

소음기 감음 성능 불확도 산출 방법 연구

°유승국*, 김대현*, 김영찬**, 김두훈***

Application of the uncertainty for insertion loss measurement of silencers

ABSTRACT

Recently the uncertainty has been made rapid progress in various fields of industry but the uncertainty measurement method of acoustical test (i.e. Insertion loss, Absorption ratio, Transmission loss etc.) hasn't been established. In this study, the uncertainty of measurement method for ducted silencers is carried out according to ISO 7235. The standard uncertainty factors are composed of sound pressure level, microphone sensitivity and pistonphone calibration in this measurement. Sound pressure level is type A evaluation of uncertainty, microphone sensitivity and pistonphone calibration are type B evaluation of uncertainty. The combined standard uncertainty is calculated by two type evaluation. The expanded uncertainty is expressed by the combined standard uncertainty multiply k value which is yield the effective degree of freedom.

1. 서론

1949년 우리 나라에서 농산물에 대한 중량, 등급, 포장 등에 대한 규격화를 시작한 이래 군수, 건설, 전자 등 모든 부문에 있어 규격화와 표준화는 빠르고 중요하게 자리 매김 되어가고 있다. 그러나 이것은 국제적으로 통일된 규격과 표준이 아니었기 때문에 상호인정에 상당한 어려움이 있었다. 특히 제품 측정에 관한 그 기준값과 불확도는 표준 방안조차 마련되어 있지 않아 더욱 더 어려움은

* 유니슨 기술연구소 연구원

** 유니슨 기술연구소 책임연구원

*** 유니슨 기술연구소 연구소장

을 수밖에 없었다. 이러한 것으로 인해 CIMP^[1](국제도량형위원회)는 1977년 국제적으로 동의를 얻을 수 있는 불확도 표현 방안을 BIPM^[2](국제도량형국)으로 하여금 검토하게 하여 1980년 불확도의 설명에 관한 추천서 INC-1을 확립하였다. 그 후 1981년 “불확도표현에 관한 접근방법”이 추천되었으며 BIPM, IEC^[3](국제전기기술위원회), ISO^[4](국제표준화기구), OIML^[5](국제법정계량기구)에서 지정한 전문가가 이 접근방식에 의거하여 광범위하게 적용할 수 있는 가이드를 개발하였고 마침내 1986년 “측정 불확도 표현을 위한 가이드”를 작성하였다. 국내에서는 1992년 10월에 측정 불확도를 표현하는 새로운 방침이 이 가이드에 의거하여

KOLAS^[6]에 의해 개시되게 되었다. 이 후 많은 산업체의 측정분야에서 ISO 가이드에 근거한 측정불확도를 고려하여 그 측정 데이터에 대한 신뢰도를 평가하려고 노력하고 있지만 보편화된 상태는 아니며 특히, 음향에 관련한 측정에 있어 그 측정불확도는 아직 그 방법을 명확하게 제시하거나 논의되지 않은 상태이다.

본 연구에서는 음향 분야의 측정 중 소음기의 감음성능을 국제 규격인 ISO 7235^[7]에 의거하여 측정하였으며 1998년 한국표준과학연구원에서 배포한 “측정불확도의 표현지침”^[8]과 KOLAS에서 제시한 “측정결과의 불확도 평가 및 표현 가이드”^[9]를 기본으로 이에 대한 측정불확도를 표현하는 방법을 연구하였다.

2. 기본이론

2-1. 표준불확도

측정의 결과는 측정의 대상이 되는 특정한 양(측정량)에 대한 추정값에 불과하며 단지 신뢰도에 대한 정량적 표현이다. 즉, 측정량(Y)은 직접 측정되지 않고 함수관계 f를 통하여 N개의 다른 입력양으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

본 시험에서의 입력량 X_i 는 모든 요인별 불확도를 포함하는 소음기 설치 전·후의 음압레벨 값이다. 측정량 Y의 추정값인 X_i 는 또다시 y로 표시하며 다른 입력 추정값 x_i 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

추정값 x_i 는 잔향실에서 측정한 각 위치에서의 음압레벨과 마이크로폰 교정, 표준음발생기의 교정이 포함되어 있다. 이때 추정값 y의 추정표준편차

는 추정값 x_i 를 고려한 합성표준불확도라 부르며 각 입력량의 추정값 x_i 의 표준불확도($u(L_i)$)로 결정한다. 특히, 추정값 y의 추정표준편차는 입력량 x_i 가 가질 수 있는 값들의 분포로부터 얻을 수 있는데 입력량 x_i 는 일련의 관측에 근거를 둔 빈도분포인 A형 평가와 선형적 분포인 B형 평가로 나눌 수 있다.

(1) 표준불확도의 A형 평가

동일한 측정조건 하에서 n개의 독립된 관측값 q_k 가 얻어졌다면 산술 평균과 분산은 다음 식과 같이 표현되며,

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3)$$

$$s^2(q_k) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (4)$$

평균 \bar{q} 의 분산에 대한 최적 추정값은

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (5)$$

로 주어진다. 이때, 평균의 실험분산 $s^2(\bar{q})$ 와 평균의 실험표준편차 $s(\bar{q})$ 는 평균 \bar{q} 의 기대값을 얼마나 잘 추정하는가를 정량적으로 나타내므로 \bar{q} 에 대한 불확도 척도로 사용된다. 또한, A형 불확도의 자유도는 독립된 측정값으로부터 계산됨으로 n-1이다.

(2) 표준불확도의 B형 평가

반복된 측정으로 얻을 수 없는 입력량에 대한 추정값에 대한 것으로 과거 측정 데이터, 인용한 참고 자료의 데이터, 교정 및 기타 인증서에 주어진 데이터로부터 그 값을 결정할 수 있다. 또한 이 표준불확도에 대한 적용 방법은 1) 신뢰수준에 따른 불확도 2) 신뢰수준 50% 구간에서 불확도 3) 신뢰

수준 2/3 구간에서 불확도 4) 대칭 직사각형 분포 다.

등이 있으며, 그 계산 방법도 각기 다르게 표현된다. 특히 음향 분야에서의 교정 성적서는 신뢰수준 95%, 99% 등에 대응하는 적정인자를 사용하기 때문에 “신뢰수준에 따른 표준 불확도”를 이용하여 그 표준불확도를 구한다. 다만, 그 적정인자를 자유도에 상관없이 95% 신뢰구간인 경우 k=2로 사용하는 추세이기 때문에 본 연구에서도 k의 값을 2로 사용하여 B형 표준불확도를 구하였다.

$$u(q) = \frac{u_{95}}{k}$$

$u(q)$: B형 불확도

u_{95} : 교정 성적서나 인증서에

95% 신뢰구간으로 산출한 불확도

2-2. 합성표준불확도

측정량의 추정값 Y는 식 (1)와 같이 입력량의 추정값 X_i 들의 함수로 표현되기 때문에 Y의 표준불확도는 X_i 의 표준불확도를 적절한 방법으로 합성하여 얻을 수 있는데 이것을 합성표준불확도라 부르고 이것은 입력량들이 서로 상관관계가 있는가, 없는가에 따라 다르게 표현된다. 본 시험은 서로 독립된 입력량임으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c^2(Y) &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial X_i} \right]^2 u^2(X_i) \\ &= \sum_{i=1}^N [c_i u(L_i)]^2 \end{aligned} \quad (6)$$

2-3. 유효자유도

포함인자 k를 구하기 위해서는 합성표준불확도의 유효자유도를 추정해야 한다. 이것은 합성표준불확도가 측정량 Y의 표준편차를 얼마나 잘 추정하는가를 나타내는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있

$$v_{eff} = \frac{u^4(X)}{\sum_{i=1}^N \frac{[c_i u(L_i)]^4}{v_i}} \quad (7)$$

2-4. 확장불확도

보편적으로 측정결과의 불확도를 표현하는데 합성표준불확도를 사용할 수 있지만 산업분야의 특정한 경우나 규제에 적용할 경우는 그 추정값 분포의 대부분이 기대되는 측정결과 주위의 어떤 구간에 있는지를 정의해 주어야 한다. 이것을 위하여 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 확장불확도를 결정한다. 식은 다음과 같다.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (8)$$

k : 포함인자 또는 보증계수

u_c : 합성표준불확도

따라서, 측정결과는 $Y = y \pm U$ 로 표현되며 Y값이 이루는 분포구간은 $y-U \leq Y \leq y+U$ 로 표현한다.

3. 측정방법

소음기 감음성능을 측정하고자 시험 소음기를 Fig. 1과 같이 본 연구소의 잔향실(용적 290m³)과 연결된 시험 덕트에 설치하였다. 시험 소음기를 설치하기 전에 1/3 옥타브 밴드 중심주파수 음압레벨을 잔향실 내의 서로 다른 4곳에 위치하는 마이크로폰간의 합으로 구하고, 소음기 설치 후 다시 음압레벨을 구하여 그 차로 소음기 감음성능을 구하였다. 이때 풍량은 음원의 진행방향과 같은 방향으로 192 CMM 만큼을 불어주었다. 이때 풍속으로 인한 소음기의 자생소음은 약 45dB정도이며 암소음은 약 27dB 정도였다. 측정에 사용된 마이크로폰간의 간격은 약 1.7m로 하였으며 벽면으로부터

1.5m 이상 떨어진 위치를 선택하였다. 마이크로폰은 LD 2556(Larson-Davis사)을 사용하였고 분석기는 8채널 분석기인 LD 3200을 사용하였다. 또한 음원발생기(B&K 1405), 밴드패스필터(B&K 1617), 파워앰프(B&K 2712)를 사용하였다.



Fig. 1 Measurement system for ducted silencer

4. 불확도 산출 방법

4-1. 각 요인별 표준불확도

(1) 음압레벨의 표준불확도 ($u(L_{p1})$, $u(L_{p2})$)

음압레벨은 서로 다른 4곳의 위치에서 5회 측정한 값을 이용하였고 식 (3), (4), (5)를 이용하여 평균과 표준편차, 추정표준편차를 Table 1과 같이 구하였다. 총 측정회수는 20회이므로 자유도는 19이다.

Table 1 Value of average, deviation, uncertainty.

주파수		평균	표준 편차	표준 불확도
125	empty	74.84	0.29	0.15
	silencer	64.64	0.30	0.15
250	empty	85.26	0.15	0.07
	silencer	63.63	0.22	0.11
500	empty	95.05	0.13	0.07
	silencer	63.85	0.32	0.16
1k	empty	101.28	0.10	0.05
	silencer	68.03	0.04	0.02
2k	empty	93.08	0.07	0.03
	silencer	63.13	0.11	0.05
4k	empty	85.98	0.10	0.05
	silencer	66.73	0.17	0.08

(2) 마이크로폰의 표준불확도 ($u(m)$)

마이크로폰의 불확도는 교정검사 성적서에 표시된 교정불확도를 이용하여 구한다. 본 마이크로폰은 한국표준과학연구원에서 발행한 교정불확도를 이용하여 95% 신뢰수준에 따른 불확도를 Table 2와 같이 구하였다. 교정에 따른 불확도이므로 자유도는 ∞ 로 간주할 수 있다.

Table 2 Type B evaluation of uncertainty.

주파수	U95	표준 불확도
125	0.08	0.04
250	0.07	0.04
500	0.07	0.04
1k	0.07	0.04
2k	0.07	0.04
4k	0.07	0.04

(3) 표준음발생기의 표준불확도 ($u(c)$)

표준음발생기는 B&K 4228로 사용하였으며 그 교정불확도 또한 한국표준과학연구원에서 발행한 교정불확도를 이용하여 95% 신뢰수준에 따른 불확도를 다음과 같이 구하였다. 그 자유도는 마이크로폰과 마찬가지로 ∞ 로 간주한다.

$$u(c) = \frac{\text{교정불확도}}{k} = \frac{0.1}{2} = 0.05$$

(4) 표준불확도

소음기 설치 전·후의 음압레벨은 각 마이크로폰과 표준음발생기의 표준불확도를 포함함으로 $u(L_i) = u(L_{p_i}) + u(m) + u(c)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 각각의 인자로 편미분한 감도계수 $\frac{\partial L_i}{\partial x_i}$ 는 함수 L을 각 요소의 인자에 관해 미분한 값으로 각 불확도 요소의 변화에 대한 L_i 의 변화를 나타내는 것으로 그 값들은 모두 1이다. 그러므로 식 (6)을 이용하여 각 주파수에 대한 합성표준불확도를 구할 수 있고 Table 3과 같다. 이 합성표준불확도는 소음기의 감음성능에 대한 합성표준불

확도와 혼돈할 수 있으므로 편이상 표준불확도라고 하겠다. 한편, 각 주파수에 대한 요인별 유효자유도는 식 (7)을 이용하여 구하며 그 값은 Table 3에서 살펴볼 수 있다.

$$u(L_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial u(L_1)}{\partial u(L_{p,1})} \cdot u(L_{p,1})\right)^2 + \left(\frac{\partial u(L_1)}{\partial u(m)} \cdot u(m)\right)^2 + \left(\frac{\partial u(L_1)}{\partial u(c)} \cdot u(c)\right)^2}$$

$$u(L_2) = \sqrt{\left(\frac{\partial u(L_2)}{\partial u(L_{p,2})} \cdot u(L_{p,2})\right)^2 + \left(\frac{\partial u(L_2)}{\partial u(m)} \cdot u(m)\right)^2 + \left(\frac{\partial u(L_2)}{\partial u(c)} \cdot u(c)\right)^2}$$

$$v(L_1) = \frac{u(L_1)^4}{\frac{u(L_{p,1})^4}{n} + \frac{u(m)^4}{\infty} + \frac{u(c)^4}{\infty}}$$

Table 3 Uncertainty and Effective degrees of freedom.

주파수		표준불확도	요인별자유도
125	empty	0.16	5.7
	silencer	0.16	5.6
250	empty	0.10	11.5
	silencer	0.12	6.9
500	empty	0.09	13.3
	silencer	0.17	5.2
1k	empty	0.08	24.8
	silencer	0.06	503.5
2k	empty	0.07	67.9
	silencer	0.08	21.0
4k	empty	0.08	25.3
	silencer	0.10	9.3

4-2. 합성표준불확도 ($u_c(D)$)

합성표준불확도를 결정하는 인자는 소음기 설치전·후의 음압레벨이므로 식 (6)을 이용하여 다음 식 (9)와 같이 구할 수 있으며 그 유효자유도 또한 식 (10)과 같이 구할 수 있다. 이것은 Table 4에서 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c^2(D) &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u_i^2(x_i) \\ &= \left[\frac{\partial D}{\partial L_1} u(L_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial D}{\partial L_2} u(L_2) \right]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{u(L_1)^4}{v(L_1)} + \frac{u(L_2)^4}{v(L_2)}} \quad (10)$$

Table 4 Combined standard uncertainty.

주파수	합성불확도
125	0.23
250	0.16
500	0.20
1k	0.10
2k	0.11
4k	0.13

4-3. 확장표준불확도 (U)

확장표준불확도의 산출은 Table 5에서 보는 바와 같으며 합성표준불확도에 유효자유도에 해당하는 포함인자 k를 곱하여 나타낸다. 이때 k는 신뢰수준 95%에 해당하는 값을 이용하였다. 현재 포함인자 k는 국제규정에 맞춰 신뢰수준 95%일 때 2로 취하는 추세이다. 본 논문에서는 유효 자유도에 해당하는 k의 값을 그대로 사용하였다.

Table 5 Expanded uncertainty

주파수	자유도	t 값	확장불확도
125	11	2.201	0.4988
250	14	2.145	0.3370
500	8	2.306	0.4511
1k	67	2.0	0.2031
2k	55	2.0	0.2147
4k	21	2.080	0.2710

5. 측정결과보고 및 고찰

소음기 감음 성능을 측정하여 그 불확도를 구한 「측정결과보고」는 다음과 같이 한다.

“잔향실법을 이용한 소음기의 감음성능은 다음과 같으며 ±기호 다음의 숫자는 (확장불확도) $U = k \cdot u_c(y)$ 의 값이며, 이 값은 합성표준불확도와 자유도 v에 대한 t분포에 근거한 k(포함인자)로부터 결정되었고, 이는 95%의 신뢰수준을 갖는 것으로 추정되는 구간을 나타낸다.”

주파수	125	250	500	1k	2k	4k
합성불확도	0.23	0.16	0.20	0.10	0.11	0.13
자유도	11	14	8	67	55	21
k 값	2.201	2.145	2.306	2.0	2.0	2.080
확장불확도	0.50	0.34	0.45	0.20	0.22	0.27
감음성능	10.19 ±0.50	21.63 ±0.34	31.21 ±0.45	33.25 ±0.20	29.95 ±0.22	19.25 ±0.27

이것은 ASTM E 477^[10]에서 언급한 “95% 신뢰허용치가 3dB 또는 그보다 작다”란 내용을 만족하며 또한 Table 6과 같이 “모든 주파수 대역에서 반복 표준 편차가 1dB 또는 그 이하이다”란 조건도 만족한다.

Table 6 Measured DIL on repeatability condition

	1st	2nd	3rd	4th	5th	편차
125	9.8	10.3	9.8	10.2	10.7	0.38
250	21.6	21.1	21.9	21.4	22.1	0.40
500	31.5	31.5	31.4	31.5	31.3	0.09
1k	33.1	33.3	33.3	33.2	33.4	0.11
2k	30	30	29.9	30	29.8	0.09
4k	19.1	19.1	19.2	19.2	19.7	0.25

6. 결론

본 연구소의 잔향실에서 측정한 소음기의 감음성능에 대한 불확도를 산출한 결과 주파수별로 약

0.5dB 이하의 불확도를 갖는 것으로 나타났으며 이 값은 ASTM E 477에 언급한 신뢰 허용치와 반복 표준편차 값을 만족함을 살펴보았다.

【참고문헌】

- [1] CIMP, "International Committee of Weights and Measures".
- [2] BIPM, "Bureau International des Poids et Mesures", <http://www.bipm.fr/>
- [3] IEC, "International Electrotechnical Comission", <http://www.iec.ch/>
- [4] ISO, "The International Organization for Standardization", <http://www.iso.ch/>
- [5] OIML, "International Organization of Legal Metrology".
- [6] KOLAS, "Korea Laboratory Accreditation Scheme", <http://kolas.ats.go.kr/>
- [7] ISO 7235, "Acoustics - Measurement Procedures for Ducted Silencers - Insertion Loss, Flow Noise and Total Pressure Loss".
- [8] 한국표준과학연구원, 1998, "측정불확도 표현지침", KRISS-98-096-SP.
- [9] KOLAS, 1998, "측정결과의 불확도 평가 및 표현 가이드", KOLAS-SG-101.
- [10] ASTM E 477, "Standard Test Method for Measuring Acoustical and Airflow Performance of Duct Liner Materials and Prefabricated Silencers", 12. Precision and Bias, pp. 7.