

측정불확도의 세계적 확산과 표현



崔 周 鎬
國科研 종합시험단
4팀장, 공학박사

측정불확도의 평가방법은 1993년부터 국제적으로 통일된 방법이 정리되면서 이제는 활용 가능한 수단으로 정착되기에 이르게 되었으며, 측정불확도의 의미는 측정결과자료의 믿을 수 있는 신뢰구간을 정의하며 측정결과에 대한 유용성을 판단하는 중요하고 효율적인 척도가 된다.

측정불확도의 용도는 측정결과의 품질을 정량적인 수치로 표시할 수 있는데, 자료의 불확실한 것을 완전히 극복할 수는 없으나 불확실한 정도의 크기를 적절한 기법을 사용하면 추정가능하며, 측정결과가 수용할 수 있는 범위내에서 적합한지의 여부를 판정하여 준다.

-필자 주-

각 국의 시험기관들은 무역기술 장벽을 극복하기 위하여 국가간 시험소인정(Laboratory Accreditation) 제도에 동의하고 있으며, 국제적인 기준이 되는 잣대를 가지고 범용성을 갖는 국제규격과 지침을 적용하고 객관성과 투명성을 보장하고자 하는 인정제도가 세계 각국에 급속히 전파되고 있다.

우리 나라도 세계무역기구(WTO) 및 경제협력개발기구(OECD)의 가입국으로 국제적인 조류와 관행을 쫓아가지 않을 수 없는 시대적 상황이 되었으며, 2000년 1월부터 국가 교정제도가 변경되기도 했다.

변경된 국가 교정제도중 측정의 소급성(retroactive)을 위해 모든 불확도(uncertainty)가 명확히 기술되고 끊어지지 않는 비교의 연결고리를 통하여 명확한 국

가 또는 국제표준기준에 연관시킬 수 있는 표준 값이나 측정결과의 특성을 소급성이라 하는데 이러한 소급성 고리의 일부중 불확도 고리는 반드시 문서화되어야 한다고 명기되어 있다. 그러므로 모든 교정성적서 및 시험성적서는 불확도가 표시되도록 규정하고 있다.

한국의 측정불확도에 대한 관심

한국은 1998년 10월에 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme)가 미국, 일본, 호주 등 아시아, 태평양지역 10개국과 시험기관 APLAC(Asia-Pacific Laboratory Accreditation Cooperations)과 상호인정협정을 이미 체결한 바 있으며, 2000년 9월에는 교정분야까지 APLAC와 상호인정을 체결하였다.

그러나 국가간 상호인정협정(MRA : Mutual Recognition Arrangement)을 확대하기 위해서는 각 부처에서 개별 법으로 시행하고 있는 인정제도를 조속히 국제기준에 부합화시켜야 할 필요성이 있으며, 또한 시험성적서 및 제품상호 인정에 있어서 기본적인 전제조건이 되는 교정성적서의 신뢰도 확보가 급선무임을 인식하는 것이 매우 중요하다.

시험소 인정제도가 미치는 영향

적합성 평가제도는 WTO 체제 이후 통상에서 매우 중요한 이슈로 등장하게 되었으며, 이전의 관세수단을 활용한 수입억제 정책은 더 이상 통용될 수 없게 되어 무역에 관한 비관세장벽이 새로운 시장접근의 장벽으로 인식되기 시작하였다.

이러한 국경 없는 자유무역시대의 도래는 어느 국가든 품질경쟁력과 투명성 있는 인정제도를 확립하여 신뢰성만 확보할 수 있다면 어느 곳이든 자유롭게 상품이 유통될 수 있게 되었다. 그러나 역으로 이러한 흐름에 역행하여 우리만의 제도를 고집할 경우에는 해외

시장 접근자체가 상당히 어려움이 뒤따를 것이다.

이러한 기술장벽 해소를 위하여 국제적으로 인정된 적합성 평가가 ISO/IEC(the International Organization for Standardization/the International Electrotechnical Commission) 17025에 의한 시험소 인정제도라 할 수 있으며, 상호 동등성평가(peer review)를 통한 세계 시험인정협정기구인 ILAC과 APLAC 및 EA 등 다자간 시험소 상호인정협정이 활발히 전개되고 있다.

이는 한번의 시험/검사로 모든 곳에서 통용될 수 있도록 하지는 것이 근본취치이기 때문에 시험소 상호인정협정의 체결은 중복시험/검사비용의 절감뿐 아니라 신속한 시장진입이 관건인 제품 수명주기가 짧은 제품의 경우 추가적인 시험과 인증(certification)에 소요되는 기간이 단축되어 경제적 파급효과는 대단하다 할 수 있다.

국가간 상호인정협정 체결현황

OECD, WTO, APEC(Asia-Pacific Economic Cooperation) 등 국제기구에서는 국제무역의 원활화를 위하여 국제기준에 의한 적합성 평가제도 도입과 이를 통한 국가간 상호인정을 적극 권장하고 있으며, 선진국에서는 MRA를 무역기술 장벽의 해소수단으로 활용하고 있다.

이미 EU는 미국, 호주, 뉴질랜드, 캐나다 등과 시험기관 및 제품 상호인정 협정을 체결하였으며, 또한 APLAC에서는 아시아, 태평양지역 10개국이 시험소 상호인정 협정을 체결하고 시험소 인정분야에서 APLAC과 EA가 참여하는 ILAC 차원의 범세계적 시험소 상호인정 협정이 이루어지고 있다.

측정불확도의 세계적 확산

1977년에 측정자료에 대한 불확도 표현에 대한 국

제적인 공감대가 부족하다는데 인식을 같이 하고, 계량분야에서 세계 제1위의 기관인 CIPM(International committee for weights and measures : Comite Internationaldes Poids et Mesures)은 국제표준 시험소들과 동 문제점을 정리하고 권고안을 준비하도록 BIPM(international bureau of weights and measures : Bureau International des Poids et Mesures)에 요청하였다.

BIPM은 32개 국제관련 시험소와 5개 국제기구에 동 문제에 대한 상세한 설문지를 배포하고 21개 시험소에서 회수한 결과 대부분의 시험소는 세계적으로 받아들일 수 있는 측정불확도 표현 및 합성에 관한 통일된 방법을 도출하는 것이 중요하다는데 합의하게 되었다.

그 이후 ISO에서 세부작업이 수행되어 TAG4에 IEC(International Electrotechnical Commission), CIPM, OIML(International Organization of Legal Metrology), IUPAC(International Union of Pure and Applied Chemistry), IUPAP(International Union of Pure and Applied Physics), IFCC(International Federation of Clinical Chemistry) 등 ISO를 포함한 7개 국제기구가 참여하고 있다.

측정분야에서 측정불확도의 표현과 평가에 대한 세계적인 공감대 형성은 자연과학 공학, 상업, 산업 및 규제분야에서 불확도의 이해를 돕고 쉽게 활용하는데 기여하였으며, 향후 측정데이터와 관련된 모든 문서와 연구논문 등도 세계적으로 공인된 불확도의 표현지침에 따라 작성 및 해석이 되어야 할 것으로 본다.

측정자료의 불확도 표현

● 측정불확도(measurement uncertainty)의 의미

측정불확도의 평가방법은 1993년부터 국제적으로 통일된 방법이 정리되면서 이제는 활용 가능한 수단

으로 정착되기에 이르르게 되었으며, 측정불확도의 의미는 측정결과자료의 믿을 수 있는 신뢰구간을 정의하며 측정결과에 대한 유용성을 판단하는 중요하고 효율적인 척도가 된다.

측정결과와 신뢰성은 측정환경이 변경되거나 간헐적인 측정방법 및 측정기술의 숙지정도가 미흡할 때 저하될 수 있다. 주요 측정불확도의 요소는 다음과 같다.

- incomplete definition of the measurand
- imperfect realization of the definition
- imperfect mathematical model
- sampling method
- uncertainties in values of measurement standards and reference materials
- uncertainties in constants or other parameters obtained from other sources
- environmental factors
- random variation in repeated observations
- instrument resolution
- etc

● 측정불확도의 용도

측정불확도의 용도는 측정결과와 품질을 정량적인 수치로 표시할 수 있는데, 자료의 불확실한 것을 완전히 극복할 수는 없으나 불확실한 정도의 크기를 적절한 기법을 사용하면 추정가능하며, 측정결과가 수용할 수 있는 범위내에서 적합한지의 여부를 판정하여 준다.

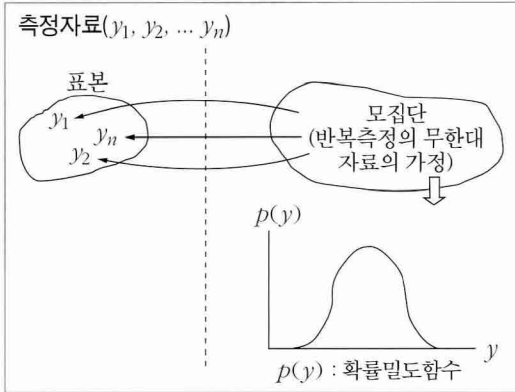
측정결과가 허용한계에 매우 근접하는 경우가 발생하게 되고 확실적인 의미에서 허용공차를 초과할 위험성에 직면하게 되면, 이 때에는 반드시 측정불확도에 대한 고려가 필요하게 된다.

● 측정불확도 관리 및 결정

측정불확도가 최소가 되도록 불확실한 성분이 최소가 되도록 해야 하고 오차평가를 잘 해야 한다. 오

불확도 평가의 통계적 개념

표본과 모집단

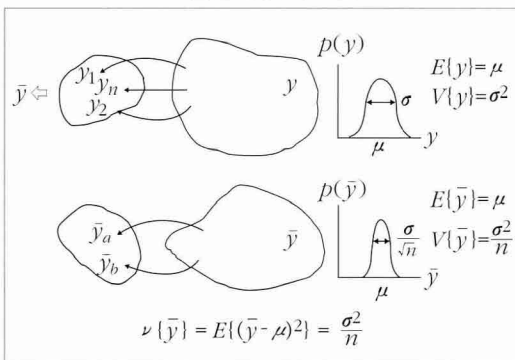


분산의 평가

	통 계 적	모 집 단 변 수
평 균	표본평균 $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$	모집단평균 $\mu = \int y p(y) dy (E\{y\})$
제 목 의 합	$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	
분 산	실험적 분산(표준분산) $V = \frac{S}{n-1}$	모집단분산 $\sigma^2 = \int (y - \mu)^2 p(y) dy$ ($= E\{(y - \mu)^2\} = V\{y\}$)
표 준 편 차	실험적 표준편차 $s = \sqrt{V}$ (표본표준편차)	모집단 표준편차 σ

↑ 우연변수, 계산으로 구함
↑ 한정된 값, 미지의(알 수 없는), 불가지의

모집단 평균의 성질



A형 불확도 평가에서 측정의 반복에 기인되는 불확도의 환산

$(x_1, x_2, \dots, x_n) \Rightarrow \bar{x}, s = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}$
 \bar{x} 의 표준불확도 $u(\bar{x})$ 는,

$$u(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$
 실제 측정에서 모집단의 수가 n 개이고, 측정자료를 m 개가 선택할 때의 표준불확도는
 (z_1, z_2, \dots, z_m) (generally $m < n$) $\Rightarrow \bar{z}$ (측정결과)

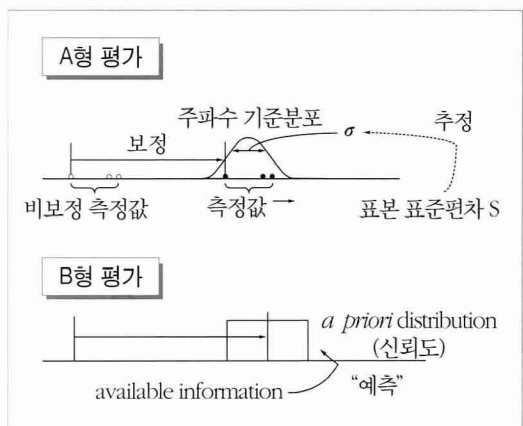
$$u(\bar{z}) = \frac{s}{\sqrt{m}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{m(n-1)}}$$

오차와 불확도 비교

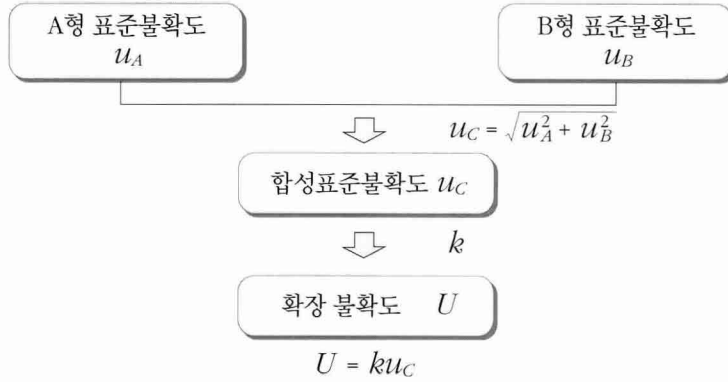
오 차	불 확 도
• 측정값 - 참값	• 불확실함
• unknowable	• evaluation procedure specified
• 우연성오차와 계통오차로 분류	• A형, B형으로 분류

↔ 우연오차 ↔ A형 평가
↔ 계통오차 ↔ B형 평가

주피수 기준과 신뢰도 기준



측정불확도 평가절차



차평가를 잘 하기 위해 먼저 오차발생요인을 적절히 제어하고 측정환경을 개선시키며, 확인된 오차는 오차평가를 잘 하기 위해 먼저 오차발생요인을 적절히 제어하고, 측정환경을 개선시키며 확인된 오차는 조정을 통하여 불확도 성분을 최소화해야 한다.

불확도 성분을 최소화하기 위하여 시간과 경비가 소요되는데 절절히 trade off 해야 한다. 일반적으로 불확도는 측정기의 성능에 따라 정적오차 및 동적오차가 결정되고, 측정한정 및 교정불확도 성능에 따라 환경오차와 교정오차가 발생된다.

*A형 표준불확도

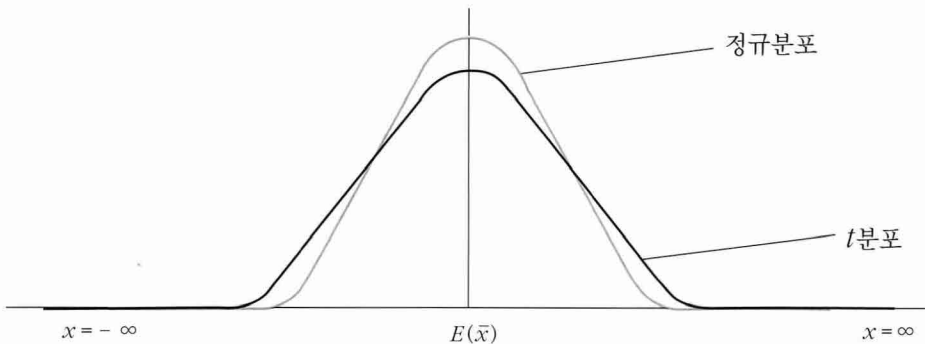
반복측정 결과를 통계적으로 처리하는 방법이며, 정규분포 또는 t형 분포로 해석한다. 전통적인 불확도 분류는 우연불확도(random uncertainty)와 계통불확도(systematic uncertainty)를 구하여 합성하는 방법을 사용하였으나 우연과 계통의 구분이 어렵고 실제 오차의 성질들은 근본적인 차이가 없어 우연과 계통 불확도가 가역적 경우가 많으므로 A형 또는 B형 불확도를 구분하여 정의한다.

*B형 표준불확도

반복측정 및 통계적 처리방법 외에 균등분포에 근거하여 기대값을 추정하는 방법이 B형 표준불확도 방

● 측정불확도 평가에 사용되는 용어 정의

정규분포와 t분포의 확률밀도함수



법이다.

***A형과 B형 표준불확도 평가차이**

A형 표준불확도 평가는 적은 자유도를 갖는 데이터에 의존한 것인 반면에 B형 표준불확도 평가는 많은 반복측정과 그 특성을 파악하기 위한 다양한 시험 등을 거쳐 산출된 데이터를 평가하는 것이다.

최근에는 측정기가 분해능이 높고, 재현성이 좋기 때문에 반복측정결과 편차가 적다. 그러므로 합성불확도의 크기는 B형으로 평가되는 성분이 대부분을 차

지하므로 B형에 의한 불확도의 성분평가가 보다 중요시되고 있다.

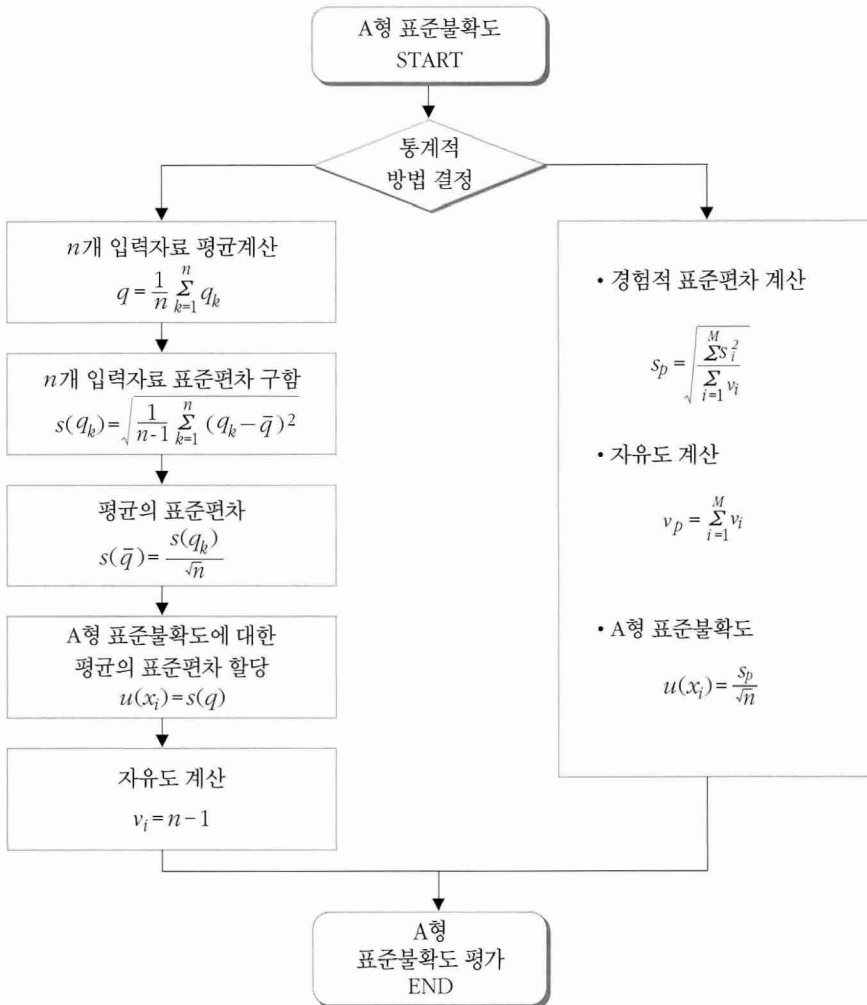
***자유도**

자유도는 신뢰구간을 결정할 수 있는 보상계수를 말한다.

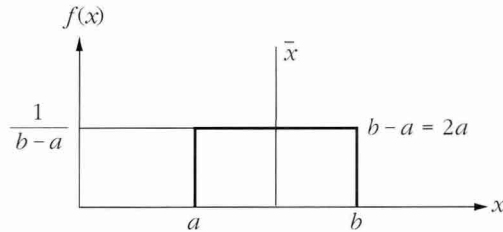
●A형 표준불확도 평가

측정대상의 참값에 가장 근접하는 기대치를 구하기 위하여는 가능한한 정확하게 무한히 많은 반복측

A형 표준불확도 계산절차



균등분포와 확률 밀도 함수



정을 실시해야 한다. 그런데 10회 미만의 유한한 측정이 일반적이므로 유한표본의 표준편차를 구한 후 모집단의 표준편차를 추정하는 것이다.

그리고 반복측정은 동일한 측정자가 동일한 환경 하에서 일정한 측정기로 같은 물리량을 측정한다는 조건을 가지기 때문에 좌우 대칭형의 연속확률 분포인 정규분포 또는 t형 분포로 한다.(P.56 아래 그림)

*B형 표준불확도 평가

B형 표준불확도 평가는 대부분의 기대값이 일정구간 이내에 꼭 같은 확률로 존재한다는 균등분포(uniform distribution)에 근거하여 기대값을 추정할 수 있다.

인용정보들은 대표 값의 양쪽으로 반범위(semi-range) 안에 기대값이 놓여짐을 의미하는 직각확률 분포는 일반적으로 해석되며, 이들 효과의 기대값 역시 표준편차를 척도로 사용한다.

● 불확도 전파법칙

측정대상 Y는 N개의 양 x_1, x_2, \dots, x_n 의 함수로 얻어진다.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

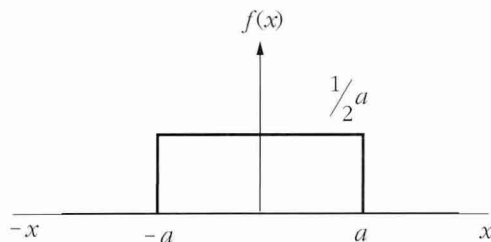
여기서 x_i 는 서로 다른 관측자, 계기, 샘플 값을 실험실 및 관측시기 등 변화의 요인을 고려한 양이 포함된다. Y는 표시되는 측정대상 또는 출력량의 추정치 y는 N개의 입력량 x_1, x_2, \dots, x_n 을 이용하여 Y식으로부터 얻어진다. 출력추정값 y의,

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

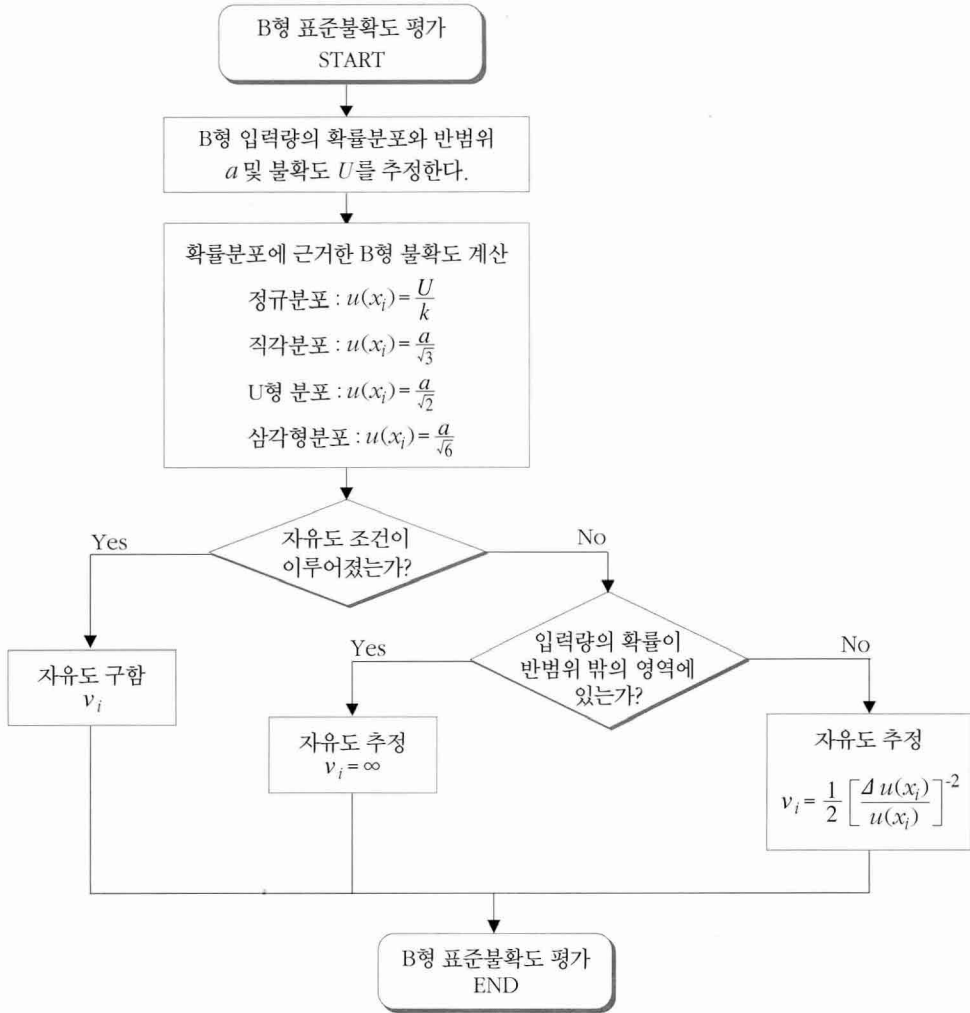
합성표준불확도는 $u_c(y)$ 로 표시되고 결과의 추정 표준편차를 나타내는 y의 합성표준불확도는 추정분산 $u_c(y)$ 의 정방근으로 된다. Y식의 1차 테일러 급수의 근사식을 불확도 전파법칙이라 하며 $u_c(y)$ 로 표현된다.

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

반범위 구간



B형 표준불확도 계산절차



$u(x_i)$: 입력 추정치 x_i 와 관련된 표준불확도
 $u(x_i, x_j)$: x_i 와 x_j 와 관련된 추정공산분 성분
 $\partial f/\partial x_i$: 감도계수임

● 합성표준 불확도(u_c)

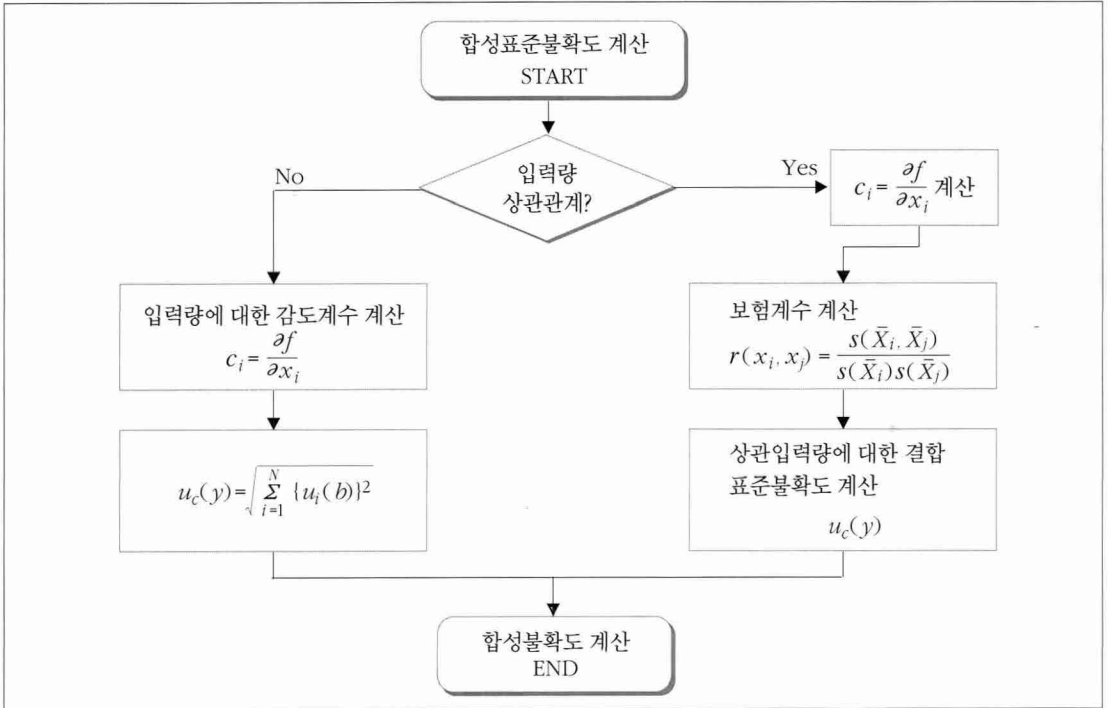
표준불확도를 A형 평가 또는 B형 평가방법을 통하여 각기 구하고 이들을 표준불확도로 산정하는 방법은 입력량들이 서로 상관하는 경우와 상관관계가 없

는 경우로 구분하여 정리한다.

● 확장불확도(U)

ISO/IEC와 같은 국제기구들은 국제교역을 원활히 하고 보건, 안전 등 공공목적의 문제들을 취급하여야 하기 때문에 합성표준불확도에 보상계수를 곱하여 신뢰도를 높이고 분쟁의 소지를 제거하기 위해 확장 불확도(expanded uncertainty)라는 개념을 도입하고

합성불확도 계산절차



있다.

$$U = k u_c(y)$$

$$k = 1(1\sigma : 68.27\%)$$

$$k = 2(2\sigma : 95.45\%)$$

$$k = 3(3\sigma : 99.73\%)$$

여기서 보상 k 는 신뢰수준과 유효자유도(effective degree of freedom)의 결정에 따라 t 분포에 의해 주어지는 상수이다. 유효자유도는 합성표준불확도 u_c 에 대하여 각 요소들의 자유도를 결합시킨 유효자유도를 산정하여야만 정확한 신뢰구간을 결정할 수 있는 보상계수를 찾아낼 수 있다. 합성표준불확도의 유효자유도는 다음 조건을 만족한다.

$$\nu_{eff} \leq \sum_{i=1}^n \nu_i$$

welch-satterthwaite 공식에 의한 유효자유도 추정 식은,

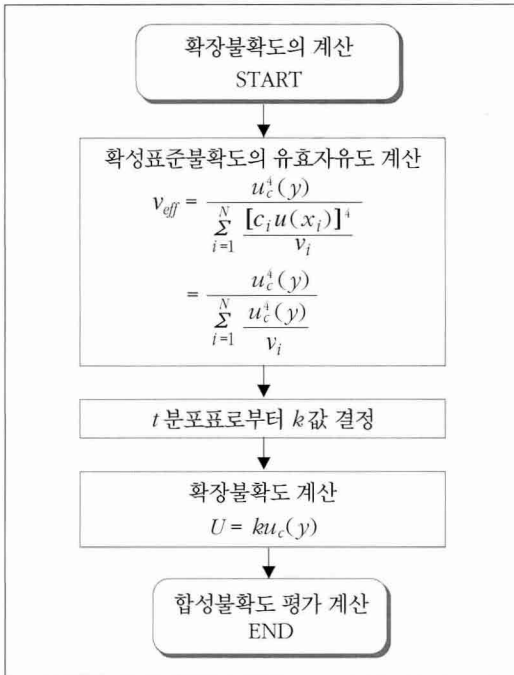
$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\mu_i}}, \quad c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

확장불확도를 구한후 최종적으로 확장불확도가 구해지는 과정을 일목요연하게 볼 수 있는 불확도 요소, 종류, 표준불확도, 확률분포, 적용인자 및 자유도 등이 명기된 불확도 총괄표를 만들어야 하는데 불확도 총괄표에 대한 한 가지 예를 당 연구실에서 개발 완료한 고정장치 불확도 총괄표를 참고로 예시하였다.

● 불확도 보고

불확도 보고는 U 를 k 와 함께 보고하거나 u_c 를 보고하도록 한다. 그리고 표준불확도와 관련된 성분의 목록, 성분의 자유도 및 u_c 의 결과치와 k 의 값이 2가 아닌 경우 k 의 값을 선택한 방법에 대한 내용을 제시한다. 防

확장불확도 계산절차



참 고 자 료

- ▲ 최주호 외 2인 「측정시스템의 정확한 평가와 공인화 절차」 한국군사과학기술학회 논문지 제2권 제2호(통권 제3호) 1999. 12.
- ▲ 최주호 외 4인 「정방향 스텝 동압력 교정장치 개발」 한국군사과학기술학회 논문지 시험평가부문 제4권 제1호(통권 제6호) 2001. 7.
- ▲ 최주호 외 1인 「압력 측정시스템의 불확도 평가」 한국군사과학기술학회 논문지 지상무기부문 제5권 제1호(통권 제8호) 2002. 5.
- ▲ 한국측정기기교정협회 「측정불확도 평가 및 표시에 관한 기술기준 개발연구」 공업진흥청 1994. 12.
- ▲ Barry N, Taylor and Chris E. Kuyatt 「Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results」 NIST Technical Note 1297, 1992. 10.
- ▲ 산업자원부 기술표준원 「국제 측정불확도 표현 및 이해」 APEC/APMP Work Shop 행정간행물 발간등록번호 1410119-10-02011-14, 2002. 4.
- ▲ 한국계량측정협회 「ISO/IEC 17025 요건」 KASTO 교육사업부 KASTO-ED-A-03, 2000. 11.
- ▲ 한국계량측정협회 「국가 교정제도 및 국가 교정기관 인정 절차」 KASTO 교육사업부 KASTO-ED-A-01, 2000. 11.
- ▲ KOLAS 「Accreditation Assessor Rackoge」 Agency for Technology and Standards, MOCIE, Korea, 2001.

교정장치 불확도 총괄표(Uncertainty Budget)

불 확 도 요 소	종 류	표준 불확도	감도계수	확률분포	적 용 인 자	자 유 도
Ea1: 반복 압력측정 평균표준편차	A Type	2.9	-	t	$1/\sqrt{10}$	9
Eb1: 기준 압력게이지 불확도	B Type	22.5	-	정규	$1/2$	∞
Eb2: 압력지시계 분해능 (100/2=50psi)	B Type	28.9	-	직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
Eb3: 기준 압력게이지 장기 안정도	B Type	15.0	-	직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
E_b4: A/D 변환(12bit)	B Type	1.4	-	직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
Eb5: 신호조절기 이득안정도(0.02%)	B Type	1.2	-	직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
Eb6: 신호조절기 직선성(0.05%)	B Type	2.9	-	직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
Eb7: 동압력 변환시 압력부피 변화	B Type	5.8	-	직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
합성표준 불확도 (psi)		40.2				
확장 불확도 (psi)		80.5				
상대불확도 백분율 (%)		0.80%				
시스템 불확도 = +/-80.5psi(상대불확도 백분율=0.80%) (k=2, 신뢰수준 : 95.5%)						