

누설 검출 시스템의 공장 인수 테스트 시 유의해야 할 사항

## 공장 인수 테스트

공장 인수 테스트(FAT)는 기계, 시스템 또는 장비를 고객에게 인도하기 전, 제조업체의 시설에서 제품을 철저히 점검하는 품질 보증 절차입니다.

주요 목적은 해당 품목이 구매 주문서 또는 계약서에 명시된 모든 사전 정의된 사양, 성능 기준 및 고객 요구사항을 충족하는지 검증하는 것입니다.

공장 인수 테스트는 일반적으로 기능 및 성능 시험, 문서 검토, 안전 점검 및 관련 표준 준수 여부에 대한 검증 과정을 포함합니다.



누설 검출 시스템이 가동 첫날부터 완벽하게 작동하도록 보장하기 위해서는 철저한 공장 인수 테스트가 선행되어야 합니다. 정교하고 체계적인 공장 인수 테스트는 실제 운전 조건에서 정확성, 반복 정확도, 규제 준수 여부를 검증함으로써 막대한 비용이 소요되는 예기치 못한 문제를 방지해 줍니다.

본 가이드는 설치 전 품질을 확보하고, 위험을 최소화하며, 확신을 가지고 시스템을 승인할 수 있도록 돕는 필수 점검 항목들을 다룹니다.

품질 관리를 위해 사용되는 누설 검출 시스템의 공장 인수 테스트(FAT) 시에는 출하 전에 시스템의 성능, 정확도 및 규제 준수를 보장하기 위해 반드시 검토해야 할 특정 고려 사항들이 있습니다. 특히 다음 세 가지 항목이 매우 중요합니다.

### 명확한 인수 기준 정의

- ✓ 요구되는 기능, 정확도, 정밀도 및 규제 준수 기준에 기반하여 상세한 인수 기준을 설정해야 합니다.
- ✓ 실제 사용 환경과 관련된 측정 불확실성, 교정 기준 및 환경 조건이 포함되어야 합니다.

### 상세한 시험 계획 수립

- ✓ 구체적인 측정 테스트, 절차 및 예상 결과를 기술한 포괄적인 시험 계획을 수립해야 합니다.
- ✓ 측정 시스템의 정확도와 신뢰성을 검증하기 위해 실제 가동 조건을 시뮬레이션하는 기능 성능 테스트를 수행해야 합니다.

### 교정 및 문서화

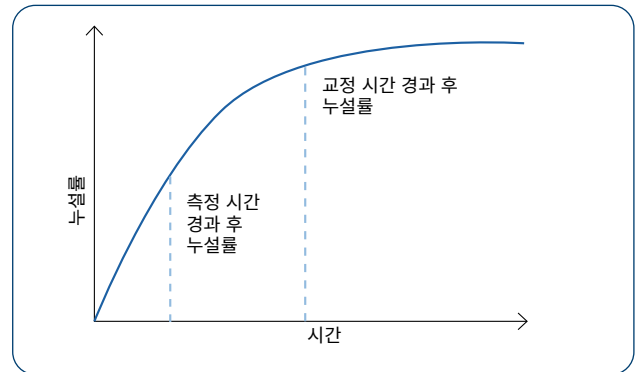
- ✓ 공장 인수 테스트에 사용되는 모든 측정 장비가 올바르게 교정되었으며 교정 유효 기간 내에 있는지 확인해야 합니다.
- ✓ 모든 교정 인증서를 문서화하고 국가 또는 국제 표준에 대한 추적 가능성을 확보해야 합니다.

## 적절한 교정 상태 보장

누설 검출 시스템의 교정은 향후 실제 측정 시와 정확히 동일한 매개변수를 사용하여 수행되어야 하며, 다음 사항에 유의해야 합니다.

### → 교정 시 적용되는 측정 시간을 실제 측정 시간과 동일하게 설정

자동화된 누설 탐지기에서 짧은 사이클 타임과 높은 처리량을 구현하기 위해 누설 탐지기 신호가 상승 중인 상태에서 최대한 이른 시점에 측정이 진행됩니다. 측정 시간이 달라지면 교정 계수 또한 달라집니다. 교정 시 측정 시간이 더 길어진다면, 누설률이 실제보다 높게 표시되고 시스템의 민감도가 과대평가될 수 있습니다.



→ 표준 시험 운전 시와 동일한 추적가스 농도에서 교정 수행

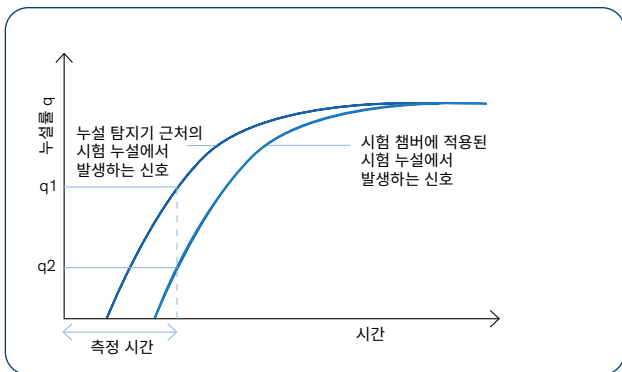
헬륨 100%로 교정을 마친 뒤 시스템을 더 낮은 헬륨 농도로 운용할 경우, 미세한 누설을 감지하지 못하고 지나칠 위험이 있습니다. 교정 누설이 추적가스로 100% 충전되어 있으나 실제 부품에는 더 낮은 농도로 충전되는 경우, 교정 누설에 보정 계수를 적용할 수 있습니다.

→ 교정 시험 누설은 반드시 시험 챔버에 설치

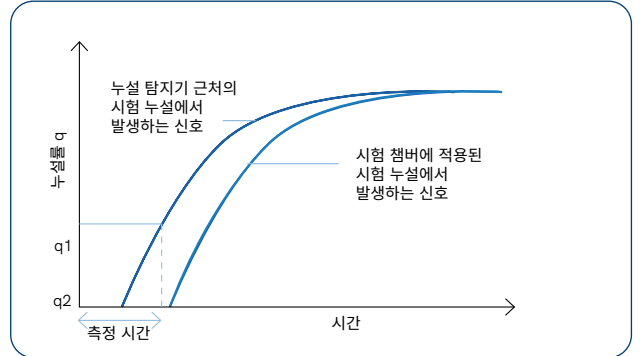


교정된 누설이 누설 검사 챔버에 연결된 상태

가스 유동 경로의 길이에 따라 반응 시간이 달라지므로, 시험 누설 위치는 교정 과정에 영향을 미칩니다. 누설 탐지기 입구에 가까운 시험 누설(또는 내부 시험 누설)은 특정 시점에서 시험 챔버에 설치된 시험 누설보다 더 높은 누설률을 보이게 됩니다.



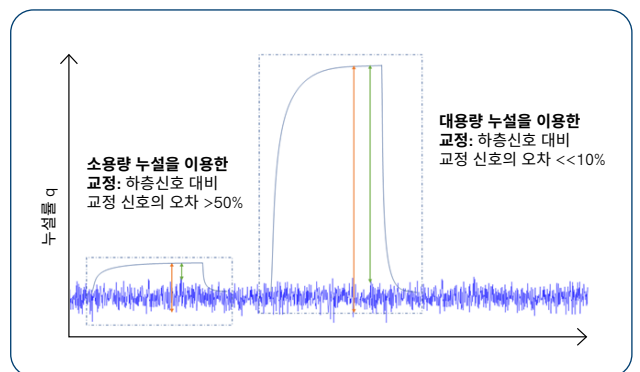
최악의 경우, 누설 탐지기 근처의 누설은 감지되더라도 시험 챔버 측의 누설은 주어진 측정 시간 내에 전혀 감지되지 않을 수 있습니다.



내부 누설 기능(누설 탐지기에 내장)을 사용하는 것은 또 다른 위험을 초래합니다. 때로는 빠른 펌프다운 시간을 달성하기 위해 챔버에 대용량 펌프를 설치하는 경우가 있는데, 이때 챔버 내 유량의 일부만 누설 탐지기로 유입될 수 있기 때문입니다. 이 경우 실제 운전 모드에서는 누설된 가스의 일부만 누설 탐지기에 도달하는 반면, 교정 시에는 전체 누설률이 그대로 반영되는 오류가 발생합니다.

→ 하층신호 값보다 최소 10배 높은 시험 누설로 교정 수행

안정적인 교정을 위해 누설 탐지기가 하층신호와 시험 누설 신호를 명확히 구분할 수 있도록, 항상 하층신호보다 최소 10배 높은 누설률로 교정하는 것이 좋습니다. 이렇게 하면 하층신호의 변동이 교정 신호에 미치는 영향을 최소화할 수 있습니다. 용량이 더 큰 교정 누설을 사용하면 보다 정확하게 교정할 수 있습니다. 특히 미세 누설을 검출할 때는 교정에 적용되는 누설률이 불합격 판정 기준보다 높아야 합니다.



→ 문서화 및 추적성 보장

누설 표준에는 교정된 누설률, 측정 불확실성 및 국가 표준에 대한 추적성이 명시된 교정 인증서가 포함됩니다. 교정 인증서의 유효 기간은 통상 1년입니다. 누설 표준은 해당 기간이 지나면 반드시 재인증을 받아야 합니다. 유효한 인증서가 없는 누설은 교정에 적합하지 않으며, 이는 규제 준수 위반에 해당합니다.

## 검측 성능의 적절한 검증

### → 불합격 판정 기준에 부합하는 최소 검출 가능 누설률의 검증

인수 기준을 충족하는지 여부를 확인하기 위해 (교정 누설과는 별도로) 불합격 판정 기준과 일치하는 시험 누설을 사용합니다. 검증은 시험 챔버에 설치된 누설 또는 동일한 불합격 누설률을 가진 더미 부품을 사용하여 수행할 수 있습니다. 챔버에서 검증용 누설을 사용하는 경우, 탐지기로부터 가장 먼 지점에 배치해야 합니다.



스크루-인 방식의 누설 선택 - 불합격 판정 기준에 맞춘 맞춤형 누설률 이용 가능

정상 가동 시와 동일한 매개변수(측정 시간, 추적가스 농도)를 적용하여 검증용 누설이 정확히 감지되는지 확인합니다. 조절 가능한 스크루-인 누설의 경우, 충전 압력이 표준 운전 압력과 일치하는지 확인해야 합니다.

### → 통계 분석을 통한 충분한 반복성 보장

측정 시스템 분석(MSA)은 측정 시스템의 정확성, 일관성 및 신뢰성을 평가하는 데 사용되는 통계적 방법입니다. 이는 품질 관리에 있어 측정값의 신뢰성을 확보할 수 있도록 장비, 절차, 작업자 또는 환경 요인으로 인한 변동성을 식별합니다.

#### 게이지 반복성 및 재현성(게이지 R&R)

게이지 R&R은 장비 자체에서 발생하는 변동(반복성)과 서로 다른 작업자 간에 발생하는 변동(재현성)의 정도를 측정합니다. 측정 오차로 인한 전체 변동 비율을 산출하여 해당 측정 시스템이 품질 관리에 적합한지 여부를 판별합니다. 일반적으로 게이지 R&R 수치가 30% 미만이면 인수 가능한 수준이며, 10% 미만일 경우 매우 우수한 상태로 간주합니다.

누설 검출 분야의 게이지 R&R 평가는 통상 3명의 작업자가 10개의 시험 부품을 반복 측정하여 측정 변동성을 파악하는 방식으로 진행됩니다. 실제 부품에서 일관된 누설률을 얻기 어려운 경우 (예: 액체 전해질을 사용하는 배터리 셀), 인증된 시험 누설을 대신 사용할 수 있습니다. 부품의 누설률은 기밀 판정 기준에 근접해야 합니다. 누설률 범위가 너무 넓은 부품을 사용할 경우 절대 오차와 상대 오차의 차이로 인해 결과가 왜곡될 수 있습니다.

### 공정 및 측정 시스템 능력 지수

$C_g$ 로 표시되는 게이지 능력 지수는 측정 시스템의 역량을 평가하는 지표입니다.  $C_g$  값이 높을수록(통상  $\geq 1.33$ ) 정밀도가 우수하고 적합한 게이지를 의미합니다. 해당 지수는 다음 공식을 통해 산출됩니다.

$$C_g = \frac{0.2 \cdot T}{6\sigma}$$

여기서 T는 공차(허용 가능한 변동 범위)를,  $\sigma$ 는 표준 편차를 의미합니다. 연관 지수인  $C_{gk}$ 는 측정 시스템의 편향(정확도)까지 반영하여 게이지 역량을 더욱 종합적으로 평가하며, 공식은 다음과 같습니다.

$$C_{gk} = \frac{0.1 \cdot T - |\bar{x}_g - x_m|}{3\sigma}$$

여기서  $\bar{x}_g$ 와  $x_m$ 는 각각 측정 평균값과 시험 누설값을 의미합니다. 시스템이 충분한 역량을 갖추었다고 판단하려면  $C_g$  및  $C_{gk}$  모두 1.33보다 커야 합니다. 보다 상세한 내용은 관련 문헌을 참고하시기 바랍니다.

### → 드리프트 시험 및 재보정 주기(장기 반복성)

측정 시스템 분석은 단기 반복성을 평가하기 위한 훌륭한 지표를 제공하지만, 장기 반복성을 평가하는 것도 매우 중요합니다. 누설 검출 시스템의 신호가 시간이 지남에 따라 서서히 변하는 드리프트의 경우, 단기 반복성은 매우 우수하게 나타날 수 있으나 한 번의 작업 교대 시간 내에서도 신호 드리프트로 인해 상당한 오차가 발생할 수 있습니다.

시스템을 평가할 때는 최소 한 번의 교대 근무 시간 동안, 가급적이면 하루 또는 이틀에 걸쳐 성능을 검증하고, 예를 들어 2시간마다 정해진 주기로 사전에 설정된 주기로 알려진 누설률을 측정해야 합니다. 확인된 드리프트의 정도에 따라 누설 검출 시스템의 적절한 재보정 주기가 결정됩니다. 재보정 주기가 낮은 시스템일수록 사용 편의성이 높고 운용 신뢰성 측면에서도 더 유리합니다.

### → 대량 누설 이후의 적절한 회복 보장

대량 누설이 감지되면 시스템의 하층신호 값이 상승하며, 이어지는 누설 검사 사이클에서 검출 성능이 저하될 수 있습니다. 통상적으로 부품에 추적가스를 충전하기 전에 압력 강하 방식을 이용한 대량 누설 시험이 수행됩니다.

시험 시스템의 거동을 평가하기 위해 대량 누설 사전 시험의 검출 한계치에 해당하는 대량 누설을 의도적으로 발생시킨 후(최악의 시나리오를 나타냄), 곧바로 시험용 누설을 측정하여 이전의 대량 누설 영향으로 후속 누설이 누락되지 않는지 확인해야 합니다.

## 모든 항목 확인하셨나요?



### 적절한 교정 상태 보장

- 교정 시 적용되는 측정 시간을 실제 측정 시간과 동일하게 설정
- 표준 시험 운전 시와 동일한 추적가스 농도에서 교정 수행
- 교정 시험 누설은 반드시 시험 챔버에 설치
- 하층신호 값보다 최소 10배 높은 시험 누설로 교정 수행
- 문서화 및 추적성 보장

### 검측 성능의 적절한 검증

- 불합격 판정 기준에 부합하는 최소 검출 가능 누설률의 검증
- 통계 분석을 통한 충분한 반복성 보장
- 드리프트 시험 및 재보정 주기(장기 반복성)
- 대량 누설 이후의 적절한 회복 보장