

측정 (Measurement), 측정학 (Metrology)

Reference (참고문헌)

- 한국표준과학연구원, 측정학 강의 자료

Radiation Detection & Measurement

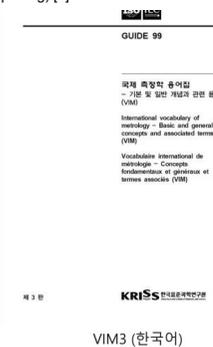
Ionizing Radiation

- We “detect” (existence)
 - Charged particles (α , β), neutral particles (γ , n, ν)
 - Non-ionizing radiation
- We “measure” (known existence)
 - Energy spectrum: energy given to the detection media
- And could we “sense” ?
 - Position and timing: requires signal processing
- Then we can “visualize” invisible things (imaging)
 - Incident direction via imaging methods
 - Radiography: X-ray, gamma ray, neutron, muon, etc.



측정학 (Metrology)

VIM3: JCGM 200:2012 — *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms* (<http://www.bipm.org>) [1].



측정학의 기초 용어

- **측정(Measurement):**
 - 어떤 양에 대하여 합리적으로 여겨지는 하나 또는 그 이상의 값을 실험적으로 얻는 과정 (VIM3)
 - 양을 결정하기 위한 일련의 작업(KOLAS-G-020)
- **양(Quantity):**
 - 수와 기준으로 표시할 수 있는, 크기를 갖는 현상, 물체 또는 물질의 성질 (VIM3)
 - 어떤 기준을 바탕으로 크기(number)를 정해줄 수 있는 현상 이나 물체 또는 물질의 성질
- **값(Value):** 숫자와 기준에 의해서 표현되는 양의 크기(magnitude)
- **측정결과(Measurement result):**
 - 측정량에 대한 값의 집합과 이용할 수 있는 관련 정보(VIM3)
 - 측정량에 부여되는 값의 집합에 대한 정보(즉, 값과 불확도!!)



측정이란?

다음 중 측정이 아닌 것은?

1. 이 방의 온도는 몇도 인가 알아보자.
2. 이 환자의 혈당량을 알아본다.
3. 지금이 몇 시인지 알아본다.
4. 공기중의 이산화탄소 농도를 알아본다.
5. 우리 공장의 이산화탄소 배출량을 추정한다.
6. 우리 애들의 IQ를 테스트한다.
7. 다섯 사람을 키 큰 순서대로 번호를 정한다.
8. 인사사고를 위해 KPI 달성도를 평가한다.
9. 개인 연봉을 결정한다.
10. 대입 합격생을 선정한다.

측정학

측정학이 필요한 이유

1. 공정한 거래를 위해
 2. 생산하는 제품의 품질을 보장하고 혁신하기 위해
 3. 안전하고 건강한 삶의 질을 위해
 4. 환경관리를 위해
 5. 효과적인 규제를 위해
- 공정하고 신뢰할 수 있는 측정을 위해 필요!!

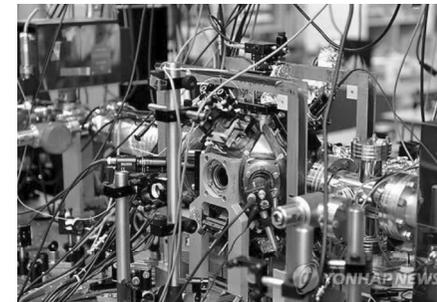


당신이 마신 술의 양을 알고 있대



측정학

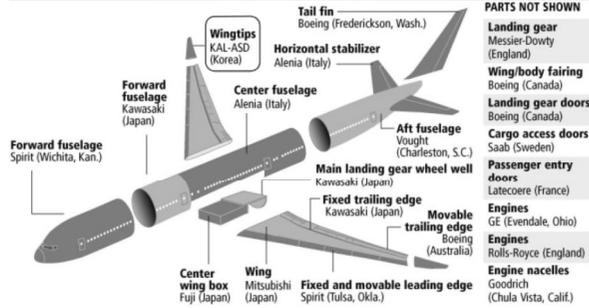
측정학이 필요한 경우: 연구분야



Yb 광격자 시계, 1억년에 1초 오차(한국표준과학연구원)

측정학

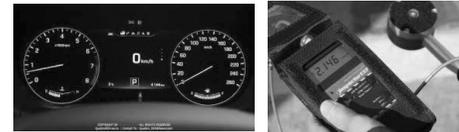
측정학이 필요한 경우: 산업분야



Boeing 787 드림라이너 글로벌 아웃소싱

측정학

측정학이 필요한 경우: 일상생활



언제, 어디서나...

측정학

측정학이 필요한 경우: 법정계량 및 규제분야



'평', '돈'은 비법정계량단위!
 g과 m³를 사용해요~



CT 찍고 또 찍고... 한국인들, 의료 방사선 被曝 심각

병원 출가(의) 찍은 데 또 찍어
 2011년 411만명이 CT 촬영
 그 중 9만명이 한 달 내 또...

20~30대, 유방촬영술에 로망
 프라카 유전자에 반영 있으면
 검사 피폭으로 유방암 확률 커져

피폭량 관리 조절 시스템 필요
 한번에 여러 부위 찍지 말고
 짧은 기간내 반복 촬영 피해야

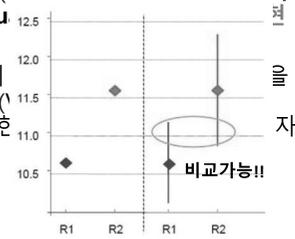
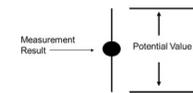
의료 방사선 검사로 받은 피폭 수준

일반: 영동/신체/신선/방사선 촬영	8~10 mSv 이하 부위 CT	의료 방사선 피폭 줄이는 요령
국립 방사선 안전 연구원	10~15 mSv 이하 부위 CT	필수 부위 CT를 한 달 내 재촬영하는 것은 피해야. CT를 찍을 때 흉부 등 여러 부위를 한 번에 검사하는 것은 피해야.
5~10 mSv 이하 부위 CT	0.2~0.34 mSv 이하 부위 CT	건강진단용 방사선 CT를 찍고 나서 다른 부위 CT를 찍는 것은 피해야. 촬영 시 호흡을 참지 말고 숨을 참지 마세요.
국립 방사선 안전 연구원	20~30 mSv 이하 부위 CT	자신의 촬영 기간과 검사/의료 방사선 피폭량을 의료인에게 알리세요.
국립 방사선 안전 연구원	200 mSv 이하 부위 CT	검사 후 피폭 받은 수 있도록 검사 소견을 따라주세요.

※ 참고: 진단방사선은 법정계량 또는 규제 대상은 아님

측정학의 기초 용어

- 측정단위(Measurement unit):**
 - 같은 종류의 양들의 비율을 수로 나타낼 수 있게 해주는, 협약에 의해 정의되고 채택된 스칼라 양
- 측정표준(Measurement standard, etalon):**
 - 기준으로 사용되는, 명시된 양(quantity)이 같고 미연계된 측정 불확도를 가지는, 주어진 양(quantities)
- 불확도(Uncertainty):**
 - 정보를 기초로 하여, 측정량에 나타내는 음이 아닌 파라미터 (parameter)가 측정값이 얼마나 확실/불확실한지를 나타내는 것



측정의 신뢰도

(1) 나의 측정결과가 유용한가?

- 측정결과는 비교할 수 있어야만 유용하다.
- 다른 측정결과와 비교: 경향을 관찰하기 위하여
- 한계값과 비교: 행동을 결정하기 위하여
- 다른 장소/다른 시간에 측정된 결과: 시공간을 초월한 비교가능성



측정의 신뢰도

(2) 내가 측정한 결과는 과연 정확한가?

- 오늘 실시한 측정을 한 달 후에 다시 해도 같은 결과가 나올까?
- 다른 동료가 실시해도 같은 결과가 나올까?
- 다른 기관에서 측정을 실시해도 같은 결과가 나올까?
- 우리 나라에서 측정한 결과와 다른 나라에서 측정한 결과가 같을까?
- 다른 방법으로 측정하면 결과가 달라지지 않을까?



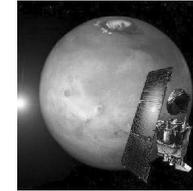
측정의 신뢰도

(3) 잘못된 측정에 의한 재앙

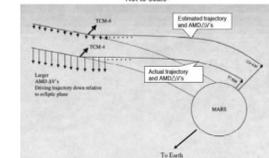
프로그램 단위오차 탓에..화성 궤도위성 실종 1999년 화성기후 관측위성(MCO)의 궤도진입 실패

- 전송받은 추력 데이터의 단위는 국제 표준 단위인 1 (N·s)으로 표시되어야 하는데, 미 국식인 4.45 (l b·s)를 사용했다. 원래 프로그램 개발 사양서에는 모든 단위를 국제 표준 단위를 사용하도록 지시되어 있었지만 어찌된 일인지 지켜지지 않았다.
- 비표준 단위를 사용하려면 적절한 단위 변환이 이루어져야 했는데 단위 변환 없이 전 송받은 값을 그대로 사용했다.
- 위성 궤도 모델에 사용된 속도 차이는 4.45 배만큼 작은 값이 사용되었고, 9 개월에 걸친 항해 동안 이 오차가 발견되지 않고 계속 누적되면서 결국 위성 궤도가 정확하게 예측되지 않았던 것이다.

※ 손실: 6,000 억원



Schematic MCO Encounter Diagram
Not to scale



측정에서 고려할 요소: 단위

(1) 국제단위계(SI)

- 현재 세계 대부분의 국가에서 채택하여 사용하고 있는 단위계
- 프랑스어 'Le Systeme International d' Unites' 에서 온 약어로서 '국제단위계'를 가리킨다.
- '미터법'이라고 부르며 사용하여 오던 단위계가 현대화된 것으로, 1960년 제11차 국제도량형총회(CGPM)에서 결정
- SI는 7개의 기본 단위가 바탕을 이루고 있으며, 이 밖의 다른 모든 단위는 이 들로부터 유도되는데, 그 중 21개의 유도단위는 편의상 특별한 명칭이 주어져 있음.

International System of Measurement



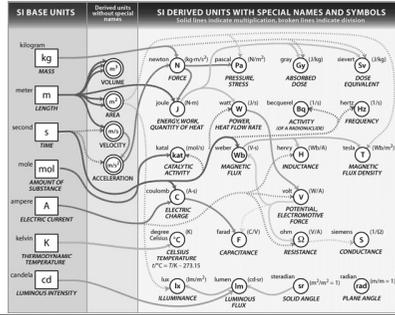
Mass	Kilogram (kg)
Length	Meter (m)
Time	Second (s)
Temperature	Kelvin (K)
Electric Current	Ampere (A)
Amount of Substance	Mole (mol)
Luminous Intensity	Candela (cd)



측정에서 고려할 요소: 단위

SI 단위의 특징

- 각 속성(또는 물리량)에 대하여 한가지 단위만을 사용
(예, 길이에 대해 m만 사용. Inch, feet, 마이크로(μ), 자(R) 등의 같은 단위를 사용하지 않음)
- 모든 활동분야에 적용: 과학기술 또는 상업 등 모든 분야
- 일관성 있는 체계: 기본단위를 바탕으로 이들의 곱이나 비의 형식으로 모든 양을 나타낸다.



측정에서 고려할 요소: 단위

SI의 사용법

- 본문의 활자체와 관계없이,
 - 단위기호는 로마체[직립체], 양의 기호는 *이탈릭체(기울임체)*
 - 단위는 일반적으로 소문자이나, 명칭이 고유명사에서 유래한 것일 경우 기호의 첫 글자를 대문자로 씀 (문장의 시작에 위치해도 단위는 소문자임)
- [보기] 양: m (질량), t (시간) 등 / 단위: kg, s, K, Pa, GHz 등
- 단위기호는 복수의 경우에도 변하지 않음, 점을 찍지 않음
[보기] 5 s이며; 5 s.(문장 끝 예외), 5 sec., 5 sec, 또는 5 secs 아님
- 어떤 양을 수치와 단위기호로 나타낼 때 그 사이를 한 칸 띄어야 함 (단, 평면각의 도, 분, 초 기호와 수치 사이는 띄지 않음)
[보기] 35 mm, 30 °C이며; 35mm, 30°C 아님
25°, 25° 24', 25°, 24', 23" 등은 옳음
- ※ 긴수자를 표기할 때 소수점을 중심으로 세 자리씩 묶어서 (반칸 정도) 띄어 쓴다.
- ※ 소수점의 기호로 프랑스식은 반점(.), 영국식은 온점(°)이 사용된다.

측정에서 고려할 요소: 단위

SI의 유래

- SI 단위의 시초: 1790년 프랑스에서 발명된 십진미터법
- CGS 단위계: 1874년 과학분야에서 CGS 단위계 도입 (cm - g - s)
1875년-17 개국이 미터협약에 조인
- MKS 단위계: 1900년경 실용적인 MKS 단위계 도입 (m - kg - s)
- MKSA 단위계: 1901년 G. Giorgi가 역학 및 전기단위의 통합 제안
1935년 IEC가 전기단위로 암페어, 쿨롱, 옴, 볼트 중 하나 채택 추천
1939년 전기자문위원회(CCE, 현재 CCEM)에서 암페어(A) 선정
1946년 국제도량형위원회에서 승인
- 국제단위계: 1954년 제 10차 국제도량형총회(CGPM)에서 온도의 단위 켈빈도(°K), 광도의 단위 칸델라 채택
1960년 제 11차 CGPM에서 이 실용단위를 국제단위계 (SI)로 정함.
- 현재의 국제단위계(SI): 1967년 °K → K, 광도의 칸델라(cd) 추가
1971년 물질량 단위 몰(mole) 추가
- 우리나라: 1961년 계량법을 제정하면서 MKS 단위를 법정단위로 채택하고
1999년 국가표준기본법을 제정하면서 SI 단위를 채택

← 약 40 년

측정에서 고려할 요소: 단위

발전하는 단위의 정의

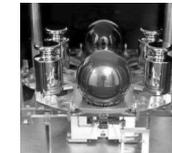
- 단위 신정의
- 2007년 제 23차 국제도량형총회(CGPM)에서 과학기술발전에 따라, 기존에 정의되었던 SI 단위를 재정의하고자 하는 안건이 제출
- 질량(kilogram), 전류(ampere), 온도(kelvin) 및 물질량(mol)에 대해 새로운 정의를 적용하는 것을 주요 내용으로 함



현재 kg의 정의 및 원기 (BIPM)



질량 신정의를 위한 Watt balance (한국표준과학연구원)



질량 신정의를 위한 Silicon Avogadro sphere (NPL)

측정에서 고려할 요소: 교정

(2) 교정(Calibration)

- 명시된 조건 하에서, 첫 번째 단계로 측정표준에 의해 제공된 양(quantity)의 값(측정불확도 포함)과 대응되는 지시값(연계된 측정불확도 포함) 사이의 관계를 확립하고, 두 번째 단계로 지시값에서 측정결과를 얻는 관계를 확립하기 위해 첫 번째 단계의 정보를 이용하는 작업.

→ 지시값과 표준에 의해 표시된 대응값 사이의 관계를 확립하는 작업

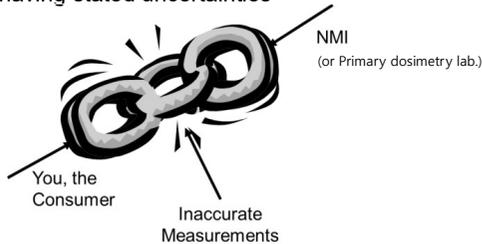


측정에서 고려할 요소: 소급성

(3) 소급성(Traceability)

- 문서화된 끊어지지 않은 교정의 사슬을 통하여 측정결과를 기준에 결부시킬 수 있는 측정 결과의 특성이며, 각 단계는 측정불확도에 기여한다.

Unbroken chain of comparisons to the SI units,
all having stated uncertainties



측정에서 고려할 요소: 불확도

(4) 불확도(Uncertainty)

~ 1984 : 측정(대상)량의 추정값이 가질 수 있는 오차의 한계
(A measure of the possible error in the estimated value of the measurand as provided by the result of a measurement)

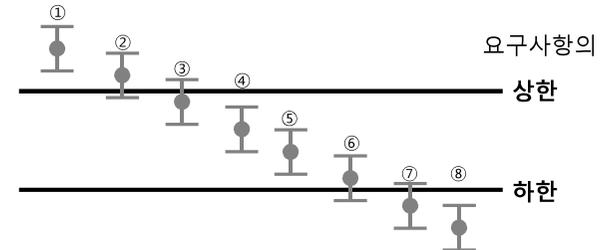
1984 ~ : 측정량의 (참)값이 속해 있는 범위를 나타내는 추정값
(An estimate characterizing the range of values with which the true value of a measurand lies (VIM 1))

1993 ~ : 측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 수정한 값의 분산특성을 나타내는 파라미터
(Parameter associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand (VIM 2))

2008 ~ : 사용한 정보를 바탕으로, 측정값의 분산을 나타내는 음이 아닌 파라미터
(Non negative parameter that characterizes the dispersion of the quantity value that are being attributed to a measurand, based on the information used. (VIM 3))



※ 측정결과 = [값 ± 불확도]



요구사항을 만족시키지 못하는 것은? ()



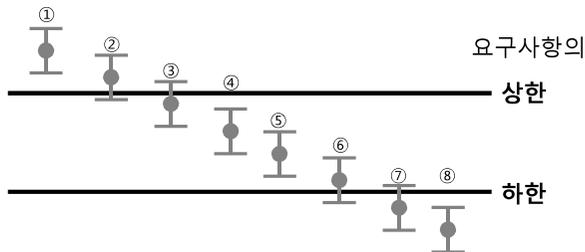
측정에서 고려할 요소: V&V

(5) 유효화와 검증(Validation and verification)

- 유효화(Validation): 명시된 요구사항이 의도된 사용에 적절한가를 검증
 - 검증(Verification): 주어진 품목이 명시된 요건을 충족한다는 객관적인 증거의 제공
- 유효화: 새롭게 수정 또는 개발된 방법에 대해 필요
- 검증: 유효화 및 측정품질보증(유효화 이후)



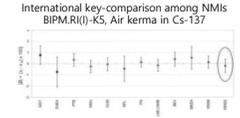
※ 측정결과 = [값 ± 불확도]



요구사항을 만족시키지 못하는 것은? ()

▪ 유효성 확인 방법

- 고정용 표준기, 인증표준물질(CRM) 사용
- 다른 방법의 결과와 비교
- 타 교정기관과 비교
- 요인별 체계적 검토, 지식+경험의 불확도 평가



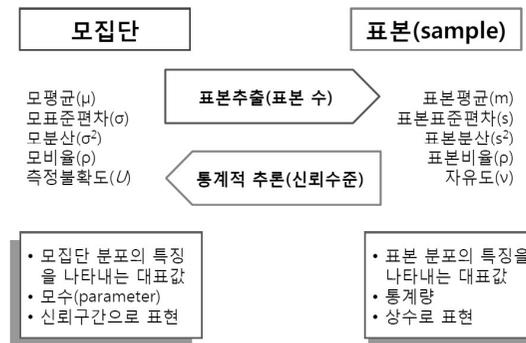
▪ 측정품질보증 방법

- CRM 또는 2차 표준물질을 사용한 내부 품질관리
- 시험기관간 비교 또는 숙련도 시험 프로그램 참가
- 동일하거나 다른 방법을 사용한 반복 시험 또는 교정
- 보관된 품목에 대한 재시험 또는 재교정
- 한 품목의 다른 특성들에 대한 결과들의 상관관계
- 기타



* CRM (Certified Reference Material): 인증표준물질

통계적 접근



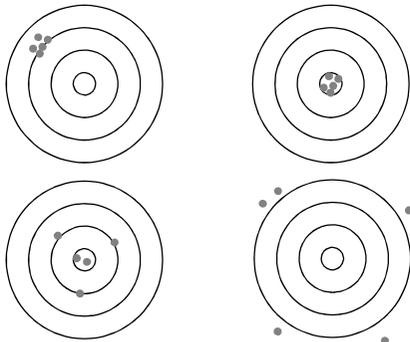
오차(Error)와 불확도(Uncertainty)

< 불확도 관련 용어 >

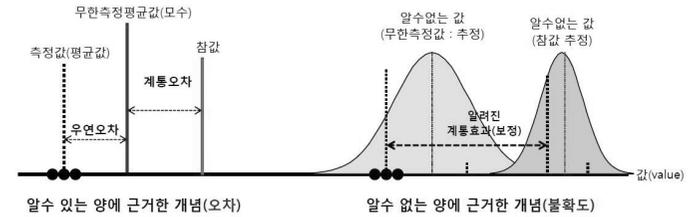
- **측정정밀도(Measurement precision):** 반복 측정하여 얻어진 지시값 또는 측정값 들이 일치하는 정도
- **측정정확도(Measurement accuracy):** 측정값과 측정량의 참값이 일치하는 정도
- **참값(Ture quantity value):** 양의 정의와 일치하는 값
 ※ 측정학에서 양의 정의가 본질적으로 안전할 수 없기 때문에 정의와 일치하는 단일한 참값은 없다고 본다. 따라서 일반적으로 참값은 알 수 없다고 생각한다.
- **협정값(Conventional quantity value):** 주어진 목적을 위해 합의에 의하여 어떤 양에 부여한 값. (때로는 참값의 추정값이 된다.)



정확도(Accuracy) / 정밀도(Precision)



오차(Error) / 불확도(Uncertainty)



- $\text{우연오차} = \text{유한측정의 평균값(측정값)} - \text{무한 측정의 평균값(모수)}$
- $\text{계통오차} = \text{무한측정의 평균값} - \text{참값}$
- $\text{오차} = \text{우연오차} + \text{계통오차} = \text{유한측정의 평균값(측정추정값)} - \text{참값}$

우연오차(random error) : 반복 측정에서 예측할 수 없이 변하는 측정 오차의 성분 (VIM3, 2007) : 보정 불가
 계통오차(systematic error) : 반복 측정에서 변하지 않거나 예측이 가능하게 변하는 측정오차의 성분 : 교정/보정



오차와 불확도의 구분

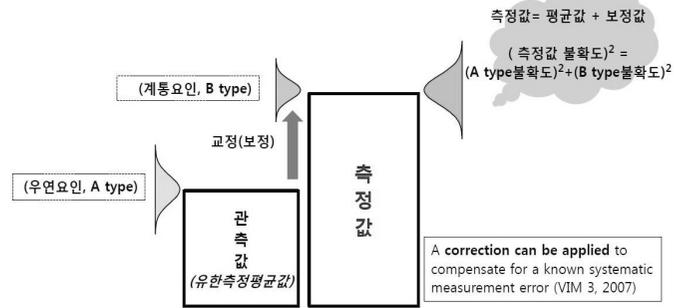
- **측정결과와 불확도**는 측정량의 값을 정확하게 알 수 없다는 사실을 반영함.
- 측정결과는 이미 알고 있는 계통효과를 적절하게 보정하여도 역시 추정값에 불과함. 계통효과에 대한 완전한 보정이 불가능하고, 또 우연효과가 있기 때문에 측정결과에는 항상 불확도가 존재하기 때문이다.

따라서

- **적절한 보정을 한 후의 측정결과**는 우연히 측정량의 값에 매우 가까울 수도 있으며 따라서 **오차(Error)**는 매우 작을 수 있다.
- **측정결과와 불확도(Uncertainty)**는 매우 클 수도 있기 때문에 불확도와 오차는 구별하여야 한다.



계통오차/우연오차 + 측정불확도



✓ 표준측정불확도(표준불확도) : 표준편차로 표현된 불확도



반복성/재현성

- **반복성 (Repeatability):** 같은 측정 조건에서 같은 측정량을 연속적으로 측정하여 얻은 결과들 사이의 일치하는 정도
※ 같은 조건: 측정절차, 관측자, 측정기기, 장소, 짧은 시간 내 반복
- **재현성 (Reproducibility):** 변경된 측정조건에서 같은 측정량을 측정하여 얻은 결과들 사이의 일치하는 정도
※ 변경된 조건: 측정원리, 측정방법, 관측자, 측정기기, 장소, 사용조건, 시간

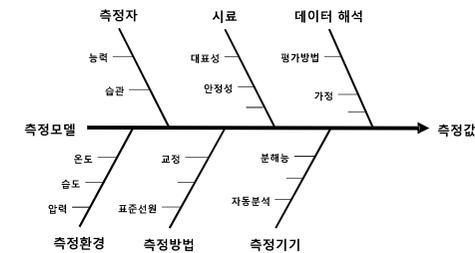


불확도에 관련된 용어

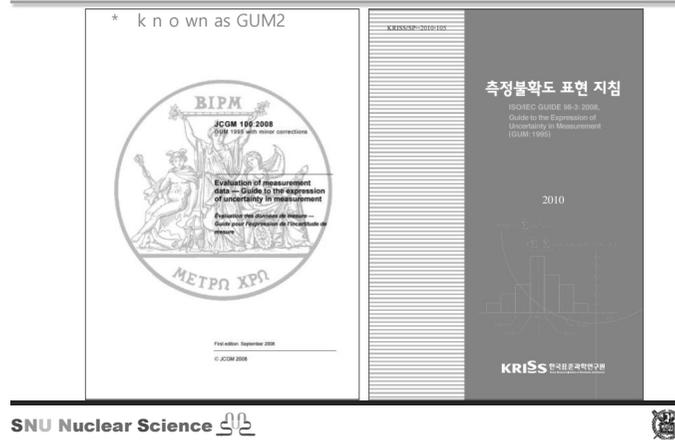
- **측정오차(Measurement error):** 측정값에서 기준값을 뺀 값
- **기준값(Reference quantity value):** 같은 종류의 양의 값과의 비교에 기준으로 사용되는 값
※ 측정량의 **참값** 또는 **협정값**이 될 수 있는데, 전자의 경우 그 값을 알 수 없고, 후자의 경우는 그 값이 알려져 있다.
※ 측정불확도와 함께 제공된다.
- 일반적으로, 참값은 알 수 없다고 생각한다.
정확도를 이야기할 수 없다. 불확도를 이야기한다.
측정의 결과는 불확도 범위만큼 신뢰할 수 있다.



불확도의 요인



불확도 평가



관련 문서

- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, (GUM), ISO, 1993.
- 측정의 불확도 표현 지침, KRIS-99-070-SP,
- 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침, KOLAS-G-002 (2016)
- Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST Technical Note 1297, NIST, 1993.
- Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements, EURACHEM, 1995.



불확도 관련 용어

- ◆ **표준불확도/표준측정불확도(standard measurement uncertainty) $u(x_i)$**
표준편차로 표현된 측정결과의 불확도 / 표준측정불확도
- (불확도의)A형 평가/Type A evaluation (of uncertainty)
일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 불확도를 평가하는 방법
- (불확도의)B형 평가/Type B evaluation (of uncertainty)
일련의 관측값의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 불확도를 평가하는 방법
- ◆ **합성표준불확도(combined standard measurement uncertainty) $u_c(y)$**
측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정결과의 표준불확도를 합성표준불확도라 한다. (추정된 y의 표준불확도, 불확도전파의 법칙)
- ◆ **확장불확도(expanded measurement uncertainty) $U(y)$**
구간으로 정의되어지는 측정결과에 대한 양, 여기서 구간은 측정량에 대한 값의 분포 중 상당 부분이 포함될 것이라고 기대 되는 범위이다. $U(y) = k \times u_c(y)$



불확도 평가: 합성표준불확도

측정량 $\rightarrow Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ \leftarrow 입력량(들)

- 모델은 측정에 필요한 모든 양을 포함한다.
- 보정은 크기가 "0"이 되더라도 불확도를 가지므로 모델에 포함되어야 한다.
- 모델이 갖는 모든 입력량(들)은 표준불확도($u(x_i)$)가 평가되어야 한다.

측정결과의 값 $\rightarrow y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ \leftarrow 입력량의 값(들)

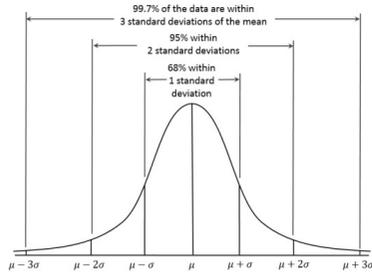
측정결과의 합성표준불확도 $\rightarrow u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}$

※ $u(x_i, x_j)$: 공분산(covariance)



불확도 평가: 표준불확도

- 모델상의 모든 입력량의 불확도는 표준불확도로 표현되어야 한다.
 <- 그래야 공평하게 다룰 수 있다.
- 구간 $(x_i - u(x_i), x_i + u(x_i))$ 는 측정값의 분포가 정규분포를 따른다고 가정했을 때, 약 68 % 신뢰구간(confidence level)에 해당한다.



A형 불확도 / B형 불확도

- A형 표준불확도 평가 (반복측정)

- 통계적으로 계산

$$u(x_i) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

- 자유도(v) : n-1
 (예: 5회반복실험 : v = 4)

- B형 표준불확도 평가 (외부정보 활용)

- 제공되는(교정성적서등) 불확도 U 활용: U/k

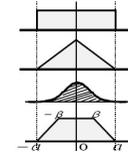
- 불확도를 모르는 경우 (표준편차 합리적 추정)

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

$$u = \sigma$$

$$u = \frac{a\sqrt{1+\beta^2}}{\sqrt{6}}$$



- 자유도(v) : $0.5(100/R)^2$

- 충분히 신뢰하면(R=0 %) : $v = \infty (=10^{99})$



표준 불확도 형태: Type A&B

◆ A type 표준불확도

- : 일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 방법
- 유한 반복측정에 의한 표본의 표준편차를 구한 다음 모집단의 표준편차를 추정
- 통계적 방법
- 우연오차 크기의 대표값

◆ B type 표준불확도

- : 일련의 관측값의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 불확도를 구하는 방법
- 통계적으로 직접 구하지 않은 모든 불확도
- 기존의 측정데이터
- 제조사 사양
- 기존 성적서의 정보
- 경험

⇒ 경험이나 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 구함

