

접촉식 트리거 프로브 센서 기술의 혁신

개요

접촉식 트리거 프로브는 1970년대에 발명된 이후로 3차원 측정기(CMM)와 공작 기계에서의 치수 측정을 위한 주요 감지 방법으로 각광받아 왔습니다. 복잡한 형상을 측정하고 각진 부품의 형태를 측정하기 위해 CMM에서 스캐닝 센서를 사용하는 사례가 증가하고 있습니다. 그러나 접촉식 트리거 센서는 여전히 CMM에서의 부품 크기와 위치 검사, 그리고 공작물 셋업과 공작 기계에서의 공정내 제어에서 매우 중요한 역할을 하고 있습니다.

이 모듈에서는 두 가지 주요 접촉식 트리거 프로브 기술(동역학적 저항성 및 스트레인 게이지)의 성능적 특성을 살펴보고 이러한 센서의 개발이 제조업체에게 지속적으로 도움이 되는 방법을 알아봅니다.

동역학적 저항성 프로브

접촉식 트리거 프로브의 기본 요구 사항은 다음과 같습니다.

- 규정 준수 - 스타일러스가 구성품의 표면과 접촉할 때 편향되고, 구성품에 작은 힘을 가하며, 기계가 표면에서 떨어지기 전에 감속할 수 있는 시간을 제공합니다
- 기계적 반복도 - 부품과의 접촉이 없을 때 스타일러스가 항상 기계 스피ن들을 기준으로 동일한 위치로 돌아옵니다
- 전기적 반복도 - 프로브가 항상 임의의 방향에서 동일한 스타일러스 편차각으로 트리거됩니다

원래의 접촉식 트리거 프로브는 로드와 볼의 스프링 방식 동역학적 배열을 기반으로 합니다(그림 1 참조). 그러면 여섯 개의 접촉점을 통해 뛰어난 반복도로 스타일러스 캐리어를 고유한 위치에 고정할 수 있습니다. 이 메커니즘을 사용하면 부품 표면과 만날 때 프로브의 스타일러스가 편향되며, 스프링은 스타일러스가 자유 공간에 있을 때 메커니즘이 재배치되도록 합니다.

접촉 요소는 매우 단단한 물질인 탄화 텅스텐으로 만들어져 스프링의 힘에 의해 자재가 탄성 변형되는 접촉 패치의 크기가 아주 작습니다. 전기 회로가 접촉부를 통과하며 프로브의 전자 장치가 이 회로의 저항을 측정합니다.

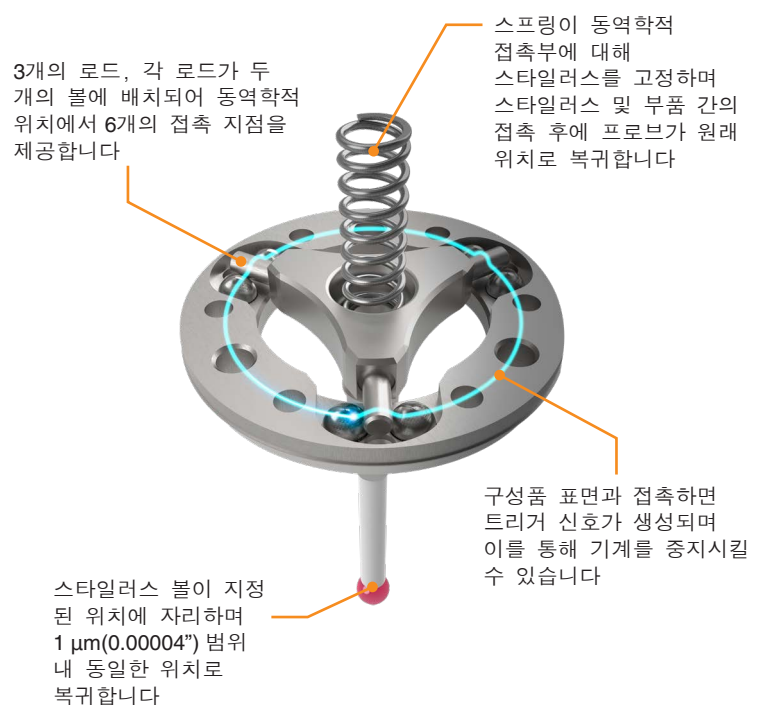


그림 1: 동역학적 저항성 프로브 구성도

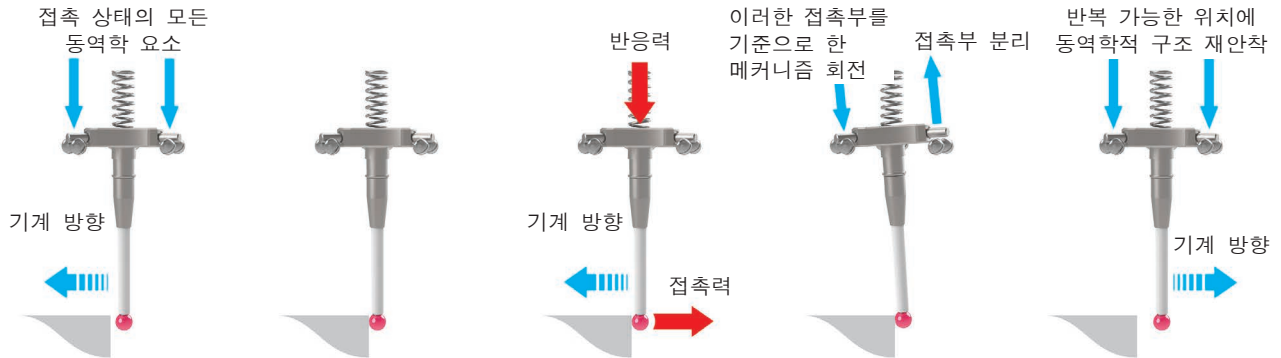


그림 2: 동역학적 저항성 프로브가 트리거를 생성하는 방법

그림 2는 트리거 메커니즘을 보여줍니다.

1. 프로브의 스타일러스가 구성품을 향해 이동할 때, 접촉하고 있는 모든 동역학적 요소가 스프링에 의해 고정되어 있으므로, 스타일러스는 스프링들을 기준으로 알려진 위치에 있게 됩니다.
2. 스타일러스가 표면과 접촉합니다.
3. 기계의 움직임이 스타일러스를 구성품과 계속 접촉하게 만들 때, 프로브 메커니즘에 힘이 가해지기 시작합니다. 스타일러스 팁에서 발생하는 접촉력으로 인해 메커니즘 좌측 접촉부를 기준으로 프로브 메커니즘에서 모멘트가 생성되며, 동일한 접촉 부분을 기준으로 회전하면서 스프링에 의해 생성되는 반응 모멘트로 균형이 유지됩니다. 이러한 힘이 쌓이면서 스타일러스가 휘어집니다(그림은 설명 목적으로 상당히 과장되게 표현됨).
4. 결과적으로, 접촉 모멘트가 커지면서 반응 모멘트를 넘어서게 되고 메커니즘이 좌측 접촉부를 기준으로 회전되기 시작합니다. 우측 접촉부가 떨어지면서 프로브의 전기 회로가 차단됩니다. 이 현상이 발생하기 전에 트리거가 생성됩니다(아래의 전기 스위칭 섹션 참조). 트리거 신호는 그 순간 기계 위치를 멈추고 기계가 속도를 늦춘 후 표면에서 떨어지도록 명령하는 데 사용됩니다.
5. 기계가 표면에서 떨어지면 프로브가 반복 가능한 정지 위치에 다시 안착됩니다.

전기 스위칭

전기 회로는 동역학적 접촉을 통해 만들어집니다. 볼 플레이트가 탄화 텅스텐 구체로부터 절연되며, 실린더 및 스타일러스 캐리어 또한 서로 절연됩니다(그림 3a 참조). 볼 플레이트의 와이어가 접촉부 사이에서 전류를 운반합니다.

스프링 부하가 걸린 상태에서 접촉 요소들이 탄성 변형을 일으키며(그림 3b 참조), 전류가 흐를 수 있는 작은 타원형 패치가 만들어집니다. 각 접촉 패치의 접촉 저항은 접촉 패치 면적과 반비례합니다. 스타일러스가 공작물과 접촉할 때 스타일러스 힘이 증가하고, 프로브 메커니즘에서 생성되는 반응 모멘트로 인해 몇몇 접촉 요소들 간 힘이 증가하는 반면 다른 요소들 간의 힘은 감소하게 됩니다. 두 접촉 요소들 간의 힘이 감소함에 따라 접촉 패치 면적이 더 작아지면서 해당 요소들 사이 저항이 증가합니다. 6개의 접촉 패치 모두가 직렬로 연결된 상태에서, 사이에 가해지는 힘이 가장 작은 접촉부가 프로브 회로의 전체 저항에 큰 영향을 미칩니다.

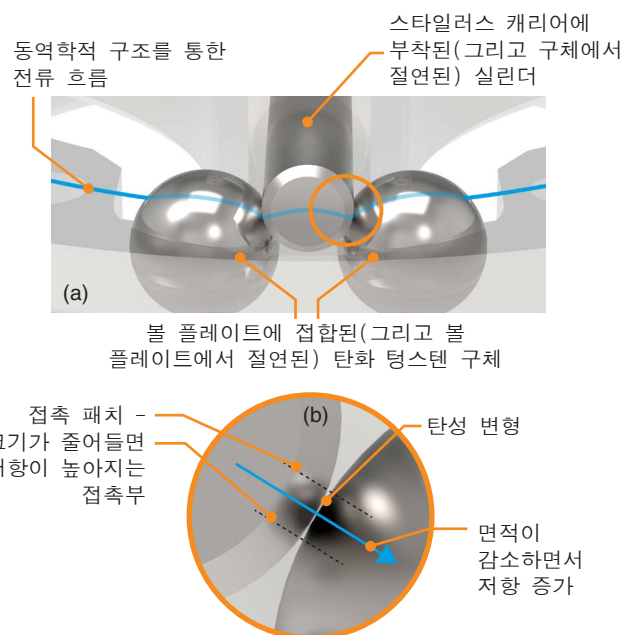


그림 3a 및 3b: (a) 동역학적 구조를 통한 전기 회로, (b) 요소들 간 접촉부 클로즈업

저항이 임계값에 도달하면 프로브의 출력이 ‘트리거됨’으로 설정됩니다(그림 4 참조). 트리거가 발생할 때 볼과 로드가 접촉 상태를 유지해야 스타일러스가 정의된 위치에 배치되어 반복 가능한 측정값을 얻을 수 있습니다.

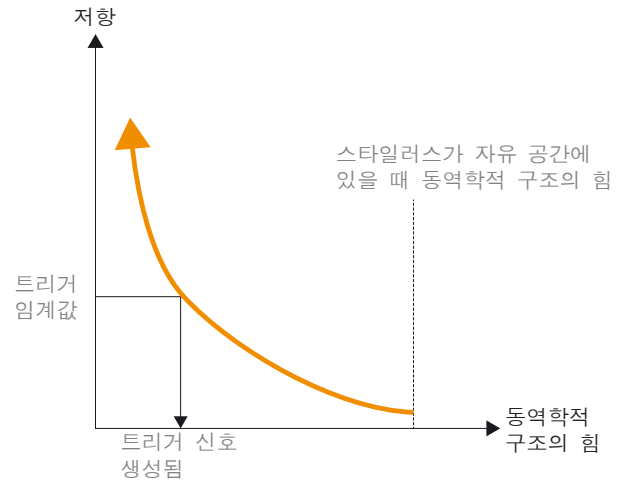


그림 4: 프로브 회로 저항이 임계값을 벗어나면 트리거가 생성됩니다

동역학적 저항성 프로브 성능 계수

사전 이동

스타일러스가 표면과 접촉할 때 힘의 균형이 이루어집니다. 트리거 임계값에 도달하기 전에, 증가하는 이러한 힘으로 인해 스타일러스가 구부러집니다. 기계가 여전히 이동 중이므로, 프로브가 트리거되기 전 스타일러스가 구부러지는 정도는 트리거가 기록 될 때 기계가 유지하는 위치에 영향을 미칩니다.

트리거 전에 발생하는 이 스타일러스 구부러짐 현상을 사전 이동이라고 합니다. 그림 5에서 사전 이동은 F_c 및 L , 스타일러스의 강성에 따라 달라지며, 다음 공식이 기준이 됩니다.

사전 이동 = $F_c \cdot L^3 / 3EI$ (E = 스타일러스 스템 소재의 영률, I = 관성 모멘트).

접촉 요소들이 분리되기 전 힘의 균형은 다음과 같습니다.

$$F_c \cdot L = F_s \cdot R$$

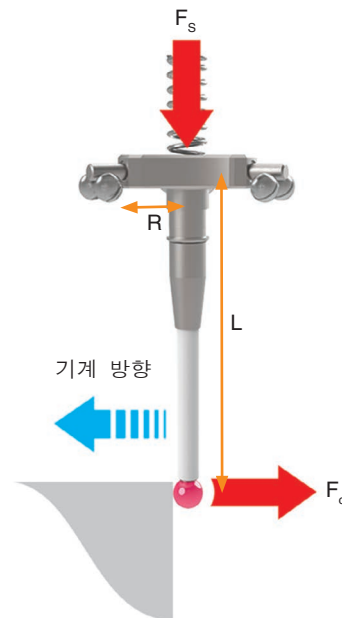


그림 5: 접촉식 트리거 프로브의 힘 균형

사전 이동 편차(로빙)

동역학적 저항성 프로브의 접촉부가 삼각형 배열을 형성합니다 즉, 프로브 메커니즘과 관련해 접촉력이 적용되는 방향에 따라 피벗 거리 R 이 달라집니다. 특정 스타일러스(즉, L 이 상수)의 경우, 접촉력 F_c 는 R 에 비례합니다.

그림 6은 지정된 스타일러스의 접촉력이 접촉 방향에 따라 달라진다는 것을 보여줍니다. 낮은 힘 방향(F_L)에서 피봇 거리 R 은 높은 힘 방향(F_H)에 있을 때 길이의 약 절반입니다. 그림 7a와 7b에서 이 내용을 좀 더 자세히 보여줍니다. $R_1 > R_2$ 이므로 $F_{c1} > F_{c2}$ 입니다. 높은 힘 방향에서 트리거 임계값에 도달하기 위해서는 더 큰 힘이 필요하므로, 해당 방향에서 더 많은 사전 이동이 있게 됩니다. 트리거 힘 변화로 인해 사전 이동 편차(PTV) 또는 로빙이라고 하는 현상이 발생합니다.

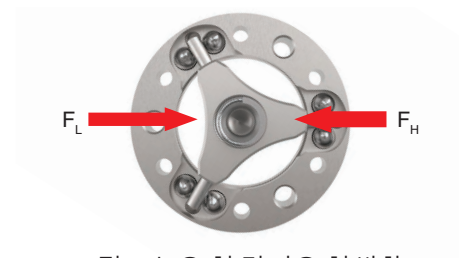


그림 6: 높은 힘 및 낮은 힘 방향

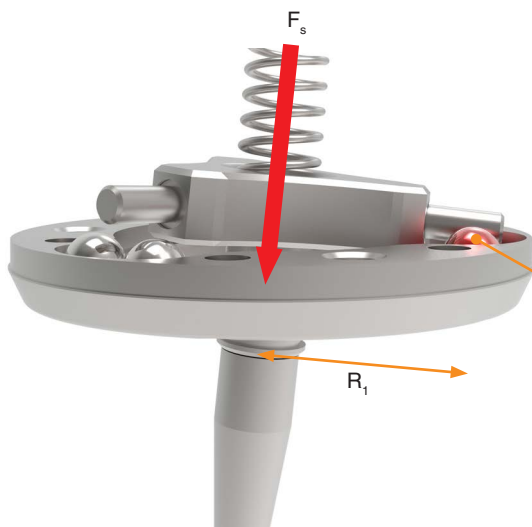


그림 7a: 피봇 점이 스타일러스 중앙선에서 높은 힘 방향으로 더 멀리 떨어져 있습니다

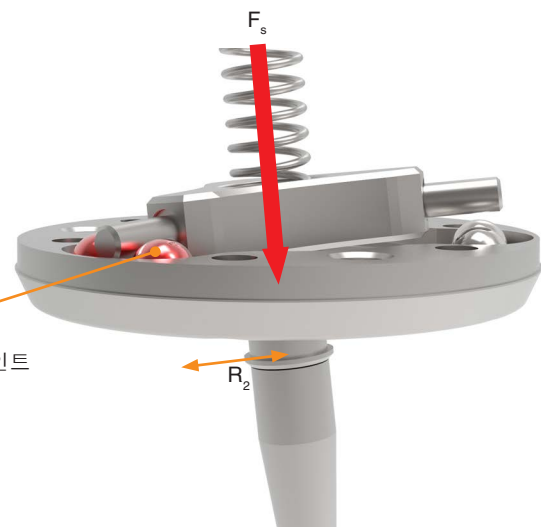


그림 7b: 피봇 점이 낮은 힘 방향으로 스타일러스 중앙선에 더 가까이 있습니다

그림 8은 TP6 동역학적 저항성 CMM 접촉식 트리거 프로브에 대한 일반적인 XY 사전 이동 플롯을 보여줍니다. 높은 힘의 세 방향이 이 플롯의 극점이라고 볼 수 있습니다. 이 경우 최대 사전 이동 편차는 약 $3.3 \mu\text{m}$ (0.00013인치)입니다.

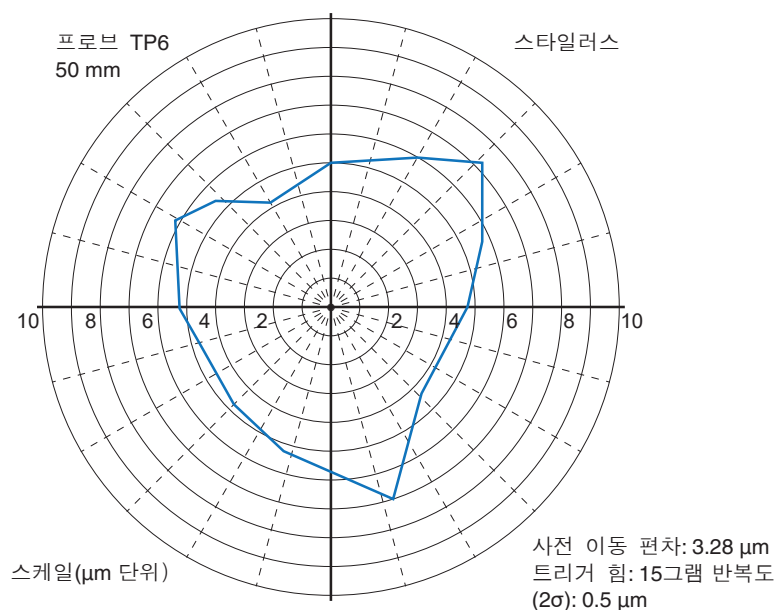


그림 8: TP6 CMM 프로브에 대한 사전 이동 편차 플롯

XYZ 사전 이동 편차

사전 이동은 XY 평면뿐만 아니라 Z 방향에도 존재합니다. 이 경우, 프로브 스프링에 비해 기계적인 이점(레버 작용)은 없으므로, 접촉력은 스프링 힘과 동일합니다(그림 9 참조). 따라서 이 방향의 트리거 힘은 XY 평면에서 보여진 힘보다 훨씬 더 큼니다. 그러나 이 방향으로 트리거할 때 스타일러스가 압력을 받기 때문에, 유효 강성은 훨씬 더 크며 일반적으로 Z 방향의 사전 이동은 XY 평면보다 훨씬 더 작습니다.

동역학적 저항성 프로브는 XY 및 Z 사전 이동 효과의 조합인 3차원(XYZ) PTV를 보입니다. 복잡한 표면을 측정할 때 이는 중요한 특성 중 하나입니다.



그림 9: Z 방향의 힘 균형

프로브 교정

사전 이동 자체는 오류라고 보지 않는데, 이는 프로브 교정을 통해 쉽게 보정할 수 있기 때문입니다. 알려진 크기와 위치에 대한 데이터 피처를 측정하여 관련 스타일러스의 평균 사전 이동 값을 얻을 수 있습니다. 이 작업을 마친 후 측정 정확도에 영향을 미치는 주요 요소는 바로 프로브의 반복도입니다(다음 섹션 참조).

하지만 여기에는 몇 가지 제약이 존재합니다. 복잡한 부품의 경우 다수의 프로빙 방향이 필요합니다. 프로브/스타일러스 조합에 대한 PTV 값이 충분히 낮으면 측정 정확도에 미치는 영향을 수용할 수 있습니다. 하지만 이 잠재적인 측정 오차가 수용 불가능할 정도로 크면 사용될 각 방향에 대해 프로브를 교정해야 할 수 있습니다.

반복도

매번 동일한 지점에서 트리거할 수 있는 프로브 기능은 반복도라고 알려져 있습니다. 이는 무작위 오차이며 공작 기계 분야의 동역학적 저항성 프로브는 일반적으로 스타일러스 팁에서 $1.0 \mu\text{m}$ (0.00004 인치) (2σ) 이내로 반복됩니다. 많은 CMM 동역학적 저항성 프로브가 $0.35 \mu\text{m}$ (0.000014 인치) (2σ) 이내에서 반복될 수 있습니다. 이러한 값은 테스트 장비 값이며 반드시 시스템 측정 반복도를 나타내지는 않는다는 점에 유의해야 합니다. 프로브가 트리거 신호를 발행할 때부터 기계 위치를 멈출때까지 소요되는 시간의 변동성은 그 자체로 반복도의 증가를 나타냅니다. CMM 제어 설계는 프로브 입력에 맞게 최적화된 반면 CNC 공작 기계의 경우 항상 그렇지 않습니다.

공작 기계 프로브의 측정 반복도에 영향을 미칠 수 있는 다른 요인으로는 다음과 같은 것들이 있습니다.

- 샘플 주파수(기계 컨트롤러에 의한 프로브 신호의 샘플 주파수) - CMM에서 이는 보통 실시간이며, 일부 CNC 공작 기계에는 트리거 지점의 위치 불확실성을 최소화하기 위한 고속 스킵 입력이 적용됩니다. 그러나 일부 CNC는 밀리초 간격으로만 프로브 입력을 샘플링합니다.
- 전송 반복도 - 컨트롤러로 프로브 트리거 신호를 전송하는 데 걸리는 시간의 편차. Renishaw 광학식 및 주파수 전송은 반복도가 높고 짧은 지연을 갖도록 설계되었습니다.

이력 현상

볼-스크류 메커니즘의 백래시와 유사하게, 선행 프로브 트리거의 방향은 트리거 지점에 작은 영향을 미칩니다. 이력 현상은 XY 평면에서 반대 방향으로 프로브가 이동 후 측정이 이루어질 때 극대화됩니다. 이 효과는 스타일러스 길이 및 접촉력에 따라 증가합니다. 하지만 동역학적 메커니즘이 이력 현상을 최소화하므로 일반적으로 프로브 단방향 반복도에 미치는 영향은 매우 적습니다.

중요도에 따라 순위를 매긴 성능 요인

1. 반복도

이는 트리거 프로브의 핵심 성능 요구 사항으로, 시스템 성능에 대한 근본적인 한계를 보여줍니다. 이력 현상이 반복도에 영향을 미칩니다.

2. 사전 이동 편차

모든 프로빙 방향을 알게 된다면 교정을 통해 이 요인을 제거할 수 있습니다. PTV 값이 큰 프로브를 부적합한 방향에서 사용하면 측정 정확도가 떨어지게 됩니다. PTV는 동역학적 저항성 프로브의 스타일러스 길이와 함께 급격히 증가합니다.

3. 이력 현상

동역학적 메커니즘을 가진 프로브의 작은 요소

스트레인 게이지 프로브 기술

더 새로운 형태의 감지 기술로 동역학적 저항성 접촉식 프로브 메커니즘인 실리콘 스트레인 게이지의 성능 한계를 해결했습니다. Renishaw가 최소 직경 13 mm(0.5인치)인 프로브를 위해 설계한 최신 소형 전자 장치와 고체 상태 감지 기능으로 이러한 문제 해결이 가능했습니다.

스트레인 게이지 프로브가 여전히 동역학적 메커니즘을 사용해 스타일러스를 고정하긴 하지만, 접촉 요소의 저항을 통해 트리거를 감지하지는 않습니다. 그 대신 동역학적 범위를 넘어 정밀하게 설계한 프로브 구조 곡면부에 스트레인 게이지를 배치합니다(그림 10 참조). 이러한 게이지는 스타일러스에 적용되는 접촉력을 측정하고 힘이 임계값을 초과할 때 트리거를 생성합니다. 이 경우 트리거 힘은 약하며, 감지가 동역학적 구조 종속적이지 않으므로 모든 방향에서 일관된 트리거 특성을 보입니다.

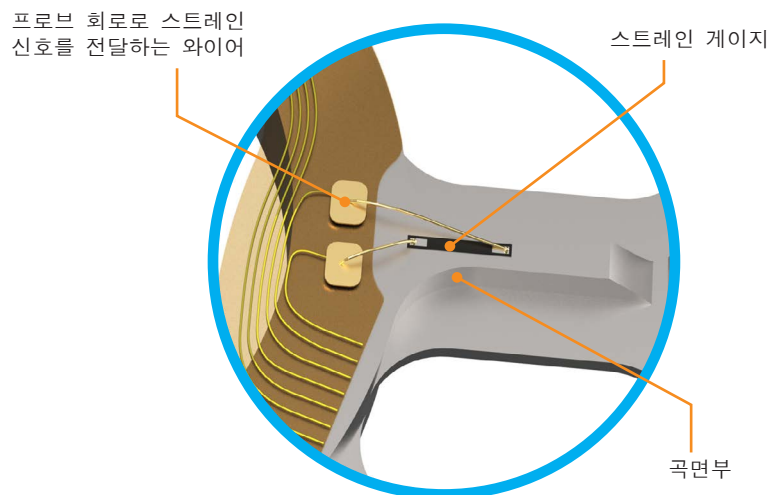


그림 10: 프로브 내 곡면부에 장착된 스트레인 게이지

접촉력 측정

그림 11은 스트레인 게이지 프로브의 구성도를 보여줍니다. 접촉력이 약한 경우 동역학적으로 배치된 상태를 유지하며 동역학을 통해 힘이 프로브 구조로 전달됩니다. 스트레인 게이지(X, Y, Z축 감지를 위해 정렬된 세 개의 측정 게이지)는 얇은 곡면부에 장착됩니다. 스트레인 게이지는 구조물에 적용되는 힘을 감지하며 방향에 상관없이 힘의 임계값을 초과하는 경우 트리거 신호를 생성하도록 출력이 합산됩니다. 이 힘의 임계값은 일반적으로 몇 그램 정도인데, 동등한 저항성 센서의 트리거 힘보다 훨씬 적은 값입니다.

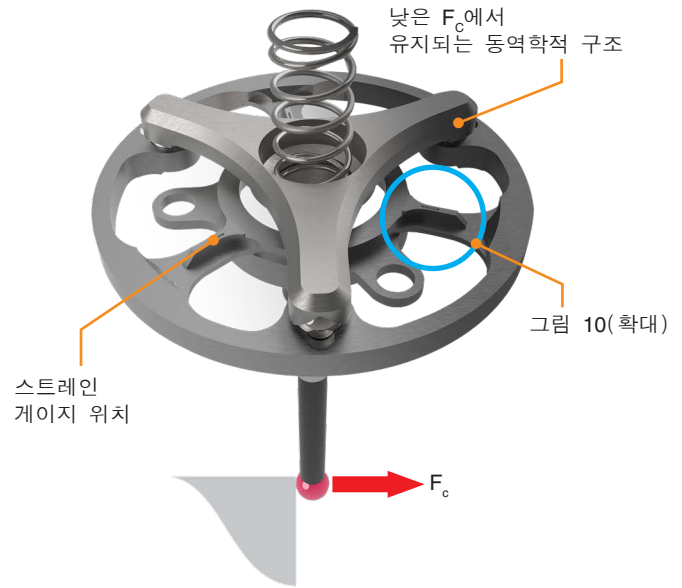


그림 11: 접촉력을 측정하는 스트레인 게이지 프로브의 구조도

스트레인 게이지는 구조물에 가해지는 힘에 매우 민감하며, 스타일러스가 부품 표면과 접촉하지 않을 때 기계의 진동을 감지합니다. 프로브 내부의 필터링 회로는 게이지에서 보여지는 힘이 지속적인 실제 스타일러스 편향의 결과인지 여부를 판단합니다. 이 목표를 달성하기 위해 힘 임계값을 처음으로 벗어나는 즉시 짧고 반복도가 높은 딜레이가 감지 회로에 삽입되며, 이후 딜레이 구간 끝부분에서 트리거가 발생하기 전에 지속적으로 증가하는 힘이 확인되어야 합니다.

거짓 트리거 거부 및 반복 가능한 측정

그림 12a는 기계 진동에 의해 상당한 노이즈가 스트레인 게이지 출력 값에 존재하는 사례를 보여줍니다. 이 경우, 특정한 진동에 의해 임계값을 벗어나면서 고정 딜레이 타이머가 시작됩니다. 그러나 힘이 임계값 미만으로 떨어지고 더 낮은 값이 유지되어, 딜레이 구간이 끝나고 난 후 실제 트리거가 발생하지 않았음을 전자 장치가 식별할 수 있어, 트리거 신호를 발행하지 않습니다.

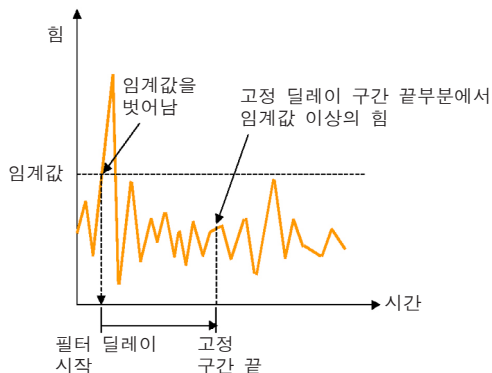


그림 12a: 스트레인 게이지 힘 임계값을 벗어나는 무작위 진동 - 트리거 발행되지 않음

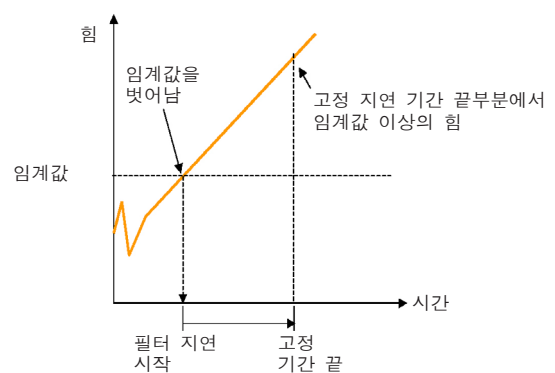


그림 12b: 프로브 트리거로 인한 지속적인 힘이 스트레인 게이지 힘 임계값을 벗어남 - 딜레이 구간 끝에서 트리거 신호가 발행됨

또한 그림 12b는 스타일러스가 표면과 만나는 사례를 보여줍니다. 스타일러스가 표면에 닿으면 스트레인 게이지가 접촉력을 측정할 때 무작위 진동이 빠르게 감소됩니다. 게이지에서 보여지는 힘이 지속적으로 증가하므로, 타이머가 시작되면 힘이 임계값 미만으로 다시 떨어지지 않습니다. 반복 가능한 딜레이 구간이 끝나면 트리거 신호가 발행됩니다.

이 반복 가능한 딜레이는 프로브 교정으로 쉽게 제거됩니다. 고정된 딜레이 시간 동안 기계가 이동한 거리와 동일한 스타일러스 볼의 반경 감소를 나타내는 순효과를 나타냅니다. 이 시간 동안 일정 속도로 기계가 이동하는 한 측정 반복도는 영향을 받지 않습니다. 즉, 측정이 이루어지는 것과 동일하게 프로그래밍 된 이송 속도에서 프로브를 교정해야 합니다. 따라서 스트레인 게이지 프로브는 자동화된 CMM 및 CNC 공작 기계에만 적합합니다. 또 다른 고려 사항은 프로그래밍 된 목표 위치입니다. 프로빙 사이클 도중 기계가 이동하도록 프로그래밍 된 표면의 예상 위치를 벗어난 지점입니다. 제조 엔지니어는 기계가 이 목표 위치 쪽으로 이동할 때 스타일러스가 표면을 만나기 전에 감속을 시작하지 않도록 해야 합니다. 따라서 초과 이동 거리는 예상되는 표면 위치 편차와 기계의 감속 프로필을 모두 고려해야 합니다.

성능상의 이점

그림 13은 OMP400 접촉식 트리거 프로브에 대한 일반적인 사전 이동 편차 플롯을 보여줍니다. 이때 원 주변에서 30° 간격으로 12개의 지점이 선택됩니다. 차트에서는 OMP400 접촉식 프로브의 일반적인 PTV 플롯을 보여주며 모든 방향에서 낮고 균일한 사전 이동을 확인할 수 있습니다. 50 mm 스타일러스를 사용하는 XY 평면의 PTV 값은 0.34 μm (0.000013 인치)밖에 되지 않으며 이는 크기가 비슷한 동역학적 접촉식 프로브의 PTV 값보다 90% 정도 작은 수치입니다. OMP400 접촉식 프로브의 XYZ PTV 값은 일반적으로 1 μm 보다 작습니다.

이러한 성능상의 이점은 보다 정확한 측정, 특히 다수의 감지 방향을 사용하는 복잡한 부품에서 더 두드러집니다. PTV 값이 작으면 단순한 프로브 교정 루틴을 사용할 수 있습니다.

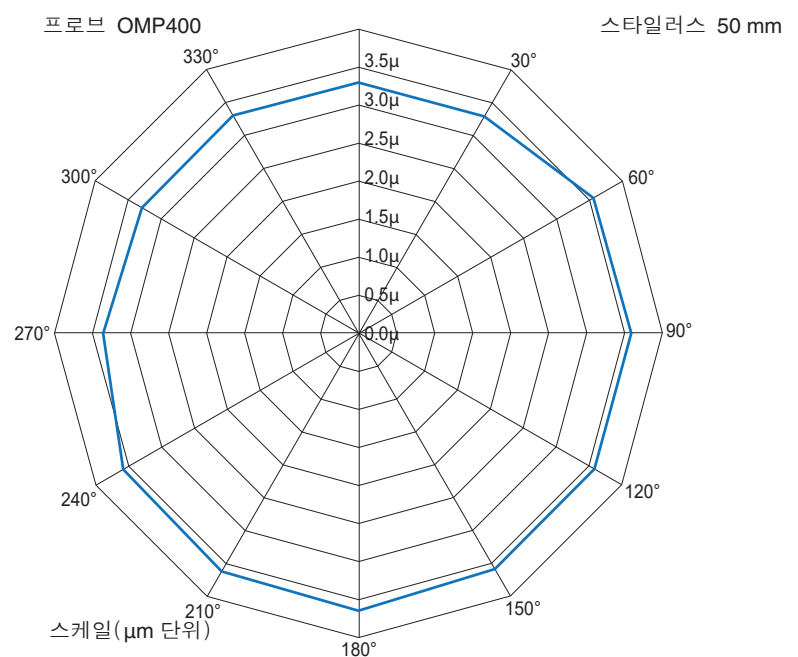


그림 13: OMP400 접촉식 트리거 프로브에 대한 사전 이동 편차 플롯

수명 및 신뢰도 측면의 이점

스트레인 게이지 기술의 또 다른 이점은 더 긴 작동 수명으로, 일반적으로 저항성 프로브보다 10배 더 오래 사용할 수 있습니다. 솔리드 스테이트 스트레인 게이지에서는 기계적 재안착 속성을 활용하기 위한 용도로만 사용되어 동역학적 접촉부의 성능 저하가 거의 없습니다. 반면 저항성 프로브는 시간이 지나면서 재안착 부정확도가 증가합니다. 접촉부를 통한 저항의 경우 표면의 미세한 성능 저하로 인해 결국 트리거 임계값 이하로 떨어지지 않습니다. 또한 스트레인 게이지 센서는 저항성 프로브와 달리 진동으로 유발되는 거짓 트리거의 영향을 받지 않습니다. 이러한 특성으로 인해 스트레인 게이지는 집중적인 접촉식 트리거 프로빙 작업에 적합합니다.

유연성

동역학적 저항성 프로브에서는 사전 이동 편차가 스타일러스 길이에 따라 급속도로 증가합니다(PTV는 스타일러스 길이의 세제곱에 비례함). 즉, 측정 성능 요구 사항으로 인해 사용할 수 있는 스타일러스 길이가 제한됩니다. 많은 경우 연장 바, 인덱싱 헤드 및/또는 작은 크기의 프로브를 사용해서 이 문제를 극복하지만, 몇몇 검사 분야에서는 매우 긴 스타일러스가 필요합니다. 트리거 힘이 더 약하고 일관된 스트레인 게이지 센서는 측정 성능이 더 우수하며 훨씬 더 긴 스타일러스를 지원할 수 있습니다. 공작 기계용 RMP600 스피들 프로브의 경우(그림 15 참조), 최대 300 mm 길이의 스타일러스를 사용할 수 있으며, 이때 측정 성능 저하는 매우 적습니다.

	스타일러스 길이	
	50 mm	100 mm
반복도		
12개 방향에서 최대 2σ	0.25 μm	0.35 μm
2D(XY) 로빙		
링 게이지에서의 최대 편차	±0.25 μm	±0.25 μm
3D(XYZ) 로빙		
알려진 구체에서의 최대 편차	±1.00 μm	±1.75 μm



그림 14: OMP600 스트레인 게이지 스피들 프로브

몇몇 측정 분야에서는 측정할 형상에 접근하기 위해 매우 작은 스타일러스가 필요합니다. 스트레인 게이지 센서의 프로빙 힘이 약하다는 것은 덜 단단한 스타일러스도 여전히 사용이 가능하다는 의미입니다.

요약

접촉식 트리거 프로브(동역학적 저항성 및 스트레인 게이지 센서)는 CMM 및 CNC 공작 기계에서 가장 널리 사용되는 형태의 접촉식 센서입니다. 최근 CMM에 스캐닝 프로브를 사용하는 경우가 증가하고 있음에도 불구하고, 접촉식 트리거 프로브는 많은 제조 현장의 품질 보증과 공정 제어에 있어 계속해서 중요한 역할을 하고 있습니다. 또한 성능 향상, 더 긴 수명, 유연성 증가 등의 다양한 이점을 제공하는 혁신적인 감지 기술을 채택하여 다양한 측정 작업 관련 요구를 충족하도록 발전했습니다.

www.renishaw.co.kr/machinetool

 #renishaw

+82 031 346 2830

 korea@renishaw.com

© 2026 Renishaw plc. All rights reserved. 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. 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: H-5650-2079-02-A