

B-3

전력구 케이블의 미분무 소화실험

박승민, 김운형*, 김종훈*, 김태수**, 전동일**, 민인홍**, 김상욱***
(주)안국 E&C, *경민대학 소방과학과, ** (주)스타코 기술연구소, *** 화재공학연구원

An Application of the Water Mist System for Underground Utility Tunnel

Seoung-Min Park, Woon-Hyung Kim*, Jong-Hoon Kim*, Tae-Su Kim**,
In-Hong Min**, Dong-Ill Jeon**, and Sang-Wook Kim***
Ankug E&C, *Kyung Min College, **Starco Co., ***Fire Research Station

1. 서론

지하 공동구는 정보사회의 필수적이며 매우 중요한 기반시설인 통신시설 및 전력시설들이 수용되는 국가기반시설이다. 이미 몇 차례 발생했던 국내 지하공동구화재사례에서도 알 수 있듯이 그 피해는 광범위하면서도 매우 심각하다 할 수 있다. 공동구에는 현재 국내 법규에서 요구하는 감지기, 방화벽 등에 의하여 구획화는 가능하다. 그러나 일정구간의 케이블이 피해를 입을 경우 전체적인 교체가 필요하므로 복구에 오랜 시간이 소요된다. 그러므로 화재를 신속히 감지하고 발화 즉시 소화 및 제어를 할 수 있는 시스템이 매우 필요한 실정이다.

본 연구는 이러한 지하공동구에 적용할 수 있는 소화시스템 중 가장 효과적이라 판단되는 미분무수소화설비(Water-Mist System)의 적용을 위하여 헤드의 개발과 실제화재실험을 통한 성능의 입증을 실시하였으며, 이를 통한 설계요소의 정립을 수행하였다.

본 연구의 구체적인 연구 목표는 다음과 같다.

- ① 케이블의 열적손상으로 인해 교체가 불가피한 정도의 최소 화재크기를 규명.
- ② 최소 화재크기를 기준으로 감지 및 소화시스템의 최적 작동시간을 설정.
- ③ 케이블의 열적손상을 최소화 하기위한 시스템 설계요소 설정
- 노즐입자직경, K-Factor, 방수량, 설치간격, 방사각도, 방향 등

2. 미분무수소화설비의 설계 요소

미분무수소시스템의 소화성능에 영향을 주는 요소로는 액적의 크기, 밀도, 분사력 등이 있으며 첨가제를 사용할 경우 효과가 달라지기도 한다. 물론 가스계 소화설비와 같은 Total

Flooding 효과도 중요한 소화요소이긴 하나, 공간이 크고, 어느 정도 구획화되는 조건이 아닌 경우이며, 기류의 변동이 심한 경우에는 그 효과를 기대하기 어렵다. 미분무수 시스템은 제조사마다 노즐의 형태에 따른 특성과 성능이 다양하여 표준화된 설계가 용이하지 않은 단점이 있다. 따라서 특정 공간에 적용하고자 하는 경우에는 대상 헤드 기술적으로 적합한지 여부를 판단할 시험이 반드시 필요하다. 즉 헤드 자체의 성능도 중요하지만, 대상공간의 특성이 고려된 화재시나리오를 채용한 실험실에서 적절한 성능을 보여주는지 여부도 매우 중요하다. 화재 시나리오는 대상공간의 특성에 맞게 설정되어야 하며, 최소노즐 방사밀도, 노즐의 설치위치, 화재 제어 가능성 등이 결정될 수 있도록 구성되어야 한다. 그러므로 미분무수 시스템의 설계는 액적의 크기, 밀도, 분사력, 구획화조건, 방해물에 대한 고려 등의 주요 설계요소에 대한 공학적이면서 타당성 있는 근거를 가지고 수행해야 한다.

3. 미분무수 노즐의 설계

본 연구에서 사용된 미분무수 노즐의 특성을 위하여 3가지 실험을 실시하였다.

3.1. 미분무수 노즐의 입자분포실험

미분무수 시스템의 주요 설계요소 중 입자분포의 측정을 위하여 Malvern 2600모델의 입자 분석계를 이용하여 미분무의 Sauter Mean Diameter (이하 'SMD')와 방사각도 등을 측정하였다. 개발된 노즐의 종류별 입자직경 분포 및 방사각도 특성은 다음과 같다.

표 1. 개발노즐의 특성 측정치

| 노즐종류 | 노즐 특성 | 방사압력 | 방사각도 | 측정 이격 거리 | 평균입자직경SMD |
|--------|---------------|------------------------|------|----------|-----------|
| Type 1 | 5구형 2.7mm 15A | 5(kg/cm ²) | 132° | 500mm | 476.61 |
| Type 2 | 6구형 3.3mm 25A | 5(kg/cm ²) | 162° | 500mm | 650 |

3.2. RTI 특성실험

본 실험에서는 폐쇄형 미분무헤드에 설치된 글라스블브(Glass blub)의 반응시간지수(Response Time Index, RTI)를 측정하여 노즐이 속도형(Fast Response Type)의 성능을 가지고 있는지 여부를 판단하였다. 측정실험은 플런지 테스트기를 사용하였다.

실험의 결과 속도형 기준 평균 유속인 1.8m/s 조건에서의 6회 실험에서 반응시간은 5.4초에서 9.8초 사이에 분포하였으며, 이에 대한 RTI의 환산값은 18.4~24.3 ml/2 · s^{1/2} 으로 나타났다. 최대 유속 3m/s 조건에서의 3회 실험결과, 반응시간은 5.0~6.9초로 측정되었으며 RTI 값은 22.1~23.4m^{1/2} · s^{1/2}이다. ISO 기준에 의한 헤드의 감도 범위는 속도형 RTI 범위가 0~50 (m · s)^{1/2}에 해당되어, 속도형의 특성을 보여주고 있다.

3.3 K-Factor 실험

본 실험은 실험 화재 실험에 사용된 미분무수 노즐의 K factor를 측정하기 위한 것이다.

표 2. K factor 측정결과

| No | 노즐 Type | 노즐 압력 | K factor | Q (LPM) | 비 고 |
|----|---------|------------------------|----------|---------|----------|
| 1 | Type 1 | 5(kg/cm ²) | 12.96 | 28.9 | 2회 측정 평균 |
| 2 | Type 2 | 5(kg/cm ²) | 22.49 | 50.3 | 2회 측정 평균 |

실험은 지하공동구 내부의 최초 노즐 앞 배관에 설치된 압력계를 이용하여 노즐의 방수압을 일정한 값으로 유지시킨 후 노즐에서 방사되는 수량을 180리터 용적의 채수통 3개에 충전시켰다. 이때 충전 시간을 측정하여 평균값을 계산하고 이를 기준으로 노즐 하나의 방수량과 K값을 계산하였다. 시험의 측정결과는 표 2와 같다.

4. 지하구 신태화재실험

4.1. 실험 개요

4.1.1. 실험의 목적

본 연구에서 수행한 신태화재실험은 실험 결과의 기술적 검토를 통해 노즐의 방수압, 입자직경, 방사각도, 방수량 등 소화특성과 소화성능 수준 등 주요 설계요소를 결정하여, 노즐 및 시스템의 최적화를 구축하는 것이 목적이다.

4.1.2. 실험 설정 및 장치

신태 화재 실험을 통하여 노즐의 소화성능 및 노출된 케이블의 열적 보호 정도를 평가하였다. 노즐은 5kg/cm²의 저압이며 single fluid system으로 실험에 관련된 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 실험용 공동구 : 실제 사용되는 지하구의 공간 용적 이상을 기준으로 하여 지하구는 2.5m(H)×2.5m(W)×25m(D)의 콘크리트구조 (두께 10cm)의 콘크리트 구조물을 제작하였다. 공간내부는 한국전력 지하구 설치기준 및 실무 담당자의 도면 검토를 통하여 2.5m 높이에 수용될 수 있는 최대 선반을 설치하여 살수장애 및 차폐효과를 반영하였다. 화원에 직접 영향을 받는 부분을 제외한 장소에는 80mm와 120mm 직경의 강관을 케이블을 대체하여 배치하였다.

(2) 화원의 설정 : 화원의 크기는 일반적으로 대형 및 소형 쓰레기통의 화재시 발생하는 열방출비율 약 70kW 내외를 기준하였다. 화원은 250mm×250mm×80mm (Pan 1)과 200mm(직경)×70mm(Pan 2)의 두 종류이며 연료는 n-Heptane을 사용하였다.

(3) 노즐 : 실험에 사용된 노즐은 Type 1과 Type 2의 2가지이며 폐쇄형과 개방형 노즐을 사용하였다. 신태 화재 실험을 위한 세부적인 노즐 설치조건은 다음과 같다.

- 설치 간격 : 1.5m ○ 노즐의 유량 : 28.9 (ℓ/min) / 50.3(ℓ/min)
- 보호공간의 최대높이 : 2.3m ○ 노즐의 작동압력 : 5kg/cm²
- 방사각도 : 132° / 162° ○ 폐쇄형 노즐 : Fast Response type (Glass-blub)

(4) 기동 방식 : 폐쇄형 헤드를 사용한 경우, Glass-blub의 감열로 작동되면 펌프가 기동하여 노즐이 개방되는 방식이다. 개방형의 경우, 펌프 기동스위치를 작동하여 노즐을 개방하

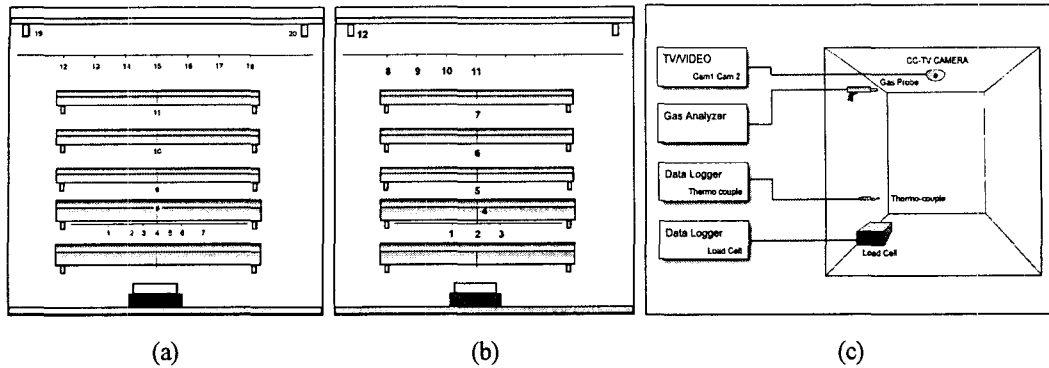


그림 1. A형식 (실험 1)의 온도측정위치 (a), B형식 (실험 2,3)의 온도측정위치 (b), 실험용 측정 장비와 구성도 (c).

었다.

(5) 측정장치 : 온도측정을 위해 설치한 열전대는 K- Type으로 0.5mm를 사용하였다. 1차, 2차 실험은 아래 그림 중 A형식으로 설치하고 3차, 4차 실험은 B형식으로 설치하였다. 온도측정 데이터는 National Instruments사의 SCXI 1000과 Labview 6.0을 사용하였다. 로드 셀의 설치로 연료의 질량감소비율을 측정하였고 비디오카메라 2대로 실내현상을 관찰하였다. 또한 유독성 가스를 측정하기 위하여 바닥에서 2.0m 높이, 화원에서 수평으로 1.3m 이격한 거리에 가스 측정기를 설치하였다. 측정결과는 ECOM 가스분석기로 입력되었다.

4.2. 화재 시나리오

전력구 케이블을 수용하는 지하구의 경우, 케이블 내부의 절연유의 발화 또는 공사 중에 싸여진 쓰레기나 시공 재료 등의 폐기물 등에서 발화할 수 있다.

(1) 화재는 지하구 내부에 직접된 쓰레기나 시공 폐기물에서 발화하여 화염이 가장 가까운 케이블에 닿게 된다. 가연물의 양은 최소 5분내지 10분정도의 연소가 가능하며 작은 쓰레기 통 (18~40ℓ 용량)의 가연물량을 기준으로 한 경우, 예상되는 열방출비율은 약 45~90 kW 정도가 된다. (J. Quintiere, Growth of Fire in Building Compartment, ASTM STP 614, 1977.) 따라서 본 실험에서는 약 60~80 kW 정도의 화재크기를 설정하였다.

(2) 발화시 즉각적인 소화가 매우 어려운 조건에서 소화설비 시스템을 통하여 화염을 냉각하고 화염에 아직 노출 안된 케이블을 보호해야 한다. 따라서 미분무수 설비를 통하여 화원에 인접한 케이블을 냉각하고 화열의 노출에 따른 열적 손상으로 인한 기능손실을 최소화해야 한다.

4.3. 화재실험의 수행과 분석

(1) 실험 1 (Unsuppressed Fire) : 본 실험의 목적은 화재 시나리오에 의한 화원에 노출된 경우, 지하구 내부에 소화설비의 개입이 없는 상황에서 케이블 외피의 연소상태를 평가하는 것이다. 화원은 Pan 1이며 연료는 n-Heptane 1.0ℓ를 사용하였다. 화원은 지하구 길이방향의 중앙부분, 바닥면에 설치되었으며 직상부 2단에 각각 1.2~1.5m 내외의 154kV 케이블 3개가 설치되었다. 지하구 내부에는 자연환기 상태에서 실험을 진행하였다. 열전대 설치

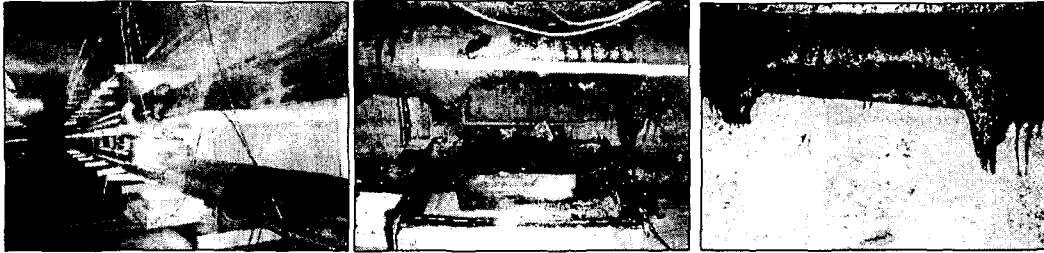


그림 2. 실내화재전파와 화원 직상부 케이블 외피의 열적 변형.

A형으로 하였다. 시작 후 약 2분 40초경 시 화염은 3단 케이블에 접촉되었다. 실험 직후의 케이블 외피는 여러 곳이 심하게 연소되고 내부형태가 노출되었다. 탄화부분의 길이는 평균 60~75cm 정도이다. (그림 2 참조)

실험결과 화염에 직접 영향을 받는 부분은 전체적으로 약 4분 또는 6분 동안 400°C 이상의 고온에 노출되었으며, 하부 케이블에 비하여 온도는 전반적으로 낮으나 중간부분의 제 3단의 케이블 온도는 500°C까지 상승하였다.

케이블의 연소에 따른 유독성 가스의 측정을 위하여 화원에서 1.3m 이격된 지점에 바닥에서 2.0m 위치에 가스측정기를 설치하였다. 일산화탄소의 경우, 발화 후 3분경부터 농도가 증가되면서 10분 전후에는 약 500 ppm에 도달하고 이후 지속적으로 높은 농도를 유지하여 실험 종료 시점인 15분경과 시에는 900ppm에 도달하였다. 지하구의 공간크기를 고려한다면 이러한 농도는 상당히 높은 것으로 소화활동에 장애가 된다. 특히 화재 초기에 연기 발생량이 너무 많아 소방관의 신속한 현장 진압을 위한 가시거리 확보 및 화점 발견이 불가능함을 알 수 있었다. 전체적으로 실험 1의 결과는 화재초기에 발생하는 유독성 가스로 인한 수동진압이 현실적으로 불가능하며 화재의 확산속도와 이에 따른 케이블의 온도상승도 치명적 범위로 측정되었다.

(2) 실험 2 (노즐Type 1) : 노즐의 소화성능에 미치는 감지시간의 영향을 평가하기 위하여 지하구 내부에 감지선형 감지기와 광케이블 감지시스템을 동시에 설치하여 비교 분석하였다. 열전대 설치는 B형으로 하였다. 노즐은 개방형으로 Type 1를 사용하였으며, 연료는 n-Heptane 1ℓ를 사용하였다. 감지선형 감지기는 작동온도 72°C이며, 1번 감지기는 천정 중앙에 위치하며 2번 감지기는 4단 선반 위 154kV 케이블에 설치하였다. 광케이블은 화재감지 온도를 70°C로 설정하고 5.7초 간격으로 온도 변화를 측정하였으며 온도 정확도는 약 ±3°C이다. 실험 시작 후 1번 감지기의 작동시간은 6분 26초, 2번 감지기의 작동시간은 1분 8초로 기록되었다. 광케이블 감지기는 발화 후 약 4분 30초 경에 화재 발생을 통보하였으며 이 시간을 기준으로 소화펌프를 작동하였다. 화원 직상부 케이블의 외피온도는 2곳에서 400°C을 초과하였으며 노즐이 개방된 직후 일시적인 온도저하가 있다가 다시 상승하여 온도제어에는 실패하였다.

(3) 실험 3 (노즐Type 2) : 본 실험은 노즐 type 2의 소화성능 평가 및 케이블 연소 시 화원의 영향을 최소화하고 화재 감지시간을 결정하는 주요한 요소인 케이블의 열적 특성을 최대한 반영하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 지상에 별도로 설치된 연료통에 연결되는 연료 주입관을 통하여 팬에 연료를 공급하였으며, 케이블이 발화된 후 자체적인 연소로 화염확산이 충분히 진행된 것을 확인한 후 연료공급 밸브를 차단하였다. 화원의 위치는 5

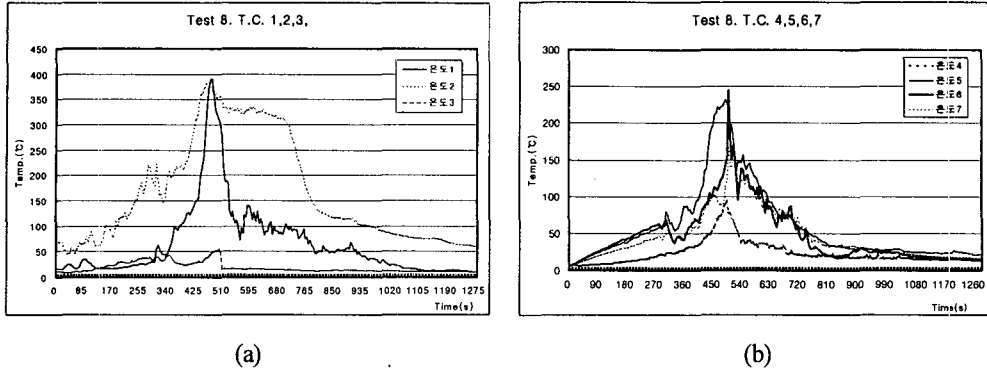


그림 3. 케이블 하부(a)와 상부 (b)의 온도변화.

단 하부에 노즐과 노즐 사이에 위치하며 Pan-1에 n-헵탄을 공급하였다. 화염의 영향을 직접 받는 화원 부근의 1단, 2단 그리고 3단에는 길이 1m 내외의 22.9kV 케이블을 각 단마다 6개를 설치하였다. 4단 및 5단에는 길이 1.5m 내외의 154kV을 각 단마다 3개를 설치하였다. 노즐의 작동온도는 68°C이며 방사 압력은 5kg/cm²이다. 2개의 노즐은 하향으로 설치되고 노즐의 간격은 1.5m로 설치되었다. 노즐 사이에는 철제 배플 (15cm x 10cm)을 설치하였다. 케이블이 발화한 후 약 2분 경과시 많은 연기가 생성되면서 약 4분 10초경에 최하단 케이블의 연소가 시작되었다. 글라스밸브의 작동 온도는 약 5분 16초경에 도달되었으며 개방 이후의 일시적인 살수 장애를 거치고 본격적인 살수가 시작된 7분 30초 경 이후에는 화원 부근의 케이블에서 확실한 온도 제어를 보여주고 있다. (그림 3(a)참조) 화원 직상부의 케이블 온도는 발화 후 460초에 최대 384°C로 측정되었으나 노즐이 작동된 이후 온도는 즉시 하강하였다. 아울러 제3단 및 1단에서도 노즐의 냉각효과를 잘 보여준다. 한편, 화원 중심부에서 우측으로 1.5m에, 바닥 위 2.3m에서 측정된 가스농도결과는 일산화탄소의 최대농도는 200 ppm 내외로 비교적 낮은 농도를 유지하였으며 노즐의 살수로 인한 일산화탄소의 생성량이 감소함을 보여주었다. 실험결과, 노즐의 직경과 방수량이 증가하면서 노즐 1에 비교하여 소화성능이 높은 것으로 나타났다. 또한 노즐의 방사로 지하구 내부에서 발생하는 연기의 유동 억제 및 연기 하강 효과가 있음을 알 수 있었다. 본 실험에서는 소화성능에 미치는 노즐의 입자분포 중요성과 살수로 인한 연기제어 효과를 입증하였다.

5. 결론

지하구 미분무수 소화설비 시스템 최적화를 위한 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

○ 목표 1 : 케이블의 열적 손상으로 인한 교체가 요구되는 최소 화재크기를 규명.

실험에 사용된 화원은 0.25 m × 0.25 m (사각), 0.2m (원형)의 2가지이며 약 60~80kW의 열 방출비율을 가지는 대형 쓰레기통, 작은 목재클립 또는 소형 쓰레기통 화재 규모에 해당한다. 실험1의 결과, 소화설비의 개입이 없는 화재에 노출된 케이블 외피는 불과 2분 이내에 열적 변형에 의한 치명적인 손상이 발생하였으며 화염이 접촉되고 2~3 분경과 후에

는 케이블 내부까지 손상되었다.

○ 목표 2 : 목표 1에서 규명된 최소 화재크기를 기준으로 감지 및 소화시스템의 최적 작동 시간을 결정.

실험에 사용한 노즐 성능과 화재 시나리오 상에서 온도제어 성능결과를 기준으로 보면, 실험 3의 경우인 5분 이내의 개방시간이 적합하다고 판단된다. 실험결과, 미분무수 노즐의 개방시간이 단축될수록 화원 상단 부 케이블의 열적 손상 정도가 감소되었다.

○ 목표 3 : 케이블의 열적 손상을 최소화하기 위한 미분무수 시스템 설계요소를 결정.

지하구 적용의 최적화를 위하여 실험을 통하여 규명된 2가지 타입별 노즐의 주요 설계 요소는 다음과 같다.

| 설계요소 | 노즐 Type 1 | 노즐 Type 2 |
|----------|---------------------------------|----------------------------------|
| 노즐 형태 | 5구형, 2.7mm 15A Impingement Type | 6구형, 3.3mm, 25A Impingement Type |
| 입자분포 | 470 미크론 (Class III) | 650 미크론 (Class III) |
| 방사각도 | 132도 | 162도 |
| 설치간격 | 1.5미터 | 1.5미터 |
| K factor | 12.96 | 22.49 |
| 방수량 | 28.9 (LPM) | 50.3 (LPM) |
| 방사압력 | 5kg/cm ² | 5kg/cm ² |
| 살수밀도 | 19.26 ℓ/mim/m | 33.53 ℓ/mim/m |

참고문헌

1. 김운형, J. A. Milke, "Water Mist Fire Suppression for Raised Subfloor Spaces," International Symposium on Fire Science & Technology, pp. 617-624, Korea, (1997).
2. 김운형, 김태수, 김상욱, "전력용 케이블의 열방출량 측정," 한국화재소방학회 추계학술 발표대회 pp. 280-283, (2001).
3. 박승민, 김운형, J. R. Mawhinney, "공동구의 미분무 소화설비 적용," 한국화재소방학회, 추계학술대회 논문집, pp. 294-300, (2001).
4. J. R. Mawhinney, "Principles of Water Mist Fire Suppression Systems," NFPA Handbook - 18th Edition, (1997).
5. J. R. Mawhinney, B. Z. Dlugogorski, & A. K. Kim, "A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist," Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium, pp. 47-60. (2000).
6. J. R. Mawhinney & J. K. Richardson, "A Review of Water Mist Fire Suppression Research & Development," Fire Technology, Vol. 33, No. 1, pp. 54-90. (1997).