



# 공기소음 및 고체소음 측정불확도 추정

## Estimation of Measurement Uncertainty in Airborne Noise and Structureborne Noise

박 성 호<sup>†</sup>  
Sungho Park<sup>†</sup>

(Received March 21, 2019 ; Revised April 23, 2019 ; Accepted April 23, 2019)

**Key Words** : Measurement Uncertainty(측정불확도), Airborne Noise(공기소음), Structureborne Noise(고체소음)

### ABSTRACT

This paper analyzes the results of the estimated uncertainties of air-borne noise and structure-borne noise. The test results include the measurement uncertainties, which are used for validation. A mathematical model with various measurement uncertainty factors is required to provide more accurate test results. The contribution of each element to the measurement uncertainty was analyzed and the characteristics of the measurement uncertainty with frequency variation were investigated.

### 1. 서 론

소음 및 진동 측정 결과는 측정량의 값에 대한 추정 값일 뿐이므로, 그 값에 대한 측정불확도가 함께 명시 될 때에 비로소 완전해진다. 소음 및 진동 시험을 수행 함에 있어 측정 환경, 대표성이 없는 표본의 추출, 기 기의 분해능과 검출 한계, 센서 민감도와 같은 상수와 파라미터의 부정확한 값, 측정방법과 측정과정에서 사 용되는 근사값과 여러 가지 가정 등 다양한 원인에 의 해 측정불확도가 발생할 수 있다. 측정결과는 이미 알 고 있는 계통효과를 완전하게 보정하기 불가능하며, 추 가적인 우연효과도 포함하고 있기 때문에 항상 측정 불확도를 포함하고 있다.

측정결과는 기초연구에서 작업현장에 이르는 다양한 분야에서 연구개발의 기초데이터, 법률이나 규정의 만 족여부, 생산을 위한 품질관리, 소급성 유지를 위한 교 정 등 다양한 목적으로 활용되며, 상황에 따라 측정결

과가 경제적으로 큰 손실이나 분쟁을 유발할 수 있다.

한국인정기구(KOLAS, Korea laboratory accredita- tion scheme)에서는 ‘측정결과의 불확도추정 및 표현 을 위한 지침’을 통하여 공인시험기관의 정확한 측정 불확도 추정에 대한 가이드라인을 제시하고 있다. 정 확한 측정불확도 추정을 위하여 시험결과에 영향을 미 치는 다양한 측정불확도 인자를 파악하여야 하고, 이 러한 인자들이 시험결과에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 합리적인 수학적 모델식이 필요하다<sup>(1)</sup>.

가속도 센서 신호에 대한 측정불확도가 연구된 바 있지만<sup>(1)</sup> 각각의 주파수에서의 측정불확도 특성이 어 떻게 달라지는지에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 소 음 및 진동 시험에서는 가진주파수, 가진주파수의 조 화성분, 구조물의 공진주파수, 유체소음 등이 주파수에 따라 달리 작용한다. 이에 대하여 주파수별 가진원과 측정불확도 사이의 특성이 연구될 필요성이 있으며, 주 파수별 어떠한 인자가 측정불확도의 주요한 원인으로 작용하는지 파악할 필요성이 있다. 또한 같은 시험품

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Defense Industry Technology Center  
E-mail : sungho88@add.re.kr

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Jun Hong Park

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

에 대하여 공기소음과 고체소음에서 측정불확도가 어떠한 연관된 특성을 나타내는지 파악할 필요성이 있다.

## 2. 측정불확도 추정 모델

측정불확도란, GUM(guide to the expression of uncertainty in measurement, 측정불확도 표현지침서)에 의하면 측정결과와 관련하여 측정량을 합리적으로 추정된 값들의 분산특성을 나타내는 파라미터로 정의되고 있다. 측정불확도는 사용된 정보를 기초로 하여, 측정량에 대한 측정값의 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 파라미터이며, 반복측정값의 빈도분포에 근거한 확률밀도함수를 통해 추정하는 A형 표준불확도와 기존의 정보 또는 문헌을 통해 측정값이 가질 수 있는 확률밀도함수를 가정하여 구하는 B형 표준불확도로 구분할 수 있다. 이 연구에서는 가속도 신호에 대하여 제시된 측정불확도 모델<sup>(1)</sup>을 활용하여 공기소음 및 고체소음의 측정불확도를 추정한다.

### 2.1 공기소음 측정불확도 모델

공기소음은 시험품에서 발생하는 소음이 공기를 통해 전달되는 소음을 의미한다. 공기소음 측정불확도 모델에서는 마이크로폰에서 계측된 전압이 물리적인 음압의 크기로 환산되어 데시벨(dB,  $P_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ ) 단위로 표현된다<sup>(2)</sup>. 공기소음 측정불확도 인자별 수학적 모델은 다음과 같다.

#### (1) 계측데이터 분해능 불확도 모델

계측데이터 분해능에 대한 불확도는 아래의 관계식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{res} = P_m \times 10^{\Delta P_{res}/20} \quad (1)$$

$$20\log_{10}\left(\frac{P_{res}}{P_{ref}}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{P_m}{P_{ref}}\right) + \Delta P_{res} [\text{dB}] \quad (2)$$

여기서  $P_m$ 은 계측된 음압레벨,  $P_{res}$ 는 분해능 불확도가 포함된 음압 레벨,  $\Delta P_{res}$ 는 계측데이터 분해능 오차(데시벨 단위)를 의미한다.

계측데이터 분해능 불확도는 직사각형 확률분포를 따른다고 가정하여 산출할 수 있다. 임의의 변수에 대한 불확도를  $u$ , 계측데이터 분해능을  $B_{res}$ 라 하였을 때 계측데이터 분해능 불확도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$u(\Delta P_{res}) = (B_{res} / \sqrt{3}) [\text{dB}] \quad (3)$$

#### (2) 센서계측 불확도 모델

마이크로폰을 통해 계측한 음압의 경우 마이크로폰 센서의 주파수별 민감도에 대한 불확도와 반복적으로 계측된 전압에 대한 불확도에 영향을 받는다. 계측되는 음압과 전압 사이에는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$P_m = (V_f / S_f) [\text{Pa}] \quad (4)$$

$$20\log_{10}(P_m / P_{ref}) = 20[\log_{10} V_f - \log_{10} S_f - \log_{10} P_{ref}] [\text{dB}] \quad (5)$$

여기서  $V_f$ 는 각 주파수에서 계측된 전압  $rms$  진폭값,  $S_f$ 는 각 주파수에서의 센서 민감도를 의미한다. 마이크로폰 센서 계측 전압의 불확도는 12회의 반복측정을 통한 A형 불확도, 마이크로폰 센서 민감도의 불확도는 센서 교정성적서 포함된 불확도를 활용하는 B형 불확도로 추정할 수 있다. 센서계측 불확도 모델은 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$u\left(20\log_{10}\frac{P_m}{P_{ref}}\right) = \frac{20}{\ln 10} \sqrt{\frac{u(V_f)^2}{V_f^2} + \frac{u(S_f)^2}{S_f^2}} [\text{dB}] \quad (6)$$

#### (3) 현장교정 불확도 모델

현장교정은 시험 현장에서 시험결과에 영향을 미치는 온도, 압력 등의 영향을 보상하기 위하여 필수적으로 이루어지도록 규정하고 있다. 현장교정 불확도의 경우 교정기 표준치의 불확도, 센서 민감도 불확도, 현장교정시 측정된 전압값의 불확도에 영향을 받는다. 현장교정에서 표준치, 측정된 음압, 현장교정 이득값은 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\tilde{P} = K_{cal}(V_{cal} / S_{cal}) [\text{Pa}] \quad (7)$$

여기서  $\tilde{P}$ 는 음압 교정기의 1000 Hz에서의 표준값 94 dB,  $K_{cal}$ 은 현장교정 이득값,  $V_{cal}$ 은 현장교정에서 측정된 전압 진폭값,  $S_{cal}$ 은 현장교정이 실시되는 1000 Hz에서의 센서 민감도를 의미한다. 시험측정에서 현장교정 이득값은 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$P_{cal} = K_{cal} P_m = (\tilde{P} S_{cal} / V_{cal}) P_m [\text{Pa}] \quad (8)$$

$$20\log_{10}(P_{cal} / P_{ref}) = 20[\log_{10} \tilde{P} + \log_{10} S_{cal} - \log_{10} V_{cal}] + 20\log_{10}(P_m / P_{ref}) [\text{dB}] \quad (9)$$

현장교정 이득값이 적용되어 측정된 음압값의 측정 불확도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$u(20\log_{10} P_{cal}/P_{ref}) = \frac{20}{\ln 10} \sqrt{\frac{u(V_{cal})^2}{V_{cal}^2} + \frac{u(S_{cal})^2}{S_{cal}^2} + \frac{u(\tilde{P})^2}{\tilde{P}^2}} \text{ [dB]} \quad (10)$$

(4) 공기소음 측정불확도 합성

공기소음 측정불확도에 영향을 미치는 분해능 불확도, 센서계측 불확도, 현장교정 불확도를 모두 반영한 측정결과를  $P_{total}$ 이라 하였을 때 모델식은 다음과 같다.

$$P_{total} = K_{cal} P_m 10^{\Delta P_{res}/20} = \left( \frac{\tilde{P} S_{cal} V_f}{V_{cal} S_f} \right) 10^{\Delta P_{res}/20} \text{ [Pa]} \quad (11)$$

$$20\log_{10}(P_{total}/P_{ref}) = 20[\log_{10} \tilde{P} + \log_{10} S_{cal} + \log_{10} V_f] - 20[\log_{10} V_{cal} + \log_{10} S_f + \log_{10} P_{ref}] + \Delta P_{res} \text{ [dB]} \quad (12)$$

공기소음의 불확도에서 현장교정시 계측되는 전압값과 시험측정시 계측되는 전압값은 A형 불확도로 추정할 수 있으며, 현장교정 표준값 및 센서장비 불확도는 센서 교정성적서에 나타난 표준불확도를 활용하고, 계측데이터 분해능 불확도는 직사각형 분포를 가정하여 추정할 경우 다음과 같다.

$$u(20\log_{10} P_{total}/P_{ref}) = \frac{B_{res}}{\sqrt{3}} + \frac{20}{\ln 10} \times \sqrt{\frac{u(V_{cal})^2}{V_{cal}^2} + \frac{u(V_f)^2}{V_f^2} + \frac{u(S_{cal})^2}{S_{cal}^2}} + \sqrt{\frac{u(S_f)^2}{S_f^2} + \frac{u(\tilde{P})^2}{\tilde{P}^2}} \text{ [dB]} \quad (13)$$

2.2 고체소음 측정불확도 모델

고체소음은 시험품에서 발생하는 소음이 구조물을 통해 전달되는 소음을 의미한다. 계측된 가속도 레벨을  $a_m$ , 데이터 분해능 오차를  $\Delta a_{res}$ , 현장교정시 가속도 표준값을  $\tilde{A}$ (10 m/s<sup>2</sup> at 160 Hz), 불확도 합성된 가속도 값이  $a_{total}$ 일때 계측된 신호와 측정된 가속도 데시벨(dB,  $a_{ref} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ )로 환산한 수학적 모델은 다

음과 같다<sup>(1)</sup>.

$$a_{total} = K_{cal} a_m 10^{\Delta a_{res}/20} = \left( \frac{\tilde{A} S_{cal} V_f}{V_{cal} S_f} \right) 10^{\Delta a_{res}/20} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (14)$$

$$20\log_{10}(a_{total}/a_{ref}) = 20[\log_{10} \tilde{A} + \log_{10} S_{cal} + \log_{10} V_f] - 20[\log_{10} V_{cal} + \log_{10} S_f + \log_{10} A_{ref}] + \Delta a_{res} \text{ [dB]} \quad (15)$$

고체소음 측정불확도에 영향을 미치는 분해능 불확도, 센서계측 불확도, 현장교정 불확도를 모두 반영한 측정결과를 공기소음과 동일한 방법으로 추정하였을 경우 다음과 같다.

$$u(20\log_{10} a_{total}/a_{ref}) = \frac{B_{res}}{\sqrt{3}} + \frac{20}{\ln 10} \times \sqrt{\frac{u(V_{cal})^2}{V_{cal}^2} + \frac{u(V_f)^2}{V_f^2} + \frac{u(S_{cal})^2}{S_{cal}^2}} + \sqrt{\frac{u(S_f)^2}{S_f^2} + \frac{u(\tilde{A})^2}{\tilde{A}^2}} \text{ [dB]} \quad (16)$$

3. 측정불확도 추정결과

3.1 시험방법 및 시험품

공기소음은 MIL-STD-740-1(SH):1986<sup>(3)</sup> 시험규격, 고체소음은 MIL-STD-740-2(SH):1986<sup>(4)</sup> 시험규격에 따라 시험을 수행한다. 공기소음은 시험품의 중심면에서 1 m 떨어진 거리, 바닥에서 1 m 높이의 지점에서 발생하는 음압의 크기를 측정한다. 공기소음은 1/1 octave band 중심주파수 31.5 Hz ~ 8000 Hz에 대하여 시험평가를 수행한다. 고체소음은 바닥과 시험품이 연결된 마운트의 상부에서 수직 방향에 대하여 가속도를 측정한다. 고체소음은 1/3 octave band 중심주파수 10 Hz ~ 10 kHz에 대하여 시험평가를 수행한다<sup>(2)</sup>.

이 시험규격은 공장이나 다양한 외부 환경에서 측정이 가능한 시험규격이지만, 시험품의 음압 크기 혹은 가속도 크기가 배경소음 음압 크기 혹은 배경진동 가속도 크기보다 10 dB 이상 커야 한다. 이는 외부의 배경소음 혹은 배경진동이 측정결과에 거의 영향이 없어야 한다는 의미이며 이 측정불확도 시험에서는 이를

만족하기 위해 무향실에서 시험을 수행한다. 시험품은 약 5분 이상 동작하여 안정화된 후 측정을 수행한다. 시험품은 공기압축기로 정격전압 220 V, 모터회전수 1720 r/min, 강성이 충분히 높은 바닥의 지그와 4개의 고무 탄성 마운트로 연결되었다. 시험품이 일정한 구동 조건을 유지하기 위하여 무부하 조건에서 시험이 수행되었다. 시험이 수행되기 이전에 시험실 환경에서 현장교정을 수행하였으며, 반복측정을 12회 수행하여 측정불확도를 추정하며 11의 자유도를 갖는다.

**3.2 측정불확도 추정 결과 분석**

공기소음 측정불확도 추정 결과는 Tables 1 ~ 6, 고체소음 측정불확도 추정 결과는 Tables 7 ~ 12와 같다

며 주파수별 측정불확도 결과에 각각의 인자가 어떻게 기여하고 있는지를 나타낸다. 여기서  $\Delta P_{res}$ ,  $\Delta A_{res}$ 의 단위는 dB,  $V_f$ ,  $V_{cal}$ 의 단위는 mV, 마이크로폰 민감도  $S_f$ ,  $S_{cal}$ 의 단위는 mV/Pa, 가속도계 민감도  $S_f$ ,  $S_{cal}$ 의 단위는 mV/(m/s<sup>2</sup>), 표준기 지시값  $\bar{P}$ 의 단위는 Pa, 표준기 지시값  $\bar{A}$ 의 단위는 m/s<sup>2</sup>이다.

공기소음, 고체소음의 주파수별 측정결과 및 측정 불확도의 크기는 Figs. 1 ~ 2와 같다. 시험은 배경소음/배경진동이 충분히 작은 무향실 환경에서 수행되었다. 공기소음은 약 0.3 dB ~ 0.7 dB의 측정불확도를, 고체소음은 약 0.5 dB ~ 2.5 dB의 측정불확도를 나타낸다.

현장교정, 음압/가속도 교정기 표준값, 분해능 인자는 주파수에 따라 동일한 불확도 절대값을 나타내며,

**Table 1** Airborne noise uncertainty at 31.5 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta P_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	0.687	0.009	12.635	0.114 dB	63.7 %
$V_{cal}$	45.306	0.022	0.192	0.004 dB	0.1 %
$S_f$	44.005	0.306	0.197	0.060 dB	18.0 %
$S_{cal}$	45.290	0.210	0.192	0.040 dB	8.0 %
$\bar{P}$	0.997	0.005	8.715	0.045 dB	10.1 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.14 dB	
Degree of freedom				27	
Test result				57.6 dB	
Expanded uncertainty				0.3 dB	

**Table 3** Airborne noise uncertainty at 125 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta P_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	2.266	0.071	3.833	0.273 dB	93.3 %
$V_{cal}$	45.306	0.022	0.192	0.004 dB	0.0 %
$S_f$	44.875	0.208	0.194	0.040 dB	2.0 %
$S_{cal}$	45.290	0.210	0.192	0.040 dB	2.0 %
$\bar{P}$	0.997	0.005	8.715	0.045 dB	2.6 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.28 dB	
Degree of freedom				12	
Test result				67.9 dB	
Expanded uncertainty				0.6 dB	

**Table 2** Airborne noise uncertainty at 63 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta P_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	1.403	0.055	6.192	0.341 dB	95.3 %
$V_{cal}$	45.306	0.022	0.192	0.004 dB	0.0 %
$S_f$	44.514	0.232	0.195	0.045 dB	1.7 %
$S_{cal}$	45.290	0.210	0.192	0.040 dB	1.3 %
$\bar{P}$	0.997	0.005	8.715	0.045 dB	1.7 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.35 dB	
Degree of freedom				12	
Test result				63.7 dB	
Expanded uncertainty				0.7 dB	

**Table 4** Airborne noise uncertainty at 500 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta P_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	3.277	0.087	2.651	0.272 dB	91.0 %
$V_{cal}$	45.306	0.022	0.192	0.004 dB	0.0 %
$S_f$	45.290	0.2108	0.192	0.040 dB	2.7 %
$S_{cal}$	45.290	0.210	0.192	0.040 dB	2.7 %
$\bar{P}$	0.997	0.005	8.715	0.045 dB	3.5 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.24 dB	
Degree of freedom				14	
Test result				71.1 dB	
Expanded uncertainty				0.5 dB	

센서민감도 불확도 및 반복측정 전압값은 주파수에 따라 값이 달라진다. 특히 반복측정 전압값은 가진원의 특성을 반영하여 값이 크게 변화한다.

공기소음 및 고체소음 측정불확도 추정결과에서 공기압축기의 회전주파수(1800 r/min)에 해당하는 주파수(31.5 Hz)와 다른 주파수에서의 특성이 확연하게 구분된다. 회전주파수에서는 모터 회전이 주 가진원이며 다른 주파수에 비해 작은 측정불확도의 크기를 나타내며, 이는 반복측정 전압값이 작은 분산 특성을 가지고 있기 때문이다.

Fig. 3에서는 공기소음의 주파수별 반복측정 전압값의 불확도와 전체 불확도의 기여도를 나타내고 있다. 회전주파수를 제외한 주파수에서는 반복측정 전압

**Table 5** Airborne noise uncertainty at 2000 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta P_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	1.103	0.023	8.572	0.196 dB	87.8 %
$V_{cal}$	45.306	0.022	0.192	0.004 dB	0.0 %
$S_f$	44.310	0.205	0.196	0.040 dB	3.7 %
$S_{cal}$	45.290	0.210	0.192	0.040 dB	3.7 %
$\bar{P}$	0.997	0.005	8.715	0.045 dB	4.7 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.21 dB	
Degree of freedom				14	
Test result				60.9 dB	
Expanded uncertainty				0.5 dB	

**Table 6** Airborne noise uncertainty at 8000 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta P_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	0.931	0.028	9.328	0.259 dB	92.6 %
$V_{cal}$	45.306	0.022	0.192	0.004 dB	0.0 %
$S_f$	32.659	0.151	0.194	0.040 dB	2.2 %
$S_{cal}$	45.290	0.210	0.192	0.040 dB	2.2 %
$\bar{P}$	0.997	0.005	8.715	0.045 dB	2.8 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.27 dB	
Degree of freedom				12	
Test result				60.2 dB	
Expanded uncertainty				0.6 dB	

**Table 7** Structureborne noise uncertainty at 10 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta A_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	0.010	0.001	872.206	0.542 dB	96.9 %
$V_{cal}$	10.134	0.014	0.857	0.012 dB	0.0 %
$S_f$	0.992	0.006	8.756	0.006 dB	0.0 %
$S_{cal}$	1.004	0.007	8.651	0.056 dB	1.0 %
$\bar{A}$	10.040	0.090	0.865	0.078 dB	2.0 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.55 dB	
Degree of freedom				11	
Test result				59.7 dB	
Expanded uncertainty				1.2 dB	

**Table 8** Structureborne noise uncertainty at 31.5 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta A_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	0.459	0.009	18.923	0.170 dB	75.3 %
$V_{cal}$	10.134	0.014	0.857	0.012 dB	0.4 %
$S_f$	1.011	0.007	8.591	0.007 dB	0.1 %
$S_{cal}$	1.004	0.007	8.651	0.056 dB	8.3 %
$\bar{A}$	10.040	0.090	0.865	0.078 dB	15.9 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.20 dB	
Degree of freedom				22	
Test result				93.2 dB	
Expanded uncertainty				0.5 dB	

**Table 9** Structureborne noise uncertainty at 63 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta A_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	0.335	0.016	25.909	0.409 dB	94.6 %
$V_{cal}$	10.134	0.014	0.857	0.012 dB	0.1 %
$S_f$	1.010	0.007	8.600	0.007 dB	0.0 %
$S_{cal}$	1.004	0.007	8.651	0.056 dB	1.8 %
$\bar{A}$	10.040	0.090	0.865	0.078 dB	2.6 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.28 dB	
Degree of freedom				12	
Test result				67.9 dB	
Expanded uncertainty				0.6 dB	

**Table 10** Structureborne noise uncertainty at 125 Hz

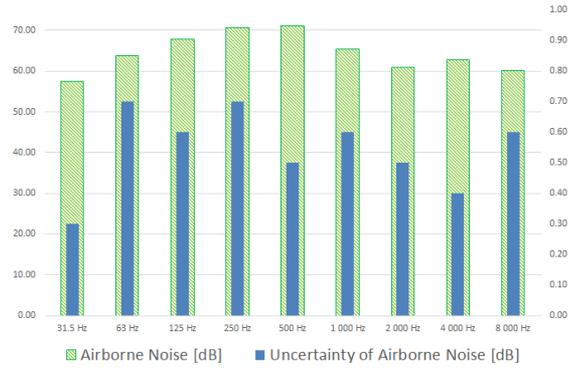
Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta A_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	4.518	0.075	1.922	0.145 dB	68.8 %
$V_{cal}$	10.134	0.014	0.857	0.012 dB	0.5 %
$S_f$	1.004	0.007	8.651	0.007 dB	0.1 %
$S_{cal}$	1.004	0.007	8.651	0.056 dB	10.5 %
$\bar{A}$	10.040	0.090	0.865	0.078 dB	20.1 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.18 dB	
Degree of freedom				28	
Test result				113.1 dB	
Expanded uncertainty				0.4 dB	

**Table 11** Structureborne noise uncertainty at 500 Hz

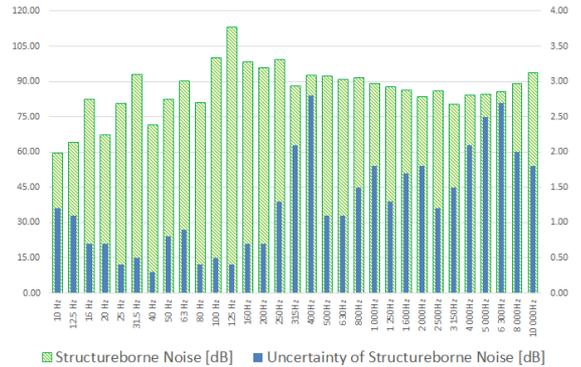
Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta A_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	0.419	0.025	20.743	0.509 dB	96.5 %
$V_{cal}$	10.134	0.014	0.857	0.012 dB	0.1 %
$S_f$	0.989	0.006	8.783	0.006 dB	0.0 %
$S_{cal}$	1.004	0.007	8.651	0.056 dB	1.2 %
$\bar{A}$	10.040	0.090	0.865	0.078 dB	2.3 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.52 dB	
Degree of freedom				12	
Test result				92.2 dB	
Expanded uncertainty				1.1 dB	

**Table 12** Structureborne noise uncertainty at 2000 Hz

Type	Estimated value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution	Ratio
$\Delta A_{res}$	0.000	0.003	1.000	0.003 dB	0.0 %
$V_f$	0.160	0.016	54.290	0.849 dB	98.7 %
$V_{cal}$	10.134	0.014	0.857	0.012 dB	0.0 %
$S_f$	0.981	0.009	8.855	0.009 dB	0.0 %
$S_{cal}$	1.004	0.007	8.651	0.056 dB	0.4 %
$\bar{A}$	10.040	0.090	0.865	0.078 dB	0.8 %
Confidence level				95 %	
Coverage factor				$k = 2$	
Combined standard uncertainty				0.86 dB	
Degree of freedom				11	
Test result				83.6 dB	
Expanded uncertainty				1.8 dB	



**Fig. 1** Uncertainty of airborne noise



**Fig. 2** Uncertainty of structureborne noise

값의 불확도가 약 90 % 이상 기여하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 유체소음 및 국부진동에서 발생하는 소음에 의한 원인이라고 추정할 수 있다. Fig. 4에서는 고체소음의 주파수별 반복측정 전압값의 불확도와 전체 불확도에 기여하는 정도를 나타내고 있다. 공기소음과 유사하게 25 Hz ~ 125 Hz 구간에서 반복측정 전압값의 불확도 크기 및 기여도가 고주파에 비하여 낮게 나타나고 있으며 이는 회전주파수의 배수성분과 국부 구조 공진에 의한 가진원의 영향이라고 판단된다. 고주파 영역에서는 공기/고체소음 모두 동일한 특성을 나타낸다.

위의 분석결과를 정리하면, 공기소음 측정불확도분석결과 모터 회전주파수에서는 모터 회전 소음의 분산 특성이 상대적으로 작아 측정불확도가 낮게 추정되며, 반복측정 전압값의 불확도 기여도가 상대적으로 낮다. 다른 주파수에서는 유체소음 등이 주 원인으로 추정되며 분산 특성이 커서 상대적으로 측정불확도가 크게 추정되며, 반복측정 전압값의 불확도가 불확도의 대부분을 차지한다. 고체소음 측정불확도에서는 공기

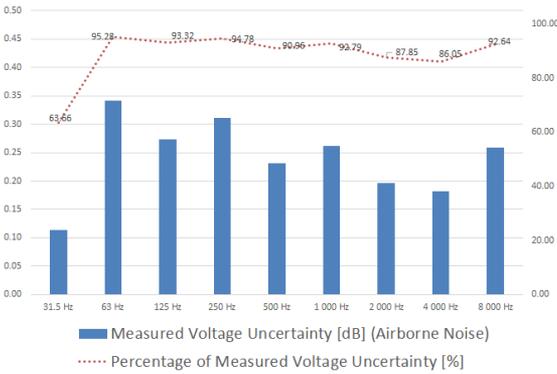


Fig. 3 Voltage uncertainty of airborne noise

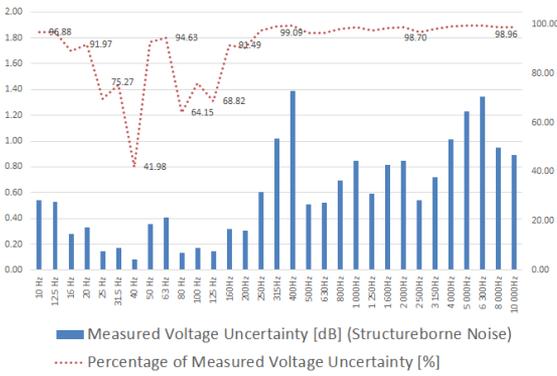


Fig. 4 Voltage uncertainty of structureborne noise

소음과 유사한 결과이지만 회전주파수의 배수 성분과 국부진동의 원인으로 반복측정 전압값의 분산이 작은 범위가 상대적으로 넓다. 공기소음 및 고체소음의 측정불확도는 주파수별 가진원의 성격에 따라 불확도의 크기 및 각 인자의 기여도가 달라지게 된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 공기소음/고체소음을 계측에 영향을 미치는 센서 특성, 현장교정, 분해능, 반복측정을 반영한 모델식을 활용하여 측정불확도를 추정하였다. 공기압축기를 대상으로 무향실에서 공기소음/고체소음 시험규격에 따라 시험을 실시하였으며 이 데이터를 활용하여 측정불확도를 추정하였다. 측정불확도 추정 분석 결과 회전주파수와 이외의 주파수에서 반복측정 전압값의 분산 특성 및 전체 불확도의 기여도가 크게 차이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 가진원의 성격에 따라 분산값이 달라지기 때문이며 유체소음과 관련된 고주파에서 측정불확도가 더 크게 추정되었다. 측정불확

도는 계측에서 필수적으로 내포하는 시험 결과의 일부이며, 시험 결과에 정확한 측정불확도가 제시되어야 완벽한 시험결과라 할 수 있다. 또한 측정불확도는 어떠한 원인에 의해 발생하였는지, 어떠한 인자의 영향도가 큰지 분석할 필요성이 있다. 이 연구에서는 공기소음/고체소음 측정불확도 분석 결과를 통해 각각의 주파수별 측정불확도의 주요 원인과 기여도 및 특성에 대하여 분석을 수행하였으며, 이 연구결과를 활용하여 함정, 항공 등에 탑재되는 장비에 대한 보다 정확한 시험결과를 제시할 수 있다.

#### 후 기

이 연구는 방위사업청과 방위산업기술지원센터의 지원(계약번호: UC170001D)하에 수행되었습니다.

#### References

- (1) Park, S., Lee, K. and Han, H., 2014, Estimation of Uncertainty in Vibration Measurement of Shipboard Equipment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 7, pp. 509~516.
- (2) Kim, S., Kim, H.-S., Kim, B.-K., Kim, J.-S. and Kang, H.-J., 2007, Case Study on the Reduction of Airborne and Structure-borne Noise of a Shipboard Pump, Proceedings of Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 411~415.
- (3) US Navy Naval Sea Systems Command, 1986, MIL-STD-740-1(SH), Airborne Sound Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment.
- (4) US Navy Naval Sea Systems Command, 1986, MIL-STD-740-2(SH), 1986, Structureborne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment.



**Sungho Park** received a BS in Mechanical Engineering from Hanyang University in 2010 and received a MS in Mechanical Engineering from KAIST in 2013. Mr. Park is currently a Researcher at Defense Industry Technology Center, Seoul, Korea.