



애플리케이션 노트: **CNC 공작 기계에서 열이 볼 스크류 정확도에 미치는 영향**

배경

대부분의 CNC 공작 기계는 볼 스크류로 구동되는 리니어 축을 사용하여 서보 모터의 회전 운동을 정밀하고 강력한 선형 움직임으로 변환합니다.

볼 스크류의 회전은 서보 모터 뒷면에 장착되어 회전 수를 카운트하는 로터리 엔코더로 측정되며 한 번 회전으로 고분해능 각도 피드백을 제공합니다.

로터리 엔코더와 볼 스크류만을 사용하여 선형 움직임을 제어하는 축을 세미 클로즈 서보 루프라고 합니다(그림 1 참조).

이 셋업의 정확도에는 로터리 엔코더의 정밀도와 볼 스크류의 형상 품질이 모두 영향을 미칩니다. 그러나 기계 작동 중에 발생하는 열로 인해 볼 스크류가 팽창하고 정밀도와 정밀도에 영향을 미칠 수 있습니다.

세미 클로즈 루프 시스템은 공작 기계의 리니어 축에 리니어 엔코더(리니어 스케일이라고도 함)를 추가하여 직접 피드백으로 강화할 수 있으며, 이를 통해 선형 운동을 직접 측정하여 풀 클로즈 루프 서보 제어가 가능합니다.

냉각시스템을 사용한 볼 스크류와 기타 고급 방법으로 열 팽창 효과를 완화할 수 있지만 복잡도와 운영 비용이 증가하고 리니어 엔코더보다 정밀도가 더 낮습니다. 풀 클로즈 서보 루프의 예시가 그림 2에 나와 있습니다.

오늘날 많은 CNC 공작 기계는 리니어 엔코더 없이 판매됩니다. 장비 제조업체는 대부분의 경우 일반 용도에 적합한 고품질 볼 스크류와 정확한 로터리 엔코더를 사용하여 우수한 수준의 성능을 얻을 수 있습니다.

그렇다면 공작 기계 사용자가 공작 기계를 구입할 때 리니어 스케일 옵션을 선택하는 이유는 무엇일까요? 이 질문에 답변하기 위해 고품질 공작 기계에 대한 테스트를 수행했습니다.



그림 1: 세미 클로즈 공작 기계 서보 루프에 사용되는 주요 구성품.



그림 2: 풀 클로즈 루프 서보 제어에 사용되는 주요 구성품.

테스트 방법

실험 방법

테스트는 세미 클로즈 루프(Renishaw FORTiS 리니어 엔코더가 꺼짐) 또는 풀 클로즈 루프(FORTiS 리니어 엔코더가 켜짐)에서 작동하도록 구성된 고품질 CNC 수직 머시닝 센터(VMC)에서 수행되었습니다. 이 공작 기계는 정밀하게 연마된 볼 스크류와 로터리 엔코더의 고분해능 각도 피드백이 특징입니다.

열 측정

볼 스크류의 온도가 상승하는 것을 시각화하기 위해 열화상 카메라를 사용하여 커버가 제거된 상태로 VMC의 상태를 기록했습니다. 다음 각 단계에서 볼 스크류의 열화상을 캡처했습니다.

- 가공 전 (볼 스크류의 실온 상태 온도를 확인하기 위해)
- 1개 부품 가공 후
- 추가적인 50개 동일 부품 가공 후
- 15분 식힌 후

선형 정밀도 측정

축의 선형 정밀도는 XC-80 인터페이스가 장착된 Renishaw XL-80 캘리브레이션 레이저를 사용하여 측정했습니다. 먼저 각 단계에 해당하는 반복정도를 비교하기 위해 선형 정밀도 측정이 수행되었습니다. 단순화를 위해 축 하나만 측정했으며 자동 선형 보정은 비활성화되었습니다.

데이터 분석

볼 스크류의 열 팽창에 따른 오차는 각 단계의 선형 정밀도 측정값을 비교하여 분석했습니다. 데이터 분석은 세미 클로즈 루프(리니어 엔코더가 꺼짐)와 풀 클로즈 루프(리니어 엔코더가 켜짐) 구성 간의 정밀도 차이를 비교하는 데 중점을 두었습니다. 볼 스크류의 온도상승이 미치는 영향과 이러한 영향을 완화시키는데 있어 리니어 엔코더의 성능을 보여주기 위해 오차 플롯을 생성했습니다. 이 오차는 레이저 위치 측정과 공작 기계가 보고한 위치의 차이로 계산됩니다.

결과

볼 스크류의 온도 상승

공작 기계 축을 움직이려면 회전운동과 에너지 전달이 필요합니다. 더 큰 부하와 빠른 가속을 위해서는 축을 구동하는 데 더 많은 회전과 큰 힘이 필요합니다. 공작 기계가 작동하면서 볼 스크류에 열 에너지가 축적되며 이 에너지는 계측, 특히 정밀도에 직접적인 영향을 미칩니다.



그림 3: 이 열 이미지(열화상)은 실온의 기계를 보여줍니다. 볼 스크류의 온도가 기계의 주변의 온도와 거의 같다는 것을 확인할 수 있습니다.

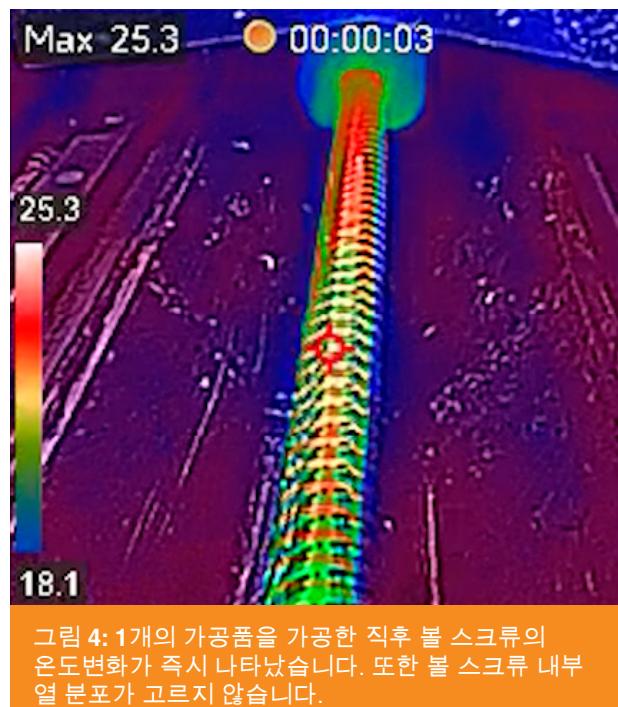


그림 4: 1개의 가공품을 가공한 직후 볼 스크류의 온도변화가 즉시 나타났습니다. 또한 볼 스크류 내부 열 분포가 고르지 않습니다.



그림 5: 그 다음 공작 기계를 구동하여 동일한 부품 50개를 생산하는 시뮬레이션을 실시했습니다. 볼 스크류의 온도가 초기 테스트 대비 크게 증가했으며 열 분포가 고르지 않은 것을 확인할 수 있습니다.

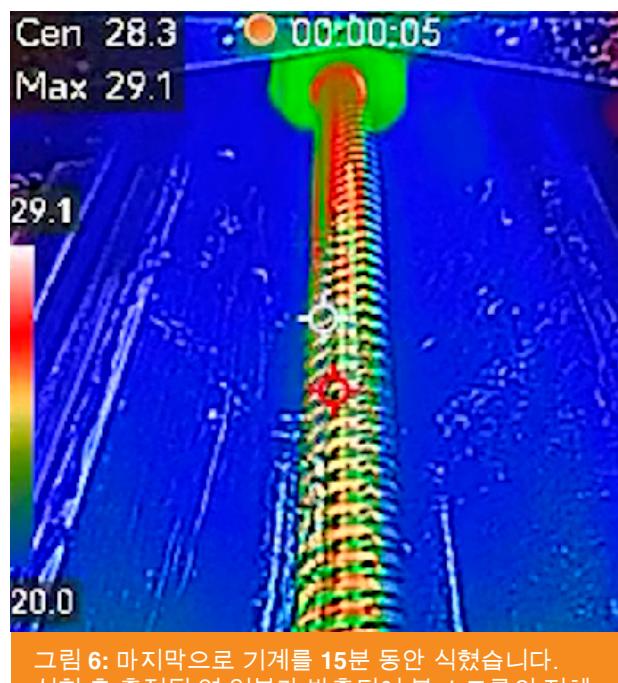


그림 6: 마지막으로 기계를 15분 동안 식혔습니다. 식힌 후 축적된 열 일부가 방출되어 볼 스크류의 전체 온도가 눈에 띄게 낮아진 것이 관찰되었습니다.



그림 7: XL-80 레이저 시스템.

볼 스크류의 선형 정확도 측정

실온에서 기계가 차가운 상태일 때 오차 매핑을 통해 세미 클로즈 서보 루프는 풀 클로즈 루프 제어와 유사한 수준의 정확도를 달성할 수 있습니다. 그러나 이번 테스트의 목표는 공작 기계의 초기 정확도가 온도에 따라 어떻게 변화하는지 확인하는 것입니다.

기계 정확도의 기본 원칙은 공작 기계의 풀 클로즈 루프 제어를 위해 리니어 엔코더를 사용하는 경우에도 적용됩니다. 예를 들어, 진직도 오차와 기계 구조상의 다른 불완전성도 기계 정확도에 계속 영향을 미칩니다.

이러한 축 위치 오차 결과가 그림 8에 나와 있습니다.

테스트 1: 가공 전 기계(실온)

리니어 엔코더를 활성화한 상태(풀 클로즈 루프)의 초기 선형 정확도가 리니어 엔코더를 끈 상태(세미 클로즈 루프)보다 훨씬 더 높았습니다.

테스트 2: 1개 부품 가공 후

세미 클로즈 루프 제어 상태에서 볼 스크류 내 열 팽창으로 인해 정확도가 약 $15 \mu\text{m}$ 변경되었습니다. 그러나 리니어 엔코더를 켜면(풀 클로즈 루프) 축의 정확도가 가동 전 기계를 사용한 초기 테스트와 거의 변화가 없었습니다.

테스트 3: 50개 부품 가공 후

리니어 엔코더를 끈 구성(세미 클로즈 루프)의 경우 볼 스크류 내 높은 가열로 인해 약 $120 \mu\text{m}$ 오차가 발생했습니다. 풀 클로즈 루프 제어를 위해 리니어 엔코더가 활성화되면 정확도가 $15 \mu\text{m}$ 이내로 유지되었습니다.

테스트 4: 50개 부품 가공 후 15분 식힘

리니어 엔코더를 끄고 볼 스크류에서 일부 열이 방출되면서 오차가 $80 \mu\text{m}$ 로 감소했습니다. 리니어 엔코더가 활성화된 상태의 정확도는 약 $10 \mu\text{m}$ 였습니다.

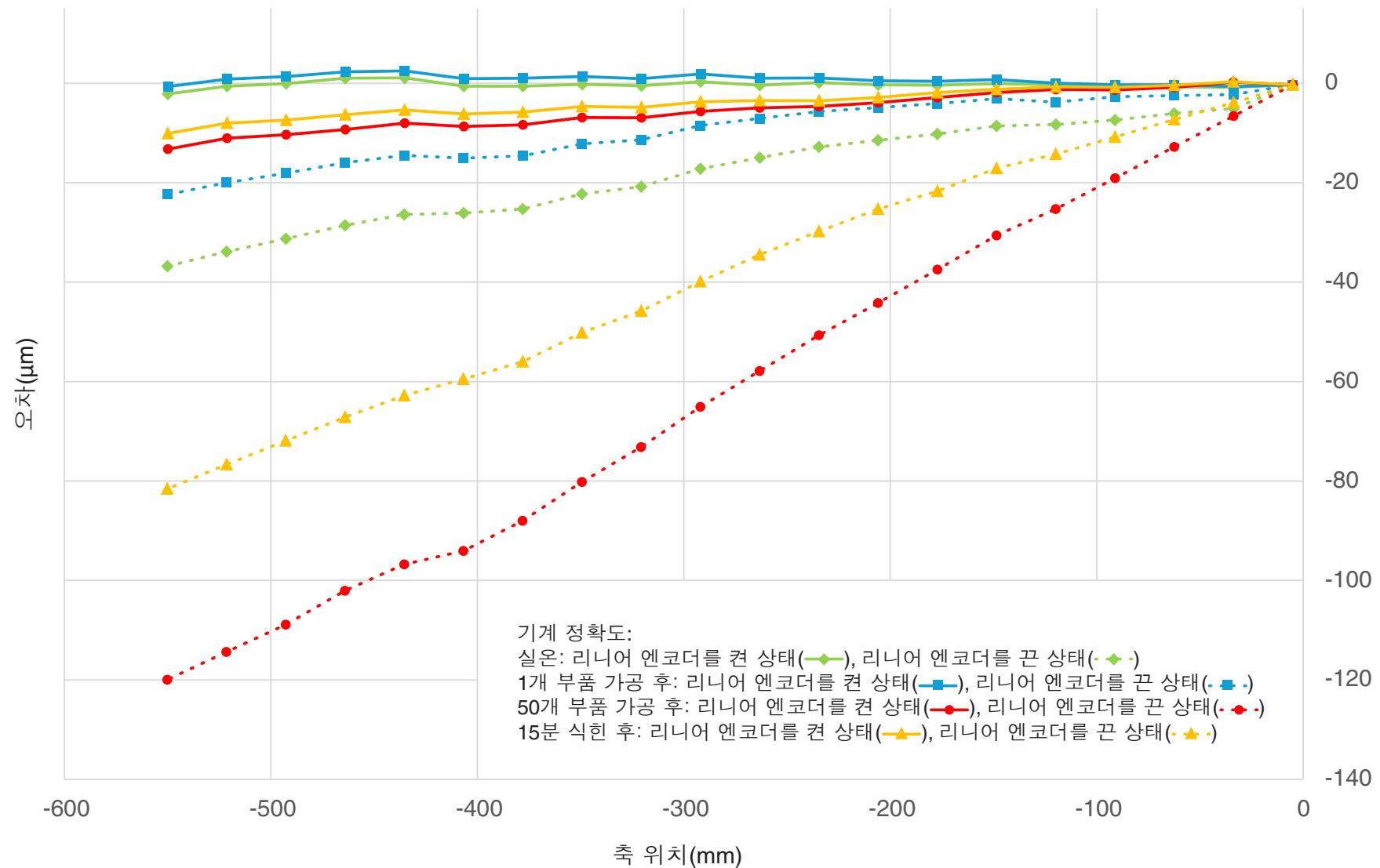


그림 8: 리니어 엔코더 활성화/비활성화 상태의 기계 축 위치 오차.

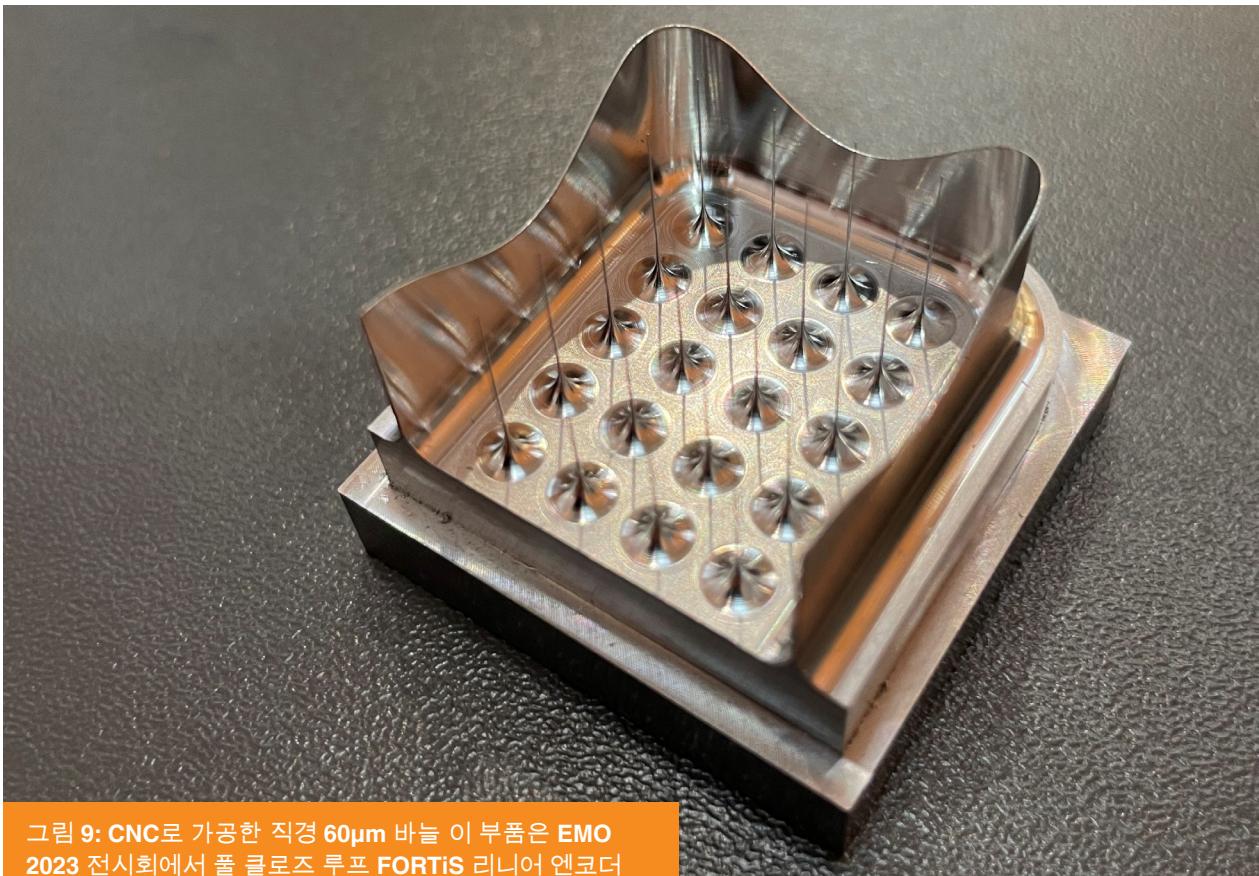


그림 9: CNC로 가공한 직경 60 μ m 바늘 이 부품은 EMO 2023 전시회에서 폴 클로즈 루프 FORTiS 리니어 엔코더 피드백을 활용하는 Kitamura 공작 기계로 가공된 것입니다.

결론

이 연구는 볼 스크류에 축적된 열이 CNC 공작 기계의 정확도에 미치는 상당한 영향을 집중적으로 다룹니다. 세미 클로즈 루프 구성의 경우 가공으로 생성된 열로 인해 큰 선형성 오차가 발생할 수 있습니다. 50개 부품을 가공한 후 증가한 오차 플롯 측정값을 볼 때 장시간 가동 후 열 효과가 특히 명확하게 나타났습니다.

풀 클로즈 루프 시스템은 리니어 엔코더를 적용함으로써 이러한 열 효과가 완화되며 장시간 사용에도 높은 기계 정확도를 유지할 수 있습니다. 리니어 엔코더는 실제 선형 운동에 대한 직접적인 피드백을 제공하므로 열 팽창을 실시간으로 보상할 수 있습니다. 그 결과, 오차가 크게 감소하여 가공 공정에서 높은 정밀도를 달성할 수 있습니다. 그림 9는 리니어 스케일로 어떤 결과를 얻을 수 있는지 보여줍니다.

리니어 엔코더를 끈 상태의 세미 클로즈 루프 제어를 사용하는 공작 기계는 일반적인 가공 공정에 충분한 정확도를 제공합니다. 그리고 열 축적 문제가 있는 환경에서 높은 정확도를 얻기 위해서는 리니어 엔코더가 큰 이점을 제공합니다.

그러나 공작 기계에서 리니어 엔코더를 사용하는 것만으로 기계 자체를 바꿀 수 없습니다. 우수한 기계를 더 우수하게 만들어줄 뿐입니다. 고품질로 설계, 제작된 공작 기계가 우수한 결과를 만들 수 있습니다.

www.renishaw.com/fortis

#renishaw

+82 31 346 2830

korea@renishaw.com

© 2025 Renishaw plc. All rights reserved. RENISHAW®와 프로브 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 기울었지만, 발생하는 모든 보증, 조건, 진술 및 책임은 법률이 허용하는 한도에서 제외됩니다.

품목 번호: PD-6517-9094-01-A