

백서:

최적의 열팽창 성능을 위한 엔코더 스케일 고정 방법

기계의 온도가 변화하면 열 팽창으로 인해 많은 기계 부품의 길이도 변화합니다.

모든 엔코더 스케일은 기계의 다른 구성품과 같은 열 법칙을 따릅니다. 즉 온도가 변하면 스케일의 길이도 변합니다. 발생하는 오차를 허용하거나 기계의 작동 환경을 제어할 수는 있지만 온도가 섭씨 1도만 변해도 1/100 (10 μm/m)이 넘는 부품의 측정 오차가 발생할 수 있습니다. 이 백서에서는 스케일의 열 팽창을 어떻게 관리할 수 있는지 알아봅니다. 온도 변화로 발생된 변형을 계산하고 보상하는 방법을 제시합니다. 또한 스케일과 모재 간 팽창 불일치로 인해 엔코더 시스템의 전반적인 성능에 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대해서도 설명합니다.

1. 열팽창을 고려한 고정 방법

열에 의한 스케일의 변형은 계산하고 보정할 수 있습니다. 일반적으로 측정된 온도와 열 팽창 계수(CTE)를 사용하여 스케일과 모재의 길이 변화를 계산하는 방식입니다. 이 방식을 이용하여 변형을 보정하면 됩니다. 스케일의 열 변형은 아래 설명하는 고정 방법에 따라 달라집니다. 기계의 주변 부품과 함께 공작물의 온도를(관련된 경우) 정확하게 측정해야 합니다. 두 오차 모두 열 보정에 영향을 미칠 수 있기 때문입니다.

예제 1: 작동 온도 범위가 15 ~ 25 °C이고 1 m 길이 리니어 축을 갖는 알루미늄 소재의 기계를 예로 들어 보겠습니다. 알루미늄은 CTE가 약 23 ppm/°C로 상대적으로 높습니다. 1 m 축은 온도 범위(±5 °C)에서 ±115 μm($1 \times 23 \times 10^{-6} \times 5 = 115 \times 10^{-6}m$) 팽창 및 수축합니다.

대부분의 리니어 엔코더 스케일은 스테인리스 스틸과 같이 알루미늄과 열 팽창이 다른 소재로 만듭니다. 이러한 엔코더를 20 °C에서 축에 설치하고 열 팽창을 무시하면 심각한 위치 불확실성이 초래될 수 있습니다. 예제의 1 m 알루미늄 축은 스케일 고정 방법에 따라 5 °C 온도 변화마다 115 μm 위치 오차가 발생할 수 있습니다.

이제 스케일을 모재에 단단히 고정시켜야 하는지 또는 모재 위에 독립적으로 떠 있도록 고정 해야할지 여부를 고려해야 합니다.

1.1 모재 마스터링

기계 주변의 온도변화로 115 μm씩 팽창하는 경우에도 모든 온도에서 기계 상의 동일한 물리적 위치로 이동하는 것이 좋습니다(예를 들어 공작물이 기계의 특정 위치에 고정되는 경우). 이러한 경우 스케일은 기계와 함께 탄력적으로 팽창, 수축되어야 합니다.

이 고정 방법을 '모재 마스터링'이라고 합니다. 모재가 스케일을 지배하고 스케일이 모재와 동일한 비율로 팽창하기 때문입니다.

1.1.1 마스터링 스케일 선택

다음과 같이 마스터링 스케일이 효과적인 여러 가지 경우가 있습니다.

절대 위치보다 기계의 좌표계가 필요한 경우(예: 기계 베드에서 고정 위치에 있는 공작물로 이동하는 경우).

공작물의 CTE가 기계 모재의 CTE와 거의 일치하고 두 CTE가 같은 온도에서 유지되는 경우 스케일과 공작물이 매우 근사하게 팽창합니다. 따라서 특정 온도에서 모재의 길이 변화는 스케일의 동일한 길이 변화로 자동 보정됩니다.

기계 축이 길면 마스터링 스케일과 관련된 불확실성이 길이에 따라 증가하지 않지만 플로팅 스케일의 경우에는 길이에 따라 크게 증가합니다.

모재의 열 전도성이 낮고 열 질량이 큰 경우(예를 들어 두꺼운 화강암) 단기적인 온도 변화에는 모재 온도가 최소 수준으로 변화하고 모재가 적게 팽창되므로 이러한 단기적인 온도 변화를 무시할 수 있습니다. 그러나 장기적인 온도 변화는 반드시 고려해야 합니다. 모재의 평균 온도가 중요하기 때문에 장기적인 온도 변화를 정확하게 측정하는 것이 더 어려울 수 있습니다. 따라서 검증된 표준 길이를 이용하여 주기적으로 검증하는 것과 같이 보다 직접적인 길이 측정이 더 적합할 수 있습니다.

1.2 플로팅 스케일

스케일은 모재와 독립적으로 자유롭게 팽창 또는 수축되도록 고정할 수 있으며 이러한 스케일을 "플로팅" 스케일이라고 합니다. 이러한 플로팅 스케일의 팽창은 스케일 자체의 CTE와 온도에 따라 결정됩니다. 예제 1에서 기계의 소재는 열 팽창 계수가 ~23 ppm/°C로 높은 알루미늄입니다. 스틸 스케일은 팽창 계수가 약 10.1 ppm/°C로 더 낮아, 5°C 변화에 115 µm 팽창하는 알루미늄 모재에 비해 스케일은 50.5 µm 만 팽창하게 됩니다. 저팽창 스케일을 사용하고 열 보정을 하면 성능을 더 향상시킬 수 있습니다.

플로팅 스케일의 팽창은 스케일 온도로 제어됩니다. 플로팅 스케일은 <1.5 mm로 얇은 경향이 있으며 상대적으로 열전도율이 높습니다. 따라서 두께에 따른 스케일 온도가 균일하다고 가정할 수 있습니다. 때문에 관련 온도 측정(및 정확한 열 보정)이 더 쉽습니다. 플로팅 스케일은 모재에 거의 독립적이므로 모재의 팽창 정도를 정확하게 알 필요가 없습니다.

CTE가 낮은 스케일을 사용하면 플로팅 스케일의 열 팽창을 개선할 수 있습니다. 온도 변화에 따른 보정량이 작아지는 경향이 있으므로 불완전한 온도 측정에 따른 보정 오차도 작아집니다. 이는 온도 측정에 있어 불확실성이 존재하거나 기계 전체에 국지적인 온도 차이가 있을 수 있는 경우 특히 효과적입니다.

모재 팽창은 모든 고정 방식에 있어 스케일의 순수한 팽창에 미세한 영향을 미칩니다. 즉 CTE만으로 예측한 것만큼 정확하게 스케일이 팽창되지 않습니다. 완벽한 플로팅 스케일 대비 예상되는 위치에서 벗어나는 편차량을 교란이라고 하며 플로팅 스케일 설치를 위해서는 교란을 최소화해야 합니다. 이러한 교란은 스케일의 CTE가 매우 낮더라도 달성 가능한 유효 CTE를 제한한다는 점에 유의해야 합니다. Renishaw는 여러 조건에서 스케일의 교란을 최소화하도록 설계된 두 가지 플로팅 스케일 고정 방법을 지원합니다. 이것은 접착식 양면 테이프를 사용하는 방법과 스파 스케일용 클립 또는 스틸 테이프 스케일용 FASTRACK™을 사용하여 스케일의 움직임을 물리적으로 제한하는 것(기계식 고정방식)이 포함됩니다. 다음 섹션에서는 스케일의 완벽한 플로팅 동작을 방해하는 교란에 대해 자세히 설명합니다.

2. 플로팅 스케일의 교란

2.1 스케일 교란

Renishaw는 두 가지 고정 방법, 즉 접착식 테이프 고정과 기계식 고정 방식에 따른 교란에 대한 수학적 모델을 개발하고 실험과 검증을 마쳤습니다. 이 모델에 대한 설명은 여기서 자세히 다루기에 너무 복잡하며 일부 결과는 비선형적입니다. 예를 들어 스케일의 끝 부분에서 위치 오차가 가장 크지만 이 오차는 스케일 길이를 따라 선형 방식으로 보간할 수 없습니다.

다음 공식은 스케일 끝 부분에서 발생하는 최악의 교란을 예측합니다.

2.1.1 주요 용어

교란은 고정 방식에 따라 스케일 팽창과 모재 팽창이 서로 결합하여 발생하는 스케일 끝 부분의 위치 오차입니다.

이는 이론적으로 완벽한 플로팅 스케일과 실제 스케일간의 길이 차이입니다. 교란은 일반적으로 μm 단위로 측정하며 이 백서에서는 u 로 표시합니다.

상대적 팽창은 온도 변화로 인한 스케일과 모재 사이의 열팽창에 대한 상대적 변화입니다(그림 1 참조). 이 백서에서는 ρ 로 표시되며 측정 단위는 ppm입니다. 상대적 팽창은 다음과 같이 정의됩니다.

$$\text{상대적 팽창} = \rho = \Delta T(CTE_{\text{모재}} - CTE_{\text{스케일}})$$

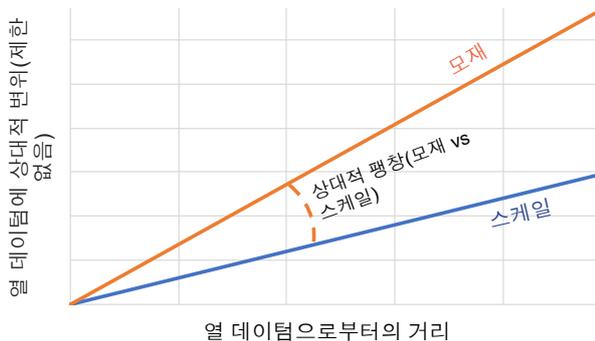
조건:

ΔT 는 설정된 온도(일반적으로 설치 온도 20°C)를 기준으로 한 온도 변화입니다.

$CTE_{\text{모재}}$ 는 모재의 열 팽창 계수(ppm/ $^\circ\text{C}$)입니다.

$CTE_{\text{스케일}}$ 은 스케일의 열 팽창 계수(ppm/ $^\circ\text{C}$)입니다.

자유 길이는 모재에 대한 스케일 고정, 즉 열 데이터(섹션 3.1 참조)와 스케일의 가장 먼 끝단 사이의 거리입니다. 일반적으로 열 데이터는 스케일의 중간에 위치하고 자유 길이는 스케일 전체 길이의 절반입니다. 이 문서에서 자유 길이는 z 로 표시되고 측정 단위는 m입니다.



팽창 불일치는 열 데이터와 가장 먼 끝단 사이에서 스케일의 열 팽창과 모재의 열 팽창의 차이이며 $z\rho$ 로 계산됩니다.

2.1.2 공식

매개변수

아래 공식에서 사용되는 매개변수는 다음과 같습니다.

E = 스케일의 탄성 계수(Pa)

A = 스케일 단면적(m^2)

L = 스케일의 총 길이(m)

z = 스케일의 자유 길이(m)(즉 중심 데이터 스케일의 경우 $z = L/2$)

u = 교란(μm)

ρ = 상대적 팽창(ppm)

q = 기계식 고정에 따른 단위 길이당 마찰 저항 (Nm^{-1})

k = 접착식 테이프 고정에 따른 단위 길이당 테이프 전단력 (Nm^{-2})

기계식 고정 스케일:

기계식 고정 스케일의 경우(클립 및 **FASTRACK**) 스케일 교란(u)은 다음 공식으로 예측할 수 있습니다.

$$u = \frac{qz^2}{2EA}$$

이 수식은 상대적 팽창이 다음 공식에 따른 임계값보다 큰 경우 성립되는 수식입니다.

$$\rho \geq \frac{qz}{EA}$$

이 조건은 대부분의 실제 조건에서 충족됩니다. 여기서 중요한 결과는 교란이 일반적으로 상대적 팽창과 관계가 없다는 것입니다. 또한 교란이 자유 길이의 제곱에 따라 달라진다는 것을 알 수 있습니다.

접착식 테이프 고정 스케일:

접착식 테이프 고정 스케일의 경우 대략적인 스케일 교란은 다음과 같습니다.

$$u = \frac{\rho kz^3}{3EA}$$

이것은 두 가지 중요한 면에서 기계적으로 장착된 방법과 다릅니다. 교란은 이제 상대적 팽창과 길이의 제곱이 아닌 자유 길이의 세제곱에 따라 달라집니다.

경계 조건:

이 두 가지 고정 방법은 다음과 같은 경우 이론적으로 동일한 교란을 제공합니다.

$$z\rho = \frac{3q}{2k}$$

예를 들어 팽창 불일치 값(자유 길이 X 상대적 팽창)이 임계값보다 작은 경우 접착식 테이프 고정이 기계식 고정보다 교란이 더 적습니다. 팽창 불일치 값이 더 큰 경우에는 그 반대입니다.

교차점은 q와 k로만 결정되므로 이 두 값을 알면 모든 스케일 구성에 있어 교차점 팽창 불일치를 평가할 수 있습니다.

이 팽창 불일치 교차점을 사용하여 접착식 테이프 고정 스케일 또는 기계식 고정 스케일이 특정 조건에서 교란을 덜 발생시키는지 여부를 판별할 수 있습니다. RTL 계열 테이프 스케일의 교차점 팽창 불일치는 20 µm이며 REL / RSL 스파의 경우에는 500 µm입니다.

교란 / 상대적 팽창 그래프

다음 그래프는 스케일 끝 변위에 대한 고정 방법의 영향을 그래픽으로 요약하여 보여줍니다. 이 그래프를 사용하면 선택한 고정 방법에 따라 시스템 계측이 어떻게 영향을 받을 수 있는지 예측할 수 있습니다. 이 그래프에는 접착식 테이프 고정과 기계식 고정에 대한 변위 / 상대적 팽창 곡선 두개가 다양한 스케일 길이로 나와 있습니다.

교란이 가장 적음(성능이 우수함) 고정 방법은 직선으로 강조 표시됩니다.

그림 2의 그래프를 사용하면 특정 상대적 팽창에 대해 교란이 가장 적은 고정 시스템을 선정할 수 있습니다.

예를 들어 중심 데이텀이 있는 알루미늄 모재(CTE ≈ 23 ppm/°C)에 RTL 스케일 1 m(CTE ≈ 10 ppm/°C)를 고정하고 5°C온도가 상승한 경우 상대적 팽창은 $(23 - 10.1) \times 5 \approx 65$ ppm이 됩니다.

그림 2a의 그래프를 보면 접착식 테이프 고정(~0.28 µm)에 비해 FASTRACK 고정(~0.18 µm)을 사용할 때 교란이 최소화되는 것을 알 수 있습니다.

그래프 오른쪽 상단에서 검은색 선 위 영역은 스케일과 모재 사이의 과도한 팽창 불일치로 인해 접착식 테이프가 훼손될 수 있음을 나타냅니다.

이들 그래프는 전체 스케일 길이, L을 기반으로 하며 중앙에 고정부가 있거나 고정부가 전혀 없는 것으로 가정합니다(즉 z = L/2). 중앙에 데이텀이 있지 않은 경우에는 자유 길이 z(자유단 끝 고정)를 알 수 있으므로 이 그래프에서 L = 2z를 사용하면 됩니다.

마찰이 기계식 고정에 미치는 영향력을 명확하게 판단하기에는 어려움이 있습니다. 그래프가 신중한 설계 지침을 제공하지만 특정 오차 보정 목적으로 사용해서는 안 됩니다.

2.2 히스테리시스

기계식 고정 스케일의 교란은 열팽창의 영향을 받을 수 있습니다. 이 내용을 이해하기 위해 CTE가 0이 아닌 모재에 CTE가 0인 스케일이 기계식으로 고정된 것으로 가정해 보겠습니다. 시스템을 가열합니다. 처음에는 고정 상태에서 발생하는 마찰을 극복하는 데 필요한 응력이 충분하지 않아 스케일이 모재에 의해 어느정도 같이 팽창하게 됩니다. 초기 가열로 모재의 CTE에 따라 스케일이 팽창됩니다(그림 3의 1 단계).

최종적으로 충분한 응력이 발생되어 스케일이 모재 위를 미끌어지며 스케일의 CTE(이 경우 0)에 따라 팽창됩니다(2 단계).

RTL 계열 테이프 스케일의 상대적 팽창 / 교란 그래프

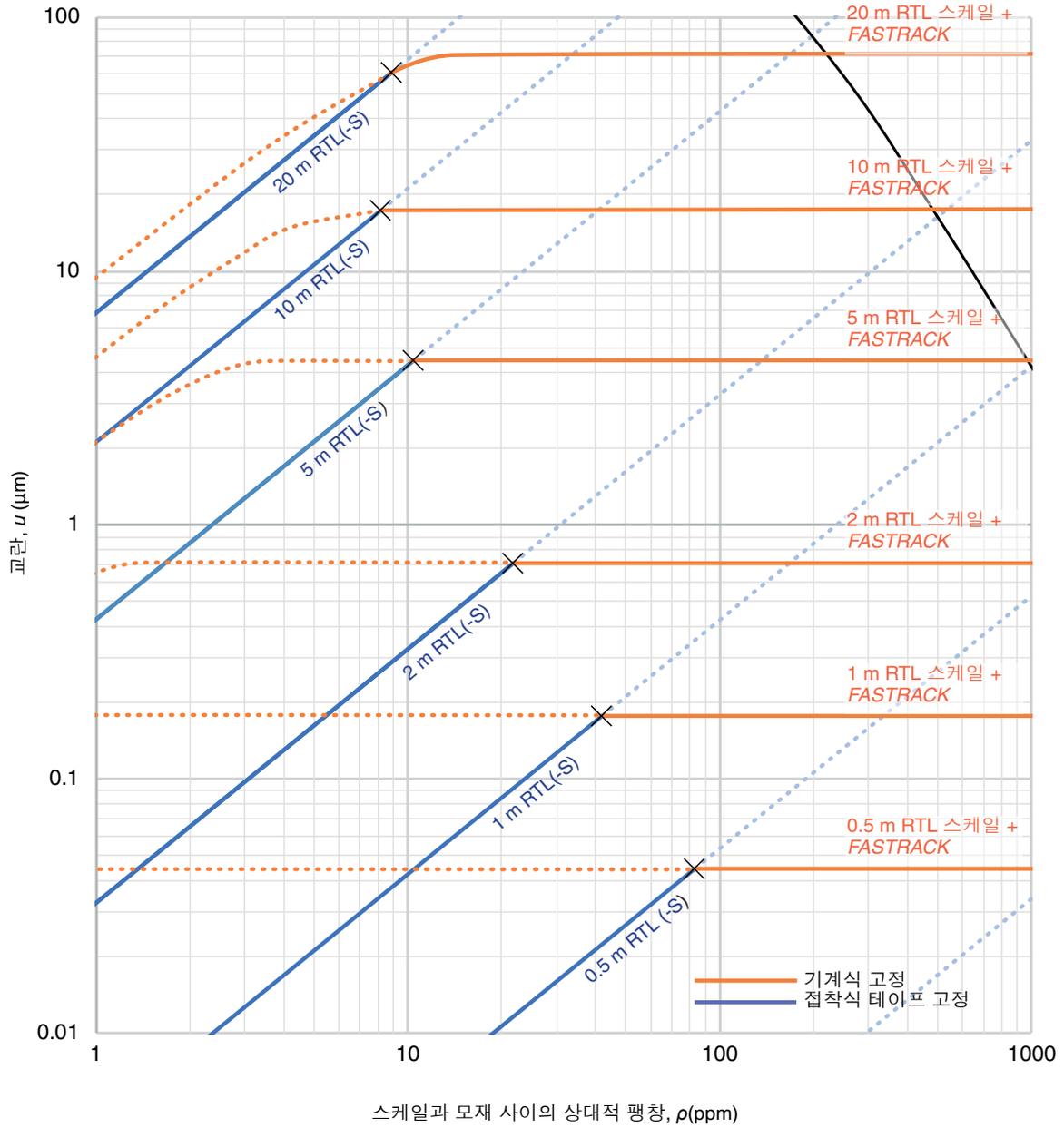


그림 2a. RTL 계열의 다양한 스케일 길이와 고정 방법에 따라 계산된 상대적 팽창에 따른 교란. 이 그래프는 스케일 중앙이 고정 또는 고정이 전혀 없는 것으로 가정합니다.

REL 및 RSL 스파 스케일의 상대적 팽창 / 교란 그래프

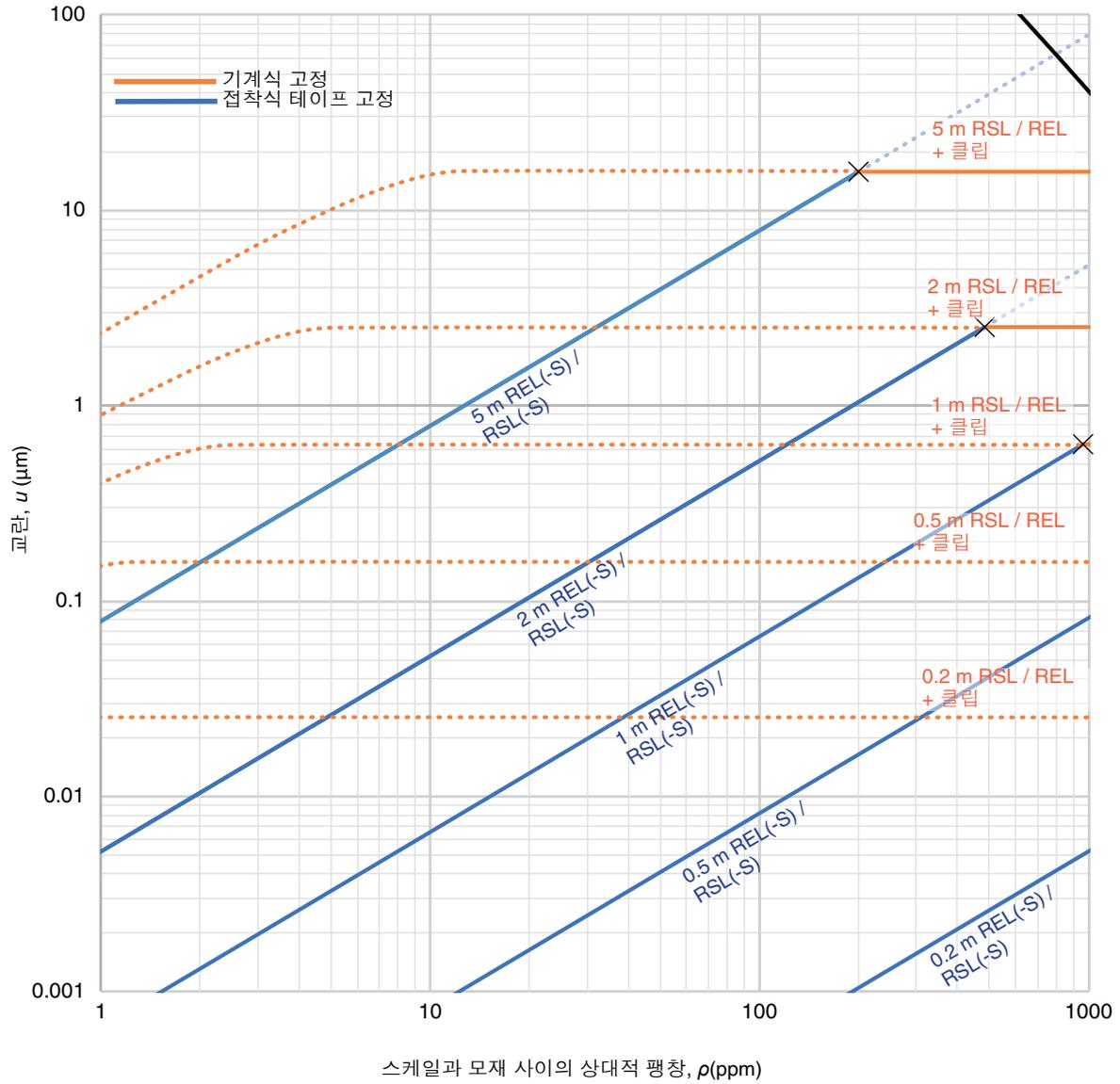


그림 2b. 다양한 RSL / REL 스케일 길이와 고정 방법에 따라 알려진 계산된 팽창에 따른 교란. 이 그래프는 스케일 중앙이 고정 또는 고정이 전혀 없는 것으로 가정합니다.

온도가 내려가면 반대의 현상이 일어나기 때문에 스케일이 정지 마찰력을 극복하고 모재 위로 미끄러지기 전에 약간의 냉각이 필요합니다(3단계와 4단계). 따라서 스케일의 위치는 시스템의 변화에 영향을 받을 수 있으며 이를 고정 히스테리시스라고 합니다. 고정 히스테리시스는 스케일 팽창에 있어 일부 불확실성을 야기합니다. 이 영향의 크기는 기계식 고정 스케일에서 나타나는 최대 교란과 같습니다. 일반적으로 접착식 테이프 고정 스케일은 기계적 마찰이 없어 고정 히스테리시스가 적용되지 않습니다.

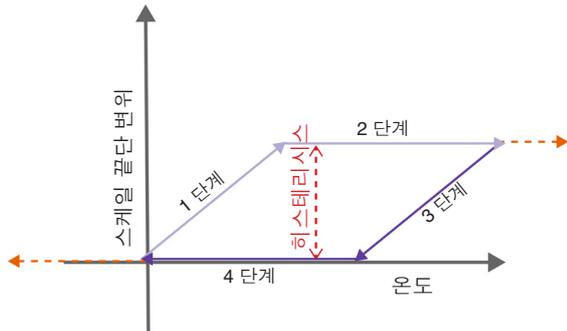


그림 3. 온도 변화에 따른 스케일 끝 부분 변위. 기계식으로 고정되는 스케일의 CTE는 0이고 모재의 CTE는 양수로 간주합니다.

3. 스케일 고정 시 추가 고려 사항

3.1 데이텀

플로팅 스케일을 사용하는 경우 열 데이텀을 사용하는 것이 좋습니다. 열 데이텀은 스케일이 모재에 견고하게 부착되어 서로 움직일 수 없는 단일 지점입니다.

일반적으로 열 데이텀은 스케일 길이의 중앙에 있는 것이 좋습니다. 자유 길이가 최소화되고 스케일의 총 교란까지 최소화되기 때문입니다.

이전 섹션 2.1.2에서 본 것처럼 스케일 끝의 교란은 기계식 고정 스케일의 경우 자유 길이의 제곱, 접착식 테이프 고정 스케일의 경우 자유 길이의 세제곱으로 결정됩니다.

데이텀 없이 Renishaw 스케일을 고정할 수도 있습니다. 그러나 데이텀을 사용하지 않는 방법은 여러 가지 이유로 권장되지 않습니다. 데이텀을 사용하지 않으면 스케일이 모재를 기준으로 움직이지 않는 지점을 알 수 없습니다. 또한 이 지점이 스케일 길이의 중앙에 있다고 가정할 수도 있지만 열 변이가 존재하거나 스케일 길이 전체에 걸쳐 고정 또는 모재 특성이 변화하는 경우에는 설득력이 없습니다. 또한 열 데이텀을 사용하면 축이 가속을 받는 경우 스케일 움직임을 방지하는 데 도움을 줍니다.

3.1.1 설치 성능 확인:

FASTRACK 및 클립 고정

기계식 고정 스케일을 사용하는 경우 설치 품질이 마찰력에 영향을 받아 교란이 발생할 수 있습니다. 설치 전에 모재가 깨끗한지 확인하고 정확하게 설치되었는지, 잔여물이 남은 액체가 설치물에 흘러 들어가지 않았는지 확인해야 하며 쉽게 해지는 천으로 표면을 반복적으로 닦는 작업을 최소화해야 합니다.

FASTRACK 또는 클립 고정 스케일을 사용하는 경우 데이텀을 스케일에 적용하기 전에 축의 미끄럼 마찰력을 확인해야 합니다. 실제 미끄럼 마찰력을 설치시 예상되는 미끄럼 마찰력(RTL의 경우 $\leq 0.3 \text{ Nm}^{-1}$, 스파의 경우 $\leq 25 \text{ Nm}^{-1}$)과 비교하여 계산된 교란이 발생하는지 여부를 알 수 있습니다. 때때로 설치 오차가 발생하였지만 미끄럼 마찰력을 확인하지 않아 인지하지 못할 수 있으며 이러한 경우 스케일의 교란이 크게 증가할 수 있습니다. 스케일 설치 가이드에 따라 스케일을 제자리에 고정하는 데 사용되는 클립 수를 줄이면 클립을 사용한 스파의 마찰과 최대 교란을 줄일 수 있습니다.

3.1.2 접착식 테이프 고정 스케일: 최대 팽창 불일치

접착식 테이프 고정 스케일의 최대 팽창 불일치는 이동 중에도 1 mm를 초과해서는 안 됩니다(그림 2a 및 2b의 오른쪽 상단에 있는 검은색 선 참조). 이 지점을 초과하면 접착식 테이프의 기계적 성능을 보장할 수 없습니다.

3.1.3 모재 마스터링 스케일: RKL 및 RGS

모재 마스터링 RKL 또는 RGS 스케일을 사용하는 경우 에폭시 엔드 클램프를 적용하여 스케일이 모재에 견고하게 부착되는 두 지점을 형성해야 합니다. 이렇게 하면 스케일이 올바르게 마스터링 됩니다. 접착식 테이프만으로는 마스터링할 수 있을 만큼 강하지 않기 때문입니다.

4. 스케일 선정 지침

다음 프로세스를 사용하면 특정 용도에 가장 적합한 스케일과 고정 옵션을 판별하는 데 도움이 될 수 있습니다.

스케일 유형:

RTL- 플로팅 스틸 테이프 스케일.

RKL- 마스터링 스틸 테이프 스케일.

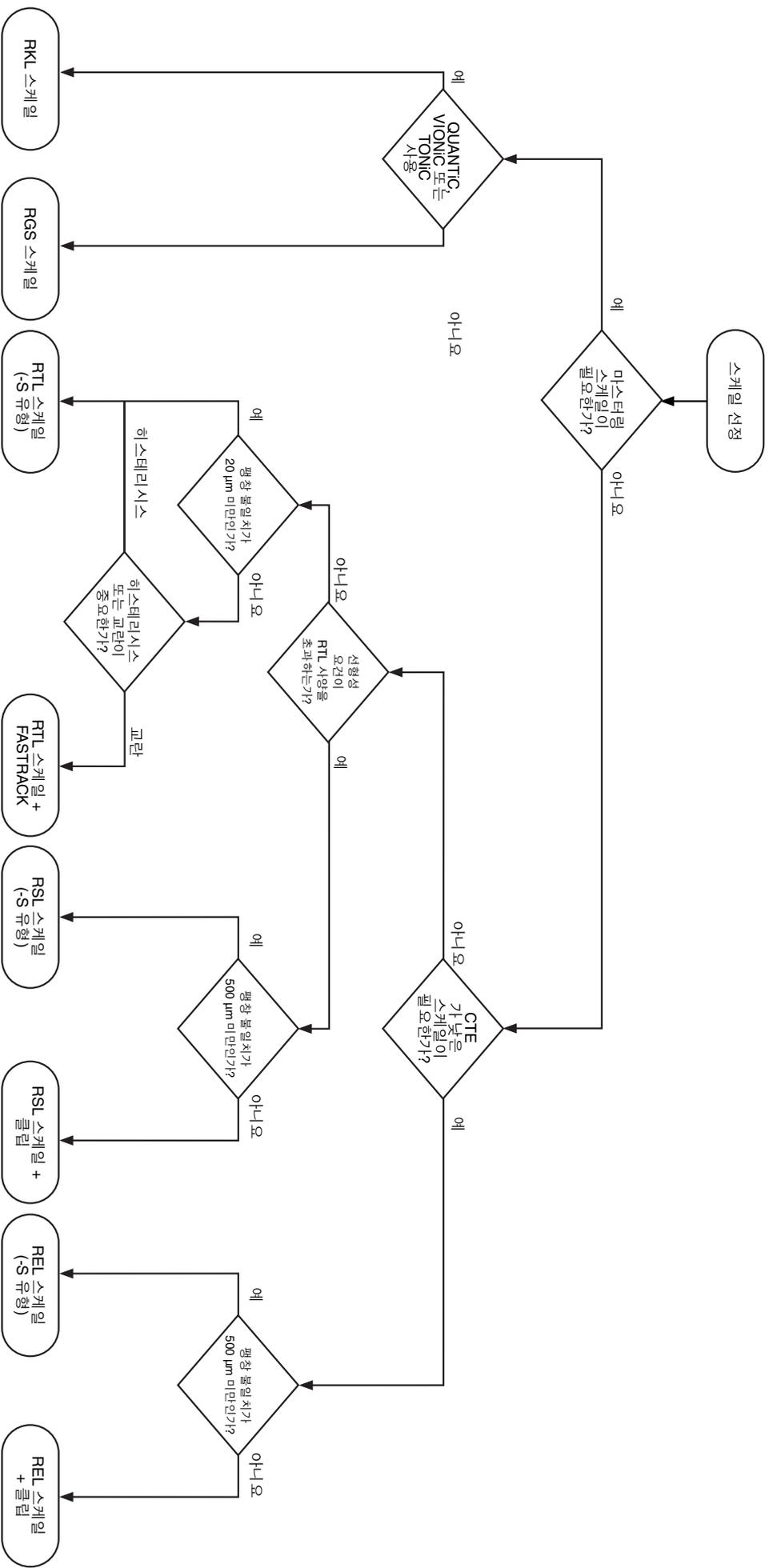
REL- 플로팅 저팽창 스틸 스파 스케일.

RSL- 플로팅 스틸 스파 스케일.

RGS- 마스터링 스틸 테이프 스케일.

-S는 스케일이 양면 접착식 테이프를 사용하여 고정되었음을 나타냅니다.

(참고: 모든 **RKL** 스케일과 **RGS** 스케일은 접착식 테이프로 고정되므로 이 표기가 적용되지 않습니다.)



마스터링 또는 CTE가 낮은 스케일이 필요한지 알아보려면 섹션 2.2, 2.3을 참조하십시오.
 때로는 교란이 더 적더라도 기계식 고정보다 점착식 테이프 고정 방법을 사용하는 것이 효과적인 수 있습니다.
 테이프 고정에서 교란이 적은 히스테리시스가 없기 때문이며 이는 경우에 따라 중요한 사항일 수 있습니다.

5. 용어정리

용어	정의
접착식 테이프 고정	양면 테이프를 길이에 따라 부착하여 제자리에 고정되는 스케일.
CTE	온도에 따라 개체 크기가 변화하는 정도를 나타내는 열 팽창 계수(CTE). 일반적으로 섭씨 1도당 백만 분의 일(ppm/°C) 단위로 표시됩니다.
팽창	구성품의 길이 변화를 원래 길이에서 뺀 값.
상대적 팽창	모재와 모재에 고정된 스케일 사이의 팽창 차이.
교란	고정 방법에 따른 스케일 끝의 위치 오차. 이상적으로 완벽한 플로팅 스케일과 실제 스케일의 끝단 위치 차이입니다.
팽창 불일치	열 데이텀에서 가장 먼 스케일 끝단에서 스케일의 열 팽창과 모재의 열 팽창의 차이.
플로팅	스케일의 열 팽창이 스케일의 고유 특성으로 제어되는 시스템으로, 대개 모재에 독립적이어야 합니다.
자유 길이	플로팅 스케일의 열 데이텀과 이 지점에서 가장 먼 스케일 끝단의 거리. 열 데이텀을 사용하지 않으면 열 데이텀이 축 중앙에 있는 것으로 가정해야 합니다.
고정 히스테리시스	더 높거나 더 낮은 온도에서 일정 온도에 접근할 때 해당 온도에서 스케일의 최종적인 팽창 차이.
마스터링	스케일의 열 팽창이 모재의 팽창으로 제어되는 시스템.
기계식 고정	스케일이 기계식 가이드를 통해 제자리에 고정되는 경우, 테이프 스케일의 경우 FASTRACK , 스파 스케일의 경우 클립과 클램프입니다.
열 데이텀	플로팅 스케일이 모재에 단단히 부착되는 지점. 서로 중첩되어 움직일 수 없으므로 스케일은 모재의 이 지점을 중심으로 팽창 됩니다.

www.renishaw.com/encoderscales



#renishaw

+82 31 346 2830

korea@renishaw.com

© 2024 Renishaw plc. All rights reserved. RENISHAW®와 프롭 기호는 Renishaw plc의 등록 상표입니다. Renishaw 제품명과 명칭 및 'apply innovation' 마크는 Renishaw plc 또는 그 자회사의 상표입니다. 다른 브랜드, 제품 또는 회사 이름은 해당 소유주의 상표입니다. Renishaw plc. 영국과 웨일스에 등록됨. 기업 번호: 1106260.
등록된 사무소: New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK.

본 문서의 공개 당시 문서의 정확성을 확인하기 위해 최선의 노력을 기울였지만, 발생하는 모든 보증, 조건, 진술 및 책임은 법률이 허용하는 한도에서 제외됩니다.

품목 번호: PD-9574-9169-01-B