

리니어 레이저 간섭계 판독값에 대한 환경 보정

M.A.V. Chapman

소개

레이저 간섭계가 자동으로 최상의 측정 정확도를 제공하는 것으로 간주되곤 합니다. "레이저이니까 측정값이 당연히 정확하겠지!"라고 생각합니다. 하지만 실제 상황은 훨씬 복잡합니다. 레이저로 대기 중 선형 변위를 측정할 때, 환경 보정 시스템의 성능이 특히 중요합니다. 레이저 및 간섭계 측정 옵틱은 고도의 선형 분해능과 정밀도를 지원하지만 1 차적으로 시스템의 측정 정확도를 결정하는 것은 환경 보정 장치(기상 관측기)입니다. 이 백서에서는 선형 간섭계에서 환경 보정의 중요성을 살펴보고 공기 굴절과 물질 팽창 보정을 모두 다룹니다. 공기 굴절률과 물질 온도의 변화에 대해 Renishaw XL-80 레이저의 선형 변위 판독값을 자동으로 보정하는 Renishaw XC-80 환경 보정 장치에 대해 자세히 설명합니다. 또한 적용 분야에 따라 환경 센서의 배치와 물질 팽창 계수 선택에 유용한 권장사항도 안내합니다.

리니어 간섭계 - 기본 원리

그림 1 은 "데이텀" 위치에서 선형 옵틱들을 서로 가까이 배치한 단일 주파수(호모다인) 레이저 간섭계 시스템을 보여줍니다.

레이저의 출력 빔은 광분할기에 의해 둘로 분할됩니다. 상부 역반사경은 광분할기에 고정되며, 간섭계의 고정 길이 기준 암이 됩니다. 나머지

역반사경은 자유롭게 움직일 수 있으며 간섭계의 측정 암이 됩니다. 각 역반사경에 의해 반사된 빔들은 광분할기에서 재결합되어 레이저로 되돌아가며, 레이저의 프린지 검출 장치 내부에서 빔들의 간섭이 일어납니다. 되돌아온 두 빔의 파동이 "같은 위상"에 있으면(그림 1 참조) 언제나 파동이 보강 간섭하여 검출기에 "밝은" 무늬를 생성합니다.

그림 2 를 보면, 기준 암 역반사경은 광분할기에 고정된 상태로 측정 암 역반사경을 광분할기로부터 거리 L 만큼 이동시켰습니다. 되돌아온 두 빔의 파동이 180° 위상차를 보이는 경우(그림 2 참조) 파동들이 상쇄 간섭하여 검출기에 "어두운 무늬"를 생성합니다. 프린지 검출기에 생성되는 무늬의 밝고

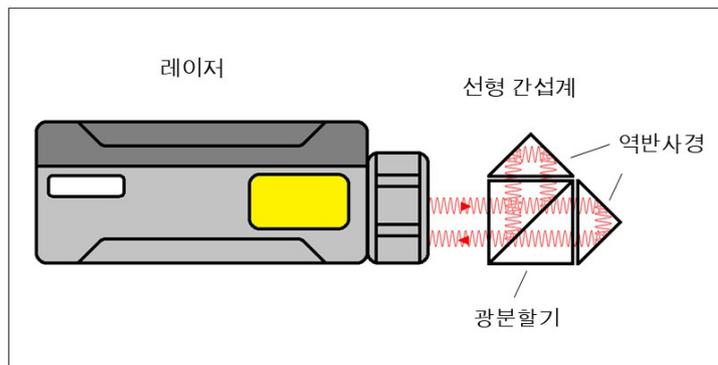


그림 1

어두운 정도(또는 둘 사이 밝기 정도)는 간섭계의 두 암에서 상대적인 옵틱 경로 길이에 따라 결정됩니다. 기준 암 역반사경이 고정된 경우, 측정 암 역반사경을 광분할기로부터 $1/2$ 파장($\lambda/2$)* 이동할 때마다 프린지 검출기가 완전히 밝음-어두움-밝음 순서의 무늬 전환을 보여줄 것입니다.

***주: 레이저 빔이 역반사경 앞뒤로 이동하기 때문에 $\lambda/2$ 거리 이동으로 총 옵틱 경로를 λ 만큼 증가시킵니다.**

간단히 말해서* 레이저 시스템은 검출기 내에서 보이는 완전한 무늬 전환 횟수를 세어 거리를 측정합니다. 여러 옵틱이 함께 있을 때 카운터가

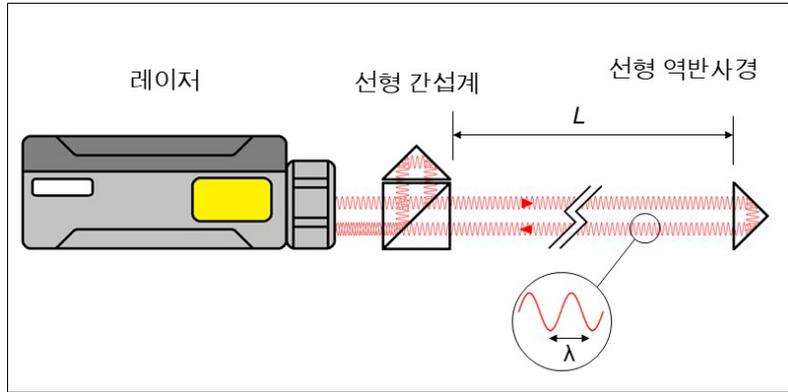


그림 2

0 점(데이텀)으로 되는 경우, $L =$

$\lambda \times N/2$ 에 의해 L 이 산출되는데 여기서 N 은 데이텀 이후 계산된 밝음-어두움-밝음의 무늬 전환 횟수입니다. 시스템을 데이텀으로 설정할 때 옵틱들이 함께 있는 경우, N 은 옵틱이 이동할 때 간섭계의 측정 암의 정방향 및 역방향 빔 경로 구간에 추가된 레이저 파동의 수와도 같습니다.

* 주- 실제로 호모다인 레이저의 프린지 검출기는 무늬를 더 작은 증분으로 세분하고 이동 방향을 판별할 수도 있습니다. 이것은 각각 다른 간섭 무늬 위상의 밝기를 감지하도록 조정된 여러 개의 프린지 광검출기를 사용하여 달성합니다.

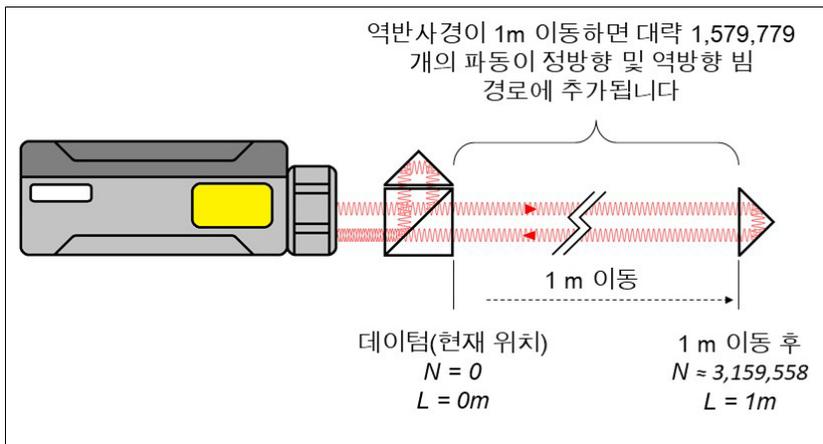


그림 3

그림 3 에 나온 예를 살펴보십시오. 데이텀 설정 후 역반사경이 1m 거리만큼 이동되고 레이저 파장이 $0.633\mu\text{m}$ 인 경우, 카운터에 표시된 프린지 개수는 대략 3,159,558 개이며, 이 수치는 반사경이 1m 이동함에 따라 광분할기와 측정 암 역반사경 사이 간극에 추가된 레이저 파동의 수와 같습니다.

어떤 이유로든 측정 암의 레이저 파동 수가 변경되면 그에 따라 프린지 카운터의 카운트가 증가 또는 감소합니다. 측정 암 역반사경이 이동하는 경우, N 과 위치 판독값 L 이 그에 따라 바뀌고 모든 추가 이동이 올바르게 표시되는 결과가 나타날 것입니다.

하지만 측정 암에 맞는 파동의 수도 대기 중의 레이저 파장에 따라 달라집니다. 레이저 파장이 변경된 경우, 측정 암에 맞는 파동의 수도 변경됩니다. 레이저 시스템이 $L = \lambda \times N/2$ 을 사용하여 거리를 계산하는 데 원래 파장을 계속 사용하는 경우, 거리 판독값이 잘못 계산되어 부정확한 판독값이 생성됩니다. 그런데 레이저 파장이 바뀐 이유는 무엇일까요?

흔히 "빛의 속도는 일정하다"라고 하지만 실제로는 빛이 통과하는 매질에 따라 달라집니다. 매질의 굴절률이 높을수록 빛이 매질을 통과할 수 있는 속도는 느려집니다. 예를 들어, 유리(굴절률 1.4)에서 빛의 속도는 진공(굴절률 1)에서 빛의 속도보다 30% 정도 느립니다. 빛의 속도가 바뀌면 파장도 그에 상응하는 양만큼 변합니다. 공기의 굴절률은 훨씬 더 작은 정도로 바뀌지만 파장 보정이 적용되지 않는 경우 선형 레이저 측정의 정확도를 심각하게 손상시킬 수 있을 만큼 영향력이 큼니다.

공기 굴절률

옵틱 설계와 계측에서의 굴절의 중요성 때문에 공기의 굴절률에 대해 광범위한 연구가 진행되어 왔습니다(참고 자료 1-5 참조). 그림 4, 5, 6 에서 기압, 기온 및 상대 습도의 변화로 인한 빨간색 0.633 μm 헬륨네온(HeNe) 레이저의 파장 변동 양상을 보여줍니다. 변동률은 백만분율(ppm) 단위로 표시됩니다.

진공의 굴절률은 정확히 1 입니다. HeNe 레이저로 확인한 표준* 대기의 굴절률은 대략 1.0002714 입니다. 따라서 표준 대기에서 레이저의 파장은 진공 파장보다 271ppm 정도 짧습니다.

**표준 대기는 기압 1013.25mbar, 기온 20 °C, 상대습도 50%의 공기로 정의됩니다.*

따라서 기압* 800 mbar, 온도 10 °C, 상대 습도 50% 조건에서 HeNe 레이저의 파장은 표준 대기의 파장에 비해 50 ppm 증가하는 것을 예로 들 수 있습니다(그림 4 참조). (각 그래프에서 표준 대기 조건은 빨간색 점으로 표시됩니다). 따라서 한 예로(그림 4 참조) 기압 800 mbar, 기온 10 °C, 상대 습도 50%

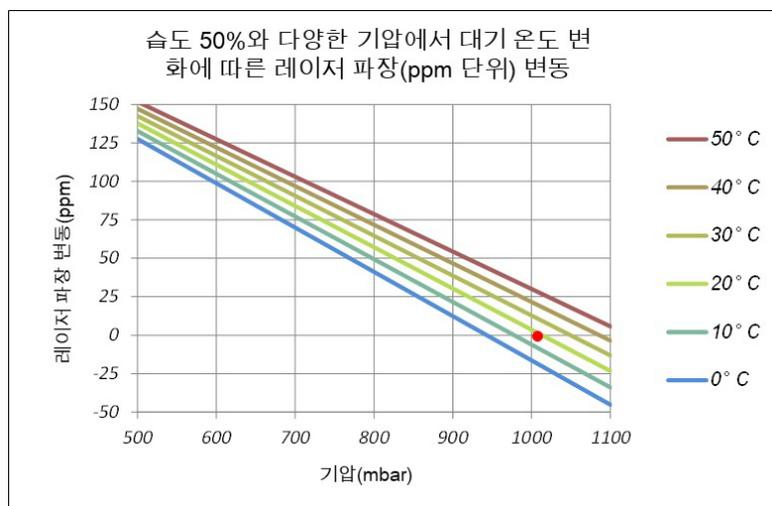


그림 4

조건에서 HeNe 레이저의 파장은 표준 대기의 파장에 비해 50 ppm 증가합니다.

*기압은 지역 기상 조건과 해발
고도, 두 가지 요인 모두에 따라
달라집니다. 예를 들어,
1013mbar 는 일반적인 해수면
기압인 반면, 900mbar 는 1,000m
고도에서 일반적인 기압입니다.

그림 4 는 레이저의 파장이 기압에
따라 달라져 온도에 따라
감도가 -0.24 ppm/mbar ~ -0.29
ppm/mbar 범위에 있다는 것을
보여줍니다. 기압이 올라가면

레이저의 파장은 감소합니다. 표준 대기에 가까운 조건에서 감도는 대략 -0.27 ppm/mbar 입니다.

그림 5 는 레이저의 파장이 온도에 따라서도 달라져 기압에 따라 감도가 +0.5 ppm/°C ~ +1.0 ppm/°C
범위에 있다는 것을 보여줍니다. 기온이 올라가면 레이저의 파장은 증가합니다. 표준 대기에 가까운
조건에서 민감도는 대략 +0.96 ppm/°C 입니다.

그림 6 은 레이저의 파장이 상대
습도에 따라서도 달라져 대기
습도가 10% 증가할 때마다 감도가
+0.02 ~ +0.4 ppm 범위에 있다는
것을 보여주며, 이때 기온의 영향도
크게 받습니다. 습도 변화에 대한
민감도는 저온에서 무시할 수 있는
수준이지만 고온에서는 점점 더
중요해지는데, 이는 따뜻한 공기의
수증기 흡수율이 훨씬 증가하기
때문입니다. 공기 중 수분 함량이

높을수록 레이저 파장은 길어집니다. 표준 대기에 가까운 조건에서 민감도는 대략 +0.1 ppm/10%
RH 입니다.

이상의 그래프와 민감도를 통해 현지 대기 조건의 변화로 인해 발생할 수 있는 잠재적 레이저 측정
오차를 대략적으로 추정*할 수 있습니다. *정확한 방법은 부록 2 를 참조하십시오.

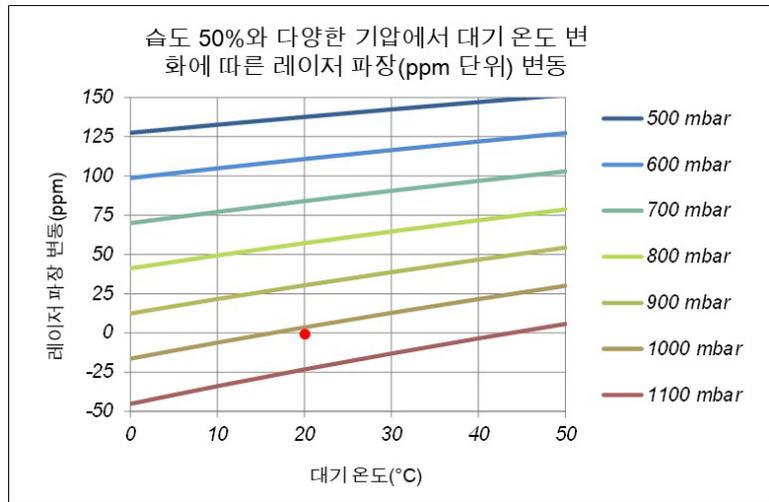


그림 5

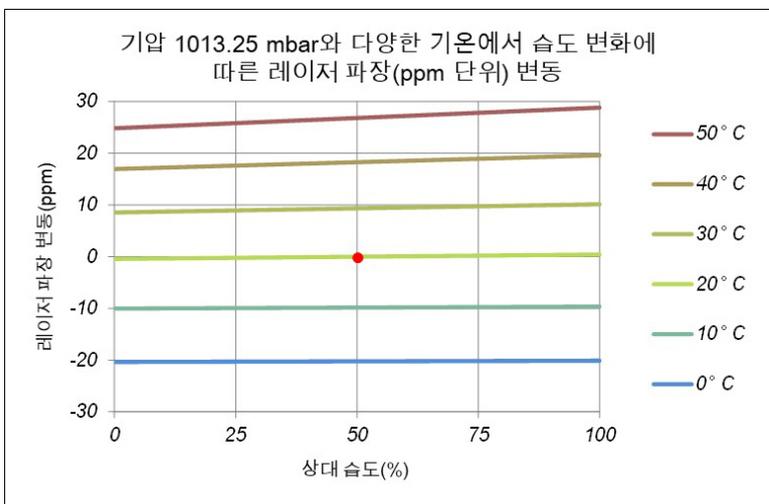


그림 6

다음 예제를 살펴보십시오.

레이저 파장 λ ($L = \lambda \times N/2$ 공식을 사용하여 선형 변위를 계산하는 데 사용되는 파장)이 표준 조건에서 정의되고 변경되지 않는다고 가정합니다(즉 보정이 적용되지 않음). 이제 현지 기압 900mbar, 기온 25°C, 습도 60% 조건에서 선형 측정을 수행한다고 가정하겠습니다. 보정되지 않은 레이저 판독값의 오차는 위에 설명된 민감도의 역수*를 사용하여 추정할 수 있습니다. *위에 제시된 민감도는 기온, 기압 및 습도의 변화에 따른 레이저 파장의 변동 양상을 정의합니다. 그러나 레이저 파장이 증가하는 경우, 주어진 이동에 대해 산출된 프린지 수(N)가 감소하여 보정되지 않은 레이저 판독값도 감소할 것입니다.

기압으로 인한 오차	$-113.25 \text{ mbar} \times (+0.27 \text{ ppm/mbar})$	-30.6 ppm
기압으로 인한 오차	$+5^\circ\text{C} \times (-0.96 \text{ ppm}/^\circ\text{C})$	-4.8 ppm
대기 습도로 인한 오차	$+10\% \times (-0.1 \text{ ppm}/10\% \text{ RH})$	-0.1 ppm
	총 오차	-35.5 ppm

레이저 간섭계로 측정된 선형 측정값이 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ (또는 1 ppm) 정도로 정확하다는 인식이 당연하게 여겨진다는(레이저니까 측정값이 당연히 정확할 것이라는 생각) 점을 고려할 때, 위 예제는 그러한 정확도 기대치를 충족시키기 위해 공기 굴절 영향을 정확하게 보정하는 것이 중요하다는 것을 명확히 보여줍니다.

공기 굴절 보정

그림 4, 5, 6 에 보여진 것처럼 기온, 기압 및 상대 습도와 굴절을 사이 관계는 상당히 복잡합니다. 다행히도 이러한 관계에 대한 광범위한 연구가 진행되어 왔고, 기온, 기압 및 습도를 알고 있으면 공기의 굴절률을 정확하게 추정하는 데 사용할 수 있는 몇 가지 방정식이 나와 있습니다. 이 중 가장 널리 알려진 것은 1966 년에 나온 Edlén Equation(참고 자료 2 참조)입니다. 이 방정식은 1993 년과 1994 년에 Birch & Downs 에 의해 갱신되었습니다(참고 자료 3,4). 또 다른 방정식이 Ciddor 에 의해 제시되었습니다(참고 자료 1). 대부분의 레이저 시스템이 "개정된 Edlén Equation" 또는 "Ciddor Equation"으로 공기의 굴절률을 계산합니다. 정상적인 환경 조건에서 두 방정식의 정확도는 비슷한 수준입니다. 두 방정식과 "굴절을 계산기"에 대한 유용한 검토 자료를 NIST 의 Metrology Toolbox 웹사이트(참고 자료 2)에서 확인할 수 있습니다.

완전한 방정식들은 다소 복잡하고 이 책서의 범위를 벗어납니다. 하지만 NIST 의 Metrology Toolbox 는 0.633 μm HeNe 레이저와 함께 사용할 수 있는 더 단순하고 정확도가 약간 떨어지는 "휴대용 계산기 친화적" 버전을 제공합니다.

$$n_{\text{air}} = 1 + ((7.86\text{e-}5 \times P)/(273 + T)) - 1.5\text{e-}11 \times H \times (T^2 + 160)$$

여기서 n_{air} = 공기 굴절률, T = 기온($^{\circ}\text{C}$ 단위), H = % 상대 습도, P = 기압(mbar 단위)입니다. 이 방정식은 위에서 인용한 표준 대기에 가까운 조건에서 허용되는 민감도보다 더 광범위한 온도, 압력 및 습도에 대한 잠재적 측정 오차를 추정하는 데 유용할 수 있습니다. 이에 대해서는 부록 2 에서 자세히 다루고 있습니다.

그림 7 은 대기 조건의 변화에 따른 레이저 판독값을 보정하기 위해 개정된 Edlén 또는 Ciddor 방정식을 사용하는 방법을 보여줍니다. 빨간색 셀은 레이저의 현재 파장 계산과 관련이 있습니다. 파란색 셀은 레이저 위치 판독값 계산과 관련이 있습니다.

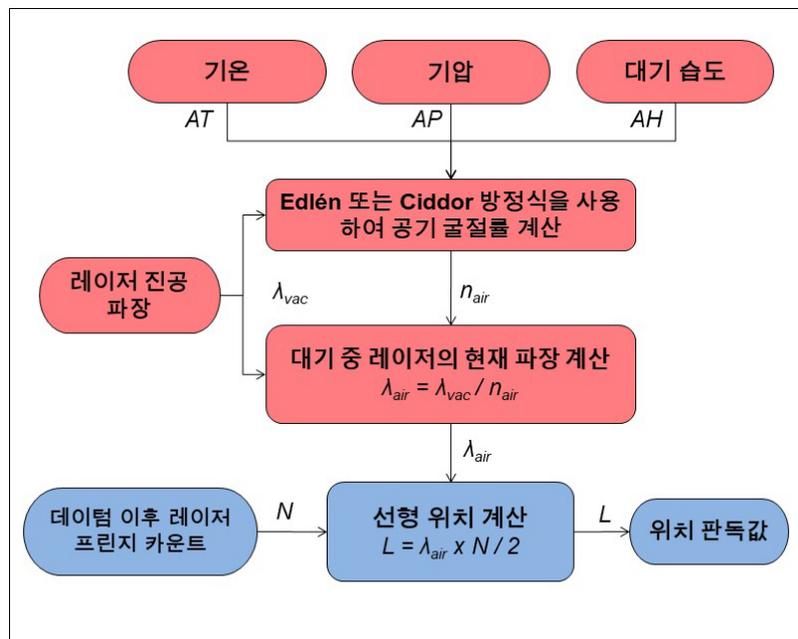


그림 7

굴절률 n_{air} 을 계산하기 위해 이러한 값을 사용합니다. 시스템은 n_{air} 과 레이저의 진공 파장 λ_{vac} 를 사용하여 "환경 요인을 보정한" 레이저 파장 λ_{air} 를 계산합니다. 그런 다음, 프린지 카운트에 기본 레이저 파장 λ 을 곱하는 대신, 환경 요인을 보정한 파장 λ_{air} 을 사용합니다. 따라서 레이저 파장이 상승하면(예시) 프린지 카운트 N(선형 변위 L 의 경우)이 감소하지만 센서 판독값으로부터 계산된 λ_{air} 값이 상승하는 양만큼 상승해야 하므로 $L = \lambda_{\text{air}} \times N / 2$ 에 의해 주어진 "환경 요인 보정" 위치는 명목상으로 일정하고 정확하게 유지됩니다.

XC-80 을 사용한 자동 환경 보정

그림 8 에 보여진 것처럼 Renishaw 의 XL-80 레이저 간섭계 시스템은 XC-80 환경 보정 장치와 센서를 사용하여 현지 대기 조건 변화의 영향을 적용해 선형 판독값을 자동으로 보정할 수 있습니다. XC-80 에는 전자 장치, 기압 및 상대 습도 센서가 포함되어 있습니다. 외부 공기 및 물질* 온도 센서는 케이블을 통해 연결됩니다. 그림 9 에서 구성품들이 연결되는 방식을 보여줍니다. *열팽창 보정을 위한 물질 온도 센서 사용에 대해서는 나중에 다룹니다.



그림 8

각 외부 물질 및 공기 온도 센서에는 아날로그 온도 감지 소자와 디지털 처리 장치가 내장되어 있습니다. 모든 센서는 공장에서 개별적으로 교정되며 오차 맵을 포함하고 있어 전체 측정 범위에서 정확도를 유지합니다. 온도 감지 소자에서 판독된



그림 9

아날로그 값은 디지털화 및 오차 보정(오차 맵

사용) 단계를 거친 후에 센서 네트워크를 통해 디지털 방식으로 XC-80 에 전송됩니다. 디지털 전송은 전기적 노이즈 및 케이블 저항에 대한 내성을 제공하여 데이터 무결성을 보장하고 필요한 경우 센서 리드를 확장할 수 있도록 지원합니다.

XC-80 에는 오차 매핑 기압 센서와 상대 습도 센서, 그리고 추가적인 디지털 처리 전자 기기가 포함되어 있습니다. 가장 까다로운 측정 중 하나가 기압 측정인데, 그 이유는 광범위한 작동 압력(650-1150mbar)과 온도(0-40°C)에서 요구되는 정확도($\pm 1\text{mbar}$) 때문입니다. Renishaw 는 매우 뛰어난 품질의 압력 센서를 사용하여 장기적인 안정성과 신뢰성을 보장합니다. 공장에서 모든 압력 센서에 대해 온도와 압력의 상승 및 하강에 따른 개별적 보정을 실시하였습니다(대부분의 상용 압력 센서는

온도에 민감하고 히스테리시스를 보임). 그 결과를 활용하여 XC-80 내부에 저장되는 3D 오차 맵을 생성하여 전체 범위의 작동 압력과 온도에서 정확도가 유지됩니다.

그림 10은 오차 매핑 후 온도 및 압력 대비 XC-80 압력 센서의 예시 오차 플롯을 보여줍니다. 예제에서 오차 범위는 0 ~ ±0.32 mbar 입니다. *정확도 플롯에서 교정 장비의 측정 불확실도가 제외되었음에 유의하십시오.*

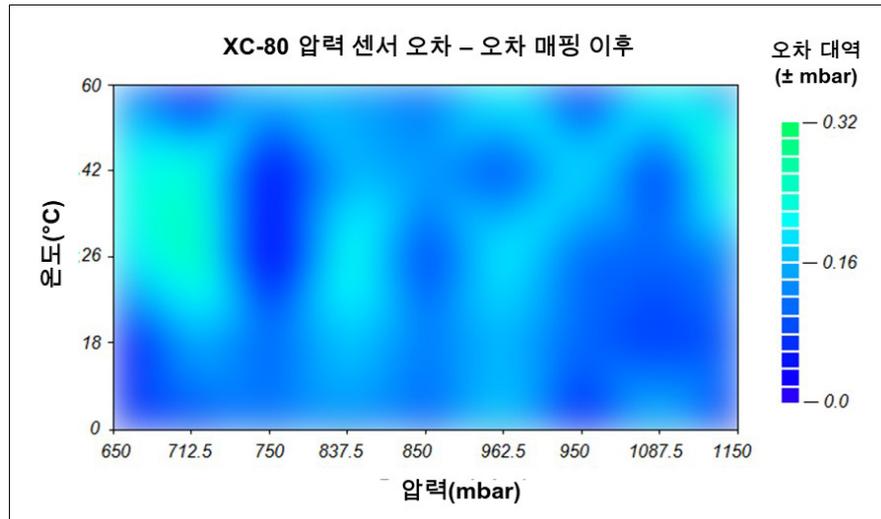


그림 10

XC-80의 교정된 센서 정확도가 그림 11의 표에 제시되어 있습니다. 모든 수치는 K=2(95% 신뢰도 수준)의 확장된 불확실도로 인용됩니다.

XC-80 측정 정확도 및 범위		
측정	정확도	범위
기온	±0.2 °C	0 - 40 °C
기압	±1 mbar	650 - 1150 mbar
대기 습도	±6% RH	0 - 95% 비응축
물질 온도	±0.1 °C	0 - 55 °C

그림 11

XC-80은 환경 센서 판독값을 USB를 통해 디지털 방식으로 PC로 전송되며, 센서 판독값을 7초마다 1개씩 업데이트하여 42초 단위로 전체 환경 요인 업데이트 결과(최대 활성 센서 6개)를 제공합니다.

PC는 또한 XL-80 레이저로부터 USB를 통해 최대 50KHz의 업데이트 속도로 레이저 상태와 프린지 카운트 N을 수신합니다. Renishaw의 LaserXL 소프트웨어는 XC-80의 공기 센서 판독값과 Ciddor 방정식을 사용하여 국소 공기 굴절률과 공기 중 현재 XL-80 레이저 파장 λ_{air} 를 계산합니다. 거리 L은

$L = \lambda_{\text{air}} \times N/2$ 방정식을 사용하여 계산되므로 공기 굴절률의 국소적 변화에 따른 레이저 판독값 보정이 자동으로 수행됩니다.

XC-80 을 사용한 공기 굴절 보정의 효과를 간단한 예를 들어 살펴볼 수 있습니다. 현지 기온 25°C, 상대 습도 70%, 해수면 기압 970mbar 인 환경 조건 아래 해발 100m 고도에서 레이저 측정을 수행하고 있다고 가정해봅시다. 이러한 조건에서는 극단적이거나 특이한 예외가 없습니다.

100m 고도에서 기압은 해수면에서보다 12mbar 정도 낮아서 국지적 기압은 958mbar 이 됩니다. 간단한 NIST 방정식을 사용하면 이러한 조건(958 mbar, 25°C, 70% RH)에서 공기 굴절률은 대략 1.0002519 임이 확인됩니다. 반면에 표준 대기(기본 XL-80 레이저의 공기 파장이 정의되는 조건)의 굴절률은 대략 1.0002714 입니다. 두 굴절률(이에 따라 연관된 레이저 파장) 간 분율 차이는 거의 20ppm 입니다. 따라서 이러한 조건에서 환경 보정을 실시하지 않으면 선형 위치 판독값에 20 ppm(또는 20 $\mu\text{m}/\text{m}$) 내외 측정 오차가 포함될 수 있습니다.

그러나 XC-80 의 공기 센서 판독값을 사용하여 굴절률 보정이 올바르게 적용되면 시스템의 선형 측정 오차가 0.5ppm(0.5 $\mu\text{m}/\text{m}$) 아래로 떨어집니다. 정확도가 40 배 가까이 향상됩니다! 이와 같은 보정되지 않은 정확도와 보정 정확도 간 차이가 그림 12 에 그래픽으로 제시되어 있습니다. 고도와 기후가 결합된 영향으로 인한 미보정 결과의 주요 오차 유발원이 기압이라는 점은 흥미롭게 살펴볼 사항입니다. 두 번째로 중요한 오차 유발원은 기온입니다.

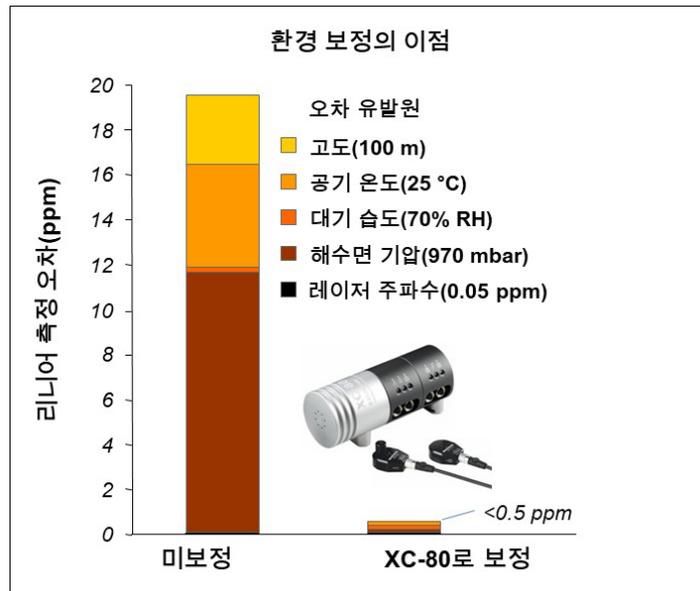


그림 12

그리고 가장 작은 오차 유발원은 레이저 주파수 정확도입니다. 이는 환경 보정의 중요성을 여실히 보여줍니다. 그림 12 에서 확인되는 정확도 향상은 센서가 적절히 배치되었으며 환경의 변화에 대응할 시간이 있었다는 가정을 전제로 한다는 점에 유의하십시오. 자동 환경 보정이 환경과 상관없이 정확한 측정이 가능한 '보편적 만병통치약'은 아닙니다. 최상의 결과를 구하려면 환경이 상당히 안정적이며 센서들이 측정 레이저 빔 근처에 배치되고 국소 열원 등에서 멀리 떨어져 있어야 합니다.

참고로, 그림 13의 표는 해발 고도 증가에 따른 기압 및 굴절을 감소를 보여줍니다. 또한 이로 인해 발생하는 레이저 파장의 변화(ppm 단위)를 해수면 고도를 기준으로 보여줍니다. 날씨로 인한 일별/계절별 기압 변화는 일반적으로 100-150 mbar 입니다. 이로 인한 변동이 25-40 ppm 정도의 레이저 파장에 추가적인 변동을 유발할 것입니다.

해발 고도에 변화에 따른 기압 및 굴절을 변동 (20 °C, 50% RH 조건)			
고도 (m)	기압 (mbar)	굴절률 n	변동 (ppm)
0	1013.25	1.0002714	0
500	954.6	1.0002557	-16
1000	898.7	1.0002407	-31
1500	845.6	1.0002264	-45
2000	795.0	1.0002128	-59
2500	746.8	1.0001999	-71
3000	701.1	1.0001877	-84
3500	657.6	1.0001760	-95
4000	616.4	1.0001649	-106
4500	577.3	1.0001544	-117
5000	540.2	1.0001445	-127

그림 13

물질 팽창 보정

대부분의 엔지니어링 물질, 구성품 및 기계는 온도 변화에 따라 팽창하거나 수축합니다. 따라서 고정밀 엔지니어링 구성품, 공작 기계 및 CMM의 치수는 일반적으로 특정 기준 온도에서 정의됩니다. 교정 분야에서 사용하는 국제 기준 온도는 20 °C 입니다.

그러나 치수를 점검할 때(예로 레이저 간섭계 시스템을 사용한 검사) 온도가 20°C 가 아닌 경우가 종종 있습니다. 이러한 문제를 방지하는 한 가지 방법은 검사 중인 품목을 온도가 20°C 로 맞춰진 통제실로 가져가는 것입니다. 하지만 이는 비현실적이며 대부분은 "제자리에서" 치수를 측정해야 합니다. 이러한 상황을 위해 Renishaw의 XL-80 레이저 간섭계 시스템에 수동으로 입력된 물질 팽창 계수와 최대 3개의 물질 온도 센서로부터 수집된 온도를 사용하여 선형 판독값을 보정하는 기능을 탑재했습니다. 이러한 과정을 물질 팽창 보정이라고 합니다. 이 과정의 목표는 국제 기준 온도 20°C 에서 측정을 수행한 경우에 얻을 수 있었던 선형 레이저 판독값을 추정하는 것입니다.

그림 14에 보여진 것처럼 선형 팽창 계수가 6 ppm/°C 인 유리로 만들어진 0.5 m 길이의 리니어 엔코더의 정확도를 검증하는 데 레이저를 사용한다고 가정해보겠습니다. 리니어 엔코더의 정확도는 20°C 의 온도에서 전체 길이에 걸쳐 ±1 μm 이내로 지정됩니다. 그러나 이동이 불가능한 기계 내부에 엔코더가

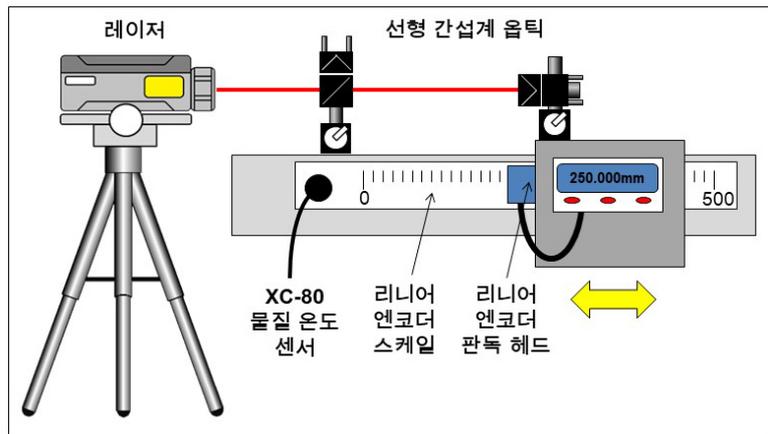


그림 14

장착되어 있고 엔코더의 온도는 현재 22 °C 입니다. 따라서 리니어 엔코더(제한이 적용되지 않은 경우)는 전체 길이에 걸쳐 $0.5 \text{ m} \times 6 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \times 2 \text{ }^\circ\text{C} = 6 \text{ } \mu\text{m}$ 만큼 확장됩니다. 물질 팽창 보정

적용하지 않고 레이저 시스템을 사용하여 엔코더의 정확도를 점검하는 경우, 엔코더의 정확도(그림 15에서 빨간색 선으로 표시)가 사양을 벗어나는 결과가 확인됩니다.

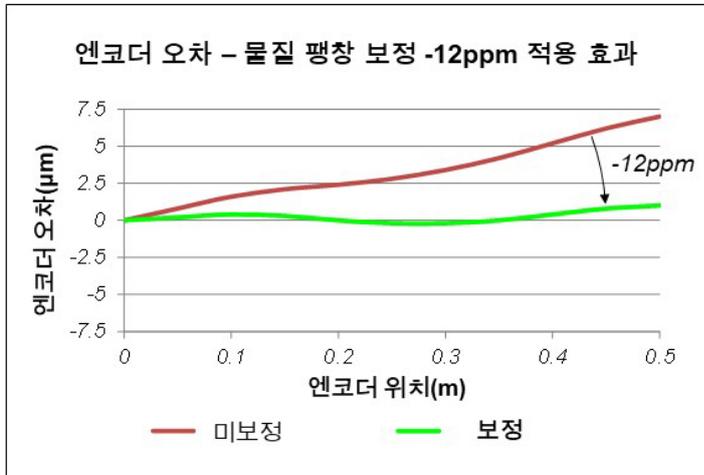


그림 15

그러나 엔코더의 온도를 측정하기 위해 물질 온도 센서가 장착된 Renishaw XC-80 환경 보정 장치를 사용하고 6 ppm/°C의 선형 팽창 계수를 소프트웨어에 입력하면, 시스템이 자동으로 물질 팽창 보정을 적용합니다. 물질 온도가 22 °C로 측정되면 시스템에서 $-6\text{ppm}/^{\circ}\text{C} \times 2^{\circ}\text{C} = -12\text{ppm}$ 의 레이저 판독 데이터에 보정을 적용합니다. 따라서 한 예로, 보정되지 않은 레이저 판독값이 500.007 mm인

경우, -6 μm의 보정이 적용되어 제시되는 보정된 레이저 판독값은 500.001 mm입니다. 올바르게 적용될 경우, 물질 팽창 보정에 따라 엔코더의 열 팽창을 상쇄하는 정반대의 동일한 보정이 추가되므로 엔코더가 20 °C에서 측정되었을 때의 레이저 측정값을 상당히 정확히 추정할 수 있습니다. 정정된 데이터는 그림 15에서 녹색 선으로 표시되는데, 이제 엔코더가 사양 범위 내에 있다는 것을 보여주는 것입니다.

그림 16은 물질 팽창 보정이 어떻게 적용되는지 보여줍니다. 빨간색 셀은 레이저의 현재 파장을 계산한 결과입니다(그림 7 참조). 노란색 셀은 물질 팽창 보정을 계산하는 것과 연관이 있습니다. 파란색 셀은 레이저 위치 판독값 계산과 연관이 있습니다. 시스템은 이제 프린지 카운트의 절반인 $N/2$ 에 λ_{air} (그림 7에서 파란색 셀로 표시)를

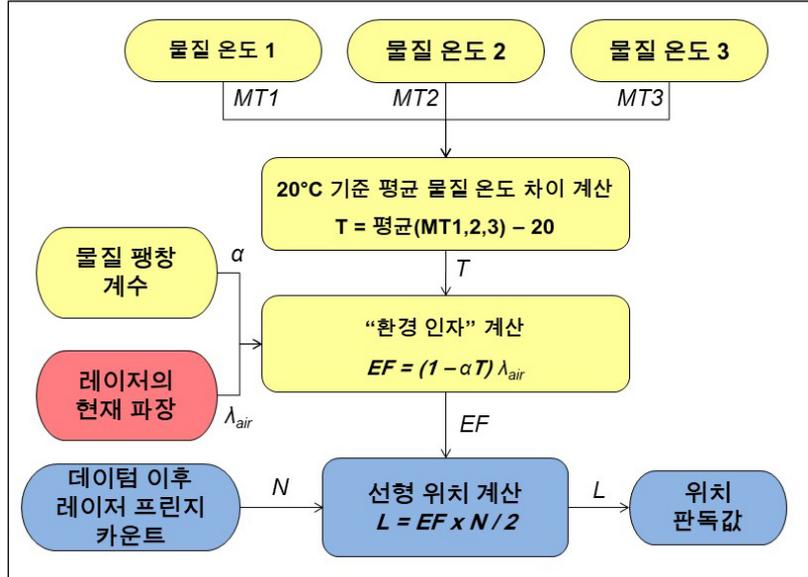


그림 16

공하는 대신 "환경 인자"

EF(그림 16에서 파란색 셀로

표시)를 사용합니다. 물질 팽창을 보정하기 위한 작은 조정이 포함된 것을 제외하고, 이 환경 인자는 레이저 파장인 λ_{air} 와 매우 비슷합니다. 따라서 $N/2$ 에 EF를 곱하면 공기 굴절 및 물질 팽창의 영향을 모두 보정할 수 있습니다.

공기 및 물질 팽창 보정을 모두 선형 레이저 판독값에 적용하는 확장된 방정식은 다음과 같습니다.

$$L = (1 - \alpha T) \times \lambda_{air} \times N / 2 \dots\dots\dots \text{방정식 1}$$

여기서 L은 레이저 판독값이고, N은 시스템 데이터 설정 이후 카운트된 레이저 프린지 개수이며, α 는 사용자가 입력한 물질 팽창 계수이고, T는 평균 물질 온도와 20°C 간 차이이며, λ_{air} 는 기온, 기압 및 습도로부터 Edlén 또는 Ciddor 방정식을 사용하여 계산된 현재 공기 굴절률입니다.

물질 팽창 계수

물질 팽창 보정은 측정 정확도에 상당한 영향을 미칩니다. 대부분의 강철의 선형 팽창 계수는 10 ppm/°C에 가깝고, 기계 작업장의 실온은 대부분 25°C를 넘습니다(그리고 기계 자체도 항상 발열 상태임). 이러한 조건에서 선형 측정을 수행할 경우, 물질 팽창에 따른

물질	적용 분야	팽창 계수 (ppm/°C)
철/강철	기계 구성 요소, 랙 및 피니언드라이브, 볼스크류	11.7
알루미늄 합금	경량 CMM 기계 구조체	22
유리	유리 스케일 리니어 엔코더	6-11
화강암	기계 구조체 및 테이블	8
콘크리트	기계 기반	12
Invar	낮은 팽창 엔코더/구조체	<2
Zerodur 유리	"0" 팽창 엔코더/구조체	<0.2

그림 17

오차가 50 ppm(50 $\mu\text{m}/\text{m}$)을 쉽게 넘을 수 있습니다. 여기서는 공작 기계의 위치 결정 정확도 측정에 특히 중점을 두고 물질 팽창 계수의 선택에 유용한 정보를 안내합니다.

특히 물질 온도가 20 °C 에 가깝지 않은 경우, 리니어 레이저 측정 중에 올바른 팽창 계수를 선택하는 것이 중요합니다. 예를 들어 실제 팽창 계수는 5ppm/°C 이지만 소프트웨어에 입력하는 값이 6 ppm/°C 이면 물질 온도가 20 °C 에서 1 °C 벗어날 때마다 1 ppm 의 측정 오차가 추가로 발생합니다. 공작 기계 또는 XY 스테이지의 위치 결정 정확도를 교정할 때 일반적으로 축 피드백 시스템의 확장 계수가 필요하며, 이상적으로 제조업체의 데이터로부터 가져옵니다. 가져오는 것이 불가능한 경우, 그림 17 에서 공작 기계, XY 스테이지 및 위치 피드백 시스템의 구성에 사용되는 다양한 물질에 대한 일반적인 팽창 계수 표를 보여줍니다.

주:

- 1) 팽창 계수를 확인할 때, 계수가 다른 두 물질이 서로 고정되어 있는 상황에 특히 주의를 기울여야 합니다. 예를 들어 랙과 피니언 피드백 시스템의 경우, 팽창 계수는 랙이 고정되어 있는 주철 레일에 더 가까울 수 있습니다. 지면 장착 레일이 있는 대형 갠트리 기계의 경우, 콘크리트 기반의 억제 작용으로 인해 레일의 팽창 계수가 감소할 수 있습니다.
- 2) 물질의 팽창 계수는 조성 및 열처리에 따라 달라질 수 있습니다. 따라서 고도로 정확한 값을 구하기가 종종 쉽지 않습니다. 이 계수의 정확도는 교정 수행 온도가 20 °C 에서 벗어날수록 점점 더 중요해집니다. 정확한 계수를 사용할 수 없는 경우, 20 °C 에 가까운 온도에서 교정을 통해 측정 오차를 줄일 수 있습니다.
- 3) 피드백 시스템의 소재(예: 알루미늄 합금, 탄소 복합체, 세라믹, 평판 유리 모체, 실리콘 웨이퍼 등)와 팽창 계수가 크게 다른 공작물을 가공하기 위해 기계를 사용하는 경우, 기계 피드백 시스템의 팽창 계수가 아닌 공작물의 팽창 계수를 사용하는 것이 좋습니다. 이를 통해 20 °C 에서 기계의 성능을 나타내는 캘리브레이션이 제공되지 않는더라도 측정을 위해 20 °C 로 복귀할 때 공작물의 정확도를 향상시킬 수는 있습니다. 이에 대해서는 다음 하위 섹션의 목표 4 에서 자세히 설명합니다.

센서 위치

여기서는 환경 센서의 배치에 유용한 정보를 안내합니다.

기온 센서 - 기온 센서는 측정 암 레이저 빔 근처(중간 정도가 이상적 위치)에 놓습니다. 모터, 전원 공급장치 등에서 올라오는 더운 공기 기둥이나 직사광선을 피해서 배치합니다.

기압 및 습도 - 두 센서는 XC-80 내부, 측정 레이저 빔과 높이 차이가 3 m 이하인 위치에 수평으로 배치해야 합니다.

물질 온도 센서 - 레이저 교정 중에 물질 온도 센서를 배치할 공작 기계 상 위치는 종종 논쟁의 주제가 됩니다.

첫 번째 단계는 물질 팽창 보정을 수행하는 주된 목표를

판단하는 것입니다. 이는 ASME B89.1.8-2011 부록 C(참고 자료 6 참조)에 설명되고 아래 표에 나온 대로 네 가지 목표 중 하나입니다.



그림 18

목표 1	국가 또는 국제 기계 승인 표준에 따라 캘리브레이션을 수행합니다.
목표 2	실온 20 °C 에서 기계를 작동한 경우에 구할 수 있는 선형 위치를 측정합니다.
목표 3	피드백 시스템의 온도가 20 °C 인 경우에 기계 피드백 시스템에서 도달될 수 있는 선형 정확도를 추정합니다.
목표 4	검사를 수행하기 위해 공작물들이 20 °C 로 복귀되었을 때 기계가 생산할 수 있는 공작물의 정확도를 추정합니다.

이러한 목표들 간 차이는 기계 작동 중에 기계의 위치 피드백 시스템(예: 볼스크류)이 뜨거워진 경우 또는 공작물 팽창 계수가 위치 피드백 시스템의 팽창 계수와 크게 다른 경우(예: 유리 스케일 리니어 엔코더 사용 기계에서 알루미늄 공작물)에 특히 중요합니다. 다음 몇 단락에서 선택한 목표에 따라 물질 온도 센서 배치 및 물질 팽창 계수 선택에 대한 권장사항을 제시합니다.

목표 1 - 국가 표준 또는 국제 표준에 따라 기계의 정확도를 교정합니다. 표준에 정의된 절차를 따라야 합니다. 물질 센서를 배치할 위치, 사용할 팽창 계수 및 수행할 기계의 예열 주기를 모두 다루어야 합니다. 열적 드리프트 테스트가 표준에 정의되어 있으면, 테스트도 포함시켜야 합니다.

목표 2 - 20 °C 환경에서 작동했을 경우의 기계 정확도를 추정합니다. 대개 기계 제작, 승인, 시운전 또는 검교정 과정의 목표이며, 많은 경우에 목표 1 과 동일합니다. 이 목표를 충족하려면 기계의 테이블 또는 열원(예: 모터, 기어박스 등)에 인접하지 않은 기계 구조체의 다른 일부 거대한 부분에 물질 온도 센서를 배치해야 합니다. 물질 팽창 계수는 피드백 시스템의 팽창 계수로 설정해야 합니다. 주: 물질 센서는 항상 볼스크류 또는 피드백 시스템에 장착해야 한다는 것은 흔한 오해입니다. 다음 예시에 나온 것처럼 목표 3 의 경우에는 적용 가능하지만, 목표 2 에는 보통 해당되지 않습니다.

기계가 25 °C 작업장에서 교정되고 있다고 가정하고, 기계 작동으로 발생하는 열로 인해 볼스크류는 실온보다 5 °C 높은 30 °C 가 됩니다. 물질 센서가 볼스크류에(또는 매우 가까이) 놓여 있는 경우, 볼스크류를 20 °C 에서 작동했을 때 판독값을 측정하기 위해 레이저 판독값이 보정됩니다. 그러나 20 °C 환경에서 기계를 작동했다고 해서 볼스크류 온도가 20 °C 인 것은 아닙니다. 나사와 모터의 작동으로 인한 발열이 잔존하므로 볼스크류 온도(25 °C)는 주변 온도보다 5 °C 정도 높습니다. 따라서 물질 센서를 볼스크류에 올려 놓으면 과보정이 일어납니다. 지난 몇 시간 동안 기계 주변의 평균 실온에 대한 온도 판독값을 구하려면 기계의 거대한 부분에 센서를 장착하는 것이 좋습니다.

목표 3 - 온도가 20 °C 였을 경우의 기계 피드백 시스템 정확도를 추정합니다. 특히 기계 위치 피드백 시스템의 결함을 진단하는 데 유용합니다. 목표 1 또는 2 에 대해 기계 캘리브레이션에 실패했을 가능성 때문에 20 °C 에서 피드백 시스템의 정확도를 검증할 필요가 있습니다. 이 목표를 달성하려면, 레이저 빔을 최대한 피드백 시스템의 축에 가깝게 정렬해야 합니다(아베 오프셋 오차를 최소화함). 아베 오프셋이 존재하면 축 피치 또는 편요각 또한 검사해야 합니다. 물질 온도 센서는 피드백 시스템에(또는 매우 가까이) 장착해야 하고, 팽창 계수는 피드백 시스템의 팽창 계수로 설정해야 합니다.

목표 4 - 검사를 수행하기 위해 공작물들이 20 °C 로 복귀되었을 때 기계가 생산할 수 있는 공작물의 정확도를 추정합니다. 이 절차는 기계 위치 피드백 시스템과 공작물 확장 계수가 크게 다르고 온도가 제어되지 않는 작업장에서 생산된 가공 공작물의 치수 정확도를 최적화하는 데 특히 유용합니다. 물질 열팽창 계수는 공작물 재료의 열팽창 계수와 일치하도록 설정해야 합니다. 물질 온도 센서는 공작물 예상 온도와 비슷한 온도를 측정하는 위치에 장착되어야 합니다. (대개 기계의 테이블 위 지점이지만 사용된 냉각 시스템의 종류와 금속 제거율 등의 여러 다른 요인을 고려해야 할 수도 있습니다). 일반적인 조건에서 이러한 유형의 교정을 수행하는 데에도 주의를 기울여야 하며, 다양한 공작물의 온도 및 팽창 계수가 비교적 일정한 경우에만 효과적일 수 있습니다.

기타 예방 조치 - 물질 온도 센서와 측정 대상 물체 사이 열 접촉 상태가 양호한지 주의 깊게 확인하십시오. 평평하고 이물질이 없는 표면이 가장 좋습니다.

공기와 기계 온도가 크게 다른 경우, 물질 표면 및 내부 온도 사이에 상당한 온도 차이가 있을 수도 있습니다. 이러한 상황에서 내부 온도를 측정할 물질 온도 센서를 배치하는 데 주의를 기울여야 합니다.

공작 기계 온도는 작동 중에 대개 온도가 상승합니다. 발열의 영향이 적용되도록 교정이 시작되기 전에 일련의 예열 이동을 수행하는 것이 좋습니다.

데드 경로 오차(Dead path errors)

방정식 1(10 페이지 참조)이 불안정한 환경에서 수행한 선형 측정값을 효과적으로 보정하기 위해서는 N(프린지 카운트)이 간섭계의 측정 암에 있는 옵틱 간 간격을 반영하는 것이 중요합니다. 예를 들어, 분리 간격이 두 배가 되면 N도 명목상 두 배가 되어야 하며, N=0 일 때는 옵틱들이 서로 근접해야 합니다. 이는 옵틱들이 서로 근접해 있을 때 레이저 데이텀 설정(즉, N을 0으로 설정)으로 쉽게 해결됩니다.

레이저 시스템의 데이텀 설정 시 선형 옵틱들이 서로 근접하지 않고 주변 환경이 변하는 경우, 데이텀 위치에서 레이저 판독값의 경미한 드리프트가 나타납니다. 이 드리프트는 종종 공기 데드 경로 오차와 물체 데드 경로 오차라는 두 가지 요소로 구성됩니다.

공기 데드 경로 오차

그림 19에 나온 예제를 살펴봅시다. 엔코더 판독값이 0.000 mm이지만 측정 암 옵틱 간 "데드 경로" 간격 D인 위치가 레이저 시스템의 데이텀으로 설정되었다고 가정합니다. 따라서 이 위치에서 N = 0이고, 레이저 위치 판독값도 0.000 mm가 됩니다. 이제 공기의 굴절률이 +1 ppm 정도 바뀐다고 가정합니다. 그로 인해 레이저

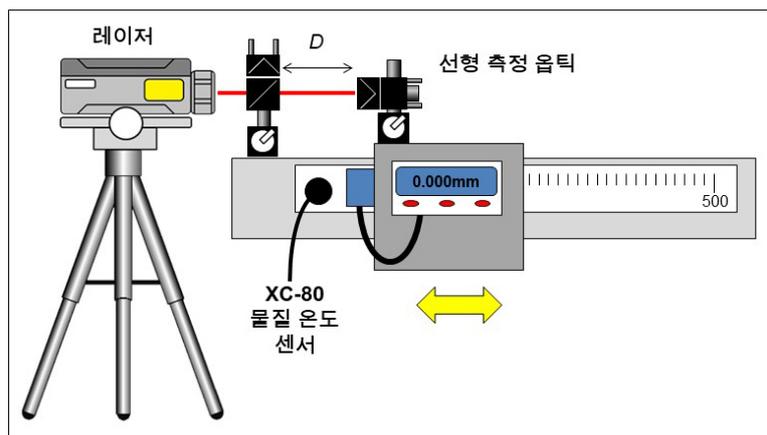


그림 19

파장이 1 ppm 짧아지며, 그 결과 측정 옵틱 간 간격 D에 맞는 파동의 수가 1 ppm 증가합니다. 이에 따라 프린지 카운트 N이 증가하고 레이저의 위치 판독값이 0에서 $1 \text{ ppm} \times D$ 만큼 멀어집니다. 이를 "공기 데드 경로 오차"라고 합니다. 환경 보정 장치가 레이저의 새로운 파장을 정확하게 계산했다라도

N 이 거의 0 에 근접($2D/\lambda_{air}$ 가 아님)하므로 공기 굴절 보정에 미치는 영향은 거의 없을 것입니다. 실제로 시스템이 측정 암에 있는 주변 공기를 "인식"하지 못하여 빔의 해당 부분에서 레이저 파장의 변동을 보정하지 않습니다.

공기 데드 경로 오차에 대한 일반적 방정식은 다음과 같습니다.

$$E_{ADP} = D \times (\lambda_{air} - \lambda_0) / \lambda_0$$

여기서 E_{ADP} 는 공기 데드 경로 오차일 때, D 는 데이텀에서 옵틱 간 거리(즉, 데드 경로), λ_{air} 는 현재 레이저 파장, λ_0 는 시스템의 데이텀 설정 시 레이저 파장이었습니다. 이 방정식을 사용하고 표준 대기를 기준으로 한 변동을 가정하면 다음과 같이 공기 데드 경로, 미터(m)당 데드 경로 오차를 추정할 수 있습니다.

데이텀 이후 기압(mbar) 변화당 오차 0.27 μm .

데이텀 이후 기온($^{\circ}\text{C}$) 변화당 오차 0.96 μm .

데이텀 이후 상대 습도 10% 변화당 오차 0.1 μm .

이로써 공기 데드 경로 오차가 일반적으로 매우 작다는 것이 분명해지고, 시스템 데이텀 설정 시 D 가 10 mm 미만이라도 측정 암 옵틱들을 배치하는 경우, 공기 데드 경로 오차는 무시할 수 있는 수준입니다.

일부 레이저 시스템에는 사용자가 수동으로 공기 데드 경로를 입력할 수 있는 소프트웨어가 있고, 이 소프트웨어가 추가적인 보정을 수행합니다. Renishaw 의 LaserXL 소프트웨어는 두 가지 이유로 이를 허용하지 않습니다.

- 1) 사용자가 부호 규약을 잘못 사용할 위험이 있습니다. 이동 방향감과 옵틱들의 배열에 따라 데드 경로를 양의 값 또는 음의 값으로 입력해야 할 수 있습니다. 부호를 잘못 입력하면 오차가 제거되지 않고 오히려 두 배로 증가합니다.
- 2) 옵틱들을 관심 지점에 가깝게 직접 고정하여 외부 공기 및 물질의 "데드" 경로를 최소화하는 것이 바람직한 계측 방법입니다. 실제로 물체의 데드 경로 오차는 다음 섹션에 나온 것처럼 일반적으로 훨씬 더 중요합니다. 따라서 소프트웨어에 의한 보정을 차단하는 것이 우수한 계측 방법으로 권장됩니다.

물체 데드 경로 오차

그림 19 에 나온 예제를 다시 살펴봅니다. 엔코더 판독값이 0.000 mm 이며 측정 암 옵틱 간 "데드 경로" 간격 D 인 위치를 레이저 시스템의 데이텀으로 다시 설정합니다. 이 위치에서 $N = 0$ 이고, 레이저 위치 판독값은 다시 0.000 mm 가 됩니다. 이제 기계의 온도가 $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 변하고, 물질의 팽창 계수가 대략 $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 라고 가정합니다. 이 팽창으로 인해 측정 암 옵틱들의 이동 거리가 $10\text{ ppm} \times D$ 정도씩 증가하여 측정 암 옵틱 간격 D 에 맞는 파동의 수가 10 ppm 증가하는 결과가 초래됩니다. 이에 따라 프린지 카운트 N 이 증가하고 레이저의 위치 판독값이 0 에서 $10\text{ ppm} \times D$ 만큼 멀어집니다. 이 "물체 데드 경로 오차"는 1°C 의 공기 변화로 인해 발생하는 공기 데드 경로 오차보다 10 배 더 크다는 점에 유의하십시오. 환경 보정 장치가 새로운 환경 인자 EF 를 정확하게 계산했다라도 N 이 거의 0 에 근접($2D/EF$ 가 아님)하므로 물질 팽창 보정을 적용함으로써 인한 영향은 거의 없을 것입니다. 실제로 시스템이 측정 암에 있는 주변 물체를 "인식"하지 못하여 물체의 열적 팽창이나 수축에 대한 보정을 수행하지 않습니다.

물체 데드 경로 오차에 대한 일반적인 방정식은 $E_{MDP} = D \times \alpha \times T$ 입니다.

여기서 E_{MDP} 는 물체 데드 경로 오차이고, D 는 데이텀에서 옵틱 간 거리(즉, 데드 경로), α 는 데드 경로에서 물질의 선형 팽창 계수이며, T 는 시스템 데이텀 설정 후 물질의 온도 변화입니다. 예를 들어 물질 팽창 계수가 $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 인 경우, 데드 경로 오차는 데이텀 이후 물체 온도($^{\circ}\text{C}$) 변화당 물체 데드 경로가 미터(m)당 $10\text{ }\mu\text{m}$ 입니다.

이로써 물체 데드 경로 오차가 공기 데드 경로 오차보다 훨씬 클 가능성이 있음이 분명해집니다. "데드 경로"의 물체가 측정 중인 품목과 같지 않을 수 있고 그 물체 온도가 독립적으로 변할 수 있기 때문에 단순한 소프트웨어 보정은 비현실적입니다. 가장 좋은 방법은 다음과 같은 바람직한 계측 사례를 적용하는 것입니다.

- 옵틱들을 서로 근접하게 그리고 관심 지점에 직접 고정하여 물체 데드 경로를 최소화합니다.
- 온도를 안정화하거나 측정을 신속하게 완료하여 측정 중에 물질 온도의 변화를 최소화합니다.
- 다음 두 섹션에 설명된 대로 사전 설정된 판독값을 사용하거나 이동하는 옵틱으로 광분할기를 사용하여 시스템의 데이텀 설정 시 옵틱 간격을 최소화합니다.

레이저 판독값 사전 설정으로 데드 경로 제거

그림 19 에 나온 설정을 변경하여 살펴봅니다. 이번에는 그림 20 에 나온 것처럼 리니어 엔코더의 기준(또는 0 위치)이 맨 끝에 위치합니다. 하지만 접근 제한 때문에 레이저와 옵틱을 재배열할 수 없습니다. 이러한 상황(기계 또는 엔코더 0 위치가 레이저의 옵틱에 근접한 위치와 일치하지 않는 경우)을 처리하기 위해

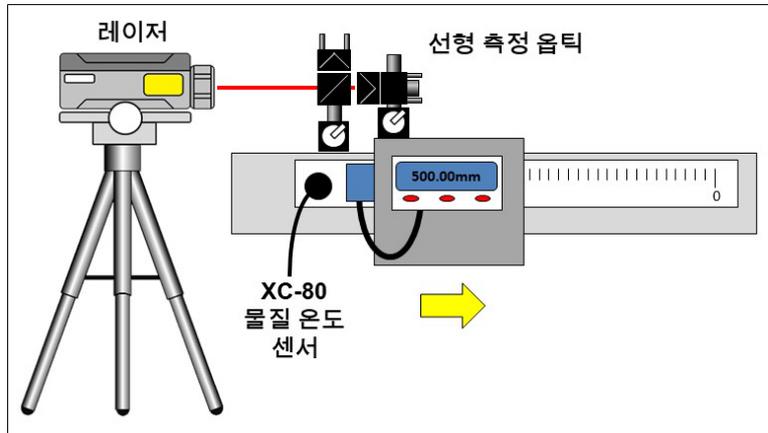


그림 20

Renishaw 의 LaserXL

소프트웨어에 사용되는 물질 및 공기 보상 방정식에 추가 "사전 설정" 항을 추가했습니다.

$$L = P + ((1 - \alpha T) \times \lambda_{\text{air}} \times N / 2) \dots\dots\dots \text{방정식 2}$$

여기서 P 는 리니어 레이저 판독값을 지정된 양만큼 오프셋할 수 있도록 허용하는 "사전 설정"으로, 사용자가 입력하는 값입니다. 사전 설정 값은 보정되지 않으며, 표시되기 전에 보정된 레이저 위치에 추가되는 고정 오프셋일 뿐입니다.

그림 20 의 예제에서 레이저를 데이텀으로 설정하고 사전 설정을 적용하는 올바른 방법은 다음과 같습니다.

1. 캐리지를 엔코더의 500mm 위치로 이동합니다.
2. 그림 20 에 나온 것처럼 옵틱 마운트를 조정하여 옵틱들을 서로 가까이 배열합니다.
3. 레이저 판독값의 부호 규칙이 엔코더와 일치하는지 확인합니다.
4. 레이저 시스템을 데이텀으로 설정합니다. 따라서 요건을 충족하면 레이저를 데이텀으로 설정했을 때 옵틱들이 서로 근접하게 됩니다. 주: 이제 레이저 판독값은 0.000 mm 이 되고 엔코더 판독값은 500mm 가 됩니다.
5. 캐리지를 엔코더의 레퍼런스 또는 0 점 위치로 이동합니다. 주: 이제 엔코더 판독값은 0.000 mm 이고 레이저 판독값은 대략 -500mm 입니다(예: -500.0011 mm 라고 가정).

- 레이저 및 엔코더 판독값을 일치시키기 위한 사전 설정 값을 레이저 소프트웨어에 입력합니다.
(이 예제에서는 사전 설정값으로 +500.0011 을 레이저 소프트웨어에 입력해야 합니다. 그러면 레이저 판독값이 0.0000 mm 로 바로 상승하여 엔코더 판독값과 일치하게 됩니다.)
- 교정을 시작합니다. 이제 추가적으로 발생하는 환경 변화에 대한 보정이 올바르게 적용되므로 옵틱들을 500mm 간격으로 배열한 상태로 레이저를 데이텀으로 설정했을 경우에 발생할 수 있는 공기 및 물질 데드 경로 오차를 방지할 수 있습니다.

옵틱 교환으로 데드 경로 제거

옵틱들을 근접 배열한 상태로 시스템을 데이텀으로 설정하는 또 다른 방법은 축 0 또는 기준 위치가 레이저에서 멀리 떨어진 끝에 있을 때 그림 21 에 나온 것처럼 이동 옵틱과 정지 옵틱을 서로 교환하는 것입니다. 이 설정에서 광분할기 옵틱(역반사경 대신)은 이동 캐리지에 고정되고 역반사경은

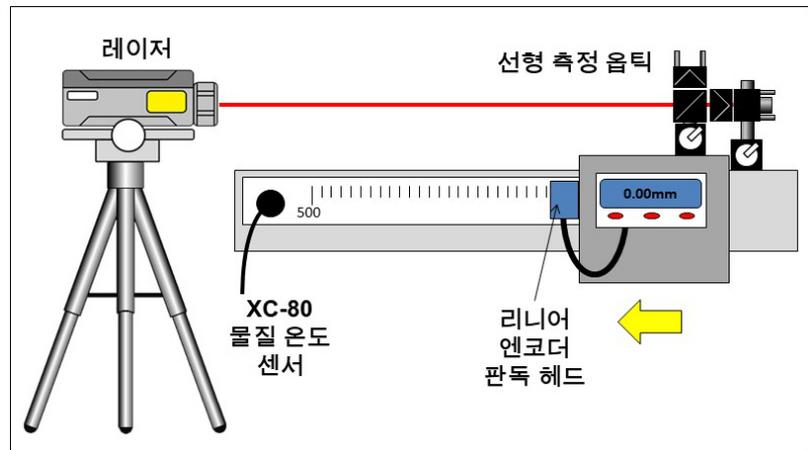


그림 21

베드 맨 끝에 고정됩니다. 그림 21 에서 옵틱들을 근접시켜 공기 데드 경로를 제거한 상태에서 데이텀 위치의 캐리지를 보여줍니다. (하지만 그림에서 옵틱 고정 지점과 엔코더 판독 헤드 및 엔코더 0 점 지점 간 오프셋은 약간 증가하는데, 이로 인해 온도가 변하고 기계 베드와 이동 캐리지가 서로 다르게 확장될 경우 일부 물질 데드 경로 오차가 발생할 수 있습니다.) 옵틱 제조 공차로 인해 광분할기의 출력 빔이 입력 빔과 정확히 평행하지 않을 수 있기 때문에 장축(10m 초과)에서 이 배열은 정렬하기가 더 어려울 수 있습니다.

결론

이 백서에서는 선형 레이저 간섭계 측정의 정확성을 보장하기 위한 공기 굴절 및 물질 팽창 보정의 중요성을 설명하였습니다. 공기 온도, 압력 및 습도와 물질 팽창의 보정되지 않은 변동과 연관된 잠재적 오차에 대해서도 자세히 다루었습니다. Renishaw 의 XC-80 환경 보정 시스템의 작동에 대해 설명하고, 시스템의 활용율을 높일 수 있는 방법을 설명했습니다. 자세한 내용은 아래 참고 자료 및 부록을 참조하십시오. 부록 1 과 부록 2 에서는 환경 보정 방법에 대한 대안들을 소개합니다. 부록 3 에서는 간섭 각도 및 진직도 측정 시 보통 환경 보정이 필요하지 않은 이유를 설명합니다.

부록 1 – 환경 보정 – 대안

이 백서에서는 Renishaw의 XC-80 환경 보정 장치를 사용하여 자동 공기 굴절 및 물질 팽창 보정을 제공하는 방법에 대해 설명했습니다. 이 부록에서는 몇 가지 대안적 방법을 간략하게 설명합니다.

수동 보정 – 적합한 환경 데이터를 사용할 수 있는 경우, 물질 온도 및 팽창 계수는 물론 기온, 기압 및 습도 정보를 수동으로 Renishaw의



그림 22

LaserXL 소프트웨어(그림 22 참조)에 입력할 수 있습니다. 사용자가 새로운 환경 데이터를 입력할 때마다 레이저 판독값에 적용된 보정이 업데이트됩니다. 이러한 접근법의 단점은 보정의 잦은 업데이트가 실용적이지 못하여 안정적인 환경에만 적합하다는 점입니다. Renishaw XC-80 시스템의 장점은 7 초마다 새로운 센서 판독값으로 보정이 자동으로 업데이트된다는 것입니다. XC-80 시스템은 또한 소형 패키지에 필요한 모든 정밀 센서들을 제공합니다.

공기 굴절계 – 공기 굴절계는 공기의 굴절률 변화를 직접 측정하는 고도의 특수 계측기입니다. 일반적으로 양쪽 끝에 거울이 달린 제로 팽창 유리로 만들어지고, 매우 안정적으로 거리가 기준 거리로 고정된 공기 굴절계에 포함되어 있습니다. 기준 거리에 맞는 레이저 파동 개수의 변화는 평면 미러 리니어 간섭계로 직접 측정됩니다. 기준 거리 내 공기의 온도, 압력 및 습도는 주변 환경과 동일합니다. 두 가지 기본 유형이 있습니다. 굴절률의 변동만을 측정하는 *추적 굴절계*와 절대 굴절률 및 모든 변동을 측정할 수 있는 *절대 굴절계*입니다. 굴절계는 높은 정확도로 굴절률 변동을 매우 빠르게 측정할 수 있지만 고가이고 번거로우며 간섭계용으로 레이저 빔이 하나 더 필요로 합니다. 일반적으로 표준 실험실 및 반도체 웨이퍼 처리 기계 내 레이저 위치 피드백 시스템에서만 굴절계가 사용됩니다. 응답 시간이 기존의 온도, 압력 및 습도 센서가 제공할 수 있는 것보다 훨씬 빠릅니다. 그러나 이로 인해 굴절계 근처 공기 굴절률의 국소적 변화가 선형 측정의 전체 길이에 즉시 적용되기 때문에 보정된 레이저 판독값의 노이즈가 증가할 수 있습니다. 기존 센서는 더 느린 반응으로 인해 갑작스러운 국소적 변화에 반응하지 않기 때문에 보정 과정에 유용한 댐핑을 제공할 수 있습니다. Renishaw의 레이저 시스템은 굴절계가 제공되는 환경 정보 입력을 지원하지 않습니다.

균형 잡힌 옵틱 설계 - 시스템

데이터 설정 시 옵틱들을
근접시킬 수 없는 경우, 균형
잡힌 옵틱 배치를 고려할 수
있습니다. 간섭계의 기준 압과
측정 압의 길이가 비슷하고

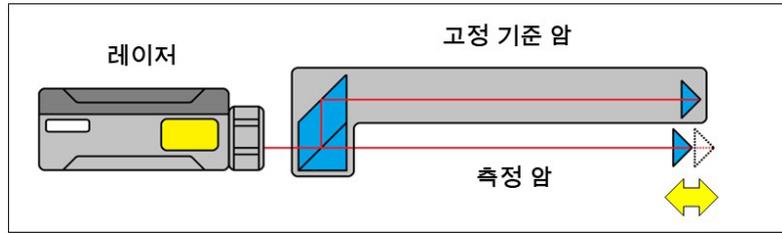


그림 23

동일한 공기에 노출될 경우, 공기의 굴절률 변화가 양쪽 압에 동일하게 영향을 미칩니다. 그림 23 에서 가능한 배열을 보여줍니다. 시스템에서 기존의 리니어 광분할기 대신 앵글러 간섭계 잠망경을 사용하여 병렬 기준 빔과 측정 레이저 빔을 생성합니다. 긴 기준 압은 측정 압과 유사한 경로 길이의 국부적 기준을 형성하기 위해 Invar(열적 안정성을 위해) 또는 기계의 다른 부분에 지지됩니다.

통제된 환경에서 측정 – 고도로 통제된 환경에서 측정을 수행하면 환경 보정이 필요하지 않을 수 있습니다. 다음 두 가지 경우가 가능합니다.

- 진공에서 측정.
- 통제된 온도, 압력 및 습도 환경에서 측정.

부록 2 - NIST 공기 굴절률 계산식 사용

앞에서 언급했듯이, NIST의 Metrology Toolbox는 0.633 μm HeNe 레이저에 사용할 수 있는 Edlén 및 Ciddor 방정식보다 단순하지만 정확도는 약간 낮은 "휴대용 계산기 친화적" 대안을 제공합니다.

$$n_{\text{air}} = 1 + ((7.86e-5 \times P)/(273 + T)) - 1.5e-11 \times H \times (T^2 + 160)$$

여기서 n_{air} = 공기 굴절률, T = 기온(°C 단위), H = % 상대 습도, P = 기압(mbar 단위)입니다. 이 방정식은 개정된 Edlén 또는 Ciddor 방정식만큼 정확하지는 않지만 정확도는 CO₂ 농도 450 ppm ±150 ppm, 0-35 °C, 500-1200 mBar, 0-100% RH 조건에서 ±0.15 ppm 이내여야 한다고 NIST는 명시하고 있습니다.

따라서 이 방정식은 광범위한 온도, 압력 및 습도에 대한 환경 보정 오차를 추정하는 데 매우 유용합니다. 또는 다음과 같이 보정되지 않은 레이저 판독값에 공기 굴절 보정을 적용하는 데 사용할 수도 있습니다.

공기 굴절 보정이 적용되지 않으면 Renishaw의 레이저 소프트웨어에서 압력 1013.25 mbar, 온도 20°C, 상대 습도 50%의 "표준 대기"에서 리니어 레이저 측정이 이뤄지고 있다고 가정합니다.

이러한 조건을 NIST 방정식에 대입하면 "표준 대기"에 대한 굴절률이 산출됩니다.

$$n_{\text{standardair}} = 1 + ((7.86e-5 \times 1013.25)/(273 + 20)) - 1.5e-11 \times 50 \times (20^2 + 160) = 1.00027139$$

하지만 실제로 레이저 측정값을 다른 조건의 P, T 및 H 아래 공기 중에서 취하는 경우, 현재 공기의 굴절률은 다음 방정식으로 계산됩니다.

$$n_{\text{air}} = 1 + ((7.86e-5 \times P)/(273 + T)) - 1.5e-11 \times H \times (T^2 + 160)$$

보정되지 않은 리니어 레이저 판독값(L)은 다음 방정식을 사용하여 두 굴절률 간 비율을 곱하여 "보정"할 수 있습니다.

$$L_{\text{compensated}} = L_{\text{uncompensated}} \times n_{\text{standardair}} / n_{\text{air}} = L_{\text{uncompensated}} \times 1.00027139 / n_{\text{air}}$$

주: 위 방정식은 유틸리티 근접한 상태에서 데이터 설정이 되지 않는 경우, 불안정한 환경에서 발생할 수 있는 공기 데드 경로 오차에 대한 보정을 수행하지 않습니다.

부록 3 – 간섭 앵글 및 진직도 측정에 대한 환경 보정

진직도 간섭계 – 그림 24 에서 진직도
 옵틱들의 개략도를 보여줍니다.

그림에서 볼 수 있듯이 간섭계의 암
 1 과 암 2 의 레이저 빔은 길이가 거의
 동일합니다. 따라서 공기 굴절률의
 변화로 인해 두 암에 미치는 영향도
 거의 동일한 정도입니다. 큰 진직도
 오차 측정 시 작은 불균형이 존재하며,

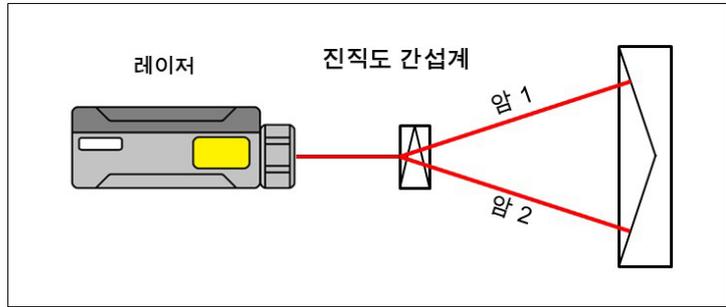


그림 24

이로 인해 공기 굴절률 변화에 다소 민감하게 반응하게 됩니다. 그러나 굴절률의 최대 예상 변동은 대략 155 ppm(그림 4, 5, 6 참조)으로 0.015%에 해당합니다. 이는 Renishaw 의 진직도 옵틱의 지정된 측정 정확도인 0.5%(단거리 옵틱) 또는 2.5%(장거리 옵틱)에 비해 미미한 수준이며, 1 mm 의 진직도 오차를 측정할 때 0.15 μm 의 오차에 불과합니다.

앵글러 간섭계 – 그림 25 에서 앵글러
 옵틱들의 개략도를 보여줍니다.

그림에서 볼 수 있듯이 반사경이 빔에
 직각일 때 간섭계의 암 1 과 암 2 의
 레이저 빔의 공기 경로는 길이가
 비슷합니다. 이는 일반적으로 축 피치
 또는 편요각을 측정할 때 해당됩니다.

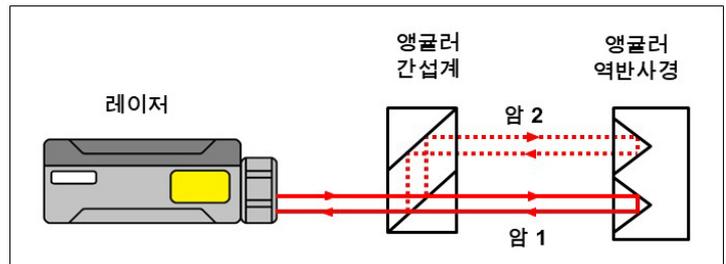


그림 25

큰 각도(최대 10 °)를 측정하는 경우에 사소한 불균형이 존재하며, 이로 인해 공기 굴절률의 변화에 다소 민감하게 반응하게 됩니다. 그러나 굴절률의 최대 예상 변동은 대략 약 150 ppm(0.015%)이므로 Renishaw 의 앵글러 옵틱의 지정된 측정 정확도인 0.6%(표준 앵글러 옵틱) 또는 0.2%(고정밀 앵글러 옵틱)에 비하면 미미한 수준입니다. 마지막으로, Renishaw 의 XR20-W 기준 인덱서와 조합으로 앵글러 옵틱을 사용하여 로터리 축을 측정할 때 옵틱 교정 사이클에서 자동으로 현재 공기 굴절률이 고려됩니다. 이 주제에 대한 자세한 내용은 Renishaw 백서 TE327 - 로터리 축의 간섭계 교정(참고 자료 7)에서 확인할 수 있습니다.

참고 자료

1. Phillip E. Ciddor, "Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared," Appl. Optics 35, 1566-1573 (1996).
2. B. Edlén, "The refractive index of air," Metrologia 2, 71-80 (1966).
3. K.P. Birch and M.J. Downs, "An updated Edlén equation for the refractive index of air," Metrologia 30, 155-162 (1993).
4. K.P. Birch and M.J. Downs, "Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air," Metrologia 31, 315-316 (1994).
5. NIST Metrology Toolbox <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>
6. ASME B89.1.8-2011 Performance Evaluation of Displacement Measuring Laser Interferometers. Non-Mandatory Appendix C – Performing Accurate Measurements with a Laser Interferometer System – Best Procedures and Practices. 41-48 (1998)
7. Renishaw 백서 TE327 - 로터리 축의 간섭계 교정

www.renishaw.co.kr/contact



#renishaw

 02-2108-2830

 korea@renishaw.com

© 2013–2022 Renishaw plc. 본 문서는 Renishaw의 사전 서면 허가 없이 전체 또는 일부를 복사나 복제할 수 없으며, 어떤 방법으로든 다른 매체로 전송하거나 다른 언어로 변경할 수 없습니다.
RENISHAW®와 프로브 로고는 Renishaw plc의 등록 상표입니다. Renishaw 제품명과 'apply innovation'의 지정 및 마크는 Renishaw plc 또는 그 자회사의 등록 상표입니다. 다른 브랜드, 제품 또는 회사 이름은 해당 소유주의 등록 상표입니다.
본 문서의 공개 당시 문서의 정확성을 확인하기 위해 최선의 노력을 기울였지만, 발생하는 모든 보증, 조건, 진술 및 책임은 법률이 허용하는 한도에서 제외됩니다. Renishaw는 이 문서와 장비 및/또는 소프트웨어, 여기에 명시된 사양을 변경할 권리를 보유하며, 이러한 변경을 고지할 의무는 없습니다.
Renishaw plc. 영국과 웨일즈에 등록됨. 기업 번호: 1106260. 등록된 사무소: New Mills, Wotton-under-Edge, Gloucestershire, GL12 8JR, UK.

품목 번호: H-5650-3562-03-A

발행일: 10.2022