

## ◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 IV

# 공작기계 주축회전체 진동 측정에서의 불확도 추정 방법

## Estimation of Measurement Uncertainty for Vibration Tests in the Machine Tool Main Spindle

이경훈<sup>1,✉</sup>, 윤상환<sup>1</sup>, Dinh Minh Chau<sup>2</sup>, 박민원<sup>2</sup>  
Jung Hoon Lee<sup>1,✉</sup>, Sang Hwan Yoon<sup>1</sup>, Dinh Minh Chau<sup>2</sup> and Min Won Park<sup>2</sup>

1 창원대학교 산학협력단 클러스터사업단 (K-MEM R&D Cluster, Changwon National Univ.)

2 창원대학교 전기공학부 (Department of Electrical Engineering, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: cluster8@changwon.ac.kr, Tel:055-213-2894

Manuscript received: 2011.1.19 / Accepted: 2011.1.31

*Report on the notion of uncertainty is important. The reason is that the measured value includes a lot of uncertain factors. Reliable results can't be derived without the notion of uncertainty. The mathematical model to evaluate uncertainty considering the quality of vibration is important to evaluate uncertainty, and it must contain the every quantity which contributes significantly to uncertainty in the measured results. In this paper, the evaluation of uncertainty analysis about rotor vibration measurements of machine tools is presented to evaluate the most important factors of uncertainty.*

Key Words: Vibration (진동), Measurement Uncertainty (측정불확도), ISO Standards (ISO 규격)

### 기호설명

$s$  = standard deviation

$u_a$  = type A standard uncertainty

$u_b$  = type B standard uncertainty

$u_c$  = combined standard uncertainty

$U$  = Expanded uncertainty

$V_{eff}$  = effective degrees of freedom

$k$  = Coverage factor

$c_i$  = sensitivity of coefficients

### 1. 서론

21 세기 국가간의 경쟁력이 치열해지고 제품의 고부가가치화가 요구됨에 따라 개발된 제품들은

보다 정밀하고 보다 정확한 신뢰성이 요구되어진다. 신뢰성을 판단하고 비교할 수 있는 방법으로 측정결과값에는 어떤 정량적인 값을 측정된 값과 함께 나타내고 있다.

정량적인 값을 나타내기 위해서는 불안한 요소들이 많이 있다. 측정의 기준이 되는 참값(True value)이란 값이 실제로 정확하게 알 수 없는 값이기 때문에 측정하는 값에 대한 오차(error)값을 정확하게 나타낼 수 없다. 이러한 불안한 요소들을 해결하기 위하여 측정값에는 항상 불확도 값을 같이 명시하게 되어있다. 불확도란 측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정한 값들의 분산특성을 나타내는 매개변수이다. 세계의 시장이 글로벌(Global)화 되고 국가들간의 무역이 급속도로 증가함에 따라, 각 국가간에서 이루어지는 측정결과

를 비교할 수 있도록 불확도를 평가하고 표현하는 방법의 통일성이 필요하게 되어졌다. 이는 생산된 제품의 검사에 사용된 측정기술이나 방법, 측정평가가 생산된 제품의 정밀도와 신뢰성 부분에 영향을 끼치는 요인이기 때문이다.

현재 세계 각국에서는 1993년 국제표준화기구(ISO)에서 발행한 측정불확도 표현 지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)를 토대로 많은 나라들이 자국의 기준으로 받아들이고 있으며, 현재로서는 불확도 평가와 표현에 있어 가장 적합한 접근방법으로 인정하고 있는 실정이다.

따라서 측정결과에 영향을 주게 되는 중요한 항목이나 부분에 대한 연구가 필요하다.

이에 관련하여 본 실험에서는 창원대학교 산학협력단에서 시행하고 있는 KOLAS 시험인정 항목 중 공작기계 주축회전체의 진동측정에 대한 불확도 요인을 분석하고 측정결과값에 영향을 주는 측정 불확도 분석을 수행하고자 한다.

## 2. 개요

### 2.1 측정불확도 개요

불확도(Uncertainty)란 측정량의 값을 정확하게 알 수 없다는 사실을 반영하고 있다. 측정불확도 추론은 측정하고자 하는 양에 대해, 측정/분석을 통하여 얻은 데이터를 수집, 정리하여 측정량의 참값이 속해있을 범위에 대한 산포정도를 합리적으로 판단하여 제시하는 학문이다.

측정불확도를 구하는 과정은 Fig. 1과 같다. 측정자의 반복된 실험을 통한 측정한 결과의 통계적인 분포로부터 구한 시험 표준편차 값인 Type A 표준불확도와 경험이나 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 구한 표준편차 값을 Type B 표준불확도라 한다. 이 두 가지 타입을 합산한 것을 합성표준불확도라고 하며 합성표준불확도에 포함인자  $K$ 를 곱하여 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 구간을 확장불확도라고 정의한다.

측정결과값과 확장불확도 값을 명시함으로 측정불확도를 표기할 수 있게 된다.

#### 2.1.1 진동 측정 모델식

진동이란 일반적으로 물리계가 평행상태에서 벗어난 후 다시 평행상태로 복원하려는 힘에 반응

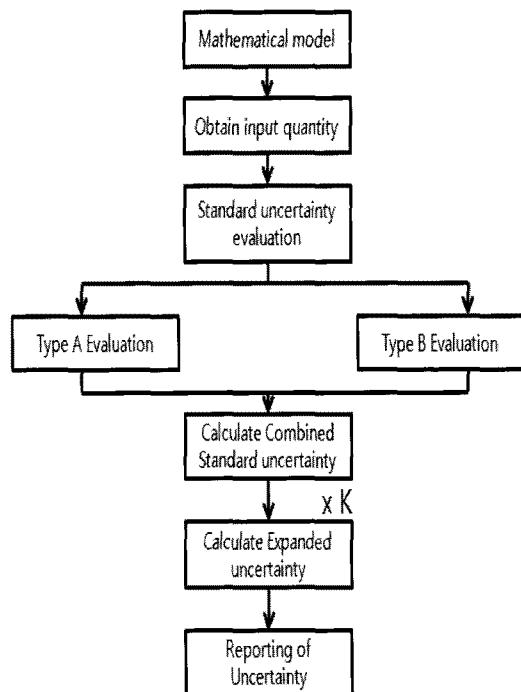


Fig. 1 Uncertainty estimation procedure

할 때 나타나는 현상을 말한다. 진동측정에서 측정 매개 변수로는 주파수, 진폭, 진동크기, 진동강도로 나타낼 수 있으며 이 중 회전체손실에 있어서 가장 큰 영향을 끼치는 요인이 진폭이기 때문에 본 연구에서는 진폭의 측정을 측정량으로 측정불확도 평가를 하였다. 진폭을 나타내는 표현식은 식 (1)과 같다.

$$x(t) = X \sin \omega t \quad (1)$$

진폭은 아래의 식과 같이 변위, 속도 및 가속도로 표현할 수 있다.

$$\text{변위: } x = A \sin \omega t \quad (2)$$

$$\text{속도: } v = \dot{x} = A \sin \omega t \quad (3)$$

$$\text{가속도: } a = \ddot{x} = -A \omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 x \quad (4)$$

이러한 진동현상에 있어서 가속도는 진동수( $\omega$ )의 제곱에 비례함을 식 (4)를 통하여 알 수 있

다. 일반 기계나 자동차의 진동현상을 측정할 때, 가속도를 기준으로 측정한 결과는 높은 진동수 성분을 강조하는 경향이 많다. 반면에, 변위를 기준으로 진동현상을 측정하는 경우에는 낮은 진동수 성분이 강조된다고 볼 수 있다. 실제로, 많은 기계 장비들은 비교적 균일한 속도 스펙트럼 특성을 갖기 때문에, 기계진동의 분석에서는 속도나 가속도를 기준으로 진동현상을 측정한다.

본 실험에서는 측정기의 속도 측정값인 식 (3)을 통하여 불확도 모델식을 정리하였다.

### 2.1.2 진동측정에서 발생되는 표준불확도 요인

진동측정에 있어서 발생하는 불확도 요인에 있어서 측정하는 장비, 방법, 환경, 시험자, 기타 등 불확도 인자가 있다. 본 실험에 있어서는 KS B ISO 10816-3:2001의 규격을 참고하여 세 가지 불확도 요인을 산출하였다.

- 실험 반복측정을 통한 표준불확도요인
- 측정기 교정성적서의 표준불확도 요인
- 측정기 분해능에 의한 표준불확도요인

#### 1) Type A 표준불확도

Type A 표준불확도는 시험에서 반복측정을 통하여 측정된 데이터값을 통하여 산출되는 불확도 요인이다. 여러 번 측정하고 평균값을 이용하는 경우, 평균의 표준편차를 구하여 표준불확도를 구하게 된다.

Type A 표준불확도는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$u_{a1} = S_x^- / \sqrt{n} \quad (5)$$

여기서  $n$ 은 반복측정 실험 횟수를 말하며  $S_x^-$ 는 측정된 값들의 평균 표준편차를 말한다.

표준편자는 식 (6)과 같다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$x_i$ 는 측정된 데이터 값이며,  $\bar{x}$ 는 평균데이터 값이다.

#### 2) Type B 표준불확도

Type B 표준 불확도의 요인에 있어서 측정에 따른 요인의 불확실성을 기기의 성질, 측정기의 규격, 교정 보고서에 따른 자료를 통하여 표준편차 상당량을 구하여 표준불확도를 산출하였다.

측정기 교정성적서에 따른 Type B 불확도 값은 식 (7)과 같다.

$$u_{b1} = u / k \quad (7)$$

$U$  값은 교정성적서상의 상대 표준불확도 값을 나타내며 측정평균값의 2.4% 범위에 해당하는 값을 기준( $k = 2$ , 신뢰수준 약 95%)으로 식 (7)을 통하여 표준불확도  $u_{b1}$ 의 값을 구하였다.

측정기의 분해능에 의한 표준불확도  $u_{b2}$  값은 장비의 사양(specifications)에 따른 분해능 0.1mm/s의 값을 가진다.

$$u_{b2} = \frac{D / 2}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

$D$ 는 측정기 자체의 분해능 값이며, 식 (8)을 통하여,  $u_{b2} = 0.0289 \text{ mm/s}$ 의 표준불확도 값을 구할 수 있다. 식에 사용된 확률분포의 모델식은 사각형 분포(Rectangular)로 나타내었다.

#### 2.1.3 합성 표준불확도

Type A 와 Type B 의 표준불확도를 통하여 합성 표준불확도는 식 (9)와 같다.

$$u_c = \sqrt{u_{a1}^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2} \quad (9)$$

사용되어진 식은 각 표준불확도들의 제곱합의 제곱근법 (RSSM: Root Sum Square Method)으로 구하였다. 본 실험에서 입력량인 표준불확도 값들은 서로 상관관계가 없이 독립적으로 구할 수 있다는 전제로 공분산이 0임을 두고 제곱근법을 사용하였다.

#### 2.1.4 확장 불확도

확장 불확도는 측정값의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측

정결과 주위의 어떤 구간을 정의해줄 수 있는 불확도의 척도를 말하며 구하는 식은 식 (10)과 같다.

$$U = k \times u_c \quad (10)$$

$K$ 는 포함인자를 말하며, 포함인자를 구하기 위해서는 유효자유도를 측정하여야 한다. 유효자유도를 구하는 식은 Weleh-satterthwaite 공식을 이용하였다.

$c_i$ 는 감도계수(index of the sensitivity of dispersion)이다.

$$\begin{aligned} V_{eff} &= \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n u_i^4(y)} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n [c_i \times u(x_i)]^4} \\ &= \frac{u_a^4(y)}{v_a} + \frac{u_b^4(y)}{v_b} + \frac{u_c^4(y)}{v_c} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 통하여 나온 유효자유도 값을 t-분포표를 이용하여 포함인자  $k$  값을 구한다.

식 (11)에서 Type B 표준불확도의  $V_b(U_{b1})$ ,  $V_c(U_{b2})$  값은  $\infty$ 값에 가깝기 때문에 본 실험에서는 10,000,000의 값을 넣었다.

본 실험에서 사용한 확률분포는  $u_{a1}$ 는 t-분포표를  $u_{b1}$  정규분포,  $u_{b2}$ 는 직사각형 분포를 이용하였다.

본 시험에서는 추정되는 불확도 요인들은 독립적인 변수이기 때문에 진동에 대한 최대진폭의 감도계수는 모두 1로 하였다.

### 3. 시험 및 결과

#### 3.1 사용장비 및 성능

본 시험에 사용되는 장비(Fig. 2)는 HOFMANN 사의 측정기로서 분해능 0.1~200 mm/s, 진동 반범위 0.05 mm/s로 교정결과 측정기의 분해능의 의한 불확도 0.0289 mm/s를 가진다. 측정기의 Bandwidth는 10 Hz~10 kHz 측정 포인트는 Rms 방식으로 측정하였다.



Fig. 2 Vibration measurement instrument

#### 3.2 시험측정 검정

시험측정 시 회전체의 진동측정위치를 수직방향으로 2 포인트 지점을 잡았으며, 진동 속도 설정값에 실효값(Rms), Peak 值, Peak to Peak 值을 주어 데이터 값을 비교하였으며, 회전체 스팬들의 속도는 1,000 rpm, 5,000 rpm, 10,000 rpm 실험시 환경요인은 온도 ( $21.0 \pm 1.0$ ) °C, 습도 (50 ± 5)% R.H.로 동일한 조건으로 실험을 하였다. 반복측정 횟수는 20 회를 하였다. 두 가지 요인에 관련하여 비교된 시험데이터는 Table 1 과 Table 2 와 같다. 측정포인트는 Fig. 3 과 같다.

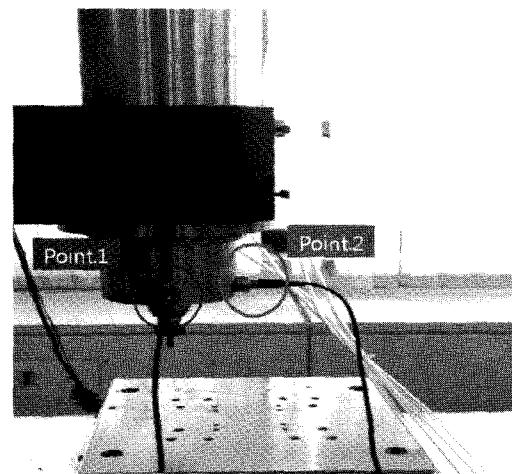


Fig. 3 Measurement point

Table 1 Comparison of measured setting of measured data

	rms	peak	p-p
max	0.808	1.447	2.770
min	0.795	1.298	2.511
average	0.801	1.356	2.623
variance	1.3E-5	1.6E-3	4E-3
Standard deviation	0.0036	0.040	0.004

Table 1 에서는 본 실험에서 최고회전수인 10,000 rpm 일 때, 측정기계 자체의 설정값 변화에 따른 데이터를 나타내보았다. 같은 조건의 환경에서 시험하였을 경우 측정한 진동 속도의 값이 기기의 설정값에 따라 데이터가 크게 달라짐을 확인 할 수 있다. 이는 불확도 추정의 표기에 있어 명확하게 표시해야 한다. 이에 KS B ISO 10816-3:2001에서 회전 기계의 광대역 진동을 평가할 때에는 진동 속도의 실효값을 고려하는 것이 가장 합리적인 방법이라고 제시하고 있다. 식 (1)에서 진폭의 계산에 있어 변위 또는 가속도와 같은 다른 양을 사용 할 때에는 실효값 대신 peak 값은 사용하는 것이 일반적으로 선호된다.

Table 2 는 측정지점에 따른 진동 속도의 변화를 실효값에 따른 데이터로 나타내보았다. Point 1 과 point 2 지점의 rpm 에 따른 측정값을 비교하여 보았을 때, point 1 은 rpm 이 증가하였을 때 측정값이 크게 증가하는 반면, point 2 에서는 rpm 이 10,000 rpm 이 되었을 때에는 point 1 의 지점과는 다르게 크게 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2 Comparison between measured speeds of measured data

	1,000 rpm		5,000 rpm		10,000 rpm	
	Point1	Point2	Point1	Point2	Point1	Point2
max	0.042	0.042	0.062	0.133	0.808	0.160
min	0.036	0.038	0.054	0.126	0.795	0.149
average	0.039	0.040	0.060	0.129	0.801	0.153
variance	2E-6	1E-6	5E-6	5E-6	13E-6	6E-6
Standard deviation	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002

진동속도값의 측정에 있어 측정위치는 측정값에 큰 영향을 주는 부분이다. 이에 측정결과값을 정확하게 알기 위해서는 규격에 따른 회전체의 규격과 종류에 따른 측정 위치점을 알고 성적서에는 측정불과 측정 위치점을 명확하게 표시하여야 한다.

### 3.3 측정불확도

20 회 반복측정에 의한 회전체속도 10,000 rpm 과 point 1 지점의 Type A 표준불확도는 Table 3 과 같으며, Type B 표준불확도에서 성적서상의 표준불확도는 0.0096 mm/s ( $k=2$ , 신뢰수준 95%), 측정기의 분해능에 의한 표준불확도는 0.0289 mm/s 이다.

Table 3 Type A standard uncertainty

run	No.			
	0.808	0.800	0.798	0.801
mm/s	0.795	0.795	0.801	0.801
	0.797	0.802	0.802	0.798
	0.804	0.801	0.797	0.802
	0.806	0.797	0.805	0.804
	Average		0.803	
	Standard uncertainty			0.002
	Degree of freedom			19

산출된 표준불확도를 식 (9)에 의하여 구하게 되면 0.030 mm/s 와 같다. 식 (11)에 의하여 유효자유도를 구하게 되면 유효자유도는 1295674이며 t-분포표를 이용하여 신뢰수준 약 95%에서 k 값이 2.00 이므로 0.061 mm/s 의 확장 불확도를 가진다.

불확도 총괄표는 Table 4 와 같다.

Table 4 Comparison of measured data

	Type	Standard uncertainty	Probability distribution
$u_a$	A	0.0019	t-distribution
$u_{b1}$	B	0.0096	Normal distribution
$u_{b2}$	B	0.0289	Rectangular distribution
$u_c$		0.0305	t-distribution
$k$		2	Coverage factor
$U$		0.061	Expanded uncertainty

성적서상의 측정불확도 표기는 다음과 같다.

$X(t) = 0.803 \text{ mm/s} \pm 0.061 \text{ mm/s}$   
(신뢰수준 약 95%, k=2)

#### 4. 결론

본 논문에서는 KOLAS 시험평가시 음향 및 진동시험분야의 진동특성 시험에 대한 측정불확도를 구하는 방법에 대하여 기술하였다.

공작기계관련 주축회전체 스픈들의 회전에 따른 진동 속도를 측정하여 이에 따른 불확도 요인을 보다 정확하고 신뢰성을 주는 측정값을 구하기 위해서는 앞서 설명하였듯이 측정물의 규격에 맞는 측정방법과 측정지점에 대한 정확한 포인트를 찾아야 더 신뢰성 있는 측정불확도 값을 표기 할 수 있음을 알 수 있었다. 이와 더불어 측정에 영향을 주는 불확도요인을 더 찾고 이에 맞는 식을 나타내는 것이 신뢰성있는 측정결과값을 나타낼 수 있을 것이다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다

#### 참고문헌

1. Korea Laboratory Accreditation Scheme, <http://www.kolas.go.kr>
2. KS B ISO 10816-3, "Mechanical vibration-evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts-part 3," 2001.
3. KS B ISO 10816-1, "Mechanical vibration-evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts-part1: General guidelines," 2001.
4. KOLAS-G-002, "Estimation of uncertainty of measurement results and guidelines for the representation," 2007.
5. Sa, J. S. and Kang, T. G., "Noise and Vibration Easy Everyday Life," pp. 23-24, 2007.
6. KOLAS-G-2007, "Estimation of uncertainty of measurement results and guidelines for the expression," 2007.
7. KOLAS-G-2007, "Field tests on the estimation of measurement uncertainty guidelines," 2007.
8. kb-c-c57(11), "Statistical Theory," Korea Conformity Laboratories Exam Training Materials (KCL), 2007.
9. kb-cc-c58(4), "Comparison Test Introduction to Measurement Uncertainty," Korea Conformity Laboratories(KCL), 2007.