

FORTIS™ 엔코더가 동급 최고의 진동 내성을 가지는 데 도움이 되는 동조 질량 감소기

1907년, 미국의 기계 공학자 Frederick Winslow Taylor는 기계 가공 시 발생하는 진동을 "기계 기술자가 직면하게 되는 가장 불확실하고 까다로운 문제"라고 묘사했습니다. 약 50년이 넘는 세월 동안 기계 가공 분야에서 방대한 경험을 쌓고 전 세계의 여러 고객층과 긴밀하게 협력해 온 Renishaw는 이러한 의견에 전적으로 공감합니다. 한 세기가 넘게 수많은 발전이 이루어졌고 오늘날 뛰어난 품질의 고속 CNC 공작 기계들이 개발되었지만, 여전히 진동은 발생하고 있습니다. 일반적으로 진동은 강한 황삭 절삭 시 또는 유달리 단단하거나 이질적인 자재의 가공 시나 구성 요소의 벽이 얇을 때 발생하곤 합니다. 진동을 줄이거나 억제하려면 올바른 공구를 선택하고 원료와 속도를 최적화하는 것이 필수적입니다. 기계 모션 제어 시스템과 결과물의 성능을 최적화하기 위해서는 사이클 시간과 정확도 간 균형을 맞추고 마감의 품질을 높이는 것이 중요합니다.

Paul Maxted – 산업 계측 부문 디렉터 – Renishaw plc.

문제점

공작 기계는 작동 중에 심한 진동을 유발할 수 있으며, 강한 기계 진동은 이러한 기계에 설치된 밀폐형 위치 엔코더에 나쁜 영향을 미쳐 측정 정확도가 낮아지게 됩니다. 축 위치 측정값은 형상 정확도, 표면 마감과 같은 공정 품질의 여러 측면에 직접적인 영향을 미칩니다. 위치 측정값을 개선하여 진동이 미치는 영향을 줄이면 생산 품질이 크게 향상됩니다. 공작 기계의 진동을 유발하는 주된 요인들은 다음과 같습니다.

i. 특정한 조건에서 절삭 공정을 진행할 때 발생하는 공구의 흔들림. 예를 들어, 단단한 자재의 밀링을 진행할 때 절삭력이 강해 공작물 또는 공구의 굴절이 발생할 수 있습니다.

- ii. 가공되는 자재의 이질성과 절삭 공구의 마모 현상. 가공 난이도가 급격하게 올라가면 충격력이 발생하면서 진동이 유발됩니다.
- iii. 밀링 작업에서 흔하게 접할 수 있는 간헐적 절단으로 인해 충격력이 발생하여 진동이 발생합니다.
- iv. 회전 질량의 불균형과 전동 장치의 감속 변화(베어링 마모, 약한 공작물 고정력 등)로 인한 장애.
- v. 마모되었거나 유지보수가 잘 되지 않은 공작 기계, 잘못 선택한 절삭 공구, 최적화되지 않은 스피들 속도와 이송 속도.

해결방안

공작 기계 분야에서 방대한 경험을 쌓아 온 Renishaw는 주요 공작 기계 제조업체, 그리고 최종 사용자와 수많은 파트너십을 성공적으로 체결하였습니다. FORTIS™ 밀폐형 엔코더는 공작 기계 진동과 관련해 알려진 문제들과 이러한 진동이 위치 측정값에 미치는 영향을 해결하기 위해 만들어졌습니다. 다음과 같은 FORTIS 엔코더의 세 가지 기능은 기계 진동에 대한 내성을 높이고 위치 제어 루프에 고진폭 위치 편차가 유입되는 것을 방지하여 엔코더의 역량을 향상시키기 위해 통합되었습니다.

1. 일반적인 밀폐형 옵티컬 엔코더의 경우 스프링과 롤러 베어링이 달린 캐리지가 엔코더 스케일을 따라 이동하는 판독 헤드의 본체를 지지합니다(그림 2a 참조). 주어진 구동 주파수에서, 판독 헤드를 지지하는 기계 안내면(V_g)에 대한 진동의 진폭과 위상은 엔코더 스케일 및 엔클로저(V_m)의 경우와 다른데, 이 경우 두개의 파트는 각기 다른 기계 장착 표면에 고정되어 있으며 이러한 진폭과 위상 응답의 차이를 롤러 베어링이 달린 캐리지의 굴곡부와 커플링에서 흡수해야 합니다(그림 1 참조). FORTIS 엔코더는 비접촉식 설계를 채택하여 판독 헤드의 본체와 엔클로저를 효과적으로 분리합니다(그림 2b 참조).

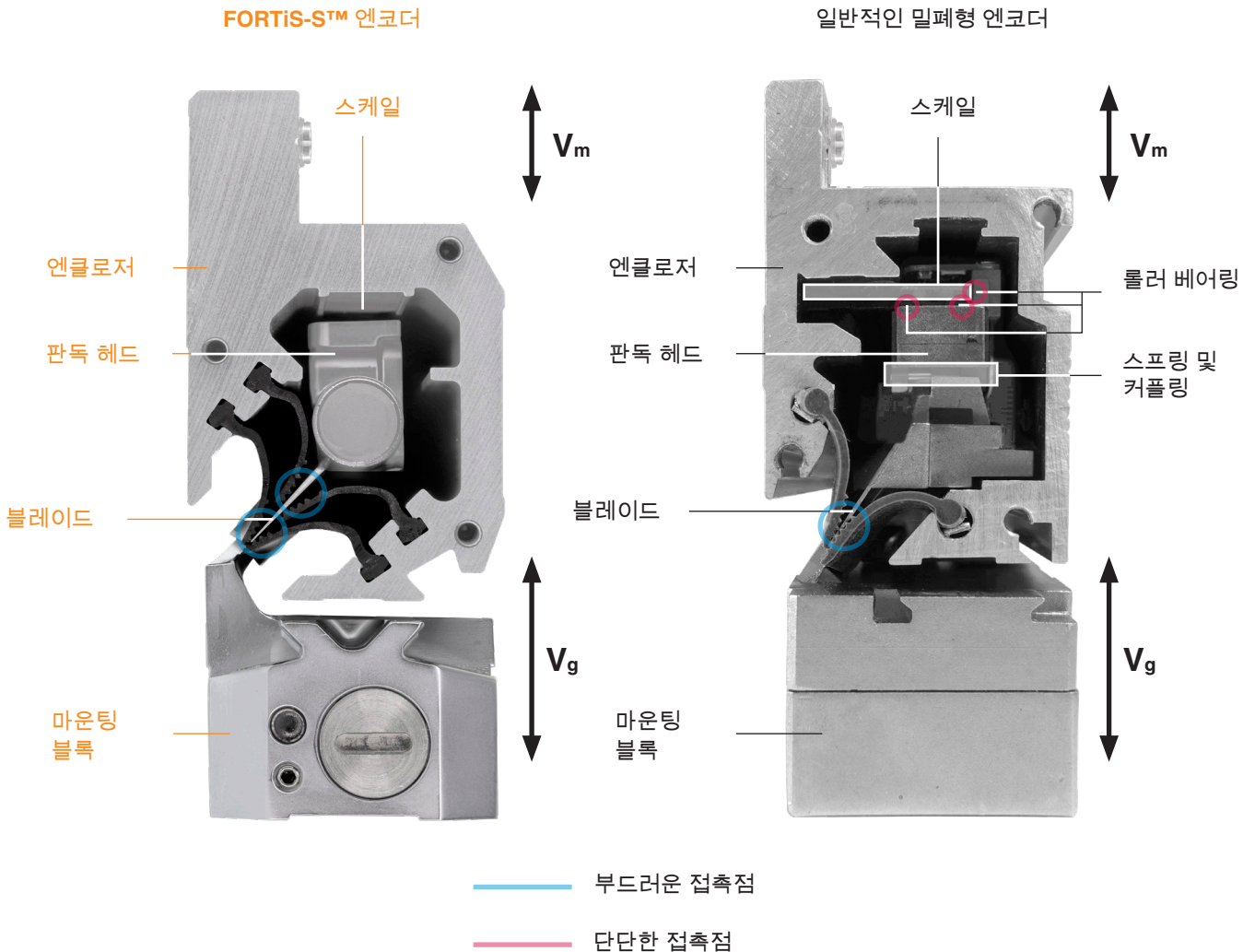


그림 1: FORTIS-S 엔코더와 일반적인 밀폐형 엔코더의 수직 단면.

2. 일반적인 밀폐형 옵티컬 엔코더는 질량이 상대적으로 큰 글라스 스케일을 사용하며 이러한 엔코더는 엔클로저의 한쪽에 매달려 있습니다. 외팔보 형태로 고정된 스케일의 진동으로 인한 원치 않는 엔클로저의 움직임을 방지하기 위해, **FORTIS** 엔코더는 엔클로저 본체 내부에 전체 길이를 따라 고정된 가벼운 강철 스케일을 사용합니다.
3. 진동을 줄이기 위한 **FORTIS** 엔코더의 세 번째 기능은 바로 동조 질량 감쇠 기능입니다. 동조 질량 감쇠기(TMD)는 일종의 기계장치로 구조물 내 특정 위치에 장착되어 공진 진동을 대폭 감소시킵니다. 수직 축과 수평 축 주변의 진동에 대응하기 위해 두 개의 TMD를 사용합니다.

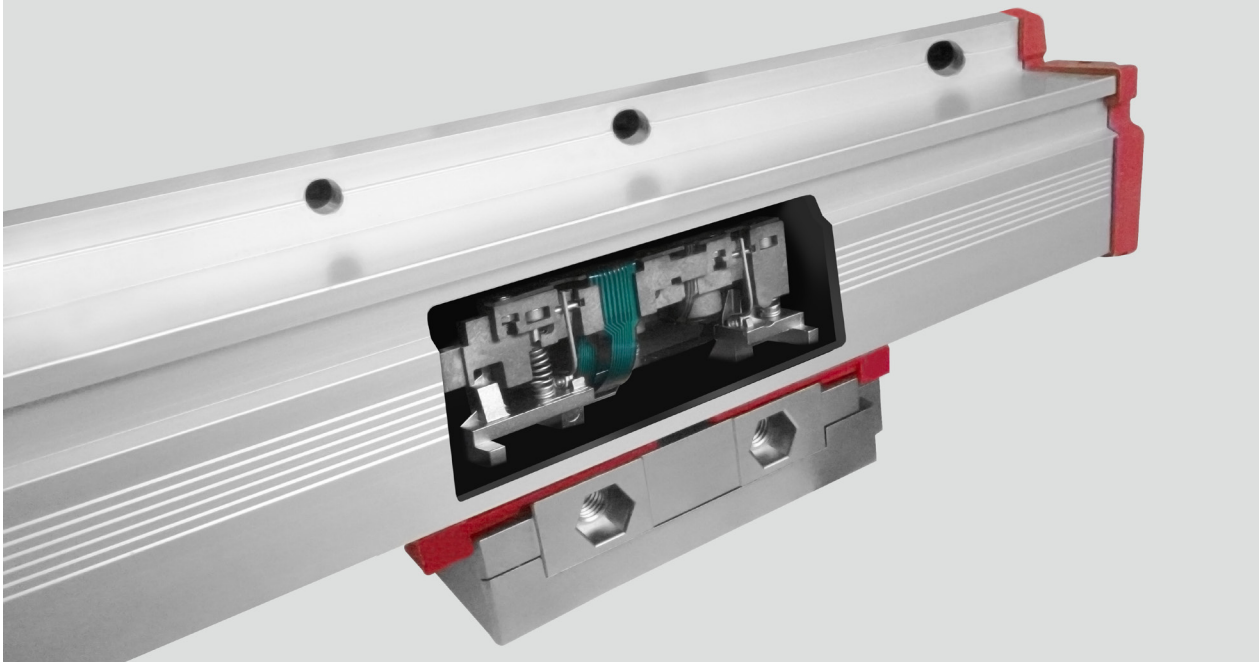


그림 2a: 일반적인 밀폐형 엔코더와 엔클로저 내 판독 헤드 본체 및 롤러 베어링이 달린 지지 캐리지를 보여주는 내부도. 여기서 판독 헤드 메커니즘은 엔클로저로 유입되는 오염 물질에 완전히 노출되어 있습니다.



그림 2b: **FORTIS-S** 밀폐형 엔코더와 엔클로저 내 비접촉식 밀폐형 판독 헤드 본체를 보여주는 내부도.

동조 질량 감소 관련 정보

동조 질량 감쇠기는 잘 정의된 공진 주파수를 갖는 개체의 기계 진동을 감쇠시켜야 하는 다양한 엔지니어링 분야에서 사용됩니다. 가장 잘 알려진 TMD의 사용 사례로는 유명한 Taipei 101 같은 초고층 건물 건축 사례를 꼽을 수 있는데, 이러한 건물에서는 강한 바람이나 지진으로 인해 발생하는 건물의 진동을 줄이기 위해 대형 동조 질량 감쇠기를 사용합니다(그림 3 참조). 그 외에도 TMD는 송전선, 항공기 날개, 차량의 크랭크축, 브리지, 그리고 FORTIS 엔코더에 장착됩니다.

동조 질량 감쇠 기술은 FORTIS 엔코더 판독 헤드의 수직(Z축) 및 수평(Y) 축 방향으로 적용됩니다. FORTIS TMD의 기본적인 설계를 살펴보면 두 개의 O링이 감쇠기 질량 양끝에 배치되며, 이 감쇠기는 O링의 압축량을 제어하기 위해 리머 포켓 내부에 설치됩니다(그림 4 참조).

대대적인 TMD 개발 작업을 거친 결과, FORTIS 엔코더는 장착 지점에서 가장 멀리 떨어진 판독 헤드(옵틱 캐리어) 끝부분의 최고 가속도를 5.3배 감소시킬 수 있게 되었습니다.

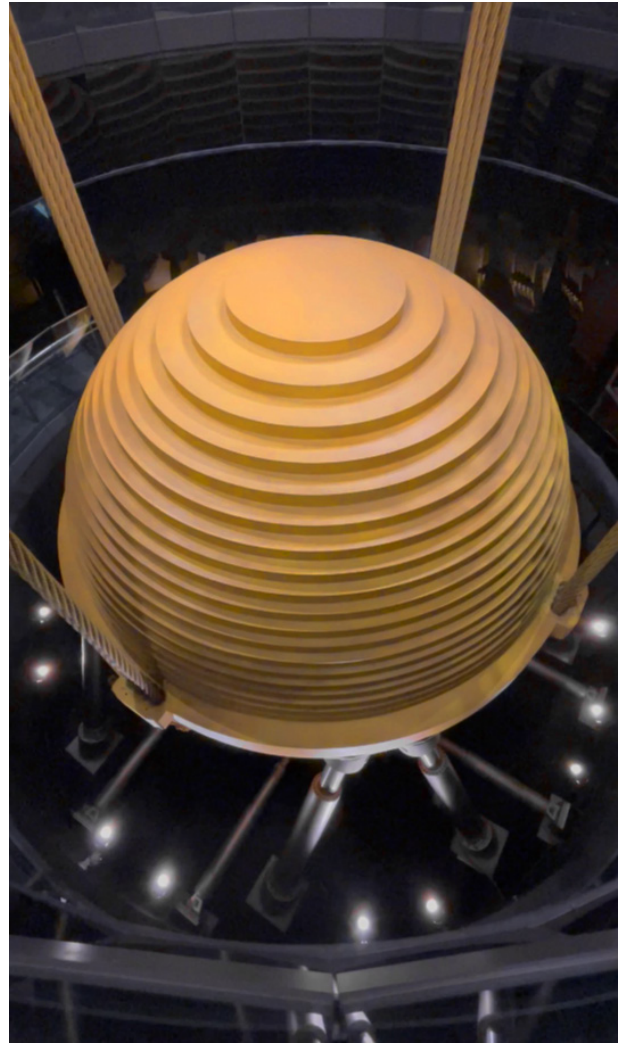


그림 3: Taipei 101 건물의 TMD 시스템.

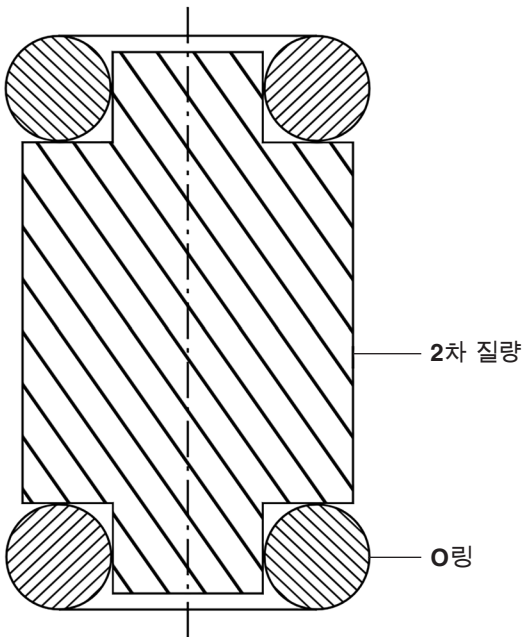


그림 4: FORTIS 엔코더를 위해 설계된 TMD의 수직 단면과 양끝에 위치한 O링.

동조 질량 감쇠기 이론

이 섹션에서는 1자유도(DoF) 시스템에 대한 동조 질량 감쇠기의 기초 이론을 설명합니다. 기계 분야와 토목 분야의 엔지니어가 자주 직면하게 되는 문제로는 시스템이 가진(excitation)에 대응하여 높은 진폭의 움직임을 유발할 때 발생하는 공진 현상이 있습니다.

공진 시스템은 강성 스프링(k)의 질량(m) 같은 간단한 구동 고조파 오실레이터 측면에서 이해할 수 있습니다 (그림 5 참조). 이 경우 익숙한 단진동 방정식이 적용되며, x 는 정적 평형 상태를 기준으로 삼는 선형 변위에 해당합니다.

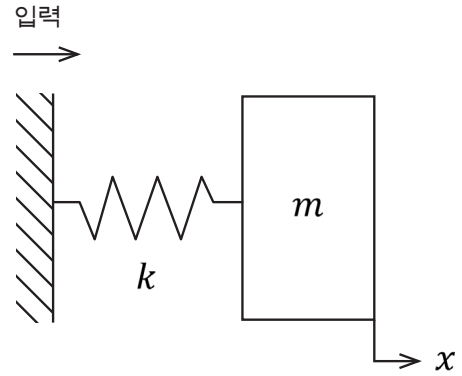


그림 5: 질량 - 1 DoF의 스프링 시스템.

방정식 1: $m\ddot{x} + kx = input$

방정식 1을 보면 스프링의 질량이 사인파 대응과 관련한 고유 주파수를 가집니다(방정식 2 참조).

방정식 2: $frequency (Hz) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$

하중 또는 변위와 관련해 시스템 입력의 주파수가 방정식 2의 공진 주파수와 유사한 경우, 심각한 결과를 초래할 수 있는 큰 공진 주파수를 얻게 됩니다(그림 6 참조).

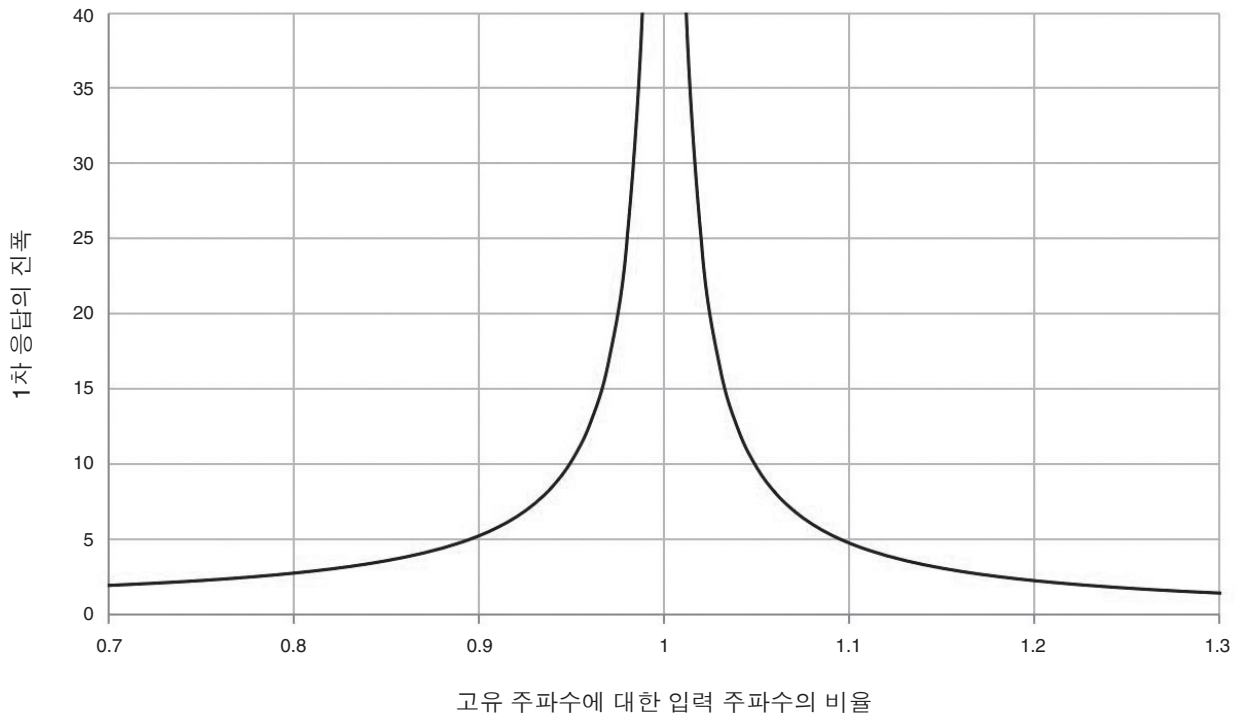


그림 6: 스프링 질량의 공진 응답.

이때 여러 사례에 적합한 일반적인 전략은 바로 기계 감쇠 효과를 추가하고 시스템의 고유 주파수를 가진 주파수에서 떨어뜨리는 것입니다.

하지만 이러한 접근법을 항상 사용할 수 있는 것은 아닙니다. 강철 프레임의 고층 건물은 고유 주파수에 맞춰 흔들리며, 주변에 보강 또는 감쇠를 위한 닷 역할을 할 대상이 없습니다. 이처럼 접근이 어려운 경우에는 동조 질량 감쇠기를 활용할 수 있습니다.

FORTIS 엔코더 판독 헤드의 질량을 지지하는 얇은 두께의 블레이드는 완전한 밀폐를 위한 스프링 역할을 합니다. 외부 가공 진동의 경우 판독 헤드 내부에 TMD를 탑재하여 제어하지 않는 한 원치 않는 공진이 유발될 수 있습니다.

TMD의 실용적인 설계를 위해서는 신중한 개발 작업을 수행해야 하지만 기본적인 개념은 비감쇠 질량 - 스프링 시스템과 고유 주파수의 공진 문제부터 시작해 시각화할 수 있습니다.

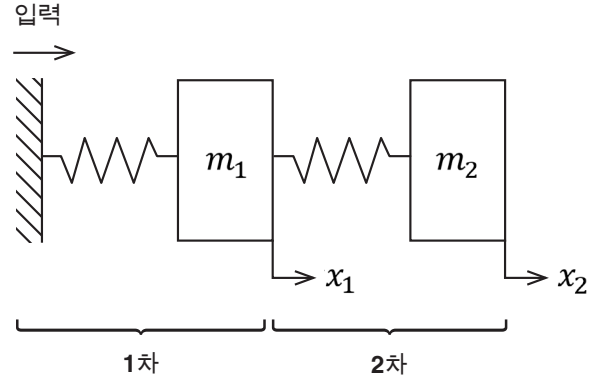
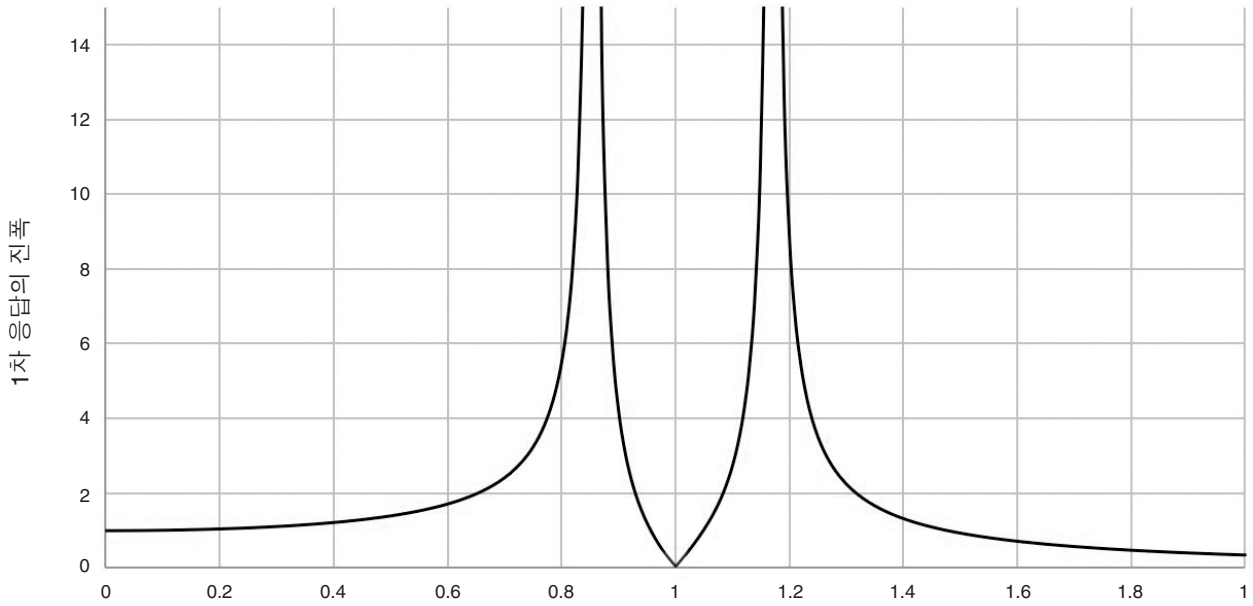


그림 7: 질량 - 2 DoF의 스프링 시스템.



1차 질량의 고유 주파수에 대한 입력 주파수의 비율

그림 8: 비감쇠 2 DoF 질량 - 스프링 시스템의 공진 응답.

상대적으로 작은 2차 질량(m_2)이 스프링을 통해 1차(원래) 질량(m_1)과 연결되어 2차 질량의 고유 주파수가 동일해졌다고 가정해 보겠습니다. 그러면 전체 시스템(그림 7 참조)이 '2자유도'를 가지면서 원래 공진 피크가 두 개로 나뉘게 됩니다. 첫 번째(하부) 고유 주파수에서는 두 질량이 동일한 위상과 방향으로 움직이지만, 두 번째 고유 주파수에서는 서로 반대되는 방향으로 움직입니다.

또한 1차 질량은 원래 고유 주파수에서 구동될 때 진폭이 0인 반면 2차 질량은 한정된 진폭 범위 안에서 움직입니다. 따라서 주파수가 다른 두 개의 새로운 무한 공진을 통해 1차 질량의 공진이 억제됩니다(그림 8 참조).

이러한 공진을 확인하지 않으면 큰 악영향을 미칠 수 있는데, TMD의 주된 이점은 바로 감쇠기를 통해 2차 질량을 지지하는 스프링 전반에서 이러한 공진을 로컬로 제어할 수 있다는 점입니다(그림 9 참조).

요약해 보면, TMD는 조정이 가능한 세 개의 근본적인 설계 매개변수를 갖추었으며 이러한 매개변수는 바로 1차 질량에 대한 2차 질량의 비율(m_2/m_1), 2차 질량과 1차 질량의 고유 주파수 비율(조정 주파수), 그리고 감쇠기의 감쇠 지수입니다.

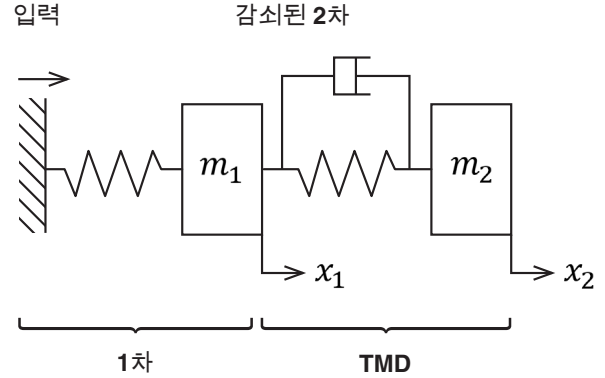


그림 9: 2 DoF 관련 동조 질량 감쇠기 시스템.

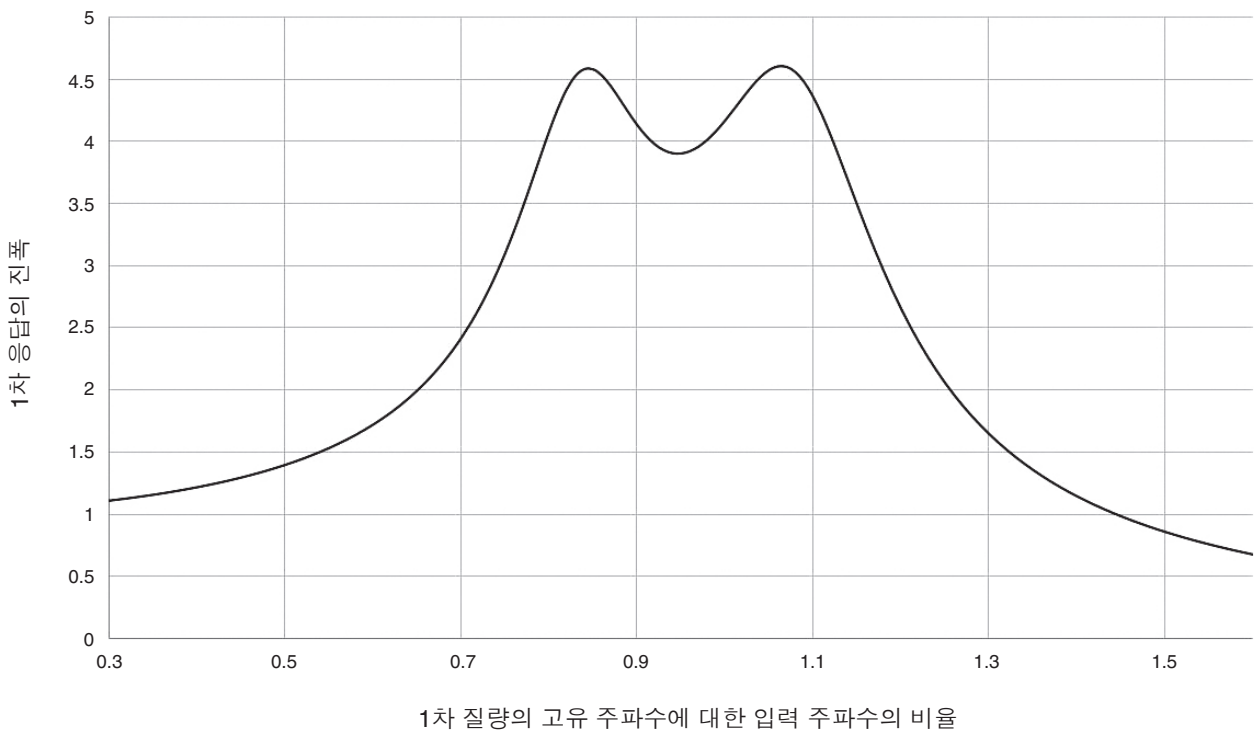


그림 10: 그림 10에서는 최종 결과를 보여 주며, 10%의 질량 비율을 기준으로 91%의 원래 공진 주파수에 대한 2차의 최적 조정을 진행하였고 적합한 감쇠가 적용된 상태입니다. 이제 그림 6과 그림 8에서 본 무한 응답과 달리 1차 반응이 언제나 정적 값을 기준으로 4.6배를 넘지 않습니다.

2차 질량에도 실질적인 한계가 존재하지만, 2차 질량이 1차 질량의 10%밖에 되지 않아 좋은 결과를 얻을 수 있습니다. 이 경우 최적의 조정 주파수가 1차 공진 주파수보다 낮은 것으로 나타나며 그 격차는 질량 비율만 기준으로 삼습니다. 마지막으로 두 개의 피크 응답을 최소화하고 다른 모든 주파수의 진폭 응답을 제어하기 위해 2차 감쇠 지수가 선택되었습니다.

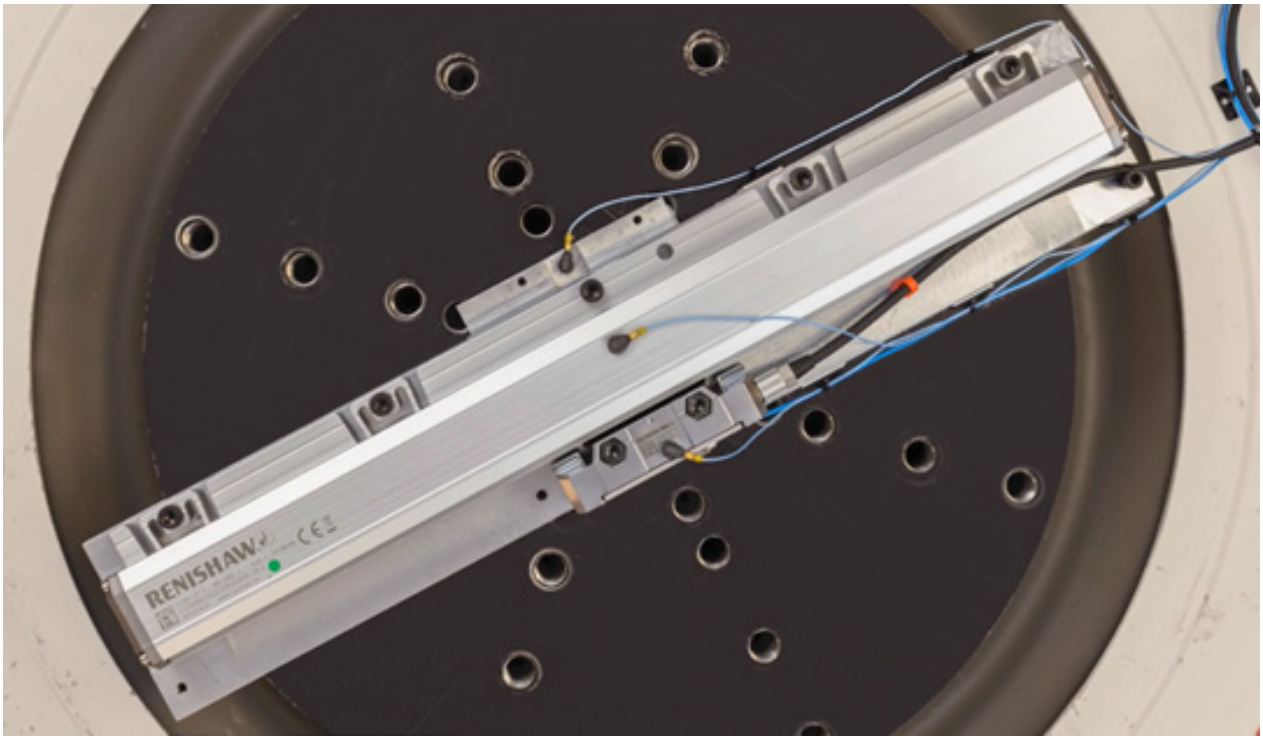
TMD를 설계할 때 가장 먼저 직면한 큰 과제 중 하나는 바로 동적인 조건에서 다양한 O링 후보 자재의 속성을 예측하는 것이었습니다. 주파수 응답을 전파하고 여러 구성 요소의 치수 변화에 대한 시스템의 민감성을 줄일 수 있는 최적의 고무 경도를 선택하기 위해서는 시뮬레이션 테스트를 위한 데이터가 필요했습니다.

두 번째로 직면한 큰 과제는 바로 유한 요소 분석을 위해 선택한 자재의 속성을 정의하는 것이었습니다. 마지막으로, 테스트 데이터를 통해 검증한 시스템을 최적화 및 조정해야 했습니다. 최종적인 설계는 판독 헤드의 공진 주파수 범위를 기준으로 최고의 모달 형태를 만들어 내며, 동조 질량 감쇠기의 나머지 고조파 응답도 여러 진동 레벨에서 유용하게 사용할 수 있습니다.

Krys Jarczyks – FORTiS 선임 기계 설계 엔지니어

진동 테스트: 사인 진동 테스트

여기서는 시작값과 비교해 절대 위치 판독값의 편차를 측정하는 FORTiS 엔코더의 역량을 테스트하였는데, 이때 50 Hz ~ 2000 Hz의 주파수 범위에서 왕복 사인 진동에 노출되었으며 1 g, 3 g, 5 g, 10 g, 15 g, 20 g, 25 g의 진동 진폭에서 테스트를 반복했습니다. 이 백서에서는 다루지 않지만 다른 테스트의 경우 30 g ~ 75 g의 범위를 다루도록 반복되었습니다. 또한 높은 무작위 진동 레벨을 활용한 추가적인 테스트도 진행하였습니다.



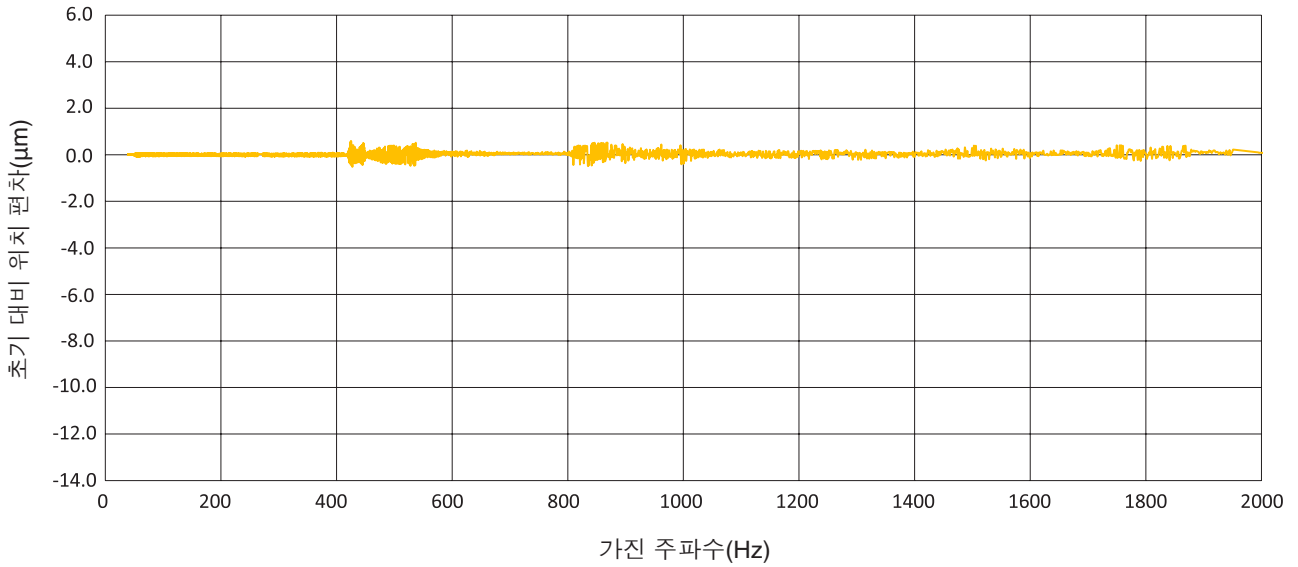
이러한 테스트는 모재에 직접 장착된 FORTiS-S 엔코더와 FORTiS-N™ 엔코더, 그리고 마운팅 스파에 탑재된 FORTiS-N 엔코더에서 진행되었습니다. FORTiS-N 엔코더는 FORTiS-S 엔코더와 동일한 기술을 사용하지만 협소한 공간에서 사용할 수 있도록 가로 폭이 좁습니다.

비교를 위해 크기, 형태, 기능이 동일한 경쟁사의 일반적인 밀폐형 엔코더에 대한 테스트를 진행하였습니다.

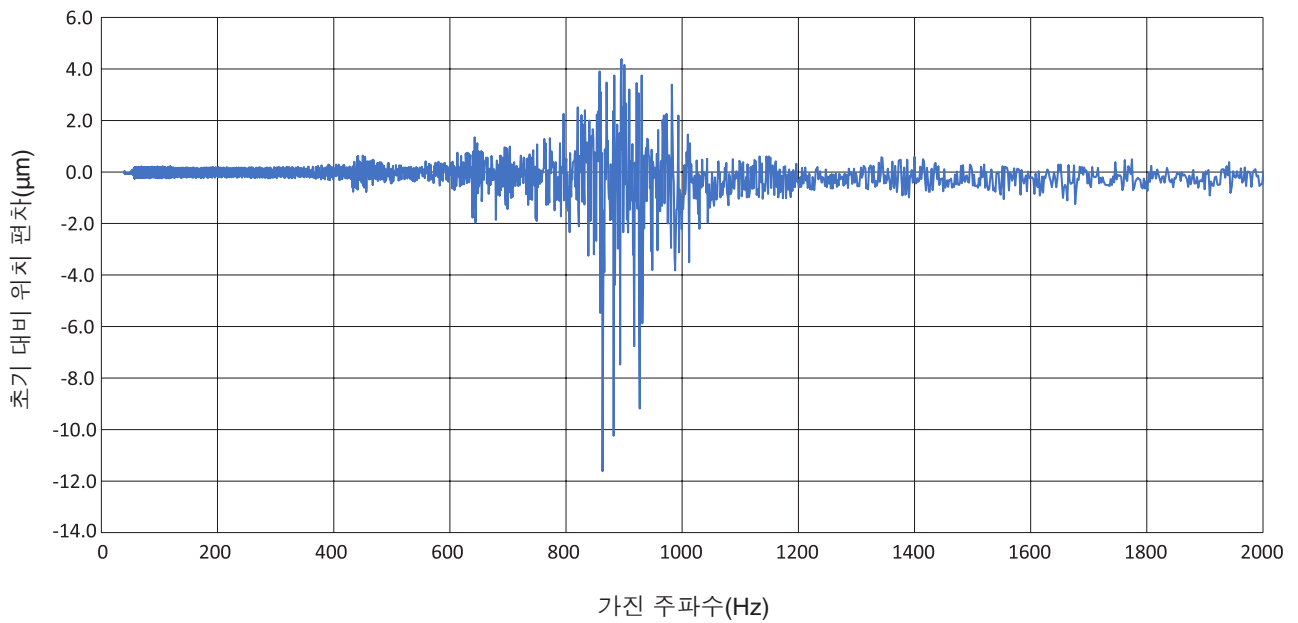
FORTIS-N 엔코더와 경쟁사 제품 비교(스파 장착형)

다음 그래프는 경쟁사의 일반적인 밀폐형 엔코더와 비교한 **FORTIS-N** 엔코더의 위치 편차를 보여 줍니다. 두 테스트 모두 엔코더가 스파에 장착되어 있습니다. 사인파 진동 테스트 프로파일의 진폭은 Z축(엔코더 스케일 방향)으로 15 g에 해당합니다.

50 - 2,000 Hz의 주파수 범위에서 Z축 방향 진동이 15 g인 **FORTIS-N** 엔코더 (스파에 장착)의 위치 편차



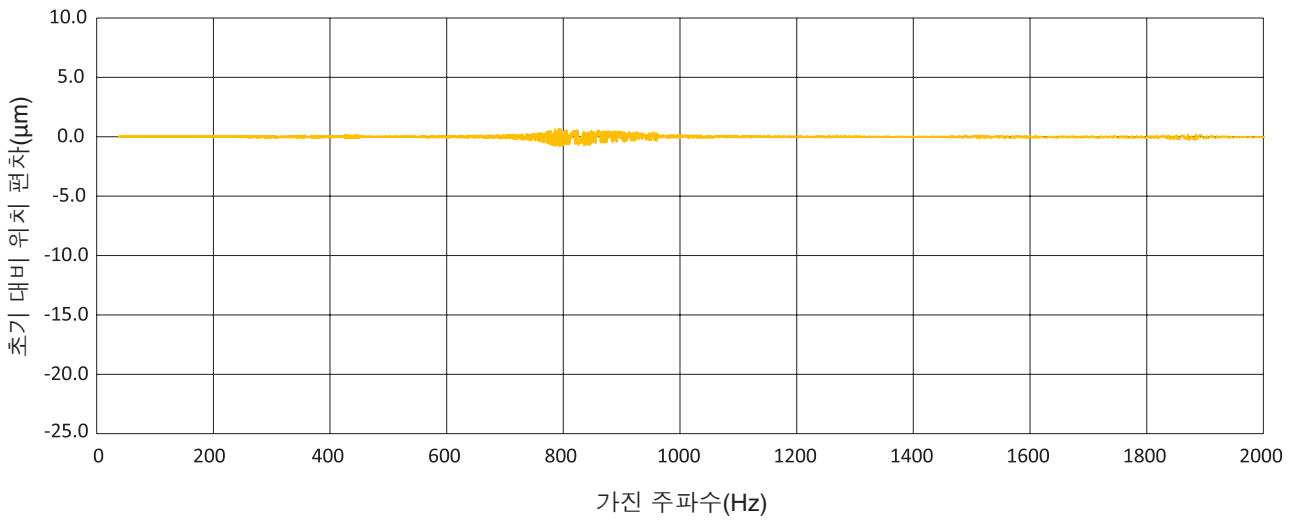
50 - 2,000 Hz의 주파수 범위에서 Z축 방향 진동이 15 g인 기존 엔코더 (스파에 장착)의 위치 편차



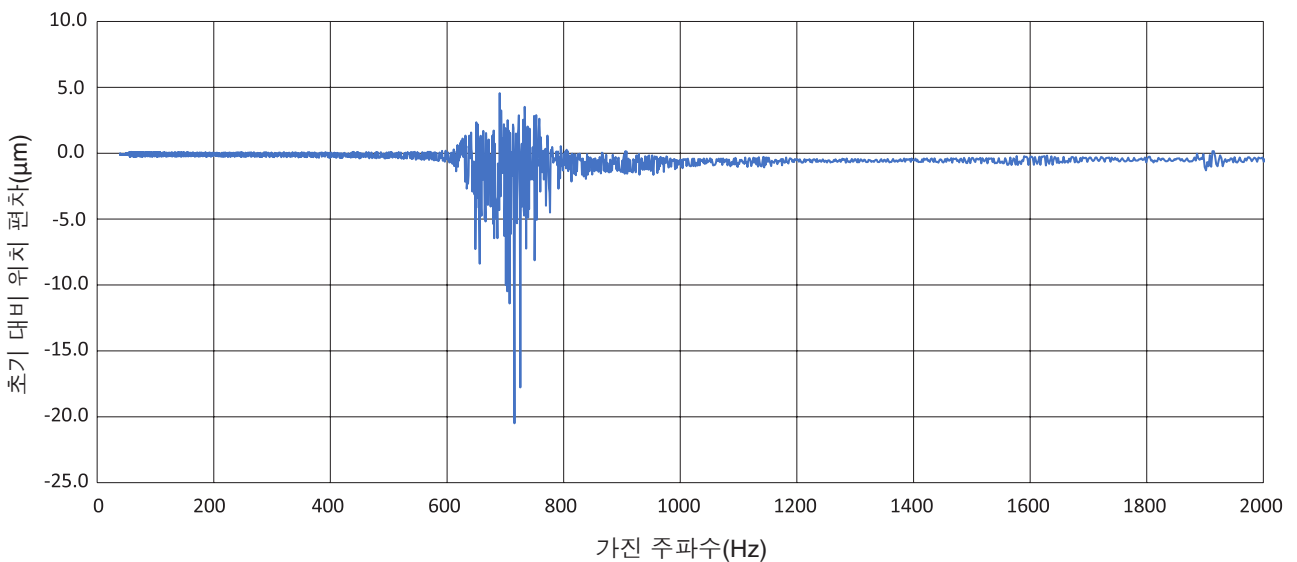
FORTIS-N 엔코더와 경쟁사 제품 비교(직접 장착형)

두 번째 그래프 집합은 경쟁사의 일반적인 엔코더와 비교한 FORTIS-N 엔코더의 위치 편차를 보여 주며, 이번에는 두 엔코더가 모재(테스트 픽스처)에 직접 장착되어 있습니다. 이 테스트에서는 진동 진폭이 10 g이며 해당 진폭이 Z축 방향으로 적용됩니다.

50 - 2,000 Hz의 주파수 범위에서 Z축 방향 진동이 10 g인 FORTIS-N 엔코더
(직접 장착)의 위치 편차

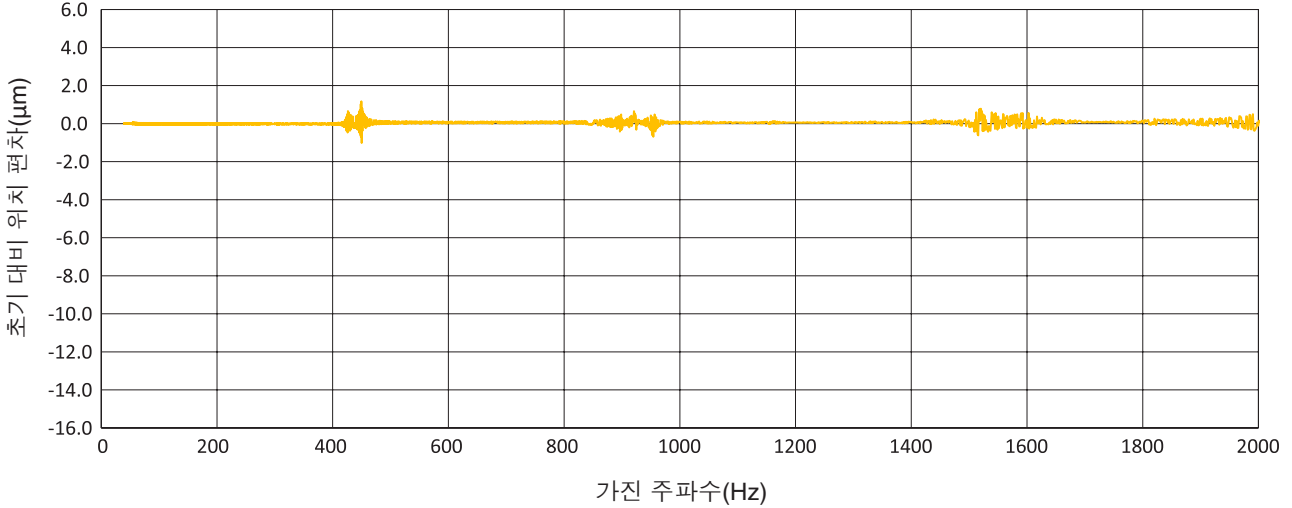


50 - 2,000 Hz의 주파수 범위에서 Z축 방향 진동이 10 g인 기존 엔코더
(직접 장착)의 위치 편차

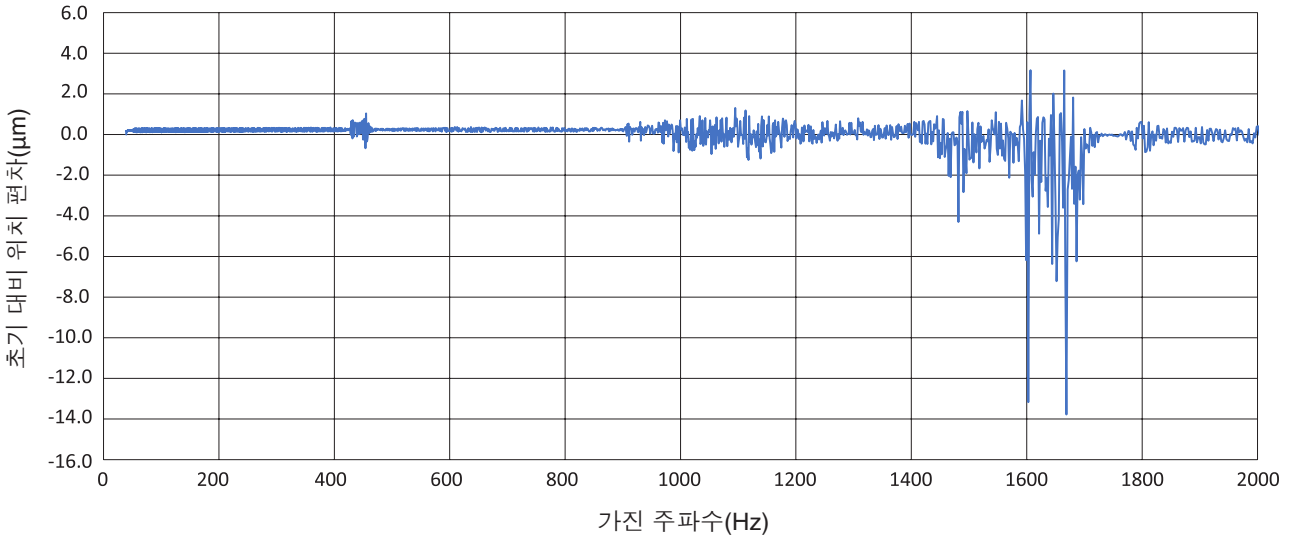


세 번째 그래프 집합에서는 경쟁사의 일반적인 엔코더와 비교한 FORTiS-S 엔코더의 위치 편차를 보여 줍니다. 이 표준 크기 엔코더의 경우 모재(테스트 픽스처)에 직접 장착되어 있습니다. 이 테스트에서는 진동 진폭이 25 g이며 해당 진폭이 Z축 방향으로 적용됩니다.

50 - 2,000 Hz의 주파수 범위에서 Z축 방향 진동이 25 g인 FORTiS-N 엔코더
(직접 장착)의 위치 편차



50 - 2,000 Hz의 주파수 범위에서 Z축 방향 진동이 25 g인 기존 엔코더
(직접 장착)의 위치 편차



결론

FORTiS 엔코더는 광범위한 진동 진폭에 노출되었을 때 50 Hz ~ 2000 Hz의 전체 주파수 스펙트럼에서 우수한 위치 안정성과 신뢰할 수 있는 작업 역량을 제공합니다. 또한 FORTiS 엔코더는 진동이 강한 환경에서 장시간 작업할 수 있도록 지원합니다.

동조 질량 감쇠 기능이 없는 일반적인 밀폐형 엔코더와 비교한 결과, FORTiS 엔코더의 진동 내성이 뛰어난 것으로 나타났습니다. 따라서 FORTiS 엔코더의 우수한 위치 안정성을 통해 공작 기계 분야의 공정 제어 역량을 개선할 수 있습니다.

www.renishaw.co.kr/contact

#renishaw

+82 (0)2 2108 2830

korea@renishaw.co.kr

© 2023 Renishaw plc. All rights reserved. RENISHAW®와 프론트 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-6517-9059-01-A