

지중송전선로 접속부용 미분무 강화액 소화설비의 개발연구 Development of Loaded Stream Fire Extinguishing Systems for Underground Transmission Cables

이 성 모

Sung-Mo Lee

(주)SH엔지니어링

(2008. 1. 29. 접수/2008. 2. 18. 채택)

요 약

지하전력구에서의 지중송전선로 접속부의 화재에 대한 강화액 미분무 소화설비의 개발을 위한 화재시험을 수행하였다. 높이 5.5 m, 폭 3 m, 길이 6 m의 화재시험실에 154 kV OF 케이블 6단으로 소화모형을 설치하였으며 하부의 점화대의 연료는 휘발유를 사용하였다. 화재감지용 정온식 감지선형 감지기는 케이블 최상단에 설치하였고, 소화약제 방출노즐은 천장부와 측벽부에 각각 설치하였다. 총 7회의 소화시험을 실시하고 미분무 강화액 소화설비로 개발된 제품을 소화모형에 방사하여 표면화재 및 심부화재의 판정기준인 3분 이내에 성공적으로 소화하였다.

ABSTRACT

Full-scale fire extinguishment tests were conducted to develop loaded stream fire extinguishing systems for protecting underground transmission cables. The dimension of test mock-up was 5.5 m height × 3 m width × 6 m length, and six 154 kV OF cables were piled up. Gasoline was used to ignite cables. Linear heat detection cables were installed on top of 154 kV OF cable and discharge nozzles were installed on the top and sidewalls, respectively. As a result, both surface fires and deep-seated fires were extinguished successfully within the specified 3 minutes by discharging loaded stream agent.

Keywords : Loaded stream, Water mist, Deep-seated fire, Surface fire

1. 서 론

한국전력이 관리하는 지하전력구는 각 지역 변전소로 전력을 공급하는 단일 통로이다. 따라서 지하전력구는 발전소에서 만들어진 154~765 kV의 초고압 전력을 송전하는 역할을 한다. 현재 우리나라에 설치된 지하전력구는 총연장이 337.8 km에 이르며 서울에만 134.2 km의 지하전력구가 설치되어 있고, 부산·인천·대전·제주 등에도 지하전력구가 늘어나고 있는 상황이다. 우리나라의 지중화율은 8.3%로 100%인 싱가포르나 11.9%인 일본보다는 낮지만 1.1%의 미국이나 3.0%의 프랑스보다는 높은 실정이다.

지난 수년간 지하전력구의 지중송전케이블 화재사고

가 빈번히 발생되고 있다. 지하전력구 화재는 대부분 전기화재의 특성을 띠고 있으며, 일반 수계 및 가스계 소화설비로는 소화 및 재발화에 대한 역제가 매우 어렵다.¹⁾ 또한 케이블 외장재인 폴리에틸렌이나 PVC는 연소시 독성가스(HCl, CO₂, CO 등)를 생성하여 단시간 동안 흡입하여도 인체에 치명적인 영향을 줄 수 있고, 축적된 연기 및 다량의 연소생성물들은 지상으로 배출되기 어렵기 때문에 화재에 대한 소화활동이 더욱 어려워지게 된다.²⁾ 지하전력구의 화재원인은 지중송전케이블의 과전류 및 전기합선, 절연파괴 등으로 인한 내부적 요인이 대다수이다. 특히 지중송전케이블의 접속부는 가장 취약한 부분으로서 이 부분에서 화재가 발생할 경우에 다른 부분으로 확산되는 것을 방지하기 위하여 화재를 자동으로 감지하여 조기에 진화하는 전용 소화설비가 절실히 필요하다. 지중송전케이블 접속

부용 소화설비는 전기화재(C급화재)에 적응성이 있어야 하며, 케이블화재의 특성인 표면화재 및 심부화재에 대하여 소화능을 가져야 한다. 본 연구에서는 지하전력구 지중송전선로 접속부의 화재를 방호하기 위한 소화장치의 개발을 위해 강화액 소화약제를 미분무 상태로 방출하여 화재를 진압하는 실규모 화재시험을 실시하였으며, 시험결과를 토대로 지하전력구의 화재 방호를 위한 최적의 미분무 강화액 소화설비를 개발하였다. 한국소방검정공사의 기술기준인 KOFEIS 0102에 의해 형식승인된 강화액 소화약제를 미분무 방출노즐을 통하여 화재시험실에 설치된 지중송전케이블 접속부의 화재에 액적의 $Dv_{0.99}$ 가 $1000 \mu\text{m}$ 이하인 상태로 방사하여 소화능을 시험하였다.³⁾

2. 화재시험실 및 시험방법

2.1 화재시험실

본 연구에서의 시험장치 구성은 한국전력공사의 미분무 강화액 소화설비 시험기준에 의거하여 설치하였다.³⁾ 화재시험실은 Figure 1과 같이 폭 3m, 높이 5.5m, 길이 6m 크기로 비계강관의 조립구조물을 설치하여 시험실 양측 벽부는 단열용 석고보드판으로 고정하였다. 입구측, 출구측과 천장부는 개방상태로 하였다.

화재시험용 케이블은 단면적 1200 mm^2 의 154 kV OF 케이블을 2.5m로 절단하여 마감처리를 하였다. 화재시험실 내부 한쪽벽부에 케이블 고정용 지지대를 설치하여 바닥면에서 0.6m, 상부이격 0.4m를 띄워서 OF 케이블을 6단으로 설치 고정하였다. 최하단 케이블은 양측 절단부위 중 한 면을 마감처리 하고 반대편은 급유관으로 임시급유탱크와 연결하여 시험 중 계속해서 하드알킬벤젠 절연유가 공급되도록 하였다. 화재감지

용 정온식 감지선형감지기는 최상단 케이블 위에 설치하여 화재수신반에 연결하였으며, 감지기는 공칭작동 온도 $70/90^\circ\text{C}$ 다신호식의 정온식 감지선형 감지기를 사용하였다.

강화액 미분무 방출노즐은 천장부 및 케이블 각 3단마다 배치하여 고정 부착하였으며, 천장부에 설치되는 방출노즐 및 고정용 배관의 높이는 5.5m로 하였고, 측벽부 고정방식의 경우 벽면에서의 돌출거리는 0.6m로 설치하였다. 미분무 방출노즐은 충원추(Full cone) 형태의 노즐로서 방사각도는 $40^\circ, 90^\circ, 98^\circ$ 의 세 종류를 준비하여 각 회의 소화시험마다 전체 노즐을 같은 각도의 방출노즐로 교체하여 시험하였다. 방출배관은 화재시험실에서 6m 이격 설치된 4병의 약제용기에 연결하였다. KSD 3576(배관용 스테인리스 강관) 호칭지름은 15A 방출배관을 사용하여 매니폴드 후단에 솔레노이드 밸브를 설치하였으며, 내용적이 50리터인 약제용기에 강화액을 주입하고 약제의 방출을 위한 가압원으로 1MPa 압력의 질소가스를 충전하였다. 화재수신반 출력신호단자와 솔레노이드 밸브를 연결하여 점화 1분 후 수동조작으로 솔레노이드를 기동하도록 하였다.

2.2 시험방법

2.2.1 표면화재 시험기준

표면화재의 시험은 유류화재의 시험방식으로 화재시험을 실시하였다. 유류화재의 기준은 소방법 수동식소화기의 형식승인 및 검정기술기준 제 5조에 근거하여 Figure 2(c)와 같이 유류 점화대의 모형번호 수치를 6단위로 하였으며, 유류화재용 연료는 휘발유를 사용하였다.

2.2.2 심부화재 시험기준

심부화재의 시험을 위해 최하단 케이블에 카트리지형 전기히터를 Figure 2(d)와 같이 설치하였다. 직경 10mm, 길이 150mm의 전기히터를 최하단 케이블의 상단중간부 좌측(측벽측) 45° 방향에 직경 11mm 구멍을 내어 도체에 2~3mm 꽂히는 정도로 삽입하였다. 전기히터는 AC 220V, 500W의 카트리지 히터를 사용하였다.

2.2.3 성능실증 시험기준

표면화재와 심부화재에 대한 소화시험을 동시에 시행하였다. 심부화재를 구현하기 위해 최하단 케이블에 설치된 전기히터에 전기를 인입하여 3분 동안 가열하였으며, 이후 표면화재의 시험기준에 따라 유류점화대를 강제 점화시켜 6단의 케이블을 1분 동안 자유연소시킨 뒤 수동으로 솔레노이드 밸브를 기동시켜 소화약제를 방출하였다. 강화액 소화약제의 소화능을 물과

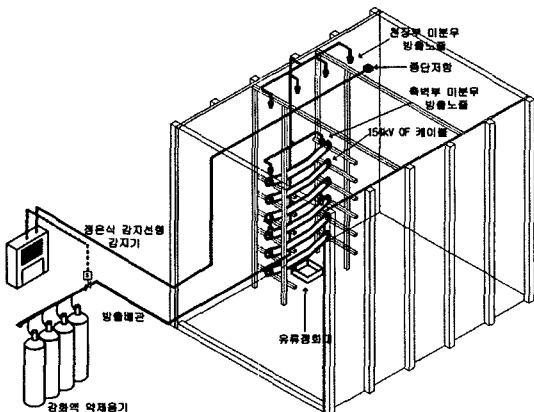
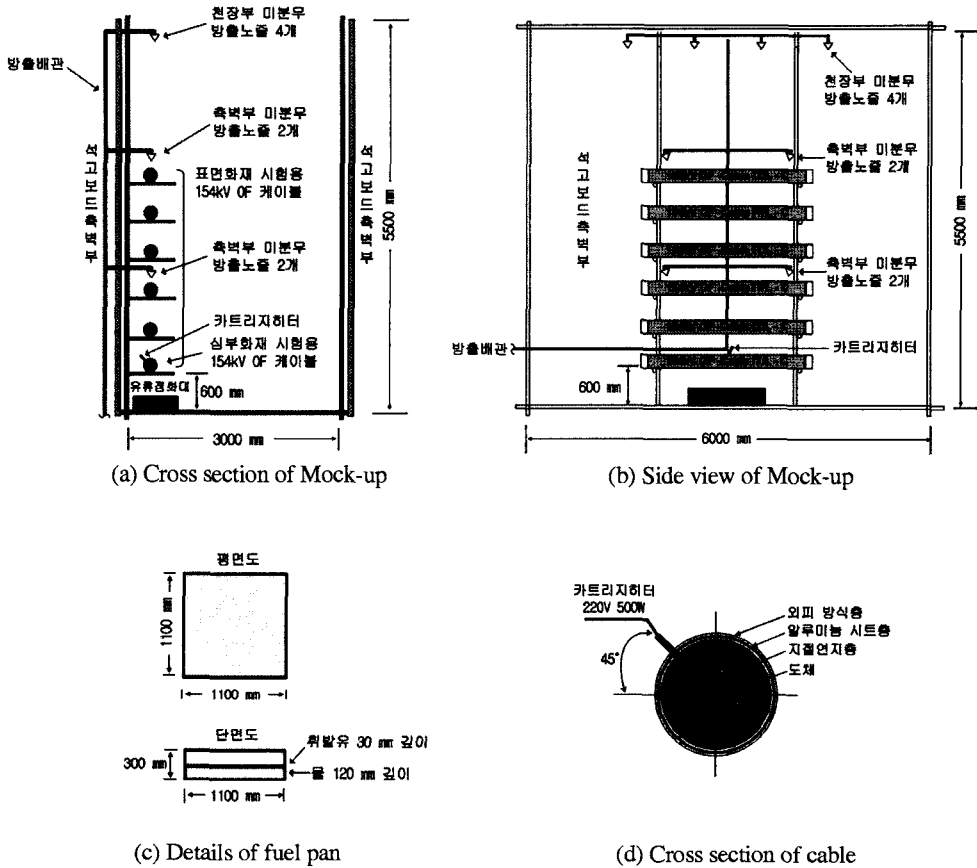


Figure 1. Isometrical drawing of experimental mock-up.



(a) Cross section of Mock-up

(b) Side view of Mock-up

(c) Details of fuel pan

(d) Cross section of cable

Figure 2. Experimental Mock-up.

비교하여 보기 위해 강화액 약제용기에 물을 넣어 소화시험을 우선 실시한 후에 강화액 소화약제로 소화시험을 실시하였다. 2회 연속 시행하여 3분 이내에 표면화재 및 심부화재를 모두 소화하는 것을 합격기준으로 하였다. 표면화재의 소화시간은 소화약제 방출 후 유류점화대에 착화된 화염이 완전히 소화되는 순간까지의 시간으로 간주하였으며, 심부화재의 소화시간은 소화약제 방출 후 케이블에 착화된 화염이 소화되는 순간까지의 시간으로 간주하였다. Figure 2에 화재시험실의 시험장치 실물모형을 나타내었다.

또한 유류점화대의 화염온도측정을 위해 연료펜 상부 0.6 m 높이에 K-type 열전대를 설치하였으며 A/D 컨버터를 이용하여 컴퓨터로 0.5초마다 화염의 온도가 저장되도록 하였다.

2.3 강화액 소화약제 물성값 측정

강화액 소화약제의 밀도, 표면장력, 어는점, 수소이온농도(pH) 등 물리적 성질을 측정하여 분석하였다. 표

면장력을 측정하기 위해서 Du Nouy ring 법을 이용한 표면장력계(Seisakusho, 514-B2)를 사용하여 측정하였다. 측정원리는 가는 금속 환을 수평으로 걸어서 액체의 표면에 접촉하여 서서히 위로 들어 올리면, 액체와 부착되어 있는 금속 환 사이에는 인장력이 생긴다. 금속 환과 수면이 분리되어지는 순간에 필요로 하는 힘을 측정하면 표면장력을 구할 수 있다.

밀도 측정 방법에는 비중병법, westphal balance법, hydrometer법, 액적 낙하법 등이 있으며, 본 연구에서는 비중병법을 이용하였다. 비중병법은 일정 온도에서 부피를 아는 액체의 질량을 측정하는 방법으로 실험에 주의를 요하나 정밀한 값을 얻을 수 있다. 물질의 어는점은 항온 순환조에 10 ml 용액을 넣은 시험관을 담그고 냉각하여 일정한 온도에서 유리막대로 휘저어 결정이 석출되었을 때의 온도를 읽되 3회 반복 측정하여 평균값을 어는점으로 하였다. 수용액의 수소이온농도는 inoLab pH 740(WTW Inc.)을 사용하여 측정하였다. 화재시험에 사용된 강화액 소화약제는 20 °C 상온

Table 1. Physical properties of loaded stream extinguishing agent

Fluid	밀도 (kg/m ³)	표면장력 (N/m)	어는점 (°C)	pH
증류수	998.23	0.072	0	7.0
강화액 소화약제	1100.00	0.033	-20	7.0

에서 다음과 같이 측정되었다.^{1,4,5)}

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미분무 방출노즐의 분무특성 시험

노즐의 분무특성을 고려하여 실제로 지하전력구 지중송전케이블의 화재를 소화하는데 적합한 미분무 방출노즐을 제작하였다. 노즐 말단에서의 압력강하를 고려하여 방수압력이 0.7 MPa에서 방사각도 98°, 90°,

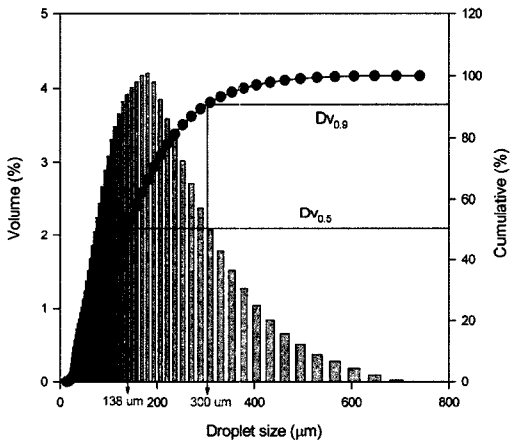


Figure 3. Cumulative volumetric distributions of water mist nozzle.

40°를 나타내는 노즐을 제작하였으며, 이때 노즐의 방사량은 각각 8.95, 8.50, 7.86 l/min이었다. Figure 3에는 제작된 미분무 방출노즐 중 소화능력이 가장 우수하게 나타난 방사각도가 40°인 미분무 방출노즐의 분무특성 분포를 나타내었다.

Mawhinney 등은 미분무수를 입자크기 별로 Class 1, 2, 3로 구분하였는데, Class 1급에 해당하는 미분무수는 누적 백분을 체적분포선 전체가 $Dv_{0.9} \leq 200 \mu\text{m}$ 인 경우이며, Class 2급 미분무수는 누적 백분을 체적분포선이 Class 1급의 범위를 벗어났으나 전체가 $200 \mu\text{m} < Dv_{0.9} \leq 400 \mu\text{m}$ 의 경우이며, Class 3급 미분무수는 $400 \mu\text{m} < Dv_{0.9} \leq 1000 \mu\text{m}$ 의 경우이다. 방사되는 물액적의 입자크기를 분석하기 위하여 Malvern 입자크기 측정장치를 사용하여 측정한 결과, 노즐로부터 1 m 떨어진 지점에서 입자크기($Dv_{0.9}$)는 방수압력 0.7 MPa일 때 $300 \mu\text{m}$ 이었고 Class 2급에 해당하는 노즐임을 알 수 있었다.^{6,7)}

3.2 소화실험결과

유류점화대 점화 후 측정된 화염의 크기는 약 1 MW 정도였고, 점화 후 다신호식 정온식 감지선형 감지기의 공칭작동온도 70 °C용 감지기가 24초에 동작하였으며, 공칭작동온도 90 °C용 감지기는 28초에 동작함을 화재수신반에서 확인하였다. 점화 후 1분 후 화재수신반에서 수동으로 솔레노이드를 기동시켜 강화액 소화약제를 화재시험실의 실물모형에 방출하여 7회의 소화시험을 실시하여 최종 확인된 시험결과를 Table 2에 요약하였다. Figure 4는 합격으로 판정된 6, 7차 소화시험결과에서의 화염온도변화를 나타낸 것으로 점화 후 화염온도가 1분 내에 최고 900 °C까지 상승하였다가 강화액 소화약제 방출과 동시에 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다.

Table 2. Extinguishing test results

소화 시험	소화약제	시험조건				시험결과			
		충진압력	방수압력	방사각도	방사량	표면화재 소화시간	심부화재 소화시간	재발화 여부	판정
1차	순수물	0.98 MPa	0.49 MPa	98 °	59.8 lpm	소화불가	소화불가	-	불합격
2차	순수물	0.98 MPa	0.49 MPa	90 °	56.8 lpm	소화불가	소화불가	-	불합격
3차	순수물	0.98 MPa	0.68 MPa	40 °	61.9 lpm	소화불가	소화불가	-	불합격
4차	강화액	0.98 MPa	0.49 MPa	98 °	59.8 lpm	196 sec	94 sec	없었음	불합격
5차	강화액	0.98 MPa	0.49 MPa	90 °	56.8 lpm	185 sec	86 sec	없었음	불합격
6차	강화액	0.98 MPa	0.68 MPa	40 °	61.9 lpm	82 sec	62 sec	없었음	합격
7차	강화액	0.98 MPa	0.68 MPa	40 °	61.9 lpm	76 sec	61 sec	없었음	합격

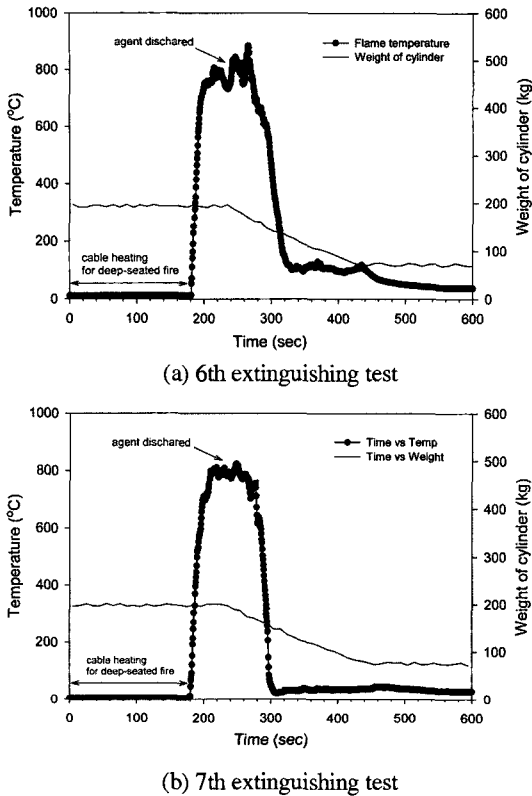


Figure 4. Flame temperature variation in acceptance test.

3.3 시험결과 고찰

소화약제로 순수물을 사용하였을 경우 어떠한 경우에도 화염은 소화되지 않았으며 연료가 전부 소모된 후 자연적으로 소멸되었다. 그러나 강화액을 사용하였을 경우는 심부화재 및 표면화재의 화염이 모두 소화되었으며 미분무 방출노즐의 방사각도에 따라 소화시간이 다르게 나타났다. 방사각도가 98°, 90°이었을 때 표면화재 소화시간은 허용기준인 3분을 초과하는 결과를 나타내었으며, 6차와 7차 시험에서의 결과와 같이 강화액 소화약제를 40° 방사각도의 방출노즐을 사용하여 2회 연속 시행한 결과 허용기준인 3분이내에 심부화재와 표면화재의 화염을 모두 소화하는데 성공하였으며 소화 후 재발화도 일어나지 않았다. 본 시험에서 사용된 미분무 방출노즐은 방사각도가 클수록 방사량이 많은 특성을 지니고 있어서 각도가 큰 노즐을 사용하면 냉각효과면에서 긍정적인 것으로 기대했으나, 실제 시험결과에 의하면 방출노즐말단에서의 방출압력 감소로 인해 소화약제의 침투력이 약화되어 표면화재를 효과적으로 소화하지 못하는 것을 확인할 수 있었다.⁸⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 유류점화대를 점화시킨 후 1분 후에 수동으로 솔레노이드를 기동시켜 강화액 소화약제를 방출하는 방법으로 시험하였으나, 시험결과 정온식 감지선형 감지기는 유류점화대 점화 후 30초 이내에 작동함을 확인하였으므로 실제로 감지기와 소화장치가 연동되는 현장시스템에서는 화재진압시간이 더 단축될 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 지중송전선로의 케이블 접속부의 심부화재 및 표면화재를 효과적으로 진압할 수 있는 미분무 강화액 소화설비를 개발하였으며 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1) 지중송전선로에서는 다량의 수원을 확보하기가 용이하지 않기 때문에 저장 가능한 소량의 수량으로 지중송전케이블 접속부에서의 화재를 진압하여야 한다. 물을 소화약제로 하여 미분무 상태로 방사한 결과 화재를 진압하는데 실패하였으나, 강화액 소화약제를 사용한 결과 소화효과를 크게 향상시키는 방법임을 확인하였다.

2) 미분무 방출노즐 말단에서의 방출압력에 따른 소화성능을 고려할 때 지중송전케이블의 표면화재 및 심부화재 소화를 위한 방출 노즐의 분무특성은 입자 크기 $Dv_{0.9} \leq 300 \mu m$, 방사각도 40°가 최적의 조건임을 도출하였다.

3) 강화액 소화약제의 소화 메커니즘은 냉각·질식·복사열 차단 및 부촉매 효과 등에 의한 것이며, 실제 소화시험 결과에 의하면 피복효과도 일부분 작용하는 것으로 관찰되었다.

지하전력구 화재에 대한 방호대책으로 스프링클러설비, 물분무설비, 미분무수설비와 같은 수계소화설비나 가스계 소화설비가 일반적으로 적용되어 왔다. 지하전력구에서 화재발생 가능성이 가장 높은 지중송전케이블의 접속부에 대한 방호대책으로는 본 연구에서 개발된 미분무 강화액 소화설비가 상당히 효과적인 소화설비임을 확인하였으나, 지하전력구가 갖는 사회기반시설로서의 가치와 중요성을 고려할 때 미분무 강화액 소화설비의 성능 및 적용에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. A.E. Finnerty, R.L. McGill, and W.A. Slack,

- “Water-based Halon Replacement Sprays”, ART-TR-1138, U.S. Army Research Lab., pp.1-2(1996).
2. Z. Jiang, W.K. Chow, J. Tang, and S.F. Li, “Preliminary study on the Suppression Chemistry of Water Mists on Poly(methyl methacrylate) Flames”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.86, Issue 2, pp.293-300(2004).
 3. 한전규격, “지중송전케이블 접속부용 강화액자동소화장치”, pp.14-19, 한국전력공사
 4. A.K. Kim, “Improvement of Water Mist Performance with Foam Additives”, *Proceedings of Fire Suppression and Detection Research Application Symposium*, pp.439-447(2001).
 5. B.A. Williams and J.W. Fleming, “Suppression Mechanisms of Alkali Metal Compounds”, *Halon Options Technical Working Conference*, pp.157-169(1999).
 6. National Fire Protection Association, *Fire Protection Handbook*, MA : Quincy, pp.2-88(1997).
 7. National Fire Protection Association, *NFPA 750 : Standard on Water Mist Fire Protection Systems* (2003).
 8. B. Downie, C. Polymeropoulos, and G. Gogos, “Interaction of a Water Mist with a Buoyant Methane Diffusion Flame”, *Fire Safety Journal*, Vol.24, pp.359-381(1995).
 9. 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).
 10. H.K. Chelliah, A.K. Lazzarini, P.C. Wanigarathne, and G.T. Linteris, “Inhibition of Premixed and Non-premixed Flames with Fine Droplets of Water and Solutions”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29, pp.369-376(2002).