

플라스틱재료의 기계적 특성시험 불확도추정에 대한 고찰

A Study on Estimation uncertainty of measurement in mechanical characteristic exam for Plastic materials

김원경*
Kim, Won-kyung

권성태**
Kwon, Sung-Tae

김정남***
Kim, Jung-Nam

ABSTRACT

Recently, uncertainty of measurement became a major concern for the people working on the laboratory evaluation and accreditation. 'uncertainty of measurement is a parameter associated with the result of a measurement that characterizes the dispersion of the value that could reasonably be attributed to the measured.' This study analysed how to estimate uncertainty of measurement in mechanical characteristic exam for Plastic material. its uncertainty was estimated according to International Organization for Standardization(ISO), they were named to A type uncertainty, B type uncertainty, combined standard uncertainty, and expanded uncertainty. We obtained that the combined standard uncertainty was 0.96697 MPa and the expanded uncertainty was 2.291MPa.

1. 서론

최근들어 ISO 17025에 의한 시험검사에 대한 국제적인 규격화가 전세계적으로 확산되면서 측정불확도의 평가와 표현방법에 대한 중요성이 점차 높아지고 있다. 1993년에 ISO에서는 측정불확도 표현 지침서 "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, (GUM)"를 발간하여 통일적으로 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 이에 따라 측정결과를 보고하는데 있어서 불확도를 병기하는 것이 필수적으로 요구되어지고 있다.

불확도란 "측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 상태를 나타내는 파라미터"로 정의된다. 일반적으로 측정결과에 대한 신뢰도를 나타내는 방법으로는 오차라는 개념이 많이 사용되어져 왔으나 측정값과 참값의 차이라는 오차의 개념은 참값을 알 수 없기 때문에 근본적으로 모호한 부분을 피할 수 없다. 이 때문에 오차가 아니라 측정된 결과를 바탕으로 참값이 존재할 범위를 추정하는 불확도의 개념을 적용하여 결과값에 대한 신뢰도를 높이고자 한다.

따라서 본 연구에서는 플라스틱의 기계적 특성 중의 하나인 항복점에서의 인장강도를 측정하고 그 결과값에 대한 불확도를 GUM의 내용에 근거하여 추정한 사례를 마련함으로써 향후 철도분야와 관련된 시험에서의 측정결과값에 대한 신뢰도를 높이는데 그 목적이 있다.

2. 불확도 산정이론

일반적으로 어떤 측정 또는 시험도 완벽할 수 없으며, 그러한 불완전함으로 인해 측정의 오차가

- * 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
- ** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
- *** 한국철도기술연구원 위촉연구원, 비회원

발생한다. 따라서 측정결과값은 단지 측정값의 근사값이고 그 근사값의 불확도(Uncertainty)가 명시될 때 완성된다.

GUM 가이드는 평가방법에 따라 두 가지 범주로 불확도요인을 그룹화하는 접근방법을 채택하고 있다. “A타입”평가는 통계적인 방법을 사용하여 반복된 측정에 대해 계산하는 것을 말하며, 이는 통계학에서 사용되는 표본분산 S^2 에 해당한다. “B타입”은 “A타입”이외의 방법에 의해 계산하는 것을 말한다. 예를 들어, 교정성적서에 있는 데이터, 이전의 측정 데이터, 기기의 행태에 대한 경험, 제조자의 사양 및 기타 관련된 정보에 근거를 둔 판단에 해당한다.

측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정결과에 대한 표준불확도를 “합성표준불확도”라 하며 $u_c(y)$ 로 표시한다. 이는 측정결과값에 대한 추정 표준편차이다. 확장불확도 U 는 합성표준불확도 $u_c(y)$ 에 포함인자 k 를 곱하여 얻는데 이러한 확장불확도를 도입한 목적은 측정결과값의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과값 주위의 어떤 구간을 제공해 주기 위함이다. Fig. 1은 측정불확도 평가의 흐름을 도식화한 것이다.

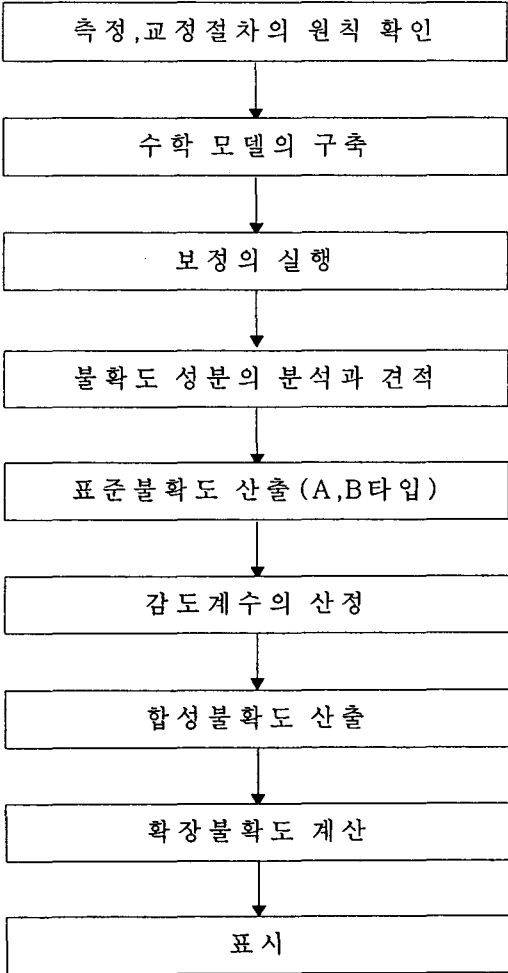


Fig. 1 측정불확도 평가의 흐름도

3. 불확도산정 기본식

일반적으로 측정값 y 를 결정하거나 영향을 주는 인자를 x_1, x_2, x_n 이라 한다면, 다음 함수식으로 표현된다.

$$y = f(x_1, x_2, x_n) \tag{1}$$

여기에서 각 인자의 변화량(표준불확도)을 $u(x_i)$ 라 하면 $u(x_i)$ 는 식(2)와 같다.

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{2}$$

x_i 가 결과에 영향을 주는 정도(감도계수)를 c_i 로 나타내면 측정결과에 대한 합성표준불확도 $u_c(y)$ 는 식(3)과 같다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=0}^n c_i^2 u^2(x_i)} \tag{3}$$

여기에서 감도계수 c_i 는 식(4)과 같이 계산된다.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial i} \tag{4}$$

확장불확도 U 는 식(5)와 같다.

$$U = k u_c(y) \quad (5)$$

여기에서 포함인자 k 는 자유도 ν 에서 신뢰도 p 일 때의 t 분포의 값이다.

합성표준불확도 $u(x_i)$ 가 두 개 이상의 표준불확도에서 구해진 것이면 그 때의 자유도 ν 는 식(6)의 유효자유도 (ν_{eff})를 사용한다.

$$\nu_{eff} = u_c^4(y) / \sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\nu_i} \quad (6)$$

이상과 같이 해서 구한 불확도는 측정결과와 함께 다음과 같이 표현된다.

$$Y = y \pm U = y \pm k u_c(y)$$

4. 플라스틱의 항복점에서의 인장강도 측정

본 연구에 필요한 불확도 산정을 위하여 플라스틱의 인장시험을 실시하였다. 본시험에 앞서 시험실의 환경조건을 온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$ 로 시험환경을 조성하였고, 시료는 동일 온, 습도의 항온항습조에서 40시간 이상 유지하여 환경조건에 따른 불확도요인을 제거하였다.

디지털 버어니어캘리퍼스와 디지털 두께측정기로 시편의 폭과 두께를 측정하였다. 시험방법은 ASTM D 638에 의하였고, 시험속도는 5mm/min이었다. 시험에 사용한 장비는 10,000kN의 로드셀을 장착한 만능재료시험기(UTM)로서 2,000~10,000kN의 사용범위를 가졌다. 인장강도의 단위는 MPa이며 소수점 이하 3자리까지 측정하였다.

Table 1은 시편의 치수와 항복점에서의 인장강도 측정결과를 나타낸 것이다.

시료구분	항복하중 (N)	항복강도 (N/mm ²)	시편폭(W) (mm)	시편두께(H) (mm)
1	2,659.05	64.265	12.81	3.23
2	2,635.55	64.093	12.81	3.21
3	2,688.04	65.574	12.81	3.20
4	2,705.22	66.618°	12.81	3.17
5	2,686.70	66.371	12.81	3.16
평균	2,674.91	65.384	12.81	3.19

Table 1 시료치수 및 인장하중결과

5. 항복점에서의 인장강도에 대한 불확도산정

ASTM D 638에 정의된 항복점에서의 인장강도는 다음과 같다.

$$\text{항복강도} (\sigma_{ys}) = \frac{\text{항복점에서의 최대하중}}{\text{단위면적}} = \frac{F}{W \times H} \quad (\text{단위:MPa})$$

수학적 모델의 입력량을 고려하여 Table 2와 같이 불확도 요인을 검출하였다.

불확도요인	표시	세부내용	불확도Type
하중	Fc	UTM 교정성적서의 불확도	B
	Fr	UTM 분해능에 대한 불확도	B
	Fs	시료간 측정하중의 편차에 대한 불확도	A
시편폭	Wc	버니어캘리퍼스 교정성적서의 불확도	B
	Wr	버니어캘리퍼스 분해능에 대한 불확도	B
	Ws	반복측정시 시편폭의 편차	A
시편두께	Hc	디지털두께측정기 교정성적서의 불확도	B
	Hr	디지털두께측정기 분해능에 대한 불확도	B
	Hs	반복측정시 시편폭의 편차	A

Table 2 불확도 요인

항복강도의 경우 강도 σ_{YS} 가 측정된 양이라면 다음과 같은 측정변량들의 함수로 표현될수 있다.

$$u(\sigma_{YS}) = f(F, W, H) \quad \text{여기에서 } F : \text{하중} \quad W : \text{시편폭} \quad H : \text{시편두께}$$

합성표준불확도 $u_c(\sigma_{YS})$ 는 합성분산인 $u_c^2(\sigma_{YS})$ 의 양의 제곱근으로서 $u_c^2(\sigma_{YS})$ 는 아래식으로 구해진다.

$$u_c^2(\sigma_{YS}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (7)$$

여기서 $u(x_i)$ 는 x_i 의 표준불확도이다. 편도함수 $\partial f / \partial x_i$ 는 함수 f 에 관하여 미분한 것으로 x_i 의 변화에 대한 σ_{YS} 의 변화를 나타낸 것이다. Table 3는 각 요인별 감도계산을 계산한 결과를 나타낸 것이다.

구분	x_i	$\partial f / \partial x_i$	단위
$c(F)$	F	0.024703	mm^{-2}
$c(W)$	W	-5.15872	N/mm^3
$c(H)$	H	-20.91241	N/mm^3

Table 3 각 요인별 감도계수

식(7)을 이용하여 합성표준불확도를 구하려면 각 요인별 표준불확도를 구하여야 한다. 각 요인별 표준불확도는 A형 또는 B형으로 구한다. 먼저 측정하중과 시편폭, 시편두께는 시편5개의 측정결과를 바탕으로 식(2)를 이용하여 A형으로 구하였다. 측정기기의 교정불확도는 직사각형 확률분포를 이용하여 구하였고, 분해능에 대해서는 삼각형 확률분포를 이용하여 B형으로 구하였다. Table 4은 표준불확도 $u(x_i)$ 를 불확도 요인별로 구한 결과를 나타낸 것이다. 각각의 요인들로부터 유발된 표준불확도를 합성하는 것은 식(7)과 같은 방법으로 구한다. 먼저하중과 시편폭, 시편두께에 대하여 각각 합성표준불확도를 구한다. 이때 각각의 감도계수는 1이 된다. Table 5는 요인별 합성표준불확도를 나타낸 것이며, Table 6은 최종적으로 구한 항복강도에 대한 합성표준불확도이다.

구분	표준불확도	단위	불확도 유형
$u(F_c)$	12.57203	N	B
$u(F_r)$	0.28867	N	B
$u(F_s)$	27.52656	N	A
$u(W_c)$	0.00400	mm	B
$u(W_r)$	0.00289	mm	B
$u(W_s)$	0.000000169	mm	A
$u(H_c)$	0.0045	mm	B
$u(H_r)$	0.00289	mm	B
$u(H_s)$	0.02881	mm	A

Table 4 요인별 표준불확도

구분	합성표준불확도	단위
$u(F)$	30.26302	N
$u(W)$	0.004935	mm
$u(H)$	0.029302	mm

Table 5 요인별 합성표준불확도

구분	합성표준불확도	단위
$u(\sigma_{YS})$	0.96697	N/mm^2

Table 6 항복강도에 대한 합성표준불확도

각 요인별 감도계수의 제공에 요인별 표준불확도를 제공한 값을 곱하여 얻은 값을 모두 더한 다음에 이 값의 양의 제곱근을 구하면 항복점에서의 인장강도에 대한 합성표준불확도가 되며 그 결과는 Table 6과 같다.

유효자유도 ν_{eff} 는 식(6)에 의하여 7.71이 계산되므로 대략 8로 본다면 포함인자는 95.45% 신뢰도에서 $k=2.37$ 로 구해진다. 합성표준불확도에 포함인자(coverage factor)를 곱하여 최종적으로 아래의 식에 의하여 확장불확도를 구한다.

$$U_{\sigma_{YS}} = k \times u_c(\sigma_{YS}) = 2.37 \times 0.96697 = 2.291$$

시험에 의하여 시편 5개에 대한 항복점에서의 인장강도의 평균값은 65.384MPa이므로 아래와 같은 방법으로 시험결과가 표기되어야 한다.

$$\sigma_{YS} = 65.384 \pm 2.291 \text{ (MPa)} \quad (95.45\% \text{ 신뢰구간}, k = 2.37)$$

6. 결론

ASTM D 638의 시험방법에 의하여 플라스틱의 항복점에서의 인장강도를 측정하고, GUM에 의하여 A형 불확도, B형 불확도, 합성표준불확도, 확장불확도 등으로 구분하여 시험결과값에 대한 측정 불확도를 추정한 결과, 항복하중의 평균값 65.384MPa에 대한 합성표준불확도는 0.96697 MPa이었고, 확장불확도는 2.291MPa이었다.

일반적으로 측정이나 분석의 결과는 사용자가 믿을수 있는 과학적인 근거가 마련되어야 한다.

이를 위하여 측정의 결과로서 측정결과값과 그것의 불확실한 정도를 국제규격에 맞게 나타내어야 하며 나아가서 그 불확도를 계산하기 위해서 사용된 방법을 명확하게 기술하여 그 신뢰성을 높여야만 할 것이다.

본 결과는 플라스틱의 항복점에서의 인장강도와 같은 기본적인 시험에 대한 불확도 추정 사례로 향후 철도분야의 다양한 시험에서도 이러한 체계적인 방법을 활용하여 측정결과값에 대한 신뢰도를 높이는 것과 동시에 불확도요인을 최소화시키는 시험방법 및 관리체계를 확립해 나가는 노력이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", ISO, 1993
2. "측정결과의 불확도 산정 및 표현을 위한 지침", KOLAS-R-005, 한국시험·검사기관 인정기구 (KOLAS), 2000
3. ASTM D 638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2002
4. 방건웅, 탁내형, "한국산업표준(KS)에 따른 로크웰 경도 시험기의 불확도 산정에 관한 연구", 열처리공학회지, 제13권, 제3호, 2000