

## 미분무수 소화시스템 철도차량 실물화재 진압실험

최병일\*, 한용식\*\*, 도규형\*\*\*, 김명배\*\*\*\*, 이유헌\*\*\*\*\*, 이동찬\*\*\*\*\*

### Fire suppression tests for a train using water mist systems

Choi, Byung Il\* · Han, Yong Shik\*\* · Do, Kyu Hyung\*\*\*

· Kim, Myung Bae\*\*\*\* · Lee, Yu Whan\*\*\*\*\* · Lee, Dong Chan\*\*\*\*\*

#### 요 약

미분무수 소화시스템을 이용하여 철도차량 내부 화재진압 실험을 수행하였다. 실험차량은 실물 철도차량이며, 화재시나리오를 표면화재 1종, 유류화재 1종, 그리고 미분무수 소화시스템에 의한 화재공간 내의 공간 냉각 능력을 조사하기 위한 차폐화재 1종 등 총 3종이었다. 실험에 사용된 소화시스템은 6종으로, 일정압력을 가지는 소화시스템 5종, 질소가압 압력용기로부터 분사되는 소화시스템 1종이다. 실험 결과 미분무수 소화시스템이 철도 차량 내부의 화재를 효과적으로 소화시키거나, 소화가 되지 않더라도 우수한 공간 냉각 능력으로 화재 피해를 최소화 할 수 있음을 알았다.

#### 1. 서 론

본 연구에서는 철도차량용 자동식 소화설비로 미분무수(water mist) 소화시스템[1]을 구축하고 실물화재실험을 진행하였다. 미분무수 소화시스템의 경우 소화성능을 실물화재 실험을 통하여 입증하여야 하는 성능기반 설계를 따른다. 일반적으로 미분무수 소화시스템의 소화 성능은 총 분사유량, 분사 속도, 분무 입경의 함수로 결정되어 진다[2]. 그러나 현재까지 사양적 지침으로 이러한 값들이 얼마를 가져야 하는지에 대한 규정이 없으며 소화성능을 실물화재 실험을 통하여 입증하여야 하는 성능기반 설계를 따른다. 따라서 화재공간 및 화재 시나리오에 따라 실험 및 이론적 해석을 통하여 최적의 설계가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 철도차량에 적합한 화재시나리오를 설정하고 이를 토대로 실

\* 정회원 · 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 선임연구원 · 공학박사 · E-mail: cbisey@kimm.re.kr

\*\* 정회원 · 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 책임연구원 · 공학박사 · E-mail: yshan@kimm.re.kr

\*\*\* 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 선임연구원 · 공학박사 · E-mail: kyudo@kimm.re.kr

\*\*\*\* 정회원 · 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 책임연구원 · 공학박사 · E-mail: mbkim@kimm.re.kr

\*\*\*\*\* 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 선임연구원 · 공학사 · E-mail: ywlee@kimm.re.kr

\*\*\*\*\* 한국철도기술연구원 에너지플랜트연구본부 선임연구원 · 공학석사 · E-mail: dclee@krri.re.kr

물 화재 진압 실험을 수행하여 미분무수 소화설비의 철도차량 적용 가능성을 보였다.

## 2. 실물 화재 진압 실험 장치 및 시나리오

### 2.1 실물 화재 실험 차량 및 경계 조건

철도차량 실물 화재 진압 실험은 철도기술연구원의 철도차량 실물 화재 실험장치에서 진행되었다. 그림 1은 실험에 사용된 차량을 보여준다. 경계 조건은 차량은 좌우에 0.9m\*1.8m의 옆차량과의 출입문이 있으며, 전 후 방에 각각 4개의 출입문이 있다. 본 실험에서는 일반 철도차량을 상정하여 전후방의 문은 닫은 상태로 실험을 진행하였으며, 화재시 내부 인원이 옆차량으로 피난하는 상황을 가정하여 좌우의 두 출입문을 연 상태에서 실험을 진행하였다, 또한 외기의 영향을 최소화하기 위하여 좌우 양단의 출입문에는 외기 유속 영향을 차단하기 위한 방풍판을 설치 하였다.

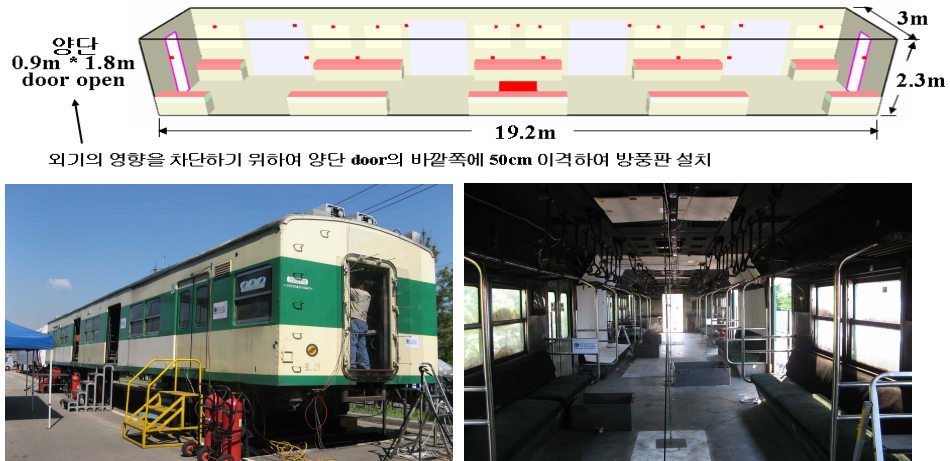


그림 1. 실물 화재 실험 차량 layout 및 실험 차량 사진

### 2.2 화재 시나리오

철도차량 실물 화재 진압 실험을 수행하기 위해서는 실험에 사용될 화재 시나리오가 중요하다. 철도차량 내장재의 안전 기준을 정하기 위한 기준[3, 4]은 존재하나 자동식 소화장치의 성능평가를 위한 화재시나리오에 대한 규정은 아직까지 존재하지 않는다[5, 6]. 자동식 소화장치의 성능평가를 위한 화재시나리오 결정에 있어서 가장 중요한 요인은 발생 가능 화재위치와 화재의 종류 그리고 화재의 크기이다. 화재 크기는 화재의 성장률과 화재가 감지되어 소화시스템이 가동되는 시간이 중요한 요소이다. 지하철 차량의 제원을 기준으로 한 총 발열량은 대략 26.8 MJ 이다.[7] 총 발열량을 기준으로 한 단위시간당 발열량은 7.5~30MW의 범위이다. 그러나 이는 Peak에서의 발열량을 의미하며 실제로 화재가 최성기에 도달한 후 소화를 시작한다는 것은 의미가 없다. 즉 화재가 발생한 후 적절한 시간안에 화재를 감지하고 소화시스템이 가동되어야 한다. 그림 2

에 가장 빠른 화재 성장곡선과 화재 발생 후 감지시간에 따른 화재크기를 도시하였다.[8]

방화를 가정하여 일반적인 화재성장보다 더 빠르게 성장하는 직선 형태를 가정하여도 일반적인 화재 감지 기준 시간인 1분에서 화재크기는 약 1.3 MW이다. 따라서 본 연구에서는 화재크기를 화재감지시간 30초 기준 0.65MW, 1분 기준 1.3 MW를 기준

으로 하여 설정하였다. 현재 국내 지하철 역간의 거리를 고려하여 인접역사까지 열차가 도착하는 시간을 기준으로 water mist 분사 시간은 5분으로 하였다.

화재의 종류는 우선 방화를 가정하여 B급 유류화재를 포함시켰다. 그림 3은 유류화재, 총 발열량 1.35 MW의 분산 유류화재 시나리오(#1)를 보여준다.

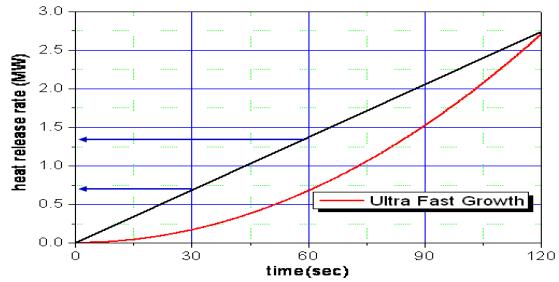


그림 2. Ultra-fast 화재 성장곡선과 감지시간

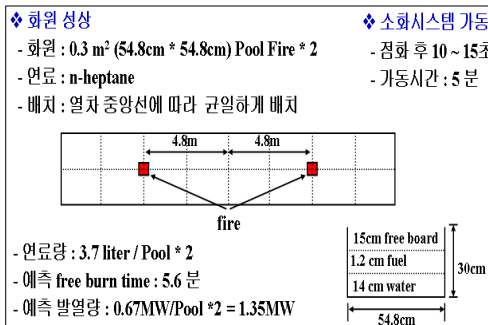


그림 3. 화재시나리오 #1

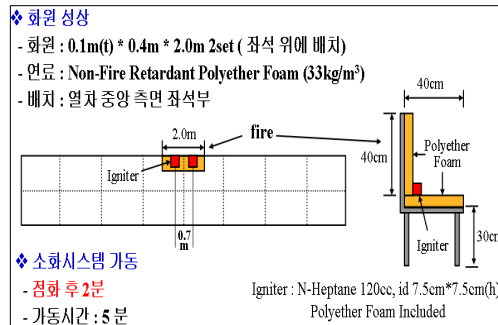


그림 4. 화재시나리오 #3

화재시나리오 #2는 화원이 열차 중앙에 한 곳 존재하는 시나리오로 화원의 크기 및 조건은 화재시나리오 #1과 같다.

열차에서 발생 가능한 화재는 일반적으로 A급 화재 (표면화재)이다. 주된 가연물은 열차의 내장재를 대표하는 가연물로 열차 좌석의 Matress foam을 상정하였다.(화재시나리오 #3, 그림 4). Matress는 IMO에서 규정된[9] 난연처리가 되지 않은 밀도 33kg/m<sup>3</sup>의 Non-Fire Retardant Polyether Foam을 사용하였다.

화재 진압에는 두 종류의 개념이 있다. 화재를 완전히 소화(extinguishment) 시키는 것과

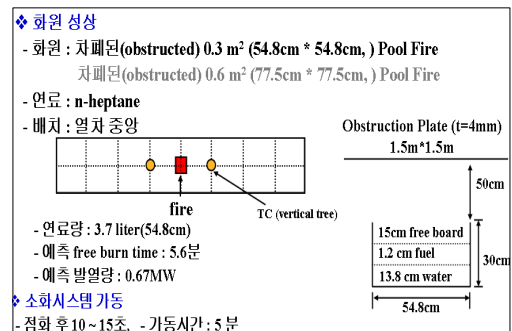


그림 5. 화재시나리오 #4

화재의 성장을 억제(suppression)하는 개념이다. 일반적으로 국부방출(local application)에서는 완전소화 개념을 전역방출(total flooding)에서는 화재억제 개념을 적용한다. 이러한 화재 억제 개념에서는 열차 내부의 온도를 제어할 수 있는 능력이 중요한 판정기준으로 제시된다. 따라서 본 실물화재 진압실험에서는 미분무수가 직접 화원에 도달하지 않는 상황에서 열차 내부의 온도 제어 능력(Thermal management)을 실험하기 위한 화재시나리오(#4)를 추가하였다.(그림 5)

그림 6에 각 시나리오의 화원 사진을 도시하였다.



시나리오 #1, #2

시나리오 #3

시나리오 #4

그림 6. 화재시나리오 화원 사진

### 2.3 계측 시스템

실물화재 실험에서의 화재 소화여부와 열차 내부 온도, 그리고 미분무수 소화시스템의 작동 압력을 측정하기 위하여 그림 7과 같이 계측시스템을 설치하였다. 분사 압력은 노즐 끝단에서 pressure

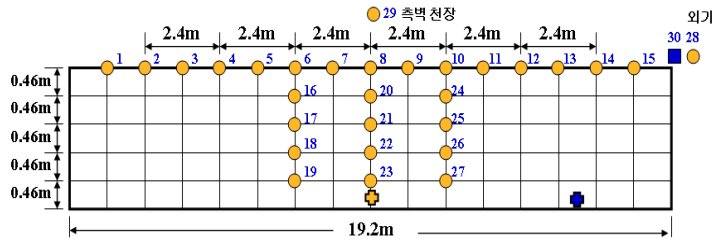


그림 7. 실물화재 실험 온도 계측 위치

transducer (PX313-3KG 10V, Omega Co.)를 이용하여 계측되었다.

### 2.4 미분무수 소화시스템

화재진압 실험에는 총 6개의 노즐이 사용되었다. 그림 3.10.14는 각 노즐 시스템의 특성인 k=factor, 아용압력, 평균유량, 노즐배치를 보여준다. 노즐배치 1의 경우 7개의 노즐을 열차내에 2.4m 간격으로 배치한 것으로 유류화재시나리오의 화재진화에 가장 좋은 결과를 보일 것으로 예측된다. 노즐배치 2와 3의 경우 열차 내부 공간을 균등하게 분배한 것으로 노즐배치 2의 경우 노즐간 간격이 3.2m, 노즐배치 3의 경우 노즐간 간격이 2.75m이다.

노즐(수량)	A(7)	B(6)	C(6)	D(6)	E(7)	F(7)
Type	Pump	Pump	Pump	Self-Contained	Pump	Pump
K-factor	1.57	1.44	0.52	0.5	1.19	1.06
사용압력	90bar	100bar	100bar	130bar	100bar	100bar
평균유량	104 lpm	86 lpm	31 lpm	27 lpm (35~22lpm)	83 lpm	74lpm
노즐배치	1	2	2	2	3	3

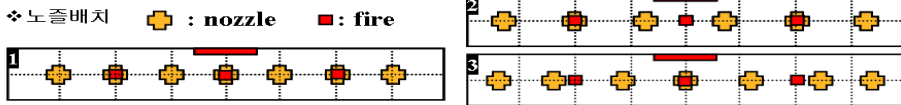
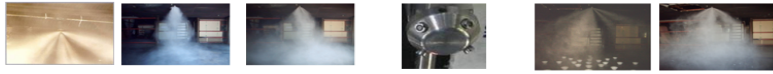


그림 8. 미분무수 시스템 특성 및 노즐 배치

### 3. 실물화재 진압실험 결과

#### 3.1 화재시나리오 #1

화재시나리오 1은 화원이 두 곳에 존재한다. 점화 순서는 우측화원, 좌측화원이다.

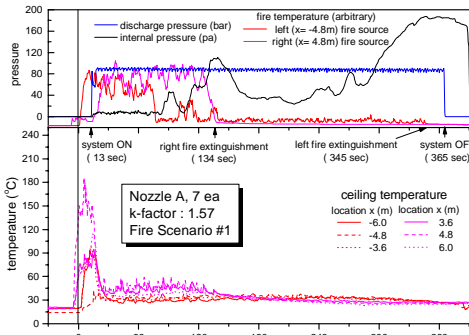


그림 9. Fire scenario #1 - nozzle A

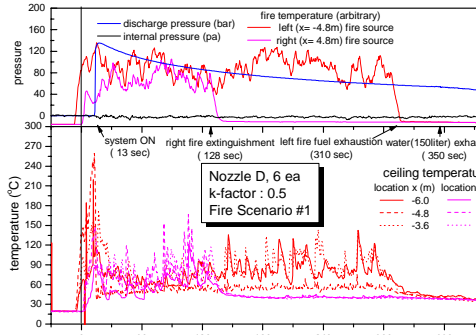


그림 10. Fire scenario #1 - nozzle D

노즐 A 시스템(그림 9)의 경우 화재 점화 13초 후에 가동 되었다. 우측 화원의 경우 후 121초 만에 소화되었다. 좌측 화재의 경우 미분무수 소화시스템 가동 약 70초 후에 화원이 매우 약화되었으나, 소규모의 화원이 pool의 모서리 부분에 잔존하여 지속되다가 미분무수 소화시스템 가동 후 352초에 소화되었다. 화원 주변의 천장면 온도를 살펴보면 화재 점화 후 약 180℃까지 상승하다가 미분무수 시스템 가동 후 급격히 하락하여 가동 후 15초가 경과하면 화원이 없는 경우보다 최대 약 40℃ 정도의 증가에 그친다. 이는 미분무수 소화시스템의 화재약화 능력과 뛰어난 공간온도 냉각특성을 보여주는 결과이다. 이러한 빠른 소화와 화재 약화는 상대적으로 많은 유량과 화원의 직상부에 노즐이 위치하고 있다

는 점(그림 8)에 기인하는 것으로 판단된다.

노즐 D 시스템(그림 10)은 self contained 방식이다. 압력특성상 분사 초기에는 압력이 높다가 시간이 지나면서 압력이 낮아지는 특성을 보인다. 분사 후 약 337초 후에 저장된 물 150 liter가 모두 분사 되었다. 우측 화원의 경우 미분무수 시스템 가동 후 115초 만에 소화되었다. 좌측 화재의 경우 소화되지 않고 연료가 소진되어 자연 소화되었다. 화원 주변의 천장면 온도를 살펴보면 화원이 없는 경우보다 최대 약 100℃ 정도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 노즐 A등 타 시스템보다 높은 증가이다. 화원에 직접적으로 분사되지 않는 상황에서 우측화원이 소화된 것은 미분무수의 냉각 및 질식효과에 의한 것으로 볼 여지가 있다.

### 3.2 화재시나리오 #3

화재시나리오 3번은 차량의 주요가연물인 A급 가연물을 상정하여 구성한 시나리오이다. 일반적으로 A급 화재는 심부화재로 내부에 잠열을 보유하고 있어 미분무수가 직접 화원 표면에 분사되어 가연물을 냉각시켜야 소화되는 것으로 알려져 있다.

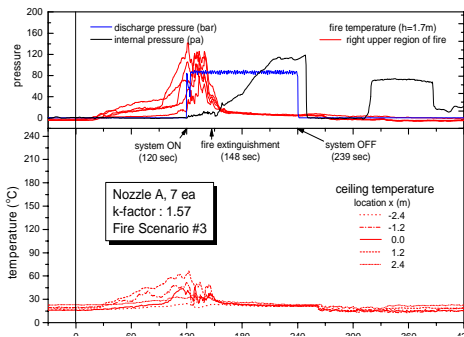


그림 11. Fire scenario #3 - nozzle A

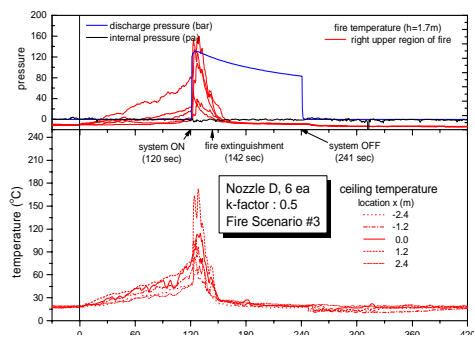


그림 12. Fire scenario #3 - nozzle D

그림 11은 노즐 시스템 A에 대한 A급 화재의 소화실험 결과를 보여준다. A급 화재의 경우 화재의 성장이 유류화재에 비해 느리기 때문에 화재성장 시간을 2분으로 주었다. 화재 점화 2분 후에 소화시스템이 가동되고 소화시스템이 가동 된 후 28초 후에 화재가 소화되었다. 노즐의 분사특성(그림 8)을 보면 분사되는 미분무의 많은 부분이 측면으로 분사된다. 또한 유량이 상대적으로 많기 때문에 화원 표면에 미분무수가 도달하여 소화된 것으로 판단된다.

그림 12는 노즐 시스템 D에 대한 A급 화재의 소화실험 결과를 보여준다. 화재 점화 2분 후에 소화시스템이 가동되고 소화시스템이 가동 된 후 22초 후에 화재가 소화되었다. 노즐의 분사특성(그림 8)을 보면 분사되는 미분무의 많은 부분이 측면으로 분사된다. 아마도 측면으로 분사된 분무 중 많은 부분이 A급 화재 표면에 도달한 것으로 판단된다. 그러나 상대적으로 유량이 매우 적음에도 불구하고 소화가 이루어진 것으로 보아 측면으로 분사된 미분무수에 의한 질식 효과도 함께 작용한 것으로 보인다.

### 3.3 화재시나리오 #4

화재 진압에는 두 종류의 개념이 있다. 화재를 완전히 소화(extinguishment) 시키는 것과 화재의 성장을 억제(suppression)하는 개념이다. 일반적으로 국부방출(local application)에서는 완전소화 개념을 전역방출(total flooding)에서는 화재억제 개념을 적용한다. 이러한 화재 억제 개념에서는 열차 내부의 온도를 제어할 수 있는 능력이 중요한 판정기준으로 제시된다. 본 화재 시나리오 #4는 미분무수가 직접 화원에 도달하지 않는 상황에서 열차 내부의 온도 제어 능력(Thermal management)을 실험하기 위한 화재시나리오이다.

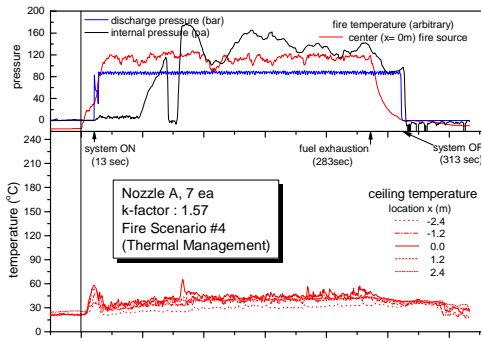


그림 13. Fire scenario #4 - nozzle A

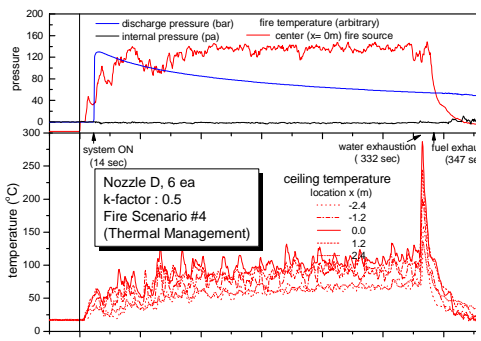


그림 14. Fire scenario #4 - nozzle D

노즐 A 시스템(그림 13)의 경우 화원 주변의 천장면 온도는 화원이 없는 경우보다 최대 약 35°C 정도의 증가에 그친다. 이는 미분무수 소화시스템의 뛰어난 공간온도 냉각특성을 보여주는 결과이다.

노즐 D 시스템(그림 14)의 경우 화원 주변의 천장면 온도는 화원이 없는 경우보다 최대 약 100°C 정도 증가하였다. 상대적으로 높은 온도 증가는 역시 총 분무유량이 매우 적기 때문으로 보인다. 노즐 D 시스템은 self contained 방식이다. 분사 초기에는 압력이 높아 상대적으로 많은 유량을 분사하지만 분사 후반으로 갈수록 분사유량이 줄어든다. 이러한 이유로 노즐 D 시스템의 경우 시간이 지나면서 온도가 조금씩 상승하는 경향을 보인다. 실험 중 시스템이 가진 물이 332초 부근에서 소진되었다. 이 영향으로 천장면의 온도는 급격히 증가하여 최고 290°C까지 상승하였다. 이는 미분무수 시스템이 가진 뛰어난 공간 냉각 효과를 입증하여 주는 결과이다.

## 4. 결 론

철도차량용 화재시나리오를 구축하고 이를 토대로 미분무수 소화시스템의 실물 철도차량 화재진압실험을 수행하였다. 실물화재 진압실험의 결과는 다음과 같다.

- 유류화재의 경우 전역방출 개념 (화원에 직접 준사되지 않는 방식) 보다는 국부방출(화

- 원에 직접 분사되는 방식)개념 시스템의 경우 진압에 유리하다.
- 유류화재의 경우 화재진압 여부는 노즐 위치에 크게 영향을 받는다.
  - 열차화재의 경우 주요 A급 가연물은 열차 중앙보다 좌석부위에 집중되므로 넓게 퍼지는 분사패턴이 소화에 유리하다.
  - 전역방출 개념의 경우 비록 소화가 되지 않더라도 온도제어에 탁월한 효과를 보인다.
  - 비록 소화가 되는 시스템이라 하더라도 가연물 주변에 산소공급이 원활하면 화재의 소화는 어려우며, 직접 화염면에 도달하지 않는 국부방출의 경우 화원에 산소를 공급하는 역할을 하여 오히려 화재를 성장시키는 역할을 한다.
  - 열차내부 온도 상승은 시스템 총 유량에 반비례한다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 철도종합안전기술개발사업의 지원을 통해 이루어진 것으로 이를 가능케 한 국토해양부와 철도기술연구원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] National Fire Protection Association. NFPA 750, Standard on Water Mist Fire Protection Systems, 2000 ed.
- [2] G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale, "Fire Suppression by Water Spray", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26, pp, 79-130, 2000
- [3] National Fire Protection Association. NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit Systems, 1990 edition, NFPA, Quincy, MA, 1990
- [4] Preventive Fire Protection in Railway Vehicles; Levels of Protection, Fire Preventive Measures and Certification, DIN 5510 Parts 1-8, Deutsches Institut Fur Normung e.V., 1988
- [5] Regulations relating to fire protection and fire-fighting measures in passenger-carrying railway vehicles or assimilated vehicles used on International services, UIC code 564-2 OR, International Union of Railways, 1991.
- [6] prEN 45545-6, Railway applications - Fire protection on railway vehicles - Part 6: Fire control and management systems, European Committee for Standardization, 2004
- [7] "지하철 안전관리실태 감사결과" 감사결과 간행물 제 8 집 2003-02-076, 감사원, 2003
- [8] National Fire Protection Association. NFPA 92B, Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2009 edition, NFPA, Quincy, MA, 2009
- [9] International Maritime Organization, "Res.A. 800(19), ANNEX, APPENDIX B (FIRE TEST PROCEDURES FOR EQUIVALENT SPRINKLER SYSTEMS IN ACCOMMODATION, PUBLIC SPACE AND SERVICE AREAS ON PASSENGER SHIPS)", 1995.