

스프링클러 消火設備의 熱感知에 관한 研究

(A study on the thermal responsiveness of automatic sprinklers)

孫 鳳 世/暎園專門大學 消防安全管理科 教授, 技術士

- ABSTRACT -

As the present industry is developing rapidly, automatic sprinklers continue to play a key role in modern fire protection. But the technical basis and methods of measurement of the thermal response of sprinklers are not studying in our country. Therefore, the purpose of this paper is to analyze the thermal response characteristics and condition parameters of automatic sprinkler head.

I. 序 論

火災를 鎮壓(Fire Suppression)하는 方法은 여러가지 System이 있으나 感知(Detection)는 물론 消火를 동시에 遂行할 수 있는 設備은 Automatic Sprinkler System 뿐이라 할 수 있다. 물론 일부 他 消火設備도 火災를 감지할 수 있는 能力은 있지만, 이 경우는 火災를 感知하는 別途의 裝置를 構成해야 하는 問題가 있다.

스프링클러 消火設備의 消火能力에 가장 큰 影響을 미칠 수 있는 Factor는 크게 두가지 側面으로 고려해 볼 수 있다. 첫째는 火災區域의 燃燒에 의한 浮遊 형성층의 狀態와 헤드의 撒水형태에 의한 相互作用과 落下速度에 의한 火원의 冷却作用, 燃燒比 등 諸 燃燒현상에 의한 問題이고 두번째로는 製造技術에 따른 製品상의 문제라 할 수 있겠다. 즉, 火災室의

화재성장과 擴散에 따른 급격한 熱的變化로 火災의 전과가 Flashover현상에 이르기 前 初期段階에서 熱流動에 따른 溫度의 變化를 正確하게 感知할 수 있느냐에 달려 있다. 이런 문제의 解決은 화재의 發生을 迅速, 正確히 探知할 수 있는 熱感知速度가 빠른 헤드의 製造와 感知 후 Automatic Sprinkler System의 作動時間이라 할 수 있다. 따라서, 本稿에서는 國內에서 가장 많이 使用되고 있는 Fusible Link Type의 熱感知特性에 관한 基本理論을 解析해 봄으로써 國內 Sprinkler Head製造技術에 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

II. Sprinkler Head의 構造와 作動原理

1. 理論的 背景

本 設備는 純粹한 理論的 根據에 의해 만들어진 消火裝置라기 보다는 實驗的, 經驗的 統計資料에 의해 考案된 設備라 하겠다. 本 設備의 推移를 보면 1723년 英國의 化學者 Ambrose Godfrey가 처음으로 스프링클러라는 單語를 使用하기 시작하였으며, 그 當時는 消火液(Water)을 罌납이 부착된 木桶에 채워 두고 火災가 發生하면 이 木桶이 熱로 破壞되어 內部에 있는 消火水가 放出하여 불을 끄는 가장 原始的인 段階에서 1806년 Jhon Croy가 配管에 一定한 間隔으로 구멍을 뚫어 木탱크와 連結하여 일정 壓力으로 放水하여 使用한 것이 本 設備의 始初라 하겠다. 그후 防災선진국의 계속적인 研究開發로 가장 重要한 部分인 헤드를 1874년 Henrys, Parmelee가 開發함으로써 널리 보급되기 시작하였다. 따라서, 우리나라의 境遇도 火災安全에 대한 時代的 要求에 따라 1973년 처음으로 Fusible Linkage형 헤드를 自體生産하기에 이르렀다.

2. 構造 및 作動

헤드의 構造는 製造業體에 따라 약간의 차이는 있으나 一般的으로 木體(Fram), 열감지부(Sensor Part), 나사부(Screw), 撒水部(Difletor), 오리피스부(Orifice)로 구성되어 있고, 헤드의 種類는 感知部の 有·無에 따라 폐쇄형과 개방형, 그리고 設置場所에 따른 상향형, 하향형, 측벽형이 있으며 熱感知部の 作動溫度에 따라 分類한다. 또한 感知部の 材質에 따라 抵熔融合金형(Eutectic Fusible Alloys)과 液體成分의 Glass Bulb형 헤드가 있다. Glass Bulb형 헤드는 주로 유럽지역에서 使用되고 있으며, 이 헤드의 유리구에 들어가는 液體를 外國에서 輸入하여 組立하는 실정이고, 國內에서는 저용융합금형 헤드만 자체기술로 생산하고 있으며 본 헤드의 作動溫度別 化學成分은 표 1과 같다.

표 1. 抵熔融合金型헤드의 化學成分과 比率

작동온도 \ 성분	Bi	Pb	Sn	Cd
72°C	50%	25%	12.5%	12.5%
105°C	54%	—	26%	20%
145°C	60%	—	—	40%

* 화학성분 비율은 제조업체에 따라 차이가 있을 수 있다.

III. 基礎 理論

1. 燃燒의 基本形狀

燃燒를 간단하게 表現하자면 熱, 燃料, 酸素의 基本因子들이(그림 1참조) 時間的, 空間的인 結合에 의해 다량의 熱을 同伴하는 發熱反應으로서 反應에 의하여 發生하는 熱에너지(Heat Energy)와 活性化物質에 의해 자발적으로 反應이 繼續되는 現狀이다. 이러한 메카니즘에는 物質傳達, 熱傳達, 化學反應이 포함되어 있으며, 이들은 靜的이 아닌 動的인 狀態에서 주로 이루어지므로 流體流動 또한 강한 影響力을 發揮한다.

熱, 物質, 流體의 流動은 基本的으로 化學成分과 物質의 保存法則, 運動量 保存法則, 에너지 保存法則에 滿足하므로 이 法則들은 數學的으로 表現할 수 있다. 또한 이들 法則이외에도 化學反應率, 熱力學的 化學平衡이 중요한 요소로 作用하며, 物性值의 溫度에 따른 變化 역시 考慮해야 한다. 특히 物質은 주위의 條件에 따라 매우 다른 양상으로 燃燒하기 때문에 小火災(Small Fire)를 실제화재로 對面하기는 매우 困難하다. 따라서, 火災現狀을 精確적으로 表現할 수 있는 방법에 관한 重要性을 認識하게 되어 1970년 후반부터 火災에 대한 實用的인 數學的 模型 研究가 始作하였다.

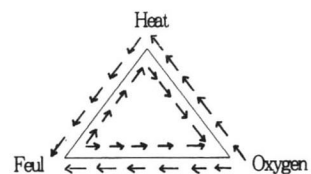


그림 1. The Fire Triangle

불의 生長은 一般적으로 時間과 火災區域에서의 溫度關係라 할 수 있다. 室內火災의 경우를 보면 그

림 2에서와 같이 바닥으로 부터 燃燒가 시작되면 에너지를 放出하고 이 에너지가 火焰領域의 壓力을 높이고 높은 溫度를 갖는 燃燒生成物은 浮力에 의해 위로 上昇한다. 亂流인 가스기둥(Plume)이 형성되고 이 運動量은 燃料表面과 天井과의 距離, 火焰強度등에 依存된다. 또한 이 Plume은 上昇하면서 주위의 空氣를 吸入하고 Plume의 流量은 天井에 도달했을 때 高溫가스는 天井을 따라 外廓으로 흘러지고, 이때 얇은 亂流 流動層을 形成하며 天井壁을 傳導, 對流, 輻射가 混合된 熱傳達方式으로 加熱시킨다. 이 가스는 壁과 天井이 結合된 境界에 부딪히고 다시 垂直壁을 따라 내려간다. 이를 Wall Jet라 한다. 이외에도 환풍 장치와 문을 통해 高溫가스와 空氣의 交換이 이루어지며 이들은 熱的인 境界를 이루는 同時에 剪斷力이 作用하는 층을 이룬다. 以上の 內容을 綜合해 보면 全體的인 物理的인 現象은 物質傳達(Mass Transfer)과 熱傳達(Heat Transfer) 化學反應에 의한 現象으로 含蓄시킬 수 있다.

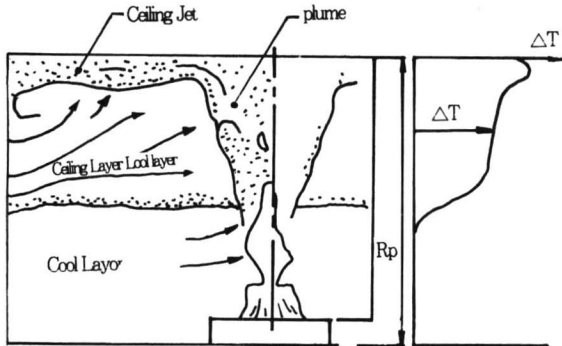


그림 2 室內火災의 Ceiling Layer Flow

2. 熱感知特性理論

熱感知部の 溫度가 發火初期 溫度에서 作動溫度까지 上昇하는데 必要한 時間을 구하기 위해서는 流動 熱氣流에 대한 S.P Head의 熱應答 特性을 알아야 한다. 따라서, 問題의 解決을 위한 前提條件으로 열감지부는 純粹한 強制對流(Force Convention)에 의해 傳達되고, 熱感知部に 傳達된 모든 熱은 축적되며, Supporting Structure(Frame)의 熱傳導로 인한 熱損失이

없는 等溫過程으로 熱感知部に 추가되는 熱이 없는 Solder Type으로 假定하면 열감지부에서의 熱平衡 방정식은 다음과 같다.

$$MC(dTe/dt)=hA(Tg-Te) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 M:열감지부의 질량(MASS)

C:비열

h:열전달 계수

A:감지부의 표면적

Te:열감지부 온도

Tg:초기 공기(가스)온도

t:시간

Heskestad와 Smith氏는 試驗모델을 통하여 일반 S. P Head는 火災로 부터 對流運動에 의해 열이 가해졌을 때 감지부의 온도는 균일하고 初期火災時 純粹 輻射 效果는 對流熱의 약 10%이하이므로 무시하거나 有效 熱傳達 係數에 포함된 것으로 가정하는 境遇가 일반적이다. 따라서 最初주위온도를 To라 하면 방정식(1)은 다음과 같다.

$$d(\Delta Te)/dt=\tau^{-1}(\Delta Tg-\Delta Te) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\Delta Te=Te-To$

$\Delta Tg=Tg-To$

$\tau=MC/hA$

방정식(2)는 열감지부의 溫度-感應에 관한 식이며 初期條件으로 $[\Delta Te(t=0)=0]$ 하면 $\Delta Tg(t)$ 와 $\tau(t)$ 를 풀을 수 있으며 τ 는 時間常數로서 比熱과 單位面積이 동일한 경우 對流熱傳達係數에만 依存한다.

헤드의 감지부는 作動하기 前 상변화를 하는 납성분(Solder Material)材質을 함유하고 있기 때문에 방정식(1)은 납성분의 상(Phase)변화가 생기는 溫度까지의 溫度反應을 나타낸다. 時間常數의 測定값은 가스 속도에 따라 다르기 때문에 가스속도가 클수록 對流 熱傳達값이 커지며 τ 값은 적어진다.

스프링클러 헤드의 作動에 적용되는 領域에서의 一般物體에 대한 對流 열전달 계수변화는 가스속도(공기속도)에 비례하며 부유가스온도에 무관하고, 강

제 대류에서의 열전달계수는 무차원으로서 Nusselt Number(nu)는 Reynold Number(Re)와 관계가 있다.

$$Nu=f(Re) \dots\dots\dots (3)$$

$$Nu=hL/k$$

$$Re=UL/v$$

여기서 L:열감지부의 1차원 특성(Constant)

k:온도층에서 가스(공기)의 열전도율

$$[(Tg+Te)/2]$$

u:가스속도

v:온도층에서 가스(공기)의 동점성율

W.HMcAdams는 實驗을 통하여 B를 熱感知部の 常數特性이라 하여 방정식 (3)을 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$Nu=B(RE)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

따라서 방정식 (3), (4)를 정리하면

$$hL/k=B(UL/v)^{1/2}$$

$$h=B(UL/V)^{1/2}k/l$$

$$=B(k/V^{1/2})U^{1/2}L^{-1/2} \dots\dots\dots (5)$$

방정식(5)에서 K와 v는 溫度에 敏感하지만 亂流상태에서 $K/v^{1/2}$ 는 溫度에 거의 無關하고 B와 L는 상수이므로 방정식(5)를 간단하게 $h \propto \mu^{1/2}$ 으로 表示할 수 있다. 즉, 열감지부의 時間常數 v는 $\mu^{-1/2}$ 에 비례하므로 $\tau\mu^{1/2}=\text{constant}$ 라 할 수 있다. 이를 Response time index(RTI)라 하여 방정식(2)에 代入하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} d(\Delta Te)/dt &= \tau^{-1}(\Delta Tg - \Delta Te) \\ &= (\mu^{1/2}/RTI)(\Delta Tg - \Delta Te) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

즉, Sprinkler Head의 作用은 $\Delta Te = \Delta Tea$ (ΔTea 는 Head의 실제 작동온도)일때 감지하게 되므로 방정식 (6)에서 ΔTe 대신 ΔTea 를 이용할 수 있다. 따라서 방정식 (6)은 RTI를 적용시킨 열 평형 방정식이 된다.

이상의 內容은 制限된 條件하에서의 S.P Head의 熱 應答特性에 관한 가장 基本的인 重要한 式이라 할 수 있으며 이 關係式을 實際 火災時에 일어나는 複雜한 열 유동 현상을 完全하게 나타낼 수 없으나 現在 선진국에서는 이를 이용한 Early Suppression Fast Response Head의 設計 資料로 使用되고 있다.

IV. 結 論

이상과 같이 S.P Head의 열감지성에 관한 重要特性에 관해 알아보았다. 이들의 상당부분은 火災의 형태, 규모에 따라 실제 화재의 경우와 많은 差異가 있으리라고 생각되며 持續的인 補完이 있어야 할 것이다.

즉, 火災 荷重에 따라 懸隔한 差異를 보이는 火焰 溫度의 變化를 正確히 感知할 수 있느냐에 달려 있다.

따라서, 多樣한 火災 현상을 파악하기 위하여 國內 製造業體 및 關聯 研究機關에서는 Computer Simulation에 의한 열전달 모델연구와 실제 실험을 통하여 상호 보완적으로 개선해 나가야 할 것이다. 또한, 열 감지효과는 스프링클러 소화설비의 소화작동시간에 중요한 요소로 작용하며 소화 설비중에서 가장 뛰어난 설비로서 제 기능을 發揮할 수 있는 문제와 직결된다.

참고문헌

1. Gunnar Heskestad And Robert G.Bill, JR:Modeling of Thermal Responsiveness of Autmatic Sprinkler. 1988.
2. Gunnar Heskestad And Robert G.Bill, JR:Quantification of Thermal Responsiveness of Automatic Sprinklers Including Conduction Effects, 1987.
3. P.F.Thorne, C.R. Theobald and S.J.Melinek:'The Thermal Performance of Sprinkler Heads:Fire Research Station; January 1988.
4. Juzo Unoki. Fire Extinguishing Time by Sprinkler;Fire Safety Science—Proceedings of The First International Symposium:November 1985
5. Alpert R.L.:Calculation of Response Time of Ceiling Mounted Fire Detectors, Fire Technology, August 1972.
6. Smith, E. E,Satija:Release Rate Model For Developing Fires:Heat Transfer Vol. 105, May 1983.
7. Fire Safety Science—Proceeding of The First International Symposium. 1986.
8. 燃燒工學, 集文堂, 1985. 5.