

성능위주설계를 위한 화재감지기배치의 공학적연구 Automatic Fire Detector Spacing Calculation for Performance Based Design

박동하

Dong-Ha Park

서울시립대학교 재난과학과
(2009. 10. 20. 접수/2010. 2. 12. 채택)

요 약

현재의 화재안전기준에서 규정하는 화재감지기의 배치방법은 면적에 따라 규정된 숫자를 적정하게 배치하는 수준이다. 이 기준은 과학적인 근거는 가지고 있지 못하다. 외국의 기준을 도입하여 그에 따라서 설치하고 있을 뿐이다. 소방시설을 설계하는 방법에는 화재안전기준과 같이 명문화 된 규정에 따르는 규범위주설계(Prescriptive-based)와 화재역학, 구조역학, 재료역학, 유체역학, 열역학 등 공학적 지식을 바탕으로 하는 성능위주설계(Performance-based design)가 있다. 현재로서는 성능위주설계가 활성화 되지 않았지만, 최근 소방시설공사업법은 성능위주설계방법을 이용하여 소방시설을 설계 할 수 있도록 개정('05. 8. 4)되었으며 그 시행령('07. 1. 24)에서 성능위주설계를 적용할 특정소방대상물의 범위를 정하고 있다. 이러한 시점에서 자동화재탐지설비의 화재감지기를 최적의 위치 및 거리에 설치하기 위하여 그에 대한 공식의 도입과 공식을 Software로 계산할 수 있도록 시뮬레이터를 제작하여 계산하고 규범위주설계에 따라 배치한 화재감지기의 상태와 비교 분석하며 향후 성능위주설계 방법으로서 정착시키기 위하여 연구를 시도하였다.

ABSTRACT

Placement method for fire detectors prescribed in current fire safety regulation is just about placing a prescribed number of detectors according to the areas. However, this regulation has no scientific basis and standards from foreign countries are just introduced and fire detectors are installed complying with them. There are two standards in designing fire protection systems; Prescriptive-Based Design that follows stipulated regulations like fire safety standards and Performance-Based Design based on engineering knowledge such as fire dynamics, structural dynamics, mechanics of materials, fluid mechanics, and thermo dynamics. Recently, Fire Protection System Construction Business Act was revised so that fire protection systems can be designed using Performance-Based Design method ('05. 8. 4), though the method has not activated until now. In addition, the enforcement decree defines the range for specific objects of fire protection to which Performance-Based Design is applied ('07. 1. 24). At the moment, by manufacturing simulator so that formulas can be introduced and calculated with software in order to install fire detector of automatic fire detection systems keeping optimized distance, comparing the results with the state of fire detector placed according to Performance-Based Design and analyzing them, this study was intended to settle Performance-Based Design method in the future.

Key words : Fire detector spacing, Performance-based design, Prescriptive-based design

1. 서 론

일반적으로 성능위주 소방설계(Performance based design)는 그 목적이 인명안전과 재산보호로 명확하게

규정하고 있다. 또한 사양위주 소방설계에 비해 명확한 계산근거를 가지고 있다. 따라서 성능위주 소방설계의 목적은 공학적인 방법을 이용하여 그 목적을 달성하기 위한 문제의 해결방법을 제공하는 것이다. 화재안전기준의 자동화재탐지설비 중 화재감지기 설치 기준은 면적에 따라 규정된 숫자를 적정하게 배치하는

E-mail: dongha.park@siemens.com

Table 1. Installation Standard for Heat Detector

부착높이 및 소방대상물의 구분		감지기의 종류			
		차동식 스포트형		정온식 스포트형	
		1종	2종	1종	2종
4m 미만	내화구조	90m ²	70m ²	60m ²	20m ²
	기타구조	50m ²	40m ²	30m ²	15m ²
4m~8m 미만	내화구조	45m ²	35m ²	30m ²	
	기타구조	30m ²	25m ²	15m ²	

Table 2. Detector Type for High Places

부착 높이	감지기의 종류
4m 미만	차동식(스포츠형, 분포형), 보상식 스포트형, 정온식(스포츠형, 감지선형), 이온화식 또는 광전식, 열복합형, 연기복합형, 열연기복합형, 불꽃감지기
4m~8m 미만	차동식(스포츠형, 분포형), 보상식 스포트형, 정온식(스포츠형, 감지선형)특종 또는 1종, 이온화식 1종 또는 2종, 광전식(스포츠형, 분리형, 공기흡입형)1종 또는 2종, 열복합, 연복합, 열연복합형, 불꽃감지기

Table 3. Japan's Installation Standard for Heat Detector

취부면의 높이		차동식 스포트형		정온식 스포트형	
		1종	2종	1종	2종
4m 미만	내화구조	90m ²	70m ²	60m ²	20m ²
	기타구조	50m ²	40m ²	30m ²	15m ²
4m 이상~8m 미만	내화구조	45m ²	35m ²	30m ²	
	기타구조	30m ²	25m ²	15m ²	

것이 전부이다. 그 기준의 공학적인 배경은 없다. 설치 기준을 보면 Table 1과 같다.

Table 1은 천정 높이가 8m 미만의 경우 설치수량을 나타내며, Table 2는 천정높이가 8m 미만일 경우 사용 가능한 감지기의 종류를 나타낸다.

하지만 이 Data는 어떤 계산결과에 따라 제시된 것인지 알려진바 없다. 조사 결과 일본의 열감지기 설치기준(소방법시행규칙 제23조)이 한국화재안전기준의 열감지기 설치기준과 동일함을 확인하였다. Table 3은 일본의 열감지기 설치기준을 나타내고 있다. 이에 열감지기의 성능위주설계를 할 수 있는 도구를 개발하고 그 사용법 및 산출과정을 연구하여 설계분야에 정착시키고자 한다.

2. 화재감지기의 배치를 위한 공학지침

현재 사용하고 있는 화재안전기준(자동화재탐지설비)은 소방방재청고시 제2008-43호(2008. 12. 15)로 최종 Update된 것이다. 오랜 세월을 지나 현재에 이르고 있으나 그 내용을 보면 기술적으로 크게 변화된 내용은 없다. 가장 중요한 각종 수치의 근거가 마련되지 않고 있는 실정이다. 화재안전기준 내에는 무수히 많은 숫자와 단위들이 있지만 어느 하나 기술적(과학적)으로 타당성이 있는 Background는 찾기 어렵다. 현재의 화재안전기준은 외국에서 도입한 기준으로 한국의 독자적인 한국형 기준은 아닌 것으로 알려져 있다. 기술적인 Background를 갖는 규정이란 대외적으로 강력한 경쟁력을 보유할 수 있다고 판단한다. 그리고 방재공학을 연구하는 모든 이들에게 과학적인 안내 지침이 될 것이다. 또한 최근에는 성능위주설계에 대한 논의가 각계에서 이루어지고 있는 실정으로 자동화재탐지설비 분야도 어떤 형태로 이던 Background를 갖기 위한 논의가 있어야 한다고 본다. 또한 범정부 차원에서 표준화를 시도하고 있는 시점이어서 더욱 의미가 있다 하겠다. 자동화재탐지설비에서는 크게 2종류의 성능위주설계가 필요하다고 하겠다. 첫째는 열감지기 및 연기감지기의 배치에 관한 사항이 될 것이다. 모든 방재시스템의 센서 역할을 하는 열, 연기감지기는 빌딩에 있어서 화재발생을 가장 처음에 감지하는 초기 감지장치로서 정확하고 성능이 입증되는 설치기준을 갖는다는 것은 중요한 일이라 할 것이다. 둘째는 화재발생을 감지한 후 재실자들에게 대피를 할 수 있도록 경보를 전달 해야 하는 것이다. 열, 연기감지기에 있어서는 사양설계기준에서는 차동식의 경우 70m²(4m 미만, 내화구조, 2종)당 1개 이상의 감지기를 설치하여야 하며 정온식의 경우 60m²(4m 미만, 내화구조, 1종)당 1개 이상의 감지기를 설치하도록 하고 있다. 이 기준은 실내의 보관물품, 물품의 수량, 실내온도 등 아무런 조건이 없다. 성능위주설계에서는 고려해야 할 사항이 보다 많다. 앞서 말한 3가지 외에도 소방대 출동시간, 화재점의 화재확산 열량, 천정높이, RTI값, UL등록된 감지기의 시간상수, 감지기의 작동온도 등이 그 고려사항이다. 여러 가지 변수를 가지고 수학적 모델을 이용하여 감지기의 설치 간격을 정하는 것이다.

2.1 열방출속도

화재의 열방출속도는 열방출밀도와 화재의 면적을 곱하는 것으로 표현될 수 있는데 그 공식은 다음과 같다.¹⁾

$$Q_m = qA$$

여기서

Q_m = 최대 혹은 최고 열방출속도[kW]

q = 바닥면적단위당 열방출속도 밀도[kW/m²]

A = 연료의 바닥면적[m²]

2.2 화재성장속도

화재는 성장속도 혹은 화재가 일정한 열방출속도를 갖게 될 때까지 소요되는 시간(t_g)에 의해 정의되기도 한다. 기존 연구에 의하면, 대부분의 화재가 기하급수적으로 성장하고 “파워로우 화재성장모델(power law fire growth model)”이라는 용어로 표현될 수가 있다. 이 성장모델의 공식은 다음과 같다.²⁾

$$Q \approx t_p$$

여기서

Q = 열방출속도(kW)

$p = 2$

t = 시간(초)

연료는 일반적으로 성장시간(t_g)이 있다고 설명된다. 이 성장시간은 연료가 안정적인 화염을 가지고 발화하여 1055kW의 열방출속도를 갖게 될 때까지 소요되는 시간이다. 다음의 공식이 설계화재의 성장을 표현하는데 사용된다.

$$Q = \frac{1055}{t_g^2} t^2$$

$$Q = \alpha t^2$$

여기서

α = 화재성장속도[1055/ t_g^2 (kW/sec²)]

Q = 열방출속도[kW]

t_g = 연소가 시작된 후 화재성장시간이 1055kW가 될 때 까지의 소요시간

t = 연소 시작으로부터의 소요시간(초)

발생위치의 가상시간(t_v)은 안정적인 화염이 탄생하여 화재가 파워로우 화재성장모델에 해당하게 되는 순간의 시간을 나타낸다. t_v 에 도달하기 전, 연료는 연기를 생산할 수도 있지만 끝이 열린 화염이 되는 본격적인 연소과정에는 도달하지 않은 상태이다. 다음으로,

모델의 커브는 다음의 공식을 사용하여 예측된다.³⁾

$$Q = \alpha(t - t_v)^2$$

$$Q = \left(\frac{1055}{t_g^2}\right)(t - t_v)^2$$

여기서

α = 화재성장속도[1055/ t_g^2 (kW/sec²)]

Q = 열방출속도[kW]

t_g = 연소가 시작된 후 화재성장시간이 1055kW가 될 때 까지의 소요시간

t = 연소 시작으로부터의 소요시간(초)

t_v = 발생위치의 가상시간(초)

2.3 화염의 높이

화염의 높이와 열방출속도 간의 상호관계는 적절한 설계화재를 정하는 데 사용될 수 있다.

화염의 높이와 화재의 면적은 직접적으로 연결되어 있다. Figure 1의 선은 다음과 같은 공식을 사용하여 도출한다.⁴⁾

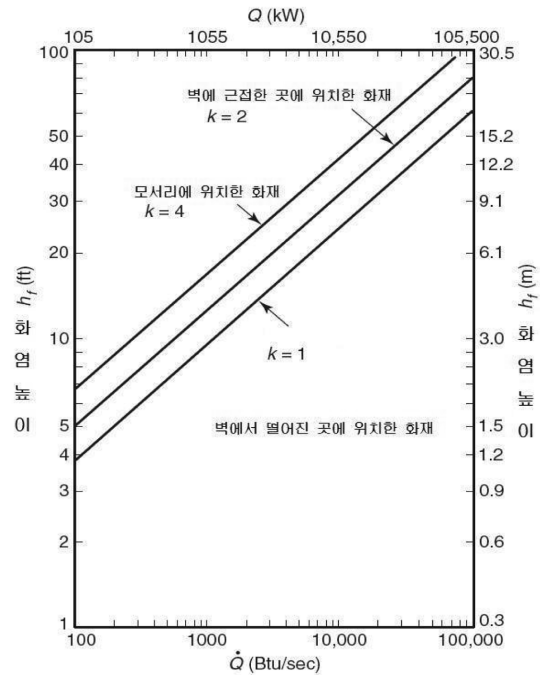


Figure 1. Heat release rate vs. flame height.

1) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. “National Fire Alarm Code Handbook”, pp.519(2007).

2) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. “National Fire Alarm Code Handbook”, pp.519(2007).

3) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. “National Fire Alarm Code Handbook”, pp.520(2007).

4) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. “National Fire Alarm Code Handbook”, pp.520(2007).

$$h_f = 0.182(kQ)^{2/5}$$

여기서

h_f = 화염의 높이(m)

k = 벽의 영향인자

Q = 열방출속도(kW)

3. 열감지 시스템 성능의 평가

3.1 일반사항

정온식 열감지기(스프링클러 포함)의 적용배치법과 차동식 열감지기를 결정하는 데 사용되는 방법을 설명한다. 이 방법은 감지기가 대형의 평평한 천장에 설치되었을 때만 유효하다. 이 방법은 기하학적으로 성장하는 불꽃화염이 일정한 크기의 화재가 되었을 때 감지기가 어떠한 반응을 할 것인가를 예상하는 데 사용된다. 이 방법은 천장높이, 감지기와 화재지점간의 방사상거리, 한계화재크기[위험 열방출속도(Q_{CR})], 화재성장속도, 그리고 감지기반응시간 지수의 영향을 반영한다. 정온식 감지기의 경우 주변온도와 감지기의 온도단위가 추가로 반영된다. 뿐만 아니라, 이 방법은 정온식 열감지기가 일반적인 점검여건에서 벗어난 주변온도(T_w)의 변화를 반영할 수 있게끔 적용배치법을 조정하는 것이 가능하다.

3.2 입력데이터의 고려사항

3.2.1 다음과 같은 데이터는 본 문서의 방법들을 설계 혹은 분석에 사용하기 위해 필요하다.⁵⁾

$$T = ^\circ C$$

$$H = m$$

$$RTI = m^{1/2} s^{1/2}$$

$$\alpha = kW/s^2$$

$$t_d = sec$$

$$S = m$$

$$Q = kW$$

3.2.2 설계를 결정하기 위한 필요 데이터에는 다음과 같다.⁶⁾

1) 천장높이 혹은 연료 위의 빈 공간(H)

2) 반응이 반드시 일어나야만 하는 한계화재크기(Q_d) 혹은 감지기 반응 시간(t_d)

5) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. "National Fire Alarm Code Handbook", pp.529(2007).

6) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. "National Fire Alarm Code Handbook", pp.529(2007).

3) 감지기의 RTI(Response time index) 혹은 정해진 배치법

4) 주변온도(T_a)

5) 감지기 작동온도(T_s)

6) 차동식열감지기의 온도변화 설정점 속도(T_r/min)

7) 연료화염강도계수(α) 혹은 화재성장속도(t_g)

3.2.3 주변온도 고려사항

천장에서 발생 예상되는 최대주변온도는 정온식열감지기의 적용에 사용되는 온도기준의 선택에 직접적인 영향을 미친다. 하지만, 천장에 존재 가능한 최소주변온도 역시 매우 중요하다. 천장의 주변온도의 감소에 따라 감지기의 감지관련 부품을 둘러싼 공기를 기준(작동)온도로 올리기 위해 보다 많은 양의 열이 화재로부터 요구된다. 이 때 주변온도가 낮을 경우 보다 느린 반응이 나타난다. 시간에 지남에 따라 성장하는 화재의 경우, 낮은 주변온도는 감지가 일어났을 때의 화재의 크기를 더 크게 한다.

3.2.4 천장 높이

감지기는 일반적으로 화재에 근접하면 근접할수록 일찍 작동한다. 천장높이가 4.9m를 넘는 공간의 경우, 천장높이가 감지시스템 반응에 가장 큰 영향을 끼치는 요소가 된다. 반응 시의 화재크기가 설계목표(설계화재)를 초과한다는 것이 계산을 통해 입증되면, 설계자는 감지기 간의 간격을 줄이는 방법으로 문제를 해결할 수 있다. 감지기를 화재 플룸⁷⁾(Plume)의 중앙선에 보다 가깝게 옮기는 효과가 있는데, 특별히 높은 천장과 작은 설계화재의 경우에는 감지기의 간격이 줄어들었다고 해서 시스템의 반응이 향상되는 게 아니라는 것을 인지해야 한다. 감지기의 배치가 천장 높이의 0.4배 밑으로 좁혀질 경우, 화재위치에 관계없이 감지기는 플룸 안에 있게 된다. 플룸 전반에 걸친 온도 및 속도의 변화는 그다지 크지 않기에, 보다 간격을 많이 좁힌다 해서 시스템 성능이 향상되는 것은 아니다.⁸⁾

3.2.5 동작온도

반응에 필요한 감지기의 동작온도, 혹은 온도변화율

7) 플룸(Plume): 화재발생시 불기둥이 형성되는데 그의 중심부를 칭함. 화염의 부력 기둥, 연료공급원 위로 상승하는 고온의 연소생성물. Entrainment형상은 부력에 의해 플룸의 고온 가스가 상승함에 따라 주위의 차가운 공기가 플룸 속으로 유입되는 현상이 일어남. 화염의 부력 기둥은 3단계로 분류하는데 Buoyant Plume(윗부분), Intermittent Flame(중간부), Persistent(아래부분)으로 구분함.

8) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. "National Fire Alarm Code Handbook", pp.530(2007).

은 생산자의 데이터에서 얻어지며 승인시험과정에서 정해진다. 천장에서의 정온식 감지기의 규격온도(T_s)와 최대주변온도(T_a)간의 차이는 가능한 한 작은 수치여야 한다. 하지만 비화재보를 줄이기 위해서는 동작온도와 최대주변온도의 차이가 11°C 보다 작아서는 안 된다. 설계자는 비화재 열원을 완전히 배제하기 위해서 각 열감지기의 근접한 기계 및 장비, 차량, 가열기, 증기기관, 반응용기, 압축기 등을 포함한 각 열감지기의 위치를 세세하게 분석하여야 한다. 이러한 열원은 구역 혹은 간헐온점을 생성에 반응해 발생하는 비화재보의 원인이 될 수 있다.

3.2.6 화재성장속도

화재성장속도는 관련 연료의 물리적 구성과 연소성질에 따라 달라진다. 발화 후, 대부분의 화재는 가속적으로 성장한다.

3.2.7 한계화재속도

설계자는 신중하게 한계화재크기를 선택해야 한다. 설계자는 한계화재사이즈의 변화가 시스템의 반응에 미치는 영향을 정량화하기 위해 민감도 분석을 해야 한다.

3.3 열감지기의 설치간격

3.3.1 열감지기 설치거리의 계산⁹⁾

열감지기의 설치거리를 구하기 위하여 다음과 같은 단계의 순서로 반복계산을 하고 가장 적절한 거리를 취하여야 한다.

1) 주변온도 천장 높이(T_a) 혹은 연료 위로부터의 높이(H)를 파악한다.¹⁰⁾

$$T_a = \text{ } ^{\circ}\text{C} + 273 = \text{ } \text{K}$$

$$H = \text{ } \text{m}$$

여기서 T_a : 천장부근의 주위온도(정상시 가장 낮은 온도)

H: 실내에 보관된 가연물의 상단에서 천장까지의 높이를 입력

2) 예상설계화재의 화재성장성격(α 혹은 t_g)를 파악한다.

$$\alpha = \text{ } \text{kW/sec}^2$$

$$t_g = \text{ } \text{sec}$$

여기서 α : 화재강도 계수

9) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. "National Fire Alarm Code Handbook", pp.532(2007).

10) Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. "National Fire Alarm Code Handbook", pp.535(2007).

t_g : 화재성장속도가 1055kW 에 이르는 시간

3) 감지기의 특성을 정의한다.

$$T_s = \text{ } ^{\circ}\text{C} + 273 = \text{ } \text{K}$$

$$\tau_0 = \text{ } \text{sec}$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \text{ } ^{\circ}\text{C/min}$$

$$RTI = \text{ } \text{m}^{1/2}\text{sec}^{1/2}$$

여기서 T_s : 열감지기의 작동온도

τ_0 : 기준속도 에서 측정된 감지기 시간상수

RTI: 반응시간지수

4) 시스템 목적(T_{CR} 혹은 Q_{CR})을 수립하고 화재시의 감지기로부터의 거리(r)에 대한 첫 추정치를 정한다.

$$T_{CR} = \text{ } \text{sec} \quad r = \text{ } \text{m}$$

$$Q_{CR} = \text{ } \text{kW}$$

여기서 T_{CR} : 임계열방출속도(Q_{CR})에 이르는 시간

Q_{CR} : 임계열방출속도

r: 감지기와 화재점의 거리

5) 최초의 열이 감지기에 닿는 순간의 무차원 시간 t_{2f} 을 계산한다.

$$t_{2f} = 0.861 \left(1 + \frac{r}{H} \right)$$

여기서 t_{2f} : r/H점에서 열전선의 도착시간

6) A 인자를 계산한다.

$$A = \frac{g}{C_p T_a \rho_0}$$

여기서 A: 넓이

g: 중력상수

C_p : 공기의 명시된 열

T_a : 주변온도

ρ_0 : 주변공기의 밀도

7) 필요 반응시간 t_{CR} 과 t_p 의 관계, 그리고 $p=2$ 를 사용하여 t_2 의 해당 값을 계산한다.

$$t_2 = \frac{t_{CR}}{A^{-1/(3+p)} \alpha^{-1/(3+p)} H^{4/(3+p)}}$$

여기서 t_{CR} : 임계열방출속도(Q_{CR})에 이르는 시간

A: 넓이

α : 화재강도계수

H: 실내에 보관된 가연물의 상단에서 천장까지의 높이

8) $t_2 > t_{2f}$ 일 경우 9번, 그렇지 않을 경우, 다른 감지기 위치(r)를 사용하여 4번부터 다시한다.

9) u/u_2 비율을 계산한다.

$$\frac{u}{u_2} = A^{1/(3+p)} \alpha^{1/(3+p)} H^{(p-1)(3+p)}$$

여기서 A: 넓이
 α : 화재강도계수
 H: 실내에 보관된 가연물의 상단에서 천장까지의 높이

10) $\frac{\Delta T}{\Delta T_2}$ 비율을 계산한다.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_2} = A^{2/(3+p)} \left(\frac{T_a}{g}\right) \alpha^{2/(3+p)} H^{-(5-p)/(3+p)}$$

여기서 T_a : 주변온도
 g : 중력상수
 A: 넓이
 α : 화재강도계수
 H: 실내에 보관된 가연물의 상단에서 천장까지의 높이

11) ΔT_2 를 계산한다.

$$\Delta T_2 = \left[\frac{t_2 - t_{2f}}{0.146 + 0.242r/H} \right]^{4/3}$$

여기서 t_2 : 5)에서 산출된 값
 t_{2f} : 7)에서 산출된 값
 r : 4)에서 입력된 값

12) $\frac{u_2}{(\Delta T_2)^{1/2}}$ 를 계산한다.

$$\frac{u_2}{(\Delta T_2)^{1/2}} = 0.59 \left(\frac{r}{H}\right)^{-0.63}$$

여기서 r : 4)에서 입력된 값
 H : 1)에서 입력된 값

13) Y를 계산한다.

$$Y = \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{u}{u_2}\right)^{1/2} \left[\frac{u_2}{\Delta T_2^{1/2}} \right]^{1/2} \left(\frac{\Delta T_2}{RTI}\right) \left(\frac{t}{t_2}\right) D$$

여기서 D: $0.146 + 0.242 r/H$

14) $T_d(t) - T_d(0)$ 의 관계를 사용하여 정온식 감지기의 결과온도를 계산한다.

$$T_d(t) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2}\right) \Delta T_2 \left[\frac{1 - (1 - e^{-Y})}{Y} \right] + T_d(0)$$

여기서 e: 자연대수 2.718

15) 차동식 감지기의 온도상승률을 계산한다.

$$dT_d = \left[\left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2}\right) (\Delta T_2)^{1/4} \frac{(1 - e^{-Y})}{\left(\frac{t}{t_2}\right) D} \right] dt$$

정온식감지기의 결과온도가 원하는 값에 미치지 못하거나 지나치게 상회하게 되면 설계자는 다시 처음으로 돌아가 감지기 상호간 거리를 조절함으로써 적합한 온도를 구할 수 있다. 또한 차동식감지기 역시 상승률이 원하는 값에 미치지 못하거나 지나치게 상회하게 되면 처음으로 돌아가 감지기 상호간 거리를 조절함으로써 적합한 온도를 구할 수 있다.

4. 열감지기 Simulator 제작

감지기추정거리의 계산은 수번의 반복처리과정을 요한다. 이러한 일련의 반복계산은 특별한 도구가 없이는 매우 어려운 것이다. 현존하는 각종 소방시설의 설계방법은 대다수의 설비가 컴퓨터 Software를 사용하여 처리하도록 하는것이 일반화 되어있다. 여기에서도 명확한 입출력의 결과를 얻기 위하여 컴퓨터를 이용한 계산용 Simulator를 제작하였다.

4.1 사양

3.3.1항의 계산을 처리하기 위한 Simulator를 제작 하였다. 각종 공식에 나오는 지수를 처리하기 위한 루틴을 구성하는 것은 매우 중요한 절차이어서 철저한 검증이 이루어져야 했다. 제작된 Simulator는 다음과 같은 조건으로 제작 되었다.

- 1) 사용 Tool: spread sheet program
- 2) 선택입력: 설계자입력변수 선택입력
- 3) 자동계산: 입력변수에 따라 자동계산
- 4) 출력 값: 정온식감지기의 주변온도 및 차동식감지기의 주변온도 상승률

4.2 구조

Simulator의 구조는 설계자가 선택한 값을 입력하면 즉시 정온식감지기의 작동온도와 차동식감지기의 온도 상승률이 실시간으로 표현된다.

Figure 2는 데이터 입력화면의 일부로서 원편에 선

Calculation Guide for Automatic Fire Detector Spacing	
1. 주위온도 Ta와 천정높이 또는 연료위 높이 H를 입력	
Ta = <input type="text" value="10"/> °C + 273 = <input type="text" value="283"/> K	
H = <input type="text" value="4"/> m	
2. 예측된 설계화재를 계산하기 위한 화재성장특성 α와 t _g 를 결정	
Q = αt ² 공식을 이용 (Q = 1055 kW)	
t = <input type="text" value="150"/> sec	α = <input type="text" value="0.047"/> kW/sec ²
3. Heat detector의 특성치를 결정	
1) RTI를 산출 (RTI = t ₀ u ₀ ^{1/2})	
시간상수 t ₀ = <input type="text" value="80"/> sec	

Figure 2. Part of the data input screen.

15. 정온식 온도 산출 공식 $T_d(t) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2}\right) \Delta T_2 \left[1 - \frac{(1 - e^{-Y})}{Y}\right] + T_d(0)$ 이용하여 Td(t)를 계산	
(T _d (0)는 T _a 와 같은 것으로 함) (e=2.718 자연대수)	
$T_d(t) =$	<input type="text" value="56.95"/> °C
16. 차동식 온도산출 공식 $\frac{dT_d(t)}{dt} = \frac{\left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2}\right) (\Delta T_2)^{3/4} (1 - e^{-Y})}{\left(\frac{t}{t_2}\right) D}$ 을 이용하여 dTd를 계산	
차동식 감지기 주위온도 상승률 $\frac{dT_d}{dt} =$	<input type="text" value="6.343"/> °C

Figure 3. Part of the last results screen.

택한 변수를 입력하면 오른쪽에 그에 해당하는 값이 나타난다. 실내온도, 천정높이, 감지기 작동온도, 가연물의 종류, 화재성장속도, RTI를 구하기 위한 시간상수 등을 초기의 입력 값으로 요구한다. 위의 공식 1)~15) 모두 자동계산이 되며 결과 값으로 Figure 3과 같이 정온식/차동식 감지기의 관련온도가 최종으로 표기된다.

Figure 3은 계산결과 값을 나타낸다. 정온식감지기의 온도는 56.95°C를 나타내며 차동식감지기는 1분당 온도상승 폭은 6.343°C를 나타낸다.

4.3 Program

Spread sheet의 Program은 다음과 같은 계산식으로

구성된다.

$$t_{2f} = 0.861 \left(1 + \frac{r}{H}\right)$$

$$= \text{IF}(E49 = "", "", \text{SUM}(0.861 * (E49/B7 + 1)))$$

$$A = \frac{g}{C_p T_a \rho_0}$$

$$= \text{IF}(B5 = "", "", \text{SUM}(9.81 / (1.04 * D5 * 1.1)))$$

$$t_2 = \frac{t_{CR}}{A^{-1/(3+p)} \alpha^{-1/(3+p)} H^{4/(3+p)}}$$

$$= \text{IF}(E13 = "", "", \text{SUM}(F38 / ((D62^{(1/5)} - (1/5)) * (E13^{(1/5)} - (1/5)) * (B7^{(4/5)}))))$$

$$\frac{u}{u_2} = A^{1/(3+p)} \alpha^{1/(3+p)} H^{(p-1)(3+p)}$$

$$= \text{IF}(B7 = "", "", \text{SUM}((D62^{(1/5)} * (E13^{(1/5)} * (B7^{(1/5)}))))$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_2} = A^{2/(3+p)} \left(\frac{T_a}{g}\right) \alpha^{2/(3+p)} H^{-(5-p)/(3+p)}$$

$$= \text{IF}(B5 = "", "", \text{SUM}((D62^{(1/5)} * (D5/9.81) * (E13^{(1/5)} * (B7^{(1/5)} - 0.6))))$$

$$\Delta T_2 = \left[\frac{t_2 - t_{2f}}{0.146 + 0.242r/H} \right]^{4/3}$$

$$= \text{IF}(B7 = "", "", \text{SUM}(((D69 - C55) / (0.146 + (0.242 * E49/B7)))^{(4/3)}))$$

$$\frac{u_2}{(\Delta T_2)^{1/2}} = 0.59 \left(\frac{r}{H}\right)^{-0.63}$$

$$= \text{IF}(B7 = "", "", \text{SUM}(0.59 * (E49/B7)^{-0.63}))$$

$$Y = \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{u}{u_2}\right)^{1/2} \left[\frac{u_2}{\Delta T_2^{1/2}} \right]^{1/2} \left(\frac{\Delta T_2}{RTI}\right) \left(\frac{t}{t_2}\right) D$$

$$= \text{IF}(D93 = "", "", \text{SUM}((3/4) * D74^{0.5} * D93^{0.5} * (D85/G21) * (F38/D69) * (0.146 + 0.242 * (E49/B7))))$$

$$T_d(t) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2}\right) \Delta T_2 \left[\frac{1 - (1 - e^{-Y})}{Y} \right] + T_d(0)$$

$$= \text{IF}(E100 = "", "", \text{SUM}(D79 * D85 * (1 - (1 - 2.718^{(1 - E100)/E100}) + B5)))$$

4.4 계산결과

이 Program을 사용하여 각 변수를 조정하여 계산한 결과는 다음과 같다.

각 변수에 대한 조건은 다음과 같음.

- 용도: 창고(천정높이 4m)
- 실내온도: 10°C(낮은 온도)
- 소화활동시작 예상시간: 315sec

- 화재확산 복사에너지: 10,000kW
- 감지기 작동온도: 57°C

Table 4. Ceiling Height Versus Detector Temperature

천장높이 (m)	가연물(팔레트)높이 = 0.5m		
	정온식 감지기의 온도(°C)	단계별 온도차이	차동식 상승률
2.0	82.35		6.69
2.5	74.47	7.88	6.84
3.0	67.72	6.75	6.78
3.5	61.94	5.78	6.60
4.0	56.95	4.99	6.34
4.5	52.36	4.59	6.04
5.0	48.96	3.40	5.74
5.5	45.56	3.40	5.44
6.0	42.65	2.91	5.13
6.5	40.07	2.58	4.83
7.0	37.77	2.30	4.56
7.5	35.72	2.05	4.30
8.0	33.88	1.84	4.04
8.5	32.22	1.66	3.81
9.0	30.72	1.50	3.59

Table 5. Detector Spacing Versus Detector Temperature

감지기간 거리(m)	가연물(팔레트)높이 = 0.5m		
	정온식 감지기의 온도(°C)	단계별 온도차이	차동식 상승률
2.00	117.51		23.03
2.50	99.93	17.58	17.48
3.00	86.27	13.66	13.51
3.50	75.42	10.85	10.62
4.00	66.65	8.77	8.50
4.50	59.47	7.18	6.88
5.00	53.50	5.97	5.62
5.50	48.49	5.01	4.64
6.00	44.25	4.24	3.87
6.50	40.63	3.62	3.24
7.00	37.51	3.12	2.74
7.50	34.81	2.70	2.34
8.00	32.45	2.36	2.00
8.50	30.38	2.07	1.72
9.00	28.56	1.82	1.49

- 등록된 감지기거리: 9.1m(UL)
- 가연물: 목재 팔레트 0.5m 높이로 보관

Table 4에서 정온식감지기는 천장높이 4m의 경우 56.95°C로 적정하다고 판단되며, 실내온도 10°C일때 56.95°C로 적정한 상태이다. Table 5에서 감지기간 거리는 4.5m일때 59.47°C로 이 거리가 적정하다고 판단된다. 차동식감지기는 1분당 15°C의 상승률이 필요하므로 2.5m의 간격이 요구되는 결과이다.

4.5 계산결과의 비교

본 결과를 가지고 사양위주설계의 결과와 비교하였다. 4m 미만에서 정온식1종 감지기는 내화구조일때 60m²당 1개 이상을 설치 하여야 한다.

40m × 60m × 4m 규모의 공간에 사양위주로 설치할 경우는 2400m²/60m² = 40개가 소요된다. 성능위주로 설치할 경우는 가로로 설치할 수량은 13개, 세로로 설치할 수량은 9개로 총 117개의 감지기가 필요하다. 천정높이가 4m로 비교적 높은 천정을 비교 하였다. 보통건물의 천정(약 2.8m)높이로 다시 비교한다. 가연물은 1.5m 높이로 설정한다. 각 변수에 대한 조건은 다음과 같음.

- 용도: 창고(천정높이 2.8m)
 - 실내온도: 10°C(낮은 온도)
 - 소화활동시작 예상시간: 315sec
 - 화재확산 복사에너지: 10,000 kW
 - 감지기 작동온도: 57°C
 - 등록된 감지기거리: 9.1m(UL)
 - 가연물: 목재 팔레트 1.5m 높이로 보관
- 천정높이 2.8m의 경우는 감지기 사이의 거리가 9.5m

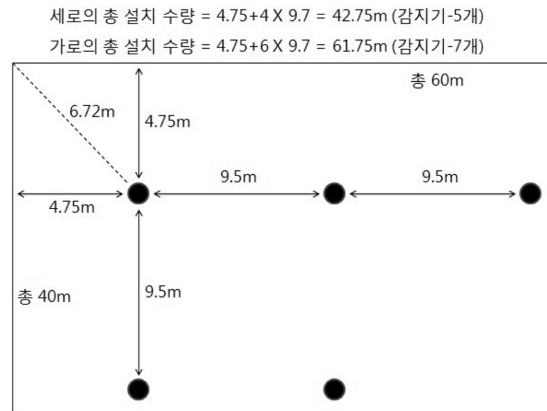


Figure 4. Heat detectors location by performance based design.

Table 6. Detector Number Comparison

가연물	면 적	천정 높이	현행기준 감지기 수량	성능위주 설계결과 수량
가연물높이 (1.5m)	2400m ²	2.8m	40개	35개
가연물높이 (0.5m)	2400m ²	4.0m	40개	117개

로 하면 정온식감지기의 온도는 57.78°C가 된다. 이 경우 사양위주설계는 동일하게 80개의 감지기가 필요하다. 성능위주설계의 경우는 가로 설치수량 7개, 세로 설치수량 5개로 총 35개의 감지기가 요구 된다. 사양 위주설계에 비하여 월등히 적은 수의 감지기가 소요된다.

5. 결 론

성능위주설계방법은 과학적인 수단을 이용하여 가장 적절한 성능을 얻기 위하여 시도하는 것이다. 성능위주설계를 보다 깊이 연구하여 도입하면 사양위주설계보다 저렴한 공사비를 기대할 수 있다는 것이다. 위의 비교 예에서 나타나듯이 천장이 낮고 가연물이 많으면 감지기의 수량이 감소되는 것은 불가분의 관계이다. 그러나 가연물이 적고 천장이 높아지면 감지기의 수량은 급격히 증가한다(Table 6 참조). 소화작업의 개시를 발화 후 얼마나 지난 후에 할 수 있는가? 발화 후 확산이 되기 위하여 얼마의 열량이 필요한가? 실내에 있는 가연물의 종류, 가연물의 열량 등은 사양위주설계에서는 전혀 고려되지 않는 사항이다. 이 새로운 설계방법은 당장 정착하기는 어려운 문제로 보다 광범위한 소방대상물에 적용할 수 있는 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 열감지기에 대한 최적의 설치거리를 계산하고 비교하였다. 천장의 구조가 복잡하

거나 철골구조물 등으로 구획된 경우에는 적용할 수 없는 상황으로 매우 기초적인 것이지만 평평하고 개방된 천장에 적용할 수 있는 결과를 보인다. 소방시설을 설계하는 문제는 단순히 교본에 의한 기기의 나열이 아니라 인명과 재산을 보호한다는 대 명제가 전제되어야 하는 것 이므로 충분한 내부적인 논리가 뒷받침 되어야 할 것이다. 소방시설의 종류가 다양하게 존재하지만 어느 하나 소홀하게 설계되어서는 안 될 것이다. 금후로 설계자의 입장에서는 과학적인 설계기법에 대하여 본질을 이해하려는 자세가 필요할 것이다. 본 고에서 제시하는 기법은 이미 수년 전부터 선진국에서 논의 되어왔던 내용을 토대로 직접 계산을 쉽게 하기 위한 TOOL을 제작하고 실험을 하였다. 작은 시도이지만 경보설비 분야에 있어서 설능위주설계의 단초가 될 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 소방방재청, 한국화재안전기준(2008).
2. Jun-ichi Watanabe and Shigeki Shimomura, “火災感知器動作予測のための天井熱煙流解析法”, 松下電工技報(Nov. 2002).
3. Lee F. Richardson and Wayne D. Moore, P.E. “National Fire Alarm Code Handbook”, pp.597-606 (2007).
4. 조호성, “성능위주 소방설계”(2008).
5. NFPA, “Fire Alarm Code 72”(2007).
6. 한국화재보험협회, “방화공학핸드북”(2008).
7. 최영화, “외국의 PBD 관련 선진외국의 제도”(2008).
8. 日本 消防廳, “消防法施行規則 第23”(2009).
9. 심대홍, “A Study Performance Based Design for Fire Detection System”, 서울 産業大學校 碩士學位論文(2003).