Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 26(7) : 781~786, 2016
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2016.26.7.781

한국소음진동공학회논문집 제 26 권 제 7 호, pp. 781~786, 2016
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

시험장비의 특성을 고려한 진동시험결과에 대한 측정불확도 추정

Measurement Uncertainty of Vibration Testing Result with Including Uncertainty of Testing Facilities

문 석 준† · 정 정 훈*
Seok-Jun Moon and Jung-Hoon Chung

(Received August 9, 2016 ; Revised November 4, 2016 ; Accepted November 4, 2016)

Key Words : Uncertainty of Measurement(측정불확도), Expanded Uncertainty(확장불확도)

ABSTRACT

All measurements are subject to uncertainty and a measurement result is complete only when it is accompanied by a statement of the associated uncertainty. By international agreement, this uncertainty has a probabilistic basis and reflects incomplete knowledge of the quantity value. The “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, commonly known as the GUM, is the definitive document on this subject. The requirements for estimation of measurement uncertainty apply to all results provided by calibration laboratories and results produced by testing laboratories under the optional circumstances. In this paper, a procedure for estimation of measurement uncertainty from vibration testing is proposed on KS F 2868:2003 as an example. Both Type A and Type B evaluation of uncertainty are considered to calculate the combined standard uncertainty and expanded uncertainty.

1. 서 론

측정결과를 보고할 때는 그 결과를 사용할 사람이 얼마나 믿고 사용해도 되는지 신뢰성을 판단할 수 있도록, 그 신뢰도를 나타내는 어떤 정량적인 값을 측정결과와 함께 나타내는 것이 바람직하다. 측정학에서는 이러한 측정결과의 신뢰도에 관한 정량적 표현의 방법으로서 오차나 오차분석 등을 오랫동안 사용하여 왔다. 그러나 이러한 것들을 아무리 잘 평가하고, 적절한 보정을 해 주어도 그 결과가 조금도 틀리지 않고 정확한가 하는 데는 의문이 남아 있을 수밖에 없다.

한국인정기구(KOLAS)에서 발행된 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침[1]에 따르면, 측정결과의 신뢰성을 나타내기 위하여 지금까지는 오차, 정확도, 정밀도, 불확도 등의 여러 가지 용어들이 사용되어 왔으나, 분야에 따라 표현방법이 달라서 통일된 지침이 필요하게 되었다. 1993년 국제표준화기구(ISO)에서 측정불확도 표현 지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)[2,3]의 사용을 권고한 후, 이 지침서에 따라서 측정불확도를 구하고 표현하는 방법이 전 세계적으로 많은 분야에 확산되어 사용하고 있다[4].

국내에서의 측정불확도에 대한 개념은 KOLAS 국제공인시험 및 교정기관 인정제도와 함께 광범위

† Corresponding Author; Member, Dept. of System Dynamics, KIMM
E-mail : sjmoon@kimm.re.kr
* Member, Dept. of System Dynamics, KIMM

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

하게 알려지게 되었다. 하지만 측정불확도의 추정방법에 대한 보급 및 연구[5,6,7]는 제한적으로 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 또한 진동특성시험분야의 측정불확도에 대한 예제는 찾아보기 힘들다.

저자들은 2016년 한국소음진동공학회 춘계학술대회에서 진동분야의 측정결과에 대한 측정불확도 추정방법을 KS F 2868:2003 "거주공간 뜬바닥용 재료의 동탄성 계수 측정방법"[8]의 시험결과를 대상으로 발표한 바 있다[9]. 적용한 시험의 측정결과에 대해 측정불확도를 추정하고, 표현하는 방법의 한 예를 소개하였다. 이때 측정불확도에 영향을 미치는 인자로서 측정한 고유진동수와 하중판의 질량만을 고려하였으나, 보다 신뢰성이 높은 불확도를 산출하기 위해서는 측정에 사용한 장비에 대한 불확도를 추가적으로 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서는 기존 발표한 논문의 연장선상에서 측정에 사용한 장비들에 대한 불확도를 포함하여 측정불확도를 산출하였다. 이 논문은 측정불확도 추정절차와 방법 및 표현법 등을 회원들과 공유하기 위해 예제를 들여서 작성한 논문이며, 논문 중 일부내용은 기존 발표된 내용을 인용하였음을 밝힌다.

2. KS F 2868:2003에 의한 시험

이 규격은 거주공간에서 바닥 충격음의 저감을 목적으로 사용되는 뜬바닥 구조용 재료의 동탄성 측정 방법을 규정하고 있다. 규격에는 정현파 가진법에 의한 측정방법과 펄스 가진법에 의한 측정방법을 규정하고 있으나, 산업현장에서는 대부분 후자 방법을 사용하고 있다. 펄스 가진법에는 스펙트럼 해석법과 시계열 해석법을 다루고 있으며, 이 논문에서는 스펙트럼 해석법에 대해서만 논하고자 한다. 펄스 가진법 및 스펙트럼 해석법에 의한 측정 구성도는 Fig. 1과 같다.

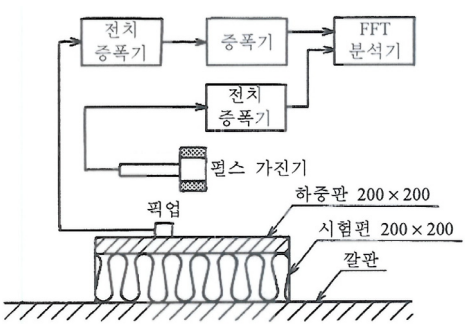

Fig. 1 Measurement configuration(unit : mm)

시험편(200 mm × 200 mm) 상부에 동일한 면적의 하중판을 설치한 후 하중판 상단에 가속도계 등 센서를 설치한다. 펄스 가진기(impact hammer 등)을 이용하여 시험편-하중판 계를 가진한 후 응답을 계측한다. FFT분석기 등을 이용하여 계측신호의 스펙트럼을 분석하여 고유진동수(f_0)를 산정한다.

이 규격에서 단위면적당 겉보기 동 탄성계수(s)는 아래의 식으로부터 산정한다.

$$s = (2\pi f_0)^2 \cdot m \tag{1}$$

여기서 m은 하중판의 단위면적당 질량이고, 디지털 저울에 의해 계측되는 것이 일반적이다. 시험편은 규격에 의해 3개(A, B, C)를 준비하여 시험에 사용하고, 식 (1)로부터 각 시험편의 동 탄성계수를 계산한 후 평균치를 이용하여 시험편의 최종 단위면적당 겉보기 동 탄성계수를 구한다.

디지털 저울을 이용하여 하중판의 질량을 측정한 후 KS F 2868의 펄스 가진법에 의한 시험을 수행하였다. 각 시험편에 대해 3번의 반복시험을 수행한 후 FFT 분석기를 활용하여 고유진동수를 확인하였다. 이로부터 산정한 시험편에 대한 단위면적당 겉보기 동 탄성계수는 8.6 MN/m^{3}임을 확인하였다. 관련 측정 자료는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Test result

Specimen	No.	Load (kg)	f_0 (Hz)	s (MN/m^3)
A	1	7.91	34.38	9.2
	2	7.75	33.13	8.4
	3	8.03	34.38	9.4
B	1	7.85	32.50	8.2
	2	8.03	33.13	8.7
	3	7.73	33.75	8.7
C	1	7.88	32.50	8.2
	2	7.73	32.50	8.1
	3	8.00	33.20	8.3
Average				8.6

3. 측정불확도 계산

3.1 반복측정에 의한 측정불확도

대부분의 경우, 측정량 y는 직접 측정되지 않고, 측정방정식이라 부르는 함수관계 $f(x)$를 통해 N개의 입력량 $x_1, x_2, \cdots x_N$으로부터 아래의 식으로 결정된다.

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_N) \tag{2}$$

2절에서 기술한 예(식 (1) 참조)에서는 고유진동수(f_0)를 x_1로, 하중판의 단위면적당 질량을 x_2로 볼 수 있으며, 단위면적당 겉보기 동 탄성계수(s)가 y에 해당한다. 각 시험편당 3번의 반복시험을 수행하여 총 9번의 고유진동수와 하중판의 질량을 각각 측정하였다. 측정한 각각의 인자에 대한 불확도를 산정하기 위해 평균, 표준편차 및 자유도를 Table 2에 정리하였다. 반복 측정에 의한 표준불확도는 다음의 식[2]으로부터 산정한다.

$$u(x_i) = std(x_i)/\sqrt{n} \tag{3}$$

여기서 std와 n은 각각 표준편차와 반복 회수이다. 자유도는 n개의 독립된 측정값으로부터 계산되며, 단순한 경우에는 $(n-1)$이다.

Table 2에는 반복측정에 의한 2개의 입력량에 대한 불확도와 관련된 수치를 각각 정리하였으며, 일반적으로 A형 불확도[1,2]라고 한다. 반면, B형 불확도[1,2]는 기존의 정보 또는 문헌을 통해 측정값이 가질 수 있는 확률밀도함수를 가정하여 구한다.

산정된 2개의 불확도를 이용하여 동 탄성계수(s)에 대한 불확도를 계산해야 하며, 이를 합성표준불확도라고 한다. 상관관계가 없는 입력량의 합성표준불확도 입력량 $x_1, x_2, \cdots x_N$들이 서로 상관관계가 없는 경우 즉 서로 독립적으로 구하여질 때, 합성표준불확도는 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^{N} \left[c_i u(x_i) \right]^2 \tag{4}$$

$u(x_i)$는 x_i의 표준불확도이고, c_i는 감도계수라고 한다. 고유진동수(x_1)에 대한 감도계수와 하중판의 단위면적당 질량(x_2)에 대한 감도계수는 아래와 같다.

$$c_1 = 2 \cdot (2\pi f_0) \cdot 2\pi \cdot m \tag{5}$$

$$c_2 = (2\pi f_0)^2 \tag{6}$$

한편, 합성표준불확도에 대한 자유도의 계산은 매우 복잡한 것으로 알려져 있으며, 아래의 Welch-Satterthwaite 공식[10]을 이용하여 유효자유도(v_{eff})를 계산하여 사용하고 있다.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{\left[c_i u(x_i) \right]^4}{v_i}} \tag{7}$$

식 (4)에서 식 (7)로부터 수치들을 Table 3에 정리하였다.

측정결과의 불확도를 표현하는데 보편적으로 합성표준불확도 $u_c(y)$를 사용할 수 있지만, 상업이나 산업분야의 특정한 경우, 또는 규제에 적용할 경우, 보건과 안전에 관련될 경우에는 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함함 것으로 기대되는 측정결과 주위의 어떤 구간을 정의해 줄 수 있는 불확도의 척도가 필요하다. 이러한 불확도의 추가적인 척도를 확장불확도라고 하며, 확장불확도는

Table 2 Type A evaluation of uncertainty

	m	f_0
Average	196.97	33.20
Standard deviation	0.795	3.101
Standard uncertainty	0.265	1.034
D.O.F.	8	8

Table 3 Combined uncertainty

	m	f_0	s
Uncertainty	0.265	1.034	-
Sensitivity co-efficient	515,761	43,462	-
D.O.F.	8	8	-
Combined standard uncertainty	-	-	0.144
Effective D.O.F.	-	-	10

유효자유도가 10보다 클 경우 포함인자(k) 2를 이용하여 신뢰구간 약 95 %로 표현한다[1]. 따라서 시험편의 단위면적당 겉보기 동탄성계수의 측정불확도는 합성표준불확도의 2배를 확장불확도로 하여 평균값과 함께 아래와 같이 표현할 수 있다. 확장불확도의 유효자리수는 평균값과 동일하게 하였으며, 특성상 올림으로 표현하였다.

(8.6 ± 0.3) MN/m^3 (신뢰구간 약 95 %, k = 2)

3.2 측정 장비에 의한 측정불확도

3.1절에서 기술한 고유진동수와 하중판의 질량을 측정하기 위해서는 관련 장비가 필요하다. 고유진동수 측정을 위해서는 센서(가속도계), 펄스 가진기, FFT 분석기 등이 사용되며, 단위면적당 하중판의 질량을 산출하기 위해서는 저울 및 자 등이 필요하다. 각 장비들로부터 산정된 수치들은 모두 자체적으로 불확도를 내재하고 있으며, 각 장비의 교정성적서를 통해 불확도의 크기를 알 수 있다. 또한 시험수행자(측정자)의 숙련도에 의한 불확도도 고려할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 고유진동수 측정에 사용된 장비 중 센서와 FFT 분석기 그리고 하중판 질량 측정에 사용된 장비 중 디지털 저울에 의한 불확도만을 추가적으로 고려하였다. 각 장비의 교정성적서에 표기된 정보는 Table 4와 같다.

식 (2)를 이용하여 고유진동수 측정량에 대한 모델 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$f_0 = f_{0,m} + \delta_{f1} + \delta_{f2} \tag{8}$$

여기서, $f_{0,m}$은 반복 측정값이고, δ_{f1} 및 δ_{f2}는 각각 센서와 FFT 분석기에 대한 보정값이다. $f_{0,m}$은 Table 1에 정리된 값과 동일하다. Table 4를 보면,

Table 4 Uncertainty of testing facility

	Correction value	Uncertainty (ab. 95 % level of confidence, $k = 2$)
Sensor	0	3 %
FFT analyzer (frequency)	0	2 %
Scale	+0.1 kg	0.05 kg

센서에 대한 불확도는 상대불확도로 표현되어 있으며, A형 불확도임을 알 수 있다. 측정된 고유진동수의 평균값을 이용하여 절대불확도 크기로 환산하면 다음의 식과 같다.

$$u(\delta_{f1}) = \frac{3\,\%}{k} \times 33.20\,\mathrm{Hz} = 0.498\,\mathrm{Hz} \tag{9}$$

FFT 분석기의 불확도도 상대불확도는 표시되어 있으며, 센서의 절대불확도 환산방식을 동일하게 적용할 수 있다. 즉,

$$u(\delta_{f2,1}) = \frac{2\,\%}{k} \times 33.20\,\mathrm{Hz} = 0.332\,\mathrm{Hz} \tag{10}$$

이다. 또한 분해능에 대한 불확도를 추가로 고려하였다. 측정에 사용된 주파수 분해능은 약 0.0039 Hz(= 80 Hz / 2048)이다. 따라서 분해능에 의한 FFT 분석기의 불확도는 B형이며, 확률분포를 대칭 직사각형으로 가정할 수 있다[1]. 이 경우 다음의 식과 불확도를 산출할 수 있다. B형 불확도의 자유도는 ∞이다[2].

$$u(\delta_{f2,2}) = \frac{0.0039\,\mathrm{Hz}}{2} / \sqrt{3} = 0.011\,\mathrm{Hz} \tag{11}$$

하중판의 질량에 대한 측정량 모델 식은 동일한 방법으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$m = m_m + \delta_m \tag{12}$$

여기서, m_m은 반복 측정값이고, δ_m는 디지털 저울에 대한 보정 값이다. 디지털 저울에 대한 불확도는 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$u(\delta_{m,1}) = \frac{0.05\,\mathrm{kg}}{k} = 0.025\,\mathrm{kg} \tag{13}$$

또한 분해능이 0.01 kg이므로 이에 대한 불확도를 추가로 고려하였다.

$$u(\delta_{m,2}) = \frac{0.01\,\mathrm{kg}}{2} / \sqrt{3} = 0.003\,\mathrm{kg} \tag{14}$$

단, 식 (13)과 식 (14)를 단위면적당 측정량에 대한 불확도로 변환해서 사용하였다.

따라서 고유진동수 측정량에 대한 합성불확도는 식 (4)와 식 (9), (10), (11)을 사용하여 산정할 수

Table 5 Combined standard uncertainty for f_0

	$f_{0,m}$	δ_{f1}	δ_{f2}	
Uncertainty	0.265	0.498	0.332	0.011
Sensitivity coefficient	1	1	1	1
D.O.F.	8	∞	∞	∞
Combined uncertainty	0.655			
Effective D.O.F.	298			

Table 6 Combined standard uncertainty for m

	m_m	$\delta_{m,1}$	$\delta_{m,2}$
Uncertainty	1.034	0.625	0.072
Sensitivity coefficient	1	1	1
D.O.F.	8	∞	∞
Combined uncertainty	1.210		
Effective D.O.F.	15		

Table 7 Measurement uncertainty of s

	m	f_0	s
Uncertainty	0.655	1.210	-
Sensitivity coefficient	516,023	43,462	-
D.O.F.	15	298	-
Combined standard uncertainty	-	-	0.342
Effective D.O.F.	-	-	309
Expanded uncertainty	-	-	0.7

있으며, 단위면적당 하중판의 질량에 대한 측정량의 합성불확도는 식 (4)와 식 (13), (14)를 사용하여 구할 수 있다. 산정된 각 측정량에 대한 불확도를 Table 5와 Table 6에 각각 정리하였다.

Tables 5, 6에 정리된 입력량(m, f_0)의 합성표준불확도와 Table 2의 표준불확도를 비교해 보면, 측정 장비의 불확도 영향으로 커진 것을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 동강성에 대한 합성표준불확도와 확장불확도를 산정하면, Table 7과 같다.

따라서 측정 장치의 불확도를 고려한 경우, 시험편의 단위면적당 겉보기 동탄성계수의 측정불확도는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$(8.6 \pm 0.7)\ \mathrm{MN/m^3}\ (\text{신뢰구간 약 } 95\,\%,\ k = 2)$$

측정 장치의 불확도를 고려함에 따라 2배 이상의 불확도 증가가 발생한 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 진동시험과 관련된 KS F 2868 규격을 한 예로 하여 측정불확도를 산정하는 방법에 대해 설명하였다.

단순히 반복측정만으로 산출된 측정불확도의 크기와 측정에 사용된 측정 장비가 내재하고 있는 불확도 요소를 고려하여 산출된 불확도의 크기는 매우 상이한 것을 판단된다. 따라서 정확도가 중요한 시험결과인 경우에는 측정불확도를 산출하여 신뢰성이 높은 시험결과를 제시할 필요가 있다.

이 논문에서 제시한 한 예가 진동분야 시험결과의 측정불확도 산출 및 이해에 기여하기를 바란다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원 주요사업 “함정 생존성 향상을 위한 취약성 M&S 기술 고도화(과제번호: NK198G)”과제의 결과임을 밝힙니다.

References

(1) Korea Laboratory Accreditation Scheme, 2016, Guide to the Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement, KOLAS-G-002, http://www.kolas.go.kr.

(2) JCGM 100, 2008, Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM Member Organization.

(3) ISO, 2011, Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO/IEC Guide 98-3/Suppl.2, http://www.iso.org.

(4) APLAC, 2006, Interpretation and Guidance on the Estimation of Uncertainty of Measurement in Testing,

APLAC TC 005, http://www.aplac.org.

(5) Cheung, W. S., Kim, Y. T., Ryu, J. D. and Hong, D. P., 2005, Study on Uncertainty Factors of Head Vibration Measurements, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 20~28.

(6) Song, G. G., Lee, C. S. and Kim, Y. H., 2014, Effects of Environmental Conditions on Uncertainty of Reverberation Time, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 439~440.

(7) Lee, S. M., Kim, J. S., Kim, S. R. and Seo, Y. H., 2013, Estimation of Uncertainty for Acoustic Performance Measurement Using the Pulse Tube, Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference, pp. 651~652.

(8) Korea Agency of Technology and Standards, 2013, Determination of Dynamic Stiffness of Materials Used under Floating Floors in Dwellings, KS F 2868:2003, http://www.standard.go.kr.

(9) Moon, S. J. and Park J. W., 2016, An Example on Measurement Uncertainty of Vibration Testing Result, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 408~409.

(10) Satterthwaite, F. E., 1946, An Approximate Distribution of Estimates of Variance Components, Biometrics Bulletin, Vol. 2, No. 6, pp. 110~114.

Seok-Jun Moon received his Ph.D. from the Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng. at Seoul National University in 1995. He has worked at Korea Institute of Machinery & Materials since 1993. His research interests include vibration control devices, testing & evaluation, and confirmity assessment.