

지하구 미분무수 소화설비 적용에 관한 연구 An Application of the Water Mist System for Underground Utility Tunnel

김운형[†] · 김종훈 · 박승민* · 김태수** · 민인홍** · 전동일** · 김상욱***

Woon-Hyung Kim[†] · Jong-Hoon Kim · Seung-Min Park* · Tae-Su Kim** ·
In-Hong Min** · Dong-Ill Jeon** · Sang-Wook Kim***

경민대학 소방학과, *(주)안국 E&C
***(주)스타코 기술연구소, ***화재공학연구원
(2002. 02. 04. 접수/2002. 03. 11. 채택)

요 약

본 연구는 지하구 미분무수 소화설비 적용에 관한 것으로, 화재 초기에 신속한 소화를 통한 케이블 열적 손상의 최소화와 신속한 본래 기능의 회복을 위한 소화 시스템의 최적화에 그 목적이 있으며, 이를 위해 미분무수 노즐개발을 위한 화재실험을 수행하였다. 실험은 2.5 m(H)×2.5 m(W)×25 m(D)의 콘크리트 지하구에서 소화설비가 작동되지 않는 경우와 2가지 종류의 미분무수노즐이 적용되는 경우를 수행하였다. 실험 결과 소화설비의 개입이 없는 경우, 2분 이내에 열적 변형에 의한 치명적인 손상을 입었으며, 2~3분 경과 후 케이블의 내부까지 손상되었다. 노즐적용실험의 결과, 타입 1(입자분포 약 470 μm) 노즐과 타입 2(입자분포 약 650 μm) 노즐은 모두 케이블의 피해 온도제어(4000°C 이하)를 만족하였다. 실험을 통하여 지하구 공간특성에 적합한 미분무수 헤드의 특성을 설정할 수 있었으며, 그 성능을 입증할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper includes new nozzle design, basic design factors of water mist system that minimize a thermal damage of cable causing business interruption and applying underground utility tunnel. A underground concrete structure (2.5 m(H)×2.5 m(W)×25 m(D)) is constructed in order to test a nozzle performance. Under the designing fire scenario, critical thermal damage of cable sheath (400°C) reached within a 2 minutes with unsuppressed fire, but type 1 nozzle (SMD 470 μm) and type 2 nozzle (SMD 650 μm) control cable temperature below 400°C. A system performance and fundamental design factors; K factor, flow rate, spray angle, size distribution, nozzle pressure, spray density are analyzed and proposed for system optimization.

Keywords : Underground utility tunnel, Nozzle performance, Thermal damage of cable basic design factors of water mist system

1. 서 론

지하 공동구는 정보사회의 필수적이며 매우 중요한 기반시설인 통신시설 및 전력시설들이 수용되는 국가 기반시설이다. 이미 몇 차례 발생했던 국내 지하공동구 화재사례에서도 알 수 있듯이 그 피해는 광범위하면 서고 매우 심각하다 할 수 있다. 공동구에는 현재 국내 법규에서 요구하는 감지기, 방화벽 등에 의하여 구

획화는 가능하다. 그러나 일정구간의 케이블이 피해를 입을 경우 전체적인 교체가 필요하므로 복구에 오랜 시간이 소요된다. 그러므로 하재를 신속히 감지하고 발 화 즉시 소화 및 제어를 할 수 있는 시스템이 매우 필 요한 실정이다.

본 연구는 이러한 지하공동구에 적용할 수 있는 소 화시스템 중 가장 효과적이라 판단되는 미분무수소화 설비(Water-Mist System)의 적용을 위하여 헤드의 개 발과 실제화재실험을 통한 성능의 입증을 실시하였으 며, 이를 통한 설계요소의 정립을 수행하였다.

[†] E-mail: kimwoon@netsgo.com

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. 미분무수 소화설비의 설계 요소

미분무수시스템의 소화성능에 영향을 주는 요소로는 액적의 크기, 밀도, 분사력 등이 있으며 첨가제를 사용할 경우 효과가 달라지기도 한다. 이는 미분무의 여러 가지 소화 효과 중 액적을 화원에 침투하여 온도를 하강시키는 것과 매우 깊은 관계가 있다.

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 헤드가 기술적으로 적합한지 여부를 판

단할 시험이 반드시 필요하다.

즉 헤드 자체의 성능도 중요하지만, 대상공간의 특성이 고려된 화재시나리오를 채용한 실험실시험에서 적합한 성능을 보여주는지 여부도 매우 중요하다.

화재 시나리오는 구획의 크기와 넓이, 환기의 유무와 정도, 미분무수 시스템이 작동하기 전까지 화재 지속시간, 연료의 유형, 화재의 크기 등이 대상공간의 특성에 맞게 설정되어야 하며, 최소노즐방사밀도, 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 수행해야한다.

3. 미분무수 노즐의 설계

본 연구에서 사용된 미분무수 노즐은 두 가지 종류가 있으며 개방형과 속동형 글라스볼브를 장착하여 폐쇄형이 있다. 각 특성치를 알아보기 위하여 입자분포 실험, RTI 실험, K Factor 측정실험을 수행하였다.

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

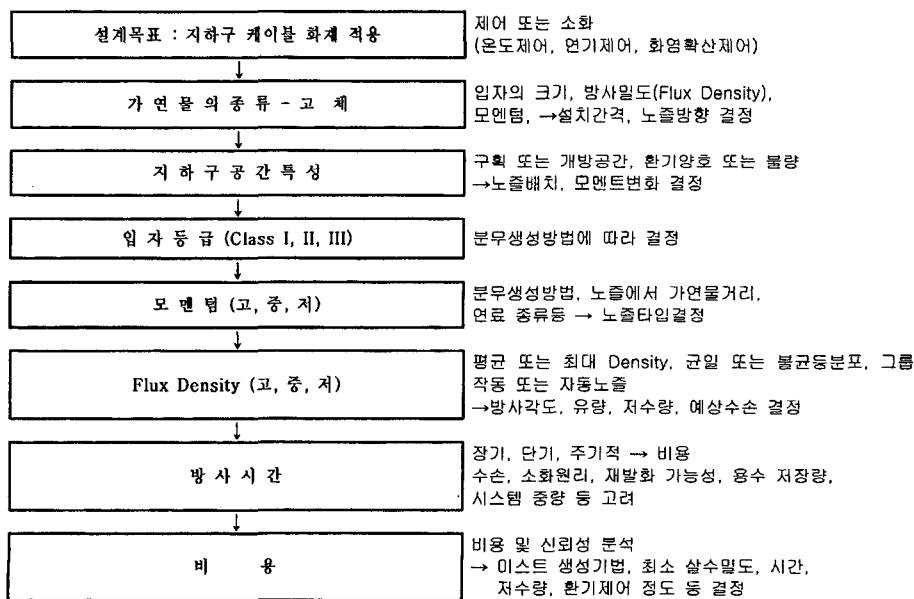
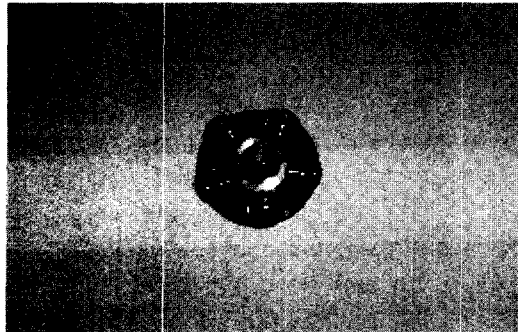
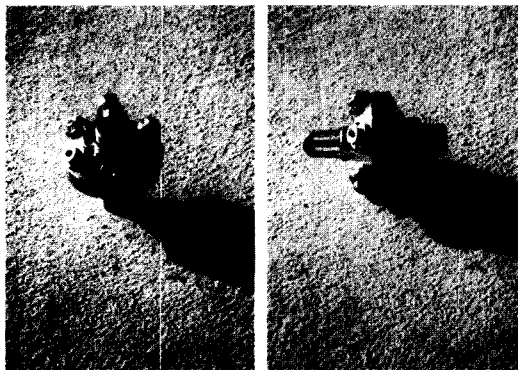


그림 1. 미분무수 소화설비 설계절차.



(a) Type 1



(b) Type 2

그림 2. 시험 헤드(Type 1: a, Type 2: b)의 형태.

방사각도 등을 측정하였다.

개발된 노즐의 종류별 입자직경 분포 및 방사각도 특성은 다음과 같다(표 1).

3.2 RTI 특성실험

본 실험에서는 폐쇄형 미분무헤드에 설치된 글라스 블브(Glass blub)의 반응시간지수(Response Time Index, RTI)를 측정하였다. 실험을 통하여 노즐이 속도형(Fast Response Type)의 성능을 가지고 있는지 여부

표 1. 개발노즐의 특성 측정치

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

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

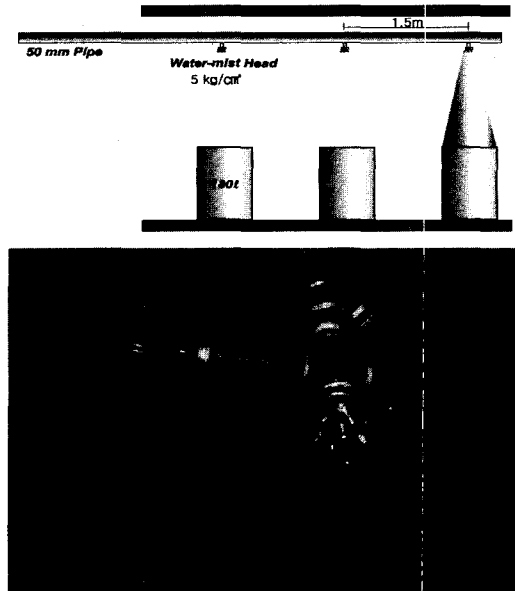


그림 3. 실험의 개념도와 압력계의 설치모습.

를 판단하였다. 측정실험은 플런지 테스트기를 사용하였으며, RTI가 0~50(m·s)^{1/2}에 속하면 속도형(Fast Response Type)이라 할 수 있다.

실험의 결과 속도형 기준 평균 유속인 1.8 m/s 조건에서의 6회 실험에서 반응시간은 5.4초에서 9.8초 사이에 분포하였으며, 이에 대한 RTI의 환산값은 18.4 24.3 m^{1/2}·s^{1/2}으로 나타났다. 최대 유속 3m/s 조건에서의 3회 실험결과, 반응시간은 5.0~6.9초로 측정되었으며 RTI 값은 22.1~23.4 m^{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

미분무수 소화시스템 설계에서 적정 방수밀도를 결

정하는 것은 노즐의 설치간격 및 배치와 방수량으로 결정에 관계되어 매우 중요하다. 본 실험은 실대 화재 실험에 사용된 미분무수 노즐의 K factor를 측정하기 위한 것이다. 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 실대화재실험

4.1 실험 개요

4.1.1 실험의 목적

본 연구에서 수행한 실대화재실험은 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

실대 화재 실험을 통하여 노즐의 소화(Fire extinguishment)성능 및 노출된 케이블의 열적 보호 정도를 평가하였다. 노즐은 5 kg/cm²의 저압이며 single fluid system으로 실험에 관련된 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 실험용 공동구

실제 사용되는 지하구의 공간 용적 이상을 기준으로 하여 지하구는 2.5 m(H)×2.5 m(W)×25m(D)의 콘크리트구조 (두께 10 cm)의 콘크리트 구조물을 제작하였다. 양단에는 출입을 위한 개구부가 각각 설치되었으며 공간내부는 한국전력 지하구 설치기준 및 실무 담당자의 도면 검토를 통하여 2.5 m 높이에 수용될 수 있는 최대 선반을 설치하여 살수장애 및 차폐효과를 반영하였다. 케이블 설치용 선반과 앵글은 양단에 각각 5단씩 한국전력 납품규격으로 설치하였으며 화원에 직접 영향을 받는 부분을 제외한 장소에는 80 mm와 120 mm 직경의 강관을 케이블을 대체하여

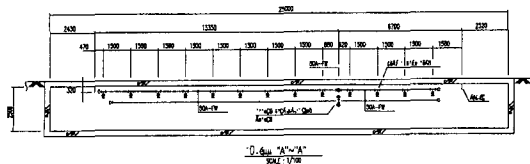


그림 4. 실험 지하구의 단면도.

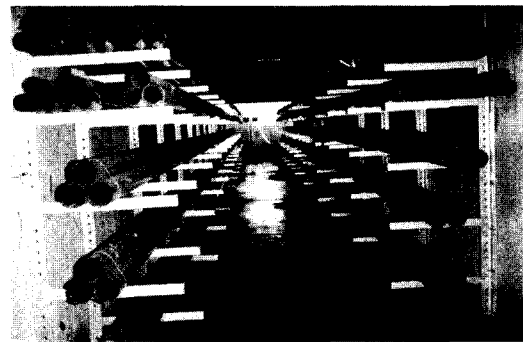
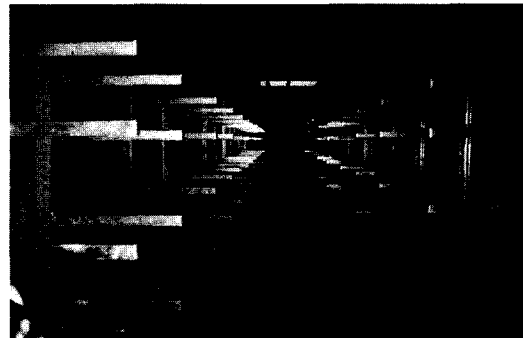


그림 5. 지하구 내부 모습.

배치하였다. 화원은 최하단부 케이블 아래에 설치하였으며 케이블이나 선반 등으로 인한 장애효과를 고려하였다.

지하구 내부에는 1.5 m와 2 m 간격으로 노즐을 설치할 수 있도록 배관을 설치하였으며 물 공급 시스템에 연결되어있다.

(2) 화원의 설정

화원의 크기는 시스템의 소화성능을 판단하기 위하여 너무 크지 않도록 설정하였다. 따라서 일반적으로 대형 및 소형 쓰레기통의 화재시 발생하는 열방출비율 약 70 kW 내외를 기준하였다. 화원은 250 mm×250 mm×80 mm(Pan 1)과 200 mm(직경)×70 mm(Pan 2)의 두 종류이며 연료는 n-Heptane을 사용하였다.

(3) 노즐

실험에 사용된 노즐은 Type 1과 Type 2의 2가지이며 폐쇄형과 개방형 노즐을 사용하였다. 실대 화재 실험을 위한 세부적인 노즐 설치조건은 다음과 같다.

- 설치 간격 : 1.5 m
- 노즐의 유량 : 28.9 (l/min)/50.3(l/min)
- 보호공간의 최대높이 : 2.3 m
- 노즐tip에서 상단 케이블 거리: 2.265 m
- 천정에서 노즐tip 거리 : 0.235 m

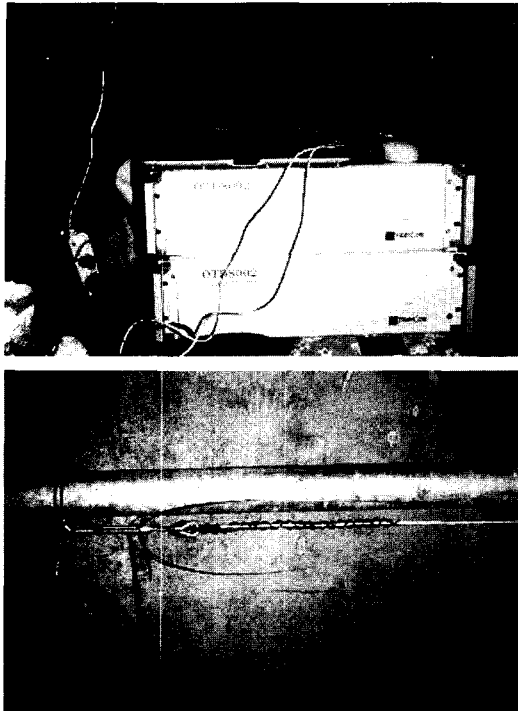


그림 6. 광케이블감지기 수신반 감지기의 설치장면.

- 벽에서 노즐까지의 거리 : 1.25 m 노즐의 작동압력 : 5 kg/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, 지하구 내부에 설치된 P형 수신기와 광케이블의 작동되어 수신반에 신호가 입력되면 펌프 기동스위치를 작동하여 노즐을 개방하였다. 광케이블은 레이저에서 나온 광 펄스를 이용하여 측정하는 장치로 실시간별로 지하구 내부의 온도의 변화를 측정하고 화재 감지 설정온도를 기준으로 이에 도달하는 경우에 미분무를 분사하였다.

(5) 측정장치

① 온도 : 온도측정을 위해 설치한 열전대는 K-Type으로 0.5 mm를 사용하였다. 1차, 2차 실험은 아래 그림 중 A형식으로 설치하고 3차, 4차 실험은 B형식으로 설치하였다. 온도측정 데이터는 National Instruments사의 SCXI 1000과 Labview 6.0을 사용하였다.

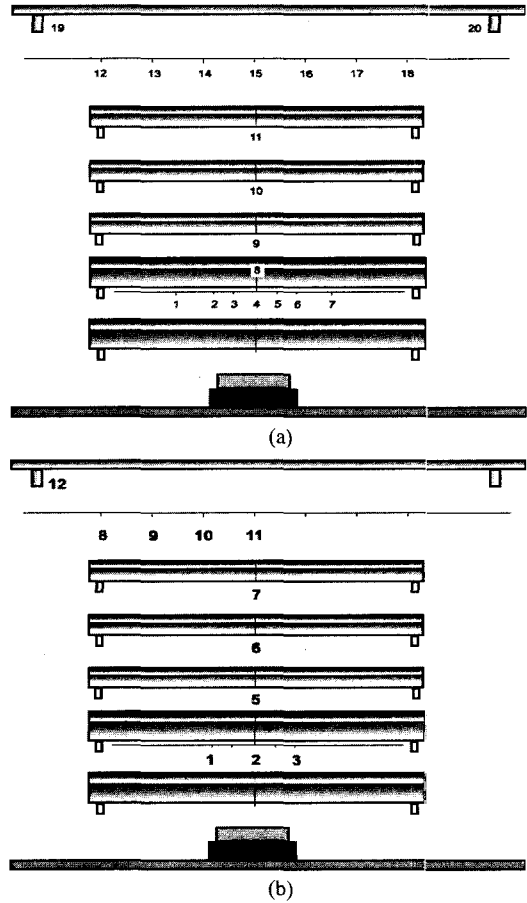


그림 7. A형식 (실험 1)의 온도측정위치 (a)와 B형식 (실험 2,3)의 온도측정위치 (b).

② 로드 셀 : 화열차단과 방수를 위하여 단열재로 제작된 500×400×60(H)보호 상자에 로드 셀을 설치하여 연료의 질량감소비율을 측정하였다.

③ 비디오 기록 및 모니터 : 2개의 실내 카메라가 화원부근 및 실내전체를 볼 수 있는 위치에 설치하고 중앙제어실에서 2개의 모니터를 통하여 실험을 관찰하였다.

④ 가스 측정 : 케이블의 연소시 발생하는 유독성 가스를 측정하기 위하여 바닥에서 2.0 m 높이, 화원에서 수평으로 1.3 m 이격한 거리에 가스 측정기를 설치하였다. 측정결과는 ECOM 가스분석기로 입력되었다.

4.2 화재 시나리오

지하구에 예상되는 실제 화재상황을 예측하는 것은 용이하지 않다. 전력구 케이블을 수용하는 지하구의 경

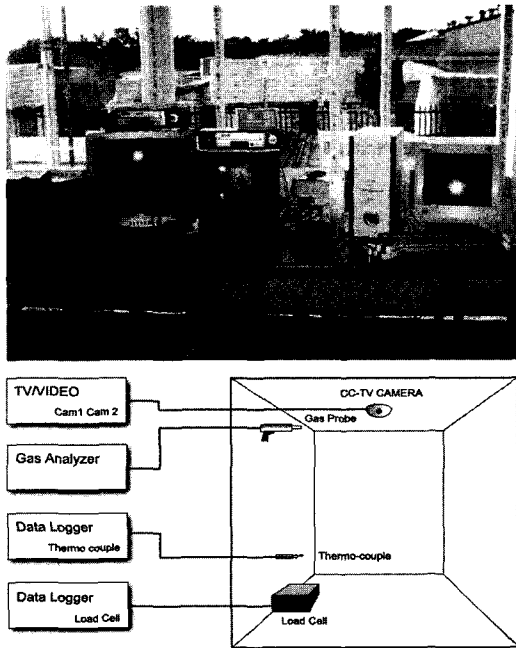


그림 8. 실험용 측정 장비와 구성도.

우, 케이블 내부의 절연유의 발화 또는 공사 중에 싸여진 쓰레기나 시공 재료 등의 폐기물 등에서 발화할 수 있다. 만일 이들이 직접된 쓰레기나 폐기물 통이 깊은 경우는 미분부의 직접 방사범위를 벗어나게 된다. 이 경우 소화성능은 쓰레기통 내부의 가연물 종류와 쓰레기통의 깊이, 그리고 인접한 노즐의 위치, 살수 장애 정도 등에 따라 결정된다.

(1) 화재는 지하구 내부에 직접된 쓰레기나 시공 폐기물에서 발화하여 화염이 가장 가까운 케이블에 닿게 된다. 가연물의 양은 최소 5분내지 10분정도의 연소가 가능하며 훈소 단계없이 신속하게 1분 내지 2분 이내로 40 kW에서 80 kW 정도로 확산된다.

케이블의 각 단을 통하여 신속하게 화염이 확산되는 경우, 화재 감지 및 이에 따른 소화작동시간도 단축되어야 하는 최악의(Worst Case) 시나리오가 된다. 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 6~80 kW 정도의 화재크기를 설정하였다.

(2) 이러한 화재 시나리오 조건에서 미분무수의 소화 성능을 확인한다. 화재감지 또는 살수장애등으로 신속한 소화가 방해되는 경우, 케이블은 수분 이내에 직

접적인 화염노출로 치명적인 열적 손상을 가져올 수 있다.

(3) 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. 헵탄의 양은 약 8분~9분 정도의 연소시간을 가지며 화원은 노즐과 노즐사이 중앙에 설치하였다. 각 단의 케이블은 3개마다 결속하여 각 단의 중앙에 위치하여 시스템 방수 시 살수 분포 한계 및 살수 장애효과를 고려하였다.

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. 화원의 크기는 250 mm×250 mm×80 mm이며 연료는 n-Heptane 1.0l를 사용하였다. 화원은 지하구 길이방향의 중앙부분, 바닥면에 설치되었으며 직상부 2단에 각

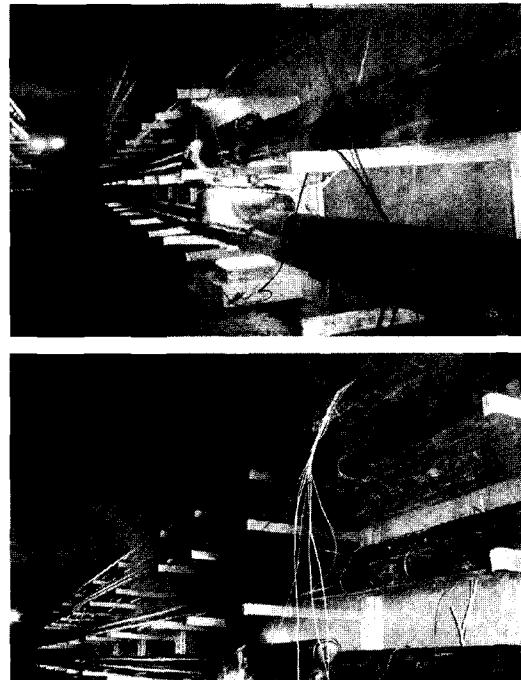


그림 9. 상부 케이블로의 연소확대와 천정부로 연기가 확대되는 모습.

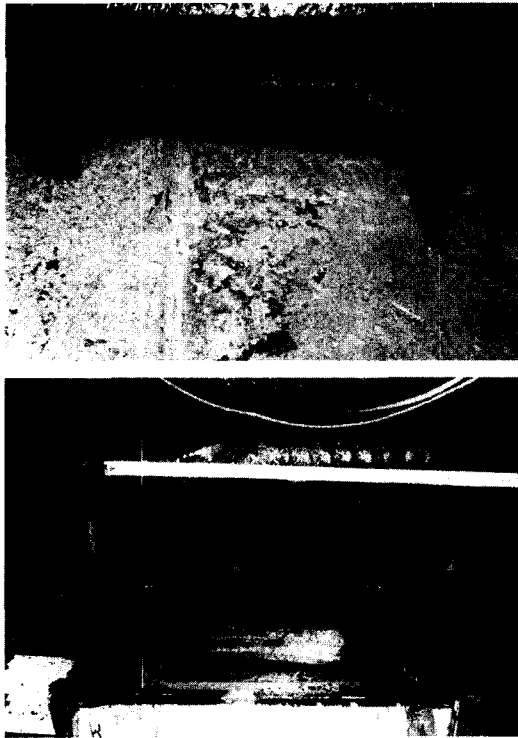


그림 10. 화원 직상부 케이블 외피의 열적 변형.

각 1.2~1.5 m 내외의 154 kV 케이블 3개가 설치되었다. 지하구 내부에는 자연환기 상태에서 실험을 진행하였다. 열전대 설치는 A형으로 하였다. 화원에 접화되고 약 30초가 경과되면서 화염은 직상부 케이블을 휘감으면서 신속하게 확산되었다. 약 2분 40초 경과시 화염은 3단 케이블에 접촉되었으며 이후 화염 영역에 포함되는 케이블에서 격렬한 연소가 진행되었다. 점화 후 약 355초까지 연소가 진행되면서 연료의 질량 손실비율을 측정할 수 있으나, 이후 케이블 외피가 용융되면서 로드셀의 질량을 증가시켜 이후에는 측정할 수 없었다. 실험 직후의 케이블 외피는 여러 곳이 심하게 연소되고 내부형태가 노출되었다. 탄화부분의 길이는 평균 60~75 cm 정도이다(그림 10. 참조).

그림 11(a)은 제4단에 설치된 154 kV 케이블의 좌측과 우측 200 mm 지점과 3개의 케이블 더미속의 온도 측정 결과로 화원에 직접 영향을 받는 부분은 전체적으로 약 4분 또는 6분 동안 400°C 이상의 고온에 노출되었다. 그림 11(b)은 중간 및 상부에 설치된 케이블의 온도 분포이다. 하부 케이블에 비하여 온도는 전반적으로 낮으나 중간부분의 제 3단의 케이블 온도는 500°C까지 상승하였다. 상부 천정부근의 온도는 평균

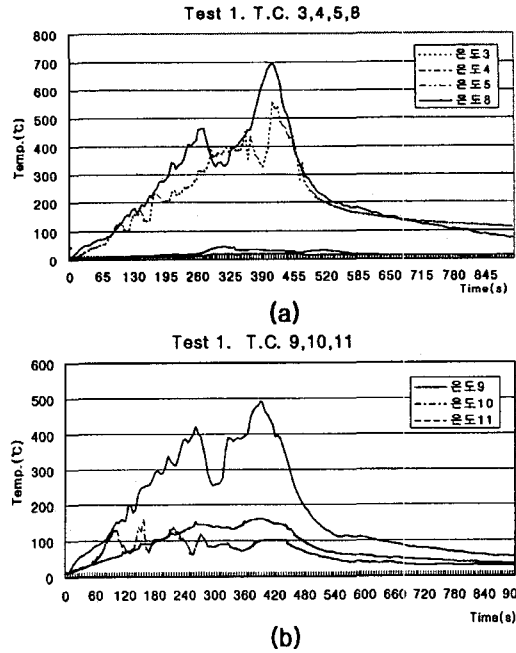


그림 11. 실험 1의 화원 직상부(a)와 중간부분(b)의 케이블 온도분포.

적으로 약 100°C에서 150°C사이를 나타내며 최고 200°C에 도달하였다.

케이블의 연소에 따른 유독성 가스의 측정을 위하여 화원에서 1.3 m 이격한 지점에 바닥에서 2.0 m 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 900 ppm에 도달하였다. 지하구의 공간크기를 고려한다면 이러한 농도는 상당히 높은 것이며 1시간 정도의 노출시 두통, 메스꺼움 등 신체적 영향으로 인하여 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. 따라서 케이블의 피해를 최소화 하기위하여 화재 초기 단계에 신속한 소화설비의 작동이 필수적임을 보여주고 있다.

(2) 실험 2(노즐 Type 1)

노즐의 소화성능에 미치는 감지시간의 영향을 평가

하기 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. 실험 시작 전 지하구 내부의 온도는 8°C 정도로 측정되었다. 감지선형 감지기는 작동온도 72°C이며 10m 길이로 2곳에 설치하고 수신반에 연결하였다. 1번 감지기는 천정 중앙에 위치하며 2번 감지기는 4단 선반 위 154 kV 케이블에 지그재그로 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. 발화 후 23초 경 4단 케이블에 화염이 도달하고 3분 30초경에 4단 케이블의 연소가 진행되었다. 화원 직상부 케이블의 외피온도는 2곳에서 400°C를 초과하였으며 노즐이 개방된 직후 일시적인 온도저하가 있다가 다시 상승하여 온도제어에는 실패하였다. 천정

부근의 온도는 100°C 내지 150°C 사이에서 3~4분간 지속되었다.

결과적으로 노즐 작동으로 화세를 제어하지 못하였으며 실험 도중 펌프 기동시간의 지연 및 원심형 펌프의 작동 중 압력변화로 인한 살수패턴의 변화가 생기는 영향을 볼 수 있었다. 또한 광케이블의 화재 설정 기준온도는 겨울철의 경우에는 70°C보다 하향 조정해야 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

(3) 실험 3(노즐 Type 2)

본 실험은 노즐 type 2의 소화성능 평가 및 케이블 연소 시 화원의 영향을 최소화하고 화재 감지시간을 결정하는 주요인 케이블의 열적 특성을 최대한 반영하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 지상에 별도로 설치된 연료통에 연결되는 연료 주입관을 통하여 팬에 연료를 공급하였다. 케이블이 발화된 후 자체적인 연소로 화염확산이 충분히 진행된 것을 확인한 후 연료공급 밸브를 차단하였다. 연료통의 직경은 15cm, 높이는 140cm이며 6mm의 연료주입관을 설치하였다. 화원의 위치는 5단 하부에 노즐과 노즐 사이에 위치하며 Pan-1에 n-헵탄을 공급하였다. 화염의 영향을 직접 받는 화원 부근의 1단, 2단 그리고 3단에는

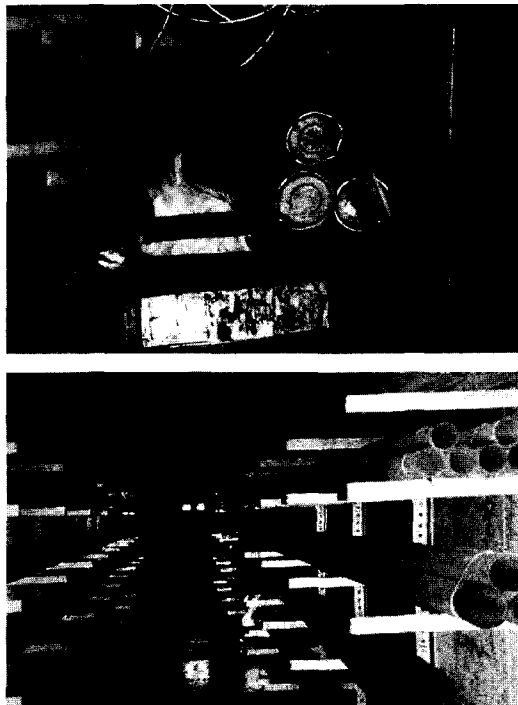
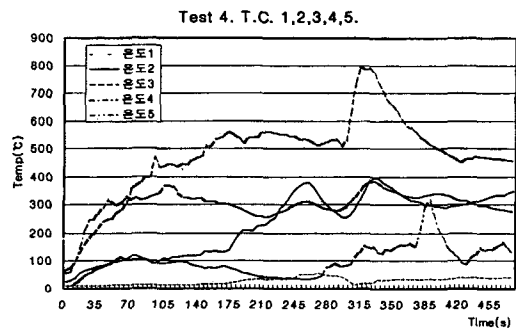
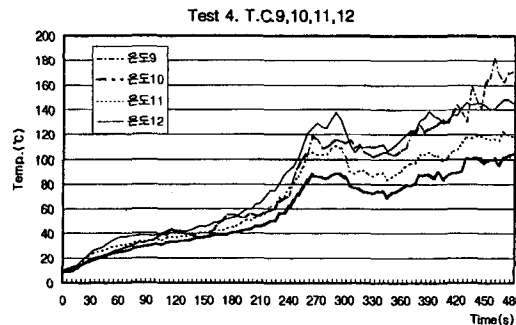


그림 12. 점화 직후 케이블 착화 상황.



(a)



(b)

그림 13. 실험 2의 화원 직상부(a)와 상단 케이블(b)의 온도.

길이 1 m 내외의 22.9 kV 케이블을 각 단마다 6개를 설치하였다. 4단 및 5단에는 길이 1.5 m 내외의 154 kV를 각 단마다 3개를 설치하였다.

실험에 사용된 노즐은 6N-3.3 mm(Type 2)이며 폐쇄형 글라스밸브를 사용하였다. 노즐의 작동온도는 68°C이며 방사 압력은 5 kg/cm²이다. 2개의 노즐은 하향으로 설치되고 노즐의 간격은 1.5 m로 설치되었다. 노즐 사이에는 노즐 설치높이를 기준으로 철제 배플(15 cm × 10 cm)을 설치하였다. 케이블이 발화한 후 약 2분 경과시 많은 연기가 생성되면서 약 4분 10초 경에 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 14(a)참조).

화원 직상부의 케이블 온도는 발화 후 460초에 최대 384°C로 측정되었으나 노즐이 작동된 이후 온도는 즉시 하강하였다. 아울러 제 3단 및 1단에서도 노즐의 냉각효과를 잘 보여준다. 천정부근온도는 100초경에 최대 180°C를 기점으로 점차 하강하였으며 전체적으로

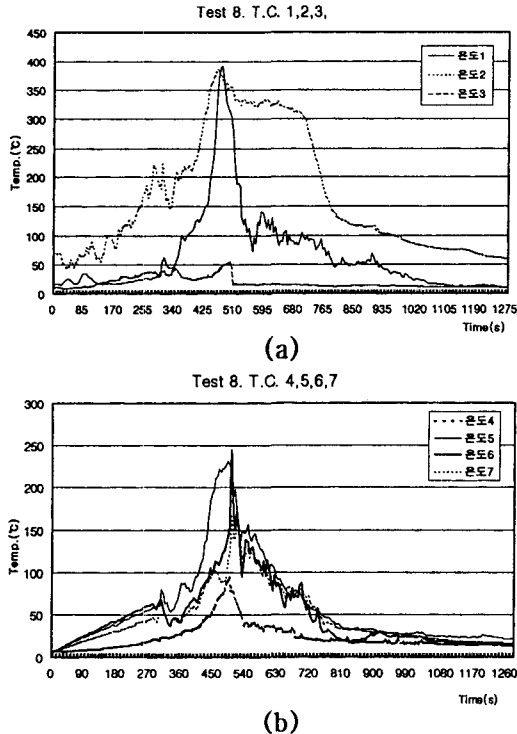


그림 14. 케이블 하부(a)와 상부 (b)의 온도변화.

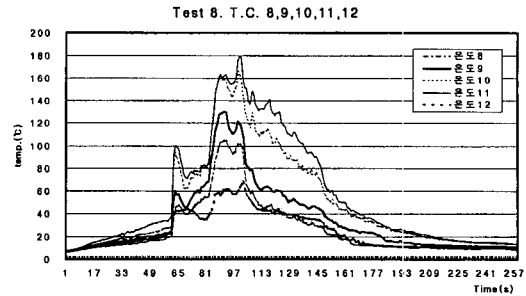


그림 15. 케이블 직상부 천정(8,9,10,11)과 헤드부근(12)의 온도변화.

모든 케이블에서 400°C 이하를 유지하여 온도계어는 성공하였다. 최초 노즐의 살수 및 냉각 효과로 2번째 노즐은 작동하지 않았으며 이후 지속적인 온도 하강을 보이면서 점차 소진하였다. 연소 후 케이블의 화염 확산 정도는 약 30~60 cm 정도로 확인되었다.

한편, 화원 중심부에서 우측으로 1.5 m에, 바닥 위 2.3 m에서 측정된 가스농도결과는 일산화탄소의 최대 농도는 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.

4.4 실험의 한계

(1) 화원의 위치

본 실험은 지하구 단면상의 화원의 위치를 노즐의 소화에 가장 불리하다고 판단되는 최하부 케이블 선반 아래 바닥면에 설치하였다. 살수밀도 측정결과를 보면 중간부에 위치한 케이블 선반의 경우, 살수 분포가 효과적으로 보여진다. 따라서 본 실험에서는 중간 선반에 화원이 위치한 경우의 실험을 제외하였다. 반면에 최상부 케이블 선반(제1단)에서는 살수밀도 분포가 불규칙하며 방사량이 측정안된 부분도 있어 이곳에 화재가 발생한 경우를 포함한 화원의 위치변화에 따른 화재실험이 필요하다.

최소한의 수량으로 소화성능을 검증하기 위하여 방사되는 노즐은 2개로 제한했으며 화원의 위치는 가장 방사 분포가 불리하다고 예상되는 2개의 노즐간격 중간지점에 설치하였다. 따라서 노즐의 간격에 관련하여

화원의 위치는 가장 불리한 화재상황으로 볼 수 있으나 이러한 판단을 검증하기 위한 추가적인 실험은 수행되지 않았다.

(2) 지하구 공간 형태

본 실험에서는 현재 한국전력에서 사용되는 12개의 다양한 지하구 공간형태를 기준으로 가장 대표적인 단면형태를 설정하여 실험하였다. 그러나 실제 현장에서 사용되는 다양한 단면형태에 따라서 케이블의 배치, 선반단수 등이 본 실험의 단면형태와 차이가 있다. 그러므로 위의 지하구에 본 시스템을 적용하는 경우, 노즐 간격, 방사각도, 방사량 등 실험결과를 기준으로 별도의 공학적 적용과 판단이 필요하다.

(3) 케이블의 손상 여부

수차례의 실험결과, 자기소화성을 가지고 있는 케이블 외피는 화염이 제거되면 자체 소화되었으나 화재초기 수 분 동안 탭탄화원에 의한 화염에 직접 접촉되는 부분은 심하게 손상되어 용융되거나 심하게 변형되었으며 연소 후에는 쉽게 분쇄되었다. 일단 외피가 손상된 경우에는 케이블 내부 절연체가 직접화염에 노출되어 케이블 내부온도가 상승됨에 따라 케이블의 본래기능이 손상된다.

본 실험에서는 시스템의 작동으로 화재가 발생한 위치의 상단부에 설치된 케이블의 외피 온도가 400°C 이하로 유지되는 경우에 화재이후에도 케이블이 복구 불가능한 피해상황을 방지할 수 있다는 평가 기준을 적용하였다.

(4) 감지 및 개방시간

화염에 직접 노출되는 케이블의 완전한 보호를 위한 소화 또는 방호 시스템을 적용하는 것은 현실적으로 용이하지 않다. 실험을 통하여 케이블 외피의 손상이 발화후 몇 분 이내에 발생되고 케이블의 외피 온도도 급격하게 상승됨을 보여 주고 있어 신속한 화원의 위치 확인과 이에 따른 노즐 개방 시간을 단축할 수 있는 감지 및 작동 방식의 평가 및 적용이 중요한 요소가 된다. 본 실험의 목적중 하나는 화원 상부의 케이블이 복구 불가능한 피해상태를 방지하기 위하여 화재 감지와 화재발생 구역의 노즐을 개방하는 적정 시간이 어느 정도 인가를 결정하는 것이다. 이를 위하여 정온식 감지선형 감지방식과 광케이블 감지방식, 그리고 수동개방 방식을 채택하여 적정 작동시간을 결정하기 위한 실험을 진행하였다. 대부분의 실험에서 발화 후 불과 60초 이내에 화염이 케이블 외피에 접촉되고 2-3분간 화염이 지속되는 상황을 보여 주고 있어 상부 케이블의 열적 손상이 불가피함을 알 수 있었다. 이를 기준으로 실험 3의 경우는 글라스밸브의 작동시간을 기

준으로 5분 16초에 노즐이 개방되었다.

본 실험에 적용한 화원보다 작은 화재크기에 노출되는 경우, 화재감지 및 노즐개방시간은 증가될 것이다. 또한 확산화염을 발생하기 이전에 장기간 훈소 상태가 진행되는 화재를 가정하면 감지시간은 이보다 증대될 것이다. 따라서 화원의 크기가 80 kW 내외의 화재 시나리오에서 노즐의 개방시간은 2분 이내, 60 kW의 경우는 4분 내외가 적절하다고 판단된다.

한편, 케이블의 대응으로 설치된 광관과 케이블의 열적 특성 특히 열전도율의 차이로 인하여 천정에 설치된 폐쇄형 노즐의 감지시간과 감지기의 작동시간이 예상보다는 상당히 지연됨을 보여 주었다. 따라서 본 실험에 의한 감지시간은 시스템의 작동을 위한 가장 지연된 상황의 결과로 볼 수 있다.

5. 결 론

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

·**목표 1 : 케이블의 열적 손상으로 인한 교체기 가파른 정도의 최소 화재크기를 규명.**

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

·**목표 2 : 목표 1에서 규명된 최소 화재크기를 기준으로 감지 및 소화시스템의 최적 작동시간을 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 상단부 케이블의 열적 손상 정도가 감소되었다.

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

소화성능 최적화를 위한 시스템 설계 요소는 하나의 주요 인자에 따라 결정되기 보다는 입자직경, 살수밀도, 방수량 그리고 화원의 모멘텀 등 다양한 관련 요

소에 의한 복합적인 영향에 좌우되고 있음을 실험을 통하여 알 수 있었다.

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, 2.7 mm 15A Impingement Type	6구형, 3.3 mm, 25A Impingement Type
입자분포	470 마이크로 (Class III)	650 마이크로 (Class III)
방사각도	132도	162도
설치간격	1.5미터	1.5미터
K factor	12.96	22.49
방수량	28.9 (LPM)	50.3 (LPM)
방사압력	5 kg/cm ²	5 kg/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, and 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 and J. K. Richardson, "A Review of Water Mist Fire Suppression Research & Development", Fire Technology, Vol 33, No1, pp. 54-90(1997).
7. NFPA 750, Standard on Water Mist Fire Protection Systems, pp.37-41, 2000, Edition.
8. NIST Report of Test FR 4000, "Determination of Water Spray Drop Size & Velocity from a Low Pressure, High Momentum, Water Mist Nozzle, NIST(1995).
9. UL 199 - A Method of Measuring Water Density Distribution.
10. Zhigang Lui, Andrew K. Kim, "A Review of Water Mist Fire Suppression Technology: Part II- Applications Studies", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. II, pp.16-42(2001).