

열전대 교정 방법

응용 지침서

열전대 응용 지침서 시리즈

열전대에 대한 네 가지 응용 지침서 중 네 번째 지침서입니다.

1. 열전대 기본 사항
2. 열전대 교정 장비 선택 방법
3. 열전대 교정 시스템의 불확실성 계산
4. 열전대 교정 방법

열전대 교정 설정

판독기 연결

내외부 기준 접점이 사용되는지 여부에 따라 판독기에 열전대를 연결하는 경우가 결정됩니다. 처리량이 많고 낮음 ~ 높음 수준의 정확도가 필요한 응용 분야에는 일반적으로 내부 기준 접점이 사용됩니다. 이 경우 오차가 발생할 가능성이 낮고 프로세스가 좀 더 간단합니다. 기준 접점 보상 회로 자체에 추가되는 불확실성 때문에 (보통 0.05°C ~ 0.25°C) 정확도가 제한됩니다.

내부 기준 접점 연결

2선 열전대는 극성을 확인하면서 판독기에 직접 연결하거나 연장 전선을 통해 연결합니다. 오차가 발생하므로 연장 전선에는 구리를 사용하면 안 됩니다. 모두 단단하고 깔끔하게 연결되었는지 확인합니다. 느슨하게 연결되어 있거나 연결 부위가 지지분하면 상당한 전압/측정 오차가 발생합니다. 스위치와 멀티플렉서는 일반적으로 구리로 구성되어 있으므로 이러한 장치를 사용해도 오차가 발생합니다. 열전대 소재로 구성된 스위치를 사용할 수 있으며, 단일 유형의 열전대를 많이 교정해야 하는 경우에도 이 스위치를 사용할 수 있습니다. 그러나 열전대 소재로 구성된 스위치라 해도 여전히 정량화하기 매우 심한 오차가 발생합니다. 많은 수의 열전대를 교정해야 하는 경우 다중 채널 판독기 또는 외부 기준 접점 기술을 사용하는 것이 좋습니다.

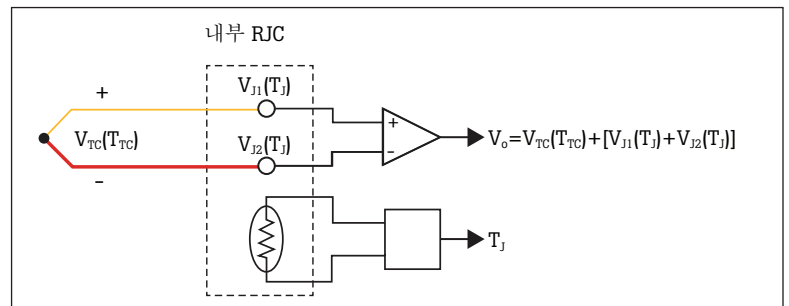


그림 1. 내부 기준 접점 연결

외부 기준 접점 연결

외부 기준 접점은 정확도가 가장 높기 때문에 거의 항상 귀금속(R, S 유형) 열전대를 교정하는 데 사용됩니다. 또한 일반적으로 비금속 열전대의 정확도 요구 사항을 충족하는 데에는 필요하지 않습니다. 외부 기준 접점은 높은 정확도가 필요하거나 판독기에 내부 기준 접점 보상이 갖춰지지 않은 경우(예: 일반 DMM)에 사용해야 합니다. 외부 기준 접점 연결은 단일 테스트 대상 유닛(UUT)과 약간 더 관련되어 있기는 하지만, 여러 UUT를 교정하고 불확실성을 최소화해야 하는 경우 상당히 복잡해질 수 있습니다.

열전대는 높은 품질의 구리선을 통해 판독기에 직접 연결됩니다. 그런 다음 열전대-구리 연결을 Ice bath에 담가 기준 접점을 형성합니다. 연결은 다른 연결에서 전기적으로 절연되어 있고 물리적으로 건조한 상태여야 합니다. 보통 전선은 용접이나 납땀한 상태 또는 단단히 꼬인 상태에서 열 수축 튜브로 보호됩니다. 전선 그룹을 박막 금속이나 유리 끝 막음 튜브 안에 넣고 이 튜브를 다시 Ice bath에 넣습니다. 담금 깊이가 중요한데, 이는 전선 지름에 따라 달라집니다. 일반적으로 6~12인치면 충분합니다. 구리 연결선은 직접 판독기에 연결하거나 스위치를 통해 판독기에 연결합니다. 각 UUT에는 개별 기준 접점이 필요합니다.

일부 UUT는 열전대 커넥터에서 중단되므로 설명한 대로 연결할 수 없습니다. 이러한 경우 필요한 유형의 구리선과 열전대 전선으로 "기준 접점 프로브"를 구성할 수 있습니다. 열전대 끝은 UUT 커넥터에 맞는 커넥터로 중단 처리되어 있습니다. 높은 정확도가 필요한 경우 이러한 프로브를 교정해야 합니다. 또는 내부 기준 접점 보상을 사용하면 됩니다. 주로 내부 기준 접점 보상 기능을 갖춘 판독기에는 열전대 커넥터가 내장되어 있습니다.

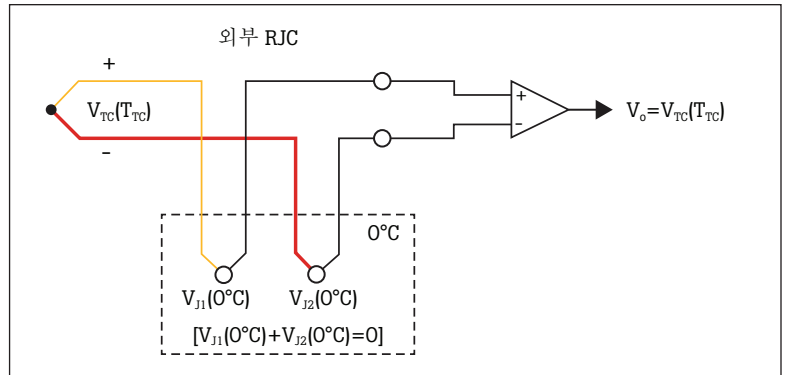


그림 2. 외부 기준 접점 연결

프로브 배치

모든 열원에는 불안정성과 구배가 있습니다. 이에 따라 교정 오차 및 불확실성이 발생합니다. 이러한 영향을 최소화하려면 프로브를 가급적 서로 가깝게 배치해야 합니다. 드라이웰 열원에서 프로브 담금점은 고정되어 있습니다. 수조와 개방형 튜브 전기로를 사용하면 유연하게 프로브를 배치할 수 있습니다. 교정 대상 프로브는 방사형 패턴으로 배치하고 기준 프로브는 원의 중앙에 배치해야 합니다. 튜브 전기로를 사용하는 경우 열전대가 기준 온도계 주위에 번들로 제공되며 유리 섬유 코어 또는 테이프로 함께 묶여 전기로 안에 삽입됩니다. 이와 같이 배치하면 기준 프로브에서 각 UUT까지의 거리를 동일하게 맞출 수 있습니다.

감지 요소도 동일한 평면 위에 있어야 합니다. 열전대 접점은 보통 프로브 팁에 있습니다. 따라서 스템이 발생하지 않도록 충분히 담가야 합니다. 일반적으로 프로브가 프로브 지름의 15배에 감지 요소의 길이를 더한 깊이로 잠기면 충분히 담근 것입니다. 예를 들어 프로브 지름이 0.25인치이고 감지 요소의 길이가 1.25인치이면 최소 5인치((15 x 0.25인치) + 1.25인치 = 5인치) 깊이로 담가야 합니다. 이 기준은 일반적으로 프로브가 박막으로 구성되어 있고 열전달이 양호한 상태일 때 적절합니다. 프로브가 두꺼운 막으로 구성되어 있거나 열 전달 상태가 양호하지 않은 경우(예: 구멍 크기가 올바르지 않은 드라이웰) 더 깊이 담가야 합니다.

데이터 수집

산업 표준과 지침에서는 열전대가 사용되는 전체 온도 범위에 대해 열전대를 교정해야 한다고 요구하고 있습니다. 교정 작업에는 상당한 시간이 소요될 수 있는데, 특히 여러 열전대를 교정해야 하는 경우가 그렇습니다. 이 프로세스에는 설정점 온도로 열원을 램핑하는 작업과 설정점 온도가 안정적인 경우 온도 판독값을 기록하는 작업이 포함됩니다. 기록하기 전에 안정성과 균일성을 확보하려면 열원의 각 설정점에 시간을 충분히 허용해야 합니다. 그런 다음 설정점에서 연속으로 관련 프로세스를 반복하여 열전대의 작동 온도 범위를 포괄하도록 합니다.

1586A Super-DAQ를 통한 열전대 교정 자동화

1586A Super-DAQ에는 열전대 교정 프로세스를 자동화하는 "센서 교정 자동화" 기능이 포함되어 있습니다. 1586A Super-DAQ를 9118A 열전대 교정 전기로에 연결하면 Super-DAQ가 9118A 설정점 온도를 제어 및 모니터링하고 최대 40개의 열전대를 판독하여 사용자가 정의한 매개변수 내에서 전기로가 안정적인 경우 자동으로 데이터를 수집합니다. 그런 다음 Super-DAQ는 9118A를 프로그래밍된 나머지 설정점 온도로 이동하여 같은 방법으로 각 설정점에서 데이터를 수집합니다. 테스트를 구성해서 시작한 후에는 기술자가 다른 작업을 수행하기 위해 자리를 비워도 됩니다. 이처럼 Fluke Calibration에서만 사용할 수 있는 고유한 기능 덕분에 연구소의 생산성과 측정 정확도가 크게 향상되었습니다.

자세한 내용을 확인하려면 1586A Resource Center (www.flukecal.com)를 방문하십시오.

두 가지 교정 옵션

열전대 교정에는 특성화 및 공차 테스트의 두 가지 유형이 있습니다. 대부분의 열전대는 특성화 교정을 수행할 만큼 안정적이지 않습니다. 보통 열전대 프로브 및 전선은 공차 테스트를 거쳐 ASTM(미국재료시험협회) 오차 등급을 준수합니다. 공차 테스트에는 다양한 온도에서 전압 출력 측정과 표준 테이블에서의 오차 계산이 포함됩니다.

공차 테스트

대부분의 응용 분야에서 열전대는 공차 테스트를 거쳐 표준 모델이 특정 한계 내에서 예측하는 대로 작동하는지 확인합니다. ASTM에는 "표준 오차 한도"와 "특수 오차 한도"라는 두 가지 한도가 있습니다. 특수 오차 한도는 좀 더 엄격한 공차를 사용하고, 더욱 고가의 열전대에서 사용되는 더 높은 등급의 향상된 성능을 아우르도록 개발되었습니다. ASTM 사양에 맞춰 열전대를 교정하는 것은 열전대가 표준 모델을 따르는지 확인하는 것입니다. 개별 열전대 프로브를 교정해야 하는 경우도 있지만, 다른 경우에는 전체 전선 풀에 인증이 필요합니다. 이 방법은 데이터 피팅 또는 복잡한 계산 과정을 거칠 필요 없이 간단합니다.

공차 테스트 단계

1. 테스트 중인 열전대의 전압 값 및 온도를 참조 표준 열전대에서 얻은 동일한 측정값과 비교합니다. 전압값은 충분히 정밀한 디지털 전압계 또는 이러한 용도에 맞는 다른 판독기에서 직접 판독할 수 있습니다.
2. 테스트 중인 각 열전대와 참조 표준 열전대의 온도 차이가 "°C"로 기록됩니다. 해당 열전대 유형의 온도 값(°C)과 전압을 비교한 표를 사용하여 이와 같이 변환됩니다. 허용 가능한 표에는 NIST Monograph 175(1993) 또는 ASTM E230-03(2011)에서 찾은 동일한 데이터와 값이 포함되어 있어야 합니다.
3. 부록 A "열전대 공차 요약 표"에 설명된 것과 같은 열전대 공차는 테스트 중인 열전대가 기준 열전대에서 얻은 측정값과 관련된 "표준 또는 특수 한도 공차"를 충족하는지 판단하는데 사용됩니다.

열전대 특성화

공차 테스트가 적용된 온도에 대해 열전대의 전압 응답과 관련된 정보를 충분히 제공하지 않는 경우, 전체 범위에 걸친 열전대의 성능 특성화를 이용하면 좀 더 완벽한 분석을 얻을 수 있습니다. 열전대 특성화는 일반적으로 귀금속 열전대와 관련되어 높은 정확도를 요구하는 응용 분야에 사용됩니다. 대부분의 경우 비금속 열전대는 안정적이지 않으므로 특성화 중 관찰된 동작이 재현되지 않습니다.

열전대 특성화에는 측정된 전압과 표준 전압의 차이를 확인해서 이 차이를 2차 다항식에 맞춰 보정하는 단계가 포함되어 있습니다. 데이터 피팅은 개념상으로는 단순하지만 실제로는 복잡할 수 있습니다. 기본적으로 데이터 피팅은 열전대 및 교정에 고유한 일련의 계수에서 얻을 수 있는 교정 데이터가 포함된 여러 연립 방정식을 푸는 과정입니다. 허용되는 "특성화"는 NIST 특별 공보 250-35에 발표된 원리를 기반으로 하며, Fluke Calibration에서 유형 S 및 R 열전대(1)를 재교정하는 데 유사하게 사용됩니다.

특성화 단계

1. 열전대를 FP(고정점) 셀 4개에 순차적으로 배치합니다. 고정점 셀 관련 요약 정보는 그림 3을 참조하십시오. 테스트 중인 열전대의 전압이 FP 셀의 네 가지 기준 온도와 관련하여 측정됩니다. 열전대 측정 접점이 FP 셀에 있는 동안 열전대 기준 접점은 독립적인 서미스터 표준에 따라 모니터링되는 물 동결점 항온조에서 제어됩니다. 참고: 전기로와 참조 표준 열전대를 FP 셀 대신 사용하여 테스트 온도 환경을 제공할 수 있습니다. 이 경우 전기로가 다양한 기준 온도로 설정되어 있으므로 방사형으로 배치된 테스트 중인 열전대를 전기로 중심에 배치된 참조 표준 열전대에서 측정한 판독값을 기준으로 비교할 수 있습니다.

2. 테스트 중인 열전대와 FP 셀이 열평형 상태에 도달하면 열전대 전압이 기록됩니다. 이 단계가 모든 FP 셀 온도 4개에 대해 반복됩니다. 또한 모든 열전대 전압 값에는 열전대 기준 접점이 배치되어 있는 절연된 컨테이너의 해당 빙점 온도 레코드도 포함되어 있습니다.

3. 각 FP의 테스트 중인 열전대에서 얻은 고유한 전압 측정값은 "편차 함수"를 작성하는데 사용되는 필수 구성 요소를 제공합니다. 그런 다음 이 함수는 해당하는 열전대 유형의 표준 "참조 함수"에 추가됩니다. 최종 결과는 테스트 중인 열전대에 대한 "열전대 특성화"입니다.

"편차 함수"를 작성하기 위해 선형 대수 연산이 여러 개 수행되어 "FP 온도 및 해당 온도의 제공값", "FP 온도에서 테스트 중인 열전대에서 측정된 값 간의 전압 차이"와 동일한 FP 온도에서 해당하는 "참조 함수" 전압 값으로 구성된, 과도하게 결정된 시스템의 "최소제곱해"를 결정합니다. 최소제곱해는 "참조 함수"의 해당 항에 대수적으로 추가되는 계수 두 개를 제공하여 "열전대 특성화" 함수를 생성합니다. 선형 대수 연산에 대한 요약은 부록 B를 참조하십시오.

동결점 요소 또는 혼합물	화학적 기호	ITS-90 동결점 온도(°C)
은	Ag	961.78
알루미늄	Al	660.323
아연	Zn	419.527
주석	Sn	231.928
물	H ₂ O	0.010

⁽²⁾NIST Monograph 175, (1993), p.4.

그림 3. 고정점 셀 요약

부록 A - 열전대 공차 요약 표^(3,4)

연장 등급 색상 = 회색				
유형 B	Pt - 30% Rh와 Pt - 6% Rh의 비교			
테스트 온도	유형 B 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
1250.00°C	10.622uV/°C	7.311mV	6.25	3.13
1000.00°C	9.123uV/°C	4.834mV	5.00	2.50

범위: 870°C~700°C, 공차: 표준: 판독값의 ±0.5%, 특수: 판독값의 ±0.25%

연장 등급 색상 = 자주색				
유형 E	Ni - Cr과 콘스탄탄의 비교			
테스트 온도	유형 E 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
870.00°C	77.393uV/°C	66.473mV	4.35	3.48
500.00°C	80.930uV/°C	37.005mV	2.50	2.00
250.00°C	76.240uV/°C	17.181mV	1.70	1.00

범위: -200°C ~ 870°C, 공차: 표준: 판독값(0 ~ 870°C)의 ±1.7°C 또는 ±0.5%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.
특수: 판독값(0 ~ 870°C)의 ±1.0°C 또는 ±0.4%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.

연장 등급 색상 = 검은색				
유형 J	철과 콘스탄탄의 비교			
테스트 온도	유형 J 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
760.00°C	63.699uV/°C	42.281mV	5.63	3.00
500.00°C	55.987uV/°C	27.393mV	3.75	2.00
250.00°C	55.512uV/°C	13.555mV	2.20	1.10

범위: 0°C ~ 760°C, 공차: 표준: 판독값의 ±2.2°C 또는 ±0.75%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.
특수: 판독값의 ±1.1°C 또는 ±0.40%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.

연장 등급 색상 = 노란색				
유형 K	Ni - 10% Cr과 Ni - 5%(알루미늄 - 실리카)의 비교			
테스트 온도	유형 K 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
1260.00°C	35.566uV/°C	51.000mV	9.45	5.04
900.00°C	40.005uV/°C	37.326mV	6.75	3.60
600.00°C	42.505uV/°C	24.905mV	4.50	2.40
300.00°C	41.446uV/°C	12.209mV	2.25	1.20

범위: -200°C ~ 1260°C, 공차: 표준: 판독값(0 ~ 1260°C)의 ±2.2°C 또는 ±0.75%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.
특수: 판독값(0 ~ 1260°C)의 ±1.1°C 또는 ±0.40%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.

연장 등급 색상 = 주황색				
유형 N	Ni - 14% Cr - 1.5% Si와 Ni - 4.5% Si - 0.1% Mg의 비교		연장 등급 색상 = 주황색	
테스트 온도	유형 N 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
1260.00°C	36.580uV/°C	46.060mV	9.45	5.04
900.000°C	39.040uV/°C	32.371mV	6.75	3.60
600.000°C	38.959uV/°C	20.613mV	4.50	2.40
300.000°C	35.422uV/°C	9.341mV	2.25	1.20

범위: 0°C ~ 1260°C, 공차: 표준: 판독값의 ±2.2°C 또는 ±0.75%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.
 특수: 판독값의 ±1.1°C 또는 ±0.40%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.

연장 등급 색상 = 녹색				
유형 R	Pt와 Pt - 13% Rh의 비교		연장 등급 색상 = 녹색	
테스트 온도	유형 R 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
1084.62°C	13.575uV/°C	11.640mV	2.71	1.09
961.78°C	13.065uV/°C	10.003mV	2.40	0.96
660.32°C	11.641uV/°C	6.277mV	1.65	0.66
419.53°C	10.480uV/°C	3.611mV	1.50	0.60
231.93°C	9.168uV/°C	1.756mV	1.50	0.60

범위: 0°C ~ 1480°C, 공차: 표준: 판독값의 ±1.5°C 또는 ±0.25%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.
 특수: 판독값의 ±0.6°C 또는 ±0.10%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.

연장 등급 색상 = 녹색				
유형 S	Pt와 Pt - 10% Rh의 비교		연장 등급 색상 = 녹색	
테스트 온도	유형 S 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
1084.62°C	11.798uV/°C	10.575mV	2.71	1.09
961.78°C	11.418uV/°C	9.148mV	2.40	0.96
660.32°C	10.398uV/°C	5.860mV	1.65	0.66
419.53°C	9.638uV/°C	3.447mV	1.50	0.60
231.93°C	8.711uV/°C	1.715mV	1.50	0.60

범위: 0°C ~ 1480°C, 공차: 표준: 판독값의 ±1.5°C 또는 ±0.25%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.
 특수: 판독값의 ±0.6°C 또는 ±0.10%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.

연장 등급 색상 = 파란색				
유형 T	Cu와 콘스탄탄의 비교		연장 등급 색상 = 파란색	
테스트 온도	유형 T 감도	공칭 EMF	표준 한도 공차(± °C)	특수 한도 공차(± °C)
370.00°C	60.928uV/°C	19.030mV	2.78	1.48
200.00°C	53.150uV/°C	9.288mV	1.50	0.80
100.00°C	46.785uV/°C	4.279mV	1.00	0.50

범위: -200°C ~ 370°C, 공차: 표준: 판독값(0 ~ 370°C)의 ±1.0°C 또는 ±0.5%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.
 특수: 판독값(0 ~ 370°C)의 ±1.0°C 또는 ±0.4%, 어느 쪽이든 더 큰 쪽을 적용합니다.

부록 B - 열전대 특성화 선형 대수 연산 단계

- 고정점 온도와 해당하는 온도 제공이 "A"라는 "5 x 2 행렬"에 기록됩니다. 이러한 단계에서 설명하는 행렬과 이 행렬에 포함된 요소에 대한 자세한 내용은 이 부록 끝 부분의 정보를 참조하십시오.
- 행렬 "A"의 오른쪽에 있는 요소로 배치된 더 작은 "2 x 1" 행렬은 해 벡터 (solution vector) 를 지정하는 데 사용됩니다. 이러한 행렬을 "X"라고 합니다.
- 이전의 두 행렬 "A"와 "X"의 곱은 테스트 중인 측정된 EMF 값과 FP 온도의 "참조 함수" EMF 값의 차이에 따라 형성된 최종 행렬에 대해 동일하게 설정됩니다. 이는 "b"라는 "5 x 1 행렬"입니다.
- 이 체계의 방정식 양식은 다음과 같습니다. $[A] [X] = [b]$ ⁽⁵⁾.
- 전치 및 역 단위 행렬을 사용하는 4단계 방정식에 대한 최소제곱해 "x*"의 양식은 다음과 같습니다. $[x^*] = (([A]^T [A])^{-1}) [A]^T [b]$ ⁽⁵⁾.
- 4, 5단계의 행렬 방정식은 50~54페이지에 있는 참조 (5)의 정보에서 수정되었습니다.
- 해 행렬은 $[x^*]$ 가 "2 x 1 행렬"이고, 이 행렬에는 2차(최적합) 곡선 "dc₁" 및 "dc₂"에 대해 0이 아닌 계수가 두 개 포함되어 있습니다.
- 유형 S 열전대에 대한 "참조 함수"는 다음과 같이 확장할 수 있습니다.

$$EMF_{ref} = c_0 + (c_1) \cdot t_{90} + (c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$$
 (여기서 EMF는 μVdc 이고 t_{90} 의 단위는 °C임)
- "차이 함수" 또는 이차 최적합 곡선은 $EMF_{dev} = 0 + (dc_1) \cdot t_{90} + (dc_2) \cdot t_{90}^2$ 입니다.
- 마지막으로 8단계의 "차이 함수"가 7단계 유형 S의 "참조 함수"에 대수적으로 추가되면 결과 중첩 방정식은 테스트 중인 특정 유형 S 열전대에 고유한 "열전대 특성화"입니다.

$$EMF_{char} = c_0 + (dc_1 + c_1) \cdot t_{90} + (dc_2 + c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$$
 ⁽⁶⁾

특성화 행렬, 요소 및 최소제곱해 $[x^*]$ (°C 단위 온도, mVdc 단위 EMF)

방정식 행렬의 체계:

$$[A] [X] = [b]$$

$$\text{행렬 요소: } [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \quad [X] = \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix} \quad [b] = \begin{bmatrix} mv_{meas(0)} - mv_{ref(0)} \\ mv_{meas(Sn)} - mv_{ref(Sn)} \\ mv_{meas(Zn)} - mv_{ref(Zn)} \\ mv_{meas(Al)} - mv_{ref(Al)} \\ mv_{meas(Ag)} - mv_{ref(Ag)} \end{bmatrix}$$

최소제곱해 행렬: $[x^*] = (([A]^T [A])^{-1}) [A]^T [b]$ (여기서 $[x^*] \approx \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix}$ 및 $[x^*]$ 의 근사치는 $[X]$ 임)

$$\text{행렬 요소: } [A]^T [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \end{bmatrix}$$

$$([A]^T [A])^{-1} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{[(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2) \cdot (\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4)] - [(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3) \cdot (\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3)]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix}$$

최소제곱해:

$[X^*]$

$$[X^*] = \frac{1}{\left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \right] - \left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \right]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mv_{meas(0)} - mv_{ref(0)} \\ mv_{meas(Sn)} - mv_{ref(Sn)} \\ mv_{meas(Zn)} - mv_{ref(Zn)} \\ mv_{meas(Al)} - mv_{ref(Al)} \\ mv_{meas(Ag)} - mv_{ref(Ag)} \end{bmatrix}$$

참조

- 1) NIST Special Publication 250-35, "열전대 및 열전대 소재의 교정", G.W. Burns and M.G. Scroger, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1989.
- 2) NIST Monograph 175, "온도-기전력 기준 함수 및 ITS-90에 따라 문자 지정된 열전대 유형의 표", G.W. Burns, et al, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1993.
- 3) ASTM E230-03, "표준화된 열전대에 대한 표준 사양 및 온도-기전력 (EMF) 표", ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 2003.
- 4) Omega Engineering 기술 참조, 섹션 Z. <http://www.omega.com/temperature/Z/zsection.asp> (TC 색상 코드에 사용됨)
- 5) 기하학적 변환 및 이미지 왜곡, University of Utah, SCI (School of Computer Imaging) Institute, School of Computing, an MS-PowerPoint Presentation by Ross Whitaker, as modified by Guido Gerig, Class CS6640, Fall, 2012, pp. 50-54.
- 6) 유형 S에 대한 열전대 교정 보고서, 최신 버전, Fluke Calibration, American Fork, UT, p. 2 of 14.

Fluke Calibration. Precision, performance, confidence.™

Electrical	RF	Temperature	Pressure	Flow	Software
------------	----	-------------	----------	------	----------

Fluke Calibration
PO Box 9090,
Everett, WA 98206 U.S.A.

Fluke Europe B.V.
PO Box 1186, 5602 BD
Eindhoven, The Netherlands
Web access: <http://www.flukecal.eu>

자세한 내용은 다음으로 문의하십시오.
미국 (877) 355-3225 또는 팩스 (425) 446-5716
유럽/중동/아프리카 +31 (0) 40 2675 200 또는 팩스 +31 (0) 40 2675 222
캐나다 (800)-36-FLUKE or Fax (905) 890-6866
기타 국가 +1 (425) 446-6110 또는 팩스 +1 (425) 446-5716
웹 사이트: <http://www.flukecal.com>

©2015 Fluke Calibration. 사양은 예고 없이 변경될 수 있습니다.
Printed in U.S.A. 6/2015 6004550B_KR

이 문서의 수정은 Fluke Calibration 의 서면 허가 없이는 허용되지 않습니다.