측정 불확도 모형 분류 및 평가
- Model Classification and Evaluation of Measurement Uncertainty -

최 성 운 *
Choi Sung Woon

Abstract

This paper is to propose model classification and evaluation of measurement uncertainty. In order to obtain type A and B uncertainty, variety of measurement mathematical models are illustrated by example. The four steps to evaluate expanded uncertainty are indicated as following;

First, to get type A standard uncertainty, measurement mathematical models of single, double, multiple, design of experiment and serial autocorrelation are shown.

Second, to solve type B standard uncertainty measurement mathematical models of empirical probability distributions and multivariate are presented.

Third, type A and B combined uncertainty, considering sensitivity coefficient, linearity and correlation are discussed.

Lastly, expanded uncertainty, considering degree of freedom for type A, B uncertainty and coverage factor are presented with uncertainty budget. SPC control chart to control expanded uncertainty is shown.

Keywords : Type A, B Uncertainty, Measurement Models, Standard, Combined, Expanded Uncertainty

1. 서 론

최근 차세대 국가 성장 동인이 될 수 있는 첨단 산업인 나노과학 및 측정기술에 관한 관심이 증대되고 있다. 나노(Nano)는 국제단위계인 SI에서 소숫점 9째 자리까지 유지하는 단위이며 최근 10^{-12}인 펨토(Femto), 10^{-15}인 아토(Atto)의 측정단위로 신제품의 연구개발에 적극적으로 활용하고 있는 첨단기업이 증가일로에 있다. 이렇듯 측정은

* 경원대학교 산업공학과 교수
2007년 1월 접수; 2007년 2월 수정본 접수; 2007년 2월 게재확정

모든 산업 및 학문의 기본이 되며 인류의 과학기술발전이 측정기술과 더불어 진행되어 오고 있다.

측정학(Metrology)은 계측기의 측정에 관련된 실험 과학(Experimental Science)이다. 사용계측기(Working Instrument)는 소급성(Traceability)의 원리에 따라 사용횟수 및 시간을 고려하여 적절한 주기로 기준기(Reference Standard)의 참값(True Value)에 교정(Calibration, Correction, Adjustment, Offset)을 해야 한다.

과거 인류가 과학기술문명이 발전되지 못한 시대에서는 기준기의 참값이 그들의 수준에서 완전한 값으로 인식되어 교정을 위한 측정데이터와 기준기 참값과의 차인 오차(Error)의 개념을 사용하였다. 오차를 발생요인에 따라 우연오차(Random Error)와 계통오차(Systematic Error)즉 정밀도(Precision ; 폭, 넓이, 산포, 흩어짐)와 정확도(Accuracy;축,중심,치우침)로 구분하여 산정방법 및 감소 방법을 연구하였다.

그러나 과학기술문명이 고도로 발달된 현대시대에서는 기준기의 참값(True Value)의 개념을 본질적으로 확정되어 있지 않고 다만 완벽한 측정에 의해서만 얻을 수 있는 값으로 정의하고 있다.

따라서 과거 인류가 확정되었다고 생각된 참값은 완전하지 못하기 때문에 다만 현재 조건에서 협정된 기준값(Conventional True Value; Assigned Value; Best Estimate of the Value; Conventional Value; Reference Value)으로 재정의 되었다. 협정된 기준값(향후 기준기 값으로 명명하며 Reference Value로 표시)은 완전한 참값(True Value)에 근접될 수 있도록 움직이는 목표(Moving Target)를 향해 끊임없이 도전하는 소급성 실험과학의 대상이 된다.

따라서 과거 확정되어지고 완전하다고 정의된 참값 (True Value)에 대한 오차(Error)의 개념을 수정하여, 현대에서는 완전한 참값을 목표로 끊임없이 소급성을 추구하기위해 현재 조건에서 협정한 기준기 값(Reference Value)에 대한 불확도(Uncertainty)의 개념을 사용하고 있다. 과거 오차가 발생요인에 따라 우연오차와 계통오차를 구분하였지만 현대에서는 평가방법에 따라 통계적인 방법에 의한 A형 불확도(Type A Uncertainty)와 경험이론분포에 의한 방법인 B형 불확도(Type B Uncertainty)로 구분하여 전혀 새로운 개념 및 평가방법이 요구되고 있다. [4, 5]

따라서 본 연구에서는 A형 불확도, B형 불확도, 결합불확도, 확장불확도 등에서 사용되는 측정 불확도 모형을 유형화하고 평가방법을 제시하고자 한다.

2장에서는 A형 표준 불확도를 위한 일변량, 이변량, 다변량, 실험계획, 시계열 자동상관 측정 모형등을 제안하며, 3장에서는 B형 표준 불확도를 위한 단변량 확률 분포, 다변량 분석 모형 등을 제시한다. 4 장에서는 감도 계수와 선형성, 상관성을 고려한 측정 모형 함수에 대한 A형 결합 불확도와 B형 결합 불확도를 다룬다. 5장에서는 7가지의 확장 불확도 모형을 제시하고 A형, B형 자유도, 포함 인자를 고려한 확장 불확도 표현과 이에 대한 SPC(Statistical Process Control) 관리도 운영방안에 대해 논의하고 6장에서 결론을 맺는다.

2. A형 표준 불확도 (Type A Standard Uncertainty) 모형

2.1 일변량 측정 모형

A형 표준 불확도는 통계적인 개념에 의해 구하는 평가 방법이다. A형 표준 불확도는 연구대상이 되는 전체 집단인 모집단(Population)을 대상으로 구하는 것이 아니고 시간과 비용의 관점에서 부분 집단인 샘플(Sample)을 대상으로 구하는 즉 효과적이지 못하지만 효율적인 통계적인 방법을 이용한다. 따라서 적정 샘플의 크기(n)는 샘플링 오차와 경제성의 타협점에서 결정되어야 하나 교정측정의 현실적인 어려움을 고려하여 샘플의 크기는 10 이하로 통상적으로 설정한다. $y=f(x)$에서 x의 변수 n 개의 측정량(Quantity) $q_1, q_2, \cdots\cdots q_n$ 에 대한 샘플 표준편차(Sample Standard Deviation) $s(q)=\frac{\sum_{i=1}^{n}(q_i-\bar{q})^2}{n-1}$ 라고 할 경우 A형 표준 불확도 $u_A=\frac{s(q)}{\sqrt{n}}=s(\bar{q})$ 가 된다. 여기서 S(q)의 (n-1)은 자유도라고 하며 순수한 독립인 개수를 의미한다.

즉 편차 제곱합(Sum of Squares)을 계산하려고 $\bar{q}$, 1개를 데이터에서 중복 사용했기 때문에 전체 데이터 n개에서 중복 사용된 데이터 1개를 빼 주어 순수한 독립인 개수 (n-1)로 만들어 주는 것이 자유도의 개념이다. 사실은 독립도로 사용해야 할 단어를 단어의 멋을 부리기 위해 (또한 독립을 얻어야 자유를 얻을 수 있으니까) 자유도로 사용한 것이 아닌가 짐작된다.

또한 u_A에서 s(q)를 $\sqrt{n}$으로 나눈 것은 중심극한 정리(Central Limit Theorem)이론에 의한 것으로 가능한 한 많은 샘플을 취하게 하기 위한 인센티브 개념으로 볼 수 있으며 불편분산(Unbiased Variance)에서 n개의 데이터를 사용했기 때문에 표준편차는 $\sqrt{\text{분산}}$의 관계에 대응해서 $\sqrt{n}$을 사용했다.

2.2 이변량 측정 모형

$y=f(x_i, x_j)$ 두 측정량의 변수가 독립이 아니고 종속적인 경우 상관계수(Correlation Coefficient) 개념이 도입된다. 즉 상관계수는 공분산을 각각의 표준편차로 나누어 -1.0 ~ +1.0 사이의 무차원(Dimensionless) 값으로 두 변수의 관련성을 해석하는 기법이다.

A형 이변량 측정 모형인 경우 두 변수 x_i, x_j 의 상관계수 r(x_i, x_j)는 두 공 표준 불확도(Co-Uncertainty)를 각각의 표준 불확도 $u(x_i)$, $u(x_j)$ 로 나누어 주면 된다. 즉, $r(x_i, x_j)=\frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}$ 가 되며 $u(x_i x_j)$는 공분산의 역할로 부호방향과 긴밀도를 표현하며 분자의 표준편차는 단위를 없애 주는 역할을 한다.

A형 이변량 측정 모형의 예로는 전도방출 측정 시 방해 레벨 불확도에 대해 안정적인 측정시스템 반복성(x_1)과 규격한계 근접 반복성(x_2)의 상관관계가 존재할 경우로 $u(x_i,x_j)=u(x_i)u(x_j)r(x_i,x_j)$로 표시된다. 즉, 각각의 표준불확도와 상관계수가 주어지면 A형 이변량 측정모형에 대한 불확도는 $u_{A_1A_2}=u_{A_1},u_{A_2},u_{A_3}$ 를 통해 구할 수 있다.

2.3 다변량 측정 모형

$y=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 측정 모형에서 변수가 많은 경우 차원(Dimension)의 수를 줄이기 위한 방법으로 주성분 분석(PCA : Principal Component Analysis)과 인자 분석(FA : Factor Analysis)을 사용한다. 두 방법 모두 공분산 구조를 분석하는 방법으로 $u(x_i,x_j)$를 이용하여 몇 개의 의미 있는 작은 집단으로 층별한다. A형 다변량 측정 모형의 불확도 계산 시 PCA 와 FA에 의해 집단화 된 그룹 내의 A형 표준 불확도는 RSS(Root Sum of Squares)에 의해 하나의 값으로 표현되어 집단화된 소수의 그룹간의 불확도를 고려해 주면 효율적인 계산이 가능해 진다.

만약 측정된 관측치에서 A형 불확도 원인인 반복성 x_1, x_2, ……x_N변수를 데이터 유사성에 의해 집단으로 구분할 경우 군집분석(CA : Clustering Analysis)과 판별분석(DA : Discriminant Analysis)를 적용한다. 이는 데이터를 통한 변수의 분류 및 군집을 통해 반복성 변수를 명확히 구분하고자 할 경우 사용된다.

결국 다변량 측정 모형에서 측정 변수가 명확하게 정의된 경우 측정 변수를 집단화하여 차원의 수를 줄이기 위한 PCA, FA를 사용하며, 측정 변수가 명확하지 않은 경우 측정치를 집단화하여 변수의 기여 정도를 파악하기 위하여 CA, DA 를 사용한다. [3]

2.4 실험계획 측정 모형

A형 실험계획 측정모형 [15]은 모든 인자가 변량인자(Random Factor)로 이루어진 경우인 지분 실험법(Nested Design)을 사용한다. 즉 변수를 인자로 하여 일간 효과 x_1, 실험실효과 x_2, 기기효과 x_3로 하고 반복을 취했을 경우 반복(r개)은 기기인자(n개)가 정해진 후, 기기인자는 실험실 인자 (m개)가 정해진 후, 실험실 인자는 일간 인자(l개)가 정해진 후 지분(Nested)되기 때문에 교호 작용은 의미가 없다. 이 경우 3단계 지분 실험법이 되며 A형 표준 불확도는 E(V) 또는 E(MS)를 이용하여 $\hat{\sigma}_{x_1}^{\ 2}=\dfrac{V_{x_1}-V_{x_2}}{mnr}$, $\hat{\sigma}_{x_2}^{\ 2}=\dfrac{V_{x_2}-V_{x_3}}{nr}$, $\hat{\sigma}_{x_3}^{\ 2}=\dfrac{V_{x_3}-V_{error}}{r}$로 구한 후 각각의 개수 l, m, n 으로 나누어 준 후 제곱근을 씌우면, u_{A_1},u_{A_2},u_{A_3}의 값을 구할 수 있다.

2.5 시계열 자동 상관 측정 모형

앞의 4개 모형은 모두 데이터가 $i.i.d.$ (Independently and Identically Distributed)인 랜덤 샘플로 가정하였다. 그러나 데이터가 시계열로 자동상관(Serially autocorrelated) 되었을 경우 Box-Jenkins가 제안한 ARMA(Autoregressive Moving Average)와 ARIMA(Autoregressive Integrated Moving Average)방법을 사용한다.

예를 들어 ARMA(1,1) 모형은 $x_t = \phi x_{t-1} + a_t - \Theta a_{t-1}$ (단, $t = 1, 2, \cdots, n$, $a_t \sim N(0, \sigma_a^2)$)으로 표현되는데 $\hat{\sigma}_{x_t}^2 = (\frac{1-2\Theta\phi+\Theta^2}{1-\phi^2})\sigma_a^2$이다. 따라서 A형 시계열 자동상관 측정모형의 표준불확도는 $u_A = \frac{\hat{\sigma}_{x_t}^2}{\sqrt{n}}$가 된다.[2]

3. B형 표준 불확도 (Type B Standard Uncertainty) 모형

3.1 단변량 확률분포모형

3.1.1 직사각 분포(Rectangular Distribution)

일정 구간의 범위 2a가 동등한 확률을 갖는 분포로 B형 표준 불확도 $u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$이며 불확도 요약표 (Budget)에서 나누는 수(Divisor)는 $\sqrt{3}$으로 1.732 이다. 비대칭 직사각형 분포의 B형 표준 불확도 $u_B = \frac{(b_+ + b_-)^2}{\sqrt{12}} = \frac{(a_+ + a_-)^2}{\sqrt{12}}$이 된다.[5]

3.1.2 U 또는 M 분포

직사각 분포의 양쪽 끝 구간에서 높은 확률을 갖는 분포로 B형 표준불확도 $u_B = \frac{a}{\sqrt{2}}$이며 불확도 요약표(Budget)에서 나누는 수(Divisor)는 $\sqrt{2}$로 1.414이다.

3.1.3 삼각분포(Triangular Distribution)

2개 직사각분포의 결합적분(Convolution)에 의해 생성되는 분포로 B형 표준 불확도 $u_B = \frac{a}{\sqrt{6}}$이며 불확도 요약표(Budget)에서 나누는 수 (Divisor)는 $\sqrt{6}$으로 2.449이다.

3.1.4 사다리꼴(Trapezoidal Distribution)

2개 직사각분포의 결합적분(Convolution)에 의해 생성되는 분포로 B형 표준 불확도 $u_B = \frac{a}{\sqrt{6}}(1+\beta^2)$이며 $\beta = \frac{|\triangle a_1 - \triangle a_2|}{\triangle a_1 + \triangle a_2}$이다.

3.1.5 정규분포(Normal Distribution)

정규분포의 B형 표준 불확도 $u_B = \frac{\sigma}{k}$로 k는 $\mu \pm ka$를 나타내는 표준편차의 배수로 $k = 1.64$일 경우 신뢰수준은 90%, k=1.96≒2일 경우 신뢰수준은 95%, k=2.58일 경우 신뢰수준은 99%에 대응한다.

3.1.6 일반화 분포

Lampasi et al.[8]은 B형 표준 불확도 계산을 위한 일반화된 λ 분포(Generalized Lambda Distribution : GλD)를 제안하였다. 이 분포는 네 개의 λ_1, λ_2, λ_3, λ_4의 값으로 $Q_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4}(P) \simeq \lambda_1 + \frac{P^{\lambda_3} - (1-P)^{\lambda_4}}{\lambda_2}$, $0 \le P \le 1$을 이용하여 정규분포, 직사각분포, t분포, U분포, 지수분포, 코시(Cauchy)분포, 로지스틱(Logistic)분포, 와이블(Weibull)를 유도할 수 있는 유연한 분포이다.

3.2 다변량 분석 모형

통계적인 방법에 의해 측정변수와 데이터를 이용하여 불확도를 평가하는 2.3절의 A형 다변량 측정 모델과 달리 B형 다변량 분석 모형은 B형 불확도 원인 변수간의 상관관계를 경험이나 이론에 근거하여 제시하게 된다.

따라서 통찰력있는 경험이나 이론적인 상관관계를 B형 다변량 통계분석 모형의 표준 불확도로 계산하려고 하는 경우 PCA는 아이겐 벡터(Eigen Vector)와 아이겐값(Eigen Value)의 주성분표시를, FA는 공통인자(Common Factor)와 인자적재행렬(Factor Loading Matrix)를 이용하는 방법이 요구된다.

그러나 경험이론에 의한 다변량 모형의 표현에 어려운 점이 있고 이를 다시 통계적 다변량 모형으로 변환하여 표준 불확도를 구하는 것이 개념상, 계산상 쉽지 않아 대부분의 B형 표준 불확도 계산에서는 변수간의 상관계수가 없다는 가정을 한다.

4. 결합 불확도(Combined Uncentainty) 모형

4.1 A형 결합 불확도

4.1.1 감도 계수(Sensitivity Coefficient)

$y=f(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_N)$의 감도 계수는 A의 불확도 원인 변수와 불확도 결과 변수와의 단위(Dimension)가 같기 때문에 $\frac{dy}{dx}=\frac{\partial f}{\partial x_1}=\cdot\cdot\cdot=\frac{\partial f}{\partial x_N}=$ c= 1 이 된다.

4.1.2 선형, 비상관 A형 결합 불확도

불확도 결과 변수 y가 불확도 원인 변수 $x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_N$과 선형 관계에 있으며 불확도 원인 변수들 간에는 상관관계가 존재하지 않을 경우에 A형 결합 불확도는

$u_c{}^2(y)=\sum_{i=1}^{N}[\frac{\partial f}{\partial x_i}]^2 u^2(x_i)=\sum_{i=1}^{N}c_i{}^2 u^2(x_i)$이 된다.

4.1.3 선형, 상관 A형 결합 불확도

불확도 결과 변수 y가 불확도 원인 변수와 선형관계가 있으나 불확도 원인 변수들 간에는 상관관계가 존재할 경우에 $u_c{}^2=\sum_{i=1}^{N}c_i{}^2 u(x_i)^2+2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{J=i+1}^{N}c_i c_j u(x_i)u(x_j)r(x_i,x_j)$가 된다.

4.1.4 비선형, 비상관 A형 결합 불확도

불확도 결과변수 y가 불확도 원인 변수와 비선형관계에 있으나 불확도 원인 변수들 간에는 상관관계가 존재하지 않는 경우에는 다음과 같은 상대 불확도에 의한 방법으로 A형 결합 불확도를 구한다.

$y=x_1{}^{p_1}x_2{}^{p_2}\cdot\cdot\cdot x_N{}^{p_N}$의 측정 모형인 경우에 A형 결합 불확도는

$[\frac{u_c(y)^2}{y}]=\sum_{i=1}^{N}[\frac{p_i u(x_i)}{x_i}]^2$이 된다.

4.1.5 비선형, 상관 A형 결합 불확도

불확도 결과 변수 y가 불확도 원인 변수와 비선형 관계에 있고 불확도 원인 변수들 간에는 상관관계가 존재할 경우에 A형 결합 불확도는 $[\frac{u_c(y)}{y}]^2=\sum_{i=1}^{N}[\frac{p_i u(x_i)}{x_i}]^2+2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{J=i+1}^{N}[\frac{p_i u(x_i)}{x_i}][\frac{p_j u(x_j)}{x_j}]r(x_i,x_j)$가 된다.

4.2 B형 결합 불확도

4.2.1 감도 계수

$y=f(x_1,x_2,\cdot\cdot\cdot,x_N)$의 측정 모형에서 A형 감도계수는 y가 불확도 결과 변수 $x_1,x_2,\cdot\cdot\cdot,x_N$이 반복성 변수로서 단위가 같아지므로 항상 1이 되어 사용의 의미가 약해진다.

그러나 B형 감도계수는 다양한 단위(Dimension)를 갖는 불확도 원인 변수 $x_1,x_2,\cdot\cdot\cdot,x_N$를 불확도 결과 변수의 단위와 같게 해주기 위해 측정모델함수를 각 원인변수에 따라 편미분(Partial Derivative)한 값 즉 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$로 사용한다. 즉, 감도계수는 불확도 단위 원인 증가분에 대한 불확도 결과 증가분으로 설명되지만 실제의 중요한 역할은 단위를 맞추어 주는 기능을 수행한다.

4.2.2 B형 결합 불확도

B형 결합 불확도 역시 A형 결합 불확도와 마찬가지로 감도계수, 선형관계, 상관관계에 의해 산출 방법이 달라지며 그 결과는 4.1.2 절 부터 4.1.5절까지와 동일하다. 차이점으로는 A형 결합 불확도일 경우 감도 계수는 모두 1이 되나 B형 결합 불확도일 경우 감도계수는 단위가 달라지면서 다양한 편미분 공식을 활용할 수 있어야 한다.

예를 들어, 인장강도 불확도 측정 모형 함수가 $R=\frac{F}{s}$일 경우 4.1.2절에 의해 B형 결합 불확도는,

$$u_c(R)=\left[\left(\frac{\partial R}{\partial F}\right)^2u_F^2+\left(\frac{\partial R}{\partial s}\right)^2u_s^2\right]^{\frac{1}{2}}=\left[\left(\frac{1}{s}\right)^2u_F^2+\left(\frac{-F}{s^2}\right)^2u_s^2\right]^{\frac{1}{2}}$$ 이 된다.

또 다른 예를 들면, 수산화 나트륨 $(NaOH)$ 불확도 측정모형 함수가

$$N=\frac{1000\cdot m\cdot p}{M\cdot n}\,[mol/L]$$ 일 경우 4.1.4절에 의해 B형 결합 불확도는

$$\frac{u_c(N)}{N}=\left[\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2+\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2+\left(\frac{u(M)}{M}\right)^2+\left(\frac{u(n)}{n}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$ 이 된다. [1]

5. 확장 불확도 (Expanded Uncertainty) 모형

5.1 확장 불확도 모형

확장 불확도 모형에는 7가지 모형이 있으며 B는 치우침 (Bias), u는 표준 불확도 u_c는 결합 불확도, δ는 t분포의 비중심성(Noncentrality)일 경우 다음과 같다. [6, 11]

모형 1 : $u_E = u + |B|$

모형 2 : $u_E = K(B^2 + u_c^2)^{\frac{1}{2}}$

모형 3 : $u_E = (B^2 + u^2)^{\frac{1}{2}}$

모형 4 : $u_E = 2[(\frac{B}{2})^2 + u_c^2)]^{\frac{1}{2}}$

모형 5 : $u_E = u \pm B$

모형 6 : $u_E = 0 + S(\overline{q}) \cdot t(\nu, 1-\alpha, \delta), -2\delta + S(\overline{q}) \cdot t(\nu, 1-\alpha, \delta)$

모형 7 : $u_E = \pm K[u_{c_A}^2 + u_{c_B}^2]$

모형 7이 ISO에서 1993년 발행된 GUM의 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침 [5] 에서의 확장 불확도 모형이다.

5.2 자유도 (Degree of Freedom)

5.2.1 A형 자유도

A형 자유도는 불편분산(Unbiased Variance) 또는 제곱평균(Mean Squares)를 구하는 경우 제곱합(Sum of Squares)의 형태에 따라 달라진다. 구하는 목적은 2.1절에서와 같이 순수한 독립인 개수로 정의되며 구하는 방법은 데이터의 전체 개수에서 데이터에 의해 결정되어 지는 수만큼 증감을 해주는 것이다. 예를 들어 2.1절의 자유도는 (n-1) 이지만 2.2절의 이변량 회귀분석을 분산 분석으로 수행할 경우 오차항의 자유도는 (n-2)가 되며 2.4절의 3단계 지분 실험법에서도 $x_1, x_2, x_3,$ 오차항은 제곱합 형태에 따라 각각의 자유도는 l, $l(m-1)$, $lm(n-1)$, $lmn(r-1)$이 된다.

5.2.2 B형 자유도

B형 자유도는 상대불확도로 과학적 판단에 의해 주관적으로 구할 수 있는 값이다. $R = \frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \times 100(\%)$로 정의되며 $\pm R\%$까지 신뢰할 수 있는 한계값을 의미한다.

B형 자유도 $\nu_i \approx \frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2$으로 측정범위의 한계 값에 대하여 100%의 확신을 가지고 있을 경우 R=0% 가 되며 이때의 자유도는 무한대 (∞)가 된다. B형 자유도에 별도의 언급이 없을 경우 자유도는 ∞로 설정한다.

5.3 유효자유도와 포함인자

확장 불확도의 유효 자유도는 A형, B형 자유도에 대해 Welch-Satterthwaite 공식을 이용하여 $\nu_{eff}=\dfrac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N}\dfrac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$ 다음과 같이 구한다. 소숫점이 나오는 경우는 소숫점 아래를 버린 정수값을 채택한다.

포함인자 (Coverage Factor) k 는 자유도 v, 신뢰 수준 p를 나타내는 수치로 참고문헌 [5] 표 2의 t 분포에 해당한다. 유효 자유도가 100이상인 경우 정규분포로 수렴되어 95% 신뢰한계일 경우는 k=1.96 을 반올림하여 k=2를 사용하며, 99%신뢰한계일 경우는 k=2.576을 사용한다. 대부분의 경우 95% 신뢰한계를 유지하는 포함인자 k=2를 사용한다. 이 의미는 불확도 추정을 100번 했을 경우 95번은 확장 불확도를 포함한다는 구간 추정의 의미를 가지고 있다.

5.4 확장 불확도 표현 및 SPC관리도

확장불확도는 측정 모형 함수(Mathematical Model)의 값(Value)을 가감한 것을 중심으로 ±확장 불확도 즉 $Y=y\pm u_E$로 표현된다. 확장 불확도의 값은 SPC 관리도의 $\bar{x}$관리도를 TAR(Test Accuracy Ratio) 와 TUR(Test Uncertainty Ratio)목표값 [9]과 더불어 규격한계(Specification, Tolerance Limit)와 함께 동시에 관리할 경우 이상한 불확도 원인을 조기에 파악할 수 있다.

또한 측정 모형함수의 공식을 특성요인도에 의해 표시하면 결과 변수 y는 특성요인도의 특성이 되며 $x_1, x_2, \cdots\cdots x_N$ 은 요인이 되어 불확도의 원인에 대한 심층파악이 가능해진다. 3장에서의 A형 표준불확도, B형 표준불확도, A형 결합불확도, B형 결합불확도, 확정불확도 등의 중간계산은 EXCEL 등의 Spreadsheet 를 활용하는 것이 좋으며 최종 불확도 요약표(Uncertainty Budget)시트를 사용하는 것이 바람직하다.

6. 결 론

본 연구에서는 인류가 완벽하게 정해진 참값(True Value)을 찾기 위해 잠정적으로 협정된 기준값으로 불확도를 산출하기 위한 다양한 측정함수모형 및 평가방안을 제시하였다.

본 연구에서는 확장 불확도 산정을 위한 4단계 절차를 제안하였다. 1단계에서는 일변량, 이변량, 다변량, 3단계 지분 실험법과 자동상관된 ARMA등의 불확도 측정모형함수에 대한 A형 표준불확도 방안을 제시하였다. 2단계에서는 6가지 확률분포와 다변량 분석모형에 대한 B형 표준 불확도 평가 방안을 제안하였으며, 3단계에서는 감도계수,

불확도 결과와 원인 변수간의 선형관계, 불확도 원인변수간의 상관관계를 고려하여 A형, B형 결합 불확도 평가 방안을 도출했다. 마지막 단계에서는 A형, B형, 유효자유도를 구하고 신뢰수준을 나타내는 포함인자값을 정하는 방법과 복잡한 계산을 위한 스프레드시트와 요약표 시트 사용을 제안하였다. 최종적으로 구한 확장 불확도는 TAR, TUR을 고려한 관리도와 함께 규격한계의 값과 비교해서 사용할 경우 불확도 이상원인을 조기에 파악할 수 있다.

향후 연구과제로는 교정의 소급성(Traceability)원리에 따라 교정시험 기관간 불확도 차이의 모형을 유형화하고 평가하는 방안이다.

7. 참 고 문 헌

[1] 기술 표준원, 시험분야 측정불확도 표현지침 개발, 2005.

[2] 김은정외, 시계열 분석입문, 자유아카데미, 1991.

[3] 이레테크, 새 Minitab 실무완성 Release 14, 2004.

[4] 최성운, "측정불확도 평가 및 표현", 한국 산업경영 시스템 학회 춘계학술대회 발표 논문집, (1999) 78-88.

[5] 한국 표준협회, KSA3000 : 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침, 2005.

[6] Dieck R.H., "Measurement Uncertainty Model", ISA Transactions, 36, (1) (1999), 28-35.

[7] Kessel W., "Measurement Uncertainty According to ISO/BIPM-GUM", Thermochimica Acta, 382 (2002) 1-16.

[8] Lampasi D.A., Nicola F.D., Podesta L., "Generalized Lambda Distribution for the Expression of Measurement Uncertainty", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 55, (4)(2006) 1281-1287.

[9] Macci D., Carbone P., Petri D., "Management of Measurement Uncertainty for Effective Statistical Process Control", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 52, (5)(2004) 1611-1617.

[10] Maroto A., Boque R., Riu J., Rius F.X., "Estimation of Measurement Uncertainty by Using Regression Techniques and Spiked Samples", Analytica Chimica Acta, 446 (2001) 133-145.

[11] Synek V., "Attempts to Include Uncorrected Bias in the Measurement Uncertainty", Talanta, 65(2005) 829-837.

[12] United Kingdom Accreditation Service, LAB 34 : The Expression of Uncertainty in EMC Testing, 2002.

저 자 소 개

최 성 운 : 현 경원대학교 산업공학과 교수 재직 중. 한양 대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 취득하고, 1994년 한국과학재단 지원으로 University of Minnesota에서 1년간 Post-Doc을 수행하였으며, 2002년부터 1년 8개월 동안 University of Washinton에서 Visiting Professor를 역임하였음. 주요 관심분야는 경영품질시스템, 서비스 사이언스, 자동화 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 컴퓨터 · 정보통신시스템의 신뢰성 설계 및 분석, RFID시스템에도 관심을 가지고 있음. swchoi@kyungwon.ac.kr

저 자 주 소

최 성 운 : 경기도 성남시 수정구 복정동 산65번지 경원대학교 산업정보시스템공학과