

Chapter 21

연속 온도 측정

Continuous Temperature Measurement

필기 내용 기반 학습 정리

Contents

1	온도와 열에너지	3
1.1	온도 (Temperature)	3
1.2	열에너지 (Thermal Energy)	3
1.3	열 (Heat)	3
1.4	온도 측정	3
2	21.1 바이메탈 온도 센서	4
2.1	열팽창 원리	4
2.2	바이메탈의 원리	4
2.3	굽힘 변형의 장점	4
2.4	부르동관과의 관계	4
3	21.2 충전식 벌브 온도 센서	5
3.1	측정 원리	5
3.2	사용 현황	5
4	21.3 서미스터와 RTD	5
4.1	공통 측정 원리	5
4.2	서미스터 (Thermistor)	5
4.3	RTD (Resistance Temperature Detector)	5
4.4	저항과 온도의 관계	6
4.5	Pt100	6
4.6	자기발열 오차 (Self-heating Error)	6
4.7	자기발열 감소 방법	7
5	21.4 열전대 (Thermocouples)	7
5.1	RTD와 열전대 비교	7
5.2	열전대 측정 원리	7
5.3	열전대의 종류	7

5.4 열전대 구조	8
5.5 기준 접점 보상	8
5.6 중간 금속의 법칙	9
5.7 하드웨어 보상	9
5.8 소프트웨어 보상	9
5.9 열전대 연장도선	9
5.10 열전대 입력 단락	9
5.11 열전대 모의 시험	10
5.12 열전대 단선 검출 (Burnout Detection)	10
5.13 Burnout Mode	10
6 필기 내용 검토 사항	10
6.1 온도와 열에너지	10
6.2 얼음점과 삼중점	10
6.3 자기발열과 양의 피드백	10
6.4 중간 금속의 법칙	11
6.5 열전대 단락과 단선	11

1 온도와 열에너지

1.1 온도 (Temperature)

온도는 물질 내부 분자의 평균 운동에너지와 관계된다.

단원자 이상기체의 분자 하나당 평균 병진 운동에너지는 다음과 같다.

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$$

여기서,

- $\overline{E_k}$: 평균 운동에너지
- k : 볼츠만 상수
- T : 절대온도 (K)

이 식에는 분자 수에 관한 항목이 없다.

따라서 온도는 물질의 전체 수량이 아니라 분자당 평균 운동에너지와 관련된다.

1.2 열에너지 (Thermal Energy)

열에너지는 물질을 구성하는 분자들의 운동에너지 총합이다.

단원자 이상기체에 대해서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{\text{thermal}} = N\overline{E_k} = \frac{3}{2}NkT$$

여기서 N 은 전체 분자 수이다.

온도가 같더라도 분자 수가 많으면 전체 열에너지는 커질 수 있다.

1.3 열 (Heat)

열은 한 시료에서 다른 시료로 전달되는 에너지이다.

열전달 방식은 다음 세 가지이다.

1. 전도 (Conduction)
2. 대류 (Convection)
3. 복사 (Radiation)

1.4 온도 측정

공정의 온도와 물질의 양, 물질의 열적 특성을 알면 열에너지 또는 열에너지 변화를 추정할 수 있다.

2 21.1 바이메탈 온도 센서

2.1 열팽창 원리

금속은 온도가 증가하면 길이가 증가한다.

$$L = L_0(1 + \alpha\Delta T)$$

여기서,

- L : 온도 변화 후 길이
- L_0 : 초기 길이
- α : 선팽창계수
- ΔT : 온도 변화량

길이 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

선팽창계수 α 는 일반적으로 매우 작다.

따라서 눈으로 확인할 수 있는 길이 변화를 얻으려면 초기 길이가 상당히 커야 한다.

교량의 신축이음은 열팽창을 고려한 대표적인 사례이다.

2.2 바이메탈의 원리

서로 다른 선팽창계수를 가진 두 금속을 서로 접합한다.

온도가 변화하면 두 금속은 서로 다른 길이로 팽창하려고 한다.

그러나 두 금속이 접합되어 있으므로 독립적으로 팽창할 수 없다.

그 결과 바이메탈은 굽힘 변형을 일으킨다.

$$\text{온도 변화} \rightarrow \text{열팽창 차이} \rightarrow \text{굽힘 변형}$$

2.3 굽힘 변형의 장점

직선 방향의 열팽창량은 매우 작다.

그러나 굽힘 변형은 곡률 변화에 따른 끝단 변위 또는 회전 운동을 만든다.

따라서 작은 길이 차이를 기계적으로 측정하기 쉬운 움직임으로 변환할 수 있다.

2.4 부르동관과의 관계

바이메탈과 부르동관 모두 곡률 변화를 이용하지만 변형을 발생시키는 원인은 서로 다르다.

- 바이메탈: 이종 금속의 열팽창 차이

- 부르동관: 압력에 따른 관 단면의 형상 변화

두 방식 모두 곡률 변화가 끝단의 움직임으로 나타나는 구조이다.

3 21.2 충전식 벌브 온도 센서

3.1 측정 원리

충전식 벌브 온도 센서는 유체 팽창의 원리를 이용한다.

온도가 증가하면 밀폐된 유체의 체적 또는 압력이 변화한다.

이 변화가 벨로즈 또는 부르동관과 같은 기계식 요소를 구동하여 온도를 표시한다.

온도 증가 → 유체 팽창 또는 압력 증가 → 기계적 변위

3.2 사용 현황

필기에서는 충전식 벌브 센서가 전자식 온도 센서에 의해 대부분 대체되었다고 정리하였다.

충전식 벌브 방식의 특징 중 하나는 외부 전원을 사용하지 않고도 기계식 온도 지시가 가능하다는 점이다.

4 21.3 서미스터와 RTD

4.1 공통 측정 원리

서미스터와 RTD는 모두 온도 변화에 따라 전기저항이 변하는 특성을 이용한다.

온도 변화 → 저항 변화 → 온도 측정

4.2 서미스터 (Thermistor)

서미스터는 온도에 따라 저항이 변화하는 반도체 계열의 온도 센서이다.

서미스터에는 두 가지 대표적인 특성이 존재한다.

- PTC (Positive Temperature Coefficient): 온도가 증가하면 저항이 증가한다.
- NTC (Negative Temperature Coefficient): 온도가 증가하면 저항이 감소한다.

서미스터는 일반적으로 감도가 높지만 저항과 온도 사이의 관계가 비선형적이다.

일반 소비자용 온도 측정 장치에 널리 사용된다.

4.3 RTD (Resistance Temperature Detector)

RTD는 백금, 구리 등의 금속 저항체를 이용한다.

온도가 증가하면 금속의 저항이 증가한다.

RTD는 비교적 선형적인 저항-온도 특성을 가지며, 산업용 온도 측정에 널리 사용된다.

4.4 저항과 온도의 관계

RTD의 저항과 온도 사이의 관계는 다음 1차 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$R_T = R_{\text{ref}} [1 + \alpha(T - T_{\text{ref}})]$$

여기서,

- R_T : 온도 T 에서의 저항
- R_{ref} : 기준 온도에서의 저항
- α : 저항 온도계수
- T_{ref} : 기준 온도

보다 정확한 온도 측정을 위해 고차 다항식이 사용된다.

대표적으로 Callendar-van Dusen 식이 있다.

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2)$$

위 식은 0°C 이상의 특정 백금 RTD 온도 범위에 적용하는 형태이다.

저항과 온도의 관계를 수학적으로 추정하는 대신 실험적으로 작성된 저항-온도 표를 사용할 수도 있다.

표에 정확한 값이 존재하지 않으면 보간법(Interpolation)을 이용한다.

4.5 Pt100

Pt100은 섭씨 0도에서 100 Ω의 저항을 갖는 백금 RTD이다.

산업용 RTD에서 매우 일반적으로 사용된다.

2선식, 3선식 및 4선식 RTD의 상세 결선 방법은 별도 문건에서 다룬다.

4.6 자기발열 오차 (Self-heating Error)

RTD나 서미스터의 저항을 측정하기 위해서는 전류를 흘려야 한다.

전류가 흐르면 다음과 같은 전력이 소비된다.

$$P = I^2 R$$

이 전력은 열로 변환되어 온도 센서 자체의 온도를 상승시킬 수 있다.

이것을 자기발열(Self-heating)이라고 한다.

센서의 온도가 실제 측정 대상보다 높아지므로 측정 오차가 발생한다.

4.7 자기발열 감소 방법

자기발열을 줄이기 위한 방법은 다음과 같다.

1. 여자 전류를 낮춘다.
2. 전류를 연속적으로 공급하지 않고 짧은 펄스 형태로 공급한다.

그러나 전류를 낮추면 측정 전압도 감소한다.

$$V = IR$$

따라서 측정 회로의 감도가 높아야 하며, 신호 대 잡음비(SNR)가 감소할 수 있다.

온도 변화는 일반적으로 비교적 느리므로 전류를 펄스 형태로 공급하고 짧은 시간 동안만 측정하는 방법을 사용할 수 있다.

5 21.4 열전대 (Thermocouples)

5.1 RTD와 열전대 비교

RTD는 저항을 측정하기 위한 여자 전류가 필요하다.

반면 열전대는 서로 다른 두 금속의 열전기적 특성을 이용하여 별도의 여자 전류 없이 전압을 발생시킨다.

따라서 열전대 센서 자체는 외부 전원이 필요하지 않다.

그러나 기준 접점 보상 회로 등이 필요하므로 전체 측정 시스템은 복잡해질 수 있다.

열전대는 일반적으로 견고하며, 넓은 온도 범위에서 사용할 수 있다.

5.2 열전대 측정 원리

열전대는 서로 다른 두 금속으로 구성된다.

측정 접점 J_1 과 기준 접점 J_2 가 서로 다른 온도에 있으면 열전기적 전압 차이가 발생한다.

$$V_{\text{meter}} = V_{J1} - V_{J2}$$

열전대는 두 접점 사이의 온도 차이를 전기적 출력으로 변환하는 차동 온도 센서로 동작한다.

그러나 실제로 알고 싶은 온도는 측정 접점의 온도이다.

따라서 기준 접점에서 발생하는 전압의 영향을 보상해야 한다.

5.3 열전대의 종류

대표적인 열전대 유형은 다음과 같다.

- J형
- K형

- T형
- E형
- N형
- R형
- S형
- B형

이 중 R형, S형, B형은 백금계 합금을 사용한다.

5.4 열전대 구조

열전대의 대표적인 구성은 다음과 같다.

- 이중 금속 와이어
- 측정 접점
- 보호관 (Sheath)
- 커넥터
- 플라스틱 플러그

측정단 구조는 다음 세 가지가 있다.

1. 노출형 (Exposed)
2. 접지형 (Grounded)
3. 비접지형 (Ungrounded)

5.5 기준 접점 보상

열전대에는 측정 접점 외에도 기준 접점이 존재한다.

측정 접점의 온도를 구하려면 기준 접점의 영향을 보상해야 한다.

열전대 표는 일반적으로 기준 접점이 0°C에 있는 상태를 기준으로 한다.

실제 측정 시스템에서는 서미스터 또는 RTD를 사용하여 기준 접점의 온도를 측정한다.

이 온도에 대응하는 열전압을 이용하여 측정값을 보상한다.

$$V_{\text{meter}} = V_{J1} - V_{J2}$$

따라서,

$$V_{J1} = V_{\text{meter}} + V_{J2}$$

5.6 중간 금속의 법칙

열전대 회로에 다른 종류의 금속이 삽입되더라도 그 금속에 의해 형성되는 두 접점이 동일한 온도에 있다면 전체 열기전력은 변하지 않는다.

$$\boxed{\text{중간 접점의 온도 동일} \Rightarrow \text{순열기전력 변화 없음}}$$

이것은 각 접점에서 전압이 발생하지 않는다는 의미가 아니라, 추가된 접점들의 순효과가 상쇄된다는 의미이다.

5.7 하드웨어 보상

하드웨어 보상에서는 기준 접점 전압과 반대 방향으로 작용하는 보상 전압을 회로에 추가한다.

$$V_{\text{meter}} = V_{J1} - V_{J2} + V_{rjc}$$

만약,

$$V_{rjc} = V_{J2}$$

이면,

$$\boxed{V_{\text{meter}} = V_{J1}}$$

5.8 소프트웨어 보상

소프트웨어 보상에서는 기준 접점의 온도를 측정한 후 그 온도에 해당하는 열전압을 계산한다.

이 값을 측정 전압에 더하여 측정 접점의 전압을 구한다.

디지털 온도 트랜스미터에서 사용하며, 열전대 종류가 달라져도 프로그램의 설정과 조회표를 변경하여 대응할 수 있다.

5.9 열전대 연장도선

일반 구리 와이어를 사용하여 열전대를 연장하면 열전대 헤드에 새로운 이종 금속 접점이 형성된다.

이 경우 실제 기준 접점의 위치와 측정 계기 내부의 기준 접점 보상 위치가 일치하지 않을 수 있다.

따라서 열전대와 호환되는 전용 연장도선을 사용한다.

예를 들어 K형 열전대에서는 KX 연장도선을 사용할 수 있다.

5.10 열전대 입력 단락

열전대 입력을 단락시키면 열전대 입력 단자의 전압은 약 0 mV가 된다.

그러나 기준 접점 보상 기능은 계속 작동한다.

따라서 계기는 기준 접점의 주변 온도에 해당하는 값을 표시할 수 있다.

이 특성은 열전대 계기의 기본적인 동작 확인에 사용할 수 있다.

5.11 열전대 모의 시험

밀리볼트 전압원을 사용하여 열전대를 모의할 때에는 기준 접점 보상에 의한 전압을 고려해야 한다.

기준 접점 보상이 활성화되어 있다면 입력한 밀리볼트에 기준 접점의 증가 전압이 더해질 수 있다.

따라서 정확한 온도 모의를 위해서는 교정기 또는 트랜스미터의 기준 접점 보상 조건을 확인해야 한다.

5.12 열전대 단선 검출 (Burnout Detection)

열전대의 대표적인 고장 형태는 개방 회로(Open Circuit)이다.

열전대가 단선되면 측정 회로가 부동 상태(Floating)가 되어 전기적 잡음에 영향을 받을 수 있다.

단선 검출 회로에서는 고저항 바이어스 저항을 사용하여 입력이 특정 방향으로 이동하도록 한다.

5.13 Burnout Mode

Burnout Mode에는 대표적으로 Hi와 Lo 설정이 있다.

- Hi: 단선 시 고온 방향으로 입력을 유도한다.
- Lo: 단선 시 낮은 전압 방향으로 입력을 유도한다.

이러한 동작은 고장 시 설비가 안전한 방향으로 움직이도록 하기 위한 Fail-safe 설계와 관련된다.

그러나 Hi 또는 Lo 설정 중 어느 것이 안전한지는 공정 위험과 제어 시스템의 동작에 따라 달라진다.

6 필기 내용 검토 사항

6.1 온도와 열에너지

온도는 평균 분자 운동에너지와 관련되며, 전체 열에너지는 분자 수와 관련된다.

단원자 이상기체에 사용하는 $\frac{3}{2}kT$ 관계를 모든 물질에 그대로 적용해서는 안 된다.

6.2 얼음점과 삼중점

일반적인 얼음과 물의 혼합물은 얼음점 기준에 해당한다.

삼중점은 고체, 액체, 기체의 세 상이 평형 상태로 공존하는 조건이다.

따라서 얼음점과 삼중점을 동일한 개념으로 취급해서는 안 된다.

6.3 자기발열과 양의 피드백

NTC 서미스터에서 온도 상승에 따라 저항이 감소하고 전류가 증가하는 현상은 회로의 전원 공급 방식에 따라 달라진다.

이러한 현상을 모든 서미스터와 RTD의 공통 특성으로 일반화해서는 안 된다.

6.4 중간 금속의 법칙

추가된 접점에서 전압이 발생하지 않는 것이 아니라, 중간 접점들이 등온 상태일 때 전체 열기전력의 순효과는 변하지 않는 것이다.

6.5 열전대 단락과 단선

단락 상태에서는 입력 전압이 약 0 mV가 되지만, 단선 상태에서는 전압이 반드시 0 V가 되는 것은 아니다.

단선 시에는 바이어스 회로에 의해 입력이 Hi 또는 Lo 방향으로 유도될 수 있다.