

# 성능위주설계를 위한 『SFPE 방화공학 핸드북』의 활용

현행 규제위주의 규정에 대한 대체 방법으로서 성능 위주의 대안을 제시한 SFPE 방화공학 핸드북의 일부 내용을 소개하고자 한다. 이 책은 설계자가 원할 경우 이용할 수 있는 방법들을 제시하고 있는 데 이해를 돕기 위한 다양한 예시들도 포함되어 있다.

정리 | 유호정 협회 위험조사부 사원

SFPE 방화공학핸드북 발간에 즈음하여 이 핸드북에 수록되어 있는 방대한 내용 중 일부를 발췌, 편집하여 소개하고자 한다. 현행 규제위주의 규정에 대한 대체 방법으로서 성능위주의 대안을 제시하지만, 이 내용이 규제위주의 코드를 대체하는 것은 아니며 설계자가 원할 경우 규제위주의 요구사항 대신 이용할 수 있는 방법으로서 제시하고자 하는 것이다.

성능위주의 설계의 예로는 현행 코드에서는 예측하지 못한 독특한 문제에

대한 화재안전설계의 개발을 들 수 있으며, 성능위주의 선택사항에서는 목적, 목표, 원하는 안전 수준, 관련된 화재 시나리오, 가정 및 안전계수에 대하여 해석상의 일치를 요구하고 있고, 개념의 이해를 돕기 위하여 간단한 예들을 포함시켰다.

## 감지기의 설계(4-1장 감지 설비의 설계 中)

성능위주설계를 위해서는 일반 규제위주 요구사항이 아닌 구체적인 성능 목표가 충족되어야 한다. UL 등에서 정하는 일반 규제위주 요구사항 중 하나가 84m<sup>2</sup> 면적 혹은 9m 길이마다 감지기를 설치하는 것이다.

규제위주설계에서는 해당 설비의 감지 속도 및 감지시 화재규모를 알 수 없거나 구체적으로 고려하지 않는다. 아울러 화재제어



를 위해 경보에 대한 조치를 취해야 할 경우에는 예상 손실도 알 수 없다.

### UL과 FMRC의 규제위주 설계기준

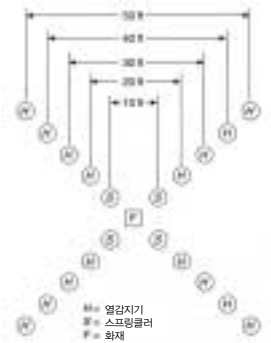
미국에서 열감지기를 이용한 화재감지설비의 설계를 위해 현재 많이 적용되고 있는 방식은 UL이 정해 놓은 간격으로 감지기를 배치하는 것이다. '규정 배치간격' (Listed Spacing)은 실물 크기 화재시험을 통해 결정된다.

UL 시험에서는 시험을 시행하는 실내 중앙에 변성알코올 (190-Proof)로 이루어진 연소용기를 배치한다. 표시온도가 71℃인 스프링클러헤드를 한 변의 길이가 3m(10ft)인 정사각형 형태로 천장에 설치한 뒤, 정사각형 중앙에 화재가 발생한다. 화재와 천장 간의 거리는 설치한 스프링클러헤드가 약 2분 이내에 작

동하도록 조정한다.

[그림 1]에 제시된 바와 같이 시험대상 기종의 감지기를 한 변의 길이가 각각 6.1, 9.1, 12.2 및 15.2m인 정사각형의 각 코너에 배치한다. 스프링클러헤드의 작동 전에 작동시킬 마지막 감지기의 간격은 해당 감지기에 대한 규정 배치간격이 된다. FMRC는 이와 유사한 시험 절차를 적용해 감지기 배치간격 승인 수치를 도출해 낸다.

대부분의 코드는 UL 혹은 FMRC가 규정하는 간격으로 감지기를 배치하도록 규정하고 있다. 규제위주 설계에 대한 보완으로서 NFPA 72(National Fire Alarm Code®)에서는 높은 천장, 보, 공기 이동 등을 고려해 규정 배치간격보다 좁은 설치 간격을 적용하도록 하고 있다. 천장이 높으므로 불기둥이 상승 중에 더 많은 주위 공기를 혼입시키기 때문이다.



■ 그림 1-1. 감지기 시험 배치도

### SFPE에서 설명하는 성능위주설계

감지설비의 설계에서는 감지기의 배치에 대한 성능위주설계에 대한 구체적인 지침을 제시해주고 있다. 우선 감지기의 열전달에 대한 분석을 통해서 RTI(Response Time Index)를 구하고, 정상상태 화재와 준-정상상태, 벽급수형태로 빠르게 성장하는 화재 등에 대해서 감지기의 응답시간을 결정하는 방법을 보여준다. 물론 여기에서도 여러 가정과 추측이 들어가므로 완벽한 설계라고 하기 힘들다. 성능위주설계의 흐름을 보여준다는 측면에서 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

### 화재시 일정 시간이 지난 후의 열감지기 온도 추정

**예제** 적재해 놓은 목재 펠릿이 6m 높이의 평천장 아래에서 연소한다. 주위 온도는 20℃이다. 불기둥 중심으로부터 감지기까지 거리가 6m라고 가정한다면, 노출 120초 후에 RTI가 55m<sup>1/2</sup>s<sup>1/2</sup>인 천장부착 열감지기의 온도는?

**풀이** 이전 예제에서와 마찬가지로 이 감지기는 발달된 천장 분출 내에 위치해 있다. <표 1-1>에는 열방출률이 제시되어 있다. 첫 번째 단계는 표 안의 열방출률 각각에 대해 온도 변화와 속도를 계산하는 것이다. 0초에서 10초간의 기간 동안 열방출률은 5kW로 주어진다. 감지기 지점에서 천장 분출의 속도 및 온도 변화는 다음과 같다.

$$T_g - T_a = \frac{5.38 \left(\frac{\dot{Q}}{r}\right)^{1.0}}{H} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{g2} - T_g = \frac{5.38 \left(\frac{\dot{Q}}{6}\right)^{1.0}}{6} = 0.794^\circ\text{C}$$

$$T_{g1} = 20.794^\circ\text{C}$$

$$u = \frac{(0.28)(1.0)(1.0)}{\rho \cdot h} \text{ m/s}$$

$$u_1 = \frac{[0.28(5^{1.0})(6)^{1.0}]}{\rho \cdot h} = 0.188 \text{ m/s}$$

그리고 난 뒤 좁은 간격에 대해 온도 및 속도가 정상 상태라는 가정을 통해, 그와 같은 노출 결과로 일어나는 감지기의 온도 변화  $\Delta T_d$ 를 계산한다.

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{T_g - T_d}{\tau} = \frac{u^{1/2}(T_g - T_d)}{RTI}$$

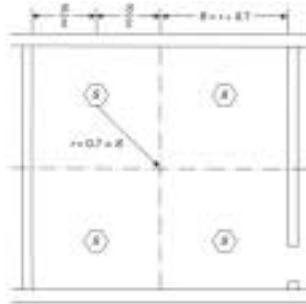
$$\Delta T_d = T_{d,n} - T_{d,n-1} = \frac{u^{1/2}(T_{g,n} - T_{d,n-1})}{RTI} \Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{d,n} = \left[ \frac{u^{1/2}(T_{g,n} - T_{d,n-1})}{RTI} \Delta t \right] + T_{d,n-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

처음에 대상 감지기는 고온 기체에 노출되지 않고 주위 온도를 유지한다. 첫 번째 단계 혹은 간격에 대해 감지기를 노출시키고, 그로 인한 간격 종점의 감지기 온도( $T_d$ )를 계산한다.

$$T_{d,n} = \left[ \frac{u^{1/2}(T_{g,n} - T_{d,n-1})}{RTI} \Delta t \right] + T_{d,n-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

이러한 과정을 간단히 하기 위해 [그림 1-2]에 제시한 것과 같은 도표 혹은 <표 1-2>의 스프레드시트를 작성해 계산을 완료한다. 마지막으로 소수점 둘째 자리에서 반올림한다. 노출 120초 후에 감지기 온도는 대략 32°C 정도이다. 따라서 해당 감지기의 정격 온도가 57°C라면 아무런 응답이 없을 것이다.



■ 그림 1-2. 감지기 배치간격

■ 표 1-1. 열방출률

$\Delta t$	$\dot{Q}$	$\Delta t$	$\dot{Q}$
0	0	100	480
10	5	110	567
20	19	120	675
30	42	130	790
40	75	140	919
50	117	150	1055
60	169	160	1200
70	230	170	1355
80	300	180	1519
90	380		

■ 표 1-2. 스프레드시트 계산결과

t	$\dot{Q}$	$\Delta T_g$	$T_g$	u	$\Delta T_d$	$T_d$
0	0	0		0	0	20
10	5	0.794	20.794	0.188	0.063	20.063
20	19	1.934	21.934	0.294	0.164	20.247
30	42	3.281	23.281	0.383	0.341	20.588
40	75	4.830	24.830	0.464	0.525	21.114
50	117	6.496	26.496	0.538	0.718	21.832
60	169	8.301	28.301	0.609	0.916	22.749
70	230	10.194	30.194	0.674	1.112	23.861
80	300	12.170	32.170	0.737	1.267	25.158
90	380	14.247	34.247	0.797	1.476	26.633
100	469	16.393	36.393	0.855	1.641	28.274
110	567	18.603	38.603	0.911	1.792	30.066
120	675	20.896	40.896	0.965	1.935	32.001

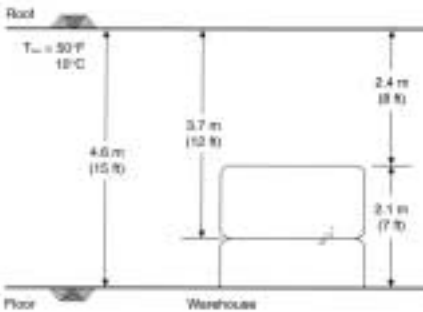
### 천장 높이에 따른 감지기 설치간격, 응답시간의 계산 과정

이번 예제에서는 천장 높이 대 감지기 설치간격과 응답시간을 계산하는 과정을 보여주고 있다. 즉 법규정에 정해져 있는 감지기 간격으로 설치하였을 경우에 원하는 수준의 방호를 할 수 있는지에 대한 검증작업의 도구로 활용될 수 있다. 이렇듯 감지기의 설치에서 성능위주설계를 가능케 하는 방법론을 제시한다. 소파 등의 가연물을 저장하는 창고에서 주어진 조건에서 화재가

주변 물품으로 전파되기 전에 화재를 감지할 수 있는 감지기 배치 간격을 창고의 높이에 따라 계산하고, 천장높이에 따라 응답시간이 어떻게 되는지를 보여준다.

**예제**

소파 및 기타 가구를 보관하는 창고가 있다. 보관된 소파는 NBS에서 가구 열량계로 시험한 것과 유사한 제품이다. 연소 특성은 Test 38에서 사용한 소파와 유사하다고 가정한다. 이 때,  $\alpha = 0.1055\text{kW/s}^2$ ,  $t_{lg} = 100\text{s}$ , 그리고 최대 열방출률 = 3,000kW. 소파는 단층 혹은 이층으로 보관한다. 대류 열전달 비율은 65%라고 가정한다. 해당 건물의 지붕 및 천장은 평탄하다. 바닥에서 천장까지의 거리는 4.6m이다. 소파를 이층으로 쌓을 경우, 가연물 포장재의 상단에서 천장까지의 거리는 2.4m이다. 창고 내 온도는 10°C 정도로 유지한다. (그림 2 참조)



■ 그림 2. 창고

**풀이**

해당 소유자가 정한 최대 허용 재산 손실 목표를 근거로 할 때, 두 번째 가연물 포장재까지 화재가 확대되기 전에 화재를 감지하여 소방서에 통보

하는 것이 바람직하다. 이 핸드북에 제시되어 있는 다른 기법과 함께 해당 정보를 이용해 두 번째 품목이 발화될 수 있는 시점을 구할 수 있다. 예를 들어 2m의 통로를 가로지르는 가구는 총 열방출률이 3,000kW에 이르는 시점에 발화된다는 결론을 얻을 수 있다. 그렇다면 목표는 화재의 열방출률이 3,000kW에 이르기 전에 화재를 제어 혹은 소화할 수 있을 만큼 미리 화재를 감지해야 하는 것이다. 이 예제에서는 화재의 총열방출률이 약 2,000kW에 이르는 시점에 화재를 감지해야 한다는 가정을 한다.

해당 화재감지설비는 제어반(이는 다시 해당 지역 소방서에 연결되어 있음)에 연결된 여러 개의 정온식 감지기로 구성되어 있다. 적용하고 하는 감지기의 정격 온도는 57°C이고 RTI는 42 m<sup>1/2</sup>s<sup>1/2</sup>이다.

문제는 이 화재를 감지하기 위한 감지기 배치간격을 구하는 것이다. 관련 컴퓨터 프로그램을 작동시킬 경우, 이용자는 상기의 모든 정보에 대해 도움을 얻을 수 있다. 이 예제에서는 천장으로부터 발화장소까지 거리를 제외한 데이터를 결정한다. 가연물 상단에서 천장까지의 거리(2.4m)를 적용해 계산할 경우, 화재가 2,000kW의 열방출률에 도달하는 시점에 감지기가 응답하기 위해서는 7.3m의 간격으로 감지기를 설치해야 한다.

최악의 경우에 대한 분석을 보장하기 위해 바닥에서 천장까지의 거리(4.6m)를 적용할 수 있다. 이 경우, 감지기 배치간격은 5.9m로 해야 한다.

■ 표 2. 천장 높이(혹은 가연물 위쪽에서의 높이) 대 감지기 배치간격

Ceiling Height, H (m)	Required Spacing, S (m)
2.4	10.3
3.7	9.2
4.6	8.4

■ 표 3. 천장 높이(혹은 가연물 위쪽에서의 높이) 대 응답시간

Ceiling Height, H (m)	Response Time, t, (s)
2.4	140
3.7	150
4.6	160



보다 현실적인 최악의 시나리오는 소파를 단층으로 적재하는 경우일 것이다. 바닥 위에 하나의 소파를 놓으면 가연물로부터 천장까지의 거리는 3.7m 정도이다. 이 경우 감지기 배치간격은 6.5m이어야 한다.

이 결과가 <표 2> 및 <표 3>에 정리되어 있다. 해당 표에는 천장 높이와 감지기 응답 간의 관계가 명확히 제시되어 있다. 화재로부터 천장까지의 거리가 커질수록 해당 설비 목표를 충족시키기 위해 감지기 배치간격은 더 가까워져야 한다. 바닥에서 천장 간 거리를 기준으로 하는 설계는 최악의 조건을 의미하는 보수적인 방법이다. 보다 현실적인 설계는 가장 가능성 있는(혹은 최대 예상) 가연물 및 감지기 간 수직 간격을 기준으로 한다.

### 스프링클러헤드 배치에 따른 화재 규모 변화

여기서는 폐쇄형 스프링클러헤드의 배치간격을 여러 가지 안으로 설계하여서 그 결과를 도출해보고 어떤 간격으로 설치하는 것이 적절한지에 대해 고찰하는 과정을 보여주고 있다.

**예제** 대형 전시실에 스프링클러설비가 설치되고 있다. 해당 건물에는 골조가 노출되어 있는 트러스로 지지된 평지붕이 놓여 있다. 지붕 데크 하단으로부터 바닥까지의 거리는 12m이다. 주위 온도는 거의 5℃ 이상을 유지한다.

해당 스프링클러설비에 대해 3가지 설계(안)가 제시되었다. 세 가지 모두 규정 면적에 대해 동일한 밀도의 물을 공급하도록 설계되어 있다. 각 설계(안)에 적용된 스프링클러헤드는 정격 온도가 74℃이고 RTI가 110m<sup>1/2</sup>s<sup>1/2</sup>이다. 3개 안 간의 유일한 차이점은 스프링클러헤드 간의 배치간격과 물을 공급하는 배관뿐이다. 제 1안에서는 3.0m 간격의 정사각형 배열을 적용하고 있고, 제 2안 및 제 3안에서는 각각 3.7m 및 4.6m 배치간격의 정사각형 배열을 사용하고 있다.

**풀이** 서로 다른 세 가지 간격이 설비 응답 시 화재규모에 미치는 영향은 무엇인가? 두 가지 화재 시나리오를 가정한다. 제 1시나리오에서는  $t_g = 200s$ 에 대해 화재가 중간 정도의 속도로 성장한다. 반면 제 2시나리오에서는  $t_g = 500s$ 에 대해 화재가 보다 느린 속도로 성장한다. 두 가지 시나리오 모두에 대해 대류 분율은 75% 정도로 가정한다. 반올림 과정을 거친 계산결과는 <표 4>에 제시되어 있다.

■ 표 4. 스프링클러헤드 설치 간격이 응답시 화재규모 및 응답 소요시간에 미치는 영향

S (m)	$t_g = 200 s$		$t_g = 500 s$	
	$t_r$ (s)	$\dot{Q}_T$ (kW)	$t_r$ (s)	$\dot{Q}_T$ (kW)
3.0	350	3300	800	2700
3.7	370	3600	840	3000
4.6	400	4100	890	3400

계산결과에서 볼 수 있듯이 설치 간격을 3.0m에서 4.6m로 50% 가량 증가시킬 때, 화재규모는 25% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 설치 간격을 늘릴 경우, 설비 원가가 감소할 수도 있다. 그러나 설치 간격을 줄일 경우 스프링클러설비의 조기 응답 가능성이 높아지게 된다. 방화기술자는 이런 식의 분석을 통해 전체적인 프로젝트 목표에 가장 적합한 설비를 선택할 수 있도록 도울 수 있다.

### 격납고의 화재감지기 선정과 배치 예

여기서는 항공기 격납고의 중요한 잠재 화재 원인인 항공유 화재를 감지하기 위한 불꽃감지설비의 설계를 위한 개념적 설계 흐름도를 보여준다.

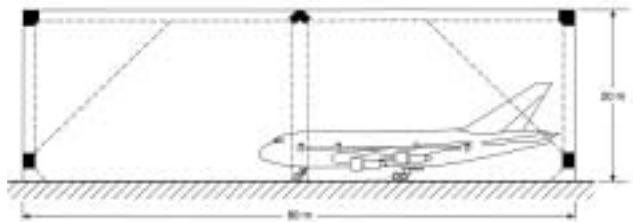
**예제** 설계 목표는 고정식 화재진압설비를 작동시키기 위해 대형 격납고에서 발생한 JP4 항공유에 의한 1.0m<sup>2</sup> 크기의 풀 화재를 감지하는 것이다. 격납고의 크기는 50m×80m×20m(천장 높이)이다. 천장 높이의 주위 온도는 계절 및 하루 중 시간에 따라 15~60℃사이에서 변화한다. 습도 또한 계절에 따라 변화하고 때에 따라서는 상대습도가 90%에 이를 수도 있다. 설비 설계를 위해 어떤 단계를 거쳐야 하는가?

**풀이** 첫 번째 단계는 감지장치를 선정하는 것이다. 예상 화재가 탄소를 기반으로 하고 있으므로 4.3 마이크론의 적외선 감지장치가 적합하다. 또한 적외선 감지기는 일반적으로 자외선 감지기보다 경계 면적이 넓으므로, 이 경우에는 자외선 감지에 비해 경제적이다. 그리고 난 뒤에는 간섭복사에너지를 방출하리라 예상되는 발원지를 판정하고 해당 발원지에 대한 내성이 있는 장치를 선정해야 한다. 이와 같은 오작동 응답 내성은 필터링 및 다중 센서 활용(2-채널 혹은 3-채널 감지기) 혹은 그 두 가지 방법의 조합을 통해 구현할 수 있다.

그 다음 단계는 해당 제작 업체의 데이터를 검토해 임계화재(1.0m<sup>2</sup>) 규모를 기준으로 설치기준을 정하는 것이다. 일반적으로 이 단계는 화재규모 대 거리 곡선 혹은 도표로부터 시작된다. 이 곡선이 작성되면, 그 다음에는 감지기의 설치 높

이 및 측면거리 한계를 결정해야 한다. 측면거리는 센서 시야 측면에서 중요성을 갖는다.

이러한 정보가 주어지면 장치 배치도를 설계할 수 있다. 배치도 설계시에는 예상 가능한 모든 장애물을 고려하고 해당 격납고의 모든 부분에 대한 결과를 감시해야 한다. 이와 같은 배치도 설계의 한 예가 [그림 3]에 제시되어 있다.



■ 그림 3. 항공기 격납고에 대한 적외선 감지기 배치도

배치도의 일부로서, 각 변위, 온도 및 습도 때문에 발생하는 감도의 감쇠로 인한 영향을 고려해야 한다. 제작 업체 기준은 해당 변수에 따라 변화하므로, 이 예제의 풀이에서는 그 영향을 설명하기 위해 일반적 변수를 사용한다.

예를 들어 제안된 배치도에는 시야 각도가 45°인 장치가 사용된다. 1.0m<sup>2</sup>의 화재를 40m 거리에서 감지할 수 있는 공칭 감도를 갖고 있고, 각도 변화로 인해 감도가 30% 감쇠한다고 가정하면, 45° 각도에서 1.0m<sup>2</sup> 화재를 감지할 수 있는 거리는 28m가 된다. 해당 제작 업체의 데이터 검토 결과, 온도에 의한 추가적인 감도 감쇠가 예상될 경우(예를 들어 50℃에서)에는 거리가 26.8m 정도로 감소한다. 습도에 의한 추가적인 감도 감쇠가 예상될 경우(예를 들어 90%에서)에는 45°에서 감지 거리가 25.6m 정도가 된다.

이 예제에서는 45°에 대한 시야 거리가 최대 20m이고, 설계 결과는 유효하다고 판단된다. 만약 감도가 감쇠해 감지 거리가 20m 미만으로 떨어진다면, 배치도를 수정하거나 다른 장치를 사용해야 한다. 어떤 경우든 제작 업체의 문헌을 참조해 가연물, 거리, 각도 변위 및 환경 조건에 의한 감지기 감도의 증감을 판단해야 한다. 이외에도 연기감지기의 성능위주설계에 대해서도 설명하고 있으며, 화재경보의 가청, 가시 한계에 대한 설계에 대해서도 논하고 있다. (M)

※ 본문에 나오는 수식의 상당수는 실험을 통해서 도출된 실험식(empirical equation) 임.