

# 산업용 백금저항온도계의 시정수 측정

## Measurement of the Time Constant of Industrial Platinum Resistance Thermometers

김용규<sup>1</sup>, 김숙향<sup>2</sup>, 양인석<sup>1,✉</sup>  
Yong-Gyoo Kim<sup>1</sup>, Sook Hyang Kim<sup>2</sup> and Inseok Yang<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국표준과학연구원 기술표준본부 (Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

<sup>2</sup> (주)와이즈신전 교정실 (Calibration Lab. Wise Control Inc.)

✉ Corresponding author: iyang@kriss.re.kr, Tel: 042-868-5772

Manuscript received: 2009.3.16 / Revised: 2009.5.24 / Accepted: 2009.7.29

*We present experimental data on the time response behavior of industrial platinum resistance thermometers (IPRT) to help with the selection of proper sensors in industry and research laboratories. Time constants of IPRTs were measured using a method specified in ASTM standards. Two different sensors of different protecting sheath diameters were tested in air, water and silicon oil at temperatures from 0 °C to 200 °C. The time constant was the smallest in water and the highest in air. As the test temperature increased, time constants tended to decrease at all heat conducting media. For different diameters of sheath of IPRT at the same temperature, it was found that the IPRT of larger diameter showed higher time constant in air, but the opposite dependence was observed in water and oil. From the measured results, it was suggested that the sensor diameter and heat conducting medium should be considered if one wants to select proper thermometer to measure the dynamic temperature change in industry and research area.*

Key Words: Time Constant (시정수), IPRT (백금저항온도계), Temperature Measurement (온도 측정)

### 1. 서론

산업적으로 온도측정센서는 동적 상태에서의 온도변화를 추적하고 모니터링하기 위한 목적으로 많이 활용되고 있다. 일반적인 생산공정의 특성이 평형상태에서 이루어지기 보다는 생산성을 향상시키기 위한 이유로 동적상태에서 진행되는 경우가 많으므로 온도센서의 시간에 따른 변화특성은 공정조건 설정에 중요한 역할을 하게 된다. 특히 안전을 위한 차단처리 시스템이나 공정제어부에 사용되는 센서는 시간변화특성에 의한 실제온도와 계기온도와의 차이, 즉 시간지연(time lag)이 중요 변수로 작용된다.

온도센서의 응답에 관한 연구는 기본적으로 비

평형상태에서의 열전달 문제이며 Newton 법칙에 따른다고 알려져 있다.<sup>1</sup> 이 고전적인 열전달 방정식의 해는 많은 연구자들에 의해 연구되고 해석방법이 잘 알려져 있다. 그러나 특정 센서의 동적 반응특성의 예측은 종종 틀린 결과를 가져오곤 한다. 이것은 해석방법의 문제가 아니라 실제 산업 현장 혹은 연구실에서 사용되는 센서들의 구조가 일관되지 않고, 온도감응물질(sensing element)의 위치 혹은 절연물질의 종류 및 두께 등 많은 외부적인 인자들에 의해 영향을 받기 때문이다. 따라서 실용적인 면에서 온도센서의 응답특성은 예측에 의하기 보다는 측정하여 구할 때 보다 정확한 값을 얻을 수 있다.

접촉식 온도계의 시간응답특성에 관한 연구는

과거 몇몇 연구자들에 의해 이루어졌으나<sup>2-5</sup> 최근에는 이렇다 할 연구논문을 발견하기 쉽지 않은 상황이다. 일부 센서 제조회사들은 자사 제품에 대한 홍보를 목적으로 한정된 데이터를 제공하고 있으나<sup>6</sup> 이 역시 범용적이지 않은 실정이다. 센서 제조기술의 발달에 따라 과거 연구결과를 참고하기에는 적절치 않은 것으로 보이며, 현재의 기술로 제조된 다양한 온도센서에 대한 실험적 결과를 산출하여 보고함으로써 관련 산업체의 생산활동에 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다.

이 연구에서는 산업적으로 폭넓은 사용영역을 가지고 있는 산업용 백금저항온도계(industrial platinum resistance thermometer, IPRT)를 대상으로 센서의 굽기 및 측정온도, 그리고 측정 매질의 종류에 따른 시간응답특성(시정수)의 변화를 연구하였다. 실험 결과를 바탕으로 산업체 및 연구실에서 사용하고자 하는 온도센서 선택에 도움을 주고자 하였다.

**2. 실험준비**

온도센서의 시간응답특성을 측정하는 방법으로 온도변화를 가하는 방법에 따라 경사형 방법(ramp method)과 계단형 방법(step change)이 있다. 통상적으로 경사형 방법보다는 계단형 방법을 실험실에서 사용하며 ASTM 에 열전대 온도센서의 시정수를 측정하는 규격이 제시되어 있다.<sup>7</sup> 규격에 의하면, 열전대를 상온에서부터 특정 온도로 안정되어 있는 유체 내부로 순간적으로 삽입시키고, 온도 변화가 전체 변화의 63.2%에 이르는 시간을 측정하여 시정수를 구하도록 한다. 이 연구에서는 ASTM 규격을 이용하여 IPRT 에 적용하여 그 시정수를 측정하였다.

실험에 사용된 IPRT 는 직경이 6.4mm(1/4inch)와 3.2mm(1/8inch)인 스테인레스-316 재질의 쉬스형으로 2 종류를 준비하였다. IPRT 의 전체 쉬스길이는 각각 60cm 이며 0°C 에서의 명목저항은 100Ω, 0°C 에서 100°C 사이에서 단위온도변화에 따른 저항변화의 평균인 온도감도계수는 0.3915Ω/°C 인 제품을 사용하였다. 온도감지부만의 저항값을 측정하기 위하여 저항 측정용 리드선을 4 개 사용하여 4 선식 방식으로 저항을 측정하였다.

열전달 매질에 따른 시정수의 변화를 살펴보기 위하여 매질로 물, 공기, 실리콘 오일을 준비하였다. 물과 오일 내에서의 시정수 측정은 Hart 사의

액체항온조를 이용하였으며 공기 중에서의 측정은 소형 전기로를 이용하였다. 사용된 오일은 Shinetsu 사의 KF96-50cs 실리콘 오일이었다. 공기와 오일 중에서의 측정온도는 각각 50 °C, 100 °C, 200 °C 를 선정하였고, 물에서는 0 °C, 50 °C, 90 °C 를 선정하였다. 0 °C 에서의 측정을 위해 진공 듀어내에 물과 얼음을 섞어 빙점을 실현하였다. Table 1 에 이 연구에서 사용된 각종 장비 및 온도조건, 매질 종류를 정리하여 나타내었다.

Table 1 Test equipments for measuring time constant

Isothermal environment	Manufacturer	Model	Test temperature	Medium
Liquid bath	Hart	6035	50 °C	Oil
			100 °C	
			200 °C	
Liquid bath	Hart	6035	50 °C 90 °C	Water
Furnace	Hart	9122	50 °C	Air
			100 °C	
			200 °C	
Ice point	-	-	0 °C	Water

Table 2 Specifications of the equipments used for the experiment

IPRT	Sheath diameter	6.4 mm 3.2 mm
	Sheath material	Stainless-steel 316
	Nominal resistance at 0 °C	100 Ω
	Sensitivity	0.3915 Ω/°C
Resistance measurement	Method	4-wire measurement
	Equipment	Agilent 34970A
	Sampling rate	20 /s

시정수 측정용 계측기로 20 채널 스캐너 카드가 장착된 Agilent 34970A 를 이용하였다. 초당 20 회의 속도로 측정하였으며, 컴퓨터를 이용하여 데이터를 수집하였다. 모든 측정은 동일 조건에서 3 회 반복하였다. 첫 번째 시정수 측정 후 센서를 항온조에서 꺼내어 실온에 유지시켜 온도가 안정

화되기를 기다린 후 동일한 방법으로 계속되는 시정수 측정을 하였다. 실험에 사용된 장치의 사양은 Table 2 에 정리하였다.

### 3. 실험결과

Fig. 1 은 6.4mm 굵기의 IPRT 를 200°C 에 유지되고 있는 전기로에 상온에서 즉시 장입하였을 때 얻은 시간에 따른 온도변화 곡선이다. 그림에서  $t_f$  는 최종 안정화된 온도이고, 시정수  $\tau$  는 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 전체 온도변화량의 63.2%에 도달할 때까지 걸린 시간이다. 빙점에서 측정된 결과를 제외하고 모든 매질 및 온도 영역에서 Fig. 1 과 유사한 시간-온도 변화 곡선을 얻을 수 있었다.

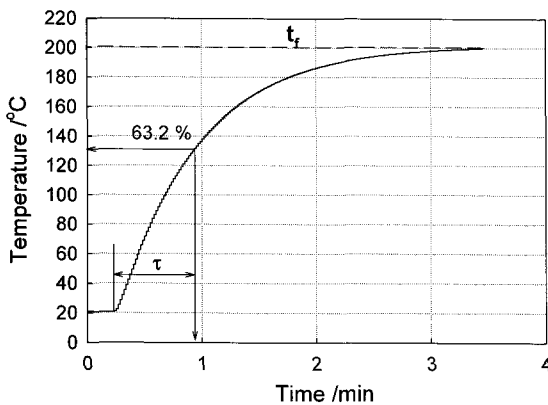


Fig. 1 Typical response of 6.4 mm IPRT at 200 °C in air

Table 3 은 두 종류의 IPRT 에 대하여 각각의 실험온도 및 매질에 따라 측정한 시정수 측정결과를 나타낸 것이다. 3 회 반복 측정한 값들의 평균과 그 표준편차를 나타내었다. Fig. 2 는 6.4mm 굵기의 IPRT 에 대하여 매질별로 온도에 따른 시정수의 변화를 나타낸 그림이다. 이 센서의 경우 공기 중에서의 시정수가 가장 크게 측정되었으며 물에서의 시정수는 가장 작은 값을 보였다. 오일에서의 값은 물보다 약간 크게 측정되었다. 모든 매질에서 시정수의 온도에 따른 변화거동을 보면 온도가 증가함에 따라 대체로 점차 작아지는 경향을 알 수 있다. 공기 중에서의 온도에 따른 평균변화율은  $-0.017s/^{\circ}C$  이며, 오일은  $-0.008s/^{\circ}C$ , 물은  $-0.011s/^{\circ}C$  정도를 나타내었다. 시정수의 변화폭을 살펴 보면 공기 중에서는 온도가 50°C 에서 200°C 로

증가하였을 때 5.2% 변화하였고, 오일에서는 19.0%, 물에서는 빙점에서 90°C 로 온도를 증가시켰을 때 34.5% 감소하였다. 즉, 물에서의 시정수의 상대 감소폭이 가장 크게 나타났다.

Table 3 Results of time constant measurement for IPRTs of 6.4 mm and 3.2 mm diameter

Medium	Test temperature /°C	(time constant $\pm 1\sigma$ ) /s	
		6.4 mm	3.2 mm
Air	50	47.7 $\pm$ 4.3	27.6 $\pm$ 1.0
	100	47.1 $\pm$ 4.6	27.2 $\pm$ 0.5
	200	45.2 $\pm$ 1.5	25.4 $\pm$ 1.2
Oil	50	6.3 $\pm$ 0.1	19.6 $\pm$ 0.4
	100	5.1 $\pm$ 0.2	21.7 $\pm$ 1.7
	200	5.1 $\pm$ 0.4	17.8 $\pm$ 1.5
Water	0	2.9 $\pm$ 0.5	10.8 $\pm$ 1.2
	50	2.6 $\pm$ 0.5	7.9 $\pm$ 0.4
	90	1.9 $\pm$ 0.2	7.6 $\pm$ 0.3

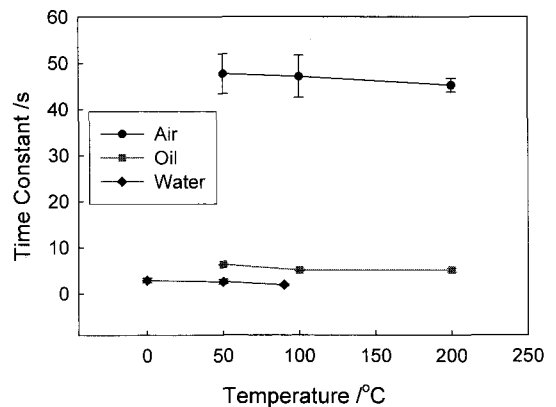


Fig. 2 Variation of time constants of 6.4 mm IPRT with temperature at various conducting media

Fig. 3 은 3.2mm 굵기의 IPRT 에 대하여 매질별로 온도에 따른 시정수의 변화를 나타낸 그림이다. 6.4mm 굵기의 IPRT 와 같이 공기 중에서의 시정수가 가장 크고 물에서의 값이 가장 작게 측정되었다. 오일의 경우 100°C 에서의 시정수 값이 50°C 에 비해 크게 측정되었으나 다른 매질에서의 결과와 Fig. 2 에 나타낸 6.4mm 굵기의 IPRT 결과를 참

조하여 볼 때 단순한 실험적인 산란에 의한 우연 효과에 의한 것으로 판단된다. 이점을 감안하면 모든 매질에서 측정온도가 증가함에 따라 시정수가 대체로 점차 감소하는 경향을 알 수 있었다. 그런데 오일에서의 시정수가 6.4mm 굵기의 IPRT 와는 달리 물에서의 값에 비해 약 3 배 정도 크게 측정되었다. 공기 중에서의 온도에 따른 평균변화율은  $-0.015s/^{\circ}C$  이며, 오일은  $-0.012s/^{\circ}C$ , 물은  $-0.036s/^{\circ}C$  정도를 나타내었다. 물의 경우 온도 의존성이 6.4mm 굵기에 비해 매우 크게 측정되었다. 6.4mm 굵기의 경우와 동일한 방법으로 시정수의 상대변화폭을 살펴보면 공기 중에서는 8.0% 변화하였고, 오일에서는 9.2%, 물에서는 29.6% 감소하였다. 이로부터 굵기에 관련없이 물에서의 시정수는 온도가 증가함에 따라 상대적으로 가장 큰 감소폭을 나타냄을 알 수 있었다.

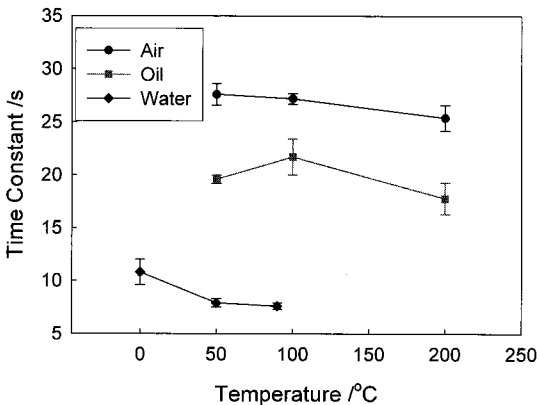


Fig. 3 Variation of time constants of 3.2mm IPRT with temperature at various conducting media

Fig. 4-6 은 50°C, 100°C, 200°C 에서 IPRT 센서의 굵기에 따라 매질에 따른 시정수 변화량을 나타낸 그림이다. 50°C 에서는 공기, 오일, 물을 비교하였고, 물을 사용할 수 없는 온도구간인 100°C 이상에서는 공기와 오일 내에서의 시정수를 비교하였다. 50°C 의 측정결과를 살펴보면 공기 중에서는 6.4mm 굵기의 IPRT 가 3.2mm 굵기에 비해 더 큰 시정수를 가지나 오일과 물 속에서는 그 반대로 오히려 3.2mm 굵기의 IPRT 가 더 큰 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 모든 측정온도에서 동일한 형태로 관찰되었다. 특히 오일에서의 시정수는 굵기가 가늘어질수록 시정수의 증가가 눈에 띄게 관찰되고 있다. 평균적으로 약 3.6 배정도 시정수

가 커졌으며 이는 그만큼 온도변화에 대한 반응속도가 늦어짐을 의미하고 있다. 공기 중에서는 센서의 굵기가 가늘어질수록 시정수가 평균적으로 약 43% 정도 감소하였다.

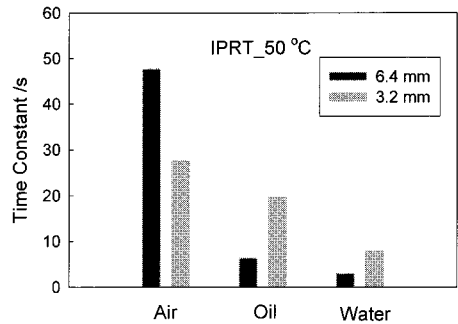


Fig. 4 Time constants of IPRTs in various heat conducting media at 50°C

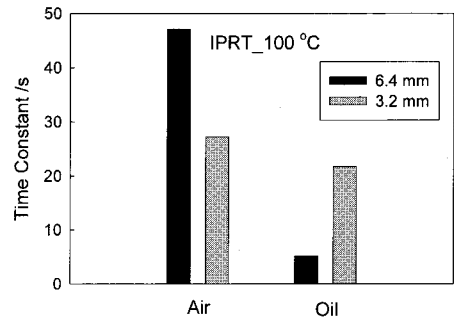


Fig. 5 Time constants of IPRTs in various heat conducting media at 100°C

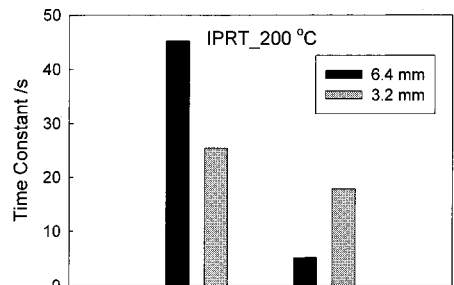


Fig. 6 Time constants of IPRTs in various heat conducting media at 200°C

4. 토론

Fig. 2 와 3 에서 알 수 있었듯이 모든 매질에서 시정수가 온도 증가에 따라 감소하였다. 이것은

센서를 둘러싸고 있는 재료 및 측정 매질의 열물성값이 온도에 따라 변화하기 때문인 것으로 믿어진다. 대류에 의한 열전달의 경우 매질로부터 센서에 빼앗긴 열은 센서가 얻은 열과 같다는 열역학 제 1 법칙을 적용하면 온도  $T$  에서 주어진 시간 간격  $dt$  동안 센서에 가해진 열에너지에 의한 온도 변화  $dT$  는 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$hA(T_f - T)dt = mCdT \quad (1)$$

여기서  $h$  는 열전달 계수,  $A$  는 열교환 면적,  $T_f$  는 최종 온도,  $m$  은 센서의 질량,  $C$  는 센서의 비열이다. 위 1 차 미분방정식을 풀게되면 (2)식과 같은 식으로 표현된다.

$$T = T_f - (T_f - T_o)e^{(-t/\tau)} \quad (2)$$

여기서  $T_o$  는 초기온도이고  $\tau$  는 시정수로서 (3)식으로 나타내어진다.

$$\tau = mC / hA \quad (3)$$

실제 온도계 시스템은 온도측정에 사용되는 저항소자, 저항소자와 쉬스 간의 절연물질, 온도계 쉬스, 그리고 공기 혹은 항온액 간의 여러단계의 복잡한 열교환으로 이루어져 있어 위와 같은 단순한 수식으로 해석하는 것은 매우 어렵다. 다만 각각의 열교환 단계에 관여하는 물질의 열물성 특성을 바탕으로 시간 상수에 어떤 식으로 영향을 미칠지를 정성적으로 논의할 수 있을 것이다. 위 식의 열전달 계수는 열교환이 이루어지는 시스템의 열전도도( $\lambda$ )에 크게 영향을 받는다. 즉, IPRT 를 감싸고 있는 SUS316 스틸과 주위 매질의 열물성 특성에 의존한다고 할 수 있다. Table 4 는 이 연구에서 사용된 IPRT 센서의 주요 부분인 SUS316 스틸<sup>8</sup> 과 공기 및 물,<sup>9</sup> 오일<sup>10</sup> 의 온도에 따른 비열 및 열전도도를 나타낸 것이다. 스틸과 공기는 온도가 증가함에 따라 비열 및 열전도도 값이 증가하나 상대적으로 열전도도의 변화폭이 비열에 비해 크게 나타나고 있다. 물은 잘 알려진 바와 같이 0 °C 에서의 비열이 가장 큰 값을 가지며 온도가 증가함에 따라 비열은 감소한 후 다시 증가하는 특성을 보이고 열전도도는 지속적으로 증가하는 특성을 가지고 있다. 실리콘 오일은 제조회사에서 제

공한 열물성 데이터를 사용하였는데 온도에 따라 비열 및 열전도도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 4 Specific heat capacities and thermal conductivities of SUS316 steel, air, water and silicon oil

Material	Temperature (°C)	Heat Capacity (C) (JK <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity (λ) (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
SUS316	50	0.48	14.1
	100	0.49	15.5
	200	0.52	17.6
Air	50	1.008	27.89
	100	1.011	31.42
	200	1.026	37.97
Water	0	4.219	561
	50	4.182	643
	90	4.205	675
Oil	50	1.55	155
	100	1.55	155
	200	1.55	155

Fig. 2 와 3 의 결과와 같이 물속에서 온도가 올라감에 따라 시정수가 감소하는 것은 SUS316 및 물의 열전도도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 오일의 경우 오일 자체의 비열 및 열전도도의 변화가 없지만 시정수가 감소하는 것은 SUS316 의 열전도도 증가에 의한 것으로 추정된다. 그런데 공기 중에서의 시정수 변화가 다른 매질에 비해 상대적으로 작게 나타나는 것은 비록 공기의 열전도도가 크게 증가하지만 기체 상태이므로 열질량(thermal mass)이 작아 영향을 적게 주기 때문인 것으로 생각된다.

이 연구에서 얻은 결과 중 흥미로운 것은 모든 측정온도에서 매질이 기체인 경우와 액체인 경우 센서의 직경에 따른 시정수의 변화가 반대라는 점이다. 즉, Fig. 4 와 같이 공기 중에서는 6.4mm 굵기의 시정수가 크게 측정되나 상대적으로 열교환 능력이 공기에 비해 우수할 것으로 보여지는 오일 및 물에서는 3.2mm 직경의 센서가 큰 시정수를

나타내고 있다. 이것은 각 매질의 열교환 방법에 차이가 있기 때문인 것으로 추측된다. 오일과 물을 이용하는 경우 교반기를 사용하여 액체의 흐름을 유발시켜 (forced flow) 센서 표면에서의 열교환이 충분히 빠르게 이루어지게 하는 반면, 공기 중에서는 전기로 내의 공기 흐름이 정지되어 있어 센서와 공기층간의 경계층(boundary layer)에 온도구배가 존재하게 되고, 강제적인 유체흐름이 없게 되어 경계층의 상태가 정체(stagnation)됨으로써 충분한 열교환이 이루어지지 않기 때문인 것으로 판단된다. 기체 내에서는 기체의 열질량이 작아 센서의 비열이 주도적인 역할을 하여 상대적으로 무게가 큰, 즉 열질량이 큰 6.4mm 직경의 IPRT가 큰 시정수를 가지게 되며, 액체 내에서는 표면적의 크기가 주도적이 되어 열교환면의 넓이가 상대적으로 작은 3.2mm 직경의 IPRT가 큰 시정수를 나타내는 것으로 생각된다. 이로부터 유체 흐름이 없는 기체 상태에서의 시정수와 원활한 유체흐름이 존재하는 액체 상태에서의 시정수는 센서 직경에 따라 다른 거동을 나타낼 수 있으므로 유념해야 함을 실험적으로 알 수 있었다.

## 5. 결론

서로 굵기가 다른 2 가지 종류의 IPRT를 대상으로 0°C 에서 200°C 까지 시정수를 측정하였다. 물, 공기 및 실리콘 오일의 3 가지 열전달 매질의 차이에 따른 변화를 조사하였다. 모든 매질에서 측정온도가 증가함에 따라 시정수 값이 대체로 감소하는 경향을 보였으며 이는 온도변화에 따른 IPRT 쉬스의 열전도도 및 매질의 열전도도가 증가하기 때문인 것으로 판단되었다. 동일한 온도에서 매질에 따른 시정수를 측정한 결과 물이 가장 작은 시정수를 나타내었으며 오일, 공기 순으로 시정수가 증가하였다. 일정온도에서 센서 굵기의 차이에 따른 매질별 변화를 조사한 결과 공기의 경우에는 굵은 센서의 시정수가 크게 측정되었으나, 물이나 오일과 같이 액체상태의 경우에는 가는 센서의 시정수가 큰 값을 나타내었다. 공기 중에서 측정할 경우에는 센서 쉬스 재질의 열질량(thermal mass)에 의해 영향을 받고, 액체 중에서 측정할 경우에는 쉬스 표면적의 크기에 주된 영향을 받기 때문인 것으로 해석되었다. 산업공정에 시정수를 고려하여 온도센서를 선택할 경우에는 매질의 종류와 함께 센서 크기를 고려해야 함을 실험적으로

알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Holman, J. P., "Heat Transfer," McGraw-Hill, pp. 11-13, 142-143, 1990.
2. Hornfeck, A. J., "Response characteristics of thermometer elements," Transactions of the ASME, Vol. 71, No. 2, pp. 121-133, 1949.
3. Goodwin, W. N., "Response time and lag of a thermometer element mounted in a protecting case," Am. Inst. Elec. Engrs., Vol. 64, pp. 665-670, 1945.
4. Kerlin, T. W., Miller, L. F., Hashemian, H. M. and Poore, W. P., "In-situ response time testing of platinum resistance thermometers," ISA Transactions, NP-834, Vol. 17, No. 4, pp. 71-72, 1978.
5. Kerlin, T. W. and Shepard, R. L., "Industrial Temperature Measurement," Instrument Society of America, 1982.
6. <http://www.eurotherm.com/products/sensors/mgo.htm>
7. ASTM E-839-05, "Standard Test Methods for Sheathed Thermocouples and Sheathed Thermocouple Material," ASTM, 2005.
8. Mills, K. C., "Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys," Woodhead Publishing Ltd., 2002.
9. Japanese Society of Thermophysical Properties, "Thermophysical Properties Handbook," Yokendo Co. Ltd., 2008.
10. Shin-Etsu Chemical Co. Ltd., "Technical data of KF96 silicon oil," Shin-Etsu Chemical Co. Ltd., 2009.