

스프링클러헤드의 소화성능 확보를 위한 요건 및 설계 적용에 관하여

김 기 옥

한국화재보험협회 부설 방재시험연구원
(kokim@kfpa.or.kr)

1. 서 론

가연물의 종류, 가연물의 양, 가연성(열방출률) 및 가연물의 배치상태 등에 따라 화재강도 및 화재지속 시간이 달라지며, 화재가 성장하기 전 스프링클러헤드로부터 소화수의 방출 유무가 결정되는 스프링클러헤드의 감열체에 대한 감도특성과 스프링클러헤드로부터의 살수밀도, 물방울의 모멘텀(momentum), 입자크기 등에 대한 방사특성이 스프링클러헤드의 소화성능 유무를 결정한다고 할 수 있다. 스프링클러헤드의 소화성능에 대한 신뢰성을 높이기 위해서는 열기류의 온도·속도 및 작동시간에 대하여 스프링클러헤드의 반응을 예상한 열적 특성인 반응시간지수(Response Time Index, 이하 RTI라 한다.)와 전도계수(Conductivity factor, 이하 C라 한다.) 그리고 스프링클러헤드의 방사특성 요소인 방출계수(K-factor), 살수밀도(water density), 방호면적, 스프링클러헤드의 설치간격 등에 대한 데이터를 시험을 통하여 검증하는 것이 필요하다. 이러한 감도 및 방사특성 관련 시험데이터를 기반으로 스프링클러헤드의 소화성능 여부를 확인하기 위한 화재시험은 재산손실의 최소화 및 인명안전을 위하여 필수적인 성능요건이라 할 수 있다. 이에 본고에서는 표준형 스프링클러헤드의 소화성능에 영향을 끼치는 감도시험, 살수분포시험 및 화재시험의 성능요건 및 설계적용에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 시험방법 및 성능요건

2.1 감도시험

스프링클러헤드의 감도는 화재시 발생하는 열기류의 온도·속도 및 작동시간에 대하여 스프링클러헤드의 반응을 예상한 반응시간지수(RTI)와 스프링클러헤드의 감열체가 주위로부터 흡수된 열량 중 방출되는 열손실량에 대한 특성치인 전도계수(C)에 의해 결정된다. 스프링클러헤드의 반응시간지수를 구하기 위한 투입 시험(plunge test)과 전도계수를 구하기 위한 연장 투입 시험(prolonged plunge test)은 스프링클러헤드 설치부의 열기류 온도 및 속도를 균일하게 제어할 수 있는 감도시험장치(그림 1)에 의한다.

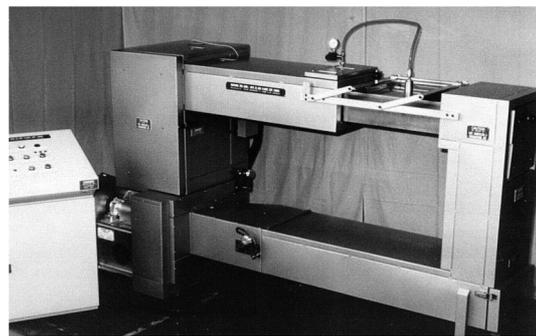


그림 1. 감도시험장치

2.1.1 반응시간지수(RTI)

스프링클러헤드의 감도성능은 스프링클러헤드의 유수로(water pathway)를 막고 있는 감열체의 열용

량, 비체적, 공칭작동온도(표시온도) 등에 따라 달라진다. 반응시간지수는 스프링클러헤드를 표 2의 기류온도 및 기류속도를 갖는 감도시험장치의 풍동 속에 그림 2, 그림 3과 같은 표준방향 및 최악의 방향으로 설치하여 스프링클러헤드가 작동할 때까지의 시간을 측정하여 아래의 반응시간지수 산출식에 대입하여 계산한다. “표준방향”이라 함은 대칭 감열체인 경우에는 공기의 흐름이 유수방향과 후레임의 평면이 서로 직각이 되는 방향을, 비대칭 감열체인 경우에는 공기의 흐름이 유수방향과 반응시간이 가장 짧게 소요되는 후레임의 평면과 직각을 이루는 방향을 말한다. 또한 “최악의 방향”이라 함은 공기의 흐름과 유수방향이 서로 수평이 되도록 설치되어 감열체와 기류의 접촉이 부족함에 의해 방해되게 설치되어 반응시간지수가 가장 큰 방향을 말한다.

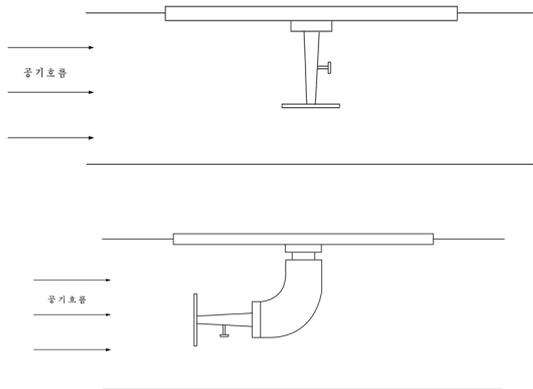


그림 2. 스프링클러헤드의 설치방향(위: 표준방향, 아래: 최악의 방향)



그림 3. 표준방향 설치상태의 스프링클러헤드

스프링클러헤드의 형식승인 및 검정기술기준 (KOFEIS 0501)¹⁾에서는 감열체로부터 열손실량의 특성치인 전도계수를 고려하지 않고 반응시간지수를 산출하고 있으나 한국산업표준 KS B ISO 6182-1²⁾과 외국 시험기관의 UL 199³⁾, FM Class Series 2000⁴⁾ 기준 등에서는 스프링클러헤드의 작동시간을 보다 정확히 예측할 수 있도록 전도계수를 적용하여 반응시간지수를 산출하고 있다. 아래의 반응시간지수 산출식에 나타난 것처럼 스프링클러헤드의 전도계수가 커지면 반응시간지수가 커지는데 이는 스프링클러헤드의 작동시간이 지연됨⁵⁾을 의미하므로 스프링클러헤드의 보다 정확한 작동시간을 예측하기 위해서는 반응시간지수 산출식에 전도계수를 적용할 필요가 있다. 스프링클러헤드의 설치방향이 표준방향일 때의 전도수를 적용한 반응시간지수 산출식⁶⁾은 다음과 같다.

$$RTI = \left\{ \frac{-t_r u^{1/2}}{\ln[1 - \Delta T'_{ea}(1 + C/u^{1/2})/\Delta T'_g]} \right\} \times \left(1 + \frac{C}{u^{1/2}} \right)$$

여기서, RTI : 반응시간지수

t_r : 작동시간(초)

$\Delta T'_{ea}$: 작동온도와 주위온도의 차(°C)

$\Delta T'_g$: 기류온도와 주위온도의 차(°C)

u : 기류속도(m/s)

C : 전도계수

스프링클러헤드의 설치방향이 최악의 방향일 경우 반응시간지수 RTI_{wc} 산정은 아래 식에 의하며 전도계수 C 는 최악의 방향에서의 반응시간지수 RTI_{wc} 를 내포하는데 이것은 반복적으로 구한다.⁶⁾

$$RTI_{wc} = \left[\frac{-t'_r u^{1/2}}{\ln \left[1 - \Delta T'_{ea} \left\{ 1 + C \left(\frac{RTI_{wc}}{RTI} \right) / u^{1/2} \right\} / \Delta T'_g \right]} \right] \times \left\{ 1 + C \left(\frac{RTI_{wc}}{RTI} \right) / u^{1/2} \right\}$$

여기서, RTI_{wc} : 최악의 설치방향에서의 반응시간지수

t'_r : 스프링클러 헤드의 반응시간(s)

u' : 열기류속도(m/s)

$\Delta T'_{ea}$: 작동시험시의 평균작동온도로부터
주위온도를 뺀 온도(°C)

$\Delta T'_g$: 열기류온도로부터 주위온도를 뺀 온
도(°C)

C: 표준방향에서의 전도계수

표 1. 반응시간지수(RTI) 시험을 위한 열기류 온도 및 속도⁶⁾

표시온도 구분	표준 반응		특수 반응		조기 반응	
	기류온도 (°C)	기류속도 (m/s)	기류온도 (°C)	기류속도 (m/s)	기류온도 (°C)	기류속도 (m/s)
57~77	191~203	2.4~2.6	129~141	2.4~2.6	129~141	1.65~1.85
79~107	282~300	2.4~2.6	191~203	2.4~2.6	191~203	1.65~1.85
121~149	382~432	2.4~2.6	282~300	2.4~2.6	282~300	1.65~1.85
163~191	382~432	3.4~3.6	382~432	2.4~2.6	382~432	1.65~1.85

2.1.2 전도계수(C)

전도계수(Conductivity : C)라 함은 스프링클러헤드의 감열체가 주위로부터 흡수된 열량 중 스프링클러헤드 연결배관 및 수로(Water way) 등으로 방출되는 열손실량에 대한 특성치로서 연장 투입 시험(prolonged plunge test)에 의하여 산정한다. 전도계수는 ISO, UL, FM, NFPA 기준 등에서 이미 적용하고 있으며 국내기준도 국제기준에 부합하기 위하여 한국산업표준 KS B ISO 6182-1을 제정(2007.11.12)하였으나 스프링클러헤드의 형식승인 및 검정기술기준에서는 전도계수를 적용하고 있지 않아 개정이 필요하다. 전도계수 산출을 위한 시험방법의 주요 내용은 다음과 같다.

전도계수를 결정하기 위하여 스프링클러헤드를 표 2의 낮은 열기류온도에서 최대 15분 동안 낮은 열기류속도로부터 가장 높은 열기류속도에 이르기까지 다양한 열기류속도에 투입하며, 15분 이내에 작동하지 않을 때의 열기류속도 (u_i)와 작동할 때의 열기류

속도 (u_h)를 측정한다. 스프링클러헤드가 가장 높은 열기류속도에서 작동하지 않을 경우 표 2로부터 한 단계 높은 열기류온도에서 시험을 반복한다. 시험 중에 스프링클러헤드가 작동하지 않는 경우에는 새로운 시험체를 사용하여야 한다.

전도계수를 결정하기 위한 열기류속도는 아래 식에 따른 연속적인 열기류속도 사이에서 선택되어야 한다.

$$\left(\frac{u_h}{u_i}\right)^{1/2} \ll 1.1$$

여기서, u_h : 시험체 설치부에서 시험체가 작동할 때의 열기류속도(m/s)

u_i : 시험체 설치부에서 시험체가 15분 이내에 작동하지 않을 때의 열기류속도(m/s)

C_x 는 아래의 식을 사용하여 2개의 열기류속도에서 계산된 2개의 C_n 값의 산술평균으로 산정한다.

$$C_n = \left(\frac{\Delta T'_g}{\Delta T'_{ea}} - 1\right) u^{1/2}$$

여기서, $\Delta T'_g$: 열기류온도에서 스프링클러헤드 마운트 온도를 뺀 값(°C)

$\Delta T'_{ea}$: 작동온도시험의 평균작동온도에서 스프링클러헤드 마운트 온도를 뺀 값(°C)

u : 열기류속도(m/s)

스프링클러헤드의 전도계수는 연속적인 과정을 3회 반복하고 3개의 C_x 값에 대한 산술평균을 계산함

표 2. 시험구간(스프링클러헤드 위치)에서 전도계수를 결정하기 위한 시험조건 범위⁶⁾

스프링클러헤드 공칭온도(°C)	열기류온도 (°C)	선택된 온도로부터 시험 중 열기류온도의 최대편차(°C)
57	85~91	±1.0
58~77	124~130	±1.5
78~107	193~201	±3.0
121~149	287~295	±4.5
163~191	402~412	±6.0

으로써 결정한다.

스프링클러헤드의 성능요건은 표시온도 구분에 따라 시험했을 때 표 3과 같이 표준반응형, 특수반응형, 조기반응형에 적합한 반응시간지수 및 전도계수를 가져야 하며, 또한 작동시 감열체 부분은 살수의 방해가 되지 않도록 헤드로부터 완전하게 이탈되어야 한다.

표 3. 반응시간지수(RTI) 및 전도계수(C)

구분	RTI (m·s) ^{0.5}	C(m/s) ^{0.5}	움셋각 (°)
표준형	350	1.0	0
표준형	250	2.0	0
표준형	600	5.0	15
특수형	80	1.0	0
특수형	200	2.5	20
조기반응형	50	0.8	0
조기반응형	30	1.0	0
조기반응형	125	2.0	25

(단위 : cm)

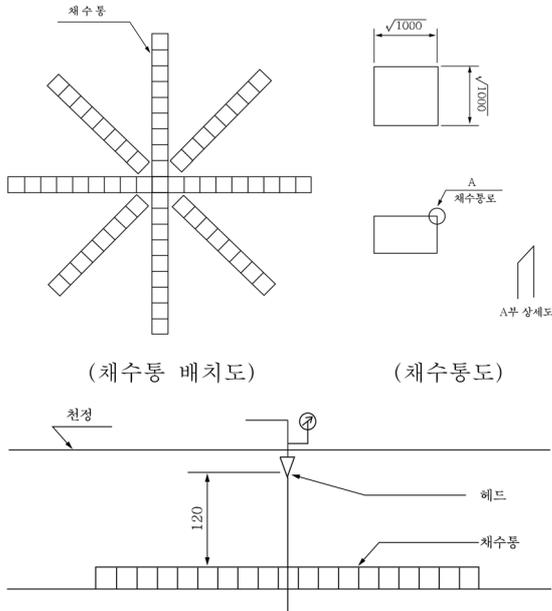


그림 4. 스프링클러헤드 살수분포 시험장치

2.2 살수분포시험

스프링클러헤드는 단위시간당 방수량, 헤드의 설치간격 및 설치높이의 조건에서 규정치 이상의 살수 밀도에 의해 성능요건을 정하고 있다. 즉, 스프링클러헤드로부터 방사된 소화수가 단위 바닥면적당 규정치 이상의 살수밀도를 갖는 범위 내에서 스프링클러헤드의 설치간격 및 방호면적을 정하고 있는 것을 알 수 있다.

스프링클러헤드의 형식승인 및 검정기술기준의 경우 그림 4와 같이 스프링클러헤드의 설치높이가 일반적인 현장 설치높이보다 훨씬 낮은 높이(스프링클



그림 5. 표준형헤드 살수분포 시험(방사압력 0.1 MPa)

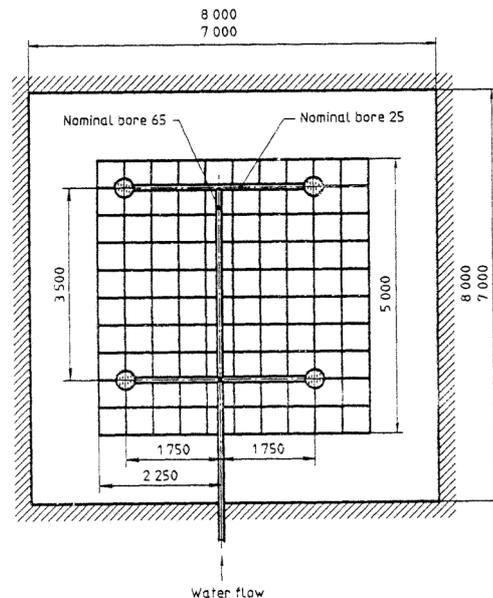


그림 6. 살수분포 시험실 개요도(측정면적 12.25 m²)⁶⁾

표 4. 국내의 살수분포 시험조건(상, 하향형, K5.6 기준)

기준 명		헤드배치	채수통으로부터 헤드설치높이[m]	헤드설치 간격 [m×m]	채수통수 및 배치형상
국내 기준	KOFEIS 0501	1개	1.2	-	69개, 8방향
	KS B ISO 6182-1	4개 정방향	2.7	3.5×3.5 3×3	100개, 정방향
국외 기준	ISO 6182-1	4개 정방향	2.7	3.5×3.5 3×3	100개, 정방향
	FM Class Series 2000	4개 및 6개 정방향	2.3	3×3	16개, 정방향
	UL 199	1개	1.22	-	10개, 회전식
4개 정방향		2.29	3.05×3.05	16개, 정방향	

표 5. 국내의 살수분포 성능요건(상, 하향형, K 5.6 기준)

기준	성능요건			
KOFEIS 0501	(1) 헤드의 축심을 중심으로 하는 동심원상의 각각 채수통의 채수량 평균치의 분포곡선이 동 기준에 나타내는 살수분포 곡선보다 위에 있어야 한다. (2) 유효살수반경 r2.3인 헤드의 경우 헤드의 축심에서 반경 300 cm(유효살수반경 r2.6인 헤드의 경우(반경 330 cm)의 범위안의 채수량 Q와 방수량 Q의 비율이 60% 이상이어야 한다. (3) 채수량의 최소치가 규정 곡선의 70% 이상이어야 한다(방수압력이 0.1 MPa 이하의 경우에는 제외).			
ISO 6182-1	살수밀도 [mm/min]	헤드당 방수량 [l/min]	살수밀도의 50% 미만의 채수통 허용수	
	5.0	61.3	5	
	15.0	135	4	
FM Class Series 2000	헤드배치	헤드당 평균 방수량 [mm/min]	최소 평균 채수량 [mm/min]	각 팬의 최소량 [mm/min]
	4개	48.4	5.2	3.9
		62.8	6.8	5.1
		90.8	9.8	7.3
6개	62.8	6.8	5.1	
UL 199	(1) 10 pan test 스프링클러 살수분포 패턴은 직경 16foot(4.88 m)를 초과하지 않아야 한다. 다만, 직경 4.88 m를 초과한 구역의 살수밀도가 0.03 gal/min ft ² (0.007 l/s m ²)이내인 경우는 제외 (2) 16 pan test (a) 16 pan : 평균치 이상 (b) 개개의 팬 : 평균치의 75% 이상			
	헤드당 방수량 [l/min]	최소 평균채수량 [mm/min]		
	56.7	6.4		

리헤드 디렉타에서 채수통 상단까지 1.2 m)에서 실시한 살수분포 시험데이터를 직접 설계에 적용하는 것은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

반면에 외국의 경우 표 4와 같이 스프링클러헤드의 설치높이, 설치개수 및 채수통(pan) 배치 등과 같은 시험조건을 현장설치 조건과 유사하게 설치하여 표 5의 살수분포 성능을 확인하고 있으며, 또한 살수분포 시험데이터를 스프링클러헤드의 화재시험에 활용 할 수 있어 보다 합리적인 시험방법임을 알 수 있다. 따라서 국내기준의 살수분포 시험방법은 현장설치와 부합할 수 있는 시험조건으로 개정이 필요한 것으로 판단된다.

2.3 화재시험

스프링클러헤드의 소화성능은 시험방법에서도 나타난 것처럼 천장부 온도를 정해진 온도 이하(주위 온도+277°C)로 제어하고 연소로 인한 화재모형의 최대 중량감소 비율을 20% 이내로 제한하는 화재제어 성능을 요구한다.⁶⁾

소화성능 여부를 검증하기 위한 화재시험은 정방향으로 설치된 4개의 스프링클러헤드 아래 중앙부에 표 6의 조건으로 소나무(미송) 또는 가문비나무(전나무)를 이용한 화재모형을 그림 7과 같이 설치한다. 스프링클러헤드는 그림 8과 같이 화재모형 상단으로부터 수직거리 2.3 m 되도록 설치한다. 화재모형을 최소 1분 동안 자유연소(free burn)시키거나 1분 이내에 천장온도가 760°C가 되면 4개의 스프링클러헤드로부터 물을 방사한다. 각 스프링클러헤드로부터 방수량은 1차 시험시는 60 l/min, 2차 시험시는 90 l/min으로 방수한다. 점화 30분 후 화재모형에 불꽃 또는 잔염이 있는 경우, 화재모형에 손상이 가지 않도록 1분 이내에 완전히 수동으로 소화한다. 시험 전 화재모형의 수분 함유량 6~12%에서의 무게와 시험 후 수분함유량 0%에서의 무게를 측정한다.

표 6. 목재의 크기 및 수량

수량 (개)	크기 (mm)
2	100 × 150 × 2400
13	100 × 100 × 1200
28	50 × 100 × 1200

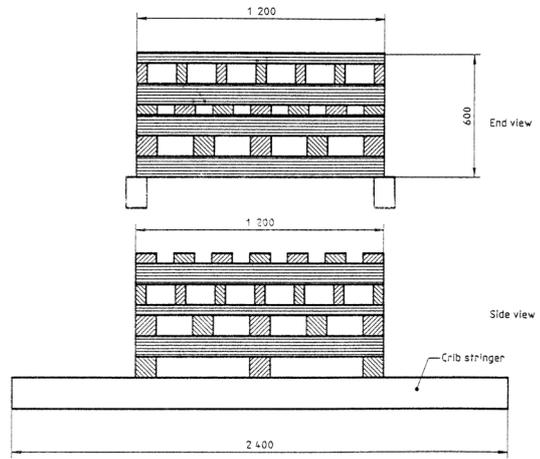


그림 7. 화재모형

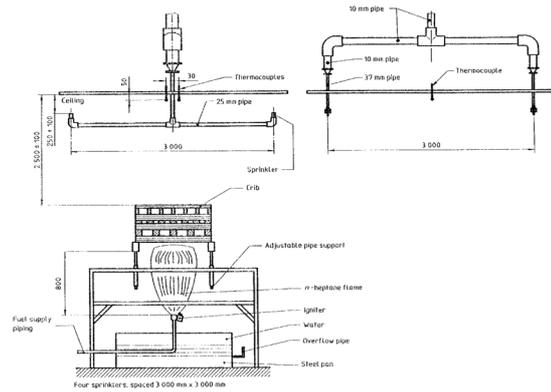


그림 8. 화재시험

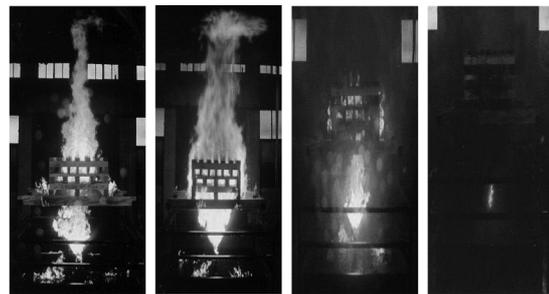


그림 9. 점화 후 경과시간(좌로부터 10초-60초-소화수 방사수동소화)

화재시험 후 측정된 천장부의 온도 및 화재모형의 중량변화로부터 스프링클러헤드의 소화성능여부를 결정한다. 스프링클러헤드의 성능요건은 아래의 온

도 이내에서 화재를 제어(fire control) 할 수 있어야 하며, 화재시험 후 화재모형의 중량손실은 시험 전 중량의 20%를 초과하지 않아야 한다.

- a. 열전대위치(화재모형 직상부 천장부 위치)의 온도는 점화 후 6분 이내에 “주위온도+530°F(277°C)” 이내이어야 한다.
- b. 열전대위치의 평균온도는 잔여 24분 동안 “주위온도+530°F(277°C)”를 초과하지 않아야 하며, 또한 연속해서 3분 동안 “주위온도+530°F(277°C)”를 초과하지 않아야 한다.
- c. 30분 후 화재모형의 중량손실은 시험 전 값의 20%를 초과하지 않아야 한다.

가연물의 점화 후 일반적인 고체 가연물의 경우 시간의 제곱승에 비례하여 성장하기 때문에 연소중인 가연물로부터의 방출열량이 적은 상태에서 화재를 감지하여 스프링클러헤드로부터 기준에서 정한 값 이상 또는 시험을 통하여 성능이 입증된 살수밀도로 가연물 및 가연물 주위에 방사되어야 위에서 언급한 최소한의 화재제어성능을 발휘할 수 있다.

스프링클러헤드의 소화성능은 디프레타(물방울이 부딪히는 반사판)의 형상, 방사압력, 오리피스크기, 스프링클러헤드와 가연물의 간격, 물방울 입자의 크기, 가연물의 연소표면으로 방사되는 물방울 입자의 모멘텀(momentum) 등이 소화성능에 영향을 미치기 때문에 화재시험을 통한 소화성능 검증은 선택이 아닌 필수시험이다. 이러한 이유로 화재시험은 ISO, FM, UL기준 등에서 스프링클러헤드의 필수시험으로 정하고 있다. 이에 국내에서도 국제기준에 부합하기 위하여 한국산업표준(KS B ISO 6182-1)을 개정하여 스프링클러헤드의 성능요건에 화재시험을 필수시험으로 적용하고 있으나 동 기준의 적용에 대한 강제조항이 없어 적용을 하고 있지 않고 있다. 또한 실질적인 적용기준인 스프링클러헤드의 형식승

인 및 검정기술기준(KOFEIS 0501)에서는 화재시험에 대한 성능규정이 없어 소화성능이 검증되지 않은 스프링클러헤드를 설치하고 있는 실정으로 스프링클러설비의 신뢰성 향상을 위하여 관련 기준의 개정이 필요한 것으로 판단된다.

3. 결 론

스프링클러설비의 설치목적인 화재방호대상물의 재산보호, 인명안전을 위해 스프링클러헤드는 가연물의 연소특성에 적합한 감도 및 방사특성을 가져야 하며, 또한 소화성능이 검증된 스프링클러헤드가 설치되도록 다음과 같은 사항을 적용해야 한다.

1. 스프링클러헤드의 작동을 예측할 수 있는 반응 시간지수(Response Time Index) 산출식은 감열체의 열손실량의 특성치인 전도계수(Conductivity factor)를 반영하여야 한다.
2. 스프링클러헤드의 설치 높이 등 살수분포 시험 방법에서 정하는 시험조건은 현장설치조건과 부합되도록 하여야 한다.
3. 스프링클러헤드의 소화성능의 신뢰성 향상을 위하여 성능시험 항목에 화재시험을 필수시험으로 포함하여야 한다.



<저 자>

김기욱
한국화재보험협회 부설 방재시험연구원