

중·설

스프링클러의 열응답성 (Thermal Response of Sprinklers)

김명배*
한용식*
윤명오**

요약

반응시간지수(Response Rime Index ; RTI)를 사용하여 스프링클러의 열응답(thermal response) 특성을 분류할 수 있다. 반응시간지수는 plunge test에서 균일한 고온의 공기속도의 제곱근과 스프링클러 열감지부의 시정수(time constant)의 곱으로 나타낼 수 있다. 고온의 주위 공기온도에서 스프링클러가 작동하는 시간을 측정하므로서 열감지부의 시정수를 계산할 수 있다. 스프링클러의 RTI가 시정수에 비하여 실험조건에 따른 변화 폭이 적으므로 실제 화재시의 스프링클러 작동시간을 예측하는데에는 RTI가 사용된다. 스프링클러의 작동시간 예측을 위해서는 RTI값과 스프링클러 열감지부 주위의 유속이 필요하며, 유속은 화재의 발열량과 스프링클러가 설치된 구획의 높이로부터 실험식으로 결정된다. 따라서 plunge test를 이용하여 얻은 스프링클러 열감지부의 기본자료로부터 실화재시의 스프링클러 작동시간을 예측하게 되며, ZONE 모델과 같은 화재 simulation 프로그램과 같이 사용된다면 스프링클러 작동시의 연총의 높이도 예측 가능하게 된다.

Key words : Response time index, Plunge test, Time constant, Sprinkler

1. 서 론

스프링클러는 가장 확실하고 효과적인 화재 진화용의 수단으로 광범위하게 이용되고 있다. 화염 주위에 많은 수의 스프링클러를 개방시켜 적정량의 물을 분사함으로 주위의 가연물을 미리 젖게하여 화재 강도가 일정 수준을 넘지 않도록 조절함으로써 건물의 붕괴를 방지하는데 목적이 있었다. 이렇게 스프링클러의 주목적을 조절기능에 둠으로 해서 화재 발생시 수반되는 열에 의한 손실과 연기 및 방화수에 의한 피해가 증가되고 있다. 또

한 급속한 산업화와 인구밀도의 증가에 따라 화재 발생에 따른 대규모 재산손실과 인명피해가 날로 증가하고 있는 실정이다. 특별히 거주구역용 스프링클러의 가장 큰 목적은 화재시 거주자들이 안전하게 대피할 수 있도록 대피시간을 연장하는데 있다. 이런 목적을 만족시키기 위해서 화재가 발생하는 즉시 감지하여 화염이 성장하지 못한 초기에 진화해야 할 필요가 생겼으며, 화재시에 빠른 응답성을 가지는 스프링클러의 개발이 필요하게 되었다.

스프링클러의 화재 감지특성은 스프링클러 헤드와 감열부에서의 열적 특성에 의해 결정되는데, 현재 스프링클러의 화재감지 특성을 나타내는 척도로 반응시간 지수(Response Time Index ;

* 한국기계연구원 산업설비연구부

** 명지대학교 건축학과 부교수, 학술이사

RTI)가 사용되고 있다. 반응시간지수는 열감지부의 열시정수와 공기속도의 제곱근의 곱으로 나타내어진다. 이 지수는 주어진 스프링클러와 방향에 따라 일정한 값을 가지며, 스프링클러 근처의 공기 온도와 공기속도에 대한 스프링클러의 응답을 예측하는데 충분한 것으로 알려져 있었다.¹⁾ 그러나 최근들어 화재가 느리게 성장하거나 화원으로부터 먼 거리에 있는 화재에서는 반응시간지수의 사용이 의문시 되고 있다. 또한 기존 스프링클러와 급속응답 스프링클러에서 공기속도가 느려짐에 따라 반응시간지수가 급격하게 커지며, 화재실험에서 응답시간이 일정 반응시간지수를 가정하고 예측된 것보다 거리에 따라 급속하게 증가된다고 알려져 있다.¹ 이러한 단점을 보완하기 위한 노력들이 계속 되고 있는 실정에 있다.^{2),3)}

2. 스프링클러의 화재반응 감도 평가방법

2.1 이론적 배경

이상적인 스프링클러는 화재가 발생하자마자 작동하는 것이다. 스프링클러의 개방온도는 주위 조건이 허용하는 가장 낮은 값에 이미 고정되어 있으므로 주위 분위기에 따라 얼마나 신속하게 반응하는가가 매우 중요한 사항이다. 스프링클러의 열응답성은 스프링클러에서의 열역학적 특성과 열전달 특성에 의해 지배된다. 스프링클러 열감지부의 열적 평형(heat balance)의 관점에서 볼 때, 주변 가스로부터 받은 열량과 감지부분에서 스프링클러의 다른 부분으로 전달된 열량의 차는 열감지부의 온도상승으로 나타나게 된다. 주변가스로부터 열감지부로 전달되는 열은 고온가스가 유동할 때 전달되는 대류 열전달(convective heat transfer)이 대부분이고 화염으로부터 전달되는 복사열량은 화재시에 발생되는 연기(smoke)에 대부분 흡수되는 것으로 알려져 있으며, 열감지부에서 스프링클러의 다른 부분으로 전도(conduction)되는 열량은 대류에 비해 매우 작은 값을 가진다. 따라서 스프링클러에서의 열평형을 다음과 같은 식으로 간략하게 표시할 수 있다.²⁾

$$mc \frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) \quad (1)$$

여기서, m 은 열감지부의 질량, c 는 열감지부의 비열(specific heat), h 는 대류열전달계수, A 는 열감지부의 표면적, T_e 는 열감지부의 온도, T_g 는 주변의 가스온도, t 는 시간을 나타낸다. 이 식을 주위 온도 T_g 를 기준으로 한 온도차 형태로 표시하면 식 (1)은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{1}{\tau} (\Delta T_g - \Delta T_e) \quad (2)$$

여기서, $\Delta T_e = T_e - T_o$, $\Delta T_g = T_g - T_o$, $\tau = mc/hA$ 이다. 방정식 (2)는 감지부의 온도에 응답특성을 나타내며, $\Delta T_g(t)$ 와 $\tau(t)$ 가 초기조건($\Delta T_g(t=0)=0$)과 함께 주어진다면 식(2)를 풀 수 있다. τ 는 시간 차원을 가지며, 스프링클러의 열시정수(thermal time constant)라 불리워진다. m , c 및 A 는 스프링클러의 열감지부의 형태에 따라 이미 고정되어 있으므로 주어진 감지부에 대해 시정수는 대류 열전달 계수(convective heat transfer coefficient) h 에 의해 결정되어진다. 대류열전달계수 h 는 무차원변수인 Nu(Nusslet number)의 함수이다. 즉

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3)$$

여기서 L 은 열감지부의 특성길이이고, k 는 고온 연소 가스의 열전도도(thermal conductivity)이다. 또한 Nu 는 주어진 열감지부의 Re 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$N = f(Re) \quad (4)$$

여기서 Re 는 UL/v 이며, v 는 고온 연소 가스의 동점성계수이다. 화재시 스프링클러의 열감지부에서 Re 값은 40에서 4000정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, 이때의 Nu 와 Re 의 관계는

$$Nu = C \sqrt{Re} \quad (5)$$

로 표시된다. 여기서 C 는 열감지부에 따른 상수이며, 대류 열전달계수는 식 (3)과 식(5)로부터

$$h = C \left(\frac{k}{\sqrt{v}} \right) \sqrt{U} \quad (6)$$

로 정리된다. 여기서 $\frac{k}{\sqrt{v}}$ 는 공기의 경우 온도에 따라 거의 일정한 값을 가지므로 열감지부에서의 대류 열전달 계수 h 는 결국 \sqrt{U} 에 비례한다. 따라서

$$\tau \sqrt{U} = \text{상수} = \text{RTI} \quad (7)$$

의 관계식을 얻을 수 있다. 이 상수를 스프링클러의 반응시간지수 (Response Time Index ; RTI) 라 부르며, 공기속도 및 온도에 무관하게 정해지는 스프링클러의 물성치를 나타낸다. 이를 식(2)에 대입하면

$$\frac{d(\Delta T_e)}{dt} = \frac{\sqrt{U}}{\text{RTI}} (\Delta T_g - \Delta T_e) \quad (8)$$

로 표시된다. 스프링클러의 열감지부의 온도가 작동온도(ΔT_{ea})에 도달되었을 때 스프링클러가 작동되므로 스프링클러의 RTI는 일정한 속도와 온도분포를 가지는 풍동 내에서의 plunge test로 부터 스프링클러의 개방시간을 측정하면 구할 수 있다. Plunge test의 경우, 식(8)은 RTI식으로 다음과 같이 표시된다.

$$\text{RTI} = \frac{-tr \sqrt{U}}{\ln(1 - \Delta T_{ea}/\Delta T_g)} \quad (9)$$

여기서 tr 은 스프링클러의 응답시간(response time) 혹은 작동시간 (actuation time), U 는 풍동 내의 공기 유속, ΔT_{ea} 는 스프링클러 작동시의 주위공기 온도에 대한 열감지부 온도차, ΔT_g 는 주위공기온도에 대한 풍동 내의 공기온도차를 나타낸다. 이로부터 스프링클러의 RTI는 일정한 속도와 온도분포를 가지는 풍동 내에서의 Plunge Test로 부터 스프링클러의 개방시간을 측정하면 구할 수 있다.

2.2 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 스프링클러의 화재 감지 특성을 나타내는 반응시간지수를 측정하는 방법인 Plunge Test를 수행하기 위해 제작된 실험장치이다. 실험장치는 균일 유동을 재현하기 위한 유로계와 공기온도를 조종하기 위한 Heater 가열부로 구성되어 있다. 실험 온도는 Heater와 연결된

온도 조절장치에 의해 조절되며, 실험영역 내의 온도가 온도조절장치로 Feedback 되어 실험온도를 유지하며, 온도변동은 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내를 유지한다. 유로계에 사용된 송풍기는 가변속도형으로 실험영역(test section)에서 최고 7m/sec까지의 속도를 얻을 수 있다.

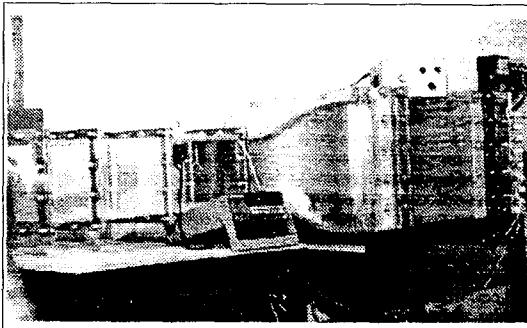


Fig. 1. Test apparatus of plunge test for response time index

실험영역의 크기가 200×200mm인 풍동은 실험영역에서 균일 유동장 및 온도장을 형성한다. 유로계의 모든 덕트는 열손실을 줄이기 위해 단열재로 감싸 주었다. 실험영역은 투명 아크릴로 제작되었으며, 스프링클러를 수직으로 설치하였다. 사용된 스프링클러가 Wet형이었기 때문에 스프링클러의 작동 유체로 압축공기를 사용하였으며, 공기압력은 5kgf/cm²으로 하였다. 실험시 초기 조건의 유지가 실험 결과에 매우 민감한 영향을 주기 때문에 시험할 스프링클러를 20°C로 유지되는 항온 인큐베이터에 저장하였으며, 스프링클러의 장착시 주위온도의 간섭을 줄이기 위해 실내온도를 20°C로 유지하였다.

실험은 개방온도가 72°C인 상용 스프링클러 중 두가지에 대해 수행되었으며, 개략적인 시편의 형태는 Fig. 2에서 보여준다. A형의 열감지부는 스프링클러의 하단부에 위치하고 있으며 직경이 26mm이고 10g의 질량을 가진다. B형은 열감지부가 스프링클러의 측면에 부착된 형태로 직경이 7.5mm, 길이가 7.0mm인 실린더 형태이며, 질량이 2g이다.

온도변화에 따른 스프링클러의 작동상태를 관찰하기 위해 80°C, 100°C, 130°C, 146°C의 공기온

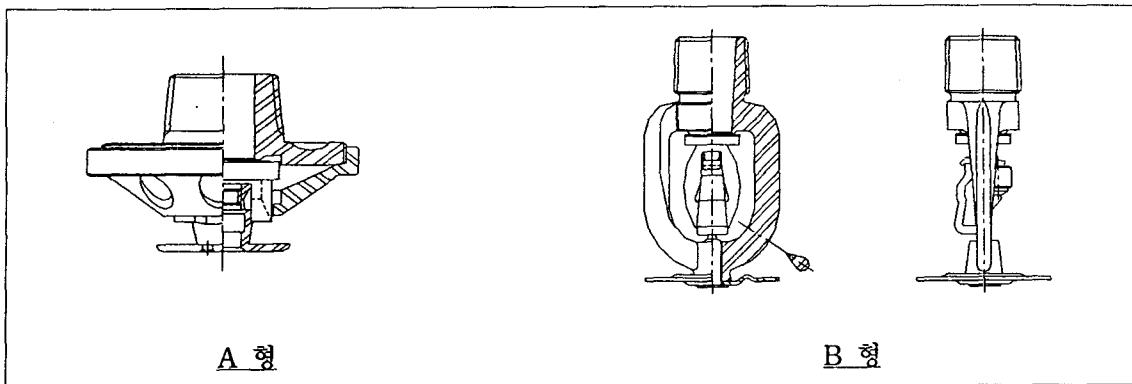


Fig. 2. A schematic of sprinklers.

도 조건에서 실험을 수행하였으며, 동일온도 조건에서 풍동내의 공기유속을 1.54m/sec , 3.4m/sec , 5.0m/sec 및 6.4m/sec 로 변경하였다. 동일조건에서 3개의 시편을 측정하였으며, 계산된 값들은 평균값을 나타낸다. 시간측정을 위해서는 $1/100$ 의 정도를 가지는 Stop Watch를 사용하였다.

2.3 화재반응지수

Fig. 3은 A형 스프링클러의 열감지부에 직경이 0.06mm 인 열전대를 설치한 뒤 측정한 온도상승곡선을 나타낸다. 공기온도가 130°C 이고, 공기속도가 3.4m/sec 의 실험조건에서 Plunge Test를 수행한 결과이다. 열감지부의 온도는 시간에 따라 대수 함수적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 작동온도에서 정확하게 작동하고 있음을 볼 수 있다. 또한 작동시간의 63% 에 해당하는 값을 가지고 식(8)을 적분한 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 식(8)의 적분은 Runge kutta 방법을 사용하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 B형 스프링클러에 대한 Plunge Test 결과를 나타낸다. Fig. 4는 고온의 공기 속도에 따른 반응시간지수에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 온도 80°C 의 경우에 약간의 변동은 있지만 공기 속도에 따라 반응시간지수 값들이 $150\sim160$ 의 범위에 걸쳐 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 이 결과는 앞서 반응시간지수의 도입에서 사용된 가정 중 반응시간지수는 공기 속도와 무관하다는 사실을 만족하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 열감지부의 시정수와

밀접한 관계를 가지는 스프링클러의 반응시간에 따른 반응시간지수 관계를 보여준다. Fig. 4의 결과와 마찬가지로 반응시간에 따라 반응시간지수들이 거의 일정한 값들을 보여주고 있다. 따라서 B형 스프링클러에 기존의 반응시간지수 방법을

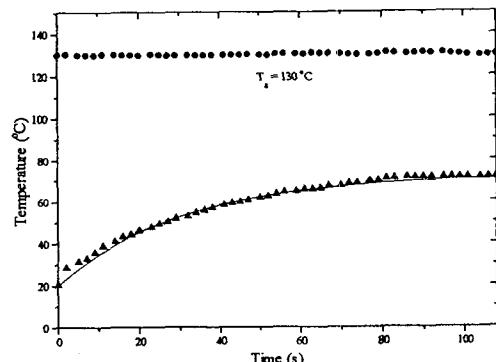


Fig. 3. Temperature rise of heat element.

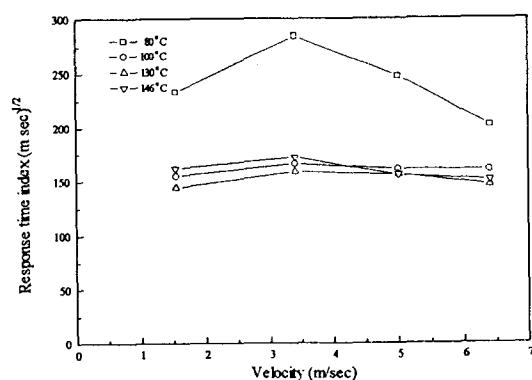


Fig. 4. Response time index with air velocity.

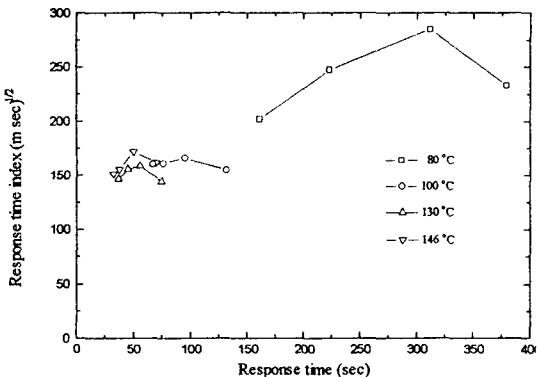


Fig. 5. Response time index with response time of sprinklers.

적용하여 화재 감지특성을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 A형 스프링클러에 대한 Plunge Test 결과를 나타낸다. Fig. 6은 고온 공기 속도에 따른 반응시간지수에 대한 결과를 보여 주고 있다. Fig. 7은 열감지부의 시정수와 밀접한 관계를 가지는 스프링클러의 반응시간에 따른 반응시간지수 관계를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 고온의 공기온도와 빠른 공기 속도에서는 일정한 값을 가지는 경향을 보여 주지만 반응시간지수들이 광범위하게 매우 폭넓게 분포하고 있다. 공기온도 80°C의 실험조건을 제외하고는 Heskethad¹⁾에 의하여 언급된 반응시간지수가 속도에 따라 일정한 값을 가지는 영역이다. 그러나 본 실험의 결과에서는 그림에서 알 수 있듯이 속도가 증가함에 따라 반응시간지수는 감소하고 있다. 이 결과는 앞서 반응시간지수의 도입에서 사용된 가정 중 반응시간지수는 공기 속도와 무관하다는 사실을 만족하지 못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 A형 스프링클러에 기준의 반응시간지수 방법을 적용하여 화재 감지특성을 완전하게 나타낼 수 없음을 알 수 있다. A형의 경우, 국내에서는 거주구 용으로 사용되는 스프링클러인데, 결과에서 알 수 있듯이 반응시간지수가 200이상의 값이다. 이는 Fig. 8의 ISO의 반응시간지수에 따른 스프링클러의 분류에서 가정용으로 사용하기에는 반응시간지수 값들이 너무 큰 값을 가진다. 미국의 경우, 30정도의 반응시간지수 값을 가지는 스프링클러

를 거주구역용으로 사용하는 것과는 대치되는 면을 볼 수 있다.

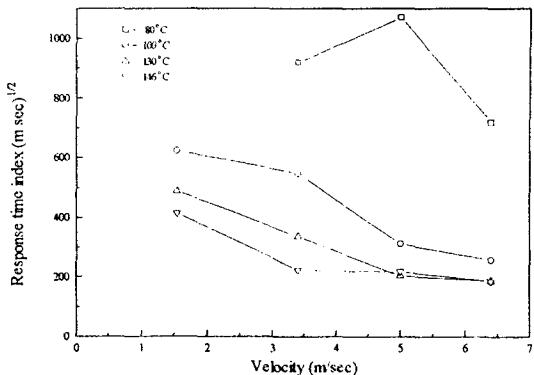


Fig. 6. Response time index with air velocity.

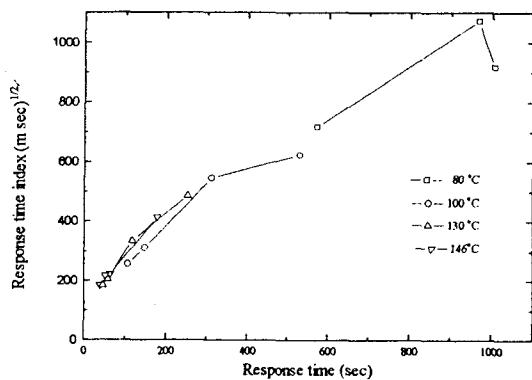


Fig. 7. Response time index with air velocity.

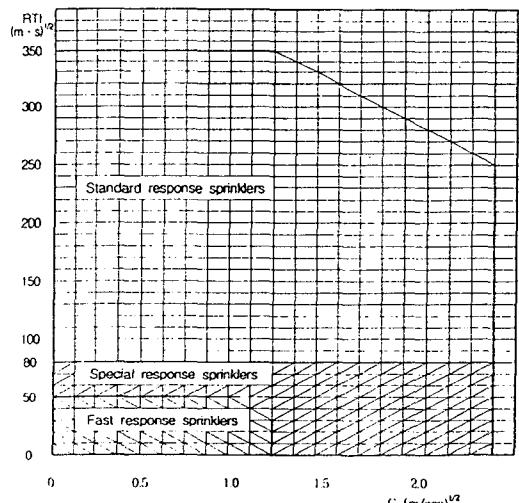


Fig. 8. 스프링클러의 감도에 따른 분류(ISO 6182-1 : 1993).

Table 1. 온도 및 속도에 따른 A형 스프링클러의 실험결과.

온도(°C)	속도(m/sec)	RTI(m · sec) ^{1/2}	개방시간(sec)	시정수(sec)
80	1.54	—	—	—
	3.4	919.62	1004.9	498.73
	5.0	1072.48	966.4	479.63
	6.4	718.43	572.2	283.98
100	1.54	625.08	528.8	503.70
	3.4	547.29	311.6	296.81
	5.0	312.25	146.6	139.64
	6.4	256.88	106.6	101.54
130	1.54	488.41	251.9	393.57
	3.4	335.34	116.4	181.86
	5.0	204.38	58.5	136.12
	6.4	185.44	46.2	72.18
146	1.54	414.87	177.5	334.31
	3.4	222.43	63.2	120.63
	5.0	217.64	51.8	97.33
	6.4	185.38	39	73.28

Table 2. 온도 및 속도에 따른 B형 스프링클러의 실험결과.

온도(°C)	속도(m/sec)	RTI(m · sec) ^{1/2}	개방시간(sec)	시정수(sec)
80	1.54	233.30	378.8	188.00
	3.4	285.07	311.5	154.6
	5.0	247.59	223.1	110.73
	6.4	202.02	160.9	79.86
100	1.54	154.91	131.05	124.83
	3.4	165.98	94.5	90.02
	5.0	160.81	75.5	71.92
	6.4	160.25	66.50	63.34
130	1.54	144.26	74.4	116.25
	3.4	158.82	55.23	86.13
	5.0	155.82	44.6	69.68
	6.4	146.51	36.5	57.03
146	1.54	161.81	69.4	130.39
	3.4	171.85	49.6	93.20
	5.0	155.44	37	69.51
	6.4	151.16	31.8	59.75

3. Mock-Up에서의 스프링클러 작동

전술한 스프링클러의 작동시간 예측은 Plunge test 결과의 신뢰성에 바탕을 두고 있기 때문에 화재실험을 통하여 그 타당성이 입증되어야 한다. 2.35(W) × 2.08(H) × 3.48(D) m 크기의 방화 판넬로 제작된 Mock-up의 상부중앙에는 스프링클

러 헤드를 설치하고, 하부 중앙에는 직경 30 cm의 가솔린 pool 화재를 발생시켜 연층과 하층부의 온도분포와 스프링클러 열 감지부의 온도변화 및 개방시간을 측정될 수 있도록 한다.

스프링클러 열감지부의 온도상승은 식(8)을 적용하여 다음식(10)과 같이 얻어진다.

$$T_e = T_g - (T_g - T_\infty) e^{-(t/\tau)} \quad (10)$$

여기에서 T_e 는 Mock-up test로부터 얻어지는 연출온도 값이며 시간의 함수이다. 식(10)에서의 시정수 τ 는 Table 1 및 Table 2와 같은데, 실험에서 얻어진 시정수 값은 실험조건에 따라 편차가 크기 때문에 상대적으로 편차가 적은 RTI 값을 이용하여 식(7)과 다음식으로⁴⁾ 시정수 τ 를 계산한다.

$$u=0.946(Q/H)^{1/3} \quad (11)$$

여기에서 Q 는 화원의 열발생률 (kW)이며 H 는 구획의 높이(m)이고 u 는 스프링클러 용융 element 주위에서의 연기의 유속(m/s)이다. 스프링클러는 $T_e=72^\circ\text{C}$ 가 되는 순간에 작동한다고 가정하면 식(10)으로부터 스프링클러의 작동시간을 예측할 수 있게 된다.

Fig. 9는 Mock-up내에서의 스프링클러 작동시험결과를 보여주고 있으며, 스프링클러의 개방시간은 약 60초 정도임을 알 수 있다. 또한 스프링클러 열감지부의 온도 측정결과와 식(10)에 의한 계산결과가 비교적 잘 일치되고 있는 것을 알 수 있다. 만일 실화재 시의 연출온도를 정확하게 예측 할 수 있다면 Plunge test의 결과를 이용하여 스프링클러 작동시간을 비교적 정확하게 예측 할 수 있게 된다.

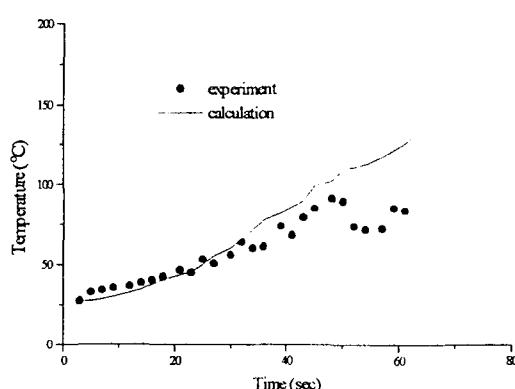


Fig. 9. 스프링클러 감지부의 온도변화.

4. 결 론

스프링클러에 대한 열응답성을 평가하기 위한 방법론과 국내에서 생산되는 두가지 형태의 스프링클러 헤드에 대한 실례를 제시하였다. 일반적으로 스프링클러의 열응답성은 RTI에 의해 분류되는데, 이 계수를 측정하기 위한 Plunge test 장비 구성 내용과 실화재 시의 스프링클러 작동시간 예측방법을 소개하였다. RTI값이 스프링클러 열응답성을 대변하는 데에는 문제점을 가지고 있지만 스프링클러 열감지부의 시정수에 비하여 실험조건에 따른 변화폭이 적어 실화재 시의 스프링클러 작동시간 예측에 사용될 수 있음을 보였다. 이를 위하여는 화재공간의 구획조건과 화재의 발열량을 필요로 한다. 따라서 기존에 사용되고 있는 2층 ZONE 모델 프로그램과 연계 시에는 Plunge test의 결과를 바탕으로 실화재 시의 스프링클러 작동시간을 예측할 수 있게 된다. 또한 스프링클러 수분무와 화재 plume의 상호작용 해석을 위한 입력자료인 스프링클러 작동시의 연출높이를 계산할 수 있게 된다.

참 고 문 헌

1. J.S. Pepi, Design Characteristics of Quick Response Sprinklers, Grinnell Fire protection Systems Company, Providence, Rhode Island, May, 1986.
2. G. Heskstad & R.G. Bill JR., "Quantification of Thermal Responsiveness of Automatic Sprinklers Including Conduction Effects," Fire Safety Journal vol. 14 pp.113-125, 1988
3. P.F. Thorne, C.R. Theobald & S.J. Melinek, "The Thermal Performance of Sprinkler Heads," Fire Safety Journal vol. 14 pp.89-99, 1988
4. R.L. Alpert, "Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors", Fire Technology, Vol. 8, pp. 181-195 (1972).