제 1 장

계측 방법의 기본 개념

1.1 서론

우리는 일상생활 중에 수많은 계측을 하고 있다. 그날 입을 적절한 옷을 선택하기 위해 습관적으로 온도계의 온도를 읽고, 자동차 연료탱크에 정확히 20리터의 연료를 주입하며, 적절한 자동차 타이어 압력을 조절하기 위해 타이어 압력계를 사용하고, 몸무게를 관찰하기도 한다. 그러나 대부분의 사람은 일상적인 단순한 계측에서 어떠한 계측기를 사용할 것인지 별로 깊이 생각하지 않는다. 왜냐하면 사용하는 계측기와 계측 기술이 일상적이며 익숙하고, 측정 정보를 직접적으로 사용하는 것이 명확하며, 측정값이 충분히 정확하다고 가정하기 때문이다. 그러나 계측 결과의 중요성과 복잡성이 높아지면 적절한 계측기와 계측 기술의 선택, 계측 결과의 질에 매우 신중해야 한다. 단순하게 엔진이 명시된 설계 규격을 만족하는지를 검증하기 위해 필요한 다양한 계측과 테스트 종류를 생각해 보라.

계측의 목적은 질문에 답하기 위해 변수에 수치를 부여하는 것이다. 획득된 정보는 사용한 계측 장치의 결과를 기반으로 하고 있으며, 이 정보를 제조 공정이 올바르게 진행되도록 보장하거나, 결함이 있는 부품을 진단하거나, 계산이나 결정을 위해 필요한 수치를 확보하거나, 공정 변수를 조절하기 위해 사용한다. 계측 장치의 결과가 측정 변수의 참값을 신뢰성 있게 나타낸다는 것을 보장하기 위하여 언급해야 할 중요한 주제들이 있다. 추가로 다음과 같은 중요한 질문도 언급해야 한다.

1. 계측을 통해 구하고자 하는 정확한 정보를 얻기 위해 계측이나 테스트 계획을 어떻게 고안할 수 있을 것인가?

2. 엔지니어가 측정값을 쉽게 해석하고 그 의미에 대한 확신을 가질 수 있도록 계측시스템을 어떻게 활용할 수 있을 것인가?

이러한 계측 관련 질문을 언급하는 절차가 있다.

먼저, 이 책의 주제는 실생활 지향적이라는 점을 강조하고 싶다. 계측시스템과 계측 절차를 구체적으로 결정하는 것은 해답이 유일하지 않은 설계 문제임을 의미한다. 즉, 계측 도전과제를 해결하는 다양한 접근 방법이 존재할 수 있고, 일부 방법은 다른 방법보다 더 좋을 수도 있다. 이 책은 장비, 방법론, 데이터 분석의 선택을 돕기 위하여 계측 도전과제를 해석하기 위한 수용된 절차를 강조한다.

이 장의 학습을 통해, 학생들은 다음의 능력을 갖출 수 있을 것이다.

- 일반적인 계측시스템의 주요 구성요소를 구별할 수 있고 각각의 기능을 말할 수 있다.
- 실험 테스트 계획을 수립할 수 있다.
- 무작위 오차와 계측 오차를 구별할 수 있다.
- 단위 표준의 계층 구조, 테스트 표준과 규격의 존재와 활용에 익숙해질 수 있다.
- 국제 단위 시스템과 실제 종종 접하게 되는 다른 단위 시스템을 이해할 수 있다.
- 유효숫자를 이해하고 사용할 수 있다.

1.2 일반적 계측시스템

계측[1]이란 물리적 변수에 특정한 수치를 부여하는 것이며, 그러한 물리적 변수가 곧 측정 변수가 된다. **계측시스템**은 측정 변수의 정량화에 사용되는 도구이다. 인간의 감각 능력은 거칠기, 길이, 소리, 색, 냄새 등의 다른 정도를 감지하고 인식하는 데에 한계가 있고 상대적이며, 감지된 변수에 특정한 수치를 부여하는 데 매우 능숙하지 않으므로 계측시스템은 이러한 제한된 인간의 능력을 확장시키는 데 사용된다.

시스템은 특정 목적을 달성하기 위하여 함께 작동하는 요소로 구성되어 있다. 우선 특정 예제를 사용하여 계측시스템을 구성하는 요소를 설명한 다음에 일반적 계측시스템 모델로 일반화할 것이다.

센서와 변환기

센서는 측정해야 할 변수를 감지하기 위해 자연적 현상을 이용하는 물리적 요소이다. 이 개념을 설명하기 위하여 표면의 윤곽을 나노미터 크기로 측정하고 싶다고 가정하자. 표면에 근접한 매우 작은 외팔보가 원자 간 힘에 의해 움직이는 것을 알고 있으며, 지금 당장은 이 힘이 반발력이라고 가정하자. 외팔보가 표면 위를 움직임에 따라 외팔보는 표면의 변화하는 높이에 반응하면서 움직일 것이다. 이 개념이 그림 1.1에 나타나 있으며 이 장치가 원자힘 현미경(AFM) 장치에 나타나 있으며, 여기서 외팔보가 바로 센서이다. 이 경우, 외팔보는 표면 높이의 변화에 반응하는 힘에 의해 움직인다.

변환기는 감지된 정보를 검출 가능한 신호로 바꿔 주며, 신호는 기계적, 전기적, 광학적 또는 의미 있

1 고딕체 단어는 이 책 끝부분의 용어 해설을 참조하기 바란다.

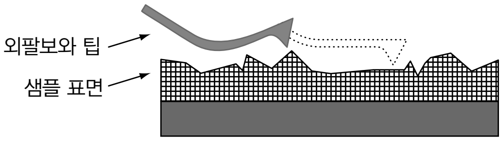


그림 1.1 원자힘 현미경의 센서 단계

게 정량화할 수 있는 기타 형태일 수 있다. 이전 예제를 계속하면, 센서 운동을 정량화할 수 있는 무언가로 바꿀 수 있는 방법이 필요하다. 외팔보의 상면이 반사적이라 가정하고 그림 1.2처럼 레이저를 상면에 비추면 외팔보의 이동은 레이저를 반사시킬 것이다. 광학 센서를 사용하여 반사되는 빛의 변화가 시간에 따라 변화하는 전류 신호로 측정될 수 있으며, 전류 세기가 바로 표면 높이에 해당하게 된다. 레이저와 광학 센서가 계측시스템의 변환기 요소가 된다.

완전한 계측시스템의 익숙한 예제가 수은온도계이다. 그림 1.3과 같은 수은온도계의 벌브 안에 들어 있는 액체는 주변과 열적 평형을 이룰 때까지 에너지를 교환하고, 열적 평형 시점에서 같은 온도가 된다. 이러한 에너지 교환이 이 계측시스템의 입력 신호이다. 액체의 열팽창 현상은 액체가 모세관을 상승, 하강하게 하고, 이것이 온도를 결정할 수 있는 출력 신호가 된다. 벌브 안의 액체가 센서로서 작용한 것이고, 모세관에서 액체를 강제로 확장시킴으로써 이 계측시스템은 열적 정보를 기계적 변위로 변환시킨다. 따라서 벌브의 내부 모세관이 변환기 역할을 한다.

센서 출력 신호가 계측 목적을 정확히 반영하는 것을 보장하기 위하여 센서 선정, 부착 위치, 설치는 특히 중요하다. 결국, 시스템에 의해 표시되는 정보의 해석은 센서에 의해 실제로 감지된 것에 의존하기 때문이다.

신호 처리 단계

신호 처리 단계는 변환기 신호를 취해서 원하는 크기나 모양으로 바꿔 준다. 이 단계는 증폭을 통한 신호 크기 증대, 필터링을 통한 신호의 부분적 제거에 사용될 수 있고, 변환기와 출력 단계 사이의 기계적 또

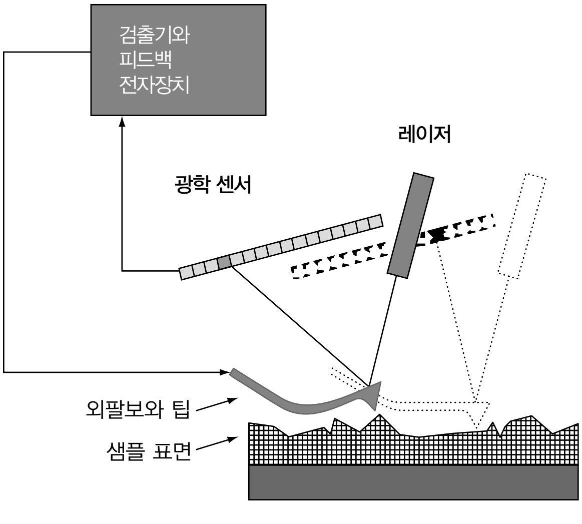


그림 1.2 원자힘 현미경의 센서와 변환기 단계

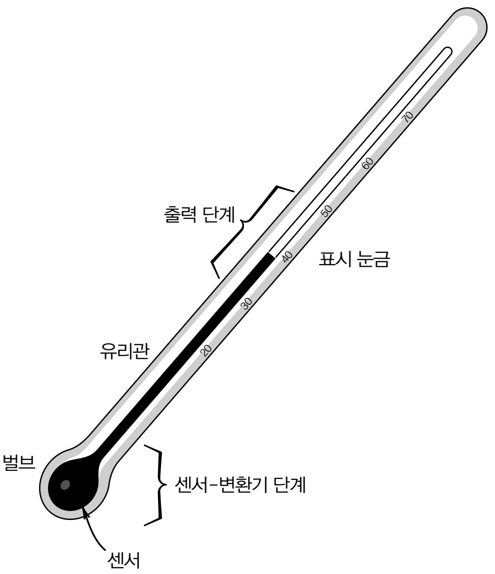


그림 1.3 센서, 변환기, 출력 단계에 해당하는 수은온도계의 구성 요소

는 광학적 연결 도구를 제공하는 데도 사용될 수 있다. 온도계 벌브 체적(그림 1.3)에 대한 모세관 지름은 온도 상승에 따라 액체가 얼마나 올라갈 것인지를 결정한다.

출력 단계

계측시스템의 목표는 감지된 정보를 쉽게 정량화할 수 있는 형태로 변화시키는 것이다. 출력 단계는 계측값을 표시하거나 기록하는 것이다. 출력 장비는 단순한 표시 장치, 눈금, 차후에 접속하여 분석할 수 있는 컴퓨터 메모리와 같은 기록 장치일 수도 있다. 그림 1.3의 수은온도계의 눈금이 출력 단계이다.

부가적으로 '변환기'는 위에서 설명한 센서, 변환기 요소, 심지어는 신호 처리 요소까지를 한 장치에 포함하는 집적된 계측 장치를 참조하는 용어로도 종종 사용된다. 이 용어는 계측시스템 각 단계로서 역할하는 기능을 나타낼 때 사용하는 '변환기'와는 다르다. 두 용어 사용이 모두 옳으며 모두 사용할 것이지만, 하나는 감지된 신호가 어떻게 다른 형태로 변화하는지를 나타내고, 다른 하나는 집적된 장치를 나타낸다는 것을 구별하기 바란다. 용어가 사용된 문맥을 살펴보면 용어의 모호성은 없어질 것이다.

계측시스템의 일반 구조

그림 1.4는 계측시스템의 일반적인 구조를 보여 준다. 본질적으로 계측시스템은 이전에 설명한 (1) 센서−변환기 단계, (2) 신호 처리 단계, (3) 출력 단계의 일부분 또는 전부로 구성된다. 이런 단계들은 계측시스템으로의 입력과 측정해야 할 물리 변수의 값을 추정하는 데 사용되는 양인 출력 사이의 연결 역할을 구성한다. 센서에 의해 획득된 입력 정보와 표시되는 출력 신호 사이의 관계가 어떻게 보정에 의해서 설정되는지는 나중에 논의하겠다.

일부 시스템은 그림 1.4에 나타난 추가적인 단계인 궤환-제어 단계를 사용할 수도 있다. 공정제어에 사용되는 전형적인 계측시스템의 궤환-제어 단계는 측정 신호와 기준값을 비교하는 제어기를 포함하고

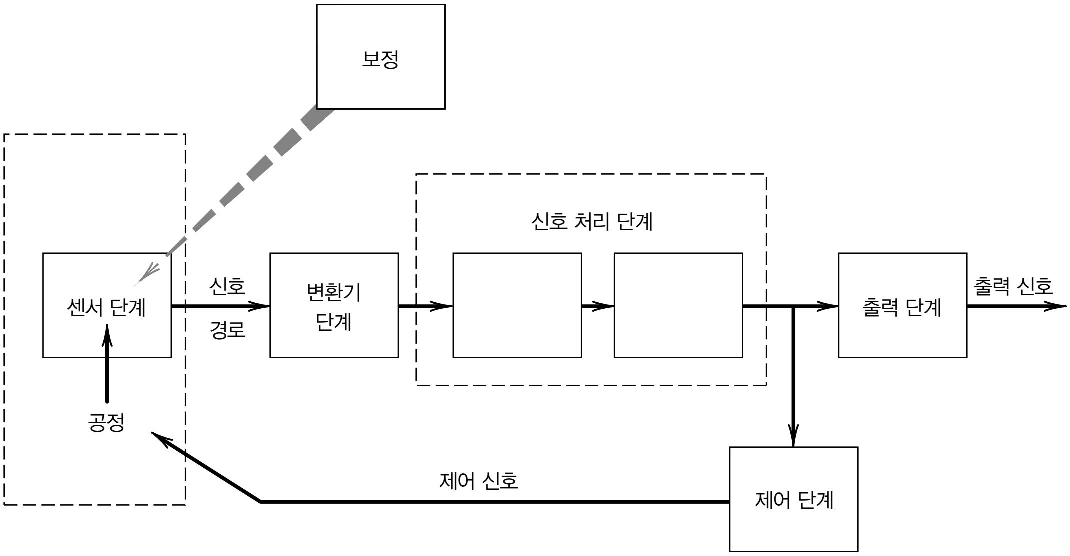


그림 1.4 일반적 계측시스템의 구성 요소

있으며 공정 제어에 필요한 조치를 취하는 결정을 한다. 간단한 제어기에서 이 결정은 신호 크기가 시스템 운영자가 설정한 값을 초과하는지, 즉 높은지 낮은지 여부에 따라 결정된다. 예를 들면, 가정용 난로의 온도조절 장치는 장치 안에 있는 센서에 의해 결정되는 온도가 설정값보다 높거나 낮으면 난로를 작동시킨다. 자동차의 크루즈 속도 제어기도 거의 동일한 방식으로 작동한다. PLC(programmable logic controller)는 많은 변수를 동시에 측정하고 프로그램된 지시에 따라 적절한 시정 조치를 취하기 위하여 사용되는 강력한 산업용 등급의 컴퓨터이자 데이터 획득 장치이다. 제어시스템의 특성은 12장에서 자세하게 논의하겠다.

1.3 실험 테스트 계획

질문에 답하기 위한 측정을 하기 위해 실험 테스트를 계획한다. 따라서 테스트는 오직 그 질문에 대한 답을 하기 위해 계획되고 실행되어야 한다. 예를 들어 보자.

"내 새 차의 연료 사용량이 얼마일까?"라는 질문에 답하기 위해서 테스트 계획을 세우고 싶다. 테스트 계획을 세울 때, 측정할 변수를 확인하겠지만 또한 결과에 영향을 미칠 수 있는 다른 변수들도 세밀히 고려할 필요가 있다. 측정해야 할 두 가지 중요한 변수는 거리와 연료 소모량이다. 주행계와 주유소 연료 펌프의 정확도는 두 계측에 영향을 미칠 것이고, 연료 탱크를 채울 때 일관성 있게 최종 체적을 채우는 것은 추가된 또는 사용된 연료를 예측하는 데 영향을 미친다. 영점 오차로 분류될 수 있는 이 영향은 사실 매우 중요하다. 이 예제에서 알 수 있듯이, 일관된 계측 기법이 테스트 계획의 일부분이 되어야 한다는 것을 추측할 수 있다.

다른 어떤 변수들이 결과에 영향을 미칠 수 있을 것인가? 고속도로, 도심, 시골길, 혼합된 주행 도로

가 결과에 영향을 미치며 독립 변수이다. 운전자도 운전 습관이 다르므로 독립 변수가 된다. 결국 어떻게 측정 데이터를 해석할 것인지는 주요 측정값에 더하여 다른 변수의 영향을 받는다. 만일 목적이 자동차 렌트 회사의 한 차 모델에 대한 차량 평균 연료 사용량을 설정하는 것이라면 테스트는 어떻게 변화해야 할 것인지를 생각해 보라.

테스트 계획에서 요구되는 대답이 얼마나 정확해야 할지를 고려해야 한다. 정확도가 100km당 2L(미국에서는 1갤런당 1마일)이면 충분한가? 만일 그 정도의 정확도를 달성할 수 없다면, 테스트는 다른 전략으로 수립되어야 한다. 마지막으로 부차적인 점검으로 미묘한 실수를 피하기 위한 정상적 점검이나 테스트 결과가 타당한지를 점검하기 위한 방법이 있는가? 이 예제는 흥미롭게도 복잡한 테스트가 가지고 있는 모든 요소를 포함하고 있다. 만일 이 테스트에 영향을 미치는 요인과 어떻게 그것을 가지고 계획을 세울 수 있을지를 개념화할 수 있다면 거의 모든 다른 테스트도 충분히 처리할 수 있을 것이다.

실험 설계는 계측 테스트 계획의 수립과 연관된다. 테스트 계획은 다음과 같이 3단계로 세울 수 있다.[2]

1. **파라미터 설계 계획** 테스트의 목적, 프로세스 변수와 파라미터의 결정, 그들을 제어하기 위한 수단을 결정한다. 질문: "해답을 얻고자 하는 질문이 무엇인가? 무엇을 측정해야 하는가?", "결과에 영향을 미치는 변수와 파라미터는 무엇인가?"
2. **시스템과 공차 설계 계획** 계측 기술, 기기, 오차의 사전 공차 한계에 근거한 테스트 절차를 선택하라.[3] 질문: "어떻게 측정할 수 있을 것인가? 질문에 답하기 위하여 측정 결과는 어느 정도 정확해야 하는가?"
3. **데이터 정리 설계 계획** 데이터를 어떻게 분석, 발표, 활용할 것인지 계획을 세우라. 질문: "어떻게 결과 데이터를 해석할 것인가? 질문에 답하기 위하여 어떻게 데이터를 적용할 것인가? 답은 얼마나 정확한가?

측정하기 전에 테스트 계획의 3단계를 모두 거쳐 보는 것은 공학자로서 성공할 수 있는 좋은 습관이 될 것이다. 종종 3단계는 1단계와 2단계를 다시 고려하게끔 만든다. 앞으로 각 단계를 해결하는 데 도움이 되는 방법을 제시할 것이다.

변수

변수는 테스트 결과에 영향을 미치는 물리량이다. 변수는 본질적으로 연속이거나 이산적이다. **연속 변수**는 범위 안에서 어느 값이든 될 수 있으나 **이산 변수**는 오직 특정한 값이다.

기능에 따라 변수는 종속적, 독립적, 외래적으로 분류될 수 있다. 다른 하나 또는 그 이상의 변수에 영향을 받는 변수는 **종속 변수**이며, 서로 영향을 미치지 않는 변수는 **독립 변수**이다. 종속 변수는 독립 변수의 함수이다. 테스트 결과는 독립 변수의 값에 의해 결정되는 종속 변수이다. 예를 들면, 하중이 작용하는 외팔보의 변형(종속 변수)은 인가된 하중(독립 변수)으로부터 결정된다.

---

2 3단계 전략은 공학시스템 설계에서 사용되는 특정한 설계 기법의 기본과 유사하다(1).

3 이 책의 공차 설계 계획 전략은 불확도(감도) 해석을 도입시킨다. 감도 해석법은 설계 최적화에서 흔한 방법이다.

독립 변수는 종속 변수에 미치는 영향을 파악하기 위해 테스트 과정 동안 의도적으로 변화되거나 고정된다. 제어 변수는 일정한 값으로 유지된다. 테스트 파라미터는 측정되는 프로세스의 거동을 설정하는 제어 변수나 변수 그룹을 말한다. 하중이 작용하는 외팔보에서 보의 치수와 물성치가 파라미터이다. 따라서 프로세스 거동을 바꾸고 싶을 때 파라미터값을 변화시킨다.

공학에서 관성 모멘트나 레이놀즈수와 같은 변수 그룹도 이들이 특정 시스템 거동과 관계가 있을 때는 파라미터로 불린다. 예를 들면, 자동차 현가시스템의 감쇠비는 입력 조건을 변경시킴에 따라 변위 속도가 어떻게 변화할 것인가에 영향을 미친다. 즉 이 파라미터는 조향과 승차감 같은 차량 거동을 측정하는 변수에 영향을 미친다. 통계학에서는 진평균이나 분산과 같이 측정 변수 모집단의 거동을 서술하는 양을 파라미터라고 부른다.

계측 중에 의도적으로 조작되거나 제어되지 않으면서 테스트 결과에 영향을 미치는 변수를 **외래 변수**라고 부른다. 종속 변수는 외래 변수의 영향을 받는다. 테스트 계획에서 적절하게 다뤄지지 않으면, 외래 변수는 잘못된 경향을 야기하거나 측정 변수 거동에 변화를 야기한다. 이러한 영향은 원인과 결과 사이의 명약한 관계를 혼동시킬 수 있다.

'제어'를 다른 용도로도 사용한다. 실험에서의 제어는 측정 중에 특정 신뢰 수준 내에서 독립 변수를 규정값으로 얼마나 잘 유지할 수 있는가를 설명한다. 예를 들어 굽힘보 테스트에서 적용 하중을 103kN으로 설정했다면, 이 하중이 전체 측정 과정 동안 정확히 고정된 값으로 유지될 수 있을 것인가 아니면 반복되는 측정마다 약간씩 변할 것인가? 서로 다른 분야마다 이 용어의 용도에 차이가 있다. 통계에서 제어 그룹은 조사 대상과는 떨어져 있는 것을 나타내지만, 무언가 고정되게 유지한다는 미묘한 차이는 유지하고 있다.

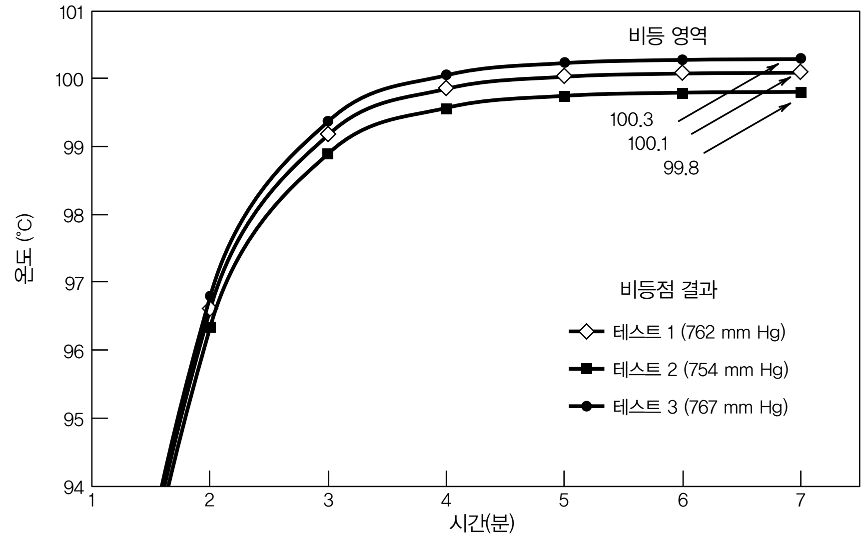


그림 1.5 물의 비등점 테스트 결과

예제 1.1

상변화 현상을 보여 주는 기초열역학 과목의 실험을 생각해 보자. 비등점을 측정하기 위해 비커의 물이 가열되고 어느 시간 동안 물의 온도가 측정된다. 그림 1.5는 같은 실험 장치와 방법을 사용하여 서로 다른 날에 다른 학생 그룹에 의해 측정된 개별 3회 측정 결과이다. 외견상 동일한 세 실험의 데이터가 왜 이렇게 다른 결과를 나타내는가?

알려진 값 서로 다른 3일에 수행된 3회 테스트에 의한 온도-시간 측정 결과

구할 값 물의 비등점

풀이 각 그룹의 학생들은 정확히 100.0℃를 기대했다. 개별적으로 각 테스트 결과는 근접하지만, 비교해 보면 3회의 테스트 결과 중에서 임의의 2개는 확실한 차이가 있다. 계측시스템 정확도와 자연적인 우연에 의해 테스트 사이에 오직 0.1℃ 불일치가 있을 것으로 가정해 본다면 무언가 다른 일이 일어나고 있는 것이다. 그럴듯한 기여 요인은 외부 변수의 영향일 것이다.

다행히, 각 테스트 동안에 실험보조자는 지역 대기압을 기록해 두었다. 비등점(포화온도)은 압력의 함수이다. 각 테스트는 지역 대기압이 제어되지 않았기(테스트 사이에 고정되어 있지 않았기) 때문에 부분적으로 다른 결과들을 보여 준다.

참고사항 여기서 압력 영향을 제어하는 한 방법은 테스트를 대기압 압력실에서 수행하는 것이다. 테스트에서 모든 변수를 직접 제어하는 것은 항상 가능한 것은 아니다. 따라서 외래 변수를 다루는 다른 방법은 특별한 전략을 적용하는 것이다. 테스트를 각 대기압하에서 측정된 단일 데이터 그룹으로 간주해 보자. 그리고 3개의 테스트 데이터 그룹을 통합해 보라. 이와 같은 방법으로 측정된 대기압이 독립변수인 것처럼 취급될 수 있으며, 그 영향이 전체 데이터 집합에 통합될 수 있다. 다시 말하면, 압력의 차이를 실제 이용하여 비등점에 미치는 압력의 영향을 연구할 수 있다. 이것이 이 장의 후반부에서 논의하는 절차인 무작위화라고 불리는 의미 있는 제어 취급 방식이다. 중요한 변수를 잘 파악하고 제어하지 않으면 퍼즐을 푸는 것과 같은 혼란을 각오해야 한다.

예제 1.2 사례 연구

미국 내 골프카 산업은 매년 거의 10억 달러 매출을 기록하고 있다. 특정 모델 골프카 제작사는 핸들 지지대의 원하지 않는 진동을 감소시킬 수 있는 해결책을 찾았다(그림 1.6). 공학자가 진동의 원인을 가스 구동 엔진으로 찾아냈으며 엔진을 특정 속도(분당 회전수)에서 운전할 때 일관되게 나타났다. 회사 경영진은 비용이 많이 드는 현가장치의 개선은 배제했기 때문에 공학자는 핸들에서의 진동을 감소시킬 수 있는 저비용의 의견을 들여다보았다.

테스트 규격 ANSI S2.70-2006(17)을 센서 설치와 결과 해석의 가이드로 활용하여 가속도계(12장에서 논의)를 핸들 지지대, 엔진, 현가장치, 차체에 설치했다. 계측시스템 연결은 그림 1.4를 따랐다. 각각의 가속도계 센서-변환기로부터의 신호는 신호 처리 전하 증폭기(6장)를 거쳐서 노트북 기반 데이터 획

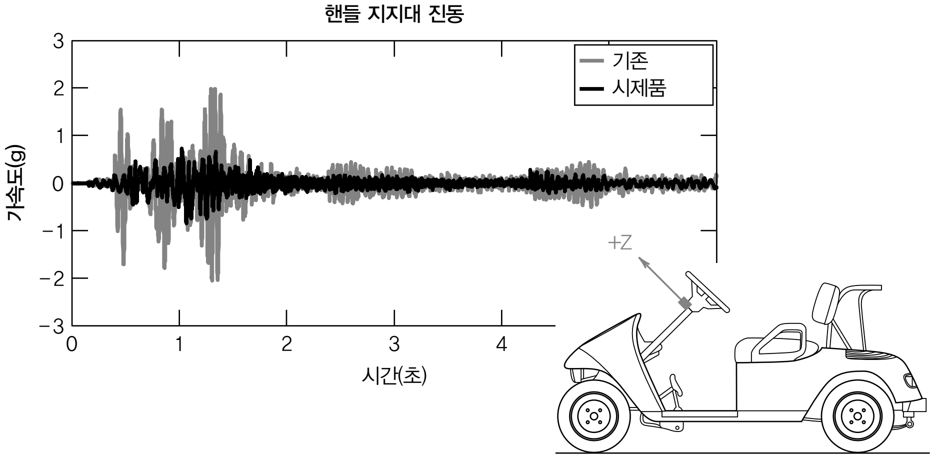


그림 1.6 엔진 구동 실험 동안 측정된 핸들에서의 시간에 따른 가속도 신호: 기존 신호와 제안된 해결책이 적용된 모델에서 진폭이 감소한 신호

득 시스템(DAS, 7장)에 전달된다. 증폭기는 변환기 신호를 데이터 획득 시스템 입력 범위에 적합하도록 0~5 V 신호로 바꿔 준다. 데이터 획득 시스템은 전압계, 출력 표시, 시간에 따른 기록계 역할을 한다.

측정 결과는 핸들에서의 치명적 진동이 지지대의 자연주파수(20 Hz)에서 발생했다. 이 진동은 엔진의 정상 운전 속도(1,000~2,200 rpm)에 해당하는 17~37 Hz의 가진 함수 주파수에서 강화되었다. 조향 장치에 대한 파라미터 변수 모델(3장)로부터 약간 무거운 핸들 지지대를 쓰면 자연 주파수를 엔진의 공회전 속도 아래로 낮출 수 있으며, 따라서 높은 엔진 속도에서 강화되는 진동의 진폭(3장)을 감소시킬 수 있겠다고 결정했다. 분석은 검증되었고, 테스트 결과에 근거해서 장치는 개선되었다. 엔진 구동 기간 측정된 진동 신호를 기존 경우와 제안된 개선이 반영된 시제품에 대해 그림 1.6에 비교하였다. 진동의 최대 진폭이 제안되어 검증된 해결책에 의해 안락한 수준으로 감소되었음을 보여 주고 있다. 제작사는 저비용의 개선책을 추진하였다.

참고사항 이 예제는 기계 테스트에 적용된 계측이 문제를 진단하고 수식화한 후, 제안된 해결책을 검증하기 위하여 어떻게 필요한 정보를 제공하는지를 보여 주고 있다.

잡음과 간섭

외래 변수가 측정 데이터에 어떻게 영향을 미치는지는 잡음과 간섭으로 나타낼 수 있다. 잡음은 측정 신호의 불규칙적인 변화로 데이터의 산포를 증가시킨다. 건물의 진동, 주변 조건의 변화, 도체를 통과하는 전자의 불규칙한 열적 잡음 등이 측정 신호에서 나타나는 불규칙적 변화의 흔한 외래 근원의 보기이다.

간섭은 측정 신호에 바람직하지 않은 특정 경향을 부가한다. 전기 장치에 흔한 간섭이 교류 전원에 기인하며, 측정 신호에 중첩된 사인파로 나타난다. 대중 음향 장치의 윙윙거리는 소리나 음향 궤환은 얻고

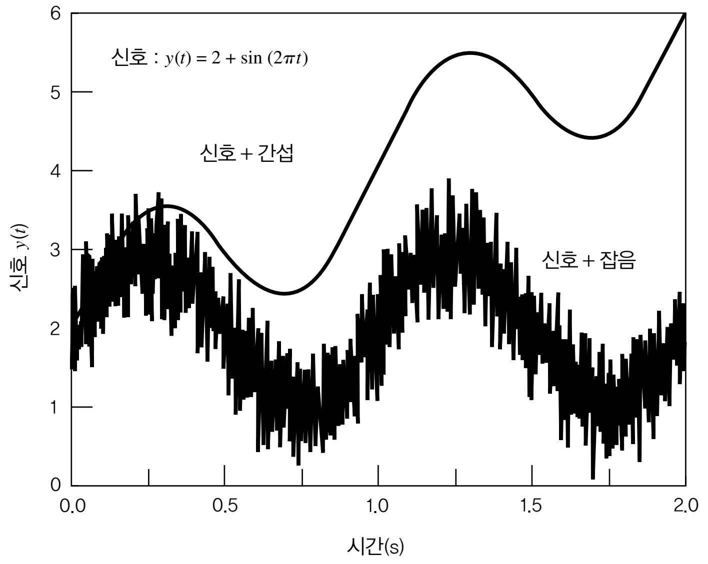


그림 1.7 신호 $y(t)=2+\sin 2\pi t$에 중첩된 잡음과 간섭의 효과

자 하는 신호에 중첩된 간섭 효과의 대표적 예이다. 때때로 간섭은 명백하지만, 만약 간섭 주기가 측정 주기보다 길게 되면, 잘못되게 중첩된 경향을 찾지 못할 수도 있다. 따라서 목표는 간섭의 근원을 제어하거나 간섭의 경향을 분해하든지 해야 한다.

예를 들어, 신호 $y(t) = 2 + \sin 2\pi t$에 대한 잡음과 간섭의 효과를 보자. 그림 1.7에 보이듯이, 잡음은 신호의 산포를 증가시킨다. 하지만 통계적 기법이나 다른 방법을 이용하여 불투명함 속에서도 선별하여 원하는 신호 정보를 추출할 수 있다. 반면 간섭은 신호에 잘못된 경향을 부가시킨다. 테스트 계획은 이러한 경향을 분해하여 데이터에 불규칙적인 변화로만 나타나도록 고안되어야 한다. 비록 이것이 데이터 측정값의 산포를 증가시키지만, 잡음은 신호의 결정적 측면은 감출 수 있으나 변화시키지는 못한다. 따라서 데이터의 잘못된 경향을 제거하는 것이 무엇보다 중요하다.

예제 1.1에서 무작위적이지만 측정된 서로 다른 대기압에서의 3회 테스트를 데이터군 하나로 결합함으로써 특정 한 테스트에서는 결과에 나타날 수밖에 없는 차이를 분해하면서, 제어할 수 없는 압력 영향을 비등점 결과에 포함할 수 있었다. 이러한 접근 방법은 다른 제어하기 어려운 변수들에 대한 제어 방법을 제시해 준다. 의도는 테스트 계획에서 고려하지 못한 효과를 무력화시키는 것이다.

무작위화

공학 테스트는 종속 변수에 미치는 영향을 결정하기 위해 하나 또는 그 이상의 독립 변수를 의도적으로 변화시킨다. **무작위화**는 독립 변수의 변화를 불규칙 순서로 놓는 테스트 전략이다.

종속 변수 y가 여러 독립 변수 x_a, x_b, …의 함수인 일반적 상황을 검토해 보자. 독립 변수에 대한 y의 의존성을 찾기 위하여 독립 변수는 정해진 방식으로 변화된다. 그러나 y의 계측은 몇 개의 외래 변수 z_j ($j = 1, 2, \cdots$)의 영향을 받으므로 $y = f(x_a, x_b, \cdots ; z_j)$이다. z_j 변수가 테스트에 미치는 영향을 제거할 수는 없지만, y값에 잘못된 경향을 초래하는 가능성은 무작위화 전략을 사용함으로써 최소화시킬 수 있

다. 한 가지 접근 방법은 독립 변수를 조정하는 순서를 무작위화하는 것이며, 이 방법은 연속적인 외래 변수에 잘 작동한다.

예제 1.3

그림 1.8의 압력 보정 시스템에서 알고 있는 압력 p가 압력변환기에 작용한다. 압력 증가는 장치의 탄성판 센서를 변형시켜 기계적 변위로 감지된다. 변환기는 변위를 전압계로 측정할 수 있도록 전압으로 바꾼다. 측정 접근 방법은 피스톤-실린더 안에 있는 기체를 압축하는 피스톤의 변위를 측정하여 가해진 압력을 제어하는 것이다. 기체는 이상기체법칙을 따른다. 그러면 피스톤 변위 x는 실린더 체적 $\forall = (x \times$ 면적)을 결정하게 되고, 실린더 압력과 쉽게 연관된다. 따라서 알고 있는 실린더 압력이 변환기 출력 신호와 연결될 수 있다. 이 보정에서 독립 변수와 종속 변수, 가능한 외래 변수를 결정하라.

알려진 값 그림 1.8의 압력 보정 시스템

구할 값 독립 변수, 종속 변수, 외래 변수

풀이 센서는 실린더 기체 압력에 노출된다. 압력변환기 출력 신호는 실린더 압력에 따라 변할 것이다. 따라서 종속 변수는 실린더 기체 압력이며 또한 변환기에 작용하는 압력이다. 이 보정의 독립 변수는 피스톤 변위이며 체적을 결정한다. 이 문제의 파라미터는 이상기체 상태방정식 $p\forall/T =$ 일정[T는 기체 온도, $\forall = (x \times$ 면적)]에서 정해질 수 있다. 이 파라미터는 기체 압력이 온도에 의존함을 보여 주고 있으며, 따라서 기체 온도도 독립 변수이다. 피스톤 변위를 변화시켜 체적은 변화하지만 온도는 실린더 기체를 일정하게 유지시킬 수 있는 장치만 있다면 제어될 수 있다. 하지만 T와 $\forall$는 본질적으로 독립적이지 않다. 실린더 체적은 온도의 함수이며 $p = f(\forall, T)$[여기서 $\forall = f_1(x, T)$]이다. 만일 실린더 온도가 일정하게 유지되면, 체적에 적용된 변화만이 압력에 영향을 미치는 변수, 즉 희망한 대로 $p = f(\forall, T)$가 될 것이다.

만일 기체 온도가 제어되지 못하거나 주위 환경 영향이 실린더와 변환기 온도를 제어하지 못하고 변하게 되면, 온도는 외래 변수 z_1이 된다. 즉,

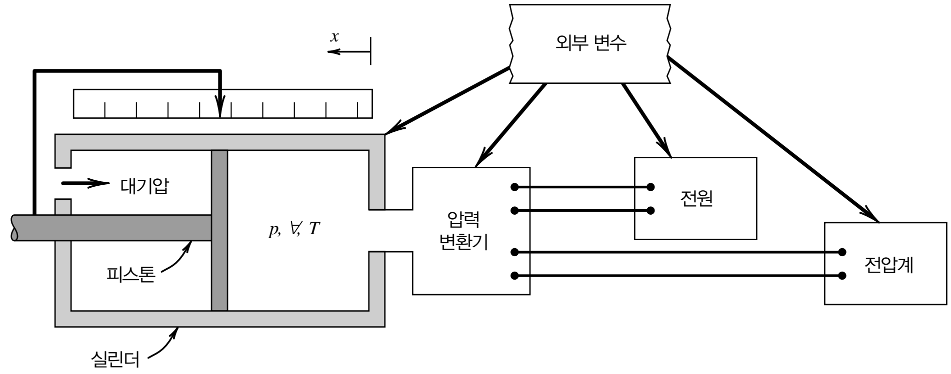


그림 1.8 압력 보정 시스템

$$p = f(\forall, z_1), \text{ 여기서 } \forall = f_1(x, T)$$

참고사항 크지는 않지만, 전원 전압의 변화와 전기적 간섭 z_2가 전원 공급 장치부터 변환기까지 구동 전압에 영향을 미치거나 전압계 성능에 영향을 미칠 수 있지만 이러한 검토가 철저한 것은 아니다.

예제 1.4

예제 1.3에서 논의된 제어할 수 없는 온도 영향 때문에 생기는 간섭을 최소화할 수 있는 테스트 계획을 세워라.

알려진 값 제어 변수 $\forall$를 변위 x를 통해 변화시키며 종속 변수 p를 계측한다.

구할 값 제어할 수 없는 실린더 체적의 열적 팽창이 측정 압력에 미칠 수 있는 가능한 영향을 무작위화하라.

풀이 실험 전략의 일부는 체적을 변화시키고 압력을 측정하는 것이다. 만일 제어되지 않은 온도 변화가 실린더 체적과 연관된다면, 즉 $\forall = f(T)$이면 이것이 간섭 효과가 될 수 있다. 이 효과는 체적 $\forall$를 적용하는 순서를 뒤섞는 무작위 테스트를 사용하여 무작위화할 수 있다. 체적이 증가하는 순으로 6개의 체적 $\forall_1$, $\forall_2$, $\forall_3$, $\forall_4$, $\forall_5$, $\forall_6$이 있다고 하자. 체적은 변위와 면적에 의해서 결정되며 어떠한 순서라도 괜찮을 것이다. 가능한 예는

$$\forall_2 \forall_5 \forall_1 \forall_4 \forall_6 \forall_3$$

테스트 파라미터로부터 고정된 기체 온도에서 압력은 체적 $\forall$에 따라 선형적으로 변화할 것이 기대된다. 계측을 무작위 순서로 하면 z_1에 의한 간섭 경향은 분해될 것이다. 이러한 접근 방법은 변환기, 구동 전압, 전압계에 영향을 미치는 주변 여건 효과로부터 발생하는 간섭 경향을 분해하는 데도 역시 기여한다.

다른 검사자, 다른 기기, 다른 테스트 조건을 사용하는 것이 계측 결과에 영향을 줄 수 있는 이산적 외래 변수의 예이다. 이산 영향을 최소화하기 위해 테스트 계획을 무작위화하는 것은, 무작위 블록을 이용한 실험 설계 기법을 사용하여 효과적으로 수행할 수 있다. 데이터 집합을 구성하는 하나의 블록은 외래 변수는 고정된 상태에서 독립 변수를 변화시키면서 측정된 변수(종속 변수)로 구성된다. 외래 변수는 블록 사이에서 변한다. 이렇게 함으로써 무작위화를 통해 이산적 외래 변수에 대한 약간의 국지적 제어가 가능해진다.

앞에서 논의한 차 연료 사용 예에서 다른 운전자(외래 변수)가 비슷한 도로를 주행하여 해당 차에 대한 연료 사용량을 평균하는 블록으로 구성되는 여러 블록을 고려할 수 있다. 예제 1.1에서 단일 테스트에서 발견되는 간섭 효과를 분해하기 위하여, 다른 대기압에서 수행된 다수의 테스트(블록)를 사용하는 전략을 적용하였다. 데이터 분석을 위한 발전된 통계적 방법이 존재하듯이, 무작위 블록에 대한 많은 전략이 존재한다(참고문헌 2~5).

예제 1.5

특수한 복합재료의 제조 과정에서 겔을 생산하기 위해 수지와 결합재를 무게비로 혼합해야 한다. 이 겔은 레이업이라는 수동 공정에서 복합재료를 만들기 위해 섬유를 주입하는 데 사용된다. 완료된 재료의 강도 σ는 겔의 결합재 비율에 의존하지만 레이업 작업자에게도 의존한다. 재료 강도와 결합재 혼합비의 관계를 설정할 수 있는 테스트 행렬을 세워 보라.

알려진 값 $\sigma = f$(결합재, 작업자)

가정 재료 강도는 결합재와 작업자에 의해서만 영향을 받는다.

구할 값 작업자의 영향을 무작위화하기 위한 테스트 행렬

풀이 종속 변수 σ는 독립 변수인 결합재 혼합비에 대해 시험된다. 실제 제조에서 작업자는 외래 변수이다. 간단한 테스트로 세 가지 혼합비 A, B, C에 대한 재료 강도를 측정할 수 있다. 또한 세 작업자 (z_1, z_2, z_3)가 세 혼합비에 대해 각각 N개의 시험 샘플을 만들어 세 블록의 테스트 패턴을 얻을 수 있다.

블록				
1	z_1:	A	B	C
2	z_2:	A	B	C
3	z_3:	A	B	C

테스트 결과를 분석할 때에는 모든 데이터를 합친다. 각 블록의 결과에는 각 작업자의 영향이 나타날 것이다. 각 블록 안에서의 작업 순서는 중요하지 않다고 가정한다. 그러나 만약 한 작업자의 데이터만 고려된다면, 결과는 그 작업자의 레이업 기술과 일치하는 경향을 나타낼 것이다. 따라서 위에서 보인 테스트 행렬은 어느 한 작업자가 재료 강도 시험 결과에 미치는 영향을 여러 작업자의 영향을 도입함으로써 무작위화시킬 것이다.

예제 1.6

레이업 공정 후 예제 1.5의 복합재료는 제어되는 고온에서 경화된다고 하자. 결합재 혼합비, 경화 온도, 재료 강도 사이의 관계를 알고 싶다. 적절한 테스트 행렬을 만들어 보라.

알려진 값 $\sigma = f$(결합재, 온도, 작업자)

가정 재료 강도는 결합재, 온도, 작업자에 의해서만 영향을 받는다.

구할 값 작업자의 영향을 무작위화하기 위한 테스트 행렬

풀이 독립 변수인 결합재 혼합비, 경화 온도에 대한 복합재 강도의 의존성을 시험하기 위한 간단한 행렬을 만들고자 한다. 예제 1.5에서와 같이, 혼합비의 세 그룹과 온도의 세 그룹, 총 18번의 별개의 테스트를 만들 수 있다. 다른 방법으로는 세 혼합비 A, B, C와 세 작업자 z_1, z_2, z_3에 대하여 세 온도 T_1, T_2, T_3를 선정하여 단일 무작위화시킨 블록을 나타내는 3×3 테스트 행렬을 만들 수도 있다. 어느 작업자도

동일한 테스트 조합을 1회 이상 수행하지 않도록 블록을 구성하면, 어느 한 작업자의 특정 혼합비와 온도에 대한 영향을 무작위화할 수 있다.

	z_1	z_2	z_3
A	T_1	T_2	T_3
B	T_2	T_3	T_1
C	T_3	T_1	T_2

참고사항 제안된 테스트 행렬은 외래 변수를 무작위화시킬 뿐만 아니라, 혼합비와 온도에 대해 세 블록을 직접 사용하는 경우에 비하여 테스트 횟수를 반으로 줄였다. 어느 방법이라도 무방하다. 위 행렬이 라틴 사각형이다(참고문헌 2~5).

중복과 반복

일반적으로 측정 변수의 추정값은 측정 횟수에 비례해서 개선된다. 단일 테스트나 배치에서 같은 변수에 대하여 되풀이하여 이루어지는 측정을 **반복**(repetition)이라 한다. 반복은 테스트 조건에서의 측정 변수의 변동을 정량화할 수 있다. 예를 들어 베어링 제조회사의 경우, 몇 개의 베어링을 측정하는 것보다는 많은 베어링을 측정함으로써 수천 개 베어링 한 묶음의 평균 지름과 분산에 대한 더 좋은 추정값을 얻을 수 있다.

일련의 계측이나 테스트를 독립적으로 복제한 것을 **중복**(replication)이라 한다. 중복은 비슷한 조건하에서 수행된 복제된 테스트 사이에서 발생하는 측정 변수의 변동을 정량화할 수 있다. 만일 베어링 제조회사가 베어링의 평균 지름이 특정 기계와 검사자에 의해 작업 개시와 종료 시 얼마나 밀접하게 제어될 수 있는지에 관심이 있다면, 서로 다른 날에 수행되는 복제된 테스트가 필요할 것이다.

만일 베어링 제조회사가 다른 기계나 작업자에 의해 생산된 베어링의 평균 지름이 얼마나 밀접하게 제어될 수 있는지에 관심이 있다면, 다른 요소들을 사용한 복제 테스트가 답이 될 것이다. 여기서 중복은 다른 베어링 기계나 작업자에 의한 간섭 효과를 무작위화하는 방법이 된다.

예제 1.7

실내 난로의 온도 조절기를 생각해 보자. 특정 온도를 설정한 후 실내 온도를 반복 측정하여, 특정 설정 온도에서의 실내 온도의 평균과 변화량을 알 수 있다. 반복은 설정 조건을 평가할 수 있고 얼마나 잘 유지할 수 있는지를 알 수 있다.

이제 설정 온도를 다른 임의값으로 바꾸었다가 얼마 후 원래 설정값으로 바꾸고, 중복 측정한다. 두 테스트 데이터는 서로 중복이다. 두 번째 테스트의 평균 온도가 처음 테스트의 평균 온도와 다를 수도 있다. 달라진 평균값은 방의 온도를 설정하고 제어하는 능력에 대해 무언가 제시하고 있다. 즉, 중복은 측정 조건을 얼마나 잘 재현할 수 있는지를 평가할 수 있는 정보를 제공한다.

부수적 방법

측정은 잘 되고 있는가? 측정에서 어떤 결괏값을 기대해야 하는가? 이런 질문에 대한 답을 도울 수 있는 좋은 전략이 측정 계획에서 **부수적 방법**을 도입하는 것이다. 목적은 각각 다른 방법에 근거한 둘 또는 그 이상의 결과에 대한 추정값을 구하는 것이고, 서로 일치하는지 확인을 위해 비교할 수 있다. 이것은 추가적인 변수를 측정해야 할 필요가 있는 것처럼 실험 계획에 영향을 줄 수 있다. 또 다른 방법은 측정에서의 기댓값을 추정하는 해석이 될 수도 있다. 한 방법이 다른 방법이 합리적인지를 점검하는 데 사용되기 때문에 두 방법이 동일한 정확도를 가질 필요는 없다. 예를 들어, 알고 있는 재료로 만들어진 봉의 체적을 구하고자 할 때 첫째, 봉의 지름과 길이를 측정하는 방법과 둘째, 봉 무게를 측정하여 재료의 비중으로부터 체적을 계산하는 방법이 있다. 두 번째 방법은 첫 번째 방법을 보완하며, 첫 번째 추정값이 적절한지에 대한 중요한 점검 수단이 될 수 있다.

1.4 보정

보정이란 시스템 출력을 관찰할 목적으로 알고 있는 값을 계측시스템에 입력시키는 것이다. 보정은 입력과 출력과의 관계를 설정한다. 보정에 사용되는 알고 있는 값을 **표준**이라 한다.

정적 보정

보정의 가장 일반적인 유형은 정적 보정이다. 이 과정에서 시스템에 값을 입력하고 시스템 출력을 기록한다. 입력한 표준값은 허용 가능한 수준으로 알려져 있다. '정적'이란 용어는 입력값이 시간과 공간에 따라 변하지 않거나 평균값이 사용된다는 것을 의미한다.

일정 범위의 알고 있는 값을 입력하고 출력값을 관찰함으로써, 계측시스템에 대한 보정 곡선을 구할

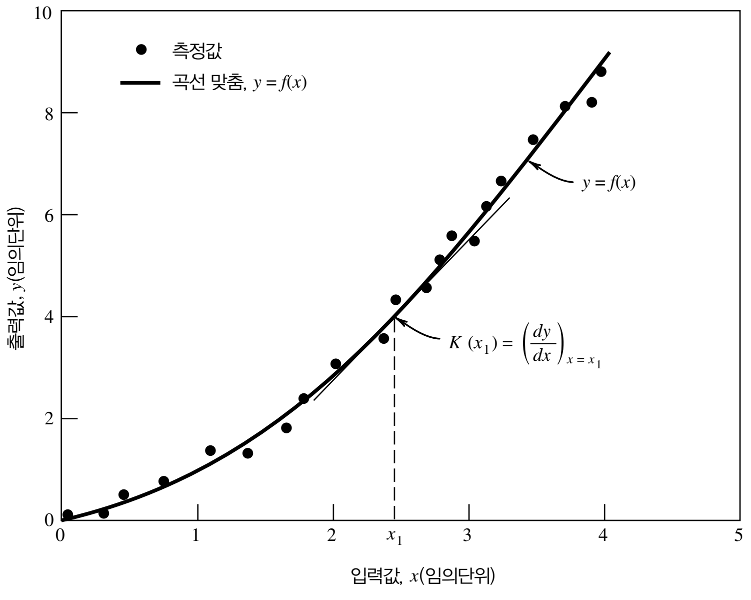


그림 1.9 전형적인 정적 보정 곡선

수 있다. 보정 곡선은 그림 1.9와 같이 입력 x를 가로축에, 출력 y를 세로축에 그린다. 보정에서 입력값은 독립 변수이고, 측정 출력값은 종속 변수이다.

정적 보정 곡선은 계측시스템의 정적 입력-출력 관계를 설명하며, 실제 측정에서 표시되는 출력을 해석하는 논리를 형성한다. 예를 들면, 보정 곡선은 그림 1.3에 나타낸 바와 같이 계측시스템의 출력을 표시하는 눈금을 결정하는 기초가 된다. 또한, 보정 곡선은 입력과 출력 사이의 상관식으로 알려진 함수 관계를 구하는 데 일부분 사용될 수 있다. 상관식은 $y = f(x)$의 형태이며 물리적 의미를 적용하고 보정 곡선을 곡선 맞춤하여 결정된다. 그러면 상관식은 나중에 계측시스템에 표시된 출력값으로부터 미지의 입력값을 알아내는 데 사용할 수 있다.

동적 보정

관심 변수가 시간(또는 공간) 의존이고 시간에 따른 변화 정보가 요구될 때 동적 정보가 필요하다. 넓은 의미에서 동적 변수는 크기와 주파수 성분 모두 시간(또는 공간)에 의존한다. **동적 보정**은 동적 거동을 알고 있는 입력과 출력 사이의 관계를 결정한다. 예를 들면, 시간과 공간에서 출력 신호가 정확히 입력값을 따라가는가, 지연은 있지 않은가, 출력값이 입력 주파수에 의존하지 않는가? 대개 이러한 보정은 알고 있는 진폭과 주파수의 삼각함수 신호나 계단 함수 신호를 입력 신호로 적용한다. 계측시스템의 동적 응답은 3장에서 자세히 설명한다.

정적 감도

정적 보정 곡선의 기울기를 계측시스템의 **정적 감도**[4]라 한다. 그림 1.9의 보정 곡선에서 나타내었듯이 어느 특정 정적 입력값 x_1에서의 정적 감도 K는 다음과 같다.

$$K = K(x_1) = \left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=x_1} \tag{1.1}$$

여기서 K는 입력값 x의 함수이다. 정적 감도는 정적 입력의 주어진 변화에 대응하는 출력 지시값의 변화를 관계 짓는 수단이다.

범위와 전폭

보정은 계측시스템이 사용되는 최솟값부터 최댓값 사이의 알고 있는 입력값을 적용하는 것이다. 이 한계를 시스템의 **동작 범위**라고 한다. 입력 전 동작 범위(full-scale operating range, FSO)는 x_{min}에서 x_{max}까지로 정의된다. **전폭**은 범위 한계의 차이이다. 예를 들면, 범위가 0에서 100 N인 변환기의 전폭은 100 N이다. 입력 전폭은 다음과 같이 표현된다.

$$r_i = x_{max} - x_{min} \tag{1.2}$$

출력 전 동작 범위는 y_{min}에서 y_{max}까지이다. 전 동작 범위의 출력 전폭은 다음과 같이 표현된다.

---

4 일부 교재에서는 정적 이득이라고도 한다.

$$r_o = y_{\max} - y_{\min} \tag{1.3}$$

분해능

분해능은 측정값에서 분별할 수 있는 최소 증가량을 나타낸다. 계측시스템의 측면에서 분해능은 최소 눈금 증가량 또는 출력 계기판의 최소 카운트(최소 유효 자리)에 의해 정량화된다.

정확성과 오차

변수의 정확한 값이 **참값**이다. 계측시스템에 표시된 변숫값이 **측정값**이다. 계측의 **정확성**은 참값과 측정값이 얼마나 가깝게 일치하는지를 나타낸다. 그러나 공학 현장에서 참값은 결코 정확히 알 수 없으며, 오차로 불리는 다양한 요인이 영향을 미친다. 이것은 계측의 정확성이라는 개념이 정성적 개념이라는 것을 의미한다.

대신에 일치 정도를 나타내는 적절한 접근법은 측정 오차를 파악하여 연관된 불확도로 정량화하는 것이다. 불확도는 오차의 추정 범위이다. **오차** e는 측정값과 참값의 차이이다. 즉

$$e = \text{측정값} - \text{참값} \tag{1.4}$$

오차의 정확한 값은 알 수 없으므로 식 (1.4)는 단지 정의의 기준이 되는 역할만 한다. 오차는 존재하며 식 (1.4)로 주어지는 크기를 가지고 있다. 때때로 출력값 수정이 근사적이기는 하지만, 추정되는 오차를 반영하기 위해 출력값을 수정할 수 있다. 이 개념을 다음에 논의하고 5장에서 폭넓게 확대할 것이다.

종종 오차의 추정은 장치의 보정 중에 참값 대신에 사용된 기준값을 근거로 한다. 이 기준값에 근거한 상대 오차는 다음과 같이 추정된다.

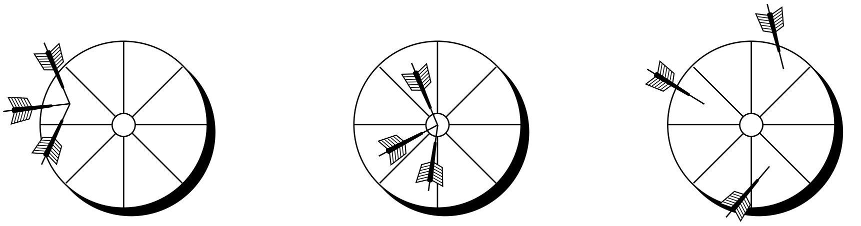
$$A = \frac{|e|}{\text{기준값}} \times 100 \tag{1.5}$$

일부 공급회사에서는 이 용어를 '상대 정확성'이라고 부르고 있다.

무작위 및 계통 오차와 불확도

오차로 인해 측정값은 참값과 다르게 된다. **무작위 오차**(random error)는 변수의 반복된 측정에서 발견되는 측정값의 무작위적 변동을 야기하는 반면에 **계통 오차**(systematic error)는 데이터의 평균값과 참값 사이의 치우침을 야기한다.

정확성의 개념과 장비와 계측시스템의 계통 오차, 무작위 오차의 효과를 다트 던지기로 설명할 수 있다. 그림 1.10의 다트판을 생각하자. 목적은 화살을 중심 과녁 안으로 맞추는 것이다. 중심 과녁은 참값, 각 투척은 측정값을 비유한다고 생각할 수 있다. 투척의 오차는 중심 과녁과 꽂힌 지점 사이의 거리로 계산할 수 있다. 그림 1.10(a)에서 투척자는 매번 화살이 표적의 동일한 위치에 반복하여 꽂히는 우수한 반복성(즉, 낮은 무작위 오차)을 보여 주지만, 매번 중심 과녁을 빗나가서 정확하지는 않다. 오차의 평균이 계통 오차의 추정이 된다. 무작위 오차는 각 투척 간 변동의 평균이며 그림 1.10(a)에서는 거



(a) 우수한 반복성은 낮은 무작위 오차를 나타내지만, 정확하다고는 할 수 없다.

(b) 높은 정확성은 낮은 무작위 오차와 계통 오차를 의미한다.

(c) 계통 오차와 무작위 오차는 좋지 않은 정확성을 초래한다.

그림 1.10 다트 던지기: 무작위 오차, 계통 오차, 정확성의 예시

의 0이다. 적은 무작위 오차가 이 투척자의 정확성을 나타내는 완전한 지표는 아니라는 것을 알 수 있다. 이 투척자는 과녁 좌측으로의 치우침, 계통 오차를 가지고 있는데, 이 계통 오차 효과만 줄일 수 있다면 이 투척자의 정확성은 개선될 것이다. 그림 1.10(b)의 투척자는 던질 때마다 중심을 맞추었으므로 높은 정확성을 나타낸다. 산포도 치우침도 거의 0이다. 높은 정확성은 이처럼 낮은 무작위 오차와 계통 오차와 관련되어야 한다. 그림 1.10(c)의 투척자는 판 여기저기 꽂혀 좋지 않은 정확성을 보여 주고 있다. 던질 때마다 오차의 크기가 다르다. 계통 오차의 추정은 투척에서 나타난 오차의 평균인 반면, 무작위 오차의 추정은 각 투척에서 나타나는 오차의 변동 정도와 관계되며 통계적 방법에 의해서 추정된다. 투척자의 무작위 오차와 계통 오차는 4장에서 논의되는 통계적 방법과 5장에서 논의되는 비교 방법을 사용하여 계산한다.

보정과 같이 값을 일정하게 유지하면서 거의 정확히 알고 있는 변수를 측정하는 계측시스템을 가정해 보자. 예를 들어, 독립적인 10회 계측으로 그림 1.11과 같은 결과를 얻었다. 측정값의 변동, 즉 데이터의 산포는 변수 측정에 연관된 무작위 오차와 관계된다. 이러한 산포는 주로 (1) 계측시스템과 계측 방

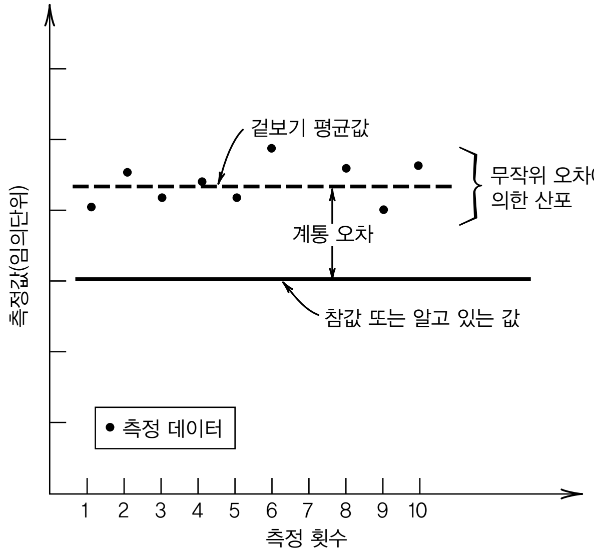


그림 1.11 보정 데이터에서의 무작위 오차와 계통 오차의 영향

법, (2) 측정 변수에 나타나는 자연스런 변동, (3) 변수의 제어되지 못하는 변동에 기인한다. 그러나 측정값의 겉보기 평균값과 참값 사이의 차이는 이 계측시스템에서 예측되는 계통 오차에 대한 척도를 제공해 준다.

불확도

불확도(uncertainty)는 변수의 표시값에서 오차의 가능한 범위에 대한 수치적 추정값이다. 계측에서는 참값을 전혀 모르기 때문에 오차를 정확히 알 수 없다. 하지만 가능한 정보에 근거하여 측정자는 오차가 표시값의 상하 일정 범위 내에 있음을 확신할 수 있는데 이 범위가 불확도이다. 불확도는 계측시스템 보정, 데이터 집합의 통계 처리, 계측 기술에 존재하는 각각의 오차에서 발생한다. 개별 오차는 장치, 테스트 방법, 분석, 계측시스템의 특성이며, 불확도는 테스트 결과의 특성이다. 그림 1.11에서 데이터의 산포를 기반으로 무작위 오차, 즉 무작위 불확도를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 계통 불확도는 부수적 방법에 의해 구한 값과의 비교를 기반으로 한 차이로부터 추정할 수 있다. 알려진 모든 오차의 추정에 근거한 불확도는 표시된 결과에 나타난다. 측정 결과에 있어서의 모든 불확도 평가 방법은 5장에서 자세히 다룰 것이다.

장비나 계측시스템 사양의 불확도는 대부분 계측시스템, 보정 절차, 알고 있는 값으로 제공되는 표준 등에 본질적으로 존재하는 다양하면서도 상호작용하는 무작위 오차, 계통 오차의 결과이다. 대표적인 압력 변환기에 영향을 미치는 일부 알려진 보정 오차의 보기를 표 1.1에 나타내었다. 각각 표시된 오차가 불확도이다.

순차적 테스트

순차적 테스트는 바라는 입력 범위에 걸쳐서 입력값을 순차적으로 변화시키는 것이다. 전 입력 범위에 걸쳐서 입력값을 증가(상승 방향)시키거나 감소(하강 방향)시키면서 수행할 수 있으며 출력값이 측정값이다.

표 1.1 대표적인 압력 변환기에 대한 제조회사의 사양

동작	
입력 범위	0~1,000 cm H_2O
전원	±15V DC
출력 범위	0~5V
온도 범위	0~50℃
성능	
선형성 오차	FSO의 ±0.5%
히스테리시스 오차	FSO의 ±0.15% 이내
감도 오차	측정값의 ±0.25%
열적 감도 오차	측정값의 ±0.02%/℃
열적 0점 오차	FSO의 ±0.02%/℃

FSO 전 동작 범위

히스테리시스

히스테리시스 오차란 순차적 테스트에 의해 값을 증가시키면서 측정한 결과와 감소시키면서 측정한 결과 사이의 차이를 말한다. 순차적 테스트는 계측시스템에서 히스테리시스 오차를 규명하고 정량화하는 효과적인 분석 기법이다. 그림 1.12(a)는 순차적 테스트에 의한 보정 곡선에서 나타나는 히스테리시스 효과를 보여 주고 있다. 시스템의 히스테리시스 오차는 불확도 $\mu_h = (y)_{상승} - (y)_{하강}$으로 추정된다. 계측시스템의 히스테리시스는 표 1.1과 같이 최대 히스테리시스 오차의 출력 전폭 r_o에 대한 백분율에 근거한 불확도로 대부분 나타낸다.

$$\%u_{h_{\max}} = \frac{u_{h_{\max}}}{r_o} \times 100 \tag{1.6}$$

히스테리시스는 계측시스템의 출력이 이전 표시된 값에 의존할 때 발생한다. 이런 의존성은 움직이는 부분의 마찰이나 점성 감쇄, 전기 장치에서의 잔류 전하 등과 같은 시스템 한계 때문에 발생할 수 있다.

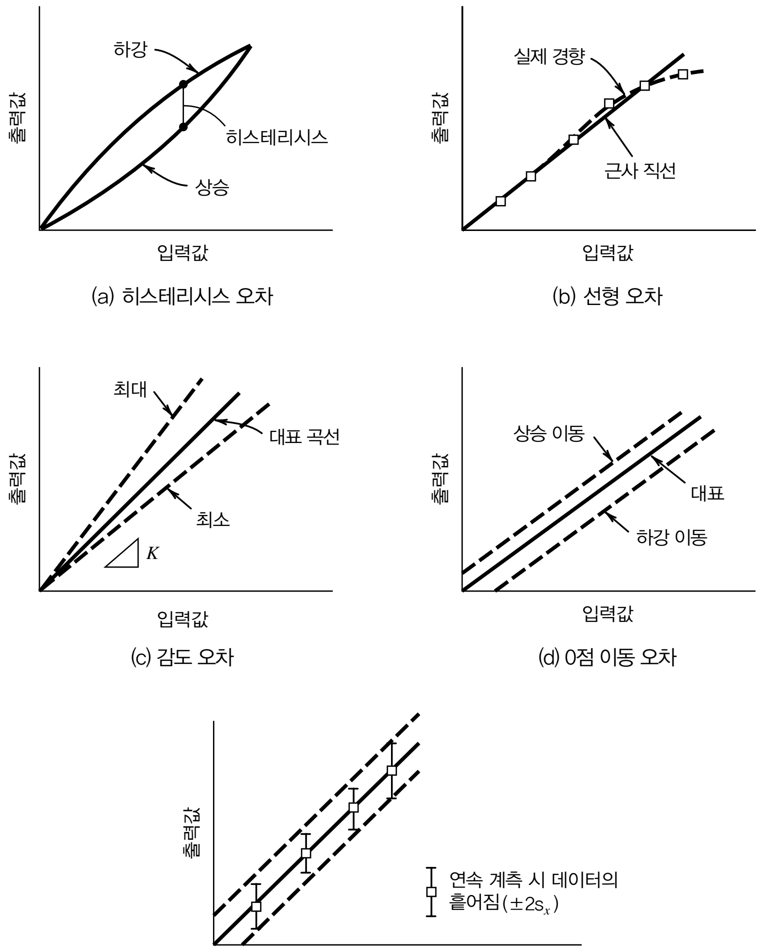


그림 1.12 계측기 오차 요소의 예.
(a) 히스테리시스 오차
(b) 선형 오차
(c) 감도 오차
(d) 0점 이동 오차
(e) 반복 오차