

백서: 로터리 엔코더의 정확도

로터리(앵글*) 엔코더는 매우 다양한 기계와 장치에서 사용됩니다. 로터리 엔코더는 링 주변부 또는 디스크 표면에 표시되는 정밀 로터리 스케일과 위치 측정 판독 헤드로 구성됩니다. 판독 헤드는 일정한 간격의 스케일 마크를 광학적으로 감지하여 위치를 측정하고 해당 정보를 아날로그 또는 디지털 신호로 출력합니다. 이어서 신호는 디지털 판독(DRO) 또는 모션 컨트롤러에 의해 위치 판독값으로 변환됩니다. 이 백서에서는 로터리 엔코더 성능에 영향을 미치는 주요 요인을 설명하고 상황에 맞는 가장 적합한 엔코더 시스템을 선정하는 데 도움이 되는 정보를 제공합니다.

로터리 형식 CTP(Computer-To-Plate) 프리 프레스 기계, 공작 기계 A, B, C 축, 표면 실장 기계(SMT), 형상 측정 시스템, 웨이퍼 핸들링 및 검사 장치, 고니오미터와 같은 다양한 최신 자동화 시스템에서 정밀 로터리 모션이 필요합니다. 용도에 따라 그 기능을 최적화하기 위해 다양한 엔코더 성능과 기능의 조합이 필요합니다. 예를 들어 정확도가 필요한 경우도 있고 반복도나 고분해능 또는 속도 루프 제어를 위해 낮은 주기 오차가 필요할 수도 있습니다. 사양과 기능이 최적의 균형을 이루는 엔코더를 선택하는 일은 매우 어려우며 모든 요건을 충족할 수 있는 엔코더는 드뭅니다.



그림 1. 다이렉트 드라이브 모터에 설치된 Renishaw의 RESOLUTE™ RESA 로터리 엔코더(SOLPOWER, 대만).

정밀 모션 제어는 시스템의 정확도와 동적 응답 모두의 영향을 받습니다. 위치를 정확하게 측정하는 것도 중요하지만 위치를 정확하게 제어하지 못하면 시스템이 성능을 발휘할 수 없습니다. 다이렉트 드라이브 로터리 모터(또는 토크 모터)는 높은 토크를 발생시키며 아주 작은 각도에 대한 정밀 서보 제어가 가능합니다. 구동 장치에 직접 부하 장치가 결합되어 백래시, 히스테리시스, 기어 오차 또는 벨트 장력 변화를 유발하는 트랜스미션 구성품이 필요하지 않아 동적 응답이 매우 훌륭합니다. 큰 내부 직경을 가진 토크 모터의 프레임리스 형태는 샤프트 엔코더에 맞는 명확한 커플링을 제공하지 않지만, 회전 링 엔코더는 편리한 솔루션을 제공합니다. 또한 로터리 엔코더는 부하 장치처럼 구동 장치에 견고하게 결합되어 시스템에서 원치 않는 느슨함을 제거합니다. 어떤 측정 또는 제어 시스템에서나 엔코더는 구동 장치에 최대한 가까운 것이 좋습니다. 특히 서보 대역폭의 증가함에 따라 서보 성능에 영향을 미치는 잠재적인 샤프트 공진을 최소화하는 데 도움을 주기 때문입니다.

*앵글 엔코더는 일반적으로 라인 수가 10,000개 이상이고 정확도는 ± 5 arc sec보다 높습니다. 엄밀히 말해 '로터리 엔코더'라는 용어는 이러한 기준이 미치지 못하는 엔코더를 말하지만 전반적인 엔코더를 나타내는 일반 용어로 사용되는 경우가 많습니다.

정밀 각도 위치 피드백을 제공하기 위한 훌륭한 솔루션이 로터리 엔코더입니다. 모터 선택과 마찬가지로 올바른 로터리 엔코더를 선택하려면 현실적인 요구 사양, 엔코더 정확도에 영향을 미치는 요인에 대한 지식과 성능 부족 문제를 극복할 수 있는 방법에 대한 올바른 이해가 필요합니다. 로터리 엔코더를 선택할 때는 정확도, 분해능뿐만 아니라 데이터 속도, 시스템 크기, 복잡도, 비용과 같은 다양한 매개변수를 고려해야 합니다. 리니어 엔코더는 정확도와 분해능을 수십 나노미터 단위로 측정하며 앵글 엔코더는 1 arc sec 미만의 측정 성능을 제공할 수 있습니다. 1 arc sec은 다음과 같은 작은 각도입니다.

- 반경 206.25 mm 원호 길이 중 1마이크론에 해당합니다.
- 지구 표면의 30m 거리입니다.
- 1 rev/sec에서 1.3 MHz 데이터 속도로 분석할 수 있습니다.

필요한 측정 성능을 결정할 때는 정밀도, 분해능과 반복도를 고려하는 것이 좋습니다.

- 반복도가 필요한 애플리케이션의 경우(예: 픽앤플레이스 (Pick & Place) 기계), 매번 동일한 엔코더 카운트에서 움직임을 멈추는 시스템에서 정확한 각도는 부차적인 요소입니다.
- 연속적으로 부드러운 모션을 위해 선택한 엔코더 분해능과 정밀도는 제어 서보 대역폭 내에서 지터를 허용해서는 안 됩니다.
- 천체 망원경과 같이 천천히 움직이는 장치의 경우에는 정확한 각도 측정이 시스템의 최대 속도보다 더 중요합니다.
- 고속 시스템의 경우에는 속도와 위치 정확도가 상충할 수 있습니다. 피치가 조밀하지 않은(라인 수가 적은) 엔코더는 높은 속도에 적합하지만 피치가 조밀한(라인 수가 많은) 엔코더는 일반적으로 보간 오차가 적습니다.

시스템 정확도 요건을 이해하면 적합한 엔코더를 훨씬 더 쉽게 선택할 수 있습니다. 일부 제조업체의 주장에도 불구하고, 고도로 정확한 로터리 측정은 쉽지 않습니다. 성능을 최적화하려면 오차 발생 요소에 대한 이해가 필수적입니다. 이 박서는 그림 3의 엔코더 로터리 링을 기본으로 하지만 그림 2의 Renishaw RCDM 엔코더 스케일과 같은 표면-판독 로터리 디스크에도 동일한 논리가 적용됩니다.

오차 발생 원인

학교에서 플라스틱 각도기로 종이에 그려진 두 연필선 사이의 각도를 측정하는 어린이를 떠올려 보십시오. 각도기의 기준선이 두 선 중 하나 위에 오도록 각도기를 종이 위에 올려 놓고 원점이 두 선이 만나는 지점과 일치할 때까지 위치를 조정합니다. 그런 다음 눈금선 상의 두 선 사이 각도를 읽고 필요한 경우 요구되는 분해능을 얻기 위해 보간을 합니다. 처음 몇 번은 학생이 읽은 값과 선생님이 읽은 값이 다를 수 있습니다. 선생님은 각도기가 선과 일치하도록 정확하게 중심을 맞춰야 하는 중요성을 강조합니다. 이러한 정렬 오차는 플라스틱 각도기에 표시된 각도값의 오차보다 측정된 각도에 더 큰 영향을 미칠 수 있습니다.

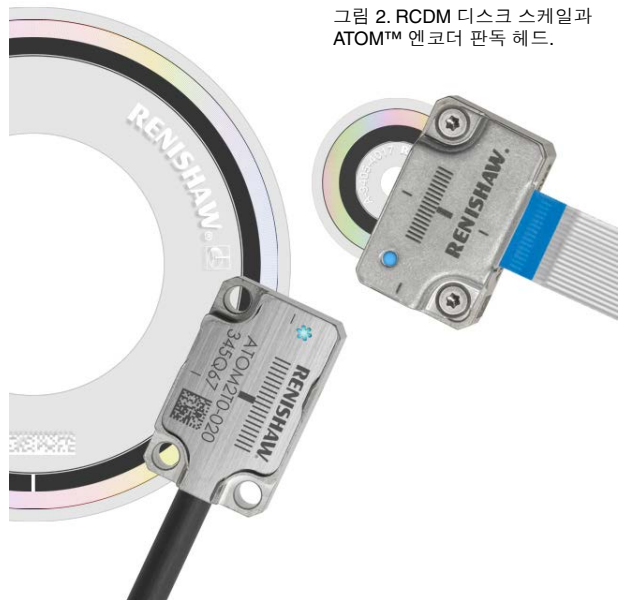


그림 2. RCDM 디스크 스케일과 ATOM™ 엔코더 판독 헤드.

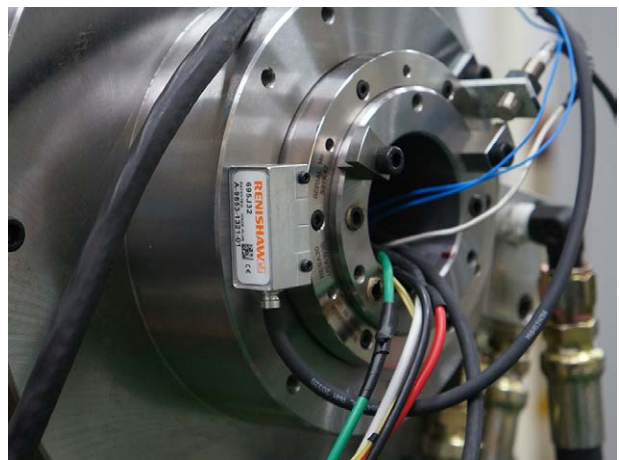


그림 3. RESOLUTE 엔코더를 사용하는 DDR 로터리 테이블 (ITRI, 대만).

지금까지 다음과 같은 정확한 각도 측정의 3가지 규칙을 배웠습니다.

1. 로터리 스케일의 중심이 측정 대상 각도의 꼭짓점과 최대한 가깝도록 정렬합니다.
2. 측정 스케일을 측정 대상 항목과 최대한 가깝게 유지합니다.
3. 측정 스케일과 측정 대상 항목 간의 상대적(각) 움직임을 최소화합니다.

다음과 같은 세 가지 다른 요인은 고려하지 않았을 수 있습니다.

4. 눈금 사이의 원주 방향 거리는 원을 중심으로 일정해야 합니다.
5. 모든 각도 위치에 있어 반경방향 스케일 중심과 측정이 이루어지는 스케일의 가장자리 사이 반경 거리가 동일해야 합니다.
6. 시차 오차를 최소화하기 위해 각도기를 통해 수직으로 선을 보면서 각도를 측정해야 합니다.

이러한 전제 조건은 종이 위 플라스틱 각도기와 같이 기계의 로터리 엔코더에 동일하게 적용됩니다.

그림 5에서 각 운동을 측정 또는 제어하는 대상 구성품은 두 베어링에 장착된 샤프트에서 회전합니다. 필수 베어링이 장착된 앵글 엔코더가 이 샤프트에 결합되어 움직이지 않는 기구에 장착된 판독 헤드로 판독합니다. 앞서 말한 규칙을 고려할 때 엔코더 시스템 출력이 구성품의 실제 로터리 모션을 반영하려면 다음 사항이 적용되어야 합니다.

1. 시스템의 각 부분은 회전 축의 반경 런아웃(즉 측면 모션) 없이 베어링에서 회전해야 합니다.
2. 대상 구성품을 엔코더에 연결하는 샤프트 시스템은 비틀림에 강해야 합니다.
3. 커플링은 베어링에서 회전하는 엔코더의 각 운동이 자체 베어링 시스템에서 회전하는 부품의 각 운동과 동일하도록 설계해야 합니다. 즉 등속 조인트가 필요합니다.
4. 엔코더 스케일 가장자리를 둘러싸는 선의 간격은 균일해야 하며 판독 헤드가 선형 방식으로 선 사이를 보간해야 합니다.
5. 엔코더 스케일은 회전 축이 중심을 수직으로 통과하는 완전한 원형이어야 합니다.
6. 판독 헤드는 시차 또는 기타 형상 오차 없이 스케일을 판독해야 하며 움직이지 않는 기구물에 견고하게 장착되어야 합니다.

이러한 조건 중 하나라도 충족되지 않으면 대상 구성품의 각도 위치와 엔코더 시스템이 보고하는 각도 위치가 일치하지 않게 됩니다. 이러한 잠재적 오차 원인을 각각 조사함으로써 오차의 크기와 전체 시스템의 오차를 판별할 수 있습니다.

베어링 요동에 따른 영향

'베어링 요동'이라는 용어는 구성품 및/또는 엔코더 회전 축의 반경 런아웃(또는 가로 방향으로 이동)으로 이어지는 다양한 시스템 특성을 설명하는 데 사용됩니다. 반경 런아웃은 반복 가능 구성품과 반복 불가능 구성품 모두로 구성되며 유격, 더 높은 고조파(예: 볼 및 레이스 불완전), 편심과 같은 베어링 시스템 결함으로 인해 발생할 수 있습니다(그림 4 참조).

롤링 베어링에서 움직이는 스피ن들의 반경 런아웃 크기는 베어링 시스템의 설계와 조정에 따라 영향을 받지만 일반적으로 $\pm 1 \mu\text{m}$ 보다 큼니다. 엔코더 시스템은 로터리 스케일의 원주 방향 위치를 이 값의 최소 1/10로 분석할 수 있으므로 베어링 요동으로 인한 오차가 잘 설계된 시스템의 나머지 부분에서 발생하는 오차를 압도할 수 있음을 알 수 있습니다. 베어링 요동에 따른 오차 기여도는 다음과 같이 계산합니다.

$$\text{각도 측정 오차(arc sec)} = \text{베어링 요동}(\mu\text{m}) \times 412.5/D$$

여기서 D는 엔코더 스케일의 직경(mm)입니다.

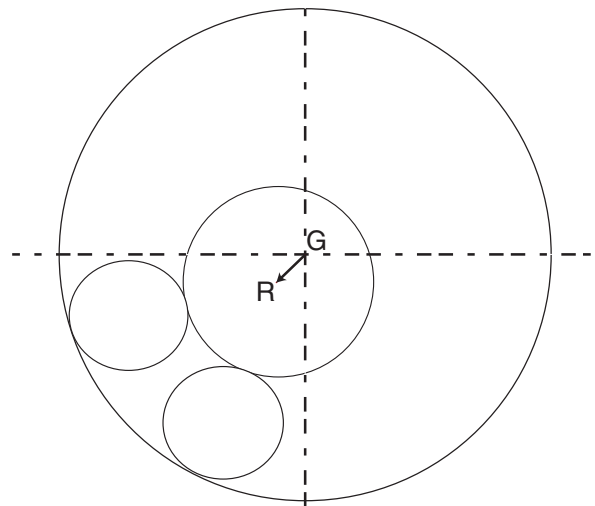


그림 4. 베어링 런아웃은 총 편심에 기여하며 기하학적 중심(G)으로부터 회전 축(R)의 변위를 의미합니다.

주기적인 오차들이 측정됨에도 불구하고 이 측정 오차는 평가하기가 어렵습니다. 보정 목적으로 사용되는 오차 맵이 많은 스피들 회전을 매핑해야 하기 때문입니다.

고정확도 시스템의 경우 잘 설계된 에어 베어링을 사용하는 것이 좋습니다. 베어링 반경 방향 강도를 올바르게 선택함으로써 반경 런아웃이 서브미크론 수준으로 감소할 수 있기 때문입니다. 에어 베어링을 사용할 때는 힘의 불균형에 따른 영향을 고려해야 합니다. 저속에서는 스피들이 기하학적 중심선을 중심으로 회전하지만 고속에서는 무게중심의 불균형에 따른 영향이 베어링과 해당 장치의 반경 방향 강도를 넘어서서 스피들이 무게 중심을 기준으로 회전하게 됩니다. 이러한 전환은 일반적으로 빠른 속도로 이루어지지만 정적 중심선과 동적 중심선 사이에 몇 미크론 정도가 차이가 날 수 있습니다. 이러한 반경 런아웃은 반복되므로 스피들 회전당 한 주기로 예측할 수 있습니다.

어떤 베어링을 사용하더라도 다음 사항에 주의해야 합니다.

- 그림 5에 나와 있는 시스템의 경우, 엔코더를 지지하는 베어링만 베어링 요동 오차에 기여합니다. 그러나 커플링으로 인한 추가 오차로 이러한 이점이 감소할 수 있습니다.
- 베어링 요동에 따른 영향을 제거하는 기술(특히 동일한 엔코더 스케일에서 두 개 이상의 판독 헤드 사용)이 존재하지만 다음과 같은 각도 측정의 목적을 고려해야 합니다.
- 예를 들어 수평 평면 또는 수직 평면의 지점 사이 각도 차이를 측정하기 위해 데오돌라이트를 사용하는 경우, 판독헤드를 두개 사용하면 큰 베어링 요동도 보정할 수 있습니다.
- 극 좌표를 사용하여 회전 구성품의 특정 지점을 찾기 위해 위치 피드백이 필요한 경우(웨이퍼 검사 기기의 경우처럼) 동일한 엔코더 링에서 세 개 이상의 판독 헤드를 사용하지 않으면 대상 구성품을 지지하는 베어링의 축 이탈이 위치 정확도에 영향을 미칩니다.

베어링 요동이 더 커진다면 적절한 스케일 피치를 신중하게 선택해야 합니다. 일반적으로 증분 신호는 2개 이상 판독 헤드의 평균이고 레퍼런스 마크가 그 중 하나의 판독 헤드에서 파생되는 경우, 스케일 피치는 베어링 요동에 3 ~ 4배 이상 되어야 합니다. 이보다 작으면 Renishaw의 propoZ™와 같은 보정 기술을 사용하지 않는 한 레퍼런스 마크 반복성 관련 문제가 심각해질 수 있습니다.

커플링 오차에 따른 영향

그림 5는 베어링과 대상 구성품이 커플링을 통해 연결되는 독립적인 앵글 엔코더가 포함된 시스템을 보여줍니다. 이 설계는 엔코더 베어링의 요동만 각도 측정 정확도에 영향을 미친다는 장점이 있습니다. 그러나 이러한 ‘이점’은 신중하게 고려해야 합니다. 시스템에서 멀리 떨어져 있는 회전체의 각도 베어링이 아닌 엔코더 자체의 한 지점 좌표를 반환하도록 설계되는 경우 주 베어링 내 이탈이 위치 정확도에 영향을 미치기 때문입니다.

커플링 자체 설계 또한 시스템 정확도에 큰 영향을 미칠 수 있습니다.

다양한 커플링 설계의 결함을 모두 설명하는 것은 이 자료의 범위를 벗어나기 때문에 생략하지만, 다음과 같은 몇 가지 요인은 반드시 고려해야 합니다.

백래시

로터리 구동 시스템에 백래시가 발생하면 회전 방향에 따라 각도 위치가 다르게 보고되며 이는 시스템 반복성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있습니다.

비틀림 강도

커플링은 연결하는 샤프트만큼 단단하지 않을 수 있으므로 진동/공진과 샤프트 비틀림에 영향을 받을 수 있습니다. 또한 피드백 루프에서 사용되는 경우 응답성, 안정화 시간, 허용 가능한 폐쇄 루프 게인과 대역폭에 심각한 영향을 미칠 수 있습니다.

각도 오차

대부분의 커플링은 특정 정렬 조건에서 구동 샤프트와 피구동 샤프트 간 각도 오차(예: Oldhams 커플링은 2개의 샤프트 축이 평행하지 않은 경우 회전당 4회 오차 발생)을 유발할 수 있습니다. 고정확도 시스템의 경우 앵글 엔코더는 대상 구성품과 동일한 샤프트 위에 단단히 장착되어야 하며 같은 베어링 내에서 회전해야 합니다.

샤프트 비틀림에 따른 영향

대상 구성품과 앵글 엔코더 스케일 사이 샤프트에서 비틀림 강도가 부족하면 동적 오차로 인해 시스템 성능이 저하되는 문제가 있습니다. 이러한 영향을 최소화하려면 대상 구성품과 최대한 가까운 위치에 비접촉식 엔코더를 장착해야 합니다(그림 6 참조).

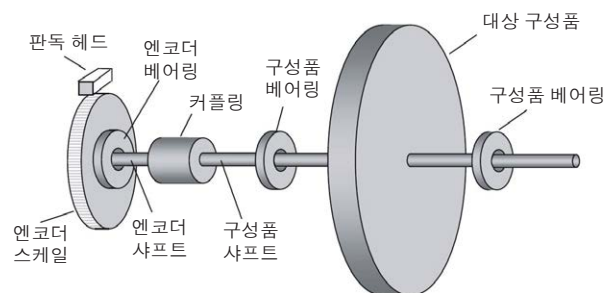


그림 5. 일반 기계 시스템

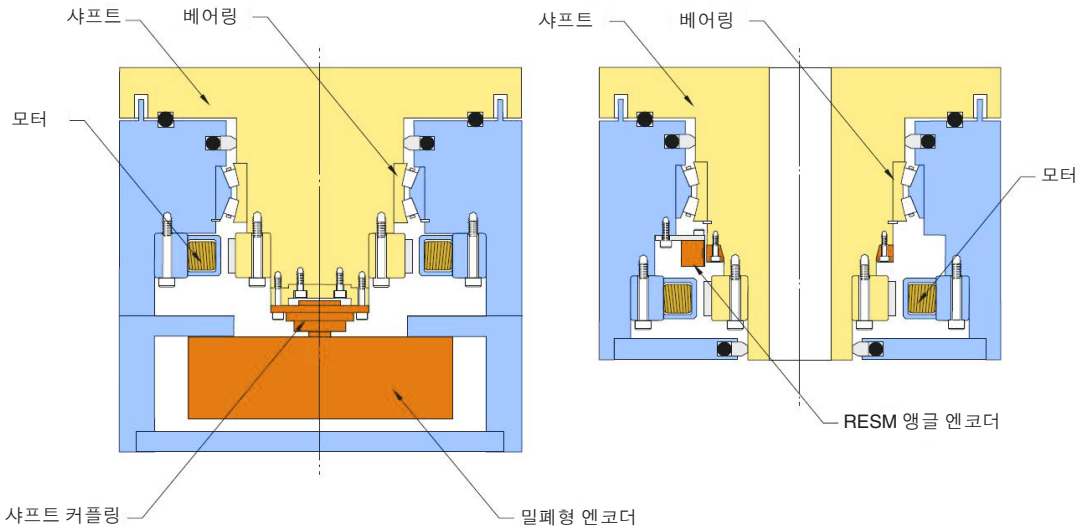


그림 6. 밀폐형 엔코더와 개방형 링 엔코더

스케일 편심과 왜곡에 따른 영향

대부분의 경우 회전 축에서 일정한 거리에 위치하고 선형 눈금이 균일한 스케일을 판독하는 것만으로도 각도를 정확하게 측정할 수 있습니다. 완벽한 원형 로터리 스케일의 편심 설치로 인해 이러한 스케일 마크의 반경이 달라지면 회전당 한 번씩 달라지는 오차가 발생할 수 있습니다. 스케일 왜곡은 회전 당 두 번 이상 달라지는 다른 오차를 발생시킬 수 있습니다.

반경이 r_0 인 완벽한 원형 스케일을 고려해 보겠습니다. 위상각 Φ_1 에서 스케일 중심으로부터 거리가 a_1 인 지점을 중심으로 회전하도록 장착됩니다(그림 7 참조). 임의 방위각, θ 에서 회전 중심에서 스케일 표면까지의 거리, $R\theta$ 는 다음과 같이 계산됩니다.

$$R\theta = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1)$$

따라서 실제 반경은 편심과 진폭이 동일한 상태에서 회전당 한 번씩 사인파 모양으로 달라집니다.

스케일 왜곡 효과를 더하기 위해 링의 전체 형태를 주파수 n , 위상 Φ_n 및 진폭이 다른 일련의 사인파를 합한 것으로 간주할 수 있습니다. 이 경우 방위각 θ 에서의 스케일 반경은 다음과 같이 계산됩니다.

$$R\theta = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1) - a_2 \cos(2\theta - \Phi_2) - a_3 \cos(3\theta - \Phi_3) - \dots - a_n \cos(n\theta - \Phi_n)$$

회전당 n 번 반복되는 진폭(평균에서 피크까지)의 사인파 형태로 변하는 왜곡에 의해 유도된 최대 원주 오차 E_n 는 다음과 같이 나타낼 수 있습니다.

$$\pm E_n = a_n/n$$

가장 단순한 사례로, 편심이 $1 \mu\text{m}$ 이면(즉 $n = 1$) 원주에서 $\pm 1 \mu\text{m}$ 사인파 선형 오차가 발생합니다.

스케일 왜곡이 클수록 진폭이 점점 더 작아지고 스케일 정확도에 미치는 영향도 점진적으로 작아집니다. 고조파가 낮을수록 영향은 커집니다. 편심으로 인한 오차 효과는 베어링 요동의 영향과 그 정도가 유사할 수 있습니다.

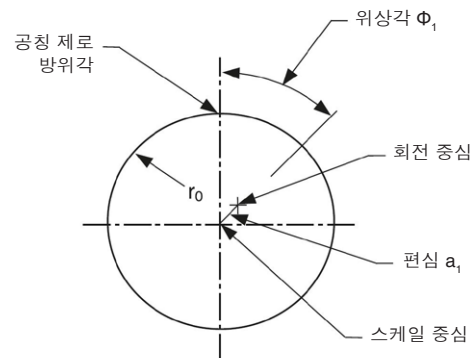


그림 7. 로터리 스케일의 회전 중심이 스케일 기하학적 중심과 달라지면 스케일 편심 오차가 발생합니다.

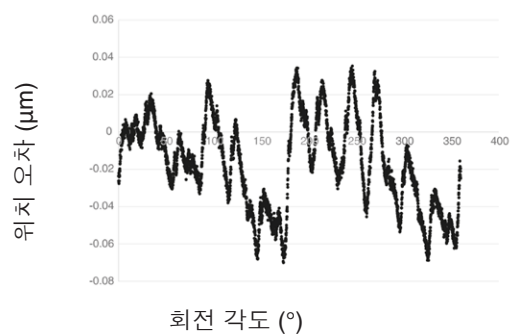


그림 8. 로터리 엔코더 링 로빙에 따른 회전당 12주기 오차.

Renishaw 로터리 엔코더 링 스케일의 경우 테이퍼 마운트에 설치하면 약간의 기하학적 왜곡이 나타납니다. 이로써 편심과 왜곡, 특히 다중 고정 볼트와 테이퍼 마운트로 인한 잠재적인 로빙 효과가 계측에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있습니다(그림 8 참조). 그러나 12개 볼트를 사용하여 올바른 토크 설정에 따라 고정된 200mm 링의 경우 주목할만한 오차가 발생하지 않습니다. 회전당 12주기에서의 오차 '노이즈'는 약 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 입니다.

일반적인 설치에서 편심은 오류의 60% 이상을 차지하며 고조파가 낮을수록(대부분 제2 - 제4 고조파) 설치 오차의 비율이 작아집니다.

다행스럽게도 편심과 왜곡으로 인한 오차에는 보정 기법이 효과적이며 가장 좋은 방법은 판독 헤드를 여러 개 사용하는 것입니다. 두 개의 판독 헤드를 사용하면 편심과 다른 모든 홀수 고조파로 인한 오차가 제거됩니다. 일부 설치에서는 판독 헤드를 네 개 사용해도 효과적이었지만 판독 헤드를 많이 추가할수록 투자 수익률이 낮아집니다. 링 단면을 신중하게 선택함으로써 더 높은 왜곡 고조파를 보다 효과적으로 제한할 수 있습니다.

Renishaw의 스케일 링 설치에서 사용되는 특허 받은 테이퍼 마운트는 편심 및 왜곡 가능성이 있는 링을 매우 효과적으로 변환하여 정확도에 미치는 영향을 현저하게 낮춥니다. 예를 들어 테이퍼 마운트는 200mm 링의 1 μ m 편심을 0.002°의 굴곡을 가진 동심 링으로 변환하여 여러 개의 판독 헤드를 사용하지 않고도 측정 정확도를 높입니다.

스케일 기울기에 따른 영향

기울기는 앵글 엔코더 스케일이 대상 구성품과 동심원 방향으로 장착되지만 기하축이 회전 축 방향으로 기울어지는 상태를 나타냅니다(그림 9 참조). 이 상태를 측면에서 즉 방사형으로 보면 앵글 엔코더 스케일의 주변에 회전당 1회 사인파 축 방향 모션이 전달됩니다.

기울기는 뚜렷하면서도 미세한 두 가지 오차 메커니즘을 제공합니다. 첫 번째 메커니즘의 경우 직경이 200 mm인 로터리 엔코더 스케일(축 눈금 표시)이 0.1° 기울기로 장착되는 것으로 가정해 보겠습니다.

설치 과정에서 스케일 표면에 있는 다이얼 게이지(DTI)를 사용하여 스케일을 동심으로 조정했습니다. 한 번 회전하는 동안 스케일이 판독 헤드를 기준으로 축 방향으로 ± 0.175 mm 이동할 뿐만 아니라 스케일 눈금의 편요각 또한 기준값에서 양쪽으로 $\pm 0.1^\circ$ 까지 변경됩니다. 판독 헤드가 DTI와 같은 위치에 배치된 경우(그림 10 참조) 발생한 오차는 2차가 됩니다. 그러나 판독 헤드가 해당 지점에서 축 방향으로 1 mm만큼 이동하면, 축 방향 모션, 편요각(Yaw) 변화 및 판독 헤드 위치의 조합으로 인해 회전당 한 번씩 사인파 모양으로 달라지는 약 $\pm 1.74 \mu\text{m}$ (± 3.6 arc sec) 오차가 원주에서 발생합니다

두 번째 메커니즘은 다음과 같습니다. 동근 동전을 정면에서 보면 원형으로 보입니다. 그 동전을 비틀어서 보면 타원형으로 보입니다. 로터리 스케일 기울기에 따른 영향도 비슷하며 회전당 2회 오차를 발생시킵니다. 오차의 크기는 기울기 각도의 코사인에 반비례합니다. 이는 2차 효과이며 위 예에서는 약 ± 0.16 arc sec 오차가 발생합니다. 대부분의 경우 이 오차 메커니즘은 무시할 수 있습니다.

판독 헤드에 따른 오차의 영향

계측용 스케일은 엔코더 시스템의 일부에 불과합니다. 판독 헤드는 전체 오차 할당에도 영향을 미칩니다. 판독 헤드로 인한 가장 중대한 오차는 다음과 같습니다.

보간 오차

눈금이 3,600개인 로터리 엔코더 스케일은 0.1° 또는 360 arc sec당 하나의 눈금을 갖습니다. 필요한 분해능이 스케일 피치보다 조밀하면 보간을 위해 판독 헤드가 필요합니다. 보간이 비선형적이면 주기 오차(보간 오차(SDE)라고도 함)가 발생합니다.

예를 들어 Renishaw 판독 헤드의 경우 스케일 및 판독 헤드 인덱스 격자는 스케일의 움직임에 따라 판독 헤드 광 검출기에 가로로 움직이는 옵티컬 프린지를 생성합니다. 이러한 프린지는 강도가 정현파이며, 판독 헤드에 의해 서로 위상 차가 90°인 두 개의 정현파 전압으로 변환됩니다.

이 두 전압이 오실로스코프에서 서로의 신호에 대해 상대적으로 표시되면 이동 스케일 피치당 한 번 회전하는 원형 리사주가 생성됩니다. 이 리사주가 완벽한 원형으로 원점에 중심이 있는 경우에는 스케일 모션과 정확하게 일치하는 속도로 회전합니다. 보간 방법이 각도를 균일하게 구분하는 경우 판독 헤드 보간이 완벽해지고 그렇지 않으면 SDE가 발생합니다.

SDE는 판독 헤드 정렬(회전 중심 스케일 기준), 스케일 조정 및 스케일 청결도의 영향을 받으므로 올바른 관리와 주의 깊은 시스템 설치가 중요합니다. 또한 SDE 성능은 판독 헤드의 옵티컬 설계로 결정됩니다. Renishaw의 20 μm 피치 TONiC 시스템의 경우 SDE는 일반적으로 ± 30 nm입니다(200 mm 링은 ± 0.06 arc sec).

SDE는 높은 주파수로 발생하는 경향이 있어 보정으로 SDE의 영향을 제거하기는 어렵지만 특정 용도에서는 단거리 평균화가 효과적일 수 있습니다.

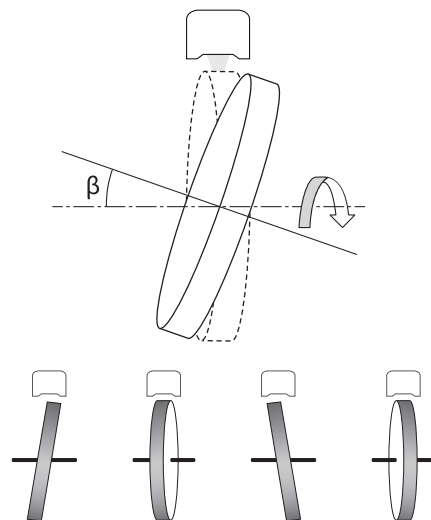


그림 9. 엔코더 스케일의 기하축이 회전 축 방향으로 기울어지면 기울기 오차가 발생합니다.

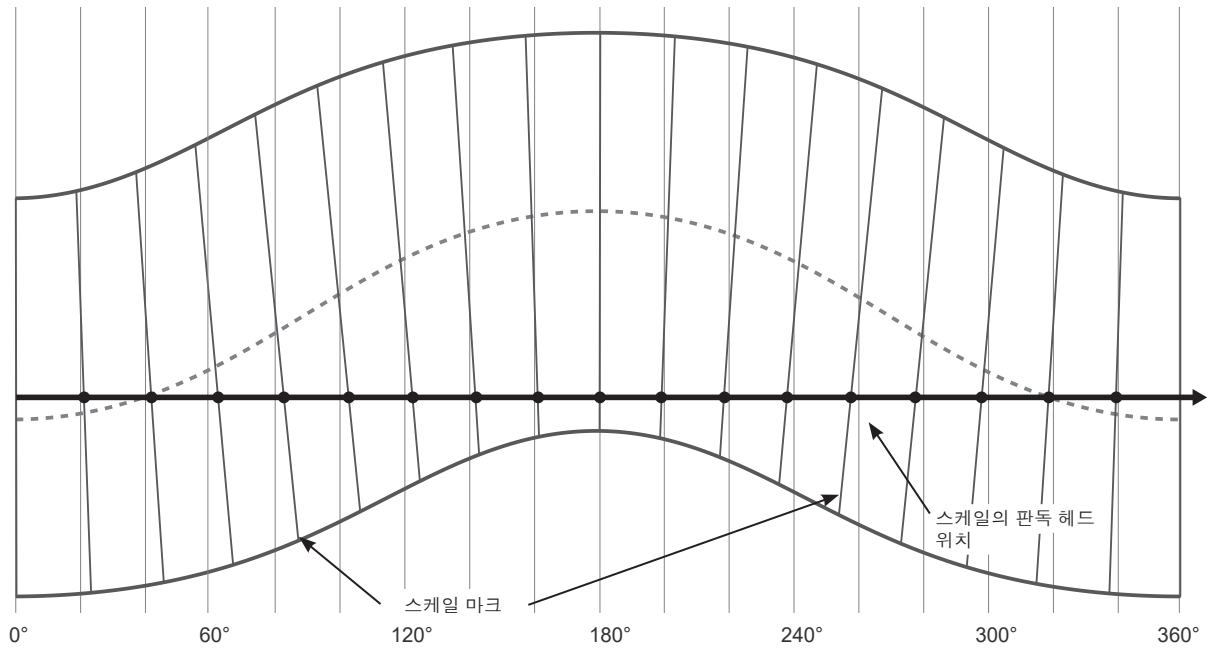


그림 10. 기울기 영향으로 회전 각도에 따른 스케일 진동. 두꺼운 검은색 선은 스케일 상의 판독 헤드 / DTI 위치를 나타내고 점선은 스케일 중심선을 나타냅니다. 검은색 점은 스케일이 판독 헤드 아래에서 회전할 때 각 스케일 마크의 관측 위치를 나타냅니다.

시차 오차

스케일과 판독 헤드 사이의 거리가 변경되고(예를 들어 링 편심, 온도 변화 등) 판독 헤드가 스케일 회전 중심선과 올바르게 정렬되지 않으면 오차가 발생합니다. 판독 헤드가 기울어지면 설치 높이가 변경되어 피치 각도의 사인에 비례하는 측정 오차가 발생합니다(그림 11 참조).

설치 안정성

정확하고 반복 가능한 각도 측정을 위해서는 판독 헤드를 견고하고 안정적으로 설치해야 합니다. 시스템의 자세, 하중, 온도, 진동 등의 변화에 따라 판독 헤드가 스케일 회전 축에 대해 움직이지 않도록 설계해야 합니다.

시스템에서 예상치 못하게 반복 불가능한 높은 오차가 발생하는 경우 판독 헤드와 연결된 브래킷을 고정하는 볼트가 시간 경과에

따라 헐거워지지 않았는지 확인하는 것이 좋습니다.

스케일 눈금 정확도에 따른 영향

눈금이 리니어 스케일에 표시되고 디스크 또는 링의 원주에 고정되는 것과 반대로 눈금이 모재 위에 직접 표시되는 앵글 엔코더의 제조 공정을 고려해 보십시오. 제조업체는 스케일 가공품을 제조 설비에 고정하고 설비를 회전하여 각 눈금을 표시합니다. 눈금 공정이 완료되고 설비에서 눈금 스케일을 제거하기 전에 측정된 스케일 정확도(눈금의 실제 위치와 원하는 위치의 차이)를 '눈금 오차'라고 합니다. 설비가 이 측정을 반복할 때 올바르게 설치된 판독 헤드를 사용하면 눈금 오차뿐만 아니라 판독 헤드에 의한 오차(특히 SDE)도 포함됩니다. 이를 '시스템 오차'라고 합니다.

이제 앵글 엔코더를 분리했다가 같거나 다른 설비에 다시 장착하고 판독 헤드로 정확도를 확인하면 이번에도 다른 오차가 기록됩니다. 이 차이는 제조 당시 설치와 사용 목적의 재설치 간 엔코더 스케일의 원형도 변화로 인한 오차와 편심 변화에 해당합니다.

이 경우 측정되는 전체 오차를 '설치 오차'라고 하며 현장 사용자가 달성한 성능을 가장 근접하게 반영하는 오차 정의입니다.

요약:

- 눈금 오차 = 제조 과정에서 눈금 간격의 오차.
- 시스템 오차 = 눈금 오차 + SDE
- 설치 오차 = 시스템 오차 + 설치 차이에 다른 영향.

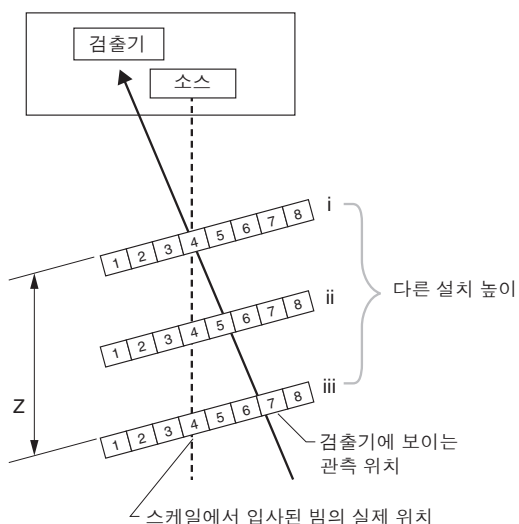


그림 11. 시차 오차는 스케일이 기울어질 때(판독 헤드 기준) 엔코더 판독 헤드의 설치 높이가 달라져 발생하는 측정 오차입니다. 그림과 같이 소스의 빛이 스케일 위치 4에서 입사되지만 설치 높이가 증가하면서 검출기가 위치 5와 6을 판독합니다.

일반적인 설치에서는 이러한 오차의 크기가 각각 다른 경향이 있습니다. 상당수의 200 mm 직경 Renishaw 로터리 엔코더를 테스트한 결과가 표 1에 나와 있습니다. 이 직경에서 1미크론은 2.06 arc sec에 해당합니다.

오차 유형	Ø200 링의 일반적인 오차	
	µm	arc sec
눈금 오차	0.5	1.0
시스템 오차	0.53	1.1
일반적인 설치 오차 (판독 헤드 1개)	2.5	5.2
일반적인 설치 오차 (판독 헤드 2개)	1.0	2.1

눈금 오차와 시스템 오차는 엔코더 제조업체가 정하지만 $\pm 2 \mu\text{m}$ 의 추가 설치 오차는 제조업체와 고객의 책임입니다. 고객이 엔코더를 완벽하게 동심원과 원형으로 장착할 수 있더라도 시스템 오차와 설치 오차가 다를 수 있습니다(고객이 스케일 제작 설비와 동일한 위치에 링을 장착하지 않은 한).

눈금 오차의 원인은 다음과 같이 제조 기법에 따라 다릅니다.

1. 디스크/링 가장자리에 개별 축선을 스크라이빙/에칭하여 제작된 앵글 엔코더의 경우 분할 프로세스의 오차가 눈금 오차의 원인입니다.
2. 마스크 및 에치 기법으로 제작된 방사형 글래스 엔코더의 경우 마스크 정확도 오차와 에칭 과정에서 마스크 배치 오차가 눈금 오차의 원인입니다.
3. 준비된 샤프트의 원주 주위에 리니어 스케일을 고정하는 앵글 엔코더 시스템은 리니어 스케일 제조 정확도, 리니어 스케일 두께 및 준비된 샤프트의 반경 변화, 샤프트에 고정되는 리니어 스케일의 장력 차이가 눈금 오차의 원인입니다.

이 마지막 형태의 눈금 오차는 설치 후 달라질 수 있습니다. 온도 변화와 스케일과 샤프트 사이 열 팽창 계수의 차이로 인해 샤프트 표면을 기준으로 스케일이 조금씩 움직일 수 있기 때문입니다. 스케일을 고정하는 데 사용된 접착제가 이완되면서 이 영향이 커질 수 있습니다.

Renishaw 엔코더 링 및 디스크와 시간에 따라 눈금 오차가 달라지지 않는 기타 로터리 스케일의 경우, 회전마다 눈금 오차를 예측할 수 있으며 사용자는 이 오차와 설치 정확도의 영향을 구분할 수 없습니다. 따라서 같은 기법으로 오차를 줄일 수 있습니다.

앵글 엔코더 가장자리의 축 눈금이 한쪽으로 기울거나 회전 축과 불안정하게 정렬되면 미세한 눈금 오차가 나타날 수 있습니다.

이는 순수 로터리 모션 중에는 영향을 미치지 않지만 판독 헤드에 대한 엔코더 스케일의 축 방향 모션(베어링 내 축 수직 이동 (end-float)으로 인한)으로 인해 스케일 회전이 잘못 표시될 수 있습니다. 이 메커니즘은 앞서 설명한 세 번째 기울기 메커니즘과 유사합니다. 방사형 스케일에 올바르게 기울어진 판독 헤드 (즉 시차가 있는 경우)를 사용하는 데 따른 영향과 비슷합니다.

오차 보정 기법

모션 제어 시스템 내 모든 오차 원인의 영향이 판별되면 장치 사양을 달성하는 데 필요한 정확도와 보정되지 않은 로터리 엔코더 시스템에서 기대할 수 있는 성능의 차이를 비교할 수 있습니다. 보정되지 않은 엔코더 시스템에서 필요한 정확도를 달성할 수 없으면 다른 고사양 엔코더 시스템(공간 제한, 배송 일정, 예산을 충족하는 시스템이 있는 경우) 또는 성능 부족 문제를 제거할 수 있는 오차 보정 기법 적용을 선택해야 합니다. 가장 강력한 두 가지 보정 기법은 여러 개의 판독 헤드와 오차 맵을 사용하는 것입니다.

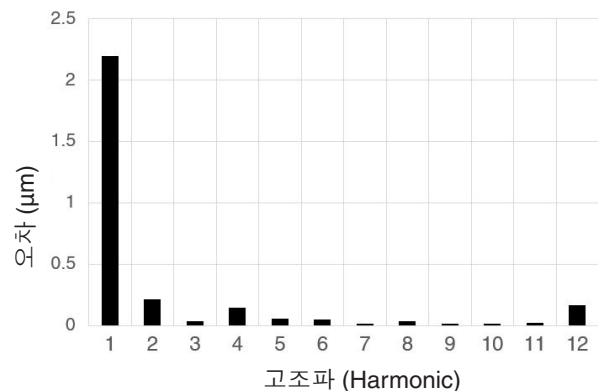


그림 12. 로터리 엔코더 링에 대한 오차 맵의 고속 푸리에 변환: 첫 번째 고조파는 링 편심에 해당하며 총 설치 오차의 최대 요소입니다.

다중 판독 헤드

판독 헤드 두 개를 정반대 방향으로 장착하면 편심과 반복 가능한 오차의 더 높은 홀수 고조파에 따른 영향이 제거됩니다. 각도 측정에서 베어링 요동의 영향 또한 제거되지만 정확한 극 포지셔닝을 위한 베어링 요동을 방지하려면 일반적으로 네 개의 판독 헤드가 필요합니다. 사용하는 판독 헤드 수를 늘리면 반복 가능한 오차 또한 감소하지만 일반적으로 다섯 개 이상을 장착하는 데 따른 이점보다 복잡성과 비용이 더 크다고 알려져 있습니다. 이러한 복수 판독 헤드 기법은 정교한 캘리브레이션이 필요하지 않아 시간과 시스템 설계 테스트 측면에서 모두 훌륭한 이점을 제공합니다.

오차 맵

선택한 제어 시스템이 한 가지 보정 기법만 사용하도록 구성된 경우 오차 맵을 사용하여 반복 가능한 오차를 줄일 수 있습니다. 이 기법을 효과적으로 활용하려면 OEM이 장치를 최종 조립한 후 간섭계 또는 다른 공식 측정 기준을 사용하여 로터리 엔코더 시스템을 캘리브레이션해야 합니다.

설치 과정에서 엔코더 제조업체가 제공한 캘리브레이션
인증서에 의존할 수 없습니다. 설치 과정에서 발생한 오차가
인증서의 오차 맵을 쓸모없게 만들기 때문입니다. 따라서 오차
맵의 지점 수를 최적화하는 것이 좋습니다. 사인파 모양으로
달라지는 주기 오차의 경우 주기당 7개 지점을 사용하면 해당
주파수의 약 90% 오차가 제거됩니다(그림 12 참조). 100개 지점
오차 맵은 처음 14개 고조파의 오류를 대부분 보정하지만 나머지
더 높은 고조파로 인한 오차가 증가할 수 있다는 점에 유의해야
합니다. 이 기법은 베어링 오동, 샤프트 비틀림 또는 기타 시간의
영향을 받는 오차 원인에 영향을 미치지 않는 점을 기억해야
합니다.

요약

이 백서에서는 앵글 엔코더 시스템의 실제 사양을 결정하는 데
필요한 몇 가지 사항에 대해 간략하게 알아보았습니다. 또한
정확도 향상에 방해가 되는 중대한 원인을 살펴보고, 이를
극복할 수 있는 여러 기법을 자세히 알아보았습니다. 이 주제에
대한 자세한 내용은 ISO 230-7:2015(제7부: 회전축의 기하학적
정확정밀도)를 참조하십시오.

추가 제품 정보는 다음에서 확인하십시오.

www.renishaw.com/encoder

www.renishaw.com/encoder



#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 웨일즈에 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-6517-9085-01-A