰 차이가 발생하지 않았다.

Fig. 4는 환기속도에 따른 객차내 평균천장온도 분포를 나타낸다. 고압 미세물분무 작동 후 약간의 지연을 두고 온도가 급격히 하강하는 초기냉각구간과 점진적으로 감소하는 냉각구간으로 분류되어 냉각된다⁶⁾. 환기속도가 증가할수록 약간의 온도차이가 발생하지만 온도 성장률은 거의 유사한 경향을 보인다. 이로 인해 최대 환기속도인 3m/s 이하에서는 환기에 대한 영향이 작다고 유추된다.

Fig. 5는 환기속도가 0m/s이고 고압 미세물분무를 작동한 후, 화원 위치와 화원이 없는 위치에서의 온도분포를 나타낸다. 화원 위치인 경우 온도는 감소하다 증가하고 다시 감소하는 경향을 보인다. 이는 미세액적이 고압에 의해 빠른 속도로 화원에서 발생된 연기로 침투하면서 열을 흡수하고 수증기로 증발하는 과정에서 온도가 급격히 감소한다. 하지만 화염과 플럼에 의한 열공급 때문에 순간적으로 온도가 상승하나 계속되는 분무로 다시 온도는 급속하게 냉각이 된다. 이에 반해 화원이 없는 위치에서는 냉각 현상만 나타난다.

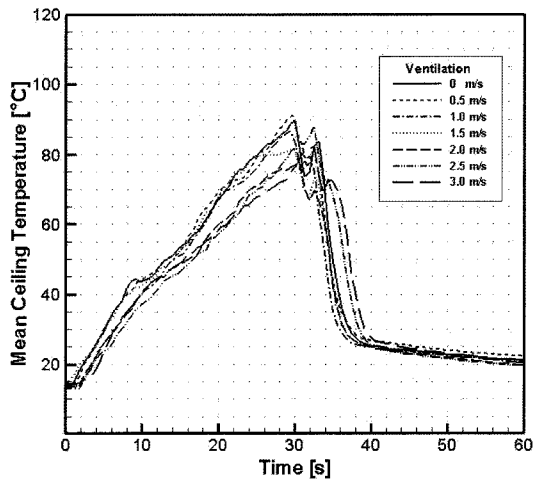


Fig. 4. A variable ventilation of mean ceiling temperature with time.

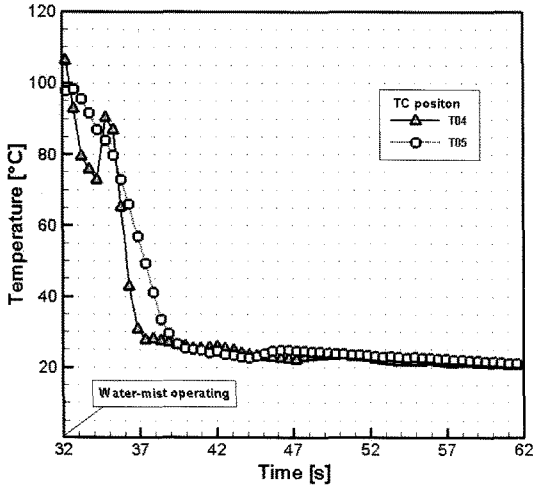


Fig. 5. Temperature distribution since water mist operates.

Table 3. Reaching time at 72°C and mean extinction time

Vent velocity (m/s)	Initial Temp. (s)	Outdoor Temp. (s)	Reaching time at 72°C (s)	Extinction time (s)	
				P1	P2
0.0	12.1	12.2	20	1	3
0.5	14.1	13.6	18.5	1	2
1.0	13.1	12.9	19	1.5	2.5
1.5	13.9	12.8	18.5	1.5	2.5
2.0	13.3	12.6	20.5	1	2
2.5	13.2	12.6	23	2	2
3.0	13.7	12.7	21	1	3

Table 3은 환기속도에 따른 72°C 도달시간과 소화시간을 측정된 값이고 소화시간은 각 화원 위치인 P1, P2(Fig. 1)에 대해 나타내었다. 각 환기속도에 따른 객차내 화재실험에서 소화시간은 환기속도가 증가하였음에도 불구하고 고압 미세물분무 화재진압 작동 후 실제 소화는 3초 이내에 이루어졌다. 이와 같은 이유는 3m/s 이하의 환기속도는 고압으로 분사되는 노즐의 분사각 변화에 크게 영향을 주지 않기 때문에 고압으로 분무되는 미세액적이 화염을 직접 냉각시키고 산소를 차단하는 효과가 지배적으로 작용함에 따라 소화시간이 짧아지는 경향을 나타낸다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 환기속도의 영향에 의한 고압 미세물분무 화재진압 실험을 실시하여 성능을 파악하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 환기속도가 0m/s에서 3m/s로 증가하면 고압 노즐에서 분무되는 미세액적의 분사각이 감소하지만, 고압 노즐의 특성상 분무되어지는 미세액적의 운동량이 환기되는 공기의 운동량보다 크기 때문에 최대 분사각 차이는 약 7.4% 이내로 환기속도에 의한 영향이 크지 않았다.
- 2) 환기속도가 증가할수록 화원에서 발생된 연기는 공기에 의해 냉각되어 환기구 위치의 온도는 감소되고 환기가 없는 경우와 최대 3m/s일 때 환기구 위치의 온도는 약 20°C 차이가 발생한다. 하지만 모든 환기속도에 대하여 평균천장 온도상승률은 유사한 경향을 나타낸다.
- 3) 객차내 환기속도의 증가에 따라 노즐의 분사각이 감소하였지만, 이 효과가 물분무 분무변경에 크게 영향을 주지 않아 0~3m/s의 환기속도에 따른 소화시간은 3초 이내로 큰 차이가 없었다.

감사의 글 : 본 연구는 2006년도 중앙대학교 교내연구비에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) B. Yao, W. Fan and G. Liao, "Interaction of Water Mists with a Diffusion Flame in a Confined Space", *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 129~139, 1999.
- 2) M. Morita, T. Minami, A. Kikkawa, A. Kubota, H. Megumi and H. Suzuki, "Suppression Mechanism of Water Mist for Pool Fire", 15th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, Vol. 1, pp. 273 ~ 279, 2000.
- 3) H. Barrow and C.W. Pope, "Droplet Evaporation with Reference to the Effectiveness of Water Mist Cooling", *Applied Energy*, Vol. 84, pp. 404~412, 2007.
- 4) J. Liu, J. Qin, X. Huang and G. Liao, "Experimental Study on Suppressing PVC Fire with Water Mist in a Confined Space", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, pp. 747~751, 2007.
- 5) K.C. Adiga, R. F. H. Jr, R. S. Sheinson, F. W. Williams and S. Ayers, "A Computational and Experimental Study of Ultra Fine Water Mist as a Total Flooding Agent", *Fire Safety Journal*, Vol. 42, pp. 150~160, 2007.
- 6) 김성찬, 박현태, 유홍선, "물분무를 이용한 화재제어에 관한 실험적 연구", *대한기계학회 논문집 B권*, 제27권, 제3호, pp. 367~373, 2003.

- 7) 노재성, 양승신, 유홍선, 김동현, 정우성, 장용준, “중저압 물분무를 이용한 객차내 화재 진압에 관한 실험 및 수치해석적 연구”, 한국철도학회지, 제9권, 제3호, pp. 291~297, 2006.
- 8) 고승우, 노경철, 유홍선, “지하철 객차내 공조시스템이 미세물분무 시스템에 미치는 영향에 대한 수치해석”, 한국안전학회 추계학술발표회 논문집, pp. 24~28, 2006.
- 9) J. G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior", Book, pp. 109~111, 1998.
- 10) 고승우, 고권현, 유홍선, “액적분열을 고려한 미세물분무 화재제어에 대한 수치해석”, 한국철도학회논문집, 제9권, 제3호, pp. 291~297, 2006.
- 11) 철도화재 조기탐지/자동소화 장치개발 연구보고서, R&D/03-안전22, pp. 345~364, 2007.