

미국에서의 소화용 스프링클러의 발달과정 및 최근 동향

남 순 일 / 미국 FMRC 선임연구원, 공학박사

I. 서 론

소화용 스프링클러 설비는 화재에 대한 가장 확실하고 효과적인 보호수단의 하나로써 현재 전 세계에 걸쳐 광범위하게 이용되고 있다. 스프링클러의 소화효과를 단적으로 보여주는 일례는 스프링클러 설비가 개발되기 전인 1860년 이전의 미국에서의 화재로 인한 재산손실이 \$100의 재산에 대해 평균 30%였으나 스프링클러 설비가 널리 보급된 최근에 이르러서는 오직 2~3%에 불과하다. 본 문에서는 미국에서의 스프링클러의 시간에 따른 발달과정과 최근의 연구 동향에 대해 언급하고자 한다.

미국에서의 소화용 스프링클러의 효과는 1850년대 New England 지방의 섬유 공장들이 화재로부터의 손실을 줄이기 위해 설치한 구멍뚫린 파이프들로부터 찾을 수 있다. 이 설비는 1885년경까지 사용되어서 화재로부터의 재산보호에 일익을 담당하였다. 그러나 이 설비를 운용하기 위해서는 누군가가 항상 현장에 상주하고 있어 화재시 소화용수를 위한 밸브를 열어주어야 할 뿐만 아니라 파이프가 설치된 전 구역에 물이 흘러내리므로 파다한 물 피해를 초래하였다.

1874년에 Henry S.Parmelee가 정해진 온도에서만 개방되도록 설계된 자동식 스프링클러를 고안함으로써 위의 문제는 해결이 되었으며 이것이 현재에 사용되는 자동스프링클러의 출발점이 되었다. Parmelee의 스프링클러는 후에 Fredrick Grinnell에

의해 개선되어 1940년 후반까지 스프링클러를 대변하는 표준스프링클러로 널리 사용되었다.

1940년대 후반기에 등장한 지게차의 출현은 창고의 고층화 및 보관물의 적재방법 등에 큰 변화를 가져왔고 또한 비슷한 시기에 시작된 고무타이어의 대량보관 등은 그때까지의 재래식 스프링클러에 의존한 화재보호방식을 재고하게 만들었다.

이에따라 Factory Mutual Research Corporation(FMRC)의 기술진에 의해 새로이 고안된 것이 Spary형 스프링클러로서 이후 미국에서의 표준형(Standard) 스프링클러가 되었다.

종래의 스프링클러는 천정과 지붕을 보호하기 위해 약 50%의 물은 스프링클러 상방으로 그리고 나머지 50%만 하방으로 분사하였으나(현재의 유럽 스프링클러는 아직도 이 방식을 따르고 있음) Spary 스프링클러는 100% 모두 아래쪽으로 분사하여 화재의 진압에 더 효과적으로 대처하도록 하였으며 결과적으로 이것이 천정과 지붕의 보호에도 더욱 유리함이 증명되었다. 현재 널리 사용되고 있는 표준형(Standard) 스프링클러는 이 Spray 스프링클러로부터 시작된 것으로 사용 온도에 따라 공칭구경 9.5mm, 12.7mm, 13.5mm(3/8", 1/2", 17/32") 등으로 구별되며 전 세계에 널리 퍼져 있다.

2차 세계대전 이후의 美國内の 모든 주요 스프링클러는 모두 FMRC의 기술진에 의해 개발되었으며 그 중 특기할만한 품목으로는 In-Rack스프링클러

(1969), Large-Drop 스프링클러(1971~1988), 주거용 스프링클러(1976~1979), Early Suppression Fast Response(ESFR) 스프링클러(1984~1988), Extra Large Orifice(ELO) 스프링클러(1992) 등으로 다음에 간략히 소개하고자 한다.

II. In-Rack 스프링클러

지게차의 발달 등으로 창고의 높이가 고층화되면서 보관물의 적재 높이도 점점 높아짐에 따라 기존의 스프링클러 설비, 즉 천정에만 설치된 표준형 스프링클러로는 화재에 대비한 보호가 부족하게 되어 창고의 선반과 선반사이에 스프링클러를 설치하게 되었다.

적재보관물의 화재 위험도에 따라 스프링클러 설치방법 및 최대 개방 허용갯수를 달리하며 현재에도 널리 사용되고 있다.

III. Large-Drop 스프링클러

현재의 우리 생활을 안락하고 편리하게 하는데 필요불가결한 요소중의 하나가 플라스틱의 발명이다. 이제는 우리의 모든 생활구석에 이 플라스틱 제품들이 중요한 몫을 담당하고 있다. 그러나 고층으로 Rack식 창고에 쌓인 플라스틱제품들에 의해 발생하는 화재는 1960년 후반기까지의 창고화재(주로 섬유제품들에 의한)와는 판이한 양상을 지니게 되었다. 화염의 전파속도가 훨씬 빠르고 발생열량 또한 매우 크므로 진화가 무척 힘들게 되었다. 이런 강도 높은 화재에 대해서는 그때까지 널리 쓰이던 표준형 스프링클러(공칭구경 13.5mm, 개방온도 138°C)로는 한계에 도달하였음을 알게 되었다.

(1) 고강도 화재시 표준형 스프링클러의 문제점

빠른 화염전파속도와 막대한 방출열량으로 그 성격을 규정지을 수 있는 고강도 화재에 대해서 표준형 스프링클러를 사용함에 있어서 여러가지 문제가 있음을 발견하였다. 일례를 들면, 6m 높이로 플라스틱 제품^(주1)을 쌓아놓고(Palletized) 화재시험을 하는 경우 화염이 급하게 전파되어 점화 후 52초만에 가연물의 최상단에 도달하고 1분만에 9m 높이의 천장에 도달하며 1분에서 1분 30초 사이에 화염의 중심에서 약 3m 반경의 천정에 퍼진다. 이후 수초 이내에 첫 4개의 스프링클러가 개방되며 가연물 최상단에서의 화재로 인한 상승기류의 속도는 이미 12m/sec에 도달한다.

이런 형태의 화재에 대해서는 공칭구경 13.5mm의 표준형스프링클러로 부터 분사된 작은 크기의 물방울로는 화염으로부터의 상승기류를 뚫고 화염의 바닥까지 도달할 수가 없으므로 화재의 조기진화를 기대할 수가 없다.

많은 물방울들이 상승기류에 밀려 화염주변으로부터 멀어지거나 윗 방향으로 움직이므로 소기의 목적을 달성할 수가 없다.

뿐만 아니라 초기에 개방된 스프링클러로부터 분사된 물방울들이 상승기류와 함께 섞여 주변의 스프링클러들을 젖게 함으로 주위의 스프링클러의 개방을 더디게 하거나 아예 개방이 되지 않도록 하는 이른바 “Sprinkler Skipping” 현상도 심하게 초래하므로 화염주위의 방수 밀도를 설계치보다 현저하게 미달이 되도록 만든다.

(2) Large-Drop 스프링클러의 개발

위에 열거한 고강도 화재에 있어서의 표준형스프링클러의 문제점들을 해결하기 위해서 개발한 것이 Large-Drop 스프링클러로써 공칭구경은 16.3mm이며 K-factor는 $160 \text{ l/min}/\sqrt{\text{kg/cm}^2}$ 에서 167 l

주 1) 화재의 위험도에 따른 가연물의 분류시 미국에서의 표준 플라스틱 가연물은 다음과 같이 정의한다. 미분지 상자 내에 Polystyrene 컵을 넣은 것으로 무게비율이 종이 40%, 플라스틱 60%의 비율이 되도록 한다. 이 글에서의 플라스틱제품은 모두 이 표준 플라스틱 가연물을 지칭한다.

$\text{min}/\sqrt{\text{kg}/\text{cm}^2}$ 사이의 값을 지낸다.

Large-Drop 스프링클러로부터 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력에 분사되는 물방울들의 체적평균 중간값은 약 1.5mm 로서, 13.5mm 공칭구경 표준형스프링클러로부터의 평균값 0.9mm 보다 상대적으로 훨씬 크므로 표준형스프링클러에 비해 상대적으로 훨씬 많은 양의 물이 화염을 뚫고 침투할 수가 있다. 또한 표준형스프링클러에 비해 “Sprinkler Skipping” 현상이 현저하게 줄어들어서 이 또한 화재의 조기진화에 중대하게 이바지 하였다.

Large-Drop 스프링클러는 기존의 표준형스프링클러를 대체하기 위한 목적으로 개발되었으므로 표준형스프링클러와 같은 $1/2\text{inch}$ 파이프 thread를 사용할 수 있도록 고안 되었으므로 그 당시 이미 설치된 기존의 스프링클러 설비를 그대로 둔채 head만 바꾸어 사용할 수 있는 장점이 있었으나 더욱 강력한 화재에 대해서는 이 제한때문에 역부족이 되어서 결국은 ESFR 스프링클러의 개발을 요구하게 되었다.

한가지 주목할 점은 Large-Drop 스프링클러의 개발을 계기로 강도 높은 화재에 대비한 스프링클러의 설치기준이 분포밀도(mm/min) 기준에서 벗어나 방사압력과 개방스프링클러 갯수(주어진 면적에 대한)로 전환하게 되었다.

실제 고강도화재에 있어서는 스프링클러로부터의 분포밀도가 아무리 크더라도 물방울의 크기나 모멘텀(Momentum) 등이 작아 화염의 상승기류를 침투하지 못하는 한은 화재진화에 아무런 효력이 없으므로 종래의 스프링클러의 분포밀도를 기준으로 하던 개념이 무너지게 되었고, 스프링클러 방사압력, 스프링클러 사이의 설치 간격, 그리고 스프링클러 최대 개방허용갯수 등으로 설계 기준을 대체하게 되었다.

IV. 주거용 스프링클러

대부분의 국가에 있어서 아직도 화재가 생명 및 재산을 앗아가는 가장 큰 재해중의 하나이다. 1970

년 중반의 미국통계에 의하면 화재로 인한 재산 및 인명의 손실이 다른 모든 자연재해로부터의 손실을 합한것보다 많으며, 비록 화재빈도수는 산업체화재보다 훨씬 적지만 인명피해는 대부분 주거용시설에서 발생함을 보여준다. 이에 따라 미연방 화재국(U.S. Fire Administration)의 요청으로 FMRC의 주관아래 National Fire Protection Association(NFPA)와 Los Angeles 소방국(Fire Department)과 함께 주거용 시설에 대한 스프링클러의 연구개발이 시작되었다.

(1) 주거용 스프링클러의 조건

주거용 스프링클러는 거주자의 생명과 재산을 비교적 낮은 설치 비용으로 보호할 수 있어야 한다. 주거용 스프링클러의 가장 큰 목적은 화재시 거주자들이 안전하게 대피할 수 있도록 대피시간을 연장하는데 있으므로 거주자의 생명을 보존할 수 있는 안전 허용치로 다음 값들이 사용되었다.

- ①CO(일산화탄소)의 최대 순간 허용치 $<3000\text{P PM}$
- ②CO(일산화탄소)의 최대 누적 허용치 $<43000\text{P PM-min}$
- ③호흡선(지면으로부터 1.5m 높이)에서의 공기 온도 $<93^\circ\text{C}$
- ④최대허용 천정온도 $<288^\circ\text{C}$

주거용 스프링클러는 화재시에 위의 조건들이 유지될 수 있도록 하여야 한다. 산업시설에서의 화재와는 달리 주거시설의 화재에서는 화재로부터 발생된 열이 대부분의 경우(최소한 초기단계에 있어서는) 발화가 시작된 방안에 갇혀 있으므로 거주자의 안전대피를 위해서는 스프링클러에 의한 냉각성능이 화염을 뚫고 들어가는 침투성능보다 더 중요성을 지닌다.

또한 대부분의 경우 방하나에 스프링클러 하나만을 설치하는 경우가 빈번하므로 산업시설에서와 같이 수개의 스프링클러가 동시에 개방되어 살수분포가 서로 겹치는 효과를 기대할 수 없으므로 주거용

스프링클러의 살수분포는 전 방향에 걸쳐 균일하여야 한다.

수년간의 연구와 많은 시험을 거쳐 다음의 조건을 주거용 스프링클러의 성능 조건으로 결정하였다.

- ① 스프링클러의 개방온도가 낮아야 할뿐만 아니라 (57~74℃) 온도상승에 대해서도 민감하게 반응하여야 하므로 반응시간지수(Response Time Index : 다음 장에서 설명) 또한 낮아야 한다. (26 $\sqrt{m \cdot sec}$ 정도)
- ② 스프링클러는 최소한 3.3mm/min의 밀도를 방 주위에 그리고 최소한 2.4mm/min의 밀도를 방 가운데에 유지할 수 있어야 한다.
- ③ 스프링클러로 부터 분사된 물은 최소 1.8m의 벽면 높이까지는 도달하여야 한다.

(2) 반응시간지수(Response Time Index : RTI)

1970년 후반까지 산업시설에서의 화재에 대비한 스프링클러 설비는 스프링클러의 살수분포밀도, 스프링클러 사이의 간격 및 개방온도만을 고려하여 결정하였으며 실제 화재시 일정한 개방온도를 가진 스프링클러들이 얼마나 민감하게 반응하여 얼마나 빨리 개방이 되는가에 대한 고려는 일체 없었다. 그러나 이 반응시간이 주거용스프링클러의 연구개발에는 매우 중요한 개념으로 등장하게 되었다.

앞장에서 열거한 안전허용치를 유지하면서 거주자들에게 최대한의 대피시간을 갖도록 하기 위해서는 주거용스프링클러가 화재가 발생하자마자 작동하도록 하는 것이 필수적이다. 주거용스프링클러의 개방온도는 이미 주위의 조건이 허용하는 가장 낮은 값에 고정되어 있으므로 다음으로는 같은 개방온도를 가진 스프링클러가 얼마나 빨리 열에 반응하는가를 연구하게 되었다.

그 결과 반응열에 대한 스프링클러의 민감도를 나타내는 지수를 찾아 반응시간지수(RTI)라 명명하였으며 다음식에 근거하여 성립되었다.

화염으로부터의 상승기류와 스프링클러 열감지부 사이의 열교환은 아래식으로 나타내어 진다.

$$mc \frac{dT_g}{dt} = hA(T_g - T_s) + \dot{q}_r - C'(T_g - T_s) \dots\dots (1)$$

여기서 m, c, T_g, t, h, A, T_s, q_r, C', T_o는 각각 열감지부의 질량, 열감지부의 비열, 열감지부 온도, 시간, 대류열전달계수, 열감지부 표면적, 상승기류의 온도, 복사 열전달량, 스프링클러 전도 열전달계수, 스프링클러 설비의 주위온도이다. 대부분의 화재에서 열감지부에서의 열전달은 상승기류와의 대류열전달이 전도나 복사 열전달에 비해 훨씬 그 값이 크므로 식(1)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{\tau} (T_g - T_o) \dots\dots\dots (2)$$

여기서

$$\tau = \frac{mc}{hA} \dots\dots\dots (3)$$

이며 시간의 단위를 가지므로 시간상수라 부르기도 한다.

식(3)에서 보는바와 같이 m, c, A는 스프링클러의 열감지부 형태에 따라 이미 고정되어 있으므로 시간상수 τ는 오직 대류열전달 계수 h에 따라서만 변화한다.

화재시 발생하는 고온의 상승기류는 천정에 부딪친 후 천정면을 따라 흐르며 스프링클러의 열감지부와 열교환을 이루는데 이때의 열전달은 성격상 강제 대류 열전달과 매우 유사하므로 Gr/Re²가 대략 0.02 정도, 무차원 열전달 계수 Nusselt number (Nu)는 Reynolds number(Re)의 함수로 나타난다.

$$Nu = f(Re) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 Nu = hL/k이며 L은 열감지부의 특성길이, k는 상승기류의 열전도도(Thermal Conductivity), Re = UL/ν이며 U는 상승기류의 속도, ν는 상승기류의 동점성도(Kinematic Viscosity)이다. 화재시 스

스프링클러의 열감지부에서의 Re는 대략 40에서 4000 사이에 있으며 이때의 Nu와 Re의 관계는

$$Nu = B\sqrt{Re} \dots\dots\dots (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 B는 열감지부에 따른 상수이며 식(4)와 (5)에 따라

$$h = B \left(\frac{k}{\sqrt{\nu}} \right) \left(\sqrt{\frac{U}{L}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

로 표시된다. 실제 k와 ν는 온도에 따라 변하지만 공기에 있어서 k/√ν 온도에 관계없이 거의 일정하므로 열감지부에서의

$$h \propto \sqrt{U} \dots\dots\dots (7)$$

이며 따라서

$$\tau\sqrt{U} = \text{상수} \dots\dots\dots (8)$$

로 표시될 수 있으며 이 상수를 스프링클러의 반응 시간지수(RTI)라 부르며 스프링클러가 열전달에 따라 얼마나 빨리 개방온도에 도달하는가를 재는 척도가 된다. 따라서 RTI는 원칙적으로 상승기류의 속도 및 온도에 무관하게 정해지는 스프링클러 열감지부의 물성치로서 실험에 의해 그 값을 측정한다.

스프링클러의 RTI는 일정한 속도와 온도의 공기를 공급하도록 설계된 풍동안에 스프링클러를 투입하여 스프링클러 개방시간을 재서 측정하며 미국내의 대부분의 산업용 표준 스프링클러는 124√m·sec로 부터 385√m·sec사이이며 주거용 스프링클러는 26√m·sec 부근이다.

RTI와 스프링클러 개방시간의 관계식은 식(8)에서 보인바와 같이

$$RTI = \tau\sqrt{U} \dots\dots\dots (9)$$

이므로 식(1)은 다시

$$\frac{dT_e}{dt} \approx \frac{\sqrt{U}}{RTI} (T_g - T_e) \dots\dots\dots (10)$$

로 표시할 수 있으며 시간에 대한 T_g와 U의 변화를

알면 RTI가 정해진 스프링클러의 개방시간을 계산할 수 있다.

V. Early Suppression Fast Response (ESFR) 스프링클러

1980년대로 들어서며 창고의 높이가 점점 높아지고 보관물품중에 플라스틱 제품이 차지하는 비중이 점점 커짐에 따라 화재의 강도도 따라서 증가하여 Large-Drop 스프링클러의 성능도 그 한계에 도달하게 되었다. 또한 산업의 형태가 바뀔에 따라 특히 정보중심산업의 급격한 발전으로 인해 보관물품들의 가격도 종전에 비해 월등히 상승하여서 화재로부터의 건물 보존이라는 종전의 화재보호의 개념이 바뀌어 이제는 건물내의 물품의 보존이라는 쪽으로 기울어지게 되었다.

따라서 화재로부터의 열피해뿐만 아니라 그에 부수되는 소방용수에 의한 물피해의 규모도 화재의 진원부근에 국한시킴으로 전체손실을 최대로 줄여야 할 필요성이 생겼다. 이 요구를 충족시키기 위해 개발된 것이 ESFR 스프링클러이며 현재 여러곳에서 산업시설보호를 위해 설치, 운영되고 있다.

종래의 스프링클러 개념은 화재의 진화보다는 화재크기의 조절에 있었다.

화염 주위에 많은 수의 스프링클러를 개방하여 적정량의 물을 분사함으로 주위의 가연물을 미리 젖게 하여서 화재의 강도가 일정 수준을 넘어 서지 않도록 조절함으로써 건물의 붕괴를 방지하는데 주 목적이 있었다.

이렇게 스프링클러의 주목적을 조절기능에 둬므로 해서 화재 발생시 수반되는 열에 의한 손실과 연기, 방화수에 의한 피해가 증가할 뿐만 아니라 때에 따라서는 기존의 스프링클러는 이 조절기능마저 수행할 수 없는 경우도 빈번하게 발생하였다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 화재의 초기에 진화를 해야 할 필요가 생겼다. ESFR은 Early Suppression

Fast Response의 머릿글자로서 화재의 초기에 많은 양의 물을 분사하여 조기진화를 이루어서 화재에 따른 열, 연기, 물피해 등을 최소화 하는데 그 목적이 있다.

시간에 따른 방출열량으로 대변할 수 있는 화재의 강도는 시간에 따라 지속적으로 증가하다 최대값에 이른 후 가연물의 소모에 따라 점진적으로 줄어든다. 이 연소과정은 수시간으로부터 수일에 이를 수도 있지만 실제 화재시 조기진화에 가장 중요한 순간은 발화로부터 수분 이내의 초기상태로서 화재의 강도가 매우 빠른 속도로 상승할 때이다. 이때 충분한 양의 물을 화염위에 분사함으로써 조기진화를 이룩할 수가 있다.

다시 말하면 화재의 강도가 약할때가 강할때보다 진화가 용이하므로 화재의 초기에는 상대적으로 적은 양의 물로서도 진화가 가능하며 이것이 ESFR 스프링클러의 출발점이 되었다. ESFR 스프링클러의 기본개념을 요약하면 화재초기에 진화를 위해서 꼭 필요한 양의 물보다 더 많은 양의 물을 화염의 뿌리에 침투시킴으로써 진화를 이룩하는데 있다. ESFR 스프링클러가 현재 지니는 중요성이 지대하므로 이 개념들에 대해 다음장에 상세히 기술하였다.

(1) ESFR 스프링클러의 반응시간지수(RTI)

위에서 언급하였듯이 조기진화를 위해서는 화재의 초기단계에 스프링클러가 반응하여야 하며 이를 위해 개방온도도 낮아야 하지만 스프링클러 반응시간지수 또한 낮아야 한다.

식(10)에서 알 수 있듯이 RTI가 낮을수록 스프링클러가 개방온도에 일찍 도달하므로 화재에 대해 더욱 민감하게 반응한다.

일례를 들면 표준 플라스틱 가연물을 이용한 화재

시험에서 RTI가 $165\sqrt{m \cdot sec}$ 인 스프링클러가 $74^{\circ}C$ 의 개방온도에 도달하였을 때 점화로부터 소요된 시간은 약 50초이며 화재로부터의 방출열량은 4.4MW, 상승기류의 속도는 12m/sec이었다. 그러나 RTI가 $28\sqrt{m \cdot sec}$ 인 스프링클러가 같은 개방온도에 도달하였을 때에는 점화로부터의 소요시간이 대략 20초로서 방출열량은 1.2MW, 상승기류의 속도는 7.3 m/sec에 불과하였다. 공칭구경 16.3mm의 Large-Drop 스프링클러의 침투력을 비교해 보면 전자의 경우는 오직 30%이나 후자의 경우는 50% 이상에 이르는 것을 보여주었다. 이 예는 화재의 초기에 스프링클러를 개방하는 것이 얼마나 중요한가를 여실히 보여준다.

(2) 필요진화밀도(Required Delivered Density : RDD)

필요진화밀도(RDD)는 가연물에 화재가 발생하였을 때 일정 크기의 화재를 진화하는데 필요한 최소한의 물의 양을 가연물 상단의 표면적으로 나눈 값이다. 이를 측정하기 위해서는 특정한 가연물을 큰 열량계^(주2) 아래에 원하는 형태로 쌓아 올린 후 점화로부터 일정한 시간이 경과한 후에 진화를 위해 방출된 물의 양을 측정한다. RDD 실험결과들을 보면 미세한 값의 차이가 판이한 결과들을 가져옴을 알 수 있다. 일례를 들면 라크식으로 쌓아올린(2×2×3) 표준플라스틱 가연물에 있어서 화재로부터의 방출열량이 1.8MW에 이르렀을 때 물을 분사하였을 경우 물의 분사밀도가

- ① 10.2mm/min인 경우는 화염의 강도가 순간적으로 급격히 약화되며 진화에 접근하는 듯 보이다 다시 불길이 강해지며 가연물이 완전히 소진될 때까지 화재의 강도가 증가하며
- ② 12.2mm/min인 경우는 불길이 약해진 후 계속 그 상태로 머무르다 약 10분이 지난후에 진화

주 2) 현재 FMRC의 Test Center에 있는 열량계는 10MW까지 잴 수 있으며 화재로부터의 연소기체를 모두 수집하여 연소에 따른 화학방정식에 의존하여 발생 열량을 산출하며 이 값은 다른 방법으로 측정된 대류열량과 복사열량을 합친 값과 일치하는지를 비교검토하여 그 정확성을 기한다.

되며

③14.3mm/min인 경우는 짧은 시간내에 조기진화를 이룰 수가 있었다.

따라서 위의 경우 RDD 값은 14.3mm/min로 결정되었다.

RDD 값을 결정하는데 있어서는 RTI 값이 $28 \sqrt{m \cdot sec}$ 이고 개방온도가 76~100°C 사이인 스프링클러를 기준으로 하였으며 표준프라스틱 가연물을 4.6m, 6.1m, 7.6m 쌓아올렸을 때의 RDD 값은 14.3mm/min, 18.3mm/min, 26.5mm/min로 밝혀졌다.

(3) 침투밀도(Actual Delivered Density : ADD)

화재초기에 조기진화를 이룩하기 위해서는 진화에 필요한 최소한의 물의 양보다 더 많은 양의 물을 화염의 뿌리에 침투시켜야 한다. 이를 위해서는 스프링클러의 침투밀도(ADD)가 가연물의 필요진화밀도(RDD)보다 커야 한다.

스프링클러의 침투밀도(ADD)는 스프링클러로부터 분사된 물중에서 화염을 통과하여 연소중인 가연물의 상단에까지 도달한 양을 가연물 상단의 면적으로 나눈 값으로 침투된 물의 분포밀도를 나타내며 스프링클러의 성능을 가늠하는 매우 중요한 요소이다.

ADD를 결정하는 주요인자로는 스프링클러 구경(K-factor), 스프링클러 방사압력, 스프링클러 개방시의 화재강도, 스프링클러와 가연물상단 사이의 거리, 개방된 스프링클러 갯수, 스프링클러 사이의 간격, 스프링클러의 살수분포, 물방울의 크기 등이다. 이중 몇가지 인자는 서로 상호 의존의 관계에 있다. 예를 들면 물방울의 크기는 구경에 따라 커지지만 방사압력이 커지면 줄어든다.

따라서 어떤 인자가 어떤 영향을 미치는가를 알아서 스프링클러 설계에 알맞게 응용하여야 한다.

일반적으로 스프링클러로부터 분사된 물방울들이

화염을 침투하는 전형을 두 종류로 대별할 수 있다. 첫째 형태는 중력에 의한 침투이다. 물방울이 지닌 중력이 화염으로부터의 상승기류가 지닌 부양력보다 우세한 경우 침투가 일어나며 이 경우 물방울이 클수록 유리하다. 두번째 형태는 물방울이 분사되면서 지니는 모멘텀에 의한 침투이다.

아랫방향으로의 모멘텀은 스프링클러의 방사압력이 클수록 커지며 이 경우 아랫방향으로의 공기유동까지 유도하므로 침투에 더욱 유리하게 작용한다. 모멘텀의 증가를 위해 압력을 증가시키면 물방울이 작아지므로 중력식 침투에는 불리하지만 침투가 주로 모멘텀에 따라 좌우되는 경우에는 물방울 입자의 크기는 그 중요성이 상대적으로 줄어든다.

이 모든 경우를 고려하기 위해 ADD를 잴 수 있는 시험장치가 고안되었으며 이 장치를 이용한 수많은 시험이 행해졌다. 이 결과 스프링클러의 배열과 점화위치의 상관 관계가 ADD에 중요한 영향을 미침이 밝혀졌으며 스프링클러 사이의 간격, 가연물 상단으로부터 스프링클러까지의 거리, 가연물의 적재방법 등을 고려한 가능한 모든 최악의 조건아래서도 항상 ADD가 RDD 보다 클 수 있도록 스프링클러가 고안되었다. 그 중 특별히 유의해야 할 점은 ESFR 스프링클러의 살수분포로서 살수의 반경이 바로 이웃에 위치한 스프링클러의 살수와 함께 0.9m 아래 떨어진 가연물 위에 겹칠 수 있을 만큼은 넓어야 하지만 스프링클러 바로 아래 위치한 1.2m 반경내에 충분한 ADD를 공급할 수 있을 만큼은 좁아야 한다.

많은 시제품들이 시험을 거친 후 그중 일부가 실물화재시험을 통해 성능이 검증된 후 현재 4종류의 스프링클러가 FMRC의 인증을 받았다. 이 스프링클러들의 공통점은 모두 하향식이고 공칭구경은 17.8mm, K-factor는 $203 \ell / \min / \sqrt{kg/cm^2}$ 이며 RTI는 $28 \sqrt{m \cdot sec}$ 부근이다.

(4) ESFR 스프링클러의 응용

미국내의 가연물의 위험도에 따른 분류^(주3) 1, 2, 3, 4급을 포함하여 비포말성프라스틱에 이르기까지의 대부분의 가연물들을 보호할 수 있으므로 ESFR 스프링클러의 이용은 매우 광범위하다.

특히 고층으로 쌓아올린 랙크식 창고의 보호에 있어서는 기존의 In-Rack식 스프링클러의 결점을 제거할 수 있으므로 매우 각광을 받고 있다. ESFR 스프링클러는 천정에만 설치하면 되므로 기존의 In-Rack 스프링클러 설치에 비해 일반적으로 설치비가 저렴하며, 특히 보관물의 상·하차시에 빈번히 발생하는 In-Rack 스프링클러의 파손으로 인한 누수피해를 방지함은 물론 In-Rack 스프링클러의 배치에 따라서 가연물의 위험도에 의해 복잡한 규정을 따라서 달리 분류 적재하여야 하는(미국의 경우) 번잡함을 피할 수 있을 뿐만 아니라 조기 진화에 따른 상당한 피해의 방지를 또한 기대할 수가 있다.

ESFR 스프링클러는 현재 세계 여러곳에서 그 실효성을 인정받아 미국, 캐나다, 멕시코, 오스트레일리아, 뉴질랜드, 유럽(영국, 프랑스, 독일, 이태리, 덴마크, 핀란드, 스웨덴, 네덜란드), 남미(콜롬비아, 베네주엘라) 및 아시아(한국, 싱가포르, 말레이시아, 타일랜드, 필리핀, 타이완, 중국, 일본) 여러나라에 이미 그 설치가 완료되었거나 추진 중에 있다. 현재의 ESFR 설치기준(NFPA-National Fire Codes 13이나 FMRC Loss Prevention Data 2-2와 8-9)에 따르면 스프링클러의 최대 개방 허용치가 12개이므로 기존의 스프링클러와 비교하여 스프링클러 하나 하나가 가지는 중요성이 더욱 크므로 그 설치에 있어 더욱 세심한 주의를 기울여야 한다.

특히 유의해야 할 점은 조기개방이 가능하도록 화재로부터의 대류열이 스프링클러의 열 감지부에 순조롭게 도달 될 수 있어야 하며 이를 위해 천정은 평평하면서 열을 가두어 둘 수 있는 구조라야 한다.

또한 각 스프링클러로 부터 분사된 물이 화염의 뿌리에 도달할 수 있도록 중간에 방해물이 없어야 한다. 다른 스프링클러와 마찬가지로 화염의 전파속도가 스프링클러의 개방속도를 앞지르는 가연물(인화성 액체, 포화성 프라스틱, 에어로졸, 고무타이어, 파라핀 왁스, Rolled Tissue Paper, Nonwoven Rolls, Hanging Garment 등)의 보호에는 일반적으로 ESFR 스프링클러를 사용할 수 없다.

그러나 최근의 시험결과 에어로졸은 깡통내의 인화성 액체의 농도에 따라서는 쌓는 방법에 따라서 ESFR 스프링클러로도 보호가 가능함이 밝혀졌으며 또한 Rolled Tissue Paper도 특별한 경우에 ESFR 스프링클러로 보호가 가능함이 밝혀졌으므로 필요에 따라서는 ESFR 스프링클러의 설치를 허용할 수 있다. 현재 ESFR 스프링클러의 사용이 허가되는 최고 높이는 스프링클러의 방사압력을 5.1kg/cm² 이상으로 유지하는 경우 12.2m 높이의 천정아래 가연물을 10.7m까지 쌓아 올린 경우이다.

실험과 컴퓨터 시뮬레이션 등을 이용하여 ESFR 스프링클러에 대한 연구가 계속중이므로 언젠가 필요에 따라서는 스프링클러의 설계변경이나 설치기준의 변경 등으로 이 제한도 바뀔 수 있을 것이다.

ESFR 스프링클러의 인증을 위해서 FMRC의 현재 인증기준을 기본으로 하여 International Organization for Standardization(ISO)의 TC21/SC5/WG1에서 ESFR 스프링클러 인증을 위한 ISO 기준 제정을 작업중에 있으므로 곧 국제 인증기준이 발표 될 것이다.

VI. Extra-Large Orifice(ELO) 스프링클러

Extra-Large Orifice(ELO) 스프링클러의 주

주3) 미국내의 화재위험도에 따른 가연물의 분류(Commodity Classification)는 NFPA의 National Fire Codes 231C를 참조할 것.

목적은 표준형스프링클러를 사용하여야 할 곳의 수압이 표준형스프링클러의 설계조건이 요구하는 만큼 높지 않을 때 낮은 압력으로도 상대적으로 고압을 요구하는 표준형 스프링클러를 사용하는 효과를 거두기 위해서 개발되었다.

따라서 표준형스프링클러와 호환용으로 사용하기 위해서는 표준형스프링클러가 지켜야 할 모든 설치조건을 같이 따라야 한다. 즉 스프링클러가 적용되는 총 보호면적, 스프링클러 사이의 간격, 그리고 분포밀도 등은 표준형스프링클러를 이용한 설계기준에 미달하지 않아야 한다.

현재 FMRC로부터 인증을 받아 사용되고 있는 ELO 스프링클러의 K-factor는 $161 \ell / \text{min} / \sqrt{\text{kg}/\text{cm}^2}$ 이며 공칭구경은 16.3mm이고 방사압력은 $0.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 보다는 낮지 않아야 한다.

Ⅶ. 미세 물분무(Fine Water Mist Spray)

미세한 물방울을 분사하여 화재를 진압하는 방법은 지난 50년간 꾸준히 대두되어 왔으나 최근까지는 크게 실용화 되지 못한 채 각광을 받지 못하였다.

그러나 1987년 서명된 몬트리얼협약(Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layers)에 의거해 세계의 대부분의 나라들에서 CFC를 사용하는 화학물질의 제조가 1994년부터 금지됨에 따라서 지금까지 Halon 1211, 1301로 대표되던 화학소화제의 대체물질을 찾게 되었으며 그 노력의 일환으로 미세 물분무(Fine Water Mist Spray)에 대한 연구가 다시 활기를 띄게 되었다.

미세 물분무는 환경오염에 대한 염려가 없으므로 지금까지는 Halon 소화제에 의존해 왔던 엔진시설, 터빈시설, 항공기, 해상유전시설, 인화성 액체의 보관시설 등에 대한 응용이 현재 활발하게 진행되고 있으며 부분적인 성공을 거두고 있다. 또한 화재에 의한 직접 열피해 보다는 화재에 수반되는 연기, 부식성 기체, 방화수에 의한 피해 등 이른바 “비열피

해(Non-thermal Damage)”에 의한 손실이 훨씬 심각한 시설 등(컴퓨터실, 전화교환시설, 반도체 공장의 무진실)에 대한 응용도 함께 진행되고 있다.

최근의 미세 물분무 연구 활성화의 또 다른 촉진제로는 최근 통과된 International Maritime Organization(IMO)의 규정으로 모든 여객선은 서기 2005년까지 스프링클러나 혹은 그와 유사한 화재안전시설을 설치하여야 한다. 미세물분무 시설은 기존의 선박용스프링클러 시설보다 훨씬 가볍고(약 10% 정도) 소요 물량도 훨씬 적으므로 현재 많은 선박에 그 설치가 진행되고 있다.

미세 물분무 시설(Fine Water Mist Spray System)로부터 분사된 미세한 물방울들은 체적대비 증간값(구경)이 $400\mu\text{m}$ 이하로서(최근 구성된 NFPA 750 Water Mist Fire Suppression Systems Committee는 미세 물분무 시설을 체적 기준으로 99%의 전 물방울들이 모두 $1000\mu\text{m}$ 이하인 물방울들을 분사하는 시설로 규정하였다.) 표면적대 체적의 비율이 기존의 스프링클러 시설에서 분사되는 물방울들에 비해 훨씬 크므로 열전달효과가 그만큼 클 뿐만 아니라 기존의 스프링클러에 의한 냉각이 주로 감열(Sensible Heat)의 감소에 의존하는 반면 미소 물방울들은 쉽게 증발하므로 잠열(Latent Heat)에 의한 냉각에 의존하므로 기존 스프링클러에 비해 훨씬 적은 양의 물로 동일한 냉각효과를 거둘 수 있다.

미세 물분무에 의한 소화효과를 크게 세가지로 분류하면

- ① 미세 물방울이 증발함으로써 뺏아가는 열에 의한 냉각 효과
- ② 물방울의 증발에 의한 수증기의 생산과 이에 의한 급격한 체적 팽창으로 인한 산소와 연료의 차단 효과
- ③ 화염주위의 미세 물방울들에 의한 화염으로부터 주위 연료로의 복사열 차폐효과로 들 수 있다.

지금 현재까지의 기술로는 밀폐공간에서의 대형화재에 대해서는 미세 물분무가 매우 효과적임이 밝혀졌으나 완전히 열린 공간에서의 화재나 규모가 작은 Class A 화재 등에서는 어려움을 겪고 있으며 Halon 대체용으로 사용하기에는 아직도 해결해야 할 많은 문제점들이 남아 있다.


VIII. 맺는말

지금까지 살펴 본 바와 같이 지난 백수십년의 기간동안 스프링클러는 화재로 인한 재산과 인명의 손실을 줄이는데 크게 이바지하여 왔다. 거주형태 및 산업형태의 변화로 거주공간 및 산업시설의 설계 변경, 새로운 재료의 출현 등 화재의 위험이 증가 할 때마다 항상 새로운 스프링클러가 출현함으로써 지금까지의 화재위험에 효과적으로 대처하여 왔음을 보여주고 있다.

지금 현재도 끊임없는 현장조사 및 실물화재시험, 컴퓨터 시뮬레이션 등을 이용한 이론의 개발 등 새

로운 화재의 위협에 대비한 연구가 계속되고 있으므로 새 형태의 스프링클러의 개발도 계속 되리라고 본다.

최근의 산업발달 특히 정보중심산업의 발달(컴퓨터, 반도체, 정보교환시설 등)로 제품 하나 하나의 부가가치가 급격히 상승함에 따라 화재보호의 개념도 지금까지의 건물 및 산업시설의 보존이라는 측면에서 벗어나 건물 및 산업시설은 물론 생산된 제품까지도 함께 보호하여야 한다는 개념으로 바뀌고 있다.

이와 함께 기존의 화재피해의 주원인이었던 열 피해로부터 피해의 주원인이 비열피해(Non-thermal Damage : 연기, 부식성 기체, 방화수 등에 의한 부차적 피해)로 옮겨져 가는 경향이 있으며 특히 고급 기술산업시설에서는 이 비열피해가 차지하는 영향이 지대하므로(약 70% 정도)이에 대한 장기적인 보호 대책도 시급히 해결해야 할 과제중의 하나이다. 

언제 방화제품의 성능 시험이 필요한가?

기술 개발

신제품, 재료에 대한 품질과 성능을 시험·평가하고자 할 때.

해외수출

해외규격 및 발주기관 기준의 적합 여부를 판정하고자 할 때.

설비보수

설치된 제품의 법령적합 여부 또는 성능유지 상태를 시험하고자 할 때.

물품검수

KS 등 국내·외 관련기준의 적합 여부 등을 판단하고자 할 때.

보험요율적용

화재위험도 판정 등으로 보험요율을 유리하게 적용하고자 할 때.

기 타

기타 방화제품 등에 대한 성능시험이 필요한 때.